

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360210

研究課題名（和文） 耐震補強した鉄筋コンクリート橋脚の地震による損傷に関する研究
 研究課題名（英文） Damage to Reinforced Concrete Piers Due To Earthquake After
 Strengthening

研究代表者

睦好 宏史（MUTSUYOSHI HIROSHI）

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60134334

研究成果の概要（和文）：本研究は、コンクリート巻立て補強された既設鉄筋コンクリート（以下RC）橋脚が地震を受けた場合、構造物全体系の地震応答性状、損傷位置とその程度を明らかにするため、地盤-基礎-橋脚-上部工から成る構造物全体系に対してサブストラクチャ仮動的実験、応答解析を行った。その結果、曲げ耐力の向上を伴う耐震補強工法を橋脚に適用した場合、橋脚の損傷は抑制される一方、基礎に大きな損傷が生じることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on the seismic behavior of reinforced concrete (RC) bridge piers and foundations based on pseudo-dynamic (PSD) tests. It was found that the foundation suffers increased hysteretic response when pier strengthening is applied.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：耐震補強、RC橋脚、全体系地震応答、杭基礎

1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震以来、橋梁の耐震補強が精力的に行われてきた。鉄筋コンクリート（以下RC）道路橋橋脚の耐震補強には、鋼板巻立て工法とRC巻立て工法が広く使われている。鋼板巻立て工法では、橋脚基部において、フーチング上面と鋼板の間に5～10cmの間隙を空けて、曲げ耐力が増大しない構造となっているが、実際には、鋼板がフーチングに接していたり、矩形橋脚の場合には、鋼板基部はコンクリートで補強されている。しかし、補強後の耐力計算にはこれらの影響は一般に無視されている。また、RC巻立て工法においては、明らかに耐力が増大し、基礎の検討が必要である。このように、RC橋脚を上

記工法により耐震補強した場合には、多くの場合、橋脚躯体の曲げ・せん断耐力が増大し、大きな地震が起きた場合には損傷が橋脚躯体から杭などの基礎構造物に生じ、甚大な被害が生じることが危惧されている。しかしながら、補強したRC橋脚の基礎、地盤を含む全体系の地震応答性状および損傷部位とその程度などは解析あるいは実験的にほとんど明らかにされていない。場合によっては基礎の補強などが早急に必要となることが想定される。本研究は、補強されたRC橋脚が地震を受けた場合の応答性状を実験および解析的に明らかにするとともに、基礎にできるだけ損傷が生じない手法を提案し、検証することである。

2. 研究の目的

本研究は、以下のことを明らかにしようとするものである。

1) 耐震補強された実RC橋脚の全体系地震応答性状を実験的に求めるために、実験部材として、①現場に打設された実杭と②スケールダウンさせたRC橋脚部材を用いて、地震波を入力した仮動的実験を行い、損傷位置とその程度を実験的に明らかにする。

2) 橋梁—補強された橋脚—基礎（フーチング・地盤・杭）からなる構造系全体の地震応答解析手法を開発し、1)の全体系仮動的実験結果と解析結果を検討し、解析手法の精度の向上を図る。

3) 基礎に損傷が生じる場合について、損傷を軽減あるいは生じさせない手法を提案して、上記実験および解析によりその効果を検証する。

4) これまでに耐震補強された実橋梁について、全体系地震応答解析を行い、損傷位置とその程度を明らかにし、基礎を補強する必要性の是非および補強による効果と影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) サブストラクチャ仮動的実験

本研究で対象とした構造物は、図-1に示すような単柱式RC橋脚、杭基礎を有する道路橋である。この構造物全体系を3自由度系、すなわち、橋脚の水平運動、基礎の水平運動（スウェイ）および回転運動（ロッキング）が生じると仮定して、モデル化を行っている。なお、モデル化を行うにあたり、各自由度に対する力学特性をバネとダッシュポットで表現することとした。

