

メカニクス・構造研究連絡委員会

地震工学専門委員会報告

地震防災の技術と科学の質的向上と国際競争力強化

平成15年2月24日

日本学術会議

メカニクス・構造研究連絡委員会

地震工学専門委員会

この報告は、第18期日本学術会議メカニクス・構造研究連絡委員会地震工学専門委員会の審議結果を取りまとめ発表するものである。

地震工学専門委員会

委員長	中村 恒善	金沢工業大学客員教授、第5部会員
幹事	家村 浩和	京都大学大学院工学研究科教授
幹事	工藤 一嘉	東京大学地震研究所助教授
幹事	西谷 章	早稲田大学理工学部教授
委員	大町 達夫	東京工業大学大学院総合理工学研究科教授
	壁谷澤寿海	東京大学地震研究所教授
	篠崎 祐三	東京理科大学工学部教授
	中島 正愛	京都大学防災研究所教授
	藤田 聡	東京電機大学工学部教授
	安田 進	東京電機大学理工学部教授

「地震防災の技術と科学の質的向上と国際競争力強化」要旨

1. 今「地震防災の技術と科学の質的向上と国際競争力強化」を提言する背景

平成14年7月4日の中央防災会議の防災基本計画専門調査会報告「防災体制の強化に関する提言」など、これまでに積み重ねられてきた努力と成果を通観すると、なお次の課題への取り組みを一層革新し、推進する必要があると考えられる。

- A. 社会技術の課題として、(1)生活者の視点から地震防災技術の全体像を見ること、住民の危機意識と防災準備努力への強いインセンティブを如何に設計するか、(2)都市の現状を考慮した高精度化危機管理戦略と危機制御、(3)多領域長時間にわたる被害影響波及過程を総合的構造化知識として体系化し、その成果を構造化ネットワーク型の防災体制の形成技術に活用すること。
- B. 学術的課題としては、(1)多種経年劣化建築物・施設等及び表層地盤の激震時の状態変化予測法の高精度化と現実的検証、(2)生活者システムとその生活空間・生活環境のシステムとの連成系について、その動態変化率予測のプログラムと発災時不連続変化の波及過程予測プログラムを構成すること、(3)被災事象の特性分析とシステム脆弱性要因等の検出に基づいて、安全レベルの高い良質地域生活空間の構成法を体系化すること、(4)多くの領域別の学術的成果を総合及び複合する方法を体系化すること、が挙げられる。

2. 科学技術政策における地震防災の技術・科学

平成13年9月決定の総合科学技術会議の「科学技術基本計画に基づく分野別推進戦略」[2]でも、社会基盤分野の重点領域の第一に「安全の構築」が取り上げられ、「過密都市圏での巨大災害被害軽減対策」「超高度防災支援システム」などが具体的項目として列挙されているほか、第二に「美しい日本の再生と質の高い生活の基盤創成」がとりあげられている。また「研究開発の推進にあたっては、社会基盤の体系的・総合的構築に関するわが国の科学技術が国際競争力を持つことが決定的に重要である」と指摘されている。これらの諸項目の内容から見ても、なお上記1項A、Bの社会技術的および学術的課題に対する振興推進施策が必要である。

また、平成13年度より5カ年計画で開始された文部科学省新規事業「社会技術の研究開発の推進」の中でも、地震防災研究グループが構成されており、地震防災に関する社会技術の研究が進められている。

3. 提言

本委員会は以上の認識に基づいて、次の振興策を提言する。

[提言 A] 国は次期科学技術基本計画などにおいて、「安全レベルの高い良質な地域生活空間・生活環境を実現するための新しい技術と科学」、特に次の課題1～4を重点事項とすること。

[課題1] 生活者システム - 生活空間・生活環境総合システムを用いた安全性向上のための社会技術と科学

[課題 2] インテリジェント都市・構造物のための技術と高度な危機管理科学の推進

[課題 3] 地盤・基礎・構造物系の現実的モデルによる地震時挙動予測の高精度化と地盤ハザードマップ作成技術の研究推進

[課題 4] 建築構造物等の地震防災性向上のための技術と科学

[提言 B] 国は国民に「高安全度良質の生活空間・生活環境の実現への強いインセンティブ」をこれまで以上に明確に与えるような制度・措置を策定すること。特に耐震性の劣る建築物・施設の自主改修・健全化を格段に促進するような強いインセンティブを設計することが望ましい。またその際 [課題 1] [同 2] の趣旨の「地震防災の総合システム的方法の技術と科学」の成果と予測結果の進展を、整備向けインセンティブの効果の予測等に活用することが望ましい。

[提言 C] 国は日本の地震防災技術と地震工学の成果を海外に発信し、国際的貢献の認知度プレゼンスを高めるために、次の方策 a ~ c に対応する具体的施策を実施すること。

[方策 a] 構造物耐震安全性総合評価の国際的標準化

[方策 b] 世界舞台・世界水準で活躍できる若手人材の育成

[方策 c] 日本技術の普及戦略を伴う国際的技術支援と国際会議開催支援などの強化

4 振興策提言に対応する関係学協会の連携活動へ向けての要望

上記の振興奨励策提言と課題・方策に対応して、研究実行側の研究者とそのコミュニティとしての学協会にも、新しい展開を目指して下記の項目等の格段の尽力が強く望まれる。

- (1) 地震工学のハード分野の研究者と社会・安全システム科学・情報科学および経済システム等文系分野の研究者との具体的協力研究の推進
- (2) 日本地震工学会には上記の多領域連成型研究のための総合的横断型研究チーム形成のインキュベーター的役割を期待したい。
- (3) 耐震安全余裕度に関する総合評価方式のあり方を関係学協会の協議で統一すること。
- (4) 文部科学省の「情報技術や生命科学などの分野で優れた研究論文が掲載されている国内学術誌を選び、出版に携わる学会などを来年度から資金面で支援」する方針に対応して、「社会のための工学と地震防災」を活動計画としているわが国の関係学協会も、支援対象に選ばれるにふさわしい発信実績を積み重ねられることが望ましい。

目次

提言要旨

総括説明と提言

1．今「地震防災の技術と科学の質的向上と国際競争力強化」を提言する背景	1
2．科学技術政策における地震防災の技術・科学	2
3．提言	3
提言A課題1～4と提言Bの背景と必要性の説明	4
1．安全レベルの高い良質な地域生活空間・生活環境を実現するための新しい技術と科学	4
2．インテリジェント都市・構造物のための技術と高度な危機管理科学の推進	11
3．強震動予測および地盤・基礎・構造物系の現実的モデルによる地震時挙動予測の高精度化と地盤ハザードマップ作成技術の研究推進	14
4．建築構造物等の地震防災性向上のための技術と科学	18
提言Cの背景と必要性の説明	24
a．構造物耐震安全性総合評価の国際標準化	24
b．世界舞台・世界水準で活躍できる若手人材の育成	25
c．日本技術の普及戦略を伴う国際的技術支援と国際会議開催支援体制	29
振興策提言に対応する関係学協会の連携活動へ向けての要望	31

総括説明と提言

1. 今「地震防災の技術と科学の質的向上と国際競争力強化」を提言する背景

1995年の阪神・淡路大震災以降、国及び各自治体による防災体制の強化が一層重視され、その努力が積み重ねられてきた。平成14年7月4日の中央防災会議の防災基本計画専門調査会報告「防災体制の強化に関する提言」[1]でも、改めて

- (1) 「迅速な災害応急体制の確保」のために、広域防災体制整備や大規模訓練実施等、
- (2) 「地方公共団体の防災・危機管理対応力の強化」のためにその対応力評価等、
- (3) 「防災情報体制の整備と災害に関する研究の推進」

等が重要項目として取り上げられている。

一方、阪神大震災以降の関係学協会の動向を通観すると、直後から、その被災事象、特にその社会的波及効果の大きさに鑑みて、地震工学の対象範囲を従来の「建物・施設・ライフライン等の崩壊や損傷を生じないように設計するにはどうすればよいか」というハード側の問題に限定するのではなく、「人にとって安全・安心な生活空間・生活環境を実現するにはどのように社会的システム整備をすればよいか」という広領域の課題に取り組むべきであるという認識が普及した。例えば日本建築学会の兵庫県南部地震特別研究委員会第三次提言「建築及び都市の防災性向上に関する提言」[2]のまえがきにおいても、次の「認識」が述べられている。

「今回の提言を通じて浮き彫りになった問題は、都市の総合的な防災計画および人間中心・生活重視の視点からの防災計画の欠如であり、建築および都市に関する広範囲の分野の研究者・技術者により構成されている本会においては、学際的・横断的見地よりこれらの問題に取り組むべきである」

このような認識の普及と共に、多くの自然災害に対する安全性向上策提言[例えば3]や、建築物耐震安全性向上策の提言書でも、そのような総合的取り扱いの必要性が指摘され、また各細分化分野別の提言のほか総合的施策を目指した提言もなされてきている。ハード側の例えば建築の専門家集団の提言でも、ハードのうち特に建築物の安全性に焦点を絞った提言のなかでも総合防災計画のパースペクティブが取りまとめられている。

行政実務機関に設置された委員会では、上述の「防災体制の強化に関する提言」に至るまでも行政側の総合防災計画等の施策の策定に向けての提言が取りまとめられてきた。そして国や地方自治体等では、種々の施策[4~7]が立案施行され、災害時の危機管理訓練のRole Playing Manual[8]も公表されている。行政側の具体的技術の開発と実施適用が「生活者側からの社会的ニーズのいくつかに直接的に応えるものではあった」のに対して、学術側からの努力は未だに「領域的成果を統合し、総合的システムの学術・社会技術として展開されるようになった」と

は言えない状況にある。又これまでの施策群を総合システムの視野で見たとき、施策群の間の整合性やシステム性能としての達成度レベルになお学術的検討が必要であり、改善の余地が少なくないと考えられる。

それらの努力の経緯と蓄積を通観すると、地震防災の技術と科学の立場からは、具体的施策の根拠にできる技術と科学の一層の推進へ向けて、次の総合システムの課題への学術的取り組みを一層革新し、振興する施策が必要であると考えられる。

社会技術の課題として、次の項目をあげるべきである。

- ・生活者のニーズとデマンドの視点から地震防災技術の全体像を見ること。住民の危機意識と防災準備努力への強いインセンティブを設計する手法
- ・都市の現状特に膨大な老朽木造建物と経年劣化施設等構造物の発災時状態変化を考慮した高精度化危機管理戦略と危機制御
- ・これまでに整備されてきた危機管理体制・危機管理訓練システム等に、増大する高齢者と新若者の生活行動・ライフスタイル・発災時行動を考慮する方法
- ・多領域長時間にわたる被害影響波及過程を総合的構造化知識として体系化すること、及びその成果を構造化されたネットワーク型の防災体制の形成技術に活用すること。

学術的課題としては、次の項目を挙げる必要がある。

- ・多種経年劣化建築物・施設等及び表層地盤の激震時の状態変化予測法の高精度化と現実的検証
- ・生活者システムとその生活空間・生活環境のシステムとの連成系について、何らかの評価指標に関してシステム状態を改善する方法を構成しようとする前に、その動態変化率予測のプログラムと発災時不連続変化の波及過程予測プログラムを構成すること、
- ・上記Aの社会技術の実現を支援する学術的基礎として、被災事象を構造化知識として記述しその特性分析とシステム脆弱性要因を検出すること、及びそれらのシステム脆弱性要因等の改修を通じて安全レベルの高い良質地域生活空間の構成法を体系化すること、
- ・「総合的な防災システムの整備」の必要性が認識されてきたにもかかわらず、それを達成する総合の技術も未熟である。多くの領域別の学術的成果を総合及び複合する方法を体系化すること。

2. 科学技術政策における地震防災の技術・科学

地震防災の技術と科学について、これまでに種々の振興策が実施されてきた。それによって地震防災の多くの細分化分野ごとの最先端技術・学術の成果が積み重ねられてきた。

平成13年9月決定の総合科学技術会議の「科学技術基本計画に基づく分野別推進戦略」[9]でも、社会基盤分野の重点領域の第一に「安全の構築」が取り上げられ、「異常自然現象発生メカニズム」「発災時即応システム」「過密都市圏での巨大災害被害軽減対策」「中枢機能及び文化財等の防護システム」「超高度防災支援システム」などが具体的項目として列挙されている。また第二に「美しい日本の再生と質の高い生活の基盤創成」がとりあげられ、「研究開発の推進にあたっては、社会基盤の体系的・総合的構築に関するわが国の科学技術が国際競争力を持つことが決定的

