

第4章 生活基盤の地震防災性向上の理念に関する研究

4.1 地震防災性向上の理念構築の緊急性

兵庫県南部地震は断層近傍において極めて強烈な地震動を発生させた。この地震断層に阪神間の大都市圏が接近していたため多くの構造物が破壊され、我国では関東地震以来の多数の犠牲者を出す災害となった。この兵庫県南部地震は建物や構造物の耐震設計において想定すべき地震動の大きさや要求される耐震性能などに関して多くの課題を我々に提起した。

これらの課題の中で地震後の耐震規準の改訂において盛んに議論されたのは「神戸で発生したような断層近傍域の強烈な地震動に対して今後構造物をどのように耐震設計するか」という問題である。

兵庫県南部地震では、神戸海洋気象台において水平方向の地表面加速度 820cm/s^2 の加速度が観測されたことは良く知られている。確かに 820cm/s^2 という数値だけを見れば、今までの通常の耐震設計で想定して来た地震動強度を遥かに超えていることになる。問題はこのような大きな加速度振幅をもつ地震動を今後の耐震設計で想定すべきか否かということである。

地震学の分野の研究者に今回の地震断層の活動の再現期間をたずねると、ある研究者は500年あるいは1000年、また他の研究者は2000年くらいであろうとの答えが返ってくる。要するに再現期間は極めて長いと言えるが、正確な活動の周期は現時点では分からないということである。仮に再現期間を1000年として構造物の耐用年限を50年とすれば耐用年限中に今回のような地震動に遭遇する確率はたかだか5%ということになる。兵庫県南部地震が我々に提起した最初の課題は「低頻度の大災害に対してどのように備えるか」という問題である。遭遇する確率は低いながらも極めて強烈な地震動に対して構造物や施設の耐震性をどこまで保持すべきか、という課題が我々に提起されたのである。

この問題に関して、土木学会では地震直後に「耐震基準等基本問題検討会議」を組織して検討を行なった。検討結果を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、発生確率は低いながらも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。

以上の土木学会の提言と同様なことが、平成7年7月に改訂された国の防災基本計画の中にも盛り込まれた。「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ながらも直下型地震または海洋型巨大地震に起因する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。さらに、構造物・施設の耐震性能は人命への影響、地震

後の応急対策活動，経済活動などを考慮してその目標を設定すべきとしている．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耐震性能を応じて定め，これにもと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約5年の間に，土木構造物に関するほとんどの耐震基準が改定されたが，いずれの耐震基準の改定においても上記の土木学会の提言や中央防災基本計画で示された耐震設計に関する考え方が基本方針として採用された．しかしながら，これらの耐震設計に関する考え方は基本的方向性のみを示したもので，個々の構造物や施設に要求される耐震性能をどのように決定し，その耐震性能を確認するための具体的な設計法を提示したのではなく，さらに耐震設計において想定すべき地震動の設定法等について言及しているものではない．また，土木学会の提言も中央防災基本計画も実務執行の緊急性のため地震直後のわずかな時間内にまとめられたものであり，当該分野の研究者や技術者によるコンセンサスを十分に得たものでは必ずしもないのが現状である．

一方，兵庫県南部地震の経験によって，構造物の地震に対する真の強度すなわち終局耐力や塑性域での挙動を精度良く評価することの必要性が強く認識された．このような背景もあって科学技術振興調整費による本研究プロジェクト「構造物の破壊過程解明による生活基盤の地震防災性向上に関する研究」が平成11年度より開始された．本研究プロジェクトでは国立研究所や大学など16機関が研究を受託する一方，研究を推進するため土木学会に4つ分科会と10の研究班が組織され，総勢110名の研究者と技術者が研究に参画している．

兵庫県南部地震以後，この地震が提起した技術的課題について，当該分野からこのような多数の研究者や実務者の参加を得て研究を推進するのははじめてである．土木学会の提言や防災基本計画による基本的方向性を見出して，本研究プロジェクトの参加者による討議を通じて「生活基盤の地震防災性向上の理念」についての社会的コンセンサスを形成して行くことは有意義であると考えられる．

科学技術庁は構造物が破壊に至る過程を実大の構造物で明らかにするため，兵庫県三木市に「実大三次元震動台」の建設を開始している．このような大型施設を有効かつ効率的に活用するためにも「生活基盤施設の地震防災性向上に関する理念」の構築を急ぐ必要がある．

4.2 地震防災性向上の理念に関するアンケート

4.2.1 アンケートの内容および回答者

「生活基盤の地震防災性向上に関する理念」は本研究プロジェクトの遂行の全期間を通じ、プロジェクトに参加する研究者の討議により深めて行かなければならない。このため、本年度はアンケートを実施し、今後の議論のための基礎資料を収集・整理することとした。地震防災性向上の理念に関するアンケートは分科会構成員および研究班座長に対して行われた。アンケートでの設問は以下の通りである。

