

# 近接する既設杭の存置・引抜・埋戻が 新設杭に与える影響に関する一考察

飯島翔一・藤田智弘・桐山孝晴

## 1. はじめに

近年、建物、橋梁等の構造物を更新する際に、既設構造物の杭との間で近接施工が生じる事例が増加しており、主に建築分野において対策が急務となっている<sup>1)</sup>。一方、土木分野においても、道路橋の老朽化等による架替が増加しており、用地や道路線形、河川などの制約により既設杭との近接施工が回避できないことが増えると考えられる。

既設杭との近接施工が生じる場合の対応としては、一般的には既設杭を存置する方法と引抜いて埋戻す方法がある。しかし、既設杭を存置した場合、既設杭が障害にならない限りは新設杭への影響は少ないと考えられるが、それに関する知見は十分ではない。また、引抜いて埋戻す場合、引抜きによる地盤の乱れや緩みが生じるため、その影響による地盤抵抗の低下を定量的に把握する必要があると考えられるが、十分に検証された方法が確立されていない。さらに、埋戻しが不適切であった場合、新設杭を施工する際に傾斜などのトラブルに繋がる恐れがある。このように近接施工に関する数多くの課題が指摘されているが、基準や指針等が整備されていないため、その対応は現場ごとに技術者の判断に拠るところが大きいのが現状である。このため、新設杭に与える影響や地盤の乱れや緩みの評価手法などが基準や指針等で示されることが望まれている。

そこで、既設杭の存置、引抜き、埋戻しが地盤と新設杭の水平抵抗特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、3次元有限要素解析、遠心模型実験を行った。本稿では、それらの概要と結果について報告する。

## 2. 3次元有限要素解析

### 2.1 解析の概要

解析は図-1に示す解析ケースで、新設杭を水平方向に正負交番载荷させた。以下、各ケースにお

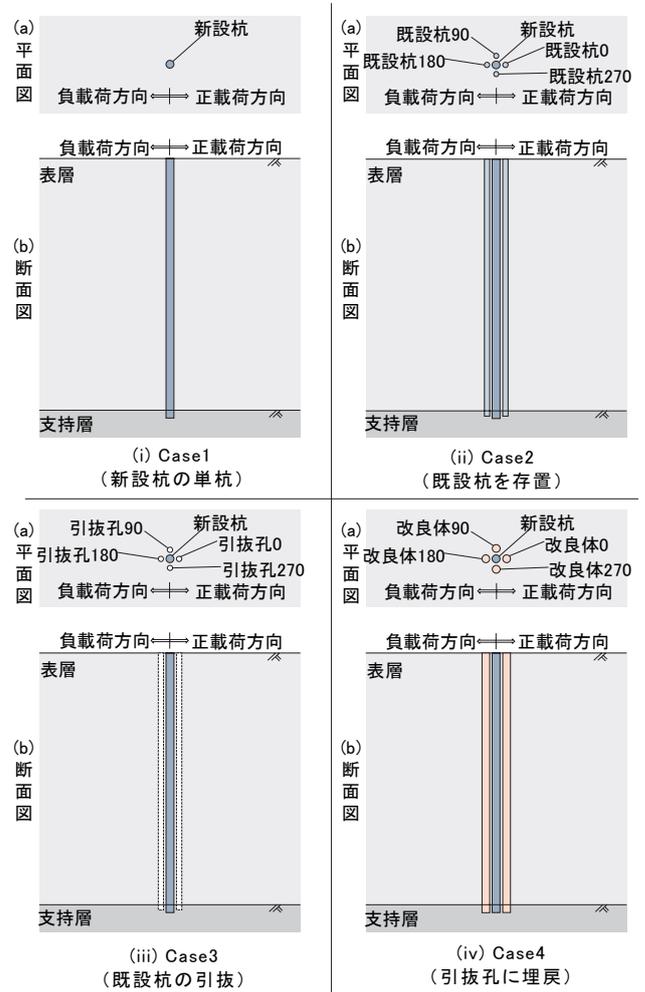


図-1 解析の概要図

いて载荷を行う杭を新設杭、新設杭の周囲に位置する4本の杭を既設杭、Case3において既設杭を引抜いた後の孔を引抜孔、Case4において既設杭を引抜いた後に埋戻された部分を改良体と呼ぶ。

