

1. 研究の概要 (目的と構想)

Outline of the Project (Purpose and Plan)

田村 重四郎*

Choshiro TAMURA

昭和 56~57 年度に亘って、千葉実験所内に建設が進められていた「地震による構造物破壊機構の解析設備」が完成して稼動を開始した。ここに、この設備を紹介する機会を得たので、詳細な説明に入る前に当該設備の目的・意義ならびに完成までの経過、設備の内容等について概説することにする。

本所で耐震工学研究の推進のため、耐震構造学研究グループ (ERS) が昭和 42 年に組織され活動してきたが、この設備は研究を進めてゆく上で、正に必要となった設備であるということが出来る。耐震工学の研究発展の線上で本計画が具体化したのは、昭和 53 年春のことである。「自然地震に対する地盤・基礎・構造物系の応答観測」(代表者 田村重四郎) および「地震荷重を主とした自然荷重による施設の事故・災害発生についての確率手法による総合的研究」(代表者 柴田 碧) の 2 つの研究計画案が同時に提案された。前者は、地震観測専用の実際の建物を築造し、その内部に地震動により破壊するような各種の弱小模型を築造し、両者を同時に地震観測することにより、地震動の各レベルにおける構造物の挙動を調べ、破壊までの過程を明らかにしようとする計画であった。この計画は、予算額も含めて種々の方向から検討が加えられ、昭和 55 年に現在のような内容にまとめられ、昭和 55 年度、特別設備費で概算要求を行った。その後各方面の協力を得て、昭和 56 年度より国立学校施設整備費と特別設備費の予算を受けることができ、建設工事の緒についた。初年度は主に地盤の地震動をアレー観測するための設備と、油圧装置の整備が行われた。この油圧装置は 2 次元振動台と構造物動的破壊実験設備のアクチュエータとに共用される。これにより、昭和 57 年度春にはまがりなりにも本研究の一部である、地盤の地震動観測を開始することができた。

完成までの間、ERS の初代の代表であった岡本舜三名誉教授は側面から協力され、久保慶三郎名誉教授、田中尚名誉教授は、この計画の推進のためたいへんな努力を払われた。特に、田中尚名誉教授はご退官前の 2 年間にこの施設の完成のため、渉外、ERS のまとめ、計画の方向づけ、工事の進捗に伴って生ずる諸々の課題の解決等に尽力された。この設備の完成により、構造物の耐震性

の研究において、新しい一歩を進めることができ、耐震工学上の諸問題の研究の推進に寄与し得るものと確信している。

さて、本邦と周辺地域から放出されている地震エネルギーは、地球全体の 10 数パーセントに達するといわれているが、あまねく開発され、大規模で高度な社会施設、産業施設が各地に建設されるに及んで、地震の予知と共に、構造物の耐震性の検討が特に強く求められることになったのは、自然な成り行きであると思われる。他方、大地震が数 10 年、あるいは数 100 年の間隔で発生するとすれば、構造物に賦与すべき耐震性は構造物の耐用年数、重要性、被害の大きさ、社会活動に対するインパクト等のみならず、社会の将来の展望をも含めて、多方面から検討されなければならない。構造物のこの耐震性のレベルが決まったとしても、これを設計に合理的に具体化するためには、構造物が地震時にいかに挙動し、どのような耐震強度をもち、かつどのような損害をどのような過程を経て受けるかを知ることが必要になる。この究明は、非常に困難なものの 1 つであり、構造物が複雑化し大型化する一方、新しい種類の構造物が築造されている現在、なお容易ではない。構造物の耐震強度の解明は、耐震工学で現時点で最も解明が急がれている重要課題の 1 つである。

