

既存杭撤去埋戻し地盤における杭の鉛直支持性能評価

廣瀬 榛名 鈴木 直子

Evaluation of the Vertical Bearing Capacity of the Pile with Removal and Backfilling of Existing Piles

Haruna Hirose Naoko Suzuki

Abstract

In an increasing number of building reconstruction projects, piles are being removed and backfilled before the construction of new buildings. In addition, the backfilled area must be considered when designing piles. Therefore, a study was conducted to improve the safety of pile-foundation buildings with removal and backfilling of existing piles. First, the validity of the analytical model was verified using a simulation analysis. Subsequently, the backfill was investigated to determine the variations in its mechanical and physical properties. Finally, the effect of the backfill on the vertical bearing capacity of the pile was quantitatively evaluated by assuming that the pile interfered with the backfill.

概要

建物の建替え工事では、杭を撤去し埋め戻した後に新築工事を行う事例が増加しており、新設杭の設計時に、埋戻し部の影響を考慮することの必要性が指摘されている。そこで、本報では、既存杭撤去埋戻し地盤上の新設杭の設計に向けた3次元有限要素法による検討結果を示す。まず、埋戻し部が新設杭の鉛直支持力に及ぼす影響について検討するため、既往の鉛直載荷試験のシミュレーション解析を行い、解析モデルの妥当性を検証した。つぎに、既存杭撤去埋戻し部の現地調査を行い、埋戻し部の力学的性質と物性のばらつきを整理した。最後に、埋戻し地盤に打設された新設杭を想定し、埋戻し部が新設杭の鉛直支持力に及ぼす影響を解析で定量的に評価した。埋戻し部と地盤の解析条件は、実際に施工された埋戻し部の現地調査と地盤条件に基づいた。調査結果に基づき埋戻し部の力学的性質とそのばらつきをモデル化する方法も示した。

1. はじめに

近年、都心部では既存建物を解体後に新築建物を建設するケースが増加している。このような場合には、敷地地盤において、既存建物を支持していた杭（以降、既存杭）の処理が必要となる。この既存杭の処理には、①直接利用、②存置、③撤去がある。既存杭の取り扱いとしては、存置と撤去の混在が一般的である。撤去の対象となる既存杭は、新設杭と干渉もしくは近接するものであることが多い。既存杭を撤去した後は、撤去孔をセメント系充填材などにより埋め戻して、新設杭を施工する。既存杭を撤去し埋め戻した部分（以降、埋戻し部）は原地盤とは力学的性質が異なる。また、既存杭を撤去した孔を均一に埋め戻すことは難しく、埋戻しの方法によってはばらつきが大きくなる。条件によっては、新設杭施工時にトラブルが発生することもある¹⁾。

このような背景を受けて、地盤工学会関東支部から2022年に「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」が発行された²⁾。このなかでは、新設杭の設計時に埋戻し部の影響を考慮することの必要性も指摘されている。加えて、2020年から2024年にかけて、国土交通省の総合技術開発プロジェクト「建築物と地盤に係る構造規定の合理化による都市の再生と強靱化

に資する技術開発」では、既存杭を含む敷地での新築建物の設計法が検討されている^{例えば3)}。

既存杭の処理後に新築建物を建設することが増加している現状において、強靱（レジリエント）で持続可能なまちづくりを実現しようとする昨今の建設業界の動向からも、既存杭撤去埋戻しに関する課題解決が必要だと考えられる。

本報では、このような状況を踏まえて実施した既存杭撤去埋戻し地盤上の新設杭の設計に向けた3次元有限要素法（以降、3D-FEM）による検討結果を示す。

まず、埋戻し部が新設杭の鉛直支持力に及ぼす影響について検討するため、既往の鉛直載荷試験のシミュレーション解析を行い、解析モデルの妥当性を検証した。つぎに、3D-FEMで埋戻し部をモデル化するために、既存杭撤去埋戻し部の現地調査を行い、埋戻し部の力学的性質と物性のばらつきについて整理した。最後に、埋戻し地盤に打設された新設杭を想定し、新設杭の鉛直支持力を3D-FEMを用いて評価した。

2. 解析モデルの妥当性の検証

既存杭撤去埋戻し地盤において、埋戻し部および既存杭撤去に伴う緩みが生じた部分は、原地盤とは力学的性

質が異なる。この部分と新設杭が干渉する場合には、新設杭の近傍には原地盤と物性が異なる部分が生じるため、この影響を解析に反映させる方法を検討した。本章では、4章の検討で用いる解析モデルについて、既存杭撤去埋戻し地盤における既往の実大杭の鉛直載荷試験のシミュレーション解析により妥当性を検証した。

2.1 シミュレーション解析の対象とした既往の実大杭の鉛直載荷試験

本節では、文献4)~文献5)で報告されている実大杭の急速載荷試験を対象としたシミュレーション解析結果について述べる。試験杭の概要をFig. 1に示す^{4), 5)}。試験杭の概要をTable 1に示す。試験は、原地盤に打設された杭、既存杭撤去埋戻し地盤に打設された杭を対象として実施された。以降、それぞれ、試験杭1、試験杭2と称す。試験杭の施工方法は、埋込み杭工法であった。埋込み杭工法では、掘削孔に根固め液（セメントミルク）を注入し、根固め部を造成する。試験における根固め部の下端は、杭先端から0.5m深い位置であった。試験の対象とした地盤条件をTable 2に示す。この試験では、杭撤去に伴う周辺地盤の緩みの調査が実施されており、杭撤去前後にPS検層によりせん断波速度が測定された^{6), 7)}。杭撤去後の調査は、撤去杭を中心にして撤去孔の外端から

同心円状に0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 mの各地点で実施された。Table 2には、各地点における杭撤去前に対する撤去後の弾性係数 E_{ps} ($\propto V_s^2$, V_s :せん断波速度)の比率を示す。試験杭2の杭芯は、既存杭を撤去して埋め戻した部分の中心と一致する条件であった。

