

シンポジウム

阪神・淡路大震災を振り返り、来たる大地震に備える
-建築振動研究に課せられたもの-

2011年3月7日

日本建築学会 構造委員会
振動運営委員会

シンポジウム

阪神・淡路大震災を振り返り、来たる大地震に備える

-建築振動研究に課せられたもの-

目次

1. 主旨説明	福和伸夫(振動運営委員会主査/名古屋大学) ……	1
2. 阪神・淡路大震災後の振動運営委員会活動	渡壁守正(戸田建設) ……	3
3. 阪神・淡路大震災後の地震被害軽減に向けたプロジェクト	壇 一男(清水建設) ……	13
4. 主題解説		
① 強震動予測と地震荷重		
(その1)地盤震動研究の立場から	加藤研一(小堀鐸二研究所) ……	25
(その2)建築物の安全制御の立場から	林 康裕(京都大学) ……	31
② 強震観測とモニタリング		
(その1)強震観測の立場から	鹿嶋俊英(建築研究所) ……	37
(その2)構造ヘルスマニタリングの立場から	西村 功(東京都市大学) ……	43
③ 表層地盤増幅と実効入力動		
(その1)地盤増幅の立場から	永野正行(東京理科大) ……	49
(その2)建物への入力地震動の立場から	飯場正紀(建築研究所) ……	55
④ 耐震と免震、制震		
(その1)免震構造の立場から	高山峯夫(福岡大学) ……	61
(その2)制震構造の立場から	池田芳樹(鹿島建設) ……	67
⑤ 地震応答と耐震設計		
(その1)上部構造について	緑川光正(北海道大学) ……	73
(その2)基礎構造について	中井正一(千葉大学) ……	79
(その3)設計者側からの意見	鳥井信吾(日建設計) ……	85

■ 振動運営委員会(2011年3月現在)

主査	福和 伸夫	名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻
幹事	壇 一男	清水建設(株) 技術研究所
幹事	宮本 裕司	大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻
幹事	渡壁 守正	戸田建設(株) 技術研究所構造グループ
	飯場 正紀	(独) 建築研究所 構造研究グループ
	池田 芳樹	鹿島建設(株) 建築設計本部 構造設計統括グループ
	大川 出	(独) 建築研究所 構造研究グループ
	鹿嶋 俊英	(独) 建築研究所 国際地震工学センター
	片岡 俊一	弘前大学大学院 理工学研究科
	加藤 研一	(株) 小堀鐸二研究所
	菊地 優	北海道大学大学院 工学研究科建築都市空間デザイン専攻
	北村 春幸	東京理科大学 理工学部建築学科
	高山 峯夫	福岡大学 工学部建築学科
	田守 伸一郎	信州大学 工学部建築学科
	鳥井 信吾	(株) 日建設計 構造設計部門
	長島 一郎	大成建設(株) 技術センター建築技術研究所
	西谷 章	早稲田大学 理工学術院(建築学)
	西村 功	東京都市大学 建築学科
	野畑 有秀	(株) 大林組 技術研究所
	林 康裕	京都大学大学院 工学研究科建築学専攻
	久田 嘉章	工学院大学 建築学科
	三浦 賢治	(株) 小堀鐸二研究所

シンポジウム「阪神・淡路大震災を振り返り、来たる大地震に備える ～建築振動研究に課せられたもの～」主旨説明

振動運営委員会主査・福和 伸夫（名古屋大学）

兵庫県南部地震から 16 年が経過した。16 年前に被災地に立った多くの建築技術者は、その惨状に驚き、同じ災害を二度と繰り返すまい、と誓った。震災の半年後、日本建築学会は、「建築および都市の防災向上へむけての課題（第一次提言）」を著した。この提言では、総合的に検討すべき課題として、「A. 災害に強い都市づくりの推進」、「B. 既存不適格建物の耐震対策」、「C. 耐震性能を明確化した設計法の開発」、「D. 災害情報システムの確立」、「E. 地震災害の防止・軽減に関する基礎的研究の振興」の 5 項目を掲げた。

これらの課題の多くは、この 16 年間で、解決・改善されてきた。特に、D については、ICT の進展もあり、緊急地震速報や各種の災害情報システムとして具現化した。また、A～C も、応急危険度判定士の養成や耐震改修促進法の制定などの仕組み作り、建築基準法の耐震規定の改正など新たな検証法の整備、各種の耐震化工法の開発など、着々と進展してきた。しかし、現行耐震基準を満足しない既存不適格住宅の耐震改修はなかなか進んでいない。

震災の半年後、地震防災対策特別措置法が制定され、地震による被害の軽減に資する地震調査研究の推進を図るために地震調査研究推進本部が設置された。地震調査研究推進本部は、主要な活断層の調査、地震の長期評価、堆積平野の地下構造調査、地震動予測地図の作成、日本の地震活動の出版など、地震の発生や地震による地盤の揺れの解明、情報の公開などに多大な貢献をしてきた。最近では、地震動予測地図の高解像度化や長周期地震動の地震動予測地図なども手がけ、これらの成果を印刷媒体や地震ハザードステーション J-SHIS などを介して広く公開している。この結果、誰もが、予測結果に加え、基礎データやプログラムシステムを容易に入手できる環境が整ってきた。

また、地震現象の理解を目的として、GPS 連続観測網、高感度地震観測網 Hi-net、広帯域観測網 F-net、強震観測網 K-NET・KiK-net などの基盤的地震観測網が整備され、大量の観測記録が蓄積されてきた。F-net の記録は震源情報の公開へとつながり、Hi-net の記録は緊急地震速報にも活用され、観測記録が多面的に利用されつつある。また、消防庁予算で自治体が設置した計測震度計も整備・更新され、今では国内全市町村で地震観測記録が取得されている。強震観測網 K-NET・KiK-net で得られた大加速度記録は、構造物の耐震設計の考え方に大きな影響を及ぼしている。

さらに、文部科学省は、「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」（2002～2006 年度）、「地震・津波観測監視システムの構築」（2006～2009 年度）、「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」（2007～2011 年度）、「東海、東南海、南海地震連動性評価研究プロジェクト」（2008 年～2012 年度）、「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」（2008～2012 年度）などの大型プロジェクトを実施してきた。また、中央防災会議も、東海地震、東南海・南海地震、首都直下地震などに対する地震動予測や被害想定を実施し、結果を広く公表している。この結果、南海トラフを中心に、アスペリティと海山のもぐり込みとの関係や、付加体の構造なども明らかになりつつあり、震源や伝播経路の情報も蓄積されつつある。また、震源の

摩擦則などの解明と共に地震の発生シミュレーションなども具体化しつつある。

一方、構造物の耐震性能についての研究も、防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設（Eディフェンス）を中心に様々な成果が得られてきた。Eディフェンスによる多数の実大震動実験結果は、構造物の終局挙動を明らかにすると共に、その実験映像は市民の啓発に多大な貢献をしてきた。最近では、高層建物や免震建物の実験も行われ、長周期地震動に対する問題の所在を明らかにすると共に制震改修の効果の実証もされてきた。

建築物の耐震性能向上に関する進展も著しい。兵庫県南部地震において、免震構造物の効果が実証され、免震構造物が急増し、また、高層建物では制震装置の設置も一般化してきている。センシング技術の進展で、構造ヘルスマモニタリングの実施事例も増えている。2000年の建築基準法の改正に伴い、表層地盤の増幅や動的相互作用効果を考慮した設計法が導入され、免震構造の告示化も図られた。また、2003年十勝沖地震以降、長周期地震動に対する社会の関心も増大してきている。最近では、高層ビルの制震改修の実施事例も報告されている。このように、振動の制御を前提とした構造物が増えると共に、入力地震動の重要度が増している。

このように、震源域や地下構造の理解度が増し、強震動予測などの信頼性も格段に向上してきた。また、実大実験を通し、構造物の終局挙動に関する理解も深まってきた。建築界としても、これらの成果を生かした耐震設計が望まれるようになっている。

一方で、軟弱な地盤に建つ建築物の強震観測が取り残されてしまったため、都市域の建築物に作用する本当の入力と建物の有する実力が未解明のままになっている点は否めない。2004年新潟県中越地震における小千谷小学校での地盤記録と建物内記録の乖離、2007年中越沖地震や2009年駿河湾の地震などでの、原子力発電所敷地内の揺れの空間的変動の大きさなど、観測密度の増大とともに、建築物への入力地震動について説明が難しい問題も増えている。また、建物地震観測記録や、E-Defenseでの実大振動実験記録などには、未だ十分な説明ができていない事例も多く残っているように思われる。

今後、建築設計に用いる地震力をより適正なものにするためには、表層地盤の増幅、地盤から建物への入力、建物の応答性状などの理解をより一層高める必要がある。表層地盤の物性評価、非線形性や不整形性、基礎と地盤間の地盤のゆるみや接触非線形、地下逸散減衰効果や、建物応答増幅・立体振動効果などの現象の理解を深め挙動の予測技術を向上させると共に、より性能の高い免震・制震技術や構造同定技術の開発などを進めていく必要があり、振動運営委員会が果たすべき役割は大きい。

振動運営委員会では、兵庫県南部地震以降の16年間、建築振動研究の立場から、現象の理解、被害原因の解明、被害軽減策の策定などに取り組んできた。兵庫県南部地震以前に比べ、格段に理解が進んだ部分があれば、依然として理解不足の課題もあると思われる。本シンポジウムでは、この16年間、われわれは何ができた、何ができなかったのか、建築振動研究の立場で、考えることで、今後の振動研究の在り方について考えてみたい。ご参加の皆さまの活発な議論を期待する次第である。

阪神・淡路大震災後の振動運営委員会活動

振動運営委員会・渡壁 守正（戸田建設）

1. はじめに

振動運営委員会は1986年に発足して以来、今日までの24年間にわたり、耐震設計の発展に大きく貢献してきた[1]。現在の運営委員会の傘下にある小委員会は、地震荷重小委員会、免震構造小委員会、地盤震動小委員会、基礎構造系振動小委員会、建物の構造振動制御小委員会、強震観測小委員会、構造ヘルスマニタリング小委員会の7委員会である。耐震設計の発展は、画期的な発明・発見とは縁遠いものであり、飛躍的に進歩することはきわめて希であり、永年の研究の積み重ねによる成果が総合され進展してきたものである。地震災害の防止・軽減は、そのような地道な基礎研究が応用されて初めて建物の耐震設計あるいは都市防災に効果を及ぼすものと考ええる。

兵庫県南部地震から16年、その間にも様々な被害地震を経験している。地震被害の発生するたびに新たな問題点が露呈している。このような中、「阪神・淡路大震災を振り返り、来たる大地震に備える-建築振動研究に課せられたもの-」と題したシンポジウムを開催し、各小委員会が横断的に各委員会での研究成果を紹介し、議論することは有意義なことである。

振動運営委員会の傘下にある各小委員会の研究成果が耐震性や防災上どのように役だっているのかを横断的な視点で捉え、議論することで各小委員会の役割を顕在化させることが重要と考える。詳細については、以降の章で各小委員会の活動として紹介されているので、そちらに譲ることとし、本章では、各小委員会の主な活動と成果を中心に系譜としてまとめ簡単に概要を紹介する。

今後の振動運営委員会の研究活動においても、本シンポジウムで紹介されるような横断的な委員会間のつながりを活用していくことが重要であると考えている。さらに、振動運営委員会内外の委員会の方々との情報交換も進めることで、研究がより一層進展・深化することが期待される。

2. 振動運営委員会傘下にある小委員会の概要

まず、「建築振動工学の発展と耐震設計」のシンポジウム[2]で報告されている振動運営委員会の前身である振動分科会の発足と振動運営委員会の変遷および歴代の主査を表1に簡単に紹介し、阪神・淡路大震災後の振動運営委員会および委員会傘下にある小委員会の系譜を表2に示した。ここでは、現在の振動運営委員会傘下にある小委員会が震災後取り組んだ活動・成果の概要について以下で紹介する。表内の主な被害地震は気象庁の被害地震資料より調べ、最大震度5以上の地震を掲載している。[\[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/higai/#higai2006\]](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/higai/#higai2006)

2.1 地震荷重小委員会

位置付け：建築物の耐震設計で使われるべき地震荷重に関する学会案を作成する。

役割：本小委員会は地震に対する建築物の要求性能を満たす設計用地震荷重の与え方や今後の方向性等について検討することを目的とする。

活動は昭和45年にスタートし(初代主査：中川恭次)、既に40年近い歴史を持っている。その目的の一つが建築物の耐震設計で使われるべき地震荷重に関する学会案を作成することであった。静的

震度法から動的解析手法を利用した耐震設計法への移行を目指して、地震荷重に関する原案を作成することを目標としてスタートした。

地震荷重小委員会では、地震に対する建築物の要求性能を満たす設計用地震荷重の与え方やその今後の方向性等について検討し、地震被害調査結果や、強震動予測手法、建築物応答評価法それぞれの進展を踏まえ、学会独自の地震荷重評価法の提案や、地震荷重に関わる関連研究の整理などを行い、シンポジウム、講習会等で、それら当小委員会の成果を紹介し、必要に応じて刊行物にまとめることを主たる活動としている。

強震動、地盤応答、動的相互作用、建物応答、基礎・上部構造の構造特性を踏まえた設計クライテリアの評価など、関連する委員会が多く、細分化された学問領域を横断し、総合する役割を担っている。

<主な活動歴>

- 1996年9月 「活断層による地震と地震荷重」大会（近畿）構造部門（振動）PD
- 1998年1月 「多次元入力地震動と構造物の応答」刊行
- 1999年9月 「これからの地震荷重と今後の課題」大会（中国）構造部門（振動）PD
- 2000年6月 「地震荷重－内陸直下地震による強震動と建築物の応答」刊行
- 2005年9月 「最近の被害地震に学ぶ：地震動特性と地震荷重」大会（近畿）
構造部門（振動）PD、地盤振動小委員会と共催
- 2007年8月 「性能設計と地震荷重」大会（九州）構造部門（振動）PD
- 2008年3月 「地震荷重－性能設計への展望」刊行
- 2009年9月 「建物の耐震性能と耐震性向上技術－観測地震動と設計用入力地震動－」大会（東北）
構造部門（振動）振動運営委員会主催PDにおいて成果報告

2014年の建築物荷重指針・同解説の改定、杭基礎の二次設計を目指した建築基礎構造設計指針の改定に合わせて、兵庫県南部地震以降に蓄積してきた知見を踏まえ、反映可能な地震荷重設定法、設計方法（計算手法）などを整備する。また、その前段階として、海溝型地震や内陸直下地震時において懸念される過大な予測地震動を念頭に、耐震性能を的確に評価できる応答指標とそのクライテリア、それらを踏まえた設計用地震荷重の設定方法の提案を行う。そのためのシンポジウム開催や刊行物の作成のための活動が計画されている。

2.2 免震構造小委員会

位置付け：2000年の建築基準法の改正施行により、免震構造の告示計算が示され、免震部材の認定制度も始まった。法整備が進む一方、戸建て免震と超高層免震建物も増え、設計用入力地震動の設定、免震部材の大型化に伴う性能評価や施工上の問題、上部構造の設計クライテリアなどの新たな問題も出てきている。これらの問題を総合的に評価し、免震構造の設計体系を議論できる場として本委員会が設置された。

役割：本小委員会では免震構造の最新の研究成果などを反映させた「免震構造設計指針」の改訂版を作成することを目的とする。

2001年9月に免震構造設計指針（第3版）を刊行し、当時の免震構造小委員会は解散した。いま免震構造は戸建て住宅、超高層建築、原子力関連施設まで適用されるようになった。しかし、長周期地震動や震源近傍での大入力地震動による建物応答、免震部材の種類や性能が多様化するなど2001

年当時とは免震構造の状況も大きく変わってきている。

また、2000年の建築基準法の改正施行により、免震構造の告示計算が示され、免震部材の認定制度も始まった。法整備が進む一方、設計用入力地震動の設定、免震部材の大型化に伴う性能評価や施工上の問題、上部構造の設計クライテリアなどの新たな問題も出てきている。これらの問題を総合的に評価し、免震構造の設計体系を議論するために、免震構造小委員会を2009年に設置した。

免震構造の最新の研究成果などを反映させた「免震構造設計指針」の改訂版を作成することを最終的な目的として活動中である。

<主な活動歴>

1997年9月 「耐震設計における性能評価-耐震・免震・制震（振）構造の比較」大会（関東）構造部門（振動）PD

2000年9月 「耐震技術：20世紀にしてきたこと、21世紀にすべきこと」大会（関東）構造部門（振動）PD、建物の構造振動制御小委員会と共催

2001年 免震構造設計指針の第3版を刊行

- ・1995年兵庫県南部地震を契機に免震建築棟数が増加
- ・用途の多様化、免震システムの多様化の進展、ゴム材料はG4が主流
- ・積層ゴムの高面圧化、低摩擦支承や直道転がり支承などによる長周期化
- ・各種標準模擬地震動（BCJ波、臨海波、横浜波、大阪波）
- ・免震告示（平12建告2009号）による大臣認定不要ルートが創設
- ・免震部材が指定建築材料に指定（平12建告1446号）
- ・超高層建物への適用が本格化、余裕度検討は不要
- ・告示波+サイト波3波+標準3波が用いられ、表層地盤による地震動の増幅考慮

2009年9月 「建物の耐震性能と耐震性向上技術-建物の耐震性能と評価指標-」大会（東北）構造部門（振動）振動運営委員会主催PDにおいて成果報告

過去の免震構造小委員会の成果としては1989年に免震構造設計指針の初版を刊行し、1993年に第2版、そして2001年に現行の第3版を刊行した。これら免震構造小委員会の成果を継承し、現委員会では2013年に改訂版（第4版）の刊行を目指している。

2.3 地盤震動小委員会

位置付け：強震動・地盤震動に関する研究上の諸問題、研究状況、動向を把握し、シンポジウムを開催して、地盤震動研究の方向付けを行う。その成果を生かし、設計用地震動作成手法の高精度化に貢献する。

役割：毎年秋に地盤震動シンポジウムを開催し、上記目的を達成する。加えて、年次大会時期にあわせ、開催地の地盤震動研究に関して情報を交換する地域交流会を開催。以上の活動を通し、建築学会員に強震動・地盤震動研究の情報を発信する。

<主な活動歴>

毎年秋に地盤震動シンポジウムを開催

1995～1998年 第23～26回の4年間は「兵庫県南部地震の強震動の解明」に焦点を当てたシンポジウムを開催

2002～2005年 第30～34回の5年間は「地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか」と題し、入

力地震動の作成法を提案した。さらに、2006年以降は頻発した内陸地殻内地震を取り上げ、震源近傍の地震動の解釈と設計用入力地震動への反映について議論

2004年8月 「強震動予測と設計用入力地震動」大会（東北）構造部門（振動）PD

2005年9月 「最近の被害地震に学ぶ：地震動特性と地震荷重」大会（近畿）構造部門（振動）PD、地震荷重小委員会と共催

2009年9月 「建物の耐震性能と耐震性向上技術-観測地震動と設計用入力地震動-」大会（東北）構造部門（振動）振動運営委員会主催PDにおいて成果報告

2010年9月 「兵庫県南部地震から15年耐-建物への入力地震動はどこまで解明されたか-」大会（富山）構造部門（振動）、基礎構造系振動小委員会と共催

兵庫県南部地震以降の精力的研究によって地震動を定量的に予測する技術は急速に進展し、シンポジウムの開催や刊行物の出版を通して地盤振動小委員会が果たしてきた役割は大きいと自負している。また、地震動の評価技術の成果を生かして、地震調査推進本部から全国の地震発生域の長期発生予測に基づいたシナリオ地震予測地図が続々と公表されている。これら強震動予測波形の精度は全国的に展開された観測網による地震記録によって検証されつつある。一方、近年頻発している内陸地殻内地震の震源近傍では、その観測地震動の加速度レベル、あるいはそのマグニチュードの割には建物被害が軽微であった。これは観測や予測が示す地震動と設計用の地震動にギャップがあることを意味する。このギャップは兵庫県南部地震の被害率からも指摘されてきた。巨大地震の発生が危惧されている現在、その定量化が急務であり、今後取り組むべき課題と認識して、活動中である。

2.4 基礎構造系振動小委員会

位置付け：上部構造と基礎構造の耐震問題を動的相互作用の観点から捉える。動的相互作用には、建物への入力地震動への寄与（表層地盤増幅と入力損失）と上部構造の振動特性への寄与（周期の伸びと逸散減衰の考慮）があり、両面からの検討を行い、動的相互作用現象の解明と耐震設計への導入について、知見を蓄積する。

役割：基礎構造の耐震性の取り扱いには、上部構造の挙動と表層地盤の挙動が関係し、両者の寄与について明確にする必要がある。1995年兵庫県南部地震後は、特に大地震を想定した、非線形相互作用（杭の挙動・被害、地盤の非線形挙動・液状化）の解明が行われている。一方耐震設計への導入については、複雑な動的相互作用現象のわかりやすく説明する必要があり、耐震設計の合理化に向けた現象の解明と簡易化に力を注いでいる。

建物と地盤の動的相互作用（建物周期や減衰定数及び建物への入力地震動）が建物・基礎の地震時応答に与える影響を明確にすることを目的として、活動している。

1998年の建築基準法改正により、地盤増幅と動的相互作用を耐震設計に取り入れることが可能となった。また、最近の地震被害からも相互作用が構造物の応答に与える影響が大きいことが再確認されている。本委員会では、相互作用の観点から建物への入力地震動を的確に捉えるための検討を行うとともに、構造物の地震時応答をよりの確に把握するために相互作用研究を行い、現象の解明と耐震設計の合理化を目指している。2006年には「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計」を刊行し、動的相互作用のより平易な説明や簡易評価法を充実させた。また講習会を開催するなどし、内容の理解への支援にも注いでいる。「第8回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム」

や「非線形相互作用と耐震設計ワークショップ」では、非線形相互作用の解明と設計への組み込みに着目した検討を行った。非線形相互作用の現象解明については、最近観測される強震記録と建物被害の関係を明らかにするために、建物・地盤のシミュレーション解析を行い、建物被害に関与する動的相互作用、基礎構造のモデル化等の影響について検討した。

<主な活動歴>

- 1996年4月 「入門・建物と地盤の動的相互作用（刊行物）」
学会としては、初めての動的相互作用の出版物
- 2006年2月 「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計（関係者では、通称緑本）」
動的相互作用の現象をわかりやすく解説することを目的として出版し、種々の基礎構造形式に対応するための簡易な地盤ばねや減衰特性の評価法についてまとめられている。
- 2006年12月 「第8回構造物と地盤の動的相互作用」シンポジウム開催
- 2008年10月 「非線形相互作用と耐震設計」ワークショップ開催
- 2009年9月 「建物の耐震性能と耐震性向上技術-建物の耐震性と相互作用-」大会（東北）構造部門（振動）振動運営委員会主催PDにおいて成果報告
- 2010年9月 「兵庫県南部地震から15年耐-建物への入力地震動はどこまで解明されたか-」大会（富山）構造部門（振動）、地盤震動小委員会と共催

今後は、相互作用を取り入れた簡易な計算法、計算例の見直し、基礎の2次設計に向けた研究の検討、非線形相互作用の現象解明と耐震設計法への展開等を基礎構造運営委員会・杭基礎の耐震設計小委員会との連携をしながら検討することを考えている。

2.5 建物の構造振動制御小委員会

位置付け：地震・風などによって振動する建物の安全性、機能性、居住性を向上させるために、建物応答制御の考え方と技術を振動論的立場から整理する。

役割：本小委員会は、今までに提案された制御技術を原理的・本質的な観点から整理し、本技術が正しく普及される環境をさらに整える。

建物の振動制御は、建築計画の初期段階で考慮すべき技術の一つとして定着し、この20年間に個々の設計レベルで様々な取り組みがなされてきた。現在、主な振動制御の考え方は出揃った感がある。その一方で、設計者からは、多様な技術の中から目的に適ったものを効率的に選択する情報が望まれている。振動制御技術は、従来の建築学科の学習カリキュラムに組み込まれていない制御や機械に関する知識を多数要求しており、解説書も設計者の立場からは難しく、取り付き難い分野である。本小委員会は、今までに提案された制御技術を原理的・本質的な観点から整理し、今後とも本技術が正しく普及される環境を整えることを目的として活動中である。

<主な活動歴>

- 2000年9月 「耐震技術：20世紀にしてきたこと、21世紀にすべきこと」大会（関東）構造部門（振動）PD、免震構造小委員会と共催
- 2002年 「建築構造物のアクティブ振動制御のこれまでの歩みと将来-構造性能の向上にむけて-」シンポジウム開催
論文560編（1960-2001年）の抄録、43棟の国内適用事例集

- 2005 年 「建築物のためのアクティブ・セミアクティブ振動制御設計」シンポジウム開催
阪神・淡路大震災 ⇒ セミアクティブ制御
- 2006 年 「アクティブ・セミアクティブ振動制御技術の現状」を刊行
制御効果の検証法の整理 ⇒ 計測・同定との連携
- 2007 年 「振動制御技術と新しい展開—交通振動から地震まで—」シンポジウム開催
大地震, 中小地震, 交通振動, 環境振動
質量項操作, セミアクティブ免震, 上下免震, 除振・・・
- 2009 年 9 月 「建物の耐震性能と耐震性向上技術-建物の耐震性・機能性を向上させる新しい対策技術-」大会(東北)構造部門(振動)振動運営委員会主催PDにおいて成果報告
- 2010 年 「建築構造物の振動制御入門」を刊行
- 2011 年 「建築構造物の振動制御の現状」シンポジウム開催予定(5月)

そこで、研究開発や技術の詳細解説という従来の委員会活動の視点を変えて、適用という視点から振動制御技術を大まかに把握できる資料の作成に取り組もうとしている。この委員会活動の方向性に関しては合意が得られており、2011年度からは、今までに提案された制御技術を原理的・本質的な観点から整理し、今後とも本技術が正しく普及される環境を整えるために、本格的な委員会活動が開始されることになっている。また、本シンポジウムにおける議論や会場からの意見も取り入れて、有用な活動成果が発表できるように心掛けたいと考えている。

2.6 強震観測小委員会

位置付け：強震記録に基づく、各地域の地震動及び構造物の地震応答研究に関する情報交換と審議の場である。

役割：強震観測に係わる状況、技術、研究の動向を調査し、強震記録の有効活用と強震観測の更なる発展に資する。

兵庫県南部地震以来、強震観測のネットワークが種々組織されているが、建築物における観測状況は十分とは言えず、建築物の耐震性の実証あるいは耐震設計法の実証データはまだ十分とはいえない。短期的にこのような状況を打破するためには、現況の観測網を有効利用することが望ましく、当委員会はそのリーダー的役割を果たすことが期待される。また、長期的には公的機関による観測網の整備が望まれるが、種々の周辺技術や知見を総合して強震観測の有用性を明らかにし、強震観測の普及に貢献することも、本委員会の任務と考えている。

<主な活動歴>

- 1995 年 4 月 「強震データの活用に関するシンポジウム-強震データベースの現状と共同利用の試み-」シンポジウムの開催
- 2000 年 12 月 「強震データの活用に関するシンポジウム-建物の耐震性能設計を目指した強震観測-」シンポジウムの開催
- 2002 年 12 月 「強震データの活用に関するシンポジウム-建物の強震観測に関する将来像-」シンポジウムの開催
- 2003 年 建物の強震観測に関する将来像(案)の提案(活動報告)
- 2005 年 3 月 「強震データの活用に関するシンポジウム-最近の地震に建築物はどう応答したか-」シンポジウムの開催

2006年9月 「建築物の地震時挙動を知るために：建築物における強震観測の意義」大会（関東）
構造部門（振動）PD，構造ヘルスマonitoring小委員会と共催

2008年12月 「強震データの活用に関するシンポジウム-社会に役立つ強震観測-」シンポジウムの開催

2009年 自治体震度情報ネットワークの更新に関する要望書(消防庁宛)

強震観測の重要性の喧伝や強震観測の普及に関しては、5回に渡る主催シンポジウムや、他の機会をとらえて常に情報発信を行ってきた。しかしながら、建物の強震観測の普及状況は十分とは言えない。今後とも建物の強震観測に対する一般の理解を深め、特に建物の強震観測の普及を意識し、一般ユーザー、設計者などにも分かりやすい解説書など整備中である。

2.7 構造ヘルスマonitoring小委員会

位置付け：建築構造物の振動観測により、構造物の剛性同定を行い、損傷の程度や動的性能評価を行い、以って建物の維持管理に役立てる技術

役割：建物の長寿命化や耐震性能の向上を定量的に評価する技術の確立を目指し、安全で安心な社会の実現に資する。

環境保全および省エネルギーの観点から、良質なストックとなる建物の比率を高めることは時代の要請である。良質なストックでありつづけるためには、機能・性能を常に良い状態に保つ良質なメンテナンスが必要条件である。その基本は、人の健康診断と同じく、建物の機能・性能状態を常に把握し、正確な情報に基づいた予防措置を講じることにある。本小委員会は、こうした状況に鑑み、建物の機能・性能の状態を自動的に把握・評価する仕組みについて、学術的な観点から研究することを目的として活動中である。

本小委員会は平成14年4月より活動を開始し、国内外の構造ヘルスマonitoring技術に関する調査研究を行ってきた。発足当初は、光ファイバーセンサー、形状記憶合金、加速度センサーなどセンサーに関する調査、構造同定法などの解析手法の調査研究などが活動の中心であった。その後、センサー技術の進歩とインターネット環境の格段の進歩により、データ蓄積、データ転送、などの技術進歩により安価で信頼性のあるセンサーとコンピューティングの融合が瞬く間に一般化した。一方で、建築構造物や土木構造物の振動計測システムの適用例が増加するに従って、多量のデータをどのように管理し、設計やビル管理にどのように反映させるかといったソフト面での遅れが顕著となってきた。

この間、新築の構造技術開発から、既存建物の有効利用や耐震補強技術の開発へ社会的要請が変化するに従って、構造ヘルスマonitoringに対する社会の認識も変化してきた。このような現状を踏まえると、持続可能な社会システムの構築に向け、構造ヘルスマonitoring技術による建築資産の管理運営や知識集約的産業の創造などは、本小委員会が今後担っていくべき重要な役割と考える。

<主な活動歴>

2002年4月 「振動・波動に基づく構造性能評価WG」として活動

2002年12月 構造ヘルスマonitoring小委員会に昇格

2003年9月 「リスク制御の視点からの構造性能表示」大会（東海）構造部門（振動）PD

2005年12月 建築構造物の健康診断に関するワークショップ

2006年9月 「建築物の地震時挙動を知るために：建築物における強震観測の意義」大会（関東）
構造部門（振動）PD，強震観測小委員会と共催

- 2008年9月 「構造ヘルスマモニタリングが作る安全・安心な建築空間」
大会（中国）構造部門（振動）PD
- 2009年9月 主題テーマ「建物の耐震性能と耐震性向上技術」-建築の構造性能モニタリング-
大会（東北）構造部門（振動）振動運営委員会主催PDにおいて成果報告
- 2010年7月 第5回World Conference on Structural Control and Monitoring, 東京,
オーガナイズドセッションを企画

最新の技術動向について討論するため、国内外のワークショップあるいはシンポジウムなどを企画・開催し、構造ヘルスマモニタリング技術についての重要性を研究者、技術者、設計者などに周知した。今後は、建築分野におけるシステム同定やセンサ技術などの構造ヘルスマモニタリングシステム実現に欠かせない技術についての調査研究をさらに進めると共に、構造ヘルスマモニタリングの必要性・有効性に加え実現へのロードマップの基礎をまとめ、今後の研究の方向性について議論し、建築学会会員にその成果を情報提供していきたいと考えている。

3. まとめ

以上本章では、阪神・淡路大震災後の振動運営委員会および傘下の小委員会の主な活動内容について記述した。現在活動中の各小委員会の詳細内容は、各委員会の担当者が以降の章で詳しく記述されているので、そちらを参照いただきたい。

本章をまとめるに当たり、各小委員会の主査の方々には多大なるご協力と助言をいただいた。また、現振動運営委員会の福和伸夫主査（名古屋大学）、宮本裕司幹事（大阪大学）・壇一男幹事（清水建設）の助言をいただいた。さらに、系譜作成に当たっては日本建築学会研究事業グループの伏見朋枝嬢に一部ご協力を頂いた。ここに記して、感謝申し上げます。

各小委員会での活動歴に関わる資料の一部は、論文情報ナビゲータ[3]により検索し整理している。

参考文献

- [1] 日本建築学会・構造委員会・振動運営委員会：建築振動工学の発展と耐震設計，2007.4
- [2] 日本建築学会・構造委員会・振動運営委員会、西谷 章：建築振動工学の発展と耐震設計—振動運営委員会の活動の歴史—，pp.3-8, 2007.4
- [3] 国立情報学研究所：CiNii 論文情報ナビゲータ

表2 阪神・淡路大震災以降の振動運営委員会および傘下小委員会の系譜

平成23年2月現在

阪神・淡路大震災

	1995年度	1996年度	1997年度	1998年度	1999年度	2000年度	2001年度	2002年度	2003年度	2004年度	2005年度	2006年度	2007年度	2008年度	2009年度	2010年度
振動運営委員会	主査:井上 豊	主査:南 忠夫	主査:西川孝夫				主査:篠崎祐三				主査:三浦賢治				主査:福和伸夫	
主な活動成果													・「建築振動工学の発展と耐震設計」運営委員会傘下の小委員会による横断的シンポジウムを開催	・「建物の耐震性能と耐震設計向上技術」大会PD開催	・「阪神・淡路大震災を振り返り、来る大地震に備える」運営委員会傘下の小委員会による横断的シンポジウムを開催	
地震荷重小委員会	主査:西川孝夫	主査:石山祐二				主査:藤堂正喜				主査:大川 出				主査:林 康裕		
主な活動成果		・「兵庫県南部地震の地震被害に学ぶ」シンポジウム	・「多次元入力地震動と構造物の応答」(1998年1月刊行)	・「これからの地震荷重と今後の課題」大会PD開催(1999年9月)	・「地震荷重-内陸直下地震による強震動と建築物の応答」(2000年6月刊行)			・「地震荷重-性能設計への展望」シンポジウム開催(2003年11月)					・「地震荷重-性能設計への展望」(2007年刊行)	・振動運営委員会の傘下にある小委員会と協賛でPDを企画(2009年9月)		
地盤震動小委員会	主査:北川良和	主査:瀬尾和大				主査:萩尾堅治				主査:川瀬 博				主査:加藤研一		
主な活動成果	・第23回地盤震動シンポジウム「1995年兵庫県南部地震で試された地盤震動研究」を開催	・第24回シンポジウム「1995年兵庫県南部地震で試された地盤震動研究(その2)-大阪平野について考える-」を開催	・第25回シンポジウム「1995年兵庫県南部地震で試された地盤震動研究(その3)-震源域での強震動予測と耐震設計について考える-」を開催	・第26回シンポジウム「1995年兵庫県南部地震で試された地盤震動研究(その4総括)-強震動予測の将来展望-」を開催	・第27回シンポジウム「地域特性を考慮した地盤震動予測」を開催	・第28回シンポジウム「震源近傍の強震動と設計用入力地震動-トルコ・コジャエリ地震、台湾・集集地震の経験を踏まえて-」を開催	・第29回シンポジウム「改正基準法の地震動規定を考慮する-地盤震動研究から見た限界耐力評価法の評価と課題-」を開催	・第30回シンポジウム「設計用地震動は、工学的基礎で決められるか? -地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その1)-」を開催	・第31回シンポジウム「震源断層を考慮した設計用入力地震動:地域波策定の現状と将来展望-耐震設計に如何に活かすか(その2)-」を開催	・第32回シンポジウム「表層地盤の増幅特性評価の現状と課題-地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その3)-」を開催	・第33回シンポジウム「地盤震動予測地因を考える-如何に活かすか(その4)-」を開催	・第34回シンポジウム「設計用入力地震動作成指針に向けて-地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その5:総括)-」を開催	・第35回シンポジウム「顕著する内陸地殻内地震の地盤震動とその解釈-新・入力地震動作成手法の使い方と検証(その1)-」を開催	・第36回シンポジウム「度重なる被害地震から設計用入力地震動を考える-新・入力地震動作成手法の使い方と検証(その2)-」を開催	・第37回シンポジウム「地盤震動研究から見た長期地盤震動」を開催	・第38回シンポジウム「短周期地震動の発生要因はどこまで解明されたか」を開催
基礎構造系振動小委員会	主査:井口道雄	主査:時松孝次				主査:福和伸夫				主査:宮本裕司				主査:飯場正紀		
主な活動成果	・1995年第4回「非線形相互作用問題の現状と課題」シンポジウム開催	・「入門・建物と地盤の動的相互作用」(1996年4月刊行)	・「兵庫県南部地震・強震記録と設計用地震動との関係」シンポジウム開催	・「近年の大地震の教訓と相互作用の設計への展開」シンポジウム開催	・「相互作用の過去・現在・未来、相互作用と性能設計」シンポジウム開催	・「地震動と地震荷重を繋ぐ」大会PD開催	・「動的相互作用を考慮した耐震設計」	・「表層地盤の増幅特性評価の現状と課題」シンポジウム開催	・「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計」(2006年2月刊行)	・「非線形相互作用の解明と設計への組み込み」シンポジウム開催(2006年12月)	・「非線形相互作用と耐震設計(最近観測される強震記録と建物被害の関係を考える)」・増大する地震動レベルと建物の終局耐震設計	大会PD主題解説テーマ「建物の耐震性と相互作用」	・兵庫県南部地震から15年:建物への入力地震動はどこまで解明されたか」大会PDを地盤震動小委員会と共催			
免震構造小委員会	主査:和田 章				主査:秋山 宏(免震構造小委員会の廃止に伴い、耐震設計小委員会設置)				主査:北村春幸(耐震設計小委員会)				主査:高山峯夫(免震構造小委員会)			
主な活動成果		・「免震構造の研究と設計」シンポジウム開催					・「免震構造設計指針」(第3版)刊行				・「建築物の終局耐震性能評価手法の現状と課題」シンポジウム(2005年5月)		・「増大する地震動レベルと建物の終局耐震性の課題と展望」シンポジウム(2008年12月)	・「建築物の耐震性能評価手法の現状と課題」(2009年2月刊行)	大会PD主題解説テーマ「建物の耐震性能と評価指標」(2009年9月)	
構造物の振動制御小委員会	主査:井上 豊(振動制御小委員会)				主査:西谷 章(構造物の振動制御小委員会)				主査:西谷章(建築物振動制御設計資料作成小委員会)				主査:長島一郎(建築構造物振動制御小委員会)		主査:池田芳樹(建物の構造振動制御小委員会)	
主な活動成果			・第2回日本制震(振)シンポジウム開催(2000年11月)	・Earthquake Eng. Struct. Dyn誌に日本のアクティブ制御技術を紹介(2001年11月)	・「建築物のアクティブ制御のこれまでの歩みと将来」シンポジウム開催、文献抄録集と適用事例集を配布(2002年11月)	・第3回日本制震(振)シンポジウム開催(2004年12月)	・「建築物のためのアクティブ・セミアクティブ振動制御設計」シンポジウム開催(2005年5月)	・「アクティブ振動制御技術の現状」シンポジウム開催(2006年12月)	・「アクティブ振動制御技術と新しい展開-交通振動から地震まで」シンポジウム開催(2007年12月)	・「振動制御技術と新しい展開-交通振動から地震まで」シンポジウム開催(2007年12月)	大会PD主題解説テーマ「建物の耐震性・機能性を向上させる対策技術」(2009年9月)	・5WCSMオーガナイズドセッション「観測による実構造物の制御効果の実証」企画(2010年7月)	・「建築構造物の振動制御入門」刊行			
強震観測小委員会	主査:北川良和				主査:若松邦夫				主査:片岡俊一				主査:鹿島俊英			
主な活動成果			・第2回強震データの活用に関するシンポジウム「建物の耐震性能設計を目指した強震観測」2000年12月		・「第3回強震データの活用に関するシンポジウム」開催(2002年12月)	・「第4回強震データの活用に関するシンポジウム」開催(2005年3月)	・「第5回強震データの活用に関するシンポジウム」開催(2008年12月)									
構造ヘルスマニタリング小委員会					主査:三田 彰(2001.9~2003.8)(振動・波動に基づく構造的評価WG)				主査:三田 彰(2002年4月~2006年3月)				主査:渡壁守正		主査:西村 功	
主な活動成果					当初、半年間「振動・波動に基づく構造的評価WG」で活動した後、小委員会が設置	・米国のNSFと連携して、日米ワークショップを開催	・「リスク制御の視点からの構造的表示」大会PD開催(2003年9月)	・「建築物の健康診断に関するワークショップ」開催(2005年12月)	・「建築物の地震時挙動を知るために」大会PD強震観測小委員会と共催(2006年9月)	・「構造ヘルスマニタリングがつくる安全・安心な建築空間」大会PD開催(2008年9月)	大会PD主題解説テーマ「建物の構造的ヘルスマニタリング」(2009年9月)	・5WCSMオーガナイズドセッション企画				
主な被害地震	1995年1月17日午前5時46分 兵庫県南部地震、Mj7.3、最大震度7 死者6,434人、行方不明者3人 負傷者43,792人 住家被害約64万棟 被害総額 約10兆円				2000年10月6日鳥取県西部地震、Mj7.3、最大震度6強	2001年3月24日茨城県地震、Mj6.7、最大震度6弱	2003年5月26日宮城県沖の地震、Mj7.1、最大震度6弱	2004年10月23日新潟県中越地震、Mj6.8、最大震度7	2005年3月20日福岡県西方沖地震、Mj7.0、最大震度6弱	2005年8月16日宮城県沖の地震、Mj7.2、最大震度6弱	2007年3月25日能登半島地震、Mj6.9、最大震度6強	2007年7月16日新潟県中越沖地震、Mj6.8、最大震度6強	2008年6月14日岩手・宮城内陸地震、Mj7.2、最大震度6強	2008年7月24日岩手沿岸北部地震、Mj6.8、最大震度6弱	2009年8月11日駿河湾の地震、Mj6.5、最大震度6弱	
補足	<ul style="list-style-type: none"> ・地震災害委員会、強震観測運営委員会、強震データ小委員会(主査:瀬尾和大) ・「第1回強震データの活用に関するシンポジウム」を開催(1994年1月) ・動的な外乱に対する設計合同小委員会(1995年度、主査:岡田恒男) ・設計体系小委員会(1995年度~1996年度、主査:秋山 宏) 															