- ①「構造物の破壊過程の解明」および「生活基盤の地震防災性向上」という観点から見た時の兵庫県南部地震の教訓は何か？
- ②上記の教訓がこの5年間どのように調査・研究され、地震防災対策の中にどのように反映されてきたか？
- ③兵庫県南部地震の教訓の中で何が未解決のまま残っているのか？
- ④（個々に担当されている研究課題でなく）本総合研究全体を概観した場合に、今後特に重要と考えられる研究課題とその研究方法は何か？
- ⑤昨年発生したトルコ・コジャエリ地震および台湾集々地震が新たに提起した課題は何か？
- ⑥三木市に建設予定の実大三次元振動台を用いた将来の研究課題と振動台を利用することにより期待される成果は何か？
- ⑦上記実大三次元振動台の利用方法（組織、体制、研究費）などに関する意見
- ⑧本総合研究の進め方に対する意見

以上のアンケートに対して下記の研究者より回答を得た（順不同、敬称略）。

田村 敬一	(建設省土木研究所)
上部 達生	(運輸省港湾技術研究所)
谷村 眞治	(大阪府立大学)
高橋 祐治	(鹿島建設(株))
毛利 栄征	(農林水産省農業工学研究所)
福田 俊文	(建設省建築研究所)
山本 鎮男	(早稲田大学)
清水 信行	(いわき明星大学)
藤田 聡	(東京電機大学)
運上 茂樹	(建設省土木研究所)
壁谷沢 寿海	(東京大学)
大津 政康	(熊本大学)

4.2.2 回答のまとめ

アンケートの各設問に対し、12の研究者による回答をまとめれば以下ようになる。

①「建造物の破壊過程の解明」および「生活基盤の地震防災性向上」という観点から見た時の兵庫県南部地震の教訓は何か？

- ・ マグニチュード7クラスの断層近傍域で発生する強烈な地震動の評価とこれに対する建造物の耐震性の在り方
- ・ 建造物の塑性領域での動的挙動や破壊過程の究明の必要性
- ・ 旧耐震設計基準で設計・建設された建造物、老朽化した建造物および非
- ・ 整型建造物（ピロティ建造物など）の耐震性評価と耐震補強の必要性
- ・ 鉄骨構造の脆性破壊、柱はり接合部の強度特性の解明の必要性
- ・ 地震後の救急、復旧・復興、社会的・経済的影響の軽減など危機管理技術の必要性

②上記の教訓がこの5年間どのように調査・研究され、地震防災対策の中にどのように反映されてきたか？

- ・ 地震後の耐震設計基準の改訂における設計地震動の見直し、必要な耐
- ・ 震性能の明確な塑性設計法の導入、建造物の極限耐力の評価
- ・ 既存建造物の耐震補強、重点建造物の耐震性の増強
- ・ 液状化、側方流動が建造物に与える影響の究明と設計基準への反映
- ・ 救急、復旧・復興などに関する危機管理システムの構築

③兵庫県南部地震の教訓の中で何が未解決のまま残っているのか？

- ・ 建造物の性能に立脚した耐震設計法（性能設計法）の確立
- ・ 活断層近傍域での地震動を精度良く評価する方法の確立
- ・ コンクリート建造物および鋼建造物の塑性領域での挙動と極限強度の評価法
- ・ アースダム、盛土、擁壁など土建造物の塑性領域での挙動と残留変形の評価方法
- ・ 地盤・基礎構造の耐震補強
- ・ 民間建造物・施設の耐震補強にかかわる費用負担等に関する社会的コンセンサスの形成
- ・ 簡便で経済的な耐震性診断技術の開発
- ・ 持続性と更新性のある地震後危機管理システムの構築

④本総合研究全体を概観した場合に、今後特に重要と考えられる研究課題とその研究方法は何か？

- ・ 強地震動（レベル2地震動）に対する地盤－基礎－上部構造連成系の塑性領域での挙動と破壊過程の実験的解明
- ・ 上記の実験的研究成果をもとにした、建造物の塑性領域での挙動と破壊過程説明のための数値解析モデルの構築
- ・ 建造物の耐震性向上のための新構造および新材料の開発
- ・ 都市の地震防災成向上のためのシステム開発などソフト面での研究推進

⑤昨年発生したトルコ・コジャエリ地震および台湾・集々地震が新たに提起した課題は何か？

- ・ 断層変位に対する構造物の耐震性の在り方および地震防災性の考え方
- ・ 断層変位による地表面変状の位置と変位量の予測手法の研究の必要性
- ・ 長周期成分を含めた断層近傍域の地震動の評価手法の開発
- ・ 耐震性の低い住宅および建物の診断と補強の緊急性
- ・ 耐震設計規準の国際化による地震時安全性のレベルの向上

⑥三木市に建設予定の実大三次元振動台を用いた将来の研究課題と振動台を利用することにより期待される成果

- ・ 部材レベルの実物を対象とした地震時動的挙動の実験的解明
- ・ 実物構造物の破壊実験実施による当該分野の研究者意識の活性化と行政施策の促進
- ・ 中・小型モデルによる実験との組合せによる総合的研究の推進の必要性

⑦上記実大三次元振動台の利用方法（組織，体制，研究費）などに関する御意見

- ・ 産官学連携の運営組織による研究体制・研究者の確保方法の検討
- ・ 施設の国際利用の方策の検討

アンケート調査の回答を以下に示す.

