

論文 耐震補強された RC 橋脚における杭基礎の地震応答性状

竹本 雄一郎*¹・阿部 正和*²・睦好 宏史*³

要旨：既設 RC 橋脚に曲げ耐力の向上を伴う RC 巻き立て補強を施し、地震動を受けた場合、杭に大きな損傷が生じる事が確かめられている。本研究では、杭基礎と橋脚の耐力比を変化させたパラメトリック解析を行い、どのような耐力比の場合に杭に損傷が生じるかを明らかにした。その結果、地震時に基礎の降伏を抑え、橋脚を曲げ降伏型の破壊に至らしめるためには、橋脚と基礎の耐力比を 1.5 以上とする必要があることが明らかとなった。また、杭の損傷を詳細に検証するために、杭頭の地震時の損傷を再現する実験を行った結果、杭はフーチングとの境界面で局所的に破壊が生じていることが明らかとなった。

キーワード：橋脚と杭基礎の動的相互作用、構造物全体系、耐震補強、地震被害

1. はじめに

兵庫県南部地震（1995）での被災経験を踏まえ、数多くの RC 橋脚の耐震補強が進められてきている。耐震補強工法としては、靱性を向上させることにより、構造物の粘り強さで地震力に抵抗する曲げ耐力制御式工法が推奨されている。しかし、実際には旧設計基準で設計された RC 橋脚では曲げ耐力が不足し、靱性の向上のみでは大地震に抵抗できないこと、また、経済的に有利だという理由から、曲げおよびせん断耐力の双方を向上させることによって、耐震性能の向上を図る RC 巻き立て補強工法が多く採用されている。

また、一般に橋梁の耐震補強設計は地上構造物（橋脚 - 上部構造）と地下構造物（地盤 - 基礎）を切り離して行われているが、実際の地震時には、両者が互いに影響を及ぼし合う。そのため、橋脚の耐震補強が基礎などの部位に影響を及ぼす可能性が十分あると考えるのが自然であり、その影響を詳細に検証する必要があると考えられる。

そこで構造物全体系の地震応答性状を求めるために、昨年度は地盤 - 基礎 - 橋脚 - 上部工から成る構造物全体系を対象として、実杭、実地盤を用いたサブストラクチャ仮動的実験を行った¹⁾。この方法は対象とする構造物のうち複雑な復元力特性を示す杭基礎を取り出し、実際に載荷試験を行うことでその復元力を求め、地震応答解析を進める方法である。

RC 橋脚の曲げ降伏水平耐力は、RC 巻き立て補強により 0.6W₁（W₁：上部工の重量）から 1.2W₁ に向上したと仮定したその結果、強地震動下において、耐震補強された橋脚の損傷は抑制されるが、杭に大きな損傷が生じることが明らかとなった。

2. 補強した RC 橋脚全体系の地震応答解析

2.1 概要

杭基礎を実験部材とした仮動的実験から、曲げ耐力の向上を伴う RC 巻き立て補強を施すことにより、地盤-基礎系に損傷が移行することが確かめられている。静的な釣合い状態を考えたとき、橋脚から基礎へ伝達される水平力は橋脚の保有耐力以上になり得ないはずであるが、既往の研究²⁾でも明らかにされているように、動的な系においては、地盤-建物間、基礎構造物-上部構造物間の相互作用が存在し、それが影響して基礎へ損傷が移行したと考えられる。そのため、橋脚の耐震補強がどの程度であれば、基礎に重大な損傷が生じないかをより詳細に検討していく必要がある。そこで、昨年度の仮動的実験の結果を基に杭の損傷量をさらに詳細に検討するとともに、杭基礎と橋脚の耐力比に着眼し、これが変化した場合に、杭基礎の塑性応答がどのように変化し得るかを解析的に検討した。

