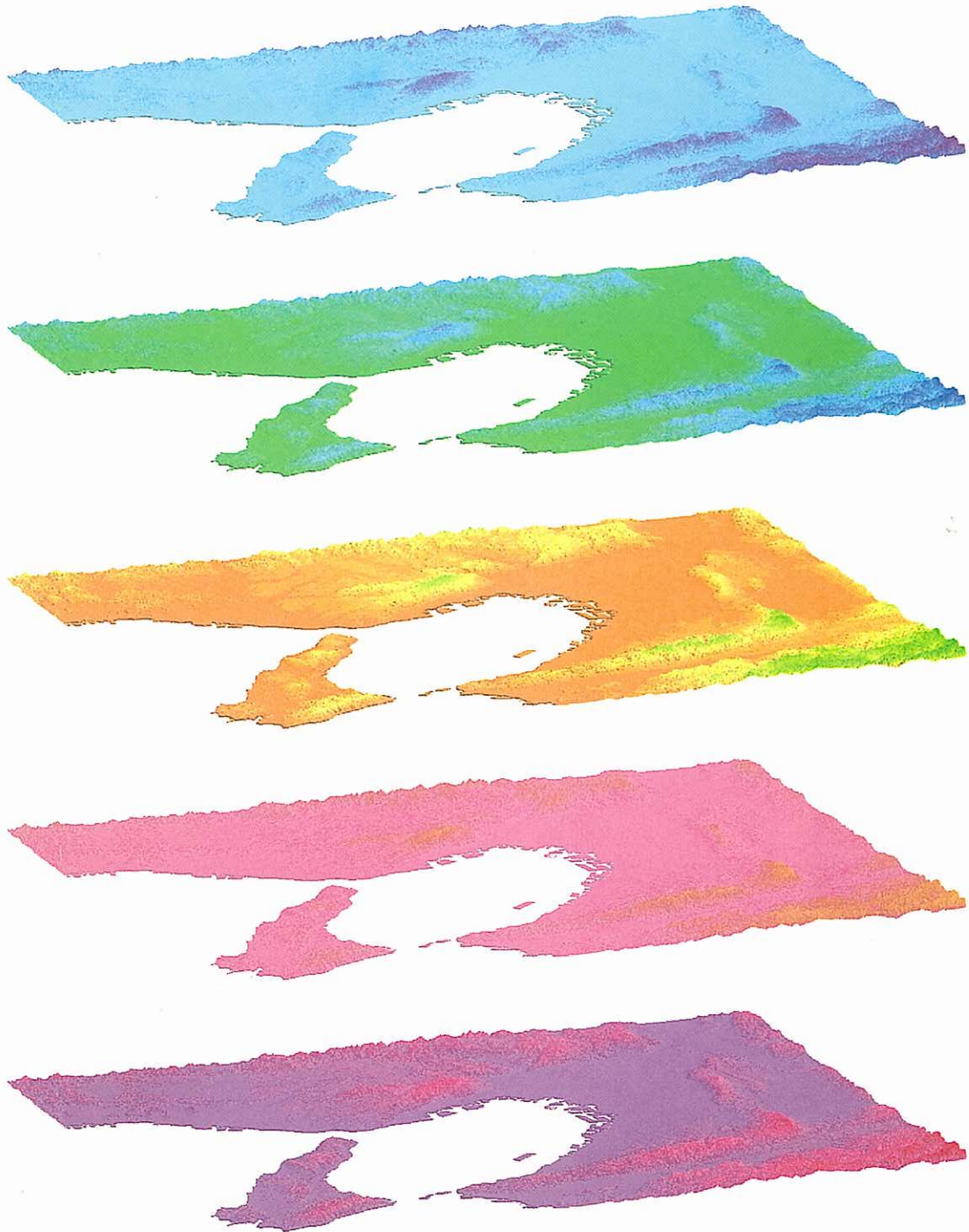


神戸の地盤研究会  
研究成果報告書  
■中間とりまとめ■



平成14年 7 月

神 戸 の 地 盤 研 究 会  
研 究 成 果 報 告 書

■ 中間とりまとめ ■

全 体 構 成

は じ め に

第一編 地震動分科会からの報告

第二編 液状化分科会からの報告

第三編 地震から守るすまいとくらし

お わ り に

平 成 14 年 7 月

## はじめに

1995 年 1 月 17 日に出現した兵庫県南部地震は 6,400 名を越える死者、全壊 10 万戸にも達する家屋の被害を生じた。特に、家屋の被災分布は六甲山麓で帯状を示すなど、特徴的な分布が生じた。神戸市ではこのような帯状の被災分布、あるいは各種社会基盤施設の被害の分布を明らかにするため、震災後「神戸市地盤調査検討委員会」を設置した。そこでは神戸の市街地が立地する地盤を明らかにする必要性が論じられた。この意見を受けて、神戸市では市が所有するボーリングデータを活用して地盤データベースを構築することとした。従来より、ボーリングデータを活用した地盤データベースは各都市で試みられてきたが、これらは紙上のデータ表示に過ぎなかった。ところが震災前よりコンピュータを活用した GIS（地理情報システム）が広く使われつつある段階であった。このため新たに構築する地盤データベースでは GIS 技術を活用し、我が国で初めてデジタル化した高密度地盤データベースとして作成することとした。これにより空間情報が容易に扱えることとなり、被災分布との重ね合わせも容易になった。このようにしてできあがった高密度地盤データベースが「神戸 JIBANKUN」である。

神戸の地盤研究会はこのようにして構築された「神戸 JIBANKUN」を活用して、神戸の地震被害の原因、分布を究明するために発足した勉強会である。そこでは地盤研究委員会が組織され、その中には「地震動分科会」と「液状化分科会」の二つの分科会が設置され、年間 10 回程度の研究会を開催するなど活発な研究活動を行っている。

この研究委員会では設立当初 5 年間の第一期として、平成 11 年度より研究計画をたててきた。平成 13 年度で前半の 3 カ年を終えるに当たり、それまでに得られてきた成果をとりまとめ、それに続く後期 2 カ年の計画を立てることは研究を進める上で重要であると考え、ここに前期 3 カ年の成果をとりまとめることとした。ここではそれぞれの分科会で得られてきた成果を個別にまとめており、分科会全体としての意見形成を行うまでには至っていない。これらは後期 2 カ年でとりまとめる予定である。

関係各位からのご意見を広く頂ければ幸いであり、皆様方からのご意見をお願いします。

平成 14 年 6 月 30 日

神戸の地盤研究会

会長 鶴来 紘一

## 第一編

# 地震動分科会からの報告

### 目 次

|   |        |
|---|--------|
| 1. 神戸市周辺地域の地震環境                                     | ( 1 )  |
| 1.1 地震の発生機構による分類                                    | ( 1 )  |
| 1.2 神戸市周辺の歴史地震                                      | ( 2 )  |
| 1.3 神戸市周辺の活断層                                       | ( 4 )  |
| 1.4 まとめ   | ( 11 ) |
| 2. 想定地震による強震動予測の現状と将来への展望                           | ( 12 ) |
| 2.1 地震動強度推定における不確定性と基盤での地震動推定の必要性                   | ( 12 ) |
| 2.2 地震動推定手法の種類と特徴                                   | ( 13 ) |
| 2.3 地震動推定の将来への展望                                    | ( 15 ) |
| 3. 各種強震動予測手法による兵庫県南部地震時の神戸市の地震動解析                   | ( 16 ) |
| 3.1 一次元等価線形化モデルによる兵庫県南部地震時の地震動解析                    | ( 16 ) |
| 3.2 断層地震解析および有効応力解析に基づく地表面変位と埋設管被害分布                | ( 31 ) |
| 3.3 深部三次元構造を評価した木造構造物被災危険度評価に関する研究                  | ( 43 ) |
| 3.4 二次元モデル(面内波・面外波入力)による応答を考慮した<br>木造構造物被災度評価に関する研究 | ( 60 ) |
| 4. 地震動を考慮した建物の新耐震設計法                                | ( 72 ) |



## 「地震動分科会からの報告」執筆担当一覧

### 1. 神戸市周辺地域の地震環境

佐藤 徹 (株)建設企画コンサルタント 総合企画本部副部長

### 2. 想定地震による強震動予測の現状と将来への展望

杉戸 真太 岐阜大学流域圏科学研究センター長(教授)

### 3. 各種強震動予測手法による兵庫県南部地震時の地震動解析

3.1 南部 光広 応用地質(株) 神戸支店長

若林 亮 応用地質(株) 東京支社技術部

3.2 木村 裕之 (株)ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業部  
地盤物性グループ地盤解析チームリーダー

荒木 繁幸 (株)ダイヤコンサルタント 大阪支店技術部部長

3.3 沖村 孝 神戸大学都市安全研究センター教授

3.4 庄司 正弘 (株)構造計画研究所 エンジニアリング営業部営業部長

栗山 利男 (株)構造計画研究所 解析技術一部地震防災室室長

倉掛 猛 (株)構造計画研究所 大阪営業部企画営業室課長

### 4. 地震動を考慮した建物の新耐震設計法

山田 正人 (株)エーアンドディー設計企画代表取締役

## 1. 神戸市周辺地域の地震環境

### 1.1 地震の発生機構による分類

神戸市周辺地域においては地震を発生機構別に分類すると、プレート境界型と直下型（活断層型）に大別することができる。

前者は南海道沖で発生する地震で代表され、和歌山県南方にある南海トラフに南方のフィリピン海プレートが北方のユーラシアプレート下部に沈み込む際に蓄積された歪みやエネルギーが一時に解放されることにより発生するもので、震源は異なるプレートの境界部となる。このタイプの地震の特徴は、開放されるエネルギーが大きいため、その規模は大きく、揺れも長く続くことにある。近畿地方においては、1946年に発生した南海地震がこのタイプに属する。

後者は阪神大震災で代表され、地震のエネルギー自体は前者と同じくプレート運動であるが、その運動によりプレート内に蓄積された歪みやエネルギーが一時期に解放されることにより生じる。地震の規模は前者に比べ小さく、揺れの時間も短く被害も局所的であることが特徴である。震源が浅く、人間の活動する場所に近いことも多いため、直下型地震と表現されている。解放された結果で生じるのが、断層構造であり、一度断層が形成されると繰り返し活動すると言われている。繰り返し活動する断層で、将来も活動する可能性の高い断層は「活断層」と呼ばれている。

活断層は一般の定義では、「最近の地質時代に繰り返し活動し、将来も活動することが推定される断層」とされている。ここで議論となるのが、「最近の地質時代」をいつと定義するかである。従来は最近の地質時代を新生代第四紀以降（約 170 万年前以降）とされ、断層を認定するさい、第四紀層を切る断層はすべて活断層とされてきた。最近においては「最近の地質時代」を地域によって使い分けるという考え方が主流であり、西南日本においては、第四紀前期と中期（約 50～70 万年前）以降とでは、地殻変動の様式や応力場が著しく異なるという見解があり、第四紀後半に限って使用することが多い。本報告ではこの定義に従い、「活断層」の定義を新生代第四紀後半に活動した証拠のある断層としている。

プレート内で大規模な地震が発生した場合、地表部分に地面の食い違いが現れる場合がある。このようにして生じた断層構造は「地震断層」、または「地表地震断層」と呼ばれており、1891 年の濃尾地震の際現れた根尾谷断層、1995 年の兵庫県南部地震で現れた野島断層がこの例である。日本で確認された「地震断層」は全て、既存の活断層に沿って形成されたと言われている。

表-1.1 にプレート境界型と直下型地震の比較を示した。

表-1.1 プレート境界型地震と直下型地震の比較

| 地震のタイプ  | 震源                     | 規模  | 揺れ方          | 再来周期     | 被害の特徴               |
|---------|------------------------|-----|--------------|----------|---------------------|
| プレート境界型 | プレート境界                 | 大   | 長周期で継続時間も長い。 | 100 年程度  | 広範囲で被害が発生し、津波が発生する。 |
| 直下型     | 火山フロント内側、20km 以浅。（活断層） | 大～中 | 短周期で継続時間短い。  | 1000 年程度 | 狭い範囲で大きな被害が生じる。     |

## 1.2 神戸市周辺の歴史地震

神戸市周辺で過去発生し、被害を及ぼしたと思われる地震の一覧表を表-1.2に示した<sup>1),2)</sup>。

表-1.2は歴史文書の中で被害が記載されている地震の一覧表で、発生日時（西暦）、地震の名称、規模、被害の分布、震源の断層等を記載している。この中で、最も古いものは西暦416年8月23日に発生したもので、「日本書紀」に記録されている被害である。

表中で、網掛けで示している地震は、1.1で述べた「プレート境界型」に分類されているもので、ほとんどの場合、南海トラフで発生している。この中で代表的な地震は、1605年の慶長地震、1707年の宝永地震、1854年の安政南海地震、1946年の南海地震がある。中でも、宝永地震は過去最大級の地震と考えられており、死者は少なくとも2万人で、津波が紀伊半島から九州までの太平洋沿岸や瀬戸内海を襲ったとされている。また、1~2m程度の地殻変動が確認されている。震源については、遠州灘沖および紀伊半島沖で二つの巨大地震が同時に発生したとも考えられえている。

網掛け部分以外は、1.1で述べた「直下型地震」に分類されている地震に相当し、活断層の活動によるものである。代表的なものは周知のとおり、1995年の兵庫県南部地震がある。

これらの地震の中で、地表において断層のずれが地表で直接確認され、「地震断層」として認定されたものは、1927年の北丹後地震と1995年の兵庫県南部地震の二つの地震である。前者は、郷村断層、山田断層でずれが確認されており、郷村断層では左横ずれが2.5~3.7m、鉛直方向のずれが最大約1mとされ、山田断層では、右横ずれが0.8~0.9m、鉛直方向のずれが0.7~0.9mとされている<sup>2)</sup>。後者では、六甲―淡路断層系に属する野島断層でずれが確認され、最大部分で右横ずれが1.8~2.1m、鉛直方向のずれが1.2m確認された<sup>2)</sup>。

二つの地震断層以外で、震源となる活断層が推定されたものが、表-1.2に示した断層である。断層の特定は主に、トレンチ掘削調査で行われ、断層が切る年代の明確な火山灰層、遺跡層とそれを覆う被覆層との関連から特定されたものである。

震源が特定された地震で、最も古い地震は868年の山崎断層を震源とする断層である。

1596年の伏見地震は、近畿地方全般に大きな被害が発生した地震であり、伏見城の天守閣が大破したことで有名な地震である。震源となる断層は、近年のトレンチ掘削調査により、中央構造線、東浦断層、先山断層、有馬―高槻構造線が連動して発生した「多重震源地震」であると考えられている<sup>2)</sup>。

1662年の寛文地震についても、近畿地方全般に大きな被害が発生した地震であるが、同様に震源となった断層は、花折断層、三方断層、日向断層、野坂断層、駄口断層とされており、「多重震源型」と考えられている<sup>2)</sup>。

これらの震源となる活断層が特定された地震とは逆に、都市部で比較的大きな地震被害があったにもかかわらず、震源の活断層が特定できない地震には、1510年の摂津・河内付近での地震、1936年の河内大和地震、1952年の吉野地震がある。いずれも、現在の大都市直下を震源していると予想され、都市防災を検討する上で重要であると考えられるため、今後の研究に期待するところが大きい。

表-1.2 近畿地方において被害が確認された地震の一覧表<sup>1)、2)</sup>

| 西暦           | 地震名称     | 地震の規模      | 被害の分布                                  | 震源の断層                    |
|--------------|----------|------------|--|--------------------------|
| 416. 8. 23   | -        | -          | 大和                                     | -                        |
| 599. 5. 28   | -        | 7          | 大和                                     | -                        |
| 684. 11. 29  | -        | 8 1/4      | 土佐、南海、東海、西海                            | 南海トラフ                    |
| 701. 5. 12   | -        | -          | 丹波                                     | -                        |
| 734. 5. 18   | -        | -          | 畿内、七道諸国                                | -                        |
| 827. 8. 11   | -        | 6. 5~7     | 京都                                     | -                        |
| 868. 8. 3    | -        | 7以上        | 播磨・山城                                  | 山崎断層                     |
| 938. 5. 22   | -        | 7          | 京都、紀伊                                  | -                        |
| 976. 7. 22   | -        | 6. 7       | 山城、近江                                  | -                        |
| 1091. 9. 28  | -        | 6. 2~6. 5  | 山城、大和                                  | -                        |
| 1096. 12. 17 | -        | 8~8. 5     | 畿内、東海道                                 | 東海沖                      |
| 1099. 2. 22  | -        | 8~8. 3     | 南海道、畿内                                 | 南海トラフ                    |
| 1177. 11. 26 | -        | 6~6. 5     | 大和                                     | -                        |
| 1185. 8. 13  | -        | 7. 4       | 近江、山城、大和                               | -                        |
| 1317. 2. 24  | -        | 6. 5~7     | 京都                                     | -                        |
| 1325. 12. 5  | 正中地震     | 6. 5       | 近江北部、若狭                                | 柳ヶ瀬                      |
| 1331. 8. 15  | -        | 7以上        | 紀伊                                     | -                        |
| 1350. 7. 6   | -        | 6          | 京都                                     | -                        |
| 1360. 11. 22 | -        | 7. 5~8     | 紀伊、摂津                                  | 南海トラフ                    |
| 1361. 8. 2   | -        | 8 1/4~8. 5 | 畿内、土佐、阿波                               | 南海トラフ                    |
| 1408. 1. 21  | -        | 7~8        | 紀伊、伊勢                                  | -                        |
| 1425. 12. 23 | -        | 6          | 京都                                     | -                        |
| 1449. 5. 13  | -        | 5 3/4~6. 5 | 山城、大和                                  | -                        |
| 1494. 6. 19  | -        | 6          | 大和                                     | -                        |
| 1498. 9. 20  | -        | 8. 2~8. 4  | 東海道全般                                  | 南海トラフ                    |
| 1510. 9. 21  | -        | 6. 5~7     | 摂津、河内                                  | -                        |
| 1520. 4. 4   | -        | 7~7 3/4    | 紀伊、京都                                  | -                        |
| 1579. 2. 25  | -        | 6          | 摂津                                     | -                        |
| 1586. 1. 18  | 天正地震     | 7. 8       | 畿内、東海、東山                               | 白川断層もしくは伊勢湾、養老断層         |
| 1596. 9. 5   | 伏見地震     | 7 1/2      | 畿内                                     | 中央構造線、東浦断層、先山断層、有馬高槻構造線  |
| 1605. 2. 3   | 慶長地震     | 7. 9       | 東海、南海、西海                               | 東海沖?                     |
| 1662. 6. 16  | 寛文地震     | 7 1/4~7. 6 | 山城、大和、河内、和泉、摂津、丹後、若狭、近江、美濃、伊勢、駿河、三河、信濃 | 花折断層、三方断層、日向断層、野坂断層、駄口断層 |
| 1665. 6. 25  | -        | 6          | 京都                                     | -                        |
| 1707. 10. 28 | 宝永地震     | 8 2/5      | 五畿、七道                                  | 遠州灘、紀伊半島沖                |
| 1751. 3. 26  | -        | 5. 5~6     | 京都                                     | -                        |
| 1802. 11. 18 | -        | 6. 5~7     | 畿内、名古屋                                 | -                        |
| 1819. 8. 2   | -        | 7 1/4      | 伊勢、美濃、近江                               | -                        |
| 1830. 8. 19  | -        | 6. 5       | 京都及び隣国                                 | -                        |
| 1854. 7. 9   | 安政伊賀上野地震 | 7 1/4      | 伊賀、伊勢、大和                               | 木津川断層                    |
| 1854. 12. 24 | 安政南海地震   | 8          | 畿内、東海、東山、北陸、南海、山陰、山陽道                  | 南海トラフ                    |
| 1899. 3. 7   | -        | 7          | 紀伊半島南東部                                | -                        |
| 1909. 8. 14  | 江濃（姉川）地震 | 6. 8       | 滋賀県姉川付近                                | 姉川断層                     |
| 1916. 11. 26 | -        | 6. 1       | 神戸                                     | -                        |
| 1925. 5. 23  | 北但馬地震    | 6. 8       | 但馬北部                                   | -                        |
| 1927. 3. 7   | 北丹後地震    | 7. 3       | 京都府北西部                                 | 郷村断層、山田断層                |
| 1936. 2. 21  | 河内大和地震   | 6. 4       | 大阪、奈良                                  | -                        |
| 1938. 1. 12  | -        | 6. 8       | 田辺湾沖                                   | -                        |
| 1946. 12. 21 | 南海地震     | 8          | 中部以西                                   | 南海トラフ                    |
| 1948. 6. 15  | -        | 6. 7       | 田辺市付近                                  | -                        |
| 1952. 7. 18  | 吉野地震     | 6. 8       | 奈良県中部                                  | -                        |
| 1995. 1. 17  | 兵庫県南部地震  | 7. 3       | 阪神、淡路地区                                | 六甲ー淡路断層系                 |
|              |          | プレート境界型地震  |  |                          |

### 1.3 神戸市周辺の活断層

#### (1) 概要

上記したとおり、近畿地方において、直下型地震は活断層の活動により発生する。そのため地震の防災を検討する上では、活断層の分布状況とその活動性を把握することは極めて重要なことであると考えられる。ここでは、既往文献より活断層の分布状況とその活動性評価について述べる。

#### (2) 近畿地方の活断層

図-1.1 は国土地理院の数値地図 250mメッシュ（標高）<sup>3)</sup>を使用して描いた陰影段採図に、文献<sup>2), 4), 5)</sup>より引用した主要活断層の分布を重ねた平面図である。

同図に示したとおり、近畿地方に分布している活断層は、淡路島南西端、福井県中央部、三重県中央部を頂点とする三角形の領域にほぼおさまリ、一般に「近畿三角地帯」と呼ばれている。地形との関連を見ると、その多くは、山地と平野の境界部に分布しており、山地の隆起または平野、盆地の沈降という造山運動の歴史をもの語っている。

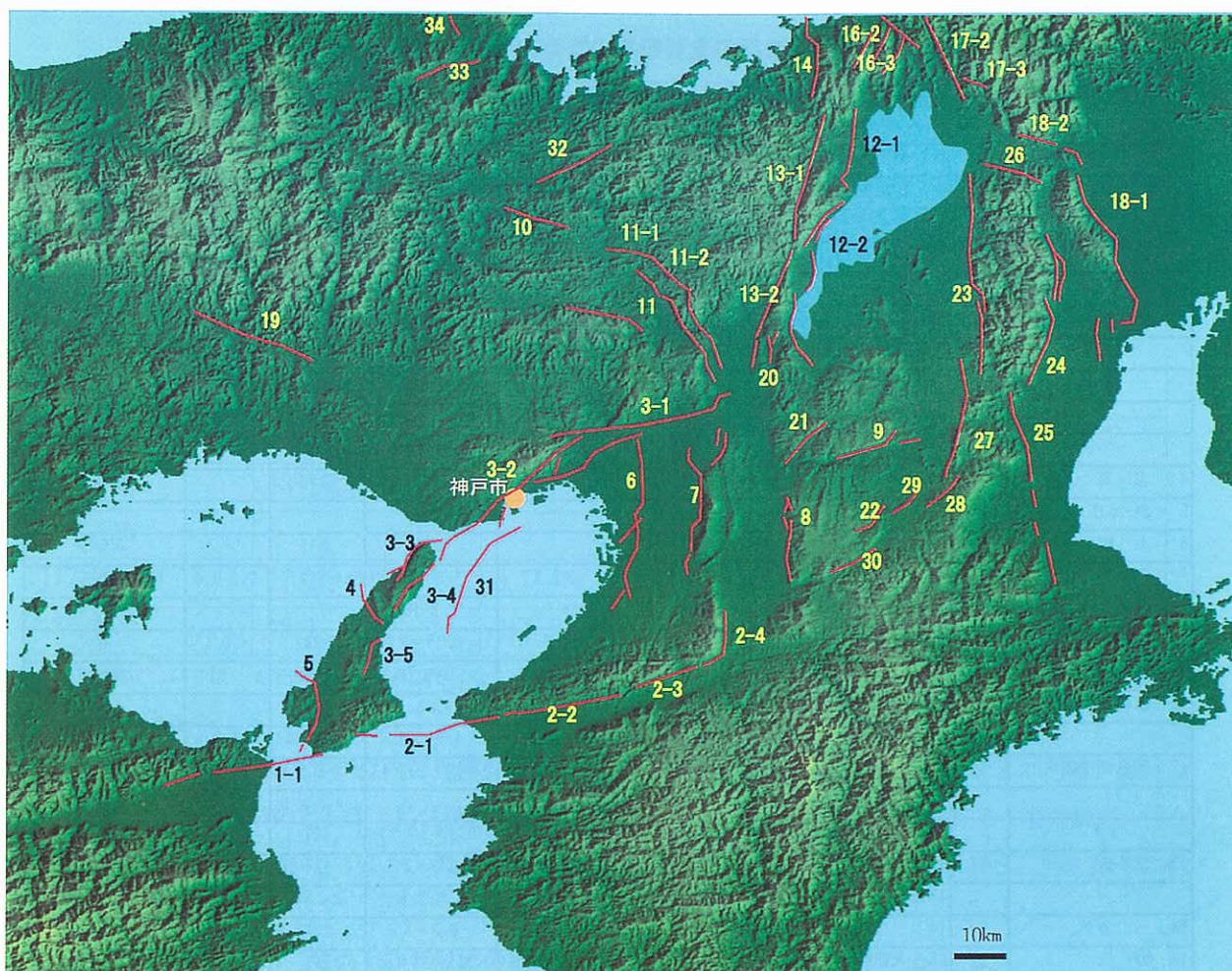
同図より主要断層を挙げると、神戸市周辺では、淡路島から京都市まで断続的に分布している「六甲淡路断層群」、「有馬一高槻構造線」がある。大阪市周辺では、千里丘陵から大阪市内を南北に縦断し、泉南地方まで連続する「上町断層」、生駒山地の西麓に分布する「生駒断層」がある。和歌山県北部の和泉山脈南縁部から香川県讃岐山地の南縁部には「中央構造線」がほぼ東西方向に連続して分布している。奈良県北部から京都府南部、三重県北部にかけては、南北方向の「奈良盆地東縁断層群」、東西方向の「木津川断層」等が分布している。三重県北部から滋賀県南東部にかけての鈴鹿山脈沿いには西側を南北方向に延びる「百済寺断層」、東側を南北に延びる「御在所岳断層」、「明星ヶ岳断層」がある。福井県南部から琵琶湖西岸にかけては、「柳ヶ瀬断層」、「敦賀断層」、「三方断層」、「琵琶湖西岸断層」、「花折断層」等がある。京都府西部には「三峠断層」、「京都西山断層」、京都府北西端部の「郷村断層」、「山田断層」がある。兵庫県西部については、「山崎断層」がある。

これらの断層のうち、表-1.1 に示した歴史地震との関連で見ると、868 年の播磨地方の地震については図-1.1 中の 19 に相当する「山崎断層」が、1596 年の伏見地震については 2、3 に相当する「中央構造線」、「六甲断層群（有馬一高槻構造線を含む）」、1662 年の寛文地震については、13 の「花折断層」を主体とする琵琶湖西岸の断層群、1854 年の安政伊賀上野地震は 9 の「木津川断層」、1909 年の江濃（姉川）地震については、17 の「柳ヶ瀬断層」（文献<sup>1)</sup>では姉川断層と記載されているが、文献<sup>2), 4)</sup>ではこの名前の記載がないため、位置的に柳ヶ瀬断層と推定した。）、1927 年の北丹後地震では 33、34 の「山田断層」、「郷村断層」、1995 年の兵庫県南部地震では 3 の「六甲断層群」がそれぞれ震源となったとされている。

さらに、地震の際、断層のずれが地表で確認された「地震断層」は 33、34 の「山田断層」、「郷村断層」、3-2、3-3 の「北淡（野島断層）」、「六甲山（横尾山断層）」がある。

近年ではこれらの断層に関して、トレンチ調査等により活動の履歴を調査し、最新活動時期や再来間隔等を推定し、そこから推定される経過時間率を求め、統計的手法により今後 100 年の地震発生率を試算する試みがなされている<sup>4)</sup>。詳細は文献による記載を参照されたいが、ここで簡単に紹介しておく。表-1.2 は文献<sup>4)</sup>による近畿三角地帯の主要断層の調査結果と地震危険度の一覧表である。起震断層と活動セグメントに付記された番号は図-1.1 の断層分布図の番号と一致している。





|     |          |      |        |      |     |    |        |
|-----|----------|------|--------|------|-----|----|--------|
| 1   | 中央構造線・四国 | 4    | 志築     | 13   | 花折  | 19 | 山崎     |
| 1-1 | 鳴門海峡     | 5    | 湊本庄    | 13-1 | 途中谷 | 20 | 花山-勸修寺 |
| 2   | 中央構造線    | 6    | 上町     | 13-2 | 北白川 | 21 | 和東谷    |
| 2-1 | 紀淡海峡     | 7    | 生駒     | 14   | 三方  | 22 | 笠間     |
| 2-2 | 根来       | 8    | 奈良盆地東縁 | 15   | 野坂  | 23 | 百済寺    |
| 2-3 | 五条       | 9    | 木津川    | 16   | 敦賀  | 24 | 御在所岳   |
| 2-4 | 金剛       | 10   | 三峠     | 16-1 | 笙の川 | 25 | 明星ヶ岳   |
| 3   | 六甲       | 11   | 京都西山   | 16-2 | 黒河川 | 26 | 今須     |
| 3-1 | 高槻       | 11-1 | 志和賀    | 16-3 | 駄口  | 27 | 頓宮     |
| 3-2 | 六甲山      | 11-2 | 世木林    | 17   | 柳ヶ瀬 | 28 | 勝地     |
| 3-3 | 北淡       | 12   | 琵琶湖西岸  | 17-1 | 椿坂峠 | 29 | 大鳥居    |
| 3-4 | 東浦       | 12-1 | 饗庭野    | 17-2 | 余呉川 | 30 | 名張     |
| 3-5 | 先山       | 12-2 | 比良     | 18   | 養老  | 31 | 大阪湾    |
|     |          |      |        | 18-1 | 養老  | 32 | 上林川    |
|     |          |      |        | 18-2 | 関ヶ原 | 33 | 山田     |
|     |          |      |        |      |     | 34 | 郷村     |

図-1.1 近畿地方の主要活断層

(国土地理院の数値地図 250mメッシュ (標高)<sup>3)</sup>を使用して描いた陰影段採図に、文献<sup>2), 4), 5)</sup>より引用した主要活断層の分布を重ねた。)

表-1.2 近畿三角地帯の主要断層の調査結果と地震危険度の一覧表<sup>4)</sup>

| 起震断層<br>(松田,1990を修正) | 長さ<br>(km) | 活動セグメント  | 長さ<br>(km) | 平均変位速度<br>(m/ky) | 単位変位量<br>(m) | 最新活動時期<br>(ka) | 再来間隔<br>(ky) | 経過時間率         | 今後100年以内の<br>地震発生確率(%) |
|----------------------|------------|----------|------------|------------------|--------------|----------------|--------------|---------------|------------------------|
| 1 MTL 四国             | 180        | 1-1 鳴門海峡 | 25         | 0.8-1.0 (V)      | 2-5.5 (V)    | 2.5-3.5        |              |               |                        |
| 2 MTL 和泉- 金剛         | 94         | 2-1 紀淡海峡 | 30         | 0.8-1.0 (V)      | 2-5.5 (V)    | 3              | 5.5-6#2      | 0.5           | 0.1-0.2                |
| "                    |            | 2-2 根来   | 26         | 1.2-5.0 (H)      |              | 1.7-3.7        | 2-3 #1       | 0.9-1.9       | 0.6-30                 |
| "                    |            | 2-3 五条谷  | 16         |                  |              |                |              |               |                        |
| "                    |            | 2-4 金剛   | 18         | 0.1-0.6 (V)      | 1.5          | 1.6-2.0        | 2-12 #1      | 0.1-1         | 0.0-17                 |
| 3 六甲                 | 123        | 3-1 高槻   | ≥38        | ≥1.5 (H)         | 5-6 (H)      | 0.4*1          | 2.5#2        | 0.2           | 0                      |
| "                    |            | 3-2 六甲山  | 35         | ≥1.0 (H)         | ≥1.5 (H)     | 0.4*1          | 1.2#2        | 0.3           | 0                      |
| "                    |            | 3-3 北淡   | 20         | 0.5-1.9          | 1.6          | 0.01           | 2-3#2        | ~0            | 0                      |
| "                    |            | 3-4 東浦   | 25         | 0.6-1.0          | 1.4          | 0.4*1          | 1.4-2.2#2    | 0.2-0.3       | 0                      |
| "                    |            | 3-5 先山   | 10         | 0.1-0.2 (V)      |              | 0.4*1          | [2]          | [0.2]         | [0.0]                  |
| 4 志筑                 | ≥12        | 4 志筑     | ≥12        | ≤0.1 (V)         |              | ≥20            | ≥20          |               | 0.0-4                  |
| 5 湊-本庄               | ≥19        | 5 湊-本庄   | ≥19        | <0.1 (V)         |              | >4             |              |               |                        |
| 6 上町                 | 44         | 6 上町     | 44         | 0.4 (V)          |              | ≥15            | ≥15          |               | 0.0-5                  |
| 7 生駒                 | 34         | 7 生駒     | 34         | 0.2-0.4 (V)      | ≥2.2         | 1.3-1.6        | 4-8 #1       | 0.2-0.4       | 0                      |
| 8 奈良盆地東縁             | ≥12        | 8 天理     | ≥12        | ≥0.2 (V)         |              | 1.3-10         |              |               |                        |
| 9 木津川                | ≥15        | 9 木津川    | ≥15        | 0.1-0.6 (V)      | 2.2-2.6 (V)  | 0.15*2         | >2#2         | <0.1          | 0                      |
| 10 三峠                | 13         | 10 三峠    | 13         |                  |              | >1.7           |              |               |                        |
| 11 京都西山              | 43         | 11-1 志和賀 | 10         |                  |              | >3             |              |               |                        |
| "                    |            | 11-2 世木林 | 30         |                  |              | 1.9-2.4        | 2.9-4.4#2    | 0.4-0.8       | 0.0-7                  |
| 12 琵琶湖西岸             | 65         | 12-1 饗庭野 | 24         | 2 (V)            | 3-5 (V)      | 2.4-2.8        | 1.5-2.5 #1   | 1-1.9         | 12-38                  |
| "                    |            |          |            |                  |              |                | 4.8-6.8 #2   | (0.4-0.6)     | (0.0-0.5)              |
| "                    |            | 12-2 比良  | 41         | ≥1.5 (V)         |              | (0.3*3??)      | [2]          | (0.2??)       | [0.0?]                 |
| 13 花折                | 57         | 13-1 途中谷 | 27         |                  | 2-5 (H)      | 0.3*3          | [2]          | [0.2]         | [0.0]                  |
| "                    |            | 13-2 北白川 | 30         |                  |              | 1.3-2.5        | ≥4.5#2       | ≤0.6          | 0.0-0.3                |
| 14 三方                | 24         | 14 三方    | 24         | 0.2-1.0 (V)      | 3-5 (V)      | 0.3*3          | ≥3#1         | ≤0.1          | 0                      |
| 15 野坂                | 32         | 15-1 野坂  | ≥6         | 0.1 (V) #3       | 0.5 (V) #3   | <2 (0.3*3)     | 5#1          | <0.4<br>(0.1) | 0                      |
| 16 敦賀                | 16         | 16-1 笹の川 | 7          |                  |              | ≥30            | ≥30          |               | 0.0-2                  |
| "                    |            | 16-2 黒河川 | 8          | 0.5-0.6 (V)      | 1.5-2 (V)    | <1.5 (0.7*4)   | 3#1          | <0.5<br>(0.2) | <0.2                   |
| "                    |            | 16-3 駄口  | 9          | 0.2 (V)          | 1-1.5 (V)    | 0.3-0.6        | 6-7#1        | ≤0.1          | 0                      |
| 17 柳ヶ瀬               | 72         | 17-1 椿坂峠 | 9          |                  |              | 7-7.2          | ≥7           |               | 0.0-5                  |
| "                    |            | 17-2 余呉川 | ≥14        |                  | 1 (V)        | 0.7*4          | [2]          | [0.4]         | [0.0]                  |
| 18 養老                | 63         | 18-1 養老  | 55         | 2 (V)            | 5-6 (V)      | 0.4*5          | 1-2#1        | 0.2-0.4       | 0.0-0.1                |

1) 今後100年以内の地震発生確率は、地震の発生間隔(再来間隔)の分布が対数正規分布に従い、標準偏差σが0.23と仮定した場合の値。

2) 地震発生確率0.0%は、少数第2位を四捨五入したもので、世木林セグメントが0.02%、六甲山セグメントが0.01%、その他のセグメントは全て0.01%未満である。

3) この表に示した断層パラメータに基づくと、兵庫県南部地震を引き起こす直前の北淡セグメントの地震発生確率(100年以内)は、2~15%であった。

4) 先山、比良、途中谷及び余呉川の4セグメントでは再来間隔は得られていないが、周辺の他セグメントのデータから、少なくとも2千年以上と推定される。このため、再来間隔を2千年とした場合の経過時間率と地震発生確率を、再来間隔と共に [] 付きで示す。

5) 最新活動後の経過時間が7千年以上、かつ再来間隔が不明な志筑、上町、笹の川、椿坂峠の4セグメントについては、再来間隔≥経過時間と見なした場合の再来間隔、経過時間率及び地震発生確率を斜字体で示す。

6) 平均変位速度と単位変位量の (V) は上下成分、(H) は水平成分を示す。

#1: 平均変位速度と単位変位量から推定された再来間隔。

#2: トレンチ調査などによって認定された複数の断層活動(古地震イベント)の年代から得られた再来間隔。

#3: 表示してある上下変位よりも、横ずれ変位(未確定)が卓越する。

\*1: 1596年慶長伏見地震、\*2: 1854年安政伊賀上野地震、\*3: 1662年寛文地震、\*4: 1325年正中地震、\*5: 1586年天正地震。

表-1.2 より比較的最近の活動が確認されたものとして、1ka(1000年)前以降のものを上げると、一覧表にしたものが、表-1.3 である。同表には断層名、最新活動時期に加え、相当するとされている地震の名称、発生年を記載した。

表-1.3 表-1.2 の内、1000 年前以降の活動が確認された断層と相当する地震

| 起震断層   | 活動セグメント  | 最新活動時期<br>(ka : 1000 年) | 活動に相当する地震 |          |
|--------|----------|-------------------------|-----------|----------|
|        |          |                         | 年度 (西暦)   | 地震名      |
| 3 六甲   | 3-1 高槻   | 0.4                     | 1596      | 慶長伏見地震   |
|        | 3-2 六甲山  | 0.4                     | 1596      |          |
|        | 3-4 東浦   | 0.4                     | 1596      |          |
|        | 3-5 先山   | 0.4                     | 1596      |          |
|        | 3-3 北淡   | 0.01                    | 1995      | 兵庫県南部地震  |
| 9 木津川  | -        | 0.15                    | 1854      | 安政伊賀上野地震 |
| 13 花折  | 13-1 途中谷 | 0.3                     | 1662      | 寛文地震     |
| 14 三方  | -        | 0.3                     | 1662      |          |
| 17 柳ヶ瀬 | 17-2 余呉川 | 0.7                     | 1325      | 正中地震     |
| 18 養老  | 18-1 養老  | 0.4                     | 1586      | 天正地震*    |

\*天正地震については、養老断層のみが震源ではなく伊勢湾の断層も震源となったとされている。また、白川断層を震源とするという意見もある。

さらに表-1.2 の、今後 100 年以内の地震発生率の高い順に整理しなおしたものが表-1.4 である。表-1.4 より、発生確率が高いものとして、琵琶湖西岸の「饗庭野断層」、中央構造線の一部である「根来断層」、「金剛断層」がある。逆に、表-1.3 に示した最近の活動が確認された断層は当然のことながら、発生確率は低いものになっている。

表-1.4 今後 100 年以内の地震発生率と起震断層・活動セグメント<sup>4)</sup>

| 最大確率           | 該当する起震断層・活動セグメント  |
|----------------|---|
| 10% 以上         | 12-1 饗庭野*, 2-2 根来, 2-4 金剛   |
| 1% 以上, 10% 未満  | 4 志築, 6 上町, 11-2 世木林, 16 笙の川, 17-1 椿坂峠  |
| 0.2% 以上, 1% 未満 | 2-1 紀淡海峡, 13-2 北白川  |
| 0.2% 未満        | 3-1 高槻, 3-2 六甲山, 3-3 北淡, 3-4 東浦, 3-5 先山, 7 生駒, 9 木津川, 13-1 途中谷, 14 三方, 15-1 野坂, 16-2 黒河川, 16-3 駄口, 17-2 余呉川, 18-1 養老, |
| 不明             | 1-1 鳴門海峡, 2-3 五条谷, 5 湊-本庄, 8 天理, 10 三峠, 11-1 志和賀, 12-2 比良   |

\*最小確率でも 10% 以上を示す

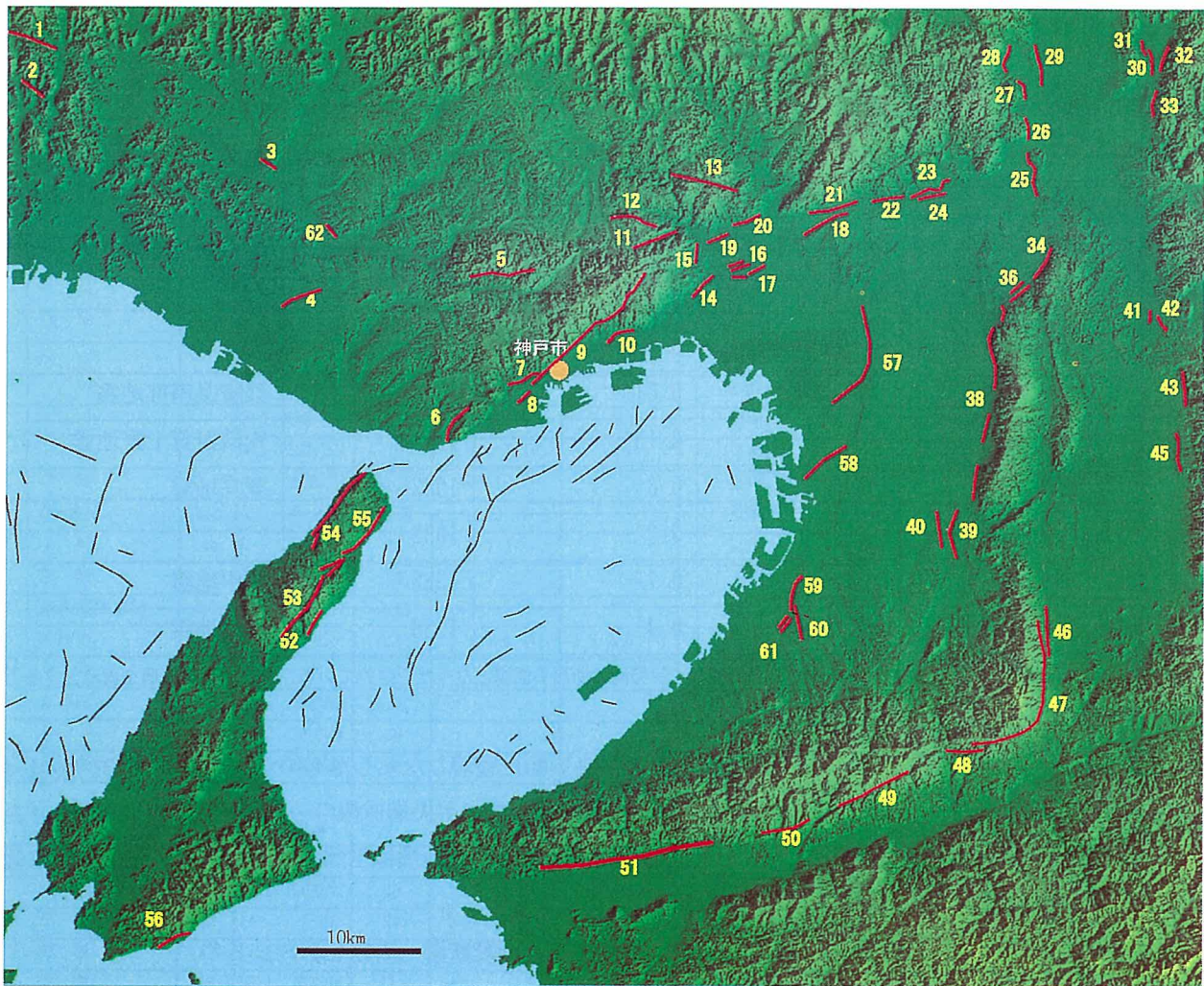
### (3) 神戸市周辺の活断層

図-1.2 は 国土地理院の数値地図 50mメッシュ (標高)<sup>6)</sup>を使用して描いた陰影段採図に、文献<sup>2)</sup>に記載された活断層のうち「活断層であることが確実のもの (確実度 I)」とされた活断層の分布と大阪湾に分布する断層の分布を重ねた平面図であり、図-1.1 より神戸市周辺に着目し、詳細な断層名を記載した。

同図に示したとおり、神戸市周辺の主要断層は、六甲山と神戸市市街地の境界部に分布する。

「7 長田山」、「8 板宿撓曲」、「9 諏訪山」、「10 岡本」、「14 甲陽」、「15 塩尾寺」、六甲山東部の低地に分布する「16 昆陽池陥没帯」、「17 伊丹」、神戸市有馬から京都市東部にかけて分布している「20 花屋敷北」等の「有馬-高槻断層帯」に属する断層群、大阪市中央部の「57 上町断層帯」とその南方延長とされる「59、60 坂本」、「61 久米田池」、大阪府東部の「34 交野」、「38 生駒」等の生駒断層群、淡路島北部に分布する「54 野島」、「55 楠本」等、和泉山脈の南側に分布する「47 金剛」、「51 根来」等の中央構造線断層帯、播磨地方に分布している「1 山崎」等の断層である。これらの断層と歴史地震との関係は上記したとおりである。





|           |               |             |          |              |          |
|-----------|---------------|-------------|----------|--------------|----------|
| 1 山崎断層帯   |               | 19 清荒神断層    |          | 41 佐紀町撓曲帯    |          |
| 2 暮坂峠断層   |               | 20 花屋敷北     | 有馬一高槻断層帯 | 42 奈良盆地東縁断層帯 |          |
| 3 琵琶甲断層   |               | 21 坊島断層     |          | 43 奈良盆地東縁断層帯 |          |
| 4 草谷断層    |               | 22 如意谷断層    |          | 45 奈良盆地東縁断層帯 |          |
| 62 三木断層   |               | 23 真上断層     |          | 46 山田断層      | 金剛断層帯    |
| 5 柏尾谷断層   |               | 24 阿威断層     |          | 47 金剛断層      |          |
| 6 横尾山断層   |               | 25 田口断層     |          | 48 五条谷断層     | 中央構造線断層帯 |
| 7 長田山断層   | 六甲山地東南縁断層帯    | 26 円明寺断層    |          | 49 五条谷断層     |          |
| 8 板宿撓曲    |               | 27 灰方断層     |          | 50 五条谷断層     |          |
| 9 諏訪山断層   |               | 28 灰方断層     |          | 51 根来断層      |          |
| 10 岡本断層群  |               | 29 樫原断層     |          | 52 釜口断層      | 上町断層帯    |
| 11 六甲断層   | 有馬一高槻断層帯      | 30 花山一勧修寺断層 |          | 53 野田尾断層     |          |
| 12 名塩断層   |               | 31 花山一勧修寺断層 |          | 54 野島断層      |          |
| 13 十万辻断層  |               | 32 黄檗断層     |          | 55 楠本断層      |          |
| 14 甲陽断層   | 六甲山地東南縁断層帯    | 33 黄檗断層     |          | 56 油谷断層      |          |
| 15 塩尾寺断層  |               | 34 交野断層     | 生駒断層帯    | 57 上町断層      | 上町断層帯    |
| 16 昆陽池陥没帯 | 千里丘陵-伊丹昆陽池断層帯 | 36 田口断層     |          | 58 住之江撓曲     |          |
| 17 伊丹断層   |               | 38 生駒断層     |          | 59 坂本断層      |          |
| 18 野畑断層   |               | 39 誉田断層     |          | 60 坂本断層      |          |
| 19 清荒神断層  | 六甲山地東南縁断層帯    | 40 羽曳野撓曲帯   |          | 61 久米田池断層    |          |

図-1.2 神戸市周辺の主要活断層

(国土地理院の数値地図 50mメッシュ (標高)<sup>6)</sup>を使用して描いた陰影段採図に、文献<sup>2)</sup>に示された活断層のうち「活断層であることが確実のもの(確実度Ⅰ)」とされた活断層の分布と大阪湾の活断層を重ねた。)

#### (4) 神戸市市街地の伏在活断層

図-1.3 は平成 8 年～平成 9 年度に行われた神戸市市街地における活断層の調査結果をまとめた活断層分布図（概略図）である<sup>7)</sup>。周知のとおり、神戸市街地の平野部は、新生代第四紀以降の厚い堆積層で覆われているため、活断層構造は地表で断層として現れる部分は稀であり、ほとんどの場所で基盤岩中の断層が、堆積層の緩やかな褶曲構造（撓曲構造）として現れている。このような活断層は、「伏在活断層」と呼ばれ、神戸市街地では図-1.3 に示したとおり、「大倉山断層」、「王子断層」、「岡本断層」がこれに相当する。さらに、海底部分まで含めると、これらに「仮屋沖断層」、「和田岬断層」、「摩耶断層」が加わる。図-1.4 は伏在活断層の意味を説明するために引用した「大倉断層」部分の地質断面図<sup>7)</sup>である。同図で、諏訪山-須磨断層、会下山断層については、基盤岩の断層構造が地表部分まで延びているため通常の活断層とされるが、大倉山断層については、基盤岩中の断層が地表付近まで延長せず、堆積層の褶曲（撓曲）として現れているため、伏在活断層と呼ばれている。

これらの伏在活断層の活動性評価については、断層が地表まで延長しないこと、市街地であるためトレンチ調査を行う場所がないこと等の理由により、明確にすることは困難であるが、撓曲の程度から読み取れる上下方向の変位により、表-1.5 のようにまとめられた。同表に示したとおり、平均変位速度は 1.0～0.1m/1000 年の範囲内に収まることがわかっている。

表-1.5 神戸市街地の伏在活断層の評価<sup>7)</sup>

| 断 層 名           | 変位速度を求めた場所                | 平均上下変位速度        | 備 考                                |
|-----------------|---------------------------|-----------------|------------------------------------|
| 仮屋沖断層<br>－大倉山断層 | 《A》須磨区東部<br>～長田区南西部       | 0.2～0.3m/1,000年 | 今回の調査による                           |
| 大倉山断層           | 《B》中央区湊川神社                | 0.1～0.2m/1,000年 | 今回の調査と兵庫県(1996) <sup>12)</sup> による |
| 和田岬断層           | 《C》神戸・兵庫港                 | 0.3m/1,000年     | 兵庫県(1996) <sup>12)</sup> による       |
| 摩耶断層            | 《D》ポートアイランドと<br>六甲アイランドの間 | 0.3m/1,000年     | 兵庫県(1996) <sup>12)</sup> による       |
| 和田岬断層<br>延長部    | 《E》灘区都賀川下流                | 0.2m/1,000年     | 今回の調査と兵庫県(1996) <sup>12)</sup> による |
| 岡本断層            | 《F》東灘区本山北町                | 0.5m/1,000年     | 今回の調査による                           |



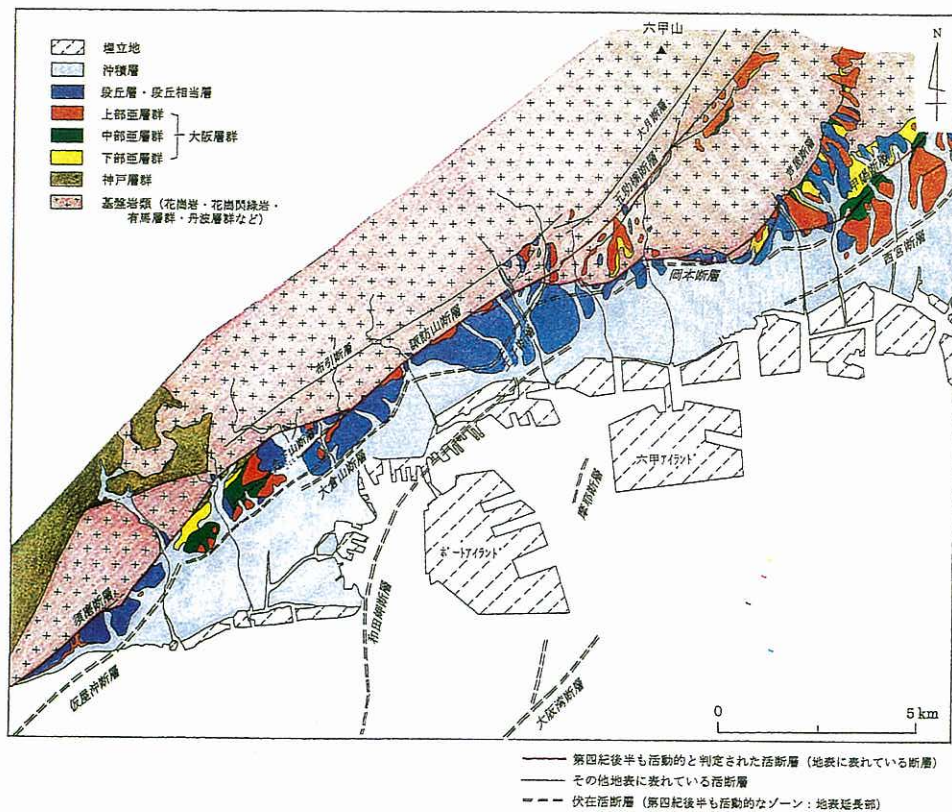


図-1.3 神戸市街地の伏在活断層（概略図）<sup>7)</sup>

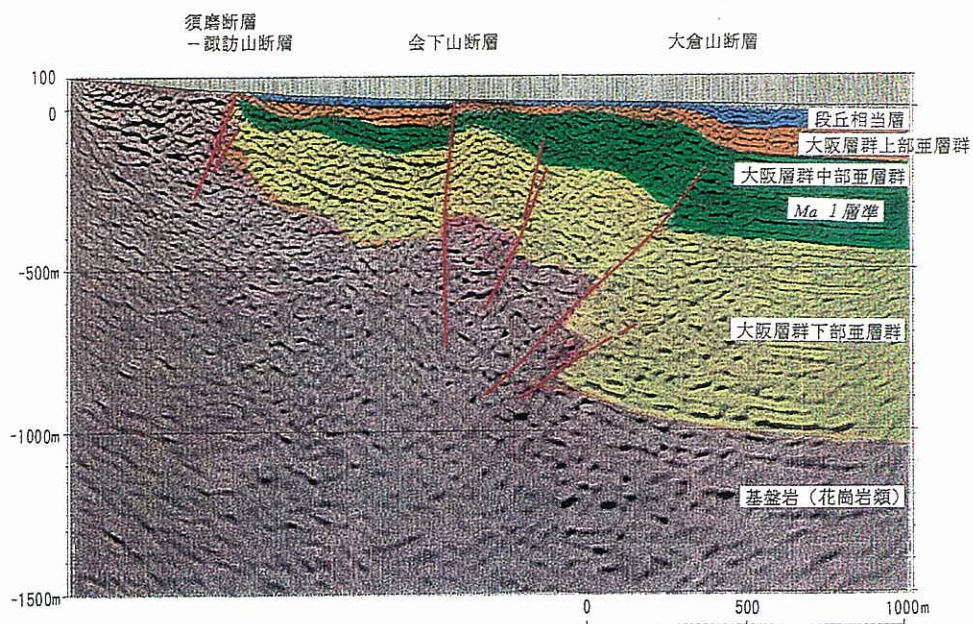


図-1.4 大倉山断層付近の地質断面図<sup>7)</sup>

#### 1.4 まとめ

以上述べた神戸市周辺の歴史地震、活断層の分布及びその活動性評価より考えられることを以下に述べる。

神戸市周辺の地震を震源タイプで分類すると、プレート境界型と活断層型に分類されるが、再来周期を見ると、前者は100年程度、後者が1000年程度で一桁異なる。プレート境界型地震で最近に起こった地震が1946年であることより、約50年以内に発生する可能性がある。活断層型については、現在までの調査では、近い将来活動すると予想される断層は確認されていない。しかしながら、現在の調査で明らかになるのは、地表にまで変位を及ぼす、いわゆる「地震断層」とされる断層の活動であり、地表に変位が現れなかった地震については評価する手法がない。また地表に断層が現れていても、その活動性を評価できるような、火山灰層や遺跡層、炭質物層が確認できない場合には、活動年代を特定することはできない。そのため、活断層の活動性評価については評価手法の確立を含めた、今後の調査結果に期待するところが多い。

したがって、神戸市周辺においては、歴史地震の研究、活断層の研究を都市防災計画に反映させるためには、まず、最も近い将来発生する確率の高い、プレート境界型地震「南海道地震」について、地震動予測さらに被害予測が必要であると考えられる。活断層型地震については、現在のところ最も活動する確率が高い活断層が特定できないため、過去繰り返し活動しており、今後も活動が予測されている活断層については、これを震源とする地震があることを想定した地震動予測、被害予測が必要であると考えられる。それに相当する断層としては、「六甲淡路断層帯」、「有馬-高槻断層帯」、「上町断層」、「生駒断層」、「山崎断層帯」、「中央構造線断層帯」等が挙げられる。

#### 参考文献

- 1) 文部科学省 国立天文台：理科年表, 平成14年度版, 2002.
- 2) 岡田篤正・東郷正美：近畿の活断層, 東京大学出版会, 2000.
- 3) 国土交通省国土地理院：数値地図250mメッシュ（標高）, 国土交通省国土地理院, 1997.
- 4) 杉山ほか：近畿三角帯における主要活断層の調査結果と地震危険度, 地質調査所速報, no. EQ/99/3, pp. 285-309, 1999.
- 5) 活断層研究会編：新編日本の活断層, 東京大学出版会, 437p, 1991.
- 6) 国土交通省国土地理院：数値地図50mメッシュ（標高）, 日本-Ⅲ, 国土交通省国土地理院, 1997.
- 7) 神戸市・財団法人建設工学研究所編：阪神・淡路大震災と神戸の活断層, 55p, 1999.

## 2. 想定地震による強震動予測の現状と将来への展望

### 2.1 地震動強度推定における不確定性と基盤での地震動推定の必要性

想定地震に対する着目地点での地震動を推定する方法には、地震規模と震源までの距離から地震動の強度を経験的に推定する簡便な方法から、震源断層の詳細な断層パラメータや伝播経路の地盤構造を考慮して時刻歴波形を推定する方法まで多種多様のものがある。推定手法が複雑になればなるほど必要とするパラメータも多くなるため、地震動推定の目的に応じて最適な方法を選ぶ必要がある。最大加速度のような地震動の基本的なパラメータを、地震マグニチュードと震央距離、震源距離などの関数として表した距離減衰式は、強震記録の充実とともに多く提案されてきたが、構造物の耐震設計に積極的に利用された例はあまりなかった。地震発生後に各地点で観測された最大加速度と距離減衰式の推定値とを比較したり、地域の地震危険度解析におけるハザード曲線算定に用いられる程度であった。

さて、土木学会から96年1月に発表された「土木構造物の耐震基準等に関する提言及び第二次提言<sup>1)</sup>」、さらに2000年6月の「第3次提言<sup>2)</sup>」では、(1)構造物の供用期間中に1～2度発生する確率を有する地震動強さ(レベル1地震動)と、(2)供用期間中に発生する確率は低いが断層近傍で発生するような極めて激しい地震動強さ(レベル2地震動)の2段階の地震動を設定することを提案している。とくに、レベル2地震動については、「基本的に損傷制御の概念に基づく耐震設計に用いられるものであるから、地震動の動的特性を端的に示す表現で示されるべきであり、応答スペクトル、または時刻歴地震波形で表すのが適切である」と述べられている。ところが、発生確率の低い強地震動の設定においては、基礎となるその地域特有の大地震発生の可能性に関する情報が極めて乏しいケースがほとんどであり、強震動予測法の不確定性の大きさを考えると、来襲時期と規模・位置を含めたレベル2地震動の設定は現在の技術ではたいへん難しいと言える。

地震動の推定法に関しては、最も基本的な地震動強度としての最大加速度の距離減衰式が多く提案されているが、想定された地震マグニチュードと震源距離に対する最大加速度の期待値には50%～70%程度のばらつきが含まれている。これは、対象としているいわゆる短周期地震動を、マグニチュードや震源距離といった極めて大まかなパラメータのみから推定することによる当然の結果ではある。また、最大加速度や最大速度のようないわゆる短周期地震動強度は、局所的な地盤条件に大きく依存することが知られている。与えられる情報量に対する強震動予測における不確定性について、Kameda & Sugito<sup>3)</sup>は多くの強震記録や地盤データを基に、表-2.1のように試算している。

表-2.1 地震動強度推定における不確定性の目安<sup>3)</sup>

| 与えられるパラメータ                | 推定誤差(変動係数) |
|---------------------------|------------|
| マグニチュード $M$ 、震源(震央)距離 $R$ | 60%程度      |
| $M$ 、 $R$ 、地盤の $N$ 値分布など  | 50%程度      |
| $M$ 、 $R$ 、詳細な地盤情報        | 25～40%程度   |

強震動推定における重要なポイントとして、表層地盤の影響をいかに精度よく取り入れるかが挙げられる。これは、対象とする周波数領域の振幅が表層地盤の特性に大きく依存するためである。さらに、基盤への入力地震動が大きい場合、土の非線形性の影響により、軟弱地盤では硬質地盤より地震動の最大加速度が低くなることがよく知られている。これは、基盤での入力地震動が同じでも、堆積層が軟弱な場合には相対的な大きなひずみが生じる結果おこる現象である。

ここで言う基盤とは、以下に述べるいわゆる工学的基盤である。断層パラメータや伝播経路特性から算定される地震動は岩盤面で規定することが望ましいが、岩盤面から地表までの地盤構造が得られている地点は稀であり、また、対象とする強震動の周波数帯域を考えれば少なくとも表層近傍の地盤特性を的確に考慮することで、十分ではないもののある程度の精度は確保されるものと考えられる。せん断波速度が400m/sec程度以上でその上の層とのインピーダンス比が大きい面を工学的基盤とし、そこで入力地震動が与えられれば、その上の堆積層の影響については別途地盤応答解析によりの確に取り入れることができる。以下、このような工学的基盤面での地震動の推定法について概説する。

## 2.2 地震動推定手法の種類と特徴

表-2.2は、各種地震動推定法の特徴、適用例などについて簡単にまとめたものである。基本的な考え方が同じであるものについては、はじめに発表されたものを掲載した。これらのうち、レベル2地震動を対象とする場合に現在よく用いられるのが、表-2.1における小断層の要素波またはスペクトルの重ね合わせ手法である(区分Ⅱ)。この中でも、基本的にマグニチュードと距離から加速度スペクトルを推定する翠川、小林の方法<sup>4)</sup>(Ⅱ-(1))がこれまでよく用いられてきた。この手法は、断層の広がりや破壊伝播速度を考慮して、応答スペクトルのレベルを修正するものであり、画期的な方法と言える。しかしながら、時刻歴波形を必要とする場合には、地震モーメントや断層の広がり、破壊パターンから推定する手法が用いられるようになってきた。着目する断層で発生した小地震による記録が得られている場合にはⅡ-(2)の手法<sup>5)</sup>が有効であるが、一般にそのような条件が整っている場合はきわめて希である。そこで、各自治体における被害想定などでは、Ⅱ-(1)またはⅡ-(3)の手法<sup>6)</sup>が使われている。

さらに、断層運動を力学的にとらえて地震動を震源から直接算定する震源断層モデルがいくつか提案されている<sup>7),8)</sup>。これらは、詳細な断層パラメータや伝播経路の構造を必要とし、かつそのパラメータの与え方により特に短周期地震動の推定値が大きく異なることから課題も多く残されているが、今後、詳細な条件が設定できるようになれば、手法の工学的意義は高いものとなることが期待されている。

これらの予測法とは異なり、Ⅳに示すように、地震動の最大加速度、スペクトル特性、時刻歴波形の包絡線形状をそれぞれ独立に与えて波形をシミュレーションすることも行われている。これは、地震危険度解析から得られる最大加速度、当該地点の地盤条件に対応するスペクトル特性、地震規模などから規定される地震動継続時間などをそれぞれ独立に考慮する場合に相当する。

想定される断層に対する着目点での地震動は、以上のように様々な手法により推定されるが、それらの不確定性は、たいへん大きいと言わざるを得ない。このような予測の精度は工学的には極めて重要な情報である。表-2.2の手法のうちで、予測精度を明示しているものは、Ⅰの距離減衰式やⅡ-(1)、Ⅱ-(3)の手法である。

表-2.2 地震動推定手法の区分と特徴

| 分類                                    | 手法   | 必要なパラメータ  | 推定される地震動                          | 適用事例                            | 課題   |
|---------------------------------------|--|---|-----------------------------------|---------------------------------|--|
| I. 距離減衰式                              | マグニチュードと震源までの距離で表される経験式  | マグニチュードM、<br>距離のパラメータR<br>〔震央距離、震源距離、<br>断層最短距離、等〕  | 最大加速度、速度、<br>応答スペクトル等の<br>スペクトル強度 | 最大地動予測<br>設計スペクトル算定<br>地震危険度解析  | 大きな不確定性、<br>局所的な地盤特性の導入法<br>データ範囲外への外挿                           |
| II. 小断層の要素波<br>またはスペクトル<br>の<br>重ね合わせ | (1) スペクトル強度の<br>合成法<br>(2) 小地震記録の合成法<br>(3) 非定常スペクトル<br>合成法    | M, R,<br>断層の広がり等<br>小地震記録と<br>地震モーメント等<br>の断層パラメータ<br>地震モーメント等<br>の断層パラメータ                | 加速度応答<br>スペクトル<br>時刻歴波形<br>時刻歴波形  | 設計スペクトル<br>設計地震動算定他<br>設計地震動算定他 | 大きな不確定性<br>着目点での小地震記録が必要<br>大きな不確定性                              |
| III. 断層震源モデル                          | (1) 有限要素法<br>・離散型波数有限要素法<br>・運動力学モデル<br>・応力緩和モデル<br>(2) 連続体モデル | 詳細な断層パラメータ<br>〔断層の広がり、<br>すべり量、<br>破壊伝播パターン、<br>震源時間関数、<br>ストレスドロップ、<br>着目点までの<br>地盤構造、他〕 | 時刻歴波形                             | 設計地震動算定他                        | 断層に関する複雑なパラメータが<br>必要、パラメータの不確定性に<br>結果が大きく依存<br>短周期地震動予測には課題が多い |
| IV. スペクトル適合<br>モデル                    | (1) スペクトル適合法   | 応答スペクトル、<br>包絡線形状または特定<br>地震動の位相スペクトル   | 時刻歴波形                             | 設計地震動算定                         | 目標スペクトル、波形の包絡線<br>形状を独立に与えるため、<br>対象断層が明確でない                     |

### 2.3 地震動推定の将来への展望

平成13年6月、中央防災会議は想定東海地震の震源位置<sup>9)</sup>を西方に最大50km程度ずらし、さらに、断層のアスペリティ分布まで想定したものを発表している。これら詳細な断層パラメータの推定精度については議論できるまでのデータが蓄積されていないが、ある程度以上の精度で予知されるようになれば、このような情報を生かした強震動予測法の工学的価値は高いものとなる。現状では、表-2.2に示されるⅡ-(1)~(3)、Ⅲ-(1)や、それらの手法を若干変更したものが数多く提案されているが、これらのどの手法でも上記のような詳細な断層パラメータを何らかの形で反映したシミュレーションが可能である。したがって、与えられる断層パラメータの推定精度ならびにそれらパラメータが着目する地震動強度にどのように影響するかについて、十分な検討が必要である。

強震動推定のもう一つのポイントは、着目点近傍の地盤特性の情報をいかに精度よく取り入れるかである。ごく表層付近の地盤特性が短周期地震動に大きく影響すること、また、入力地震動のレベルによりそれが変化することはこれまでの強震記録からも明らかであり、さらに地震動の周期によってはより深部の地盤構造が大きく影響する事例も報告されている。強震動推定の目的に応じて適切な解析手法を導入することが極めて重要である。近年、とくに実務において地盤震動解析の汎用プログラムが多用されているが、解析法に見合った精度の地盤パラメータが与えられていること、解析過程における地盤定数が適切に設定されているか、等について十分吟味する必要があることは言うまでもない。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」、社団法人土木学会、1996. 1.
- 2) 土木学会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説、社団法人土木学会、2000. 6.
- 3) H. Kameda and M. Sugito, Microzonation and Simulation of Spatially Correlated Earthquake Motions, Proc. of Third International Conference, Seattle, Vol. III, 1982, pp. 1463-1474.
- 4) 翠川三郎、小林啓美：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定、日本建築学会論文報告集、第282号、1979. 8、pp. 71-79.
- 5) K. Irikura : Prediction of Strong Acceleration Motions using Empirical Green's Function, 第7回日本地震工学シンポジウム論文集、1986、pp. 151-156.
- 6) M. Sugito and H. Kameda, Prediction of Nonstationary Earthquake Motions on Rock Surface, Proc. of Japan Society of Civil Engineers, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 2, No. 2, Oct. 1985, pp. 149-159.
- 7) K. Toki and F. Miura : Simulation of a Fault Rupture Mechanism by a Two-dimensional Finite Element Method, Journal of Phys. Earth., Vol. 33, 1985, pp. 485-511.
- 8) 山田善一、野田茂：離散型波数有限要素法を用いた地震動のシミュレーション、自然災害科学、Vol. 5, No. 2, 1986、pp. 35-60.
- 9) <http://www.bousai.go.jp/jishin/chuou/tokai/index.html>



### 3. 各種強震動予測手法による兵庫県南部地震時の神戸市の地震動解析

#### 3.1 一次元等価線形化モデルによる兵庫県南部地震時の地震動解析

##### 3.1.1 はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、各種構造物に甚大な被害をもたらし、特に神戸市街地を中心とした地域には、被害の著しい「震災の帯」と言われる地域が形成された。

これらの構造物被害は、地震による揺れが媒体となっていると推定され、地震動分布の実態を把握することは、地震による構造物被害の原因を究明するためには、必要不可欠であると考えられる。

しかしながら、この「震災の帯」が形成された地域においては、兵庫県南部地震の地震観測記録は僅かであり、地震観測記録から地震動分布の全体像を把握することは不可能であった。

本研究では、この地震動分布の実態を把握する目的で、任意の地点における地震動を推定する手法を用いて、兵庫県南部地震による地震動分布の推定を行った。また、推定した地震動分布と、構造が比較的単一である木造建物の被害との対比を行い、推定した地震動分布に対する妥当性の確認や、地震動と木造建物被害の相関についての検討を行った。

なお、本研究を進めるにあたり、必要となる地盤のS波速度や密度値等、地盤物性値等の地盤情報に関しては、同様の研究を実施している、財団法人 阪神・淡路大震災記念協会より研究成果<sup>1)</sup>の提供を受けている。

##### 3.1.2 地震動推定手法

構造物の被害と地震動分布の対比を行うためには、任意の地点における地震動を推定する必要がある。本研究においては、地震動の推定手法として、以下に示す2種類の手法を用いた。

まず、兵庫県南部地震の震源パラメータやスペクトル特性を反映させた、強地震動の統計的予測モデル<sup>2)</sup> (EMPRモデル、EMPR: Earthquake Motion Prediction II Revised Model) を基に兵庫県南部地震のシミュレーションを用い、地震動推定地点の工学的基盤における地震動の予測を行う。

さらに、工学的基盤から地表まで地盤浅部の地震動増幅について、地震応答解析プログラムFDEL<sup>3)</sup> (FDEL: Frequency-Dependent Equivalent Linearization Technique) を用い、地表における地震動を推定する手法を採用した。

これら2つの手法を用いて、任意の地表面における地震動を推定した。

以下に、それぞれの手法についての概要を述べる。

##### (1) 工学的基盤における非定常強地震動の統計的予測モデル (EMPRモデル)

一般的に周期が数秒程度までの短周期地盤震動が、局所的な地盤の影響を強く受けることはよく知られている。この局所的な地盤の影響は、震源の特性や伝播経路の特性に比べ、比較的調査しやすく、地震動予測に取り入れることが比較的容易である。そのため、工学的基盤レベルまでの強地震動を概略的に推定し、そのうえで局所的な地盤の影響を詳細に考慮して付加することがよく行われてきている。

本研究では、工学的基盤における強地震動の予測手法として、小断層からの非定常スペクトルの重ね合わせ (図-3.1.1) による地震動シミュレーション手法 (EMPRモデル) をベースとして、兵庫県南部地震のシミュレーションを行った。この地震動シミュレーションのフローチャートを図-3.1.2に示す。

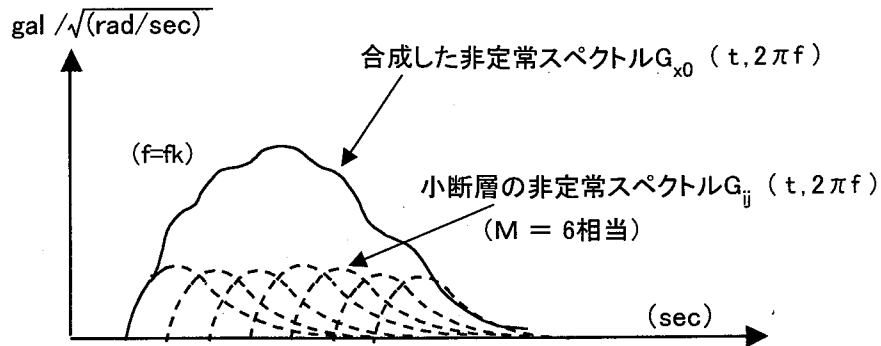


図-3.1.1 非定常スペクトルの重ね合わせ概念図<sup>4)</sup>

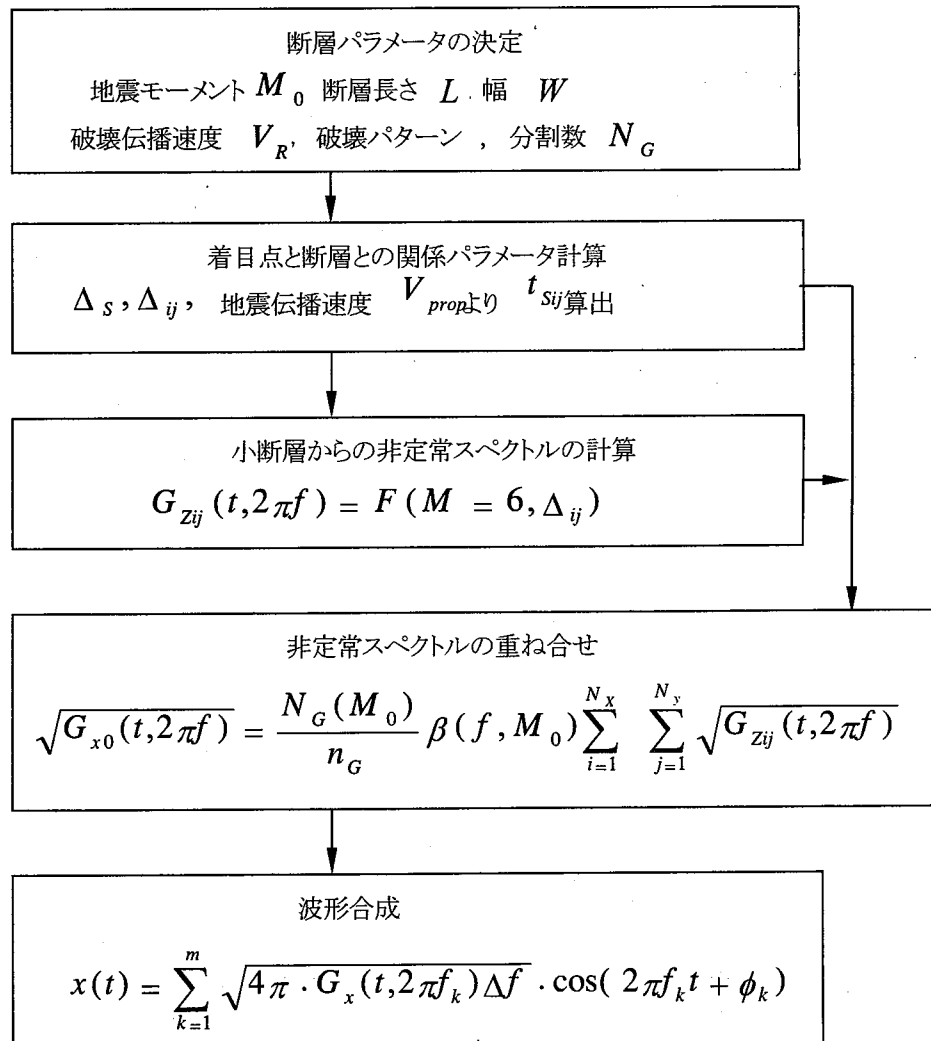


図-3.1.2 地震動シミュレーションのフローチャート<sup>4)</sup>

この手法は地震動の予測手法のなかでも、短周期波の表現に優れているといわれる経験的手法の一つであり、時系列での予測が可能で、さらに断層破壊速度や断層面でのモーメント分布などの、震源に関する物理的なパラメータの影響を考慮できるという特長を持っている。

EMPR モデルでは各種断層パラメータ、破壊伝播速度、断層から地震動推定地点までの地震波伝播速度、小断層ごとのモーメント分配率などの入力が可能であるが、ここでは、菊池<sup>5)</sup>によって指摘されている兵庫県南部地震のメカニズムなどを参考に、これらの震源パラメータを決定している。さらに、兵庫県南部地震の震源断層に固有のスペクトル特性を考慮することができるよう、観測記録に基づいてモデルの補正を行っている。