①「構造物の破壊過程の解明」および「生活基盤の地震防災性向上」という観点から見た時の兵庫県南部地震の教訓は何か？

- ・ 従来の耐震設計で想定されていた地震力を上回る地震動の発生
- ・ 新しい設計基準類で設計・建設された構造物の被災に比較して古い設計基準類による構造物の被災が甚大であったこと
- ・ 構造物の変形性能と動的耐力の適切な評価
- ・ 地盤の液状化及びそれに伴う流動化による構造物の被災
- ・ 輻輳する都市における復旧戦略
- ・ 構造物が破壊するしないの二者択一的に設計することから、構造物の破壊を連続的に把握して設計することの合理性が再確認された。
- ・ 構造物が破壊しても、緊急時の機能が確保されるようなハード、ソフト両面での検討が必要であることが再認識された。
- ・ 大都市に直下型の厳しい地震が起こり、多大な被害が生じたが、それらの中には従来見られなかったような構造物の破壊パターンも、数多く含まれていた。設問の地震の教訓としては、わが国土に起きたこのような数10年又は何100年に1回起きるかどうかという極めてまれな経験、教訓を、十分に、生かすことが重要となる。そのためには、よく言われているように、関連する種々の観点、種々の専門分野から調査研究を行うことが重要となる。たとえば、破壊過程の解明のためには、振動工学や破壊力学のみならず、波動工学、衝撃工学、土木、建築、機械、材料など、種々の視点、分野から調査研究を進めることが重要となる。より具体的な例としては、今回の地震特有の揺れ初期の厳しい上下・水平動に起因した大型構造物の破壊過程の解明を、特に注意して進めることが重要であることを、認識させられた。
- ・ 耐震設計された構造物が壊れるはずがないと思っていたが、実際には多くの構造物が壊れた。単に我々が知っている（経験した）地震強さや破壊現象について壊れないようにするにはどうすればよいかを知っていただけである、ということを経験させられた。

→地震の強さや構造物の破壊現象について、まだわからないことが多い。

- ・ とはいえ、地震発生時点において最新の指針や基準に従って設計され、きちんと施工された構造物の被害は小さかった。過度ともいえるほどコストダウンを追求し、耐力に余裕がなかった構造物、古い指針や基準で設計され、耐震補強がされていなかった構造物に被害が多かった。大変おおざっぱな言い方をすれば、被害発生の実体は以上のようなようであったと思う。これを費用の点からみると、それなりに費用をかけて造り、耐力に余裕のある構造物、費用をかけて耐震補強された構造物は被害が小さかった。

→地震防災性向上のためには既存構造物の耐震補強が重要な課題である。

→被災後、迅速な復旧・復興が行える体制が必要である。

- ・ 兵庫県南部地震が内陸直下型で比較的狭い範囲での地震被災であったことから、被災地の状況は壊滅的ではありましたが周辺部には健全な地域も存在し、ここからの支援も可能な状況でありました。このことは面的な広がりを持ったライフラインなどの施設の設計にとって大きな意味を持つものと思われます。構造物個々の耐震性の向上を検討しなければならないことは当然として、地域社会全体としての地震防災機構の欠落が顕在化したと考えています。今まで施設構造物の耐

震性を向上することを目的として、数値解析の高度化や実証試験の必要性を訴え、幾つかの研究成果が報告されているとはいえ、これらの個別施設毎の機能向上を目指す方法だけでは地域全体の地震被災をゼロにすることは不可能です。その意味で、地域社会の生活基盤の機能低下を最小限にとどめるための防災機構の構築が急務であることが示唆されたものと考えています。

