

3. 地上構造物等の破壊過程解明に関する調査

3.1 背景と目的

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、各種の地上構造物に甚大な被害をもたらした。その中でも橋梁の倒壊や橋梁橋脚の完全崩壊は、我が国の近代的構造物にとっては例のないものであった。また、家屋や建物の被害も広範囲にわたり、特に古いものは倒壊、多くの人命を奪った。これら被害を受けた構造物は、基本的に昭和56年の「新耐震設計法」の施行以前の古い設計基準類にもとづき設計され、その後の補強対策も施されていなかったものであった。

1995年兵庫県南部地震以降、構造物被害の原因追及のため関係各機関による活発な研究が行われ、構造物の被害形態や破壊に至るメカニズムの説明などがなされてきた。その結果、構造部材の耐力（せん断強度）が不足していたことと、大きな変形に追従することができなかったことが致命的な被害に至った大きな理由と考えられるに至った。構造物に対する被害を最小限に留め、人命の損失を防ぐことが地震防災の基本であり、このような大規模な地震に対して、構造物は強固にするだけでなくそれとともにねばり強くする必要のあることが、今回の地震被害であらためて示された。しかしながら、これらはあくまで構造物が受けた被害結果から導き出された仮説の域を出ず、その科学的な検証のためには、実験や解析による現象の説明と破壊過程の把握を必要とする。すなわち、構造物の損傷メカニズムが明確に説明できなければ、安全かつ合理的な構造物を設計することができない。

一方、最近において従来の仕様設計をあらため、より合理的な性能設計へ移行しようとする動きがある。この設計法は、構造物の限界状態を具体的な性能として定め、ある荷重状態でそれを満足するように構造物を設計するものである。一般にレベル1（構造物の耐用年数内に1～2度発生する確率を有する地震動）およびレベル2（発生確率は低いが非常に強い地震動）という地震荷重状態に対して性能を照査するが、レベル2では構造物被害を許し、崩壊しないあるいは機能上限界の変形状態を目指して設計が行われる。このような性能設計を行うためには、構造部材レベルはもとより構造全体としての破壊領域まで踏み込んだ挙動を正確に理解し、高い精度の設計計算を行うことが求められる。つまり、設計で要求される構造解析は、これまでのような弾塑性領域の最大耐力（強度）を追えるだけでは不十分で、それ以降（ポストピーク）の複雑な塑性～破壊挙動を追跡し、限界状態を見極める精度を有している必要がある。

以上のような状況に鑑み、構造物破壊実験調査WGにおいては、大地震時における各種構造物の震動～破壊挙動およびそこに至るまでのメカニズムの解明を基本的なテーマとする各種研究（実験、解析）の必要性を明らかにし、具体的課題について整理し提案することとした。さらに、その中には構造物破壊の防止のための具体的な方策や、耐震設計法の提案・開発、免震・制震等の新しい設計技術の確立等も視野に含めるものとした。対象とする構造物は、地上の建築物、道路橋、鉄道橋を中心とし、既設構造物についても含めることとした。

3.2 過去の震災における被害実態および研究の現状

3.2.1 橋梁^{1), 2), 3)}

1995年の兵庫県南部地震は、鉄筋コンクリート構造の橋脚を持つピルツ橋の倒壊や鋼製橋脚の圧壊に代表されるように、これまでの我々の想定を越えた高い破壊レベルの爪あとを残した。大きな地震動のもと、橋梁が致命的な損傷を受ける原因としては、橋脚の耐力不足、支承および落橋防止構造の破壊、液状化およびそれに伴う地盤流動の影響等が、代表的なものと考えられる。

鉄筋コンクリート橋脚の被害で崩壊にまで至るような破壊の形式は、写真-3.2.1に示すようなせん断破壊あるいは軸方向鉄筋段落とし位置での曲げせん断破壊であった。崩壊に至らないまでもなんらかの損傷を受けている橋脚であれば、基本的には同様な破壊モードであり、ただその進行程度が大きな損傷に至る前で留まっていたようである。図-3.2.1に鉄筋コンクリート橋脚の被害の典型的な例を示す(1本柱)。

鋼製橋脚は、鉄筋コンクリート橋脚に比べ橋脚数がかなり少ないが、鉄筋コンクリート橋脚では構造が成り立たない、もしくは施工困難な場所に存在していた。鋼製橋脚の被害は、圧壊したものが3基で、それ以外は基本的に脚基部付近でのパネル全体ないしは局部の座屈がほとんどで、いくつか矩形断面の角溶接部に割れが生じたものが見られた。鋼製橋脚の被害の事例を写真-3.2.2に、図-3.2.2には被害の典型を模式的に示す。

上記の橋脚そのものの被害に加えて、桁、支承、落橋防止構造(桁間連結装置など)にも被害が発生し、その中でもとりわけ支承の被害が、今回の橋梁構造物に対する損傷としてはもっとも多かった。支承は、橋梁構造の中で、上部構造と下部構造をつなぐ非常に重要な役割を担っており、強すぎても弱すぎても上部構造ないしは下部構造のどちらかに影響がでるというやっかいなものである。桁については構造的に致命的となるような被害は少なく、橋脚、支承、落橋防止構造の被害の影響を受けて、路面段差や横方向へずれるといった状況に至ったものが多い。桁間連結装置については、かなりの損傷を受けたものが多く、今回のような大きな地震動に対して、有効に機能したかどうか疑問が残る結果となっている。

震災後、その結果に対して、関係各機関による実態調査、実験、解析といったいろいろな研究がなされ、兵庫県南部地震による橋梁の被害の要因をさまざまな角度から掘り下げていった。その結果、崩壊ないしは大きな被害を受けたRCや鋼の橋梁については、ある程度その理由や要因は推定されてきた。一方、同じ路線上や隣接しているもので、部分的な損傷を受けているものやまったく損傷のないものもあり、現状ではそれらの関連性については十分に理解されているとは言い難い。すなわち、本質的な橋梁構造物の地震時挙動があいかわらず不明のままであるともいえる。これらの橋梁構造物の被害については、これまでのような構造エレメント単位の説明では不十分であり、構造全体をシステムとして捉える必要が指摘され⁵⁾、より精度を高めた部材レベルや構造要素レベルの動的特性を考慮した、構造全体系としての挙動の評価が重要な研究テーマとなってきている。



