

## 場所打ち杭の近接防護工に関する影響検証



坂本 なつみ\*<sup>1</sup> 和田 旭弘\*<sup>2</sup>

### Verification of the protection effect during neighboring work by cast-in-place pile

Natsumi SAKAMOTO\*<sup>1</sup>, Akihiro WADA\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> Researcher, Construction System Design Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

\*<sup>2</sup> Chief researcher, Construction System Design Unit of Research and Development Center of JR East Group

#### Abstract

Centrifugal model experiments and analyses were conducted to verify the effect of protective work on the existing piles due to the presence or absence of protective work and the impact of differences in the scope of protection on the existing piles during the construction of new cast in place pile. The same degree of protective effect was obtained when the existing pile side was protected around the entire circumference and when the existing pile side was protected around the half-circumference. It was found that the most protective effect could be obtained in the case of protecting the depth of 3 m from the existing pile.

●**Keywords:** Neighboring construction, Cast in place pile, Centrifugal model experiment

\*<sup>1</sup>JR東日本研究開発センター 構造システムデザインユニット 研究員  
\*<sup>2</sup>JR東日本研究開発センター 構造システムデザインユニット 主幹研究員

## 1. はじめに

近年、主に都市部を中心に、既設の構造物に近接して人工地盤などの新設構造物が建設されるケースが増加している。図1に示すように、既設構造物の基礎杭（以下、既設杭）に近接して新設の場所打ち杭（リバース工法を想定）を施工する際、孔壁崩壊の危険性が高い地盤条件の場合や既設杭との離隔が小さい場合などには、既設構造物へ影響を及ぼさないように、地盤改良による新設杭施工時の防護工（以下防護工）を実施することがある。しかし、実際の設計・施工例をみると、場所打ち杭施工が近接した既設杭に及ぼす影響が明確になっていないことから、必要以上の防護工が計画される場合がある。そこで、遠心載荷装置を用いた模型実験にて防護工の有無や防護範囲の違いが、既設杭の挙動に与える影響について検証し、実験を再現した有限要素解析にて、より効果的な防護範囲の検討を行った。

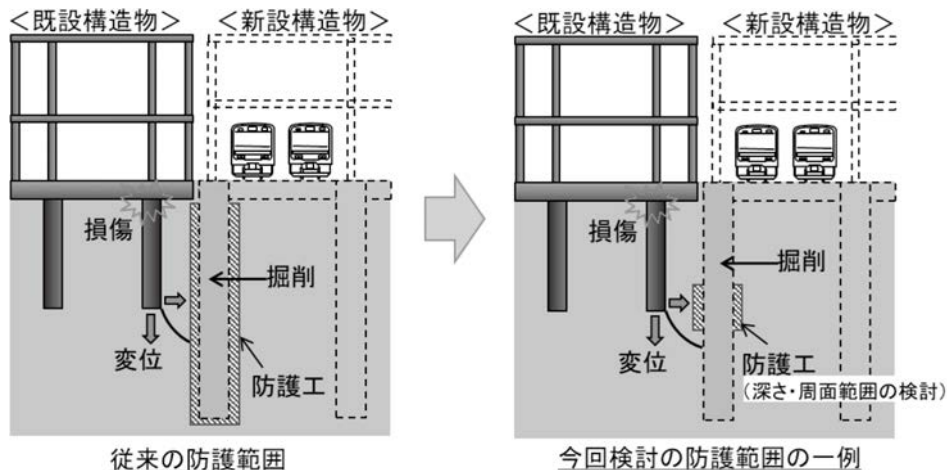


図1 場所打ち杭の近接施工による既設杭への影響

## 2. 遠心模型実験

遠心模型実験は、地盤や基礎構造物などの1/N倍の縮尺模型にN倍の遠心加速度を作用させることで、想定する実物相当の応力場およびひずみ場を再現し、実物大実験に近い結果が得られる実験手法である。遠心模型実験における相似則に関しては既往文献<sup>1)</sup>に詳細が示されているため、ここでは今回の実験で用いた相似則についてのみ表1に示す。

### 2・1 遠心載荷装置の概要

図2に実験に用いた遠心載荷装置を示す。装置は、回転アーム、駆動装置、アーム内に設置した計測および映像収録装置により構成される。表2に装置の主な性能を示す。回転アームは、静的バケットと振動台バケットを装備しており、実験の用途に応じ、いずれかのバケットに実験模型を搭載する。回転アームが回転することで、先端のバケットに搭載された実験模型に遠心加速度が作用する仕組みとなっている。本実験で使用した静的バケットは、広い搭載面積と大きな搭載容量(700ton・g)を有しており、多目的な実験用途に活用ができる。

