

日本地震工学会誌

Japan Association for Earthquake Engineering

No.4

Jul.2006

特集：強震動予測



<http://www.jaee.gr.jp/>

日本地震工学会

〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館
Tel:03-5730-2831 Fax:03-5730-2830

INDEX

巻頭言

直下地震の強震動予測の黎明期／大町 達夫	1
----------------------	---

特集：強震動予測

強震動予測の必要性／入倉孝次郎	3
地震動予測地図／藤原 広行	7
震源のモデル化とシナリオ地震の強震動予測／岩田 知孝	9
地下構造と長周期地震動／額 一起	12
サイスミックマイクロゾーニング／翠川 三郎	16
強震観測と強震動予測／工藤 一嘉	18
強震動予測と土木工学との連携／堀 宗朗	22
強震動予測法と設計用地震動：展望と課題／武村 雅之	26

記事：

震動台E-Defenseの活用／梶原 浩一	31
RC建築構造物の振動破壊実験／壁谷澤寿海、松森 泰造	37
五重塔5分の1模型の振動実験 その2／藤田 香織、千葉 一樹、岩崎英一郎	42

学会ニュース：

第6回通常総会講演会・議事／中澤 博志、坂本 成弘	47
学会ニュース	52

年間カレンダー：

年間カレンダー	55
法人会員一覧	
日本地震工学会のご案内・入会案内	
第12回日本地震工学シンポジウム開催概要	

編集後記

巻頭言

—直下地震の強震動予測の黎明期—

大町 達夫

●東京工業大学 大学院総合理工学研究科

直下地震の強震動特性が観測記録をもとに実証的に解明されたのは、1995年阪神淡路大震災以降と言ってもよいと思われる。この震災時には阪神地域で入手された貴重な強震記録が詳細に分析され、それ以降はk-netをはじめとする全国規模の地震観測網で系統的に観測された直下地震の強震記録も加わり、解明に拍車がかかった。現在実用されている強震動予測手法が完成の域に接近したのは、これらの強震記録の蓄積と軌を同じくしている。

確固たる強震記録がない時代、研究者や技術者は直下地震による強震動をどのように考えていたか、興味のあるところであろう。そのような興味をわずかでも満たせればと思い、筆者のささやかな経験を紹介してみることにした。

「明日起きてもおかしくない」という東海地震再来の逼迫感を背景に、大規模地震対策特別措置法が制定されたのは1978年であった。その法律により翌年には、静岡県など6県170市町村が地震防災対策強化地域に指定された。筆者が東京工業大学助教授に着任したのは、このような時期であった。当時、強化地域の指定に関連し、小林啓美教授と翠川三郎氏（博士課程3年生）が震源周辺地域における地震動強さの予測を行っていた。想定される東海地震の断層モデルと地盤増幅特性をもとに地震動強さを予測する彼らの手法は、当時としては、理学と工学を融合した画期的な最先端技術のように思えた。

1984年9月、長野県西部地震（マグニチュードM6.8）が発生した。震央付近の牧尾ダム（高さ107mのフィルダム）には地震計が設置されていたが、測定上限の0.2G（Gは重力加速度）で振り切れて、本当の地震動強さは不明であった。この地震で地表地震断層は出現しなかったが、地下をジグザグに走る発電用導水路トンネルの破損箇所から震源断層の位置が確定された。筆者はこのトンネル被害の実地調査に同行し、その結果を1985年8月に開催されたIASPEIのポスターセッションで発表した。その時、偶然、隣のブースでは長野県西部地震の震央付近で見つかった飛び石に関する研究発表があった。それによれば、震央附近の尾根

では多数の石が地面から飛び出し、数十cmの飛距離から逆算した地震動の推定加速度は1～10Gとのことであった。その後、同じ研究者グループによって飛び石の詳細な調査が進められ、石だけでなく倒木も空中へ飛び出したことや、中にはひと抱えもある石が3mも離れて着地した事例があったことなどが紹介された。そして飛距離の増加とともに、地震動加速度の推定値も5～30Gへとエスカレートして行った。これが事実とすれば、それに耐えるように建造物の耐震設計をすることは不可能だという危機感を抱いた。

当時よく知られていた地震動の最大加速度は、1971年サンフェルナンド地震（M6.5）の際、パコイマダム（高さ113mのアーチダム）左岸地山で観測された水平最大加速度1.25Gであった。この記録は史上初めて1Gを越えたとして世界中で注目されたが、痩せ尾根の影響で地震動が異常に増幅されたもので、実質的な地震動強さとは異なると議論されていた。また1979年インペリアルバレー地震（M6.4）ではエルセントロ#6地点で鉛直最大加速度1.5Gの、1984年モーガンヒル地震（M6.2）では震源直上のコヨーテレイク・ダム（高さ37mのフィルダム）左岸で水平最大加速度1.3Gの強震動が観測された。これらのことから、現実的な地震動の最大加速度は水平、鉛直方向ともせいぜい2G程度が上限であろうと、筆者は直感的に思っていた。

1985年9月に、メキシコ西海岸沖でミチョアカン地震（M8.0）が発生した。その頃に読んだN.M.ニューマークの論文（5WCEE、1973）の中で、次の主旨が目にとまった。「地震による物体の跳躍は、物体と地盤とで構成される振動系の地震応答加速度が1Gを越えれば生じるので、必ずしも地震動の鉛直加速度が1Gを上回った証拠にならない。」これに共感して、すぐに緩衝用の波形スポンジ板やパチンコ玉大の鋼球などの材料をかき集め、振動実験を始めた。試行錯誤の結果、振動数15Hz前後で片振幅1.3G程度の水平動で加振すると、鋼球がスポンジの深い窪みからポンポンと空中へ飛び出すことが目撃された。引き続き、数値シミュレーションも行って、次のような結論を得た。

1) 地震による飛び石現象は、典型的な非線形地震応答の一種である。

- 2) 飛距離は、水平動の周期や振幅に強く支配され、上下動の影響は比較的小さい。
- 3) 地震で石が穴から飛び出すためには、周期0.3～1.0秒の成分が卓越し、最大加速度で1.5G程度、最大速度で1.5m/s程度の強さが必要である。

ところで、れっきとした直下地震の強震記録ではあるが、記録媒体が風変わりて天然記念物にも指定されている魚雷が、伊豆長岡町の道路脇に保存展示されている。この魚雷は、1930年北伊豆地震 (M7.3) の際、震央から約8km離れた旧江間小学校校庭に静置されていたが、地震時に石の台座上を大きく滑り茶褐色の胴体側面に全長1m以上の擦痕を残した。この擦痕から判断すると、魚雷は先ず円周方向に約30°回転し、次に長さ方向に7、8回大きく滑った。1回の滑動で生じた最長の擦痕は25.5cmであった。寸法や作製年代から、この魚雷は四四式二号で、直径45cm、全長538.8cm、重量719kgと推察された。また常時微動測定により、魚雷展示場所の地盤の卓越周期は約1秒と推定された。模型振動実験や数値シミュレーションの結果、および東京本郷での地震観測記録に基づく多重震源性に関する今村明恒の所見を総合し、魚雷展示場所での本震の強震動を次のように推測した。

- 1) 本震の主要動は、継続時間が10秒程度の極めて強烈な地震動であり、最初の数秒間に加速度で1G程度、速度で0.8m/s程度を示すピークが少なくとも5回出現した。
- 2) 更に、逆向きに加速度で1.3～2G、速度で1.2～1.7m/sの最大値を示す激烈な強震動が襲った後、強い揺れが少なくとも1往復あった。

これらの推測を得たのは1993年3月であったが、従来の強震記録を凌ぐ強烈さであったため、自分自身半信半疑のところもあり、1994年ノースリッジ地震 (M6.7) のタルサナ地点での強震記録 (最大加速度1.82G) を見るまで、外部への論文発表は差し控えた。

1993年の春先、姉川地震で跳んだ鐘樓が琵琶湖北東岸近くにある願教寺に現存することを同僚が教えてくれた。調べてみると、1909年姉川地震 (M6.8) では5つの鐘樓が、いずれも北東ないし北北東に0.5～1m跳躍した。それらのうち、安土桃山時代に建立された願教寺の鐘樓は、瓦吹替え工事は数回施されたが、柱や横桁などは姉川地震当時のまま残されていた。例によって、現地調査や模型振動実験を重ねて鐘樓跳躍の逆解析を試みた。研究が暗礁に乗り上げ思案に暮れていた時、大築・金井共著「耐震設計」(コロナ社、1961) にペーパークリップを指で押して飛ばす挿絵と説明を見つけた。早速、鐘樓模型を剛構造から柔構造へ転換し、

振動実験を繰り返した。ある時、鐘樓模型の対角線方向に、固有周期とほぼ同周期で急激に水平加振すると、4本足の動物が跳ねるように鮮やかに跳躍した。一連の振動実験から、願教寺鐘樓の跳躍が示唆する強震動は、最大加速度1G程度の強さであり、周期0.5～1.0秒程度の成分を強く含むと推定された。

飛び石や鐘樓の跳躍の本質は振動系の地震応答にあり、これと入力地震動とを峻別することが極めて重要と思われるが、専門家にも両者の混同が見られた。前述のように、これらは既に数十年前からニューマークの論文や大築・金井の著書で指摘されていたが、専門分野に定着していなかったのは意外であった。

1995年兵庫県南部地震 (M7.2) は、神戸市や周辺地域に未曾有の大被害をもたらした。この地震で出現した「震災の帯」の生成原因について、種々の憶測と議論が展開された。当時博士課程1年生であった片岡正次郎氏は、ダム用に開発した3次元動的解析手法を震源近傍の地震動シミュレーションに適用し、明石海峡から宝塚市に至る地域での本震の地震動を計算して見せてくれた。この地震動は強震記録とよく類似していたうえに、アニメーションで見ると、震央付近では小円状であった強い揺れの場所が断層破壊の進展につれて「逆くの字」型に変形しながら京都方面に抜けていき、その過程で自然に「震災の帯」が形成される状況がみごとに再現されていた。これにより、震源と地盤のモデルが適切であれば、直下地震の強震動はかなりの精度で予測可能であることが実感できた。

兵庫県南部地震による構造物被害が極めて深刻であることを踏まえ、土木学では耐震基準等基本問題検討会議などが設置され、検討結果が提言として相次いで発表された。第一次提言 (1995年3月) では、直下地震による地震動のように極めて稀であるが非常に強い地震動 (レベル2地震動) を設計で考慮する必要性が指摘された。第二次提言 (1996年1月) では、レベル2地震動は「脅威となる活断層を同定し、その破壊過程を想定して地震動を評価することを基本とする」ことがうたわれた。第三次提言 (2002年6月) では、レベル2地震動は「現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動」と再定義され、「伏在断層に起因するM6.5程度の直下地震が起こる可能性に配慮し、これによる地震動をレベル2地震動の下限とする」ことが加えられた。第二次提言で基本とされた、活断層を想定したレベル2地震動の評価方法については、現実を無視した理想論であるとの批判が強かったが、その後、強震動予測レシピの構築などにより、当該分野の実用レベルは飛躍的に向上したのであった。

強震動予測の必要性

入倉孝次郎

●愛知工業大学

1. はじめに

1995年阪神・淡路大震災以降の11年間に世界中に起こった死者1000人以上の被害地震は13件にもものぼる(表1)。あの阪神・淡路大震災は死者数が6000名を超える大惨事であったが、その死者数は6番目で、1万人を超える被害地震が5つも起こっていることに驚かされる。

被害が最も大きかったのは2004年のスマトラ沖の海溝型巨大地震で、巨大な津波が震源に近いスマトラ島西部のみならずインド洋沿岸の国々や島々を襲い20万人以上の人命を奪った。津波警報システムが有効に作動していれば人命の損失を大幅に減らすことが可能であったことは明らかで、この地震の後、津波災害に対する国際協力の必要性が叫ばれ、ユネスコなどの国際機関や政府間協力による支援活動が進められつつある。一方で、津波の陰に隠れて殆ど議論されてないが、この地震は津波だけでなく揺れによる被害も少なくなかったと言われている。地震後のテレビ映像でも、震源近くのアチェ州の町で地震直後に建物が倒壊して人々が救援活動をしているところに大津波がやってき

て、被害建物や被災者が波に巻き込まれていく衝撃的なシーンが写されていた。アチェ州やシムルー島では揺れにより家屋が大きな被害を受けていたと報道されている。この地震によるインドネシアの死者は約12万人であるが、このうちの少なからぬ数が揺れと津波による複合災害による被害者と考えられる。津波対策と同時に揺れによる家屋の被害を少なくする対策が必要とされている。

2005年にパキスタン北部のカシミール地方を M_w 7.6の地震が襲い、建物の倒壊などにより87,000人の犠牲者が出た。2003年にはイランのバム近傍に起こった地震は M_w が6.6で阪神・淡路大震災を引き起こした1995年兵庫県南部地震よりも規模が小さかった(エネルギーにして約1/3)が、3万人を超える犠牲者が出ている。また今年(2006年)5月27日にインドネシアのジャワ島中部に起こった M_w 6.3の地震は人口300万人のジョグジャカルタ市を直撃し、6000名以上の人命を奪った。この地震も兵庫県南部よりも遥かに規模が小さい(エネルギーにして約1/8)。規模が小さいのに大きな被害を引き起こした最大の理由は人口密集地を直

撃したことであるが、見落としてならないのが揺れに対する家屋の脆弱性である。

上記の大被害を受けた国に共通した特徴の1つは強震観測が殆ど行われていないことにある。これらの国々は日本と同様歴史的に繰り返し地震による被害を受けてきた。それは将来も大きな地震に見舞われる可能性が極めて高いことになる。つぎの地震に対して被害を少なくするには地震によりどのような揺れが生じるかの予測が不可欠である。耐震性ある建物を造

表1 1995年以降に発生した世界の主な地震(死者・行方不明者100人以上)

No	発生日	場所	M_w	死者数(人)
1	2004. 12. 26	スマトラ沖・アンダマン海	9.1	228569 (津波被害)
2	2005. 10. 8	カシミール(パキスタン)	7.6	87000 (家屋倒壊など)
3	2003. 12. 26	バム(イラン南東部)	6.6	31000
4	2001. 1. 26	グジャラート州(インド西部)	7.9	20023
5	1999. 8. 17	コジャエリ・イズミット(トルコ)	7.6	17118
6	1995. 1. 17	兵庫県南部(阪神淡路大震災)	6.9	6433
7	2006. 5. 27	ジョグジャカルタ(インドネシア)	6.3	6234
8	1998. 5. 30	アフガン・タジキスタン国境	6.6	4000
9	1999. 9. 20	集集(台湾)	7.7	2297
10	2003. 5. 21	アルジェから東方60km(アルジェリア)	6.8	2266
11	1997. 5. 10	アルデクル(イラン北部)	7.3	1572
12	2005. 3. 28	ニアス、北スマトラ(インドネシア)	8.7	1303
13	2002. 3. 25	ヒンヅクシュ(アフガニスタン)	6.1	1000 ~ 2000
14	2005. 2. 22	ザランド(イラン南東部)	6.4	612
15	1996. 2. 3	雲南(中国)	6.6	322
16	1996. 2. 17	イリアンジャヤ(インドネシア)	8.2	166
17	2000. 6. 4	スマトラ南部(インドネシア)	7.9	103

資料：米地質調査所、気象庁

るにはコストが掛かりすぎるという問題はあるが、最小のコストで最大の耐震性ある建物を造るためにも、どこでどのくらいの揺れが生じるかの予測は不可欠である。

このことは、決して他の国の問題とは言い切れない。阪神・淡路大震災の前の日本の強震観測体制は上記の国々とあまり違わなかったことを思い出す必要がある。

2. 1995年阪神・淡路大震災の教訓 —強震観測の重要性—

1995年阪神・淡路大震災のとき、構造物が大被害を受けたところで揺れの記録が観測された。このことは少なくとも日本でははじめてのことであった。これらの記録の解析により、揺れと被害の関係が詳細に研究された。震源断層近傍で強震動が記録されたのははじめてであった。強震動記録が震源の破壊過程の詳細な研究に生かされ、逆に、破壊過程の研究が強震動予測の研究に生かされるようになった。

このような研究が可能となったのは、この地震の前に震源近傍地域で強震観測を行っていた国立研究機関、民間会社、民間団体により、その貴重な記録が研究用に自主的に提供されたことによる。「強震動記録」が観測を行った研究機関や研究者個人に属するのではなく、人類の共有のデータとすべきと理解されたことによる。このことは、「強震動記録」の使用にあたって、強震観測を行っている研究者および機関の成果に対して敬意を払うべきことと合わせて重要である。

私は、阪神・淡路大震災の教訓の中で最も重要な1つは強震観測の重要性が広く認識されたことにある、と考える。阪神・淡路大震災の前までは、公的機関により公開を前提とした観測は気象庁による全国に80地点に配備された87型強震計のみであった。それ以外にも、大学、国立の研究機関、民間会社、民間団体が強震観測をほそほそと行っていたが実数がどの程度つかめてない。実際には、気象庁以外の機関による観測記録は一般の研究者や実務家には殆ど公開されず、また観測点の配置も極端に大都市に集中していた。この地震の震源域に近い神戸から大阪にかけての地域では、公的機関によるものは神戸海洋気象台の1地点のみであったが、国立研究機関、民間会社、関震協という民間団体により独自に10数地点で強震観測が行われていた。これまでの慣習に従っていたら、気象庁以外の記録は観測行っていた研究機関の研究者のみしか使用出来ず、この地震の破壊過程の解明や、震災の帯の生成、揺れと構造物破壊の関係、などの研究はなかなか実現しなかったであろう。

阪神・淡路大震災を契機として、地震災害の軽減の

ために強震観測の重要性が認識されるようになった。主なものだけでも、気象庁による全国約600個所の95型震度計網、防災科学技術研究所による全国約1000個所のK-NET観測網、地中と地表に強震計を設置した約800個所のKiK-net観測網、そのほか総務省の自治体震度情報ネットワーク、国土交通省、民間会社も強震観測を行っている。現在、これらの強震観測データは震度情報や構造物の設計用地震動としてのみではなく、地震の破壊過程、地下構造推定のためのデータ、など地震学、地震工学の研究に活用されている。

このような研究成果を基に、強震動予測のためのレシピが構築され、地震調査研究推進本部による「全国を概観する地震動予測地図」（地震調査委員会、2005）の1つとして「震源を特定した地震動予測地図」や中央防災会議の東海地震、東南海・南海地震、首都直下地震、日本海溝地震の被害予測に役立てられている（例えば、中央防災会議、2003）。

3. 阪神・淡路大震災以後10年間の地震とその被害の特徴

阪神・淡路大震災の教訓が十分生かし切れない内に、国内でも被害の伴う地震が次々と発生した（表2）。2000年鳥取県西部地震は気象庁マグニチュード（ M_J ）7.3で阪神・淡路大震災を引き起こした1995年兵庫県南部地震と同じ規模であるが、被害は顕著に小さかった。国際的に用いられているモーメント・マグニチュード（ M_w ）で表すと、2000年鳥取県西部地震は6.6で1995年兵庫県南部地震の6.9に比べてやや小さいことは、相対的に短周期成分が卓越した地震だったことになる。1995年兵庫県南部地震の被害状況の分析から1秒付近で卓越するパルス波が木造家屋や中・低層構造物に大きな破壊力をもつことが分かっているが、2000年鳥取県西部地震では地震動の卓越周期が1秒よりも短周期だったため破壊力がやや小さかった可能性がある。もう1つの原因として鳥取県西部地域の家屋は雪対策のため強度が大きかったことも指摘されている。

2004年中越地震（ M_J 6.8, M_w 6.5）は、1995年兵庫県南部地震に比べ規模は顕著に小さく、震源域が山間部の過疎地域という条件にも関わらず、死者63名、全壊家屋3,000棟以上という大きな被害をもたらした。また、数字の上の被害だけでなく山古志村では交通や産業への打撃によって村民全体が今もなお村に戻れない状況にあるなど過疎地域での地震災害の深刻な問題が明らかになった。さらに、震源近傍域を走る上越新幹線で、走行中の列車が脱線するという初めての新幹線

表2 1995年以降に発生した国内の主な地震

発生日	場所	M _w (M _J)	死者数* (人)	全壊 (棟)、半壊 (棟)	
1995. 1. 17	兵庫県南部 (阪神淡路大震災)	6.9(7.3)	6,437	104,906	144,274
2000. 10. 16	鳥取県西部 (鳥取県西部地震)	6.6(7.3)	0	435	3,101
2001. 3. 24	安芸灘 (芸予地震)	6.7(6.7)	2	70	774
2003. 7. 26	宮城県北部	6.0(6.4)	0	1,276	3,809
2003. 9. 26	十勝沖・釧路沖 (十勝沖地震)	8.0(8.0)	2	116	368
2004. 10. 23	新潟県中越地方 (新潟県中越)	6.6(6.8)	63	3,175	13,785
2005. 3. 20	福岡県西方沖	6.4(7.0)	1	133	244
2005. 8. 16	宮城県沖	7.2(7.2)	0	1	?

死者数*：行方不明者を含む

資料：気象庁

列車被害が起こった。高い確率で発生が予測されている東海・東南海・南海地震の震源近傍域には新幹線や在来線がきわめて高頻度で走っており、もし地震が起こったならばはるかに大きな事故が引き起こされる可能性がある。今回の列車被害の原因解明とその対策の検討は緊急を要する課題である。この地震の被害域は地下構造が極めて複雑な形状をしている。このような地域の強震動予測には地下構造の詳細な調査が必要なことが指摘される。

2003年十勝沖地震 (M_w 8.0) は発生の予測されている東海・南海地震と同様の性質をもつ海溝型巨大地震である。震源域は沖合にあり都市域から離れていたこともあり木造家屋や中低層建物の被害は比較的軽微にとどまった。しかしながら、震源域から200 kmも離れた苫小牧で石油タンクの火災事故が起こったことは新たな課題を突きつけた。被害の元となった長周期地震動は、巨大地震によって生成され遠くまで伝わるとともに、堆積盆地で強められる性質がある。巨大地震に対しては、長大構造物や石油タンクの耐震安全性を検討するため長周期地震動の予測の重要なことが明らかになった。

4. 南海トラフ地震に対する備え

今世紀の前半にも発生の可能性の高い南海トラフで生じる地震はM_w 8.0～8.4という巨大地震と想定されている。この巨大地震が発生すると、震源域に近い東海、紀伊半島東部から南部、そして四国南部地域が、高震度の強い揺れに襲われる。また、南関東から九州に至る広い地域に強い長周期の揺れが引き起こされる。強震動域となる名古屋、大阪、東京などの巨大都市およびその周辺域には、未だ巨大地震の地震動では験されていない超高層建築物、免震構造物、長大橋、石油タンクなどの長周期構造物が存在する。このような巨大地震が発生したときの大都市の堆積盆地における長

周期を含む広帯域地震動の特性について、これまで地震防災の観点から殆ど検討がなされてこなかった。予測される広帯域地震動に対して既存の都市構造物が十分な耐震性を有しているかどうかの調査は緊急の課題となっている。

強震動予測のためのレシピは内陸の活断層地震の震源インバージョンの解析

結果に基づいて構築された (入倉・三宅, 2001)。海溝型巨大地震に対しての有効性について1978年宮城沖地震や2003年十勝沖地震など個別の地震に対して同様の考えが適用可能なことがわかってきた (Kamae et al., 2004)。しかしながら、地震毎に地域性などの個性の考慮が必要となるなど一般化するにはデータが不足している。南海トラフ地震による強震動のより精度ある予測を行うには解決すべきいくつかの問題がある (入倉, 2004; 2006)。

その1つはアスペリティから生成される短周期地震動の評価手法にある。巨大地震の場合アスペリティの面積が大きくなるため、従来の合成手法に限界が出てくる。例えば、アスペリティを分割して要素に分けて個々の要素から一様なすべり速度関数をもつ地震動が生成されると考えると、アスペリティのサイズが大きくなると分割要素数が多くなって合成される地震動は ω^{-2} モデルから想定される加速度スペクトル平坦の特性を持たなくなる (Irikura and Kamae, 1994)。アスペリティ内部にフラクタルなサイズをもつ小アスペリティを想定するなど合成手法の工夫が必要とされる (入倉, 2006)。

南海トラフに起こる地震については、東海、東南海、南海の3つのセグメントの組み合わせで、昭和タイプ、安政タイプ、あるいは宝永タイプの地震が起こると考えられている (中央防災会議, 2003)。しかしながら、つぎに南海トラフに起こる地震がどのタイプになるかいまのところわからない。最近、GPSによるプレート間の相対速度の空間変化やプレート境界の3次元構造の調査、さらに岩石実験に基づく摩擦則を用いて、繰り返し発生する海溝型巨大地震の発生メカニズムの数値シミュレーションが試みられるようになった (Hori, 2006)。このような断層セグメントの連動の研究と強震動予測レシピを結合した研究の進展が期待される。

5. まとめ

阪神・淡路大震災を引き起こした1995年兵庫県南部地震では、震源断層の近傍で強震動が国内ではじめて複数地点で記録され、波形インバージョンにより精度の高い断層破壊過程が推定された。大きな被害を受けたサイトではじめて強震動記録が得られ、揺れにより構造物が破壊に至る過程の研究がなされた。その結果、将来の大地震による災害の軽減のために強震動予測の重要性が明らかになってきた。このことは、阪神・淡路大震災以降に起こった諸外国の地震被害が強震観測のなされていない国ほど大きいことから裏付けられる。

この地震を契機にこれまで貧弱だった強震観測体制の整備が図られ、気象庁による95型震度計網、防災科学技術研究所によるK-NET・KiK-net、その他の省庁による特定対象に対する強震観測網の充実がなされた。それにより、一定規模以上の地震が発生すると直ちに断層破壊過程の推定がなされ、波形の数値シミュレーションとの比較で地下構造の高精度推定がなされ、また、工学的にも構造物の応答解析、地盤の非線形性の評価などがなされ、地震学および地震工学の研究に活用されている。

上記の断層破壊過程や地下構造推定の研究成果を基に、強震動予測のためのレシピの構築がなされた(入倉・三宅, 2001)。このレシピは、地震調査研究推進本部による「震源を特定した地震動予測」や中央防災会議による「想定東海地震の被害予測」「東南海・南海地震による被害予測」等に利用されている。しかしながら、強震動予測レシピの基になったデータは極めて限られたもので、観測データの蓄積とともに、地震の地域性など個々の地震の特性の考慮などレシピの高度化の検討が必要とされている。

特に、21世紀の中頃までに確実に発生すると考えられている南海トラフ地震については震源近傍地域における震度に影響する短周期地震動のみならず、広域に伝播する長周期地震動の精度良い予測が重要となっている。南海トラフ地震のような海溝型巨大地震の震源のモデル化の研究はデータも少なく十分な検証がなされていない。また短周期地震動、長周期地震動とも予測精度の向上には地下構造のデータが不可欠となっている。

これらのことは強震観測データに基づく強震動予測が近い将来必ずやってくる大地震の被害を軽減するためのキーであることを物語っている。

参考文献

- Hori, T.: Mechanism of separation of rupture area and variation in time interval and size of great earthquakes along the Nankai Trough, southwest Japan, *Journal of Earth Simulator*, Vol. 5, pp. 8-19, 2006.
- 入倉孝次郎：強震動予測レシピ－大地震による強震動の予測手法－, 京都大学防災研究所年報, Vol. 46A, pp. 25-45, 2004.
- 入倉孝次郎：総論：巨大地震による長周期地震動－予測と今後の対応策－, 月刊地球号外No. 55, pp. 5-16, 2006.
- Irikura, K. and K. Kamae: Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique, *Annali di Geofisica*, Vol. 37, pp. 1721-1743, 1994.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, Vol. 110, pp. 849-875, 2001.
- Kamae, K., H. Kawabe, and K. Irikura: Strong ground motion prediction for huge subduction earthquakes using a characterized source model and several simulation techniques, 13WCEE, Vancouver, Paper No. 655 (CD-ROM), 2004.
- 地震調査委員会：全国を概観した地震動予測地図報告書 分冊1：確率論的地震動予測地図の説明 2.2. 海溝型地震, pp. 53-59, 2005.
- 中央防災会議「東南海・南海地震等に関する専門調査会」：第14回会合(2003.9.17)資料1, 内閣府中央防災会議ホームページ, 2003.