橋脚被害（曲げせん断破壊）

橋脚被害（せん断破壊）

写真-3.2.1 鉄筋コンクリート橋脚の被害例（文献2）より引用）

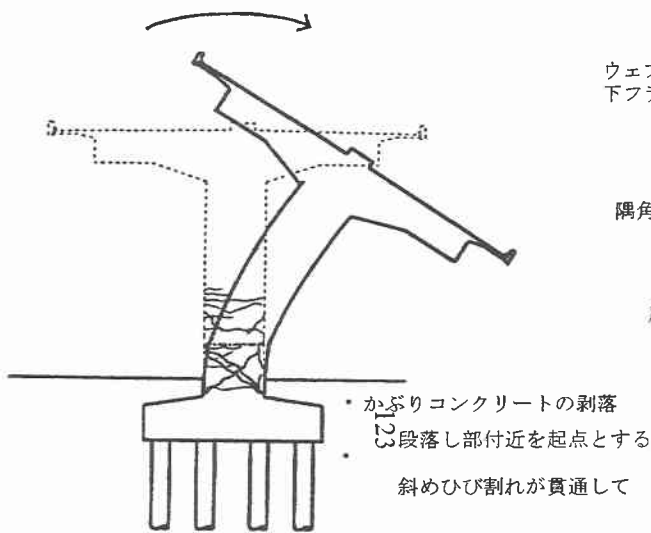


図-3.2.1 鉄筋コンクリート橋脚の破壊形態
（文献3）より引用）

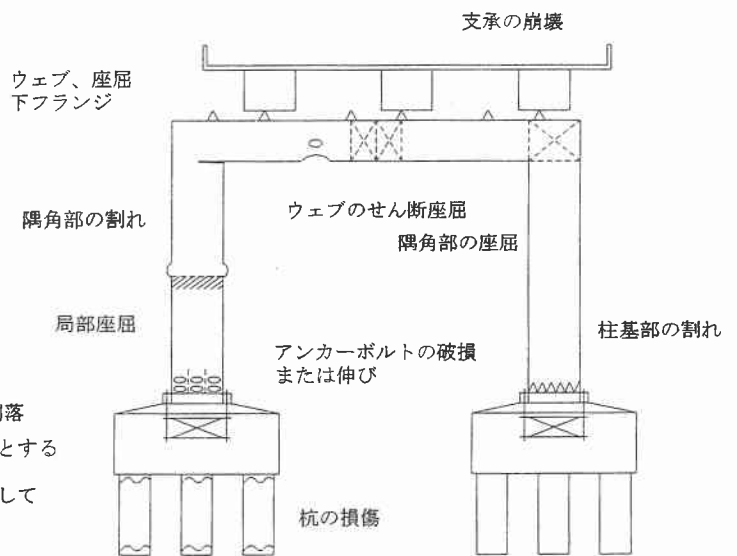


図-3.2.2 鋼製橋脚の破壊形態
（文献4）より引用）



写真-3.2.2 鋼製橋脚の被害例（文献3）より引用）

3.2.2 建築構造物

1995年兵庫県南部地震では、建物に作用した地震動の大きさが近年の被害地震に比較してきわめて大きく、その被害程度も大破、崩壊など甚大であった。建物の中間階層の崩壊、最下階の崩壊に伴う建物全体の倒壊など、従来の構造解析で対象としていた弾塑性地震応答解析の範疇を大きく越える被害状況が出現した。

(1) 木造家屋の被害⁶⁾

木造家屋では、構法、形態により、被害が特徴的に分かれた。構法としては、在来型の軸組構法に被害が集中し、近年普及している枠組壁構法(ツーバイフォー)や木質パネル構法では、倒壊に至るような重大な被害は殆どなかった。在来構法の木造家屋は、建築年代の古いものが多く、耐震基準の普及不足や老朽化に加え、構法自体の耐力不足が大きな要因と考えられる。

一方、建築形態は、建築用途とも密接な関係を有するが、一階部分に大開口を持つ店舗併用住宅、桁行き方向に十分な壁を配置できない共同住宅や狭小間口住宅等、壁量を十分に取れない形式の建物や壁配置のバランスが悪い建物に重大な被害が集中している。これらの建物は、震動により一階部分が大きな変形を受け、二階および屋根の重量を支えきれなくなって崩壊したものである。木造家屋の被害例を写真-3.2.3に示す。

(2) RC・SRC構造物⁷⁾

RC・SRC構造物の被害としては、ピロティ構造の崩壊や中間層の崩壊等の被害が多く発生し注目を集めた。中間層崩壊の被害事例を写真-3.2.4に示す。これらの被害は、層剛性の低い層に変形が集中し層崩壊した事例であり、層せん断力と上層部総重量とのバランスが急変する構造物の危険性を示唆している。一方、梁曲げ降伏先行型に設計された建物では、多くの梁端部で曲げ降伏が発生したため、倒壊を免れても補修に膨大な費用が必要となり、耐震安全上問題がないのに取り壊された建物もあった。その他には、エキスパンションジョイント部の被害や異種構造物切り替え部分での被害等が見られた。

建築年代としては、1971年建築基準法施行令改正(せん断補強筋増強)、1981年建築基準法施行令改正(新耐震設計法導入)を境に、主に三つの年代に分けることができる。1971年以前の建物では、せん断補強筋の不足から、壁、柱にせん断亀裂被害が顕著に見られる(写真-3.2.5)。現行設計基準では被害は少なく、基準改正による耐震性の向上が確認できる。

(3) 鋼構造物⁸⁾

柱、柱梁仕口、柱脚の順に被害が多く、これらの被害がそのまま建物全体の被害へとつながっている。溶接部被害においても、溶接法により被害の差が出ており、構法および施工管理の重要性が浮き彫りとなった。また、戦後復興期の鉄骨小規模建物で多く被害が見られたが、これらの被害は、筋かい等水平抵抗材の不足や柱と梁の緊結不十分等が主な原因と思われる。一方、近年の高水準な技術レベルで設計施工された高層鉄骨建物における、

ボックス柱の引張破断(写真-3.2.6)のように、今回の地震で始めて受けた地震被害形態もあり、適正な評価手法の早急な確立が望まれている。

近年、地震動（設計用入力地震動）の不確かさを設計上の余裕度（安全率）でカバーする設計法から、入力地震動研究の進展に伴って限界状態設計への移行が議論されてきた。さらに、この地震以来、阪神・淡路大震災における震度7の地域のように、確率論的には1000年から3000年の再現期間を想定したり、活断層の運動を考慮しなければならないほど低頻度で大きな地震動に対しても、建物の耐震性能・機能維持性能を求める設計法として、性能設計法の議論が行われてきた。耐震性能のグレードを上げてその性能を確保するためには、建物が崩壊に至るまでの地震応答シミュレーションを精度よく実施することが求められる。

従来からの弾塑性地震応答解析に加えて、破壊過程まで追跡できる解析法として破壊力学、強い幾何学的非線形問題の解析法などの応用が期待される。一方、大きな入力地震動に対しても免震・制震機構をもつスマートストラクチャー（次世代高性能構造）の採用により上部構造を弾性変形の範囲に留めて、建物の地震時安全性と建物の機能維持をはかる考え方や、建物内にエネルギー吸収部材としての各種ダンパーを設置して減衰性能を高め、地震応答を低減させる減震構造技術がますます注目されるようになってきた。



写真-3.2.3 木造家屋の被害
(文献6)より引用)

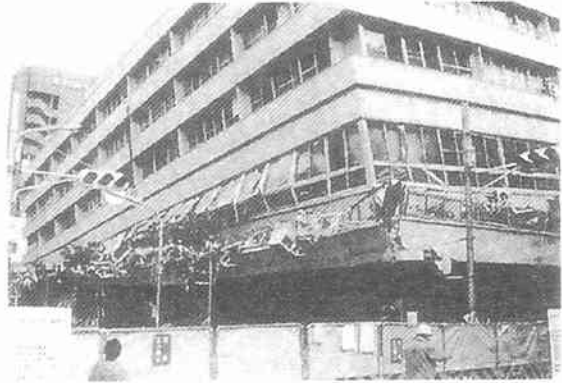


写真-3.2.4 RC造建物の被害
(文献7)より引用)



写真-3.2.5 RC造建物の被害
(文献7)より引用)

