

道路、鉄道、... 線状インフラ ～あれまで、あの時、あれから～

神戸大学自然科学系先端融合研究環
都市安全研究センター

吉田 信之

nyoshida@kobe-u.ac.jp

内 容

- はじめに
- 線状インフラ（道路, 鉄道, 河川, 港湾施設）～ あの時
- 技術基準の変遷～ あれまで、あの時、あれから
- 道路土工の変遷～ あれまで、あの時、あれから
- 東日本大震災では
- おわりに

社会ストック推計被害額の比較

	東日本大震災 (内閣府 (防災担当))	東日本大震災 (内閣府 (経済財政分析担当))		阪神・淡路大震災 (国土庁)
		ケース 1	ケース 2	
建築物等 (住宅・宅地、店舗・ 事務所・工場、機械等)	約 10 兆 4 千億円	約 11 兆円 (建築物の損壊率の想定 津波被災地域： 阪神の2倍程度 非津波被災地域： 阪神と同程度)	約 20 兆円 (建築物の損壊率の想定 津波被災地域： ケース1より特に大きい 非津波被災地域： 阪神と同程度)	約 6 兆 3 千億円
ライフライン施設 (水道、ガス、電気、 通信・放送施設)	約 1 兆 3 千億円	約 1 兆円	約 1 兆円	約 6 千億円
社会基盤施設 (河川、道路、港湾、 下水道、空港等)	約 2 兆 2 千億円 約13%	約 2 兆円	約 2 兆円	約 2 兆 2 千億円 約23%
その他	農林水産	約 2 兆円	約 2 兆円	約 5 千億円
	その他			
総 計	約 16 兆 9 千億円	約 16 兆円	約 25 兆円	約 9 兆 6 千億円

注：ストックの区分は内閣府（防災担当）の推計で用いたものによるものであり、推計により若干異なる。

【内閣府：東日本大震災における被害額の推計について、記者発表資料、2011.06.24】

- ・ 都市近郊集中災害vs広域多所災害 => 社会基盤施設の被害はほぼ同じ
- ・ 東日本大震災 => 農林水産関連の損害が大

被害と復旧 ～道路



阪神高速3号神戸線(深江本町)



再構築し復旧



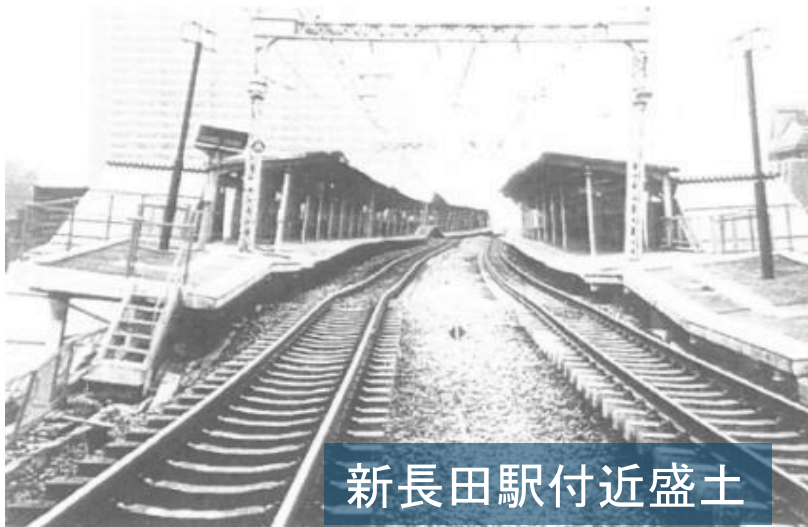
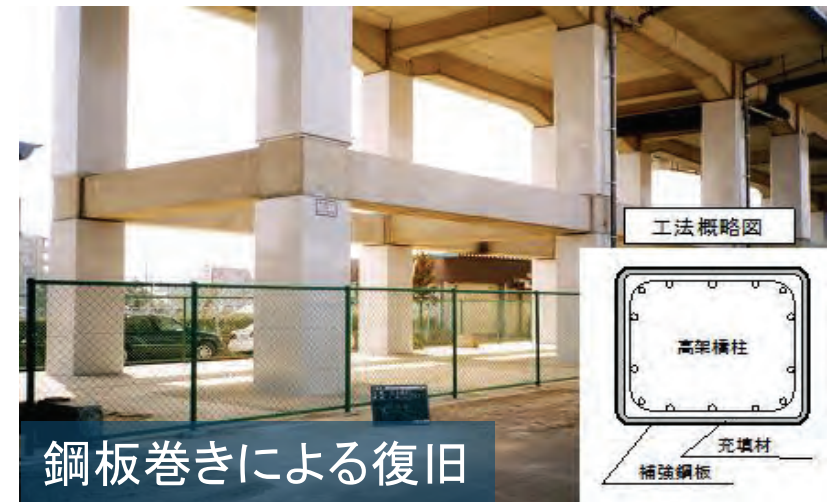
阪神高速5号湾岸線
(六甲アイランド大橋)



