

地盤改良を用いた軌道内で施工可能な 止水性仮土留め工

加納暢彦¹・桑原清¹・有光武¹・伊藤孝司²・吉川豊史³・平方義人⁴・山内崇寛⁵・藤本賢二⁵

¹正会員 JR東日本 東京工事事務所（〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目2番6号JR新宿ビル）

²正会員 日本総合防水 技術部（〒171-0022 東京都豊島区南池袋三丁目11番10号）

³非会員 前田建設工業 土木事業本部（〒102-0071 東京都千代田区富士見二丁目10-26）

⁴非会員 前田建設工業 東京支店（〒102-8215 東京都千代田区九段北4-3-1）

⁵正会員 前田建設工業 土木事業本部（〒179-8903 東京都練馬区高松5-8J. CITY）

開削工法による線路下横断工では、一般的に線路横断方向に仮土留め工の設置が必要であるが、仮土留めの施工は線路内での作業となるため、レール・枕木に干渉が生じない親杭横矢板方式が多く採用されている。その際、地下水位が高い環境の場合には、土留背面に補助工法による止水防護（薬液注入、地盤改良）を設ける必要があり、工期・工事費の両面を増大させている。

そこで、噴射付機械攪拌工法を用いた止水防護の地盤改良体内にH形鋼を挿入して仮土留め工とする工法の開発を行った。今回、実施工を想定した条件で実施した確認試験、鉛直・水平載荷試験および改良体の出来形などの確認を実施し、本開発の有効性を確認した。

キーワード：噴射付機械攪拌工法, 止水性仮土留め, 軌道内, 遅延材

1. はじめに

開削工法による線路下横断工では、一般的に線路横断方向に仮土留め工の設置が必要であるが、仮土留めの施工は線路内での作業となるため、レール・枕木に干渉が生じない親杭横矢板方式が多く採用されている。その際、地下水位が高い環境の場合には、仮土留め背面に補助工法による止水防護（薬液注入・地盤改良）を設ける必要があり、工期・工事費の両面を増大させている（表-1参照）。

そこで、止水防護の地盤改良工自体を仮土留め工とする方法として、改良体内にH形鋼を挿入し柱列式仮土留め工とする開発を行った（表-1参照）。

今回、線路内で施工する土留杭を想定した施工性試験および載荷試験を実施し、①造成した地盤改良体内へのH形鋼の挿入性、②造成・H形鋼挿入のサイクルタイム、③仮土留め杭としての出来形、④鉛直・水平載荷試験での現設計への適応の確認を実施し、地盤改良を用いた仮土留めの有効性の確認を行った。

表-1 線路内仮土留め概要図

親杭横矢板方式仮土留 (従来工法)	噴射付地盤改良杭仮土留 (開発工法)



写真-1 地盤改良施工機械

2. 工法概要

本工法は、止水防護の地盤改良体内にH形鋼を挿入し、止水性能を有した仮土留め工である。

本工法の適用に際しては、H形鋼が挿入可能な径のボーリング状の造成が必要であり、杭打設のオーガー削孔と類似した機械攪拌工法に着目した。一般的に、機械攪拌工法は、施工機械が大型なため空頭制限のある線路内作業への適応が難しいが、今回線路内作業での実績がある低空頭噴射付機械攪拌工法¹⁾を使用することで問題を解消することとした。

(写真-1、図-1参照)

また、首都圏において線路内での施工は、1日の実作業時間が終初電間の2.5時間程度と制限され1本の施工が複数日に渡るため、遅延材を添加した配合の固化材を使用することでH形鋼挿入完了まで所定の流動性を確保することとした。

本工法の造成には、固化材スラリーを機械攪拌用ロッドの吐出口から低圧で噴射するとともに、 $\phi 500\text{mm}$ ～ 600mm の攪拌翼先端から高圧噴射することにより $\phi 800\text{mm}$ のソイルセメント改良体を造成する噴射付機械攪拌工法を用いた(図-2参照)。