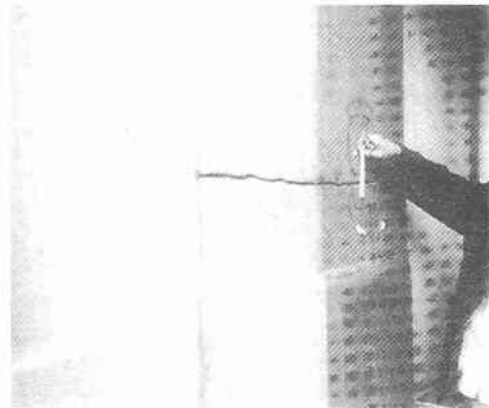


写真-3.2.6 鉄骨造建物の被害
(文献8)より引用)

3.3 研究すべき課題の整理と抽出

3.3.1 研究対象

橋梁、建築物、産業施設、タンク・電力施設等の構造物全般を対象とするが、特に橋梁および建築物の地上構造物とそれに付随するものを研究対象の基本とする。基礎および地下構造物については、4章でとりあげる。

3.3.2 研究課題の整理と抽出

平成17年度からの実大三次元震動破壊実験施設の有効利用を意識し、それまでの5ヶ年程度（平成11年度～平成15年度）で必要と考えられる研究を準備研究として位置づけ、最終的には実大三次元震動破壊実験施設での検証・確認実験を行うことが必要となる研究課題を整理・抽出する。

研究課題を抽出するにあたっては、大きくは破壊現象・機構の解明とその制御に向けて、どんな研究が今求められているか、また次世代を意識してどんな研究をしていく必要があるかを、社会のニーズに対する緊急性と社会における安全な生活確保の重要性から、課題の整理を行った。

研究の対象となる構造物は橋梁、建築物を中心とし、それに関連・付随するものも含めて考えることとした。表-3.3.1に研究実施にあたって認識すべき、全体のフレームワークを示す。このフレームワークを基本として、橋梁および建築物を対象構造物として着目した場合に、研究すべき事項としては以下のものが考えられた。

- ① 現象の解明（強地震動下の実現象）
- ② モデル化（構成則、ひずみ速度依存性、履歴特性、減衰特性等）
- ③ 計算法（数値解析手法、設計法等）
- ④ その他（装置の開発等）

構造物は、巨大地震を受けても人命損失を避けるべく、安全であり、しかも重要構造物においてはその機能を維持して、緊急事態に対処可能とすることが求められている。このような視点から、地震時の構造物の挙動・現象の把握、その現象の予測をするために必要な構造モデルの構成およびそれをを用いた精度の高い計算法ないしは設計法といった研究の流れが導き出され、上記の研究すべき事項として整理したものである。

一方、構造物側としては、橋梁および建築物として大きく分類しても、それらは用いられる材料や規模等により様々なタイプがあり、さらに阪神・淡路大震災の構造物の構成エレメントに着目するのではなく、構造システムに着目すべきとの教訓にもとづけば、上部工～下部工～基礎／地盤のいわゆる全体構造系を対象とする必要性がでてくる。また、その他、構造物の挙動により影響を受ける、走行車両や建物内容物の安全性の問題も重要となってくる。

表-3.3.2に上記の研究対象構造物と研究すべき事項等の関連をマトリックスとして整理し、緊急性、重要性および他分野との連携といった観点から仕分けてみた。この整理結果をもとに、特に緊急性と重要性を持つ地上構造物において必要と思われる大きな研究の課題を、以下のように4つ抽出した。なお、同表中の上部工～下部工～基礎/地盤については、動的相互作用の問題が大きく関与し、構造物というよりは地盤の問題がより重要な要因として考えられることから、ここでは具体的な研究対象とはしない(4章参照)。

1. 構造物の破壊過程解明と高精度評価手法に関する研究

- ・ 部材レベル実験
- ・ 数値解析モデル(数値解析方法)
- ・ 復元力特性と減衰メカニズムの解明
- ・ 建物、橋梁

2. 補強構造物の破壊過程解明と高精度評価手法に関する研究

- ・ 部材レベル実験
- ・ 数値解析モデル(数値解析方法)
- ・ 建物、橋梁

3. スマートストラクチャー(次世代高性能構造)の開発およびその挙動に関する研究

- ・ 数値解析方法の改良
- ・ 免震・制震技術(機構、装置等)の開発
- ・ 高性能構造の設計法開発

4. 強地震動が鉄道車両走行に与える影響に関する研究

- ・ 解析による限界安全性評価
- ・ 脱線、転倒防止対策方法

表-3.3.1 研究のフレームワーク

開発の要請時期	研究分野	現象解明から設計法への流れ	実現象の再現	力学的問題	振動台での再現と部材レベルでの再現
緊急的課題	既存構造物の診断・補強	実構造物のポストピークを含めた実地震動下での実現象の解明 ↓ 数値モデル化コンピュータソフトの開発 ↓ 設計法の開発	実物大	相似則 スケール効果	全体系モデルの範囲
現・近未来的課題	多段階の要求性能に応じた耐震設計法(性能設計)		Real Time 実時間	載荷速度	
中・長期的課題	高性能材料 } 高性能構造 免震 } 制震 }		3次元	組合せ応力 全体的挙動	
理想的課題	どんな地震でも機能維持 →次世代構造(スマートストラクチャー)		気候環境	温度 腐食 劣化 疲労	

表-3.3.2 研究対象構造と研究すべき現象、事項等

対象構造等		研究すべき現象、事項等					
		現象解明 (実現象)	モデル化	計算法	その他 (装置など)	備考	
橋梁	RC	B(診断、補強)	B	B			
	鋼	A	A	A			
建築物	低層	A(診断、補強)	B	B		家屋	
	中層 以上	RC(PC)	A(診断、補強)	A(新設、既設)	A(新設、既設)		
		S	A(診断、補強)	B	B		
		SRC	A(診断、補強)	B	B		
		その他					
上部工～下部工～地盤 (全体系)		C	C	C		動的相互作用問題	
高性能構造 (スマートストラクチャー)		B	B	B	B	免震・制震	
その他(車両、建物内容物など)		B	B	B	B		

A: 緊急性があり重要な研究 B: 重要な研究 C: 構造物以外の分野との連携が必要な研究

3.4 研究課題および内容

3.4.1 構造物の破壊過程解明と高精度評価手法に関する研究

(1)研究テーマ：鉄筋コンクリート造実建築物の地震時における部材及び材料応答予測精度向上に関する研究

1)目的と必要性

性能設計法を具現化するためには、設計において求められた架構応答、部材応答及び材料応答が実際の挙動に対して十分な精度を有している必要がある⁹⁾。

すなわち、架構応答であれば、応答変位、応答加速度、残存耐震性能等が、部材応答であれば、応答変位、損傷レベル（残存強度及び変形能力）及び補修レベル等が、材料応答であれば、ヒンジ回転角、材料損傷レベル（コンクリート歪み、鉄筋歪み、ひび割れ幅等）を精度よく推定しなければいけない。

その為には、架構、部材及び材料レベル応答すべてに渡って概略同じ精度を有する解析用モデルが必要となる。本研究では、RC造柱及び柱・梁接合部を対象とし、現在までに明らかになっていない部材及び材料応答のうち、ヒンジ柱の寸法依存性(実大)、載荷速度による柱破壊モードの変化(縮小模型)、及び、柱・梁接合部の軸力耐荷性能(縮小模型)を実験により明らかにし、部材モデル及び材料モデルに組み込んでいくことを目的とする。

2)研究の内容・方法

- ①文献調査等既往研究成果の取りまとめ
- ②部材モデル及び材料モデルの調査研究（スケール、載荷速度、適応性、その他）
- ③必要な部材実験計画（柱及び柱-梁接合部）
- ④部材実験の実施
- ⑤実構造物に適用できる部材モデル及び材料モデルの開発・提案

