

目 次

1.	はじめに.....	- 1 -
2.	研究方法.....	- 2 -
2.1	建物の振動解析による倒壊判定手法の概要.....	- 2 -
2.2	倒壊判定を含めた耐震補強イメージと研究範囲.....	- 3 -
2.3	研究の流れと本報告書の構成.....	- 4 -
3.	解析対象建物の設定.....	- 5 -
3.1	解析対象建物の概要.....	- 5 -
3.2	兵庫県南部地震による被災状況.....	- 6 -
4.	確率論的地震ハザード・リスク評価手法による予備検討.....	- 7 -
4.1	検討地点の設定.....	- 7 -
4.2	地震ハザードステーション「J-SHIS」による評価.....	- 7 -
4.3	自然災害リスク分析ソフトウェアによる評価.....	- 13 -
4.4	検討結果と今後の課題.....	- 19 -
5.	振動解析による倒壊判定手法の適用事例.....	- 20 -
5.1	振動解析の概要.....	- 20 -
5.2	補強前の建物の地震応答解析.....	- 21 -
5.3	倒壊防止を目的とした補強後の建物の地震応答解析.....	- 24 -
5.4	倒壊判定手法の適用可能性.....	- 28 -
6.	振動解析用の入力地震動の作成要件に関する中間とりまとめ.....	- 30 -
6.1	入力地震動の作成要件.....	- 30 -
6.2	今後の方向性.....	- 33 -
7.	まとめ.....	- 34 -

1. はじめに

集合住宅等の中高層建物は一般に建物重量が大きいために、0.6以上の I_s 値を満足する従来の耐震補強方法では、図-1.1に代表的な補強事例を示すように大規模な工事が必要となり、費用負担面から耐震化が進みにくい要因の一つになっている。一方、既往の I_s 値のみにとらわれることなく、大地震後の再使用を前提としない等の条件付きながら「振動解析による倒壊判定手法」により動的応答性状を検討する方法が提示されている¹⁾。

振動解析を行うにあたっては、解析結果に大きく影響する入力地震動の作成が課題となる。特に、耐震診断や設計、補強等に従事する実務者にとっては時間・費用・技術の各観点を踏まえた判断が必要となる。例えば、エル・セントロ波、タフト波等の既往の観測波は比較的容易に入手できるが、解析地点の地盤条件による増幅特性を考慮した波形を作成するには、地盤データを入手した上で別途解析（SHAKE等）が必要であり、必要な各地盤パラメータの設定に迷うことになる。また、入力地震動の作成から振動解析による倒壊判定までを一人で全て実施できる実務者は限られるとともに、解析の各段階において種々の判断が必要であることから、実務者ごとに結果のバラツキが生じやすい。よって、実務者の立場からは簡便で一義的な形で入力地震動が作成可能な手法の開発やそのマニュアル化が望まれている。

近年、大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会から、大阪府域を地盤特性の観点からゾーニングした上で、5つの断層帯（上町、生駒、中央構造線、有馬―高槻、六甲・淡路）毎に膨大な破壊ケース数を想定して統計処理により作成された地表地震波（フラットタイプ、パルスタイプ）が詳細な解説とともに公開され、上町断層と生駒断層については地表加速度波形データが提供された。ただし、これは大阪府域を対象にしているため、神戸市内に距離的に近い有馬―高槻断層帯や六甲・淡路島断層帯については公開されていない。

上記の背景から、本研究ではより合理的な耐震診断・補強方法の実現により、耐震診断や設計、補強等に従事する実務者の作業負担軽減を図り、中高層建物の耐震化促進に貢献することを目的として、今後30年程度の建物使用期間の中で発生しうる最大級の地震に対して、建物は再使用できなくても倒壊はしない性能の確保を目的とした「振動解析による倒壊判定手法」の耐震診断・補強実務への導入可能性を検討する。具体的には神戸市域の膨大な地盤情報が集積された高密度地盤情報データベース「神戸JIBANKUN²⁾」を活用し、神戸市特有の地盤特性を反映した入力地震動を作成するための要件を整理して、実務者が入力地震動を選択する際の考え方を提示する。なお、本研究は2015年度より2019年度までの5か年の計画で推進しており、本報では2017年度までの3年間の中間成果を報告する。



図-1.1 中高層集合住宅の耐震補強事例

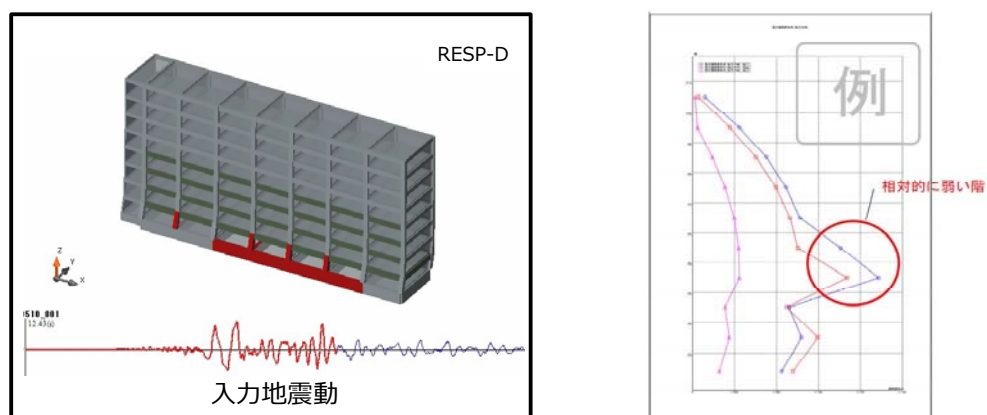
参考文献

- 1) (社)建築研究振興協会：既存建築物の耐震診断・耐震補強設計マニュアル2003年版，2003.
- 2) 沖村孝，田中泰雄，鎌江伊三夫，大星直樹，鳥居宣之，川下光仁：地盤情報データベースとGISの活用による都市災害および都市開発の検討，土と基礎，48号，pp.27-29，2000.

2. 研究方法

2.1 建物の振動解析による倒壊判定手法の概要

図－2.1.1 に「振動解析による倒壊判定手法」の概要を示す。まず，図－2.1.1 a)に示すような建物の振動解析モデルを構築する。本研究では，振動解析モデルとして(1) 質点系解析モデルと(2) 3次元立体フレーム解析モデルの2種類を構築する。次に地震動を振動解析モデルに入力し，振動解析結果から得られた各階の最大応答層間変形角を基に建物倒壊の可能性を判断する。図－2.1.1 b)に最大応答層間変形角の例を，表－2.1.1 に判断基準の例を示す。



a) 建物の振動解析の例（3次元立体フレームモデルの場合） b) 最大応答層間変形角の例

図－2. 1. 1 建物の振動解析による倒壊判定手法の概要

表－2. 1. 1 倒壊判定基準の例¹⁾

領域	最大応答層間変形角 (rad)	推定損傷状況
I	1/100 以下	倒壊はせず，構造体や内部の損傷も少ない
II	1/100 を超え 1/50 以下	倒壊はしないが，構造体の損傷がある
III	1/50 以上	部分的または建物全体が倒壊する可能性が大きい

2.2 倒壊判定を含めた耐震補強イメージと研究範囲

「振動解析による倒壊判定手法」を含めた耐震補強の進め方を図-2.2.1 に示す。まず、通常の耐震診断（2次診断, 3次診断）を実施する。次に、振動解析による検証を行いたい実務者が、対象建物の建設地点における表層地盤特性が考慮された入力地震動（地表加速度波形等）を振動解析プログラムに取り込み時刻歴応答解析を実行する。その解析結果を基に補強の費用対効果を考慮して、建物所有者と相談しながら補強計画を以下のように段階的に進めることを想定している。

- 1 次的補強： 極脆性柱や下階壁抜け柱など重要かつ壊れやすい部材（第2種構造要素）に対して、比較的容易かつ安価に工事できるスリットや柱巻き補強を行い、建物の決定的な弱点を改善する。
- 2 次的補強： ブレースなどの壁要素を既存建物に付加することで保有水平耐力を増強して目標 I_s 値を満足させる。（公的機関の評価取得や補助金申請が必要な場合）

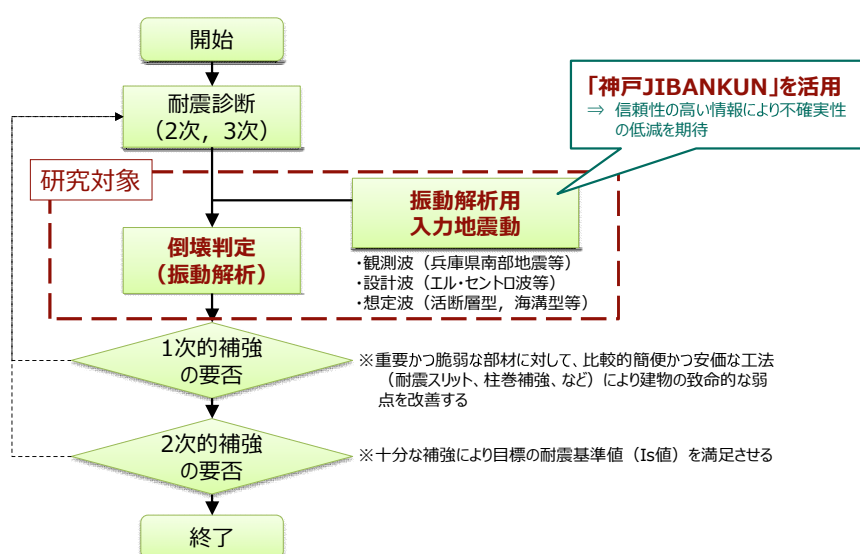


図-2.2.1 倒壊判定を含めた耐震補強イメージと研究範囲

本研究の範囲を図-2.2.1 に併せて示す。本研究では1)「振動解析による倒壊判定手法」の適用可能性、および2)振動解析に必要な入力地震動に関する検討について検討を行う。1)倒壊判定手法の検討では、ケーススタディとして耐震補強が進んでいない中高層集合住宅を対象に具体的な解析を実施し、大地震後の再使用を前提としない条件付きでその適用可能性を検討する。2)入力地震動に関する検討では建物倒壊の可能性を検討するにあたり、神戸市域においてどのような地震動を想定して設定すべきかを検討する。

2.3 研究の流れと本報告書の構成

本研究は5か年計画とし、以下のようにフェーズ1とフェーズ2の2段階で進めている。

フェーズ1 (2015.8~2018.7)	実建物を対象に振動解析による倒壊判定に関するケーススタディを実施し、耐震補強検討のための入力地震動の要件に関する中間とりまとめを行う。
フェーズ2 (2018.8~2019.7)	フェーズ1で整理した要件を踏まえて、入力地震動の作成や費用に関する検討を行う。

フェーズ1における研究の流れと本報告書の構成を図-2.3.1に示す。

第3章では、解析対象とする建物の設定を行った。対象建物は神戸市の協力のもと、建物の構造と兵庫県南部地震による被災履歴が明らかな8階建ての中高層集合住宅を選定した。被災履歴が明らかな建物を選定した理由は、地震応答解析において兵庫県南部地震による被災程度や箇所を再現することにより、より現実に即した解析モデルを構築するためである。

第4章では、設定した対象建物の基本的な地震リスクを把握するために、予備検討として2種類の既往の確率論的手法に基づき地震リスク評価を行った。ただし、実際の建物には住民が居住していることに配慮して、本報告書では仮想の建設地点を設定して実施した地震リスク評価結果を記載している。仮想の建設地点は表層地盤の違いによる影響を把握するために、神戸大学工学部地点と神戸市役所地点の2か所を設定した。

第5章では、対象とした建物の振動解析モデルを構築して地震応答解析を実施した。地震応答解析は最初に補強前の建物に対して、兵庫県南部地震で観測された波形や耐震設計に用いられている代表的な地震波形を入力し、実際の被害を再現できるかどうか妥当性を確認しながらモデルを改良した。次に、建物の倒壊を防止する目的で必要最低限の補強を実施した条件にて地震応答解析を実施し、補強効果の確認を行った。以上の解析結果をふまえて、倒壊判定手法の適用可能性を検討した。

第6章では、第4章と第5章の検討結果を基に振動解析用の入力地震動の要件を検討した。

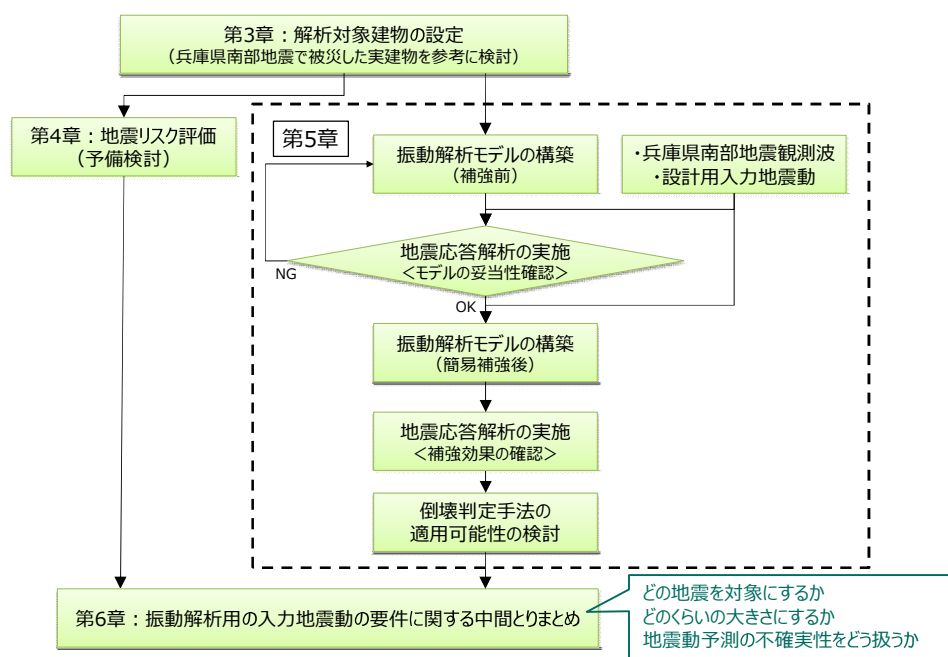


図-2.3.1 研究の流れ（フェーズ1）と本報告書の構成

3. 解析対象建物の設定

3.1 解析対象建物の概要

解析対象とした建物の概要を表-3.1.1 に示す。対象建物は神戸市の協力のもと、建物の構造と兵庫県南部地震による被災履歴が明らかな神戸市に実在する 8 階建ての中高層集合住宅を選定した。被災履歴が明らかな建物を選定した理由は、地震応答解析において兵庫県南部地震による被災程度や箇所を再現することにより、より現実に即した解析モデルを構築するためである。1 階～4 階までは柱と梁に充腹形の鉄骨材が使用された SRC 構造、5 階以上は RC 構造で、新耐震設計基準が適用される以前の 1979 年に建設されている。

図-3.1.1 に 3 階部分の床伏図を示す。X 方向（桁行方向）は、X1-X2 間に設置されている外部階段を除くと 7 スパンで、Y 方向（張間方向）は 1 スパンの建物規模である。図 3.1.2 a) と b) に A 通り（バルコニー側）と D 通り（廊下側）の軸組図を示す。1 階はピロティ構造で駐輪等のスペースになっており、2 階以上は居住空間に使用されている。典型的な集合住宅の特徴として、X 方向は耐震壁に開口部を有したラーメン構造、Y 方向は各戸境に耐震壁を配置した耐震壁付ラーメン構造である。