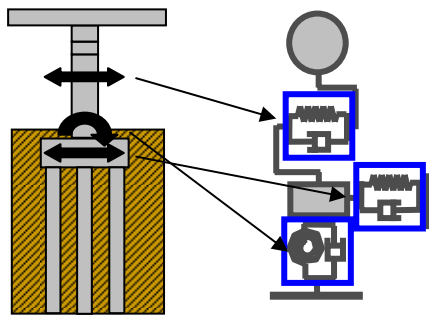


図-1 対象構造物のモデル化

図-2にサブストラクチャ仮動的実験システムの概要を示す。本研究では、各バネの復元力を得るため、橋脚のバネに対してはバイリニア型の復元力モデルを仮定し、基礎のスウェイバネ、ロッキングバネに対しては载荷実験から復元力を検出し、コンピュータの応答計算にフィードバックしている。運動方程式を解くための数値積分法は、RC構造物のように剛性劣化をする部材において無条件安定なオペレータ・スプリットティング (OS) 法

を用いた。入力地震波は、神戸海洋気象台で観測された兵庫県南部地震の地表面波NS成分の8秒間を、相似則等により調整したものをを用いた。この入力地震波の積分時間刻みは0.01sec、最大加速度は11.82m/s²である。

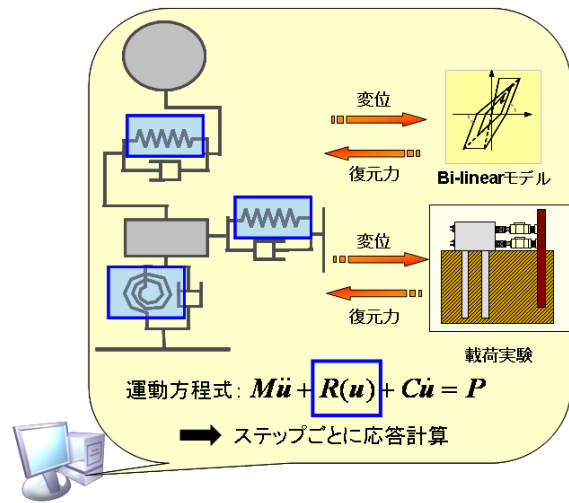


図-2 サブストラクチャ仮動的実験システム

実験対象とした橋梁は2種類である。すなわち、既設RC橋脚をRC巻き立て補強し、基礎が無補強のものをA橋、A橋の基礎を耐震補強したものをB橋とした(図-3)。基礎の補強には、軟弱地盤に建設された杭基礎に対する既往の耐震補強工法を参考にした。この工法では、フーチング近傍を鋼矢板で取り囲み、鋼矢板内部の地盤を固化改良し、さらに既設フーチングと鋼矢板をコンクリートによる増しフーチングを介して一体化することにより、補強構造物としたものである。

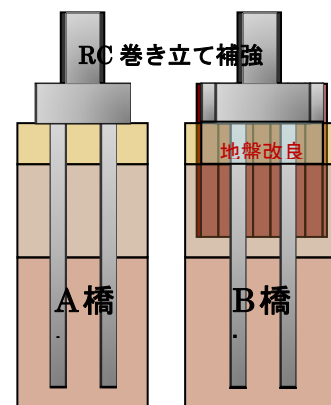


図-3 実験対象とした橋梁

A橋、B橋の両橋脚は、旧設計基準（許容応力度設計法で、震度が0.25）で設計された

既設RC橋脚に RC巻き立て補強を施したものと仮定した。補強を施す前のRC橋脚の曲げ降伏水平耐力は、既往の資料等を参考にして、 $0.6W_1$ (W_1 : 上部工の重量)と仮定した。一方、RC巻き立て補強を施したRC橋脚の曲げ降伏水平耐力は同様に既往の資料等を参考にして、 $1.2W_1$ の耐力を有するものと仮定した。両橋脚の復元力特性は、先述したようにバイリニアモデルによって表すものとした。

(2) 全体系地震応答解析

図-1 の構造物を動的解析により検討するために図-4 に示すような橋脚バネ、地盤バネ、2 次元梁要素から成る 2 質点系の骨組みモデルでモデル化した。ここでは、右側に慣性力が作用した場合に圧縮側となる杭を前列とし、引張側となる杭を後列とする。