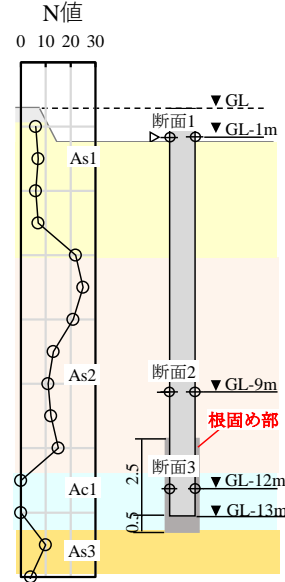


Fig. 1 試験杭の概要^{4), 5)}
Outline of Test Pile

杭径/ 削孔径 (mm)	700/ 800
杭長 (m)	13
杭の種類	SC杭
鋼管厚 (mm)	9.0
施工方法	埋込み杭 工法

Table 2 地盤条件と解析定数
Soil Condition and Analysis Constants

地盤 No.	下端 深度 (m)	土質 区分	単位 体積 重量 γ (kN/m ³)	弾性 係数 E_{ps} (MN/m ²)	杭撤去前に対する 撤去後の E_{ps} の比率				有効 上載圧 σ_v (kN/m ²)	基準 せん断 ひずみ γ_r (%)	極限周面 摩擦力度 f_{max} (kN/m ²)																																																																																													
					調査 位置* 0 ~ 0.5m	調査 位置* 0.5m ~ 1m	調査 位置* 1m ~ 1.5m	調査 位置* 1.5m ~ 2m																																																																																																
S1	-1.8	As1 細砂	18	91.7	0.7	0.8	1	1	16.2	0.050	試験杭1： 36.8 試験杭2： 20.6 試験杭1： 60.0 試験杭2： 55.8																																																																																													
	-2.3	As1 細砂	18	91.7					34.5	0.050		S2	-3.8	As1 細砂	18	79.1	0.5	0.8	0.7	0.8	42.7	0.050	S3	-6.7	As2 細砂	18	187	60.7	0.070	S4	-9	As2 細砂	18	187	—	—	—	—	60.7	0.070	-10.9	As2 細砂	18	169	89.8	0.070	S5	-12	Ac1 粘土質シルト	16	93.8	—	—	—	—	110	0.18	-12.5	Ac1 粘土質シルト	16	93.8	115	0.18	S6	-12.9	Ac1 砂質シルト	16	191	—	—	—	—	118	0.18	S7	-13.8	As3 シルト質細砂	16	169	123	0.080	S8	-14.8	Ac2 砂質シルト	16	107**	130	0.18	S9	-15.9	Ac2 粘土質シルト	16	68.9**	136	0.18	S10	-16.8	Ac2 シルト質細砂	18	79.1**	144	0.080	S11	-17.7
S2	-3.8	As1 細砂	18	79.1	0.5	0.8	0.7	0.8	42.7	0.050																																																																																														
S3	-6.7	As2 細砂	18	187					60.7	0.070		S4	-9	As2 細砂	18	187	—	—	—	—	60.7	0.070	-10.9	As2 細砂	18	169	89.8	0.070	S5	-12	Ac1 粘土質シルト	16	93.8	—	—	—	—	110	0.18	-12.5	Ac1 粘土質シルト	16	93.8	115	0.18	S6	-12.9	Ac1 砂質シルト	16	191	—	—	—	—	118	0.18	S7	-13.8	As3 シルト質細砂	16	169	123	0.080	S8	-14.8	Ac2 砂質シルト	16	107**					130	0.18	S9	-15.9	Ac2 粘土質シルト	16	68.9**	136	0.18	S10	-16.8	Ac2 シルト質細砂	18	79.1**	144	0.080	S11	-17.7	Ac2 砂質シルト	16	68.8**	150	0.18									
S4	-9	As2 細砂	18	187	—	—	—	—	60.7	0.070																																																																																														
	-10.9	As2 細砂	18	169					89.8	0.070		S5	-12	Ac1 粘土質シルト	16	93.8	—	—	—	—	110	0.18	-12.5	Ac1 粘土質シルト	16	93.8	115	0.18	S6	-12.9	Ac1 砂質シルト	16	191	—	—	—	—	118	0.18	S7	-13.8	As3 シルト質細砂	16	169	123	0.080	S8	-14.8	Ac2 砂質シルト	16					107**	130	0.18	S9	-15.9	Ac2 粘土質シルト	16	68.9**	136	0.18	S10	-16.8	Ac2 シルト質細砂	18					79.1**	144	0.080	S11	-17.7	Ac2 砂質シルト	16	68.8**	150	0.18																						
S5	-12	Ac1 粘土質シルト	16	93.8	—	—	—	—	110	0.18																																																																																														
	-12.5	Ac1 粘土質シルト	16	93.8					115	0.18		S6	-12.9	Ac1 砂質シルト	16	191	—	—	—	—	118	0.18	S7	-13.8	As3 シルト質細砂	16	169	123	0.080	S8	-14.8	Ac2 砂質シルト	16					107**	130	0.18	S9	-15.9	Ac2 粘土質シルト	16	68.9**	136	0.18	S10	-16.8	Ac2 シルト質細砂					18	79.1**	144	0.080	S11	-17.7	Ac2 砂質シルト	16	68.8**	150	0.18																																							
S6	-12.9	Ac1 砂質シルト	16	191	—	—	—	—	118	0.18																																																																																														
S7	-13.8	As3 シルト質細砂	16	169					123	0.080		S8	-14.8	Ac2 砂質シルト	16	107**					130	0.18	S9	-15.9	Ac2 粘土質シルト	16	68.9**	136	0.18	S10	-16.8	Ac2 シルト質細砂	18					79.1**	144	0.080	S11	-17.7	Ac2 砂質シルト	16	68.8**	150	0.18																																																									
S8	-14.8	Ac2 砂質シルト	16	107**					130	0.18																																																																																														
S9	-15.9	Ac2 粘土質シルト	16	68.9**					136	0.18																																																																																														
S10	-16.8	Ac2 シルト質細砂	18	79.1**					144	0.080																																																																																														
S11	-17.7	Ac2 砂質シルト	16	68.8**					150	0.18																																																																																														

*: 撤去孔の外端を基準にした位置, **: N値から求めたせん断波速度の換算値

既存杭撤去埋戻し工事は、既存杭をケーシングによって縁切り削孔し、引き抜きながら流動化処理土を上から投入するという手順で実施された⁸⁾。既存杭は、埋込み杭工法で施工され、杭長は12m、杭径は500mmであった。撤去に用いたケーシングの最大外径は780mmであった。

2.2 解析モデルの概要

試験杭と敷地地盤をモデル化し、3D-FEMにより2.1章に示した実大杭の鉛直載荷試験のシミュレーション解析を実施した。解析では、試験杭1、試験杭2の両方を対象とした。解析ケースをFig. 2に示す。既存杭撤去埋戻し地盤に打設された杭である試験杭2については、撤去到用いたケーシングの最大外径より、試験杭施工時の削孔径の方が大きかったため、埋戻し部は試験杭施工時に除去されたと考え、モデル化の対象外とした。よって、試験杭2で考慮する既存杭撤去埋戻し地盤における特有の条件は、既存杭撤去到に伴う周辺地盤の緩みである。Fig. 3にシミュレーション解析のFEMモデル、Fig. 4に杭周辺地盤のメッシュ分割を示す。なお、解析コードは市販の汎用ソフトSoilPlus Ver.2021⁹⁾を用いた。

2.2.1 地盤

地盤は弾塑性のソリッド要素でモデル化した。解析に用いた定数は、文献10)を参考に設定した。解析定数をTable 2に示す。弾性係数 E_p は、せん断波速度 V_s から評価した。評価に用いた V_s は、基本はPS検層で得た値としたが、PS検層結果がない深度ではN値に基づきN値と V_s との関係式¹¹⁾から換算した。試験杭2の地盤については、杭撤去到に伴う緩みの影響を考慮した。解析モデルでは、Fig. 2に示す領域にわけて、対応する地点の調査結果から杭撤去到に伴う緩みを設定した。緩みの設定は、杭撤去到後に実施したPS検層結果に基づいた。杭撤去到前に対する撤去到後の弾性係数の比率をTable 2に示す。

地盤の非線形特性は、次式で表されるHardin-Drnevichモデル（以降、H-Dモデル）¹²⁾とした。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (1)$$

