

## 実大三次元震動破壊実験施設の開発(Ⅰ)

—建設計画と要素技術開発の概要—

大谷圭一\*・小川信行\*・箕輪親宏\*\*・御子柴正\*・田村修次\*・中村いずみ\*

### Development of 3-D Full Scale Earthquake Testing Facility(Ⅰ)

—A Summary of Construction Plan and Basic Technical Development—

By

Keiichi OHTANI\*, Nobuyuki OGAWA\*, Chikahiro MINOWA\*\*,  
Tadashi MIKOSHIBA\*, Shuji TAMURA\*, Izumi NAKAMURA\*

\*Disaster Prevention Research Division,

\*\*Cooperative Research Officer,

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

#### Abstract

The 1995 Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster clearly demonstrated that the occurrence of very strong ground motion in the area nearest to the seismic fault is capable of causing severe structural damage beyond general estimation. It has emphasized the importance of earthquake engineering research into why and how structures collapse in real conditions and how these processes are reproduced numerically. Considering the lessons learnt from recent earthquake disasters and experience using the 1-D Large Scale Shaking Table, NIED and Science and Technology Agency (STA) has planned to build a "3-D Full Scale Earthquake Testing Facility", which will test soil and structures on the ground, and be able to simulate the process of destruction. This facility will be a powerful tool in a new concept of earthquake engineering research organization. After technical preparations, that is, the development of an ultra size shaking mechanism which commenced in fiscal 1995, and technical surveys in earthquake engineering and related fields, NIED and STA will begin the design and construction of this new facility in fiscal 1998. This paper summarizes the construction plan of the facility and the technical development work of NIED and STA during the past three years.

**Key words :** Earthquake, Strong motion, Structural damage, Shaking table, Collapse test

#### 1. はじめに —防災科研における構想の経緯—

防災科学技術研究所の大型耐震実験施設(一次元, つくば)は, 1965年に構想が始まり, 1970年7月に完成した。この振動台建設計画は, 1964年の新潟地震の際に地盤液状化をはじめとする多くの被害があったことを受けて, 大型のモデル実験が行える振動実験装置の必要性が認識され, 日本学術会議等からの勧告もあり積極的に推

進されたものである。その後, この振動台が多くの実験研究に活用されてきていることは周知の通りであるが, その特徴は基礎研究(すなわち現象の再現と解明実験)から実証実験(新技術等の評価確認)までの幅広い目的に使われてきたこと, また地盤やブロック塀から原子力機器まで, さまざまな構造物を対象に用いられてきたことである。その後作られた他機関の振動台が大なり小なり目的志向型であることを考えるとこの点はかなり特徴的である。さらにコスト面, 利用面からみて使いやすい振動台という意味でも高い評価を受けている。

このように文字通り共用施設としての汎用性を基本理

\*防災科学技術研究所 防災総合研究部

\*\*流動研究官

念として建設，利用が行われてきた振動台であるが，その後の時代の進展に対応するためにも少なからぬ努力が必要とされた。経年劣化した加振機等の更新，それに合わせた性能の向上，特に最大変位，最大速度の大幅な向上，基礎の増し打ち，制御系，計測とデータ処理システムの更新などが実施され，使いやすいシステムとして利用範囲を拡大してきた。しかしながら耐震工学の進展とともに三次元強震動を再現できる実験施設の必要性が議論されるようになり，当研究所において中型規模(6m×6m)の三次元振動台製作のための技術開発が行われた。この開発は振動台の実現には至らなかったが，その成果はその後民間等で急速に整備が進んだ二，三次元振動台の技術基盤として活用された。

当研究所における三次元振動台の構想はその後，一次元大型振動台の活用経験と民間等における中規模三次元振動台の普及を踏まえた見直しが行われ，国として整備する場合はより実証能力の高い大型三次元振動台が適当との議論がなされた。一方，耐震工学ではコンピュータを活用したハイブリッド実験手法や遠心载荷実験がポピュラーな方法となり，近年の地震による構造物災害の減少も相俟って，コストのかかる大型三次元振動台の構想は簡単に受け入れられるものではなかった。このような中で発生した阪神淡路大震災は，周知のように，震源近傍では極めて強い地震動が発生し，それによる予想外の大被害が起こりうることを示した。これを契機に構造物の振動破壊に対する関心が再び高まり，当研究所の大型三次元振動台構想も新たな視点から取り組みが開始されることとなった。地上にある実物規模の構造物の破壊を再現し，他の様々な手法，実験手段とも連携して破壊の解明を目指すことが基本的な目標として位置づけられた。これまでは木造家屋ですら基礎を含むありのままの姿，寸法で三次元強震動に対する耐震性を検証する手段がなかったことを考えると本計画施設の役割は明確である。また，この施設は前述したような現在の一次元大型振動台の有する利用面での特徴を受け継ぐものであることが重要である。

前述のように阪神・淡路大震災は，市民のみならず地震防災関係者にとっても，それまでの立脚点を見直さねばならない程の教訓と課題を提供するものであった。科学技術庁では，直ちに災害調査に着手すると共に，学識経験者による委員会の実施，報告書の刊行，各種予算措置による具体的研究や施策の実施を行ってきた。特に，科学技術庁長官の諮問機関である「航空・電子等技術審議会」への「地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方」(諮問第24号)諮問を行い，地震防災科学技術の更なる振興に努力している。

防災科学技術研究所においても，この震災の教訓を深く受け止め，平成7年度第一次補正予算により，全国1000ヶ所に強震観測点を展開し，その記録を速やかにインターネット上で公開する「強震ネットワーク(K-NET)」の開発を行った。さらに，平成7年度第二次補正予算において，三次元地震動を受ける実大構造物の破壊

実験を可能とする振動実験施設の建設を目指し，「大型三次元震動実験装置加振機構の要素技術開発」に着手した。この要素技術開発は，平成7年度から4ヶ年計画で実施されており，平成9年度末までには，振動実験施設の全体構想のとりまとめ，施設の中核となる加振機構の要素部分の製作を完了し，試験が最終段階に到達する予定である。なお，当初の計画であった「大型三次元震動実験施設」は，その後種々の検討を受けて現在は「実大三次元震動破壊実験施設」建設計画として推進されることになった。本論は，この計画を進めるに当たってこれまでの検討経緯，計画の概要，要素技術開発の現状などを要約して取りまとめたものである。

なお，要素技術開発の確証試験は現在進行中であり，本論第5章で概要を紹介するが，速報的なものであり記録波形図等，やや見づらい点があることをあらかじめお断りしておきたい。

## 2. 地震防災研究基盤構想への発展

平成7年(1995年)1月17日に発生した「阪神・淡路大震災(兵庫県南部地震)」は，地震防災関係者にとって，大きな教訓と課題を提供するものであった。科学技術庁では直ちに災害調査に着手すると共に，学識経験者による検討会の実施・報告書の刊行，各種予算措置による具体的な研究及び施策を実施している。

### 2.1 科学技術会議政策委員会

防災に関する科学技術に関しては，平成5年12月に科学技術会議が答申し内閣総理大臣が決定した「防災に関する研究開発基本計画」により，諸施策が推進されてきた。科学技術会議政策委員会では，平成5年3月より，地震防災についての検討を行い，平成7年5月25日に「阪神・淡路大震災を踏まえた地震防災に関する研究開発の推進について」をとりまとめた。

### 2.2 地震防災科学技術推進検討会

上記の基本計画を踏まえ，かつ，最近の地震被害による教訓を考慮して，地震防災科学技術分野で推進すべき研究開発課題を検討するために，科学技術庁研究開発局に「地震防災科学技術推進検討会(委員長：伊藤 滋慶 応大学教授，委員：13名)が，平成7年3月に設けられ，早期に取り組むべき研究開発課題を整理した，同年5月31日に「阪神・淡路大震災等を踏まえた地震防災科学技術の推進方策について」と題する報告書を発表した。

本報告書で早期に取り組むべき研究開発課題として抽出されたのは，次の4つの課題である。

- 1) 総合的な地震防災の推進の基礎となる地震防災評価手法に関する研究開発
- 2) 地震防災と生活を支える情報に関する研究開発
- 3) 市街地環境を地震に強くする研究開発
- 4) 震災時の生活・社会活動を確保するための研究開発

また，報告書では，地震防災に関する研究開発の実施上の留意点についても言及しており，「研究基盤の整備」の必要性を，以下のように指摘している。

「耐震化技術あるいは地震災害予測に関する研究開発を着実に進展させるためには、それらの研究開発に必要なとされる大型の耐震実験施設及び全国的な強震観測網や都市域の高密度強観測等の観測施設の整備・充実が必要である。」(この指摘を受けて、当所では全国強震ネットワーク(K-NET)の整備を実施した。)

