

E-Defenseを用いた大型橋梁実験の目的と概要

梶原浩一¹・右近大道²・川島一彦³

¹工博（独）防災科学技術研究所（〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀田1501-21）

²正会員（独）防災科学技術研究所（〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀田1501-21）

³正会員 工博 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

1. はじめに

1889 年米国ロムプリータ地震、1994 年米国ノースリッジ地震、1995 年兵庫県南部地震は、橋梁に甚大な被害を与え、交通系ライフラインの機能を大きく損なわせた¹⁾。橋梁は都市や地域の生命線であり、橋梁の被害により生じる都市や地域の機能の大幅な低下は、地震直後の避難、緊急車両の通行、震災後の復旧活動等に重大な影響を与え、国民の生命と財産を脅かすものである。日米両国とも被害の多くは、橋脚、特に鉄筋コンクリート製橋脚（RC 橋脚）で発生しており、耐震性の検証のために、RC 橋脚に対する繰り返し載荷実験や振動台加振実験が日米両国で多数行われてきた。しかし、これらの実験は実験装置の制約から、小型模型による検討に留まっており、実大規模の橋脚を用いた破壊現象の解明が求められてきたところである。また、上部構造の被害では、桁間衝突や落橋防止構造等が複雑に影響した、いわゆる進行性破壊が発生しており、これらの解明も重要な課題である。しかし、現象が複雑であり、従来の小型模型による検討や解析では十分な検討が行えない状況にある。これらについても、より規模を拡大した実験研究の実施が求められている。

これらの課題を背景とし、ここで述べる「橋梁の耐震実験研究」では、RC 橋脚の耐震性を対象とし、独立行政法人防災科学技術研究所（以下、防災科学技術研究所）の E-Defense（以下、E-ディフェンス）による実大を含む実験の実施を目指すこととした。研究の推進では、米国の「The Gorge Brown Jr. for Earthquake Engineering Simulation」（NEES）の研究施設群との相互連携の体制を整え、目的として、RC 橋脚の破壊特性の解明、耐震性能の検証を行うとともに、データの蓄積・公開を目指す。これらのデータは、今後の橋梁の耐震性向上に貢献する多くの実験研究の参考になるデータ、いわゆる原器

データとなることを期待している。本報告では、2006 年度までに進めた大型橋梁耐震実験の準備研究について述べる。

2. 課題選定の背景

橋梁耐震実験研究を推進する背景には、2004 年 2 月に日本で開催された「日米安全・安心な社会に資する科学技術に関するワークショップ」がある。この会合で、文部科学省及び米国科学財団（NSF）は、日米の地震研究に関する協力についてその推進を合意した。この合意に基づき、防災科学技術研究所を中核として、以下に関する日米の専門家会合を開催し、2005 年度からの日米共同研究の準備及び E-ディフェンス利用した日米共同研究の具体的な実施に結びつけることとした。

1) 防災科学技術に関し、日米間において共同で研究開発を行うことが出来る分野の特定

2) E-ディフェンスを利用した日米共同研究実施方策

ほぼ同時期に、米国では、米国科学財団（NSF）の主導による「The Gorge Brown Jr. for Earthquake Engineering Simulation」（NEES）と呼ばれるプロジェクトの中で、全米の 15 の研究拠点にそれぞれ最先端の耐震工学実験施設を建設した。これらは、2004 年 9 月に完成し、施設をネットワークで結んだ研究プロジェクトが進行されている。E-ディフェンスと NEES で推進する喫緊の実験研究の課題については、日米の専門家会合として行われた第 3 回ワークショップで、橋梁と鉄骨構造建物とされた。これにより防災科学技術研究所は、2005 年度と 2006 年度からの中期 5 ヶ年の計画で両課題を実施するに至った。防災科学技術研究所が文部科学省に提出した中期計画には、「橋梁構造物の破壊過程や耐震性能・耐震余裕度評価に関するデータの

取得・蓄積を行う。」「橋梁構造物の耐震補強技術、耐震解析技術の向上や新たな免震技術の開発を目指す。」を記述している。現段階では、NEES側がE-ディフェンス実験への参画を目指し、米国の予算確保の調整をしており、E-ディフェンスを活用した実験計画については、日本側が主導で進めている状況にある。