阪神・淡路大震災後の地震被害軽減に向けたプロジェクト

振動運営委員会・壇 一男（清水建設）

1. はじめに

本稿では、1995年兵庫県南部地震(M_j 7.3)における震度7の震災の帯を引き起こした強震動パルスに関連するプロジェクトおよび2003年十勝沖地震(M_j 8.0)で石油タンクの火災を引き起こした長周期地震動に関連するプロジェクトを、地震の現象を客観的にとらえる観測、地震の現象を解明もしくは予測する調査研究および実験、震災を防ぐための実務展開に分けて紹介する。

観測については、防災科学技術研究所による地震観測、国土地理院によるGPS観測、総務省消防庁による震度情報ネットワーク、および気象庁による緊急地震速報を紹介する。調査研究については、地震調査研究推進本部による活断層の長期評価と強震動評価、日本活断層学会の設立、文部科学省による大都市大震災軽減化特別プロジェクトと東南海・南海地震における調査研究、および土木学会と日本建築学会による海溝型巨大地震対策への提言を紹介する。また、実験については、防災科学技術研究所のE-ディフェンスによる実験を紹介し、実務展開については、大阪府と大阪市による設計用入力地震動の策定、愛知県設計用入力地震動研究協議会による設計用入力地震動の策定、福岡市による警固断層帯南東部を考慮した条例の改正、原子力安全委員会における発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針の改訂、国土交通省による設計用長周期地震動の作成手法、日本構造技術者協会による性能設計法の提案、および中央防災会議による地震対策の大綱を紹介する。

2. 観測

2.1 防災科学技術研究所による地震観測

(1) K-NET(強震観測網)¹⁾とKiK-net(基盤強震観測網)²⁾

1995年の阪神・淡路大震災では、日本における強震観測体制に対する反省がなされ、日本のどこで地震が発生したとしても必ず被害地域での記録が取得でき、しかも必要としている全ての人々が、それらの強震記録を自由に利用できる強震観測・データ流通システムを構築する必要性が認識された。これをうけ、防災科学技術研究所により、全国規模の強震観測網K-NET(強震観測網)の整備が開始された(藤原・他, 2007)³⁾。これは、全国を約25 kmメッシュで覆う強震観測網であり、1996年6月より運用を開始した。さらに、1995年7月には地震防災対策特別措置法が成立し、当時の総理府に地震調査研究推進本部(現在は文部科学省内)が設置され、基盤的地震観測網と呼ばれる総合的な地震観測網の整備が開始された。その一環としてKiK-net(基盤強震観測網)と呼ばれる地表及び地中での強震観測網の整備が行われた。現在、K-NETおよびKiK-netの観測点数は約1,700ヶ所に達しており、すべてインターネットを介して公開されている。

K-NETとKiK-netで得られた記録は、地震の震源特性や地盤中を伝わる地震波動の減衰や増幅の特性を解明するうえで、非常に役に立っている。また、日本国内だけではなく、海外でも活用されており、地震学、地震工学、耐震工学の分野で重要な位置を占めている。

(2) Hi-net(高感度地震観測網)⁴⁾とF-net(広帯域地震観測網)⁵⁾

同じく、阪神・淡路大震災のあと、基盤的地震観測網の一環として、防災科学技術研究所によりHi-net(高感度地震観測網)およびF-net(広帯域地震観測網)も整備された。Hi-netの観測点数は、現在、約850か所に達しており、微小地震に対する検知能力は格段に向上した。一方、F-netの観測点数は、現在、約70カ所で、震源メカニズムの決定に大いに力を発揮している。

Hi-netによる地震観測の成果のひとつとして、深部低周波地震によく似た低周波の波動が火山性微動のように非常に長く継続する現象が、西南日本で広範囲に発生していることが発見された(Obara, 2002)⁶⁾。これは深部低周波微動と呼ばれ、深さ30 km程度を震源とし、西南日本に沈み込むフィリピン海プレートの走向と平行に、総延長600 kmの範囲で発生している。現在、深部低周波微動を用いた地震発生の解明がすすめられている。

2.2 国土地理院によるGPS(全地球測位システム)観測⁷⁾

阪神・淡路大震災以前は210点だった国土地理院によるGPS観測点は、現在では1200点以上に増設されている。このGPS連続観測によって、従来、三角測量の結果から指摘されていた東北地方から新潟にかけての日本海沿岸、さらに中部・近畿地方へと連なる変形集中帯の存在がより明瞭なものとなった(Sagiya *et al.*, 2000)⁸⁾。この変形集中帯はひずみ集中帯と呼ばれ、大地震との関連が注目されている。図1(海洋研究開発機構のパンフレットに加筆)⁹⁾に示すように、東北・北海道地方日本海沿岸の日本海東縁ひずみ集中帯(大竹・他, 2002)¹⁰⁾では、近年、1964年新潟地震、1983年日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震等が発生している。一方、中部・近畿地方に連なる新潟-神戸ひずみ集中帯では江戸時代以降に多数の内陸大地震が発生している(Sagiya *et al.*, 2000)⁸⁾。こうしたひずみ集中と内陸地震発生との因果関係は必ずしも明らかにされていないが、周囲よりもひずみ蓄積速度が大きいためには大地震の発生頻度が高いと考えられている。

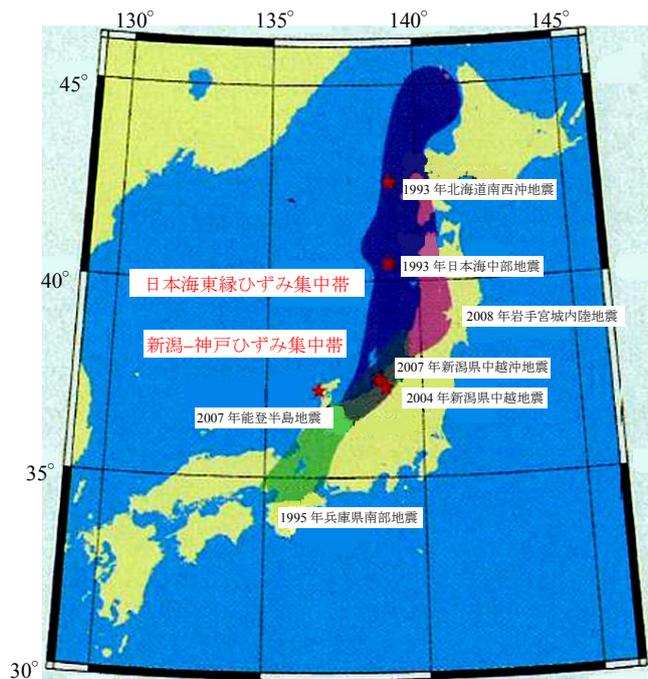


図1 日本海東縁ひずみ集中帯および新潟-神戸ひずみ集中帯と被害地震 (海洋研究開発機構のパンフレットに加筆)⁹⁾

2.3 総務省消防庁による震度情報ネットワーク¹¹⁾

総務省消防庁では、各自治体が設置した震度計、気象庁の震度計、防災科学技術研究所のK-NETの一部を利用し、全国で3,500点を超える震度情報ネットワークが構築されている。震度情報ネットワークは、国や地方公共団体の適切な初動対応および地域住民、企業等の防災対応に資する情報提供の実施などに有効に活用されている。

2.4 気象庁による緊急地震速報¹²⁾

緊急地震速報とは、気象庁の約 200 点の地震観測点および防災科学技術研究所の約 800 点の地震計の P 波初動データに基づいて、地震発生直後から震源の位置やマグニチュード M および震度などを短時間で推定し、 S 波主要動が到達する前に各地に配信する情報である。この情報を活用することにより、例えば、工事現場では作業員の安全確保が、工場および事業所では製造装置の緊急遮断と従業員の安全確保が、学校では職員と児童・生徒の安全確保が迅速にできるようになることが期待される。また、鉄道では列車の安全運行確保が可能となり、既に、このような取り組みが様々な分野で始まっている。

3. 調査研究および実験

3.1 地震調査研究推進本部による活断層の長期評価と強震動評価¹³⁾

1995年7月に地震防災対策特別措置法が成立し、当時の総理府に地震調査研究推進本部が設置された。地震調査研究推進本部では、地域ごとの地殻変動、活断層、地震活動の特徴を明らかにしたうえで、長期的な観点からの地震発生の可能性を評価している。また、この結果をうけて、これらの地震による強震動の評価も行われている。強震動の評価は、距離減衰式を用いた簡便法と断層モデルを用いた詳細法の2つで行われており、その結果は、全国地震動予測地図として公表されている。強震動の評価においては、断層モデルの設定や地下構造モデルの構築に関する標準的な方法が提案されており、実務に供されている。

3.2 日本活断層学会の設立¹⁴⁾

前節で述べたように、地震調査研究推進本部では、全国の主要活断層帯に関する基本的な調査を実施し、その成果に基づいて、地震が発生する可能性を長期評価として公表している。しかし、地震発生予測のための活断層データは、未だ十分に整備されたとはいえないこと、および活断層の幾何学的形状と震源過程の関係や大地震の発生様式をはじめとして、明らかにすべき科学的課題が数多く残されていることから、活断層に関する基礎研究のさらなる発展、多分野間の連携強化による総合的研究の推進、成果の普及を通じた社会貢献、ならびにそれらを担う人材の育成などを目的として、2007年に日本活断層学会が設立された。

3.3 文部科学省によるプロジェクト

文部科学省では、防災分野の事業として、下に述べる大都市大震災軽減化特別プロジェクトと東南海・南海地震における調査研究の2つが実施された。

(1) 大都市大震災軽減化特別プロジェクト¹⁵⁾

大都市大震災軽減化特別プロジェクトでは、首都圏や京阪神などの大都市圏において、大地震が発生した際の人的・物的被害を大幅に軽減するための科学的・技術基盤を確立することを目的とした研究開発が実施された。具体的には、大都市圏地殻構造調査研究、震動台活用による耐震性向上研究、災害対応戦略研究、および研究成果の地震防災対策への反映が行われた。

本プロジェクトは2006年度に終了し、その内容は2007年度からの新規事業である首都直下地震防災・減災特別プロジェクト¹⁶⁾に引き継がれた。

(2) 東南海・南海地震における調査研究¹⁷⁾

東南海・南海地震に関する調査研究では、地震発生可能性の長期評価と強震動や津波の予測を高精度で行うことを目的として、プレートの形状・動きや強震動・津波発生領域を詳細に推定するため、気象庁関係機関と連携して観測研究がすすめられている。具体的には、海底下地殻構造調査研究、微小地震分布を把握するための海底地震観測研究、および海底地震変動観測の精度向上のための技術開発が行われている。図2は、海洋研究開発機構⁹⁾による海底下地殻構造調査研究の成果の一部である。

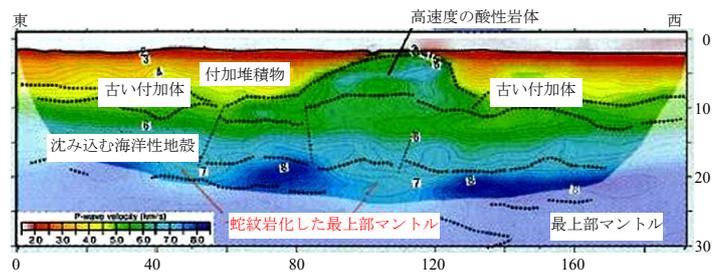


図2 紀伊半島沖の東南海・南海地震震源域のセグメント境界で発見された高速度・高密度岩体と破碎された脆弱な海洋地殻の構造イメージ(海洋研究開発機構のパンフレットに加筆)⁹⁾

3.4 土木学会と日本建築学会(2006)¹⁸⁾による海溝型巨大地震対策への提言

東海地震等の海溝型巨大地震では、既往の耐震補強で想定した地震動を上回る強い地震動の発生と、高層建物、長大橋、大型貯槽等の長い固有周期を有する構造物での耐震性が懸念されている。これを受け、日本建築学会と土木学会では共同研究を行い、巨大海溝型地震によって発生する長周期地震動を含む広帯域の地震動の予測および既存構造物の耐震診断と耐震補強などに関して、地震動、土木構造物、建築構造物の3つの側面から、総括的な提言を行っている。

3.5 防災科学技術研究所のE-ディフェンスによる実験(梶原, 2010)¹⁹⁾

防災科学技術研究所の兵庫耐震工学研究センターでは、地震防災における究極の検証手段として世界最大の実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)を稼動し、これまで、42課題の実験を実施している。E-ディフェンスの究極の目的は数値震動台(構造物の破壊過程を再現できるシミュレーションシステム)の開発であり、実験はそのためのデータ取得の位置付けにある。

(1) 構造安全性に関する実験

木造建物実験では、建築基準法が改正された1981年以前に建てられた木造建物を対象とし、そのような建物が持つ耐震性能の把握、耐震診断法の精度検証、耐震補強の効果が明らかにされている(写真1)。鉄筋コンクリート建物実験では、1970年代当時の一般的な構造設計手法により設計された鉄筋コンクリート構造物を想定し、地震時の三次元挙動や崩壊過程の解明、耐震補強の有用性、補強方法の違いによる補強効果の差などが明らかにされている(写真2)。地盤・基礎実験においては、これまでの模型実験では実施し得なかった規模の実験を実施することで、地震時における地盤・基礎構造物の挙動を再現し、これまで、不明であった地震時に基礎構造物を破壊させる原因を解明するためのデータが取得されている。4階鉄骨建物の実験では、阪神・淡路大震災を引き起こした兵庫県南部地震における観測地震波により、現行基準による設計であっても建物が層崩壊する場合がある事例を示すと共に、崩壊に至るまでの耐震性能・余裕度について検証されている(写真3)。また、2008年度には4種類の制振ブレースを設置した実大建物実験が行われ、建物レベルでの性能検証および設計等に資するデー

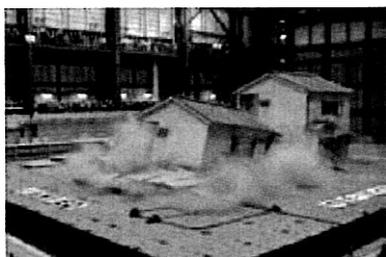


写真1 木造建物実験¹⁹⁾

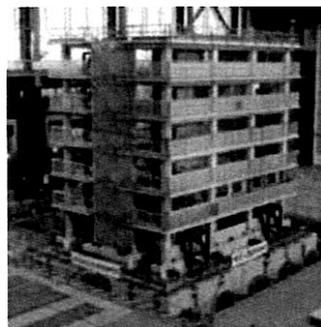


写真2 鉄筋コンクリート建物実験¹⁹⁾

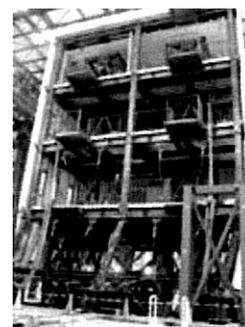


写真3 4階鉄骨建物の層破壊¹⁹⁾

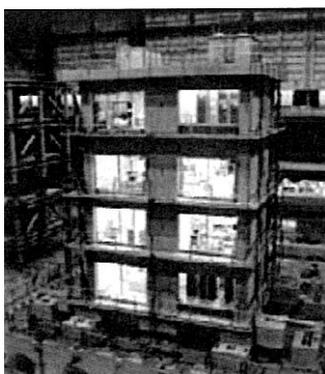


写真4 機能保持に関する実験¹⁹⁾

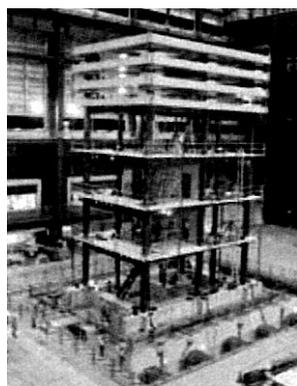


写真5 高層建物の実験¹⁹⁾

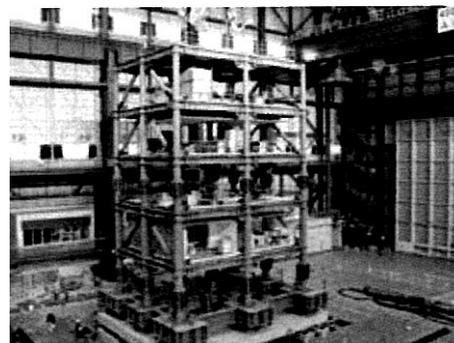


写真6 居住空間の実験¹⁹⁾

タが取得された。実験研究の進展に伴い、その目的は、これまでの破壊過程の解明から、次世代の高耐震技術の開発・実証に推移している。

一方、将来の数値振動台(シミュレーションシステム)の構築を目指した構造物崩壊シミュレーション技術の研究とともに、将来の都市地震災害の統合的な予測解析を目指し、構造物群に対する解析モデルの自動作成と非線形地震応答解析手法についても研究が行われている。

(2) 施設の機能性に関する実験

施設の機能性に関する実験では、病院を模擬したRC造4階建ての建物の内部に、撮影室、診察室、人工透析室、スタッフステーション、手術室、ICU室、病室、情報通信室が設けられ、それぞれの室内に撮影機器、手術室内精密機器、人工透析機、医療棚、情報通信機器等が設置された。加えて、屋上階には高架水槽および室内に給水配管、スプリンクラー等の設備も設置され、本格的な医療施設が再現された(写真4)。また、病院建築物については近年新たに建設されるものに免震構造が採用される場合が多いことから、耐震構造と基部に免震装置を設置した免震構造の2つの場合について実験が行われ、それぞれに、近い将来の発生を想定した長周期成分を含む地震動(三の丸波)と兵庫県南部地震で観測された地震動(JMA神戸波)で加振がされ多くの知見とデータが得られている。

一方、長周期地震動をうける高層建物の耐震性能評価および被害軽減を目的として、高層建物と等価な応答となる実験が実施されている。この実験の試験体は、1階から4階までの鋼構造架構を実規模で構築し、5階以上の高層階は5階分を1枚のコンクリート錘で代用して、これに想定建物と同様の剛性、強度、減衰性を与えるため、積層ゴムとダンパーが組み込まれ

ている(写真5)。加振した結果、上層部をモデル化したコンクリート鍾は大きくゆっくり揺れ、下層階の骨組に生じた変形は梁の短部に集中し、溶接部に破断が生じている。この実験結果を受けて、エネルギー吸収ダンパーを敷設した高層建物の応答低減効果を検証する実験も行われている。

(3) 居住空間の安全性に関する実験

居住空間の安全性に関する実験では、30階高層建物の最上階の応答を種々の居室空間に再現するため、5層の剛な鉄骨建物基部に、積層ゴムによる振動増幅層を設置した試験体が作成されている(写真6)。この実大部分モデルは、250秒以上に及ぶ長周期地震動により大振幅応答することができている。オフィス空間でコピー機が暴れまわる状況、本棚の転倒等、想定以上の危険性が内在することが確認されている。また、定量的に対策手法を検討するために、種々の耐震対策を施した家具、什器類を室内に設置し、その耐震効果を調査する実験が行われている。

4. 実務展開

4.1 大阪府と大阪市による設計用入力地震動の策定

大阪府(1997)²⁰⁾では、1995年の兵庫県南部地震の教訓を踏まえ、従来の南海トラフ沿いの海溝型地震だけではなく直下地震も加えて地震被害想定が行われている。このときの直下地震は、上町断層系、生駒断層系、有馬高槻構造線、および中央構造線による地震である。

その後、大阪府では上町断層帯の調査や大阪平野の地下構造の調査がすすみ、これをもとに、大阪府と大阪市では地震被害想定が再度実施された。この検討では、上町断層帯地震、生駒断層帯地震、有馬高槻断層帯地震、中央構造線断層帯地震、および東南海・南海地震の5つの地震が選択されている(大阪府, 2007)²¹⁾。このうち、上町断層帯地震による大振幅の地震動が注目をあびている。新聞報道(朝日新聞, 2008a)²²⁾によると、最も大きな地点では最大速度が368 cm/s、最大加速度が1614 cm/s²となっており、これらの値は、1995年の阪神・淡路大震災をうけて1997年に大阪市が「建築物の耐震性向上の指針」(現行指針)の中で示した数字より大幅に増え、74.5 cm/sだった最大速度は約5倍に、262 cm/s²だった最大加速度は約6倍になっている。

上町断層帯地震による大振幅の地震動の予測結果を耐震設計の実務でどう考慮していくかは慎重な議論が必要なところであり、大阪市危機管理室では、想定最大の数値は、断層の割れ方などが最悪の条件の場合に、最も揺れが大きくなる特定場所の値であること、上町断層帯の地震でどこでも必ずこのような揺れになるというわけではないことを指摘したうえで、今後の設計でどんな揺れを想定すべきか、既存の建物の安全性をどうみるかなどを現在の委員会より幅広い参加を求め、検討する必要があると述べている。

4.2 愛知県設計用入力地震動研究協議会による設計用入力地震動の策定(福和・他, 2001)²³⁾

名古屋地区では、阪神・淡路大震災をうけて、本格的な地震動予測のために、1999年に愛知県設計用入力地震動研究協議会が発足した。名古屋地区における設計用入力地震動を策定するにあたり採用された主な方針は以下のとおりである。

- 1) 一般建物ばかりでなく固有周期が長い免震・制震建物までの適用性を考え、周期0.1秒から10秒を含む広帯域の地震動を計算する。

- 2) 求める地震動は安全側の包絡波ではなく、想定される最も起こりえる地震動波形とする。
- 3) 想定すべき地震の設定は、被害地震や活断層などに関する最新の知見に加え、確率論的想定地震(亀田・他, 1997)²⁴⁾の考え方に基づいて抽出された地震を合わせた合理的判断により行う。

その結果、想定地震としては、フィリピン海プレートの沈み込み帯で発生する巨大地震である想定新東海地震(M 8.3)、特定の活断層の活動に起因する地震である想定濃尾平野西縁地震(M 7.7)、想定伊勢湾地震(M 7.5)、想定猿投北地震(M 7.0)、活断層の知られていないところでも発生する地殻内地震である想定名古屋浅発直下地震(M 6.8)が選定されている。

その後、愛知県設計用入力地震動研究協議会の実績をふまえ、中部地方整備局、愛知県、名古屋市が、名古屋市三の丸地区において各庁舎の免震構造化を含む耐震改修をほぼ同時期に計画し始めたとき、耐震改修に用いる地域波を上記の公的機関3者が共同して作成している(中田・他, 2004)²⁵⁾。これは、法制上は地域波の作成は必ずしも必要ではないが、性能規定化への対応と、建物使用者や住民への説明責任のためである。

図3に想定新東海地震の応答スペクトルを告示スペクトル(国土交通省, 2001)²⁶⁾と比較して示す。想定新東海地震の応答スペクトルは、周期3秒において、告示スペクトルの2倍~3倍の大きさとなっているが、これは主に、三の丸における深さ数kmの地震基盤から上の地盤の増幅特性によるものである。庁舎の耐震改修には、この推定波が設計用入力地震動として用いられている。

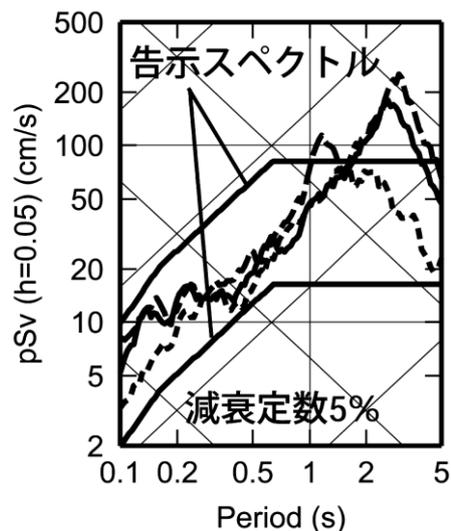


図 3 想定新東海地震による名古屋三の丸における設計用入力地震動 (中田・他, 2004)²⁵⁾

4.3 福岡市(2008)²⁷⁾による警固断層帯南東部を考慮した条例の改正

地震調査研究推進本部(2007)²⁸⁾によると、警固断層帯南東部で M 7.2の地震が今後30年以内に発生する確率は、0.3~6%で、我が国の主な活断層の中では高いグループに属することになる。また、2005年に発生した福岡県西方沖地震の影響により、警固断層帯南東部の活動を促進する可能性もあるといわれている。

警固断層帯南東部に起因した地震が発生した場合、兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)など過去の地震の被害状況からみて、極めて低い確率ではあるが、新耐震基準の建築物の倒壊等の可能性を否定できない。さらに、警固断層帯南東部は福岡市の都市機能が集積している都心部を縦断している。

これらを受けて、福岡市は、警固断層帯南東部に着目し、長期的な視点に立って耐震性能を強化した建築物の建築を誘導するため、警固断層帯南東部に近い一定の区域において、これから新しく建築される中高層の建築物についての耐震性能を強化し、建築物の安全性を高めるよう、福岡市建築基準法施行条例の一部を改正した。

具体的には、一定の区域において、条例制定後、新築、改築される一定規模以上の建築物について、現在の地域係数($Z=0.8$)を、その数値に1.25を乗じたもの($Z=1.0$)としている。

4.4 原子力安全委員会(2006)²⁹⁾における発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針の改訂

原子力発電所の耐震基準は、1981年に制定されているが³⁰⁾、1995年の阪神・淡路大震災をうけて2006年に改訂されている。

この改訂により最も大きく変わったのは、旧指針では、 $M 6.5$ の直下地震をS2(設計用限界地震)のひとつとして必ず考慮することになっていたのが、改訂された審査指針では、震源と活断層を関連付けることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、これらを基に敷地の地盤物性を加味した応答スペクトルを設定して震源を特定せず策定する地震動を策定することになったこと、および地表では短い活断層しか観察されないときでも、不確かさを考慮して地中の震源断層としては相当の大きさのものを想定しなければならなくなったことである。特に、短い活断層については、長さが10 km以下のものは M が6.5以下との評価だったので、 $M 6.5$ の直下地震でカバーされていたのであるが、地中の震源断層の長さの不確かさを考慮すると M は6.5を超すことになったため、その影響は大きいものとなった。

改訂された指針は、新設の原子力発電所だけでなく、既設の原子力発電所にも適用されることとなり、耐震性能が不足している部分には補強工事が施されることとなった。図4は、各原子力発電所における従来のS2(設計用限界地震)の最大加速度と改訂された指針による基準地震動 S_s の最大加速度である(朝日新聞, 2008bに加筆)³¹⁾。図中、柏崎刈羽における2つの最大加速度は、それぞれ1号機~4号機と5号機~7号機のものである。図より、まず、すべての発電所で S_s がS2より大きくなっていることがわかる。また、旧指針で $370 \text{ cm/s}^2 \sim 380 \text{ cm/s}^2$ となっているところは、主として、 $M 6.5$ の直下地震によりS2が決っていたところであるが、指針の改訂をうけて $450 \text{ cm/s}^2 \sim 600 \text{ cm/s}^2$ と大きくなっている。さらに、柏崎刈羽では1号機~4号機で 2300 cm/s^2 、5号機~7号機で 1209 cm/s^2 と、特に、大きくなっていることが注目される。これは2007年の新潟県中越沖地震でS2を超える記録(1号機ではS2の約3.8倍)がとれたことを強震動評価に反映させた結果である。

4.5 国土交通省(2010)³²⁾による設計用長周期地震動の作成手法

国土交通省では、2003年の十勝沖地震の際に長周期地震動が問題となったことをうけ、既往の観測地震記録に基づく長周期地震動の評価手法の検討と、それを踏まえた長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法の検討を行ってきた。その結果、建築物へ影響を与える0.1~10秒の幅広い周期成分を含めた設計用長周期地震動の作成手法の試案がまとめられた。

設計用長周期地震動の作成対象としている地震は、発生確率が高く、かつ発生した場合に

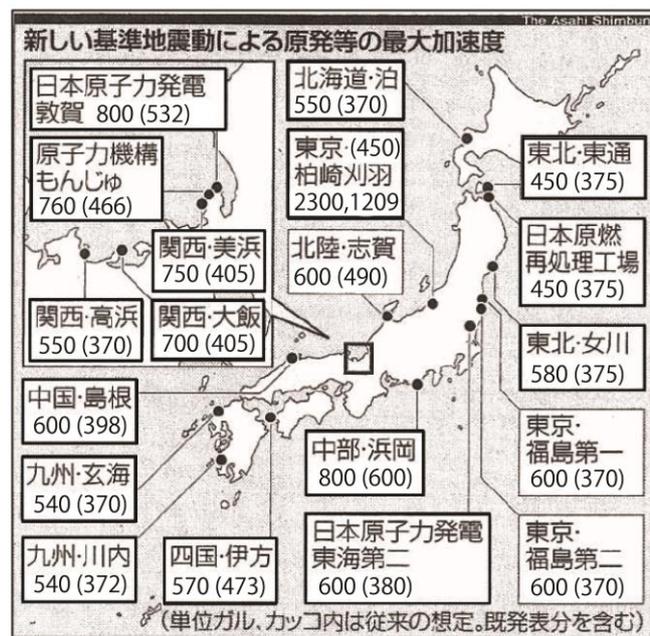


図4 新しい耐震設計審査指針による基準地震動の最大加速度 (朝日新聞, 2008bに加筆)³¹⁾

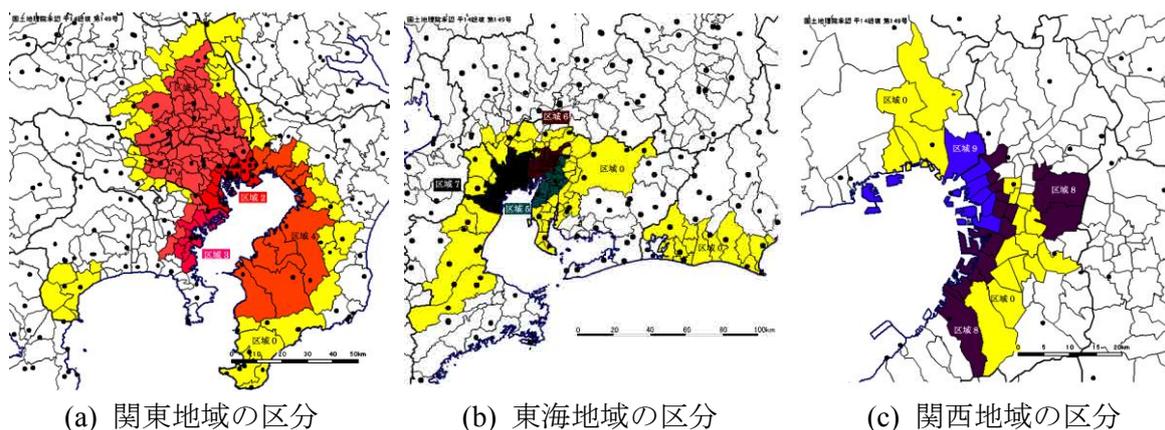


図 5 長周期地震動考慮のための地域区分 (国土交通省, 2010)³²⁾

大きな被害が予想されるとしている3つの海溝型地震で、想定東海地震(M_w 8.0)、東南海地震(M_w 8.1)、宮城県沖地震(M_w 7.6)である。

高さが60メートルを超える建築物及び免震建築物における長周期地震動への対策として、告示1461号第四号に定める極めて稀に発生する地震動地震動に加えて、上記3地震によって建設地で発生すると想定される長周期地震動による検討を求めている。ここで、対象地震によって建設地で発生すると想定される長周期地震動は、別途示されている観測データに基づく手法による設計用長周期地震動、もしくはこの手法と同等以上に適切に長周期地震動を想定できる手法による長周期地震動を用いることとされている。

また、超高層建築物等では長周期地震動によって家具の転倒等による被害が発生する恐れがあると想定されているため、家具等の転倒防止対策に対する設計上の措置についてあわせて説明を求めている。さらに、既存の高さが60メートルを超える建築物及び免震建築物のうち、大臣認定を受けた建築物、特に長周期地震動による影響が大きい一部の建築物については、倒壊・崩壊しないことの再検証を求めている。

図5には長周期地震動考慮のための地域区分を示す。

4.6 日本構造技術者協会(2000)³³⁾による性能設計法の提案

我国における建築物の耐震設計は、人命の確保を目標に倒壊に至らなければ損傷を許容する建築基準法に準拠し、一部の特殊な建物を除いて、一般的には建築基準法に規定された性能のみで設計されている。しかしながら、1990年代に入ると国際化・市場開放の流れのなかで、建築基準法を上回る耐震性能や使用性能なども含めた様々な性能が建物に求められるようになってきた。

一方、1995年阪神・淡路大震災の被害経験から、人命確保を目標とする建築基準法に従った耐震設計だけでは不十分であり、分譲マンションなどでは財産としての価値の保全や、震災時に防災拠点や救護拠点となる庁舎や病院などでは、建物としての機能維持が求められていることが明らかになった。このような社会の要請を満たすためには、建築主との対話を通して要求性能を引き出し、それに基づき設計した目標性能に対して建築主の合意を得る性能設計手法の確立が急務になった。以上を背景に、1995年に建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」が発足し、三年間を費やして性能設計体系の研究・開発が行われ

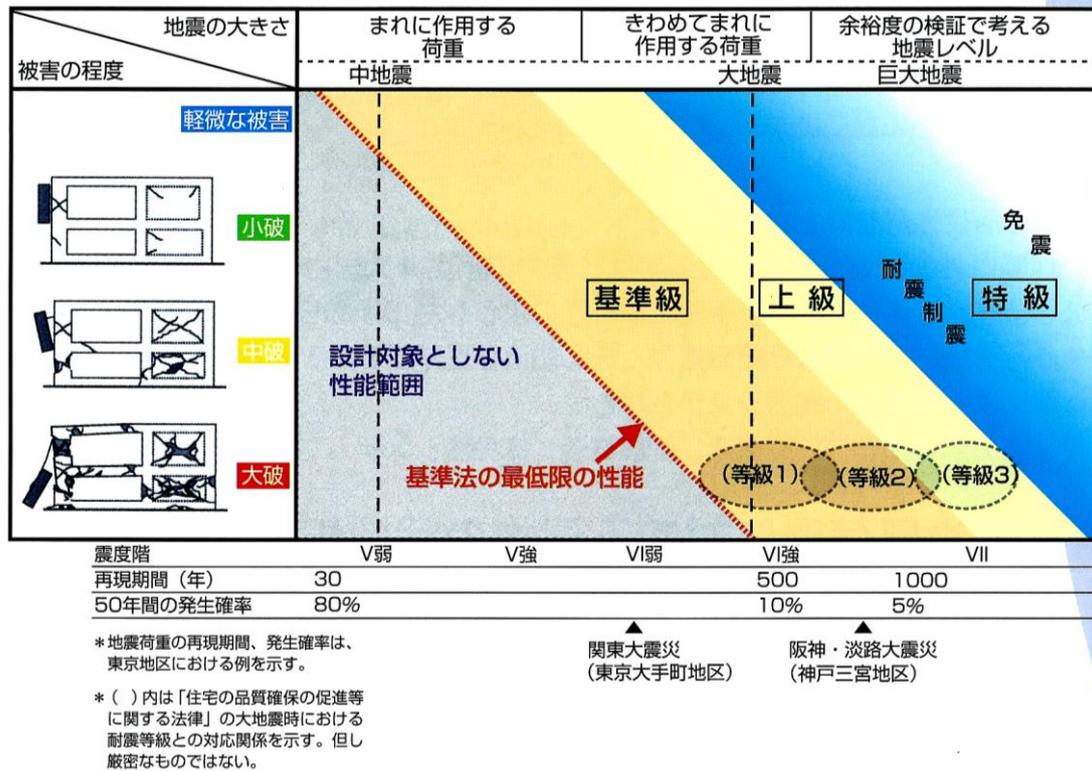


図 6 建物の耐震性能グレードと被害・修復程度の関係 (日本構造技術者協会)³⁴⁾

た。

日本構造技術者協会(JSCA)では性能設計の健全な発展と普及を目的に、この研究成果を基本にしてより具体的な設計ツールとすべく研究を継続し、その成果をJSCA性能メニューとして発表している。図6には、要求性能を把握するときに用いられる建物の耐震性能グレードと被害・修復程度の関係(日本構造技術者協会)³⁴⁾を示す。

4.7 中央防災会議による地震対策の大綱

(1) 東海地震対策大綱(中央防災会議, 2003)³⁵⁾

中央防災会議は、よりの確な東海地震対策を講じるため、大規模地震対策特別措置法が制定された1978年以降の20数年間の観測データや科学的知見の蓄積をもとに、東海地震の地震像を再検討し、図7に示す新たな震源域を発表した。また、新たな震源域による地震の揺れ、津波の高さの分布、地震防災対策強化地域の見直しについて検討を行った。その結果、強化地域が従来の6県167市町村から8都県263市町村へと大幅に拡大され、最大の場合、建物全壊棟数約23万~26万棟、死者約8千人~1万人という甚大な被害が発生することが明らかになった。

中央防災会議では、これらを踏まえ、予防段階から災害発生後まで含めた東海地震対策のための全体のマスタープランとして東海地震対策大綱の骨子がとりまとめられた。

その後、同様の大綱が、今世紀前半にも発生する可能性が高いと見られている東南海・南海地震³⁶⁾および房総半島の東方沖から択捉島の東方沖までの日本海溝および千島海溝ならびにその周辺の地域におけるプレートの境界またはその内部を震源とする大規模な地震³⁷⁾につ

いても発表されている。

(2) 首都直下地震対策大綱(中央防災会議, 2010)³⁸⁾

相模トラフ沿いのプレート境界では、1923年の関東地震と同様の M 8クラスの地震が200年～300年間隔で発生している。次の M 8クラスの地震の発生は、今後100年から200年程度先と考えられるが、その間に南関東地域で M 7クラスの地震が数回発生することが予想されている。1995年に発生した阪神・淡路大震災の経験により、大規模地震に対する大都市の脆弱性が明らかになったため、1998年に南関東地域震災応急対策活動要領および南関東地域直下の地震対策に関する大綱がそれぞれ改訂され、南関東直下の地震発生に備えた政府の防災体制について充実が図られた。しかしながら、近年、インターネットによる情報通信技術や物流、金融等の高度化・国際化が進展し、経済・社会情勢が著しく変化しつつあることから、首都直下地震対策について、首都中枢機能障害による影響と膨大な人的・物的被害の発生に着目し、これらの被害を軽減するための対策が首都直下地震対策大綱としてまとめられた。

その後、同様の大綱³⁹⁾が名古屋市直下および阪神地域直下に想定した13地震を対象としてまとめられている。

謝辞

本稿を執筆するにあたって海洋研究開発機構の大堀道広博士と大崎総合研究所の島津奈緒未博士には、有用な情報を多くご教示いただきました。また、清水建設技術研究所の高橋郁夫博士、石井透博士、森井雄史博士、石井やよい氏には文献収集にご協力いただきました。ここに、記してお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所: <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/> (2011年2月10日参照).
- 2) 防災科学技術研究所: <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/> (2011年2月10日参照).
- 3) 藤原・他(2007): 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第2号(特集号), pp. 2-16.
- 4) 防災科学技術研究所: <http://www.hinet.bosai.go.jp> (2011年2月10日参照).
- 5) 防災科学技術研究所: <http://www.fnet.bosai.go.jp> (2011年2月10日参照).
- 6) Obara(2002): Science, No. 296, pp. 1679-1681.
- 7) 国土地理院: <http://www.gsi.go.jp/REPORT/JIHO/vol103-content103.html> (2011年2月10日参照).
- 8) Sagiya *et al.*(2000): Pure and Applied Geophysics, Vol. 157, pp. 2303-2322.
- 9) 海洋研究開発機構: 地震津波・防災研究プロジェクト, パンフレット.

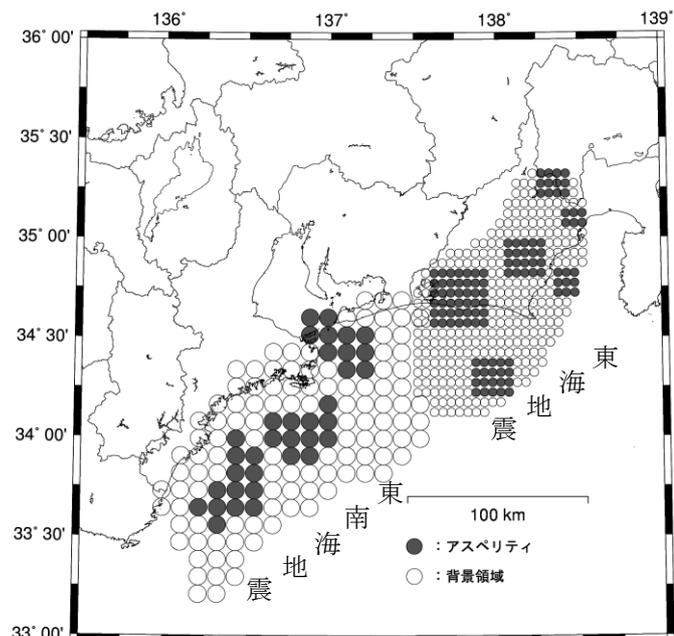


図 7 東海地震と南海地震の震源域 (中央防災会議公表のデータから作成)^{35),36)}

- 10) 大竹・他(2002): 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版会.
- 11) 総務省消防庁: <http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/180414-3/180414-3houdou.pdf> (2011年2月10日参照).
- 12) 気象庁: <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/index.html> (2011年2月10日参照).
- 13) 地震調査研究推進本部: http://www.jishin.go.jp/main/p_shokai03.htm (2011年2月10日参照).
- 14) 日本活断層学会: <http://danso.env.nagoya-u.ac.jp/jsafr/pdfs/schui.pdf> (2011年2月10日参照).
- 15) 文部科学省: http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/04031203.htm (2011年2月10日参照).
- 16) 文部科学省: http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/19/02/07020515.htm (2011年2月10日参照).
- 17) 文部科学省: http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/04031204.htm (2011年2月10日参照).
- 18) 土木学会・日本建築学会(2006): 海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言.
- 19) 梶原(2010): 第13回日本地震工学シンポジウム, pp. 80-84.
- 20) 大阪府(1997): 大阪府地震被害想定調査, 報告書, 平成9年3月.
- 21) 大阪府(2007): 大阪府自然災害総合防災対策検討(地震被害想定), 報告書(概要版), 平成19年3月.
- 22) 朝日新聞(2008a): 上町断層揺れ想定は5倍, 2008年3月11日.
- 23) 福和・他(2001): 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), B-2, 構造 II, pp. 81-82.
- 24) 亀田・他(1997): 土木学会論文集, No. 577/I-41, pp. 75-87.
- 25) 中田・他(2004): 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), B-2, 構造 II, pp. 529-530.
- 26) 国土交通省(2001): 告示第388号, 平成13年3月30日.
- 27) 福岡市(2008): <http://www.city.fukuoka.lg.jp/data/open/cnt/3/10759/1/kaisetu.pdf> (2011年2月10日参照).
- 28) 地震調査研究推進本部(2007): 警固(けご)断層帯の長期評価について, 平成19年3月19日.
- 29) 原子力安全委員会(2006): 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, 平成18年9月19日決定.
- 30) 原子力安全委員会(1981): 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, 昭和56年7月20日決定.
- 31) 朝日新聞(2008b): 活断層、原発は安全か, 2008年4月1日.
- 32) 国土交通省(2010): http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000218.html (2011年2月10日参照).
- 33) 日本構造技術者協会(2000): 建築の構造設計, オーム社.
- 34) 日本構造技術者協会: 安心できる建物をめざして JSCA 性能メニュー, パンフレット.
- 35) 中央防災会議(2003): 東海地震対策大綱, 平成15年5月29日.
- 36) 中央防災会議(2003): 東南海・南海地震対策大綱, 平成15年12月.
- 37) 中央防災会議(2006): 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震対策大綱, 平成18年2月.
- 38) 中央防災会議(2005): 首都直下地震対策大綱, 平成17年9月, 平成22年1月修正.
- 39) 中央防災会議(2009): 中部圏・近畿圏直下地震対策大綱, 平成21年4月.

