

究極の震動破壊実験施設 (E-Defense)

森 利 弘

独立行政法人防災科学技術研究所は、兵庫県三木市に世界最大規模の震動台（平面寸法：長さ 20 m×幅 15 m）を有する実大三次元震動破壊実験施設（愛称 E-ディフェンス）を建設した。この震動台の上に木造建物、鉄筋コンクリート建物、橋梁などの実大構造物を載せ、地震時の複雑な三次元の揺れ、例えば阪神・淡路大震災と同じ揺れを再現させ、構造物の破壊過程までの研究および破壊の予測・防止技術の検証を行うことができる。本実験施設の目的と役割、加振系機器の性能と特徴および計測システムについて紹介するとともに、E-ディフェンスの現況について報告する。

キーワード：実験施設、震動台、加振機、地震防災、破壊過程

1. はじめに

E-ディフェンスとは、独立行政法人防災科学技術研究所（以下、防災科研という）が、兵庫県三木市に建設した実大三次元震動破壊実験施設の愛称である。E は Earth（地球）を表し、地球規模で地震防災をとらえるとともに、人々の生命と財産を守る研究開発への期待が込められている。

E-ディフェンスの計画は、平成 7 年 1 月 17 日に起こった阪神・淡路大震災（直下型地震、マグニチュード 7.3）が契機となった。この震災により、死者の数は 6,433 人にも及び、建物、高速道路、港湾施設等、数多くの構造物に未曾有の被害が発生し、

「なぜこんなに壊れてしまったのか」

「壊さないためにはどうすればよいのか」

を再検討する必要に迫られた。その結果、これまでの施設では不可能であった実物大の構造物の破壊までを研究できる究極の実験施設が建設される運びとなった。

平成 10 年までの 4 年間をかけて、実験装置一部の開発試験を実施した後、平成 12 年 3 月に現地工事に着手し、約 5 年の歳月をかけて完成した。

本報文では、E-ディフェンスの目的と役割、各実験施設の性能と特徴を中心に紹介する。

2. E-ディフェンスの目的と役割

E-ディフェンスの目的とするところは地震時にお

ける、

①破壊の再現

②破壊の予測

③破壊の防止

である。

①破壊の再現

阪神淡路大震災で発生した構造物の種々の破壊を再現し、その発生メカニズムを解明することが、破壊の予測や破壊の防止の出発点となるという意味で、本施設の最も基本的な目的となっている。

この場合、「破壊した状態」という結果よりも、そこに至るまでの「破壊過程」に関するデータを得ることが重要である。無傷にとどまるレベル、損傷が起きるレベル、そして完全に倒れるレベルまでの一連の破壊プロセスのデータを各構造物について得ることができるので、地震後における構造物の被害調査とは違った意味あいがある。

②の破壊の予測

破壊を考慮した設計技術の開発検証といった広い意味と、個々の構造物のモデルに基づく破壊の数値シミュレーション技術の検証に有効なデータを提供するという二つの側面がある。

さらに、今後は既存構造物の耐震診断やモニタリングがいっそう重要になると予想されるが、そのような診断や検査の結果が正しいかどうかは実際の地震が来るまでは本当の意味ではわからない。

E-ディフェンスにおいては限られたケースではあるが、そのような検証を行うことが期待できる。例え

ば、既存の木造住宅を解体してE-ディフェンスに持込み、試験体として再度組立てを行い、震動実験を実施することにより、木造住宅の耐震性およびその耐震診断の検証が可能となる。

③破壊の防止

これまでもさまざまな耐震補強技術や免震、制振技術が開発され実用化されてきているが、部材要素としての性能確認は行われていても、構造物に組込まれたシステムとしての検証は充分であるとは言い難い。今後、普及しやすい合理的かつ経済的な技術開発を進めねばならないが、システムとしての性能確認、限界性能の確認にはE-ディフェンスが非常に有効である。