表1 遠心模型実験の相似則

項目	相似則
寸法	1/N
力	1/N <sup>2</sup>
ひずみ	1
変位	1/N

表2 遠心載荷装置の性能

項目	仕様
回転半径	7.01m
搭載容量	700ton・g
搭載質量	7ton
搭載面積	2.2m×2.2m



図2 遠心載荷装置<sup>2)</sup>

### 2・2 実験方法と実験ケース

本実験では、実物の1/25に縮小した模型に遠心加速度25Gを作用させた。地盤の作製は剛土槽(幅950mm、奥行き400mm、深さ800mm)を用い、全ケース均一な砂地盤(硅砂7号、相対密度Dr=60%)で作製した。また、杭周辺地盤は地下水位の影響を考慮するため、飽和状態とした。模型地盤に25Gの遠心加速度を作用させ、応力場を再現するため、回転している模型において、実際に掘削作業を行うのは困難である。そのため、図3に示すように、新設杭孔内に満たした重液(液状の模擬地盤、比重1.4)を塩水(模擬安定液、比重1.05)に置換することで掘削を模擬し、掘削中の挙動を再現した。重液置換を繰り返し、新設杭孔内の水圧が一定値となったところを掘削完了時点とした。以後、数値については模型スケールで示す。既設杭の模型にはSUS製の中空部材(φ40mm、t1.0mm)を使用し、杭先端部は閉塞とした。既設杭には荷重5.31kg(実物大換算値で813kN)の鉛散弾を載荷した。これは、今回の実験では、場所打ち杭施工時の防護工の有無や防護範囲の違いにより、既設杭の杭頭変位や支持力分担の変化を確認するため、事前に、新設杭掘削後を模擬した地盤で既設杭に対してジャッキ載荷を行い、周面摩擦抵抗がピークに到達した荷重を設定した。

図4は各計測装置の位置を示した図である。既設杭の先端抵抗は、先端部に取り付けた土圧計から、周面摩擦抵抗は、GL-10mm、-195mm、-380mmに取り付けたひずみゲージから算出した。

各ケースの実験条件を表3に示す。Case1は新設杭に防護工を設置しない無対策の条件、Case2は既設杭の先端付近 (GL-360mm~-480mm) の深度において新設杭の既設杭側に半周にわたり防護工を設置する条件、Case3は同深度において新設杭の全周にわたり防護工を設置する条件とした。防護長の考え方については、既設杭が十分な先端支持力を有する場合、既設杭先端の地盤が緩まなければ支持力は維持されるのではないかと仮定し、既設杭先端の地盤に限定して防護を行うことで防護効果を確認することとした。

