

## 耐震構造から総合防災へ

藤原 悌三

### 要旨

本稿は、著者が京都大学工学部・防災研究所に在籍中に行ってきた研究内容を紹介したものである。本文の前半は主として耐震構造に関する研究内容を震害調査を含めて記述している。断面力間の相互作用を考慮した、部材レベルの地震応答解析法を提示し、柱の安全性を確保するための条件、耐震設計上の部材の適正分布、2軸水平地震動に対する終局安全性に関する評価手法を導き、検証実験を行った。後半は主として都市防災・総合防災の研究内容についての記述と阪神・淡路大震災の調査研究結果を示した。すなわち、市域の地震被害推定と室内被害の調査分析、木造・RC造建物の震害調査、居住空間の安全性保持のための社会システムの検討など、これまで著者が行ってきた研究を概観している。

キーワード：耐震構造, 震害調査, 総合防災, 阪神・淡路大震災, 振動台実験

### 1. 地震との出会い

私の地震との出会いは昭和23年の福井地震である。その頃京都の下鴨に住んでいたが、母がコンロで夕食の準備をしていたから多分夕方であったろう。揺れの最中に母は炭火の入ったコンロを

転けそうになりながら、前面道路の中央まで運び出した。私も母について外へ出ると、隣の木造2階建ての住宅が、子供の目から見れば、今にも倒れそうに大きく揺れていたのを鮮明に覚えている。この道に進んでからこの地震が福井地震で、京都は震度5であったことを知ったが (Fig. 1)<sup>1)</sup>,

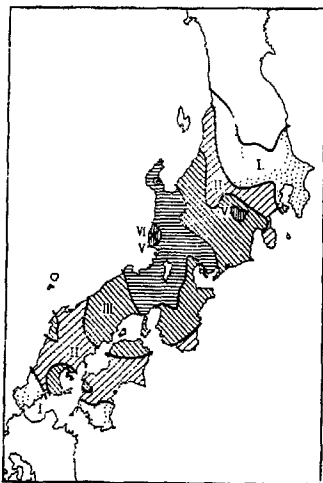


Fig.1 Seismic intensity due to Fukui Earthquake

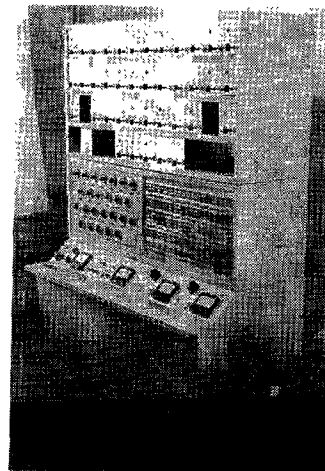


Photo 1 Analog computer in Kobori's laboratory

揺れの時間が相当長かったこと、木造の2階建てで固有周期が長く揺れの振幅が目に見えたのは遠地地震のせいであろう。今年は福井地震から50周年に当たり、6月には記念シンポジウムが予定されている。福井地震の前にも何度か大地震が発生しているが記憶には定かでない。

高校から大学へ進学するときには、工学系のかでは最も生活に密着していると思われた建築学科を選択した。終戦後の混乱期で、住宅事情の悪い時期でもあり、京大教授の西山卯三先生の住居論に惹かれ、入学したときは建築計画を志望していたが、最初の設計演習が西山教授の課題「噴水」であり、さんざんな批評にあつてはやばやと計画系志望を断念した。大学1年の夏休みに、兄（元防災研教官）が逢坂山の旧トンネルの中で地震観測を行っているのを手伝いに行く機会があった。何を測定していたか詳しくは覚えていないが、たしか50mほど離れたところですよ書きの記録を取り、記録紙を膠の液に浸けて膠着していたような気がするが、恐らく地核変動の計測と思われる。

小堀鐸二先生（現小堀研究所所長）の耐震構造の講義が非常に新鮮な印象であり、4年時のセミナー選択には躊躇無く小堀先生のゼミを志望した。その頃の建築学科の学生定員は30名で、井上豊（現大阪大学教授）、浦上和彦（現リビングアメニティ協会専務）、笹井徹夫（現鴻池組）、田川健吾（現福井大学教授）、東郷武（現大和ハウス副社長）、中村英樹（現KKテクネット専務）の諸君と私の7人が棚橋・小堀研究室という大所帯であった。当時、棚橋諒先生（故京都大学教授）は直接学生の指導はされていなかったため、小堀研究室と一緒のゼミであった。後で知ったことだが、棚橋先生は「20代でアイデアを考え、30代で実行し、40代は終わりですよ」と言われた。当時、先生は50才を越えておられたが、建築教室全体に行き届いた判断をされる意味でもボス的存在であった。金多潔先生（現京都大学名誉教授）と南井良一郎先生（故防災研教授）が助手、水畑耕治さん（故神戸大学教授）がドクターコースの学生という豪華スタッフであった。

## 2. アナログコンピュータによる非線形過渡振動

京大合唱団の活動に明け暮れた出来の悪い学生だったため、世界の耐震工学研究の指導的立場におられた先生方とは知らないままに当時を過ごしたのは、今から考えるとまことに残念なことであ

った。とはいえ、卒業論文を始める頃には興味湧いてきて、暗室でJacobsen & Aireの振動工学概論の原著をコピーし、先生方からご指導いただきながら、アナログコンピュータによる1質点振動系の非線形過渡地震応答解析に関する卒業論文を纏めることが出来た。その内容は構造物の非線形過渡応答に関する一連の研究に纏められている<sup>2)</sup>。このアナログ計算機は加算器、積分器、backlash elementなどで構成されるPhoto 1のような低速型アナログコンピュータである<sup>3)</sup>。棚橋先生が速度一ポテンシャル理論を世に出し<sup>4)</sup>、非線形振動の重要性を指摘されてから20年以上を経過した昭和30年代前半でも、非線形振動の解析手段としてはPhase-Plane-Delta Methodという図式解法に代わって、漸くアナログコンピュータやタイガー計算機による解析が始まったばかりの時代である。

大学を卒業して大阪建築事務所に入社した。勿論当時は、大学で学んだ動的耐震設計法は巷では使用されておらず、基準に沿って構造計算する仕事であった。とはいえ、新しい仕事であったため、3年が経過したが、現業に飽きたらず、小堀先生のところに相談に伺った。先生からは助手になるか、大学院に戻るかという二つの方法があるとサジェスションされた。そのとき既に子供がいたけれども、設計事務所のご厚意で援助を受けながら、結局正規？のルート、大学院へ戻ることにした。

耐震構造特論の講義は世界地震工学会議の論文の輪読であったが、非常に高度な内容のある論文であったため、その基礎となる文献を自分で読まなければ理解出来なかった。塑性力学特論、制御理論など他学科の講義も時間の許すだけ聞きに行った。自由な選択の可能な時代であった。最近では講義でなければ駄目という風潮も見られるが、当



Photo 2 Overturn of Kawagishicho apartment house due to Niigata Earthquake

時は学会の論文集より地震工学会議の論文が高い評価を受けていたことを知らない先生も多くなったようである。審査論文の数だけが一人歩きしている昨今を危惧するのは年を取ったせいだろうか。良いものは良い。

### 3. 院生時代と新潟地震

大学院へ戻って間もない1964年6月17日午後のゼミ中に防災研究所の吉川宗治先生から小堀先生に電話が入った。新潟で大きな地震が発生したので調査にいかないかという電話であった。金多 潔先生、竹内吉弘先生（現大阪工業大学教授）と藤原の三人が先発隊として調査に行くことになった。私が地震災害調査に関わった最初の地震である。防災研究所でコロナを買って折り畳みの自転車をのせ、日本では初めてという金多先生の運転で新潟に入った。液状化によって横倒しになっても窓の開閉はスムーズな川岸町のアパート（Photo 2）、二週間以上燃え続けた昭和石油のタンク、完成したばかりの単純梁形式の昭和橋の落橋、コンクリート造建物の傾斜によって押しつぶされた隣家の木造住宅、そろって傾斜している電柱など、主要な被害原因は信濃川流域の地盤の液状化によるものだった。近代都市の地震災害として記憶に残る地震であった。調査後資料収集のため東京を経由して帰郷したが、東京の建物がどれも傾いて見えたのが印象的であった。人間の感覚というのは確かなものと実感した。

修士論文は鈴木 有先生（現秋田県立短大付属木材高度加工研究所教授）の指導を得て、従来行われてきた質点系の地震応答解析では表現出来ない部材レベルの非線形応答解析手法の導出を試みたもので、部材端部に弾塑性ジョイントを想定し、軸力の影響を考慮し、座屈撓み角法を導入した解

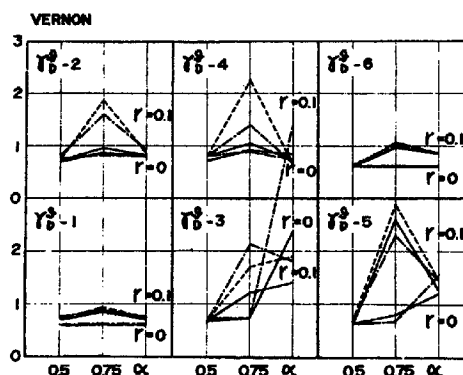


Fig.2 Effect of axial force on the ductility response of structural members

析と結果を纏めたもので、第2回日本地震工学会議に発表した(1966 JEES)。Fig.2は柱靱性率応答に及ぼす軸力の影響を示している。

当時、京大にKDC1という計算機が導入されていたが、まだ、機械言語でプログラムを作成し、紙テープで入力する方法であった。私の解析には大容量のメモリーが必要なため、民間の計算機を借用したが、非常に高価なため、プログラムの作成は緊張の連続であった。その頃、材端に剛塑性ジョイントをもつ架構を対象とした解析手法がBergとDaDeppoによっても行われているが、部材の安全性を評価するには、有限領域の非線形挙動を表現できる手法が重要であるとの視点にたった研究であった。Fig.2の実線は軸力を無視した場合、破線は軸力が大きい場合の部材端の靱性率応答を示している。このような架構レベルの応答解析手法は、今日では高層建物の耐震安全性評価に用いられることが多くなっている。

その後、この手法を用いて、外乱周波数特性の相違により柱反曲点がstep by stepに異なること、梁材に作用する初期条件により梁の塑性変形が一方に累積すること、梁降伏形架構の成立条件などについて検討し、梁強度を柱強度の6割以下に設定して初めて実現することを示した(1969年報)。Fig.3は横軸に梁・柱強度比 $\beta$ 、縦軸に柱の靱性率応答を示した図であり、地震入力の周波数特性により柱反曲点位置が移動するため、梁強度

