

フーチングの接合部を非一体構造とする 増し杭工法の提案に向けた取組み

瀧本耕大・堀内智司・桐山孝晴

1. はじめに

平成8年道路橋示方書以前の古い基準で設計された道路橋下部構造の杭基礎は、現行基準に基づき評価すると、せん断力等の照査を満足しない場合がある。地震により一部の橋で重篤な被害が生じていることから、所要の性能が満足されていない基礎は何らかの補強を行う必要がある。このとき、増し杭工法を採用する場合には、既設フーチングと増設フーチングの接合部（以下「新旧フーチングの接合部」という。）を剛結合とすることが一般的であり、既設フーチングの鉄筋をはつり出し、その鉄筋を切断したうえで溶接等により新たな鉄筋を繋いだうえで増設フーチングのコンクリートを打設する手順となる。ただし、鉄筋をはつり出したり、切断する行為は、当初設計で見込む構造物の形状を一時的に変更するため、施工中の安全性のリスク要因の一つとなり得る。これを踏まえ、土木研究所は、新旧フーチングの接合部を非一体構造とし、既設フーチングのはつりや鉄筋の切断を要せず、上記のリスク要因を避けて増し杭工法を構築する手法（以下「提案手法」という。）を考案したり。本報では、提案手法のモデル化の妥当性と補強効果等の検証を目的に実施した遠心模型実験の結果について報告する。

2. 新たな増し杭工法の提案

2.1 提案手法の特徴

提案手法は、図-1に示すように、新旧フーチングの接合部を非一体構造とすることで、既設フーチングの鉄筋のはつり出しや切断を避けつつ、増し杭による補強効果を期待する手法であり、上述の供用中のリスク要因を避けることができると考えられる。既報¹⁾では2次元骨組みモデルのプッシュオーバー解析の結果から、既設杭のせん断力の負担割合が減少したことを踏まえ、一定の補強効果が発現することを示した。ただし、その2次

元骨組みモデルにおける新旧フーチングの接合部の非一体構造のモデル化手法には、いくつかの選択肢があるものと思われるが、適切なモデル化手法に関する知見はない。

2.2 提案手法のモデル化

既報¹⁾の骨組みモデルにおける新旧フーチングの接合部の非一体構造のモデル化は、図-2に示すように、圧縮に剛で、引張に抵抗せず、せん断および曲げを伝達しないばねとしている。一方で、実構造物に提案手法を採用することを想定した場合、既設フーチングの回転により生じる曲げやせん断が接触面を介して増設フーチングおよび増設杭に伝達することが考えられる。そのため、新旧フーチングの接合部の曲げやせん断の伝達状況を模型実験により再現することで、新旧フーチングの接合部のモデル化手法の妥当性を確認し、知見を得る必要があると考えた。そこで、基礎および地盤の模型を製作し、遠心場での水平方向载荷を行う遠心模型実験を行うこととした。

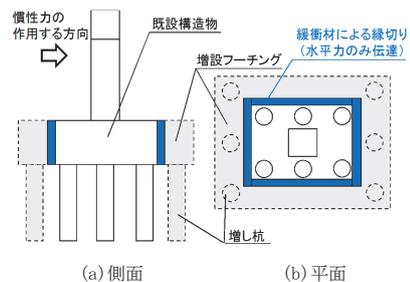


図-1 提案手法による新旧フーチングの結合方法のイメージ

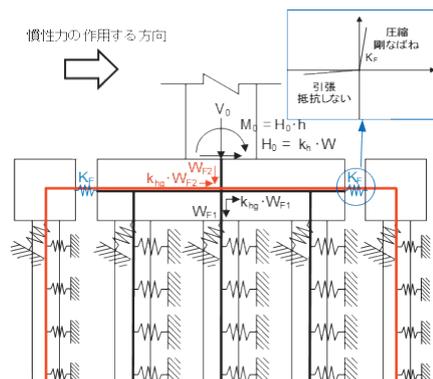


図-2 2次元骨組みモデル

表-1 実験ケース (実寸)

Case	A-0	B-1	B-2	B-3
地盤層厚	13.5 m			
支持層厚	1.4 m			
既設杭基礎の詳細	杭種：場所打ち杭 (φ1000) 杭列：3(橋軸方向)×2(橋軸直角)			
非一体構造の増し杭工法の補強詳細	無補強	増設側の杭列詳細		
		既設の両側にそれぞれ3本の鋼管杭 (φ800) を増設		
		既設と増設フーチング接触状態		
		面接触	面接触	線接触
		増設側フーチングどうしの連結状態		
		剛接合	ピン接合	剛接合

