

# 振動台実験による PC 鋼材を用いた 橋脚天端の変位拘束の耐震補強効果

岩田 秀治<sup>1</sup> ・ 関 雅樹<sup>1</sup> ・ 阿知波 秀彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東海旅客鉄道㈱ 総合技術本部 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33)

<sup>2</sup>フェロー 博(工) 東海旅客鉄道㈱ 総合技術本部 技術開発部 ( 同 上 )

<sup>3</sup>正会員 修(工) 東海旅客鉄道㈱ 総合技術本部 技術開発部 ( 同 上 )

## 1. はじめに

兵庫県南部地震により鉄道橋梁の RC 橋脚にも大きな損傷が生じた。これら鉄道構造物の甚大な被災を鑑み、新しい耐震設計基準 (以下、耐震標準)<sup>1)</sup> が制定され、構造物は、その耐震標準に示されている L1, L2 地震動の想定地震動に対し、耐震性能を満足することとなった。同時にこれらの被災を教訓とし、長期不通防止、耐震性能および復旧性能の向上を図るため、耐震補強を実施している。橋梁の橋脚く体の耐震補強としては、脆性的なせん断破壊の防止を目的に、今まで RC 巻きや鋼板巻き補強を実施してきた<sup>2)</sup>。

従来の耐震補強の対象橋脚は、せん断破壊モードの RC 橋脚としていたが、曲げ破壊モードの RC 橋脚も加えて、合理的な補強工法の検討を行うなかで、地震時の応答変位を拘束させる耐震補強工法として、橋脚天端部を PC ケーブルで連結させる方法について、模型試験体により振動台実験を実施した。

以下、その振動台実験、その結果および補強効果について示す。

## 2. 補強工法の概要

### (1) 従来の補強工法

鉄道橋梁の橋脚補強は、図-1 に示すような RC 巻立て工法を基本としており、段落し部分を含めて、せん断破壊防止と変形性能の向上を要求性能としている。

また、河川や道路交差部の橋脚では、補強後の増分する橋脚断面を少なくするため、鋼板巻き補強を採用している。

### (2) PC 鋼材で橋脚を連結する補強工法

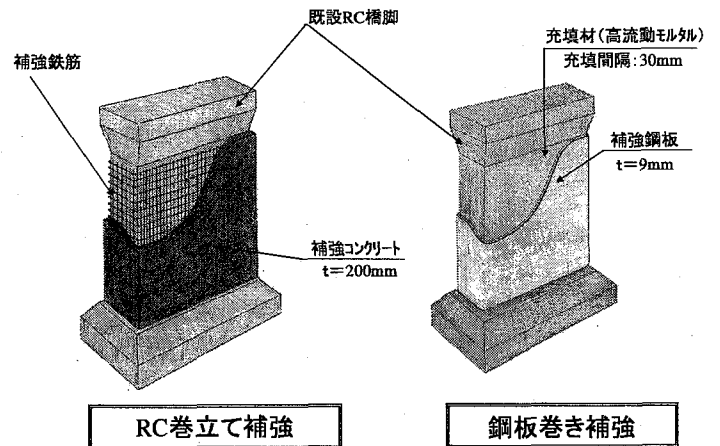


図-1 従来の橋脚補強工法

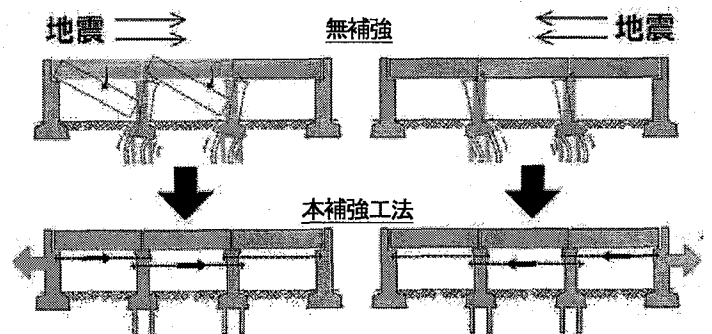


図-2 PC 鋼材で橋脚を連結する補強工法の概要

今回検討を実施した補強工法の概要を図-2 に示す。

本工法は、橋脚と橋脚または橋脚と橋台を補強 PC 鋼材で連結し、橋脚天端の応答変位量を抑制することにより、橋脚基部および主筋段落し部に作用する断面力を低減する補強工法である。

