

施工性向上に着目した橋梁基礎の増し杭工法の補強効果に関する遠心模型実験

楊 勇¹・行藤 晋也²・堀内 智司³・桐山 孝晴⁴

¹正会員 博（工）（国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 専門研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

²正会員 修（工）（国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員（同上）

³正会員 修（工）（国研）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（同上）

⁴正会員 修（工）（国研）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（同上）

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、レベル2地震動に対する照査等が行われておらず、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。現行基準に規定された性能が確保できない既設杭基礎は、一般的に増し杭工法を用いて補強する。補強施工にあたっては、既設側と増設側の一体化を図るため、既設側のフーチング鉄筋をはつり出し切断し、溶接や機械式継ぎ手で増設側の鉄筋と結合し、既設側と増設側のフーチングを剛結合させる。ただし、施工空間や用地などの制約条件が厳しい場合、増し杭補強の工事規模が大きく煩雑な工事となるため、施工性向上の観点からより合理的な増し杭工法の検討が求められている。

既設側と増設側のフーチングを剛結合させない場合（例えば、図-1に示す面接触の状態）、補強後の杭基礎を一体化する必要がなく既設側の鉄筋のはつり出し等の作業が省略できるために優れた施工性が期待できる。また、既設側と増設側のフーチングが面接触の状態においては、水平地震力を既設側から増設側に伝達できるため、既設杭のせん断力低減という観点から増し杭工法の補強効果も期待できると考えられる。これまでに、著者らは解析的な検討¹⁾、²⁾を行い、既設側と増設側のフーチングが接触の増し杭工法について補強効果が確認した。

そこで、本研究では、以上の施工性向上に着目した橋梁基礎の増し杭工法の考え方に対して、静的遠心載荷実験を実施し、既設側と増設側のフーチング

が接触の増し杭工法について補強効果を検証する。

2. 遠心模型実験概要

(1) 実験ケース

本報の報告対象とした実験ケースを表-1に示す。増し杭の有無以外に、補強効果の発揮メカニズムの解明のために既設・増設フーチングの接触状態及び増設したフーチングどうしの連結状態も実験パラメータとした。

そのうち、無補強CaseA-0における橋脚杭基礎及び周辺地盤の諸元は、「既設道路橋の耐震補強に関する参考資料」³⁾の計算事例を参考に設定した。地盤層厚と支持層厚はそれぞれ13.5mと1.4mとし、既設杭基礎は場所打ち杭（φ1,000）による3（橋軸方向）×2（橋軸直角方向）の杭列とした。

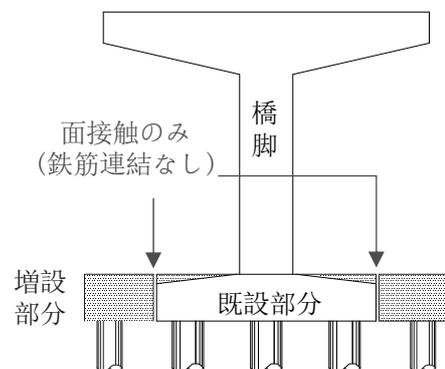


図-1 既設側と増設側のフーチングが面接触の状態

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	<ul style="list-style-type: none"> 杭列：3(橋軸方向)×2(橋軸直角) 杭種：場所打ち杭(φ1000) 			
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本鋼管杭(φ600)を増設		
		既設/増設フーチング接触状態		
		面接触	面接触	線接触
		増設杭基礎どうしの連結状態		
		剛接合	ピン接合	剛接合

増し杭工法により補強したCaseB-1においては、既設の両側にそれぞれ3本鋼管杭(φ600)を増設し、新設・既設フーチングの接触状態を面接触とし、増設フーチングどうしは、剛梁で連結させて剛接合とした。

補強したCaseB-2においては、増設したフーチングどうしをピン接合で連結しており、他の諸元はB-1と同様とした。

補強したCaseB-3においては、新設・既設フーチングの接触状態を線接触(増設フーチングと既設フーチングとの接触部が円弧状)としており、他の諸元はB-1と同様に設定した。

(2) 実験模型

a) 杭基礎

表-1に示す橋脚杭基礎の諸元をもとに静的遠心載荷実験模型を設計し、CaseB-2を代表として実験模型の詳細を図-2に示す。なお、実験模型の縮尺率は、遠心載荷設備の寸法や容量に合わせて1/50とした。