解析対象建物は耐震診断（二次診断）が実施されているが、 I_s 値は 0.6 は満足していない。

表-3.1.1 解析対象建物の概要

所在地	神戸市内	
階数・構造	5～8 階	RC 造
	1～4 階	SRC 造（充腹形鉄骨）
延床面積	2721.3m ²	
建物高さ	22.9m	
建築年	1979	
基礎構造	杭基礎	



図-3.1.1 3階床伏図

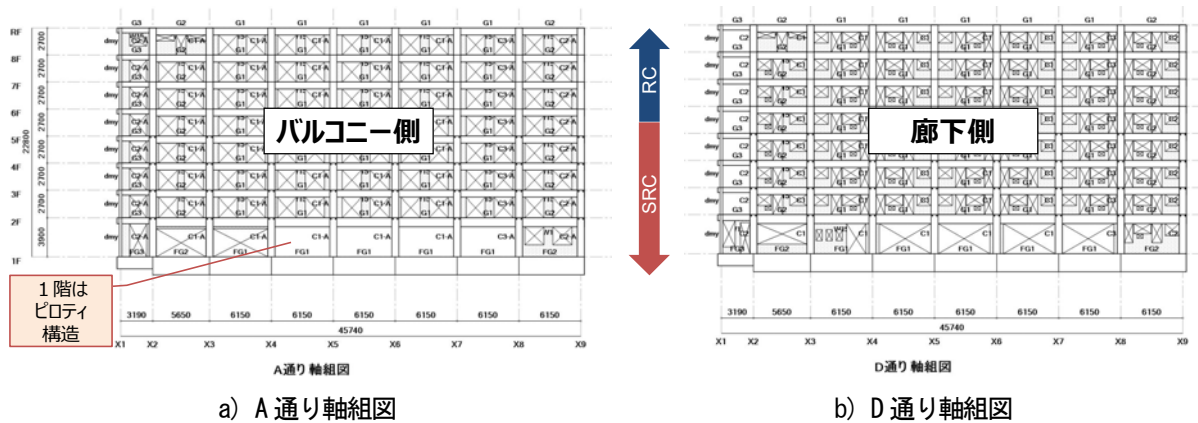


図-3.1.2 軸組図

3.2 兵庫県南部地震による被災状況

解析対象建物は 1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震により 1 階のピロティ部分に被害が集中した。図-3.2.1 に被害状況の写真を示す。主な被害として、図-3.2.1 a) に示すように、1 階の柱の一部に主筋の座屈や被りコンクリートの剥落が確認された。また、柱際の腰壁や垂壁のコンクリートが圧壊した箇所や、図-3.2.1b) のように短柱化した袖壁がせん断破壊している箇所があった。階段室まわりについても外壁端において主筋の座屈や被りコンクリートの剥落が確認された。



a) 1 階柱脚筋の座屈状況



b) 短柱化した 1 階袖壁のせん断破壊状況

図-3.2.1 兵庫県南部地震による被災状況

4. 確率論的地震ハザード・リスク評価手法による予備検討

4.1 検討地点の設定

解析対象建物の基本的な地震リスクを把握するために、予備検討として2種類の既往の確率論的手法に基づく地震リスク評価を行った。研究会では実在する建設地点で検討を実施したが、本報では実在建物には住民が居住していることに配慮して、仮想の建設地点を設定して同様の検討を行った結果を記載した。したがって、定量的なリスク評価の結果としての数値そのものは大きな意味はなさないが、神戸市における地震特性を理解し、各地点においてどのように振動解析用の入力地震動を設定するのか、その課題を明らかにする点では同様な結論が得られたため、仮想の建設地点での結果を報告する。

仮想の建設地点は表層地盤の違いによる影響を把握するために、神戸大学工学部地点（KU 地点）と神戸市役所地点（KC 地点）の2か所を設定した。この2地点において、①地震ハザードステーション「J-SHIS」による評価、および②自然災害リスク分析ソフトウェアによる評価の2種類の地震リスク評価手法を適用した。

4.2 地震ハザードステーション「J-SHIS」による評価

（1） J-SHIS の概要

J-SHIS とは、地震防災に資することを目的に、日本全国の「地震ハザードの共通情報基盤」として活用されることを目指して作られたサービスである¹⁾。「全国地震動予測地図」の公開システムとして、2005年5月より運用が開始されている。地図そのものだけでなく、その作成の前提条件となった地震活動・震源モデル及び地下構造モデル等の評価プロセスに関わるデータも公開されている。

「全国地震動予測地図」とは、将来発生のおそれのある地震による揺れの強さを予測し、250m メッシュの分解能で結果を地図表示したものである。地図には大きく、①確率論的地震動予測地図と②震源断層を特定した地震動予測地図の2種類がある。

図-4.2.1 に示している確率論的地震動予測地図は、日本およびその周辺で起こりうる全ての地震に対して、その発生可能性、規模を確率論的に評価し、さらにそれらの地震が発生したときに生じる地震動の強さをばらつきも含めて評価した結果を地図表示するものである。また、図-4.2.2 に示す震源断層を特定した地震動予測地図は、ある特定の地震が発生した場合に各地点がどのように揺れるのかを計算して、その分布を地図表示するものである。

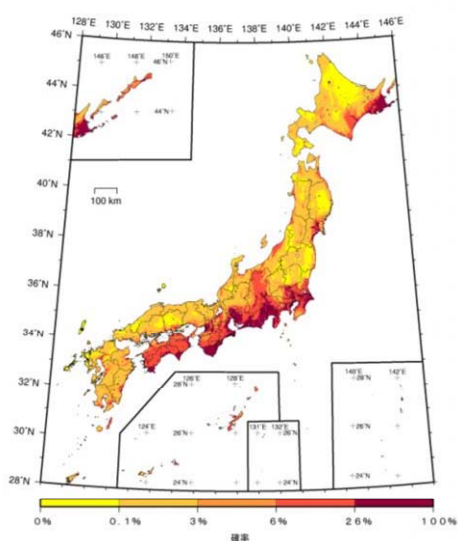


図-4.2.1 確率論的地震動予測地図

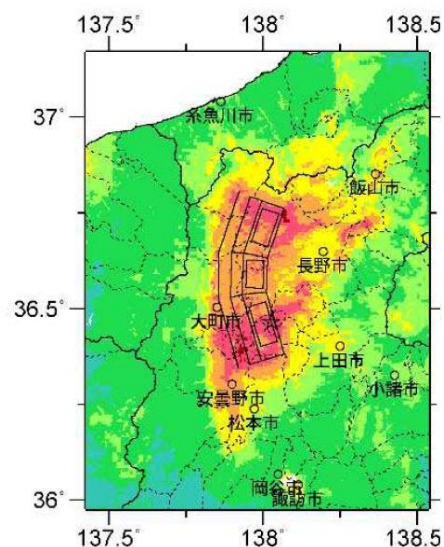
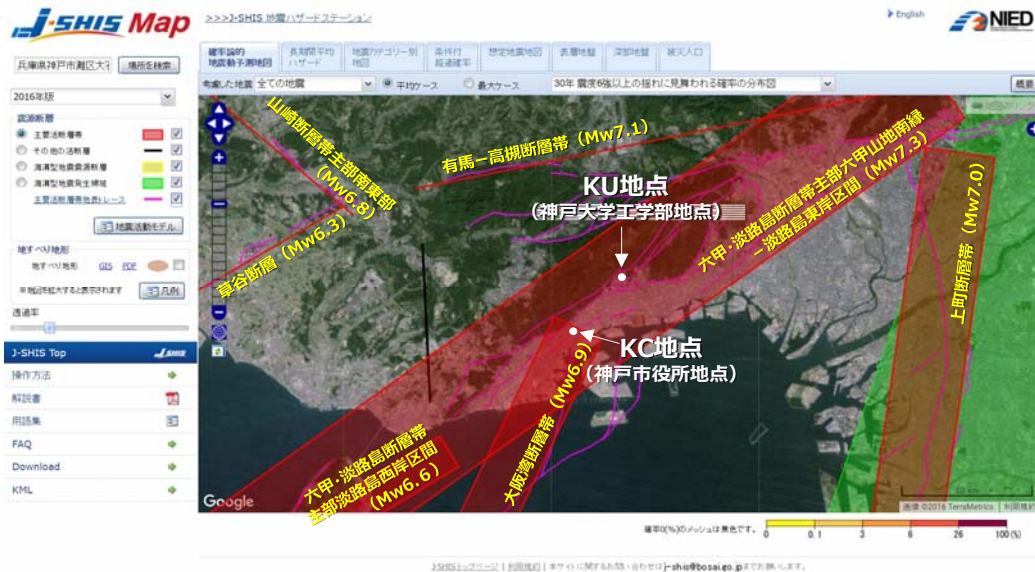


図-4.2.2 震源断層を特定した地震動予測地図

(2) 神戸市近傍の地震発生源と発生確率

J-SHIS 上で表示した神戸市近傍に存在する主要活断層と KU 地点、KC 地点との位置関係を図-4.2.3 に重ねて示す。両地点ともに六甲・淡路島断層帯上に位置し、大阪湾断層帯、有馬一高槻断層帯、上町断層帯が比較的近傍に存在している。表-4.2.1 にこれらの各断層における地震活動モデルを示す。このモデルに基づく 30 年や 50 年の発生確率をみると上町断層の地震発生確率が比較的高いが、全体的に神戸市は主要活断層による地震発生確率が低い地域特性が認められる。「振動解析による倒壊判定手法」を検討するにあたり、入力地震動を設定する際に発生確率が低い地震発生源を考慮すべきかどうか、地震発生確率が低い地域においてどの程度の規模の地震動を想定すべきかについて検討が必要となる。



(J-SHIS 表示画像を一部加工して作成)

図-4.2.3 検討地点（仮想の建設地点）と主要活断層の位置関係

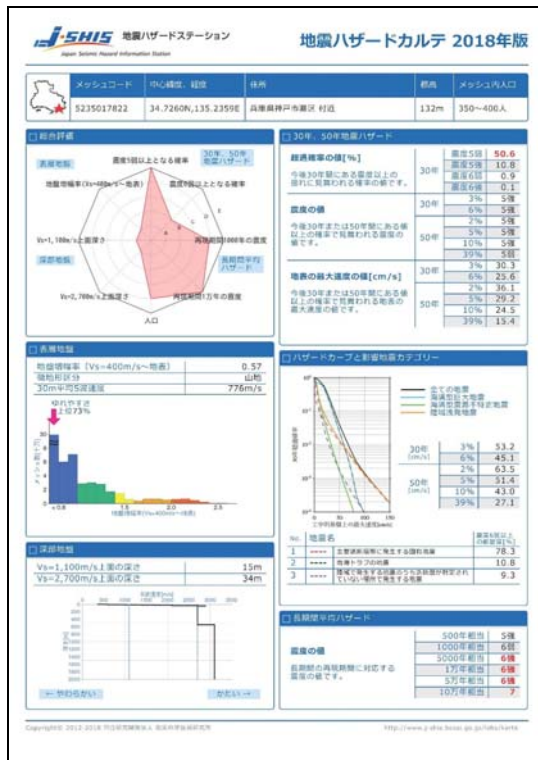
表-4.2.1 近傍の主要活断層帯の地震活動モデル

断層名	平均発生 間隔 (年)	最新活動 時期 (年前)	30 年 発生確率※ (%)	50 年 発生確率※ (%)	マグニチュ ード (Mw)
山崎断層帯主部南東部	3,900	1,566	0 (0.03~5%)	0 (0.06~8%)	6.8
草谷断層	6,500	1,266	0 (ほぼ 0%)	0 (ほぼ 0%)	6.3
有馬一高槻断層帯	1,500	420	0 (ほぼ 0~0.02%)	0 (ほぼ 0~0.04%)	7.1
六甲・淡路島断層帯主部 淡路島西岸区間	2,150	21	0 (ほぼ 0%)	0 (ほぼ 0%)	6.6
六甲・淡路島断層帯主部 六甲山地南縁-淡路島東岸区間	1,850	466	0 (ほぼ 0~0.9%)	0 (ほぼ 0~2%)	7.3
大阪湾断層帯	5,000	608	0 (0.004%以下)	0 (0.007%以下)	6.9
上町断層帯	8,000	18,500	2.89 (2~3%)	4.78 (3~5%)	7.0

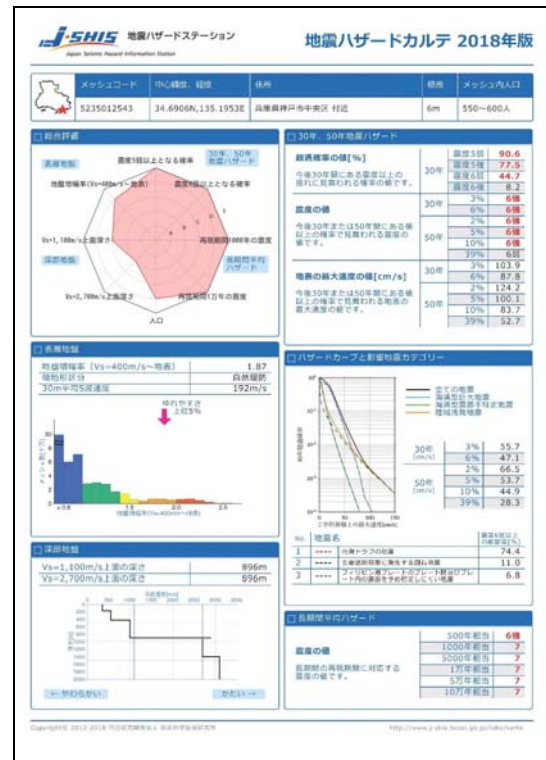
※ 30 年、50 年発生確率：上段の確率は J-SHIS の表示に基づく。下段のカッコ内の確率は地震調査研究推進本部による活断層の長期評価に基づく。

(3) 地震ハザードカルテによる評価

J-SHIS では地震ハザードカルテにより各地点の地震ハザード情報の全体を詳細に把握することができる²⁾。この地震ハザードカルテには、① 評価地点情報、② 総合評価、③ 表層地盤、④ 深部地盤、⑤ 30 年、50 年地震ハザード、⑥ ハザードカーブと影響地震カテゴリー、⑦ 長期間平均ハザードに関する情報がまとめられている。図-4.2.4 に KU 地点と KC 地点における地震ハザードカルテを示す。以下に各地点における評価結果を説明する。



a) KU 地点 (神戸大学工学部地点)



b) KC 地点 (神戸市役所地点)

図-4.2.4 地震ハザードカルテによる評価結果一覧

① 評価地点情報

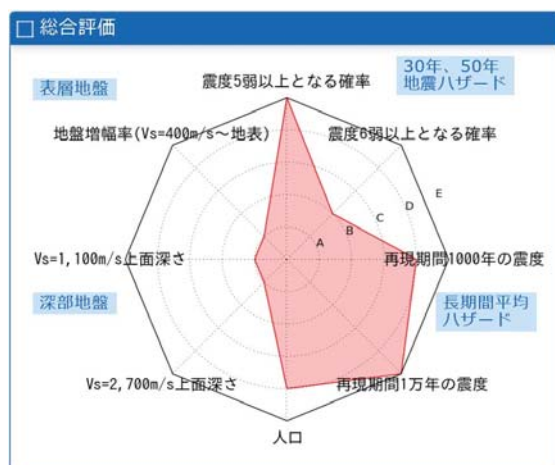
評価地点の位置や人口に関する情報を把握することができる。KU 地点における標高は132mで、250mメッシュ内の人口は350人~400人であり、KC 地点の標高は6mで、人口は550人~600人と評価されている。

