

# E-Defense を用いた大型橋梁耐震実験

右近 大道

防災科学技術研究所は兵庫県南部地震による大震災を受け、地震動による構造物の破壊現象を解明するために実大三次元震動破壊実験施設（E-Defense）を建設し、2005年から本格運用を開始した。そして、2005年度からの防災科学技術研究の中期目標の中で、E-Defenseを用いた耐震工学研究の一つとして大型橋梁耐震実験研究が取り上げられた。本稿では、現在進められている実大規模のRC橋脚を用いた大型橋梁耐震実験について、紹介するものである。

キーワード：NEES, E-Defense, 橋梁, 鉄筋コンクリート橋脚, 震動破壊実験

## 1. はじめに

1995年1月17日未明に発生した兵庫県南部地震は、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<sup>1)</sup>。その被害の多くは、橋脚、特に鉄筋コンクリート製橋脚（RC橋脚）で発生した。

RC橋脚の耐震性の検証のために、正負交番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）の実大三次元震動破壊実験施設（以下、E-Defense）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 George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation」（NEES）の研究施設群との相互連携の体制を整えつつ、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。本文では、大型橋梁耐震実験計画<sup>2)</sup>ならびに2008年度までに実施した研究内容について紹介する。

## 2. 橋梁耐震実験研究の目的と概要

### (1) 実験研究推進体制

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のとおりである。

#### (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-Defense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。

### (2) 実験研究の目的

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1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耐震性能向上の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-Defense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。

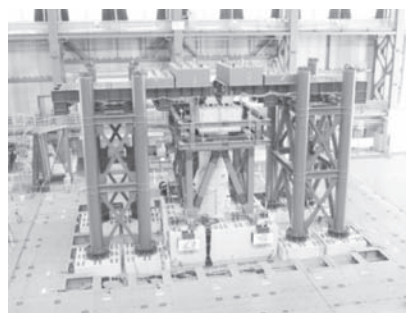


図-1 C1 実験

表-1 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。

### (3) 実験の種類

兵庫県南部地震では、RC橋脚に柱地盤面位置の曲げ破壊、柱地盤面位置のせん断破壊、曲げせん断破壊、段落し部のせん断破壊などが発生し、上部構造には、桁の過大な移動（慣性力）による伸縮装置の破損、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した<sup>1)</sup>。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種類の実験を実施することにした（表-2）。一つは、RC橋脚の破壊特性に着目した橋梁コンポーネント実験（C1実験と呼称、図-1）、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～2009年度においてはC1実験を実施し、

表-2 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。

2010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-Defense実験に用いる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が、C1実験と同規模の模型を目指している。C2実験については、現在検討中であり、詳細な実験内容は定まっていない。

## 3. E-Defenseの震動台仕様とデータ収録仕様

### (1) 震動台仕様

E-Defense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月の性能確認試験から実験研究の運用に入っている。

図-2に震動台の外形を、加振能力限界曲線を図-3に示す。E-Defense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。震動台には、水平2方向に各5台（片側）、鉛直方向

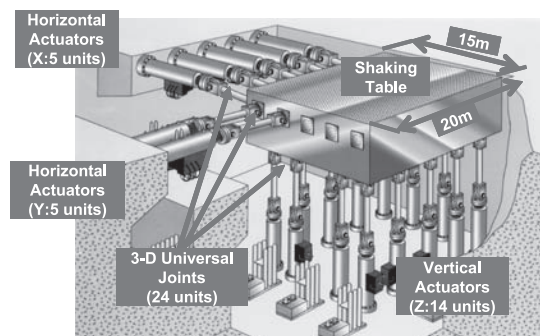
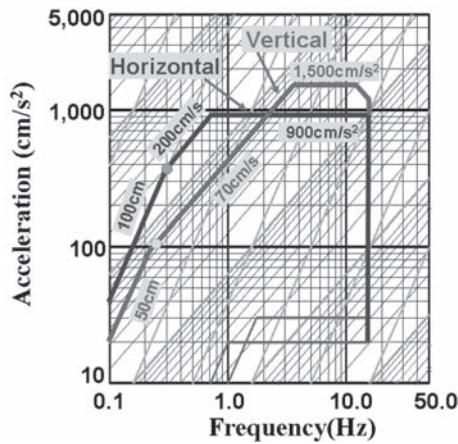