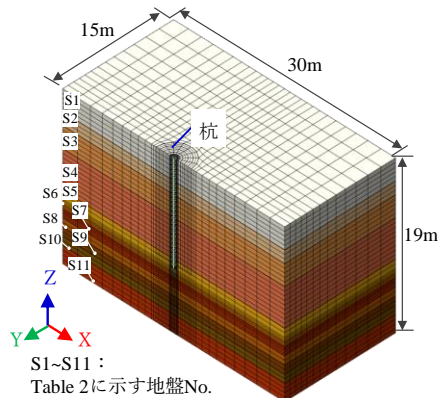


Fig. 3 シミュレーション解析のFEMモデル
FEM Model for Simulation Analysis

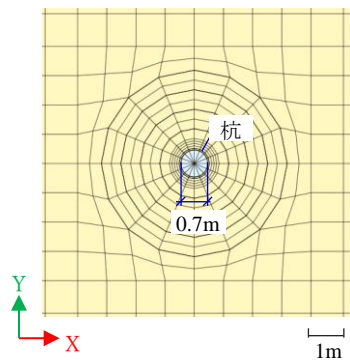


Fig. 4 杭周辺地盤のメッシュ分割
Mesh Division around the Pile

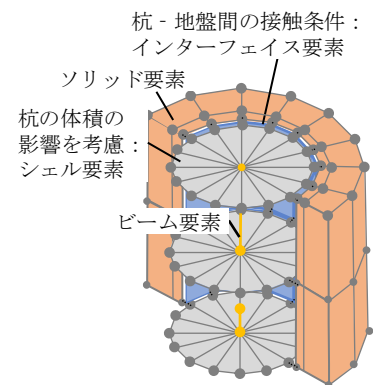


Fig. 5 杭モデル化の概要
Outline of Pile Modeling in FEM

ここに、 G_0 : 初期せん断弾性係数(kN/m^2)、 G : 割線せん断弾性係数(kN/m^2)、 γ_r : 基準せん断ひずみ、 γ : せん断ひずみ

基準せん断ひずみは、土質の力学的性質を考慮して設定した。砂質土の基準せん断ひずみは、拘束圧に依存する^{例えば12)}ため、有効上載圧ごとに設定した。粘土の基準せん断ひずみは、標準的な値である0.18%¹²⁾を用いた。地盤の境界条件は、底面が固定条件、側面が鉛直ローラーとした。杭の極限周面摩擦力度は、鉛直載荷試験結果の値を用いた。

2.2.2 杭

杭はビーム要素とシェル要素でモデル化した。Fig. 5に示すように、杭体積を考慮するため、地盤中に杭径 700mm の円筒に外接する角柱の空洞（杭による排除体積に相当）を作り、シェル要素を設けた。シェル要素と地盤の間には、インターフェイス要素を設けて、地盤と杭の接触面の滑り・剥離を考慮した。そして、

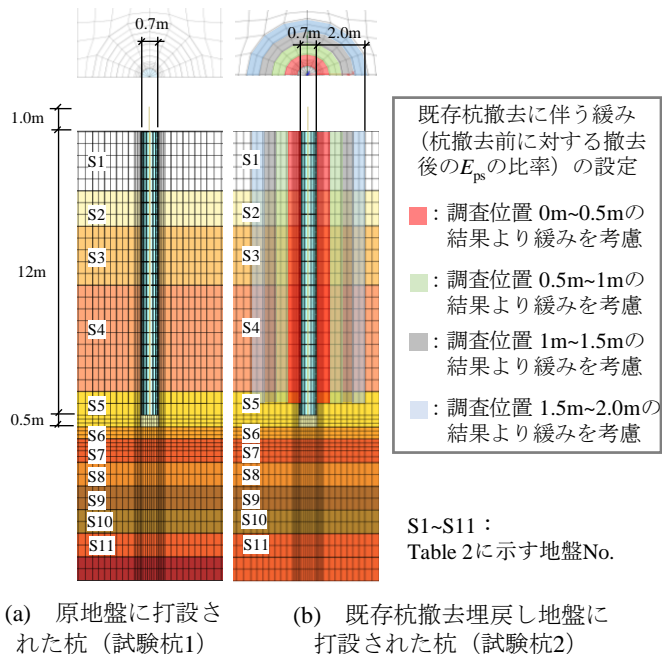


Fig. 2 シミュレーション解析のケース
Cases of Simulation Analysis

杭芯位置にビーム要素を配置し、同一深度にあるシェル要素の節点とビーム要素の節点とを同一変位条件で結合した。このとき、断面内で平面保持を満足するように、Multi-Point Constrain (以降、MPC) 機能を用いてビーム要素の節点とシェル要素の構成節点を線形結合関係とした。MPC 機能を用いることで、1つの独立節点と、その他の複数の従属節点との間に多点拘束方程式を作成し、関係性を定義することができる。

2.3 解析結果

解析結果の中から、軸力-沈下量関係と軸力深度分布を整理し、試験結果と比較した。試験で測定された3深度の軸力-沈下量関係をFig. 6に示す。原地盤に打設された杭(試験杭1)、既存杭撤去埋戻し地盤に打設された杭(試験杭2)両ケースとも3深度における軸力-沈下量関係の解析結果は試験結果と概ね対応することを確認した。軸力深度分布をFig. 7に示す。軸力深度分布についても、両ケースの解析結果は試験結果と概ね対応した。なお、Fig. 7に示す実験結果は、文献5)に示された軸力-沈下量関係の値を読み取って軸力深度分布に変換した。

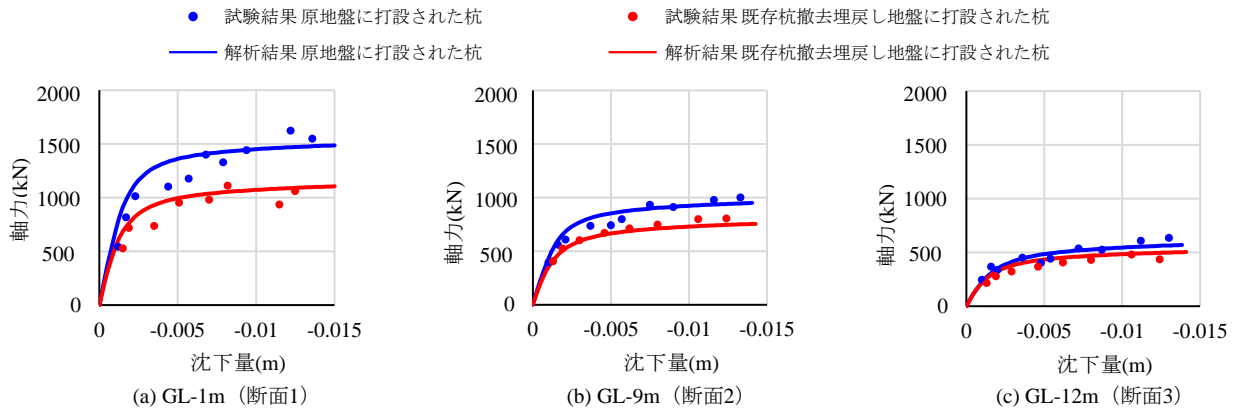


Fig. 6 試験結果と解析結果の比較：杭体の軸力-沈下量関係
Comparison with Test Results and Analysis Results : Axial Force Versus Displacement

