

研究討論会・これからの土木構造物の耐震構造の在り方

—基本問題検討会議による提言の具体化に向けて—

濱田 政則*

Masanori HAMADA

はじめに

阪神・淡路大震災の発生から約二ヶ月後の平成7年3月に、「土木学会耐震基準等基本問題検討会議（以下、検討会議）」が組織された。この検討会議には耐震工学はもとより、コンクリート工学、鋼構造工学、地盤・基礎工学および都市計画など広い分野の研究者が参加し、土木構造物の耐震性の向上のための方策と今後の都市の地震防災性の在り方などについての広範な議論が行われた。これらの検討結果は、1次および2次提言としてまとめられ、それぞれ平成7年5月、同8年1月に公表されてきている。さらに、2次提言発表後の検討結果および提言とりまとめの経緯などが解説としてまとめられ、去る平成8年8月に発表されてきている。

検討会議による提言は、現在行われている関係各機関による耐震基準の改定において取り入れられている。耐震設計におけるレベル2地震動については、大多数の土木構造物の耐震基準の中で考慮される方向で検討が進められている。また、構造物が保有すべき耐震性能の決定に影響を与える構造物の重要度についても、土木学会の提言に基づいてそれぞれ関係各機関により検討がなされ、重要度による構造物や施設の分類が行われているところである。

しかしながら、提言に唱われた内容を耐震基準改定の中で具体化していくためには、なお多くの未解決の課題が残されていることも事実である。たとえば、上記のレベル2地震動に関しても、提言では「マグニチュード7クラスの活断層による地震動を耐震設計において考慮する必要がある」としただけであり、レベル2地震動を設定するための方法論について言及している訳ではない。活断層が同定された場合の地震動の推定方法、また、活断層の存在が不明の灰色ゾーンにおける標準的なレベル2地震動の設定方法など、残された課題が数多く存在する。土木構造物の限界状態の照査方法についても、コンクリート構造および鋼構造についてはそれぞれの常置委員会において検討が進められているものの、盛

土、擁壁、堤防などの土構造物については提言後、ほとんど土木学会としての検討が進められていないのが現状である。

以上のように、土木学会による提言が耐震基準改訂の基本方針として生かされているものの、なお多くの技術的課題が残されている。このような現状認識に立ち、本研究討論会では提言以後の土木学会が果すべき役割を中心課題として討論を行なった。

話題提供の概要

田村重四郎（日本大学）：話題提供の概要「提言の背景について」

耐震性の基本である構造物の耐震性能の照査は従来、通常構造物の供用期間中に1~2回発生が予想されるレベル1地震動を基本としてきたが、兵庫県南部地震では、ほとんど全ての種類の構造物が被災しており、古い基準に基づく構造物の耐震性が十分なものではないことを示した。特に社会活動の基礎を支えている社会基盤施設に対して、高いレベルの耐震性をもつことが必要であることは、大災害、緊急対応、二次災害、復旧の過程等を見れば明らかである。今回の災害はB級の活動度の内陸の活断層の活動で発生した大地震に因るものであるが、全国的に見た場合、10年間に一度程度発生することが予想され、活断層の同定による地域の設定を含めてこの地震に対処する必要がある。レベル2地震動の採用はこのような背景をもっている。

しかし、構造物、施設の供用期間は通常数10年~100年程度と考えられているから、当該地点の視点に立てば、レベル2地震動の採用は、地震に対する安全のために大きな経済的対価を常に支払うことを意味する。大きな負担を常に強制した場合、負担の軽減すなわち耐震性の低下を指向する恐れがある。このため、必要な耐震性能を最も少ない負担で得るようにすることが大切であり、必要な耐震性能を、それを必要とする対象にのみ必要に応じて具備することが望まれるのである。そして、これを実施するには多くの課題が残されているが、その基本的な評価基準として重要度の判断が導入されてい

* フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学部

る。

レベル1地震動に対しては、構造物に構造的損傷を与えず従って機能的にも被害がなく、供用し続けるよう耐震設計がなされてきた。しかし、これとは異なる性質のレベル2地震動に対しては適切な設計基準を設ける必要がある。発生間隔が1000年単位の強い地震動に対しては、必要な耐震性能はその構造物が持つべき機能とし、その維持を計るのが適切であろう。これにはシステムの複線化、リダンダンシーの増加など、システムとしての耐震性の向上などの手段も含まれる。この場合、機能の維持に関わらない構造上の被害は許容されることになる。

亀田弘行（京都大学）：「都市直下地震—低頻度巨大災害への備え」

設計地震荷重の評価において再現期間を大きくとるほど、サイトに影響す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、周辺の活断層が支配的影響を持つ特定の地震の姿に移行する。兵庫県南部地震はこうした条件のもとで発生したものであり、それは「低頻度巨大災害」の問題として、将来の地震対策の中に位置づけられるべきものである。土木学会二次提言において、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日本から西日本にかけては、ここに述べた状況はかなり明確である。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動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帯構造となっている地域など、地域によって、それぞれが特徴ある条件のもとにある。したがって、全国展開が行われるべき土木構造物の耐震基準において、当面の方策として、兵庫県南部地震の強震記録を中心に既往の記録に基づいて、レベル2地震動を設定しその適用範囲について保守的な側に判断することも現実的な方策であろう。

阪神・淡路大震災の経験をふまえて、社会基盤施設の耐震化方策が広く検討されている。そこでは、震源断層近傍の地震動の影響を取り入れるという点で新たな研究課題と技術課題が喚起されている。これらの対策を進め

る中で、i) 社会基盤施設の戦略的強化と、ii) 既存ストックの耐震強化が意思決定上の主要な課題となる。低頻度巨大外力に対し、限られた資源・コストのもとでの社会基盤施設の整備では、特にライフライン（交通・供給処理施設）の基幹施設・幹線ルートや、重要な防災拠点（消防・病院・警察・行政官庁・避難所など）を選別的に強化することが重要である。

大町達夫（東京工業大学）：「レベル2地震動に関する私見」

活断層にもとづいてレベル地震動を評価する方法と課題を表-1に示す。現状では、脅威となる活断層が日本全国一様に、詳細に判明しているわけではない。むしろ全体的には活断層による危険度が判明している地域の方が少ないのかもしれない。したがって、現在までに脅威となる活断層が発見されていない地域でも、当該地域が本当に地震危険度が低いとは限らないので、その地域に活断層に起因するレベル2地震（いわゆる歯止め）を考慮すべきか、考慮するとすればどのような地震が適切かが、課題となる。

表-1 レベル2地震動の評価手順

1. 地震関連資料の収集・整理
A. プレート内地震資料（起震断層の分布、地体構造、すべり量、など）
B. プレート境界地震資料（海溝型地震の再来期間、空白域など）
C. 歴史地震のリスト
2. 設計で考慮すべき地震（L2地震）の選出
1) 年超過確立や最近までの地震発生状況から、注目地点でのL2地震候補C1を選出
2) C1に含まれない切迫度の高い地震C2を選出
3) 以上の候補からL2地震を選出（複数でもよい）
3. L2地震の震源特性の想定
1) 静的パラメーター（断層位置、震源深さ、断層面の大きさ、平均ずれ変位量）
2) 破壊過程と動的パラメーター（震源時間関数、破壊伝播速度、アスペリティ）
3) 対象とする周期範囲、その他
4. 震源近傍効果（Near-field effects）の評価
1) 震源メカニズム解の影響（ラジエーションパターン）
2) 破壊伝播効果の影響
3) 面震源の効果
4) アスペリティやマルチプル破壊の影響、その他
5. L2地震動の設定（簡便法／詳細法）
1) 地震基盤での地震動特性（スペクトル／時刻歴）
2) 地盤特性の設定（線形／非線形／液状化）
3) 地表・工学的基盤での設計用地震（スペクトル／時刻歴）
6. L2地震動に対する地震荷重の評価