② 総合評価

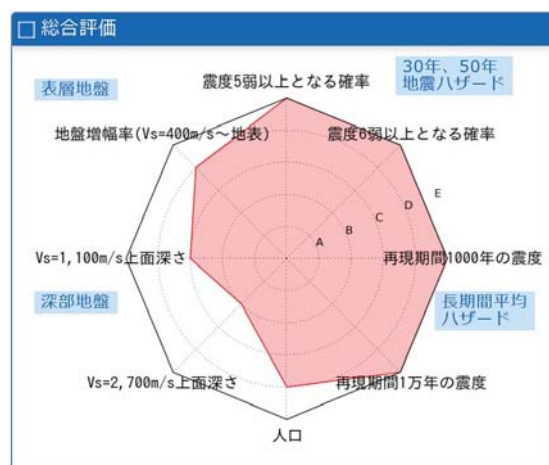
③~⑦の項目を表-4.2.2のランク表に従ってA~Eの5段階で評価し、レーダーチャートで示している。レーダーチャートの面積が大きいほど、地震ハザードが高いと評価されている場所である。図-4.2.5をみると、KC 地点の方が KU 地点よりも地震ハザードが高いことがわかる。

表-4.2.2 ランク表

名/ランク	A 低め	B やや低め	C 中程度	D やや高め	E 高め
震度 5 弱/6 弱以上となる確率	0.1%未満	0.1 以上 3%未満	3%以上 6%未満	6%以上 26%未満	26%以上
再現期間 1000 年/1 万年の震度	5 弱未満	5 弱以上	5 強以上	6 弱以上	6 強以上
人口	1 人未満	1 人以上 10 人未満	10 人以上 100 人未満	100 人以上 1000 人未満	1000 人以上
$V_s=2,700$ m/s 上面深さ	300m 未満	300m 以上 1000m 未満	1000m 以上 2000m 未満	2000m 以上 3000m 未満	3000m 以上
$V_s=1,100$ m/s 上面深さ	200m 未満	200m 以上 500m 未満	500m 以上 1000m 未満	1000m 以上 2000m 未満	2000m 以上
地盤増幅率	1.0 未満	1.0 以上 1.4 未満	1.4 以上 1.6 未満	1.6 以上 2.0 未満	2.0 以上



a) KU 地点（神戸大学工学部地点）



b) KC 地点（神戸市役所地点）

図-4.2.5 総合評価の比較

③ 表層地盤

図-4.2.6 に KU 地点と KC 地点における表層地盤の評価結果を示す。図には全国の地盤増幅率の分布が棒グラフで表示され（色はランク A～E に対応）、評価対象地盤の位置が矢印で示されている。「ゆれやすさ上位」に示される値は、全国の値に対し揺れやすい方から上位何%に入っているかを表しており、この値が小さいほど、全国の中で比較的揺れやすい地域であることが示されている。KU 地点と KC 地点を比較すると、KC 地点の方が地盤が軟らかく、地震で揺れやすいと評価されている。

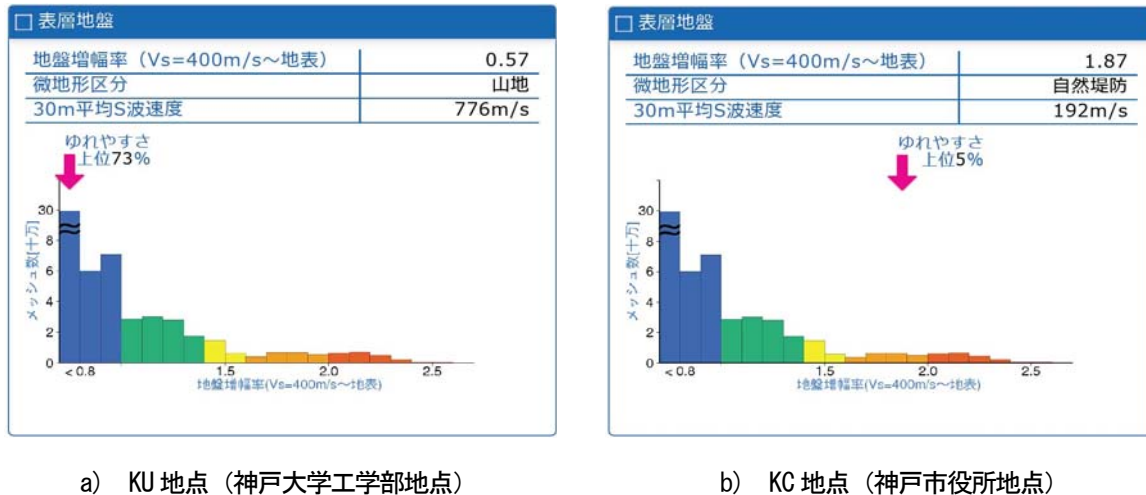


図-4.2.6 表層地盤の比較

④ 深部地盤

図-4.2.7 に KU 地点と KC 地点における深部地盤の評価結果を示す。深さごとの S 波速度 (V_s) の変化が階段グラフで示されており、深部地盤の内、盆地や平野の特徴をよく反映していると考えられる速度層上面深さの値として、 $V_s=1,100, 2,700\text{m/s}$ 上面深さの位置が点線で示されている。 $V_s=1,100\text{m/s}$ 上面深さは、揺れの増幅によく影響する堆積層の深さを表しており、 $V_s=2,700\text{m/s}$ 上面深さは地震基盤相当の固い岩盤の深さを表している。KU 地点と KC 地点を比較すると、KC 地点の方が固い岩盤に到達するまでが深く、厚い堆積層が存在していることがわかる。

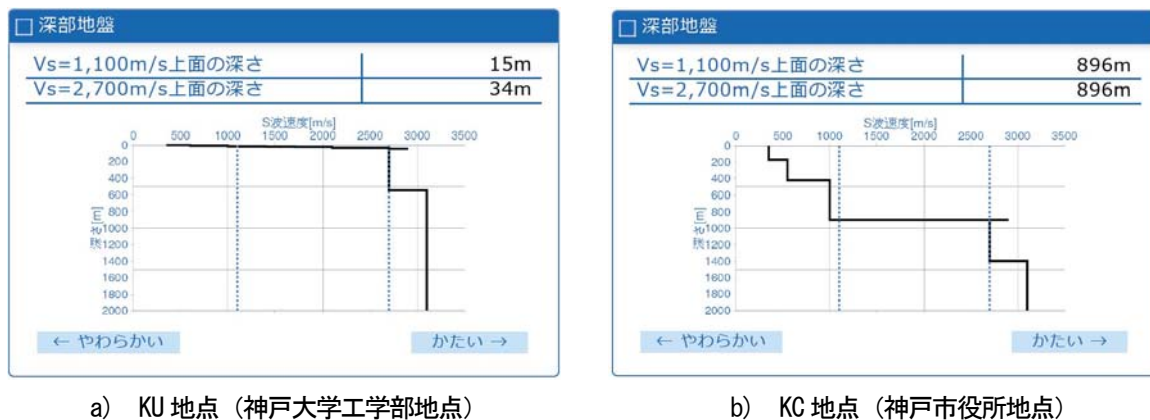


図-4.2.7 深部地盤の比較

⑤ 30 年, 50 年地震ハザード

図-4.2.8 に KU 地点と KC 地点における 30 年, 50 年地震ハザードの評価結果を示す。2018 年 1 月 1 日を評価基準日とし, 超過確率の値は評価基準日から 30 年間に, ある震度以上の揺れに見舞われる確率を示している。また, 震度の値は評価基準日から 30 年または 50 年間に, ある値以上の確率で見舞われる震度の値を, 地表の最大速度の値は評価基準日から 30 年または 50 年間に, ある値以上の確率で見舞われる地表の最大速度の値を示している。評価結果を比較すると, 例えば, 今後 30 年間に震度 6 強以上の揺れに見舞われる確率は KU 地点は 0.1% で, KC 地点は 8.2% と大きな差があることがわかる。したがって, 入力地震動を設定する際にはこのような各地点における地震ハザードの違いが反映されることが望ましい。また, 経済的合理性の観点から発生確率が極めて低い地震動を検討対象に含めることは現実的とはいえない。「振動解析による倒壊判定手法」に用いる入力地震動を設定する際の一つの基準として, 例えば, 「今後 30 年間で 10% の確率で発生する地震動の大きさ」というように設定できると, KU 地点は震度 5 強程度, KC 地点は震度 6 強程度の地震動に最低限備えておく必要があることが明確にできるようになる。

□ 30 年, 50 年地震ハザード			
超過確率の値[%] 今後30年間にある震度以上の揺れに見舞われる確率の値です。	30年	震度5弱	50.6
		震度5強	10.8
		震度6弱	0.9
		震度6強	0.1
震度の値 今後30年または50年間にある値以上の確率で見舞われる震度の値です。	30年	3%	5強
		6%	5強
	50年	2%	5強
		5%	5強
		10%	5強
		39%	5弱
地表の最大速度の値[cm/s] 今後30年または50年間にある値以上の確率で見舞われる地表の最大速度の値です。	30年	3%	30.3
		6%	25.6
	50年	2%	36.1
		5%	29.2
		10%	24.5
		39%	15.4

□ 30 年, 50 年地震ハザード			
超過確率の値[%] 今後30年間にある震度以上の揺れに見舞われる確率の値です。	30年	震度5弱	90.6
		震度5強	77.5
		震度6弱	44.7
		震度6強	8.2
震度の値 今後30年または50年間にある値以上の確率で見舞われる震度の値です。	30年	3%	6強
		6%	6強
	50年	2%	6強
		5%	6強
		10%	6強
		39%	6弱
地表の最大速度の値[cm/s] 今後30年または50年間にある値以上の確率で見舞われる地表の最大速度の値です。	30年	3%	103.9
		6%	87.8
	50年	2%	124.2
		5%	100.1
		10%	83.7
		39%	52.7

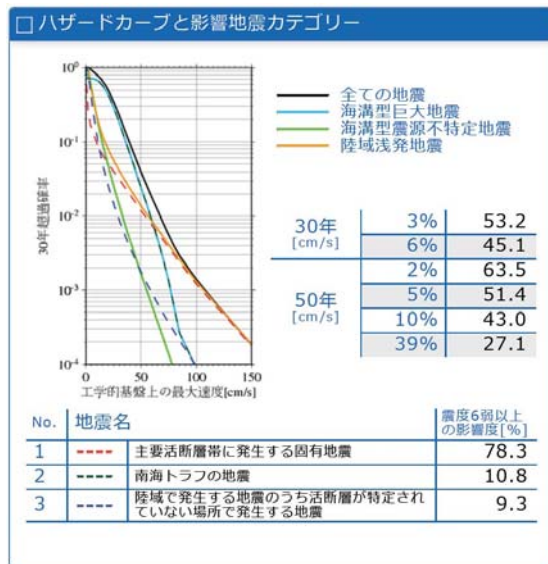
a) KU 地点 (神戸大学工学部地点)

b) KC 地点 (神戸市役所地点)

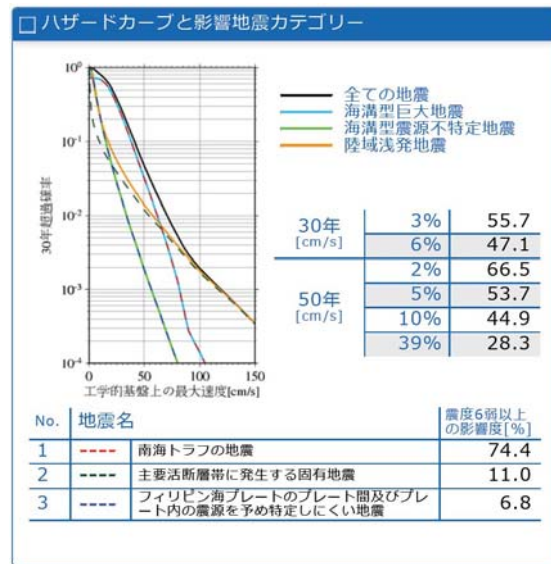
図-4.2.8 30 年, 50 年地震ハザードの比較

⑥ ハザードカーブと影響地震カテゴリー

図-4.2.9 に KU 地点と KC 地点におけるハザードカーブの比較結果を示す。図には a) 全ての地震のハザードカーブ, b) 地震カテゴリー別の地震のハザードカーブ, および c) 30 年間に於いて震度 6 弱以上の超過確率に対する影響度が大きい上位 3 地震のハザードカーブが示されている。地震カテゴリーは 3 種類あり, カテゴリー I は海溝型巨大地震, カテゴリー II は海溝型震源不特定地震, カテゴリー III は陸域浅発地震である。図中の右の表は, 全ての地震のハザードカーブにおいて, 各超過確率に対応する工学的基盤上の最大速度の値を示している。図中の下の表は, 評価基準日から 30 年間に於いて震度 6 弱以上の超過確率に対する影響度が大きい上位 3 地震の地震名と影響度の値を示している。この影響度を比較すると, KU 地点は主要活断層帯で発生する地震の影響度が高く, KC 地点は南海トラフ領域で発生する地震の影響度が高い。この情報から KU 地点と KC 地点では最も警戒しなければならない地震のタイプが異なることが把握できる。



a) KU 地点（神戸大学工学部地点）



b) KC 地点（神戸市役所地点）

図-4.2.9 ハザードカーブと影響地震カテゴリーの比較

⑦ 長期間平均ハザード

J-SHIS には 2012 年版から「長期間平均ハザード地図」が追加されている。この地図は数百～数千年に 1 回程度の頻度で発生し比較的切迫性の高い地震の影響ではなく、数百～数万年といった長期間の再現期間において、どの程度の揺れが起こりえるのかに着目して作成されたものである。図-4.2.10 に KU 地点と KC 地点における長期間平均ハザードの比較結果を示す。10 万年相当の再現期間では両者ともに震度 7 の地震動の発生が想定されている。しかし、建物の使用期間を考慮すると再現期間 500 年相当（50 年期間内で約 10% の確率）が扱いやすく、KU 地点では震度 5 強、KC 地点では震度 6 強程度の揺れに備える必要があることが示唆される。

□ 長期間平均ハザード

震度の値	500年相当	5強
1000年相当	6弱	
5000年相当	6強	
1万年相当	6強	
5万年相当	6強	
10万年相当	7	

長期間の再現期間に対応する震度の値です。

a) KU 地点（神戸大学工学部地点）

□ 長期間平均ハザード

震度の値	500年相当	6強
1000年相当	7	
5000年相当	7	
1万年相当	7	
5万年相当	7	
10万年相当	7	

長期間の再現期間に対応する震度の値です。

b) KC 地点（神戸市役所地点）

図-4.2.10 長期間平均ハザードの比較

4.3 自然災害リスク分析ソフトウェアによる評価

(1) 地震リスク分析用ソフトウェアの概要

一般的に「リスク」とは危険とか危険の度合いといった意味合いで用いられている。つまり、何かよくないことが起こるときとか、不利益をあたえそうだとした時に漠然とした用語としてよく使われている。このようなあいまいな概念では取り扱いに困るため、リスクという言葉にはいくつかの定義が与えられている。

工学的な定義としては、「リスク」とはある事象が発生する確からしさと、それによる負の結果の大きさの組合せとして、確率と強度の積として表すことができる、としている。この定義に従うと損害保険分野では、ある事象が発生する確からしさと、損失という不利益な結果をこうむる可能性（確率）と考えることができる。

またその可能性（確率）とともに、その損失の大きさ（強度）を持っている。このように「リスク」は確率と強度の2つの要素で構成される（式1）。

$$\text{損失リスク} = \text{損失が発生する可能性（確率）} \times \text{損失の大きさ（強度）} \quad (\text{式1})$$

