

土木構造物の耐震基準等に関する提言（第一次提言）

社団法人土木学会

1995-5-23

提言の要約

1. 構造物の耐震性能の照査では、供用期間内に1～2度発生する確率を持つ地震動強さと、発生確率は低いが極めて激しい地震動強さの二段階の地震動強さを想定することが必要である。
2. 構造物が保有すべき耐震性能、すなわち想定された地震動強さの下での被害状態はその構造物の重要度を考慮して決定すべきである。重要度は、人命への影響、被害の社会経済への影響などを考慮して総合的に決められる。
3. 兵庫県南部地震による被災経験に照らし、現行の耐震基準を見直すべきであり、その際、水平震度の割り増し、地盤の増幅特性の考慮、液状化による地盤の水平変位の照査などについての追加・修正が必要である。
4. 兵庫県南部地震による被災経験を踏まえ、既存構造物の耐震診断を行い、緊急度により優先順位をつけ、必要な補強を早急に推進する。
5. 耐震基準等の見直しに必要な研究開発を早急に促進する。

本 文

はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は多くの犠牲者を出すとともに道路・鉄道の橋梁、岸壁・護岸等の港湾施設、地下鉄、地下埋設管、堤防などの広範、多様な土木構造物に未曾有の大被害を発生させ長期に亘り都市機能を麻痺状態に陥れている。土木学会は地震直後より数次に亘り調査団を現地に派遣し、

被害実態の把握、被害原因の究明に努めるとともに、多くの土木学会会員は応急復旧・復興に対する助言を関係各機関へ行って来ている。さらに、土木建造物の被害の重大性に鑑み、学会内に「耐震基準等基本問題検討会議」を設置し、検討を重ねて来ている。

本報告はこれらの検討事項を整理して、現行耐震基準等を検討する際の基本となる方針を提言としてまとめたものである。土木建造物の被害の詳細については、現在関係各機関で調査中であり、また、被害原因についても土木学会をはじめとする関係機関が設置した各種委員会で究明中である。今後、これらの委員会の検討結果を踏まえて、土木建造物の耐震基準等の見直しに関する具体的な提言がなされる予定である。

1. 兵庫県南部地震による地震動に関する基本的見解

兵庫県南部地震は六甲断層系の活断層による内陸型地震である。過去にもマグニチュード7以上の内陸型地震は、1891年濃尾地震、1927年丹後地震、1930年北伊豆地震、1943年鳥取地震、1948年福井地震等が発生しており、その例は少なくはない。しかしながら、浅い震源をもつ内陸型地震は海洋型地震と比較してその影響範囲が局地的であるため、都市部を直撃する確率は比較的 low、兵庫県南部地震は大都市圏を直撃する直下型地震としては初めての例となった。

今回の兵庫県南部地震による地表の強震記録の中には0.8Gを越える最大加速度や1m/秒前後の最大速度を示すものがあり、これらは日本で観測された強震記録として最大級のものと言える。浅い震源をもつM7級の地震が発生した場合、震央域では強烈な地震動を生ずるであろうことは前述の地震による被害からも推測されていたが、それらは強震観測が始まる以前の地震であり、定量的には未知の問題であった。しかし近年1993年釧路沖地震で1Gに近い地表面加速度が観測され、さらに1994年ノースリッジ地震において1Gを超える記録が得られて、定量的な議論が始められている中で兵庫県南部地震が発生した。

兵庫県南部地震を引き起こしたような活断層は日本の内陸部に少なくない。その活動する間隔は数百年から数千年とされ、地震の有史年数に比べてかなり長く、発生の不確実性もまた高いと言わなければならない。一方、日本の地震活動は静穏期から活動期に入り、直下型地震が従来よりも高い頻度で発生するであろうとの指摘がなされている。

また、国土の開発に伴って都市への人口の集中、社会資本の拡充が進んでいる。したがって、今後、土木建造物の耐震性能を検討するにあたっては、兵庫県南部

地震のように震源が浅く、かつ規模の大きい直下型地震による地震動も考慮の対象に含めることが必要である。

2. 土木構造物の被災状況から見た現行耐震基準等に関する見解

(1) 被害の実態と耐震基準の現状

震央域および近接した地域の道路・鉄道の鉄筋コンクリート橋梁には激しい地震動により甚大な被害が発生した。特に、橋脚は鉄筋コンクリート製、鋼製ともに弾性領域内で挙動したものはほとんどなく、これらの被害の度合は塑性領域の変形性能に依存したものと考えられる。鉄筋コンクリート橋脚の塑性領域における変形性能の照査とせん断補強については、昭和55年頃より逐次耐震基準に採用されて来た所であり、今回大破した橋脚の大部分はそれ以前の基準によるものであった。鋼製橋脚には座屈などの被害が発生したが、現行の基準には変形性能の照査に関する規定が存在しない。

護岸際の橋脚が変位、傾斜し、桁が落下する被害が発生した。この原因として液状化による地盤の水平移動や地盤の軟化による応答変位振幅の増大が考えられている。しかし、現行耐震基準では地盤の水平移動の影響は考慮されていない。また、道路橋では落橋防止対策が講じられていたにもかかわらず、桁が落下する被害が発生した。

港湾地区では岸壁や護岸が地震動による慣性力や地盤の液状化により大きく移動し、背後の地盤が顕著に沈下する被害が発生した。岸壁や護岸が移動し、背後の液状化した地盤に水平移動が発生した事例もあった。一方、現行基準にのっとり最大級の配慮を払って建設された、いわゆる耐震強化岸壁は被害をほとんど受けていなかった。

ライフラインの埋設管路の被害は建設年代が古く、かつ比較的強度が低い管路に集中した。可撓性継手等を有する管路、良質な熔接鋼管の被害は軽微であった。しかしながら、液状化に伴う地盤の側方流動や大規模沈下によって、これらの管路にも比較的少数ではあるが被害が発生した。ガス、上下水道、電力等の埋設管および洞道の現行耐震基準では液状化に起因する地盤の大きな変位は考慮されていない。

さらに、比較的地盤条件が良好な地盤においても地震動の変位振幅が大きかったことに起因すると見られる埋設管被害が発生した。

開削工法による比較的浅い地下鉄に大被害が発生した。地下鉄、共同溝等の現行耐震設計基準では、地盤変位を考慮した応答変位法が耐震計算法として採用さ

れている。被災した地下鉄はこの計算法の採用以前の旧基準により設計されたものであり、設計方法と被害との関連を検討することが必要である。

危険物施設に関しては旧基準に準拠した貯槽には傾斜、移動が生じたが、現行基準に依った貯槽には被害が発生していない。高圧ガス施設に関しては、液状化による沈下、側方流動の影響を受け、配管系からの漏洩が発生したことから、貯槽と配管系の接合部の耐震性の検討が必要と考えられる。

河川堤防、溜池、および擁壁等の土留め構造物にも被害が発生した。これらは一般的には耐震性が考慮されていない構造物であるが、特に周辺地域への影響が大きいものについては総合的な耐震的配慮が必要と考えられる。

3. 耐震基準等に関する提言

耐震技術の発達とその成果が耐震基準等に反映される中で、「供用期間と同等の再現期間を有する地震動に対しては無被害であり、発生確率がきわめて小さいがその地点で発生しうる最大級の地震動に対しては人命を損ねるような重大な被害を防ぐこと」が多くの土木構造物の耐震性能の基本目標とされて来た。兵庫県南部地震は、i) 新しい耐震基準による構造物ほどこの目標の達成度が高いこと、しかし、ii) 最近の基準においても検討を要する課題が残されていること、を示した。これを踏まえ、以下の提言を行う。

(1) 耐震設計において想定する地震動と地震外力

土木構造物の耐震性照査では原則として、i) 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強さ、および ii) 海洋型地震や直下型地震による地震動のように、供用期間中に発生する確率が低い地震動強さ、の二段階を考慮する。

耐震設計計算で用いられる地震外力は上記の二段階の地震動強さに当該地盤の増幅特性、および構造物の動的特性等を考慮して決定する。

地震外力を決定するための地域係数については、最近の地震学および地震工学の知見を取り入れるための検討が必要である。海洋型地震のみならず、活断層の活動状況・分布を考慮し、地域に密接したきめ細かいゾーニングによる地域係数の導入を図る。