ここで本研究の母体である ERS にふれることにしたい。昭和 39 年 6 月の新潟地震の際、震央距離約 50 km にあった新潟市では、工業設備も含めて多くの近代的構造物が、大きな被害を受けた。このため、耐震工学研究の推進をはかって本所に生産施設防災工学、動的材料強弱学、耐震機械構造学の 3 研究部門が設置された。これを契機に、昭和 42 年度春より岡本名誉教授を中心に研究者の任意の集まりである ERS が発足した。広い分野に亘る知見が必要であると共に、共通の研究分野も多いという耐震工学の特質から、相互に研究情報の交換を行ったり、実験施設、測定計器の共通の利用をはかるなど、研究が円滑にかつ容易に推進できるよう組織されたものである。月 1 回開催される研究会、年 1 回の Bulletin (英文) の発行が定常的な活動であるが、本所内外の研究活動においては、研究者の集団として或いは夫々の研究室の研究活動のベースとして日常的に機能している。

*東京大学生産技術研究所 第 1 部

退官または退所したメンバーおよびかつて本所で研究活動に従事したメンバーを含めて、現状で総勢 42 名であり、昭和 58 年 5 月 1 日現在、所内の助手以上のメンバーは次のとおりである。

教授 田村重四郎(第 1 部) 岡田恒男(第 1 部)
 柴田 碧(第 2 部) 川井忠彦(第 2 部)
 佐藤壽芳(第 2 部) 高梨晃一(第 5 部)
 片山恒雄(第 5 部)
 助教授 藤田隆史(第 2 部) 石塚 満(第 3 部)
 半谷裕彦(第 5 部) 龍岡文夫(第 5 部)
 助 手 加藤勝行(第 1 部) 関松太郎(第 1 部)
 重田達也(第 2 部) 藤田 聡(第 2 部)
 佐藤暢彦(第 5 部) 大保直人(第 5 部)
 田波徹行(第 5 部) 大井謙一(第 5 部)
 山田真一(第 5 部)

ERS で行っている研究には、各研究室で独自に実施しているもの、臨時事業における活動や震害調査の場合のように、横の連絡をとりながら共同で行っているものがある。各研究課題については、震害調査から模型破壊実験等を経て震害予測までほぼ一貫しているもの、あるいは部分的に取り上げているものなどがある。今までに ERS のメンバーによって行われてきた研究課題を、あえて分類して列記すれば次のようになるが、いくつもの項にまたがっているもののあることはもちろんである。

地震動に関するもの

各種地盤の地震動観測
 地震記録の統計的解析
 構造物の地震応答の極値分布
 計画地震動の策定
 地震危険度の推定

構造物における観測

実構造物の動特性ならびに地震観測
 ダム、トンネル、建物、配管系、橋梁
 模型の地震観測
 貯槽モデル、化学プラントモデル

模型による実験的研究

動的特性を対象としたもの

ダム、地下構造物、配管系、杭、剛体基礎、免震装置

主に破壊性状を対象としたもの

フィルダム、鉄筋コンクリート造建物、鉄骨造建物、歩道橋、斜面

土の工学的性質に関するもの

土質試験方法
 土の動力学特性
 補強土および改良土の力学的性質

解析的手法による研究

“剛体一バネ”モデルの開発とそれによる構造物の静的および動的安定性の解析
 配管系の固有振動
 津波の伝播性状
 シェル構造の動的安定性

震害調査

コイナ地震(インド, 1967, 12), 1968 年十勝沖地震, 秋田県南東部の地震(1970, 10), サンフェルナンド地震(1971, 2), 1974 年伊豆半島沖地震, 1975 年大分県中部地震, ルーマニヤの地震(1977, 3), 1978 年伊豆大島近海地震, 1978 年宮城県沖地震, 1983 年日本海中部地震等
 このほか中国において発生した海域地震(1975, 2)および唐山地震(1976, 7)の震害地を 1981 年視察した。

震害の分析

震害の分析は土木、建築、機械の各分野でそれぞれ実施されている。
 統計的な分析に特に注目した場合、ライフライン、橋梁、火災の延焼などがあり、避難過程に関する研究もある。

