

既設杭との近接施工が新設杭に与える影響とその対策に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令1～令3

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：桐山孝晴、藤田智弘、飯島翔一

【要旨】

今後、都市計画や老朽化により、道路橋基礎の更新が増加すると考えられる。杭基礎を更新する際、既設杭を残置する場合と撤去する場合があります。後者では撤去後適切な材料で埋戻す。しかし、それらの場合の新設杭に与える影響は不明な所が多い。そこで、本研究では、既設杭を残置、引抜きおよび埋戻した場合の新設杭に与える影響を明らかにすることを目的として、文献調査と3次元有限要素解析、遠心模型実験、既設杭の引抜きを模擬した模型実験を行った。その結果、既設杭を引抜いた場合は新設杭の水平剛性が減少する一方、残置や埋戻した場合、3次元有限要素解析では新設杭の水平剛性が増加し、遠心模型実験では载荷初期に既設杭や改良体の曲げ抵抗により新設杭の杭頭曲げモーメントが増加したが、载荷後期には既設杭や改良体に残留変位が生じたことにより曲げ抵抗が発揮されず新設杭の杭頭曲げモーメントが増加しないなど、新設杭に与える影響について一定の知見を得た。

キーワード：既設杭、残置、引抜き、埋戻し

1. はじめに

道路橋の架替に関する最近の調査¹⁾によると、架替数は平成18年度頃から横ばいで推移している。架替の理由として、上部構造の損傷、下部構造の損傷、耐荷力不足、耐震対策、機能上の問題、改良工事が挙げられており、その中でも改良工事のための架替が最も多い。また、改良工事は道路線形改良、河川改修、都市計画によるものがあり、平成18年度には道路線形改良によるものが6割程度であったのに対して、平成28年度の調査では、都市計画によるものが9割を超えている。

道路橋の架替では、基礎を含めて更新することが必要となる場合がある。そのような場合、問題になると考えられるのが、既設基礎と新設基礎の干渉である。例えば、市街地において、用地取得や道路線形により切り回すことが困難であったり、河川を跨ぐ橋では河川管理施設等構造令により下部構造位置をずらすことが困難であったりすると、新設基礎を施工する際に既設基礎が干渉してしまい、何らかの対応が必要になる場合があると考えられる。

既設基礎と新設基礎が干渉する場合の対応としては以下が考えられる。第一に、既設基礎を避けるように新設基礎の配置を計画し、既設基礎を残置する方法である。既設基礎を撤去するには、原地盤の乱れやコストが増加することから、障害とならない限り残置させることが多い。第二に、既設基礎を避けて新設基礎を

配置することが困難な場合に、既設基礎を撤去した後に適切な材料で埋戻すことで原地盤を復旧させる方法である。第三に、後述するように建築構造物では行われることがあるが、既設基礎を再利用する方法である。これは、道路橋においても、既設の下部構造を補強する際に既設基礎にも支持力などを負担させようとすることがあり、同様の考え方によるものである。本研究では、後述するとおり地盤の評価を目的としているため、前二者のみを対象とする。また、道路橋基礎として採用されることが多く、干渉が問題となることが多いと考えられる杭基礎を対象とする。

前二者の方法にはそれぞれ課題がある。既設杭を残置させる方法は、既設杭を残置させることにより新設杭に与える影響が明らかになっていない。先述したように残置させることが障害とならない限りは道路橋の安定性の観点から問題無いと思われるが、障害とならないことを確認した知見に基づいている訳ではなく、定性的な推測に拠るものと思われるため、定量的に障害とならないことを明らかにする必要がある。既設杭を引抜いた後に埋戻す方法では、引抜きによる地盤の乱れや緩みに起因する力学的特性の低下が懸念される。そして、その力学的特性の低下が埋戻した後も継続するのか、または回復するのかも明らかにはなっていないため、新設杭を従来の方法で設計した場合、期待する地盤の抵抗が得られないなどの性能不足が生じる恐れがある。一方で施工上の課題として、引抜孔の埋戻

しが不完全であった場合、新設杭が傾斜するなどのトラブルに繋がる恐れがある。さらに、先述のように既設杭の引抜き時に生じる力学的特性の低下が埋戻すことにより回復されない場合、引抜きを含め周辺地盤を地盤改良することが必要となることも考えられるが、その効果や改良範囲なども不明確である。

ところで、建築構造物は旧構造物を解体した後に同じ敷地内に新設構造物を築造することが多いため、既設杭と干渉するケースが多く、既設杭を避けて新たに杭を打つ場所が無くなるのが危惧されており、建設コストや工期の削減、廃棄物の削減等の観点から既設杭を再利用することが推奨されている。また、撤去を行う場合には、前述したような撤去による地盤の乱れ等に起因した新設杭の施工におけるトラブルなどが懸念されているが、撤去や埋戻しは各事業者が独自に対処を行っているのが現状であり、基準や指針等の策定が望まれている。このような背景から、既設杭の引抜きや埋戻しに対し多くの施工事例が報告されており^{2), 3)}など、研究委員会などによる活動が行われている^{4), 5)}。文献⁶⁾では、施工方法については留意点や事例がまとめられており相対的に評価がされているが、普遍的な施工管理方法が提示されるには至っていない。また、設計方法についても提案された方法が示されているものの十分に検証がされているとは言えないなど、建築構造物に対して基準や指針等に反映されるような評価方法はまだ確立されていないのが現状である。

道路橋においても、施工状況等が異なるものの、同様に明確な基準や指針等が整備されておらず、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。そのため、設計において確保されるべき安全余裕度等の考え方が統一されないことなどが懸念される。したがって、既設杭の残置や引抜き、埋戻しに対する適切な対応を行うための地盤の評価手法の提案や明確な基準、指針等が必要と考えられる。

そこで、本研究では、既設杭の残置および引抜き、埋戻しが地盤と新設杭に及ぼす影響を明らかにし、適切な地盤の評価手法を確立することを目的として、文献調査、3次元有限要素解析、遠心模型実験、既設杭の引抜きを模擬した模型実験を行った。本稿では、それらの結果について報告するものである。

2. 文献調査

2.1 文献調査の概要

既設杭の残置および引抜き、埋戻しによる地盤への影響評価に関する文献調査を行った。前章で述べたと

おり、この課題に対する基準や指針等が整備されておらず、特に建築分野で比較的近年に課題として挙げられていることなどの状況を踏まえ、分野を超えて広い範囲で知見や事例を収集することを目的として、以下の方法で文献の収集を行った。

まず、以下に示す検索キーワードを設定した。

検索キーワード：近接施工、既設杭（既存杭）、遠心実験、数値解析、残置、引き抜き、地盤の乱れ、撤去、埋め戻し

そして、これらの検索キーワードを用いて、（公社）土木学会、（一社）日本建築学会、（公社）地盤工学会で公開されている論文の検索を行った。他には、過去に実施されたシンポジウムや講習会などの資料や出版されている書籍やマニュアル等を収集した。以上で収集した文献約300本から、一次抽出として事前に決定した、既存杭の残置・引抜き・埋戻しに関するものを141本、二次抽出として既設杭が新設杭、新設杭が既設杭に及ぼす影響に関する実験・計測・解析を実施したものを52本抽出し、それらの目的や概要、成果などを整理した。最後に、整理した内容から、項目別に既往の実験的・解析的検討の内容、設計・施工上の現状の課題点などをとりまとめた。

表-1 文献の整理項目

大項目	小項目
既存杭による新設杭への影響	① 既設杭による新設杭への影響
	② 既設杭の撤去が新設杭（周辺地盤）に及ぼす影響
既存杭による新設杭への影響（地震時）	③ 残置杭による地盤改良効果の影響（地震時）
	④ 既設杭撤去後の引抜き孔の充填材が周辺地盤に及ぼす影響（地震時）
新設杭による既設杭への影響（参考）	⑤ 新設杭の施工が既設杭に及ぼす影響
	⑥ 新設杭と既設杭の荷重分担
施工に関する報告	⑦ 既設杭撤去後の埋め戻し工法のまとめ

2.2 文献調査の結果

文献を収集し、最終的に絞り込みを行ったものについて、表-1に示す項目別に、実験的・解析的検討で得られた知見、杭の諸元や地盤条件などの範囲、それらを踏まえた現状の課題点を整理した。その結果を項目別に一部抜粋して以下に示す。

① 既設杭による新設杭への影響

文献⁶⁾では、遠心模型実験により既設杭が新設杭の水平抵抗に与える影響を検討している。その結果、新設杭の水平抵抗は、既存杭があると杭上部で増加し杭下部で減少することが報告されている。文献⁷⁾では、遠心模型実験により既設杭が新設杭の周面摩擦、先端抵抗に与える影響を検討している。その結果、新設杭の鉛直抵抗は、既存杭があると周面摩擦力や先端支持力が增加することが報告されている。上記の他にも解析による検討などが報告されており、その検討範囲は、水平方向の検討では砂質土、粘性土ともに検討されており、杭径は0.5m~2.0m、杭長は8.2m~35mの範囲、鉛直方向の検討では、砂質土、粘性土ともに検討されており、杭径は0.5m~2.0m、杭長は5.8m~35mの範囲であった。検討の結果をまとめると、水平方向の検討では抵抗がわずかに低下する結果もあったが、おおむね影響は無く、鉛直方向の検討では1.3倍程度の抵抗増加が確認された。以上を踏まえ、課題としては検討範囲外についても実験・解析による感度を確認し補完を行うことが考えられる。

② 既設杭の撤去が新設杭（周辺地盤）に及ぼす影響

文献^{8), 9)}では、撤去される杭近傍の地盤に発生する緩み領域の把握を目的とした現地計測が行われた結果が報告されている。その結果、深度5m~10mまでの範囲で水平変位が増加し、せん断波速度が6割程度まで低下したと述べている。この他には、実験・解析的検討の文献は見つからず、砂質土を主体とした地盤に対する検討は行われていないため、影響が不明である。

③ 残置杭による地盤改良効果の影響（地震時）

文献¹⁰⁾では、既設杭を残置させることによる、地盤の拘束効果の影響度合いを確認するために、原地盤の場合、残置させた場合、引抜き後の埋戻しが未固結であった場合に対して、地震時の新設杭や地盤の挙動を解析的に検討している。その結果、既設杭を残置させることにより拘束効果が期待できること、埋戻しの管理を十分行わないと耐震上問題となる可能性があることを指摘している。この他にも、原位置実験や室内実験が報告されており、その検討範囲は既設杭の杭径が0.5m~3.0m、杭長が15m~38mであった。

④ 既設杭撤去後の引抜孔の充填材が周辺地盤に及ぼす影響(地震時)

文献¹¹⁾では、杭の引抜孔および充填材が地盤の動的特性に与える影響を解析的に検討している。その結果、充填材強度の違いにより固有周期が変化することで変形挙動が異なることが報告されている。この他に実験

的検討を報告したものは無く、解析においても引抜孔の配置間隔や削孔径、深度、充填材の配合強度、地盤条件の違いをパラメータとした検討は行われていないため、これらのパラメータの違いによる感度を確認することが望ましいと考えられる。

⑤ 新設杭の施工が既設杭に及ぼす影響

文献^{12), 13), 14)}では、遠心模型実験により、既設杭に近接して施工を行う場合に、既設杭の荷重が新設杭の掘削面に及ぼす影響および新設杭の施工による既設杭の支持力に与える影響を実験・解析の両面から検討している。その結果、新設杭掘削時に既設杭の周面摩擦力の低下と掘削に伴い杭体が沈下することで先端荷重の増加が生じることが報告されている。既往の検討の範囲は、主に砂質土に対して検討されており、新設杭の杭径は1m~2.5m、杭長は15m~23.5mである。深度30mより深い杭や粘性土を対象とした検討は行われていないため影響を確認しておく必要があると考えられる。