- ・ ライフラインに代表される広域的なインフラの地震防災機能の向上を例として見ると、これに付帯する個別の施設についてはその機能向上を図るとともに、ラインとしての広域インフラの機能を最小限保証するという観点での耐震性向上の研究開発が不可欠です。これは今までの研究の多くの成果の延長線上にあるものと考えられますが、個々の施設の耐震性だけでなく地震という外的な刺激に対して社会全体を取り巻くインフラのリスクマネジメントでもいべきバランスのとれた地震防災機能の向上を目指さなければならないと考えます。
- ・ 非整形構造建物の被害 ピロティー構造建物（1階の耐力・剛性が他に比べて小さい構造）、角地の建物（平面的な構造部材の偏り）など、非整形建物の被害が構造計画の問題として提起された。
- ・ 旧基準（建築の場合、1981年以前の基準）により設計施工された建物の耐震性の問題が再び提起された。この既存不適格建築の問題は大きな地震災害の度に指摘されてきている。今回の地震では、1981年改正の建築基準による建物の被害は概ね軽微であったことから、旧基準による建物の耐震性向上が将来の災害に対する防災の観点から、注目されている。
- ・ 経年劣化と耐震性の問題 特に、木造建物で経年劣化（腐食、蟻害）により耐震性の低下した構造に大きな被害があった。劣化した木造建物の耐震性評価と補強の問題は重要である。
- ・ 鉄骨造建物の脆性破壊の問題 重量鉄骨を用いた巨大構造の柱に相当するトラス部材に、脆性破壊が生じた。構造の倒壊には至らなかったが、鉄骨構造の信頼性に問題を投げかけ、一方、応力の作用速度（歪速度）の影響の問題を提起した。原因の調査は、建設省総プロで進められた。
- ・ 鉄骨造建物の溶接性の問題 角型閉断面材を柱に用いた中低層建物の柱梁接合部の溶接部分及びその近傍に破断を生じ、倒壊等の大破を生じた。溶接施工に対する信頼性の問題として提起された。
- ・ 鉄骨構造に関して、残留変形を伴わない（あるいは殆ど残留変形のない）建物ではあるが、その柱梁接合部、柱脚部などに、鋼材の亀裂、アンカーボルトの抜け出し、基礎部分のコンクリートの破壊など予想を越える被害を生じた。逆の言い方をすると、これらの建物は、柱梁接合部に鋼材の亀裂などの大きな被害を受けながら、倒壊せずに外観はほぼ元のまま地震に耐えた。繰り返し回数のない衝撃的地震入力による被害の現象解明の問題が提起された。
- ・ 兵庫県南部地震の教訓は、設計用地震荷重より大幅に大きな地震力が作用して、大きな地震災害が、発生したことである。設計用地震荷重は、設計震度としてかんがえられており、この荷重によって発生した構造物の各部オオ応力は、許容応力以下に収まるように設計されていた。しかし、このように、設計用地震荷重を大幅に越えた地震外力が作用して、災害が発生したので、今までの耐震設計の考え方を大変革する必要があるでしょう。すなわち、設計震度による瞬間きな強度設計から、時間軸上の損傷の積分が倒壊を起こさない限度にとどめることがようきゅうされるにいたった。以前より、構造物の保有するエネルギーが、地震の保有するエネルギーより大きくなるように設計する提案は言われていたが、今回の震害により、この点の必要性を強く認識した。
- ・ 兵庫県南部地震では安全であると思われていた構造物に甚大な被害が出た。これらの多くは、

冷静に考察すると耐震設計上、現行法規では構造強度上、問題のあるものに集中したと言える、と思われる。したがって被害を破壊過程の解明という見地から見直し、考察することにより、旧来の法規と現行法規の相違およびこれらの耐震強度上の位置付けが明らかになるとと思われる。旧法規により耐震設計された古い建物や構造物を生活基準の地震防災という点からどのように扱っていくか、歴史ある都市にとっては重要な課題である。

- ・ 設計地震動の大きさと構造物耐力のマーヅンの見直しの必要性。通信、医療といった地震時機能維持が要求されるシステムに対する耐震設計の考え方の転換（免震構造の適用など）。
- ・ 兵庫県南部地震は、人口、都市機能の集積する都市部の直下に起こった地震であった。非常に強い地震動により多くの人命が失われるとともに、生活基盤を構成する各種の構築物等が倒壊を含む甚大な被害を受けた。こうした被害は、被災地域に今までにない大きな影響を及ぼしたのはもちろんのこと、全国的な規模で社会的、経済的な影響を及ぼした。こうした甚大な被害に基づくと、「生活基盤の地震防災性向上」という観点では、以下の点が大きな教訓と考える。
 - 1) 地震動の評価技術とリスクの評価技術の向上
 - 2) 生活基盤を構成する各種構築物の被災予防技術・被災軽減技術（各種構築物の強化方法、機能の代替性の確保）の向上
 - 3) 被災後の危機管理技術（避難、復旧、復興、短期的・長期的な社会経済的影響の軽減を含む）の向上

「構造物の破壊過程の解明」は、上記2)の構造物の合理的な被災予防技術・被災軽減技術にとって必要不可欠な事項である。

- ・ 設計基準などに規定される”設計用地震動”を上回る地震動に対する安全性,”損傷制御”など安全性以外の設計要求など、従来とは異なる設計目標を考慮する必要性を設計者が認識したこと
- ・ 既存建築物の耐震診断と耐震補強の必要性”や”安全性の保証は継続使用を保証するものではない”と施主が認識したこと
- ・ 地盤条件による地震動”だけでなく,”構造物への入力地震動”など、強震観測基盤が十分でないと研究者が認識したこと
- ・ 構造物の破壊形態とその原因との関係についての明快な答えの必要性
- ・ ライフラインの redundancy と robustness の重要性

② 上記の教訓がこの5年間どのように調査・研究され、地震防災対策の中にどのように反映されてきたか？

- ・ 設計地震動の見直し
- ・ 道路橋基礎、支承部等に対する地震時保有水平耐力法による耐震設計の導入
- ・ 設計における動的解析の積極的導入
- ・ 液状化判定法の見直し及び流動化に対する耐震設計法の導入
- ・ 橋脚を中心とした耐震補強
- ・ 港湾施設の技術基準の改訂
- ・ 三次元大型水中振動台の建設（港湾構造物の破壊実験）
- ・ 耐震性強化岸壁の整備の促進

