

巨大地震災害への対応



早稲田大学教授
フェロー会員 工博
土木学会理事・副会長
濱田政則
HAMADA Masanori

はじめに

2003年の5月と12月に、東海地震および東南海・南海地震の「対策大綱」が中央防災会議から、相次いで発表された^{1), 2)}。東海地震に関しては従来から「発生の切迫性はきわめて高い」とされており、また東南海・南海地震についても今後50年間に発生する確率が80~90%と予測されている。中央防災会議の専門調査会による被害予測によれば、これらプレート境界型の巨大地震では兵庫県南部地震による被害の2~3倍程度の被害が発生するとされている。

これらの差し迫った巨大地震に対して適切な対策を講じていくことが緊急の課題であるが、そのためにはまず約10年前の兵庫県南部地震の教訓と、地震後行われてきた社会基盤施設の耐震性向上のための施策を振り返り、現時点で未解決のまま残されている課題を明らかにしておく必要がある。

兵庫県南部地震後も国内外で地震災害が発生し、地表地震断層や長周期地震動などの課題が提起されてきているが、これらも将来の地震では新たな脅威となると考えられる。

本文では以上のことを踏まえて、巨大地震による災害の軽減に向けて「土木学会がどのような活動を展開しようとしているのか」、また「学会が果しうる役割は何か」について述べる。

兵庫県南部地震による土木構造物の被害と教訓

兵庫県南部地震による土木構造物の直接被害額は道路、鉄道、港湾、河川堤防等を併せて約1兆5000億円に達した。道路橋で崩壊または大破したコンクリート橋脚は約80基、鉄道の高架橋では1000本以上のコンクリートが破壊した。それらの多くがせん断耐力の不足による破壊で橋脚の大崩壊の原因となった。地下鉄の駅舎もコンクリート中柱のせん断破壊により崩壊した。このような大断面の地下構造物が大被害を受けたのは世界ではじめての例であった。

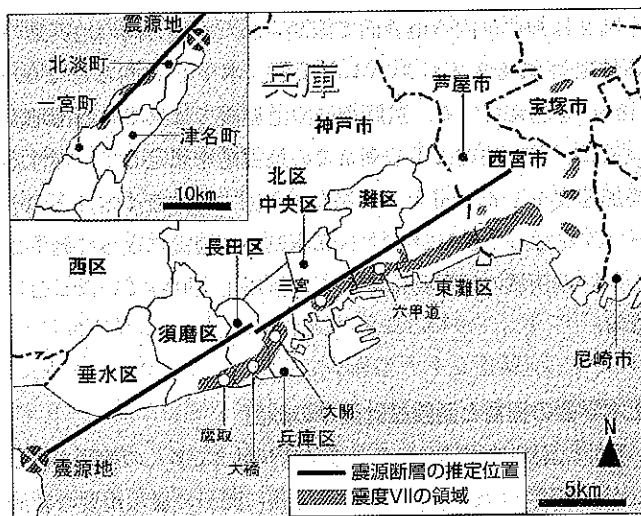


図-1 震源断層の推定位置と震度VIIの領域 (文献3) に加筆)

11万戸以上の家屋と建物が倒壊して、これが5500名以上の人命損失の直接的な原因となった。

臨海埋立地および河川沿いの沖積低地で発生した液状化は港湾施設、橋梁、建物、産業施設および水道やガスなどのライフライン施設に甚大な被害を与えた。特に液状化地盤の側方流動によりライフラインの埋設管路が被害を受け、水道やガスの完全復旧には約3か月の日時を要し、長期にわたって都市機能が麻痺した。

兵庫県南部地震によって何故このような大被害が発生したのか? 図-1に兵庫県南部地震の震源断層の推定位置を示す³⁾。震源断層は淡路島北部より西宮市付近に及んでいると考えられている。この震源断層の近傍域できわめて破壊力のある地震動が発生し、断層近傍に位置していた神戸市などの大都市圏を襲い、多くの構造物を破壊した。わが国ではマグニチュード7クラスの内陸断層による地震は10年に1回位の割合で発生しているが、これほど断層近傍域に大都市圏が存在してい

