

E-Defenseを用いた大型橋梁実験における計測計画

右近大道¹・梶原浩一²・川島一彦³

¹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）

²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）

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

兵庫県南部地震の後、防災科学技術研究所は、実物大の構造物の破壊実験ができる実大三次元震動破壊実験施設（E-Defense）の建設に着手した¹⁾。その建設目的は、強い地震動を受けた構造物の地震災害の予測であり、構造物が「なぜ壊れるのか」、「どのように壊れるのか」、「どこまで壊れるのか」を解明することである。

防災科学技術研究所では、平成17年度よりE-Defenseを用いた橋梁耐震実験研究を日米共同研究の一環として実施してきた。現在、大型橋梁実験計画を立案中であり、平成19年度より本実験を実施予定である。本文は、現時点における大型橋梁耐震実験の計測計画について報告するものである。

2. E-Defenseを用いた大型橋梁実験概要

2-1 実験概要

橋梁に関する震動台実験は、大きく分けて2つのタイプを予定している。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（C1実験）と橋梁システムとしての進行性破壊や耐震性向上を目指した橋梁システム実験（C2実験）である。本文で報告する計測計画はC1実験に関するものである。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。

1) C1実験の目的

鉄筋コンクリート橋脚（RC橋脚）の地震時保有水平耐力については、静的載荷実験、振動台実験などが行なわれ、その特性については既に明らかにされている。しかし、それらの実験での供試体は、実験装置の制約等から縮小模型を用いた実験であった。縮小模型においては、寸法効果の影響が避けられない。また、破壊特性の解明を対象とするRC橋脚実

験での相似律の設定は困難である。

E-Defenseで実施する実物大のRC橋脚を用いた震動台実験では、相似律や寸法効果の影響を受けないデータの採取が可能であり、実験結果を直接的に評価できる。

本研究においては、2007年～2008年の2年間に表-1に示す実験ケースを実施し、破壊現象や複雑な地震応答の解明を図ることを目的としている。

表-1 C1実験全体ケース（暫定案）

年度	供試体	試験橋脚の特性
2007	07-01	1970年代に建設されたRC橋脚（曲げ破壊タイプ）
	07-02	1970年代に建設されたRC橋脚（主鉄筋段落タイプ）
2008	08-01	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
	08-02	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
	08-03	現在建設されているRC橋脚1:耐震性の確認
	08-04	現在建設されているRC橋脚2:耐震性余裕度の検討

2) C1実験概要

E-Defenseの震動台（15m×20m）上に、2径間橋梁模型を設置する（図-1）。試験橋脚はフーチング幅7m×長さ7m×高さ1.8m、高さ7.5mである（図-2）。端部はRC製架台上に鋼管を用いた構造である。桁は5主桁構造であり、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り、試