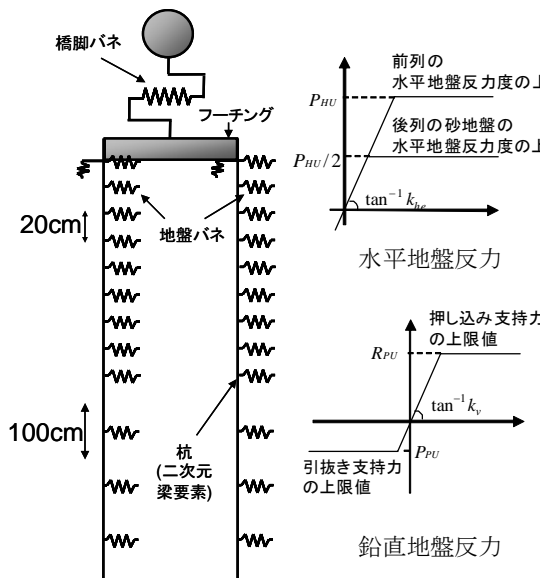


図-4 解析モデル

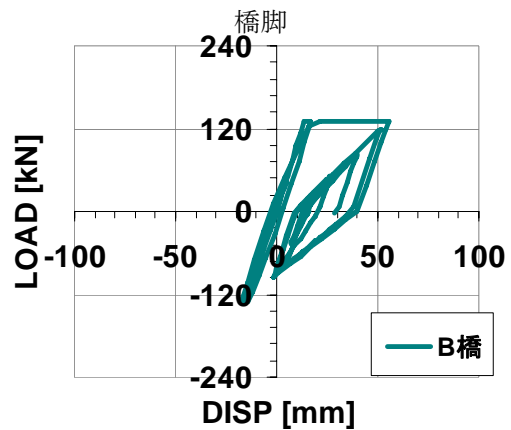
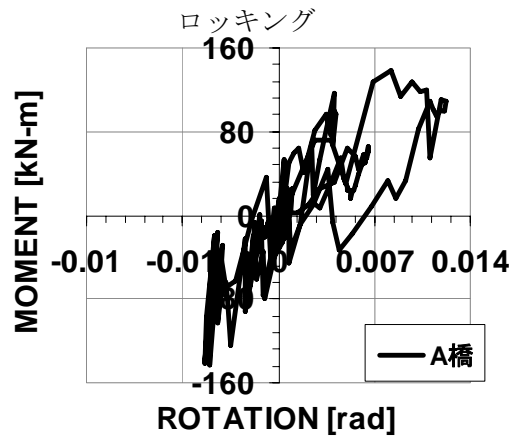
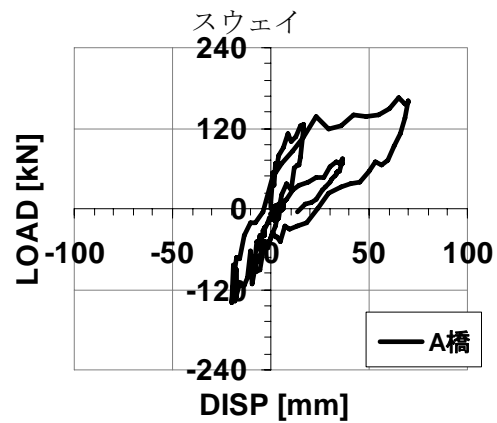
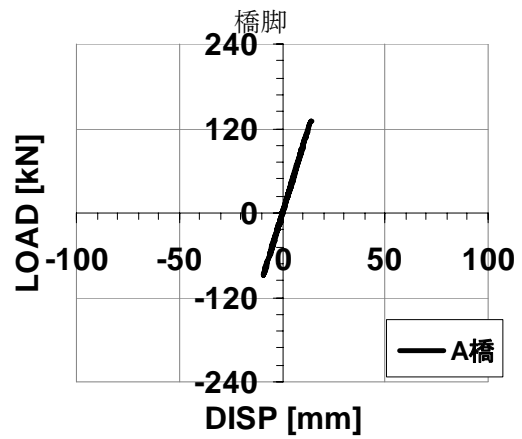
橋脚は終始曲げ挙動のみを示すと仮定し、バネでモデル化した。橋脚バネの復元力特性は、最大点指向バイリニアモデルで仮定している。杭側面の地盤の影響は水平方向地盤バネを杭側面に取り付けることで考慮し、周面摩擦の影響や杭先端の地盤の影響は、杭頭に取り付けた鉛直方向地盤バネで考慮した。減衰の効果は、初期剛性に比例するレイリー減衰を用いてモデル化し、減衰定数は5%とした。