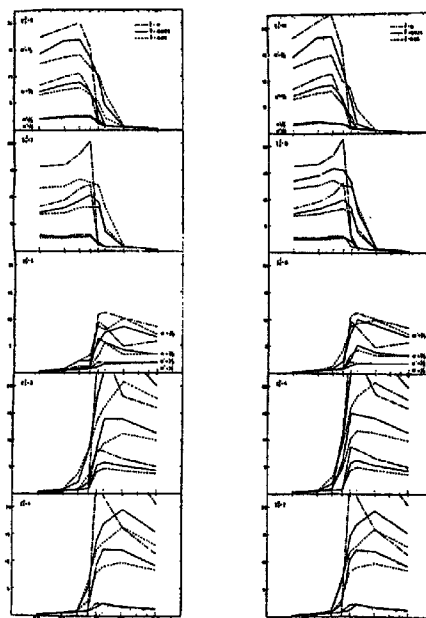


Fig.3 Relationship between strength ratio of beam to column and member ductility response

を柱強度の6割程度にすれば、梁降伏を保証できることを示した。

その後、New ZealandのRC規準に柱の安全性確保のため、このような内容が取り入れられていることを若林 實先生（現京都大学名誉教授）、森田司郎先生（現日本建築総合試験所所長）らとの研究会で知った。

#### 4. 棚橋先生の業績と京大耐震グループの研究

博士課程に進学と同時に大阪建築事務所を退社し、アルバイトをしながら、子育てをしながらの博士課程の時代であった。それも1年あまりで終わり、昭和42年秋には工学部の助手にいただき、本部の建築教室1階東端の棚橋 諒教授の隣の部屋を与えられた。その頃の棚橋教授は朝11時頃にお見えになり、3時にはお帰りになっていたが、その間多くの先輩たちとお会いする機会に恵まれた。先生は昭和45年にご退官になり、先生の退官記念論文集をお手伝いすることになり、これまでの先生の研究業績に触れる機会を得た。

有名な速度一ポテンシャル理論が私の生まれる前に提案され、その後もしばらく剛柔論争が続いたが、その当時、京都大学土木教室の真島健三郎先生が柔構造を主唱され、建物の固有周期を地震動の卓越周期より大きくすることによって地震入力を低減できると主張されたが、この考え方は超高層建物の耐震設計に現在も効果的であり、免震構造にも生かされている。一方、東京大学の佐野利器先生、武藤 清先生は剛構造を主唱され、地震時に生じる慣性力に耐えるだけの強い建物にすべきと主張された。これが剛柔論争の始まりである。

当時、若干20代後半であった京都大学助教授棚橋先生は、地震力の強さは加速度ではなく速度に関係し、建物の耐震力は破壊までに蓄えられる

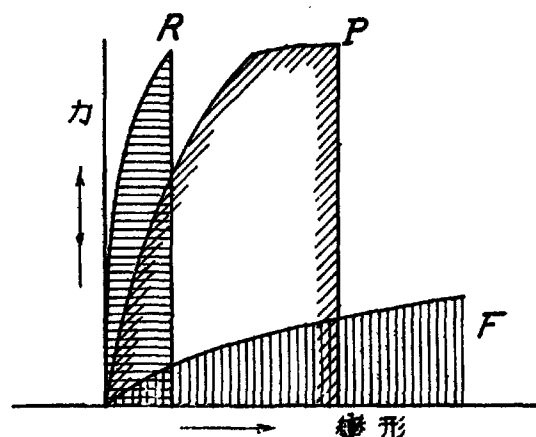


Fig.4 Hypothesis of potential energy by RioTanabashi

ポテンシャルエネルギーであるという新しい仮説を発表された。Fig.4には棚橋先生の書かれたポテンシャルの概念図が示されている。今では万人が認めるこの考え方も当時は理解されず、その後の耐震設計は、剛構造を主流とする動きになったのに対し、「学会は世界の界にあらず、社会の会なり」と嘆き、自らは鉄骨や木造の非線形挙動で表されるポテンシャルエネルギーの実態解明に当たられた。

この仮説を実証する研究が棚橋・小堀両先生を中心とする京大の耐震グループによって行われ、1956年の第1回世界地震工学会議に報告されたのを契機に、計算機の急速な進展もともなって、京都大学の研究が世界の耐震構造をリードすることになる。現在は、非線形過渡地震応答解析は高層建物の安全性評価の方法として常識となっているが、意外と棚橋先生の業績は東京では知られていないのは、最近行った座談会<sup>5)</sup>で横尾義貫先生（現京都大学名誉教授）も指摘しておられる。京大でも最近耐震工学の伝統を理解していない先生も増えてきているようにも見える。

当時、小堀鐸二・南井良一郎研究室では地盤一構造物の動的相互作用が地震応答に及ぼす影響についての研究を鈴木 有先生・日下部馨先生（現神戸大学教授）が数値的に、井上 豊先生・鎌田輝男先生（現福山大学教授）がアナログコンピュータを駆使して行っており、地震及び地震動の不確定・不規則性を確率論的に評価し、構造物の安全性を信頼度関数として評価する研究が竹内吉弘先生・河野允宏先生（現京都大学助教授）・浅野幸一郎先生（現関西大学教授）・鈴木祥之先生（現防災研究所助教授）により行われた。また、篠崎祐三先生（現京都大学助教授）は地盤の不整形性を考慮した解法を導き、立川 剛先生（現名城大学教授）は飽和した地盤の振動特性を明らかにし

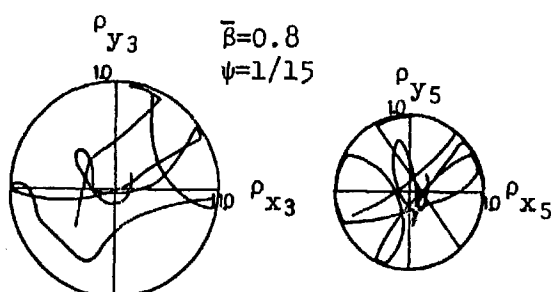


Fig.5 Locus of force vector on the yield surface of column section

ていた。上部構造物の耐震性については久徳敏治氏（現竹中工務店取締役）と藤原が行っていた。いずれも現在に続く先端的な研究であった。このような優秀な諸先生、先輩、同僚に支えられて充実した時代を過ごすことができた。

1968年には、又木義浩君（現竹中工務店）の協力を得て、上述の手法を、降伏曲面を考慮した立体架構の解析に展開し、柱の安全性に断面力間の相互作用が重要であることを明らかにするとともに、対称架構に対しても、非線形領域で振れ挙動の発生すること、局所的な靱性率の評価が建物の終局安全性に重要であることなどを指摘した（1970年報）。これを発展させ、1973年の第5回世界地震工学会議で発表したが、司会者のO. A. Glogau氏が発表後にわざわざ探して来てくれて、"wonderful"と言ってくれたのが嬉しかった。Fig.5には柱断面力の降伏曲面上の軌跡を示している（1973 WCEE）。

この解法は塑性領域を有限と仮定しており、H形の部材には適用可能であるが鉄筋コンクリート部材など塑性領域が広がる部材にはそれに合った解析が望ましいため、材軸方向に連続したモーメントー曲率の関係を導入した解法に拡張した。

Giberson, Goelの提案している手法に、梁中央部に集中荷重が作用する場合や軸力と曲げモーメントが同時に作用する柱部材に関する非線形座屈撓み角法を導いて、Ramberg-Osgood形履歴特性をもつ梁降伏架構の局所的な地震応答性状と架構の終局的安全性の関係を示した（1971年報）。Fig.6は3層梁降伏架構のR階のモーメントー曲率関係を示している。

せん断型質点系の適正動力学特性分布については久徳敏治氏が纏めているが<sup>9)</sup>、柱・梁など個々の部材に対する適正分布を求め、適正分布は梁・

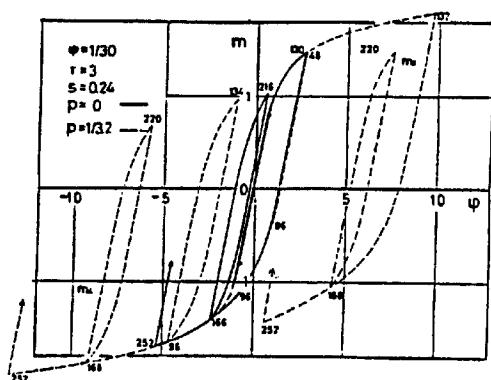


Fig.6 Relationship between nonlinear bending moment and curvature

柱強度比、柱軸変形の影響を強く受けることなどを示した（1977建論）。Fig.7は梁塑性率応答の平均値を示している。また、構造物の耐震性を向上させるために、鉄骨造建物では筋かい付き架構が用いられるが、筋かいは一般に正負繰り返し荷重に対して、座屈を伴う複雑な挙動を示す。筋かい中央に弾塑性ジョイントをもつ部材を対象とした履歴復元力特性の理論解を導き、架構全体の地震応答解析法を提示し、適正な筋かいの部材特性の分布性状を導出した（1979建論）。Fig.8に種々の細長比をもつ筋かい断面の軸力と軸変形の履歴を示す。

以上を纏めて1978年に博士論文（1978博論）を提出した。ワープロのない時代に、楽な生活でなかったとはいえ、今から思うと、手書きの論文を提出したのは主査の先生に申し訳なく思っている。

この間、多くの地震災害調査に参加した。1965年の松代地震（1965.8.3）、1968年のえびの地震（1968.2.21）は群発地震で、余震観測を行ったが、当時はまだ効率の良い観測装置が無かったため、TEACの大きなテープレコーダーを運んで行かなければならなかったが、松代での観測中に震度4

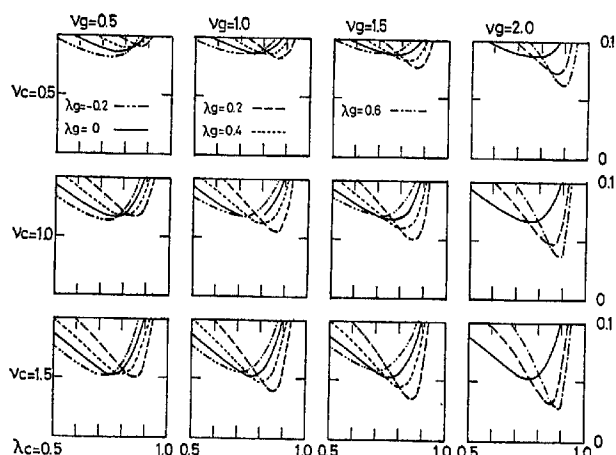


Fig.7 Standard deviation of ductility response of beams

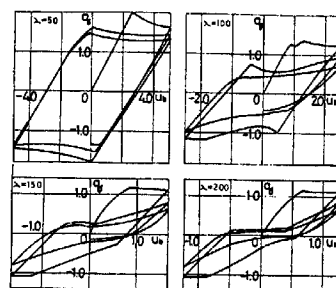


Fig.8 Some types of nonlinear hysteresis of brace members

を体験した。1968年の十勝沖地震(1968.5.16)は函館大学のRC造校舎の1階が倒壊するなど、鉄筋コンクリート造建物の被害が数多く発生したが、その時は研究室の別の人たちが調査に行った。その後、短柱のせん断破壊を防止するため建築学会のRC造建物の耐震基準が改定された。