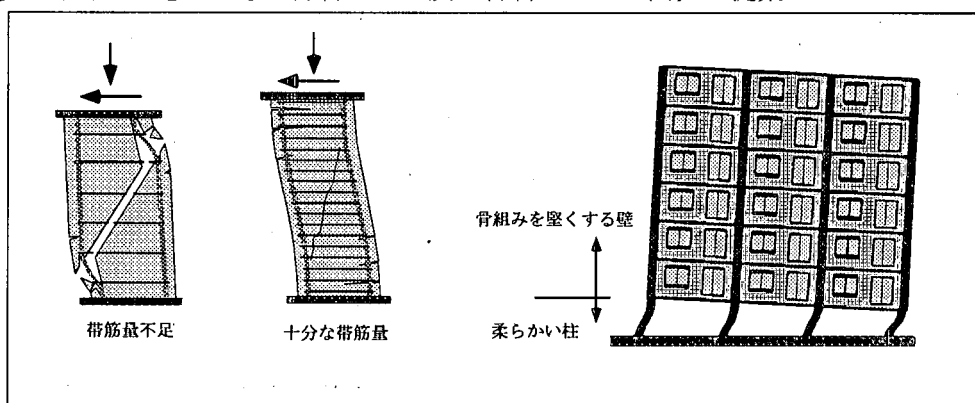


図-3.4.1 鉄筋コンクリート造建物の破壊挙動

3)期待される成果

本研究の成果により、鉄筋コンクリート造建築物の地震時における終局性状が解明されることで、建築物の安全性についての明確な性能指標を提示することが可能となり、建物自体の耐震設計の高性能化につながるばかりではなく、高密度な大規模都市の強地震動に対する防災機能を高めることにもつながる。また、動的な材料特性を予測するモデルの精度向上は、構造全体の動力学的特性を予測するモデルの開発の基礎ともなり、今後実施されるであろう実大三次元震動実験の有効活用にも大きく寄与するものである。

(2)研究テーマ：鉄筋コンクリート壁式構造の地震時における部材及び材料応答予測精度向上に関する研究

1)目的と必要性

耐震診断に基づく補強の一環として、後打ち壁などが用いられる場合、その動的破壊特性、限界強度などの知見に基づいて補強効果を評価する必要がある。

原子力以外ではこのような動的な実験例は少なく、通常の壁について計算結果（変形角）などから終局挙動を推定することが未だ困難な状況にある。

以上から、実物を表現しうるモデル、実験方法により鉄筋コンクリート壁式構造の動的破壊挙動の基礎データを蓄積する必要がある。

2)研究の内容・方法

a)実験手法の検討

建築研究所等の7層RC実験などの既往の研究結果によれば、1/2程度のモデルであれば部材破壊挙動は実大のものに近い状況が再現されること、最大耐力等について、動的載荷と静的載荷の結果に差異があり、これは歪み速度の影響であると考えられたこと等を考慮して、1/2程度のモデル実験が行える実験手法を検討する。具体的には、以下について検討する。

- ・慣性加力法（防災科研の官民共同研究で作成した装置の流用）により、壁に動的せん断変形を加える方法を検討する。現状で200tonf程度(概略1Hz, ±30cm)の慣性加振力が可能。
- ・軸力を加える模型規模で手法を検討する。将来の実大三次元でも利用できるような軸力載荷法を検討する。
- ・歪み速度の影響をみるために、動的、静的とその中間的なものが実施できる方法（慣性加振装置のバネの変更など）を検討する。

b)破壊実験と解析

試験体は、以下の条件、パラメータを考慮して選定し、歪み速度の効果を確認するケース（動的、中間、静的）を含めて、一連の実験として行う。

- ・ 一体打ち、後うち補強壁、補強ブレース付き
- ・ 壁厚、壁筋量

3)期待される成果

耐震上、有効とされる壁の動的終局破壊強度が、模型規模ではあるが把握され、R C造の耐震限界性能評価法の進展に寄与するほか、実大構造の検証実験の計画実施にも活用できる。

(3)研究テーマ：「木造建築物の動的挙動の把握と予測モデルの開発」

1)目的と必要性

a)目的

本研究は、木造建築物の地震時の構造安全性の確保に資するため、耐震技術を高度化することを目指し、以下に関する研究を行うものである。

- ① 材料および接合部、耐力壁等構造要素の耐力特性等の速度依存性の解明
- ② 材料、接合部、耐力壁の一次元、二次元要素から構造体としての三次元要素へのモデル化とそのモデルの検証
- ③ 三次元モデルに対する多方向入力応答の解析的な検討

b)必要性

阪神・淡路大震災において木造住宅は甚大なる被害を受け、多くの犠牲者が出た。木造住宅の耐震技術をより高度化する必要性は論ずるまでもない。ここで被害状況を観察すると、崩壊型の破壊モードが多くみられた。従来の木構造の設計法では動的に加わる荷重に対する終局時の破壊モードを想定した研究が進展しておらず、専ら静的な実験の結果得られた強度に安全率を見込むことによって、安全性を確保する設計を行っている。また、これまでの実験室における検討で明らかにされてきていることであるが、入力が一方向であっても破壊は三次元的に発生する。このような破壊を説明できるモデルを構築することは、木構造の終局的な挙動を解明する上で欠かすことができない研究である。

2)研究の内容・方法

- ① 材料、接合部に対しては衝撃的破壊試験装置による実験を通じて強度、剛性、変形性能などの動的荷重下における力学的特性を評価し、静的な実験結果と比較検討する。耐力壁に対しては、高速度下における繰り返し実験、あるいは振動台実験を通じて力学的な特性を評価し、静的な実験と比較検討する。