地震防災に関する研究開発は、地震発生前の計画的な対応から、震災後の復旧・復興に至るまでの様々な事象を対象とし、それらの成果が全体として、総合的な地震防災の推進に資することが必要である。この必要性の認識に立脚して、「平成7年度科学技術振興費による生活・社会基盤研究」の1課題として、「市民の安心を確保し安全な市街地を創出するための総合的な地震防災に関する研究」と題して、全体としてソフト・ハード両面のバランスのとれた研究開発を、平成7年より第1期3ヶ年計画で関係機関による共同研究として実施されることとなった。研究は以下に記す3つの大きなテーマに集約されており、官学民併せて15機関により実施されている。

- 1) 地震防災の理解を深め、安心な市街地を計画するための研究
- 2) 震災時の市民生活・社会活動を守る研究
- 3) 住宅地の総合的な耐震化に関する技術開発

### 2.3 地震防災研究基盤の検討に関する懇談会

阪神・淡路大震災等の教訓を踏まえ、地震防災科学技術に関する研究は、国立試験研究機関・大学・民間を含め様々な研究機関で実施されており、更に、既存の各研究機関においては、それぞれ研究の拡充強化、体制整備等が図られているが、既存研究機関の充実強化のみでは、今般の阪神・淡路大震災の経験から地震防災科学技術に求められている要請に、十分応えることが困難である。すなわち、阪神・淡路大震災の結果明らかとなった新たな大型の試験研究施設の整備を必要とする研究開発や、国際協力を十分視野に入れた、内外の多分野の研究者が流動的な体制で推進すべき研究開発、さらに、ソフト面にも重点を置いたような総合的な地震防災の開発研究などについては、既存の枠組みにとらわれずに、新しい発想の下で新規に研究拠点を設けて、地震防災科学技術の一層の推進に寄与していくことが重要と考えられる。科学技術庁では、このような認識の元に「地震防災研究基盤の検討に関する懇談会(座長：岡田恒男芝浦工業大学教授、委員：16名)を平成7年11月に設け、平成8年5月に「阪神・淡路大震災を踏まえた地震防災研究基盤の効果的な整備の推進について」と題する報告書を発表した。

新しい研究拠点では、「都市部を中心とする地震災害の軽減を目指す総合的な研究」の一環として、以下のような研究を推進することが必要であると指摘している。

- 1) 総合的な耐震、免震、制震に関する研究
- 2) 活断層と地震防災に関する研究
- 3) 総合的な地震災害情報に関する研究
- 4) ソフト面も含めた総合的かつ基礎的な地震防災科学技術の研究

このような研究を推進する新たな地震防災研究拠点においては、まず、従来の機関ではなかなか設置・運用が困難であった、大型の共同利用施設の整備を図っていくことが必要であり、更に、研究を効果的に推進する上で不可欠な地震防災研究データベース等についても、併せてその整備を図っていくことが重要であるとしている。報告書では、具体的に整備すべき大型の共同利用施設として、大型三次元震動実験施設を挙げ、その必要性、機能・仕様、運用について記述している。

また、新たな地震防災研究拠点に求められるコンセプトとして、以下の項目を列挙している。

- 1) 災害から人命を守るということを基本的考え方に据え、その目標達成のため、工学、理学、人文・社会科学、情報科学、医学等幅広い分野の研究者が、協力、交流、相互理解の促進が図られる場とすること。
- 2) 固定化した研究組織では困難な課題を流動的な研究システムで推進すること。
- 3) 共同利用施設を整備し、内外の幅広い分野、組織の利用ニーズに応えうる体制を、人的な体制を含めて整備すること。
- 4) アジア太平洋地域を中心とした国際研究交流の拠点とすること。
- 5) 阪神・淡路大震災の経験を将来に有効に伝えていくことができるようにする観点や、防災研究への理解・支援の観点等も踏まえて、研究拠点の立地を検討すること。

### 2.4 地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方についての検討

「地震防災研究基盤の検討に関する懇談会」での検討が煮詰まってきて、地震防災研究基盤の整備方策について、より広範な意見集約が必要であるとの判断に立脚し、科学技術庁長官は、同長官の諮問機関である、航空・電子等技術審議会に対し、「地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方について」(諮問第24号)の諮問を、平成8年3月29日に行った。航空・電子等技術審議会では諮問を受け、審議の担当は「地球科学技術部会」にて行うこととした。地球科学技術部会では、さらに具体的な審議のために「地震防災研究基盤分科会(主査：岡田恒男芝浦工業大学教授、委員：24名)を設置した。この分科会の下に、個別の課題に対する検討のためのワーキンググループが3つ設けられた；研究拠点ワーキンググループ(主査：亀田弘行京都大学教授、委員：19名)、対象地震ワーキンググループ(主査：小谷俊介東京大学教授、委員：15名)、大型三次元震動実験施設ワーキンググループ(主査：柴田碧東京大学名誉教授、委員：17名)。

航空・電子等技術審議会は、審議会・部会・分科会・ワーキンググループで総計30回の会議を開催し、慎重な審議の結果として、「地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方について(諮問第24号)に対する答申」を、科学技術庁長官に平成9年9月3日に提出した。<sup>2)~4)</sup>

この答申の中で、地震防災研究基盤の中核的施設として「大型三次元震動実験施設」が位置づけられ、詳細な検討結果が報告されている。ここでは、同答申に盛り込まれた大型三次元震動実験施設の整備のあり方について、その記述内容を転載することにより、本施設に対する位置づけを明確にしておくものとする。

1) 大型三次元震動実験施設について

大型三次元震動実験施設は、研究拠点における実験的研究の中核となるべき施設である。また、この施設は将来開発していく地震災害のプロセス、全体像を詳細に解析、予測しうる総合的なソフトウェアシステム（「地震災害時空間シミュレーション・システム」と呼んでいる）の主要要素となり、『地震に強い国土・社会を創る』ための地震防災研究になくてはならない施設であるため、できるだけ速やかに整備する必要がある。

2) 必要性と位置づけ

a) 「地震災害時空間シミュレーション・システム」の開発の主要要素としての振動実験施設としての位置づけ

振動実験施設等による建造物の破壊実験等の成果が蓄積されることにより、数値振動台の有用性を飛躍的に増大させることが可能となり、「地震災害時空間シミュレーション・システム」の開発につながる。

b) 破壊現象の解明のための振動実験施設としての位置づけ

阪神・淡路大震災では予想を超える破壊が起こった。これは、既存の振動実験施設の性能の限界から、工学的に予想した以上の意外な破壊を招き、予測しない災害発生の一因になったといえる。したがって、破壊過程を詳細に解析できる実大の建造物等についての振動実験が可能な高性能の震動実験施設の整備が必要である。

c) 振動実験の主要課題への対応のための施設としての位置づけ

阪神・淡路大震災をはじめとする破壊的地震の被害の教訓を活かし、地震に強い国土・社会創りを行うために必要な耐震主要課題を検討した結果、以下のような領域の課題についての振動実験が必要である。

- (イ) 一般建築構造、高付加価値建築構造の新しい設計・施工技術の開発と検証
- (ロ) 土木建造物の新しい設計・施工技術の開発と検証
- (ハ) 異なる地盤条件立地点における建造物の新しい設計・施工技術の開発と検証
- (ニ) 免震・制震構造の開発と適用性・安全性の検証
- (ホ) 産業施設・機器、特に防災上の問題のある、または、社会機能の維持に重要な施設等の耐震性の高度化と安全性の検証

3) 振動実験施設が要求される基本的性能

a) 破壊実験の実施が可能であること

阪神・淡路大震災のひとつの特徴である、いわゆる長周期パルス波による実大建造物の破壊現象を解明できる性能を有する振動実験施設が必要である。

b) 三次元振動実験の実施が可能であること

少なくとも兵庫県南部地震での地震動を、変位、速度を含め、完全に再現できる三次元振動実験施設の整備が必要である。

c) 実大建造物の振動実験の実施が可能であること

建造物の破壊は実大建造物においてはじめて現れる現象も多いため、その破壊のメカニズムを詳細に理解するための振動実験が必要である。したがって、十分に大型の試験体について振動実験を可能とするような、搭載荷重、許容転倒モーメント等のスペックを有することが必要である。