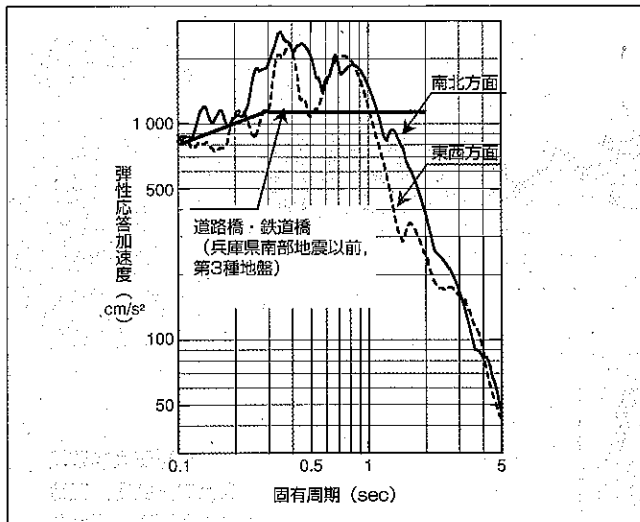


図2 兵庫県南部地震による地震動の加速度応答スペクトル (神戸海洋気象台)

たのは初めての経験であった。このことが兵庫県南部地震で未曾の被害が発生した最大の原因となった。

図2は神戸市内の地表面で観測された水平方向の地震動の弾性応答加速度スペクトルを示す。水平2方向とも2000 cm/s^2 を超えている。道路橋や鉄道施設では兵庫県南部地震以前に、関東地震による東京での地震動を想定して、弾性応答加速度を1000 galとして保有水平耐力の照査や塑性率のチェックを行ってきたが^{4), 5)}、兵庫県南部地震によって発生した断層近傍域の地震動はそれを2倍以上上回っていたことになる。

土木学会の提言と耐震設計基準の改訂

兵庫県南部地震はハードからソフト面まで多くの教訓を残したが、構造物の耐震設計や耐震補強に関して最も重要な教訓は「兵庫県南部地震の震源断層近傍域で発生したような極めて強い地震動に構造物が遭遇しても構造物を完全に破壊させることなく人命と財産を守る。」ということであったと考える。これを実現するために、土木学会は3度にわたって土木構造物の耐震設計と既存構造物の耐震補強に関する提言を行った⁶⁾。地震から約4か月後の1995(平成7)年5月に第一次提言を発表し、この中で、二つの基本方針を打ち出した。

最初の方針は「2段階地震動による耐震設計」の提唱であり、レベル2地震動に兵庫県南部地震の断層近傍域で発生したような地震動を考慮し、2段階の地震動による耐震設計をすべての土木構造物に適用しようとするものである。

2番目の基本方針は、性能規定型設計法の提唱である。提言の中に性能規定型設計という用語は用いられていないが、「構造物が保有すべき耐震性能、すなわち被害状態は人命への影響、応急活動等への影響を考慮して決定する」と記述されており、性能規定型設計の考え方が唱われている。地震後の混乱の中、4か月でこれだけ明確な基本方針を打ち出したこと、またこの提言がその後の耐震基準の改訂などに及ぼした影響を

考えれば、土木学会が社会的に果たした役割として高く評価できる。

土木学会の提言が出されてから2か月後の1995年7月に、中央防災会議により「防災基本計画」が策定された⁷⁾。第1章「災害予防」の冒頭において「構造物・施設等の耐震性の確保」についての基本的考え方が示された。表現、用語など若干異なるが、内容は土木学会の提言とほとんど同じであり、2段階の地震動については内陸の直下型地震の地震動を考慮すること、また人命への影響を最重要視して耐震性能を定めることが唱われ、これらが構造物の耐震性確保のための国の基本方針として位置づけられた。