この地震動予測モデルより、任意の地点における工学的基盤での、断層の走行に対し直交する成分 (N38.4W)、断層の走行と平行な成分 (N51.6E) の水平方向 2 成分、及び鉛直方向成分の加速度波形を推定した。

## (2) 地震応答解析プログラム (FDEL)

地盤の地震応答解析において、土の剛性や減衰特性とひずみとの非線型な関係を、等価な線形関係に置き換えるいわゆる等価線形化法は、周波数領域の解析ができるため簡便であり、また、地表で得られた強震記録からその地盤構造を用いて、基盤での入力地震動を推定する逆解析も可能であることから、特に実務の面で多用されている。このような等価線形化法による地盤応答解析プログラムとして、Schnabel, Lysmer and Seed により 1972 年に発表された SHAKE<sup>6)</sup> は、地震工学の分野において多大な貢献をしてきたが、軟弱な地盤でかつ入力地震動のレベルが大きい場合には、計算結果が観測値と大きく異なることが以前から指摘されてきた。

SHAKE が用いている等価線形化法では、地盤ひずみを基にして地盤の等価ひずみを決定する。このため、地盤が軟弱な層へ大きな地震動が入力されると、地盤ひずみが大きくなる。これに対応して、 $G \sim \gamma$  曲線から得られる等価剛性は極端に小さくなり、 $h \sim \gamma$  曲線から得られる等価減衰は極端に大きくなる。

一般に、地盤のひずみ波形のスペクトル振幅は、周波数に依存して大きく異なり、例えば高周波数領域では、地盤ひずみに大きく関与しないことが知られているが、SHAKE 型の等価線形化法では、スペクトル振幅の大小に関わらず、一様の剛性と減衰を与えてしまうため、結果として高周波数成分においては、地震動の振幅が極端に小さく評価される結果になる。

このことは、逆に、等価線形化手法においては、土のせん断剛性と減衰定数を規定する等価ひずみを、ひずみ波形のフーリエスペクトル振幅の大小に応じて規定すればよいことを示唆している。

そこで、等価ひずみの規定方法を改め、地盤各層においてひずみ波形に寄与する割合に応じた等価ひずみを周波数毎に与えることにし、地盤のひずみ波形のスペクトル振幅の周波数依存性を考慮するモデルを使用した。

また、その妥当性については、地盤情報が詳細に得られている鉛直アレー観測点での強震記録や、外国の他のアレー観測記録を用いて検討を重ねており、それぞれに良好な結果が得られている。また、前述した地震動予測モデル (EMPR) では、地表の観測記録から基盤の入射波を推定する際に、本手法を用いた応答解析を行っている。

この手法により、前項で述べた EMPR で得られた水平方向 2 成分の地震動波形を入力波形とし、地表面における水平方向 2 成分の地震動を推定した。地表面における鉛直方向の地震動については、非常強震動の統計的予測プログラム (EMPR モデル) で求めた工学的基盤における地震動を、地表面相当の地震動と仮定し用いた。

### 3.1.3 解析測線の設定

神戸市内は、表層地質の違いや兵庫県南部地震で被った被害の度合いから、東部・中部・西部の3地区に大別することができる。

そこで、本研究では、それぞれの地区について、図-3.1.3に示すような代表測線を設定した。各測線の断面図を図-3.1.4～3.1.6に示した。

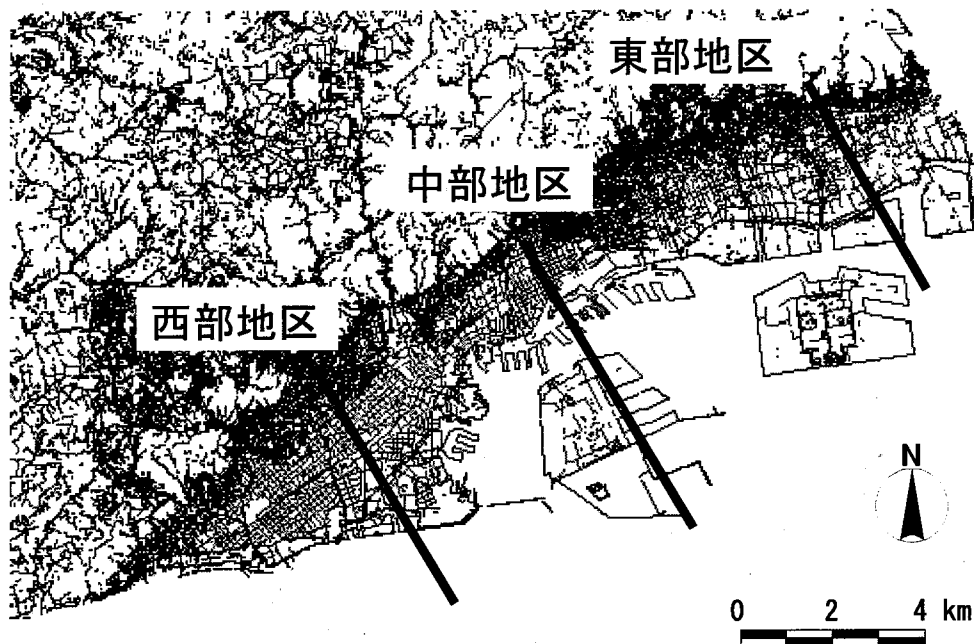


図-3.1.3 解析測線位置図

以下に、各地区代表測線の地質状況について概説する。

東部地区を代表する測線としては、住吉川東部の平坦地を通過する測線とした。当地区は東灘区特有の海浜性の砂～砂礫層が厚く分布する地域であり、兵庫県南部地震による家屋等の被害が激しかった地区である。

次に、中部地区を代表する測線として、中央区の生田川沿いの測線を設定した。当地区の内陸部は生田川の扇状地にあたり、沖積層の砂礫もしくは砂層が約10mの厚さで分布している。

最後に、西部地区を代表する測線として、和田岬の西側を通り、兵庫区と長田区の境界付近の平坦地を通過する測線を設定した。和田岬周辺は砂礫もしくは砂層が分布する砂州に相当し、兵庫駅周辺の内陸部はその後背湿地に相当している。東部地区と同様、内陸部においては、兵庫県南部地震による被害が激しかったところである。

なお、各代表測線とも測線の山側を起点(0番)として、それぞれ100m毎に地震動推定点を設けた。

ただし、海上や運河上等、水上の地点、及び地表に花崗岩が露岩している地点は、地震動推定地点から除外している。

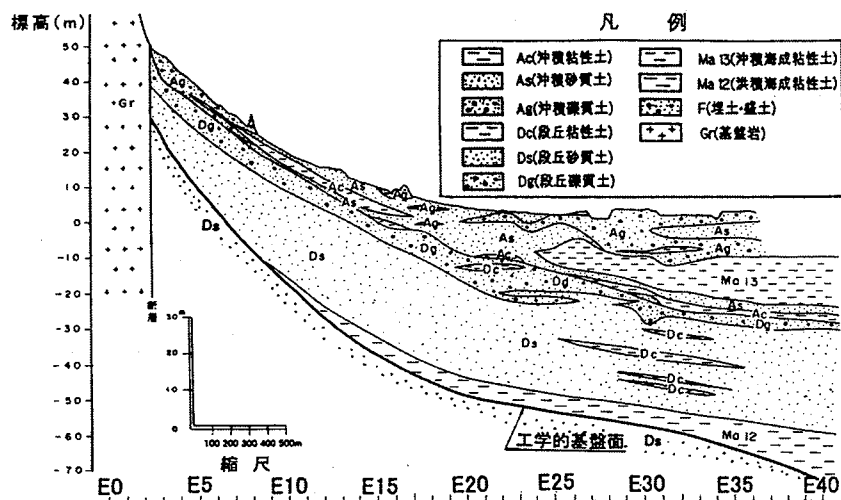


图-3.1.4 东部地区代表测线地质断面图

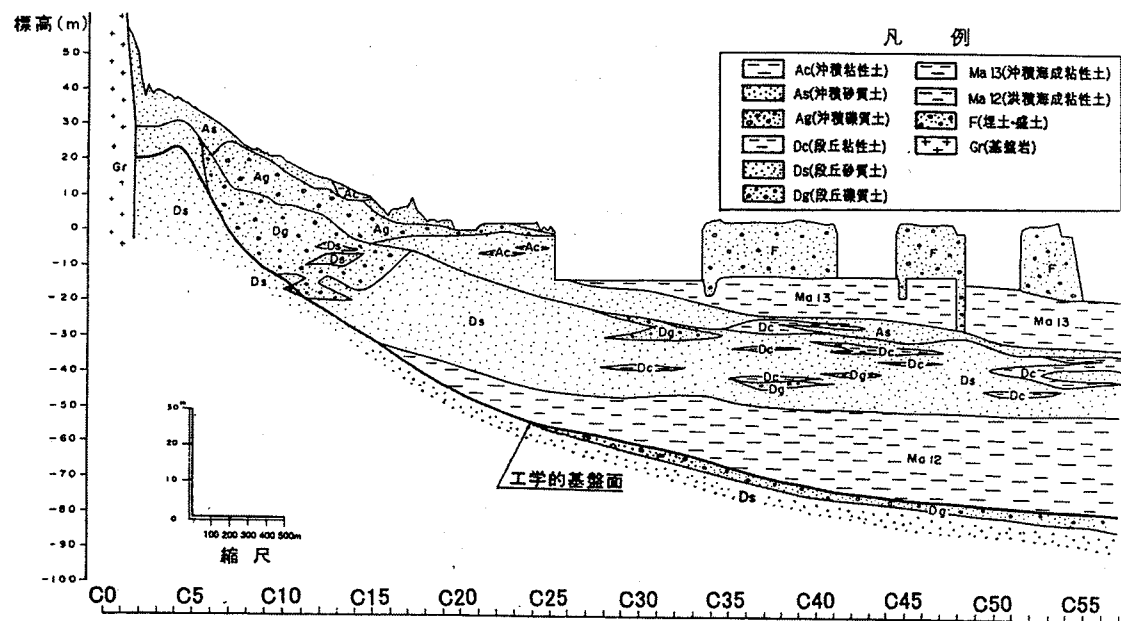


图-3.1.5 中部地区代表测线地质断面图

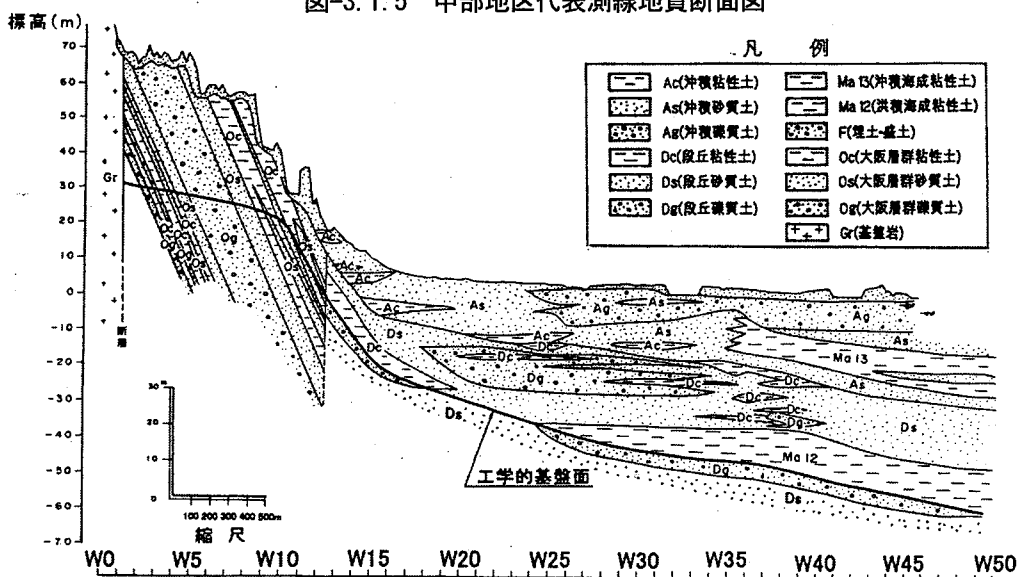


图-3.1.6 西部地区代表测线地质断面图

### 3.1.4 地盤物性値の検討

3.1.2 項で述べた手法によって、地表面における地震動を推定するためには、推定地点の地盤情報が必要となる。

本研究で必要となる物性値については、前述した財団法人 阪神・淡路大震災記念協会の研究成果を基に設定した。この研究成果は、神戸 JIBANKUN<sup>10)</sup> に登録されている約 4,000 本のボーリングデータから、各種地盤物性値の検討を行っている。その結果を用いて、地震動解析に必要な工学的基盤より浅い地盤の地盤モデルを作成した。

以下に、地盤物性値についての概要を示す。

#### (1) N 値

各解析測線を中心とした約 2km 幅に分布するボーリング柱状図から、各地区毎に N 値の平均値をまとめた。各地区、各地層毎の平均 N 値を表-3.1.1 に示す。

表-3.1.1 各地区・各地層毎の平均 N 値

|      |         | 西部地区 (約700本) |        | 中部地区 (約550本) |        | 東部地区 (約400本) |        | 全地区 (約1650本) |        |
|------|---------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|
|      |         | 平均N値         | n      | 平均N値         | n      | 平均N値         | n      | 平均N値         | n      |
| Ac   | 沖積粘性土   | 11           | (866)  | 9            | (394)  | 11           | (1376) | 11           | (2636) |
| As   | 沖積砂質土   | 25           | (2357) | 23           | (1553) | 23           | (1706) | 24           | (5616) |
| Ag   | 沖積礫質土   | 39           | (2009) | 42           | (1067) | 33           | (831)  | 39           | (3907) |
| Dc   | 洪積粘性土   | 22           | (1107) | 23           | (1116) | 23           | (580)  | 23           | (2803) |
| Ds   | 洪積砂質土   | 43           | (998)  | 42           | (2917) | 45           | (1424) | 43           | (5339) |
| Dg   | 洪積礫質土   | 54           | (2099) | 50           | (1461) | 52           | (1519) | 52           | (5079) |
| Ma13 | (沖積粘性土) | 10           | (528)  | 3            | (564)  | 3            | (652)  | 5            | (1744) |
| Ma12 | (洪積粘性土) | 18           | (139)  | 16           | (262)  | 14           | (43)   | 16           | (444)  |
| F    | 盛土・埋立土  | 11           | (614)  | 17           | (1754) | 11           | (1223) | 14           | (3591) |
| Oc   | 大阪層群粘性土 | 30           | (178)  | 26           | (3)    | 41           | (6)    | 30           | (187)  |
| Os   | 大阪層群砂質土 | 48           | (151)  | 51           | (32)   | 59           | (6)    | 49           | (189)  |
| Og   | 大阪層群礫質土 | 52           | (243)  | 39           | (8)    | 43           | (3)    | 51           | (254)  |

注) N値60以上は、N値60として処理している。

これによると、沖積層のうち Ac 層、As 層は各地で大きな差は認められないが、Ag 層では東部地区で小さくなっている。

一方、段丘層に相当する Dc, Ds, Dg 層は各地区で大きな差は認められない。

また、Ma13 層は東部、中部地区では約 3 であるのに対して、西部地区では約 10 と大きな値を示しているのに対し、Ma12 層は各地区で大きな差は認められない。

#### (2) S 波速度

一般的に、地質調査で S 波速度を求める PS 検層が実施されることは稀で、N 値を得る標準貫入試験のみ行われることが殆どである。従って、地盤の S 波速度を求めるためには、N 値から S 波速度を換算する等

の工夫が必要である<sup>11)</sup>。

そこで、神戸 JIBANKUN に登録されているボーリングデータのうち、PS 検層が実施されているデータについて、地層毎にN値とS波速度とを抽出し、N値からS波速度を推定する回帰式を得た。これら回帰式の係数一覧を表-3.1.2 に示す。

表-3.1.2 地層毎のN値とS波速度の関係

| S波速度 (m/sec) = $A \times N^B$ |       | 今井らの換算式 |       | 神戸地域 |       |
|-------------------------------|-------|---------|-------|------|-------|
|                               |       | A       | B     | A    | B     |
| Ac                            | 沖積粘性土 | 107     | 0.274 | 87   | 0.372 |
| As                            | 沖積砂質土 | 81.8    | 0.292 | 106  | 0.231 |
| Ag                            | 沖積礫質土 | 75.4    | 0.351 | 103  | 0.205 |
| Dc                            | 段丘粘性土 | 128     | 0.257 | 102  | 0.362 |
| Ds                            | 段丘砂質土 | 110     | 0.285 | 175  | 0.171 |
| Dg                            | 段丘礫質土 | 136     | 0.246 | 241  | 0.099 |
| Ma13                          | 沖積粘性土 | —       | —     | 150  | 0.157 |
| Ma12                          | 洪積粘性土 | —       | —     | 183  | 0.142 |
| F                             | 盛土・埋土 | 91.7    | 0.257 | 141  | 0.129 |

注) F (盛土・埋土) における今井らの換算式の値は、  
文献<sup>11)</sup> 中の、盛土 (砂質土) : Fs の値を示している。

### (3) 密度

S波速度と同様、地盤の密度値を求める密度検層が実施されることも少ない。そこで、神戸 JIBANKUN に登録されている密度検層結果から、地層毎の平均密度値を抽出し、それを基に入力密度値とした。各地層毎の平均密度値及び入力密度値一覧を表-3.1.3 に示す。

表-3.1.3 地層毎の平均密度値及び平均密度値

| 地 層 名 |       | 平均密度値<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 入力密度値<br>(t/m <sup>3</sup> ) |
|-------|-------|------------------------------|------------------------------|
| Ac    | 沖積粘性土 | 1.71                         | 1.70                         |
| As    | 沖積砂質土 | 1.83                         | 1.80                         |
| Ag    | 沖積礫質土 | 1.86                         | 1.85                         |
| Dc    | 段丘粘性土 | 1.84                         | 1.85                         |
| Ds    | 段丘砂質土 | 1.96                         | 1.95                         |
| Dg    | 段丘礫質土 | 2.02                         | 2.00                         |
| Ma13  | 沖積粘性土 | 1.66                         | 1.65                         |
| Ma12  | 洪積粘性土 | 1.71                         | 1.70                         |
| F     | 盛土・埋土 | 1.84                         | 1.85                         |

### 3.1.5 地震動の計算

#### (1) 工学的基盤における地震動

非定常強地震動の統計的モデル (EMPR) を用いて、各地点の工学的基盤における地震動を推定した。図-3.1.7 に各代表測線における各成分の工学的基盤での最大加速度分布を示す。ここで、各成分とは断層の走行に直交する成分 (N38.4W)、断層の走行成分 (N51.6E)、及び鉛直成分の計 3 成分を示す。

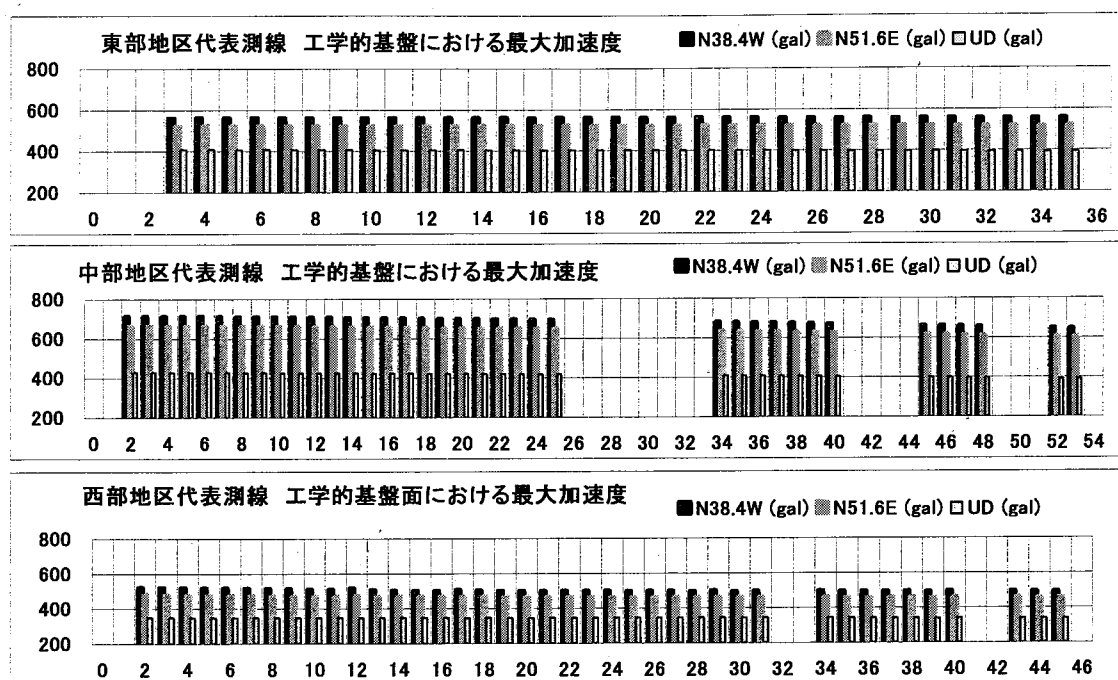


図-3.1.7 工学的基盤における最大加速度

以下に、工学的基盤における地震動計算結果について、各測線毎にその特徴をまとめる。

#### ①東部地区代表測線

断層直交成分の地震動の大きさ (加速度の絶対値) は 560gal 前後で、断層の走行成分は 520gal 前後、鉛直成分は 400gal 前後である。地震動の大きさは測線の起点側で大きく、終点側に向かうに連れて小さくなる傾向が各成分で見られる。

#### ②中部地区代表測線

断層直交成分の地震動の大きさは 700gal 前後、断層走行成分は 650gal 前後、鉛直成分は 420gal 前後である。東部地区と同様、地震動は測線の起点側が大きく終点側に向かうに連れて小さくなる傾向が各成分で見られる。また、中部地区は 3 地区の中で地震動の大きさは各成分とも最大となる。

#### ③西部地区代表測線

断層直交成分の地震動の大きさは 500gal 前後、断層の走行成分では 460gal 前後、鉛直成分は 340gal 前後である。他の地区同様、各成分で測線の起点側が大きく終点側に向かうに連れて小さくなる傾向が見られる。また、3 地区の中では地震動が最も小さくなっている。



## (2) 地表面における地震動

前項で算出した工学的地震基盤における加速度波形を入力として、地震応答解析プログラム（FDEL）を用いて、地表での地震動を推定した。

推定した地震動（加速度波形）は、断層の走行に直交する成分（N38.4W）と断層の走行成分（N51.6E）の2成分であり、鉛直成分については工学的基盤と同じと仮定し、非定常強震動の統計的予測プログラム（EMPR モデル）で求めた地震動（加速度波形）を使用した。また、推定した地震動を基に、最大速度、SI 値、気象庁震度階による計測震度についても計算を行った。

図-3.1.8～3.1.10 に解析の結果求められた、各地区代表測線の地表面における最大加速度（gal）、最大速度（kine）、SI 値（kine）、及び気象庁震度階による計測震度の分布を示す。

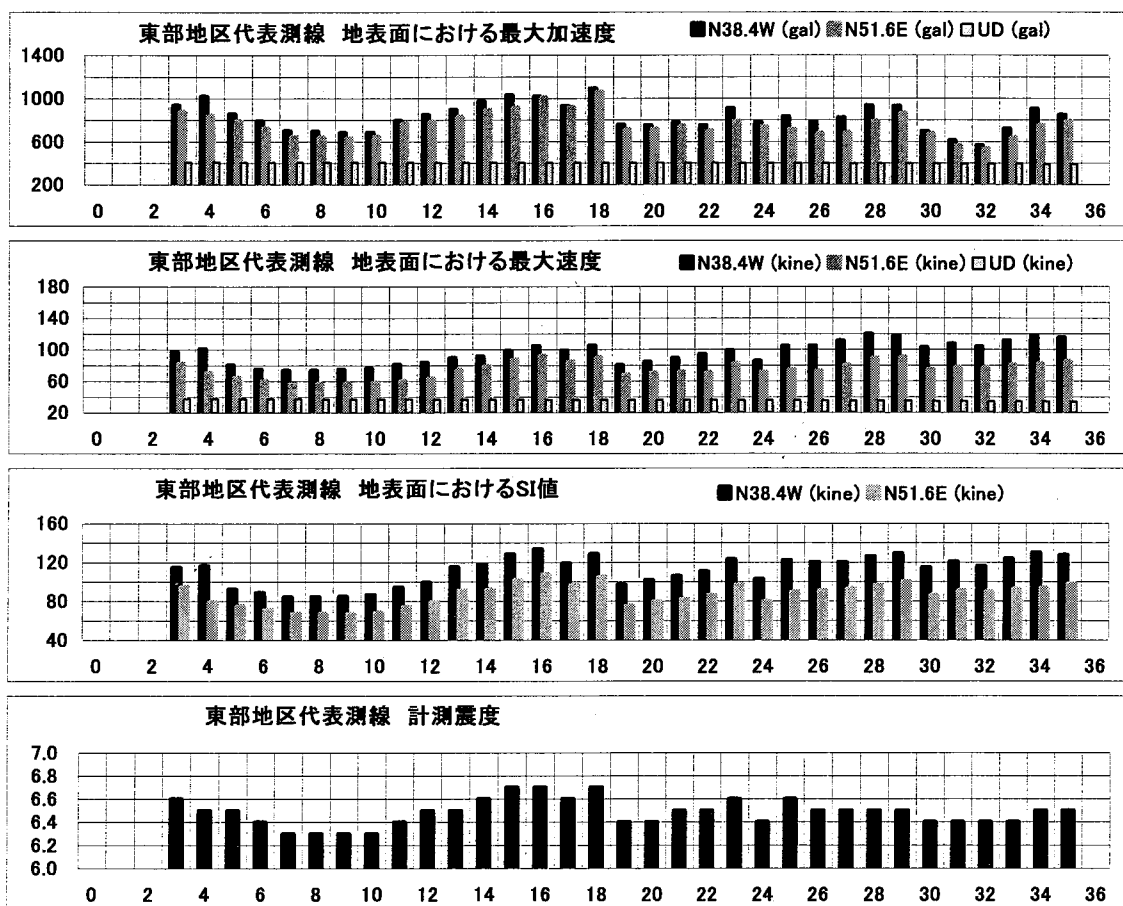


図-3.1.8 地表面における地震動（東部地区）

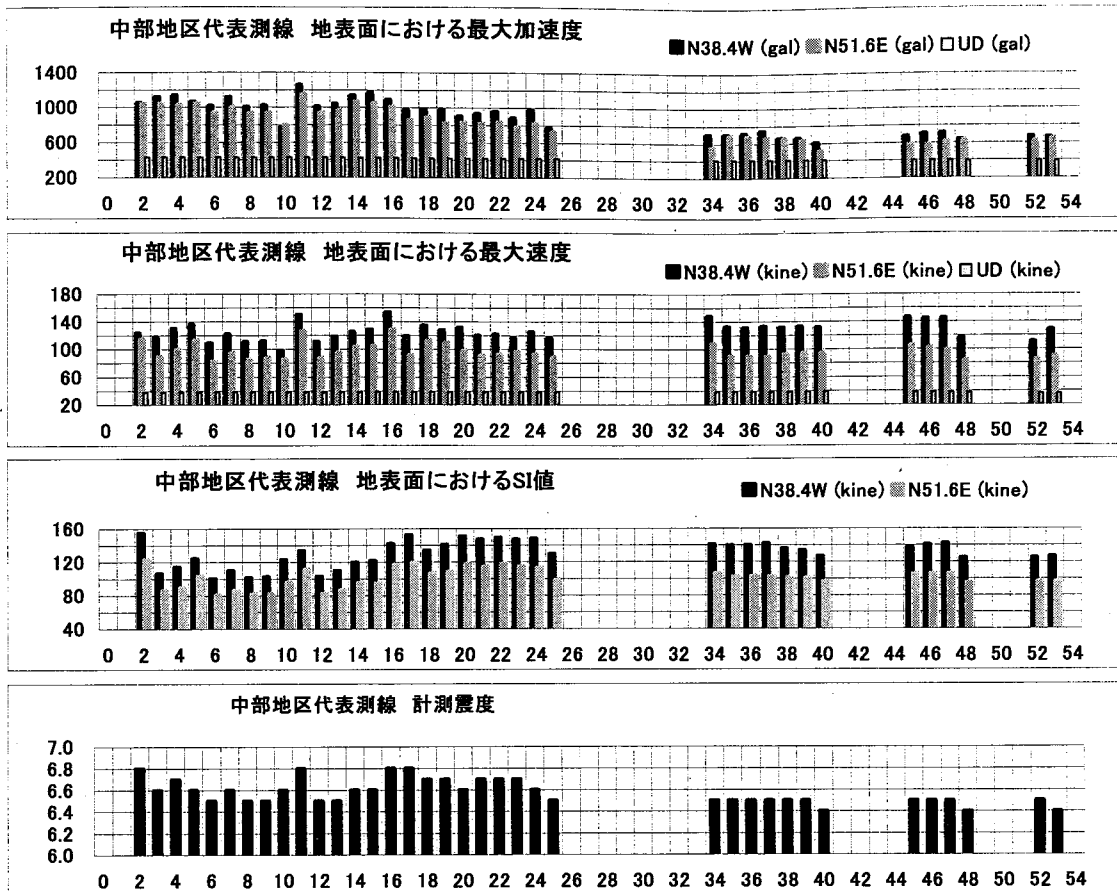


図-3.1.9 地表面における地震動（中部地区）

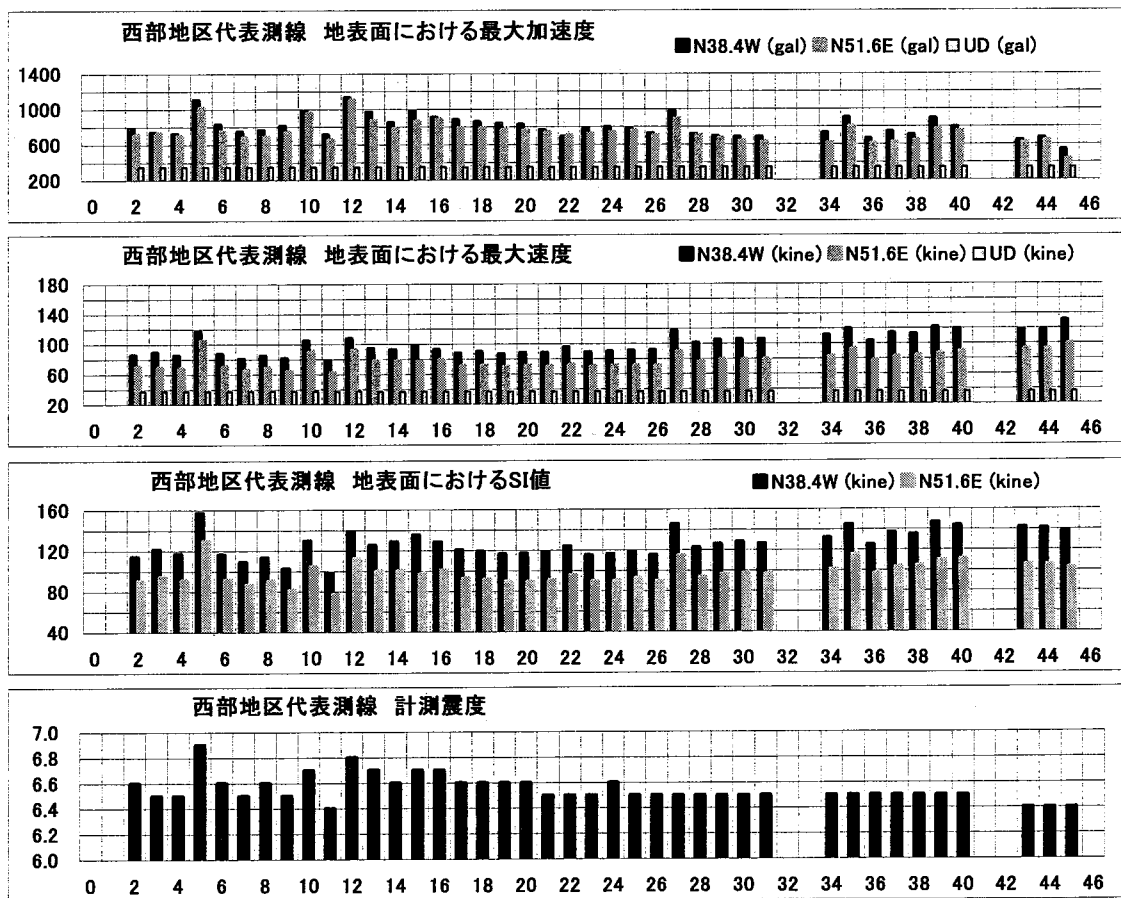


図-3.1.10 地表面における地震動（西部地区）

以下に、これらの計算結果について、各測線毎にその特徴を簡単に述べる。

#### ①東部地区代表測線

断層に直交する成分、及び断層の走行成分の最大加速度は 500～1000gal 程度、最大速度は 60～120kine 程度、SI 値は 70～130kine 程度であり、これら水平 2 成分は断層に直交する成分の方が断層の走行成分よりも大きな値を示している。また、計測震度は 6.3～6.7 である。

分布の特徴として、測線の起点付近と測線の中央やや起点側（12 番～18 番付近）でそれぞれの値が大きくなっている。

なお、鉛直成分は加速度で 400gal 程度、速度で 40kine 程度であり、地点間の差は殆ど見られない。

#### ②中部地区代表測線

断層の直交する成分、及び断層の走行成分の最大加速度は 600～1300gal 程度、最大速度は 60～150kine 程度、SI 値は 80～160kine 程度と、東部地区に比べて値の幅が広がっている。東部地区同様、断層に直交する成分が断層の走行成分に比べ、大きな値を示している。また、計測震度は 6.4～6.8 である。

分布の特徴としては、測線の前半側で地震動が大きく、終点側に向かうに連れて徐々に小さくなり、終点付近の埋立地では前半側の半分程度の大きさになる地点も見られる。

なお、鉛直成分については、最大加速度で 400gal 程度、最大速度で 40kine 程度であり、地点間の差は殆ど見られない。

#### ③西部地区代表測線

断層に直交する成分、及び断層の走行成分の最大加速度は一部で 1000gal を超える地点もあるものの、概ね 700gal～900gal 程度であり、最大速度は 60～120kine 程度、SI 値は 80～160kine 程度である。他の地区同様、水平 2 成分については、断層に直交する成分が断層の走行成分より大きな値を示している。また、計測震度は 6.4～6.9 である。

分布の特徴としては、局所的に値が大きくなる地点も見受けられるものの、他の 2 地区に比べてそれぞれの値の変化（変動幅）が少ない傾向が見られる。

なお、鉛直成分は最大加速度で 350gal 程度、最大速度で 40kine 程度で地点毎の差は殆ど見られない。

### 3.1.6 兵庫県南部地震による木造建物被害

兵庫県南部地震による構造物被害と地震動分布との分析を行うに際し、分析対象とする構造物を、比較的単一な構造からなる木造建物とした。さらに、木造建物については昭和 45 年に建築基準法が改正されたが、その前後で被害状況に顕著な差が認められたため、昭和 45 年以前に建築された木造建物を対象とした。

神戸 JIBANKUN には、昭和 45 年以前に建築された木造建物被害の分布状況が、町長目毎の全壊ならびに滅失率として登録されている。これらのデータから、各地区代表測線周辺における木造建物の被害率分布を抽出し、図-3.1.11～3.1.13 に示す。

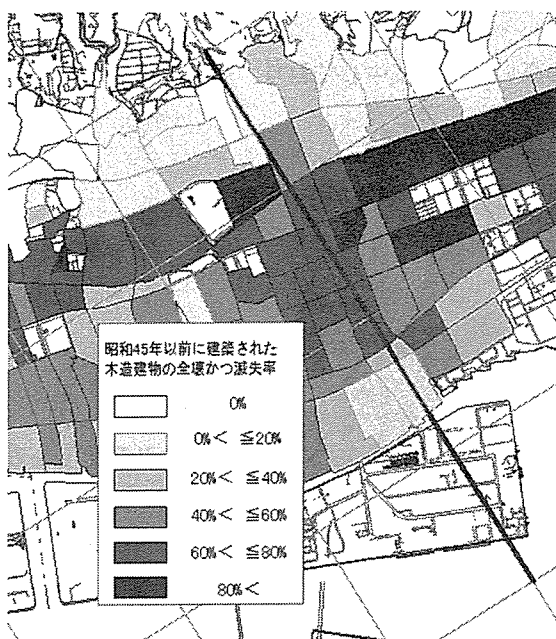


図-3.1.11 木造建物被害分布（東部地区）

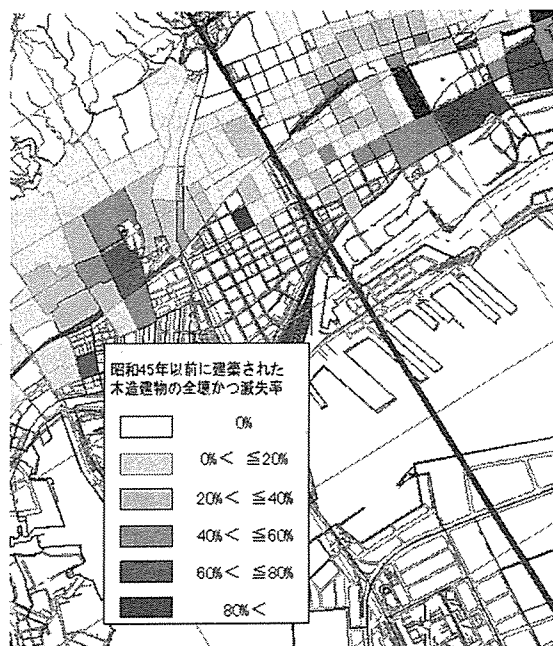


図-3.1.12 木造建物被害分布（中部地区）

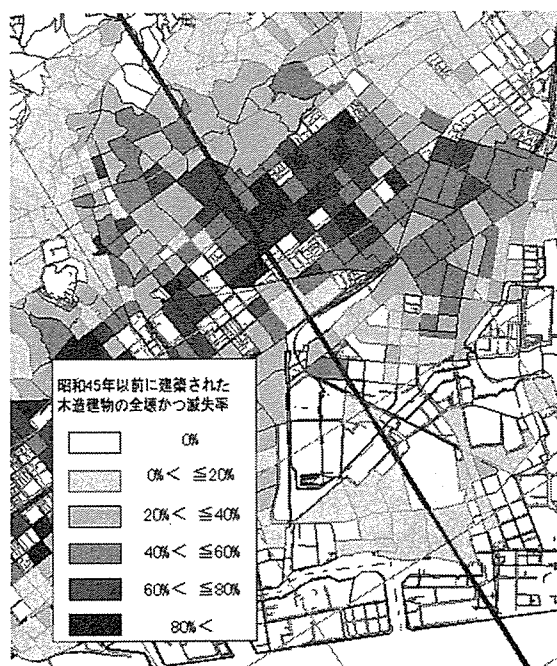


図-3.1.13 木造建物被害分布（西部地区）

以下に、各測線毎の木造建物被害の分布状況を概説する。

#### ①東部地区代表測線

測線の前半で被害の度合いが高く、中でも中央部付近で最も被害の度合いが高くなっている。一方、測線の終点側での被災の度合いは小さくなっている。

#### ②中部地区代表測線

測線の起点側に被害の度合いの高い地区が見受けられるが、全体的には被災度は低くなっている。ただし、中部地区はもともと木造建物の少ない地区であるため、木造建物についてのみ着目した場合、全体的に被害の度合いが低く見えると考えられる。

### ③西部地区代表測線

測線の起点側から測線中央部にかけて被害の度合いの高い地区が集中しており、逆に、測線の終点側では被害の度合いは低くなっている。

#### 4.1.7 地震動計算結果と木造建物被害との比較

本項では、推定した地表地震動の結果と、前項で抽出した兵庫県南部地震による木造建物を用いて、地震動推定値と実際の被害状況に、どのような関係があるかの検討を行った。

図-3.1.14～3.1.16に、木造建物被害分布図に、地震動計算結果のうち気象庁震度階による計測震度を重ねたものを示す。これらのデータを重ねて示すことで、推定地震動の大きさと木造建物被害との相関が検討できる。

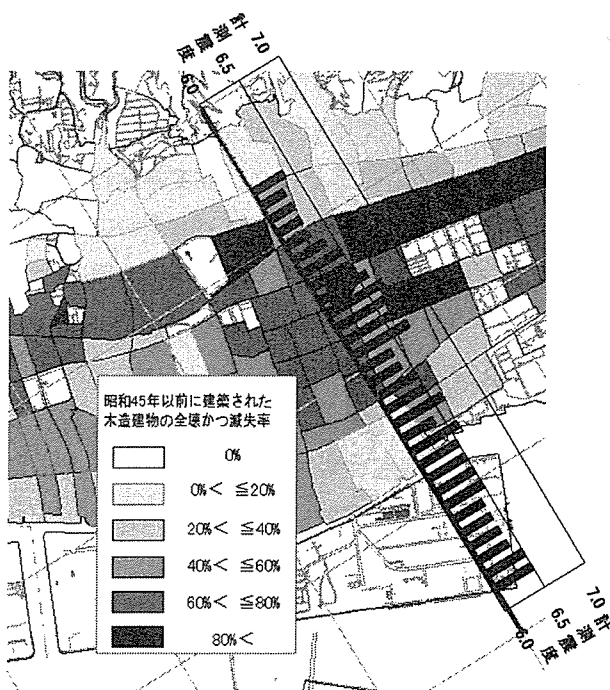


図-3.1.14 計測震度と木造建物被害分布  
(東部地区)

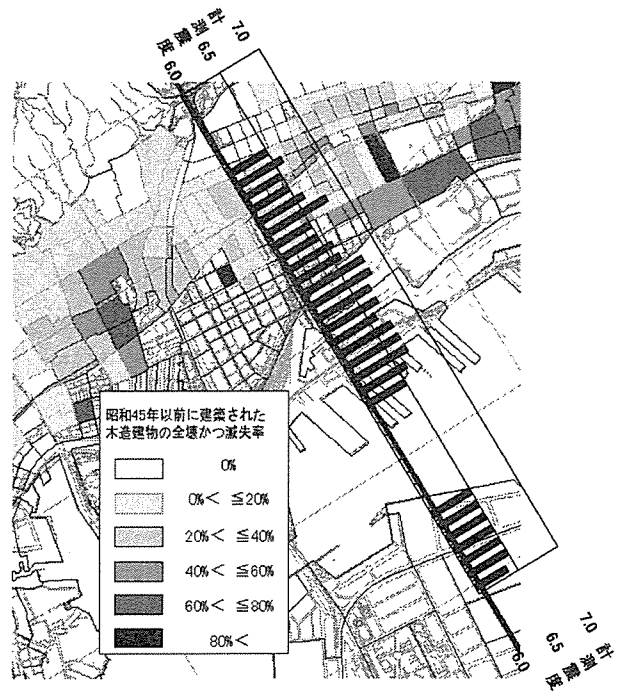


図-3.1.15 計測震度と木造建物被害分布  
(中部地区)

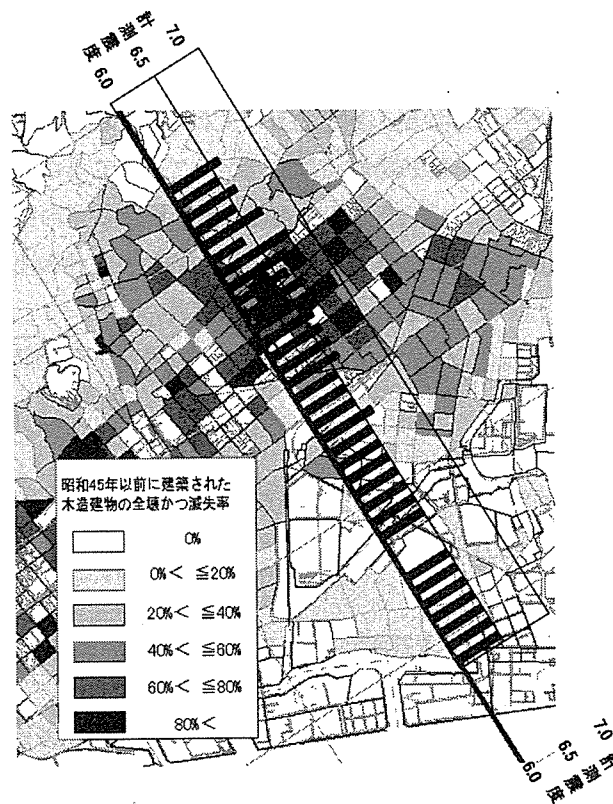


図-3.1.16 計測震度と木造建物被害分布（西部地区）

以下に、各測線毎に推定地震動と被害状況の関係を述べる。

#### ①東部地区代表測線

東部地区における木造建物被害は、測線の中央付近に集中しており、被害の度合いも高くなっている。一方、推定した地震動は、測線の中央付近で計測震度が6.5以上となっている。

#### ②中部地区代表測線

中部地区における木造建物被害は、測線山側に集中しているものの、全体的に被害の度合いは他の地区に比べると低い。一方、推定した地震動は測線の山側で計測震度が6.5以上を示しているとともに、沿岸部でも大きな値を示している。なお、沿岸部においては、対象となる木造建物自体が無く、この区域における両者の比較はできなかった。

#### ③西部地区代表測線

西部地区における木造建物被害は、測線の山側から中央付近に集中している。推定した地震動も測線の山側から中央付近で計測震度が6.5以上となっており、両者は概ね一致している。

以上の結果から、推定地震動の分布と木造建物の被害分布について、推定地震動の大きな地点では木造建物被害も集中していると言え、概ね計測震度が6.5を超える地点では、木造建物被害の度合いも大きくなる傾向が見られる。

### 3.1.8 まとめ

本研究で得られた知見、及び今後の課題を以下に列挙する。

- ①神戸市域における地盤特性を考慮した地震動の推定結果によれば、各地区とも推定地震動は、測線の起点付近から前半側で地震動が大きく、測線の終点側に向かうに連れて小さくなる。
- ②兵庫県南部地震による木造建物の被害は、各地区とも測線の前半側で被害の程度が高い。
- ③地震動の推定結果と、兵庫県南部地震による木造建物被害分布の状況を比較すると、推定地震動の大きな地点と被害の分布域は、概ね一致しており、両者の相関が高い。
- ④今後の課題として、地震動の面的な広がりについての検討や、地震動との相関を取る上で最適な構造物被害の分類方法などが挙げられる。

### 参考文献

- 1) 財団法人 阪神・淡路大震災記念協会：兵庫県南部地震による地震動解析入力データの作成業務委託報告書，1999. 3
- 2) 古本吉倫，杉戸真太，梅原秀哲：強震動予測モデル (EMPR) による兵庫県南部地震のシミュレーション，文部省科学研究費特定領域研究「都市直下地震」第 3 回都市直下地震災害シンポジウム論文集，pp. 171-174，1998
- 3) M. Sugito, Y. Furumoto, and T. Sugiyama, : Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, Proc. of the 12th WCEE, CD-ROM, Oakland, New Zealand, 2000
- 4) 岐阜大学工学部土木工学科 杉戸・能島研究室：工学的基盤における非定常強地震動の統計的予測モデル (EMPR モデル) による兵庫県南部地震のシミュレーション 解析手順説明書 第 1.1 版，1999. 3
- 5) 菊池正幸：日本建築学会兵庫県南部地震災害調査緊急報告会，社団法人日本建築学会，1995
- 6) P. B. Schnabel, J. Lysmer, and H. B. Seed : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC, 72-12, 1972
- 7) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集，No. 493/II-27, pp. 49-58, 1994
- 8) M. Sugito : Frequency-Dependent Equivalent Strain for Equi-Linearized Technique, Proc. Of IS-Tokyo ' 95, The First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, pp. 655-660, Nov. 1997
- 9) 杉戸真太 他：軟弱地盤の地震応答解析に適応できる等価線形化手法の高精度化，平成 7 年度～8 年度 科学研究費補助金（基礎研究 C 2）研究成果報告書，1997
- 10) 神戸市・財団法人建設工学研究所：阪神・淡路大震災と神戸の地盤－神戸 JIBANKUN の構築ならびに地盤と被害の分析－，1999
- 11) TSUNEO IMAI & KEIJI TONOUCHI : Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus , Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, pp. 67-72, 1981

### 3.2 断層地震解析および有効応力解析に基づく地表面変位と埋設管被害分布

#### 3.2.1 はじめに

本研究は、地震応答解析により神戸市における代表的な横断面を解析し地表面ひずみ分布と、埋設管の被害分布との関係について考察した結果である。なお、本研究では地震応答解析を2段階に分け、震源モデルから理論的に地震波を生成する断層地震解析（竹宮モデル）と、浅層モデルについて有効応力解析によって構成しており、地表面のひずみ分布と埋設管被害分布との比較を行った。

#### 3.2.2 断層地震解析

震源モデルと深層地盤モデルをもとに、薄層要素法による断層地震解析を実施した。将来的に発生が予想される地震に対して防災計画を立案とするため、活断層情報から地震波を推定する方法を採った。

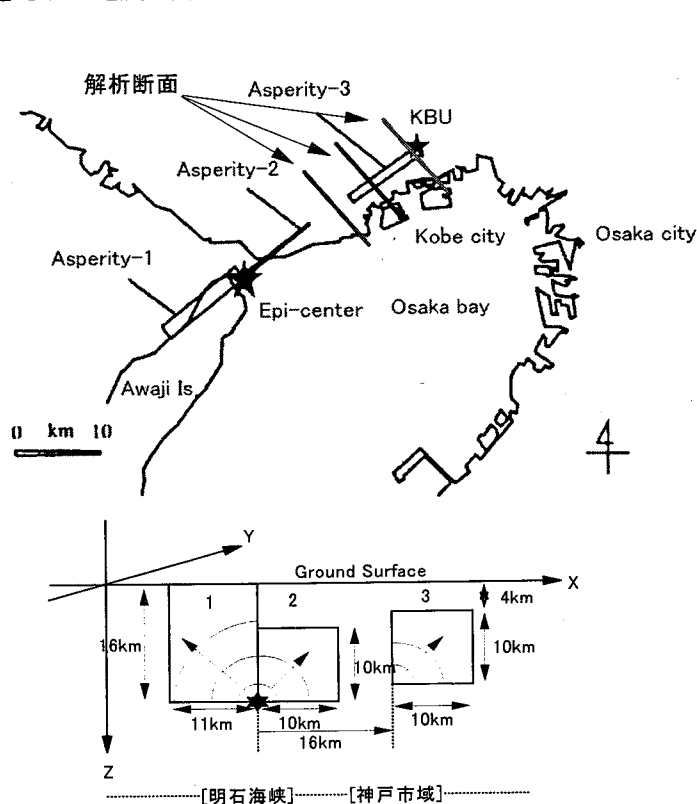


図-3.2.1 断層モデルの平面および震源モデル

今回の解析は神戸市街地を横断する3つの断面において理論地震波を出力した。震源モデルは既往文献<sup>1)</sup>と同じモデルを使用している。(図-3.2.1) 断層地震解析の特徴は、深層地盤を薄層要素で深さ方向に離散化し、波の伝播方向の展開を波数級数法により表現しており、震源モデルとしてKostrovによる応力降下モデルを導入している。それにより3次元の広がりの中で、理論的に求まった波動を任意の点で検出することが可能である。断層地震解析の利点は、活断層情報と地質データから将来的な地震動を予測できることにある。

神戸市を縦貫する断層に沿って断層地震解析を行い、西部断面（図-3.2.2）、中部断面（図-3.2.3）、東部断面（図-3.2.4）において変位波形として出力した。これら3つの出力結果を、引き続き浅層モデルの基盤に入力変位波形として有効応力解析を実施した。



### 3.2.3 浅層地盤における有効応力解析

埋設管の被害は、地盤の変形やひずみと密接な関係があることが考えられたため、液状化や間隙水圧の影響を考慮して残留変形が解析可能な有効応力解析を実施した。本解析では Dynaflo<sup>2)</sup> と呼ばれる解析コードを用いている。

浅層地盤は、沖積世の軟弱な砂と粘土の互層として構成されており、山側から海側にかけて厚い層厚となっている。解析モデルとしては、断層地震解析で対象とした断面に直交して、神戸市中心を横断する2次元の断面をとった。地盤物性値は、JIBANKUN および神戸の地盤研究会で提供された地盤データから選択して採用した。ただし、有効応力解析では透水性やダイラタンシーに関連するパラメータも必要とするため、既往研究成果を参考にして地盤物性値を決めた。

有効応力解析のモデルを作成するにあたり、特に以下のような工夫をした。

- ① 変位波形による入力をした
- ② 砂質土に粘着力を少し持たせた
- ③ 減衰比 ( $\eta=0.1$ ) を新たに全節点に設定した
- ④ 海側の側方境界を延長した

断層地震解析によって変位波形を求め、浅層地盤を対象にして、基盤をMa12（洪積粘性土層）の底面として有効応力解析を実施した。一般的に地震応答解析では加速度波形を入力するが、今回のような2種類の解析を段階的に実施する場合は、深層地盤モデルと浅層地盤モデルとの境界で連続性が保たれるため、本解析では変位波形を入力した。

拘束圧のかからない地表面の砂質土は、まったく粘着力がない状態では、解析上、地震力によって容易に不安定な応力状態になり、実際の地盤と異なる挙動を示す。そこで砂質土については若干のみかけの粘着力を考慮した。なお、同じ砂質土であっても地下水に飽和している部分もあるため、表層の砂質土層は、地下水位を境に2分してモデル化した。

有効応力解析は非線形解析として材料非線形を考慮しているが、地盤のもつ固有の減衰と地盤の3次元的な広がりによって波が伝播して消失する逸散減衰を組み込むことにした。数値解析上はモデルが2次元断面で設定されているため、減衰比を0.1に設定して全節点に導入し上記減衰を表現した。その結果、数値解析上の安定性が向上し、減衰を伴う波形形状となった。

浅層地盤のモデルと解析結果を図-3.2.2~3.2.4に示す。断面は水平方向を1とし、鉛直方向を20倍に拡大して示している。解析モデルで洪積砂質土層およびMa12(洪積粘性土層)、Ma13(沖積粘性土層)、および地表面は水を考慮せず、沖積砂質土層について地下水との連成を考慮した。黒線で囲まれた地層が地下水を考慮している。変位波形は時間刻みを0.1秒として断層地震解析により求めたもので、深層地盤における結果として変位波形が求まる。この値を浅層地盤における有効応力解析の入力値とした。

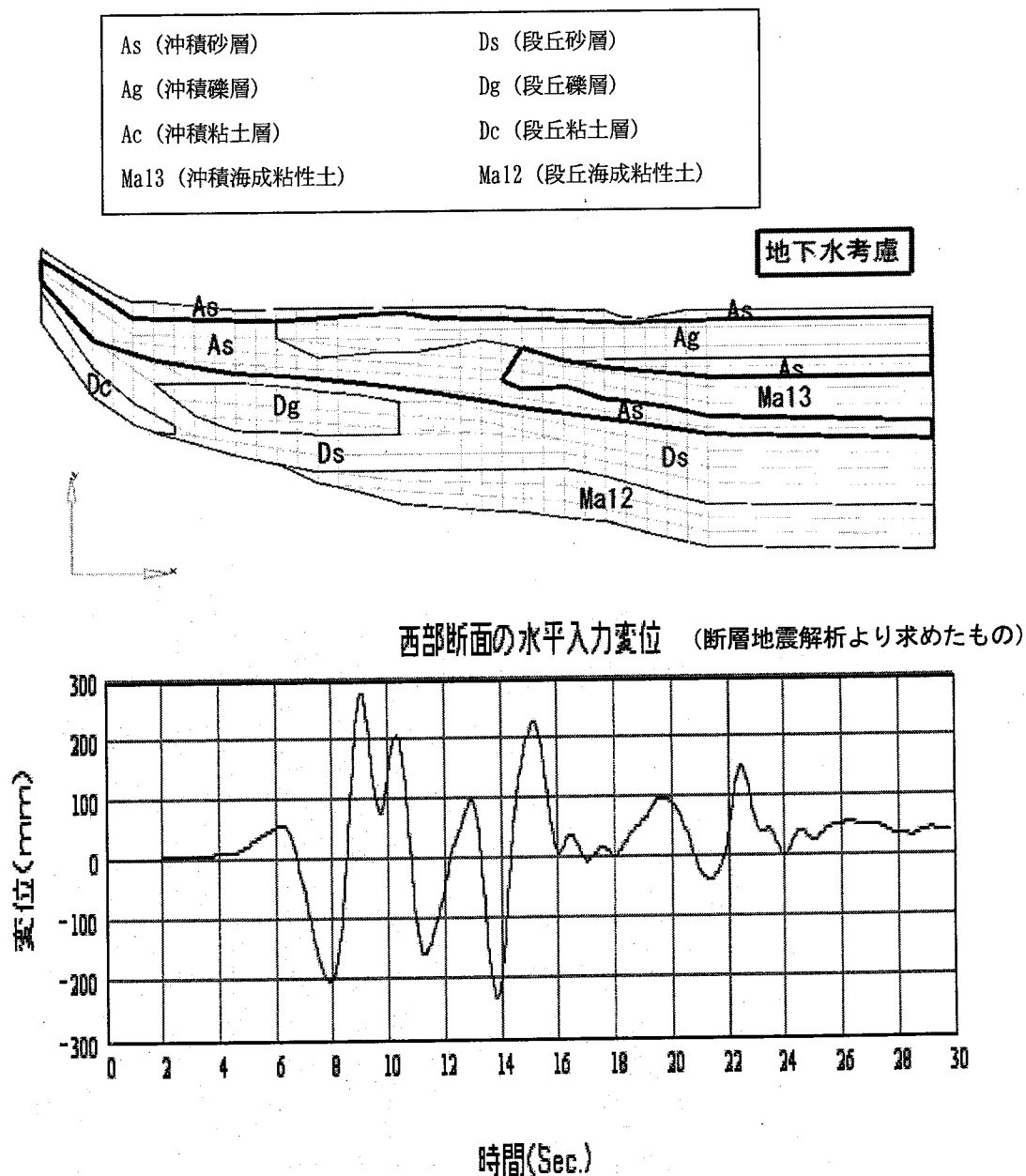


図-3.2.2 西部断面と水平入力変位

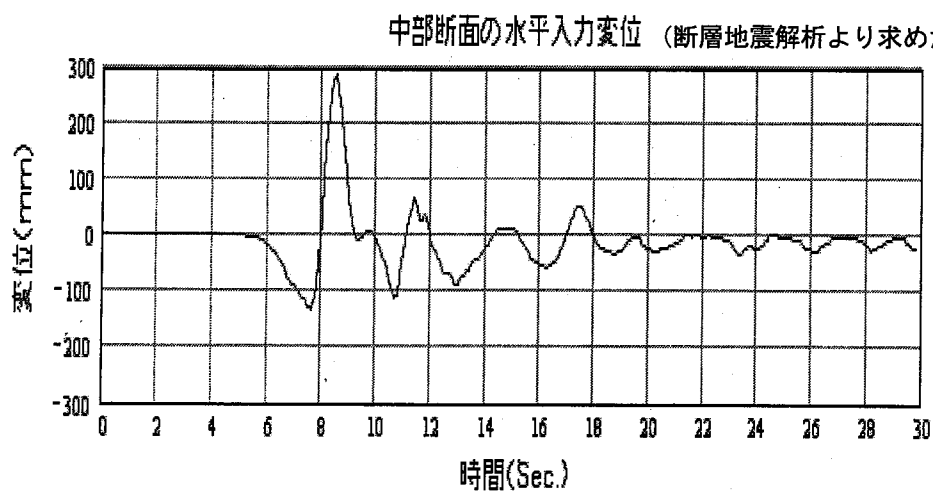
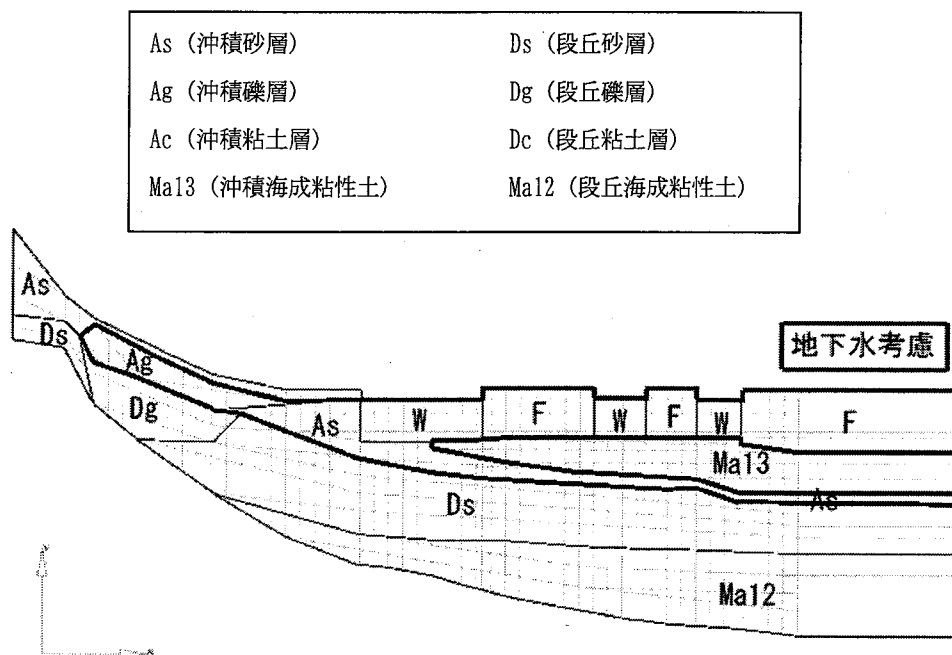


図-3.2.3 中部断面と水平入力変位

|                |                |
|----------------|----------------|
| As (沖積砂層)      | Ds (段丘砂層)      |
| Ag (沖積礫層)      | Dg (段丘礫層)      |
| Ac (沖積粘土層)     | Dc (段丘粘土層)     |
| Ma13 (沖積海成粘性土) | Ma12 (段丘海成粘性土) |

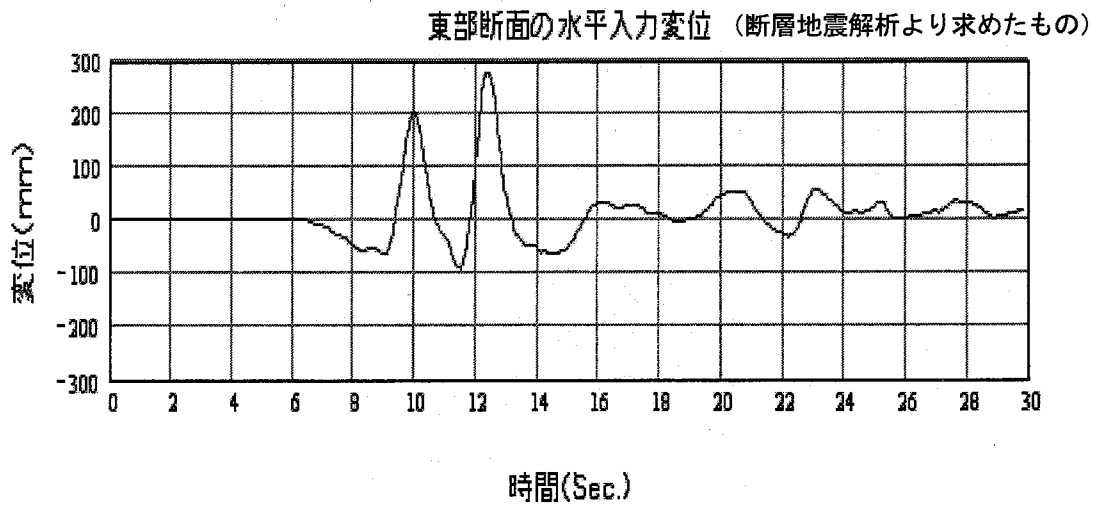
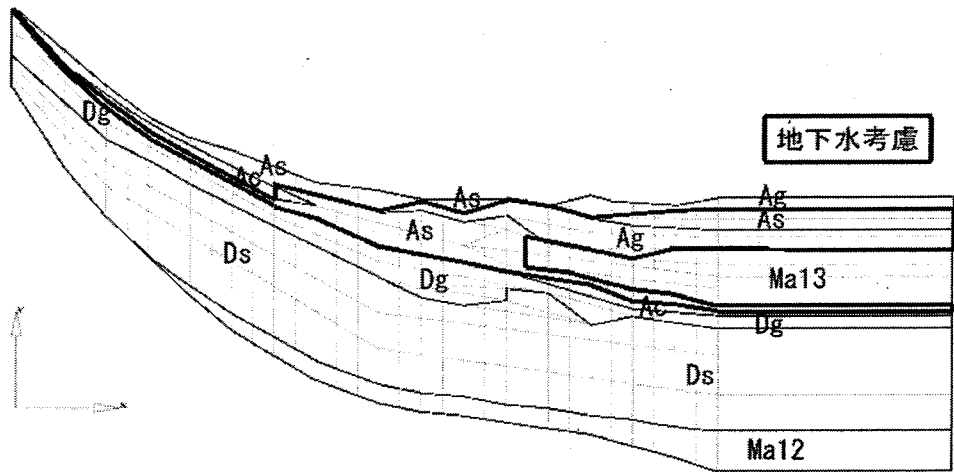


図-3.2.4 東部断面と水平入力変位

### ①西部断面

西部断面における水平方向の残留変位を図-3.2.5に示す。Station 番号の平面的な位置は図-3.2.6に示すとおりである。W20 付近までの水平変位は小さく、W25 付近から大きく変位している。最大の残留変位量は約 800mm 程度を示している。図-3.2.6 に西部断面の下水道埋設管被害分布をしめす。下水管の被災箇所と比べてみると W32 付近の残留変位が山側に変位しているのに対して、W35 付近から海側に大きく変化しており、この付近に伸びが生じていることを示していると同時に下水道被災がやや多くなっている。

図-3.2.7 には、西部断面における変位時刻歴波形を示す。山側の出力点 W12 付近では残留変位は小さいが下水管被害は認められており、地震中の地震動による被害の可能性もある。それに対して海側の出力点 W30 や W35 付近では大きな変形が山側 (-) や海側 (+) に向かって永久変形が生じていることを意味する。これは、地盤の剛性が低いことを意味し、大きな変位振幅をとめない残留変位が大きくなっており、間隙水圧の影響が考えられる。

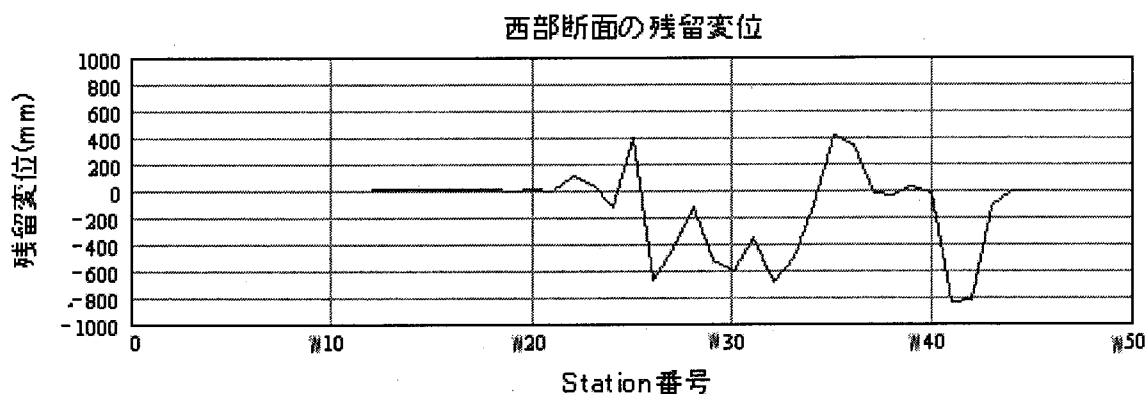


図-3.2.5 残留変位(西部断面)



図-3.2.6 西部断面付近の下水道埋設管被害分布

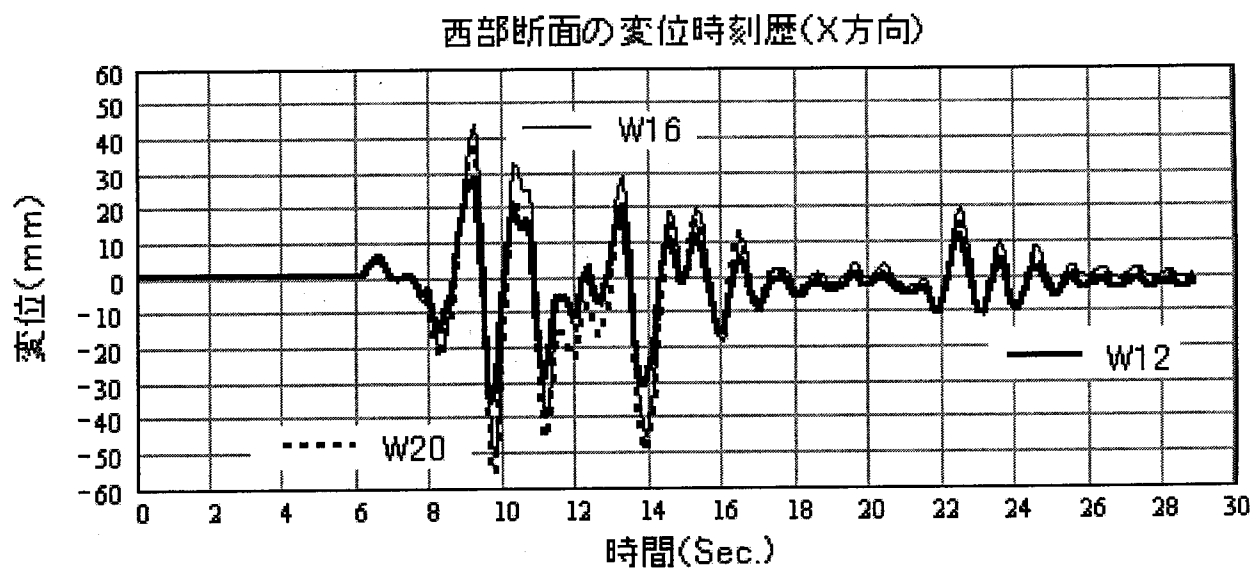
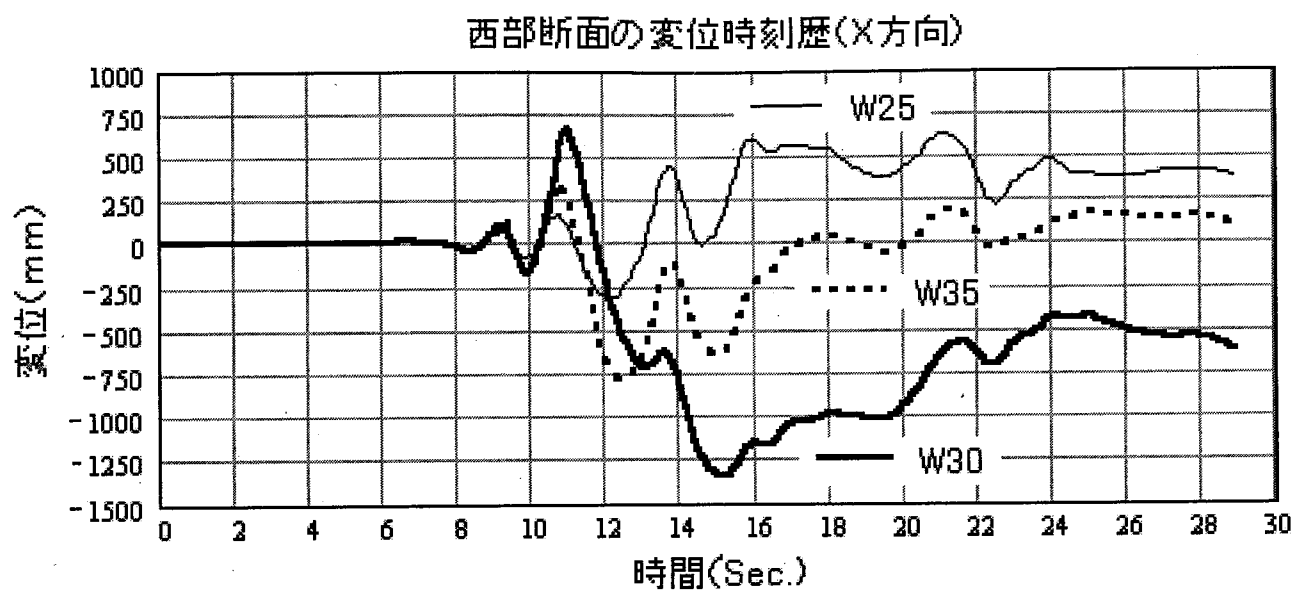


図-3.2.7 変位時刻歴(西部断面)

## ②中部断面

中部断面残留変位を図-3.2.8に示す。C25よりも海側では海と埋め立て地では護岸等の構造物が考慮されておらず、大きな変形が生じる結果となっていると思われる。図-3.2.9には中部断面の下水道埋設管被害分布を示す。この断面ではC18付近から残留変形が大きくなり、下水管の被害が多くなっている場所と一致している。図-3.2.10には、山側のC2地点の変形や山側と平野部との境界付近のC16付近における変位時刻歴波形を示す。いくつかの大きな振幅を持つ波形の後には、振幅は小さく残留変位もなく大きな動きがなく推移する。平野部の出力点C20では、振幅がやや大きくなり残留変位が山側（マイナス側）に向けて発生している。

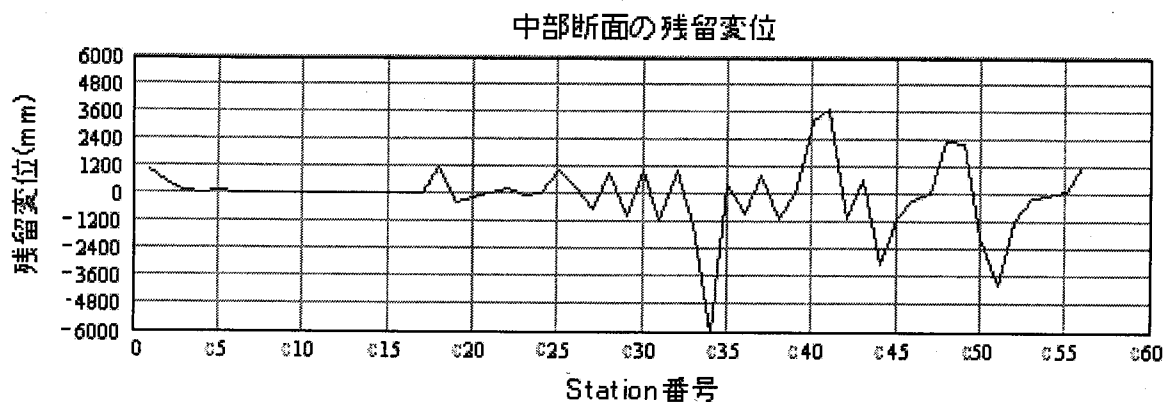


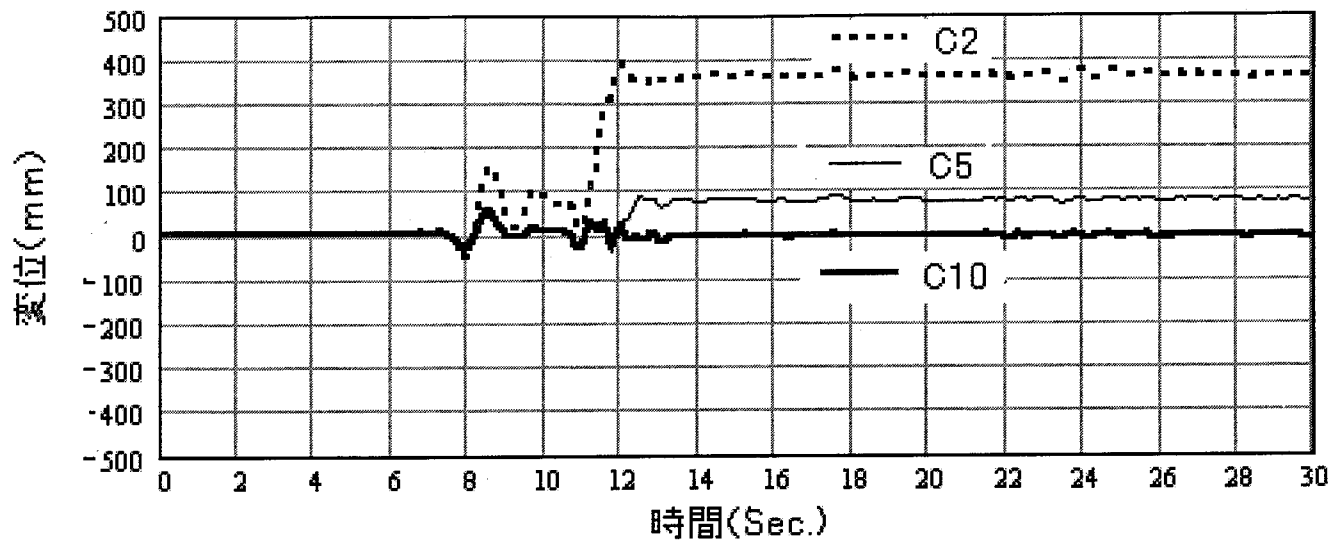
図-3.2.8 中部断面の残留変位図(T=28.0sec)



図-3.2.9 中部断面付近の下水道埋設管被害分布



中部断面の変位時刻歴(X方向)



中部断面の変位時刻歴(X方向)