(2) 重要度と保有すべき耐震性能

土木構造物が保有すべき耐震性能は構造物の重要度および耐震設計において想

定する地震動の発生頻度等を総合的に考慮して決定されなければならない。

構造物の重要度は、i) 構造物が損傷を受けた場合に人命・生存に与える影響の度合、ii) 発災後の避難・救援・救急活動と二次災害防止に影響を与える度合、iii) 地域の生活機能と国際的視野をも含めた経済活動に与える影響の度合、および iv) 都市機能の早期復旧に与える影響の度合、および復旧の難易度等をもとに決定される。

また、耐震性能を規定するための構造物の具体的な状態としては、i) 無被害、ii) 構造物としての機能を維持しているが補修が必要な状態、iii) 崩壊または完全な破壊ではないが構造物の機能が喪失している状態、および iv) 崩壊または完全な破壊、等の数段階が考えられる。

世界有数の地震国であるわが国においては土木構造物の建設および維持管理において耐震安全性を確保することは基本的な要件である。しかしながら、構造物の耐震設計は地震による被害を軽減もしくは防止するための手段であって、社会の経済的能力や土地資源などの制約下で耐震設計された構造物には自ずから強度的にも限界があるということが正しく社会一般に理解されるような努力が必要である。

(3) 耐震基準において新たに考慮すべき事項および修正すべき事項

土木構造物の種類、構造形態、動力学的特性はいずれも多様であり、これまでの提言に基づく検討は構造物の種別ごとに入念に行われるべきであるが、現段階で指摘出来る事項を以下に挙げる。

耐震基準で今後新たに考慮すべき事項は下記の通りである。

- (i) 構造部材および構造系の変形性能の照査方法
- (ii) 重要度の高い盛土、堤防等の土構造物、擁壁、岸壁などの土留構造物の耐震性の照査
- (iii) 液状化等による地盤の水平移動を想定した地盤と構造物基礎との相互作用の評価
- (iv) 耐震計算における動的解析法の積極的活用
- (v) 免震・制震構造の採用と耐震設計法
- (vi) 構造物の耐震診断方法と補強方法

耐震基準で見直すべき事項は下記の通りである。

- (i) 液状化判定における細目
- (ii) 構造細目に関する耐震規定
- (iii) 構造系全体を考慮した設計法

(iv) 地下構造物および埋設管路の耐震設計のための地盤の変形量

(4) 既存構造物の耐震補強

既存構造物の耐震補強の必要性の有無については構造物別の被害原因の調査結果を待たなければならないが、既存構造物の耐震強度を入念に診断して、その結果に基づいて適切な補強方法を採用しなければならない。また、耐震補強においては構造物の重要度によって補強の優先順位を適切に定める必要がある。この場合の構造物の重要度の決定にあたっては、(1)で述べた構造物の重要度評価に関する提言が参考になろう。さらに、耐震補強の優先順位の決定に際しては地域における地震発生の切迫度も考慮する必要がある。

4. 研究・開発の促進

以上述べた耐震基準等の改訂に関する本検討会議の提言をより深度化するために、以下の研究・開発を促進する必要がある。

(i) 直下型地震による地震動特性の解明：直下型地震による強震観測記録の収集をより密度高く行ない、それにより、上下動を含めた地震動特性の解明を行う。

(ii) 実物大構造物の耐震性の確証試験が可能な大型振動台および加力装置の建設：兵庫県南部地震では、ほとんどの構造物の挙動が弾性領域を越え、被害の程度は塑性領域内における変形性能に大きく依存したと考えられる。「3 耐震基準等に関する提言」で述べた二段階の地震動レベルによる耐震性照査では、構造物の変形性能を正しく把握することが基本的な要件となる。このため、実物大構造物の耐震性の確証実験が可能な大型振動台および大型加力装置の建設とこれらを用いた研究を促進する。

(iii) 動的解析法の整備と耐震設計での活用：動的解析法は三次元的な揺れを有する構造物の動的応答を正しく評価し、構造物の塑性域における変形性能を照査するための方法として有力である。耐震設計において動的解析法を積極的に活用するため、計算手法の整備と評価方法の確立を促進する。

(iv) 既存構造物の耐震診断法と耐震補強法に関する研究：一部実用に供されているが既存構造物に関し、地盤、基礎構造を含めた総合的な耐震診断法と補強方法の開発を促進する。

(v) 高密度地震観測網の整備：全国規模において地震観測網の整備を行い、さらに地震活動度の高い地域については高密度観測を促進する。

(vi) 広領域にわたる震災予防研究：構造物の耐震性能を向上させるために必要な投資が市民生活や社会経済に及ぼす影響、および保障される安全性のレベルと社会や個人の負担の割合等について、工学、理学、社会学の境界領域研究を推進する。

土木建造物の耐震基準等に関する「第二次提言」

社団法人土木学会

1996・1・10

本 文

はじめに

わが国は、常に自然災害の危険性にさらされている。一方で、自然に対するわれわれの知識は限られている。われわれは自然に対して謙虚であるとともに、防災機能、環境の保持、経済性のバランスのもとに、国土、地域、および都市づくりを考えることの重要性を再度認識する必要がある。

阪神・淡路大震災の甚大な被害は、高度な社会基盤施設と稠密な人口分布をもつ大都市の直下に発生した大地震に対し、主として、1) 建造物の耐震性の不足、2) 市街地構造および都市機能システムの不備、3) 被災後の危機管理の不備、の3種類の問題に起因しており、これらの問題は互いに強く関連している。本来、ある規準の下で建設された建造物が絶対に破壊しないと断定することはできない。また建造物の直接的被害はなくても、火災などによる間接的被害も発生しうる。したがって、建造物の耐震性能の強化とあわせて、より広い観点から総合的な地震防災性の向上が図られるべきである。

そのためには、耐震設計基準のもとで建造物を建設する技術のみでは十分ではなく、設計における地震力を上回る超過地震力への対応も必要となる。限られた財源、建造物や土地利用の改変に伴う困難等、様々な制約条件の中で、未知の超過地震力に対応することになる。この対応は、指針となるべき絶対的な論理的決定根拠が存在しないがゆえに、国民の価値観に依存する意思決定に基づくこととなる。

阪神・淡路大震災は、過去の震災の記憶の風化と、そのことの危険性を改めて示した。さらに人口の都市への集中、社会施設の高度化が進む現在、以前にも増して地震が与える重大な被害と影響を強く考慮しなければならないことを示した。

社会の現状と将来に向けて、防災に関わる国民の価値観ないし意識は、教育や啓蒙、訓練等によって絶えず磨き高められていなければならない。

このような地震災害を繰り返さないために最も重要なことは、徹底した震災原因の解明が行われることである。そのために、地震動の観測記録や構造物被害の調査結果に関する情報に基づいた関係分野の技術者および研究者による横断的かつ広範囲な検討が必要であり、早急に促進されなければならない。

土木学会では、平成7年5月に第一次提言を発表して以来、提言内容の深度化を目的として4つの分科会を組織して検討作業を続けてきた。第一次提言は、わが国の地震防災力を高める各方面の努力のなかで、真剣に受け止められ有効に活用されている。これを踏まえて二次提言では、より広い観点からの地震防災性向上の基本方針を新たに加えるとともに、第一次提言で示した土木構造物耐震性能の強化のための諸方策をより詳細に示している。第二次提言は、土木学会が学術的見地より望ましいと考える事項をとりまとめたものであり、今後の研究開発を待たなければならない事項が含まれている。今後、関係各機関が地震防災対策を立案する上で本提言が有効に活用されることを期待する。

1. 耐震性能照査で考慮すべき地震および地震動

1.1 震源断層近傍域での地震動を考慮することの必要性

兵庫県南部地震によって、多くの土木構造物が大きな被害を受けた。兵庫県南部地震は大都市近傍の内陸活断層の活動により引き起こされたが、マグニチュード7級の地震による震源断層近傍の地震動の問題は、従来の耐震基準等では取り入れられていなかった。兵庫県南部地震により、最大加速度約 8 m/s^2 、最大速度約 1 m/s 、最大変位 $30 \sim 50 \text{ cm}$ の強い地震動が震源断層近傍の広い範囲で観測されたことはわが国初の経験であり、弾塑性設計が導入される以前の地上構造物や、比較的安全とされてきた地中構造物に対して、想定外の地震外力として作用したことが被害を大きくしたものと考えられる。一方、最新の耐震技術により建設された構造物が大被害を免れ、震源断層近傍域の強い地震動への工学的な対処が可能であることも多くの事例によって示された。