に重要である」と指摘されている。これらの諸項目のすべてが、いずれも緊急に取り組むべき課題であることには違いないが、総合的危機管理システムの高度化・多領域知識の総合的複合的活用・安全度の高い良質生活空間生活環境の実現のための社会的技術と基盤的学術の観点からは、なお上記1項A、Bの社会技術的および学術的課題に対する振興推進施策が必要である。

また平成13年度より5カ年計画で開始された文部科学省新規事業「社会技術の研究開発の推進」の中でも、地震防災研究グループが構成されており、地震防災に関する社会技術の研究が進められている。

3. 提言

本委員会は以上の認識に基づいて、次の振興策を提言する。

【提言A】 国は次期科学技術基本計画などにおいて、「安全レベルの高い良質な地域生活空間・生活環境を実現するための新しい技術と科学」、特に次の課題1～4を重点事項とすること。

[課題1] 生活者システム - 生活空間・生活環境総合システムを用いた安全性向上のための社会技術と科学

[課題2] 構造物と都市のインテリジェント化と高度な危機管理科学の推進

[課題3] 地盤・基礎・構造物系の現実的モデルによる地震時挙動予測の高精度化と地盤ハザードマップ作成技術の研究推進

[課題4] 建築構造物等の地震防災性向上のための技術と科学

【提言B】 国は国民に「高安全度良質の生活空間・生活環境の実現への強いインセンティブ」をこれまで以上に明確に与えるような制度・措置を策定すること。特に耐震性の劣る建築物・施設の自主改修・健全化を格段に促進するような強いインセンティブを設計することが望ましい。またその際[課題1][同2]の趣旨の「地震防災の総合システム的方法の技術と科学」の成果と予測結果の進展を、整備向けインセンティブの効果の予測等に活用することが望ましい。

【提言C】 国は日本の地震防災技術と地震工学の成果を海外に発信し、国際的貢献の認知度プレゼンスを高めるために、次の方策a～cに対応する具体的施策を実施すること。

[方策a] 構造物耐震安全性総合評価の国際標準化

[方策b] 世界舞台・世界水準で活躍できる若手人材の育成

[方策c] 日本技術の普及戦略を伴う国際的技術支援と国際会議開催支援などの強化

引用文献

- [1] 中央防災会議 防災基本計画専門調査会報告「防災体制強化に関する提言」及び「今後の地震対策のあり方に関する専門調査会報告」平成 14 年 7 月 4 日
- [2] 日本建築学会兵庫県南部地震調査特別委員会「建築及び都市の防災性向上に関する提言=阪神・淡路大震災に鑑みて(第 3 次提言)」(1998.1)
- [3] 「災害に強い社会をつくるために-For Disaster Resilient Society」日本学術会議第 17 期・社会環境工学研究連絡委員会自然災害工学専門委員会対外報告書(平成 12 年 4 月 24 日)
- [4] 「国土交通白書」(平成 13 年度) 編集協力国土交通省、(株)ぎょうせい、平成 14 年 3 月 8 日、第 2 部第 1 章都市再生の推進、第 2 節良好な生活環境の形成、2 都市防災、p87-89.
- [5] 国土庁計画・調整局編「21 世紀の国土のランドデザイン」戦略推進指針、大蔵省印刷局、平成 11 年 8 月 12 日、国の施策の方向、2 「4 戦略関連施策の推進」 B 「大都市のリノベーション」(2) 防災対策の充実による住民の安全の確保、p36, 91.
- [6] 国土交通省都市・地域整備局編、「大都市のリノベーション・プログラム(東京圏・京阪神圏)」、財務省印刷局、平成 13 年 5 月 30 日
- [7] 例えば東京都地域防災計画震災編(平成 10 年修正)東京都防災会議、第 7 次東京都震災予防計画(平成 10-13 年度) 東京都、平成 11 年 2 月
- [8] 災害危機管理研究会編、「ロールプレイングマニュアル BOOK」毎日新聞社、2001.5.16
- [9] 総合科学技術会議編「科学技術基本計画に基づく分野別推進戦略」財務省印刷局、平成 13 年 12 月 25 日
- [10] 「平成 13 年度文部省科学技術関係施策の概要」C 6 項「社会技術の研究開発の推進」学術月報, Vol.54, No.8, p756.
- [11] 小宮山 宏、堀井 秀之、「安全安心へ社会技術」日本経済新聞 2002.9.19.

提言 A 課題 1 ~ 4 及び提言 B の背景と必要性の説明

1 . 安全レベルの高い良質な地域生活空間・生活環境を実現するための新しい技術と科学

[課題 1] 要旨

「安全レベルの高い良質な地域生活空間・生活環境を実現するための総合システム的方法(例えば「多領域属性を有する多主体生活空間・生活環境複合システム」の動態記述プログラムや改修設計法)の社会技術と科学」を発展させること。

背景と必要性の説明

1.1 背景

1995年の阪神大震災の被災事象、特にその社会的波及効果の大きさから、上記Ⅰの1項の記述の通り、「人にとって安全・安心な生活空間・生活環境を実現するにはどのように社会的システム整備をすればよいか」という広領域の課題に取り組むべきであるという認識が普及した。例えば日本建築学会の第三次提言「建築及び都市の防災性向上に関する提言」[2]のまえがきにおいても、「都市の総合的な防災計画および人間中心・生活重視の視点からの防災計画の欠如（中略）の問題に取り組むべきである」という認識が述べられている。また、それ以後の建築物耐震安全性向上策の提言書でも、そのような総合的取り扱いの必要性が指摘されている。一方国や地方自治体等では、種々の施策[3~6]が立案施行され、災害時の危機管理訓練のRole Playing Manual[7]も公表されている。しかしながらそのような提言や、「生活者側からの社会的ニーズの特定の一部にせよ直接的に答える」社会技術の展開に対して、学術側からの努力は必ずしも、「領域的成果を統合し、総合的システムの学術として展開されるようになった」と言い難い状況にある。またこれまでの施策を総合システムの学術的視野で見たとき、それらの施策間の整合性や全体システム性能としての達成度レベルの改善に関しても、社会技術的研究の進展が必要であると考えられる。

更にこれまでの提言書には、地域生活環境の総合システムモデルの状態推移の動的シミュレーションシステムもその成果も添付公表されていないし、またその多くのサブシステムやその構成要素が地震発生時に被害を受けて部分的又は全体的機能不全に陥ったとき、他の不完全構成要素やサブシステムに如何なる効果をもたらすか、どのような相互作用と影響波及が逐次発生するか、などのシミュレーション結果も提示されていない。

1.2 生活者システム - 生活空間・生活環境総合システムモデルの構成要件

地域生活環境の劣化や崩壊をもたらすレベルの地震災害に対する安全性を論じるときには、「人為事故の安全学」[8]と同様の意味での「より広い立場から安全問題に対処する学」を構築するアプローチが必要であると考えられる。そのような趣旨の提言にもかかわらず実際に多領域成果を総合する学術的方法論も定かではないし、異種の相特性を呈するサブシステム群で構成された総合システムの体系化の方法も未熟であって、次の諸点を指摘すべきである。

- (1) 街区や村落などの地域生活環境に対する安全性向上策の問題を論じるときには、第一に地域生活空間システム・地域住民システム・地域施設システム・ライフラインシステム・地域経済システムなどを含む総合システムモデルを作成し、平常状態での導入施策効果を、適当な精度で予測できることを実証する必要がある。その上でそのモデルによって、採用に値する精度で実被災状態推移の動的シミュレーションを実行できることを示すべきである。安全戦略構成のためには「起こり得る危機的事態の諸相を必要精度で予測できること及び全体像の把握」が第一要件である。

- (2) 第二にそのような人-生活空間・生活環境システムの動的シミュレーションプログラムを用いて、個々の質的向上策案やインセンティブ案がどのような向上効果をもたらすか予測する必要がある。
- (3) 第三に、そのような施策感度ベクトルの中から最適施策ベクトルを選定する方法のみならず、その実行システムの構成法も確立すべきである。
- (4) ところがいずれの特定分野の専門家でも、その上位分野から見た場合の細分化分野の専門家であるから、自己の細分化分野の理解に基づく限定的な総合システムモデル(全体システムのサブシステムモデル)しか構成できない。それらのサブシステムモデル群が必要不可欠であるとしても、それらを並列しても、単にモザイク状に組み合わせても全体的総合システムモデルを構成することができない。その場合の各細分化分野専門家は、主題問題の全体システムの現状を十分には把握できているとは限らないことを認識しているがゆえに、当該細分化分野中心のサブシステムモデルを越えた全体モデルの提出を躊躇することになる。
- (5) そのレベルの成果の次に必要なことは、その各サブシステムモデルの関連隣接分野との関係・相互作用等を明らかにし、異種の成果を連成させることである。そして上記のような総合システムの中での当該サブシステムの動態やその構成要素の状況が全体システムの動的挙動とどのような相互作用を及ぼしあうかを明らかにできるモデルとすべきである。その上で全体システムの総合的判断指標の観点から各サブシステムの在るべき姿はどのように判断されるか、などの最重要課題を論じることができる。各サブシステムが今日のように高度化されて複雑となり、それらの間の関係も相互作用も複雑化した総合システムを扱わなければ適正な全体システムの判断が困難となっているのである。

1.3 生活者システム - 生活空間・生活環境総合システムの社会的技術と科学

現代の科学と技術の間には密接でしかも複雑な関係がある。現代の工業製品等人工物システムの設計製造技術は自然科学の成果の単純な応用で構成できるものではなく、多領域知識複合システムの構成技術であると言える。一方社会システムの改修方法の技術すなわち社会技術は、実在社会経済システムについて、例えば有界合理性経済人行動モデル等で定義されるエイジェンツのシステムと生活空間・生活環境のハードシステムの複合システムモデルに、法的制約条件等の制約及び境界条件を課し、その一部または全体システムの状態代表指標を改善する外的効果・施策を探索するものといえる。いずれの個別技術もそれ自体は「技術の科学」と区別されなければならないが、技術の実体があってこそ技術の科学が在りえることにも留意せねばならない。

「一つの目標を実現するシステムを作り出す行為」には設計と製造又は施工のプロセスが組み合わされている。建築物や土木構造物については古来その技術の蓄積がある。それに対して「設計のプロセスや施工・製造のプロセスの論理を体系化する科学」は、人工物システムの「認識科学」(例えば挙動解析・システム脆弱性解析)の発展レベルより遥かに低いレベルに留まっているといえる。「実在社会システムについて、適当なシステム指標群に関して改善目標を設定し、それを実現すると予測される施策システムの構成」でも、「施策システムの設計」と「具体化プロセス」

が組み合わせられる。しかしそれらのプロセスの論理を体系化する科学も今後の展開が待たれている。

それらの技術の科学[9]、設計プロセスの科学、又は施工・製造プロセスの科学を考えると、[それはどのような「科学としての資格条件」を満たすものと定義すべきであるか]も問われる。「科学の真理」の内容が自然科学とそれ以外で異なっているとき、「生活者システム 生活空間・生活環境総合システムのような多領域システム混成システムの設計と構成の科学」に対する「真理の内容」と「科学であるための資格条件」も吟味が必要となる。技術の科学も当然に科学の一般的属性即ち「普遍性」と「真理性」を備えていなければならない。

地震工学の目的は、「地震襲来時にも、事後にも、地域住民にとって安全で安心して従来生活を継続できる生活空間と生活環境を実現すること」といえよう。これまでそれを実現する要素技術は大きく発展させられてきたが、今人文科学・社会科学諸分野のシステム的方法とそれらの社会的技術を組み合わせたり総合して、安全レベルの高い良質生活空間・生活環境システムを実現する社会的施策を構成する必要がある。その構成方法の学術を振興し、そのようなシステム構成を誘導する政策施策が必要である。政策施策を構成する方法の体系化[10]もまた技術の科学の一分野である。

1.4 被災事象の全体像記述の科学

地震襲来時の1個の生活環境システム・生活空間システムが被災し、被災事象の波及効果が伝播していく過程は、「1回限り」「その生活環境システム・生活空間システム特有のもの」であり、他のいずれの被災波及事象とも異なっているとされて、その全体像を科学的に構造化された知識体系として把握し、普遍性を有するものとして認識する考え方は無かったように見える。