この確率と強度はデータ量が豊富であれば統計的に求めることができるが、地震や津波などの巨大災害リスクを扱う場合には、あまり頻繁には発生しないため、統計的なアプローチのみで確率と強度の関係を求めることは難しい。そこで、損害保険会社では、理論的なアプローチに基づく手法を組み合わせた専用ソフトウェアを導入し、リスクの定量的評価を行っている。

本報ではこのソフトウェアを用いて、3章で説明した解析対象建物（8階建て集合住宅）を参考に仮想の建物を設定してKU地点およびKC地点における地震リスクを分析した。ソフトウェアは米国の大手ソフトウェア開発会社であるAIR Worldwide社の協力のもと、同社が提供する「AIR Touchstone」を使用した。図-4.3.1に「AIR Touchstone」のソフトウェア画面を示す。

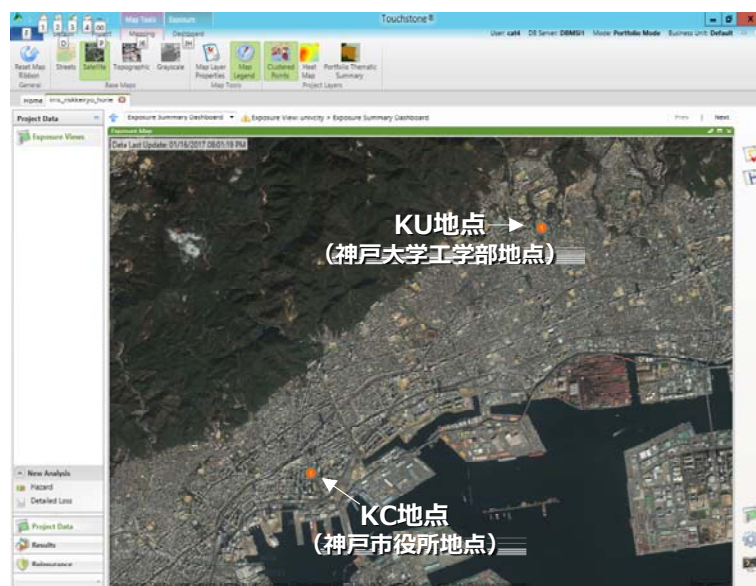


図-4.3.1 自然災害リスク分析ソフトウェア「AIR Touchstone」の画面

地震リスク分析用ソフトウェアは、地震による「揺れ」や地震を起因とする「地震火災」、「液状化」、「津波」が発生した際に想定される損失額を同時に予測することが可能だが、今回は地震動（揺れ）による損失のみを対象に分析を実施した。地震動による損失リスクの分析では、日本全域の震源域を対象として、今後起こりえる数十万イベントの地震による確率的な損失予測が可能である。分析の結果は、「どのくらいのリスクがあるのか」、「どの地点のリスクが大きいのか」、「大きな影響を与える地震（震源）は何か」、といった地震対策を着手するにあたっての基礎資料として活用されている。

（2）地震リスク分析の流れ

図-4.3.2に地震リスク分析の流れを示す。ソフトウェアは大きく4つのモデルで構成され、①地震発生モデル、②地震動伝播モデル、③地震動増幅モデル、④被害予測モデルの順番で分析が進められる。

① 地震発生モデル

J-SHIS 等の情報から日本全国の震源を考慮した地震カタログを生成する。地震カタログには地震の発生確率を考慮して、1 年間に発生しうる地震の様々なパターンを想定し、基本的に1 万回分計算するための地震イベントがセットされている。地震カタログの生成方法について、例えば、ある震源における地震の発生確率が年1 %と仮定すると、1 万回の中にその地震が発生するパターンを100 回分セットすることにより確率を反映させた地震カタログを生成することができる。また、地震の発生確率だけではなく、震源断層の位置、深さ、形状、および地震の規模には不確実性が存在し、ばらつきを考慮して地震イベントをセットするため、同じ震源から発生した地震であっても、100 回の地震イベントが全く同じ地震というわけではない。その結果、地震カタログには数十万におよぶイベント群が含まれている。

② 地震動伝播モデル

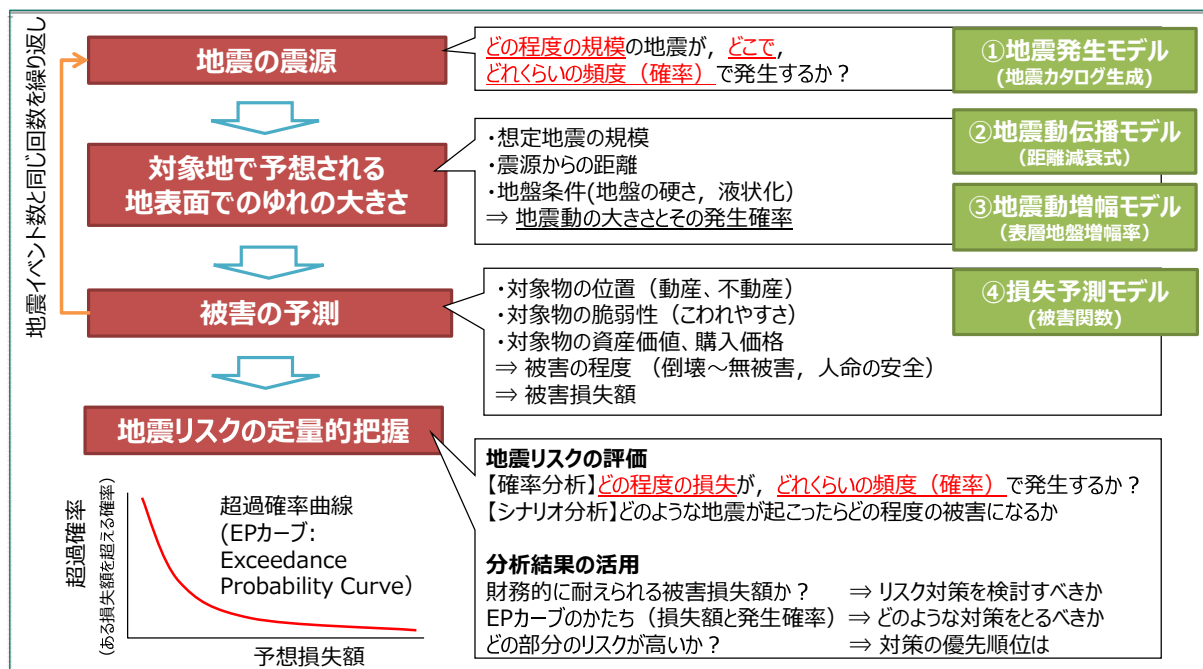
地震による揺れの大きさは、一般に震源から離れるにしたがって小さくなる。この現象を地震動の距離による減衰、または距離減衰と呼んでいる。ソフトウェアではこの関係を利用して、震源からの距離と揺れの減衰の程度を式で表した距離減衰式を用いて各地点における工学的基盤上の揺れの大きさを推定している。距離減衰式の多くは強震記録の回帰分析によって、震源からの距離と揺れの大きさの関係を統計的に処理して求められている。また、単に震源からの距離だけではなく、地震規模や断層の破壊メカニズムも考慮して構築されている。「AIR Touchstone」では地震加速度だけではなく、構造物の周期特性を考慮して保険損失推定を行うために加速度応答スペクトルを評価できる距離減衰式が採用されている。

③ 地震動増幅モデル

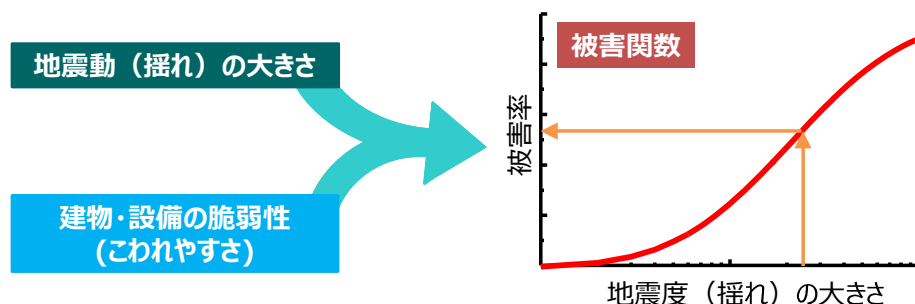
一般に軟らかい地盤が深く堆積している場所では地震動の振幅が増大する現象が発生する。「AIR Touchstone」では地震動の増幅の影響を組み込むために、日本全国の地盤条件をマップ化して増幅度を評価する手法を採用している。増幅度を評価するための基本情報として Matsuoka *et al.* (2006)³⁾ が整備した地表面 30m の平均せん断波速度分布図 (VS30 マップ) を使用している。この基本情報に加えて、日本国土地理院が公開している 250m グリッドの微地形図や、AIR 社が独自に収集したボーリングデータを用いて Matsuoka *et al.* (2006) によるマップを補間し、8 大都市域 (東京、横浜、川崎、大阪、神戸、名古屋、京都、広島) では 50m 解像度のマップを、その他の地域では 200m 解像度のマップを作成している。また、地盤に入力する地震動の強度や周期特性によって増幅度は影響を受けるため、「AIR Touchstone」では地盤の特性毎にあらかじめ計算した増幅度テーブルを用意して、入力地震動の強度と周期に対応した増幅度を読み込むことにより分析を行う方法が採り入れられている。

④ 損失予測モデル

損失の推定を行うために地震動の強さと損失の関係を関数化した被害関数が用いられている。被害関数は図 4.3.3 に示すように、横軸に地震動の強さとして震度や加速度などを取り、縦軸を損失率で表した曲線となる。「AIR Touchstone」ではこのような従来の被害関数に加えて、建物等に対する損失を推定する場合には、まず、応答スペクトル法により地震動の大きさや周期に応じた変形量を算出し、次に変形量に応じた損失率を求める方法が採用されている。



図－4.3.2 地震リスク分析の流れ



図－4.3.3 被害関数の概要

（３） 地震リスク分析ソフトウェアのアウトプット

「AIR Touchstone」では確率分析とシナリオ分析の結果を出力することができる。確率分析では年超過確率や再現期間ごとの予想損失額との関係や、その関係を図示した年超過確率曲線を算出する。この年超過確率曲線からは年間期待損失額を求めることができる。シナリオ分析とは、例えば、南海トラフ地震などの想定地震や兵庫県南部地震などの過去に発生した地震を設定して、その地震が発生した場合に分析対象が受ける予想損失額を計算する。その結果から「どのような地震が起こったらどの程度の損失になるか」を具体的にイメージすることができる。また、このシナリオ分析による予想損失額を確率分析の結果に照らし合わせることで、シナリオ分析の結果がどの程度の年超過確率や再現期間に対応するのかを把握することができる。

（４） 地震リスクの分析条件

分析は３章で設定した解析対象建物（８階建て集合住宅）を参考に仮定の住宅を設定して３ケースの確率分析を実施した。表－4.3.1に分析ケースを示す。各ケースともに鉄筋コンクリート造の８階建て集合住宅として分析を行った。Case-1とCase-2はともに建築年は新耐震設計基準適用前の1979年とし、建設地点の違いによ

る影響を比較するために、KU 地点と KC 地点に建設されたと仮定して分析を行った。また、Case-2 と Case-3 は建物の耐震性の違いによる影響を比較するため、建設地点はともに KC 地点としたが、Case-3 の建築年は新耐震設計基準適用後の 2010 年と設定した。

表-4.3.1 分析ケース

分析ケース	Case-1	Case-2	Case-3
住宅名	仮想住宅 A (新耐震基準適用前)	仮想住宅 A (新耐震基準適用前)	仮想住宅 B (新耐震基準適用後)
建設地	KU 地点 (神戸大学工学部地点)	KC 地点 (神戸市役所地点)	KC 地点 (神戸市役所地点)
構造	鉄筋コンクリート造	鉄筋コンクリート造	鉄筋コンクリート造
用途	集合住宅	集合住宅	集合住宅
建築年	1979	1979	2010
階数	8	8	8

(5) 地震リスク分析結果

① 年超過確率曲線および再現期間別予想損失額の比較

図-4.3.3 に各ケースの地震リスク分析結果として得られた年超過確率曲線（EP カーブ）を比較して示す。想定される損失リスク（予想損失率）の大きさを比較すると、Case-2 が最も大きく、次いで Case-3 の順となり、地盤が比較的硬い KU 地点で分析を行った Case-1 が最も小さい結果になった。

図-4.3.4 に代表的な再現期間毎の予想損失率を各ケースについて比較した結果を示す。再現期間が長い領域（すなわち発生確率が小さい領域）になると、Case-2 と Case-3 の差が大きくなる傾向が認められ、耐震化の効果により地震リスクの大きな低減が期待できることがわかる。

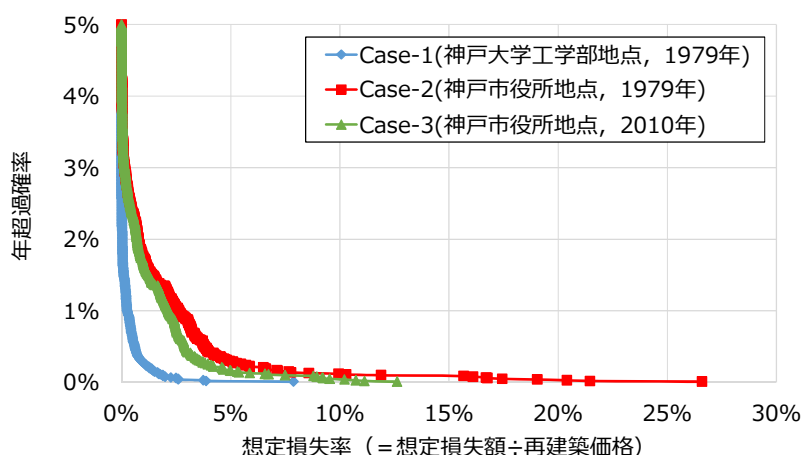


図-4.3.3 地震リスク分析結果：年超過確率曲線（Exceedance Probability カーブ）

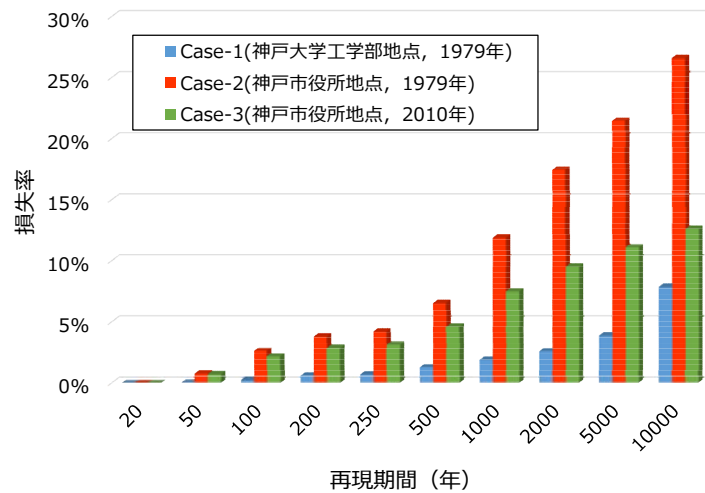


図-4.3.4 地震リスク分析結果：再現期間別予想損失額

② 影響が大きい地震イベントの比較

確率分析における数十万の地震イベントのうち、各ケースの分析において大きな損失を与えた上位15の地震イベントを表-4.3.2に示す。Case-1のKU地点では有馬一高槻断層帯、大阪湾断層帯、上町断層帯などの内陸で発生する活断層型の地震や、震源断層を予め特定しにくい地震（背景地震）が上位を占めている特徴がある。一方でCase-2のKC地点では、活断層型地震や背景地震も上位に含まれているが、発生確率が高い南海トラフ地震が多く含まれている特徴がある。また、Case-2と同じ地点で分析を実施したCase-3は新耐震設計基準適用後の建物を想定しており、分析結果に基づく損失の大きさはCase-2よりも小さい値が得られているが、上位に占める地震イベントはCase-2と同じであった。なお、六甲・淡路島断層帯（主部淡路島西岸区間）はいずれの分析ケースでも上位に含まれていないが、これは地震発生確率が極めて低く、「AIR Touchstone」の地震カタログに含まれていなかったためである。以上の結果より、倒壊判定のための振動解析における入力地震動の検討にあたり、南海トラフと主要活断層に加えて、震源断層を予め特定しにくい地震や、地震発生確率が小さい地震を対象に含めるかどうか検討が必要である。