2.2 対象構造物と入力地震波

対象とした橋梁は仮動的実験で対象とした橋梁とし、杭基礎を有する既設 RC 橋脚を RC 巻き立て補強した橋梁とした。仮動的実験では実際に載荷試験を行う必要があるが、実験器具の制限等の理由から実験可能な範囲内で限りなく実規模スケールに近づけた杭基礎を用いている（図-1）。この杭基礎を有し、橋脚の高さが 0.94m の橋梁を対象とした。これは軟弱地盤上に建設された実規模橋梁（図-2）の固有周期を参考にして設計しており、橋脚、スウェイ（フーチング重心位置の水平運動）、ロッキング（フーチング重心位置の回転運動）の固有周期の比が同一になるようにしている。すなわち、実規模構造物と振動モードが同一になるように縮小している。

杭基礎は、実地盤に杭長 13m の試験杭 2 本を 0.9m 間

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 博士前期課程（正会員）

*2 埼玉大学大学院 理工学研究科 博士前期課程（正会員）

*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門教授 工学博士（正会員）

隔で打設し、高さ 1.45m のフーチングに杭を 0.5m 埋め込むことにより作製したものである。ここに、フーチングの断面は 1.8m×0.9m である。試験杭は杭径 30cm の円形断面を有する PHC 杭 (A 種) であり、材料試験から得られたコンクリートの圧縮強度は 79MPa、軸方向 PC 鋼棒の降伏強度は 1462MPa であった。

入力した地震波は、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 4 秒間を、縮小した構造物の寸法に合わせて相似則等により調整したものをを用いた (図-3)。この入力地震波の積分時間刻みは 0.01sec、最大加速度は 1182gal である。

