

地盤を考慮したハイブリッド実験を用いた構造物全体系地震応答性状に関する研究

プロジェクト代表者：睦好宏史（理工学研究科環境・社会基盤部門・教授）

1. はじめに

地震を受けるコンクリート構造物の応答性状は、地上構造物に対しては、地表面に地震波を入力することによって、かなりの精度で地震応答性状を求めることが可能となってきた。しかし、これまでの震災例を見てみると、地上にある上・下部構造物のみならず、地中の杭等にもかなりの損傷例が報告されている。また、隣り合う同じ構造物が、地盤条件が異なるだけで被災程度が全く異なることも報告されている。さらに、阪神・淡路大震災以降、既設橋脚の耐震補強が数多く行われているが、補強により地震時水平耐力を向上させると、橋脚から基礎構造物へ伝達される地震力も大きくなり、損傷が基礎構造物へ移行することが懸念されている。全体系応答を求める手段として仮動的実験が挙げられる。

一般に、仮動的実験手法は、地震応答を求めたい構造物をモデル化し、複雑な復元力特性を示す部分だけを取り出して、この部分に対しては実験によって復元力を求め、他の部分の復元力はすべて電算機の中の数値計算で求める手法である。しかし、これまでの仮動的実験手法はそのほとんどが地盤より上にある単純化された構造物が対象で、地盤、基礎（杭）などの影響を含めて行われた例は極めて少ない。先に述べたように、補強された既設RC橋脚の場合には、地震力下において損傷が地盤あるいは杭に生じる可能性がある。

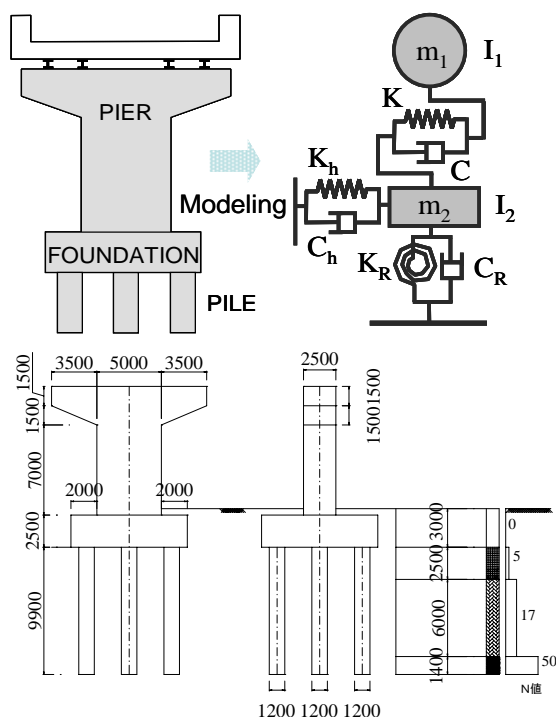
本研究は、地盤－基礎（杭）－RC橋脚から成る全体系の仮動的実験手法を開発して、実RC橋脚を模した供試体を用いて実験を行った。実験から、補強されたRC橋脚の耐力の向上が地盤および杭の地震応答性状に及ぼす影響を明らかにした。

2. 仮動的実験の概要

2.1 仮動的実験システムの概要

本研究で解析対象とした系は、図－1に示すような基礎と上部構造物からなる系であり、この基礎－構造物系を非線形相互作用の影響を考慮した3自由度系、すなわち、橋軸直角方向に対する構造物の水平運動、基礎のスウェイおよび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動的特性を非線形バネとダッシュポットで表現することとした。建物がないときの自由地表面の動きを z 、建物の頂部および基礎部の自由地表面に対する相

