

展 望

地震災害軽減方策のあるべき姿と今後の課題

A REVIEW AND FUTURE ISSUE ON SEISMIC IMPROVEMENT MEASURES
FOR INFRASTRUCTURES

佐伯光昭

Mitsuaki SAEKI

フェロー会員 博士(工学) 日本技術開発株式会社 取締役 技術開発本部副本部長
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

Key Words: seismic preparedness plan, seismic design,
seismic retrofitting, seismic performance & risk assessment,
opening administrative information to the public

1. はじめに

早くも阪神・淡路大震災が生じて5年半を経過した。大阪湾北部、六甲山南麓を東西に広がる扇状地上に高度に発達した都市域を揺るがした兵庫県南部地震は六千有余名の尊い人命を奪い、神戸およびその周辺の地域を壊滅状態に陥れた。直接的な被害額は10兆円、種々の間接的な被害までを含めるとおよそ30兆円に及んだものと推定されている。

千人を超える死者が生じた地震は1948年の福井地震以来のことであった。激しい地震動による密集した古い木造家屋の倒壊と地震後にこれらの地域で発生した火災の延焼拡大が犠牲者の数を増加させた。公共土木施設にも、1960年代以降のわが国の高度経済成長期に建設された鉄道や道路の橋・高架構造や地下鉄、港湾施設、上下水道などのライフライン施設にこれまでに見られない重大な被害が発生した。

20世紀後半からの科学技術の急速な進展は、わが国の社会・経済の著しい成長と社会活動の活性化と利便性の向上を生み出してきた。このような文明の進展は国全体の都市化をもたらした。一方で1964年の新潟地震、1978年の宮城県沖地震そして1983年の日本海中部地震の際には、ライフライン施設の被害によって震後の市民生活に及ぼす深刻な影響が明らかにされた。そして、1995年1月17日早暁に発生した兵庫県南部地震の際のあの悲惨な事態を経験することとなったのである。大地震に対する備えは、このような都市化が進み、人々の暮らしが便利になるという社会の急激な変化に追いついていない状況にある。

今から66年前、寺田寅彦はその著作¹⁾の中で、① 文明の進展につれて自然の猛威による災害の激しさを増大させること、② 人間は文明の進化に伴い自然を征服しよ

うとする野心を生じ、その結果として重力や種々の作用に耐えるような工作物を造営してきたが、それが災害の運動エネルギーとなるべき位置エネルギーを蓄積させ、結果として人間が災害を大きくしようとしていること、③ 20世紀の現代では日本全体が一つの高等な有機体であって、各種の動力を運ぶ電線やパイプが縦横に交差し、いろいろな交通網がすきまもなく張り渡されているありさまは高等動物の神経や血管と同様であり、その神経や血管の一方所に故障が起こればその影響はたちまち全体に波及するであろうなどの議論を展開した上で次のような示唆に富む文章を表している。

「文明が進むほど天災による損害の程度も累進する傾向があるという事実を充分に自覚して、そして平生からそれに対する防衛策を講じなければならぬはずであるのに、それがいっこうにできていないのはどういうわけであるか。そのおもなる原因は、畢竟そういう天災がきわめてまれにしか起こらないで、ちょうど人間が前車の顛覆を忘れたところにそろそろ後車を引き出すようになるからであろう。」

最近では阪神・淡路大震災の記憶や教訓が風化してきたという感が否めない。また、「この構造物あるいは建物は兵庫県南部地震にも安全に耐えられる。」という安全神話が新たなうごめきを見せ始めているようにも思われる。現在の複雑な各種のシステムから構成される大都市に大地震が襲ったとき、どのように被害の軽減を講じていくべきであろうか。上述した寺田寅彦の透徹で鋭い指摘を、21世紀に生きようとするわれわれ世代がどのように受け止め、克服していくかを真剣に考え、必要な行動を実践して行かなければならない。

兵庫県南部地震の際に生じた重大な被害状況を教訓に、土木学会では土木構造物の耐震基準等に関する二度にわたる提言(「第一次提言」、「第二次提言」)を公表した。こ

の提言を受け、国や関係する協会などで耐震設計基準類の改訂や新たな制定が積極的に行われてきた。それらの成果にもとづいて、道路や鉄道の橋・高架、港湾施設、河川堤防および上下水道などの各種ライフライン施設に対する耐震補強が広汎に推進されてきている。

この論文は、阪神・淡路大震災にいたるこれまでの地震災害の教訓にもとづいて、最近のわが国における巨額な公共財政赤字の膨脹、少子高齢社会の到来など、社会情勢の大きな変化の中で、地震災害の軽減方策のあるべき姿と課題について実務の立場から展望するものである。筆者の専門とする土木構造物の耐震設計や地震防災分野の技術面からの議論に加えて、上述した寺田寅彦の指摘した命題を克服するため、地震災害軽減の達成にむけた新たな行政施策やシステムについても論及している。

以下、2.でこれまでの地震災害の教訓を整理する。3.では、地震災害軽減に対する取り組みの現状評価と問題点を指摘し、4.ではその内容を踏まえた地震災害軽減への新たなパラダイムの提案を図る。次いで5.ではそれに含まれる課題とその達成に向けての解決方策の提案をまとめている。

2. これまでの地震災害から得られた教訓

(1) 耐震・地震防災技術の意味するもの

明治以降、西欧の近代的な土木技術が精力的に国内に移入され、社会資本の整備が驚異的な速さで進められた。新しい土木構造物が受けた大地震の洗礼は1891年に生じた濃尾地震で鉄道橋に落橋を含む大被害が生じたのが最初の体験であった。しかしながら、土木の分野で本格的な耐震設計が行われ始めたのは道路や鉄道の整備が全国的に進んだ時期に生じた1923年の関東地震以降のことであった。

土木構造物の耐震設計の基準化は新幹線、高速道路の建設やバイパスなどの国道整備が盛んに行われ始めた1960年代の高度経済成長期に入った頃から本格化した。1964年の新潟地震、1968年の十勝沖地震そして1971年の米国ロサンゼルス近郊に発生したサンフェルナンド地震での地盤の液化化現象を含む各種構造物の被災が耐震設計の重要性を広く認識させた。参考までに、表1に最近の主な地震の際に道路橋に生じた被害の特徴と耐震設計関連規定類の変遷の概要を示す。

設計基準類の内容は、この表からもわかるように、1978年の宮城県沖地震、1982年の浦河沖地震、1983年の日本海中部地震などの大きな地震の際に生じた構造物の被災

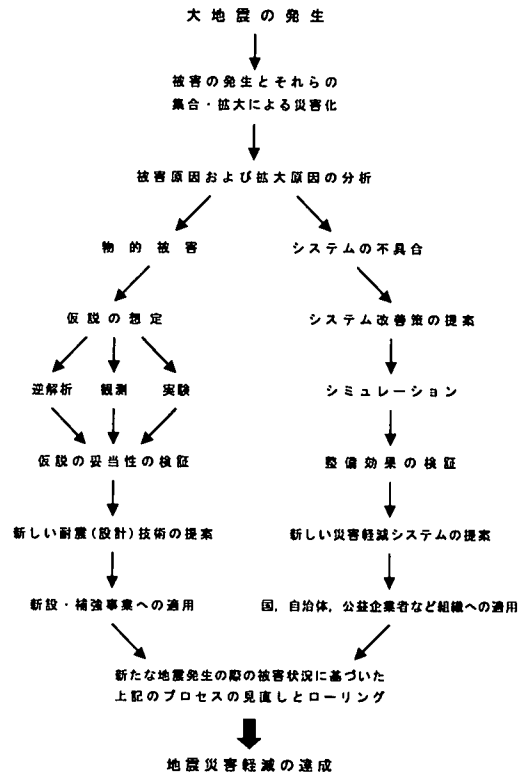


図-1 大地震の発生と地震災害軽減の因果関係

形態・程度への分析結果に基づき改訂されてきた。そして、あの1995年1月の兵庫県南部地震で、その時まで予想さえしなかった激甚な被害にみまわれた。

阪神・淡路大震災での事態は何を示唆するのであろうか。古い設計基準で設計され、現行の基準類の内容を満足していない構造物に被害が集中したのは上述した地震被害と設計基準改定の経緯の再現である。大きな地震のたびに予測し得なかった現象～被害の発生が認められるという「耐震設計＝もぐら叩き」論といわれてもやむを得ないのかもしれない。つまるところ、耐震設計は、地震による構造物の被災原因の究明という過程を経て、地震時挙動の予測手法に関する仮説の提示と実験や解析によるその妥当性の検証を通してはじめて設計法として提案、改訂されるのである。いわば地震という現象の発生する機会を実大規模の構造物に対する現場振動～破壊実験と捉えればわかりやすい。社会システムに及ぼす地震の影響についても同じようなことが言える。大地震のたびに生じたいろいろな対応や措置のまずさに対して改善策が講じられる。このようなプロセスを図-1に示す。耐震・地震防災技術の現状は、これまでの大地震における被害や欠陥の原因究明に関する分析結果の蓄積であると言えよう。

