

適用範囲を拡大したハイスペックマイクロパイル®工法の開発

粕谷 悠紀 高橋 真一

Development of High Standard Micro-Piles Method with Expanded Application

Yuki Kasuya Shinichi Takahashi

Abstract

Micro-pile methods with a pile diameter of less than 300 mm have been increasingly adopted as the foundation of highway bridges as a seismic reinforcement; therefore, high bearing capacity, high strength, and construction on bedrock are required. Therefore, the “High-standard Micro-piles Method” was developed. It expands the applicable steel pipe diameter and wall thickness while utilizing a compact and lightweight machine and can be constructed even on a rock. Moreover, this method has been improved so that it can be used as a low-cost soldier pile. Static axial compression load tests and horizontal alternative load tests were conducted to examine the reliability of the proposed method. Examples of applications of reinforcing and soldier piles for highway bridges were introduced.

概要

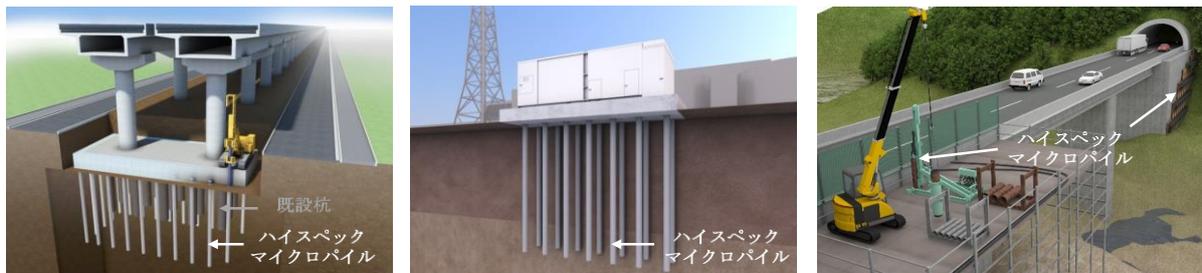
杭径が300mm以下の小口径杭工法は、道路橋基礎などの耐震補強対策としての採用が増加しており、高支持力の岩盤でも施工可能な高耐力の杭工法が求められている。そこで、コンパクトで軽量の施工機械を活かしつつ、適用可能な鋼管径や鋼管肉厚を拡大し、かつ岩盤でも施工可能な高性能小口径杭工法「ハイスペックマイクロパイル®工法」を開発した。さらに、低コストな土留め杭として活用できるように改良した。本報では、杭性能の確認を目的として実施した押し込み載荷試験結果および水平交番載荷試験結果について述べる。加えて、空頭制限下における道路橋基礎の補強杭、および鉄道営業線や高速道路に近接した斜面上の土留め親杭として適用した事例について述べる。

1. はじめに

道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成8年度版）¹⁾の改定に伴う設計荷重の増大によって、地震時の支持力不足や杭の耐力不足となる既設構造物の補強対策の1つとして、増し杭工法がある。都市部では大型重機を使用した場合に、道路占有に伴う交通規制が生じるだけでなく、狭隘地では施工が困難という課題がある。また、道幅が狭く傾斜のある山間部では搬入経路や施工スペースが確保できないなどの課題もある。このため、交通規制を最小限に抑えられ、山間部でも搬入可能なコンパクトな施工機械を用い、周辺の地盤や構造物への影響が小さい小口径杭の採用が望まれる。既存の小口径杭工法は、施工上の理由から特殊鋼管を使用し、継ぎ杭1本が1.5m

と短尺であるため、鋼管のコストが高いうえに高価な継ぎ手が多く必要であった。

そこで、既設構造物における補強工事等において、狭隘地や空頭制限下等でも施工可能かつ経済性に優れた高性能小口径杭工法「ハイスペックマイクロパイル®工法」（以下、本工法という）を開発した。Fig. 1に本工法の適用例を示す。本工法は、これまで鉄道営業線に近接した工用栈橋基礎杭²⁾、および高速道路桁下の歩道橋基礎杭³⁾などの施工実績があった。設計時における地震力の増加により、道路橋などの構造物の耐震補強を目的とした増し杭への適用にあたって、杭1本あたりの高支持力化や高耐力化が望まれていた。そこで、コンパクトで軽量の施工機械を活かしつつ、鋼管径や鋼管肉厚を拡大し、かつ岩盤でも施工可能な本工法を開発した。さらに、低



(a) 道路橋基礎の補強

(b) 発電所基礎

(c) 土留め親杭・抑止杭

Fig. 1 ハイスペックマイクロパイル工法の適用例
Example of High-Standard Micro-Piles Method

Table 1 ハイスpekマイクロパイル工法の種類
Type of High-Standard Micro-Piles Method

種類	支持杭タイプ		土留め杭タイプ
技術審査証明	2015年取得	2020年内容変更	なし
鋼管径	φ165.2, 190.7	左記+φ267.4	左記
鋼種	STK400, STK490	左記	制約なし
削孔方式	湿式削孔	湿式削孔, 乾式削孔	
土質	砂質土, 粘性土 砂礫	砂質土, 粘性土 砂礫 (岩盤は参考扱い)	砂質土, 粘性土 砂礫, 岩盤
備考		適用拡大範囲	

コストな土留め杭として活用できるようにした (Table 1)。本工法には、技術審査証明を取得している支持杭タイプと取得していない土留め杭タイプの2種類がある。また、従前の湿式削孔方式に加え、乾式削孔方式を開発した。

本報では、本工法の概要を述べた後、杭性能の確認を目的として実施した押込み載荷試験結果および水平交番載荷試験結果について述べる。空頭制限下における道路橋基礎の補強杭 (支持杭タイプ), 鉄道営業線や高速道路に近接した斜面上の土留め親杭 (土留め杭タイプ) として適用した事例について述べる。

2. ハイスpekマイクロパイル工法の概要

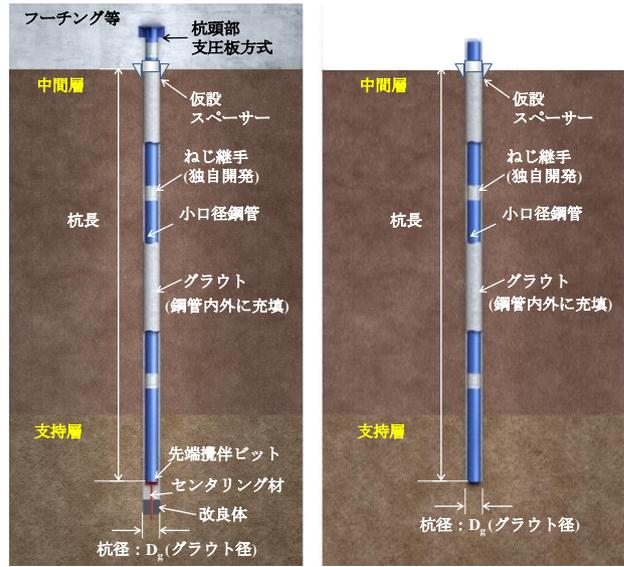
2.1 支持杭タイプの概要

Fig. 2(a)に支持杭タイプの概要図を示す。ボーリングマシンを用いて二重管削孔し、鋼管を建て込んだ後にグラウトを充填し、地盤中に鋼管を定着させる。

鋼管は、一般構造用炭素鋼鋼管を標準とする。鋼管の継手には、ねじ継手を用いる。削孔時に孔底に残留するスライムによる支持力低下を改善するため、鋼管先端部に取り付けた攪伴ビットを用いて杭先端の地盤を改良する。グラウトの設計基準強度は30N/mm²である。杭頭部は、鋼管を基礎フーチング等へ定着させる支圧板方式を標準とする。支圧板の形状は円形タイプと矩形タイプがある。