対速度を y_1 および y_0 、基礎回転を θ とすると、運動方程式は式(1)のようになる。



図－1 モデル化

図－2 対象構造物、土質柱状図

$$[M]\{\ddot{y}\} + [c]\{\dot{y}\} + [k]\{y\} = -[M]\{f\}\ddot{z} \quad (1)$$

ここで、 m_1 、 m_2 ；上部構造物およびフーチングの質量
 $I = I_1 + I_2$ ；回転慣性（ I_1 、 I_2 ；それぞれの重心に関する回転慣性）

K 、 c ；上部構造物の剛性と減衰定数

K_h ； c_h ；スウェイバネの剛性と減衰定数

K_R ； c_R ；ロッキングバネの剛性と減衰定数

\ddot{z} ：水平地震動

本研究では数値積分法として、コンクリート構造物のように剛性劣化をする部材において無条件に安定なオペレータ・スプリッティング（OS）法を用いた。橋脚への鋼板巻立て補強が基礎構造物に与える影響を明らかにするために、RC橋脚部分は実験部分とし、地盤・基礎部分は復元力モデルを仮定して仮動的実験システムの開発を行い、実大サイズ橋脚をスケールダウンした供試体を用いて仮動的実験を行なった。入力地震波は、コンクリート標準示方書耐震性能照査編に記載されてい

る照査用地震動のレベル2地震動内陸型2を入力した。

2.2 数値積分法

本研究で用いたOS法の基本原理は、履歴に依存する非線形な剛性(K_{n+1})を、履歴に独立な線形部分の剛性(K^L)と履歴に依存する非線形部分の剛性($K_{n+1}^E = K_{n+1} - K^L$)に分け、線形部分には無条件安定なNewmarkの β 法を、非線形の部分には条件付安定な予測子-修正子法を用いて積分するものである。

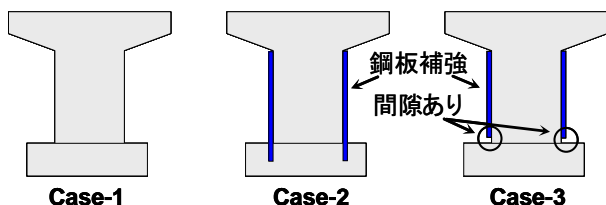


図-3 橋脚イメージ図

2.3 解析対象構造物

本研究において対象とした対象構造物、土質柱状図を図-2に示す。解析対象構造物は一種地盤上に建設された道路橋とし、道路橋橋脚は2.5m×5.0mの矩形断面を有するRC橋脚で、軸方向鉄筋としてD29が150本配筋されている。杭基礎は杭径1.2mの円形断面を有するRC場所打ち杭であり、杭長は9.9mとなっている。杭本数は橋軸直角方向に3列、橋軸方向に3列の合計9本である。

本研究の目的であるRC橋脚への鋼板補強が基礎構造物に与える影響を確認するために、解析対象モデルの橋脚部分のみを変えた3種類のケースを実施した。

図-3に橋脚イメージ図を示す。case-1は、上記橋脚と同じ無補強橋脚とする。case-2は、case-1のRC橋脚に鋼板厚10mmの鋼板巻立て補強がされた橋脚であり、鋼板とフーチングが一体となるように施工されたと仮定し、橋脚下部には塑性ヒンジを設けないように設定した。case-3は、case-1のRC橋脚に板厚15mmの鋼板巻立て補強がされた橋脚であり、鋼板とフーチングの間に間隙70mmを設けたと仮定し、塑性ヒンジが形成されるように設定した。

2.4 地盤・杭基礎のモデル化

地盤・杭基礎のモデルには、双曲線型のHardin-Drnevichモデル(以下、HDモデル)を用いた。HDモデルは本来、土の応力-ひずみ関係を表すものとして提案されているが、ここでは復元力-荷重関係を表すものとする。図-4にHDモデルの荷重-変位関係を表す。

2.5 実験供試体

実大サイズ橋脚をスケールダウンした供試体の形状寸法を図-5示す。すべての供試体は、300×300mmの断面を持つ柱部材で、基部から載荷点までの高さは962mmで、せん断スパン比は3.7である。case-1では、軸方向