表-1 主な地震による道路橋の被害形態と耐震設計法の変遷

西暦	地震名	マグニチュード M	最も特徴的な被害形態	耐震設計法
1920	関東地震 (1923年)	7.9	橋梁本体の強度不足による被害(落橋数:17のうち火災によるもの9橋)	1926「大正15年道路構造に関する細則案」 → 地震荷重が初めて規定される
1940	福井地震 (1948年)	7.3	基礎を含めた下部工としての強度不足による被害(落橋数:7)	1939「昭和14年鋼道路橋設計示方書案」 → 設計震度の標準化 1956「昭和31年鋼道路橋設計示方書」 → 地域、地盤条件に応じた設計震度の補正
1960	新潟地震 (1964年)	7.5	液状化による落橋, 下部工の沈下, 傾斜(落橋数:3)	1980「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」 ・液状化に対する設計法の明確化 ・主鉄筋段落し部の設計法の改良 ・動的解析入力力の規定 ・RC橋脚の変形性能照査
1970	宮城県沖地震 (1978年)	7.4	支承部の被害 RC橋脚の損傷(落橋数:1)	1990「道路橋示方書・同解説 V.耐震設計編」 ・震度法と修正震度法との区別を撤廃し、応答を考慮した震度法に一本化 ・液状化判定法の洗練化 ・設計震度算出法の洗練化(「設計振動単位」の概念の導入) ・動的解析による照査の明確化 ・RC橋脚の保有耐力照査法の明確化
1980	浦河沖地震 (1982年)	7.1	RC橋脚の主鉄筋段落し部の損傷	1996「道路橋示方書・同解説 V.耐震設計編」 ・設計地震入力として内陸直下型地震を想定したものを追加
1990	日本海中部地震 (1983年)	7.7	液状化による被害	・従来の震度法に加え、地震の影響の大きい橋脚、基礎、支承部、落橋防止システム等の部材については地震時保有水平耐力法を適用
1990	釧路沖地震 (1993年)	8.0	RC橋脚の主鉄筋段落し部および支承部の損傷	・その他、新たに規定された事項 a. 非線形性の効果を含んだ挙動解明のための動的解析法 b. 基礎の地震時保有水平耐力法による耐震設計に適用する液状化判定法 c. 地盤流動の影響を考慮した液状化による基礎の安定性照査法 d. 免震設計法 e. RCラーメン橋脚、鋼製橋脚および各種基礎に対する地震時保有水平耐力法 f. 支承部、落橋防止システムの設計方法
1990	兵庫県南部地震 (1995年)	7.2	RC橋脚部の損傷、圧壊 鋼製橋脚の損傷、圧壊 基礎杭の損傷 (落橋数:9、46径間) 鋼製支承および落橋防止構造の損傷 埋立て護岸付近の地盤の液状化による流動現象に起因する橋脚の傾斜と基礎杭の損傷	

(2) 兵庫県南部地震での被災状況の特徴と教訓

a) 構造物の破壊の恐ろしさ

兵庫県南部地震は不幸中の幸いにも午前5時46分と早朝に発生したことが公共土木施設の被災による人的被害を減らす要因となった。橋や高架構造の被災により貴重な人命を失われた方の数は16名に留まった。もしも、あと2時間ないしは3時間遅れてあの地震が発生していたらどのような事態を招いていたであろうか。当日は月曜日の朝であり、ラッシュアワーの時間帯と重なることに

なる。新幹線ではおそらく朝9時台には上下線あわせて10本以上の列車が運行されているはずであり、少なくとも1万人を越す乗客が影響を受けたことになる。落橋や激しい損傷を受けた箇所では車両の脱線や転覆によって乗客の人命のみならず、沿線の街路や住家にも被害を及ぼし、それによる通行者や住民の人命にも影響を与えたことが考えられる。地下鉄の大開駅の崩壊についても、多くの乗客に大きな影響と混乱を引き起こしたことは間違いのない。また、阪神高速道路神戸線、湾岸線では、あ

わせて数千台の車両が走行していたものと考えられ、多くの利用者が被害に巻き込まれたはずである。このような公共施設・構造物の破壊につながる被災は、地震の発生する時間によって、それらを利用する不特定多数の人々の人命の喪失につながることを改めて強く認識すべきである³⁾。

b) 構造物被害の特徴と教訓

高速道路、新幹線の高架橋の崩壊や落橋防止構造の損壊による桁の落下そして地下鉄の鉄筋コンクリート製（以下、RC と略）の中柱のせん断破壊による躯体の崩壊などは、土木技術者の誰もが自らの眼を疑う光景であったと言っても過言ではあるまい。高架橋の基礎杭の損傷や液状化の発生とその直後の地盤流動による橋脚の傾斜と東灘下水処理場の各種施設の被災も衝撃的な状況であった。また、上・下水道、都市ガスなどのライフライン施設の被害は、復旧までに長い期間を要した。このような事態は住民に深刻な精神的打撃を与えたばかりでなく、日常生活にも大きな支障を生じさせた。

これらの被害は建設時点での古い設計基準で造られたいわゆる既存不適格の構造物に集中したことがその後の調査で明らかにされた。RC 橋脚の主鉄筋段落し部や地下鉄躯体の RC 中柱、裏込めや基礎地盤を置換した砂質土の液状化の影響を受けた港湾の護岸さらには埋設管の被害がこの範疇に入るものと考えられる。この地震が発生する前の研究成果からある程度予想することができた現象として、鋼製橋脚の損傷、液状化に伴う地盤流動の影響、基礎杭の損傷などがあげられる。ちなみに、落橋防止構造の被害については、作用した地震による慣性力の大きさも含め、遺憾ながら被害を受けて初めて現象的な理解をすることができた現象と考えられる。

上述した被害の多くについては、地震動の強さがこれまでの設計で想定していた範囲をはるかに超えるものだったことが主な原因であることは確かである。直下型地震が生じた場合、震源域近傍の地震動の強さに対して、構造特性の如何によらず震度法～許容応力度設計法を機械的に適用してきた当時の体系が結果として無力であった。しかしながら、鉄筋コンクリートの材料・品質の面から施工方法やその監理面にも必ずしも十分でないところがあったという指摘³⁾もある。構造物の安全性確保には、その前提として、施工が適正に行われなければならないことを改めて認識すべきである。

一方、道路の橋・高架については、1980年以降の規定によって耐震設計されたものについては被害は一般に軽微であったことが指摘⁴⁾されている。また、最近、整備

が進められてきている港湾の耐震護岸についても問題となるような変状は認められていない。1970年代半ば以降開発され、実用化された耐震継手付ダクタイル鉄鋼管を用いた水道管路では、大きな地盤変状の発生にも耐え、ライフラインとしての機能を全うした⁵⁾。なお、建物も1981年に定められた現行の耐震設計規定で築造されたものはそれ以前の規定で建てられたものよりも被害が少なかったことが詳細な被害の分析結果⁶⁾から明らかにされている。これらの大地震に対する弾塑性設計法の開発による耐震技術の向上とそれらを取り入れた現場の熱意は災害軽減に大きな貢献を果たした。

「日本人は失敗を学習しない国民である。」という柳田邦男の厳しい指摘⁷⁾がある。われわれは過去の震害をどのように捉えてきたのだろうか。過去の地震による被害を失敗とする見解については議論がある。ただ、兵庫県南部地震に生じた構造物の激甚な被害に対して、土木技術者の多くは、自らの良心としてそれら事態の発生を想定外のこととするには割り切れないものがある。

問題は補強の必要性は認識していたものの、社会的、経済的な制約の中で事業実施の優先度の判断から補強の実施が神戸などの被災地域で遅れていたことにある。耐震補強の設計に用いる直下型地震の地震動の大きさを適切に評価することができたかという疑問はある。しかし、古い基準で建設された構造物の耐震補強が最新の知見によって適切に行われていれば、あのような甚大な被害の発生を軽減できたものと考えられる。

c) 土木学会「第二次提言」の概要

兵庫県南部地震の際に生じた重大な被害状況を教訓に、土木学会では、耐震基本問題等検討会議を設置し、①耐震性能照査で考慮すべき地震動、②耐震設計法、③耐震診断と耐震補強、④地震防災性の向上、の各分野の課題に対する対処の基本方針を検討した。その成果が集約されたものが土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」である。耐震設計にはレベル1、レベル2の二段階の地震動を採用し、このうちレベル2では震源断層近傍の地震動を海洋底のプレート境界の大地震による地震動に加えて新たに考慮すること、耐震設計では、構造物の一部が損傷過程に入ることを想定した耐震性能の照査を行うこととされた。耐震補強の水準については原則として新設の構造物と同じものとする、また、地震防災性の向上には、地震災害アセスメント制度を導入することや危機管理体制の改善によって被害拡大を防ぐ方策を整備することなどが提案された。

(3) 耐震安全性に対するアカウンタビリティの必要性

構造物の耐震性能を評価する際には、外的な作用としての地震の影響、それを受ける周辺地盤を含む構造物の挙動に大きなばらつきがあることに留意しなければならない。

構造物の地震時の挙動に大きな影響を及ぼす地震動の予測も技術的に難しい。これは、地震が地殻の脆性破壊による再現性の無い自然界の物理現象で、しかも、構造物が建設される地盤や地形がどれ一つ同じと言えないからである。さらに地盤や使用材料の物性のばらつきとを考慮合わせると大地震の際に生じる周辺地盤や基礎を含む構造物の挙動を‘正確’に予測し、耐震安全性を‘完全に’保証することは不可能である。言い換えれば、構造物の耐震安全性の確保とは、何らかの被害の発生を想定したリスクの下での社会的かつ工学的な意思決定であり、絶対的な安全性を保障することを意味するものではない。

したがって、耐震安全性を確保するという行為は、定められた予算の制約のもとで、安全性確保の信頼度を最新の知見、技術力および創造力の発揮により最大限高めながら、最適な費用対便益効果を求めることを目標とするものである。これを達成して行くには、構造物の地震時挙動の予測と安全性の評価の精度向上に向けた調査・研究への不断の努力が必要である。さらには設計技術者がこのことを十分理解するとともに、土木学会などの学協会や管理者、企業者も社会一般に積極的に働きかけることが必要である。

耐震安全性の確保の精度を高めるには、各種要因に対する‘ばらつき’——地震の作用、構造物の応答性状および地盤や構造部材の使用材料の強度や耐力などそれぞれに関する——の影響を適切に評価した破壊を含む終局状態に対する安全性の水準に対して、構造物の重要度に応じた一定の余裕を確保することが基本である。種々の経験の蓄積に基づく工学的判断により、最悪な事態の発生の可能性を極力最小化するような設計上の構造細目の配慮やフェールセーフ的な対策が講じられなければならない。

このような点を考慮して、一旦被災した場合に使用ができなくなる構造物の崩壊や人命に関わる重大な損傷が生じないように、例えば、橋・高架などに対する落橋防止構造等の対処が講じられてきている。また、地震後に速やかな復旧対応を講じることができるよう、震後対策の進め方や復旧工法などをまとめたマニュアルなどの整備も進められている。

しかしながら、上述した土木構造物の安全性確保の限界や耐震安全性確保の基本的な考え方について、社会一般には十分知らしめられてきていないように思われる。阪神・淡路大震災の前までは専門家を含む国民の大半が少なくともわが国の地震工学そして耐震技術は世界的にも先進的な水準を有しており、1923年の関東地震級の大地震が生じて安全だと信じ込んでいた。1989年米国サンフランシスコ湾岸地域を襲ったロマリプリアタ地震や兵庫県南部地震のちょうど1年前に発生したノースリッジ地震の際に生じた高架橋の被害状況に対して、日本では決してあのような被害は生じないという意識をわれわれ技術者が抱いていたことは事実である。この趣旨のわが国専門家のマスコミでの発言に対し、阪神・淡路大震災の後で識者から厳しい批判⁹⁾を受けることとなった。冒頭に紹介した寺田寅彦の言を待つまでもなく、自然現象としての地震の脅威に対する畏敬の念と、自らの技術力に対する謙虚さ、誠実さの大切なことを改めてかみしめるべきであろう。