3. E-ディフェンス実験研究の経緯と震動台仕様

3-1. 実験研究の経緯²⁾

これまで、E-ディフェンスの利用に関する検討として、科学技術振興調整費による「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究（1999年度～2003年度）」が推進され、これに引き続き、科学技術振興費による「大都市大震災軽減化特別プロジェクト（2002年度～2006年度）」の「震動台活用による構造物の耐震性向上研究」が実施されている。総合研究は、E-ディフェンスの利用に関する準備研究として実験技術の向上を目的として進められ、大都市大震災軽減化特別プロジェクトでは、具体的な耐震実験研究として、木造建物、鉄筋コンクリート建物、地盤・基礎構造物系の実験研究を実施している。ここでは、橋梁耐震実験研究は実施されていなかった。

3-2. 震動台仕様

兵庫県南部地震による未曾有の災害を教訓として、文部科学省と（独）防災科学技術研究所は、耐震技術の向上に資する地震防災の中核施設として、E-ディフェンスを建設した³⁾。このE-ディフェンスは、3次元加振を行える施設として、その積載荷重と積載面積において世界最大の規模であり、完成後の2005年6月の性能確認試験⁴⁾から実験研究の運用に入っている。

図-1に震動台の外形を、表-1にその仕様を示す。また、加振能力限界曲線を図-2に示す。E-ディフェンスでは、地震動の再現の意味を込めて、振動台の振の字に地震の震の字を充てている。震度台には、水平2方向に各5台（片側）、鉛直方向に14台、計24台のアクチュエータが設置されている。アクチュエータの駆動は、エネルギーの効率化を図るために、アキュムレーターの蓄圧を用いた電気油圧制御により行っている。震動台の寸法は、長辺方向が20m、短辺方向が15mであり、最大積載質量は1,200トンである。大規模な震動台であるが、橋梁のような長大構造物に対してはその仕様の制限より、実験計画にて以下を考慮する必要がある。

- 1) 震動台の積載許容質量の範囲で、試験体と破壊を考慮した支持構造体を計画
 - 2) 震動台の積載面積の範囲で、試験体と支持構造体を計画
 - 3) 加振能力限界線図の範囲での入力地震動の選定
- 上記については、以下で述べる実験研究を推進する実行部会で多くの議論を持って検討されている。

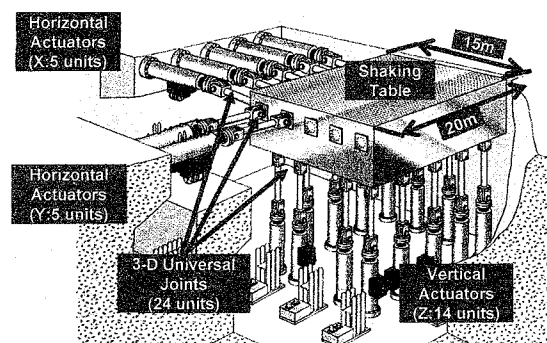


図-1 震動台俯瞰図

表-1 三次元実大破壊実験装置の性能

搭載質量	1200t	
大きさ、質量	20m×15m, 775t	
駆動方式	アキュムレーター蓄圧／電気油圧制御	
加震方向	X・Y水平	Z鉛直
最大加速度 (最大搭載時)	900cm/s ²	1500cm/s ²
最大速度	200cm/s	70cm/s
最大変位	±100cm	±50cm
許容モーメント	水平軸周り	鉛直軸周り
	150MN・m	40MN・m

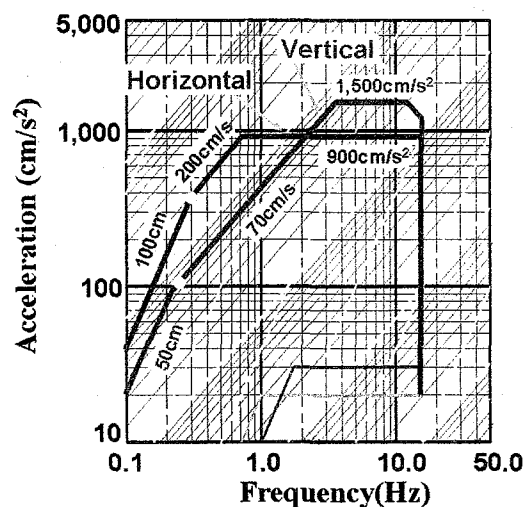


図-2 加振限界曲線（最大質量1200t搭載時）

4. 橋梁耐震実験研究の目的と概要

4-1. 推進体制

防災科学技術研究所は、橋梁の耐震実験研究を推進するために、実験研究を推進する実行部会と分科会を組織し、国内の有識者により実験研究の計画を推進している。それぞれの役割は以下である。