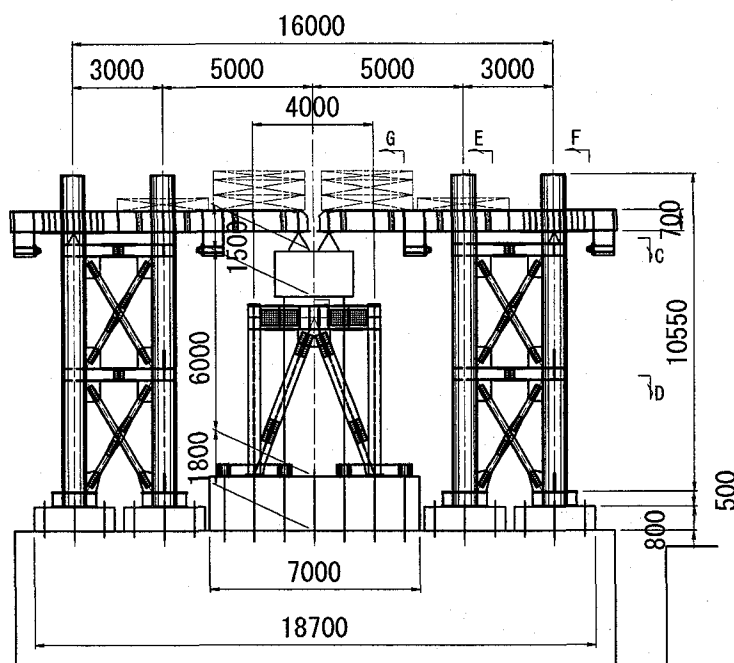


図-1 C1 実験の加振条件

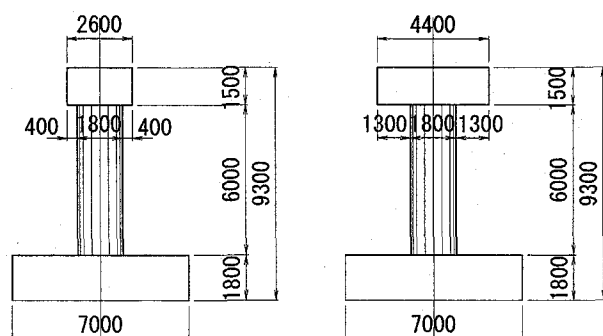


図-2 1970 年代の供試体（ $\phi 1.8\text{m}$ ，現在の基準による供試体では直径 $\phi 2.0\text{m}$ となる．）

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，各軸回り可動である。端部支持台上は橋軸方向可動，直角方向固定である。

2-2 E-Defense の計測システム

1) 震動台特性²⁾

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ーがある（図-4）。駆動はアキュムレーターにより蓄圧し，電気油圧制御により行う。加振性能を表-2 に示す。また，能力限界曲線を図-3 に示す。

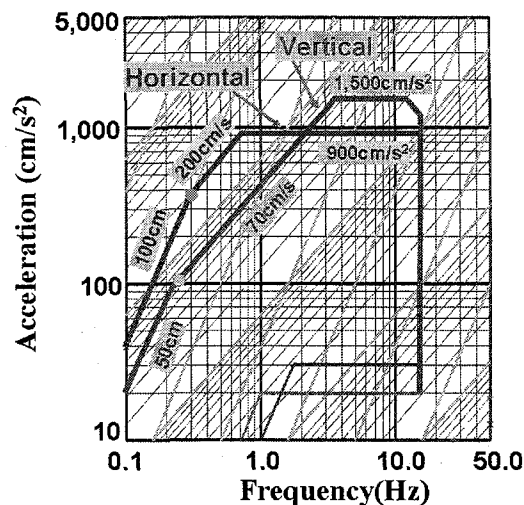


図-3 加振限界曲線（最大質量 1200t 搭載時）

表-2 三次元実大破壊実験装置の性能

搭載重量	1200tf	
大きさ	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

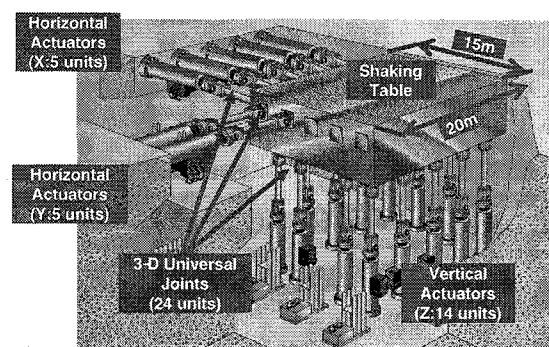


図-4 震動台俯瞰図

2) 計測システム³⁾

E-Defense の計測システムを図-5 に示す。本システムでは震動台内部に A/D 変換器内蔵型の増幅器が設置されている。このため，震動台上の模型に取り付けられた各センサー（振動計，荷重計，変位計，

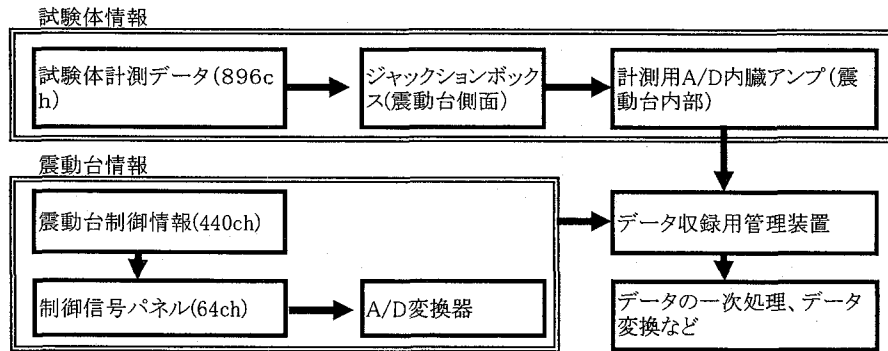


図-5 計測システム

ひずみ計等最大 896ch) の信号は、震動台側面のジャクソンボックスを介して震動台内部に取り込まれる。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 64ch）もデータ収録用管理装置に取り込まれる。試験体に設置するセンサーに対応した増幅器の構成を表-3 に示す。