1999年に相次いで生じたトルコ、台湾の大地震では断層運動による土木構造物の被害が目立った。特に、台湾中部では多くの道路橋が断層両側の地盤の‘ずれ変位’の発生により、壊滅的な被害を受けた。このような断層運動は、わが国でもこれまで多くの地震で認められている。中でも1891年濃尾地震の際、岐阜県根尾谷の水鳥地区に鉛直方向6m、横方向に4mの相対変位を生じ、延長400mにも達する断層崖が現れた事例が代表的である。それ以降、兵庫県南部地震に至るまで、関東地震、北丹後地震、北伊豆地震、鳥取地震、福井地震、伊豆半島沖地震、伊豆半島東方沖地震などで断層周辺での地盤の相対的な変位の差が生じた。

幸いにして、わが国では、これまでは、土木構造物には地震の際の断層運動による人命に影響を及ぼすような大規模な被害はあまり生じなかった。しかしながら、上述した台湾の状況から、わが国でもこのような断層運動による被害の発生の可能性は決して低くはないものと考えられる。断層運動による‘ずれ変位’の発生に対する耐震設計上の対策については、その量にもよるが、それが数mにも達すると物理的にも限界がある。

問題は「大地震にも安全である。」とか「大地震にも耐えられる。」というこれまで行政や管理者、企業者が社会一般に説明してきた表現の意味が曖昧なことにある。土木構造物は社会資本の根幹を構成するものであるから、それらの使用者や受益者である国民は耐震安全性の水準について知る権利を有する。したがって、公共施設の管

理者や公益事業体は、耐震安全性の確保には限界があること、そして目標とする耐震性能の内容を具体的かつわかりやすく国民に説明しなければならない。より具体的に言うならば、極めて稀にしか起きない内陸直下型地震を含む大地震に対して、① 激しい地震動や断層運動による構造物に生じる被害～損傷の受忍限度(どこまで壊れてよいのか、どの部位が壊れていけないのか。)をどの程度に設定しているのか、② 特に地震後の機能に着目した構造物の耐震性能をどのように設定しているのか、③ 被害想定に適用する各種の前提条件、たとえば地震の起きる時間帯や季節として影響を受ける地域特性(大都市かそれとも山間部か)の考え方と具体的な被害の発生シナリオはどのようなものか、などについて、社会一般に対してわかりやすく説明する必要がある。

1999年2月に建設省から「公共事業の説明責任(アカウンタビリティ)向上行動に関する指針⁹⁾」が公表された。国土条件と社会資本の整備実態の明確化が謳われ、わが国の脆弱な国土条件や少子・高齢社会の到来を踏まえ、社会資本整備の現状について国民に情報を提供し、認識の共有を進めることとされている。具体例として洪水のハザードマップ(災害予測図)を用いて河川沿いの地域住民に危険性を開示することが示されている。大地震に対しても、このような動きが波及して、公共施設や構造物の耐震安全性の実情についてもアカウンタビリティが発揮されることを大いに期待したい。

(4) 供用中の各種施設・構造物に対する耐震診断・補強の重要性

わが国の供用中の土木構造物に対する耐震診断については、1971年のサンフェルナンド地震における高架橋の大規模な落橋被害をきっかけに、同年に道路橋の震災点検が実施されたのが最初であった。以来、国の重要施策に取り上げられ、国内外の地震によって大きな被害が生じるたびに震災点検が行われることとなった。その後、道路橋以外の道路施設、鉄道施設、港湾施設などにも点検の対象が広がり、最近では兵庫県南部地震の後に、全国的に各種公共土木施設に対して防災点検が行われた。

耐震補強については、道路橋では1972年の道路橋耐震設計指針・同解説の刊行前に建設された橋に対して落橋防止構造を設置することから始められ、1980年代後半には概ね全国的に完了していた。この他、1986年度の点検結果を受けて RC 橋脚の主鉄筋段落し部の補強が、また1991年度の点検結果から液状化に対する基礎の補強がそれぞれ開始されていた。兵庫県南部地震以降は土木学会

「第二次提言」の内容を踏まえて、基本的に新設の場合と同じ考え方で橋脚躯体、落橋防止構造の補強が行われている。

河川堤防や港湾の護岸、石油コンビナート等の危険物貯蔵施設についても、兵庫県南部地震の後、液状化の危険性に着目した点検と補強工事が実施された。また、上・下水道施設や電力・都市ガス・電話などについては、1983年の日本海中部地震を契機にして液状化を主な対象とした耐震診断・補強が各企業体で鋭意進められている。

地震災害軽減に向けて耐震診断・補強の重要性は誰もが認めるところである。現在の社会機能を支えている公共土木施設の多くが近代的な耐震設計法の体系が導入される1960年代半ば以前の基準類によって設計・施工されたことが問題である。今後は国および地方自治体の多額な財政赤字の状態の下で、これらの大地震に対する備えを含む維持管理および更新をどのように合理的に進めて行くかが大きな課題となる。

(5) システムの概念に根ざした耐震性能確保の重要性

地震に強い構造とするには全体系を力学的にねばり強い、冗長度の高いシステムとすることが基本である。重要な構造物では、対象となる構造物の周辺地盤を含む個々のさまざまな条件を適切に考慮して、地震の影響を大きく受けにくい構造系にしなければならない。桁、梁および柱、壁などの構造部材の配置と使用材料の設定、基礎の形式や構造・材料諸元そして免震・制震装置の採用などの耐震構造計画を適切に行うことが設計のプロセスの中で大切な課題となる。

わが国では、最近10年ぐらい前から大地震に対する耐震設計の基本として、特定の部材に損傷を意図的に生じさせ、地震の応答エネルギーの吸収を図ろうとする考え方が採用されてきている。この方法は建築物でも1981年から採用されており、兵庫県南部地震の際にもその有効性は確かめられている。

ちなみに、橋や高架では、兵庫県南部地震以後、耐震性に有利なダンダンシーに富む多径間連続構造として桁と橋脚を剛結とするラーメン形式もしくはゴム支承を用いる形式が採用される場合が多くなっている。特に、前者の場合には設計で想定した大地震時には塑性化する領域での挙動が確実に発揮されなければ意味が無い。設計で想定した使用材料の強度を正確に発現させること、また、配筋などの構造細目などが確実に行われることが設計の前提である。これらを確認するため施工監理を適切に行う必要がある。いわば、構造システムとして地震

表 - 2 主な公共土木施設の耐震設計基準類の見直しおよび耐震補強の現状

施設	耐震設計基準類の見直し	耐震補強の状況
道路橋	平成 8 年 12 月道路橋示方書・同解説改訂。重要度を 2 分類し、それぞれに目標とする耐震性能を設定	平成 7~9 年度に震災対策緊急橋梁補強事業 3 箇年計画を定め有料道路 21,800 橋、一般国道 7,600 橋に対して耐震補強を実施。 平成 8~9 年度に実施した道路防災総点検に基づき平成 10 年度からの道路整備 5 箇年計画内で緊急性の高い役 38,500 か所に対策を実施するとともに緊急輸送道路上の橋梁について耐震補強を概成する予定
鉄道施設	平成 10 年 12 月に 2 段階の地震動を考慮した鉄道構造物等設計標準(耐震設計)を策定	新幹線および輸送量の多い線区において、高架橋 11,000 連の落橋防止工設置。開削トンネルの中柱 53,000 本の耐震補強を実施予定。このうち、新幹線は平成 10 年度末で完了、在来線等については平成 10 年度末で 70%実施済みで平成 12 年度までに完了予定
港湾施設	平成 11 年 4 月に耐震基準を改正して公表	全国 177 か所の港湾のうち、緊急物資輸送に対応した耐震強化岸壁 358 バースを実施予定。 平成 9 年度末で 109 バースが完了。27 バースで事業中。概ね平成 22 年中に概成予定 この他国際コンテナターミナル等についても耐震改修を予定
河川堤防	平成 9 年 9 月に河川砂防技術基準(案)を改訂。震度法(レベル 1 地震動)に基づく静的解析を導入。	第 9 次治水事業 7 箇年計画(平成 9~15 年度)において 700km 実施予定。 耐震性能の目標として地震で壊れても堤内地への浸水による二次災害を生じさせないこととしている。
水道施設	平成 9 年 3 月に水道施設耐震工法指針の改訂	21 世紀に向けた水道事業の長期目標により耐震改修を実施することとしている。管路の耐震化については石綿管等の耐震性の低い管路の布設替え、システム全体については管路のループ化等の推進を図る。
下水道施設	平成 9 年 8 月に下水道施設の耐震対策指針と解説を改訂	左記の指針に基づく既存施設の補強、改築などによる耐震性向上を図るとともに、幹線管渠や処理場のネットワーク化などにより下水道のシステムとしての地震対策の推進を図る。

注：表の内容は「国土庁編：平成 12 年版 防災白書」¹⁾による。

時の挙動(パフォーマンス)を設計で想定するものになるように構造細目、施工方法を適切に定め、それらを守って正しく施工することが求められる。ゴム支承の採用については、地盤条件が軟弱でしかも地表から厚く堆積しているようなところに計画することは桁端部の水平変位の著しい増大を招くことになるため、減衰性能を付加するといった設計上の配慮が必要である。

関東地震の際、東京の日本橋などの明治末期に建造された石造アーチ形式には被害が生じなかった。昭和の初めに、新潟市内の信濃川の最下流に RC 連続アーチ形式で施工された万代橋が設計では地震荷重は考慮されなかったにもかかわらず、1964年の新潟地震の際には橋台部分で変状が生じたものの、交通機能には影響がなく震後の救急・救援や各種復旧活動などの重大な使命を果たすことができた。日本橋も万代橋も 21 世紀を間近に控えた現在、健全にその機能を果たしている。