(a) 橋梁耐震実験研究分科会

日米共同研究として橋梁の耐震に関する実験的研究を推進していくための全体調整、橋梁耐震実験研究実行部会の研究活動への助言および評価、橋梁の耐震性に関わる研究コミュニティとの連携および他機関で実施されている橋梁の耐震性に関する研究プロジェクトとの連携を促進することを目的とする。

(b) 橋梁耐震実験研究実行部会

橋梁の耐震性に関する実験的研究を具体的に推進することを目的とする。ここでは、E-ディフェンスで行う実験の計画、試験体仕様、入力地震動等についても議論され決定される。

以降に示す研究目的、研究計画等は、この実行部会にて議論され進められている内容である。

4-2. 研究目的

大型橋梁耐震実験を計画するに当たり、以下を研究の目的とした。表-2にまとめたものを示す。

- 1) 従来、実験装置の制約から十分な検討が出来なかった破壊現象や複雑な地震応答の解明。
- 2) 兵庫県南部地震で被災した橋梁の破壊メカニズムの解明と現在の耐震補強技術、耐震設計法の有効性の実証。この中には、現在の耐震技術で建設された橋梁の耐震余裕度の検討を含む。
- 3) 耐震性の向上を図るための次世代型耐震技術の開発。

上記の推進では、NEES と E-Defense の協力関係を持って実施し、実験計画は、米国側の E-ディフェンス実験への参画を見据えて、米側研究者と十分な連携を行う。また、本研究の推進過程で、日本側の若手研究者の育成にも配慮することとした。

表-2 実験目的と内容

実験目的	内容
現象解明	従来、実験装置の制約から十分な検討が出来なかった破壊現象や複雑な地震応答の解明を図る。
耐震性能検証	現在の耐震補強法や耐震設計法によって補強・新設された橋梁の耐震性・耐震余裕度を検証する。
新技術開発	耐震性の向上技術を開発する。

4-3. 実験の種類

兵庫県南部地震においても多く見られた RC 橋脚の損傷モードを分類すると以下の通りである¹⁾。

- 1) 柱地盤面位置の曲げ破壊：被りコンクリートの崩落、主鉄筋の座屈、コアコンクリートの圧壊。
- 2) 柱地盤面位置のせん断破壊
- 3) 曲げせん断破壊：一般にせん断耐力と曲げ耐力が近接している部材に現れるモード。軸力を支持する機能を喪失。
- 4) 段落し部のせん断破壊：顕著な斜めひび割れが見られるのが特徴。この破壊モードは一般に脆性的な挙動を示し、主鉄筋の降伏以前に斜めひび割れを発生。軸力を支持する機能を喪失。
- 5) 上部構造では、桁の過大な移動（慣性力）により、伸縮装置の破損、支承の破損、桁の支承からの落下、桁どうしの衝突、桁の横ずれ、落橋防止構造の破損、桁の落下などが発生。

これらの事象を踏まえ、橋梁耐震実験では、RC 橋脚に着目した 2 つの実験の種類を設定し実施する（表-3）。1 つは、RC 橋脚の破壊特性に着目した橋梁コンポーネント実験実験（C1 実験と呼称）、もう一つは橋梁のシステムとしての進行性破壊特性並びに新耐震技術の開発を目指した橋梁システム実験（C2 実験と呼称）である。2007 年度、2008 年度においては C1 実験を実施し、2009 年度に C2 実験を実施する予定である。

C1 実験は震動台上に 2 径間橋梁模型を構築して実施する。E-ディフェンスの実験では試験橋脚の RC 橋脚は実物大とし、相似律を設定せずに、実験データがブレイクスルーできるものとする。一方、C2 実験は、震動台上に多径間橋梁模型を構築し、伸縮装置、支承、落橋防止装置、ダンパー等に着目した実験である。震動台上に実物大の多径間橋梁模型の設置は不可能であることから、模型橋梁の設計に当っては、相似律を設定することになる。

表-3 実験の種類

実験種類	内容
コンポーネント実験 (C1 実験)	世界最大の RC 橋脚模型を用いた振動台実験から、橋脚の破壊特性や耐震性能を明らかにする。
システム実験 (C2 実験)	桁、橋脚、支承、ジョイント、落橋防止構造等、橋梁全体系モデルを用いて橋梁の複雑な地震応答や破壊特性を明らかにする。