Table 2に支持杭タイプの諸元を示す。Table 1の赤字かつ下線で示した箇所が適用範囲を拡大した内容である。鋼管径はφ267.4mmを追加し、グラウト径はφ335.0mmを追加した。φ165.2mmやφ190.7mmの鋼管径についてもSTK490の鋼材に限定して10mm以上の肉厚を追加した。

本工法は、上部構造から伝達された軸方向荷重を先端地盤抵抗と、地盤とグラウトとの周面摩擦抵抗で支持する。杭頭部に伝達された水平荷重、回転モーメントに対しては、鋼管と鋼管内外のグラウトにおける合成断面の抵抗メカニズムが不明確であるため、安全側として、グラウトを無視した鋼管の剛性および耐力と水平地盤反力で抵抗するものとした。ゆえに杭径は、支持力算定時はグラウト径、水平抵抗時は鋼管径とする。使用する削孔機は、ロータリーパーカッションドリルであり、クローラ型やスキッド型がある。クローラ型はφ267.4mm鋼管を用いた施工は可能であるが、スキッド型は軽量の削孔



(a) 支持杭タイプ (b) 土留め杭タイプ

Fig. 2 ハイスpekマイクロパイル工法の概要図
Model of High Standard Micro-Piles Method

Table 2 支持杭タイプの諸元
Specification with the Type of Bearing Pile

削孔方式		湿式削孔 or 乾式削孔		
ケーシング径 (mm)		φ216.3	φ245.0	φ318.5
杭径 (mm)		φ225.0	φ255.0	φ335.0
鋼管	鋼種	一般構造用炭素鋼鋼管 STK400, STK490		
	径 (mm)	φ165.2	φ190.7	φ267.4
	肉厚 (mm)	4.5~7.1 ※10mm以上 はSTK490のみ	5.3~8.2 11.0, 13.0	6.0~9.3 12.0, 15.0
ねじ継手 (独自)	鋼種	機械構造用炭素鋼鋼管 STK400対応: STKM13A, S490対応: S45C		
	肉厚 (mm)	18~40 (鋼管の仕様に応じて検討)		
グラウト	比重	1.89 ± 4%		
	強度 (N/mm ²)	30.0		

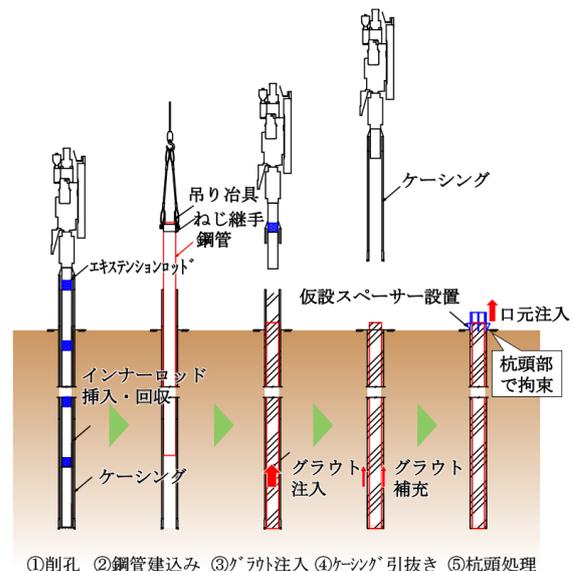


Fig. 3 土留め杭タイプの施工手順
Construction Process of Soldier Pile Type

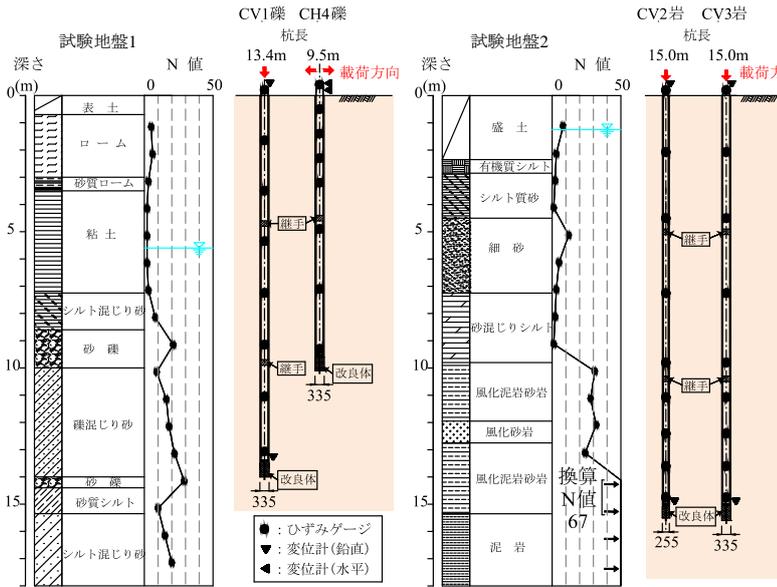


Fig. 4 地盤条件および試験杭模式図
Soil Condition and Test Piles Model

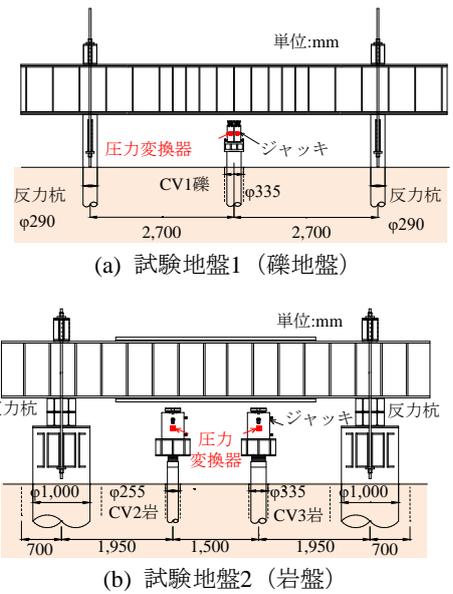


Fig. 5 試験杭および反力杭の断面図
(押し込み荷重試験)

Cross Section of Test Piles and Reaction Piles
(Static Axial Compressive Load Tests)