現代を生きるわれわれ設計技術者は情報技術や解析技術の進展に眼を向けるばかりでなく、このように時代の

変遷を超越して、先人の慧眼に対して敬意を表すことが大切である。単に、コスト削減に目を奪われるのではなく、安全性と経済合理性の両面から、真摯に技術の本質とは何かを追求する姿勢を大切に保持すべきであろう。土木学会や地盤工学会などで、これまで刊行されている地震被害調査報告書の内容に改めて目を向け、大きな被害ばかりでなく、軽度なものについても状況や原因を把握しようとする態度が求められる。

3. 地震災害軽減の取り組みの現状と問題点

(1) 「第二次提言」に取り上げられた課題について

a) 耐震性能照査に用いるレベル 2 地震動の考え方

レベル 2 地震動については「第二次提言」を受けて、各種構造物の耐震設計基準類の整備・改訂では、沿岸海底のプレート境界に生じるマグニチュード 8 級の大地震によるものと、内陸直下に震源を有する地震動によるものからなる二つのタイプの地震動が採用されている。詳細

に眺めると、各種基準類の対象とする構造物の特性と関係して、設計に適用する考え方の相違が見られるようである。最近、土木学会地震工学委員会レベル2地震動検討小委員会では「第二次提言」を受けて、レベル2地震動の設定の考え方について検討を進め、各種構造物の耐震設計に共通に適用すべき方針¹⁰⁾をまとめた。この内容は今後の基準類の整備に大いに参考になるものと思われる。

b) 設計基準類の整備・改訂と耐震診断・補強事業

国においては、阪神・淡路大震災以後の土木学会の取り組みや建築物の耐震設計法に関する基本的な考え方を踏まえて、平成7年度に「防災基本計画」を改訂した。その中で、レベル1およびレベル2の二段階の地震動を想定し、前者に際しては機能に重大な支障が生じず、後者に際しては人命に重大な影響を与えないとする基本的な目標が定められた。これに基づいて施設ごとに耐震設計基準類の見直しが行われた。既存の施設や構造物に対して、この新しい耐震性能照査の考え方を適用し、耐震性が十分でないものには、耐震補強が進められている。表-2にこれらの現状をまとめる。

このうち、鉄道施設および港湾施設の基準では建築基準法の改訂とあわせて、性能照査型設計法の体系としてまとめられた。道路橋でも平成8年に改訂された現行の道路橋示方書・同解説を平成12年度中に性能照査型に移行させることを目指して現在、精力的に改訂作業が進められている。この性能照査型の設計体系は近年、西欧諸国でWTOの条約締結による国家間の通商障壁を撤廃するための施策として、建設市場の開放の観点から採用されつつある。これは構造物の要求性能に基づいて定める各種の限界状態における構造物の挙動や機能の具体的達成目標を満たすように設計する方法である。対象構造物の重要度に応じて定められる確保すべき安全性の水準と具体的内容が要求性能である。この内容についての合意が広く社会一般の間で形成され、それらが設計基準類にわかりやすい形式の「性能照査型設計」として表現されることは2.(3)で述べたアカウンタビリティの具現化という観点からも望ましい。基準類の中で安全性の確保を含む耐震技術の内容と目標水準について、管理者、企業者が広く社会一般にわかりやすく説明することになるのである。

c) 地震防災性の向上

阪神・淡路大震災以降さらに地震災害に強いまちづくりをより効果的に推進するために、国では密集市街地における防災街区の整備促進の他、公共・公用施設の耐震化および防災基盤の整備を行う緊急防災基盤整備事業、

計画的に公共施設の整備を行う防災まちづくり事業の推進を行っている。地方公共団体は、① 地域防災計画の見直し、② 住民の防災活動の活性化、などに対する地方財政措置による支援を国から受け、防災対策の強化を進めている。その他、国では、地震直後の応急対策への備えとして、a.初期情報の収集・連絡体制の改善・整備 b.初期情報収集システムの航空機や画像処理などの活用による高度化 c.被害の早期評価システムの整備 d.情報・通信基盤の充実・強化 等々の一連の施策¹¹⁾を進めてきている。

「第二次提言」では、① 地域安全性の向上をはかるための「地震災害アセスメント」制度の導入や都市施設の計画基準の見直し、② 危機管理体制の改善による被害拡大の阻止、③ 既存構造物の耐震補強費用や復興費用の負担ルールの明確化、の必要性を提言している。上述した国や自治体の施策と比べてみると、残念ながらこの②以外には未だに具体的なものは見られないようである。

(2) 地域防災計画の問題点

阪神・淡路大震災の教訓として寺田寅彦の貴重な指摘を地震災害軽減に生かすには、地域の生活者の視点から考える必要がある。そのために、国や自治体はその地域の地震に対する抵抗性や弱点を日常から地域社会に広くPRしておく必要がある。その地域で想定する大地震の規模や震央(源)の位置の情報、その地震が発生する切迫の度合い、それが発生した場合の被災の具体的な状況が被害想定として明らかにされなければならない。

この被害想定は国が定めた災害対策基本法で自治体に策定が義務付けられている地域防災計画の中で示される。一般的な地域防災計画の内容は、① 総則：目的、防災業務機関の業務の大綱、自然的・社会的特性、被害想定など、② 災害予防計画：未然防止対策、被害軽減対策、震後の迅速かつ効率的な応急～復旧活動のために平常時から措置しておくべき対策の内容・方法、③ 災害応急対策計画：警戒時、発災時の活動内容・方法、④ 災害復旧計画：発災時(復旧期)の復旧内容・方法、などから構成されている。

このように被害想定の結果は震前対策としての災害予防計画、震後対策としての災害応急対策計画や災害復旧計画の前提となる重要な意味を持つものである。

日野¹²⁾は、地域防災計画で定められてきた内容が阪神・淡路大震災の際に役立たなかったとする指摘が各方面から出されたことに着目して問題点を整理している。この

中で被害想定について、想定される被害程度が示されておらず、都道府県レベルのものでも精度が粗く、市町村レベルに適用するには適切でないとしている。また、予防対策実施の優先順位や目標水準が明確でないことも指摘している。坪川¹³⁾も現在の地震被害想定には、① 危険情報の具体性に欠けること、② 災害の時間経過に伴う状況変化の把握が不十分なこと、が問題であるとし、前者の理由として、a. 想定の内容が複雑で感覚的に捉えにくいこと、b. 被害が住民の生活のサイズに適合した形で視覚化されていないことの二点を挙げている。

筆者はこの他に、当該地域に含まれる国の省庁(指定行政機関)や公団、公益企業者(指定公共機関)などが管理する施設・構造物に対する被害想定がどのように地域防災計画に反映されているかという点を指摘したい。この問題には、① 被害想定の対象とする地震が自治体とこれらの自治体以外の機関とで整合しているか、② 管理主体の異なる同一施設、たとえば道路施設で全国的に行われる点検・診断手法と地域防災計画の被害想定的手法が整合しているか、という二つが含まれる。

つまるところ、3. (1)に示した耐震設計基準類で想定している地震動が地域防災計画で想定しているものと同じかどうか、そしてそれを含めた耐震補強の前提となる耐震診断の考え方と地域防災計画での被害想定の方法と整合しているかという問題である。自治体の地域防災計画ではこれらは整合していない場合が多いようである。この原因は、公共土木施設・構造物の耐震診断や補強事業の計画が国レベルで定めたルールで行われている場合が多いこと、地域防災計画の被害想定では既往の地震による被害状況に基づく統計的手法を用いる場合が多いことといった手法の違いによるものである。このような状況は自治体固有の地震環境や社会・経済的な特性が自治体管理のこれら同種の施設に影響が及ばないことが多いことを示すものである。言い換えれば、自治体が管理する施設や構造物でも耐震診断や補強設計に想定する地震動および安全性照査手法と基準が国レベルの基準類に準拠せざるを得ない状況が多い。よって、同じ自治体であっても地域防災計画に基づく防災業務と土木施設・構造物の管理主体が行う維持管理業務とリンクしていないことがありうる。これは実際に行われる予防対策としての耐震点検や補強事業が地域防災計画で定められている災害応急対策計画や災害復旧計画の内容と整合しないおそれにつながる。

このように、わが国の地域防災計画は地震による公共施設や構造物の被害の軽減という事前の対策については、

国の影響を大きく受けていることが理解されよう。これからは地域住民に対する具体的な耐震安全性の現状の情報公開によって、確保すべき安全性の水準とコストの関連について自治体単位で合意形成を求めていく努力が国、自治体、公営企業者に求められるべきであろう。

この他、耐震性が不十分と評価された施設・構造物の位置や安全性の程度が地域防災計画の中で明確に特定されないことが多いことも問題である。このことは2. (3)にも述べたが国管理の施設や構造物にも当てはまる。これでは、地域住民や利用者の防災意識が向上しないのもやむをえないのではあるまいか。

米国のFEMA(連邦緊急事態管理庁)では「総合地震対策指針 企業編、自治体(郡、市および大都市)編¹⁴⁾」: Comprehensive Earthquake Preparedness Planning Guidelines for Corporate, County, City and Large City」を定めており、市および大都市編では準備および被害軽減(地震が発生する数年～数十年前から準備しておくべき活動)の対策の一環として地震安全対策および構造被害軽減を課題に挙げ、必要な業務の内容と役割分担を具体的に示している。大都市編では問題となる建物と構造物とを特定し、危険度にもとづく分類と公共の安全に対するリスク評価を掲げていること、米国土木学会からの支援を受けることなどが明記されているのが特徴である。

地域防災計画の中ではこのように大地震が生じた場合の被災状況を極力、具体的かつ発災後の時間経過に応じたシナリオとしてわかりやすく提示すべきである。米国カリフォルニア州で行われているサンフランシスコ湾岸地震対策事業(Bay Area Regional Preparedness Project : BAREPP)では1987年にサンフランシスコ湾岸北西部に位置するヘイワード断層の活動によって生じるマグニチュード7.5の大地震を想定したシナリオが作成された¹⁵⁾。この特徴として、① 想定地震が生じた場合の各地点での地震の揺れ具合を詳細に解析していること、② 高速道路、家屋、学校、病院、水道、ガス、電力、電話などの主要なものについて個別に被害状況を分析していること、③ これらのデータがコンピュータにより一元管理され、机上演習の際には随時、出力して眺めることができること、④ 一般市民への公開がなされており、誰でもこのシナリオを入手できること、などが挙げられる。