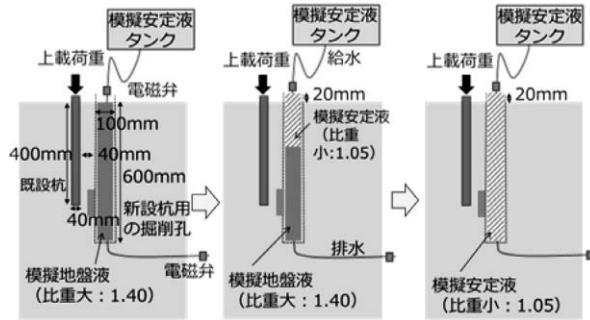


図3 重液置換概要

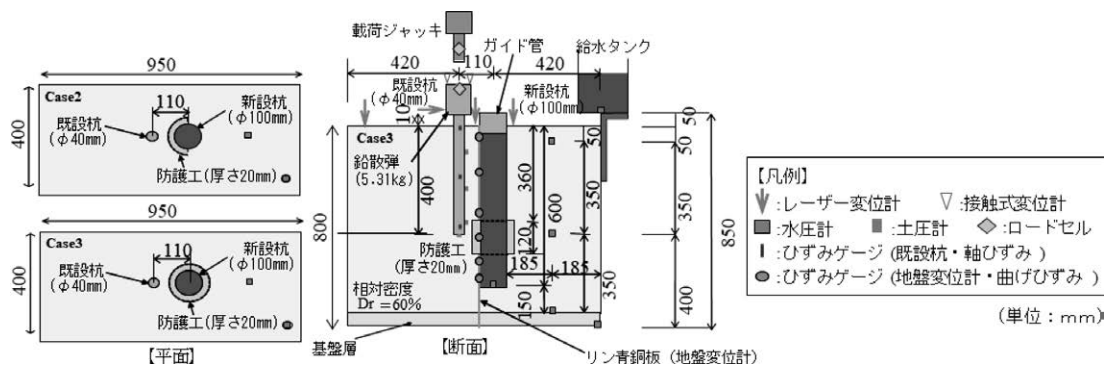


図4 遠心模型実験の計測装置

表3 遠心模型実験ケース

ケース	地盤の 相対密度 (%)	既設杭		新設杭		離隔	防護工				上載荷重 鉛散弾 (kg)
		杭径D (mm)	杭長 (mm)	杭径 (mm)	杭長 (mm)		上端長さ (GL-mm)	下端長さ (GL-mm)	防護 範囲	防護 厚	
Case1	60	40	400	100	600	1D	-	-	-	-	5.31
Case2	60	40	400	100	600	1D	360	480	半周	0.5D	5.31
Case3	60	40	400	100	600	1D	360	480	全周	0.5D	5.31

### 2・3 実験結果 (変位量)

杭頭変位量と掘削深さの関係を図5に示す。掘削深さについては、新設杭底面に設置した水圧計より、圧力が一定となり始めた時点を掘削深さ620mm (新設杭杭長600mm+水頭差20mm) となるように補正を行い算出した。

グラフ上の◇のマーカで示した時点は水圧が掘削深さ620mmに最初に達した時点 (以下掘削過程) を表しており、○のマーカで示した時点は水圧が安定するまで重液置換を10回行った掘削完了時点を表す。防護工以浅においては全ケース杭頭変位にほとんど差は見られなかったが、掘削過程の杭頭変位は、Case3 (全周防護) が0.011Dと最も大きな変位を示し、Case2 (半周防護) が0.007Dと最も小さい値を示した。掘削完了時点では、Case1 (無対策) で急激に変位が進行し、0.017Dとなった。防護工があるCase2、Case3については、急激な変位の進行は見られなかった。

ここで、図6にCase1 (無対策) の掘削時間と新設杭孔内の圧力変化量の関係を示す。重液排水と塩水注水を1サイクル終えた時点の圧力変化量を掘削深さとしてプロットしているため、縦軸は掘削深さとしている。圧力が徐々に下がっている過程を掘削過程とし、サイクルごとの圧力が一定になった時点を新設杭内の置換が完了し、掘削が完了した時点とした。また、前述の通り、掘削

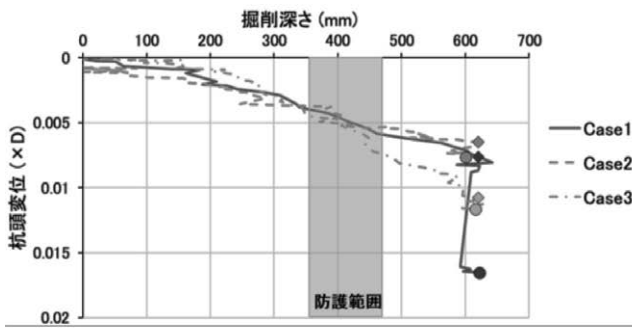


図5 杭頭変位－掘削深さ

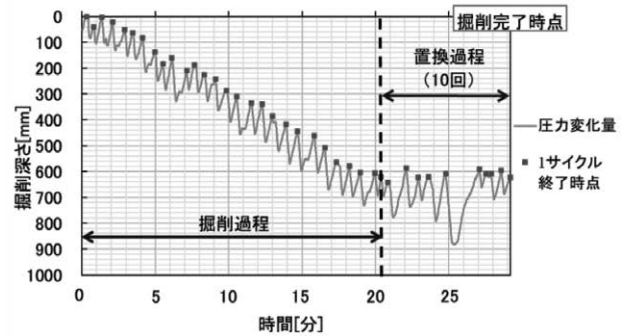


図6 新設杭孔内の圧力変化量－時間 (Case1)

完了後10サイクル程度は水圧の安定を確認するための置換過程とした。置換過程の約25分付近で大きく圧力が低下していることがわかる。これにより図5に見られるCase1 (無対策) の既設杭の急激な沈下は、新設杭の孔壁に変形が生じたことによる孔内の圧力低下が原因と推察される。

### 3. 有限要素解析

遠心模型実験で行ったN値20～30程度の砂地盤 ( $D_r=60\%$ ) を模擬した単一層の土層について、既設杭に近接して新設杭を施工する際の地盤掘削をモデル化し、3次元FEM解析にて防護工効果の検証を行った。

#### 3・1 解析モデル

既設杭およびその周辺地盤を3次元FEM (ソリッド要素) でモデル化する。既設杭周囲には周辺地盤とのすべりや剥離を表現できるジョイント要素を設ける。新設杭削孔領域は最初に地盤要素でモデル化、掘削と安定液置換を6段階でモデル化し、掘削の状況を再現する。地下水の水頭差は実験同様0.5mとし、既設杭と新設杭との離隔は1Dとした。