4) 大型三次元震動実験施設の駆動方式の選定とその理由

大型三次元震動実験施設の駆動方式については、技術的に必要とされる新たな解決課題が少ないこと、同種の建設事例が小から大まで世界的に見て数多くあり、直ちに設計・製作が可能であること、上流から下流までの技術蓄積がなされていること等から、「電気・油圧方式」を採用することが適当である。また、同方式は、周辺及び全体系を構成する計算機システムと、現状において最も結合しやすい方式である。

5) 大型三次元震動実験施設の仕様

次章（3. 実大三次元震動破壊実験施設の計画概要）にて記述することとする。

6) 施設整備計画にあたっての留意点

答申が指摘している「施設整備計画に当たっての留意点」は、実大三次元震動破壊実験施設計画推進にとって重要な指摘であるので、ここに記すこととする。

a) 以上のような大型三次元震動実験施設の整備計画においては、基本の設計思想に立ち返って十分な検討を行うことが必要である。本震動実験施設は、今後20年間は使われるものと考えられる。細部設計の実施に当たって、今後発生するであろう地震防災科学技術の多様な社会的・研究的要求に対する柔軟な検討や、この20年間の計算機、通信関係の進展を見込んだシステム設計が必要である。また、「地震災害時空間シミュレーション・システム」の今後の発展も念頭に置くことが必要である。

b) 立地場所を選定するにあたっては、本施設の主要な実験対象が基本的には現地での建物や橋梁などの建造もしくは組み立てるものを前提としていることや、施設建設のコスト面、周辺への振動影響等を考慮すると相当の敷地面積が必要であること

と、また地元の理解等に配慮して検討すべきであると考えられる。

- c) 周辺環境に及ぼす影響、今後長期にわたっての研究者・実験従事者の作業性の変化、及び海外からの派遣者に対し良好な環境を提供できるようにすべきであり、その永続的使用を確保するためにも、いわゆる「使いにくい」施設と受け止められることのないよう十分な配慮が必要である。

#### 7) 実験施設の運営のあり方

##### a) 国際的にも開かれた共同利用施設

本施設は、世界で群を抜いた大規模かつ高性能の施設であるという性格からも、国内はもとより海外にも広く開かれた「国際的な共同利用施設」として、運営されるべきである。したがって、自ら研究を実施する研究機関の施設という性格とともに、国内外の研究者、研究機関等に開かれた利用が可能な体制、設備及び補助部門の整備が不可欠となる。

##### b) 運営主体の考え方

本施設の運転・点検等については、専門的知識と経験を有する者が実施することが肝要であり、運営機関にその人材を確保する必要がある。なお、その運営機関は必ずしも本施設の組織である必要がなく、業務委託することも適当である。

##### c) 運用の基本要件

大型三次元震動実験施設を効果的に運用していくためには、以下のような基本要件に十分配慮することが必要である。

- (イ) 産官学及び海外にも広く開かれた共同利用施設として運営されること。  
 (ロ) 利用者への支援体制を含めた適切な管理・運営体制が確立されること。  
 (例えば、保険の取り扱い、利用者教育、安全教育、実施への助言などへの配慮を含む。)  
 (ハ) 施設の円滑な運営のための高度の能力を有する人員及び継続的な経費が確保されること。  
 (ニ) 施設の将来の高度化等への改修等にも十分対応できるような措置が講じられていること。  
 (ホ) 施設を利用した実験研究等を促進、支援、評価する制度を確立すること。  
 (ヘ) 利用者が研究を実施する上での良好な環境を整備すること。(特に、長期利用者への対策に万全を期すること。)  
 (ト) 新しい技術への展開を保證する施設としての運営を保證すること。

#### 2.5 地震防災研究拠点の整備にむけて

航空・電子等技術審議会、地震防災研究基盤の検討に関する懇談会等の提言を具体化するための施策が講じられることとなった。

##### 1) 実験施設の建設着手

地震防災研究拠点の中核的施設である大型三次元震動実験施設は、種々の検討を経て、「実大三次元震

動破壊実験施設」という名称で、防災科学技術研究所が、その建設主体となって平成10年度から、建設に着手することが決定された。

#### 2) 地震防災フロンティア研究センターの設置

地震防災研究拠点では、ハード面での地震防災研究と併せて、ソフト面からの研究を推進することが必要であるとされている。この必要性に鑑み、理学的、工学的、社会科学的な研究分野を総合した広い視点に立った研究開発を進めるために、理化学研究所に「地震防災フロンティア研究センター」が、兵庫県三木市に平成10年1月に開設された。このセンターは、亀田弘行京都大学教授をセンター長とし、「都市部を中心とする地震災害の軽減を目指す先導的な研究」を総合課題として、都市地震災害における物理的課題、社会的課題、情報課題を包含する災害過程を総合的に理解するための方法論の開発に取り組んでいる。

#### 3. 実大三次元震動破壊実験施設の計画概要

1章に述べたように「大型三次元震動実験施設」計画は、その後「実大三次元震動破壊実験施設」計画に変更され、現在に至っている。このため、本章では後者の内容について記述する。

##### 3.1 施設の目標と役割

本施設は、実物規模の構造物を対象に兵庫県南部地震をはじめとする強震動を再現し、その破壊過程を解明、実証することを目標としている。阪神淡路大震災では、設計レベル以上の地震動ではあったが、予想を超える規模、形態の被害が発生し、構造物の持つ安全余裕を実証的に評価することの重要性が改めて示された。また、阪神淡路大震災を契機に、構造物の耐震設計に性能設計的な考え方を導入する機運がさらに高まっているが、このような性能設計を信頼性あるものとするためには、構造物の最終的な破壊挙動とそれに至る過程、破壊モードなどを予測できる手法、データが必要である。このような予測手法とそれに必要なデータベースを構築していく上でも本施設のような実証的な耐震実験施設による検証が必要とされている。構造物破壊に関する研究には、材料挙動、部材のモデル化、基本構造の破壊過程の解明等の研究をベースに最終的には実規模構造の破壊挙動を検証することが必要とされる。この意味で、本施設は他の多くの実験手段と連携し、それらの成果を活用して実規模構造の破壊過程の解明、検証を行うという役割を担っている。

##### 3.2 実験装置の構成と基本性能

###### (1) 基本性能

本装置の基本諸元を表1に示す。

###### (2) 機器構成

本装置は基本的には従来型の油圧制御振動台と同様である。地震動を再現する装置としては、必ずしも油圧制御だけでなく、動電型振動台、爆破型振動台、液体ロケット利用振動台など種々の構想があり、実用化されている

表1 実大三次元震動破壊実験装置の基本諸元

Table 1 Basic Specifications of 3-D Full Scale Earthquake Testing Facility.

項目	仕様		
最大搭載重量	1 2 0 0 tonf		
搭載面積	2 0 m × 1 5 m		
駆動方式	アキュムレータ蓄圧電気油圧制御		
最大加速度	水平 X	水平 Y	垂直 Z
(最大搭載時)	0.9 G 以上	0.9 G 以上	1.5 G 以上
最大速度	水平 X	水平 Y	垂直 Z
(3 軸同時, 2 秒以上)	1 3 0 cm/s	2 0 0 cm/s	7 0 cm/s
最大変位	水平 X	水平 Y	垂直 Z
	± 0.5 m	± 1 m	± 0.5 m
許容モーメント	X 軸周り	Y 軸周り	Z 軸周り
(転倒及び偏揺)	15,000tonf・m 以上 (Z 軸 1G 加振時)	15,000tonf・m 以上 (Z 軸 1G 加振時)	4,000tonf・m 以上 (水平 1 軸最大加 速度時)

表2 実大三次元震動破壊実験装置の主要機器構成

Table 2 Configuration of 3-D Full Scale Earthquake Testing Facility.