強震動予測と地震荷重（その1）地盤震動研究の立場から

地盤震動小委員会・加藤 研一（小堀鐸二研究所）

1. はじめに

地盤震動小委員会は1972年の発足以来、実に四半世紀以上の長年にわたり、地盤震動関連分野のみならず、震源や伝播経路の諸問題など、その時々タイムリーなテーマを発信し続けてきた。毎年開催する地盤震動シンポジウムも、今年度で第38回目を数えるに至っている。また、建築学会年次大会時期にあわせ、開催地の地盤震動研究に関して情報を交換する地域交流会を開催し、その回数も今年度で第31回目を迎えた。以上の活動を通し、阪神・淡路大震災後の15年間に明らかになった事実、および未解明の項目を地盤震動研究の立場からまとめると共に、強震動予測を地震荷重の設定に反映させるための課題と展望を述べる。なお、本年度の建築学会年次大会(富山)において、「兵庫県南部地震から15年ー建物への入力地震動はどこまで解明されたかー」と題したパネルディスカッションを基礎構造系振動小委員会と共催した。この15年間の研究の進展については文献[1]の神野・松島・久田・永野論文に詳しく報告されている。

2. 地盤震動小委員会のこの15年の歩みと特徴

本小委員会は地震防災、及び建築構造物の耐震安全性に係わる地盤震動の諸問題について発掘、整理、方向付けを行うとともに、その成果を次世代の耐震設計に生かすことを目的としている。地震に強い構造物を築くためには、設計用地震動の想定から始まり、構造計画、地震応答解析、骨組の断面決定、構造実験、設計・施工、建設後の検証に到るまで、高度な技術の積み重ねが必要である。図1に示すこれらの要素技術には、当然のことながら評価精度に差があり、ある分野(例えば地震動評価)では倍半分の議論をし、他の分野(例えば上部構

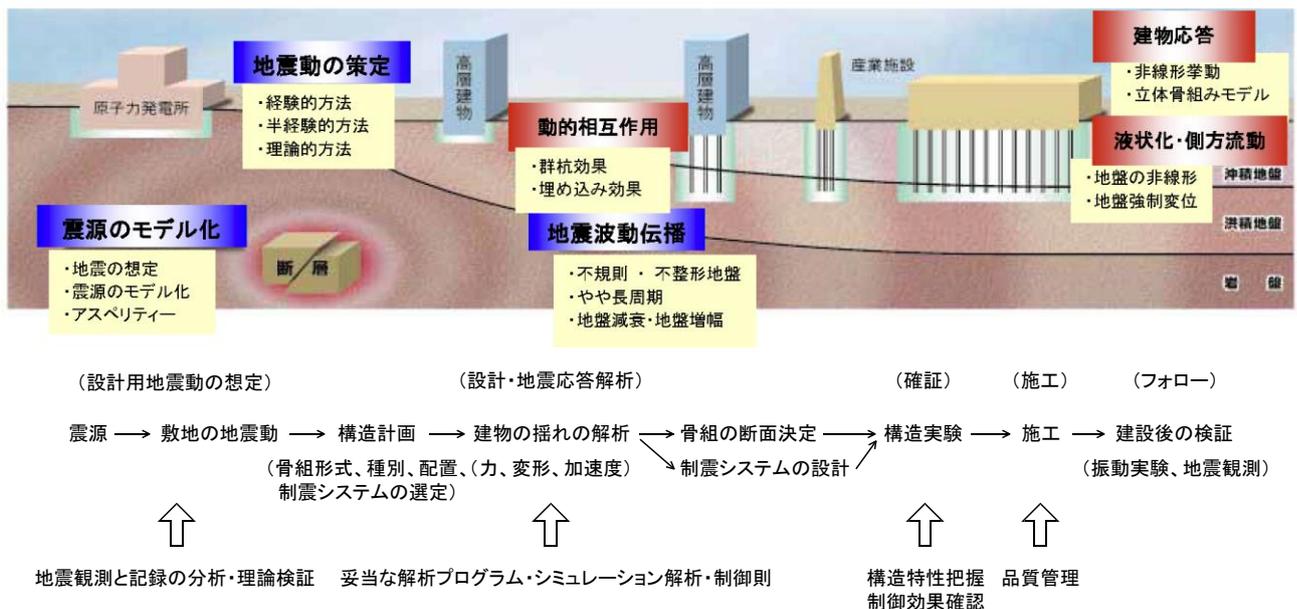


図1 震源から構造物の応答に到る耐震設計の流れ

造の地震応答解析)では小数点以下の桁に着目しているのが現状である。ここで重要なのは、精度差がある要素技術を、いかにバランス良く繋ぎ、地震に強い構造物を後世に残すかにあると思われる。震源から構造物の応答に到る耐震設計の流れのうち、昨今の相次ぐ被害地震の発生や今後発生が危惧される海溝型巨大地震の発生を考えると、今後とも急速に進展する地盤震動研究の成果をその都度わかりやすく取りまとめ、地震被害の原因について正しい情報を発信するとともに、その成果を具体的に今後の耐震設計に生かしていく必要がある。

本小委員会が関連する強震動・地盤震動分野は、ハード面とソフト面で大きな変換時期にある。ハード面については、計算機の飛躍的な発達が挙げられる。従来はスパコンを用いて計算していた3次元波動伝播解析が、パソコンレベルで処理可能となった。また、計算ソフトも無償配布される機会が増え、震源パラメータや地下構造データを準備すれば誰もが高度な計算を実行できる状況にある。それらのパラメータやデータも、防災科学技術研究所等の国家プロジェクトにより順次公開されている。また、1995年兵庫県南部地震以後、K-NETやKiK-netに代表される高密度強震観測網も飛躍的發展を遂げ、インターネットを介して誰もが地震波形を入手可能となった。地震動を評価する環境は、以前と比べものにならないほど整備が進んでいる。

ソフト面については、強震動地震学と称する分野が形成され、地震学的要素を盛り込んだ研究が盛んに行われている。断層モデルがその一例であり、震源における破壊過程を物理モデルで表現した地震動評価が可能となった。さらに2000年の建築基準法の改訂に伴い、建設予定地点でサイト波を作成する機運と相まって、設計実務においても断層モデルが徐々に使われつつある。以上の背景を反映し、表1に示す地盤震動シンポジウムをこの15年も継続的に開催し続けてきた。第23～26回(1995～1998年)の4年間は「兵庫県南部地震の強震動の解明」に焦点を当てたシンポジウムを、次に2000年の建築基準法の改正に関連した話題を議論した。第30～34回(2002～2005年)の5年間は「地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか」と題した中長期テーマに取り組み、全国一律の標準地震動を用いるのは実情に即しておらず、震源と地盤特性を反映して入力地震動を作成することの重要性を指摘した。最近の4年間は

表1 地盤震動シンポジウムのこの15年間の歩み

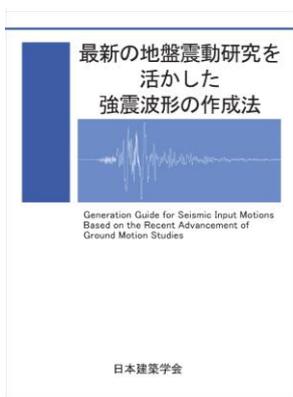
開催年	回数	主 題	副 題
1995.10.13	第23回	1995年兵庫県南部地震で試された地盤震動研究	
1996.10.30	第24回	1995年兵庫県南部地震で試された地盤震動研究(その2)	大阪平野について考える
1997.10.31	第25回	1995年兵庫県南部地震で試された地盤震動研究(その3)	震源域での強震動予測と耐震設計について考える
1998.10.22	第26回	1995年兵庫県南部地震で試された地盤震動研究(その4総括)	強震動予測の将来展望
1999.10.25	第27回	地域的特性を考慮した地震動予測	
2000.11.02	第28回	震源近傍の強震動と設計用入力地震動	トルコ・コジャエリ地震、台湾・集集地震の経験を踏まえて
2001.10.31	第29回	改正基準法の地震動規定を考える	地盤震動研究から見た限界耐力評価法の評価と課題
2002.10.29	第30回	設計用地震動は、工学的基盤で決められるか?	地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その1)
2003.11.05	第31回	震源断層を考慮した設計用地震動評価:地域波策定の現状と将来展望	地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その2)
2005.01.07	第32回	表層地盤の増幅特性評価の現状と課題	地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その3)
2005.11.18	第33回	地震動予測地図を考える	地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その4)
2006.11.30	第34回	設計用入力地震動作成指針に向けて	地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その5:総括)
2007.11.16	第35回	頻発する内陸地殻内地震の地震動とその解釈	新・入力地震動作成手法の使い方と検証(その1)
2008.12.09	第36回	度重なる被害地震から設計用入力地震動を考える	新・入力地震動作成手法の使い方と検証(その2)
2009.11.27	第37回	地盤震動研究から見た長周期地震動	どこまで解明されて何が課題か?
2010.12.03	第38回	短周期地震動の発生要因はどこまで解明されたか	広帯域の入力地震動予測に向けて

頻発した内陸地殻内地震を取り上げ、震源近傍の地震動の解釈と設計用入力地震動への反映について議論すると共に、広帯域の入力地震動予測に向けて短周期および長周期地震動はど
 こまで解明されて何が課題かを整理してきた。この過程において、2004年には図2に示す「地
 盤震動—現象と理論—」を刊行し、兵庫県南部地震を踏まえて進展した強震動研究の **state of
 the art** をまとめた。2009年には図3に示す「最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成
 法」を刊行し、地震と建設サイトを特定したシナリオ型強震動予測手法に基づいて強震波形
 を作成するガイドラインをまとめてきた。以上の委員会活動を通し、強震動予測と地震荷重
 について現状の知見を整理する。



- | | |
|----|--------------------------------|
| 1章 | 過去10年の被害地震における地盤震動の特徴的現象と研究の進展 |
| 2章 | 強震観測の変遷と展開 |
| 3章 | 地震波データ処理の基礎理論 |
| 4章 | 地震波動の生成と伝播の解析手法 |
| 5章 | 震源過程と断層破壊 |
| 6章 | 地殻・マントルにおける波動伝播と減衰 |
| 7章 | 地盤構造と震動特性 |
| 8章 | 入力地震動評価への応用 |
| 9章 | 地盤震動研究の新たな展開 |

図2 地盤震動—現象と理論—(2004)の概要



- | | |
|----|--------------------------------|
| 1章 | 本書の目的と使い方 |
| 2章 | シナリオ型の想定地震の設定法 |
| 3章 | 震源モデルの与え方 |
| 4章 | 統計的グリーン関数法における伝播経路モデル・経時特性の考え方 |
| 5章 | 地下構造モデルの与え方 |
| 6章 | 用いるべき強震動予測手法 |
| 7章 | 予測結果の評価 |
| 8章 | 作成した強震波形の利用上の留意点 |
| | 資料編 |

図3 最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法(2009)の概要

3. 兵庫県南部地震とその後の地盤震動研究の展開

兵庫県南部地震を経験し、我々は多くのことを学んだ。最も衝撃的であったのは「震災の帯」の発生であり、しかも震災の帯が震源直上ではなく、大阪盆地北西部の端部から約1km海寄りの盆地内に生じたことである。その原因として、震源から神戸地域に向かう破壊伝播効果に加え、S波直達波と段差状の深部地下構造に起因する表面波高次モードとの増幅的干渉により、周期1~2秒の大振幅パルス波が生成され、建物被害に強い影響を及ぼした結果と解釈されている[1・松島論文参照]。震源近傍における強震動は震源と地盤の双方の影響を受けるため、震源から地盤までをモデル化した一体解析の重要性を示している。

1995年当時、神戸市域などの震源域に10点以上の強震観測点は存在したものの、震災の帯内とその近傍の観測点はJR鷹取や大阪ガス葺合などに限られていた。兵庫県南部地震は強

震観測のあり方にも大きな変化を与え、様々な機関による地震観測ネットワークが整備された[1・神野]。防災科学技術研究所による K-NET、KiK-net、気象庁による 95 型震度計、自治省消防庁による震度情報ネットワークなど国や自治体による強震観測網に加え、東京ガスなど民間のも含めると 1 万点以上の観測点が日本に存在し、兵庫県南部地震以前とは隔世の感がする。しかも、インターネットを介して地震発生直後に公開される強震記録も多く、地盤震動を研究する上では、世界で最も恵まれた環境にあると言える。

兵庫県南部地震以後は被害を伴う内陸地殻内地震が頻発し、後に示すように震源近傍の強震記録も徐々に蓄積されてきた。また、2003 年十勝沖地震では震源から約 250km 離れた苫小牧でスロッシングによる石油タンクの火災が発生し、長周期地震動が着目されるようになった。強震記録の蓄積により、新しい距離減衰式も数多く提案されている[1・神野]。従来の距離減衰式は地震規模と距離など、数少ないパラメータを用いていた。最近では地震タイプ(内陸地殻内、プレート境界、スラブ内)、断層タイプ(横ずれ、縦ずれ)、破壊伝播効果の補正係数など、多くのパラメータが取り入れられている。説明変数が多いため、観測記録への合致度は向上していると思われるが、パラメータの与え方を誤ると評価結果が変動する。距離減衰式を強震動予測に用いる場合は、以前に比べてパラメータの設定に注意する必要がある。

近年発生した地震も含め、波形インバージョンによる断層破壊過程の研究も盛んに行われるようになった。断層面の不均質すべり分布からアスペリティ部分を抽出し、強震動予測のための震源断層のモデル化方法(特性化震源モデル)が提案されている。深部地下構造についても交付金により全国各地で調査が進み、他のプロジェクトによる地盤調査結果も含めた膨大な情報を防災科学技術研究所がとりまとめ、日本全国の工学的基盤までの地下構造モデルが構築された[4]。Web によるデータの公開も始められており、3 次元差分法などによる波動伝播解析に活用されている。また、地震調査研究推進本部(地震本部)により主要活断層帯や海溝型巨大地震の長期評価が行われ、断層形状の情報や発生確率が公表されている。さらに地震本部の地震調査委員会では「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(レシピ)」を取りまとめ、特性化震源モデルの設定、地下構造モデルの作成、強震動計算、予測結果の検証の各過程における考え方を提示している。このレシピに基づいて主要活断層の強震動を計算し、その結果を「全国地震動予測地図」として整備している[5]。

以上、兵庫県南部地震以後の地盤震動関連の研究を概観した。観測記録の質と量、地下構造モデルの精度と情報量、特性化震源モデルの構築、計算機能力の向上による震源～地盤の 3 次元解析の実用化など、強震動予測の構成要素のいずれもが進展を遂げている。その時々最新の動向は、表 1 に示す毎年のシンポジウムで紹介されている。

4. 強震動予測と地震荷重：今後の課題と展望

先にのべたように、1995 年兵庫県南部地震以後、頻繁に内陸地殻内地震が発生するようになった。西南日本で発生する内陸地殻内地震と、東海・東南海・南海地震等の南海トラフで発生する巨大地震は相関があることが指摘されている。地震本部[5]によれば、今後 30 年以内に南海トラフ沿いで M8 クラスの地震が発生する確率は、東南海地震が 70%、南海地震が 60% 程度と推定されている(2011 年 1 月 1 日時点)。これらの指摘を考え合わせると、我々は今後も様々な地震を経験せざるをえない状況にある。

1995 年以降に発生した主な内陸地殻内地震の震央位置と震源メカニズムを図 4 に、各々の

本震の震源近傍で得られた代表的な加速度波形を図5に示す[6]。主要動の継続時間は10秒前後と短いものの、最大値が1gを上回る記録が数多く得られている。減衰定数5%の加速度応答スペクトルを図6に示す。図中には告示スペクトルのレベルを太線で示した。地表観測記録は様々な地盤条件の基で得られているため、 $V_s = 400\text{m/s}$ 程度以上として設定された告示スペクトルと厳密に比較することはできないが、震源近傍の観測記録の多くが告示スペクトルを大きく上回っている。図中には兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の記録も含まれており、それを上回る記録が次々と得られているのが現状である。

それでは、地震動振幅は青天井か……。地震動振幅の上限を調べたところ[6]、最大加速度には表層地盤のせん断強度に起因する上限が存在する可能性があるが、最大速度と最大変位については認められない。また、岩盤サイトでは震源と伝播経路の特性がそのまま反映され、最大加速度であっても上限値が存在しないと予想される。このことは、建設サイト周辺で発生する可能性のある地震を想定し、伝播経路特性や地盤増幅特性を適切に考慮した予測地震動を作成して耐震安全性を検討することの重要性を示している。以上の背景のもと、「最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法」[3]では、専門家以外であっても予測地震動を評価できる道筋をつけることを目的として刊行した。

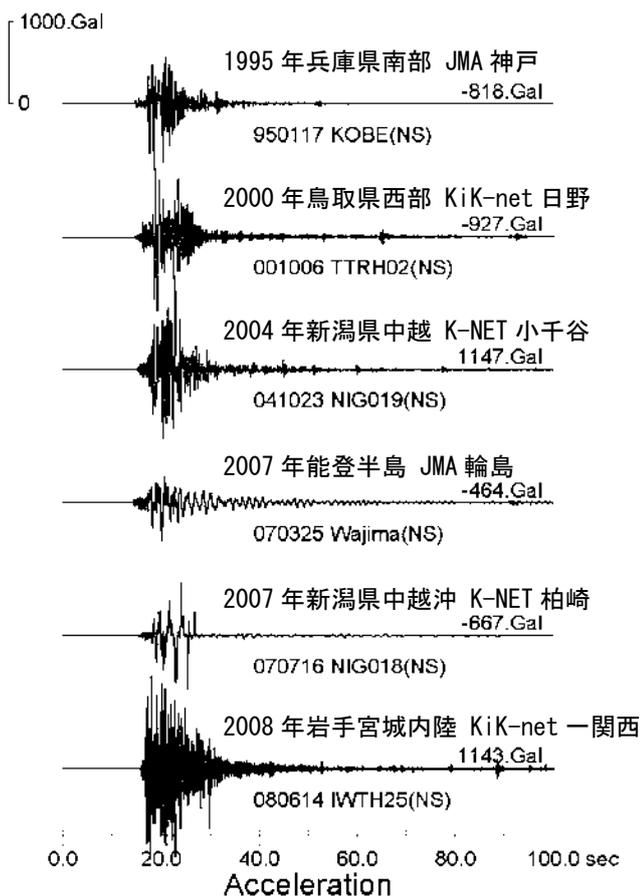


図5 主な内陸地殻内地震の震源近傍の加速度波形(NS成分)[6]

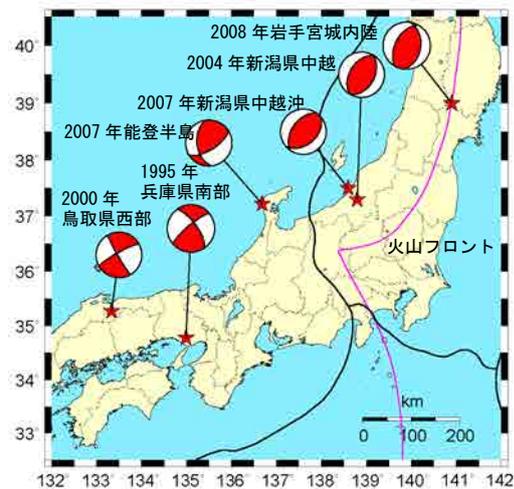


図4 1995年以降の主な内陸地殻内地震[6]

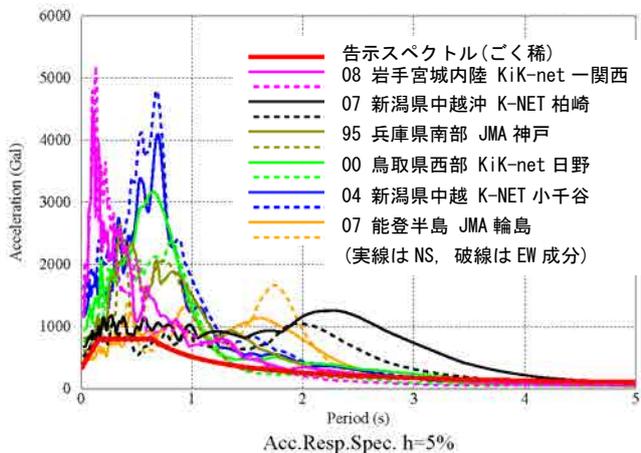


図6 主な内陸地殻内地震の震源近傍の応答スペクトル[6]

予測地震動の精度は向上しているが、震源のモデル化や地震動の評価手法の相違により、評価結果にばらつきが生じているのも事実である。たとえば、同一地点(KiK-net 此花)を対象とし、異なる手法で南海地震を評価したところ、卓越周期やスペクトル振幅が異なる傾向を示している[7]。予測地震動を設計に反映させるには、ばらつきを減らすことが必要である。その一環として、地震動評価の解析コードをチェックするためのベンチマークテストを実施した[8,9,10]。現在、震源のモデル化に起因するばらつきを把握するためのブラインドテストを計画中である。また、同一の解析コードを用いて全国主要都市の予測地震動の評価も検討しており、その成果はシンポジウム等を通して公開予定である。

巨大地震による長周期地震動、工学的基盤以深の深い地盤構造の影響、理論地震動計算の短周期化など、その他の課題も山積みされている。強震動予測はまだまだ発展途上にあり、不明な点にどのような判断を加えて入力地震動を考えていくかなど、強震動予測を地震荷重に繋げる努力が今後も必要である。

5. おわりに

兵庫県南部地震以降の精力的研究により、地震動を定量的に予測する技術は急速に進展した。また、地震動の評価技術の成果を生かして、地震本部から全国の地震発生域の長期発生予測に基づいたシナリオ地震予測地図が続々と公表されている。強震動予測波形の精度は全国的に展開された観測網による地震記録によって検証されつつある。一方、近年頻発している内陸地殻内地震の震源近傍では、その観測地震動の加速度レベル、あるいはそのマグニチュードの割には建物被害が軽微であり、観測や予測が示す地震動と設計用の地震動に乖離があることを意味する。巨大地震の発生が危惧されている現在、その定量化が急務であり、他の小委員会と共同で今後取り組むべきテーマと認識している。

参考文献

- [1] 日本建築学会：兵庫県南部地震から15年—建物への入力地震動はどこまで解明されたか—、2010年度日本建築学会大会PD資料、79pp、2010
- [2] 日本建築学会：地盤震動—現象と理論—、408pp、2004
- [3] 日本建築学会：最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法、163pp、2009
- [4] 藤原広行ほか：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討、防災科学技術研究所研究資料、第337号、2009.
- [5] 地震調査研究推進本部：長期評価結果一覧、2011. (<http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/kaikou.htm>)
- [6] 日本建築学会：建物の耐震性能と耐震性向上技術、2010年度日本建築学会大会PD資料、7、69pp、2009
- [7] 日本建築学会：各種波形予測手法に基づいた海溝型巨大地震の予測強震動波形収集資料、東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会・地震動小委員会、2007.
- [8] 久田嘉章ほか：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：理論的手法の場合(その1)、日本建築学会技術報告集、第17巻、第35号、2011.
- [9] 吉村智昭ほか：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：数値解析手法の場合(その1)、日本建築学会技術報告集、第17巻、第35号、2011.
- [10] 加藤研一ほか：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：統計的グリーン関数法の場合(その1)、日本建築学会技術報告集、第17巻、第35号、49-54、2011.

強震動予測と地震荷重（その2）建築物の安全制御の立場から

地震荷重小委員会・林 康裕（京都大学）

1. はじめに

地震荷重小委員会は昭和 45 年にスタートし(初代主査：中川恭次[1])、既に 40 年近い歴史を持っている。発足以来、地震に対する建築物の要求性能を満たす設計用地震荷重の与え方や方向性等について検討してきた。そして、地震被害調査結果や、強震動予測手法、建築物応答評価法などの進展を踏まえ、地震荷重に関わる関連研究の整理などを行うとともに、学会独自の地震荷重評価法の提案を行ってきた。このため、強震動、地盤応答、動的相互作用、建物応答、基礎・上部構造の構造特性を踏まえた設計クライテリアの評価など、関連する委員会が多く、細分化された学問領域を横断し総合する役割も担っている。

2. 地震荷重小委員会の活動履歴 [2]

地震荷重小委員会の活動は、建築物の耐震性能を確保し、安全性を制御することを念頭に、工学的な立場から建築物の応答特性や限界状態を踏まえた地震荷重設定法の構築に向けて検討を行ってきた。

地震荷重小委員会の活動略歴を簡単に表 1 に示し、その特徴を以下にまとめる。

- 1) 中低層建物のように、必ずしも設計用地震動を用いて耐震設計を行うことに馴染まない建物も多く存在している。本小委員会では、木造建物も含めた様々な建物を対象にして、静的・動的な設計用地震荷重の設定法について検討を行ってきた。以上から、強震動評価に関する専門家というよりも、むしろ各種構造や耐震構造全般に造詣の深い研究者に委員として多く参画していただいていた経緯がある。
- 2) 設計用地震荷重は単独では存在し得ず、検証法や設計クライテリア（建物応答指標とその限界値の関係）とセットになって存在することで意味がある。この点が、地盤震動特性や強震動特性を科学的に解明してきた地盤震動小委員会との違いと考えられる。最新の強震動研究の成果は取り入れつつも、建物応答への影響や実被害との対応を常に意識しつつ設計用地震荷重を設定する枠組み構築を行ってきた。
- 3) 確定論的アプローチと確率論的アプローチの両面から地震荷重の検討を行ってきた。特に、設計用地震動レベルが過大となってしまう場合もあり、確定論的な（シナリオ型）アプローチでサイト波を設定しても設計用地震荷重レベルの妥当性を確率論的な視点から検討してきた。
- 4) 想定地震に対する予測地震動の精度が十分であっても、サイト波として適切であるとは限らない。限られた数の予測地震動を用いて検討しても、それが何を検証したことになるのか明確でないことが多い。このような背景の下、予測地震動を基にして如何にして

設計用地震荷重を設定するかについて検討してきた。枠組み構築を行った性能設計用地震荷重策定法を表2に示す。

表1 15年間の委員会活動のまとめ

主査	目標	主な検討項目	出版物など
大澤胖主査 WG1(松島豊 WG 主査)	新耐震設計法の施行に伴う課題抽出と新提案	・重要度係数 ・確率論的評価	地震荷重—その現状と将来の展望(1987) [3]
松島豊主査 WG2(田治見宏 WG 主査)	地震荷重の新たな体系化の模索と5種類の入力地震動作成法の提案	・震源と波動伝播 ・動的相互作用 ・地震応答特性	地震荷重—地震動の予測と建築物の応答」(1992) [4]
西川孝夫主査 多次元入力・多次元挙動WG (洪忠憲 WG 主査)	構造解析と安全性評価法の検討	性能評価のための多次元入力・応答の評価	多次元入力地震動と構造物の応答 (1998) [5]
石山祐二主査 限界状態に対応した地震荷重検討WG (太田外気晴 WG 主査)	兵庫県南部地震の地震動と建物被害を踏まえた地震荷重のあり方の提案	内陸直下地震に着目した地震動特性と応答特性の評価と限界状態を考慮した地震荷重評価	地震荷重—内陸直下地震による強震動と建築物の応答 (2000) [6]
藤堂正喜主査 大川出主査	性能設計用地震荷重策定法の枠組み構築	国内外の地震荷重のレビューと性能設計用地震荷重の提案 (表1)	地震荷重—性能設計への展望—(2008) [7]
林康裕主査	過大入力に対する性能設計用法の構築	過大入力地震動に対する応答指標と地震荷重の設定法の検討	出版予定(2012)

表2 性能設計用地震荷重策定法の分類 [7]

方法	性能設計用地震荷重
方法1	現行の告示スペクトルに適合する模擬地震動など
方法2	現行の告示スペクトルに適合する模擬地震動などを定数倍したもの
方法3	予測地震動のうち代表的なもの、もしくは、予測地震動の特性をもとに作成した模擬地震動
方法4	予測地震動のうち代表的なもの、もしくは、予測地震動の特性をもとに作成した模擬地震動を定数倍したもの
方法5	すべての予測地震動

3. 地震荷重小委員会を取り巻く環境と活動状況

まず、本小委員会の活動の特徴を明確にする上で、社会的なニーズとの関係を記述する。

- 1) 学会独自の地震荷重案の立案を行うとともに、新耐震設計法や限界耐力計算などの国が定めた地震荷重に関わる基準類が施行されれば、運用上の課題や積み残された課題の解決や合理化のための検討が必要となる。
- 2) 兵庫県南部地震においては甚大な建物被害が発生した。しかし、設計で慣用されてきた設計用入力地震動のレベルを大きく上回る過大な観測地震動が観測されたことを考えると、クライテリアぎりぎりに設計され、被害も軽微であった建物のシミュレーションは困難となる(「観測地震動と建物被害との乖離」)。その一方で、発生が懸念される大地震に関して、慣用されてきた設計用地震動レベルを大きく上回る過大な地震動が予測され

る場合がある。今後、性能設計を実質化していく上では、「観測地震動と建物被害との乖離」を埋めて、設計用地震荷重に対応した耐震設計目標の説明能力を向上していく事が不可欠となっている。

- 3) 兵庫県南部地震後、全国各地で被害地震が多発するとともに、K-NET や KiK-net などの地震観測網の充実を背景として多くの強震観測記録が蓄積され、そのシミュレーションを通じて強震動予測手法の高精度化が行われてきている。これにより、強震動予測結果を設計用地震動へ反映するための基盤が概ね整備されている。
- 4) 建物に要求される設計目標も多様化しつつある。近年に発生した多くの地震で震度 VI クラスの地震動による被害経験に基づき、人的安全性や構造的損傷だけでなく、機能維持やBCPの観点から、外壁・天井・間仕切り壁などの内外装材や、建物内の設備・家具・什器類・製造機器類・医療器具などの被害低減も望まれている。

次に、学会内での動向としては、2014年頃を目標に建築物荷重指針・同解説の改定や、杭基礎の二次設計を目指した建築基礎構造設計指針への改定に向けて作業が進んでいる。これに合わせて、地震荷重小委員会としては、兵庫県南部地震以降に蓄積してきた知見を踏まえ、反映可能な地震荷重設定法、設計方法（計算手法）などを整備していく必要がある。このため学会内の委員会との連携強化も重要であると認識しており、振動運営委員会傘下の小委員会にとどまらず、荷重運営委員会(高田毅士委員長)や基礎構造運営委員会(中井正一委員長)と、年2回程度を原則として連絡会を開催して情報交換を実施している。

一方、海溝型地震に起因した長周期地震動や内陸直下地震によるパルス性地震動に対する関心が高まり、本小委員会も積極的に取り組んでいる。特に、海溝型巨大地震の再現期間が比較的短く切迫度も年々増大している上、被害が広域化するとともに大都市が位置する平野部で長周期構造物の被害が懸念される。このため、長周期地震動の予測と既存建築物の耐震性評価・向上に関する研究が、建築学会で横断的・総合的に実施されている。

これに対して、内陸地殻内地震に関しては、パルス性の予測地震動を特性化・理想化して設計に用いる海外における新たな地震荷重^{例えば[8]}の取り組みに比べて遅れていたように思われる[12]。これは、日本では、前述の「観測地震動と建物被害との乖離」に関する関心が高く、兵庫県南部地震以降に発生した地震に対する強震動と建物被害のシミュレーションが中心であった事に起因している。いずれにしても、観測地震動と同程度の過大な予測地震動をレベル2地震動として用いた場合、従前と同じ設計クライテリアでは設計が困難となる。このため、大阪市域では、上町断層帯の地震の予測地震動を、1/2程度に震幅調整した設計用地震動を慣用的に用いてきた[9]。しかし、最近になって、新たな予測地震動(図1, [10])を基に、震源近傍のパルス性予測地震動を用いた設計用地震動を策定して、地震動レベルに応じた性能設計法の枠組みを新たに構築(図2, [11])するとともに、パルス性地震動を正弦波パルスで近似し、設計検討に用いるための方法論を導入して(図3, [12])、実務設計へ活用しようとする動きが関西地域で広がっている。

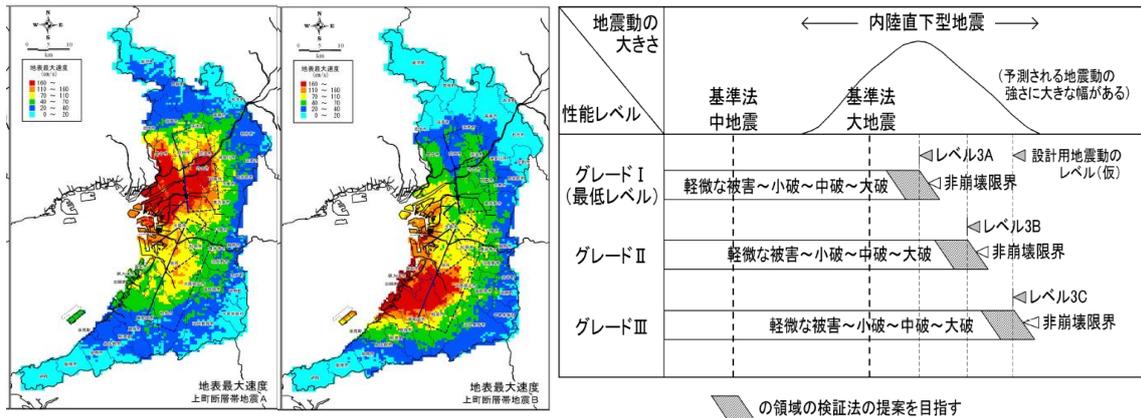


図1 上町断層帯の地震の予測地震動[10] 図2 過大な予測地震動に対する性能設計例[11]

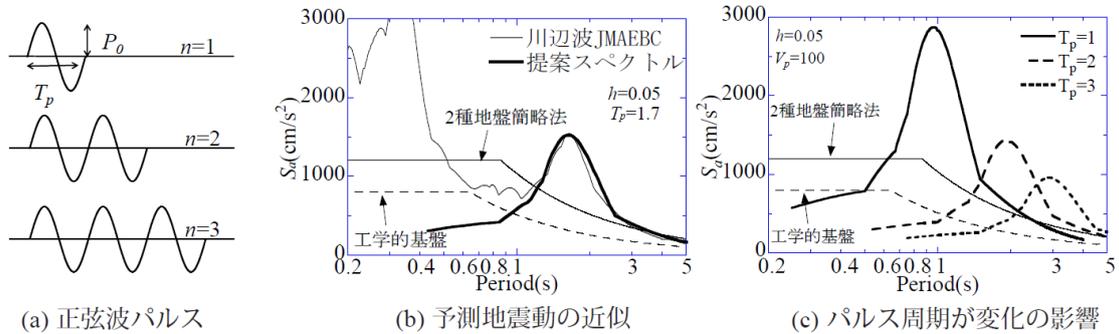


図3 内陸地殻内地震の予測地震動の正弦波パルス近似に基づく設計用スペクトルの例[12]

4. 今後の課題と展望

海溝型地震や大都市圏を襲う内陸地殻内地震において懸念される過大な予測地震動を主たる研究対象として、耐震性能を的確に評価できる応答指標とそのクライテリア、それらを踏まえた設計用地震荷重の設定方法の提案を下記のような視点から行う。そして、研究成果を展開・普及させるためのシンポジウム開催や刊行物の出版に向けた活動を予定している。

1) 耐震性能制御のための地震荷重

設計用地震荷重は、計算法や設計クライテリアとセットとなって設計実務で用いられ、建物の耐震性チェックに用いられる。例えば、限界耐力計算においては、設計用地震荷重を加速度応答スペクトルで定義し、応答スペクトル法に基づいて建物の応答変形量を計算し、限界変形以下となっていることを確認する。限界耐力計算法は、表層地盤での地震動増幅効果や動的相互作用効果を考慮可能な方法であり、理論的に一歩も二歩も進んだ考え方を実務設計に導入したと評価される。しかし、実際に適用された建物規模は、安全限界の等価固有周期にして1～2秒以上のものが殆どで、変位一定則が成り立ちやすい性質を持っている。このため、残念ながら、設計用スペクトルのレベルを規定した時点で、耐力

にあまり関係せず建物の応答変形量が定まってしまうため、限界変形量を定めても殆ど意味がない。このため、新耐震設計法と同等として定めたはずの設計用地震荷重が、新耐震設計法では許容されなかった低い耐力の建物を世に生み出していくこととなった。このように、設計用地震荷重(耐震設計法)としての健全性は、必ずしも理論的合理性で決まる物ではなく、生み出される建物の耐震性をどのように制御できるかの視点が不可欠である。実は、この問題は限界耐力計算に始まったことではない。超高層建物のレベル 2 地震動の速度振幅を 50cm/s と決めた時点で、損傷集中さえしなければ、大凡の変形量は決まってしまう。動的応答解析が十分に機能していたとは考えにくい。逆に、サイト波がこのレベルを超えたとき、慣用的に用いられてきた設計クライテリアを満足しないのは極自然な成り行きと考えられる。設計クライテリアの取り扱いも含めて議論されるべきであろう。

以上のような問題点を解決していくためには、予測地震動の地震動特性と建物の応答特性を十分に把握するとともに、適切な設計クライテリアを設定する必要がある。つまり、地震動特性と建物特性に応じて建物の耐震性を横断的に評価する応答指標を確立し[13]、合理的な地震荷重(と設計クライテリア)の設定に向けた取り組みが必要である。

2) リスク管理の視点からの地震荷重

これまでも述べてきた様に、強震動予測精度の向上に伴い、サイト特性を反映した地震荷重を設定することの重要性は疑いもない。しかし、サイト特性を反映することは、サイト波を直接設計用地震動として用いるだけでは十分とは言えない。例えば、河角マップ他では 10 倍以上差のあった地震危険度を、地震地域係数 $Z=1.0, 0.9, 0.8, 0.7$ としている[7]のは、建物に要求する最低限の耐震性能水準を制御しようとする高度な工学的判断に基づいている。今後は、このような工学的判断に対する説明性を高めていく必要がある。また、上町断層帯の地震のように、告示スペクトルを遙かに上回る地震動が予測される場合がある。このような場合にも、高度な工学的判断が必要で予測地震動を十分な配慮無くそのまま設計に使う事ができない場合もある。極端に過大であれば、設計が困難な構造種別や規模の建物が出てくるため、地域や住文化の存亡に関わりかねない。恐らく、伝統構法の木造住宅などは倒壊を避けることが困難であろう。しかし、いくら倒壊危険性が高いからと言っても、過疎地に建つ個人住宅に、再現期間の極めて長い内陸地殻内地震に備えて基準法で要求しているよりもはるかに大きな設計用地震荷重を設定することは行き過ぎと言わざるを得ない。その一方で、影響度を考えれば、超高層建物のように、倒壊などの最悪のケースはどうしても避けなければならない建物も存在している。

これらの問題を解決するためのヒントは、「発生確率」と「影響の大きさ」の組み合わせとして考える「リスク」管理の視点ではないだろうか？個々の建物に要求される耐震性は基準法が要求する最低水準や所有者と設計者の間の協議で定められるのが良いと考えるが、地域や日本全体への影響度も含めたリスク管理・危機管理の視点を持った研究も必要であろう。もっとも、地震荷重という言葉で語るには荷が重いかも知れないし、将来的には地

震荷重小委員会の枠にとらわれず、より大きな体制で取り組むべき課題かもしれない。

5. まとめ

地震荷重小委員会は、今後、細分化された学問領域を横断・総合し、関連委員会との連携強化をはかる一方で、小委員会活動の独自性をより明確化していく必要がある。また、大振幅レベルの入力地震動に対し、建物の終局状態に至るまでの耐震性能を的確に評価できる応答指標と設計クライテリアの提案を行うとともに、建物の倒壊抑止など安全性を制御するために必要な地震荷重設定法の提案を行っていききたい。

参考文献

- [1] 中川恭次：「地震荷重第1案について」建築雑誌、日本建築学会、1973.9.
- [2] 構造委員会振動運営委員会、地震荷重研究と耐震設計、「建築振動工学の発展と耐震設計」、日本建築学会、2007.4.
- [3] 日本建築学会、「地震荷重－その現状と将来の展望」、日本建築学会、1987.11.
- [4] 日本建築学会、「地震荷重－地震動の予測と建築物の応答」、日本建築学会、1992.5.
- [5] 日本建築学会、「多次元入力地震動と構造物の応答」、日本建築学会、1998.1.
- [6] 日本建築学会、「地震荷重－内陸直下地震による強震動と建築物の応答」、日本建築学会、2000.6.
- [7] 日本建築学会、「地震荷重－性能設計への展望」、日本建築学会、2008.3.
- [8] G.P. Mavroeidis, A.S. Papageorgiou : A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 3, pp. 1099-1131, June, 2003.
- [9] 亀井功, 西影武知：現状の設計用地震荷重と予測地震動との対応, シンポジウム「大阪を襲う内陸地震に対して建物をどう耐震設計すれば良いか?」, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会, pp.25-29, H20.3.
- [10] 大西良広, 澤田純男：上町断層について想定される地震動, 第36回地盤震動シンポジウム、度重なる被害地震から設計用入力地震動を考える、新・入力地震動作成手法の使い方と検証(その2)-, pp. 83-90、2008.
- [11] 多賀謙蔵, 角彰, 近藤一雄：上町断層を想定した設計用地震動についてのJSCAの取り組み、内陸地震に対して構造設計者はどう対応すればよいか? 「地震荷重と構造設計」, pp.55-58、2009.10.
- [12] 鈴木恭平, 川辺秀憲, 山田真澄, 林康裕：断層近傍のパルス地震動特性を考慮した設計用応答スペクトル, 日本建築学会構造系論文集, No.647, pp.49-56, 2010.1.
- [13] 耐震設計小委員会、「増大する地震動レベルと建物の終局耐震性の課題と展望－地震動と建築物の耐震性との関係を横断的に評価する指標の確率に向けて－」, 日本建築学会、2008.11.