表-4 実験目的と実験種類の関係

実験目的 種類	現象解明	耐震性能検証	新技術開発
コンポーネント実験 (C1実験)	●兵庫県南部地震で被災した橋脚の破壊メカニズム解明 ●寸法効果の解明 ●3方向加震の影響、載荷速度の解明	●耐震補強法の検証 ●現在の設計法の検証・耐震余裕度の検討	
システム実験 (C2実験)	●桁、橋脚、支承、ジョイント、落橋防止構造からなる全体系の逐次破壊メカニズム解明		●ダンパーの活用技術 ●高性能橋脚、落橋防止構造、高性能支承の開発

表-5 E-Defenseを用いた実験計画（2007、2008年度はE-Defense以外の施設を利用）

年度	実験種類	実験内容
2005年度	段落し実験	小型模型による段落し強制載荷実験（ハイブリッド実験含）
	RC橋脚3方向振動台実験	円柱模型、曲げ破壊タイプ、3方向加振
	進行性破壊実験予備検討	非線形地震応答破壊メカニズムの検討（数値モデル開発）
2006年度	事前振動台実験	2007年度にE-Defenseで実施する振動台実験の縮小模型実験
	日米の設計基準に関する実験	日米の設計基準の差異、載荷方法（振動台、繰返し載荷）の差異に着目したRC実験
	進行性破壊実験予備検討（その2）	橋梁システムを用いた予備検討
2007年度	1970年代に建設されたRC橋脚（曲げ破壊タイプ）（1体）	1964年の技術基準で設計された橋脚で、兵庫県南部地震の際、曲げ破壊した橋脚。入力地震動は原則としてJR鷹取、3
	1970年代に建設されたRC橋脚（主鉄筋段落としタイプ）（1体）	1964年の技術基準で設計された橋脚で、兵庫県南部地震の際、定着長の不十分な主鉄筋段落とし部で曲げせん断破壊し
2008年度	1970年代に建設されたRC橋脚を鋼板巻き立て工法で耐震補強（1体）	1964年の技術基準で設計された橋脚のせん断耐力及び曲げ変形性能を鋼板巻き立て工法で補強した場合の耐震性検証。
	1970年代に建設されたRC橋脚をカーボンファイバーシート巻き立て工法で耐震補強（1体）	1964年の技術基準で設計された橋脚のせん断耐力をカーボンファイバー巻き立て工法で補強した場合の耐震性検証。
	現在建設されているRC橋脚の耐震余裕度の検討（1体）	1990年以降、地震時保有耐力法で耐震設計されている橋脚の耐震性の検証と耐震余裕度の検討。
2009年度	橋梁システムの逐次破壊メカニズム解明（1体）	同一モデルを用いて、損傷部材を逐次取り替えることにより、以下の検討を行う。 ●積層ゴム支承で支持された橋梁系のシステム加震実験。桁間衝突、ジョイントの損傷、落橋防止構造の稼働変位、支承の損傷等の複雑な動的相互作用を解明する。 ●ダンパーの活用技術の検証 高性能橋脚、落橋防止構造、高性能支承の開発

実行部会では、この表より、2005 年度から 2009 年度までの実験計画案を表-5 に示すように提案している。E-ディフェンス実験の準備段階となる 2006 年度までの計画は、予定通り遂行されているが、その内容については別報をご参考いただきたい。

4-4. 2007 年度以降の実験概要

2007 年度では、C1 実験の内、旧耐震設計基準に基づいた特性の異なる RC 橋脚 2 体の震動破壊実験を実施する予定である。1970 年代以前の旧基準で設計された RC 橋脚は橋脚高さ方向に、作用曲げモーメントの大きさに従って軸方向鉄筋量を配置する手法（段落し）が用いられていた。このため、曲げ耐力は適切に設計されているが、せん断耐力が段落し部において不足している場合がある。RC 橋脚のせん断耐力の評価手法に関する研究は少なく、問題が多い。これらのことを考慮し、実験項目として、以下の項目を掲げる。