構成要素	数量	備考
震動台	1 台	20m × 15m
加振機及び三次元継手		
水平加振機(X)	5 台	450tonf, ± 0.5m
水平加振機(Y)	5 台	450tonf, ± 1m
垂直加振機(Z)	1 4 台	450tonf, ± 0.5m
サーボ弁 水平用 X	1 0 台	15,000 ℓ /min/台
Y	1 5 台	同上
垂直用 Z	1 4 台	同上
三次元継手	2 4 台	
油圧供給装置		
主油圧ポンプユニット	7 台	3600 ℓ /min/台, 3150PS
主プーストポンプ	7 台	4000 ℓ /min/台, 90kW
補助ポンプ設備	1 式	
主アキュムレータ	1 8 台	1000 ℓ /台
熱交換装置	1 式	
タンク設備	1 式	
配管設備	1 式	
制御システム		
ハードウェア	1 式	
ソフトウェア	1 式	
計測システム	1 式	
動力系設備	1 式	22kV 受電, 容量 7,000kWH
大型天井走行クレーン	2 基	400tonf/50tonf

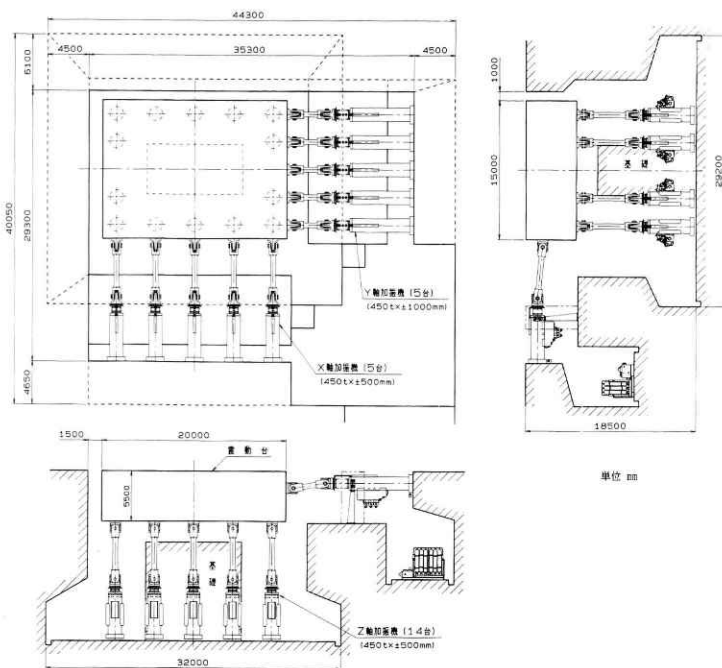


図1 実大三次元震動破壊実験装置の主要部  
Fig. 1 Main Parts of 3-D Full Scale Earthquake Testing Facility.

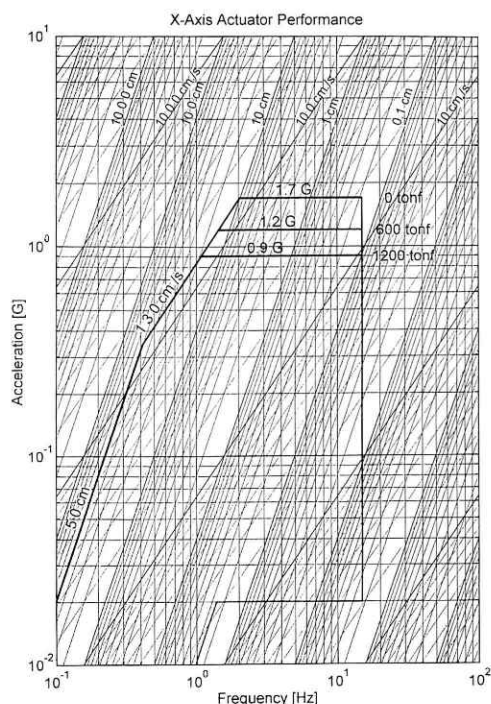


図2 目標限界性能図 (水平 X 軸)  
Fig. 2 Limit Performance (horizontal X).

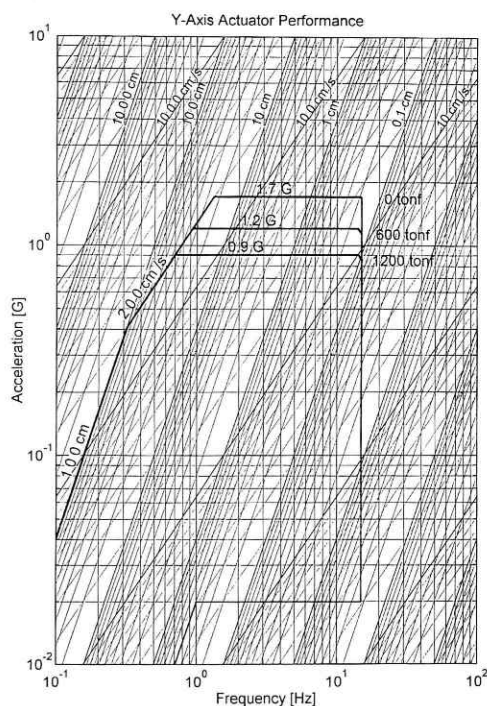


図3 目標限界性能図 (水平 Y 軸)  
Fig. 3 Limit Performance (horizontal Y).

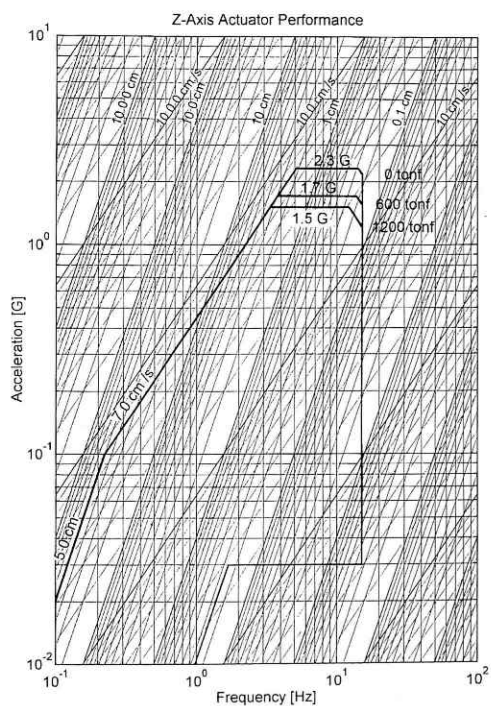


図4 目標限界性能図 (垂直 Z 軸)  
Fig. 4 Limit Performance (vertical Z).

ものも少なくない。本施設の計画に当たっては、これら他の方式についても比較検討を行ったが、本施設の規模と目的に見合った信頼性が得られるものとして従来と同様の油圧制御振動台方式を選定した。