この補強工法は、従来の巻立て工法と比較し、簡易かつ経済的で、以下のような利点があげられる。

- 1) PC ケーブルを橋脚-橋台の天端に結合するシンプ

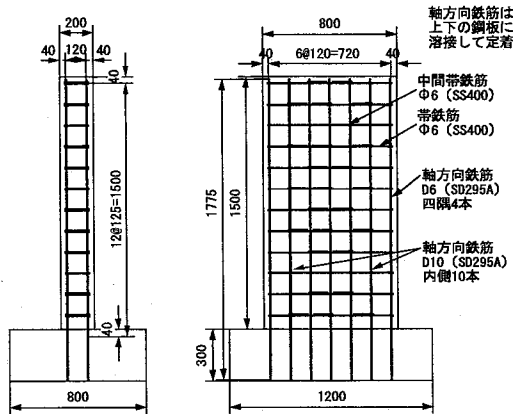
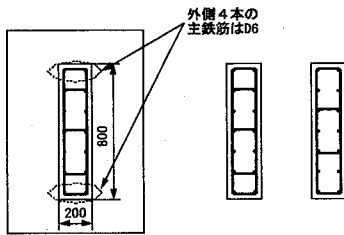


図-3 NO1 試験体（段落し無し）

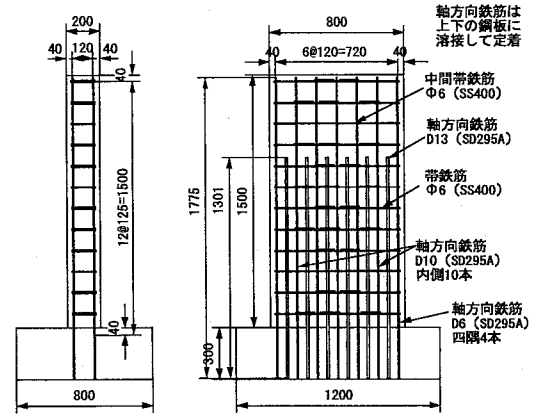
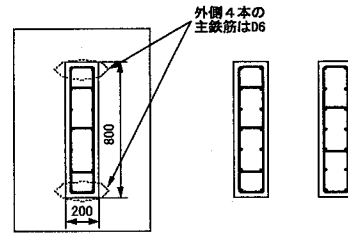


図-4 NO2 試験体（段落し有り）

No. 1との相違点  
 1. 追加主鉄筋として、D13を12本配置  
 2. 付加質量固定用全ネジM24の長さが150mm長い

るな構造で、耐震評価も比較的安易に可能である。

- 2) 大掛りな仮設足場が不要である。
- 3) 河川・道路交差部の橋脚においては、施工時期・桁下制限等の制約条件に支障なく施工可能である。
- 4) フーチングまでの掘削も不要である。そのため、仮土留め工（河川橋脚では締切り工）も省略となる。
- 5) 施工は、橋脚・橋台の天端に PC ケーブルの取付けと、簡易な吊り足場程度であるため、工費縮減と工期短縮が見込まれる。

### 3. 振動台実験

道路橋では、本補強工法を適用した施工実績は、数例あるものの、鉄道橋での適用は無く、また、非線形動的解析による耐震性能の検討も行われているが、動的実挙動に対して、実被災事例も無く、振動台実験のような動的作用に対する詳細な検証がなされていないため、今回、RC 橋脚の縮小模型を用いた振動台実験を実施し、その動的な補強効果を検証した<sup>3)</sup>。

#### (1) 振動台実験装置

本実験で用いた振動台実験装置の諸元は以下のとおりのものである。

- ・振動台寸法 : 4.0m×4.0m
- ・最大振幅 : 水平2方向±200mm
- ・入力最大加速度 : 水平方向±1.0G (10f 上載時)
- ・加振周波数 : 50Hz まで

#### (2) 試験体

試験体は、せん断破壊モードではない曲げ破壊モードの新幹線 RC 橋脚を対象に、橋脚断面に対する主筋量が少なく、降伏震度が小さい RC 壁式橋脚を抽出し、その橋脚を 1/9 縮小しモデル化した。