このシナリオには極めて具体的な地震の被災状況が示されており、地域住民は日頃から地震の際の状況に関心を持って行動することができる。

都市や地域の地震災害軽減には震前の予防～補強対策と震後の応急対策そして復旧・復興対策をバランス良く

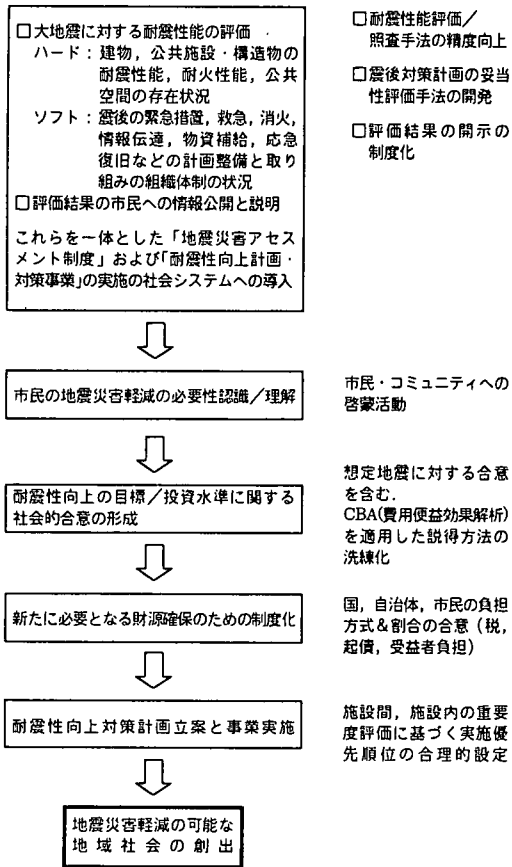


図-2 地震災害軽減可能な地域社会の創出に向けた新たな制度／事業の進め方

推し進めていくことが必要である。これまでわが国の地域防災計画では、ややもすると技術的な色彩の強い耐震診断・補強といったハードな予防対策に比べて、それ以外の総務～事務処理的なソフトの行政対応に重点が置かれた感が否めない。

地域防災計画を名実ともに地域の地震災害軽減に関連する施策を推進させる行政の基本文書として位置づけなければならない。地域住民やその地域に関わりのある多くの人々の身近な存在とし、安全で安心できる地域社会の創出に有効に活用されるためにも上述した種々の問題点を克服して行く必要がある。

4. 地震災害軽減方策の新たなパラダイム

21世紀には太平洋沿岸の海洋底に位置するプレート境界に生じるマグニチュード8級の大地震が生じる可能性は日増しに増大していく。一方、内陸部においてもM7

級の直下の地震が発生する懸念はこれまでの全国の被害地震の統計的なデータからも否定しがたい。このような大地震の発生により、情報ネットワークが被害を受けて機能支障をきたすと、一瞬にして情報の断絶と社会の混乱に陥いることも十分考えられる。IT化の急激な進行による社会・経済的な活動の利便性の向上は、このような災害発生のポテンシャルを高めることになる。

加えて、阪神・淡路大震災の状況から、人命が失われるのは建物や公共施設・構造物の地震による直接的な損傷～破壊によるものが改めて強く認識された。震後の応急対応や復旧をたとえどのように迅速かつ的確になしえても、地震によるこれら構造物の物理的な大被害を生じさせては人命への影響を抑えることは困難である。よって、地震災害軽減の基本は既存不適格な施設や構造物の発見とそれらに対する効果的な耐震補強を事業として計画的に行うことにある。しかしながら、3.で述べたように、現状ではその取組みは必ずしも十分とは言えない状況にある。

それではこのような展開をどのようにしたら、少子高齢社会の到来、公共財政赤字の大幅な膨脹などといった現下の厳しい社会・経済情勢の中で実現することができるだろうか。

国全体からすれば数年間に一度は必ず地震による被害がどこかに生じる一方で、大地震の発生はその地域にとっては頻度の極めて低い偶発的な現象である。既存施設・構造物の耐震診断・補強を着実に進めていくためには、その地震の影響を大きく受ける地域の住民や利用者・受益者の理解と自己責任の必要性の認識を得ることが不可欠である。地方分権、行政のアカウントビリティの発揮、情報公開といった最近における社会システムの変化の動向と整合させた新たなパラダイムがここに必要とされるのである。このような考え方を整理、体系化したものを課題とあわせて図-2に示す。

ここに提案する地震災害の軽減方策では、まず、地震に対する備えの実態を情報開示して、地震災害軽減の必要性を地域の住民、施設の利用者、受益者に理解、認識させることが特徴である。それにより、耐震性向上の目標や投資水準に関する社会的合意形成を図り、実際の予防対策としての耐震性向上～補強対策事業を推し進めていく。このために地震災害アセスメントを自治体行政の施策に新たに組み込むことが必要となる。この制度の実施は、これから発生するであろう新たな地震の被害状況と教訓、地震工学や関連工学技術の進展状況、社会情勢の変化などを考慮して5～10年おきに手法や条件を見直

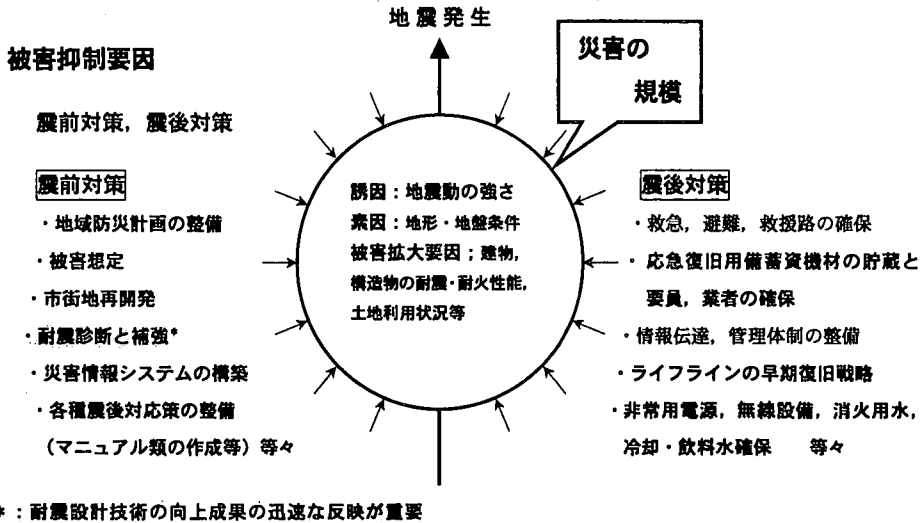


図-3 地震災害とその軽減対策の概念

した上で、定期的実施することが考えられる。当然ながら、この地震災害アセスメント制度は地域防災計画の被害想定および災害予防計画の中に位置づけられるものである。

もう一つの特徴はこれらの耐震性向上対策事業に必要な財源の確保である。阪神・淡路大震災の後では防災関連予算は大幅に増加したものの、国全体の予算の大枠の中で最近では急速に減少しているのが現状である。このような傾向は米国でも同じと見えて、B.A.Bolt¹⁰⁾によれば被害地震が起こった後には急激に予算が膨脹し、政治的な支援が活発となるが、1年程度の半減期を持つ減衰曲線で急激にしぼんでいく状況だと述べているのが興味深い。結局、このような人間の熟しやすく、冷めやすい気質を克服して図-2に示した展開で地震に強い社会を創り出していくことが寺田寅彦の指摘に対する回答である。わが国の厳しい地震環境を直視し、地震災害軽減のため5.で提案する方策を衆知を集めて達成して行かなければならない。

5. 主な課題と対処方策について

(1) 地震災害軽減の基本的な考え方と社会的合意形成

a) 地震災害軽減の基本

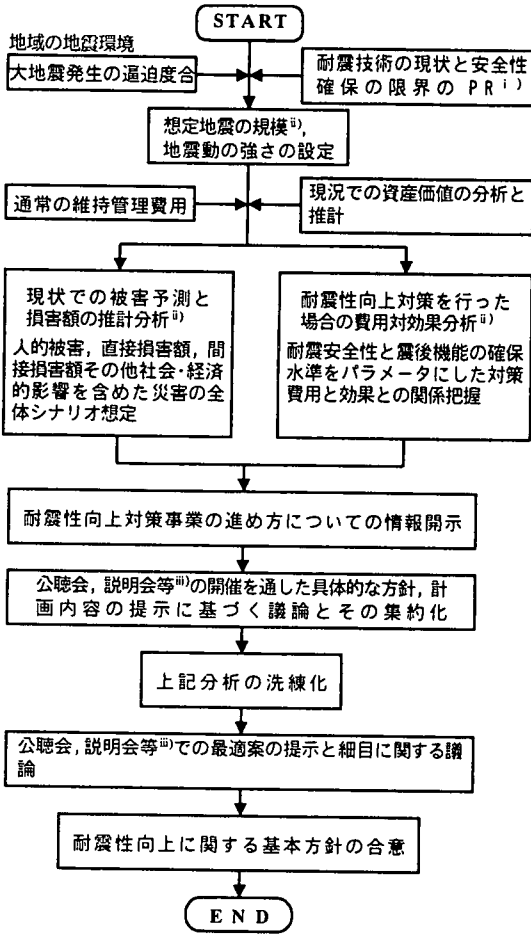
大地震の際の被害を軽減するためには、現在供用中の構造物の耐震性能をできるだけ正確に評価し、問題がある構造物に対して耐震補強を行うことが必要である。これから社会資本ストックの時代を迎えるにあたって、耐震診断・補強の推進が社会的に重大な課題となる。この

ような状況の変化を考えると、耐震技術という言葉を新設の構造物を対象にした「耐震設計」の主な対象となるという狭い意味合いではなく、新設も既存構造物もその対象に含めた「耐震性能評価・向上技術」と位置づけて用いた方が適切であろう。

この考えは耐震技術のもつ社会的な重要性和地震災害の軽減への意義を示すものである。地震災害を防ぐという「防災」の概念は耐震安全性確保の限界を考えれば適切でなく、災害の程度を如何にして最小限に抑えるかという「軽減」の概念に立脚して、耐震技術をハードな震前対策を推し進める重要な手段の一つと位置づけるべきである。災害軽減にはこの震前対策と併せて、震前・震後のソフトな対策に取り組む必要がある。