##### (1) モデル化領域

挙動の対称性を考慮して、既設杭と新設杭の軸心を通る面を基準としたハーフモデルとする。半無限の弾性体において、孔周辺の応力集中の影響範囲は孔直径の3倍程度であることから、モデル化領域は各杭から掘削孔径の5倍程度を確保する (図7)。

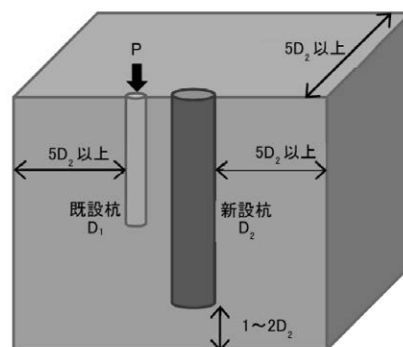


図7 モデル化領域イメージ

##### (2) 境界条件

ハーフモデル断面上の全節点の面外方向を固定、面内方向をフリーとした。

##### (3) 防護範囲

防護厚0.5m、防護長3mの防護工をGL-9m～12mの範囲で新設杭の既設杭側180°を防護 (半周防護)、新設杭を360°防護 (全周防護) したケースで設定した。モデル図を図8に示す。



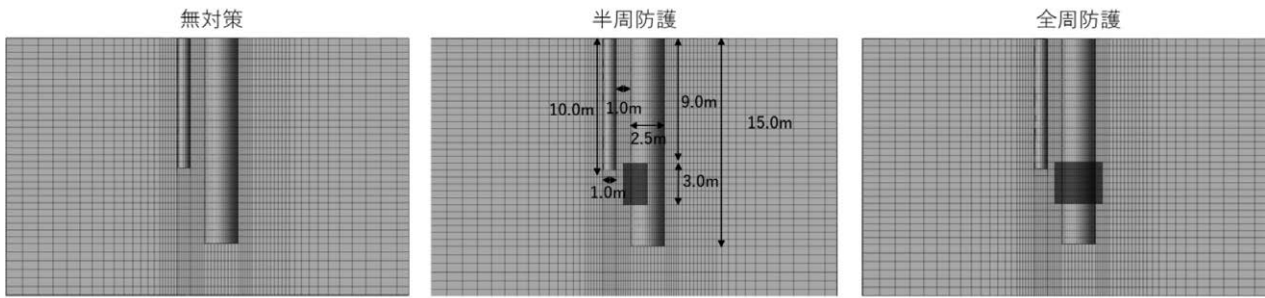


図8 解析モデル図

(4) 物性値

地盤および防護工の三軸圧縮試験結果 (LDT) を表4に示す。拘束圧は地盤の深さによって変化することから、再現解析の変形係数は既設杭中間付近の静止土圧 $=9.1 \text{ kN/m}^3 \times 5\text{m} \times 0.5 = 22.75\text{kPa}$ を参考に、拘束圧 $=25\text{kPa}$ の値を適用することとした。地盤の非線形特性はMohr-Coulombモデルとした。

ジョイントの物性値を表5に示す。法線剛性 $K_n$ 、せん断剛性 $K_t$ については地盤の弾性係数の約1000倍程度とした。これは、解析の際に杭モデルが地盤モデルに食い込むなどの不安定な挙動、過大な変形がないように、周囲の地盤材料よりも大きな値を取るのがよいという既往の論文などを参考に設定した。ダイレイタンシー角の設定については、今回用いた既設杭は、ほとんど不陸のない滑らかな面のSUS部材の杭ということを考慮して $0^\circ$ に設定した。粘着力 $c$ は鉄道構造物設計標準・同解説(基礎構造物)より、場所打ち杭の杭基礎の基準周面支持力度の考え方を参考にし、 $0.4c=2 \text{ (kN/m}^2)$ で設定した。内部摩擦角 $\phi$ は、鋼管杭と土の間の内部摩擦角に関する明確な考え方が現状ないことから、鉄道構造物設計標準・同解説(土留め構造物)に記載のコンクリートと土の間の内部摩擦角の考え方を参考におよそ $\phi/3$ 程度と想定し設定した。

表4 地盤・防護工物性値

	地盤	防護	
		半周防護	全周防護
変形係数 $E_{s0\_LDT}$ (kN/m <sup>2</sup> )	10,790	47,900	49,230
ポアソン比 $\nu$	0.3	0.3	0.3
湿潤単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	9.1	9.31	9.15
粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	4.7	62.9	58.5
内部摩擦角 $\phi$ (°)	35.7	42.9	39.7
ダイレイタンシー角 $\psi$ (°)	5.7	12.9	9.7