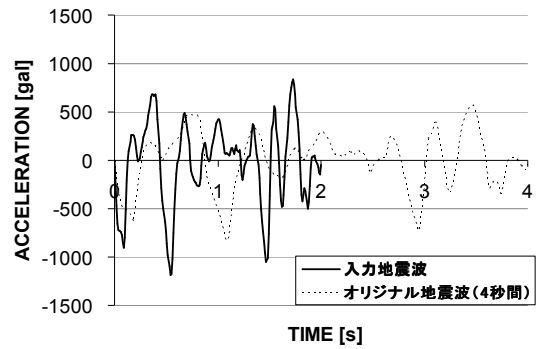


図-3 入力地震波

2.3 解析モデル

(1) モデル化の基本方針

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。

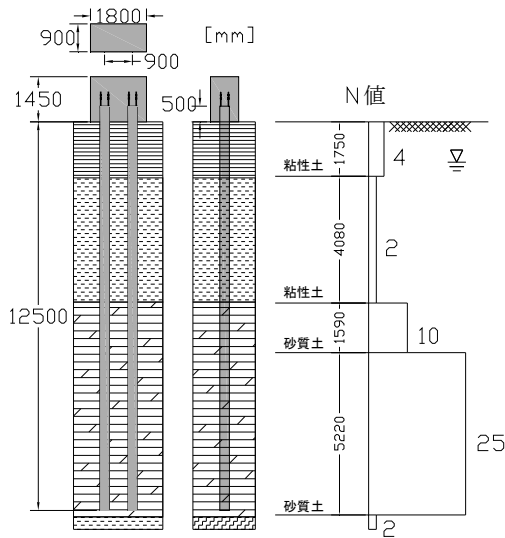


図-1 対象とした杭基礎

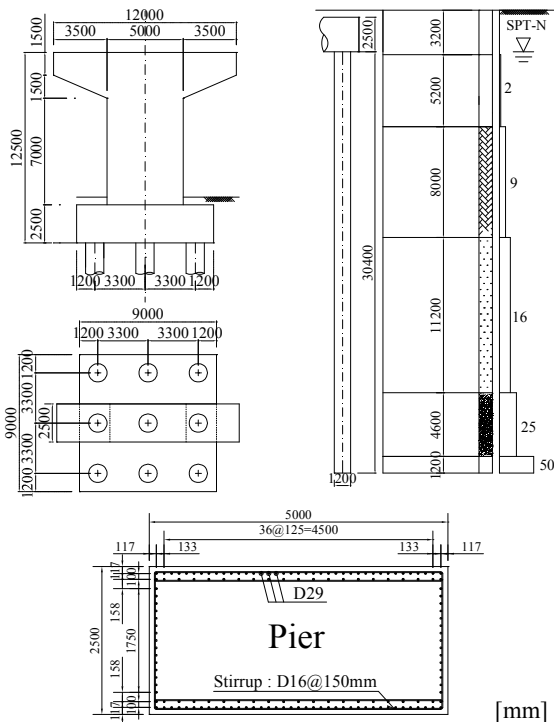


図-2 参考にした実規模橋梁

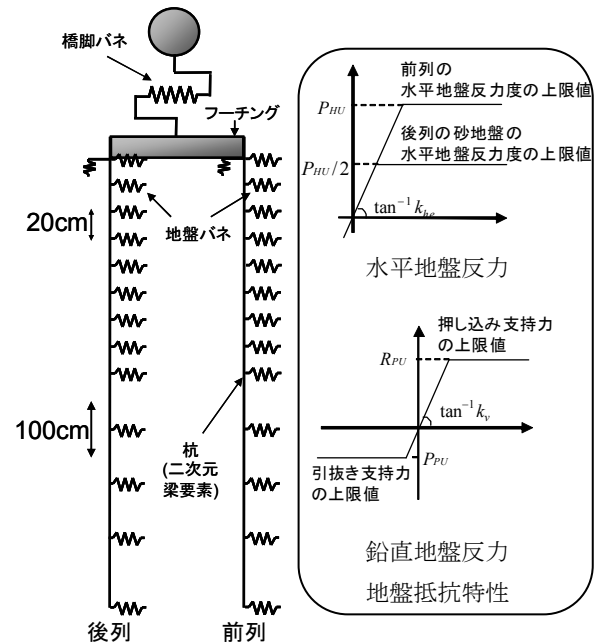


図-4 解析モデル

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する。杭体の梁要素は杭先端～7.6m は 1.0m ごとに、7.6m～杭頭は 0.2m ごとに節点を設け要素分割し、それぞれの節点に地盤バネを取り付けた。地盤バネは、地盤反力

係数を用いて決定される。ここでは、道路橋示方書・同解説 下部構造編³⁾を参考に決定した。また、群杭による影響は、砂質地盤における後列の杭の水平地盤反力度の上限値 P_{HU} を、1/2 とすることで考慮した。すなわち砂質地盤の場合、前列と後列に位置する杭の水平方向バネでは、杭と地盤間の相対変位が圧縮となる場合は P_{HU} を水平地盤反力度の上限値とし、引張となる場合は P_{HU} の1/2 を上限値とした。

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。

(2) 杭試験体の正負交番試験

杭体の2次元梁要素は対象とした構造物と同一の断面諸元を持つPHC杭に対して正負交番試験を行い、モデル化している。供試体は杭長が2.0mのPHC杭(A種)をフーチングに埋め込むことで作製している。荷重方法についてはせん断スパンを1mとし、制御変位の振幅を3mm間隔で変化させ、各振幅3サイクルの繰返し荷重とした。このとき、杭試験体に対して行ったFEM解析から軸力の影響は小さいと考えられるため、本研究では考慮していない。正負交番試験の概略を図-5、図-6に示す。

PHC杭は24mm(1サイクル目)でPC鋼棒が破断し、終局に至った。この結果から、杭体のモーメント-曲率関係を原点指向型のトリリニアモデルで仮定した。正負交番試験から得られたモーメント-曲率関係を図-7に、トリリニアモデルの設定値を表-1に示す。