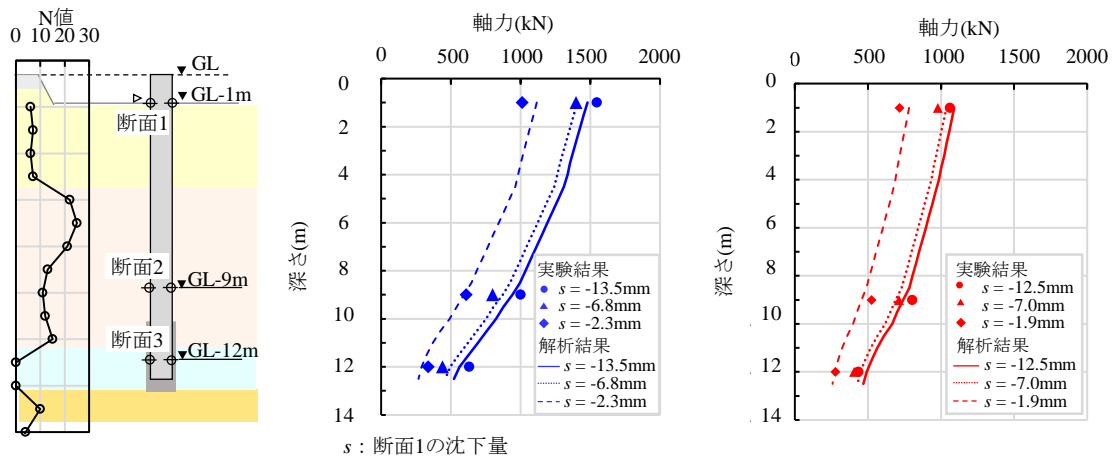


Fig. 7 試験結果と解析結果の比較：杭体の軸力深度分布
Comparison with Test Results and Analysis Results : Disribution of Axial Forces of Pile with Depth

打設された杭だけではなく、杭近傍に原地盤と物性が異なる部分がある既存杭撤去埋戻し地盤に打設された新設杭についても鉛直支持性能を評価できることを確認した。

3. 既存杭撤去埋戻し部の調査結果

本章では、検討対象とした実際に施工された埋戻し部の調査結果を示す。

解析的検討を見据えて、埋戻し部の力学的性質として剛性と強度およびそのばらつきを把握するための現地調査を実施した。

調査対象の既存杭撤去埋戻し工事では、既存杭を縁切引抜工法により撤去しながら、セメントベントナイト(水セメント比417%)を撤去孔の下方から注入して埋め戻した。セメントベントナイトの配合は、新設杭の施工時における掘削不良が発生しないように設定された。

文献2)では、既存杭撤去と埋戻し方法の組合せを分類し、埋戻し部の品質を5段階「1:非常に悪い~5:非常に良い」で評価している。文献2)において、先に記した方法で施工した埋戻し部の品質は「3:どちらも悪い~4:良い」と評価されている。そこで、調査

対象の埋戻し部の品質は比較的良いものに位置づけられると考えた。

既存杭は、杭径が約1.4m、杭長が約22mの場所打ち杭である。杭撤去到に用いた削孔ケーシングの外径は、2.0mである。調査対象の削孔完了深度は、GL-23mであった。杭撤去の時には、既存杭と地盤との縁切りが確認できた深度で削孔を完了する。この深度を削孔完了深度と称す。

埋戻し部の径は削孔ケーシングの外径、先端深さは最削孔完了深度に相当すると考え、埋戻し部の径は2.0m、長さは23mと想定した。

原位置では、標準貫入試験と試料採取を実施した。標準貫入試験と試料採取は同一の埋戻し部を対象とした。採取した試料に対して、室内土質試験を実施した。室内土質試験は、湿潤密度試験 (JIS A 1225)、一軸圧縮試験 (JIS A 1216)、ベンダーエレメントによる土のせん断波速度測定 (JGS 0544) である。これらの3つの試験は、同一の供試体で実施し、湿潤密度、一軸圧縮強さ、せん断波速度のデータを測定した。一軸圧縮強さは、埋戻し部の強度、せん断波速度は、埋戻し部の剛性と相関がある。深度方向に複数箇所て採取した試料で試験を実施し、それぞれ深さ方向のばらつきを求めて評価した。既存杭撤去埋戻し部の調査結果をFig. 8に示す。本調査の標準貫入試験結果では、埋戻し部の平均N値は4であった。また、GL-23mで原地盤を確認した。既存杭撤去埋戻し方法によっては、埋戻し部に未固結部分が生じることがある。そのような埋戻し部で標準貫入試験を実施すると、ロッドやハンマーの重量のみで所定の貫入量に達する自沈が数メートルにわたり生じる。よって、Fig. 8に示す標準貫入試験結果からは、調査対象には未固結部分がなかったことが確認できた。

埋戻し部の力学的性質の把握を目的として測定した湿潤密度、一軸圧縮強さ、せん断波速度については、ばらつきの指標である平均値 μ 、標準偏差 σ 、変動係数CVを示す。湿潤密度、せん断波速度の変動係数は、10%以下であった。一軸圧縮強さの変動係数は30.9%であった。

改良地盤の一軸圧縮強さの変動係数については、原地盤の土質により異なるが、砂質土系は35%程度、粘性土系は45%程度との報告¹³⁾があり、今回、測定した埋戻し部の値はこれらと比べて大差はなかった。

なお、埋戻し部の非線形特性を把握するために、土の変形特性を求めるための繰返し三軸試験 (JGS 0542) も実施した。試験結果は、4.3.2項に示す。

4. 既存杭撤去埋戻し部を考慮した鉛直支持力の解析的検討

調査結果に基づいて埋戻し部をモデル化し、2章で妥当性を検証した解析モデルを用いて鉛直支持力を評価した結果について示す。ここでは、設計および施工時に埋戻し部の目標強度の設定に活かすために、埋戻し部が新設杭の鉛直支持力に及ぼす影響に着目した。

3D-FEMでは、埋戻し地盤に打設された新設杭を想定し、地盤、新設杭、埋戻し部をモデル化した。

地盤と埋戻し部について3章で示した実際に施工された埋戻し部の現地調査と地盤条件を活用して設定した。解析モデルの概要をFig. 9に示す。既存杭撤去埋戻し地盤に施工される新設杭の設計では、新設杭の先端深度は埋戻し部よりも1m以上かつ $1d_p$ (d_p : 杭先端径) 分以上深くすることが望ましく、これを満足しない場合には、詳細な検討が必要と指摘されている²⁾。