試験体の種類は 2 体で、形状寸法は同じとし、主筋の段落しの有無とした。

試験体の配筋は、NO1 試験体（段落し無し）を図-3、NO2 試験体（段落し有り）を図-4 に示す。試験体は 200mm×800mm の長方形断面で、高さは 1,500mm とし、試験体重量は 12.4kN である。主筋は D10 (SD295A) としたが、4 隅のみ D6 (SD295A) とし、補強対象橋脚に近似させた。帯鉄筋は φ6 (SS400 相当) を千鳥に配置した。また、NO2 試験体の段落し鉄筋は、D13 (SD295A) とした。

使用材料の性質は、コンクリート設計基準強度  $f_{ck}=21\text{N/mm}^2$  に対し、圧縮強度は  $19.8\text{N/mm}^2$  で、鉄筋の引張試験結果を表-1 に示す。

表-1 鉄筋引張試験結果

鉄筋の種類	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>	伸び %
D10	344.9	476.2	184.2	32.8
D13	343.3	505.1	185.0	28.8
D6	335.2	487.0	178.9	25.1
φ6	393.4	498.1	198.7	18.7

#### (3) 入力方法および入力地震動

水平1方向の加振として、それぞれ橋軸方向、橋軸直

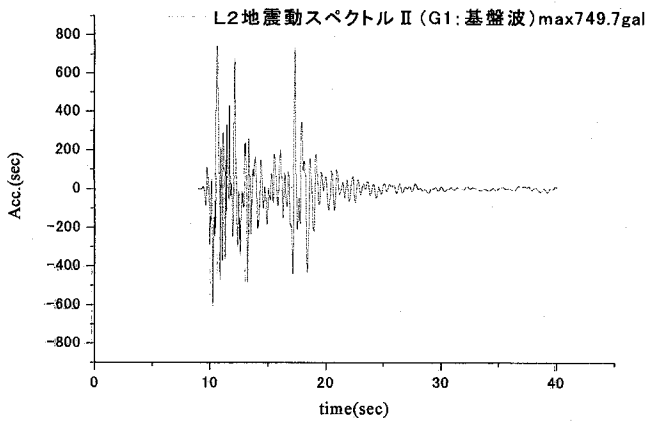


図-5 入力地震波形

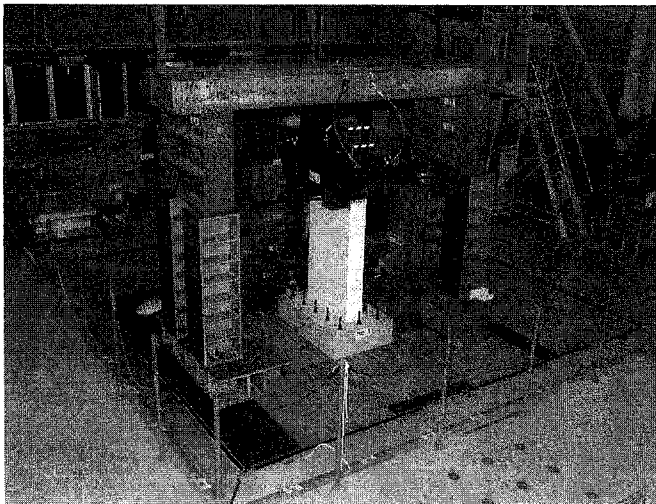


写真-1 試験体・載荷装置全景

角方向に入力した。

入力地震動は、図-5 に示す耐震標準<sup>1)</sup>の L2 地震動スペクトルⅡ基盤波 (G1) 最大加速度 749.7Gal を時間軸を調整 (1/3 圧縮) した波形を用いた。

#### (4) 載荷装置

振動台テーブルに上載する載荷装置の概要を図-6 に、その全景を写真-1 に、補強方法を図-7 に示す。

補強 PC ケーブルは、補強試験体での必要鋼材量を強度換算させ、丸鋼φ22 とした。また、この補強材の設置方法は、橋軸方向に平行に設置したケースと、クロス (22.5° : 30m スパン想定) したケースの 2 種類とした。