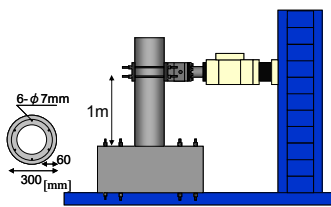


図-5 セットアップ図

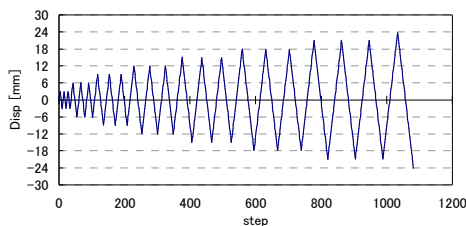


図-6 入力変位

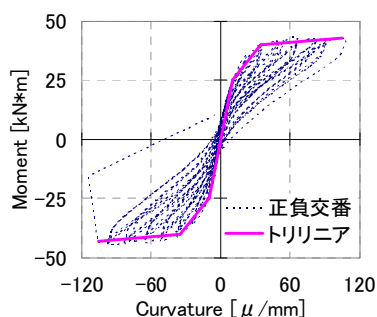


図-7 モーメント-曲率関係

表-1 トリリニアモデルの設定値

	曲率 [μ /mm]	モーメント [kN*m]
ひび割れ	10	25
降伏	35	40
終局	105	43

2.4 地盤-基礎系の降伏耐力

杭基礎と橋脚の耐力比に着目して杭基礎の損傷量を検討するために、杭基礎の降伏耐力を求める必要がある。そこで地盤-基礎系のモデルに対して、変位制御による非線形静的解析を行った。フーチング重心位置に構造物の重量を初期荷重として作用させた状態で、水平変位、回転変位を入力することで、スウェイの降伏点および終局点、ロッキングの降伏点を求めた。なお、道路橋示方書ではすべての杭列において杭が降伏するとき、もしくは杭先端に作用する軸力が押し込み支持力の上限値に達するときを杭基礎としての降伏と定義されており、本研究でも同様に定義した。また、終局点を何れかの列の杭体が終局に達したときとした。ここで、杭体の降伏、終局とは杭の材料特性で用いたトリリニアモデルにおいて、降伏点および終局点に達した時の状態とした。杭基礎の降伏点・終局点を表-2に示す。

表-2 杭基礎の降伏点・終局点

	スウェイ		ロッキング	
	変位 [mm]	荷重 [kN]	回転角 [rad]	モーメント [kN*m]
降伏	37	116.56	0.006	475.52
終局	76	126.81		

2.5 解析パラメータ

解析パラメータは橋脚と基礎の水平耐力比とし、仮想的実験と同じ耐力比(0.89, A橋)を含めた15ケースで解析を行った。ここでは、既往の資料⁴⁾からRC巻立て補強により橋脚の降伏変位を一定として橋脚の降伏荷重が向上すると仮定して、杭基礎と橋脚の降伏耐力比を変化させている。なお、橋脚の剛性が変化することによる基礎への影響は小さいことを同様の解析から確認している。表-3に解析ケースを示す。

表-3 解析パラメータ

Case	Pfound./Ppier	Case	Pfound./Ppier
1	2.22	9	0.96
2	1.97	10 (A橋)	0.89
3	1.78	11	0.81
4	1.61	12	0.74
5	1.42	13	0.68
6	1.27	14	0.63
7 (B橋)	1.15	15	0.59
8	1.04		

2.6 解析結果

(1) 荷重-変位関係

図-8 に A 橋（水平耐力比=0.89）の橋脚バネ、スウェイ、ロッキングにおける荷重変位関係を仮動的実験の結果とともに示す。このとき、橋脚バネの変位は橋脚天端位置の変位を示し、スウェイ、ロッキングはフーチング重心位置の水平変位および回転変位を示している。この結果をみると、仮動的実験結果と解析結果が概ね良好に一致しており、現実の挙動との整合性がある程度有しているものと考えられる。また、橋脚は RC 巻立て補強により曲げ耐力が向上し、損傷が生じていないが、スウェイが大きくなり、終局変位にまで達している。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。