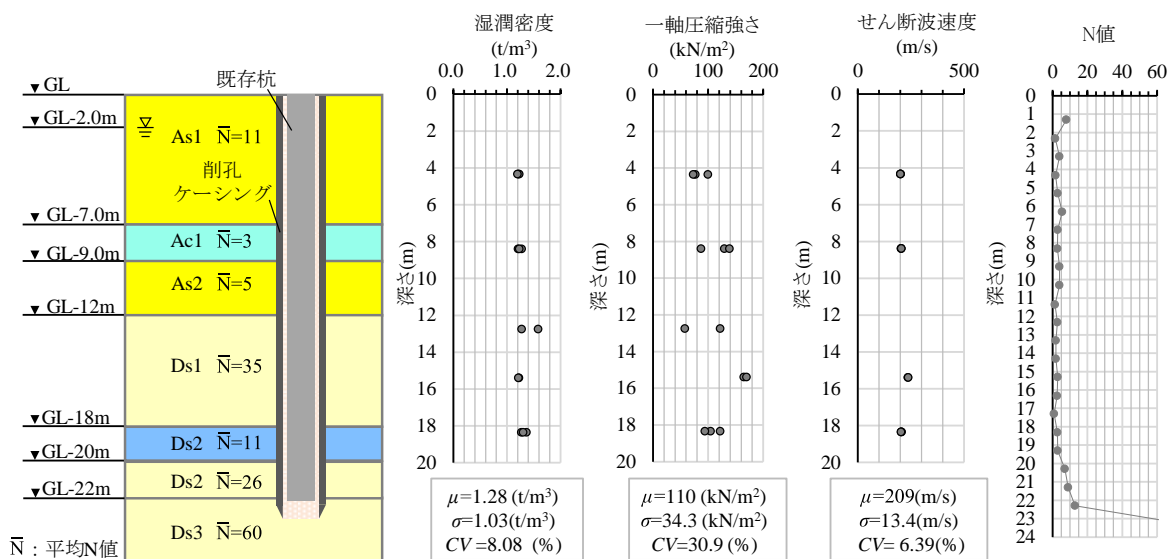


Fig. 8 既存杭撤去埋戻し部の調査結果

Survey Results of Existing Pile Removal and Backfilling Section

本検討では、まず新設杭と埋戻し部の鉛直断面的な位置関係に着目して新設杭の鉛直支持力を評価した。その結果、新設杭と埋戻し部の先端深度が同一の条件において、新設杭と埋戻し部の平面的な位置関係によっては、先端支持力が低下するケースがあった。これは、文献2)の先の記述とも対応する。つぎに、新設杭と埋戻し部の先端深度が同一の条件で、新設杭と埋戻し部の平面的な位置関係が先端支持力に及ぼす影響を定量的に評価した。さらに、埋戻し部については、調査結果で得たその力学的性質とばらつきに基づいてモデル化する方法も示した。

4.1 検討対象

地盤条件をTable 3 に示す。粘性土層と砂質土層の互層地盤であり、GL-12m 付近を境に以浅は沖積層、以深は洪積層であった。

埋戻し部の直径は2.0m、長さは22~24mとし、物性は3章の調査結果に基づいて評価した。

新設杭は、高さが31m~60m程度の高層建物を支持すると想定し、直径1.8mの場所打ち杭とした。杭支持層はDs3層とし、杭先端深度をDs3層上端から約1d_p下方のGL-24mとした。新設杭の諸元をTable 4に示す。

4.2 解析モデルおよび解析定数

4.2.1 地盤と杭 地盤は2.2.1項で示したとおり非線形のソリッド要素でモデル化した。地盤の解析定数をTable 3に示す。非線形特性はH-Dモデルとし、パラメータである基準せん断ひずみは、土質と拘束圧を考慮して設定した。

杭は、ビーム要素とシェル要素でモデル化した。シェル要素と地盤の間には、剛塑性のインターフェイス要素を設けて、地盤と杭の接触面の滑り・剥離を考慮した。極限周面摩擦力度f_{max}は、国土交通省告示1113号に準拠し、Table 3の平均N値から評価した。なお、極限周面摩擦力度f_{max}の上限は100(kN/m²)である。

4.2.2 埋戻し部 埋戻し部は非線形のソリッド要素でモデル化した。解析定数をTable 5に示す。解析定数は、Fig. 8に示した湿潤密度、一軸圧縮強さ、せん断波速度の平均値に、ばらつきを考慮した低減係数αを乗じた値を用いて設定した。低減係数αは、文献14)を参考にして、次式で与えた。

$$\alpha = 1 - 1.3 \cdot (\sigma / \mu) \quad (2)$$

ここに、μ：平均値、σ：標準偏差

非線形特性は、地盤と同様に式(1)で表されるH-Dモデルとした。非線形特性を設定するパラメータである基準せん断ひずみは、土の変形特性を求めるための繰返し三軸試験 (JGS 0542) (以降、繰返し三軸試験) を実施して、評価することが一般的である。しかしながら、実務設計において、埋戻し部の繰返し三軸試験の実施は限られる。また、砂・粘土の基準せん断ひずみには、既往研究で標準化された値が整理されている(例えば15)が、埋戻し

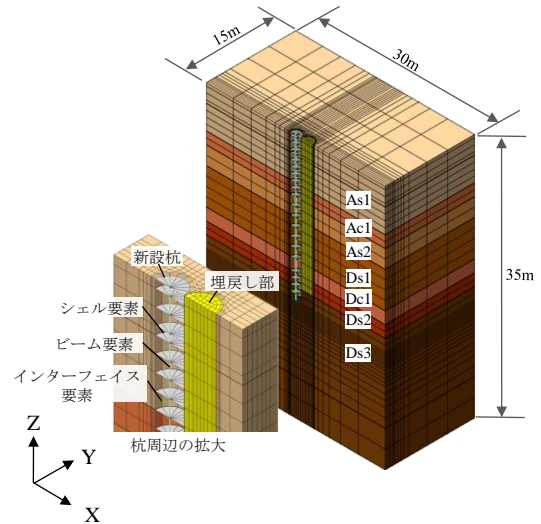


Fig. 9 解析モデルの概要 (XZ平面对称モデル) Outline of FEM Model

Table 3 地盤条件と解析定数 Material Properties of Soil and Analysis Constant

No.	土質区分	層厚 (m)	平均 N 値	せん断波速度 V _s (m/s)	初期弾性係数 E ₀ (MN/m ²)	基準せん断ひずみ γ _r (%)	極限周面摩擦力度 f _{max} (kN/m ²)
1	As1	7	11	168	117	0.050~0.070	37.8
2	Ac1	2	3	159	92	0.18	18.8
3	As2	3	5	148	91	0.07	17.5
4	Ds1	6	35	318	473	0.08	100
5	Dc1	2	11	280	329	0.18	58.3
6	Ds2	2	26	290	394	0.08	85.0
7	Ds3	-	60	376	661	0.12~0.15	100

Table 4 新設杭の諸元

Pile Specifications			
軸部径/先端径 (m)	杭長 (m)	杭種	設計基準強度 (N/mm ²)
1.8 / 1.8	24	場所打ち杭	36

Table 5 埋戻し部の解析定数

Material Properties of Existing Pile Removal and Backfilled Section

埋戻し部径 (m)	一軸圧縮強さ q _u (kN/m ²)	せん断波速度 V _s (m/s)	初期弾性係数 E ₀ (MN/m ²)	基準せん断ひずみ γ _r (%)	極限周面摩擦力度 f _{max} (kN/m ²)
2.0	66.4	192	110	0.052	33.2

部においては、標準値はない。そのため、本検討では、実用性の観点から一軸圧縮試験などから基準せん断ひずみを設定することとした。加えて、一軸圧縮試験は、繰返し三軸試験と比べて簡便に試験可能であるため、複数箇所実施しやすく、解析的検討にばらつきを考慮するという目的にも対応していると考えた。

