

土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」・解説

社団法人土木学会

1996-5-10

1. はじめに - 提言の背景と概要 -

われわれは自然という地球の営みの上に生活しており、多くの恵みを享けるとともに、自然による災害の危険にさらされてきた。自然災害の規模・激しさは自然現象の特性のみならず、国土・地域の開発、社会活動、社会施設の整備状況などわれわれの生き方にも密接に関連している。活発に活動する地震帯に位置するわが国は地震被害については、1891年の濃尾地震の翌年、官製の震災予防調査会が発足して以来、国を挙げて地震学と地震工学の両面から被害原因の究明と対応策の確立にあたってきた。国内では1923年の関東地震、1933年三陸沖津波地震、1948年の福井地震、1964年新潟地震、1968年十勝沖地震、1978年宮城県沖地震、1983年日本海中部地震など、国外にあっては1971年のサンフェルナンド地震、1989年のロマ・プリエタ地震等被害地震の発生の際に、地震動と震害の研究から、被害のない構造物の築造を目指して、合理的な耐震設計方法の研究を進め、構造物に適用して、最近の20数年間に著しい発展があった。

その基本となる地震動の強さはわが国の周辺海域にしばしば発生するプレート境界での大規模地震と内陸に震源を持つ地震を対象とし、近年の地震および歴史地震の発生過程に基づいて、確率的に求めるのが一般的であった。地震活動の時間尺度に較べてわれわれが取り扱う時間の尺度が極めて短く、その間、地震活動は同じように繰り返されると想定しているからである。地震観測から得られた資料は耐震設計基準に生かされていて、結果的に本邦に於ける震害が非常に少ないことに反映している。一方われわれの地震に関する知識が限られたものであることは言をまたない。震源域の地震動については、対象とする規模の地震の発生確率が低いこと、観測網の目をごく細かくする必要がある事などの理由により最

近まで量的な記録を得る事ができていなかった。内陸部の直下の地震では活断層が1000年単位の間隔で活動するという要因が加わって、地震動に関する数量的な資料が得られていなかったのである。

阪神・淡路大震災はこのような事情の下で発生した。野島断層の北の部分から六甲断層系の断層の活動により、淡路島北部—大阪湾沿いの神戸市から尼崎市に至る諸都市は直下型地震動に直撃され、甚大な被害を蒙った。特に六甲山麓から海岸に至る幅約1.5～2kmの間に密に人口が分布し、高度に発達した社会基盤施設を持つ神戸市の被害は激甚であった。

土木学会は、この震害の重大性にかんがみ1995年3月「耐震基準等基本問題検討会議」を設置し、社会の現状と将来に向けて震害の軽減を目指した耐震設計基準等の基本的方向について検討を開始した。同年5月、耐震設計にあたり、従来の設計対象地震に加えて、震源断層近傍での地震動を考慮すべきであることを中心とした「第一次提言」(以下第一次提言と略記)を行ない、1996年1月には第一次提言の内容を深度化して耐震性向上のための諸方策を具体的に示すとともに、広い視点から地震防災性の向上の基本方針を加えて「第二次提言」(以下第二次提言と略記)を公表した。

兵庫県南部地震における激甚災害は、マグニチュード7級の直下の地震に対し構造物の耐震性能が十分でなかったことが基本的要因であり、加えて都市の地震防災機能の不足、危機管理システムの不備が人的・物的被害を増大させた要因であると指摘されている。この震害と過去の震害の教訓に基づいて、提案は社会基盤施設の保有すべき耐震性能の評価、対象とする地震および地震動ならびに適用すべき耐震設計法、既存構造物の耐震性能の診断と補強および都市の地震防災性向上について、今後進むべき基本的方向を検討した結果をまとめたものである。

以下に提言に示された各事項についてその概要を述べる。

(1) 土木構造物の耐震性の照査にあたっては、レベル1地震動とレベル2地震動の2種類の地震動を適用する。

レベル1地震動は、多くの土木構造物に対して従来から設定されていた地震外力にあたる。過去の地震発生の時間的経過に基づいて、構造物の使用期間中に1～2回発生すると考えられる強さの地震動である。

レベル2地震動は、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震に加えて、兵庫県南部地震のような内陸の直下の地震による地震動も対象とした発生確率の極めて低い地震動である。

内陸の直下の地震による地震動の策定にあたっては、活断層を同定しそのメカニズムを想定して、発生する地震動を予測することを基本とする。したがって、

その適用範囲は地域によって差が生ずる。活断層の情報から直接地震動を決定できない場合は、兵庫県南部地震などの断層近傍の強震記録を基に、震源断層近傍で予想される地震動を作成してレベル2地震動の基礎とすることができる。

陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震の震源域の地震動については、上記の内陸の震源断層近傍の地震動とは異なる特性を持つことが予想される。1993年釧路沖地震では震源が深く、通常の震源深さを持つ地震の記録はまだ得られていない。このため、プレート境界で発生する巨大地震の断層近傍地域の地震動の観測と研究を進める必要がある。

(2) 土木構造物の保有すべき耐震性能と耐震設計法は、橋梁、ダム等の地上構造物、ライフライン、トンネルなどの地中構造物、堤防、盛土等の土構造物、港湾構造物等構造物の種類が多く、また、構造形式も多様であって、そのうえ、建設環境、使用環境も異なるため、それぞれ構造物ごとに評価し、適用すべき耐震設計手法を選択しなければならない。レベル1および2の地震動に対して次のように対応するものとする。

レベル1地震動に対しては、すべての構造物を対象とし原則として構造物の機能が維持されるものとし、現行の耐震設計方法を適用して所定の安全性を持たなければならない。

レベル2地震動に対しては、当該構造物の重要度を考慮して保有すべき耐震性を評価しなければならない。

構造物の重要度は、1) 構造物が損傷を受けた場合、人命・生存に与える影響の度合い、2) 避難・救援・救急活動と二次災害防止活動に与える影響の度合い、3) 地域の生活機能と経済活動にあたえる影響の度合い、4) 都市機能の早期復旧に与える影響の度合いおよび復旧の難易度等、を総合して決定する。

耐震設計にあたっては構造物が損傷を受けることおよび機能が低下することを前提としてその損傷過程に立ち入って耐震性能を照査することが必要である。

許容される損傷ならびに機能低下の程度は各構造物の重要度、機能の早期の修復の可能性、経済性の評価により定めるものとし、構造物全体系が崩壊するようなことがあってはならない。

このため、レベル2地震動に対する構造物の合理的な耐震設計手法を確立する必要がある。

橋梁についてはレベル1地震に対し動的応答が弾性範囲のあるものとし、レベル2地震動に対しては崩壊しないことを限度として、重要度の応じて、動的応答解析から得られる塑性変形および保有耐力が所定の範囲内におさまらなければならない。

地中構造物については周辺地盤の地震時の変位と安定性が耐震設計の基本であ

り、レベル1地震動については構造の機能が維持され、レベル2地震動については構造物が損傷しても機能に重大な支障が起らず短期間の復旧が可能な範囲でなければならない。

構造物基礎はレベル1地震動に対しては機能の維持を目標とする。レベル2地震に対しては上部および地中構造に重大な損傷が生じない事を目標とし、液状化防止が困難な場合には上部構造に重大な被害が生じないよう基礎の強化等を行うものとする。

岸壁、堤防、盛土等の土構造物では一般に復旧が容易であることを考え、重要度に基づき、重点的に対応すべきであるレベル1地震動に対しては一般には軽度の損傷があっても早急に復旧できるものとし、レベル2地震動については支持する構造物や周辺の諸施設に重大な被害を生じないことを目指し、災害時の救援、復旧に必要な重要施設はその機能を維持することを目標とする。

(3) 阪神・淡路大震災における土木構造物の被害を踏まえ、既存土木構造物の耐震診断を早急を実施し、結果に応じて、構造物の重要度の評価と想定するレベル1およびレベル2の地震動とに基づいて設定された耐震性能を保持するように、適切な優先順位に従って耐震補強を行わなければならない。一次および二次の二段階の耐震診断により耐震補強が必要な構造物を選定し、新設構造物と同等の耐震機能を目指し、経済性、施工性を勘案し、機能の代替性の整備などソフト面を含めて、撤去、新設も視野に入れた対応が必要である。このためには、診断に必要なデータベースの構築、耐震補強技術の開発が必要である。

(4) 自然的に発達したわが国の都市では、都市の計画性、社会基盤の整備の状況は現在の社会活動には十分でなく、地震防災性に劣っている。

土木構造物の耐震性の強化と併せて、想定を超える外力への対応も考慮に入れ、より広い視点から総合的な地震防災性の向上を計るべきである。

1) 自然条件、住宅条件、社会基盤施設の諸条件を総合した、区域ごとの災害安全性の評価、分析の実施、公表を柱とした災害アセスメント制度を導入して、適切な土地利用および施設配置を促進し、地域防災計画を都市・地域計画と連携させて地震防災機能を計画の基本に取り込むべきである。

2) 災害に関する複数の機関、組織の情報の整合性を確保し、災害時の一元的活用を可能にするシステムを構成するとともに、大震災という非常事態への対応の論理（災害管理の論理）の構築と社会的合意の形成について検討すべきである。また、防災訓練の内容を改善し防災専門家を養成してその位置付けを適切にし、より高い防災体制の持続的維持を計るべきである。

3) 地震国としてのわが国の特殊性を考慮して、構造物の補強費用や災害復興費用の負担ルールの明確化などを早急に推進すべきである。

2. 耐震性能照査で考慮すべき地震および地震動

2.1 はじめに

土木学会による土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言においては、これまでの設計地震動に加えて、今後考慮すべき設計地震動として

(1) マグニチュード7クラスの内陸地震による震源断層近傍の地震動

(2) 陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震による震源域の地震動の2つをあげている。前者は、兵庫県南部地震の経験とそこで得られた新たな知見をもとに打ち出された方向であり、後者は、関東地震のタイプの地震の将来の発生に対して、先行的に対応することの重要性を強調するものである。

また、震源断層近傍の地震動は震源過程と断層近傍の基盤構造の影響を強く受けることから、危険断層を同定し、その震源メカニズムに基づいてレベル2地震動を求めること、レベル2地震動を与える地盤レベルは基盤岩とすることを基本方針として提示している。

この基本方針は、すでに一部の地域行政で実行されつつあるもので、現実的な方法論として位置づけられているが、一方全国的観点からはなお多くの工学的な調査・研究・開発課題を提起するものである。兵庫県南部地震の経験をふまえた社会基盤施設の耐震強化は急務とされ、そのための行政レベルでの現実的対応も進みつつある。

したがって、当面の方針として、既往の強震記録からレベル2地震動を設定する方法、地表または工学的基盤で地震動を与える方法についても第二次提言でその方針を述べた。

以上の状況をふまえて、第二次提言で述べられている「1. 耐震性能照査で考慮すべき地震および地震動」について、特にその中で、兵庫県南部地震の経験を直接の動機とする内陸直下地震を対象とするレベル2の設計地震動の設定法に限定して、第二次提言の背景となる考え方を示し、この提言を今後活かすための手だてとする。

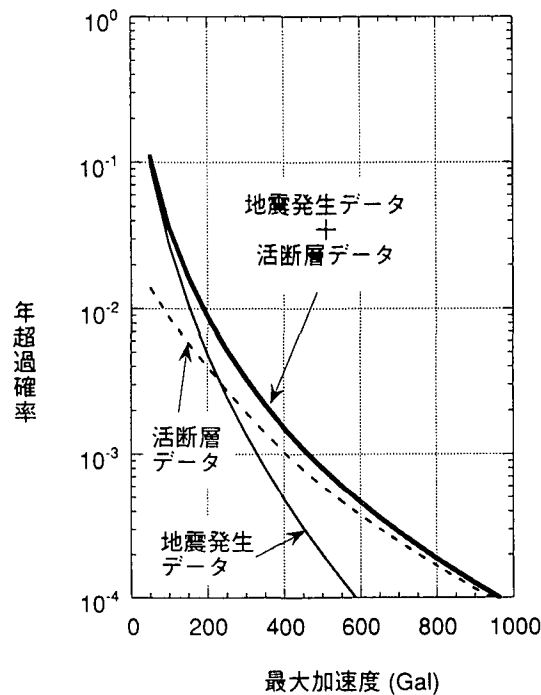
2.2 レベル2設計地震動の設定における地震危険度

これまでのわが国の土木構造物の耐震設計体系では、着目地点に影響を与える

地震は周辺地域の種々の場所で発生する多様なシナリオがあることを前提とし、着目地点における一定期間内の最大地震動の期待値をもとに設計地震動が設定されてきた。そこでは、確率論的地震危険度解析が基本的な解析・評価の手法として用いられ、期待値を求める期間（再現期間）として、100年のオーダーの長さが考えられてきた。

しかしながら、この考え方では、内陸活断層の活動によって引き起こされる地震の震源断層近傍の地震動が評価されることはほとんどない。個々の活断層の活動の間隔は1000年のオーダーとされるため、その発生確率の低さにより100年オーダーを対象とする地震危険度解析に対しては、結果に影響を与えないからである。

一方、いかに活動間隔が長くても、活断層はいずれは活動するときがあり、その結果、震源断層の近傍ではこれまでわが国で観測されなかった強大な地震動が発生することを示したのが兵庫県南部地震であり、これが、レベル2地震動に関する再検討を促している。この事態は、地震危険度解析において、1000年オーダーの再現期間を対象とする低頻度巨大外力の問題として扱うことにより、はじめて荷重評価の結果に反映される。



(石川ほか：土木学会 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、1996年)

図 - 2.1 神戸に対する地震危険度の評価

図-2.1に、神戸に対する地震危険度解析から得られたハザード曲線を示した。同図には、地震発生データ（歴史地震）を用いた結果、活断層データを用いた結果、ならびに両者を組み合わせて得られる結果が示されている。年超過確率 $=10^{-2}$ （再現期間 $=100$ 年）では、ハザード曲線はほとんどが歴史地震のみによって決まっているのに対し、年超過確率 $=10^{-3}$ （再現期間 $=1000$ 年）では、活断層データのみにより結果が決まる。