1975年の大分県中部地震(1975.1.23)は限られた範囲に被害が集中した地震であったが、やまなみハイウエーにある料金所や九重レークサイドホテルのピロティ部分が倒壊した。料金所は神戸の阪神高速道路と類似の構造形式であり、ホテルでは短柱のせん断破壊に続くピロティ部分の破壊であったと考えられる。庭に置いてある石の椅子が別の位置に跳んで移動した形跡があったり、植木鉢が倒れていないのに中の土が飛び出したりして、上下動が大きい地震ではなかったかと推測されている。Photo 3 にホテルの庭にある椅子の移動状況を示す。この地震を契機に上下動に関する研究を始めた。

1978年の宮城県沖地震(1978.6.12)では、ブロック塀の転倒による死者が発生したほか、RC柱のせん断破壊(Photo 4)、揺れ振動による倒壊、重量鉄骨造の工場の倒壊など振動的な被害が耐震設計された建物に発生したが、1970年頃の学会規準改定後に建てられた和泉高校の建物は、密なせん断補強筋の配置によりカバーコンクリートの脱落のみで済んだ。新興の住宅地、緑が丘では造成地の地すべりにより買ったばかりの自分の土地の境界がわからなくなるという被害も発生した。数年前に造成地にたつ住宅を購入したところだったため、私にとっては衝撃的な被害であり、住宅の安全性により強い関心を持つようになった。

このような地震災害の経験と高層建物の設計を合理化するため、1970年頃から建築基準法改定の検討が進められ、京大耐震グループは独自の第

2案を提案していたが<sup>7)</sup>、当時の研究成果を取り入れた斬新的な内容であったためか、もう少し簡単な表現を取った案で改定されることになり、1981年に建築基準法が、いわゆる新耐震設計法としてスタートした。先に述べた建築学会の規準改定と建築基準法の改定の重要性和今回の兵庫県妥当性が南部地震の被害状況に表れている。

## 5. 防災研究所若林研究室での振動実験

京都大学防災研究所には恩師の南井先生が地盤震害部門を担当しておられたので研究所の年報には既に何度か投稿してきたが、1979年に防災研究所に新しく設置された脆性構造耐震部門の助教授として、若林 實教授(現京都大学名誉教授)のもとで中村 武先生(現京都工芸繊維大学教授)とともに研究する機会をいただいた。それまでは、構造物の常時微動計測や振動実験は行ってきたが、いわゆる実物大に近いモデルの静的加力実験としては1967年の架構実験のみ(1968年報)で、実験的研究は殆ど行っていなかった。

若林研究室では従来から建築構造物の耐震安全性に関する精密な実験的研究を行ってきており、そのころ南井先生の努力により完成した人為地震発生装置は、2方向加力の可能な世界でも新しい振動台であったが、当時、振動台を用いた1方向入力による1層鉄骨架構の振動台実験を研究室の中村先生らが行っていた。1980年富田真一君(現NTTファシリティーズ)の1層偏心モデルの振動実験から学生の指導に当たり、断面力間の相互作用を考慮した解析と実験結果を比較したが必ずしも満足のいく結果は得られなかった(1981年報)。

1980年にはYugoslaviaのT. Basotov氏とともに1層立体架構の下部にスライド機構をもつモデルを用いた免震構造の振動実験を行い、動摩擦力



Photo 3 Jumping phenomena of chair on the garden due to Oitaken-Chubu Earthquake

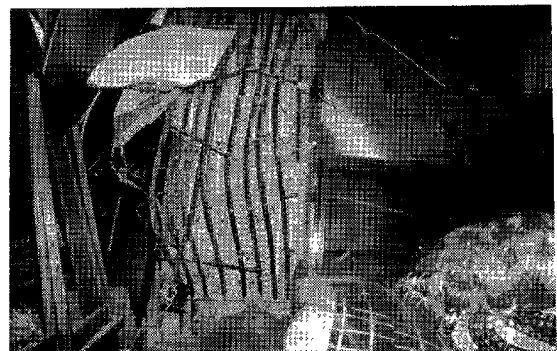


Photo 4 Shear failure of RC-column due to Miyagiken-Oki Earthquake

の作用する免震構造物の復元力と減衰力をモデル化し、上下動によって免震効果が減少することを解析的に明らかにした (1981 Bull)。阪神大震災後、免震建物の需要は急速に伸びているが、上下振動に対する解決策は検討段階にある。Fig.9 に動摩擦係数の異なるデバイスを想定したときの免震架構の相関変位とエネルギー応答を示す。また、やはり Yugoslavia の M. Tomazevic 氏 (現 National Building and Civil Eng. Institute, Slovenia 教授), 下戸芳寛君 (現清水建設) と行った煉瓦造壁の振動実験 (1981 JEES) では、鉄筋補強の効果などを明らかにした。Fig.10 は煉瓦造壁の振動実験の概観である。林 康裕君 (現清水建設), 斉藤哲朗君 (現福井村田製作所) らによる鋼3層モデルの振動実験は部材各部の地震時の応力がひずみ速度の影響を受けることを示した (1970 近畿)。このように、主として振動実験と応答解析についての研究を行ったが、モデルの作成から実験の手法など多くのことを若林研究室で学ぶことができた。しかし、

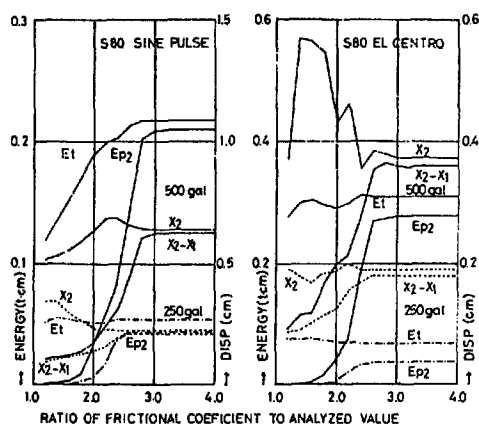


Fig.9 Energy and displacement responses versus dynamic friction coefficient of isolated system

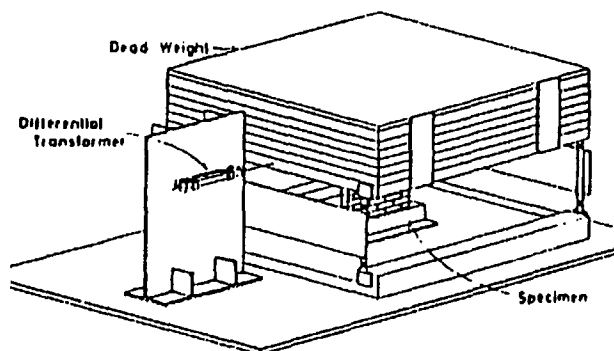


Fig.10 Dynamic test of brick masonry wall by M. Tomazevic et al.

結局今日まで自分自身で満足のいくモデルを作ることには出来なかった。

これまで解析的に検討してきた断面力間の相互作用解析をさらに検討するため 1981 年には北原昭男君 (現防災研究所助手) の協力を得て、本格的な2方向地震入力を受ける立体架構の振動実験を開始した (1982 年報)。

対象とした架構は2方向で異なる断面をもつ長さ 10cm の柱4本からなる剛床の架構であり、1方向地動、2方向地動が作用する場合の履歴性状を求めた結果、1方向の入力の場合には、鋼材の性状を反映して紡錘形のきれいな履歴を描くのに対して、2方向入力の場合には断面力間の相互作用の影響を受けて複雑な挙動を示し、特に弱軸方向の変形が、断面力を減少させながら進展する傾向が見られた (Figs.11, 12)。また、1軸の履歴性状に Ramberg -Osgood 形の履歴を与え、降伏条件と塑性流れ則を導入した解析法をこの実験モデルに適用すると複雑な履歴を再現できることを示した。

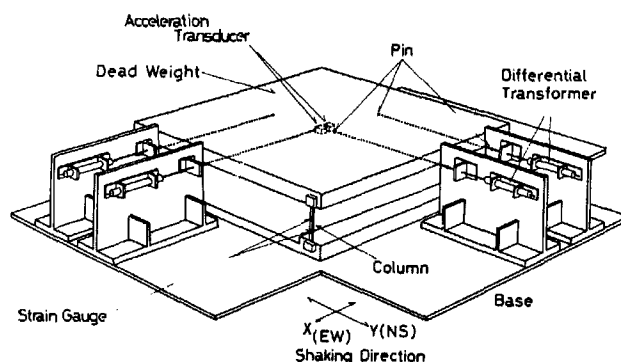


Fig.11 Dynamic test of steel frame due to bi-axial ground motion

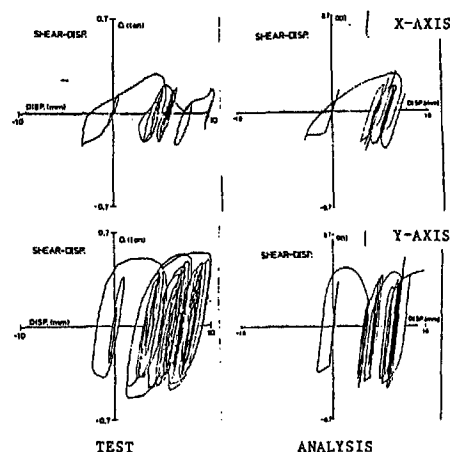


Fig.12 Comparison between experimental and theoretical hysteresis due to bi-directional ground motion

この実験結果は、地震工学シンポジウムにおいて発表した(1984 WCEE)。

その後、桑名 斉君(現西日本旅客鉄道)も加わり、2方向入力によって構造物の終局安全性がどのように変化するかを数値解析によって確かめたが(1984 年報)、非線形地震応答の常で、入力周波数特性と非線形挙動による固有周波数の変化などにより一般的な結論を導くには至らず、後に再び検討することになった。

鉄筋コンクリート造建物では連層耐震壁が高層住宅に多用されるが、連層壁にはせん断力が集中し、壁直下の基礎が転倒モーメントにより浮き上がる場合があり、その結果抵抗力が減少する傾向が見られる。この現象を把握するため、久保尚文君(現佐藤工業)、陶器浩一君(現日建設計)らとともに連層壁基礎の上下方向に浮き上がり可能なジョイントを設けた連層耐震壁付き架構の振動実験を行い、履歴特性をモデル化して実験結果と比較した(1985 年報)。Fig.13 は a)柱脚ヒンジ・壁脚の浮き上がりを考慮、b)柱壁とも浮き上がり考慮、c)柱脚・壁脚ともヒンジの場合の履歴であり、浮き上がりがあるとスリップ形状の履歴を示すことが判る(1986 JEES)。