この噴射付機械攪拌工法の特徴としては、①最大機械高さ4.0mに抑えた施工機械により空頭制限のある線路内、桁下等での施工が可能である、②一般的な噴射攪拌工法に比べ改良時の引上速度が1.0min/mと高速な造成が可能であり、排泥量も25～30%と少ない、③噴射攪拌領域でのラップ施工が可能であり止水防護を目的とした改良にも適する等が挙げられ、制約条件の多い線路内での施工に適応した工法である。

なお、開発当初は軟弱地盤への地盤改良を目的としていたが、先端ビットの改良により礫質土等の硬質地盤での施工も可能となっており幅広い土質に対応可能である。

3. 全体試験概要

本開発で行った試験は、実施工を考慮した環境での施工性試験と、仮土留め杭としての所定の性能を確保しているかを確認する载荷試験の2つの区分に分けて行った。

施工性試験は、線路内で施工する仮土留め杭を想定し、改良体造成からH形鋼挿入までの一連の作業を打設延長・H形鋼挿入までの時間を変えて3本実施し本工法の施工性の確認を行った。また、複数日に渡る施工に適応させるために、改良に使用する固化

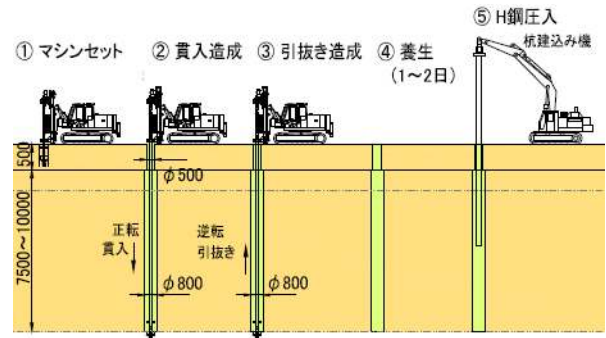


図-1 施工手順図

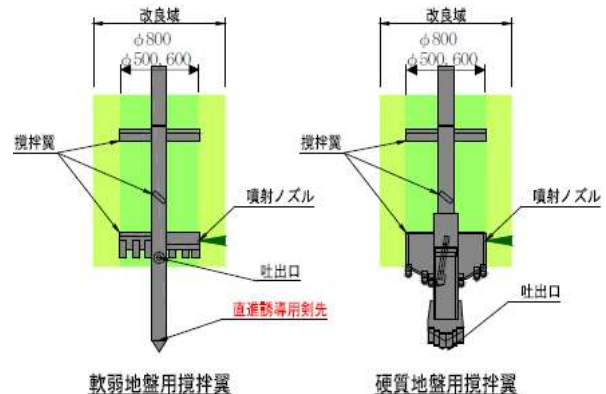


図-2 改良体造成部概略図

材の材料試験も併せて実施した。

载荷試験は、現設計法での適応性確認のために施工性試験の杭を使用し、急速载荷試験で鉛直支持力の確認、水平载荷試験で仮土留め杭としての性能確認を行った。

4. 施工性試験

(1) 試験概要

施工性試験は、線路内で施工する土留杭を想定して仕様の決定を行い3本の試験杭を施工した。

3本の試験杭の詳細を表-2、図-3に示す。

H形鋼の挿入は、線路内で行う造成1日、芯材挿入1日の施工を想定してNo.Ⅰ、Ⅱは造成から24時間後に芯材の挿入を行い、No.Ⅲは列車運行の影響で翌日に施工できない状況を想定して造成日の48時間後に芯材の挿入を行った。

また、使用する固化材の材料試験は、事前の室内配合の試料、造成時と硬化した改良体から採取した試料に対して、流動性確認試験および強度確認試験を行った。

試験箇所の土質は、関東ローム層(N値4～8程度、

含水比79.9%, $C=44\text{kN/m}^2$)であるが、一般的に関東ローム層は粒度特性や含水比の影響で改良体強度が発現しにくく、試験環境としては厳しい施工条件にて行った(図-3参照)。