- ・ リアルタイム地震防災に関する研究の着手
- ・ 兵庫県南部地震特有の揺れ初期の厳しい上下・水平動と、大型及び大規模構造物の揺れ初期の挙動との関係は、まだ十分には研究されていない。とくに、揺れ初期における大型・高層建造物の過渡応答時における部材中の破壊開始（亀裂）の発生、メカニズムの解明が、今後の重要な課題の1つとなる。この課題は、直下型地震特有の、従来見られなかったような破壊過程の解明と、そのような場合に特有な破壊開始を防止する対策のための、新しい観点からの、研究課題の1つともなる。
- ・ 発生する地震の強さや構造物の破壊現象については、本総合研究も含め多くの研究者が研究に取り組んでおり、成果の一部は設計基準や耐震補強の中に反映されている。しかし、地震防災対策に結びついていない研究成果も多いように感じる。
- ・ 耐震補強についても橋梁や建築構造物を中心に、多くの研究／耐震補強が行われている。施工的にも費用的にもやりやすいところの補強実績は多いが、施工がやりにくい構造形式や費用が高い構造物、戸建ての民家等の補強はまだ数多く残されている。
- ・ 迅速な復旧・復興を支援する防災システムが研究され、一部の自治体ですでに導入されている。
- ・ 地震を契機として防災全般に対する意識変化が見られ、行政的な対応が大きく進んできました。例えば、農業農村社会の地震防災という観点では、地域社会の基本的な防災機能を高めるために、老朽施設の更新事業が進んでいる。これに伴って、農村地域の生産・生活基盤を支えるため池などの施設の老朽度評価やデータベース化が進み、全国のため池の情報が電子ファイル化され維持管理・更新に有効に利用されている。これらのデータベースに基づいて地震発生によって点検すべきため池やダムなどの選別が実施され、また第4紀断層の位置情報とリンクするなど有益な情報を付加しながら具体的な地域防災支援の形ができてきている。
- ・ 個別の施設の耐震性向上という観点では鉛直振動の影響を耐震設計に取り込むための基礎的な研究が始まり、土質構造物の進行性破壊現象の解明に基づく限界状態の把握などにも着手している。
- ・ ピロティー構造の問題 地震後、建設省はピロティー構造の設計に関する技術指針を応急的に公布し、ピロティー階の崩壊を防止する設計方針を提示したが、同構造の破壊メカニズムを解明したうえでの対策ではないので、改善すべき事項を含んだものである。
- ・ 建築構造に用いられた鋼材の脆性破断の問題 この問題については、建設省総プロで取り扱い、現象の再現、破壊の原因究明、対策が検討され、報告書にまとめられた。溶接材料に関する研究成果は実務に反映されようとしている。
- ・ 鉄骨造建築の歪速度と破壊の問題は、学でも研究されてきているが、その成果が実務にはまだ反映されていない。
- ・ 建築構造の溶接部破断の問題 構造骨組の溶接接合部の破断、特に角型断面柱の溶接接合部の破断については、施工上の問題も提起されている。建築研究所では、施工品質に関する総プロを実施し、溶接施工における品質確保の問題を現在取り扱っている。
- ・ プラントの耐震法規ではプラント施設内の地盤の液状化や配管の耐震設計などに対する分科会での作業が進められている。将来、耐震法規の見直しや新たな制定後には耐震強度は格段に上昇するものと考えられる。
- ・ 各分野における耐震設計指針等の充実とその見直しに表れている。機械分野においても火力発電

施設(LNGタンク, 発電用ボイラー)の耐震性実証試験と安全性向上に関する提案がなされている。

- ・ 兵庫県南部地震の地震動特性, 被害分析等を通じて, 地震動の評価技術, 強震動を受ける構造物の耐震設計技術や補強技術などの強化方法に関する調査・検討が進められ, それぞれが設計基準の形や実際の実務への適用などの形で具現化されてきていると考える。さらに, 地震発生後の被害調査・診断技術, 復旧技術を始めとする各種の危機管理計画や危機管理体制についても, 生活基盤を管理する行政機関などにおいて整備の充実が図られつつある。
- ・ レベル2を超える地震動も検討用として用いられる場合がある。性能基盤設計法など新しい考え方が設計基準に採り入れられつつある
- ・ 公共建物では耐震診断, 耐震補強は広く実施されている
- ・ K-NETを始め, 高密度観測網が整備されつつある
- ・ 非常に精力的に研究が進められ, 基準・コード類の改訂が進められたと考えている。