新設杭および既設杭、改良体の諸元を表-1に示す。既設杭と改良体は、既設杭径の2.5倍を中心間隔として格子状に配置し、対角線の交点と新設杭の杭芯が等しくなるようにしている。既設杭および新設杭の杭径は、建設年代の杭基礎の採用実績や模型製作の制限等を踏まえて決定した。改良体は、実施工を参考に、引抜きによる緩みの範囲を一部改良することを想定して、既設杭よりも大きな杭径とした。杭間隔は道路橋の設計において規定されている杭中心間隔を考慮した。また、杭

表-1 構造物の諸元

|     | 材質      | 杭長<br>$L$<br>(m) | 直径<br>$D$<br>(m) | 厚さ<br>$t$<br>(mm) | ヤング率<br>$E_{pile}$<br>( $kN/m^2$ )                 | ポアソン比<br>$\nu_{pile}$ | 曲げ剛性<br>$EI_{pile}$<br>( $kN \cdot m^2$ ) |
|-----|---------|------------------|------------------|-------------------|--|-----------------------|---|
| 新設杭 | 鋼管      | 41.2             | 1.2              | 12                | $2.0 \times 10^8$<br>(内実換算<br>$1.55 \times 10^7$ ) | 0.3                   | $1.58 \times 10^6$                        |
| 既設杭 | 鋼管      | 40.8             | 0.8              | 8                 | $2.0 \times 10^8$<br>(内実換算<br>$1.55 \times 10^7$ ) | 0.3                   | $3.12 \times 10^5$                        |
| 改良体 | ソイルセメント | 41.2             | 1.2              | -                 | $2.0 \times 10^5$                                  | 0.17                  | $2.04 \times 10^4$                        |

表-2 地盤作製プロセス

| ケース   | プロセス1                    | プロセス2                                     | プロセス3                      | プロセス4                    |
|-------|--------------------------|---|----------------------------|--------------------------|
| Case3 | 既設杭を築造                   | 新設杭を築造                                    | 既設杭を引抜                     | -                        |
|       | ・応力解放なし<br>・該当要素を<br>入れ替 | ・応力解放なし<br>・該当要素を<br>入れ替                  | ・応力解放45%<br>・引抜き時の<br>変位維持 | -                        |
| Case4 | 既設杭を築造                   | 既設杭を引抜                                    | 改良体を築造                     | 新設杭を築造                   |
|       | ・応力解放なし<br>・該当要素を<br>入れ替 | ・応力解放を20%<br>・変位をクリア<br>・引抜きに改良体<br>要素を追加 |                            | ・応力解放なし<br>・該当要素を<br>入れ替 |

配置は、格子状あるいは千鳥状が一般的であること、簡単のため各既設杭から等距離とすることを踏まえて決定した。

地盤の表層は相対密度60%の砂質土を想定し、過去に実施した東北珪砂7号のCD試験の結果から得られた物性値を入力値としている。地盤の構成則は弾塑性モデルを用いている。

既設杭の引抜きや埋戻しの施工過程や条件による影響を考慮するため、新設杭を載荷する前に表-2に示す地盤作製プロセスを実施した。Case3については、実施工では埋戻しをせず引抜いた状態のままというのは考えにくい、本稿では引抜きの影響のみに着目するために表のようなプロセスとした。なお、表中の応力解放とは、既設杭の引抜きを再現することを目的として、既設杭の各ソリッド要素を取り除いた際に、それまで地盤と既設杭の境界部分の節点に作用していた作用力を任意の割合で低減させ、残りの作用力とつり合うだけの力を反対方向に作用させることである。

解析モデルは、新設杭を中心として載荷方向を対称面とした対称形モデルである。解析領域は載荷方向に40m、載荷軸直角方向に20m、鉛直方向には10mである。これは、地表面付近の応答を精度良く把握することを目的としたためであり、鉛直方向の解析領域を表層40m+支持層2mとしたモデルで予備解析を行い、載荷したときの新設杭の