各データは収録後に、サーバに転送する。転送時間はデータ量に依存する。500ch をサンプリング 500Hz で 270 秒間計測した場合では約 6 分かかる。また、本システムでは、実験時に、時刻歴波形出力、計測波形の最大値／最小値リストの出力、任意のセンサー間での伝達関数／リサージュ出力をすることができる。

表-3 増幅器の構成

増幅器	成分数 (ch)	サンプリング周波数	収録時間 (秒)	分解能
DCマルチアンプ	800	10Hz～2kHz	195s (2kHz)	24bit
ACストレインアンプ	64	10Hz～2kHz	195s (2kHz)	24bit
高速マルチアンプ	32	1kHz～1MHz	195s (1MHz)	16bit
計	896			

3. 試験橋脚の変形特性

1) 試験橋脚の特性

試験橋脚の材料および配筋特性を表-4 に示す。

2) 試験橋脚の地震時保有水平耐力

各試験橋脚の地震時保有水平耐力をプッシュオーバー解析によって求めると図-6、表-5 のようになる。供試体 07-01 は 1970 年代の震度法にて設計し、段落しを行わないものである。供試体 07-02 は段落しのある実橋脚を参考に設計したものであり、鉄筋が降伏する前にせん断破壊する。供試体 08-03 は現在の

設計基準で設計したものである。曲げ破壊タイプの RC 橋脚では、道路橋示方書⁴⁾で求められる終局変位以上の変位となるレベルでの加振予定である。せん断破壊タイプの RC 橋脚では、完全にせん断破壊するレベルでの加振予定である。

表-4 実大規模の RC 橋脚模型の諸元

供試体番号	断面寸法 (m)	せん断支間比	コンクリート強度 (MPa)	軸筋材料強度	軸方向鉄筋比 (%)	横拘束筋比 (%)	軸圧縮力 (MPa)
07-01	φ 1.8	4.16	30	SD295	2.020 (D29)	0.422 (D13)	1.20
07-02	φ 1.8	4.16	30	SD345	2.497 (D32)	0.238 (D10)	1.20
08-03, 04	φ 2.0	3.75	30	SD345	2.192 (D35)	0.911 (D22)	1.00

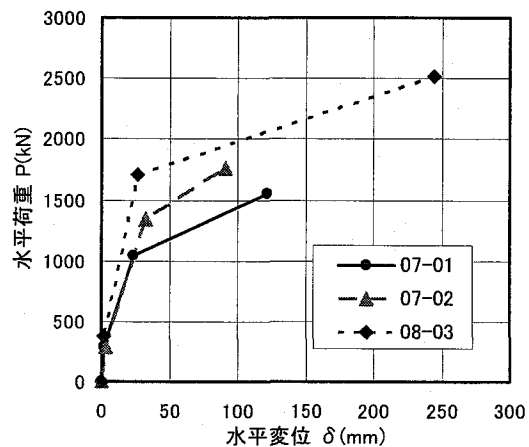


図-6 各供試体の地震時保有水平耐力

表-5 試験橋脚の地震時保有水平耐力

	供試体 07-01	供試体 07-02	供試体 08-03
	変位 (mm)	変位 (mm)	変位 (mm)
ひび割れ	2.4	2.5	2.1
降伏	23.5	32.7	26.6
終局	121.8	91.2	244.4
せん断耐力	—	—	—
せん断耐力	284.4	1342.6	5194.8