③ 兵庫県南部地震の教訓の中で何が未解決のまま残っているのか？

- ・ 構造物の性能を基盤とする耐震設計法の確立
- ・ 活断層を直接的に考慮し, かつ, 実務的な設計地震動の設定手法
- ・ 橋台, 土構造物等に対する地震時保有水平耐力法による耐震設計の導入
- ・ 構造物全体系(地盤-基礎構造-上部構造)としての地震時挙動の解明とそれを考慮した耐震設計法の導入
- ・ 簡易でかつ精度のよい耐震診断技術の開発
- ・ 地震防災対策でのソフトの面の検討の充実
- ・ 大都市近傍での海岸保全施設の耐震性の検討
- ・ 直下型地震特有の揺れ初期の激しい揺れに起因する大型構造物の破壊過程の解明とそれに基づく破壊防止対策。
- ・ 戸建て民家の耐震補強を促進するシステム作り
- ・ 今までの地震に対する研究の多くは一方向の振動に対する構造物の応答特性の評価や限界状態の把握であったが, 兵庫県南部地震では鉛直振動の大きさが目に付いた。現実の三次元的な地震動に対する構造物の応答については未解明なものが多く, 限界状態の予測, 評価についてはこれからの課題である。ある程度の変形, あるいは破壊を許容しながらも最小限の施設機能を維持するための構造形態や施設設計という観点では, 研究的にもまだまだ多くの問題を抱えたままである。土質構造物の限界状態を評価するためにはその許容する変形量を規定することが合理的で実用的と思われるが, 地震時の最終変形量を定量的に予測・評価する手法については十分な成果が得られておらず大きな問題として残されている。
- ・ 鉄骨造建築で, 残留変形を殆ど伴わないものの局部的にかなりの被害を生じた現象を解明すること。
- ・ 角地の建物等, ねじれ振動による被害を解明すること。
- ・ 建物-地盤の相互作用の問題で, 局地的な地震入力の差異と建物被害の関係を解明すること。
- ・ 都市のシステムとしての地震防災性向上対策は十分であろうか? 例えば関東地方で巨大地震が発生したときの東京はどうであろうか?
- ・ 設計用地震動の策定手法に関しては今後も継続的に検討する必要がある。
- ・ 全てに対して完全かつより合理的な解決にはなっていないかもしれないが, それぞれの分野

において当面必要と考えられる事項については対応が図られてきている。この中でも、さらに検討が必要と考えられる事項をあげると、以下の通りと考える。第1には、上記1)の地震動の評価とリスクの評価技術の信頼性の向上と考える。地震防災性の向上において最も基本になるのが地震動をどのように信頼性高く評価するかであり、地震動の評価に関しては、今後、さらなる研究が必要と考えられる。この精度が上げられれば上げられるほど、合理的な予防対策・軽減対策が可能になる。ただし、一方で、地震は自然現象であり、そのメカニズムが完全に明らかにされている訳ではなく、現状ではその評価の精度をどこまでも高くして行くには限界があるのも事実である。このため、こうした不確定性を考慮した上で、より合理的かつシステムチックに3つの課題に対する対応が重要と考える。

- ・ 地域性を考慮した最悪地震動レベル、コストパフォーマンスと設計地震動の関係、損傷制御設計、ピロティなど不整形建造物の設計法
- ・ 民間建物、個人所有建物の耐震診断、耐震補強
- ・ 建造物への入力地震動、非線型相互作用、入力逸散効果、地震動のマイクロゾーニング
- ・ 町の復興への手順と住民との合意の作り方

④ (個々に担当されている研究課題でなく) 本総合研究全体を概観した場合に、今後特に重要と考えられる研究課題とその研究方法は何か？

- ・ 地震時における建造物の挙動の実験的把握
- ・ レベル2地振動に対する地盤-基礎構造系の地震時挙動(大変形)の評価
- ・ 各種建造物それぞれの検討が進んでいるが、それぞれの建造物の破壊状況の相互比較、比較を踏まえた防災対策のシナリオ作成
- ・ 破壊を模擬した振動実験結果と実建造物の破壊現象を定量的に結びつける研究
(特に、地盤と建造物の連成を考慮した実験について)
- ・ 総合研究では振動実験や遠心載荷装置による実験的な研究が幾つか実施されております。それぞれの対象建造物毎に抱えている問題が異なるためその破壊メカニズムの解明という観点では重要な展開で必要不可欠と思いますが、大型三次元振動台を用いた大規模な実証試験に今後展開して行くことを考えると、スケール効果に関する研究がもっと全面に出てきていいのではないのでしょうか。当然、数値解析によるアプローチも重要で、現在の数値解析方法が建造物の終局状態・破壊状態をどの程度定量的に予測でき、実大建造物の評価に耐え得るのかは検証しなければならぬ大きな問題と思います。
- ・ 数値解析の支援があれば三木に予定されている「実大三次元振動台」を用いた研究も効率的に実施することができるのでは無いかと考えます。
- ・ 累積損傷評価方に関する研究 特に、大歪み状態での累積損傷
- ・ 既存建造物の耐震性調査法の研究 安価で、信頼性のあるシステム同定技術の開発。
- ・ 欠陥の進展予測技術。
- ・ 累積損傷にたいするタフな構造法の開発。
- ・ 既存建造物の補強方法の提案
- ・ 地震エネルギーを熱に変換する安価で、信頼性のあるデバイスの開発。
- ・ 生活基盤の地震防災性向上をうたう以上、都市をシステムとして捕らえた地震防災性向上を考えることが必要ではないのでしょうか？今回の研究テーマの枠内には収まらないかもしれませ