地震災害の規模は、図-3に概念的に示すように、① 災害の誘因となる地震動の強さ、② 素因となる地形・地盤条件、③ 被害拡大要因としての地域の土地利用状況、建物や土木施設の保有耐震性能、耐火性能など、④ 被害抑制要因としての事前（震前）および震後対策の実施水準、などの相対的なバランスによって決まるものと言えよう。

地震災害をできるだけ軽減するためには、既存の施設や構造物に対する2.(4)に述べた震前対策としての耐震診断・補強の実施、災害の拡大を防ぐ震後対策の適切な実施計画の準備・立案と実践を系統的に行うことが不可欠である。耐震性能評価・向上技術を充実、高度化したら、耐震設計ばかりでなく早急にその成果を耐震診断や耐震補強に反映させることによって、その地域の地震に対する脆弱性を一定の水準で改善することが可能となる。い



- 注 i) : 土木学会などでの日常的な情報発信が必要
 注 ii) : 学識経験者, 専門家, 管理者, 受益者/使用者の代表者等からなる委員会で検討・審議することが必要
 注 iii) : NPO, NGO, 受益者/使用者, 社会的弱者など各界各層からの参画を要請

図-4 耐震性向上に関する社会的合意形成までのプロセス

わば地震災害軽減対策の効果の信頼性を向上させる有力な手段として、震前対策に用いる「耐震性能評価・向上技術」の向上を図ることが重要である。

このような考えを推し進めて地震災害軽減のための種々の対策を実効的なものにするには、4.に述べたような耐震診断や評価を地震災害アセスメントとして制度化することが必要となるのである。

b) 耐震安全性および震後機能の確保の目標水準と財源の確保に関する社会的合意形成

上述したプロセスを社会に定着させていくためには、各種の施設や構造物の耐震安全性と震後機能の確保水準、財源確保の方針などについて社会的合意を形成することが必要となる。地震災害の軽減は、地域住民や使用者、

受益者に経済的な負担増を新たに求め、自己責任を果たして行くことによって達成されるものであることを認識しなければならない。

合意形成を進める上で必要と考えられる各種の施策とその実施のプロセスを図-4に示す。この図に示した合意形成を達成する上での要点はつぎのとおりである。

まず、社会一般への耐震設計の意義と技術の現状についての理解を促すことが必要である。その地域の地震環境などの情報についてもわかりやすく開示することが有益である。大切なのは、現状での災害予測～リスクを誤解が生じないように正確に公開することである。これまででは、いたずらに社会一般を不安に陥れることを恐れて、管理者が把握している知見や情報をつまびらかにはして来なかったのが実情であろう。わが国の固有の文化や社会習慣を配慮したとしても、管理者や企業者がこのような対応を積極的にとることが必要と考える。このためには、報道関係者に対して土木学会や行政も土木構造物の耐震技術の水準、安全性確保の限界についての理解を積極的に求める努力を講じるべきである。

次の段階では、現状で何も対策を講じない場合の損失の大きさと耐震性向上対策を施した場合に耐震安全性そして震後機能の確保水準をパラメータにした費用に対する便益効果の感度を把握すること(Cost & Benefit Analysis : CBA)が重要である。確保水準の程度が合意形成の代替案となる。この費用の財源には最終的には納税額の増額や使用料金値上げなどの受益者負担となるが、この負担がどの程度家計に響くかが究極の問題となる。

この際、対費用効果の推計を合理的なものとするには、供用中の各種構造物の資産価値を推計する必要がある。税法上の減価償却期間を過ぎていても現在の果たしている社会的役割を何らかの経済学的手法で金額に換算しなければならない。上述した東京の日本橋のように竣功後およそ90年も経過して今日もなお重要な道路交通機能を果たしているものの価値を考えなくては防災投資という概念がそもそも成り立たない。

また、目安として当該施設全体の資産価値に対する耐震性向上対策の費用がどの位になるのか、現行の維持管理や予防保全的な対策に使われる費用との相対的な比率がどのようなものになるのかといったことを公開することも有意義と思われる。このような進め方を実のあるものにするには、地域住民の各層すなわち納税者、受益者からの意見を幅広く受け容れ、活発に議論することが前提となる。安全は「ただ(無償)」では得られないこと、その負担の意思決定には、自らのリスクに対する判断が

必要なことの合意が求められるのである。

大地震を対象とした耐震性向上対策の財源の確保を従来の公共事業の枠内で考えることは、国や地方の厳しい財政状況から、まず実現が難しい。大地震の再現期間は人間の生涯の長さ比べてはるかに長いという間歇的、突発的な現象であること、それが生じた場合、大きな被害を受ける範囲はせいぜい数から10程度以下の都道府県の範囲に留まるといふ全国から見れば限定的であることが大地震による災害の特徴である。筆者はこのような状況から自治体が管理する公共土木施設や構造物については都道府県が主体となって耐震性向上の基本方針と戦略を立案すべきであると考えている。レベル2地震動の対象となる大地震の想定、確保すべき安全性や震後機能の目標水準、対策実施の優先順位などの考え方と具体的内容および財源措置などについて地域住民や利用者、受益者などに代替案を含むメニューを提示して、合意形成を図るのである。この考え方はレベル1地震動については国の最低確保水準(ナショナルミニマム)として、レベル2地震動による大地震の対策については影響を受ける自治体の自己責任にもとづく対処方針を地域住民などの合意をもとに定めるものである。

必要な財源については、上・下水道や鉄道、電力、都市ガスなどでは使用料の値上げ、それ以外の公共施設や構造物の対策には法人超過課税、個人住民税の超過課税に加え、今年4月に施行された地方分権一括法で認められた法定外目的税の活用¹⁷⁾も考えられよう。これらの負担増については当然、期間を限定して受益者や納税者の合意を得ることが必要である。ちなみに、静岡県では東海地震の発生を想定した対策を1978年に施行された「大規模地震対策特別措置法」に基づいて実施してきたが、その財政的な基盤はその2年後に施行された「地震防災対策強化地域に係る国の財政上の特例措置に関する法律」による国庫からの助成が主なものであった。しかしながら県では対策実施の緊急性を配慮し、これに加えて独自に県内の経済界の協力を得て、新税による財源の確保に努めたことが特徴である。法人税に対する超過課税を昭和54年度から10ヵ年については10%、続く5ヵ年の平成5年度までは7%の割増率で行い、のべ1,500億円余りの独自財源を確保して、県、市町村、民間の地震対策事業に充当した¹⁸⁾。このような法人超過課税は当時、東京都、大阪府、京都府、神奈川県、愛知県、兵庫県などで行われていたが地震対策を目的としたものは静岡県のみにあった。

c) 社会的合意形成に基づく耐震性向上事業の進め方

上述してきたプロセスで耐震性向上対策事業を推進している興味深い事例¹⁹⁾を紹介しよう。米国カリフォルニア州サンフランシスコ湾東部沿岸地域の水道企業体(EBMUD²⁰⁾: East Bay Municipal Utility District)で行われている耐震補強プロジェクトである。供給人口約120万人を抱えるこの企業体は、近い将来マグニチュード7級の直下型地震の発生に備え、供用中の各種施設に対して詳細な耐震性の調査・診断を実施した。

その結果、現状のままではどのような被災が生じるのかをビジュアルに表現した被害想定シナリオを利用者である住民、企業に公開した。あわせて最低限の緊急対応の他に4段階の耐震性向上計画の内容とコストを提示し、利用者地震直後の消火活動への影響および飲料水供給の程度を含む議論を徹底して行う機会を設けたのである。そして全体として189百万ドル、日本円にしておよそ200億円の事業規模を決定し、1994年から2005年の完成に向けて事業を開始した。この費用は今後30年間に平均的な利用者が年間一人あたり約20ドル、日本円にしておよそ2,100円の負担になる。これらの事業内容は関連する市当局、都市計画委員会、住民団体、企業団体、ロータリークラブなどの地域活動団体、退職者団体や生活弱者団体などに教育・広報活動を通して周知が図られた。

この状況とは逆に、大地震の発生時期についての逼迫度合いがよくわかっていない場合には、どのような対処が考えられるのであろうか。リスクの概念を導入し、リスク情報の開示とそのリスクの低減に要する耐震性向上対策に必要な費用を地域住民に適切に説明することによって社会的に許容しうるリスク(Acceptable Risk)の合意形成を図ることが可能になるものと思われる。

この種の概念は、われわれにとって暗黙知として自らの行動や判断の意思決定のベースになっている。例えば、飛行機に搭乗するとき、雨が降るかもしれない空模様で外出するときなど、自分でリスクを評価し行動している。大地震で生じる災害についても同様な類推は可能で、濱田政則²¹⁾は新幹線の直下型地震による脱線の可能性を引用してリスクと便益との比較から、許容しうるリスクについてある種の社会的合意が形成されているものと指摘している。今後、この種の研究の成果が地震災害軽減の対策事業に反映されることを期待したい。

(2) 耐震補強事業の迅速な展開

耐震補強は上述した構造システムや施設の構成システムに着目して構造的、機能的に重要度を適切に評価した

事業計画を定めて行う必要がある。ちなみに現在、行われている道路橋の耐震補強では橋脚、支承、落橋防止システム等を対象にしているが、重要なことは橋全体系としての挙動を評価し、どの構成要素(部分)が安全性に最も影響が大きいかをレビューすることである。この他の施設、例えば上・下水道などのライフライン施設の耐震補強についても同様なことが言える。予算執行上の問題はあるかもしれないが、単に、機械的に業務発注を進めることは新たな「安全神話」を作り出すことに手を貸すことになりかねない。管理者は無駄の無い合理的な補強事業の進捗を図るために、技術的につめた計画の策定を行う必要がある。耐震診断や補強設計業務の発注に当たってプロポーザル方式を積極的に採用することも有効な手立てと考えられる。

また、限られた予算を効率的に活用するためには、対象とする施設を構成するシステムの特性に着目した効果的な耐震性向上対策を講じることが基本である。システムを構成する各要素の重要度の合理的な評価方法の確立が大きな課題である。例えば、道路橋などでは橋は道路の一部を構成するものとして道路網として地震直後の状態を想定して、通行機能の支障による救急・消火や救援、復旧活動への影響の程度を考慮した地震防災上の重要度の評価方法が提案²²⁾されている。上水道管路やガス導管などではネットワークとしての地震後の供給信頼性解析結果を震後対策の評価に反映している²³⁾。上述した米国の EBMUD では、水道管路のネットワークの現状評価に基づいて、緊急時にバックアップを果たすため、管轄区域の南東縁部に新たなループを形成する管路を耐震性向上対策事業の一環として敷設することとしている¹⁹⁾。