当時、若林研究室では、袖壁付き柱の耐震性(1985 年報)を社家寛子君(現社家一級建築士事務所)、RC造建物の曲げ変形、せん断変形を統合する履歴モデルの統一的表現を渡辺泰志君(現清水建設)・田中 宏君(現大信興業)(1985 年報)、SRC架構を大橋直也君(現竹中工務店)中野 尚君(現第2電々)らが主として中村先生の指導で研究を進めた。

1983年に日本海中部地震(1983.5.26)があり、多くの小学生が津波の犠牲者となった。能代市の木

造り町は地盤の液状化によって、木造建物が倒壊し、浪岡町ではRC造の病院が大破した。残念ながら、その時は、木造住宅の被害の大半が液状化など地盤の変状によるものであったため、私自身それほど関心を持たず、RCの病院被害を中心に調査していたのは迂闊であった。浪岡病院の調査は制限を受けていたため当時院生の北原昭男君を同行出来なかったため、10年後に都市耐震で調査する事になったときの参考にならなかったのは申し訳なく思っている。

若林研究室に入った頃、母が入院して、病院に寄り道するのが日課であったせいか、軽い胃潰瘍を患ったため、若林先生の奥様から、研究室が替わって気苦労されたのでは、心配していただいたのには恐縮したが、そんな思いやりのある若林研究室であった。若林先生の退官記念出版で、松井千秋先生(現九州大学教授)、辻文三先生(現京都大学教授)、中村武先生他多くの教え子が熱心に準備を進めておられたのもなるほどと思われた。

## 6. 脆性構造耐震部門を担当して

1985年若林 實先生が定年でご退官になり、脆性構造耐震部門を担当することになった。同年中村 武助教授が塑性構造耐震部門から配置換えとなり、1991年まで共に研究室を運営した。先に述べた陶器浩一・斉藤哲朗・久保尚文の諸君が1986年3月に最初に修士課程を修了した。

北原昭男君と一緒に研究を進めた2方向入力に対する振動実験は非常に興味ある結果を得ることができたが、2方向入力に対する一般的な結論を導くためには、ランダム応答による統計的な応答

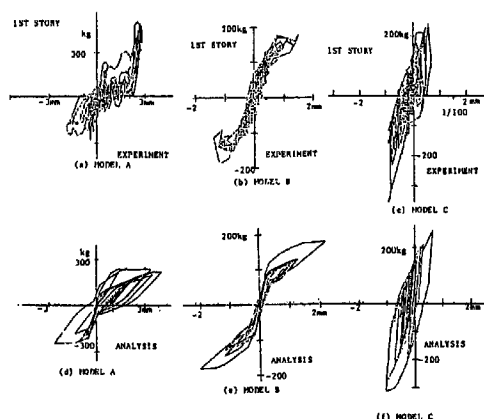


Fig.13 Hysteresis due to up-lifting phenomena of shear wall building

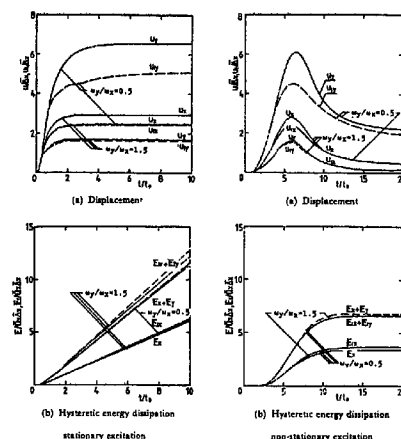


Fig.14 Effect of bi-directional ground motion on the random responses of space frame

性状を把握することが必要であった。1986年に防災研究所に都市施設耐震システム研究センターが設置されたのを機会に北原昭男君が助手として戻り、細川高志君（現四国電力）と共に上述の研究を進めることになった。

2方向断面力の動的相互作用効果を導入したランダム外乱を受ける1層架構の二乗平均値応答解析手法を、鈴木祥之先生の協力を得て導出し、部材靱性率は2方向入力によって増加するが、全エネルギー応答は個別の1方向応答の和と大差ないことなどを示した（1988 Bull）。Fig.14はランダム外乱の作用する1層架構の変位応答とエネルギー応答に及ぼす2方向入力の影響を示している。

## 7. アメリカでの4ヶ月

その年、文部省の在外研究員として4ヶ月アメリカに行く機会があり、California大学 Berkeley校のJ. Penzien教授の元で2ヶ月半を過ごした。

Penzien教授のところでは、地盤一構造物系の動的相互作用に関する講義にも参加し、討論も行って勉強になったが、毎日の生活はRichmondのCampusで文献を読んだり、当時Wayn State Universityから出向していたH. Aktan教授やClough教授、Bertero教授らと話をするのが楽しみであった。この間、日米の研究体制や習慣の相違など多くのことを学んだ。たとえば、技官・秘書は自分の仕事に対する自覚と責任を意識して秘書室・実験室での活動を統括しており、教官もそれに従うという体制が確立している。総合防災研究部門では、そのあたりの合理化を進めつつあるが、研究室の配置の問題が解決していないため、防災研究所全体で取り組むべき問題となっている。P. Spanos教授の招待講演も、年輩の先生方も参加して、コーヒーを飲みながら、講演の途中で議論を

挿みながら行ったりしている。たまたまPenzien教授の退官記念パーティに参加する機会があったが、日本におけるような長たらしい挨拶は一切なく、バイオリンの音を聞きながら三々五々に集まった人たちがワインを飲み、雑談しているうちにPenzien教授のお話が始まるといった和やかな雰囲気だったのが印象的である。

滞在中にSan Francisco市の郊外のPoint Arays公園までH. Aktan教授に案内してもらった。Fault Trailと呼ばれている散歩道に、1906年に甚大な被害が発生したSan Francisco Earthquakeによる露出断層の軌跡が保存され、地震の起こり方、被害の様子などを立て看板で説明して、市民が散歩をしながら自然の驚異を理解できる仕組みが作られていることを知った（Photo 5）。最近になって、根尾谷断層記念館や郷村断層跡などを訪れることができたが、兵庫県南部地震でも野島断層の記念館だけでなく、たとえば、阪神高速道路や市庁舎など、どこか被害の事実を残せなかったかと惜しまれる。

Stanford大学でのKravinkler教授の精密な縮小モデルの実験、UCLAでのHousner教授によるMilican Libraryの紹介、同級生の福島勉君によるアメリカでの住宅生産の現場説明、Texas大学Jirsa教授夫妻とのCross river trailなど興味ある経験をしてMexicoへ向かった。Mexicoでは木青木紀男先生、Lomnits先生のお世話になったが、1985年に大地震があり、3年を経過した時点に訪問したが、トラテルリコの高層共同住宅の被害跡がそのまま残っており、メキシコの復興の遅れを心配したが（Photo 6）、日本の経済レベルを考えれば、兵庫県南部地震後の仮設住宅が未だ半数残されている現状はあまり自慢出来る状態でもない。

その後、Missouri-Rolla大学でF. Y. Cheng教授のお世話になった後、次の滞在地 Urbana Champaign



Photo 5 Earthquake trail due to the 1906 San Francisco Earthquake



Photo 6 Mexico City 3 years after the 1985 Mexico Earthquake

に着いた。Illiminois 大学の Y. K. Wen 教授は当時私と同じ多次元入力と多次元挙動についての確率論的研究を行っていたため、イリノイ大学で講演も行い、活発な議論を戦わすこともできた。帰国後、南井先生のご意見も伺い、若干内容を修正して日本で開催された第9回世界地震工学会議に発表した(1988 WCEE)。

アメリカでの4ヶ月はいろんなことを学ぶことが出来た。たとえば、技官が自分の仕事にプライドをもち、エキスパートとしての能力をそなえ、実験研究システムも技官が中心となっていること、若手研究者が associate professor として独自の研究を進める反面、研究費確保のため研究内容が時流に乗らざるを得ない状況にあること、日本と違ってパーティの企画にご祝辞は一人か二人で参加者全員が同じ立場でお祝いをしていることなどである。自分の故郷の歴史をよく理解していることにも感動した。

一方、脆性構造耐震部門を担当することになって半年後に出張したため、当時の院生である谷田憲司君(現大林組)、金本忠義君(現神戸市)には十分指導出来なかったことを反省している。

## 8. インド・ネパール国境地震の調査

4ヶ月のアメリカ滞在から帰国して間もなくインド・ネパール国境でマグニチュード6.4の地震があり、防災研究所の佐藤忠信先生、名古屋工大の久保哲夫先生、北海道大学の村上ひとみ先生(現山口大学助教授)の4人で地震の2週間後に調査に出かけた。海外での本格的な被害調査の最初で最後の機会であった。

突発災害に対する科研費の調査計画を東大の伯野先生と文部省へもっていくと、担当の人から「この地域の調査を行って日本にどう貢献するんです



Photo 7 Damage of brick masonry houses due to the 1988 Nepal-India Border Earthquake

か」と詰問された。国際防災の10年(IDNDR)に関する国連決議の出る前のことである。その時は、世界の自然災害の軽減のために日本も積極的に調査研究を行うことが重要であるとの見解を述べたように記憶している。

被害の大きい場所は、インドで最も貧しい町といわれるパトナのダーバンガとネパールの東部ダーラン、ダンクッタ、ピラトガナルであり、被害の大半は煉瓦造あるいは日干し煉瓦の2階建て建物の全体崩壊またはゲーブルウォールと呼ばれる妻壁の転倒であった。被害を受けた建物と同じ建て方の建物を近隣の協力によって建てている状況に、防災と経済の接点をみた(Photo 7)。

ここでは、地震記録のない地域での震度を、カトマンズの観測記録と地形図から推定し、煉瓦造やRC造の耐力から推定した入力加速度の値、あるいは液状化した砂の粒度試験によって検証することを調査班全員で試みた。街区一円の全数調査、アンケート調査から被害の一般的特性を示した(1989 科研費)。

その後国際防災の10年の関係で亀田教授らと上海の同済大学と共同研究する機会があり、中国を訪問して、北原助手と煉瓦壁の復元力のモデル化を行い、地震応答解析によって上海での被害推定を行った(1993 DPRI)。

## 9. 都市耐震センターと釧路沖地震

1986年に防災研究所に都市施設耐震システム研究センターが設置された。当時南井良一郎先生が担任しておられた地盤震害部門から助手のポストを都市耐震センターに出したことから、助手2名は建築関係の人を当てるとの合意がなされてい