地震後ほとんどの土木構造物の耐震設計基準が土木学会や防災基本計画に示された基本方針に沿う形で改訂された⁸⁾。2段階の耐震設計用地震動が規定され、また、目標とすべき構造物や施設の耐震性能も多く改訂基準の中に明記された。しかしながら、土木学会等の基本方針に沿って耐震設計法を改訂するためには解決しなければならない課題がその時点で数多く残っていた。

耐震設計基準の改訂で最も大きな課題となったのは、レベル2地震動の設定法である。震源断層より数値解析により直接地震動を設定するという方法が提案された。このためには構造物の建設地点付近での断層の有無の判定と断層破壊に関するパラメータの同定が必要となる。しかしながら内陸断層の場合、地域によっては断層パラメータの同定はもとより断層の有無の判定も難しいということもあって、観測地震動をもとにレベル2の標準地震動を設定して、これを地域の地震活動度により補正する方法も併せて採用することになった⁹⁾。

改訂された耐震設計基準では、レベル2地震動を引き起こす地震としてマグニチュード7クラスの内陸地震とマグニチュード8クラスのプレート境界型の地震が想定されている。このうちマグニチュード7クラスの内陸地震については断層近傍域の地震動を考慮することになったが、プレート境界のマグニチュード8クラスの地震に関しては震源断層よりやや離れた地点、例えば鉄道の耐震設計標準⁹⁾では30~40kmの地点での地震動を想定することになった。東海地震などを想定した場合、静岡市などではマグニチュード8クラスの震源域での地震動も考慮する必要があるが、マグニチュード8クラスの震源域での観測地震動が十分でなく、かつ断層から直接的に地震動を算定する手法の精度もその時点では十分ではなかったということもあって、この問題は将来の研究課題として先送りされることになった。

耐震基準の改訂において、次に問題となったのは、レベル2地震動に対して構造物の損傷度と残留変形をいかに精度良く予測するか、さらに構造物各部位の損傷度や残留変形と耐震性能の関係をどのように明確に関係づけるかという問題である。例えば杭基礎を有する単柱式のRC橋脚の地震力と変形の

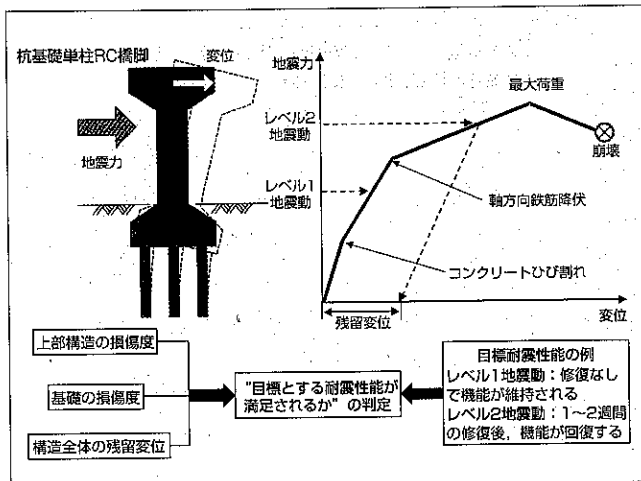


図3 構造物の損傷度および残留変位と耐震性能の判定

関係は一般に図3のように表わせる。橋脚の軸方向鉄筋の降伏等により徐々に構造物の剛性が減少し、最大荷重に達した後、崩壊に至る。ここで、目標耐震性能を例えば、「レベル2地震動に対して1~2週間の修復後、機能が回復する」と設定した場合、この耐震性能が満足されるか否かは、上部構造の損傷度と基礎構造の損傷度および構造全体系の残留変形等により判定されることになる。柱、梁および壁などの構造物の構成要素の塑性変形や終局耐力に関しては基準の改訂時点でそれなりの研究成果の蓄積がなされてきてはいたが、構造系全体としての大変形挙動、特に最大荷重付近から崩壊に至るまでの知見は不十分であった。土木学会や防災基本計画が提唱した性能規定型設計を具体化するためには技術的にはそれなりの割り切りが必要となった。鉄道の耐震設計標準では、上部構造と基礎構造の損傷度の組合せによって目標とする耐震性能が満足されるか否かを判定しているが⁹⁾、判定に用いた損傷度の基準値は暫定値と考えるべきもので、構造系全体の破壊過程が十分に解明された時点で改めて検討する必要がある。