変形が収束する深度を確認し、それ以浅を解析領域とした。また、解析モデルの底面は水平ローラー、側面は鉛直ローラーである。

載荷ステップは、載荷変位を±1cm～±40cmまで±1cm刻みで漸増させ、各変位に対して1サイクルの正負交番載荷とした。

### 2.2 水平荷重－水平変位関係

新設杭の杭頭における水平荷重－水平変位関係を図-2に示す。横軸は載荷変位を新設杭の杭径で正規化している。縦軸は載荷荷重を弾性床上的はり式で計算したCase1の水平変位が新設杭の杭径の1%時の水平荷重で正規化している。 $d$ : 載荷変位(m)、 $D_p$ : 新設杭の杭径(m)、 $P$ : 載荷荷重(kN)、 $P_a$ : 水平変位が新設杭の杭径の1%時の水平荷重計算値(Case1)(kN)である。水平剛性に注目すると、Case1よりも、Case2およびCase4では大きくなっており、Case3では小さくなっている。Case3では既設杭を引抜いたことによる水平剛性の低下が確認されたが、Case4の水平剛性は低下していないため、埋戻しによって引抜きに起因した地盤の緩みの影響が打ち消されていると考えられる。また、Case2よりもCase4の方が大きな水平剛性を示す結果から、径の大きさによって新設杭と改良体の離隔が小さくなり、地盤への拘束効果が強まったことが大きく寄与したと考えられる。

### 2.3 地表面の水平応力

新設杭を正載荷方向に40cm載荷したときの地表面の水平応力のコンター図を図-3に示す。Case2は、Case1よりも新設杭の載荷方向の地盤部分(図中の赤枠部分)の水平応力が大きくなっていることがわかる。このことから、既設杭が存置された状態では、新設杭と既設杭間の地盤が既設杭によって拘束されることにより水平応力が増加すると考えられる。Case3は、引抜き孔の周面付近(図中の赤枠部分)で水平応力が小さくなっていることがわかる。これは、既設杭を引抜いたと

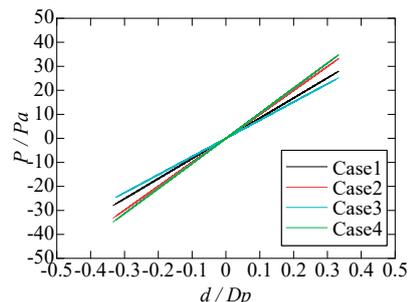


図-2 水平荷重－水平変位関係

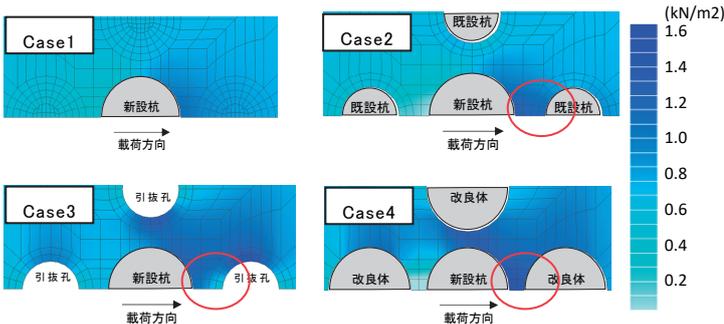


図-3 地表面の水平応力のコンター図

きの応力解放による応力の減少と考えられる。  
 Case4は、Case1とCase2よりも、新設杭の正  
 荷方向の地盤部分（図中の赤枠部分）の水平応力  
 が大きくなっていることがわかる。また、水平応力  
 が大きく示される表層の範囲も広がっている  
 ことから、改良体による新設杭間の地盤の拘束効  
 果が大きかったといえる。これは、改良体の杭径  
 が既設杭の杭径よりも大きいことが影響を与えた  
 可能性が考えられる。一方で、Case3で見られた  
 ような既設杭を引抜いたときの応力解放による応  
 力の減少は見られない。このことから、埋戻しに  
 より応力解放の影響が打ち消され、新設杭と改良  
 体間の拘束効果の影響が大きかったと考えられる。