このように設計地震荷重評価における再現期間を大きくとるほど着目地点に影響を与える地震の種類は限定され、多くの地震シナリオが関与するランダムな荷重環境から、次第に着目地点周辺の活断層（群）が支配的影響を持つ特定の地震の姿に近づく。二次提言において、レベル2地震動を設定する際に、地域ごとに脅威となる活断層を同定して、その震源メカニズムを想定することを基本方針としたのはこの理由による。

多数の活断層が確認されている中部地方から近畿地方にかけては、ここに述べた状況はかなり明確であり、特に、限定された地域での地震危険度に注目して作業が進められる地域防災計画や地域の構造物耐震化計画では、特定の活断層が活動することを前提として想定地震を設定する作業がすでに行われつつある。

一方、全国的に見ると、確認された活断層が少ない地域、厚い堆積層に覆われているため活断層が存在している可能性はあってもその確認が困難な地域、首都圏の地下のように3つのプレートの境界が集まって複雑な地体構造となっている地域など、地方によって、それぞれが特徴ある地震環境のもとにある。

したがって、それぞれが特徴ある地域の地震環境を明確にすること、そこに介在する不確定性を評価することが必要である。そのうえで、荷重評価の局面では、構造物の安全性担保という観点からできる限り共通の意思決定規範が用いられるべきである。

2.3 兵庫県南部地震による地震動の破壊力

兵庫県南部地震で観測された地表最大加速度は概ね1Gを超えない程度であるが、気象庁震度7の激甚被害地域では観測記録が知られていない。これについては多くの推定がなされているが、まだ定説がない。この地域の北側に位置する断層面の花崗岩の地震動と基底部の花崗岩の地震動による励振が重なったことが多くの数値実験において推測されており、この効果は肯定できる。しかし、これらはいずれも南北断面でのシミュレーションであり、断層に沿った方向での地震動の関係、たとえば神戸海洋気象台の記録と神戸大学の地震動の性格の異同は

未だ十分に説明されていない。

震源断層近傍の地表面の水平動は、概して非線形なふるまいをしており、その結果、線形を維持した場合に比べて加速度は小さくなる。このため最大加速度のみの規定では、兵庫県南部地震の破壊力を表現するのは困難である。図-2.2は減衰5%に対する加速度応答スペクトルで、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台での記録を太実線で示す。一方、同図の細線は1993年釧路沖地震による釧路気象台の地震記録に対するもので、本震の強震記録としてはわが国では既往最大の 900 cm/s^2 以上の大きな加速度を記録したが、これには0.5秒以下の短周期域の寄与が大きく、それより長周期域では神戸の応答スペクトルの方が大きい。

また、同図の点線は1995年ノースリッジ地震におけるTarzana観測点の記録で、これは実に $1,800 \text{ cm/s}^2$ 以上の大きな加速度を記録しているが、応答スペクトルはやはり神戸の方が大きい。

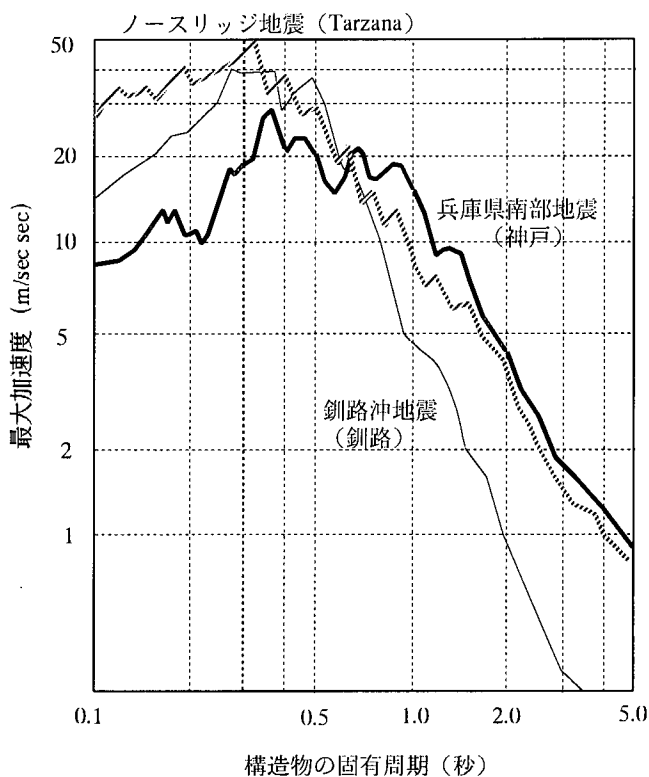


図 - 2.2 応答スペクトルの例

兵庫県南部地震に特徴的な周期1秒前後の揺れが、このような震源過程を反映する動きに当たること、その動きは初期の3秒間の大振幅震動となって現れていることが注目されている。こうした記録が得られたのはわが国では最初であるが、米国でも例がある。

2.4 レベル2 設計地震動の与え方

第二次提言では、応答スペクトルまたは時刻歴地震波形を用いてレベル2 地震動を表現することを規定している。これは、レベル2 地震動に対する耐震設計は構造物の弾塑性的性能を保証することを目的に行われること、構造物の損傷過程を照査する必要があること、それには地震動の動的特性を的確に表現できることが必要であることによる。

従来 of 震度法では、地震ハザードの大きさと構造物の耐震性能を勘案しながら相互譲歩的に設計地震荷重が定められてきた。これは、震害経験を生かすという利点がある反面、そこに内在する経験主義が合理的手法への脱皮を制約する側面があった。現在の構造解析技術が、部材の動的損傷過程を定量的に扱うことを多くの場合において可能にしていることを考えると、地震荷重に構造特性を含ませることで設計地震動をブラックボックス化することを避けて、設計用入力地震動に係わる事項と、構造物の耐震性能に関わる事項とを明確に分けて議論することが耐震設計の信頼性向上のために必要である。

もちろん、多種多様な土木構造物に対する耐震基準の最終的な形では、より簡略化した表現がとられることが多いのは当然である。レベル2 地震動についても、静的設計による耐力の照査と、動的設計による損傷過程の照査が併存することになると考えられる。前者では、弾塑性的性能により応答スペクトルから換算された地震荷重（靱性による低減係数、所要強度スペクトルなど）により、後者では時刻歴応答により、損傷過程を直接照査することになる。さらに、今後の課題として、移動を許容する剛体構造物の設計法も視野に入り、レベル2 地震動に対する荷重規定もその内容は多様な姿になると考えられる。

さらに、近年、免震構造および制震構造の実用化が進んでいる。免震構造では、想定される設計地震動に適応してパラメータが選択されるため、設計地震動を設定する際に織り込んだ筈の余裕を無効にする可能性を有している。したがって、通常の（静的な）設計地震荷重の規定の仕方では危険になるおそれがある。また制震系では、応答の情報を考慮した適応が加わるため、本質的に地震動波形を用いた照査が要求される。

こうした状況を踏まえながら、多様な設計体系の根拠となる設計入力地震動は自然からの外力としてできる限り統一的理解のもとに置かれるべきであり、それを応答スペクトルまたは時刻歴波形で表そうというのが、第二次提言の主旨である。

2.5 震源断層近傍の地震動時刻歴の評価法

震源断層近傍で記録された既応の実地震波形が数多くあれば、統計的な解析を行うことにより、最大値のみならず応答スペクトルについても推定が可能であるし、対象とする地点の近傍または地質学的に類似の地層構造を持つ場所で観測された過去の強震記録波形をそのまま予測波形として利用することも可能である。

しかし、兵庫県南部地震を経験した現在でもなお、こうしたデータベースの蓄積は十分とは言えず、今後の強震観測とそのデータの共有化の努力が必要である。

既往の強震記録に依拠して時刻歴波形を生成する場合、i) 実際の観測波形をスケール変換する（震源と観測点が対象地点と無関係な記録）、ii) 同（想定震源域内の中小地震によって生じる対象地点の地震動）、および iii) スペクトル適合地震動（フーリエスペクトルまたは 応答スペクトルを指定しこれを満足する波形を生成する）などの方法が実績を持っている。一方、活断層の存在が明らかでない場合には、発震機構を断層のくい違い運動により表現し、それを規定するパラメータや伝播経路の地盤構造を評価して地震動波形を合成する方法が、現実的な手法として、震源断層近傍の地震動予測に用いられるようになりつつある。

しかし、将来発生する地震の震源断層近傍での強震動予測のために、どのような震源パラメータを与えればよいかと言う問題は、まだ明確な答えを持たない困難な課題である。一般に、大地震の際の断層の面積はかなり広がるので、断層面上の破壊強度もこれに加わる剪断応力も一様ではなく、かつこの不均一さを知る手がかりは今のところない。また、断層面上のどこに破壊開始点を設定すればよいかも未解決の問題として残っている。こうした地震学的データは今後も蓄積され、情報量は増えるであろうが、地殻の破壊現象である震源メカニズムを工学的精度で予測することは、基本的な困難を含むと考えられる。したがって、将来発生する地震への対処を目的とする工学的適用に際しては、状況をパラメトリックに設定して、それによる幅をもって判断する不確定性のもとでの意思決定が必要となる。

2.6 詳細な地域特性の考慮

兵庫県南部地震が提起した工学的課題は、土木施設の適切な耐震安全性を実現するために、従来の設計荷重の評価体系の再検討を迫るものである。危険活断層の同定から出発するという基本方針を中心に据えながら、多様な地震環境に応じた荷重設定法が必要である。今後、以下のような工学的な研究・開発の努力が傾

注されるべきである。その成果のうえに、従来より詳細な地域特性を反映した設計地震荷重の評価体系が構築されるべきである。

(1) 活断層に関する工学的調査

ある断層に関する調査、断層の形状・規模・構造、活動度、断層近傍の地質、起こりうる地震のメカニズムなど、活断層に関する情報量を充実させることがまず重要である。

(2) 震源断層近傍の地震動に影響を与える地盤構造に関する工学的調査

震源断層近傍では、基盤岩より上部の三次元的な地層構造が地表付近の地震動に大きな影響を持つことが既往の地震の経験から明らかにされつつある。今後のレベル2地震動の設定の信頼性向上のために、基盤岩（剪断波速度 V_s が 3 km/秒程度）の形状、およびそれより地表に至る岩盤・地盤、特に工学的基盤として用いられることが多い $V_s = 300 \sim 400$ m/秒程度の地盤を含む地盤構造の詳細な調査が展開されるべきである。

(3) 活断層が明確でない地域でのレベル2地震動の設定法

活断層の調査が困難な地域においては、震源断層近傍でとれた既往の強震記録に基づいて地震動を評価せざるを得ない。統計的手法、超過確率による評価、シミュレーション技法による種々の断層破壊過程によるばらつきの評価等の方法を組み合わせる、などの方法の開発とその検証が重要である。

(4) 活断層に関する情報量に応じた地震危険度評価法の開発

断層調査のレベルに応じて情報量が異なることによる不確定性を評価し、これに的確に地震危険度評価に結びつける工学的方法が必要である。情報量が増すと、それに応じて評価結果の信頼度が向上するような意思決定の方法論が開発されるべきである。

3. 耐震設計法

第二次提言の第2章では、土木構造物が保有すべき耐震性能と耐震設計法についての提言を行っている。土木構造物は極めて多種であり、かつ構成材料も多様であるため、保有すべき耐震性能を一律に論ずるのは困難である。このため、提言では、地上構造物、地中構造物、地盤・基礎構造物の3つに大別して記述して

いる。

本解説は、上記の提言を行うに至った背景を簡潔に述べたものである。

すなわち、まず第二次提言の本文では言及していない現在までの被害地震と耐震設計法の変遷について簡単にふりかえった後、過去の地震記録と比較した兵庫県南部地震記録の破壊力と各種設計スペクトルとの関係についても比較・検討した結果を示した。

さらに、各種構造物ごとに兵庫県南部地震による被害のモードの調査結果と第二次提言の主旨との関係について言及した。

3.1 日本と海外における地震被害と耐震設計基準の変遷

構造物の耐震設計に際しては、まず地震力の設定を行わなければならない。最近になって、地震の断層パラメータを基礎に強震動を予測する各種の手法が開発され、その適用性が検討されつつあるが、自然現象を対象とした地盤震動そのものの予測および設計荷重の決定は容易ではない。現在までの耐震基準では、地震被害の経験や得られた地震記録を基に逐次改正されてきているのが現状である。

したがって、構造物の地震被害の原因究明に際しては、構造物が何時の時代の基準によって設計されたかをまず知る必要がある。

現在までの比較的簡便な耐震設計法では、構造物の自重の何割かを水平方向あるいは鉛直方向に作用させて構造の安全性をチェックしてきた。この重力に対する地震外力の割合は設計震度と呼ばれている。

日本と米国（特にカリフォルニア州）では、過去によく似通った被害地震を経験してきており、そのつど耐震設計の見直しをすすめてきている。こうした経緯をまとめて示したのが表-3.1である。この表から日・米の地震被害に関するさまざまな宿命を考察できるが、ここでは構造被害に限って見てみることにする。

日本における1970年以前の構造物の耐震設計は、水平方向の設計震度0.2の地震荷重に対して、構造物の弾性強度のみを保証するものであった。しかしながら、1968年の十勝沖地震や1971年の米国カリフォルニア州のサンフェルナンド地震で、鉄筋コンクリートの柱がもろく崩れる「剪断破壊」現象が数多く見られた。

1970年代前半にはこの原因調査が数多く行われ、その結果から構造物の強度を上回る地震力に対しても、崩壊という大破壊を防ぐためには「剪断破壊」を絶対避け、構造物に「粘り」をもたせなければならないとの結論になった。