表-4.3.2 予想損失が大きい地震イベント（上位15イベント）

順位	Case-1 (KU 地点)		Case-2, Case-3 (KC 地点)	
	震源名	規模 (Mw)	震源名	規模 (Mw)
1	背景地震	7.16	南海トラフ	9.09
2	有馬一高槻断層帯	7.09	背景地震	7.16
3	南海トラフ	9.09	南海トラフ	8.93
4	大阪湾断層帯	6.06	南海トラフ	8.89
5	上町断層帯	7.36	南海トラフ	8.85
6	南海トラフ	8.93	南海トラフ	8.84
7	南海トラフ	8.89	南海トラフ	8.83
8	南海トラフ	8.85	大阪湾断層帯	6.90
9	南海トラフ	8.84	南海トラフ	8.81
10	南海トラフ	8.83	南海トラフ	8.80
11	南海トラフ	8.81	南海トラフ	8.79
12	南海トラフ	8.80	南海トラフ	8.79
13	南海トラフ	8.79	有馬一高槻断層帯	7.09
14	南海トラフ	8.79	南海トラフ	8.76
15	背景地震	7.19	南海トラフ	8.78

4.4 検討結果と今後の課題

地震ハザードステーション J-SHIS の情報から、神戸市の建物に被害を与える可能性がある主要活断層のうち、上町断層の地震発生確率が比較的高いことを確認した。また、同じ神戸市内であっても、建設地の位置や地盤の影響等により想定しておくべき地震発生源や地震規模は異なることを確認した。

地震リスク分析ソフトウェアを用いて地震リスクを定量的に分析した結果から、地盤や耐震性の違いによるリスク量への影響を確認した。また、南海トラフや主要活断層による地震以外に、震源断層を予め特定しにくい地震も検討する必要があることが明らかになった。

今後の課題として、倒壊判定のための地震応答解析に必要となる入力地震動の条件設定において、具体的にはどの地震発生源を対象とするか、どのレベルまでの地震動を対象にするか、発生確率が極めて低い断層（例えば、六甲・淡路島断層帯など）を対象に含めるかどうか、震源位置や地震規模等にばらつきをもたせるのかどうか、ばらつきを持たせるとすればその幅をどのように設定するかを挙げることができる。

参考文献

- 1) J-SHIS : 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2018 年 6 月 29 日参照)
- 2) J-SHIS : 地震ハザードカルテ, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/labs/karte/> (2018 年 6 月 29 日参照)
- 3) Masashi MATSUOKA, Kazue WAKAMATSU, Kazuo FUJIMOTO, and Saburoh MIDORIKAWA : Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.23, No.1, pp.57-pp.68, 2006.

5. 振動解析による倒壊判定手法の適用事例

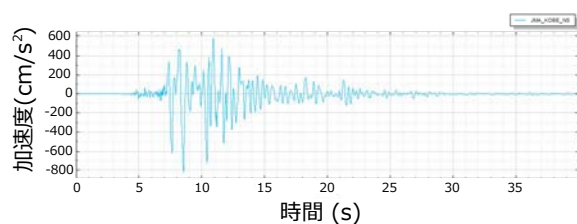
5.1 振動解析の概要

3 章で設定した解析対象建物について、倒壊判定手法の実現可能性を検討するために振動解析モデルを構築して地震応答解析を行った。振動解析モデルは耐震補強前と耐震補強後の2種類を構築した。構造解析プログラムは質点系振動解析や3次元立体フレームの時刻歴応答解析が可能な構造計画研究所の汎用ソフトウェア「RESP-D ver.3.3.0.0」を使用した。各解析における共通の条件を表-5.1.1に示す。

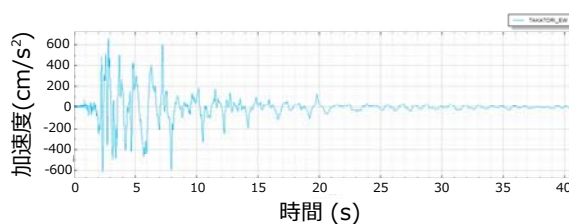
表-5.1.1 共通の解析条件

粘性減衰	初期剛性比例型 (2%)
数値積分法	平均加速度法
計算時間間隔	0.001 秒

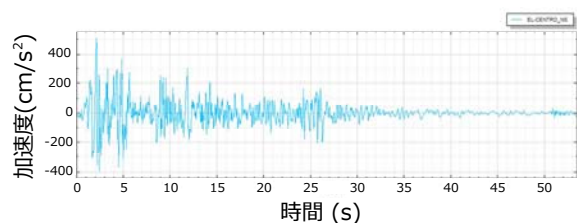
入力地震動は、観測地震波から①神戸海洋気象台 NS 波、②JR 鷹取 EW 波、および設計用地震波から③エル・セントロ NS 波、④タフト EW 波、⑤八戸 NS 波の計5波を使用した。なお、③～⑤の設計用地震波は最大速度振幅 50cm/s で基準化した波形を用いた。解析に使用した入力地震動の波形を図-5.1.1に、各波形の加速度応答スペクトル(減衰5%)を図-5.1.2に示す。



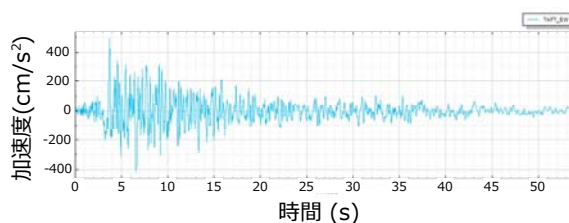
① 神戸海洋気象台 NS 波



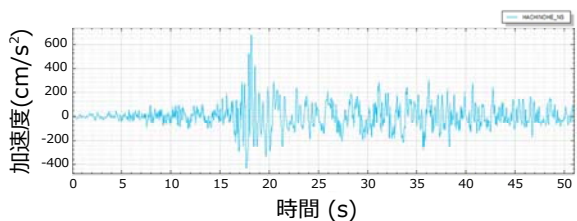
② JR 鷹取 EW 波



③ エル・セントロ NS 波



④ タフト EW 波



⑤ 八戸 NS 波

図-5.1.1 入力地震動波形

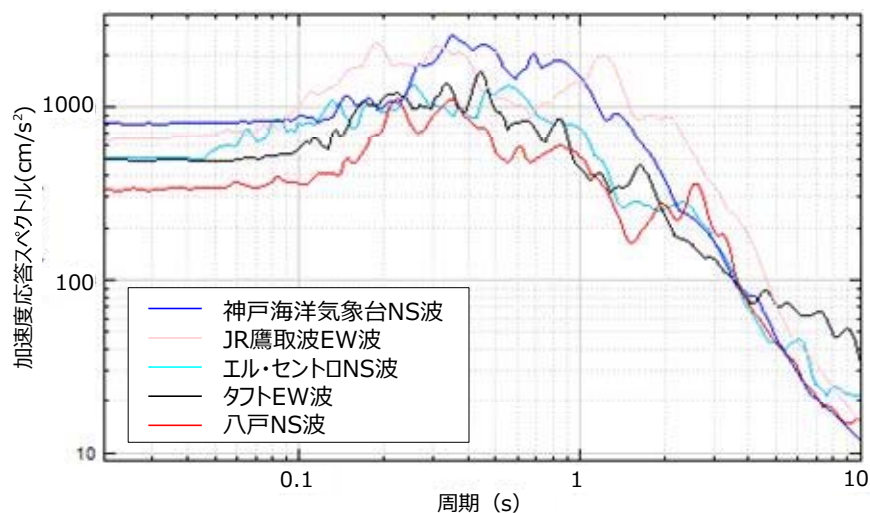


図-5.1.2 加速度応答スペクトル（減衰 5%）

5.2 補強前の建物の地震応答解析

（1） 振動解析モデルの構築

補強前の建物の振動解析モデル（3次元立体フレーム）を図-5.2.1に示す。モデルは解析対象建物を参考に1979年に建設された8階建ての集合住宅で、構造は1～4階はSRC造、5階以上はRC造として構築した。

ここで、「RESP-D」等の一般の設計用解析プログラムでは、耐震壁に大きな開口部がある場合は、安全側の判断として非耐震壁として扱われ、剛性、耐力ともにフレームに反映されず、その結果、2～8階はバルコニー側、廊下側ともにX方向（桁行方向）は純ラーメン構造となる。この条件でモデルを構築して振動解析を実施したところ5～7階に大きな応答が得られ、兵庫県南部地震で1階部分に被害が集中した被災状況を再現することができなかった。そこで、今回の解析では兵庫県南部地震における被災状況を再現できるように2～8階の開口部付き耐震壁の剛性、耐力の調整を行った上で解析を行った。したがって、3章で設定した解析対象建物に対して、振動解析モデルは、1階部分の構造は極力厳密に再現しているが、2階以上は調整を加えた想定建物である点に留意されたい。

表-5.2.1に各層の建物重量を、図-5.2.2に荷重増分解析から得られたX方向（桁行方向）の正加力時における各階のせん断力変形曲線を示す。

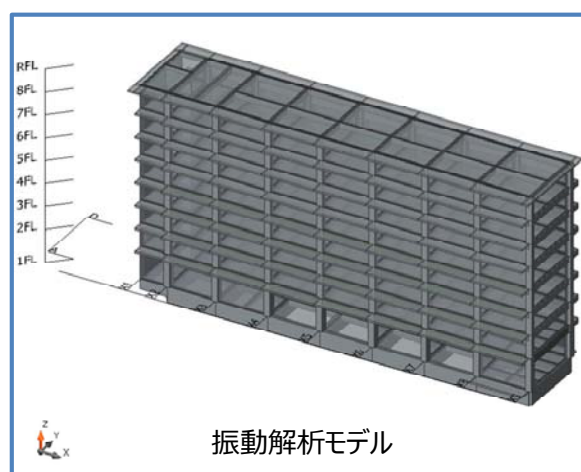


図-5.2.1 補強前の建物の振動解析モデル（3次元立体フレーム）

表-5.2.1 各層の建物重量

層	Wi (kN)	ΣW_i (kN)	A (m^2)	W_i/A (kN/m^2)
8	5,160	5,160	377.36	13.67
7	5,418	10,578	377.36	14.36
6	5,295	15,873	377.36	14.03
5	5,299	21,173	377.36	14.04
4	5,324	26,496	377.36	14.11
3	5,327	31,823	377.36	14.12
2	5,327	37,151	377.36	14.12
1	6,132	43,283	377.36	16.25

※ W_i : 層重量, A : 各層の床面積, W_i/A : 各層の単位床面積あたりの重量

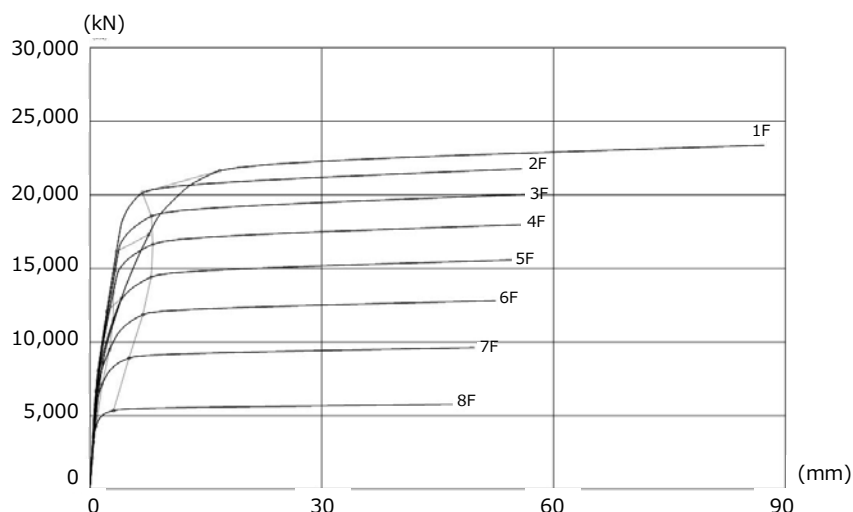


図-5.2.2 補強前の建物のせん断力変形曲線 (X 方向正加力)

(2) 振動解析結果

「RESP-D」を用いて質点系振動解析と3次元立体フレームの時刻歴応答解析を行った。解析結果から得られた1次固有周期について、質点系振動解析は0.243秒、立体フレーム解析は0.271秒であった。表-5.2.2 a)とb)に質点系振動解析および立体フレーム解析の結果から得られた最大応答層間変形角の一覧を示す。また、図-5.2.3 a)とb)にそれぞれの結果を図化したグラフを示す。2種類の解析方法ともに1層の層間変形角が大きく、兵庫県南部地震による被災状況を一定再現できていることを確認した。

最大応答層間変形角について、設計用地震波3波による解析結果は全てのケースで1/100rad以下であり、倒壊する可能性は小さいと考えられる。しかし、実際に観測された地震波による解析結果は、より大きな応答値が得られており、設計波を上回る地震動の発生を考慮する必要がある。特に神戸海洋気象台NS波を用いた解析結果からは、質点系振動解析において1層の最大応答層間変形角が1/50radを超えており、前掲の表-2.1.1における倒壊判定基準の例に照らすと、「部分的または建物全体が倒壊する可能性が大きい」という結果になった。また、立体フレーム解析においても最大応答層間変形角は1/59radとなり、「倒壊はしないが、構造体の損傷がある」という結果が得られた。

表-5.2.2 最大応答層間変形角一覧

a) 質点系振動解析結果<補強前>

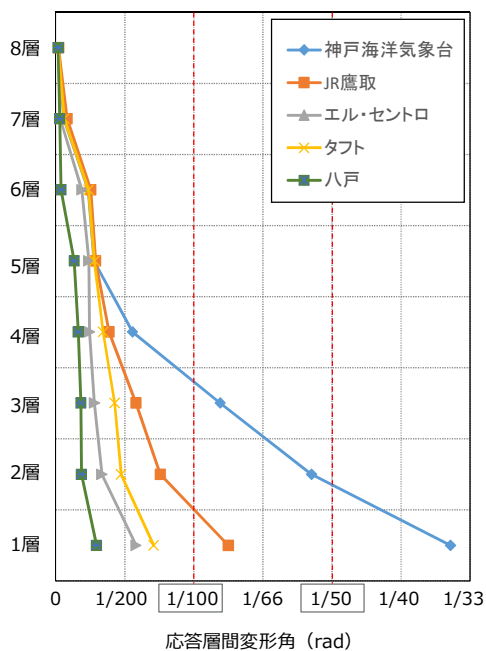
(rad)

層	神戸海洋気象台 NS 波	JR 鷹取 EW 波	エル・セントロ NS 波	タフト EW 波	八戸 EW 波
8	1/5,281	1/4,806	1/5,648	1/5,285	1/5,945
7	1/1,705	1/1,210	1/3,052	1/1,614	1/3,469
6	1/424	1/393	1/526	1/419	1/2,556
5	1/360	1/345	1/416	1/357	1/745
4	1/180	1/259	1/407	1/291	1/611
3	1/84	1/172	1/357	1/234	1/546
2	1/54	1/132	1/299	1/211	1/536
1	1/35	1/80	1/172	1/141	1/338