個々の活断層について見れば、その活動の再現期間は千年のオーダーに及ぶとされ、それが大都市圏を直撃することによる被害は典型的な低頻度巨大災害である。これを人間活動の時間スケールで表現すると、50年間の発生確率が5%程度であることと等価であり、このような低い発生確率の災害のもとで、土木構造物にいかなる耐震性能を保持させるかという観点から戦略的な判断がなされるべ

きである。さらに、強震観測による定量的な資料が得られる以前の時代を含めれば、過去においてマグニチュード 7 以上の内陸型地震により大きな被害を被った例が少なくないことは一次提言でも述べたところであり、全国のどこかでという観点に立てば、このタイプの地震も看過できない発生確率を持つと考えられる。このことから、兵庫県南部地震の経験を今後に生かすためには、現行の耐震設計の枠組みに加えて、内陸の断層破壊に起因する断層近傍の地震動の影響を、耐震設計に取り入れることが必要である。

1.2 設計地震動の体系への影響

第一次提言では、土木構造物の耐震性能の照査で考慮する地震動として、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、および陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や直下型地震による地震動のように供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動、の二段階を考えることが示されている。この考え方は、現行の耐震設計の一部ではすでに取り入れられており、それぞれ、レベル 1 地震動、レベル 2 地震動として位置づけられている。これらの地震動の耐震設計における目的と性格は以下の通りである。

(1) レベル 1 地震動は、原則として、それが作用しても構造物が損傷しないことを要求する水準を示す。

(2) レベル 2 地震動は、きわめて希であるが、非常に強い地震動を定式化したもので、構造物が損傷を受けることを考慮して、その損傷過程にまで立ち入って、構造物の耐震性能を照査する水準を示す。

レベル 1 地震動は、弾性設計手法と組み合わせて用いられており、静的荷重または弾性動的解析用の地震動として設定されている。土木構造物は多種・多様であり、構造種別ごとに、その特性を反映した設計法の体系とノウハウが、多くの経験の蓄積の上に発達してきており、これを尊重するのが適当である。

一方、レベル 2 地震動を現行の設計体系において考慮する場合には、標準的地盤における弾性応答で 1 G の設計地震動を考慮するなどの形で扱われているが、兵庫県南部地震で経験された強い地震動から、震源断層近傍域で発生する強震動を対象としたレベル 2 地震動の再評価が要請されている。以上の理由により、本章ではレベル 2 地震動の問題に限定して提言する。

さらに、内陸直下地震に特有の問題として、地震断層のずれによる相対変位が地表面にまで達し、構造物が断層を横断する場合がある。断層の正確な位置の特定が困難な場合があること、また線状構造物では断層を避けて通れない場合があることなど、現代の科学技術ではその対処が困難な場合が多く、今後の研究・開発を待たなければならない。

1.3 レベル2地震動の考え方

レベル2地震動は以下の考え方に従って設定する。

(1) 内陸活断層によるレベル2地震動は、活断層に関する地質学的情報、地殻変動に関する測地学的情報、地震活動に関する地震学的情報を総合的に考慮して、地域ごとに脅威となる活断層を同定するとともに、その震源メカニズムを想定することにより定めることを基本とする。このため、その工学的方法の確立に向けて努力が傾注されるべきである。

(2) 兵庫県南部地震を契機として、わが国では現在、上記の地球科学的研究が精力的に進められている。しかし、内陸活断層による地震の再現期間、その規模や地震動の特性の予測の精度は、耐震設計の基礎とするにはなお不十分なことが多い。このため、活断層の情報から直接地震動を定めることができない場合には、兵庫県南部地震等の断層近傍の強震記録をもとに震源断層の近傍で予想される標準的な地震動を作成して、レベル2地震動の基礎とする。

(3) 関東地震のような、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は、内陸活断層による震源断層近傍の地震動とは異なる特性を持つと予想される。この型の地震による強震記録が存在しないため、現状では地震動の特性については多くの不明な点が残されている。このため、プレート境界で発生する巨大地震による地震動に関する研究を進める必要がある。

1.4 レベル2地震動の表現形式

レベル2地震動の表現形式は以下の通りとする。

(1) レベル2地震動は、基本的に損傷制御の概念に基づく耐震設計に用いられるものであるから、地震動の動的特性を端的に示す表現で示されるべきで、応答スペクトル、または時刻歴地震波形で表すのが適切である。

(2) 地震動を与える地盤レベル

1) 基盤岩における地震動：レベル2地震動は、基盤岩において設定することを基本とする。兵庫県南部地震では、地盤構造の不整形性が地震動の局所的な増幅効果に大きな影響があったこと、また表層地盤の動的な非線形特性や砂質地盤における軟化現象が地震動の増幅特性に大きな影響を与えたことなどが指摘されている。こうした現象を評価して地震動を規定するためには、ここで定義する基盤岩より上部の三次元的な地層構造の情報を考慮することが不可欠であり、地形・地盤条件に関する情報の充実と研究開発の推進が急務である。

2) 工学的基盤面における地震動：工学的基盤面における地震動は、当該基盤面における地震記録の分析、上記の手法の活用および以下に述べる地表面の地震

動の逆解析などにより設定する。

3) 地表面における地震動：基盤岩および工学的基盤面での観測記録が少ない現状では、それらの面での地震動を規定できない場合も多いと考えられるので、当面は強震記録の裏付けがある地表面で地震動を設定する。

1.5 地震動に関するその他の研究・開発課題

(1) レベル2地震動の適用範囲：レベル2地震動の適用範囲については兵庫県南部地震等の観測記録の分析や解析的手法による研究を促進する必要がある。対象とする断層を明確に同定することが困難な場合には、構造物の重要度、保有すべき耐震性能などにより、その適用範囲を慎重に検討すべきである。この場合、工学的な研究のみならず地球科学分野の最新の知見を反映させた学際的な研究を進展させる必要がある。

(2) 上下動の影響：兵庫県南部地震において、構造物の損傷・破壊過程に対する地震動の三次元的影響、特に上下方向地震動の影響に対して注意が向けられ、その解明の努力が精力的に行われた。これまでのところ、主要な土木構造物の破壊に上下動が主因となったとの結果は出されていない。地震動の三次元的な性質が構造物の破壊過程に与える影響に関する詳細な研究は今後も継続されるべきである。耐震設計における上下動の影響を従来と異なる観点から扱うべきか否かについては、今後の耐震技術の高信頼度化への議論として位置づけ、必要となれば上下動に関する設計入力地震動が改めて議論されるべきである。

2. 耐震設計法

2.1 提言の前提条件

本章では、レベル2の地震動に対して、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述べる。

土木構造物は、橋梁・ダムなどの地上構造物、岸壁・堤防・盛土などの土構造物、トンネル・埋設管路などの地中構造物、および橋梁・タンクなどの各種基礎構造等、極めて多種であり、かつ地盤条件や構成材料も多様であるため、これら多種・多様な構造物が保有すべき耐震性能を一律に論ずるのは困難である。

それぞれの構造物の耐震設計法等の見直しに当たっては兵庫県南部地震による被害レベルの異なる構造物の被害原因の究明を十分行い、その結果を反映させることが重要であり、引き続き詳細な検討が実施されなければならない。このため、地上構造物、地下鉄・埋設管路などの地中構造物、および盛土・基礎などの地盤・基礎構造物の3つに大別して記述する。

2.2 地上構造物 (橋梁) が保有すべき耐震性能と耐震設計

(1) レベル1 地震動に対する耐震性能

- ・全ての構造物を対象とし、損傷が発生させないことを原則とする。このため地震時の動的応答が弾性限界を超えないものとする。

(2) レベル2 地震動に対する耐震性能

- ・重要な構造物および早期復旧が必要な構造物は、損傷が発生したり、塑性変形が残留しても、地震後比較的早期に修復可能であることを原則とする。このため、構造物の最大の地震応答が許容される塑性変形もしくは極限耐力の限界を超えないものとする。

- ・上記以外の構造物は損傷して修復不可能となっても、構造物全体系が崩壊しないことを原則とする。このため、地震応答が終局の変形を超えないものとする。

- ・上記で言う構造物の重要度は一次提言で示したように、1) 構造物が損傷を受けた場合に人命・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与える影響の度合い、を考慮して決定される。