図-2 震動台俯瞰図



図一三 加振限界曲線（最大質量 1,200 t 搭載時）

に 14 台、計 24 台のアクチュエータが設置されている。震動台の寸法は、長辺方向が 20 m、短辺方向が 15 m であり、最大積載質量は 1,200 t である。

## (2) データ収録仕様

E-Defense では震動台内部に A/D 変換器内蔵型の増幅器が設置されている。震動台上の供試体等に取り付けられた各センサー（振動計、荷重計、変位計、ひずみ計等最大 896 ch）の信号は、震動台側面のジャンクションボックスを介して震動台内部に取り込まれ、その後、A/D 変換器内蔵型の増幅器、光ケーブルを用いて、計測制御室のデータ収録用管理装置に取り込まれる。同時に、震動台制御に関するデータ（変位、速度、加速度等の指令値、応答値 64 ch）もデータ収録用管理装置に取り込まれる。

## 4. 橋梁コンポーネント実験（C1 実験）

### (1) C1 実験ケース

C1 実験ケースを表一三に示す。今までに、1970 年

表一三 C1 実験全体ケース（現在案）

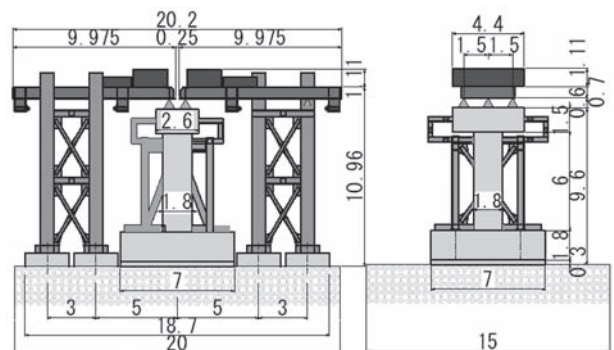
年度	試験体	試験橋脚の特性
2007	C1-1	1970 年代に建設された RC 橋脚（基部曲げ破壊タイプ、段落し無し）
2008	C1-2	1970 年代に建設された RC 橋脚（主鉄筋段落し部せん断破壊タイプ）
	C1-5	現在建設されている RC 橋脚の耐震性能の確認
2009	C1-6	次世代型 RC 橋脚の耐震性
2010 以降	C1-3	1970 年代に建設された RC 橋脚を鋼板巻き立て工法で耐震補強
	C1-4	1970 年代に建設された RC 橋脚をカーボンファイバー巻き立て工法で耐震補強

代に建設された RC 橋脚を対象とした C1-1 実験<sup>3)</sup>（基部曲げ破壊タイプ）と段落しを有する C1-2 実験<sup>4)</sup>（せん断破壊タイプ）、現在建設されている RC 橋脚を対象とした C1-5 実験<sup>5)</sup> の 3 体の実験を実施した。2009 年度には、次世代型 RC 橋脚の開発を目指して、高強度鉄筋、高強度コンクリートを用いた C1-6 実験を計画中である。

### (2) C1 実験装置

C1 実験では E-Defense の震動台上に、2 径間橋梁模型を設置（図一四）する。中央が試験橋脚で、その大きさはフーチング幅 7 m × 長さ 7 m × 高さ 1.8 m、橋脚の直径は C1-1, C1-2 で  $\phi$  1.8 m、C1-5 で  $\phi$  2.0 m、橋脚高さ 7.5 m、橋脚基部の死荷重による軸圧縮応力は 0.9 ~ 1.1 MPa である。柱部の材料強度は鉄筋 SD345、コンクリート 27 Mpa である。1970 年代に建設された RC 橋脚に使用されていた鉄筋は SD295 であるが、今は製造されていないため SD345 を用いることにした。