試験体の天端に設置する付加質量は、NO1 試験体が 20kN (死荷重相当)、NO2 試験体が 30kN (死荷重+付加死荷重相当) とした。

#### (5) 実験計測

振動台実験での試験体の計測項目を以下に示す。

- ① 応答加速度：6 箇所 振動台上 3 方向、試験体天端 3 方向
- ② 応答変位：4 箇所 試験体高さ方向 2 断面×2 箇所

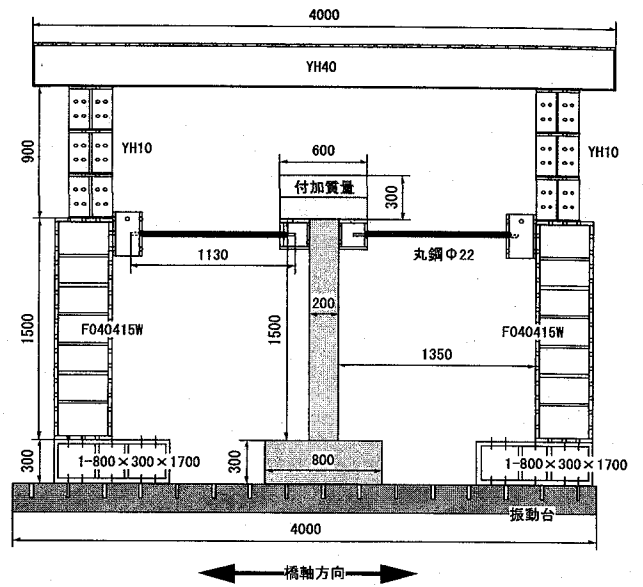


図-6 載荷装置の概要

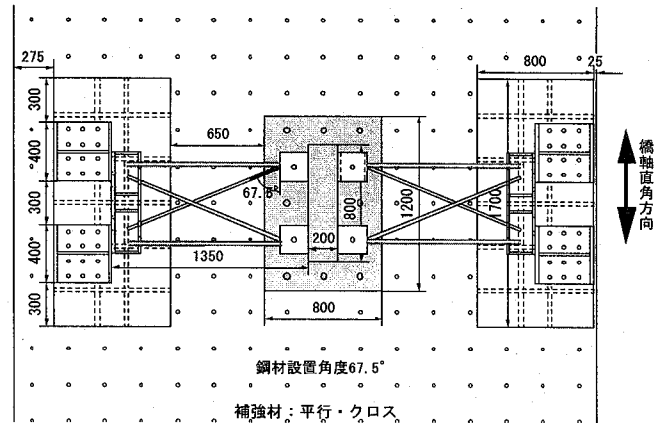


図-7 補強方法 (補強材の設置)

- ③ 試験体鉄筋ひずみ：16 箇所
- ④ 補強材ひずみ (丸鋼)：4 箇所
- ⑤ 損傷状況 (加振後)

## 4. 実験結果

### (1) NO1 試験体 (段落し無し) の実験結果

段落し無しの試験体において、橋軸方向に入力した場合の橋脚天端の荷重と変位の関係を、補強材を平行に設置したケースを図-8 に、クロスさせたケースを図-9 に、無補強ケース図-10 に示す。橋軸直角方向に入力した場合も同様に、図-11~図-13 に示す。

#### a) 橋軸方向入力の場合

橋軸方向入力では、計算上の降伏変位が 10.2mm であるので、補強材が平行ケースで最大応答変位 1.2mm、クロスケースで 8.8mm となり、双方とも弾性域内の挙動を示し、最大応答変位 27.5mm の無補強ケースと比較し、補強効果が確認できた。写真-2 にクロスケースの加振後の損傷状況を示す。

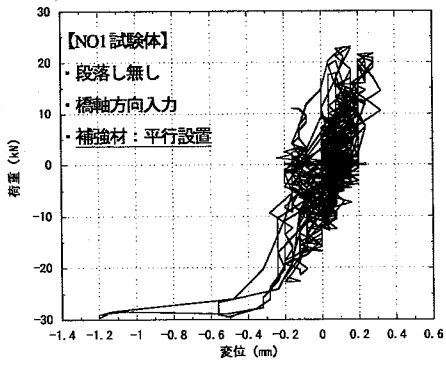


図-8 荷重-変位 (平行)