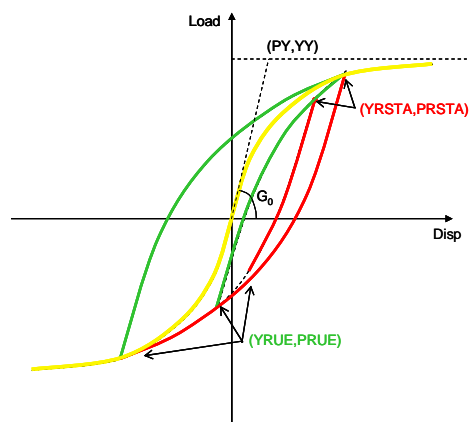


図-4 HDモデルの荷重-変位関係

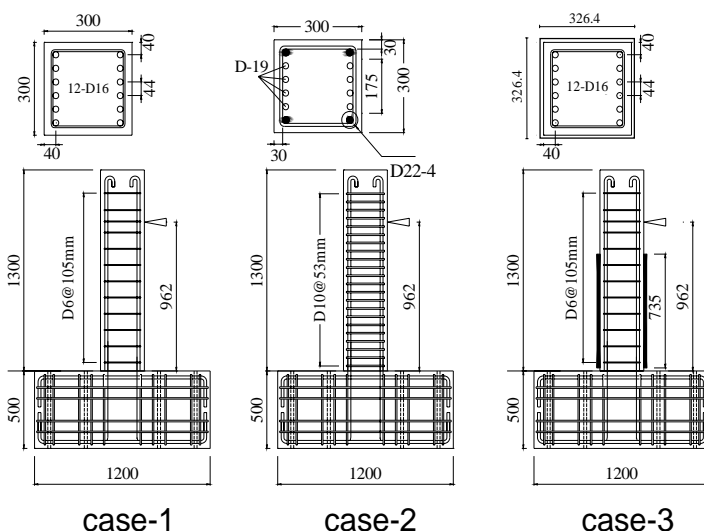


図-5 供試体の形状寸法図

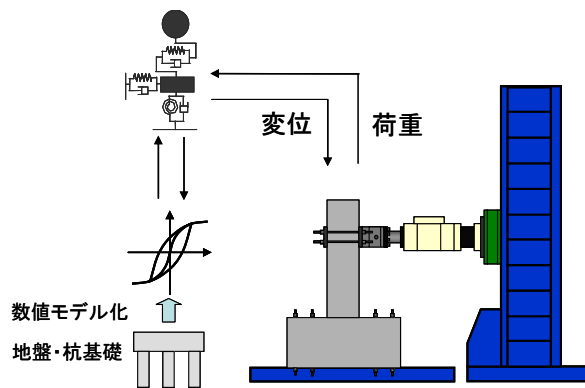
鉄筋にはD16を12本、せん断スパン内の帯鉄筋はD6を供試体基部から105mm間で配筋している。case-2では、軸方向鉄筋にはD22を4本、D19を8本、せん断スパン内の帯鉄筋はD10を供試

体基部から53mm間隔で配筋している。case-3では、case-1と同様の供試体に、板厚3.2mm、高さ735mmのSS400材を溶接して作製した鋼板補強を行った。RC橋脚の設定と同様に鋼板底部とフーチングは浮かせて設置してある。供試体の設置、載荷装置および仮動的実験の概要図を図-6に示す。載荷は水平アクチュエーターにて行った。

2.6 実橋脚と供試体との関連

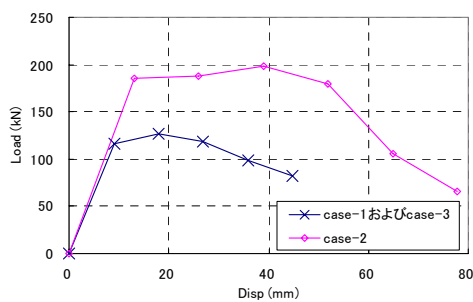
本研究では、実橋脚にあるスケールファクターをかけてスケールダウンさせた供試体に対して仮動的実験を行