⑥ 新設杭と既設杭の荷重分担

文献¹⁵⁾では、既設杭の再利用を目的として、既存杭の支持力や沈下剛性、水平耐力等の性能を十分に利用するために、既存杭と新設杭の基礎スラブへの結合時期を調整することによって、各杭の性能に見合った荷重を杭頭に与える工法の開発について報告されている。この他には、粘性土層を主体とした地盤を対象に、原位置試験や計測が行われている。対象としている新設杭の杭径は実寸で0.5~2.8mである。また、深度方向には、4~30m程度を対象としている。30mを超える深い深度や砂質土層を主体とした、現地計測結果はみられない。

⑦ 既設杭撤去後の埋め戻し工法のまとめ

文献¹⁶⁾では、既存杭撤去後の埋め戻し部の品質に関する施工事例の報告が行われている。その結果、施工方法によっては埋戻し不良が発生することが報告されており、その要因として、杭頭部を露出させるため掘削を行った結果、水だまりができセメントスラリが大幅に希釈されたことが述べられている。その他にも、いくつか施工事例の報告が行われており、対象としている引抜杭の径は実寸で0.4~2.0m、深度方向には、9~28m程度であり、30mを超える深い深度の報告はみられない。また、上記のような考察は行われているが、具体的な要因の解明にまでは至っていない。

2.3 文献調査のまとめ

既設杭の残置および引抜き、埋戻しによる地盤への影響評価に関する文献調査を行い、実験的・解析的検討・現地計測で得られた知見、杭の諸元や地盤条件な

どの範囲、それらを踏まえた現状の課題点を整理した。

整理した結果、既設杭を残置させた状態では地盤の拘束効果が期待できることや、新設杭の周面摩擦力や先端支持力が増加することなどがわかった。また、既設杭の引抜きにより地盤が緩むことが確認されたが、埋戻しに関しては固化材の強度が変形挙動に影響を与えることが確認された一方で施工では固化不良が生じるなどの報告がありその影響について明らかになっていない部分が残されている。

また、実験的・解析的検討は杭の諸元や地盤条件が一定の範囲で行われているが、検討が行われていない範囲も多くあり、その範囲においても既設杭の残置および引抜き、埋戻しによる影響を確認する必要がある。

以上の文献調査の結果を踏まえ、既設杭の残置や引抜きによる影響に加えて、埋戻しによる影響を確認するため、実験的・解析的検討を行うこととした。なお、その検討範囲は収集した文献では検討されていない範囲とし、特に地盤の深度が深く、杭長が長い範囲を対象にすることとした。

3. 3次元有限要素解析

3. 1 3次元有限要素解析の概要

既設杭の残置および引抜き、埋戻しが地盤に及ぼす影響を明らかにするため、これらを条件として新設杭の水平方向交番荷重を行う3次元有限要素解析を行った。その概要について述べる。

3. 1. 1 解析条件

解析条件は、表-2に示すように基準となるケースと既設杭の残置および引抜き、埋戻しを条件としたケースの計4ケースである。各ケースにおいて新設杭の杭頭を変位制御で水平方向に正負交番荷重させた。概要図を図-1に示す。以下、各ケースにおいて荷重を行う杭を新設杭、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部分を引抜き孔、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。また、既設杭および引抜き孔、改良体を正載荷方向の位置から反時計回りの順に角度を付記し、既設杭0、既設杭90、既設杭180、既設杭270のように呼ぶ。

3. 1. 2 構造条件

新設杭および既設杭、改良体の諸元を表-3に示す。杭長は地盤の表層への根入れ長40mと支持層への根入れ長1Dの和である。Case3の引抜き孔は既設杭と同径としている。Case4は、ケーシングで既設杭の周囲を縁切りして引抜いた後、ソイルセメントで埋戻すこと

表-2 解析および実験条件

ケース	条件
Case1	新設杭の単杭のみ（基準）
Case2	新設杭の周囲に既設杭を残置
Case3	新設杭の周囲の既設杭を引抜き
Case4	新設杭の周囲の既設杭を引抜いた後に埋戻し

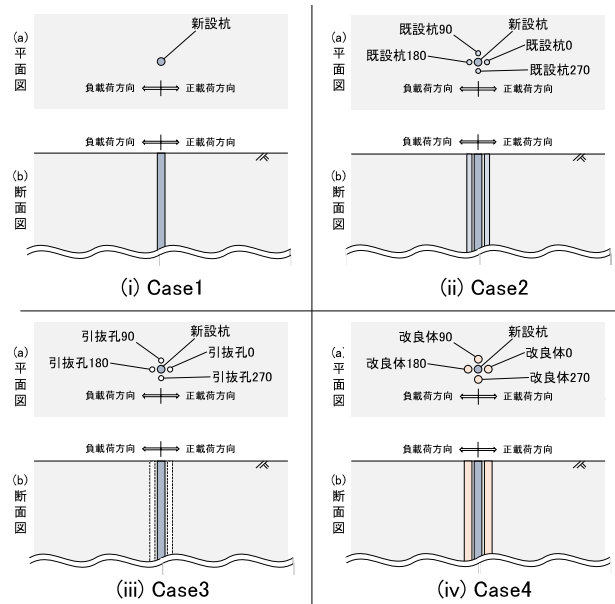


図-1 解析の概要図

表-3 構造物の諸元

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

を想定したため、ソイルセメント改良体の径は既設杭径より大きい1.2mとした。また、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。新設杭および既設杭、改良体は線形弾性体としてモデル化し、充実断面に換算している。

3. 1. 3 地盤条件

地盤の表層は相対密度60%の砂質土として、表-4に示す過去に実施した東北珪砂7号の三軸圧縮試験(CD試験)の結果から得られた物性値を入力値としている。

変形係数は表-4の拘束圧を変化させた3つの供試体で得られた値を式(1)で近似し、各深度における拘束圧に応じて近似した値を入力している。また、乾燥密度は3つの供試体で得られた値の平均値を用いている。地盤の構成則は弾塑性モデル (Mohr-Coulomb モデル) を用いている。

$$E = K \times P_a \times \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

ここに、

- E : 土の変形係数 (kN/m²)
- K : 実験から求められる定数
- P_a : 大気圧 (kN/m²)
- σ_3 : 各深度における拘束圧 (kN/m²)

表-4 地盤の物性値

相対密度 D_r (%)	拘束圧 σ_3 (kN/m ²)	乾燥密度 ρ_t (g/cm ³)	変形係数 E_{snd} (MN/m ²)	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)
60	30	1.473	12.3	3.5	41.8
	60	1.474	15.0		
	90	1.479	25.8		

3. 1. 4 地盤作製プロセス

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-5に示す地盤作製プロセスを実施する。Case3は、既設杭、新設杭を築造した後に既設杭を引抜くという順序のプロセスである。実際の施工ではこのように既設杭を引抜いた状態のまま埋戻しを行わずに新設杭を施工することは考え難いが、既設杭の引抜きによる条件が地盤の応力状態や新設杭の応答に与える影響を直接的に確認することや新設杭の施工による影響を排除することを目的とするため、このようなプロセスとする。一方でCase4は、既設杭を引抜いた影響とその後に埋戻すことによる影響の複合的な影響を確認するため、実際の施工で行われると考えられる施工過程を考慮し、既設杭を築造し、引抜いた後に改良体を築造し、新設杭を築造するというプロセスとする。

表中の応力解放とは、既設杭の引抜きを再現するため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解放つまり低減させ、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。応力解放を行うことで、各要素に一定の応力を作用させた状態を維持することができ、そのつり合いに

表-5 地盤作製プロセス

ケース	ブotts1	ブotts2	ブotts3	ブotts4
Case3	既設杭を築造する	新設杭を築造する	既設杭を引抜く	-
	・応力解放なし ・地盤要素を既設杭要素に入替え	・応力解放なし ・地盤要素を新設杭要素に入替え	・引抜き時の応力解放を45% ・引抜き時の変位は維持	-
Case4	既設杭を築造する	既設杭を引抜く	改良体を築造する	新設杭を築造する
	・応力解放なし ・地盤要素を既設杭要素に入替え	・既設杭引抜きと改良体築造時の応力解放を20% ・変位はクリア ・該当部分に改良体の要素を追加		・応力解放なし ・地盤要素を新設杭要素に入替え

応じた変位を算出することができる。これは、既設杭を引抜いた際に、孔壁が崩れ、孔の周に均一に変位したと仮定すると、孔の半径だけ孔壁が移動した後、孔壁同士がある応力で押し合うようにして孔内が地盤で埋まることを想定したものである。

3. 1. 5 解析モデルおよび載荷ステップ

解析モデルは、図-2に示すCase1の例のように、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。解析モデルの底面は水平ローラーとしている。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、載荷したときの既設杭の変形が収束する深度を確認し、それ以上を解析領域とした。また、解析モデルの側面は鉛直ローラーである。

載荷ステップは、新設杭の杭頭に作用させる水平変位を±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。

3. 2 3次元有限要素解析の結果

既設杭の残置および引抜き、埋戻しを条件として新設杭の水平方向交番載荷を行う3次元有限要素解析を行った。その結果について述べる。

3. 2. 1 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-3に示す。全てのケースで載荷変位の増加とともに線形的に荷重が増加しており、地盤の降伏による非線形性は見られない。これは、地盤条件として入力したCD試験で得られた変形係数とそれから算出されるせん断剛性が大きく、本解析の載荷範囲では地盤が降伏しな

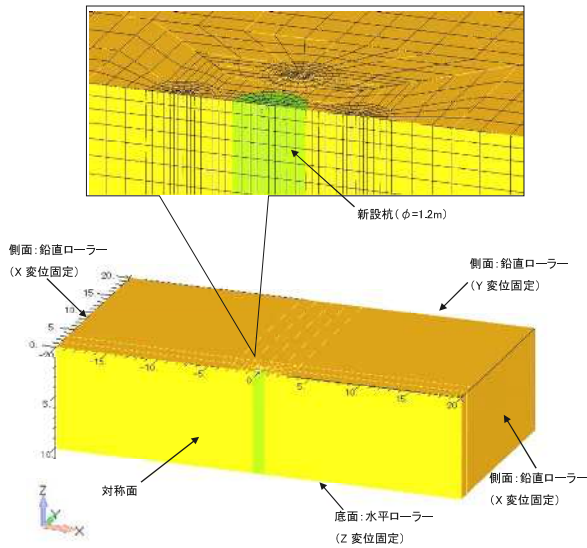


図-2 解析モデルの例 (Case1)

かったためと考えられる。水平剛性に着目すると、基準である Case1 よりも、既設杭および改良体がある Case2 および Case4 では大きくなっており、既設杭を引抜いた 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 では低下していないため埋戻しによって引抜き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 の方が水平剛性は大きいことから、既設杭よりも改良体の方が曲げ剛性が小さいことよりも、改良体の方が径が大きいことによって新設杭と改良体の離隔が小さいことが影響したと考えられる。また、荷重変位が+40cm 時における荷重と Case1 との比に着目すると表-6 に示すとおりであり、Case2 および Case4 は約 2 割大きく、Case3 は 1 割小さい。つまり、既設杭を引抜いたままの状態の新設杭に荷重すると、新設杭のみに荷重させたときと比べ水平剛性が減少するが、その割合はそれほど大きくないことがわかった。