強震観測とモニタリング（その1）強震観測の立場から

強震観測小委員会・鹿嶋 俊英(建築研究所)

1. はじめに

日本の強震観測は 1950 年代に始まり、その黎明期より建物は観測の重要な対象であった。1970 年代の超高層建物の建設や 1980 年代の免震建物の実用化でも、実建物による設計法の検証や効果の確認が不可欠であり、強震観測は重要な役割を果たしてきた。強震観測は古くから建築と密接な関係にあったと言える。

日本建築学会に設けられた強震観測小委員会は、建物の耐震構造や地震防災の立場から強震観測と強震データを扱う研究委員会である。その組織形態に変遷はあったものの、長い歴史を有する研究委員会であり、現在は構造委員会振動運営委員会の下に位置付けられている。本稿は、強震観測小委員会の活動を通して、兵庫県南部地震以降の強震観測の動向を振り返る。なお、強震記録は、振動運営委員会傘下の全ての小委員会の研究分野で活用されており、その応用に関しては各小委員会からの話題提供に含まれるので、ここでは強震観測網、強震記録、及び観測技術に密接に関わる話題に焦点を合わせる。

2. 強震観測小委員会の活動

強震観測小委員会の活動履歴については他の講演で概説されるので、ここでは小委員会が開催してきたシンポジウムを振り返り、対象としてきた研究課題の変遷を追いたい。小委員会では 1995 年からこれまでに 5 回の「強震データの活用に関するシンポジウム」と題したシンポジウムを開催している。各シンポジウムの副題は以下のとおりである。

- ・ 第 1 回(1995 年 4 月 12 日) - 強震データベースの現状と共同利用の試み -
- ・ 第 2 回(2000 年 12 月 1 日) - 建物の耐震性能設計を目指した強震観測 -
- ・ 第 3 回(2002 年 12 月 18 日) - 建物の強震観測に関する将来像 -
- ・ 第 4 回(2005 年 3 月 11 日) - 最近の地震に建築物はどう応答したか -
- ・ 第 5 回(2008 年 12 月 15 日) - 社会に役立つ強震観測 -

第 1 回のシンポジウムは当初、1995 年 1 月 20 日の開催が予定されていたが、直前の兵庫県南部地震の発生を受けて 4 月に延期された。副題は「強震データベースの現状と共同利用の試み」とされ、当時の強震データベースの現状がレビューされ、その有効活用が議論された^{1),2)}。兵庫県南部地震以前には、大規模な強震観測ネットワークや広く公開されたデータベースは存在しておらず、多くの機関が保有する強震データを如何に有効に活用するか、あるいは複数の機関が共同で観測したりして観測の密度を上げる方策が議論された。

第 2 回の開催は 2000 年であり、それまでに日本の強震観測の状況は激変した。後述するように、5,000 以上の地盤上の観測地点が新設され、また多くの強震データがインターネット等を通じて容易に入手できるようになった。シンポジウムではこのような状況を踏まえ、「建物の耐震性能設計を目指した強震観測」と題して、強震観測や強震データをどのように建物の耐震設計に役立てるかという観点で議論が行われた^{3),4)}。

第3回のシンポジウムは、「建物の強震観測に関する将来像」との副題で、2002年に開催された^{5),6)}。充実した地盤上の強震観測に比べて数量的に劣り、また対象建物や地域的な偏りが存在する建物の強震観測を改善する方向が議論の的であった。

第4回のシンポジウムは2005年に開催され、副題は「最近の地震に建築物はどう応答したか」であった^{7),8)}。21世紀に入り、2003年十勝沖地震や2004年の紀伊半島南東沖の地震、2004年中越地震など大きな地震を経験し、地盤上だけではなく建物内での強震記録も蓄積されてきた。第4回のシンポジウムはそのような状況を受けたものである。

第5回のシンポジウムは「社会に役立つ強震観測」との副題で、2008年に開催された^{9),10)}。強震観測の普及のためには、必要なインフラとして社会に広く認知してもらうことが不可欠であり、その観点から建物の強震観測が社会にどう役立っているか、また社会に役立つ強震観測とはどういうものかが議論された。

これまでの強震データの活用に関するシンポジウムのテーマを概括すると、強震データがまだ十分ではなかった第1回のシンポジウムは、観測地点の不足をどのように補い、限られた観測データをどのように有効活用するかが論点であった。一方、兵庫県南部地震以降のシンポジウムでは、地盤系の観測地点の増強を受けて、それを建物の耐震設計にどう生かすか、あるいは建物の強震観測を如何に充実させるかが課題となった。

3. 強震観測の進展と成果

1995年以前の強震観測は、複数の機関がそれぞれの強震観測網を維持し、強震観測事業推進連絡会議が強震観測機関の間の連絡調整や情報収集と整理、あるいは出版機能を担っていた¹¹⁾。観測を担う機関の数は多かったが、それぞれの機関の観測網の規模は大きなものではなく、互いに補い合うことが不可欠であった。現在でも強震観測事業推進連絡会議の枠組みは維持されているが、強震観測を取り巻く状況は、兵庫県南部地震以前と大きく異なっている。最も大きな進展はもちろん、地盤系の観測地点の充実である。

まず、防災科学技術研究所の強震観測ネットワーク(K-NET)と基盤強震観測網(KiK-net)の整備が挙げられる。K-NETは全国をほぼ20 kmから25 km間隔で覆う1,000地点以上の観測網である¹²⁾。その均一な密度が特色であり、質の高い強震記録を供給し続けている。強震計は地表のみに設置されているが、すべての観測地点で深さ20 mまでのPS検層が行われており、表層地盤の影響もある程度検討することができる。K-NETで得られた強震記録はウェブ上で即座に公開される。

KiK-netは、地震調査研究推進本部の推進する地震に関する基盤的調査観測(基盤観測網)整備の一環として設置が進められており、高感度地震観測網(Hi-net)に併設されている¹³⁾。700地点近い観測施設は、高感度地震計の埋設のために掘られたボアホール内と地表に2台のセンサーを有している。KiK-netの強震記録もK-NET同様ウェブ上で公開されている。

気象庁は、従来基本的には体感によって決定していた震度を、加速度記録から演算によって算出する方式に改め、震度観測地点を大幅に増強した¹⁴⁾。現在、気象庁直轄の震度観測地点は約600地点となっている。各観測地点で用いられている震度計は、基本的に強震計と同一の機構を有し、加速度記録が収録される。気象庁の震度計で得られた加速度記録は気象業務支援センターから定期的に刊行されている。

更に、全国の都道府県は、消防庁の補助金を得て、震度情報ネットワークを整備した。これは、各都道府県下の市町村単位で震度計を設置し、震度情報を即座に集約して防災対策に役立てようというものである。震度計の総数は 2,800 台に及ぶ。震度情報ネットワークで得られた加速度記録の一部は、大都市圏強震動総合観測ネットワークシステムとして公開されている¹⁵⁾。また、大きな震度が観測された場合は、気象庁が震度情報ネットワークの加速度記録を収集して、公開する。

さて、これらの強震計や震度計は 1996 年から 1997 年にかけて新たに整備されたもので、その信頼性を維持するためには観測機器の更新が不可欠であった。このため K-NET では 2004 年から、KiK-net では 2007 年から新しい機器への更新が進められた。また、都道府県の震度情報ネットワークについても、総務省消防庁の交付金が措置され、2010 年から更新が進められている。強震観測小委員会では都道府県の震度計の更新に際し、自治体の震度計で得られた記録が防災関連の研究開発や技術開発に活用されるように、地震波形データの保存や地震波形データの書式と取得方法の標準化を求めて、消防庁に要望書を提出した¹⁶⁾。

ここで述べた観測網の観測地点の総数は 5,000 を超える。自治体の震度情報ネットワーク以外の観測記録は容易に入手できる。これらの観測網から得られた膨大なデータセットは、地震学や地震工学の分野で様々な成果を挙げている。震源から地盤震動に至るまで研究対象は広範で、ここでは詳細に述べることはできないが、例えば文献 17) にまとめられている。

また、個々の記録を見ても、話題となった強震記録は多い。建物の被害や地震応答に関連するものを取り上げれば、例えば 2004 年新潟県中越地震では、小千谷小学校の校庭にあった K-NET 観測地点(NIG019)で、最大加速度が 1.5G を超える強震記録が得られた。震度に換算すると 7 となる強烈な地震動であったが、小学校校舎の被害は小破であり¹⁸⁾、観測記録と建物被害との関係をどのように説明するかが課題として浮かび上がった。また、2007 年新潟県中越沖地震では、柏崎市庁舎の敷地内に設置された K-NET 柏崎(NIG018)の強震計と新潟県震度情報ネットワークの震度計で、地盤の液状化に伴うサイクリックモビリティが顕著に表れた強震記録が得られた。K-NET 柏崎の記録の最大加速度は 0.7G、震度に換算すると 6 強となる。敷地内に建つ市民ホールは大破したが、市庁舎は小破であり、その地震動入力メカニズムが詳しく検討された¹⁹⁾。

4. 建物の強震観測の現状

日本における建物の強震観測の全貌は、実はよくわかってはいない。建築研究所や都市再生機構などの独立行政法人、電力、NTT や建設会社などの民間機関、大学などの教育機関など様々な機関がそれぞれの立場で建物の強震観測を実施している。観測対象建物の所有者や管理者の意向で表に出せない、あるいは観測の目的が研究的ではなく論文などの形で表に出ない事例も相当数あると思われ、正確な状況の把握は困難である。それでも全体像の把握を目指して、いくつかの調査が行われている。

筑波建築研究機関協議会(BRIC)の勉強会では、1990 年から 2001 年までの日本建築学会大会梗概集を中心に文献調査を行い、当時の建物の強震観測の現状をまとめている²⁰⁾。この調査では、127 件の観測建物が抽出されている。また、建築研究所は、2003 年に公団や電力等の公的機関及び建設関係の民間企業を対象に、建物を対象とした強震観測のアンケート調査

を行い、159 事例をまとめている²¹⁾。両者の結果には少なからぬ重複があると思われるが、その実数は定かではない。両者の結果を併せると、以下のような傾向が指摘できる²²⁾。

- 近年の建物の強震観測は建設系の企業が主要な担い手となっている。BRIC の調査では半数以上、建築研究所の調査では 2/3 の観測物件が建設会社の管理となっている。加えて大学、設計事務所、電力/通信系、公団や鉄道系の企業など様々な機関によって観測が行われている。
- 建物の強震観測の場合、新しい技術の開発や検証が主要な動機のひとつである。このため近年導入が盛んな免震構造や制振構造の建物の観測が観測事例の中の多くを占めている。BRIC の調査では 1/3 が、建築研究所の調査では半数以上が免震あるいは制振構造である。
- このような背景から、首都圏や大阪、名古屋などの大都市圏での観測事例が多く、BRIC の調査では 2/3 を、建築研究所の調査では 9 割が大都市圏にある。都市圏には建物数が多く、また新しい技術を導入した物件も多くなるので当然とも言える。一方建物の階数を見ると極端な偏りはなく、幅広い分布を示す。

これらの調査結果は若干古いものなので、その後の建物の強震観測の動向を探るために、強震観測小委員会が更に文献調査を行った²³⁾。調査対象は BRIC の調査以降の 2002 年から 2008 年の日本建築学会大会梗概集で、この間に発表された強震観測の対象建物は 119 棟と集計されている。全般的な傾向は BRIC の調査と変わらないが、木造建物の観測が行われるようになったことや、北海道、宮城県、新潟県などの観測事例が増えたことが指摘されている。調査期間内に北海道、東北、北陸で地震が頻発したことも影響していると思われる。これらの調査結果を踏まえ、建物の観測総数は 300 棟程度と見積もられている。

5. 建物の強震観測の動向

強震観測の動向をまとめるのは難しいが、最近重視されている観測対象や、取り組まれている研究や技術開発について概観を試みる。

5.1 入力地震動の検討

前章でも述べたが、地表で観測される地震動の大きさと、近傍の建物の被害の程度との不整合は、近年しばしば指摘されるようになった。多くの地震動記録は地表で得られており、また設計用の地震動は工学的基盤上や地表面上で規定される場合が多い。このため、信頼できる耐震設計を行うためには、入力地震動の適正な評価が極めて重要な課題となっている。これまでも、地盤と建物の動的相互作用として研究が進められてきているが、実際の現象は複雑で、強震観測によって現象面からの解明の必要性は高い。

5.2 長周期地震動と長周期建造物の応答

2003 年十勝沖地震の苫小牧での石油タンクの火災は、長周期地震動が世間の注目を集める契機となった。また、2004 年中越地震では、震央から 200km も離れた都内の超高層建物のエレベーターが破損するなど、関東平野での長周期地震動の励起が問題となった。長周期建造物の増加によって長周期地震動の問題の重要性は増しており、長周期建造物は長周期地震動の励起が想定される大都市圏に多い。近年の観測技術の進展によって、長周期地震動とそれを受ける長周期建造物の挙動は徐々に明らかになってきているが、歴史も浅く観測事例は限られている。緊急に強震観測の強化が望まれる分野である。

5.3 建物の健全性評価

建物の地震応答、特に建物が損傷を受けるような大きな地震動を受ける場合の挙動は、建物の強震観測の本来の重要な標的である。実際には強震観測対象の建物は限られており、損傷を受けた地震の記録を得ることは難しい。それでも軽微な被害を受けた建物の観測事例もいくつか報告されており、また、振動特性の経年変動や振幅依存性などの知見も蓄積されてきている^{例えば 24)}。この分野は近年さまざまな取り組みがなされており、しばしばモニタリングという言葉で表わされる。詳細は構造ヘルスマニタリング小委員会の発表に譲るが、建物の健全性診断や損傷評価は、建物の所有者や利用者に安全に関わる情報を提供できる有用な技術であり、建物の強震観測の普及にも大きな役割を果たすと思われる。

5.4 新技術を用いた観測機器の開発

強震計は、堅牢で耐久性の高い機器であるべきとされ、信頼性の高い技術や部品を用いるため、それなりのコストが必要であった。現在でも基幹となるような観測は、このような考えに支えられている。一方で、建物の観測では、少なくとも建物の基礎と頂部、場合によっては更に広がりを持ったセンサー配置が必要であり、如何にコストを下げるかが普及の鍵となる。そこで、ある程度性能を犠牲にしても多数のセンサーを設置したいとの考えも成り立つ。近年技術開発が盛んな半導体技術を使ったセンサーや LAN を使ったデータ転送などは大幅なコスト低減を可能としている。観測の大幅なコスト低減は、構造ヘルスマニタリングの実用化にも必須の要件である。

5.5 建築研究所の取り組み

最後に建築研究所が取り組んでいる課題を紹介する。建物の強震観測事例を大幅に増やすことができれば、それは最善である。しかしながら現状では厳しいと言わざるを得ず、限られた予算や人員で最大の成果を挙げることのできる観測を目指す必要がある。このような状況で、建築研究所では入力地震動や長周期構造物の観測に重点的に取り組んでいる。また、国土技術政策総合研究所は、総合技術開発プロジェクト「地震動情報の高度化に対応した建築物の耐震性能評価技術の開発」を進めており、このプロジェクトでは”各種建築物の地震観測によるデータ等を用いて地表面の「地震動」と建築物に作用する「地震力」との関係を解明する”ことを柱としている²⁵⁾。実際に、入力地震動の解明に焦点を絞った強震観測もいくつか計画されており、観測地点の選定にあたっては建築研究所の強震観測との連携を図っているところである。

6. 今後の課題と展望

強震観測は地震が発生して初めて成果が得られるものであり、長期的展望に立って観測網を整備し、維持管理してゆく根気の良さが求められる。一方で、予算に見合った成果を常時発信してゆくことが、長期に継続するために不可欠である。更に入力地震動や長周期地震動など時代の要請に的確に応えて行くことも大切なことである。継続性と適応性を両立させるためには、基幹的な観測と課題対応型の観測の二面性が必要となる。

観測機器に関しても、基幹となる観測に用いる高性能な強震計と、広く普及に供する普及型の強震計へと二極化の方向にあると考えられる。長期に渡って維持し、リファレンスとなるような観測は基幹的観測と位置付け、優れた信頼性と耐久性を有する高性能な強震計を用

いる必要がある。一方で、広範かつ大量に観測地点を増やし、どこにでもある強震計を目指すためには、廉価な観測システムが必要である。また、広く一般への普及を図るには、地域防災や建物のメンテナンスシステムへの組み込みなど、社会に役立つ工夫も必要となる。

建物の強震観測は、その目的として耐震設計技術の向上を謳っている。しかしながら、その成果が陽な形では見えにくい。更なる観測網の増強に加え、設計への反映や行政への橋渡しで一層の工夫が必要である。数十年同じ場所で観測を続けて見えてくることもあるし、ひとつの地震を多面的に捕らえて分かることもある。長期的戦略が必要な強震観測を、如何に社会的に必要なインフラとして認知してもらうかが課題となっている。

参考文献/参照サイト

- 1) 強震データの活用に関するシンポジウム資料 -強震データベースの現状と共同利用の試み-, 日本建築学会強震データ小委員会, 1995年4月
- 2) 三浦篤, 土肥博: 強震データの活用に関するシンポジウム, 建築雑誌, Vol.110, No.1373, pp.83-84, 1995年6月
- 3) 第2回強震データの活用に関するシンポジウム資料 -建物の耐震性能設計を目指した強震観測-, 日本建築学会強震観測小委員会, 2000年12月
- 4) 内山泰生: 第2回強震データの活用に関するシンポジウム「建物の耐震性能設計を目指した強震観測」, 建築雑誌, Vol.116, No.1469, pp.96-97, 2001年3月
- 5) 第3回強震データの活用に関するシンポジウム資料 -建物の強震観測に関する将来像-, 日本建築学会強震観測小委員会, 2002年12月
- 6) 元木健太郎: 第3回強震データの活用に関するシンポジウム「建物の強震観測に関する将来像」, 建築雑誌, Vol.118, No.1504, pp.96-97, 2003年4月
- 7) 第4回強震データの活用に関するシンポジウム資料 -最近の地震に建築物はどう応答したか-, 日本建築学会強震観測小委員会, 2005年3月
- 8) 田中清和: 第4回強震データの活用に関するシンポジウム「最近の地震に建築物はどう応答したか」, 建築雑誌, Vol.120, No.1538, pp.63-64, 2005年10月
- 9) 第5回強震データの活用に関するシンポジウム資料 -社会に役立つ強震観測-, 日本建築学会強震観測小委員会, 2008年12月
- 10) 栗田勝実, 安井健治: 第5回強震データの活用に関するシンポジウム「社会に役立つ強震観測」, 建築雑誌, Vol.124, No.1590, p.72, 2009年5月
- 11) 大谷圭一: K-NET完成までの強震観測事業について, 防災科学技術研究所研究資料第264号, pp.17-20, 2005年3月
- 12) 防災科学技術研究所強震ネットワーク K-NET: <http://www.k-net.bosai.go.jp/> (参照: 2011年2月1日)
- 13) 防災科学技術研究所基盤的調査観測 KiK-net: <http://www.kik.bosai.go.jp/> (参照: 2011年2月1日)
- 14) 石垣祐三: 全国の震度観測網, 防災科学技術研究所研究資料第264号, pp.99-106, 2005年3月
- 15) 首都圏強震動総合ネットワーク: <http://www.sknet.eri.u-tokyo.ac.jp/> (参照: 2011年2月1日)
- 16) 日本建築学会: 自治体震度情報ネットワークの更新に関する要望書, 2009年7月
- 17) 神野達夫: 強震観測網の飛躍的展開, 日本建築学会大会構造部門(振動)パネルディスカッション資料, pp.2-24, 2010年9月
- 18) 日本建築学会: 2004年10月23日新潟県中越地震災害調査報告, 日本建築学会, 2006年8月
- 19) 護雅史, 飯場正紀, 山本耕司, 宮本裕司, 古山田耕司, 小山信, 鹿嶋俊英: 2007年新潟県中越沖地震における強震観測記録を用いた被災建物の応答評価, 日本建築学会構造系論文集, No.651, pp.933-942, 2010年5月
- 20) Okawa, I., et al. (2003): Status Report on Strong Motion Recording for Buildings in Japan, Proceedings of the 35th Joint Panel Meeting on Wind and Seismic Effects, Public Works Research Institute
- 21) 小山信, 飯場正紀, 鹿嶋俊英: 建物の強震観測現状調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.877-878, 2004年8月
- 22) 鹿嶋俊英, 大川出, 小山信: 建築物における強震観測, 第4回強震データの活用に関するシンポジウム, pp.3-8, 日本建築学会, 2005年3月
- 23) 片岡俊一, 境茂樹, 栗田勝実, 神原浩, 山村一繁, 安井健治: 建築物における強震観測の現状調査, 日本建築学会技術報告集, 第32号, pp.87-90, 2010年2月
- 24) 鹿嶋俊英, 北川良和: 強震観測記録から推定した建物の振動特性の特徴, 日本建築学会技術報告集, No.22, pp.163-166, 2005年12月
- 25) 小豆畑達哉, 西山功, 井上波彦, 石原直, 向井昭義, 飯場正紀, 鹿嶋俊英: 建築物の地震観測に基づく設計用地震力の検討について. 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.21-22, 2010年9月

強震観測とモニタリング（その2）構造ヘルスマニタリングの立場から

構造ヘルスマニタリング小委員会・西村 功（東京都市大学）

1. はじめに

構造ヘルスマニタリング小委員会は、2002年4月より「振動・波動に基づく構造性能評価WG」として活動を開始し、同年12月より小委員会に昇格した後、約10年間継続的に活動を行ってきた。本小委員会は、「振動計測による建物構造物の損傷検知」を主たるテーマとしており、関連する様々な応用技術に関する理論研究、実証研究、情報の交換、耐震構造技術へのフィードバックなど多岐にわたる活動を行っている。振動運営委員会主催の本シンポジウムでは、過去の委員会活動を振り返り、建築構造物の振動観測技術と将来展望について考えてみたい。

2. 構造ヘルスマニタリング技術とは何か？

本シンポジウムが建築学会の構造委員会傘下にある振動運営委員会主催で開催され、構造ヘルスマニタリング小委員会は振動運営委員会の中の小委員会であることを踏まえたうえで、この技術が今後の社会あるいは耐震構造工学に与える影響について改めて考えてみたい。そのためには、耐震構造工学の置かれている昨今の現状について、まず考察する必要がある。その後、耐震工学としての構造ヘルスマニタリング技術とは何か、同技術の現状と今後について私見を述べたいと思う。

2.1 阪神淡路大震災後の建築構造工学の歩み

建築耐震構造学は我が国における構造工学の一分野ではあるが、地震大国である我が国においては構造工学分野の必須技術体系として今日まで発展してきた。しかし、建築耐震構造学は純粋な科学というよりも、震害を教訓として学ぶ姿勢に重きを置き、経験知の蓄積として耐震法規を改定するというプロセスをとって進歩し現在の形をとるに至ったことも忘れてはならない事実である。大きな目で見れば、震害の観察はセンシングであり、耐震規定の改正は社会的なフィードバックである。従って、建築耐震工学は経験と教訓という現象論的な体裁に大きな比重を置いてはいるものの、依然として、その発達の初期から科学としての体裁も整えているのである。勿論、科学としての体裁を整えていないものは、現代社会においては殆ど信頼を得ることができないからでもある。

しかし、科学というものは、現象論的な枠組みから発して、より一般的な因果関係に基づく広範な事象を客観的に説明しようとする方向に向かうのが、歴史的にみても自然な流れである。建築耐震工学のみが世の中の人々が共有している科学に対する普遍的な認識の外に存在することはできない。結局、大地震があり震害に遭遇するたびに耐震規定を改正するというやり方に、多くの人がやり切れなさを感じ始めたのである。大地震とはどれほど大きく、建築構造物の耐震性能とは一体何がどれほど必要なものなのかを客観的に定量化しない限り、耐震規定を法制度の中に組み込むことができなくなったのである。1981年の保有耐力設計法

(新耐震設計法)による耐震構造規定の大きな改正の背景には、以上のような感情が社会全般に存在したことを認識しておかなければならない。

新耐震設計法が施行された当時、我々は科学的な思考方法により耐震工学が到達した高いレベルに対して、誇りさえ感じたものである。ここでいう科学とは、前提条件(サポジション)を設定し、論理の展開(ロジック)によって合理的な結論(コンクルージョン)を導くことを意味している。もしも得られた結論が観測結果や実験結果と整合しなければ、前提条件は間違ったものであり、論理展開が正しいとしても、提示された結果が一般的だとは言えない。逆に、導かれた結論が常識を打ち破るような結果を予想するものであったとしても実験結果や観測事実を合理的に説明できるものであれば、設定された前提条件を否定することはできないのである。これが、科学的な見方である。新耐震設計法が施行された当時、我々は正しいと信じる前提条件のもとに論理を展開し、結果として耐震規定が合理的に改正されたと思ったのである。

当時、皆が検証せずに認めた一つの前提条件があった。それは、大地震の大きさである。大地震として認識されるレベルについて、当時は極めて大まかな議論しかできなかったにもかかわらず、不思議なことに殆どの関係者にとって、法律を制定するという観点から見た大地震のレベルについては、完全なコンセンサスが得られたのである。すなわち、大地震と言えば、最大加速度は300ガル程度を超えることはまずないであろう、あるいは、建物応答加速度で考えれば低層建物であっても1Gを超えることはまずないであろう、超高層建物であれば従来の既往地震動で計算しておけば、ほぼ安全であろう、と言った類の認識である。この前提条件があったために、保有耐力設計法は大きな成功を収めたのである。まず、従来の許容応力度設計法で一律0.2と定められていた設計用せん断力ベースシア係数が、保有耐力検討時は1.0に引き上げられた。この事実にも関わらず、最終的に設計が終了した建物に必要とされる鋼材の量はほとんど変化しなかった。設計からみた大地震のレベルは変わらなかったのである。なぜこのようなことが可能だったのであろうか。それは、変形能力があれば必要保有耐力を低下させることができたからである。つまり、耐力ではなく変形能力という、今まで評価されなかった構造性能を耐震規定に盛り込むことによって、設計用地震レベルを5倍まで高めることに成功したのである。

ところが、1995年1月17日を境に我々は非常な矛盾に直面せざるを得なくなったのである。強烈な地震動が観測され、想定外の震害に遭遇したのである。しかし、その後の人々の対応はその立場によって、様々に異なるものとなった。ある者は法律体系を守ろうとし、ある者は地震動の大きさを客観的に観測することから見直そうとし、ある者は新しい技術開発によって事態を打開しようとした。様々な努力が、異なった認識を出発点として一斉に開始されたのである。そのため、社会が予期せずして遭遇することになるその後の様々な問題に対して、我々は一致団結して解決に当たることが極めて困難になったのである。認識を共有するものは一体誰なのか、皆が踏み絵を始めた。これが、事態をより不幸にしまった。実は、全ての問題の根本にある原因を共有することができなかったがために、言い換えるならば小異を捨てて大同につくことができなかったがために、我々は戦略を立てることさえできず、敵と味方の区別さえつかなくなってしまったのである。16年経った今でも、事態は全く変わっていない。以上が阪神淡路大震災から16年経った建築耐震構造学に対する私見である。本日、振動運営委員会主催のシンポジウムにおいて、構造ヘルスマニタリング小委員

会を代表して、この技術が我が国の耐震建築工学の一分野として何ができるのか、阪神淡路大震災後に何ができるようになり、何ができなくなったのかを振り返ったとき、私はこの点をまず明確にしておきたいのである。では、構造ヘルスマニタリング技術を、建築耐震構造学の一分野として見たとき、大地震とは何かについて答えを用意することができるのだろうか？ この一点に絞り、以下の議論を進めたい。

2.2 耐震構造分野における構造ヘルスマニタリング技術の果たすべき役割と定義

既に述べたように、建築耐震構造学における共通のサポジションが崩壊してしまったために、今日における諸問題の解決は著しく困難なものとなった。なぜなら、論理が展開できないからである。もちろん、結論も異なったものになる。このような状況の下で、「構造ヘルスマニタリング技術に何ができるか？」とか、「構造ヘルスマニタリング技術は役に立つ技術か？」などの問いに答えることは、踏み絵を踏むかどうかという問題に過ぎない。もちろん、当事者にとっては死活問題であるが、根本的な問題の解決にはならないのである。然しながら、そのような状況下にあっても言葉の定義を避けていたのでは何も始まらないのである。敢えて、構造ヘルスマニタリング技術とは何かという問いに答えようとするれば、耐震構造工学の最も重要な課題である「大地震レベルの共通認識の醸成に向かって、必要な個別技術を開発し定量的に意味のある耐震性能評価手法を提示する技術体系」とであると定義したい。なぜ、この定義が必要なのかを再度述べれば、建築耐震構造学における共通の前提条件である、「大地震」のレベルについて、皆の同意を取り付けることが今ほど必要なときは無いからである。

阪神淡路大震災直後に、構造界は新耐震設計法で定められていた極限的な地震動レベルと観測された地震動レベルのずれや震害の甚大さに対して合理的な説明責任を果たすことなく次のステップに進んでしまったために、必然的に今日の行き詰まり状態に至ったのである。社会的な説明責任を果たすことなく、耐震構造工学の進歩はない。我々は今日の動きのとれない状況、例えば、25 カイン弾性、50 カイン弾塑性で設計した超高層建物に、記録された地震動を入力すると必ずしも、想定された範囲の応答には留まらないことを社会に説明しているだろうか。新耐震設計法で設計された建物は被害が少ないと主張することは現象論であって、現行の設計体系の前提条件である大地震のレベルを変更しなくても良いかどうかとは別の問題である。もしも、現行設計体系で決めた大地震のレベルが妥当だとしたらその理由は何にかを明確にする必要がある。論理がどれほど正しくとも、前提条件が崩れてしまった以上、結論には一般性がない。姉齒事件の遠因を探れば、「大地震が起こった時には、法令を守っていてもいなくても、結果はどうせ同じだ。」という漠然とした感情が、構造エンジニアの間に広まっていたことが関係してはいないだろうか。

建築基準法は最低レベルの耐震性能を保証したものだから、今後予想される地震動が大きくても耐震規定を変更する必要はないと言ってしまえばそれまでである。実際に、新耐震で設計された建物の被害はそれほどでなかったと言ってしまえば、それまでである。被害の実態と設計レベルに大きな差があることは分かっているのであるから、建物には余力があるとすればその量は一体どれほどなのかを示すべきである。あるいは、建物に入力する地震動は、フリーフィールドで観測された地震動よりもずっと小さいことを示さなければならない。新耐震設計法が成立した背景を考えれば、この設計体系が成立したアプローチそのものを大切

にすべきなのである。1981年以前の、決別したはずの古い手法（震害と教訓）に戻ることは社会が認めないし、また、社会に説明せずに構造界がかってに先祖がえりするようなことは許されないのである。我々は、この点に気がついていないのだとしたら余りにも不勉強であるといえようが無い。実際は、もっと別の理由によって、大地震のレベルに対して明確な回答を避けているのが実情ではないだろうか。大地震のレベルに対する認識の違いが、実務家、研究者、行政、しかも、各個人でさえ大きく異なる現状においては、研究成果や開発成果を法改正によって社会に還元しようとする手法そのものさえ、機能不全に陥っている。こうして我々は、何一つとして解決できない深い闇の中で、現状を追認しているだけなのである。なぜなら、本質的な問題の所在を明確にしないから、解決手段を考察するスタートポイントにさえ立つことができないのである。

現代のように多くの課題を抱えた時代にあっては、我々は一致団結して問題の解決に当たらなければならない。そのためには、大地震のレベルについて少なくとも合意しなければ、何も始まらないのである。だからと言って、大地震のレベルについて同じ考え方を持つ者が集まり、踏み絵を行うことで他者と区別し既得権を守ろうとする努力からは何も生まれないのである。進歩しない社会に住んでいることが、現代人の深い憂鬱の根本原因である。なぜ進歩しないのかと言えば、問題の本質を無視しているからである。問題が設定されさえすれば、皆で協力して問題を解決することが可能である。問題の本質が分かっているながら、躊躇している時間の余裕はもはや無いのである。

では、どうすればよいのであろうか。勇気を出して一歩前に進む以外に無い。例えば、次のように考えたらどうであろうか。中規模の地震であれば、建物の被害も少なく観測結果や地震動記録なども十分な精度を持ったデータが数多く得られるであろう。そのデータをベースとして、新たなディスカッションの出发点としてはどうだろうか。保有耐力設計法で設計された建物では、どの程度の応答値が計測され、数値計算で予想された弾性範囲の変形量を超えたのか超えないのか、また、その後の振動計測などによる損傷検知結果は建物の損傷を計測できるのか否か。さらに、減衰装置などを有する建物の被害は、事前予測に基づく損傷の低減を達成することができたのかどうか。免震構造は事前に予測されたとおりの性能を発揮したであろうか。もしも、予想よりも大きな地震入力に対しても性能を発揮して建物被害を食い止めることができたならば、限界となる地震の大きさはどれだけなのか。その限界値は阪神淡路大震災の時に計測された値と比較して、どちらが大きいのか。少し考えただけでも、大小さまざまで、多種多様な問題に同じ視点からアプローチできることに気づくのである。「大地震」とはどれほどのレベルの地震動か。この一点を明らかにするために、皆が持つ力を合わせようではないか。自分の所属するセクトの既得権を主張するのは、結局は社会的に大きな損失になることを理解すべきである。

中規模の地震動に対して、建物応答と地震動との相関が説明できるようになれば、大地震に対する設計レベルの設定についても構造技術者、あるいは研究者の間で合意を得ることは困難ではない。もしも、ある程度普遍性のある合意が形成されれば、耐震規定の地震動レベルを引き上げるべきか否かの問題についても、自然に合意が形成されるであろう。このように、構造ヘルスマニタリング技術の普及は、構造界が1995年の地震以降、宿題としてきた問題に最終的な回答を与える役割を果たすことになる。否、構造ヘルスマニタリング技術だけでなく、様々な分野で行われてきた個別の努力についても同じことが言えるのである。本

節の冒頭で示した定義は、構造ヘルスマニタリング技術の普及が、大地震の地震動レベルについての社会的合意形成を目的としていることを改めて指摘しておきたい。

2.3 構造ヘルスマニタリング技術と構造設計

我が国の耐震構造技術は、保有耐力設計法という優れた設計体系に集約されている。この設計法はサイスミックリスクのある諸外国のどこでも十分に通用する普遍性を有している。しかし、この設計法を英語に翻訳したところで、どの国のエンジニアもこの設計基準を用いて建築構造を設計しようとはしないであろう。理由は簡単である。日本人の構造設計者で建築基準法に則って設計することが好きな者は、殆ど一人もいないからである。誰一人として生き生きと設計業務に携わることができないような微に入り細に入った法規を英語に翻訳したところで、誰も利用するわけではないのである。設計指針に書かれたとおりに設計しないと許可されないので、膨大な量の設計図書を作成しているに過ぎない。設計者が自らの判断で設計用地震力を設定することも許されていない現状では、設計者の役割はコンピュータ以下となる。思想的には大変優れた設計体系でありながら、魅力が失われてしまったのは何故であろうか。次に、この点を考えてみたい。

重要なことは、設計エンジニアが誇りを持って設計業務に携われる環境を作ることである。では、構造ヘルスマニタリング技術で何が可能になるのであろうか。これは私見であるが、基準法の最低基準を守るのではなく、それ以上のクライテリアを目指した設計を行ったときには、モニタリングシステムを設置して設計条件が竣工後に満足されているかどうかを確認できることを条件に、地震荷重の分布や設計用地震荷重の大きさと建物損傷レベルの設定を設計エンジニアの責任で行うようにしてはどうであろうか。もしも、構造ヘルスマニタリング技術を併設することを条件に建築基準法で定められた多くの仕様規定や地震力に関する規定を設計者が自由に決められるようになれば、構造エンジニアに笑顔が戻ってくるのではないだろうか。この方が、最新の研究成果や開発成果を短期間に市場に投入することが可能となる。30年も研究して何も新しい成果が出ないようでは、最早、間に合わないのである。

事実として、想定外の大地震が起きて建物の被害が発生しても、政府や地方行政が責任を持って個人財産である建築物の損害を補償することが無い以上、地震荷重の設定が設計者に任されても良いのではないだろうか。我々は自分の財産と自分の生命は自分自身で守らなければならないのである。この基本的な認識に立って考えるならば、自分の財産である建築構造物の性能を担保する構造ヘルスマニタリング技術は新しい市場を形成することができると思うのである。それだけでなく、各分野で行われてきた様々な努力の成果が、迅速に応用される環境を整えることになるはずである。建築基準法を満足するだけでは、現在想定されている大地震に耐えることは無理であるという事実を、社会に対して正しく説明する必要がある。

2.4 構造ヘルスマニタリング技術への批判と現状

最後になったが、構造ヘルスマニタリング技術の現状と置かれている立場について述べたい。構造ヘルスマニタリング技術は建築耐震構造の一分野に属している。従って、今まで指摘したような前提条件が無ければ、必要のない技術となる。つまり、現行法規が設定された地震動に対して無矛盾で存在し、法規を守って設計した建物に大きな震害が無い。という立

場をとれば、何をいまさら測っているのか。優秀な解析ソフトがあり建物応答は十分な精度で予測でき、その予測に従って免震構造や制震構造が設計されているのに、建物応答を計測する意味などは無い。こうした意見が存在しているのに、一方では、E ディフェンスで大型の実験を繰り返しているのである。構造耐震工学全体を俯瞰すると、理解に苦しむような状況である。論理的な話ができるのは、極めて小さな領域でのみ適応できる現象論的な記述だけなのである。

一方で、もっと直接的な批判が存在することも承知している。構造ヘルスマニタリング技術では建物の振動モデルの同定さえ正確にはできないのではないかという意見である。正直に言えば、現象を表現することのできる振動モデルが必ずしも因果関係を表現できるモデルとは限らないのである。つまり、地震に伴う建物応答をある程度正確に再現できる数学モデルができたとしても、その数学モデルで原因を説明できるかどうかは、不明のままである。しかし、これは構造ヘルスマニタリング技術の責任ではない。現在、建築構造で使っている数学モデルが実情と遊離しているのは、なにも構造ヘルスマニタリングに限ったことではないからである。このように、現象を後から説明することは簡単でも、現象を事前に予測するモデルを作ることは不可能なほど困難である。従って、建物剛性の評価でさえ事前に行うことは極めて難しいと言わざるを得ない。局所的に発生している損傷を、全体応答を俯瞰しただけで損傷部位までを特定することのできる同定手法の決定版のような技術は今のところ知られていない。また、建物の存在によって地震入力がどの程度低減するのかについても、データが不足していて明確に定量的な結論を出すには至っていない。

しかし、具体的な技術の発展について述べれば、インターネットの発展やセンサー技術の進歩など、飛躍的な技術発展が最近の十年間で達成されたのである。従って、数年前までは不可能であったような価格で建物の振動計測とデータ処理を行うことが可能になったことは事実である。こうした周辺技術の発達を利用し、研究開発の正しい方向性を導くことこそ最も重要な課題なのである。

3.今後の課題と展望

阪神大震災以降の構造工学分野の進展は、共通の認識が欠落した状態で、分野ごとに異なったヴィジョンを求めて進んできた。個々の技術は発達し、大きな成果を収めたように見えるが、統一感が欠落してしまったために、実際に応用することが極めて困難な状況にある。

現在の耐震構造分野における閉塞状況は、一致団結して問題を解決しようとする視点が大きく欠落していることによって生じている。おそらく、対象としなければならない大地震のレベルは、従来考えられていたよりも大きい。少なくとも、この事実だけは認めなければならない。その大きさの程度、耐震設計側から見たときの対応の仕方、耐震規定をどのように変更するのかという視点、都市防災に必要な地震レベルの設定と建築構造単体に必要な耐震性能の相違、建築基準法における最低基準の再定義、免震構造や制震構造などの性能表示方法の検討、耐震補強の性能評価、など多くの緊急かつ重要な課題を統一的に解決していくためには、皆が共通の土俵に立つことが何としても必要である。本質的な問題点の存在を皆が認識すれば、構造ヘルスマニタリング技術が、各分野に共通する土俵を構築するために果たしうる役割は決して小さくはないのである。

表層地盤増幅と実効入力動（その1）地盤増幅の立場から

基礎構造系振動小委員会・永野 正行（東京理科大学）

1. はじめに

振動運営委員会・基礎構造系振動小委員会で行うテーマのうち、ここでは前半部分に相当する「地盤増幅」を取り上げる。1995年兵庫県南部地震以後の15年間で、地盤増幅に関し進んだ点や明らかにされた研究内容、課題、また耐震設計法への反映や地震動評価法への展開を整理する。本稿は筆者と新井洋氏（国総研）、田村修次氏（京大防災所）との共著による報告¹⁾を基に編集、加筆している。

2. 地盤増幅について

地盤増幅は、震源、伝播経路とともに地震動評価で重要となる項目であるとともに、建物基礎との動的相互作用を介し、建物基礎に作用する地震動を評価する最後の橋渡し役として、耐震設計だけではなく、建物被害との関係を考える上でも極めて重要な位置付けにある。

地盤増幅の影響は、主にせん断波速度 $V_s=3000\text{m}$ /前後の地震基盤よりも浅い地盤構造を対象とするが、通常は図1に示すように、工学的基盤面を境に、深部地盤と浅部地盤に分けて増幅特性を評価することが多い。この場合、後者の浅部表層地盤を分離して、SHAKE等により地盤応答解析が実施される。2000年建築基準法改正で工学的基盤が $V_s=400\text{m/s}$ 程度以上の地層面として定義されてから²⁾、両者がより明確に区別された傾向もある。

動的相互作用の立場からは、主に表層地盤の非線形挙動を考慮した増幅特性が検討対象となる。表層地盤による増幅特性は、建物への入力地震動評価に直結している点で極めて重要である。工学的基盤位置で精度の良い強震動予測が行われていても、軟弱地盤の非線形挙動の考え方により、地表での地震動特性ががらりと変わるケースもある。一方、表層・深部地盤による地震動の増幅評価は、本来は不可分であるのも事実であるため、本稿では適宜地震基盤からの増幅特性を含め議論を進めていきたい。