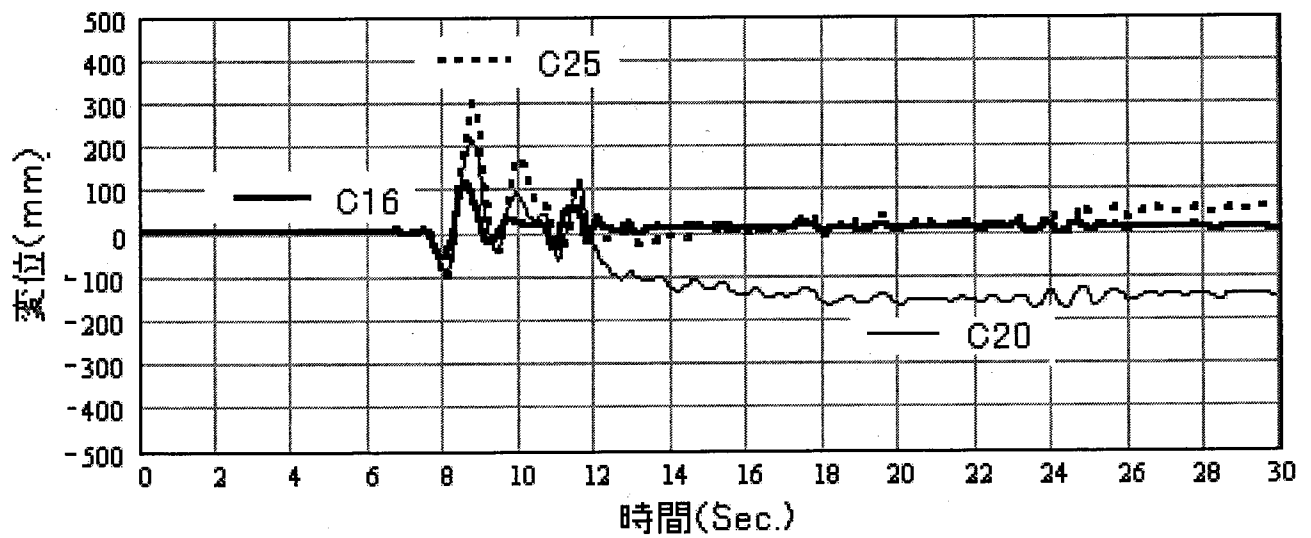


図-3.2.10 変位時刻歴(中部断面)

### ③東部断面

東部断面における残留変位を、図-3.2.11に示す。E27 付近より山側ではあまり大きな残留変位は認められない。E27 より海側の地点でやや大きな残留変位が認められる。図-3.2.12 に東部断面下水道埋設管被害分布を示す。残留変形が大きくなる E27 付近での下水管被害との相関性はある程度認められる。E15 あるいは E20 付近の被害は図-3.2.13 の変位時刻歴からみると、地震の振動中に大きな変形が生じており、それによる下水管への損傷が考えられる。

一方で、海側の埋立地点では残留変位が認められているが、下水管の被災はあまり報告されていない。

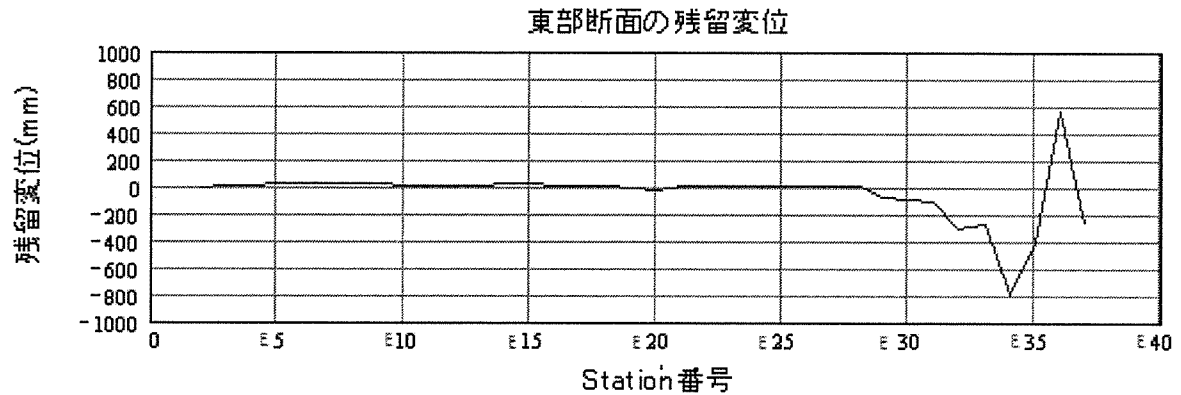


図-3.2.11 東部断面の残留変位図 (T=28.0sec)

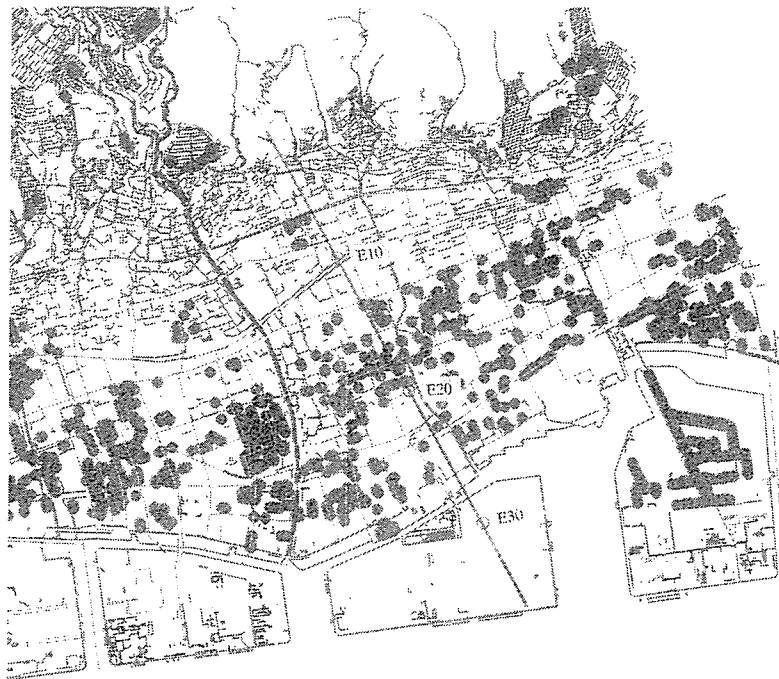


図-3.2.12 東部断面付近の下水道埋設管被害分布

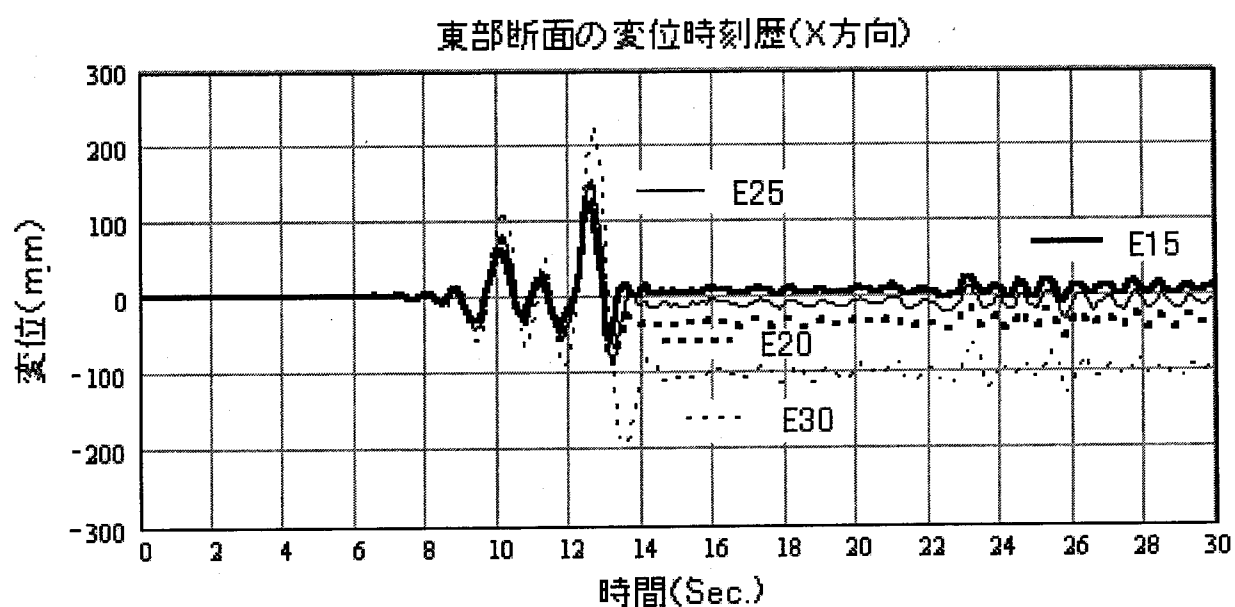
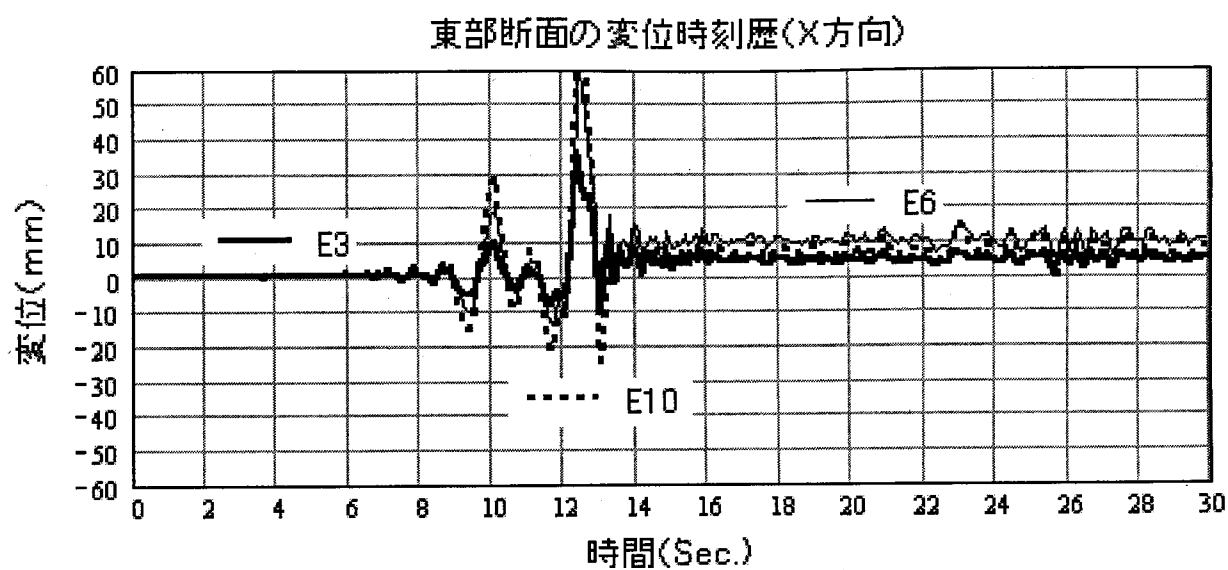


図-3.2.13 変位時刻歴(東部断面)

### 3.2.4 おわりに

震源モデルと深層地盤データをもとに理論地震波を生成し、浅層地盤の有効応力法に基づく地震応答解析を実施した。解析結果から、神戸市を横断する断面において山側と海側の加速度や変位に関する応答に対比が見られ、海側は残留変形が大きくなる結果を得た。

一般的に埋設管の動的挙動は慣性力よりも地中変位によって左右される。地盤の変形やひずみと、埋設管被害との関係について関連が予想されたため、下水道埋設管分布と残留変位と比較した。その結果、地盤変形が大きい沿岸部に下水道埋設管の被害が集中して部分があり、解析結果から残留変位の差が大きい地区と下水管の被害を示す範囲とがやや相関が見られた。しかし、山側の下水管被害が大きい場所では沿岸部に比べ残留変位は小さいため、残留変位のみでは説明しがたく、残留変位のみでなく地震時の時刻歴変位も下水管被害に関与していると考えられる。

### 参考文献

- 1) 竹宮宏和・合田和哉：薄層要素に基づく離散デイスロケーション法による断層近傍地震動のシミュレーション、土木学会論文集、No. 639/IV-46、pp. 89-98, 2000.
- 2) Prevost, J. H. (1988), "DYNAID: a computer program for nonlinear seismic site response analysis", Report No. NCEER-88-xxxx, Dept. of Civil Eng. and Oper. Re., Princeton University, 2000.

### 3.3 深部三次元構造を評価した木造構造物被災危険度評価に関する研究

#### 3.3.1 はじめに

1995年1月17日、明石海峡を震源とする兵庫県南部地震が発生し、神戸市域を中心とする阪神・淡路地域に甚大な被害をもたらした。この地震は、日本の近代都市において初めて発生した都市直下型地震であったため、その被害は住宅家屋・高層建築構造物・高速道路の短柱橋梁及び地下鉄構造物等の倒壊、交通網・ガス・水道及び電気等のライフラインの寸断、ポートアイランド・六甲アイランドに代表される埋立地等における液状化現象の発生、及びこれらを起因とする6,300人余の犠牲とといった人的被害など様々であった。このことから、この地震は特に大都市において地震防災に対する様々な課題をもたらした。

このような多種多様な被害の中で、神戸市域における建築構造物被災分布は震度7の激震地区に代表されるような帯状分布を呈した。このような特徴的な建築構造物被災分布が生じた原因を究明し、汎用性のある地震危険度評価手法を提案することは、今後の都市型地震災害の低減を考える上で非常に重要であると考えられる。そこで、本報では①被害を引き起こす側の要因、②被害を受ける側の要因を考慮することにより建築構造物地震危険度評価手法を提案する。

#### 3.3.2 被害状況の定量化

本報では、図-3.3.1に示す3本の解析測線（東部測線、中部測線、西部測線）を設定し、まず、測線上の建築構造物被災状況を定量的に把握した。なお、解析測線には、応答地震動を算出する点（以下、算定点と称す）が北側から100メートル間隔で設定されており、東部測線はE-0～E-30、中部測線はC-0～C-25、西部測線はW-0～W-35となっている。その結果、測線両幅100mにおける被災建築構造物の殆どが木造構造物であった。そこで、本報では被害の対象を木造構造物に限定する。また、大局的に被害を把握するため、本報では木造構造物の建築年代及び規模といった属性は考慮せず、木造構造物は全て一様な耐震性を有していると仮定する。そのため、木造構造物の属性としては木造構造物数のみを考慮することとなる。なお、東部測線のE-24以南、中部測線のC-16以南、西部測線のW-32以南には、木造構造物が存在していない。そのため、本研究では東部測線のE-0～E-23、中部測線のC-0～C-15、西部測線のW-0～W-31を対象に木造構造物被災状況を把握した。

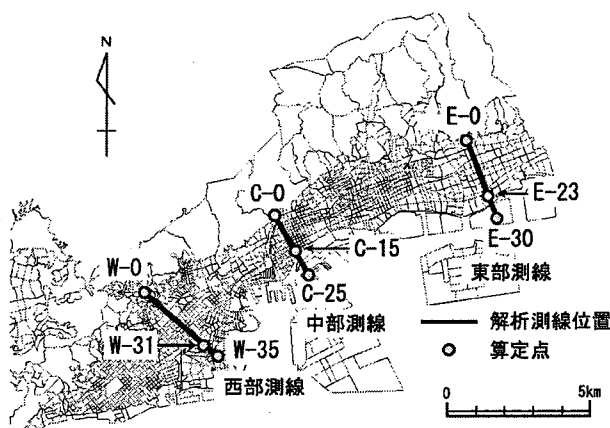


図-3.3.1 解析測線位置

本報では兵庫県南部地震で生じた木造構造物被害状況を、木造構造物被災密集率 (Damage Density of Wooden Houses) (以下、Ddw と称す) を用いることで定量的に把握する。Ddw を以下の式 (1) で定義する。

$$D_{dwi} = \frac{W_{Di}}{\sum_{i=1}^p W_i} \quad (1)$$

ここで、Ddwi：算定点 i における木造構造物被災密集率、Wi：サイト i における木造構造物数  
WDi：サイト i における被災木造構造物数、p：総サイト数

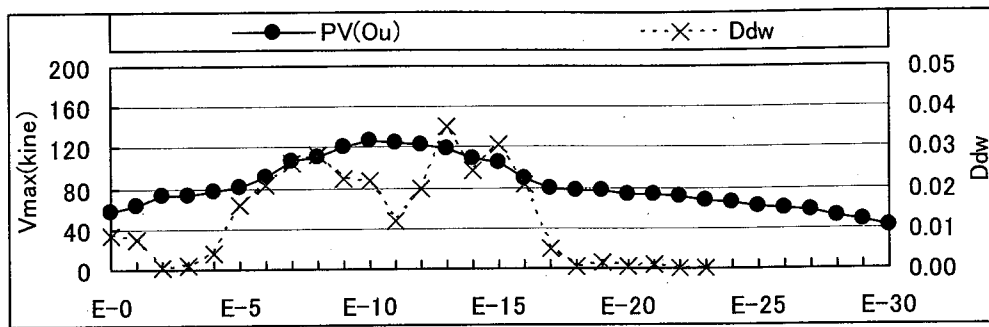
ただし、サイトは算定点を中心とする半径 100 メートルの円である。

その結果、Ddw の解析測線上の分布傾向は、帯状被害を概ね表現していることを明らかにしている。そこで、本報では Ddw の分布傾向を表現できるような物理量を定義し、両者の分布傾向を比較・検討する。さらに、その結果をもとに木造構造物地震危険度評価を行う。

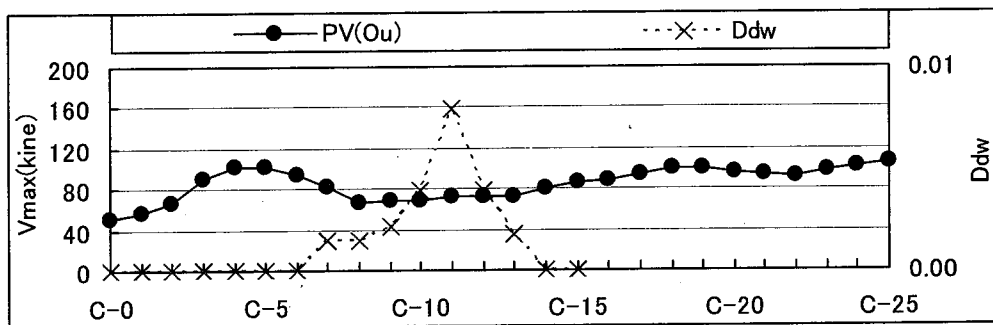
### 3.3.3 木造構造物地震危険度評価

#### (1) 震源特性及び伝播経路特性を考慮した地震応答解析

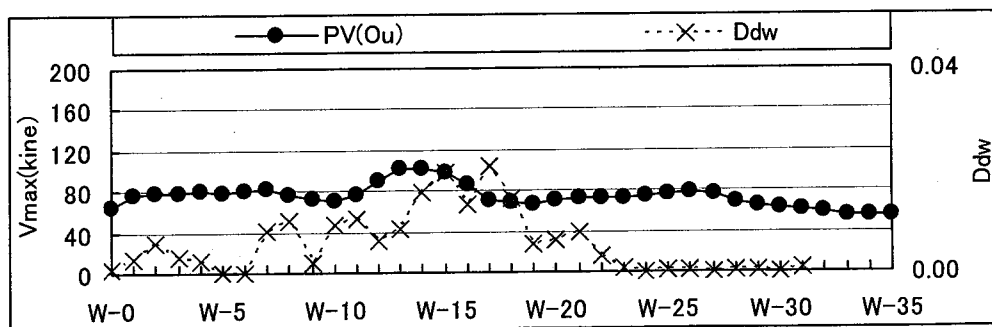
松島・川瀬<sup>1)</sup>は、神戸市域で実施された反射法地震探査結果を元にできる限り現実的な深い三次元盆地構造をモデル化し、さらに神戸海洋気象台の観測記録の断層直行成分 (N33W) の速度波形を説明できるような震源モデルを推定し、これら二つのモデルを組み合わせて大阪層群上面における応答地震動 (以下、0u 波と称す) を算出している。その結果、0u 波の最大応答速度分布と「震災の帯」がよく対応することを示している。なお三次元盆地構造モデルは、134.957° E, 34.645° N を原点として反時計回りに 33° 傾いており、長さ 42km, 幅 18km, 深さ 22.8km である。また、メッシュ間隔は 80m で、X 軸は右向き正、Y 軸は下向き正の右手系座標系である。このため、応答地震動は格子点間隔 80m 毎に算出されている。なお、本報で用いる解析測線は中部測線を除いて三次元地盤構造モデルの Y 軸と平行とはなっておらず、算定点は 100m 間隔で設定している。そのため、本報で 0u 波を用いる際には測線上に設定した算定点に最も近いと判断した格子点における 0u 波を、その算定点における 0u 波とした。測線上の 0u 波の最大速度 (以下、PV (0u) と称す) の分布を図-3.3.2a) ~ c) に示す。図中には木造構造物被災密集率 (Ddw) の分布も重ねて示す。



a) 東部測線



b) 中部測線



c) 西部測線

図-3.3.2 各測線における大阪層群上面における最大応答速度分布

各測線における  $PV(Ou)$  のピーク値は、東部測線では 126kine、中部測線では 105kine、西部測線では 102kine であった。 $PV(Ou)$  の分布傾向は、東部測線では E-7～16 付近で、中部測線では C-3～7 付近で、西部測線では W-11～17 付近でピークを示していることが分かる。また、中部測線では C-8 から海側に行くに従い  $PV(Ou)$  値が大きくなる傾向にあることが分かる。一方、これらの分布傾向と  $Ddw$  との分布傾向を比較すると、両者は必ずしも一致していないことが分かる。



## (2) 地盤増幅特性を考慮した地震応答解析

### ① 解析プログラム

本報では、地盤増幅特性を考慮するため  $0u$  波を入力地震動として、浅層地盤(沖積層・段丘相当層)を対象に地震応答解析を行う。

なお、東部測線のE-24以南、中部測線のC-16以南、西部測線のW-32以南には被害の対象とする木造構造物が存在しない。そのため、地表面の応答地震動はE-0～E-23、C-0～C-15、W-0～W-31において算出することとした。解析プログラムは、東部測線、中部測線及び西部測線のW-0～25では一次元等価線形解析であるDYNEQ<sup>2)</sup>を、西部測線のW-26～31ではFL値が5以上であったことから、液状化現象を考慮するために一次元有効応力解析であるYUSAYUSA-2<sup>3)</sup>を用いた。

### ② 浅層地盤モデル

浅層地盤モデルを作成する際には、解析対象地の浅層地盤状況を把握する必要がある。そこで、本報では測線下の2次元的な浅層地盤状況を把握するため、地盤情報データベース「神戸JIBANKUN」<sup>4)</sup>に収録されているボーリングデータ及び既往の文献<sup>5)</sup>を参考として浅層地盤断面図を作成した。また、浅層地盤の地層は、沖積砂層(As)、沖積礫層(Ag)、沖積粘土層(Ac)、沖積海成粘土(Ma13)、段丘砂層(Ds)、段丘礫層(Dg)、段丘粘土層(Dc)、段丘海成粘土(Ma12)の8層に分類した。作成した浅層地盤断面図を図-3.3.3～3.3.5に示す。ここで、各測線における浅層地盤の特徴を述べる。

図-3.3.3に着目すると、沖積層は地表面地形傾斜の変換点付近(E-16)から断面南側にかけて砂層が厚く分布していることが確認できる。沖積粘土層は、E-8～15付近の陸域で分布が確認されることより、後背湿地性の粘土と考えられる。また、Ma13はE-20～30にかけて10～15メートル前後の厚さで堆積している。一方、沖積層の下位は段丘相当層が分布している。断面の北側から南側にかけて砂層が卓越しており、その下位にはMa12が確認される。Ma12は、E-14付近から断面南側にいくに従い厚く堆積している。

図-3.3.4に着目すると、沖積層は断面内陸部では礫層が主体であるが、C-5付近より北側及びC-15付近より南側では砂層が分布していることが確認できる。これらの堆積物は生田川によって形成された河川性堆積物と氾濫堆積物であると考えられる。沖積粘土層は、C-12付近で地表面に現れている以外はほとんど確認できない。段丘相当層は沖積層と同様、C-15付近より北側では礫層が、C-15付近より南側では砂層が主体となっている。Ma12は、C-17から断面南側にいくに従い厚く堆積している。

図-3.3.5に着目すると、断面北部は断層の影響により大阪層群が隆起しており、断層付近(W-9付近)での地層の連続性は見られない。また、W-10までは、浅層地盤の層厚は約2m程度である。全体的にみて、沖積層は砂層で占められており、旧湊川の河川作用によって形成された堆積物に相当すると考えられる。W-11～20付近では沖積粘土層が確認される。段丘相当層に着目すると砂層、礫層が混在している。Ma12は、W-25から断面南側にいくに従い厚く堆積している。

以上より、神戸市域における浅層地盤は南北方向だけでなく東西方向にも地層変化が著しく、連続性に乏しいことが分かる。このことから、神戸市域の浅層地盤を把握する際には、地域毎に詳細な地盤情報を用いる必要があると考えられる。

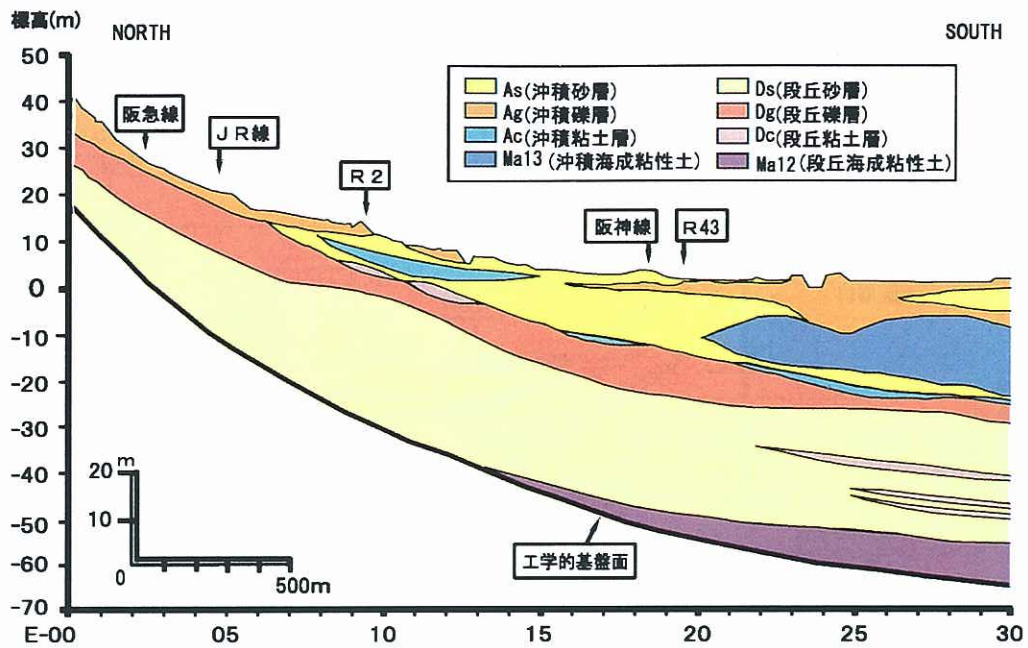


图-3.3.3 浅层地盤断面图(东部测线)

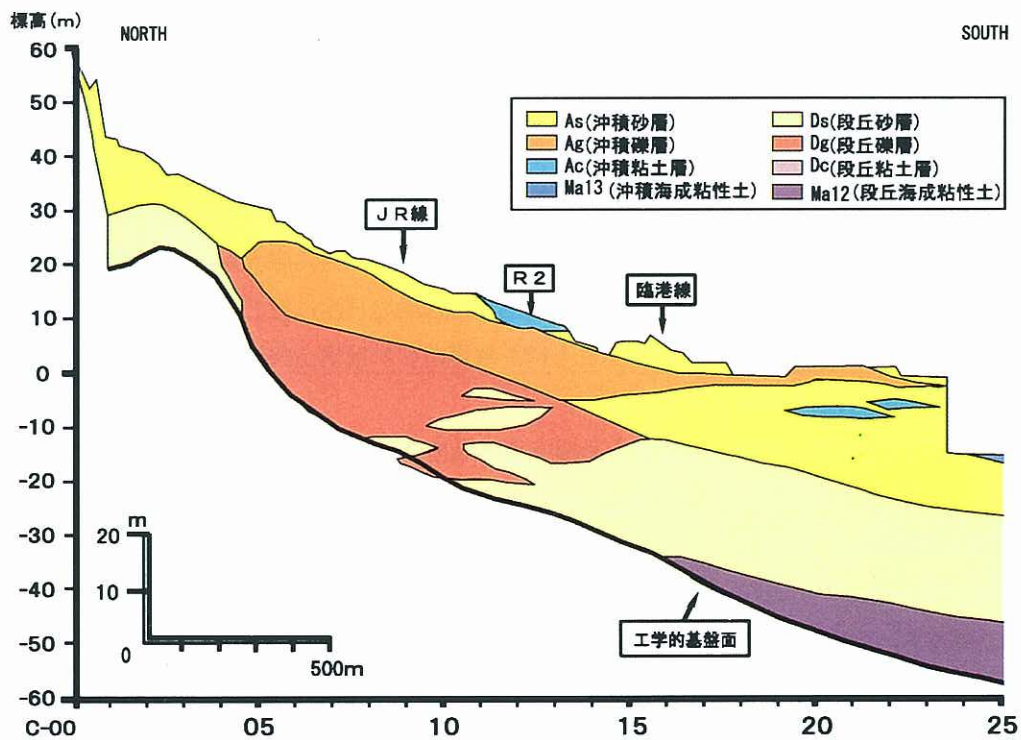


图-3.3.4 浅层地盤断面图(中部测线)

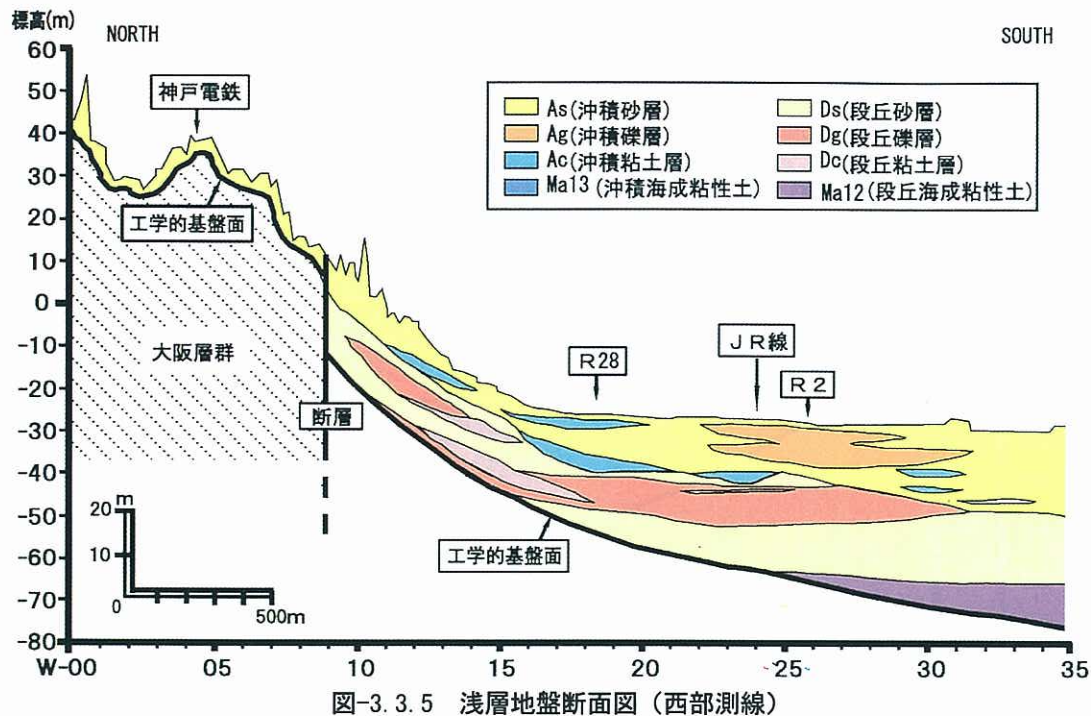


図-3.3.5 浅層地盤断面図（西部測線）

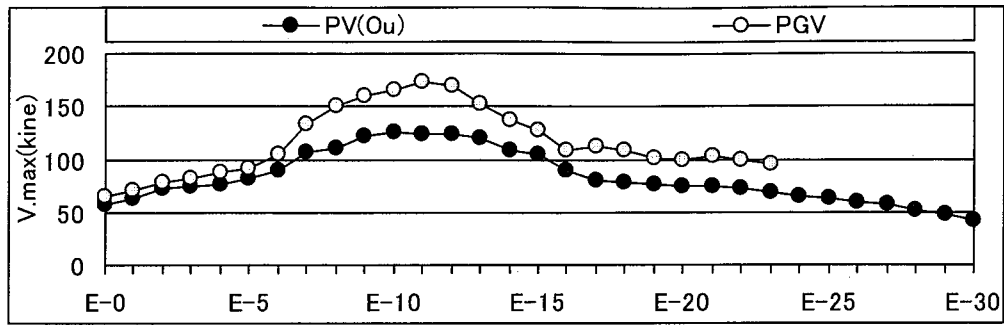
### ③ 地震力指標

一般に、木造構造物被害は最大地動速度やSI値といった地震力指標との相関が高いことが指摘されている<sup>8)</sup>。既往の研究<sup>9)</sup>では、浅層地盤で増幅傾向を示し、かつ木造構造物の平常時固有周期帯であった周期帯0.2~0.6(sec)に着目し、積分区間を0.2~0.6としたSI値を地震力指標としている。しかし、林・川瀬<sup>11)</sup>は兵庫県南部地震による建築構造物被害の主な原因として、周期1秒程度の大振幅パルス波の影響を挙げている。また、断層破壊過程および伝播経路過程における周期1秒以下の短周期成分地震動を説明することは、①決定論的な扱いが難しい、②差分法で計算する計算機の能力に限界がある、等の理由により困難とされている<sup>2)</sup>。このことから、松島・川瀬<sup>1)</sup>は短周期地震動の再現は行わず、周期1秒以上を対象として大阪層群上面の応答地震動を求めている。さらに、地震時の木造構造物は、塑性化によって平常時に比して固有周期が伸びることも指摘されている<sup>10)</sup>。

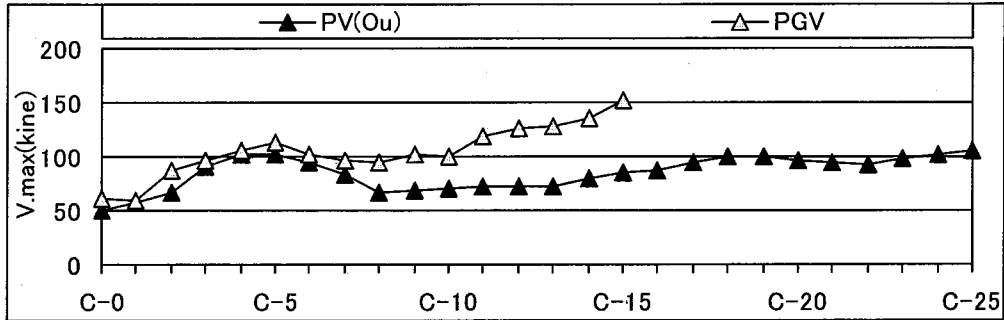
以上より、本報では木造構造物被災に影響を及ぼす地震力指標として最大地動速度に着目する。

### ④ 地震応答解析結果

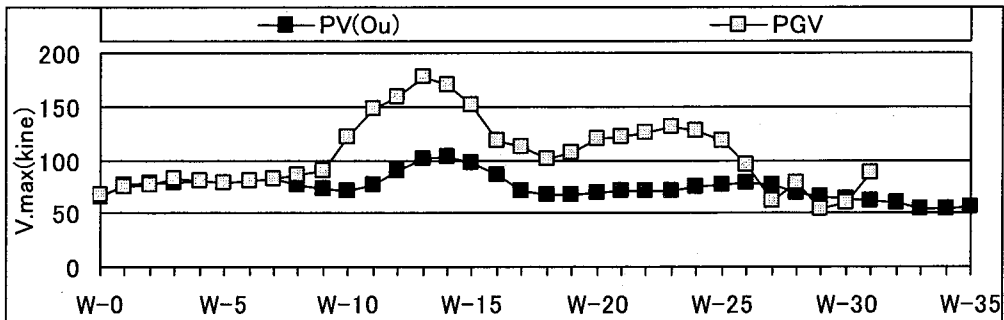
得られた最大地動速度(以下、PGVと称す)の分布を図-3.3.6a)~c)に示す。図-3.3.6には、図-3.3.2の結果も重ねて示す。図-3.3.6より、浅層地盤の影響を受けて最大地動速度が0uに比して増幅していることが分かる。最大地動速度のピーク値は、東部測線で173kine、中部測線で146kine、西部測線で178kineであり、中部測線における値が他の2測線に比して小さいことが分かる。また、東部測線、西部測線では、中部測線に比して「震災の帯」に該当する算定点(E-6~E-17, C-6~C-14, W-7~W-22)で最大地動速度に顕著なピークを示していることが分かる。



a) 東部測線



b) 中部測線



c) 西部測線

図-3.3.6 最大地動速度分

### (3) 木造構造物地震危険度評価

本節では、 $D_{\text{木}}$ を説明できるような物理量について検討する。まず、最大地動速度と木造構造物被害の関係を考える際、最大地動速度がある値(以下、しきい値と称す)に至るまでは被害が殆ど生じず、しきい値を越えてから被害が生じはじめるを考える。また、木造構造物が存在しなければ木造構造物被害は生じないこと、ならびに $D_{\text{木}}$ は定義式からも明らかなように、被災木造構造物数に依存したパラメータであることから、木造構造物分布を考慮する必要があると考えられる。そこで、本報ではしきい値を越えた最大地動速度と木造構造物被害の関係を簡易的に線形関係で表現し、さらに木造構造物分布を考慮することで、木造構造物被災ポテンシャル (Damage Potential of Wooden Houses) (以下、 $P_w$ と称す)を定義した。 $P_w$ を以下の式(2)で定義する。

$$P_{wi} = v \cdot w \quad (2)$$

$$v = \frac{V_i - V_T}{V_T} \quad (3)$$

$$w = \frac{W_{Hi}}{\sum W} \quad (4)$$

ただし、 $P_{wi} < 0$  のとき、 $P_{wi} = 0$  とする。

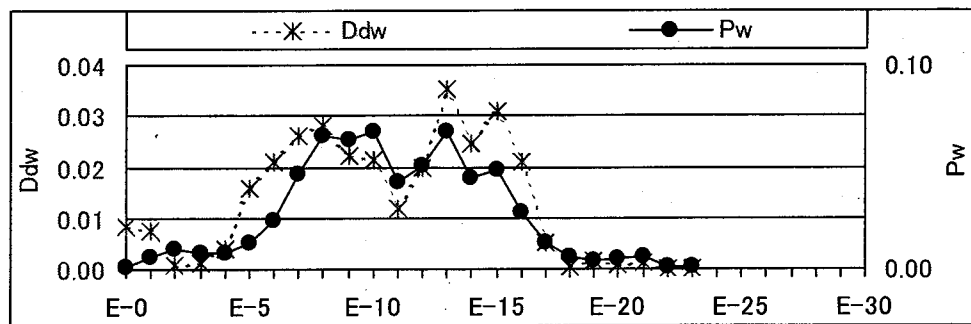
ここで、 $P_{wi}$ ：算定点  $i$  における木造構造物被災ポテンシャル， $V_i$ ：算定点  $i$  における最大地動速度， $V_T$ ：最大地動速度のしきい値， $W_{Hi}$ ：サイト  $i$  における木造構造物数， $\sum W$ ：全サイトにおける木造構造物数

なお、しきい値は全測線で 60kine とした。

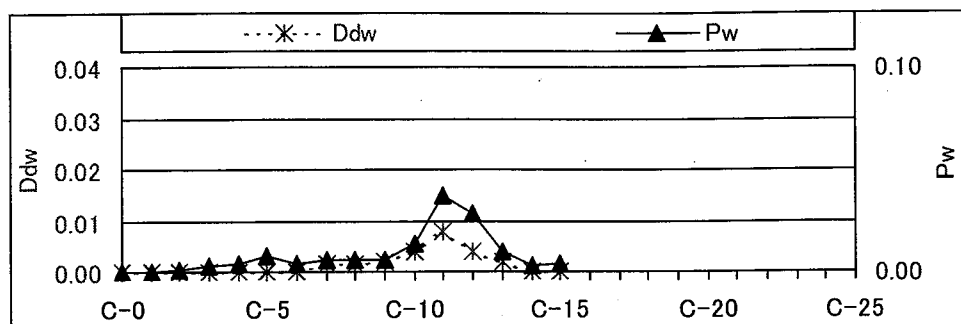
#### (4) 木造構造物被災ポテンシャルと木造構造物被災密集率の比較

式(1)によって得られた  $D_{dw}$  と式(2)によって得られた  $P_w$  の分布傾向を図-3.3.7a)～c)に示す。この図より、若干のズレがあるものの、全測線で両者の分布傾向は概ね一致していることが分かる。また、震源特性及び伝播経路特性を考慮することで、しきい値が全測線で 60kine となった。さらに、有効応力解析を用いることで、図-3.3.7c)のW-26～31における  $D_{dw}$  と  $P_w$  の分布は、概ね一致する結果となった。

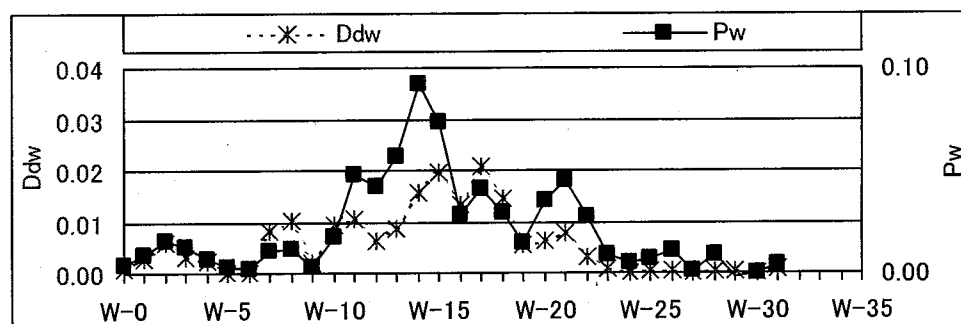
以上より、 $D_{dw}$  が帯状被害を表現していたことを考慮すると、帯状被害は  $P_w$  の定義式からも明らかなように、最大地動速度と構造物分布の影響を受けていたことが分かる。このことから、これら2つのパラメータを考慮することで木造構造物地震危険度をある程度評価することができると考えられる。また、 $D_{dw}$  は被災木造構造物数の密集状況を定量化したパラメータである。そのため、 $D_{dw}$  を表現することができた  $P_w$  は、設定した集計単位の中で最も被災木造構造物数が多くなる可能性のある集計単位を予測することに適したパラメータであると考えられる。



a) 東部測線



b) 中部測線



c) 西部測線

図-3.3.7 木造構造物被災密集率( $D_{dw}$ )と木造構造物被災ポテンシャル( $P_w$ )の比較

しかし、本報では被害の対象とした木造構造物が一様な耐震性を有しているものと仮定している。そのため、 $P_w$ を用いて予測した結果は、対象木造構造物が一様な耐震性を有しているという条件下で評価する必要がある。また、東部測線の算定点E-0, 1, 5~7, 13~16では $P_w$ に比して $D_{dw}$ のほうが大きく、逆に西部測線の算定点W-11~15, W-20~22では $D_{dw}$ に比して $P_w$ のほうが大きく、両者の分布傾向が一致しない算定点も存在する。その原因としては、 $P_w$ を定義する際にしきい値を越えた最大地動速度と木造構造物被害の関係を線形関係で表現していること、地震力と構造物分布以外のパラメータを検討する必要があることが考えられる。

ここで、村上ら<sup>11)</sup>は、神戸市東灘区西部地区を対象に木造構造物の建築年代、建物規模などの属性について全数調査・分析を行っており、その結果、建築年代の古い木造構造物ほど、被害率が大きかったことを指摘している。また、その地域を対象に長谷川ら<sup>12)</sup>は、建築年代別の木造構造物被害推定式を作成しており、建築年代の古い木造構造物ほど、被害率が大きい関係を定量化している。村尾・山崎<sup>13)</sup>は、神戸市灘区を対象に、構造・建築年代別の建築構造物被害推定式を作成しており、建築年代の古い建築構造物ほど被害率が大きい関係を定量化している。

以上より、兵庫県南部地震における建築構造物被災分布を考える上では、建築年代を考慮する必要がある。そこで、地震応答解析により算出された地表面における応答地震動と建築年代別の木造構造物被災分布とを比較し、建築年代別に木造構造物被害推定式を作成する。さらに、得られた木造構造物推定式を用いて建築年代を考慮した木造構造物地震危険度評価を行う。



### 3.3.4 建築年代を考慮した木造構造物地震危険度評価

#### (1) 評価対象地の概要

村上ら<sup>1)</sup>は、被災木造構造物の建築年代、建物規模などの被害属性を明らかにするため、図-3.3.8に示す神戸市東灘区西部地域(以下、評価対象地と称す)で全数調査を行っている。全数調査は、当対象地域内の全木造構造物の建築年代、建築規模、工法、被害程度を外観目視により詳細に行っている。建築年代の分類に関しては、外観目視による推定を参考に、昭和23年、36年、49年、60年、及び、震災後の平成7年1月20日、3月26日撮影の1/10,000縮尺の航空写真(2～4倍伸)に基づいて1棟ずつ確認し、5つに分類している。具体的には、昭和23年以前、昭和23年～36年、昭和36年～49年、昭和49年～60年、昭和60年以降である。被害区分は、外観より調査して主要構造部材などの破損状況を記録するとともに総合的に判断して、4段階に分類している。被害区分の定義を以下に示す。

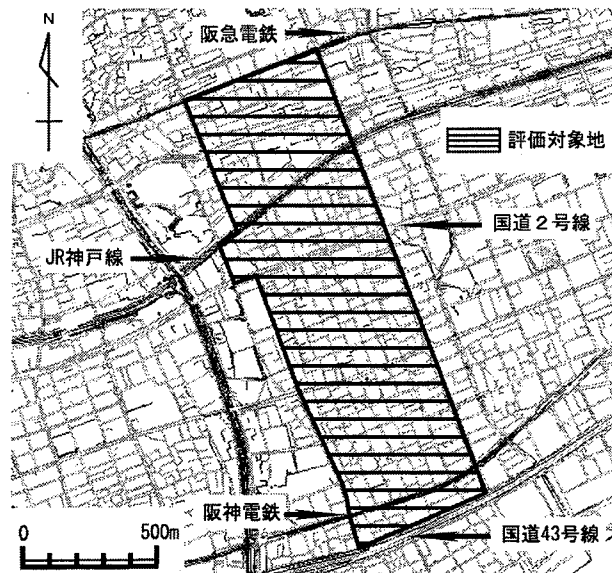


図-3.3.8 評価対象地

倒壊：1階部分の層崩壊、2階部分の層崩壊、全階層崩壊(瓦礫状態)。

大～中破：下屋等の一部崩壊、柱の折損や傾斜大、外壁の大部分が剥離落下、基礎の崩壊、小屋組の崩壊など。

中～小破：瓦のズレや脱落、外壁や基礎のひび割れなど(目視による傾斜は認められない)。

小破以下：外壁開口部の軽微なひび割れなど、外観上被害無し。

#### ① 評価対象地における木造構造物被災状況

本報では、村上ら<sup>1)</sup>が行った全数調査結果を元に、「神戸 JIBANKUN」<sup>4)</sup>に GIS 木造構造物データを作成した。なお、属性データは、建築年代及び被害状況を入力した。「神戸 JIBANKUN」<sup>4)</sup>上でプロットさせた建築年代別木造構造物分布を図-3.3.9に、木造構造物被害分布を図-3.3.10に示す。

まず、図-3.3.9に着目すると、全体的な傾向として昭和49年以前に建築された木造構造物が多いことが分かる。また、当対象地の南西部では昭和23年以前に建築された木造構造物が多数分布していることが確認できる。一方、JR神戸線以北では昭和49年以降に建築された木造構造物が多数分布していることが確認できる。次に、図-3.3.10に着目すると、国道2号線と国道43号線に挟まれた「震災の帯」に該当するエリアでは、倒壊した木造構造物が多数分布していることが確認できる。一方、山手幹線以北では小破以下の木造構造物が多く確認できる。



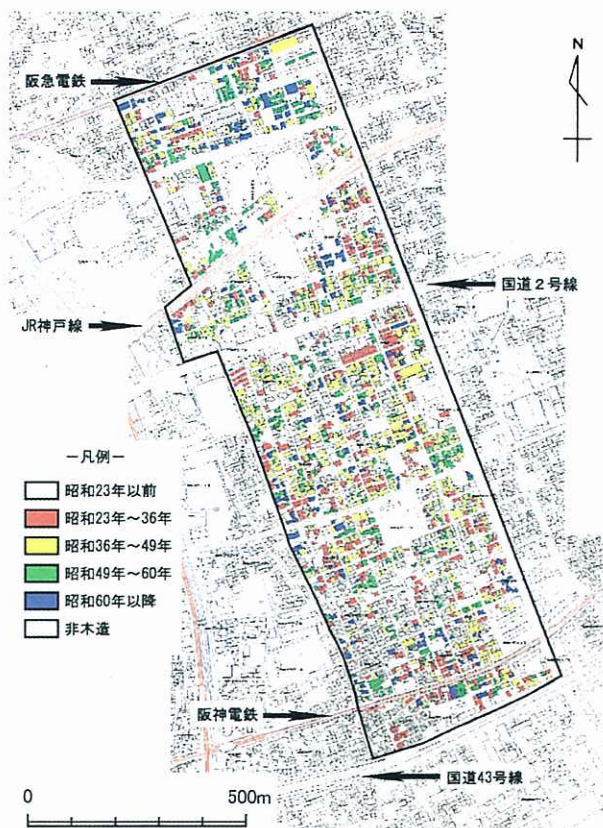


図-3.3.9 建築年代別木造構造物分布マップ

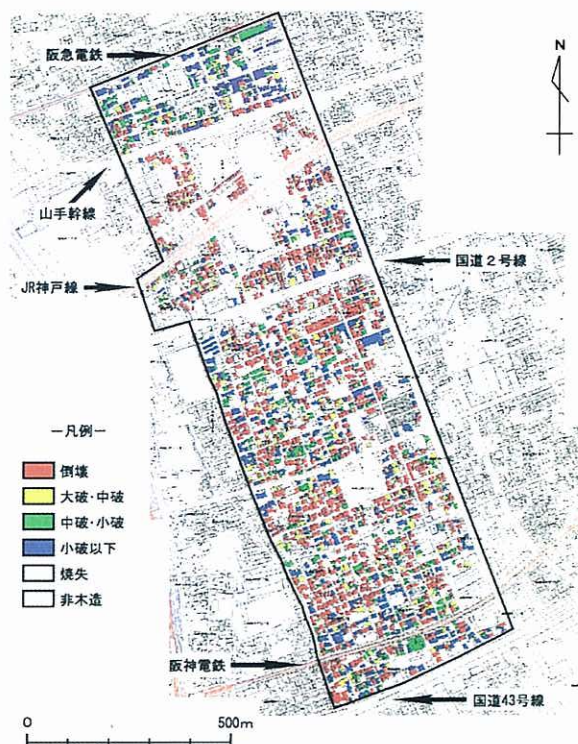


図-3.3.10 被災程度別木造構造物分布マップ

図-3.3.11 に建築年代別の木造構造物の割合を、図-3.3.12 に被害程度別の木造構造物の割合を示す。まず、図-3.3.11 に着目すると、当対象地の木造構造物の73%が昭和49年以前に建築されたことが分かる。次に、図-3.3.12 に着目すると当対象地では倒壊した割合が半数を占めていることが分かる。

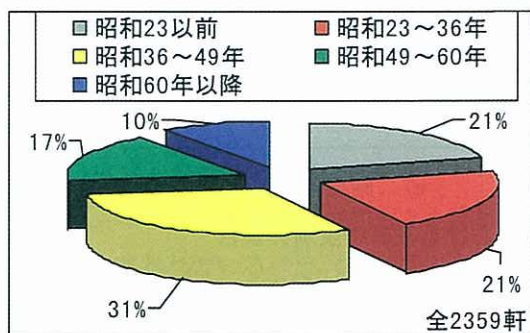


図-3.3.11 建築年代別の割合

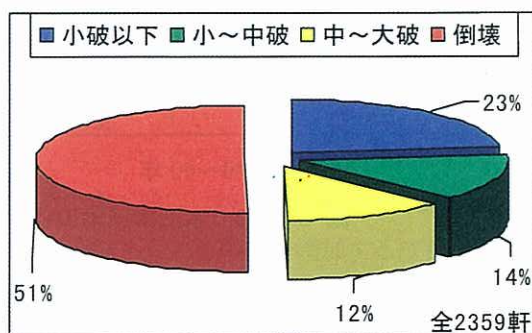
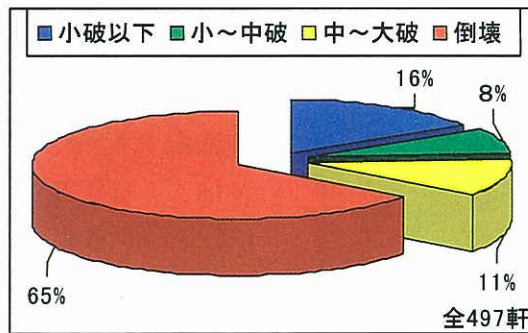
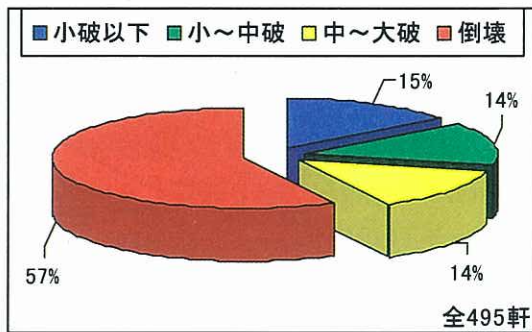


図-3.3.12 被害程度別の割合

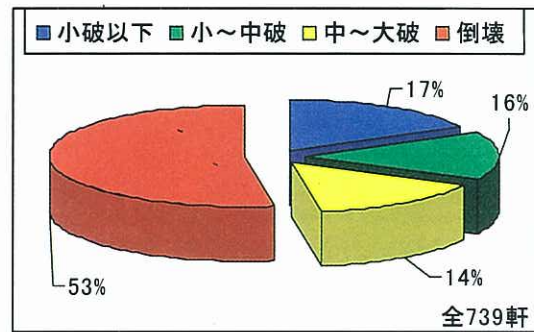
木造構造物の各建築年代における、被害程度の割合を図-3.3.12a)～e)に示す。これらの図より、建築年代の古い木造構造物ほど、倒壊の占める割合が大きいことが分かる。逆に、建築年代の新しい木造構造物ほど、小破以下の占める割合が大きい傾向にあることが分かる。



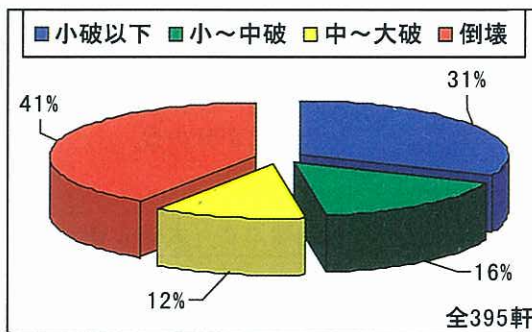
a) 昭和 23 年以前



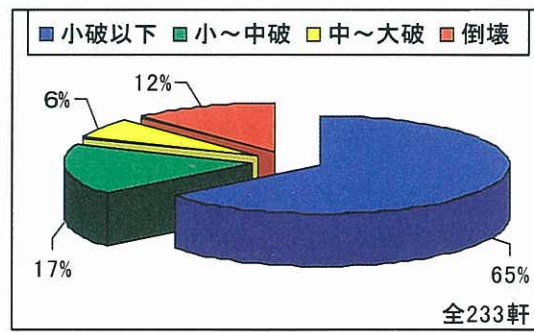
b) 昭和 23～36 年



c) 昭和 36～49 年



d) 昭和 49～60 年



e) 昭和 60 年以降

図-3.3.13 木造建造物の各建築年代における被害程度別の割合

## (2) 地震応答解析

評価対象地における最大地動速度を推定するため、3.3.3 項と同様、0u 波を入力地震動として浅層地盤における地震応答解析を行う。浅層地盤モデルを作成する際には、「神戸 JIBANKUN」<sup>4)</sup> に収録されているボーリングデータ及び既往の文献<sup>5)</sup> を参考とした。また、応答地震動は図-3.3.14 に示すボーリングポイント毎に算出した。前章でも述べたように、0u 波は格子点間隔 80m 毎に算出されている。そのため、本報で 0u 波を用いる際には、ボーリングポイントに最も近いと判断した格子点における応答地震動を、そのボーリングポイントにおける入力地震動とした。なお、解析プログラムは DYNEQ<sup>2)</sup> を用いる。得られた最大地動速度を用いて、評価対象地全体の最大地動速度の推定を行う。



### ① 地震応答解析結果

解析結果を用いて得られた最大地動速度のコンターマップを図-3.3.14に示す。図-3.3.14より、国道2号線と国道43号線に挟まれた「震災の帯」に該当するエリアでは、その他のエリアと比較して最大地動速度値が大きい傾向にあることが分かる。

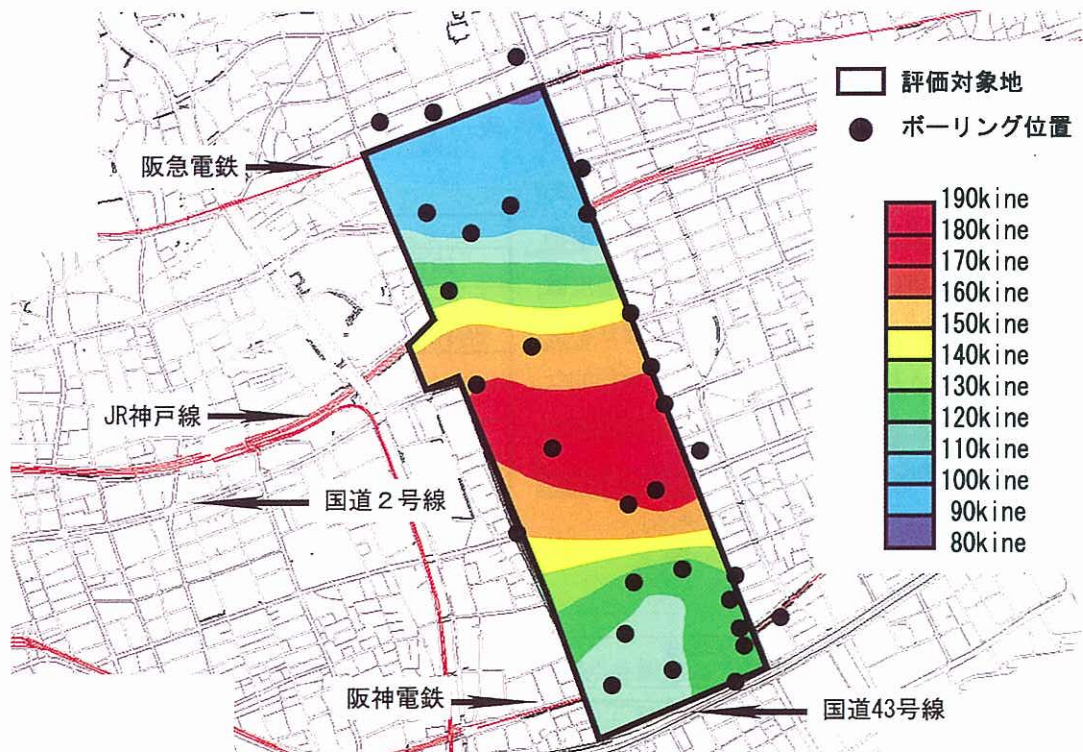


図-3.3.14 最大地動速度のコンターマップ

### (3) 木造構造物被害推定式

本節では、建築年代別の木造構造物被害状況及び最大地動速度を用いて、木造構造物被害推定式の作成を試みる。

#### ① ロジスティック曲線

一般に、被害率は地震動の増加とともに増加するが、その増加傾向は被害率の最大値に近づくに従い小さくなると言われている<sup>14)</sup>。すなわち、被害率0と1を漸近線とし、その間を増加する成長曲線となる。そこで、本報では谷口、飯田の研究<sup>14)</sup>に従い、最大地動速度と木造構造物被災率の関係をもとに、成長曲線の一種であるロジスティック曲線を用いて木造構造物被害推定式を作成する。ここで、木造構造物被害率をY、最大地動速度をVとすると、ロジスティック曲線は以下の式(5)<sup>14)</sup>で示される。

$$Y = K / \{1 + m \cdot \exp(-a \cdot V)\} \quad (5)$$

ここで、Kは漸近の上限値、m、aは定数である。従って、Kは1となる。また、この曲線の特性から、mは木造構造物の耐震力に、aは対象地域における木造構造物の耐震性の一様性を示す指標に相当すると考えられる。本報では、式(5)で得られるロジスティック曲線を用いて、最大地動速度と木造構造物被害率の関係を明らかにする。

## ② 木造構造物被害推定式を用いた木造構造物の耐震性の評価

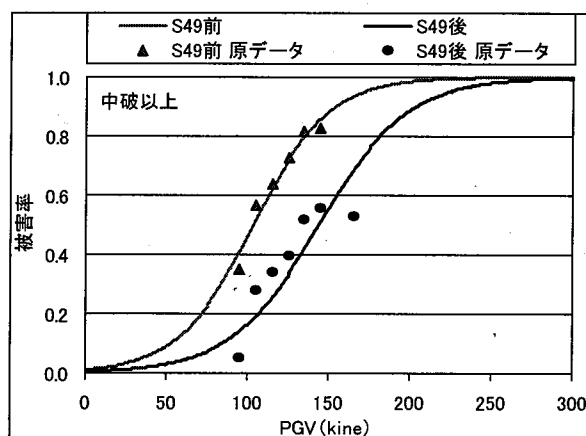
作成したロジスティック曲線の係数  $a$ 、 $m$  及び相関係数  $R^2$  を表-3.3.1 に、作成したロジスティック曲線及び用いたデータを図-3.3.15a)、b) に示す。なお、建築年代の分類は、建築基準法が昭和 45 年に改正されたことを参考に、昭和 49 年以前 (以下、S49 前と称す) と昭和 49 年以降 (以下、S49 後と称す) の 2 つに分類した。

まず、中破率と最大地動速度の関係 (図-3.3.15a)) に着目すると、S49 前のロジスティック曲線は、30kine 付近から立ち上がっているのに比して、S49 後のロジスティック曲線は、60kine 付近から立ち上がっていることが分かる。このことから、木造構造物が中破以上の被害になりはじめる最大地動速度は、建築年代によって異なることが分かる。また、中破以上の被害率が 0.5 に達する地震動強さを平均的な耐震強さとする、S49 前の木造構造物の平均的な耐震強さは 104kine、S49 後の木造構造物の平均的な耐震強さは 145kine であると評価できる。

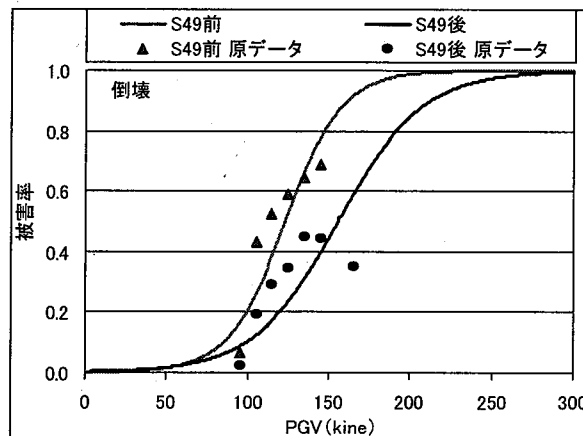
表-3.3.1 ロジスティック曲線の係数  $a$ 、 $m$

及び相関係数  $R^2$

| 被害率 (中破以上) |       |          |       |
|------------|-------|----------|-------|
| 建築年代       | $a$   | $m$      | $R^2$ |
| 昭和49年以前    | 0.043 | 89.421   | 0.976 |
| 昭和49年以降    | 0.037 | 208.097  | 0.853 |
| 被害率 (倒壊)   |       |          |       |
| 建築年代       | $a$   | $m$      | $R^2$ |
| 昭和49年以前    | 0.058 | 1194.719 | 0.877 |
| 昭和49年以降    | 0.039 | 412.648  | 0.672 |



a) 中破以上



b) 倒壊

図-3.3.15 木造構造物被害推定式

次に、倒壊率と最大地動速度の関係 (図-3.3.15b)) に着目すると、S49 前のロジスティック曲線は、70kine 付近から立ち上がっているのに比して、S49 後のロジスティック曲線は、75kine 付近から立ちあがっていることが分かる。このことから、木造構造物が倒壊しはじめる最大地動速度は、木造構造物が中破以上の被害になるときと同様、建築年代によって異なることが分かる。また、被害率が 0.5 になる最大地動速度は、S49 前では 124kine、S49 後では 156kine であることが分かる。

ここで、木造構造物被害推定式を用いた木造構造物地震危険度評価について検討する。前章で定義した  $P_w$  を用いて木造構造物地震危険度評価を行う場合、設定した集計単位の中で被災する木造構造物数のある程度把握できたとしても、どの木造構造物が被災する可能性が高いのかを把握することはできない。一方、木造構造物被害推定式を用いて木造構造物地震危険度評価を行う場合、対象木造構造物毎に被害率を評価することが可能である。さらに、建築年代別に木造構造物被害推定式を使い分けることで、耐震性を考慮した被害率を評価することが可能である。

#### (4) 建築年代を考慮した木造構造物地震危険度評価の検討

前節の結果より、中破以上の被害が生じはじめると最大地動速度は建築年代によって異なることが分かった。このことから、前章で定義したしきい値は木造構造物の建築年代によって異なると考えられる。また、木造構造物被害推定式からも分かるように、最大地動速度と木造構造物被害は線形関係ではないと考えられる。

そこで、 $P_w$ の第一項に建築年代別木造構造物被害推定式を用いることで、建築年代を考慮した木造構造物地震危険度評価を行う。ただし、その際には建築年代別の木造構造物分布を把握する必要がある。しかし、解析測線付近では、建築年代別の木造構造物分布を把握することができない。そのため、建築年代別の木造構造物分布を把握することのできる位置に、新たな解析測線（以下、東灘測線と称す）を設定した。東灘測線の位置を図-3.3.16に示す。東灘測線にはEw-0～Ew-15の計16の算定点を設定しており、算定点毎に最大地動速度を算出した。また、算定点毎にサイトを設定し、中破以上の被災木造構造物数及び建築年代別の木造構造物数を把握した。

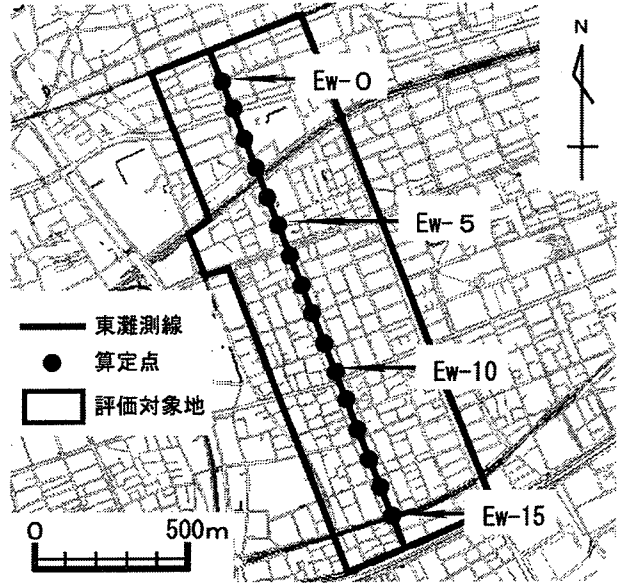


図-3.3.16 東灘測線位置図

建築年代別木造構造物被災ポテンシャル (Damage Potential of Wooden Houses Considered the Built age) (以下、 $P_{wag}$ と称す) を以下の式(6)で定義する。

$$P_{wag} = v_1 \cdot w_1 + v_2 \cdot w_2 \quad (6)$$

$$v_1 = 1 / \{1 + m_1 \cdot \exp(-a_1 \cdot V_i)\} \quad (m_1=89.42, a_1=0.043) \quad (7)$$

$$v_2 = 1 / \{1 + m_2 \cdot \exp(-a_2 \cdot V_i)\} \quad (m_2=208.097, a_2=0.037) \quad (8)$$

$$w_1 = \frac{W_{H1i}}{\sum W} \quad (9)$$

$$w_2 = \frac{W_{H2i}}{\sum W} \quad (10)$$

ここで、 $P_{wagi}$ : 算定点  $i$  における建築年代別木造構造物被災ポテンシャル、 $V_i$ : 算定点  $i$  における最大地動速度、 $W_{H1i}$ : サイト  $i$  における昭和49年以前に建築された木造構造物数、 $W_{H2i}$ : サイト  $i$  における昭和49年以降に建築された木造構造物数、 $\sum W$ : 全サイトにおける木造構造物数

$D_{dw}$ と $P_{Wag}$ の算定結果を図-3.3.17に示す。また、 $P_{Wag}$ の妥当性を検討するため、 $D_{dw}$ と $P_W$ の分布を図-3.3.18に示す。これらの図より、 $D_{dw}$ と $P_{Wag}$ 及び $D_{dw}$ と $P_W$ の分布傾向は概ね一致していることが分かる。ここで、図-3.3.17及び図-3.3.18に示す $D_{dw}$ と $P_{Wag}$ の相互相関係数及び $D_{dw}$ と $P_W$ の相互相関係数を比較すると、図-3.3.17における相関係数のほうが大きい値を示していることが分かる。このことから、 $P_W$ に比して $P_{Wag}$ を用いることでより精度の高い地震危険度評価を行うことができると考えられる。また、 $P_W$ は対象木造構造物が一般的な耐震性を有しているという条件下でしか評価することができないのに対し、 $P_{Wag}$ は建築年代別を考慮しているため、ある程度の耐震性の相違を考慮して地震危険度を評価することができると考えられる。

しかし、算定点 Ew-2, 3 では、 $P_{Wag}$ に比して $D_{dw}$ のほうが大きく、両者の分布傾向が良くないことが分かる。このことから、算定点 Ew-2, 3 では最大地動速度、木造構造物分布、木造構造物の耐震性だけでなく、木造構造物の構造の相違といったさらに詳細な要因についても検討する必要があると考えられる。これらのことをふまえ、今後は、さらに詳細な木造構造物地震危険度評価を行うことを課題とする。

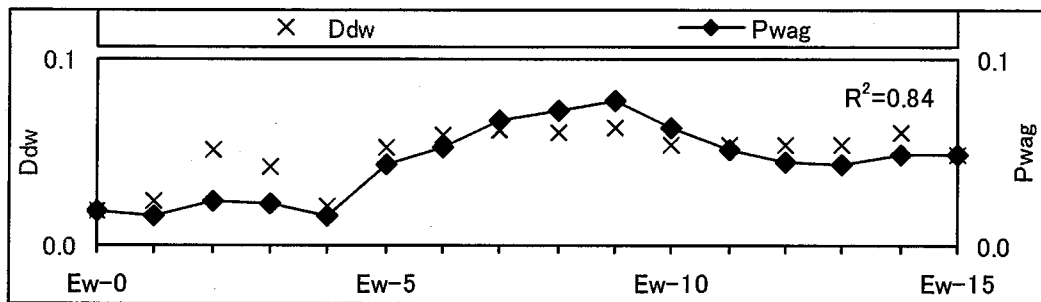


図-3.3.17  $D_{dw}$ と $P_{Wag}$ の比較

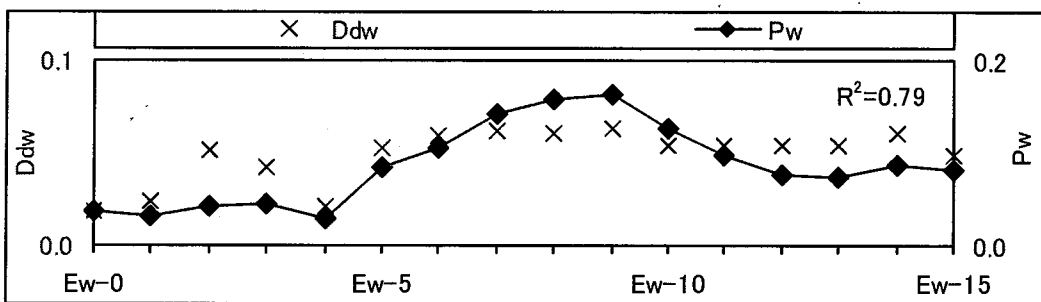


図-3.3.18  $D_{dw}$ と $P_W$ の比較

## 参考文献

- 1) 松島信一, 川瀬博: 1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション日本建築学会構造系論文集, 第 534 号, pp. 33-40, 2000.
- 2) 吉田望, 末富岩雄: DYNEQ 等価線形解析に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株) 技術研究報, pp. 61-70, 1999.
- 3) 吉田望, 東畑郁生: YUSAYUSA-2 理論と使用法, 佐藤工業(株) 中央技術研究所, 45. p, 1995.
- 4) 神戸市役所, 建設工学研究所: 神戸市地盤調査報告書, 第 7 章, 神戸地盤の地層構成, pp. 7 (1) -7 (26), 1998.
- 5) 応用地質株式会社: 兵庫県南部地震による地震動解析入力データの作成業務委託報告書, 197. p, 2000.
- 6) 童華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾: 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第 9 回日本地震工学シンポジウム, Vol. 2, pp. 2299-2304, 1994.
- 7) 林康裕, 川瀬博: 1995 年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価, 建築学会構造系論文集, 第 481 号, pp. 37-46, 1996.
- 8) 村上雅英, 田原賢, 藤田宜紀, 三澤文子: 阪神・淡路大震災にみる在来木造都市型住宅の問題点, 日本建築学会構造系論文集, 第 481 号, pp. 71-80, 1996.
- 9) 吉田晋暢: 兵庫県南部地震による神戸市域の地震動増幅特性と建築構造物被災分布との関係について, 神戸大学大学院修士論文, 53. p, 2001.
- 10) 岡田恒男, 土岐憲三: 地震防災の事典, 朝倉書店, p. 529, 2000.
- 11) 村上雅英: 東灘西部地区全数調査, 平成 7 年阪神・淡路大地震木造住宅等震災調査報告書, 木造住宅震災調査委員会, pp. 116-126, 1995.
- 12) 長谷川浩一, 翠川三郎, 松岡昌志: 地域メッシュ統一を利用した広域での木造建築物群の震害予測ーその 2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例ー, 日本建築学会構造系論文集, 第 505 号, pp. 53-59, 1998.
- 13) 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 第 527 号, pp. 189-196, 2000.
- 14) 谷口仁士, 飯田汲事: 地震時住宅被害予測法定式化への試みー主として, 地盤液状化に起因する被害を中心にー, 日本建築学会構造系論文集, 第 365 号, pp. 108-118, 1986.