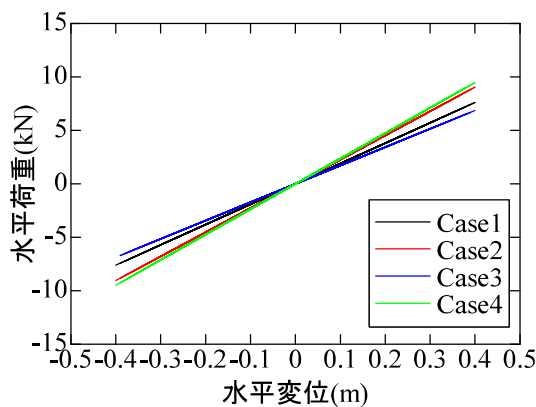


図-3 水平荷重—水平変位関係

表-6 荷重変位+40cm 時荷重と比、離隔

	+40cm 変位時 荷重(kN)	Case1 との比	新設杭との 離隔(m)
Case1	7.61	-	-
Case2	9.05	1.19	0.4144
Case3	6.87	0.90	-
Case4	9.48	1.25	0.2144

また、既設杭を残置させた場合と既設杭を引抜いた後に埋戻した場合は、新設杭のみを荷重させたときと比べ水平剛性が増加するが、その割合は離隔が小さいほど大きくなることがわかった。

3. 2. 2 地盤反力度の深度分布

新設杭および既設杭、改良体と地盤との境界部分に作用する地盤の水平応力を地盤反力度と呼ぶこととし、新設杭を正側に 40cm 荷重したときの深度方向における地盤反力度の変化を確認した。図-4 に地盤反力度の深さ方向の変化を見る対象位置の概要図として Case2 の例を示す。対象位置は赤線で示す深度 10m までの範囲であり、新設杭正面側の他に、Case2 では既設杭 0 背面側と正面側、Case4 では改良体 0 背面側と正面側である。そして、図-4 に示している新設杭正面側の位置での地盤反力度の深度分布を図-5 に、既設杭 0 および改良体 0 の背面側と正面側での地盤反力度の深度分

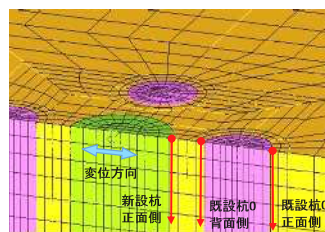


図-4 対象位置(Case2)

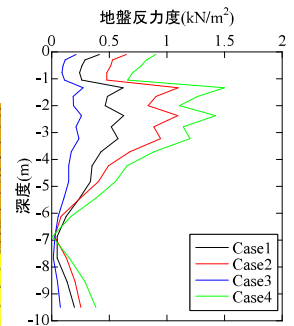


図-5 地盤反力度の深度分布 (新設杭)

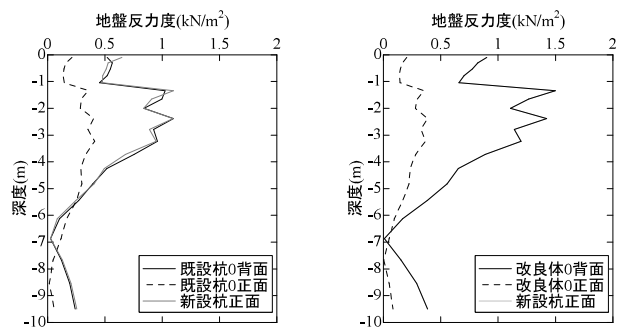


図-6 地盤反力度の深度分布 (既設杭 0、改良体 0)

布を図-6に示す。図-6には図-5に示したものと同一新設杭正面側の位置での地盤反力度の深度分布も合わせて示している。横軸に地盤反力度、縦軸に地表面位置より下を負とした深度を示している。

すべての図において、深度-1m~-3mの浅い範囲で地盤反力度が最大になっている。一方、深度-7m付近では地盤反力度がほぼ0となっている。これは、前面で受ける地盤反力度と背面で受ける地盤反力度が釣り合ったと考えられる。図-5において、地盤反力度の最大値を各ケースで比較すると、水平荷重-水平変位関係の水平剛性の大小と同様、Case2およびCase4はCase1よりも大きく、Case3は小さくなっている。

図-6に着目すると、新設杭正面側と既設杭0および改良体0背面側の地盤反力度の深度分布は、分布形状や最大値がほぼ同じである（新設杭正面側と改良体0背面側はまったく等しい）。一方で、既設杭0および改良体0正面側では、地盤反力度がほぼ全深度において小さくなっている。このことから、新設杭と既設杭0および改良体0は、新設杭が荷重されることによって新設杭と既設杭0および改良体0間の地盤が新設杭に押されるようにして荷重が伝達し、その荷重が既設杭0および改良体0にも直接伝達されていることがわかる。また、既設杭0および改良体0正面側の地盤反力度が小さくなっていることから、既設杭0および改良体0の曲げ変形による抵抗が大きく寄与していると考えられる。

3. 2. 3 地表面の水平応力

新設杭を正側に40cm荷重したときの各ケースにおける地表面の水平応力のコンター図を図-7に示す。図-7(ii)のCase2に着目すると、図-7(i)のCase1よりも新設杭の荷重方向の地盤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、既設杭が残置された状態では、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。図-7(iii)のCase3に着目すると、新設杭の荷重方向の地盤の引抜孔の周面付近において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きの応力解放による応力の減少と考えられる。なお、荷重直角方向の引抜孔の周面付近の地盤で応力が高くなっているのは、円環断面である引抜孔が荷重されると、アーチ効果により荷重直角方向の地盤が圧縮を受けたためであると考えられる。図-7(iv)のCase4に着目すると、Case1およびCase2よりも、新設杭の荷重方向の地盤部分の水平応力が大きくなっていることがわかる。また、水平応力が大きい範囲も広がって

いることから、Case4の方が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。

以上のことから、Case3では既設杭を引抜いたときの応力解放が、Case2およびCase4では新設杭と既設杭および改良体間の地盤の拘束効果が確認でき、これ

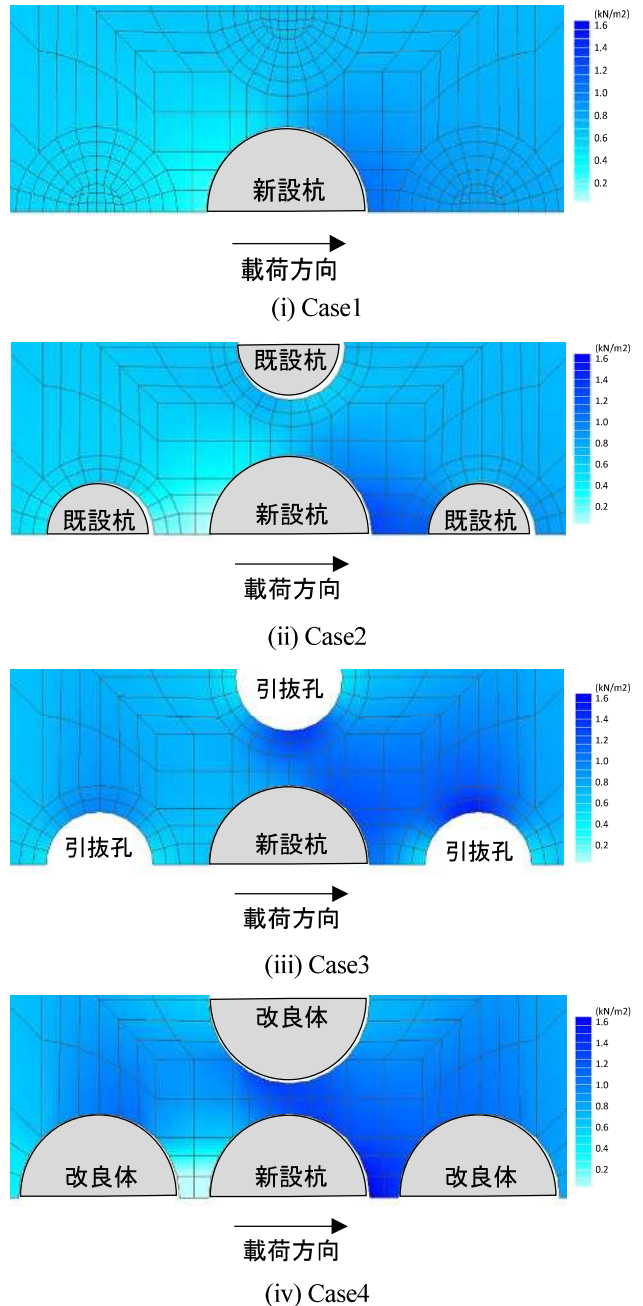


図-7 地表面の水平応力のコンター図

らが図-3 に示す水平荷重—水平変位関係の水平剛性や図-6 に示す地盤反力度の大小に影響を与えたと考えられる。

3. 2. 4 水平変位の深度分布

新設杭を正側に 40cm 載荷したときの新設杭および既設杭、引抜孔、改良体の深度方向における水平変位度の変化を確認した。図-8 に水平変位の深さ方向の変化を見る対象位置の概要図として Case2 の例を示す。対象位置は新設杭正面側の他に、Case2 では既設杭 0 背面側と既設杭 90 側面側、Case3 では引抜孔 0 背面側と引抜孔 90 側面側、Case4 では改良体 0 背面側と改良体 90 側面側である。図-8 に示している新設杭正面側の位置での水平変位の深度分布を図-9 に、既設杭 0 および引抜孔 0、改良体 0 の背面側と既設杭 90 および引抜孔 90、改良体 90 の側面側での水平変位の深度分布を図-10(a)、(b)に示す。横軸に水平変位、縦軸に地表位置より下を負とした深度を示している。

図-9 に着目すると、深度-10m 付近で水平変位にやや違いがあるが概ね同形状の深度分布となっており、ケースによる違いは杭の変形モードに影響を与えないと思われる。図-10 に着目すると、いずれのケースにおいても、図-10(a)に示す 0° 位置の水平変位よりも図-10(b)に示す 90° 位置のものは小さくなっている。90° 位置は荷重方向と直角方向に位置しているが、新設杭の荷重に追従するように水平変位が発生していることから、新設杭の荷重によって発生する地盤のせん断力が 90° 位置に伝達されたことによると考えられる。図-10(a)に着目すると、Case3 の引抜孔 0 背面側よりも Case2 の既設杭 0 背面側および Case4 の改良体 0 背面側の水平変位が小さくなっており、既設杭 0 および改良体 0 の曲げ抵抗により変形が抑えられたものと考えられる。このように各ケースにおいて水平変位の大小の違いはあるものの、変形モードは新設杭と違いはなく、新設杭と一体となって変形していると考えられる。

以上のことから、既設杭の残置および引抜き、埋戻しによる条件の違いは、新設杭および既設杭、引抜孔、改良体の水平変位量に違いはあるものの、その変形モードに与える影響は大きくないことがわかった。