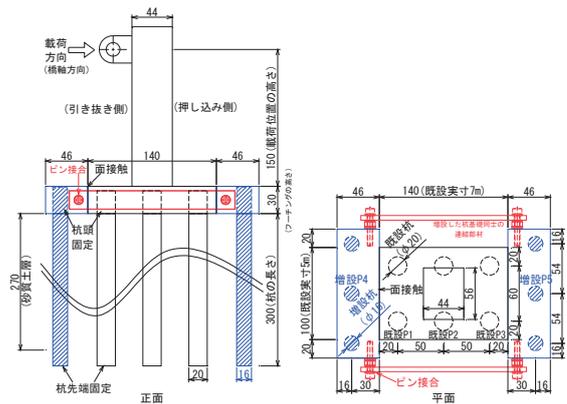


図-3 模型詳細図 (CaseB-2、単位mm)

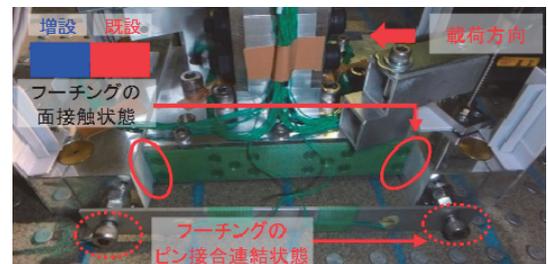
3. 遠心模型実験による検証

3.1 遠心模型実験に用いた模型・地盤条件

実験ケースを設定するうえで想定した実寸の諸元を表-1に示す。このうち、既設杭基礎および周辺地盤の諸元は文献²⁾の計算事例を参考に設定した。増設フーチングどうしの連結方法が実験結果に与える影響を検証するため、表-1に示すように、無補強のケース (CaseA-0) と、新旧フーチングの接合部を面接触させたうえで、増設したフーチングどうしを剛に連結するケース (CaseB-1)、ピン結合とするケース (CaseB-2)、新旧フーチングの接合部を線接触として剛に連結するケース (CaseB-3: 既報¹⁾の骨組みモデルにおける非一体構造のモデル化手法を模型で再現) を対象に検証を行う。模型の縮尺率は、遠心载荷設備の寸法や容量に合わせて1/50とした。CaseB-2を代表に模型の詳細を図-3に示す。

橋脚とフーチングの材料はアルミニウムとした。図-3に示すように、連結部材を介して増設側のフーチングどうしを連結する。CaseB-1およびCaseB-3は連結部材と増設側のフーチングを複数本のボルトで剛に連結し、CaseB-1は新旧フーチングの側面どうしを面接触とし、CaseB-3は既設フーチングの側面を直方体形、増設フーチングの側面を半円柱形にして接触させることで線接触を構築した。CaseB-2は新旧フーチングの接合部を面接触としたうえで連結部材と増設側のフーチングをピンで連結した。各ケースの新旧フーチングの接合部、連結部材と増設側のフーチングの連結状況を写真-1に示す。

杭の曲げ剛性と地盤からの受圧面積に関する相似則を満足するよう、既設杭は厚さが1 mm、増設杭には厚さが0.8 mmのアルミ製パイプを用い



(i) CaseB-2



(ii) CaseB-3

写真-1 模型のセッティング状況 (CaseB-2およびCaseB-3)

た。なお、いずれの杭模型においても杭頭をフーチングと剛結させ、杭先端にキャップを設置することで先端を閉塞した。各実験ケースの杭基礎の周辺地盤は、宇部珪砂6号を使用し、相対密度 $D_r=80\%$ を目標とした。三軸圧縮試験より、粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ は、それぞれ 43.5 kN/m^2 と 38.5° であった。支持層として、杭模型の先端を完全に固定できるように石膏を用いた。

3.2 载荷計画

模型実験の各実験ケースにおいて载荷を三つの段階に分けて実施した。まず、遠心加速度を50 Gまで上昇させた。遠心加速度が50 Gの状態を図-4に示すように既設杭の杭径の2%を基準値として押し込み側の杭頭変位を制御しながら一方向漸増繰返し载荷を行い、押し込み側の杭頭変位が既設杭の杭径の26%に達した後に、既設杭径の50%

までプッシュオーバー荷重を実施する計画とした。一方向漸増繰返し及びプッシュオーバーの荷重段階において、荷重位置の荷重や水平変位、杭頭の水平変位及び杭部材のひずみなどを計測した。水平荷重後に、遠心加速度を0 Gまで除荷させた。

3.3 実験結果

本節の実験結果の数値は相似則により実寸に換算した値を示す。なお、今回製作した模型は杭頭をフーチングに差し込んで固定したものの、荷重初期段階で引抜側の杭頭がフーチングから抜ける方向の滑りが発生したため、本報で扱う実験結果は杭頭の滑りの影響が小さい範囲（杭頭相対変位4%まで）の実験データのみを対象に報告する。