フローティングクレーンによる復旧状況

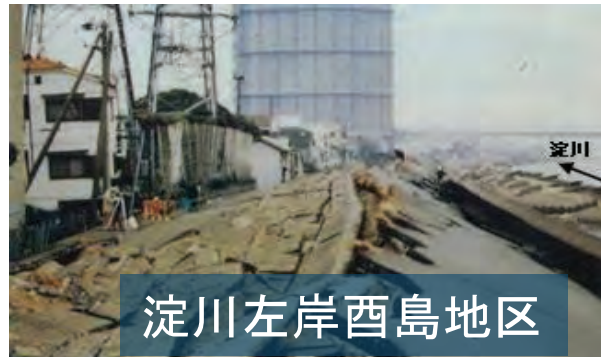
【志村他:地上線状構造物WGの活動報告, 兵庫県南部地震を後世に伝承するための研究委員会, 地盤工学会関西支部, 2012.05.11】

被害と復旧 ～鉄道



【志村他：地上線状構造物WGの活動報告，兵庫県南部地震を後世に伝承するための研究委員会，地盤工学会関西支部，2012.05.11】

被害と復旧 ～河川堤防



【志村他:地上線状構造物WGの活動報告, 兵庫県南部地震を後世に伝承するための研究委員会, 地盤工学会関西支部, 2012.05.11】

被害と復旧 ～港湾



【志村他:地上線状構造物WGの活動報告, 兵庫県南部地震を後世に伝承するための研究委員会, 地盤工学会関西支部, 2012.05.11】

技術基準 ～あれまで、あの時、あれから～

佐野利器博士 ⇒ 地震力の大きさを震度で表し、設計に用いる

道路		鉄道		河川堤防		港湾	
技術基準等の制定・改正	設計法に関する事項等	技術基準等の制定・改正	設計法に関する事項等	技術基準等の制定・改正	設計法に関する事項等	技術基準等の制定・改正	設計法に関する事項等
1915 佐野利器博士「家屋耐震構造論」における設計地震力の提唱							
1923 関東大震災 (M7.9)							
1924 市街地建築物法(建築基準法の前身)改定(世界初の耐震規定)							
1926道路構造に関する細則(案)	■耐震設計の導入	1930橋梁設計標準	■耐震設計の始まり(自重・土圧に対する水平震度)			1950港湾法制定	■港湾の設計法を初めて体系化
1939鋼道路橋設計示方書案	■設計震度の標準化	1955無筋および鉄筋コンクリート土木構造物の設計基準	■地域別水平震度の導入			1950港湾工事設計示方要覧	■設計震度の範囲を規定(0.05~0.3)
1956鋼道路橋設計示方書	■地域、地盤条件に応じた設計震度の設定	1961新幹線構造物設計基準	■新幹線構造物への適用			1959港湾工事設計要覧	■常時土圧と地震土圧の算定式を導入
1964 新潟地震 (M7.5), 1966							
1972道路橋耐震設計指針	■地域、地盤、重要度、構造特性に応じた設計震度の算定 ■液状化判定法の導入	1970建築物設計標準(鉄筋コンクリート構造)	■設計標準(国鉄)			1967~1968港湾構造物設計基準	■地域別震度、地盤種別係数、重要度係数に応じた設計震度の算定
		1974建築物設計標準(基礎・抗土圧構造物)	■液状化判定方法の導入				■修正震度法 ■液状化判定法導入
1978 宮城県沖地震							
1980道路橋示方書	■液状化に対する設計の考え方導入	1979耐震設計指針	■特殊地盤の対応 ■修正震度法 ■応答変位法			1979港湾の施設の技術上の基準を定める省令	■地域別震度の改正と重要度係数の明記
1990道路橋示方書	■RC橋脚の地震時保有水平耐力法および動的解析による照査の導入	1983建築物設計標準(鉄筋コンクリート構造)	■耐震構造細目の強化(部材じん性の確保)			1979港湾の施設の技術上の基準・同解説	■地震応答解析による耐震性評価
		1992鉄道構造物等設計標準(鉄筋コンクリート構造)	■限界状態設計法の導入			1989港湾の施設の技術上の基準・同解説	■液状化の予測・対策
		1992鉄道構造物等設計標準(土構造物)					■地域別震度(改正) ■地震応答解析と変位法による耐震性の評価 ■砂質土の液状化予測判定法の充実 ■液状化対策工法
1995 兵庫県南部地震 (M7.2)							
1995兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様	■各構造物材の強度・変形性能を向上 ■震度法+地震時保有水平耐力の照査実施	1995新設構造物の耐震設計に係る当面の措置について	■兵庫県南部地震規模の耐震性能保有明記 ■所要降伏震度スペクトルの利用 ■動的解析の導入	1995河川堤防耐震点検マニュアル(建設省河川局通知)	■耐震点検の導入 ■概略点検、詳細点検の2段階 ■詳細点検では震度法(円弧すべり法:L1)で照査 ■安全率を沈下量に換算し残留堤防高で照査	1999港湾の施設の技術上の基準・同解説	■レベル1・レベル2地震動の2段階地震動の導入
1996道路橋示方書	■動的解析に用いる地震入力・照査法を規定 ■液状化、流動化が生じる場合の耐震設計法を規定 ■免震設計法を規定	1999鉄道構造物等設計標準(耐震設計)	■2段階設計法導入(L1, L2地震動) ■性能照査型設計法の採用	1997改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説	■堤防の耐震設計手法の基準化 ■照査法は上述の点検マニュアル(1995)と同様		■地域別震度の細分化(3地区→5地区)、重要度係数の改正
2002道路橋示方書	■橋の耐震性能、設計地震動の設定方法および耐震性能の照査に関する基本的な要求事項を明示	2001鉄道に関する技術上の基準を定める省令	■技術基準の性能規定化	2007河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説	■L2地震動を考慮 ■堤防の変形を静的照査法にて照査 ■残留堤防高で照査	2007港湾の施設の技術上の基準・同解説	■液状化判定において限界N値の変更と塑性指数Ipの考慮 ■固化処理された地盤の主働土圧の導入
		2007鉄道構造物等設計標準(土構造物)	■性能照査型設計法の導入 ■性能ランク毎の耐震性能を明示				■仕様規定から性能規定への移行 ■信頼性設計法の導入
		2007鉄道構造物等維持管理標準(土構造物)	■構造物維持管理の指針				■地震動の考え方の変更(震源特性、伝播経路特性、サイト特性より地震動を設定) ■耐震強化施設の新たな枠組み