表5 ジョイント物性値

ジョイント物性値			
法線剛性 $K_n$	(kN/m <sup>3</sup> )		$1.0 \times 10^7$
せん断剛性 $K_s$	(kN/m <sup>3</sup> )		$1.0 \times 10^7$
粘着力 $c$	(kN/m <sup>2</sup> )		2
内部摩擦角 $\phi$	(°)		10
ダイレイタンシー角 $\psi$	(°)		0

(5) 地盤掘削および安定液置換のモデル化

新設杭施工の地盤掘削および安定液置換を模擬するため、最初に新設杭孔内に重液(比重 1.40)を地表面まで満たし、塩水を補充してGL+0.5mまで液面を上昇させた後に、液面を維持しながら徐々に安定液(比重 1.05)に置換している。この置換過程を5ステップに分割して計算する。

### 3・2 荷重条件

#### (1) 杭頭作用荷重

遠心模型実験時では鉛散弾5.31kgを載荷しており、25Gの遠心場では1.3kNとなる。実寸モデルに換算すると25<sup>2</sup>倍で813kNとなり、これを既設杭の杭頭に等分布で載荷するため杭頭荷重は1035kN/m<sup>2</sup>と設定した。

#### (2) 新設杭孔壁面作用荷重

各ステップの置換過程を安定液と重液の液圧差によって表現する。液圧変動のイメージを図9に示す。

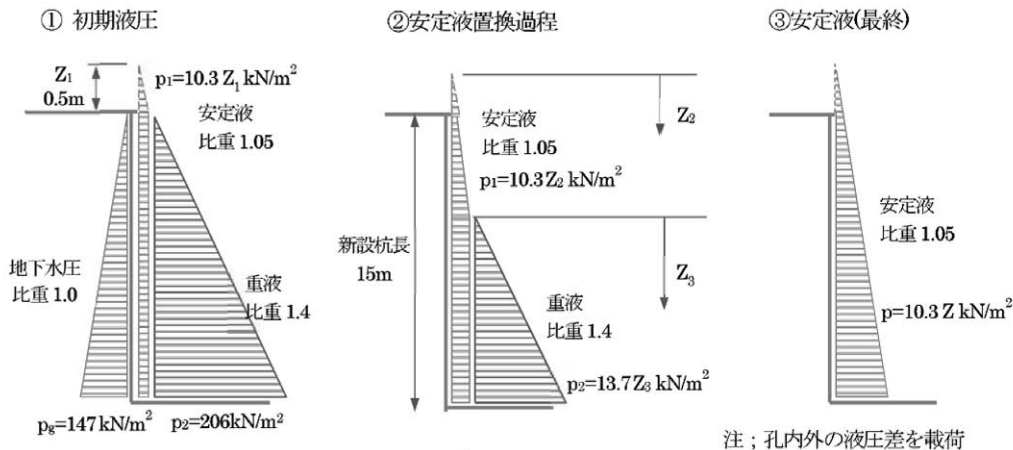


図9 置換過程の液圧変動のイメージ

### 3・3 解析ステップ

以下のステップで解析を行った。

#### ステップ1: 自重解析

地盤と既設杭の自重および初期の孔壁面の液圧差を設定。

#### ステップ2: 杭頭荷重

鉛散弾荷重を杭頭に載荷。

#### ステップ3～7: 液圧差載荷

安定液置換過程による液圧の変化を5段階で設定。

### 3・4 解析結果

#### (1) 変位量

実験結果と再現解析の掘削開始から掘削終了時までの杭の鉛直変位量を比較したグラフを図10に示す。なお、実験結果の変位量は、解析結果と比較するため図5の変位量の値を実応力場に変換した値である。図10を見ると、実験での変位量と解析での掘削終了時の最終沈下量は、防護工がある半周防護、全周防護ともに概ね再現されている。無対策の場合については、防護工ありの場合と比べて多少乖離があるものの、実験にて重液置換完了直前に既設杭先端 (GL-10m付近) で急激に沈下が生じた際の変位と解析での掘削完了後の変位量は概ね一致をしていることがわかる。

また、再現解析の結果から防護効果は半周防護と全周防護でほとんど変位量に差異はなく、実験結果と同様に半周防護と全周防護でほぼ同程度の防護効果が得られることが明らかとなった。

#### (2) コンター図

図11に掘削開始時から最終掘削時までの合成変位のコンター図、図12に掘削開始時から最終掘削時までの最大せん断ひずみのコンター図を示す。掘削が進行する過程において、防護の有無に問わず、既設杭上部の周辺地盤に変位がほとんど生じておらず、1D程度の離隔があれば地表付近の地盤にほとんど変位が生じていないことがわかる。無対策の場合、既設杭以深は掘削に伴い新設杭側へ滑るような挙動がみられるが、防護工を設置することで掘削に伴う既設杭以深の地盤の緩みが抑えられた