各ケースの荷重位置の水平荷重－水平変位関係（包絡線）を図-5に示す。荷重位置の水平変位が0.1 mまでの範囲では、同じ水平変位に対してCaseB-1における水平荷重は、無補強CaseA-0と比較して大きくなり、CaseB-2及びB-3における補強後の杭基礎の水平剛性は、無補強CaseA-0と比較して大きくなったが、CaseB-1よりは小さい結果となった。この結果から提案手法を用いた杭基礎の水平剛性は、増設フーチングどうしの連結状態及び新旧フーチングの接合部の接触状態により異なっており、ピン接合よりも剛接合の方が大きく、また、線接触よりも面接触の方が大きくなるため、骨組みモデルにおける非一体構造のモデル化手法の選び方には注意が必要といえる。

計測した杭の軸方向のひずみを用い、杭頭相対変位毎の杭の曲げモーメントを図-6に示す。既設杭P1～P3の曲げモーメントは、深さ0～6mの範囲において非一体構造の増し杭工法の補強対策により抑制される傾向が見られる。また、CaseB-1～3の既設杭の杭頭付近の曲げモーメントは同程度であり、新旧フーチングの接合部の接触状態や増設フーチングどうしの連結状態は、既設杭の曲げモーメントの分布や大きさに与える影響が小さかった。このことから、新旧フーチングの接合部の接触状態や増設フーチングどうしの連結状態が既設基礎の回転拘束に与える影響は小さく、新旧フーチングの非一体構造のモデル化手法が数値解析の結果に与える影響も小さいと考えられる。ただし、CaseB-2に対してCaseB-1とB-3の増設杭(P4、P5)の深さ6 m以深の曲げモーメントは傾向が異なるため、増設フーチングどうしの連結方法により杭の変形に与える影響が異なることが分かった。

杭の曲げひずみの計測値から杭頭せん断力を算出する方法³⁾により、補強前CaseA-0に対する補強後CaseB-1～3の既設杭の各杭列のせん断力の比率（既設1～3）および全ての既設杭列のせん断力の合計の比率（ Σ 既設）を杭頭相対変位毎に整理した（図-7）。杭頭相対変位4%時の引抜側の