河川堤防
⇒ 本格的な耐震基準の制定は兵庫県南部地震以降

【兵庫県南部地震を後世に伝承するための研究委員会:第1章 地上線状構造物, 報告書, 地盤工学会関西支部, p.1・27, 2012】

道路土工 ～あれまで、あの時、あれから～

年	発生地震	技術基準の制定・改正	主な内容	
			設計法に関する事項	設計地震力・設計地震動
1923	大正関東地震(M7.9)			
1956		道路土工指針(道路工法叢書 第10集)(日本道路協会)	耐震設計に関する規定なし	耐震設計に関する規定なし
1964	新潟地震(M7.5)			
1967		道路土工指針(日本道路協会)	耐震設計に関する規定なし	・擁壁の地震時における土圧のところに、「地震時における土圧を考慮する場合には、物部-岡部式を用いるとよい」との記述 ・カルバートについては、「設計に用いる荷重は、... 地震荷重、温度変化による影響は一般に考えなくてよい」との記述
1968	えびの地震(M6.1) 十勝沖地震(M7.9)			
1972		のり面工と斜面安定工指針(日本道路協会)	耐震設計に関する規定なし	耐震設計に関する規定なし
1977		道路土工-擁壁・カルバート・仮設構造物工指針(日本道路協会)	「構造物が特に大きく、あるいはその破壊が周辺地域に重大な影響を与えるか、また復旧が極めて困難であることが予想されるときには、地震の影響を考慮することが実際的となる」との表現あり	「地震時土圧を考慮する場合は、物部-岡部公式などを用いるとよい」との記述
1978	伊豆大島近海地震(M7.0) 宮城県沖地震(M7.4)			
1979		道路土工-のり面工・斜面安定工指針(日本道路協会)	耐震設計に関する規定なし	耐震設計に関する規定なし
1982	浦河沖地震(M7.1)			
1983	日本海中部地震(M7.7)	道路土工要綱(日本道路協会)	<p>「地震荷重に対する配慮」</p> <p>・切土や盛土のような土構造物は、一般に他の構造物に比べて復旧が比較的容易である。盛土の場合は施工後の時間経過に応じて、盛土および地盤の強度が増して安定性に余裕が得られることが多い。また風雨などに耐えた多年の経験から求められた標準のり面勾配を適用した切土や盛土のり面では安定が確保されていると考えられる。このような理由から土構造物の設計では通常の場合、地震に対する配慮は行わない。</p>	<p>「地震荷重に対する配慮」</p> <p>・重要な構造物に近接した盛土部、あるいは道路交通や沿道諸施設に大きい被害を与えることが予想される道路の部分で、盛土後の基礎地盤の強度増加が少なく、地震時に液状化が予想されるゆるい砂質土層に富む地盤に対しては地震時の検討を行っておくことが望ましい。</p> <p>・擁壁については、... 過去の経験によれば規模の小さい構造物では設計、施工を確実に行えば地震の影響を特に考慮しなくても、機能的には十分耐え得ることが認められている。したがって通常の擁壁では地震を考慮した設計を行わなくてもよい。しかし高さが8m程度をこえる規模の大きい擁壁や、高さが5m程度であっても倒壊が付近に重大な損害を与えたり、その復旧が極めて困難であるような擁壁については、地震時土圧と慣性力を考慮した設計を行う必要がある。</p> <p>・ボックスカルバートおよびパイプカルバートの設計においては、原則として地震の影響は考えない。門形カルバートの設計においては、規模が大きく破壊した場合に道路や沿道に与える影響が著しい時に地震を考慮した設計を行う。この場合には両側から土圧を受ける場合でも、片側だけ地震時土圧が働くものとして検討する。</p>

【兵庫県南部地震を後世に伝承するための研究委員会:第1章 地上線状構造物, 報告書, 地盤工学会関西支部, 2012に加筆】