その一つのモデルは「総合システムモデルによる実状態推移の動的シミュレーションプログラム」であろう。従来の自然科学の陽的又はイムプリシットな法則を導出する方式のアプローチに対して、1個の生活者システム・生活空間・生活環境総合システムの地震時被災事象の波及効果伝播過程の数学モデルをプログラムで記述することもまた「全体像記述の科学の一形式」であると考えられる。1個の生活者システム・生活空間・生活環境総合システムは、地域生活空間システム・地域施設システム・ライフラインシステム等のハードシステムのみならず、地域社会経済システムや地域生活者システム・物品・エネルギー・情報等の循環流通ネットワーク、交通運輸ネットワークなどをも含む総合システムであるから、システム特性・ネットワーク特性を記述できるモデルでなければならず、かつ相互連関作用と因果関係をも記述できなければならないと考えられる[8]。個別建築物については、登記簿データしか使えず、未登記建築物も多くて、当初データは限定的になるとしても、「スローコマ送り型」レベルのシミュレーションが望まれる。

激震時には被災者にも被災物にも、状態量の大きな不連続変化を生じる。巨大地震や直下地震によって引き起こされる地域生活環境の多面的複合的劣化や、構築物の崩壊・焼失が不連続状態変化の例である。「危機的事態の予測プログラム」はそれらの不連続量を予測できるものでなければならない。現代のものづくり・製造業の在庫無し型グローバル展開時代には、激震時にその生

産施設集積地に操業停止レベルの被害が発生すると、その生産ラインネットワークの範囲によっては影響が一国内だけでなく世界中にまで波及することにもなり得る。情報中心・集積施設に機能不全・操業停止レベルの被害を生じたときも同様である。

一方被災者の心に生じた不連続変化はその後の生活行動に大きな影響を及ぼす。更に弱い状態にある被災者に色々の困難が襲来する。以上の例示から明らかなように、「起こりうる危機的事態の予測プログラム」は更にその不連続量の発生効果が近隣及び全国的な生活環境へどのように波及していくか、その諸相も予測できなければならない。その精度の検証を行うには、いくつかの過去の地震時被災事象に適用してハード側の被災記録と照合するだけでなく、被災住民の被災時行動の記録と、被災時情報の発信受信記録に対しても照合しなければならない。ところがそれらの行動記録は多くの場合、ハード側の調査結果記録に比して著しく信頼性が劣っているであろうし、被災時企業活動の詳細は必ずしもすべてが公開されるわけではないという困難をはらんでいる。

1.5 良質生活空間・生活環境システムへ向けての質的改善向上策の構成・設計の科学 [11]

多くの人々は日々の生活行動においても、生活空間整備行動においても、感覚的にせよ、理詰めにもせよ、個体合理性を追求しつつ生きている。その行動はいずれのフェイズにおいても、「何らかの範囲のマルチエージェントシステム [12] 内の適応インテリジェントエージェントとして他の同種エージェントとの間で相互作用を及ぼし合うほか、種々の広域システムの振舞いの影響も受けるし、互いに他がどのような戦略による行動をとるかに応じて自己の戦略を決定する必要がある」という意味で戦略的状況にある」というようなモデルで表される。「激震時の半壊家屋から避難し、近隣火災の広がり状況を推定し、風の向きを観察し、さらには公共情報と他の避難者等からの情報の信頼性を瞬時に判断し、行動しなければ生き延びることが出来ないかも知れないとき」、人はそのための戦略的行動をとらなければならない。いずれの戦略的行動も他者の平常時における防災向け生活空間・生活環境システム改善行動の影響を受けるだけでなく、自身の平常時における防災向け生活空間・生活環境改善努力のレベルに大きく左右される。それにもかかわらず、多くの人々は「日常生活の維持と質的向上への努力」を優先し、「非常事態に対する備えと戦略」を後回しにせざるを得ない状況にある。多くの人々に後者への努力を然るべきレベルに誘うには、国や自治体からのインセンティブの導入が不可欠となる。

国や自治体の導入する質的向上奨励策はインセンティブ効果を予測推測してデザインされるべきものである。当然にインセンティブ効果を計る望ましさ・質的向上の尺度が必要である。例えば国土庁は早くから、平常時に重点を置いた「快適な生活空間の形成に向けて」[13]において、「快適な生活空間を捉える視点」の検討結果と「快適さのレベルの分類」をまとめている。また「科学技術基本計画に基づく分野別推進戦略」[1]では、「安全の構築」と「質の高い生活の基盤創成」が包括的表現ながら取り上げられている。多くの生活者側質レベル評価尺度群のシステムをどのように上記の意味の全体的総合システムのシステム良質化目標・状態判断指標として学術体系化するか、が今後の課題である。上述の「連成総合モデル」で平常時および危機事態でのシステムの振る舞いを記述予測できると、次にはいろいろのインセンティブが住民にどのような

生活空間整備行動とハード改善行動を促すか、さらにはそれぞれが総合システムの状態判断指標にどのような効果をもたらすか、又各サブシステムやその構成要素の状態指標にどのような効果をもたらすか、についてそのプログラムで予測をできるようにすべきである。それに基づいて、「総合システムの状態判断指標のセットを指定しただけ改善するために、組み合わせ採用すべき施策群セットを見出す」手順を構成できると期待される。そのような意味で、「良質生活空間・生活環境システム（へ向けての質的改善向上策）の構成・設計の科学」とすべきである。

1.6 「生活者システム - 生活空間・生活環境総合システムの科学」と「安全レベルの高い良質な生活空間・生活環境総合システムの構成法」の学術側課題

上記の1.2～1.5項に対応する学術側課題を要約すると、次の(a)項の総合システム科学と、(b)(c)項を要件とする「安全レベルの高い良質の生活空間・生活環境総合システムの構成法」の社会技術とにまとめられる。

- (a) 阪神大震災のような災害調査結果諸事象の主要な動的な特性を「出力」としてシミュレーション結果を出せるような「総合システムモデル」プログラムを構成すること。巨大地震や直下地震によって引き起こされる地域生活環境の多面的複合的劣化や崩壊、及びその効果の近隣及び全国的な生活環境への波及の諸相、ソフト=ハード混合型動態システムのシステム同定問題では、災害発生時の住民行動など、検証対象出力の存在しないシミュレーション部分を含むにもかかわらず、システム脆弱性要因と「弱いリンク」を探索出来るものとすべきである。
- (b) 「総合システムモデル」について、第一に種々のハード側改善策・リスク軽減策の効果予測を行うことが出来る。その際当然改善効果・リスク軽減効果の評価尺度が必要になり、それらが「良質」の内容と「安全レベルの高さ」を規定する。それに基づいて、当該生活環境の劣化レベルの低減や崩壊焼失範囲の最小化のための戦略と対策を論じることが出来る。それが「総合システム構成法の後半」であり、その結果を「住民の安全がこのように改善される」という目に見える形で公表すべきである。例えば「各戸が耐震性レベルをこのように改善して、倒壊率をこれだけ低減していたら、この震災の災害事象と災害後事象はこのように異なっていたであろう。」という数値的予測を提示すべきである。
- (c) 「総合システムモデル」の特性は、ハード側改善策の実施組み込みに対応して改修されるのみならず、それを促すインセンティブとなる税制上の施策の実施組み込みに対応して住民が採用した行動によっても、変更又は改修できるものでなければならない。例えば、住民それぞれが Distributed Artificial Intelligence 分野の Intelligent Information Agents [14] として、また Adaptive Information Agents として振舞うとするような Multi-agent Systems をサブシステムとして含む巨大複雑システムモデルを構成すべきである。そして各 agent は当然に Strategic reasoning と Adaptation の機能を示し、例えば税制上の施策が導入された時に、住民のそれに対する適応行動を記述し、予測できるものでなければならない。その平常時の振舞いのモデルとしての可能性についてはすでに第17期日本学術会議社会環境工学研究連絡委員会生活環境設計専門委員会活動報告「人間 - 生活環境系設計学の新しい展開を目指して」(平

成 12 年 6 月 30 日) [1 5] の中で論じられたところである。

(d)このような「総合システムモデル」は到底一つ又は二つの細分化専門分野の専門家が単独で構成し得るものではない。少なくとも数名の広領域の専門家の共同研究による必要がある。したがって、そのような共同研究を特に奨励する施策と仕組みづくりも必要である。

引用文献

- [1] 総合科学技術会議編「科学技術基本計画に基づく分野別推進戦略」、財務省印刷局、平成 13 年 1 月 25 日、「社会基盤分野」2 重点領域、(2) 安全構築、美しい日本の再生と質の高い生活の基盤創成。pp90-91.
- [2] 日本建築学会兵庫県南部地震調査特別委員会「建築及び都市の防災性向上に関する提言= 阪神・淡路大震災に鑑みて(第 3 次提言)」(1998.1)
- [3] 「国土交通白書」(平成 13 年度) 編集協力国土交通省、(株)ぎょうせい、平成 14 年 3 月 8 日、第 2 部第 1 章都市再生の推進、第 2 節良好な生活環境の形成、2 都市防災、pp87-89.
- [4] 国土庁計画・調整局編「21 世紀の国土のランドデザイン」戦略推進指針、大蔵省印刷局、平成 11 年 8 月 12 日、国の施策の方向、2 「4 戦略関連施策の推進」 B 「大都市のリノベーション」(2) 防災対策の充実による住民の安全の確保、pp36, 91.
- [5] 国土交通省都市・地域整備局編、「大都市のリノベーション・プログラム(東京圏・京阪神圏)」、財務省印刷局、平成 13 年 5 月 30 日
- [6] 例えば東京都地域防災計画震災編(平成 10 年修正)東京都防災会議、第 7 次東京都震災予防計画(平成 10-13 年度) 東京都、平成 11 年 2 月
- [7] 「ロールプレイングマニュアル BOOK」災害危機管理研究会編、毎日新聞社、2001.5.16
- [8] 「安全学の構築に向けて」日本学術会議第 17 期・安全に関する緊急特別委員会対外報告書(平成 12 年 2 月 28 日)
- [9] 第 17 期日本学術会議「20 世紀の学術と新しい科学の形態・方法」特別委員会竹内啓委員長「審議のまとめ」平成 12 年 7 月
- [10] 平成 13 年度文部科学省科学技術関係施策の概要 C - 6 項「社会技術の研究開発の推進」学術月報 Vol.54, No.8, p756
- [11] 中村恒善「人間-生活環境総合システムのためのインセンティブデザイン」、学術の動向、第 3 巻第 8 号(1998.8)、pp46-51.
- [12] 生天目 章「マルチエージェントと複雑系」森北出版、1998 年 11 月
- [13] 国土庁計画・調整局編、「快適な生活空間の形成に向けて」大蔵省印刷局、平成 5 年 2 月 15 日、1 - 2 快適な生活空間を捉える視点 pp23-27.
- [14] 例えば M.Klusch(Ed.) Intelligent Information Agents, Springer-Verlag, Berlin
- [15] 中村恒善「人間 - 生活環境総合システム研究の新しい展開を目指して」生活環境設計専門委員会の活動から 「学術の動向」2000.9, pp65 - 67

2. インテリジェント都市・構造物のための技術と高度な危機管理科学の推進

[課題2] の要旨

地震前・地震時・地震後のより高度な危機管理科学の推進を目指して、防災に向けてのインテリジェント都市・構造物の実現のための技術から、地震後の危機管理システムの高度化、復旧施策システムまでを含む広領域地震防災科学技術の進展を図ること。この目的のために IT 科学、人文・社会科学等を融合した取り組みを奨励すること。また先端技術を総合的に応用して、激震時における構造物の安全性を飛躍的に向上させる、革新的な荷重適応型等インテリジェント（スマート）構造ならびにその設計法の開発を進めるべきである。

背景と必要性の説明

近年のコンピュータ技術の発展は、大量のデータの高速度処理をはじめ、かつての「不可能」を可能としつつある。これにともない、多くの工学分野において、進展著しい情報技術、計測制御技術との融合が促進され、境界領域があいまいとなる傾向にある。このような流れは、地震工学分野も例外ではない。かつての地震工学は、地震発生にともなう地盤、構造物等に関連する各種現象の解明を主目的としていた。具体的に言えば、地震時の、建築土木構造物・地盤・プラント・機械構造物の挙動、そしてこれらの挙動を踏まえた耐震設計の構想や方法の開発が中心であった。これらはもちろん現在も発展中であるが、それらの学術領域は、いまや「クラシカルな地震工学領域」と言われて良いであろう。それに対して、今新しい地震工学への動きが鮮明になっている。