ため、変位が起きにくかったと考えられる。ひずみについても、防護工を設置することにより既設杭直下のひずみがある程度抑えられることが明らかとなった。

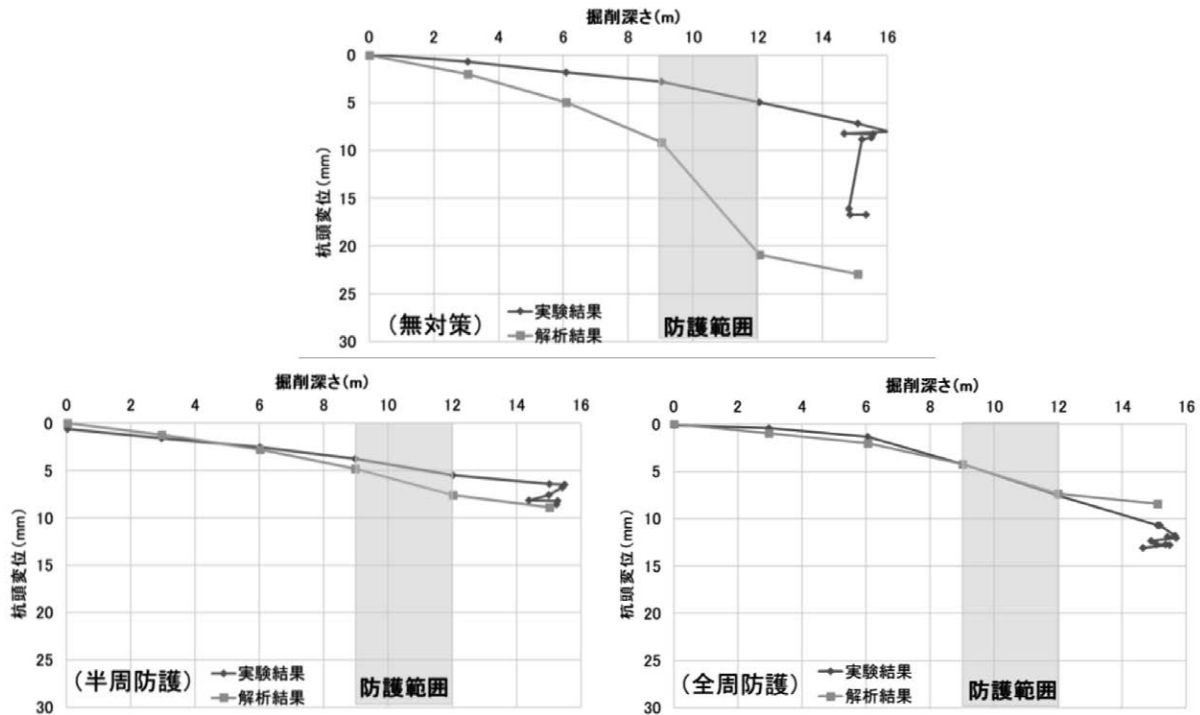


図10 杭頭変位量 (実験結果と解析値の比較)