道路土工 ～あれまで、あの時、あれから～

年	発地震	技術基準の制定・改正	主な内容	
			設計法に関する事項	設計地震力・設計地震動
1984	長野県西部地震(M6.8)			
1986		道路土工のり面工・斜面安定工指針(日本道路協会)	<ul style="list-style-type: none"> ●下記の場合には地震の影響を考慮した安定検討が必要 <ul style="list-style-type: none"> ・万一崩壊すると隣接物に重大な損害を与える場合 ・万一崩壊すると復旧に長期間を要し、道路機能を著しく阻害する場合 ●地震時の安定検討には円弧すべり面を仮定した震度法による安定計算法を用いることができる ●円弧すべり面のかわりに直線の複合すべり面を仮定した計算方法もあり 	<ul style="list-style-type: none"> ・設計水平震度 $k_h = v_1 \cdot v_2 \cdot k_0$ $k_0: 0.15$ v_1: 地域別補正係数 v_2: 地盤別補正係数
1987	千葉県東方沖地震(M6.7)	道路土工擁壁・カルバート・仮設構造物工指針(日本道路協会)	「過去の経験によれば常時のもので設計と施工を綿密に行っておけば、地震時の影響を特に考慮しなくても、機能的には耐え得ることが認められている。したがって通常の擁壁では複雑な地震時安定の検討をすることを省略してもよい。ただし、重要度が高いと考えられる擁壁については地震の影響を考慮するものとする。」との表現あり	<ul style="list-style-type: none"> ・設計水平震度 $k_h = v_1 \cdot v_2 \cdot k_0$ $k_0: 0.15$ v_1: 地域別補正係数 v_2: 地盤別補正係数
1993	釧路沖地震(M7.8) 北海道南西沖地震(M7.8)			
1994	北海道東方沖地震(M7.5)			
1995	兵庫県南部地震(M7.2)			
1999		道路土工のり面工・斜面安定工指針(日本道路協会)	参考例として地震時の安定検討で考慮する地震動レベルを示す	(参考例) ・構造物の重要度・復旧の難易度に応じて耐震検討(大規模or中規模)を実施 ・円弧すべり面を仮定した震度法による安定計算を紹介 ・設計水平震度として下式を紹介 $k_h = c_z \cdot k_{h0}$ k_h : 設計水平震度 k_{h0} : 設計水平震度の標準値 (大規模: 0.16~0.24、中規模: 0.12~0.18) c_z : 地域別補正係数
		道路土工擁壁工指針(日本道路協会)	<ul style="list-style-type: none"> ・過去の経験によれば常時のもので設計と施工を綿密に行っておけば、地震の影響を考慮しなくても、通常規模の地震に対しても機能的には耐えられることが認められている ・したがって高さ8m以下の通常の擁壁では地震時の安定検討の省略可 ・ただし8m以下であっても擁壁の重要度・復旧の難易度を考慮し必要に応じて地震時の安定検討実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・構造物の重要度・復旧の難易度に応じて耐震検討(大規模or中規模)を実施 ・設計水平震度 $k_h = c_z \cdot k_{h0}$ k_h: 設計水平震度 k_{h0}: 設計水平震度の標準値 (大規模: 0.16~0.24、中規模: 0.12~0.18) c_z: 地域別補正係数
2000	鳥取県西部地震(M7.3)			
2003	三陸口地震(M7.1) 宮城県北部地震(M6.4) 十勝沖地震(M8.0)			