3. 本実験施設の構成とその特徴

E-ディフェンスは、図-1に示すように主に4つの棟と屋外機器エリアから構成されている。

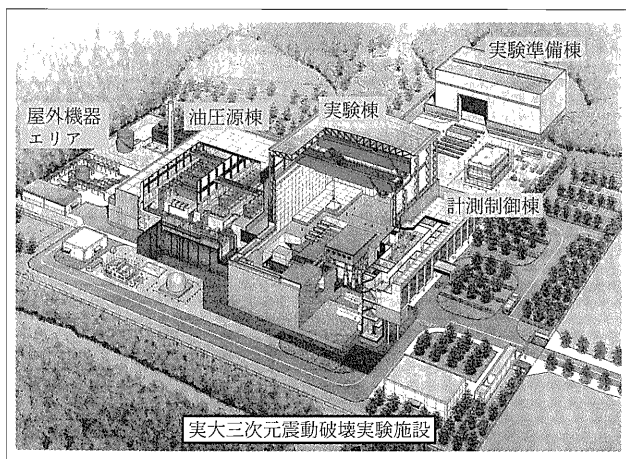


図-1 E-ディフェンスの全体図(鳥瞰図)

(1) 加振系機器

(a) 震動台

E-ディフェンスの中央に位置する実験棟(60m×87m×高さ43m)に、震動台を設置している。この震動台の上に試験体として木造建物、鉄筋コンクリート建物、橋梁などの構造物を設置し、地震時の揺れを再現させ、構造物が破壊するまでの実験を行うことができる。

震動台の基本仕様を表-1に示す。震動台は、32個のブロックに分割して工場製作し、現地で組立て、溶接、機械加工を行った。震動台の質量は約770tである。震動台の平面寸法は、長さ20m×幅15mの長方形である。実際の構造物の形状を考慮し、台の面積を効率良く使用できるようにしている。また、どのような構造物に対しても性能が有効に使えるように水平

表-1 震動台の基本仕様

項目	仕様	
最大搭載質量	1,200 t	
搭載面積	20 m×15 m	
駆動方式	アキュムレータ蓄圧/電気油圧制御	
加振方向	水平	上下
最大加速度(最大質量搭載時)	900 cm/s ² 以上	1,500 cm/s ² 以上
最大速度	200 cm/s	70 cm/s
最大変位	±100 cm	±50 cm
許容モーメント	水平軸周り	上下軸周り
	150 MN・m以上*	40 MN・m以上*

*1: 上下軸 980 cm/s²加振時 *2: 水平1軸最大加速度時

二方向(X, Y)の性能は同等としている。

一般に剛性の高い構造物では加速度が破壊の起因となるが、その後の破壊の進行には速度などの影響も大きい。また、比較的柔い構造物では、変形が十分に出ることが破壊の条件となり入力加速度のピーク値が大きいくだけでは破壊の再現が難しい。さらに免震などの破壊を防ぐ技術検証を実施することも踏まえ、本施設では加速度仕様をやや控えめに設定する一方、大きい速度と変位の実現を可能にしている。

(b) 加振機

この世界最大規模の三次元震動台を揺らすために水平方向には合計で10台の加振機(X, Y方向にそれぞれ5台)、上下方向には合計で14台の加振機が付いている(図-2参照)。加振機は大揺動の三次元継手(球面継手)を介して震動台と接続している。

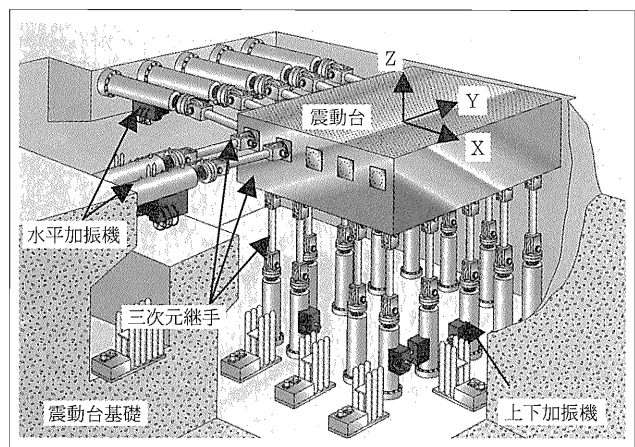


図-2 震動台の主要構造

水平加振機の構造は復動型油圧シリンダであり、1台あたりの出力は4,410 kN、ストロークは±100 cmである。中立状態でシリンダ後端からピストン先端までの全長は8.7 mである。各加振機は、電気油圧サーボ弁によって駆動されるが、速度200 cm/sを実現するために15,000 L/minの高速サーボ弁を各3台ずつ