こうしたことから、1980年代以降の基準では、鉄筋コンクリートの柱の帯（おび）鉄筋をより多く配置するなど、構造部材および構造系全体としての「ねばり」を増すため、多くの工夫が盛り込まれた。

表 - 3.1 日本と海外における被害地震と耐震基準の変遷

米 国 (その他の各国)	日 本
1906 サンフランシスコ地震 (M8.3 直) 大火災 A W S S 完成	1891 濃尾地震 (M8.0 直)
1933 ロングビーチ地震 初強震記録 設計震度 (Riley Act 0.02)	1923 関東大地震 (M7.9 海直) 大火災 設計震度 0.1
1936 ベイブリッジ竣工	1939 道路橋示方書 設計震度 0.2
1937 ゴールデンゲイトブリッジ竣工	1943 鳥取地震 (M7.2 直)
1940 インペリアルバレー地震 (M7.1 直) エルセントロ記録	1944 東南海地震 (M7.9 海)
	1945 三河地震 (M6.8 直)
	1946 南海地震 (M8.0 海)
	1948 福井地震 (M7.1 直) S M A C 開発・耐震コード
1955 U B C (Uniform Building Codes) 設計震度 0.06	
1956 第1回世界地震工学会議 (W C E E, 於サンフランシスコ)	1956 道路橋示方書 設計震度 0.1~0.35
1957 I-880サイプレス地区竣工	
	1964 新潟地震 (M7.5 海) 液状化
	1968 十勝沖地震 (M7.9 海) 八戸記録 R C 柱せん断破壊
1971 サンフェルナンド地震 (M6.6 直) R C 柱せん断破壊・桁落・ライフライン	1971 道路橋示方書耐震設計編 設計震度 0.1~0.24 修正震度法
1975 A A S H T O, Interim Spec., Bridges 設計震度 0.5 (塑性設計) 耐震補強開始 桁連結	1971 建築基準 せん断補強筋の強化
	1978 宮城県沖地震 (M7.4 海) ライフライン
	1980 道路橋示方書 (新耐震設計法案) 変形性能照査
1981 A T C - 6 設計地震 0.4 (塑性設計)	1981 建築基準 保有耐力、許容変形の規定 1 g 応答
1983 A A S H T O, C A L T R A N S	1983 日本海中部地震 (M7.7 海) 長周期地震動
1985 メキシコ地震 (M8.1 海) 2秒共振崩壊	1986 コンクリート標準示方書 限界状態設計法の導入
	1988 本四 児島・坂出ルート竣工
1989 ロマプリータ (サンフランシスコ) 地震 (M7.1 海)	
1990 ————— 国際防災の十年 —————	1990 道路橋示方書 耐震設計スペクトルの見直し 動的解析, 保有耐力, 3倍の地震力を考慮 1 g の応答 制振構造の研究と建設
1990 フィリピン地震 (M7.8 海直)	1991 鉄道構造物等設計標準・解説 塑性変形性能の確保
	1992 道路橋の免震設計マニュアル
	1993 釧路地震 (M7.8 海) 北海道南西沖地震 (M7.8 海)
	1994 北海道東方沖地震 (M8.1 海) 三陸はるか沖地震 (M7.5 海)
1994 ノースリッジ地震 (M6.8 直) (直下型都市地震, 大加速度, 大速度)	1995 兵庫県南部地震 (M7.2 直) (都市直下型地震)

今回の地震で大きく崩壊した高速道路や新幹線、さらに建物などを調査したところ、その主な原因は、やはり鉄筋コンクリートの「剪断破壊」であった。

さらに今回の地震より以前には大きな被害が無かった鋼製橋脚においても、設計震度を越える地震力による局部座屈やさらに2例の崩壊も見られた。大被害を受けた構造物のほとんどは1970年以前に建設されている。鋼構造物においても設計震度を上回る地震に対する粘りの欠如は大被害の原因である。

一方、従来は安全と考えられていた地下鉄などの地中構造物においても、被害が発生し、地盤の変位の影響を強く受けたものと推定されている。さらに、従来の判定基準では液状化し難いと考えられていた地盤の液状化や、地盤の側方流動に基づく基礎構造物の被害なども報告されている。

3.2 兵庫県南部地震の破壊力と設計スペクトル

(1) 過去の地震加速度記録と神戸海洋気象台における記録との比較

震度7の地域および周辺においては、極めて大きな加速度記録が得られている。水平成分の最大加速度が600 galを越える地点は、神戸海洋気象台(気象庁)、鷹取(JR)、葦合(大阪ガス)、宝塚(JR)、西宮(大阪ガス)の5ヶ所にもものぼっている。特に神戸海洋気象台では、南北方向818 gal、東西617 gal、上下方向332 galの極めて大きい加速度記録が得られた。

神戸海洋気象台での加速度記録NS成分を、現在までの代表的な記録(いずれもNS成分)と比較したのが、図-3.1(a)~(d)である。同図(b)には、米国カリフォルニア州でのノースリッジ地震(1995年1月17日)時におけるシルマーでの記録、(c)には十勝沖地震(1968年5月16日)における八戸での記録、(d)にはインペリアル地震(1940年5月18日)時におけるエルセントロでの記録をおのおの同じスケールで示した。

神戸およびシルマーでの記録は、最大加速度が約800 gal程度と極めて大きい。強震部の継続時間は10秒程度と比較的短い。一方、最近の構造物の耐震設計によく用いられてきた八戸記録やエルセントロ記録は、最大加速度は250~350 gal程度と比較的低いが、強震部の継続時間が30秒程度と長い。こうした地震動の時刻歴波形の差が構造物の応答や破壊に及ぼした影響について、各種の応答スペクトルから検討してみる。

(2) 絶対加速度応答スペクトルの比較

従来から地震工学において良く用いられている線形1自由度系(減衰定数5%)の絶対加速度応答スペクトルを図-3.2に示した。同図を見ると、従来から

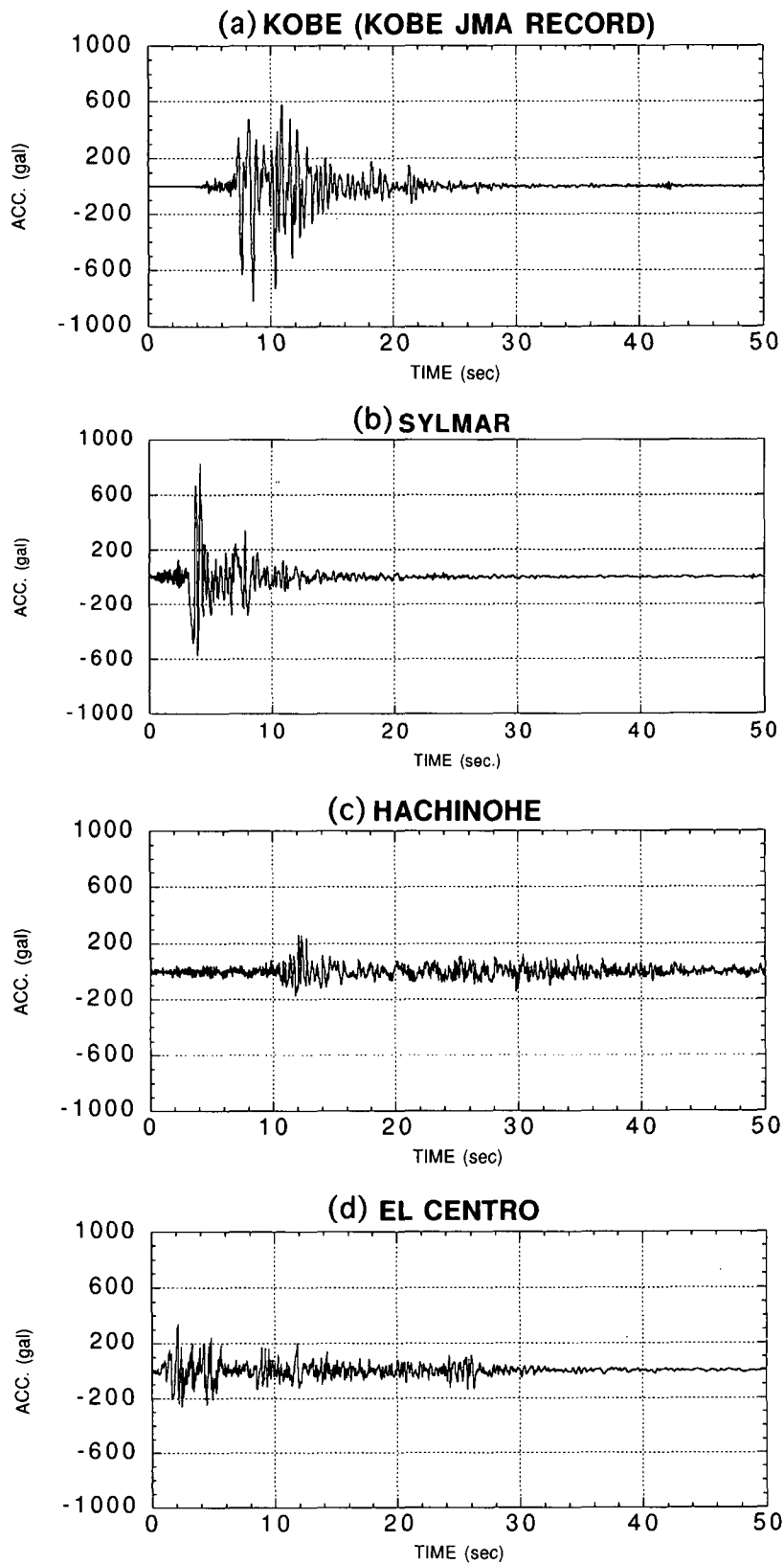


図 - 3.1 過去の地震加速度記録と神戸海洋気象台における記録との比較

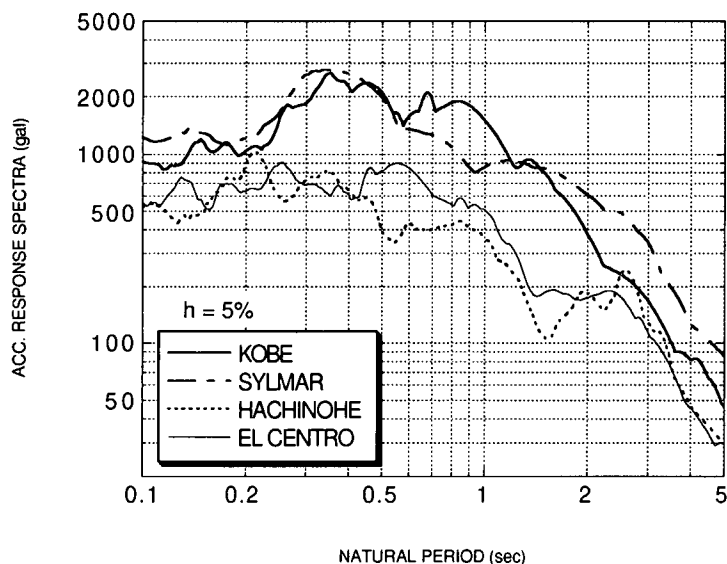


図 - 3.2 絶対加速度応答スペクトルの比較

の八戸、エルセントロ記録では、全周期領域において1 G以下となっているのに対し、神戸の記録では、0.15～1.2秒の周期帯で1 Gを越えている。特に0.3～0.5秒の区間では2 Gを越える極めて大きな値となっている。シルマーでの記録も全周期帯において、神戸の記録とほぼ同じ傾向を示している。すなわち、断層のごく近くで得られた神戸とシルマーでの記録の加速度応答スペクトルは、いままでの地震記録からほぼ上限に近いと思われていた1 Gをはるかに越える極めて大きなものであることが判る。

阪神間の震度7の地域における構造物の被害を調査した結果、比較的剛な橋脚や10階建て以下の建物の崩壊が数多く見られた。反面、背丈の高い橋脚や10階以上の中高層建物には大きな被害がみられなかった。こうした被害の分布は、同図の線形系の応答スペクトルの結果から十分には説明できない。震度7の地域で被害を受けた構造物は大きく塑性域に及び挙動を示しているわけであるから、こうした弾塑性復元力を考慮した応答の評価が必要である。

(3) 必要弾性強度スペクトルの比較

合理的な耐震設計法の基本的考え方は、ねばり強くしなやかに、そして構造系全体で地震エネルギーを吸収するというものである。この考え方は、弾塑性耐震

設計法によって具体化されている。構造物の弾性強度を10倍に上げずに地震に耐えるには、地震応答が弾性限を越えて塑性域に及んでも、最大変形に至るまで抵抗力が大きく減少しない「ねばり」を持たせれば良い。当然コンクリートのクラックや鋼材の降伏などの小被害は発生しても大きく崩壊することはない。つまり、ねばりで地震エネルギーを吸収できれば、弾性限を越えて塑性域に入っても一気には壊れず、構造系としてねばって行くはずである、というのが弾塑性耐震設計法の基本である。

この考え方に従えば、より大きなねばりを有する構造物では、より低い弾性強度で耐震設計可能である。エネルギー一定則では、弾性ポテンシャルエネルギーと弾塑性ポテンシャルエネルギーとが等しくなるという静的条件で、ねばりによる設計震度の低減率を算出している。

必要弾性強度スペクトルは、構造物のねばりを塑性率（構造物の耐力が保証される変形 / 降伏時の変形）で表し、構造物の変位応答が定められた塑性率になる時の降伏強度（単位質量あたりでは降伏加速度）を縦軸に、構造物の弾性固有周