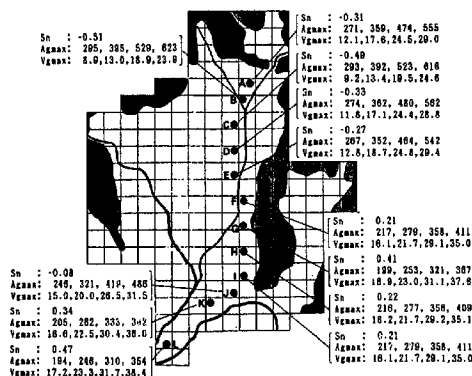


Fig.15 Response of surface ground in Kyoto area

たと同っている。ただし、今後、助教授ポストの要求が実現すれば建築系の助教授として、助手のポストは土木にわたすと言う話も聞いた。助手の一人は建築関係の研究を、もう一人は都市耐震の研究を、ということで、都市耐震に関する研究を行う助手として北原昭男君が助手となり、一緒に研究を進めることになった。

最初に手がけたのは、京都市域を対象とした地震被害想定であり、日本で最も古い木造建物の比率が高い京都市内の木造建物の構造別、地域別耐震性分布を京都市の資料から把握し、京都市西部と北部を起震断層と想定した場合の市域の被害想定を行ったものである。この研究は北原君を中心に、学生の関戸嘉紀君（現竹中工務店）、龍沢正之君（現朝日新聞社）、松浦純也君（現外務省）らの協力を得て行った。堀田洋之君（現清水建設）とは地盤特性を考慮した京都市域の被害想定の研究を試みた。Fig.15 は京都市各地域の地表の加速度・速度の推定最大値である。木造の復元力特性を実験データから推定し、想定地震による各小学校区での被害率を求めた（1987 年報）。

1986 年に中国から機械工業部第 7 設計研究院の王昌貴氏と国費留学生、喻徳明君（現香港の設計事務所）が来日し、喻君はその後 10 年間日本で滞在して博士号を取得した。彼の研究テーマは三次元入力的作用する RC 構造物の耐震設計に関す

る研究であり、高層建築で見られる柱の引張曲げ破壊の性状を考慮した応答解析と上下方向地震動の性質が構造物の安全性評価に及ぼす影響を明らかにしたものであり、非対称降伏曲面状態となる RC 柱部材に繰返し力が作用する場合には塑性軸変形が一方に累積すること、総合的な層間変形には動的軸力の影響は必ずしも多くないが、部材レベルの応答には影響することなどを示した（1991, 1992 年報）。Table 1 はどのような架構に上下動の影響が水平動との関連で大きくなるかを、水平と上下の同時入力による応答を、水平動に対する比として表しており、上下地動の特性と構造物の動特性の影響によって異なることを明らかにした（1993 建論）。

この頃から、室内の地震被害についても北原先生が中心に研究してきたが（1992 年報）、1993 年の釧路沖地震はいろんな課題を耐震研究に与えてくれた。釧路地方気象台の地表で観測された加速度記録を Fig.16 に示す。建物内部の記録では 922gal、地表では 711gal の加速度最大値を示した

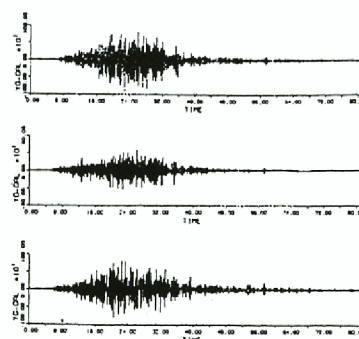


Fig.16 Accelerograph at the Kushiro Branch of Japan Meteorological Agency due to Kushiro-Oki Earthquake

Table 1 Effects of vertical ground motion on the beams of different types of frame structures

| SPAN RATIO L/H=2.0 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
| Number of Story    | 1st  | 5th  | 10th | 15th | 20th | 25th | 30th | 35th | 40th |  |  |
| 5                  | 1.07 | 1.11 |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 10                 | 1.03 | 1.05 | 1.12 |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 20                 | 1.03 | 1.03 | 1.04 | 1.07 | 1.09 |      |      |      |      |  |  |
| 30                 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.04 | 1.05 | 1.10 | 1.08 |      |      |  |  |
| 40                 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.04 | 1.05 | 1.07 | 1.12 | 1.35 |  |  |

| SPAN RATIO L/H=3.0 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
| Number of Story    | 1st  | 5th  | 10th | 15th | 20th | 25th | 30th | 35th | 40th |  |  |
| 5                  | 1.11 | 1.14 |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 10                 | 1.08 | 1.10 | 1.10 |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 20                 | 1.07 | 1.04 | 1.01 | 1.12 | 1.21 |      |      |      |      |  |  |
| 30                 | 1.07 | 1.07 | 1.00 | 1.00 | 1.10 | 1.16 | 1.43 |      |      |  |  |
| 40                 | 1.06 | 1.07 | 1.07 | 1.08 | 1.08 | 1.09 | 1.12 | 1.19 | 1.50 |  |  |

| SPAN RATIO L/H=4.0 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
| Number of Story    | 1st  | 5th  | 10th | 15th | 20th | 25th | 30th | 35th | 40th |  |  |
| 5                  | 1.13 | 1.25 |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 10                 | 1.11 | 1.14 | 1.20 |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 20                 | 1.10 | 1.11 | 1.12 | 1.18 | 1.41 |      |      |      |      |  |  |
| 30                 | 1.10 | 1.10 | 1.11 | 1.12 | 1.15 | 1.22 | 1.62 |      |      |  |  |
| 40                 | 1.09 | 1.10 | 1.10 | 1.11 | 1.12 | 1.12 | 1.17 | 1.95 | 1.59 |  |  |

| SPAN RATIO L/H=5.5 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
| Number of Story    | 1st  | 5th  | 10th | 15th | 20th | 25th | 30th | 35th | 40th |  |  |
| 5                  | 1.20 | 1.33 |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 10                 | 1.10 | 1.20 | 1.35 |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 20                 | 1.10 | 1.16 | 1.12 | 1.26 | 1.48 |      |      |      |      |  |  |
| 30                 | 1.14 | 1.16 | 1.16 | 1.17 | 1.21 | 1.31 | 1.56 |      |      |  |  |
| 40                 | 1.13 | 1.14 | 1.15 | 1.15 | 1.17 | 1.19 | 1.23 | 1.34 | 1.90 |  |  |

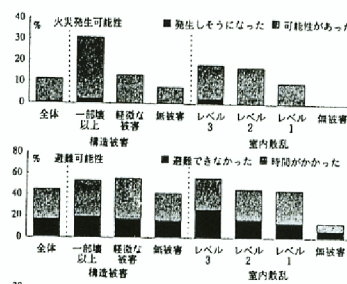


Table 2 Cause of disability for evacuation

| 避難できなかった（避難しなかった）理由 | 割合  |
|---------------------|-----|
| 出入り口が閉まらなかった        | 7%  |
| 出入り口が家具などでふさがれた     | 9%  |
| 室内が散乱した             | 3%  |
| けがをした               | 1%  |
| 揺動で動けなかった           | 79% |
| 揺動で階段が降りれなかった       | 2%  |
| 暗くて動けなかった           | 3%  |
| 家具などが入っていた          | 4%  |
| 火の発生を恐れていた          | 5%  |
| 家具が倒れないように押さえていた    | 4%  |
| かへ出ないほうがよいと判断した     | 4%  |

Table 3 Cause of injury

| けがの原因        | 本アンケートの結果 | 釧路市の調査結果 |
|--------------|-----------|----------|
| 破れたガラスなどで    | 18(72%)   | 63.8%    |
| 落下物・転倒物に当たって | 3(12%)    | 12.1%    |
| つまずく・階段から落ちる | 2(8%)     | 8.7%     |
| ストーブなどの火で    | 0(0%)     | 5.2%     |
| 網などの湯で       | 1(4%)     | 19.8%    |
| その他          | 1(4%)     | 2.6%     |

Fig.17 Questionnaire responses of damage in rooms due to Kushiro-Oki Earthquake

が、直接の死者はなく、造成地に建つ木造住宅の何棟かが地盤変状によって倒壊したのみであった。

釧路沖地震の翌々日から都市耐震センターの亀田先生、林先生、岩井先生（現広島工大助教授）、北原先生、耐震基礎の佐藤先生、広島工大の能島先生（現岐阜大学助教授）と現地調査にでかけた。それぞれ専門が異なるため連携は十分とは言えなかったが、お互いの特徴を生かした都市の総合的な防災研究に関する最初の共同調査であった。

その後5月に北海道建築士会釧路支部・十勝支部の会員を対象にアンケート調査を実施し、建物被害（特に室内被害）、ライフライン、生活支障、復旧過程などについての実態を把握し、木造だけでなく、鉄骨造建物もノースリッジと同様な被害を受けている可能性のあることを指摘した。これらの研究は、同センターの赤松純平先生、金沢工大の鈴木有先生の協力も得てセンターの研究報告として纏められた（1995 都市耐震）。Fig.17 はアンケート調査の結果から得た、家具別・地域別の室内被害の分布状況を示している。

日本建築学会では 1993 年 8 月に 6 課題の調査班を組み、地盤の常時微動観測や学校建築を対象

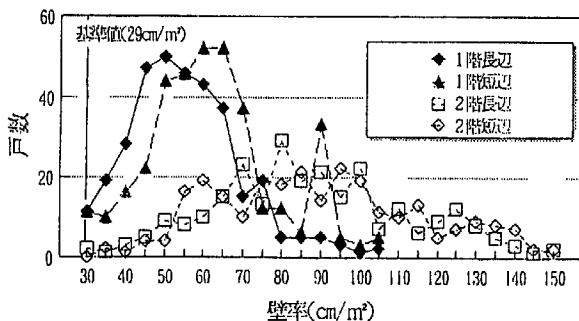


Fig.18 Wall-area ratio of wooden houses in Kushiro City



Photo 8 Damage of wooden house on the hill of Midorigaoka due to Kushiro-Oki Earthquake

とした微動観測を行った。調査の目的は最大加速度値が大きいのに被害が少ないのは何故かという疑問から出発したものであった。私たちの研究室でも5校の微動観測を担当した。さらに、独自に木造建物の微動観測を研究室と防災研究所市川信夫氏、金沢工大の鈴木有先生と共同で行い、地盤一建物系の動特性と被害の関係を明らかにした（1995 年報）。

また、釧路市から提供された 682 棟の木造建物の資料を分析して、壁率の分布状態、仕上げ材の特徴、基礎工事の地域性などを検討した結果、被害が軽微であった理由として、1) 屋根仕上げが軽いこと、2) 寒冷地のため開口が少なく、壁率が大きいこと、3) 地表の凍結に対処するため、基礎梁の埋め込みが大きいこと、などを指摘した（1995 JEES）。Fig.18 は釧路市が調査した建物平面図から算出した壁率の分布状況を示しており、寒冷地のため基準を上回る壁量のあることを指摘した。Photo 8 は緑が丘の地盤変状に伴う木造住宅の被害であり、この地域は地滑り危険地域に指定されており、宅地造成の耐震性が今後の都市空間の脆弱性保持に重要であることを指摘した。また、アンケートでは地震後の修理状況についても集計しており、鉄骨造建物の修理がかなりあることから、仕上げ材で隠れた部分の被害に注意すべきことなどを指摘した（1995 都市耐震）。