本装置の主要機器構成を表2に示す。また、図1に装

置の主要部を示す。

図2~4は最大荷重1200 tonfを搭載した場合の限界性能を示す。

### 3.3 施設計画

#### (1) 施設レイアウト計画

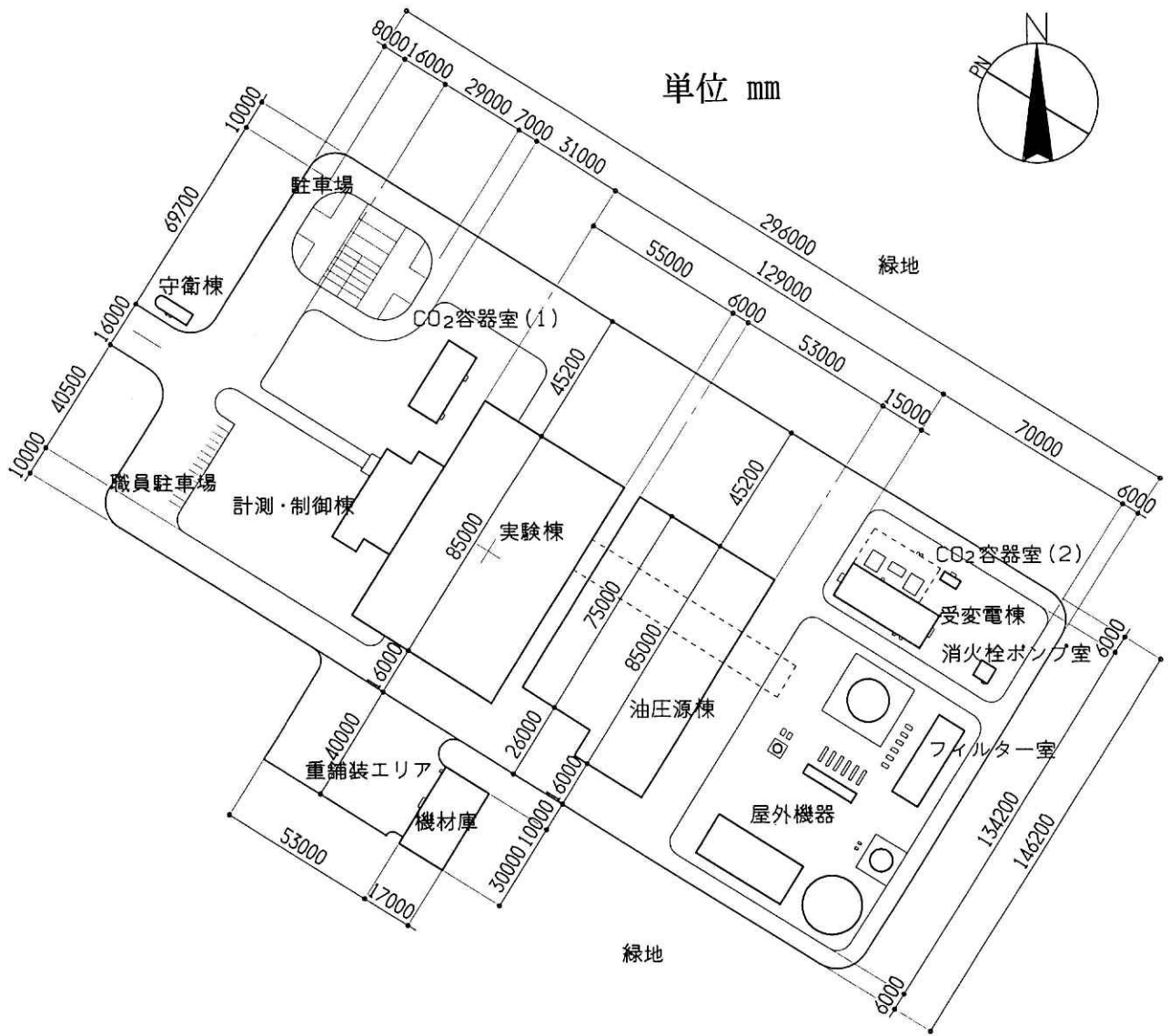


図 5 施設のレイアウト概要図

Fig. 5 Layout of the Facility.

本施設の配置計画を図 5 に示す。建屋配置の基本的な考え方を以下に示す。

- ① 地盤条件を考慮し、岩盤上に震動台基礎を配置する。
- ② 職員、見学者のアクセスのため、施設入口の近い位置に計測制御棟を、また景観を考慮して屋外機器は、施設入口から最も遠い位置に配置する。
- ③ 実験状況を計測制御室から監視できるように、実験棟に隣接して計測制御棟を配置する。
- ④ 油圧配管の距離を短くするため、ポンプユニット、アキュムレータユニットは震動台に隣接した位置に配置する。

(2) 基礎建屋計画

基礎建屋計画の基本的考え方を以下に示す。

- ① 試験に悪影響を与えないため、基礎自身が共振し

ない。

- ② 地盤振動が周辺環境に悪影響を及ぼさないこと。
- ③ 岩盤である神戸層までの深さが最も浅い現在の地山の谷部に、震動台基礎を配置することにより、神戸層の掘削土量を少なくする (図 6)。
- ④ 供試体の高さを 20 m 以下と想定し、クレーンの天端を GL+28 m、建屋の軒高を 40 m とする。
- ⑤ 環境についても考慮する (例えば、油圧源棟の内部の壁に吸音材を張り、ディーゼルエンジンの騒音を遮断する)。

実験棟の基礎形状を図 6、建屋の平面図および断面図を図 7 に示す。





4. 施設の建設, 利用に関わる技術上の検討

4.1 技術検討委員会

平成7年度補正予算により前述のように加振機構の要素技術開発がスタートしたが, この開発に伴う技術的事項の審議, 助言を行うため, 防災科学技術研究所長の諮問機関として, 「大型三次元震動実験施設技術検討委員会」(委員長 柴田碧横浜国大教授(当時)) が平成8年7月に設置された。技術検討委員会の審議事項は以下の通りである。

- (1) 全体システム設計調査に関する結果
- (2) 全体システムの機能及び性能の総合数値シミュ

レーシヨンの結果

- (3) 振動, 騒音等環境への影響評価結果
- (4) 加振機構確認試験装置の計画
- (5) 加振機構確認試験の結果
- (6) 総合的な評価
- (7) その他関連する技術的事項

審議経過は表3に示す通りである。また, 上記目的に添って具体的事項の詰めを行うために, 技術検討委員会ワーキンググループ(主査 藤田隆史東京大学生産技術研究所教授) が設置された。ワーキンググループでは主として以下の事項の審議を行った。審議経過は表4の通

表3 技術検討委員会開催経緯 (平成10年2月現在)

Table 3 Meeting List of Technical Research Committee.

開催状況	審議内容
準備会 平成8年 6月13日(木)	(1)趣旨説明 (2)要素技術開発の中間報告(案)の報告 (3)検討会の構成, 今後の進め方等について
第1回 平成8年 7月9日(火)	(1)趣旨説明 (2)防災科研における開発試験計画の概要説明 (3)開発調査についての第一次中間報告書の説明及び審議
第2回 平成8年 7月26日(金)	(1)委員長代理及びワーキンググループの設置について (2)一次中間報告書(資料技1-6)に関する継続審議
第3回 平成8年 10月24日(木)	(1)ワーキンググループにおける技術検討状況 (2)技術的課題の技術検討状況 (3)各種駆動方式の概略調査状況 (4)確認試験計画 (5)ユーザアンケート実施(案) (6)震動台運用・製作経験等に基づく追加コメント (7)技術検討委員会中間報告書の構成について
第4回 平成8年 12月26日(木)	(1)ワーキンググループにおける技術検討状況 (2)要素技術開発の進捗状況(サーボ弁他) (3)ユーザアンケート実施結果について (4)技術検討委員会中間報告のまとめ方について (5)今後の審議の進め方
第5回 平成9年 3月13日(木)	(1)ワーキンググループ技術検討報告 (2)技術検討に関する委員のコメント(追加) (3)数値シミュレーションの検討状況 (4)制御の課題と進め方 (5)ユーザアンケート調査の取りまとめ
第6回 平成9年 6月10日(火)	(1)ワーキンググループ技術検討報告 (2)油圧供給系カオスの検討結果概要 (3)確認試験の進捗状況
第7回 平成9年 10月27日(月)	(1)前回委員会後の経緯報告 (2)ワーキンググループ報告 (3)要素技術開発の進捗状況 (4)今後の運営について
第8回 平成10年 1月28日(水)	(1)ワーキンググループ報告 (2)震動台連成時の破壊シミュレーションについて (3)要素技術開発の進捗状況 (4)今後の進め方

表4 技術検討委員会ワーキンググループ開催経緯(平成10年2月現在)

Table 4 Meeting List of Technical Research Committee Working Group.

開催状況	審議内容
第1回 平成8年9月13日(金)	(1)WG設置について (2)指摘された技術的課題と進捗評価のとりまとめ方案 (3)代表的モデルの設定と震動台基本スペックの概略評価 (4)総合性能評価用シミュレータの構成,内容 (5)既存振動台の性能,利用状況等の調査について
第2回 平成8年10月9日(水)	(1)モデル計算による震動台スペックの検討(続) (2)震動台制御において考慮すべき基本事項について (3)制御手法及び制御システム計画設計(現状) (4)既存震動台のユーザアンケートの実施案 (5)技術的課題と進捗表の追加,訂正について(報告) (6)WG第1次中間報告書 目次(案)と分担について
第3回 平成8年11月11日(月)	(1)モデル計算による震動台スペックの検討(続) (2)基礎の設計方針について (3)安全に関わる検討事項 (4)制御手法検討サブワーキンググループ設置について
第4回 平成9年2月25日(火)	(1)震動台スペック検討のための実験試案(追加増補) (2)サーボ弁及び制御に関する技術検討 (3)生涯コストの検討方法 (4)技術検討報告書案の作成方法 (5)アンケート調査結果
第5回 平成9年5月14日(水)	(1)ツインテーブル実験における技術的課題 (2)数値シミュレーションの中間結果について
第6回 平成9年7月8日(火)	(1)試験体の破壊に関する検討(その1,振動台非連成) (2)試験体の破壊に関する検討(その2,振動台連成)
第7回 平成9年9月9日(火)	(1)破壊に関するシミュレーションの方針について (2)試験体の破壊に関する検討(振動台非連成) (3)付帯設備の計画について
第8回 平成9年10月13日(月)	(1)試験体の破壊に関する検討(振動台非連成) (2)付帯設備の計画について
第9回 平成9年12月19日(金)	(1)試験体破壊に関する検討結果(振動台非連成)のとりまとめについて (2)付帯設備の計画について (3)制御手法に関する検討について (4)今後の予定について

りである。

- (1) 実験目的・種別と油圧源能力のパラメトリックスタディ
  - (2)  $H_u$ を含む制御システムのあり方
  - (3) 異常監視システムのあり方
  - (4) 実験施設生涯コストの評価
  - (5) 基礎の設計方針
  - (6) その他関連する技術的事項
- さらに,制御については特に専門的な内容を含むため,

サブワーキンググループ(座長 背戸一登日本大学教授)を設け,下記事項について集中的な審議を行った(表5)。

- (1) 震動台制御の目的と課題の整理
- (2) サーボ弁等の制御ハードウェア及び各種制御手法の内容,特徴及び振動実験における有用性の評価
- (3) 制御技術の今後数年間の趨勢と開発を要する課題の抽出

以上の委員会等での審議内容は,参考資料に記載した報告書としての取りまとめを進めている<sup>5)</sup>。本委員会で

表 5 技術検討委員会サブワーキンググループ開催経緯 (平成10年 2 月現在)

Table 5 Meeting List of Technical Research Committee Sub-working Group.