地震動予測地図

藤原 広行

●防災科学技術研究所

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、我が国の地震防災対策に関して多くの課題を残した。特に地震に関する調査研究においては、その研究成果が国民や防災機関に十分伝達される体制になっていないとの指摘がなされた。この地震の教訓を踏まえ、全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するため、議員立法により、平成7年7月に地震防災対策特別措置法が制定され、同法に基づき、行政施策に直結すべき地震に関する調査研究の責任体制を明確にし、これを政府として一元的に推進するため、政府の特別の機関として、地震調査研究推進本部が総理府に設置（現在：文部科学省に設置）された。

地震調査研究推進本部は、平成11年4月に、今後10年間程度にわたる地震調査研究の基本方針、活動の指針として、「地震調査研究の推進について－地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策」（以下では総合基本施策と呼ぶ）を策定した。総合基本施策では、地震防災対策の強化、特に地震による被害の軽減に資する地震調査研究の推進を基本的な目標に掲げ、当面推進すべき地震調査研究として以下の4つを主要な課題とし、このために必要な調査観測や研究を推進するとした。その4つの課題とは、①活断層調査、地震の発生可能性の長期評価、強震動予測等を統合した地震動予測地図の作成、②リアルタイムによる地震情報の伝達の推進、③大規模地震対策特別措置法に基づく地震防災対策強化地域及びその周辺における観測等の充実、及び④地震予知のための観測研究の推進である。

特に、地震動予測地図の作成は、推進すべき主要課題の筆頭に掲げられ、これに基づき地震調査研究推進本部地震調査委員会では、平成16年度末を目途として、「全国を概観した地震動予測地図」¹⁾の作成が開始され、平成17年3月に完成し公表された。現在は、その高度化に向けた取り組みが行われている。独立行政法人防災科学技術研究所では、「全国を概観した地震動予測地図」の作成に資するため、平成13年4月より、特定プロジェクト研究「地震動予測地図作成手法の研究」を立ち上げ、地震動予測地図の作成に資する技術的な検討及び地図の作成作業を行ってきた。

2. 全国を概観した地震動予測地図

地震調査委員会により公表された「全国を概観した地震動予測地図」は、地震発生の長期的な確率評価と、地震が発生した時に生じる強震動の評価を組み合わせた「確率論的地震動予測地図」と、特定の地震に対して、ある想定されたシナリオに対する詳細な強震動評価に基づく「震源断層を特定した地震動予測地図」の2種類の性質の異なる地図から構成されている。「全国を概観した地震動予測地図」は、地震調査研究推進本部が進めてきた過去10年間の調査研究の成果の集大成として位置づけられる。

3. 確率論的地震動予測地図

地震の発生及びそれに伴う地震動の評価（地震ハザード評価）は、現状では数多くの不確定要素を含んでいる。現状の地震学・地震工学のレベルでは、将来発生する可能性のある地震について、地震発生の日時、場所、規模、発生する地震動等について、決定論的に1つの答えを準備することは困難である。こうした不確定性を定量的に評価するための技術的枠組みとして有力と考えられているのが、確率論的手法である。確率論的地震動予測地図を作成するために、以下に述べる手法に従った地震ハザード評価が採用されている。地震ハザード評価とは、ある地点において将来発生する「地震動の強さ」、「対象とする期間」、「対象とする確率」の3つの関係を評価するものである。確率論的地震動予測地図作成における地震ハザード評価の大まかな手順は、以下に示す通りである。

- ① 地震調査委員会による地震の分類に従い、対象地点周辺の地震活動をモデル化する。
- ② モデル化したそれぞれの地震について、地震規模の確率、対象地点からの距離の確率、地震の発生確率を評価する。
- ③ 地震の規模と距離が与えられた場合の地震動強さを推定する確率モデルを設定する。モデル化された各地震について、対象期間内にその地震により生じる地震動の強さが、ある値を超える確率を評価する。強震動評価手法としては、経験的な距離減衰式を用いる。具体的には、対象地点から断層面までの最短距離を用いた距離減衰式に基づき、工学的基盤における最大速度を求め、これに表層

地盤の速度増幅率を乗じることにより地表における最大速度を求め、最大速度と計測震度との関係式を用いて地表の震度を評価する。

- ④ 上の操作をモデル化した地震の数だけ繰り返し、それらの結果を足し合わせるにより、全ての地震を考慮した場合に、対象期間内に生じる地震動の強さがある値を少なくとも1度超える確率を計算する。

このようにして、地点毎に地震ハザード評価を実施し、地震動の強さ・期間・確率のうち2つを固定して残る1つの値を求めた上で、それらの値の分布を示したものが「確率論的地震動予測地図」である。

4. 震源断層を特定した地震動予測地図

地震発生の長期評価により発生確率が高いと評価された地震の一部については、確率論的な地震ハザード評価に加えて、あるシナリオを想定し、詳細な強震動評価手法を用いた震源断層を特定した地震動予測地図を作成している。これまでに11の断層帯及び4つの海溝型地震に対して強震動評価あるいは検証がなされ結果が公表されている。なお、詳細な強震動評価を行っていない残りの主要98活断層帯の地震等については、経験的な距離減衰式を用いた簡便な手法による個別の地震についての強震動評価が実施されている。

震源断層を特定した地震動予測地図の作成においては、詳細な強震動評価手法としてハイブリッド法と呼ばれる地震波形の合成法が用いられている。ハイブリッド法は、複数の要素技術の組み合わせからなる複雑な波形合成法であるが、この手法をできるだけ標準化し、誰が計算を実施しても同じ結果が得られることを目標とした手法の検討が行われ、「震源断層を特定した地震の強震動評価のレシピ」が、地震調査委員会により作成されている。

5. 地震ハザードステーション (J-SHIS)

「全国を概観した地震動予測地図」の作成のためには、活断層・地震活動に関する情報や地下構造に関する情報等の大量の情報が用いられていると同時に、それら情報に基づいた地震ハザード評価のために、各種の評価手法や判断が取り入れられている。

一方、現状では、こうした大量の情報に基づいたとしても、地震ハザード評価には多くの不確実性が残存していることも事実である。このため、地震ハザード評価に必要な不確実性を評価するプロセスにおいては、さまざまなレベルにおいて客観的な科学的手法に加えて、各種の判断がなされる場合がある。このため、こうした不確実性評価のプロセスを経て作成された地震動予測地図は、利用目的・利用者によっては、その最終的な評

価結果としての地震動予測地図のみの情報開示では不十分な場合があり、その評価プロセスで用いた手法や判断及び用いた情報を併せて開示することが望ましいと考えられる。また、地震動予測地図のユーザは、一般市民、行政担当者、技術者、研究者など多岐にわたると考えられ、それぞれの立場で必要とする情報項目も異なることが予想される。このように、地震ハザード評価に関する情報開示に対しては、多様なニーズに応えられるような開示情報項目の多様性が要求されるとともに、最終的な評価結果だけでなく、不確実性の評価プロセスで用いた手法や判断、用いた情報など階層的な構造を持つ情報群について広く公開されることが望ましいと考えられる。これは、言い換えれば、地震ハザードの共通情報基盤として「全国を概観した地震動予測地図」を位置づけることと解釈することができる。

このような観点から防災科学技術研究所では、地震動予測地図の利用に関する検討の一環として、「地震動予測地図工学利用検討委員会」を設置し検討を行ってきた。本委員会がまとめた報告書²⁾では、「全国を概観した地震動予測地図」を最終成果物としての地図そのものだけでなく、その作成の前提条件となった地震活動・震源モデル及び地下構造モデル等の評価プロセスに関わるデータも併せた情報群としてとらえることにより、「地震ハザードの共通情報基盤」として位置づけるべきとの提言がなされた。この提言を実現するために、防災科学技術研究所では「全国を概観した地震動予測地図」のインターネットを利用した公開システムの開発に取り組み、「地震ハザードステーション J-SHIS」として、平成17年5月より運用を開始した (<http://www.j-shis.bosai.go.jp>)。

6. 今後の課題

現在、地震調査研究推進本部では、地震動予測地図の高度化に向けた取り組みが実施されている。より信頼される予測地図に向けての高度化と同時に、こうした調査研究の進展による発信情報の高度化や、利用技術の進歩による多様な発信情報に対するニーズに即応できるように、それら情報が定期的に更新・改良されていく仕組みを確立することも重要な課題である。

参考文献

- 1) 地震調査委員会：全国を概観した地震動予測地図報告書，2005。
- 2) 防災科学技術研究所：「地震動予測地図の工学利用 - 地震ハザードの共通情報基盤を目指して -」：防災科学技術研究所研究資料第258号，2004。

震源のモデル化とシナリオ地震の強震動予測

岩田 知孝

●京都大学防災研究所

1. はじめに

入倉・三宅(2001)によって提案されているシナリオ地震の強震動予測のための震源のモデル化(入倉レシピ)は、文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会によって公表された全国を概観した地震動予測地図のうち、震源断層を特定した地震動予測地図作成(地震調査研究推進本部地震調査委員会、2005)をはじめとして内閣府中央防災会議や地方自治体の地震被害予測のための強震動予測手法として広く取り入れられている。ここでは、震源のモデル化の経緯と今後の展開について述べる。

2. 特性化震源モデル

地震記録は断層面上の食い違い関数(時空間の関数)と震源から観測点までのグリーン関数のコンボリューションを断層面上で積分することによって表現される(表現定理、例えばAki and Richards, 2002)。したがって、観測された地震記録から適切なグリーン関数と断層面を仮定することによって逆問題として定式化し、断層面上での食い違いを推定することができる。遠地地震記録を使った震源インバージョンは1970年代後半から、近地の強震記録などを使った震源インバージョンは80年代くらいから、コンピュータ能力の向上とデータセットの充実に伴って行われるようになってきた(岩田, 1991)。Hartzell and Heaton (1983)によるマルチタイムウインドウ法による線形インバージョンの定式化によって、現在では地震が起きれば複数の研究チームが震源モデルを提案するようになってきた。

Somerville et al. (1999)は、80年代後半から90年代前半にかけて多発した米国カリフォルニア州での内陸地殻内地震の震源インバージョンの結果を踏まえ、断層面上の不均質すべりの分布をある基準に従って、すべりの大きい領域(アスペリティ)とそうではない領域に分け、そのアスペリティ面積が地震規模依存性(相似性)を持っていることを示した。地震学においては、断層(破壊)全面積が地震規模に依存していることはKanamori and Anderson (1975)によって指摘されているが、その中のすべりの大きい領域の面積も地震規模依存性を示していることが指摘された。1995年兵庫

県南部地震以降の日本等で起きた内陸地殻内地震のすべり分布が震源インバージョンによって推定されたが、これらのイベントもSomerville et al. (1999)の経験式に沿うことが示されている(例えば宮腰, 2002)。

この不均質すべり分布の推定を行っている強震記録を用いた震源インバージョンには、だいたい周期が1秒程度以上の波形を用いている。最初に述べたようなグリーン関数を与えるには地下構造モデルが必要であり、信頼できる地下構造モデルの限界が現在のところ1秒程度と考えるからである。すなわちここで求められている不均質すべり分布は周期1秒以上の地震動から推定されたものである。強震動予測のための震源モデルは、これより短周期地震動の生成も含む広帯域の地震波生成を考慮する必要がある。三宅・他(1999)、Miyake et al. (2003)は広帯域のグリーン関数として実際に起きた中規模地震記録を経験的グリーン関数として用いる経験的グリーン関数法(Irikura, 1986)を用いて、内陸地殻内地震の強震動生成領域を推定し、それが震源インバージョンによって求められたすべりの大きい領域と対応していることを示した。このような解析は、内陸地殻内地震に対して、Kamae and Irikura (1998)、Suzuki and Iwata (2006)などによっても行われており、第1義的にはすべりの大きな領域と広帯域の地震動の生成域は対応していると考えられている。

これらの経験をもとに、入倉・三宅(2001)は、1995年兵庫県南部地震時に観測されたやや短周期のパルス波のような、震源域での地震被害に直結する強震動の特徴を失わないための震源モデルとして、特性化震源モデルを提案した。特性化震源モデルは、相対的にすべりが大きく、すべり速度や応力降下量も相対的に大きいアスペリティとそうではない背景領域から構成される。また地震調査研究推進本部地震調査委員会でのレシピでは、広帯域強震動シミュレーションのために特性化震源モデルの応力パラメータを、既往の地震データから経験的に得られている短周期レベルから設定する方法(壇・他, 2001)を用いている。また、入倉・他(2003)では、プレート境界地震に対する特性化震源モデルを提案するとともに、マルチアスペリティモデルに基づく考察を加えて応力パラメータの設定方法に

ついて示している。

この特性化震源モデルの適用性が既往の被害地震の再現を行うことによって議論が行われている。最近の被害地震の実観測記録の検証において、震源インバージョンによって得られた震源モデルと地下構造モデルに基づく強震動シミュレーションでは、震源インバージョンのターゲット観測点でない観測点の再現性も満足できるものであるが、震源モデルから設定された特性化震源モデルでは、やや再現性が劣る場合もある。現在の地下構造モデルの更新改良とともに、地震被害予測等の面的な地震動評価の信頼性をあげるには、次に述べるような特性化震源モデルの高度化も推進していく必要がある。

3. 震源のモデル化のこれから

特性化震源モデルと地下構造モデルに基づく強震動予測レシピは、現代社会を構築する様々な社会基盤施設の震動特性・耐震性評価を目的として、広帯域な地震動時刻歴の予測を念頭におき、それを行うための枠組みである。地下構造モデルはこれからの情報の蓄積によって、高度化した詳細なモデルパラメータを与えていくことができると考えられる。

特性化震源モデルの基礎となっているのは、起きた地震の分析によるアスペリティや強震動生成領域のサイズや位置の知見である。日本の場合、強震観測点で囲むことができる内陸地殻内地震に比べて、プレート境界地震の場合はカバレジが悪く、震源域で記録がない。また観測点がやや遠く、更にプレート境界から陸までの地殻構造が複雑で地震被害に直結する周期帯域を十分にカバーする断層破壊過程の分析ができていないわけではない。現代の地震調査観測により、高精度化された地下構造モデルやプレート境界位置によって、歴史地震の震源過程の再検討が行われている（例えばIchinose et al., 2003; Kobayashi and Koketsu, 2005）。三宅・他(2006)はSomerville et al. (1999)と同様の方法でプレート境界大～巨大地震のアスペリティなどのスケーリング則を検討し、同じ規模の地震であれば、プレート境界地震の破壊領域全体面積、アスペリティ面積は地殻内地震のそれより系統的に大きく、アスペリティ面積/全体面積は似通っていることを指摘している。

また2003年十勝沖地震や2005年宮城沖地震では、強震観測網記録を活用した震源インバージョンによる断層破壊と経験的グリーン関数法による強震動生成領域が推定されている（例えばKamae and Kawabe, 2004）。これらの結果を積み重ねることによってプレート境界

地震のより適切な特性化震源モデルの提案が行われると考えられる。

沈み込むプレート内で起きるスラブ内地震については、強震動生成領域の応力降下量が深さ依存性を持っている（Asano et al., 2003）ことが示され、これまで収集されているパラメータに基づく震源モデル化の提案がされている（壇・他、2006）。これもまた事例が増えていくことにより、地域性や深さ依存性を含めたモデルの信頼度が向上していくことが期待される。

断層の破壊過程の本質は動力学であり、断層面上のすべり速度関数を与える運動学的な手法から動力学的な方法論への展開が必要である。すでに動力学的な知見を陽に与えて破壊過程をモデル化する（例えば関口・他、2005）取り組みも行われている。現存する強震観測網記録を用いた既往地震、そして今後起きる地震記録の分析によって動力学的パラメータの設定についての検討と震源モデル確立手法の改良を進めていくことによって、より信頼性の高い強震動予測手法を構築することができる。

参考文献

- Aki, K. and P. G. Richards (2002) . Quantitative Seismology, 2nd Edition, University Science Books.
- Asano, K., T. Iwata, and K. Irikura (2003) . Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations, Earth Planets Space, 55, e5-e8.
- 壇 一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井 透(2001) . 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化、日本建築学会構造系論文集、545, 51-62.
- 壇 一男・武藤尊彦・宮腰淳一・渡辺基史(2006) . スラブ内地震による強震動を予測するための特性化震源モデルの設定方法、日本建築学会構造系論文集、600、35-44.
- Hartzell, S. H. and T. H. Heaton (1983) . Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 73, 1553-1583.
- Ichinose, G. A., H. K. Thio, P. G. Somerville, T. Sato, and T. Ishii (2003) . Rupture process of the 1944 Tonankai earthquake (Ms 8.1) from the inversion of teleseismic and regional seismograms, J. Geophys. Res., 108, 2497, doi:10.1029/2003JB002393, 2003

- Irikura, K. (1986) . Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., Tokyo, 151-156.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵 (2001) . シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110, 849-875.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵・岩田知孝・釜江克宏・川辺秀憲・Luis Angel Dalguer (2003) . 将来の大地震による強震動を予測するためのレシピ, 京都大学防災研究所年報, 46B, 105-120.
- 岩田知孝 (1991) . 震源近傍の強震動とそれを用いた震源過程の推定, 地震第2輯, 44, 特集号, 315-327.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2005) . 「全国を概観する地震動予測地図」報告書, <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- Kamae, K. and K. Irikura (1998) . Source model of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake and simulation of near-source ground motion, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 400-412.
- Kamae, K. and H. Kawabe (2004) . Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake ($M_{JMA}=8.0$) estimated by the empirical Green's function method, Earth Planets Space, 56, 323-327.
- Kanamori, H. and D. L. Anderson (1975) . Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1073 - 1095.
- Kobayashi, R. and K. Koketsu (2005) . Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data, Earth Planets Space, 57, 4, 261-270.
- 三宅弘恵・岩田知孝・入倉孝次郎 (1999) . 経験的グリーン関数法を用いた1997年3月26日 (M6.5) 及び5月13日 (M6.3) 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, 地震第2輯, 51, 431-442.
- Miyake, H., T. Iwata, and K. Irikura (2003) . Source characterization for broadband ground-motion simulation, Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, Bull. Seism. Soc. Am., 93, 2531-2545.
- 三宅弘恵・室谷智子・瀬戸一 (2006) . プレート境界地震のアスペリティのスケーリング則, 月刊地球号外55, 86-91.
- 宮腰 研 (2002) . 不均質震源の特性化, 月刊地球号外37, 56-61.
- 関口春子・加瀬祐子・堀川晴央・吉田邦一・吉見雅行 (2005) . 内陸地殻内地震の強震動評価: 上町断層系を例として, 日本建築学会第33回地盤震動シンポジウム, 25-34.
- Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, A. Kowada (1999) . Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seism. Res. Lett., 70, 59-80.
- Suzuki, W. and T. Iwata (2006) . Source model of the 2005 west off Fukuoka prefecture earthquake estimated from the empirical Green's function simulation of broadband strong motions, Earth Planets Space, 58, 99-104.

地下構造と長周期地震動

額 額 一 起

●東京大学地震研究所

1. はじめに

強震動予測における地下構造モデルの重要性については言を待たないであろう。言い古された言い方であるが、強震動は震源特性・伝播特性・サイト特性が組み合わさったものである(図1)、震源特性を表現する震源モデルだけでなく、伝播特性やサイト特性を表現する地下構造モデルの良し悪しが、強震動予測の精度を左右する。その地下構造モデルのうち、主に伝播特性を担う部分を深部地下構造、サイト特性を担う部分を浅部地盤構造(または表層地盤)と区別して呼ぶことも多い。

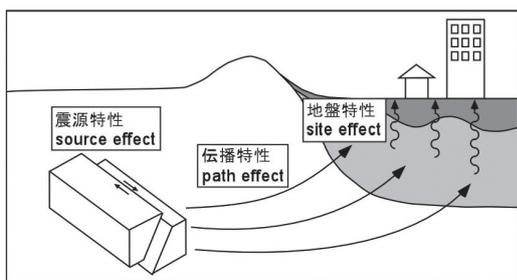


図1 強震動の三要素

強震動予測も大別すると確率論的予測とシナリオ地震予測の二種類があり、確率論的予測では伝播特性を距離減衰式と呼ばれる回帰式で表現することがほとんどで、地下構造モデルが利用されることは少ない(藤原, 2006)。また、サイト特性や浅部地盤構造に関しては翠川(2006)が詳しいので、ここでは深部地下構造あるいは基盤構造と呼ばれる地下構造について述べる。

2. 「基盤」の定義

基盤面とは普遍的に存在する地下構造内の不連続面で、その面への入射地震波はほぼ一様とみなせる面であり、その面より下の比較的均質な部分が「基盤」である。この意味で地殻最上部(S波速度Vs 3 km/s程度)を基盤と呼ぶのが適切であるが、都市の立地する堆積平野、堆積盆地では厚い堆積層にはばまれて探査や調査が困難である場合が多い。また、こうした深い地下構造は多くの構造物に強い影響は与えない。そこで、たとえば東京下町地区の深さ200~300 m付近

に広く存在する土丹層(Vs 600~700 m/s)や、構造物の支持層とされることの多い東京礫層(N値50以上、Vs 300~400 m/s)などをとりあえずの基盤とすることも多い。この意味での基盤を「工学的基盤」と呼び、本来の意味での基盤を区別して呼ぶ場合は「地震基盤」と呼ぶ(図2: 天池, 1998; 額額, 1993)。

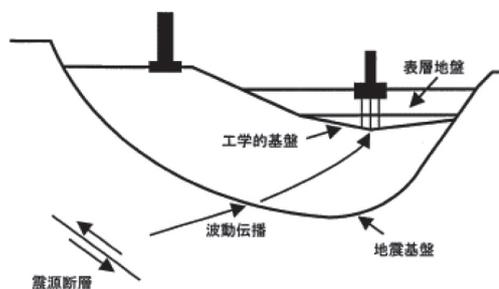


図2 地震基盤と工学的基盤(天池, 1998)

内陸地殻内地震のシナリオ地震予測のために必要な地下構造モデルは、この工学的基盤から地震基盤の間の部分と基盤内部の上部地殻構造である(これらを合わせて基盤構造と呼ぶ)。海溝型地震の場合には、それに加えて下部地殻構造や、沈み込むプレートを含む深さ100 km程度までの上部マントルの構造も影響を及ぼす(たとえばSato et al., 2005)。

3. 地下構造の探査

工学的基盤よりも深い地下構造の探査やモデル化は1970年代に始まり、1990年代初頭までの国内の状況は額額(1993)により整理されている。その後2002年までの状況は額額(2002)、堀家・川辺(2002)、福和・他(2002)に詳しい。それらによれば、関東平野などで探査の主力になった屈折法探査は1980年代までにはほぼ終了しており、1990年代以降の大規模探査は反射法探査とボーリング検層が中心となった(関東地域については図3)。また、ポータブルな地下構造探査としては重力探査に長い歴史があるが、1990年代中頃から微動探査もさかに行われるようになった。

こうした構造探査に加え、阪神・淡路大震災以降、各種地震計(強震計、震度計、高感度地震計、広帯域地震計)のネットワークが防災科学技術研究所や気象

序、各自治体などにより全国展開されているので、これらのネットワークで観測された自然地震の記録を解析することにより、観測点直下の地下構造を得ることができる。たとえば、記録の動径成分と鉛直成分のスペクトル比 (R/Vスペクトル) を求め、それを理論的に再現するような速度構造を求める方法がある (鈴木・他, 2005)。また、構築された地下構造モデルを用いて観測点での地震動をシミュレーションして、それを観測記録と比較しながら地下構造モデルをチューニングするという利用方法もある。

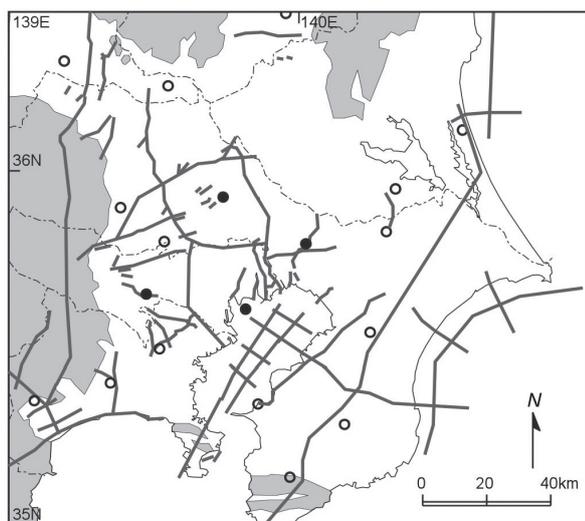


図3 関東地域の深層ボーリング(丸印、黒丸は基盤到達)と反射法探査測線(灰色実線：纈纈, 2002に加筆)。灰色領域では基盤がほぼ露頭

4. 地下構造のモデル化

地下構造のモデル化はこうした探査結果を基に行われることになるが、基盤構造に対するその手順にはおよそ次のようなものが想定される。

- (1) 表層およびボーリング地点の地質情報や、各種構造探査の結果から総合的に判断して成層構造を仮定する。
- (2) 屈折法探査、反射法探査、ボーリング検層などの結果を参照して各層にP波速度を与え、ボーリング検層や微動探査、自然地震記録のスペクトル比解析などの結果を参照してS波速度を与える。
- (3) 面的に存在する探査データ(屈折法探査や重力探査など)を用いて、各層を区切る境界面の形状を決定する。決定は逆問題(インバージョン)として行われることが望ましいが、十分なデータがない場合は補間などの順解法を用いる。
- (4) 工学的基盤直下の層に対して、微動探査以外の探

査は感度がない場合が多いので、その下面の形状は微動探査結果やボーリング情報などを補間して求める。

- (5) 反射法やボーリング検層のデータは、用いる速度構造が(2)の速度と矛盾しないように注意して深度へ変換する。この深度は(3)のインバージョンに拘束条件として取り入れられることが望ましい。(3)が補間ならば追加データとして扱う。
- (6) K-NETやKiK-netなどの自然地震記録に対してスペクトル比解析(この解析もインバージョンであることが望ましい)などを適用して得られた、複数の観測点における速度構造を用いて、(3)、(5)による地下構造モデルを調整・修正する。
- (7) 観測記録のある中規模地震をいくつか選定し、それに対して(6)により調整された地下構造モデルを用いて、各観測点における地震動をシミュレーションする。
- (8) (6)のシミュレーション結果が観測記録に一致するように地下構造モデルをさらに調整する。このチューニング作業は逆問題(インバージョン)として行われることが望ましいが、困難な場合には試行錯誤的な調整作業を行う。

Tanaka et al. (2005) は上記の手順をほぼ踏襲して、首都圏を中心とした地域における基盤構造モデルを構築できることを示した(図4)。その際、手順(1)では鈴木(1996)による成層構造に、手順(2)、(4)では山中・山田(2002)による微動探査の結果に準拠した。

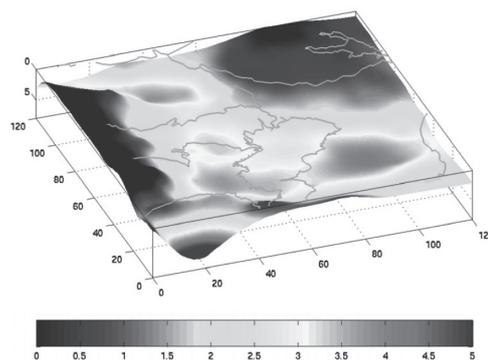


図4 首都圏を中心とした地域における基盤上面の分布 (Tanaka et al., 2005)

地殻や上部マントルの構造も原理的には基盤構造と類似の方法でモデルを構築可能であるが、強震動分野の研究者がこうした構造の探査を行う例はほとんどない。そこで他分野(海底地震、地殻構造、地球内部構造など)で行われた探査の結果と構造モデルを導入

し、自ら構築した基盤構造モデルに合体させるというモデル化が行われる。田中・他(2006)はBaba et al.(2006)の地殻・上部マントル構造(図5)にTanaka et al.(2005)の基盤構造モデルを合体させて、統合地下構造モデルを構築した。

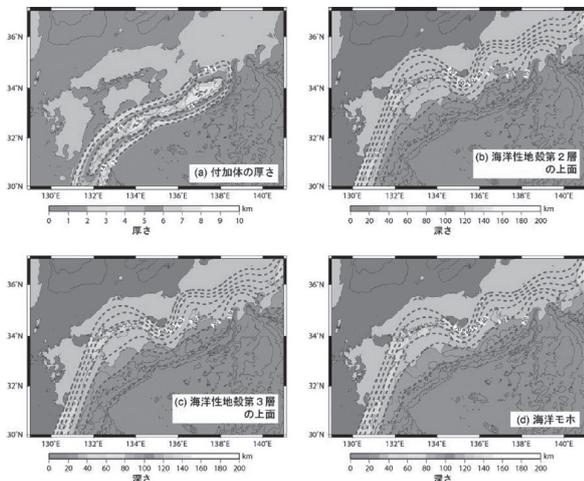


図5 南海トラフ・相模トラフ沿いの地殻・上部マントル構造(Baba et al., 2006)

4. 長周期地震動のシミュレーション

構築された統合地下構造モデルは強震動予測において、長周期の強震動を数値シミュレーションする際に用いられる。長周期の強震動のうち、4秒程度より長い周期を持って長距離を伝播し、遠方の堆積盆地に立地する固有周期の長い大型構造物などに被害を及ぼし得るものを「長周期地震動」と呼ぶ。長周期地震動は、たとえば、2003年十勝沖地震において発生し、震央から250 km離れた勇払平野にある苫小牧市内の石油タンクに被害をもたらした。また、2004年伊半島南東沖地震では関西圏だけでなく、遠く首都圏まで伝播した。

長周期地震動は大きく浅い地震、効率的な伝播経路、深い堆積盆地という三条件が揃えばどこでも発生するので、過去にも1964年新潟地震や1983年日本海中部地震でも経験している。また、海外では、1985年メキシコ地震の長周期地震動が史上最悪の被害を、震央から400 km離れたメキシコシティにもたらした。周辺では地震の起きないシンガポールでも、スマトラなどの大地震からの長周期地震動を経験している。

2004年伊半島南東沖地震の長周期地震動をシミュレーションしてみると、南海トラフ沿いに存在する付加体(図5左上)が効率的な伝播経路として機能していることがわかった(図6: Yamada and Iwata, 2005; Hayakawa et al., 2005; 池上・他, 2005)。一方、堆積盆

地もそのサイト特性が長周期地震動に強い影響を及ぼしており、同じ2004年伊半島南東沖地震でも平野によって長周期地震動の卓越周期が違うという現象が観測された(図7: Miyake and Koketsu, 2005)。

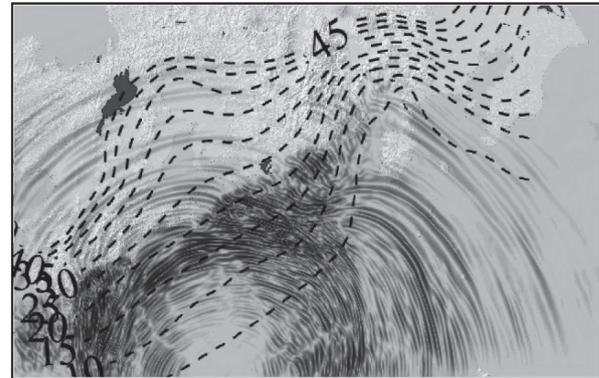


図6 2004年伊半島南東沖地震による長周期地震動のシミュレーション(池上・他, 2005)

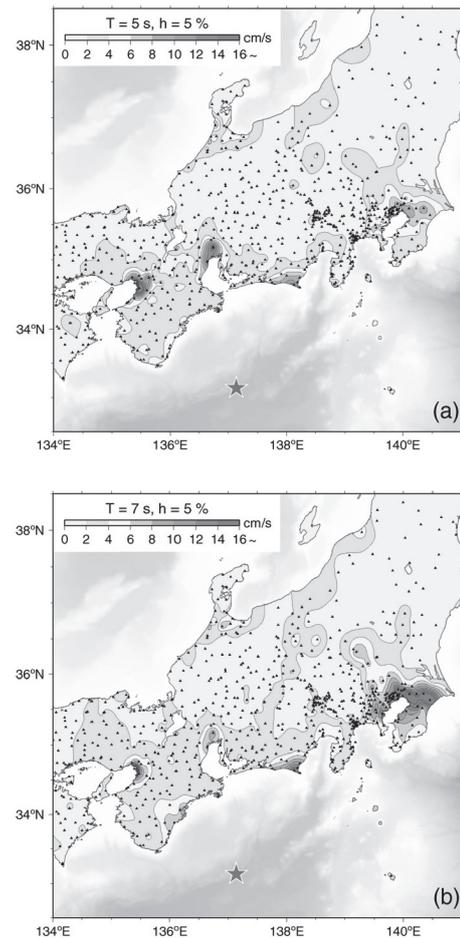


図7 2004年伊半島南東沖地震による長周期地震動の周期5秒(上)と7秒(下)の応答スペクトル分布(Miyake and Koketsu, 2005)