いずれの実験ケースにおいても、橋脚模型の材質は、アルミニウムとし、橋脚の断面サイズは、44 mm(橋軸方向)×56 mm(橋軸直角方向)とした。橋脚の高さは、フーチング上面から載荷位置までは、150 mmとした。

フーチング模型の材質は、橋脚と同様でアルミニウムとした。既設フーチングの大きさは、140 mm(橋軸方向)×100 mm(橋軸直角方向)とし、片側の増設フーチングの大きさは、46 mm(橋軸方向)×140 mm(橋軸直角方向)とした。既設及び増設フーチングの高さは、30 mmとした。既設・増設フーチング接触状態は、図-2に示すようにCaseB-2において面接触状態とし、増設した杭基礎どうしの連結状態は、同図に示すようにCaseB-2においてピン接合とした。

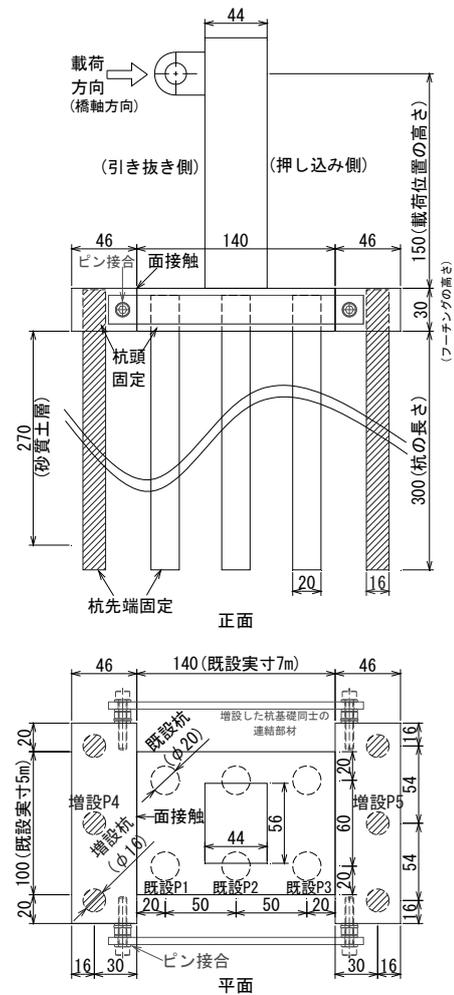


図-2 杭基礎模型の詳細 (CaseB-2, 単位 mm)

既設や増設杭模型は、アルミ製パイプを用いて製作することにした。既設杭や増設杭の長さは、同様で300 mmとした。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に、アルミ製パイプの断面寸法を設定した。既設杭には、外径が20 mmで厚さが1 mmのアルミ製パイプを、増設杭には、外径が16 mmで厚さが0.8 mmのアルミ製パイプを使用した。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閉塞型としている。また、既設や増設杭の先端を支持層に固定した。

b) 地盤

各実験ケースにおける杭基礎の周辺地盤模型は、宇部珪砂6号(土粒子密度 $\rho_s = 2.655 \text{ g/cm}^3$, 50%粒径 $D_{50} = 0.336 \text{ mm}$, 細粒分含有率 $F_c = 0.9\%$, 均等係数 $U_c = 2.31$)を使用し、相対密度 $D_r = 80\%$ を目標とした。三軸圧縮試験より求めた粘着力 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。なお、支持層模型は、杭模型の先端を固定できるように石膏を用いて製作した。

(3) 載荷計画

本実験の載荷を三つの段階に分けて実施した。まず、遠心加速度を50Gまで上昇させた。次に、押し込み側の杭頭変位の基準値を既設杭径の2%とし、既設杭径の26%まで一方向繰返し載荷を行った。その後、既設杭径の50%までプッシュオーバー載荷を実施した。最後に、遠心加速度を0Gまで除荷させた。

上記の一方向繰返し及びプッシュオーバー載荷段階においては、載荷位置の荷重や水平変位、杭頭の水平変位、新設・既設フーチング接合部の鉛直ずれ、杭部材のひずみを計測した。

ングの接触状態や増設した杭基礎どうしの連結状態によって剛性差が生じており、杭基礎の水平剛性はピン接合よりも剛接合の方が高く、また、線接触よりも面接触の方が高くなったことが分かる。