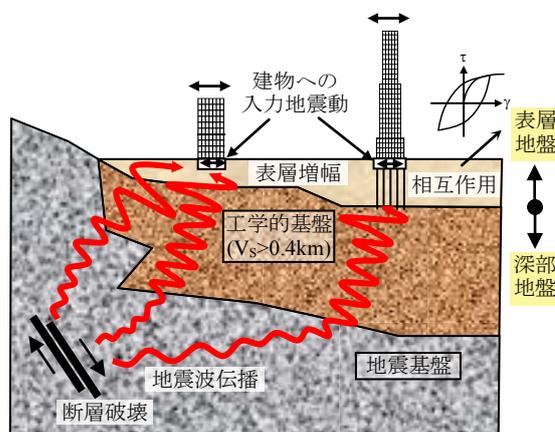


図1 地震基盤と工学的基盤、表層増幅、建物への入力地震動

3. 1995年兵庫県南部地震時に起きたこと、明らかになったこと、課題

(a) 深部地下構造による地盤増幅

1995年兵庫県南部地震時の地震動と被害に関し、大阪平野端に位置する神戸市直下の深部地下構造が1つの重要なポイントであった（図2）。段差状の地震基盤構造は、六甲断層系から生じた周期1秒前後のパルス波生成と相俟って、幅わずか1km程度の「震災の帯」におけるS波直達波と表面波高次モードとの干渉と増幅に大きく寄与した。これにより強震動評価における地下構造の重要性が改めて認識されることとなり、その後の国、自治体による全国

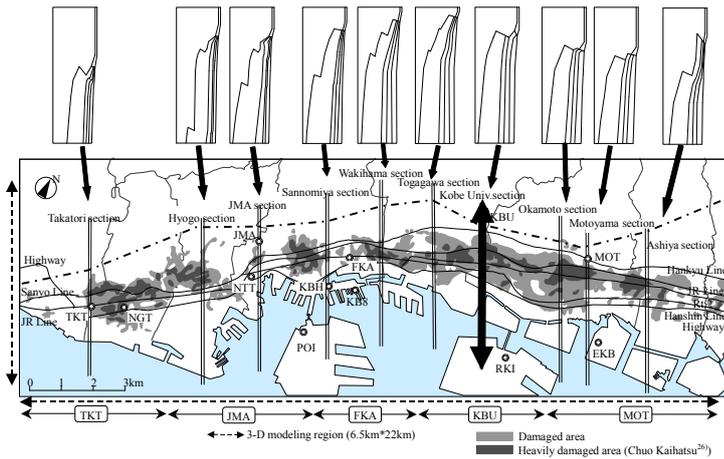


図2 1995年兵庫県南部地震時の神戸市中心部の「震災の帯」と強震観測点⁵⁾

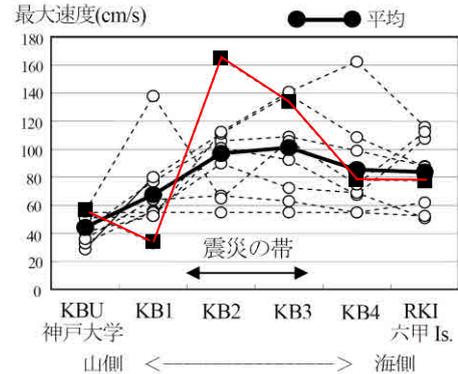


図3 ESG1998における神戸市直下の深部不整形地盤を考慮した解析検討による最大速度分布、対象断面は左図の南北方向矢印断面⁷⁾

地下構造調査や深部地下構造モデルの作成³⁾とJ-SHISを通じた公開⁴⁾へと繋がった。

この地震以降、地震動予測は震源モデルと3次元地下構造の影響を同時に考慮した評価方法に大きく進んだ。震源モデルに関しては、逆解析に基づく詳細化や、レシピ⁶⁾に代表されるパラメータの特性化に精力が注がれた。しかしながら、逆解析により得られた震源モデルやそのパラメータの特性化により、地盤増幅を含めた予測精度が十分に確保されているかどうかは判断はなかなか難しい。図3は、1998年のESGで実施された神戸地震のブラインドテストで提出された結果のうち、「震災の帯」を横切る断面での最大速度分布⁷⁾である。主に、インバージョン解析によって得られた震源断層モデルと、段差状の地下構造を同時に考慮した3次元差分法が用いられている。平均的には、「震災の帯」域で地震動が増幅する傾向は見られるものの、必ずしもそれを精度良く再現できるような地震動の最大値分布は得られていない。■—■は神戸大学での観測記録をコントロール波として、2次元地盤モデルと1次元の有効応力解析を用いて、地盤増幅を評価した筆者らの結果⁸⁾である。「震災の帯」域で1.5m/sを超える最大速度となっており、JR鷹取での最大速度レベルと概ね対応する形となる。3次元地下構造モデルを考慮した計算自体に関しては、モデリングにより地盤増幅をある程度反映できると考えられるが、震源モデルの評価精度により入力地震動評価に重要となる深部、浅部を含めた地盤増幅の精度も左右されてしまう点には注意する必要がある。

(b) 被災地域における表層増幅

表層地盤に関しては、「震災の帯」域で地震動が増幅し、海岸部では逆に液状化等により最大加速度が低下し、「震災の帯」を顕在化させた一因として地震直後から指摘されている⁹⁾¹⁰⁾。

ポートアイランド(POI)では最深部GL-83mの記録を入力地震動として利用した、有効応力解析を含むシミュレーション計算が多数行われている(例えば11)12)。地震基盤での入射地震波推定後、地震基盤からのシミュレーション解析もPOI¹³⁾のほか、葺合(FKA)⁹⁾や東神戸大橋(EKB)、六甲アイランド(RKI)、神戸港湾事務所(KBH)¹⁴⁾でも実施されている。各種議論¹⁶⁾はあるものの、液状化等を含む表層地盤の非線形挙動を考慮した当時の計算技術により、海岸部を含む強震記録は概ね再現されていたと考えられる。

(c) 地盤増幅評価の課題

地震基盤からのシミュレーション解析では、 $V_s=400\sim 500\text{m/s}$ の工学的基盤の露頭面位置で一度地震動を評価し、それより浅い表層地盤については、工学的基盤面～地表の1次元モデ

ルを分離して解くアプローチがほとんどであった¹⁵⁾。この手順は、現在の強震動評価でもほぼ踏襲されている。分離型の計算法の妥当性については、前述の本震記録の再現解析や、RKIにおける余震記録のシミュレーション解析⁸⁾でも示されている。また深部地盤と非線形表層地盤を一体型として解いた結果は、分離型として解いた結果と大きく異なるものではなく、神戸のケースでは分離型解法で地表応答の推定が可能であった¹⁷⁾ことが示されている。しかしながら、より一般的なケースで、深部地盤が薄い場合や周期特性までを含めた地震動評価の精度向上を議論する場合には、更なる詳細な検討が必要である¹⁸⁾¹⁹⁾。

工学的基盤より深い地盤、特に $V_s=400\text{m/s}$ 前後の地層における非線形挙動に関する議論²⁰⁾²¹⁾も重要なテーマではあるが、現在に至るまでに強震動予測の枠組みや耐震設計にはほとんど考慮されていない。これらは地震基盤からの地盤増幅特性を考慮した強震動評価を行う上で、工学的基盤の設定位置の議論とともに重要な課題である。

4. 兵庫県南部地震以降の15年間で起きたこと、明らかになったこと、課題

(a) 15年間の概観

1995年兵庫県南部地震から15年における地震動の地盤増幅に関する主な出来事と、解釈と課題を表1にまとめた。1995年兵庫県南部地震以降の15年間で、内陸地殻内、プレート境界、スラブ内、いずれの被害地震も国内で経験している。併せて、様々な実験や大規模計算で現象解明を試みる動きや、耐震設計に反映させようという動きも活発に見られた。

1995年兵庫県南部地震以降、国内の強震観測網が、(独)防災科学技術研究所のK-NET²²⁾やKiK-net²³⁾、気象庁²⁴⁾などを中心として、飛躍的に展開された。これにより、堆積地盤に設置された強震計において、大地震時の記録が得られる機会が格段に増え、これらを用いて表層地盤の大ひずみ領域における非線形挙動を把握するための実証的な検討が行われるように

表1 1995年兵庫県南部地震から現在までの地盤増幅に関する主な出来事と、解釈と課題の整理

被害地震、プロジェクト、イベント	地盤増幅に関する事項
兵庫県南部地震(1995)	深部地下構造による地震波の局所的増幅、海岸部、埋め立て地盤での加速度低減、「震災の帯」の顕在化、有効応力解析による強震アレー記録の検証、側方流動、深部、浅部地盤の分離による地震動評価、工学的基盤以深の非線形挙動
KiK-net観測開始(1996)	地中・地表記録の充実、表層増幅評価
AJ動的相互作用(入門本)出版(2006)	建築学会の動的相互作用に関する最初の入門本
鳥取県西部地震(2000)	基盤地震動評価、境港・米子の液状化被害
建築基準法関連法令改正(2000)	工学的基盤位置での地震動(告示波)と表層増幅(GS)の導入、工学的基盤の定義、大崎・原モデルに基づく非線形モデル($G/G_0-\gamma$, $h-\gamma$)の明示化
中央防災会議による被害想定(2002-)、推本・地震動予測地図の公開(2005-)、炭鉱爆破を利用した加振実験(2002-)	表層地盤による増幅評価、地盤モデルの設定、公開、経験的表層増幅評価の利用
AJ巨大災害への対応特別調査委員会(2004)	爆破振動による地盤液状化現象の再現
地盤震動・基礎振動共催による表層増幅に関するシンポ(2005)	長周期地震動に対する非線形動的相互作用
AJ動的相互作用(緑本)出版(2006)	GS導入の経緯、GS議論
新潟県中越沖地震(2007)	地盤の非線形特性提示、液状化地盤応答の簡易評価
建築基準法関連法令改正(2007)	柏崎での液状化被害、大振幅記録、東電・柏崎刈谷サイトの記録公開、鉛直アレーによる表層増幅検証、震源方向と深部地盤による1号機における地震波の集中
宮城・岩手内陸地震(2008)	工学的基盤の傾斜の影響追加、(A)損傷限界時のGS評価の変更、(A)GS算定のための液状化危険度判定
ワークショップ 非線形相互作用と耐震設計(2008)	一関西・4G上下動、トランポリン効果
駿河湾沖の地震(2009)	非線形相互作用に関する研究動向
国土交通省(2010)、建築研究所(2010)	中部電・柏崎刈谷サイトの記録公開、レンズ効果による地震波の集中
ワークショップ 建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法(2011)	長周期地震動のための都市部におけるサイト増幅特性、位相差分の提示
課題	液状化地盤への限界耐力計算の適用、長周期地震動に対する非線形、液状化評価、傾斜地盤の増幅評価、表層地盤、速度構造のデータベース化、地盤-建物系の同時地震観測記録の蓄積と分析、非線形相互作用、観測記録と被害関係の解明、大地震時の有効入力動、基礎入力動の解明

なった。特に KiK-net は山間部での観測が多いものの、地中、地表の 2 点で強震記録が得られるため、伝達関数、増幅特性の評価を始めとする検討を大地震が発生してすぐに実施できる体制となった。2000 年鳥取県西部地震時には、震源近傍地点での強震記録を用いた等価地盤物性の同定や基盤地震波の推定に利用されている²⁵⁾²⁶⁾。

近年では、2007 年中越沖地震時に東京電力・柏崎刈羽原子力発電所²⁷⁾²⁸⁾で、2009 年駿河湾の地震時には中部電力浜岡原子力発電所²⁹⁾で得られた強震記録の全てが、地震発生後比較的早い時期に公開された。これらは震源近傍における地震動や地盤増幅特性を詳細に検討する上で、極めて貴重なデータとなっている。

(b) 深部地盤による増幅特性

上記の 2007 年中越沖地震時の柏崎刈羽原子力発電所では、1 号機直下の褶曲構造と 3 番目のアスペリティに起因する極めて局所的な増幅であることが確認された³⁰⁾。また、2009 年駿河湾の地震時の浜岡原子力発電所建屋 5 号機では、原子力建屋直下に存在する低速度堆積層の影響により、短周期で大振幅のパルス波が発生したものと推定されている³¹⁾。いずれも神戸の「震災の帯」における地震動増幅と共通するものがあり、地下構造の形状（+地震波の到来方向）により局所的に地震動が増幅したことが示されている。2003 年十勝沖地震時には、震源から遠く離れた苫小牧市内で石油タンクのスロッシングによる火災被害が発生した。この成因として堆積平野における長継続で長周期の地震動が指摘され、その後の大都市部における「長周期地震動」対策に繋がっている。

(c) 表層地盤による増幅特性

先の柏崎刈羽原子力発電所の強震データには、サービスホール位置で、表層から深度 250m までの砂層および泥岩層を含む地盤内 4 深度の鉛直アレイ強震記録が含まれていた²⁷⁾。時松・他³²⁾³³⁾は、本震および余震の記録を用いて、周波数ひずみ依存型の減衰を持つ 1 次元等価線形解析に基づき、4 深度の観測波形のフーリエスペクトル比 6 組の同時逆解析から、地盤内各層の等価 S 波速度と等価減衰定数の分布を同定している。この他、2000 年鳥取県西部地震^{例えば 34)35)36)}、2004 年新潟県中越地震^{例えば 37)}、2007 年能登半島地震^{例えば 38)}、2007 年新潟県中越地震^{例えば 39)}で各種検討が実施されている。2008 年岩手宮城内陸地震時には、最も震源域に近い KiK-net の一ノ関西(IWTH25)では、地表の上下方向で 4G 弱の最大加速度が発生した。天井方向にその振幅が偏っていたことから、Aoi et al.⁴⁰⁾はこれを表層地盤の垂直引張強度に起因するトランポリン効果として解釈した。古山田⁴¹⁾は観測小屋の基礎浮き上がりと再接地により誘発される上下動からこの現象の説明を試みた。強震記録数の増加により新しい現象も出てくるが、それに伴い新しい解釈や知見も並行して提示されている。

(d) 限界耐力計算での表層増幅評価とその課題

2000 年建築基準法改正で導入された限界耐力計算⁴²⁾では、建物の耐震設計用の入力地震動を、工学的基盤（S 波速度 400m/s 以上の層）を露頭させた解放工学的基盤上の標準加速度応答スペクトルで設定し、建物の地点ごとに求められる表層地盤による増幅率 G_s を乗ずることにより、地表面での地震荷重（加速度応答スペクトル）を評価する方法が採用された。また基礎底面、側面の地盤ばね算出方法とともに、基礎の根入れによる入力動の低減方法が提示され、設計法の体系として動的相互作用が初めて取り入れられることとなった。これにより、「工学的基盤」と「表層増幅」の考え方が広く浸透した点では、大きな前進であった。

一方、技術的な課題もいくつか指摘されている。地盤の非線形特性に関し、限界耐力計算

では大崎・原モデル⁴³⁾をベースとした G/G_0 - γ , h - γ 曲線が提示された⁴²⁾。しかしながら、大ひずみ域で等価減衰定数が過大となり、地震荷重が危険側に評価されてしまう欠点も指摘された⁴⁴⁾。その後、膨大な室内試験データを整理し、微小から2%程度までの(せん断)ひずみ範囲で、モデルのパラメタを適合させたモデル(古山田・他⁴⁵⁾: H-D モデル)、福武⁴⁶⁾: 修正 R-O モデル) が呈示され、現時点での表層地盤の地震応答解析において多用されている。表層増幅については、表層地盤を等価な1層地盤に置換し、これと工学的基盤から成る2層構造を仮定して増幅率を評価する。林・他⁴⁷⁾は、S波速度400m/s以上の層を工学的基盤として設定する場合、告示の方法では、2層構造を仮定することが原因で、地盤条件によってはインピーダンス比が過大評価され、実際の地震動増幅率に比べて G_s を過小評価する可能性を指摘している。井上・他⁴⁸⁾は、告示の方法による地盤増幅率 G_s の算定法の問題点として、地盤の固有周期の算定精度が十分でない場合があること、地盤のせん断ひずみが約3倍程度大きめに評価される場合があることを指摘している。また液状化地盤や崖地形、工学的基盤が10°以上傾斜しているケースへの対応法も研究レベルに留まっている。

5. 今後の課題と展望、まとめ

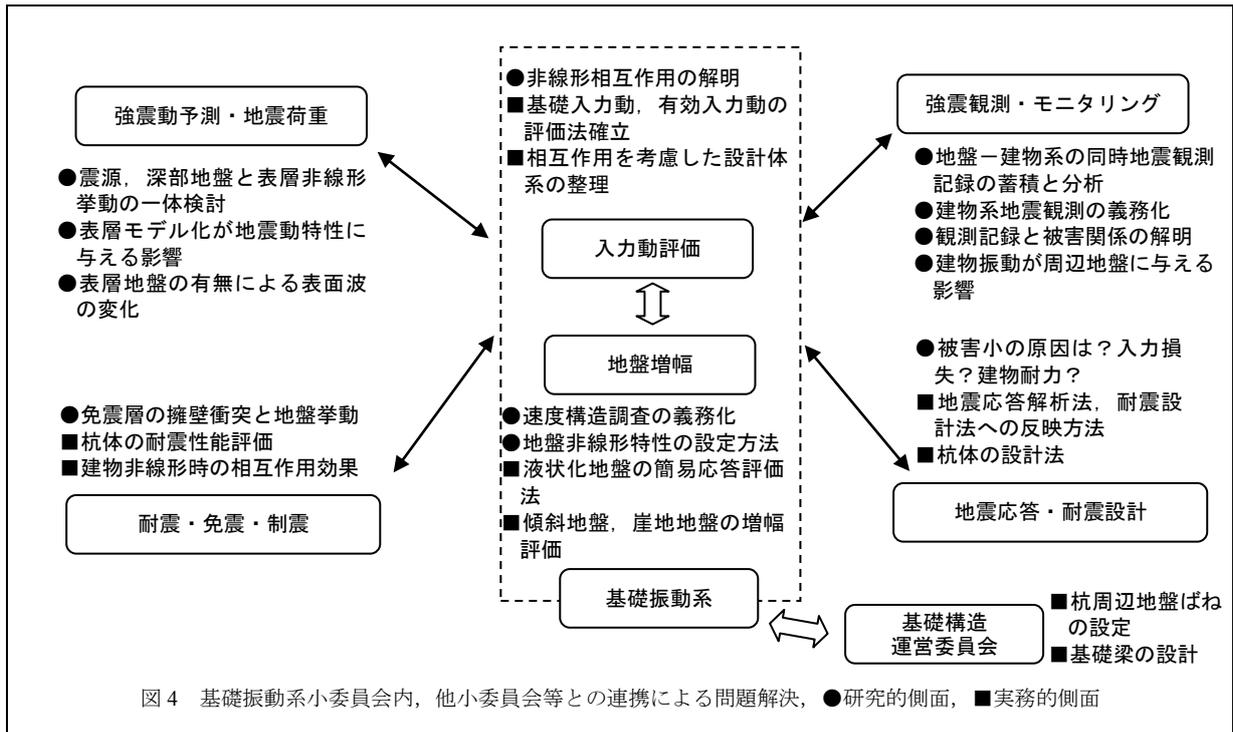
地震基盤から工学的基盤への地盤増幅については、神戸地震以降、その重要性は認識されていると考えられるが、一部の重要構造物を除き、一般建物の耐震設計へ反映されることはほとんど無い。2010年12月に国土交通省より試案が発表された、「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案」⁴⁹⁾⁵⁰⁾は、長周期建物に限定されるものの、ある意味で地震基盤からの地盤増幅を耐震設計に反映させるための第一歩と言える。

工学的基盤より浅い表層地盤の挙動に関しては、強震記録の再現の観点では概ね説明可能のレベルとなっている。大臣認定レベルの耐震設計では、SHAKE や全応力解析、有効応力解析による地盤増幅評価も行われており、また一般ルートでも、兵庫県南部地震以降に導入された限界耐力計算での G_s 評価により地盤増幅の考えを取り入れることができるようになった。しかしながら、2011年1月に開催されたワークショップ「建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法」では、液状化を含む表層増幅を耐震設計時に取り入れる際の注意事項もいくつか指摘されている。

- ・表層地盤の液状化を考慮した計算において、手法により増幅特性に違いが見られる⁵¹⁾。
- ・液状化考慮の有無により建物、杭応答の大小関係が異なり、複数ケースでの検討が必要となる⁵²⁾。
- ・仮定する非線形特性(G/G_0 - γ , h - γ)が異なると、地盤の非線形応答は勿論のこと、建物応答、地盤ばね等も異なる結果となる⁵³⁾。

表層地盤の非線形特性の与え方は、この後で議論される非線形相互作用、杭応答評価、さらには「大加速度記録と建物被害小」のギャップにも直接的に関わり、極めて重要な位置づけにある。今までの相互作用シンポジウム、ワークショップ資料を改めて見返すと、このような観点での検討⁴⁴⁾は建物への入力地震動評価に直結する問題にも関わらず、意外と少ない印象もある。

図4に地盤増幅、動的相互作用問題を軸に、基礎振動系小委員会内、他小委員会、基礎構造運営委員会との連携による課題の取り組みの関係を示した。現象解明を含む研究的側面と、設計への反映を含む実務的側面があると考えられるが、現象が分からないと設計への反映が



難しい。現象を明らかにするためには、強震観測体制を充実させる必要がある。地盤系に関しては、K-NET²²⁾や KiK-net²³⁾、気象庁²⁴⁾などの観測システムが整備されてきた。一方、建物内や地盤との同時観測に関しては、SMAC 強震計が普及していた時点では多かったようだが、現在では完全に逆転されている。また大地震時の記録が未だに不十分であることも手伝い、大振幅レベルにおける挙動解明が進んでいない。中小記録だけでは、大振幅レベルでの挙動予測は大変難しいことから、本番に備えて観測体制を整えておくことが現時点で最優先させて行おうべきものとする。

また近年では、PC、ネットワークの急速な普及に伴い、web や GIS 上で利用可能な地盤データベースの整備が進んでいる。しかしながら、そこに収められている地盤情報は、土質および N 値が圧倒的に多く、PS 検層結果が含まれる場合は稀である。地盤増幅評価に重要となる速度構造の重要性を広く認識させるとともに、調査の義務づけを含めそれを積極的に展開する方向性も考える必要がある。

参考文献

1) 永野・新井・田村: 2010年度日本建築学会大会 PD, 2010.9 2) 国土交通省建築研究所: ぎょうせい, 2001 3) 藤原・他: 防災科学技術研究所研究資料, 337, 2009
4) 地震ハザードステーション: 深部地盤, <http://www.j-shis.bosai.go.jp> 5) 永野・山田: 日本建築学会構造系論文集, 第560号, 2002.10 6) 地震調査研究推進本部事務局: 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レンジ」), 平成21年12月21日改訂 7) 永野: 地震工学ニュース, No.165, 震災予防協会, 1999.3 8) Koyamada et al., 1998., Proc of 2nd ESG 9) 林・川瀬: 日本建築学会構造系論文集, 第481号, 1996.3 10) 源栄・永野: 日本建築学会構造系論文集, 第488号, 1996.10 11) Aguirre, J. and K. Irikura: J. Natural Disaster Science, Vol. 16, No.2, 1995 12) 川瀬・佐藤・福武・入倉: 日本建築学会構造系論文集, 第475号, 1995 13) 川瀬・林: 日本建築学会構造系論文集, 第480号, 1996 14) 永野・大野・古山田・加藤: 日本建築学会構造系論文集, 第511号, 1998.9 15) 源栄・永野: 土と基礎, 1995.7 16) 吉田: 第26回地盤震動シンポジウム, pp.65-82, 1998.10 17) 山田・永野: 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 1998.12 18) 吉田・篠原, 澤田: 日本建築学会大会学術講演梗概集, B2, 2004.8 19) 佐藤: 第32回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, 2005.1 20) 藤川・林・福武: 日本建築学会構造系論文集, 第545号, 2001.7 21) 吉田: 日本建築学会大会学術講演梗概集, B2, 2001.9 22) (独)防災科学技術研究所: 強震ネットワーク K-NET ホームページ, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/> 23) (独)防災科学技術研究所: 基礎強震観測網 KiK-net ホームページ, <http://www.kik.bosai.go.jp/> 24) 気象庁: 地震・津波ホームページ, <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/index.html> 25) 永野・加藤・武村雅之: 日本建築学会構造系論文集, 第550号, 2001.12 26) 山添・加藤・山田・武村: 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, 2004 27) 東京電力: 柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された強震観測データの分析に係る報告(第一報), 2007. 28) 東京電力: 柏崎刈羽原子力発電所における「平成19年(2007年)新潟県中越沖地震」の加速度時刻歴波形データ(本震, 余震), (財) 震災予防協会, 2007. 29) 中部電力: 浜岡原子力発電所における2009年8月11日駿河湾の地震の加速度時刻歴波形データ, 震災予防協会, 2009 30) 渡辺・他: 日本建築学会構造系論文集, 第659号, 2011.1 31) 中部電力: 地震・津波, 地質・地盤合同ワーキンググループ(第46回)一配付資料, 原子力安全保安院 HP, <http://www.nisa.meti.go.jp/shingikai/107/3/046/R000002-46.html>, 2010 32) 時松・新井・養和: 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73, No. 630, 2008. 33) 時松・新井・養和: 第43回地盤工学研究発表会講演集, 2008. 34) 飛鳥建設: 2000年10月6日鳥取県西部地震被害調査報告書, 124pages, 2000. 35) (株)ジオトップ: 平成12年(2000年)鳥取県西部地震 節航を用いた建物の調査報告書, 75pages, 2000. 36) 徐・富永・田村: 日本建築学会技術報告集, No. 15, 2002. 37) 時松・関口・三浦・翠川: 日本建築学会構造系論文集, No. 600, 2006. 38) 鈴木・時松・新井・翠川: 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 645, 2009. 39) 新井・他: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, 2008. 40) Aoi, S. Kunugi, T. and Fujiwara, H.: Science, 322, 727-730, 2008 41) 古山田: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, 2010. 42) 2001年版 限界耐力計算法の計算例とその解説, 工学図書, 276pages, 2001. 43) 原: 土の動的変形特性と地盤の応答解析に関する研究, 東京大学学位請求論文, 1980 44) 栗本: 第6回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム, 2001.3 45) 古山田・宮本・三浦賢治: 第38回地盤工学学会研究発表会, pp. 2077-2078, 2003. 46) 福武: 名古屋工業大学博士論文, 1997. 47) 林・森井・鬼丸・吉川: 日本建築学会構造系論文集, No. 567, 2003. 48) 井上・他: 日本建築学会技術報告集, No. 32, 2010. 49) 国土交通省住宅局建築指導課: 超高層建築物等における長周期地震動への対策試験について, 平成22年12月21日 50) 大川・他: 長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討, 建築研究資料, 2010.12 51) 新井: 建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法, 日本建築学会, 2011.1 52) 木村: 建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法, 日本建築学会, 2011.1 53) 船原: 建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法, 日本建築学会, 2011.1

謝辞

本資料の作成に当たり、図を提供していただきました、(独) 建築研究所・鹿嶋俊英氏に、また本資料の作成に協力いただきました、基礎構造系振動小委員会の委員各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会、兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書、1996.7
- 2) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集、1996
- 3) 安井 譲、井口道雄他：1995年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察、日本建築学会構造系論文集、No.512, pp.111-118, 1998
- 4) 酒向裕司、宮本裕司：変動軸力を考慮した杭基礎の地震応答に関する解析的検討、日本建築学会構造系論文集、第523号, pp.79-86, 1999.9
- 5) 古山田耕司、時松孝次、宮本裕司：兵庫県南部地震時に建設途中で側方流動により被災した場所打ちRC杭のシミュレーション解析、日本建築学会構造系論文集、第599号, pp.43-50, 2006.1
- 6) 小島宏章、福和伸夫他：強震観測・常時微動計測に基づく中低層建物の入力損失効果に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第587号, pp.77-84, 2005.1
- 7) 飯場正紀、鹿嶋俊英他：地下階を有する直接基礎建物における基礎入力動の簡易評価法の検討、日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp.367-368, 2009.8
- 8) 齊藤正人、池亀真樹他：地盤のひずみ依存性が大型基礎の入力損失効果に与える影響に関する評価、土木学会論文集、No.738/I-64, pp.219-231, 2003.7
- 9) 関崇夫、藤森健史他：大型せん断土槽を用いた遠心振動台実験による基礎入力動の低減効果に関する研究、(その1) 日本地震工学会大会, pp.164-165, 2007.11, (その2, 3) 日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp.15-18, 2008.9
- 10) 日本建築学会：ワークショップ「建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法」、第1章, pp. I-18-I-20, 2011.1
- 11) Abrahamson, N. A. et al.: Spatial Variation of Strong Ground Motion for use in Soil-structure interaction Analysis, Proceedings of 4th National Conference on Earthquake Engineering, pp.317-326, 1991
- 12) 上林宏敏、竹内吉弘：地震動空間変動による実在埋込剛基礎の入力動評価、日本建築学会構造系論文集、第529号, pp.105-112, 2000.3
- 13) 文学章、福和伸夫：直接基礎、杭基礎とパイルド・ラフト基礎の動的相互作用特性、日本建築学会構造系論文集、第608号, pp.53-60, 2006
- 14) 飯場正紀、鹿嶋俊英、護雅史：地下階を有する直接基礎建物における基礎入力動の簡易評価法の検討、日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp.367-368, 2009.8
- 15) 原田隆典他：有効地震動の計算式とその実測例による検討、土木学会論文集、No.362, pp.435-440, 1985
- 16) Koyamada, K., Nagano, M., Kato, K. & Ohno, S.: Simulation of strong ground motions during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake using 2-D seismic profiles at six sections in Kobe City, Proc of 2nd International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, pp.1457-1464, 1998
- 17) 松島信一・川瀬 博：1995年兵庫県南部地震での神戸市域における強震動と木造建物被害の再評価、日本建築学会構造工学論文集、55B, pp.537-543, 2009
- 18) 長戸健一郎、川瀬 博：建物被害データと再現強震動によるRC造建物群の被害予測モデル、日本建築学会構造系論文集、第544号, pp.31-37, 2001.6
- 19) 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、第520号, pp.45-51, 1999.6
- 20) 井口道雄、宇波桃子、安井譲：大型振動台基礎と周辺地盤の同時地震観測に基づく基礎有効入力動、日本建築学会構造系論文集、No. 537, pp. 61-68, 2000
- 21) 川島学、井口道雄、箕輪親宏：地震観測に基づく基礎有効入力動の抽出とその評価指標に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No. 615, pp. 85-92, 2007
- 22) Toshihide Kashima: Strong motion network for buildings operated by Building Research Institute of Japan, Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering, Macedonian Association for Earthquake Engineering, 2010.8
- 23) 小豆畑達哉、西山功他：建築物の地震観測に基づく設計用地震力の検討について、日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp. 21-22, 2010.9
- 24) 安達直人、渡辺哲史他：地盤の非線形性を考慮した低層建物の入力損失効果の検討、日本地震工学会、第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.686-689, 2006.11
- 25) 宮本裕司、酒向裕司、古山田耕司、三浦賢治：1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いた液状化地盤における杭基礎構造物の応答に関する解析的検討、日本建築学会構造系論文集、第493号, pp.23-30, 1997.3
- 26) 土方勝一郎、杉山達也、徳光亮一、山添正稔、古山田耕司、岡野創、宮本裕司：2004年新潟県中越地震で被害を免れたRC造校舎の入力地震動と地震時応答に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第631号, pp.1519-1527, 2008.9
- 27) 林 康裕：直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果、日本建築学会構造系論文集、第485号, pp.53-62, 1996.7
- 28) 壁谷澤寿一、壁谷澤寿海：基礎滑り挙動を伴う直接基礎建物の地震応答推定手法、日本建築学会構造系論文集、第634号, pp.2151-2158, 2008.12
- 29) 日本建築学会：ワークショップ「建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法」、2011.1
- 30) 泉洋輔、三浦賢治：基礎の耐震設計用地下震度に関する研究、日本建築学会論文報告集、No.597, pp.47-53, 2005
- 31) 宮本裕司：基礎の地震荷重と相互作用、2002年度日本建築学会大会構造部門(振動)PD、地震動と地震荷重を繋ぐー現状と将来の課題ー、P.36~46, 2002
- 32) 泉洋輔、三浦賢治：限界耐力計算における基礎入力動評価の合理化に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第616号, pp.57-65, 2007.6,
- 33) 河辺美穂、関崇夫：埋め込みを有する群杭基礎の基礎入力動の簡易評価に関する研究、日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp.369-370, 2008.9
- 34) 鈴木承慈、福和伸夫他：埋め込み基礎の簡易基礎入力動評価法、日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp.663-664, 2010.9

表層地盤増幅と実効入力動（その2）建物への入力地震動の立場から

基礎構造系振動小委員会・飯場 正紀（（独）建築研究所）

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、湾岸の軟弱地盤や市街地の震度7の地域で杭基礎の被害が多く発生した。特に、沖積低地や人工埋立地で液状化、側方流動が広範囲に発生し、それに伴う杭基礎の被害が著しかった[1]。また、ポートアイランドの鉛直アレーにおいて貴重な強震記録が観測され[2]、杭基礎—上部構造への確かな入力地震動が得られたことにより、多くの研究者により軟弱地盤における地盤及び杭基礎の地震時挙動や杭被害のシミュレーション解析等が行われた。また、最大加速度の大きな観測記録に基づいて、建物地下階と地表面での地震動の比較に基づき、大地震時での有効入力動の特性が明らかにされた[3]。

1995年兵庫県南部地震以後は、大地震時における建物・地盤挙動の解明に向けた検討が行われ、基礎の被害や地盤挙動（液状化等）の影響を含め、非線形性状に注目した動的相互作用に関連する研究が積極的に行われた（例えば[4,5]）。また近年では、常時微動や地震観測による建物への入力地震動の研究[6,7]や入力地震動に関する地盤非線形の影響に関する実験的研究 [8,9] が行われている。ここでは、建物に作用する実効入力動（ここでは、基礎入力動や有効入力動を取り扱う）に関する研究の現状及び課題等について述べる。

2. 基礎入力動と有効入力動

図 2.1 に、建物に入力する地震動（ここでは水平動を取扱う）の設定における基礎構造等の条件を示した。地表面上の基礎（ただし基礎の剛性は無限大を仮定）の場合、建物が存在しない条件での入力動（基礎入力動）は、地表面のそれと等しくなる ($B1=A$)。一方、建物に根入れがある場合、建物への基礎入力動は地表面のそれに比べて小さくなる ($B3 \leq A$)。これは、根入れ部分の剛性が地盤に比べて大きいことから、地盤の変形を拘束する効果があるためである。建物が存在する場合の基礎応答 ($B2$ または $B4$) は、基礎入力動と建物の応答の影響が組み合わされた応答を示し、基礎入力動とは異なる応答を示す ($B1 \neq B2$, $B3 \neq B4$)。 $B2$ または $B4$ の応答（地震動）は、有効入力動と呼ばれる。図 2.2 に、スウェイ・ロッキングモデルにおける、地表面に対する建物・基礎応答の伝達関数(振幅)を示す[10]。基礎の伝達関数（有効入力動に相当）には、建物の共振による影響を受け、伝達関数に山と谷が現れる。実効入力動とは、地表面の地震動ではなく、建物に作用する入力動を意味する。建物に影響されず設定される地震動

は基礎入力動と、建物が存在する場合の基礎応答は有効入力動と呼ばれる。有効入力動が作用する基礎固定条件での建物応答は、動的相互作用が含まれた結

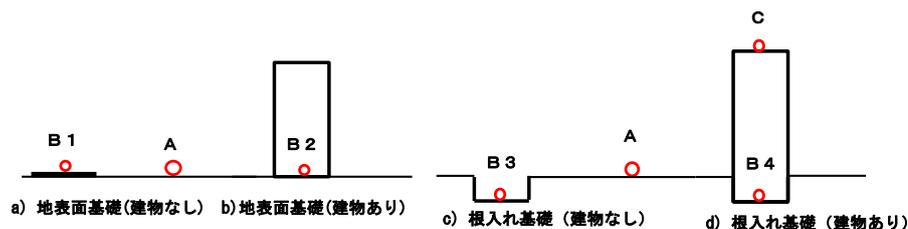


図 2.1 建物に入力する地震動の設定における建物や基礎根入れ条件

果を与える。

この現象は、解放工学的基盤からの入力動に対する表層地盤増幅と同様である。図 2.3 に、解放工学的基盤での波動に対する地表面と工学的基盤境界面での振幅の伝達関数を示す。工学的基盤境界面では、表層地盤の影響を大きく受け、解放工学的基盤での振幅と大きく異なってくる。

3. 建物への入力地震動への基礎構造の影響

基礎構造の剛性が地盤に比べて大きいことにより、鉛直下方からの入力動が平均化される。その結果、地表面における地震動の振幅に対して、基礎位置における地震動の短周期成分が減少する。この現象は入力損失効果と呼ばれる。

3.1. 地震動の特性による平均化

2.で示したように、地震動が鉛直下方から入射する場合、地表面基礎の基礎入力動は、地表面の地震動と等しいとしたが、地震動の条件により、基礎入力動が変化する。

地震動の平均化の生じる代表例として、入力する地震動にばらつき(振動数における振幅や位相の差、空間変動と呼ばれる)があり、剛性の大きな基礎構造では、振幅や位相が平均化される現象がある[11,12]。他の1つは、平面波が斜め入射する場合であり、基礎位置により入力動に位相差が生じ、振幅が平均化される。

3.2. 基礎根入れ・杭の効果による低減

1) 数値計算例

基礎根入れ・杭の効果は、文らの数値計算結果に示されている[13]。図 3.1 に示すように、基礎構造の条件を設定し、基礎入力動への影響を調べている。図 3.2 に結果を示すが、基礎根入れや杭を有することにより、基礎入力動(水平成分)は、振動数とともに、地表面の振幅より低減する特性を示す。一方、回転成分が発生することには、注意が必要である。

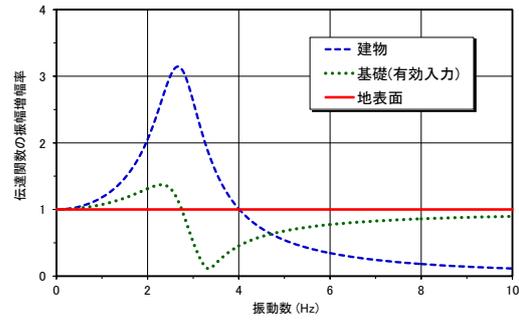


図 2.2 地表面に対する建物と基礎の伝達関数

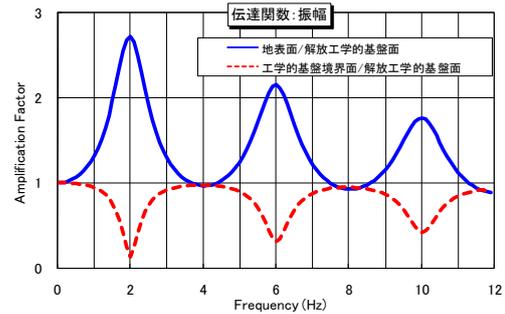


図 2.3 地表面と工学的基盤境界面の伝達関数

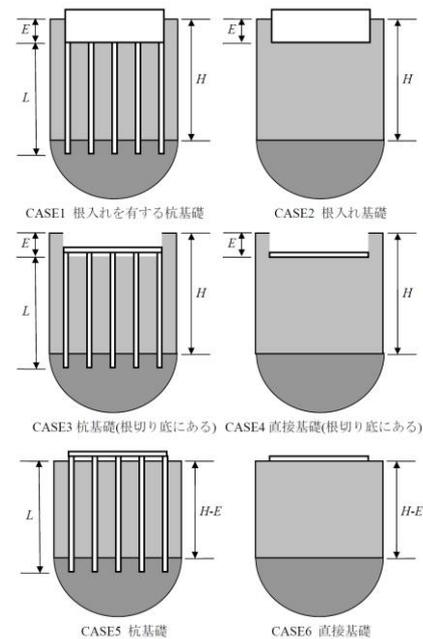


図 3.1 基礎・地盤条件の設定¹³⁾

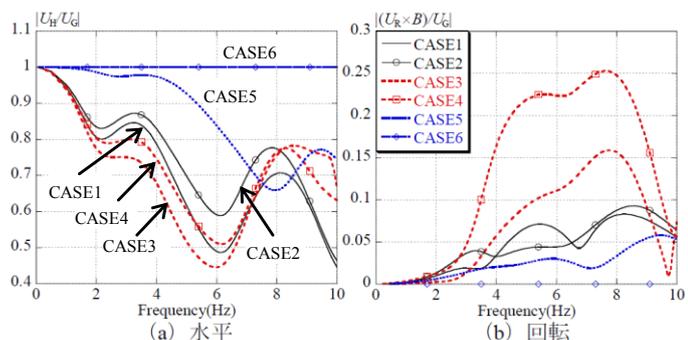


図 3.2 基礎・地盤条件による基礎入力動の特性(文献 13 に加筆)

2) 地震観測例

図 3.3 に、SRC 造 8 階建て、地下 1 階（基礎底面深さ：約 8m）の直接基礎建物での地震観測結果（水平 NS 方向）に基づいて、地表面に対する地下 1 階のフーリエスペクトル比（全ての観測記録の平均値）、薄層要素法結果及び簡易評価結果を示す[14]。なお観測結果では、地下 1 階の観測記録を用いており、建物や基礎応答が含まれた有効入力動である。基礎に根入れを有すると、建物への有効入力動は振動数とともに低減する。薄層要素法による結果は、観測結果と良く対応している。また、原田他[15]により提案された簡易評価結果は地震観測結果とほぼ対応し、下限値の設定を見直すことにより、構造設計に取り入れることができると考えられる。

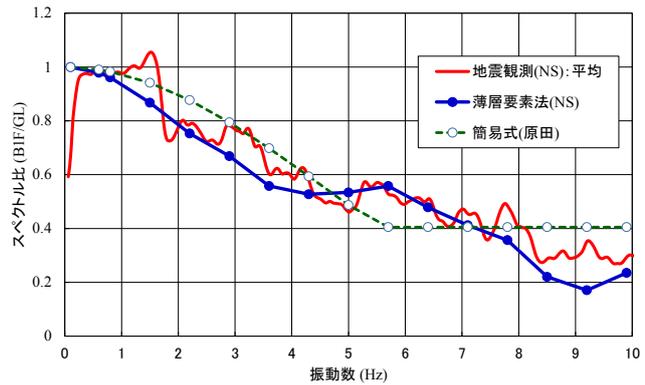


図 3.3 フーリエスペクトル比(地下 1 階/地表面)の平均値、薄層要素法・簡易評価結果(文献 14 に加筆)