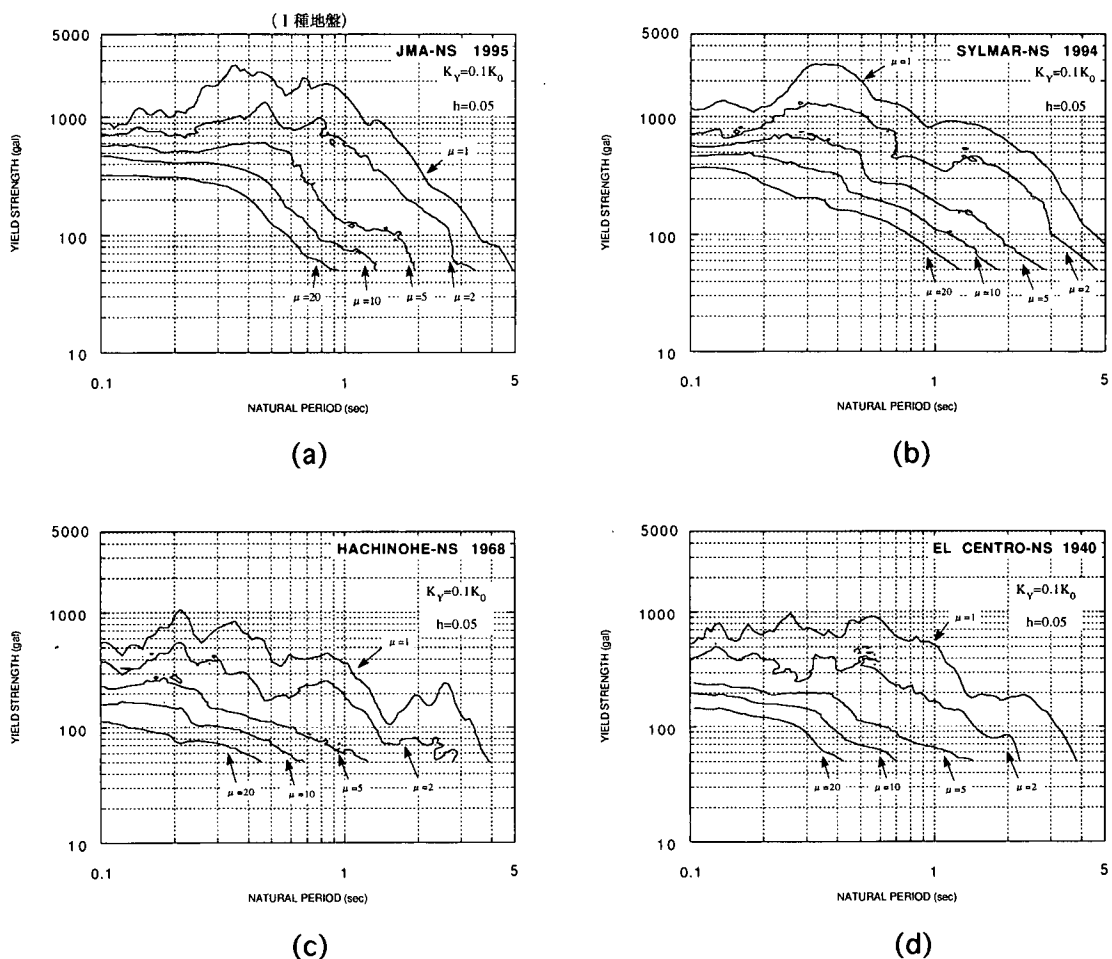


図 - 3.3 必要弾性強度スペクトルの比較

期を横軸に示したものである。この考え方は、Newmark, Veletsosによって最初に提唱され In-elastic Response Spectrum と呼ばれたが、最近ではより内容に近い Strength Demand Spectrum という呼び方が一般的になってきている。

構造物の履歴復元力特性を完全弾塑性型と仮定し、減衰定数を 5 % とした時の必要弾性強度スペクトルを、図 - 3.3 (a) ~ (d) に示した。塑性率 μ が 1 の場合は、弾性絶対加速度応答スペクトルそのものを示している。 μ をより大きく取れる場合には、必要降伏加速度 (質量を掛ければ必要弾性強度) が低下することが判る。エネルギー一定則では、 $\mu = 1$ の弾性絶対加速度応答を、全周期領域で $1/\sqrt{2\mu - 1}$ 倍することになる。

今までのエルセントロ記録や八戸記録では、 $\mu = 5$ のねばりを有すれば、弾性強度レベルは、0.2 G でほぼ充分であるのに反し、神戸やシルマーの記録では、周期 0.5 秒以下の短周期領域において $\mu = 10$ のねばりであっても 0.4 G レベルの弾性強度が必要となる。強い直下地震に対して、強度とねばりの両方とも今までのほぼ倍の値が要求されている。

3.3 地上構造物 (橋梁) が保有すべき耐震性能と耐震設計法

(1) 地上構造物の被害の概要

阪神・淡路大震災では、地上構造物 (橋梁) は、鉄筋コンクリート構造および鋼構造を問わず、大きな被害を受けた。この第一の原因が作用した地震力が設計で想定したものを大きく上回ったことにあるのは明らかであって、発生確率は極めて低いが一度発生すれば巨大な外力として作用するという特徴を有する地震に対して、設計でどのような地震を想定し、構造物にどのような耐震性能を保有させるかが大きな課題であることには異論がないであろう。被害の具体的な様相は鉄筋コンクリート構造と鋼構造では若干その趣を異にする。以下構造別に述べる。

鉄筋コンクリート構造で生じた著しい被害は、橋脚におけるものが大部分であり、被害のメカニズムはほとんどが剪断破壊あるいは曲げ降伏後の剪断破壊であって、総じて従来の大震災で見られた現象以外の現象は見られなかったといえる。このような既知のメカニズムで被災した原因としては、当時の設計基準では、塑性変形によるエネルギー吸収を考慮する規定が設けられていないこと、コンクリート断面で受け持たれる剪断力を過大評価していたこと、軸方向鉄筋の途中定着、帯鉄筋の定着その他の構造細目に属する事項に不備があったことなどがあげられる。これらのうち、大半は宮城県沖地震以後に改められているが、今回のような大地震に対して十分な塑性変形量の確保、施工性を考えた帯鉄筋の定着方法など

に関しては、なお検討が必要である。

鋼構造では、橋脚の座屈および脆性破断、ラーメンの柱および梁部材の座屈、溶接部近傍の割れなど様々な被害が見られたほか、杓および落橋防止工のなどの局部的被害が落橋その他の大被害につながった例も少なからず認められた。従来、鋼構造は弾性域内にあるように設計されていたが、想定地震より大きな地震力により弾性域を越えて応答した結果このような被害につながったと考えられ、特に橋脚その他の柱部材では、塑性変形能に期待した設計を取り入れることが必要であるといえる。このほか、鉄筋コンクリート構造および鋼構造を問わず、地盤の液状化により橋脚が水平移動して大被害につながった例があり、これの防止策も今後の検討課題である。

(2) レベル1 地震動に対する耐震性能

レベル1 地震動とは、従来の設計基準類で標準的に想定されていた地震動に対応するものであって、構造物の供用期間内に1～2度発生する確率を有する地震動である。換言すれば、すべての構造物がその供用期間内に体験する確率が極めて高い地震であって、すべての構造物に対して損傷を受けないという耐震性能を保有させることは、社会的な要請と合致するばかりでなく経済的にも十分に容認されるものである。ここで損傷を受けないとは、地震後になんらかの補修・補強を行わないで使用できることを意味し、必ずしも全くの無被害であることを意味するものではない。これは、おおむね構造物の応答が弾性限界を超えないことと対応する。このような耐震性能は、鉄筋コンクリート構造物にあっては、主鉄筋および剪断補強鉄筋が降伏しないことおよびコンクリートに圧壊が生じないことを実現すれば、また鋼構造物にあっては、断面応力が降伏点を越えなければこれを実現することができる。

(3) レベル2 地震動に対する耐震性能

レベル2 地震動は、発生する確率は極めて低いが、非常に強い地震動である。このような地震動に対して、すべての構造物にレベル1 地震動に対する場合と同様の耐震性能を発揮させるのは経済的に得策でないことは明らかであるが、一方で、人命、社会・経済に大きな影響を与えるような損傷を防止しなければならないこともまた明らかである。そのため、このような地震動に対しては、ある程度の損傷が発生し残留変位が生じても、地震後比較的早期に修復可能な耐震性能を保有させるか、最悪な場合でも、構造物全体系の崩壊が生じないようにとしたのである。どの程度の損傷を許容するかは、構造物が損傷を受けた場合に、人命・生存、避難・救援・救助活動と二次災害防止活動、地域の生活機能と経済活

動に与える影響の度合いなどを考慮して決定される構造物の重要度によって定める。なお、許容される損傷の程度には、重要度のほかに、復旧の容易さが大きな影響を及ぼすことに留意しなければならない。すなわち、復旧に多大の費用と日時を要さない構造物では、重要度が同じであっても、大きな損傷が許容されてしかるべきである。構造物が損傷を生じても早期に復旧できること、あるいは崩壊しないことが実現されているか否かを検討することは必ずしも容易でないが、構造物の応答変位がその塑性変形能を越えないことを確かめれば、概ねこれを正しく評価できる。

(4) 耐震設計上の留意点と今後の研究課題

設計用入力地震動に対し構造物が上記のような耐震性能を発揮するか否かは、応答解析を行って各種の応答値を求め、これに対して構造物が安全に耐え得るか否かを確かめることによって検討される。応答解析については、時刻歴応答解析によることを第一に推奨し、場合によっては、より簡便な応答スペクトル法によってもよいとした。このように従来からの静的解析に加え、動的方法によることを提言したのは、地震動を適切に設定できれば、動的解析の方が正しい結果を与えること、コンピュータの著しい進歩により解析の手段に隘路がなくなったことを考慮したものである。なお、構造物の耐震性能を考えれば、応答解析は、レベル1地震動に対しては線形解析、レベル2地震動に対しては非線形解析を適用すべきであることは明らかである。また、応答スペクトル法による場合、レベル2地震動に対しては、非線形の復元力特性を仮定して求めた非線形応答スペクトル、あるいは線形応答スペクトルと非線形の影響を修正する適切な方法との組み合わせによることができる。

残された問題は、レベル2地震動に対して構造物に保有させるべき塑性変形能とその評価である。鉄筋コンクリート構造物の場合、これは相当程度明らかにされており、大きな問題はない。すなわち、曲げ降伏後の塑性変形に期待した設計法は従来から採用されてきているものであり、塑性変形評価式もある程度確立している。今後検討すべき事項は、広範な構造物に適用できる塑性変形能評価式を確立すること、剪断補強鉄筋の役割をより明確にし、これの性能を十分に発揮させるための、配置方法、定着方法といった構造細目に属する事項を確立すること、などである。これに対し、鋼構造物では、従来から塑性変形能に期待した設計はほとんどなされておらず、これの実現方法や評価方法は確立されているとは言い難い。したがって、これらを解明することが今後の研究課題である。

このほか、構造物の種類に限らず適用される留意事項・研究課題は、構造物が崩壊に至るか否かの判定、構造物と地盤との相互作用の考慮、免震・制震装置の

採用などである。このうち、崩壊に至るか否かの判定は、特に不静定次数の高い構造にあっては、塑性ヒンジの回転能を考慮した終局変形能を算定する必要があり、研究・開発が要請される。地盤と基礎の動的相互作用に関しては、これにより被害に至った例が見られることから、今後必要に応じて耐震設計に取り入れることが検討されなければならない。また、免震・制震装置は、構造部材の耐震性を高めて構造物の耐震性を向上させるより、経済的かつ効果的に耐震性の向上が図れる可能性があり、積極的な導入がなされるよう研究を押し進めるべきである。

3.4 地中構造物の被害と提言の主旨

兵庫県南部地震における地中構造物の被害は土被りの小さな開削トンネルの一部で重大な被害が生じたものの、大部分の地中構造物の挙動は従来のもものと大きな違いはない。ここで言う地中構造物はトンネルおよび埋設管路類のことであり、その構造は多様である。

(1) トンネルの被災状況

山岳トンネルの被災の状況は、覆工コンクリートのアーチ部あるいは側壁アーチ部打ち継ぎ目のコンクリートの部分的な剥離、打ち継ぎ目部の目違い、クラックの発生あるいは既往のクラックの拡大などである。また、トンネルの中心線のずれと見られる現象が報告されている。被災の程度はロックボルト、吹き付けコンクリートで復旧が可能な程度にとどまっており、その箇所数も限られ大部分は無被害か補修を必要としないクラックの発生程度である。被災箇所の多くは施工中に記録されている断層破碎帯の位置と符合している。これらの現象は従来のもと同様であり特異なものではない。

シールドトンネルにおける被害の状況は、二次覆工の縦断方向のクラックの発生、セグメントの目違い、セグメントのクラック、一部セグメントの欠け、剥離などである。また、立坑との取り付け部でのトンネルと立坑とのずれ、それに伴う漏水現象が報告されている。クラックなどの発生位置は地盤状況などを反映して複雑であり、傾向を見い出すには詳細な検討が必要であるが、橋梁のアバット下部や杭切断部を通過している場合はその影響が認められる。今回の被害の特徴はトンネル横断面内での動きに基づくと考えられる現象が顕著であったことであり、従来からの問題としてきた軸方向の動きに基づく挙動は必ずしも明確でなかった。いずれにしろ、トンネルとしての機能を失うような被害は生じておらず、シールドトンネルは耐震性の高い構造形式であることが示された。

開削トンネルでは神戸高速鉄道大開駅に見られるように大きな被害を受けたものがあり、従来の地震では見られない現象が生じた。すなわち、中柱を有する開削トンネルにおいて中柱が押しつぶされトンネル全体が破壊し、復旧に多くの時間を要した。また、床板と側壁部とのずれなども生じている部分もある。トンネルの破壊には至らなかったものの中柱の損傷は神戸市営地下鉄でも生じている。大きな損傷を受けた箇所は土被りの小さい部分に多い。しかし、被害の生じていない区間が多く、また、当該地域には開削工法で造られた地下街、地下駐車場が存在するが、ほとんどは無被害であり、被害が生じたものでも給排気塔、階段室との取り付け部における被害で二次的なものである。現象は複雑で今後の検討に待たなければならない点が多い。