(2) 杭の曲げモーメントと軸力

計測した杭のひずみを用いて算定した杭の曲げモーメントや軸力の結果をそれぞれ図-4と図-5に示す。なお、既設杭 (P1~P3) や増設杭 (P4, P5) の配置位置を杭基礎模型の詳細 (図-2) に合わせて示す。杭先端においては、曲げモーメントを0と、軸力を深さ0~9m範囲の4断面の平均値とする。

3. 実験結果

本章及び本章以降の実験結果の数値は相似則に基づき実物スケールに換算した値である。

(1) 載荷位置の荷重 - 変位関係

各実験ケースにおける載荷位置の水平荷重 - 水平変位関係を図-3に示す。載荷過程に引張側の杭頭や杭先端に引抜変形が発生したため、初期載荷段階の実験データのみを用いて実験結果を整理する。

図-3に示すように、水平変位が小さい範囲では、CaseB-1における杭基礎全体の水平剛性は無補強CaseA-0と比較して大きくなった。CaseB-2及びB-3における杭基礎全体の水平剛性は、無補強CaseA-0と比較してやや大きくなるが、CaseB-1よりは小さいことがわかった。このように、既設・新設フーチ

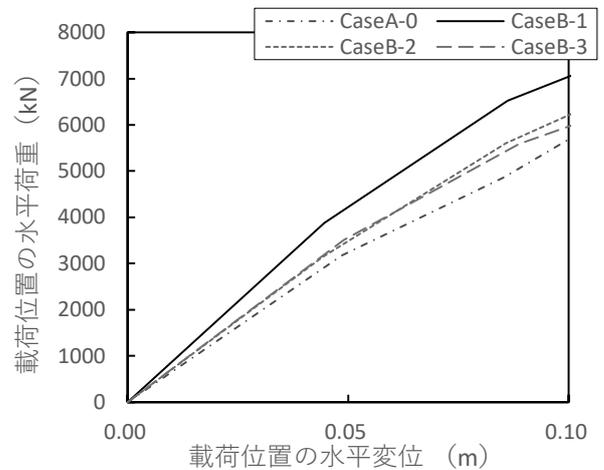
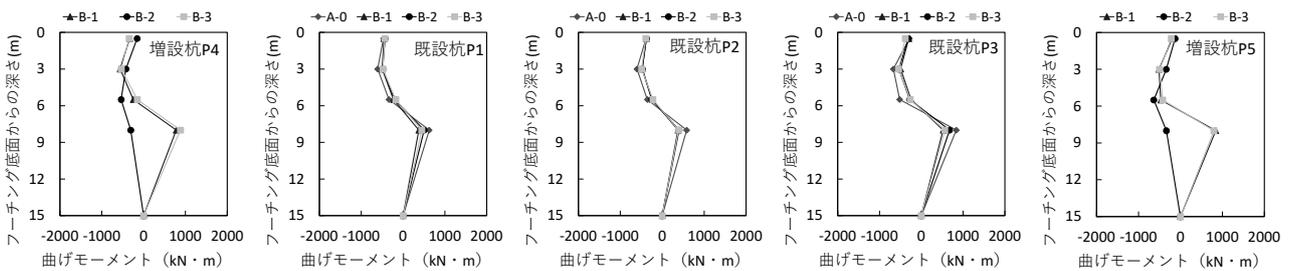
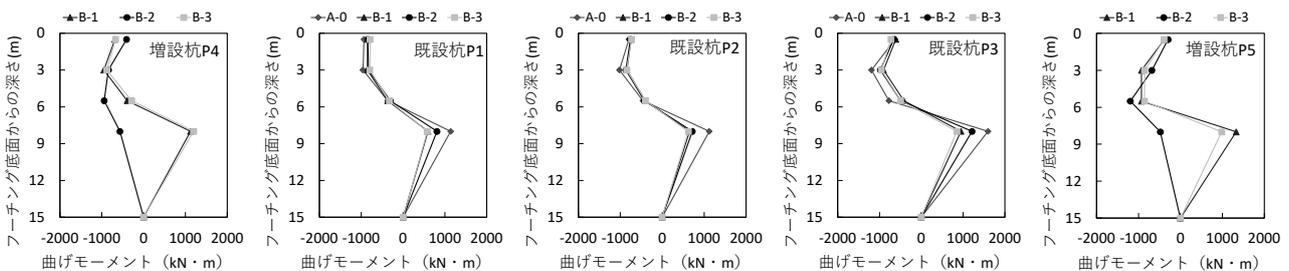