開催状況	審議内容
第 1 回 平成 8 年 12 月 2 日(月)	(1)サブワーキンググループの設置について (2)サーボ弁の方式, 性能について (3)震動台ユーザの要求と制御の課題 (フリー討議) (4)今後の検討の進め方
第 2 回 平成 9 年 1 月 30 日(木)	(1)サーボ弁の方式と性能について (まとめ) (2)震動台ユーザの要求と制御の課題 (まとめ) (3)制御手法, 制御システム設計の基本事項
第 3 回 平成 9 年 2 月 17 日(月)	(1) サーボ弁の方式と性能について (まとめ) (2) 震動台ユーザの要求と制御の課題 (まとめ) (3) 制御手法, 制御システム設計の基本事項
第 4 回 平成 9 年 5 月 27 日(火)	(1)油柱共振周波数を克服するためのサーボ制御手法 (2)低減衰試験体の加振実験においてピッチングを抑制し, 目標波形を忠実に再現できる制御手法 (フリー討議) (3)動的破壊試験において目標波形を忠実に再現できる制御手法について (フリー討議)
第 5 回 平成 9 年 8 月 1 日(金)	(1)油柱共振周波数を克服するためのサーボ制御手法 (続)
第 6 回 平成 9 年 11 月 20 日(金)	(1)油柱共振周波数を克服するためのサーボ制御手法 (続)

の技術的検討は当初の目的に加え, 付帯施設に関する検討など関連事項を含め現時点までほぼ予定通り進んできており, 今後は, 震動台との連成を考慮した試験体の破壊に関する検討, 制御手法に関する検討などを進める予定である。なお, 平成 10 年度より建設計画が具体化することを受けて, 本委員会は平成 10 年 3 月に任務を終了し, その後は「具体的な施設建設計画推進の技術的検討を行う委員会」(仮称)が新たに設置されることとなる予定である。

#### 4.2 利用検討会

一方, 施設の利用に関する検討は防災科学技術研究所における予備調査を受けて, 科学技術庁研究開発局に「大型三次元震動台の利用に関する検討会」(座長 石丸辰治 日本大学教授)が平成 8 年 5 月に設置された。同検討会は平成 8 年 7 月まで, 計 5 回の検討会, 3 回の幹事会での審議を経て「大型三次元震動実験施設の利用に関する検討報告書」(平成 8 年 8 月)を取りまとめた。同報告書は, 大型三次元震動台を用いる主要課題の分野として

- (1) 地盤の破壊現象の解明と土木構造物の耐震性の強化
- (2) 建築物の動的破壊機構の解明
- (3) 橋梁等大スパン, 長大構造物の耐震性の確保
- (4) 産業設備, 機器等の耐震性の高度化
- (5) 免震, 制震構造の開発と適用性の検証
- (6) 新しい建築構造, 高付加価値建築構造の設計技術の開発

の 6 つを抽出し, さらにこれら各分野で重要とされる課

題の選定を行い, 計 17 の主要実験課題を提案している。さらに, これらの実験研究を行っていく場合に施設が持つべき機能, 性能についても調査を行っている。

本検討会の成果を発展的に受け継ぐものとして, 平成 10 年 1 月に, 「構造物破壊実験による地震動の破壊力検討委員会」(委員長 岡田恒男芝浦工業大学教授)が科学技術庁の委託により(財)地震予知総合研究振興会に設置された。同委員会には「入力地震動小委員会」(主査 入倉孝次郎京都大学防災研究所教授)及び「運用利用小委員会」(主査 澤田義博名古屋大学教授)が設置され, 前者は震動台の入力として考えるべき地震動を様々な角度から検討すること, 後者は利用検討会の成果を受けて利用課題と施設のあり方を種々の角度から検討することを目的としている。この委員会は 2 年半ほどの審議を行い成果を取りまとめることとしている。

### 5. 要素技術開発

#### 5.1 要素技術開発の目的

実大三次元震動破壊実験装置の加振機構は, 大きな被害をもたらす地震動により発生する大速度, 大変位を再現するために, これまでの耐震実験装置にない性能と機能を有することが要求される。

この目的の達成に必要な基盤技術は, これまでの一次元, 二次元的大型振動台や, 中型三次元振動台の製作を通じて確立されてきている。しかしながら, 今計画における加振機構の規模と性能は, 既存の実験装置から見て群を抜くものであり, これに関連したハードウェア及び

ソフトウェアでは、細部において多くの改良、改善を伴う開発が必要とされる。

このため、実大三次元震動破壊実験装置を含む全体システムについて、加振機構の性能に見合った設計製作技術の調査やシミュレーションによる制御手法の開発を実施すること、また加振機構の中核部分については確証試験装置の試作・試験を行い、技術的課題を解決するとともに実大三次元震動破壊実験装置の加振機構の実現性を確認することが必要である。

## 5.2 開発計画の概要

### 5.2.1 開発課題

本施設の実験装置の機能・性能と特に関連して開発確認を必要とする課題は以下の通りである。

- 1) 模擬振動台各部の応力精密評価に基づく軽量化、高剛性化設計法の確立
- 2) 加振機の振動台取り付け面、基礎取り付け面などの振動解析、応力解析、疲労解析手法の信頼性の確認
- 3) 加振機の安定運動に必要な、軸受け潤滑及び摩擦、摩擦評価技術の実証
- 4) 大速度サーボ弁の速度性能、静的安定性、耐ノイズ性、電氣的・油圧的特性などの実証確認
- 5) 複数加振機による回転抑止制御、及び回転実現制御技術の検証
- 6) 試験体破壊時の振動台制御の安定性及び制御精度の検証
- 7) 大速度、大変位再現時の波形実現精度向上のための制御技術の検証
- 8) 大速度加振時の油圧供給系の安定性の検証と加振性能への影響評価手法及び振動騒音低減法の確立

要素技術開発では、本体施設建設に関わる全体システムの設計調査を行うとともに、加振機構の確認試験を行う。ここでは加振機構の眼目となる大型加振機の設計製作、試験装置の組立、要素試験とシステム試験などを通じてこれらの課題を詳細に検討し、設計、解析の基本データを取得することにより、実大三次元震動破壊実験装置の製作技術を確立する。

### 5.2.2 全体システム設計調査

施設の基本計画に基づき、実大三次元震動破壊実験装置の各部設計に関わる技術調査を実施する。また加振機構確認試験の成果をふまえて全体システムの持つべき構成、機能を明確にするとともに、加振系の運転制御、油圧システム等については全体シミュレーションを実施して目的に見合ったシステムの構築が可能であることを検証する。

### 5.2.3 加振機構確認試験装置の製作

5.2.1 項の目的に従い、加振機構確認試験装置を設計製作し、試験を実施する。試験装置の構成を表6に、システム性能を表7に示す。また、確認試験装置の限界性能図を図8(a)、(b)に示す。加振機(含むサーボ弁)、油圧ポンプ等の機能部品は実計画で用いるものと同様の性能とする。試験装置の全景を写真1に示す。

表6 確認試験装置の構成

Table 6 Configuration of Shaking Performance Verification System.

機器	台数	単体性能
水平加振機(X方向)	2台	最大変位 ± 100cm 最大速度 200cm/s
水平加振機(Y方向)	2台	最大変位 ± 100cm 最大速度 200cm/s
垂直加振機(Z方向)	4台	最大変位 ± 50cm 最大速度 70cm/s
三次元継手	8本	作動角度 ± 12° (ねじれ方向 ± 4°)
模擬振動台	1台	6 m × 6 m 最大搭載重量 50 tonf
油圧供給装置	1式	
配管・配線	1式	
制御装置	1式	

表7 確認試験装置のシステム性能

Table 7 Specifications of Shaking Performance Verification System.