世界有数の地震国である日本の過密都市圏では複雑な様相の被災事象を想定せねばならない。それに対応する防災戦略は、必然的に「地震発生に備えた防災」「地震時の防災」「地震後の防災」を総合的に扱う高度・危機管理科学の性格を強くもつことになる。またその基盤となる学術・技術領域は、IT 科学や、従来の区分からは工学以外に分類される学術分野を統合した広領域地震防災科学技術となろう。この学術領域は「現代地震工学」と呼ばれて良いであろう。

たとえば、非常時に備えた、交通網を含むライフラインの震害予測と危機管理および補修方針の技術は「地震発生に備えた防災技術」である。地震前・地震時・地震後の連続した時間軸での、情報・計測・制御技術を融合したヘルスマニタリング技術が確立できれば、オンラインによる最新被害状況の把握を可能とし、地震発生に備えた補修優先順位決定のための理論的・科学的根拠を与えよう。「地震時の防災」としては、IT 技術を統合した構造物個々の耐震性の向上や安全な都市のデザイン・構築、建築土木構造物のためのアクティブ・セミアクティブ・パッシブ振動制御技術の開発を挙げることができる。また、「地震後の防災」としては、発生直後の支援や救急医療のあり方、数ヶ月さらには数年先までをにらんだ心のケア、また復興まちづくりに対する研究も重要である。このような研究においては、工学的側面ばかりではなく、医学、看護学、心理学、社会学等の側面からの地震工学・地震防災へのアプローチも非常に重要となる。

上述のような方向の新しい地震工学研究の萌芽と源流は、『文部省科学研究費補助金採択課題・

公募審査要覧』[1,2]に掲載されている平成 12 年度、13 年度の採択題目にも見ることができる。該当する課題を挙げてみる。

地震発生に備えた、地震被害予測・危険度評価、地震防災システムの構築としては、以下の項目をテーマとした研究が行われている。

- ・都市地震災害軽減のための構造物健全度監視システムの開発
- ・震源・地盤・構造物総合系の観点からの都市震害予測と制御に関する研究
- ・ベネズエラ・カラカス市を対象とする総合的地震防災対策の構築に関する研究
- ・既存密集市街地を対象とする防災・安心ネットワーク
- ・防災計画及び計画策定支援システムに関する共同研究
- ・都市域の総合的地震被災ポテンシャルの定量化に基づく地域防災カルテの作成
- ・木造文化都市における風土に根ざした都市防災・水供給システムに関する研究
- ・強震時のライフライン施設の被害軽減対策と経済評価手法の開発
- ・GPS 技術を利用した未来型都市防災システムの構築
- ・東北地域における中核諸都市の地震被害予測とその防災都市づくりへの応用に関する研究
- ・台湾地震断層地表変位に関わる都市ライフラインの脆弱性調査と被災軽減法に関する研究
- ・近年の地震被害統計調査データに基づく建築物の地震リスク評価と表示
- ・橋梁のインテリジェント化と耐震安全性のスマートモニタリング技術の開発
- ・双方向通信に基づくリアルタイム地震防災システムの構築

また、地震時・地震発生直後の対応あるいは地震後の復興に関しては、以下のような研究が行われており、いずれも新しい展開へ向けての源流と萌芽を表しているといえる。

- ・阪神淡路及び台湾集集大震災における復興まちづくりの国際共同研究
- ・阪神・淡路大震災を契機とする神戸市都市計画の現代的変容過程に関する研究
- ・震災復興における仮設市街地の計画的形成に関する研究
- ・震災時における水の安全対策に関する研究
- ・阪神・淡路大震災における被災建物の再建過程からみた地域の復興支援方策の効果分析
- ・阪神大震災で被災した要援護高齢者の生活再建と住宅ニーズに関する調査研究
- ・災害危険居住地の成立要因の研究 - 居住地の安全を確保する社会システムの研究
- ・災害時の傷病者搬送計画に関する研究
- ・阪神大震災復興過程における社会的格差の形成に関する研究
- ・災害多発県における災害時看護指針の作成と看護支援ネットワークに関する研究
- ・災害時における看護支援ネットワークの構築に関する研究
- ・災害救急医療における遠隔医療ネットワークシステムの開発に関する研究
- ・災害情報の「情報到達度」向上のための戦略の開発
- ・震災による地域社会の崩壊と復興 レスキュー段階から復興段階の NGO の新たな展開
- ・日米二都市における災害による都市の変貌と防災体制整備に関する比較研究
- ・台湾大地震と阪神大震災における外傷・疾病構造の特長ならびに災害救急対応の比較検討

- ・地震時における道路交通システムの機能性能評価システムの開発
- ・震災 10 周年を見据えた災害ボランティアに関する長期的総合研究

一方再現期間が千年以上にもなる、極限的な地震動の大きさや周波数特性を予測するのは、極めて難しい。震源過程の推定や波動伝播の数値解析により、極限地震動のある程度のオーダーの予測は可能であるにしても、断層を含む諸パラメーターの設定により、大きなばらつきが発生する。従って、荷重を決めてそれに対して構造設計を行うという、従来型の設計手法を極限的な地震動にも適用することには、大きな不合理性が存在する。

低頻度かつ極限的な地震動に対しては、構造体やその機能のある程度の損傷は社会的に許容される場合が多いことを考えると、通常荷重とは全く異なる、極めて大きな動的な外乱に対しては、構造体がアダプティブなもの（適応構造）に変化するのが望ましい。具体的には、その剛性や減衰性が、常時のそれらと全く変わったものであっても良いであろう。すなわち、極限的な地震動時には、極めてしなやかではあるが、減衰性能に富んだ構造体に変化し、構造体内における高応力の発生を予防するのである。

或る試算では、50 cmの振動振幅下で、15%の減衰比の性能があれば、ほとんどの地震入力エネルギーは、1サイクルでほぼ吸収出来るという考えも提出されている。それによれば、構造体の剛性を極低レベルに制御することにより、振動を長周期化させ、応答加速度、ひいては作用地震力を格段に低減し得る。一方、剛性の低下に伴う変位の増大に対しては、減衰性の増大により極力低減化を図る。

こうした構造体の動特性の変化を導入するためには、所定の部材が、一定の外力に対して、降伏・破断あるいは開放される必要がある。ただし、地震後はこうした構造部材の一部を修復・取り替えまたは再着することにより、地震前の構造体に復元できることが望ましい。これと同時に、大振幅下で、高減衰性能を効率的に発揮するための、新しいエネルギー吸収装置の開発が必要である。

このようなアダプティブストラクチャー（適応構造）の研究が進むと、極限的な地震動に対する設計の余裕が拡大する。すなわち、予想を大きく上回る地震動に対しても、構造体の崩壊を防ぎうる設計が可能となる。崩壊しないことを、目標の性能とするならば、極限地震動の大きさを確定しなければ、設計が進まないという周知の隘路は解消される。

こうした考え方より、従来の耐震設計法に代えて、次のような設計体系を開発することが望ましい。この開発過程において、新材料や制震装置の開発、制御理論の応用、構造性能と安全性の考え方、設計法の展開に関する学術上の大きな成果が期待される。

- 1) レベル 1 地震（構造物の耐用年間における発生確率がかなり高い地震）時およびレベル 2 地震（発生確率は低い、強力な地震）時における、構造物の耐震要求性能を明確に示すこと。
- 2) 地震時の性能評価に際しては、動的応答解析法によるのみ行うこと。
- 3) 新しい、荷重適応型インテリジェント免震・制震装置の開発を、積極的に進めること。

- 4) 免震・制震手法による耐震補強を積極的に進めること
- 5) 要求性能に基づいて、多段階の設計を進める体系を構築すること

参考文献

- [1] 科学研究費研究会編：文部省科学研究費補助金採択課題・公募審査要覧 平成12年度（上下）ぎょうせい、平成12年
- [2] 科学研究費研究会編：科学研究費補助金採択課題・公募審査要覧 平成13年度（上下）ぎょうせい、平成13年
- [3] T. Kobori, Mission and Perspective towards Future Structural Control, Proceedings of Second World Conference on Structural Control, Vol.1, 1998, pp25-34
- [4] 家村浩和：極限地震動に対する要求性能と設計法野あり方,土木学会論文集, No.623/VI-43,1-8,1999.6,pp.1-8.
- [5] 家村浩和：「50cm、15%論」、MENSIN, 日本免震構造協会、No.26,1999.11,P.3.
- [6] 家村浩和・足立幸生：免震・制震手法による長大橋の安全性の向上、第4回鋼構造の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集、2002年1月、pp.1-12
- [7] Hirokazu Iemura, From Ductility Demand to Flexibility and Damping Demand, Proceedings of the Third World Conference on Structural Control, April 2002, Como, Italy.

3. 強震動予測および地盤・基礎・構造物系の現実的モデルによる地震時挙動予測の高精度化と地盤ハザードマップ作成技術の研究推進

[課題3] 要旨

地震災害を軽減するためには、震源特性、地形および地盤の動的特性を考慮した地震動の予測・評価法を高度化すると同時に、深部および浅部地下構造の調査とその結果のデータベース化を推進し、地盤・基礎・構造物系の動的相互作用の高精度予測と、そのための高精度数値解析が不可欠である。その効率的・経済的推進のために、地震工学分野のスーパーコンピュータ共同利用制度の整備(グリッドコンピューターの普及^注)を計ること。

また、地震動予測研究の推進に連動した地盤変状に関する研究推進とハザードマップ作成技術の開発を進め、地盤のハザードマップを作成し地震安全対策を進めること。

背景と必要性の説明

3.1 背景

構造物の震害の原因を正確に予測することは、最新の耐震工学の知見をもってしても困難なことが多い。地震時の構造物の崩壊ないし大被害に至る過程の動的挙動を詳細に把握するために、大型振動台の加力装置を用いて構造物の実物大モデルによる実験を行うことは、現段階では一部の例外を除き極めて困難な状況にある。また、解析領域での手法や研究成果を駆使するにしても、柱・梁・壁な

どの構造部材やそれ以外の非構造部材で構成される現実の構造物が激震・烈震時の終局状態に至るまでの複雑な力変位関係の全貌は、現段階の解析的研究によっても完全に解明されているとはいえない。とりわけ、構造物への入力地震動の実態そのものに不分明な点が多い。

地震動予測の難しい問題の例として、1992年開催の「表層地質が地震動に及ぼす影響」国際シンポジウムで実施された、足柄平野のブラインド・プリディクションを挙げる事ができる。予測すべきサイトの地下構造と約1~2km程離れた別サイトでの地震動波形とを与条件として地震動を予測するものであったが、国内外の地震工学の研究者・技術者が参加して行われたブラインド・プリディクションの結果は「予測値は観測値の倍~半分の範囲にばらつく」というものであった。

このようなブラインド・プリディクションはその後実施されていながら、1995年の兵庫県南部地震を契機に地震動シミュレーションが盛んに研究されるようになった。インバージョンで求められた震源断層パラメータに基づき、震原からサイトまでの地震波の伝播を考慮した地震動波形シミュレーションの研究は、かつてない高度なレベルに達したといえる。

しかしながら、実際の建物の地震応答を評価するための入力地震動モデルとして使用するためには、まだ不十分な点がいくつかある。インバージョンで求められた震源断層モデルの物理的制約と地盤応答評価の際の計算上の制約のため、シミュレーションの対象を約1秒以上の長周期の地震動波形に絞らざるを得ないことや、表層地盤のS波速度を約400m/s²以上に設定しなければならず、より軟弱な表層地盤の非線形挙動が考慮できないことなどである。また、地下構造をモデル化する際に地震動予測の精度に大きく影響する減衰量を、的確に見積もることが難しい点も指摘できる。

1993年釧路沖地震では従来耐震設計で想定されていたレベルを超える、1000cm/s²近い強震動が観測されたが、構造物の被害は少なく、その原因究明のための研究が盛んに行われた。その結果、動的相互作用による入力低減効果が被害を少なくした理由の一つであるとされた。また、1995年兵庫県南部地震はいわゆる都市直下地震であり、地震規模は比較的小さかったものの震源が直下に位置したことにより、場所によっては地震動の最大加速度が1000cm/s²近くにも達しただけでなく、構造物の被害に直結する周期1秒前後のやや短周期域の強震動が記録された。この地震でも、建物基礎での最大加速度が建物近傍の地表面最大加速度に比べて30%近く減少した観測記録が得られている。