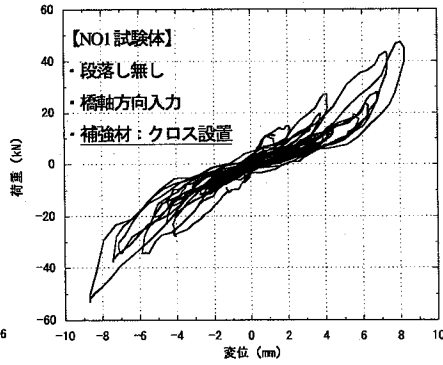


図-9 荷重-変位 (クロス)

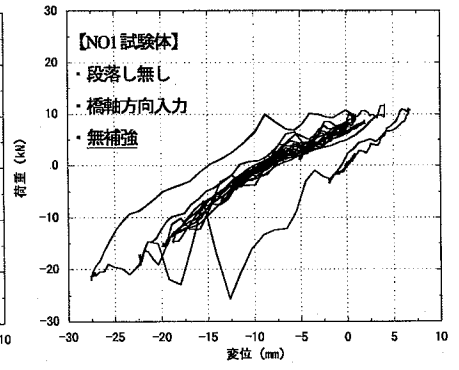


図-10 荷重-変位 (無補強)

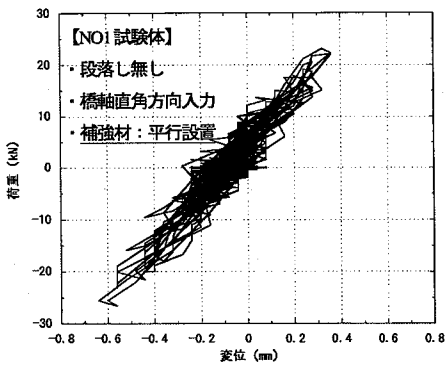


図-11 荷重-変位 (平行)

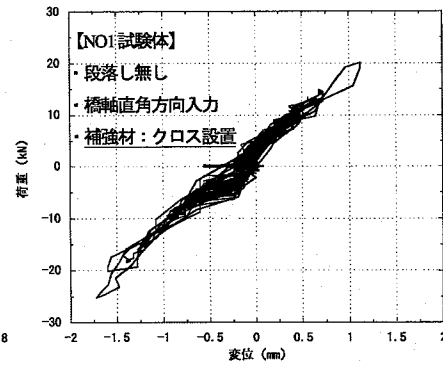


図-12 荷重-変位 (クロス)

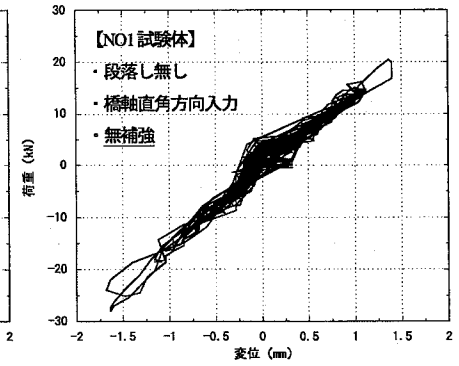


図-13 荷重-変位 (無補強)