### 3.4 二次元モデル(面内波・面外波入力)による応答を考慮した木造構造物被災度評価に関する研究

#### 3.4.1 はじめに

強震時における地表面での揺れの強さは、地震の震源特性や地震波の伝播特性の他に地域全体の深部までを含めた地盤構造、該地点の表層地盤の影響を受ける。1995年兵庫県南部地震においては、神戸市域における建物被害分布は「震災の帯」と呼ばれる特徴的な分布を示したが、その震災の帯の要因としては、震源特性（断層破壊方向に生じる指向性効果）と地盤特性（盆地端部におけるエッジ効果）の相乗効果により大振幅のパルスが形成されたことによるとの報告がなされている。<sup>1) 2)</sup>

本検討では、1995年兵庫県南部地震における「震災の帯」のシミュレーションを行うことを目的とし、深部地盤構造の不整形性と表層地盤の増幅特性に着目し、2次元地盤モデルおよび1次元地盤モデルを用いてモデル面内波および面外波を考慮した地震応答解析を行ない、木造構造物被災度分布との比較を行った。

#### 3.4.2 検討方法

図-3.4.1に地震応答解析のフローを示し、以下に本研究での検討方法の概要を記す。

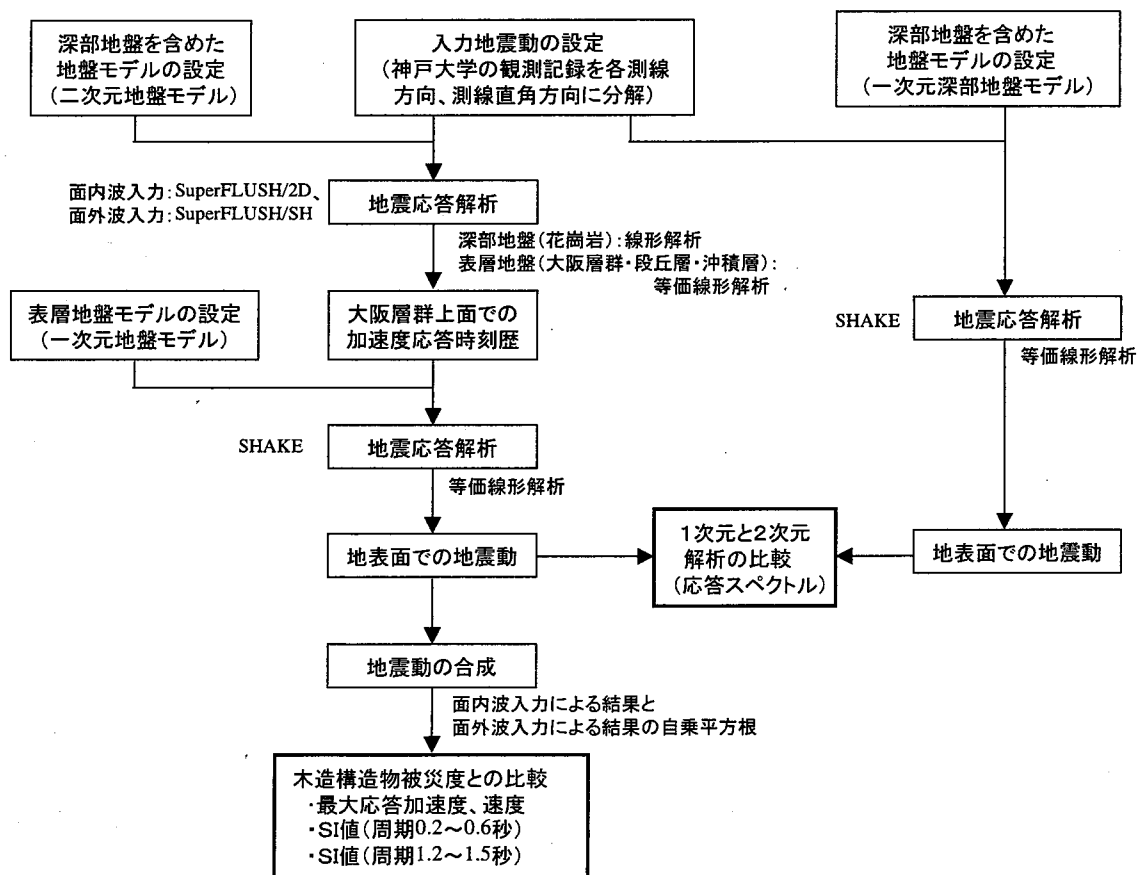


図-3.4.1 地震応答解析のフロー

## (1) 地盤の不整形性を考慮した2次元地震応答解析

深部地盤を含めた地盤の不整形性を考慮するために、図-3.4.2 に示す3本の解析測線（東部、中部、西部）を対象として、図-3.4.3 に示す深部地盤構造を含む二次元地盤モデルを設定し、モデル面内波入力および面外波入力により地震応答解析（使用プログラム、面内波入力：SuperFLUSH/2D、面外波入力：SuperFLUSH/SH）を行ない、工学的基盤（大阪層群上面）における加速度応答波形を算定した。この際、沖積層・段丘層・大阪層群上部・中部・下部については、地震時における土の非線形性を考慮するために等価線形化手法を用いた。

解析に用いた入力地震動は、神戸大学における観測記録（NS成分、EW成分）を2次元解析モデル面内方向（解析測線方向）と面外方向（解析測線直角方向）にベクトル分解したものを、鉛直上昇波入力（入射角0度）による検討と進行波入力（入射角45度）による検討を行った。

図-3.4.4 に神戸大学の観測記録とそれを測線方向、測線直角方向にベクトル分解した入力地震動を、図-3.4.5 に入力方向の概念図を示す。

## (2) 地表面における応答加速度・速度の算定

地表面における地震動は、各測点において沖積層・段丘層を対象とした表層地盤モデル（一元地盤モデル）を設定し、重複反射理論に基づく地震応答解析（使用プログラム：SHAKE）により算定した。入力地震動は、前述した二次元地盤モデルを用いた各入力（モデル面内波および面外波）による地震応答解析から得られた各測点における工学的基盤相当位置での加速度応答波形を用いた。また、表層地盤の土の非線形性を考慮するために等価線形化手法により解析を行った。

モデル面内波入力と面外波入力による各測点地表における加速度応答波形を計算し、各入力に対する最大加速度・速度応答や加速度・速度応答スペクトルを合成（自乗平方根）し、さらにこれら合成後の応答スペクトルからSI値を計算し、地表面の応答について検討した。

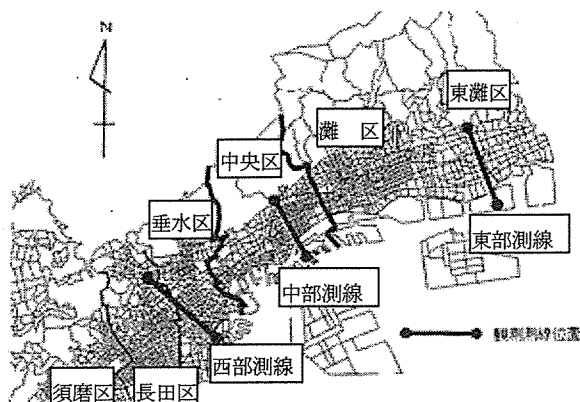
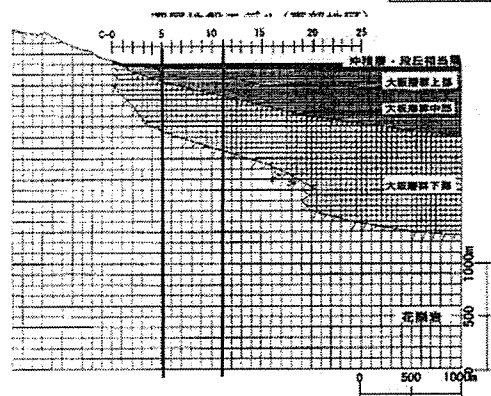
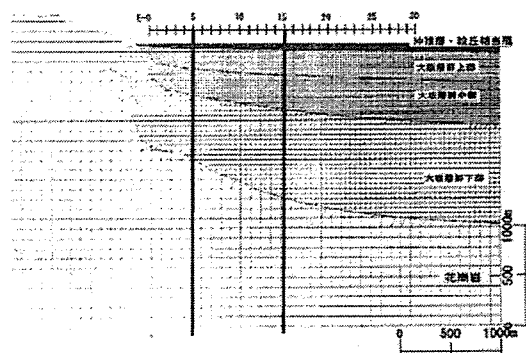


図-3.4.2 解析測線



深層地盤モデル(中部地区)

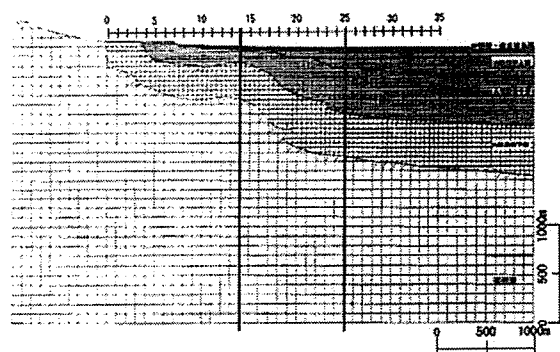
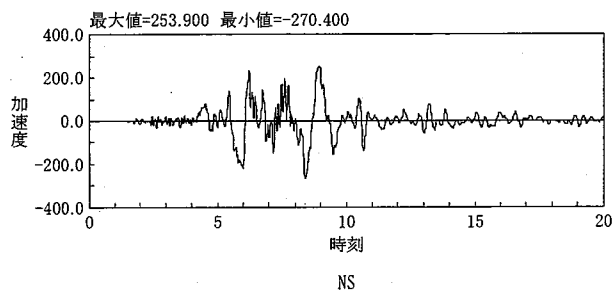
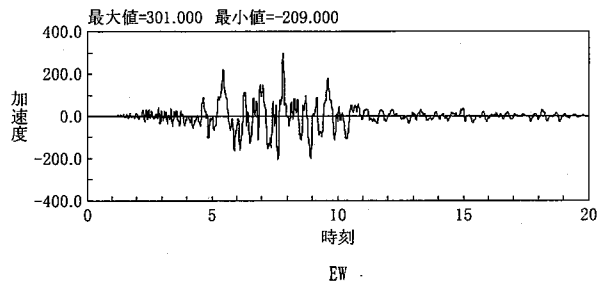


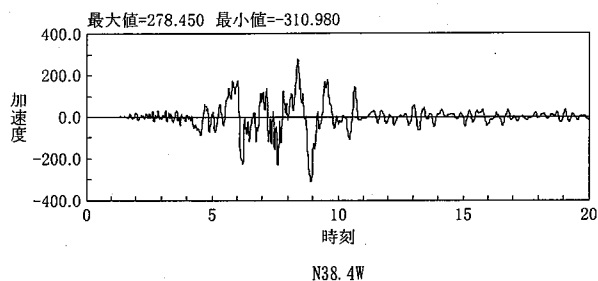
図-3.4.3 二次元地盤モデル  
(縦線は一次元深部地盤モデル設定位置)



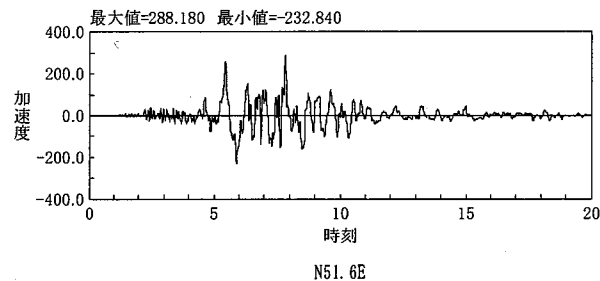
神戸大学観測波 (NS 成分)



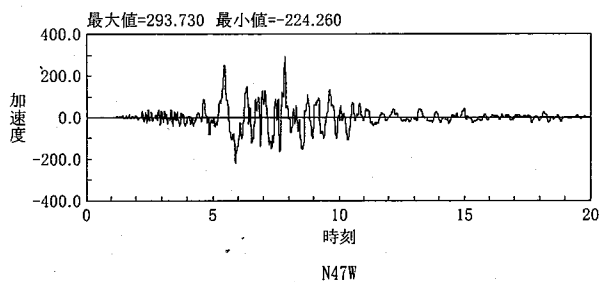
神戸大学観測波 (EW 成分)



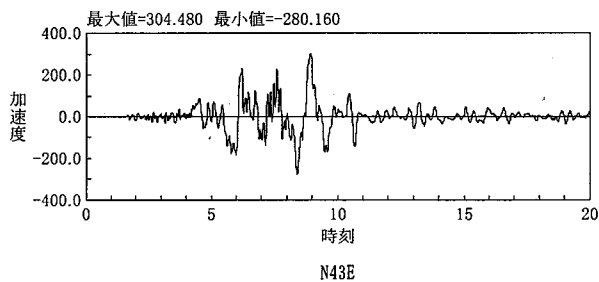
面内波「測線方向」東部・中部地区



面外波「測線直角方向」東部・中部地区



面内波「測線方向」西部地区



面外波「測線直角方向」西部地区

図-3.4.4 神戸大学観測記録と各測線でベクトル分解した入力地震動

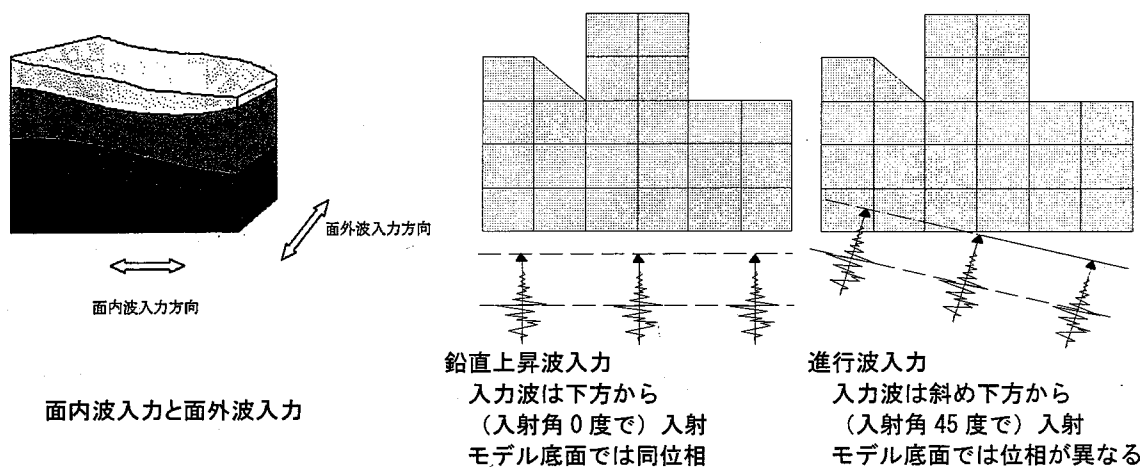


図-3.4.5 面内波・面外波入力および鉛直上昇波・進行波入力概念

### (3) 木造構造物被災度との比較

上記の解析結果より得られた地表における加速度波形を用いて建物周期を考慮した SI 値を算定し、吉田<sup>3)</sup>の木造構造物被災度 ( $D_w$ ) との対応関係を比較した。ここで SI 値は、平常時における木造建物の固有周期帯として 0.2~0.6 秒における SI 値 (以下、SI'値とする)、および地震時における木造建物の損傷時周期帯として 1.2~1.5 秒における SI 値 (以下、SI''値とする) を算定した。<sup>4), 5)</sup>

つぎに、これらの木造建物周期に対応した SI'値および SI''値に対して、しきい値を考慮した木造構造物被災危険度 (それぞれ  $R_w$ 、 $R''_w$  とする) を算定し、 $D_w$  の分布との対応関係を比較した。

以下に、木造構造物被災度 ( $D_w$ )、建物周期を考慮した SI'値、SI''値および木造構造物被災危険度 ( $R_w$ 、 $R''_w$ ) の定義を示す。

木造構造物被災度 ( $D_w$ ) とは、算定点を中心とした半径 100m の円内 (以下、サイトと称す) に含まれる全壊及び半壊した木造構造物を各測線における全サイトの木造構造物数で除した値である。こうして求めた木造構造物被災度の各測線での分布は、その測線における被害分布を概ね再現している。なお、木造構造物の建築年代及び規模といった属性については考慮していない。

建物周期を考慮した SI'値、SI''値は、それぞれ以下に示す (1) 式、(2) 式により算定した。なお算定に用いた速度応答スペクトルの減衰定数は、平常時の周期帯を考慮した SI'値においては 3%、損傷時の周期帯を考慮した SI''値においては 20% とした。また、これらの SI'値および SI''値に対するしきい値を考慮した  $R_w$  および  $R''_w$  は (3) 式、(4) 式によって算定した。この際、しきい値は各測線ともに 70cm/s を設定した。

#### ●SI'値 (0.2~0.6 秒の SI 値)

$$SI'_i = \frac{1}{0.4} \int_{0.2}^{0.6} Sv(h,T)dT \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 $SI'_i$  : 算定点 i における 0.2~0.6 秒の SI 値  
 $Sv$  : 速度応答スペクトル  
 $T$  : 周期  
 ただし、減衰 3% のとき

#### ●SI''値 (1.2~1.5 秒の SI 値)

$$SI''_i = \frac{1}{0.3} \int_{1.2}^{1.5} Sv(h,T)dT \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 $SI''_i$  : 算定点 i における 1.2~1.5 秒の SI 値  
 $Sv$  : 速度応答スペクトル  
 $T$  : 周期  
 ただし、減衰 20% のとき

#### ●木造構造物被災危険度 ( $R_w$ )

$$R_w = \frac{SI'_i - SI'_T}{SI'_T} \times \frac{W_{Hi}}{\sum_1 W_{Hi}} \quad \dots\dots (3)$$

$R'_w$  : 算定点 i における木造構造物被災危険度  
 $SI'_i$  : 算定点 i における 0.2~0.6 秒の SI 値  
 $SI'_T$  : 0.2~0.6 秒の SI 値のしきい値 (70kine)  
 $W_{Hi}$  : メッシュ i における木造構造物数  
 $p$  : 各測線の算定点数

#### ●木造構造物被災危険度 ( $R''_w$ )

$$R''_w = \frac{SI''_i - SI''_T}{SI''_T} \times \frac{W_{Hi}}{\sum_1 W_{Hi}} \quad \dots\dots (4)$$

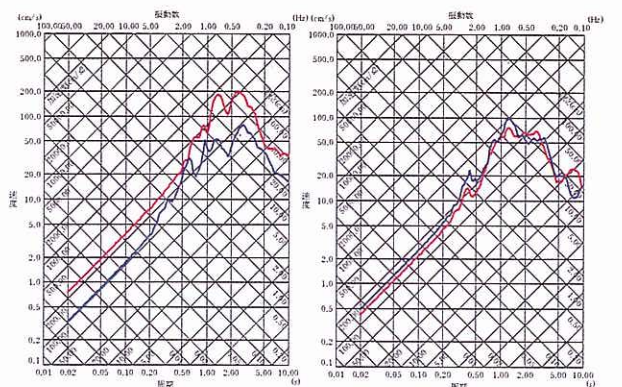
$R''_w$  : 算定点 i における木造構造物被災危険度  
 $SI''_i$  : 算定点 i における 1.2~1.5 秒の SI 値  
 $SI''_T$  : 1.2~1.5 秒の SI 値のしきい値 (70kine)  
 $W_{Hi}$  : メッシュ i における木造構造物数  
 $p$  : 各測線の算定点数



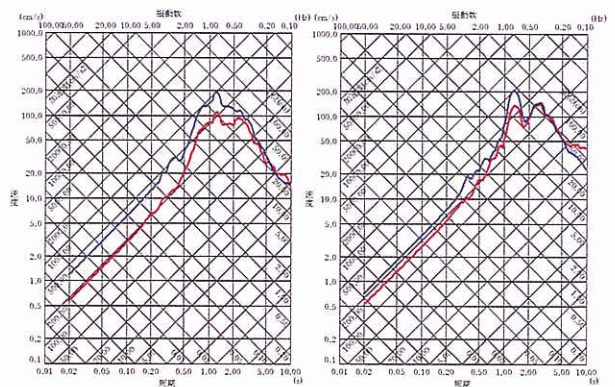
### 3.4.3 検討結果

#### (1) 一次元と二次元解析結果の比較

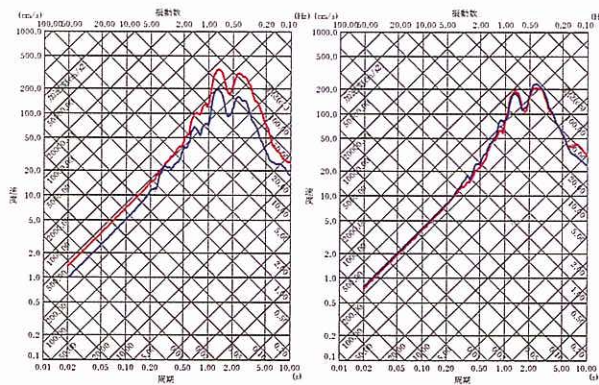
各測線代表点（図-3.4.3に示した地盤モデル図の縦線位置）において、深部地盤から地表までを成層構造と仮定し、一次元地盤モデルによる地震応答解析結果を行ない地表での応答スペクトルを計算した。計算した応答スペクトル（ $h=5\%$ ）を、二次元地盤モデルを用いた面内波入力および面外波入力による地震応答解析結果（両者とも鉛直上昇波入力）から得られた応答スペクトルと比較した。比較した結果を図-3.4.6に示す。図より面内波入力および面外波入力の場合ともに一次元解析結果と二次元解析結果では応答スペクトルの振幅に差異があり、周期特性も若干異なることがわかる。また、面外波入力の場合は、各地区各測点ともに2次元解析結果の方が、ほぼ全周期帯にわたりスペクトル振幅は大きくなっている。



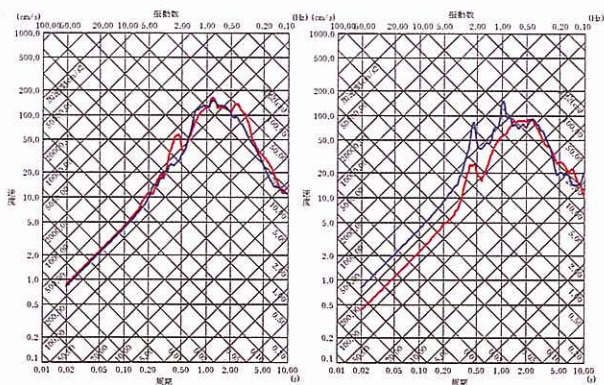
東部地区 5km 位置：面内波入力      東部地区 15km 位置：面内波入力



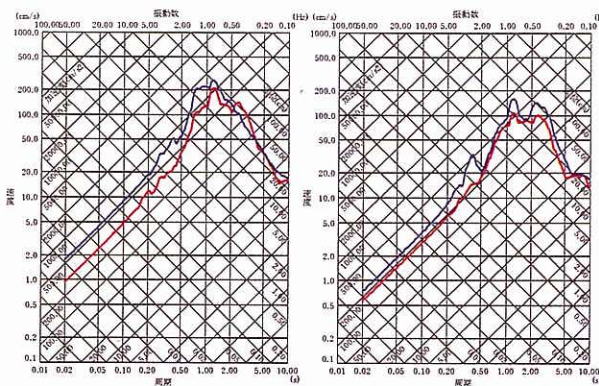
東部地区 5km 位置：面外波入力      東部地区 15km 位置：面外波入力



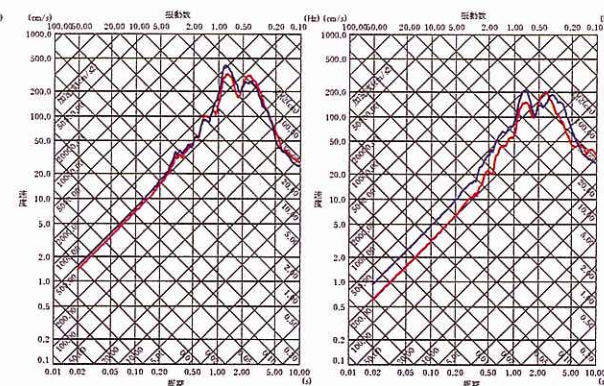
中部地区 5km 位置：面内波入力      中部地区 11km 位置：面内波入力



西部地区 14km 位置：面内波入力      西部地区 25km 位置：面内波入力



中部地区 5km 位置：面外波入力      中部地区 11km 位置：面外波入力



西部地区 14km 位置：面外波入力      西部地区 25km 位置：面外波入力

— 1次元  
— 2次元

図-3.4.6 応答スペクトル（ $h=5\%$ ）の比較「一次元解析結果と二次元解析結果」

## (2) 最大応答分布の比較

図-3.4.7 に、最大加速度応答分布図を示す。鉛直上昇波入力および進行波入力の場合の両方共に、また面内波入力と面外波入力、さらに面内波入力と面外波入力の合成結果の全てのケースにおいて、地表における最大応答加速度は、入力の2～3倍程度の応答となっている。特に進行波入力の場合においては、海側での応答が顕著に大きくなった。

図-3.4.8 に、最大速度応答分布図を示す。最大速度は、海側における応答は大きいが内陸側では小さく、この傾向は進行波入力の場合に顕著である。海側での応答が大きいのは、海側の地盤は比較的軟弱層が厚く堆積しており、非線形性の影響が大きく現われ、全体的に長周期側で卓越するような応答性状になっているためと考えられる。

なお、最大加速度、最大速度ともに木造構造物被災度との対応については、全体的に明瞭な相関関係は認められなかった。

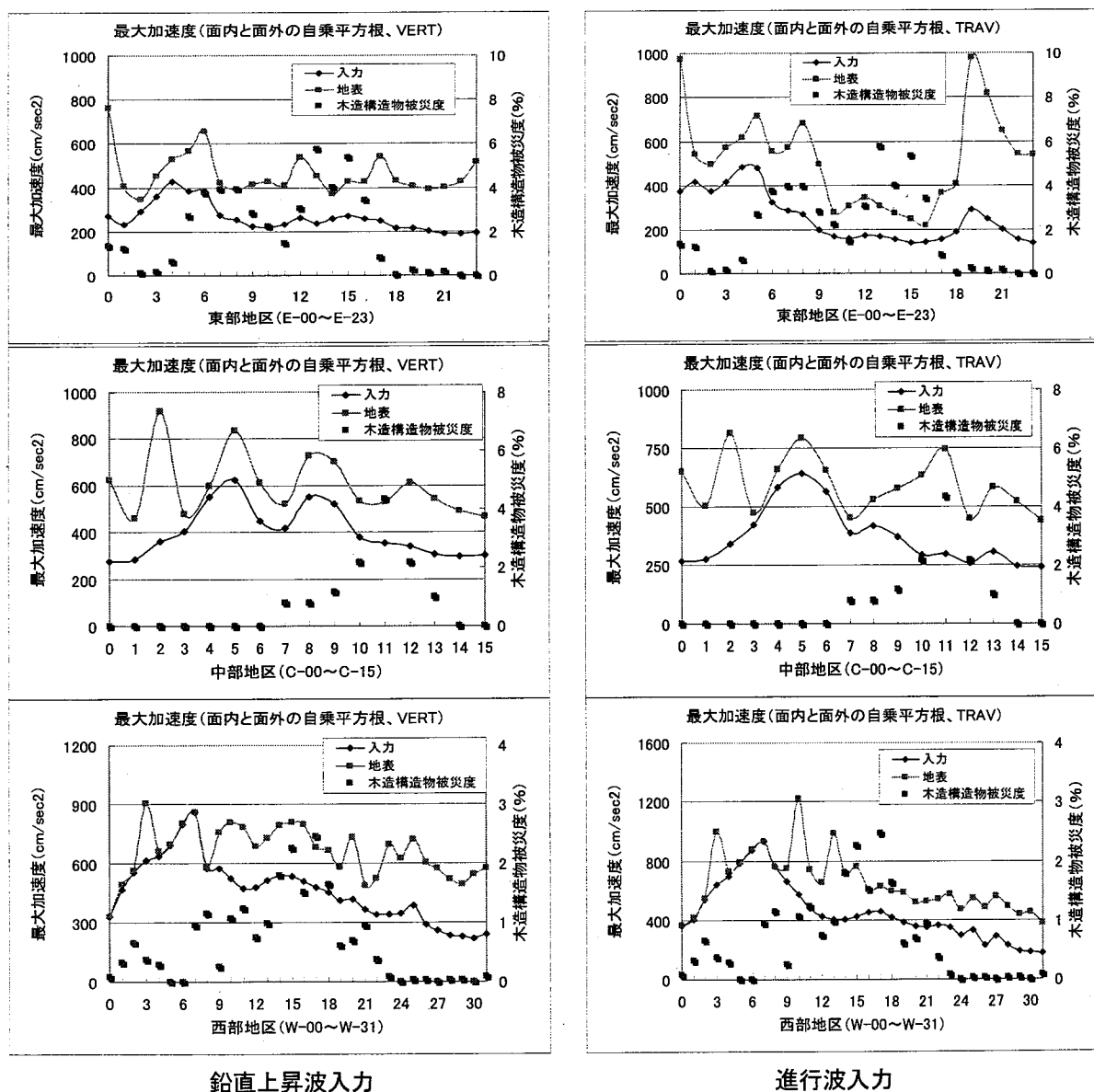


図-3.4.7 最大加速度分布と木造構造物被災度

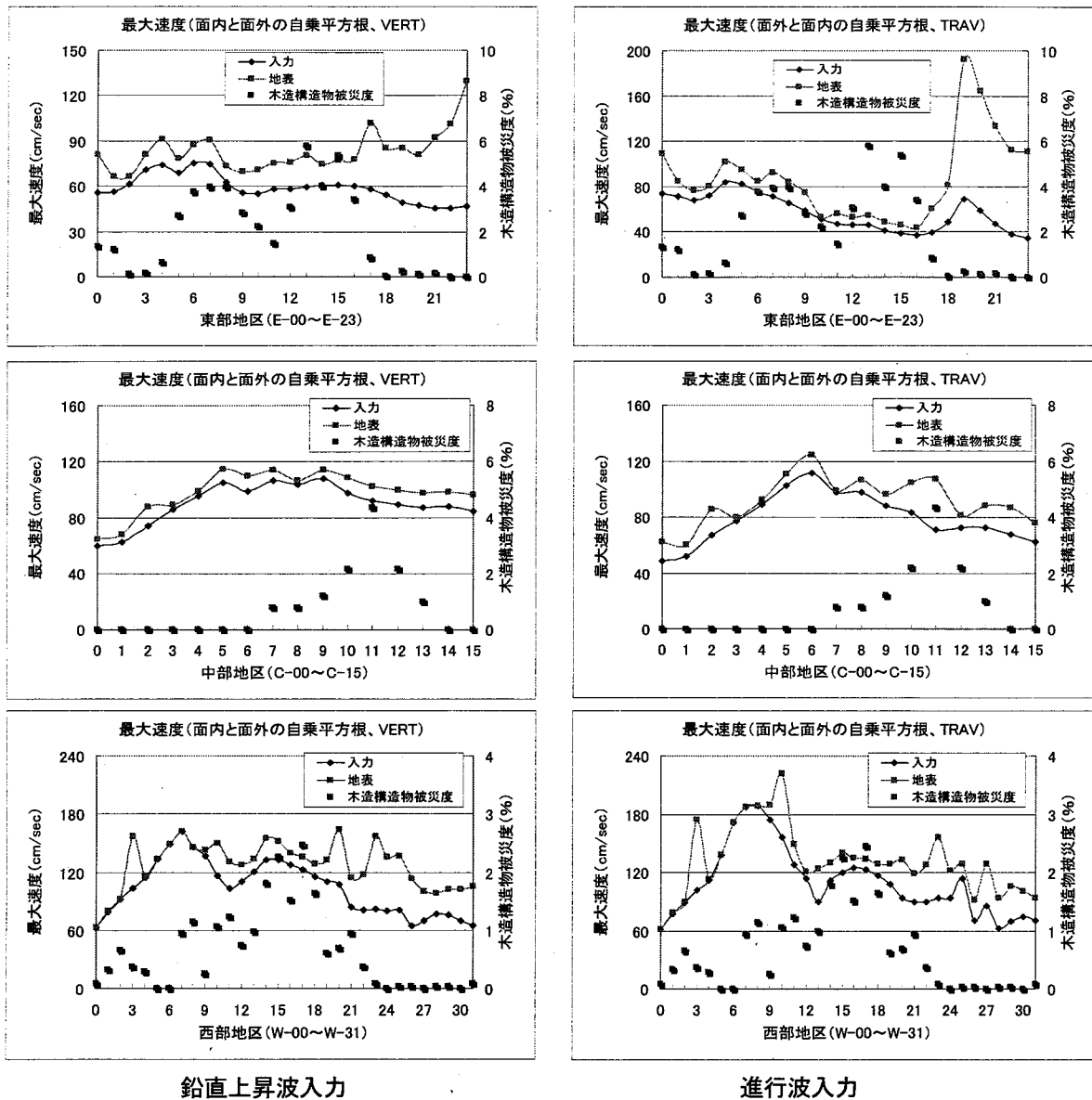


図-3.4.8 最大速度分布と木造構造物被災度



(3) SI 値（周期 0.2～0.6 秒、 $h=3\%$ ）と木造構造物被災度および危険度との比較

図-3.4.9 に SI 値（周期 0.2～0.6 秒）の分布と木造構造物被災度を示す。図より SI 値と木造構造物被災度との対応関係については、全体的に明瞭な傾向は認められなかった。

図-3.4.10 に SI 値に対してしきい値を考慮した場合の木造構造物危険度と木造構造物被災度との比較を示す。両者の対応関係については、東部地区においては全体的な傾向に差異が認められるが、中部地区・西部地区においては、比較的良好な対応関係が認められる。この傾向は進行波入力の場合においても同様であった。

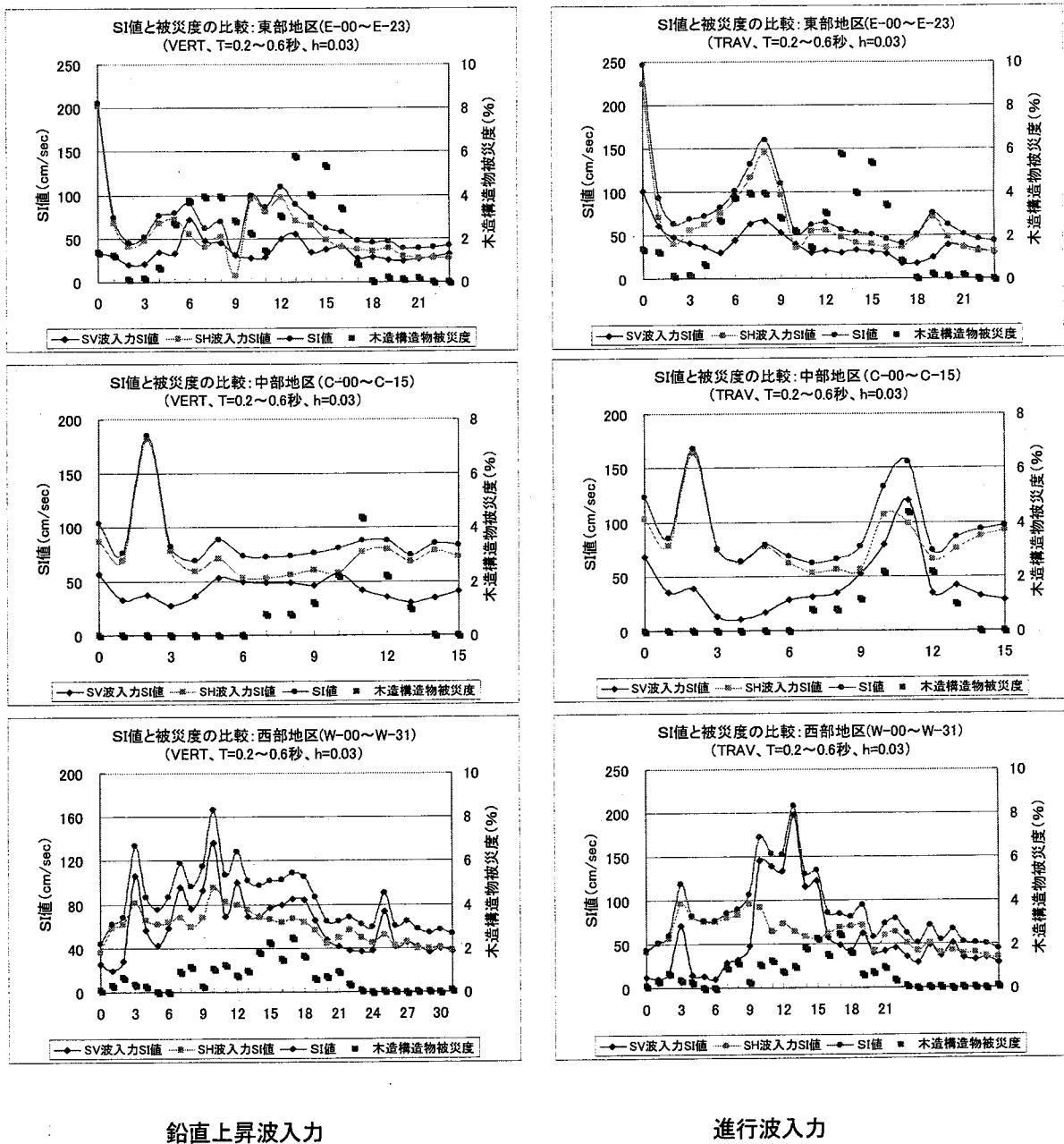
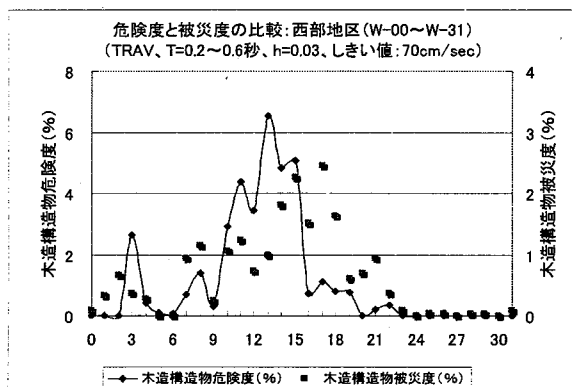
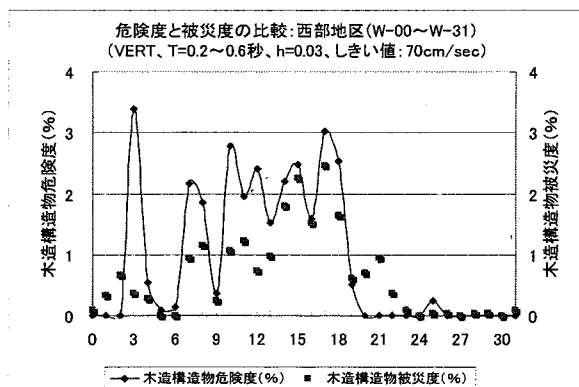
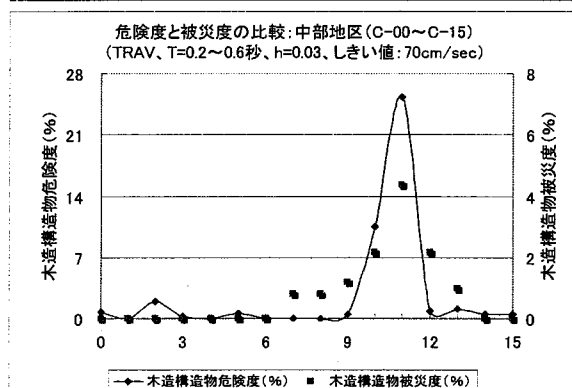
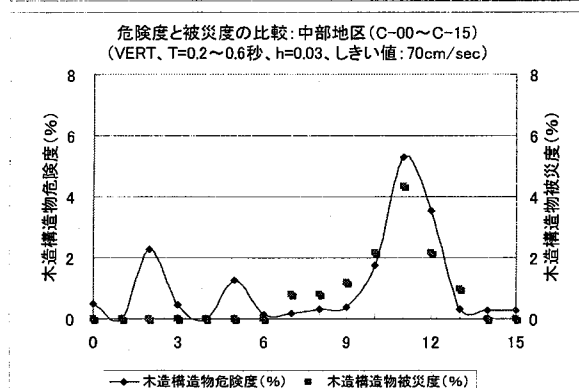
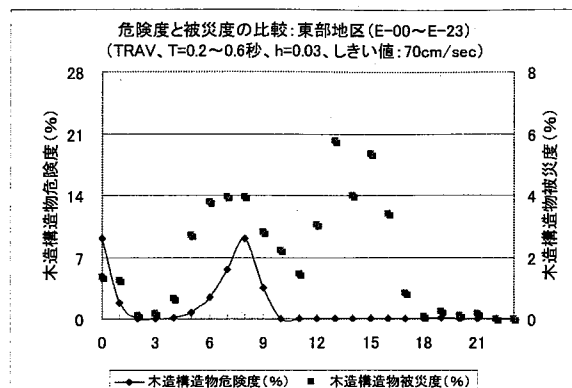
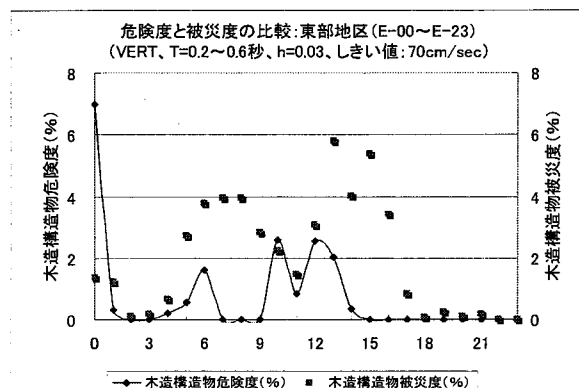


図-3.4.9 SI 値（周期 0.2～0.6 秒、 $h=3\%$ ）と木造構造物被災度





鉛直上昇波入力

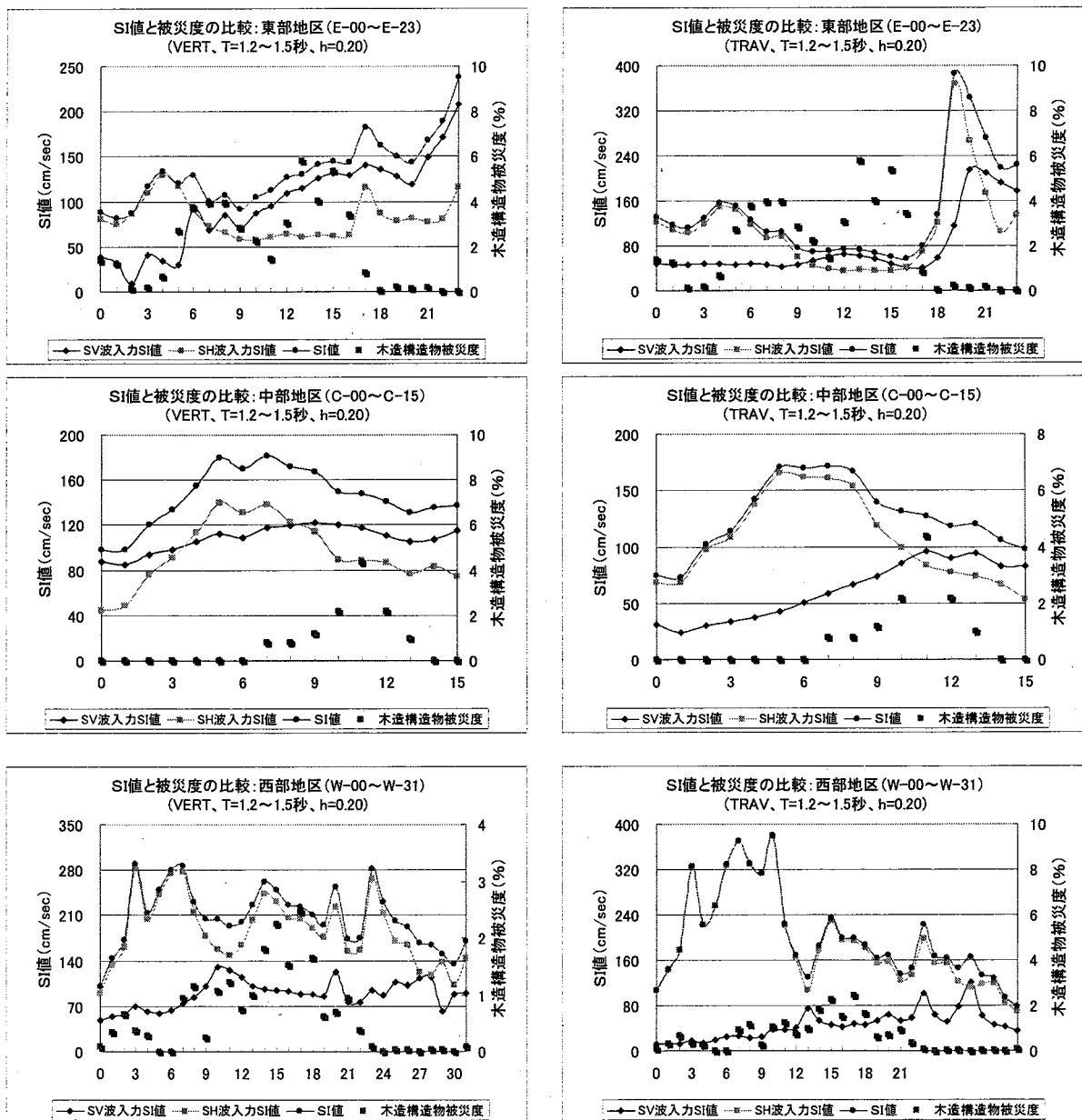
進行波入力

図-3.4.10 木造構造物危険度と木造構造物被災度

(4) SI 値（周期 1.2～1.5 秒、 $h=20\%$ ）と木造構造物被災度および危険度との比較

図-3.4.11 に SI 値（周期 1.2～1.5 秒）の分布と木造構造物被災度を示す。図より SI 値と木造構造物被災度との対応関係については、全体的に明瞭な相関性は認められなかった。

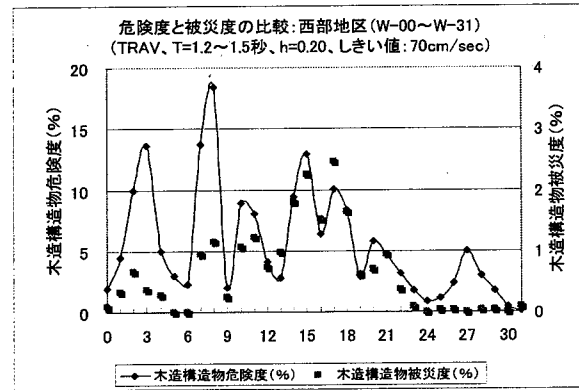
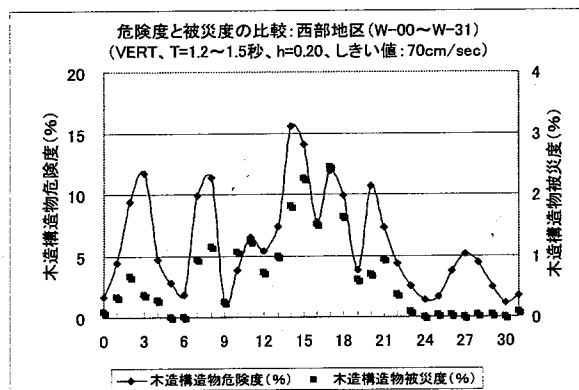
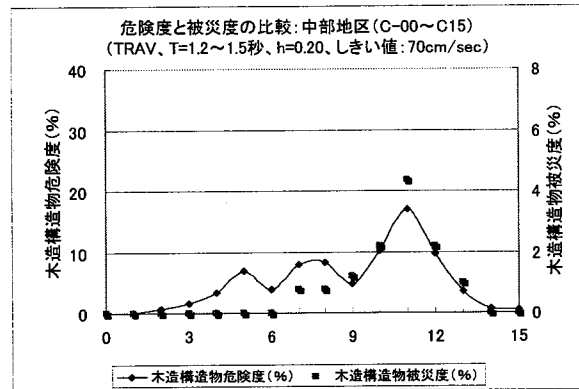
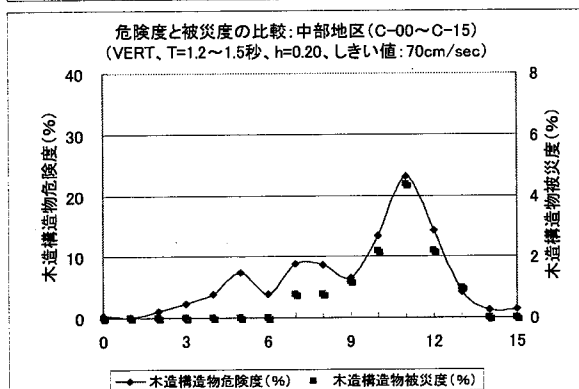
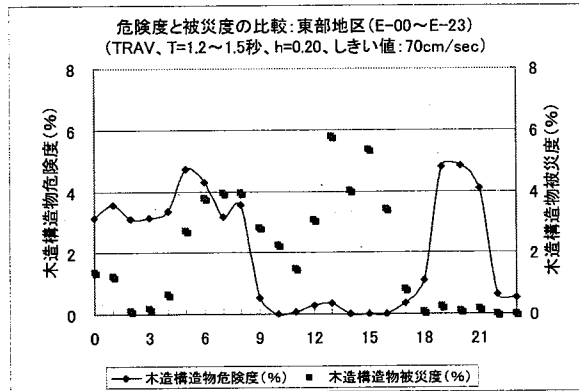
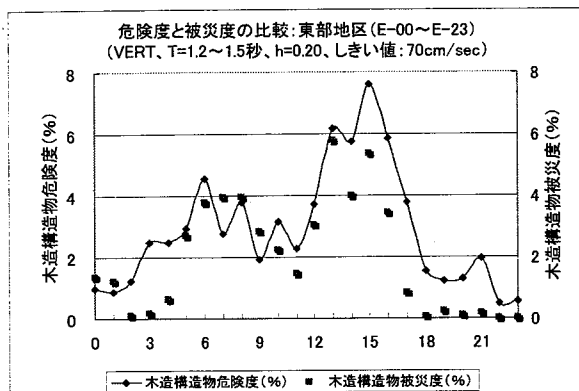
図-3.4.12 に SI 値に対してしきい値を考慮した場合の木造建物危険度と木造建物被災度との比較を示す。図より両者の対応関係については、東部・中部・西部の全てにおいて良い対応が認められる。この傾向は、東部地区以外では進行波入力の場合についても同様である。進行波入力の東部地区の結果については、E-9～E-17 の範囲で危険度が小さくなっており、被災度の傾向とは異なる結果となっている。これは、しきい値を小さくする事によりこの対応関係は改善されると考えられるが、本検討で設定した進行波入力の入射角度が 45 度とやや大きいことにも起因しているとも考えられる。



鉛直上昇波入力

進行波入力

図-3.4.11 SI 値（周期 1.2～1.5 秒、 $h=20\%$ ）と木造構造物被災度



鉛直上昇波入力

進行波入力

図-3.4.12 木造構造物被災危険度と木造構造物被災度

#### 3.4.4 まとめ

本検討で得られた知見を以下に要約して示す。

- ①最大加速度分布および最大速度分布と木造建物被災度分布を比較すると、明瞭な相関性は認められず、単純に、最大加速度や最大速度のみでは木造構造物被災度の分布を説明することは難しいと考えられる。
- ②木造建物の平常時における固有周期（0.2～0.6 秒）に着目して SI 値を算定し、しきい値を考慮した木造構造物危険度を算定した結果、東部地区においては木造構造物被災度と差異があるものの、中部・西部地区においては比較的良好な対応関係が得られた。
- ③木造建物の損傷時における固有周期（1.2～1.5 秒）に着目して SI 値を算定し、しきい値を考慮した木造構造物危険度を算出した結果、東部・中部・西部の全ての地区において木造構造物被災度との対応は、平常時の周期（0.2～0.6 秒）に着目した場合よりも良い対応関係が認められた。
- ④なお進行波入力 of 東部地区においては差異が認められ、その要因としては入射角度が 45 度と大きめに設定した影響と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 例えば、入倉孝次郎：兵庫県南部地震と都市深部地下構造調査、都市の地震防災と深部地盤構造に関するシンポジウム、日本応用地質学会地震防災技術委員会, pp. 2-3, 1998.
- 2) 栗山利男・荏本孝久・望月利男：地盤不整形性を考慮したマイクロゾーニングに関する研究－西宮市を例として－, 日本建築学会構造系論文集 第 546 号, pp. 71-78, 2001.
- 3) 吉田晋暢：兵庫県南部地震による神戸市域の地震動増幅特性と建築構造物被災分布との関係について, 神戸大学大学院修士論文, 2001.
- 4) 沖村孝・鳥居宣之・吉田晋暢・藤井紀之：地盤特性が兵庫県南部地震による建築構造物被災分布に及ぼした影響について, 土木学会第 56 回年次学術講演会, I-A117, pp. 234-235, 2001.
- 5) 境有紀・綾瀬一起・神野達夫：建物被害を簡便にかつ的確に予測する地震動の破壊力指標の検討, 第一回日本地震工学研究発表・討論会梗概集, pp164, 2001.

#### 4. 地震動を考慮した建物の新耐震設計法

##### 阪神淡路大震災の構造被害の調査と原因究明

1995年1月17日早朝に発生した阪神淡路大震災では、関東大震災以上の大被害をもたらしました。2000年1月11日現在の死傷者は6400人ですが、87.9%の方々が家屋の倒壊により尊い生命を奪われています。日本建築学会はただちに「兵庫県南東部地震災害調査小委員会」を発足させ、今後の設計並びに研究に反映させるべく活動を開始しました<sup>1)</sup>。主な検討項目は次のようなものです。

I RC 構造物に見られる特徴的被害とその原因究明

II RC 運営委員会の基準・指針における見直しを必要とする部分の指摘とその内容

III 新耐震基準以前（1981年）の既存建築に対する所見と対応

その後検討を進めるために次のような作業部会を設置した。

- |           |           |
|-----------|-----------|
| ①層崩壊 WG   | ②配筋継手 WG  |
| ③柱梁接合部 WG | ④非構造部材 WG |

##### ①層崩壊 WG

コンクリート系建築構造物の特徴的被害の一つである1階および中間階での層崩壊の原因究明を行い、詳細な解析により要因には主因と誘因があり、ほぼその内容は確定できることが示された。中間層の崩壊は、崩壊層への耐力不足や耐力低下が主因、壁の偏心配置等が誘因となって生じ降伏状（特に全体降伏形）の意識が薄かった旧耐震基準（1981年以前）の建築物に集中した。→全体降伏形の考え

しかし、1階の崩壊については1982年以降の建築物にも見られ、問題となった。中被以上のRC建築物の1982年以降の比率はそれ以前に比べて大幅に少ないと言え、一部の激震地域を対象としたRC建築物の全体調査によれば一般建築物の被害率とピロティ建築物の被害率ではピロティ建築物の被害率が4倍近くになり、これは1982年以降の新耐震設計法になっても言える→ピロティ建築物は現行の耐震基準でも不十分であり、今後さらに余裕を持った設計が必要。

##### ②配筋継手 WG

1. 剪断性能の強化のため接合部パネル内への定着（抱えこみ定着・U型定着）
2. ピロティ階において柱の鉄筋本数が柱頭や柱脚と中間部に異なるカットオフ部分でコンクリートの部分的な圧壊や、主筋の座屈がみられた。→ピロティ階の柱への主筋の本数は柱頭・柱脚と中間部で変えない方が良い。
3. RC 柱の剪断能力を上げるために、柱頭・柱脚部において十分な横拘束補強が必要なため角型フープだけでは不十分で、中子筋が必要である。さらに中子筋の末端部は180°フックが望ましい。

##### ③柱梁接合部 WG

過去の日本の地震被害ではあまり見られなかった柱梁接合部の被害が今回の地震ではかなり顕著に見られた。接合部に剪断破壊が生じた時の剪断応力のレベルは決して非常に大きな値ではなく、柱や梁の曲げ耐力時や剪断耐力時の応力レベルとはあまり差が無いことが分かってきた。すなわち、柱や梁の部材断面が小さく現行規定で必要とされる曲げ耐力をもたすために主筋量が多くなっている建物では、曲げ応力による全体崩壊型の形成以前に接合部破壊が生じる可能性が少なくないことが分かった。問題はどの程度小

さいと被害が生じやすくなるかということであるが、一つの目安として柱の長期軸方向力が  $30\text{kgf/cm}^2$  (FC/5~6) 程度以上梁の引張鉄筋が 1.0%以上といった条件が指摘される。又、柱と梁が偏心している接合部分では、接合部耐力に対する偏心の影響が懸念され、被害建築物をみると偏心接合部を持つ建物が多いことが判明されている。→RC 基準改定に新たに柱梁接合部の検討内容がもりこまれた。

#### ④非構造部材 WG

非構造部材としてモデル化された壁は、実際の外力に対して構造部材としての挙動をまったくしないかと言うとそうでもない。RC 壁の場合には、ほとんどすべての壁が地震時には構造部材としての挙動を示し、建物全体の構造性能に関係する。RC 造構造住宅の 2 次壁（非構造部材）H に多くの被害が見られたが、住民には構造部材と非構造部材との被害の区別が難しいことや、補修のための種々の問題で取り壊しになってしまった建物の例もある。改修や取り壊しのための住民の合意にかかる時間と心労などから容認できる建築物の損傷を考えたいわゆる性能設計にまでいかなければならないと思われます。→日本建築センター 剛接架構内の RC 造腰・壁・袖壁等の構造計算上の取扱いについて



#### ◎建築物の稀に発生する地震動について

建築物の地上部分・地下部分が損傷しないこと（補修が必要であるが継続使用が可能である）

#### ◎建築物に極めて稀に発生する地震動について

建築物の地上部分が倒壊・崩壊しないこと（人命保護の立場で建物の崩壊を避ける）



限界耐力の計算

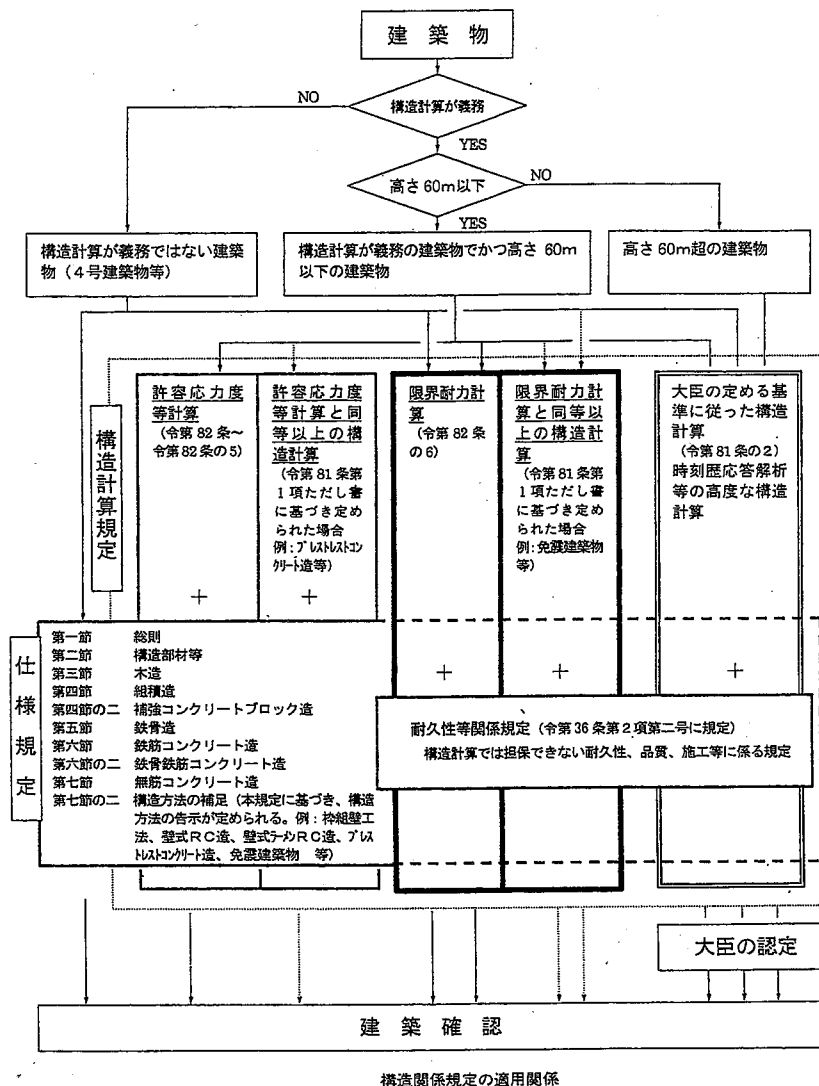
(性能設計)

平成 12 年 6 月に施行された構造方法に関する技術的基準を図-4.1 に示す。<sup>2)</sup>

施行令 82 条の 6 及び関連項目に基づく限界耐力試算の流れを図-4.2 に示す。<sup>3)</sup>

限界耐力計算の流れは、損傷の防止と倒壊・破壊の防止を地震力のみでなく風圧力・積雪荷重に対しても直接検証することになる。図-4.3 に RC 5 階建ての事務所設計例を示し、限界耐力の設計と時刻歴地震応答解析の比較を示した。<sup>3)</sup>

図-4.4~4.9 は図-4.3 設計例における設計諸元である。



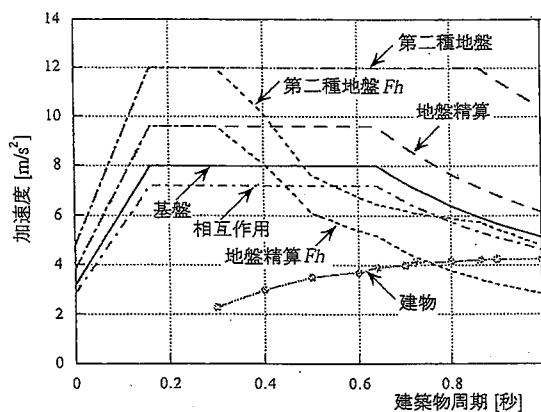
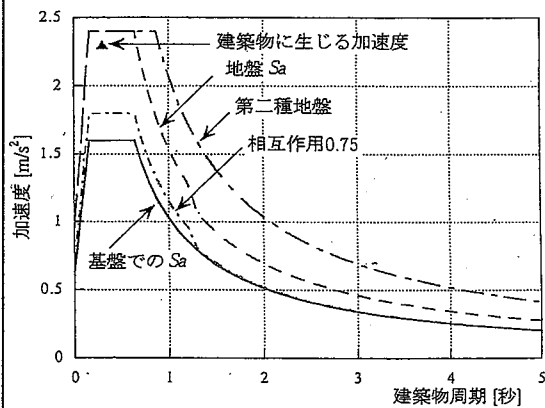
■許容応力度等計算との比較

|                      | 限界耐力計算                                | 許容応力度等計算                         |
|----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| 極めて稀に発生する積雪・暴風に対する検討 | 直接検討<br>終局強度を用いた計算                    | 中程度の積雪・暴風に対する検討から推定              |
| 極めて稀に発生する地震に対する検討    | 直接検討、変形量算定<br>建物の応答値と建物が保有する安全限界値との比較 | 構造形式等により建物の変形量を推測し、推測に基づき必要耐力を算定 |
| 仕様規定の適用              | 耐久性等関係規定のみ適用                          | 令第3章第2節から第7節の2までの仕様規定適用          |
| 建物周期の算定方法            | 建物の変形量に基づき算定                          | 略算法                              |

図-4.1 構造方法に関する技術的基準<sup>2)</sup>

### ■限界耐力計算法の特徴

1. 地震の加速度によって生じる地震力(応答値)を  
応答スペクトルより算出  
(稀に発生する地震、極めて稀に発生する地震)
2. 変形量に見合った建物固有周期から応答値を算出
3. 表層地盤の影響を加速度の増幅率( $G_s$ )で考慮
4. 稀に発生する地震による応答値  $\leq$  損傷限界耐力  
極めて稀に発生する地震による応答値  $\leq$  安全限界耐力



限界耐力計算のスタート

許容応力度による検証(耐震を除く) 令第82条の6第一号

暴風、大雪に対する終局強度による検証 令第82条の6第二号

令第82条の6第三号～第七号

耐震計算関係スタート

令第82条の6第三号

各階に作用する水平力  $<$  各階の損傷限界耐力  
各階の層間変形角  $<$   $1/200$  ( $1/120$ )

損傷限界変位

損傷限界固有周期(平12建告第1457号第1)  
加速度の分布係数(平12建告第1457号第2)  
地盤の増幅係数  $G_s$ (平12建告第1457号第7)

地下部分の設計(短期許容応力度設計) 令第82条の6第四号

各階に作用する水平力  $<$  各階の保有水平耐力 令第82条の6第五号

安全限界変位

安全限界周期(平12建告第1457号第3)  
加速度の分布係数(平12建告第1457号第4)  
地盤の増幅係数  $G_s$ (平12建告第1457号第7)  
加速度の低減(平12建告第1457号第6)

使用上の支障  
外装材等の脱落防止 令第82条の6第六号  
令第82条の6第七号

終了

図-4.2 限界耐力計算の流れ<sup>3)</sup>



用 途：事務所

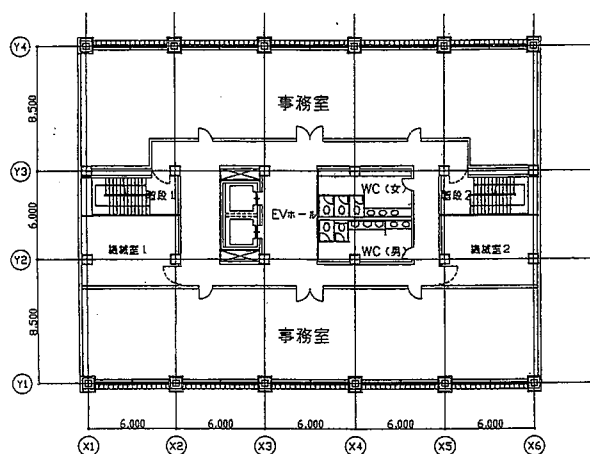
規 模：建築面積 738.5m<sup>2</sup> 延べ面積 5,258.6m<sup>2</sup>

階数 地上5階，地下1階，塔屋1階

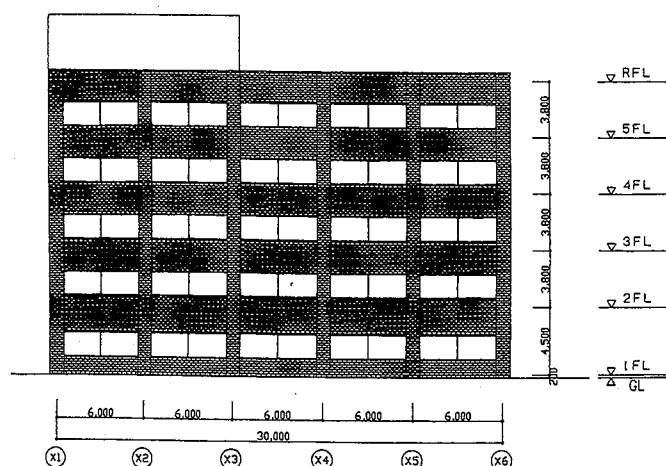
最高高さ 24.0m 軒の高さ 19.9m

仕 上：外部仕上 タイル張り

内部仕上 ALCパネル及び軽鉄下地ボード張り



2階平面図



立面図

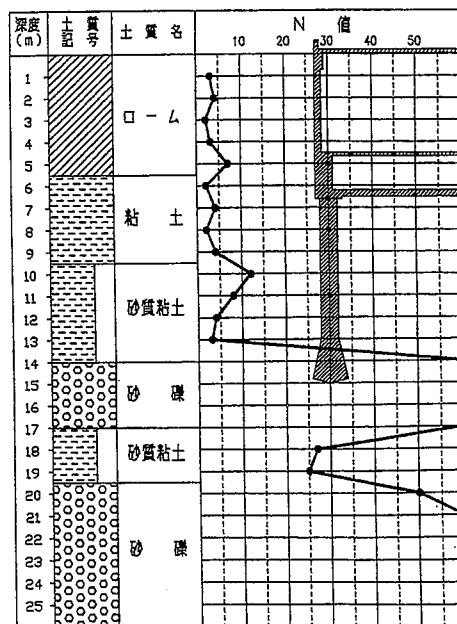
建築平面図及び立面図

構造概要

|      |        |   |
|------|--------|---|
| 基礎構造 | 基礎形式   | 杭基礎（現場打ちコンクリート杭）  |
|      | 許容支持力  | 長期：2,450 (kN/m <sup>2</sup> )，短期：4,900 (kN/m <sup>2</sup> ) |
| 主体構造 | 骨組形式種別 | 短辺方向：鉄筋コンクリート造，耐震壁付ラーメン構造<br>長辺方向：鉄筋コンクリート造，純ラーメン構造         |
|      | 床形式    | 現場打ち鉄筋コンクリートスラブ   |
|      | 非耐力壁   | 内壁 ALCパネル及び軽鉄下地ボード張り  |

使用材料及び許容応力度

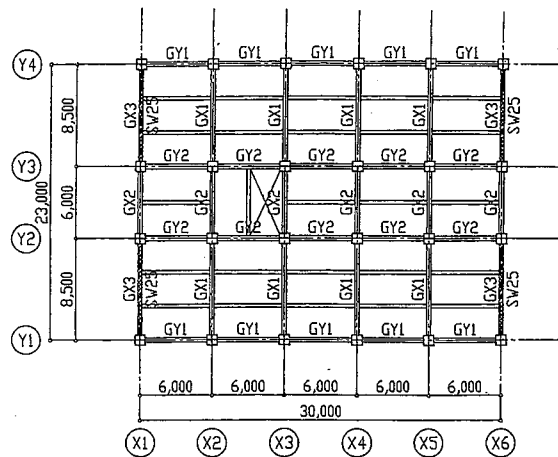
- ・コンクリート 1階立上り以上 普通コンクリート（単位容積重量23kN/m<sup>3</sup>）  
 $F_c = 24\text{N/mm}^2$   
 3階立上り以上 普通コンクリート（単位容積重量23kN/m<sup>3</sup>）  
 $F_c = 21\text{N/mm}^2$
- ・鉄 筋 D19以上 D29以下の異形鉄筋 SD345  
 D16以下の異形鉄筋 SD295A



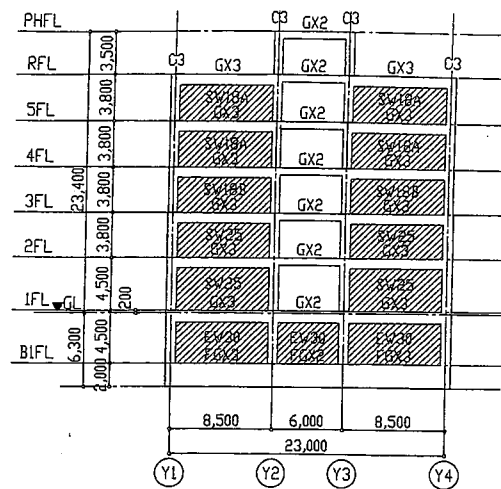
ボーリング柱状図

図-4.3 設計例 RC造5階建事務所<sup>3)</sup>

伏図 軸組図



2階伏図



X<sub>1</sub> 通軸組図

地震時検証のまとめ

|         |     | 短辺方向                | 長辺方向     |
|---------|-----|---------------------|----------|
| 地震時損傷限界 | 保有値 | 全質量 $M$ [ton]       | 4,290    |
|         |     | 損傷限界耐力 $Qd$ [kN]    | 28,434   |
|         |     | ベースシア係数 $C_s$       | 0.68     |
|         |     | 層間変形角               | 最大 1/556 |
|         |     |                     | 平均 1/715 |
|         |     | 有効質量 $M_{ue}$ [ton] | 3,483    |
|         | 必要値 | 有効質量比 $M_{ue}/M$    | 0.81     |
|         |     | 代表変位 $\Delta d$ [m] | 0.021    |
|         |     | 損傷限界固有周期 $Td$ [s]   | 0.32     |
|         |     | 必要損傷限界耐力 $Qdn$ [kN] | 14,944   |
|         |     | ベースシア係数 $C_s$       | 0.36     |
|         |     | 余裕度                 | 1.90     |
| 地震時安全限界 | 保有値 | 全質量 $M$ [ton]       | 4,290    |
|         |     | 安全限界耐力 $Qs$ [kN]    | 51,790   |
|         |     | ベースシア係数 $C_s$       | 1.23     |
|         |     | 層間変形角               | 最大 1/150 |
|         |     |                     | 平均 1/179 |
|         |     | 有効質量 $M_{ue}$ [ton] | 3,538    |
|         | 必要値 | 有効質量比 $M_{ue}/M$    | 0.82     |
|         |     | 代表変位 $\Delta s$ [m] | 0.084    |
|         |     | 安全限界固有周期 $Ts$ [s]   | 0.47     |
|         |     | 必要安全限界耐力 $Qsn$ [kN] | 43,512   |
|         |     | ベースシア係数 $C_s$       | 1.03     |
|         |     | 建物の減衰 $h$           | 0.12     |
|         |     | 加速度低減率 $Fh$         | 0.70     |
|         |     | 余裕度                 | 1.19     |

図-4.4 図-4.3 の設計諸元 (1) <sup>3)</sup>

## 表層地盤の加速度応答スペクトルの設定

平12建告第1457号第7に従って表層地盤の増幅率  $G_s$  の算定のための計算フローを示す。

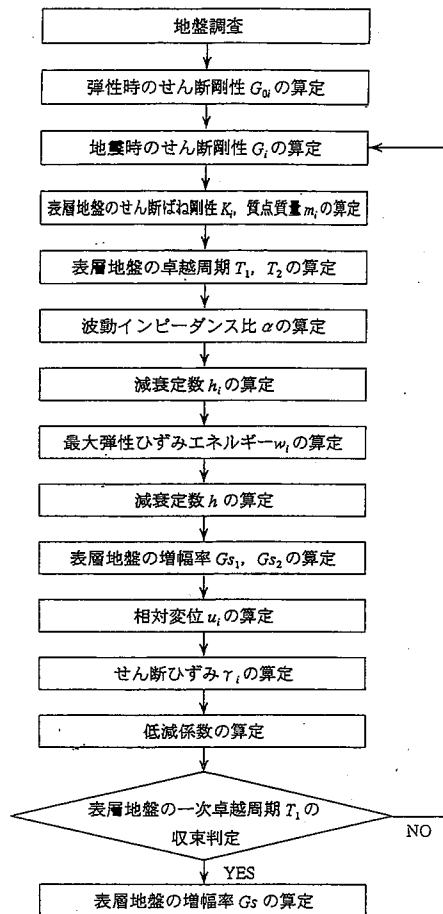


図3.1.1 表層地盤の増幅率  $G_s$  の計算フロー

## 解析モデル

表3.1.1 表層地盤の特性

| 深度(m)     | 層番号<br>$i$ | 層厚<br>$H_i$ (m) | 湿潤密度<br>$\rho_i$ (t/m <sup>3</sup> ) | P波速度<br>$V_{pi}$ (m/s) | S波速度<br>$V_{si}$ (m/s) | 土質  |
|-----------|------------|-----------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|-----|
| 0~5.5     | 1          | 5.5             | 1.4                                  | 360                    | 120                    | 粘性土 |
| 5.5~9.4   | 2          | 3.9             | 1.5                                  | 680                    | 210                    | 粘性土 |
| 9.4~14.1  | 3          | 4.7             | 1.5                                  | 680                    | 230                    | 粘性土 |
| 14.1~17.2 | 4          | 3.1             | 2.0                                  | 1,220                  | 470                    | 砂質土 |
| 17.2~19.6 | 5          | 2.4             | 1.7                                  | 1,220                  | 380                    | 粘性土 |
| 19.6~25.3 | 6          | 5.7             | 2.1                                  | 2,000                  | 590                    | 砂質土 |

表3.1.2 表層地盤の多質点モデル化

| 層番号<br>$i$ | 弾性せん断剛性<br>$G_{0i}$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 低減係数  | せん断剛性<br>$G_i$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断ばね剛性<br>$K_i$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 質点質量<br>$m_i$ (t/m <sup>2</sup> ) |
|------------|--|-------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1          | 20,160                                   | 1.000 | 20,160                              | 3,665                                 | 3.9                               |
| 2          | 66,150                                   | 1.000 | 66,150                              | 16,962                                | 6.8                               |
| 3          | 79,350                                   | 1.000 | 79,350                              | 16,883                                | 6.5                               |
| 4          | 441,800                                  | 1.000 | 441,800                             | 142,516                               | 6.6                               |
| 5          | 245,480                                  | 1.000 | 245,480                             | 102,283                               | 5.1                               |
| 6          | 731,010                                  | 1.000 | 731,010                             | 2,131,164                             | 8.0                               |

図-4.5 図-4.3 の設計諸元 (2) <sup>3)</sup>

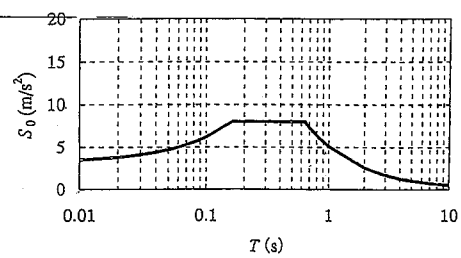
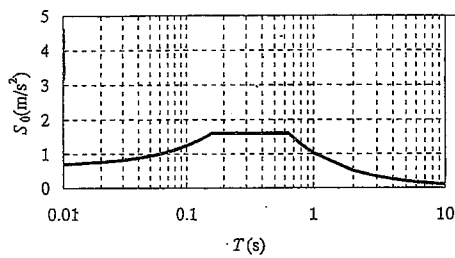
表層地盤の増幅率  $G_s$  の算出

損傷限界時の表層地盤の増幅率

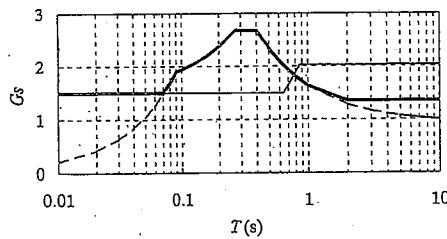
| 建築物の固有周期             | $G_s$           | 下限値  |
|----------------------|-----------------|------|
| $T \leq 0.09$        | $23.6T$         | 1.5  |
| $0.09 < T \leq 0.27$ | $5.67T + 0.94$  | 1.5  |
| $0.27 < T \leq 0.40$ | 2.68            | 1.5  |
| $0.40 < T$           | $0.62/T + 0.94$ | 1.35 |

安全限界時の表層地盤の増幅率

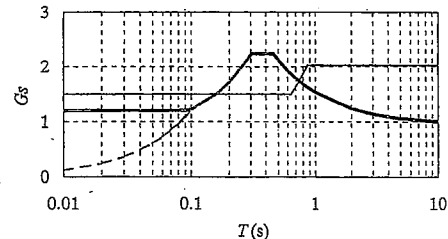
| 建築物の固有周期             | $G_s$           | 下限値 |
|----------------------|-----------------|-----|
| $T \leq 0.10$        | $12.06T$        | 1.2 |
| $0.10 < T \leq 0.30$ | $4.99T + 0.72$  | 1.2 |
| $0.30 < T \leq 0.46$ | 2.24            | 1.2 |
| $0.46 < T$           | $0.59/T + 0.94$ | 1.0 |



工学的基礎での5%減衰の加速度応答スペクトル



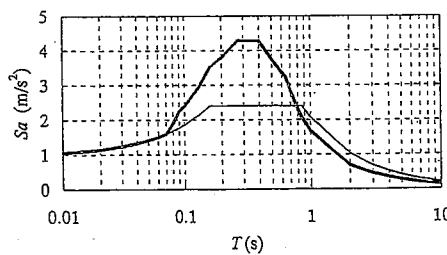
工学的基礎での5%減衰の加速度応答スペクトル



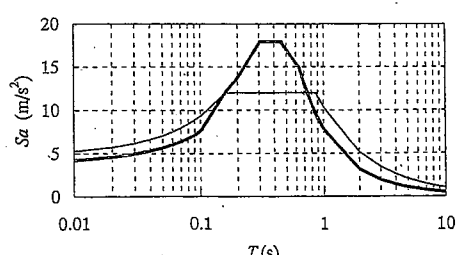
--- 第七. 一(ろ) ——— 第七. 一 ——— 第七. 二(第二種地盤)