今回のような内陸の地震はわが国の多くの地域で発生する危険性のあること、またこれが都市近傍で発生した場合には、阪神・淡路大震災に比肩する被害をもたらす可能性のあることが改めて認識された。この兵庫県南部地震の震源特性、地震波の伝播特性、地盤による増幅特性、地震動記録そして建物の応答特性についての研究を通じ、現象の解明ならびに基礎・応用技術の開発を推進し、得られた成果を合理的な耐震設計法の開発など、総合的な耐震性向上のために資する必要がある。

3.2 震源特性を考慮した地震動の予測・評価

兵庫県南部地震以後、トルコと台湾で内陸直下地震が続いたため、いま世間の耳目は活断層に集中している。これら三つの地震の震源断層モデル、最大加速度、卓越周期等を比較検討した詳細な研究がされているが(科学 2000年1月号)、ここでは地震応答スペクトルを用いて地震被害との関連が論じられており、キーワードは「最大加速度」と「卓越周期」である。地震動の継続時間の比較対象として、内陸

直下地震では、これらの指標は建物被害との相関をある程度示すと考えられる。しかし「継続時間」の長い地震動では、線形弾性論に基づく地震応答スペクトルだけでは建物被害との関係を単純に論じられず、建物の非線形領域の復元力特性(靱性)が鍵となる。1985年メキシコ地震で見られたように、海溝性地震では最大加速度だけでなく、地震動の「継続時間」も建物被害に大きな影響を及ぼすと予想される。地震災害軽減のため、海溝性地震の強震動研究も並行して推進する必要がある。

また、大地震の不均質破壊過程が建物被害と密接に関連していることが論じられるようになってきたが、予測の高精度化に向けた理論の開発と観測の充実が必要である。

3.3 地形および地盤の動特性を考慮した地震動の予測・評価と地下構造のデータベース

地形および地盤の動特性が地震動の特性に大きく影響し、地震動災害に限られた特定地域に集中する現象もしばしば経験されてきた。1985年メキシコ地震や兵庫県南部地震の地震災害に見られるように、構造物群や地盤の被害分布や様相が地域的に著しく集中あるいは偏在し、局所的な敷地地盤の動特性(サイト特性)の差異が被害分布に決定的な影響を及ぼしたと判断される場合が多い。被害の甚大なサイトにおいては、地層構成が水平成層というよりも、むしろ深さ方向・水平方向ともに複雑に変化する地盤になっており、その中を伝播してきた地震波の焦点効果による地動増幅現象や、軟質地盤と硬質地盤とが接する盆地端部で生成された表面波などにより、構造物に入力する地動特性の破壊能力飛躍的に増大したものと推測されている。このように、地下構造が不規則に変化する地盤域での地震動を予測し、より合理的な設計用入力地震動を策定できるようにする必要がある。

しかし、現実的課題である定量的地震動予測に結びつけるためには、地下構造資料が決定的に不

足している。特に地震動予測の高精度化が必要とされるのは、多くの人口と多種多様な構造物を抱える大都市である。一般に大都市は軟弱な地層で構成される沖積平野に位置し、地表付近の速度構造の急変により地震動が大きく増幅される。然るに、都市部の広域を対象とした系統的な地下構造調査は、ごく近年に地震調査研究推進本部と主要都市を抱える自治体との共同で開始されたばかりで、いまだに調査が着手されていない都市も多い。系統的かつ継続的に全国規模での地下構造調査を実施し、データベースを構築することが不可欠である。また、一般構造物への影響が大きい浅部地下構造に関しては、自治体が所有する各種資料のデータベース化を進め、地震動予測の不確かさを減らす努力が必要である。

3.4 地盤 基礎 構造物の動的相互作用の解明

建物への入力地震動は地盤 基礎 構造物の動的相互作用の影響を受ける。兵庫県南部地震では、設計時の想定を大きく上回る地動を受けたにも関わらず、新耐震設計による中低層RC建物の被害率は小さかった。これは、設計時に考慮に入れていなかった建物の余力の存在に加え、実際に建物に作用する地震力と地動との差異についての認識不足が一因と思われる。地動から地震力への変換には、上部構造・基礎構造、地盤およびそれらを繋ぐ相互作用特性が影響する。これらの現象を定

量的に解明し、建物への有効入力地震動を設定するために、この動的相互作用効果を適切に評価する研究を一層推進する必要がある。

また神戸市の低地、人口島ウォーターフロント地域では、地盤が液状化を含む非線形の挙動を生じたことが地震観測記録や地盤変状から判明している。このような地盤・地形による地震動の増幅特性を評価するためには、基盤岩までの深い地盤構造と浅い地盤構造を調査して地盤情報データベースを作成し、これらに基づいて地震動への地盤非線形挙動の影響をより一層解明する研究の推進が必要である。

3.5 地震工学におけるスーパーコンピュータ共同利用制度の整備

地震工学のなかでコンピュータの利用が最も盛んなのは、震源断層より発生した地震波動が地盤経路を伝播し、サイトでの地盤増幅に至るまでを対象とする、強震動および地盤震動分野であろう。この分野では大型計算機ではなく、ワークステーション(WS)やパソコン(PC)を利用する研究スタイルが主流となっている。解析モデルや演算手法によっては1週間程度の時間がかかるものでも、利用負担金の問題やスーパーコンピュータへの乗り換えの困難さのため、大型計算機の利用を断念している場合が多い。ちなみに日本最高速のスーパーコンピュータ「地球シミュレーター」の演算速度は40TeraFlops(40兆回演算/秒)であり、最高速のパソコンの約400,000倍である。

WSやPCは利用負担金は不要であるが、性能は購入後数年で旧式のものになるため、数年おきに更新するための負担が大きく、また、個別の研究者集団がそれぞれ独立に計算機を調達している現状は不経済である。WSやPCで稼動する計算プログラムを新規にスーパーコンピュータ(特に並列計算機)に移植するには膨大な作業と新知識が必要になることも、スーパーコンピュータへの移行を阻んでいると考えられる。

このことは地震工学研究の健全な発展を阻害する要因になっている。すなわち、WSやPCでのみ可能な演算手法による応用的研究に安住しがちで、制約のより少ない数理モデルや、より汎用性の高い演算手法に関して基礎研究を行う機運が起こらないからである。高精度で信頼性の高い地震動予測については設計用地震動入力の策定のためにも、地震工学分野でスーパーコンピュータを低費用で共同利用する制度(グリッドコンピュータ)の発足が強く望まれる。

3.6 地震地盤工学の研究の推進とそれを考慮したハザードマップ作成技術の向上

地震動予測の研究推進とともに、二次・三次災害に大きく影響を与える地盤変状ハザードに関する研究推進と社会への情報発信が必要である。地震時の地盤変状の代表的なものは砂地盤の液状化と斜面崩壊である。これらの地盤変状に対しては、過去にいくつかの国内外の主要な都市でハザードマップが作成されてきた。ところが、これらのハザードに関してはその予測技術自体の研究が遅れており、手法がなかなか確立されてきていない。このため、国内の各自治体でこれまで作成されているハザードマップの作成方法はまちまちであり、自治体の境界線で不連続な予測結果を生じるといった矛盾を抱えている。また、予測技術は漸次進歩しているにもかかわらず、ハザードマップは10年前や20年前に開発された古い手法で作成されたまま放置されており、グレードアップされていない自治体が多

い。

地震時地盤変状に関する研究、つまり地震地盤工学に関する研究は地震工学の分野の中でも、新しい分野である。例えば液状化に関しては1964年に発生した新潟地震を契機に研究が開始されて以来、約40年の間に精力的な研究が行われて、漸次問題が解決されてきている。ところが、液状化の現象自体が急激な破壊現象であり、また、地盤の密度や粒径のみならず、堆積環境や地下水変動など、種々の要因に液状化の発生の有無が左右され、まだまだ解決されずに残っている課題が多い。地盤変状のハザードマップ作成技術に関しても、まだ以下のような研究課題が残されている。

大規模地震動に対する液状化発生予測方法

液状化にともなう地盤の流動の予測方法

液状化による各種構造物の変形・変状の予測方法

また、地盤変状のうち、地震時の斜面崩壊に関しては、崩壊の予測方法自体の研究がさらに遅れていて、精度の保証できるハザードマップ作成技術に取り入れるまでの段階にきていない。山地が多い我が国にあっては毎年どこかで地震による斜面崩壊が発生し、人命も多く失われているが、このように基本的な研究すら十分に行われてきていないのが現状である。

従って、地盤変状のハザードマップに関しては、このような基本的な研究をまず推進する必要がある。そして、その成果を取り入れて、実際に利用価値があるハザードマップを作成する必要がある。例えば、液状化に関してこれまで作成してきたハザードマップは、どの地区で液状化が発生し易いか、といったマップであった。これでは、液状化により実際に各種構造物にどのような被害が発生するかまでは判断できない。液状化が発生する場合、小規模住宅や強度の小さい埋設管などは被害を受けやすいが、埋設管でも強度が大きいとか、建物でも基礎がしっかりしたものは被害を受けにくいなど、液状化が与える影響は大きく異なる。そこで、住宅やライフライン、産業施設、社会基盤施設など、構造物ごとの液状化による被害程度を把握し、ハザードマップに反映させる必要がある。

以上のような事情により、地震調査研究推進本部が計画している「地震動予測地図」に連動した地盤変状のハザードマップ作成技術の開発、また、それに必要な基礎的な研究を推進していく必要がある。そして、自治体などで精度が良く実用に適したハザードマップを作成し、それを公表するよう促進していくべきである。

注 グリッドコンピューターとは、国内外にある超高速並列計算機をインターネットで接続し、それらの計算パワーを一般の多くの研究者、教員、学生などに開放するためのシステムである。なお、総合科学技術会議は平成15年度科学技術関係予算の概算要求に向けて、グリッドコンピューター(経産省)関連で3年間169億円を予定している。(科学新聞2002年8月2日)

4. 建築構造物等の地震防災性向上のための技術と科学

[課題4] 要旨

建築構造物の地震防災性向上のために、(1) 解析技術の高精度化と大型実験による検証、(2) 既

存構造物の被害予測技術の高精度化と観測による検証、(3) 補強技術・フェイルセーフ技術の開発、(4) 防災性向上を促進する社会制度、等に関する研究を推進すること。

背景と必要性の説明

4.1 背景

1994年米国ノースリッジ地震、1995年兵庫県南部地震、1999年8月トルココジャエリ地震、9月台湾集集地震、11月トルコデュズゼ地震など、地震工学先進国においても、近年の地震で多くの建築構造物が深刻な被害を受け、一部の構造物は地震時あるいは直後に鉛直荷重を支持しきれない崩壊に至って、多数の人命が失われている[1][2]。兵庫県南部地震では、早朝という地震発生の時間帯により、木造建築物（個人住宅やアパート）の倒壊が大きな問題になったが、地震が昼間に発生していれば人命の損失をもたらしたであろう構造物の崩壊は、鉄筋コンクリート造や鉄骨造の事務所などでも数多くみられた。

一方、近年の地震による新たな教訓のひとつとして、建物の耐震性能が特に資産保護の観点でユーザーに必ずしも明示されておらず、したがって当然理解もされていなかったという点が指摘されている。古い建物の被害率が比較的大きいとはいえ、同じ基準にもとづいて設計・建設された近くの建物が同じ地震で結果として大きく違う被災度になるのは、地震動の局所的な地域差（地盤の増幅特性）や構造物の余裕度のばらつきに起因すると説明してしまえば簡単であるが、個々のユーザーにしてみれば納得できない。研究者や設計者にとっては、大地震の場合には構造物は崩壊さえしなければ一定の損傷が生じるのはやむを得ないというのが暗黙の了解事項であったが、所有者あるいは使用者にとっては、地震直後にほとんど無被害で継続使用可能か、一定の修復によって再使用が可能か、あるいは、経済的な修復は実質的に不可能で建替えが必要になるか、は実際問題として極めて重大な違いであることが実感された。

このような構造物（地盤条件も含む）の違いに起因する被災度の違いは本来設計の段階で明示し、保証すべきであると認識されつつある。そこで、想定する地震動レベルに応じて地震後の機能を保証する性能規定化が世界の趨勢になっている[3][4][5]。仕様規定における本来の要求性能を分析して、より明快に目標性能を明示する設計体系が検討されているが、性能規定化は、概念的には極めて明快であっても、構造物の実際の挙動や損傷の程度を精度よく予測し、工学指標によって評価する具体的な手法はむしろこれからの研究課題である。また、実際の構造物で供用期間中に性能を保証し、地震後には検証し、必要な復旧過程に責任を負うことまでを可能にするには社会のシステムを根本的に見直す必要があり、これを実現するには社会制度の研究も必要であろう。