図-9 に橋脚と基礎の塑性率が同程度のケース（B 橋、水平耐力比=1.15）の各荷重-変位関係を示す。橋脚が降伏し、杭基礎も終局付近まで塑性変形しており、橋脚・基礎ともに損傷が生じている。また、A 橋と比較すると、水平耐力比が大きくなったことで、基礎の変形が小さくなるが、その分橋脚に損傷が移行していることがわかる。

(2) 杭基礎と橋脚の水平耐力比が杭基礎に及ぼす影響

図-10 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。前述しているように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、それに応じて他の部位に損傷が集中してしまうという現象を表している。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す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わかる。

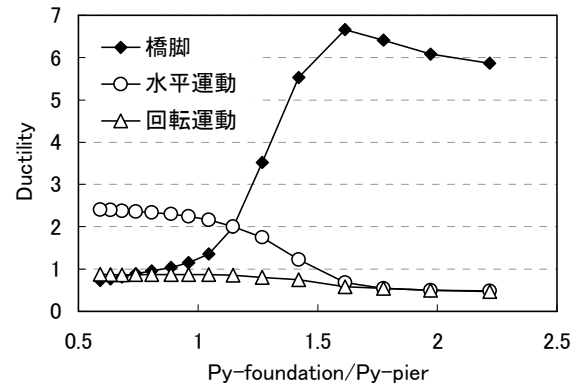


図-10 杭基礎と橋脚の水平耐力比と各塑性率の関係

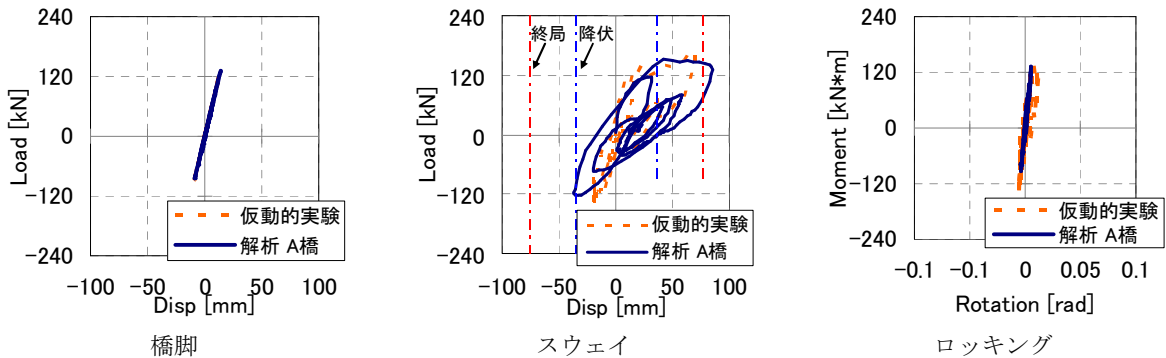


図-8 荷重-変位関係 (A 橋)

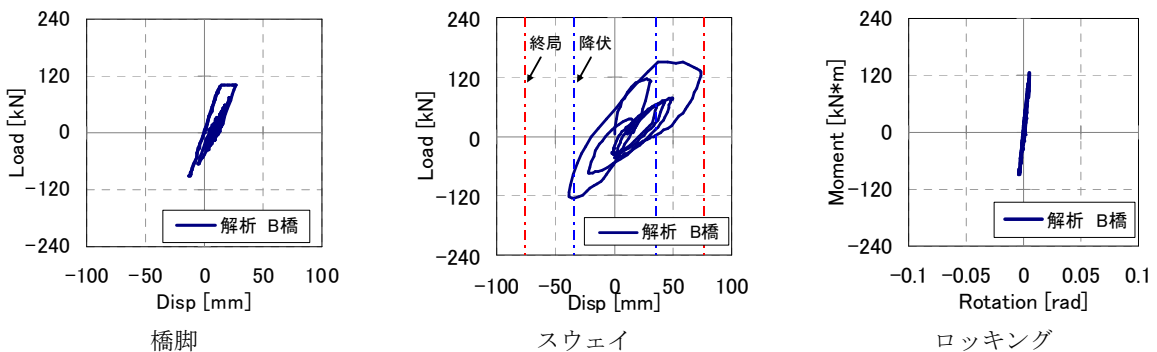


図-9 荷重-変位関係 (B 橋)