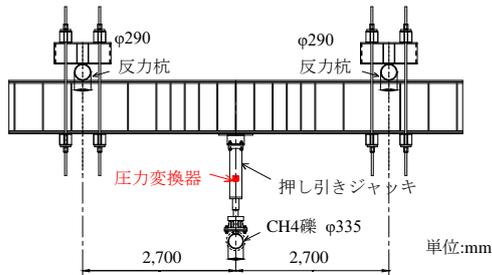


Fig. 6 試験杭・反力杭の平面図 (水平交番荷重試験)
Ground Plan of Test Piles and Reaction Piles
(Horizontal Alternate Load Tests)

Table 3 試験杭の諸元
Parameters of Test Piles

ケース	単位	CV1礫	CV2岩	CV3岩	CH4礫
試験地盤	—	1	2	2	1
荷重方向	—	押し込み	押し込み	押し込み	水平交番
鋼種	—	STK490	STK490	STK490	STK490
鋼管径	mm	φ 267.4	φ 190.7	φ 267.4	φ 267.4
鋼管肉厚	mm	9.3	8.2	9.3	9.3
杭径	mm	φ 335.0	φ 255.0	φ 335.0	φ 335.0
杭長	m	13.4	15.0	15.0	9.5
改良体長	m	0.5	0.4	0.5	0.5

機を用いるため、φ267.4mm鋼管を用いた施工はできない。なお、支持杭タイプの施工手順は既報⁴⁾に譲る。

2.2 土留め杭タイプの概要

Fig. 2(b)に土留め杭タイプの概要図を示す。親杭横矢板工法の親杭として使用する土留め杭タイプは、主として水平力に対して抵抗する構造である。支持杭タイプの施工工程のうち、特殊冶具で先端部を地盤改良して改良体を構築する工程や、鋼管を持ち上げたのちに鋼管と杭頭部材をねじ継手で連結する工程を省略した (Fig. 3)。その結果、工程の短縮や施工設備の簡素化により、低コストな土留め杭としての適用を可能とした。

地下水位よりも深く杭を構築する場合の削孔方式は、地表面に泥水が湧出する湿式削孔方式となる。この削孔方式は、地上からインナーロッド内に送水し、泥水循環により土砂を地上に排出させるが、軟弱な排土が多く発生する。そこで、盛土上の道路沿線など地下水位より浅く杭を構築する場合 (例えば、Fig. 1(c)) において、空気の圧送と少量の泥水を用いる乾式削孔方式を新たに開発した。排土処分費を大幅に削減でき、湿式削孔方式と比

べて約5%のコスト低減が可能となった。また、乾式削孔方式に限りインナーロッドにダウンザホールハンマーをセットすることで、一軸圧縮強さ q_u が25MN/m²以下の岩盤への適用が可能となった。

3. 実大荷重試験

3.1 実大荷重試験の概要

適用拡大した鋼管径267.4mmにおける杭の鉛直支持力特性と水平抵抗特性を確認するため、実大荷重試験を実施した。Fig. 4に地盤条件および試験杭の模式図を示す。試験地盤1は、GL-7.3mまでロームおよび粘土、GL-7.3m以深は途中シルト層が介在するものの、砂層と砂礫層の互層地盤で構成されている。試験地盤2は、GL-9.8mまで盛土、シルト層、砂層、GL-9.8m~15.4mは風化泥岩砂岩および風化砂岩、GL-15.4m以深は泥岩で構成されている。

Table 3に試験杭の諸元を示す。押し込み荷重試験杭は3本であり、支持層および杭径を変化させている。試験地盤1の支持杭はN値30程度の砂礫地盤に根入れしており、試験地盤2の支持杭はN値50以上の岩盤に根入れしている。

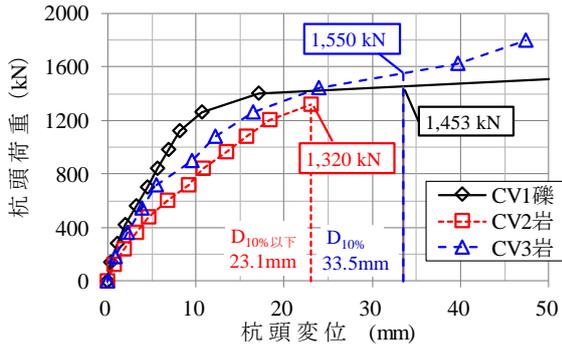


Fig. 7 杭頭荷重—杭頭変位関係
Relationship between Pile Head Load and Displacement

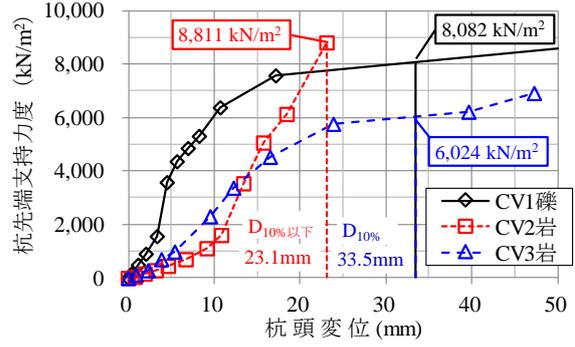


Fig. 9 杭先端支持力度—杭頭変位関係
Relationship between End Bearing Pressure and Displacement

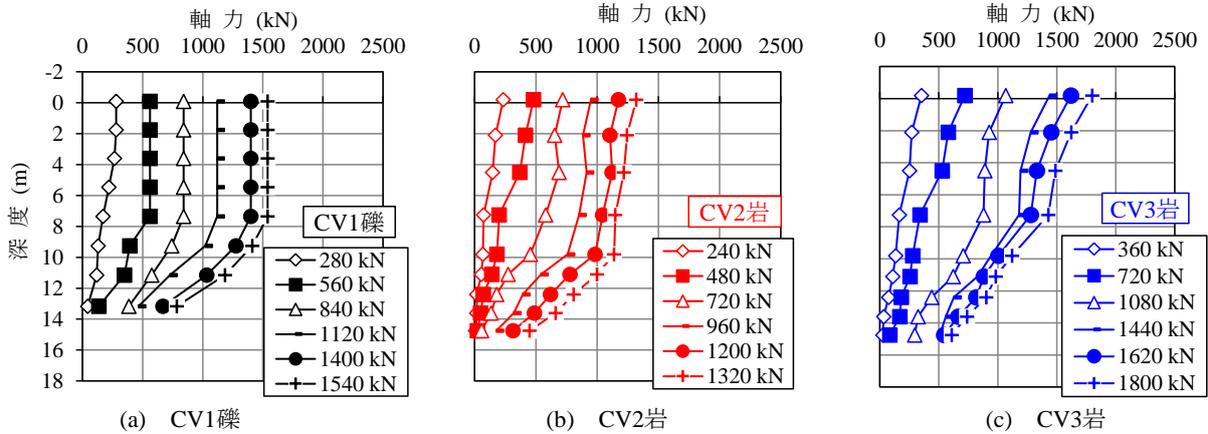


Fig. 8 軸力分布
Distributions of Axial Force

Fig. 5に試験地盤1と試験地盤2における試験杭および反力杭の断面図を示す。Fig. 6に試験地盤1における水平交番載荷試験杭および反力杭の平面図を示す。水平交番載荷試験杭は試験地盤1で1本施工した。