装備している。

上下加振機は震動台下部周辺部に沿って配置している。出力は水平加振機のそれと同じであるが、ストロークは±50 cm である。また、速度 70 cm/s を出すために水平加振機と同じサーボ弁を各 1 台ずつ装備している。また、震動台と試験体の自重を支えるバランスシリンダを内蔵している。なお、上下加振機には、水平加振によって特に高さが高い試験体に生じる回転力（転倒モーメント）に抵抗する力が必要であるために、合計で 14 台の加振機を配置している。

一方、加振機が取付けられている震動台基礎は加振機の反力に耐える必要がある。また、これだけのパワーを使用して震動台を動かすことになるため、E-ディフュゼンス周辺での振動をできる限り小さくする必要がある。このため、震動台基礎は健全な岩盤（砂岩）に支持させるとともに、水平方向加振力の約 100 倍の 20 万 ton にも及ぶ質量のコンクリートで構築し、振動エネルギーを吸収している。

（c） 三次元継手

震動台と加振機を機械的につなぐ場合、加振機は一方方向の運動しかできないので、震動台を三次元に動かすためには、いわゆるユニバーサルジョイントが必要となる。このため、リング両端に球面軸受けを持つ全長 7.1 m の三次元継手を両者の間に設置している。

（2） 油圧供給系機器

油圧供給系機器の配置は図-3 に示すとおりである

が、実験棟に隣接した油圧源棟（57 m×77 m×高さ 21 m）に主油圧ポンプユニットと主アキュムレータユニットを設置している。

（a） 主油圧ポンプユニット

主油圧ポンプユニットには同一性能のユニットを 4 式設置しており、高圧の作動油を主アキュムレータに蓄圧したり、また直接加振機に送ることができる。各ユニットは 1 台のガスエンジンとこれによって駆動される 12 台の油圧ポンプから構成され、20.6 MPa、7,080 L/min の作動油を送り出すことができる。環境性と経済性に配慮して、ガスエンジン（天然ガス）を採用している。

（b） 主アキュムレータユニット

油圧ポンプユニットのみの作動油量では、低速度の加振にしか対応できない。そこで、主アキュムレータユニットには 20 台のアキュムレータを設け、合計で 20,000 L の作動油を蓄圧し、加振機に必要な流量を高速で供給する。これにより、兵庫県南部地震での観測記録など大きな速度をもつ地震動を再現することができる。

（c） 屋外機器エリア

屋外機器エリアには、主油タンクの作動油を主油圧ポンプユニットに送りこむ補助ポンプ、タンク内作動油を熱交換機で冷却する装置、清浄化のためのフィルタ循環装置などを設置している。なお、作動油の全量は、タンク類、配管内を含めて約 750 kL である。