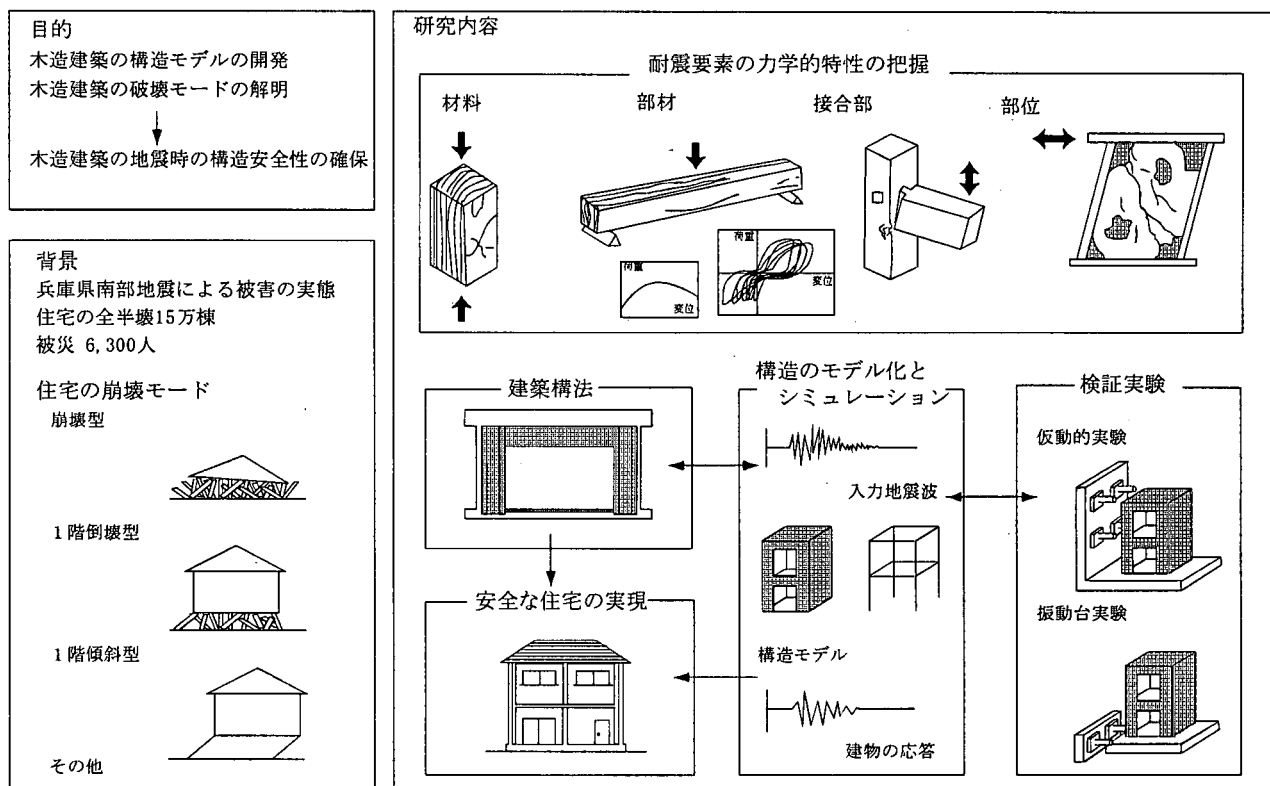


図-3.4.2 木造建築物の動的挙動実験

- ② 部材、接合部を最小単位とする力学的モデル、あるいは部材、接合部を有限要素に分割した力学的モデル、またはそれらを組み合わせた三次元の力学的モデルを、実験に基づき得られた動的特性を考慮して構築する。さらに、簡単な模型実験による力学的モデルの検証を行う。
- ③ ②で構築したモデルに対し、解析的なアプローチから実建物の崩壊挙動の予測を試みる。

3)期待される成果

本研究の成果により、木造建築の地震時における終局性状が解明されることで、木造建築の安全性を一段と高めることが可能となることから、より一層安心して住める住環境を推進することができる。また、木構造における動的な力学的特性を精緻に予測するシミュレーションモデルの開発は、各種複合構法の力学的特性シミュレーション開発の基礎ともなり、多様な建築技術の開発が進む中でその評価を適切に行うことが可能となるなど波及効果は測り知れない。

本研究で得られる成果は部材、接合部、耐力壁レベルの動的効果の解明と、三次元の実大建物の力学振動モデルである。最終的な目標は実大建物の動的な崩壊挙動を解明することであり、提案モデルの妥当性を実建物に対する実大三次元震動実験結果との照合により検証することが可能となる。

(4)研究テーマ：「非整形建築物の地震破壊挙動の解明とその防止技術の開発」

1)目的と必要性

a)目的

本提案課題は、平面内および立面方向の剛性、耐力ならびに重量の分布が比較的不均一ないわゆる非整形建築物の地震時における破壊挙動を実験的および解析的研究によって解明し、その耐震性能評価手法、破壊防止技術等を開発することを目的とする。

b)必要性

1995年の兵庫県南部地震では、多数の建築物が被害を受けた。その中で中高層建築物における最下層あるいは中間層の崩壊はその特筆すべき一つであった。これらの建築物のほとんどは平面内あるいは立面方向の剛性、耐力ならびに重量の分布が不均一であり、地震エネルギーが比較的脆弱な層に集中し、局所的な応答の増大をもたらしたことが崩壊の一因であると指摘されているが、その崩壊メカニズムも含めて、本質的な崩壊原因の解明には至っていないのが現状である。また、建築基準法施行令ではこの種の非整形建築物の耐震設計に対処するため、偏心率および剛性率と称する整形性を判定する指標に基づいた規定を定めている。しかし、これらの規定は明解な研究成果に基づくものではなく、崩壊した建築物の中には現行建築耐震基準によって設計されたものも少なからず含まれていた。一方、非整形建築物は立地条件、人口・建築物密度、自由な建築空間の確保等を勘案すると建築計画し難いものであり、既存建築物のほとんどは非整形建築物と言っても過言ではない。したがって、非整形建築物における層崩壊メカニズムの把握、崩壊原因の究明および耐震性能の定量的評価は急務である。さらに、既存建築物に対する耐震性能評価手法および新建築物に対する耐震設計・性能評価手法の確立も含めた層崩壊防止技術あるいは崩壊モード制御技術を開発することが緊急かつ重要な課題である。

2)研究の内容・方法

本課題では、平面内および立面方向の剛性、耐力ならびに重量の分布が比較的不均一な非整形建築物を対象として、以下の内容、方法の研究を行う。

a) 非整形建築物の層崩壊メカニズムおよび終局限界状態の把握・解明

- ① 実大規模の立体壁フレーム試験体の静的載荷実験および仮動的実験による検討
- ② モデル建築物の地震応答解析による検討

b) 非整形建築物に対する層崩壊防止技術の開発

- ① 層崩壊モード制御指標の提示
- ② 指標の適用範囲の明確化
- ③ 既存建築物に対する耐震性能評価法および耐震補強設計法の開発
- ④ 新建築物に対する性能評価型（崩壊モード制御型）耐震設計法の開発