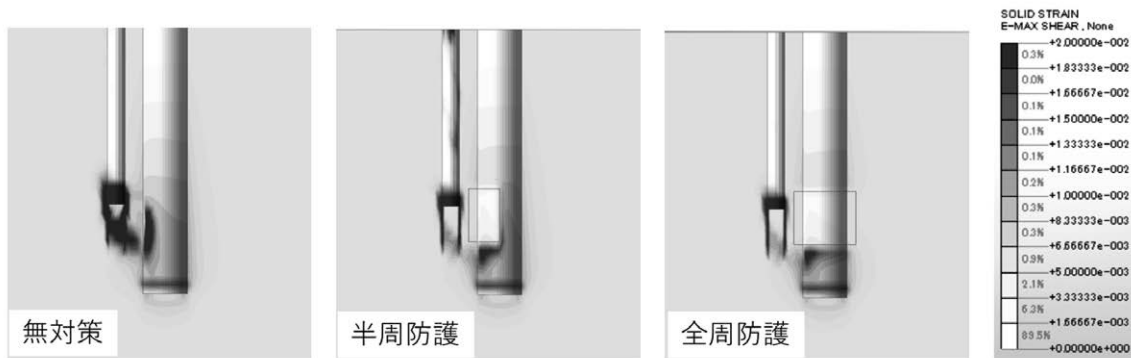


図11 合成変位コンター図

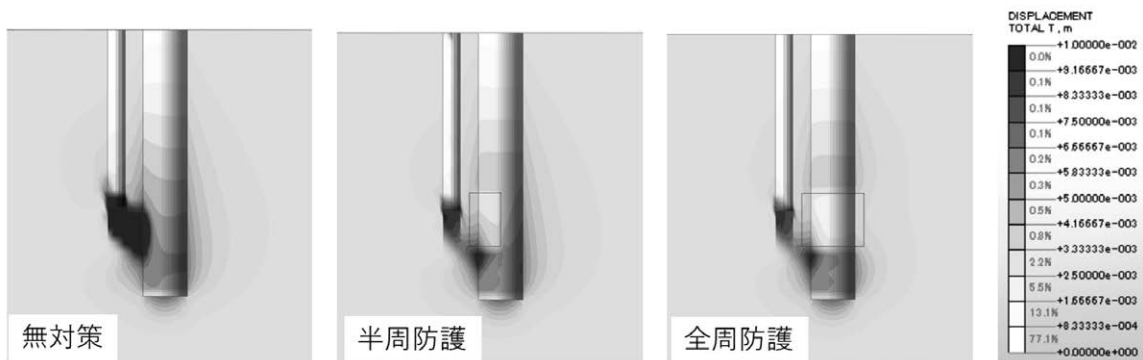


図12 最大せん断ひずみコンター図

### 3・5 効果的な防護深さの検証

図11の無対策のコンター図から、変位の影響線は既設杭下端より深い箇所 (GL-10~13m) に生じていることがわかる。このことからGL-10~13mで防護を行うことでより防護効果が得られると想定し、防護深さを変更したモデル (図13) にて解析を行った。

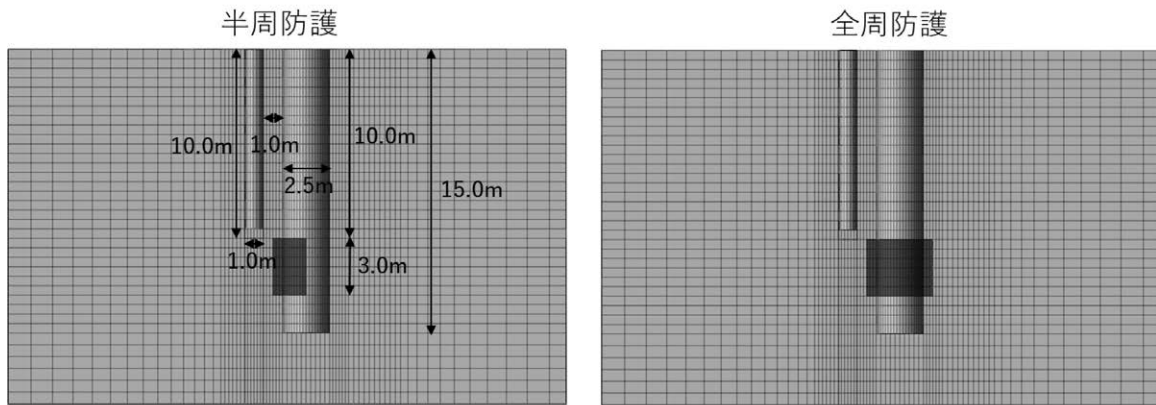


図13 解析モデル図 (防護深さ変更)

図14に防護深さGL-9~12mとGL-10~13mの場合の半周防護・全周防護の変位量を示す。防護深さをGL-10~13mにした場合の方が半周防護・全周防護ともに変位量が抑えられており、防護効果が期待できる。また、図15に無対策を含めた安全率を示す。「列車運行時間帯の近接工事設計施工マニュアル<sup>3)</sup>」から、グラフ上の点線は基準水位を設定した全体安全率1.35を表しており、実線は限界水位の全体安全率1.1を表している。深さGL-9~12mの場合は全周防護が基準水位の安全率に達しておらず、GL-10~13mの場合は半周防護・全周防護ともに基準水位の安全率を満たしている。