(2) 埋設管路の被害状況

埋設管路の被害は幹線系では比較的少なく、多くの被害は端末の管路部分で生じた。被害はマンホールあるいは建物との接続部など変位挙動の異なる部分もしくは液状化、側方流動が生じるなど地盤条件から変位が大きい部分で生じている。被害形態は管継手部の破損で、形式の古いもの、対策のとられていないもので発生しており、新しい形式の継手では被害が少ない。改良された継手の有効性が示された結果となっている。また、共同溝に収容された管路では被害は生じておらず、共同溝はライフラインの安全上有効な施設であることが確認された。

(3) 地中構造物の耐振性のあり方

地中構造物は山岳トンネルのように地盤そのものが構造体にあたり、あるいは全周が地盤に支持された構造物であるため、地下構造物の安定は地盤の安定性の確保が前提である。したがって地震時の地盤の安定性の十分な照査が必要である。

山岳トンネルの場合は、地盤の安定性が問題となるのは坑口、土被りの小さい斜面下にトンネルが設けられる場合、断層破砕帯などである。地形的に不安定な場合には安定性を確保するための対策が必要である。断層破砕帯ではトンネル構造で対応する必要が大きくなるが、その構造は耐荷力とともに変形性を有するものであることが必要である。

地震動の伝播にともなって地盤変位が生じ地中構造物に影響を与える。一般にこの影響は土被りが大きく、均質な地盤では小さく検討を省略できることが多い。土被りが小さい場合、地盤の構成が複雑な場合あるいは近接構造物が存在し他の構造物との相互作用が考えられる場合は地盤の地震応答を三次元的に検討し、地中構造物に与える影響を十分に把握する必要がある。また、立坑との取り付け部、トンネル断面変化部など挙動の異なる構造物との接続部では地震動が構造物に与

える影響が特に大きい。地震動の影響の解析手法については、震度法、応答変位法、動的解析法が用いられているが、検討の対象と目的に応じて適切なものを選択する必要がある。

解析結果の評価は、レベル1地震動に対しては、弾性限界状態を超えずトンネルの機能が維持されるようにすることが必要であり、レベル2地震動に対しては、使用目的に重大な支障を与えず、構造物の復旧が可能な損傷に留めることが必要である。

地盤変位は構造物を歪ませる結果となり、過大な応力を発生させることがある。地震時応力には構造物の耐力を増加させて対応する方法と構造物に可撓性を持たせ応力の発生を軽減する方法とがある。一般に可撓性構造を採用することが可能な場合は可撓性構造が採用されてきている。従来考慮されていない大きな地震動に対応するためには、さらに可撓性を高めるための構造および材料の検討が望まれる。また、可撓性の構造を用いることが容易でない開削トンネルなどの構造では、構造部材の脆性的な破壊を防ぐための構造細目の採用および一部の構造部材の破壊が連鎖的に全体的な破壊に繋がることのないような構造形式の採用が必要である。なお、地盤変位の影響の他、地震動の衝撃的影響などについては今後検討していく必要がある。

今回の地震のみでなく過去の地震においても地震による断層のずれの直接的な影響を受けることがある。今回の地震では比較的小さな影響であったが、過去には非常に稀ではあるが大きな影響を受けた例もある。活断層の位置が明確である場合にはその対策を考慮することが望ましいが、規模の大きなトンネルでは技術的に困難であるのが現状である。規模の小さな場合あるいは管路の場合は大断面化、二重化、可撓化、構造物と内部施設の絶縁化などが考えられるが、技術的に大きな課題がある。したがって、システムとしての代替性などソフト面からの対策も併せて考慮することが考えられる。

ライフラインシステムのように広がりが大きく、量が大きいものについては端末に至るすべてに同等の耐震性を維持するのは現実的でない場合が考えられる。また、ライフラインはまさに生活するうえでの基本である。したがって、ライフラインシステムでは、レベル2地震動に対しても機能の最低限の維持と早期の復旧が要求される。このため、地域の地形・地盤条件および都市計画などを考慮し、幹線ラインについてはレベル2地震動に対し機能を維持するよう計画する必要がある。地盤の状況や経済性からこれが困難である場合には、災害時に必要な機能を維持し早急な復旧を可能にするよう、幹線の設定、多ルート化、ブロック化、代替手段の採用などシステム面からの対策を取り入れることが必要である。

3.5 地盤および構造物基礎の耐震性能と耐震設計

(1) 構造物基礎の耐震性能

直接基礎など主に地盤の鉛直支持力が重要である構造物が液状化の可能性のある地盤に建設されている場合は、締固め等により地盤を何らかの方法で改良して液状化を発生させないことが必要とされている。

橋梁などの杭基礎やケーソン基礎などの場合も、基礎の深部が液状化する可能性のない地盤で支持されていることが基本である。基礎の周囲の地盤が液状化する可能性がある場合は、地盤改良よりも、液状化により地盤の抵抗力を低減したり無視した設計あるいは落橋防止工などによる機能保持に重点を置いた設計の方が合理的である場合が多い。さらに、地盤が液状化により側方流動する可能性がある場合は、その影響を考慮して基礎の設計をする必要がある。

(2) 岸壁、堤防および盛土の耐震性

これらの構造物は、建設延長が長く構造物の重要性が変化するという特徴がある。また、基礎地盤や盛土本体は、液状化して流動的に変形・変位するのでなければ、地震により変形が生じても完全な崩壊に至るまでに粘りを発揮する、という意味で靱性が期待できる。したがって、岸壁、堤防および盛土の設計では、重要度に応じた所定の性能を保持できるレベルに変形・変位が収まるように設計することが肝要である。

(3) 地盤、構造物基礎、岸壁、堤防および盛土の耐震設計における留意事項と研究・開発課題

従来、自然の洪積礫地盤が液状化した事例は殆どない。一方、自然の沖積地盤では通常、平均粒径が大きければ細粒分含有率がそれほど小さくなく、透水性が十分高く、液状化強度が大きいと考えられていた。したがって、今まで、平均粒径が2mm以上の礫地盤に対しては、液状化の可能性を検討しない場合が多かった。しかし、今回の地震では締固めなどの地盤改良をしていないまさ土の埋立て地盤が広範囲に液状化した。これは平均粒径が2mm以上でも、均等係数が非常に大きく、シルトと粘土分の含有率がかなり高い状態にあったためと考えられている。このことは単に平均粒径が2mm以上では液状化の可能性がゼロとするのは適切ではない事を示している。

震度が大きくなると密な砂地盤でも液状化の可能性を検討する必要がでてくる。最近の研究によれば、 N 値が20程度以上の砂は液状化しにくいこと、密な砂は

非排水状態で繰り返し载荷を受けた場合、ひずみの振幅の増加とともに強さが増し粘りを発揮すること、また、繰返し回数が少なく衝撃的な地震動では強度は増加することが明らかになってきた。これらの要因を考慮して、密な砂の液状化強度を評価する必要がある。

地盤が液状化により側方流動する可能性があり、その影響を考慮して基礎の設計をする場合、側方流動する可能性のある地盤の範囲、地盤の変位量や液状化の程度と基礎に加わる流動土圧の関係を適切に評価する必要がある。

また、レベル2の設計地震動の対して、岸壁、堤防、擁壁および盛土の耐震設計や地盤設計、液状化判定では、従来の震度法による極限釣合法安定解析が基本にならざるを得ないと考えられる。その場合、安定解析で用いる設計震度は、従来の値より大きくなるであろうが、地盤面での設計地震動の最大加速度を重力加速度で除した値をそのまま使用することは必ずしも現実的ではない。極限釣合法で用いる土の強度の評価については再検討する必要がある。

従来、静的試験から得られる内部摩擦角と粘着力を用いて安定解析を行うのが通例であった。しかし、地震動のような急速荷重が加わる場合、粘性の粘着力成分は相当増加することが知られているので、安定解析を行う場合、地震時の载荷環境に合った試験条件で求めた強度定数を用いる必要がある。

設計水平震度は、一定の変位・変形が生じることを許容するが盛土・擁壁の強度上の粘りを確保し、盛土の流動的破壊や擁壁の倒壊が生じないように決定する必要がある。

4. 耐震診断と耐震補強

4.1 耐震診断

(1) 耐震診断の基本方針

1) 既存土木構造物は、多種多様であり、かつその数は膨大となるため、これらの耐震診断は概略的な方法による一次診断とより詳細な方法による二次診断に区分した。

2) 一次診断法は多くの土木構造物を対象とする。そのため、なるべく簡易で経済的な方法とすることが望まれるので、阪神・淡路大震災による土木構造物の被害の実態を踏まえて診断の対象構造物を選定し、耐震補強を必要とする構造物および二次診断による耐震性能の詳細検討を必要とする構造物を抽出することと

した。一次診断では以下の理由により、特に下記の4項目に着目して一次診断を行うものとした。

- ① 建設年代：1980年以前の古い構造物に被害が多い。
- ② 準拠基準：準拠基準により、耐震性能が異なる。
- ③ 概略な構造特性：鉄筋コンクリート構造物の場合では剪断先行型、鉄筋の途中定着有無などで損傷程度が異なる。またラーメン型高架橋脚と一本型橋脚では損傷程度が異なる。
- ④ 地盤条件：液状化の有無、側方流動の可能性などで損傷程度が異なる。

一次診断では第一次提言で示された構造物の重要度に影響を与える諸要因に加えて、既設構造物に対して構造物が構成するシステム機能の代替性を評価したり、建設後の環境変化や材料、地盤強度の経年変化など建設時からの条件の変化等を考慮することを追加項目としてあげた。

3) 二次診断は設計図書、地盤条件をもとに新設と同様な耐震設計法を用いることを原則としている。ただし、構造物の耐震性能の最低限の目標として「構造物が損傷して修復不可能であっても崩壊しないこと」としている。補強が必要と診断された場合は、新設と同様な耐震性能まで耐震補強することが望ましいとした。また、必要に応じて、常時微動測定、コンクリート非破壊試験等の現場計測、試験および地盤条件等の調査を行い、想定地震動強さに対する耐震性能を再評価することとした。

(2) 耐震診断のためのデータベースの整備

建設年代が古く、構造物等に関するデータが不明な場合についての扱い方を述べ、耐震診断で必要となる建設年代、準拠年代、設計図書、施工記録などのデータベースの早急な整備の必要性を示した。

(3) 構造系としての耐震性能

構造物の全体系としての性能とは、橋梁・基礎構造物の場合は上部構造、支承、橋脚、基礎の全体としてのバランスを保持するように考慮し、一部位の補強が他の部位の損傷に大きな影響を与えることがないように全体系としての配慮が必要としている。また、液状化の可能性のある地盤における構造物については液状化を考慮した地盤も含めた全体系での耐震性能の検討が必要である。

(4) システムとしての地震防災性

道路や鉄道施設の場合は線的に連続しており、橋梁・基礎構造物や盛土等の土構造物 およびカルバート等地中構造物により構成されている。このような場合では耐震性能が異なる構造物で構成されていること、また、代替施設の有無と迂回路距離が異なること等を考慮して、システム全体の地震防災性の効果的な向上を考慮する必要があるとした。

4.2 耐震補強

(1) 耐震補強の基本方針

既存の土木構造物はそれぞれ建設年代が異なり、その種別や環境条件、使用状態、メンテナンス状況等によってその構造物が今後使用可能な期間である耐用年数（平均余命）も異なる。また、構造物としては健全であっても、使用環境の変遷に伴う機能不足が顕在化することなどにより、残された供用期間は異なってくる。

一方、構造物の耐震設計（新設）に用いる設計地震動として、供用期間を確率変数に含むと考えられるレベル1地震動と、供用期間には関わらず地理的条件等から設定される低確率のレベル2地震動を考慮すべきとしている。この基本思想を既存の構造物の耐震補強に適用するにあたり、以下のような2通りの考え方が提示された。

第一は、残された供用期間が短ければ、確率論的にはその構造物が遭遇する地震動のレベルは低くなり、それに応じて耐震補強レベルはある程度異なってくるのが当然との考え方である。たとえば、数年後に再建が予定されている構造物の耐震補強には限界があるだろうとの常識論である。

第二は、新設構造物、既設構造物を問わず大地震が発生すれば同程度の地震力を受けるのであり、レベル2の地震動を想定することに決めたかぎりは新設と既設の区別はないという原則論である。

想定地震動レベルを上げた新しい耐震指針が適用された場合、それ以前の指針で構築された構造物の実質的な強度が高いとしても、構造体の経年変化等を考慮すれば、新しい耐震基準が要求している水準を満足しない既存構造物が相当数存在することは明らかである。ただし、これらの構造物全てを新しい耐震水準に引き上げるには多くの困難が伴い、現実性がないこともまた事実である。一方、地震直後の救援活動に不可欠となる通信、交通ルートの確保や救急施設などについては、通常の耐震基準以上の性能が要求される場合もあると考えられる。

構造物が地震を受けた際の想定被害を低減する選択肢の一つが既設構造物の耐震補強ではあるが、想定被害の程度に応じて地震後の応急復旧や再建を選択する

場合もあり得る。また、直接対象構造物を補強するのではなく、代替機能を有したバックアップシステムの構築なども広義の耐震性向上対策と考えられる。

これらの討議を踏まえ、構造物の耐震補強の検討に際しては、原則として新設構造と同様の耐震性能を追求すべきものとした。耐震性向上対策としていったん耐震補強を選択した場合、その補強程度による工事費の差異は一般に小さいと考えられ、まずは新設構造と同等の耐震性能を目指すべきであるとしたものである。したがって、このことは自動的に新しい耐震基準を満たさない全ての構造物を一律に耐震補強すべきであるとしたものではない。