3. 杭の載荷実験

3.1 実験概要

杭の損傷をビジュアルな実験により明らかにするために、最も大きな曲率が生じる杭頭部分を取り出し、地震時の杭の応答を再現する載荷試験を行った。対象範囲は杭頭からモーメント分布が最初に0に近づく点までとし、フーチングから1.0mとした(図-11)。供試体は正負交番試験と同様に作製し、フーチングから1.0mの位置に変位制御で載荷することで、地震時の杭の変形を再現している。ここで、入力した変位は地震応答解析結果から得られた変位から、杭軸直角方向の変位分を算出したものであり、フーチングの回転などの影響は排除している。実験対象としたのは、水平耐力比=0.89(A橋)と、水平耐力比=1.15(B橋)の2ケースとした。

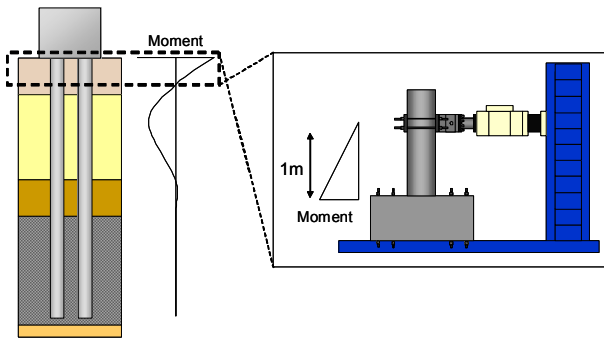


図-11 実験概要

3.2 実験結果

(1) A橋 (水平耐力比=0.89)

A橋では最大変位(-26.1mm)が正負交番試験でPC鋼棒が破断した24mmを超える変位(図-12)を入力したが、PC鋼棒の破断には至らなかった。ただし、実験終了後単調載荷試験を行った結果、26mmまで載荷した時点でPC鋼棒が破断したことから、杭体はほぼ終局まで達していたと考えられる。

図-13にフーチングとの境界面の杭体のモーメント-曲率関係を示す。このとき、正負交番試験から得られた終局曲率を点線で表す。杭体の曲率は最大で降伏曲率の336%、終局曲率の112%に達していることから杭に大きな損傷が生じていることがわかる。

杭体は、フーチングとの境界面に大きなひび割れが生じ、変位が増大してもこのひび割れが大きくなり、杭体はほぼ剛体変形するような局所的な破壊となった(写真-1)。

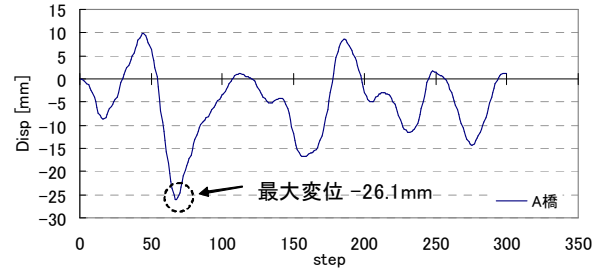


図-12 入力変位 (A橋)