実構造物の耐震性の評価および補強・修理

鉄筋コンクリート造建物、鉄骨造建物の耐震診断、補強
 ライフラインの機能の耐震性

以上に見られるように研究の範囲は震害調査から火災時の避難にまで及ぶ広い領域に亘っていて、これらは独立ではなく相互に関連しつつ総合的に耐震工学上の問題の究明を目指しているが、地震動の観測、実構造物の挙動、特に震害を含めた構造物の性状、これを解明するための実験的研究、それらを総合した耐震性の評価、換言すれば実際の資料に基づいた実証的な構造物の耐震性の総合的な研究に主要な特質を見出すことができる。このような研究の特質と本研究設備との関係を、千葉実験所にすでに設置されている大型共同研究設備とを結びつけて、本研究設備の耐震工学上の位置づけを述べることにする。

大型振動台

ERS が設立された昭和 42 年より、時を同じくして本振動台は稼働を始めた。長さ 10 m, 最大積載重量 170 t の本振動台は、水平 1 方向に加振し、最大積載荷重時 0.4 G の加振力で、加振波形は 0.2~1 秒の正弦波形のみではあったが、この種類の振動台としては最大規模のものであった。これは杭・ケーソン等の基礎の動的挙動、アースダム、ロックフィルダム等の土構造物の地震時挙動ならびに地震時の安定を模型を用いて研究する場合、相似則のゆえに大型模型が必要であるため築造されたものである。本振動台を使用して、ロックフィルダム模型の

振動破壊実験を継続的に実施し、模型の振動性状を動力学的に説明し、その耐震性と耐震強度の解明に役立っている。又各種基礎の動的挙動を明かにするため砂箱内の模型地盤中に模型を作って、振動実験を行い、基礎の地盤中の挙動を明らかにしている。

この種類の実験研究の進展に伴い、加振々動数の範囲を拡大する必要がでてくるとともに、他方油圧機器の進歩ならびに制御技術の発展があつて、昭和50~51年にかけて、アクチュエータの出力を20tから80tに増し、また間接加振方式から直接加振に変え、かつ任意波形で加振可能とするよう改良された。この改良により、粘着力をもつ砂で築造したフィルダム模型の振動破壊実験が可能となり、フィルダム模型の振動破壊機構の研究が大きく前進し、フィルダムの耐震強度の評価に貢献している。

構造物動的破壊実験施設

1968年十勝沖地震では青森、岩手両県を中心に広い地域に被害が発生した。ERSは、数グループに分かれ、それぞれの専門分野から震害の踏査を行った。その結果は生産研究第20巻第12号にまとめられている。この際注目されたのは近代的な手法で耐震設計された鉄筋コンクリート建造物が比較的多く被害を受けたことであつた。ERSの耐震建築構造の研究者は被害を詳細に検討し、建築物のもつ実際の耐震強度を明らかにするため構造物の動的強度の研究を進めることにした。昭和46年度から始まった第一次臨時事業でERSが分担した課題「都市構造物の被害」のうちの主要研究課題として、これが取り上げられ本施設が完成し、昭和49年度より稼動した。この施設は構造物動的破壊実験装置および小型高性能振動台よりなり、前者により構造物の動的破壊実験を行うとともに、後者は、積載荷重は5tonと小さいが、最大速度70m/sec、最大加速度1.5g(各々無負荷時)という性能を生かして、各種の模型の動的挙動ならびに振動破壊性状を調査しようとするものである。

構造物動的破壊実験装置は耐力床、耐力壁および3台のアクチュエータからなる試験装置と応答発生装置および入出力データ解析処理装置からなる電子計算機システムとから構成されている。これらを結合してアクチュエータにより、構造物または構造部材に地震時の強制変位を与え、その時点における復元力特性を用いて構造物モデルの地震応答計算を行い、この結果をアクチュエータにフィードバックして、順次次の時点へ進め、非線形領域の地震応答実験を行うという電算機-アクチュエータオンラインシステムを実用化することに成功した。その後設備の充実を行い、1方向または2方向の地震入力に対する実験を行っているが、鉄筋コンクリート部材の実験では、鉄筋コンクリート構造物の震害状況をかなりよく再現することに成功している。この実験結果から得た耐震強度の性質をもとに、建物の震害を分析して、建築