4. おわりに

地下構造モデルの構築は震源モデルに比べ、データの収集やモデル化に膨大な手間と費用がかかる。そのため、強震動予測における重要性を考えれば、収集済みのデータや構築済みのモデルを広く共有できるような体制が望ましい。科学技術振興調整費による「統合化地下構造データベースの構築」(中核機関:防災科学技術研究所)は、2006年度から5カ年でこうした体制やシステム作りを行う研究プロジェクトである。

また、地震調査研究推進本部の地震調査委員会は地下構造モデル検討分科会を設置して、強震動予測のための標準地下構造モデルの構築とその公開をめざしている。その手始めとして2006年7月に、全国を概観した地震動予測地図の「震源断層を特定した地震動予測地図」(地震調査委員会, 2005)で使用された、15地域の地下構造モデルが、防災科学技術研究所の地震ハザードステーションのウェブページから公開された。今後は日本全国をカバーする標準地下構造モデルの構築と、そのための標準的なモデル化手法の検討が引き続き行われる予定である。

謝辞

本稿の一部は三宅弘恵 博士(東大地震研)との議論に負うところが大きい。記して感謝します。

参考文献

- 天池文男 (1998), 基盤と地盤特性の考え方, 日本地震学会ニュースレター, Vol.10, No.2, pp.22-23.
- Baba, T. et al. (2006), Offshore 3-D crustal structure models in the Nankai and Japan trench subduction zones derived from marine seismic surveys, *Earth Planet. Sci. Lett.*, submitted.
- 藤原広行 (2006), 地震動予測地図, 日本地震工学会会誌, 本号.
- 福和伸夫・他 (2002), 濃尾平野の地盤調査とそのモデル化, 月刊地球, 号外No.37, pp.108-118.
- Hayakawa, T. et al. (2005), Simulation of strong ground motions caused by the 2004 off the Kii peninsula earthquake, *Earth Planets Space*, Vol.57, No.3, pp.191-196.
- 堀家正則・川辺秀憲 (2002), 大阪平野の地盤調査とそのモデル化, 月刊地球, 号外No.37, pp.102-107.
- 池上泰史・他 (2005), 海溝型地震による長周期地震動 (2): 伝播経路での発達過程, 日本地震学会2005年大会, B089.
- 地震調査委員会 (2005), 「全国を概観した地震動予測

- 地図」報告書, 本編/分冊2, 地震調査研究推進本部, pp.121/262.
- 額綱一起 (1993), 基盤構造の探査, *地震2*, Vol.46, No.3, pp.351-370.
- 額綱一起 (2002), 関東平野の地下構造調査とそのモデル化, 月刊地球, 号外No.37, pp.96-101.
- 翠川三郎 (2006), サイスマックマイクロゾーニング, 日本地震工学会会誌, 本号.
- Miyake, H. and K. Koketsu (2005), Long-period ground motions from the 2004 off the Kii peninsula earthquake, Japan, *Earth Planets Space*, Vol.57, No.3, pp.203-208.
- Sato, H. et al. (2005), Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, Vol.309, No.5733, pp.462-464.
- 鈴木晴彦・他 (2005), 地震動シミュレーションのための琵琶湖周辺地域の3次元深部地下構造モデル, *地震2*, Vol.58, No.2, pp.91-106.
- 鈴木宏芳 (1996), 江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏の地質構造, 防災科学技術研究所研究報告, No.56, pp.77-123.
- Tanaka, Y. et al. (2005), Integrated modeling of 3D velocity structure beneath the Tokyo metropolitan area, *Eos Trans. AGU*, 86 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract S21A-0200.
- 田中康久・他 (2006), 首都圏下の速度構造の大大特統合モデル (2), 日本地球惑星科学連合2006年大会, S116-P04.
- Yamada, N. and T. Iwata (2005), Long-period ground motion simulation in the Kinki area during the MJ 7.1 foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes, *Earth Planets Space*, Vol.57, No.3, pp.197-202.
- 山中浩明・山田伸之 (2002), 微動アレイ観測による関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築, *物理探査*, Vol.55, No.1, pp.53-65.

サイスミックマイクロゾーニング

翠川 三郎

●東京工業大学 都市地震工学センター

1. はじめに

過去の被害地震で被害の大きさは地盤条件に大きく支配されることが以前から指摘されてきた。例えば、1692年のジャマイカの地震で、岩盤上では被害がなく、砂質地盤で大きな被害が生じたことが報告されている (Duke, 1958)。日本でも、Milne (1880) により1880年の横浜強震の被害分布が綿密に調査され、被害と地盤条件の関係が指摘されているのを始めとして、多数の地震で同様の指摘がなされている (Ohsaki, 1972)。

そこで、適切な防災対策を策定するためには、各地点での地盤の揺れ易さを評価して、想定される大地震での震度分布や被害分布を予想すること、サイスミックマイクロゾーニングが重要であることが認識されてきた。例えば、今村 (1913) は、市街地における震度分布の状況を知っておくことが震災軽減において重要であるとの考えを示し、1854年安政江戸地震および南海地震の被害状況調査等に基づいて、東京および大阪の予想震度分布図を示している。ここでは、日本でのマイクロゾーニングや今後の方向について簡単に述べてみたい。

2. マイクロゾーニングに関する基礎的研究

サイスミックマイクロゾーニングの基礎は地点毎に異なる地盤の揺れ易さを評価することであり、そのため地盤特性の評価に関する研究が行われてきた。Medvedev (1962) は、被害と表層地盤に関係がみられることから、被害から震度を算定し、岩盤に対する各地盤での震度の増分値を整理して、表層地質図等から震度分布図を推定する手法を提案した。

その後、地盤の応答解析手法が開発され (Haskell, 1960; 小林・鏡味, 1966)、地盤モデルを設定して地盤の応答計算により震度分布図等が計算されるようになった。都道府県単位を対象とする場合には、このような方法がよく用いられている。しかし、より広域を対象とすると、対象地域全域で地盤モデルを設定できるほどの地盤データは得られていない場合がほとんどのために、解析的に地盤の応答を計算することは困難であった。そこで、広域を対象として地盤特性を評価する際には、今日でも前述のMedvedev (1962) の考え方が用いられている。

例えば、Borcherdt et al. (1978) は深さ30mまでの地盤の平均S波速度Vs30と地盤の増幅度との相関が高いことを示し、Vs30で地盤特性を簡便に評価できることを示している。さらに、Vs30と表層地質等との相関についても検討し、地質図等からより精度良く地盤の増幅率を推定できることを示している。翠川・松岡 (1995) は日本のデータを用いて同様の検討を行い、全国版データベースである国土数値情報のみから地盤の増幅度を推定する手法を提案している。この方法は全国や都道府県を越える地域を対象とする際によく用いられている。

3. 自治体等によるマイクロゾーニング

自治体等によるマイクロゾーニングとしては、1960年頃から検討が始められ、1964年新潟地震を契機に、神奈川県、川崎市、東京都により先駆的な地震被害想定作業が行われた。その後1968年十勝沖地震などが発生し、横浜市、大阪市、千葉県、静岡県、埼玉県、大阪府なども被害想定作業を開始した。

図1に示すように、1981年では17都道府県で、1995年兵庫県南部地震の直前では27都道府県で地震被害想定が行われている (佐伯・他, 1999)。兵庫県南部地震以降、被害想定的重要性の認識が深まり、ほとんどの都道府県で行われている。予測項目は、地震動、液状化、津波、斜面災害、建物被害、地震火災、ライフライン、人的被害、生活支障などで、予測単位は500mメッシュ単位で行われている場合が多い。また、震災のイメージを把握するために、これらの予測に基づいて災害シナリオも作成される場合が増えつつある。

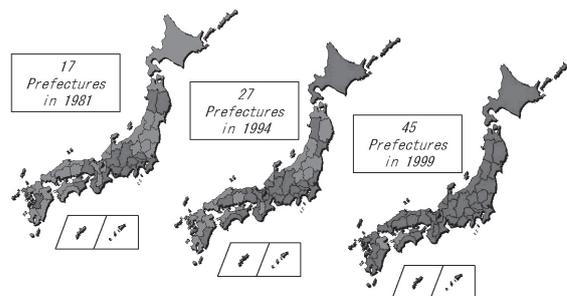


図1 都道府県の地震被害想定実施状況の推移 (佐伯・他 (1999) による)

4. 最近のマイクロゾーニングマップ

全国の地震危険度を概観するマップとしては、地震調査研究推進本部による確率論的地震動予測地図があげられる。都道府県を越える広域のものとしては、中央防災会議による東海地震や東南海・南海地震の予測震度分布図や予測被害分布図があげられる。一例として、東南海・南海地震の予測震度分布図を図2に示す。

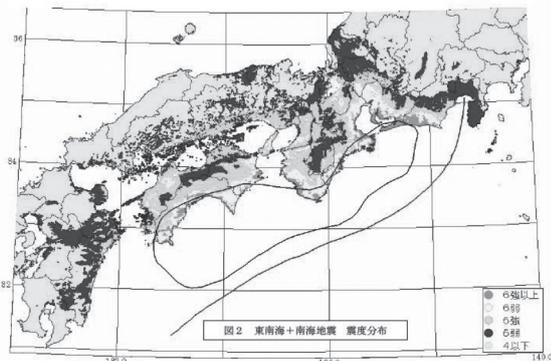


図2 東南海・南海地震の予測震度分布図
(中央防災会議(2003)による)

これらは広域を対象とした大縮尺のものであるが、小縮尺の細かいマップも作成されている。一例として、50mメッシュ単位で計算された横浜市の地震マップを図3に示す。市では、これを約10万部印刷し、区役所などで配布し、インターネット上で公開するとともに、各地域での説明会も行った。その結果、無料耐震診断や耐震改修工事助成の応募者は倍増した。

これに刺激されて、2005年9月現在、名古屋市や京都市など全国の市町村の5.5%でこのようなマップが作成されている(国土地理院, 2006)。さらに普及を推進させるために、国土地理院と内閣府が共同で詳細なマップ整備の支援を進めている。

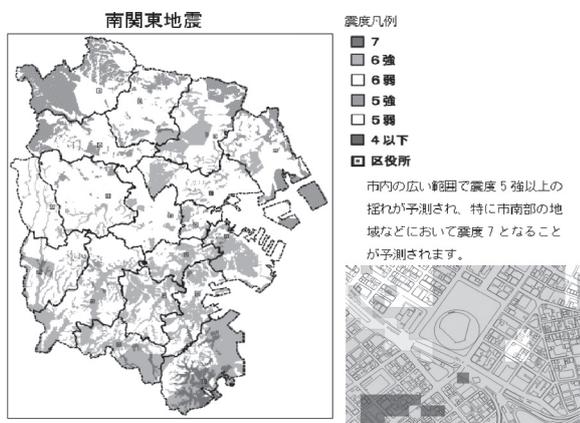


図3 横浜市の地震マップ(左:市全域、右:拡大)
(横浜市(2002)による)

5. 今後の方向

内閣府(2005)は、迫りくる大地震による災害軽減のために、防災活動を国民運動として実践・展開していくことを提唱している。その第一歩として、ハザードマップで災害リスクを知り、防災意識の向上を図ることがあげられている。従来、サイスミックマイクロゾーニングは行政機関の防災対策策定の基礎資料として利用されてきたが、今後は一般市民の防災意識や防災準備の向上のための役割が高まるものと考えられる。そのためには一般市民にとってわかりやすい魅力あるマイクロゾーニングマップが求められている。

参考文献

- Borchardt et al. (1978), Progress on Ground Motion Predictions for the San Francisco Bay Region, California, Proc. of the Second International Conf. on Microzonation, Vol.1, pp.241-253.
- 中央防災会議(2003)、東南海、南海地震の被害想定について、45pp.
- Duke (1958), Effects of Ground on Destructiveness of Large Earthquakes, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. ASCE, Vol.84, pp.1730-1-1730-23.
- Haskell (1960), Crustal Reflection of Plane SH Waves, J. Geophys. Research, Vol.65, pp.4147-4150.
- 今村(1913)、東京大阪両市街地に於ける震度の分布、震災予防調査会報告第77号、pp.17-42.
- 小林・鏡味(1966)、波動理論を用いた成層構造の地震応答数値解析法について、第2回日本地震工学シンポジウム講演集、pp.15-20.
- 国土地理院(2006)、詳細な地震防災マップの作成について、月刊GSIテクノニュース、No.165.
- Medvedev (1962), Engineering Seismology, Academy of Sciences of the U.S.S.R., 260pp.
- 翠川・松岡(1995)、国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価、物理探査、Vol.48, pp.519-529.
- Milne (1880), The Earthquake in Japan of February 22nd, 1880, Transactions of the Seismological Society of Japan, Part II, pp.1-116.
- 内閣府(2005)、防災白書(平成17年版)、国立印刷局.
- Ohsaki (1972), Japanese Microzoning Methods, Proc. of the International Conf. on Microzonation, Vol.1, pp.161-182.
- 佐伯・他(1999)、兵庫県南部地震以降の自治体の地震被害想定、地域安全学会論文集、Vol.1, pp.165-172.
- 横浜市(2002)、横浜市地震マップ、登録番号130288.

強震観測と強震動予測

工藤 一嘉

●日本大学総合科学研究所 生産工学部・建築工学科、東電設計

1. わが国の強震観測50年

わが国の強震観測は1948年福井地震を契機としてSMAC (Strong-Motion Accelerograph Committee) 型強震計が開発され(高橋、1953)、東京大学地震研究所に設置されたことに遡る(金井、1969)。米国からは約30年遅れをとったことになり、建築設計の照査用に多く用いられてきた通称エルセントロ波(Imperial Valley地震、1943年)、タフト波(Kern County地震、1952年)などは、わが国での強震計開発以前に記録されていたことになる。

強震計は大きな被害地震の後で設置箇所が増加されてきたが、最も顕著な進展は1995年兵庫県南部地震以降のK-NET(防災科技研)、KiK-net(防災科技研)震度観測網(気象庁、消防庁・自治体)によることは周知の事実である。わが国の強震計記録の取得・利用形態がK-NETを境に大きく転換したことは、1996年以降に始めて強震記録を利用するようになった若い方には特別な感慨はないかもしれないが、全国の地震記録が1996年当初は1-数日以内に、現在ではほぼリアルタイムで強震データを見ることが出来るのは極めて画期的なことであり、世界に類を見ない体制である。

わが国の強震観測は当初、東京大学地震研究所を中心に進められ、建築研究所、土木研究所、港湾技術研究所などが独自の観測網を展開し、各機関の連絡機構として強震測定委員会(事務局:地震研究所)が、1967年から強震観測事業推進連絡会議(事務局:国立防災センター、現、独立行政法人防災科学技術研究所)が設けられ、「Strong-Motion Earthquake Records, in Japan」を毎年刊行してきた。この強震観測連絡会議(会長:太田 裕先生)と本学会の「強震動データの共有化及び活用法に関する研究委員会」が中心となり、SMAC型強震計の誕生から50年経過したことを記念して、2004年11月に防災科学技術研究所(以下、防災科技研と略)、東京大学地震研究所および本学会との共同主催により、「強震観測の歴史と展望」に関するシンポジウムが開催された。その概要はすでに芝(2005)によって本会誌への報告があり、また強震観測の歴史に関しては前掲の田中貞二先生(田中、2005)により、このシンポジウムのProceedings(防災科技研、発行)に詳しく紹介されているので参照されたい。

2. 現在および近い将来の強震観測への期待

—シンポジウム決議・提言から—

ご紹介したシンポジウムでは、現状と今後の強震観測に関する意見交換を行い、骨子がResolution案として認められ、その後に観測担当者・利用者(実質的には強震観測事業推進連絡会議幹事会、本学会の強震動データの共有化及び活用法に関する研究委員会)の検討を経て、Proceedingsの刊行と合わせて提言として纏めた。総花的であり、作成に関与された委員各位は多少の不満を抱えながらも、最終的には合意の下に出来上がった内容なので、改めてご紹介し、ご理解と実現へのご協力を賜りたい。以下はその緒言に当たる部分である。

「地震災害への対策を合理的なものとするためには、地震時の地盤や構造物の揺れをできるだけ正確に把握する必要がある。この要請に応えるため、約半世紀前にSMAC型強震計が開発されて以来、我が国の強震観測網は次第に整備されてきた。特に、阪神・淡路大震災以降、全国を約20km間隔でカバーする強震観測網や、さらに高密度な震度観測網が整備されるなど、観測網の拡充とデータ公開の迅速化には目を見張るものがある。近年発生した地震に関してはかつてないほど迅速かつ精緻な解析結果が公表され、強震観測の重要性を改めて認識させるものとなっている。しかしながら、わが国の強震観測体制は、現時点では恒久的施設あるいは機能として位置付けられてはならず、特に構造物における観測体制が極めて手薄であると同時に記録の公開や流通が進んでいない。発生が懸念されるプレート境界の巨大地震や内陸の様々な地震を対象として、強震観測体制を長期間にわたり維持し、充実させるための施策と関係者の不断の努力が必要である。強震観測の更なる充実には、適切な配置計画に加え、長期的に安定しかつIT化に即応した機器開発などが含まれる。さらに、地震安全対策のための強震観測の即時的・広域的利用を可能とし、来るべきユビキタス社会に相応しい観測体制を志向する必要がある。また、地震多発国であるわが国は、世界に対する技術と情報の発信源としての役割を率先して担う必要があり、そのためにもデータの共有化・流通を促進させる施策が必要である。」、具体的には以下の6項目の提言となっている。

1) 基幹的観測体制の充実に関する提案

全国一定の密度に配置された強震観測網および地域行政の主要地点に配置された震度観測網とともに基幹的観測と位置付け、恒常的予算により国が指導し、推進する。基幹的観測における観測機器は危機管理・緊急時対応に資すること、かつ波形取得が可能で、均質な機能や精度を備え、規格化された条件下で設置されることが望ましい。

2) 特定観測の推進に関する提案

震源特性・伝播経路特性・局所的地盤構造の影響などの解明を目的とした高密度観測や機動的観測などは、基幹的観測とともに地震防災対策と学術・技術の発展に寄与する。特に地震発生危険度の高い地域や重要構造物・施設では高密度の観測が重要であり、そこで得た知見は特定課題への反映に留まらず、広く地震対策に活用される。このような特定観測は国をはじめとして多くの機関・団体・個人が推進する。

3) 構造物における観測と機器開発の提案

重要構造物や多くの人が集まる公共的施設での強震観測を推奨し、将来は強震計設置の義務化を目指す。当面は設置希望者（機関）を募集し、国が支援する。構造物等への設置を広範に推進するためには、保守が簡便で安価な機器の開発が必要である。また、将来的には、当該施設の地震安全性に関する現場での即時的判断が可能となる機器を開発する。

4) データの流通・公開への提案

国や自治体などの公的機関が取得した波形データおよび観測点の地盤情報は速やかに公開されることが望ましい。データ公開はホームページを利用するなど、可能な限り円滑な流通・共有化を図る。また、建物の観測記録をはじめとする民間所有のデータや震度観測網による波形データの公開が、データ提供者及び利用者双方の理解と配慮の下に促進されるような状況を醸成する。

5) データベース、データの保存に関する提案

国内の複数の機関が取得したデータを統合し、強震データベースを作成する。特に古いデータを逸散させない取り組みが急務である。

6) 社会と新技術への取り組み（研究者・技術者の課題）

公的機関や住民に対して強震観測の意義を説明し、強震観測への地域の理解と参画を得るように努める。また、近未来に到来するIT化社会において、地震安全性が確保されるよう、新技術を活用した強震観測機器とシステムの開発に努める。

となっている。

2- 1. 強震観測の推進に関する提言

このResolutionは、現状の強震観測体制がここ10年の間に飛躍的に進展し、データ利用にも大きく貢献してきてはいるもの、現状の不十分性と将来への期待と方向性を指摘したものである。各項目に説明があり、屋上屋を重ねる恐れがあるが、私見として、少し具体的にかつ平易な言い方を試みたい。

1) は、全国展開されているK-NET(KiK-net)、気象庁・自治体の震度観測網は、現状でも強震計としての機能（波形の取得まで含めて）はほとんど同等であるから、少しの努力と予算で、震度観測網からの波形の提供をK-NETと類似のシステムに、逆にK-NETデータが震度観測網と同等に震度などの危機管理情報を提供し、強震観測網を国の一体化した（一つの組織に拘泥するものではない）恒久的な観測網が可能ではないか、そのためには現状の補正予算の枠ではなく、保守・機器更新が機能的に行える予算の枠組みで実施すべきではないか、という見解である。

2) は、強震動の生成・伝播の要因分析や系統的把握には、地理的に均等なK-NET (KiK-net)、主要な行政単位を包含する震度観測網だけでは不十分といわざるを得ず、1) の基幹的観測網のほかに、強震動の分析あるいは地震対策のための、いわばローカルな観測網の重要性を訴えたものである。震源過程や地盤での増幅作用の定量的把握のための超高密度のアレイ観測や構造物・施設等の地震時挙動把握のための総合的多成分観測などがその例となろう。予算的な面而言えば、これまで個々の研究機関で実施されてきた強震観測の軽視化や新たな観測網の設営の難しさなどの問題点を訴えている一面がある。

3) は、兵庫県南部地震では地震動の強さ以上に構造物の耐震性に問題があったと考えるが、現在、構造物での強震観測はむしろ低減傾向にある（公表されていないためかもしれない）と言わざるを得ない。SMAC時代(便宜的に1950-1980年頃)は勿論現在ほど数は多くないが、むしろ建物に率先して設置されてきた。特に1960年代の建築物に多く設置されたが、保守の難しさから、その多くは保守停止あるいは廃棄されたままの問題がある。一方で、最近の建物には強震計が設置されるケースが少なく、更に問題が大きい。実大振動台実験が可能だから、強震観測を待つてはられないとの意見もあり得る。しかし、現在のところ構造物が倒壊に至る観測記録はなく、何らかの被害が認められた記録として1978年宮城県沖地震の東北工大工学部、1995年兵庫県南部地震の長田区の公団アパートなどの記録などに留まる。当然のことながら、倒壊を期待し

て観測するのではなく、被害結果と推定した地震動による被害関数を推定している現状を、より精度の高い現実的内容にする必要があるのではないか。勿論多くの強震計設置と費用、多大な努力が必要となろう。6)の強震関係者が自戒をこめた項目と関連するが、労力の軽減と費用の低減化を図った計器の開発と、建物等のオーナー・管理者の理解と協力が得られるような仕組みが不可欠であろう。このような試みは既に始まっており、このシンポジウムでも紹介があった。

2-2. データ流通・データベースの促進について

K-NET、KiK-netがほぼリアルタイムでデータが公開され、大・被害地震の直後あるいはごく短期間での震源インバージョン結果の公表を促進し、被害調査等の第1次資料としての速報的な役割から、地震全体像把握の鍵となるほどの活躍を演じている。また、かつて、海外の研究者からしばしば指摘されていた日本の強震データの公開性の悪さについては、一挙に解消してくれた感がある。ただ、“神戸地震”以前の記録はないとの要請が相変わらず聞こえるので、何とかしなければと思う。

少し横道にそれたが、自治体の震度計による波形データの取得と提供への要望が4)、5)に込められている。大都市圏の自治体は波形データ取得に力を注いでおり、一般に公開している例が多く、大学等の要請に応じWEBでの閲覧や共同利用(鷹野・他、2005; 福和・飛田、2005; など)が可能になっている。しかし、本震データが余震データで上書きされてしまった、あるいは故障で取れないなどの問題を聞くにつけ、経費が大変だとは理解しつつも、機器の保守と波形記録の重要性が震度情報に比べてかなり軽視されているように感ずる。6)の研究者の自戒の一つとして挙げている内容と符合し、われわれ地震工学関係者が波形記録の重要性を広く・強く訴え、行政・住民の方々に理解してもらうための努力に欠けているとの反省である。データが確保されてさえいれば、気象庁が公表・データ提供の労をとる仕組みは出来上がっているのだが。

データ流通で難しいのは2)で提言した、特定目的の観測のデータの流通・公開の問題である。この問題は、建て前と本音が交錯する難しい問題をはらんでいる。かつては強震観測の主要な対象は構造物を対象とし、国の研究機関が携わってきた。研究論文や報告が出た後に、公開を求めることは一般的なことではあるが、それ以前にデータの流通や公開を求めることには、いかに国の費用で実施されたとはいえ、担当者にはやや酷な要求に思える。観測は自然を相手にしているという

特殊性はあるものの、たとえば実験データが実施後にすぐデータ公開を要求されることはほとんどないであろう。両者は質的には似た性格を持ち、研究の主体性とアイデアは尊重されるべきであろう。USGSでも余震観測データはなかなか公開されない場合があるのはこの配慮がなされているのではないだろうか。観測のアイデア自体が十分評価されればこの状況は変わるかもしれないが。

そうは言ってもいずれはデータが公開されるべきで、データを子々孫々まで伝えるために、煩雑ではあるが日本の強震データベースを作る必要性を訴えたのが5)である。強震観測事業推進連絡会議(強震連絡会と略)は十分とは言えないが、先に紹介した「Strong-Motion Earthquake Records in Japan」、強震速報でその一端をカバーしてきたが、波形データ(時刻歴デジタルデータ)までは含まれていない。強震連絡会のホームページ(<http://www.k-net.bosai.go.jp/KYOUKAN/index/>)では各機関へのリンク先、データ入手方法を提示している。昨年度まで強震連絡会の幹事長職を承りながら、この問題の進展を見ることが出来なかったのは不徳の致すところと反省している。しかし、各関係機関の「著作権」を尊重しながら実現させることは決して容易なことではないと考える。そこで、波形データがいずれ提供された時に何時でも受け皿になることが出来れば、いずれはデータベースが出来上がるという期待をもつ。一例ではあるが、熊谷組の強震観測網KASSEMのデータをご提供いただき、このような仕組みに向けた端緒と考えている。

K-NETが開設されてから、インターネットを通じてデータを公開する、あるいはCDなどで提供する機関が増え、データ利用の環境が大きく改善された。各機関または個々の研究者の独自性とデータの「著作権」を尊重しながら、さらに研究者のみならず危機管理や対策のための、より効率的利用を図る全国的な統合データベースの設立が望ましい。強震観測事業推進連絡会議が設立された時の強い連携を保った省庁横断型を志向した時点の意識に学びながら、もう一度この種の連絡機構の意義を見直す必要があるのではないか。研究者向けの色彩が濃いのが、米国のCOSMOS(<http://www.cosmos-eq.org/>)は先例といえよう。

2-3. 地震即時対策への強震観測の更なる活用を

これまでの議論は、どちらかといえば、強震観測の地震安全性に寄与する事前あるいは恒久対策への利用の視点といえる。しかし、強震計(あるいは感震器)は地震の揺れの最中に各種制御のための判断に使われ

てきた。兵庫県南部地震で特に大震動を記録したJR鷹取や大阪ガス・葺合の記録は制御用あるいは監視・警報を主目的とした装置による記録である。いわゆる強震観測と銘をうった観測だけでは、このような貴重な記録が存在しなかったことになる。リアルタイム地震防災のための機器が、新潟中越地震でも貴重な波形データを提供したことは記憶に新しい。1)で要望していることは、このようなメリットを更に大きくし、制度化することであるが、逆に強震情報を地震即時対策に、より有効活用していく工夫が必要であることは言うを待たない。

本シンポジウムでも多くの紹介や提案があった。鉄道の警報システム、道路・橋梁・河川監視、都市ガスの監視・供給制御、震度情報の応急対策への利用などであるが、建物や施設の揺れをリアルタイムで可視化・表示するシステムも紹介され、利用が大きく広がっていることが理解された。招待講演で、CIT名誉教授のIwan先生が今後の強震観測の将来展望はリアルタイムで精度良く危機管理・政策決定に利用されることを強調されたが、試用期間ではあるが気象庁の緊急地震速報とのタイアップなど発展が急がれる分野である。同時に、1)、2)の課題との連携も図って行きたいものである。

3. 強震動予測の精度向上に向けて

揺れの最中あるいは最強の地震動レベルに達する前に、適切な措置が出来れば、大きな減災効果が期待される。かつての制御・監視用の判定には加速度レベルが使われてきた。最近では震度やSI値などにより、複雑な地震動を数値処理し、体感・被害に直結する地震動強さの指標に変わりつつある。極めて短時間の情報としては単一指標一分かりやすい指標一が適切ではあるが、第2・第3段の判断に、例えば震度情報だけでよいのだろうか。1983年日本海中部地震で新潟は震度3であったが大型石油タンクからスロッシングで石油が溢れ、2004年新潟中越地震では東京都区内は多くが震度3であったが、高層ビルでのエレベーター被害があるなど、更なる情報と対策が必要とされ、想定される被害や機能障害などへのより精度の高い推定が求められている。また、震度情報に関しては、最近の震度観測(計測震度)と震度解説表の間に、特に高階震度において、やや乖離を感じるのは私だけであろうか。先にも触れたが、地震動強さと被害関数の関係にはまだ多くの未(理)解部分があるように思われる。

かつては、強震記録はもっぱら経験的距離減衰式作成のためのデータとして、また一部の大地震記録は耐

震設計照査用のデータとしても使われてきた。震源インバージョンはサイエンスの興味を別にして、強震動予測の精度を向上させるための一里塚の一面を持っており、現在ではそこに強震記録の大いなる活躍を見ることが出来る。インバージョンが自動化され地震動が収束する頃には震源解が出ていて、直ちに地震動レベルの空間的な推定が可能となるのは、それ程遠い将来ではないように思う。但し、フォワードモデリングとしての強震動予測を実用化するまでには、地下構造に起因する増幅・減衰の影響評価や非線形挙動などについて、要因分析を進め、精度の向上が益々必要になってくる。そのためにはこれまで以上に強震記録の利用が不可欠であり、広い意味での強震観測の充実を期待するところである。