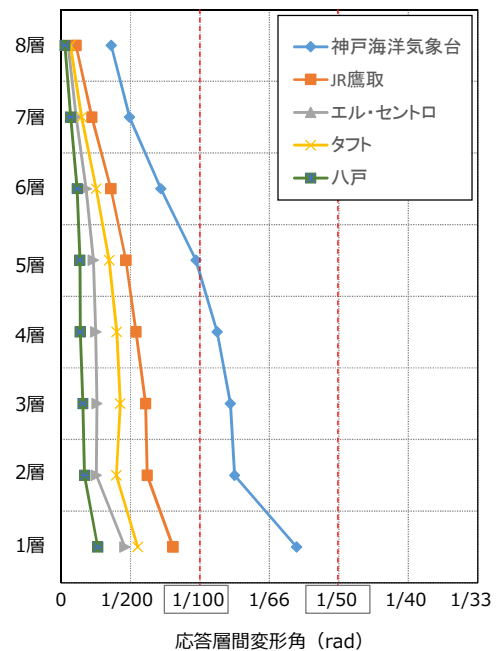
b) 立体フレーム解析結果<補強前>

(rad)

層	神戸海洋気象台 NS 波	JR 鷹取 EW 波	エル・セントロ NS 波	タフト EW 波	八戸 EW 波
8	1/277	1/928	1/2,001	1/1,508	1/3,495
7	1/203	1/450	1/918	1/670	1/1447
6	1/139	1/279	1/554	1/396	1/855
5	1/103	1/214	1/430	1/288	1/737
4	1/89	1/185	1/401	1/249	1/724
3	1/82	1/164	1/387	1/235	1/632
2	1/80	1/161	1/393	1/251	1/593
1	1/59	1/124	1/217	1/181	1/379



a) 質点系振動解析結果<補強前>



b) 立体フレーム解析結果<補強前>

図-5.2.3 最大応答層間変形角

5.3 倒壊防止を目的とした補強後の建物の地震応答解析

(1) 振動解析モデルの構築

補強前の建物の分析結果では1層の最大応答層間変形角が大きくなり、質点系振動解析では倒壊する可能性が高い結果となった。そこで、倒壊防止を目的とした簡易な補強による効果を確認するため、1層のバルコニー側、廊下側の各1か所ずつに耐震壁を増設した場合を仮定して振動解析を行った。耐震壁の壁厚は20cmと30cmの2パターンとした。耐震壁の増設箇所を図-5.3.1に示す。補強後の建物について、表-5.3.1に各層の建物重量を示す。また、図-5.3.2と図-5.3.3に壁厚20cmおよび30cmの耐震壁増設後の各振動解析モデルについて、荷重増分解析から得られたX方向（桁行方向）の正加力時における各階のせん断力変形曲線を示す。

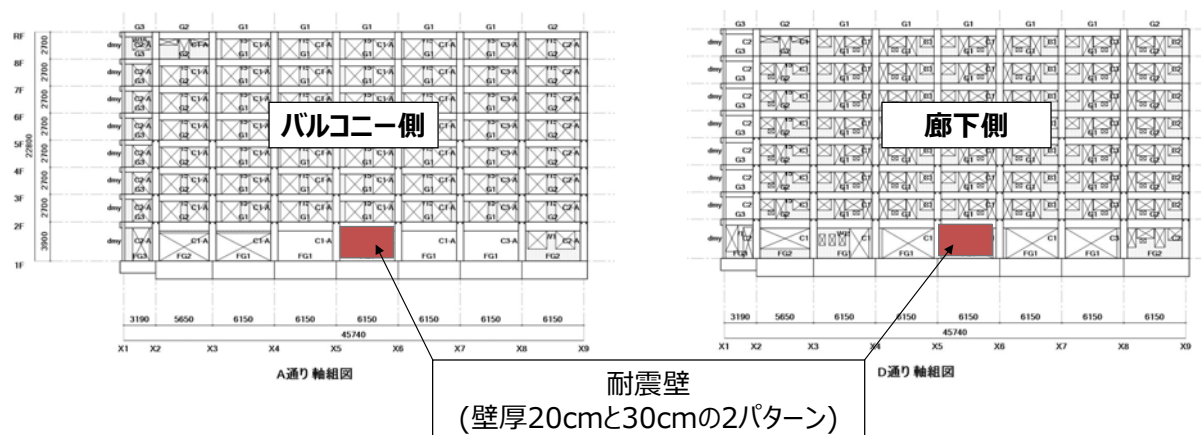
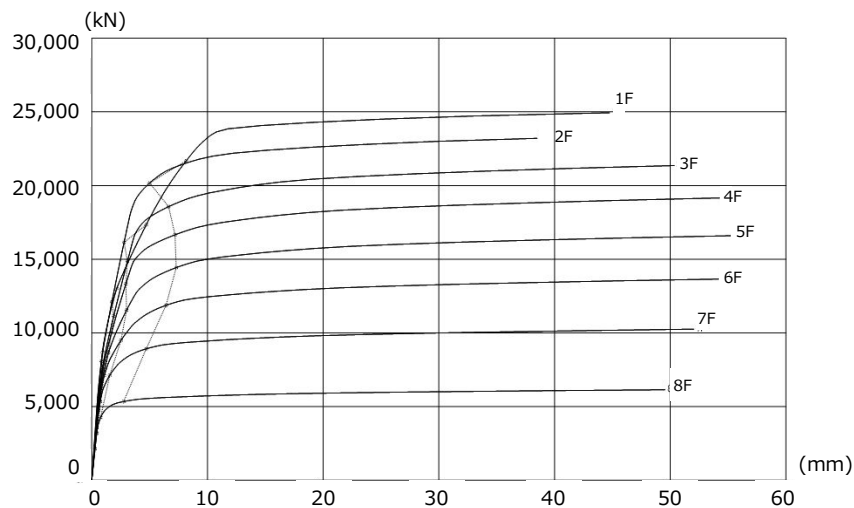


図-5.3.1 耐震壁の増設補強箇所

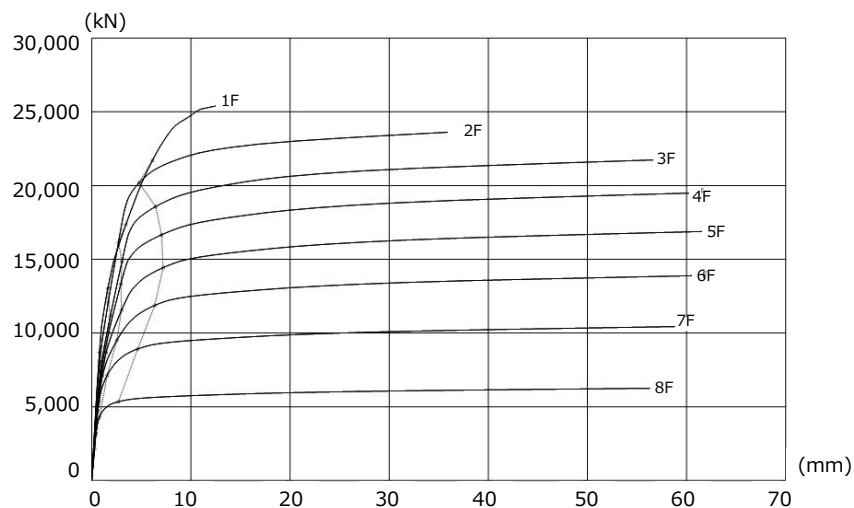
表-5.3.1 各層の建物重量

層		Wi (kN)	ΣWi (kN)	A (m^2)	Wi/A (kN/m^2)
8		5,160	5,160	377.36	13.67
7		5,418	10,578	377.36	14.36
6		5,295	15,873	377.36	14.03
5		5,299	21,173	377.36	14.04
4		5,324	26,496	377.36	14.11
3		5,327	31,823	377.36	14.12
2		5,327	37,151	377.36	14.12
1	耐震壁 20cm	6,222	43,372	377.36	16.49
	耐震壁 30cm	6,261	43,412	377.36	16.59

※ Wi：層重量，A：各層の床面積，Wi/A：各層の単位床面積あたりの重量



図ー5.3.2 耐震壁増設後（壁厚 20cm）の建物のせん断力変形曲線（X 方向正加力）



図ー5.3.3 耐震壁増設後（壁厚 30cm）の建物のせん断力変形曲線（X 方向正加力）

（2） 振動解析結果

① 壁厚 20cm の耐震壁を増設した場合

補強前の建物と同様に質点系振動解析と 3 次元立体フレームの時刻歴応答解析を行った。1 次固有周期は、質点系振動解析の場合は 0.239 秒、立体フレーム解析の場合は 0.252 秒であった。表ー5.3.2 a) と b) に質点系振動解析および立体フレーム解析の結果から得られた最大応答層間変形角の一覧を示す。また、図ー5.3.4 a) と b) にそれぞれの結果を図化したグラフを示す。2 種類の解析方法ともに 1 層の層間変形角は補強前より減少し、JR 鷹取波を用いたケースも $1/100\text{rad}$ 以下となった。また、神戸海洋気象台波を用いたケースにおいても質点系解析では倒壊する可能性が大きいという結果であったが、補強後は $1/50\text{rad}$ 以下となり、前掲の表ー2.1.1 における倒壊判定基準の例に照らすと倒壊はしないレベルまで応答が抑えられている。立体フレーム解析についても 1 層の層間変形角は $1/59\text{rad}$ から $1/89\text{rad}$ に減少している。

表-5.3.2 最大応答層間変形角一覧

a) 質点系振動解析結果<耐震壁増設 (20cm) >

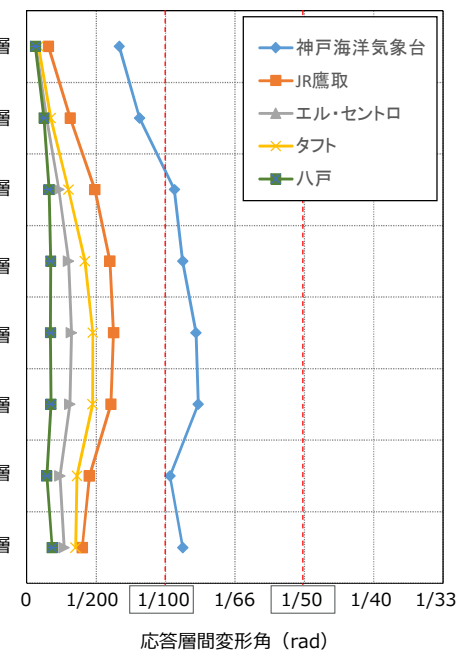
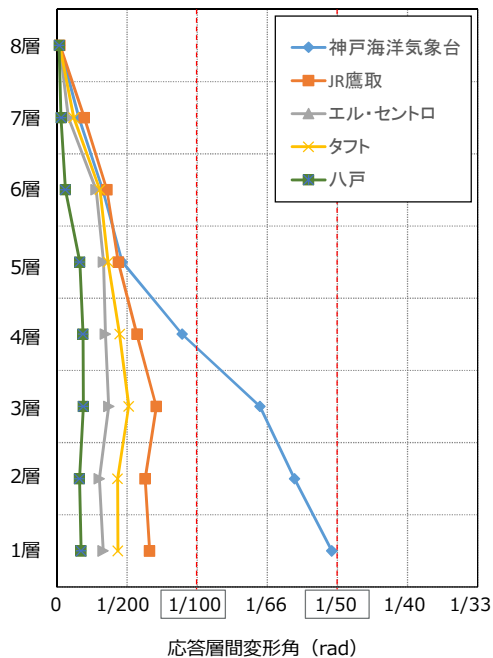
(rad)

層	神戸海洋気象台 NS 波	JR 鷹取 EW 波	エル・セントロ NS 波	タフト EW 波	八戸 EW 波
8	1/4,903	1/4,294	1/5,204	1/5,023	1/5,747
7	1/633	1/511	1/1199	1/830	1/3,360
6	1/305	1/280	1/357	1/325	1/1,661
5	1/214	1/228	1/301	1/273	1/610
4	1/112	1/175	1/288	1/223	1/534
3	1/69	1/141	1/270	1/195	1/530
2	1/59	1/159	1/330	1/231	1/618
1	1/51	1/151	1/302	1/230	1/583

b) 立体フレーム解析結果<耐震壁増設 (20cm) >

(rad)

層	神戸海洋気象台 NS 波	JR 鷹取 EW 波	エル・セントロ NS 波	タフト EW 波	八戸 EW 波
8	1/150	1/639	1/1,518	1/1,183	1/1,607
7	1/123	1/320	1/704	1/580	1/807
6	1/94	1/204	1/432	1/333	1/624
5	1/89	1/167	1/332	1/239	1/579
4	1/82	1/160	1/311	1/210	1/588
3	1/81	1/165	1/322	1/211	1/574
2	1/97	1/222	1/419	1/277	1/694
1	1/89	1/250	1/372	1/285	1/550



a) 質点系振動解析結果<耐震壁増設 (20cm) >

b) 立体フレーム解析結果<耐震壁増設 (20cm) >

図-5.3.4 最大応答層間変形角

② 壁厚 30cm の耐震壁を増設した場合

1 次固有周期は、質点系振動解析の場合は 0.238 秒、立体フレーム解析の場合は 0.247 秒であった。表－5.3.3 a) と b) に質点系振動解析および立体フレーム解析の結果から得られた最大応答層間変形角の一覧を示す。また、図－5.3.5 a) と b) にそれぞれの結果を図化したグラフを示す。2 種類の解析方法ともに 1 層の層間変形角は大きく低減され、質点系振動解析において神戸海洋気象台波を用いたケースを除き、全て 1/100rad 以下の応答に収まっている。一方、上層階の中には補強前よりも最大応答層間変形角が顕著に増大したケースがみられた。例えば、質点系振動解析において神戸海洋気象台波を用いた場合に、2 層の最大応答層間変形角は 1/52rad で、3 層は 1/57rad であり、補強前よりも上層階で層崩壊が発生する可能性が高くなる結果となった。

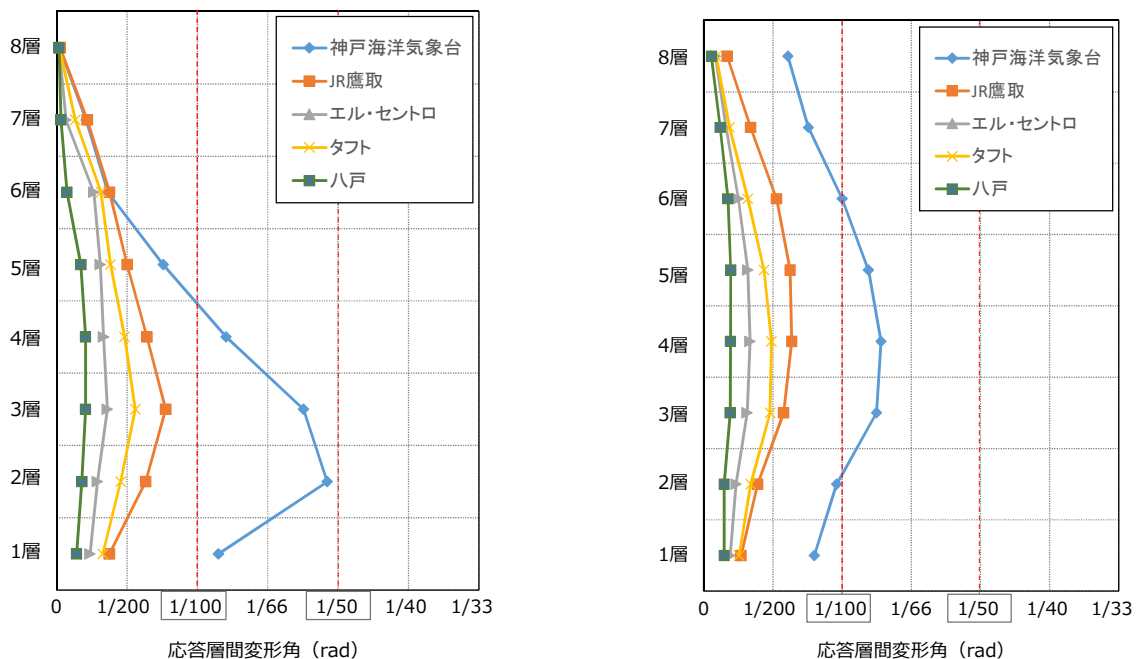
表－5.3.3 最大応答層間変形角一覧

a) 質点系振動解析結果＜耐震壁増設（30cm）＞ (rad)