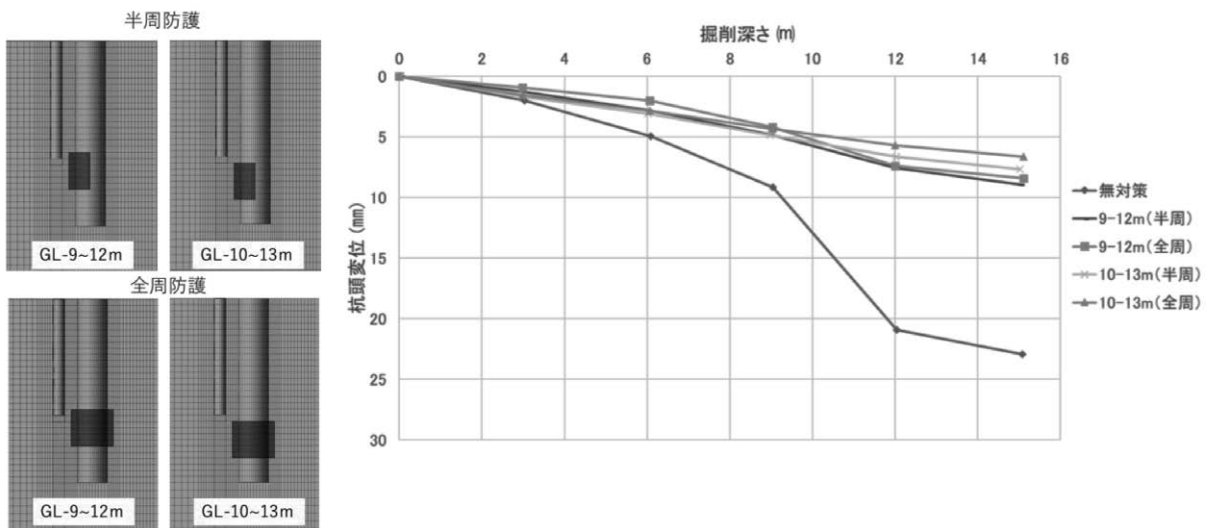


図14 防護深さの違いによる杭頭変位量の比較

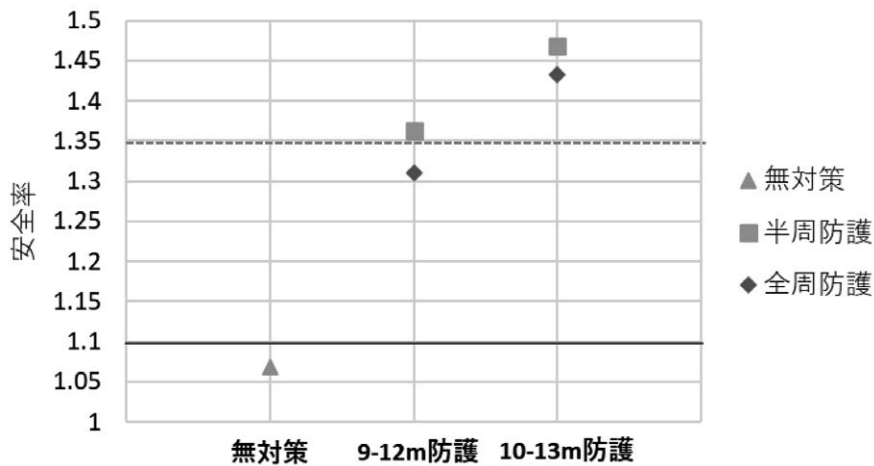


図15 安全率 (全ケース)



## 4. 結論

本稿では、杭の掘削過程を模擬した遠心模型実験と実験の再現解析から、場所打ち杭施工時における防護工の有無や防護範囲の違いが、近接する既設杭の挙動に与える影響検証結果を報告し、以下のことが明らかとなった。

- ・遠心模型試験結果から、無対策の場合には、新設杭の掘削に伴う既設杭の急激な沈下、周面摩擦抵抗の減少が確認された。また、近接での場所打ち杭の掘削時において、半周防護と全周防護では既設杭へ与える影響に明確な差異が見られなかった。
- ・再現解析では、遠心模型実験と同程度の沈下量の解析モデルを構築・確認し、遠心模型実験同様、無対策と比較して既設杭以深にのみ防護工を設置したことによる防護効果が確認でき、半周防護と全周防護ではほぼ同程度の防護効果を有する結果であった。
- ・今回の条件下では、防護工の設置深さは、既設杭の先端以深への範囲 (GL-10~13m) が最適である。

本稿では杭頭変位の変化についての考察を行ったが、今後は、実験結果の更なる精査と、再現解析にて得られた支持力に関する考察等を行い、場所打ち杭の施工条件の違いによる既設杭への影響や合理的な防護方法・防護範囲をより明確化していく予定である。

### 参考文献

- 1) 渡邊康司、桐生郷史、山本忠、高崎秀明、金田淳、阿部慶太、山本忠久、「既設杭に近接した場所打ち杭の掘削時の影響評価に関する研究 (その1: 研究目的, 遠心模型実験方法)」土木学会第73回年次学術講演会、pp.793-794 (2018)
- 2) 大林組技術研究所報、No.66、2003
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社、「列車運行時間帯の近接工事設計施工マニュアル 付属資料2-5」、pp.32