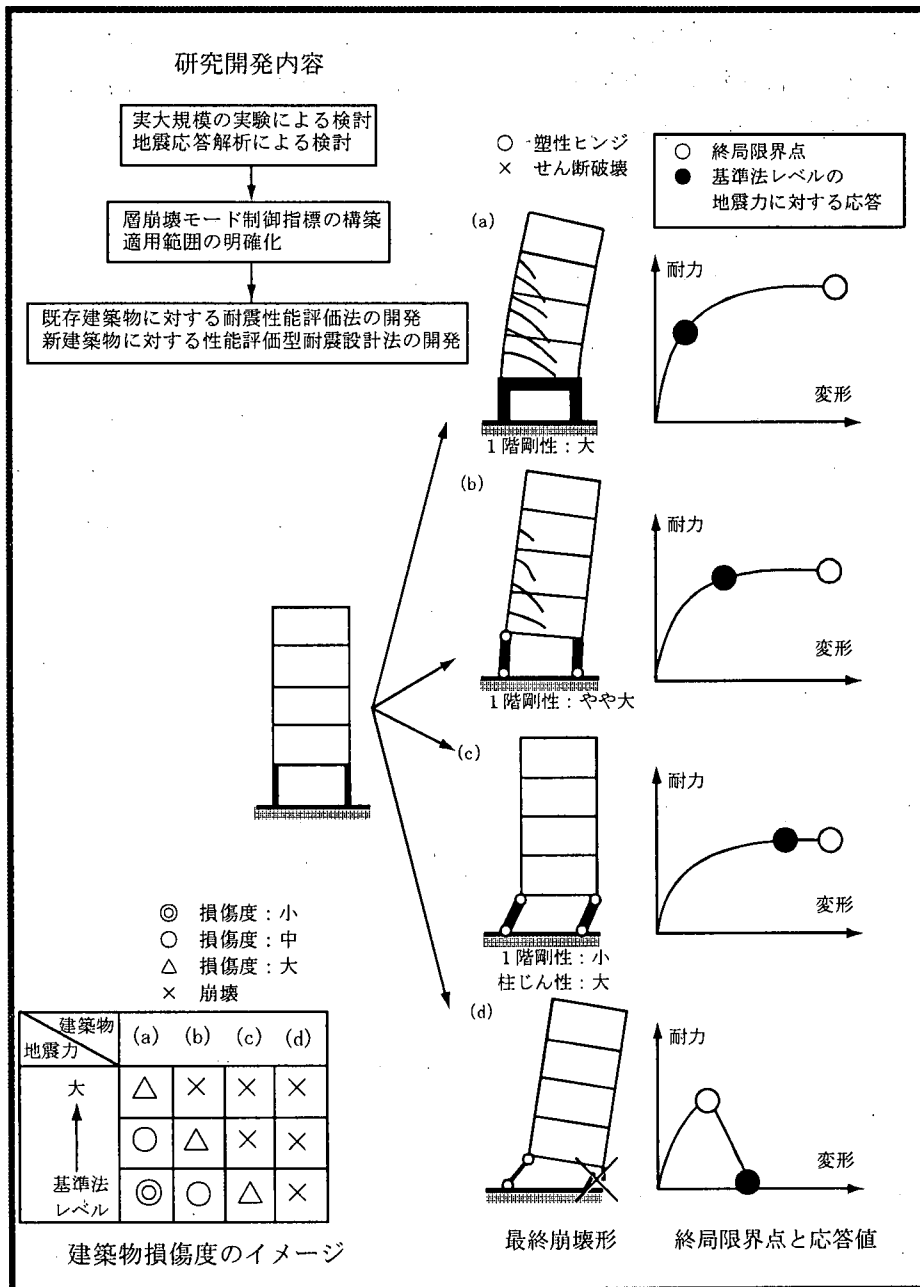


図-3.4.3 非整形建築物の破壊挙動実験

3)期待される成果

非整形建築物の地震時における層崩壊メカニズムを解明することにより、既存、新築を問わず想定する種々の地震力レベルに対するこの種の建築物の耐震安全性能を定量的に予測することが可能となる。また、非整形建築物の耐震性能評価手法の開発は、多種多様化する建築物の耐震安全性の確保に資すること大である。

本研究は、静的あるいは仮動的実験および動的地震応答解析の両面から非整形建築物における地震応答性状、層崩壊メカニズムおよび部材破壊メカニズム等を検討し、適切かつ有効な破壊防止技術を開発しようとするものである。したがって、静的・仮

動的実験結果と実地震動に対する応答の関係、地震応答解析の妥当性および開発された防止技術の信頼性等を検証する上で、実大3次元震動破壊実験施設による実大建築物の実験結果との比較検討は極めて重要かつ有効である。

(5)研究テーマ：鋼製橋梁構造物の地震等衝撃的荷重下における動的挙動とその予測シミュレーション技術に関する研究

1)目的と必要性

これまで比較的耐震性が高いものと考えられていた橋梁などの鋼製橋脚が、先の阪神・淡路大震災において世界的にも例のない被害を受けた。それらは、これまで実験等では確認されていた、座屈、破断等の脆性破壊や地震動による低サイクル疲労などであった^{10),11)}。しかしながら、実際の被害は、実験室で再現されるような単純応力状態ではなく、複雑な複合応力状態において発生しているものと考えられ、これまでの知見では、これらの動的挙動、破壊現象、耐震パフォーマンスを説明することが極めて困難である。また、これに加えて衝撃的荷重に対する鋼製部材の脆性破壊の問題が新たに露呈し、これに対する防止方策も緊急的な要請事項と考えられた。

本研究は、鋼製橋脚の耐震性能を把握、評価し、次世代の性能設計の適用に資するため、動的挙動、ポストピークの破壊過程の解明、およびそれらの挙動解析技術の開発を目的とするものである。

2)研究の内容・方法

具体的な研究としては、要素レベル実験、部材レベル実験、部分構造体レベル実験により、鋼製橋脚の動的挙動、破壊性状の把握を行い、その結果にもとづいて解析モデルの開発を行う。

実験は、建設省土木研究所における実験を想定し、同所の載荷実験装置や三次元振動台を用いて、静的実験や仮動的実験およびハイブリット振動実験などを行う。実験の対象となる構造形式は、通常の単柱式鋼製橋脚およびラーメン式鋼製橋脚（特に柱と梁の隅角部や梁部）を基本とする。定量的な鋼製橋脚の耐力特性の評価のためには、できるだけ実大に近い供試体として、部分モデルで1/2スケール程度が求められるが、挙動の解明としてはある程度スケールの小さな供試体として、全体モデルで1/5ないしはそれ以下でも有益な情報が得られる。なお、実験にあたっては、上部構造や支承の存在を適切に考慮する必要がある。

解析技術としては、これまでもピークレベルまではかなりの精度を有しているものがあるものの、ポストピークを予測するためには、既存のプログラムでは精度および計算時間の問題がネックとなる。そのため、新たな解析ツールの開発を上記の実験と並行して進めていく。

3)期待される成果

現段階での鋼製橋脚の耐震設計は典型的な仕様規定型のものであり、本研究の成果よりこの状況を積極的に改善して、破壊現象と終局状態の確認を踏まえた信頼できる安定限界を明確にすることができ、精度の高い設計方法の提案に進展していくことができる。

(6)研究テーマ：復元力特性と減衰メカニズムの解明

1)目的と必要性

建築構造物の減衰に関しては、弾性応答時には等価減衰定数の形で与えられ、高次振動モードに関する減衰定数の設定法は振動数比例型などが多く用いられている。高層建物の場合は、振動実験や地震観測の結果を参照して定めることも行われている。しかしながら、構造物の減衰に関するメカニズム解明、地盤－基礎－建物の動的相互作用に起因する減衰の取り扱いや地盤の非線形性の影響など、十分に解明されているとは言えない。

制震構造の開発においては建物の構造体の内部減衰、2次部材や非構造部材の摩擦に起因する減衰と制震ダンパーとして別途設置したエネルギー吸収部材による減衰を明瞭に分離して、定量的な評価を行うことが必要である。また、弾塑性地震応答解析を行う際に仮定する減衰の評価（減衰マトリクスの作成）と構造部材の履歴特性の評価（復元力特性の仮定）を適正に行う必要がある。本研究は、各種構造物の減衰メカニズムの評価を目的とする。

2)研究の内容・方法

- ①地震観測、風観測による建物応答の観測データの収集とシステム同定による減衰評価、シミュレーション解析の実施。
- ②文献調査により構造物の減衰を明らかにした研究成果を収集・整理・分析する。
- ③大型振動台による振動実験の実施により、減衰メカニズムの解明、復元力特性の検討を行う。
- ④システム同定による減衰評価、シミュレーション解析の実施。

3)期待される成果

本研究の成果により、建物の地震応答予測精度の向上が図られ、強い非線形領域まで適用可能な信頼性の高い応答シミュレーション技術が確立される。これにより、構造物の種別に関係なく実験結果の評価や合理的な設計法（性能設計）の開発に極めて有効なツールとなる。