H-Dモデルを設定するパラメータである基準せん断ひずみ γ_r は、式(3)で与えた。

$$\gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_0} \quad (3)$$

ここに、 τ_{max} ：最大せん断強度(kN/m²)、 G_0 ：初期せん断弾性係数(kN/m²)

G_0 、 τ_{max} を設定することで、H-Dモデルを評価することとした。各々を式(4)、式(5)¹⁶⁾で与えた。

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (4)$$

ここに、 ρ ：湿潤密度(t/m³)、 V_s ：せん断波速度(m/s)

$$\tau_{max} = \frac{q_u}{3} \quad (5)$$

ここに、 q_u ：一軸圧縮強さ(kN/m²)

式(3)～式(5)により、一軸圧縮試験結果などから非線形特性の設定方法を示した。埋戻し部の非線形特性として、せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係を整理した。式(3)～式(5)により設定した τ - γ 関係と繰返し三軸試験結果より得られた τ - γ 関係をFig. 10に示す。以降に示す解析的検討には、式(3)～式(5)にばらつきによる低減を考慮したTable 5の値を用いて設定した τ - γ 関係を用いた。Fig. 10には、式(3)～式(5)により設定した τ - γ 関係と繰返し三軸試験結果より得られた τ - γ 関係との対応を確認するために、ばらつきによる低減を考慮しないケースも示す。ばらつきによる低減を考慮しないケースの τ - γ 関係は、 $\gamma=0.001$ までは繰返し三軸試験結果と対応していることが確認できた。また、解析的検討に用いるばらつきによる低減を考慮した τ - γ 関係については、せん断ひずみの大きさによらず、繰返し三軸試験結果と比較して、せん断応力が小さくなっていることを確認した。

極限周面摩擦応力度 f_{max} については、粘性土相当と考えて、一軸圧縮強さ q_u の1/2とした。

4.3 解析結果

4.3.1 新設杭と埋戻し部の鉛直断面的な位置関係に着目した検討 新設杭と埋戻し部の鉛直断面的な位置関係に着目して検討した。ここでは、Fig. 11に示す埋戻し部の先端深度をパラメータとして、新設杭よりも $1d_p$ ほど浅くするケース、同一とするケースを考えることとした。平面的な位置関係については、Fig. 12に示す(b)、(f)の2ケースを対象とした。これらを埋戻し部がないケースと比較した。解析ケースをTable 6にまとめる。まず、極限先端支持力に至るまで杭の沈下挙動を評価するために、本検討の解析結果と既往の知見^{11)、17)}との対応を確認した。Fig. 13に埋戻し部がないCase-00の杭先端の荷

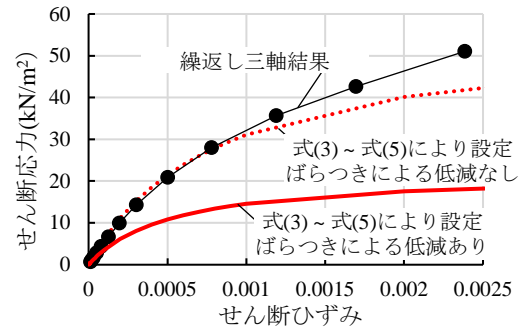


Fig. 10 埋戻し部のせん断応力-ひずみ関係
Shear Stress-Strain Relationship of Backfilled Section

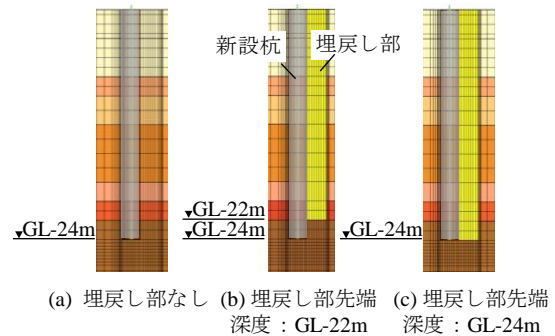
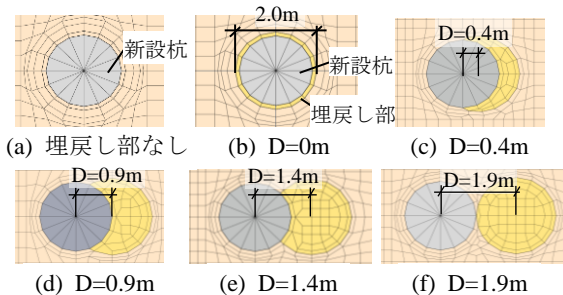


Fig. 11 新設杭と埋戻し部の鉛直断面的な位置関係
Vertical Cross-Sectional Location of Pile and Backfilled Section



D：新設杭-埋戻し部の中心間距離(m)

Fig. 12 新設杭と埋戻し部の平面的な位置関係
Planar Location of Pile and Backfilled Section

Table 6 新設杭と埋戻し部の鉛直断面的な位置関係に着目した検討の解析ケース
Analysis Case of the Study Focused on the Depth Positional Relationship Between the Pile and the Backfilled Section.

解析ケース名	新設杭と埋戻し部の鉛直断面的な位置関係		新設杭と埋戻し部の平面的な位置関係
	埋戻し部の先端深度	新設杭の先端深度	
Case-00	—	—	埋戻し部なし
Case-D0-L22	GL-22m	GL-24m	D=0m (Fig. 12 (b))
Case-D0-L24	GL-24m		
Case-D19-L22	GL-22m	GL-24m	D=1.9m (Fig. 12 (f))
Case-D19-L24	GL-24m		

重 - 沈下量曲線を示す。Case-00は、Fig. 12 (b), (f) に示す2 ケースのメッシュ分割で解析を行った。両者の荷重 - 沈下曲線は概ね一致しており、メッシュ分割の差異による解析結果への影響が無視できる程度であることを確認した。

既往の文献¹¹⁾中の杭先端における荷重 - 沈下量曲線は、杭径1.0~2.5mの先端載荷試験結果に基づき提案されているが、杭径が1.5m以上のデータは2件と少ない。そこで、杭径1.5mの先端載荷試験結果の杭先端の荷重 - 沈下量曲線¹⁷⁾もFig. 13に併記した。検討対象の杭径は比較的大きいが、既往の知見の範囲内にあることを確認した。つぎに、埋戻し地盤に打設された杭軸力 - 沈下曲線をFig. 14に示す。杭先端軸力 - 沈下量関係について、埋戻し部と新設杭の先端深度が十分に離れたCase-D0-L22, Case-D19-L22は、埋戻し部がないCase-00と同程度であった。極限先端支持力を杭径10%変位 (0.18m) 時の杭先端軸力とすると、埋戻し部の先端深度が新設杭と同一のCase-D0-L24, Case-D19-L24において、極限先端支持力はCase-00と比べて低下した。その低下程度は、本検討の条件では約2割であった。杭頭の軸力 - 沈下曲線を見ると、新設杭と埋戻し部の接する範囲が大きいほど支持力が低下している。