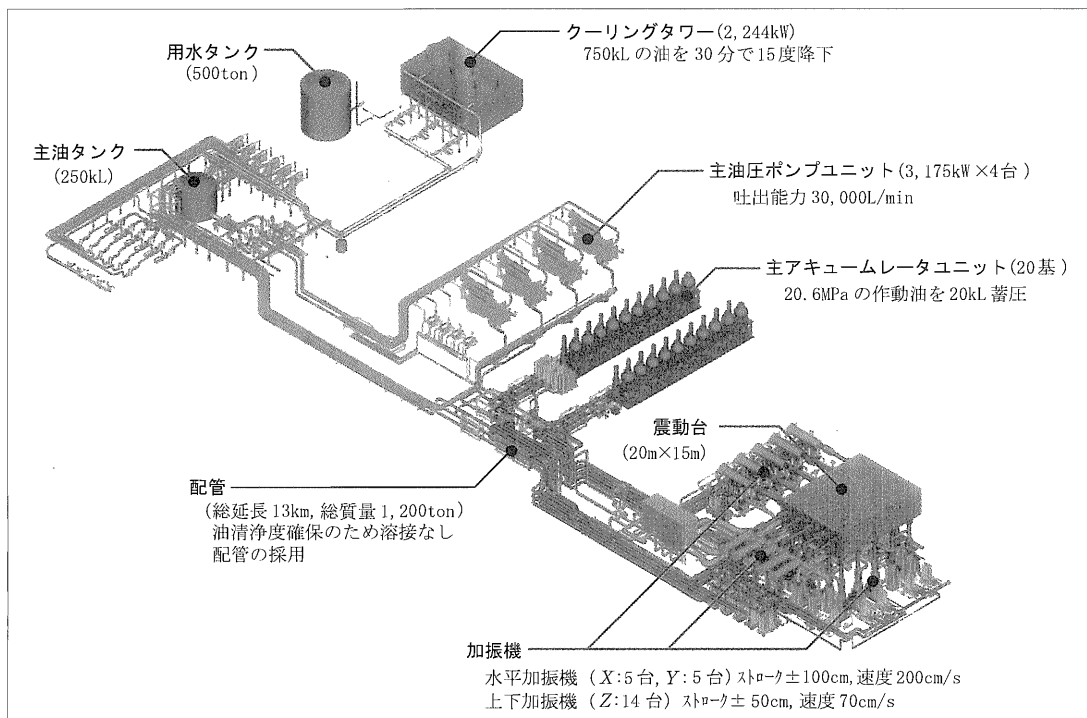


図-3
油圧供給機器
系統図

(3) 震動台の制御と計測システム

(a) 震動台の制御

震動台の制御は、計測制御棟（建築面積約 1,300 m²）の 2 階にある計測制御室にて行う。震動台を 2 名の操作員で一括して集中運転できる制御システム装置を設置している。万一実験時に大地震が発生してもこの制御システムに支障が生じないように計測制御室には三次元の床免震システム（空気バネ+ボール・ベアリング支承）を採用している。大規模で費用もかさむ試験体を使う E-ディフェンスの実験では、震動台が意図した動きを再現できるように制御する必要がある。そこで、これまでの研究成果を踏まえ、震動台の安定性を重視した通常の実験に対応する「基本制御」と、基本制御をサポートし、より加振精度の高い「応用制御」の 2 段階で制御するシステムを採用している。また、「応用制御」では複数装備した制御手法のうちから実験ケース等にあわせて選択できる。

(b) 計測システム

E-ディフェンスにおける試験体は、大規模かつ破壊までの実験を行うために、計測点数も数多く必要になる。このため、E-ディフェンスは合計で 960 チャンネル（うち震動台の制御信号集録用として 64 チャンネルを使用）の計測データを集録するシステムを備えている。

試験体に設置した計測センサのケーブルは震動台の周囲各側面にある計測用のジャンクションボックスにつなぎ込むことにより、集録が可能となる。ジャンクションボックスはアナログケーブルによって震動台の内側に設置した計測アンプと AD コンバータに接続され、AD 変換されたデジタルデータは光ファイバケーブルを通して、計測制御室にあるデータ収録装置に転送される（図-4）。

一般用のサンプリング周波数は最大 2 kHz であるが、高速用（32 チャンネル分）は 1 MHz までの計測が可能である。

実験時には映像システムを利用してさまざまな角度

から、試験体の映像を撮影し、集録することができる。撮影された映像は大型ディスプレイ（100 インチプロジェクタ）等に表示させ、画像を通して試験体の破壊状況を観察することができる。また、試験体各所にターゲットマーカを取付け、複数台の高速カメラで撮影し、得られた映像を解析することにより、実験時における試験体の三次元挙動（変位）を求めることもできる。