4. 建物への入力動に関する研究の現状と課題

4.1. 地震観測記録に基づく入力地震動評価

1) 地震観測記録の分析による入力地震動の特性

1995 年兵庫県南部地震時における「震災の帯」での被害は、古い木造建物や新耐震設計以前の RC 造、S 造に集中した。「震災の帯」における被害分布は、地震動の最大加速度や最大速度と概ね対応付けられるものであった[16]。一方、「震災の帯」域でも被害の小さい、もしくは無被害の建物も多数あった。この原因を、(a)建物の応答評価精度の影響と考える(例えば[17,18])、(b)入力動の低減等による動的相互作用の影響と考える、2つの立場が存在する。ここでは、(b)に着目した研究として、1995 年兵庫県南部地震における観測記録とシミュレーション解析により評価した有効入力動について、地表面の最大加速度・速度と比較した安井他の結果を、図 4.1 に示す[3]。入力損失効果は、最大加速度で 3 割、最大速度で 1 割程度である。動的相互作用に関するパラメータ解析でも、同様の結果が得られている[19]。

1995 年兵庫県南部地震以降も、建物・地盤での同時地震観測が継続して実施され、観測記録が整理されている。小島らは、複数の中低層建物における地震観測記録に基づいて、有効

入力動を最大加速度、最大速度等から算定される等価卓越振動数を用いて体系的に分析している[6]。基礎根入れが存在する建物は、根入れのない建物に比べて入力損失効果が大きいこと、隣接建物があると、入力損失効果が不明確になる場合があ

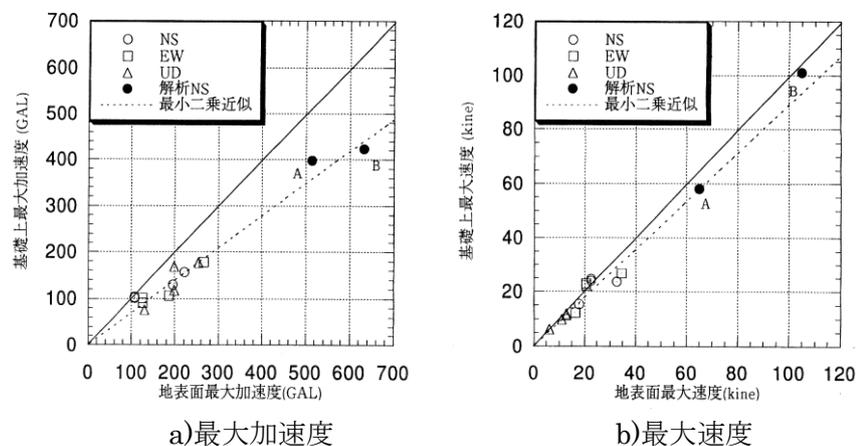


図 4.1 地表面と基礎の最大応答値の比較(1995 年兵庫県南部地震)³⁾

ること等が指摘されている。井口らは、大型振動台基礎と周辺地盤の同時地震観測記録を用いて、地表面の地震動と水平および回転成分の有効入力動との関係について検討している[20]。川島らは、地表の地震動に対する有効入力動の割合を示す新たな評価指標として、両波形の2乗積分値の比（有効入力係数）を提案し、その有効性を検証している[21]。また、鹿嶋は、八戸市に建設された建物（10階建）での観測記録を整理し、地下1階と地表面の最大加速度の関係を図4.2のようにまとめている[22]。1999年3月からの10年間のすべての記録を描いており、

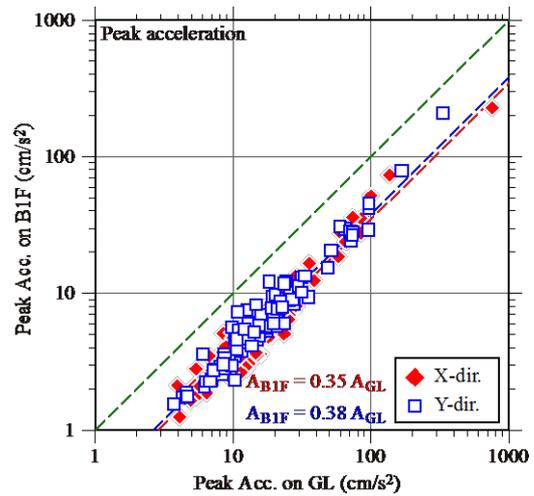


図 4.2 地下1階と地表面の最大加速度²²⁾

これによると、地表面に対する地下1階の最大加速度比の平均値は、35%、または38%となっており、最大加速度の低減が顕著である。

2) 建物基礎（地下階）・地盤における地震観測記録の統一的評価と観測体制の継続

建物への入力動に関する研究は着実に進められてきているが、その成果が十分にはまとめられていない。震央に近い場所での地震観測記録が少ないこともあり、地震動の加速度や速度が大きくなる場合が、十分な把握できていない。有効入力動は、基礎構造の形式、平面寸法や根入れ深さ、地盤条件、地震動の特性等に依存すると考えられ、多くの地震観測記録を収集し、統一した整理・評価を行う必要がある。国土交通省国土技術政策総合研究所では、総合技術開発プロジェクトにおいて、建物への入力地震動の設定に関する検討を実施しており[23]、現象解明と今後の地震観測方策について検討される予定である。

4.2.建物・杭応答への地盤・杭の非線形評価

1) 非線形の要因と建物・杭応答への影響

a) 地盤の非線形：地震動が大きくなると、地盤の非線形化により、地盤の等価せん断波速度が小さくなるため、地盤に比べて基礎構造の剛性が相対的に大きくなる。この結果、振動数の低い範囲から基礎入力動が低減することが解析的に示されている。しかし低振動数で低減した基礎入力動の振幅が、振動数とともに大きくなり、地表面の振幅より大きくなる特性も確認されている[24]。

杭基礎建物の入力地震動に着目すると、通常は杭体の拘束効果によって地表面の応答よりも低下する入力損失効果が現れる。液状化地盤の場合、液状化地盤層を通過した地震動では短周期成分が減少し、地表面では最大加速度が小さくなるのに対し、液状化地盤層以深の短周期成分の地震動が杭を通して上方に伝搬し、短周期成分を含む地震動が建物に入力する。その地震動の加速度振幅は、地表面のそれより大きくなるのが解析的検討から指摘されている[25]。

b) 杭頭条件と杭の非線形：大きな地震動が観測された近傍の建物において、杭頭条件や杭の非線形の考慮により、杭頭応力が低減することが報告されている[26]。

c) 幾何学的非線形：地震動が大きくなると、基礎構造と周辺地盤の間で、すべり、剥離、浮き上がり等の発生（幾何学的非線形と呼ぶ）が予想される。例えば、基礎浮き上がりの発生

は、転倒モーメントを頭打ちにし、建物応答を低減させる結果となる[27]。また E-defense 実験結果に基づいて、基礎滑りの建物応答への影響に関する研究[28]なども行われている。

2) 大地震時の建物の入力と応答の現象解明に向けた数値計算、実験や地震観測の拡充

相互作用解析手法は、地震観測や動の実験のシミュレーション解析により、ある程度の適用性は確認されているものの、地表面に比べて建物の地震観測記録が非常に少ないことから、建物挙動の検討は数値計算にとどまっている。表層地盤の挙動、動的相互作用効果などの建物応答への影響についてはまだ十分に解明できていないことから、動の実験の実施とともに、建物も含めた地震観測体制を拡充し、入力地震動から建物応答に至る総合的な検討とともに、各部分のモデル化の妥当性を検証する必要がある。

4.3.一般建物の耐震設計・構造性能把握のため外力評価

1) 動的相互作用効果の簡易的取り扱い

一般建物の設計においても、動的相互作用効果を導入するための検討が行われ、動的相互作用効果を使いやすい形にするために、「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計」が出版され、簡易評価のための知見がまとめられている。出版に際して、わかりやすい内容とすることを心掛けたが、理解の難しい点や説明が不十分な点が指摘され、内容に関するフォローアップも行われている[29]。

基礎構造の耐震設計における、2次設計における地下部分に作用する地下震度の提案が行われている。泉・三浦は、建物と地盤との連成モデルにより、損傷限界時と安全限界時における根入れ深さと基礎震度の関係を求めている[30]。また、宮本は、超高層建築物の応答結果から、安全限界時における根入れ深さと基礎震度の関係を求めている[31]。基礎震度は、根入れ深さが深くなると小さくなる関係がある。

2) 大地震時における上部構造・基礎構造の安全性検討のための外力設定

建物への入力地震動における動的相互作用効果については、薄層法や有限要素法の数値解析に基づいて検討される場合が多く、一般建物設計には使いやすい形には整理されていない。地震応答算定に導入するための簡易評価法の適用性についても検討[32-34]が行われているが、非線形性状も含めた簡易法の提案とその精度の検証については今後の検討が必要である。

現在、杭基礎耐震小委員会では、建築基礎構造設計指針の改訂に向けた作業が始められている。地震時における地盤応答変位の簡易算定法や地下部分の震度の設定法など、基礎構造の外力設定に反映できるような成果の取りまとめも必要である。

5. まとめ

建物に作用する入力地震動（基礎入力動や有効入力動）に関する研究の現状及び課題等について示した。現状を踏まえ、下記の課題が挙げられる。

- ・建物基礎（地下階）・地盤における地震観測記録の統一的評価と地震観測の継続
- ・大地震時の建物の入力と応答の現象解明に向けた数値計算・実験・地震観測の拡充
- ・大地震時における一般建物の基礎構造の安全性検討のための外力評価

表層地盤の挙動、動的相互作用効果などの建物応答への影響についてはまだ十分には解明できていないこともあり、入力地震動から建物応答に至る総合的な検討とともに、各部分のモデル化の妥当性を検証する必要がある。

謝辞

本資料の作成に当たり、図を提供していただきました、(独)建築研究所・鹿嶋俊英氏に、また本資料の作成に協力いただきました、基礎構造系振動小委員会の委員各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会、兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書、1996.7
- 2) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集、1996
- 3) 安井 譲、井口道雄他：1995年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察、日本建築学会構造系論文集、No.512, pp.111-118, 1998
- 4) 酒向裕司、宮本裕司：変動軸力を考慮した杭基礎の地震応答に関する解析的検討、日本建築学会構造系論文集、第523号, pp.79-86, 1999.9
- 5) 古山田耕司、時松孝次、宮本裕司：兵庫県南部地震時に建設途中で側方流動により被災した場所打ちRC杭のシミュレーション解析、日本建築学会構造系論文集、第599号, pp.43-50, 2006.1
- 6) 小島宏章、福和伸夫他：強震観測・常時微動計測に基づく中低層建物の入力損失効果に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第587号, pp.77-84, 2005.1
- 7) 飯場正紀、鹿嶋俊英他：地下階を有する直接基礎建物における基礎入力動の簡易評価法の検討、日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp.367-368, 2009.8
- 8) 齊藤正人、池亀真樹他：地盤のひずみ依存性が大型基礎の入力損失効果に与える影響に関する評価、土木学会論文集、No.738/I-64, pp.219-231, 2003.7
- 9) 関崇夫、藤森健史他：大型せん断土槽を用いた遠心振動台実験による基礎入力動の低減効果に関する研究、(その1)日本地震工学会大会, pp.164-165, 2007.11, (その2, 3)日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp.15-18, 2008.9
- 10) 日本建築学会：ワークショップ「建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法」、第1章, pp. I-18-I-20, 2011.1
- 11) Abrahamson, N. A. et al.: Spatial Variation of Strong Ground Motion for use in Soil-structure interaction Analysis, Proceedings of 4th National Conference on Earthquake Engineering, pp.317-326, 1991
- 12) 上林宏敏、竹内吉弘：地震動空間変動による実在埋込剛基礎の入力動評価、日本建築学会構造系論文集、第529号, pp.105-112, 2000.3
- 13) 文学章、福和伸夫：直接基礎、杭基礎とパイルド・ラフト基礎の動的相互作用特性、日本建築学会構造系論文集、第608号, pp.53-60, 2006
- 14) 飯場正紀、鹿嶋俊英、護雅史：地下階を有する直接基礎建物における基礎入力動の簡易評価法の検討、日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp.367-368, 2009.8
- 15) 原田隆典他：有効地震動の計算式とその実測例による検討、土木学会論文集、No.362, pp.435-440, 1985
- 16) Koyamada, K., Nagano, M., Kato, K. & Ohno, S.: Simulation of strong ground motions during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake using 2-D seismic profiles at six sections in Kobe City, Proc of 2nd International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, pp.1457-1464, 1998
- 17) 松島信一・川瀬 博：1995年兵庫県南部地震での神戸市域における強震動と木造建物被害の再評価、日本建築学会構造工学論文集、55B, pp.537-543, 2009
- 18) 長戸健一郎、川瀬 博：建物被害データと再現強震動によるRC造建物群の被害予測モデル、日本建築学会構造系論文集、第544号, pp.31-37, 2001.6
- 19) 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、第520号, pp.45-51, 1999.6
- 20) 井口道雄、宇波桃子、安井譲：大型振動台基礎と周辺地盤の同時地震観測に基づく基礎有効入力動、日本建築学会構造系論文集、No. 537, pp. 61-68, 2000
- 21) 川島学、井口道雄、箕輪親宏：地震観測に基づく基礎有効入力動の抽出とその評価指標に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No. 615, pp. 85-92, 2007
- 22) Toshihide Kashima: Strong motion network for buildings operated by Building Research Institute of Japan, Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering, Macedonian Association for Earthquake Engineering, 2010.8
- 23) 小豆畑達哉、西山功他：建築物の地震観測に基づく設計用地震力の検討について、日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp. 21-22, 2010.9
- 24) 安達直人、渡辺哲史他：地盤の非線形性を考慮した低層建物の入力損失効果の検討、日本地震工学会、第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.686-689, 2006.11
- 25) 宮本裕司、酒向裕司、古山田耕司、三浦賢治：1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いた液状化地盤における杭基礎構造物の応答に関する解析的検討、日本建築学会構造系論文集、第493号, pp.23-30, 1997.3
- 26) 土方勝一郎、杉山達也、徳光亮一、山添正稔、古山田耕司、岡野創、宮本裕司：2004年新潟県中越地震で被害を免れたRC造校舎の入力地震動と地震時応答に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第631号, pp.1519-1527, 2008.9
- 27) 林 康裕：直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果、日本建築学会構造系論文集、第485号, pp.53-62, 1996.7
- 28) 壁谷澤寿一、壁谷澤寿海：基礎滑り挙動を伴う直接基礎建物の地震応答推定手法、日本建築学会構造系論文集、第634号, pp.2151-2158, 2008.12
- 29) 日本建築学会：ワークショップ「建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法」、2011.1
- 30) 泉洋輔、三浦賢治：基礎の耐震設計用地下震度に関する研究、日本建築学会論文報告集、No.597, pp.47-53, 2005
- 31) 宮本裕司：基礎の地震荷重と相互作用、2002年度日本建築学会大会構造部門(振動)PD、地震動と地震荷重を繋ぐー現状と将来の課題ー、P.36~46, 2002
- 32) 泉洋輔、三浦賢治：限界耐力計算における基礎入力動評価の合理化に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第616号, pp.57-65, 2007.6,
- 33) 河辺美穂、関崇夫：埋め込みを有する群杭基礎の基礎入力動の簡易評価に関する研究、日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp.369-370, 2008.9
- 34) 鈴木承慈、福和伸夫他：埋め込み基礎の簡易基礎入力動評価法、日本建築学会学術大会梗概集、構造Ⅱ, pp.663-664, 2010.9

耐震と免震、制震（その1）免震構造の立場から

免震構造小委員会・高山 峯夫（福岡大学）

1. はじめに

本稿では免震構造小委員会の活動、および免震構造の現状と課題について報告する。

2. 免震構造小委員会のこれまでの活動

免震構造に関する研究開発は1900年ごろから盛んに行われていたが、広く普及するのは積層ゴムアイソレータが実用化された1980年代初めからとなる。1982年に千葉県八千代台に免震住宅の第一号が建設された。それ以降、建設各社のみならず材料メーカーによる免震構造に関する開発競争の顕在化がみられた。構造設計、即耐震設計であるといえる我が国の実情から、可能性が提示された本構造法に各社が競って参入することは事前の成り行きであった。しかしながら、現実設計判断の段階ではいくつかの重要な未確認の問題を包含しており、その安全性評価に大きな誤解を導入する恐れなしとしない。一方、当時の日本建築センターにおいては八千代台免震住宅の評定以来、20件を超える評定およびそれに先立つ研究会がもたれ、行政の立場からの対応がはかられていた。このような状況において、科学、技術、芸術のすべての面にわたり、重要な影響をもつ免震建築の正しい認識と設計者のための有効なアドバイスを提供することは、学会の当然の使命であると考えられる。そこで、当面の問題点と将来の研究発展の基礎となる論理構成の明確化、その適正活用法の提示などを主眼とする「免震構造小委員会」（主査：多田英之）が1986年11月に設置された。本小委員会では積極的な活動が展開され、1989年には「免震構造設計指針」が刊行された。本指針の理念は序文にみることができる。

「耐震設計を行うには地震入力の推定が基礎となるが、現時点においてははまだ、建築物の建設地点における地震動を的確に予測することは不可能に近い。このような不確定な条件下においても設計者は設計を行ってきた。設計を可能ならしめたものは設計者の決断と法規制（建築基準法）の存在である。免震構造は、その機構の特徴により、比較的高い精度でエネルギー吸収能力の評価が可能である。したがって地震入力としての基本量は地震動が建物にもたらすエネルギーとするのが有効である。

本書は設計者の決断を支援するための客観的な判断材料の整備に重点をおいて作成されている。新構法の可能性を探るうえでは、設計の本質を認識することが重要であり、設計手法の形式的な完結性を重視すべきではない。すなわち不確定な事実に対して、指針が判断を示し、設計者の便宜をはかることは極力避けるべきであると考えられる。この種の決断は見かけ上設計を容易にするが、設計者の創造性を奪い、また技術の進歩を阻害することになるからである。」（免震構造設計指針初版の序文より抜粋）

初版の刊行以来、免震構造小委員会（主査：秋山宏）は引き続き免震構造関連技術の収集と開発に努め、1992年4月には国際ワークショップを「免震構造技術の最近の発展」と題して主催し、1992年日本建築学会全国大会においてはパネルディスカッションを「免震構造の可能性」と題して行った。これらの成果を踏まえて、1993年には免震構造設計指針の改訂版を刊行した。免震構造は高い性能を明快に実現できる耐震構造における優れた選択肢である

ことが確認され、今や建物規模、形式、維持管理方式などにおいて通常の建物と比べて何ら特別の制約を受けるべきものではないことが明らかになった。

1994年ノースリッジ地震、1995年兵庫県南部地震では建築物の継続使用、機能維持が難しく、修復にも莫大な費用を要するなどの問題が顕在化した。兵庫県南部地震以降、免震構造が多く建設されるようになったのを受け免震構造小委員会（主査：和田章）では1996年に「免震構造の研究と設計」というシンポジウムを開催した。その後、免震構造の設計ならびに免震部材の開発などで大きな進展がみられた。これらの発展を反映した免震構造設計指針の改訂版が2001年に刊行され現在にいたっている。

2001年に免震構造設計指針（第3版）を刊行した後、免震構造小委員会は解散した。その後、免震構造の適用範囲の拡大、長周期地震動による応答評価などの課題が出てきたため、2009年に免震構造小委員会を設置し、指針の改訂を目標に活動を行っている。

3. 免震構造の現状

図1に免震建物の棟数の推移を示す。1995年の阪神淡路大震災において免震建物の耐震性能が実証され、それまでの約10年間で80棟あまりの実施例であった免震建物が、その後は急激に増加した。特に、病院、防災拠点など、大地震時にも機能を維持しなければならない公共建築や、地震被害により財産価値を失った分譲マンションなどに急速に広がり、高い耐震性能をもつ新しい構造形式として認知され広く普及した。

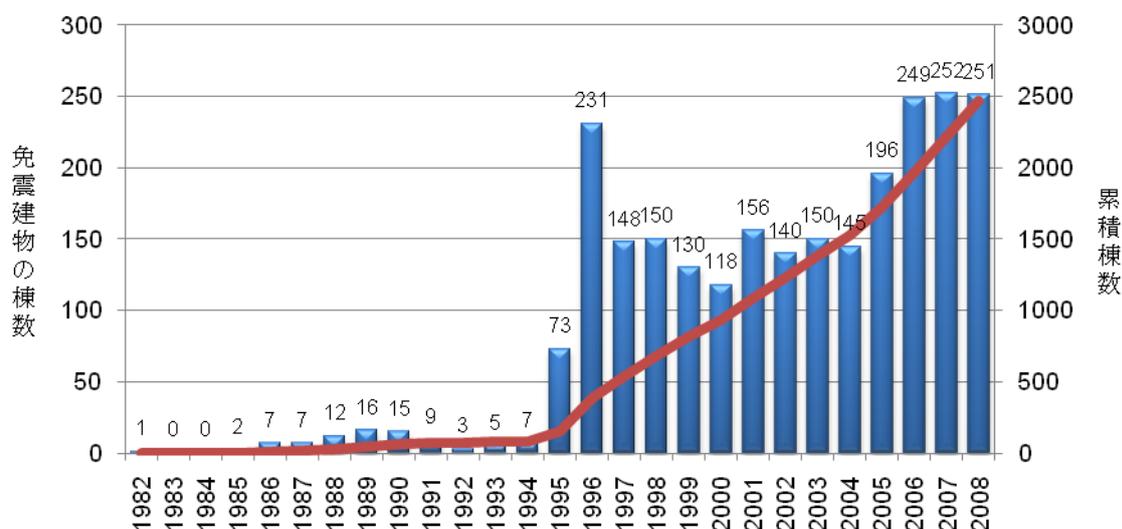


図1 免震建物の棟数（日本免震構造協会による集計データに基づく）

免震建物の普及拡大を背景に、2000年の建築基準法改正の際には、免震構造は限界耐力計算と同等以上の安全性を確かめられる計算法として平成12年建設省告示第2009号により規定され、一般の建物と同様の確認申請により建設できるようになった。同時に、平成12年建設省告示第1446号により、免震材料の備えるべき性能や品質、それを検証する試験法が規定され、免震構造の設計に際して、積層ゴムやダンパーなどはこの免震材料認定を取得したものを使用することが義務づけられた。2000年以降は、大臣認定を取得した免震建物と告示免震によるものが共存するようになり、告示で規定されるレベルを基準にして、時刻歴応答解析により大きな余裕度を確保した高耐震性能のものまで、様々な耐震レベルの免震構造が存

在するようになった。これまでアスペクト比の小さい RC 造の建物に限られていた免震構造も、鉄骨構造やプレストレス構造などの構造種別や 60m を超える超高層住宅に適用されるなど、多様化した。積層ゴム、すべり支承、転がり支承、履歴減衰型ダンパー、粘性減衰型ダンパーなど様々な使用の免震部材が開発され、一つの建物で多種類の免震部材を採用する事例も増えた。また、積層ゴムを用いた免震構造とは全く異なる性状や性能を示すすべり支承や転がり支承を採用した戸建て免震住宅が多く建設されるようになった。

2003 年十勝沖地震の苫小牧でスロッシング振動による巨大な石油タンク火災から、長周期地震動の存在が実証された。東海・東南海・南海地震などの海溝型巨大地震が発生すると、東京、大阪、名古屋などの大都市は、数秒から数十秒の長周期の揺れが数分から十分間も続くと言われている。長周期地震動により、免震建物はこれまでの想定を超える大きな揺れが繰り返し生じる恐れがある。

2007 年の建築基準法改正により、限界耐力計算と同等以上の安全性を確かめられる計算法である免震告示も、より詳細な地盤調査が必要となった。免震告示を用いて設計されてきた多くの戸建て住宅は、建設費とのバランスから必要とされる地盤調査が困難になり、建設戸数が急激に減少した。建設棟数などの詳細は文献[1]に詳しい。また、免震構造や免震デバイスの審査の状況に関しては文献[2]が参考となる。

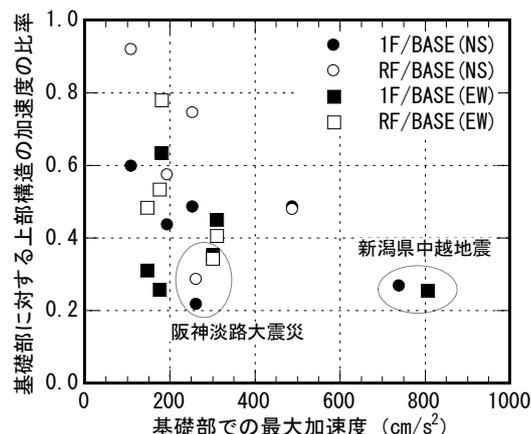


図2 免震建物での地震観測から得られた応答低減効果

図2に2005年福岡県西方沖地震の際に福岡市内の免震建物(4棟)で観測された最大加速度の分布を示す。横軸は基礎部(免震層の下)での最大加速度を、縦軸は免震層直上階での観測値(1FL)と最上階(または塔屋)での観測値を基礎部での加速度で除した値(応答低減率)が示されている。同図中には1995年のWESTビルでの記録と2004年新潟県中越地震の水仙の家での観測記録も加えている。基礎部での加速度が小さい時には免震効果は小さいものの、上部建物の加速度応答は基礎部での加速度以下であり、増幅はしていない。基礎部での加速度が大きくなると免震効果が大きくなり、基礎部での加速度の1/2~1/4程度の加速度応答となっている。免震効果をどの程度の加速度(入力地震動の大きさ)からどの程度発揮させるのかは、免震層や免震部材の設計に関係している。もし耐震構造が同様の地震動を受けた場合には基礎部での最大加速度に対して上部建物の加速度は2倍から3倍に増幅することになり、免震構造の応答は耐震構造に比べて最大1/10くらいに低減していると言える。

免震建物の地震時応答を記録できるようにしておくことは免震層の健全性を評価する上でも効果的である。できるだけ多くの建物に地震計を設置し、地震観測網が広がることを推進

すべきである。地震計でなくても「けがき式変位計」による免震層の変形を追跡できるようにしておくことは、免震建物がどういう応答をしたのか、免震部材の健全性を判断する上でも重要なデータとなる。免震建物の応答挙動を観測することが今後の免震構造の発展・普及に役立つのは間違いない。戸建て免震住宅の地震時応答については、文献[3][4]などに詳しい。

4. 課題と展望

わが国初の免震構造（八千代台免震住宅）ができてほぼ 30 年が経過し、成熟した技術になってきたと思われる。免震構造の新たな展開としては、3 次元免震、セミアクティブ・アクティブ制御免震、免震+制震システムなどがある。免震技術を活用した新たな展開と下記に示す課題の解決が相まって、免震構造にも新たな展望が開けていくと思われる。

4.1 長周期地震動に対する応答評価

長周期地震動に対する免震構造の応答については文献[5]で詳しく検討されている。この研究で使用した長周期地震動に対しては、エネルギー吸収能力の余裕が少ないケースがあったり、水平クリアランスを少し超えるケースが一つあった以外は、特に問題となる結果はなかったとされている。しかし、限られた応答解析である点には注意が必要である。今後の課題としては、免震部材の大振幅繰り返し変形時の特性調査、最大応答値と総入力エネルギー量の両面からの検討、地震動評価のばらつきを考慮した設計法の構築などが指摘されている。

地震動の卓越周期と免震構造の周期が近い場合には、キャスター機器が想像を超えて移動するなどの実験報告[17]もあり、室内安全性に対する配慮も必要だろう。

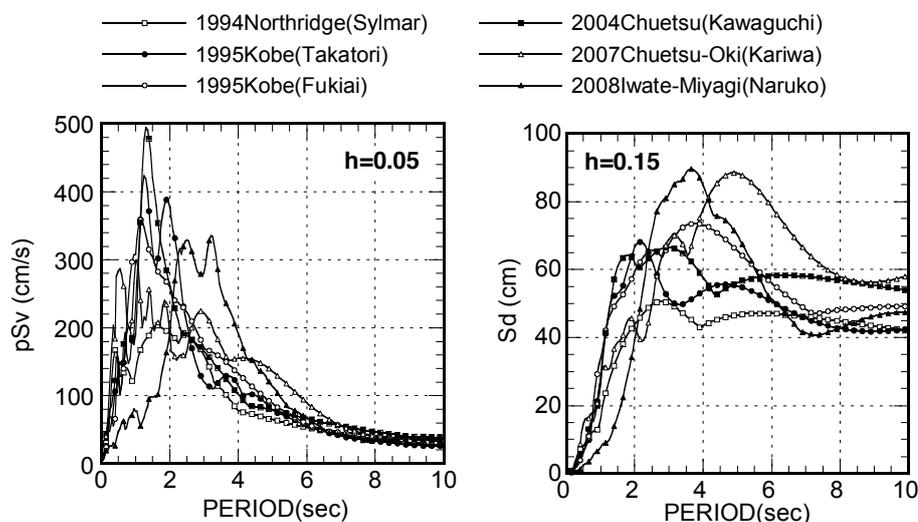


図3 観測地震動の疑似速度応答スペクトル（左）と変位応答スペクトル（右）

文献[6]では大きな断層変位が観測された場合の強震度（例えば 1999 年の台湾・集集地震での記録）に対する免震建物の応答について検討している。その結果、免震層の許容変形量として 1m を想定すれば、断層運動を伴う強震動に対しても免震構造の設計は可能だと述べられている。しかし、このような強震動に対応できる免震層の性能レベルは通常地震動対応の場合と大きく異なっている。従って、免震建物を設計しようとしている地域で、こういった地震動を想定すべきかを定量的に示して欲しいとも述べられている。

近年観測されている震源近傍での地震動のスペクトルを図 3 に示す。ここで使用した地震動の最大速度振幅は 120~150cm/s であり、通常免震設計で使用されるもの比べて大きい。

しかし震源近傍ではこのような大きな速度レベルの地震動が発生する可能性が高いため、設計レベルを超える地震動に対する免震建物の応答特性、限界に至るまでの余裕度などについて検討しておくことも必要となる。

免震建物の設計用地震動は、告示 1461 号に規定された方法で作成された告示波が多く使用されている。図 3 に示される観測地震動は告示波のレベルを超えており、設計用地震動として何を採用すべきか、あるいは応答の余裕度をどの程度確保しておくのか、さまざまな特性を有する地震動に対してロバスト性を有しているか、など設計用地震動の設定と応答の適切な評価がますます重要となっている。

4.2 風荷重に対する応答評価

風荷重に対する基本的な考え方は、風荷重に対して免震層を降伏させないことである。想定される風荷重による免震層の層せん断力に対して、免震層の降伏せん断力が上回っていれば良い。近年普及した超高層免震建物においては、より高い免震性能を確保するために、免震層のダンパー量を少なくする傾向がある。従って、風荷重によって生じる免震層の層せん断力が、免震層の降伏せん断力を上回ることがある。また、免震部材の種類により、水平方向の荷重によりクリープ変形が生じることも想定される [7]。このような場合は、風荷重による免震層の応答変位を詳細に検討するとともに、エネルギー吸収性能の観点からも検討を行う必要がある。

風向方向に対する風応答の特徴は、一定外力となる静的成分と動的に変化する変動成分が重畳されていることと、荷重自体は地震ほど大きくないものの、想定される加力時間が地震と比べて著しく長いことである。このような荷重が免震デバイスに加わると、速度依存性や繰返し変形による発熱によりデバイスの剛性が低下する。そのため、風荷重と積層ゴムの復元力の釣合い位置が時間とともに変化し、水平クリープ変形が大きくなることが考えられる。風荷重を想定した長時間加力試験による各免震装置における水平クリープ特性については文献 [8]～[10]などにおいて実験的に求められている。また、免震構造協会では「免震建築物の耐風設計指針」の作成をすすめている[11]。

4.3 免震デバイスのエネルギー吸収性能評価

免震デバイスが、長周期地震動などにより多数回の繰返し変形を受けた際に、初期の剛性やエネルギー吸収性能を維持しているかどうかの確認が重要となる。これ以前にも繰返し依存性として 40 回程度の繰返し試験は実施されていたものの、それ以上の繰返し変形に対する影響を確認する実験が実施されてきている（文献[12]～[16]など）。

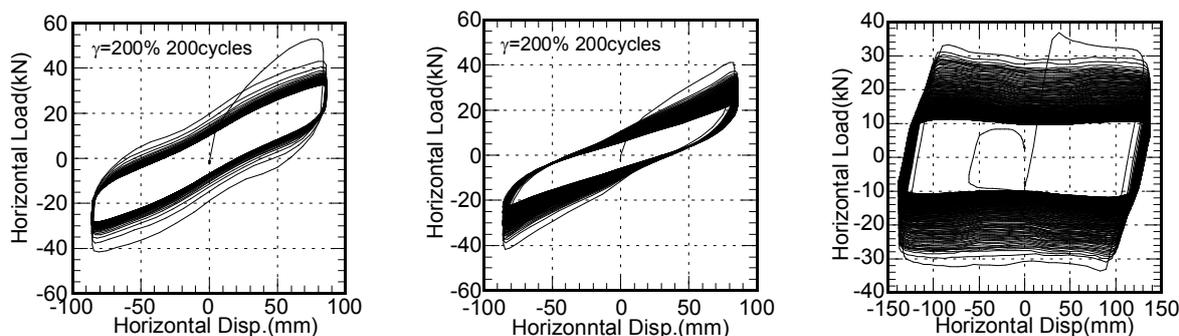


図 4 繰返し試験での履歴特性（左から LRB, HDR, 弾性すべり支承 $\mu=0.13$ ）

文献[13]で示された繰り返し試験による履歴特性を図4に示す。繰り返しにともない剛性や降伏荷重(すべり荷重)が低下していくことがわかる。降伏荷重などの低下が応答にどの程度の影響を与えるのかを検証することも必要となるケースもあるだろう。

また、高減衰積層ゴムについては水平2方向加力をした場合、破断ひずみが低下するとの報告[18]もあり、今後他の免震デバイスについても2方向加力の影響について検証する必要があるだろう。

5. まとめ

本稿では免震構造の現状と課題についてまとめた。免震構造の適用範囲の拡大にともなう新たな課題に対しては、さらなる研究開発が求められる。免震構造は初期の開発段階から普及期に入ったといえる。今後も免震技術の向上をめざし、より広く免震技術が活用され、普及することを目指したい。今後多くの設計者(技術者)が日常的に免震設計に取り組めるような環境整備がはかられ、地震の脅威から市民や都市を守ることにつなげていきたい。

参考文献

- [1] 免震構造協会運営委員会：2009年度免震制振建物データ集積結果，MENSIN，No.69，2010.8
- [2] 日本建築センター免震構造審査委員会：建築新技術レポート 免震建物・免震材料 評価，ビルディングレター，2010.4
- [3] 及川，平野ほか：岩手県沿岸北部地震(2008年7月24日)における木造免震住宅の免震効果(その1～2)，建築学会大会学術講演梗概集(東北)，pp849～852，2009.8
- [4] 及川，平野ほか：駿河湾の地震(2009年8月11日)における木造免震住宅の応答調査(その1～3)，建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp325～330，2010.9
- [5] 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性，2007
- [6] 宮崎ほか：震源近傍の強震動に対し免震構造は対応可能か？，第28回地盤震動シンポジウム，2000.11
- [7] 竹中ほか，鉛プラグ型積層ゴムのクリープ性を考慮した高層免震建物の風応答簡易評価法，日本建築学会構造系論文集，第561号，pp89～94，2002.11
- [8] 河内山ほか：風応答における高層免震建物のLRBの健全性評価，MENSIN，No.47，pp47-53，2005
- [9] 鈴木ほか：錫プラグ入り積層ゴムの長時間加力実験，日本建築学会関東支部研究報告集，2008
- [10] 藤山ほか：高減衰ゴム系積層ゴムの長時間動的繰り返し加力実験(その1～2)，日本建築学会学術講演梗概集，pp545-548，2003
- [11] 免震構造協会：耐風設計部会の活動，MENSIN，No.66，2009.11
- [12] 近藤ほか：大振幅繰り返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的錬成挙動に関する研究(その6)，建築学会大会学術講演梗概集(九州)，pp877～878，2007.8
- [13] M.Takayama et al.: Durability of Rubber Isolators by Long-Duration Ground Motion due to Large Earthquakes, Proc. of 14WCEE, 2008.11
- [14] 嶺脇ほか：縮小試験体による鉛プラグ入り積層ゴムの高速繰り返し力学特性，建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp265～266，2010.9
- [15] 早川ほか：大振幅繰り返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的錬成挙動に関する研究(その14)，建築学会大会学術講演梗概集(東北)，pp835～836，2009.8
- [16] 石塚ほか：高減衰積層ゴムの性能確認試験(その3)，建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp377～378，2008.9
- [17] 佐藤ほか：医療施設の機能保持性能を検証するための実大震動台実験 震災時における都市施設の安全性・機能性評価，建築学会構造系論文集，第650号，pp771～780，2010.4
- [18] 山本ほか：高減衰積層ゴム支承の水平2方向変形時の力学特性に関する実大実験およびモデル化，建築学会構造系論文集，第638号，pp639～645，2009.4

耐震と免震、制震（その2）制震構造の立場から

建物の構造振動制御小委員会・池田 芳樹（鹿島建設）

1. はじめに

1980年代後半から建物の振動制御に関する研究開発が活発になったことを受けて、振動制御系の小委員会は1997年度から振動運営委員会内に設置されている。昨年の日本建築学会大会でも当該分野の講演数は約100を数え、免震とともに研究開発が活発な分野である。本報告は14年間の小委員会の活動を設置期間ごとに振り返り、活動の主旨と成果を報告する。次に、研究開発と適用の現状を概観して、1995年の兵庫県南部地震以降、振動制御分野がどのような方向に進んでいるかを概説する。最後に、本分野の課題と現小委員会の展望を述べる。

2. 本小委員会の活動を振り返る

1997年度から活動を開始した振動制御系の小委員会は、振動運営委員会の中では歴史が浅い委員会である。1980年代後半からの研究の隆盛を受けて、1991年度から3年間、制震(振)構造特別研究委員会（委員長：小堀鐸二）が設置された。この特別研究委員会は、理論ワーキンググループと実験・適用ワーキンググループに分かれて、研究開発の国内外の動向をまとめた[1]。当時、この新しい技術に対する建築構造界の期待は大きく、1990年代前半には日本建築学会大会における当該分野の講演数はすでに100以上を数えた。

振動制御では物理現象の動的把握が重要であり、当小委員会の振動運営委員会内の設置は適切な判断であったと言える。2005年度以降、小委員会の設置が更新される際に委員会名称を変更させているが、その活動は特別研究委員会からの流れを汲んでいる。表1には、活動報告の場となったシンポジウムと学会刊行物を示す。

表1 振動制御系小委員会の主な活動

2002年	シンポジウム「建築構造物のアクティブ振動制御のこれまでの歩みと将来—構造性能の向上にむけて—」を開催、文献抄録と適用事例集の配布
2005年	シンポジウム「建築物のためのアクティブ・セミアクティブ振動制御設計」を開催
2006年	『アクティブ・セミアクティブ振動制御技術の現状』を刊行 シンポジウム「アクティブ・セミアクティブ振動制御技術の現状」を開催
2007年	シンポジウム「振動制御技術と新しい展開—交通振動から地震まで—」を開催
2010年	『建築構造物の振動制御入門』を刊行
2011年	シンポジウム「建築構造物の振動制御の現状」を開催予定（5月）

2.1. 構造物の振動制御小委員会（1997—2000年度）

常設委員会としての第1期では、井上豊主査の下でアクティブ振動制御に関する文献を整理した。振動制御技術に関する関心の高さを反映して、1997年9月に *Journal of Engineering Mechanics* は *Structural Control* の特集号を刊行した[2]。そこでは、パッシブ制御、アクティブ制御およびセミアクティブ制御の研究の現況が概説されており、日本ですでに実用化されていたアクティブ制御も多数紹介されている。実際、委員会活動の開始時点で、アクティブ制御の国内適用例は20以上数えられた。アクティブ制御に限っても、すでに膨大な研究成果が報告されており、研究開発への新たな参入と適用の推進のために、溢れている技術情報を整

理して発信することが小委員会の急務であった。また、振動制御が従来の建築教育カリキュラムの枠組みに収まり難い機械と制御の知識を要求するため、小委員会設立時は技術を建築構造分野で適切に伝えることも要求された。そこで、1960年以降の国内外の研究論文560編について文献抄録を作成すると同時に、実用化されているアクティブ・セミアクティブ制御技術を調査した。文献調査では、作業が終了したかと思うと新しい研究成果がさらに多数報告されるといった状況で、抄録執筆作業は次期小委員会に受け継がれた。

2.2. 構造物の振動制御小委員会（2001－2004年度）

2001年度からは、西谷章主査の下で活動を継続した。2002年にはシンポジウムを初めて開催し、日本における建物のアクティブ振動制御の進捗状況を報告して、将来展望を討議した。シンポジウムでは、講演資料集のみならず、1997年度からの活動成果である文献抄録集と適用事例集が配布された[3]。文献抄録集と適用事例集は200頁にも及び、アクティブ制御の研究開発を概観することができる。アクティブ制御の研究開発の勢いは2000年代前半から落ち着いたため、この文献抄録集は今でもアクティブ制御の研究の進展を伝える貴重な資料である。文献抄録集と適用事例集は、暫くは小委員会活動の核となる役割を果たした。また、海外の要請を受けて、日本における建物のアクティブ・セミアクティブ制御の適用状況を井上前主査と西谷主査が報告している[4]。小委員会活動に国際的配慮がなされている点は、本分野の特徴の1つである。

1995年の兵庫県南部地震は、2001年度以降の小委員会活動に具体的に反映されてくる。この地震によってセミアクティブ制御の研究開発が促進され、その技術紹介も求められてきた。2005年5月には、次期小委員会の下でシンポジウム「建築物のためのアクティブ・セミアクティブ振動制御設計」を開催し、セミアクティブ振動制御の考え方を紹介している[5]。

2.3. 建築物振動制御設計資料作成小委員会（2005年度）

この小委員会は、変則的に1年間設置されている。前小委員会の活動成果と2005年のシンポジウムを反映させて、2006年5月には「アクティブ・セミアクティブ振動制御技術の現状」を刊行した[6]。これは、振動制御系小委員会で最初の学会刊行物となった。この刊行物には、アクティブ制御の効果確認を整理した50頁にも及ぶ章があり、実建物の制御効果を実観測記録で検証している点で好評である。効果確認方法の多くはパッシブ制御にも適用可能である。2006年12月には、次期小委員会の下で刊行物の紹介を兼ねたシンポジウムを開催した[7]。