図-3 載荷位置の水平荷重 - 水平変位の関係

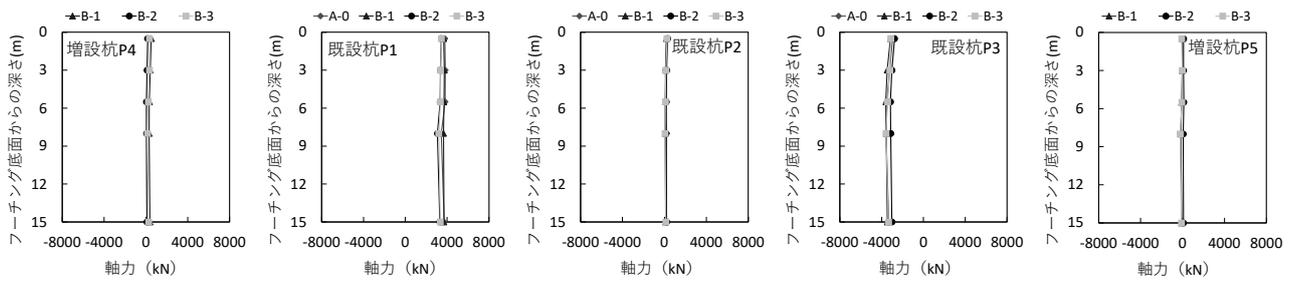


(a) 杭頭相対変位 2%

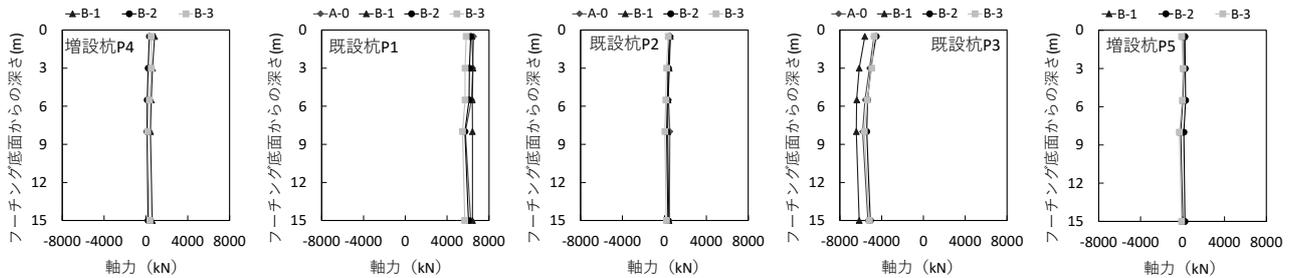


(b) 杭頭相対変位 4%

図-4 深さ方向の杭の曲げモーメントの分布



(a) 杭頭相対変位 2%



(b) 杭頭相対変位 4%

図-5 深さ方向の杭の軸力の分布

既設杭 (P1~P3) の曲げモーメントは、深さ0~6m 範囲において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、補強対策を有するCaseB-1~3における既設杭の杭頭付近の曲げモーメントはほぼ同程度であり、新設・既設フーチングの接触状態や増設杭基礎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いと考えられる。

増設杭 (P4, P5) の曲げモーメントは、深さ0~6m 範囲において新設・既設フーチングの接触状態や増設杭基礎どうしの連結状態によらずほぼ同様な分布と同程度の大きさを有することが分かる。6m以深の増設杭の曲げモーメントは、CaseB-3の実験結果がCaseB-1とほぼ同様の傾向がみられるが、CaseB-2の実験結果がCaseB-1より小さくなった。この原因は、増設杭基礎どうしの連結状態により杭の変形や周辺地盤の抵抗が異なることが考えられる。

また、既設杭 (P1~P3) の軸力は、補強有無によらずほぼ同様な分布と同程度の大きさを有し、増設杭 (P4, P5) の軸力は、新設・既設フーチングの接触状態や増設杭基礎どうしの連結状態によらずほぼ0となった。それは、新設・既設フーチングは縁切りされていることから、水平地震力による杭の変動軸力は増設杭にほとんど発生しない状況と考えられる。