(4) 試験体の製作

試験体の製作は、中小規模のものは実験準備棟（30 m×58 m×高さ 29 m）で、大型試験体構造物は屋外製作ヤード（重舗装エリア）で行う。実験準備棟の天井には試験体作製等のために 150 トンクレーンを 1 基設置している。また、屋外製作ヤードは震動台を設置している実験棟に隣接した 2 箇所には設けている。試験体の実験棟への移動・運搬は、曳き屋あるいは台車等によるが、実験棟の天井には試験体等の設置・撤去のための吊り荷重 400 t クレーンを 2 基設置している。

4. E-ディフェンスの現況

E-ディフェンスでは現在（平成 17 年 11 月 21 日時点）、木造建物の耐震補強の妥当性を検証するための実験を実施中である（写真-1）。

2 棟の既存木造住宅を E-ディフェンスの震動台上に移築し、一方の住宅はそのまま、他方は耐震補強を施し、同時に加振を行い、比較する。実験に用いる住宅は、昭和 49 年 5 月に兵庫県明石市に建てられた木造軸組構法 2 階建て住宅であるが、2 棟の住宅は同じ構造仕様、間取りで建てられている。

また、平成 18 年 1 月には 6 階建て鉄筋コンクリート建物の実大実験を予定している。試験体は高さ 16 m、平面寸法は 12 m×17 m（2×3 スパン）、試験体総質量は約 1,000 t である。現在、試験体の作製はほぼ終了している（写真-2）。実験では、阪神・淡路大震災で記録された観測地震波を用いた 3 方向加振を行