2.4. 建築構造物振動制御小委員会（2006－2009年度）

2006年度からは、長島一郎主査の下で活動している。振動制御分野では、大地震時の構造安全性の確保に留まらず、強風・中小地震から交通振動・環境振動に至るまで、様々な外乱に対する機能維持や居住性向上も求められている。そこで、2007年にはシンポジウム「振動制御技術と新しい展開－交通振動から地震まで－」を開催し、地震や風以外に対応する振動制御の特徴と具体的な対策事例を、環境振動運営委員会の協力を得て紹介した[8]。セミアクティブ免震、上下免震、質量操作によるパッシブ制御など新たな技術展開も紹介した。

昨年12月には、「建築構造物の振動制御入門」を4年間の活動成果として刊行した[9]。この刊行物は1997年度から継続してきた小委員会活動の集大成であり、基礎理論、マスダンパの設計、新たな振動制御方法の適用事例、環境振動分野における振動制御の取り組み等、多様な内容が盛り込まれている。今年5月18日には、小委員会の活動報告と刊行物の紹介を兼ねてシンポジウムが開催される。

2.5. 建物の構造振動制御小委員会（2010年度一）

昨年4月からの現小委員会は、2010年7月に The Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring において「実観測記録による実建造物の制御効果の確認」のセッションを企画担当し、海外からも多くの聴講者があった[10]。日本の振動制御技術の適用には相変わらず海外から高い関心が寄せられており、委員会活動の一端を海外に発信する良い機会となった。制御法の違いに拘らず、適用した制御の効果確認にはシステム同定・計測分野との連携が必要なことが再認識された。現小委員会の活動の展望は4.で紹介する。

3. 振動制御の現状

図1に、制震（構造振動制御）建物の累積数を引用する[11]。2000年以降は、構造性能評価機関が増えたため適用事例がすべて把握されていないが、兵庫県南部地震以降の制震建物の増加傾向がよく示されている。特に鉄骨造高層建物では、制御装置を組み込むことが標準仕様になってきている。本節では、アクティブ制御、セミアクティブ制御およびパッシブ制御に分類して、その現状を概観する。

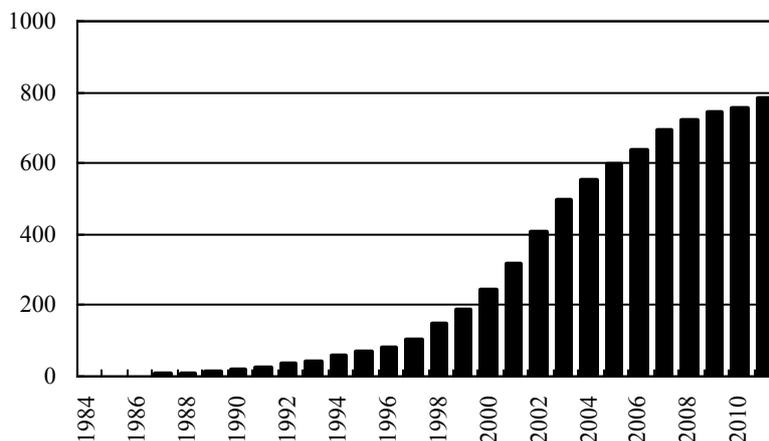


図1 制震建物の累積数の推移

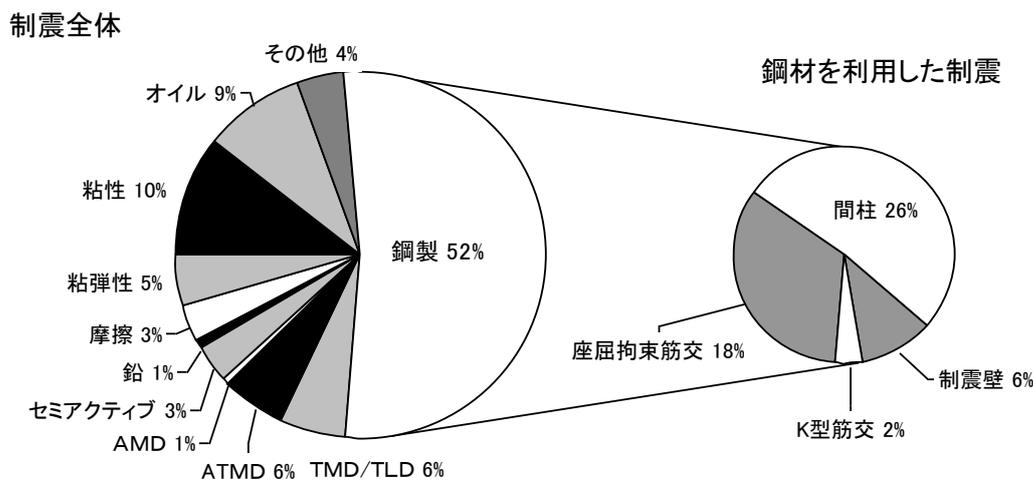


図2 制震全体と鋼材を利用した制震の内訳（図1に対応）

3.1. アクティブ振動制御

アクティブ制御は 50 棟以上の建物にすでに適用されており、そのほとんどはマスダンパ (Active Mass Damper, Active Tuned Mass Damper) である。1989 年に初めて適用され、1990 年代後半には設計法は実質的に確立されている。マスダンパは適用数が多く、適用の傾向を文献から抽出することができる。一般に、マスダンパによる制御効果は建物重量に対する重錘重量の比率に依存する。建物設計総重量に対するマスダンパ重錘の割合は 0.06~1.35 % であり、平均的には 0.3 % である。図 1 は、アクティブ制御の効果を建物 1 次モードの等価減衰比として評価している[12]。最近ではアクティブ制御の話題性は乏しく、新しい適用事例の効果を知ることは難しい。等価減衰比は 4~20% に分布し、平均値は 9% 弱である。ただし、減衰比を求めた手段 (自由振動実験、強制加振実験、地震観測、強風観測) や振動の大きさは建物ごとに異なっており、統一した性能評価にはなっていない。概して、中小地震や数年期待程度の方が制御対象であり、大地震時の「制震」効果ではない。

アクティブ制御によって大地震時の構造安全性を確保することは現実には不可能に近いが、その研究開発がその後の振動制御技術を支える多くの知見を蓄積したことは事実である。最近では、回転慣性質量による制御が新たなアクティブ制御として注目されており、昨年の学会大会でも発表数が際立って多い。従来のアクティブ制御が運動方程式の減衰項を操作していたのに対して、この制御は質量項すなわち入力項を操作している。アクティブ・セミアクティブ制御は振動計測を必要とするため、振動計測に基づく制御効果は多数報告されており、性能検証が進んでいる。制御効果の確認では同定分野の連携が重要であり、その方法は 2006 年の時点でほぼ整備された感がある[7]。

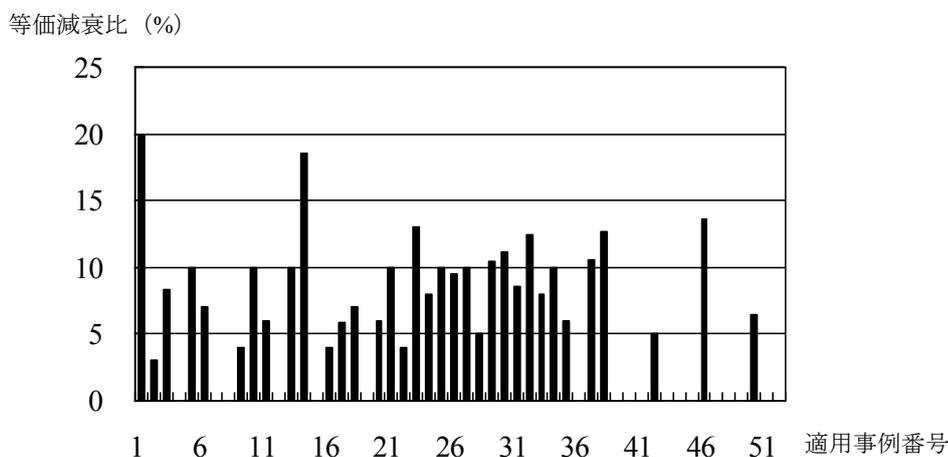


図 1 アクティブ振動制御された建物の 1 次モードにおける等価減衰比

3.2. セミアクティブ振動制御

セミアクティブ制御は、アクティブ制御のうち外部から供給されるエネルギー量がきわめて少ない制御を意味するが、「きわめて少ない」の定量的定義はなく、この制御は厳密に定義されていない。実際のセミアクティブ制御の数字としては、アクチュエータ内にある流量調整弁の開度を数十 W の電力消費量で調整して、最大 1,000~2,000kN 程度の力を変化させている。この制御の隆盛は兵庫県南部地震以後であり、研究開発の関心が大地震に対抗できる制御に移行したと理解される。現在、セミアクティブ制御が適用された建物は 20 棟程度と推定

される。研究としては、磁気粘性流体（MR）ダンパも多数報告されているが、実用としてはオイルダンパによる制御が占めている。オイルダンパは一台あたりの抵抗力が大きく、産業界で豊富な実績も有することも適用数の増加に影響している。構造フレームの層間ダンパまたは免震層のダンパとして使用されることが多く、後者はセミアクティブ免震と言われる。

オイルダンパによるセミアクティブ制御は、当初、油流量調整弁の開度を連続的もしくは段階的に変化させる方式であったが、最近では調整弁を閉じるか開くかの2段階に簡素化した方式が主流である。2段階切替方式でも、連続的に変化させた場合に近い制御効果が得られるからである。その後、2段階切替方式は、電力なしに油圧変化だけで弁開閉が出来るように装置機構が工夫され、新しいパッシブ制御ダンパにも発展した。これは、アクティブ・セミアクティブ制御の知見がパッシブ制御に生かされた例である。

セミアクティブ制御は小地震から大地震まで幅広い振動レベルに対応できることを長所とする。例えばセミアクティブ免震では、中小地震時の免震効果の改善と免震層変位を抑えながら建物加速度を低減することが意図されている。現在、セミアクティブ制御が経験した比較的大きな地震は、新潟市の31階高層建物が受けた2004年10月新潟県中越地震と2007年7月新潟県中越沖地震であろう。後者の地震の方が揺れは大きく、建物頂部の最大加速度は 100cm/s^2 であった。いずれの地震でも、1次振動モードの等価減衰比は約7%であった[9]。

3.3. パッシブ振動制御

パッシブ制御は、建物に共振する付加振動体を設置し振動エネルギーを吸収する方法（同調型マスダンパ、液体スロッシングダンパ等）と材料・部材の非線形履歴を利用してエネルギー吸収を図る方法に大別される。後者は大地震への対応が可能であり、弾塑性ダンパ、摩擦ダンパ、粘性・粘弾性ダンパ、オイルダンパ等が含まれる。制震という概念が定着する以前から、耐震構造として履歴によるエネルギー吸収という考え方はある。同一建物で複数のパッシブ制御が組み合わせられる場合は多く、パッシブ制御とアクティブ・セミアクティブ制御の併用もある。複数の制御方法を採用した場合の各制御の役割分担は、整理される必要がある。

大地震を対象としている場合が多いパッシブ制御は、制御機構上は振動計測を伴わないため、適用数が多い割には制御効果が確認されていない。適用数の多さを考えれば、パッシブ制御の効果を実観測記録で確認することは重要である。制震構造の発想の一つに「耐震構造よりも性能が高い建物」という目標があったが、制震で従来の耐震と同じ性能を目指している場合も数多くあり、制震の目的に関して再考することも必要である。

4. 今後の課題と小委員会の展望

2009年度までの小委員会は、振動制御技術を建築構造分野の先進技術として認識しており、研究開発や学術的な視点から主に活動を行ってきたように思われる。仕様設計から性能設計への移行、防災に対する国民意識の高まり、高品質建物への社会の要求にも影響され、この20年間、振動制御は構造設計に広く浸透した。小委員会発足当時に比較すると、振動制御法は多様化し、実建物の制御装置として具体化され制御法の種類も増加している。その一方で、研究開発競争は激化し、制御方法や制御装置の些細な違いが強調され、制御性能の不適切な比較があったことも否定できない。免震と比較すると、制震は研究内容がきわめて多様なことに特徴がある。小委員会は新たに提案された制御法に常に関心を払っているが、数値解析や実験室における小型制御装置の検証で留まってしまう研究も多く、最新の研究成果を技術

整理にどこまで取り入れていくかの判断は難しい。

振動制御は建築計画の初期段階から考慮すべき技術の一つとしてすでに定着し、主な考え方は出揃った感もある。設計側からは、多様な技術の中から目的に適ったものを効率的に選択できるような情報が欲しい、といった声も聞かれる。そこで、現小委員会は、各振動制御法の基本原理を分かり易く解説し、ある制御法を選ぶ理由が制御の専門家以外さらには意匠設計者にも分かるような情報の提供を目標として活動している。成果物としては、建築を専攻する学生への教育的配慮も必要と考えられる。2010年度からは、重層構造物のみならずシェル・空間構造の制御も視野に入れ始めている。

5. まとめ

振動制御系小委員会の活動を報告し、振動制御技術・制震技術の現況を概説した。振動制御は建築計画の初期段階で考慮すべき技術の一つとして定着し、大地震時の構造安全性のみならず、居住性を改善する技術としても認識されている。しかしながら、制震構造は大地震を経験しておらず、性能実証のためには建物の振動計測を推進していく必要がある。制御法が多様化している現在、各制御法の本質を見極めて特徴を整理することは重要であり、目的に適った制御法を選び易くする情報の提供を現小委員会は目指している。本小委員会は、今後ともシンポジウム等で活動成果を報告し、活動に対する要望も汲み取っていききたい。

参考文献

- [1] 日本建築学会・制震(振)構造特別研究委員会：建築構造物の制震(振)構造に関する理論的実験的研究の推進、活動報告書、1994.11
- [2] Housner G.W. et al.: Special Issue on “Structural Control: Past, Present, and Future”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.129 No.9, 1997.9
- [3] 日本建築学会・構造物の振動制御小委員会：シンポジウム「建築構造物のアクティブ振動制御のこれまでの歩みと将来—構造性能の向上にむけて—」、講演資料集、文献抄録集と適用事例集、2002.11
- [4] Nishitani A. and Inoue Y.: Overview of the Applications of Active/Semiactive Control to Building Structures in Japan, Special Issue on “Practical Applications of Active or Semi-active Structural Control Systems to Actual Civil Engineering Structures”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.30 No.11, pp.1565-1574, 2001.11
- [5] 日本建築学会・建築物振動制御設計資料作成小委員会：シンポジウム「建築物のためのアクティブ・セミアクティブ振動制御設計」、配布資料、2005.5
- [6] 日本建築学会・建築物振動制御設計資料作成小委員会：アクティブ・セミアクティブ振動制御技術の現状、2006.5
- [7] 日本建築学会・建築構造物振動制御小委員会：シンポジウム「アクティブ振動制御技術の現状」、講演資料集、2006.12
- [8] 日本建築学会・建築構造物振動制御小委員会：シンポジウム「振動制御技術と新しい展開 - 交通振動から地震まで -」、講演資料集、2007.12
- [9] 日本建築学会・建築構造物振動制御小委員会：建築構造物の振動制御入門、2010.12
- [10] Ikeda Y., Nagashima I. and Fujitani H.: Verification of Structural Control by Observation Records, *Proceedings of the Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring*, Paper No.56, 2010.7
- [11] 小鹿紀英：制震・免震構造の開発と適用の現状、スペシャルテーマセッション「この10年の地震工学の動向と発展」、第13回日本地震工学シンポジウム論文集、STS2-10、2010.11
- [12] Ikeda Y.: Active and Semi-active Vibration Control of Buildings in Japan - Practical Applications and Verification -, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol.16 Nos.7-8, pp.703-723, 2009.11-12

地震応答と耐震設計（その1）上部構造について

緑川 光正（北海道大学）

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震後の建築構造分野の動きを振り返ると、免震・制振構造の建物数が飛躍的に増加し、性能指向型耐震設計の概念が導入されるとともに、耐震規定が大幅に改定された。このような状況の中で、損傷制御の考え方が一般に広く受け入れられつつあり、新たな構造システムや構造部材の開発が活発に行われると同時に、新たな構造システムに対応した構造設計指針などの整備も進められつつある。

また、最近では社会の進展に伴い、事業継続計画(BCP)の観点から地震後における建物の機能維持が求められるようになり、持続可能な建物に対する社会的要求が高まっている。米国でも、持続可能な建物に対応して *earthquake-resilient structures* といった言葉が使われている。地震に対して回復力のある構造物といった意味で、単に地震などの災害に耐えるという受け身の姿勢から、回復力を持たせるという積極的な姿勢に進化した概念と捉えることができる。一方、耐震工学の歴史を振り返ると、耐震工学は被害地震による教訓を契機として発展してきたが、大被害をもたらす地震の発生間隔は非常に長く、高度化する社会的要求に追いつかなくなっている。このような状況の中、最近、建物の大型振動台実験が数多く行われるようになり、いわば擬似地震被害を有効に活用しようという試みがなされている。

本論では、鋼構造建物を主な対象として、新たに開発されている構造部材・構造システム、最近行われた大型振動台実験による地震応答、鋼構造運営委員会の下で整備しつつある鋼構造制振設計指針（案）の概要を紹介する。

2. 鋼構造運営委員会の活動を振り返る

1995年兵庫県南部地震では、鋼構造建物に柱梁接合部の溶接部破断が多数生じたため、溶接部破断防止に関する研究が各方面で精力的に進められた。表1に示すように、過去15年間の日本建築学会大会・鋼構造パネルディスカッション(PD)では、接合部、座屈、耐震性能、設計法、環境などの主題が取り上げられている中で、接合部に関するものが多い。

表1 日本建築学会大会・鋼構造パネルディスカッション主題

1995：地震時における鋼構造骨組の破壊現象の解明
1996：鋼構造設計規準体系のあり方
1997：鋼構造柱梁接合部の耐震要求性能と実挙動
1998：制振(震)デバイスを有する鋼構造建築の現状と課題—履歴型ダンパーを中心として—
1999：鋼構造における初期不整と座屈問題
2000：鉄骨の破断現象はどこまで解明されたか、当面の対策技術
2002：建築鋼構造における環境性とは何か
2003：鋼構造の性能設計を考える—耐震・変形限界を中心として
2004：日米鋼構造耐震設計の相違—ノースリッジ・神戸から10年を経て
2005：座屈設計におけるコンピュータ解析の活用
2006：鋼構造制振技術の現状と設計指針への期待—鋼構造における制振のこれから
2007：既存鋼構造建物の耐震性能評価と補強・再生
2008：高力ボルト接合における高強度化技術の最前線
2009：鋼構造による新構造システム開発の現状と今後の展望
2010：鋼構造建物の大型振動実験の今とこれから—鋼構造設計施工の高度化と合理化に向けて

3. 上部構造の地震応答と耐震設計

3.1 新たな接合部・構造部材・構造システム

1995年兵庫県南部地震において、鋼構造建物では柱梁接合部の溶接部破断や露出柱脚の損傷などが多く見られ、それらを防止・軽減する研究が進められた。さらに、安定した施工品質の確保、地震被害軽減や地震後の機能維持のための損傷制御、地球環境に配慮した省力構法やリユースに向けた新たな接合部、構造部材や構造システムに関する研究¹⁾が進展している。

柱を梁フランジ位置で切断し、挿入したダイアフラムと柱を溶接する通しダイアフラム形式柱梁接合部は広く使われているが、多くの溶接作業と管理が必要となる。この接合部の製作コスト低減と品質確保のため、図1-3のような柱梁接合部¹⁾が開発されている。図1はダイアフラムを設けないもの、図2は外ダイアフラム形式として梁端は溶接せずにボルト接合としたもの、図3は梁端溶接を避けて特殊高力ボルトあるいは勘合接合としたものである。

図4は、被接合部材と接合要素の間で耐力差をつけ、損傷を許容する部位と損傷させない部位を区別した柱梁接合部¹⁾である。柱を貫通する高強度ボルトで梁は圧着接合され、梁端圧着面で離間を伴う回転を許容し、地震後の残留変形の最小化を意図したセルフセンタリング機構、あるいは梁端の回転能力を高めるため、高力ボルト接合スプリットティに長孔の断面欠損部を設けてその部分だけ塑性化させる塑性化スプリットティ梁端接合などがある。

図5は、エネルギー吸収要素を組み込み、エネルギー吸収要素だけに塑性変形を許容する柱梁接合部¹⁾である。鉛ダンパー付梁端接合、摩擦ダンパー付梁端接合、座屈拘束プレースを方杖として用い、梁端上フランジだけをピン接合とし、現場接合は高力ボルト接合として安定した施工品質確保を意図した方杖ダンパー接合による構造システムなどが提案されている。

架構の柱脚は終局時に大きな回転能力を要求されるが、図6は損傷を制御したりエネルギー吸収能力を高めることを意図した柱脚^{1),2)}である。アンカーボルトとベースプレートの間に楔装置を取り付け、スリップ型履歴を改善してアンカーボルトの塑性化によるエネルギー吸収能力を高めたノンスリップ型露出柱脚、最下層柱脚ベースプレートを上部構造の降伏に先行して意図的に浮き上がり降伏させ、強震時のロッキング振動による柱脚浮き上がりを許容する構造に用いるベースプレート降伏型柱脚²⁾などが提案されている。

図7は、解体が容易で部材のリユースが可能となるように考案された接合部¹⁾である。鋼管柱の継手に設けられたエレクションピースに継手パネルを高力ボルト接合し、柱との間隙にモルタルを充填して剛接合とするリングソケット柱継手、あるいは上下の柱端部に溶接されたダイアフラム同士を柱梁接合部の中央位置で接触させ、外側からかぶせたリングパネル鋼管と柱との間隙にモルタル充填して剛接合とするリングパネル柱梁接合部などがある。

図8に示す座屈拘束プレース^{例えば3),4)}は、芯鋼材の周囲を拘束材で覆う座屈拘束部と柱や梁との接合部で構成され、強震動時に主架構に先立って降伏して地震入力エネルギーを吸収し、架構の応答変形を抑制して主架構の損傷を低減する履歴ダンパーとして鋼構造建物に広く用いられており、様々な形式の座屈拘束方法や設計法が提案・研究され実用化されている⁵⁾。

3.2 鋼構造建物の大型振動台実験による地震応答

耐震工学は「被害地震に学ぶ」ことから発展してきたが、大都市化が急速に進む現代では「擬似被害地震に学ぶ」あるいは「予見と予防」の観点から、大型振動台実験が最近多く行われており、鋼構造建物についてもE-ディフェンスで幾つかの実験が実施された。

現行の耐震基準と鉄骨工事の標準仕様に従って設計・施工された実大4層建物(図9)に1995

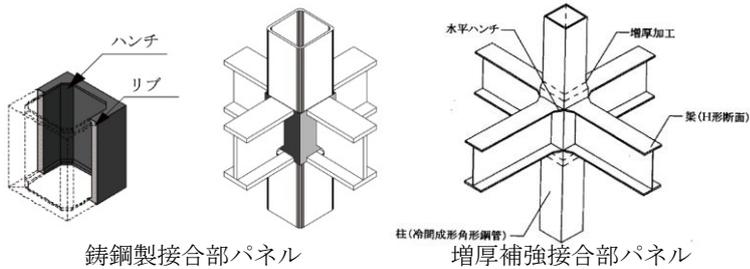


図1 ノンダイヤフラム形式柱梁接合部¹⁾

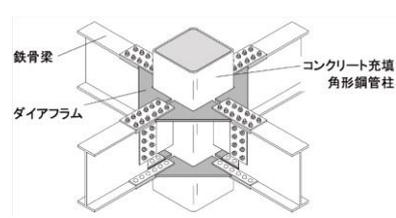


図2 外ダイヤフラム形式柱梁接合部¹⁾

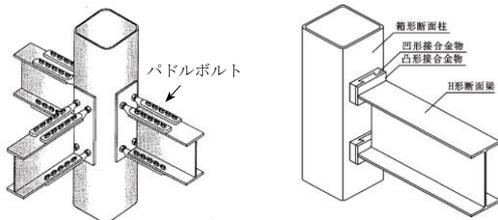


図3 特殊な接合要素による柱梁接合部¹⁾

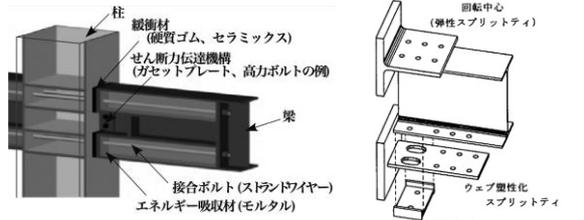
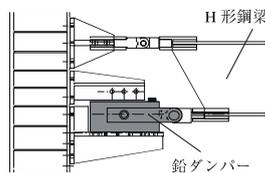
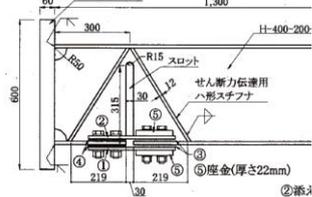


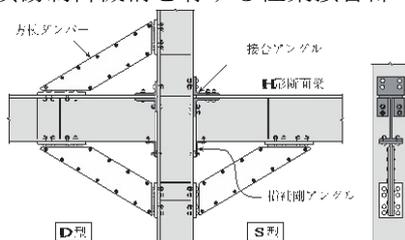
図4 損傷制御機構を有する柱梁接合部¹⁾



鉛ダンパー付き梁端接合



摩擦ダンパー付き梁端接合

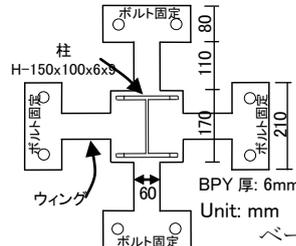


方柱ダンパー接合

図5 エネルギー吸収要素を持つ柱梁接合部¹⁾

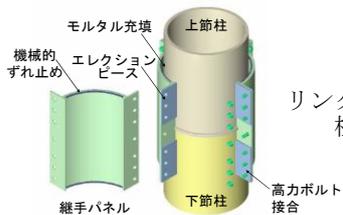


ノンスリップ型¹⁾

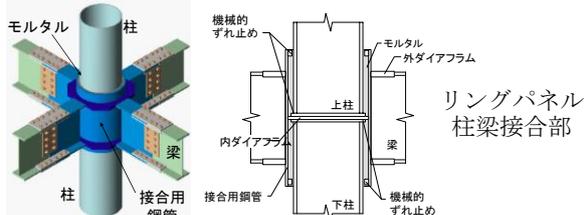


ベースプレート降伏型²⁾

図6 損傷制御機構を持つ柱脚^{1), 2)}



リングソケット柱継手



リングパネル柱梁接合部

図7 リユースのための接合法¹⁾

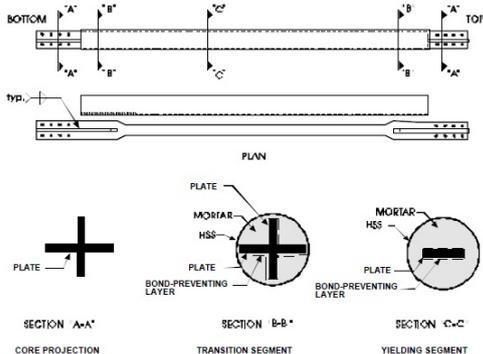
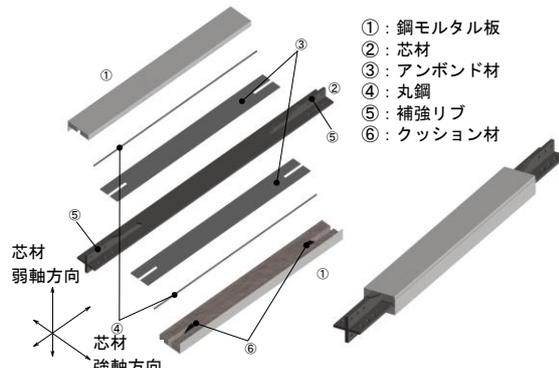


図8 座屈拘束ブレース^{3), 4)}



年兵庫県南部地震JR鷹取駅の原記録(超高層建物でのレベル2の2.6倍)を入力した結果、1層の層崩壊で倒壊に至った⁶⁾。建物は、梁または柱梁接合部パネルの塑性化を伴う全体崩壊機構を形成するように設計され、最初は全体崩壊形が形成されたものの、最終的には1層柱頭部と脚部に局部座屈が生じ、1層の層崩壊機構が形成されて倒壊した。実験後の詳細解析⁷⁾(図10)では、他の入力地震動(最大地動速度100cm/s)に対しても倒壊する場合があること、角形鋼管柱の幅厚比を改善しても(FCからFAランク)倒壊挙動には大きな差がないことなどが示されている。

次に、4種のブレース型ダンパー(鋼材、粘性、オイル、粘弾性の各ダンパー)を順次付け替えて実大5層制振建物実験⁸⁾(図11)が行われた。1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅の原記録を入力した結果、制振建物の最大層間変形角は全てのダンパーにおいて非制振建物の約半分に低減し、設計目標の最大層間変形角1/100以下に応答が収まり、また特定層への変形集中も見られず、全てのダンパーが設計で想定したように有効に機能した。

さらに、強震動後に建物の継続使用を可能とする方法として提案されたヒューズ(ダンパー)および張力材(PTワイヤ)付き制御型ロッキング架構実験^{9),10)}(図12)が行われた。この構造システムは、転倒モーメントによる柱脚の浮き上がりを許容し、長周期化により地震入力を低減すること、瞬間入力エネルギーの一部を建物自重の位置エネルギーに一時的に置換すること、上部構造や基礎構造の応力を制限する機能を持たせることを意図している。実験の結果、PTワイヤにダンパー降伏耐力以上の初期張力を導入することで、架構に復元力を与え、強震動後にも残留変形を生じない架構が実現できることが検証された。

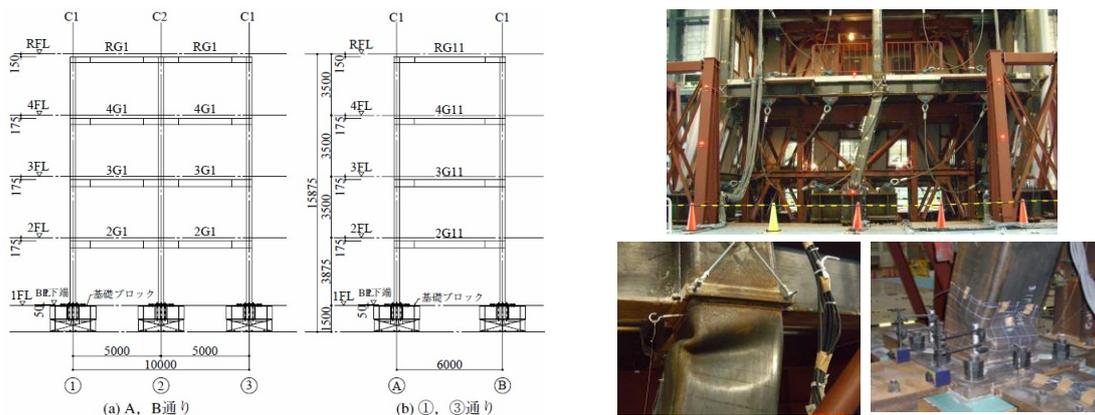


図9 実大4層鉄骨造建物崩壊実験⁶⁾

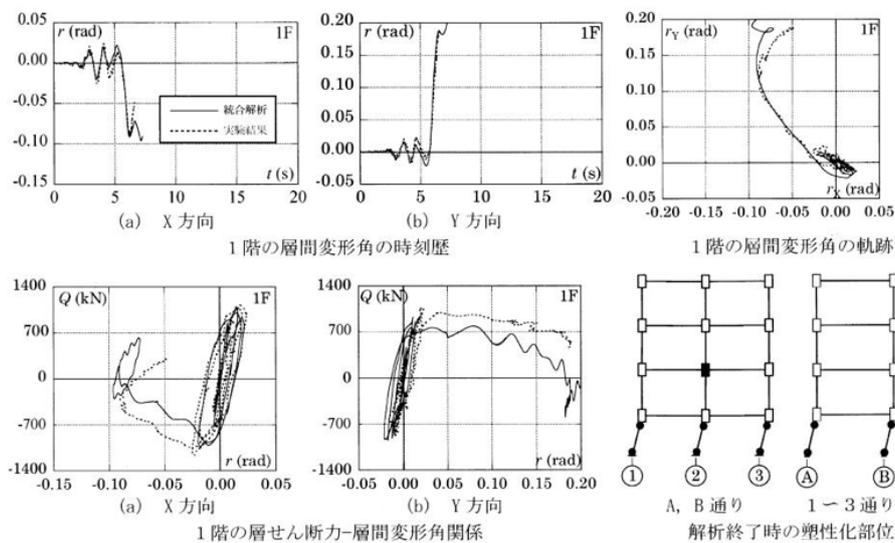


図10 実大4層鉄骨造建物崩壊実験の解析結果⁷⁾

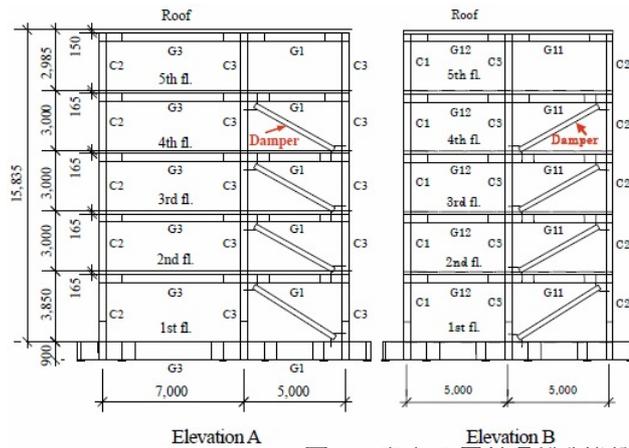


図 11 実大 5 層鉄骨造制振建物実験⁸⁾

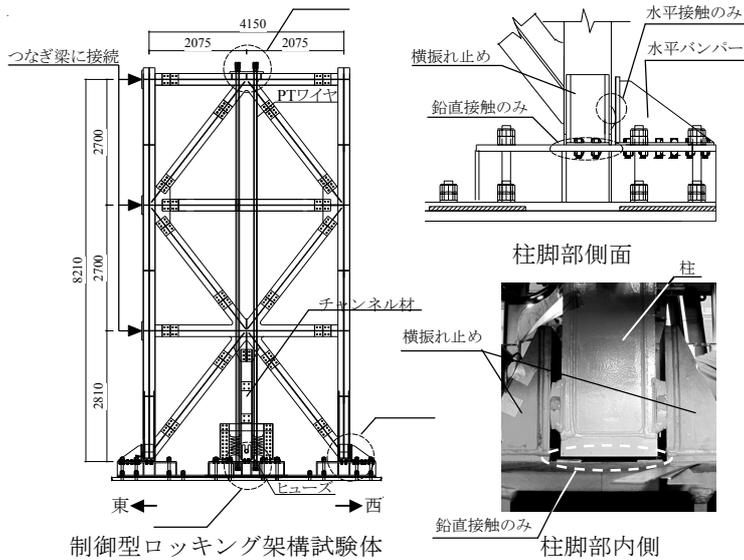
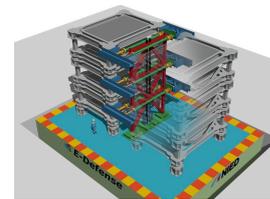


図 12 鉄骨造制御型ロッキングフレーム実験^{9),10)}



3.3 鋼構造制振設計指針（案）の概要

鋼構造制振小委員会は、鋼構造制振設計指針の発刊に向けて活動している。指針案の基本的考え方は以下の通りである。1) 中低層を含む鋼材ダンパーによる鋼構造制振建物を対象とする。2) 鋼材ダンパーおよび架構の保有性能評価法に主眼を置く。3) 制振架構と非制振架構に分けて架構全体を評価する。4) 設計目標の最大層間変形角を 1/100 とする。5) 時刻歴応答解析を前提とする。指針案の目次を表 2 に示す。

4. 今後の課題と展望

「耐震性能の水準」は、「荷重および外力の大きさ」と「限界状態」の組み合わせによって設定されて設計に使われる。水準の設定に際しては、地震動評価側と建物応答評価側との情報交換が不可欠である。最近の予測地震動には非常に大きな評価結果となる場合があり、従来の設計用地震荷重レベルとの間に大きな乖離が存在する。しかし、地震動評価側と応答評価側の情報交換が十分とは言い難い現状では、この状況を打開する努力が求められる。

そのためには、地震動評価側は、評価結果を示す際に平均値とばらつき、生起確率を併せて示して、応答評価側が設計に反映しやすいようにすること、一方、応答評価側は、向上する地震動評価技術に対応して、構造物が崩壊に至るまでの応答を評価できるような、つまり地震被害を合理的に説明できるような水準にまで応答評価技術を向上させることが必要である。

表 2 鋼構造制振設計指針（案）の目次¹¹⁾に加筆

1. はじめに	5.3 部材の保有性能
1.1 鋼構造制振の定義	5.4 架構の保有性能
1.2 損傷制御と性能設計	6. 部材間バランスと制振効果
1.3 変位と加速度の低減	6.1 骨組の包括的表現法
1.4 既往指針などの考え方	6.2 ダンパー効果を阻害する要因
1.5 本指針の位置づけ	6.3 筋違型・シアリンク型制振構造の力学特性
2. ダンパーと架構に用いる鋼材の力学特性	6.4 間柱型・パネル型制振構造の力学特性
2.1 ダンパー用鋼材の力学特性	6.5 方杖型・仕口型制振構造の力学特性
2.2 普通鋼の力学特性	7. 鋼材ダンパーの時刻歴解析
2.3 高張力鋼の力学特性	7.1 ダンパー解析モデルの前提条件
3. 座屈拘束ブレースの力学特性と設計法	7.2 ダンパー解析モデルの特徴と設定法
3.1 座屈拘束の方法と特徴	7.3 骨組構造解析におけるダンパーモデル精度の影響
3.2 座屈拘束ブレースの力学特性	8. 制振鋼構造の簡易時刻歴解析
3.3 座屈拘束材の設計	8.1 骨組解析モデルの前提条件
3.4 接合部の設計	8.2 簡易解析モデルの特徴と設定方法
4. せん断パネルの力学特性と設計法	8.3 簡易解析モデルの精度
4.1 せん断降伏と座屈	9. おわりに
4.2 せん断座屈の抑制と設計	付録 1. ダンパーや部分架構の性能試験
4.3 境界条件の影響	付録 2. ダンパー解析モデルのアルゴリズム
4.4 接合部の設計	付録 3. テーマストラクチャー（JSSI改訂モデル）
5. 鉄骨架構の力学特性と設計	付録 4. 鋼材ダンパーを用いた鋼構造設計例
5.1 柱梁部材の設計	付録 5. 鋼材ダンパーによる耐震補強法
5.2 接合部の設計	

特に、設計レベルの地震動応答に対して崩壊レベルがどの程度なのかを予測することである。ちなみに、米国 IBC 規準では、50 年 2%超過確率の想定最大級(MCE)地震動の応答スペクトルを 2/3 倍して 50 年 10%超過確率の設計用地震動(DBE)の応答スペクトルとしており、設計レベルから崩壊レベルまでの余裕度を一律に 1.5 倍に設定していることになる。この余裕度を合理的に求めることは容易ではないが取り組まなくてはならない重要課題である。

5. まとめ

予測地震動と従来の設計用地震荷重とのレベルの間に大きな乖離がある現状において、地震動評価側と応答評価側との相互理解を促進し、耐震性能の水準を互いの議論を通して適切に設定する努力が望まれる。

謝辞 本資料を作成するにあたり、多田元英 大阪大学教授、吹田啓一郎 京都大学教授、笠井和彦 東京工業大学教授から資料を提供して頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- [1] 吹田啓一郎: 新しい鋼構造接合部開発の最近の動向、鋼構造による新構造システム開発の現状と今後の展望、日本建築学会大会構造部門（鋼構造）パネルディスカッション資料, pp. 4-15, 2009.8
- [2] 緑川光正, 堀泰健, 石原直, 小豆畑達哉, 草刈崇圭, 麻里哲広: ベースプレート降伏により柱脚浮き上がりを許容した鉄骨造縮小模型架構の 3 次元振動台地震応答実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 647 号, pp. 213-221, 2010.1
- [3] Joint AISC-SEAOC Task Group: Recommended Provisions for Buckling-restrained Braced Frames, Seismology and Structural Standards Committee, Structural Engineers Association of Northern California, 2001.10
- [4] 緑川光正, 佐々木大輔, 麻里哲広, 村井正敏, 岩田衛: 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究—クリアランスの圧縮耐力への影響と圧縮軸力に応じた座屈モード数の評価—, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 653 号, pp. 1361-1368, 2010.7
- [5] 井上一郎: 座屈拘束ブレースと接合部, 鋼構造制振技術の現状と設計指針への期待—鋼構造における制振のこれから, 日本建築学会大会構造部門（鋼構造）パネルディスカッション資料, pp. 8-17, 2006.9
- [6] 吹田啓一郎, 山田哲, 松岡祐一, 島田侑子: 4 層鋼構造建物の完全倒壊実験, 鋼構造建物の大型振動実験の今とこれから—鋼構造設計施工の高度化と合理化に向けて, 日本建築学会大会構造部門（鋼構造）パネルディスカッション資料, pp. 14-20, 2010.9
- [7] 多田元英, 玉井宏章, 大神勝城: 完全倒壊の数値シミュレーション, 鋼構造建物の大型振動実験の今とこれから—鋼構造設計施工の高度化と合理化に向けて, 日本建築学会大会構造部門（鋼構造）パネルディスカッション資料, pp. 14-20, 2010.9
- [8] 笠井和彦, 大木洋司, 引野剛, 伊藤浩資, 元結正次郎, 石井正人, 小崎均, 梶原浩一: 5 層実大制振建物の振動台実験, 鋼構造建物の大型振動実験の今とこれから—鋼構造設計施工の高度化と合理化に向けて, 日本建築学会大会構造部門（鋼構造）パネルディスカッション資料, pp. 33-47, 2010.9
- [9] 緑川光正, 竹内徹, 引野剛, 笠井和彦, グレゴリー・ディアライン, 大林優, 山崎僚平, 吉敷祥一: せん断パネル及び張力材を有するロッキング架構の耐震性能—汎用慣性質量装置を用いた鉄骨造ロッキング架構の振動台実験—その 1—, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 654 号, pp. 1547-1556, 2010.8
- [10] 竹内徹, 緑川光正, 引野剛, 笠井和彦: テストベッドを利用したロッキングシステム実験, 鋼構造建物の大型振動実験の今とこれから—鋼構造設計施工の高度化と合理化に向けて, 日本建築学会大会構造部門（鋼構造）パネルディスカッション資料, pp. 48-57, 2010.9
- [11] 笠井和彦: 鋼構造制振設計指針の考え方, 鋼構造制振技術の現状と設計指針への期待—鋼構造における制振のこれから, 日本建築学会大会構造部門（鋼構造）パネルディスカッション資料, pp. 45-52, 2006.9