4. 補強効果についての考察

(1) 既設杭と増設杭のせん断力の分担率

杭のひずみ計測値から求めた曲げモーメント分布の補間関数を1回微分する方法⁴⁾により杭頭のせん

断力 (フーチング底面位置) を算出し、図-6に示す方法を用いて既設や増設の杭列のせん断力の分担率を求める。求めた杭列のせん断力の分担率を図-7に示す。

既設杭列のせん断力は、いずれのケースにおいても押し込み側の杭列が最も大きいせん断力を負担することが分かる。

補強対策を有するCaseB-1からB-3においては、引抜側の増設杭列 (増設1) は、近くに配置された既設杭列 (既設1) より大きくせん断力を負担することが分かる。増設1のせん断力の分担率は、増設杭基礎どうしの連結状態や新設・既設フーチングの接触状態によらずほぼ20%である。一方で、押し込み側の増設杭列 (増設2) のせん断力の分担率の範囲は、約10% (CaseB-2) ~40% (CaseB-1) となり、増設した杭基礎同士の連結状態及び新設・既設フーチングの接触状態によって影響を受けることがわかる。

また、各増設杭のせん断力から算定した増設杭のせん断力の分担率の合計 (Σ 増設) は、約40% (CaseB-2) ~60% (CaseB-1) となった。

(2) 既設杭のせん断力の低減効果

上記の杭列せん断力の結果を用いて、無補強ケースに対して補強ケースにおける既設杭基礎のせん断力の比率を算定し、補強対策による既設杭基礎のせん断力の低減効果を検討した。無補強CaseA-0に対して補強対策を有するCaseB-1~3における既設杭列 (既設1~3) 及び既設杭全体 (Σ 既設) のせん断力の比率の算定結果を図-8に示す。