3. 3 3次元有限要素解析のまとめ

既設杭基礎の残置および引抜き、埋戻しを条件として新設杭の水平方向交番荷重を行う 3次元有限要素解析を行った。解析によって得られた知見は以下の通りである。

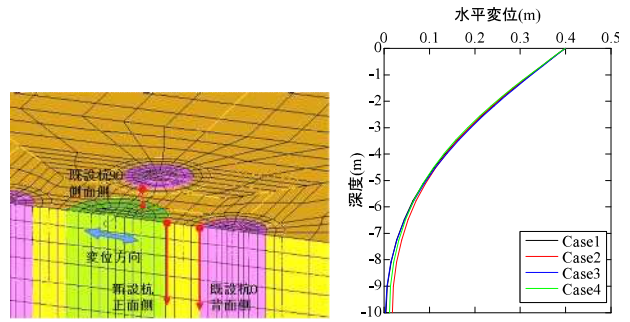


図-8 対象位置(Case2)

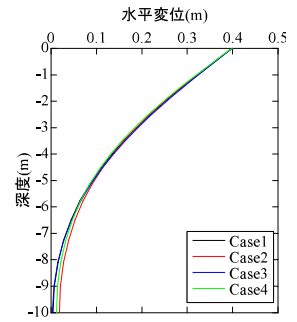


図-9 水平変位の深度分布 (新設杭)

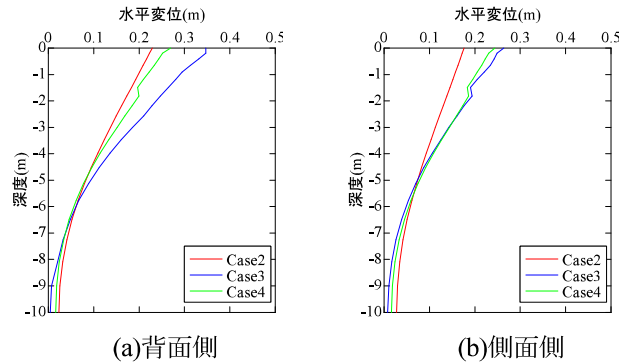


図-10 水平変位の深度分布 (既設杭、引抜孔、改良体)

- 既設杭を残置した場合および改良体を埋戻した場合、新設杭のみの場合と比べ、新設杭の水平抵抗が増加することがわかった。その要因としては、既設杭および改良体と新設杭の間の地盤の応力が増加することや、既設杭および改良体の曲げ剛性と前面地盤の抵抗が影響していると考えられる。
- Case4 では Case2 よりも改良体と新設杭の間の地盤の応力の増加と範囲が大きくなった。このことから、既設杭を引抜いた際の応力解放の影響が埋戻しによって打ち消され、既設杭と改良体の杭径やそれに伴う離隔の違いが与える影響が大きかったと考えられる。
- 既設杭を引抜いた場合、解析条件として設定した応力解放の影響により引抜孔の周面付近の地盤の水平応力が減少し、新設杭の水平抵抗が小さくなった。
- 新設杭および既設杭、引抜孔、改良体の水平変位量に違いはあるものの、その変形モードには大きな違いは見られなかった。また、荷重方向と直角に位置する既設杭や引抜孔、改良体も変形し、新設杭の荷重による影響を受けることがわかった。

4. 遠心模型実験

4. 1 遠心模型実験の概要

既設杭基礎の残置および引抜き、埋戻しが地盤に及

ばす影響を明らかにするため、これらを条件として新設杭の水平方向交番载荷を行う遠心模型実験を行った。その概要について述べる。

4. 1. 1 実験条件

遠心実験は、遠心実験用土槽内に作製した二層の模型地盤中央に設置した新設杭を、80Gの遠心力作用下で、水平方向に正負交番载荷させるものである。実験ケースは2章の3次元有限要素解析と同じく4ケースで、表-1に示すとおりである。ただし、詳しくは後述するが、Case3は1G下で既設杭の引抜きを行い、Case4は改良体を模擬した試験体をあらかじめ地盤中に設置したケースである。また、概要図を図-11に示す。なお、2章と同じく、各ケースにおいて地表面から突出させ载荷装置により载荷を行う杭試験体を新設杭、新設杭の周囲に位置する4本の杭試験体を既設杭、Case3において既設杭を引抜いた後の孔部分を引抜孔、Case4

表-7 試験体の諸元

	材料	杭径 D m (mm)	板厚 t m (mm)	杭長 L m (mm)	曲げ剛性 EI kN/m ² (kN/m ²)
新設杭	アルミ パイプ	1.2 (15.0)	0.08 (1.0)	45.6 (570)	2.80×10^6 (3.50×10^4)
既設杭		0.8 (10.0)		40.0 (500)	7.96×10^5 (9.95×10^3)
改良体	アクリル棒	1.2 (15.0)	-	40.4 (505)	3.72×10^5 (4.65×10^3)

※表中の数値は実スケールでの値、括弧内の数値は模型スケールでの値を示す。

では既設杭を引抜いた後に引抜孔を改良体で埋戻すことを想定し改良部分を模擬した試験体を改良体と呼ぶ。また、既設杭および引抜孔、改良体を正载荷方向の位置から反時計回りの順に角度を付記し、既設杭0、既設杭90、既設杭180、既設杭270のように呼ぶ。

4. 1. 2 試験体の諸元と配置

試験体（新設杭、既設杭、改良体）の諸元を表-7に示す。表中には実寸換算値と括弧内に模型スケールの値を示している。以降、全ての値は実寸換算値を用いる。杭径は3章で設定したものと等しくなるようにし、新設杭および既設杭は鋼管杭を想定しアルミパイプを、改良体は流動化処理土を想定しアクリル棒を材料として使用した。アクリル棒については、流動化処理土の曲げ剛性と近づけることと、実験において材料を容易に入手できること、ひび割れなどの塑性変形が生じないことを考慮した。試験体の配置については、3章と同様の杭間隔となるように、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た。新設杭の载荷位置は地表面から6.92mの高さにある。Case2およびCase4では支持層に杭径分根入れさせている。

4. 1. 3 模型地盤の作製

模型地盤は、幅=800mm、奥行き=500mm、高さ=605mmの遠心実験土槽に、宇部硅砂6号を用いて砂質土地盤を作製した。支持層は層厚110mmで相対密度90%となるように突き固めて作製し、表層は、層厚300mmを相対密度60%、それ以深の層厚185mmを相対密度70%となるよう自由落下で作製した。なお、自由落下では深いところで自重により密度が高まり相対密度60%の様な地盤を作製するのが困難であったため、相対密度60%の様な地盤を作製できる深さより深いところでは相対密度70%ととしている。相対密度60%と90%の砂質土のコアに対して三軸圧縮試験を実施し、得られた物性値を表-8に示す。

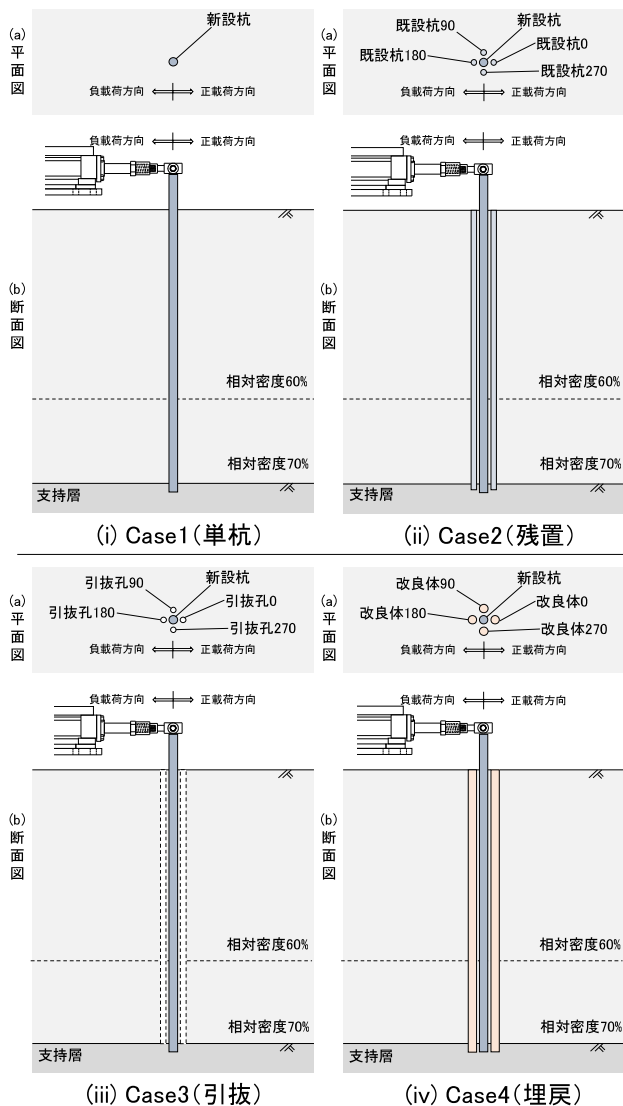


図-11 遠心実験の概要図

表-8 地盤の物性値

相対密度 D_r (%)	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	最小密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	最大密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)
60	2.619	1.358	1.678	4.26	43.1
90				4.36	45.3

Case2 は支持層を作製後、新設杭および既設杭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。Case4 は Case2 と同様、支持層を作製後、新設杭と改良体を所定の位置にセットし、表層の地盤を作製した。そのため、既設杭を引抜く過程は再現されていない。

4. 1. 4 荷重ステップと計測概要

遠心模型実験は、80G の遠心力作用下で新設杭に対して正負交番 3 サイクル繰り返し水平方向荷重を行った。荷重ステップは、初期荷重変位を $0.01D_p$ (D_p : 新設杭の杭径)、計画最大荷重変位を $0.36D_p$ として、初期変位に対する倍率 α を 1, 2, 4, 6, ..., 36 と偶数倍で漸増させた。それぞれの荷重ステップに対して、正負を 1 サイクルとして 3 回繰り返した。荷重ステップを図-12 に示す。

遠心実験で計測した項目は、新設杭の荷重荷重と荷重変位、新設杭と既設杭 0、既設杭 90、改良体 0、改良体 90 の杭頭水平変位とひずみ、土圧である。新設杭の荷重荷重と荷重変位は荷重装置のロードセルと変位計で、杭頭水平変位はレーザー変位計で、新設杭と既設杭のひずみはアルミパイプ内面に、改良体のひずみはアクリル棒の外面に貼り付けたひずみゲージで、土圧は試験体の外面に設置した土圧計で計測した。

計測器配置の概要図を図-13 に示す。以下、図中に示すとおり、新設杭の荷重荷重と荷重変位を P と D-L、杭頭水平変位を D-H、土圧を EP としてその計測位置が新設杭の正面側の地表面から浅い位置と深い位置、背面側の地表面から浅い位置と深い位置のものに -FU、-FL、-BU、-BL を付記して表す。また、既設杭 0、既設杭 90、改良体 0、改良体 90 の杭と杭頭水平変位と土圧は新設杭と同じように表し、対象とする試験体に付記している角度 (0、90) をそれぞれの計測項目にも付記し、EP0-FU のように表す。また、Case2 と Case4 では新設杭と既設杭 0 および改良体 0 の土圧は、試験体同士の間隔が狭く、荷重方向に沿って土圧計を配置することができなかつたため、平面上で反時計回りに

45° 回転させた位置に土圧計を配置しており、図-13 の断面図では見やすさのため断面に沿うように示している。

4. 2 遠心模型実験の結果

既設杭基礎の残置および引抜き、埋戻しを条件とした新設杭の正負交番水平方向荷重を行った遠心模型実験の結果について述べる。なお、以降の実験結果は各荷重ステップの 1 サイクル目のピーク値を抜き出して整理している。