これまでは管理者や企業者がそれぞれ単独に地震防災上の重要度の評価、設定を行ってきた。大都市のように都市機能は多くの公共施設、例えば、① 道路、鉄道などの交通・運輸関連施設、② 電力、ガス、上水道、電信電話などの生活関連資源や情報の供給施設、③ 廃棄物、下水道などの処理施設、④ 警察、消防、病院、自衛隊などの人命や都市機能の安全確保を任務とする施設、などによって支えられているのが実態である。

地震災害の軽減対策を適切に講じるためには、これらの多様な施設を被災の波及もしくは連鎖効果という共通の視点で重要度の評価を行うべきであろう。柳田邦男⁷⁾は阪神・淡路大震災の状況から次のような鋭い指摘をしている。「交通機関の被害は、大惨事になる上に、時宜の救援活動にも支障を来すものであるから、耐震性の確保は通常のビル(や構造物)以上に厳格にすべきである

にもかかわらず、そうなのはなかったことが今度の災害で露呈された。」

このような批判に応えるには、いわば施設の管理者の縦割りの慣行を排して、大地震が生じた後の被害状況のシナリオに基づいて一元的に、社会システム全体を見通した重要度の評価方法を確立する必要がある。土木学会、建築学会などが指導的な役割を担い、具体的方法論の検討とその成果に基づく重要度の試案を広く提示し、社会的な合意を得るように務めることが望ましい。

(3) 構造物の耐震技術の信頼性向上

構造物の耐震性能を合理的に評価するためには、構成部材の変形性能を適切に定めるとともに、地震時の挙動を的確に予測することが必要である。この予測手法の精度の向上には、実際の地震を受けた際の構造物の応答や破壊に至る挙動を定量的に把握することが不可欠である。

このためには、実際に地震動および構造物の応答を観測して、基礎や地盤を含む構造システムの動的挙動の実態を把握しなければならない。兵庫県南部地震の後、多くの機関で強震観測事業が始められ、膨大な数の強震計が設置されてきた。それらは地震動を観測するものから、単に震度情報しか把握しないものまで設置機関の目的に応じて観測が進められている。ちなみに科学技術庁では全国1001地点²⁴⁾、気象庁では同じく約600箇所²⁵⁾に設置している。これに対して土木構造物では、1960年代後半から観測が始められ、現在では建設省所管施設で全国361箇所²⁶⁾、運輸省所管の港湾・空港施設では60港湾、6空港²⁷⁾で各種構造物と周辺地盤に対して強震観測が行われてきた。例えば、道路橋では、橋梁周辺の地表面と橋脚天端、橋台天端、橋桁の観測を標準²⁸⁾としている。このように、基礎や地盤内の工学的基盤を含む構造物全体系の挙動や代表的な線状地中構造物の一つである共同溝でも応答観測を実施しているものは極めて少ないのが実状である。これでは耐震設計法の根拠や前提を検証するには不十分であり、いかに構造物や地盤の動的解析法が高度化、精緻化されても耐震設計法の精度向上には役立たない。民間の建築物に対する地震応答観測の蓄積と比べると明らかに見劣りするの否めない。土木構造物の耐震技術を Virtual Reality の次元から実際の現象に即した真の Reality の次元に引き戻すために、そして、「重要な構造物に対しては動的解析を含む詳細な検討を行うことが望ましい。」といった耐震設計基準類の表現を意義あるものにするためにも、早急に国を挙げて実際の周辺地盤や基礎を含む各種の構造物に対する地震応答観測を推

進すべきである。また、このような質の高い観測の実施は構造物の地震後の健全度評価に役立つのはもちろん維持管理～予防保全の観点からも有効であり、付加価値の高い事業として積極的に優先度の高い施策として事業化を進める必要がある。

しかしながら、この種の観測は息の長いものであり、有用な情報を得るには、大地震の発生を待たなければならないという効率の極めて低いものである。それを補うために、大規模な振動実験を系統的に行うことによって構造物の損傷から破壊までの挙動を把握する試みも重要である。科学技術庁では、現在、兵庫県三木市に世界で最大級の三次元振動台を建設中であり、その積極的な活用が望まれる。同庁では、研究振興調整費による科学技術全般にわたる研究テーマを広く公募している。平成10年度には、土木学会が主体となって作成した研究計画のプロポーザルが採択された。「構造物の破壊過程解明にもとづく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」と銘打たれたこのプロジェクトでは、平成11年度から5ヶ年間を目途に総額およそ15億円の予算が想定されており、建築物を含む各種構造物の破壊機構の解明を目的にさまざまなタイプの実験研究が国内の官学民の主要研究機関で精力的に行われるとのことである。これらの成果が大いに期待される。

この他、これまでの震害状況からその原因を解明しようとする方法も有意義である。無被害や軽微な被害を受けたものも含めた整理分析を行って、関連する要因を抽出し総合的な被害像を浮かび上がらせるアプローチが必要である。このような観点から阿部ら²⁸⁾が兵庫県南部地震の際の阪神高速道路神戸線を対象に行った分析結果が参考になる。GISを活用した高田ら²⁹⁾の成果も注目される。磯山、石田ら³⁰⁾はGISを用いた兵庫県南部地震における水道管路の挙動の分析結果に基づき、水道管路の地震被害予測を提案している。これからの地震防災計画の策定の前提となる被害予測に有効な手段を提供するものと考えられる。

(4) 技術者個人の意識向上と役割の再認識

a) 技術者に求められるもの

耐震技術が高度化して行くことは上述した精度向上を目指した研究の進展を取り入れる以上、必然の流れである。3.(1)b)でも述べたように構造物の設計が性能照査型設計体系へ移行するに伴い、設計に携わる技術者の高い能力と豊かな経験に根ざした主体的かつ合理的な工学的判断が極めて重要な意義を持つようになるものと思われる。

情報化の著しい進展のもとで、自らの日々の研鑽が耐震性能の評価や耐震性向上技術の品質を決定する大きな要因となることを自覚することが大切である。

耐震技術とはどのようなものであろうか。地震は突発性で再現性の無い自然現象であり、地震動の予測自体も不確定性の極めて高いものである。加えて構造物を支える地盤の物性や地震を受けた時の地盤の挙動を精度良く予測することも難しい。地震時挙動の予測や耐震性能の評価を含む耐震性の検討や設計という行為は構造物の特性や建設地点の地形や地盤の状況を十分理解した上で、自らの知恵と工夫を行って、常に最新の知見を吸収しつつ、既往の震害事例とそれらの特徴、経済性、常時の使用性や安全性、施工性、維持補修性等を勘案しながら、大地震の際の安全性を確保するための最適解を見いだす知的創造作業と言えよう。現在、用いられている基準類の内容を忠実になぞるだけでは、これらの各種要因を満たす解を得るのが難しいことを自覚すべきであろう。専門技術者としての矜持と自然現象に対する畏敬の念を持ち、常に批判的な眼で基準類に規定された表現の背景、設計計算式の適用に際して前提となる条件などを洞察しようとする姿勢が大切である。改めて、性能照査型設計とは技術者の裁量の範囲が広がり、性能を満たさずれば従来の細かい仕様に拘束されることなく、積極的に新しい視点で創意工夫が可能になるものであり、技術格差をより一層拡大させるものと認識しなければならない。

最近の情報技術のめざましい進展により、設計技術者が高度な解析ツールを容易に使える状況になっているが、解析方法や計算式の精度と適用条件、入力する各種パラメータの定義や具体的設定の仕方などを正しく理解しておくことが前提である。それも無しに、ただ、やみくもに解析や計算結果の評価を行うのは、明らかに意味の無いことである。

b) 新たな安全神話の創出の阻止

阪神・淡路大震災の前までは「わが国の土木構造物は1923年関東地震級の大地震に対しても安全だ。」また、先の米国のロマブリエタ地震やノースリッジ地震の際に生じた高架橋の落橋などに対しても日本では同じようなことは起きないといった考え方が常識であった。それが1995年1月17日早晩5時46分に発生した兵庫県南部地震のわずか十数秒の間に脆くも崩壊してしまった。まさに、わが国の土木構造物に対する耐震技術そして安全性に関する神話が崩壊したのである。

何故このような神話が生まれてくるのであろうか？このような問いかけに対し、外岡秀俊は著書³¹⁾の中で興味

深い洞察を投げかけている。すなわち、『神話』とは危機に対して脆弱な現実を覆い隠す被膜であり、普段は意識されることなく、崩れることによってしか露呈しない社会の合意事項だ。」と示唆している。以下、土木技術者にとって重要な見解が示されているので、少々引用させていただく。

「大切なのは、災害によって露呈した社会の合意事項のどの部分が崩されたのか、その箇所と原因を探り、確定して行くという作業だろう。その場合に、合意のレベルがどこにあるのかを、その都度明らかにしておく必要がある。社会の合意と言っても、技術者や専門家、法曹、消費者など、各職種、各層によってその認知度や了解の範囲が大きく異なるからだ。」(中略)『神話』は技術者や専門家が独自に創りあげ、流布することによって成立するのではない。『神話』は実は、一定の専門家の合意がさまざまな網の目を通じて社会に流布される間に、次第に緩められて変質し、当事者ですら、気がつかないうちにその変質した合意を暗黙のうちに受け入れることによって成立する。その時点で、専門家は、責任と権限を持った技能集団ではなく『神話』を解釈する巫女、ないしは預言者に近い集団に転化する。

専門家の合意は、社会的合意にならない限り、また新たな『神話』を紡ぐことにしかならないだろう。」

設計基準類を整備する立場の行政および公益企業体の技術者そして実際に設計実務に従事する民間の技術者はこれらの指摘に対して謙虚に耳を傾けるべきではないだろうか。耐震技術に関わる技術者は専門家として阪神・淡路大震災を深刻かつ重大な教訓にして、改訂された基準の内容が、それらの趣旨、前提を離れて一人歩きしないように、また、設計に携わる技術者が本質的な理解を十分にしないで、思考停止的な基準類を運用することのないように、最大限の努力をしなければならない。このためには、① これまでの大地震の際の被害状況、② 建設地点の地形・地質、③ 当該構造物の構造特性、等から大地震の際に構造物が示すであろう挙動(パフォーマンス)をできるかぎり想像豊かに、視野を広くめぐらせて想定することが大切である。そして、安全性の照査の対象となる‘限界状態’を漏れないように整理・分類することが要求される。