杭頭相対変位が2%の時に、補強対策を有する各ケースにおける各既設杭列のせん断力の比率は、新設・既設フーチングの接触状態及び増設杭基礎どう

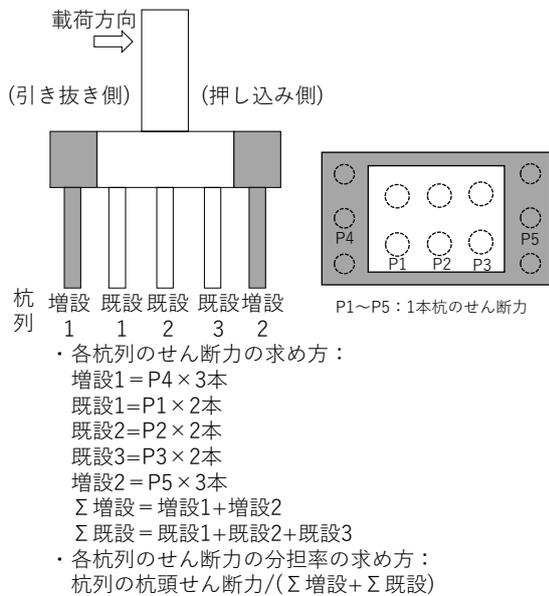


図-6 杭列のせん断力及びその分担率の求め方

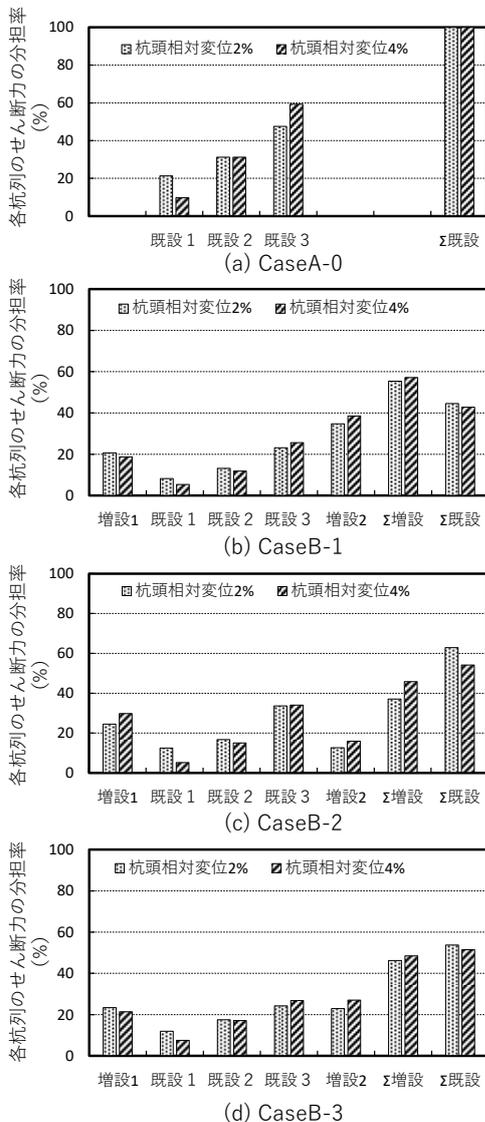


図-7 杭列のせん断力の分担率の算定結果

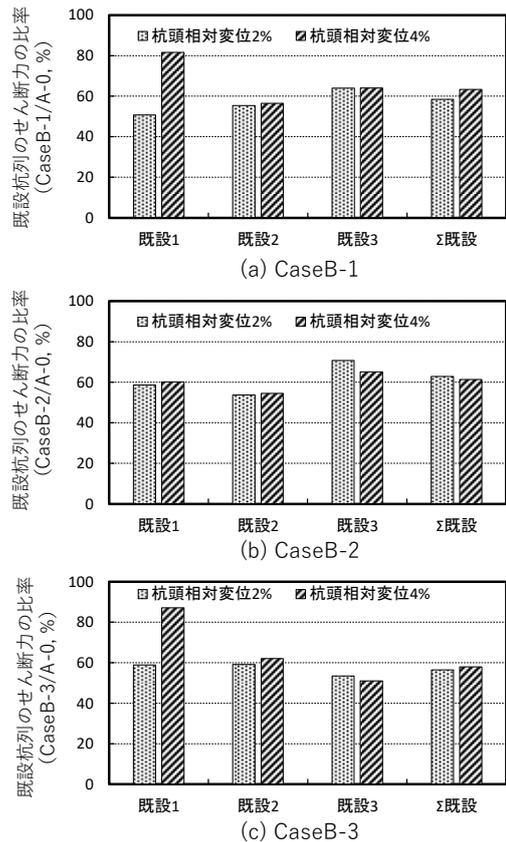


図-8 既設杭列のせん断力の比率の算定結果

しの連結状態によらず、60%前後となりほぼ同程度である。

杭頭相対変位が4%の時に、増設杭基礎どうしが剛接合としたCaseB-1とB-3における各既設杭列のせん断力の比率は、多少の変動が見られるが、増設杭基礎どうしがピン接合としたCaseB-2における各既設杭列のせん断力の比率は、概ね60%とほぼ一定となった。

また、既設全体のせん断力の比率は、杭頭相対変位が2%及び4%の時、いずれのケースにおいても概ね60%程度となった。つまり、補強対策を有する実験ケースにおける既設杭基礎のせん断力は、杭基礎同士の連結状態及び新設・既設フーチングの接触状態によらず、無補強実験ケースの概ね60%まで低減されたことが分かる。

5. まとめ

本研究では、既設・増設フーチングを剛結合せずに既設橋梁杭基礎の補強工事の施工性向上が期待できる増し杭工法に対して、静的遠心荷重実験を用いて補強効果を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 接触構造の増し杭工法は、無補強の場合と比較して、杭基礎の水平剛性が高くなることが確認できた。また、新設・既設フーチングの接触状態及び増設した杭基礎どうしの連結状態によって剛性差がみられ、杭基礎の水平剛性

は、ピン接合よりも剛接合の方が高く、また、線接触よりも面接触の方が高くなった。

- 接触構造の増し杭工法により、既設杭の曲げモーメントが抑制される傾向がみられた。
- 接触構造の増し杭工法では、増設杭の軸力がほとんど0となっており、新設・既設杭基礎が接触状態で水平地震力による杭の変動軸力は増設杭にほとんど発生しないことが確認できた。
- 接触構造の増し杭工法においては、増設杭が水平地震力を大きく分担できることが確認できた。また、補強後の既設側杭列のせん断力は、無補強ケースの概ね60%程度まで低減されたことが確認できた。

なお、本遠心実験においては、杭基礎部材が塑性化した場合や地盤構成が異なる場合の補強後の杭基礎の挙動が確認できていないことがあるため、接触構造の増し杭工法の補強効果について更なる検証をしていきたい。

謝辞：本研究の一部は（一社）日本鉄鋼連盟から寄付された研究助成金により実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉田 英二，増田 隆宏，楊 勇，桐山 孝晴：既設杭基礎の合理的な補強工法に関する解析的検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，vol. 74, 2019
- 2) 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，vol. 63(4)，pp. 44-47, 2021
- 3) 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
- 4) 菊池喜昭：軟弱粘性土地盤着定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