耐震性能の違いを段階的に明示するため、住宅に限って実施された耐震等級も従来の最低基準の設計用地震力をベースにそれを係数倍することに落ち着いた[6]。耐震等級化は、適用範囲を既存建築物（中古住宅）に広げつつあるが、法律の対象外である最低基準を下回る場合（既存不適格）の等級化こそが問題になるであろう。既存不適格の問題は法的に厳格に扱うには限界もあるのであるが、研究者や構造設計者は、法律という約束ごとの枠組みを超えて、構造物の実際の

挙動にもとづいてユーザーにとって意味のある耐震性能の評価方法を追求し、具体化していく必要がある。例えば、鉄筋コンクリート建物で問題にしたいのは、地震後の残留ひび割れ幅（最大応答値ではない）の評価法、耐震性能が不足している場合または地震動が想定より大きい場合の倒壊限界の評価や倒壊の防止などであり、従来やや軽視されてきた感があるが、近年あらためて検討されつつある。

4.2 構造物の解析技術の高精度化と大型実験による検証

地震時の構造物の挙動は、基礎または工学基盤などで確定した地震動が与えられる場合であれば、実験室や理論解析ではかなり精度よく推定あるいは理解することが可能になってきている。数値解析はもとより、理論的な一般性をともなう理解も可能である。依然残された課題がないわけではないが、非線形地震応答は、“等価線形化”ないしは“エネルギーの釣合い”という考え方によって、入力地震動の性質にもとづいて一般性のある表現も試みられつつある。結果としてこれらは従来の経験式と大きく違うものではなく、特に、建築基準法による必要保有水平耐力を確保した構造物では、設計用地震動のレベルに対する応答はさほど大きな塑性変形にはならず、比較的精度のよい等価線形化が可能である。また、塑性化の程度が大きくない範囲では実際の構造特性や挙動も安定しており、十分な精度で予測可能である。

しかし、構造物が倒壊に至る場合の応答や挙動に関する解析は、設計で陽に使われないこともあってモデル化も精度検証も不十分である。特に、多自由度構造物の変形集中問題（特定層へに変形集中、捩れ応答など）、さらにこれに対する繰返し荷重による耐力低下の影響などは個別の数値計算は可能ではあってもこれらを一般化する理論的な背景は十分ではない。また、地震動のパラメータとして、振幅レベル（フーリエ振幅、応答スペクトル）は問題にされるが、継続時間（あるいは総エネルギー入力、繰返し荷重）の影響は一般的には扱われていない。

大変形域での応答を解析的に予測する手法とともに、倒壊するまでの構造物の挙動を物理的または理論的に解釈するのはまだ困難である。鉄筋コンクリートや鋼構造の破壊（崩壊）過程には塑性変形の最大値とともに累積値（繰返し荷重）が大きく影響することは個別の実験事例では古くから指摘されるところであるが、これを一般的に表現することはまだまだ難しい。特に、繰返し荷重の影響によってせん断抵抗機構、軸力支持能力の喪失過程のメカニズムを明らかにした研究は少ない[7]-[10]。このように、現在の解析技術や予測技術が追いつかない場合の現象によってこそ、むしろ人命安全性が問題になる。その意味で、部材実験はもとより、構造物や地盤を対象にした実験的研究（特に大規模震動実験）はその意義を失ってははいない。今後マグニチュードの大きい地震による被害が発生すれば、現在暗に想定されている地震動の継続時間、繰返し荷重による構造物の破壊過程が問題になることが考えられる。

4.3 既存構造物の被害予測技術の高精度化と観測による検証

実在建築構造物の地震時の挙動、さらに、ある地域全体の実際の地震被害を解釈し、予測するためには、地震動とともに、構造物の挙動についてさらに厳密な検証が必要である。都市全体を

対象にすると建築物全数については、構造パラメータはもとより棟数ですら精確に把握する方法がないのが実情である。構造物に関するデータの高精度のデータベース化が必須であるとともに、地震被害における高密度観測体制による検証が不可欠である。従来の地震被害調査では、入力地震動も応答量も定量的には不明であるので、被害の解釈の精度には限界があった。大きな被害を受けた建物の被害は解析的に大略説明されるが、無被害に留まった建物の大部分についてはなんら厳密な検証はされないことが多い。一般に構造物群としての被害率は解析による予測よりも小さい傾向があり、その理由は入力地震動の低減、いわゆる相互作用効果によって説明されることが多い。しかし、地盤が線形の範囲ではこの効果は顕著ではなく[11]、基礎近傍地盤の非線形化（Local Nonlinearity）などによる可能性も考えられるが、確かな検証例はない。また、間仕切り壁、非構造部材などによって構造物の耐力は計算以上に大きな余力があることも一因である。特に実地盤での構造物への入力地震動は、当面実験的な検証は困難で、構造物地盤系での精度よい高密度観測によってのみ実証可能であると考えられる。

兵庫県南部地震を契機にして、我が国の強震観測網は飛躍的に進展した。公的機関による数千点規模の強震・震度観測網が全国展開され、大地震時における初動体制の早期確立とともに、良質かつ均質な観測データが大量に収集、公開されるようになった。これによる地震動研究の進展は極めて急ピッチで、システムティックな情報が迅速に公平に公開される観測が如何に科学の進歩に役立つかを日々証明している。

一方、建物あるいは地盤 建物系を対象とした観測は、1970年代を中心に主として民間の建物で実施されてきた。しかし、近年では新規設置数が激減し、しかもかつての強震計はその耐用年限を越え、さらには保守されなくなったものも多い。兵庫県南部地震において、日本建築学会が収集した観測記録によると、地盤以外で少なくとも建物内の2点以上の観測が行われていたのは30棟に過ぎず、その多くが民間の観測である。しかも、倒壊を含む多くの建物が大被害を受けたにもかかわらず、大被害を受けた建物での強震記録は皆無であった。また、もし記録が得られていたとしても、民間の観測データは一般に公開されることは期待できず、研究に必要な建物の設計資料とあわせて公開されることはさらに難しい。耐震安全性の向上、延いては都市全体としての地震災害軽減を計る上で、大きな阻害要因となっている。

構造物、特に建物での強震観測で重要な点は、地震動入力および構造物が破壊に至るまでの動的崩壊挙動を把握することである。したがって、観測建物の選定に当っては、まず大きな震源域地震動が予測される地域を重点的に選定することと、重要な丈夫な建物だけではなく一般的で耐震性の劣る建物も重点的に選定する、という2点が重要である。また、なるべく局所的な各層層間変形角を定量化できる観測、相互作用効果を含む構造物への入力地震動が検証できる観測（ロッキングや近傍との地表との違いなどが特定できること）を意識した高密度観測、多点観測が望ましい。さらに、低頻度である激震時のデータを得るには、できるだけ多くの地域、数多くの構造物で観測することが望ましく、そのためには、安価な普及型地震計を開発して多数配備することが有効である。

構造物における観測データは、研究への利用だけでなく、警報および応急危険度判定の即時化、

被災度判定および残余耐震性能推定の高精度化、応急補強設計および恒久復旧設計の合理化など、直接構造物の防災性向上に繋がる実用的な利用も可能である。従来は地震動に関する研究を主な目的としていた高価な地震観測網は、地震時の構造物の応答計測、応急復旧、被災度判定、さらに将来の防災性向上のための実用的な標準装備として広く普及させる方向を目指すべき段階にある。このような観測は、防災上の実用利用システムも兼ね備えて、組織的に公的機関が設置し、観測から、防災利用、データ公開までを一貫して執り行う仕組みを策定することが肝要である。そのためには、普及型地震計に要求される性能、防災装備として有効なシステムの開発、判定基準の検証、などに関する基礎研究、実用化研究も必要である。

4.4 補強技術・フェイルセーフ技術の開発

耐震工学の先進的な技術が進歩する一方で、特に古い既存建築物に関しては最悪でも倒壊を防ぐ安全性の確保は依然重要な課題である。これらの建築構造物の崩壊は、鉄筋コンクリート構造の建物では、多くの場合、せん断補強筋量の少ない古い建物、いわゆる既存不適格の建物で生じてきたが、たとえばピロティ建物など、最近の建物でも問題がないわけではないし、これから建設される建物でも生じうる。現行の耐震基準は限られた地震動の性質を経験的に踏まえたものであり、極めて稀に生じる地震動のレベルや性質は従来の経験と異なる可能性があることは明らかである。既存建築物の耐震診断、耐震補強は特定建築物の改修の際に義務づけられたものの[12]、そのほかの、特に民間の建築物では遅々として進まない。法律的な義務をとまなわない場合、施主の自助努力には限界があり、耐震改修の目標レベルが高く、補強費用が高価すぎることも原因のひとつであると考えられる。大地震に対する第一義的な基本性能はいうまでもなく人命保護であり、高価で大掛かりな既往の耐震補強方法に代わって、最小限軸力保持能力を確保するための経済的で簡易な補強方法の開発研究は極めて有意義であると考えられる[9]。次世代に夢を与える先進的な技術も重要であるが、従来の研究を実際の構造物、特に既存構造物、の耐震性向上にどのように適用していくか、は同様に重要な応用技術である。既存構造物の倒壊を防止する研究は、部材実験とともに、震動台による破壊実験なども基本にして今後とも重要になるであろう。

一方、例えば、免震、制振など先端技術を駆使して設計された構造物についても、地震の経験は限られているだけに、将来のあらゆる可能性を予測して倒壊安全性を保証しうるかどうか、は再吟味が必要な課題である。建築基準法の諸規定は過去の被害経験を踏まえたものであり、伝統的な技術に対しては、計算上の要求と実際の構造物の余裕度も含めて、結果として地震被害を制御すべく、ある意味で合理的に設定されてきたと考えられる。しかし、研究室での実験ならともかく、実際の構造物で、入力地震動から応答、その確率分布などを純粹に解析のみによって定量的に扱って安全性を保証するのは依然難しいと思われる。我々は地震動を定量的に観測できるようになって100年未満であり、しかも、建築技術、地震工学や観測技術が発展した最近の50年は、日本の歴史に限れば比較的静穏な、特殊な時期の経験を背景にしていることを再認識する必要がある。解析主体の先進技術に依存する構造物では、将来の地震動のばらつきを大幅に先取りする形で、計算外のフェールセーフ機構も付与することを考えるべきであろう。

4.5 防災性向上を促進する社会制度

地震に対して安全な社会を実現するためには、地震工学の研究、技術開発とともに、それを有効に普及するための政治行政の仕組み、社会資本の投資、次世代への技術伝達、防災意識の啓蒙、防災性向上を促進する社会制度などが必要である。「天災は忘れられたる頃きたる」のであって、個人レベルの認識や経験には限界があり、専門家は社会の経験を伝達継承するとともに、提言していく義務がある。少ない投資で未然に防止しうるにもかかわらず放置して地震被害を生じさせた場合、単に費用を負担して復旧すればよい、という問題ではなく、短期の復興には、社会全体の経済、地球環境に無用の負荷をかける、という点に注意する必要がある。

このように、地震防災性を向上させ、恒常的に維持するための社会システムを合理的に構築する方策は、施主、設計者、施工者、管理者、使用者の自助努力を促すのが基本であり、そのためには、防災性向上に努力すれば報われる、という社会の仕組みに関する研究が必要である。構造物に関連したものでは、例えば、以下のような項目が考えられる。(1) 新築構造物の設計、耐震性能評価の評価法、(2) 第三者機関による施工管理、検査、(3) 耐震性能の明示、表示制度、(4) 供用期間に耐震性能を保証するシステム、(5) 供用期間中の劣化、耐久性の診断と改修システム、(6) 耐震性能、診断と改修の履歴の有無などに応じた地震保険料率、(7) 耐震改修の促進と公的補償。

(1)は技術的な問題であるが、(2)～(5)は長い供用期間中にわたって維持する必要がある社会制度の問題で、合理的な制度を実現するには税制などを含む制度全般にわたる見直しが必要になると思われる。(6)(7)などは現行制度を基本にした運用で対応することも十分可能であると思われ、例えば、地震のたびに場当たりの一律に支払われる地震被害に対する公的補償などは、放置して被害を受けた場合には損害補償はしないが、一定レベルの耐震改修の努力をしてなおかつ被害が発生した場合には全面的に損害補償をする、といった運用方法なども考えられる。

(参考文献)