液状化や側方流動に関しても未解決の課題が残されていた。特に側方流動が杭基礎に与える外力の特性についての知見が不十分であった。このため、道路橋¹⁰⁾では流動圧を、また鉄道施設⁹⁾では地盤変位を入力する方法など基準によって異なった方法が採用されることになった。

さらに、土木学会の提言では、盛土や擁壁などの土構造物にも性能規定型設計法の考え方をとり入れることが提唱されている。このためには土構造物の損傷度や残留変位を精度良く推定する方法が必要である。いくつかの改訂された基準の中で盛土などの残留変位を推定する方法が示されたが、推定精度を上げるためには今後一層の調査研究が必要である。

以上述べたように、上記の課題に関しての十分な知見と情報に基づいて耐震基準の改訂が行われたのではない。兵庫県南部地震後の毎年度の建設事業を執行するために新たな耐震基準が必要であった。実務の要請に応えるための見切り発車的な改訂であったと考える。これらの諸課題が十分に調査研

究され、研究者や実務者間でのコンセンサスが形成された段階で改めて耐震基準を改訂する必要がある。

兵庫県南部地震後の研究活動

耐震基準の改訂において未解決の課題が数多く残されていたこともあって、地震後の約10年間に文部科学省などによる大型の研究プロジェクトが推進されてきた。これらの研究プロジェクトでは、i) 地震動の予測手法、ii) 液状化や側方流動に対する構造物の耐震性、iii) 上部構造と基礎構造の塑性域での大変形挙動と破壊過程の解明、iv) 先端技術や新材料を用いた高耐震性構造の開発、v) 既存構造物の診断法と補強方法の開発、などのハード面の研究課題に加え、防災情報、緊急対応、リスクマネジメントおよび都市地震災害の軽減化の施策などソフト面の研究も実施された。

土木学会は、平成11年度より平成15年度にわたって実施された科学技術振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明による生活基盤の地震防災性向上に関する研究」において、研究統括機関として中心的役割を果たした。この総合研究には土木学会の他、独立行政法人の研究所、大学および民間企業など合わせて16機関が参画した。上記にあげた項目が主要課題となった。ピロティ構造をはじめとするコンクリート建物や鋼構造物の破壊過程¹¹⁾、側方流動による地盤変位の予測手法と基礎構造の耐震設計法¹²⁾などの課題に関し所期の成果を挙げることができた。また、高強度の鋼製芯材をアンボンド状態で橋脚コンクリート内に配置した構造¹³⁾や2重鋼管によるコンクリート充填橋脚など高耐震性能を有する新しい構造系¹⁴⁾が開発された。これら一連の研究成果は、土木学会が主催した「構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム(土木学会技術推進機構、第1回~第5回)の論文集、「地震防災・破壊メカニズムニューズレター第1号~第15号」およびホームページ(<http://faculty.web.waseda.ac.jp/hamada/index.htm>)に詳しい。

本総合研究には、現在文部科学省が兵庫県三木市に約400億の巨費を投じて建設している超大型の震動台「実大三次元震動破壊実験施設」を活用した研究の準備、具体的には大型模型の破壊実験における測定手法や震動台制御手法の開発も研究課題として含まれていた。この震動台の建設は兵庫県南部地震の直後に決定されたもので、構造物の大変形挙動や破壊過程解明するためには一つの有力な手段となり得ると考えられる。しかしながら、この施設を有効かつ効果的に活用するためには多くの課題が残されている。維持管理費に加えて実験に多額の費用が必要となることから、地震防災分野の他の研究を圧迫することなく研究費を確保することが必要である。また、数値解析と破壊対象部位のみの実験を組み合わせたハイブリッド実験手法など、構造物の破壊過程解明のための研究手法もすでにいくつかの機関で開発されている。これらの研究手法と適