4. おわりに

独りよがりの、漠とした期待文になってしまった。

また、戴いたテーマの強震動予測についてはほとんど触れることが出来なかったが、他の執筆者の顔ぶれから、たぶん多くは触れていただいていると思う。強震観測の重要性は誰もが認めてくれるが、注目される記録が得られまでは、なかなか振り向いてもらえない。特に最近のように、長くても5年計画のプロジェクトでは強震観測の成果を出すことは難しい。全国的連合を再考する際に、強震観測の意欲をそがない工夫も論議していただきたいと考える。

記念シンポジウム「日本の強震観測50年」-歴史と展望-講演集、pp241はまだ残部があり、防災科学技術研究所内の強震連絡会事務局に依頼すれば入手できます。

引用文献

- 高橋竜太郎、1953、SMAC型強震計、地震2、6、117-121.
- 金井清、1969、地震工学、共立出版
- 芝良昭、2005、日本地震工学会誌
- 田中貞二、2005、わが国の強震観測事始を振り返って、防災科学技術研究所研究資料、264号、7-16.
- 鷹野 澄・他、2005、首都圏強震動総合ネットワークSK-net、防災科学技術研究所研究資料、264号、119-122.
- 福和伸夫・飛田 潤、2005、地域における多機関の強震観測 網のネットワーク化と地域防災への活用、防災科学技術研究所研究資料、264号、223-230

強震動予測と土木工学との連携

堀 宗朗

●東京大学地震研究所

1. はじめに

強震動予測と土木工学との連携はいろいろな視点で考えることができる。紙面も限られているため、著者が重要と思われる二つの視点でこの小論をまとめる。土木構造物の耐震設計と都市の被害予測との連携という視点である。言わずもがなのことであるが、最も高い耐震性を要求される構造物は原子力発電プラントのような重要構造物である。本特集には含まれなかった原子力施設・機器の耐震性確保と強震動予測の連携が近い将来に地震工学の研究者で議論されることを強く希望する。

土木構造物の耐震設計との関連を論ずる前に、土木工学に馴染みのない読者はまず次の二点を理解してもらいたい。一口に土木工学といっても、土木工学が対象とする構造物の種類は多い。橋梁やダムのような大型構造物はもとより、トンネル等の地下構造物や地盤構造物、港湾・空港施設も含まれる。使われる材料も鋼・コンクリートの他、地盤・岩盤、さらには複合材料のような新しい素材もある。構造や材料の違いは構造物の変形メカニズムや地震応答の違いとなるが、さらに、要求される耐震性のレベルも構造物の重要度に応じて異なる。この結果、共通する部分は勿論あるものの、土木構造物は構造物ごとに特有の耐震設計の体系が作られている。これが第一点である。次に、社会基盤を欧米並に引き上げることは長期にわたって我が国の重要な課題であり、社会基盤を迅速かつ効率的に整備し、さらに、全国で一定の質を確保するため、土木構造物には標準的な設計が重視されてきた。このため、土木構造物の耐震設計では標準的な地震動を使う傾向が強い。大雑把に言えば、標準的な地震動とは全国一律に設計で用いる地震動であり、地震の伝播特性やサイト特性を積極的に取り入れるものではない。したがって、機械工学や建築と比べ、土木工学では地震学はもとより強震動予測に関する関心は決して高いものではないように思われる。これが第二点である。

さて、都市の被害予測は建築と土木工学の境界に位置している。人命に直結するため、住居として使われる建築構造物の地震被害予測は重要な課題であり、建築分野で優れた研究が多数行われている。一方、土木

工学が対象とするものは都市基盤施設の被害予測である。加えて都市基盤施設の被害軽減の技術も研究されてきた。都市基盤施設の被害予測と強震動予測の関わり方には注意が必要である。耐震設計と同様、都市基盤施設の耐震化の基本的な考え方は、「地点毎の強震動を予測しそれに耐えられるように補強する」というのではなく、「所定の地震外力に耐えられるよう補強する」ということである。したがって、必ずしも構造物に作用する強震動を精密に予測することが行われるとは限らない。また、強震動予測とは別に、実際に発生した強震動に対応することも居住以外の種々の機能を持つ社会基盤施設には重要である。例えば、都市基盤の一翼を担うエネルギー系のライフライン企業では、極めて高密度な強震動観測網を開発・展開している例があるが、これは地震発生後迅速にライフラインの安全性やエネルギー供給を確保するためであり、発生した強震動への対応が目的なのである。

安全・安心は比較的新しい研究領域であり、我が国では地震等の自然災害からの安全・安心が大きな課題となっている。土木工学ではこの枠組みでの地震防災が比較的積極的に研究されている。安全・安心の枠組みでも強震動予測は重要である。強震動が引き起こす都市の地震被害を綿密に推定することで、法・経済・社会心理等の研究者と連携しながら多面的に地震防災の研究や技術開発が行われている。地震の防災では分野横断の研究は新しいことではないが、安全・安心では、情報技術を駆使して分野横断を促進するとともに、さまざまな脅威の一つとして地震を位置付けることで、より総合的な地震防災を目指している。企業等の事業継続計画は安全・安心の具体的な目標である。地震に対して効果的な事業継続計画を立案するためには、都市の強震動予測が重要な役割を果たすと思われる。

2. 強震動予測と耐震設計

前述のように、さまざまな構造や材料が使われるため、土木構造物の耐震設計は多岐多様である。このため、強震動の何が予測されるべきかは実は構造物や設計法によって異なる。構造物に直接入力される加速度や速度の波形データが必ずしも必要とはされない。勿

論、地盤-構造物相互作用をも検討するために工学的基盤から地盤に入力される波形データが必要となる場合もあるが、構造物の諸元を決める設計においては、入力される地震動のより簡単な情報で十分とされる。

土木工学には限らないが、設計の際の強震動の使われ方として応答スペクトルは取り上げるべきであろう。多くの読者には説明の必要もないことであるが、応答スペクトルは、地震動の時系列データを単純な一自由度系モデルの応答に変換するものであり、モデルの固有周波数と変位・速度等の応答の最大値の関係となる。地震学の最新の知見を活用しても強震動の時系列を予測することは決して容易ではない。その一方で、努力して推定された強震動が、一自由度系モデルの応答の最大値に変換されてしまうことは皮肉である。しかし、応答スペクトルは地震動がどの固有周期を持つ構造物にどの程度影響を与えるかを知るには極めて有効であり、枝葉末節を省き応答の最大値として地震動を捕らえることは、設計の視点で見れば本質的に重要なのである。なお、地震は設計の際に考慮される要件の一つであり、大型の土木構造物は自重や使用時の荷重も大きくなるため、他の荷重がよりクリティカルな場合となることも多い。したがって、構造物の地震応答を把握するために強震動を応答スペクトルに変換することは有効なのである。

さて、より良い構造物を作るために設計法は改良が進められている。限界状態設計法への移行したように、現在、多くの土木構造物で性能規定型の設計法が研究・検討されている。従来、所定の安全性を満たすことが設計の目的であったが、性能規定型の設計法は構造物が持つ性能を明示することを目的とする。性能規定型の耐震設計は、どのような強震動まで構造物が耐えることができるか、もしくは、どの程度の余裕があるかを示すことになる。耐震設計が高度化すると、当然、設計に必要な地震動もより高度なものが要求される。一部の重要構造物を除き、建築構造物と比べれば強震動予測との連携が弱かった土木構造物も、性能規定型の耐震設計が一般化すれば格段に連携が強まる可能性がある。これは性能を正確に明示するためには、より精緻な構造物応答の解析が必要となるためである。全国一律に所定の地震動に対する応答を計算し性能を明示することが依然として標準となるように思われるが、地点毎に起こりうる地震動を予測してそれに対する応答から性能を考えることがより合理的な設計となる場合、強震動予測の必要性が増すと考えられる。

性能規定型と並び、確率論的設計論が設計の高度化として検討されている。設計の際に荷重や強度の不確

定性を確率的に扱うことは既にいろいろ試みられており、確率論的設計論は決して新規なものではない。しかし、より合理的な設計を行うために確率論的設計論の有効性は広く認識されつつある。自然と対峙する土木構造物では、河川流量や風力のような自然外力に対する安全性が重要であり、ある大きさの自然外力の発生確率を考えることは当然でもある。また、土木構造物の供用期間は総じて長いため、自然外力を確率論的に扱うことは有効でもある。地震は発生頻度が少ないため、強震動を確率的に扱うには、一工夫必要であることは確かである。地震学の進歩により地震の発生確率の予測が行われるようになったのであるから、もう一步進めて、想定される地震動の幅が提示されたり、さらには、その確率が提示されることは、設計の合理化に繋がる確率論的な耐震設計を実現するためには極めて重要である。強震動予測との連携を考える上で有望な領域と考えられる。

耐震設計という観点で強震動予測との連携を論じてきたが、予測された強震動の利用の仕方は今後重要となるであろう。例えば、予測された強震動の信頼性が高くなれば、それに応じて構造応答の計算もより高度なものが必要となる。すなわち、構造物の動的応答の数値計算技術を高度化することが土木構造物研究者・技術者に要求されることになると思われる。構造応答の計算技術は設計や照査には十分に使えるレベルに達しているが、地震動による構造物の破壊過程のシミュレーションは大きな課題を解決するためにも、強震動予測の進歩に見合った数値計算技術の高度化は必要である。また、強震動予測に進歩に伴い、構造本体のみならず設備の耐震性の評価も要求されるかもしれない。いわゆる非構造部材の地震応答や耐震性は重要な課題となることが考えられ、より精緻な強震動が予測されると、この課題の解決も重要度が増す。したがって、強震動予測との連携の具体例として、非構造部材の地震応答挙動について詳細がわかる数値計算技術の開発が期待される。

上記の強震動予測と土木工学の連携は研究レベルである。連携の強化や活性化には研究レベルから入ることが一番であるが、連携の実効を上げるには最新の強震動予測の成果が実際の設計に活用されることが望ましい。前章で説明したが、土木構造物の耐震設計が多岐多用にわたり、また、全国で一様の質を確保することが重要であった現状を考えると、設計実務に最新の強震動予測が使われることは容易ではないことは想像できる。勿論、重要土木構造物の設計や耐震性判定には最新の成果が使われており、実務に活用することは

不可能ではない。連携の実効を挙げるためには、強震動予測の研究の本質的な要素ではないであろうが、強震動予測の最新の成果が簡単に使える仕組みが検討されることが望まれる。すぐに思いつくことであるが、所定の地震シナリオを与えると該地点の地震動が相応の精度・信頼度で計算されるような仕組みである。勿論、構造物の応答の振動数まで地震動が計算され、既存の動的応答解析手法に簡単に入力できることが望ましい。

3. 強震動予測と被害予測

耐震設計の視点と同様、都市の被害予測の視点で強震動予測と土木工学の連携を考える際、重要な点は強震動の何を予測すべきかである。各地点で発生する強震動が正確に予測できるのであれば、個々の構造物に起こりうる被害が予想できるため、必要かつ十分な耐震補強が施されることになる。勿論、強震動の正確な予測は不可能であり、ある幅を持った予測をすることになる。極めて大きい強震動からさほどでもない強震動までさまざまであるかもしれない。このような幅のある地震動の予測の中でどれを使って土木構造物の被害予測をするかは技術者や防災担当者が決めることになる。その際、選ばれる地震動の発生確率にも依存するが、構造物の重要度も大事である。重要な構造物の重要度が高いほど、発生確率は低くとも、大きい地震動が選ばれる。至極当然なこの選択を、きちんと行うには予測される地震動の幅や発生確率をできるだけ正確に見積もる必要がある。強震動予測そのものが容易でない現状をみると、幅や発生確率の見積もりは難問であることは確かである。しかし、この難問を解決することが、被害予測の視点でみた強震動予測と土木工学の連携を強化すると思われる。

強震動の幅のある見積もりは決して新規なことではない。複数の地震シナリオが想定されれば、手間はかかるが、発生しうる地震動分布やそれが引き起こす構造物等の被害を算定することは十分可能である。なお、構造物被害の算定は過去の地震被害データに基づいていることは注意が必要である。設計では入力された地震動に対する構造物の応答を計算して耐震性を判定しているが、被害推定ではこのような計算に基づく判定は使われていない。計算に基づく被害判定には、都市内に配置された多数の構造物のデータが必要である。古い構造物では、設計図が無くなっている場合やデジタル化されておらず計算の準備に手間がかかる場合がある。また、安全性を確保するため、実際の構造物は設計されたものよりも強くなっているが、施工の質

によっては逆の場合もある。さらに経年劣化によって設計時とは構造物の特性が変わる場合もある。建築構造物であるが、構造物の固有周期が次第に長周期化する観測結果がある。したがって、強震動予測の高精度化が、被害予測の高度化に直結するとは限らない。都市内の各構造物に対して良質なデータを得る努力が必要とされる。

第1章で述べたが、安全・安心の枠組みでの地震防災では、従来にも増して詳細な地震被害の推定が必要とされている。逆に言えば、詳細な地震被害推定を行って適切な対処を実施することで、従来よりも高いレベルでの安全性を確保することが安全・安心の目的となる。なお、安全・安心では他の自然災害の他、テロへの備え・対応も検討される。危機として想定される状況はさまざまなものがある。したがって、地震シナリオが複数あることや地盤や構造物のデータに不確定な要因があることは致命的な障害とはならない。想定される危機の状況が複数あれば、各々もしくは一部の状況を選定し、備えや対応を検討することになるからである。安全・安心の枠組みで精緻な地震被害の推定を実現するには最善の強震動予測が必要であり、強震動予測との連携は不可欠である。実際に起こる地震と推定される地震が合う合わないということではなく、合理的に推定された結果、備えや対応を検討するに値すると判定されるのであれば、予測される強震動やその帰結となる構造物被害の推定が必要とされるのである。

安全・安心の具体的な目標として挙げられた事業継続計画を使って上記の点をもう少し詳しく説明してみる。事業継続計画は、危機的状況が発生した後の主要業務の継続を目的としている。全業務を対象としない点が従来の危機管理と若干異なり、企業の事業計画であるため極めて詳細な部分まで検討することが望ましい。発生する地震災害が完全に分かるのであれば事業継続計画の立案は容易である。災害状況にさまざまなものが考えられるため、どのような状況になっても効果的に主要業務の継続ができる計画を立てるのである。したがって、事業継続計画は固定的なものではなく、事業そのもの状態によって適宜変化するものである。細部まで詰めた地震被害を想定し有効な事前の準備や事後の対応を検討しより実効のある計画とすることが重要なのである。荒唐無稽な地震災害状況を想定しても意味が無く、地震シナリオに応じた地震動分布とその結果引き起こされる地震災害を客観的な方法で推定し、災害状況を合理的に想定することが必要であると思われる。前述のように、このような想定を実現

するには強震動予測との連携は不可欠となるのである。

事業継続計画は個々の企業が立案するものである。しかし、想定される地震が発生した場合に、交通網やエネルギー・情報等に関わる社会基盤施設がどのような被害を受ける可能性があり、また、被害を受けた場合にどのように復旧するかを明らかにすること共通の課題である。社会基盤を対象とする土木工学がこの課題に答を出すことが望まれる。土木構造物は元々高い耐震性を持つよう設計され、また、耐震性を向上させるために補強を受けたものがある。しかし、そうでない構造物が残されていることも事実である。地震によっては被害を被る可能性がある社会基盤施設を明らかにすることは、事業継続計画を実効あるものとするために重要な責務であろう。決して愉快なことではないが、合理的な耐震補強を進める一方で、不備を明らかにすることは避けては通れないことかもしれない。特に社会基盤施設は相互に強く依存しており、一つの施設の被害が波及的に広がることは周知の事実である。効率化を追求する現代社会において冗長性の確保は軽視される傾向にあると思われる。過去のいかなる時よりも、地震被害の波及的拡大が大規模なものになる可能性が懸念される。社会基盤施設の間の相互依存性を分析し、被害の拡大の可能性を検討することは重要である。このような検討にも、合理的な強震動予測とそれに基づく被害推定が不可欠であることは自明である。

4. おわりに

強震動予測と土木工学の連携を論ずるに際して、土木工学の中では強震動予測の必要性が必ずしもたかくなかったことを説明した。しかし、長周期地震動に関しては、過去の観測データがないだけに、予測に強い関心がもたれた。これは長周期成分が大きく継続時間が長いという特徴が耐震設計で想定されているものと異なる可能性があり、構造物に想定外の被害が発生することが懸念されたためである。構造物の応答に関連する強震動の予測には積極的に取り組むことは十分期待できる。本論で述べたように、設計や被害想定を高度化するには信頼性の高い強震動の予測が必要であり、積極的に連携を進めるべきと思われる。

重要構造物の設計や耐震性の検討には、地震学の最新の知見を使って地震動を予測することが行われている。また、一部の自治体の被害想定にも高度な地震動予測が利用されている。通常の土木構造物の設計や被害想定に高度な地震動予測が使われるようになることは時間の問題かもしれない。このような地震動予測に見合うよう、構造物の地震応答予測を高度化したり、

また、現存する構造物の特性を正確に計測することは将来の課題となると思われる。解析手法や構造センシングの高度化を目的とする研究・開発が望まれる。

参考文献

- 土木学会「特集 大地震に備える」『土木学会誌』、87(12)、5-45、2002。
- 朱平、堀宗朗、清野純史、藤野陽三、「地震被害の共通認識形成を目的とした広域都市モデルの構築にむけて」、『社会技術研究論文集』、2、435-443、2004。
- 保野健治郎、「地震防災行政の今日」『土木学会誌』、71(4)、58-60、1986。
- 大林厚臣、「意思決定論の地震防災における応用可能性」『社会技術研究イニシャティブ』(地震防災グループ) <http://www-msd.civil.tohoku.ac.jp/~EDPRG/mate/03/obayashi03124.htm>、2002。
- 堀宗朗、市村強、「高分解能強震動シミュレータの開発」『土木学会誌』、87(12)、39-40、2002。
- 田所諭、北野宏明監修、ロボカップレスキュー—緊急大規模災害救助への挑戦、共立出版、2000。
- 林春男、『いのちを守る地震防災学』、岩波書店、2003。
- 鹿島建設土木設計本部編、『耐震設計法／限界状態設計法』、鹿島出版会、1993。
- 土木学会コンクリート工学委員会、『コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]』、土木学会、2002。
- 日本道路協会、『道路橋示方書・同解説、V耐震設計編』、日本道路協会、1998。
- 土木学会地震工学委員会、『実務の先輩たちが書いた土木構造物の耐震設計入門』、土木学会、2001。
- 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会、『土木構造物の耐震設計ガイドライン—耐震基準作成のための手引き—』土木学会、2001。

強震動予測法と設計用地震動：展望と課題

武村 雅之

●鹿島小堀研究室

1. 設計用地震動

工学における地震・地震動の研究は、一言で言えば地震の科学で分かったことを耐震設計や地震防災など社会に生かすことである。地震の科学は、地震の震源を研究することから始まるので、当然、地震学ではどこで地震が発生するかをつきとめ、様々なデータから、その地震の震源となる断層の動きを予測する。さらに、地下構造の情報をモデル化し、弾性波動論を用いて地震動を計算することが一般的である。これが強震動予測の研究である。近い将来発生することが予想されている宮城県沖地震や東海・南海地震、糸魚川・静岡構造線の地震など、全てはこの流れで強震動予測が行われている。ところが、これだけでは耐震設計には十分ではない。例えば、強震動が予測されている地震、つまり震源が良く分かり特定されている地震だけが被害地震かというそうではないからである。設計という極めて人間的な行為と、自然現象を認識し物理的に記述しようとする地震学的行為とは必ずしもストレートには繋がらない。地震現象に予測困難な部分が多ければ多いほど、その間の溝は大きくなる可能性がある。

おそらく現状では震源を特定できない地震に対して地震学者は一般に興味を持ってないし、答えるすべもない。なぜならそれらは認識不可能な対象で、地震学の研究対象にはならないからである。こんな時に思い出すのは、20数年前東海地震の発生が予測され、マグニチュードM=8クラスの巨大地震に対し強震動予測の必要性が生じた時のことである。当時の地震学では、断層モデルを用いてまっとうに地震動を計算できる周期帯は10秒以上で、到底地震被害と関連するような短周期領域まで地震動を計算できる状況ではなかった。当時の地震学者は皆そんな評価は無理だと思っていたし、私も駆け出しの地震学者として同じように感じた覚えがある。

そこで立ち上がったのは、地震工学者で東工大名誉教授であられた故小林啓美先生である。先生は当時工学で培われていた距離減衰式に工夫を加え、この“無理な”要求に答えて見せたのである。小林・翠川法¹⁾と呼ばれるこの方法は、決して地震現象を物理的に記述できるわけではないが、それから10年以上に渡って設

計用地震動評価に貢献し、今日でもその考え方は我々が発案した等価震源距離として受け継がれ²⁾、震源断層の複雑性を考慮できる新しい経験的予測法の一つのベースとなっている。

先にあげた問題も、地震学者だけでは前には進まない。こんな時は地震工学者が自らの役割を自覚して立ち上がるべきである。我々が中心となって行った「震源が特定できない地震の地震動レベルの評価」は正にその一部に当たる³⁾⁴⁾。この種の問題には、最新の科学的知見を総合する能力と実証主義に裏付けられた工学的直感が必要である。まさに地球科学の成果を社会に生かすという工学における地震・地震動の研究の本質がそこにある。

なお、本稿では話をわかり易くするために、強震動予測に関連する研究者をあえて地震学者(理学)と地震工学者(工学)に分けて、それぞれを対比して話を進めるが、個々の研究者が完全に2つに色分けされる訳ではない。かく言う私も自分では地震学者だと思っているが、たぶん地震工学者だと見られている方も多いと思う。

2. “工学レシピ”の必要性

震源を特定できない地震の例は極端にしても、震源を特定できるとされている地震の震源は本当に“特定されている”のだろうか。小林・翠川法が生まれたころの地震学でも地震の震源は地下の岩盤が断層で食い違う現象であるということは分かっていたが、工学で必要とされる周期帯の地震動を説明するために、どのような震源のモデル化をすればいいのか、また震源から観測点まで地震波が伝播する間にどのような変質を受けるのかなどについて、物理的に評価する確たる目途が立っていなかった。

1980年代に入ると、小林・翠川法に代表される新時代の距離減衰式が強震動予測の精度を向上させ、設計用地震動評価の世界で活躍する。距離減衰式は基本的にマグニチュードMと震源距離Xで地震動が決まる仕組みであるから、震源断層の位置や広がりには特定する必要がある。今も続いているがこの時代でも、一方では震源は特定できないもの(不特定多数という意味

も込めて)との前提のもとで、エルセントロやタフトに代表される観測記録の振幅を過去の経験に基づいて調節し、設計用地震動として用いることも行われていた。この時期地震学では、今日強震動予測の代名詞となったアスペリティなど震源の不均質性を記述するインバージョン解析や、複雑な地下構造の影響を波動伝播解析に考慮する計算法の開発が着々と行われ、今や遅しと出番を待っていたように思われる。

そんな時に発生したのが1995年の兵庫県南部地震である。このときの被害のすさまじさは今でも脛に焼き付いて離れないが、そのことが地震学者の社会的責任への自覚を促し、地震学者が設計用地震動評価の世界に大きく足を踏み出す契機となった⁵⁾。しかも、この地震は、地震の規模といい、アスペリティの大きさや性質といい、段差をもった明確な基盤構造など、今から思えば当時の地震学の到達点を生かすのに最適な条件がそろった地震であったように思われる⁶⁾。その後発生した地震をみても、これほど強震動現象が明解に説明された地震はないようだ。地震後に整備された世界一高密度の強震観測網にも支えられて、断層モデルを用いた強震動予測法は一躍時代の寵児となっていった。

断層モデルによる強震動予測法は、先的小林・翠川法などと異なり、もともと予測を目的としたものではない。そのことは、兵庫県南部地震による強震動現象をほぼ説明することに成功したことからも分かるように、地震現象の物理的記述を目的としたところから出発した技術である。このため本来予測を目的に開発された距離減衰式などの技術とは異なり、はるかに高度な震源断層のモデル化が可能である反面、そのことが予測法としては大きな課題を背負い込む結果となっている。つまり、予測時に決定困難なパラメータを多数含むという問題である。この問題点をできるだけ緩和し、予測法としての要件を満足させるために、特性化と呼ばれる震源モデルの単純化を行い、パラメータを決めるための手順を定めた“強震動を予測するためのレシピ”が作成された⁷⁾。この手順書は入倉孝次郎京大名誉教授を中心として作られたもので通称“入倉レシピ”と呼ばれている。これによって本来地震現象の物理的記述を目的としていた断層モデルが強震動予測法として生まれ変わり、国や地方自治体等における特定の地震に対する強震動予測に使われているのは周知の事実である。

しかしながら、断層モデルによる強震動予測法は、依然としてその生い立ちを引きずり、東海地震のように国をあげて詳細な調査研究を行っている場合⁸⁾は例

外として、断層の形状や破壊の開始点やアスペリティの位置など、たとえ“レシピ”を用いても決められないパラメータをなお多く含む場合が一般的である。小林・翠川法が出現する時とは異なり地震学が手も足も出せないという状況ではないが、予測がきわめて困難な状況には変わりがなく、そのままでは多くの計算ケース数を重ねる以外方法がないという実用上の大きな問題に直面することとなる。またそれぞれの計算ケースの評価結果間には大きな差があることが通例で、いくら計算しても安心できないという設計者の心理的な不安は相当なものにならざるを得ない。

多くの計算ケースの中には、予測の対象としている地震が将来起った時に、ほぼ近い結果を与えるケースもあれば大きく外れるケースもあるだろう。結局期待値がそこそこであるとすれば、距離減衰式を用いて経験的に地震動レベルを求め、地震規模に見合った震動継続時間を考慮して地震動波形を計算するような従来法(例えば文献⁹⁾)でも精度はそれほど変わらない。むしろ大幅に手間が省けて合理的であると考える人がいても無理はない。

それでは細かな位相の影響が評価されないという意見も出てきそうだが、いずれ震源の詳細が決まらない限り位相の精度など保障されるべくもない。例えば震源のディレクティビティ効果によって生じるパルスの幅はアスペリティの大きさや位置、さらには破壊伝播方向に依存し、それらが少しでも変われば敏感に周期も変動してしまう。

一方、不確定な部分はパラメータスタディーをやればよいと気楽にいう人もいるが、設計用地震動評価は後工程のある作業であり、当然作業効率も考える必要がある。ましてや起るか起らないか分からないケースを可能性があるという一言で多数計算し、結局地震の専門家の判断を仰がなければ地震動のレベルが決められないとすれば、設計の現場で常に用いることはむずかしい。パラメータスタディーをやるにしても手順書が必要である。

“レシピ”には最後に予測結果の検証の項があり、そこには距離減衰式と比較をして推定値が大幅に外れていないかを確認することが書かれている。断層モデルを用いた強震動予測法が常に予測精度が高いと勘違いされている方はこの項の意味を是非考えて欲しい。予測できないパラメータを抱える問題点の認識とその方法を使う場合の慎重な態度を求める姿勢がそこにはよく表れているからである。

以上のような現状を打開し、断層モデルを用いた強震動予測法を汎用性のあるものにするためには、地震

工学者が立ち上がる必要があるように思う。地震学者の苦勞によって生み出された“レシピ”の意を汲んで、地震学者から十分な情報を得て、工学者自らが実務で常に使えるよう“工学レシピ”とでもいうものを作り、ある種のルール化を行って簡便でしかも誰がやっても同じ結果が出せるような方法を提案すべきではないだろうか。先に述べたように兵庫県南部地震後には観測記録も充実して、経験的予測法の精度も格段に上がってきた。“工学レシピ”は、断層モデルを用いた強震動予測法を設計地震動評価に直結する方法に昇華させることを目的に、対象構造物の特性も考慮し、そこそこ安心できる経験的予測法の利点も活かした内容にすべきであろう。

最近“レシピ”の改良も一段落してきたようである。工学者が地震学者によって日々進化するレシピの内容を理解し、フォローするのが精一杯という時期は過ぎようとしている。これからが地震工学者の出番であるように思う。

3. 地震学者の課題

“工学レシピ”を作り上げ、断層モデルの計算に一つのルール化を考えることは地震工学者の課題である。一方地震学者の課題はもちろん地震現象の解明にある。現状の予測法に関して一般的に解明しなければならない課題を私なりに整理すると以下ようになる。

1. アスぺリティの位置ならびに活動の繰り返しはどの程度確からしいか？
2. いわゆる震源域の運動に対してスケーリング則は

成り立つか？

3. 破壊は断層のどこから始まるか？
4. アスぺリティと短周期地震波発生域との関係は？
5. 主要動部分の上下動の生成メカニズムは？

5番目の問題は波動伝播に関わる問題で、現在考えられているような基盤での直達S波のP波変換だけでは上下動が過小評価気味になるというものであるが、1-4の問題はいずれも震源のモデル化に関するものである。“レシピ”には、未解決な問題を解決するための手がかりになるような最新の研究成果も紹介されている⁷⁾が、一般的には、予測に直結できる段階のものにはなっていない。またいずれの問題も地下構造調査をして分かるような性質のものでも無さそうで、現状では強震動予測に進むためには何らかの仮定が必要な場合が普通である。裏返して言えば、場合分けによって多くの計算ケースを生み出し強震動予測の計算を煩雑なものにしている原因である。

これらの問題に共通する点は、一つの地震を詳細に調べただけで答えが得られるものではなく、過去の地震、できれば同じ場所で繰り返し発生する地震やその痕跡を調べる以外、解決の糸口を見つけるのが難しいことである。

内陸地震のように再来間隔が長い場合には、地震そのものの直接的な解析をすることは難しい。その代わり繰り返しの痕跡として活断層が残されており、地中部分も含めた今後の活断層調査の進展が問題解決の鍵を握っているように思われる。これに対して海溝沿いのプレート境界地震については、歴史時代に繰り返し