項目	基本諸元	
模擬振動台	搭載面積	6 m × 6 m
	最大搭載重量	50 tonf
	振動台重量	45 tonf
	可動部重量	230 tonf (継手、ピストン等を含む)
駆動方法	固有振動数	50 Hz 以上
	振動方向	X, Y, Z並進3方向 及びX, Y, Zまわり回転
	駆動制御	アキュムレータ蓄圧電気油圧サーボ
最大変位	水平(X方向)	± 100 cm
	水平(Y方向)	± 100 cm
	垂直(Z方向)	± 50 cm
最大速度	水平(X方向)	200 cm/s
	水平(Y方向)	200 cm/s
	垂直(Z方向)	70 cm/s
最大加速度	水平(X方向)	± 0.4 G*
	水平(Y方向)	± 0.4 G*
	垂直(Z方向)	± 0.4 G*
総合加振性能	加振限界	限界性能図(図5.1)による
	入力可能振動数	0 ~ 30 Hz

\* 確認試験装置の仮設基礎の制約による。

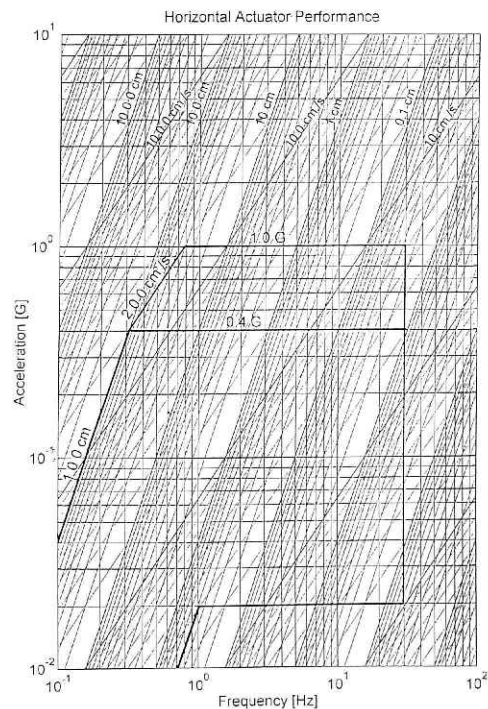


図8(a) 水平方向限界性能図

Fig. 8(a) Limit Performance of Horizontal Excitation.



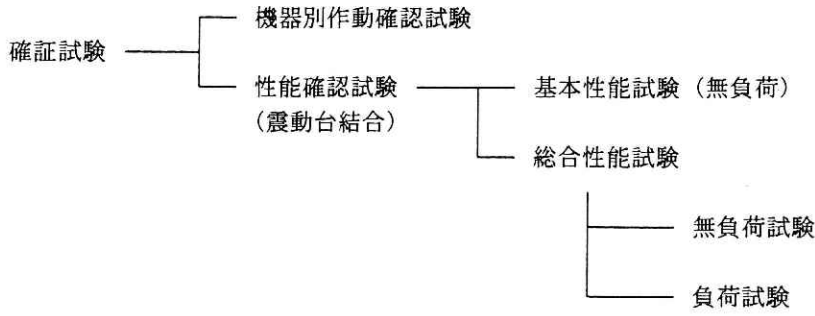


図9 確証試験の流れ

Fig. 9 Procedure for Performance Verification Test.

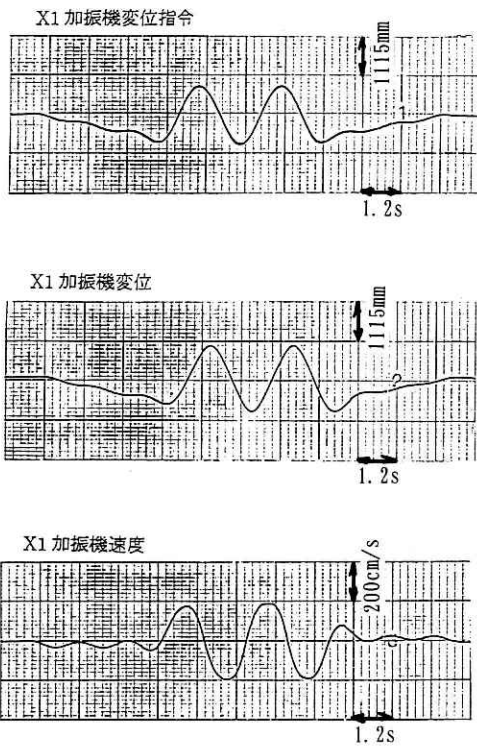


図10(a) 機器別作動確認試験 最大速度波形 (X1加振機)

Fig. 10(a) Wave Form at Maximum Actuator Velocity (act.-X1, Unit performance test).

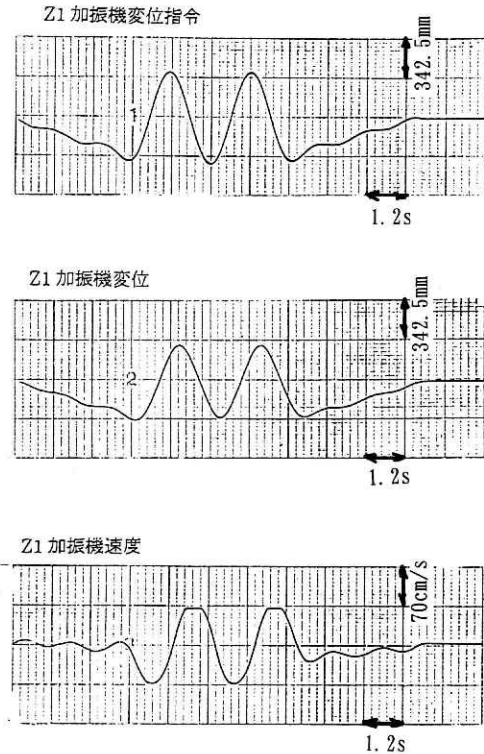


図10(b) 機器別作動確認試験 最大速度波形 (Z1加振機)

Fig. 10(b) Wave Form at Maximum Actuator Velocity (act.-Z1, Unit performance test).

総合性能試験のうち、無負荷総合試験では加振機構の周波数特性や連続加振性能といった総合特性の試験を行い、負荷総合試験では負荷が搭載されたことによるシステムに対する影響を調べる。図9に確証試験の流れを示す。

### 5.3.2 結果概要

平成10年1月の時点で、機器別作動確認試験、基本性能試験、無負荷総合性能試験が終了している。以下では今回開発した加振機の特徴である最大速度試験と最大変位試験の結果を示す。

#### 5.3.2.1 最大速度試験

最大速度試験では、水平 200 cm/s 0.4 Hz、垂直 70

cm/s 0.4 Hz の正弦2波の加振を行い、加振可能なことを確認する。図10(a), (b)に機器別作動確認試験での最大速度波形を、図11(a), (b)に基本性能試験での最大速度波形を示す。速度は加速度記録の積分により算出し、機器別作動確認試験では加振機の加速度FB(フィードバック)信号を、基本性能試験では模擬振動台上での計測加速度を用いている。

#### 5.3.2.2 最大変位試験

最大変位試験では、水平 ±1000 mm 0.05 Hz、垂直 ±500 mm 0.05 Hz の正弦波加振を行い、最大変位での加振が可能なことを確認する。確認は機器別作動確認試験では変位FB信号で、基本性能試験では模擬振動台の記

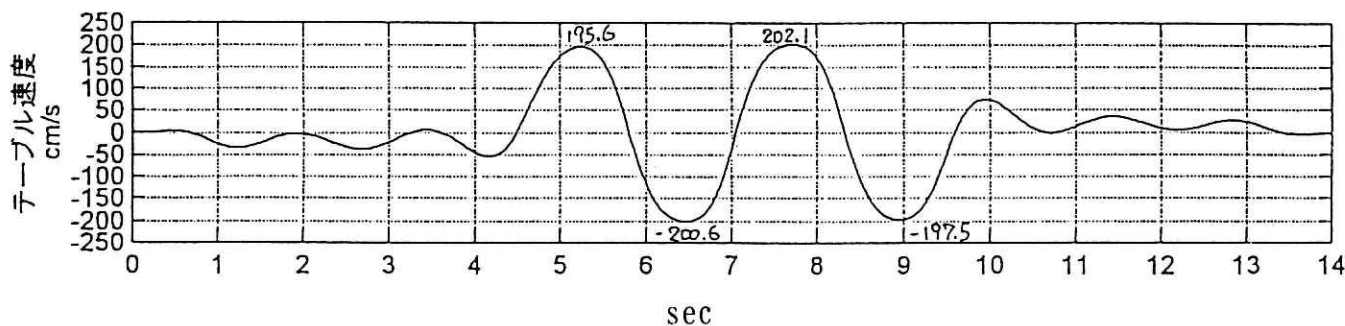


図11(a) 基本性能試験 最大速度波形 (X軸方向)

Fig. 11(a) Wave Form at Maximum Table Velocity (X-axis, Basic performance test).