押込み載荷試験は、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説⁵⁾」に準拠して実施した。載荷方法は段階載荷・多サイクル方式である。測定項目は、杭頭荷重、杭頭および杭先端変位、鋼管のひずみである。杭先端変位は二重管方式で測定した。一方、水平交番載荷試験は、地盤工学会基準「杭の水平載荷試験方法・同解説⁶⁾」に準拠して実施した。載荷方法は段階載荷・多サイクル方式による正負交番方式である。測定項目は、杭頭荷重、載荷点変位および載荷点+0.3m変位、鋼管のひずみである。

3.2 押込み載荷試験結果

Fig. 7に新規荷重時の杭頭荷重と杭頭変位の関係を示す。「道路橋示方書・同解説IV下部構造編(平成29年度版)⁷⁾(以下、H29道示IVという)によると、押込み載荷試験による設計上の極限支持力度は、杭頭変位量が杭径の10%を超える場合は、杭径の10%を超える時の荷重としている。CV1礫のケースでは、1,000kN程度まで弾性的な挙動を示しており、杭径が同一のCV3岩に比べて大きな初期剛性を有する結果となった。その後、1,120kN付近で

曲線の勾配が変化する降伏荷重と判断でき、杭頭変位が33.5mmで極限支持力度となる1,453kNに到達した。CV2岩のケースでは、1,000~1,200kN程度まで弾性的な挙動を示しており、杭頭変位が23.1mmで極限支持力度の1,320kNに到達した。これは、杭頭変位が杭径10%の25.5mmに到達していないものの、杭頭部に載せた台座と圧縮ジャッキの間で偏心作用が確認されたため、安全を考慮して試験終了としたためである。CV3岩のケースでは、700~800kN程度まで弾性的な挙動を示しており、杭頭変位が33.5mmで極限支持力度の1,550kNに到達した。杭径が異なるCV2岩とCV3岩のケースを比較すると、CV3岩の極限支持力度はCV2岩の極限支持力度と比較して17% (=1,550kN/1,320kN)大きくなっているが、杭径の比率の31% (=335mm/255mm)を下回る結果であった。

Fig. 8(a)~(c)に各杭の軸力分布を示す。ここで、軸力は鋼管と鋼管内外のグラウトを考慮し、試験で得られたひずみに各断面積および各ヤング係数を乗じることにより算出した。いずれの杭も荷重の増加に伴い、杭先端部に到達した軸力(=杭先端支持力度)も増加しており、支持杭の挙動を示している。この杭先端支持力度をグラウト体の断面積で除した値が杭先端支持力度であり、Fig. 9に杭先端支持力度と杭頭変位の関係を示す。

CV1礫における杭先端の極限支持力度は、杭頭変位が

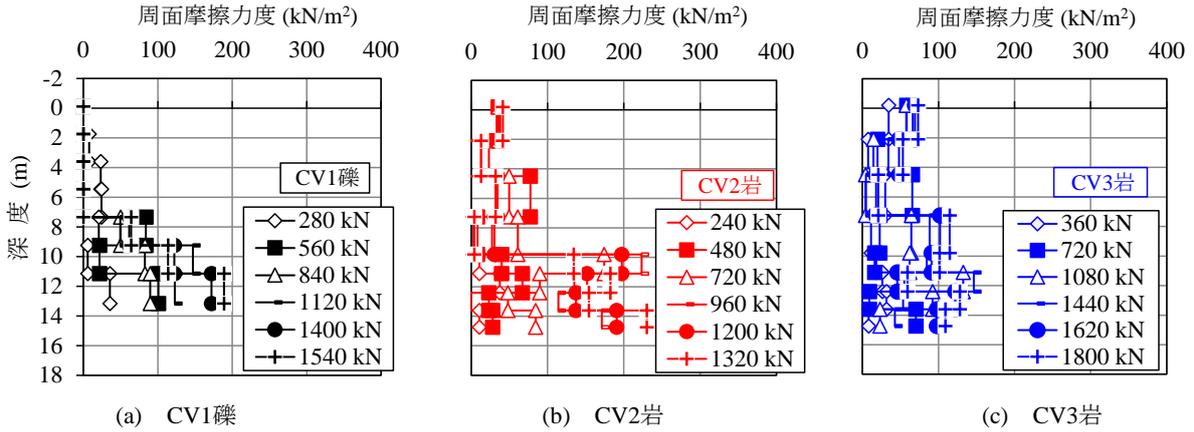


Fig.10 周面摩擦力度分布

Distributions of Shaft Friction Pressure

33.5mmで8,082kN/m²に到達した。場所打ちコンクリート杭の砂礫を支持層とした杭先端の極限支持力度は、H29道示IV⁷⁾より、160N (≦8,000kN/m²) で算出できる。杭頭変位が7mm付近でN値30を代入して得られる4,800kN/m²を上回ることがわかる。CV2岩における杭先端の極限支持力度は杭頭変位が23.1mmで8,811kN/m²に到達しており、CV3岩のそれは33.5mmで6,024kN/m²に到達している。場所打ちコンクリート杭の岩盤を支持層とした杭先端の極限支持力度は、土木研究所共同研究報告書第503号「岩盤を支持層とする杭基礎の設計法・施工法に関する共同研究報告書⁸⁾」(以下、土研報告書という)を参考にし、60N (≦12,000kN/m²) を用いて算出した。CV2岩とCV3岩のいずれにおいても、杭頭変位が15mm付近で試験地盤2における泥岩の換算N値67を代入して得られる4,020kN/m²を上回る結果となった。

Fig. 10(a)~(c)に各杭の周面摩擦力度分布を示す。CV1礫の最大周面摩擦力度はGL-7.4m付近では40kN/m²程度であるのに対し、GL-7.4m以深では80~200kN/m²と大きくなった。CV2岩の最大周面摩擦力度はGL-4.5m付近では40kN/m²程度と比較的小さいのに対し、GL-4.5m以深では80~250kN/m²と大きい。

一方、CV3岩の最大周面摩擦力度は、GL-4.5m付近では70kN/m²程度であるのに対し、GL-4.5m以深では50~150kN/m²と比較的小さい。これは、CV2岩よりCV3岩の方が杭の断面積が1.7倍大きく、打撃時間が長くなったことにより杭周辺の地盤が乱されたため、杭押し込み時に周面摩擦力が発揮されづらくなったと推察される。

Fig. 11に杭先端極限支持力と杭の周面摩擦力における算定値 (=A) と実測値 (=B) の比較を示す。ここで、粘性土、砂質土、砂礫の算定値はH29道示IV⁷⁾、岩盤の算定値は土研報告書⁸⁾に記載されている場所打ち杭の支持力推定式で計算した値と定義する。この図から、いずれのケースにおいても杭先端極限支持力と杭の周面摩擦力の実測値は算定値以上であり、場所打ち杭の支持力推定式により評価できることを確認した。