前項の耐震診断では、構造物の耐震性を種々の指標で判定し、耐震性が不足する可能性がある場合に耐震補強の検討に進むが、対象構造物が供用中であることを考慮すればその補強方法は自ずから制約されるし、現状の技術水準では十分な補強効果が得られなかったり、構造的なバランスや合理性に欠けることも想定される。このような場合には、構造物あるいは周辺地盤の耐震補強というハード面の直接的な対策ばかりでなく、対象構造物の補強レベルを多少低下してでも、代替システムの整備や早期復旧法の開発など、柔軟で合理的なソフト面での対策をも検討すべきであり、総合的な価値判断が重要となってくる。

(2) 優先順位

耐震補強の実施にあたっては優先順位を決めて取組まざるをえないが、この決定過程を客観的に明示することが、耐震性向上対策事業を効率的かつ社会的に受け入れられる形で進めてゆくうえで今後重要になるものと考えられる。

アメリカ合衆国連邦道路管理局発行の『道路橋耐震補強マニュアル』(1995)では事前評価手法の中で、道路橋の想定地震被害度の程度によって幹線道路網の橋梁に優先順位を付けるための数量化手法(優先度指標)を示している。これは耐震診断の段階で、構造上の脆弱性および地震活動度に基づく等級付けを行い、次に構造物の重要度(社会的、経済的要因)、非地震関連の構造要因、その他ネットワークの代替機能性等の要因を加味して優先度指標なるものを算定するとしている。

河川堤防、護岸、岸壁、擁壁、盛土などの土構造物は、延長が長大であり、大規模地震に対応できるように耐震性を向上させるには現状の技術水準では財政的負担が大きすぎることから、その崩壊が甚大かつ長期、広範囲に及ぶような影響を及ぼしたり、地震後の救急活動に不可欠な部分を優先させる考え方が要求される。

ライフライン等の構造物については、個々の構造体の耐震性以前に供給システムとしての強靱性を維持・確保するため、ルート別の優先順位が検討され、局部

的な崩壊がシステム全体の機能麻痺に陥らないように補強すべき構造物を特定してゆく手順が必要となろう。

(3) 耐震補強の方法

構造物の耐震補強は、地震時に部分的な損傷は受けても急激な全体崩壊を回避するなどの相対的に望ましい破壊形態に導くような補強方法を模索すべきである。これまでの震災事例などから、甚大な被害に結びついた構造要素（たとえば剪断耐力が不足した橋脚、地下鉄の中柱、落橋に至った支承周辺構造等）が着目され、これを効果的に補強する以下のような対策が検討されている。

橋梁・基礎構造物の鉄筋コンクリート脚柱では、鋼板や鉄筋コンクリートあるいは炭素繊維を巻立てて補強する工法が実用化されている。鋼製橋脚では、コンクリート中詰めによる橋脚柱の座屈防止が図られている。

土構造物の護岸・岸壁では、背面土圧や液状化圧力等を軽減する地盤改良、既存護岸の変形を抑制する異種構造物の併設、既設構造物の一体化などが考えられている。

耐震補強は、現状構造物の地震時の危険性を減少させる一つの方法として選択されるが、地震時に想定される損傷形態や被災程度とそれが及ぼす影響度合い、復旧の難易度によって現実にはその補強程度や方法が変わってくる。最近注目を集めつつある免震構造化や地震荷重を適切に分散化する構造等も有効な選択肢の一つとして検討されるべきと考えられる。

耐震補強工法の選定にあたっては、今回の地震で比較的被害が軽微であった構造物の分析結果などが参考になる。たとえば、地中埋設管路におけるフレキシブルジョイント、地下鉄におけるコンクリートが充填された鋼管柱など、今回の地震でその耐震性が評価された構造を、積極的に取り入れることも考えられる。しかしながら、今回の大震災において大きな損傷を受けた構造物と比較的損傷程度が低かったものの差異が全て解明されたわけではなく、耐震性能を適切に予測する技術の確立が一層望まれる。

また、これらの耐震補強は、既設構造物であるため、多くの場合、構造物を供用しながら、耐震補強工事を実施することが要求されるため、施工期間、施工スペースが制限され、かつ振動・騒音等に対する周辺環境からの規制条件も厳しくなると考えられる。このため、施工性、安全性、経済性、周辺環境への影響度および維持管理の容易性を考えて選定することが望ましい。

耐震補強では、維持管理の容易な方法を採用することも重要である。これは現時点での知見に基づいて施された耐震補強法でも、技術開発の動向（新工法、新材料）によって見なおす必要が生ずる可能性があること、および、重要な箇

所であればあるほど補強後のモニタリングが不可欠となるからである。たとえば、ライフラインについては、可能であれば重要な幹線ラインは共同溝に改変して維持管理が容易になるシステムをめざすことが望ましく、現実の予算面、既設のルート of 制約を考慮に入れた上で対象部位を選択する必要がある。

(4) 補強構造物の耐震性能評価

補強された構造物は、新設構造物に比べより複雑となるため、従来の設計式や新設構造物に適用される評価式では対応できない場合がある。補強された構造物の耐震性能評価は、耐震診断の二次診断に用いる手法に基づいて実施するが、より詳細な挙動を把握するため、構造物や地盤の非線形性を考慮した数値解析も有効と考えられる。また、必要に応じて模型実験や実物載荷試験を実施したり、あるいは地震観測によって得られた知見に基づき耐震性能評価の妥当性を再評価・検証することが望ましい。

補強部材の取付け加工などによって構造本体の強度の低下を招いたり、補強された構造物の耐荷性能が向上しても、これを支持する未補強部材の負担が大きくなり、結果として構造全体の耐震性能が不足する場合があります。また、特定の構造物補強工が隣接するより重要な構造物の損傷を誘発する可能性や、補強対策工の影響程度を総合的に評価しておく必要がある。

(5) 維持管理・補修

補強された構造物に対しては新設構造物と同様あるいはそれ以上の頻度で定期的な点検を行い、劣化等に対する維持管理を適切に行い、必要に応じて補修を行なうのが望ましい。

特に人的災害への影響、社会経済的コストへの影響が大である重要な構造物、施設については、地震観測を併用したモニタリングを行い、中小規模の地震に対する挙動のデータを蓄積・分析し、目標とした耐震性能が保持されていることを確認すべきである。さらに、維持管理の過程で得られた新しい知見に基づき、構造物の耐震性能評価手法や補修方法を見なおして行く姿勢も重要である。

4.3 耐震診断および耐震補強に関する今後の研究・開発課題

(1) 耐震診断および耐震補強に関する今後の研究・開発課題

今後、兵庫県南部地震による強震動を想定してわが国の地震防災性の向上を図るためには、多くの既存土木構造物の耐震診断と耐震補強が不可欠である。しか

しながら耐震診断と耐震補強は容易な事業ではない。補強を必要とする構造物の数量は全国規模で考えれば膨大な量に達する。高速道路橋、鉄道、地下鉄、各種コンビナート施設など緊急な補強を必要とする構造物は無数に存在し、かつ構造物も多種・多様である。さらに耐震診断と耐震補強が容易でないことの原因の一つとして、ほとんどの構造物、施設をそれらの機能を停止することなしに実施しなければならないことである。道路、鉄道等にしてもそのほとんどは供用しながら補強工事を行うことが要求される。このため、補強工法や施工時間が大きく制約を受けることになる。阪神・淡路大震災のような悲劇を二度と繰り返すことのないように地震に強い国土を建設するためには、耐震診断と耐震補強が国家的事業であることは明白である。このためにはこれらの困難を克服して、施工法、経済性に優れた耐震診断と補強技術を開発することが急務である。

現在、コンクリート橋脚や地下鉄柱部の鋼板巻きによる補強が関係各機関によって積極的に進められている。未着工の関係各機関もこれらの新工法の有能性を十分に確認のうえ積極的な採用を図るべきであろう。また、新工法の有用性の確認のためには、実物大に近い載荷実験や数値解析を行うことも必要となる。

土木構造物の耐震補強において大きな課題の一つは基礎や地盤の補強である。兵庫県南部地震では液状化した地盤が水平方向に数メートルのオーダーで移動する現象、すなわち側方流動が生じ、水際部の建物、橋梁の基礎に極めて深刻な被害を発生させた。液状化や側方流動に対して十分な強度を持たない構造物基礎の補強が急務であるが、しかしながら、側方流動が構造物基礎に及ぼす外力の特性など未解明な点が多く、合理的な補強方法確立するための基礎的な知見が著しく不足している。このためには、兵庫県南部地震によって被害を受けた基礎構造物の逆解析、模型実験あるいは数値解析を行って、液状化や側方流動が構造物基礎に与える影響を明かにしていく必要がある。

液状化対策が全く施されていない地盤、特に危険物や高圧ガス施設の地盤の改良も重大かつ緊急な課題の一つである。阪神・淡路大震災ではタンクヤードに液状化が生じ、さらに側方流動が発生して、多くのタンクが移動・傾斜した。幸いにも内容物の重大な漏洩は発生しなかったが、液状化対策が施されていないコンビナート施設および地盤の耐震補強が極めて重要な課題であることを示した。

さらに、このような未改良埋立地盤に埋設されているライフライン管路の補強も緊急な課題である。東京、大阪などわが国の大都市域には海浜部や河川を埋立たた地盤が存在する。これらの埋立は古くは江戸年間から行われており、液状化に対して何らの考慮もされていない。これらの埋立地には既に多くの構造物が建設され、敷設年代が古くかつ強度の低い管路が埋設されているのが現状である。このようなライフライン埋設管は順次高強度の管路に敷設替えすることが必要であ

るが、敷設替えの必要な路線数が多いため、この場合もまた耐震補強は容易ではない。

(2) 構造物、施設等に関するデータベースの整備

土木構造物の供用時の定期的な維持・点検のための管理データベースの構築はすでに各公的機関で進められているが、地震防災、耐震診断、耐震補強を目標とする構造物や都市施設に関するデータベースの構築は遅れている。耐震補強法や優先順位を決定し、総合的な補強戦略を立案して行くためにはこのようなデータベースの構築は不可欠な課題である。さらに、これらのデータベースの整備は地震後の復旧・復興戦略にも極めて重要である。阪神・淡路大震災において神戸市庁舎が崩壊し、水道関連の図面など資料の喪失は復旧作業に極めて深刻な影響を与えたことは記憶に新しい。

都市施設のデータベースの整備はガス事業などを中心に一部のライフラインおよび建設省など幾つかの公的機関で進められているが、すべてが相互の連携なしに独立して進められている。地震に強い都市と地域作りには、ライフライン、危険物、交通など都市施設を総合化した、共通データベースの構築が必要であることは言を持たない。しかしながら、縦割り社会というわが国の行政上の組織の問題もあり、統一的な都市データベースの構築には多くの障害がある。このような現状を打破するために、土木学会などの中立的な学術的機関が中心となった「地震防災のための都市と地域のデータベースの在り方に関する研究会(仮称)」を組織し、関係各機関の参加を得て、防災データベースの基本的な構想をまとめることを提案したい。

5. 地震防災性の向上に向けて

5.1 土地利用 および施設の適切配置による面的な地域安全性の向上

(1) 地震災害アセスメント制度の導入に関する背景と解説

安全な地区をつくりあげていく基本は、公共側が住民自らの発意に基づいて地区計画を策定し、事業を実施することにある。しかし、このシステムをつくり上げさらに不適格建物を更新するためには、公共側の都市計画だけでは到底達成できない。

そこで、従来の水害に対する安全度と同様に、地震災害安全度(敷地の地盤

条件、地区の類焼危険度など）を不動産鑑定要因に明示的に組み込むことによって不動産市場に反映させ、安全度の低い物件ほど不動産価値が低く、安全な物件ほど価値が高くなる不動産市場が形成されるよう、鑑定評価が活かされる仕組みをつくりあげることが有効であると考えられる。こうすることにより、各土地所有者やディベロッパーが、より安全な建物および地区を整備する誘導策を与えることとなる。安全な建物・施設へ投資することにより地価が上昇することになるが、これは資産価値を高めると同時に固定資産税や都市計画税の上昇となり土地所有者の負担増にもつながってしまう。そのため、これを回避するために、地区の災害安全度を高めるような一定レベル以上の品質を有する建物に対しては、同時に課税の減免措置を施すことが必要である。

以上のようにして、災害安全度に関して住民参加によるアセスメント制度をつくり、これを土地市場へ組み込むことによって、地震に安全な地区へと整備していくことを提案する。

(2) 都市・地域計画および各種施設の計画基準の点検と改訂

1) 都市・地域計画の役割

地震防災面に優れた都市・地域の形成のためには、各種基盤施設における個々の耐震性能の強化に加えて、都市・地域計画面での対応が重要なことはいうまでもない。その期待される役割は以下に示すとおりである。

- a) 都市・地域における機能、空間、および施設の適切な配置による、地域としての（面的な）耐震性の向上
- b) 物的被害から生じる二次災害、機能停止、被害の広がりへの軽減およびその期間の短縮
- c) 耐震基準を望ましい水準に高められない施設、地域への対応
- d) 耐震基準を越える災害に対する被害経験

2) 都市・地域計画と地域防災計画

都市計画においては、従来からマスタープランとしての「整備、開発、保全の方針（都市計画法第7条4項）」を定めることになっている。その中で、地域の特性に応じて定めるべき事項として、都市防災に関する方針を定めることが明記されている（昭和55年通達）。一方、災害対策基本法（1961年）に基づく地域防災計画は、これまで、防災事務、災害予防、災害復旧および災害応急対策を4つ柱とする計画体系で構成されてきた。その一つの柱である災害予防の中には都市の不燃化促進に関する事項等が含まれている。

このように、両者は都市防災という共通の目標を持つものの、都市計画と地域防災計画との連携や、施策体系の接点では必ずしも整合がとられてこなかったと言えよう。

1996年7月、阪神・淡路大震災の経験等を踏まえつつ修正が行われた防災基本計画（中央防災会議）では、災害に強い国づくり、まちづくりが明確に打ち出されている。このような気運を捉え、今後、都市・地域計画と地域防災計画がより一体的に連携して機能する仕組みにしていくことが強く望まれる。