4. 2. 1 荷重-変位関係

新設杭の荷重位置での荷重-変位関係を図-14 に示す。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 (Case1 と Case4 は重なっている)。非線形形状は見られず、ほぼ線形形状となった。また、荷重初期と中期、最大荷重荷重時に着目し、 $y/D_p = 0.04, 0.10, 0.36$ (ここに、 y/D_p : 変位レベル、 y : 新設杭の荷重変位、 D_p : 新設杭の杭径) のときの各ケースの荷重と Case1 の荷重との比を表-9 に示す。各ケースの荷重の Case1 の荷重との比の平均は、Case2 で 0.79、Case3 で

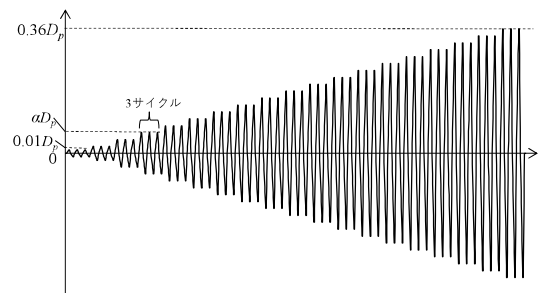


図-12 荷重ステップ

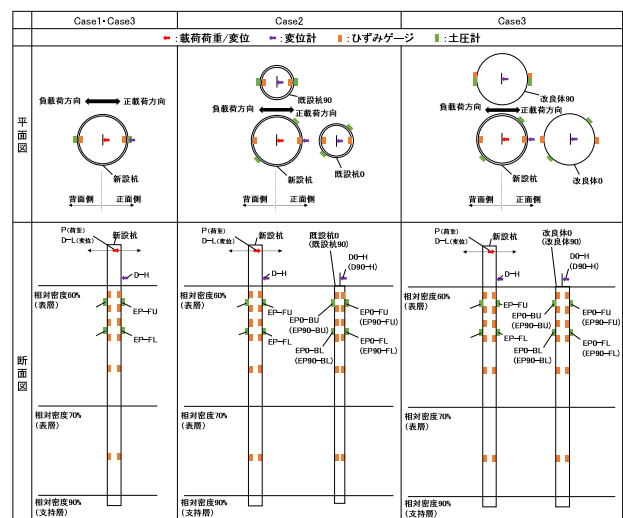


図-13 計測器配置の概要図

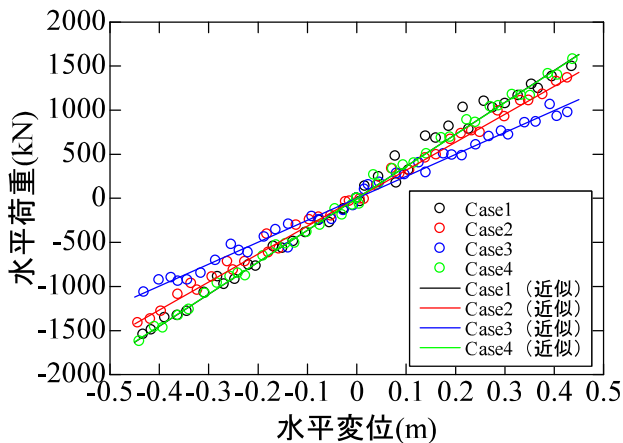


図-14 荷重－変位関係

表-9 $y/D_p=0.04, 0.10, 0.36$ 時荷重と Case1 との比

	$y/D_p=0.04$ 時荷重 (kN)	Case1 との 比	$y/D_p=0.10$ 時荷重 (kN)	Case1 との 比	$y/D_p=0.36$ 時荷重 (kN)	Case1 との 比	Case1 との比 (平均)
Case1	244.44	-	318.48	-	1495.26	-	-
Case2	146.24	0.60	316.23	0.99	1365.73	0.91	0.79
Case3	179.98	0.74	401.18	1.26	973.84	0.65	0.66
Case4	159.17	0.65	400.01	1.26	1577.38	1.05	1.05

0.66、Case4 で 1.05 であり、Case4 は Case1 とほぼ変わらない一方 Case2 と Case3 は Case1 よりも小さくなった。

4. 2. 2 曲げモーメント、水平変位、地盤反力度の深度分布

各ケースの $y/D_p=0.04, 0.10, 0.36$ のときの新設杭の曲げモーメント、水平変位、地盤反力度の深度分布を図-15 に示す。また、Case2 と Case4 について、 $y/D_p=0.36$ のときの既設杭 0 と改良体 0、既設杭 90 と改良体 90 の曲げモーメント、水平変位、地盤反力度の深度分布を図-16 に示す。縦軸に地表面位置より下を負とした深度を、横軸に曲げモーメント、水平変位、地盤反力度を示しており、各変位レベルで横軸のスケールは異なっている。

曲げモーメントは計測された曲げひずみから式(2)を用いて算出した。水平変位および地盤反力度は、算出した曲げモーメントを 3 次の平滑化スプラインにより近似し、2 回積分および 2 回微分することにより算出した^{17), 18)}。なお、水平変位を算出するための 2 回積分の境界条件には杭頭での変位が計測した杭頭変位と等しく、杭先端での変位が 0 となるようにした。

図-15 に着目すると、各ケースにおいて、 y/D_p が増加するに従って、曲げモーメント、水平変位、地盤

$$M = \varepsilon \frac{EI}{D_g} \quad (2)$$

ここに、

M : 曲げモーメント ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)

ε : 曲げひずみ

EI : 曲げ剛性 (kN/m^2)

D_g : 図心からひずみゲージまでの距離 (m)

反力度が増加している。各変位レベルの曲げモーメントの深度分布を見ると、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写真-1 に示すように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、図-15 (i)~(iii)の曲げモーメントの深度分布に着目すると、 $y/D_p=0.04$ 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、 $y/D_p=0.10, 0.36$ のときは同程度となっている。このことから、載荷初期では残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。また、各図からわかるとおり、深度 10m 以浅で新設杭が大きく変

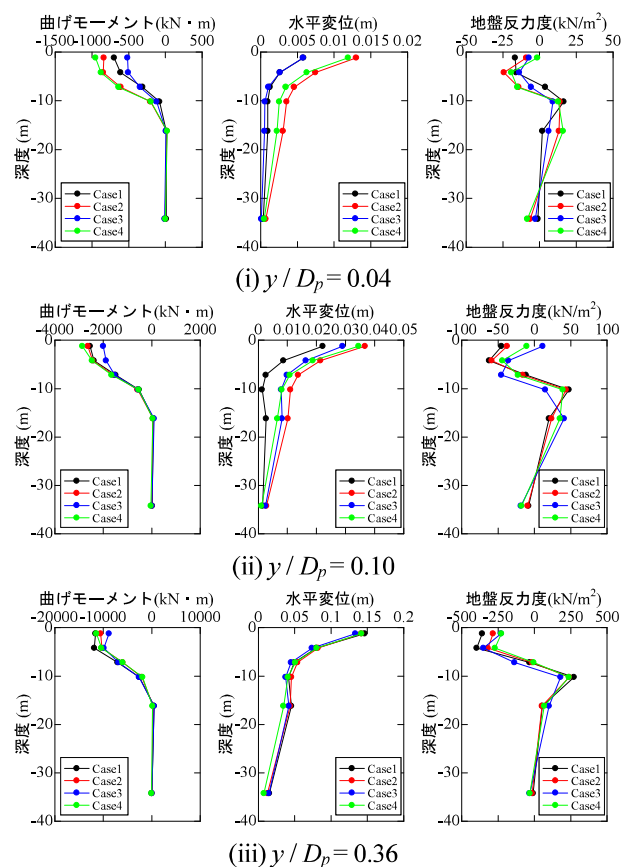


図-15 新設杭の曲げモーメント及び水平変位、地盤反力度



写真-1 既設杭の引抜き後の実験状況

形し、地盤の抵抗が増加している。また、深度 10m 以深では反対方向に地盤の抵抗を受けており、新設杭が荷重方向と反対方向にたわむことにより抵抗を受けたと考えられる。

図-16 (i)の水平変位の深度分布に着目すると、既設杭 0 と改良体 0 の水平変位は、図-15(iii)に示す新設杭の水平変位と同程度となっており、新設杭と同様の変形挙動であったと考えられる。一方で、曲げモーメントの深度分布に着目すると、既設杭 0 と改良体 0 の曲げモーメントは杭頭を荷重していないため新設杭の曲げモーメントと比べ小さい値となっているが、深度 10m 以浅の部分で曲げモーメントがやや大きくなっており、前面の地盤の抵抗を受けていることがわかる。以上のことから、新設杭が荷重されることによって新設杭と既設杭 0 および改良体 0 間の地盤が新設杭に押し、既設杭 0 と改良体 0 には新設杭と同様の変位が生じ、前面の地盤の抵抗を受けることでわずかに部材に変形が生じたと考えられる。

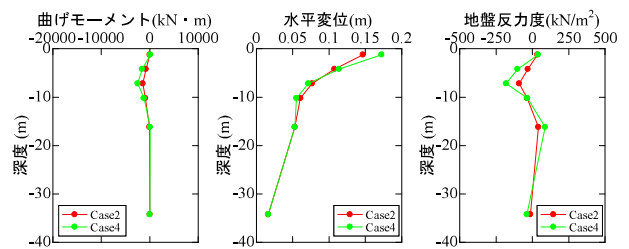
また、図-16 (ii)に着目すると、既設杭 90 と改良体 90 は、荷重方向と直角に位置するため、発生する曲げモーメントや水平変位はごくわずかとなっており、影響は少ないと思われる。

4. 2. 3 土圧-変位関係

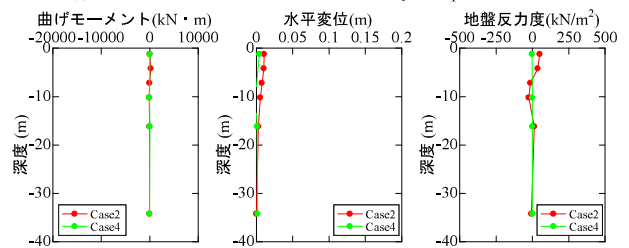
新設杭および既設杭、改良体に設置した土圧計で計測された土圧と新設杭の荷重位置での水平変位との関係を図-17 に示す。図-13 に示した土圧計のうち各ケースの新設杭に設置した EP-FU と、既設杭 0 および改良体 0 に設置した EP0-BU、EP0-FU、既設杭 90 および改良体 90 に設置した EP90-FU の結果を(i)~(iv)にそれぞれ示している。縦軸に土圧計で計測した土圧、横軸に新設杭の荷重位置での水平変位を示している。なお、

Case2 と Case4 については、EP-FU と EP0-BU、EP0-FU の土圧計を平面上で反時計回りに 45° 回転させて設置したため、計測された土圧を $\sqrt{2}$ 倍して整理している。

図に着目すると、変位が増加するにつれて EP-FU、EP0-FU で土圧が増加している。EP-FU は荷重荷重が作用する新設杭に設置しているためと考えられ、EP0-FU は新設杭が荷重されることによって新設杭と既設杭 0 および改良体 0 間の地盤が新設杭に押し、その地盤によって既設杭 0 および改良体 0 が押しされたためと考えられる。しかし、そう考えた場合、土圧は EP-FU、EP0-BU、EP0-FU の順に伝わっていくと考え