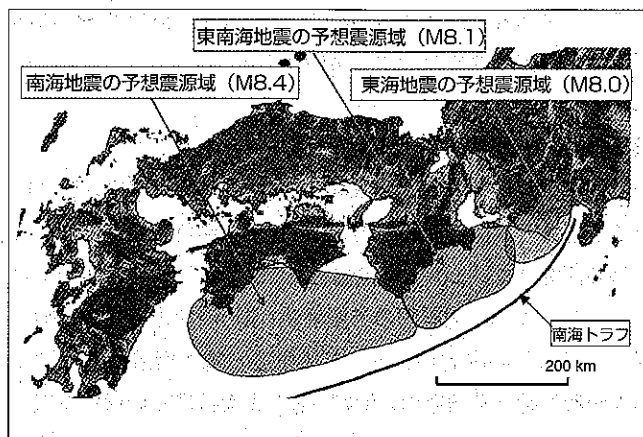


図-4 東海地震、東南海・南海地震の予想震源域(文献15)、16)に加筆)

切に組み合わせて大震動台による研究を実施することが肝要である。大震動台の運用にあたっては、現在これを所管している防災科学技術研究所の一研究所に留まらず、多くの研究者の参画を得た研究体制を整備することも重要であり、この点で土木学会や日本建築学会が果たせる役割も大きいと考えられる。

巨大地震災害への対応

図-4は中央防災会議の専門調査会より発表された東海地震、東南海地震および南海地震の予想震源域を示す^{15)、16)}。東南海地震、南海地震は過去の例によると同時に発生する場合と、ある時間差をおいて発生する場合があるとされているが、双方を合わせると図示したように震源域が東海沖から四国沖までの約600kmにもわたる巨大地震となる。また、東海地震と東南海地震が同時に発生する可能性もあることも最近になって指摘されている。

表-1は中央防災会議の専門調査会によるこれらの地震の被害推定結果の概要を示す。これによれば、建物の全壊棟数は東海地震で22万棟から26万棟で兵庫県南部地震の約12万棟の約2倍、東南海地震と南海地震が同時に発生した場合、全壊棟数は33万から36万棟で、兵庫県南部地震の約3倍という予測結果となっている。東南海・南海地震の場合は、津波による死者が最大で8600名と見積もられており、全体では1万2000人から1万8000人でこれも兵庫県南部地震の約3倍という予測結果になっている。

建造物の直接被害額は、東海地震で約22兆円、兵庫県南部地震の10兆円の2倍、東南海・南海地震では43兆円で約4倍である。

これらの被害の推定精度には多くの問題はあるが、東海地震や東南海地震が発生した場合、兵庫県南部地震の被害の2倍から3倍程度の被害が、場合によっては数倍の被害が発生する可能性があることを十分に念頭において対策を進める必要がある。

東海地震のようなマグニチュード8クラスのプレート境界型地震では新たに以下のような課題が提起されることになる。

表-1 中央防災会議専門調査会による被害の推定^{15)、16)}

	東海地震 (警戒宣言なし朝5時)	東南海・南海地震 (朝5時)	兵庫県南部地震	
建物全壊棟数	揺れ	17万棟	11万棟	
	液化・崖崩れ	3万8千棟	10万棟	
	津波	7千棟	4万棟	
	火災	1万~5万棟	1~4万棟	
	合計	約22万~26万棟	33万~36万棟	11万7千棟
死者数	建物の全壊	6700	6600	4915人
	津波	400~1400人	3300~8600人	0人
	火災	200~600人	100~500人	550人
	崖崩れ	約700人	2100人	37人
	合計	7900~9200人	12000~18000人	5520人
経済的被害	直接被害	約22兆円	約43兆円	約10兆円
	間接被害	約9兆円	14兆円	
	合計	約31兆円	57兆円	