このような技術者の、常に創造的で、積極的な問題抽出と解決への姿勢が「阪神・淡路大震災にも耐えられる。」という新たな安全性の神話の創出を防ぐことになるものと考えられる。兵庫県南部地震における神戸市内の地震動の強さをしのぐ次の大地震(Next Big One)発生の

可能性は誰も否定できないのである。

耐震技術を業務として実施する企業側としても単に情報化投資を進めるばかりでなく、このような点の注意喚起も含め、技術者に対する定期的な教育・研修の実施やISO9001などの確実な運用などによる品質の確保に努めるべきである。

c) 優れた技術力の発揮に必要な施策

技術者個人への動機付けの一つとして、わが国の国家資格の一つである技術士の専門科目に「耐震・地震防災」を設けることが有意義と考え、土木学会では学会内に設けられた「阪神・淡路大震災対応技術特別研究委員会」からの提言³²⁾を受けて、平成9年3月に日本建築学会と協同して両学会長名で技術士制度を所掌する科学技術庁長官あてにその旨の要望書を提出した。遺憾ながら先の通常国会での技術士法改正の過程の中では、考慮されなかったようである。地震災害軽減への意義を考えると上述した「地震防災アセスメント制度」の施行と関連させて、専門技術者としての優れた技術力の発揮と社会的地位の向上を目指した公的資格の新たな導入が望まれる。

この他に重要な課題として、国、自治体などの発注機関の技術者の技術力育成・向上が挙げられる。現在では公共事業の設計は建設コンサルタンツ企業に発注されるが、技術検討や設計成果に対する発注機関からの適切かつ迅速な評価・判断が必要となる。耐震技術の高度化に対処しうる発注機関の核となる技術者の育成と教育・研修制度のありかたにも一段の工夫が望まれる。

6. おわりに

阪神・淡路大震災の深刻かつ重大な事態をわれわれ技術者は風化させてはならず、きちんと後世に伝える責務があることを忘れてはならない。阪神・淡路大震災の教訓を地震災害の軽減に生かすためには、耐震技術や各種施設や構造物の耐震性の現状について、自治体、管理者や企業者が地域の生活者にわかりやすい情報の開示を行うって、耐震安全性確保の限界や耐震診断や補強の重要性とその意義の理解を積極的に求めることが必要である。さらには事業の進め方に対する代替案をメニューとして提示し、地震災害軽減のための適正な投資水準に関する社会的な合意形成が得られるように努力することも求められる。これらの達成には地震防災アセスメントの制度化などの社会システムの整備が必要であり、必要な財源の確保方策と併せてこれらを推進する方策を精力的に官学民が一体となって検討すべきである。基本的にはレベ

ル2地震動に対する地震災害軽減は自らの地域社会を生活者、企業が自らの責任で成し遂げるという自治意識の下に確保すべき安全性の目標水準や財源の確保に関する議論を徹底的に行って、合意を形成する必要がある。

また、ハードな耐震性能評価や挙動予測、耐震性向上技術の発展には地震時の挙動や破壊に至る過程の挙動説明が不可欠であり、地震応答観測や大規模な破壊実験なども国家的事業として精力的に取り組むべき課題である。

現在、関係機関で進められてきた耐震設計の高度化や性能規定化への動きそして耐震補強事業の重要性は、兵庫県南部地震以前と比べると、特に発注機関や設計実務に従事する技術者の業務に取り組む姿勢にいわばコペルニクス的転回を迫るものである。このためには発注機関や企業の努力に加えて技術者個人が自らの研鑽に主体的に励むことが必要である。最近の公共事業のあり方や構造物の耐震安全性に対する社会的関心の高まりの中で、社会資本の整備、維持・更新に参画する土木技術者の使命は最終的には受益者である国民のためにあるということ認識しなければならない。国民の安全の確保と安心できる社会の整備のために、耐震技術に携わる技術者は、自らが専門職業人としての高い倫理観と誇りを持って地震災害軽減の新たな展開に対して積極的に取り組むこと、そして、これまでのややもすると指示されたことに対処する体質から、積極的に問題を指摘し、解決し、そして信頼される存在となるように自らの意識と発想の転換を図ることが求められている。

なお、紙面の都合で本章の中では議論として触れることができなかったが、地震災害軽減に向けて、次のテーマも極めて重要な課題として積極的に取り組むことが必要と考える。

■レベル2地震動、特に震源域近傍での強さの合理的な設定方法の確立

■全国レベルでの活断層や地震地体構造などの統一的なデータにもとづく地震動のハザードマップの作成

■21世紀中には生じる確率が高いと考えられている太平洋のプレート境界に発生するM8級の巨大地震に対する震源域近傍に位置する地域の地震災害軽減～耐震性向上(余震対策を含む)対策の基本方針の策定

■活動度、確実度の高い活断層を横切る地点での構造物の対策

謝辞：この論文の作成に当たっては、筆者が委員として参画している土木学会地震工学委員会地震防災技術普及小委員会の後藤洋三委員長(榑大林組技術研究所)

をはじめ、委員の岩本利行(榑コボタ)、小川雄二郎((財)アジア防災センター)、田蔵 隆(清水建設(株)技術研究所)などの諸氏との議論が与って大きいものがあつた。各位に対し深甚なる謝意を表する次第である。また、論文の構成や、文章表現に対して、有意義なご意見、ご指摘をいただいた筆者と同じ職場に勤務する真鍋進、野中昌明、森敦、金聲漢の各氏に対しても、ここに記して厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 寺田寅彦：天災と国防 (初出：昭和9年11月 経済往来)、ワイド版岩波文庫102、寺田寅彦随筆集、第5巻、小宮豊隆編、1993.6.
- 2) 片山恒雄：ものが壊れて人を殺す。21世紀になっても問題は変わらない。土木学会誌、pp.61-62、2000年1月
- 3) 小林一輔：コンクリートが危ない、岩波新書616、pp.112-127、1999.5.
- 4) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震による道路橋の被災に関する調査報告書、建設省、pp.36-40、1995.12.
- 5) 亀田弘行：20世紀の災害から21世紀の防災へ 阪神・淡路大震災が土木技術者に課した使命、土木学会誌、pp.29、2000年1月.
- 6) 日経アーキテクチュア編：阪神大震災の教訓「都市と建物」を守るため、いま何をなすべきか、pp.68-69、日経 BP 社、1995.3.
- 7) 柳田邦男：この国の失敗の本質、講談社、1998.12.
- 8) 中野孝次：いまこそ山河に償いを、中央公論、1998.6.
- 9) 公共事業の説明責任(アカウンタビリティ)向上行動指針、建設省、1999年2月.
- 10) 土木学会地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会：レベル2地震動研究小委員会の活動成果報告書、2000.3.
- 11) 国土庁編：平成12年版防災白書、大蔵省印刷局発行、2000.6.
- 12) 京都大学防災研究所編：地震防災計画の実務、第2章 地域防災計画の現状と問題点、pp.9-36、1997.4.
- 13) 坪川博彰、佐伯琢磨、汐見勝彦：地震被害想定よりよい実用化にむけて、地震工学ニュース、No.172、pp.30-35、2000.5.
- 14) 榑住友海上リスク総合研究所監訳：企業と自治体のための総合地震対策指針、(財)日本規格協会、1995.9.
- 15) 新潟地震30年事業実行委員会 学術技術誌編集委員会編：新潟地震と防災技術、pp.324-325、(社)北陸建設弘済会、1994.6.
- 16) ブルース A ポルト著、松田時彦・渡邊トキエ訳：地震、pp.292、古今書院、1995.3.
- 17) 日本経済新聞 記事：スクープ 地元の首長が大統領になる日、2000年4月2日朝刊第17面.
- 18) 井野盛夫著：抗震 東海地震へのアプローチ、pp.95-99、静岡新聞社、2000.2.
- 19) Diemer, D.M. : ANTI-SEISMIC MEASURES ON WATER SUPPLY IN CALIFORNIA, Proc.of Water & Earthquake '98 Tokyo, IWSA International Workshop, 1998.11.
- 20) <http://www.cbmd.com>.
- 21) 濱田政則：新しい耐震設計、土と基礎、Vol.47, No.6 Ser.No.497, 1999.6.
- 22) 佐藤次郎、篠崎之雄、佐伯光昭、磯山龍二：大都市における既設道路橋の地震防災上の重要度の評価手法、土木学会論文集、No.513/ I -31、1995.4.
- 23) Isoyama, R., Iwata, T. and Watanabe, T. : Optimization of Post-Earthquake Restoration of City Gas Systems, Proc.of the

- Trilateral Seminar-Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, Nov. 1985.
- 24) 青井 真：K-NET，地震学会ニューズレター連載：強震観測の最新情報(1)，<http://www.jssst.or.jp/ssj/ssjinfo/kyosin>
 - 25) 川上徹人：気象庁における強震波形観測・収録と提供，地震学会ニューズレター連載：強震観測の最新情報(2)，<http://www.jssst.or.jp/ssj/ssjinfo/kyosin>
 - 26) 杉田秀樹：公共土木施設の地震観測，地震学会ニューズレター連載：強震観測の最新情報(3)，<http://www.jssst.or.jp/ssj/ssjinfo/kyosin>
 - 27) 一井康二：港湾および空港における強震観測，地震学会ニューズレター連載：強震観測の最新情報(6)，<http://www.jssst.or.jp/ssj/ssjinfo/kyosin>
 - 28) 阿部哲子，藤野陽三，阿部雅人：1995年兵庫県南部地震による阪神高速高架橋の被害と2，3の分析，土木学会論文集，No.612/1-46,1999.1.
 - 29) 高田至郎，森川秀典，松本正人，花川和彦：GISデータベースに基づいた橋梁耐震診断法の構築と損傷確率マトリックスの評価，構造工学論文集 Vol.44A,土木学会,1998.
 - 30) 磯山龍二，石田栄介，湯根清二，白水 暢：水道管路の地震被害予測に関する研究，水道協会雑誌，第67巻，第2号(第761号)，1998.2.
 - 31) 外岡英俊：地震と社会 「阪神大震災」記 上巻，みずがき房，1997.11.
 - 32) 土木学会：阪神・淡路大震災対応技術特別研究委員会報告書，1997.4.

(2000.7.18受付)