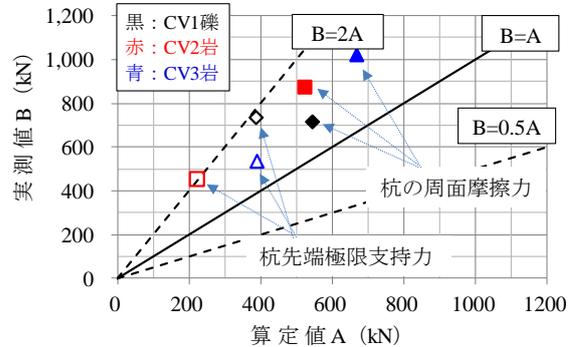


Fig. 11 各支持力の算定値と実測値の比較
Relationship between Calculation Load and Measuring Load

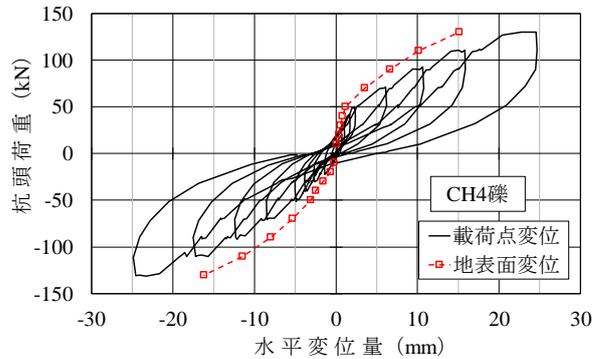


Fig. 12 杭頭荷重-水平変位量関係
Relationship between Load and Horizontal Displacement

3.3 水平交番载荷試験結果

Fig. 12に杭頭荷重と水平変位量の関係を示す。この図では、載荷点変位量を荷重履歴曲線で示し、新規荷重時の地表面レベルにおける杭の水平変位量を載荷点変位と載荷点+0.3m変位から換算した値で示している。載荷点変位は、杭頭荷重の増加に伴い各水平変位も増大するが、杭頭荷重は最大変位まで増加傾向であることから、粘り強く水平抵抗を発揮しているといえる。これは、杭が鋼管とグラウトから構成される合成鋼管杭であるため、曲

げ座屈しにくいことを示唆している。H29道示IV⁷⁾によると、杭の水平変位の制限値は杭径1.5m以下では15mmとしている。各方向の地表面水平変位量が15mm時の杭頭荷重は、押側で129kN、引側で-125kNであり、押側と引側で概ね同等であった。

Fig. 13に曲げモーメント分布を示す。载荷段階ごとに曲げひずみ（同一深度の杭軸に対し対称的な位置に貼った2つのひずみゲージの差の半分）から曲率を算出し、それに杭体のヤング係数と断面係数を乗じて曲げモーメントの実測値が得られる。Fig. 13より、いずれの载荷方向においても曲げモーメントは地表面から特性長1 β となるGL-2.0m付近で最大となる傾向を示し、GL-5.0m以深ではほぼゼロであった。また、杭頭部で水平方向に ± 130 kNの加力を行い、いずれの载荷方向も地表面変位が15mm程度発生した段階における曲げモーメントの実測値は ± 60 kN \cdot m以下であった。鋼管本体の降伏曲げモーメント $M_y=148.1$ kN \cdot mの半分以下であることから鋼管は降伏しておらず、 ± 130 kN以上の水平荷重においても粘り強く水平抵抗を発揮すると推察される。

Fig. 14に水平方向地盤反力係数と地表面変位量の関係を示す。载荷点の変位量から杭の特性値 β を算出し、各荷重や水平変位量に対する水平方向地盤反力係数 k_H を求めた。Fig. 14より、水平方向地盤反力係数は水平変位量の増大に伴い急激に低下する傾向がみられた。15mm時の k_H は48,000kN/m³程度であり、载荷方向による差異はほとんどみられない。また、载荷初期における押側の k_H が引側のそれよりも大きくなる理由として、試験杭施工時に削孔機を押側に据え付けたことにより表層地盤が締固まり、 k_H が増大した可能性が挙げられる。

H29道示IV⁷⁾に準拠した水平抵抗に関与する地盤深さ1/ β の変形係数を把握するため、標準貫入試験、孔内水平载荷試験、三軸圧縮(UU)試験を実施した。Table 4に各種調査・試験結果から得られた変形係数 E_0 、地盤反力係数の換算係数 α 、1/ β から推定した k_H を示す。 k_H の算定値は、最大でも三軸圧縮(UU)試験の36,000kN/m³程度であった。水平交番载荷試験で得られた水平方向地盤反力係数は、H29道示IV⁷⁾に記載されている各種調査・試験より推定したそれより上回るものの、計算値と実測値とあまり乖離がないことを確認した。以上の結果より、杭の水平変位の制限値15mmにおいても鋼管本体は降伏していないこと、各種調査・試験結果の変形係数を用いて、水平方向地盤反力係数を適切に評価できること確認した。

4. 空頭制限下の道路橋基礎における補強杭への適用事例

4.1 工事の概要

Fig. 15に道路橋基礎における補強杭の側面図を示す。本工事は、ロッキング橋脚を有する高速道路本線橋の耐震補強工事であり、空頭制限が5.0mであった。上部工形式は、3径間連続RC中空床版であり、上下線ともに橋

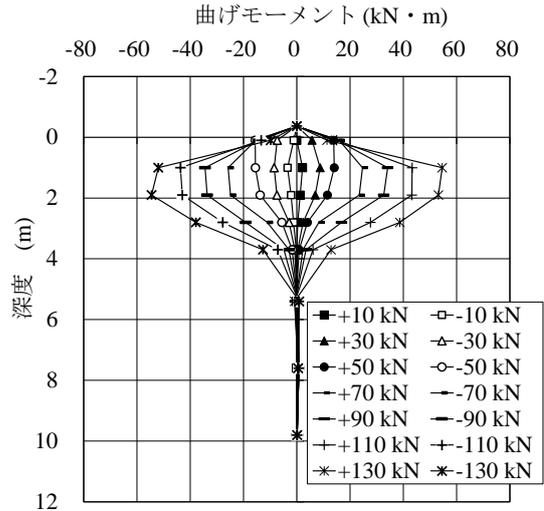


Fig. 13 曲げモーメント分布
Distributions of Bending Moment

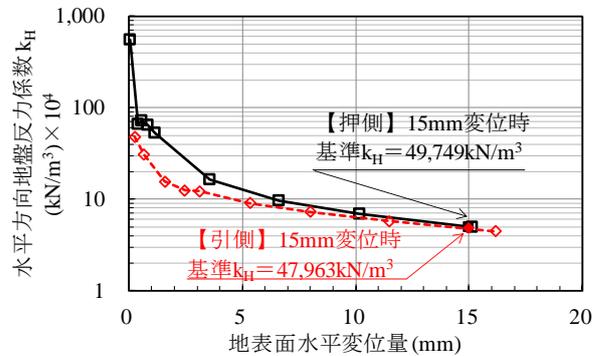


Fig. 14 水平方向地盤反力係数—地表面変位量関係
Relationship between Coefficient Horizontal Subgrade Reaction and Horizontal Displacement