写真-2 補強 (クロス) 加振後の損傷状況

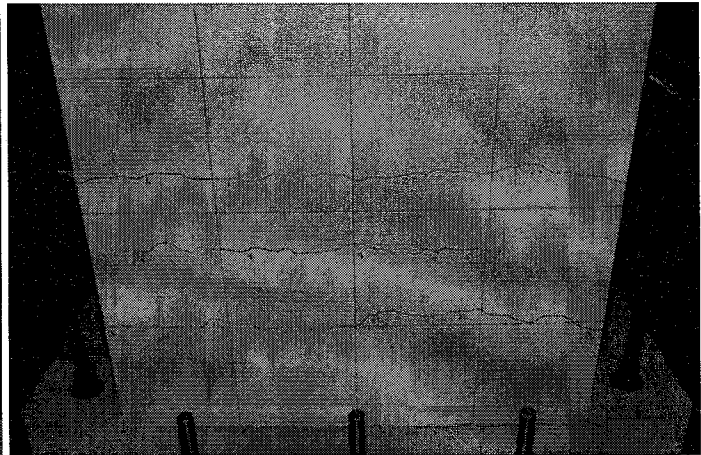


写真-3 無補強での加振後の損傷状況

また、平行設置のケースの方が、クロスケースと比べ補強材の長さが短いため、顕著に橋脚天端の変位を拘束した結果となった。

なお、無補強ケースの加振後の損傷状況は、写真-3に示すように、鉄筋は破断していないが、橋脚基部等に貫通していないもの大きな曲げクラックが発生した。

#### b) 橋軸直角方向入力の場合

橋軸直角方向では、補強材が平行ケースで最大応答変位 1.75mm、クロスケースで 0.65mm、無補強ケースで 1.73mm となり、補強材をクロス設置の方が平行ケースと比べ、橋軸直角方向にも補強効果が大きいことが確認できた。

また、橋軸直角方向の応答変位が大きいと、その変位により補強材に角度が生じ拘束力が発生するため、平行ケースでも補強効果が現れると推測するが、本実験ケースにおいては応答変位が小さかったため、平行ケースと無補強ケースでは補強効果が生じなかった。

なお、3 ケースとも弾性域内の挙動を示し、加振後の損傷として、クラックの発生は確認できなかった。

#### (2) NO2 試験体 (段落し有り) の実験結果

段落し有りの試験体において、橋軸方向に入力した場合の橋脚天端の荷重と変位の関係を、補強材を平行に設置したケースを図-14 に、クロスさせたケースを図-

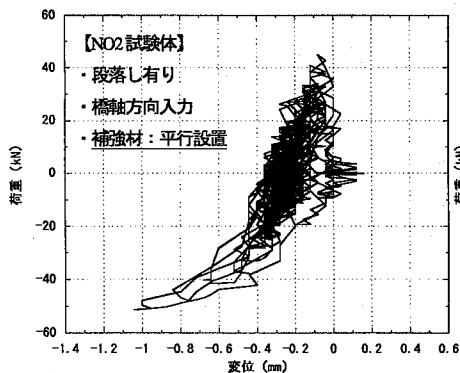


図-14 荷重-変位 (平行)

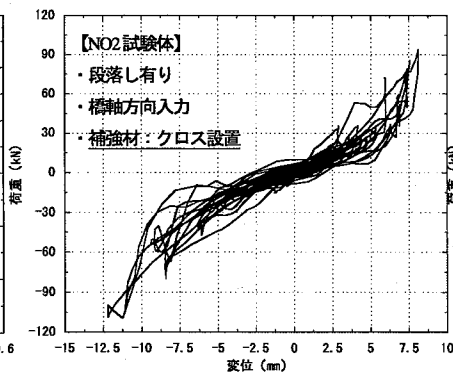


図-15 荷重-変位 (クロス)

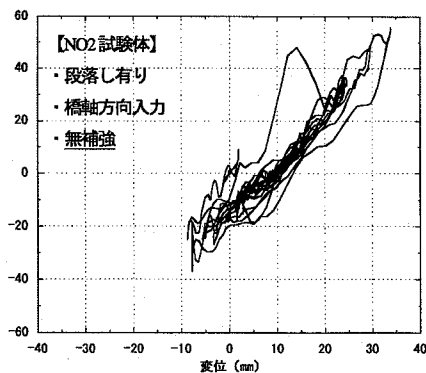


図-16 荷重-変位 (無補強)

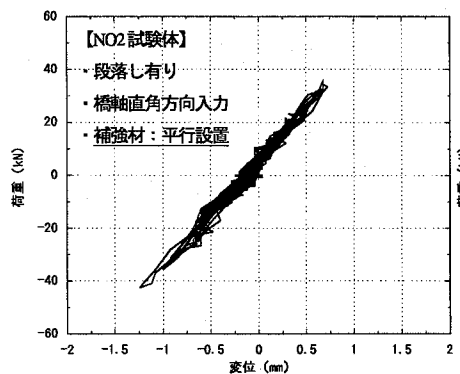


図-17 荷重-変位 (平行)