の耐震診断法を開発し、防災計画に有力な方法を与えている。

小型振動台では橋梁、建築等の模型の振動実験、振動破壊実験が行われたほか、ライフラインの3次元模型の振動実験、免震装置の動特性の試験等が行われ、各種類の実験に多用されている。

以上のほか、震害の調査・検討、実構造物の動力特性、地震時挙動の測定の重視もまた研究姿勢の特質をあらわしている。耐震機械構造の研究の一部として、化学プラントおよび貯槽のモデルを千葉実験所内に設置して昭和47年より地震観測を続けている。この種類の構造物、施設の震害調査、地震応答解析方法の開発等とあわせて、耐震性の究明と耐震設計方法の発展を目指している。トンネル、ライフライン等の地下構造物の耐震性の研究についても同様で、関東地震(1923年)サンフェルナンド地震(1971年)、1978年宮城県沖地震等における被害の統計的分析、実構造物の地震観測、模型振動実験、それらの研究結果に基づいた地震応答解析モデルの作成、さらにライフラインシステムの地震時の機能の安全性の統計的解析等、実際の構造物の地震時の挙動に基づいた耐震性の解析が行われ、その成果は耐震設計、防災計画に実用化されている。

前述のように本邦では大地震の発生頻度、構造物の重要性和耐用年数等を総合したとき、構造物の一次または場合によっては二次被害の種類と規模に対する検討および経済的な検討が必要である段階に達している。一方測定計器の著しい進歩により、各地で地震観測が実施され、以前に比して地震動に関する資料が得やすくなって来た。その結果、従来震度法の基準となっていた地震動の最大加速度値についても高い値が記録され、さらに必ずしも最大加速度値が構造物の震害に直結しないことが一般に認識され、構造物の被害の発生機構についてはさらに動力学研究が必要であることが明らかになってきた。

このような研究事情のもとで、地震動の強さのレベルに対する構造物の損傷、被害の種類・程度-耐震強度-を構造力学的に究明してゆくことは基本的な研究の方向といえる。構造物の強い地震に対する応答-損傷または被害の程度を含めて-の制御が可能になれば、構造物に賦与すべき耐震性の決定に資料を提供することができるとともに、これを耐震設計に合理的に反映することが可能になる。また構造物のみならず、構造物を含んだシステムの全体としての機能を保持するための方策、安全対策、修復等の方策についても合理的な検討を行うことができるであろう。構造物の損傷を力学的に解明することは容易でない課題の1つであるが、地震動が非定常の不規則過程であらわされる動的現象であることを考慮すると、これはなお解明が容易でない課題であることがわかる。震害を、構造物が地震動によって試験を受けた

結果として把え、震害の調査検討を重視してきたのは上述のような見地からである。

震害についてはすでにいくつかの大地震について報告書が明らかにして、被害状況を類形化し得る構造物もある。しかし、結果としての震害であって、震害を受けるまでの構造物の地震応答を明らかにするような資料は得られていないように思われる。この目的に沿うような地震観測資料は今後容易に得られないものと考えられる。

そこで基礎条件を実構造物の場合に類似させて、構造物模型を地表に築造し、地震によって破壊または損傷させ、これを詳細に研究し、さらに振動台による試験等の結果と照合して、模型の地震による破壊機構を力学的に把握し、構造物の地震による損傷あるいは破壊に対する基本的知見を得ることを主目的とし、その第一段階として計画したのが本施設である。

次に設備全体の概要を述べることにする。本設備は研究手法の面から見れば、実測的研究のための設備と実験的研究のための設備に分けることができ、機能の面からさらに分類すれば次のようになる。