### 3. 遠心模型実験

#### 3.1 実験の概要

実験は、解析と同じ条件の4ケースで80Gの遠  
 心力作用下で新設杭を水平方向に正負交番載荷さ  
 せた。杭径や杭配置も実大スケールに換算すると  
 解析と同様であるが、新設杭は載荷のため表層か  
 ら模型スケールで86.5mm突出させた状態とした。

実構造物と模型の曲げ剛性が等しくなるよう、  
 新設杭、既設杭はアルミパイプで、改良体はアク  
 リル棒で作成した。アクリル棒には表面の摩擦を  
 発揮させるため砂を接着させた。地盤は宇部硅砂  
 6号を用いて、表層は相対密度60%、それ以深は  
 70%となるよう自由落下で作製した。また、  
 Case2とCase4は支持層を作製後、新設杭と既設  
 杭、改良体を所定の位置にセットし、表層の地盤  
 を作製した。Case3はCase2と同様に地盤を作製  
 後、一度80Gの遠心力を作用させ、計測器の値が  
 落ち着くことを確認した後1G場に戻し、既設杭を  
 垂直に引抜いた。載荷ステップは、 $0.01D_p \sim$   
 $0.36D_p$ として、各ステップに対して、正負を1サ  
 イクルとして3回繰り返した。

#### 3.2 水平荷重－水平変位関係

新設杭の載荷位置での荷重－変位関係を図-4に  
 示す。解析と同様に両軸を正規化している。図中  
 には各ケースを線形近似したものを併せて示して  
 いる（なお、Case1とCase4の近似線は重なって  
 いる）。図-2と比較して正規化荷重のスケールが  
 異なっているが、これは解析において解析モデル  
 に対して応力作用領域が小さかったため、解析  
 メッシュなどの影響が結果に大きく表れたことよ  
 りと考えられる。今後より精査する必要がある  
 が、本稿ではCase1との水平抵抗特性の相対的な  
 違いに着目することにした。水平剛性に着目する  
 と、基準であるCase1よりも、既設杭がある  
 Case2では若干小さく、既設杭を引抜いたCase3  
 では小さく、Case4では同等となっている。  
 Case3では既設杭を引抜いたことによる水平剛性  
 の低下が確認された。

#### 3.3 曲げモーメント深度分布

各ケースの  $d / D_p = 0.04, 0.36$  のときの  
 新設杭の曲げモーメントの深度分布を図-5に示す。  
 図に着目するとCase3の杭頭部の曲げモーメントが  
 小さくなっている。これは、既設杭を引抜いたこ  
 とにより周囲の地盤が引抜孔を埋め、引抜いた体積  
 の分だけ地表面部がすり鉢状に変形したため、地  
 表面部の地盤の抵抗が減少したことが要因として  
 考えられる。また、載荷初期である  $d / D_p = 0.04$   
 のとき、Case2とCase4の杭頭曲げモーメントが  
 他のケースと比べて大きくなっており、載荷後期  
 である  $d / D_p = 0.36$  のときは同程度となっている。  
 このことから、載荷初期では存置された既設杭や  
 改良体があることによって地表面部の地盤の抵抗  
 が大きかったと考えられる。これまでの結果と合  
 わせて考えてみると、荷重－変位関係では、既設  
 杭や改良体による水平剛性の増加は見られなかつ  
 たものの、載荷初期においては、解析と同様に、  
 既設杭や改良体によって水平抵抗が大きくなると