--- 第七. 一(ろ) ——— 第七. 一 ——— 第七. 二(第二種地盤)

表層地盤の増幅率



地震時の地盤の増幅率



—— 第七. 一 ——— 第七. 二(第二種地盤)

—— 第七. 一 ——— 第七. 二(第二種地盤)

増幅後の5%減衰の加速度応答スペクトル

増幅後の5%減衰の加速度応答スペクトル

損傷限界時

安全限界時

図-4.6 図-4.3 の設計諸元 (3) <sup>3)</sup>

損傷限界時における時刻歴地震応答解析との比較

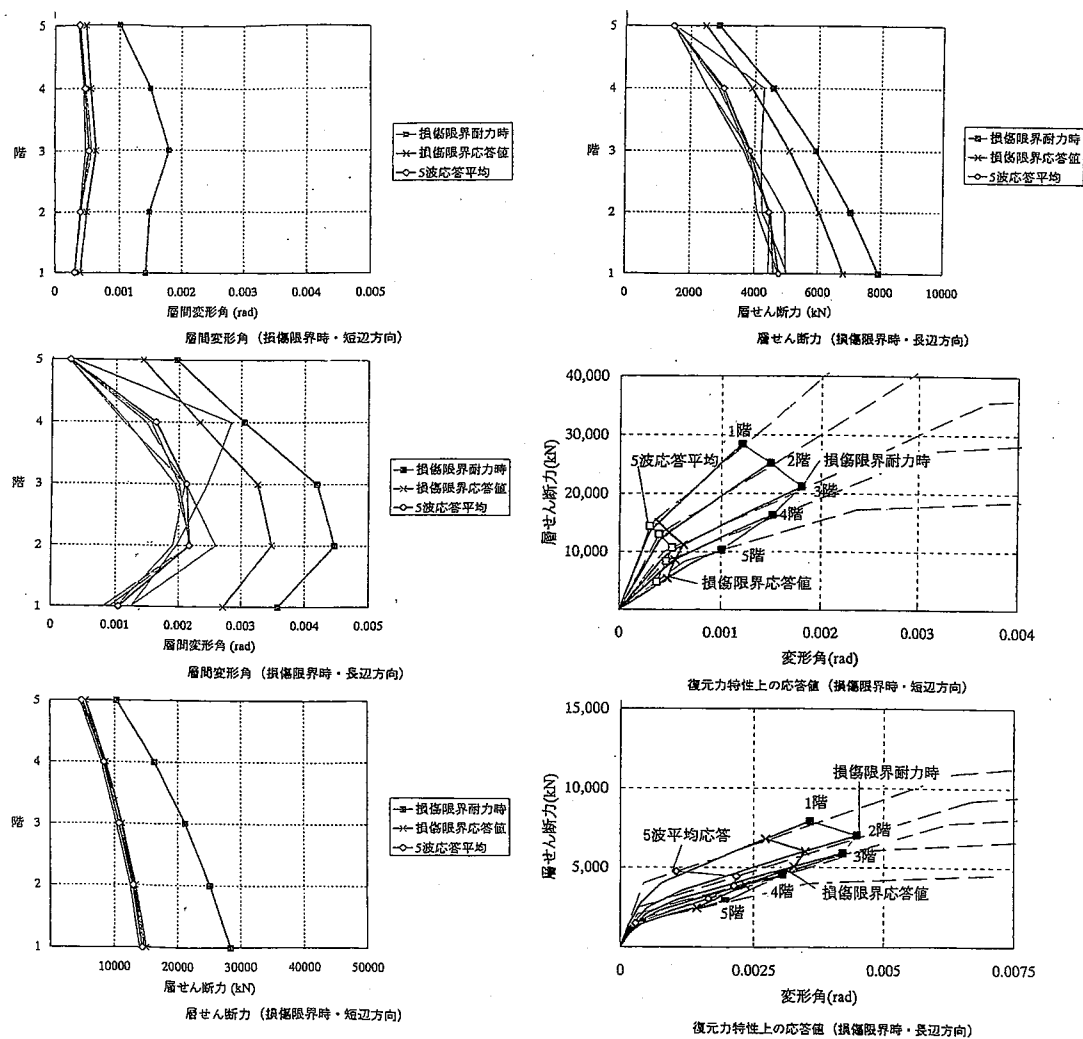


図-4.7 図-4.3 の設計諸元 (4) <sup>3)</sup>

安全限界時における時刻歴地震応答解析との比較

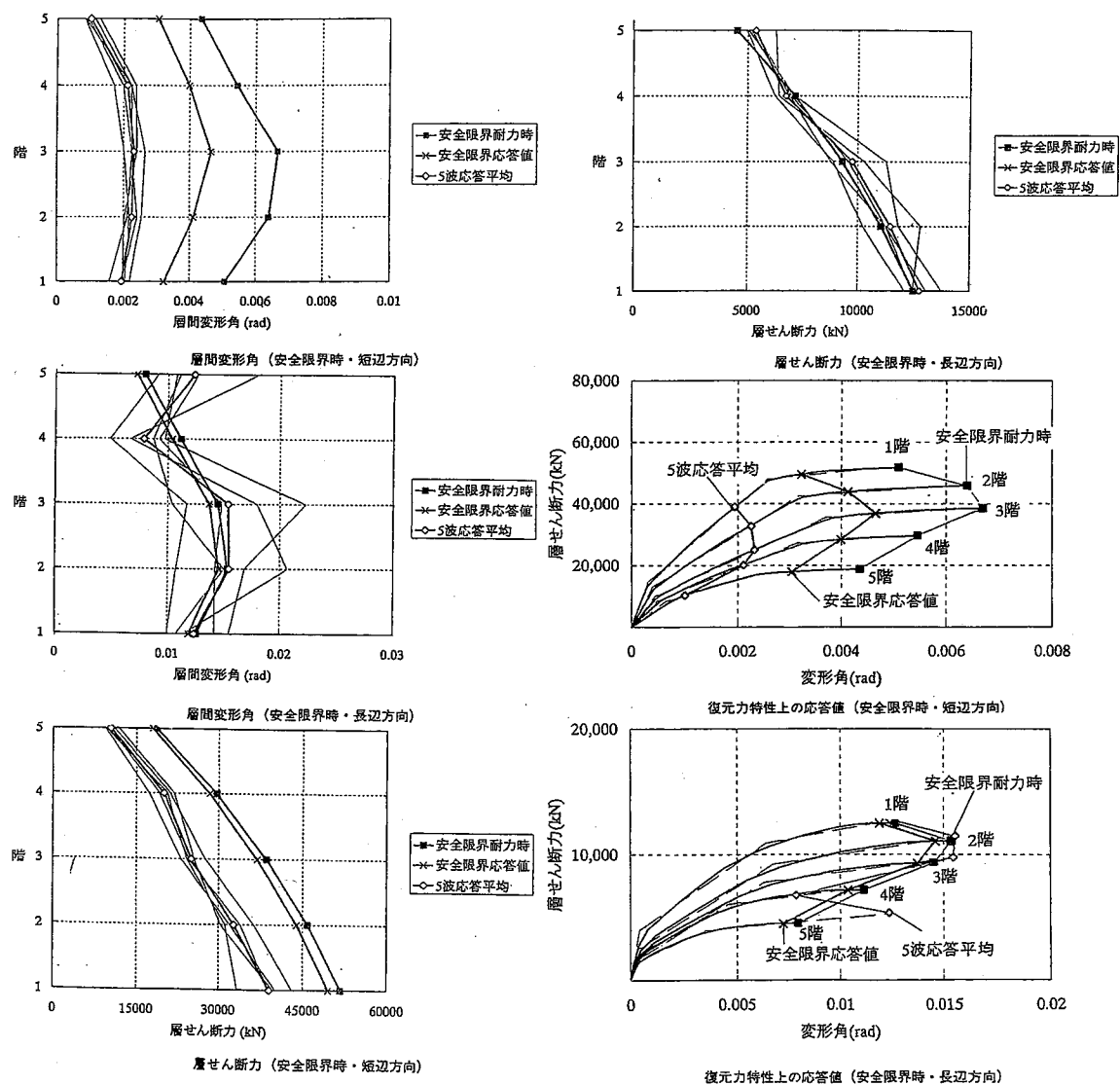


図-4.8 図-4.3 の設計諸元 (5) <sup>3)</sup>

# 阪神淡路大震災の被害状況

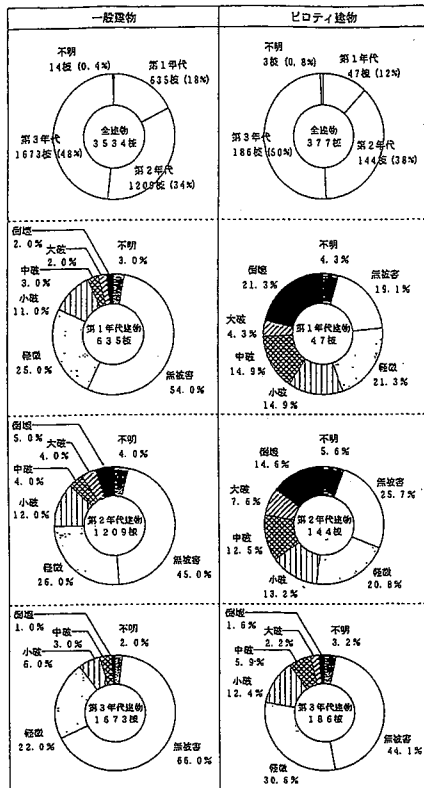


表-1 RC系の一般建物とプレキャスト建物の年代区分被害率<sup>1)</sup>

# 神戸の地盤物性値

表-2 S波速度換算式係数一覧<sup>4)</sup>

| S波速度 (m/sec) = A × N <sup>0.5</sup> |       | 今井常雄氏らの換算式 |       | 神戸市街地 |       |
|-------------------------------------|-------|------------|-------|-------|-------|
|                                     |       | A          | B     | A     | B     |
| Ac                                  | 沖積粘性土 | 107        | 0.274 | 87    | 0.372 |
| As                                  | 沖積砂質土 | 81.8       | 0.292 | 106   | 0.231 |
| Ag                                  | 沖積礫質土 | 75.4       | 0.351 | 103   | 0.205 |
| Dc                                  | 段丘粘性土 | 128        | 0.257 | 102   | 0.362 |
| Ds                                  | 段丘砂質土 | 110        | 0.285 | 175   | 0.171 |
| Og                                  | 段丘礫質土 | 136        | 0.246 | 241   | 0.099 |
| Ma13                                | 沖積粘性土 | —          | —     | 150   | 0.157 |
| Ma12                                | 洪積粘性土 | —          | —     | 183   | 0.142 |
| F                                   | 盛土・埋土 | 91.7       | 0.257 | 141   | 0.129 |

注) F (盛土・埋土) における今井常雄氏らの換算式の値は、文献<sup>15)</sup>中の、盛土 (砂質土) : Fsの値を示している。

表-3 地層毎の平均密度値と入力密度値<sup>4)</sup>

| 地層名  | 平均密度値 (t/m <sup>3</sup> ) | 入力密度値 (t/m <sup>3</sup> ) |
|------|---------------------------|---------------------------|
| Ac   | 1.71                      | 1.70                      |
| As   | 1.83                      | 1.80                      |
| Ag   | 1.86                      | 1.85                      |
| Dc   | 1.84                      | 1.85                      |
| Ds   | 1.96                      | 1.95                      |
| Dg   | 2.02                      | 2.00                      |
| Ma13 | 1.66                      | 1.65                      |
| Ma12 | 1.71                      | 1.70                      |
| F    | 1.84                      | 1.85                      |

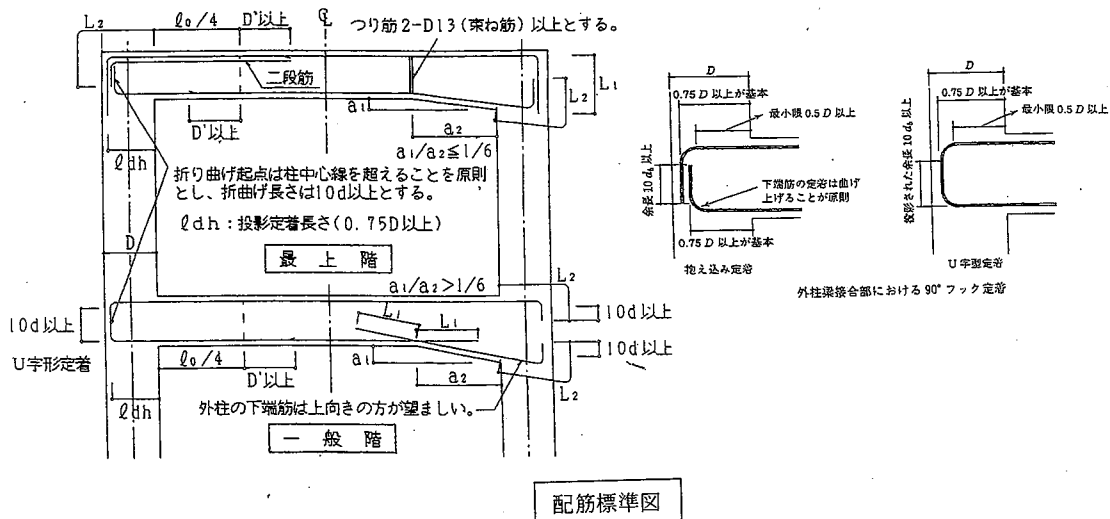


図-4.9 図-4.3の設計諸元 (6)<sup>3)</sup>

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：阪神・淡路大震災と今後のRC構造設計。
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課・日本建築主事会議・(財)日本建築センター編：2001年版建築物の構造関係技術基準解説書。
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課・日本建築主事会議・(財)日本建築センター編：2001年版限界耐力計算法の計算例とその解説。
- 4) 神戸の地盤研究会。



## 第二編

### 液状化分科会からの報告

#### 目 次

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| 1. 神戸の地盤構成                 | ( 1 )  |
| 1.1 概 要                    | ( 1 )  |
| 1.2 表層地盤                   | ( 8 )  |
| 1.3 地下水の分布                 | ( 25 ) |
| 1.3.1 グリッド内の地下水の決定         | ( 25 ) |
| 1.3.2 地下水位変動幅について          | ( 27 ) |
| 1.3.3 地下水位変動と液状化について       | ( 27 ) |
| 1.4 表層地盤の工学的特性             | ( 30 ) |
| 2. 液状化の検討                  | ( 37 ) |
| 2.1 各種液状化評価の手法について         | ( 38 ) |
| 2.1.1 地盤内液状化強度の推定法         | ( 38 ) |
| 2.1.2 地盤内地震動分布の推定法         | ( 41 ) |
| 2.1.3 液状化分科会の地震動応答解析法      | ( 42 ) |
| 2.2 液状化危険度予測の事例            | ( 44 ) |
| 2.3 計算結果                   | ( 49 ) |
| 2.4 液状化解析結果の評価と問題点         | ( 59 ) |
| 2.4.1 SASW 法による原位置せん断波速度調査 | ( 59 ) |
| 2.4.2 液状化解析の問題点            | ( 61 ) |
| 3. 液状化解析のまとめ               | ( 62 ) |

## 「第二編 液状化分科会からの報告」執筆担当一覧

### 1. 神戸の地盤構成

- 1.1 末廣 匡基 (株)阪神コンサルタンツ 技術開発部 副部長
- 1.2 (1) 武藤 淳 (株)応用地学研究所 取締役 技術部長
- (2) 古田 芳彦 中央開発(株) 大阪事業部地盤技術部長
- (3) 北川 義治 川崎地質(株) 関西支社技術部技術課長
- 1.3 徳山 益成 (株)応用地学研究所 技術部地質調査課
- 1.4 八谷 誠 中央復建コンサルタンツ(株) 測量・地盤グループ統括リーダー
- 榎本 亮二 川崎地質(株) 関西支社技術部防災設計グループ

### 2. 液状化の検討

- 2.1 田中 泰雄 神戸大学都市安全研究センター教授
- 2.2 山本 浩司 (財)地域 地盤 環境 研究所 技術コンサルタント部担当部長
- 2.3 白川 和靖 (株)阪神コンサルタンツ 地震防災部係長
- 岸田 浩 中央開発(株) 地盤技術部副長
- 2.4 田中 泰雄 神戸大学都市安全研究センター教授

### 3. 液状化解析のまとめ

- 田中 泰雄 神戸大学都市安全研究センター教授

## 1. 神戸の地盤構成

### 1.1 概 要

神戸は大阪湾と六甲山地にはさまれた、東西に細長く発達した港湾都市である。市街地は、六甲山地からはき出されてくる土砂が形成する扇状地の上に建設されてきたが、昭和13年災害をはじめとして、これまでに幾多の土砂災害を受けてきている。その凄まじさは、文豪谷崎潤一郎によって「細雪」に詳しく表現されている。このように、山から流れ出た水と土砂は、一気に流れ下って海にまで達する。この土砂こそが、神戸の地盤を作ってきた堆積物となっている。

一方、海面は約10万年を周期として昇降してきたことが、これまでの天文および地質学的な研究によって明らかにされている。そして、海退時には大阪湾が干上がった状態となったり、海進時には、市街地の多くの部分が水没した証拠が堆積物に残されている。とくに、水没した地域の海底には、粘土が堆積していたことがわかっている。また、波打ち際には、明治時代の神戸の海岸線に広がっていた白砂が堆積していたことが容易に推定される。さらに、六甲山地の南縁を走る断層や、市街地の地下深くに埋もれている伏在断層などの長年の活動によって、地層が堆積した後に変形してきたことも、反射法地震探査をはじめとするこれまでの各種の調査によって明らかにされている。

このように、神戸の地盤は、海と山の両方の作用によって粘土、砂、砂礫などが繰り返し複雑に堆積して形成されてきていることがわかってきた。その地質構成をまとめて示すと図-1.1.1のようである。

| 地質時代                       |             | 地層区分                                 |             | 単層区分<br>(海成層)   | 岩 相  | 層厚<br>m | 堆積環境<br>(堆積化石) | 火山灰層           | 花 粉 帯<br>(花粉化石) | 年 代<br>( )は推定          |           |
|----------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------|---|--|---------|----------------|----------------|-----------------|------------------------|-----------|
| 新<br>生<br>代<br>第<br>四<br>紀 | 完<br>新<br>世 | 完<br>新<br>統                          |             | 沿岸部では中部に<br>海成(粘土)層を挟<br>在する。神戸市内<br>では礫層主体となる                            | 0<br>?<br>20   | 一部海成    |                |                | P1帯             | 3,230±100<br>4,080±100 |           |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                |                |                 | 8,710±170<br>(10,000)  |           |
|                            | 新<br>期      | 後<br>期                               | 低位段丘<br>堆積層 | 沿岸部ではごく薄い<br>か、欠如している場<br>合がある。全体に礫<br>質層を主体とし、淡<br>水成の粘土、腐植<br>を挟在する     | 0<br>?<br>26   |         |                | AT             | P2帯             | >34,500<br>>36,200     |           |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                |                |                 |                        | (70,000)  |
|                            |             | 中<br>位<br>段<br>丘                     | 堆積層         | 沿岸～低地部では<br>中部に海成層(Ma12<br>層)を挟在する。上部<br>と下部は淡水成の<br>堆積物で、層厚・岩<br>相変化が激しい | 0<br>?<br>24   | 海 成     |                | V1, V2         | P3帯             | (130,000)              |           |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                | J-a地点<br>K-a地点 | P4帯             |                        |           |
|                            |             | 高<br>位<br>段<br>丘<br>堆<br>積<br>層<br>? |             | Ma11(3)層  | 3層の汽水～海成層<br>を挟在し、全体として<br>砂、礫層が卓越する<br>Ma11(3)層は場所<br>によって欠如したり、<br>淡水成層となる | 25<br>+ |                |                | V3              | P5帯                    |           |
|                            |             |                                      |             | Ma11(2)層  |  |         |                |                |                 | P7帯                    |           |
|                            |             |                                      |             | Ma11 層  |  |         | 海 成            |                | G9              | P9帯                    |           |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                |                |                 |                        |           |
|                            | 中<br>期      | 大<br>阪<br>層<br>群                     | 上<br>部      | Ma10 層  |  |         | 海 成            |                |                 | P11帯                   | (270,000) |
|                            |             |                                      |             | Ma 9 層  | 大阪層群上部の海<br>成層を5層挟在する<br>西宮～芦屋の丘陵<br>に近接した低地の<br>地下で浅い深度に<br>分布する            | 30      | 一部海成           |                |                 | P13帯                   |           |
|                            |             |                                      |             | Ma 8 層  | 西宮市神原のMa9<br>層は特徴が明瞭で<br>鍵層として注目され<br>る                                      | +       | 海 成            |                |                 | P15帯                   |           |
|                            |             |                                      |             | Ma 7 層  |  |         | 海 成            |                |                 | P17帯                   |           |
|                            |             |                                      |             | Ma 6 層  |  |         | 海 成            |                |                 | P19帯                   | (450,000) |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                |                |                 |                        |           |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                |                |                 |                        |           |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                |                |                 |                        |           |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                |                |                 |                        |           |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                |                |                 |                        |           |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                |                |                 |                        |           |
|                            |             |                                      |             |   |  |         |                |                |                 |                        |           |

図-1.1.1 阪神地域における地下地質層序<sup>1)</sup>

図-1.1.1 に示されるように、神戸の地盤は主として沖積層の大部分を占める完新統(1万年未満に形成された地層)と、低位～高位段丘堆積層よりなり、その下位に大阪層群に属する地層が分布する。これらの地層は、砂礫、砂、粘土などの互層で構成され、まれに火山灰層が挟まれている。また、粘土層にはMa番号が付けられた海成粘土層が確認されており、地層の連続性を追跡する上で重要な地層となっている。

以下では、おもに「神戸JIBANKUN」に収められているボーリングデータをもとに、地質想定断面図を作成し、神戸の地盤構成を概観する。作成した断面図の位置は、図-1.1.2に示すとおりであり、東西4断面、南北3断面としている。

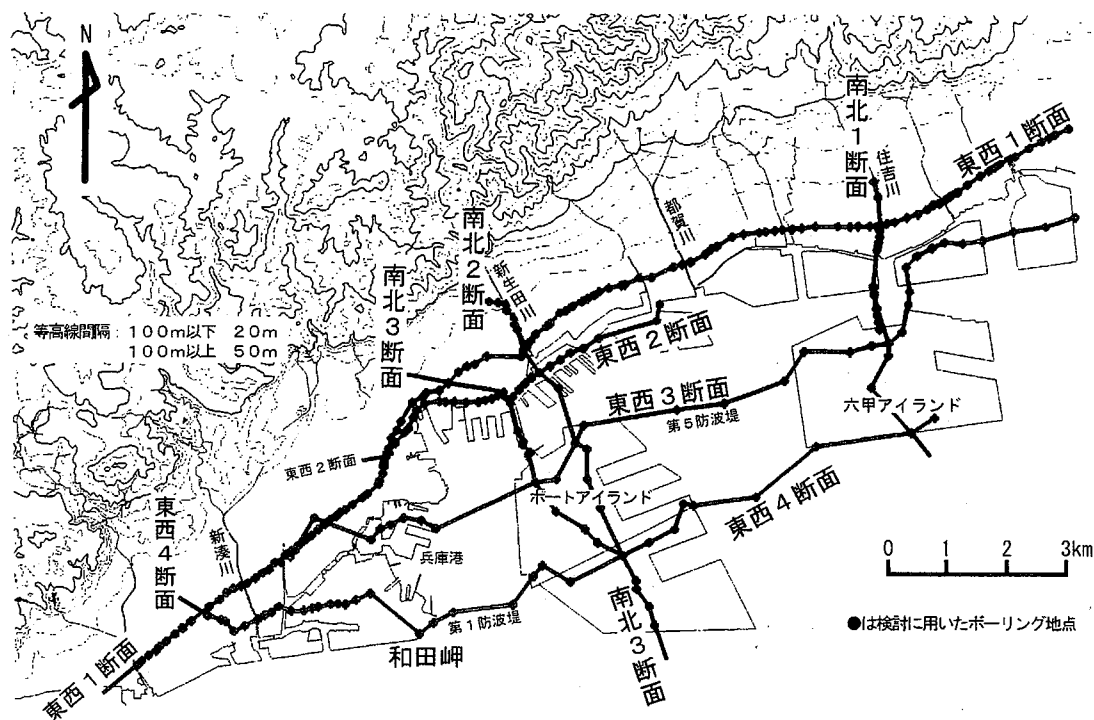


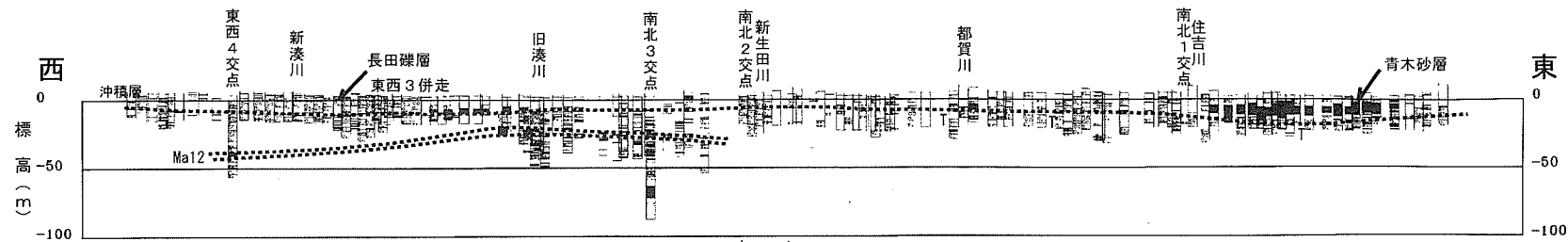
図-1.1.2 地質想定断面位置図

なお、図に示した地質柱状図は、海域における堆積の証拠となる貝殻片を混入する粘土や砂などの地層を黒塗りとして表現し、砂礫層を○記号として表現している。したがって、柱状図の無印の部分は、あまり特徴を持たない砂、シルト、粘土などとなっている。柱状図としては、完全な表現がされていないが、地層の連続性や地質構造を明確にするため、このように表現した。

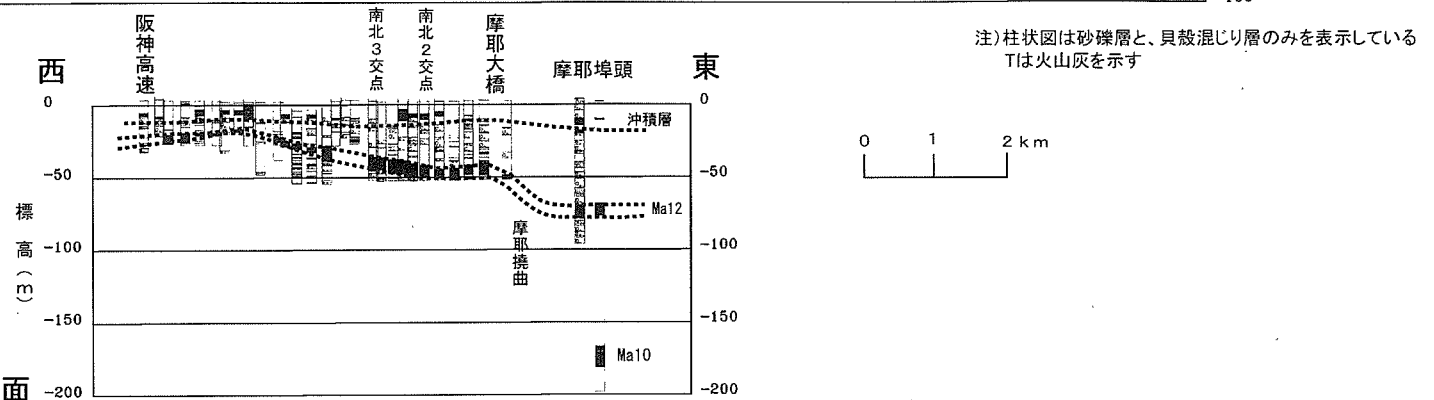
図-1.1.3、図-1.1.4 に作成した地質想定断面図を示し、これらの断面図をもとに地盤の特徴を以下にまとめる。

最上位の沖積層は、陸側から海側にかけて層厚を増すとともに、海成粘土層(Ma13)も同様に厚く堆積していることがわかる。沖積層は最終氷期以降における約2万年前よりも新しい時代の堆積物としており、沖積粘土層(Ma13)の直下付近を沖積層の基底としている。まれに、約24000年前に噴出したAT火山灰に対比できると考えられる火山灰(断面図中に示したT記号)が、ボーリング調査によっても確認されており、沖積層の基底を推定する上での鍵層とした。また、第2章において液状化検討の対象とした地層は、東西1断面の東部に示した青木砂層や、西部の長田礫層分布地域における沖積砂層などである。

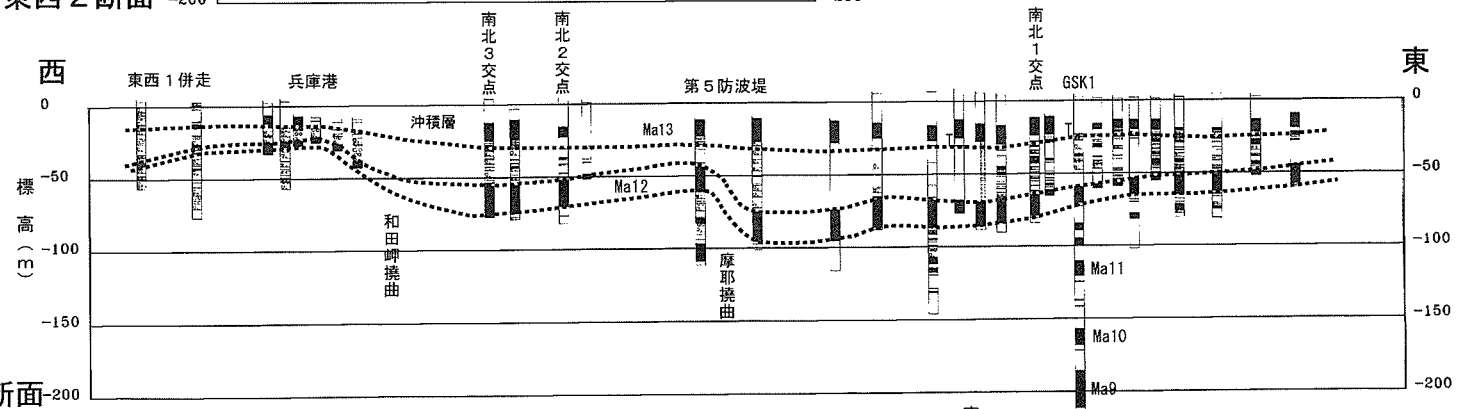
沖積層の下位に分布する段丘堆積層のうち、中位段丘堆積層に属する海成粘土層(Ma12)は、調査対象地域においておおむね追跡される。その深度分布より把握される地質構造としては、和田岬断層と



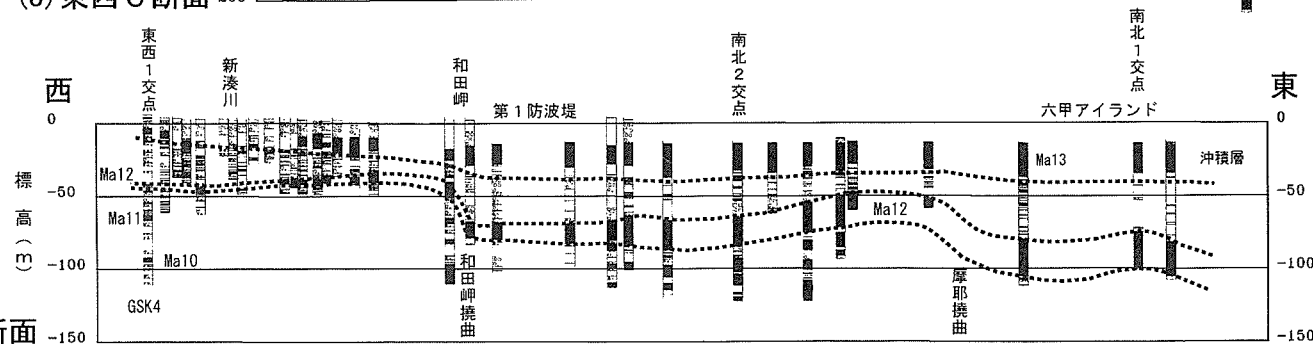
(1) 東西 1 断面



(2) 東西 2 断面

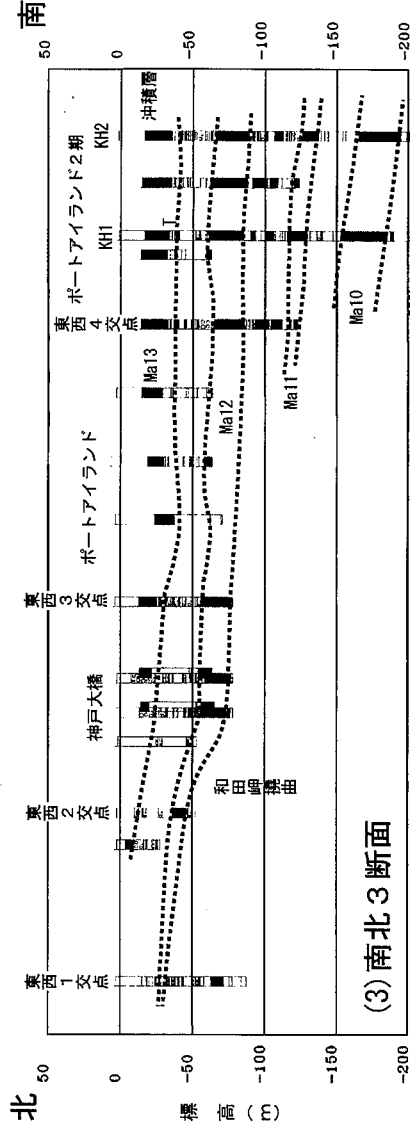
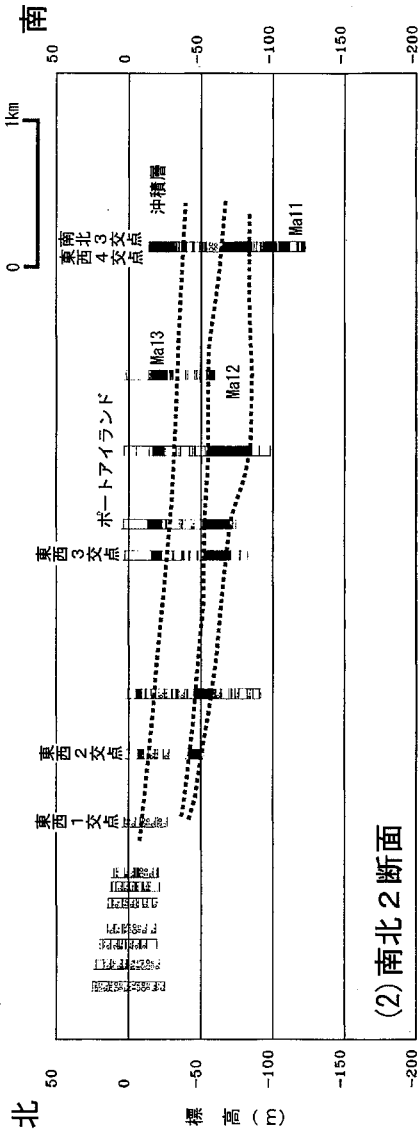
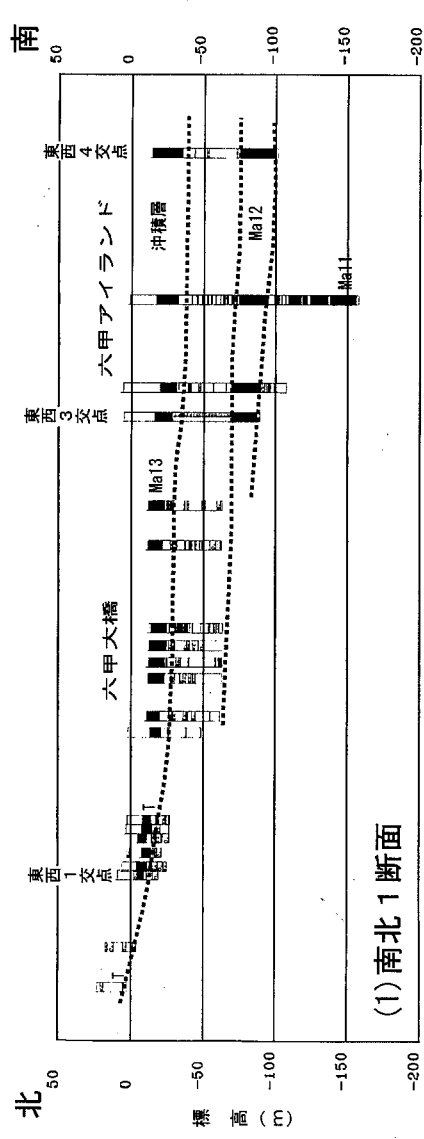


(3) 東西 3 断面



(4) 東西 4 断面

図-1.1.3 地質想定断面図〔東西断面〕



注) 柱状図は砂礫層と、貝殻混じり層のみを表示している  
Tは火山灰を示す

図-1.1.4 地質想定断面図 [南北断面]

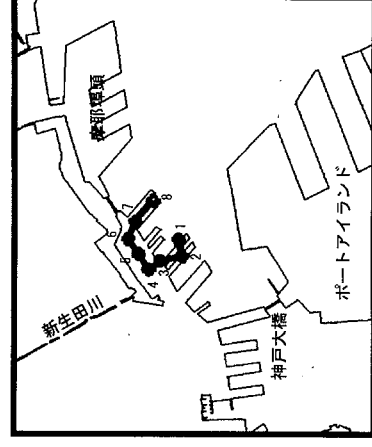
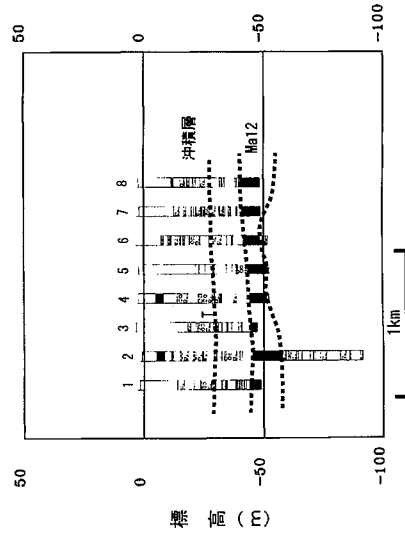


図-1.1.5 地質想定断面図 [第6～8突堤断面]

摩耶断層によって変形した地層の撓曲構造が明らかである。

和田岬断層は、図-1.1.3 の東西 3、4 断面および図-1.1.4 の南北 3 断面に示すように、和田岬の先端付近から兵庫港付近を通過して北東進すると推定される。その延長は、反射法探査によって新生田川河口の南側を通過すると推定されているが<sup>2)</sup>、さらにその延長は必ずしも明確に追跡されているわけではないようである。とくに、反射法探査によって地層の変形が推定されている第 6 突堤北部には、図-1.1.3 の東西 2 断面および図-1.1.5 に示すように、とくに地層(Ma12)の明確な変形は認められず、より北側を通過するか、あるいは断層による地盤表層部における変形は生じていない可能性があるといえる。

一方、摩耶断層による鉛直変位は、図-1.1.3 の東西 2～4 断面に示すように、六甲アイランド南西部海域から第 5 防波堤を通過して北西進し、摩耶大橋付近まで追跡できると推定される。とくに、摩耶大橋付近に見られる海成粘土層(Ma12)の鉛直変位は、地質調査所が実施した GS-6 測線<sup>3)</sup>の西端部に見られた撓曲の位置と一致する。また、撓曲の上下盤における海成粘土層(Ma12)の分布深度の整合性を考慮すると、東西 2 断面の摩耶大橋付近に見られる撓曲は、和田岬撓曲の延長ではなく、東西 3 断面の第 5 防波堤に見られた摩耶撓曲の延長と推定される。

以上より、和田岬断層と摩耶断層による撓曲は、図-1.1.6 に示すように連続する可能性があると考えられる。これら 2 断層は、いずれも大阪湾を南北に縦断する大阪湾断層の北部における延長と考えられており<sup>3)</sup>、神戸港域から神戸市街地域の地盤構造を規制する地質構造である。今後、地下深部における地質構造と併せて、さらに検討を加える必要があると考えられる。

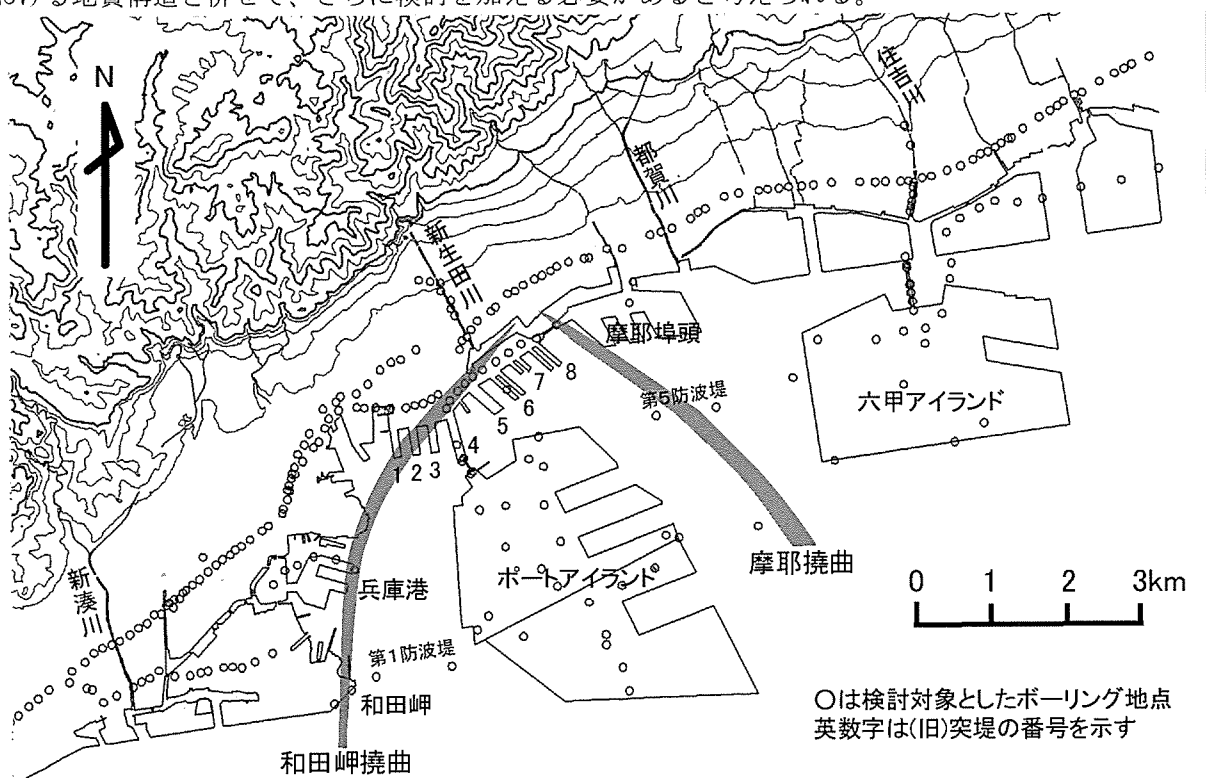


図-1.1.6 和田岬撓曲と摩耶撓曲の地盤表層部における変形帯の連続性

#### 参考文献

- 1) 建設省近畿地方建設局：大阪・兵庫地域の地質構造特性調査業務概要版。建設省，59p. 1997.
- 2) 関西地盤情報活用協議会地盤研究委員会編：新関西地盤。関西地盤情報活用協議会，270p. 1998.
- 3) 横倉隆伸ほか：神戸・芦屋周辺地域における反射法深部構造探査。地質調査所月報，Vol. 50，No. 4，pp. 245～267. 1999.



## 1.2 表層地盤

芦屋川から須磨に至る六甲山南縁には神戸市街地を含む細長い平地部が約 20 km 続いている。

本節で扱う表層地盤としては基本的に Ma12 以浅の地層が対象で、中でも地震時に液状化をきたし、また振動の増幅にも大きく関わっている沖積砂層の分布特性について検討を加えた。

神戸市街地表層地盤の特徴として、特に内陸部では新しい時代の扇状地性の砂礫層が卓越分布するが、後背地の地質や地形あるいは海域環境により特徴的な地層の分布が見られる地域もある。

ここでは、東部（東灘区）、中部（中央区）、西部（兵庫区～長田区）の地域についてそれぞれ浅層地盤の成因、特性、分布等について述べる。

### (1) 東部（東灘区）

今回の検討区域は住吉川河口部の住吉浜町付近を基点に東側へ約 2.3 km、北側へ約 1.9 km の範囲を対象とした。

#### [地層構成]

南北断面を図-1.2.5～図-1.2.7 に、魚崎中町付近を通る東西断面を図-1.2.8 に示した。これによると海性の沖積粘土層 (Ma13) の内陸側への分布は阪神電鉄以北ではほとんど見られない。また海成の砂層も JR 線以南（沿岸線より概ね 1 km の範囲）に限られている。一方、東西方向には急激に層相の変化をきたす区間はない。

大略の層順は上位より盛土（海域は埋立土）、扇状地性砂礫層、海浜性砂層、沖積粘土 (Ma13)、沖積下部砂層、洪積砂礫層と続く。この内、当地域は海浜性の砂層の分布が他地域に比べ明瞭で、住吉川から東の芦屋川付近までの限られた区間に分布する比較的淘汰された砂層（断面図の As1(上)）が特徴的である。

#### [海浜性砂層の特性]

#### <成因>

この砂層は青木砂層<sup>1)</sup>と称され、縄文海進の高面海期の後、海面が少し下がった時期、住吉川と芦屋川に沿う扇状地の後背低地に当たる汀線付近に形成された砂堆で沖合部にはほとんど伸びては分布しない。海域から六甲アイランド、魚崎浜に厚く分布する沖積粘土層 (Ma13) と同時異相の関係と見られており旧海岸付近を境に砂層に遷移している<sup>2)</sup>。

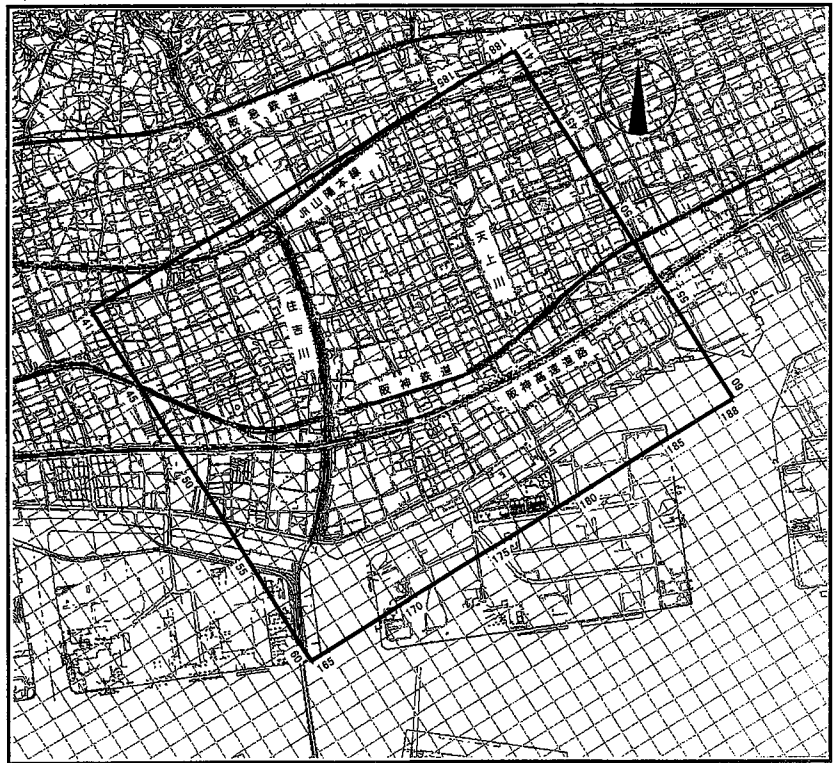


図-1.2.1 断面検討範囲図

### <分布範囲>

海岸付近では Ma13 の上位に分布しその上面は概ね T.P-1m でほぼ水平を呈し、また少し内陸に入った国道 43 号線付近ではその下端は T.P-12m 程度にある。北側は阪神電鉄より少し北の地形的段差の見られる付近から海側へは魚崎浜付近までに見られる。また東西方向では、若干東側に層厚を増すようであるが今回の検討区間で見ると限りほぼ一定で比較的安定している。

### <緊密度>

N 値の平面的な分布は後節 (1.4) で示されている。傾向としては、阪神高速道路付近を境に北側は  $N=20\sim40$  回を示し沖積砂層としては比較的高い緊密度を有しているのに対し、南側は 15 回以下がほとんどで、所によっては 10 回以下の緩いゾーンが見られる。

### <粒度特性>

図-1.2.2、図-1.2.3 に住吉川左右岸域に分布する砂層に分類されるものの粒度の集積図<sup>3)</sup>を示す。

左岸側では  $D_{50}$  が概ね 0.3 mm 付近に集中しているのに対し右岸側では 0.1~0.7 mm の範囲でばらついている。また、細粒分の含有を見ても左岸側は 10~30% の範囲に卓越するが、右岸側は 30% を超えるものも多く見られる。ただ、全体的に見た場合は均等粒度の砂が卓越していると言えよう。

### [地盤特性と液状化]

#### ①地下水位

検討地域内における地下水分布を標高で表したものを図-1.2.4 に示す。地下水位は住吉川に沿った部分および旧河川の分布していた東側の地域が高く、全体としては南より北側が浅い傾向を示す。

#### ②地表面加速度

後の第 2 章に示されている地表面加速度を見れば、検討区間（阪神電車の北 300m から南側）は南

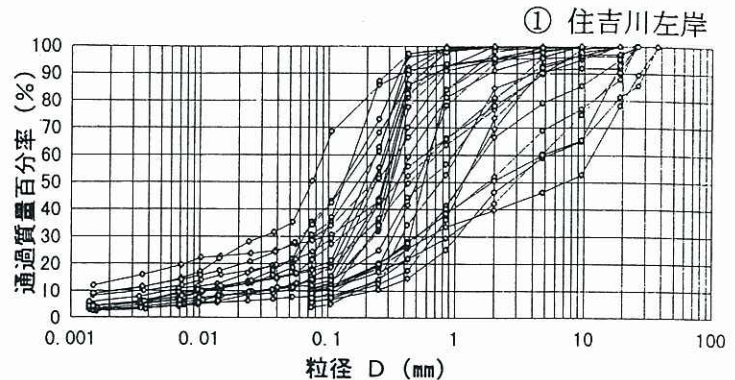


図-1.2.2 住吉川左岸 As 層粒径分布図

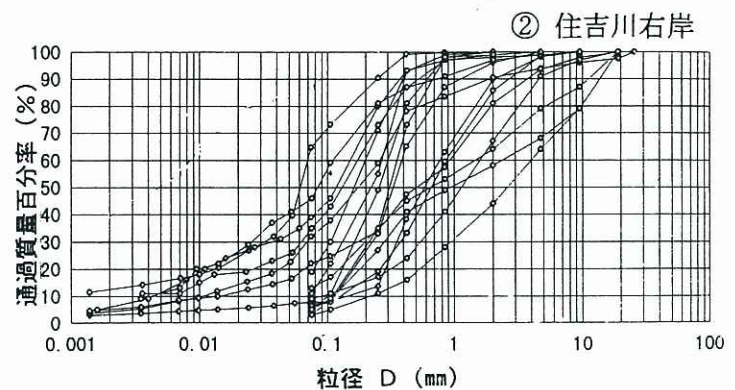


図-1.2.3 住吉川右岸 As 層粒径分布図

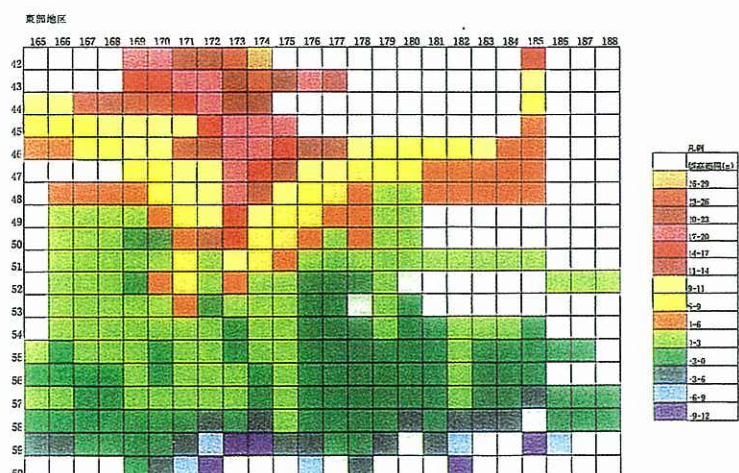


図-1.2.4 東部標高地下水位図

の沿岸域に比べ北側が約2倍大きい。

### ③PL 値および液状化（噴砂）確認区域

PL 値は沿岸部では大きく内陸側で極端に小さくなっている。一方、噴砂も PL 値に概ね一致する形で沿岸部および埋め立て地に多く確認されているが（主に人工埋め立て土）、阪神高速道路以北の内陸部ではほとんど確認されていない。（国道 2 号線沿いの神社の旧井戸跡地下に液状化痕跡が確認されているが、当時は地表部に近く土被りがわずかであったと思われる。）

内陸部は地下水も高く加速度も大きく液状化をきたす条件が揃っているにもかかわらず液状化が生じにくかったことは、対象砂層上の土被り厚が 5m 以上あり N 値も高かったためと考えられる。これに対し沿岸部での噴砂は主に埋立層が多かったようであるが、住吉川河口付近の土被りが薄く N 値の低いゾーンの噴砂は（55-172、172）青木砂層が液状化したと考えられる。

### 参考文献

- 1) 関西地盤情報活用協議会：新関西地盤—神戸および阪神間—，1998
- 2) 藤田和夫・笠間太郎（地質調査所）：地域地質研究報告，神戸地域の地質，1983
- 3) 神戸市・（財）建設工学研究所：阪神・淡路大震災と神戸の地盤，1999

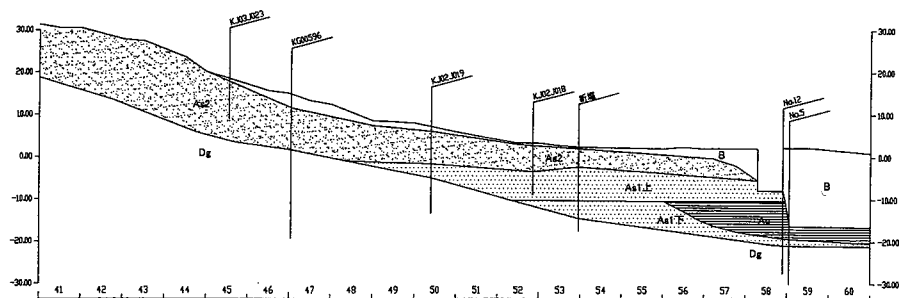
0                      200                      400 (m)



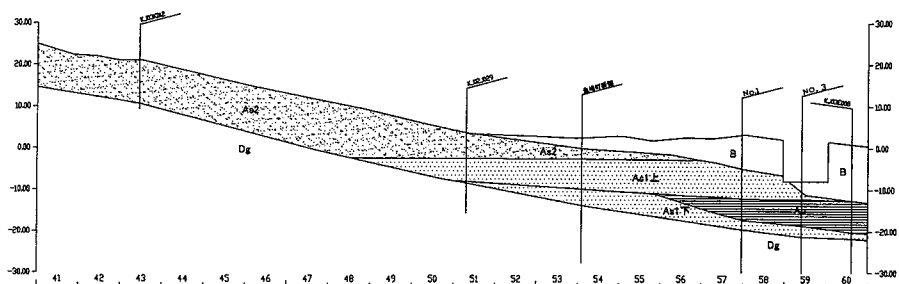
図-1.2.6 東部南北地質断面

0 200 400 (m)

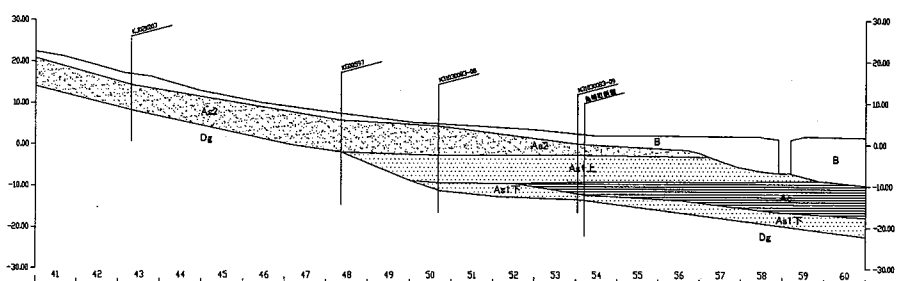
(175)



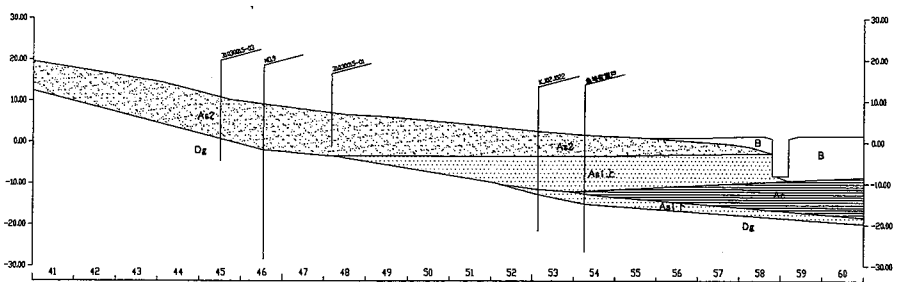
(177)



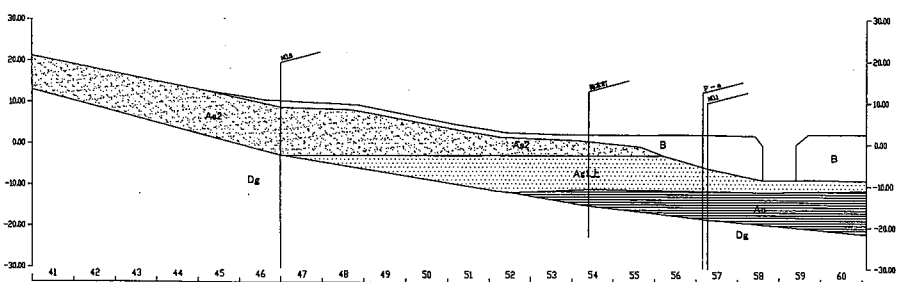
(179)



(181)



(183)



《断面図凡例》

B : 盛土・埋土

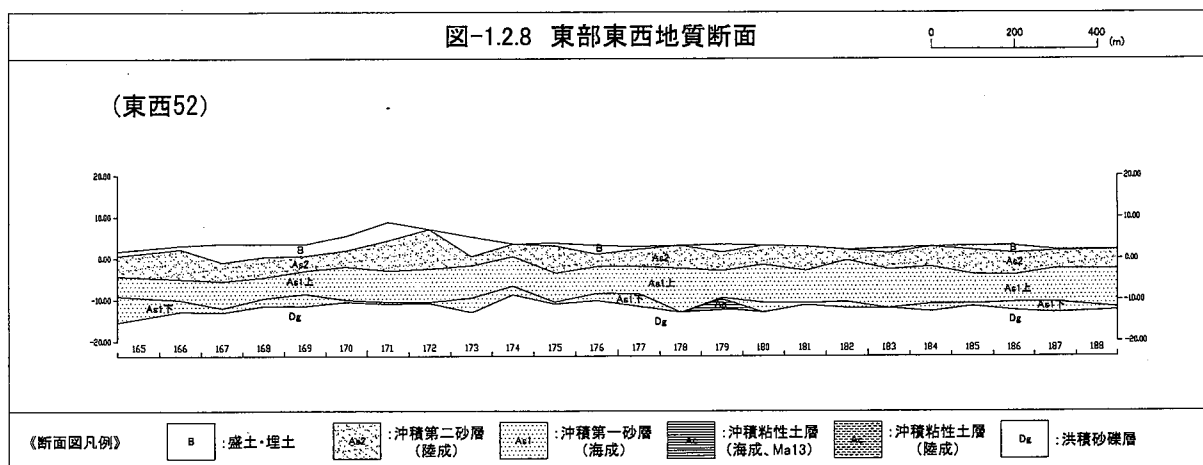
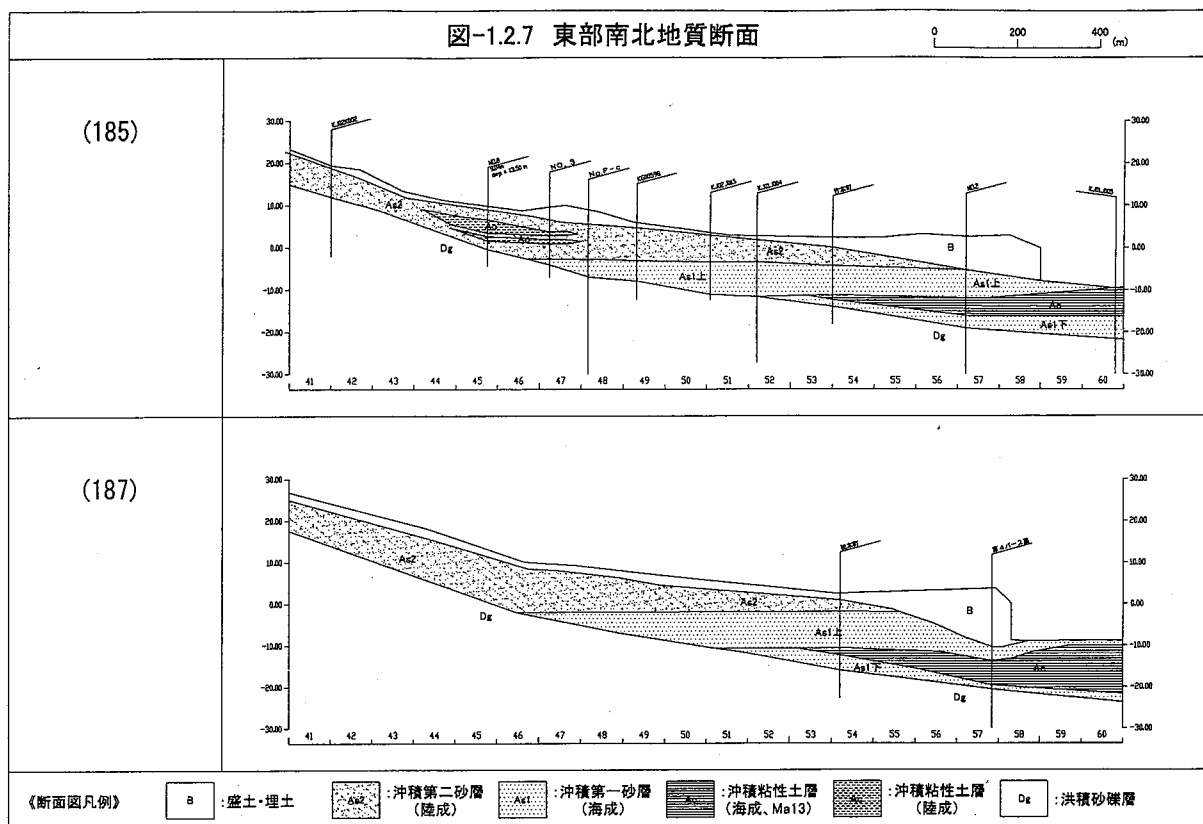
Aa2 : 沖積第二砂層 (陸成)

Aa1 : 沖積第一砂層 (海成)

Aa1.L : 沖積粘性土層 (海成, Ma13)

Aa1.F : 沖積粘性土層 (陸成)

Dg : 洪積砂礫層





## (2) 中部（中央区）

中部地区における検討対象区域は旧生田川下流域，J R 三宮駅，J R 元町駅を含めた南北 1.4km，東西 1.4km の範囲とした（図-1.2.9）。

### 〔地層構成〕

当該地は北西部での段丘面，中央部に広がる沖積低地，北から南東側に細長く分布する旧生田川による微高地並びに海岸沿いの埋立地からなる。従って，当該地における表層地盤は主に段丘層の上位に旧生田川やその他小河川によって形成された河川性堆積物やその氾濫堆積物と海浜性の堆積物が交差する区域に当たり，複雑な土層構成を示していると考えられる。

当該地の南北地層断面を図-1.2.12～1.2.14 に示した。また，東西方向の Ma13, 12 の分布状況を図-1.2.11 に示した。

これより，当該地の表層地盤は主に下記の土質名に区分することができる。

- ① 盛土・埋立土（B）
- ② 沖積海成砂層（As1）
- ③ 沖積河川性堆積砂層  
・扇状地性砂層（As2）
- ④ 沖積河川性堆積砂礫層（Ag）
- ⑤ 沖積海成粘土層（Ac：Ma13）
- ⑥ 沖積下部砂泥互層（As-c）
- ⑦ 段丘砂泥互層（Ds-c）
- ⑧ 段丘海成粘土層（Dc：Ma12）

### 〔表層地盤の特徴〕

- ・沖積層は旧生田川沿いや段丘層を開析する谷部から海岸低地部において分布する。
- ・この内海浜性の砂層（As1）は西側中央部付近から南側一帯に分布するが，東側の旧生田川沿いでは河川による堆積物（As2）が入り込み，指交性の分布形態を示している。また，As2 は段丘面から海岸低地へ移行する区域にも分布する。従って，As1, As2 層の境界部は指交性により複雑で判別は困難である。
- ・As1 層は標高 3m 付近より以深に分布し，砂及びシルト混じり砂を主体とし，一部礫混じり砂からなり，貝殻片混入の所があるのに対し，As2 層は礫混じり砂～砂礫の粗粒砂を主体とする。As1 及び As2 層の上部は  $N=10\sim20$  程度の緩い～中位な締まり程度に対し，As2 層の下部は粗粒化し， $N>30$  もみられる。
- ・旧生田川沿いの As2 層の下部には  $N\geq 50$  の砂礫（Ag）が南北方向に細長く分布する。これは海進前に粗粒土砂が流出したものと考えられ，中央部付近が厚く分布する特徴を示す。
- ・沖積海成粘土層（Ac：Ma13）は西側海岸低地部に最大層厚 2～3m 程度で分布するが，東側では旧生田川による河川堆積物で欠除している。



図-1.2.9 断面検討範囲図



- ・沖積下部砂泥互層 (As-c) は砂層を主体とし、低地部の全域に亘って分布するが、東側では層厚は薄くなる傾向を示す。N値は細粒土分の影響により 5~20 程度とバラツキがあり、緩い~中位の締まり程度である。
- ・沖積層の下部に分布する段丘砂泥互層 (Ds-c) は薄層の粘土層や細粒土分混入の砂質土層が複雑に混在しており、N値にかなりのバラツキがあり、 $N \geq 50$  の連続した地層はみられない。また、沖積層との境界も判別は困難な状況にある。
- ・段丘海成粘土層 (Dc: Ma12) は検討区域の中央部から南側にかけて最大層厚 4m 程度で分布するが、旧生田川付近になると不明瞭または欠除の様相を呈する。また、東西測線 34 付近 (JR 線) より北側でも Ma12 の分布はみられない。
- ・当該地の工学的基盤面は Ma12 より以浅に分布する Ds-c 層では N 値にバラツキがあり、10~20 程度の値もみられ、安定性や連続性に乏しいことから、Ma12 以深が妥当と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 神戸市・(財)建設工学研究所：阪神・淡路大震災と神戸の地盤 1999.3

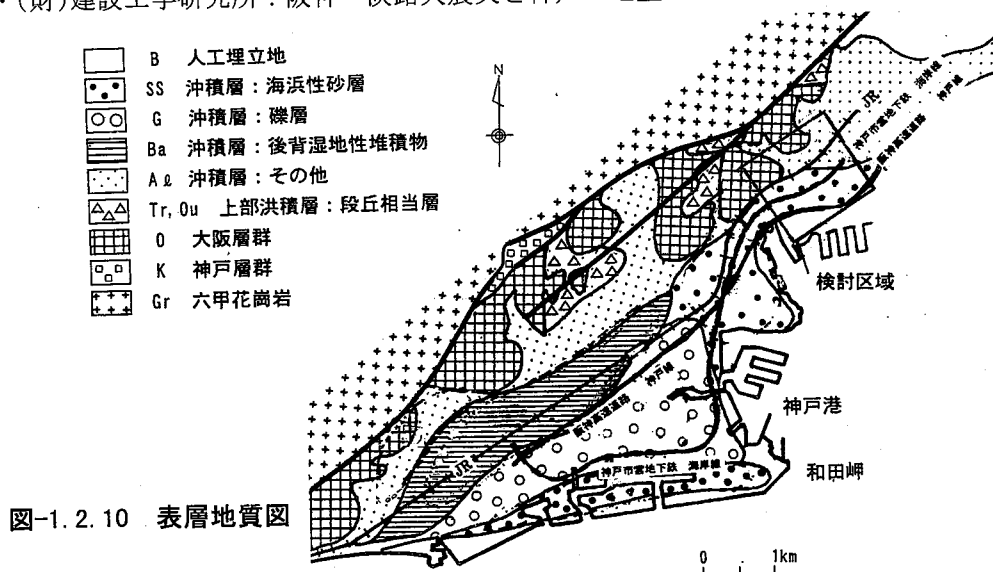


図-1.2.10 表層地質図

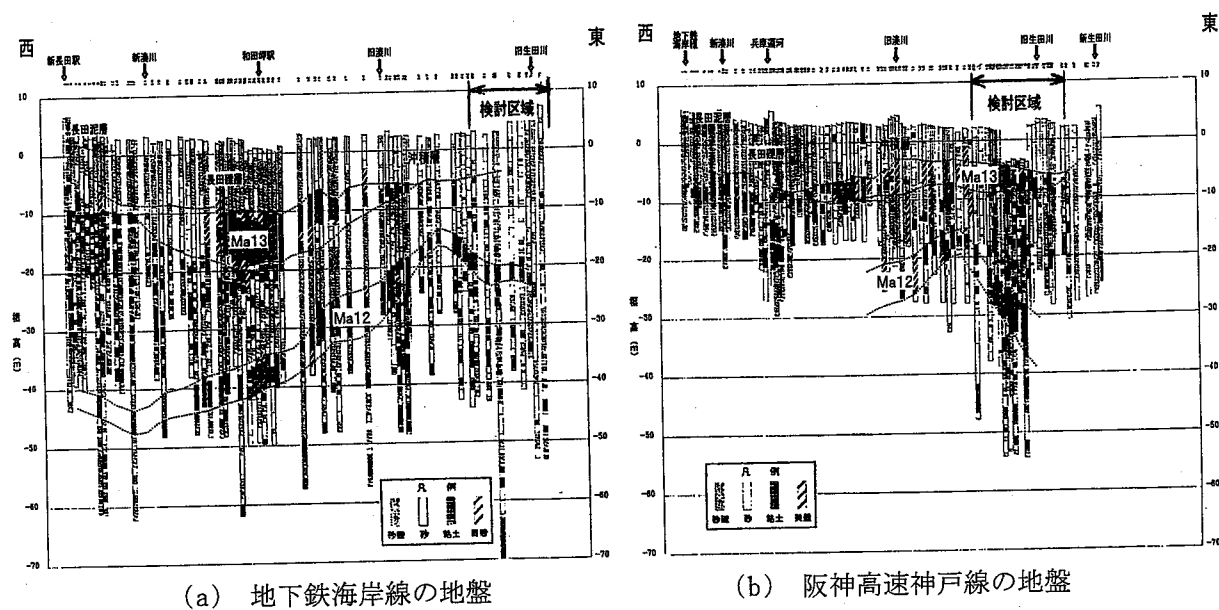
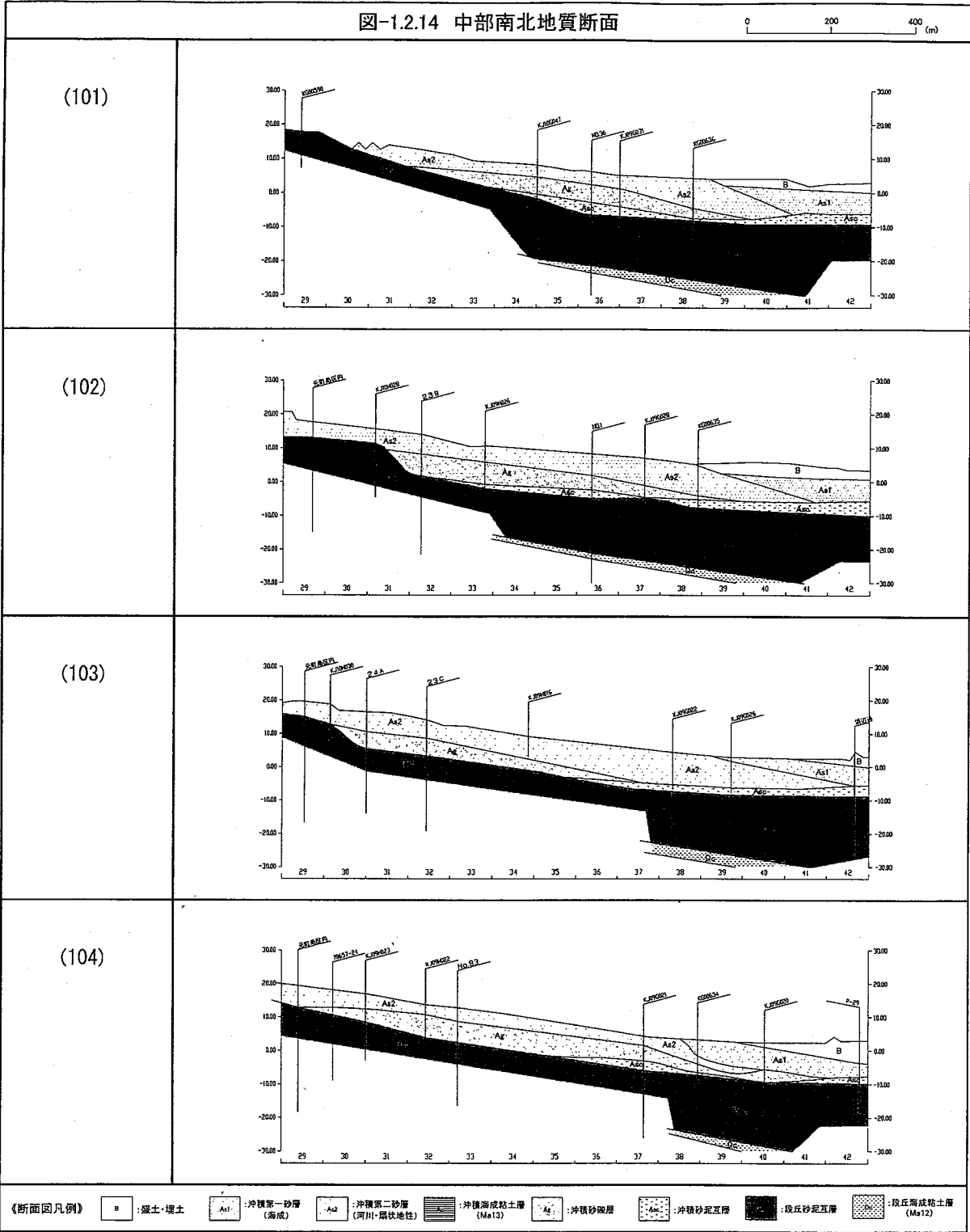


図-1.2.11 地下鉄海岸線・阪神高速神戸線の地質断面図



A horizontal number line with tick marks at 0, 200, and 400. The unit is meters (m).