せん断耐力は、Cc=0.8の場合

4. 計測項目及び、計測結果の利用

実験では、震動台・フーチングの地震動、桁の慣性力、橋脚の変形、橋脚の鉄筋ひずみを計測する。計測成分を表-6に示す。

各データのサンプリング周期は 200Hz を予定している。加速度計等全体の計測器配置を図-7に示す。

表-6 計測成分

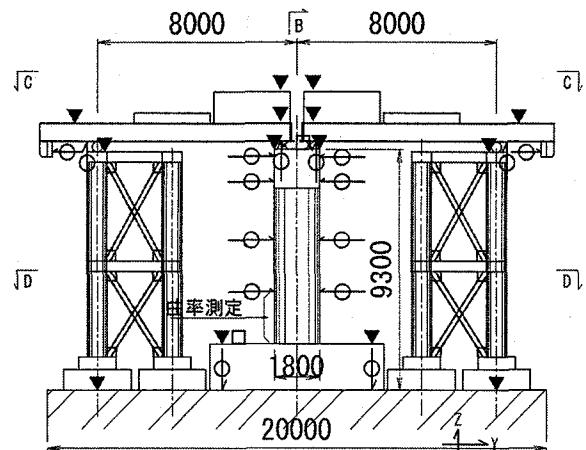
計測項目	基部曲げ破壊タイプ	せん断破壊タイプ	備考
震動台加速度	12成分	12成分	10G
フーチング加速度	12成分	12成分	10G
フーチング速度	3成分	3成分	200cm/s(4G)
フーチング滑動変位	8成分	8成分	
フーチング浮上り	8成分	8成分	
橋脚天端作用力	24成分	24成分	三分力計×8基=24
橋脚天端加速度	12成分	12成分	10G
橋脚天端速度	3成分	3成分	200cm/s(4G)
RC橋脚変形	32成分	32成分	高さ方向4点×8
曲率測定(変位計)	40成分	なし	200mmピッチ
桁加速度	36成分	36成分	200cm/s(4G)
桁水平変位	12成分	12成分	
桁鉛直変位	8成分	8成分	
端部橋脚天端加速度	12成分	12成分	10G
計測架台加速度	60成分	60成分	変位計固定点に設置
鉄筋軸方向ひずみ	208成分	308成分	
帯鉄筋ひずみ	64成分	144成分	
合計	554成分	694成分	

1) 震動台・フーチングの地震動(加速度, 速度, 変位)

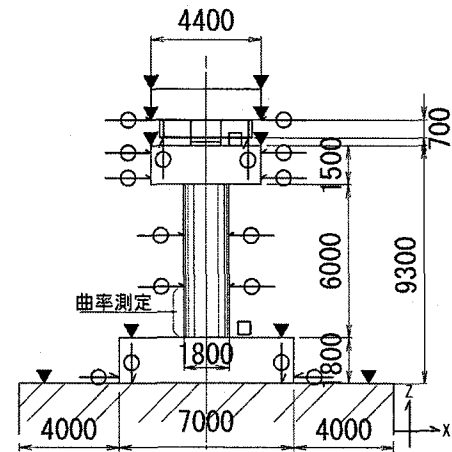
震動台はアクチュエーターからの入力によって、6 自由度の応答を示す。目標とする入力地震動を得るために、 $6 \times 6 = 36$ 個の伝達関数を設定してアクチュエーターの制御を行う。震動台上に橋梁構造物等の大型構造物を設置した場合、伝達関数は当然無載荷時とは異なるため、震動台・フーチングの応答を計測する必要がある。震動台上の搭載物を考慮した伝達関数は、搭載物が線形振動する範囲では、微小なランダム波加振によって得ることができるが、構造物が非線形挙動する場合には伝達関数の加振前予測は困難である。本実験では、弾性範囲の予備加振結果に基づいた逆伝達関数を用いて、目標波形に対応した入力波形(信号)を用いることになる。

2) 上部構造(桁)の慣性力

本実験は震動台を用いた2径間橋梁模型でのRC橋脚の破壊実験であることから、橋脚に作用する外力(桁からの慣性力)と慣性力による変形量の計測が主体となる。また、加震方向は三次元加震を基本としている。桁の橋軸方向の慣性力は試験橋脚に作



a) 正面図



b) 側面図

- ▼ 加速度計(サーボ型、ひずみゲージ型) (3成分/台)
- 速度計(サーボ型) (3成分/台)
- 変位計(巻取り型、接触型)
- 曲率測定(変位計) (2方向、4ライン、10測点/ライン)

図-7 計測器配置

用するが、橋軸直角方向の慣性力は端部橋脚でも分担することになる。このため、試験橋脚支承下側に三分力計を設置し、試験橋脚に作用する桁の慣性力を計測する。従来の橋軸方向加振の振動台実験では桁の慣性力は桁質量に桁加速度を乗じて算出している。本実験でも加速度計による桁加速度を測定し、桁加速度による慣性力と三分力計による慣性力を比較検討する。桁加速度からの慣性力の算定に用いる桁質量は事前に計測する。また、桁と端部支持台との相対変位、試験橋脚との鉛直方向の相対変位の計測を行なう。