桁は I 形鋼 5 本を用いた箱桁構造であり、桁上に上部構造質量に相当する鋼製マスを設置する。鋼製マスは大が 78 t、小が 44.6 t、桁 22.7 t、支承質量が 16.2 t (C1-1 実験のみ 10.2 t) で、上部構造の基本質量は 307 t (C1-1 実験のみ 301 t) である。C1-5 実験では、小さい鋼製マスの質量を増やして全体質量を 372 t にした実験も実施した。上部構造質量は、C1-5 実験での地震時保有水平耐力法<sup>6)</sup> を満足する質量を逆算した。C1-1, C1-2 はこの上部構造質量に合わせて、1970 年代の技術基準に基づいて設計した。鋼製マスは橋軸直角方向に加振した場合で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て設置する。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桁の落下を防止する。また、試験橋脚の周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



図一四 C1-2 実験

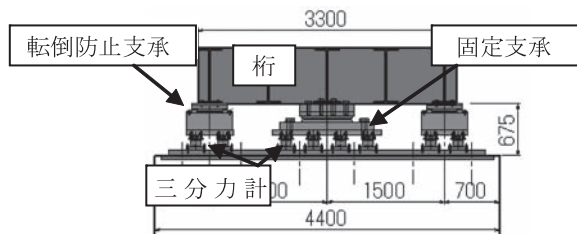


図-5 橋脚天端支承

であり、試験橋脚の変形測定用の変位計固定治具を兼ねている。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、水平2軸回りの許容回転角は7度である。固定支承の両側には転倒防止支承を設置している(図-5)。転倒防止支承は滑り支承構造である。固定支承の下には8台の三分力計、転倒防止支承の下には4台の三分力計を設置している。端部支持台上は橋軸方向可動、直角方向固定、橋軸方向の可動範囲は±1,000 mmである。なお、試験橋脚の変形は橋軸方向、直角方向ともに800 mm以内を想定している。

### (3) C1 実験試験体

C1 実験での各試験体の配筋図を図-6~8に示す。C1-1は直径φ1.8 mで、D29×32本の2.5段配筋である。C1-2は、基部ではC1-1と同じで、2箇所段落しがある。C1-1、C1-2の帯鉄筋は1本物の重ね継手である。C1-5は直径φ2.0 mで、D35×36本の2段配筋である。帯鉄筋は2本1組で、鋭角フック付である。

### (4) 入力地震動

入力地震動には、1995年兵庫県南部地震でJR鷹取駅で記録された地震動に動的相互作用を考慮して振幅を80%に調整した地震動を実地震動100%として用いた。これは、震動台実験ではフォーミングを震動台に剛結するため、本来の地盤への逸散減衰を考慮できないため、実記録波形をそのまま入力として用いると過大な入力地震動となるためである。

## 5. C1 実験結果

膨大なデータを用いた実験解析は、現在検討中である。ここでは、各試験体の損傷状況を紹介する。

C1-1 実験<sup>3)</sup>では、実地震100%加振を2回実施した。写真-1は1回目と2回目加振後の基部の損傷である。1回目で、かぶりコンクリートが崩落し、2回目には損傷が進行し帯鉄筋の拘束効果を喪失している。