### (3) 西部の地盤

西部地区、特に兵庫区から長田区にかけての市街地での表層地盤は、六甲山地からの河川（湊川、旧湊川、荻藻川、妙法寺川など）による土砂供給と西方（明石方面）からの沿岸流による土砂供給（沿岸漂砂<sup>1)</sup>）とが微妙に絡み合って複雑な堆積環境が形成され、場所によって非常に複雑な土層構成を示していると考えることができる。

ここでは、図-1.2.15 に示した東西 1.3km×南北 1.8km の区域（図中四角形部分）に注目し、新たに収集された地下鉄海岸線沿いの調査ボーリング資料を加えて、地質断面の検討を詳細に行った。その際、特に湊川流路の変遷と沿岸漂砂を考慮した土砂の堆積過程を想定した。図中の破線は地下鉄海岸線のルートを示す。

図-1.2.15 での等高線を見ると、各河川の平野への出口付近には明瞭な扇状地性の地形が確認され、六甲山地からの土砂の供給量が豊富であったことが推定される。

また、参考文献 2) に示されている湊川の流路の変遷を図-1.2.16①～図-1.2.16④に示した。これによれば、湊川の流路は平安時代末期までは JR 兵庫駅の東付近から南西方向へ流下し、次第に南から南東方向に向きを変え、和田岬のすぐ北側東向きに河口が形成され（古湊川，図-1.2.16①、②），その後江戸時代に付け替えられたと想定されている（旧湊川，図-1.2.16③）。現在の湊川は、会下山の下をトンネルで西方向に向かい、刈藻川と合流する形に変更されている（新湊川，図-1.2.16④）。

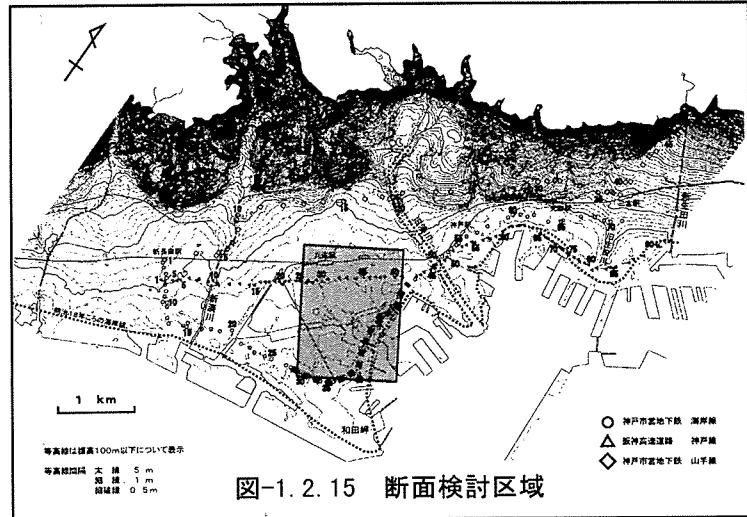
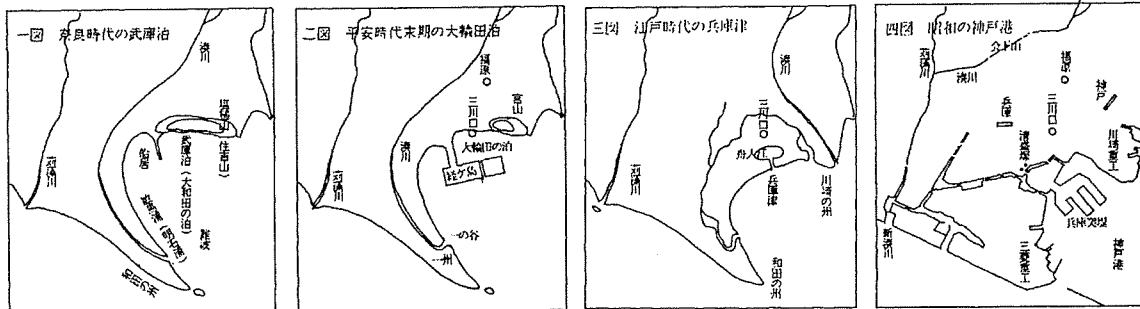


図-1.2.15 断面検討区域



①奈良時代

②平安時代末期

③江戸時代

④昭和～現在

図-1.2.16 湊川流路の変遷<sup>2)</sup>

一方、同文献<sup>2)</sup>には図-1.2.17 に示すように古湊川の下流部は海拔 0m 地帯を形成していたとの記載もみられる。

和田岬周辺には、図-1.2.17 に示されるような複雑な海流が形成されており、そのことも複雑な地盤が形成される一因となっているものと考えることができる。すなわち、和田岬南側には西から東への沿岸流が流れ、北側湾内の反時計回りの海流とが複雑にからみ合っていたものと推定される。これ

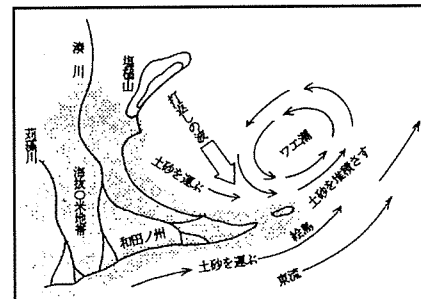


図-1.2.17 周辺における海流<sup>2)</sup>



は、卓越する風向きが和田岬を境として東と西で異なるためであり、また海岸線の形状から打ち返しの波による干渉作用などが関係し、複雑な海流を形成していたと考えられる。

兵庫区から長田区付近の表層地質図<sup>3)</sup>を図-1.2.18に示した。

これによれば、海岸沿いには広く礫層(長田礫層)の分布があり、この礫層と北側丘陵部との間には、後背湿地性の砂～粘性土(互層状地層)の分布域が存在するものとされている。

地下鉄海岸線沿いの地質縦断面図を図-1.2.19に示した。

この断面において、今回検討区間の地下鉄海岸線和田岬駅前後(Bor. No.30～No.47)での地盤の特徴を示すと次のとおりである。

i)標高0m～10m付近に、非常に特徴的な長田礫層が分布する。この礫層は、海岸線に平行してほぼ同一層厚で分布し、和田岬駅付近までは礫優勢層として確認される。和田岬を回り込んだ付近から礫量が急激に減少し、砂優勢層となっている。

ii)沖積粘土層(Ma13層)は、ほぼ連続することが確認される。旧湊川の下にも粘性土が連続しており、古湊川がこの位置へ付け替えられた時期が比較的新しいことが裏付けられる。

iii)沖積粘土層(Ma13層)の下位には、安定した地層の分布が見られず、堆積環境が短い周期で変化していたことが考えられる。

図-1.2.20に断面位置平面図を、図-1.2.21～図-1.2.23に北西～南東方向の地質断面を示した(グリッドNo.63～75の13断面)。

作成した地質断面での特徴をまとめると次のとおりである。

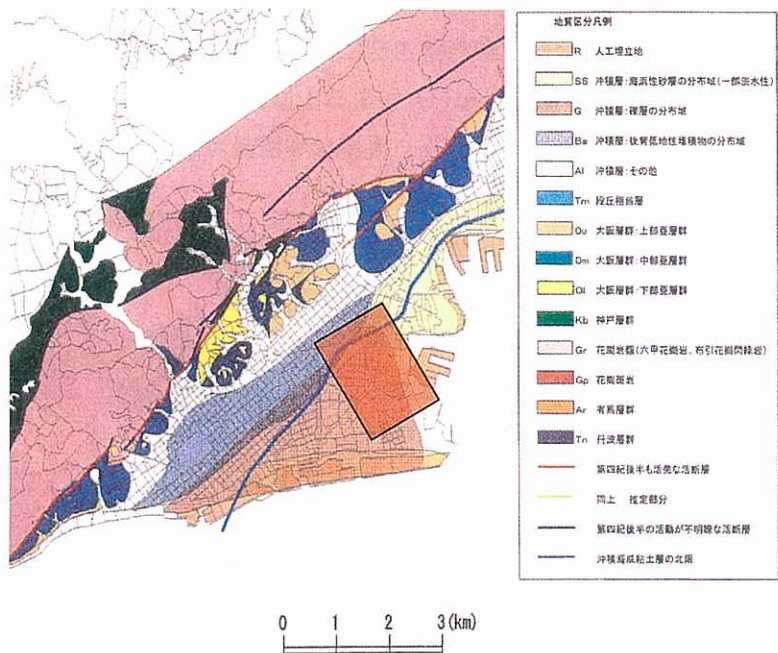


図-1.2.18 地質図<sup>3)</sup>

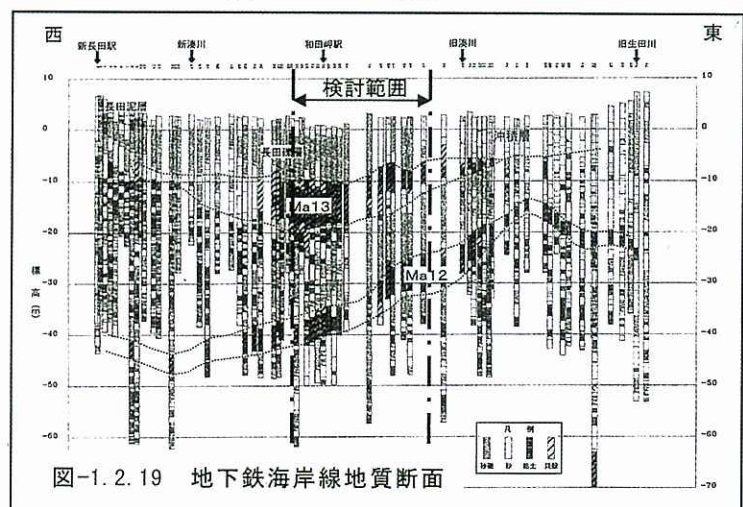


図-1.2.19 地下鉄海岸線地質断面

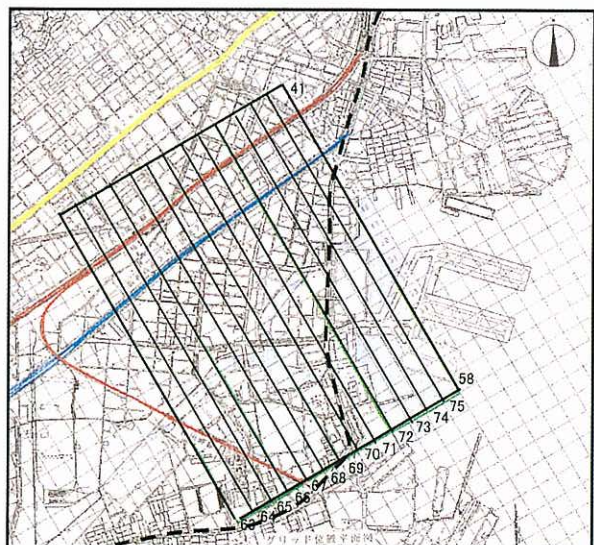


図-1.2.20 断面検討範囲(枠線内)  
(破線:地下鉄海岸線)

1)No.63～No.65 断面の海岸寄り標高-10m付近までに見られる砂礫層は沿岸漂砂による堆積物と考えられる。この砂礫は、No.66 断面より東では砂層に変化する。この層に含まれる礫は、チャート主体の円礫であることが、地下鉄海岸線御崎車庫掘削時に確認されている。

2)No.69～No.75 断面の山側、洪積層 (Dg) 直上に分布する砂礫層は、湊川起源の砂礫層であると考えられる。

3)No.63～No.68 断面表層部 (GL-8m付近以浅) に分布する砂礫層 (Ag) は、古湊川の想定流路における平均勾配から考えて古湊川からの供給土砂でなく、沿岸標砂起源である可能性が高いと考えられる。

液状化の対象地層は、主として沖積砂層 As であり、No.66 断面よりも東では地表付近まで分布し、No.70 断面以降は今回の断面作成範囲全域に分布することが図-1.2.27 において確認できる。これら沖積砂層の分布域は、後述する液状化判定結果において液状化の可能性が高い区域と大筋で一致している。

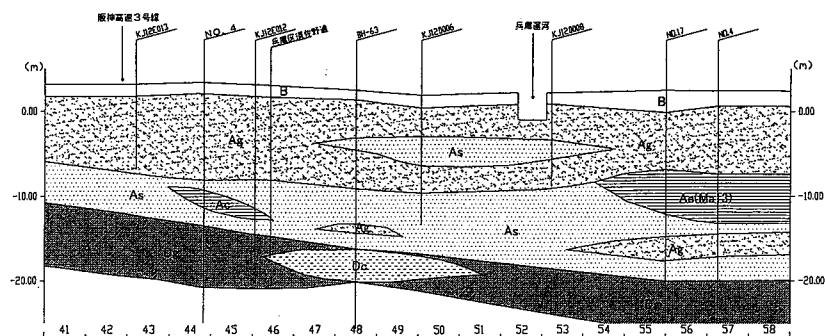
#### 参考文献

- 1) 宇多高明、西原在浩、加三千宣：大阪湾に面した神戸市和田岬の形成機構に関する一考察、地形、第 21 巻、第 3 号、pp329～340、2000
- 2) 梅村伸雄：源義経一の谷合戦の謎、pp84～85、1989
- 3) 神戸市、(財)建設工学研究所：阪神・淡路大震災と神戸の地盤、1999.3

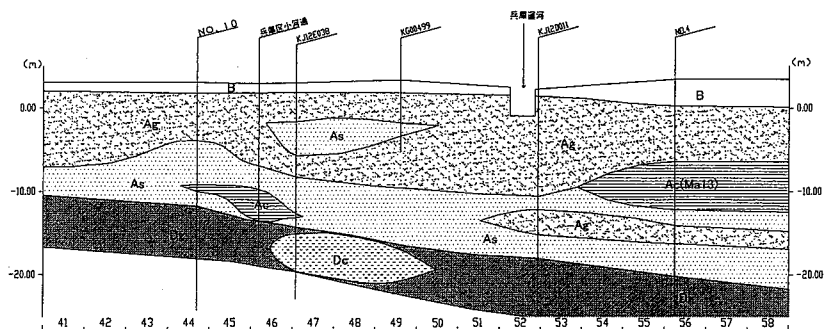
图-1.2.21 西部土质断面

0 200 400 (m)

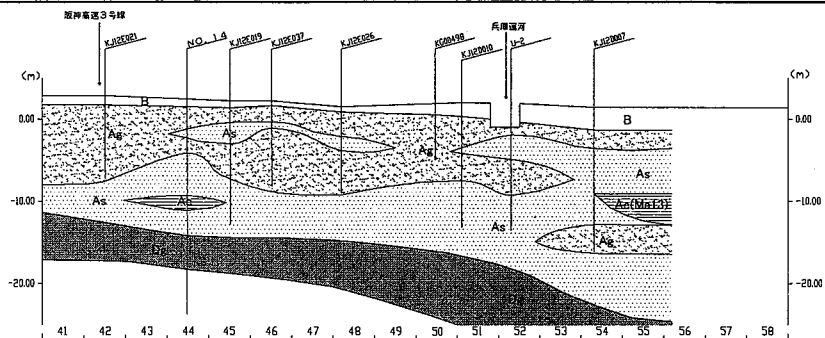
(63)



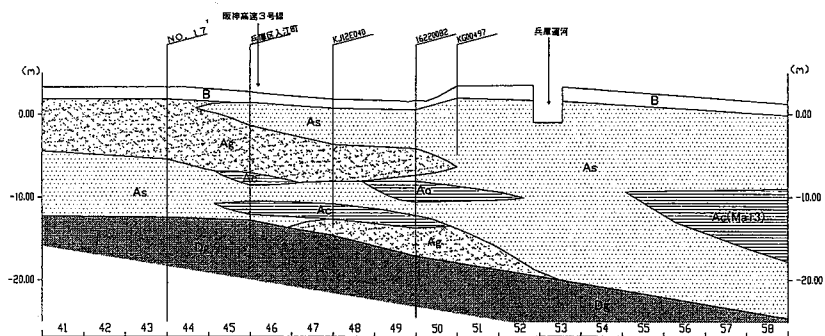
(64)



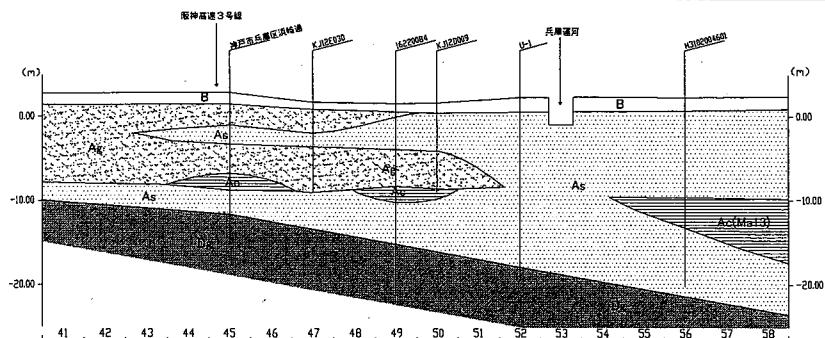
(65)



(66)



(67)



《断面図凡例》

盛土・埋土

沖積粘土層

沖積砂層

沖積砂礫層

洪積粘土層

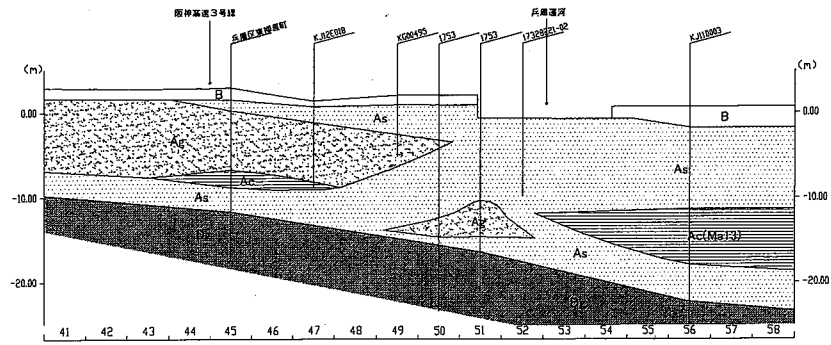
洪積砂礫層



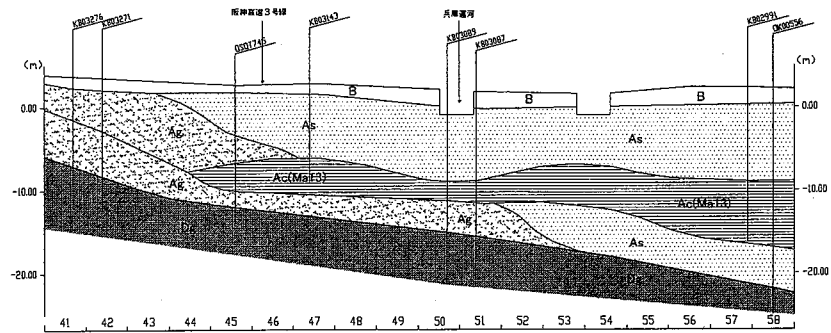
圖-1.2.22 西部土質断面

0 200 400 (m)

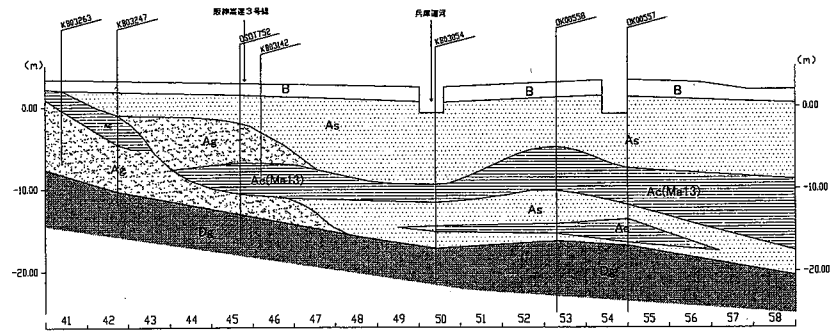
(68)



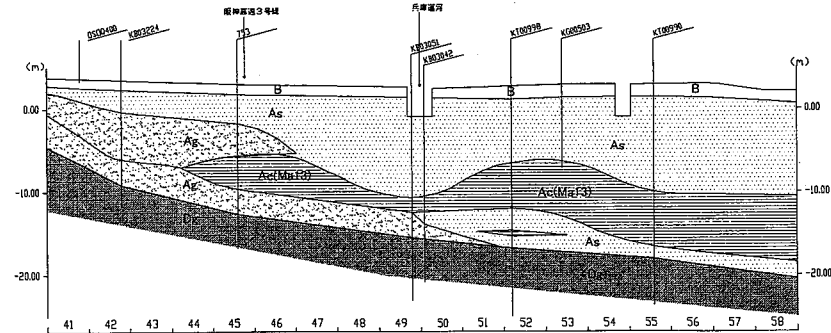
(69)



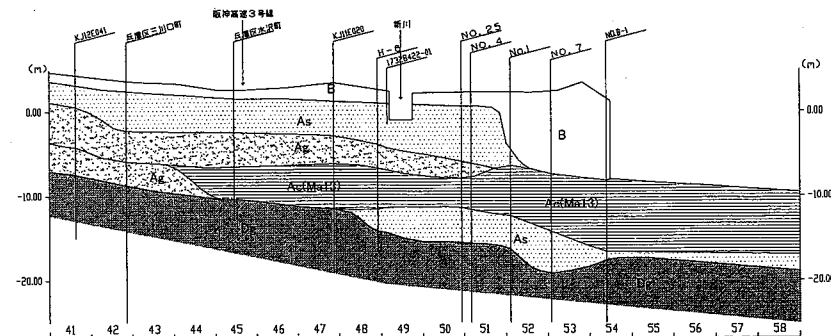
(70)



(71)



(72)



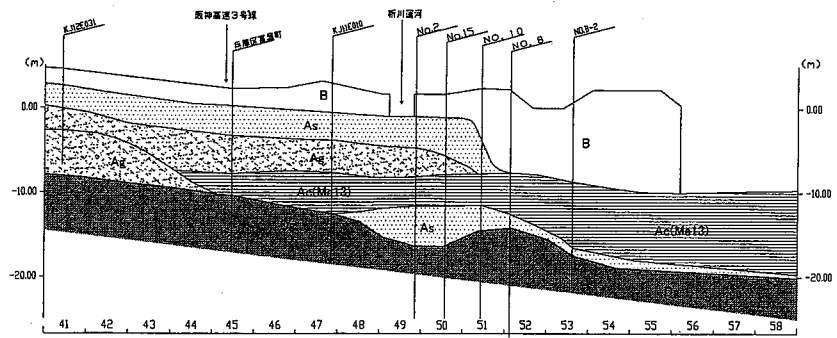
《断面図凡例》

盛土・埋土 沖積粘土層 沖積砂層 沖積砂礫層 洪積粘土層 洪積砂礫層

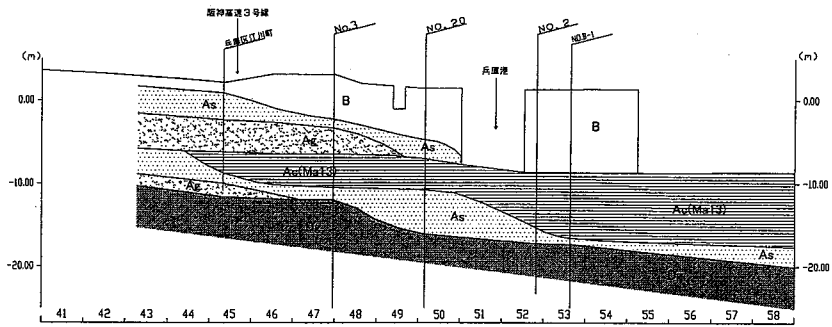
图-1.2.23 西部土质断面

0 200 400 (m)

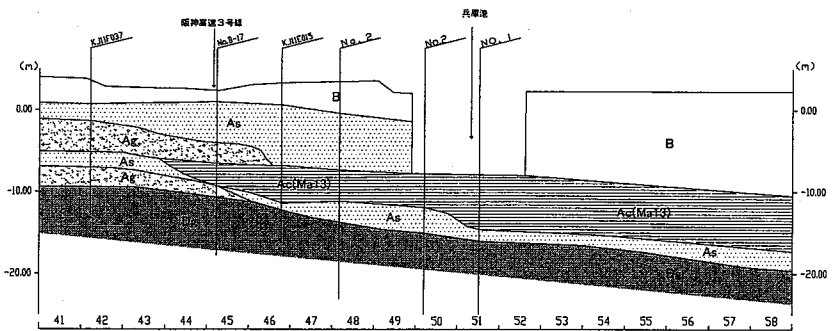
(73)



(74)



(75)



《断面图凡例》



: 盛土·埋土



: 冲积粘土层



: 冲积砂层



: 冲积砂砾层



: 洪积粘土层



: 洪积砂砾层

### 1.3 地下水の分布

液状化判定にとって、地下水は重要な要素の一つであり、液状化危険度判定を行う3地区（東部・中部・西部）の正確な地下水情報の提供は不可欠である。

そこで、今回は JIBANKUN に納められているボーリング DATA の地下水位あるいは別途に収集した工事記録の際に記録された地下水位等に対して河川との位置関係や地形等を考慮してグリッド地下水位を決定した。

#### 1.3.1 グリッド内の地下水の決定

##### (1) 地下水位の決定についての問題点

東部・中部・西部地区を対象に、地下水位コンター図を作成の後、地区全体の地下水位の把握を試みたが、以下の点で問題となり今回は作成していない。

- a) ボーリング DATA が少ないこと、ボーリング DATA 自体に地下水位を持たないものが多いこと等から地域全体をカバーできる状況でない。
- b) ボーリング時に得られた地下水位の測定時期（渇水期、豊水期）の統一を図ることがむずかしい。
- c) ボーリング時に測定された地下水位が自然水位を示しているものか、泥水位を示しているものか、判別が難しい。
- d) 地下水位と地形との関係をみると、東部・中部地区については概ね整合性が認められたが、西部地区についてはかなり複雑な分布で今後の検討が必要である。

##### (2) 地下水位の決定

各グリッド毎に地下水位を決定した。各グリッドの地下水位を以下の方法で決定した。

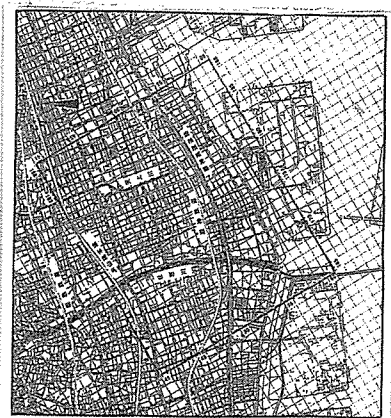
- a) 噴砂が認められたグリッドのボーリングデータの地下水位を抽出した。（旧ため池や旧河道等で噴砂が認められたグリッドについては除く）
- b) 抽出したグリッドの地下水位は地形との関係を考慮しながら特異値を除いた平均値とした。
- c) その地下水位の信頼性を確認するために平均地下水位の他、2水位程度を用いて液状化判定（簡易法）を行い、PL 値が高い値を示した地下水位を基本地下水位とした。
- d) 噴砂の認められなかったグリッドの地下水位については基本地下水位を参考にして外挿・内挿により決定した。

##### (3) 決定された地下水位について

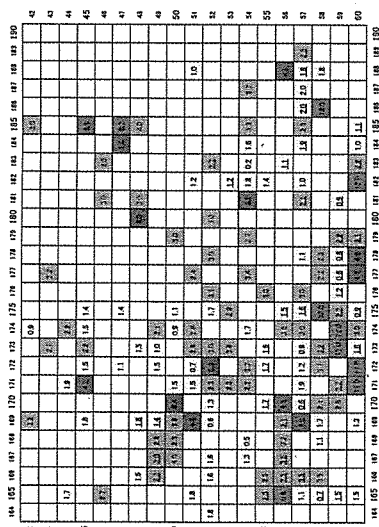
東部地区の地下水は地形の変化に係わらず GL-1～3m の範囲と比較的浅層に分布している。

中部地区の地下水位は海側から JR 線付近まで GL-2～4m と浅いが、JR 線から山側については GL-6～8m と深く分布している傾向がある。

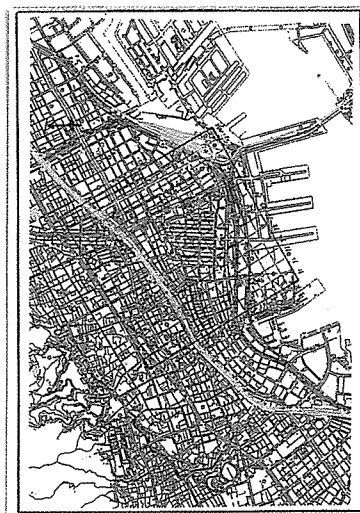
西部地区の地下水位は概ね GL-1～3m の範囲に入り、比較的浅層に分布している。



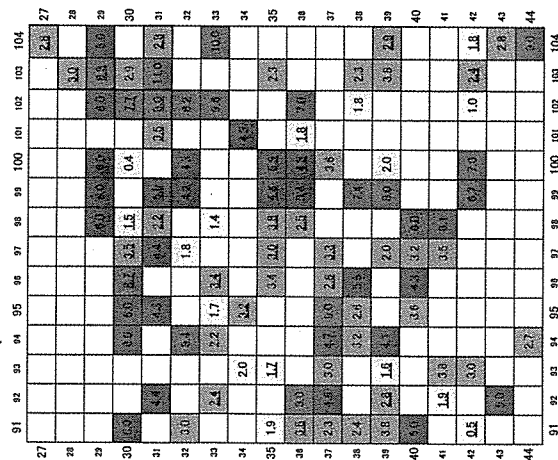
◆ 検 討 メ ッ シ ュ 図 ( 東 部 ) ◆



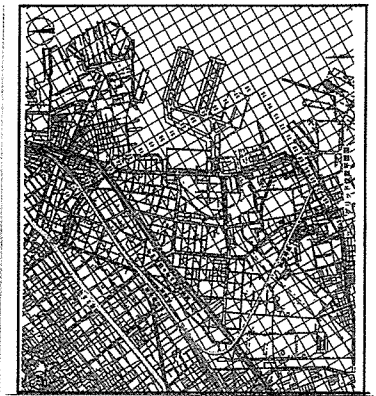
東部地区の地下水位



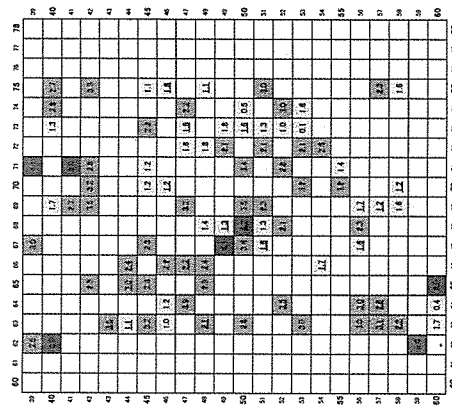
◆ 検 討 メ ッ シ ュ 図 ( 中 部 ) ◆



中部地区の地下水位



◆ 検 討 メ ッ シ ュ 図 ( 西 部 ) ◆



西部地区の地下水位

### 凡 例

- 0 m ≤ 水位 ≤ 2 m
- 2 m < 水位 ≤ 4 m
- 4 m < 水位 ≤ 6 m
- 6 m < 水位

|    |
|----|
| 水位 |
| 水位 |
| 水位 |
| 水位 |
| 水位 |
| 水位 |

噴砂が確認されたグリッド  
噴砂が確認されたグリッドで、  
旧ため池・旧河道が認められる地点

図-1.3.1 東部・中部・西部地区の地下水位分布状況 (GL-表示)

### 1.3.2 地下水位変動幅について

地下水位は降雨期・渇水期に変動し、季節により液状化判定の結果に影響を与えることとなる。そこで、地下水位の変動幅より、地下水位の経年変化の把握を行う。

各市域の地下水の連続観測 DATA より地下水位の変動幅に着目した。

観測 DATA は、神戸市営地下鉄湾岸線（長田、御崎、元町）、新神戸トンネル、神戸栄光教会の地下水観測結果（建設工学研究資料）、兵庫区荒田町（平成12年5月23日に発表）における第1帯水層の経年変動としたが、神戸市営地下鉄湾岸線の DATA については、観測期間において施工に伴う揚水・掘削を行っており自然条件の水位を反映しているとは言えない、また、各地域での観測地点は陸域の内陸部で海岸線と山地のちょうど中間付近に位置している。

神戸栄光教会は神戸市中央区下山手通り15丁目にあり、付近には県民会館や県庁第3庁舎が建っている。地下水観測期間は、県庁第3庁舎施工時に当たる1988.12～1991.12まで観測が続けられた（県庁第3庁舎施工に伴う揚水は1990.1に完了）。地下水変動は1990.8以降、ほぼ安定し、TP+15～16mの範囲に入っており、その変動幅は1m程度である。

兵庫県荒田町(1997.11～1998.11)における第1帯水層の経年変動は、降雨時には敏感に反応している傾向を示し、その変動幅は1m程度である。

新神戸トンネル(1997.6～1998.10)における経年変動幅は海側で1.5m、山側で3m程度である。

神戸市域の中央部に限って見れば地下水変動は1～3mの変動幅があると言える。

#### 地下水位変動幅

##### 神戸トンネル

水位(minTP+17m～maxTP+20m)山側地点[観測期間 1997.6～1998.10]

(minTP+7.5m～maxTP+8m)海側地点

##### 栄光教会

水位(minTP+15m～maxTP+16m) [観測期間 1990.8～1991.7]

##### 兵庫区荒田町(No.2 観測孔)

水位(minTP+11.9m～maxTP+13m) [観測期間 1997.11～1998.11]

##### 長田区 (No.1 観測孔)

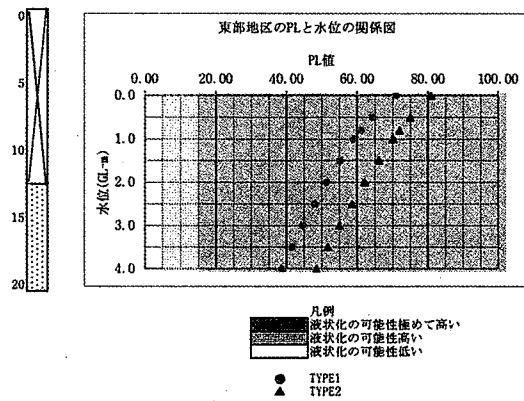
水位(minTP+5m～maxTP+7m) [観測期間 1997.11～1998.11]

### 1.3.3 地下水位変動と液状化について

地下水位の影響を見るために、基本地下水位のあるグリッドで地下水位を変化させた場合の地下水位と PL 値の関係を求めた。地下水位の変化は、基本地下水位と推定された変動幅を考慮して、GL-0～4m (0.5m ピッチ) とした。PL 値の判定は簡易法（道路橋示方書 H8）で行い、地下水位が盛土層、砂質土層、礫質土層で変化しているグリッドを選び、それを検討断面とした。

各検討断面で求めた PL 値の変化を見ると概ね、「液状化の可能性が高い、液状化の可能性は極めて高い」の範囲に入るが、地層構成の違いにより PL 値と地下水関係図の分布状況に違いが見られた。盛土層で算定したもの（東部地区のデータを採用）では、地下水位の変化に PL 値が敏感に反応している。砂質土層で算定したもの（中部地区のデータを採用）では、地下水の変化に対し PL 値は緩や

かに変化していく。礫質土層で算定したもの（西部地区のデータを採用）では地下水の変化に対し PL 値は GL-3.0m 以深より急激に変化し、小さくなる傾向がみられた。

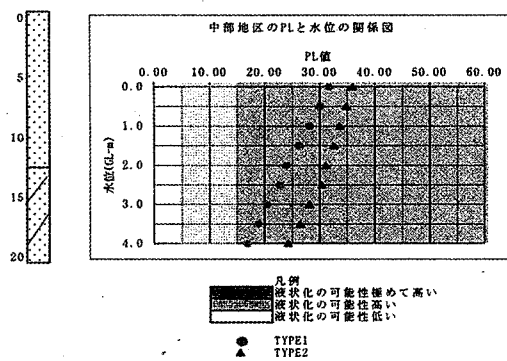


PL 値の変化

TYPE I PL=38~70

TYPE II PL=48~80

図-1.3.2 盛土層主体のグリットでの水位と PL 値の関係図 (X=178, Y=59grid)

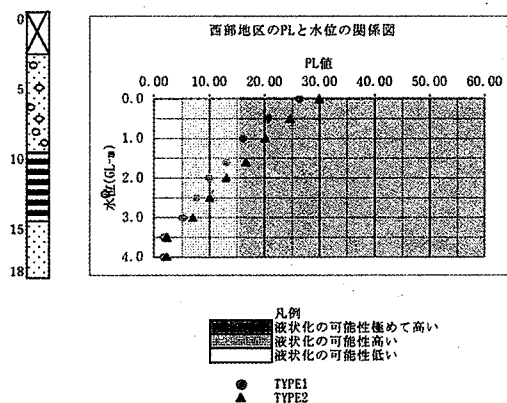


PL 値の変化

TYPE I PL=16~31

TYPE II PL=24~35

図-1.3.3 砂層主体のグリットでの水位と PL 値の関係図 (X=96, Y=37grid)

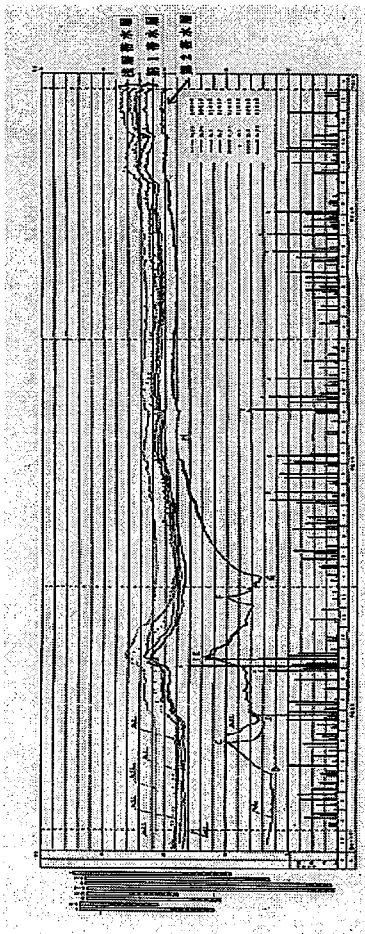


PL 値の変化

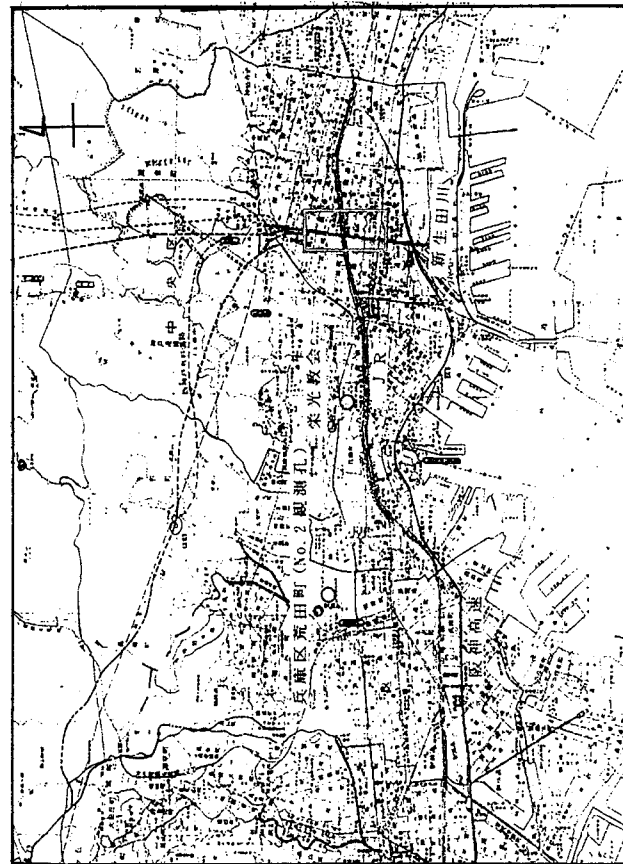
TYPE I PL=1.7~26

TYPE II PL=2.3~29

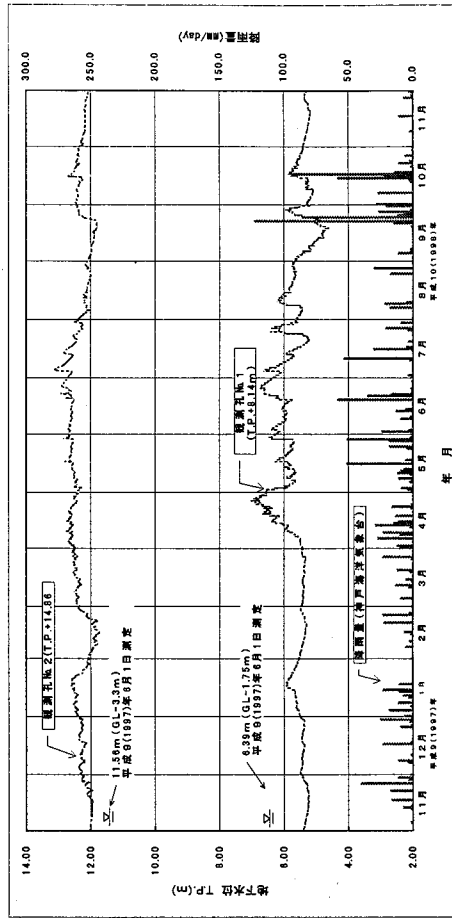
図-1.3.4 礫質土層主体での水位と PL 値の関係図 (X=64, Y=56grid)



神戸栄光教会の地下水位変動図



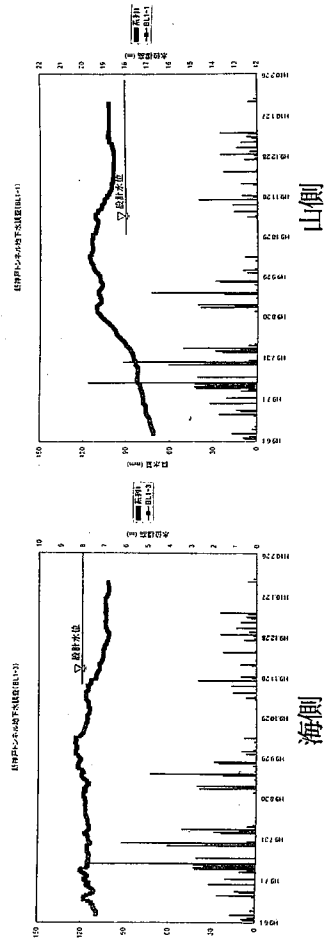
観測位置図



長田区 (観測孔No. 1) と兵庫区 (観測孔No. 2) 孔

地下水変動と降雨量(1997.11~1998.11)

[2000.5.23発表会資料より抜粋]



神戸トンネル観測図

図-1.3.5 地下水変動図

#### 1.4 表層地盤の工学的特性

本節では、液状化対象層である沖積砂層に着目し、1.2 節で述べた地域別に砂質土層あるいは礫質土層の工学的特性について述べる。本節で示す N 値、平均粒径  $D_{50}(\text{mm})$  および細粒分含有率  $F_c(\%)$  は、すべて神戸 JIBANKUN に入力されているデータを整理したものである。

##### (1) 検討対象地層とデータ整理方法

神戸 JIBANKUN に収録されているボーリング DATA には、N 値や粒度特性値などのほかに、地層のラベリングがされている。このラベリングは沖積／洪積の区別と粘土／砂／砂礫の区別となっており、1.2 節で示した土層構成や液状化に着目した場合の地層の特性区分とはかならずしも対応していない。今回は、液状化検討のための地盤モデルを構築することを目的としているため、新たに沖積砂層を海成の砂層【As1】と陸成の砂層【As2】とに区分するとともに、沖積粘性土層(Ma13)の天端標高（ほぼ標高-10m）より上位に堆積する砂層【As1（上）】と下位に分布する砂層【As1（下）】にも区分して整理を行った。表-1.4.1 は地域別の地層層序【地層記号】を示しており、本検討で着目した地層に○印を記している。

東部地区では、海成の沖積砂質土層である【As1（上）】と【As1（下）】ならびに、陸成の沖積砂質土層である【As2】を対象とする。中部地区では、同様に【As1】と【Asc】（ここでは Ma13 層の下部層を Asc 層と名づけている）ならびに、【As2】を対象とする。中部の東側では【Ag】が挟在しているが、ここでは【As2】として整理している。西部地区では、古湊川と和田岬付近の複雑な海流の影響を受け、特徴的な地層構成を呈しているため、西域（断面 No.63～71）と東域（断面 No.72～75）に分けた上で、【As1（上）】、【As1（下）】および【As2】に分類し、さらに Ma13 層の上部の礫層【Ag（上）】と下部の礫層【Ag（下）】に分類整理した。

データ整理の方法としては、検討対象地層の N 値、平均粒径  $D_{50}$  および細粒分含有率  $F_c$  の深度分布図の作成、ならびに各地層別の層厚と平均 N 値を平面分布図にして表示した。

なお、盛土・埋土層は本来なら液状化しやすい地層であるため検討が必要であるが、一般的に非常に土質が不均質であるため、神戸 JIBANKUN に集積されているデータのバラツキも大きく評価が困難であると判断し、本検討においてはデータ整理を行っていない。

表-1.4.1 各地区の地層層序と検討対象地層（○）

| 西 部 地 区           |   | 中 部 地 区          |  | 東 部 地 区              |   |
|-------------------|---|------------------|--|----------------------|---|
| 盛土・埋土【B】          |   | 盛土・埋土【B】         |  | 盛土・埋土【B】             |   |
| 沖積礫質土(海成)【Ag(上)】  |   | ○ 沖積砂質土(陸成)【As2】 |  | ○ 沖積砂質土(陸成)【As2】     | ○ |
| 沖積礫質土(陸成)【Ag(下)】  |   | ○ 沖積礫質土(陸成)【Ag】  |  | 注1 沖積砂質土(海成)【As1(上)】 | ○ |
| 沖積砂質土(海成)【As1(上)】 |   | ○ 沖積砂質土(海成)【As1】 |  | ○ 沖積粘性土【Ac1(Ma13)】   |   |
| 沖積粘性土【Ac1(Ma13)】  |   | 沖積粘性土【Ac1(Ma13)】 |  | 沖積砂質土(海成)【As1(下)】    | ○ |
| 沖積砂質土(海成)【As1(下)】 | ○ | ○ 沖積砂質土(海成)【Asc】 |  | ○ 洪積礫質土【Dg】          |   |
| 沖積粘性土【Ac2】        |   | 沖積粘性土【Ac2】       |  |                      |   |
| 沖積砂質土(陸成)【As2】    |   | 洪積砂質土【Dsc】       |  |                      |   |
| 洪積礫質土【Dg】         |   | 洪積粘性土【Ma12】      |  |                      |   |

注1: 沖積砂質土層(陸成)【As2】に含んでいる



## (2) 沖積砂質土層・礫質土層の工学的特性

図-1.4.1 は上段に N 値、中段に平均粒径  $D_{50}$ (mm)、下段に細粒分含有率  $F_c$ (%)の深度分布図を示しており、右列から東部、中部、西部（東域）、西部（西域）、西部の礫質土層の順に配置している。

### a) 東部

【As1(上)】の N 値は、深度との相関が若干見られる。浅い部分では  $N < 10$  の緩い部分が存在するが、概ね  $N=20 \sim 40$  である。【As1(下)】と【As2】の N 値は、広い範囲にわたってばらついている。相対的に見れば、陸成の砂質土層である As2 層の方が、海成の砂質土層である As1 層と比べ若干高めの N 値を示しており、液状化の被害の程度とも整合している。なお、【As1(上)】はほぼ青木砂層に対応している。

粒度特性データからは、一部の土層を除いて、例えば道路橋示方書 V 耐震設計編(平成 14 年 3 月)に従った場合の液状化判定対象土層（現時盤面から 20m 以内の深さ、平均粒径  $D_{50}$  が 10mm 以下、細粒分含有率  $F_c$  が 35%以下）であることが分かる。東部地区においては、【As1(下)】と【As2】の一部において細粒分含有率が 35%以上の値となっている。平均粒径  $D_{50}$  は、他地区と比べ比較的ばらつきが少なく、0.1~1.0mm 間に分布している。

### b) 中部

【As1】の N 値は、若干深度相関が見られるものの、概ね 20 回程度より低い値を示し「非常に緩い」から「中位な」相対密度を示す。平均粒径  $D_{50}$  は 0.2~1.0mm 間に分布し、細粒分含有率  $F_c$  は概ね 20%以下を示す。これらの特性から【As1】は液状化しやすい土層であると判断される。

【Asc】の N 値は概ね 5~20 回を示し、土質は細粒分を比較的多く含む砂質土または細粒土の特性を有するものと考えられる。細粒分含有率は 20%程度以下を示す部分と、40%以上を示す部分があるが、N 値が比較的小さいため液状化に関しては十分留意すべき地層といえる。

【As2】の N 値は非常にばらついているが、 $N=50$  回以上を示す部分も多く、粗粒分が多い（ $D_{50}$  が相対的に大きい）礫質土に近い性状を示している。

### c) 西部

【As1(上)】と【As1(下)】に関して、西域と東域の N 値を比較する。西域の【As1(上)】は主に 10~30 回を示すのに対して、東域では 10~20 回程度と少し小さめの値を示している。また、西域の【As1(下)】は全般的にばらついているのに対して、東域では概ね 40 回以下である。【As1(上)】の粒度特性は堆積環境を反映した傾向が見られる。すなわち、平均粒径  $D_{50}$  は西域の方が大きく、東域ほど小さくなる。西域は礫質土が卓越しており、徐々に砂質土に遷移する様子がうかがえる。

【Ag(上)】と【Ag(下)】の N 値は全般的にばらつきが大きい。平均粒径  $D_{50}$  も 0.1~10mm と分布範囲が大きい。礫分の混入程度の相違により N 値がばらついたものと考えられる。なお、細粒分含有率  $F_c$  は 20%以下を示す。【Ag(上)】は長田礫層と対比される。

## (3) 沖積層厚の平面分布と N 値の平面分布特性

図-1.4.2~図-1.4.4 は、1.2 節で示した南北断面をもとにして、グリッドの交点における上述した各地層の層厚を読み取り、また、格子内にボーリング DATA が存在する場合、地層ごとの平均 N 値を求め、それぞれの値を表示するとともに段階ごとに色分けしたものである。なお、本検討は液状化現象に着目しているため、東部では東西 50 断面（ほぼ阪神電鉄付近）より南側（海側）の、中部では東西 34 断面（ほぼ JR 線）より南側（海側）の範囲を対象にこのような整理を実施した。なお、西部は全域である。

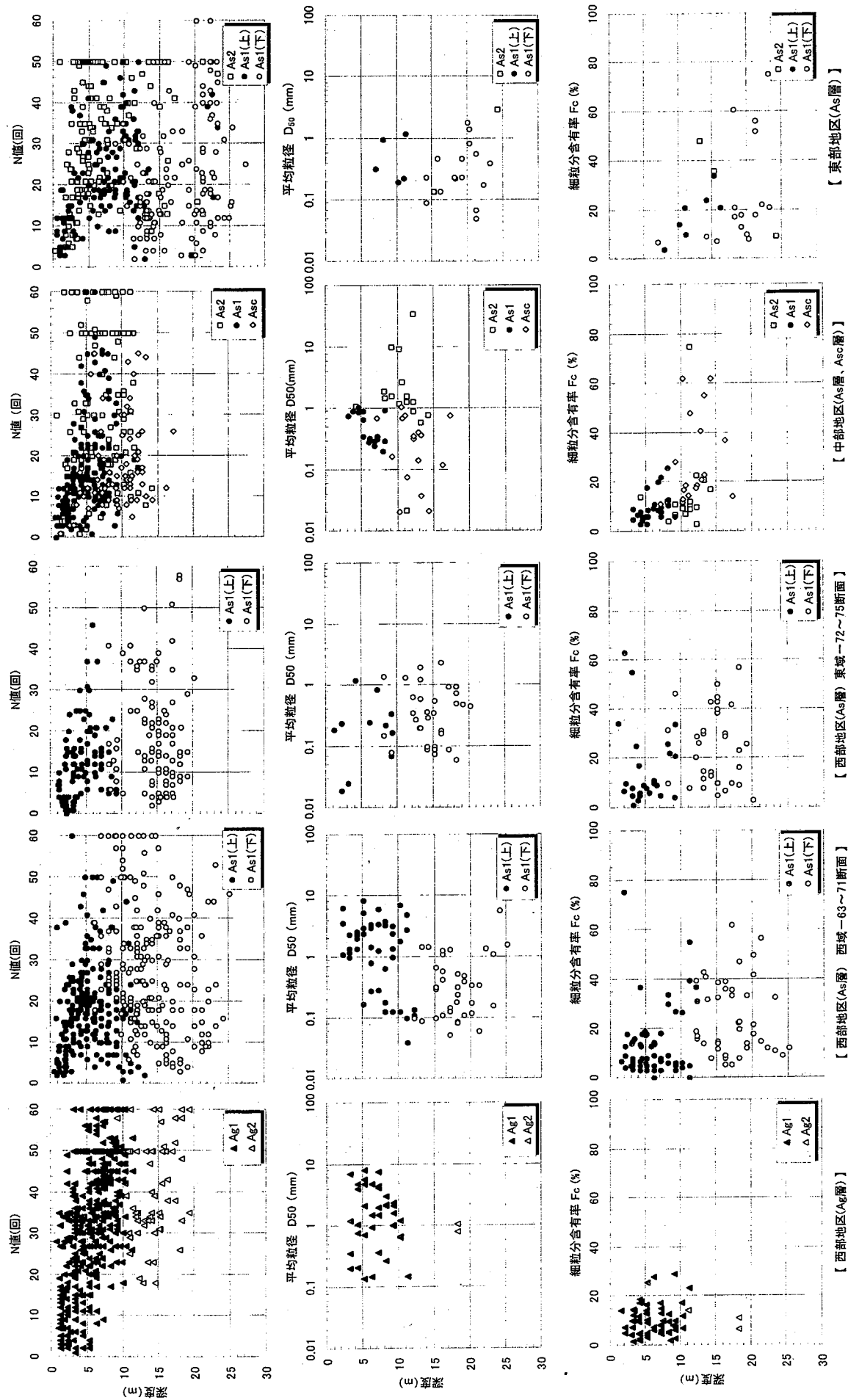


図-1.4.1 沖積層の N 値, D<sub>50</sub>, F<sub>c</sub> の深度分布図

a) 東部

図-1.4.2 に東部地区の各地層の層厚と地層別の平均 N 値を示した。層厚 3~9m を有する【As1(上)】は現在の海岸線付近で消滅し、南側への連続性は確認できない。1.2 節で示した断面図によると沖積粘性土層 (Ma13) は、概ね東西 53 断面~56 断面付近から挟在し始めている。【As1(上)】の平均 N

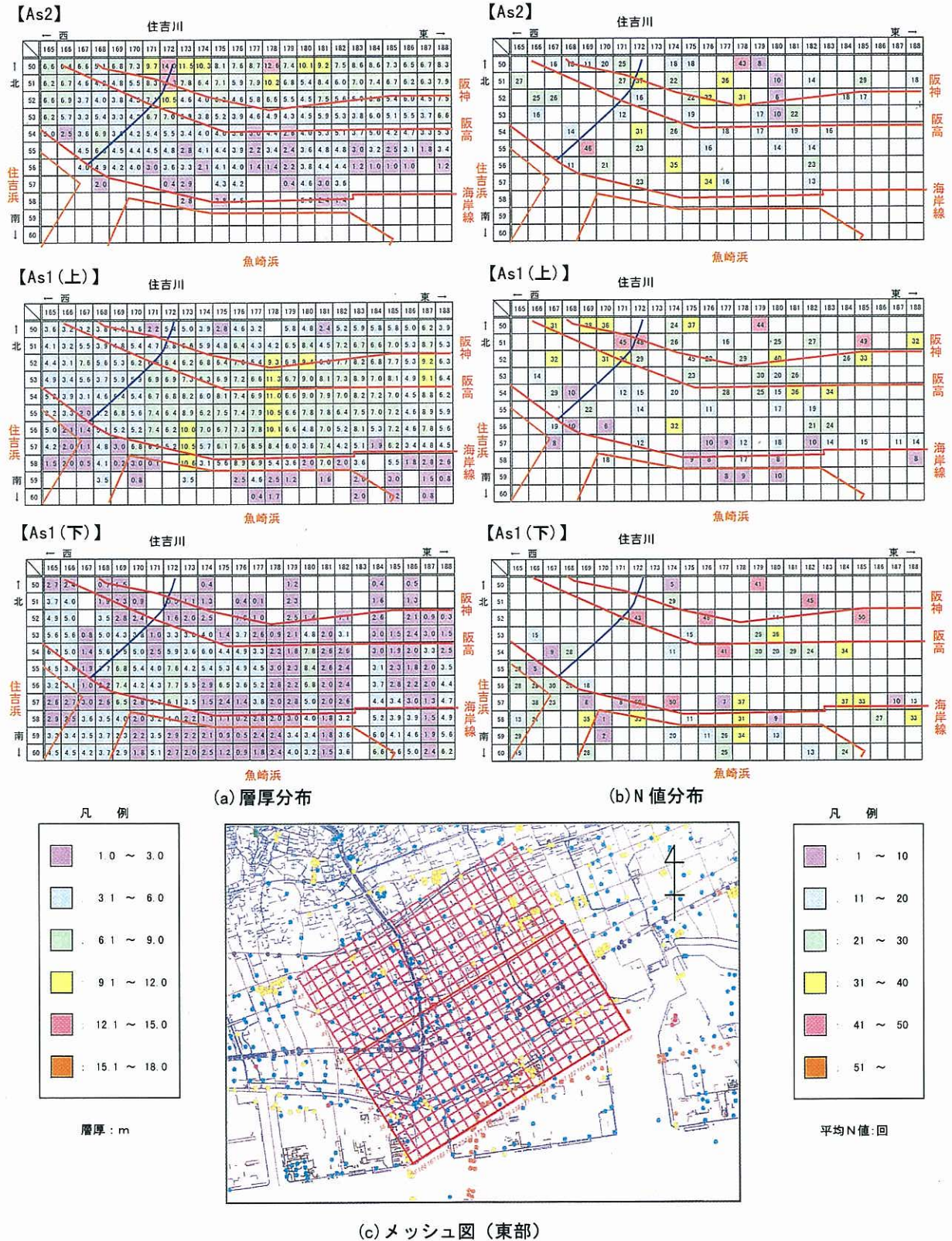
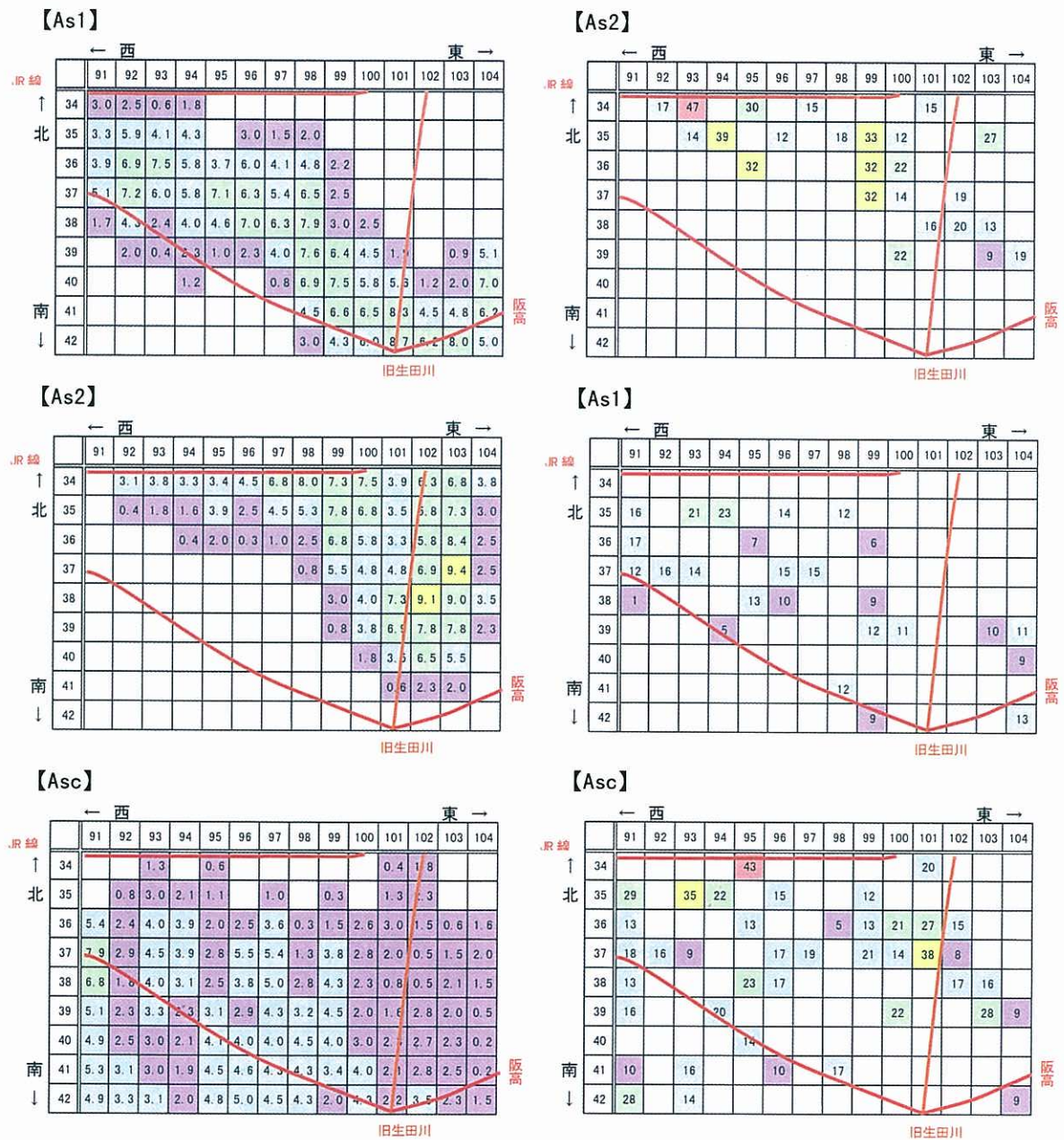


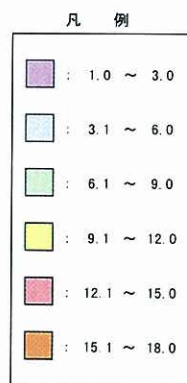
図-1.4.2 東部地区における沖積砂層の層厚及び N 値分布図



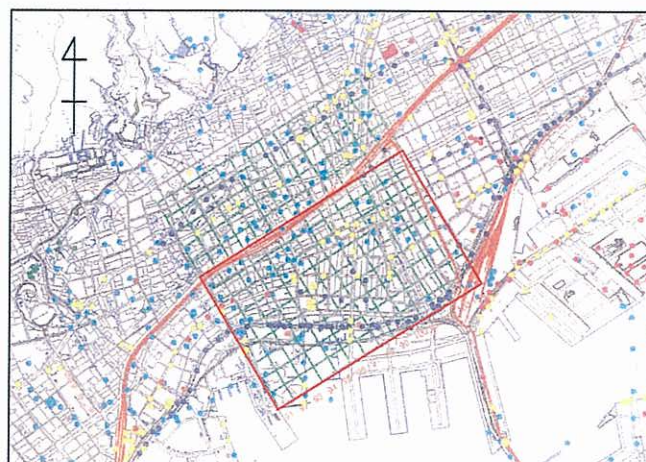


(a) 層厚分布

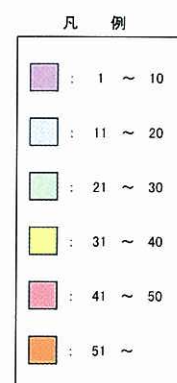
(b) N 値分布



層厚: m



(c) メッシュ図(中部)



平均N値: 回

図-1.4.3 中部地区における沖積砂層の層厚及びN値分布図







値は、埋立地から旧海岸線付近までは 20 回以下を示す部分が多い。一方、内陸部では 21～50 回である。また、住吉川右岸地域は  $N=31\sim50$  であるのに対して、住吉川左岸地域は  $N=11\sim30$  である。

【As1(下)】は標高-10.0m 以深の砂層で、層厚は 6～3m 以下の地域が多い。平均 N 値は【As1(上)】ほど地域的な傾向は見られない。

【As2】は山側からの供給による堆積物のため、現海岸線付近より北側に分布しており、北へいくほど層厚が増大している。N 値は南北方向、東西方向とも連続性が悪く、地域的な特徴は見られない。

#### b) 中部

図-1.4.3 に中部地区の各地層の層厚と地層別の平均 N 値を示した。【As1】は元町駅付近から南側一帯に分布し、層厚は 3.1～9.0m である。N 値はほとんどの地域で 20 回以下を示している。

【Asc】の層厚は、旧生田川周辺で 3m 以下、それより西側で 6m 以下である。N 値は 20 回以下を示す地域が多い。

【As2】は海岸地形なりに堆積分布しており、生田川の扇状地性堆積物である傾向が見てとれる。平均 N 値は東西方向で連続性が悪く、ばらついている。

#### c) 西部

図-1.4.4 に西部地区の各地層の層厚と地層別の平均 N 値を示した。図-1.4.5 にはメッシュ図を示している。【As1(上)】は北西方では分布せず、南域または南東域へいくに従い、その層厚が増大する。一方、

【Ag(上)】は逆の傾向を示し、北西域で層厚を増している。西域に分布する礫層（長田礫層）が、和田岬を境に砂層に変化していることを示している。【As1(上)】の N 値は、南域または南東域で小さく 20 回以下を示すところが多い。一方、【Ag(上)】の N 値は西域で大きく  $N=31\sim50$  を示す。これより、西部地区では南東域の方が液状化の可能性が高いことが予想される。

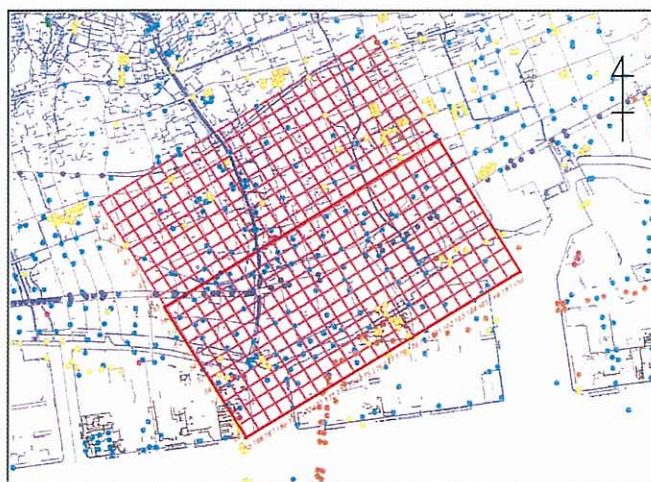


図-1.4.5 メッシュ図（西部）

【As1（下）】は東側で 3m 以下、西側で 3～9m の層厚を有し、本層の欠落部分に【Ag（下）】が入り込んでいる状況が確認できる。【As1（下）】の平均 N 値は、地下鉄海岸線近辺で小さい傾向を示し、北西方または西方で大きくなる傾向を示す。

#### (4) まとめ

神戸市域に分布する表層地盤、ここでは沖積砂層・礫層に着目し、液状化の検討に必要な特性を整理することを目的として、3つの地域別に JIBANKUN データを利用して分析できる N 値と粒度特性ならびに各層の層厚と N 値の平面分布状況について述べた。統計的な処理を施すことによって、例えば青木砂層や長田礫層などの表層地盤の特徴ならびに工学的特性を把握することができた。ここで求めた N 値や粒度特性値を次章で述べる液状化解析のためのモデル化に用いた。

## 2. 液状化の検討

一般に、液状化の検討方法として、下記の3つの方法がある。

### A・地形・地質図を用いた液状化危険度の概略予測：

地盤構成の概略を、地表面からの情報により判断し、大まかに液状化の難易度を整理する方法である。液状化しやすい地盤を特定するには、便利な方法である。しかし、地震規模の大小による、液状化危険度の程度の差や危険領域の変化を判定することは困難である。

### B・土質調査結果を用いた簡易な液状化危険度の判定：

主に地表面加速度と標準貫入試験データを基に、土質調査地点の液状化危険度を判定する。地震規模の大小に応じて、地表面加速度のレベルを変化させ、液状化危険度の変化を簡便に推定できるが、地盤構造の違いによる地表面加速度の変化は検討できない。

### C・室内液状化試験や動的応答解析を用いた詳細な液状化危険度の判定：

主に、重要構造物の建設地点などにおいて、解析対象地盤をモデル化し、全応力法による動的応答解析や有効応力法による液状化解析を行い、解析地点の液状化危険度評価を行う。液状化判定に加えて、地盤変位等が推定できるなど、付加的解析結果が得られる。

今回、液状化分科会が目標とした神戸市内の液状化危険度評価は、上記Cに述べた全応力法の動的応答解析により、神戸市内のできるだけ広範囲地域の液状化判定を行おうとするものである。神戸JIBANKUNに収録されている多数のボーリングデータ地点について、上記Bの簡易的液状化判定を行い、

多地点での判定結果を元に液状化危険度マップを作成することも可能である。しかしながら本分科会では、本報告の前半部分で示したように、まず神戸市内の東部・中部・西部の3箇所において、地盤構造と工学的性質の分布を詳細に把握し、各地域内で約1.5km四方の領域を100mx100mのメッシュ要素に分割し、要素毎に数値地盤構造モデルを作成して全応力法による動的応答解析を行い、検討対象域内の液状化危険度の変化を検討した。本分科会の液状化危険度評価の流れを示すと、図-2.1.1のようである。

図のように、メッシュごとに工学的基盤や地下水位置を設定し、全応力法（SHAKE及びMDMプログラム）の一次元応答解析を実施して、動的解析から得ら

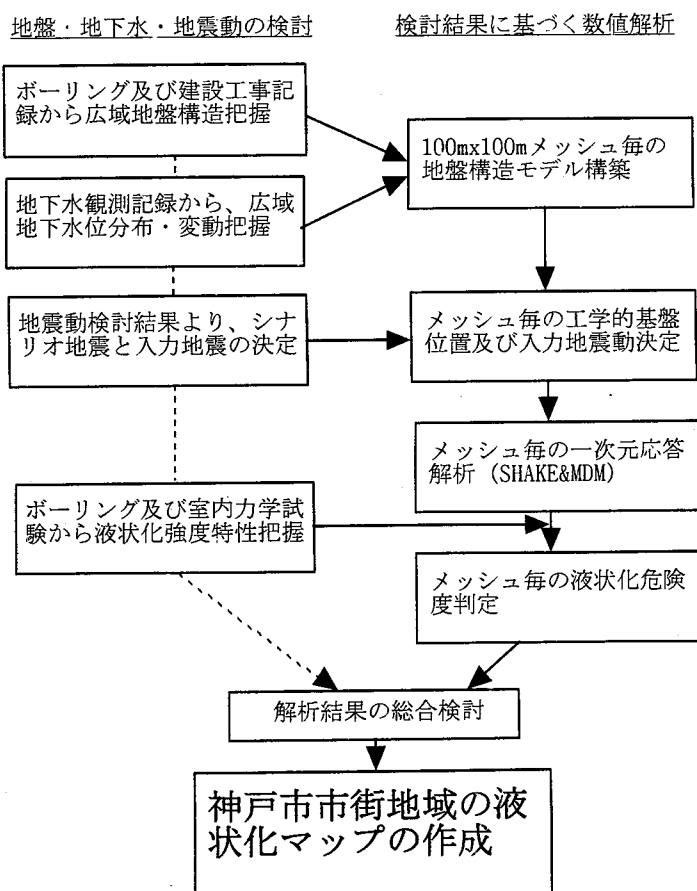


図-2.1.1 本研究での液状化危険度評価法

れるせん断応力と、地層毎の平均N値から得られる液状化強度を比較して、液状化判定を行っている。動的応答解析手法の詳細については後で述べる。

今回は神戸市内の限定された領域内での検討であるが、地盤情報を詳細に分析し、その結果から得られた知見を元に検討領域について数値地盤構造モデルを作成しておけば、地震動分科会の研究成果と連携して、工学的基盤深さでの任意の地震動入力に対応できるため、将来的な地震動想定に対しても検討対象地盤の液状化危険度評価が可能となると考えたためである。また、今回得られた数値地盤構造モデルは、検討対象域の3次元的地層変化を数値空間上に作成できるため、液状化判定のような地震地盤災害の検討の他にも、平常時の建設工事での施工計画など、各種の工学的利用が広がると考えた。今回実施した、3地域での液状化評価の詳細な実施方法については、2.3節以降で示すこととし、ここでは設計指針等で用いられる、既往の液状化危険度予測法について概述する。また、液状化評価法に関する国内外の知見・方針の比較についても記述する。

## 2.1 各種液状化評価の手法について

国内での基準としては、近年改訂された指針としては、以下のようなものが代表的であろう。

①道路橋示方書・同解説「耐震設計編」、日本道路協会 2002

②建築基礎構造設計指針、建築学会 2001

③港湾の施設の技術上の基準・同解説、運輸省港湾局 1999

④鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、(財)鉄道技術研究所 1999

また米国の液状化判定基準としては、1996年にYoudとIdrissによって米国内の研究者を集めたワークショップ<sup>1)</sup>開催され、Seed & Idriss (1971)によって提唱された簡便液状化判定法(simplified procedure)<sup>2)</sup>について議論が交わされた。その成果が本年2001年4月の米国土木学会論文集<sup>3)</sup>に掲載されている。

一般に液状化判定では、以下の2つのパラメータを基に液状化判定をすることが多い。1つは、地震動により地盤内に作用するせん断応力 $L$ であり、他の1つは、地盤の液状化強度 $R$ である。両者の比をFL値( $=R/L$ )で表現し、その深度分布を基に、解析対象地点の液状化危険度判定を行う。設計指針の殆どが、この液状化判定の方法を用いるが、上述Cの詳細解析においても、動的応答解析で得られた地盤内せん断応力の推定値と、土質調査に基づく液状化強度を比較し、液状化危険度評価が行われる。以下では、これら2項目の評価方法についての現状を述べる。

### 2.1.1 地盤内液状化強度の推定法

国内の液状化強度推定法では、殆どの場合、標準貫入試験の値を用いることが多かったが、2001年改定の建築基礎構造設計指針では、コーン貫入試験結果が強度判定に採用された。一方、米国では、標準貫入試験の他に、コーン貫入試験、礫質地盤用のベッカー貫入試験、せん断波速度の値が液状化強度判定に利用されている。

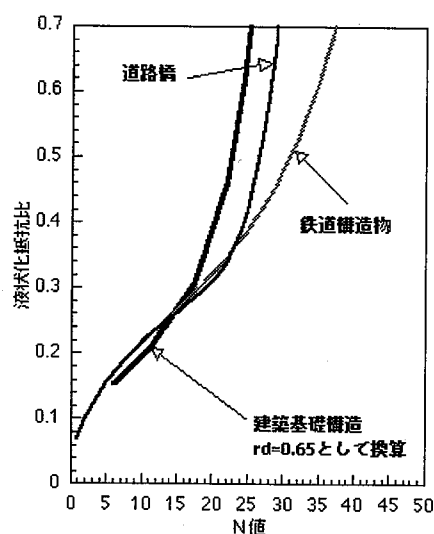


図-2.1.2 液状化抵抗比 vs N値



○標準貫入試験： 図-2.1.2は国内基準の①②④で得られる、細粒分の影響がないきれいな砂についての標準貫入抵抗と液状化強度の関係を示したものである。なお、図中横軸のN値は拘束圧の影響を補正したもので、100kPaの拘束圧での値に換算したものである。道路橋示方書と鉄道構造物設計標準では、N値が約25以上で、異なる強度であるが、建築基礎構造設計指針ではN値が約20以上で異なる強度が示されている。なお、建築基礎構造設計指針で用いられるN値と液状化抵抗比の関係は、米国で用いられているもので同じであるが、米国での標準貫入のN値は $N_{1(60)}$ と表現され、標準貫入の打撃効率が60%であるとしている。従って、 $N_{1(60)}$ 値とはエネルギー効率が60%となる貫入試験で得られたN値を100kPaの拘束圧での値に換算したものであり、日本での標準貫入試験では一般にエネルギー効率は約80%とされるため、日本のN値に換算するには、 $N_{1(60)}$ 値を0.8倍する必要がある。また米国の液状化強度としては、三軸非排水繰返し載荷試験で繰返し回数15回において、DA5%ひずみが発生する応力比を基準としており、我が国の繰返し回数20回と異なる点に注意する必要がある。

なお米国の液状化判定に用いる判定図では、縦軸に地震によるせん断応力比（CSR, Cyclic Stress Ratio）又は液状化強度（CRR, Cyclic Resistance Ratio）を表現し、横軸に原位置試験結果を示しており、液状化危険度の判定図を統一している。先述のように、米国での原位置試験法としては、1. 標準貫入試験  $N_{1(60)}$  値、2. せん断波速度、3. コーン貫入試験、4. ベッカー（大型）貫入試験の4つの試験を取り上げている。

一方、液状化強度については細粒分含有率による補正、深さによる貫入抵抗値の補正が必要である。各指針により、細粒分増加による液状化強度増加の推定式や、拘束圧の変化によるN値の補正方法が異なっている。

拘束圧による、N値の補正について各基準での補正法の一覧を示すと以下のようなものである。また、補正係数を $C_n$ として、拘束圧の違いによる $C_n$ の変化を示すと、図-2.1.3のようである。

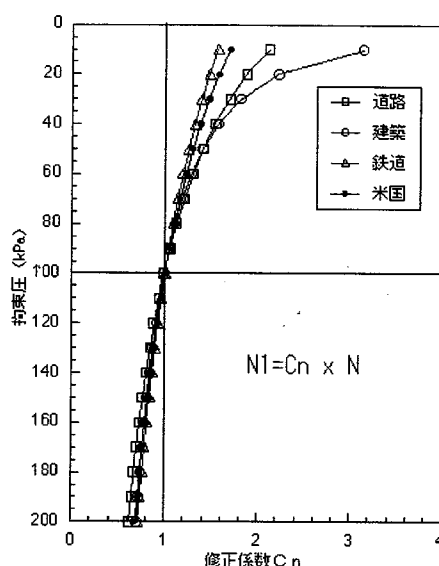


図-2.1.3 拘束圧による補正係数 $C_n$

| 基準名                   | 鉛直応力の単位は kPa  |
|-----------------------|---|
| 道路橋示方書・同解説            | $N_1 = 1.7N / (\sigma'_z / 98 + 0.7)$                                       |
| 建築基礎構造設計指針            | $N_1 = N \sqrt{98 / \sigma'_z}$   |
| 鉄道構造物等設計標準・同解説        | $N_1 = 2.5N / (\sigma'_z / 100 + 1.5)$                                      |
| 米国 Youd&Idriss (2001) | $N_1 = N \sqrt{98 / \sigma'_z}$ or $N_1 = N (2.2 / (1.2 + \sigma'_z / 98))$ |

一方、細粒分により液状化強度の評価は様々であり、下記の表に示すような対応となっている。

| 基準名                   | 強度増加への対応方法                            |
|-----------------------|---------------------------------------|
| 道路橋示方書・同解説            | $N_a = c_1 N_1 + c_2$                 |
| 建築基礎構造設計指針            | $N_a = N_1 + \Delta N$                |
| 鉄道構造物等設計標準・同解説        | $f(D_{50}, Fc, \sigma'_z)$ で、直接強度増加評価 |
| 港湾の施設の技術上の基準・同解説      | $f(Fc, I_p)$ で、等価N値の増加評価              |
| 米国 Youd&Idriss (2001) | $(N_a)_{60} = c_1 (N_1)_{60} + c_2$   |