第一の課題は、東海地震による震源近傍域の地震動の問題である。東海地震の震源域の直上に静岡市などの都市圏が存在する。プレート境界地震であると同時に都市直下型地震ということになる。前述したように、兵庫県南部地震後、耐震設計や耐震補強のためにレベル2地震動にマグニチュード7クラスの断層近傍域の地震動を考慮することになったが、マグニチュード8についてはやや離れた位置、鉄道の場合では前述したように30kmから40kmの震央距離を想定して地震動を決定した。このため、地域によってはレベル2地震動の見直しが必要になる場合が想定され、想定された地震動によっては兵庫県南部地震後行ってきた耐震補強の見直しが必要になると考えられる。

二番目の課題は、マグニチュードが大きくなることによる地震動の継続時間の増大の問題である。これによって建造物の損傷度が増大することになる。また、地震動が長く続くことにより、液状化の度合や側方流動の増加が予想される。兵庫県南部地震では臨海部の埋立地を中心に液状化が生じ、多くの高圧ガス貯槽、危険物貯槽が傾斜した。しかしながらこれらの貯槽の中で倒壊したものは一基もなかった。これは兵庫県南部地震がマグニチュード7.2の地震で地震動の継続時間が比較的短かったことによると考えられる。マグニチュード8クラスの巨大地震では、地震動の継続時間の増大によって危険物貯槽や高圧ガス貯槽の倒壊の危険性も増大することになる。

三番目の課題は長周期地震動への対応である。昨年の上勝沖地震では苫小牧市の製油所の貯槽の内容液が長周期地震動によってスロッシングを生じ、そのうち2基の貯槽が炎上破壊した。長周期地震動は、マグニチュードの大きい震源断層より長周期の波動成分が出され、これが地域の深い地盤構造により増幅されることにより発生する。貯槽の内容液のスロッシングによる火災は1964年の新潟地震でも発生しており、この当時からその危険性が認識されてきた課題であるが、内容液の液面を低下させる以外有効な対策がないことから、特別な対策が講じられてこなかった。

東京湾の周辺はその地盤構造より6~10秒程度の長周期地震動が発生しやすいとされている。東京湾の沿岸のコンビナ-

ト地区には現在浮屋根式貯槽が総計で600基余りあるが、筆者らの試算¹⁷⁾によると、東海地震と東南海地震が同時に発生するという条件下で、約1割の64基の貯槽の内容液がスロッシングにより外部に溢出するという結果が得られている。

長周期地震動は、超高層建物、長大橋梁および免震構造物など長い固有周期をもつ構造物の耐震性に関しても重大な懸念を投げかけている。超高層建物の耐震設計では長周期成分を有する観測地震動が考慮されてきてはいるが、東海地震など巨大地震を想定した場合、設計に用いられた地震動が十分な安全性を保障するものかどうかを検討する必要がある。このためには、長周期地震動の精度の高い予測が必要となる。

プレート境界型地震への対応として津波対策はきわめて重要な課題である。住民の避難方法や津波情報の伝達方法などの対策の整備が緊急課題であるが、護岸や堤防の耐震性の確保も重要である。地震動により護岸や堤防が破壊され、その後津波が来襲するという事態が考えられる。1993年釧路沖地震では液状化により津波防潮堤が変形し、水門が閉鎖できなかったという事態も発生した。

土木学会の活動

将来の巨大地震による災害の軽減に向けて、土木学会は2003年11月に「巨大地震災害への対応特別委員会」を設置した。以下の7つの課題に関して約2年間で調査検討を行い、調査結果を提言としてまとめ、社会に公表していく予定である。