(3) 地上構造物の耐震設計における留意事項と研究・開発課題

- ・レベル1 地震動に対する構造物の動的応答を評価するに当たっては、線形応答スペクトルや時刻歴地震波形を用いた弾性解析を行い、また必要に応じて、上下動を含めた三次元的な影響を検討することが望ましい。

- ・レベル2 地震動に対する構造物の動的応答の評価に当たっては、弾塑性時刻歴応答解析を実施するのが望ましいが、等価線形化解析法、許容塑性率に基づく設計スペクトルの活用などより簡便な方法を用いることも出来る。

- ・不静定次数の低い構造物については、特にレベル2 地震動に対する保有耐力の確認を厳格に実施する必要がある。このため、各種の弾塑性解析手法の精度を載荷実験の結果との比較等により検討しておくのが望ましい。

- ・不静定次数の高い構造物については、鋼あるいはコンクリート構造物を問わず、損傷過程を考慮した終局変形性能の解析を行うのが望ましい。

- ・鋼構造物については、一部の構造物を除いて許容応力度法のみでの設計で、保有耐力や変形性能の照査が実施されていない。今後の耐震設計に当たっては、鋼構造物であってもこれらの照査を実施すべきである。特に変形性能を増大させるための断面構成あるいは、断面内応力の制限等についての研究開発を進める必要

がある。

- ・周期の短い構造物の地震応答は、基礎—地盤系の非線形領域の動的相互作用の影響を大きく受けるため、この影響を設計に取り入れるための研究を推進すべきである。このための簡便な手法として、動的相互作用の効果を全体構造系の長周期化と減衰定数の増大として耐震設計に取り入れられるような手法が考えられる。

- ・構造物の耐震性を向上させるために免震・制震技術など新しい技術を積極的に導入すべきである。免震構造は比較的短周期構造物の変形性能と減衰性の増大を可能とし、エネルギー吸収機構を含む制震構造は長周期構造物の減衰性の増大を可能とする。

2.3 地中構造物が保有すべき耐震性能と耐震設計法

周辺地盤の地震時の変位・変形挙動と安定性が地中構造物の耐震設計の基本である。シールドトンネルや開削トンネルなどの大断面を有する地中構造物の耐震設計では、周辺地盤の地震時の変位の平面のみならず深さ方向を含めた三次元的分布、小断面の埋設管では管路線上の地震時の変位分布が重要である。したがって表層地盤の地震応答を十分に把握することが必要である。また、地盤の液状化やこれに起因して発生する地盤の側方流動は地中構造物の耐震性に大きな影響を与えるため、耐震設計にあたっては地盤の安定性を十分検討しなければならない。

(1) 保有すべき耐震性能

- ・レベル1地震動に対しては構造物の機能が維持されるものとする。レベル2地震動に対しては、構造物が損傷しても機能に重大な支障が発生せず、かつ短期間での復旧が可能な範囲内での損傷に留めるものとする。

(2) 可撓性構造等の採用

- ・レベル2地震動に対しても地中構造物が所要の耐震性能を保持するため、可撓性を高めるための構造および材料を積極的に採用することが望ましい。また、構造部材の脆性的な破壊を防ぐための適切な構造細目を採用して一部の構造部材の破壊が全体的な破壊に繋がることのないようにしなければならない。

(3) ライフラインシステムの計画

- ・線または面状に敷設される上・下水道、電気、ガス、通信等のライフラインはレベル2地震動に対し、当該地域の地形・地盤条件および都市計画等を考慮して、幹線ライフラインについては機能を維持するよう計画し、適切な構造を選択

する必要がある。経済性、地盤状況等によりこれが困難である場合、災害時に必要な機能を維持し、早急な復旧を可能とする様、幹線の設定、多ルート化、ブロック化の推進、代替手段の採用等システム面からの対策を取り入れる必要がある。

(4) 地震断層を横切る地中構造物

・活断層の位置が明確に知らされている場合には、その位置での地中構造物の大断面化、二重化、可撓化、構造物と内部施設の絶縁化などの対策が考えられるが、技術的に困難な場合があるので、システムとしての代替性などのソフト面からの対策も併せて考慮する必要がある。

2.4 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

・レベル1 地震動に対して上部および地中構造の機能を維持することを構造物基礎の耐震性能の目標とする。液状化発生の可能性がある地盤に関しては、地盤改良により液状化を発生させないことを一応の原則とするがそれが困難な場合には基礎構造の工夫や強化により上部構造の機能を保持できるようにする。

・レベル2 地震動に対しては、上部および地中構造に重大な損傷が発生しないことを耐震性能の目標とする。地盤改良による液状化防止が困難な場合には、地盤の側方流動や沈下により基礎に過大な変位が発生し、上部構造に重大な被害が生じないように、基礎構造の強化や構造全体系の見直しを行うものとする。

(2) 岸壁、堤防および盛土の耐震性

・岸壁・堤防等は延長距離が長く、ある程度の損傷は復旧が容易であるということから、全延長にわたって同じレベルの耐震性を持たせることは、経済的に見て妥当な方策と考えにくい。重要度の高い区間に対して、重点的に耐震性を強化するという施策を採用することが望ましい。

・レベル1 地震動に対して、重要度の高い区間の岸壁、堤防、擁壁、盛土はその構造物自体の機能を維持すると同時に、地震後も当初の設計条件を保持するものとする。その他の一般区間については、周辺に悪影響を及ぼさない軽度の損傷は許容するが短期間に復旧が可能で、全体系としての機能が早急に回復できることを耐震性能の目標とする。

・レベル2 地震動に対して、重要度の高い区間の岸壁、堤防、擁壁、盛土はそ

れらが支持する構造物や周辺の諸施設に重大な被害を生じさせないことを耐震性能の目標とする。なお、被災地への緊急輸送路の確保を目的とする重要施設(たとえば、耐震性強化岸壁)は、レベル2地震動に対して、その所期の機能を維持することを耐震性能の目標とする。その他の一般区間については、周辺に二次災害等の悪影響を及ぼさないことを目標とする。

(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

・礫が多く含まれた土でも砂質のマトリクス部分がある割合で存在すれば、この部分の密度、細粒分含有率、透水係数などの条件によっては液状化の可能性が生ずると考えられる。したがって、沖積層または埋立土層で礫を多く含む土についても、液状化判定の対象とするなどの改善を図るべきである。

・近年比較的密な砂質土の液状化強度が精密に調べられ、標準貫入試験の N 値が 20 程度を越えると地盤の液状化強度は急激に増大することが明かにされている。また、震源域の地震動のように繰り返し回数が少ない場合には液状化強度が増大することが判明してきている。このような最近の知見を考慮し、高密度、低繰り返し回数のもとでの液状化強度を適切に評価できるよう基準等を改訂する必要がある。

・マサ土のような礫、砂、シルトからなる均等係数の高い土の静的および動的変形強度特性については未解明の問題が多く、この分野の研究の進展が望まれる。

・液状化による地盤の側方流動発生メカニズムと流動量の予測法に関する研究を促進する必要がある。

・側方流動を生ずる地盤内に設置された杭、ケーソンや埋設管等の挙動に関しては未知の点が多く残されている。この点の知見を考慮した基礎や管路の設計法を早急に確立するために、研究・開発の促進が必要である。

・岸壁、堤防、盛土、擁壁の地震時の挙動には未解明の点が多い。このため原位観測やモデル実験等を通して地震時に発生する沈下や変形量等の評価手法や耐震性の向上方法についての研究・開発の促進が必要である。

3. 耐震診断と耐震補強

3.1 耐震診断

(1) 耐震診断の基本方針

・既存土木構造物の耐震診断は、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よって行う。

・一次診断においては、阪神・淡路大震災による土木構造物の被害の実体を踏まえて診断の対象構造物を選定し、建設年代、準拠示方書、概略な構造特性および地盤条件等より、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。

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〔1) 構造物が損傷を受けた場合に人命生存に与える影響の度合、2) 発災後の避難・救援・救急活動と二次災害防止に影響を与える度合、3) 地域の生活機能と経済活動に影響を与える度合〕に加えて、構造物が構成するシステム機能の代替性、建設時からの条件の変化等を考慮する。

・二次診断は、一次診断により耐震性能の詳細検討が必要と判断された構造物を対象とし、設計図書、地盤条件をもとに、レベル1地震動およびレベル2地震動に対して所要の耐震性能を有しているか否かを診断し、補強を必要とする構造物を抽出する。二次診断では、「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」を構造物の耐震性能の最低限の目標とする。