N値に換算するものが大勢であるが、鉄道の場合のように、直接強度増加を評価するものもある。また、粒度や塑性指数を考慮したものもあり、細粒分増加への対応は、研究成果の発展が望まれる分野であろう。上記の表中で、N値に細粒分の影響を考慮した3基準(道路、建築、米国)の比較を行ったものが、図-2.1.4である。図から分かるように、細粒分の増加によるN値の変化は、N値増加に強く関係する道路橋示方書と、細粒分増加に強く支配される建築基礎構造設計指針及び米国基準の2つに大きく分かれるようである。また、これらの関係が大きく異なるのは、N値が約20以下の緩い地盤で有り、この条件での細粒分の影響についてはさらに検討が必要であろう。

○コーン貫入試験結果の利用： 先述のように、コーン貫入試験結果の導入が国内で開始されたが、米国と②の基準とをそれぞれ示したものが図-2.1.5、図-2.1.6である。なお砂礫地盤においては、標準貫入試験及びコーン貫入試験は困難な場合が多い。ベッカー貫入試験は粗粒土地盤での試験を目的としたもので、ドリルビット外径168mmのものをディーゼルハンマーで貫入した値により液状化強度を推定するものである。我が国の動的貫入試験と同様な位置付けと思われるが、以下の考察では検討の対象外とする。

コーン貫入試験結果を用いて液状化判定をする場合は、両図に示すように横軸に拘束圧の影響を補正したコーン貫入値  $q_{c1N}$  を用いることとしている。なお、 $q_{c1N}$  は次式により算定するとしており、 $q_{c1N} = C_q (q_c / \text{Pa})$  ,  $C_q = (\text{Pa} / \sigma'_{v0})^n$  で補正する。ここで、 $q_c$  は補正前のコーン先端抵抗、 $\text{Pa}$  は1大気圧であり、係数  $n$  は粒状土では0.5とする。また、浅い場所では  $C_q$  が1.7以上にならないこととする。

○せん断波速度の利用： せん断波速度による液状化判定は、図-2.1.7に示す結果を用いる。なお、図中の横軸は正規化されたせん断波速度であり、拘束圧による影響を  $V_{s1} = V_s (\text{Pa} / \sigma'_{v0})^{0.25}$  の関係により補正する。せん断波速度による判定は、盛土や粗粒土地盤のように標準貫入試験やコーン貫入試験が困難な場合に利用価値が高い。なお、以上の他の方法として、実測された地盤振動エネルギーを基に液状化判定を行う方法<sup>9)</sup>が検討に値すると指摘されている。鉛直アレー観測等が得られることによって、この方面の研究が進展することが期待される。

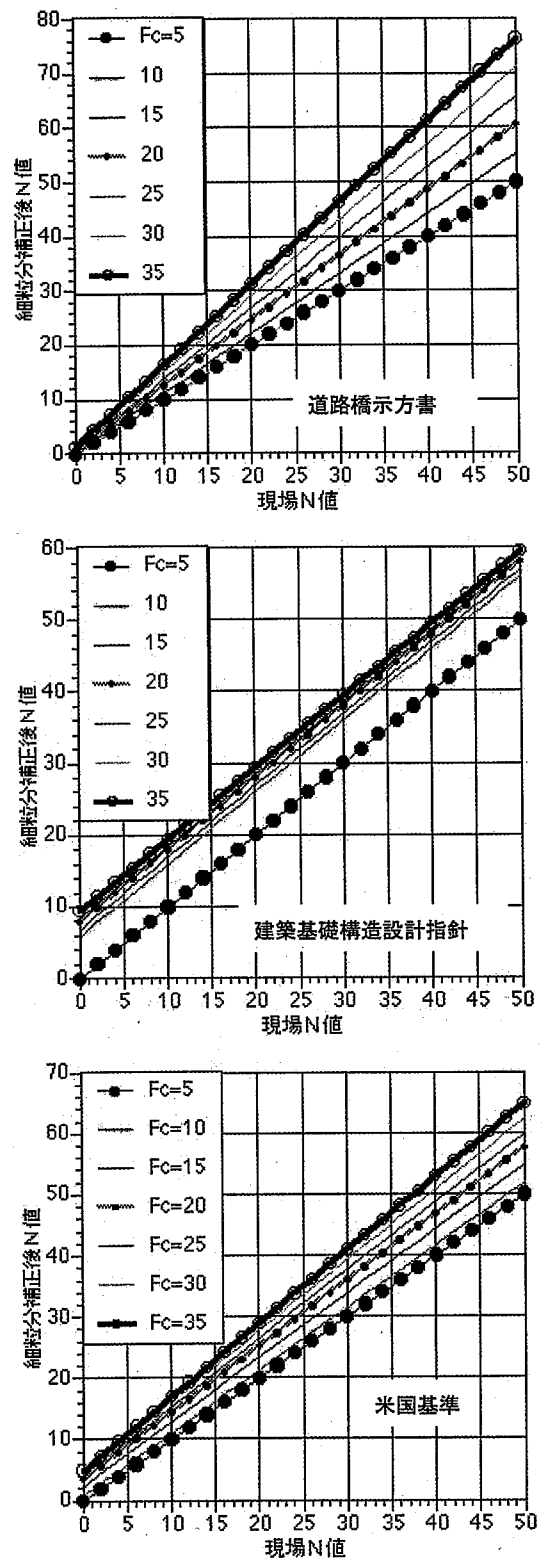


図-2.1.4 細粒分増加によるN値変化

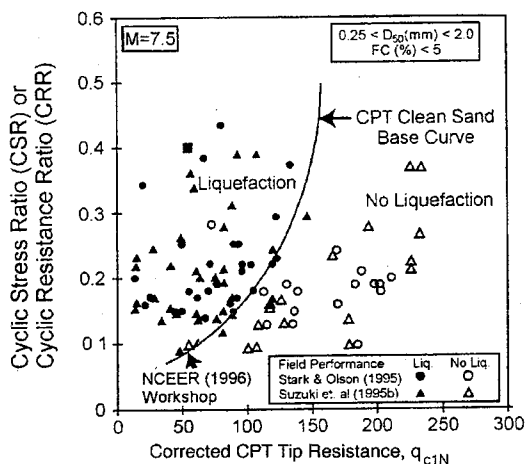


図-2.1.5 コーン試験による液状化判定（米国）

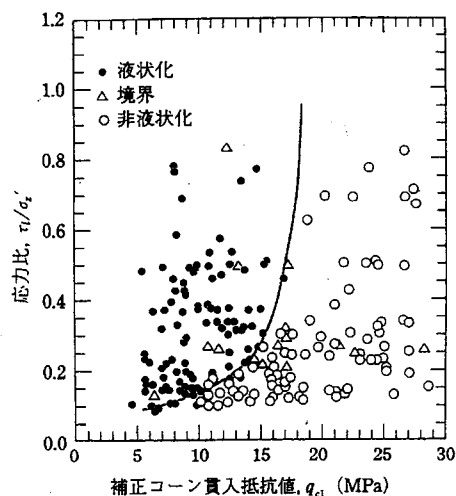


図-2.1.6 コーン試験による液状化判定（日本）

以上の判定法では大地震時のせん断応力評価などに簡略に過ぎる面もあるが、液状化強度評価については、異なる原位置調査を導入するなど意欲的であると思われる。神戸市内でも、せん断波速度などのデータが意欲的に収集されつつあるため、上記のような解析結果の利用が可能であろう。

## 2.1.2 地盤内地震動分布の推定法

国内での地震動推定法の特徴としては、阪神大震災以降に直下型地震を考えた強震動へ対応があり、前出の③以外の基準において、直下型地震への対応が取り入れられている。例えば①では、通常地震では水平震度は0.21~0.40であるが、直下地震のタイプ2の場合は2倍の値となり、地表面での水平震度は0.42~0.80の値となる。一方、地盤の最大加速度を推定するのではなく、等価な一定繰返しせん断応力比として外力を求めようとするのが、米国のSeedらによる方法や②の場合である。②ではレベル2の場合、せん断応力比=0.23の値が推奨されている。

いずれの方法においても、地盤内地震強度の地盤深さ方向の減衰は、国内では同じであり、 $1-0.015z$ の関係により、地表面の値より一次的な変化で減少させている。一方、米国においては、約10m以浅では $1.0-0.00765z$ の関係を用いており、地震動の減衰が緩やかである。

またSeed&Idriss(1971)の簡易判定図では、M7.5の地震力が基本となっているが、それ以外の地震動に関して以下のような補正法が提案されている。次式に示すように、Mとともに変化するMSF値よりM7.5の地震力に対する液状化強度について補正を行い、安全率を修正する：

$$FS = (CRR_{7.5} / CSR) \times MSF.$$

以上のいずれの指針においても、地表面加速度を基準として、その値を地盤深さ方向に減衰させ、

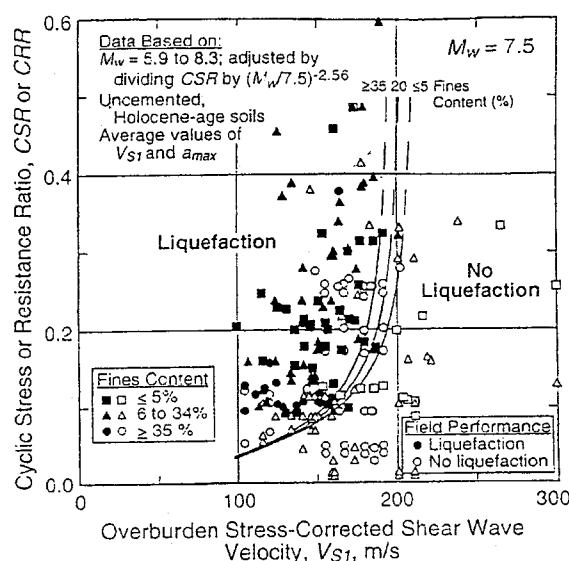


図-2.1.7 Vsによる液状化判定

ある一定の深さの範囲（通常 20m）の中での液状化危険度を判定する。これに対し、動的応答解析を利用する場合、深さ方向の応答加速度の変化が地盤構造の違いにより敏感に生じる。本分科会では、地盤構造の違いによる深さ方向の応答加速度の変化は重要であると考え、一次元地盤モデルを構築し、工学的基盤において想定地震動を入力して応答解析することとした。

### 2.1.3 液状化分科会の地震動応答解析法

今回、神戸市域の液状化判定を行うにあたって、等価線形解析法である SHAKE と非線形解析法である MDM の 2 つのプログラムにより、地震により発生するせん断応力の評価を行うこととした。液状化判定の流れは先に示したとおりであり、100mx100m で区切られたメッシュ毎に、1 次元の数値地盤構造モデルを確定し、工学的基盤に兵庫県南部地震の波形を最大加速度が 500 ガルとなるように設定して入力した。今回の検討対象域は、東部、中部、西部の 3 カ所において、それぞれの地域は約 250 程度のメッシュから構成された。

等価線形法である SHAKE については、多くの機関で使用されているため、説明は不要と思われるが、本解析法はあくまで線形解析であるため、大きな地盤変形（せん断ひずみ）が生じた場合に解析精度が悪くなることや、地表面での応答加速度が過大評価されやすいことが知られている。しかし、周波数領域で解を求めるため、計算時間は非常に少なくて済む。一方、土の非線形モデルを時刻歴解析するものが MDM の方法である。一般に、液状化現象のような土の非線形な力学挙動が卓越する問題では、非線形な力学モデルを用いて、繰返し載荷による剛性低下を表現する必要がある、そのためには地震波形を元に、地盤振動を表す運動方程式を時刻歴解析する手法が望ましい。従来、周波数領域での解析を行う等価線形解析と、運動方程式を時刻歴解析により逐次積分する非線形解析では、解析速度にかなりの差があったが、近年のコンピュータ速度の大幅な向上は、両者の差を意識させないようになっている。

これまで、土の非線形な力学モデルとしては、Hardin-Drnevich モデルや Ramberg-Osgood モデルが使用されてきたが、これらのモデルでは応力-ひずみ関係に使用される最大せん断剛性  $G_{max}$  の値が一定であるため、液状化のように大きな変形を生じる場合に、応力-ひずみのループ面積から求まる減衰比の値が過大となる場合があった。このため MDM(Momentary Deformation Modulus)法<sup>4)</sup>では、**図-2.1.8**に示すように履歴毎に描かれる応力-ひずみのループの初期剛性  $G_{MDM}$  が発生ひずみ量に応じて低下するとしている。この関係を用いると、上述の H-D モデルや R-O モデルで問題となった、減衰比が過大評価されることが無くなり、実験で得られるせん断剛性率  $G$  と減衰比  $h$  のせん断ひずみ  $\gamma$  との関係を、非常に精度よく再現する非線形力学モデルを構築することが可能となった。なお、実験から得られる  $G-\gamma$  関係、 $h-\gamma$  関係を表現するため、Hardin & Drnevich が示した以下の関係を用いている。

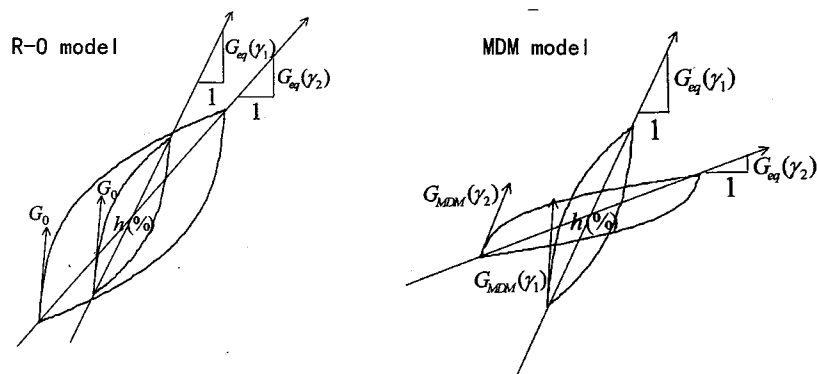


図-2.1.8 R-O モデルと MDM モデルの違い（初期剛性の低下）

ため、Hardin&Drnevich が示した以下の関係を用いている。

$$h(\gamma) = h_{\max} (1 - (G_{\text{eq}}/G_{\text{MDM}}))$$

これから、応力-ひずみのループの初期剛性  $G_{\text{MDM}}$  の変化は以下の式で与えられるとして、実験データから  $G_{\text{MDM}}$  のひずみによる剛性低下を表現している。

$$G_{\text{MDM}}(\gamma) = h_{\max} \cdot G_{\text{eq}}(\gamma)_{\text{実験値}} / (h_{\max} - h(\gamma)_{\text{実験値}})$$

解析の第1の目的は、地震動によるせん断応力分布を求めることであるため、簡便法に比べてせん断応力分布はより詳細なものとなる。一方、強度評価として、神戸 JIBANKUN のデータより液状化対象層の特定とその液状化強度の変化を求める必要がある。道路橋示方書では直接  $N$  値より液状化強度が求められるが、神戸市域の沖積砂の液状化強度は必ずしも豊浦標準砂のものと一致しないという可能性がある。

今回は各基準で用いる  $N$  値からの液状化強度判定により、最終的な  $F_L$  値の検討を行った。将来的には  $N$  値から相対密度を推定して、現地密度に応じた液状化強度の評価が望ましい。

#### 参考文献

- 1) Youd, T.L. and Idriss, I.M.: Proc. of NCEER Workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils, Nat. Ctr. for Earthquake Engineering. Res., State Univ., of New York at Buffalo, 1997
- 2) Youd, T.L. and Idriss, I.M.: Liquefaction resistance of soils; Summary report from 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.127, No.4, 2001, 297-313, 2001
- 3) Seed, H.B., and Idriss, I.M.: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 97(9), 1249-1273, 1971
- 4) 熊崎幾太郎、上田稔(1998): 石炭埋立地盤の耐震性評価における技術的問題について、電力土木、276、71-75

## 2.2 液状化危険度予測の事例

新潟地震（1964）や十勝沖地震（1968）による液状化被害の経験を契機に、液状化の予測法に関する研究が数多く行われ、地震防災対策の基礎的な検討事項として液状化危険度予測が実施されるようになった。その後、1995年の兵庫県南部地震では内陸直下型地震の非常に強い地震動による液状化現象を経験し、マサ土埋立地や比較的良好な締まった礫層の液状化に対して、いわゆるレベル2地震動の液状化判定法などが研究・提案され、諸構造物の耐震設計指針に新たに取り入れられた。また、同地震以後には、各自治体で地域防災計画の見直しが行われ、その中で液状化の予測が行われている。

ここでは、関西圏の中でも特に液状化発生の可能性が高いとされる大阪市域において、これまでに実施されてきた液状化危険度予測の事例等を紹介する。

### (1) 兵庫県南部地震による大阪市域の液状化

大阪市域の地盤は沖積低地で、軟弱な粘土層と砂層が広範囲に厚く堆積している<sup>1)</sup>。沖積層の上部に堆積する上部沖積砂層（As）は、図-2.2.1に示すように西大阪地域では層厚6～10mを有しており、N値は10～15程度で緩く、液状化発生の可能性が高いことをうかがわせる。

兵庫県南部地震では震源断層から15～30km離れた大阪市域にも液状化が発生した。図-2.2.2に、兵庫県南部地震の液状化発生箇所の分布図を示す<sup>2)</sup>。同図は、地震発生直後に撮影された空中写真から液状化噴砂泥跡を判読した結果や、各機関による現地調査の情報を総合して作成されたものである。液状化が発生した場所は西大阪地域に多く見られ、上部沖積砂層の分布域と大まかに整合している。また、この付近の地震動は、強震動観測記録より地表最大加速度が150～300galと推定され、従来の液状化予測の対象とされた海溝型の遠距離地震や近距離地震の地震動に類するものであった。

図-2.2.3は、兵庫県南部地震の10年前の1986年に実施された液状化危険度予測の結果である<sup>3)</sup>。この予測は、既存のボーリング資料のデータベースから土性、粒度、N値のデータを用い、地下水位は地表面の掘削現場の地下水位情報を参照して平面的な分布を把握し、岩崎・龍岡の簡易判定手法によりボーリング1本毎の液状化危険度を評価して250mメッシュに平均化している。液状化危険度は、簡易法によるN値深度毎の $F_L$ 値を次式の $S_L$ 値（ $P_L$ 法で深度方向の重みを1で一定にした値： $P_L^*$ と同値）により評価している。また、同図の結果は、地表最大加速度の入力を200galとして市域全体に一样に与えている。

$$S_L = \sum S_z \cdot d$$

ここで、

$$S_z : \begin{cases} F_L < 1.0 \text{ の時 } 1 - F_L \\ F_L \geq 1.0 \text{ の時 } 0 \end{cases}$$

$F_L$  : ある深度の液状化抵抗

$d$  :  $S_z$  で評価される土層厚(m)

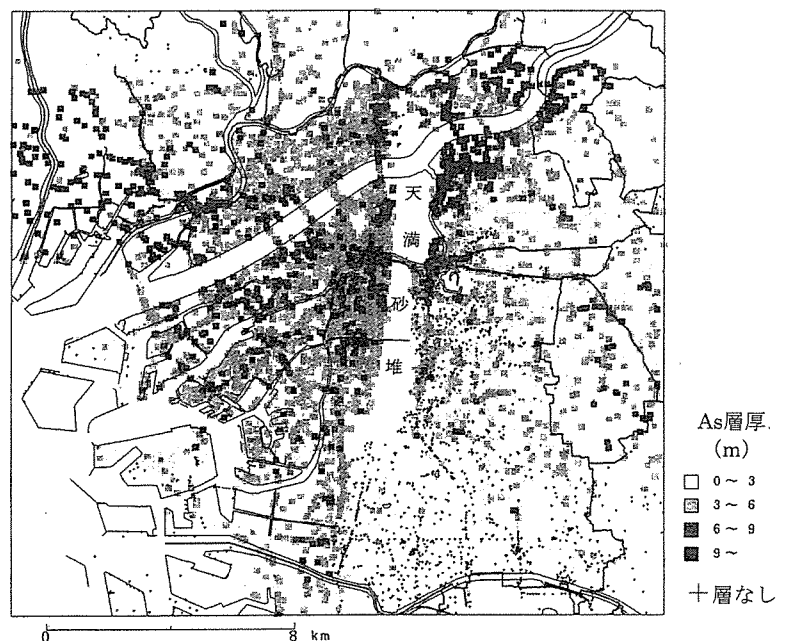


図-2.2.1 上部沖積砂層の層厚分布<sup>1)</sup>

事前予測は、地域の相対的な液状化危険度を一様な入力加速度により評価したもので、兵庫県南部地震の地震動による予測ではない。しかしながら、大阪市域では想定と同程度の地震動が観測され、西大阪地域のように液状化危険度が相対的に高いと予測された地域では実際に多くの地点で液状化が発生している。淀川上流の危険地域では液状化発生地点は数箇所しか見られなかったが、この付近の観測地震動は100gal程度と小さかった。このように、ボーリングデータに基づく液状化予測は、実際の液状化発生地域をほぼ再現しており、予測法として有効であることが確認された。

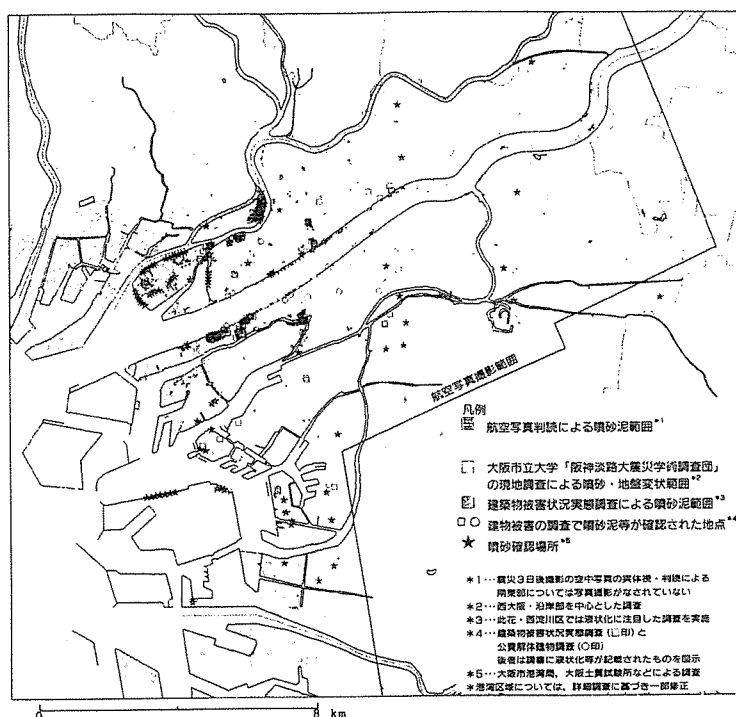


図-2.2.2 兵庫県南部地震による大阪市域の液状化<sup>2)</sup>

## (2) 旧地形と液状化

液状化危険度を概略的に判定する方法として、微地形区分図を参照する方法がある。これは、埋立地や旧河道といった過去に液状化がよく発生してきた地形や、過去に液状化した履歴を持つ地点で再び液状化が生じやすいことから、微地形図や旧地形図の情報より液状化危険度を判定するものである。

図-2.2.4は、兵庫県南部地震における西大阪地域の液状化とその被害の発生地点を明治17～22年の旧地形図上に図示したものである<sup>1)</sup>。図には河川改修工事前の旧淀川などの旧河道の位置が示されている。図中、○、□印で示す建物被害の調査で液状化の発生が

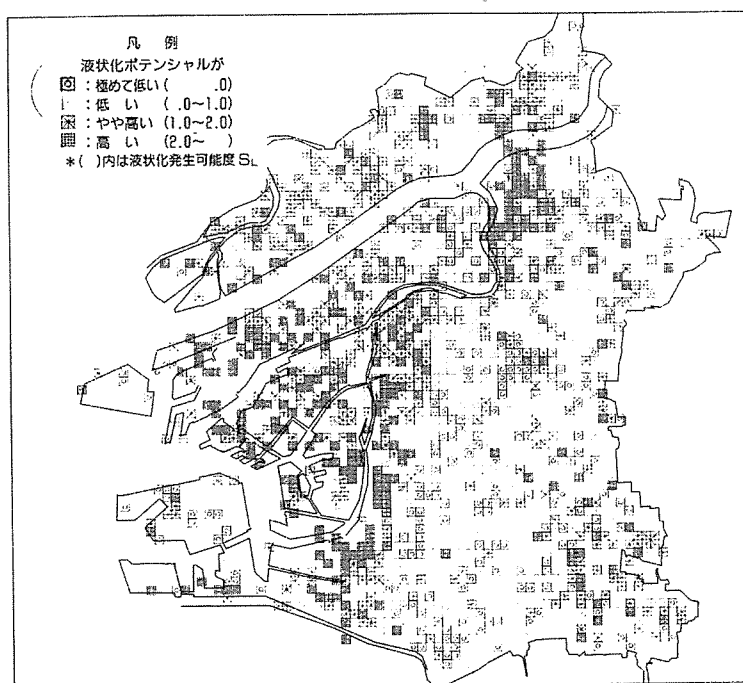


図-2.2.3 事前の液状化予測<sup>3)</sup>

確認された地点に注目すると、それらは旧河道の分岐・蛇行する場所や、旧中州の造成地付近に局所的に集中していることが分かる。図示はしていないが水道管や道路の被害もこの場所に集中している。このような局所的に液状化危険度の高い箇所は、図-2.2.3のボーリングデータによる予測では表現されていない。また、ボーリングデータの密度を高めたとしても、各点の予測結果がばらつく中で、このような液状化を評価することは難しい。ゆえに、この経験に基づき、旧地形図等の情報も参照して液状化危険度を予測することは重要である。大阪市の新しい予測では、この情報も加えた検討がなされている。



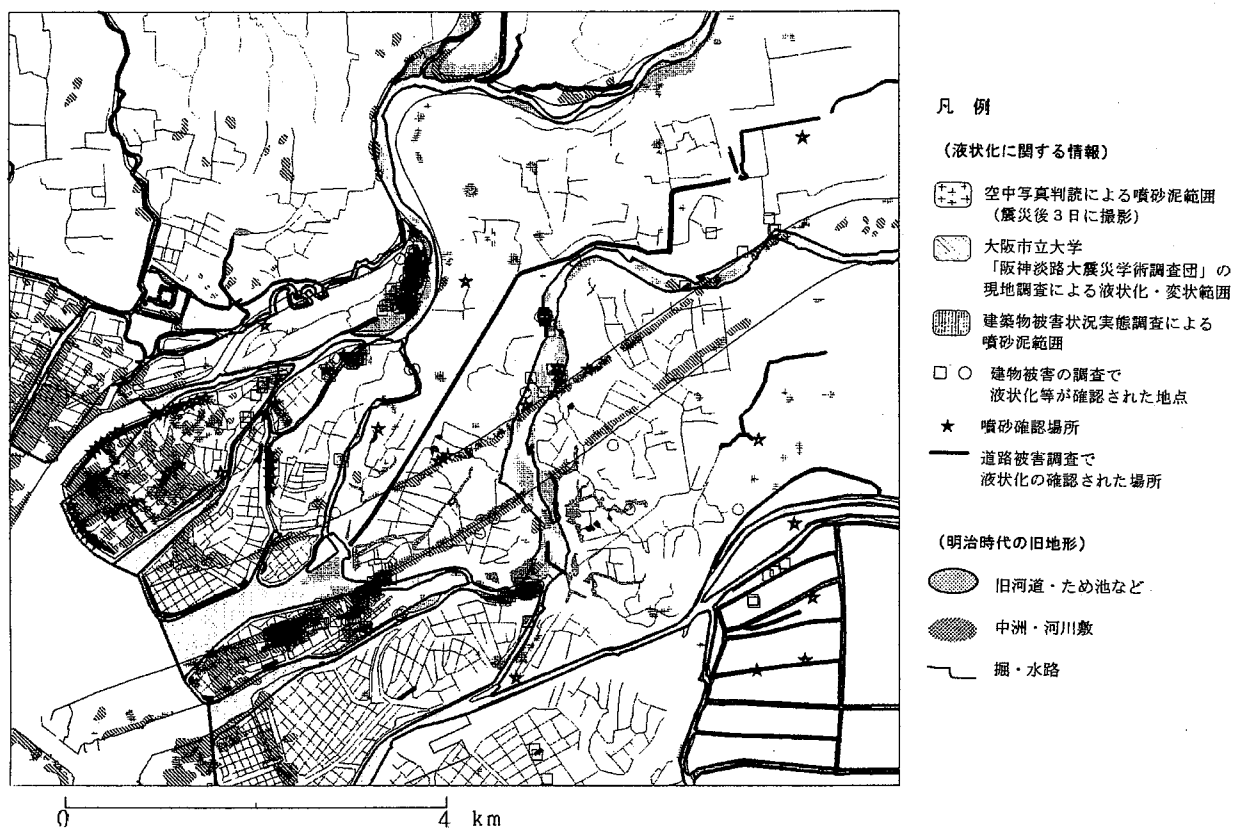


図 2.2.4 兵庫県南部地震による西大阪地域の液化化・被害と旧地形<sup>1)</sup>

### (3) 震災後の液化化危険度予測

兵庫県南部地震以降に、大阪市では地域防災計画の見直しが行われ、その中で液化化危険度予測が実施された。この予測では、図-2.2.5に示すようにボーリングデータを基礎資料に簡易判定法による危険度評価を基本とし、兵庫県南部地震の液化化被害データより危険度評価値等を検討して予測精度の向上が図られた。大阪府で実施された液化化予測でも同様な手法が用いられている<sup>4)</sup>。なお、この予測は地域の液化化危険度（液化化ポテンシャル）を評価したもので、地域の地震動特性や想定地震に対する液化化危険度を評価したものではない。

以下に、検討内容と結果を紹介する。

#### A. 予測条件

予測では、データベースの約 10,000 本のボーリングデータから、N値の試験数が多く、調査深度が 20m 以浅で砂層を貫通した調査など、液化化予測に適切なデータのみを用いている。

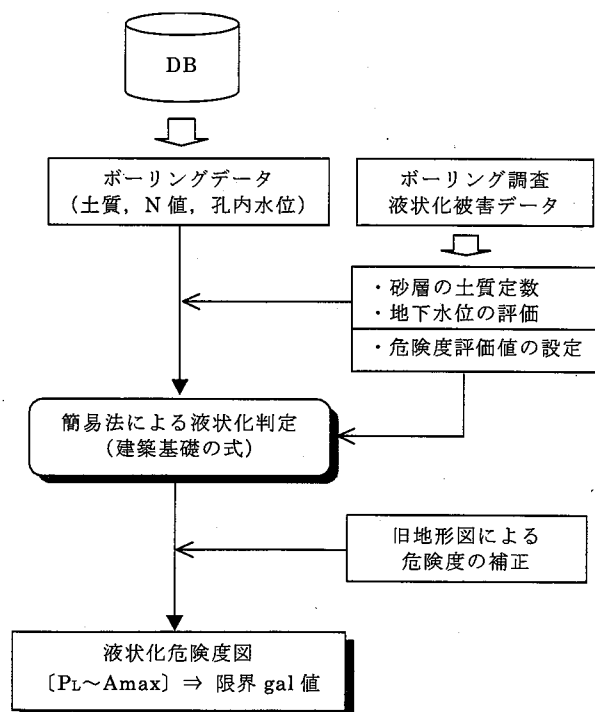


図-2.2.5 液化化予測の流れ

地下水位は、大阪市域の表層地下水位を把握するために 20 箇所の水位観測孔を設置し、この観測値とボーリング孔内水位との対応を検討したうえで、ボーリング孔内水位を 250m メッシュで平均・補完した値を用いている。

土質定数は、ボーリング柱状図に記載された土質名毎に一律に値を設定している。液状化対象層の砂層については西大阪地域に分布する上部沖積砂層の平均粒径  $D_{50}$  と細粒分含有率  $F_c$  の平均的な値を用いている。

## B. 液状化危険度の評価指標

液状化判定式は「建築基礎構造設計指針の式（以下、建築基礎の式という）」を用い、各調査地点の液状化危険度は「 $P_L$  値」<sup>5)</sup> により評価している。各判定式では、図-2.2.6 のように  $N$  値から推定される各土質の液状化強度は異なるので、液

状化発生 の  $P_L$  値も各式で異なることになる。よって、兵庫県南部地震における液状化地点と非液状化地点の  $P_L$  値を算出して液状化発生 の  $P_L$  値を求め、危険度評価の指標としている。

図-2.2.7 に、液状化発生  $P_L$  値の検討結果を示す。検討では、水位観測用のボーリングとその周辺の既存のボーリング地点を対象に、土質・地下水位条件は今回の調査データを用い、入力地震動は強震記録から大まかに 3 区分して各々の最大加速度値を入力し、 $P_L$  値を算出している。図中、黒く塗られた記号が液状化地点、白抜きが液状化した可能性を有する地点、矢印が非液状化地点である。これより、液状化が発生した地点はほぼ  $P_L > 3 \sim 5$  であることが分かる。さらに、液状化地点の中で建物被害が発生した地点は  $P_L > 5$  なので、 $P_L = 5$  を液状化危険度の評価指標としている。

図-2.2.8 は、この評価指標を検証した結果である。兵庫県南部地震の地震動を強震動記録より推定して入

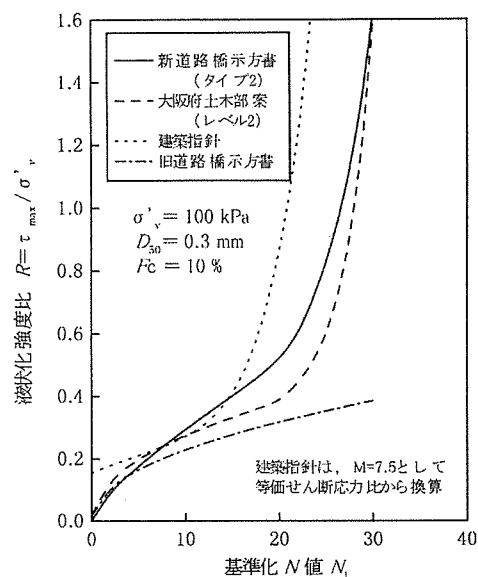


図-2.2.6 判定法の液状化強度比～ $N$  値

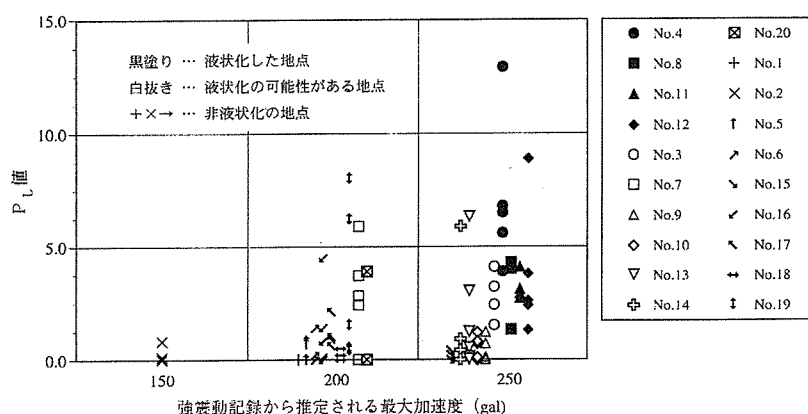


図-2.2.7 建築基礎の式による  $P_L$  値と液状化の関係（西大阪地域）

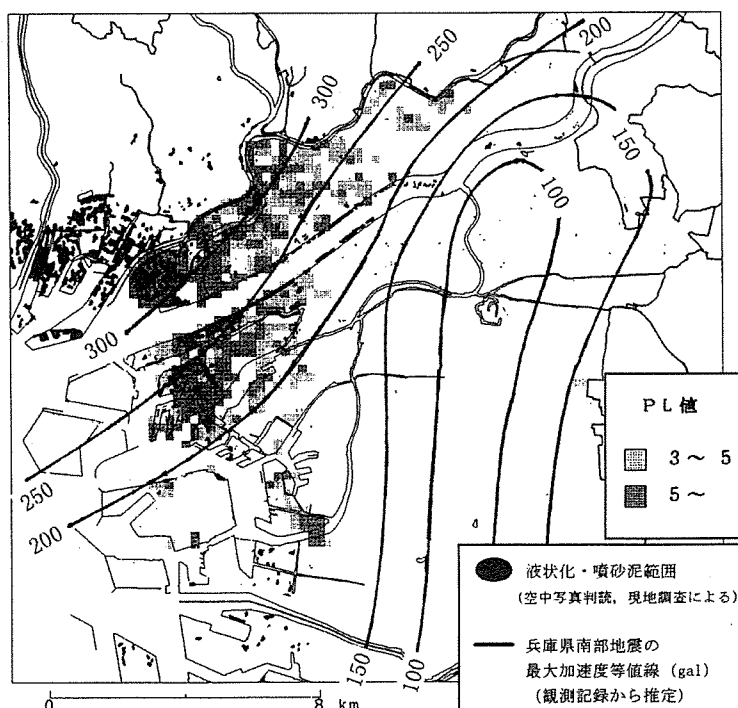


図-2.2.8 建築基礎の式による兵庫県南部地震の液状化予測

力とし、建築基礎の式でボーリングデータを液状化判定して  $P_L$  値を算出し、同地震の液状化発生地点と比較している。図より、兵庫県南部地震の液状化状況をよく再現していることがわかる。

### C. 液状化危険度の予測結果

図-2.2.9 に、以上の手順で予測された大阪市域の液状化危険度図を示す。同図は、 $P_L=5$  となる地表最大加速度（限界 gal 値）を逆算し、その値から液状化危険度を次のように表現している。なお、局所的な液状化危険箇所に対しては、(2) の結果をもとに補正が行われている。

- A) 液状化が極めて発生しやすい… 200gal 以下
- B) " 発生しやすい … 200～300gal
- C) " 発生しにくい … 300～400gal
- D) " 極めて発生しにくい… 400gal 以上

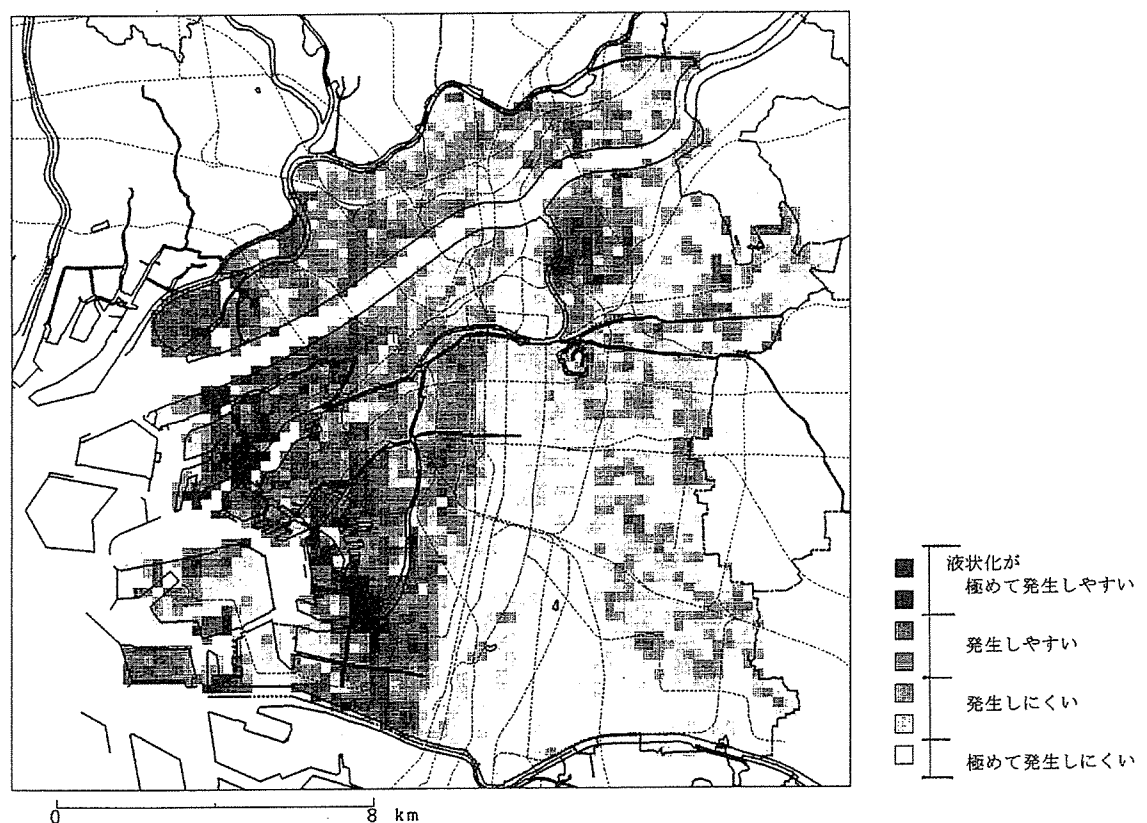


図-2.2.9 大阪市域の液状化危険度予測図

### 参考文献

- 1) 山本浩司・柴田徹・辻江賢治(1996)：大阪市の液状化予測，第一回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp.141-144
- 2) 大阪市(1996)：土木・建築構造物震災対策検討会中間報告
- 3) 柴田徹・岩崎好規・諏訪靖二・山本浩司(1987)：ボーリングデータベースによる大阪地盤のポテンシャルゾーニング，都市防災シンポジウム講演集，土木学会関西支部，pp.87-92
- 4) 大阪府(1997)：大阪府被害想定調査 報告書
- 5) 国生剛治ほか(1984)：密な砂地盤のN値による液状化判定法，第 19 回土質工学研究発表会，pp. 559-562

## 2.3 計算結果

本節では、東部、中部、西部の3地区について、先の表層地盤に関する検討結果をもとに作製した地盤モデルを用いて液状化解析を行った。解析に使用した計算プログラムは、SHAKE及びMDMの2種類である。SHAKEは等価線形の地震応答解析プログラムであり、液状化解析に広く用いられている。一方、MDMは近年提案された非線形全応力解析のプログラムで、等価線形の計算で見られるように地盤の非線形性を線形挙動に置き換えずに、そのまま非線形挙動として取り扱えるのが特徴である。3地区においてボーリングデータが存在するメッシュの中から、地下水位やN値といった解析に必要なデータが得られるメッシュについて地盤モデルを作製し、SHAKE<sup>1)</sup>及びMDM<sup>2)~5)</sup>により地震応答解析及び液状化判定を行い、計算結果の比較を行った。

### (1) 解析条件

#### 1) 地盤モデルの作製

1.2節において作製された東部、中部、西部の3地区における地質断面図をもとに、解析を実施するメッシュについて、地盤モデルの地層構成と層厚及び土質を決定した。各地層の層厚は、地質断面図から計算を行うメッシュ位置での値を読み取り決定している。

解析を実施するメッシュは、ボーリングデータが存在するメッシュの内、応答解析の対象となる工学的基盤面以浅の地層について、地下水位やN値等の解析に必要なデータが得られるメッシュとした。なお、東部、中部については、表層地盤の検討から液状化検討の対象とすべき地層の範囲を考慮して、東部では東西方向の断面 No.50 以南、中部では No.34 以南を解析範囲とした。

#### 2) 物性値の設定

解析を行ったモデル地盤の物性値を、表-2.3.1に示す。表-2.3.1中の地層記号は、1.2節中に示した3地区の地質断面図中の記号に対応している。N値、平均粒径  $D_{50}$  及び細粒分含有率  $F_c$  は、1.4節における表層地盤の工学的特性の整理結果をもとに決定している。なお、液状化検討上重要である沖積砂質土層 (As1, As2) については、N値に各メッシュにおける該当層の平均値を用いることとした。また、単位重量  $\gamma$  はN値に応じて表中に示した関係から値を決定している。

東部及び中部地区では、各地層の物性値はそれぞれの地区内では同一の物性値を用いることとした。しかし、西部地区は南北方向の断面 No.67 以東と、断面 No.66 以西で Ag 層や As 層の性質がそれぞれ異なると考えられたため、地区内を東域と西域に区分し、特に沖積砂質土 As1 層及び As2 層は各領域で個別に物性値を設定した。

動的物性値であるせん断弾性定数 $\sim$ ひずみ関係 ( $G/G_0 \sim \gamma$ ) 及び減衰定数 $\sim$ ひずみ関係 ( $h \sim \gamma$ ) については、既往の研究より建設省土木研究所の提案式<sup>6)</sup>を用いて、各地層の土質に対応したものを適用した。

各地層において層厚は、地質断面図より計算を行うメッシュ位置で読み取った値を用いるが、層厚が 3m 以上の場合は、表に示すように計算時は層厚に応じて 2 $\sim$ 4 分割した。

#### 3) 工学的基盤面

地震波を入力する工学的基盤面は、東部及び西部地区では沖積層下面すなわち洪積砂礫層 (Dg) 層上面とした。しかし、中部地区では沖積層下に堆積する洪積互層の緊密度にばらつきが見られ、基盤

表-2.3.1 入力物性値一覧

| 地層記号 | 地層名        | 液状化の可能性         | 土質       | N値         | D50 (mm)   | Fc (%)     | $\gamma$ (tf/m <sup>2</sup> ) | G, h- $\gamma$ 曲線 対応土質 | 地震波 スベック  | 地震波 入力位置    |
|------|------------|-----------------|----------|------------|------------|------------|-------------------------------|------------------------|-----------|-------------|
| 西部   |            |                 |          |            |            |            |                               |                        |           |             |
| B    | 盛土・埋土      | 高い (地下水位依存)     | 砂質土 (緩い) | 5          | 0.35       | 10         | 1.7                           | 沖積砂質土                  | 神戸大学 観測波形 | 沖洪積境界 Dg層上面 |
| Ag1  | 沖積礫質土 (海成) | 西域：高い<br>東域：低い  | 砂礫 (中位)  | 30         | 0.6        | 0          | 1.9                           | 沖積砂質土                  |           |             |
| Ag2  | 沖積礫質土 (陸成) | 西域：低い、<br>東域：低い | 砂礫 (密な)  | 50         | 2.0        | 0          | 2.0                           | 沖積砂質土                  |           |             |
| As1  | 沖積砂質土 (海成) | 西域：高い<br>東域：高い  | 砂        | 該当層<br>平均値 | 1.0<br>0.2 | 5.0<br>5.0 | N値に<br>応じて                    | 沖積砂質土                  |           |             |
| As2  | 沖積砂質土 (陸成) | 西域：高い<br>東域：高い  | 砂        | 該当層<br>平均値 | 0.3<br>0.6 | 20<br>20   | N値に<br>応じて                    | 沖積砂質土                  |           |             |
| Ac1  | 沖積粘性土 (軟)  | 対象外             | 粘性土 (緩い) | 4          | 0.02       | 80         | 1.4                           | 沖積粘性土                  |           |             |
| Ac2  | 沖積粘性土 (硬)  | 対象外             | 粘性土 (中位) | 10         | 0.02       | 80         | 1.6                           | 沖積粘性土                  |           |             |
| 中央部  |            |                 |          |            |            |            |                               |                        |           |             |
| B    | 盛土・埋土      | 高い (地下水位依存)     | 砂質土 (緩い) | 5          | 0.35       | 10         | 1.7                           | 沖積砂質土                  | 神戸大学 観測波形 | Ma12下面      |
| Ag   | 沖積礫質土      | 陸成：低い           | 砂礫 (中位)  | 30         | 0.6        | 0          | 1.9                           | 沖積砂質土                  |           |             |
| As1  | 沖積砂質土 (海成) | 高い              | 砂        | 該当層<br>平均値 | 10         | 0.6        | N値に<br>応じて                    | 沖積砂質土                  |           |             |
| As2  | 沖積砂質土 (陸成) | 高い              | 砂        | 該当層<br>平均値 | 20         | 1.0        | N値に<br>応じて                    | 沖積砂質土                  |           |             |
| Ac1  | 沖積粘性土 (軟)  | 対象外             | 粘性土 (緩い) | 4          | 0.02       | 80         | 1.4                           | 沖積粘性土                  |           |             |
| Ac2  | 沖積粘性土 (硬)  | 対象外             | 粘性土 (中位) | 10         | 0.02       | 80         | 1.6                           | 沖積粘性土                  |           |             |
| Asc  | 沖積砂質土      | 低い              | 砂質土 (緩い) | 10         | 0.1        | 40         | 1.7                           | 沖積砂質土                  |           |             |
| Dcs  | 洪積砂質土      | 低い              | 砂質土 (中位) | 30         | 0.1        | 40         | 1.8                           | 沖積砂質土 (代用)             |           |             |
| Ma12 | 洪積粘性土      | 対象外             | 粘性土 (中位) | 10         | 0.02       | 80         | 1.6                           | 洪積粘性土                  |           |             |
| 東部   |            |                 |          |            |            |            |                               |                        |           |             |
| B    | 盛土・埋土      | 高い (地下水位依存)     | 砂質土 (緩い) | 5          | 0.35       | 10         | 1.7                           | 沖積砂質土                  | 神戸大学 観測波形 | 沖洪積境界 Dg層上面 |
| As2  | 沖積砂質土 (陸成) | 高い              | 砂        | 該当層<br>平均値 | 0.35       | 10         | N値に<br>応じて                    | 沖積砂質土                  |           |             |
| As1上 | 沖積砂質土 (海成) | 低い              | 砂        | 該当層<br>平均値 | 0.5        | 15         | N値に<br>応じて                    | 沖積砂質土                  |           |             |
| As1下 | 沖積砂質土 (海成) | 高い              | 砂        | 該当層<br>平均値 | 0.3        | 20         | N値に<br>応じて                    | 沖積砂質土                  |           |             |
| Ac   | 沖積粘性土      | 対象外             | 粘性土      | 4          | 0.02       | 80         | 1.4                           | 沖積粘性土                  |           |             |

・地層記号の添え字は、  
1：造成  
2：陸成 を表す。

◆N値と土の単位重量  $\gamma$  (tf/m<sup>3</sup>) ◆

| N値   | ～10 (緩い)  | 10～30 (中位) | 30～50 (密な) |
|------|-----------|------------|------------|
| 砂～砂礫 | 1.8       | 1.9        | 2          |
| 砂質土  | 1.7       | 1.8        | 1.9        |
| N値   | ～4 (軟らかい) | 4～15 (中位)  | 15～ (硬い)   |
| 粘性土  | 1.4       | 1.6        | 1.8        |

◆入力地震波◆  
・兵庫県南部地震、神戸大学観測波形 (NS方向)  
・最大加速度 (入力時) 500gal

◆工学的基盤◆  
・せん断波速度 300m/s  
・層厚 5m

◆層分割◆  
・層厚 3～5m 2分割  
5～7m 3分割  
7～9m 4分割

面としては不十分であると考えられることから、Ma12 層下面を地震入力基盤面とした。また、いずれの地区においても、基盤層のせん断波速度  $V_s$  は 300m/s とし、層厚は 5m 程度とした。

#### 4) 入力地震動

入力地震波形は、兵庫県南部地震時に神戸大学で観測された NS 方向の波形を用いた。また、入力時の最大加速度は、全解析地点で一様に 500gal とした。

#### 5) 地下水位

地下水位は、1.3 節の整理により得られた値を用いた。これらの値は、ボーリングデータに付随する地下水位データをもとに、兵庫県南部地震時の噴砂の有無や地形等を考慮して決定した値である。

#### 6) 液状化判定

液状化の判定は、道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編（平成 8 年 12 月、(社)日本道路協会）<sup>7)</sup> による判定基準を用いた。

### (2) 計算結果

図-2.3.1～2.3.3 に、東部、中部、西部の 3 地区における SHAKE 及び MDM の計算結果を示す。各地区毎に、地震応答解析より得られた地表面加速度分布及び液状化危険度（PL 値）分布を示している。また、図中には神戸 JIBANKUN に収録されている、兵庫県南部地震時の噴砂マップをもとに、地震時に噴砂が確認されたメッシュを太枠で示している。

いずれの地区においても、概ね SHAKE による計算結果は MDM の結果に比べて、地表面加速度、PL 値ともに大きい値を示す傾向が見られる。特に東部地区では埋立層が卓越する沿岸部や、西部地区の兵庫運河以南の範囲等では、地表面加速度の値が大きく異なっている。これらは、噴砂の観測されたメッシュが多く見られることから、兵庫県南部地震時には液状化が多く発生したと考えられる地域であるが、SHAKE では入力地震動が増幅されているのに対し、MDM では地表面加速度が基盤入力加速度の 500gal を下まわるメッシュも多く見られ、液状化による加速度の減衰がうまく表現されている。

PL 値については、基本的に地表面加速度に応じて同じ傾向を示すが、液状化判定では地下水面以下の砂質土、礫質土を対象とし、粘性土は対象外となるため、地層構成や地下水位の状況によっては、地表面加速度の傾向に必ずしも一致しない場合もある。

以下に、各地区毎に液状化解析結果について述べる。

#### a) 東部地区

阪神高速道路以南で海岸線付近では、SHAKE と MDM では地表面加速度の値が大きく異なっている。SHAKE では、地表面加速度が 600～700gal 程度の値を多く示しており、入力地震動が幾分増幅されているが、MDM では基盤入力加速度の 500gal を下まわる 250～350gal の値を示すメッシュが多い。これらの地域では噴砂が確認されたメッシュが数多くあり、液状化が多く発生していたと予想されるが、MDM では液状化による加速度の減衰がうまく表現されているようである。

PL 値も地表面加速度と同様の傾向を示しており、SHAKE 及び MDM のいずれにおいても海岸線付近から阪神高速道路に至るまでの範囲は液状化危険度が高いが、SHAKE に比べると MDM は相対



●東部地区

◇PL値◇

◆SHAKE計算結果◆

|    | 165  | 166 | 167  | 168  | 169  | 170 | 171  | 172  | 173  | 174  | 175 | 176 | 177 | 178  | 179  | 180 | 181 | 182  | 183 | 184 | 185  | 186 | 187 | 188  |
|----|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|
| 50 |      |     | 9.0  |      |      | 3.2 |      |      | 14.0 | 11.3 |     |     |     | 23.2 |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |
| 51 |      |     |      |      |      |     |      |      | 0.0  |      |     |     |     |      |      |     |     | 12.9 |     |     |      |     |     | 7.0  |
| 52 |      |     | 28.6 |      |      |     |      | 12.0 |      |      |     | 3.1 | 0.5 | 9.8  |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |
| 53 |      |     |      |      |      |     |      |      |      |      | 7.0 |     |     |      |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |
| 54 |      |     |      | 50.0 | 35.6 |     |      |      | 12.7 |      |     | 4.3 | 2.4 | 0.1  | 7.8  |     |     |      |     |     |      |     |     |      |
| 55 |      |     |      |      |      |     |      |      |      |      |     |     |     |      |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |
| 56 |      |     |      | 36.1 | 29.3 |     |      |      |      |      |     |     |     |      |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |
| 57 |      |     |      |      |      |     |      | 40.3 |      |      |     |     |     | 42.9 |      |     |     | 39.8 |     |     |      |     |     | 40.8 |
| 58 |      |     |      |      |      | 0.0 | 34.5 | 36.1 |      |      | 9.1 |     |     | 38.6 |      |     |     |      |     |     |      |     |     | 43.5 |
| 59 | 48.6 |     |      |      |      |     |      |      | 1.5  |      |     |     |     | 50.9 | 55.0 |     |     |      |     |     |      |     |     |      |
| 60 | 49.1 |     |      |      |      | 0.0 |      |      |      |      |     |     |     |      |      |     |     |      |     |     | 48.6 |     |     |      |

◇地表面加速度 $\alpha_s$ ◇

◆SHAKE計算結果◆

|    | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 50 |     |     | 317 |     |     | 596 |     |     |     | 686 | 729 |     |     | 813 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 51 |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 661 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 723 |
| 52 |     |     | 923 |     |     |     |     | 687 |     |     |     | 657 |     | 634 |     |     |     | 727 |     |     |     |     |     |     |
| 53 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 647 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 54 |     |     |     | 585 | 602 |     |     |     |     | 564 |     |     |     | 779 |     | 822 |     | 645 |     | 747 |     |     |     |     |
| 55 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 56 |     |     |     | 572 | 681 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 57 |     |     |     |     |     |     |     | 878 |     |     |     |     | 583 |     |     |     |     |     |     |     | 686 |     |     | 609 |
| 58 |     |     |     |     |     | 647 | 462 |     | 653 |     | 571 |     | 715 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 675 |
| 59 | 571 |     |     |     |     |     |     |     |     | 670 |     |     | 604 | 573 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 60 | 556 |     |     |     |     | 738 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 643 |     |     |     |     |

(単位: gal)

◆MDM計算結果◆

|    | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 50 |     |     | 633 |     |     | 613 |     |     |     | 378 | 604 |     |     | 489 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 51 |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 571 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 603 |
| 52 |     |     | 487 |     |     |     |     | 518 |     |     |     | 561 |     | 560 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 53 |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 423 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 54 |     |     |     | 244 | 327 |     |     |     |     | 331 |     | 585 |     | 606 |     | 572 |     | 673 |     |     |     |     |     |     |
| 55 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 56 |     |     |     | 289 | 337 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 57 |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 496 |     |     |     | 394 |     |     |     |     |     |     | 345 |     |     | 282 |
| 58 |     |     |     |     |     | 659 | 75  |     |     | 289 |     | 267 |     | 337 |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 328 |
| 59 | 255 |     |     |     |     |     |     |     |     | 316 |     |     | 260 | 257 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 60 | 240 |     |     |     |     | 616 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 274 |     |     |     |

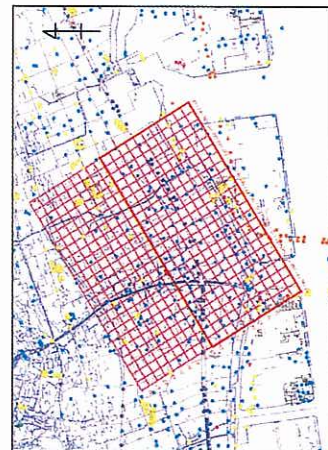
(単位: gal)

□ 噴砂の確認されたメッシュ

| 地表面加速度                    |
|---------------------------|
| $\alpha_s \leq 300$       |
| $300 < \alpha_s \leq 500$ |
| $500 < \alpha_s \leq 600$ |
| $600 < \alpha_s \leq 700$ |
| $700 < \alpha_s \leq 800$ |
| $800 < \alpha_s \leq 900$ |
| $900 < \alpha_s$          |

□ 噴砂の確認されたメッシュ

| PL値               | 液状化危険度 |
|-------------------|--------|
| PL=0              | かなり低い  |
| $0 < PL \leq 5$   | 低い     |
| $5 < PL \leq 15$  | 高い     |
| $15 < PL \leq 25$ | 極めて高い  |
| $25 < PL \leq 35$ |        |
| $35 < PL$         |        |

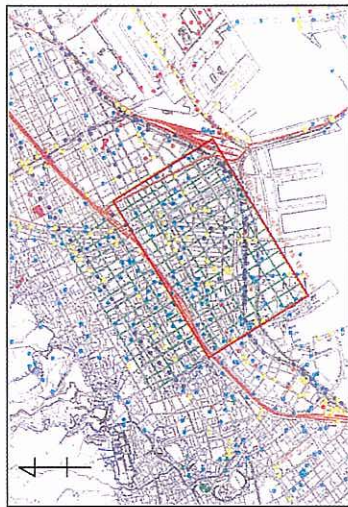


◆接封メッシュ図(東部)◆

図-2.3.1 計算結果(東部地区)



● 中部地区



◇ PL値◇

◆SHAKE計算結果◆

|    | 91   | 92  | 93  | 94   | 95   | 96   | 97  | 98  | 99  | 100 | 101 | 102 | 103  | 104 |
|----|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| 34 |      |     |     |      | 0.0  |      |     |     |     | 1.9 |     |     |      |     |
| 35 | 4.1  |     | 9.2 |      |      | 1.4  |     | 0.0 | 1.7 | 2.7 |     |     | 1.3  |     |
| 36 | 8.2  |     |     |      |      |      |     |     | 2.3 | 2.6 |     |     |      |     |
| 37 | 13.5 | 6.0 | 3.0 |      |      | 13.0 | 9.0 |     |     |     |     |     |      |     |
| 38 | 20.1 |     |     |      | 16.0 | 9.1  |     |     |     |     | 7.3 |     |      |     |
| 39 |      |     |     | 19.1 |      |      |     |     |     |     |     | 2.4 |      |     |
| 40 |      |     |     |      |      |      |     |     |     |     |     |     | 15.8 | 6.9 |
| 41 |      |     |     |      |      |      |     | 6.4 |     |     |     |     |      |     |
| 42 |      |     |     |      |      |      |     |     |     |     |     |     |      |     |

◇ 地表面加速度  $\alpha_s$  ◇

◆SHAKE計算結果◆

|    | 91  | 92  | 93  | 94  | 95  | 96  | 97  | 98  | 99  | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 34 |     |     |     |     | 526 |     |     |     |     |     | 460 |     |     |     |
| 35 | 698 |     | 618 |     |     | 534 |     | 496 | 478 | 490 |     |     | 459 |     |
| 36 | 629 |     |     |     |     |     |     |     | 541 | 490 |     |     |     |     |
| 37 | 564 | 564 | 583 |     |     | 526 | 575 |     |     |     |     |     |     |     |
| 38 | 657 |     |     |     | 612 | 644 |     |     |     |     | 450 |     |     |     |
| 39 |     |     |     | 707 |     |     |     |     |     | 484 |     |     | 597 | 473 |
| 40 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 41 |     |     |     |     |     |     | 558 |     |     |     |     |     |     |     |
| 42 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

(単位: gal)

□ 噴砂の確認されたメッシュ

| PL値      | 液化危険度 |
|----------|-------|
| PL=0     | かなり低い |
| 0<PL≤5   | 低い    |
| 5<PL≤15  | 高い    |
| 15<PL≤25 | 極めて高い |
| 25<PL≤35 |       |
| 35<PL    |       |

◆MDM計算結果◆

|    | 91  | 92  | 93  | 94   | 95   | 96  | 97  | 98  | 99  | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 |
|----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 34 |     |     |     |      | 0.0  |     |     |     |     |     | 0.4 |     |     |     |
| 35 | 1.0 |     | 2.6 |      |      | 0.0 |     | 0.0 | 0.4 | 0.0 |     |     | 0.3 |     |
| 36 | 1.2 |     |     |      |      |     |     |     | 0.2 | 0.7 |     |     |     |     |
| 37 | 2.8 | 1.7 | 3.8 |      |      | 2.0 | 0.7 |     |     |     |     |     |     |     |
| 38 | 8.1 |     |     |      | 18.2 | 2.6 |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 39 |     |     |     | 12.3 |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 40 |     |     |     |      |      |     |     |     |     | 2.1 |     |     | 4.8 | 2.3 |
| 41 |     |     |     |      |      |     |     | 0.1 |     |     |     |     |     |     |
| 42 |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

□ 噴砂の確認されたメッシュ

| 地表面加速度                    | $\alpha_s$ |
|---------------------------|------------|
| $\alpha_s \leq 300$       |            |
| $300 < \alpha_s \leq 500$ |            |
| $500 < \alpha_s \leq 600$ |            |
| $600 < \alpha_s \leq 700$ |            |
| $700 < \alpha_s \leq 800$ |            |
| $800 < \alpha_s \leq 900$ |            |
| $900 < \alpha_s$          |            |

◆MDM計算結果◆

|    | 91  | 92  | 93  | 94  | 95  | 96  | 97  | 98  | 99  | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 34 |     |     |     |     | 414 |     |     |     |     |     | 360 |     |     |     |
| 35 | 499 |     | 414 |     |     | 380 |     | 388 | 381 | 335 |     |     | 360 |     |
| 36 | 424 |     |     |     |     |     |     |     | 381 | 332 |     |     |     |     |
| 37 | 345 | 403 | 357 |     |     | 313 | 345 |     |     |     |     |     |     |     |
| 38 | 313 |     |     |     | 501 | 370 |     |     |     |     |     | 300 |     |     |
| 39 |     |     |     | 346 |     |     |     |     |     | 289 |     |     | 333 | 333 |
| 40 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 41 |     |     |     |     |     |     | 297 |     |     |     |     |     |     |     |
| 42 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

(単位: gal)

図-2.3.2 計算結果(中部地区)

●西部地区



◆校計メッシュ図(西部)◆

◇PL値◇

◆SHAKE計算結果◆

|    | 63  | 64   | 65   | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75  |
|----|-----|------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| 41 |     |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 42 |     |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 43 | 1.5 |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 44 | 0.3 | 17.8 | 1.6  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 45 | 4.4 | 0.0  |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 0.3 |
| 46 |     | 6.0  |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 47 |     | 12.0 |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 48 | 2.8 | 0.0  | 16.0 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 49 |     |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 50 | 0.0 |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 51 |     |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 52 | 0.2 |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 53 | 0.0 |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 54 |     |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 55 |     |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 56 | 2.1 | 8.0  |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 57 | 1.7 |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 58 |     |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |

◇地表面加速度 $\alpha_s$ ◇

◆SHAKE計算結果◆

|    | 63  | 64  | 65  | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 |
|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 41 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 42 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 43 | 521 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 44 | 506 | 628 | 628 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 45 | 489 | 581 | 648 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 46 |     | 647 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 47 |     | 512 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 48 | 548 | 564 | 671 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 49 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 50 | 610 | 654 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 51 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 52 | 751 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 53 | 586 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 54 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 55 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 56 | 548 | 757 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 57 | 652 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 58 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

(単位: gal)

◆MDM計算結果◆

|    | 63  | 64  | 65  | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 |
|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 41 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 42 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 43 | 0.0 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 44 | 0.7 | 9.1 | 2.5 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 45 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 46 | 0.0 | 1.9 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 47 | 5.3 | 3.2 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 48 | 1.0 | 0.1 | 5.8 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 49 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 50 | 0.0 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 51 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 52 | 0.3 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 53 | 0.0 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 54 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 55 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 56 | 1.6 | 1.7 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 57 | 0.8 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 58 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

□ 噴砂の確認されたメッシュ

| PL値      | 液状化危険度 |
|----------|--------|
| PL=0     | かなり低い  |
| 0<PL≤5   | 低い     |
| 5<PL≤15  | 高い     |
| 15<PL≤25 |        |
| 25<PL≤35 | 極めて高い  |
| 35<PL    |        |

◆MDM計算結果◆

|    | 63  | 64  | 65  | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 |
|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 41 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 42 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 43 | 634 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 44 | 605 | 381 | 473 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 45 | 631 | 564 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 46 | 627 | 574 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 47 | 342 | 502 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 48 | 420 | 473 | 561 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 49 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 50 | 499 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 51 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 52 | 488 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 53 | 440 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 54 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 55 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 56 | 288 | 321 |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 57 | 350 |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 58 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

(単位: gal)

図-2.3.3 計算結果(西部地区)

的に低い値を示している。MDM の計算結果では、噴砂の見られたメッシュやその周辺での PL 値は 20 以上の値を示しているものが多く、兵庫県南部地震時に発生した液状化現象とは整合性が見られる。一方、SHAKE の計算結果では、これらの地域における PL 値が 35 以上のものが多く、液状化危険度について、むしろ過大な評価を与えている可能性がある。

阪神高速道路以北においても、SHAKE と MDM による地表面加速度の値には差が見られ、概ね SHAKE では 600～800gal であるのに対し、MDM では 500～600gal 程度の値を示す。一方、PL については、地表面加速度ほど大きな差は見られない。この地域では、液状化対象層である As1（上）層や As2 層が比較的厚く堆積しているのに加えて地下水位も比較的浅い箇所が多いが、N 値が相対的に高く、主に N=20～40 の範囲で分布していることから、液状化危険度は比較的低くなったものと考えられる。

#### b) 中部地区

地表面加速度については、地区全域で SHAKE と MDM の計算結果に有意な差が見られ、地区の西域の方が差は大きいようである。SHAKE による地表面加速度は 500～700gal の値を示しているが、地区の東域では一部 400～500gal と入力加速度以下の値を示している箇所もある。一方 MDM では、ほとんどの箇所で入力加速度以下の 300～400gal 程度の値を示している。先に述べたように、東部及び西部地区では、沖積層下面すなわち洪積砂礫層（Dg）の上面を工学的基盤面として入力地震動を与えたが、中部地区では沖積層下に堆積する洪積互層の緊密度にばらつきが見られたため、工学的基盤面は Ma12 層の下面に設定している。このため、後述の考察で述べるように、入力された地震動は Ma12 層を通過する際に大きく減衰し、深度の浅い液状化対象層付近や地表面では加速度が小さくなる傾向が見られたと考えられる。

液状化判定結果（PL 値）についても、SHAKE と MDM の計算結果には差が見られ、SHAKE の方が相対的に高い値を示している。先述の東部地域に比べると、地表面加速度の計算結果は、SHAKE、MDM のいずれにおいても相対的に低いため、それに応じて PL 値も、SHAKE では地区内のほとんどの点で 15 以下、MDM では 5 以下となっている。地区内の東西で比較した場合、検討結果では東域に比べ西域が液状化しやすい結果となっているが、噴砂は東域で多く見られることから、解析結果と実現象では必ずしも一致していない。また、液状化対象層である As2 層は、N 値が 20 程度以上の比較的締まった箇所が多いことや、地下水位が G.L.－3.0m 以下の比較的低い地点が多いこと等も、PL 値を低くしている一因と言える。

#### c) 西部地区

SHAKE と MDM による地表面加速度の計算結果には、顕著な差が見られる。西部地区は、南北断面 No.66 と No.67 の間を境にして東域と西域に分けられるが、SHAKE では東域で 600～900gal、西域で 500～700gal と、特に東域で高い値を示している。これに対し、MDM では東域で 400～700gal、西域で 400～600gal と、全体的に SHAKE に比べると加速度は小さく、入力加速度値 500gal 以下の値を示す箇所も見られる。

PL 値の分布では地表面加速度ほど SHAKE と MDM の計算結果に差は無いが、SHAKE に比べると MDM の方が相対的に低い値を示している。PL 値分布と噴砂の確認されたメッシュとの対応を見ると、噴砂の場所の PL 値は高い値を示しており、実現象と解析結果は概ね整合している。

地区内の東域と西域を比較すると、東域に比べて西域が液状化危険度は低い傾向にある。これは、

液状化対象層である As1（上）層の N 値が、東域に比べると西域の方が高い傾向あることや層厚も小さいこと等によると考えられる。西域では南北断面 No.72 以西では As1 層が、No.73 以東では軟弱な盛土・埋土（B）層が、いずれも 5～10m 程度の層厚で分布しており、液状化の検討の際には注意を要する。なお、西域については、今回の計算で用いた地下水位データがかなり低い値のものが多かったことから、PL 値は比較的低い値を示していると考えられる。

### (3) 考察

これまで、東部、中部、西部の 3 地区について、SHAKE 及び MDM による液状化解析結果について述べてきた。以下では、今回の液状化解析において問題となった点について述べる。

#### a) 計算時の地下水位

液状化解析を行う場合、解析地点における地層構成や物性値とともに地下水位データが必要となる。特に、液状化判定では、地下水位以下の飽和砂質地盤を判定対象とするため、水位より上であれば軟弱な砂質土層であっても判定対象外となる。従って、地下水位の変化が液状化判定に大きく影響する場合が少なくないため、解析に用いる地下水位データの決定は非常に重要である。

今回の検討では、神戸 JIBANKUN より解析対象地区において地下水位データを持つボーリングデータを抽出し、各データの照査・検討を行った上で、信頼性の高い地下水位を選出し各メッシュの地下水位を決定している。これらの地下水位データは、周辺地形を考慮して若干の修正は加えられている場合があるが、基本的には信頼性があると認められたボーリングデータにおける地下水位データに近い値である。しかし、これらの検討を経た地下水位データであっても、かなり深い地下水位データを与える場所もあった。このような箇所では、液状化の検討対象となり得る緩い砂質土層が堆積していたとしても、液状化判定時に対象外となる可能性がある。例えば、西部地区東域における東西断面 No.45 上の解析点は、B 層及び As1（上）層が 5m 以上堆積しているが、いずれも地下水位が G.L.－8.0～10.0m であったため、解析の結果すべての点で PL 値は 0 となっている。そこで、これらの No.45 上の解析点について、周辺地形等を勘案した上で推定した地下水位による液状化解析を試みた。

表-2.3.2 は、地下水位の違いによる解析結果を比較したものである。表中下段に推定地下水位による試算結果を示す。表から、地表面加速度の値には大きな影響は無いが、PL 値については、液状化危険度の高い地点（70、75）が見られるようになり、地下水位の設定が液状化危険度判定結果に影響を与えることが確認できた。

#### b) 工学的基盤面

液状化解析において、地盤の地震応答解析を行う際には地震波形を入力する工学的基盤面を決定しなければならない。工学的基盤面の要件としては、十分堅固でありせん断弾性波速度が 300m/s 以上の連続する地層で、基盤とする層の下位に軟弱な地層が無いこと等である。本解析における工学的基盤面は、東部、西部については沖積層と洪積層の境界面である。しかし、中部地区では沖積層下に堆積する洪積互層（Ds-c）の緊密度にばらつきが見られたことから基盤面としては不適と判断し、Ds-c 層の下位に位置する Ma12 層の下面を基盤面として設定した。



表-2.3.2 地下水位の違いによる解析結果の比較

| 南北 Line (東西 Line45) |        | 67   | 70   | 71  | 73  | 75  |
|---------------------|--------|------|------|-----|-----|-----|
| 地下水位(ボーリング)         |        | 10.0 | 8.0  | 8.0 | 8.0 | 9.0 |
| SHAKE               | PL 値   | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
|                     | 地表面加速度 | 648  | 697  | 741 | 655 | 685 |
| MDM                 | PL 値   | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 1.0 | 0.0 |
|                     | 地表面加速度 | 668  | 693  | 726 | 730 | 630 |
| 地下水位(推定)            |        | 2.3  | 1.2  | 1.2 | 2.2 | 2.2 |
| SHAKE               | PL 値   | 1    | 17.8 | 4.7 | 0   | 6.5 |
|                     | 地表面加速度 | 642  | 670  | 786 | 713 | 762 |
| MDM                 | PL 値   | 1.5  | 12.4 | 4.6 | 0   | 5.9 |
|                     | 地表面加速度 | 641  | 707  | 709 | 686 | 597 |

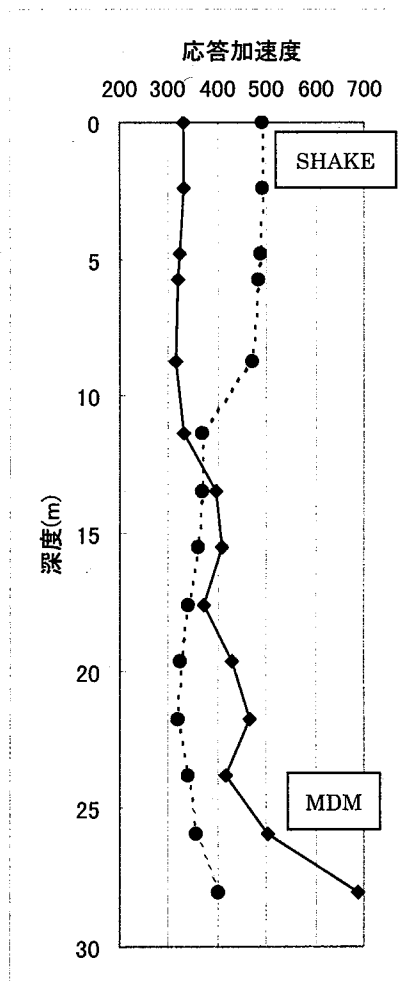


図-2.3.4 SHAKE 及び MDM による応答加速度 (中部 : No. 100-36)

図-2.3.4 は、中部地区の南北断面 No.100-36 における、SHAKE 及び MDM の地震応答計算結果を示したものである。両手法に計算された土中の地層境界における加速度分布を示したもので、基盤面の深度が 30.5m、深度 28.0m 以深が Ma12 である。図から、SHAKE 及び MDM のいずれにおいても Ma12 層を通過後は加速度が減衰しているのが分かる。特に MDM において、加速度の減衰は顕著であり、中部地区の他の地点においても同様の傾向が見られた。MDM は SHAKE に比べて、地盤の大ひずみ領域における剛性低下をより精度良く再現することが出来る手法として提案されており、図-2.3.4 に示した応答計算の結果によってもそのことが確認でき、液状化解析において MDM は有用であると考えられる。一方、SHAKE については、各地区の地表面加速度分布や PL 値分布の比較から分かるように、実現象に比べると過大な評価を与える等、等価線形手法の液状化解析における 1 つの限界が示されていると考えられる。また、中部地区の解析結果例に見られるように、粘土層等の軟弱な地層の影響による地震波の減衰は顕著に現れるため、今後の地震応答解析における工学的基盤面の選定には十分な検討が必要となる。

#### 参考文献

- 1) Per B. Schnabel、 John Lysmer、 H. Bolton Seed : SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites、 EERC 72-12、 1972
- 2) Ikutaro Kumazaki : Hysteresis model considering shear strain dependency of fractal dimension and Momentary Deformation Modulus、 *Chaos in Dynamic Deformation Properties of Nonlinear Elements and Prediction of their Constitutive Relations*、 Doctoral Dissertation、 Kyoto University、 Chapter 7、 1998
- 3) 熊崎幾太郎、杉山 武、上田 稔、長谷川英明：瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮した履歴モデル、第 53 回土木学会年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-A89、pp.176-177、1998
- 4) 熊崎幾太郎、上田 稔：瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮した履歴モデルの定式化、第 54 回土木学会年次学術講演会講演概要集、Ⅰ-B111、pp.220-221、1999
- 5) 熊崎幾太郎、上田 稔：液状化地盤応答解析が可能な非線形全応力モデルによる乾燥砂と飽和砂の要素シミュレーション～MDM モデルによる飽和砂の極度の剛性低下率と急峻なひずみ軟化および流動的挙動の再現～、第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-A098、pp.196-197、2001
- 6) 建設省土木研究所：地盤の地震時応答特性の数値解析法—SHAKE : DESRA—、土木研究所資料第 1778 号
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅴ耐震設計編、1996