最近柱を弾性設計し、梁のエネルギー吸収に期待する設計が一般化している。秋元理仁君の協力を得て、柱を弾性とし、梁降伏型架構を対象に、地盤特性を考慮した構造物と構成部材の動特性を

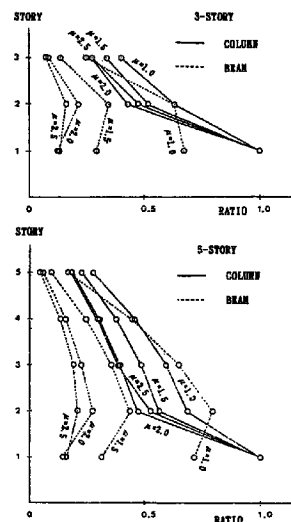


Fig.19 Optimum member distribution under the homogeneous ductility responses

求める手法を等価線形化手法により展開し、地震入力の不規則、不確定さを考慮して、ランダム入力の作用する場合の、梁部材の塑性率および柱部材の応力度を制約条件とする部材レベルの適正分布を求め、塑性挙動の増大に伴って適正分布も異なること、地盤の動特性に応じて適正せん断力係数が異なることを示した（1991 年報）。Fig.19 は塑性率を制約条件とする柱・梁部材の剛性の適正分布である。

## 10. 鈴木祥之先生との研究室

1988 年 1 月中村 武先生の転出後は、1990 年に塑性構造耐震部門から脆性構造耐震部門に配置換えとなった鈴木祥之助教授と研究室をともにすることとなったが、その年の秋から在外研究員としてアメリカとイギリスへ 1 年間出張されたため、今日まで実質 6 年余りの間であったが、その間、南井良一郎先生のご逝去、防災研究所の改組、そして、兵庫県南部地震と、まさに激動の期間であった。

この間の研究室の活動は主として鈴木祥之先生を中心に行った。井上貴之君（現鹿島建設）は九州大学松井研究室から大学院に入学し、確率論的多自由度地震応答（1992 近畿）、岡崎 敦君（現関西電力）は波動伝播の時間領域での解析、岡潤君（清水建設）はファジー制御手法や H<sup>∞</sup> 制御理論による制震、山岸義晃君（現大阪大学）は応答曲面法を用いた確率論的応答解析・信頼度評価法の研究を行ってきた。韓国の大学院を出て再び

日本の大学院に入学した Bae Gi-hwan 君は構造物の確率論的同定・応答推定法と制震システムへの応用の研究、竹中工務店技術研究所の山本雅史君は社会人博士課程として、大地震にも適用し得る構造制御の研究、荒木時彦君は不確定構造物系の耐震信頼度解析法の研究（1996 近畿）を現在も継続して行っている。ハルビン建築大学の李恵助教授は、1997 年 11 月から半年間、招聘学者として構造制御理論と振動台による検証実験を行って帰国した。

北山宏貴君（大林組）は 3 次元地震動の作用する立体構造物の地震応答解析手法の導出を試み、谷 敬大君（大林組）、石原大雅君は北原先生と 3 次元地震動の作用する鋼構造物の振動実験を行って、柱降伏に及ぼす上下動の影響について解析した。Photo 9 は兵庫県南部地震後に導入された 3 次元振動台による 4 層鋼構造物の実験風景である（1998 JEES）。

伊藤嘉彦（東日本旅客鉄道）、山口 拓（東日本旅客鉄道）、竹本智明（医療経済研究機構）、森浩二（浅沼組）、伊藤 啓（三菱重工）、菅野悦也（フォルム建築設計工房）、笹田秀幸（大林組）、標 智仁（帰省）、中山裕樹（東大大学院）、平山貴之の学生諸君とも研究生活をともにすることができた。また、滋賀職業能力訓練大学の平野直樹先生と同校の学生とも兵庫県南部地震をテーマにした研究を進めた（1997 近畿）。

1991 年 9 月、学生時代からこの日まで全ての面で教えられ、支えていただいた南井良一郎先生が他界された。私にとっては勿論、おそらく、建築学界にとっても、防災研究所にとっても、痛恨の極みであったに違いない。棚橋先生が「人の能力は平均すれば皆同じで、いかに集中するかが大切である」と天才ならではの言葉を新聞紙上に書かれたのを思い出すが、南井先生にもびったりの内容である。先生のお人柄と集中力、その一端でも、私たちの周囲に残されることを願ってやまない。

## 11. 防災研の改組と兵庫県南部地震

1985 年にスタートした都市施設耐震システム研究センターが 10 年の時限を迎えることを契機に防災研究所の改組の問題が現実化してきたのは、入倉孝次郎教授が将来計画検討委員会の委員長をしていた 1993 年頃からである。

都市耐震センター発足以来、亀田弘行先生、赤松純平先生、岩井 哲先生らと研究を共にし、また、地震災害の調査や地震・地震動と関わりのあ

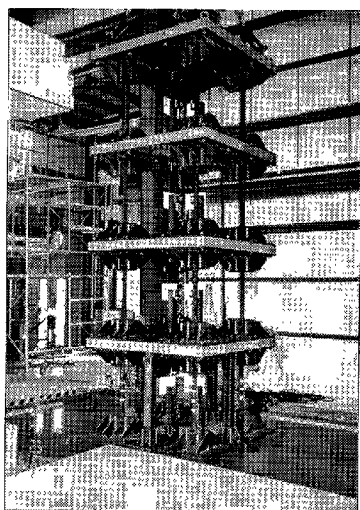


Photo 9 Dynamic test of 4-story steel frame due to 3-dimensional ground motion

る耐震構造の研究をしてきたことから、土岐憲三先生、入倉孝次郎先生らとも親しく議論してきたため、防災研究所の改組には積極的に他分野との共同研究を推進するのがベターだと考えていた。ただ、その時点で委員長から定員を供出できないところは新しい分野を構築するのは不可能だ、と言われたことを真に受け止めたのは今から思えば迂闊であったとしか言いようがない。

ともあれ、新しい部門である総合防災研究部門の核として私たちの脆性構造耐震部門が関与することになり、耐震研究という立場から、エンジニアリングをベースにした上に、より広い視点から防災研究を行う部門・分野として議論を重ねてきた結果が今の総合防災研究部門であると認識している。兵庫県南部地震の発生した1997年5月に改組が実現することとなった。総合防災研究部門では発足当初、亀田弘行先生、岡田憲夫先生、鈴木祥之先生、岩井 哲先生と私の5名で始まり、後に萩原良巳先生、多々納裕一先生が加わって、研究発表やゼミ旅行などを通じて、防災研究に関する異文化の交流と研究領域の拡大・発展を目指してきた。

同時に、防災研究所が全国の共同利用研究所としてスタートすることになり、共同研究のお世話をさせていただいた。私たちの研究室では、北浦かほる先生（大阪市大教授）代表の「室内被害」（1997 共同研究）、岡田先生の「町づくり」（1997 共同研究）、鈴木祥之先生の「生産・社会システム」、亀田先生の「防災情報」、萩原先生の「石油流出」などの共同研究、研究集会に加わった。

社会の要請により形式は整い、予算も増えたが、結果をせっかちに要求される現状で、研究者はますます忙しくなっている。若い人たちがこの

ような現状に流されずにじっくり研究できる環境になればよいのだがと、気にするのは年寄りの杞憂であろうか。

IDNDR の特別事業については、日中地震地震防災をテーマに、亀田先生をリーダーとして中国の同済大学と、また、入倉先生をリーダとして中国国家地震局工程力学研究所と進めてきたが、平成9、10年度の国際学術研究により、中国西安で地震動の予測と災害軽減に関する日中 workshop を開催し、唐山地震と兵庫県南部地震の経験を共有するための、北京・唐山・昆明地域の地震活動と被害予測、構造物の耐震免震・制震手法など新技術の開発、総合防災計画についての討論を行った（1997 科研費）が、今年度も引き続き共同研究を進める計画である。

1997年1月17日午前5時46分の兵庫県南部地震は、丁度半世紀前の1945年8月16日正午の玉音放送とともに、私にとって一生忘れることのできないショッキングな出来事である。前者は自覚のない内に教え込まれた戦時体制の崩壊であり、後者は理解していたつもりの安全性の崩壊であった。

地震当日、高橋所長から突発災害の科学研究費による調査のまとめを依頼され、研究内容・組織の編成について二晩徹夜で文部省、各専門の研究者と連絡を取り合い、地震（代表安藤雅孝）・地震動（入倉孝次郎）・土木施設被害（佐藤忠信）・建築物被害（鈴木祥之）、社会的課題（林 春男）の5課題、55名の研究組織でスタートした（1995 科研費報告）。その後、次年度にも被害分析の研究を85名の研究組織により行った（1996 科研費報告）。そのため、すぐにでも現地視察をとの思いは実現しなかったが、鈴木祥之先生を代

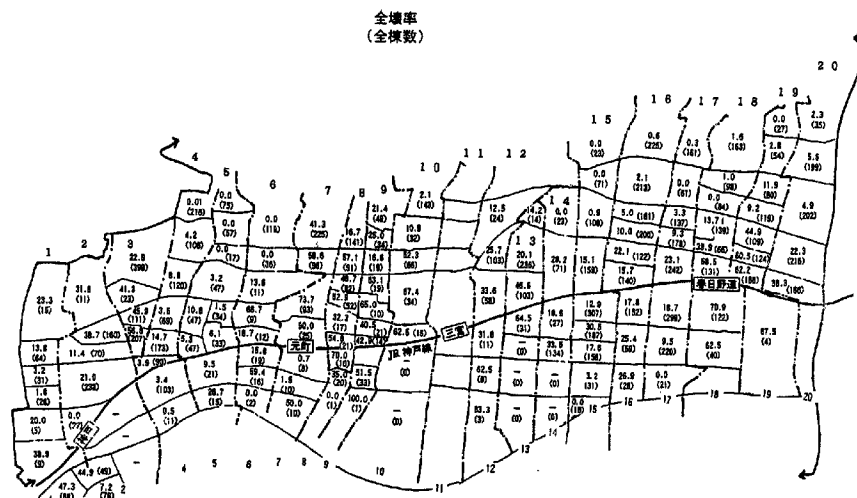


Fig.20 Damage in Chuuo Ward, Kobe City

表に、中島正愛先生、岩井 哲先生など被害を身近に感じた先生方が当日夜に車2台で京都を出発し、現地調査が行われた。

1月19日には日本建築学会近畿支部の耐震構造研究部会（主査：大阪工大竹内吉弘）が中心となり、調査方法を打ち合わせた。そのときに初動調査が生かされ、鈴木先生の意見によって、木造建物を含む全数調査を行うことになり、近畿支部の構造関係の研究者・技術者の他、関東からも多数参加して各被災地を分担調査を行うことになり、私たち防災研究所のグループは神戸市中央区を担当し、中島正愛先生らと速報を掲載した（1997 NDS）。