3.4.2 補強構造物の破壊過程解明と高精度評価手法に関する研究

(1) 目的と必要性

現行の耐震規定を満足しない木造家屋は全国レベルで相当多いものと推定され、先の兵庫県南部地震のような都市直下型の大震災は、日本の多くの都市で発生可能性があると考えられる。阪神・淡路大震災においては、死亡者のほとんどが木造家屋の被害に起因している事実があり、これは今後においても、家屋構造に課題がある限りは解決されず、極めて緊急かつ重要な問題である。これに対して、既存家屋の改修・補強を実施することが考えられるものの、現状では比較的大規模な工事を伴い、時間的、経済的に負担が大きく、現実的な対応がとれないのが現実である。そのため、強地震動に対して既存家屋がどの程度の耐震性を有しているか、また、どのような破壊過程を示すものかを把握し（耐震診断法の高精度化）、人命遵守の観点からそれらの構造物の構造・諸元特性を明らかにするとともに、合理的かつ極めて経済的な補強対策方法を開発して、その有効性を検証する必要がある。

本研究は、既存家屋に対する耐震診断法の高精度化による挙動予測評価方法の確立と、補強対策方法の開発およびその有効性を部分実験およびスケールモデル実験で検証することを目的とする。

(2) 研究の内容・方法

- ① 国内各地域での木造家屋の構造的特徴を分類して、阪神・淡路大震災での既存家屋の崩壊や被害の状況の調査結果を反映させた、家屋の構造危険度評価指標を作成する。
- ② 構造特性パターンと破壊との関係に応じた、コンパクトで経済的な補強対策方法（機構、装置）を開発する。

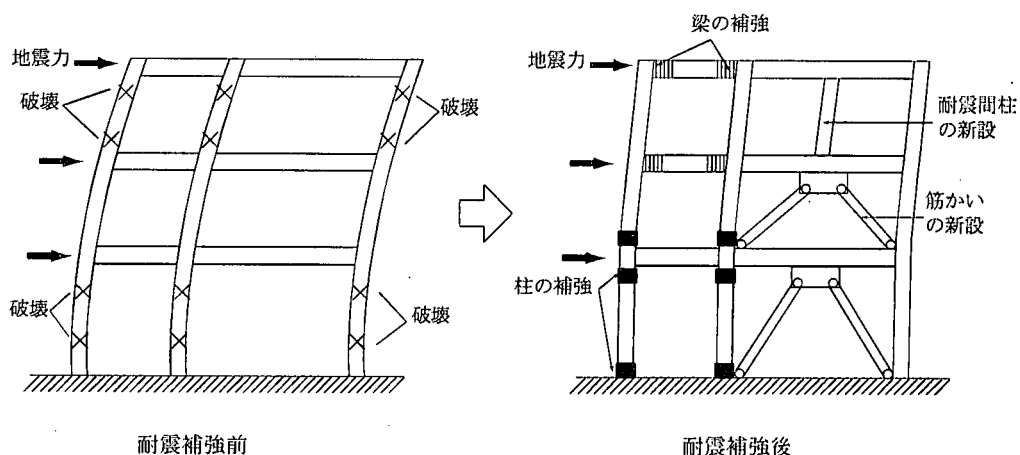


図-3.4.4 耐震補強方法の適用イメージ（文献12）より引用

- ③開発した補強対策方法を部分モデルやスケールモデルとして中小振動台を用いた実験を行い、その有効性を検証するとともに、必要に応じて補強対策機構・装置の諸元や性能の変更を行う。
- ④実験で得られたデータにもとづき、数値解析による挙動予測精度の向上を図り、実大家屋の補強効果のシミュレーション解析を行い、補強対策の有効性評価を試みる。

(3)期待される成果

全国に数多くある既存家屋に対する実用的かつ有効な耐震補強対策が現実的なものとなる。家屋の耐震補強対策についての助成金制度が、いくつかの自治体ではあるものの¹³⁾、現状ではわずかな金額であり、ほとんど実用的な状況ではない。本研究の成果は基本的にコンパクトで極めて経済的な補強対策工法であることが前提のため、利用者の負担を著しく低減することになり、さらに若干の助成金の増額が可能であれば、それと合わせることで、既存家屋の耐震補強の普及に著しく貢献することになる。

3.4.3 スマートストラクチャー（次世代高性能構造）の開発およびその挙動に関する研究

(1)目的と必要性

従来の弾塑性耐震設計法では、構造物への作用地震力に対して、構造物の降伏強度と塑性変形性能との組み合わせで直接地震荷重に抵抗することを原則としていた。しかし、兵庫県南部地震のような極めて高い地震力に対しては、高いじん性率を期待することとなり、その結果地震後に修復不可能な残留変形あるいは被害を発生することになり、要求される耐震性能を満足しなくなる可能性が高い。

こうしたことから、高性能が要求される今後の構造物の耐震設計に当っては、作用地震力そのものの積極的な低減をはかる、減衰・免震・制震設計法が望ましい。このためには、新材料・新技術を駆使した高性能構造（スマートストラクチャー）の提案・開発が緊急的に要望されている¹⁴⁾。

一方、すでに実際の構造物に適用されてはいるものの、免震・制震技術は新しい構造技術であり大地震の経験がまだ十分とは言えない。免震構造に関しては1995年兵庫県南部地震の際に神戸市北区で2棟の免震建物が地震を経験して、その免震効果を実証した。また、米国では1994年ノースリッジ地震の際に南カリフォルニア大学の大学病院の免震建物が地震時の応答低減効果を実証している。しかしながら、これらの免震建物が経験した地震動は、設計時に仮定していた地震動の範囲内の大きさであり、設計レベルを大きく超える地震動に対する終局安全性については、免震装置の静的な加力実験データに基づく数値解析の結果や数少ない中規模レベルの振動台実験¹⁵⁾によっている。また、制震構造建物の強震観測データはほとんど得られておらず、大地震時の制震効果については、縮小模型や装置レベルの要素実験、応答シミュレーションにたよっていることから、免震構造、制震構造の終局安全性の確認と、強地震動入力時の地震応答シ

ュレーション技術の開発が強く要望されている。

研究テーマ：

- ① 免震・制震構造の限界状態およびその予測技術に関する研究
- ② 研究テーマ：高性能構造（スマートストラクチャー）の提案・開発

(2)研究の内容・方法

a)免震構造の開発

①三次元応力下における実大免震支承の実時間載荷

三次元的な地盤震動下では、免震支承に変動する軸力、頂部曲げモーメント、水平力などが組み合わされて作用する。本研究では、小型免震支承の組み合わせ載荷試験や実時間載荷試験を行って、実大免震構造物の実験への準備を行う。

②三次元免震装置の開発

強震動による構造物の損傷を皆無にするという理想を実現させるためには、三次元免震装置の開発が必要である。美術品などを防護する小型の三次元免震台は既に実用化されている。本研究は、大型構造物に対しても三次元的な免震効果を発揮するスマートストラクチャーの実用化に向けて、実用的な装置の開発を行う。

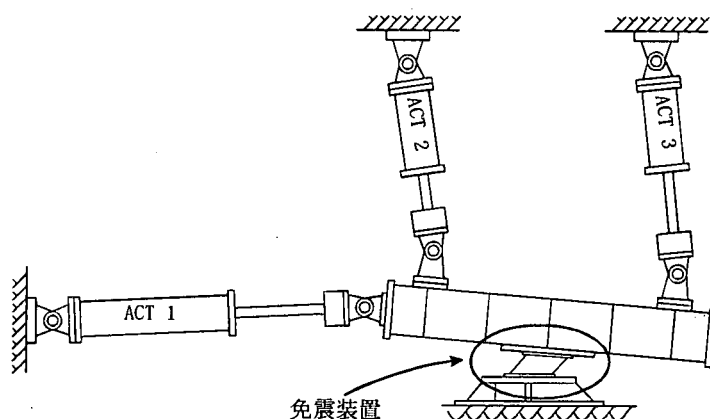


図-3.4.5 スマートストラクチャーに適用する免震装置のハイブリッド実験
(文献 16) より引用)

c)制震構造の開発

小型もしくは実物大のインテリジェントな制御装置として、新材料をも視野に入れた各種のダンパー等を開発、および粘性流体、粘弾性体や電磁流体などの特性を、外部情報により制御可能な装置の開発と実時間での載荷実験を行う。