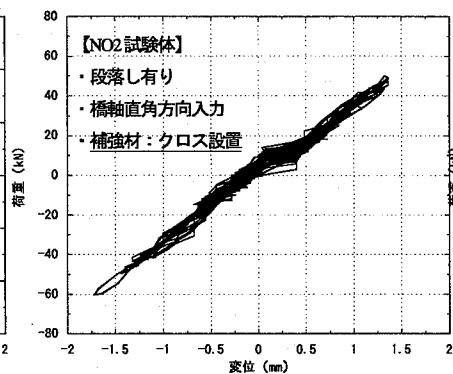


図-18 荷重-変位 (クロス)

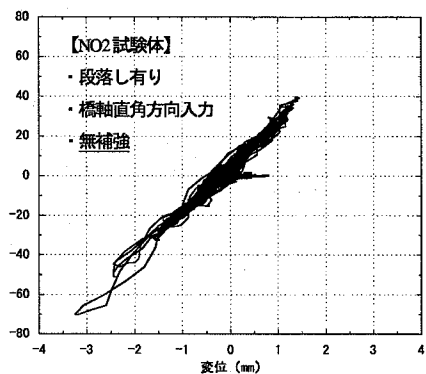


図-19 荷重-変位 (無補強)

15 に、無補強ケース図-16 に示す。橋軸直角方向に入力した場合も同様に、図-17~図-19 に示す。

#### a) 橋軸方向入力の場合

橋軸方向入力では、計算上の段落し部の降伏変位が 16.8mm であるので、補強材が平行ケースで最大応答変位 1.05mm、クロスケースで 12.2mm となり、段落し部分を中心に曲げクラックが発生しているが、橋脚基部には発生してなく、双方とも NO1 試験体と同様、弾性域内の挙動を示し、最大応答変位 33.5mm の無補強ケースと比較し、補強効果が確認できた。写真-4 にクロスケースの加振後の損傷状況を示す。

また、これも NO1 試験体と同様、平行設置のケースの方が、補強材の長さが短いため、顕著に橋脚天端の変位を拘束した結果となった。

なお、無補強ケースの加振後の損傷状況は、写真-5、写真-6 に示すように、段落とし部の大きな曲げクラックが貫通し、NO1 試験体と同様、鉄筋は破断していないものの、大きな損傷状態であった。

#### b) 橋軸直角方向入力の場合

橋軸直角方向では、補強材が平行ケースで最大応答変位 1.25mm、クロスケースで 1.72mm、無補強ケースで 3.25mm となり、本ケースでは橋軸直角方向でも補強効果が確認できた。

また、3 ケースとも弾性域内の挙動を示し、加振後の損傷として、NO1 試験体と同様、クラックの発生は確認できなかった。

## 5. まとめ

曲げ破壊モードの RC 橋脚も対象として、合理的な補強工法の提案を行うべく、地震時の応答変位を拘束させる耐震補強工法として、橋脚天端部を PC ケーブルで連結させる方法について、模型試験体を用いた振動台実験を実施した。その結果以下の知見が得られた。

- 1) 橋脚天端部を PC ケーブルで連結させる方法は、既存の巻立て補強と同様、L2 地震動に対する橋脚の耐震補強として有効な工法と考える。
- 2) 動的挙動の検証として、模型試験体による振動台実験の結果から、無補強では倒壊寸前の大きな損傷レベルであるのに対し、補強後は弾性範囲内の損傷に留まる補強効果の確認ができた。
- 3) 主筋の段落しが有る橋脚補強についても、本補強により橋脚天端を拘束することで、橋脚の応答変位を小さくし、損傷を抑えることが可能となる。
- 4) PC ケーブルをクロスに設置することで、橋軸直角方向でも、橋脚天端の変位が拘束され、補強効果が確認できた。しかし、その場合 PC ケーブルが長くなるため、橋軸方向の変位拘束効果に影響する。