4.3.2 新設杭と埋戻し部の平面的な位置関係に着目した検討 4.3.1項に示すとおり、新設杭と埋戻し部の先端深度が同一の場合に、新設杭と埋戻し部の平面的な位置関係によっては、先端支持力が低下するケースがあった。そこで、新設杭と埋戻し部の先端深度が同一の条件で、新設杭と埋戻し部の平面的な位置関係が先端支持力に及ぼす影響を解析で定量的に評価した。解析ケースをTable 7に示す。平面的な位置関係は、Fig. 12に示す(a)~(f)の全6ケースを対象とした。埋戻し地盤に打設された杭の杭先端軸力 - 沈下曲線をFig. 15に示す。新設杭と埋戻し部の中心間距離が大きいほど、先端支持力の低下率は小さくなり、新設杭が埋戻し部に外接するCase-D19はCase-00と概ね一致した。新設杭と埋戻し部の位置関係、極限先端支持力を整理してFig. 16に示す。新設杭と埋戻し部の位置関係は、新設杭の周長が原地盤と接する割合として示した。極限先端支持力は、杭径10%変位 (0.18m) 時の杭先端軸力とした。本検討において、両者にはよい相関がみられた。つぎに、先端支持力の低下率が最も大きく2割程度であったCase-D0とCase-00の杭先端付近の応力、変位量を比較した。両者の地中増加応力 $\Delta\sigma_z$ 、鉛直変位量 Δz のコンターをFig. 17に示す。Fig. 17は、杭先端軸力が12,300kN時のコンター図で、この軸力はC

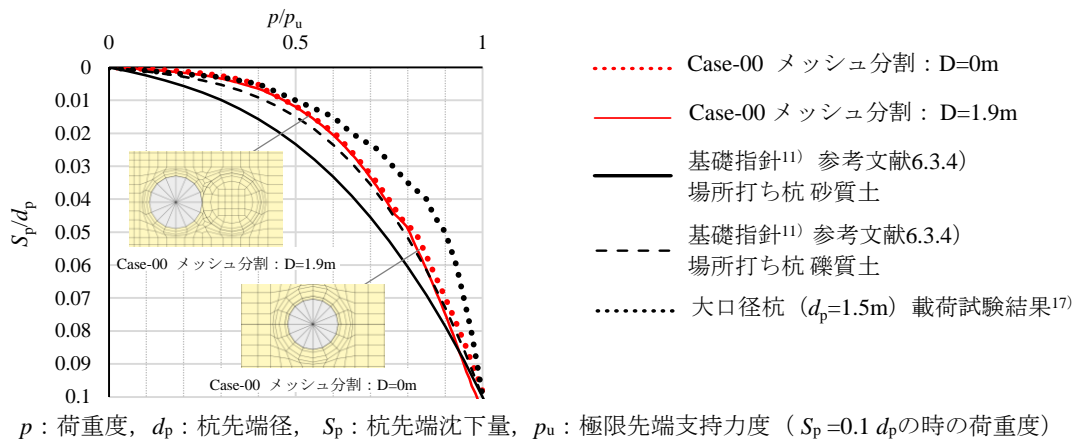


Fig. 13 杭先端の荷重 - 沈下曲線
Curve between Load and Settlement at Pile End

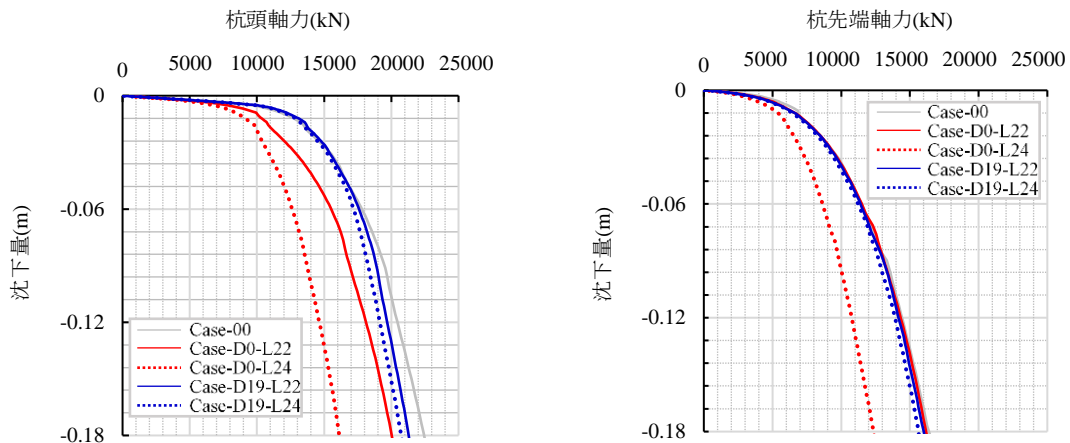


Fig. 14 埋戻し地盤に打設された杭の軸力 - 沈下量関係
Pile Axial Force Curve of Pile Interfering with Backfilled Section

ase-D0 の極限先端支持力に相当する。Fig. 17 (a-1), (b-1) に示すとおり、Case-D0 は、Case-00 と比較して杭直下に地中増加応力が集中した。また、Fig. 17(a-2) に示すとおり、Case-D0では、埋戻し部の鉛直変位量が大きくなった。埋戻し部が大きく変形することで、その外側に応力が広がりにくくなった結果、埋戻し部と接する面の杭先端からの荷重分散が小さくなりCase-D0の杭直下に地中増加応力が集中したと考えられる。埋戻し部に大きな変形が生じて応力が広がりにくくなる現象は、Fig. 16に示したとおり、新設杭の杭周長のうち埋戻し部と接する部分が大きいほど極限先端支持力が低下している傾向とも対応すると考えられる。

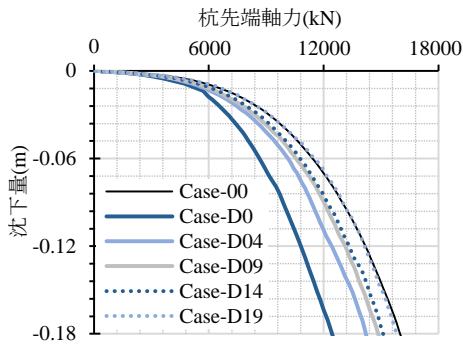


Fig. 15 杭先端軸力 - 沈下量関係
Axial Force-Settlement Relationship at Pile Tip

Table 7 新設杭と埋戻し部の平面的な位置関係に着目した検討の解析ケース
Analysis Case of the Study Focused on the Planar Positional Relationship Between the Pile and the Backfilled Section

解析ケース名	新設杭と埋戻し部の平面的な位置関係 (Fig. 12)	新設杭と埋戻し部の深さ方向の干渉	
		埋戻し部の先端深度	新設杭の先端深度
Case-00	埋戻し部なし	—	GL-24m
Case-D0	D=0m	GL-24m	
Case-D04	D=0.4m		
Case-D09	D=0.9m		
Case-D14	D=1.4m		
Case-D19	D=1.9m		