使用する芯材は、軌道内での作業を想定し、1本あたりの部材長を最長1.5mとしボルト継手で連結する形状とした。

試験杭は、試験完了後に掘起こしを行い、造成した改良体の出来形、ラップ状況、固化材と芯材の密着性に関して目視にて確認を行った。

今回の施工性試験において、①芯材挿入時に流動性を確保するスラリー配合の選定、②汎用機械でのH形鋼芯材の挿入性、③造成・芯材建込みのサイクルタイムの確認、④改良体の出来形、ラップ状況および芯材と改良体との密着性の確認を行った。

(2) 材料試験

材料試験は、室内配合と現地採取試料に対して、流動性確認試験および強度確認試験を行った。流動性確認試験は、テーブルコーン試験によりテーブルフロー値を測定して行い、造成完了後から時間経過に伴う変化の確認を行った。

本試験に用いたスラリーは、固化材の違いによる流動性の影響を確認するために、試験地盤(関東ローム)に適した特殊地盤用固化材と一般的に多く用いる高炉セメントを使用し、別途行った予備試験で流動性と強度発現のバランスを考慮して決定した配合を用いて試験を実施した(表-3参照)。

スラリーの流動性の目標性能は、実施工では造成から24時間後に芯材挿入となるが、列車運行の影響による遅れを考慮して48時間後まで芯材挿入が可能な流動性を保持することとした。テーブルフロー値の目標値は、芯材の挿入状況が類似するTRD工法技術資料²⁾を参考とし150mmとした。

改良体の強度の目標性能は、対象地盤に適した特殊地盤用固化材の配合にて確認を行い、SMWの設計基準強度³⁾を参考に目標値を 500kN/m^2 とし、材齢28日で強度確保することとした。

a) 流動性確認試験結果

スラリーの流動性は、室内試験では異なる固化材を使用した両配合とも24時間までテーブルフロー値が徐々に低下するが目標値の150mmを確保でき、その後も同様に低下傾向を示し、48時間では130mm程度のテーブルフロー値となった。

現地造成時に採取した試料では、配合による若干の差はあるが、24時間に至る前に目標値を下回る130mm程度となり、その後48時間まで同程度の値で推移する結果となった。テーブルフロー値は室内試

表-2 試験杭一覧表

	芯材	削孔径	杭長	備考
		造成径	挿入日	
No. I	H-300	$\phi 500\text{mm}$	8.0m	鉛直載荷試験用
		$\phi 800\text{mm}$	24時間後	
No. II	H-400	$\phi 500\text{mm}$	10.5m	水平載荷試験用 ラップ施工
		$\phi 800\text{mm}$	24時間後	
No. III	H-400	$\phi 600\text{mm}$	10.5m	
		$\phi 800\text{mm}$	48時間後	