Table 4 各種調査・試験結果から求めた k_H の算定値
Calculation of Coefficient Horizontal Subgrade Reaction

各種調査・試験	E_0 (kN/m ²)	α	β (m ⁻¹)	1/ β (m)	k_H (kN/m ³)
標準貫入試験	14,000	1	0.61	1.64	25,769
孔内水平载荷試験	2,661	4	0.56	1.77	19,039
三軸圧縮 (UU) 試験	4,670	4	0.66	1.52	35,377

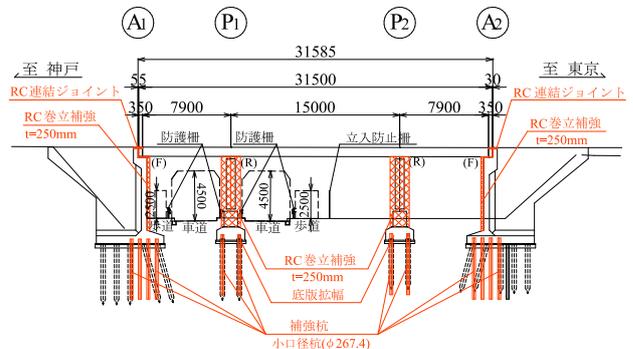


Fig. 15 道路橋基礎における補強杭の側面図
Side View with Reinforcement Piles of Highway Bridge

長 31.5m, 幅員 13.0m である。下部工形式は、橋台が控壁式、橋脚が3本柱橋脚である。既設杭は打込み杭 (RC杭) であり、杭径φ400mm, 杭長は3.9mまたは4.9mであった。当現場で行ったRC巻立て補強等の耐震補強工事の詳細な施工手順、道路橋の平面図および断面図は既報⁹⁾に譲る。

Fig. 16に補強杭の概要図を、Table 5に補強杭の諸元を示す。補強杭の杭径 (=グラウト径) はφ335.0mmであり、杭長は5.5mである。継杭1本あたりの長さは1.4mまたは1.7mとし、勘合したねじ継手部の長さは0.2mである。杭先端部には、鋼管と削孔機を用いて地盤改良できるように攪拌ビットを取り付けており、改良体長は0.5mとした。補強杭のフーチング厚は1.2mであり、杭頭部の突出長は0.5mであった。補強杭同士の平面ピッチは、橋軸方向および橋軸直角方向ともに0.75mであった。

地層構成は設計地盤面から約3mはN値12の粘性土であり、3m以深はN値60の砂礫土であった。補強杭の設計は、道路橋示方書・同解説IV下部構造編 (平成24年度版)¹⁰⁾に準じて行い、L2地震動も考慮した。

4.2 施工結果

Photo 1に道路桁下での二重管削孔状況を示す。補強杭の準備工として、構造物掘削の発生土を大型土のうに詰め込み、仮設土留めとして積み上げた後に鉄板を敷設した。削孔機はクローラ型であり、削孔時の機体高さは約3.8mであった。

施工箇所は、歩道が近接しているうえ、構造物掘削後に地下水位が確認されたことから、安全性と施工性を考慮して湿式削孔方式を採用した。削孔の結果、いずれの施工箇所もGL-2.0mまで粘土混じり砂礫, GL-4.0mまで粘性土, GL-5.6mまで砂礫であった。Fig. 16の地層構成と比較して地質や深度に若干の差異はみられるものの、概ね一致することを確認した。道路桁下の空頭高さは約5mであり、継杭+上下のねじ継手の長さは最大2.0mであったが、ミニクレーンで問題なく建て込むことができた。

Photo 2に補強杭の施工完了状況を示す。杭頭部は鋼管を基礎フーチングに定着させる支圧板方式とした。杭頭部材と鋼管はねじ継手により接続した。支圧板の形状を矩形から円形にすることで、施工後の向きの調整が不要となった。詳細は既報に譲る¹¹⁾。

5. 鉄道盛土の恒久復旧対策として行った土留め親杭への適用事例

5.1 工事の概要

2017年10月の台風21号の豪雨に伴い、鉄道盛土が崩壊した箇所は大型土のうで応急復旧されていた (Photo 3)。崩壊幅は約15mであった。崩壊箇所の現地踏査、追加地盤調査結果から変状メカニズムを推定し、崩壊のり面における安定性評価を行って対策工を検討した。その結果、鉄道沿線に近接した斜面上に足場を設置して大型土のう

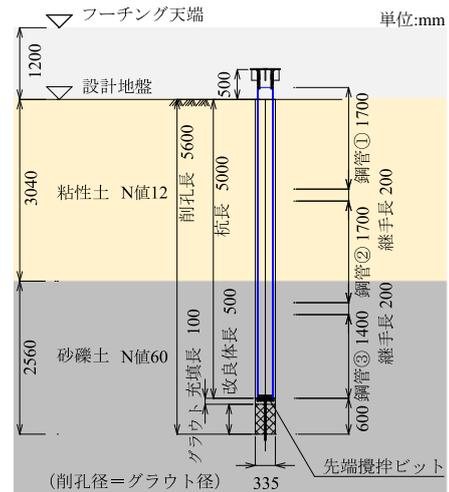


Fig. 16 補強杭の概要図
Model of Reinforcement Pile

Table 5 補強杭の諸元
Specification of Reinforcement Piles

項目	杭本数	鋼種 鋼管径	鋼管肉厚	杭径	杭長
内容	橋台:32本 橋脚:16本	STK490 φ267.4mm	橋台:15.0mm 橋脚:9.3mm	φ335.0mm	5.5m



Photo 1 桁下での
二重管削孔状況
Double Tube Excavation
Under Girder Space



Photo 2 補強杭の
施工完了状況
Completion with Construction
of Reinforcement Pile



Photo 3 鉄道盛土被災後の応急復旧状況
Emergency Recovery After Disaster of
Railway Embankment

を貫通するように残置型の親杭横矢板を構築した後、機電停止時間内に数日かけて大型土のうを撤去しながら地盤改良土で埋め戻し、鉄道盛土を再構築した。Fig. 17に鉄道に近接した土留め親杭の断面図を示す。鉄道盛土の恒久復旧対策として、のり枠工および地山補強土工を実