った。スケールファクターは、荷重と変位に対してそれぞれ設定することとし、実橋脚と供試体の降伏荷重、降伏変位の比からそれぞれ決定した。実橋脚の降伏点を求めるにはファイバーモデルを使用した。また、供試体の

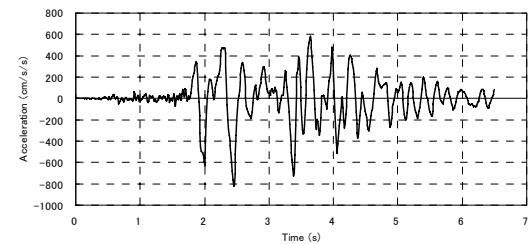


図－ 5 供試体の設置，载荷装置，仮動的実験の概要図

降伏点を求める際には、仮動的実験に用いる供試体と同一の供試体による正負交番载荷実験を行った。図－ 7 に供試体、図－ 8 に橋脚の骨格線を示す。



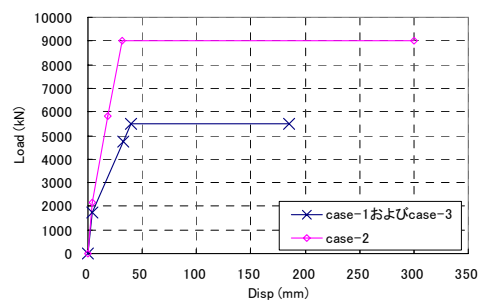
図－ 7 実験供試体の骨格線



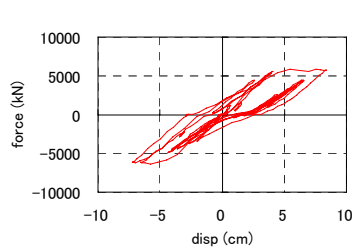
図－ 9 入力波形

3 実験結果

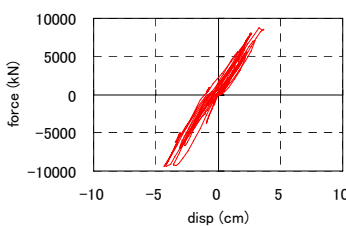
図－10 に仮動的実験より得られた、それぞれの橋脚・スウェイばねの履歴曲線を示す。ロッキングばねについては、剛性が非常に高く、線形領域での変形に収まっていたのでここでは省略した。