活断層や直下地震のこのような不確実性に対し、従来「原子力」ではごく近傍である程度の規模の地震が発生したと仮定しても安全性が保てることを目標とし、いかなる敷地においても設計用限界地震 S2 の 1 つとして M 6.5 の直下地震を震源距離 10 km の位置において考慮することが行われている（原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987）。これらの数値が決定された経緯は分からないが、M 6.5 にしても 10 km にしても、それぞれに根拠があって決定されたものと思われる。

設計で考慮すべき断層が同定されたとしても、その震源メカニズムを想定することにも困難が伴う。ただし、この困難が地震動の設定に及ぼす影響は長周期成分ほど低減されるので、特に直下地震による地震動の短周期成分を設定する場合に影響が大きく、具体的には地震動の強さや特性の「ばらつき」や、それに対する処置が問題となる。

この「ばらつき」の支配要因は、断層破壊の過程や状況を規定する断層パラメーターであり、具体的には応力降下量（またはすべり量）や破壊伝播速度、地震時間関数などである。しかも断層全体にわたるこれらの平均値よりも、不連続的な分布や局所的な値が及ぼす影響が大きいこともよく知られている。これらの動的パラメーターは従来の地質学的活断層調査では究明されていない項目である。今後、設計用地震動を設定するという地震工学的観点から活断層調査を推進する必要性が極めて高い。

石原研而（東京理科大学）：「地盤の液状化と基礎に及ぼす側方流動の影響」

レベル 2 地震動に対しては、地震応答が弾性域を越えて塑性領域にいたっても抵抗力が極端に減少しない「ねばり」を持たせる、いわゆる弾塑性設計法を採用すべきであることが推奨されている。以上の考え方に対応して、地盤および基礎構造の耐震性をいかに考え、それを設計に反映すべきかについて、以下私見を述べる。

地盤の安定性は、液状化の発生の有無、さらにそれに伴って生じる水平流動の有無に依存していることが多い。液状化については標準貫入試験の N 値を用いた判定法が諸基準の中に盛り込まれているが、道路橋の基準によるとこの値が 20 以上になっても液状化抵抗力がさほど大きくならないようになっている。この基準は最大水平加速度が 200 gal 程度の新潟地震における液状化の経験に準拠し、相対密度がほとんど 60% 以下（N 値 20 以下）のゆるい砂層を対象にしていたために、このようになっていたのである。一方、兵庫県南部地震では外力が格段に大きかった。にもかかわらず、N 値が 20 以上のマサ土地盤では液状化による被害が起こっていない。

このことは N 値 20 の地盤が相当大きい抵抗力を発揮したことを意味するわけで、従来の基準による N 値と液状化抵抗力の関係式が N 値の大きい範囲では不適切であると判明したわけである。そこで、これを修正する必要があるが、そのための基本的情報として礫混じりの砂層より凍結サンプリングによって不攪乱試料を採取し、それに対して室内実験を行ってみる必要がある。さらに、兵庫県南部地震の際に実際の地盤がいかなる挙動をしたかを調査して見る必要がある。

高低差がある地盤で液状化が生じると、土が緩詰めの場合、地盤の流動が起こることがある。阪神・淡路大震災では神戸港周辺の人工島をとりまく岸壁背後のマサ土が液状化し側方流動が至るところで発生した。岸壁が 2~3 m 海側にせり出すと、その変位が後方に伝播し背後の敷地が広範囲にわたって地盤被害を受けることになる。この中には貯蔵タンクや化学工業プラントなどの重要工業施設がならんでいたため、地盤変状に起因する上部施設の被害が各所で続出した。ケーソンや鋼管セル基礎は側方流動の影響を受けにくい、杭基礎は大きな被害を被ることが兵庫県南部地震で示された。流動する土がどのような横方向力を杭に与えるか推定することが、基礎構造の耐震設計において今後の大きな課題となることであろう。