本工法を用いることにより、橋脚の耐震補強の施工の合理化が計られると考えられ、今後の実施工に向けた検討としては、橋台への PC ケーブルの反力伝達部の更な

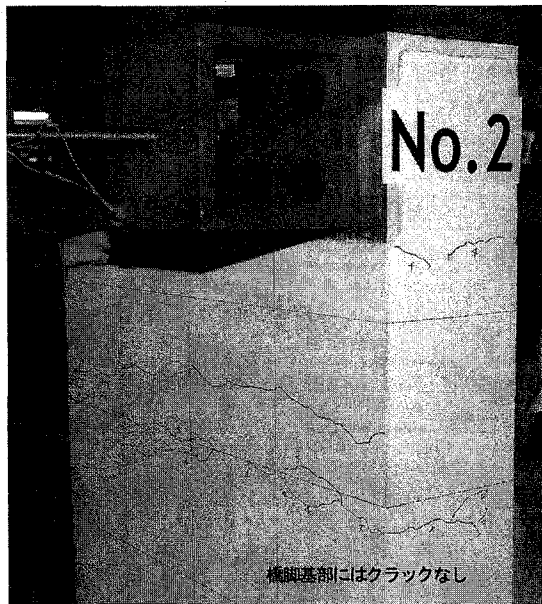


写真-4 補強(クロス)の損傷状況

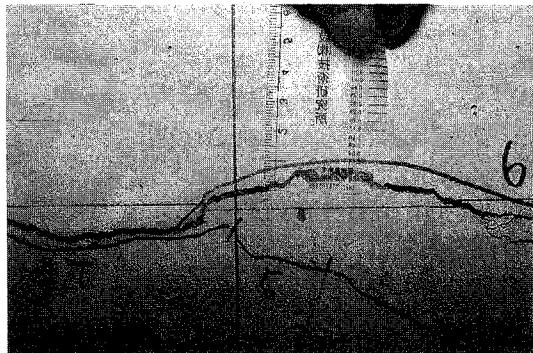


写真-6 クラック拡大(無補強)

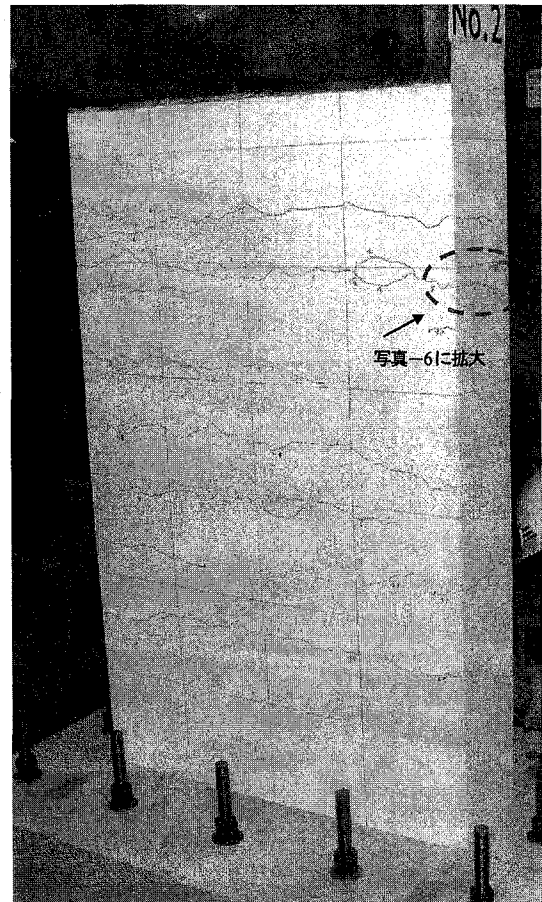


写真-5 無補強での加振後の損傷状況

る合理的な構造形式の開発や、適用範囲の拡大およびコスト削減等を図るものである。

また、想定東海地震のような L2 地震を上回る地震動に対する本補強工法の耐震性能の検証を行い、橋脚含む鉄道構造物の耐震補強の早期完了を目指したい。

謝辞：本稿をまとめるに当って、東京大学 生産研究所 小長井一男教授には貴重な御意見、御指導を賜り、解析評価では、(株)千代田コンサルタント 勝谷康之氏、高田竜氏に、振動台実験では、清水建設(株) 滝本和志氏を、

はじめとする多くの方々に御協力を賜ったこと、深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修 (財)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999.10.
- 2) (財)鉄道総合技術研究所編：既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 鋼板巻立て補強編，1999.7.
- 3) 成田久平，岡安功二：PC 鋼材で連結された既設橋脚の補強効果，土木学会第 57 回年次講演会，I-778，2002.9.