- [1] 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告、総集編、日本建築学会、2000年3月
- [2] 日本建築学会・土木学会・地盤工学会：1999年トルココジャエリ地震災害報告書、2001年9月
- [3] 国土交通省住宅局建築指導課他：2001年版建築物の構造関係技術基準解説書、2001年
- [4] SEAOC: Performance-Based Seismic Engineering of Buildings - Vision 2000 reports, SEAOC, 1995.
- [5] FEMA: NEHAP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA273, 1997
- [6] 建設省住宅局：住宅の品質確保の促進等に関する法律、ベターリビング、2000年7月。
- [7] K. J. Elwood and Jack P. Moehle: Shaking Table Experiments on Shear and Axial Failures of Columns, Proceedings of The Third U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, 393-406, 2001
- [8] Yoshimura, M., and T. Nakamura: Intermediate-Story Collapse of Concrete Buildings, Proceedings of

The Third U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, 93-104, 2001

- [9] 壁谷澤寿海, 金裕錫他: 鉄筋コンクリート造偏心ピロティ建物の震動実験, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム, 165-176, 2002年2月
- [10] Kinugasa, H. and S. Nomura: Failure mechanism of RC beam under reversed cyclic loading after flexural yielding caused by lateral strain accumulation in plastic-hinging region, Proceedings of Earthquake Resistant Engineering Structures 2001, Spain, September 2001
- [11] 林 康裕, 藤森健史, 安井 譲, 井口道雄: 1995年兵庫県南部地震における相互作用効果と建物応答, 日本建築学会構造系論文集, NO.520, pp.45-52, 1999年6月
- [12] 日本建築防災協会: 「建築物の耐震改修の促進に関する法律」の法令及びその解説, 日本建築センター, 1996年1月

提言Cの背景と必要性の説明

a. 構造物耐震安全性総合評価の国際標準化

[方策 a] 要旨

- ・耐震安全性に関する, 国際的標準化の枠組み作りについて, 国がイニシアティブを取ること。
また, そのための環境整備として, 日本の地震防災関係基準・学会論文集等の英文出版助成策を一層整備すること。

背景と必要性の説明

平成16年に完成予定の「三木市3次元震動台」等の施設の利用を積極的に進めることで, より一層の地震工学/耐震工学の発展/充実が期待され, これらの施設を用いての総合的耐震性能評価が可能になると考えられる。ただし, この場合, 本評価結果がある意味でのリファレンスとなることから, 経済的な観点からも振動台性能/精度に対する要求が高まることが予想される(既存の振動台についても同様のことが云えるが)のも事実である。しかしながら, 国際的なレベルでの総合的耐震性能評価(安全性評価)が可能になれば, 地震被害により世界的に及ぼされる経済的/人的被害のリスク分散にも可能性を拓くと予想される(耐震安全性のISO的なもの)。

地震工学関係の研究・技術開発は世界で我が国と米国が最も進んでいると言える。特に兵庫県南部地震以降は特に強い地震動に対する研究が急速に進み, 米国よりこの分野では研究が進んでいる。また, 地盤条件が悪い我が国では地盤関係の地震災害も米国に比べて研究が進んでいると言える。そこで, これまでの我が国における研究・技術開発成果を積極的に海外に広め, 海外諸国で利用普及を図るため, これまでのJICAを中心とした従来型の技術・研究協力に加えて, いくつかの新しい国際連携方法を積極的に考える必要がある。

海外諸国に対する技術協力や援助に関しては、これまで地震活動が活発ないくつかの国を主に対象に行われてきたが、今後この対象や内容の変更を検討する必要がある。特に地震活動があまり活発でない国でも、近年は地震防災対策を考えようとする国が増えてきているため、これらに対しても技術協力や援助を行う必要がある。

このような技術協力や援助を行う場合、技術内容を現地の言葉または英語で伝える必要がある。我が国では耐震設計基準、調査・試験基準、免震・制震用の製品の規格など、多くの高技術レベルの基準類が作られてきたが、これらの多くは日本語表示で、海外に紹介されることが少なく、国内で地震の被害を軽減するのに役立っている状況に留まっている。そこで、JISなどの基準・規格の英文版を積極的に海外に発信することや、ISOなどを通じて、我が国の基準類を海外に紹介し、各国での被害軽減に役立ててもらうことが大切である。また、我が国における地震工学関係の研究成果を世界に公表するために、各学会で英文のジャーナルを発行するだけでなく、世界最高水準の論文を掲載し、認知度を高める必要もある。これらには費用がかかるため、関連学会だけでは十分に出来ないのが現状であり、学協会と国が連携したシステムを作る必要がある。すでに文部科学省の「情報技術や生命科学などの分野で優れた研究論文が掲載されている国内学術誌を選び、出版に携わる学会などを来年度から資金面で支援する」振興方針[1]が報ぜられたところであるが、この支援対象に本提言関係学会も含めることが強く望まれる。

この他、海外では毎年のように大地震が発生し、甚大な被害が発生しているので、その場合に緊急に技術援助できる支援体制を整える必要がある。これには、地震直後の被災状況の迅速な調査方法の英文マニュアルの作成、緊急対応・応急復旧・本復旧方法に関する英文マニュアルの作成（例えば文献2）などが必要である。また、関係学会等と外務省などで、地震直後から2,3段階に分けて現地に赴き、緊急復旧・本復旧・復興の技術指導をするシステムを作っておく必要がある。

以上のような海外技術協力は海外諸国に対して役立つだけでなく、我が国の国益にも沿うところである。例えば、海外諸国における我が国の高度の耐震技術への理解が普及することになり、地震・防災に関連したプロジェクトが海外諸国で実施される場合に、日本の企業がそのプロジェクトを受注し易くなる。また、地震計などの観測機器はすでに海外に輸出されてきているが、このような観測機器のみならず、制震・免震装置や、耐震装置なども海外に輸出し易くなる。さらに、研究面においても海外で地震が発生した場合にその被災調査が行い易くなり、我が国の地震工学の研究に大いに役立つと考えられる。

参考文献

[1]日本経済新聞、平成14年9月16日19ページ

[2] Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, ISSMGE: Case Histories of Post-liquefaction Remediation, The Japanese Geotechnical Society, 117p., 2001.

b. 世界舞台・世界水準で活躍できる若手人材の育成

[方策 b] 要旨

日本の地震工学的研究・防災技術のプレゼンスを世界に発信主張するためには、論述力・討論力を含めて世界舞台・世界水準で活躍できる若手人材を積極的に養成することが必要である。現行の若手研究員海外派遣制度の拡充改善策のひとつとして、わが国修士修了レベルの学生向けに、先進国博士学位取得用奨学金制度を導入すること、及び同取得者に対する国内での処遇上の優遇措置を導入すること

現状認識と必要性の説明

わが国の地震工学研究の歴史は深く、その質においても量においても過去数十年世界の最先端を走ってきた。さらに耐震や防災の実践に欠かせない技術の高さと広さにおいて、「ものづくり」に対する長年の伝統を誇る日本は他の追従を許さない。それゆえにわが国の地震工学研究者も防災技術者も、「このように研究・開発を支える頭と、実践技術を支える身体の両輪が整ったわが国の「耐震技術」は世界の最先端にある」と自負してきた。

しかしながら、この日本の実力は、諸外国では必ずしも十分に理解されていない。世界最先端の研究成果があるのに、それが必ずしも認知されない大きな理由として、「その成果のfull papersが評価の高い国際専門誌に掲載されるようにする」努力の不足と、「国際舞台での論述力と討論力の弱さ」が挙げられる。また日本が誇る耐震技術が、他の諸国に必ずしも受け入れられない理由として、日本国と日本人が海外ビジネス（研究ではない）に弱い伝統や、全体システムのバランスから見て細かすぎる（大らかではない）部分を含むために値段が高過ぎる日本の技術性癖が挙げられる。これらはすべて、日本の地震工学や耐震・防災技術の国際プレゼンスの低さを助長している。

いまほどに情報の流通が多くない時代においては、ローカリティーの高い建設業は鎖国を続けてこられた。しかしながらグローバリゼーションが急速に進む昨今(*)、上に示した事態が続くようでは、日本の将来（国の富と力）は危うい。（*：反グローバリゼーションへの動きも含めてその功罪への議論は尽きないが、グローバリゼーションは歴史の必然と考えなければならない。）

この閉塞した事態を打開するためにいま求められるのは、耐震工学研究・開発に従事するとりわけ若手日本人研究者・技術者による海外情報発信努力に尽きる。ここで、国際共通言語である英語に対する若手の能力が問われることになる。現在の若手研究者・技術者層を見るとき、残念ながら、彼らの英語による情報発信能力が、戦後盛んに欧米諸国へ留学した世代（最近次々に退職している世代）に比べて向上しているとは思えない。昨今学生の海外旅行は盛んではあるけれども、豊かになった日本で生を受けた若者達には、外国暮らしへの動機（Motivation）は驚くほど低い。一方で、外国最先端研究機関にある程度以上の期間滞在して刻苦修行し、現地での諸交流を通じたCosmopolitanismを会得せずして、世界最先端研究・開発の情報発信を実践することも難しい。ちなみに、2001年にノーベル化学賞を受賞された野依良治博士は、受賞通知直後の会見において、「国際論文誌に論文を発表してこと足りると思っはいけない。若いころから海外の研究者と密接な交流を深め、自らの研究への理解を求める努力なくして真に認知を受けることは

難しい」と語られている（文献1）

「アジアで世界最先端レベルにある日本」、「アジアのリーダーシップを担う日本」は、国際化を展開しようとする日本の半ばキーワードと化している。しかしながらアジア諸国を見ても、日本が質・量共に他に抜きん出て世界最先端防災技術の英文情報を発信しているとはとても言いがたい。そしてその主因は、大学等に属する研究者の「英語論文発信能力の低さと論述力・討論力の弱さ」にある。表1は台湾の大学（土木工学科）と韓国の大学（建築学科）に勤める教員の最終学歴を示したものである（文献2）。圧倒的多数が最終学位（Ph.D.）を海外で取得し、またその

表1 台湾・韓国大学における海外博士号取得教員数

	教員数	博士号取得者	海外大学での博士号取得者	米国での博士号取得者
Department of Civil Engineering, National Taiwan University	57	51	49	46
Department of Civil Engineering, National Taiwan Institute of Science and Technology	31	28	26	26(*1)
Department of Architecture, Seoul national University	13	10	10	8
Department of Architecture, Ajou University	7	5	5	5

(*1) 出身大学内訳 UC Berkeley (5), U of Washington (4), U of Illinois at Urbana (3), U of Texas at Austin (3), Lehigh U (2), Northwestern U (2), Cornell U (1), Cal Tech (1), Stanford U (1), Purdue U (1), Michigan U (1), Minnesota U (1), SUNY Buffalo (1)

中でも米国で学位を取得したものが大半を占めている。ちなみに、現在日本の建築・土木関連学科に在職する教員のうち、海外で学位(修士号、博士号を含む)を取得したものは128名である(文献3、4)。全学科数約200を母数にすれば、1学科あたり0.5名強の教官となり、韓国や台湾との差は歴然としている。大学院教育が十分整った日本と、それらがまだまだ未熟である台湾や韓国との違いを指摘することもできる。また米国で最終学位を取得し現在台湾や韓国で教鞭をとっている教員の研究が、いかにも米国の二番煎じであってなんら独創性を持たないという一部批判もあながち的外れではないかもしれない。しかし、少なくとも彼らが、日本人に比べてはるかに高い「英語による情報発信能力」をもっていることは紛れもない事実である。

表2は、米国の幾つかの大学院（土木工学科）における大学院生の国別内訳を示したものである

(文献5) いずれの大学も、多数の外国人留学生を受け入れているが、アジアを見ると、韓国、台湾、中国が突出している。他方、日本からの留学生はと見れば、いずれの大学においてもほぼ皆無に近い。この傾向は近年のみならず1980年代から恒常的に見られる。日本からの留学生の少ない一因として、入学志願者数そのものの低さが挙げられる。例えば、カリフォルニア大学バークレー校土木工学科では、2001年度において約200人が構造・材料プログラムに志願したが、このうち約30%が中国から、約25%が韓国から、約15%がインドからの志願であったのに対して、日本では僅か1名が志願したに留まっていた。一方で、日本人志願者の採択率が高いとも限らず、

表2 米国土木系大学院における留学生数(2001年度)