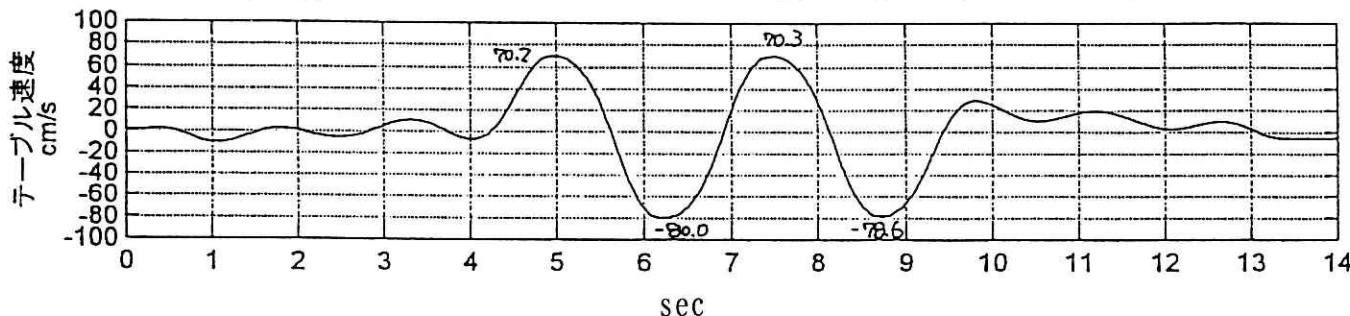


図11(b) 基本性能試験 最大速度波形 (Z軸方向)

Fig. 11(b) Wave Form at Maximum Table Velocity (Z-axis, Basic performance test).

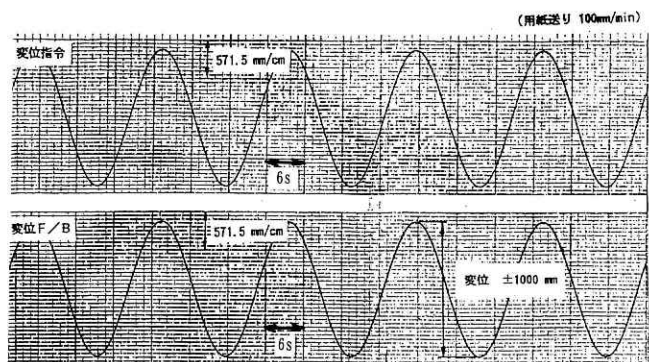


図12(a) 機器別作動確認試験 最大変位波形 (X1加振機)

Fig. 12(a) Wave Form at Maximum Actuator Displacement (act.-X1, Unit performance test).

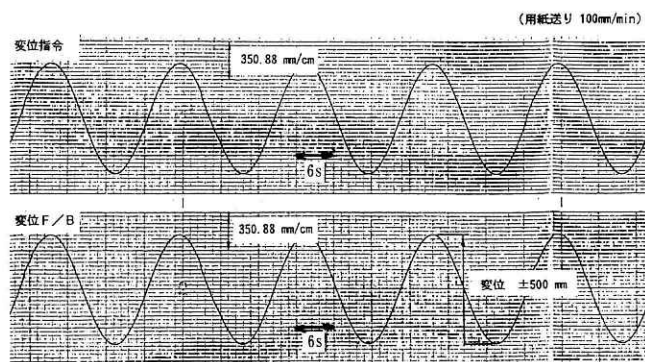


図12(b) 機器別作動確認試験 最大変位波形 (Z1加振機)

Fig. 12(b) Wave Form at Maximum Actuator Displacement (act.-Z1, Unit performance test).

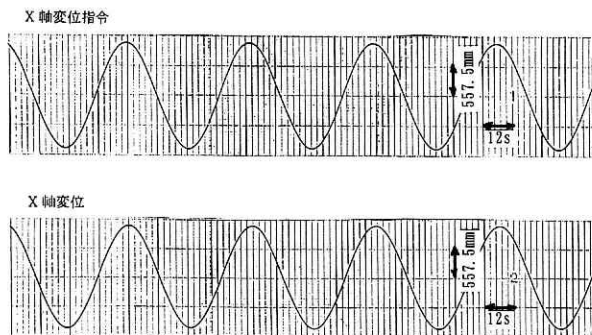


図13(a) 基本性能試験 最大変位波形 (X軸方向, 0.02Hz ±1000mm)

Fig. 13(a) Wave Form at Maximum Table Displacement (X-axis, Basic performance test, 0.02 Hz ±1000mm).

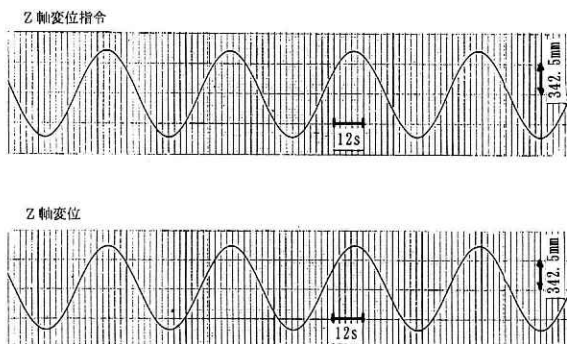


図13(b) 基本性能試験 最大変位波形 (Z軸方向, 0.02Hz ±500mm)

Fig. 13(b) Wave Form at Maximum Table Displacement (Z-axis, Basic performance test, 0.02 Hz ±500mm).



録変位で行う。図 12(a), (b)に機器別作動確認試験の結果を、図 13(a), (b)に基本性能試験の結果を示す。

## 6. おわりに

本報告は、阪神・淡路大震災発生から約 3 年を経過した時点までの実大三次元震動破壊実験施設に対する研究開発を取りまとめたものである。本施設の建設に係わる予算が、平成 10 年度一般会計政府原案に盛り込まれ、新年度より具体的な建設に向けての種々の作業が開始されることとなるので、建設作業開始を前に、これまでの進捗状況を取りまとめたものである。

なお、詳細な内容、特に要素技術開発の確証試験データ等については、次報にて取りまとめを行う予定である。実大三次元震動破壊実験施設の建設計画の検討に当たっては、科学技術庁に設けられた各種委員会及び当所に設けた「大型三次元震動実験施設技術検討委員会(委員長：柴田碧東大名誉教授)」において多くの研究者及び関係機関の専門家のご支援・ご協力を頂きました。ここに記し

て、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 大型三次元震動実験施設の利用に関する検討報告書 (科学技術庁研究開発局大型三次元震動台の利用に関する検討会, 平成 8 年 8 月)。
- 2) 対象地震ワーキンググループ報告書 (航空・電子等技術審議会地震防災研究基盤分科会, 平成 8 年 11 月)。
- 3) 研究拠点ワーキンググループ報告書 (航空・電子等技術審議会地震防災研究基盤分科会, 平成 8 年 11 月)。
- 4) 「地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方について」(諮問第 24 号)に対する答申 (航空・電子等技術審議会, 平成 9 年 9 月 3 日)。
- 5) 大型三次元震動実験施設技術検討委員会報告書 (準備中)。

(原稿受理：1998 年 2 月 16 日)

## 要 旨

阪神淡路大震災は、周知のように、震源近傍では極めて強い地震動が発生し、それによる予想外の大被害が起こりうることを示した。これを契機に構造物の振動破壊に対する関心が再び高まり、当研究所がそれまで持っていた大型三次元振動台構想も新たな視点から取り組みが開始されることとなった。地上にある実物規模の構造物の破壊を再現し、他の様々な手法、実験手段とも連携して破壊の解明を目指すことが基本的な目標として位置づけられた。また、この施設は現在の一次元大型振動台の有する利用面での特長を受け継ぐものである。計画提案後さまざまな側面からの評価検討が行われ、振動実験施設は単独の施設として存在するのではなく、地震防災研究基盤の新たな展開の中に位置づけられることになった。これら種々の検討、準備及び平成 7 年度より取り組んでいる要素技術開発の成果を受けて平成 10 年度から建設計画が具体的に進展することとなった。本論は、この計画を進めるに当たってこれまでの計画検討の概要、要素技術開発の現状などを要約して取りまとめたものである。

キーワード：地震，強震動，構造物被害，振動台，破壊実験