- 1) 旧基準に従った段落し部せん断破壊タイプの破壊特性の解明
- 2) 旧基準に従った基部曲げ破壊タイプの破壊特性の解明

なお、C1 実験実施予定実験ケースを表-6 に示す。

表-6 C1 実験全体ケース

2007 年度	1970 年代に建設された RC 橋脚（曲げ破壊タイプ）
	1970 年代に建設された RC 橋脚（主鉄筋段落としタイプ）
2008 年度	1970 年代に建設された RC 橋脚を鋼板巻き立て工法で耐震補強
	1970 年代に建設された RC 橋脚をカーボンファイバーシート巻き立て工法で耐震補強
	現在建設されている RC 橋脚 1：耐震性の確認
	現在建設されている RC 橋脚 2：耐震余裕度の検討

C1 実験では、震動台（15m×20m）上に、2 径間橋梁模型を設置する（図-3）。試験橋脚はフーチング幅 7m×長さ 7m×高さ 1.8m、高さ 7.5m であり（図-4）、端部は RC 製架台上に鋼管を用いた構造とした。桁上に上部構造質量に相当する鋼製マスを設置するが、橋軸直角方向に加振した場合にもできるだけ試験橋脚に慣性力が作用するように試験橋脚側に寄せた配置とする。試験橋脚の変形により桁に過大な変

位が生じた場合には、桁を端部支持台に衝突させて橋の落下を防止する構造になっている。また、試験橋脚の回りに設置する中央架台は、試験橋脚がせん断破壊し、桁が落下した場合にこれを防護する装置である。支承条件は、試験橋脚上は橋軸、橋軸直角、鉛直各方向固定、各軸回り可動である。端部支持台上は橋軸方向可動、直角方向固定である。

E-ディフェンスでは、その大きさに制限はあるものの、実物大の RC 橋脚を用いた震動台実験が可能であり、それにより相似律や寸法効果の影響を受けない貴重なデータの採取が望める。

本研究においては、2007 年度の実験として、実物大の旧基準による RC 橋脚を用いた震動台実験を実施し、破壊現象や複雑な地震応答の解明を図ることを目的とする。また、2008 年度には旧基準で設計された RC 橋脚を補強した橋脚、現行耐震設計基準による RC 橋脚の耐震性、耐震余裕度に着目した実験を実施する予定である。

2007 年度に実施を予定する C1 実験の配筋、計測点等については、本シンポジウム講演論文集の「E-Defense を用いた大型橋梁実験における計測計画」をご参照いただきたい⁵⁾。C2 実験については検討初期の段階であり、計画が確定した段階で報告する予定である。図-6 に現段階で想定する 3 径間橋梁模型の実験イメージの一例を示す。

5. まとめ

E-ディフェンスが 2005 年 3 月に無事完成し、その滞りない稼働の経過より、これまで出来なかった具体的な実験イメージを持った活用提案が可能となり、それらは、省庁間や機関の垣根を超えた連携で受け入れられる方向に推移しつつある。今後、海外との連携においても幅広い有効活用が見込めると考える。

特に RC 橋脚の耐震性については、その構造体の機能が、地震後の救助・復旧に平面的・広範囲に波及することから、過去の事例、現状の構造体、未来に向けた各種提案の実験検証・検討が重要であることは言うまでもない。防災科学技術研究所としては、E-ディフェンスでの実験研究、日米の共同研究の展開も含め、その進捗を見据えつつ継続的に進めるべき最も重要な課題と考え、本テーマを推進している。2006 年度の成果は以下である。