福本啓士（福山大学）：「耐震診断と耐震補強に関する今後の研究・開発課題」

今後、兵庫県南部地震のようなレベル 2 強震動を想定して我が国の地震防災性の向上をはかるためには、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は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。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。

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、合理的な補強方法を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らかにしておく必要がある。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。

討 論

(1) 内陸断層近傍域の地震動を含めたレベル2地震動を設定するためには兵庫県南部地震やノースリッジ地震による地震動の分析が不可欠であるが、兵庫県南部地震による地震動の分析は現在のところ極めて不十分と言わざるを得ない。強震記録観測地点における地形・地盤条件の調査を行うとともに地盤の振動解析などを行って断層近傍域の地震動の実体の解明を急がなければならない。

レベル2地震動を確定論的に与えることは不可能であるが、地震動の平均値やばらつきなど確率論的な情報を与えることは可能であろう。このような情報にもとづき、設計用地震動を設定する際には設計値を超える確率についても明記すべきである。断層から直接地震動を設定する方法に関しても断層パラメーターの同定など多くの技術的課題が残されている。

(2) 盛土、堤防、擁壁などの土構造物の耐震設計は自重や地震力などの外力に対する抵抗力の比がある一定値(安全率)以上になることを確認することにより行なわれてきた。いわゆる「力の釣合」のみを考慮した設計法である。レベル2地震動に対しては多くの場合、力の釣合が破れて構造物が塑性変形が生じ、地震後もその変形が残留することになる。この残留変形を予測する方法として有限要素法や模型振動実験などが考えられるが、実務設計で用いるには簡便さなどに難点がある。土構造物の変形予測のための簡易法の開発を急ぐべきである。

(3) 現在高速道路や鉄道などのコンクリート橋梁および地下鉄のコンクリート柱の補強が精力的に行われている。レベル2地震動を想定して都市と地域の地震防災対策を推進して行くためには、今後これらの構造物の基礎構造の補強も必要となってくる。また、地盤改良が施されていない埋立地などにおいては地盤や構造物の液状化対策も必要であるが、解決を要する多くの技術的課題が残されている。特に護岸や岸壁など水際に位置する構造物の側方流動対策は重要である。側方流動が基礎構造に与える影響については兵庫県南部地震による被害事例および無被害事例の分析を急ぎ、これをもとに合理的な対策工法を開発しなければならない。

(4) 土木構造物の耐震設計においてレベル2地震動を考慮することなど「提言」の基本精神は、現在改定が行われている耐震基準の中に生かされている。しかしながら、提言の内容を具体的に耐震基準の中に取り入れていくためには、なお多くの技術的課題が残されていることが明らかにされた。「提言」で土木学会の役割が果たされたと考えすることはできない。阪神・淡路大震災が提起した課題を見落とすことなく調査・研究し、これをもとに耐震性の高い土木構造物を建設して、より地震防災性に優れた社会を建設して行くことは、土木技術者全体に課せられた責務である。研究者のみならず広い領域の土木技術者で構成されている土木学会に期待される役割は大きいと言わざるを得ない。提言の内容をさらに前進させて関係機関で行われている耐震基準の改定作業に貢献していくことが土木学会が果たすべき役割と考えられる。

あとがき

検討会議「提言」の内容がもともと地震動から耐震補強まで広範囲なテーマを含んでいたこともあり、研究討論会での話題も多岐に及んだ。このため、2時間という限られた時間内では十分な討議を尽くすことができなかった。しかしながら、検討会議による「提言」について検討会議のメンバー以外の会員を含めて討議を行ったのは提言発表後はじめてであった。提言の取りまとめの経緯や今後の課題について、それぞれの担当者より参加者に説明があり、また会場からの参加者よりいくつかの問題提起があったことは、提言以後の土木学会の活動を考へて行く上で有意義であったと考えられる。