が確認されるものが殆どで、最後の発生に対してはほぼ例外なく地震計による観測記録が残されており解析が進められている¹⁰⁾。これに対して2回前、3回前となるに従って、観測記録は乏しくなるが、一方で揺れや津波に対する被害記録の利用が有効で、歴史地震研究が問題解決に大きな役割を果たす可能性が高い。

近年、神田・武村¹¹⁾は、震度データから震源での短周期地震波発生域(短周期域)を評価する方法を開発し、十勝沖地震、宮城県沖地震、関東地震、南海・東海地震など海溝沿いで数十年から数百年毎に繰り返す地震に対し数回前までの地震の震源過程を調べている。

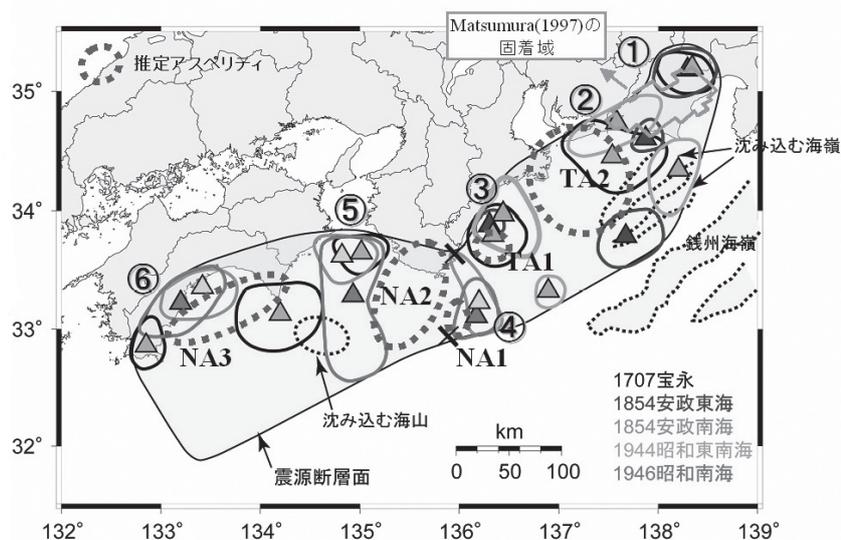


図 宝永、安政、昭和の東海・南海地震に対する短周期域 [文献12]
 三角印はそれぞれの中心。点線の楕円は昭和の地震に対して求められているアスぺリティの位置。X印は破壊開始点。詳細は文献参照

図は宝永、安政、昭和の3代に渡る東海・南海地震に対し結果をまとめたものである¹²⁾。図の点線で囲まれたTA1-TA2、NA1-NA3は昭和の地震に対するアスペリティ（断層すべりの大きな部分）であり、他の地震の例も総合すると短周期域の中心（図の三角印）はアスペリティ破壊の終端部に現れる性質があることが分かってきた。

安政、宝永の場合に注目しても短周期域中心は昭和の場合とほぼ同じ位置に求められ、昭和の地震で確認されている少なくとも5箇所のアスペリティがほぼ同様の破壊伝播によって活動したと考えることができる。一方駿河湾内においては、安政、宝永の場合、来るべき東海地震に対し推定されている固着域の縁に当たる湾奥に短周期域中心が求められる。安政、宝永の際に破壊が湾口から湾奥へ進み、この固着域がアスペリティとして活動したと考えると整合する。また宝永の場合、室戸岬沖に強い短周期域が求められるが、中心は海山が潜り込んだとされる場所の北西端に当たる。安政や昭和の際にはバリエーションとして働いた海山の潜り込みが、宝永の際には南東方向から進んできた破壊伝播とともにアスペリティとして活動したと考えられる。

以上のように、震度分布の情報や最近の地震観測結果、さらには海底下の地下構造調査結果などを総合すれば、破壊開始点の位置が各回でそれほど変わらないことや、アスペリティも多くは繰り返し活動していること、さらにはたまに活動するアスペリティがあることなど、震源のモデル化にとって重要な発見がある。これらの成果を活用すれば、来るべき南海・東海地震に対する強震動予測を行う場合、震源モデルの検討ケース数は、飛躍的に減少するものと思われる。全ては長年地道に続けられてきた歴史地震研究の成果ならびにデータベースのお陰である。歴史地震の調査研究が活断層に比べて、地震学者の間においても注目度が低いことが気が掛かることである。

4. 将来に向けて

耐震設計法の父ともいえるべき佐野利器博士は、新しい振動論の台頭によって柔剛論争が続く学会で、昭和2年に警鐘をならす意味で、有名な演説を行っている。その中に“諸君、建築技術は地震現象の説明学ではない。現象理法が明でも不明でも、之に対抗するの実技である。建築界は百年、河の清きを待つ余裕を有しない。”という一節がある¹³⁾。この考えに同調する地震工学者は多いと思う¹⁴⁾。この言葉は決して物理学を不要だと言っている訳ではなく、工学者に対して、新しい物理を理解しその限界をわきまえた上で実用に供す

る方法を考えるべきだと言っているのである。

兵庫県南部地震後、それまで出番を待っていた地震学的知見が大きく花開き、地震学者の社会的責任感が“レシピ”をつくりあげ、強震動予測法の大きな発展の芽を生み出す結果となった⁵⁾⁷⁾。そこで提案されている強震動予測法はいうまでもなく断層モデルをベースとしている。断層モデルは地震の震源のモデルとしてその物理的な妥当性は広く認められているが、それがそのまま強震動予測に際して精度を保証するものではないことに注意が必要である。そのことは未解明の課題の多さを見れば自明である。地震工学者は、佐野利器が述べたように、片方で実用を睨みその時点での強震動予測法のレベルを把握して、大鉦をふるって設計用地震動評価法に昇華させる必要がある。

一方地震学者は、決して現状を保守することなく、未解明の問題に果敢に取り組み地震の物理を進めることが重要である。両者の活動がかみ合ったときに、初めて地震の科学の成果が耐震設計に生かされる道が構築され、強震動予測の研究成果がより広く社会に役立つことになるものと確信する。

参考文献

- 1) 翠川三郎・小林啓美,1979,地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定,日本建築学会論文報告集,第282号,77-81.
- 2) 高橋克也・武村雅之・藤堂正喜・渡辺孝英・野田静男,1998,様々な岩盤上での強震動応答スペクトルの予測式,第10回日本地震工学シンポジウム,1,547-552.
- 3) 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大栄・上田圭一・壇一男,2004,震源を事前に特定出来ない内陸地殻内地震による地震動レベル,日本地震工学会論文集,4,4,46-86
- 4) 地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会,2001,レベル2地震動の明確化にむけて,土木学会論文集,No.675/I-55,15-25.
- 5) 山中浩明・武村雅之・岩田知孝・香川敬生・佐藤俊明,2005,地震の揺れを科学する－みえてきた強震動の姿,東大出版会(7月下旬発売予定).
- 6) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会,1998,阪神・淡路大震災調査報告 共通編－地震・地震動/地盤・地質,pp576.
- 7) 地震調査研究推進本部・地震調査委員会,2005,震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」),日向灘の地震の想定(付録).
<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>

- 8) 内閣府中央防災会議,2001,東海地震に関する専門調査会(第11回)資料. <http://www.bousai.go.jp/>
- 9) 武村雅之・釜田正毅・小堀鐸二,1989,地震波の発生伝播理論を考慮した模擬地震動作成法,日本建築学会構造系論文報告集,403,25-33.
- 10) Yamanaka, K., and M. Kikuchi, 2004, Asperity map along seduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, J. Geophys. Res., 109, B07307, doi:10.1029/2003JB002683.
- 11) 神田克久・武村雅之・宇佐美龍夫, 2004, 震度インバージョン解析による南海トラフ巨大地震の短周期地震波発生域, 地震2, 57, 153-170.
- 12) 武村雅之・神田克久,2006,東海・南海地震の短周期地震波発生中心とアスペリティ,第12回日本地震工学シンポジウム(投稿中)
- 13) 佐野利器,1927,耐震構造上の諸説,建築雑誌,第491号(講演速記録).
- 14) 加藤研一,2002,改正建築基準法に至る地震外力の考え方ー設計適用の観点から見た現状と課題,第30回地盤震動シンポジウム,13-24.

震動台E-Defenseの活用

梶原 浩一

●防災科学技術研究所

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震(マグニチュード7.3)は、建物・橋梁・港湾施設といった構造物に、専門技術者・研究者の想像力を遥かに凌ぐ損害を与え、日本の耐震構造は万全であるという神話を覆すこととなった。そこで生じた地震動は、事前の想定を遥かに超えるものであり、そうした過大な地震動に対して現実の構造物がどういった挙動を示すのか、更なる実験研究の必要性が判明したのである。

震災後、地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方について、当時の科学技術庁の航空・電子等技術審議会により諮問がなされ、その答申の一部として、「地震動入力シミュレータ」、「数値震動台」、「災害拡大過程シミュレータ」の研究開発要素が提示された。その1つである「数値震動台」構築の目的を達成する施設として、破壊過程の再現が出来る大規模な三次元震動台の建設計画が進められたものである。この「数値震動台」とは、構造物の破壊現象までを計算機上で再現する所謂シミュレータである。

計画開始からおよそ10年の歳月を経て建設されたのが、防災科学技術研究所(以下、防災科研)の実大三次元震動破壊実験施設(愛称:E-ディフェンス)である。2000年から兵庫県三木市で建設を開始し、2005年3月に完成した。本稿では、このE-ディフェンスの施設概要と2005年度にここで行われた木造・RC造・地盤についての実験概要、今後の計画について報告する。

2. E-ディフェンスの概要

振動台とは、地面などに見立てた鋼製の箱に動的アクチュエーターを連結し、アクチュエーターをリアルタイムで制御、駆動することによって、振動台に搭載した構造物の地震応答を再現するための装置である。図1にE-ディフェンスの震動台の模式図を示す。20m×15mの鋼製の震動テーブルにアクチュエーターが、水平二方向に5機ずつと鉛直に14機の計24機取り付けられている。この鋼製のテーブルだけで、800t近い質量がある。アクチュエーターの反力は周囲のコンクリート製の基礎が負担するが、その基礎の重量が20万tもある。震動台の最大搭載重量が1,200tであるので、震動台本体と合わせた2,000tの加震重量に対して、100

倍の重量で抵抗しているわけである。それでも最大加震中の実験棟内では、20万tの基礎を介して震度1.2程度の僅かな震動が伝わってくる。

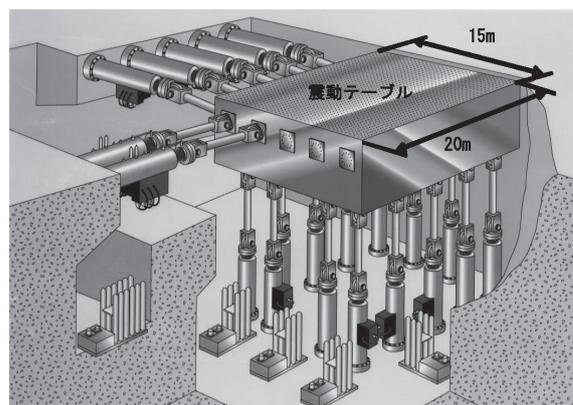


図1 E-ディフェンス震動台

振動台の性能は、搭載可能重量・加振力・最大速度・最大変位などによって表される。表1に、日本の代表的な大規模振動台の性能を示す。E-ディフェンスの性能でまず目に付くのは、その搭載能力と変位量の大きさである。実大実験を行うのを主目的としているわけであるから、大きな構造物を大きな振幅で加震することが必要で、ここが世界一の震動台といわれる所以である。中小規模震動台では縮小実験も実施するため、時間軸を縮小した比較的大きな加速度性能が要求されるが、E-ディフェンスの実験は実大実験を基本とするため、むしろ速度・変位に大きな性能が要求される。表に掲げた数値は、兵庫県南部地震での震度7に相当する地震動を再現できるだけの十分な値となっている。

表1 振動台の性能比較

研究機関	最大質量 (トン)	面積 (㎡)	加振	加速度 (cm/s ²)	速度 (cm/s)	変位 (cm)
E-Defense (兵庫県)	1,200	300	3方向 (X,Y,Z)	900	200	100
原子力発電技術機構 (多度津)	1,000	225	2方向 (X,Z)	1,900	75	20
土木研究所 (つくば)	300	64	3方向 (X,Y,Z)	1,000	200	60
防災科研 (つくば)	500	217	1方向 (X)	500	75	22

なお、E-ディフェンスの震動台は、実大の構造物に対して実際の地震を正確に模擬することが出来ることから、あえて震動という漢字を充てて震動台と呼んでいる。

図2は、施設全体の鳥瞰図である。これで分かるように、全体施設に比べると震動台本体は小さく、周辺に震動台を動かす源となる油圧を供給する設備などの、様々な施設が配置されている。また、試験体質量は数百tになるわけであるが、もはやこの規模になると試験体といえども一つの建設工事である。実験棟の横には、試験体を建設するための実験準備棟や、広々とした建設ヤードが確保されている。

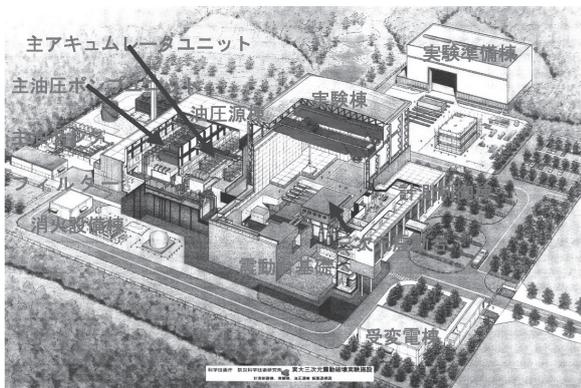


図2 E-ディフェンス鳥瞰図

3. E-ディフェンスの運営体制

E-ディフェンスの開設に先駆けて、防災科では兵庫耐震工学研究センターを設立した。本センターはE-ディフェンスの施設管理運営を行うと共に、E-ディフェンスを活用した研究開発を自体研究、共同研究、受託研究、施設貸与研究で進め、ここで産み出される成果の防災実践への速やかな移行を促進する役割を担っている。早速2005,2006年度については、文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」(通称：大大特)の震動台活用による耐震性向上研究として、三つの構造物(木造建物、RC建物、地盤・基礎)を対象とした実大実験研究を、この兵庫耐震工学研究センターが実験を中心となって推進している。以下の項では、2005年度に行われた、大大特プロジェクトの実大実験の概要について報告する。

4. 2005年度の活用

1) 京町家震動台実験

木造建物に関する実験は、2種類の実験が行われた。ひとつは伝統的木造家屋の耐震性能を検証する実験で、京都市内に現存する築数十年の町家(以下、京町家)が対象建物に選定された。もう一方は、一般的な住宅

の耐震補強に関する実験で、これについては後述する。

京町家は、建築年代が古いことから大地震時の被害が懸念されている。京都市などが実施した耐震調査研究ではその耐震性に多くの問題点が指摘された。また、町並み保存・再生の観点から、既存の町家に耐震補強を施してその耐震性能を上げることや、最新の耐震技術を活かした耐震性能の高い新しい京町家を建設することも、望まれている。

実験はまず、実際に京都市内に建つ京町家を柱・梁といった部材レベルまで一旦解体して、E-ディフェンスまで運ぶことから始まった。その部材を使って、E-ディフェンスの実験準備棟内で復元するとともに、予め耐震補強を施した新築の京町家も建設した。これら二棟の京町家をE-ディフェンスの震動台に並べて設置し、同時に加振する計画である。写真1に震動台上の2つの試験体を示す。右側が移築試験体、左側が新築試験体である。中央に見える鉄骨は、試験体の変位計測用のフレームである。移築試験体は、一度そのままの状態に加震を行い、現有する耐震性能を把握した後、改めて震動台上で耐震補強工事を行い、補強前後の違いを比較した。



写真1 京町家試験体

いくつかの予備加震を経た後の本加震は、町家の間口方向に建築センターのBCJ-L2波、最大加速度400galで実施された。加震中には、震動台の動きとともに、木造独特の軋み音が実験棟内に響き渡り、大きな変形が生じたものの、倒壊まで至る気配はなかった。建物内には、家具の転倒に関する実験のために、箆筒などが置かれていたが、新築試験体の家具のみが転倒する結果となった。振幅だけを見れば新築試験体のほうが小さいのであるが、振動周期は短く、家具の転倒にかかわる速度・加速度が大きくなったものと予想される。更にその後、兵庫県南部地震での神戸海洋気象台観測波を原波で入力する加震を行い、試験体は大きな損傷を受けたが、倒壊には至らなかった。

2) 補強・無補強住宅の耐震比較実験

京町家実験に引き続き行われたのは、既存木造住宅の実験である。この実験の目的は、耐震補強によって既存住宅の耐震性が向上することを実証することにある。そのために、同仕様の2棟の建物に対して片方のみ補強を施し、その2棟の建物を同時に加震することによって耐震性能を直接に比較することとした。

対象試験体は、実在する住宅から公募により決定され、E-ディフェンスへ移築された。この建物は、兵庫県明石市に建つ、築30年の木造軸組構法2階建て住宅2棟で、一部に軽微な改修等があるものの、2棟はほぼ同じ間取りであった。しかも、隣同士に建ち、同じ経年劣化を経ていることも、本実験の目的と見事に合致する建物であった。

実験に先立ち、「木造住宅の耐震診断と補強方法」(国土交通省住宅局監修、日本建築防災協会発行)に基づき耐震診断を行った。なお、耐震補強も本書に基づき行っている。診断結果によると、この建物の保有耐力の充足率は0.3～0.4とかなり耐震性に劣り、兵庫県南部地震の激震に対して倒壊する可能性が極めて高いことが分かった。

試験体の移築は、トラックによる運搬可能な大きさまで分割して行われた。ここでは、京町家実験のように部材レベルまでの解体は基本的には行わない。分割切断箇所は、それが実験結果に極力影響を与えないよう慎重に決定された。まず、屋根とその小屋組は部材ごとに解体した。鉛直方向の分割は2階床梁と1階柱頭の間で分解し、1階部分は基礎と土台を分離した。水平方向は、1階、2階ともに主振動方向と平行に分解した。これにより、主振動に抵抗する柱梁と壁の切断箇所を最小限に留める事が出来る。

E-ディフェンスでの再構築後、一方の試験体に耐震補強を施した。この耐震補強により、保有耐力の充足率は約1.5まで改善され、兵庫県南部地震の激震に対しても、倒壊しないだけの十分な耐力が付与された。

実験での加震波は兵庫県南部地震の震度7の地域で観測された、JR鷹取駅の観測波とした。その最大速度はおよそ150cm/sで、建築基準法上で極めて稀に遭遇するとされる地震動を遥かに上回るものである。

実験は、多くのマスコミ関係者と見学者の見守る中、11月21日に実施された。その結果は写真2に示すように、無補強試験体のみ1階が層崩壊するという、耐震補強の見事な効果を示す結果となった。国民に対して耐震補強の重要性を直接的な形で示す形となり、その防災意識を高める貴重な役割を果たしたと考えられる。



写真2 移築補強・無補強試験体

3) RC (鉄筋コンクリート) 建物震動台実験

木造実験の次には、RC建物の実験が実施された。この実験の目的も、やや古い既存のRC建物の耐震性能を検証しようというものである。既存建物の検証であるから、木造実験と同様、実在の建物を加震するのが最も良いのであるが、流石にRC建物をE-ディフェンスまで運搬することは不可能であるため、試験体は実験棟横の屋外準備ヤードで新築建物として建設された。

試験体の仕様は、1970年代の建設を想定した6階建てRCマンションである。短辺10m長辺15m、2×3スパンの長方形平面で、階高は2.5m建物高さは約16mであり、実大試験体と言って差支えない。その構造は、耐震壁や腰壁・袖壁・短柱・長柱の混在した、やや複雑な構造をしている。試験体総重量は約1,000tで、準備ヤードで建設された試験体は、曳家工事により約2週間かけて震動台上に設置された。写真3、写真4が震動台上の試験体である。



写真3 震動台上の試験体(南東面)

加震波には、兵庫県南部地震での神戸海洋気象台観測波の原波を選定し、最大加速度が試験体の長辺方向とほぼ一致するよう、南北軸を45度回転させた。事前の解析では、試験体はほぼ最大耐力付近まで変形し、終局状態にまで達するものと予想した。



写真4 震動台上の試験体(北東面)

1月13日の加震実験では、予想通り、試験体はかなりの損傷を受けることとなった。1階の腰壁付きの短柱は、写真5のようにせん断破壊を生じ、鉛直保持能力を失った。一方で腰壁の無い長柱は、両端が塑性ヒンジとなりながらも、鉛直荷重は支持していた。試験体中央部に位置する連層耐震壁も、1層脚部でせん断すべり破壊を生じた。一方で2階から上の構造体には、目視による大きな損傷は見られなかった。更に、1月16日には余震想定として、13日に実施した地震波の60%強度の加震を行い、試験体は倒壊寸前にまで至った。実験の終わった試験体は、損傷部を補修した後、再び曳家工事で準備ヤードに移され、解体された。

実験内容の詳細については、本誌別頁をご覧ください。



写真5 実験後のRC試験体

4) 地盤基礎震動台実験

地盤の液状化や杭基礎の破損など、地盤基礎構造物の地震での損傷は、大地震のたびに問題となってきた。しかし、目で見ることの出来ないという地下構造特有の問題から、それら破壊現象の原因と過程は十分に理解することができなかったのが実状である。このような基礎構造物にとって、世界最大の震動台である

E-ディフェンスは、その破壊現象を人工的に再現できる可能性の最も高い実験施設であると言える。この地盤基礎構造物の実験を行うために、E-ディフェンスには2つの土槽が整備された。一つは円筒形せん断土槽、もう一つは直方体剛体土槽である。

円筒形せん断土槽とは、写真6に示すように、直径8m、厚さ150mm程度の円筒形の鋼製リングを積み重ねて高さ6.5m程度にしたもので、鋼製リング間は摩擦抵抗の極めて小さいリニアスライダにより連結されている。このリングで構成される円筒型の容器の中に、人工的に地盤構造を再現する。この再現された地盤を震動台上で加震した場合、鋼製リング間には水平力を負担する機構がないため、水平力はすべて地盤構造によって負担されることになり、境界条件に左右されない地盤基礎実験が可能となる。地盤基礎実験の初年度となる2005年度は、土槽の性能試験を兼ねた乾燥砂による非液状化水平地盤における杭基礎の実験が実施された。入力地震波は木造実験と同じJR鷹取波である。加振後に一般の構造物では難しい杭の掘り出しを行い、杭頭から1mから1.5mほど下で曲げ変形を生じた鋼管杭を取り出すことで、杭の損傷状況を視覚的に捉えることに成功した。

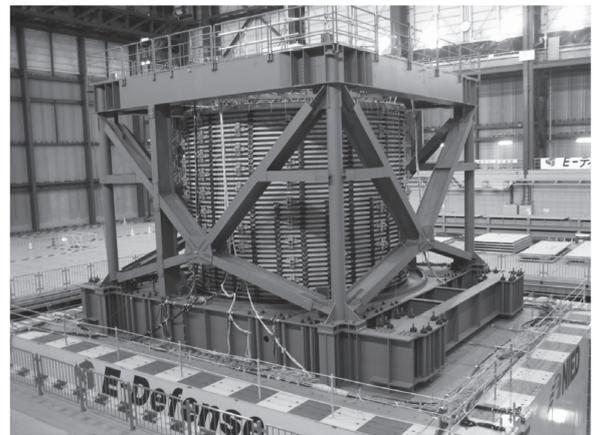


写真6 円筒形せん断土槽

もう一方の直方体剛体土槽は、護岸の側方流動などの地盤境界部の地震時の挙動の解明を狙った土槽である。この土槽の中に矢板護岸と地震で液状化を生じる飽和砂層を作成し試験体とした。この護岸と液状化地盤のセットにより、地盤が海岸方向に押し流される側方流動を再現することが出来る。地盤側には、鋼管杭基礎の構造物を設置し、液状化と側方流動による杭構造の損傷が観察できるようにした。

飽和砂層の液状化は極僅かの振動によっても生じてしまうため、加振はただ一回のみに制限される。所定の乾燥砂を導入された土槽は震動台にセットされた後、

真空飽和用の蓋を設置して設置地盤を飽和させる作業が行われた。実験に使われる地震波は、円筒形土槽の実験と同様のJR鷹取波である。実験後の直方体土槽を写真7に示す。左側の地盤が液状化して右側に向かって押し流され、そこに建つ構造物が大きな損傷を受ける結果となった。

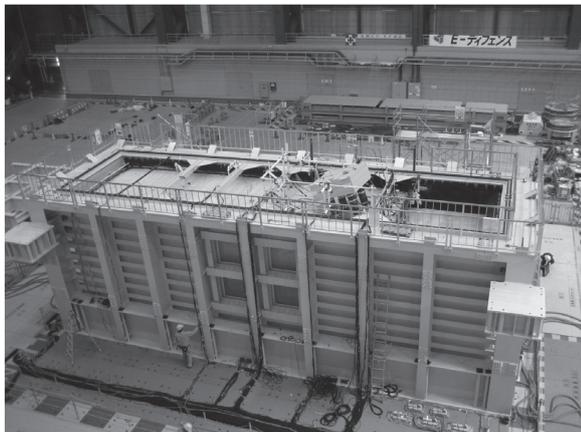


写真7 実験後の直方体剛体土槽

5. 2006年度の活用

表2 2006年度実験スケジュール

実験名	2006年度実験スケジュール											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
法定点検等												
施設貸与実験												
地盤基礎実験												
鉄筋コンクリート建物												
木造建物実験												
共同研究実験(兵庫県)												

1) 施設貸与実験

表2に2006年度の実験スケジュールを示すが、今年度も途切れることなく実験が予定されている。年度当初は、施設メンテナンスの後の6月下旬から7月末にかけて、2件の施設貸与実験が実施された。両者とも民間機関による住宅耐震の実大実験であり、当方としては施設の運転・計測に協力したところである。その内容については近々メディア等を通じて公表されるかもしれない。この施設貸与実験から判るように当施設は外部に対してオープンであるが、外部機関からの施設貸与の申し込みに対しては、防災科研が設置する利用委員会に諮り、その実験の目的・内容、E-ディフェンスを使用する必要性、安全計画の内容等について意見を伺い、最終的に防災科研が判断して貸与許可を与える手続きとなっている。今後とも是非活用いただきたい。なお、実験データの公開の有無は、施設使用料の割引に連動しており、今回の2件については一定の期間を経て公開する予定にある。

2) 大大特プロジェクトと兵庫県実験

大大特プロジェクト最終年度の実験として、再び、木造・RC・地盤基礎の実験が実施される運びである。

木造実験では、平成18年12月末から平成19年3月中旬にかけて、在来軸組構法木造住宅を使用した実験、および伝統構法木造住宅を使用した実験の2種類を実施する計画である。在来軸組構法木造住宅を使用した実験では、平成17年度に使用した試験体と同様の軸組を有する試験体を2体作成し、劣化の影響、基礎条件や耐力要素の配置低減の影響等を調査する予定である。一方、伝統構法木造住宅を使用した実験では、伝統構法の構造的な特徴の一つである柔床に着目し、柔床が耐震性能に与える影響についての検討を行う計画としている。

RC建物実験は、9月上旬から11月下旬にかけて行われる。ここでは耐震補強の検証をテーマとして、既存無補強試験体と耐震補強(外付鉄骨ブレース)試験体の比較実験を予定しており、この成果を、より有効な耐震補強法の開発につなげる予定である。試験体一体の質量は概ね600tを見込んでいる。

地盤基礎実験では、8月上旬から9月上旬にかけてと、11月下旬から12月下旬にかけて2つの実験を計画している。1つは、側方流動に伴う護岸とその背後杭基礎の実験として、今年度はケーソン護岸を対象とした実験である。もう1つは、水平地盤における杭基礎の実験として、飽和砂地盤における杭の損傷の進行過程の実験である。

年度末の3月下旬には、既に新聞等で報じられているが、兵庫県が主体となって長周期地震動を想定した耐震実験が行われる。当センター内では、「兵庫プロジェクト」と称しており、国内の自治体が主導で行う初めての建築物の耐震実験となる。兵庫県が、県民への防災意識の向上と防災施策への反映を意図した、非常に貴重な試みと捉えている。本実験は、兵庫県、神戸大学、防災科学技術研究所と共同で進めており、試験体の仕様等については現在進行中にある。

2006年度の実験研究は以上となっているが、これに加え、前年度の実験結果の詳細な分析を行った結果の発表も予定されており、視覚イメージだけではない、より科学的な知見に基づく耐震・防災性の向上へと、その成果は広まっていくはずである。

6. 2007年度以降の活用計画

表3に2007年度の実験スケジュール案を示す。現段階では、当該年度の予算が確定していないことと、外部研究資金の獲得、施設貸与依頼、共同研究の申し込み等が未定のため計画が流動的である。しかしなが

表3 2007年度実験スケジュール(案)

実験名	2007年度実験スケジュール(案)											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
法定点検等												
施設貸与実験(未定)												
鉄骨建物実験(予定)												
橋梁構造実験(予定)												
共同研究実験(予定)												

ら、2007年度以降は、新たに鉄骨建物と橋梁の実験が予定されており、米国のNEESとの連携を見据えつつ、防災科研では既にその準備研究に着手している。橋梁耐震実験では、2007年度と2008年度に、橋梁の要素(橋脚)実験を計画しており、2009年度以降に橋梁の全体系としての進行性破壊実験を計画している。また、鉄骨建物の耐震実験では、2007年度に完全崩壊実験を、2008年度に免震・制振実験計画している。併行して、2007年度から2009年度にかけてイノベティブシステム 実験を推進する計画である。

以上の実験研究の推進以外に、震動台から生み出されるデータの統合的な格納・蓄積システム、破壊までを模擬する数値震動台の計画も進められている。今後どのような成果がこの震動台から生み出されるか、期待していただきたい。