3) 試験橋脚の変形

橋脚の高さ方向の変形は変位計を多段に設置して測定する。加震は三次元であり、変形も3方向であること、変位量も200mm以上、場合によっては600mmもの橋脚天端変位が予測されることから、大

変位にも対応できるワイヤー巻取り型変位計を用いる。変位計測結果を用いて、橋脚の高さ方向の回転を求める。変位計は中央架台に固定する。また、変位計固定部の加速度を計測し、変位計固定部の変形量を確認する。中央架台に変形の増幅が認められた場合は中央架台で記録した加速度の 2 回積分から求めた変位を用いてワイヤー巻取り型変位計で計測した変位を補正する。

4) 試験橋脚の曲率

橋軸方向、橋軸直角方向の 2 軸方向に曲率を測定する。測定には棒状型の変位計を高さ方向に 200mm ピッチに設置する。棒状型変位計の固定には、鋼棒（ $\phi 6\text{mm}$ 程度）を橋脚表面から内部に埋め込む予定である。曲率に基づく橋脚天端変位と直接計測された天端変位を比較する。

5) 試験橋脚の軸方向鉄筋ひずみ

橋脚基部曲げ破壊タイプの場合は、フーチング内部とフーチング天端より約 2m（橋脚径）高さの範囲に、300mm ピッチで軸方向鉄筋にひずみゲージを設置する。1箇所あたり 2 枚設置する。計測では 2 枚のゲージより軸ひずみと曲げひずみを測定する。設置状況を図-8、9、10 に示す。軸方向鉄筋は多段配筋であることから、いずれの軸方向鉄筋にも同じ高さにひずみゲージを設置する。鉄筋ひずみ分布から降伏耐力や鉄筋の座屈、塑性ヒンジ区間長を明らかにする。

段落しタイプの場合は、段落し部では鉄筋段落しに伴い軸方向鉄筋に生じる鉄筋ひずみが増加すること。また、内、中、外鉄筋とひずみ値が変わるものと想定される。さらに、2008 年度の実験では、段落し部を耐震補強した RC 橋脚を実験する予定であり、補強供試体との差異を見るために橋脚基部から段落し部までの広範囲にひずみゲージを設置する予定である。

フーチング内部に設置した軸方向鉄筋のひずみ分布より、フーチングからの伸びだし量を算定する。また、伸びだし量より基部の回転量を算定する。

6) 試験橋脚の帯鉄筋ひずみ

橋脚部の帯鉄筋に、円周方向に 8 枚のひずみゲージを設置する。帯鉄筋のひずみゲージ位置は軸方向鉄筋のひずみゲージと同一高さである。帯鉄筋のひずみ分布から、帯鉄筋の拘束効果を検討する。

7) 三次元変位計測

震動台と試験橋脚のフーチング、橋脚、梁の各部

位に複数の反射マーカを設置して、マーカーの挙動を複数のデジタルカメラによって撮影する。撮影に際しては、反射マーカーと他の反射とを区別し、反射マーカーのみの挙動データを記録する。記録データより、震動台との相対変位を算定し、供試体の変位を求める。サンプリング周波数は 100Hz である。公称精度は、25mm レンズを用い、15 m 遠方から測定した場合 $\pm 0.6\text{mm}$ である。