【兵庫県南部地震を後世に伝承するための研究委員会:第1章 地上線状構造物, 報告書, 地盤工学会関西支部, 2012に加筆】

道路土工 ～あれまで、あの時、あれから～

2004	新潟県中越地震(M6.8)			
2007	新潟県中越沖地震(M6.8)			
2008	岩手・宮城内陸地震(M7.2)			
2009		道路土工要綱(日本道路協会) ・1要綱+6指針に再編	<ul style="list-style-type: none"> ・性能規定型設計の枠組みの導入 ・様式の変更⇒分かりやすく ・地震動の作用として道路橋示方書Ⅴ耐震設計編(2002)に規定されるレベル1地震動、レベル2地震動を想定することを基本 	<ul style="list-style-type: none"> ●レベル1地震動 ・加速度応答スペクトル $S=C_z \cdot C_D \cdot S_0$ $S_0: \sim 300\text{gal}$ ●レベル2地震動 ・加速度応答スペクトル タイプI: $S=C_z \cdot C_D \cdot S_{10}$ $S_{10}: \sim 1000\text{gal}$ タイプII: $S=C_z \cdot C_D \cdot S_{110}$ $S_{110}: \sim 2000\text{gal}$
		道路土工一切土工・斜面安定工指針(日本道路協会)	<ul style="list-style-type: none"> ・安定度判定等により、地震に対して注意の必要と考えられる切土のり面や斜面に対してはのり面保護工による対策を実施 ・重大な被害をもたらす可能性の高いのり面・斜面に対しては、耐震性が高いと考えられるのり面保護工を用いるのが望ましい 	
2010		道路土工カルバート工指針(日本道路協会)	<ul style="list-style-type: none"> 地震の影響として次のものを考慮 ・カルバートの自重に起因する地震時慣性力 ・地震時土圧 ・地震時の周辺地盤の変位または変形 ・地盤の液状化の影響 	<ul style="list-style-type: none"> ●慣性力 ・静的照査法に用いる設計水平震度 $K_h=C_z \cdot K_{h0}$ K_{h0}: 設計水平震度の標準値(0.16～0.24) C_z: 地域別補正係数 ・動的解析 道路橋示方書Ⅴを参考に、目標とする加速度応答スペクトルに近似したスペクトル特性を有する加速度波形を使用 ●地震時土圧 ・構造物の種類、土質条件、設計地震動のレベル、地盤の動的挙動を考慮して適切に設定 ・一般には道路橋示方書Ⅴに示される地震時土圧を参考に設定 ●周辺地盤の変位・変形 ・地震動による作用を地震時の周辺地盤の変位あるいは変形として与える方法 ・地震動レベル、地盤条件、解析手法に応じてその影響を適切に設定 ・「共同溝指針」(日本道路協会)、「駐車場設計指針」(同)を参考に設定 ●地盤の液状化の影響 ・カルバートが地下水位以下に埋設される場合で、周辺地盤が液状化する可能性がある場合には、過剰間隙水圧による浮力を考慮して浮き上がりに対するカルバートの安定性を検討