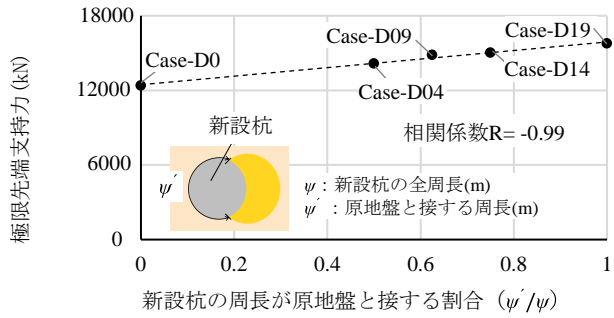
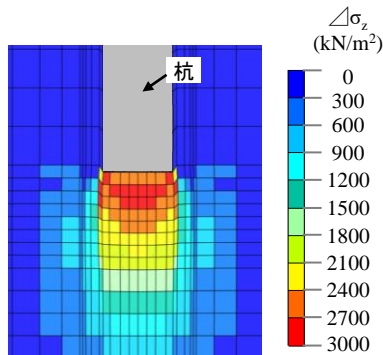
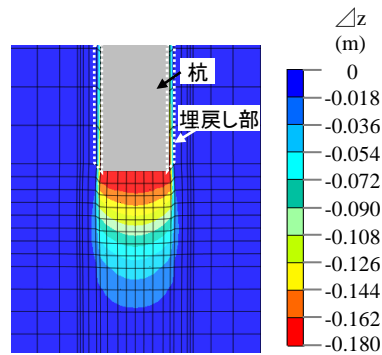


Fig. 16 極限先端支持力と新設杭の杭周長が原地盤と接する割合
Ultimate End Bearing Capacity and the Ratio of the Pile Circumference of the Pile in Contact with the Soil

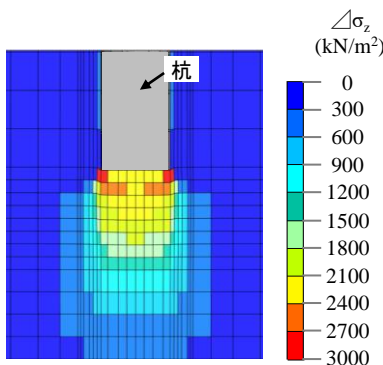


(a-1) 地中増分応力 $\Delta\sigma_z$

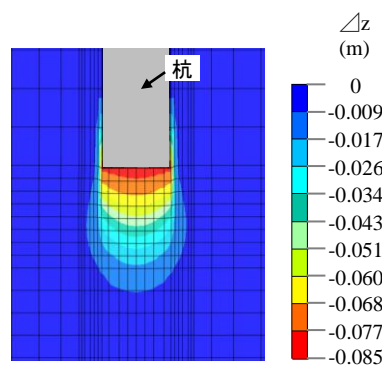


(a-2) 鉛直変位量 Δz

(a) Case-D0



(b-1) 地中増分応力 $\Delta\sigma_z$



(b-2) 鉛直変位量 Δz

(b) Case-00

Fig. 17 杭先端付近の地中増分応力 $\Delta\sigma_z$ と鉛直変位量 Δz のコンター (杭先端軸力=12,300kN)
Contours of Incremental Stress and Vertical Displacement in the Soil Near the Pile End

5. まとめ

既存杭撤去埋戻し地盤における新設杭の設計のために、3D-FEMを用いて、埋戻し部が新設杭の鉛直支持力に及ぼす影響について検討した。以下に本報で得られた知見を示す。

- 1) 本検討の 3D-FEM による解析モデルを用いると、原地盤に打設された杭だけではなく、既存杭撤去埋戻し地盤に打設された杭の鉛直支持性能を評価できることを確認した。
- 2) 3D-FEM における埋戻し部のモデル化について、一軸圧縮試験などの調査結果に基づき力学的性質とそのばらつきを考慮できる手法を見出した。
- 3) 3D-FEM による検討によると、本検討の原地盤と埋戻し部の条件では、新設杭と埋戻し部の先端深度が同一の場合は、平面的に埋戻し部が新設杭を包絡する位置関係で、新設杭の先端支持力への影響が最も大きく、新設杭の極限先端支持力の低下率は 2 割程度であった。一方、新設杭の先端深度が埋戻し部の先端深度よりも $1d_p$ (d_p : 杭先端径) ほど深ければ、埋戻し部が新設杭の先端支持力に与える影響は、ほぼ認められなかった。

既存杭撤去埋戻し地盤における新設杭の設計は、既存杭の処理後に新築建物を建設することが増加している現状において、強靱（レジリエント）で持続可能なまちづくりを実現するために必要な技術だと考えられる。本検討は限られた条件下の一評価であるため、今後もさらに知見を蓄積していきたい。そして、既存杭撤去を伴う杭基礎建物の安全性向上に資する研究開発に努めたい。

参考文献

- 1) 地盤工学会：杭基礎のトラブルとその対策（第一回改訂版），pp.70-71，94-95，100-101，190-191，2014.11
- 2) 地盤工学会関東支部：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，189p.，2022.6
- 3) 柏尚稔，井上波彦，喜々津仁密，石原直：既存杭を含む敷地における建築物の設計法構築に向けた実験および解析検討（その 1）研究の背景と目的，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.571-572，2021.7
- 4) 横山雅樹，柏尚稔，喜々津仁密，亀井秀一，青木雅路，森 利弘：既存杭を含む敷地における建築物の設計法構築に向けた実験および解析検討（その 2），既存杭の撤去および試験の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.573-574，2021.7
- 5) 亀井秀一，柏尚稔，喜々津仁密，横山雅樹，青木雅路，森 利弘：既存杭を含む敷地における建築物の設計法構築に向けた実験および解析検討（その 3）既存杭撤去地盤における鉛直載荷試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.575-576，2021.7
- 6) 阿部秋男，辻靖彦，田口智也，郡司康浩，木谷好伸，今井泰幸：既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響（緩み）に関する研究（その 6）：探査技術を利用した調査結果（茨城稲敷金江津地区），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.565-566，2021.7
- 7) 森利弘，青木雅路，山本裕司，二木幹夫，沼田俊輔：既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響（緩み）に関する研究（その 3）：地盤調査方法の比較計画と杭撤去埋戻し部の調査結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.559-560，2021.7
- 8) 遠藤正美，井上波彦，栗本悠平，柳悦孝，名和義恭，松江繁尚：既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響（緩み）に関する研究（その 4）：ボーリング孔を利用した調査結果（稲敷金江津地区），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.561-562，2021.7
- 9) SoilPlus "Theory Manual of SoilPlus Static"，伊藤忠テクノソリューションズ(株)，2021.10
- 10) 山添正稔，柏尚稔，酒向裕司，石原直，喜々津仁密，井上波彦：既存杭を含む敷地における建築物の設計法構築に向けた実験および解析検討（その 9）3次元 FEM による杭の水平載荷試験の再現解析，日本建築学会学術講演梗概集，pp.533-534，2022
- 11) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，p.31，pp.222-233，2019.11
- 12) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計，pp.52-57，2006.2
- 13) 建設省 建築研究所他：建設省総合技術開発プロジェクト「大都市地域における地震防災技術の開発」震害対策（建築）分科会報告書，pp.2-55，1996.3
- 14) 日本建築センター：2018 年版 建築物のための改良地盤の設計および品質管理指針，707p. 2018.11
- 15) 日本建築センター：2020 年版 建築物の構造関係技術基準解説書，p.481，2020.10
- 16) 日本材料学会：ソイルセメントミキシングウォール設計施工指針，p.22，2002.3
- 17) 杉村義広，田村昌仁，寺川鏡，持田悟，長鋼弘明，山崎雅弘，藤岡豊一：大口径場所打ちコンクリート杭の先端載荷試験とシミュレーション解析，日本建築工学会構造系論文集 560 号，pp.115-123，2002.10