地震応答と耐震設計（その2）基礎構造について

基礎構造運営委員会・中井 正一（千葉大学）

1. はじめに

1998年の建築基準法改正に伴い、2000年には建築基準法施工令等の諸規定が改定され、性能設計の概念とともに、新たな耐震設計法（構造計算法）として限界耐力計算が導入された。この計算法は、応答スペクトル法であること、工学的基盤の概念とともに表層地盤による増幅効果を取り入れられたこと、建物-地盤系の動的相互作用効果を考慮できること、など数多くの新しい考え方が導入された新しい計算法であると言える。一方で、基礎構造の設計法は今回の法改正でも改定されることはなかった。諸規定の改定に遅れること1年、2001年に改定出版された建築学会の基礎構造設計指針においては、いわゆる限界状態設計法の概念が取り入れられたものの、地下震度による静的地震外力による耐震設計の範囲を超えてはならず、動的相互作用や地盤震動と言った動的設計法の観点は希薄である。

基礎構造の耐震設計を複雑にしている最大の要因は地盤の性質の複雑さによるものである。本来、土は三相（土粒子、間隙水、空気）混合体であり、混合体としての力学的挙動はきわめて複雑にならざるを得ない^{たとえば}^[1]。三相混合体としての忠実なモデル化は発展途上にあり、完成したとしても建築構造物の設計に用いるにはさらに時間と労力を必要としよう。

現在、基礎構造運営委員会では、2014年度末をめどに基礎構造設計指針の改定を進めている。本論では、上部構造と対応した基礎構造の耐震設計法のあり方を、地盤のモデル化、静的・動的相互作用、地震力算定モデルの観点から考えてみたい。

2. 基礎構造運営委員会の活動を振り返る

1995年の兵庫県南部地震に伴う基礎構造の被害は上部構造に劣らず甚大であり、その被害状況は貴重な資料としてまとめられている^[2]、^[3]。この地震被害の分析を契機に始まった各種の研究は急速に進展し、その一部は2001年版の指針に反映されるとともに、以降の大会におけるPDにおいてその成果が報告されている。その内容を見ると、上部構造の設計体系や法整備に対する対応が少なからず見て取ることができ、基礎構造の新たな設計（特に耐震設計）を模索しようとしていることが分かる。基礎構造設計法の高度化に資する成果がまとまりつつあると言ってよい^{[4]~[7]}。

3. 基礎構造の耐震設計と動的相互作用

3.1 基礎構造設計における問題点

現行の基礎構造設計指針は、耐震設計法の手順が明示されていない、液状化を除いて地盤震動の影響が考慮されていない、設計対象や設計段階ごとの基礎-地盤系のモデル化に整合がとれていない、などの問題点を有している。たとえば、地盤の変形係数 E_s を求める方法として、① PS 検層結果から求める方法、② 一軸/三軸圧縮試験結果から求める方法、③ ボーリング孔内載荷試験などの原位置載荷試験結果から求める方法、④ N 値や c_u/q_u 値などの土質

定数から推定する方法：直接基礎の沈下の場合、⑤ 杭の水平抵抗の場合が挙げられている。

このうち、①では微小ひずみレベルにおいて、②ではある程度大きなひずみレベルにおいて地盤を等価な線形弾性体と考え、変形係数をヤング率とみなしたものである。対象とするひずみレベルに差はあるものの、連続体の微小要素における応力-ひずみ関係が念頭に置かれている点と同じである。これに対して、③では地盤の境界値問題に主眼が置かれている。すなわち、境界における圧力-変形関係に近似的な線形性が成り立つと仮定し、地盤全体を等価な仮想等方線形弾性体と考え、その応力-ひずみ関係を考える。仮想であるが故に、現実の応力-ひずみ関係との対応はない。一方、④・⑤は、①～③における変形係数を強度パラメータである土質定数から推定しようとするもので、剛性と強度に高い相関が成り立つことを前提にしている。これら①～⑤はいずれも、本来、三相混合体である土の非常に複雑な力学的挙動をそれぞれ限定された視点から見たものである。このような統一的視点の欠如は、もはや前時代的と言われてもしかたのないところである。

3.2 地盤の力学モデル

ミクロレベルで見た場合の土は三相混合体である。このミクロレベルの構造を忠実にモデル化し土の挙動を説明しようとする試みは発展途上にある。しかしながら、ミクロレベルの構造そのままではなく、三相混合体の挙動を微小要素における構成則として定式化し、土はこの構成則を有する連続体であるとするアプローチは比較的長い歴史を有している。近年では境界値問題への適用も試みられるようになってきている^{たとえば[8], [9]}。いわゆる弾塑性理論であり、モール・クーロンの破壊規準を仮定する弾完全塑性モデル、楕円型の降伏曲面を仮定するカム・クレイモデル、降伏曲面が応力によって相似形に変化するとする下負荷面モデルなどがよく知られている。弾完全塑性モデルでは降伏に至るまでは地盤は線形弾性であるが、カム・クレイモデルでは非線形弾性、下負荷面モデルでは非線形となる。このように、非線形性と弾塑性性は別の概念であること、土は両方の性質を有している点に注意が必要である。

3.3 弾性論に基づく杭-地盤系の静的相互作用

頭部に静的な水平力を受ける杭-地盤系の挙動は、古くより実験的・解析的検討が進められたため知見の集約も早く、土木・建築の分野における一般的な杭基礎構造の設計法の基本となっている。これらの設計法では、杭を梁、地盤を分布ばねであるウィンクラーばねに置換するいわゆる弾性支承梁モデルによって杭-地盤系をモデル化する。このモデルでは、地盤のあらゆる性質がばね定数である地盤反力係数に集約されることになる。しかしながら、地盤反力係数は地盤固有の性質ではなく、杭と地盤の相互作用によって決まる点に注意が必要である。これは、サブストラクチャー法¹の概念により説明することができる。

杭-地盤系を杭と地盤の接触面において分離することを考える（図 1）。この時、分離された杭と地盤の双方において、接触面に相互作用力が働いている。杭系にとってはこれが地盤反力である。これは、地盤が杭と同じ変形をするために必要な力であることから、地盤系に杭と同じ変位を与えた時の力、すなわち、地盤系の接触面における力-変位関係が分かればこの力が分かることになる。この力-変位関係が地盤ばねである。

弾性支承梁モデルでは、この地盤ばねを以下の考えに基づいて求める。まず、地盤系を多くの水平層にスライスする。次いで、各スライスをばねに置換する。最後に、各スライスの

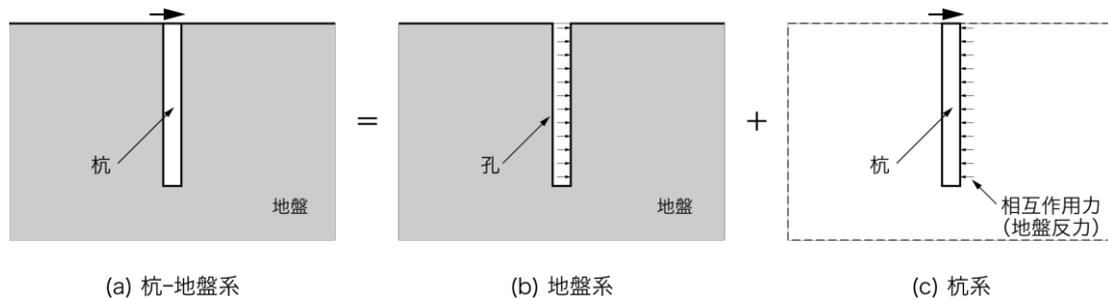


図1 杭-地盤系の分離

厚みをゼロに、ばねの数を無限に多くする（つまり、分布ばねにする）。このようなばねをウィンクラーばねと呼ぶ。その仮定から、スライス間（ばね間）に力のやりとりは生じない。これは明らかに実際の地盤が連続体であることは整合しておらず、ウィンクラーばねモデルの限界となっている。このような問題に対応するため、Vesic は、半無限弾性体の上に置かれた幅 B 、曲げ剛性 $E_p I_p$ 、長さ無限大の梁の 1 点に力を加えた時の加力点における梁の接地圧の解析から、ウィンクラーばねのばね係数 k_h を次式で近似することを提案した^[10]。

$$k_h B = \frac{0.65 E_s}{1 - \frac{2}{s}} \sqrt{\frac{E_s B^4}{E_p I_p}} \quad (1)$$

ここに、 E_s 、 ν_s はそれぞれ地盤のヤング率およびポアソン比である。杭-地盤系では、梁（杭）の前後に地盤が存在することから、(1)式を 2 倍して用いられることが多い。図 1 に示したサブストラクチャー法の観点からすれば杭の剛性は杭系で考慮されるため、この式を杭-地盤系の解析に適用する論理的根拠は乏しいが、ウィンクラーばねに連成効果を反映する方法の一種と考えれば、一定の合理性を有しているとも言える。

表1 解析の諸定数

地盤	土質：乾燥砂（豊浦砂） 構成則：モール・クーロン則 強度定数： $\phi=35.34^\circ$ 、 $c=0$ 弾性定数： $V_s=65.5\sigma_v^{0.25}$ 、 $\nu=0.35$
杭	杭種：鋼管杭 寸法： $B=1\text{m}$ 、 $t=0.01\text{m}$ 、 $L=10\text{m}$ 構成則：弾性 杭頭条件：回転拘束

3.4 杭-地盤系に対する弾塑性論の適用

地盤の弾塑性や非線形性を考慮すると地盤の力-変位関係は非線形となる。このことを、一様な砂地盤に設置された単杭の水平載荷試験を、二次要素を用いた三次元の弾塑性有限要素法^[11]によってシミュレートしてみよう。解析では表 1 の仮定を設けている。簡単のため、地盤は弾完全塑性体と仮定している。有限要素メッシュを図 2 に、解析結果のうち杭頭における荷重-変位関係を図 3 に、杭頭変位 0.01m 時における杭周辺地盤のひずみ分布を図 4 に示す。

図 3 より、弾塑性地盤に設置された杭の荷重-変位

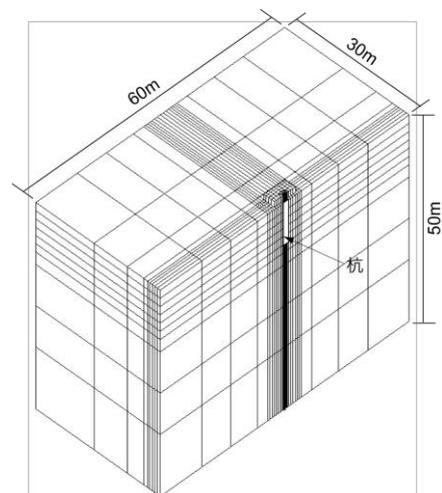


図2 有限要素モデル

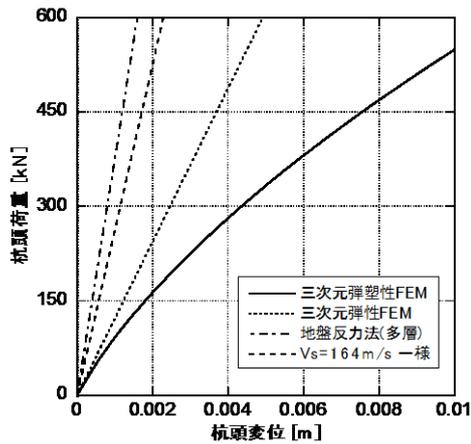


図3 杭頭の荷重-変位関係

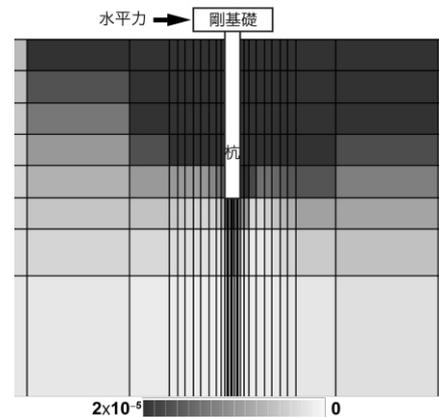


図4 杭周辺地盤のせん断ひずみ分布

曲線は非線形性を示すことが分かる。図には、完全弾性と仮定した場合（弾性 FEM）、完全弾性と仮定し深さごとの地盤反力係数を(1)式の 2 倍で評価した場合（地盤反力法（多層））、および、その結果から第一不動点深さの 1/3 の深さにおける地盤反力係数を用いて求めた値（ $V_s=164\text{m/s}$ 一様）のそれぞれを併せ示している。これらを比較すると、予想されるとおり、完全弾性（微小ひずみ）を仮定した場合には地盤の剛性をかなり過大に見積もることが分かる。また、図 4 より、杭周辺地盤のひずみも大きく変化していることが分かる。より詳細な土の弾塑性モデルの必要性が理解できる。

3.5 杭-地盤系における動的効果

新潟地震を契機に飽和砂地盤の液状化現象が注目を集め、そのメカニズム解明に多大な努力が傾注された。その結果、現在では、地震時の繰返しせん断に伴う過剰間隙水圧の発生と消散という液状化発生のメカニズムはおおむね解明されたと考えてよい^[12]。また、兵庫県南部地震を契機にその重要性が明らかとなった側方流動についても、その後の精力的な研究でそのメカニズムや構造物の地震被害に与える影響が明らかになりつつある^[13]。

一方、液状化問題と並行する形で、表層地盤における地震動の増幅についても多くの研究がなされてきた^[14]などに詳しい。この問題では、地盤の堆積環境の一般性から平行成層地盤が仮定され、一次元波動伝播問題として扱われることが多い。この問題で特に重要視されるのは、土の非線形性と減衰の影響である。幸いなことに、一次元問題では構成則はテンソルではなくスカラー関数となるため、応力-ひずみ関係をばねと同様の非線形復元力特性と考える方法、等価線形計算を前提に、剛性と減衰のひずみ依存性を考える方法の 2 つのアプローチがよく用いられている。最近では、これに液状化の影響を考慮する方法も提案されている^[15]。

しかしながら、多次元問題としての地盤（たとえば不整形地盤）における地震動の増幅、境界値問題としての動的挙動（杭-地盤系の動的相互作用）についてはまだまだ道半ばと言わざるを得ない。それは、このような場合、構成則がテンソル表現となるために単純な復元力特性や剛性・減衰のひずみ依存性の拡張では十分とは言えず、また、大地震時には単なる非線形の範囲にとどまらず、土が破壊状態になることを想定する必要があることによる。

簡単のため線形弾性を仮定し、静的問題における弾性支承梁と同様のモデル化を杭-地盤系の動的問題で考えてみる。すなわち、地盤系を多くの水平層にスライスし、各スライスの孔

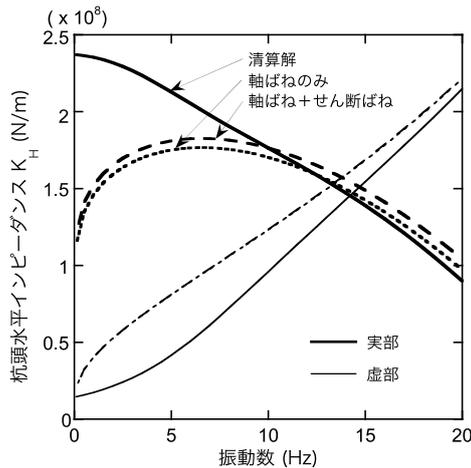


図5 単杭の杭頭インピーダンス

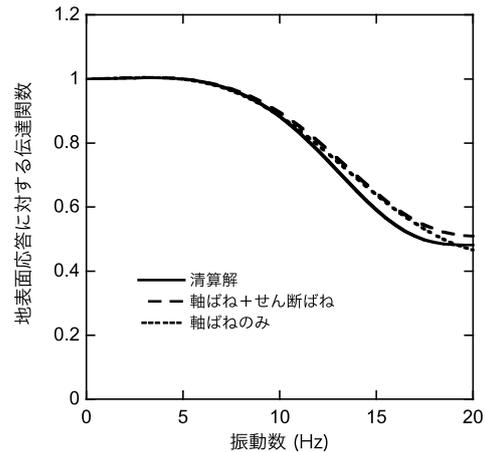


図6 単杭の基礎入力動

壁における力-変位関係を求める。静的問題とは異なり、動的問題では二次元平面ひずみ問題の変位解が存在する。いわゆる Novak の解^[14]などを参照がこれに相当する。この解が存在するために、動的問題では Vesic の解のような近似がなされることはなかった。試しに、表 1 と同じ問題を三次元薄層要素法（精算解と呼ぶ）で解析し、杭頭における力-変位関係すなわち杭頭インピーダンスを求めてみよう。次に、スライスされた地盤モデルにより杭頭インピーダンスを求める。Novak のばねでもいいが、ここでは単層の薄層により計算してみる^[16]。文献にあるとおり、1 層のみからなる薄層要素において、鉛直方向変位を固定し、薄層の 2 節点を同時に水平変位させれば、その解は Novak の解に一致する（これを軸ばねと呼ぶ）。一方、2 節点の片方を固定したままもう一方の接点を水平変位させれば 2 節点間のせん断ばねが得られる。これらのばねを用いて杭頭インピーダンスを求めてみる。以上 3 種類の結果を比較したものが図 5、これを用いて計算した基礎入力動が図 6 である。

図より、弾性支承梁モデルによって杭-地盤系の動的問題を扱う場合、静的問題においてなされたような工夫、すなわち、ばねが連成する効果を導入する必要があることが分かる。

3.6 杭-地盤系の耐震設計モデル

建築基準法で定められている上部構造の構造計算法には、許容応力度等計算と限界耐力計算の二種類がある。ここでは、基礎構造の新たな耐震設計法のイメージを提示するにあたり、上部構造のみを対象とする現行の許容応力度等計算および限界耐力計算に、既往の研究^{[6], [7]}等を参考に基礎構造を取り込むことを考える。たとえば、現行の限界耐力計算を基本とし、SR モデルに基づいてこれを拡張することを考えると図 7 のようになろう。

4. まとめと今後の課題

本論では、基礎構造の耐震設計のあり方について、地盤のモデル化の観点から考察を加えた。その結果、耐震設計高度化のための基本的な準備は整っているものの、課題も山積していることが分かった。基礎構造運営委員会としては、振動運営委員会を始めとする他の委員会とも密接な協力の下にその実現に向かう努力をしたい。

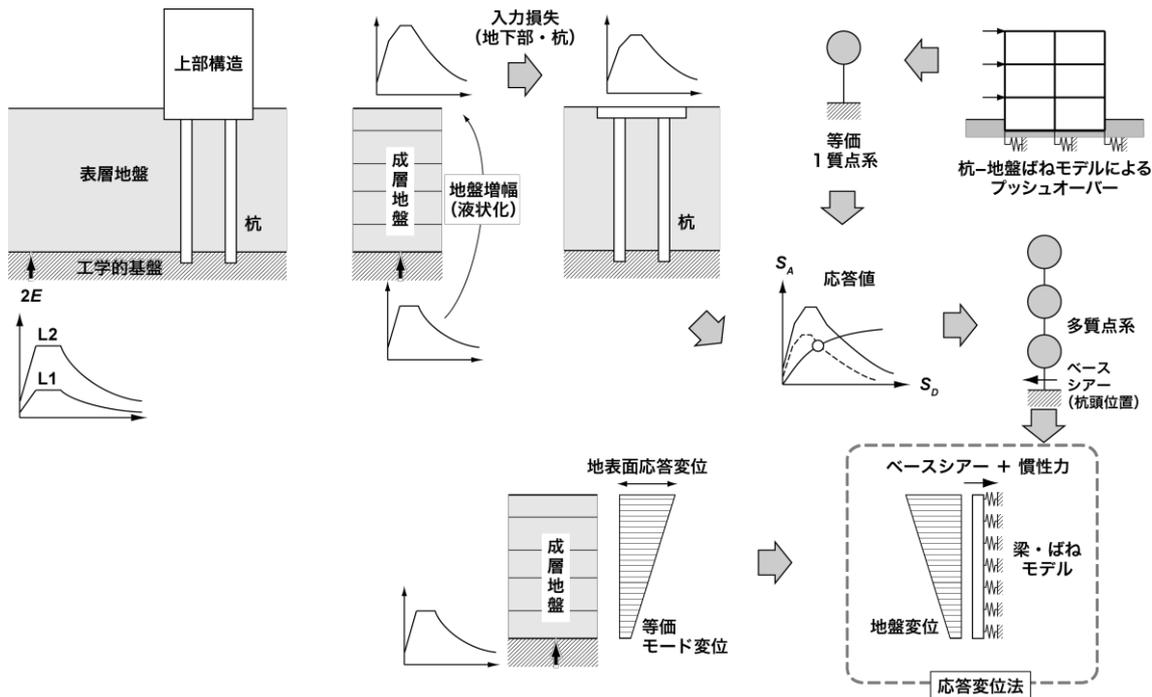


図7 杭基礎の耐震設計フローのイメージ（限界体力計算ベースの場合）

参考文献

- [1] 岡二三生：土における有効応力の原理、土と基礎、Vol. 36、No.6、pp.11~17、1988
- [2] 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 建築編-4 木造建築物／建築基礎構造、日本建築学会、1998
- [3] 日本建築学会近畿支部基礎構造部会兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書、1996
- [4] 総プロ「新建築構造体系の開発」性能評価分科会・基礎WG：基礎WG最終報告書、建設省建築研究所、2000
- [5] 日本建築学会大会基礎構造PD資料：大地震時の杭基礎の耐震設計-2次設計を導入するのに何が必要か-、2008
- [6] 建築研究所・都市再生機構・建築研究振興協会：一体解析に基づく建物の設計指針に関する報告書(案)、2006
- [7] 建築基礎構造WG：限界耐力計算に基づく建建築鋼管杭基礎耐震設計に関する調査研究報告書、日本鉄鋼連盟、2009
- [8] 地盤工学会：弾塑性有限要素法がわかる-地盤技術者のためのFEMシリーズ②、2003
- [9] 間瀬辰也ほか：下負荷面モデルを用いた単杭の水平挙動の3次元弾塑性解析、日本建築学会構造系論文集、No. 626、pp. 575-582、2008
- [10] Vesic, A. B.: Bending of Beams Resting on Isotropic Elastic Solid, Proc. ASCE, Vol. 87, No. EM2, pp. 35-53, 1961
- [11] 群馬大学建築工学科社会基盤工学講座第二研究室：GA3D及び網子 Ver.3、2003
- [12] 吉見吉昭、福武毅芳：地盤液状化の物理と評価・対策技術、技報堂出版、2005
- [13] 基礎構造運営委員会：液状化地盤における基礎設計の考え方、建築基礎の設計施工に関する研究資料4、日本建築学会、1998
- [14] 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006
- [15] 新井洋ほか：建物設計への利用を前提とした液状化地盤応答の簡易評価法、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol. B、pp. 799-800、2010
- [16] 下村幸男ほか：薄層地盤ばねを用いた杭-地盤系の動的相互作用解析（その1・その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol. B、pp. 425-428、1990

地震応答と耐震設計（その3）設計者側からの意見

振動運営委員会・鳥井 信吾（JSCA、日建設計）

1. はじめに

本稿は、意見収集を主体とした少し異色のスタイルとなったが、振動運営委員会においても、率直な意見提出をしようという位置取りが確認された経過を経ていることを、まずご了承頂きたい。即ち、構造設計という視点から見た時、本稿で紹介する意見や提言は、現代日本の社会資本建設事情の断片を素直に表現しており、かつシンポジウムの主旨である対地震技術の発展と普及に対して、あるいは振動運営委員会の小委員会の連携を一層蜜にするために、これらの意見を記憶の片隅において頂きたい、ということをご理解頂きたいのである。

いずれにしても、本稿のような意見を述べる場合は、今までもあった¹⁾が、それが限られた時間や紙面の都合か、社会の反応は以外に弱く、繰り返し訴える場が改めて重要に思え、関係者の活発な議論を期待したい。

2. 社内外からの意見収集

まず、筆者は下記のキーワード（キーセンテンス）をもとに社内外から意見収集を行った。

- ・ 地震はどこまで大きなものがあるか？
- ・ ばらつき予想の精度はどのくらいなのか？
- ・ 今の強震動予測が、実建物の設計にどの程度活かしていると思うか？
- ・ 理学と工学の世界における地震予測はどの程度対応しているのか？
- ・ 入力が決まれば建物の設計は楽か？
- ・ 地震動によって建物の壊れ方が変わることが社会的に認知されているか？
- ・ 震度で地震を語る時代は終わり、社会と対話するための地震の大きさを表す指標の確立を目指さねばならないのではないか？

そして、集めた意見をなんらかの分析（分類）をして示そうと思ったのであるが、現実にはたいへん微妙なニュアンスの違いがあり、自らの考えが甘かったことを思い知った。結果として、完全な重複部分は除き、また語り口調を修正しつつ語尾を統一して、かつ字数制限からの要約を行って、なるべくそのまま掲載することにさせて頂いた。A～I) は順不同につけた単純な意見番号である。また、文中の下線は、著者が考える当該意見の重要ポイントである。

- A) 日本にあって、地震は避けて通れない天災である。これにどう向き合うかである。新たな地震が発生するごとに知見を踏まえ耐震基準等を改定していくことに異論はないが、まずは予見のばらつきの多い事象に対してどう設計するか、どの程度の被害までなら許容できるかを、社会で合意すべきである。どんな地震に対しても大丈夫などということは幻想に過ぎない。自然換気は重要であるし光もほしい、眺望も大事で炊事が必要だし、風呂にも入りたい。このような状況の中、耐震的にどんどん強くしていったら生活がで

きなくなってしまう。何かを犠牲にしないと、トレードオフがないと成立しないのが建築の設計である。そういう意味で『大地震時には被害が発生する可能性があります』と宣言し、スタートしてほしい。いつまでも逃げていては始まらない。減災しかないということ、はっきり社会の共通認識にしてほしい。地震には大丈夫でも津波に家ごとさらわれたら…？ 構造設計者はどこまで考えなくてはいけないのだろうか？

- B) 長年設計に携わってきたものとして、断面を決めるにおいて、またある架構形式を選択する等の「設計」においては、それなりの経験（成功・失敗体験）に基づき、それがどの程度リスクを伴い、どの程度喜ばれ、どの程度失望させるものかの「手触り」を、なんとなく持って対処している。直感的には、設計した者として今後もそのいろいろな種類の責任感の中で、つぶされずに毎日すっきり眠れるかどうかといった尺度に照らしての判断の連続といった所であると思う。入力地震動を作成される方は、その仕事の中でこれに類する「手触り感」あるいは多方面の「責任感」をどの程度お持ちなのかを素朴にお聞きしたい。様々な実験による事実を解析結果と照らす場合、大体の場合は解析ありきではまず合わない。実験結果により事実を踏まえた上で、いろいろな調整を経てはじめて事実をどうにか説明できる解析が後から追いつくのが一般的。実験の困難な領域に携わる解析者として、自身の出した結果に対してどの程度の深さで「自分自身が結果を信用しているか」をお聞かせ頂きたい。あらゆる事象の可能性は無限であり、どのレベルであっても可能性を論じるとき、危険側の可能性を指摘することは簡単であり、「安全」の証明は困難なもの。「可能性はゼロではない」と硬直化するのではなく、現実的に健全な社会運営を考慮した上で本当にどこまでのレベルへの対応が「必要」なのか・「適切」なのか・「望ましい」のか、等、多くの人が「実感」できる形での説明がなされることが望まれる。
- C) 新しい知見を取り入れる姿勢はいつの時代にあっても必要なことであるが、これまで行ってきたこととの連続性も考慮すべきと考える。地震動や地震荷重などに関しては特にそうで、急に「最新の知見によるとこの程度の地震は起こりうるので、設計に反映するように」といわれて巨大なパワーを持つ地震動を提示されても、社会の混乱を招きかねない。直下型地震に関しても、阪神・淡路大震災時に記録された地震波をそのまま入力したら、ほとんどの中低層建物は倒壊に至りそうであるが、実際にはそこまではいたっていない。なぜ壊れたのかだけでなく、なぜ壊れなかったのかの考察も大事だと思う。その理由のひとつが「地盤と建物の動的相互作用」ということであれば、新しい地震動や地震荷重の提示と同時に、「地盤と建物の動的相互作用」に対する定量的な見解が必要であると考え。震度表示に関してはいつも困っている。建物オーナーからは必ずといってよいほど、「こと建物は震度いくつまでたえられるのか」という質問がきて、「震度だけでは地震の強さや建物の性能は語れません」といって答えに窮しているのが実情である。かつては気象庁の係官が墓石の倒れ方等をみて数字を決めていた震度が、形は変わってきているとはいえ、いまでも残っているのも変な気がする。これこそ最新の知見に基づき、新たな指標を確立していくべきものと感じるところである。どのような地震動や地震荷重を提示するにしても、法律でがちがちに縛りかけるのではなく、設計者

の裁量にゆだねる範囲を残すべきである。地震動そのものも建物挙動のシミュレーション解析もいろんな仮定のもとで行っているのであるから、その結果は建物の実挙動を類推するひとつの尺度にしかならないのである。後は設計者がそれをどのように捕らえ、設計に反映させるかが重要なのだと思う。

D) 検証用地震動等の提言に関する要望事項は以下2点。

- ・ 提案される地震動はどのような不確定要因を含んでいるか、同時にこれに従って行われた評価結果にはどの程度のばらつきが予測されるかの「考え」を明らかにすること。
- ・ 現時点でどういう目的（強制力を持った法令に組み込まれるものか、個々のケースの判断による性能検証に用いるものか）で活用されることを想定しているかを示すこと。

構造設計実務の立場に身を置く者のひとりとして、各種の解析法が精緻さの程度を深めるに従い、構造設計とは「構造検証のことであり、規定された計算法に従い、規定された判定値を満たす計算結果さえ得られれば、それを以って完了する」という風潮が強まっているように感じる。元々こうした考えをよしとしていなかった我国でも、気付かぬ内にこの方向へ進んでおり、特に確認制度の強化の下で、今後もさらにこうした考え方が一般社会に強まることを危惧する。学会の研究活動は、第一義的には学究的信念に基づいて為されるものであろうし、そのことに何等異論を申し立てるものではないが、その結果を社会に発信するに際しては、上述の現状を充分認識されることを希望する。研究結果を正しく受け止め、実地に活用するのはもとより実務者の責務であるが、上述の状況の下では、ともすると提言や研究成果を金科玉条となし、これに強制力を与えて安心したい（それがどのような偶発的要因を含んでいようと、当面は等閑視して）との動きも生じ易い。地震作用に関しては、不確定性の高い要因も残っている筈と信じる。であれば、そのことを明確に社会に対して説明し、最終的にどのような形で提言や研究成果を用いるかは、そうした説明を踏まえて工学の専門家内以外もふくめた議論によって決せられるべきと考える。そうでないと折角の提言・研究成果も、意義の希薄な利用をされたり、場合によっては技術の発展や社会の自主的判断への意志を阻害する可能性がある。前記の2点の要望はそうならないための最低限の条件と考える。

E) 民間事業主体の建設業界においては、建物オーナーによっては、ある場所に建設する建物が地震を含めて、絶対安全であることを前提に話を始める。この場合、設計者は、ある前提条件をつけた上で（現在の知見の範囲では）、この程度の地震が想定される最大の地震であり、それに対して、これこれのような建物の応答が予測され、ひいては、建物の機能性、安全性が確保できますといった具合に、まがりにも展開している。しかしながら、多くのオーナー（ユーザー）は、どの程度の地震を考えておくことが妥当（相場）で、それに対して、建物（の耐震性）をどの程度の仕様にしておくことが、妥当（相場）なのかを求めてくるのが実状で、このような要求は、経済性の観点からは、無視できないのが現実であると思う。したがって、このような要求に真正面から答えるには、地震動作成者と構造物設計者の相互連携が必要であることは勿論のこと、さらには建物の応答評価自体の価値評価が必要だと思う。単に、地震動研究と構造物応答検証を一連の手法論としてまとめること自体（ひとつの答を出すこと）は、今の建築工学、地震工学の

知見の中で、さほど夢物語とは思わないが、これを運用することはまた別問題のような気がする。国指導による強力な運用とするのが良い選なのか、ひとつの道筋を示すのみに踏みとどまり、緩やかに見守るのがよいのかここは思案のしどころだと思う。この点、性急に急ぎすぎているような気がしてならない。なお蛇足ながら、上記の前提条件を説明するにあたり、これを設計者の「責任回避」と誤解されることが稀にあるが、これほど悲しいことはない。

- F) 強振動予測がある程度できるようになったとはいっても、予測法によってまだ大きな違いがあり （予測者にとっては小さな違いかもしれないが）、その違いは設計者にとっては雲泥の差なので、設計用入力地震動を作る人はそれを認識してほしい。 また、設計者としては実際にその地震来ると言うわけではなく、どのレベルで設計するかを目安程度のものに過ぎないと認識している。設計者としては、予測地震動より大きな地震がきたときにも、ある程度の冗長性を確保することで不確定部分をカバーするしかないのではないだろうか。
- G) フリーフィールドでの地震動と、構造物への入力地震動のギャップを明らかにする取り組みを続けたい。真の構造物への入力を捉える必要がある。
- H) 実現象を定量的に評価できるリアリティある手法が美しく確立できるだろうか。構造物の安全性という目的に対しては、包括的な評価体系とその実証の蓄積がもっとも必要であると考えている。
- I) マスコミの役割は大きいと思う。視聴率という指標はきっと我々の震度のような感覚であるのかもしれないが、危険や不安だけで人々の興味をひくのではなく、地に着いた意見を紹介してほしいものである。

上記の意見を、多少無理をして以下の3点にまとめた。相応に筆者の主観が入っており、読者あるいはシンポジウム参加各人のまとめも重要であると考えている。

- ・ 「不確実性の周知」はどの意見にもある。当たり前のこと、また従前から誰もが思っていることであるといえるが、その実務者の主張が弱い、あるいは地震動作成者の前提条件の記述に実務者はまだ納得していないものと考えられる。
- ・ 工学的に特に知りたいのは、建物と地盤との「相互作用」や「真の建物への地震動入力」である。
- ・ 地震動の作成者と利用者（設計者）の「連携」を本気で考える時期がやってきたのではないだろうか。そのためには、自分の主張や相手の批判でなく、相手方の理論をもっと理解する姿勢も重要といえる。

3. 長周期パブコメ私案

この原稿を作成するに前後して、おりしも国土交通省から「超高層建物等における長周期地震動への対策試案について」についての意見募集がなされた。各所に思慮したものといえ

るが、前節にあるような不確実性や相互作用、その他自然現象に対する社会的合意等の与件が述べられていないのが残念である。法律の条文に適合させることの難しさはあるが、表1程度の簡単なもので必要かつ十分な気がするの筆者のみであろうか。そして、重要なことは与件（前提条件）と共に、いかに社会的に広く訴え、かつ資金補助や保険の制度も合わせて考えるかということにある。さらに、この記述形式は長周期地震動に限らず、自然現象全般に対する姿勢を示す意味でも重要である。

表1 理想の長周期地震動パブリックコメント

「超高層建物や免震建物の設計（既存建物の性能評価を含む）には別紙の特性が適切に評価された長周期地震動を考慮すること」

.....

別紙：長周期地震動とは、建築物へ影響を与える幅広い周期成分を含み、特に各地域の地盤特性により、数秒の周期を有する超高層建物や免震建物の地震時の揺れに比較的大きな影響を与える地震動である。大きな特徴としては、継続時間が長いこと、各種の振動指標の最大値に加えて、値が小さくとも繰り返しが問題となるようエネルギー的観点の指標を的確に評価して、建物の検討を行う必要があること、があげられる。その一例として、〇〇地震を想定した東京・大阪・名古屋三大都市圏の長周期地震動について、継続時間と速度応答スペクトルならびにエネルギースペクトルを示す。（以下省略）

ところで図1～4には、当該試案に掲載された地震動とほぼ同地域を対象として弊社で作成した長周期地震動^[2]について、二つのスペクトルを比較して示した。どちらも意味のある検討用の地震動であり、かつどちらも正解ではない。ただし、この比較からもわかるように地震動について「同等以上」とか「大きい（あるいは小さい）」という表現を扱う際には十分な注意が必要といえる。この点、現在発表された長周期地震動への対策試案も、改善されていくものと信じている。

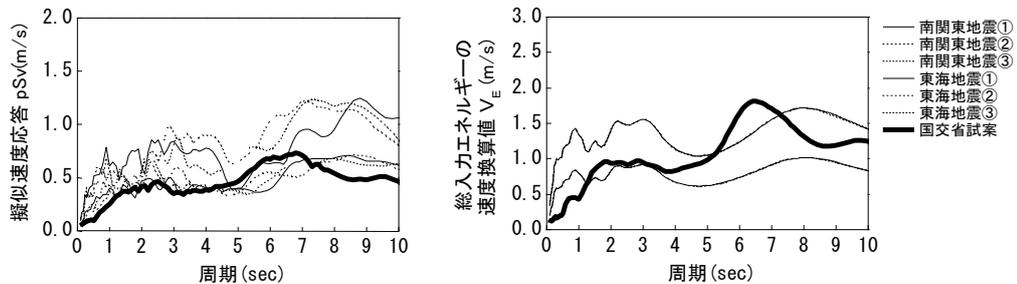


図1 区域1における応答スペクトル(h=5%)とエネルギースペクトル(h=10%)

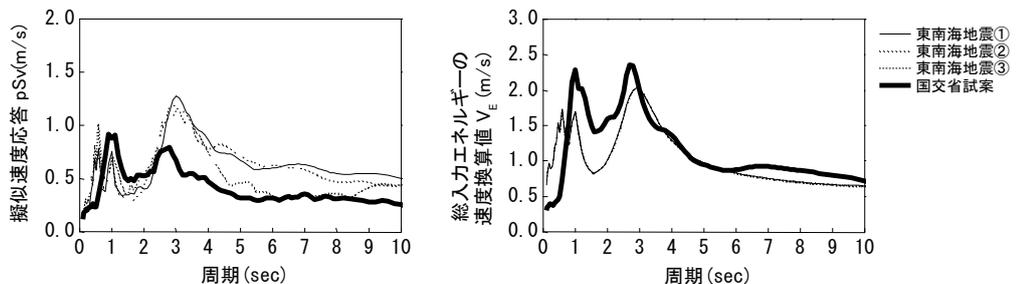


図2 区域6における応答スペクトル(h=5%)とエネルギースペクトル(h=10%)

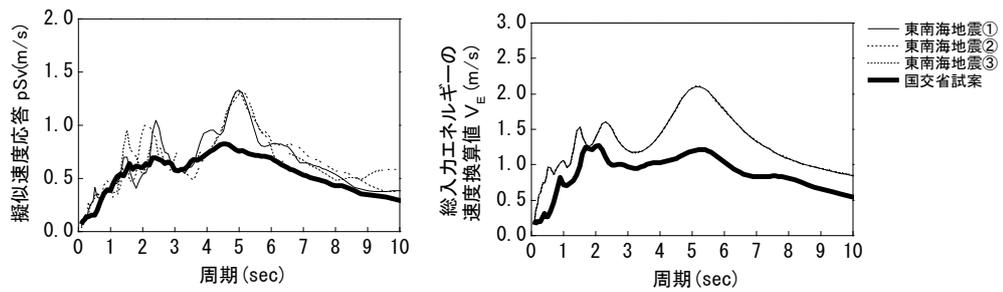


図3 区域8における応答スペクトル($h=5\%$)とエネルギースペクトル($h=10\%$)

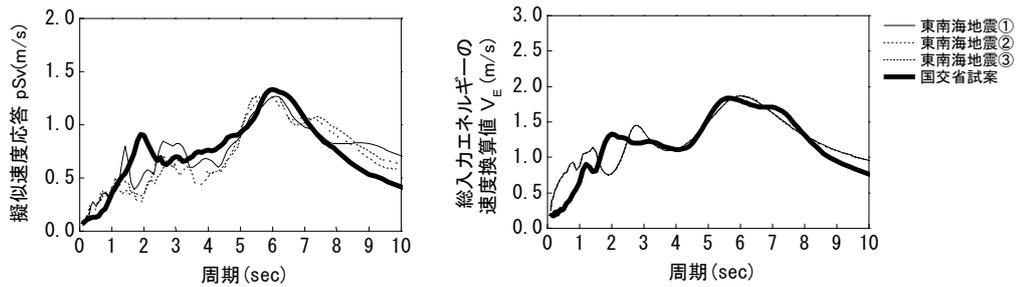


図4 区域9における応答スペクトル($h=5\%$)とエネルギースペクトル($h=10\%$)

4. まとめにかえて：社会への提言

社会への提言とは、以下の三分野の関係者への提言である。

- ・ 産（例えば設計者）へ：建物の本当の終局状態は何か？…法令順守に加えて、本質を忘れない社会資本整備（設計行為）の姿勢がさらに必要である。
- ・ 官（例えば行政関係者）へ：自然現象を相手にした法律とは？…「〇〇してはいけない」といった単純なものではなく、各種前提条件を丁寧に明らかにする。
- ・ 学（例えば研究者へ）：地震動の発生確率が 20%と降水確率が 20%の違いとは？…地震動の作成は、素人にもわかりやすい指標の確立とセットである。

そして、建築振動研究に課せられたもの…という本シンポジウムの副題に、具体的試案（私案）をあげてまとめにかえる。それは、上記の産官学の関係者の連携や相互理解という視点からの解説書をつくる。そして、産官学のトップレベルの会談を行ってマスコミを利用して広報活動を行うというものである。それには、自然現象に関する「理念の構築」を含む。この理念があれば、建物のオーナーを含む関係者全員が、予想を上回る地震がきても精神的には早々にうろたえる必要はない、天災に対して真摯に向き合える…というものである。

5. 謝辞

本稿の作成には、著者周囲のたいへん多くの構造設計関係者に意見を頂いた。各個人の氏名をあげることはここではできないが、改めてここに厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 寺本 隆幸:解決されていない問題、日本建築構造技術者協会機関紙 STRUCTURE、No.114、pp.44-47、2010.4
- [2] 山根尚志, 長橋純男:位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動 —長周期地震動に関する作成事例一、第13回日本地震工学シンポジウム、pp.2624-2631、2010.11