【兵庫県南部地震を後世に伝承するための研究委員会:第1章 地上線状構造物, 報告書, 地盤工学会関西支部, 2012に加筆】

道路土工 ～あれまで、あの時、あれから～

年	発生地震	技術基準の制定・改正	主な内容	
			設計法に関する事項	設計地震力・設計地震動
2010		道路土工－盛土工指針(日本道路協会)	<ul style="list-style-type: none"> ●地震による変状・崩壊の分類 <ul style="list-style-type: none"> ・傾斜地盤(傾斜地盤、集水地形)上の盛土の崩壊 ・地すべり・崖錘上の盛土の崩壊 ・軟弱地盤上の盛土の崩壊 ・腹付け盛土の変状・崩壊 ・横断構造物取り付け部・切り盛り境部の盛土の沈下 ●地震動の作用 <ul style="list-style-type: none"> ・地震動の作用として道路橋示方書Ⅴ耐震設計編(2002)に規定されるレベル1地震動、レベル2地震動を想定することを基本 ●盛土の要求性能 <ul style="list-style-type: none"> ・重要度・地震動による例示あり 	<ul style="list-style-type: none"> ●設計水平震度 $k_h = c_z \cdot k_{h0}$ <ul style="list-style-type: none"> k_h: 設計水平震度 k_{h0}: 設計水平震度の標準値 c_z: 地域別補正係数 ●レベル1地震動のk_{h0} <ul style="list-style-type: none"> I種地盤: 0.08 II種地盤: 0.10 III種地盤: 0.12 ●レベル2地震動のk_{h0} <ul style="list-style-type: none"> I種地盤: 0.16 II種地盤: 0.20 III種地盤: 0.24 ●上記震度の根拠 <ul style="list-style-type: none"> ・参考資料にて言及 ・兵庫県南部地震の被災(7地点)、無被災(1地点)からの推定と工学的判断より最大加速度800gal程度のレベル2地震動に対する水平震度は0.2程度
2011	東北地方太平洋沖地震(M9.0)			
2012		道路土工－擁壁工指針(日本道路協会)	<ul style="list-style-type: none"> ●地震の影響として次のものを考慮 <ul style="list-style-type: none"> ・擁壁の自重に起因する地震時慣性力 ・地震時土圧 ・地盤の液状化の影響 ●地震動の作用 <ul style="list-style-type: none"> ・地震動の作用として道路橋示方書Ⅴ耐震設計編(2002)に規定されるレベル1地震動、レベル2地震動を想定することを基本 ●擁壁の要求性能 <ul style="list-style-type: none"> ・重要度、地震動による例示あり 	<ul style="list-style-type: none"> ●設計水平震度 $k_h = c_z \cdot k_{h0}$ <ul style="list-style-type: none"> k_h: 設計水平震度 k_{h0}: 設計水平震度の標準値 c_z: 地域別補正係数 ●レベル1地震動のk_{h0} <ul style="list-style-type: none"> I種地盤: 0.12 II種地盤: 0.15 III種地盤: 0.18 ●レベル2地震動のk_{h0} <ul style="list-style-type: none"> I種地盤: 0.16 II種地盤: 0.20 III種地盤: 0.24 ●上記震度の根拠 <ul style="list-style-type: none"> ・参考資料にて言及 ・遠心模型実験結果、兵庫県南部地震の被害例(中規模、小規模)、新潟県中越地震の被害例(小規模)から、少なくとも水平震度0.2であればレベル2地震動に対して致命的な変形は生じない

【兵庫県南部地震を後世に伝承するための研究委員会:第1章 地上線状構造物, 報告書, 地盤工学会関西支部, 2012に加筆】

東日本大震災では 阪神・淡路大震災以降の地道な耐震対策の効果



- ・ 震度6弱
- ・ 耐震補強(鋼板巻立) 済み道路橋脚
- ・ 橋脚損傷無し



- ・ 震度5弱
- ・ 耐震補強無し道路橋脚
- ・ 橋脚損傷



- ・ 耐震対策(のり尻付近グラベルドレーン) 済み河川堤防
- ・ 無被害



- ・ 無対策
- ・ 天端～表のり方向に陥没被害

【兵庫県南部地震を後世に伝承するための研究委員会:第1章 地上線状構造物, 報告書, 地盤工学会関西支部, pp.1・45, 1・72, 2012】