- 1) RC 橋脚の E-ディフェンス実験研究に向けた研究推進体制の構築
- 2) E-ディフェンス実験研究に向けた国内、海外での実験の推進

3) C1 実験の詳細計画の立案

4) C2 実験の準備計画の推進

以上の 2006 年度の成果を持って、防災科学技術研究所は、試験体の製作、計測・制御の手配、準備に入り、2007 年度の実大橋脚破壊実験に望む予定である

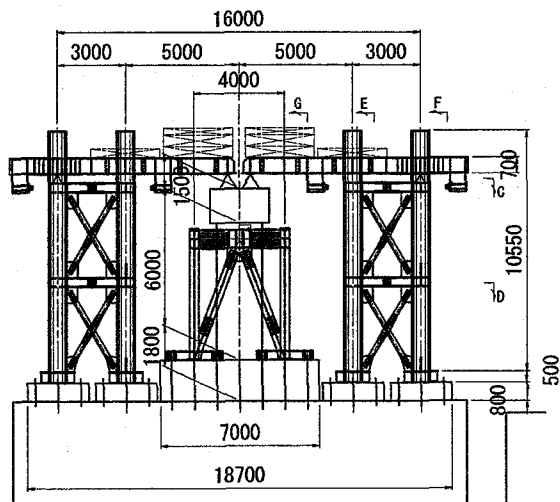


図-3 C1 実験の加振条件

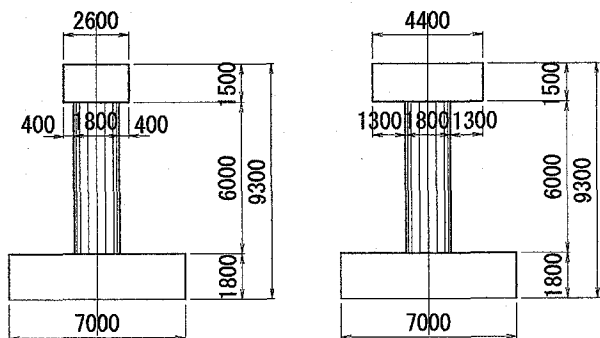


図-4 1970 年代の供試体 (φ1.8m、現在の基準による供試体では直径 φ2.0m となる。)

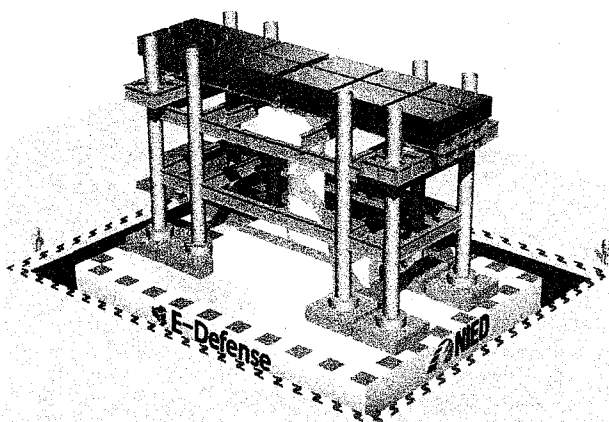


図-5 C1 実験想定図

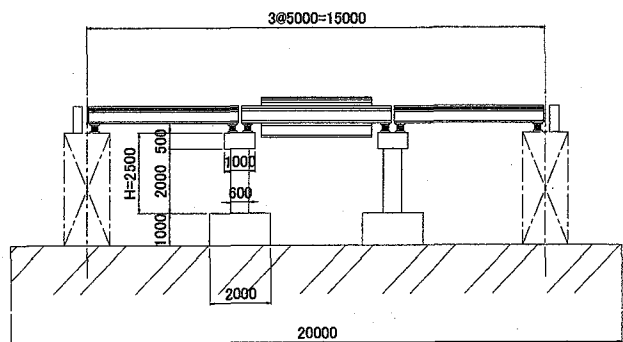


図-6 C2 実験想定図

6. 謝辞

実大三次元震動台破壊実験施設 (E-Defense) を用いた橋梁耐震実験研究は、防災科学技術研究所に設置した橋梁耐震実験研究分科会 (委員長: 家村浩和 京都大学教授), 橋梁耐震実験研究実行部会 (委員長: 川島一彦 東京工業大学教授), 実行部会に設置された解析検討 WG, 進行性破壊検討 WG, 計測方法検討 WG の委員各位のご協力により遂行されている。ここに、委員各位に対し、心より謝意を表したい。

7. 参考文献

- 1) 土木学会: 阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害、阪神・淡路大震災調査報告編集委員会、pp.21-40、1996
- 2) Ogawa, N., Kajiwar, K., Sato, M. : Introduction of E-Defense Project with Recent Progress, PVP-Vol. 486-2, Seismic Engineering-2004, Volume 2, pp.181-186, 2004
- 3) Ogawa, N., Ohotani, K., and Katayama, T. : Construction of A 3-D Large Scale Shaking Table, PVP-Vol. 402-2, Seismic Engineering-2000, Volume2, pp199-209, ASME, 2000
- 4) 佐藤栄児, 梶原浩一, 田川泰敬, 山田哲: 実大三次元震動破壊実験施設の負荷試験体搭載時の性能確認実験, 日本地震工学会・大会 2005 梗概集, pp. 488-489, 2005
- 5) 右近大道, 梶原浩一, 川島一彦: E-Defense を用いた大型橋梁実験における計測計画、第 10 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2007