二次診断では、必要に応じて対象構造物の現場計測、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設計や数値解析等により評価する。

(2) 耐震診断のためのデータベースの整備

・一次診断の円滑な実施のため、既存土木構造物に関するデータベース（準拠示方書等、建設年代など）の整備が急務である。

・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は、一次診断においてなるべく厳しい側の診断となるように配慮し、二次診断において必要な現場調査や各種試験を行って耐震診断に必要なデータの収集に努める。

(3) 構造系としての耐震性能

・耐震補強の対象とする構造部位の抽出にあたっては、補強が構造物の全体系としての耐震性能に与える影響を十分に考慮する必要がある。

(4) システムとしての地震防災性

・耐震補強の対象とする構造物の抽出にあたっては、それらの構造物が構成する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。

3.2 耐震補強

(1) 耐震補強の基本方針

- ・既存土木構造物の耐震補強においては、新設構造物と同様、レベル1地震動およびレベル2地震動の二種類を考慮する。この場合、補強の対象となる構造物の供用期間は原則として新設構造物と同等とする。

- ・耐震補強において目標とする耐震性能は新設構造物と同等とすることを原則とする。すなわち、新設構造物と同様に、構造物の重要度と耐震補強において想定するレベル1およびレベル2の地震動の発生確率を考慮することにより補強の目標とする耐震性能を設定する。

- ・既存土木構造物の中には耐震性能レベルを新設と同等に引き上げることが施工性あるいは経済性の観点から困難な場合が考えられる。このような場合には、構造物の重要度を十分に勘案したうえで、地震後の早期復旧体制や機能の代替性の整備などによるソフト面の対策を講ずる必要がある。また、撤去・新設も視野に入れた検討も必要である。

(2) 優先順位

- ・耐震補強の優先順位は、前述した構造物の重要度に加え、地域における地震発生の切迫度等を考慮して決定する。さらに、優先順位の決定にあたっては、構造物が構成するシステム全体の地震防災性向上に与える影響度合と経済性をも併せて考慮することが重要である。

- ・優先順位の決定に際しては、その根拠を明確にしておく必要がある。

(3) 耐震補強の方法

- ・耐震補強の方法は、施工性、安全性、経済性、周辺環境に与える影響度および維持管理の容易性を考えて選定されなければならない。このため、構造特性や現場環境に適合した新工法の開発や新材料の活用を積極的に行う必要がある。

(4) 補強構造物の耐震性能評価

- ・補強された構造物の耐震性能は定量的な方法によって評価する。このためには必要に応じて実物大の試験、数値解析および地震観測等を行って評価方法の妥当性を検証する必要がある。特に新工法や新材料を用いる場合には耐震性能の評価方法に関する十分な検証が必要である。

- ・補強された構造部位の耐震性能の評価にとどまらず、構造系としての耐震性

能および他の荷重系に対する安全性も評価する必要がある。

・補強構造物が構成するシステムとしての地震防災性の向上の度合いについても評価する必要がある。

(5) 維持管理・補修

・補強された構造物は新設構造物と同等に綿密な定期的点検を必要とする。必要があれば地震観測や各種計測等を行い、目標とした耐震性能が保持されていることを確認する。

3.3 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) 構造物の特性に応じた耐震診断技術の開発

・土木構造物は多種・多様であるため、耐震診断の手法は構造物の特性に即したものでなければならない。既に関与されている診断技術を活用し、さらに必要な研究・開発を行って、それぞれの土木構造物に対して合理的で適切な耐震診断法を確立する必要がある。

・一次診断法は多くの土木構造物を対象とするため、なるべく簡易で経済的な方法とすることが必要である。二次診断法は既存構造物が保有する耐震性能を適切に評価する方法でなければならず、このため、最新の実験・試験技術および数値解析技術を活用することが必要である。

(2) 耐震補強技術の開発

・わが国全域で考えれば耐震補強を必要とする土木構造物は相当数に達するもの考えられる。また、多くの場合、構造物を供用しながら耐震補強工事を施工することが要求されるため、施工時間、施工スペースが制限され、かつ振動・騒音など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、それぞれの土木構造物の特性にもとづいて、これらの諸条件を満たした適切な耐震補強技術を開発することが急務である。

(3) 設計図書等に関するデータベースの構築

・設計図書等に関するデータベースの構築は、適切かつ合理的な耐震診断と耐震補強にとって不可欠な要件であるとともに、地震後の被災構造物の復旧においても極めて重要である。このため、土木構造物を所管する関係各機関はデータベースの構築と整備に関する必要な研究・開発を積極的に行う必要がある。

4. 地震防災性の向上に向けて

4.1 土地利用および施設の適切な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

わが国の都市の多くは、道路、公園等のオープンスペースがきわめて少なく、また住宅地では狭い街路、少ない緑、林立する電柱に象徴されるように、インフラストラクチャーの整備はきわめて不十分と言わなければならない。

加えて宅地は狭小であり、そこには耐震性能を保持しない、いわゆる既存不適格の建物が密集している。これらの地域では防災性はもちろん快適性においても先進諸国のそれと比べて極めて劣るものであり、その改善は我が国の抱える最大の都市問題である。

これらの地域においては長年月がかかると思われるが、今後根本的な再整備が必要である。そのために以下に述べる「地区災害アセスメント制度」の導入が必要である。

(1) 幹線および補助幹線道路、小河川等で区切られた一つの小ブロックを地区単位とし、この地区ごとにその自然条件、インフラストラクチャー条件、住宅条件の3つの要素から災害安全度を評価する。

(2) 自然条件には、地形・地質条件、地盤条件等を、インフラストラクチャー条件には、道路、公園、消火栓等を、さらに住宅状況には、建物構造、階数、築年数等を考慮する。

(3) それぞれの項目はそれぞれの地区の実態や住民の価値観に基づいて重みを付け、地区ごとに総合評価し、公表する。

(4) これらの分析のために地理情報システム(GIS)を活用する。

このような分析・評価を行い、公表することによって各地区が自らの地区の置かれた状況を正しく理解し、またその状況が地価に反映されることになる。このことが地区改善への誘導策となり、住民自らの発意によって改善事業が励起されることになる。

さらに、住民からの改善への要求に対して、行政は計画案の作成や財源的な助成などにおいて様々な支援制度を作り、従来の都市再開発事業、土地区画整理事業などの制度と組み合わせながら地区改善を進めるべきである。

(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

都市・地域計画において、従来より防災安全性は重要な計画目標の一つであったが、地域防災計画との連携が十分に行われていたとはいえない。

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、この体系が十分確保されておらず、個々の施設の規模、配置共に不足していることは前述のとおりであるが、それらの計画基準の改善・拡充の必要性が従来より議論されてきた。それに加えて、被災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はじめとする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。地震防災性向上の観点から、都市・地域計画および各種施設の計画基準の点検と改訂を行なうことが必要である。この計画基準は、上記アセスメントを実行する上での、評価の尺度ともなるべきものである。

4.2 災害時の危機管理体制の改善による被害拡大の阻止

被災後の救援の遅れや、火災等への対応等災害時の危機管理体制の不十分さが被害の拡大をもたらした。被害拡大の阻止方策としては、平常時からの体制整備と訓練、被災時の状況把握、情報伝達、救助・救援活動の各段階があり、それぞれに関し以下の改善が必要である。

(1) 各種防災情報の統合活用：複数の政府機関、各自治体、民間企業等で災害情報の収集と伝達のシステム構築がすすめられつつあるが、それぞれのシステムは必ずしも十分調整されていない。それらの整合性確保と、災害時の一元的活用を前提とするシステム設計を行い、かつ防災訓練等を通じてその機能の十分な確認をしておくこと。

(2) 災害管理の論理構築：避難する人々の車両と救援車両の優先度、あるいは空からの散水による消防活動の是非等の例にみられるように、ある選択が被害を拡大する可能性と、逆により大きい被害を防ぐ可能性の間の厳しい選択が非常時には必要となる。平常時には社会的に受け入れ難いような非常時の論理（災害管理の論理）の導入の是非と社会的合意形成について検討し、状況に応じた対応方針を設定しておくこと。

(3) 防災訓練の改善：大震災時には公的救援活動の能力を越えて被害が拡大し

得ることから、避難と火の元対策中心の訓練からコミュニティとしての救援体制を含めた被災時の行動のあり方についての訓練にその内容を変え、また設定されたシナリオに従って行われる従来の防災訓練（シナリオ演習型）から、さまざまな予想しない状況の発生への対応を訓練する内容（シナリオ欠陥発見型）に転換すること。