特に、耐震構造の関係者が積極的に被害の分布性状の調査に参加した背景には、専門家としての責任感や構造物応答に地盤特性の影響が顕著であるため地震動の分布特性を把握する必要性を認識してのことと考えられる。Fig.20 に中央区の街区毎の被害率を示す。

この初動調査の結果は、日本建築学会から災害調査速報として日本文と英文で出版され（1997 学会）、中央区の被害を鈴木祥之先生と、木造の被害を鈴木 有先生と担当執筆し、木造被害の原因として、1)平面計画 2)壁率不足 3)維持管理 4)重量屋根などを指摘した。

初動調査では定量的な評価が困難なため、芦屋市と宝塚市が続けている建物情報データベースと被害レベルの資料を分析して、建設年代別被害分布、建物種別毎の被害率、地域別被害率などを求めるとともに、住民の年齢構成と被害の関係などを明らかにした（1996 年報）。Fig.21 は芦屋市の木造建物の被害状況、Fig.22 はRC造建物の建設年代別の被害状況を示しており、木造建物は建設年代が古いほど被害が大きいこと、RC造建物は昭和40年前後の建物に被害が多く、建築基準法改正後は大きな被害は殆ど受けていないことなどを示した。西宮市は亀田先生が担当されていたため、データは頂いたがあまり検討していない。

阪神・淡路大震災は木造建物の倒壊による死傷者数が圧倒的に多かったが、早朝の地震で大半の住民は自宅で睡眠中のためであった。しかし、鉄筋コンクリート造や鉄骨造の建物の被害も中間層崩壊や溶接部の破断など相当数にのぼった。被害を受けた建物の大半は1981年の基準法改正以前の建物であり、以後の建物ではピロティ形式の建物など特殊な建物に限られると言われている。

日本建築構造技術者協会の協力により、激震地に建つ中低層RC建物263棟の1次耐震診断を行った（1996 年報）。このデータと学校建物のデータをもとに、林康裕氏らが想定した地盤の最大速

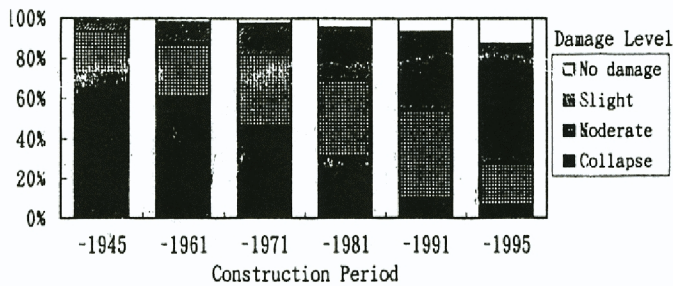


Fig.21 Damage ratio of wooden houses classified by construction year

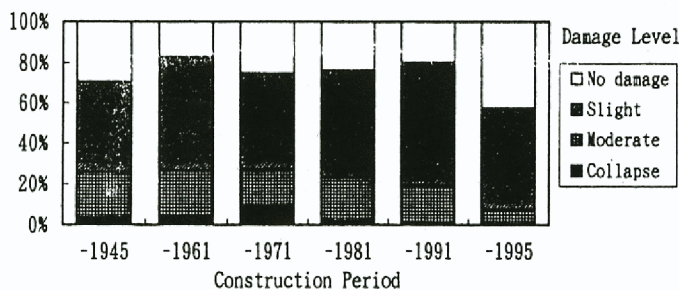


Fig.22 Damage ratio of RC structures classified by construction year

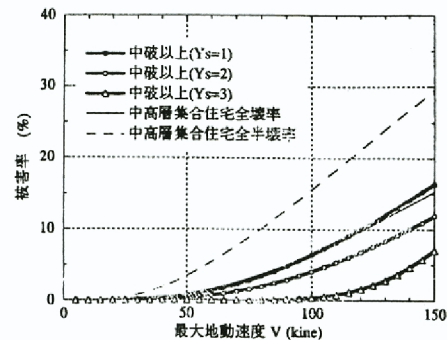


Fig.23 Damage ratio vs. maximum ground velocity of RC building in hit area

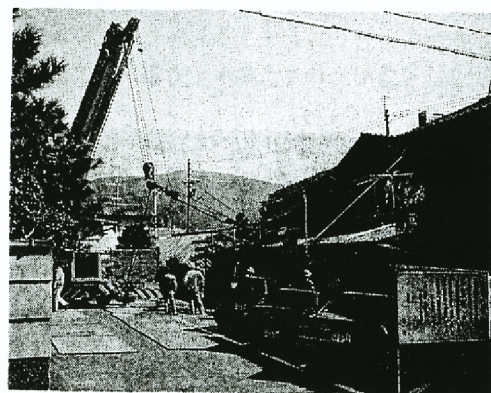


Photo 10 Static failure test of existing wooden house

度分布<sup>8)</sup>との関係を求め、樹型モデルによって解析した結果、建設年代区分による影響が最も大きいこと、建物の被害に及ぼす最大地動速度の影響は、耐震性能だけでなく、被害の程度によっても異なることなどを示した(1998 建論)。Fig.23 に RC建物の被害関数を示す。

兵庫県南部地震により木造建物が甚大な被害を受けたことから、研究室でも木造建物の耐震性向上に関する研究を進めるようになった。在来構法木造住宅の耐震性については鈴木先生が主として研究しているが、中治弘行君は土壁の正負載荷実験、実在建物の倒壊実験、微動観測など従来壁率評価の低いこの種の建物の耐震性評価と安全性向上に関する研究を継続して行っている(1998 住総研)。Photo 10 は鈴木祥之先生らが行った京都市内に建つ、土壁の在来構法木造建物の破壊実験である。

日本建築学会、土木学会、地震学会など5学会合同で災害調査報告の出版が企画され、東大の坂本 功教授と「木造編」の編集のお世話をする事になり、被災地各地の被害の実状に関する原稿を近畿支部の調査に加わった研究者にお願いした(1998 学会)。その中では研究室で行った芦屋市の地盤の微動計測など芦屋市を鈴木祥之先生がまとめたほか、調査した淡路島郡家の200年前に建てられた民家の被害や全体のまとめなどを執筆した。この報告により、被害の事実はある程度解明されているが、現在ある建物の耐震補強は木造に限らず、残念ながら遅々として進んでいないといわれている。

小中学校の耐震補強は文部省の予算措置によ

り、各都道府県で進められているが、木造その他の建物は私有財産であることが予算措置を困難にしている主因といわれる。持続的な安全性保持は社会資本の活用にもつながるため、市民・研究者・設計者・所有者・行政が一体となってあらたな設計システムを構築する必要があると思われる。

Fig.24 には新たな生産・社会システム構築のための構成図を提示している(1995 SINO-US)。

小倉正臣君(現長谷工コーポレーション)の協力を得て、地震の発生時刻に注目し、兵庫県南部地震を含む過去に起こった地震災害の発生形態の

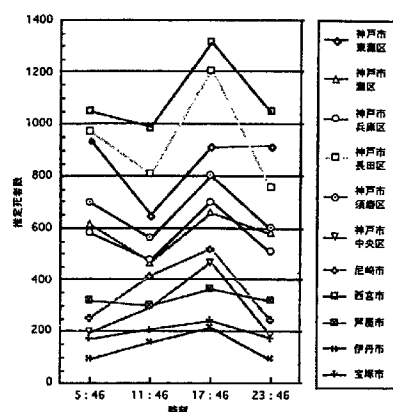


Fig.25 Estimation of human loss from earthquake occurrence time evaluated from the Great Hanshin Earthquake

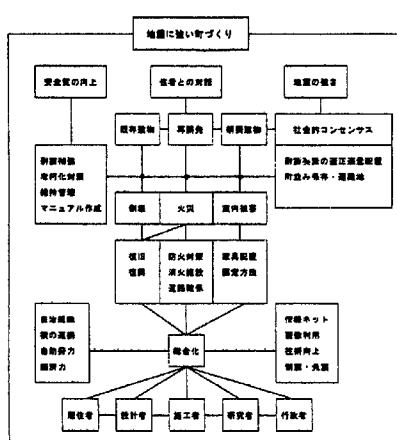


Fig.24 Flow of new system for improvement of aseismic safety in urban space

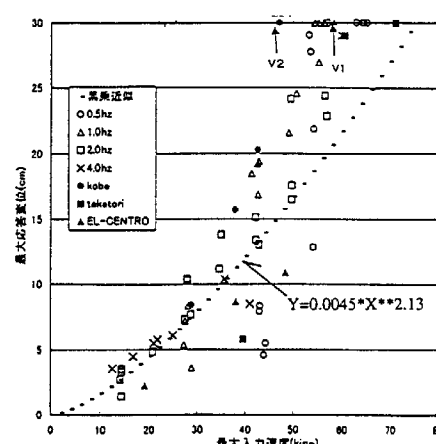


Fig.26 Relationship between displacement of book-shelf and maximum input velocity

資料を分析し、地震発生時刻による死傷者数の推定を試みた（1997 防災研）。その結果、Fig.25 に示すように、午後5時46分に発生した場合の死傷者数は現状の1.5倍程度に増加すると推定し、また、地域的には昼間人口の最も多い中央区の被害が増大するという推定結果を得た。

家具の転倒被害については釧路沖地震でも検討してきたが、大阪市大北浦先生が詳細な調査を行っている。現象把握を理論化するため、大阪の高見フローラルタウンの高層、中層、低層建物を対象に各層の地震応答を求め、最大加速度と被害の関係を明らかにした（1997 共同研究）。さらに、北原昭男君、瀬戸隆之君らと、後述する振動台を用いた室内実験から、家具の転倒条件について検討した。Fig.26 は家具のスケール、床仕上げなどの異なる家具類の転倒限界を推定した図である（1998 近畿）。

従来から、振動台の更新の要求を続けてきたが、鈴木祥之先生、中島正愛先生の努力により、地震の経験を踏まえた新たな展開として検討してきた振動台の設置が認められ、兵庫県南部地震規模の入力も可能な、アクチュエータと連動する3軸6自由度振動台を導入することができた。これまでに、室内被害実験、瓦屋根の耐震実験、3次元入力による4層鋼構造物の立体架構実験などを行い、現在も鈴木祥之先生が振動台を用いた構造制御実

験を継続している。従来の人為地震発生装置室は木造建物などの耐震実験室として利用できるように改装された。

また、鈴木祥之先生が20年ほど前から検討して実現できなかった地震観測ネットワークも認められ、京都市10地点に展開した3次元アレー強震応答観測システム（Fig.27）も京都市の協力を得て実現し、これまでに震度4を1回、震度3を3回記録している。このシステムには、宇治の喜撰山、防災研究所の実大実験架構、京都駅の観測システムも連動している。