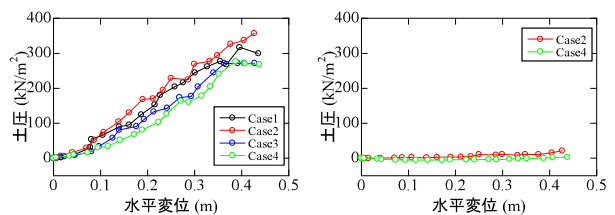


(i) 既設杭 0 および改良体 0 ($y/D_p = 0.36$)



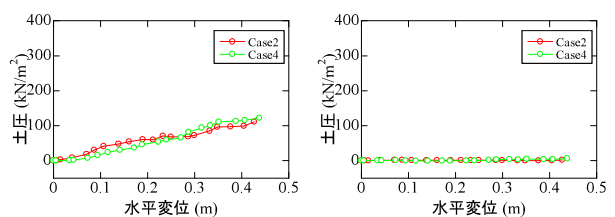
(ii) 既設杭 90 および改良体 90 ($y/D_p = 0.36$)

図-16 既設杭と改良体の曲げモーメント及び水平変位、地盤反力度



(i) EP-FU

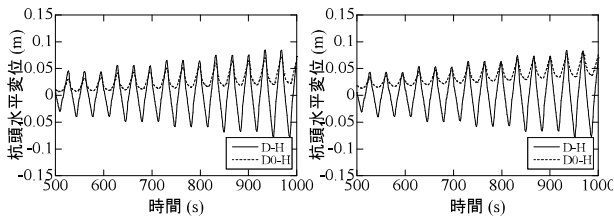
(ii) EP0-BU



(iii) EP0-FU

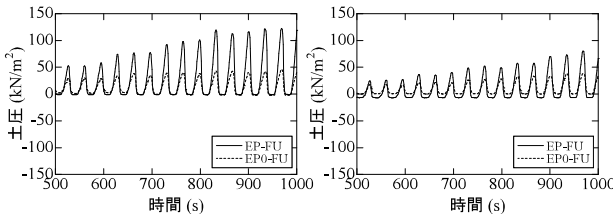
(iv) EP90-FU

図-17 土圧-変位関係



(i) Case2 (ii) Case4

図-18 杭頭水平変位の時刻歴



(i) Case2 (ii) Case4

図-19 土圧の時刻歴

られるが、EP0-BU では土圧がほとんど計測されていない。これは、土圧計を 45° 回転させて設置したため地盤からの力を計測できなかったためと考えられる。また、EP-FU の土圧に着目すると、Case1 よりも Case2 は大きく、Case3 および Case4 は小さくなっている。4.2.1 の荷重-変位関係では、Case4 の荷重は Case1 とほぼ変わらない一方 Case2 と Case3 は Case1 よりも小さくなっており、Case2 と Case4 について大小関係が整合しない結果となった。これは、Case2 と Case4 では平面上で反時計回りに 45° 回転させた位置に土圧計を配置したことにより直接的に土圧を計測できなかったことや、新設杭の水平载荷において実験の都合上突出杭となったこと、また、载荷装置と新設杭の杭頭を鉛直力は伝達せず水平力だけを伝達できるように結合したことにより計測値のブレが大きかったと考えられることなどが要因として考えられる。また、EP90-FU では土圧がほとんど計測されておらず、前節の結果と同様となった。

4. 2. 4 杭頭水平変位と土圧の時刻歴

Case2 および Case4 の新設杭と既設杭 0 および改良体 0 の杭頭水平変位と土圧の時刻歴図を図-18、図-19 に示す。縦軸に杭頭水平変位および土圧、横軸に時間 500s~1000s を、土圧は新設杭の EP-FU、既設杭 0 および改良体 0 の EP0-FU の結果を示している。

図-18 に着目すると、D-H は新設杭を正負交番载荷しているため、正負交互にピークが生じているが、D0-H は正側に载荷したときにピークが生じ、負側に

载荷したときは杭頭変位が 0 にならず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、既設杭および改良体の曲げ剛性による抵抗は発揮されていないと考えられる。また、実験終了後には地表面がすり鉢状に変形していたことから、既設杭および改良体の変形に伴い地盤も変形しており、地盤による抵抗も発揮されていなかったと考えられる。図-19 に着目すると、EP-FU、EP0FU ともに新設杭が正载荷されたときにピークが生じていることがわかる。さらに、それぞれのピークの微細に着目すると、ごくわずかにピークの位相がずれ、EP-FU のピークの後に EP0-FU のピークが生じている。このことから、载荷された荷重が新設杭から既設杭 0 および改良体 0 に伝達していることがわかる。

4. 3 遠心模型実験のまとめ

既設杭の残置および引抜き、埋戻しを条件として新設杭に対して正負交番水平方向载荷を行った遠心模型実験を実施した。遠心模型実験によって得られた知見は以下の通りである。

- 既設杭を引抜いた場合、荷重-変位関係における新設杭の水平剛性や杭頭曲げモーメント、土圧が減少した。
- 既設杭を残置した場合および改良体を埋戻した場合、荷重-変位関係における新設杭の水平剛性と土圧の大小関係が整合しない結果となった。载荷初期では、杭頭曲げモーメントが増加することがわかった。このことから、残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。また、载荷中期~後期では、既設杭および改良体に残留変位が生じており、その時点から曲げ剛性による抵抗は発揮されていないと考えられる。それに伴い、実験後には地表面付近の地盤がすり鉢状に変形していることが観察されたことから、地盤の抵抗も発揮されていなかったと考えられる。

5. 既設杭の引抜きを模擬した模型実験

5. 1 既設杭の引抜きを模擬した模型実験の概要

既設杭の引抜きによって発生すると考えられる周辺地盤の緩みと、引抜きへの埋戻しによって期待される地盤の緩みの抑制効果または地盤の強度の回復効果を確認するために、既設杭の引抜きを模擬した模型実験（以下、模型実験と呼ぶ。）を行った。模型実験は、既設杭に鋼管杭を想定し、鋼管杭の外周と地盤が接する外周の一部を切り出すようなイメージのもと、鋼管杭

の肉厚部分で仕切れ一方が地盤で他方が鋼管杭内の空洞の状態を再現した模型に対して、仕切りを撤去することで既設杭の引き抜きを、空洞部分に埋戻し材を充填することで埋戻しを模擬し、引抜き前後と埋戻し後に地盤強度と変形を計測することで、引抜きによる地盤の緩みと埋戻しによる緩みの抑制効果を評価することを試みた。その概要について述べる。

5. 1. 1 模型の作製

(i) 土槽の作製

模型実験は、図-20の左図に示すように、地盤内に鋼管杭が在る状態を平面で見たときに、赤点線で囲まれた部分を切り出し、それを右図の模型で再現した。模型には図-21に示す土槽を使用した。土槽は内径が幅600mm、奥行き200mm、深さ400mmで、幅方向に2分割する位置に溝を設け、幅16mmの鋼製の仕切りを差し込めるようにした。ここで、仕切りとは鋼管杭の肉厚部分に相当し、既設杭の引き抜きを模擬できるように、天端部にフックを設け、垂直に吊り上げることができる構造とした。そして、土槽の一方には地盤を作製することで鋼管杭周辺の地盤を、もう一方は鋼管杭内部の空洞を模擬した。また、もう一方には埋戻し材を充填することで、既設杭を引抜いた後に埋戻しを行うことを模擬した。

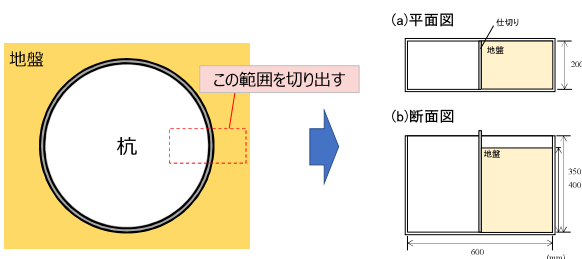


図-20 土槽の概要

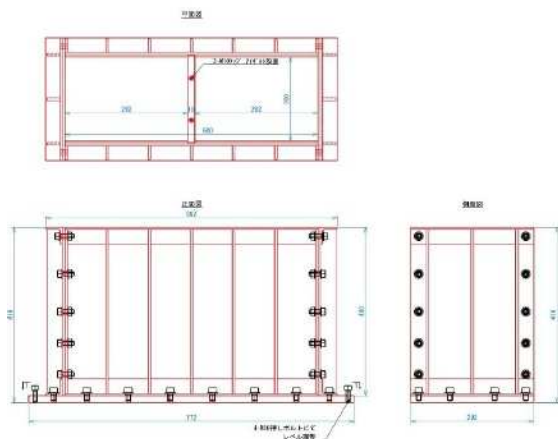


図-21 土槽の図面

(ii) 地盤の作製

地盤は、DLクレーを使用し、地盤高さが350mmとなるように各層50mmで7層に分けて突き固めにより作製した。模型実験は、既設杭の引抜きによる地盤の緩みを確認することを目的としているため、ある程度自立させることを念頭に地盤の材料を選定した。そのため、①事前に地盤定数が明らかであり、かつ、②均一な材料であること、③地盤の作製が容易であることを満たすものとした。①については、既往の実験¹⁹⁾から地盤定数は表-10に示すとおりである。②、③については、文献²⁰⁾において同様の理由から試料として選定されており、既往の実験¹⁹⁾において突き固めにより地盤の作製が可能であることが確認されている。以上を踏まえ、式(3)、式(4)により自立可能高さは0.53mとなる²¹⁾。これを基に、十分余裕を持たせつつ、計測の容易さを考慮して、地盤高さは350mmとした。また、文献²⁰⁾において締固め曲線が得られており、最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.5 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt} = 20\%$ として締固め管理を行った。目標とする締固め度は後述する。

表-10 地盤定数

材料	単位体積重量(kN/m ³)	粘着力(kN/m ²)	せん断抵抗角(度)
DLクレー	17.897	2.4	36.5

$$H_c = \frac{2c}{\gamma\sqrt{K_A}} \quad (3)$$

$$K_A = \frac{\cos^2 \phi}{(1 + \sin \phi)^2} \quad (4)$$

ここに、

H_c : 自立高さ(m)

c : 粘着力(kN/m²)

γ : 単位体積重量(kN/m³)

K_A : 主働土圧係数

ϕ : せん断抵抗角(度)

(iii) 埋戻し材の作製

文献²²⁾に示されるとおり、既設杭の引抜きへの埋戻しには、主に土や流動化処理度、貧配合セメントミルクが使用される。模型実験では、配合管理が容易な貧配合セメントミルクを対象とした。文献²²⁾において実施された埋戻し部の調査では、水セメント比が68~463%の範囲で、多くの場合は200~400%程度で用いられている。これを参考に後述する水セメント比を決定した。

5. 1. 2 模型実験の方法

模型実験は、既設杭の引抜きによる地盤の緩みと引抜きへの埋戻しによる地盤の緩みの抑制効果の確認のため、土槽に仕切りを設置した状態で一方に地盤を製作し、仕切りを垂直に引抜き、その後もう一方に埋戻し材を充填することで、既設杭の引抜きと埋戻しを模擬した。そして、①地盤製作完了後、②仕切り引抜き後、③埋戻し材が硬化後の3回、地盤工学会基準²³⁾JGS1431 に準拠し、ポータブルコーン貫入試験を実施し、地盤の貫入抵抗値を計測した。つまり、引抜きにより地盤の緩みが生じれば、貫入抵抗値は減少し、埋戻しにより地盤の緩みが抑制されれば、貫入抵抗値は増加すると考えられる。また、既設杭の引抜きによる地盤の緩みによって生じる孔壁や地表面の変形を確認するために、①地盤製作完了後、②仕切り引抜き後、③仕切り引抜き後に静置した後の3回、孔壁と地表面の変位を計測した。ここで、孔壁とは仕切りと地盤が接していた面を指す。