んが、もう少しソフト的な問題意識を持ちながら検討することが重要であると思います。

- ・ 種々構造物の究極的な破壊過程を明確にすることにより、安全性に関するマージンの意味をはっきりとさせ、その経済的観点からの評価、例えば RC 造建物あるいは産業施設構造物に対して免震構造を適用した場合に安全性がどのように向上するかを定量化する。それにより、保険金査定がどのように変化するかのも表れると思う。
- ・ 「構造物の破壊過程の解明」という観点では、現状では必ずしも十分な精度をもって明らかにされていない地盤の分野に関する研究課題が重要と考える。現状では、いわゆるレベル2地震動レベルの評価法が十分ではないとともに、地盤・基礎に対する対策は、一般にコストを含むいろいろな面で大がかりとなるため、こうした分野について進歩が図ればより合理的な構造物の構築も可能になると考える。
- ・ 構造物への入力地震動、非線型相互作用、入力逸散効果
- ・ インフラの維持管理（メンテナンス）が世界的に重要とされているが、その計画の中に、aging において更なる耐震性の向上をどのように展開するか。

⑤ 昨年発生したトルコ・コジャエリ地震および台湾集々地震が新たに提起した課題は何か？

- ・ 断層変位に対する地震防災の考え方（社会的なコンセンサスの形成を含めて）及び構造物の耐震設計
- ・ 断層の破壊過程（アスペリティの分布等）を考慮した地震動評価の高度化
- ・ 8 mにも及ぶ断層変位
- ・ 断層変位の出現位置、移動量の推定と断層変位に対処可能な構造
- ・ 台湾集々地震の被災状況を現地で拝見して断層活動の大きさを痛感するとともに、私たちの生活基盤は大自然の運動の上に立っており、これに真正面から立ち向かうことは愚かとも思える状況でした。ただ、一部の土質構造物についてはある程度の被災や変状を許しながらも施設の貯水機能を維持しているものもあり、ある意味では免震的な構造的機能が有効に働いたのでは無いかと想像しています。
- ・ 断層に関しては第4紀断層の中でも特に注意すべき活断層の調査が急務でその位置の特定や地表面近傍の構造物に与える影響の評価方法についても大きな勢力を投入する必要があると考えます。さらに、断層と構造物の関係で見ると、断層の影響圏をどの程度の距離に設定するかは耐震設計上大きな問題です。すなわち、構造物の重要度や2次災害発生の危険性などを指標として、どの程度の距離において施設を構築するかは極めて重要です。
- ・ 構造計画の問題 平面計画の非整形性、高さ方向の非整形性、規則的な柱-梁のラーメンを形成しない構造計画
- ・ 構造詳細の問題 柱のせん断補強筋の配筋方法、柱梁接合部にせん断補強筋を配筋しないため接合部のコンクリートを充分拘束していないこと、梁の主筋の柱への定着不足、非構造の腰壁（その高さが階高に比べ非常に大きい）による柱の拘束・短柱化、長方形断面柱の弱軸方向の耐力不足
- ・ 施工上の問題 柱上端または下端にコールドジョイント、コンクリートの品質
- ・ 断層近傍の断層による構造物の破壊
- ・ 耐震基準の違いと被害の大小関係。産業施設の被害により、その被害は当該国のみに影響するのではなく、国際的な問題となる点（特に経済的に）。したがって、極めて重要度の高い施設／構造物に

あつては、国際的標準耐震設計基準によって地震時安全性を確保すべきであると考えられる。

- ・ トルコ、台湾における地震の状況、構造物被害から、以下の点が課題と考える。
 - 1) 断層近傍の地震動特性の評価技術の解明
 - 2) 長周期地震動の予測と長周期構造物に対する対策
 - 3) 地表地震断層による大規模な変位の出現とこれによる被害
 - 4) 国際的な協力のあり方と地震国日本の各種レベルでの対応方策
- ・ 活断層近傍での防災対策、復旧と補償に関する政策
- ・ 恐らく、今後国内でも aging などの影響により、発生するとかんがえられるにもかかわらず、施工不良、基準の未整備など神戸で感じられたのと同じ発想の中で問題を捉えているように感じられた。日本では起きないとは、誰もいえないのに。