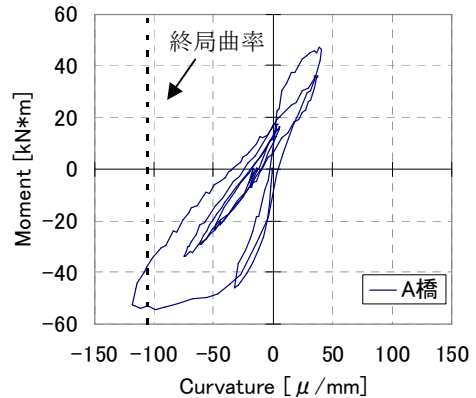


図-13 モーメント-曲率関係 (A橋)



写真-1 損傷状況 (A橋、フーチングとの境界面)

(2) B橋 (水平耐力比=1.15)

B橋の入力変位を図-14に示す。B橋でも、A橋同様にフーチングとの境界面で局所的に破壊する破壊形式となった。

モーメント-曲率関係(図-15)を見ると、最大曲率が降伏曲率の275%、終局曲率の91%に達しており、杭が大きく損傷していることがわかる。つまり、橋脚と基礎の耐力比が同程度の場合であっても、杭体が降伏するような大きな損傷が生じている。

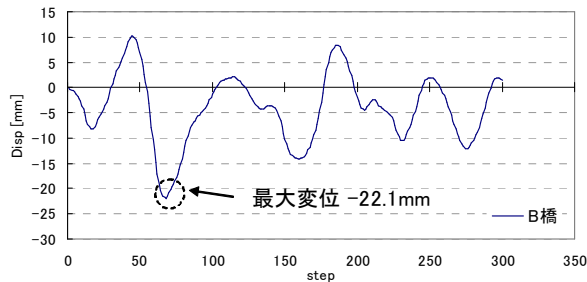


図-14 入力変位 (B橋)

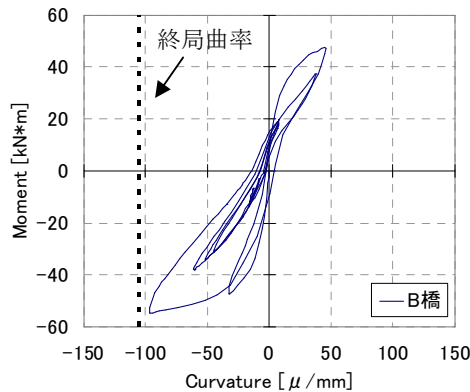


図-15 モーメント-曲率関係 (B橋)

4. 結論

既設 RC 橋脚に曲げ耐力の向上を伴う RC 巻立て補強を施すことで、杭に生じる影響を検証するために、昨年度行った仮動的実験の結果を基に、杭基礎と橋脚の水平耐力比を変化させたパラメトリック解析を行った。

また、杭の損傷を詳細に検証するために、解析結果から2ケースを取り出し、杭頭の地震時の応答を再現する実験を行った。

解析と実験より得られた知見を以下に記す。

1) 構造物を地盤を含めた全体系で考えた場合に、構造物のどこか一箇所の耐力を向上させると、それに応じて他の部位に損傷が移行してしまう現象が見られた。地震時に基礎の降伏を抑えるためには、橋脚と基礎の耐力比を1.5以上とし、橋脚で地震エネルギーを吸収させるためには橋脚の塑性率を6.7以上にすることが必要であることが明らかとなった。

2) 杭基礎が損傷する場合、フーチングとの境界面で局所的に損傷し、終局に至っていることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 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.2，2010
- 2) 永田和寿 渡邊英一 杉浦邦征：基礎-構造物系の非線形動的相互作用に関する研究，構造工学論文集，Vol.42A，1996.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 下部構造編，日本道路協会，2002.3
- 4) (財) 海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工法事例集，(財) 海洋架橋・橋梁調査会，2005.4
- 5) 矢部 正明ほか：橋脚と杭の降伏耐力比が杭基礎の塑性損傷に及ぼす影響，土木学会論文集，No.626，pp.51-68，1999.7

本研究は科学研究費補助金（基盤研究（B）：代表 睦好宏史）により行われたものである。