層	神戸海洋気象台 NS 波	JR 鷹取 EW 波	エル・セントロ NS 波	タフト EW 波	八戸 EW 波
8	1/4,678	1/4,203	1/5,323	1/4,981	1/5,773
7	1/475	1/459	1/1503	1/754	1/3,406
6	1/273	1/266	1/377	1/317	1/1,352
5	1/132	1/200	1/322	1/261	1/582
4	1/83	1/156	1/300	1/207	1/487
3	1/57	1/129	1/278	1/179	1/484
2	1/52	1/158	1/345	1/220	1/558
1	1/87	1/267	1/422	1/305	1/708

b) 立体フレーム解析結果＜耐震壁増設（30cm）＞ (rad)

層	神戸海洋気象台 NS 波	JR 鷹取 EW 波	エル・セントロ NS 波	タフト EW 波	八戸 EW 波
8	1/164	1/586	1/1,171	1/1,118	1/1,794
7	1/132	1/295	1/618	1/533	1/839
6	1/100	1/190	1/397	1/314	1/573
5	1/84	1/160	1/314	1/229	1/510
4	1/78	1/157	1/299	1/204	1/515
3	1/80	1/173	1/318	1/208	1/523
2	1/104	1/256	1/429	1/293	1/670
1	1/125	1/369	1/517	1/392	1/669



a) 質点系振動解析結果<耐震壁増設 (30cm) > b) 立体フレーム解析結果<耐震壁増設 (30cm) >

図-5.3.5 最大応答層間変形角

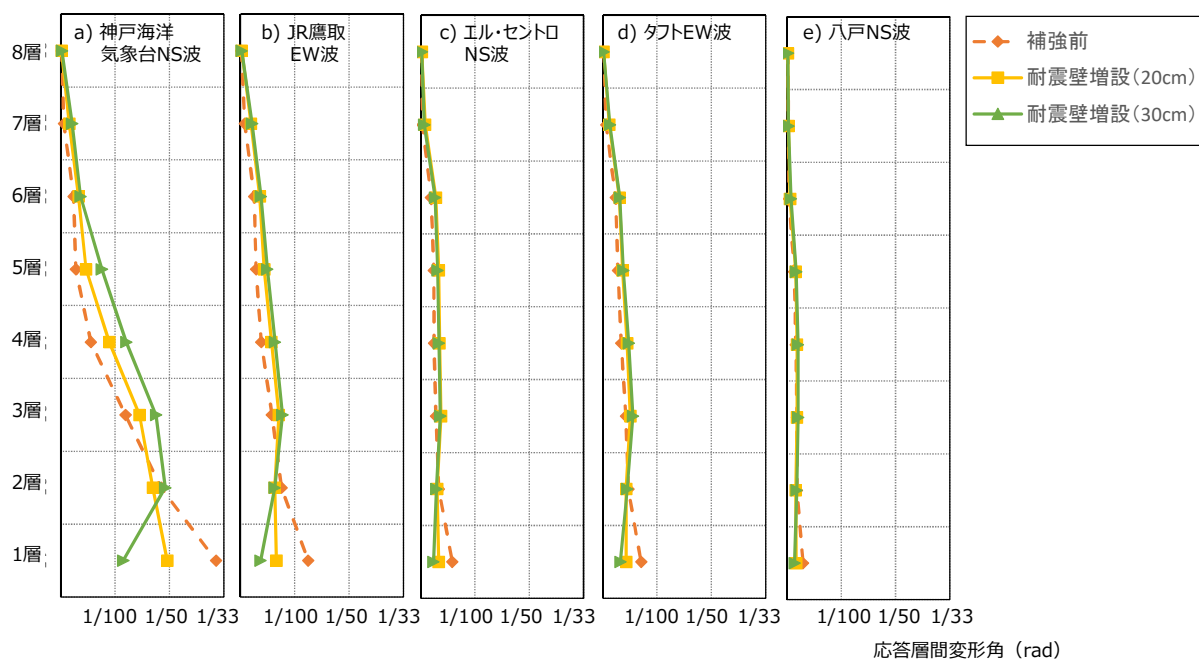
5.4 倒壊判定手法の適用可能性

振動解析において補強前の応答が大きかった1階のピロティ部分のみを対象に、簡易的な補強として集合住宅のバルコニー側と廊下側に1か所ずつ耐震壁を増設した補強効果の確認を行った。図-5.4.1 a)~e)に質点系振動解析について入力地震動毎に補強前と補強後の最大応答層間変形角の比較結果を示す。補強後については壁厚20cmと30cmの耐震壁を増設した場合を併せて示している。また、図-5.4.2 a)~e)に立体フレーム解析について同様の比較結果を示す。

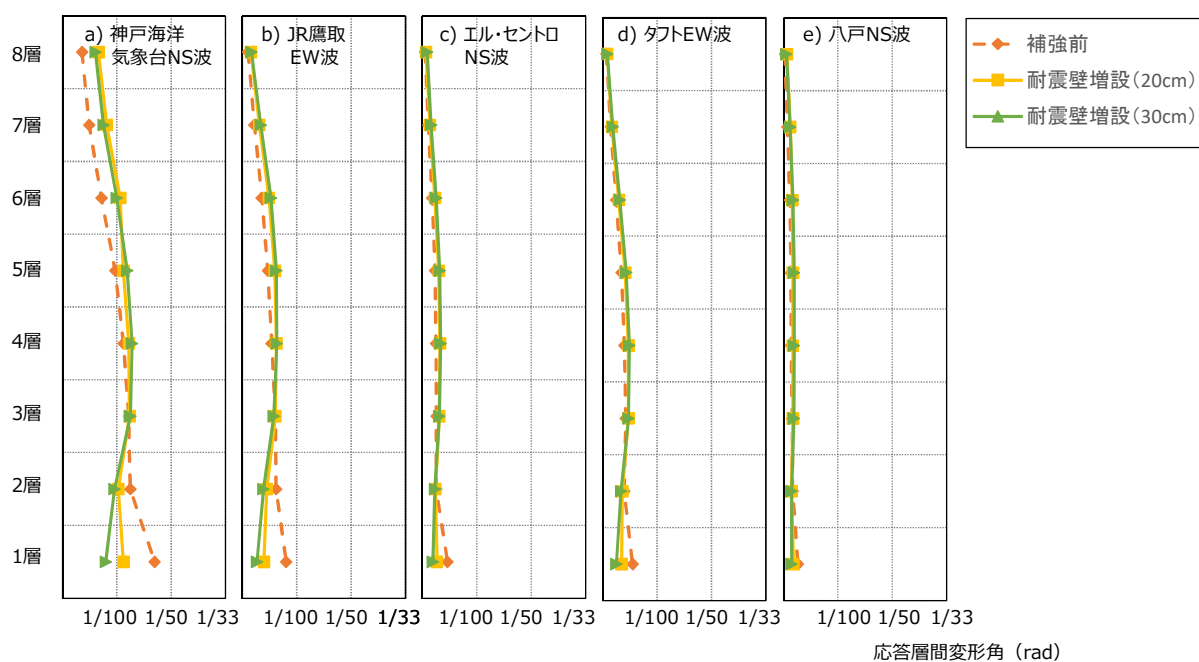
2種類の解析方法ともにピロティ部分の補強のみでも1層部分が層崩壊する可能性を大きく軽減する効果が得られた。一方、部分的に補強を施した今回の解析事例からは、神戸海洋気象台波やJR鷹取波のように建物がある程度塑性化するようなレベルの地震動に対しては補強効果が認められたが、通常的设计レベルの地震動に対しては効果が表れにくい結果が得られた。

耐震壁の壁厚を20cmと30cmにした場合を比較すると、30cmにした場合の方が1層部分の応答層間変形角が小さくなっているが、反対に上層階の応答値が増加しているケースがみられた。したがって、部分的に過剰な補強を行うと、未補強部分に大きな影響を与えてしまうことがある点に留意する必要がある。

質点系振動解析と立体フレーム解析の結果を比較すると必ずしも応答値は一致しないが、同様の傾向が得られることが明らかになった。合理的な補強設計を行う上ではより精緻な解析手法である立体フレーム解析の採用が望ましいが、実務者の立場からは比較的扱いやすい質点系振動解析による方法の適用が期待されている。今回の検討範囲では、質点系振動解析の方が比較的大きい応答値を算出しているが、倒壊判定の目的に照らすと安全側の評価となるため、適用性に大きな問題があるとはいえないと考える。今後の課題として解析事例を増やして倒壊判定手法の適用性の検証を進めるとともに、振動解析モデルの精緻化や解析手法の標準化に向けた検討が必要である。



図一5.4.1 補強前後の最大応答層間変形角の比較＜質点系振動解析＞



図一5.4.2 補強前後の最大応答層間変形角の比較＜立体フレーム解析＞

6. 振動解析用の入力地震動の作成要件に関する中間とりまとめ

6.1 入力地震動の作成要件

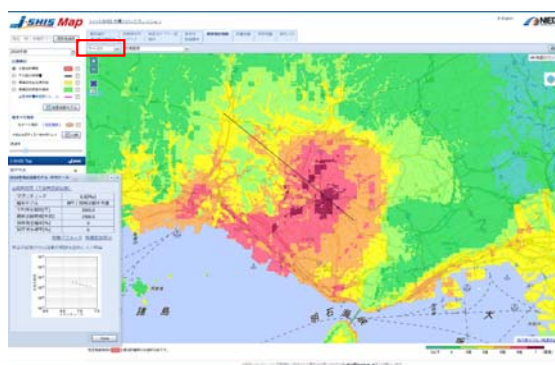
今後 30 年程度の建物使用期間中に発生することが想定される地震に対して、建物は再使用できなくても倒壊を免れるレベルの耐震性能の確保を目的とした場合において、「振動解析による倒壊判定」に用いる入力地震動の作成要件を検討した。検討結果を以下にとりまとめる。

(1) ワorstケース地震シナリオ設定の考え方

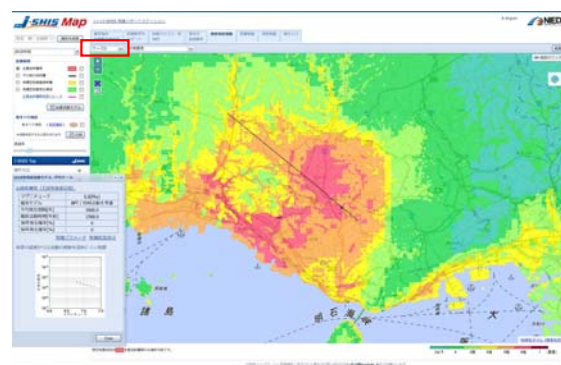
建物が倒壊するかどうかを判定する場合に用いる入力地震動は、その建物に対して最悪となる地震シナリオを設定することが望ましい。そのような地震シナリオの設定において、4 章における検討結果から、どの地震発生源（活断層）を対象とするか、どのレベルまでの地震規模を対象にするか、どのレベルの地震発生確率まで対象とするか（発生確率が極めて低い、六甲・淡路島断層帯など）、どの程度断層パラメータ（震源位置や地震規模等）にばらつきをもたせるのかどうか、ばらつきの幅はどのように設定するか、などが課題として挙げられた。ここでは、ワorstケース地震シナリオの設定にあたり、①地震発生源の選択、②地震規模の設定、③地震動評価における不確実性の扱いについて以下のように整理した。

① 地震発生源の選択

実務者の利便性を考慮すると、解析対象地点において最も適した地震動波形が簡単に入手できることが理想である。しかし、4 章で検討したように神戸市域においても建物の建設地点によってワorstケースとなる地震発生源は異なるため、地点ごとにどの地震発生源を選択するかが難しい課題となる。例えば山崎断層を選択したとしても、図-6.1.1 に示すように断層パラメータの設定条件によって各地の地震動は異なり、どのような地震シナリオを採用するかによっても建物応答は異なる。さらに、建物の周期特性の違いによって、例えば海溝型地震や直下型地震では地震動の特徴に違いがあるため、構造物への影響の程度が異なることから、一つの地震発生源や地震シナリオに限定してしまうと、条件によっては危険側の評価となる可能性がある。したがって、様々な地震発生源を設定して検討した上で、解析対象地点における地震動の特性を包含した地震シナリオを設定する必要がある。



a) ケース 1 の結果



b) ケース 3 の結果

図-6.1.1 山崎断層帯（Mw6.8）を対象とした地震動予測結果の例（出典：J-SHIS 想定地震地図）

② 地震規模の設定

発生確率が極めて低い断層（例えば、六甲・淡路島断層帯など）は、断層位置や地震規模から、神戸市周辺

地域で大きな影響をおよぼす可能性がある。一方で、全ての可能性を考慮した地震動レベルの設定は現実的ではない。本研究の目的はより簡便で安価な耐震補強を施すことにより、今後 30 年程度の建物使用期間の中で発生することが想定される地震動に対して、倒壊を回避可能な耐震レベルの確保である。扱いやすさを考慮すると「30 年内の発生確率が 10%（再現期間：約 285 年）の地震動」や、「震度 6 強クラスの地震動」などの検討に適した現実的な地震動レベルを目安に、ワーストケース地震シナリオを設定すべきである。この場合に例えば JR 鷹取波は極めて稀に観測される強い地震動として検討対象外となる可能性があることに対しては慎重に検討を進める必要がある。

③ 地震動評価における不確実性の扱い

地震動評価に伴う不確実性を考慮する必要がある。技術的には震源位置や断層パラメータのばらつきを考慮して、数多くのシナリオを作成することができるが膨大な作業量になり、実務的には現実的ではない。地震動予測に関する不確実性を考慮して予測できる地震動の範囲を鑑みて、一般的に考えられる地震動レベルを適用する方法が合理的である。

(2) 震源断層を予め特定しにくい地震の扱い

第 4 章の検討において、南海トラフや主要活断層による地震以外に、震源断層を予め特定しにくい地震の発生も考慮に入れる必要性が指摘された。2018 年 6 月 18 日に大阪府北部で発生したマグニチュード 6.1 の地震も、明確にされている活断層上ではない地点においても地震が発生しうる典型的な事例となった。この事例をはじめとして、表-6.1.1 に示すように、マグニチュード 6 クラスの地震は日本国内やその周辺で毎年 10 程度発生しており、建設地点付近で同等クラスの地震が発生する可能性は十分に考えられる。震源断層を予め特定しにくい地震の発生を考慮する場合は、地震規模は政府の専門調査会が整理した考え方を参考にマグニチュード 6.5 ～6.9 程度とする考え方がある。また、マグニチュード 6 クラスの地震は観測データも比較的多く、基盤まで引き戻した後に各地点の地盤条件を入力して作成することができる。建設地点直下に震源を設定した場合、大きな影響の発生が想定されるため、前述のワーストケース地震シナリオに加えて震源断層を予め特定しにくい地震シナリオを含めるのかどうか、今後更なる検討が必要である。