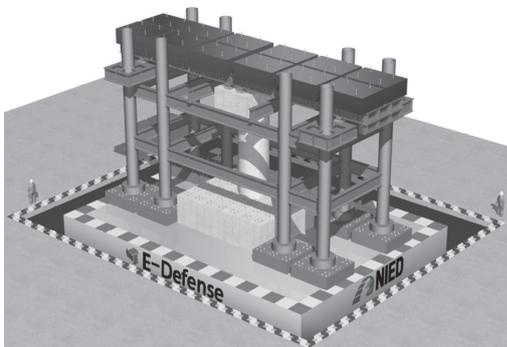


図3 橋脚破壊実験イメージ図

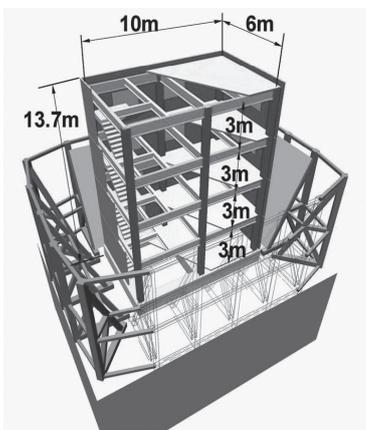


図4 鉄骨構造建物破壊実験イメージ図

7. まとめ

震動台建設過程では、その従来に無い規模と複雑な機構のため、施設の稼働が1年以上遅れるのではないかと危惧も噂されていた。しかしながら、2005年度のE-ディフェンスは、運用開始初年度にもかかわらず大きなトラブルもなく、大規模実験を予定通り成功させ、その成果を公知とすることができた。国民の防災意識を高める上でもE-ディフェンスは少なからぬ役割を果たしているといえよう。

施設建設の過程では、まずは確実に動く建設を目指したことが現在の稼働に結びついたと考えられるが、今後の運用では、更に高精度な実験や高度な技術を用いた実験研究の要求により施設機能が注目されると考える。現状に甘んじることなく、それらに応じられる施設機能の向上を、実験研究の推進と共に進めなくてはならない。

また、本施設の今後の実験研究の活用は、建築・土木構造物を始めとし、防災性向上が必要な様々な研究対象にもその展開が見込まれるものである。今後様々な分野の研究者、研究機関の横断的な連携がこの施設を介して進むことを懇望する次第である。

最後となるが、本施設稼働の成功は、防災科研を所管する文部科学省のご指導、技術検討に関わる委員会関係諸氏のご尽力、施設建設に関わったメーカー及び防災科学技術研究所の関係各位と表舞台には登場しない多くの方々のご支援による賜物である。ここに記して謝意を表すものである。

なお、本稿で紹介した実験の様子や更に詳しい情報は、防災科研のWebサイトより自由にご覧いただくことが出来る。下記URL まで是非アクセスいただきたい。

<http://www.bosai.go.jp/hyogo/index.html>

RC建築構造物の振動破壊実験

壁谷澤寿海

／松森 泰造

●東京大学地震研究所

●防災科学技術研究所

1. はじめに

独立行政法人防災科学技術研究所は、兵庫県三木市に「実大三次元震動破壊実験施設（通称：E-Defense）」を完成させ、2005年度より本格的な運用に入っている。

E-Defenseは世界最大の3次元振動台であり、振動台床面積20m×15m、試験体の最大許容高さ20m、最大搭載質量1,200tである。1,200t搭載時の振動台の最大加速度、速度、変位は、水平方向9.0m/s²、2.0m/s、1.0m、鉛直方向15.0m/s²、0.7m/s、0.5mである。したがって、E-Defenseを用いることにより実大の中低層鉄筋コンクリート（RC）造建物を崩壊させることが可能である。

文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特）II. 震動台活用による耐震性向上研究」¹⁾では、E-DefenseでRC建築物を対象に最初に実施する振動台実験の試験体として実大6層耐震壁フレーム構造を選択し、2006年1月に加振実験を実施した。実験の主な研究目的は、①動的な外力による構造物の崩壊挙動、②耐震壁とフレーム構面のせん断力負担、③構造物の損傷評価、④シミュレーション解析のためのデータ取得、である。①は即ち、静的な外力によって曲げ降伏型に設計された構造物が、動的効果によるせん断力の上昇により層崩壊に至ることを実験的に再現しようとするものであり、②として、耐震壁の負担せん断力をロードセルで計測するという実大実験として未踏の試みを行っている。また、部材の耐力低下、層降伏

などを含む崩壊過程を最新の解析手法によって再現可能であるかどうかを検証することも意図している。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体は、長手方向（Y方向）3スパン、その直交方向（X方向）2スパンの6階建てRC耐震壁フレーム構造とした。試験体の概観を写真1、基準階伏図と軸組図を図1に示す。

1体の試験体の実験結果からより多くの知見を得るため、性質の違う複数の構面を混在させ、異なる損傷、破壊性状が観察できるような計画とした。Y方向は、X₂通り中央に連層耐震壁、X₁通り大梁に腰壁を配置し、腰壁の柱際に構造スリットは設けていない。X方向は、Y₁、Y₄通りの中央に連層の袖壁と間柱を配置した。各階の外周部には片持ちスラブを設けた。

試験体の重量は、RC躯体の体積の計算値に比重2.4を乗じて算出した。各階とも1.25MN、1層柱の中央高さより上の合計は7.50MN、基礎梁および鉄骨計測架構を含む振動台上の総積載重量は9.70MNである。各階重量を片持ちスラブを含まない基準階床面積10m×15mで除した単位床荷重は、各階8.3kN/m²である。

2.2 試験体の設計

試験体は1970年代当時の一般的な構造設計手法により設計されたRC建物を想定し、1975年版のRC規準²⁾および1970年代当時の建築基準法・同施行令に準じて構造設計を実施した。各部材の断面算定は許容応力度設計に基づき行い、次のように仮定した。(a)基礎は固定とする。(b)Y₁、Y₄通り袖壁は構造部材として考慮する。(c)X₁通り腰壁は自重のみを考慮、剛性および耐力への寄与は無視する。(d)荷重はRC躯体と鉄骨計測治具類の重量を考慮し、仕上げ荷重および積載荷重は考慮しない。

コンクリートは設計基準強度F_cを18 N/mm²とした。ただし、現場水中養生したテストピースによる加振当日の圧縮強度試験結果は、1階立ち上がりで31.7 N/mm²、上層ほど低く、R階では22.8 N/mm²であった。

柱は、全層全柱とも断面寸法を500×500mm、配筋

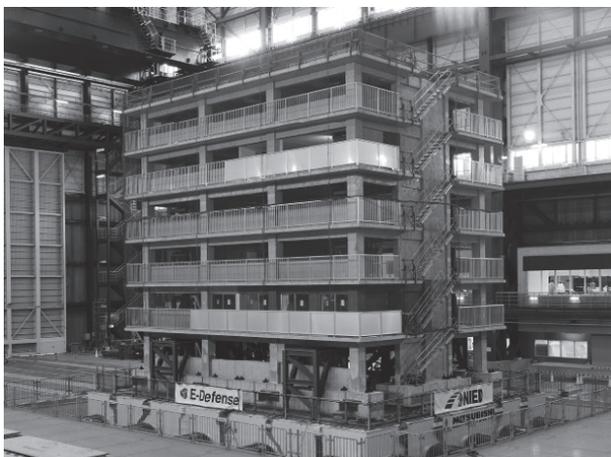


写真1 実大実験 全景

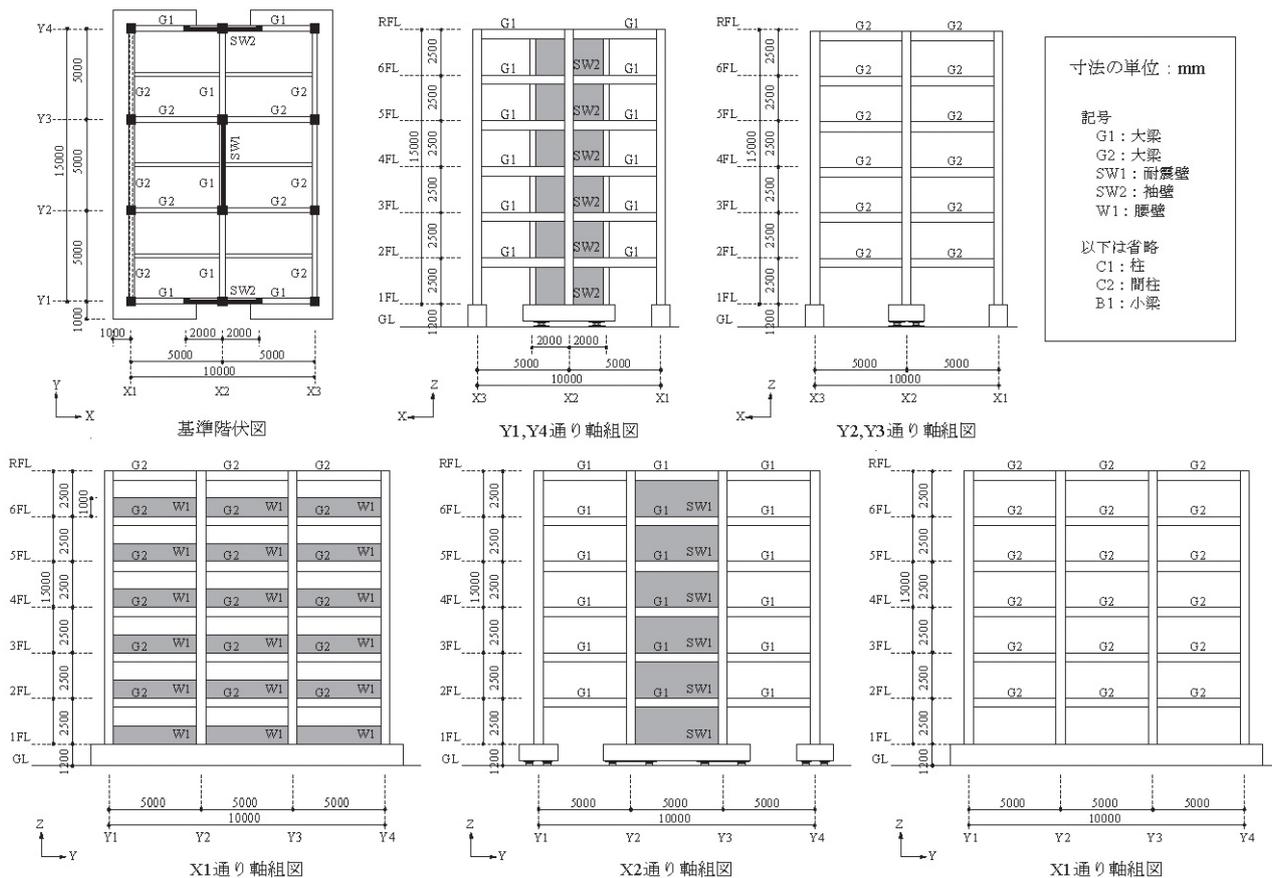


図1 試験体の基準階伏図と軸組図 (RC部分)

は主筋を8-D19、帯筋を2-D10@100mmとした。耐震壁は、厚さ150mm、縦横共D10@300ダブル配筋とした。梁は、幅300mm、せい500mmであり、記号G2の4階以上を除き、上端主筋3-D19、下端主筋2-D19、あばら筋2-D10@200mmとした。^{3) 4)}

2.3 試験体の算定強度

各節点における柱梁の曲げ終局モーメントの比較による試験体の崩壊機構は、梁端の曲げ降伏と連層耐震壁脚部の曲げ降伏が先行する全体降伏形であった。また、外力分布を逆三角形とし、仮想仕事法により算定した1層の保有水平耐力は、X方向で2.91MN (ベースシア係数0.39)、Y方向で3.60MN (同0.48)であった。節点振分け法により算出したメカニズム時の負担せん断力に対する、柱は荒川min式、耐震壁は広沢式によるせん断終局強度の比は、1層短柱で1.25 (柱の内法高さを腰壁高さ分減じて扱った場合)、耐震壁で1.37であった。

2.4 基礎の形式

連層耐震壁の脚部における応力を計測するため、 X_2 通り連層耐震壁および Y_1 , Y_4 通り袖壁下の基礎梁と振動台テーブルの間にロードセル (3分力計) を設置した。また、 X_1 , X_3 通りの基礎梁は振動台テーブル上に直接固定した。

2.5 計測計画

試験体各部位の変位、絶対加速度、部材の変形、鉄筋の歪み、ロードセルによる応力など、合計888成分の計測を行った。サンプリング周波数は1 kHzとした。なお、本稿で紹介する結果の使用データは、2階床変位、各階床の重心位置の絶対加速度などのみである。

2.6 試験体製作・実験工程

試験体の製作は、実験棟屋外にて2005年7月中旬から開始し、同年11月中旬に竣工した。その後、試験体を振動台テーブル上へ設置するために、試験体基礎部に取付けたブラケットを合計32台の油圧ジャッキによりジャッキアップし (写真2)、基礎下に



写真2 ジャッキアップ



写真3 移動中の試験体

レールを敷き込み、その上をコロ曳きして移動させた(写真3)。試験体移動工事は、試験体にダメージを与えることがないように約1ヶ月の工期をかけて行われた。同年12月中旬から翌年明けにかけて計測関係などの準備作業を行い、加振実験は2006年1月7日から16日まで行った。1月13日および16日は、プレス・一般公開および研究者限定公開を行い、それぞれ約900人、300人の来場者があった(写真4)。



写真4 公開実験の様子

3. 実験結果⁴⁾

3.1 加振内容

加振実験では、気象庁神戸海洋気象台観測波(1995)を用い、水平2方向+鉛直方向の3方向加振とし、振幅倍率をと順次増大させて入力した。最終的に破壊させる方向が試験体の長手方向(Y方向)となるよう、原波を水平45度回転し、N45W方向をY方向に、N45EをX方向に入力した。加振一覧を表1に、振幅倍率100%時のX,Y方向入力加速度を図2に示す。

一般に振動台実験では試験体と振動台の相互作用による入力波の再現性低下が懸念される。本実験では、「繰り返し入力補償法」と呼ばれる一般的な加振制御方法を応用し、比較的高い精度で再現された。

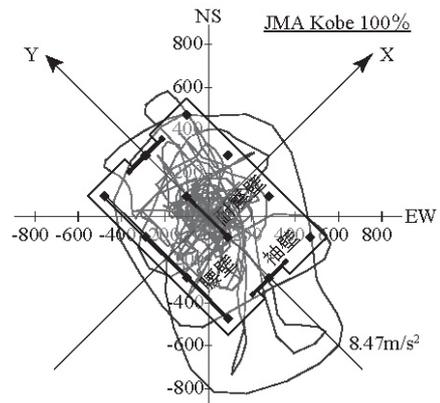


図2 振幅倍率100%時の入力加速度

3.2 破壊経過

各加振による試験体の損傷経過および被災度区分判定結果⁵⁾を表1に併せて示し、加振5終了時の破壊状況を図3および写真2に示す。

加振4においては、柱端・梁端に曲げひび割れが多数発生し、1層腰壁付き短柱の内柱2本(柱X₁Y₂、X₁Y₃)の腰壁上端付近に曲げひび割れが生じた。1層耐震壁にせん断ひび割れが発生し、側柱脚部で主筋の降伏が確認された。梁主筋の降伏は見られないが、損傷は全層に分散し、全体降伏形の様相を呈した。

加振5において、1層腰壁付き短柱の内柱2本が短柱部分でY方向にせん断破壊した。1層耐震壁では斜

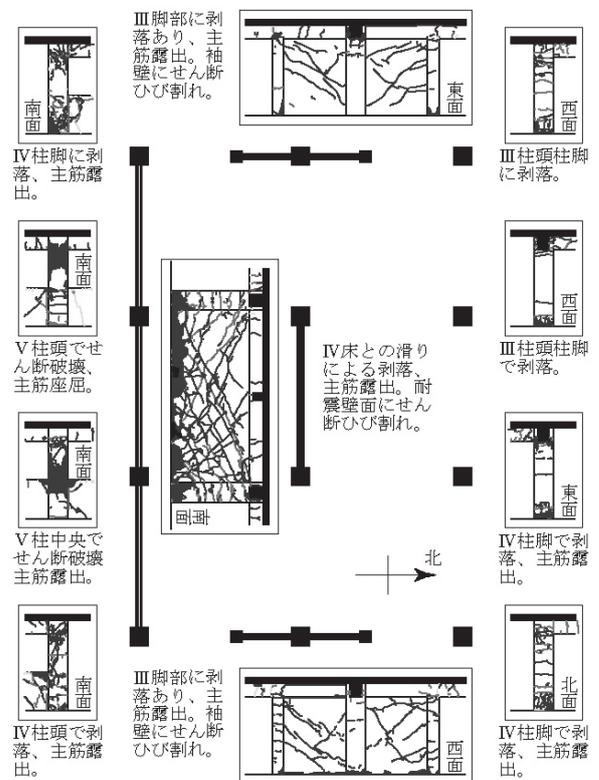


図3 加振5後の損傷状況(1層)

表1 地震波入力加振結果

加振番号	地震波名称	振幅倍率	「被災度区分判定結果」損傷概要	最大応答層間変形角	
				X方向	Y方向
1	気象庁 神戸海洋気象台 観測波 (1995)	5%	「無被害」	1/3600	1/5400
2		10%	「軽微」1層柱脚曲げひび割れ。	1/1000	1/1900
3		25%	「軽微」各階梁端曲げひび割れ。	1/480	1/630
4		50%	「小破」1層耐震壁せん断ひび割れ。	1/220	1/270
5		100%	「大破」1層崩壊型。1層短柱せん断破壊、 1層耐震壁脚部せん断すべり破壊。	1/52	1/25
6		60%	「倒壊」1層長柱曲げ圧縮破壊、崩壊寸前。	1/57	1/17



(1) 1層 X_1Y_2 短柱
めのせん断ひび割れが進展
(2) 1層 X_1Y_3 短柱



(3) 1層 $X_2Y_{2,3}$ 耐震壁

写真2 加振5終了時の破壊状況

し、壁脚部ではせん断すべり破壊に至った。損傷は1層に集中した。加振後も試験体は自立し、全体的な鉛直支持能力は保持していた。

加振6において、加振5でせん断破壊した短柱は鉛直支持能力が喪失するまで破壊が進行した。また短柱 X_1Y_1 は柱頭側で接合部破壊し、短柱 X_1Y_4 は腰壁端部の破壊および腰壁上端付近での柱のせん断破壊に至った。耐震壁は1層脚部でのすべりが顕著に生じる性状を示した。 X_3 通り長柱は全て1層脚部で曲げ圧縮破壊した。加振後の試験体は崩壊寸前だが辛うじて自立している状態であった。

3.3 層せん断力-層間変位関係

1層せん断力と2階変位の関係を図4に示す。ここで、層せん断力は、各階床の平面重心位置の応答加速度と各階質量から求まる慣性力を累加して算出し、減衰力は無視した。2階変位は、XY両方向とも、振動台上に設置した鉄骨計測架構に対する1階天井(2階床下面)の柱 X_2Y_1 近傍における相対変位とした。

2階変位は、加振4以前では剛性が低いX方向の方が大きく、加振5以降ではX方向とY方向の大小関係が逆転している。

Y方向では、1層最大応答せん断力は加振4で4.93MN、加振5で7.41MNであった。梁が未降伏でメカニズムを形成していない加振4でも既に保有水平耐力の算定値を上回っており、加振5ではさらに増大している。これらは算定精度誤差だけでなく、外力分布、歪み速度、上下動など本質的要因によるものであり、実験データから定量的に要因を分析している。

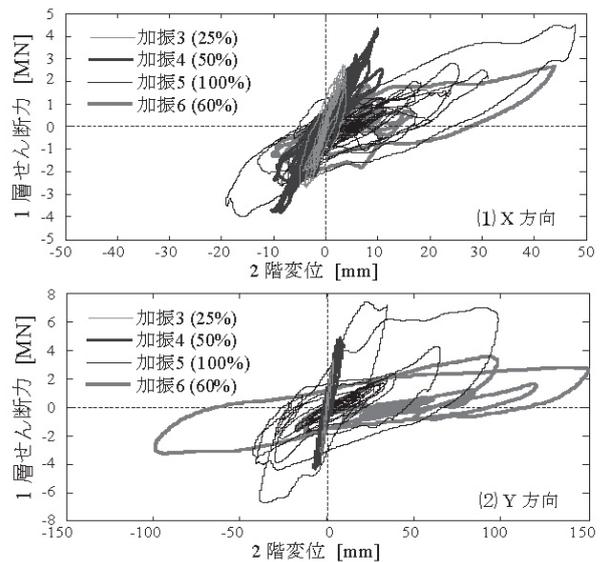


図4 1層せん断力-2階変位関係

4. まとめ

世界最大の三次元振動台E-Defenseにより実大6層RC耐震壁フレーム構造の振動台実験を行った。柱や耐震壁のせん断終局強度はメカニズム時負担せん断力の計算値を上回っていたが、強震動加振において、試験体は1層の腰壁付き短柱と耐震壁のせん断破壊による層崩壊に至った。1層応答せん断力は保有水平耐力算定値を大きく上回っており、動的な外力分布や耐震壁と柱の負担せん断力などに関する実験データによりその要因を分析中である。

参考文献

- 1) 文部科学省研究開発局、独立行政法人防災科学技術研究所：大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ震動台活用による建造物の耐震性向上(平成16年度)研究成果報告書, 2005.5.
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説1975
- 3) Toshimi Kabeyasawa, Taizo Matsumori, Hideo Katsumata, and Kazutaka Shirai, Design of the Full-Scale Six-Story Reinforced Concrete Wall-Frame Building for Testing at E-Defense, The First NEES/E-Defense Workshop on Collapse Simulation of Reinforced Concrete Building Structure, Berkeley, July 6-8, NIED and PEER, 23-46, 2005.
- 4) 松森泰造、壁谷澤寿海、白井和貴、勝俣英雄：鉄筋コンクリート造実大6層壁フレーム構造の震動実験概要、JCI年次大会論文集、2006
- 5) 財団法人日本建築防災協会：震災建物等の被災度判定基準および復旧技術指針(鉄筋コンクリート造編)、2005.

謝辞

実験実施にあたり、大大鉄筋コンクリート建物実験委員会関係各位(倉本洋(豊橋技科大)、勅使川原正臣(名古屋大)、福山洋・斉藤大樹(建築研)、田中仁史・河野進(京都大)、勝俣英雄・白井和貴(大林組)、五十嵐克哉・鈴木紀雄・田上淳(鹿島建設)、長嶋一郎(大成建設)、長谷川俊昭・熊谷仁志(清水建設)、真田靖士(東京大)、陳少華・加藤敦(防災科研)(敬称略))には数多くのご助言をいただいた。実験時の試験体損傷調査では、東京大学地震研究所、豊橋技術科学大学、京都大学、建築研究所、(株)大林組および鹿島建設株式会社の方々にご協力いただいた。ひび割れ図の作成は、豊橋技術科学大学北倉友佳氏・濱田匡利氏による。試験体製作は大成建設株式会社、計測は震動実験総合エンジニアリング株式会社に請け負っていただき、また、実験終了後の撤去移動のための試験体の応急補強は、構造品質保証研究所株式会社のSRF工法によった。ここに記して謝意を表します。

五重塔5分の1模型の振動実験 その2

藤田 香織／千葉 一樹／岩崎英一郎

●首都大学東京 ●東京都立大学 ●信州大学

1. はじめに

2004年度に引き続き、2006年に伝統的木造構法五重塔1/5縮小模型を用いた振動台加振試験及び静的水平加力試験を行った(2004年度の結果概要は本誌等^{1~8)}で報告)。縮小模型を対象とした実験ではあるが、伝統的木造構法五重塔の大変形に至る加振及び加力結果を測定し、その挙動を把握することが出来たので、ここに実験内容と結果の一部を報告する。なお、本報告は既報^{9,10)}をもとに一部加筆修正したものである。

2. 研究の背景と目的

伝統的木造構法による五重塔は地震で倒壊した記録がないため¹¹⁾、その耐震性に関して様々な論考や数値解析が行われてきた^{12~21)}など。実験を伴う定量的な研究は大正時代から主に微動測定を中心に行われ^{22~30)}、伝統的木造構法五重塔の基本的な振動特性はある程度、明らかになってきている。しかし、塔のような高層建築の微動測定では風圧力の影響が顕著であり、変位も微妙範囲であることなどにより、既往の実験的な研究結果からは、地震時に優れた特性を示す具体的な要因は明らかにされてはいない。最近では地震観測も行われており^{31~33)}、1994年9月5日紀伊半島沖地震の観測結果も報告されているが³²⁾。当該観測結果の最大入力加速度は122gal、最大応答変位は塔身頂部で15mm程度であり大変形とはいえない。木質構造は強い非線形性を示すため、微小変位時の挙動から大変形時の挙動を推定することは困難である。(なお、既往の諸研究については^{34~35)}に詳述。)

本研究は、伝統的木造構法五重塔の耐震性能を定量的に検証するため、特に地震入力による大変形領域での振動特性を明らかにすることを目的としている。

3. 実験概要

独立行政法人防災科学技術研究所内の大型振動台にて振動台加振試験及び、静的水平加力試験を2006年3月~4月に行った。本年度は、伝統的木造構法五重塔の心柱と相輪がどのようにその振動特性に影響を及ぼしているかを考察することを目的に、2004年度に用いた試験体の一部(心柱と相輪)の形状を変更して同様の実験を行った(写真1、図1、表1参照)。実験方

法等については^{4)~6)}に詳述。実験は独立行政法人防災科学技術研究所、及びNPO木の建築フォーラムが主催し、表2に示した研究組織で行った。

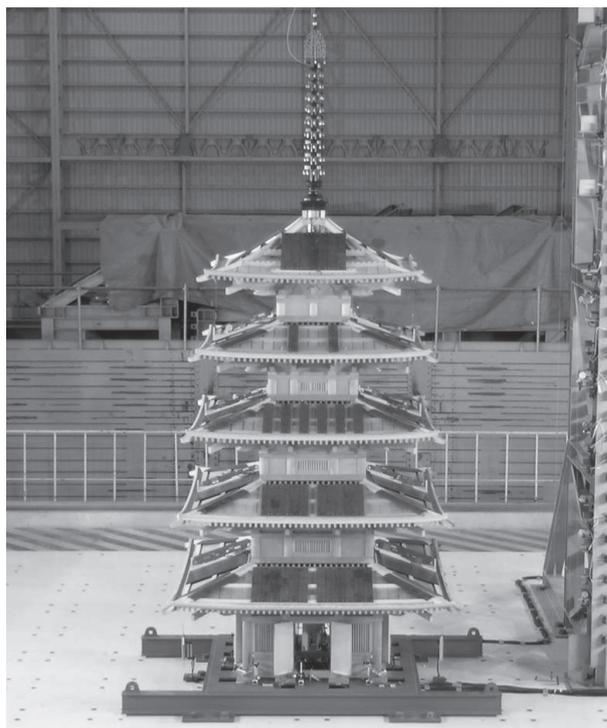


写真1 試験体設置風景

4. 試験体

実験に用いた五重塔は飛鳥様式の法隆寺五重塔を範として、宮大工・宮崎忠仍棟梁により実物同様に精巧に製作された1/5模型である。総高さ約6.6m、塔身高さ4.7m、初層平面1.3m四方である。木材はベイヒバ(カナダ産)を使用。試験体組立時に計測した試験体重量は、木部合計約10kN、これに屋根(鍾)荷重を加えた総重量は約20kNであった。

2004年に用いた試験体は心柱を礎石(花崗岩)上に設置し、礎石と心柱はダボで接合した。2006年の実験では、まず心柱を取り外し、相輪を支える目的の心柱先端部分を4層上に設置した(心柱なし・相輪あり)。その後、相輪と心柱の先端部分を撤去し(心柱なし・相輪なし)、最後に初重天井上に心柱を設置した(心柱初重・相輪あり)。

表1 実験の進行

実験時期	心柱設置位置	相輪
2004.11 ~ 12	礎石上	あり
2006.3.15 ~ 3.30	なし(4層上)	あり
2006.3.31 ~ 4.4	なし	なし
2006.4.5 ~ 4.19	初重上	あり

表2 研究組織(2006年4月現在)

坂本 功	慶應義塾大学	教授
河合直人	建築研究所	上席研究員
箕輪親宏	防災科学技術研究所	流動研究員
腰原幹雄	東京大学生産技術研究所	助教授
花里利一	三重大学	教授
前川秀幸	職業能力開発総合大学校	講師
道場信義	職業能力開発総合大学校	講師
杉本健一	森林総合研究所	チーム長
藤田香織	首都大学東京大学院	准教授
千葉一樹	首都大学東京 藤田香織研究室	博士課程
富岡祐一	首都大学東京 藤田香織研究室	修士課程
岩崎英一郎	信州大学 五十田博研究室	修士課程
伊藤佑介	三重大学 花里利一研究室	学部4年生
小林康太	三重大学 花里利一研究室	学部4年生
徳広京士	職業能力開発総合大学校 松留慎一郎・前川秀幸研究室	学部4年生
・画像計測		
藤田 聡	東京電機大学	教授
新津 靖	東京電機大学	教授
古屋 治	東京都立工業高等専門学校	助教授

5. 実験方法

各試験体形状に対し、表4に示す方法で実験を行った。振動台加振試験を行う前日に、反力柱を用いて静的水平加力試験を行った。振動台加振試験には、表4に示す加振波を用いた。地震波加振を行う際には、試験体が1/5大模型であることを考慮し、時間軸を1/3に調整した入力波も用いた(時間軸調整に関しては⁴⁾に詳述)。

計測は振動台14Ch、変位計66Ch、加速時計33Ch、歪みゲージ10Ch、合計約120Chを用いて行った。なお、変位は試験体各部の相対変位及び計測用鉄骨架台からの絶対変位を接触型変位計により計測した。データは2kHzで収録した後、200Hzに間引いて使用した。

表3 試験体重量

部位	2006年計測試験体重量(kN)			2004年 試験体
	試験体	積載	合計	
五層	1.32	1.51	2.83	1.50
四層	1.28	1.00	2.28	1.63
三層	1.76	1.77	3.53	1.85
二層	1.82	2.42	4.24	1.90
初層	2.73	3.03	5.76	2.69
合計	8.92	9.73	18.65	9.57

部位	設置位置	重量(kN)	実験時期(年)
相輪	5層上	0.36	2004、2006
心柱	礎石上	0.48	2004
	初重天井上	0.36	2006
	4層上	0.06	2006