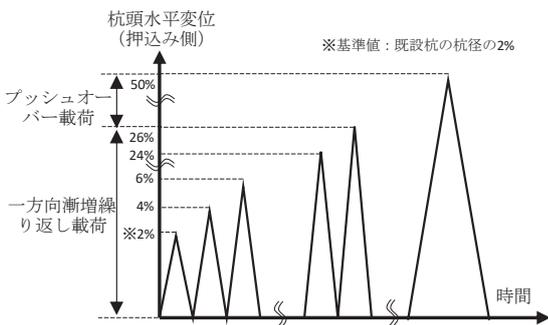


図-4 水平荷重の荷重計画（各ケース共通）

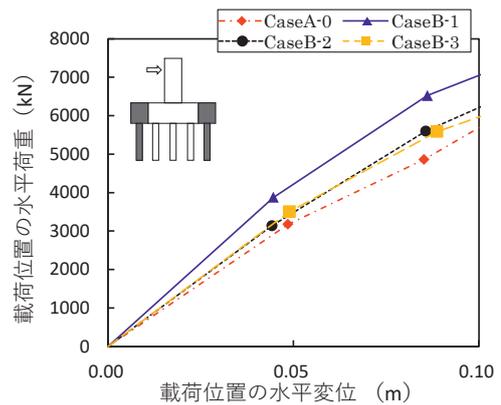


図-5 荷重位置における水平荷重－水平変位関係（包絡線）

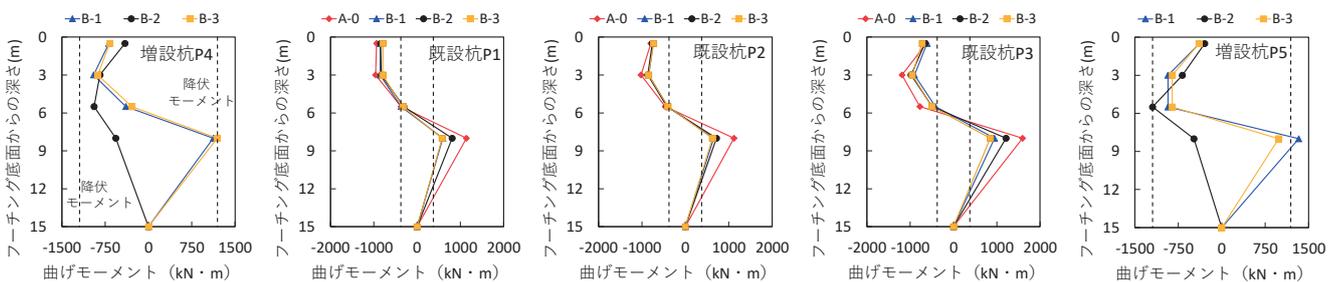


図-6 深さ方向の杭の曲げモーメントの分布（杭頭相対変位4%時）

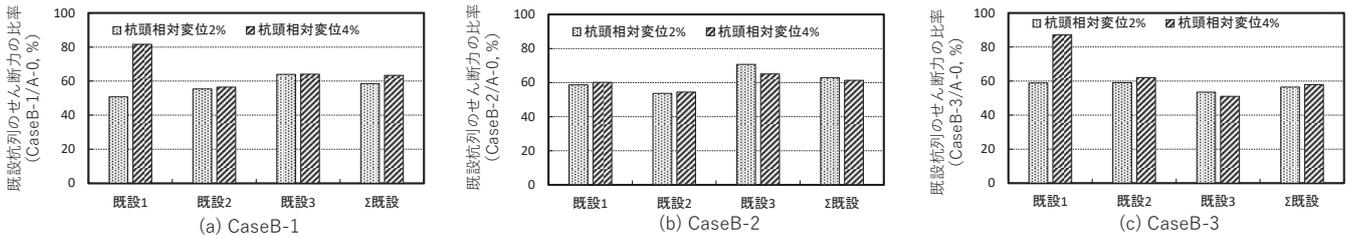


図-7 各杭列のせん断力の分担率

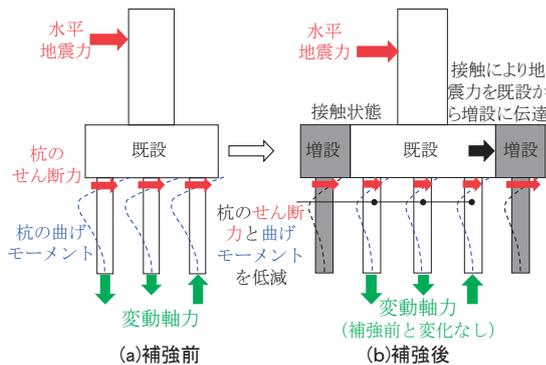


図-8 提案手法の補強効果の発現メカニズム

既設杭（既設1）のせん断力の比率が、CaseB-1およびB-3で80%程度、CaseB-2で60%程度と、20%程度の差が生じたものの、いずれのケースにおいても無補強CaseA-0に対して既設杭の各列のせん断力の比率は100%未満であり、せん断力の合計値の比率も60%程度に減少したことから、少なくとも提案手法による補強効果の発現を確認できた。なお、本実験の範囲では、杭の軸力変動は全てのケースで大きな傾向の違いはなく、増設杭の軸力はほとんど生じなかった。

上記を踏まえると提案手法の補強効果の発現メカニズムとして、既設基礎の回転を大きく拘束しないものの、新旧フーチングの接合部の接触面を介して水平方向の地震力を増設杭に伝達することが推測できる（図-8）。ただし、実験で観測された挙動として、水平荷重が大きくなるにつれて新

旧フーチングの接合部の鉛直方向のずれが著しく大きくなった。設計状況によっては基礎の安定の観点で留意が必要と言える。

4. まとめ

土木研究所が提案した新旧フーチングの接合部を非一体構造とする増し杭工法を対象に遠心模型実験を行った結果、下記の知見が得られた。

- ・ 無補強に対して補強時の既設杭列のせん断力の比率が小さくなったことから、提案手法の補強効果を確認できたと言える。
 - ・ 杭頭相対変位4%までの範囲では、新旧フーチングの接合部の接触状態の違いが既設杭の曲げやせん断に与える影響は小さいものの、基礎の水平剛性に差があることが分かった。非一体構造のモデル化手法の選定に際しては適切な手法を選定する必要があると言える。
- 引き続き、安定の照査方法や非一体構造の構造細目等の検討を行っていく。

参考文献

- 1) 行藤晋也、堀内智司、楊勇、桐山孝晴：既設杭の合理的な補強工法提案に向けた解析的検討、土木技術資料、第63巻、第4号、pp.44～47、2021。
- 2) (社)日本道路協会：既設道路橋基礎の補強に関する参考資料、2000。
- 3) 菊地善昭：軟弱粘性土地盤着底式くし形構造物の横抵抗特性に関する研究、港湾空港技術研究所資料、No.1039、2003。

瀧本耕大



土木研究所 構造物メンテナンス
研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
TAKIMOTO Kodai

堀内智司



研究当時 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員、現 国土交通省国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 道路基盤研究室 主任研究員
HORIUCHI Satoshi

桐山孝晴



土木研究所 構造物メンテナンス
研究センター 耐震研究監
KIRIYAMA Takaharu