実測的研究のための設備

- A. 地盤の地震動観測システム
- B. 弱小モデルによる地震応答観測システム
 - B-1 鉄骨造弱小モデル
 - B-2 鉄筋コンクリート造弱小モデル
 - B-3 モデル応答観測塔

実験的研究のための設備

- C. 2次元振動台
- D. 2方向耐力壁および耐力床

A は地震時の地盤の動きを、地盤内に3次元的に配置された地震計群によって地盤のひずみを含めて、地盤の局部的挙動の複雑さをも把えて、正確に把握することを目的とするもので、これにより当該地域したがってBの弱小モデルの地震応答を解析するための必要な入力地震動の資料を得ることができる。これと並行して、当地域内の地盤中に埋設した管路の地震時の動ひずみを観測して、ライフラインの地震時挙動を明らかにするための研究を実施している。

B は地表に築造された建物の弱小モデルの地震応答、特に損傷または破壊時の挙動を詳細に解析して、破壊過程、破壊機構を明らかにし、実構造物の耐震強度に関する基本資料を得ることを目的としている。A で記録された地震動は基礎を通じてモデルに伝達される。既説の構造物動的破壊実験施設後を用いて、鉄骨ならびに鉄筋コンクリート造の構造模型の破壊時の挙動をかなり明らかにしてきたが、本設備では、地盤-基礎-構造系として総合的に研究を行うわけである。基礎と複雑な力学特性をもつ地盤との間の相互作用は、モデルの1つである観測塔

の基礎を利用して調査する。この基礎には動土圧測定のため25個の土圧計が設置されている。観測塔に設置してあるカメラおよびビデオにより、地震時の挙動を光学的に記録する。観測塔には各種機器ならびに免震装置が設置してあって、強震時のこれら機器装置の機能の耐震性を実測を通じて研究する。

C は鉛直方向ならびに水平1方向の2次元振動台である。地盤の地震動をそのまま表現するには十分ではないが、供試体を2次元的に加振し実験することにより、特に非線形領域における挙動で新しい知見が得られるであろう。フィルダム等の土構造物の地震時の安定性の研究では、振動台の規模は必しも十分な大きさではないが、鉛直方向の加振実験の結果に大きな期待がかけられている。

D は直交する2面の耐力壁と耐力床よりなっていて、耐力壁に取り付けられるアクチュエータにより、供試体に2方向から動的に載荷することができる。この場合、電算機-アクチュエータオンラインシステムを利用して非線形領域の実験が可能である。また耐力壁の外周を利用して、実構造物の基礎条件に似せて地表に築造された構造物モデルの動的破壊実験も可能である。

弱小モデルに対する本装置による実験結果は、2次元振動台による実験の結果とともに、地震動による破壊機構の究明に貴重な資料を与えるであろう。

上述のA~Dの設備は、必要に応じて独立にあるいは関連しつつ使用することができる。実測的研究のための設備であるA、Bは直接的に連結し、記録装置は共通のスタータによって起動し、500点をこえるすべての測定諸量をデジタル化して、同時に記録し、地盤の地震動と、土圧を含めたモデルの地震応答力学諸量とを記録する。これと並行して光学的なモデルの挙動の記録が進行するわけで、いわばモデルの地震応答を立体的に総合的に把握するようになっている。記録装置の一部は、2次元振動台ならびに2方向耐力壁を用いた実験における測定諸量の記録にも使用できる様になっている。

実験的研究のための2設備の油圧装置は、1つの油圧源を共用するようにして効率的な利用をはかり、電子計算機は、電算機-アクチュエータオンラインの実験、地震記録の整理、解析等汎用されるように計画してある。

これらの設備の詳細については次項から順に記述される。

この設備の建設に当たり、関係機関各位、石原所長始め所内各位から暖かい理解と援助が与えられた。特に本所経理課、司計、施設、研究協力、用度の各掛にはなみなみならぬ協力をうけた。本項を終わるに当たり、このことを記して謝意を表明する。(1983年8月10日受理)