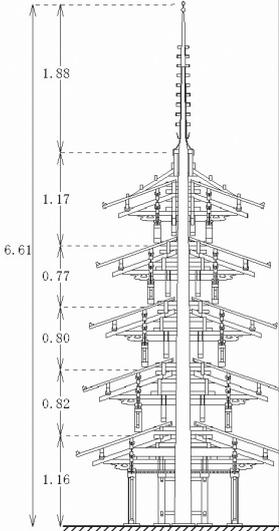
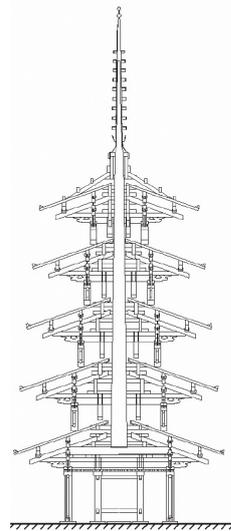
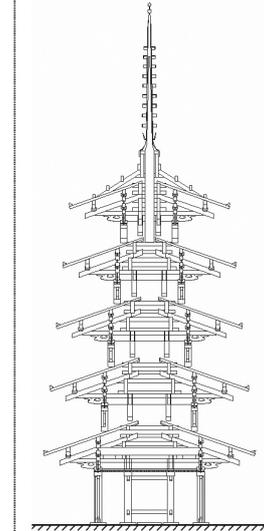
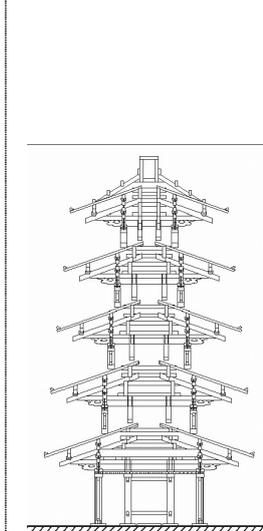
試験体 形状					
	心柱	礎石立ち	初重天井上	なし(4層上)	なし
	相輪	あり	あり	あり	なし
	総重量	20.14 kN	19.37 kN	19.07 kN	18.65 kN

図1 試験体形状

表4 実験方法と内容

実験内容	緒言	入力最大値
微動測定	200Hz	
静的水平加力試験		
頂部1点载荷	5層頂部引張	
5点载荷	各層柱頭引張	0.88kN×5層
振動台加振試験		
Step波	10s間隔、矩形波	1mm
Random波	0.3-10Hz	50gal
Sweep波	正弦波1-10Hz	30gal
JMA神戸波	時間軸1/1	10,40,60*mm
NS	時間軸1/3	5,20,30*mm
JMA小千谷波	時間軸1/1	20,80,120*mm
EW	時間軸1/3	10,40,60*mm
津観音040925 ³¹⁾	時間軸0.7	125gal
Step波		1mm
Random波	0.3-10Hz	50gal
微動測定	200Hz	

*心柱初重天井上・相輪ありの試験体でのみ実施した。

6. 静的水平加力試験

6.1 実験方法

塔身頂部を加力点とし、反力柱からロードセルを介して静的水平加力試験を行った。塔身頂部高さ約4.6mの水平変位と荷重から荷重変形関係を求め、2004年度の実験結果と併せて図2に示した。実験は、水平変位約100mm (1/45rad.)まで行った。ただし、心柱なし・相輪なしの試験体では5層の浮上りが顕著に観測されたため、約1/80rad.で実験を終了した。

6.2 荷重変形関係

水平変位約30mm (1/150rad.)までは4種類の試験体ともほぼ等しい曲線を描いている。30mm (1/150rad.)より変位が増大すると、心柱がない試験体では荷重が1.5kN (Co=0.075)のまま一定値を示すのに対し、心柱がある試験体では耐力が上昇していることが分かる。心柱がある場合、水平変位約100mm (1/45rad.)、2.5kN (Co=0.125)を得たが、耐力の低下は認められなかった。

6.3 水平変位

荷重変形関係より、1/150rad.前後で心柱の有無により挙動が異なることが分かった。頂部の水平変形角が1/300rad.1/150rad.1/80rad.の変形状態を図3、4に示す。心柱がある場合(図3)では、塔身は曲げ変形、心柱はほぼ剛体的に転倒しており、1/150rad.までは塔身頂部と心柱の間に相対変位が認められる。心柱がない場合(図4)、1/150rad.程度までは塔身の曲げ変形は、心柱がある場合と同様であるが、水平変位が増大するに伴い、5層の水平変位が著しく増大している

ことが分かる。心柱がない場合には5層屋根の浮上りが(写真2、3)が目視からも顕著に認められたことから、1/150rad.以降の水平変位は加力点近傍層の転倒であると考えられる。

6.4 静的水平加力試験結果まとめ

心柱と相輪の有無が五重塔の水平抵抗機構に及ぼす影響を静的水平加力試験(塔身頂部1点载荷)の結果をもとに考察した結果、以下の結論を得た。

- ① 水平変位が小さい範囲(本実験では1/150rad.以下)では、心柱・相輪の影響は認められない。
- ② 1/150rad.、1.5kN (Co=0.075)以上の加力では、心柱がある場合は耐力が上昇した。
- ③ 心柱がない場合は、加力点近傍層の転倒・浮上りに伴い耐力が一定(1.5kN)に止まったと考えられる。

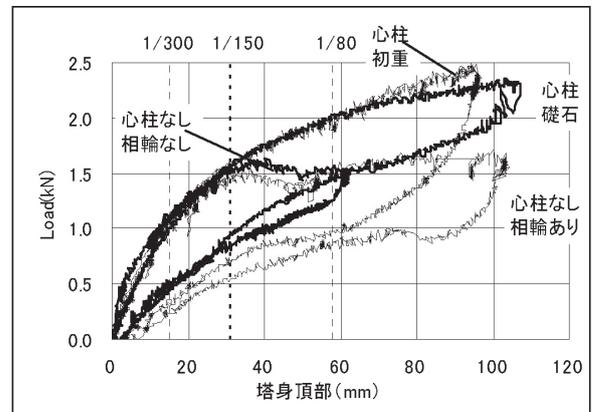


図2 荷重変形関係(塔身頂部静的水平加力)

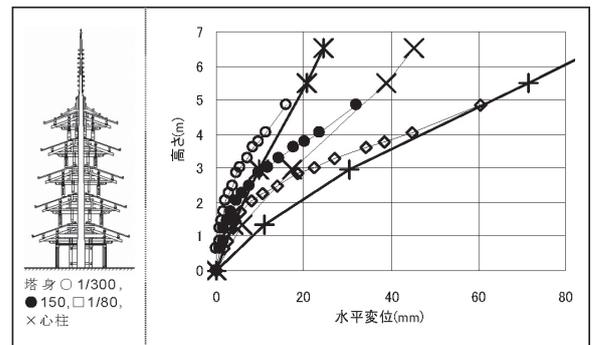


図3 水平変位図：心柱礎石立・相輪あり

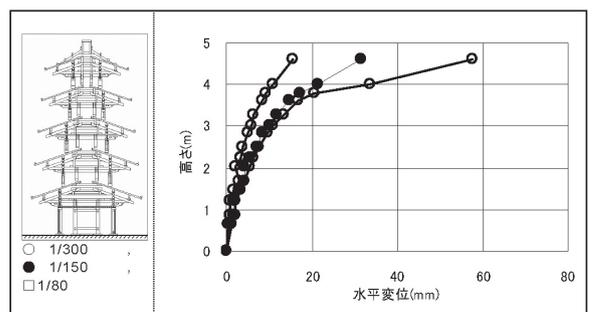


図4 水平変位図：心柱なし・相輪なし

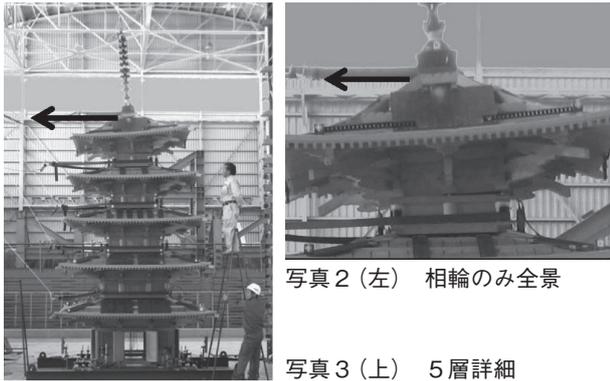


写真2 (左) 相輪のみ全景

写真3 (上) 5層詳細

7. 振動台加振試験

7.1 計測最大値

各試験体間で共通の加振波のうち最も大きい応答加速度を計測したもののうち、JMA神戸NS (入力変位最大20mm、時間軸1/3) の計測最大値を表5に示す。(心柱礎石上形式では、同波を複数回入力したため、他の試験体と最も近い状態の結果No.62を示した) 入力加速度約900galに対して、塔身頂部の最大加速度応答倍率は、心柱ありが約1.0、ない場合は約1.3倍であり、心柱がある方が応答加速度は低い傾向が認められる。しかし、塔身頂部の応答変位は必ずしも低減されている訳ではない。今後は、複数の加振波・変位レベルを対象に更に検討を行う必要がある。

7.2 応答加速度波形

図5には、上記の最大値を記録したJMA神戸波NS (時間1/3、変位20mm) による各層の応答加速度波形および振動台の入力加速度波形の主要動付近を示した。計測位置は、図6を参照。塔身(図5上)の応答加速度は各層で少しずつ位相がずれ、塔身頂部(A6)は初層とは約180°振動台とは約90°の位相差がある。一方、心柱(図5下)は、振動台とはほぼ同位相・同振幅で振動していることがわかる。

7.3 振動特性と最大変位等

心柱礎石立・相輪あり形式を例に、基礎的な振動特性を示す¹⁰⁾。図6は振動モードの例であり、図7は振動台の絶対加速度を入力、各層の絶対加速度を出力とした伝達関数から読み取った一次固有振動数と塔身頂部の最大変位の関係である。一次固有振動数は応答変位の増加に伴い、入力波に依存せず対数関数的に低下する傾向が認められる。微動測定時は2.7Hzであったが、水平変位150mmでは1.2Hz (0.44倍、剛性は0.20倍) に低下しており、強い非線形性を示している。線形1自由度系の伝達関数との二乗平均誤差が最小となるようにフィットさせて求めた減衰定数と最大変位の関係を図8に示す。1~6%に分布し、水平変位による明確な傾向は認められない。

表5 JMA神戸NS (時間1/3, 変位20mm) 計測最大値

試験体形状	相輪	塔身頂部			
		加速度 gal	加速度 gal	加速度 応答倍率	変位 mm
礎石上	あり	954	934	0.98	69.8
初重上	あり	942	959	1.02	60.0
なし	あり	909	1248	1.37	65.0
なし	なし	902	1109	1.23	66.6

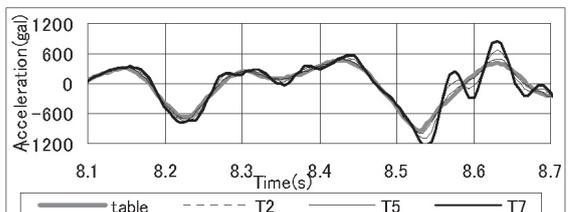
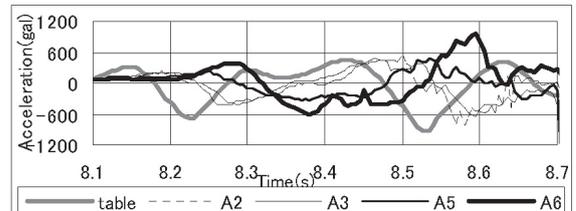


図5 応答加速度波形(心柱初重上・相輪あり)

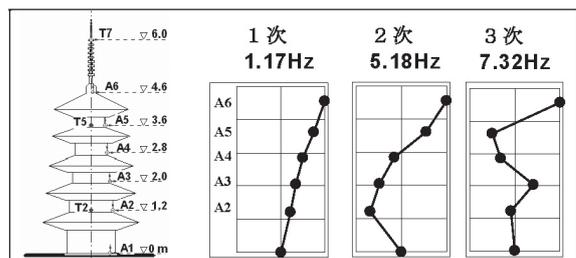


図6 振動モード (JMA 神戸 NS 時間軸 1/3, 40mm)

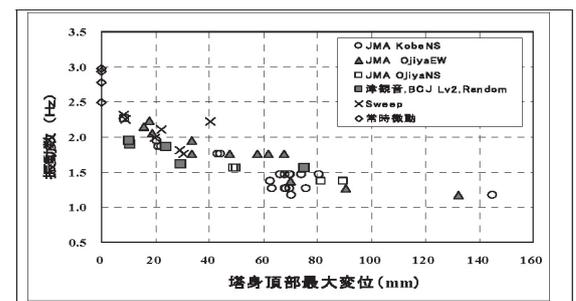


図7 一次固有振動数と塔身頂部最大水平変位

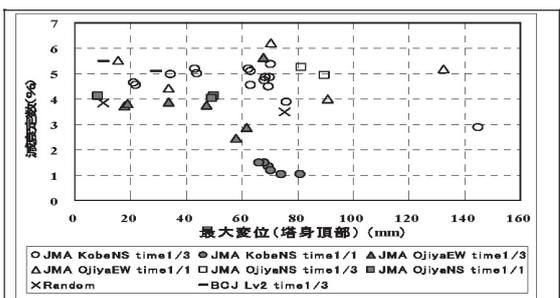


図8 減衰定数と塔身頂部最大変位の関係

8. まとめ

伝統的木造構法五重塔の1/5大模型を対象とした静的水平加力試験及び振動台加振試験結果の概要を速報的に報告した。静的水平加力試験からは変位1/150radを超えると、心柱が塔の水平変位を抑制する効果があることが明らかになった。強震下で心柱と塔身は位相差を持って振動することが分かったが、塔全体に及ぼす影響については今後更に検討が必要である。一次固有振動数は水平変位の増大に伴い低下し、150mmで微動時の0.4倍を示した。一次減衰定数は1～6%の間に分布し、水平変位だけでなく相関のある物理量は見いだすことができなかった。

参考文献

- 1) 河合直人・箕輪親宏：五重塔5分の1模型の振動実験、日本地震工学会誌1号、2005年1月
- 2) 藤田香織・千葉一樹：技術情報・五重塔1/5模型振動実験及びシンポジウム、NPO木の建築・第11号、pp.24-31、NPO木の建築フォーラム、2005年4月
- 3) 河合直人・藤田香織・千葉一樹：五重塔を揺らす2004報告、月刊消防・5月号、pp.67-70、東京法令出版、2005.5
- 4) ～6) 河合直人・箕輪親宏・藤田香織・他：五重塔の耐震性に関する縮小模型実験その1～3、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.2005年8月
- 7) 五重塔を揺らす2006シンポジウム資料、NPO木の建築フォーラム、pp.35-114。2006年4月
- 8) Sakamoto Isao・Kaori Fujita・Kazuki Chiba：Recent Studies on Seismic Performance of Traditional Timber Pagodas in Japan, International Conference on Reconstruction of the Hwangnyongsa Temple, pp.281-312, Korea, Gyeongju-si, 2006.4
- 9) 藤田香織・千葉一樹・河合直人他：五重塔の耐震性に関する縮小模型実験、その5、日本建築学会大会学術講演梗概集、2006年8月
- 10) 千葉一樹・藤田香織・他：伝統的木造構法五重塔1/5模型の振動台加振実験結果の概要と変位依存性、日本建築学会構造系論文集(投稿中)
- 11) 藤田香織・大山瑞穂他：伝統的木造五重塔の振動特性に関する研究、第11回日本地震工学シンポジウム, CDR 2002.11
- 12) 真島健三郎：地震と建築、丸善、1930.6
- 13) 佐野利器・谷口忠：耐震構造汎論。岩波全書30、1934
- 14) Katsutada SEZAWA・Kiyoshi KANAI：Further Studies on the Seismic Vibrations of a Gozyunoto (Pagoda), Earthquake Research Institute, 1936.12
- 15) 武藤清：五重塔と重構造、毎日新聞社図書編集部
- 16) 梅村魁：地震と建物、東京大学出版会、pp.77-106、1976
- 17) 石田修三：心柱門説、京都伝統建築技術協会誌、普請第8号、1982.7
- 18) 上田篤：五重塔はなぜ倒れないか、新潮選書、1996
- 19) 花里利一・荻原幸夫・稲山正弘他3名：木造伝統構法五重塔の設計における構造安全性の検討、日本建築学会技術報告集 第7号、pp.33-38、1999.2
- 20) 小田原聖・三辻和弥・佐々木達夫・杉村義広：小型振動台を用いた五重塔の制振効果に関する一考察、日本建築学会大会学術梗概集、C-1、pp.55-56、2004.8
- 21) 小田原聖・三辻和弥・杉村義広：質点系モデルによる五重塔の地震応答に関する一考察、日本建築学会大会学術梗概集、C-1、pp.493-494、2005.9
- 22) 大森房吉：五重塔の振動に就きて、建築雑誌414、pp.219-227、1921.4
- 23) 山辺克好・金井清：五重塔の耐震性に関する研究、日本大学生産工学部報告第21巻2号、1988.12
- 24) 内田昭人・河合直人・前川秀幸：伝統的木造建築物の振動特性(その2)法隆寺五重塔の常時微動測定、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.171-172、1996.9
- 25) 登坂弾行・松留慎一郎・前川秀幸他4名：伝統的木造建築物の振動特性(その11)日寛永寺五重塔の振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.467-468、2003.9
- 26) 登坂弾行・松留慎一郎・前川秀幸他4名：伝統的木造建築物の振動特性(その12)日光東照宮五重塔の振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.245-246、2004.9
- 27) 内田昭人・前川秀幸・河合直人他4名：伝統的木造建築物の振動特性(その13)最勝院五重塔の振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.491-492、2005.9
- 28) 大場新太郎・木下顕宏：木造多層塔の振動特性、日本建築学会構造系論文集No.559、pp.47-54、2002.9
- 29) 井上郁郎・大場新太郎：醍醐寺五重塔の振動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.851-852、2003.9
- 30) 石倉英幸・大場新太郎：瑠璃光寺五重塔と巖島神社五重塔の振動特性の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.851-852、2004.8
- 31) 藤田香織・花里利一・坂本功：伝統的木造構法五重塔の振動特性に関する研究(その3)津観音五重塔の地震観測、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.465-466、2003.9
- 32) 藤田香織・花里利一・坂本功：伝統的木造構法五重塔の振動特性に関する研究(その4)2004年9月5日東海道沖の地震観測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.487-488、2005.9
- 33) 花里利一・藤田香織・千葉一樹・坂本功：伝統的木造構法五重塔の振動特性に関する研究(その5)観測記録に基づく津観音五重塔の地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.489-490、2005.9
- 34) 藤田香織：木造層塔の構造性能に関する既往の研究、五重塔5分の1模型振動実験及びシンポジウム・五重塔を揺らす-2004資料、pp.25-34、NPO木の建築フォーラム、2004年12月
- 35) 河合直人：五重塔振動調査-大森房吉調査から振動台実験、建築雑誌第121集・第1546号、p.10、2006.4

謝辞

本実験で用いた五重塔は、(萱工房)宮崎忠仍棟梁が製作・所有されているものを借用した。ここに、深く謝意を表します。

本実験は、独立行政法人防災科学技術研究所、NPO木の建築フォーラムが主催し、独立行政法人森林総合研究所、有限会社萱工房、佐藤木材株式会社、株式会社いちい、からご協力を頂き、大成建設自然・歴史環境基金の研究助成を頂きました。実験を行うにあたり、本文中表2に示した研究組織メンバー以外に、柳澤建築研究所の柳澤孝次先生、職業能力開発総合大学校の松留慎一郎先生、信州大学の五十田博先生、防災科研の御子柴先生、東京大学生産技術研究所腰原研究室、東京電機大学新津研究室、首都大学東京藤田研究室の大学院生・学生諸氏のご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

第6回通常総会講演会・議事

中澤 博志 / 坂本 成弘

●防災科学技術研究所 ●大成建設

I. 第6回通常総会講演会

第6回通常総会での講演会が2006年5月22日(月)13:30～15:30に建築会館ホールにおいて田蔵隆理事(清水建設)の司会の下、約60名の参加者を集め開催された。講演は、防災科学技術研究所が兵庫県三木市に建設し、昨年度から稼働が始まった実大三次元震動破壊実験施設(通称、E-ディフェンス)に関する内容で行われた。同施設を管理・運営している同研究所兵庫耐震工学研究センターについての紹介や「大都市大震災軽減化特別プロジェクトII. 震動台活用による構造物の耐震性向上研究」において昨年度実施した実大実験のうち、地盤基礎実験、木造住宅実験およびRC建物実験についての講演がなされた(写真1)。講演者と講演題目は表1に示すとおりであり、講演要旨について以下に簡単にまとめる。



写真1 講演会の様子

【E-ディフェンスのプロジェクト概要および土槽実験の報告、講演者：防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 佐藤正義副センター長】

講演では、E-ディフェンスの震動台を始めとする4つの主要施設(実験棟、計測制御棟、油圧源棟および実験準備棟)、震動台の仕様および進行中のプロジェクトに関する概要が紹介された。最初に、施設全体の概要について説明がなされ、実験施設の特徴として実験棟(60m×87m×高さ43m)内に世界最大規模の震動台(平面寸法：長さ20m×幅15m)が設置され、これまでの実験施設では不可能であった実物大の構造物が地震動により破壊に至るまでのプロセスを追跡できる震動実験が可能であることが述べられた。また、震動台仕様についてビデオ映像を交えながら、合計24本の加振機により最大搭載質量1,200t、1,200t搭載時に構造物の破壊現象再現に必要な大変位(水平方向±100cm)および大速度(水平方向±200cm/s)で三次元地震動を発生させることができる基本性能を持ち、破壊現象の分析に必要な約900チャンネルもの膨大な実験データの収録が可能であるとの説明がなされた。

次にE-ディフェンスにおける平成16年度からの活動実績と平成21年度まで計画されているE-ディフェンスを活用した鉄骨構造物と橋梁の耐震実験研究について述べられた。鉄骨構造物に関しては、実大鉄骨造建物の完全崩壊実験(平成19年度)、免震・制振実験(H20年度)、テストベットとイノベーティブシステム(平成19～21年度)、橋梁に関しては、兵庫県南部地震で崩壊したRC橋脚を

表1 講演者と講演題目

講演会「E-ディフェンスのプロジェクトの実験報告」

1. E-ディフェンスのプロジェクト概要および土槽実験の報告
佐藤正義 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 副センター長
2. 木造家屋の震動破壊実験
坂本功 慶応大学理工学部 教授(防災科学技術研究所 客員研究員)
3. 実大RC6階建て建物の震動破壊実験
壁谷澤寿海 東京大学地震研究所 教授(防災科学技術研究所 客員研究員)
4. 質疑応答

対象とする要素実験(平成19年度および20年度)、橋梁の全体系としての進行性破壊実験(平成21年度)が計画され、いずれもNEESとの共同研究を指向しており、現在その実施に向けて準備段階にあることが述べられた。

土槽実験の報告については、本プロジェクトへの参画機関の紹介の後、平成17年度に実施された「水平地盤における杭基礎の実験…杭の損傷の進行過程」および「側方流動に伴う護岸とその背後杭基礎の実験…護岸・構造物への影響」についての概要についての説明がなされた。前者は、作製した大型円形せん断土槽のチェックを兼ね、乾燥砂地盤により実験が行われた。構造物モデルは、杭基礎(フーチング:10ton、群杭3×3、鋼管杭L:6m、D:152.4mm、t:2mm)と建屋(建屋:28ton)で構成され、JR鷹取波(amax=606gal)による加振では、鋼管杭の折損が杭頭から1~1.5mの地中部とこれより2~3秒後に杭頭部で確認され、これに伴うフーチングと建屋の不当沈下が確認された。一方、後者については、1995年兵庫県南部地震で実際に地盤の側方流動による被害を受けた護岸近傍の建物の被災状況をモデルとして試験体が作製された。矢板護岸の前面に海を模擬し、背後地盤には杭基礎(フーチング:10ton、群杭3×2、鋼管杭L:6m、D:152.4mm、t:2mm)と建屋(建屋:12ton)のモデルを設置した。JR鷹取波(amax=606gal)により加振し、地盤の液状化により生じる側方流動、また、これに伴う矢板護岸の移動、杭基礎の折損およびフーチングと建屋の傾斜が確認された(写真2)。



写真2 側方流動に伴う護岸とその背後杭基礎の実験

【木造家屋の震動破壊実験、講演者：慶応大学理工学部 坂本功教授】

講演では、想定する試験体の種類が違う3種類の試験について、その準備段階から実験に至るまでのプロセスと実験結果について丁寧な解説がなされた。いずれの実験も、地震による木造建物の倒壊を防ぐことを

第一に掲げ、「木造建物が倒壊する過程を把握すること」、「倒壊を防ぐために具体的な耐震補強方法の提案を行うこと」を目的に実験が行われた。各実験の対象とする試験体の概要を以下に示す。

- ・既存不適格の木造住宅を対象とし、最も数が多い1950年の建築基準法制定から1981年の建築基準法改正までに建てられた住宅の耐震補強効果の検証(写真3)。
- ・既存不適格住宅の中でもより一層建築年代の古い伝統構法による住宅を対象とし、1950年の建築基準法制定前に建てられた戦災をくぐり抜けた土壁を主体とする耐震性の検証。
- ・1981年の建築基準法改正後に建てられた住宅を対象とし、新しい住宅における強震動による耐震性能の検証。

上記3種類の実験は、JR鷹取波(amax=606gal)およびJMA神戸波(amax=818gal)による加振実験であり、実験を通じ、既存不適格である木造住宅(建築年代の古い伝統構法による木造住宅を含む)でも、一般的な耐震補強を実施することで建物の倒壊を防ぐことが可能であること、逆に、既存不適格である住宅は耐震補強を実施しないと倒壊する危険性が高いこと、1981年の建築基準法改正後に建てられた比較的新しい木造住宅は耐震性能が高いことが確認され、都市部に建つ既存の軸組構法木造住宅は、適切な耐震設計と耐震補強によって倒壊を防ぐことが可能であることが述べられた。



写真3 木造家屋の震動破壊実験

【実大RC6階建て建物の震動破壊実験、講演者：東京大学地震研究所 壁谷澤寿海教授】

講演では、RC建物の崩壊過程を実験的に明らかにすることを目的に実施した実験計画から結果までの詳細な説明がなされた。本実験において製作した試験

体は、E-ディフェンスで実施可能な最大規模に近い大きさ（6階建て:総高さ16.0m、平面:2×3スパン、各階床:12.0×17.0m、連層耐震壁・腰壁・袖壁で構成、総重量:約1000tonf）であり、1970年代当時の一般的な設計手法により設計され、ほぼ整形であるが壁、短柱が混在して複雑な挙動が予想される場合を対象としている。特に、本実験では、動的な効果によるせん断力上昇と変形増大によるせん断耐力低下による層崩壊を再現すること、耐震壁と柱の負担せん断力を計測すること、および部材の耐力低下、層降伏などを含む（ポストピーク）崩壊過程を構造解析により検証することなどの意図も含まれている。

実験はJMA神戸波（ $a_{max}=818gal$ ）により行われ、全体降伏型が予想された試験体は、短柱と耐震壁のせん断破壊による1層の層崩壊を確認することが出来（写真4）、崩壊過程のデータを得ることで、既往の耐震技術（耐震設計・耐震診断法、各種強度算定式、地震応答解析手法）の検証のための実験データを得ることができた等の説明がなされた。



写真4 実大RC6階建て建物の震動破壊実験

佐藤正義防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター副センター長の講演でも述べられていたが、E-ディフェンスで実施する実験・研究の意義としては、大きく2通りあるものと考えられる。一つは社会への技術的な貢献、具体的には構造物の破壊過程を実験的に追跡することで、被害結果だけで現象を予測する領域から実現を把握し合理的な設計法確立への貢献すること、もう一つは、公開実験による有効性の普及や新聞・TV等を通じての国民への啓蒙を意図したPRを行う事である。今回、3名の先生方から御講演頂いたが、E-ディフェンスはその役割を着実に果たしつつあることが感じられる講演会であった。

II. 第6回通常総会議事

1. 日時

2006年5月22日（月） 15時20分～16時45分

2. 場所

建築会館ホール

3. 出席者（71名、他に委任状出席557名）

相沢寛・青木繁・家村浩和・五十嵐克也・石川裕・石原研而・和泉眞一・大庭正俊・大町達夫・岡本伸・岡本晋・小谷俊介・表佑太郎・勝山正嗣・加藤満・金子貴司・壁谷澤寿海・亀岡裕行・亀田弘行・亀村幸泰・川島一彦・河村壮一・北川良和・北原裕一・木全宏之・木村榮一・木村秀雄・鎌田泰子・後藤洋三・小長井一男・小林賢龍・小林喜久二・小林康人・斎藤賢吉・坂本功・坂本成弘・佐藤正義・塩原等・柴田碧・清水秀丸・末富岩雄・菅原光弥・杉崎良一・梶谷さおり・鈴木浩平・武村雅之・田蔵隆・田中伸幸・田村重四郎・藤堂正喜・東畑郁生・年縄巧・富山隆一・中澤博志・中村晋・野畑有秀・林康裕・土方勝一郎・平田和太・樋渡健・藤田宗久・真崎雄一・松田宏・森下正樹・安田進・山添正稔・吉松賢二・吉村昌宏・米田昌弘・若松加寿江・渡辺孝英（50音順）

4. 会議の概要および議決

(1)定足数の確認

出席者が委任状を含めて628名となり総会が成立することが渡辺理事より報告された（定足数は規約第24条により現在の正会員1,212名および法人会員85社の1/3以上で、433名以上）。

(2)議長指名

規約第16条により会長が議長を務めることが渡辺理事より説明され、小谷会長が指名された。

(3)会長挨拶

小谷会長より議案の審議に先立ち挨拶があった。

（概要）この一年は、法人化への準備、事務局の整備に取り組んできた。事務局については、3月より事務局長を迎え、新体制を発足することができた。しかし、法人化については、公益法人に関する法律の改正時期と重なり対応できなかったものの、今後も法人化への向けた努力を継続してほしい。また、かねてよりの懸案であった名誉会員の推挙を行うとともに、若手研究者や若手技術者が地震防災・工学の研究へ取り組むことを支援するために論文奨励賞を設定し、授与を行うことができた。さらに、国内だけでなく国際的な貢献も視野に入れた重要な学会活動の一つである災害対応に対して、常置の地震災害対応委員会を設置することができた。