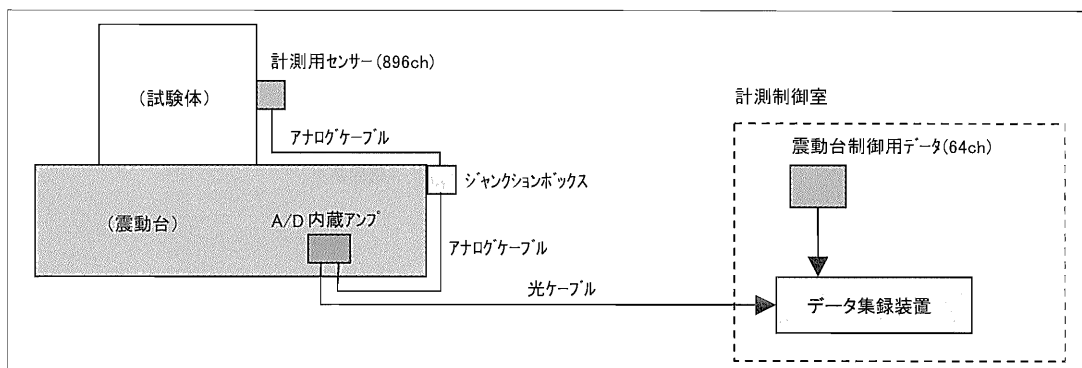


図-4 計測信号の伝達と保存

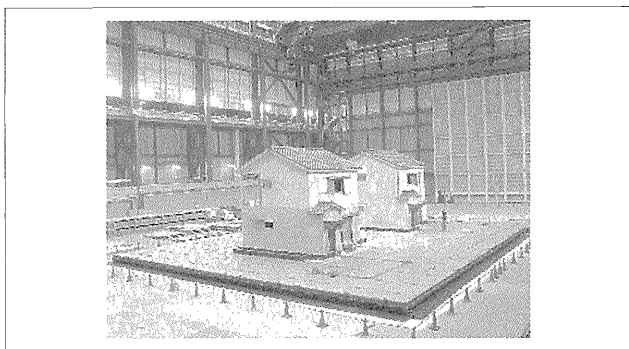


写真-1 木造建物の実験状況（震動台の上に防護架台を設置し、その上に木造住宅を設置）

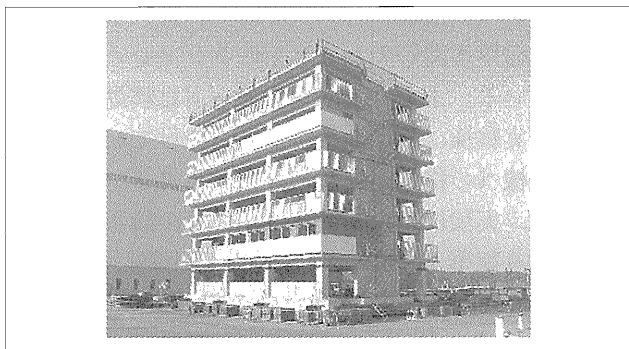


写真-2 鉄筋コンクリート建物の試験体作製状況

う。最初は小さく、徐々にレベルを増大させ、建物に生じる損傷の程度と地震動の強さの関係を解明する予定である。さらに平成18年2月以降に予定している地盤・基礎実験（液状化に伴う側方流動を再現させ、それによる杭基礎の破壊過程を解明する実験等）の実施に向け、地盤および構造物を中に入れて造るための土槽の製作を進めている。

これら3つの構造物の実験は、文部科学省の「大都市大震災軽減化特別プロジェクト・テーマII」の一環として取組んでいる研究である。

5. おわりに

E-ディフェンスは世界唯一の実験施設であり、地震防災に関わる共用施設として、日本と世界の地震防災に貢献する必要がある。このため、E-ディフェンスの運営と利用については、他機関、学識経験者の協力を得つつ、さまざまな検討作業を実施してきた。

E-ディフェンスの運営については、図-5に示す運営組織体制をとることが決められ、運営協議会、利用委員会などの支援の元に防災科研が運営を実施することとしている。

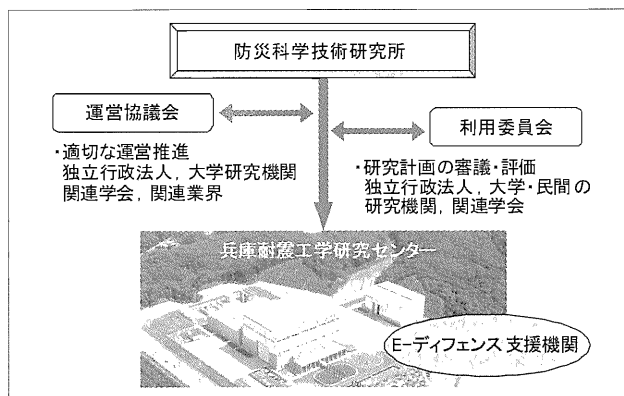


図-5 E-ディフェンスの運営組織体制

E-ディフェンスでの利用研究課題については、これまでもいくつかの委員会、検討会が設けられ各種の提案が審議されてきている。現在は、前述したように木造建物、鉄筋コンクリート建物、地盤・基礎の三つの実験を計画通りに進めている。また、E-ディフェンスでは、米国科学財団の支援を受け、全米で展開する耐震工学プロジェクト（Network for Earthquake Engineering Simulation；NEES）との包括的研究協力協定を結び、鋼構造建物、橋梁構造物等に関する日米共同研究の準備を進めている。このようないわば国主導型の研究に加え、試験課題の公募や受託研究、また国際協力による実験の実施など幅広い利用を図る必要がある、そのために必要な体制や使用条件などを利用委員会を中心に審議している。

研究を研究で終わらせるのではなく、その成果を実践的技術へと転移し、より安全で安心な国土づくりに貢献していくことがE-ディフェンスに課せられた使命である。E-ディフェンスが生み出す成果が国民に幅広く理解されるように、E-ディフェンスを活用していきたい。

JCMA

《文 献》

- 1) E-Defense Today: <http://www.bosai.go.jp/hyogo/today.html>
- 2) E-Defense: <http://www.bosai.go.jp/hyogo/greeting.html>
- 3) NEES: <http://www.nees.org/research/facilities/index.php>

【筆者紹介】

森 利弘（もり としひろ）
 独立行政法人防災科学技術研究所
 兵庫耐震工学研究センター
 企画室
 特別技術員
 技術士（建設部門）
 一級建築士