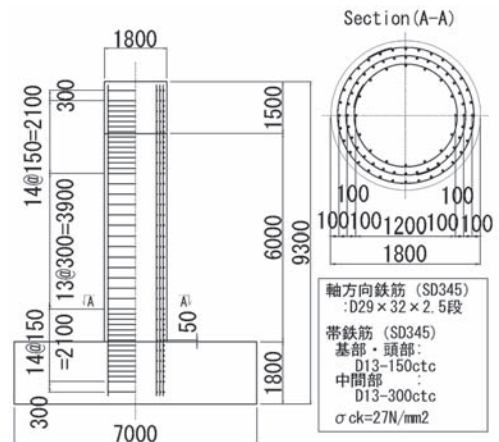


図-6 C1-1 実験試験体配筋図

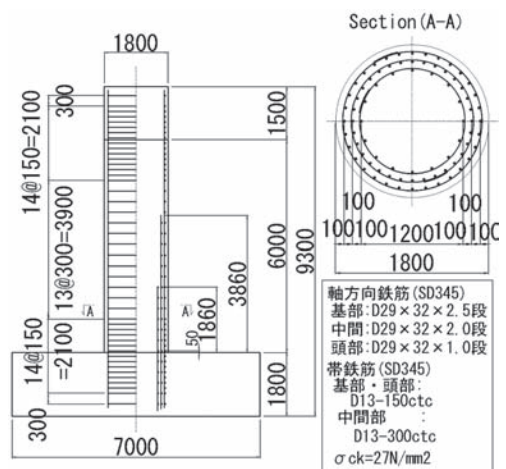


図-7 C1-2 実験試験体配筋図

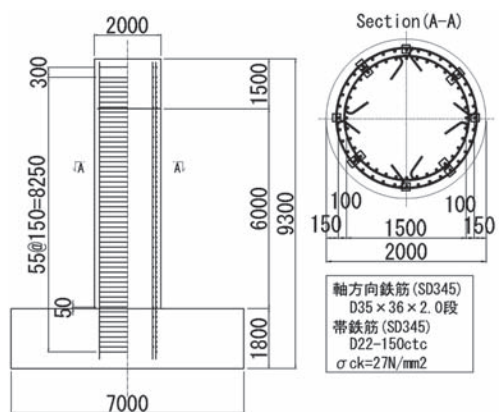


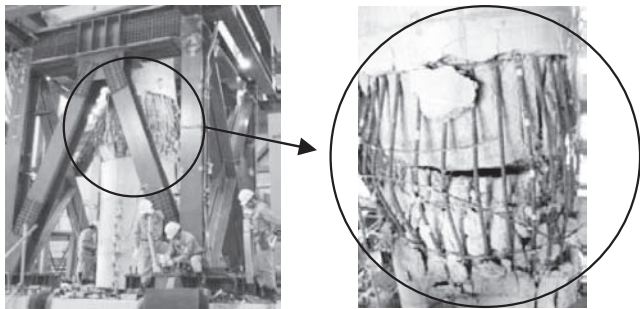
図-8 C1-5 実験試験体配筋図



a) 1回目加振後                      b) 2回目加振後

写真-1 C1-1 実験加振後

写真一2はC1-2実験<sup>4)</sup>での実地震100%1回目加振後の損傷である。上部段落し位置(1段配筋への変化点)において、曲げ損傷からせん断破壊している。かぶりコンクリートは崩落し、軸方向鉄筋は大きく座屈している。かぶりコンクリートの崩落は、軸方向鉄筋の座屈とともに爆発的に生じた。



写真一2 C1-2実験加振後

C1-5実験<sup>5)</sup>では以下に示す5回の加振を行った。写真一3はC1-5(1)実験(上部構造質量307t)での実地震100%1回目加振後と2回目加振後の基部の損傷である。いずれもかぶりコンクリートにクラックが入った程度である。



a) 1回目加振後      b) 2回目加振後

写真一3 C1-5(1)実験加振後

写真一4は上部構造重量を372tに増加したC1-5(2)実験での実地震100%加振後である。かぶりコンクリートが浮き上がり一部で崩落している。

写真一5はC1-5(2)の条件で、実地震125%加振(C1-5



写真一4 C1-5(2)実験加振後

(3)実験)1回目と2回目での損傷である。1回目では基部のかぶりコンクリートが崩落しているが、軸方向鉄筋の座屈は認められなかった。2回目では、軸方向鉄筋が座屈し、軸方向鉄筋内部のコンクリートが粉碎されたような粒子状になって、外側に出てきた。帯鉄筋はこの最後の加振まで、その拘束効果を維持していた。