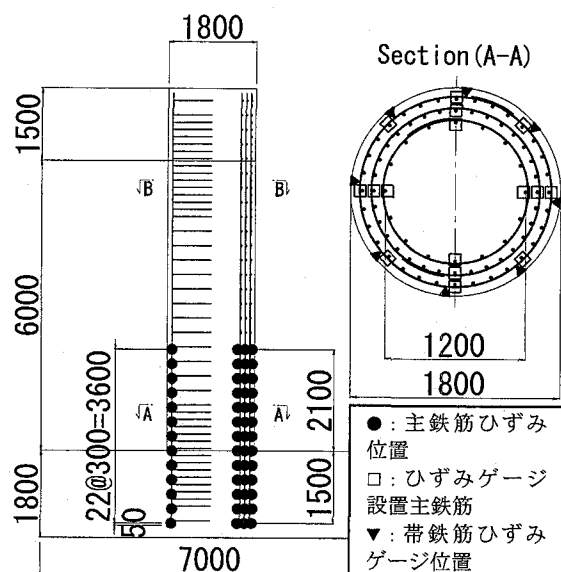


図-8 旧基準基部曲げ破壊型 RC 橋脚の配筋とひずみゲージ設置位置

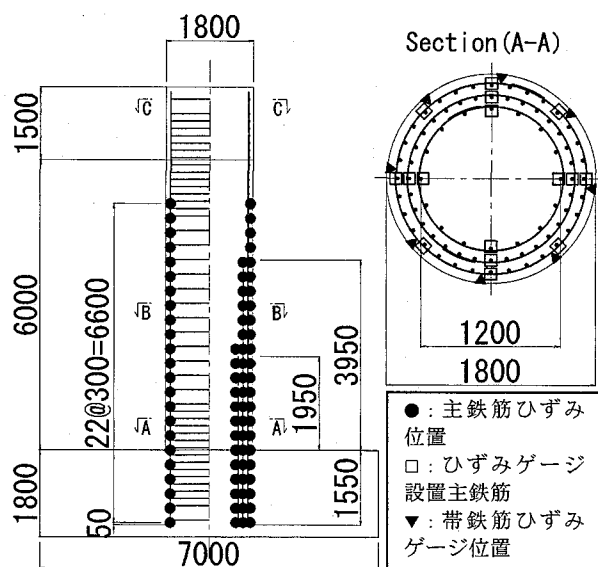


図-9 段落し部せん断破壊型 RC 橋脚の配筋とひずみゲージ設置

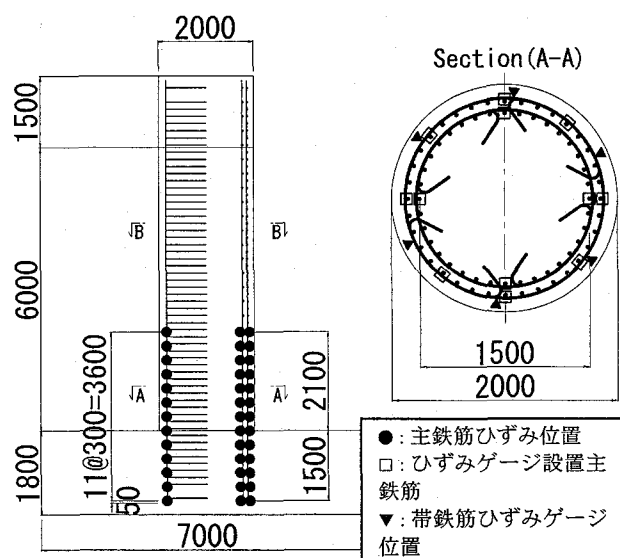


図-10 現在の基準で設計した基部曲げ破壊型 RC 橋脚の配筋とひずみゲージ配置位置

8) 映像撮影

E-Defense には固定式カメラ 9 台、移動式カメラ 8 台、細部を拡大する小型カメラ 10 台からの映像を同時に収録できる映像収録システムが常設されている。本映像収録システムの約 20 台のカメラを用いて、実験装置全体の挙動、RC 橋脚の応答、RC 橋脚表面に生じるクラック、鉄筋の座屈等の映像を収録予定である。本システムでは、1 秒間に 30 コマの映像を収録することができる。この映像と応答波形とを時刻歴で検証することにより、クラックの発生、鉄筋の降伏、軸方向鉄筋の座屈などの破壊過程を検討する。

5. まとめ

実大三次元震動破壊実験施設 (E-Defense) を用いて世界で初めての実大規模の RC 橋脚破壊実験を実施し、RC 橋脚の破壊過程を明らかにする予定である。このためには、破壊に至るプロセスを検証できるレベルの損傷が生じるまで加振する必要があるが、大きな損傷は桁の落下を引き起こすなどの危険性もあり、落下防護装置等の設置が必要となる。一方、落下防護装置の設置は、映像システムでのデータ収録の障害となる。安全性とデータ収録を両立させながら、実験を実施する予定である。

本実験で得られた計測データは、当所にて一次解析を行い逐次報告する。さらに、2 年後には広く、国内外の研究者に活用していただくために当所内のデータ公開システム (ED-GRID、現在構築中) によって実験データを公開する予定である。

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、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 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の下に遂行している。ここに、深く感謝の意を表します。

7. 参考文献

- 1) Ogawa, N., Ohotani, K., and Katayama, T. : Construction of A 3-D Large Scale Shaking Table, PVP-Vol.402-2, Seismic Engineering-2000, Volume 2, pp199-209, ASME, 2000
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002