小澤雄樹君（現東大大学院）の協力を得て、これまでに得られた地震記録から遠地地震として愛知県東部の地震、近地地震として京都府南部を取り上げ、各観測点の表層地盤の伝達関数、加速度波形の最大値、地中波形のフーリエスペクトルを求め、遠地地震では各サイトの最大値に差は少ないこと（図39）、地表と地中のスペクトル比により地盤特性を検出できることなどを示した。

また、京都市の防災活動の拠点である地上7階地下2階のSRC造の消防本部建物内部で記録された波形の解析から、固有周期は設計時の推定周期より短く、減衰定数は3～5%程度であること、近地地震では建物の2次モードが卓越し、遠地地震では1次モードの振動を示すこと、遠地地震のスペクトルから推定される固有周期は錦地震から得られる周期より若干長く地盤連成の性質を表すことなどを示した。

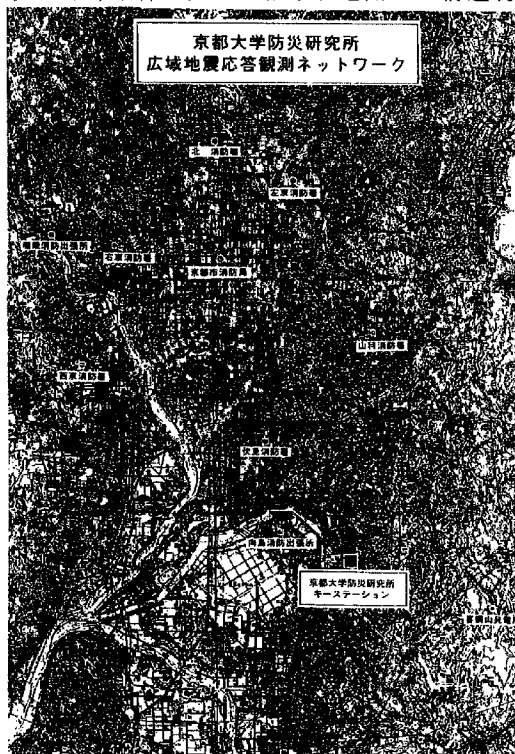


Fig.27 Observation network system of earthquake response in Kyoto city

Table 2 Maximum acceleration recorded at GL-40m and GL-3m in Kyoto area due to far field earthquake

| 観測場所 | 観測点深さ (m) |          | 地震1                  |                      | 地震2                |                     | 地震3 |    |
|------|-----------|----------|----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----|----|
|      | 地中        | 地表       | 地中                   | 地表                   | 地中                 | 地表                  | 地中  | 地表 |
| 本部   | GL -49.10 | GL -2.54 | NS: 11.3<br>EW: 10.8 | NS: 19.3<br>EW: 23.8 | NS: 6.8<br>EW: 3.8 | NS: 7.0<br>EW: 4.5  |     |    |
| 伏見   | GL -53.50 | GL -2.10 | NS: 15.6<br>EW: 9.1  | NS: 24.1<br>EW: 13.5 | NS: 3.3<br>EW: 2.8 | NS: 8.1<br>EW: 9.1  |     |    |
| 喜撰山  | GL -32.20 | GL -2.10 | NS: 3.4<br>EW: 4.4   | NS: 5.8<br>EW: 6.7   | NS: 2.1<br>EW: 3.0 | NS: 3.2<br>EW: 4.2  |     |    |
| 北    | GL -39.85 | GL -3.90 | NS: 6.3<br>EW: 12.7  | NS: 12.5<br>EW: 25.2 | NS: 3.4<br>EW: 3.1 | NS: 5.3<br>EW: 5.6  |     |    |
| 向島   | GL -49.90 | GL -3.00 | NS: 7.5<br>EW: 4.6   | NS: 21.5<br>EW: 16.8 | NS: 2.2<br>EW: 3.9 | NS: 8.0<br>EW: 9.6  |     |    |
| 西京   | GL -35.69 | GL -3.30 | NS: 13.2<br>EW: 11.2 | NS: 28.2<br>EW: 25.5 | NS: 4.1<br>EW: 5.0 | NS: 6.3<br>EW: 8.3  |     |    |
| 嵯峨   | GL -39.77 | GL -3.10 | NS: 24.6<br>EW: 28.6 | NS: 40.4<br>EW: 20.9 | NS: 3.9<br>EW: 3.4 | NS: 4.4<br>EW: 4.5  |     |    |
| 左京   | GL -34.38 | GL -2.01 | NS: 21.2<br>EW: 21.6 | NS: 75.3<br>EW: 44.6 | NS: 5.5<br>EW: 8.6 | NS: 6.9<br>EW: 11.6 |     |    |
| 右京   | GL -39.89 | GL -4.05 | NS: 11.5<br>EW: 10.6 | NS: 20.9<br>EW: 25.2 | NS: 4.7<br>EW: 3.9 | NS: 7.4<br>EW: 5.2  |     |    |

## 12. 30年を振り返って

昭和42年に工学部の助手にさせていただいてから工学部建築系教室で12年間、昭和54年に防災研究所脆性構造耐震研究部門に赴任してから20年間、定年まで2年を残して辞職することになりました。

省みますと、すばらしい先生方の教えを受け、暖かい同僚の励ましに支えられ、研究を共にしてきた後輩の協力のおかげでここまで研究を続けることができました。

特に、小堀鐸二先生、南井良一郎先生、若林 實先生には不肖の弟子を公私にわたり、暖かく導いて下さり感謝の気持ちに絶えません。金多 潔先生には学生時代から、森田司郎先生には防災研究所の研究担当として、巽 和夫先生には総合防災の研究に、教えを受け、多くのアドバイスを頂きました。小堀・南井研究室、若林研究室の先輩・同僚・後輩の皆様には暖かいご支援を頂きました。ありがとうございました。防災研究所では、脆性構造耐震部門時代、総合防災部門時代を通じて、土岐先生、亀田先生、入倉先生、佐藤先生はじめ多くの先生にご指導頂き、また、議論する機会を頂きました。また、建築系の先生方には専門を通じてご教示くださり、ありがとうございました。

辞任前の7年間は、研究室の運営、学生・院生の指導、防災研改組の方針など全般にわたり、鈴木祥之先生には絶大なご支援を頂きました。また、兵庫県南部地震の調査とその後の振動台設置、京都市域地震観測ネットワークの構築などの大半は鈴木先生の努力によるものであり、防災研究の方

向など、阪神大震災後はほとんど休みもなく貴重な議論をさせていただきました。多くの問題を残したまま、定年2年前に急遽辞職することになり、ご迷惑をおかけしましたが、総合防災の発展のためにご活躍になることと信じています。

北原昭男先生とは防災研究所在職中の大半と一緒に研究することが出来ました。研究室をともにした後輩の皆様にもご協力頂きました。

京大の研究生生活、耐震構造から総合防災まで、良い環境のもとで終えることが出来、幸せに思っています。

研究を支えていただいた防災研究所の事務職員の皆様にも大変お世話になりました。特に、市川信夫技官には振動台実験全てにご援助頂きました。また、伊藤直子さんには兵庫県南部地震後、今日まで最も多忙な時期に時間を厭わずご支援頂きました。研究室を支えてくださった関井美雪さん、宮下和見さん、筏真紀さん、上道京子さん、そして総合防災の山下敦代さん、藤田亜紀さん他ご支援頂いた皆様に心よりお礼申し上げます。

最後になりましたが、この報告を掲載する機会を与えていただきました防災研究所長今本博健先生、出版専門小委員会委員長高山知司先生に心より御礼申し上げます。

1998年4月より滋賀県立大学環境科学部にお世話になっています。総合防災の経験を生かして環境に優しい、安全性に厳しい町づくりを目指して微力ながら今後も努力したいと思っています。

末筆ながら、皆様方のご活躍を心より希望して最後の雑文とさせていただきます。



Photo 11 Banquet at Xian workshop

## 参考文献

- 1) 宇佐美竜夫：日本被害地震総覧, 東大出版会
- 2) 棚橋諒・小堀鐸二・金多深ほか：振りを伴う構造物の耐震解析, 日本建築学会論文報告集第 69 号, 1961
- 3) 金多深：構造物の地震応答に関する基礎的研究, 博士論文, 昭和 36 年
- 4) 棚橋諒：地震の破壊力と構造物の耐震力に関する私見, 建築雑誌, 1935
- 5) 藤原悌三：木造建物の耐震性向上のための社会システムの改善に関する調査研究, 第一住宅建設協会助成金研究成果報告書, 1998, 4
- 6) 久徳敏治：構想建築構造物の適正動力学特性とその応用に関する研究, 博士論文, 昭和 44 年
- 7) 南井良一郎：建築物の地震荷重について, 季刊カラム, 61 号, 1977. 1
- 8) 林康裕・宮腰惇一・田村和夫：1995 年兵庫県南部地震の低層建物被害に基づく最大地動速度の推定, 日本建築学会構造系論文集, No.502, 1997

## 注

- ・ 建論：日本建築学会論文報告集, 構造系論文集
- ・ 年報：京都大学防災研究所年報
- ・ WCEE：World Conference on Earthquake Engineering
- ・ JEES：Japan Earthquake Engineering Symposium
- ・ 科研費：文部省科学研究費研究成果報告書
- ・ 学会：日本建築学会
- ・ 近畿：日本建築学会近畿支部
- ・ Bull.：Bulletin, DPRI, Kyoto Univ.
- ・ IDNDR：International Decade for Natural Disaster Reduction
- ・ 都市耐震：都市施設耐震システム研究センター研究報告
- ・ 住総研：住宅総合研究財団研究助成報告書
- ・ SINO-US：SINO-US Joint Symposium.
- ・ 共同研究：防災研究所共同研究
- ・ NDS：Journal of Natural Disaster Science
- ・ 住総研：住宅総合研究財団研究年報

## From the Study on the Earthquake Resistant Structures to the Study on the Integrate Management of Disaster Risk

Teizo FUJIWARA

## Synopsis

This paper describes about author's research history during the School of Engineering and the Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University. In the former half of this paper, research works on the multi-axial responses and aseismic safety of building structures subjected to multi-dimensional input ground motion are mainly introduced. In the latter half, estimation of urban earthquake disaster, engineering method and social system for risk management are discussed considering valuable experience of great Hanshin Earthquake and others. Almost all research works mentioned above, were supported from Profs. T.Kobori, R.Minai and M.Wakabayashi and other professors, colleagues, students and all of related persons.

**Keywords:** Earthquake Resistant Structures, Survey of Seismic Damage, Integrate Management for Disaster Risk  
1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Shaking Table Test