5. 1. 3 模型実験の条件

模型実験は、表-11 に示す5ケースを実施した。着目するパラメータは地盤として用いる DL クレーの目標締固め度、埋戻し材として用いるセメントミルクの水セメント比、地盤に上載圧を作用させるための重錘の重量、埋戻し方法である。埋戻し方法の A は文献²²⁾に示す代表的な工法であるケーシング縁切引抜き工法で既設杭を引抜いた後埋戻しを行うことを模擬するため、仕切りを撤去後に埋戻し材を充填する方法、B は文献²²⁾に示す代表的な工法であるオールケーシング破碎撤去工法で既設杭を撤去しケーシングを残置したまま埋戻しを行うことを模擬するため、仕切りを撤去する前に埋戻し材の充填を行い、充填完了直後に仕切りを撤去する方法である。

Case1 は比較のための基準のケースである。Case2 は地盤の目標締固め度を増加させることが引抜きによる地盤の緩みに与える影響を確認することを目的とした。Case3 は埋戻し材の水セメント比を増加させ強度を低下させることが埋戻しによる地盤の緩みの抑制効果に与える影響を確認することを目的とした。Case4 は地盤に上載圧を加えることで地表面からの深度を増加させた状態を模擬し、それが引抜きによる地盤の緩みに与える影響を確認することを目的とした。なお、上載圧 100kg を土被り圧として地表面からの深度を計算すると 0.62m となる。Case5 は工法の違いが地盤の緩みに与える影響を確認することを目的とした。

5. 1. 4 計測

5.1.2 で述べたとおり計測項目はポータブルコーン貫入試験の貫入抵抗値と孔壁と地表面の変位である。ポータブルコーン貫入試験は①～③のそれぞれに対して図-22 に示す5カ所（孔壁から近い順に計測位置1～5と呼ぶ）で、1カ所につき深度方向に 0-100mm、100-200mm、200mm-300mm の3点（深度1～3と呼ぶ）で計測を行った。また、②仕切り引抜き後の計測については、Case1～Case4 では仕切りの引抜き後 24時間静置した後、Case5 では埋戻し材で充填を行い仕切りを引抜いた直後に計測を行った。③埋戻し材が硬

表-11 実験ケース

ケース	目標締固め度	水セメント比	上載圧	埋戻し方法
Case1	90%	70%	0	A
Case2	100%	70%	0	A
Case3	90%	200%	0	A
Case4	90%	70%	100kg	A
Case5	90%	70%	0	B

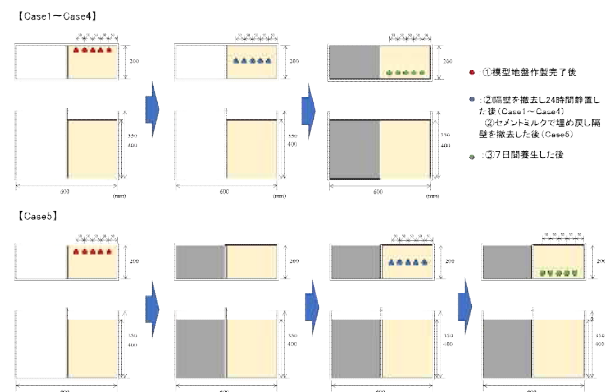


図-22 ポータブルコーン貫入試験の計測位置

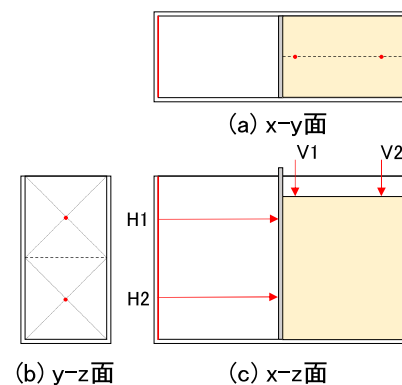


図-23 変位の計測位置

化後の計測については、硬化まで7日間養生を行った。

孔壁と地表面の変位は、図-23 に示すとおり、各2カ所をレーザー距離計を用いて計測した。また、③仕切り引抜き後に静置した後の計測については、24時間静置させた。

5. 2 既設杭の引抜きを模擬した模型実験の結果

既設杭の引抜きによる地盤の緩みと、引抜孔への埋戻しによる地盤の緩みの抑制効果を確認するために、既設杭の引抜きおよび埋戻しを模擬した模型実験を行った。その結果について述べる。

5. 2. 1 ポータブルコーン貫入試験の結果

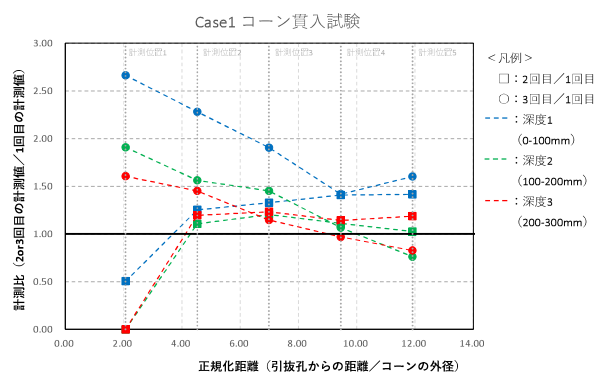
ポータブルコーン貫入試験によって計測された貫入抵抗値と孔壁からの距離との関係を図-24 に示す。縦軸に計測比、横軸に正規化距離を示している。ここで、計測比とは②および③の貫入抵抗値を①の貫入抵抗値で正規化した値、正規化距離とは孔壁からの距離をポータブルコーン貫入試験機のコーン部の外径で正規化した値である。

なお、Case1~Case4において、②の計測時に計測位置1において地盤が崩壊し計測不可となった。また、Case2の全計測位置において①および②の計測時には深度1、③の計測時には深度2で貫入抵抗が大きいいため貫入不可となった。Case3では②の計測時に計測位置1において地盤が崩壊したことにより、③の計測時に計測位置1および2において計測不可となった。Case4では重錘が地盤上からセメントミルク中に滑落したことによりセメントミルクが模型地盤表層を覆い硬化したため、③の計測時に計測位置1~4において計測不可となった。

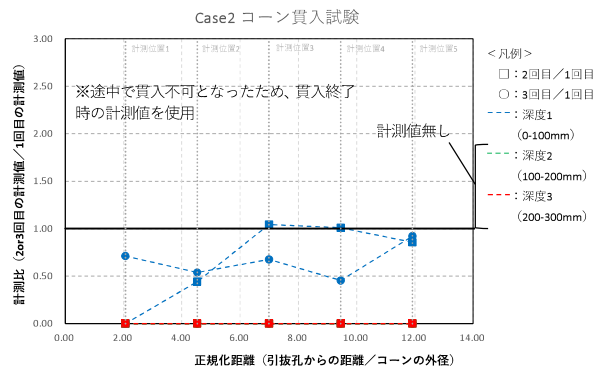
図-24の②仕切り引抜き後の計測結果に着目すると、Case1計測位置1で、Case2~Case5では計測位置1~2で計測比が1以下となった一方、計測位置3~5では計測比はほぼ1となった。このことから、実施工においても引抜きの際には孔壁の崩壊が起こりえること、また、孔壁の近傍では引抜きによる影響があるが、孔壁から離れるほど引抜きの影響は少ないことが推察される。また、③埋戻し材が硬化後の計測結果に着目すると、Case1では孔壁に近づくにつれ計測比が増加しているが、Case2~Case5では全計測位置で計測比が1以下となっている。このことから、実施工においても適切な施工管理の下、埋戻しを行うことで地盤の強度増加を期待できる可能性がある。一方で、計測比が減少したのは、埋戻し材の水分が地盤に浸透し軟化したことによると考えられることから、埋戻しの際は孔壁の保護や埋戻し材の水分量に注意することが重要と思

われる。

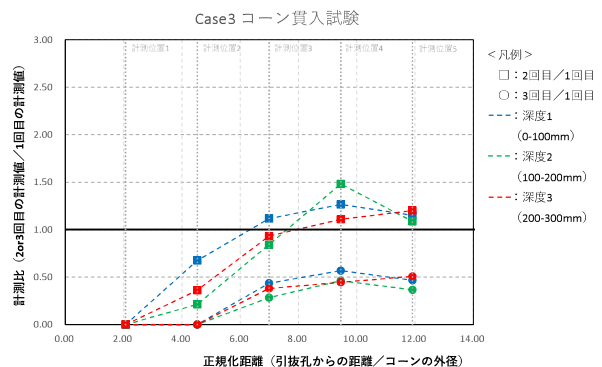
Case2は目標締固め度が他のケースより高いが、他のケースと同様に計測位置1で地盤が崩壊したため、地盤の硬軟によらず孔壁近傍では地盤の崩壊が起こりえると考えられる。Case3は埋戻し材の水セメント比が大きい条件だが、他のケースでも見られたように水分が地盤に浸透し軟化したと考えられることなどにより、期待していた埋戻し材の強度が地盤の緩みの抑制効果に与える影響を定性的には確認できなかった。また、Case4においても上載圧を作用させて地中の状態を再現することを目的としていたが、Case3と同様の



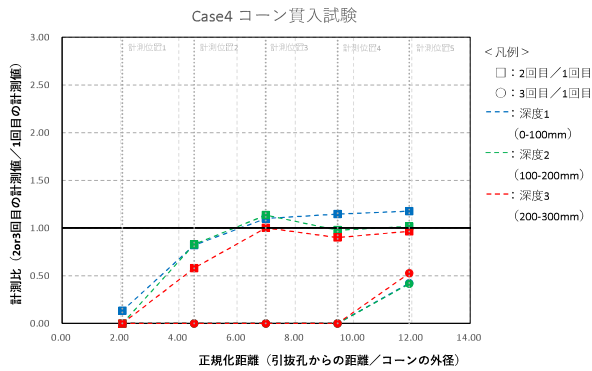
(i) Case1



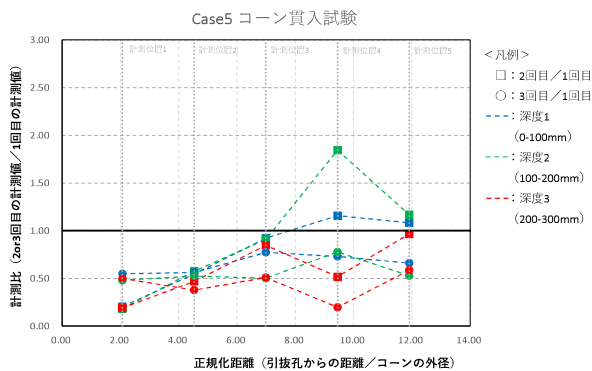
(ii) Case2



(iii) Case3



(iv) Case4



(v) Case5

図-24 ポータブルコーン貫入試験の計測結果

ことが要因となり上載圧の荷重を中断せざるを得なかったため影響を確認することができなかった。Case5では他のケースとは別の方法で埋戻しを行い、その結果計測位置1において地盤の崩壊は見られなかったことから、孔壁保持を適切に行うなど、孔壁の拘束がない状態を短くすることで地盤の崩壊の可能性を低下させることができると考えられる。