4. 研究成果

(1) サブストラクチャ仮動的実験結果

① 荷重-変位関係

A 橋 (橋脚: 補強、基礎: 無補強) と B 橋 (橋脚、基礎: 補強) を対象としてサブストラクチャ仮動的実験を行い、構造物全体系の地震応答を求めた。実験から得られた結果を以下に示す。ここでは、橋脚のバネ、基礎のスウェイバネ、ロックンバネの荷重-変位



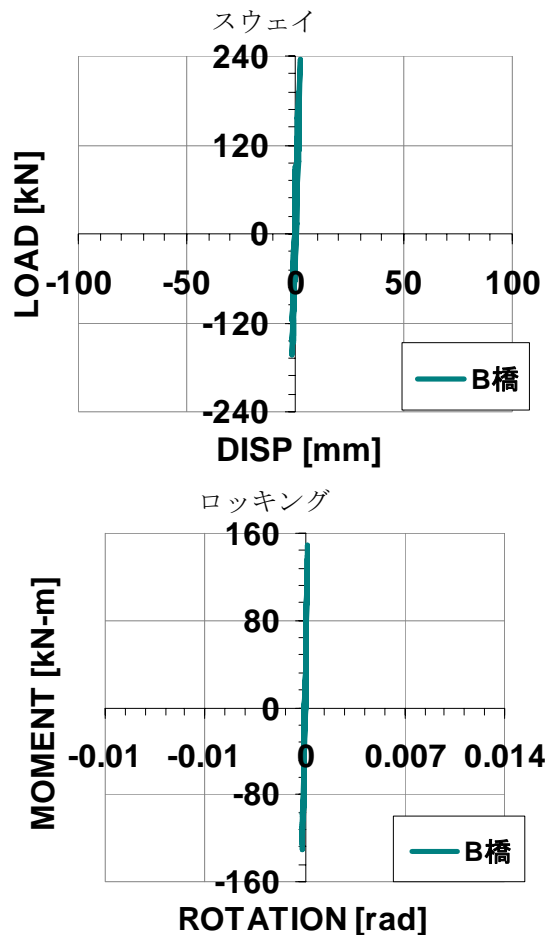


図-5 各バネの荷重 - 変位関係

関係を用いて、A橋とB橋を比較した(図-5)。A橋における各バネの荷重 - 変位関係をみると、橋脚バネでは線形領域内の応答となっており、損傷は生じていない。これは、橋脚をRC巻き立て補強したことにより、橋脚の曲げ耐力が向上したためである。一方、A橋のスウェイバネは終局には至らなかったものの、最大応答変位が仮動的実験終了後の正負交番載荷から得られた終局変位の72%であり、非常に大きな応答を示した。また、剛性低下や大きな履歴を描いていることから、基礎のスウェイバネに大きな塑性変形、すなわち、大きな損傷が生じているといえる。これは、RC巻き立て補強により橋脚の曲げ耐力が向上し、基礎に伝達される地震力が大きくなったためである。道路橋示方書では、橋脚に対して基礎の設計上の保有耐力を1.1倍以上にすることが原則とされている。一方、仮動的実験終了後の正負交番載荷から得られたスウェイバネの終局耐力は166kNであり、事前に設定した橋脚の終局耐力131kNの約1.27倍であった。単純比較することは難しいが、道路橋示方書で示されている耐力比を上回る耐力を基礎が有しているにも関わらず、スウェイバネの応答は非常に大きなものと