本実験では、実大構造物を用いて制震装置の確証実験を行う。

(3)期待される成果

本研究により得られる成果は、次世代における各種構造物の地震時の挙動信頼性を高

めるためにかかすことのできない、実用的な高性能構造（スマートストラクチャー）の実現に不可欠であり、経済性に配慮していることから、従来の耐震設計では現実的には困難であった、安全性と経済性という相反する問題を解決する決め手となりえる。また、免震・制震構造の終局安全性の確保についての定量的な結論を示すことが可能となり、それにより性能設計法における耐震グレードの高い、信頼性の高い構造の開発が現実的なものとなる。

なお、これらの高性能構造（スマートストラクチャー）は、実物大、三次元、リアルタイム載荷の条件下で確認実験を実施する必要がある。

3.4.4 強地震動が鉄道車両走行に与える影響に関する研究

(1) 目的と必要性

鉄道車両は、これまで高速走行中に強地震動を受けた経験がなく、その地震時挙動は全くといってよいほどわかっていない。阪神・淡路大震災でも発震時間が幸いし、静止または低速走行時の脱線、転覆はあるが、新幹線などは被害を免れた。

高速走行時に地震に遭遇し、脱線転覆した場合は多数の被害者を出すのみならず、周辺住宅、危険物施設などを巻き込んだ大災害を引き起こすおそれがあり、大都市圏ではこれが同時多発する可能性もある。

高速走行時の鉄道車両の脱線転覆は確実に防がなければならない災害事象であり、そのためには、地震動による脱線転覆の可能性を含めた車両の走行安定性メカニズムを解明する必要がある。また、その検証のためには、実物の挙動をできるだけ精度よく再現する実験が必要とされる。

本研究では、将来の実大三次元震動破壊実験施設による検証を展望しつつ、走行時の脱線転覆の可能性、メカニズムの解明を目的とし、部分モデル実験による解析モデルの構築を行う。

(2) 研究の内容・方法

a) 走行車両への入力地震動の検討

鉄道車両が走行する構造物（盛土、橋梁、トンネル）などの地震時挙動を踏まえ、車両—支持系へ加えるべき地震動のレベル、スペクトル、波形などの適切な設定法の検討を行う。

また、大都市圏、地震危険地帯を中心に、鉄道車両の走行時地震対策の現状、既往の脱線転覆被害の調査を行う。

b) 車両—支持系の振動挙動の検討

静止車両とレール、支持構造物の地震時の振動、連成応答について既往の成果を踏まえたモデル化の検討を行う。

また、1/10 程度の車両モデル、模擬盛土モデル、模擬橋梁モデルなどを用いた震動

実験により、モデル化の妥当性を検証する。

c) 車両走行模型実験(脱線、転覆実験)

大型振動台に搭載できる 10m 規模の走行設備 (カタパルト、走行レール、ブレーキキャッチャー) を作成し、速度を種々変えて走行させ、各種の地震波に対する挙動を計測する。この結果をもとに走行速度を考慮した振動挙動解析モデルの構築を行う。

この実験の概念図を図-3.4.6 に示す。

(3) 期待される成果

走行速度と支持構造の振動特性を考慮した、車両の挙動、脱線転覆などの判定を行うための基礎的なモデルが構築される。この結果は、既存施設の安全評価の向上に一定程度役割を果たすと同時に、実大三次元震動破壊実験施設による、より信頼性の高い手法構築の基礎データを提供できる。

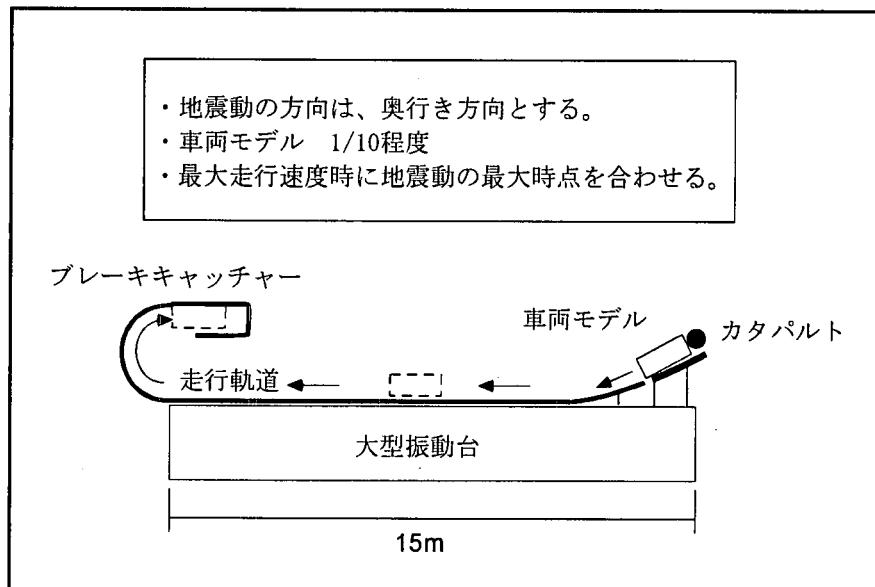


図-3.4.6 強震動下の車両走行実験概念図

参考文献（3章）

- 1) 土木学会 関西支部：大震災に学ぶ－阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書－ 第Ⅰ巻、第Ⅱ巻、平成10年6月。
- 2) 土木学会 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害原因の分析、1996年12月。
- 3) 兵庫県南部地震 道路橋耐震対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、平成7年12月。
- 4) 日本技術開発株式会社：最新の橋梁の耐震設計技術に関するトピックス、平成10年8月。
- 5) 土木学会：実務者のための耐震設計入門、1998年7月。
- 6) 日本建築学会 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編－4、1998年3月。
- 7) 日本建築学会 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編－1、1997年7月。
- 8) 日本建築学会 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編－3、1997年10月。
- 9) 日本建築学会：性能性構造設計法のあり方と性能評価尺度、1998年3月
- 10) 秋山宏：鋼構造骨組みの耐震設計、第10回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集、1998年11月
- 11) 坂野、三上、鷹羽：鋼製橋脚隅角部の低サイクル疲労挙動、土木学会論文集 No.563/I-39、1997年4月
- 12) (財)日本建築防災協会：既存鉄骨造建築物の耐震診断基準・同解説、平成8年10月
- 13) 鈴木有：木造住宅耐震改修促進の展望、阪神・淡路大震災が問いかける地震防災システムのあり方(2)、日本建築学会、1996年10月
- 14) 家村浩和：より高度な水準の実現に弛まぬ技術革新でチャレンジ－免震・制震技術による耐震性能の向上－、平成10年度土木学会全国大会研究討論会「国土防災の適正水準を考える」、平成10年10月
- 15) 菊池、猿田、田村、ケリー、アイケン、クラーク：鉄筋コンクリート造免震構造物の振動台実験、日本建築学会構造系論文集 第462号、1994年8月
- 16) 家村、五十嵐、陳、中島：曲げ・変動軸力載荷条件下における免震支承の復元力特性、第1回免震・制震コロキウム講演論文集、土木学会、1996年11月