（４）防災専門家の養成：地震災害が稀な現象であることから、過去の震災の教訓を継承し、持続的に整合性ある防災対策を実施していくためには、専門家が必要であることは明らかであるが、担当者の平常時の業務量や定期的人事移動体制は専門家の養成および配置になじまず、専門的知識を得た頃には他の部署へ配置転換されるという状況となりがちであった。高位の意思決定者を含め防災専門家の養成とその業務内容の再構築および組織内での位置づけが適切になされ、専門的ノウハウの常備体制が確立されること。

4.3 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

社会基盤施設の耐震性レベル、既存構造物の補強工事期間、被災後の復興計画の決定には、それらに要する費用の大きさと、その財源負担のルールが大きな評価要因となる。それぞれの負担費用に対し、効果が評価され、補強、復興計画が決定されることが原則であるが、次のような価値観に関連する事項が存在する。

1) 阪神・淡路大震災のように被災地のみでは負担の限界を遥かに超える費用を要する反面、地域を限定するとその被害発生確率は極めて小さく、かつその時期が不確かであること。

2) 被害が経済的被害にとどまらず、人命や安心感等心情的領域に及ぶものであること。

3) 安全性向上のための投資増加は、新たなプロジェクトに対する予算を減ずることとなり、安全性向上効果とそれ以外の社会経済的効果の相対的評価を必要とすること。

防災投資による被害軽減効果を定量的に評価することは重要であり、4.1のアセスメントと併せて実施することが必要である。その効果は防災対策の相対的な社会経済的効率を定める基準となり得る。ただし、保険や官民の多くの防災投資事例から明らかのように、防災投資額を被害軽減額の期待値より大きくとる場合が多く、想定していた以上の超過外力への対応も含め、防災投資のレベルは国民

の価値観に基づく社会的選択の問題となる。

また、その財源についても、阪神・淡路大震災に対処するための立法措置および財政的施策が講じられたが、時間的制約もあり議論が十分とはいえず、施設間の整合性、各種ルールの論理性、合意形成等に関し再検討の余地は大きい。ここに改めて、復旧・復興財政、既存施設の補強費用負担についてのルールの確立が必要である。

(1) わが国特有の財源制度確立による復興の促進体制：わが国のどの地域も潜在的に大震災の危険性を有するものの、その発生確率は小さい。このため、安全性の向上投資、被災に備えた保険的支出、被災時の復旧・復興費用負担のどれに関しても個別地域での対応は極めて難しい状況にある。このような状況は欧米諸国をはじめとするほとんどの国と異なっていることから、地震国として、わが国独特の復興財政システムを構築する。

基本的には国民が全員で、かつ世代間で分担して社会基盤施設の復旧・復興のための財源を負担せざるを得ないが、その分担、および負担方式については、各施設の管理主体と負担ルールの関連、国・自治体・受益者の負担論理と分担、復興国債や特別増税あるいは強制地震保険等の特別財源、既存予算比率の大幅組み替えによる財源確保をはじめとして、さまざまな論議が存在する。これらの論議を集約し、大震災に速やかに対応できる財政システムを制度化する。

(2) 防災投資レベルに関する国民的合意：設計基準の見直しによる耐震安全性向上のための工事費増加と経済性の問題について、納税者の立場からの論議を積極的に行い、21世紀を迎え、高福祉・高負担などの社会状況を踏まえた防災投資についての国民的合意を得る努力が必要である。

(3) 既存施設の補強費用に関する負担ルールの確立：国、地方自治体、公社、公団、民間公益事業主体、管理主体による各種施設の補強費用負担のあり方についても、検討の余地は大きい。特に、民間公益事業主体や第三セクター等については、事業主体決定時に今回のような大災害は想定されておらず、そのため新設時の建設費用負担ルールをそのまま適用すると、早急に行うべき補強を遅らせる危険性も存在する。上記1)と同時に、この費用負担についても国民、地域住民、施設利用者の財源負担割合、世代間の負担割合、および被災地住民や利用者の負担能力等を勘案したルール構築を促進する。

第3次提言にあたって

土木学会は兵庫県南部地震の直後に「耐震基準等基本問題検討会議」を組織して、今後の土木構造物の耐震性と設計法の在り方について検討を行い、この検討結果を平成7年5月と8年1月の2度に亘る提言としてまとめているが、その中で次のように述べている。

- i) 構造物の耐震性能の照査では、供用期間内に1～2度発生する確率を持つ地震動強さ（レベル1地震動）と、発生確率は低いが断層近傍域で発生するような極めて激しい地震動強さ（レベル2地震動）の2段階の地震動を想定することが必要である。
- ii) 構造物が保有すべき耐震性能、すなわち想定された地震動強さの下での被害状態は、その構造物の重要度と地震動強さの発生頻度を考慮して決定すべきである。構造物の重要度は、人命・生存に対する影響の度合、地震直後の救急活動、火災などの2次災害防止、地震後の地域の生活機能と経済活動および復旧の難易度などを総合的に考慮して決められる。

すなわち、第1次、第2次提言において、土木構造物の耐震設計法の基本方針として、レベル1とレベル2の強さの異なる地震動を想定する、いわゆる「2段階設計法」並びに「性能規定型設計法」を提唱されたのである。

以上の土木学会の提言と全く同様なことが、平成7年7月に改定された、国の防災基本計画の中にも盛り込まれた。すなわち、「第1章1節 地震に強い国づくり、まちづくり」の中に「構造物・施設等の耐震設計にあたっては、供用期間中に1～2度発生する確率を持つ一般的な地震動、および発生確率は低いが直下型地震または海洋型巨大地震に起因する実に高いレベルの地震動をともに考慮の対象とするものとする。」と述べられている。構造物の耐震性能の照査において2段階の地震動レベルを採用すること、また、それぞれの地震動レベルに対して構造物の重要度に応じて耐震性能を定め、これに基づいて耐震設計を行うことが国の基本方針として打ち出された。

兵庫県南部地震後の5年間において、鉄道構造物等設計標準・同解説などの土木構造物の耐震設計基準が改訂されたが、そのいずれもの基準においても土木学会の提言および防災基本計画に規定された基本方針が採用されることになった。

しかしながら、土木学会の提言を真に具体化して、実務に反映可能とするためにはなお

多くの解決を必要とする課題が残されていることも事実である。性能規定型設計法を実現するためには、コンクリート構造物や鋼構造物の塑性域での動的挙動や終局強度を精度良く評価する手法の開発が必要であり、また盛土、堤防、ダム等の土構造物についても地震後の残留変形量を正しく推定する方法が要求される。兵庫県南部地震後の土木構造物の耐震基準の改訂においては、これらの諸課題が全て解決されたわけではなく、不十分ながらも、実務上の要請から現状の知見と情報を集約して基準に採り入れたものである。この意味で一連の耐震規準の設計は暫定的な色彩の強いものと解釈しなければならない。

さらに、上述のハード面の課題のみならず、社会の地震防災性を高めるための経費と残存リスクとの関係に関する合意形成や既存構造物の耐震補強と診断に関する費用負担の問題などソフト面で更に深い検討を要する課題が残されていた。

以上のような状況に鑑み、土木学会は「土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会」を平成8年9月に組織し、土木構造物の耐震設計法や社会基盤施設の地震防災性向上の在り方について検討を重ねてきた。本3次提言は、特別委員会での検討結果に基づき既存の提言を発展させるとともに、それらを可能な限り具体化したものである。第3次提言のとりまとめにあたっては、第1、第2次提言の内容との重複を避け、特別委員会の活動によって得られた新たな知見と情報を集約することに努めた。第1次から第3次の一連の提言は一体であり、全体として「土木学会による土木構造物の耐震性能と耐震設計法に関する提言」として位置づけられるものである。

1 地震動に強い社会基盤システムの構築と土木建造物の耐震性

(1) 土木施設の耐震安全性・信頼性の向上を図るにあたっては、個々の構造要素やその集合体より形成される構造系としての耐震性能を向上するだけでなく、システム全体、公共インフラストラクチャー全体、ひいては都市システム全体としての機能性が地震時にも著しく損なわれることのないように十分に配慮されなければならない。