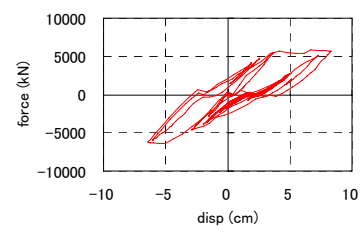
図－ 8 実橋脚の骨格線



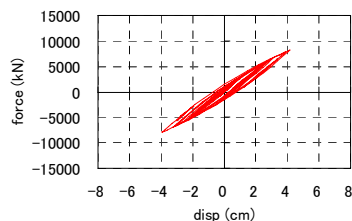
Case-1 橋脚



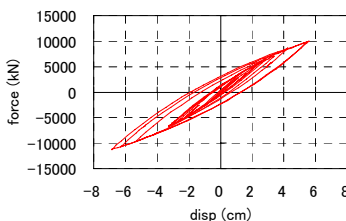
Case-2 橋脚



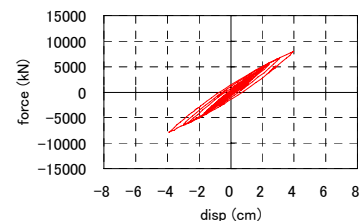
Case-3 橋脚



Case-1 スウェイばね

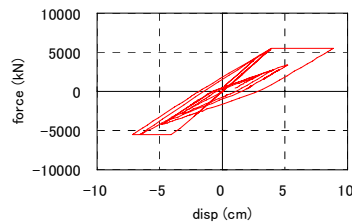


Case-2 スウェイばね

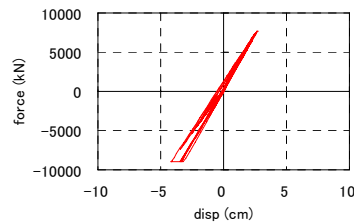


Case-3 スウェイばね

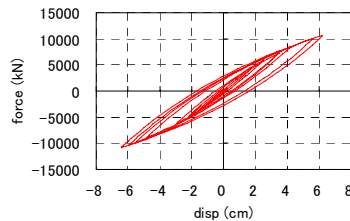
図－10 橋脚・スウェイばねの履歴曲線
(仮動的実験)



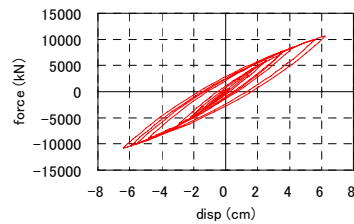
Case-1 橋脚



Case-2 橋脚



Case-1 スウェイばね



Case-2 スウェイばね

図—11 橋脚・スウェイばねの履歴曲線
(2 質点 3 自由度系解析)

橋脚、スウェイばねが吸収したエネルギーの割合を比較すると、case-1, case-3 においては、主に橋脚がエネルギーを吸収しているが、case-2 においては、主にスウェイばねがエネルギーを吸収している。これは、case-2 の補強方法による橋脚の曲げ耐力が大幅に増加したことともない相対的に基礎構造物の曲げ耐力が低下したことが原因である。ここで、2.4 で定めた杭基礎の 2 次元梁要素における静的載荷での降伏点(鉄筋が降伏したとき)、終局点(圧縮縁コンクリートのひずみが終局ひずみに達したとき)でのフーチングの変位は、3.69cm, 5.97cm であるので、case-2 では終局まで達していることになる。したがって、case-2 の補強方法により損傷が基礎構造物に移動したと判断できる。また case-1 と case-3 の橋脚、スウェイばねの履歴曲線は、おおむね一致している。これは鋼板とフーチングの間に十分な間隙を設けたことにより塑性ヒンジが形成され、橋脚基部でエネルギーを吸収できたからである。

仮動的実験では、橋脚に対しては復元力モデルではなく実験供試体を用いて実験を行ったが、橋脚に対しても地盤・杭基礎と同様に復元力モデルを設定し、2 質点 3 自由度解析を行った。図—11 に case-1, case-2 の橋脚、スウェイばねの履歴曲線を示す。解析結果は、仮動的実験とよい一致を示した。

4. 結論

本研究では、地盤—基礎（杭）—RC 橋脚から成る全

体系の仮動的実験手法を開発して、実 RC 橋脚を模した供試体を用いて実験を行った。本研究の範囲で次のようなことが言える。

- (1) 仮動的実験手法は、地震応答性状を明らかにするためのアプローチとして極めて有効である。
- (2) 仮動的実験結果より、橋脚基部に塑性ヒンジを設けずに鋼板とフーチングを一体として施工した鋼板補強では、主に基礎構造物でエネルギーを吸収することが確認できた。また、塑性ヒンジを設けるために鋼板とフーチングの間に間隙を確保した鋼板補強では、主に橋脚でエネルギーを吸収することが確認できた。この結果より、鋼板補強の影響で橋脚から基礎構造物に損傷が移動することも確認できた。
- (3) 供試体の代わりに復元力モデルを用いて 2 質点 3 自由度の地震応答解析を行った結果、仮動的実験結果とよい一致を示した。

参考文献

- 1) 中島 正愛 ほか：サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法、日本建築学会 構造系論文報告集、No.417、pp.107-117、1990.11
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物、丸善株式会社、2000