- (1) 地震動の予測：長周期地震動およびマグニチュード8クラスの震源近傍域での地震動の予測を行う。
- (2) 耐震診断と耐震補強技術の総合化：兵庫県南部地震後に開発されてきた構造物の診断技術と補強技術を総合化する。さらに、長周期構造物の補強方法、基礎構造の補強方法等を開発する。
- (3) 大都市圏の地震防災性向上の方策の提言：東海地震では名古屋市が対策強化地域に、また東南海・南海地震では大阪府や京都府などが防災対策推進地域に指定されたことから、大都市圏の地震防災の在り方について土木学会としての提言をまとめる。
- (4) 自治体および民間事業者との連携強化：自治体および民間事業者等の地震防災対策を支援するとともに、防災対策実務者から地震防災対策立案のための要望を聞き、これを学会の活動に反映する。
- (5) 地震防災分野の研究開発の方向性に関する提言：地震防災分野の国全体としての研究の在り方、組織、研究費等について提言をまとめる。
- (6) 災害情報の共有化の方策の検討：各省庁、自治体などの協力を得て、災害情報を多機関で広域にわたって共有化するシステムについて提言をまとめる。
- (7) 地震防災教育：一般市民向けの防災教育のための教材作

りや講習会などを行う。

土木学会の特別委員会の課題のうち、長周期地震動に関しては日本建築学会と共同研究を実施している。この共同研究ではまず長周期地震動の予測手法についての検討を行う。次に東京、静岡、名古屋、大阪などを想定し、これらの地域で代表的な長周期構造物すなわち超高層建物、免震建物、長大橋梁および免震橋梁等を選定し、これらの構造物の動的応答、損傷の有無、損傷があるとすればその度合、残留変位等を推定する。耐震補強の必要性があれば補強方法を提案する。また本共同研究では、構造物の耐震性照査に用いる土木分野と建築分野共通の標準地震動の策定も予定されている。

兵庫県南部地震による大災害は残念ながら土木技術への信頼を大きく損なった。地震後約10年、土木技術者は信頼を回復するため構造物の耐震性向上や地震防災対策に懸命の努力を積み重ねてきたが、東海地震などの巨大地震への対応が十分という状況にはない。将来の地震で、再び兵庫県南部地震と同じ失敗を繰り返すことは許されない。土木学会は、関係機関の協力を得ながら、巨大地震災害の軽減に向けて社会のリーダーシップを積極的にとっていく必要があると考えている。

参考文献

- 1-内閣府中央防災会議：東海地震対策大綱，2003
- 2-内閣府中央防災会議：東南海・南海地震対策大綱，2003
- 3-阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告，共通編2，1編 地震・地震動，pp263，1998
- 4-鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，コンクリート構造物，1992
- 5-日本道路協会：道路橋示方書，V耐震設計編，1990
- 6-土木学会：耐震基準等に関する提言集，1996
- 7-中央防災会議国土庁防災局編：防災基本計画，1995
- 8-濱田政則：兵庫県南部地震後の耐震基準の改訂，土木学会誌，Vol. 87 No.3，2002
- 9-鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），1999
- 10-日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1996
- 11-福田俊文他：純ピロティ建築物の耐震設計法，第5回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，pp.205～210，2004
- 12-張至縞・濱田政則：液状化地盤の流動が基礎杭に及ぼす外力特性に関する研究，土木学会論文集，No.766/I-68，2004.7
- 13-一家村浩和・高橋良和・曾我部直樹：アンボンド芯材を活用した高耐震性能RC構造の開発，土木学会論文集，No.710，pp.283～296，2002
- 14-佐藤雄亮・依田照彦：ジャケット式継手を有するコンクリート充填鋼管柱のじん性に関する研究，第5回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，pp.175～180，2004
- 15-中央防災会議東海地震対策専門調査会：東海地震対策専門調査会報告，2003
- 16-中央防災会議東南海・南海地震に関する専門調査会：東南海・南海地震に関する報告，2003
- 17-濱田政則：臨海コンビナートの耐震性，消防防災春季号（8号），2004