a) 1回目加振後      b) 2回目加振後

写真一5 C1-5(3)実験加振後

以上の損傷写真から、1970年代に建設されたRC橋脚は、兵庫県南部地震には耐えられないものであったことが分かる。一方、現在建設されているRC橋脚は、兵庫県南部地震クラスの地震を2回程度受けても十分な耐力を保持していることが分かる。また、上部構造質量を1.21倍、入力地震動を1.25倍として、上部構造作用力を単純計算で1.5倍に増加しても落橋にはいたらない耐力を保持していることが推察される。

## 6. まとめ

1970年代に建設されたRC橋脚や現在建設されているRC橋脚を対象とした世界で初めての実物大のRC橋脚の震動破壊実験が実施できた。そして、相似則の影響を受けない多数の破壊過程の特性を現すデータを得る事が出来た。今後、破壊過程の解明を進め、解析手法の検証を実施していく上で、本実験の意義は大きい。

今後、関係者のご支援、ご協力の下に、膨大なデータの整理、破壊現象の解明を進めると同時に、これらのデータを逐次公開する予定である。また、平成21年度には、より高性能な次世代型RC橋脚の開発を目指したC1-6実験を実施する予定である。

謝辞：E-Defenseを用いた橋梁耐震実験研究は、当所に設置した橋梁耐震実験研究分科会(委員長：家村浩和近畿職業能力開発大学校長)、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、事前解析コンテストWGの

委員各位のご協力の下に遂行している。ここに、深く感謝の意を表します。



- 5) 右近大道, 梶原浩一, 川島一彦: E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-5 橋脚) 震動破壊実験報告, 第 12 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, pp193-198, 2009  
6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002

(2009 年 3 月 20 日受付)

#### 《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) 梶原浩一, 右近大道, 川島一彦: E-Defense を用いた大型橋梁実験の目的と概要, 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, pp23-28, 2007
- 3) 右近大道, 梶原浩一, 川島一彦, 佐々木智大, 運上茂樹, 堺淳一, 高橋良和, 幸左賢二, 矢部正明: E-Defense を用いた実大橋脚 (C1-1 橋脚) 震動破壊実験報告書, 研究資料第 331 号, 防災科学技術研究所, 2009
- 4) 右近大道, 梶原浩一, 川島一彦: E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-2 橋脚) 震動破壊実験報告, 第 12 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, pp199-206, 2009

#### 【筆者紹介】

右近 大道 (うこん ひろみち)  
 (独)防災科学技術研究所  
 兵庫耐震工学研究センター  
 招へい研究員



## 橋梁架設工事の積算

——平成 21 年度版——

#### ■改訂内容

1. 積算の体系
  - ・ 共通仮設費率の一部改定
2. 橋種別
  - 1) 鋼橋編
    - ・ 送出し設備質量算出式の改定
    - ・ 少数主桁架設歩掛の改正
    - ・ 歩道橋(側道橋)一部歩掛改定
  - 2) PC橋編
    - ・ 多主桁橋 主桁製作工歩掛の追加
    - ・ 架設桁架設工法 歩掛の改定
    - ・ トラッククレーン架設工法 歩掛の改定

■ B5 判 / 本編約 1,100 頁 (カラー写真入り)  
 別冊約 120 頁 セット

#### ■定 価

非会員: 8,400 円 (本体 8,000 円)  
 会 員: 7,140 円 (本体 6,800 円)

※別冊のみの販売はありません。  
 ※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも  
 沖縄県以外 600 円  
 沖縄県 450 円 (但し県内に限る)

### 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>