表-6.1.1 日本周辺で 1997 年～2016 年の 20 年間に発生したマグニチュード別の地震回数
(気象庁地震カタログによる)

M	—	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	計
1997年	2,025	7,910	25,259	11,583	2,762	477	49	8	—	—	—	50,073
1998年	3,128	22,816	31,089	11,417	2,862	471	45	4	—	—	—	71,832
1999年	3,139	22,260	27,285	9,729	2,426	372	44	4	1	—	—	65,260
2000年	5,646	31,752	34,047	22,867	6,886	1,266	114	15	2	—	—	102,595
2001年	12,256	50,607	34,173	11,206	2,488	473	68	6	—	—	—	111,277
2002年	15,466	56,048	33,221	10,334	2,453	467	52	6	1	—	—	118,048
2003年	13,947	62,987	39,925	14,221	3,518	707	99	14	2	1	—	135,421
2004年	11,787	52,408	42,464	15,350	3,646	702	100	12	3	—	—	126,472
2005年	9,901	55,268	41,559	13,372	3,794	659	77	14	3	—	—	124,647
2006年	8,438	49,449	34,895	10,821	2,474	451	47	3	—	—	—	106,578
2007年	9,254	55,010	38,696	12,177	2,770	512	50	8	—	—	—	118,477
2008年	9,434	53,032	41,690	13,564	2,982	569	74	8	3	—	—	121,356
2009年	11,051	64,949	38,563	11,079	2,565	431	46	6	—	—	—	128,690
2010年	9,155	57,655	35,731	10,528	2,772	423	39	6	—	—	—	116,309
2011年	9,817	84,673	110,729	58,365	22,151	5,000	617	105	7	—	1	291,465
2012年	8,176	64,738	60,481	25,055	7,986	1,087	120	14	2	—	—	167,669
2013年	8,524	54,687	38,064	17,468	4,773	721	86	10	1	—	—	124,334
2014年	8,729	53,375	36,662	15,276	3,965	567	49	7	1	—	—	118,631
2015年	7,920	49,797	32,261	13,979	3,741	679	74	9	1	—	—	108,461
2016年	23,154	111,828	70,815	24,242	5,337	736	88	15	2	—	—	236,217
計	190,947	1,061,249	847,609	332,633	92,351	16,780	1,938	274	29	1	1	2,543,812

(3) 短い間隔で複数回の揺れが発生した場合への対応方針

2016年の熊本地震は4月14日にマグニチュード6.5の前震が発生し、2日後の16日にはマグニチュード7.3の本震が発生して、いずれの地震も最大震度7が観測された。また、2004年10月23日に発生した新潟県中越地震では、午後5時56分にマグニチュード6.8の本震により新潟県内では震度7が観測された後、大きな余震が発生し、本震発生後2時間以内に2回の震度6強と1回の震度6弱が記録された。短い間隔で大きな地震が発生すると、連続した地震の影響で被害が拡大する可能性があることを念頭におく必要がある。特に、本研究では大きな地震を経験した場合に建物を再使用しないことを前提にしており、2回目の地震に対しては倒壊する可能性があることを建物所有者や居住者に十分に説明して理解を得ておく必要がある。

(4) 地震動波形の公開方法

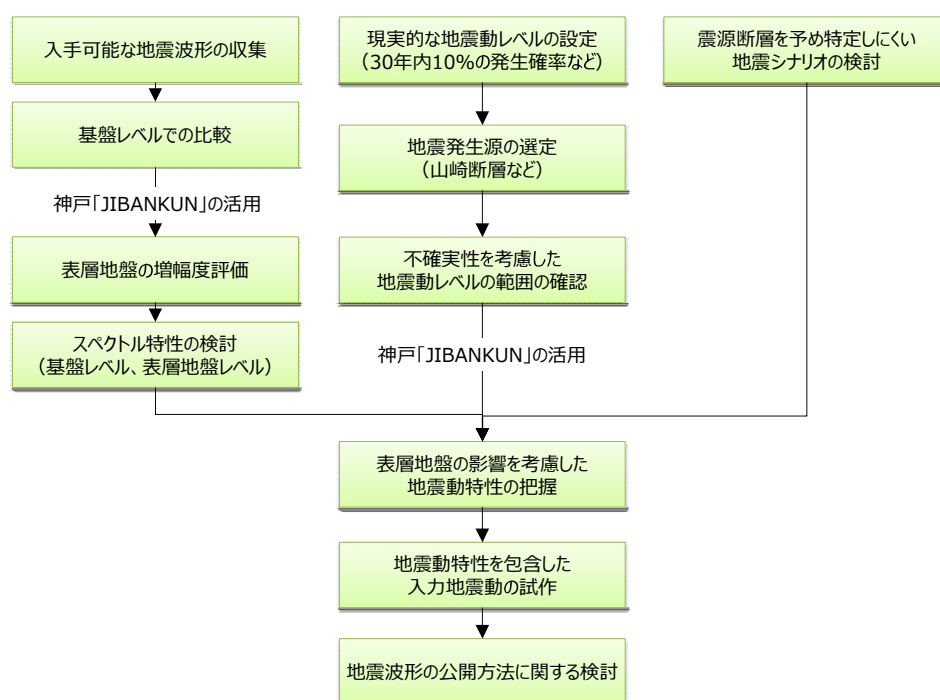
各サイトの地盤特性を考慮した入力地震動が示され、かつ、振動解析による耐震診断、耐震補強のあり方が示されると実務者や市民にとってコスト面でのメリットが大きい。設計スペクトルのような指標が提案できることが望ましいが、地震動の公開方法について関係者と協議する必要がある。また、建物所有者や居住者に対して絶対に倒壊しないと断定することはできないため、設定以上の大きさの地震が発生した場合には倒壊する可能性があることも説明するような配慮が必要である。

6.2 今後の方向性

上記の要件を踏まえた入力地震動の作成に向けて、さらに検討を進めるために、今後、入手可能な地震波形を極力網羅的に集めて、①基盤レベルでの比較、②地震動増幅の評価、③スペクトル特性の検討を行った上で、JR 鷹取波やエル・セントロ波等を比較して整理する予定である。その整理の結果、網羅的に検討できているかどうか、ケーススタディを追加する必要があるのかをどうかについてスペクトル特性を含めて検討を行う。

現時点における入手可能な地震動は、告示波、設計3波（エル・セントロ波、タフト波、八戸波）、観測波（JMA 神戸波、JR 鷹取波、神戸大観測波など）、南海トラフ地震想定波、J-SHIS 強震動評価波である。J-SHIS 強震動評価波は統計的グリーン関数法によるが深部地盤の影響も含まれており、また、1つの断層で複数のケースの波形を公開しており、全国一律で評価できるため扱いやすく比較対象として適している。

また、今回の第5章におけるケーススタディでは表層地盤の影響を十分に考慮できていなかったため、基盤波として公開されている J-SHIS 強震動評価波を含めて、今後は「神戸 JIBANKUN」を活用して表層地盤の影響を考慮した地震波形で検討を進める予定である。本 WG のフェーズ2における今後の進め方（案）を図－6.2.1 に示す。



図－6.2.1 入力地震動の作成に関する今後の進め方（案）

7. まとめ

本研究ではより合理的な耐震診断・補強方法の実現により、耐震診断や設計、補強等に従事する実務者の作業負担軽減を図り、中高層建物の耐震化促進に貢献することを目的として、今後 30 年程度の建物使用期間の中で発生しうる最大級の地震に対して、建物は再使用できなくても倒壊はしない性能の確保を目的とした「振動解析による倒壊判定手法」の耐震診断・補強実務への導入可能性を検討した。

第 1 章では本研究の背景として、近年、既往の 0.6 以上を確保する I_s 値のみにとらわれることなく、建物の動的応答性状に着目した「振動解析による倒壊判定手法」に実務者の期待が寄せられていること、大阪府では地盤特性を考慮した地表地震波が公開されており、他の地域でもそのような振動解析のための入力地震動の公開が望まれていることを述べ、本研究の目的を説明した。

第 2 章では倒壊判定手法の概要を示した。倒壊判定手法は建物の振動解析結果から得られた最大応答層間変形角を基準に建物が倒壊する可能性を判定する手法である。また、この手法を含めた耐震補強の進め方として 1 次的補強、2 次的補強の考え方の導入を想定していることを説明した。さらに本研究は 5 か年計画の中でフェーズ 1 とフェーズ 2 の 2 段階で進めており、フェーズ 1 を対象とした本報における研究の流れを説明するとともに、本報告書の構成を示した。

第 3 章では解析対象建物の概要を示した。解析対象建物は神戸市に実在する 8 階建ての集合住宅で、建物の構造と兵庫県南部地震による被災履歴が明らか建物である。構造は 1～4 階までは SRC 造、5 階以上は RC 造で新耐震基準設計法が適用される前の 1979 年に建設された。耐震診断（二次診断）が実施されているが、 I_s 値は 0.6 を満足していない。兵庫県南部地震では 1 階のピロティ部分に大きな被害が集中的に生じていたことを述べた。

第 4 章では仮想の建設地点において解析対象建物の地震リスクを把握するために、2 種類の既往の確率論的な手法に基づく評価手法を適用した。まず地震ハザードステーション「J-SHIS」の情報から、神戸市の建物に被害を与える可能性がある主要活断層のうち、上町断層の地震発生確率が比較的高いことを確認した。また、同じ神戸市内であっても、建設地の位置や地盤の影響等により想定しておくべき地震発生源や地震規模は異なることを確認した。次に地震リスク分析ソフトウェアを用いて地震リスクを定量的に分析した結果から、地盤や耐震性の違いによるリスク量への影響を確認した。また、南海トラフや主要活断層による地震以外に、震源断層を予め特定しにくい地震も検討する必要があることを明らかにした。

第 5 章では解析対象建物に対して振動解析による倒壊判定を適用し、その適用可能性を検討した。検討用の入力地震動は兵庫県南部地震で観測された 2 波形と、設計に用いられている 3 波形の計 5 波形である。補強前の建物について、兵庫県南部地震における被災状況を再現した振動解析モデルを構築し、質点系振動解析および 3 次元立体フレームの時刻歴応答解析を実施した結果、神戸海洋気象台波を入力したケースでは 1 階部分の最大応答層間変形角が倒壊する可能性が大きいレベルまで達した。そこで、1 階のピロティ部分のみを対象に、簡易的な補強として壁厚 20cm または 30cm の耐震壁を増設したケースで振動解析を実施した結果、1 階部分が層崩壊する可能性を大きく軽減する効果が認められることを確認した。また、質点系振動解析と立体フレーム解析の結果を比較した結果、今回の検討範囲では質点系振動解析の方が比較的大きい応答値を算出したが、倒壊判定の目的に照らすと安全側の評価となるため、適用性に大きな問題があるとはいえないと考えられることを述べた。

第 6 章では「振動解析による倒壊判定」に使用するための入力地震動の作成要件について、中間とりまとめとしての検討結果を報告した。今後 30 年程度の建物使用期間中に発生することが想定される地震に対して、建物は再使用できなくても倒壊を免れるレベルの耐震性能の確保を目的とした場合において、ワーストケース地

震シナリオ等を対象とした入力地震動を設定するための考え方を以下のように整理した。

- ・地震発生源の選択について、一つの地震発生源や地震シナリオに絞ってしまうと、条件によっては危険側の評価となる可能性があり、様々な地震発生源を設定して検討した上で、解析対象地点における地震動の特性を包含した地震シナリオを設定する必要がある。
- ・地震規模の設定について、全ての可能性を考慮した地震動レベルの設定は現実的ではなく、今後 30 年程度の建物使用期間の中で発生することが想定される地震動に対して、倒壊を回避可能な耐震レベルの確保を目的としているため、検討に適した現実的な地震動レベルを目安に、ワーストケース地震シナリオを設定すべきである。
- ・地震地震動評価における不確実性の扱いについて、技術的には震源位置や断層パラメータのばらつきを考慮して、数多くのシナリオを作成することができるが、膨大な作業量になり現実的ではないため、地震動予測に関する不確実性を考慮して予測できる地震動の範囲を鑑みて、一般的に考えられる地震動レベルを適用する方法が合理的である。
- ・震源断層を予め特定しにくい地震の扱いについて、地震規模は政府の専門調査会が整理した考え方を参考にマグニチュード 6.5～6.9 程度とする考え方があり、マグニチュード 6 クラスの地震は観測データも比較的多く、基盤まで引き戻した後に各地点の地盤条件を入力して作成することができるが、前述のワーストケース地震シナリオに加えて震源断層を予め特定しにくい地震シナリオを含めるのかどうかは、今後更なる検討が必要である。

また、第 6 章では今後の方向性として、上記の要件を入力地震動の作成に向けて、入手可能な地震波形を極力網羅的に集めて、①基盤レベルでの比較、②地震動増幅の評価、③スペクトル特性の検討を行った上で、JR 鷹取波やエル・セントロ波等を比較して整理を進める予定であることを述べた。

本研究におけるフェーズ 2 での検討課題として、「振動解析による倒壊判定手法」の適用性に関しては、「神戸 JIBANKUN」を活用して表層地盤の影響を考慮した地震波形による検討など、解析事例を増やして倒壊判定手法の検証を進めるとともに、振動解析モデルの精緻化や解析手法の標準化に向けた検討を行う予定である。また、入力地震動の作成については第 6 章で述べた方向性に沿って、神戸市の地震動特性を考慮した入力地震動の試作およびその公開方法に関する検討まで進める予定である。

編集後記

本研究成果報告書は、平成 27 年度～平成 29 年度の 3 カ年の研究成果を取りまとめたものである。

「神戸の減災研究会」の研究活動は、(1) 神戸市域内のインフラ構造物の調査、性能評価および対策に関する研究、(2) 豪雨による斜面災害に関する研究、(3) 神戸 JIBANKUN を活用した研究および、(4) 神戸市の地震動特性と中高層建築物の耐震補強に関する研究を主として行っている。今回は、特に神戸市の行政ニーズを十分に取り入れるために、協議を重ねることによりテーマを設定してきた。成果報告書の内容としては、第 1 編が石積み擁壁の健全性評価、第 2 編が既設盛土の耐震性評価、第 3 編が斜面上の転石の危険度評価に関する研究報告を、第 4 編では神戸 JIBANKUN を活用した下水道管渠の健全性と空洞調査に基づく陥没等の災害予測に関する研究、および第 5 編では神戸市域での地震動に対する検討と中高層建築物の耐震補強に関する研究報告である。この成果を神戸市行政の方々にも十二分にご活用いただき、「防災・減災」の一助になることを祈願しております。

本研究成果報告書をまとめるにあたり業務多忙の中ご執筆いただいた会員の方々、また、3 カ年に渡る研究活動に参画いただいた研究会会員・学識会員の皆様方、またオブザーバーとして各種の有益で、忌憚のないご助言をいただいた神戸市役所関係部局の皆様方に厚くお礼申し上げます。

(代表幹事 八谷 誠 (中央復建コンサルタンツ株式会社))

神戸の減災研究会 研究成果報告書

発 行 平成 30 年 8 月

編 集 神戸の減災研究会
会長 澁谷 啓
神戸大学大学院工学研究科
神戸市灘区六甲台町 1-1
TEL (078)803-6023 FAX (078)803-6023

印 刷 株式会社東和インフォセービングス
大阪市淀川区西中島 6 丁目 1-19
TEL(06)6305-0150 FAX(06)6305-0170