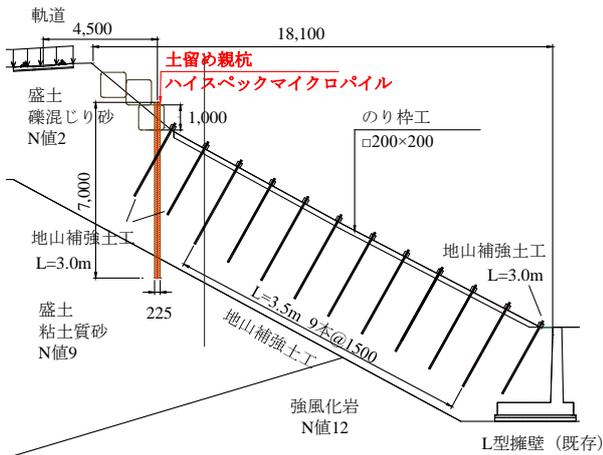


Fig. 17 鉄道に近接した土留め親杭の断面図
Sectional View of Soldier Piles Nearby Railway

Table 6 土留め親杭の諸元
Specification of Soldier Piles

項目	杭本数	鋼種 鋼管径	鋼管肉厚	杭径	杭長
内容	20本	STK400 φ165.2mm	7.1mm	φ225.0mm	7.0m



Photo 4 鉄道営業線での二重管削孔状況
Double Tube Excavation Nearby Railway



Photo 5 土留め親杭の施工完了状況
Completion with Construction of Soldier Piles

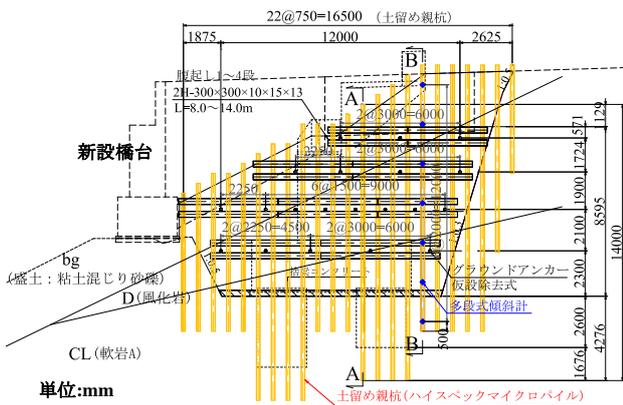


Fig. 18 新設橋台土留め工の正面図
Front View of New Pier Retaining Works

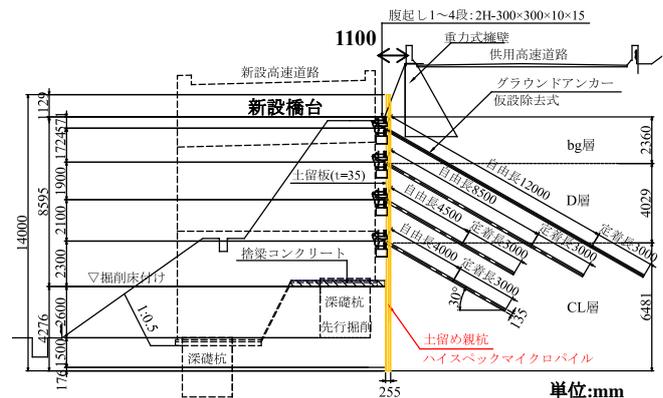


Fig. 19 供用高速道路および新設高速道路のA-A断面図
A-A Sectional View of Highway in Service and Planned

施している。

Table 6に土留め親杭の諸元を示す。土留め親杭の削孔径(=グラウト径)はφ225.0mmであり、鋼管長は7.0mで、土留め親杭のピッチは0.75mである。継杭1本あたりの長さは2.9mまたは3.9mとし、勘合したねじ継手部の長さは0.2mである。ここで、土留め親杭には鉛直力が作用しないので、杭先端部の地盤改良は行っていない。

地層構成は、表層地盤から6m程度はN値2の盛土(礫混じり砂)であり、それ以深はN値9の粘土質砂であった。土留め親杭の設計は、道路土工 仮設構造物施工指針¹²⁾に準じて行った。

5.2 施工結果

Photo 4に二重管削孔状況を示す。斜面足場上で施工す

るため、削孔機はスキッドタイプ、揚重機はカニクレーンタイプを使用した。杭長が比較的短く、杭先端よりも地下水位は低いと想定されたため、コンプレッサーによる乾式削孔方式を採用した。ただし、インナービットの目詰まりを防止するため、少量の水を使用しながら削孔した。

作業足場から6.8m上空の架空線の影響と鉄道近接作業による安全性を考慮して鋼管1本あたりの長さは最大3.9mとしたが、問題なくケーシング内に建て込むことができた。

Photo 5に土留め親杭の施工完了状況を示す。土留め親杭打設後は、高さ0.2mの横矢板を線路側に5段配置し、厚さ8cm~10cmのモルタル吹付を行った。

6. 高速道路本線に近接した斜面上の土留め親杭への適用事例

6.1 橋台拡幅工事

6.1.1 工事の概要 Fig. 18に新設橋台土留め工の正面図を、Fig. 19に供用高速道路（2車線）および新設高速道路（2車線）の断面図を示す。新設橋台と既設高欄との離隔（約1.1m）内で掘削深さ8.6m程度の土留め親杭を構築する厳しい施工条件であった。土留め親杭のピッチは750mmとし、杭長は新設橋台におけるウイング（翼壁）の形状および仕上がり地盤に合わせて5.5～15.5mとした。地盤条件は、CL級の軟岩（ $q_u : 3.7\text{MN/m}^2$ ）であった。

Table 7に土留め親杭の諸元を示す。鋼種はSTKM20A（降伏点： 390N/mm^2 以上）、鋼管径は $\phi 190.7\text{mm}$ 、肉厚は15mmとした。土留め杭タイプは、Table 1に示すように技術審査証明の対象外であるため、材料の規定は特に設けていない。杭径 $\phi 2.5\text{m}$ 、杭長3.0mの深礎杭に隣接する土留め親杭の杭長は、深礎杭底面から根入れ長1.5mを確保する長さとした。

Fig. 20に土留め親杭の概要図を示す。親杭打設後、掘削ごとに前面側における鋼管外周のグラウトを撤去した。次に、鋼管側面に等辺山形鋼（L-75×75×6）を所定の長さ分を溶接し、背面側から横矢板を設置した。

6.1.2 施工結果 Photo 6に高速道路に近接した斜面足場上での削孔状況を示す。軽量でコンパクトなスキッド型の削孔機を使用することで、既設の高欄から杭芯まで約0.6mの離隔でも施工できた。削孔は、エアと少量の水による乾式削孔方式とした。CL級の軟岩を効率的に削孔するため、インナーロードにダウンザホールハンマーをセットし、先端には3枚翼の拡径ビットを取り付けた。その結果、軟岩の削孔歩掛は20～30分/mであった。

Photo 7に最終掘削完了段階の土留め状況を示す。等辺山形鋼（L-75×75×6）を水平に3段配置し、杭頭変位を抑制した。なお、B-B断面における土留め親杭の水平変位計測結果は既報に譲る¹³⁾。