このため、レベル2地震動への対応においては、社会基盤システムを構築する個々の建造物の耐震対策をバランス良く組み合わせることにより、それぞれが相互補完的な役割を果たすことが重要である。それが実現されていることを確認するため、「地震時における社会基盤システムのパフォーマンスの照査」を行うことが望ましい。

(2) レベル1地震動に対して、基本的にはいずれの新設建造物においても「無被害レベル」の耐震性能を要請することは、現時点での技術的及び社会経済的条件を前提としたシビルミニマムの要求と見なされる。

(3) レベル2地震動に対する新設建造物の耐震性能は、損害回避便益と耐震化費用に基づく費用便益分析を基礎として決定するべきである。具体的には、施設の置かれた地域特性や施設の利用特性および重要度ランク等に応じて建造物に要求するべき耐震性能を決定する、簡便で実用的な手法を早期に開発することが必要である。

レベル2地震動に対しては、単に地震発生確率と損害回避額の積をもって損害回避便益を評価するのでは不十分であり、限られた資源しか持たない個人や国家にとっての被害のカタストロフィックな効果などを考慮に入れることが不可欠である。このため、カタストロフ回避便益を適切に評価する方法を開発する必要がある。

(4) 地震災害の特性、既存及び新設建造物のもつ耐震性能、あるいは耐震性能向上に必要な費用やその負担方法を国民に十分分かりやすく示すことが不可欠である。これは、費用便益分析を基礎とする耐震性能決定の前提条件といえる。また、耐震性能とあわせて、地震災害による損害の補償責任を明確にして国民に示し、社会的な合意を得ることが必要である。

2 耐震設計に用いるレベル2地震動

- (1) レベル2地震動は、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動であり、内陸および海溝で発生する地震の活動履歴、震源断層の分布と活動度、活断層から当該地点に至る地下の構造、当該地点の地盤条件、および強震観測結果などに基づいて設定する。
- (2) レベル2地震動の設定では、震源断層の破壊過程や地盤条件の評価などに多くの不確定性が残されていることを十分に認識するとともに、地震動の予測手法の適用性や予測結果の妥当性についての十分な吟味が必要である。
さらに、地震動予測の精度を向上させるために、この分野に関わる最新の研究成果を取り入れ、地震動の予測手法を更新していくことが必要である。
- (3) 対象地点およびその周辺に活断層が知られていない場合でも、レベル2地震動の設定に当たってはマグニチュード 6.5 程度の直下地震が起こる可能性に配慮するものとし、これによる地震動をレベル2地震動の下限とする。
- (4) レベル2対象地震は、単一の地震に限定する必要はなく、複数の地震が選定されてもよい。また、同一地点のレベル2対象地震であっても、対象とする建造物の動的力学特性によって結果として対象地震が異なることがありうる。

3 地盤の液状化と側方流動

- (1) 地盤の液状化の判定においては、細粒分含有率と礫分の影響、レベル2の強地震動に対する強度、地震動の繰り返し回数および初期の静止土圧の影響などを適切に評価する必要がある。さらに液状化による地盤の沈下量を精度良く予測し、これが建造物に与える影響を適切に評価する必要がある。さらに地中建造物の浮上の有無と浮上量についても適切な方法により予測し、必要な対策を講じる必要がある。

(2) 液状化による地盤の水平移動（側方流動）の発生メカニズムと地盤変位量の予測法についてはなお一層の研究を推進する必要がある。研究の推進のためには既往地震での事例分析，模型実験による研究および数値解析的研究の総合化を図るとともに，実地盤に近い大型模型による実験による検証を行う必要がある。

また，側方流動が構造物基礎や地中構造物に与える影響の評価方法を確立するための調査，研究を推進する必要がある。さらに側方流動の発生を防止する方法および側方流動時においても耐震性を有する基礎構造物および地中構造物の開発を促進する必要がある。

4 鋼構造物の耐震性能と設計法

(1) 鋼構造物の耐震性能は，安全性を考慮した終局限界と復旧性を考慮した損傷限界によって照査される。終局限界は変形限界で，また損傷限界は地震後の残留変位で評価される。これらの限界値の設定には，塑性域での座屈現象（局部座屈および全体座屈），材料の低サイクル疲労および脆性破壊現象をよく把握して行う必要がある。

(2) 鋼構造の変形性能の算定は弾塑性有限変位解析により行うが，その精度の向上および適用構造物の範囲拡大が必要である。また，鋼構造の変形性能向上のための鋼材の開発が必要である。さらに，コンクリート充填や，低サイクル疲労破壊防止のための構造細目の検討が必要である。

耐震性能の照査を行うための地震時挙動の推定には，非線形解析手法が不可欠であるが，力学モデル構築における精度向上を図る必要がある。さらに，複雑な鋼構造物に対しては，構造系全体としての耐震性能の把握が必要であり，解析手法の精度向上のために，大型・実大実験を通じて解析結果の検証を行うことが必要である。

5 コンクリート構造物の耐震性能と設計法

(1) 鉄筋コンクリート構造物の耐震性能を適切に照査するためには，塑性領域の動的挙動

特性及び限界状態を明らかにするとともに、限界状態を評価可能な数値モデルを確立する必要がある。

- (2) 鉄筋コンクリート構造部材及び構造全体系の、最大耐力点までの弾塑性復元力特性や地震時の弾塑性動的挙動については、現有の解析技術である程度対応可能であるが、最大耐力点以降の挙動については、部材の復元力特性や全体系の応答特性など解析的な追求の困難な要素が現時点では数多くあり、これを克服するために特に大型動の実験装置を用いた実験的研究の蓄積が必要である。

耐力、変形性能を合理的に向上させることが可能な新しい配筋方法、新しい合成構造、新材料の活用方策などを開発する必要がある。

- (3) 地震直後における機能を保持するという耐震性能を評価する場合には、線形応答解析を行えばよい。この結果に基づき、材料の応力度が設計強度以下であること及び応答変位が許容変位以下であることを照査する。

耐震性能が、機能が回復可能である、もしくは機能回復に長期間を要するが安全性は確保するという場合には、非線形応答を考慮した解析法が必要である。非線形応答解析の結果に基づき、部材の最大応答変形が許容変形以内であること、設計上降伏を想定していない部材・構造要素及び断面力が降伏していないこと、残留変形が許容値内であることなどを照査する。

- (4) 動的解析に当たっては、基礎－地盤系の相互作用の影響を考慮する必要がある。特に、周期の短い構造物の地震応答は、基礎－地盤系の非線形領域の動的相互作用の影響を大きく受けるため、これを設計に取り入れる必要がある。また、地中構造物は、慣性力だけでなく、周辺地盤の地震時変形の影響を考慮して、動的応答を評価する必要がある。

6 土に関わる構造物の耐震性能と設計法

- (1) 構造物全体系に要求される耐震性能を照査するためには、基礎構造の損傷が上部構造

の機能に与える影響を適切に評価するとともに、上部構造—地盤連成系の非線形領域における挙動を明らかにする必要がある。このため、実構造物基礎での地震時挙動の観測体制を整備するとともに、実験方法および数値解析手法に関する研究を推進する必要がある。

- (2) 液状化および側方流動が基礎構造に与える影響を解明し、設計法の合理化を図る必要がある。
- (3) 開削トンネルの耐震設計では、その地表応答が周辺地盤の地震時挙動に支配されることから、周辺地盤の地形・土質条件の調査結果に基づいて、液状化や地滑りなど地盤の耐震安定性を検討することが重要である。
- (4) 抗土圧構造物の耐震性能の指標としては、構造物の安定、部材の損傷程度、周辺地盤を含めた構造系全体としての安定等が考えられる。また、耐震性能の設定に際しては、破壊モードに留意する必要がある。
- (5) レベル2地震動など強地震動に対する杭土圧構造物の耐震設計では、合理的な地震時土圧の算定法を開発する必要がある。このためには、抗土圧構造物の地震時挙動観測および実物大模型実験などにより構造物と地盤の非線形領域での挙動を明らかにする必要がある。また、強い地震動を対象とした土圧の低減工法の開発を促進する必要がある。
- (6) 盛土のレベル2地震動に対する耐震性能は、地震後に残留する塑性変形により設定する必要がある。このため、塑性変形を精度良く予測する手法の開発が必要である。
- (7) レベル2地震動に対するダム耐震性能は、貯水機能の維持を主眼とし、貯水機能に影響を与えない変形・変位は許容されるものとする。
- (8) 堤高の高いダムにおいては、3次元の拡がりを持つ構造体としての動的挙動に基づく安定性の検証を行うことが望ましい。