なっている。

A橋のロッキングバネに関しては、多少剛性低下する部分もあり、スウェイバネ同様の傾向はみられるものの、大きな塑性変形は確認できなかった。一方、基礎を耐震補強したB橋をみると、基礎のスウェイ、ロッキングでは、両者ともほぼ線形応答を示しており、損傷は生じていない。これらのことから、基礎の補強効果がみてとれる。しかし、橋脚は塑性域に入っており、最大応答塑性率は4.04であった。これは、基礎を補強したことで、基礎の剛性および耐力が向上し、橋脚に伝達される地震力が大きくなったためである。

②曲げモーメント - 曲率関係

各杭の軸方向PC鋼材に貼り付けたひずみゲージから深さ方向曲率分布を求めた。A橋、B橋それぞれの杭において、応答曲率が最大となったときの曲率分布を図-6に示す。

A橋では右の杭において、深さがGL-2.4m

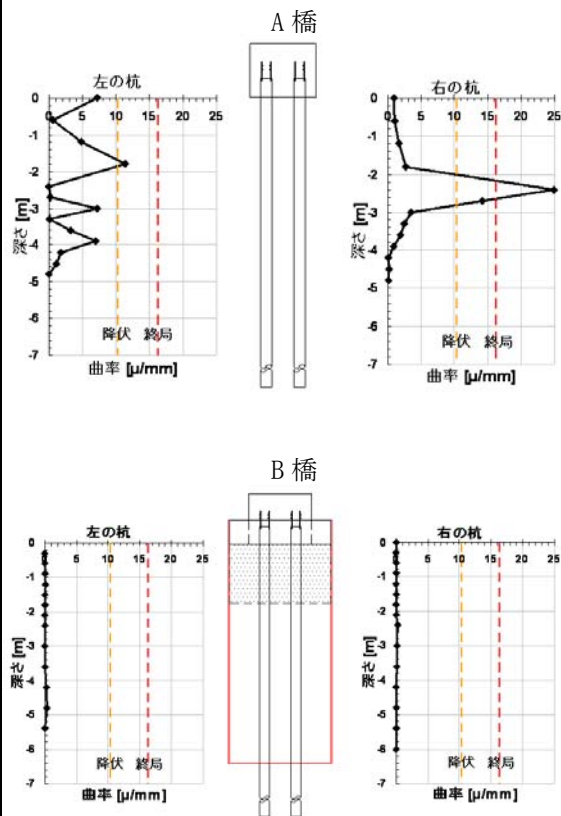


図-6 各杭の深さ方向曲率分布

で、最大応答曲率が降伏曲率の2.4倍(以下、曲率塑性率)であった。これは、事前に行った曲げ載荷試験から得られた終局曲率を超えており、杭体に大きな損傷が生じていることが確認できる。左の杭においては、深さGL-1.8mで、曲率塑性率が1.1であり、終局曲率には達していないものの、大きな応答値

を示した。一方、B橋では左の杭において、深さGL-4.8mで、曲率塑性率0.03を示し、右の杭において深さGL-2.4mで、曲率塑性率0.02を示した。両杭ともに、曲率塑性率が0に近いことから、杭体に損傷は生じていないといえる。これは、地盤改良による杭の拘束効果および鋼矢板により基礎全体の水平抵抗、摩擦抵抗が増加したことに起因する。

(2) 解析的検討

図-7に杭基礎と橋脚の水平耐力比と橋脚・基礎の塑性率の関係を示す。橋脚と基礎の耐力比が小さくなるに従い、杭基礎の塑性率が大きくなる傾向が見られた。本研究で対象とした橋梁の場合、特に基礎の水平変位が大きくなっており、耐力比が1.5以下になると基礎が降伏している。それに伴い、橋脚の塑性応答が減少し、橋脚の塑性率が1.0を下回ると基礎の塑性率は横ばいの傾向を示している。これは構造物を地盤を含めた全体系で考えた場合に、どこか一箇所の耐力を向上させると、それに伴って他の部位に損傷が移動するという現象を現している。橋脚に耐震補強を施すことによって、このように構造物のどこか一部に損傷が集中しないように、全体系でのエネルギー吸収、応力分担を把握し、意図的に補修・補強が簡単な橋脚基部に損傷を誘発させることが重要であるといえる。