	大学院生数	米国外からの留学生	韓国からの留学生	中国からの留学生	台湾からの留学生	日本からの留学生
Structure and Material Program, Department of Civil, Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology	84	45	18	8	5	1
Department of Civil, Environmental, Architectural Engineering, University of Colorado at Boulder	198	92	28	7	4	2
Department of Civil, Environmental Engineering, University of Texas at Austin	326	183	42	18	12	4
Structure and Material Program, Department of Civil, Environmental Engineering, University of California at Berkeley	103	52	12	7	3	0

ジョージア工科大学土木工学科では、1995年から2002年度までの8年間に、日本から計44名の大学院生が志願、そのうち入学許可を与えた大学院生は15名であった。関係者の談によれば、志願者の多くは必ずしも成績がよくな(ジョージア工科大学では、GREとして約1300を、GPAと

して3.0を最低の目安としている) これは主として優秀な日本人大学院生が志願しないことによる。

なぜ台湾や韓国からの留学生がこのように多く、翻ってわが国からの留学生が少ないのか。つまるところそれは、留学によって磨かれる「英語による発信能力の高さ」によって得られる報酬 (Reward) の有無にゆきつく。いま韓国や台湾では、英語圏が発刊する論文誌への論文投稿が、採用や昇進に大きく影響するシステムをとっている。それは例えば、米国ACI Journalへの投稿が近年激増し、その多くが韓国からの論文である事実にも現れている (文献6)

自らの評価を外国の基準に頼るのは後進国の証であるというもっともな議論も聞かれる。しかしながら、(1)世界共通言語が残念ながら日本語ではないという厳然たる事実、(2)多くの世界最高水準の成果は評価の高い国際専門誌に掲載されるという現実、(3)英語による発信能力向上には「英語圏での学生としての刻苦修行が効果的である」という事実、(4)英語圏での修行を(若手に)自発的に期待することは難しい事実は、「できるだけ若い時期に学位取得等を目指して刻苦修行する機会と成果処遇を与える抜本的な施策」の喫緊の必要性を訴えている。つまり、機会を与えただけで事は完結せず、評価の高い成果を達成した若手が達成後に与えられるRewardもあわせて準備しておかなければならない。後者については、例えば大学教員への積極的・優先的任用など、国内研究教育機関の自助努力によっても達成しうるところである。

参考文献

1. 朝日新聞夕刊、2001年9月10日。
2. Personal communications with Prof. S. J. Huang of National Taiwan Institute of Science and Technology, Prof. L. J. Liu of National Taiwan University, Prof. S. G. Hong of Seoul National University, and Prof. J. H. Kim of Ajou University.
3. 大学(建築関連学科)名簿2001年度版、日本建築学会、2001年。
4. 2000年度版全国土木系教官・教員名簿、土木学会、2000年。
5. Personal communications with Profs. B. Stojadinovic and S. Govindjee of University of California at Berkeley, Prof. P. B. Shing of University of Colorado at Boulder, Prof. M. D. Engelhardt of University of Texas at Austin, and Prof. R. Leon of Georgia Institute of Technology.
6. Personal communications with Prof. R. Leon of Georgia Institute of Technology who serves as board member of the ACI Structural Journal.

c . 日本技術の普及戦略を伴う国際的技術支援と国際会議開催支援体制

[方策 c] 要旨

従来の地震防災国際連携を一層効率化すると共に、技術的支援体制と国際会議開催支援体制を、日本技術の普及とグローバルスタンダード化を伴う方向で充実すること。また海外の技術者・大学院生の研修制度を一層発展させ、充実すること。

背景と必要性の説明

我が国において地震工学の技術を開発途上国の技術者に広く教えることは、1960年に東京大学で行われた国際地震工学研修に始まった¹⁾。ここでは海外技術協力事業団から出された奨学金によって研修が行われた。その後、建設省建築研究所が担当になり、建設省、外務省、国連特別基金のサポートのもとに、国際地震工学研修所として発展してきた。最近の状況としては2001-2002年、レギュラーコースに18カ国から19名ほど研修を行っている²⁾。これまでにこの研修所で研修した研究者や技術者は、自国に戻り地震工学の分野で大変活躍してきている³⁾。また、日本からの技術援助などを行う際の橋渡しを行うなど、研修の成果は大いに現れている。

この研修は開発途上国の技術者に対する教育を目的とされているが、これに対し、大学院レベルの学生が我が国に来て研究するシステムは十分ではないと言えよう。地震工学は、地震学、土木工学、建築学、地盤工学、機械工学などの幅広い分野を横断した学問である。上述した国際地震工学研修所でもこれらの広い分野について研修を行っている。これに対し、現在は各大学において教官がそれぞれの専門分野で留学生として受け入れているだけであり、留学生は総合的な教育を受け、また、研究を行うことが出来にくい状況にある。そこで、地震学・土木工学・建築学・地盤工学・機械工学などの地震工学関係者からなる、総合的な地震工学の専門の教育・研究が行える国際大学院等の研究教育体制を充実する必要がある。これには、電力・ガスなどのライフライン企業や、リスクマネジメント関係の企業、自治体などの協力・援助も仰いだ、産官学が連携したものとすることが望まれる。

このような総合的な国際大学院等の研究教育体制を充実することにより、留学生の教育はもとより、教官の研究も進み、我が国の地震工学の研究レベルがより高いものになると考えられる。

一方、日本地震工学シンポジウムは、学術会議メカニクス・構造研究委員会地震工学専門委員会の指導の下で、世界地震工学会議の中間年に開催されて、異分野の研究者に学際的な交流の場を提供するという役目を担って来た。建築、土木、地盤、機械、地震の分野の研究者が融合的に参加した。同様に世界地震工学会議の中間年に開催されているヨーロッパ地震工学会議や米国地震工学会議が、国際色豊かに開催されていることをも考え合わせれば、その同年にアジア地震工学会議をアジアの国々とともに開催するのが一層望ましい。論文集は当然英語で出版されるから、現在の日本語論文集より、世界の技術者・研究者により広く読まれるであろう。日本の進んだ地震防災技術と地震工学研究の成果を、世界特にアジア諸国に発信する良い機会になるものと期待される。また、この会議が契機となって、共同研究や技術支援などの国際協力への道筋が拓かれものと期待される。

米国の科学財団(NSF)は、米国と世界各国の研究者との交流を図るために、各種のワークショップや共同研究を積極的に支援している。特に地震工学の分野においても、米国とアジア各国との連携を、日本の頭越しに、強めてきている。地震防災技術と地震工学の先進国のひとつである日本としては、アジアにおける推進イニシャチブをとるべきである。その支援方策の強化が強く望まれる。

参考文献

- [1] 建設省建築研究所：建築研究所 30 年のあゆみ, 1976.
- [2] 松原毅：国際地震工学研修所(IISEE)便り, 地震工学ニュース, No.181, 震災予防協会 pp.24-27, 2001.
- [3] 元田良孝：国際技術協力概論 土木分野を中心として一, 森北出版, 1995.

振興策提言に対応する関係学協会の連携活動へ向けての要望

上記の提言A課題1～4, 提言C方策a, b, cに関連する研究のいくつかはすでに関係学協会研究者がその新しい方向の模索・開拓を行ってきたものであるが、上記の振興奨励策に対応して、研究実行側の研究者とそのコミュニティとしての学協会に対して、以下に列挙する各項を含めて新しい展開にふさわしい努力が要望される。上記の振興策の意義を裏書きするものである。

- (1) 課題1, 2のような研究では、文理の異分野多領域にわたる研究者の、共通目標の明確な認識と一致協力が必要であり、適切なチームでなければ目標を達成できない。「総合システム」という標題にふさわしい実質的共同作業が必要となる。平成15年度科学研究費補助金の新しい分科細目で初めて「総合領域」「複合新領域」分野が導入された。そのうち、「社会・安全システム科学」が本提言A, Bの課題と親近関係を有する分科ではあるものの、「地震工学のハード分野の研究者と社会・安全システム科学分野・情報分野のみならず経済システム分野等文系分野研究者を含む適切なチーム」の構成と、俯瞰的なリーダーが必要である。
- (2) 日本地震工学会は、「建築、土木、地盤、地震、機械等の分野に分かれて行われてきた」地震工学研究活動をまとめた活動とするため、「関連した各分野の研究者や実務者が協力して、問題解決にあたる必要がある」という認識に基づいて平成12年12月に設立された。日本地震工学会が多くの分野のエキスパートの協力による総合的な研究・横断型研究のチーム形成のインキュベーター的役割を果たし、今後関係各省庁、日本学術振興会、関連学協会と協力・連携しながら、以下のような活動を行うことが望ましい。
 - (a) さまざまな分野から地震防災に関わる研究者を結集して、新しい試みの交流と総合化へ向けての相互刺激を図る目的で、連続シンポジウム等を積極的に主催し、関連する活動を支援すること。一方、「三木市三次元振動台」のような世界的に見ても数少ない施設を国際的にも有効利用することで、広く学術的貢献が図れると期待される。国際関係学会への情報提供と大型研究企画のインキュベーター的役割も望まれるところである。
 - (b) 日常時の監視体制をベースとした構造ヘルスマニタリング、地震後のダメージ・ディテクションを目的とする構造ヘルスマニタリング、地震時の振動低減に向けたアクティブ、セミアクティブ、パッシブ制御技術の発展をはかり、これらを融合した構造物のスマート化、スマート構造化に向けた研究、さらにはIT、計測、制御技術を融合したインテリジェント都市化に向けた研究推進を支援する。
 - (c) 多くの横断的な分野の会員をもつ日本地震工学会であるから、地震前・地震時・地震後

の危機管理システムの整備に向けて、幅広い分野の協力から新しい性格の研究成果を生み出し、新しい防災戦略の構成に貢献するよう、連絡調整に尽力すべきである。

(3) 耐震安全余裕度に関する総合評価方式のあり方を関係学会協議で統一すること。

近年、世界各地で被害地震が連続して発生しており、地震工学/耐震工学の重要性が再認識されている。機械工学の分野においては、社会的重要度が高くまた2次災害の危険性が極めて高い原子力発電所や化学プラントの地震時安全性を確保すべく耐震設計技術が発展してきた経緯がある。一方、1980年代初頭より免震構造等の新しい地震災害低減技術の研究開発に伴い、「地震時安全性確保」の技術から「地震時機能維持」の技術へとその領域を拡大している。これは、経済的な側面からも重要視されるべきであり、例えば半導体製造工場などの製造施設の地震被害は当該国の安全上/経済上の問題に留まらず世界的な問題として考える必要があるからである。機械工学分野においてはこれらの免震装置/制振装置の研究開発において優れた業績を残しており、また学術的にも一つの大きな柱となっている。今後は、論理的/工学的に整合性の取れた設計地震動を耐震設計に適用することで、コンベンショナルな耐震設計、免震設計、制振設計それぞれを適用した場合の地震時安全余裕度を総合的に相互評価することが望ましいと考える(最近原子力耐震設計の合理化/高度化を目的に再注目されているPSA技術を適用することも考えられる)。そして、これを実施するに当たっては、第1段階として「日本地震工学会」などの学会において、合理的な総合評価方式のあり方について議論すべきであり、これは巷間通称VE(バリュー・エンジニアリング)と呼ばれる考え方にも一致するものである。

(4) [提言C]の方向の各学会のこれまでの取り組みは評価されるところではあるが、なお次の方向への一層強い取り組みが望ましい。

「科学技術基本計画」(平成13年3月30日閣議決定)の第2章重要施策「科学技術活動の国際化の推進2項「国際的な情報発信力の強化」で次の通り述べられている。

「わが国の科学技術活動が国際的に認知され、評価され、その結果、世界一流の人材や最新の情報がわが国に結集するようになるためには、研究成果、研究者、研究機関に関する情報の積極的な海外への発信が重要であり、研究成果の英語での発表を強化するための支援を行うとともに、学協会とも連携しつつ、国際的水準の論文誌の刊行等情報の組織的な発信を行うための環境を整備する。」

これに対応して最近文部科学省は「世界の科学者から注目される日本発の電子版学術誌を育成し、日本の研究成果を世界に発信する」こととし、「情報技術や生命科学などの分野で優れた研究論文が掲載されている国内学術誌を選び、出版に携わる学会などを来年度から資金面で支援」する方針であると報じられている(日本経済新聞2002.9.16)。

予算上の限界から当初支援対象分野が一部に限定されることはやむを得ないものの、「社会のための工学や地震防災」を活動計画としているわが国の関係学会としては、速やかに上記の出版支援範囲を「社会基盤・生活基盤分野を含む重点全8分野に拡大すること」を要望するとともに、支援対象に選ばれるにふさわしい発信実績を積み重ねられることが望ましい。