6.2 ボックスカルバート拡幅工事

6.2.1 工事の概要 Fig. 21にボックスカルバート拡幅のための仮設土留め工の断面図を示す。既設ボックスカルバートに近接して掘削深さ4.5m程度の仮設土留め工を構築する厳しい施工条件であった。地盤条件は、D級の軟岩（ $q_u : 0.64\text{MN/m}^2$ ）であった。

Table 8に土留め親杭の諸元を示す。土留め親杭のピッチは750mmとし、杭長は土留め工の根入れ長計算結果に基づき8.5mであった。鋼管の材質はSTKM20A、鋼管径は $\phi 190.7\text{mm}$ 、肉厚は15.0mmとした。なお、土留め親杭にはグラウンドアンカーにおけるプレロード荷重の分力として鉛直力が作用するので、杭先端部を地盤改良した。

6.2.2 施工結果 Photo 8に高速道路に近接した斜面足場上での二重管削孔状況を示す。削孔は、エアと少量の水による乾式削孔方式とし、インナーロードにダ

Table 7 土留め親杭の諸元

Specification of Soldier Piles					
項目	杭本数	鋼種 鋼管径	鋼管肉厚	杭径	杭長
内容	23本	STKM20A $\phi 190.7\text{mm}$	15.0mm	$\phi 255.0\text{mm}$	5.5～ 15.5m

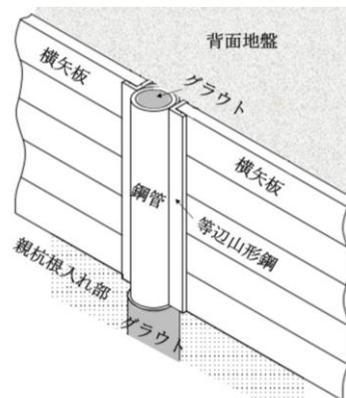


Fig. 20 土留め親杭の概要図
Model of Soldier Piles



Photo 6 高速道路本線での二重管削孔状況
Double Tube Excavation Nearby Highway



Photo 7 最終掘削完了
Completion of Final Excavation

ウンザホールハンマーをセットして行った。互層で途中に礫層や玉石層を含む場合は、エアと水を調整して削孔した。Photo 9に土留め親杭の施工完了状況を示す。既設ボックスカルバートへの最小離隔は、杭心から約0.65mであった。

7. おわりに

鋼管径や鋼管肉厚を拡大することで支持力と耐力を向上させ、岩盤でも施工可能な乾式削孔方式を開発した。

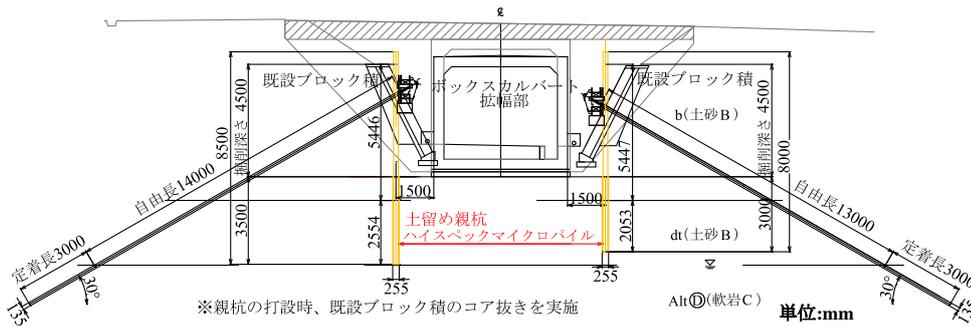


Fig. 21 ボックスカルバート拡幅のための仮設土留め工の断面図
Sectional View of Retaining Works to Expand Box Culvert



Photo 8 高速道路本線
での二重管削孔状況
Double Tube Excavation
Nearby Highway

また、適用拡大した鋼管径φ267.4mmにおける杭の性能確認を目的として、押込み載荷試験と水平交番載荷試験を実施した。加えて、工程の短縮や施工設備の簡素化により、低コストな土留め杭として活用できるようにした。以下に得られた所見を示す。

- 1) 杭先端極限支持力と杭の周面摩擦力の実測値は算定値以上であり、H29 道示IV⁷⁾および土研報告書⁸⁾に記載されている場所打ち杭の支持力推定式により評価できることを確認した。
- 2) 杭の水平変位の制限値15mmにおいても鋼管本体は降伏していないこと、H29 道示IV⁷⁾に記載されている各種調査・試験結果の変形係数を用いて、評価した水平方向地盤反力係数を適切に評価できることを確認した。

本報が空頭制限下の杭基礎工事、および斜面上かつ鉄道営業線や高速道路に近接した土留め杭工事などの適用の参考になれば幸いである。

謝辞

本工法の現場適用にあたっては、中日本高速道路の中部支社、近畿日本鉄道株式会社の本社、西日本高速道路の関西支社にご協力をいただきました。また、試験施工および実大杭載荷試験にあたっては、日本基礎技術株式会社、三信建設工業株式会社、システム計測株式会社にご協力をいただきました。関係諸氏に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編,1996.12
- 2) 粕谷悠紀，他：鉄道営業線に近接した高性能型マイクロパイル工法の施工，第50回地盤工学研究発表会,pp.1391-1392,2015.7
- 3) 横木孝輔，他：制約条件が多い状況下での歩道橋の急速施工，第74回土木学会年次学術講演会,pp.735-736,2019.9

Table 8 土留め親杭の諸元
Specification of Soldier Piles

項目	杭本数	鋼種 鋼管径	鋼管肉厚	杭径	杭長
内容	12本	STKM20A φ190.7mm	15.0mm	φ255.0mm	8.0~ 8.5m



Photo 9 土留め親杭の施工完了状況
Completion with Construction of Soldier Piles

- 4) 粕谷悠紀，他：二重管削孔を用いた高性能小口径杭工法の出来形・品質特性および鉛直支持力特性,土木学会論文集 C,Vol.73,No.3,pp.248-265,2017.7
- 5) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説,2004.9
- 6) 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説,2010.7
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編,2017.3
- 8) 土木研究所：岩盤を支持層とする杭基礎の設計法・施工法に関する共同研究報告書,2019.4
- 9) 高沢利之，他：高速道路における狭隘な橋梁下部工の耐震補強工事事例，－ロッキング橋脚の RC 巻立補強および補強杭－,第75回土木学会年次学術講演会,VI-207,2020.9
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編,2012.3
- 11) 粕谷悠紀，他：高速道路における狭隘な橋梁下部工の耐震補強工事事例，－高性能小口径杭工法による補強杭－,第75回土木学会年次学術講演会,VI-208,2020.9
- 12) 日本道路協会：道路土工仮設構造物工指針,1999.3
- 13) 粕谷悠紀，他：斜面上かつ高速道路に近接した仮設土留め工における高性能小口径杭の施工事例，第56回地盤工学研究発表会,2021.7