道路橋示方書では橋脚に対して基礎の設計上の保有耐力を1.1倍以上にすることが明記されている。しかし、今回のケースでは杭基礎の降伏を抑制するためには、1.5以上とする必要がある。また、履歴減衰のみを考えた場合、橋脚で全ての地震エネルギーを吸収するためには橋脚の塑性率が6.7以上必要であることが明らかとなった。

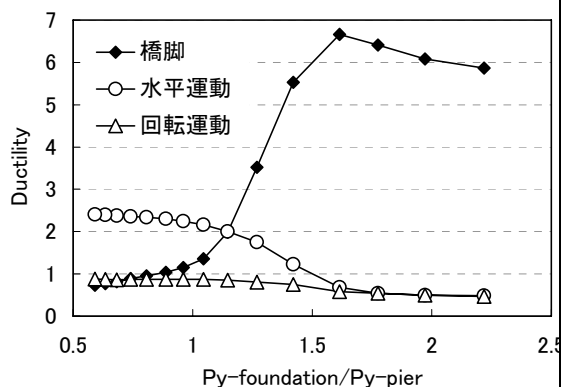


図-7 杭基礎と橋脚の水平耐力比と各塑性率の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

①大野拓也、竹本雄一郎、睦好宏史、牧剛史：耐震補強されたRC橋脚と杭基礎の連成系地震応答性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.2、2012

②Anawat Chotesuwan, Hiroshi Mutsuyoshi and Takeshi Maki：Seismic behavior of bridges with pier and foundation strengthening: PsD tests and analytical study, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 41, Issue 2, pp.279-294, 2011

③竹本雄一郎、阿部正和、睦好宏史：耐震補強されたRC橋脚における杭基礎の地震応答性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.2、pp.847-852、2011.

④小山純一郎、睦好宏史、牧剛史、阿部正和：耐震補強したRC橋脚の構造物全体系の地震応答性状に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.2、pp.1069-1074、2010

⑤ Anawat Chotetsuwan, Hiroshi Mutsuyoshi, Takeshi Maki and Junichiro Koyama：Seismic Behavior of Bridge Pier and Foundation After Strengthening, Proc. of JCI, Vol.32, No.2, pp.841-846, 2010

⑥阿部正和、Anawat CHOTESUWAN、睦好宏史、牧剛史：耐震補強したRC橋脚全体系の地震応答性状に関する研究、第13回日本地震工学シンポジウム、pp.1345-1350、2010

⑦ Anawat Chotetsuwan, Hiroshi Mutsuyoshi, Yusuke Suzuki and Takeshi Maki：Influence of Strengthening of Brige Piers on Seismic Behavior of Foundation, Proc. of JCI, Vol.31, No.2, pp.877-882, 2009

[学会発表] (計2件)

①阿部正和、竹本雄一郎、睦好宏史、牧剛史：耐震補強されたRC橋脚の全体系地震応答解析性状に関する研究、土木学会第65回年次学術講演概要集、pp.1221-1222、2010年9月2日、北海道大学札幌キャンパス

②竹本雄一郎、睦好宏史、牧剛史、阿部正和：RC橋脚が耐震補強された場合の基礎構造物を含めた全体系の地震応答性状に関する研究、土木学会第65回年次学術講演概要集、pp.1223-1224、2010年9月2日、北海道大学札幌キャンパス

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

睦好 宏史 (MUTSUYOSHI HIROSHI)
埼玉大学・理工学研究科・教授
研究者番号：60134334

(2) 研究分担者

牧 剛史 (MAKI TAKESHI)
埼玉大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：60292645
齊藤 正人 (SAITO MASATO)
埼玉大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：40334156

(3) 連携研究者

なし