3) 市街地における物的被害と都市施設計画上の課題

今回の地震による都市基盤施設および市街地の物的被害の特徴は次のように要約される。

a) 道路、鉄道、港湾、ライフラインなどの基幹的な都市基盤施設の倒壊、損壊により、都市機能を長期間に停止させ、都市システムそのものを破壊させるに至った。

b) 市街地全域にわたり、16万戸をこえる住宅・建物が倒壊・損壊、火災による被害を受け、なおかつ、その被害状況は地区によって様々である。また、建物被害による影響は敷地内にとどまらず、地区レベル、広域レベルの各種施設の機能を著しく低下させた。

そのような被害状況のもと、都市基盤整備における計画的な対応として下記の課題への再認識と今後の取り組みの重要性が明らかにされた。

a) 道路、公園等の都市施設は、幹線道路から補助幹線道路、区画道路に至る体系や、広域公園から近隣公園に至る体系のように、本来、その施設規模およびサービス圏域による階層的体系をなすべきものである。わが国の都市の場合、広域的、幹線的施設から地区的施設に至る計画の階層的構成が十分に確保されていない。

b) 都市計画として決定された施設計画に対して、整備の進捗状況が追いついていない。たとえば、現在、全国の都市計画決定されている幹線道路の計画延長に対して、整備延長は概ね47%（1994年3月現在）に止まっている。

c) 各種施設がもつ計画の目標水準と現況の計画水準との間には相当程度のギャップがある。

4) 各種計画基準の点検と強化

これまで、都市計画施設の計画基準として「都市計画道路の計画基準」（1974年）、「区画整理計画標準（案）」（1977年）等、それぞれの施設ごとに計画

基準あるいは計画基準が作成・運用されてきた。それらの計画基準の改善・拡充の必要性は従来より議論されてきたとおりである。しかしながら、災害時を考慮した最低限かつ緊急に確保すべき避難・救援用道路、オープンスペース等を含む各種都市施設の計画基準が整備されているとは言えない。

したがって、今回の震災の経験を踏まえ、地震防災性向上の観点から、各種都市計画施設はもとより都市・地域計画に関する計画基準の点検と強化を行い、都市計画の技術基準（都市計画法第13条5項）として位置づけていくことが必要である。

5) 計画基準に関する研究課題

計画基準の点検・強化にあたって、都市・地域の地震防災安全性からとりわけ次のような側面での計画技術の研究が強化されなければならない。

- a) 施設ならびにネットワークの代替性と選択性
- b) 平常時および緊急時における施設の機能的、空間的役割
- c) 施設と周辺空間との安全性と調和
- d) 機能の異なる施設空間の単独整備と一体化、複合化の適用性
- e) 施設におけるツリー型構造とネットワーク型構造の信頼性
- f) 施設の階層構造に応じた施設規模と配置密度のあり方

(3) 地域安全性の再点検

阪神・淡路大震災以来、各地域において大地震を想定した安全性の点検が行われ、対策が講じられてきた。このような点検は、重ねて行ってこそ見落とし等がなくなるものであり、特に部局ごとの点検対象の境界域に注意が必要なことが多い。後述の危機管理体制の定期的点検の一環として、地域内の総点検が行われるべきであろう。

密集市街地に関しては(1)の対策により、従来の区画整理事業、再開発事業等に加えて、市場機構を通じた改善の仕組み作りを提言し、また、(2)の対策の重要性を述べている。しかし、被災地で特徴的であった、店舗併用住宅の被害の大きさ、高齢居住者の犠牲者の多さに対してこれらの対応では解決は困難である。しかも、後継者のいない高齢者の店舗の存在、都心の空洞化傾向等はわが国の都市および社会の構造的問題であり、都市計画と福祉政策の接点にまでその解決の道を求める必要がある。このように本提言で取り上げた都市の地震防災計画上の課題はほんの一部であり、上記のように社会構造にまで遡る困難な課題も多い。それゆえに、各地域における専門家による点検に加えて、住民による総点検が望まれる。

5.2 災害時の危機管理体制の改善による被害拡大の阻止

(1) 各種防災情報の統合活用

阪神淡路大震災においては、発災当初、被害の規模や状況の把握ができなかった。また、情報伝達体制にも明かな欠陥があり、各方面で緊急初動体制の立ち上げが遅れた。このような事態の反省に立ち、国、地方公共団体は機動的で多様な情報収集を行うための体制整備を推進し、情報の蓄積・分析整理が円滑に実施されるようデータベース化、オンライン化、ネットワーク化を推進することとが、新防災基本計画（平成6年7月）にも盛り込まれている。ただし、災害情報の収集、蓄積、連絡、分析等に関して以下のような点にも留意すべきである。

a) 航空機による調査は、短時間で100 km x 1 km程度の地域が調査できる利点がある反面、夜間や強風時には実施できないことや横転・倒壊以外の詳細な被害状況把握はできないなどの欠点がある。一方、オートバイやジープを用いる地上査察は、1時間当たり15 km程度の沿道状況が連続して詳細に把握できる利点はあるが、被害状況や地形によっては移動の制限を受けるなどの欠点がある。したがって、

1. 空中査察と地上査察を組み合わせ、双方の利点を生かした調査方法を確立するとともに、両者および対策本部との通信・伝送機能の向上を推進する必要がある。なお、異常状態の発見には、日常の正常状態の把握と訓練が不可欠である。
2. 空中査察の欠点を改善するために、高解像度の撮影装置や夜間撮影に適した特殊な照明方法なども早期に開発する必要がある。

b) 激甚災害時には被災地域内（あるいは被災自治体）の災害情報システムが有効に機能するとは限らない。また、被災した自治体による被害状況の把握は困難を伴い遅れがちとなる。そのため災害情報システムには、被災自治体にかかわって政府機関や周辺自治体が被害情報を収集したり、収集した情報を分析し被災自治体と関連機関に伝達することなどを想定した外部支援機能を組み込むことが望ましい。

c) 中央省庁、地方自治体、大学、研究機関等で、各種地震計の設置やGPS、GIS（地理情報システム）などの構築が進められている。現状ではこれらのシステムは各機関ごとに独立で、共同利用や相互支援が意図されていない。しかし、

相互に連結して統合し、インターネットなどを通じて広く共同利用や相互支援ができればその効果は極めて大きいと考えられるので、各種防災情報の統合システムにかかる体制整備を早急に行うべきである。

(2) 災害管理の論理構築

災害管理の目標は、発災時の異常事態を速やかに収拾し、秩序だった復興過程に一刻も早く復帰することである。この目標達成のためには、事前の準備と発災時の臨機応変な対応が基本的に重要であり、これによって不用の混乱と災害の拡大が防止できる。

a) 災害管理手法の一例として、救急医療分野におけるトリアージ (triage) がよく知られている。これは、一時に多数の患者が発生したような場合、医療によって得られる効果が大きい順に従って患者の治療や搬送の優先順位を分類するシステムである。実際には、トリアージ指揮者を定め傷病者に優先度を示す色別の札 (タグ) を付けることによって分類作業が行われる。

b) 大地震時の救急医療と類似の状況は、同時多発火災に対する消火作業、避難車両や救援救急車両のための交通規制、ライフラインの応急復旧作業などに共通する。種々の応急作業の効率を最大限度まで高めるため、上記トリアージのような作業目標と具体的手順を事前に定め習熟訓練をしておくことが重要である。

c) 阪神淡路大震災においては、消防や警察、自衛隊などによる救援が遅れた。震災犠牲者の死亡原因の 90% 近くは家屋の倒壊による圧迫・窒息死であったが

表 - 5.1 日別救助出動件数および救助人員

月/日	1/17	1/18	1/19	1/20	1/21	1/22	1/23	1/24~2/10	合計
救助件数	320	304	298	202	96	49	24	66	1,359
救助人員	604	452	408	238	121	37	12	20	1,892
生存者	486	129	89	14	7	5	2	1	733
死亡者	118	323	319	224	114	32	10	19	1,159

出典：神戸市：阪神・淡路大震災 — 神戸市の記録 1995年 —。

被災者の救出率は表-1のように、発災後24時間を経過すると急激な低下を示した。救出作業は「発災後24時間以内が勝負」と言われてきたが、今回の震災でもそれが実証された。機動的な救援隊を迅速に派遣する体制づくりの重要性が改めて指摘される。

d) 外国からの緊急援助隊派遣の申し出に対する処置にも混乱があった。救援物資の受付と配分、仮設住宅の数量不足と入居者選定、行政主導による復興町づくり計画などにも多くの問題がみられた。災害管理の観点から、今回の震災における各問題点を分析し、被災状況や復旧状況の時間的推移に適合した対応処置の基本方針と役割分担、手順などを具体的に明示しておく必要がある。

(3) 防災訓練の改善

大震災以前の阪神地域における地震安全神話の浸透状況は、防災意識の低下や防災訓練のマンネリ化による緊迫感の欠如などにも関連があると考えられる。

以下の点に留意し、現状の防災訓練を早急に改善する必要がある。

a) わが国の諸都市は年々めざましい変貌を遂げている。人口の集中、都市化の進展、科学技術の発達などに伴い、都市災害は多様化、深刻化、国際化の度合いを強めている。阪神淡路大震災では、従来の地域防災計画の前提とされてきた被害想定（被災シナリオ）にない事態が発生している。都市の変貌状況に対応して、防災訓練の内容を変化させることが重要であり、大災害がない場合にも

表 - 5.2 被災状況と被災者対策の重点の推移

概略時間経過	被災状況、復旧状況	被災者対策の重点
災害発生～	家屋倒壊、ライフライン遮断	生命維持／救出救援、避難誘導 二次災害防止など
数日間～	道路啓開、電力・電話復旧	生活維持／避難所整備、防疫、 補修、治安維持など
数週間～	水道・ガス復旧	生活向上／仮設住宅整備、復職 義援金品の配分など
数週間以降	復興町づくり	本格復旧／税軽減・金融補助、 永久住宅建設など

被災者の救出率は表-1のように、発災後24時間を経過すると急激な低下を示

b) 従来の被災シナリオに沿う防災訓練（シナリオ演習型）では、常に何らかの正常機能が暗黙に想定されているが、実際の震災では想定外の事態が発生し、臨機応変な対応が求められる。冷却水や燃料油の不足で非常用発電機が作動しなかったり、消防用スプリンクラーの配管が地震で損傷し予期しない浸水被害を招いた例もある。被災シナリオに想定されている正常機能を意図的に遮断して予期しない事態が発生させ、それに対する臨機応変な対応を習得する（シナリオ欠陥発見型）形式の実践的な緊迫感に溢れた訓練を行う。

c) 被災地の混乱を軽減し早期復旧をはかるためには被災地域外からの支援が不可欠であり、都道府県の枠を越えた広域支援が重要である。近年、陸・海・空の自衛隊が共同で、さらに地方自治体なども含めた大規模演習が実施されるようになったが、このような大規模共同演習を一層推進する。その際、広域支援を要請する場合の手順や具体的内容についても訓練する。

d) 阪神地域では、道路交通の規制が遅れたため交通渋滞が続き、救援・救出活動の支障となった。発災直後に警察官による交通規制が期待できないこともありうることを考え、自衛官や一般市民をも含めて交通規制の習熟訓練を行う。

(4) 防災専門家の養成

阪神淡路大震災以前の京阪神地域における地震安全神話の浸透状況から、過去の震災の記憶の風化とそのことの危険性が明かとなった。これまで各地で地震被害を何度も経験しながら、その教訓が地震対策に十分生かされず他地域で同種の失敗が繰り返されてきたという学習効果の不足を今こそ改めるべきであり、そのためには防災専門家の養成と組織内での地位の確保などが不可欠である。防災専門家には次のような知識や能力、役割が期待されている。

a) 防災専門家に必要な専門的知識

- ・ 地域の自然条件や土地利用、危険度分布などの特性や実状
- ・ 自然災害や人為災害による被害と対応の事例、教訓など
- ・ 災害対策に関する現行の法令と懸案事項
- ・ 防災対策の各種基準や運用規則、防災計画など
- ・ 国や自治体、マスコミなどの防災関連組織と連絡手続きなど
- ・ 災害情報システムなどの運用管理

・その他

b) 防災専門家の組織内での役割

防災対策は、一般に各部局の共同作業で計画・実施されるものである。また通常、防災対策が施策の目玉になることは稀であり、予算規模や職務権限は極めて限られている。そのため防災対策を成功に導くためには、担当者の職業的使命感と洞察力、および企画、調整、渉外などの面での粘り強い努力が必要とされる。とりわけ、最近ではマスコミを活用した効果的な広報や、「稲むらの火」のような良質な防災教育用教材の開発と活用、地域住民に対する液状化地盤図、想定震度分布図、洪水氾濫予想図などの災害情報の継続的発信が重要視されている。

5.3 既存構造物補強費用と災害復興費用の負担ルールの明確化に関する背景と解説

(1) 防災投資レベルに関する国民的合意

1) ライフライン確保の経済的意義

ライフラインはネットワークを多重にすることによってその被害や影響を著しく減少させることが出来るという特徴をもつ。そのため、しばしばフェイル・セーフ（一次システムが故障した場合のバックアップ）やリダンダンシー（ゆとり、冗長性：システムの一部が故障した場合、代替システムまたは残りのシステムでカバーされる）の重要性が主張される。この場合、ライフライン確保の経済的意義を防災投資レベルの面から考えるにあたって、次の2点について国民の理解を得ておくことが必要である。第一に、投資額には一定の限界があるため、すべての災害に対してライフラインの確保は出来ないということである。第二に、経済性の観点のみから防災投資の妥当性を論じることは困難である。それは以下の理由による。

a) 阪神・淡路大震災の被害は10兆円とも15兆円とも言われている。しかし、こうした被害の生起確率は極めて低く、災害被害の期待値は計算するまでもなく極めて小さい。したがって、通常のコスト便益比率で投資の妥当性は主張できない。

b) 人的被害を金銭に換算（計量）することは社会的にはなかなか受け入れ

られない。もちろん他の事例に基づき換算することは可能である。たとえば、自動車事故においては多くの裁判事例もあり、最高額が 2 億円程度、平均的には 1 億円程度と言われている。これを阪神震災に適用すると 6,000 億円程度であり、上記の経済被害と比較していかにも少ない。