⑥ 三木市に建設予定の実大三次元振動台を用いた将来の研究課題と振動台を利用することにより期待される成果

- ・ 構造物全体については困難にせよ、部材レベルでは実物を対象とした地震時挙動の実験的解明
- ・ 過去を振り返ると地震で大被害を受けないと研究、行政が進まない面が強いので、これまでたまたま被害を受けていないが、地震で被害を受ければ大きな影響を及ぼすような構造物の破壊状況を示し、研究・行政の検討を促すような実物破壊実験の実施
- ・ 大形振動台で実験しようとするとき、その揺れ初期の立ち上がり特性（過渡応答特性）と、被験体の大きさ、構造との関係を、十分に注意してその振動台を設計、製作し、そのような実験ができるようにすることが、重要なことの一つになると考える。また、大型構造物の過渡応答と対応した破壊防止対策のための、有効な実験とその成果が、期待される。
- ・ 実物を想定した実証的試験がその役割ではあるが、構造物のスケールが重大な影響を及ぼす対象に特化した研究課題が理想的であると思います。ただ、大規模な実験だけでなく小規模な実験による問題の抽出や基本的なメカニズムの解明などにも大きな勢力を割けるような施設・組織であってほしいと思います。
- ・ 「土質構造物の三次元振動による崩壊と限界状態評価」などは今までの多くの研究成果を集大成する意味でも重要と思われますし、遠心実験との併用などによってスケール効果を解明する点でも意味あるものと思われます。
- ・ 実大の試験体を加震し破壊現象を観察・記録するので、そこから得られる成果は非常に大きいものがあると推察される。しかし、現象は極めて短時間に終了するものであるので、全体的な破壊過程の視覚的記録は容易であるが、部材の局所的な挙動、部材に作用する応力、発生する歪、変形などを適切に計測し、解析と比較できることが必須である。また、このような計測により、膨大な量の既存の静的加力実験結果との対応を付け、それらのデータを活かすことが可能となる。大規模な振動実験（動的加力実験）と静的加力実験の結果の関連付けが重要であると考えている。
- ・ 慣性力により生じる破壊現象を実大規模で破壊確認することができるテーマはすべて含まれるが、特に massive な構造物の振動破壊実験が期待される。また産業施設の中では液体を含む貯槽などは静的実験と動的実験では性質が大きく異なると思われるので、これらの実験とその成果を期待したい。さらに列車の脱線の実験、クレーンの実験（大変形する構造体）等が機械系としては期待される。
- ・ 構造物の破壊が、加速度、速度、変位あるいは応力といった主要な評価ポイントのどれが支配的

起きるのかを明確化することがほぼ可能になる点。

・ 実大規模の実験が可能な振動における研究課題と振動台の利用により期待される成果を記述すると以下の通りと考える。

- 1) 各種構造物の破壊特性に関する寸法効果の影響に関する研究
 - ・ 寸法効果の影響を受ける構造物に対する大型ベンチマークデータの作成と模型実験に基づく各種評価式の検証
- 2) 構造物の破壊特性の解明
 - ・ 模型実験では再現できない構造物の破壊特性の解明と各種力学モデルの高度化
 - ・ 実大構造物の破壊挙動，地盤構造物系の応答，減衰系など振動実験が必要な構造物の実大実験

⑦ 上記実大三次元振動台の利用方法（組織，体制，研究費）などに関する御意見

- ・ 産官学の運営組織を早急に作り，研究体制および研究費の確保方法を検討する必要がある。
- ・ 単なる大規模な実証試験のみの終わらせないで，遠心実験との比較や小規模の実験，数値解析などとの比較も大いに実施できるような体制が望まれます。
- ・ 研究費の調達が重要であると思う。当初は，全額国費による実験的研究の実施が必要であろう。
- ・ 上は国際協力から，下は民間企業体でも使用できるような運用システムやコストになることを望みたい。
- ・ 独立法人化。イタリア ISMES 社のように実験，解析，コンサルティングを行う。施設の国際利用。
- ・ 大規模施設を有効に活用するために，我が国が中心となって，国際的な規模での研究体制を組んで研究を進めることが必要と考える。このためにも，破壊関係に関する実験法，試験法，実験結果の評価法などに関する国際標準を開発し，我が国として提案していくことも必要と考える。
- ・ 国民（納税者）に対する説明責任に最大限の配慮が必要であろう。共同研究が主体になるにしても研究推進者の責任を明らかにしておく必要がある。

⑧ 本総合研究の進め方に対する御意見

- ・ 各研究分野の研究者が集まり，研究を実施する体制はよいが，テーマはもう少し絞った方がわかりやすい。もし可能であるならば，初期の研究計画を変更して，もう少しまとまりをつけることが望ましい。
- ・ 同様の研究を実施する研究機関相互の情報交換（個別打合せ）を行う。
- ・ 支援技術の研究を構造物破壊の実験や地盤基礎の実験の中で活用し，実証実験とする
- ・ 初年度の活動では班会議や分科会での議論から多くの有益な情報を得ておりますので，総合研究の運営そのものは順調では無いかと感じております。ただ，研究計画に記述していない内容まで進むことも許容しながら，多くの研究者が共同で実施するような項目や実験を新たに設けるのも一案かと思えます。
- ・ 研究費を名目ではなく実際に使えるようになる時期をもっと早める必要がある。本年度は建築研究所では9月初め，建築研究所から更に研究委託をした京都大学と東京大学では11月であった。実質の研究期間は半年程度である。使用可能とする時期を早めることが困難であるとす

れば、研究報告を求める時期を遅らせるよう配慮願いたい。

- ・ 第2分科会は性格の異なる研究班により構成されているので、全体把握が難しいのが現状です。特に人体被災の計測についての研究は適切な説明が中々得られず、分科会主査として苦慮しています。これについては引き続き検討していきます。ただ人体被災の計測のテーマをすぐにカットしたいということではありません。研究全体としての中に収まりが良くなれば、テーマそのものは優れていると考えています。また、振動台のソフトのシミュレータを作りたいと考えています。一億円くらい必要のようです。もちろん、総合研究のテーマの中に収まり、魅力あるテーマと考えられれば進めたいと考えますが、全体のバランスを崩すようでしたらもちろんご辞退いたします。
- ・ 予算を早く執行していただきたい。
- ・ 実験や観測などどうしても費用がかかる研究とソフト的な研究とでは予算査定で区別する必要があるのではないかと思う。