(4)議案の審議

（第1号議案：平成17年度事業報告）

平成17年度事業内容について、渡辺理事より議案書

に沿って報告され、小谷議長が本件に関する意見と質問がないことを確認して出席者に承認を諮り、承認された。主な報告内容は次の通りである。

- ・第5回通常総会を開催し、活動計画の承認を得るとともに、新しい会長、副会長、監事、理事などが選任された。
- ・理事会を10回開催し、法人化、事務局長の雇用に事務体制の充実、論文集の査読基準・査読過程の改革や特集号の発行、論文奨励賞内規と受賞者の決定、日本地震工学シンポジウムの運営方法、地震災害対応委員会の設置、各研究委員会の活動状況と新研究委員会の設置、2006年サンフランシスコ地震100年会議の取り組み、ホームページの改修、年次大会の運営・実施、名誉会員の推挙、などについて論議した。
- ・幹事会・委員会活動について概要を報告した。

(第2号議案：平成17年度収支決算報告・監査報告)

平成17年度収支決算について、五十嵐理事より議案書に沿って報告された。また、平成17年度監査報告が後藤監事より行われ、適切に会計処理されていることを確認した旨が報告された。続いて、小谷議長が本件に関する意見と質問がないことを確認して出席者に承認を諮り、承認された。

(第3号議案：次期会長・副会長・監事選挙結果報告)

平成18年度次期会長・副会長・監事選挙結果が報告され、小谷議長が本件の承認を出席者に諮り、承認された。次期会長に北川良和夫氏、副会長に家村浩和氏ならびに小長井一男氏、監事に亀田弘行氏が就任する。

(第4号議案：平成18年度役員選任)

役員理事の選任は規約第15条により、正会員の中から会長が選り総会で選任すると定められていることを小谷議長が説明し、7名の理事が退任して新たに7名の理事を選んだ旨を出席者に諮り承認された。退任する理事は青木繁・小林喜久二・東畑郁生・年縄巧・林康裕・平田和太・渡辺孝英の各氏、新たに就任する理事は石川裕・壁谷澤寿海・小林信之・末富岩雄・野畑有秀・久田嘉章・若松和寿江の各氏である。

(第5号議案：平成18年度役員候補推薦委員会の選任)

役員候補推薦委員会坂本委員長より、平成18年度役員候補推薦委員会委員の8名の退任を受けて、新たに会員の中から9名を選任した旨の報告があり出席者に承認を諮り、承認された。退任する委員は加藤研一・金谷守・小林淳・佐藤俊明・曾根彰・田村敬一・成富勝・渡辺孝英の各氏、就任する委員は青木繁・石川裕・佐藤清隆・菅野高弘・杉田秀樹・前田匡樹・松田泰治・宮本裕司・山中浩明の各氏である。

ここで、議長が小谷会長から大町新会長に交代した。

(第6号議案：平成18年度選挙管理委員会委員の選任)

大町議長より、平成18年度選挙管理委員会委員として天池文男氏及び前田寿朗氏の2名を指名した旨の説明があり出席者に承認を諮り、承認された。続いて、大町議長より、理事の中からは坂本成弘理事及び野畑有秀理事の2名を指名する旨の報告があった。

(第7号議案：平成18年度事業計画)

平成18年度事業計画について、坂本理事より議案書に沿って説明され、質疑応答の後、大町議長が出席者に承認を諮り、承認された。質疑応答は以下の1件。

- ・資料3の委員会名簿について、各委員会の後に示されている任期は委員会の設置期間かとの質問があり、坂本理事より、委員の任期である旨の説明があった。

(第8号議案：平成18年度収支予算案)

平成18年度収支予算案について、五十嵐理事より議案書に沿って説明され、いくつかの質疑応答の後、大町議長が出席者に承認を諮り、承認された。質疑応答は以下の通りである。

- ・日本地震工学シンポジウムについて、開催により得られた利益のうち、日本地震工学会よりの支出分は返金されるのかとの質問があった。これに対し、日本地震工学シンポジウム実行委員会の委員長でもある大町会長より、同シンポジウムは他の共催学会の支援もあり、シンポジウム終了後、利益の配分などについては他学会の意見を聞いた後に対応を考える必要があるとの説明があった。

- ・法人化への対応に関して、会計制度の法改正が一昨年実施されており、会計報告は新会計制度に対応したものとすることが、公益法人に関する法律の改正後に法人化の申請に際して必要ではないかとの質問があった。これに対し、五十嵐理事より、会計報告の新会計制度に対する対応の有無について今後調査を行う旨の説明があった。

(第9号議案：名誉会員の推挙)

大町議長より、規約第13条に定める名誉会員の称号を贈る候補者として9名を推挙する事を理事会において議決した旨の報告があり、9名の候補者に名誉会員の称号を贈ることが承認された。名誉会員の称号を贈られたのは、金井清氏、小堀鐸二氏、田中貞二氏、田治見宏氏、吉見吉昭氏、山田善一氏、田村重四郎氏、篠塚正宣氏、柴田碧氏である。

(5)新会長挨拶

大町新会長より会長就任の挨拶があった。

(概要)日本地震工学会は設立されてから平成18年で6年が経過し、人であれば漸く小学校に入学したところである。学会を取り巻く環境はかなり厳しいが、活

動の範囲を拡大し、学会の成長と発展への道筋をつけたい。本年は、日本地震工学会が幹事学会として初めて日本地震工学シンポジウムを開催する重要な年でもあり、シンポジウム実行委員会の委員長としても会員の強力な支援を受けてシンポジウムを成功させたい。

(6)名誉会員推挙式および論文奨励賞の授与式

坂本理事より、名誉会員の称号を贈られることになった方のうちご来場頂いた、田中貞二氏、田治見宏氏、吉見吉昭氏、田村重四郎氏、柴田碧氏が紹介され、小谷会長により名誉会員の称号の授与が行われた。その際、各名誉会員より言葉をいただいた。

次に、坂本理事より、論文奨励賞を受賞した山添正稔氏、楯田泰子氏の紹介があり、小谷会長より記念の賞状および楯が贈られた。その際、各受賞者より受賞による抱負が述べられた。

以上、議事録より(一部修正)。

議事録記録：中村理事

議事録確認：大町会長、鈴木副会長



会場フロア



小谷会長



大町新会長



名誉会長推挙



奨励賞授与

日本地震工学会ニュース No.125

(2006年7月15日配信)

《日本地震工学会関連のニュース》

○第12回日本地震工学シンポジウム・ホームページを公開中

12JEES運営委員会

2006年11月3日(金)～5日(日)に開催予定の同シンポジウムのホームページを以下のURLで公開しています。今回は論文投稿から査読、参加登録まですべてWEBベースで行います。情報は順次追加していきます。

<http://www.12jees.jp/>

○講習会「性能規定型耐震設計法の現状と課題」

～必ずやって来る大地震にどう対処すべきか！～

主催：日本地震工学会

協賛(予定)：(社)日本建築学会、(社)土木学会、(社)地盤工学会、(社)日本地震学会、(社)日本技術士会、(社)建設コンサルタンツ協会、(社)日本コンクリート工学協会

日時：平成18年8月2日(水) 10:00～17:15

会場：建築会館3階(303・304)会議室(東京都港区芝5-26-20 建築会館内)

<http://www.jaee.gr.jp/research/res01/res01.html>

○セミナー 分かりやすい「地盤の液状化・流動化と構造物の応答」

主催：日本地震工学会

協賛(予定)：(社)日本建築学会、(社)土木学会、(社)地盤工学会、(社)日本機会学会

日時：平成18年8月29日(火) 10:00～17:00

会場：建築会館3階(302・303)会議室(東京都港区芝5-26-20 建築会館内)

<http://www.jaee.gr.jp/event.html#seminar>

○新規研究委員会の委員を公募します

委員会名：土構造物におけるライフサイクルコスト戦略の研究委員会

期間：平成18年度～平成20年度(3カ年)

期待される成果

- ・LCCを計算する手法を提案する。
- ・いくつかの事例につき、所期の建設時の防災への

配慮がLCCの通減を満たすことを例証する。

- ・耐震設計が土構造物においても重要であることを広く知らしめる。

詳細は、

http://www.jaee.gr.jp/contribution/con05/con05_r01.html

《地震災害情報》

<2006年インドネシア・ジャワ島中部の地震の関連情報>

○2006年インドネシア・ジャワ島中部の地震に関する情報をホームページに掲載しています。

<http://www.jaee.gr.jp/disaster/2006/2006indonesia.html>

「インドネシア・ジャワ島中部地震災害調査速報会」のお知らせ

主旨：

5月27日(土)早朝にインドネシア・ジャワ島中部のジョグジャカルタ郊外で発生したマグニチュード6.3の地震は、バントゥール県を中心に甚大な被害をもたらしました。その原因を究明するため、文科省科研費「2006年5月27日インドネシアジャワ島中部地震による被害に関する調査研究」(代表者：九州大学教授川瀬博)が認められ、日本地震工学会・日本建築学会・土木学会・地盤工学会・地震学会など関係学会の協力のもとで研究チームが組織され、これまで現地調査・地震情報収集および解析等の調査研究を企画し、現在鋭意実施中です。今回、下記の予定でその調査研究成果の概要を速報の形で広く報告することといたしましたので、興味のある方々は是非ご来場ください。

日時：2006年9月13日(水曜日)

10:00～17:00(開場9:30)

場所：東京大学弥生講堂(一条ホール)

〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1

東京大学農学部内

地下鉄東大前駅から徒歩1分

<http://www.a.utokyo.ac.jp/yayoi/map.html>

主催：科研費「ジャワ島中部地震による被害に関する調査研究」プロジェクトチーム

共催(予定)：日本地震工学会・日本建築学会・土木学会・地盤工学会・地震学会

定員：280名(先着順)

参加費：無料

参加登録：toroku913@seis.arch.kyushu-u.ac.jp

あて氏名と所属機関、連絡先を記入の上1名につき1メールを送付ください。件名は「参加登録希望」としてください。

問合せ先：九州大学大学院人間環境学研究院

川瀬博(kawase@arch.kyushu-u.ac.jp)

または東京大学地震研究所

壁谷澤寿海(kabe@eri.u-tokyo.ac.jp)

<2005年パキスタンの地震関連情報>

○2005年パキスタンの地震に関する情報をホームページに掲載しています。

<http://www.jaee.gr.jp/disaster/2005/2005pakistan.html>

《行事案内行事予定・論文募集(関連学協会を含む)》

○大都市大震災軽減化特別プロジェクトIII-3「巨大地震・津波による太平洋沿岸巨大連担都市圏の総合的対応シミュレーションとその活用手法の開発」研究成果発表会

日時：平成18年7月27日(木)10:00～平成18年7月28日(金)16:00

場所：大阪新阪急ホテル

詳細

http://www.ddt33.dpri.kyoto-u.ac.jp/oshirase/060727_osaka.html

○大都市大震災軽減化特別プロジェクトIV-2 災害情報部門 研究成果発表会

日時：平成18年7月28日(金)10:00-17:00

場所：山上会館(東京大学本郷キャンパス内)大会議室

地図：

http://www.u-tokyo.ac.jp/campusmap/cam01_00_02_j.html

概略プログラム：

第一部 研究成果の発表 10:10-14:10

第二部 パネルディスカッション 14:30-17:00

「大都市大震災軽減を図る災害情報とそのシステム—廣井脩先生の防災の構想を実現化するために—」

申し込み連絡先：東京大学大学院情報学環・学際情報学環 廣井研究室

FAX：03-3811-5970

E-mail：hiro-i-ken@iii.u-tokyo.ac.jp

○第1回緊急地震速報展・講演会

—緊急地震速報の本運用開始に向けて—

主催：(独)防災科学技術研究所・NPOリアルタイム地震情報利用協議会

後援：内閣府・総務省消防庁・文部科学省・気象庁・(財)地震予知総合研究振興会・(財)震災予防協会・(社)土木学会・(社)日本建築学会・(社)地盤工学会・日本地震工学会

日時：平成18年7月28日(金)10:00～16:50

場所：大手町サンケイプラザ4F(ホール・ラウンジ)

〒100-0004 東京都千代田区大手町1-7-2

参加費：1,000円

詳細：<http://www.real-time.jp/>

○公開研究会「新潟県中越地震の被害と対応から学ぶ」(住まいの被害と復興)

主催：日本建築学会 都市計画委員会都市防災・復興小委員会

日時：2006年8月7日(月)13:00～16:30

会場：建築会館会議室(東京都港区芝5-26-20)

定員：40名(申込先着順)

参加費：会員1,000円 登録メンバー1,500円

会員外2,000円

学生500円(資料代含む、支払いは当日)

申込締切8月3日(木)

詳細：日本建築学会催し物・公募のページよりpdfファイル参照可

<http://www.aij.or.jp/jnetwork/scripts/index3.asp>

○STESSA 2006 (Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas)

国際会議「地震地域の鋼構造の挙動」の第5回が日本で開かれます。秋山宏教授、フェデリコ・マツォラーニ教授、和田章教授らのもと、世界20カ国から130もの論文が集まり、多くの関心と期待が寄せられています。12の国内団体、EERIやNISTなどの13の海外団体の後援または協賛を頂きました。鋼構造建築の設計施工に携わる方々の多数のご参加をお待ち致します。

主催：ナポリ大学フェデリコII、東京工業大学

開催日：2006年8月14日(月)～17日(木)
会場：東京工業大学すずかけ台キャンパス 大学
会館すずかけホール
参加費：一般70,000円(6/15まで) / 一般80,000円(6/16
以降) / 学生30,000円 / 同伴者20,000円
詳細：<http://www.serc.titech.ac.jp/stessa2006>
問合せ：東京工業大学山田研究室 川口
TEL 045-924-5330

JAEE NEWSへのお問い合わせ・ご意見は admin@news.jaee.gr.jp にお寄せください。

入会・資料等の問い合わせは
事務局 (office@general.jaee.gr.jp, 電話：03-5730-
2831、FAX：03-5730-2830) にお寄せください。

○5th International Conference on Seismology and
Earthquake Engineering (再掲)

日時：2007年5月14-16日

場所：Tehran, Iran

※アブストラクト締切が9/20に延びました。

<http://www.iiees.ac.ir/SEE5>

○Journal of Earthquake Engineering and Structural
Dynamics

-Special Issue on Seismic reliability analysis of
structures-

原稿締切：2006年7月31日

[http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/
fulltext/112216680/main.html,ftx_abs](http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/112216680/main.html,ftx_abs)

○Computational Methods in Structural Dynamics and
Earthquake Engineering

日程：2007年6月13日-15日

場所：Rethymno, Crete, Greece

URL：<http://www.eng.ucy.ac.cy/compdyn2007>

梗概締切：2006年10月15日

論文受領：2006年11月30日

全論文提出期限：2007年2月28日

連絡先：Institute of Structural Analysis and

Seismic Research

National Technical University of Athens

Zografou Campus, Athens 15780

Greece

E-mail：compdyn2007@central.ntua.gr

○その他の行事等は下記のページをご覧ください。

<http://www.jaee.gr.jp/event.html>

JAEE NEWSのバックナンバーは

[http://www.jaee.gr.jp/news/back_number/index_b.
html](http://www.jaee.gr.jp/news/back_number/index_b.html)

で御覧いただけます。

年間カレンダー

日本地震工学会 主催・共催・関連団体行事予定一覧

2006年7月現在

<主催行事>

日 程	行 事 名	開催場所
2006年8月2日	講習会「性能規定型耐震設計法の現状と課題」(東京:建築会館)	東京(建築会館)
8月29日	セミナー 分かりやすい「地盤の液状化・流動化と構造物の応答」	東京(建築会館)
11月3～5日	第12回日本地震工学シンポジウム(2006)	東京工業大学

<共催行事>

2006年9月13日	インドネシア・ジャワ島中部地震災害調査速報会	東京大学
------------	------------------------	------

<関連団体行事>

2006年 7月12日～15日	第41回地盤工学研究発表会	鹿児島
8月14～17日	STESSA2006 (Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas)	東京
9月7～9日	日本建築学会大会(横浜)	横浜
8月30日～9月1日	3rd International Symposium on "THE EFFECTS OF SURFACE GEOLOGY ON SEISMIC MOTION" ESG 2006	フランス
9月3～8日	First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology	スイス
9月4～8日	6th Annual Meeting of the European Meteorological Society	スロベニア
9月18～22日	日本機械学会2006年度年次大会	熊本
9月20～22日	土木学会全国大会	草津
2007年 5月14～16日	Fifth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering	東京
6月27～29日	9th Canadian Conference on Earthquake Engineering	カナダ
2008年 10月12～17日	The 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE)	北京

下記の企業・団体は日本地震工学会の法人会員として、地震工学の発展に貢献されています

日本地震工学会 会長 大町 達夫

【特級】

(建設)

鹿島建設株式会社
清水建設株式会社
大成建設株式会社
(電気・ガス・鉄道・道路)
関西電力株式会社
東京電力株式会社
(各種団体)
社団法人プレハブ建築協会

【A級】

(建設)

株式会社大林組
株式会社奥村組
小田急建設株式会社
株式会社熊谷組
株式会社竹中工務店
戸田建設株式会社
(設計・コンサルタント)
株式会社阪神コンサルタンツ
(電気・ガス・鉄道・道路)
四国電力株式会社
中部電力株式会社
電源開発株式会社
東北電力株式会社
東日本高速道路株式会社
(各種団体)
社団法人静岡県建築士事務所協会
社団法人土木学会
社団法人日本建築学会
財団法人日本建築センター
社団法人文教施設協会

【B級】

(建設)

株式会社浅沼組
安藤建設株式会社
東亜建設工業株式会社
東急建設株式会社

飛鳥建設株式会社
(設計・コンサルタント)

株式会社建設技術研究所大阪本社
ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社
中央復建コンサルタンツ株式会社
株式会社社長大
株式会社東京建築研究所
東電設計株式会社
株式会社ニュージェック
ビューローベリタスジャパン株式会社
(電気・ガス・鉄道・道路)

九州電力株式会社

中国電力株式会社
日本原子力発電株式会社
東日本旅客鉄道株式会社
北陸電力株式会社
北海道電力株式会社
(官公庁・公団・公社)

国土交通省国土技術政策総合研究所
独立行政法人防災科学技術研究所
(各種団体)

危険物保安技術協会
社団法人建築業協会
社団法人日本水道協会
全国建設労働組合総連合
社団法人全国地質調査業協会連合会
損害保険料率算出機構
財団法人電力中央研究所
財団法人日本建築防災協会
(建材・システムなど)

株式会社エヌ・ティー・エス
ジャパンシステムサービス株式会社
東京鉄鋼株式会社
白山工業株式会社

【C級】

(建設)

五洋建設株式会社
東洋建設株式会社
株式会社福田組

株式会社本間組
真柄建設株式会社
(設計・コンサルタント)

株式会社大崎総合研究所
基礎地盤コンサルタンツ株式会社
株式会社構造計画研究所
ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社
株式会社システムアンドデータリサーチ
株式会社篠塚研究所
株式会社スリーエーコンサルタンツ
株式会社ダイヤコンサルタント
財団法人地域地盤環境研究所
株式会社日建設計
株式会社三菱地所設計
株式会社安井建築設計事務所
(電気・ガス・鉄道・道路)
東邦ガス株式会社
(官公庁・公団・公社)

独立行政法人港湾空港技術研究所
(各種団体)

財団法人愛知県建築住宅センター
財団法人大阪建築防災センター
社団法人高層住宅管理業協会
構造調査コンサルティング協会
財団法人国土技術研究センター
財団法人ダム技術センター
千葉県耐震判定協議会
社団法人日本クレーン協会
社団法人日本ガス協会
社団法人日本建築構造技術者協会
財団法人日本建築設備・昇降機センター
財団法人日本建築総合試験所
社団法人日本ボイラ協会
社団法人日本免震構造協会
日本木造住宅耐震補強事業者協同組合
(建材・システムなど)

エイム株式会社
株式会社CRCソリューションズ



日本地震工学会のご案内

1. 日本地震工学会の目的

我が国は、世界でも有数の地震国であり、古くから世界をリードする地震学ならび耐震技術に関する学問や技術開発が行われてきました。ところが、これらの活動は、これまで、建築、土木、地盤、地震、機械等の分野に分かれて行われてきており、地震工学としてまとまった活動を行う学会がありませんでした。しかし、たとえば1995年兵庫県南部地震による被害を見ても明らかなように、大都市の耐震性を向上させるためには、関連した各分野の研究者や実務者が協力して、問題解決に当たる必要があります。

このようなことから、2001年1月1日に日本地震工学会が発足しました。日本地震工学会の目的は、地震工学の進歩および地震防災事業の発展を支援し、もって学術文化と技術の進歩と地震災害の防止と軽減に寄与することにあります。

2. 日本地震工学会はどのような分野を対象としているか

日本地震工学会は、これまでの地震工学関係の研究者や技術者のみならず、地震そのものや地震による災害に関わるあらゆる分野の人々にとって有益な交流の場となるものであります。したがって、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野を対象としています。

日本地震工学会が対象とする分野はこのように大変幅広いものですが、これをもう少し具体的に示すと、地震動や活断層の工学的評価、建築物、道路・鉄道施設、電力・上下水道・ガス・通信等のライフライン施設、地盤・土構造物、河川施設、港湾施設、機械施設等多岐にわたる施設・構造物の地震前の耐震化、地震時の機能維持、地震後の復旧などのほか、国や自治体の地震防災対策、地域防災計画、地震危険度評価、発災後の対応、医療対策、震災時の救援救急システム、震後復興、地震災害調査と分析、さらには国際的な震災軽減の技術的支援、地震防災教育などの分野となります。

3. 日本地震工学会はどのような活動を行うか

日本地震工学会は、電子メディアを活用して充実した論文集を効率的に会員の皆さんにお届けするほか、会員の皆様にインタラクティブな情報交換の場を提供します。また、年次学術講演会などの定期的な研究発表会の開催、地震工学・地震防災関連の講習会や研修会の開催、調査・研究プロジェクトの指導・推進、新技術の評価、耐震基準の開発・普及、技術者の生涯教育支援、地震防災施策の提言、地震工学・地震防災分野における国際交流ならびに国際貢献を担う活動、地震工学の広い分野が連携した地震災害調査とその成果の公表、などを行っています。

4. 日本地震工学会はどのような組織か

日本地震工学会は、会員の会費に支えられた任意団体として活動を行っています。活動の充実とともに、将来は法人格をもった団体に発展させます。

会則、学会組織、役員、最近の活動状況などの詳しい情報は下記の日本地震工学会のホームページをご覧ください。

<http://www.jaee.gr.jp/>

事務局 〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館 日本地震工学会

E-mail : office@general.jaee.gr.jp、Tel : 03-5730-2831、Fax : 03-5730-2830

5. 歴代会長

- | | | | | | |
|--------|------|--------|-------|--------|------|
| ・初代会長 | 青山博之 | ・第二代会長 | 岡田恒男 | ・第三代会長 | 土岐憲三 |
| ・第四代会長 | 石原研而 | ・第五代会長 | 入倉孝次郎 | ・第六代会長 | 小谷俊介 |
| ・現会長 | 大町達夫 | | | | |



日本地震工学会 入会案内

日本地震工学会は、これまでの地震工学関係の研究者や技術者のみならず、地震そのものや地震による災害に関わるあらゆる分野の人々にとって有益な交流の場となるものであります。したがって、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野の方々を対象としています。

▼ 申込方法

個人会員（正会員・学生会員）用及び法人会員用の申込書（PDF ファイル）は、ホームページ（<http://www.jaee.gr.jp/>）からダウンロードすることができます。必要事項を直接記入して、事務局に郵送もしくはファックスするか、Adobe Acrobat で必要項目を記入して保存し、そのファイルを電子メールに添付して事務局にお送りください。

事務局 〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館 日本地震工学会
E-mail : office@general.jaee.gr.jp、Tel : 03-5730-2831、Fax : 03-5730-2830

▼ 年会費

◇会費種別と年会費			◇年度途中入会の年会費		
会員種別	会費	入会金	入会の申込日	正会員	学生会員
正会員	10,000円	1,000円	3～5月	10,000円	3,000円
学生会員	3,000円	なし	6～8月	7,500円	2,250円
法人会員	特級 200,000円以上	なし	9～11月	5,000円	1,500円
	A級 100,000円	なし	12～2月	2,500円	750円
	B級 50,000円	なし	*法人会員は年度途中入会でも通年の会費を納めて頂きます。		
	C級 20,000円	なし			

▼ 一般規則で定める会員資格

【正会員の資格】

地震工学・地震防災の分野に関する学歴・経験をもつ個人で次の各号の一つに該当する者。

- (1) 大学を卒業した者
- (2) 高等専門学校または同程度以上の学校を卒業し、実務経験を持つ者
- (3) 高等学校を卒業し、実務経験を持つ者
- (4) 上記の分野以外を専門とする者または外国の学校を卒業した者の正会員としての資格は前各号に準じ、かつ、この会の目的に寄与するに必要な学識経験を持つ者
- (5) その他理事会で、前各号と同等以上の資格ありと認められた者

【学生会員の資格】

地震工学あるいは地震防災に関連する学術・技術を学ぶため、大学院、大学、専門学校、高等学校およびこれに準ずる学校に在学中の個人

【法人会員の資格】

地震工学あるいは地震防災およびこれらに関連する次の事業を営む法人等とする。

- (1) 建設業、建設設計業、建設コンサルタント、建材業、その他これらに準ずるもの
- (2) 製造業、公益事業、報道・情報事業、保険業、その他これらに準ずるもの

▼ 入会の承認と資格の発効

入会申込書受理後、理事会の審査を経て入会が承認されます。理事会の審査は入会申込書受理月の翌月に行われます。なお、理事会での入会承認後に、会員証と会費請求書が送付されます。

会員としての効力は、正会員にあっては入会金および会費を、学生会員および法人会員にあっては会費を納めたときに生じます。

▼ 会員の特典

【正会員・学生会員】

1. 役員の選挙権と被選挙権を持ちます。(正会員のみ)
2. 総会における議決権をもち、総会に出席して意見を述べることができます。(正会員のみ)
3. 日本地震工学会「JAEE NEWS」のメール配信を受けられます。
4. 日本地震工学会のホームページから「地震工学論文集」を閲覧・入手できます。
5. 日本地震工学会「JAEE NEWS」や「コラム」への投稿ができます。(ただし、掲載の可否および掲載号については当会に一任させていただきます。)
6. 日本地震工学論文集に論文発表ができます。(ただし、審査があります。)
7. 日本地震工学研究発表・討論会で論文発表ができます。
8. 研究発表会、講習会、講演会、見学会等に会員割引で優先的に参加できます。
9. 委員会に委員として参加する資格が得られます。

【法人会員】

1. 正会員・学生会員の上記特典のうち「5.」、「6.」、「7.」を除く特典。ただし、法人会員には被選挙権はありません。
2. その他に次の特典があります。

特 典 内 容	法人会員種別			
	特級	A級	B級	C級
講習会等の行事に会員会費で参加できる人数	12人	6人	3人	1人
地震工学会誌への広告の割引掲載	掲載箇所等については当会に一任させていただきます。			
研究発表会等の催し物会場でのパンフレット配布	制限のある場合もあります。			
学会ホームページと法人会員ホームページとのリンク	法人会員リンク集を掲載します。			
法人会員のイベント情報等の学会ホームページへの掲載	掲載の時期、掲載箇所等については当会に一任させていただきます。			

第12回日本地震工学シンポジウム開催概要

名 称	第12回日本地震工学シンポジウム (略称: 12JEES) http://www.12jees.jp/index.html
主 催	日本地震工学会(幹事学会)、(社)地盤工学会、(社)土木学会、(社)日本機械学会、 (社)日本建築学会、(社)日本地震学会、(財)震災予防協会
シンポジウムの主旨	日本地震工学シンポジウム(JEES)は1962年に第1回が開催され、おおむね4年ごとに、世界地震工学会議(WCEE)の開催の中間年に開かれて参りました。最近数回の本シンポジウムの参加者は800名を超える実績があり、この種の会議の代表的なものと評価されております。この度、「人・技術・減災」をテーマとして、第12回日本地震工学シンポジウム(12JEES)を開催することになりました。
期 日	2006年11月3日(金)～5日(日)
会 場	東京工業大学大岡山キャンパス(〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1) 東急大井町線大岡山駅下車すぐ http://www.titech.ac.jp/access-and-campusmap/j/o-okayama-campus-j.html
プログラム	特別講演、パネル討論、論文口頭発表、論文ポスター発表、早わかり連続講義、技術展示、懇親会
問合せ先	第12回日本地震工学シンポジウム運営委員会 〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館 日本地震工学会事務局 TEL:03-5730-2831, FAX:03-5730-2830, E-Mail: 12jees@jaee.gr.jp

編集後記：

日本地震工学会誌では、これまでに機械・建築・土木・地震の各分野の特集を組んで参りました。本号では、平成17年3月に地震調査研究推進本部より「全国を概観した地震動予測地図」が公開されたことから、地震分野の特集として「強震動予測」を取り上げ、この問題に長年関わってこられた方々に原稿執筆をお願いいたしました。

会誌編集委員会では、分野間の横断的なトピックスを取り上げ、より日本地震工学会らしさを活かした会誌をお届けすることを検討しています。会誌へのご要望や記事のアイデアがありましたら、是非お寄せください。E-defense等の実験速報の記事も増えており、会員の皆様のご協力に深く感謝いたします。

日本地震工学会会誌編集委員会委員長 森下 正樹(日本原子力研究開発機構)
同委員 三宅 弘恵(東京大学地震研究所)

編集委員

委員長 森下 正樹	日本原子力研究開発機構	幹 事 古屋 治	東京都立工業高等専門学校
委 員 渡邊 鉄也	埼玉大学	委 員 五十田 博	信州大学
委 員 大保 直人	鹿島建設	委 員 中瀬 仁	東電設計
委 員 三宅 弘恵	東京大学地震研究所		

日本地震工学会誌

2006年7月31日発行

編集・発行 日本地震工学会
〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館
TEL 03-5730-2831 FAX 03-5730-2830