2) 防災投資は社会的選択の問題

こうしたことから防災投資は社会的選択の問題であり、最終的には公共経済学という投票行動で決定する以外にないことがわかる。この場合も選択基準となるのは防災の効果と予算の機会費用である。防災の効果を計測することは困難ではあるが、過去の多くの事例から学べば不可能ではない。しかし、これも推定精度に多くの問題を残が残っている。

防災投資の性格は通常の世界基盤投資より国防に類似している。国防のように国のあり方自体を左右する問題は単なる投資効果ではなく、「国の安全性に関するリスク」をどのように評価するかの問題であり、年次予算の枠組みを越えた議論（防衛大綱の論議に見るように）によって決定され、最終的には国政選挙や国民投票で決められる問題である。防災投資の社会的選択は端的にいえば次世代以降に生じる（可能性が高い）効果の 1 単位に対して現在いくら投資すべきか（どれだけの負担を後の世代に残すか）の社会的合意の問題である。ただ防災投資は次の 2 点に関して国防と決定的に異なる点があり注意を要する。

a) 防災投資は通常の世界資本と事業主体が同一であるため、予算的にトレード・オフ関係が生じる。

b) ライフラインの防災は耐震基準の強化以外に、先のフェイルセーフやリダンダンシーによる防災も有力である。この場合二次システムやゆとりのためのシステムは通常時においても利用可能であることである。たとえば災害時のための交通施設のゆとりは混雑緩和、通常の維持・修繕・管理の容易化、ピーク時対応など、通常時にも大きな便益を生じる。

c) 危険度に若干の差はあるものの、国防は日本全体の問題であるのに対し地震の危険度（被害の大きさ）は地域によって著しく異なる。したがって、防災投資のレベルに地域差が生じる。

3) 個人・企業のリスクと保険

防災投資に対する国民の考え方を知るにあたって、損害保険に対する支払意志

額との比較は参考になろう。生命保険は個人のリスク回避とは考えられないため除外する。ここでは損害保険の損率、支払額に対する期待収入の比率、との関係を考察する。ただし、損率は企業の利益率と直結するため公開資料は存在しないため、以下は著者等が聞き取り調査を行った結果に基づくものである。

交通保険は、対人、対物、車両保険等様々であるが多くの保険会社の最近の損率は 100% を越えている。すなわち、日本全体でみれば掛け金より受取額が多い。一方、地震保険は火災保険の特約となっており、その最大限度額はわずか 1,500 万円である（地震に起因する火災は火災保険の対象とはならない）。しかも、その損率は一般にわずか 40% 程度といわれている（阪神淡路大震災前）。したがって、日本全体では 100 の掛け金に対して 40 の払い戻ししかなされていない。地震特約の加入者比率は阪神淡路大震災の被害地域でわずか 7% 程度であったとされている。しかし、これらの人々はリスク回避に便益の 2.5 倍の掛け金を支払っていることになる。

また、国際貨物輸送のオールリスクの標準保険料は貨物の CIF 価格（運賃、保険料込み価格）の 110% の 0.5%（対安全国、欧米等は更に 5 割引）すなわち、0.55% である。大きな海難事故が続発した年の損率は 100% を越えた場合もあったが（1995 年のロイド保険組合の危機）通常年の損率は 80% 程度といわれている。

以上から明らかなように、保険はそれ自体は投資に対して便益を生じるものではなく、通常の利益の何パーセントかを必要経費としてリスク回避に向けるかということである。すなわち、防災投資は投資に対してどれだけ被害を減少させられるかではなく、便益のどれだけをリスク回避に向けるかという基準による選択といえる。

4) 阪神淡路大震災の経済被害

表 - 5.3 は交通施設の被災による神戸市、西宮市、芦屋市の間接経済被害（平成 7 年 3 月の 1 ヶ月値）の推計結果である。ここで、被害額は入荷側の被害と出荷できないことによる被害の大きいほうを採っている。*印は出荷側を採用したことを示している。これによれば 3 月 1 ヶ月の製造業、卸売業、小売業の被害総額は 650 億円程度であり、最終的に被害が 3 年程度まで続くと考えれば、1 兆 2 千億円（18 ヶ月分）となる。これに直接被害の 2 兆円、他地域、その他産業まで考えれば、最終的には 4 兆円程度と考えられる。いま直接被害 2 兆円をその部分の建設費として防災の経済効果を考えてみよう。わが国の一般の公共投資の利用経済効果（事業効果は除く）は投資額の 3 倍程度である。したがって 2 兆円の建設投資が社会的に是認されるならば 6 兆円程度の経済効果がその

施設のライフタイムの間に期待されることになる。今回は その 66 % が短期間に失われた。いま 公共投資の費用便益比率（利用経済効果の投資に対する比率）を 2.5 倍程度で社会的合意がえられると考えると 2.4 兆円の投資、すなわち 2 割増しの工事費が是認される。この 2 割の工事費を設計基準の向上等の防災投資にまわし、稀に起こる大震災にどれだけの被害が減少するかは不明である。しかし安全側をとり被害が半分になると仮定すれば、その防災投資はもし震災が起これば（この確率が非常に低いことはここでは考えない）2 兆円すなわち 5 倍の便益を生むことになり、先の通常時の便益を考えたときは更に大きな費用便益比率となる。この生起確率と経済効果の関係が “ 社会的に受容可能か？ ” の問題となる。

5) 国民的議論の必要性

経済性の観点から防災の意義を論じることには限界がある。計量経済の立場からいえることは防災投資による経済効果の推定のみである。公共経済学の枠組みにおいては純粋公共財としての国防との比較、市場の失敗、効果の外部性、財政論の立場での検討が可能である。また、社会的選択論としては課税論、公債論、政治過程論としての社会契約、投票行動としての検討が可能となってくる。ただ、こうした検討は国土レベルの論議と都市圏、地域レベルの論議で異なり、また評

業種	付加価値額（搬出）			付加価値額（搬入）			被害額	陸上減少額	海上減少額
	震災前	震災後	減少額	震災前	震災後	減少額			
食料品製造業	23,442	16,638	6,803	23,442	13,790	9,652	9,652	1,252	8,400
飲料・飼料・タバコ製造業	12,817	7,868	4,949	12,817	9,008	3,809	4,949	4,831*	118*
パルプ・紙・紙加工品製造業	2,438	2,074	364	2,438	1,703	736	736	502	234
出版・印刷・関連産業	5,469	5,315	154	5,469	3,502	1,967	1,967	1,954	13
化学工業	3,772	1,597	2,175	3,772	2,297	1,475	2,175	1,477*	698*
ゴム製品製造業	10,642	6,700	3,941	10,642	8,681	1,961	3,941	237*	3,704*
なめし革・同製品・毛皮製造業	2,741	452	2,289	2,741	1,076	1,665	2,289	0*	2,289*
窯業・土石製品製造業	1,833	1,825	8	1,833	866	967	967	40	927
鉄鋼業	7,652	4,303	3,350	7,652	2,061	5,591	5,591	120	5,471
金属製品製造業	5,697	4,270	1,427	5,697	3,867	1,831	1,831	1,691	140
一般機械器具製造	33,451	30,122	3,329	33,451	30,074	3,377	3,377	2,882	495
電気機械器具製造	18,767	16,597	2,169	18,767	13,552	5,215	5,215	4,613	602
輸送機械器具製造	6,421	3,837	2,585	6,421	4,570	1,851	2,585	1,683*	902*
その他の製造業	7,960	3,033	4,927	7,960	3,516	4,443	4,927	992*	3,935*
製造業合計	143,101	104,631	38,470	143,101	98,563	44,538	50,202	22,274	27,928
卸売業合計	34,943	32,583	2,360	34,943	30,609	4,334	4,334	3,516	818
小売業合計	0	0	0	35,276	25,373	9,903	9,903	8,448	1,455
合計	178,044	137,214	40,830	213,320	154,545	58,776	64,439	34,238	30,201

（神戸市、西宮市、芦屋市 / 平成 7 年 3 月の 1 ヶ月値：単位 100 万円）

表 - 5.3 交通施設の被災による間接経済被害

価基準も異なってくる。たとえば地域レベルにおいてはライフライン問題として論議されるが、国家レベルにおいては、防災投資は国土の多角的利用や産業の最適配置問題とも深く関りをもっている。

阪神・淡路大震災の被災地域にあっては、直接的な施設被害もさることながら、交通施設、特に高速道路と港湾の破壊によりその経済被害を更に拡大させている。社会・経済的影響は物理的被害と異なり、目には見えない。

こうしたことが国民の記憶の中で鮮烈な印象を残している現在、少しでも早く検討を進め、論議を進めることが重要と考える。

(2) わが国特有の財源制度確立による復興の促進体制

1) 公共財の定義、公共負担の論理、事業および運営主体の選択論理については多くの蓄積があり、それに基づく法制度も整備されている。また、近年、規制緩和、公的事業の民営化等に向けての社会的動きがある。しかし、それらの論理は今回のような大災害を考慮したものではなかった。

激甚災害に対処するための特別の財政援助等に関する法律、公共土木施設災害復旧事業費国庫負担法および各施設ごとの法律、各事業主体ごとの法律にも想定されていなかった災害であったことから、阪神・淡路大震災に対処するための特別の財政援助および助成に関する法律が施行された。また、その後の補正予算でかなり手厚い復旧、既存施設の補強予算が配分された。

2) これらの経験を踏まえ、大災害に対する被災施設の復旧における財源負担の考え方に対し、次項のように、事前にその論理構成と基本的ルールを設定しておくこと。

3) 災害復旧費の国庫負担等

大震災の広範かつ高額な災害復旧費を新規投資と同様の負担ルールで対応することは困難であり、従来に加え、今回特別の立法措置が講じられたことは前述のとおりである。ただし、費用と地方自治体の財政力により決定する、国と地方自治体の負担割合の様に明確な論理的背景が必ずしも明確化されず、予算折衝的に決定された部分も多い。公共土木施設のうち、通常の事業主体が、国、地方自治体、公団、地方公社の事業、第三セクターのそれぞれの場合、さらには私鉄のような民間会社による公益事業施設の場合に対し、国庫負担金、補助金、財政投融资、無利子貸付等の支援がなされた。

たとえば、地方分権や民営化、規制緩和の論議も受益と負担の問題と関連づけて議論することの少ないわが国では、災害発生後にその負担に関し原則論の論議

で徒に時間を費やししたり、情緒的決定がなされたりする可能性がおおきいことに配慮する必要がある。その決定については次のような観点からの判定ルールを明示化することが望ましい。

① 復旧費用の負担能力とそれに伴う復旧所要期間

社会資本は、一般に事業主体に係わらず早急に復旧の必要がある。

② 平常時の公的関与と災害復旧費の負担の区別

国と地方自治体、およびその他事業主体のうち一部については平常時の投資に対する比率と異なる災害復旧費用負担比率が設定されているが、ある部分では今回特別立法で決定された。ただし、その理論的背景は必ずしも明かではない。このルールが明確でない限り、各事業主体は、保険加入や積立金の料金転嫁等の災害に対応戦略を明確に設定せず、公的援助に依存する可能性もあろう。また、国の補助金は与えられてはいないが、市場参入規制と料金規制等により国の強い関与があるにも係わらず、災害時は一般民間扱いすることの妥当性に関する論議も必要であろう。

③ 地域間、世代間、あるいは受益の程度による負担割合

事業主体の事業範囲による、一体的経営と災害時の内部補助的負担は整合しているべきか否か、災害復旧を別扱いするとすれば、地域間、世代間、受益者間の負担割合は如何に設定すべきか等についての考え方を明確にする必要がある。

④ 全国的危険負担の分散化方策

全国各地が極めて低い確立ながら被害に合う可能性のあるわが国では、全国的に、またなるべく広く国民が被災地を支援する方式が望ましい。その方法が、国の一般財源、道路公団のような全国的利用者負担、電力・ガスのように特定地域の利用者負担、同種事業者間の共同保証、民間の保険による不特定多数の相互保証、その他の各種方法の選択が必要である。

⑤ 国の財源の調達方法

一般財源（地域的、分野的配分変更：他の地域が予算を削減し被災地に配分）、特別増税、赤字（復興）国債、財政投融资資金等の財源の選択は③の負担を規定するのみならず、財政構造を通じて経済全体にも大きな影響を与えることとなる。

(3) 既存施設の補強費用の関する負担ルールの確立に関する背景と解説
補強費用についても(1)と同様の論議が必要であるが、より平常時の投資（新規投資、維持管理投資）に近い考え方が妥当である。復旧事業と比較して、

緊急度、工事費用規模等に差異が存在し、また負担が問題となる規模の大災害において復旧は一時的事業であるのに対し、補強は維持管理に類似の継続的事业だからである。

これは、復旧事業との相対的特性にすぎず、補強も緊急の社会資本の機能向上のための投資であり、論点としては次の 5 項目が重要であろう。

- ① 早期補強促進の誘導策の付与
- ② 国の統一的補強基準の実行
- ③ 利用料金の増大による問題
 - ・事業の採算性（需要の減少）
 - ・利用者の負担増
 - ・同上に対する合意形成
- ④ 通常時の維持管理との区別のつきにくさ（本体補強工事、付帯工事）
- ⑤ 補強のレベル、補強完了までの期間、優先順位等の特定化

これらの項目に関し、とり得る方策を設定し、その方策にふさわしいかたちで、(2)で述べたと同様の各主体の補強費用負担配分に関する望ましいルールを設定する必要がある。