5. 2. 2 地盤の変形

①～③の計測時における孔壁と地表面の変位の変化の推移を図-25に示す。横軸に①～③の計測段階を、縦軸に変位を示している。ここでの変位は②および③の計測値から①の計測値を差し引いた値である。また、鉛直変位 (V1、V2) は沈下方向が正、水平変位 (H1、H2) は地盤の圧縮方向が正である。

図-25 を見てみると、全てのケースで地表面が隆起し、孔壁は地盤が縮む方向へ変位していることがわかる。一般的には引抜きにより孔壁が自由になる場合、地盤の自重により引抜き側に緩み、地表面は沈下すると想定されるが、その反対の結果となった。このことから、乾燥収縮や計測誤差などが考えられるが、具体的な要因は明らかとなっていない。

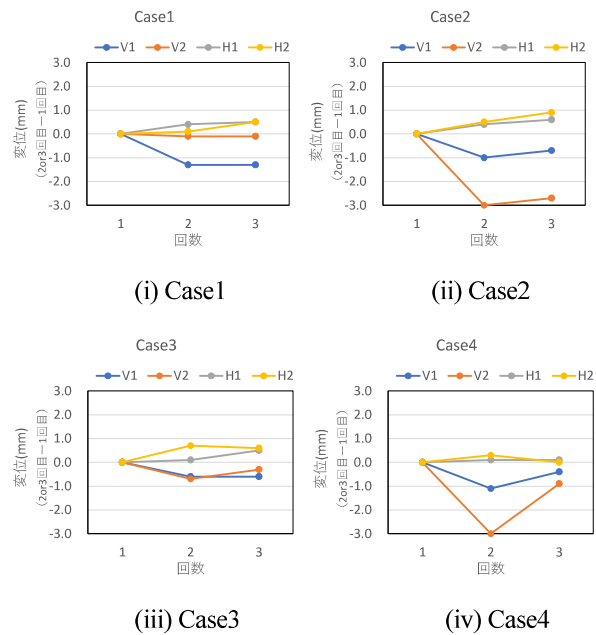


図-25 孔壁と地表面の変位の計測結果

5. 3 既設杭の引抜きを模擬した模型実験のまとめ

既設杭の引抜きによる地盤の緩みと、引抜きへの埋戻しによる地盤の緩みの抑制効果を確認するために、既設杭の引抜きおよび埋戻しを模擬した模型実験を行い、①地盤作製完了後、②仕切り引抜き後、③埋戻し材が硬化後の3回において、ポータブルコーン貫入試験による貫入抵抗値および変位計による地表面と孔壁の変位を計測した。得られた知見は以下の通りである。

- 孔壁の近傍では地盤の崩壊が発生したが、孔壁から離れると貫入抵抗値に変化は見られなかった。このことから、拘束がない孔壁近傍では地盤の崩壊が起きる可能性が有り、孔壁の保持が重要と考えられる。また、孔壁から離れると地盤の緩みによる影響は少ないと考えられるので、現地の地盤の状況を考慮して緩みの影響がある範囲を適切に評価する必要がある。
- 埋戻しにより貫入抵抗値が増加するケースも見られたが、低下するケースがあった。貫入抵抗値が低下したのは、水分の浸透により地盤が軟化したことが影響したと考えられる。このことから、適切に埋戻しを行うことで地盤の緩みを抑制できる可能性があるが、埋戻し材の配合などを適切に設定する必要があると考えられる。
- 引抜き後の地表面と孔壁は、想定とは反対の方向に変位したことから、乾燥収縮や計測誤差などが要因として考えられるが、具体的な要因を明らかにすることはできなかった。

6. まとめ

本稿では、既設杭の残置および引抜き、埋戻しが地盤と新設杭に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、第2章で文献調査、第3章で3次元有限要素解析、第4章で遠心模型実験、第5章で既設杭の引抜きを模擬した模型実験を行った結果について述べた。上記の検討から得られた知見をまとめると以下の通りである。

1) 既設杭の残置が地盤と新設杭に及ぼす影響

新設杭の周囲に既設杭を残置させた状態で新設杭の水平方向交番荷重を行った結果、3次元有限要素解析では、新設杭の前面地盤の応力が増加するとともに新設杭の水平剛性と作用する地盤反力度が増加する結果となった。一方で、遠心模型実験では、荷重初期において新設杭の杭頭曲げモーメントが大きくなることが確認されたことから地表面付近において地盤の抵抗が増加したと考えられるが、水平剛性はやや小さくなる結果となった。これは、荷重初期には残置された既設杭が抵抗の増加に寄与したが、既設杭に残留変位が生じたことが確認されたことから荷重後期には残置された既設杭の影響が表れなかったためと考えられる。以上のことから、既設杭を残置させることによって新設杭が受ける抵抗が増加し水平剛性が大きくなるが、その傾向は既設杭の状態に影響を受けることがわかった。

2) 既設杭の引抜きが地盤と新設杭に及ぼす影響

新設杭の周囲に位置する既設杭を引抜いた状態（引抜き孔を埋戻していない状態）で新設杭の水平方向交番荷重を行った結果、3次元有限要素解析と遠心模型実験ともに、新設杭の水平剛性が小さくなることがわかった。さらに、新設杭に作用する地盤反力度や杭頭曲げモーメントも小さくなることがわかった。

3) 引抜き孔への埋戻しが地盤と新設杭に及ぼす影響

新設杭の周囲に位置する既設杭を引抜いた後に埋戻した状態で新設杭の水平方向交番荷重を行った結果、3次元有限要素解析では、既設杭を残置させた場合と同様、新設杭の水平剛性や作用する地盤反力度、その前面地盤の応力が増加する結果となり、さらに、その増加の度合いは既設杭を残置させた状態よりも大きいことがわかった。遠心模型実験では、新設杭の水平剛性は単杭を荷重させた場合と同程度であったが、既設杭を残置させた場合と同様、荷重初期では新設杭の杭頭曲げモーメントが大きく、改良体には残留変位が生じた。以上のことから、改

良体も既設杭と同様に抵抗に寄与するが、改良体の状態に影響を受けると考えられる。ただし、引抜きによる影響と改良体による影響は完全には区別できていない上、剛性などの改良体の諸元に関するパラメータの違いも影響すると考えられるため、詳細を明らかにするには更なる検討が必要である。

今後は、本稿では明らかにできなかった土質の違いや引抜きおよび埋戻しの施工による乱れの影響、さらには地盤の緩みの実態などに関する検討が行われることが期待される。

参考文献

- 1) 白戸真大、藤田裕士、高橋慶：橋梁の架替に関する調査結果（V）、国総研資料第1112号、pp.I-21、2020
- 2) 崎浜博史、堀井宏謙、八重樫光：既存杭撤去後の掘削孔に埋戻された流動化処理土の品質調査、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.435-436、2014
- 3) 藤橋俊則、川鍋賢人、平山勇治：深層混合処理工法による既存杭撤去後の埋戻し地盤への施工事例と品質調査結果、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.553-554、2021
- 4) 一般社団法人日本建設業連合会 地盤基礎専門部会 杭の再利用促進 WG：既存杭利用の手引き—現在と将来の利用に向けて—、2018
- 5) 公益社団法人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と施工、2022
- 6) 足立圭佑、田村修次、樋口康仁、林康裕：残置杭が新設杭の水平地盤反力の深度分布に及ぼす影響、第44回地盤工学研究発表会、2009.8.
- 7) 田村修次、樋口康仁、足立圭佑、林康裕、山崎雅弘：遠心実験における残置杭が新規杭の周面摩擦力と先端支持力に及ぼす影響、第44回地盤工学研究発表会、2009.8.
- 8) 田中俊平、鈴木康嗣、宮田章、松元秀樹：杭撤去に伴う周辺地盤の挙動—その1 地盤移動—、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2005.9.
- 9) 松元秀樹、田中俊平、鈴木康嗣、田中章：杭撤去に伴う周辺地盤の挙動—その2 地盤物性—、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2005.9.
- 10) 吉田洋之、今村晃、色摩康弘、間瀬辰也：液化地盤における残置杭が新設杭の地震時挙動に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、2016.8.
- 11) 納庄一希、鳥越友輔、稲積真哉、桑原秀一：杭基礎の引抜き孔が周辺地盤の動的挙動に及ぼす影響の解析的検討、

第 51 回地盤工学研究発表会（岡山）、2016.9.

- 12) 渡邊康司、山本忠久、高崎秀明、金田淳、阿部慶太、桐生郷史、山本忠：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：研究の目的・遠心模型実験方法)、土木学会第 73 回年次学術講演会、2018.8.
- 13) 阿部慶太、高崎秀明、金田淳、山本忠久、渡邊康司、桐生郷史、山本忠：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 2：遠心模型実験結果)、土木学会第 73 回年次学術講演会、2018.8.
- 14) 桐生郷史、山本忠、高崎秀明、金田淳、阿部慶太、山本忠久、渡邊康司：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 3：有限要素解析による検討)、土木学会第 73 回年次学術講演会、2018.8.
- 15) 青島一樹、堀井良浩、渡邊徹、長尾俊昌：杭頭結合時期を調整した杭基礎模型の原位置鉛直載荷実験—その 2：実験結果とそのシミュレーション解析—、第 40 回地盤工学研究発表会（函館）、2005.7.
- 16) 崎浜博史、堀井宏謙、八重樫光、西正晃：既存杭撤去後の掘削孔に埋戻された泥水固化体の品質調査、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、2015.9.
- 17) 江川拓也、西本聡、富澤幸一：遠心力模型実験に基づく火山灰質地盤における杭の地震時水平地盤反力の評価、地盤工学会北海道支部技術報告集第 5 3 号、2013.1.
- 18) 江川拓也、林憲裕、富澤幸一：火山灰質地盤の液状化に伴う杭の水平地盤反力係数の評価に関する研究、寒地土木研究所月報、No.749、2015.10.
- 19) 国立研究開発法人土木研究所、株式会社オリエンタルコンサルタンツ、JFE シビル株式会社：フーチングを有しない多柱式ラーメン構造の性能検証法に関する共同研究報告書、共同研究報告書第 500 号、2018.9.
- 20) 社団法人土質工学会 不飽和地盤の安定性に関する研究委員会：不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム 発表論文集、1993.1.
- 21) 龍岡文夫：初級講座 この式どうやってできたの？どう使うの？第 18 回粘着力のある場合の土圧、基礎工、2011.4.
- 22) 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と施工、2022.5.（出版予定）
- 23) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説、丸善出版株式会社、2013.3.

RESEARCH ON THE IMPACT OF CLOSE CONSTRUCTION WITH EXISTING PILES TO NEW PILES AND COUNTERMEASURES

Research Period : FY2019-2021

Research Team : Bridge and Structural Engineering

Research Group

Author : KIRIYAMA Takaharu

FUJITA Tomohiro

IJIMA Shoichi

Abstract : In the future, it is expected that the renewal of road bridge foundations will increase due to city planning and aging. When renewing the pile foundation, the existing pile may be left behind or removed, and in the latter case, it is backfilled with an appropriate material after removal. However, there are many unclear points about the impact to new piles in those cases. Therefore, in this study, three-dimensional finite element analysis and centrifugal model experiments were conducted with the aim of clarifying the effects of leaving, pulling out, and backfilling existing piles to new piles. As a result, when the existing pile is pulled out, the horizontal rigidity of the new pile decreases, but when it is left behind or backfilled, it increases in the 3D finite element analysis and does not increase in the centrifugal model experiment, which affects the new pile.

Key words : existing piles, leftovers, withdrawals, backfills