- (9) 地下タンクの耐震設計では、地盤の大ひずみ、非線形領域でのタンクー地盤の連成系の動的挙動を適切に評価する必要がある。特に、タンク近傍においてはタンクの存在による地盤の3次元的な応力状態を評価しうるモデル化に努めねばならない。

7 耐震診断および耐震補強

耐震診断と耐震補強については、土木学会による第2次提言（1996年1月）において基本的方向性を示した。兵庫県南部地震より約5年の間に多くの土木構造物の耐震診断と耐震補強が実施されてきたが、社会的および技術的などの理由から、未だ耐震診断と耐震補強が実施されていない土木構造物が数多く存在する。この第3次提言においては耐震診断と耐震補強の基本方針に関する補足的事項および今後残された課題について述べる。

- (1) 土木学会の第2次提言で記述された土木構造物の2次診断（詳細な診断）に当たっては、兵庫県南部地震以降に設計された耐震基準における設計地震動、地震応答評価のための解析モデル、目標耐震性能レベルを用いることを原則とする。
- (2) 既設構造物の耐震診断に当たっては、新設構造物の耐震設計で必要とされる調査項目に加え、使用条件の変化、増改築、周辺環境の変化、変状と劣化など影響を考慮する必要がある。
- (3) 基礎の耐震診断においては、地震による基礎の損傷の推定および基礎の損傷が上部構造に与える影響を適切に推定することが要求される。このための基礎の適切な診断方法の開発が必要である。また、基礎など地中構造物の健全度の調査方法に関する研究・開発を推進する必要がある。
- (4) 既設土木構造物の耐震補強は、兵庫県南部地震後に改訂された耐震基準による新設構造物と同等の耐震性能を付与することを原則とする。
- (5) 兵庫県南部地震後に改訂された耐震基準を満たさない基礎構造物のうち、基礎の被災

により上部構造物の安全性が著しく損なわれるものから早急に補強することが必要である。耐震補強にあたっては、補強後の構造物全体系の動的挙動を考慮して効率的な補強方法を選定する。また基礎の補強工法について実験や解析などを通じその効果を確認することが重要である。

- (6) 液状化対策が施されていない建設年代の比較的古い埋立地に関しては、老朽化護岸の補強、改修および護岸近接構造物の補強を促進するとともに、埋立地全体として地震防災性向上の方策を立案し、実施する必要がある。
- (7) 兵庫県南部地震後、道路・鉄道など公共土木構造物の耐震補強は順次実施されて来た。しかし、中小の事業者による産業施設などでは経済的な理由により耐震補強が進んでいないものも多数残されている。公共資金の投下や、耐震診断と耐震補強へのインセンティブ向上の方策を早急に構築する必要がある。

8 研究の促進と新技術の開発

- (1) 兵庫県南部地震後、この地震による土木構造物の被害原因の分析および耐震性向上に関する研究が精力的に実施され、これらの分析結果や研究成果をもとに、多くの土木構造物の耐震規準の改訂が行われて来た。しかしながら、前述したように、レベル 2 地震動の評価手法、鋼構造物やコンクリート構造物の非線型領域での動的挙動における終局強度の推定手法、さらには土に関わる構造物の残留変位の推定手法などに関しては未だ多くの解決を要する課題が残されている。このような観点から、兵庫県南部地震後の耐震規準の改訂は建設実務執行の必要性を考えた暫定的なものと位置づけるべきものである。本提言で挙げた課題が十分に解決された段階で再び耐震設計規準や指針の改訂を行う必要がある。
- (2) レベル 2 地震動に対して土木構造物の耐震性能を合理的に照査するためには、地盤を含めた構造物全体系の塑性領域の動的挙動と終局強度を精度良く評価する手法が不可欠である。このためには、実大規模の実験的研究の推進が必要である。

(3) 地震時における構造物の安全性及び性能の向上をはかるため、新構造形式や新材料の開発を進め、実構造物への積極的な適用を図るべきである。

土木学会 地震工学委員会 地震防災技術普及小委員会 委員構成

(五十音順 敬称略)

| | | |
|------|-------|----------------------|
| 委員長 | 田中 努 | (株)オリエンタルコンサルタンツ 本社 |
| 副委員長 | 森本 巖 | 基礎地盤コンサルタンツ(株) 防災部 |
| 幹事長 | 木全 宏之 | 清水建設(株) 土木事業本部 技術第2部 |

■第1WG

| | | |
|--------|-------|---------------------------------|
| 主査・幹事 | 柳原 純夫 | (株)奥村組 技術本部 技術開発部 |
| 副主査・幹事 | 渡辺 和明 | 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構造研究室 |
| 委員 | 青地 和也 | (株)開発工営社 交通第2部 |
| 委員 | 池田 隆明 | 飛鳥建設(株) 技術研究所 防災研究室 |
| 委員 | 清宮 理 | 早稲田大学 建設工学社会環境工学科 |
| 委員 | 濱野 雅裕 | 日本技術開発(株) 環境防災技術センター 防災・リニューアル部 |
| 委員 | 目黒 公郎 | 東京大学 生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター |

■第2WG

| | | |
|--------|---------------|-------------------------|
| 主査・幹事 | 大野 春雄 | 攻玉社工科短期大学 環境建設学科 |
| 副主査・幹事 | 廖峰(Liao Feng) | 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤工学専攻 |
| 委員 | 井上 雅夫 | (財)建設技術研究所 研究本部 研究課 |
| 委員 | 小金丸健一 | 東京ガス(株) 防災・供給センター |
| 委員 | 指田 朝久 | 東京海上リスクコンサルティング(株) |
| 委員 | 佐藤 紘志 | 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科 |
| 委員 | 高原 秀夫 | (株)イー・アール・エス リスクマネジメント部 |
| 委員 | 中野 雅弘 | 大阪産業大学 工学部 土木工学科 |
| 委員 | 能島 暢 呂 | 岐阜大学 工学部 土木工学科 地球診断学講座 |
| 委員 | 橋本 隆雄 | (株)千代田コンサルタント 東京支店 技術3部 |

■第3WG

| | | |
|--------|-------|----------------------------|
| 主査・幹事 | 松田 隆 | (株)大林組 技術研究所 土木基礎・耐震研究室 |
| 副主査・幹事 | 酒井 久和 | 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター |
| 委員 | 佐藤 正行 | 東電設計(株) 第二土木本部 地盤・構造部 |

■第4WG

| | | |
|--------|-------|------------------------------|
| 主査・幹事 | 橘 義規 | (株)オリエンタルコンサルタンツ 総合マネジメント事業部 |
| 副主査・幹事 | 橋本 至 | (株)ドーコン 構造部 |
| 委員 | 大保 直人 | 鹿島建設(株) 技術研究所 都市防災・風環境グループ |

■第5WG

| | | |
|--------|-------|-------------------------------------|
| 主査・幹事 | 鈴木 直人 | (株)建設技術研究所 大阪支社 道路・交通部 |
| 副主査・幹事 | 福武 毅芳 | 清水建設(株) 技術研究所 (和泉研究室) |
| 委員 | 上島 照幸 | (財)電力中央研究所 我孫子研究所 地盤耐震部 |
| 委員 | 中山 学 | (株)奥村組 本社 土木技術部 |
| 顧問 | 佐伯 光昭 | 日本技術開発(株) 東京支社 |
| 顧問 | 田蔵 隆 | 清水建設(株) 技術研究所 |
| 顧問 | 泉 博允 | (株)シー・エス研究所 |
| 顧問 | 岩本 利行 | (株)クボタ 鉄管事業部 水情報システム部 |
| 顧問 | 小川雄二郎 | 富士常葉大学 |
| 顧問 | 後藤 洋三 | 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター 川崎ラボラトリー |

ご注意 当該出版物の内容を複製したり他の出版物へ転載するような場合は、必ず土木学会の許可を得てください。

平成15年度実務者のための耐震設計入門 別冊

平成15年9月9日 第1版・第1刷発行

編集者 〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目無番地 地震工学委員会
委員長 後藤洋三
発行者 〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目無番地 社団法人 土木学会
古木守靖
発行所 社団法人 土木学会
〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目無番地
電話 03-3355-3559(研究事業課) FAX. 03-5379-0125

印刷：(株)ワコー