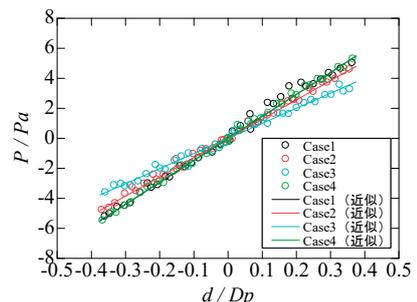


図-4 水平荷重－水平変位関係

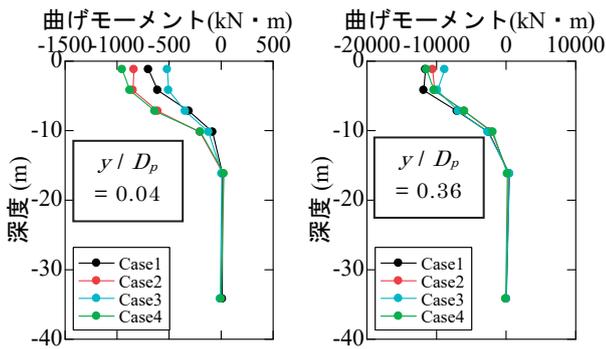


図-5 曲げモーメント深度分布

いう傾向が見られた。なお、ここで荷初期としている  $d / D_p = 0.04$  の変位レベルは、従来の道路橋基礎の設計において、見込まれていた安全余裕と同程度の信頼性を有し、弾性的な挙動の限界点として許容できるレベルとして提案されている<sup>2)</sup>。

### 3.4 杭頭水平変位の時刻歴

Case2、Case4の新設杭と荷正側に位置する既設杭、改良体の杭頭水平変位の時刻歴図を図-6に示す。図から既設杭、改良体には残留変位が生じていることがわかる。このことから、残留変位が発生した時点から既設杭、改良体は新設杭の水平抵抗に寄与していいないと考えられる。前節の曲げモーメントの結果と合わせて考えると、荷初期では曲げ剛性による抵抗で杭頭曲げモーメントが大きくなったが、荷中～後期では残留変位により水平抵抗に寄与しないため杭頭曲げモーメントは大きくならなかったといえる。

## 4. まとめ

既設杭の存置、引抜き、埋戻しが地盤と新設杭の水平抵抗特性に及ぼす影響を3次元有限要素解析、遠心模型実験により確認した。

今回の検討では、解析と実験ともに同じ条件のケースを設定したものの、引抜きや埋戻しの施工時における実挙動の再現性については、解析と実

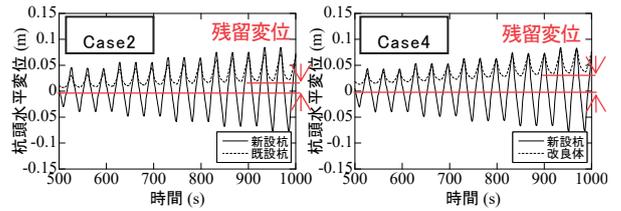


図-6 杭頭水平変位の時刻歴

験においてそれぞれ特有の制限や限界があるため、同じレベルで模擬できているとは言えないことから、単純に比較するには注意が必要である。それを踏まえた上で、得られた知見を以下に示す。

既設杭を引抜いた場合、解析と実験ともに、地盤の抵抗が減少し水平剛性が低下することがわかった。また、既設杭を存置、埋戻した場合、地盤と曲げ剛性による抵抗が増加し、荷初期において、解析と実験で同様の傾向を示すことがわかった。このことから同じ荷重が杭頭に作用したとき既設杭を引抜いた場合には新設杭の変位が増加し、存置、埋戻した場合には変位が減少することが推察される。

現場の地盤や施工の条件によって影響の度合いや鉛直方向の支持力特性等は異なると考えられるが、既設杭を引抜いた場合には新設杭の変位が大きくなる可能性が示唆されたため、引抜きによる地盤の緩みの影響が見込まれる場合にはその影響を適切に評価することが重要といえる。

今後も引き続き、現場の技術的な課題などの情報収集を行い、知見を積み重ねていき、基準等への反映を目指して検討を進める予定である。

### 参考文献

- 1) 地盤工学会 関東支部 新設杭に干渉する既存杭の撤去・埋戻しに関する研究委員会：既存杭の撤去・埋戻し方法とその影響を受ける新設杭の設計・施工、株式会社総合土木研究所、pp.1、2022.6.3
- 2) 中谷昌一ほか：性能規定体系における道路橋基礎の安定照査法に関する研究、土木研究所資料、第4136号、pp.210~212、2009.

飯島翔一



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 研究員  
IIJIMA Shoichi

藤田智弘



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  
FUJITA Tomohiro

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