## 2.4 液状化解析結果の評価と問題点

上記のように、神戸市の東部・中部・西部の3地点で液状化解析を行った結果、阪神大震災時に実際に液状化を生じた箇所との整合性は、中部地域での解析結果を除けば、東部や西部での結果は、ある程度満足できる結果といえる。

中部地域での液状化判定結果が、実際の噴砂等の結果と合わない大きな理由は、応答解析結果からの地震動が小さいことが挙げられる。地震動の解析値が他の地域より小さくなった理由は、中部地域では地震動入力基盤面を洪積粘土層（Ma12）の下面に設定したことにより、洪積粘土層を通過する地震動が大きく減衰したことによると考えられる。中部地域で工学的基盤面の位置を検討した場合、沖積砂層の下部に堆積する洪積互層の締め具合に不確定な傾向が見られ、現場N値の結果からは、決して連続した支持層があるとは断定できないといった結論が得られた。従って、工学的基盤面の位置として、さらに下部の洪積粘土層（Ma12）の下面に設定することとした。このため、洪積粘土層を通過する地震動に減衰がみられ、地表面での応答加速度が低下するなど、液状化判定を行うためには不具合な地震動解析結果が得られた。

中部地域の解析とは異なり、東部と西部地域での解析結果は、ある程度阪神大震災での液状化被害を説明できる結果であったといえる。特に、西部地域において、解析検討対象域の西端に位置するJR和田岬線近辺で、液状化しにくい箇所が出現したが、この解析結果は、ボーリング調査結果と動的応答解析に基づく今回の検討とは異なり、原位置でのせん断波速度調査の結果によっても、同様な液状化し難い箇所が特定されている。

以下に、西部地域の原位置でのせん断波速度調査結果について述べる。

### 2.4.1 SASW 法による原位置せん断波速度調査

SASW（Spectral Analysis of Surface Wave）法とは表面波スペクトル解析と称されるもので、地表面で微弱な振動を与えて、地盤内を透過する振動記録を表面に接地した複数のセンサーで観測し、その結果をスペクトル解析することにより、地盤内のせん断波速度の分布を求めようとするものである。加振装置の概要を示すと図-2.4.1のようであり、現場での測定方法は図-2.4.2のようである。

神戸大学都市安全研究センターのロバートケイラン客員教授により、西部地域の西端に位置する和田岬線沿いで、本試験法によるせん断波速度の調査が実施された。調査地点の平面図を示すと、図-2.4.3のようである。調査したJR和田岬線は約2kmの延長距離があり、約200m間隔で合計8地点の調査を行った。本調査の実施に当たっては、JR西日本の多大なるご協力を得て、JR和田岬線での運転が休止する朝9時より夕方5時の間で調査が行われた。

SASW調査で得られる結果の1例を示すと、図-2.4.4のようであり、深さ方向のせん断波速度分布を求めることが出来る。解析には、地盤内を弾性変形係数が異なる数枚の多層地盤を仮定し、理論計算から求まるせん断波速度と計測結果が一致するように収束計算を行い、最終的なせん断波速度分布を求める。

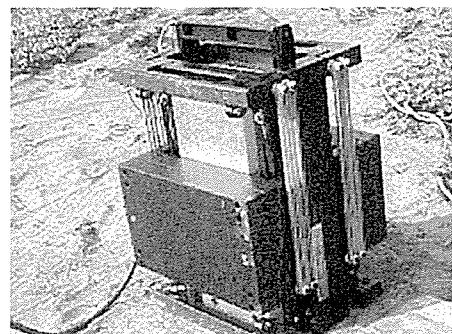


図-2.4.1 SASW 加振装置



図-2.4.3 に示した8測点について、せん断波速度の深度分布を全て求め、調査域でのせん断波速度の2次元分布を示したものが、図-2.4.5 である。同図の右端が和田岬線の北端で、左端が和田岬線の南端である。また、同図の上側の分布はせん断波速度変化の計測結果を直接示したものであり、下側の分布は測点間の値にスムージングをかけたものである。図から分かることは、せん断波速度が大きい緑の領域が、速度の小さい青色の領域の上部

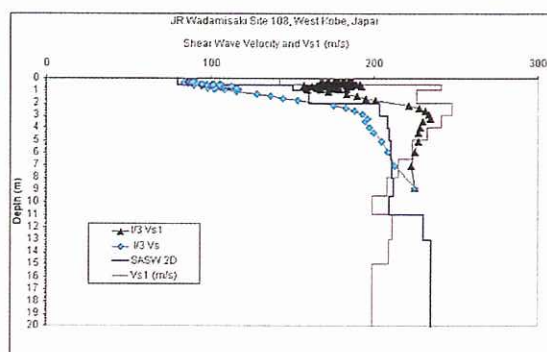


図-2.4.4 SASW 試験結果の例



図-2.4.2 現場での SASW 試験法の概要



図-2.4.3 JR 和田岬線での SASW 試験位置

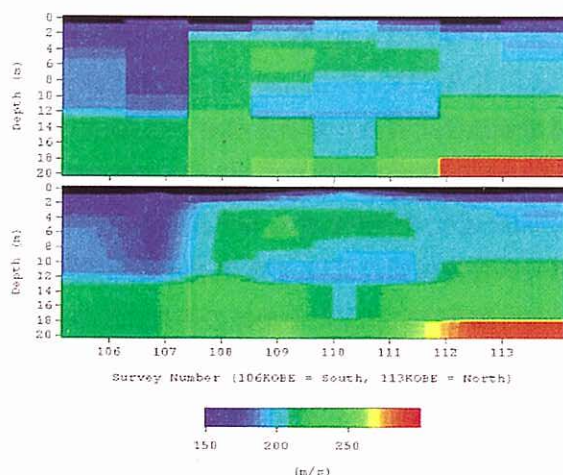


図-2.4.5 SASW 試験による Vs 分布

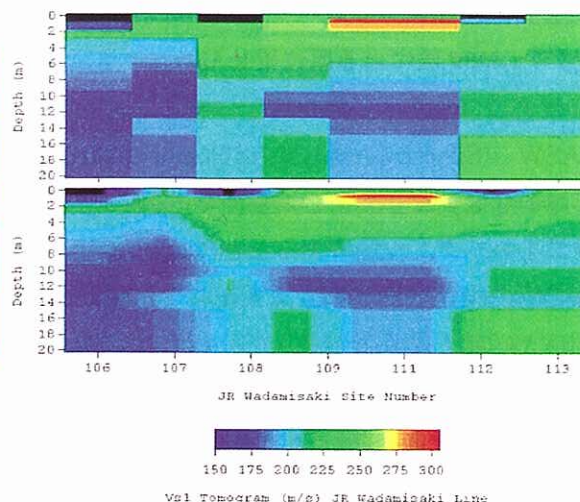


図-2.4.6 SASW 試験による Vs1 分布

に浮き上がるように位置していることである。これと一致するもので、和田岬では西から北東にかけて、

のような地層の分布は、ボーリング調査とも一密度の高い和田岬礫層が堆積していることを示

本報告で先に述べたように、せん断波速度から液状化判定をするには、せん断波速度に与える拘束圧の影響を除去する必要がある。図-2.4.6 は拘束圧の影響を除去し、拘束圧 100kPa の値で正規化したせん断波速度の2次元分布を示したものである。図-2.4.5 の直接記録に比べて、液状化対象層の分布が明瞭であり、特に前述の密度の高い和田岬礫層の南端部で、低いせん断波速度の領域が明瞭とな

っている。阪神大震災においても、和田岬線の南端部では、噴砂が多く、箇所を観測されており、2.3節で示した液状化解析結果からも、解析した西部地域の東及び南の地域にかけて液状化危険度が高くなることと良い一致を示している。

以上のように、今回の動的応答解析による液状化解析結果と、現場でのせん断波速度調査から推定される液状化危険域とは、良く一致しており、今回の液状化解析手法の特徴である数値地盤構造モデルを用いた解析手法が妥当であったことを示していると考えられる。

#### 2.4.2 液状化解析の問題点

今回の動的応答解析による液状化解析結果の精度については、上述のように、西部地域で現場せん断波速度調査結果とも良く一致することから、おおむね良好であったと判断される。しかしながら、今回の実施した動的解析結果の利用は、あくまで地盤内で発生した最大加速度の算定に限られており、 $F_L$  値の算定においては、直下型のレベル2地震で問題となる地震波の不規則波の影響を、既往の道路橋指針の方法に基づき換算しており、最終的な液状化評価は道路橋指針の方法にほぼ従って行っている。このため、道路橋指針が用いた条件設定に誤りがあるとすれば、その誤差は今回の解析結果の中に縫合されている。

ここで、道路橋指針が用いたレベル2地震に対する不規則波の影響を考慮した手法を整理すると以下のようなものである。従来、不規則波の液状化強度に与える影響については、実験結果等に基づき、衝撃形と振動形の地震動に区別して、それぞれに異なる固定の補正係数を適用していた。阪神大震災以降に、道路橋指針が改訂されるに当たり、不規則波の影響を考慮するため、以下の2つの条件設定が用いられた。1.不規則波の影響を考慮するため、地盤材料の液状化強度曲線に、累積損傷法の理論を適用し、衝撃形と振動形の地震動に対する液状化強度の補正係数を決定した。いわゆる  $c_2$  の補正係数である。2.累積損傷法の適用に当たっては、地盤の液状化強度が豊浦標準砂の液強化強度曲線で代表できると仮定している。

上記1の累積損傷法の適用については、不規則波の液状化強度に与える影響を評価する方法として、適用例が増える傾向である。例えば、1999年の鉄道構造物設計標準においても、レベル2地震での液状化評価には、累積損傷法の適用が要求されている。累積損傷法の限界点とすれば、地震波の強弱の出現順序を考慮できない点であり、高度な土の構成式を用いる有効応力解析で無い限り、不規則波の出現順序を考慮することは現状では無理であろう。次に2点目の豊浦標準砂の液状化曲線を、地盤材料の代表的液状化強度と設定した点については、今後の検討により、その評価精度を見直すことが可能である。今回用いたような非線形な力学モデルによる時刻歴の動的応答解析を用いると、本来なら、累積損傷理論を用いて特定材料の液状化強度曲線に対して、液状化危険度を評価することが可能である。すなわち、神戸市内、或いは特定の検討地域の液状化対象層について、液状化強度曲線を求めることは十分可能であり、今回用いたMDMのような非線形モデルを用いた時刻歴解析を行えば、従来に比べて精度の高い液状化解析が可能である。従って、神戸市内域の液状化対象層について、このような液状化強度曲線のデータを蓄積していくことは、非常に重要であると考えられる。

また、今回の解析作業においても問題となった、地下水位の分布の設定や、標準貫入試験結果の分析及び整理方法、工学的基盤の設定方法、および数値地盤構造モデルを作成する上での、地層構成の解釈方法など、上記の不規則波の影響を検討する以前の、基本的な地盤条件を設定する上で、数々の問題点がある。以下のまとめにおいて、総合的な考察を行う。

### 3. 液状化解析のまとめ

今回の液状化解析の目的は、出来るだけ簡便な解析方法で、かつ神戸 JIBANKUN に収録されている高密度の地盤情報を最大限に利用して、精度の良い液状化危険度評価手法を検討することである。このため、本液状化部会では、図-2.1.1 で示したような液状化危険度評価のための作業を行い、精度の良い簡便な神戸地盤データベースの利用を試みた。これらの作業を通じて、以下のような結論が得られたと考えられる。

- 1) 100mx100m の小要素からなる数値地盤構造モデルを、約 1.5km 四方の検討域について作成した。作成に当たっては、既存のボーリング調査結果の他に、検討地域での大規模建設工事での施工事例を活用し、地盤の堆積過程も考慮した、神戸市内の地盤構造モデルの構築に努めた。
- 2) 上記作業の問題点としては、約 5000 本のボーリング数をもってしても、神戸市域の全域をカバーする密度ではデータは存在せず、地盤構造に対する、地盤・地質技術者の時間を要する緻密な考察・解釈が必要である。
- 3) 地下水位分布の設定においても、同様なデータ不足と、データ誤差の問題が生じる。この点に関しても、地盤・地質技術者の時間を要する緻密な考察・解釈が必要である。
- 4) 上記の作業を通じて、地盤構造条件、地下水条件が設定した後、地盤応答解析と液状化強度評価のために必要な、地盤の力学特性の同定作業を行った。通常の土質調査では、標準貫入試験結果が基本となるため、液状化対象層の堆積層厚分布やN値の分布変化などを検討した。その結果、西部地域では、沖積砂層の堆積過程と工学的性質との間に、有意な関係が見られるなど、非常に興味深い結果が得られた。
- 5) しかしながら、上記の地層毎の力学パラメータの特定作業において、克服すべきいくつかの問題が生じる。項目2で述べたように、検討対象域の要素数に対するボーリングデータ密度は、約 50% 程度と不足しており、各要素における土質パラメータの精度良い特定と、検討域内でのパラメータの分布・変化特定には、精度重視か解析対象域拡大かの難しい選択が迫られる。
- 6) 以上の作業は、あくまで検討領域に於ける数値地盤構造モデルを作成しようという、当研究会の目標に沿ったものである。液状化危険度評価作業のみに限定すれば、現存するボーリング位置毎に、既存ボーリングデータをそのまま利用した液状化評価は十分可能であったと思われる。しかしながら、地盤構造の解釈、力学パラメータの同定作業で得られた知見は、ボーリングデータ数値処理だけでは得難い、付加的価値を有するものであると考えられる。

上記の結論は、地盤構造の特定と地盤定数の同定過程でのものである。液状化解析には、外力となる地震動の特定が必要であるが、それらに関しては以下のような結論が得られた。

- 7) 地震動解析を行う上で、工学的基盤の設定が必要である。液状化分科会では、西部・東部地域では、沖積層と洪積層の境界を工学的基盤とし、中部地域では支持層としての連続性を検討した結果、洪積粘土層 (Ma12) の下層を工学的基盤とした。地震動部会においては、地震動伝播の2次元効果など、縮尺の大きな地盤構造を対象としているため、液状化分科会とは異なる地層境界で工学的基盤を設定している。工学的基盤の位置については、今後も検討が必要ある。また、工学的基盤における地震強度の地域分布についても、同様な課題が残されている。

- 8) 地震動的応答解析においては、等価線形モデルを周波数領域で解析する SHAKE プログラムと、非線形モデルを時刻歴で解析する MDM プログラムを使用した。両解析手法から得られた液状化危険度は、良く対応した結果を与えており、解析結果の信頼性が確認された。
- 9) ただし、等価線形モデルの SHAKE を用いた解析では、従来から知られている等価線形解析の限界が再確認された。すなわち、過大な地表面加速度が得られることなどである。このような問題は、非線形モデルを時刻歴解析する MDM プログラムでは生じず、地表面の加速度応答についても、液状化による加速度の減衰が得られるなど、液状化現象を再現する効果が得られた。
- 10) 以上の、地震応答解析では、地盤剛性のひずみ量増加による変化や、減衰特性<sup>1)</sup> ひずみ関係のデータが必要となる。このようなデータは、神戸 JIBANKUN においても、殆ど皆無であるため、既存の研究成果に基づく力学パラメータの選定を行った。今後、地震動解析には、地盤の動的変形特性についての、さらなるデータ蓄積が必要である。
- 11) 液状化危険度評価については、SHAKE 及び MDM 解析から得られた、地盤内最大加速度の値を用いて、道路橋指針の方法を基に、阪神大震災規模（レベル 2）地震における液状化評価を行った。いわゆる  $F_L$  及び  $P_L$  法の利用である。危険度評価結果は、おおむね阪神淡路大震災の液状化状況と一致するものであり、また西部の現場で実施された、せん断波速度分布調査とも整合する結果であった。
- 12) しかしながら、今回用いた非線形モデルの時刻歴解析方法では、道路橋指針と同一手法で、レベル 2 地震のような不規則波の影響が大きい液状化解析を、道路橋指針の制約条件外で行うことが可能である。すなわち、地盤材料の液状化強度モデルを豊浦標準砂に限定することなく、実際の検討対象地盤のパラメータを用いた解析が可能である。先述の項目 10 の結論と同様、動的変形データの収集に加えて、神戸 JIBANKUN における液状化強度データの蓄積が必要である。

最後になるが、神戸 JIBANKUN はそのデータ内容が高密度であるがため、その活用作業において、活用成果の精度追求と、活用域拡大・効率的作業との間で、非常に悩ましい選択を地盤・地質技術者に突きつける。将来的には、人工知能などの活用も考えられるが、データ内容の緻密な解釈を通じて得られる発想の新鮮さも見逃しがたい。今後も、さらに種々の地盤工学的、社会工学的データが同データベースの蓄積されることが望まれる。

## 第三編

# 地震から守るすまいとくらし

谷口 仁士 名古屋工業大学システムマネジメント工学科教授

## 目 次

|  |        |
|--|--------|
| 1. 地震防災のしくみづくり                                   | ( 1 )  |
| 1.1 地震防災に関連する分野とその位置づけ                           | ( 1 )  |
| 1.2 地震防災のコンセプト                                   | ( 2 )  |
| 1.3 市民、自治体が成すべきリスクマネジメントのキーワード                   | ( 4 )  |
| 2. 過去を知る   | ( 5 )  |
| 2.1 阪神地域の被害地震履歴                                  | ( 5 )  |
| 2.2 1707 年宝永地震、1854 年安政東海・南海地震、1946 年南海地震の震度分布比較 | ( 5 )  |
| 2.3 阪神大震災の記憶と教訓                                  | ( 9 )  |
| 3. そして、今を知る（東海地域の地震防災の事例）                        | ( 9 )  |
| 3.1 東海地震から東南海地震、南海地震発生の危機                        | ( 9 )  |
| 4. では、どうすれば良いのか！                                 |        |
| -地震災害に対抗するリスクマネジメントの構築が必要-                       | ( 10 ) |
| 4.1 危険を及ぼすもの（敵）は！-プレート境界で発生する巨大地震-               | ( 10 ) |
| 4.2 危険の分析！-東海地震や南海地震による震度や地盤災害の可能性は？-            | ( 10 ) |
| 4.3 危険の評価（家族を守る家は大丈夫？）                           | ( 12 ) |
| 5. リスクコミュニケーション                                  | ( 13 ) |
| まとめ  | ( 16 ) |



## 1. 地震防災のしくみづくり

### 1.1 地震防災に関連する分野とその位置づけ

1995 年阪神・淡路大震災は大都市の脆弱性を露呈させたばかりでなく地震防災と密接に関係していた理学・工学の分野に大きなショックを与えた。端的に結論付ければ、「思っていたほど構造物は耐震的ではなかった」こと、「工学の分野だけでは地震防災は進まない」ことである。そして、この地震を契機に、理学・工学・社会科学の研究者や技術者の協力のもとで、21 世紀の地震防災がスタートした。

社会は家族、コミュニティ、地域(市町村)そして地方(経済圏)から構成されている。地震防災は、これら 4 つの社会単位で目的とする内容が異なるはずである。すなわち、家族単位で考えると「だれもが家族を守りたいと思い、守ってくれるのは行政である」と考え、行政は「(市民を守りたいが守りきれないので)地震後の対応を中心とした防災対策」を展開してきた。ここで、両者に大きなギャップが生じている。すなわち、行政の目標とするところは災害発生の軽減ではなく拡大阻止である。異なった組織(世帯～国)が、一つの目標に向かって行動を起こすとき、「コンセプト」と「最終目標」を共有しなければならない。日本人は、このコンセプト作りが大変苦手で、最終目標をコンセプトと履き違えている場合が多い。

図-1.1 は、地震防災の位置づけとして「守る対象を中心に置いたときの各専門分野とのかかわり」を概念的に示したものである。例えば、家族を地震から守るとき、工学＝家屋の耐震化、科学・医学＝緊急医療、社会科学＝経済被害の軽減などと密接な関係にある。すなわち、家屋の耐震化は命の安全を保障し、緊急医療はもしものときの安心、経済被害の軽減はくらしの保障をおこなうことにつながる。

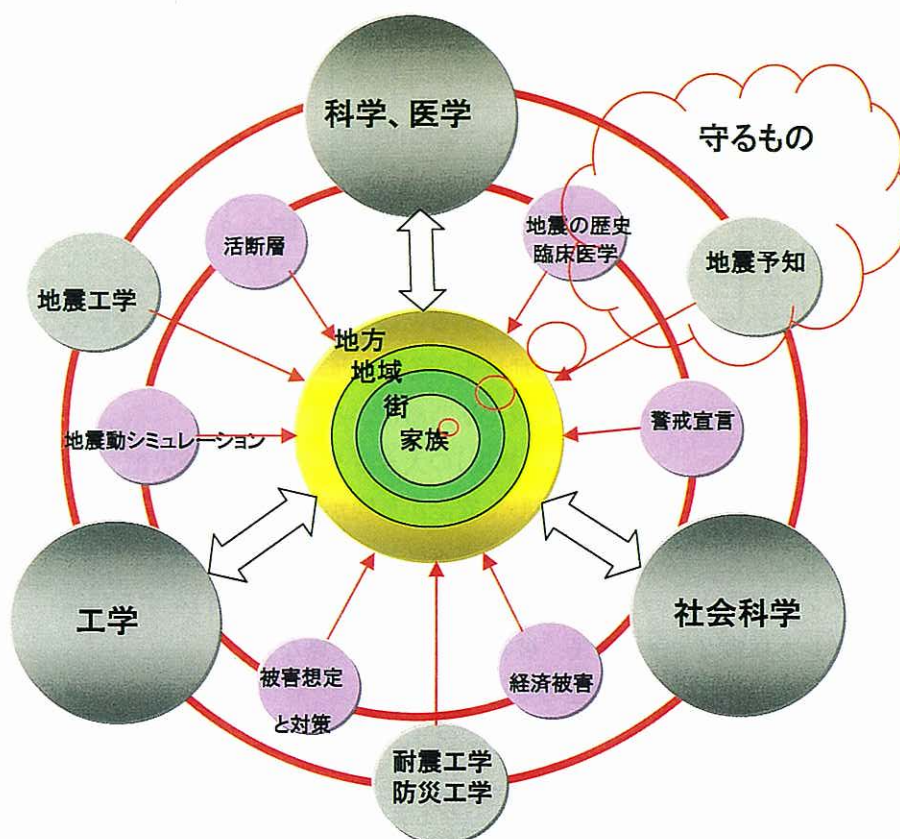


図-1.1 地震防災と関連する専門分野の関連の概念図

このような概念に基づけば、各専門別に行っている地震防災のための研究・技術開発・政策などの位置づけが明確になり、かつ、相互に関連する分野とのリスクコミュニケーションが図れるようになる。今まで、縦割りの行われていた色々な防災対策の体系化が図られる。

## 1.2 地震防災のコンセプト

被害の最小単位は「家族」であるが、防災の最小単位は「家族だけでなく、幾つかの家族の集合体であるコミュニティ」であり、「安全と安心な暮らし」を手にすることが地震防災の基本である。そのためには、まず「命＝すまい」を守ることであり、これは個人とコミュニティが自らすべきことである。行政は、住民が自らすべきことに対する情報・技術と資金の援助を行うことである。さらに、この過程の中で、被害想定結果や学識経験者、技術者がどのように関わっていくかのマネジメントを行うことである。

図-1.2 は、地震防災に対するリスクマネジメントの基本的な流れを示したものである。図中の番号は以下の意味を持っている。

- ①：コンセプト
- ②：危険を及ぼすもの(敵)
- ③：危険の分析
- ④：危険の評価
- ⑤：危険の低減(守る方法)
- ⑥：マネジメント組織 1 (政策立案)
- ⑦：マネジメント組織 2 (防災の実行)
- A：ループ 1
- B：ループ 2
- C：情報交換(リスクコミュニケーション)

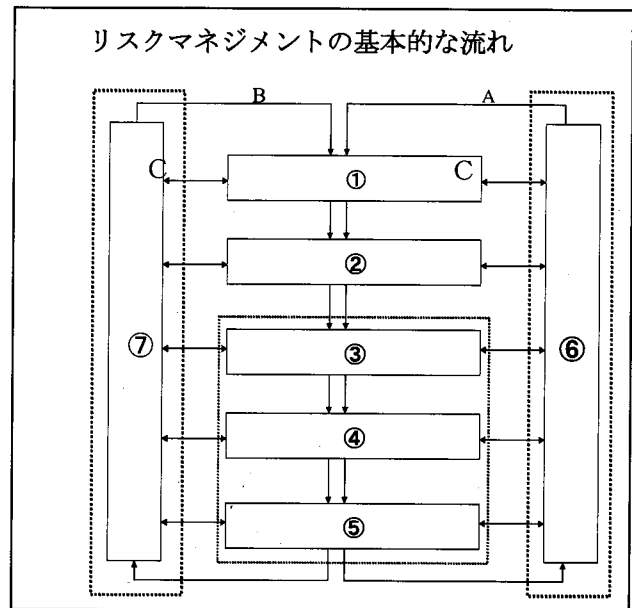


図-1.2 リスクマネジメント・フロー

以上の項目について、具体的な内容を考えると以下ようになる。すなわち、

- ①：コンセプト → 「家族と地域を守る」(その時、あなたは家族を守れますか?)
- ②：危険を及ぼすもの → 「南海地震や活断層による直下地震」
- ③：危険の分析 → 「地震動(震度)の大きさや地盤災害(液状化、斜面崩壊)」
- ④：危険の評価 → 「③に対して安全か危険かの評価」
- ⑤：危険の低減 → 「④に対する被害軽減、分散などの対策」
- ⑥：マネジメント組織 1 → 「全体の統括(検討・議論・政策提言)をする組織」
- ⑦：マネジメント組織 2 → 「市民、被管理対象者、組織など」
- A：ループ 1 → 「チェックループ 1」
- B：ループ 2 → 「チェックループ 2」
- C：情報交換 → 「リスクコミュニケーション」

研究組織

である。



以上の具体的な項目を図-1.2に当てはめた一例を示すと図-1.3のようになる。すなわち、「その時、あなたは家族を守れますか？」をコンセプトとし、市民や地域を南海地震の被害から守るための防災に関する技術開発、調査・分析、教育、政策提言の流れである。

ここで、地域(市町村)行政がしなければならないことは、すまいの安全化支援のほか、「くらしの早期復旧」である。そのためには、地域の安全と産業の早期復旧を視野に入れた防災計画を考えるべきである。すなわち、ライフラインの耐震化、緊急医療システムの構築、重要施設(病院、学校などの公共施設)の安全確保、さらに企業防災の推進である。これらの施設やシステムが構築されれば、住民は被災から速やかに「もとのくらし」に帰ることができると思う。1995年阪神淡路大震災では地場産業の甚大な被害は、多くの離職者を生み、住民のくらしを脅かす結果となった。是非、企業防災を重点課題とした防災政策を期待したい。

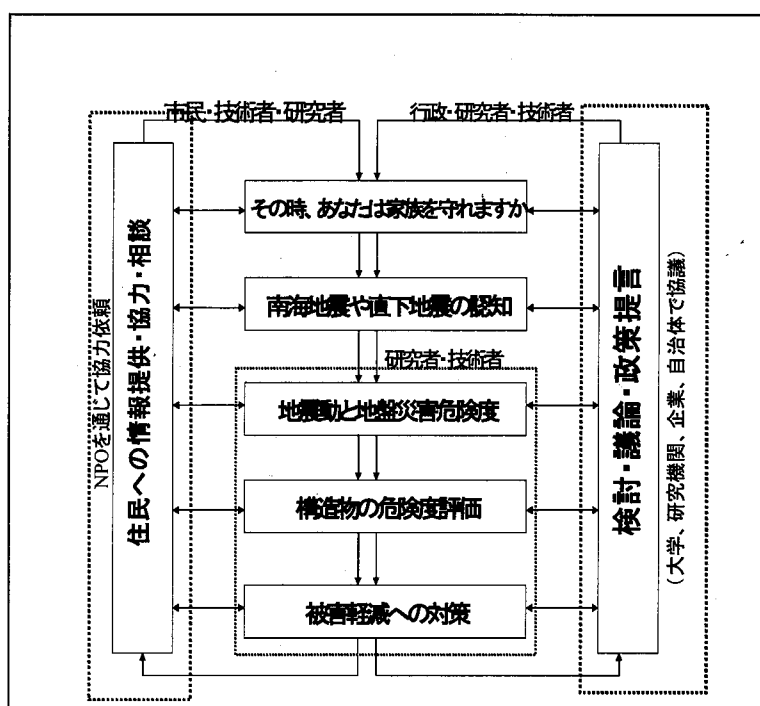


図-1.3 地震防災マネジメントの流れの一例

### 1.3 市民、自治体が成すべきリスクマネジメントのキーワード

上記でも述べたが、社会は家族、コミュニティ、地域(市町村)そして地方(経済圏)から構成されており、地震防災はこれら4つの社会単位で目的とする内容が異なるはずである。図-1.4 は、異なる4つの社会構成単位ごとのコンセプト～総括方針までをキーワードでまとめたものである。

まず、市民にすべきことは、「自らの命は自らが守る」ことを、特別な事情がない限り念頭に置いた意識を持つことである。さらに、防災の最小単位である「街（コミュニティ）」の形成に取り組むべきである。すなわち、命を守ること＝家の耐震化(耐震診断と耐震補強)や室内の安全確保、街の安全＝会話が楽しめる街(コンパクトタウン)の中の共助システムの育成と達成が市民に課せられた“社会協力”である。

自治体(市町村)単位として成すべきことは、「家族(市民)の安全、暮らしと安心」は必要条件であっても十分条件ではない。さらに、「安全と産業」を守ることが自治体に課せられたコンセプトであり、具体的な防災項目は Lifeline, 重要施設、医療システム、産業防災を推進することである。これらが完成されれば、被災者の救助ばかりでなく「もとの暮らしへの早期復旧」が可能となる。

一方、兵庫県や阪神経済圏における地震防災とは、被災後の早期地域経済復興が最重要課題である。その結果として、被災者(市民)は「暮らしの安心」を手に入れることができる。そのためにも、今から経済復興シミュレーションを行い、復興プランを県単位や経済圏で作成しておくべきである。

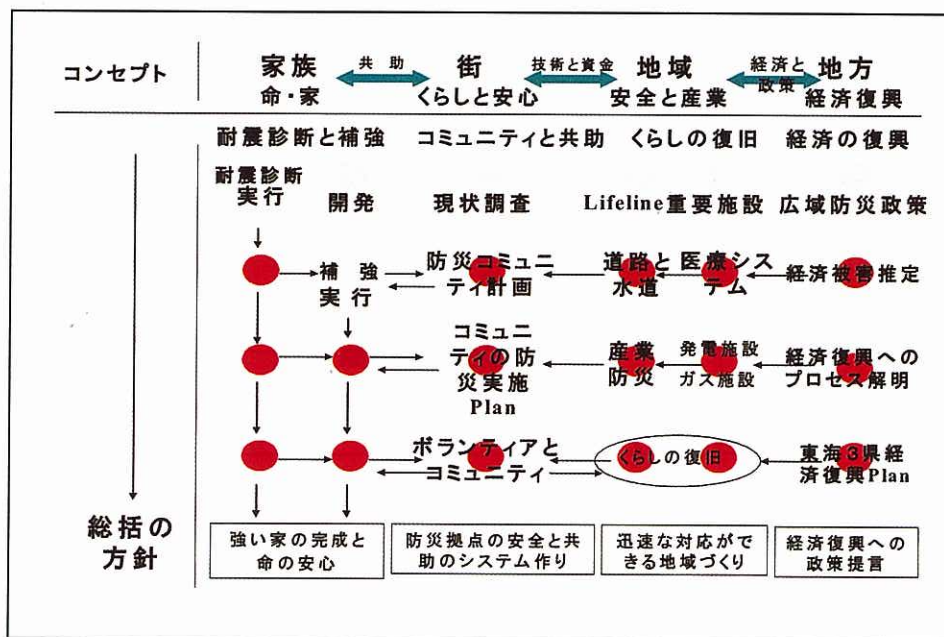


図-1.4 社会構成単位別防災コンセプトとそのキーワード、総括方針

## 2. 過去を知る

## 2.1 阪神地域の被害地震履歴

阪神地域は、南海沖で発生する海溝型の巨大地震(M8 クラス)ばかりでなく 1995 年阪神大震災のような内陸直下で発生する地震にも襲われている。図-2.1 は南海トラフ沿いに発生する巨大地震と内陸直下地震の関連を示したものである。両者の関連は、トラフで発生する巨大地震の前後で内陸直下地震が発生し、1995 阪神大震災やその後の鳥取県中部や西部、平成芸予地震の発生は次の南海地震の前触れかもしれない。その他、山崎断層などが神戸に被害を及ぼす地震である。

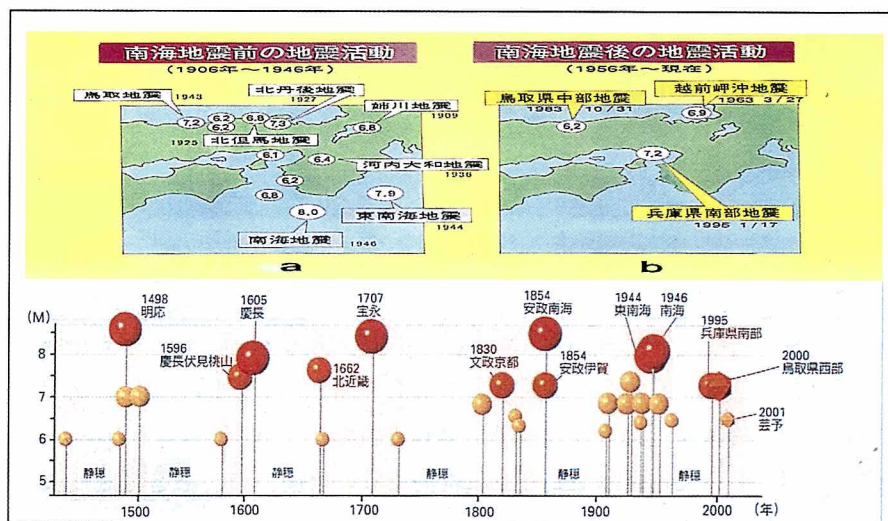


図-2.1 西日本の被害地震発生環境

## 2.2 1707 年宝永地震、1854 年安政東海・南海地震、1946 年南海地震の震度分布比較

図-2.2 は 1707 年宝永地震(M8.4)の震度分布(断層モデルに基づく計算結果)である。この地震では、駿河湾～四国沖までの南海トラフ沿いの広大な範囲で地震エネルギーを放出し、世界でも稀な巨大地震が発生した。この地震の影響(?)で富士山が噴火(宝永の噴火)している。以下は、理化年表(2001)に記載されている宝永地震の被害記述の抜粋である。

「1707年10月28日発生。五畿・七道で被害発生。我が国最大級の地震の一つ。全体で少なくとも死者2万人、倒壊家屋6万、流出家2万。震害は東海道・伊勢湾・紀伊半島で最もひどく、津波が紀伊半島から九州までの太平洋岸や瀬戸内海を襲う。」

神戸地域では、図-2.2 の震度分布に示すように、ほぼ全域が震度6弱以上となっている。

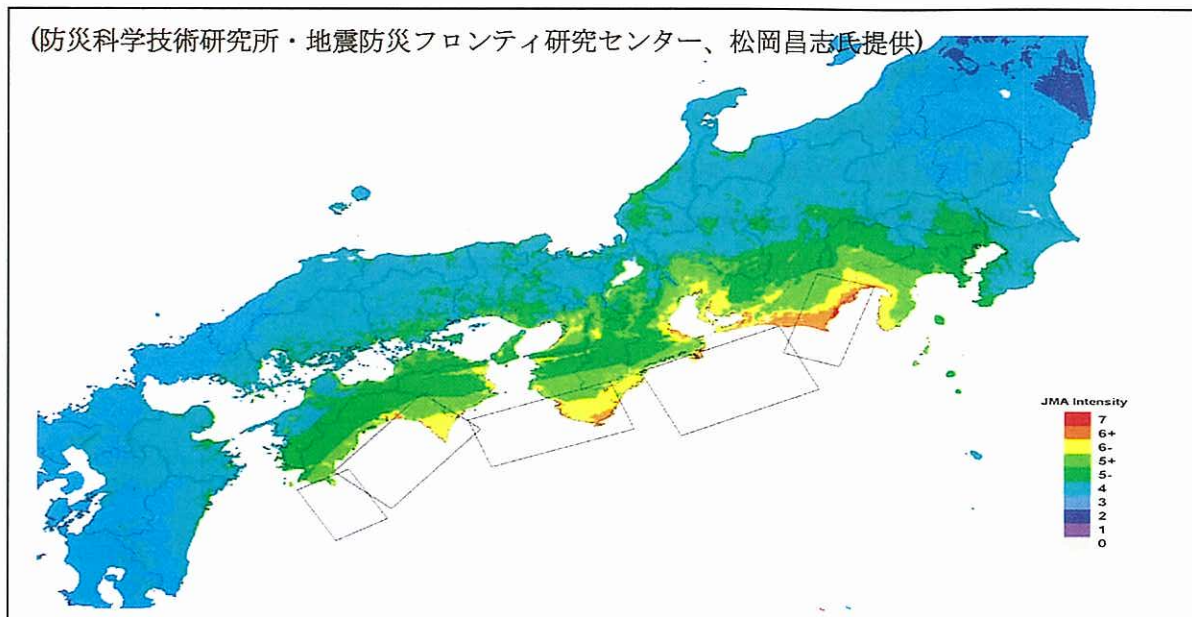


図-2.2 1707年宝永地震による全国の震度分布

図-2.3 および図-2.4 は 1854 年安政東海地震と安政南海地震の震度分布である。さらに、図-2.5、2.6 に 1944 年昭和東南海地震と 1946 年昭和南海地震の震度分布を示した。

1845 年 12 月 23 日 M8.4 の安政東海地震が発生し、関東～近畿にかけて甚大な被害が生じた。被害統計によれば、死者 2000～3000 人、倒壊・焼失家屋約 3 万棟となっている。この 32 時間後には図-2.4 に示した南海沖で地震が発生し、安政南海地震(M8.4)とよばれている。安政東海および安政南海地震による神戸市の震度は、両者とも 4～5 弱程度となっている。



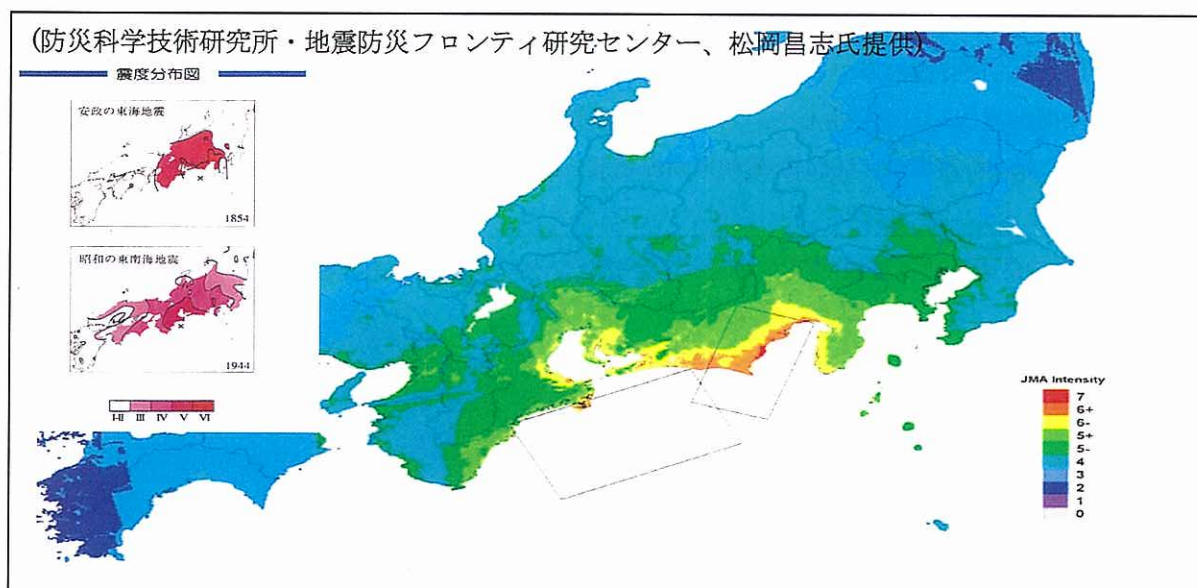


図-2.3 1854 年安政東海地震による全国の震度分布  
(図左上：被害記録などから推定された震度分布)

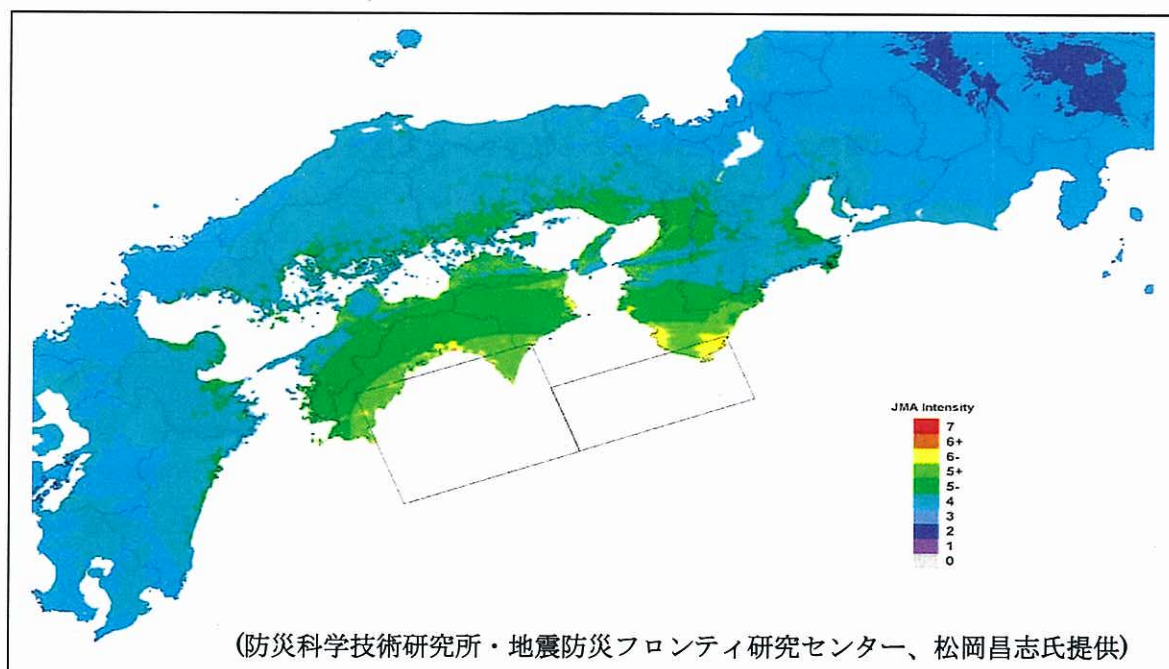


図-2.4 1854 年安政南海地震による全国の震度分布

図-2.5 および図-2.6 は 1944 年昭和東南海地震と 1946 年昭和南海地震の震度分布である。1944 年 12 月 7 日 M8.0 の昭和東南海地震が発生し、静岡・愛知・三重県に甚大な被害が生じた。被害統計によれば、死者・行方不明 1223 人、住家全壊：17599、半壊：36520、流失：3129 棟となっている。津波が各地に押し寄せ、熊野灘沿岸で 6～8m、遠州灘沿岸で 1～2m。さらに、この約 2 年後の 1946 年 12 月 21 日昭和南海地震(M8.0)が発生している(図-2.6 参照)。

神戸地域における震度は、1944 年昭和東南海地震、1946 年昭和南海地震とも、海岸部で震度 5 強となっている。

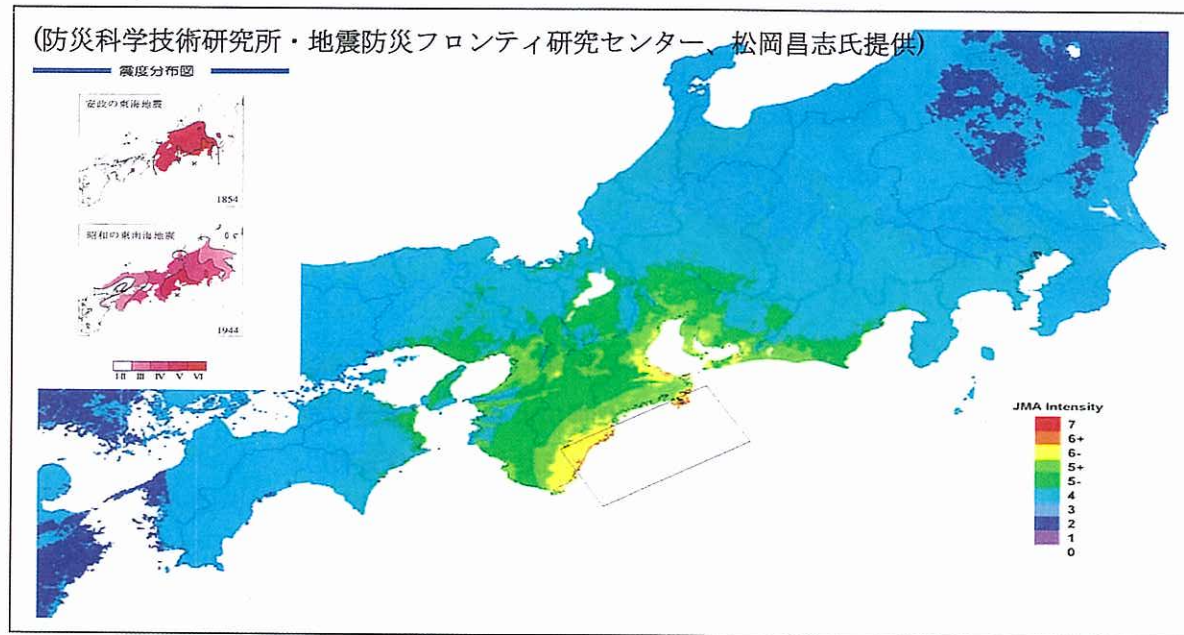


図-2.5 1944 年昭和東南海地震による全国の震度分布  
(図左上：被害記録などから推定された震度分布)

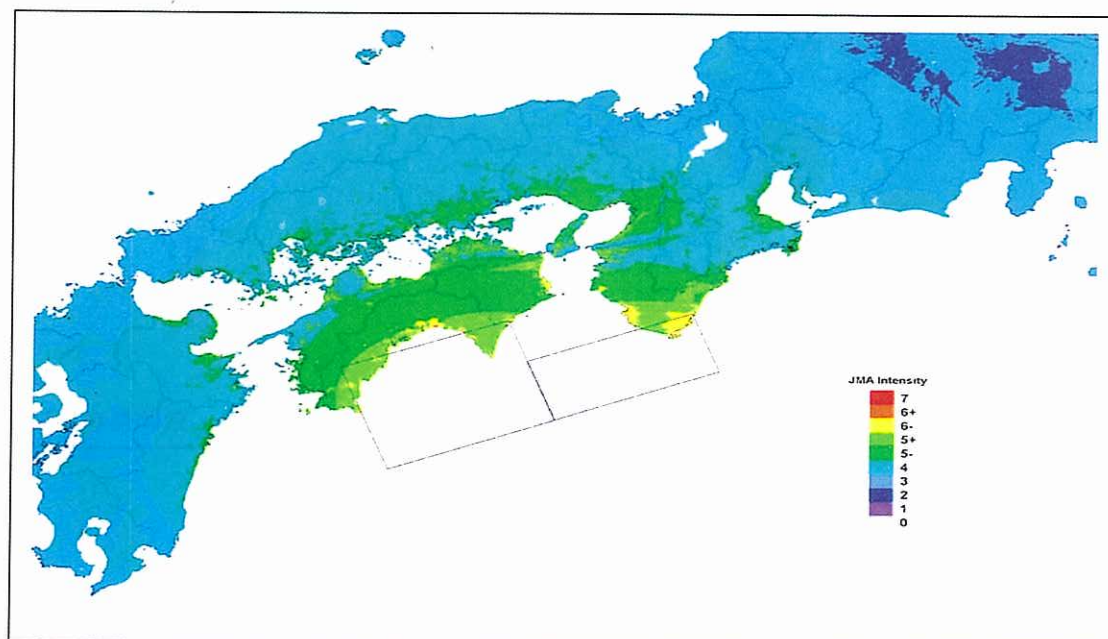


図-2.6 1946 年昭和南海地震による全国の震度分布



### 2.3 阪神大震災の記憶と教訓

1995 年 1 月 17 日未明、M7.2 の地震が明石海峡を震央として発生し、死者約 6500 名、全壊家屋約 10 万棟、直接被害総額約 10 兆円の被害をもたらした。被災地の中心は神戸市で、特に、長田区、中央区などに被害が集中した。

この地震災害は、多くの教訓を残した。例えば、ボランティア、コミュニティなどの必要性である。このボランティア活動やコミュニティの形成は神戸ばかりでなく全国的に広がり、震災が残した正の財産である。一方、負の財産である被害の痕跡は神戸市内で見つけることは困難になってきたが、写真-2.1 の震災前、直後そして現在の神戸市役所 2 号館の被災状況は痕跡の一つである。この 2 号館は、1995 年阪神・淡路大震災の「生き証人」として後世に、その震災の大きさを伝えていくものと思われる。



震災前

震災直後

現在

写真-2.1 1995 年阪神・淡路大震災で被害した神戸市役所 2 号館(被災した上部を取り除き使用)

一方、語り継がれる震災の記憶や教訓は年々少なくなっているが、神戸市ではこの教訓を生かそうと「防災福祉コミュニティ」の活動が行なわれている。その活動として、「コミュニティ安全マップ」の作成や「こうべ市民安全まちづくり大学」などが開催され、官学民が一体となった活動が精力的に行なわれている。

### 3. そして、今を知る（東海地域の地震防災の事例）

#### 3.1 東海地震から東南海地震、南海地震発生の危機

東海地震説は、1854 年安政東海地震と 1944 年昭和東南海地震の震度分布や被害、津波の波高を比較し、駿河湾内の地震エネルギーを開放していないことが 1970 年代に指摘され、この指摘が東海地震発生説の根拠となった。そして、1978 年中央防災会議はその震源域の想定、震度予測に基づく対策強化地域の指定そして地震予知体制の整備・強化を図ってきた。その後 22 年が経過した昨年 6 月と 11 月に、中央防災会議は東海地震の想定震源域の見直し、想定震度分布、津波危険度を公開し、2002 年 4 月に対策強化地域の指定を行った。この一連の発表は、東海地域、特に、愛知・岐阜・三重県に大きな波紋を投げかけ、自治体のみならず市民にも大きな関心事となった。

さらに、中央防災会議では東海地震ばかりでなく、東南海地震や南海地震の発生についても検討を行っている。地震学者による両地震の今後 30 年以内の発生確率は、東南海地震については 50%、南海地震については 40%と指摘している。



また、今後 10 年間東海地震が発生しなければ、東海・東南海・南海地震の連動的発生も、十分可能性の高い地震発生シナリオである。2001 年 6 月 16 日、中日新聞(夕刊)の第一面に“東南海、南海地震も忘れるな―「東海」と同時発生！？―”と題するショッキングな報道がなされた。これは南海トラフで繰り返し発生してきた巨大地震発生への警鐘である。

#### 一口メモ

南海トラフ沿いに発生するプレート境界型の巨大地震(M8 クラス)は、およそ 100～150 年の周期で発生している。この巨大地震の前後で西日本では M6～7 クラスの地震が集中して発生する特徴がある。現在、東海地域や南海道地域では巨大地震の発生が今世紀前半には発生するだろうと言われ、また、それまでに過去の地震発生の特徴からもしばらく内陸直下型地震の発生が続くだろうとも言われている。

### 4. では、どうすれば良いのか！ -地震災害に対抗するリスクマネジメントの構築が必要-

#### 4.1 危険を及ぼすもの(敵)は！-プレート境界で発生する巨大地震-

阪神経済圏は、周知のように、南海地震や東南海地震の脅威にさらされている。ここで、「この敵」の何を具体的に知ることが防災にとって重要かと言えば、「発生するまでの猶予期間」である。残された時間によって防災戦略が変わってくるからである。

この問いに対し、正確な答えは誰も持ち合わせていない。しかし、一部の地震学者が指摘しているように、「東南海地震の今後 30 年以内の発生確率は 50%、南海地震は 40%」である。残された猶予期間は極めて少ないと言える。

#### 4.2 危険の分析！-東海地震や南海地震による震度や地盤災害の可能性は？-

次にしなければならないことは、東海・東南海地震や南海地震が発生した場合、どのくらいの地震動(震度)や、液状化などの地盤災害の危険性の定量評価である。何故ならば、両者は構造物被害を発生させるための「破壊力の大きさ」であるからである。この危険度の分析に必要な情報は、

① 想定地震の震源情報

② 表層地盤の情報

である。①の震源情報としては色々あるが、主として「震源域の大きさと位置」「地震の規模」「破壊伝播速度」などである。②の表層地盤の情報としては、神戸 JIBANKUN に記載されている柱状図(地質、N 値、地下水位など)が基本となる。

まず、神戸地域について、上記①と②の情報から計算された結果の一例として、図-2.2(宝永地震)、図-2.4(安政南海地震)、図-2.6(昭和南海地震)の事例を示した。ただし、表層地盤の情報は、神戸 JIBANKUN ではなくて国土数値情報が用いられている。以上 3 つの地震を想定した場合の神戸地域の震度は、表-4.1 に示す通りである。

表-4.1 宝永、安政南海、昭和南海地震による神戸地域の震度(推定)

| 対象とする地震と規模        | 神戸地域の震度(推定値)  |
|-------------------|---------------|
| 1707 年宝永地震 M8.4   | ほぼ全域が震度 6 弱以上 |
| 1854 年安政南海地震 M8.4 | 震度 4～5 弱程度    |
| 1946 年昭和南海地震 M8.0 | 海岸部で震度 5 強    |

次に、東海地震をモデルとした場合の東海地域におけるケーススタディを示す。図-4.1は東海地震の震源モデル(中央防災会議発表)による東海4県の震度(計測震度に対応)予測結果である(岐阜大学・杉戸研究室提供)。また、図-4.2に液状化の危険度についても示した。これらの計算を行う場合、神戸 JIBANKUN のような表層地盤のデータベースが必要不可欠である。

静岡県全域、愛知県三河地域、名古屋市の一部で震度5強以上となっている。特に、静岡県全域、豊橋市、岡崎平野の東部では震度6弱以上となり甚大な被害が発生するものと予測される。

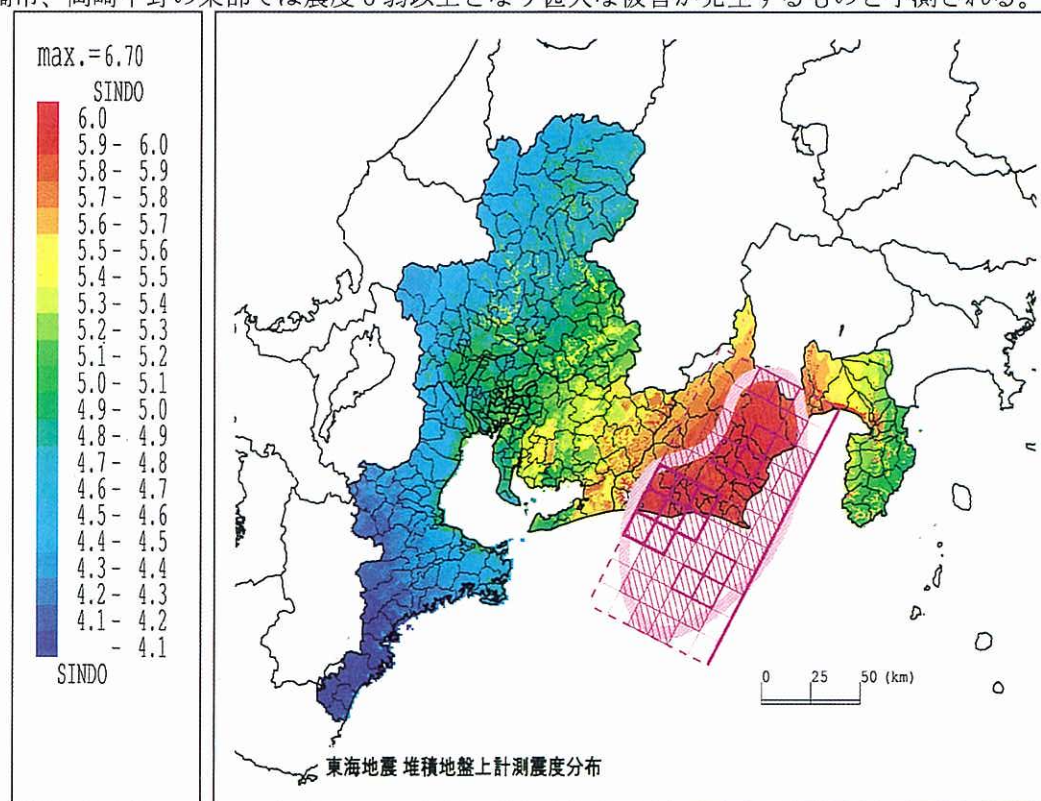


図-4.1 東海地震による震度推定(岐阜大学・杉戸研究室提供)

震度6弱以上の地域は“対策強化地域”に指定され、もし、警戒宣言(予知)が発令されると公共機関の活動はほぼ全面ストップする。具体的には、東海道新幹線、東名高速道路、JR東海道線など日本経済の動脈が完全にストップする。この影響をお金に換算すると、7000～8000億円/日と言われている。

さらに、もし、地震が発生すれば運輸手段は壊滅的な被害を受け、東からの援助は期待できないばかりか西からの援助も愛知県西部でストップする可能性は大きい。したがって、愛知県や三重県では他地域からの援助は当てに出来ない可能性が高くなる。

#### 4.3 危険の評価(家族を守る家は大丈夫?)

以上は、地震防災において最も基本的であり重要な情報であった。次に行うことは、上述の危険度(震度や液状化)に対する被害の定量評価である。ここでは、木造住家の簡易耐震診断結果をまとめたもの図-4.3、4.4に示した。診断は、日本建築防災協会が開発した方法を用いて「家屋の耐震力」を判定し、この判定結果と図-4.1および図-4.2に示した震度と液状化危険度を考慮した「総合診断」を実施している。図-4.3および図-4.4は「総合診断結果」と「耐震力」の判定結果である。

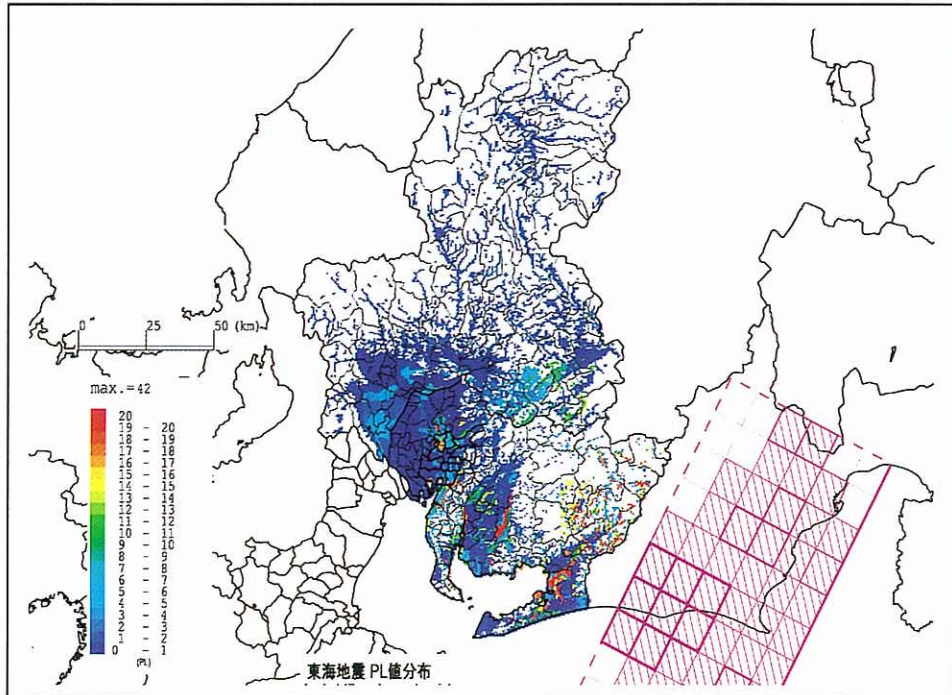


図-4.2 東海地震による液状化危険度(岐阜大学・杉戸研究室提供)

図-4.3に示した「総合判定」によれば「安全、一応安全」と判定された家屋は34%で、「危険、かなり危険」と判定された66%を大きく下回っている。特に、安全であると判定した家屋は11%であるのに対し、32%の家屋は倒壊や大破壊の危険性があり、今後、精密診断を受ける必要がある。

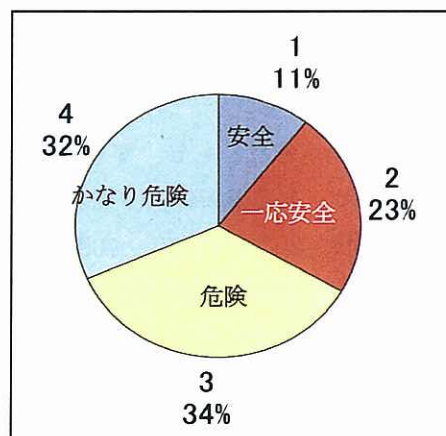


図-4.3 総合診断結果

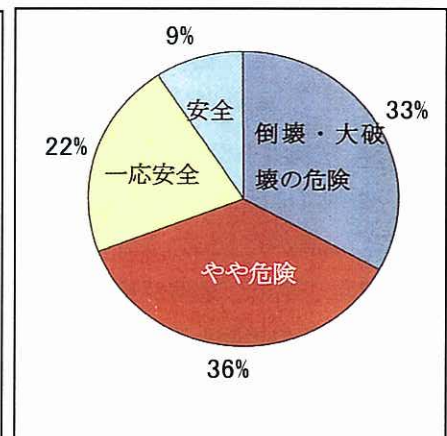


図-4.4 耐震力の判定結果

図-4.4の耐震力の結果によれば、「安全：9%」「一応安全：22%」となり、やや危険、危険(両者で69%)となっている。あなたの家は大丈夫ですか？以上、図-1.2および図-1.3のリスクマネジメントの流れに沿って、可能な限り危険の認知、分析、評価の事例を紹介した。

次に行うことは、もし、あなたの家が「危険」と診断された場合、耐震補強を行うことが必要である。ここで、問題となるのは「建て替え」もしくは「補強」のどちらを選択するのかとその資金である。さらに、「補強」を選択した場合「補強方法」の問題も残っている。「建て替え」にしても「補強」にしても技術的な問題は無いが、資金が重要な問題となる。この問題を解決する中で、「資金を潤沢に



持っておられる方」は良いとして、「資金がない方」については行政からの資金援助他の支援が必要である。例えば、

- ① 低金利で補強に要する資金を援助する
- ② 無償で補強に要する資金を援助する
- ③ 補強は自分で行うが、もし、地震で倒壊した場合、行政がその補強に要した資金を支払う
- ④ 代替としての安全な住まいを提供する(市営住宅や県営住宅など)。取り壊した跡地の運用で家賃を支払う

の方法が考えられる。①～③は資金援助に関する政策の策定、④は“住まい”の提供に関する政策である。現状では、②～④とも一般化していないが(②については横浜で事例がある)、このままでは悲惨な状態が繰り返されることは明白である。行政サイドの柔軟な政策を期待したい。

一方、技術面で問題ないと記したが、「安価で信頼できる補強方法」の開発は技術者に課せられた問題である。現在、100万円～1000万円などあまりにも大きな開きがある。市民感覚からすればどのくらい補強のために支出しても良いと思っているのか不明であるが、おそらく100万～200万円までであろう。

以上は、図-1.2の中央の流れに沿っての説明である。いろいろな危険の定量評価や分析、さらに被害軽減対策を考えても幾つかの問題が残っている。すなわち、技術面での問題と減災に要する資金などの問題である。この問題解決には、その成果・結果を関係する部署や組織、市民と共有しなければ始まらない。以下の章では、そのコミュニケーションについて記す。

## 5. リスクコミュニケーション

東海地震、東南海地震さらに南海地震の震源域の見直しなどは、静岡県・愛知県・三重県を始めとする東海3県ばかりでなく東海道経済圏や関西・阪神経済圏、四国経済圏をゆるがす21世紀最悪の地震災害のシナリオであり、1707年宝永地震の再来である。まさに、個人の被災ばかりでなく日本の経済を揺るがす事態となる可能性を有している。このような事態に対処するには、「真のリスクコミュニケーション」が必要である。

図-5.1はリスクコミュニケーションの一例で、かなり単純化した概略図である。図中の中段は具体的な危険度評価項目のためのキーワードである。上段は対策の検討を総合的に行う部署(消防防災課など)であり、ここで危険度の評価と対策そして抜本的な政策を策定する。下段は、市民の皆さんや防災コミュニティの皆さんへの情報交換を行うシステム作りである。コミュニティの安全環境の構築は、「コミュニティ全体(個人単位ではない)で被害を出さない!最小にとどめる」ことがどのような重要な意味があるかを理解し、その実現のための政策を総合的に検討するためにも「住民と自治体ばかりでなく住民相互のリスクコミュニケーション」が可能となる社会システムを作ることが、住民と自治体に課せられた課題である。

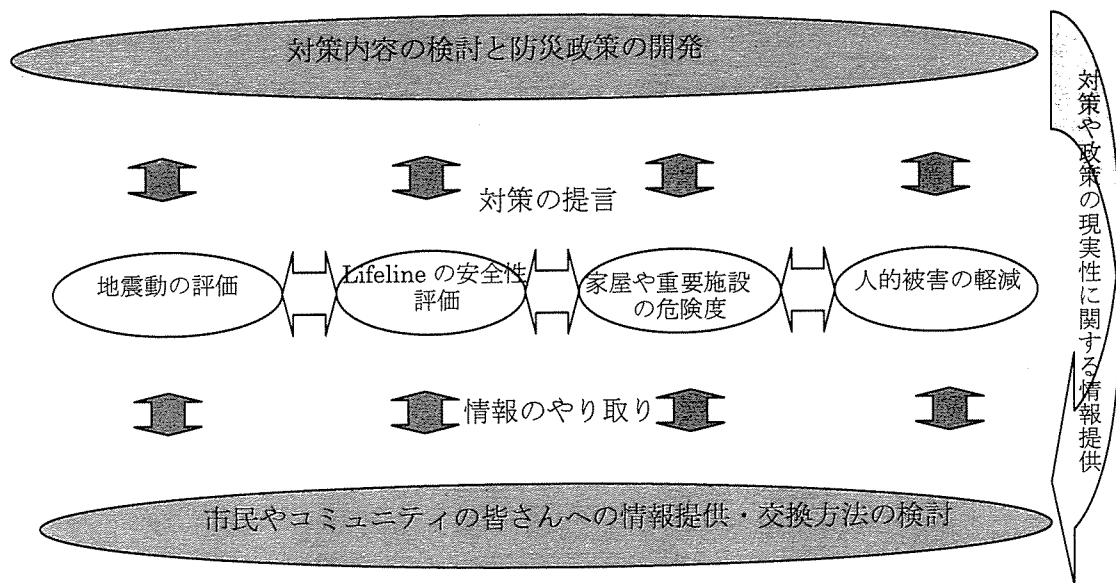


図-5.1 リスクコミュニケーションの概要

この概念は、以下の図-5.2 から図-5.5 に示した各組織が異なるコンセプトの基に防災を推移しても情報の交換がスムーズに行えるような仕組み、すなわち、図-1.2 の“C”に該当する情報のやり取りである。

図-5.2 は住民が行うべき「住まいの安全」であるが、この目的達成のためには研究者・技術者・行政のサポートが直接的にも間接的にも必要である。特に、神戸 JIBANKUN のような地盤のデータベースを用いた各種危険度の定量評価結果は、構造物の耐震化に関して有効であり、市民への情報支援になる。また、技術者の方々も、地盤情報に基づいた家屋の安全を推進していただきたい。

図-5.3 は、街の安全で、特に防災コミュニティの形成を目標としたものである。これは、被害の最小単位は“家族”であるが、防災の最小単位は“コミュニティ”であるとの視点に立ったもので、コミュニティでの共助や“自らのまちは自ら守る”との目標のもとで形成されるものである。

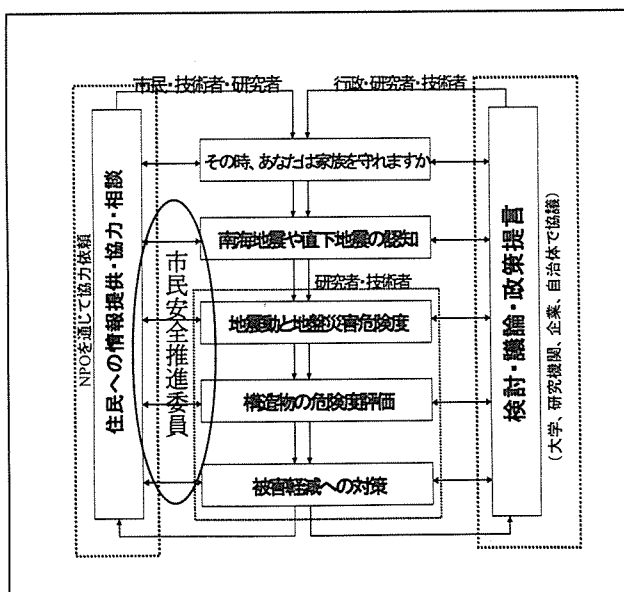


図-5.2 家族のためのリスクマネジメントフロー  
(家の耐震化・補強、室内の安全空間)

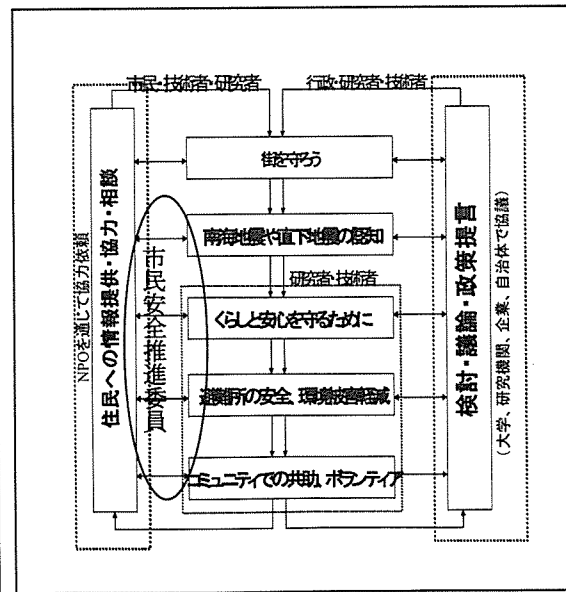


図-5.3 街のためのリスクマネジメントフロー  
(コミュニティの形成と共助のシステム)

平成 9(1997)年度から、神戸市では「防災福祉コミュニティ」づくりが活発に行なわれており、平成 13 年度末で 151 地区で結成された。このコミュニティは、日常の地域福祉等のコミュニティ活動で育まれた住民相互の助け合いの絆を、災害時の初期消火、救出救護活動などに生かせるように平常時から福祉・防災活動に取り組む組織である。具体的な活動として「コミュニティ安全マップ」の作成が、住民参加のもとで行われている。さらに、「こうべ市民安全まちづくり大学」が発足し、学識経験者、技術者、行政の方々が講師となって、市民の皆さんを対象にした「人材育成のための参加型講座」が開講している。受講の修了とともに、「市民安全推進委員」として登録され、地域の安全のための実践活動に取り組んでおられます。まさに、図-5.2 の中央の流れと左側の「住民への情報提供・協力・相談」の掛け橋となられる方々である。

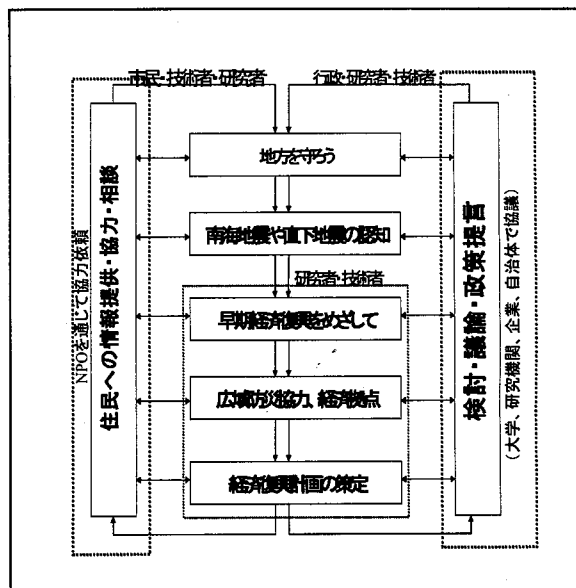
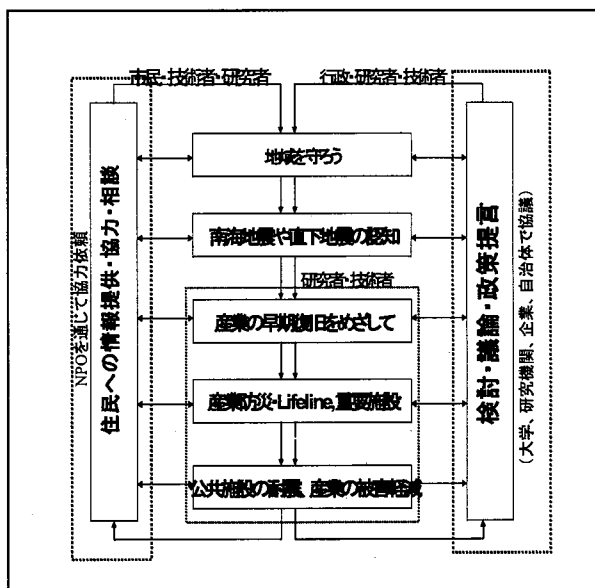


図-5.4 地域のためのリスクマネジメントフロー (産業防災、ライフラインなど) 図-5.5 地方のためのリスクマネジメントフロー (経済復興、経済拠点整備)

図-5.4 と 5.5 は地域(市町村)と地方(県単位や経済圏単位)の地震防災である。市町村単位で守るのは「重要施設、Lifeline、産業」である。これらを守ることににより、災害から復帰した市民のくらし(仕事)を守ることにつながるからである。そのためには、「市民安全推進委員」のような同図右側と中央の橋渡しができる組織や人材の育成が必要である。例えば、「退職された防災関係者」や「商工会議所の方々」を対象とした「少し専門的な講座」の開講が必要である。同様に、図-5.5 における「経済復興」のための事前戦略の構築ができる「シンクタンクの方々」「経済の専門家」「法律家」など幅広い人材が必要である。



## まとめ

地震防災の重要性は誰もが認めるところである。この地震防災の骨幹を成すのは自治体ごとで行っている被害想定や地域防災計画であった。今まで、多くの自治体で被害想定が行なわれてきたが、その想定結果をどのように生かしてきたかを考えると多くの疑問が残ると言わざるを得ない。すなわち、家屋やビル、ライフラインの被害などの予測結果は、避難所の指定、毛布・食料などの備蓄量の算定には生かされたと思うが、肝心の住民サイドに立った被害軽減(予防)に生かされたとは、どう考えても疑問が残る。阪神大震災は多くの被害と教訓を残し、また、21世紀の地震防災の課題も残してくれました。この課題をひとつひとつ解決していくことが、尊い命を亡くされた方々への償いと考え、産官学民が一体となった地震防災の在り方を考究・実践したい。神戸 JIBANKUN はそのための重要な情報源とツールで、その中に多くの解答が埋まっていると思う。

## おわりに

本報告書は平成 11 年度より活動を開始した地盤研究委員会での 3 年間活動成果を取りまとめたものである。報告内容としては、研究委員会に設けられた 2 つの分科会、すなわち地震動分科会と液状化分科会での活動成果をまとめるとともに名古屋工業大学の谷口先生には「すまいとくらしのリスクマネジメント」について、これまでの研究成果をまとめていただいた。

地震時における各種地盤の地震動増幅特性については、これまでに各種研究機関や大学等で研究が進められてきたが、現段階に至っても十分に解明された状態とは言えない。増してやプレート境界ならびに内陸直下で起こる地震力の大きさについても不明な点が多く、今後解決していかなければならない問題が山積みしている。

一方、我が国における平野部は欧米諸国と違って、急流河川が運んできた堆積物が表層付近に分布しており、地層構成も砂、礫、粘土が複雑に絡み合っ一様な状態ではない。特に、神戸市街地は六甲山地と海域との間に形成された扇状地に存在し、そこでの地層構成は一段と複雑なものとなっている。

兵庫県南部地震以降、神戸市街地において各種の地盤調査や地震動、液状化解析などが行われ、地層の成層状態や地震動増幅特性がかなり明らかになってきている。上述した神戸市街地における各種問題を解決していく上で有力な情報源となっているのが、神戸 JIBANKUN の存在である。神戸 JIBANKUN を有効に活用することによって、神戸市街地の地盤構成をより詳細に把握でき、将来発生が予測される地震に対しても精度の高い地震動分布図やハザードマップ作成が容易となる。

我が国においては地震発生を日常生活の中で切り離して考えることはできず、地震が発生した時、いかに人命と財産を守るということが我々技術者に課せられた宿命である。本報告書では地震動解析手法ならびに神戸市街地の地盤構成、液状化特性などについてまとめているが、ここで得られた知見が今後の市民生活を安全にしていくなで役立つことができれば幸甚の至りである。

神戸の地盤研究会  
地盤研究委員会  
委員長 沖村 孝