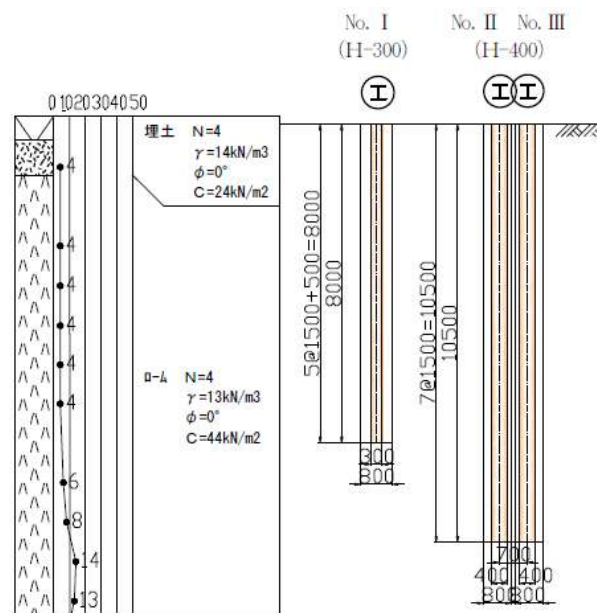


図-3 試験杭概要図

表-3 スラリー配合表

	固化材	添加量	W/C	遅延材 添加率
1	特殊地盤用	600kg	70%	5%
2	高炉セメント			

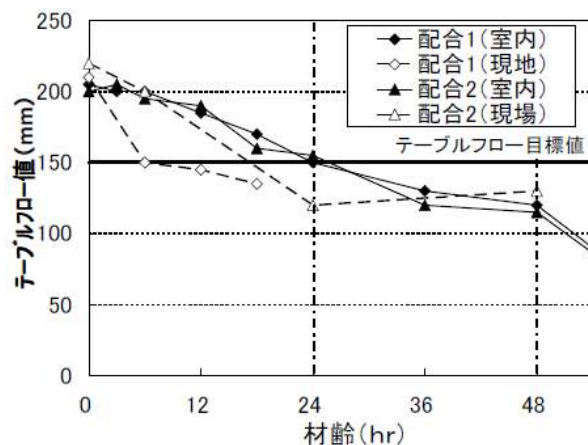


図-4 テーブルフロー値経時変化

験に比べ最大15%程度の差が生じる結果となった。

(図-4参照)流動性の差が生じた理由としては、室内試験と異なりスラリーが地山と接するなどの環境条件の差が影響していると考えられる。

本結果と後述の施工性試験の結果より、130mmのテーブルフロー値で芯材挿入が可能なことが確認されたため、実施工時には流動性低下を考慮し室内試験時に150mm以上のテーブルフロー値を確保する管理とする。

b) 強度確認試験結果

室内試験試料、現場造成時採取試料および改良体コア採取試料における各材齢での一軸圧縮強度試験結果を図-5に示す。

改良体の強度は、室内試験では材齢28日で目標強度に達したが、遅延材の添加が影響して材齢60日まで強度増進し、その後安定する傾向が確認された。

現場造成時に採取した試料は、室内試験と同様の強度・強度発現傾向を示した。それに比べ、掘起した改良体からコア採取した試料では、強度発現傾向は他試料と同様な傾向を示したが、強度は他試験値と比べ約1.5倍高い値となった。これは、芯材挿入時に使用したバイプロハンマーによる締固め効果や、養生条件の違い、硬化過程での地山への水分逸散で見掛けのW/Cが低下したことなどが影響していると考えられる。

本試験では、管理材齢を28日としたことと流動性保持のために遅延材を多く用いたことが影響し、最終強度が目標強度の2.5倍と大幅に高い値となった。そのため、実施工においては、遅延材を添加しない配合と遅延材を添加した配合の材齢28日強度から強度発現特性を把握し、現場の掘削開始までの期間を適切に判断して管理材齢・配合を決定する必要がある。

(3) 試験杭打設試験

試験杭打設試験は、実施工を想定した条件にて3本の杭の打設を行い、H形鋼芯材の挿入性、造成・建込みのサイクルタイムの確認を行った。

施工に使用する機械は、造成時は低空頭噴射付機械攪拌工法の施工機械のみ、H形鋼の挿入は軌道内で使用する低空頭型の施工機械にて行った。また、H形鋼の挿入には、室内試験でのテーブルフロー値の結果より、自沈不可能な場合の対応としてバイプロハンマー（以下バイプロ）を用意して行った。

a) 試験杭造成結果

本試験の改良体の造成は、固化材添加量が 600kg/m^3 と多いため、一般的な造成仕様から変更し低圧・高圧噴射および貫入・引抜き時とも同じ吐出



写真-2 テーブルフロー試験状況（造成時採取試料）

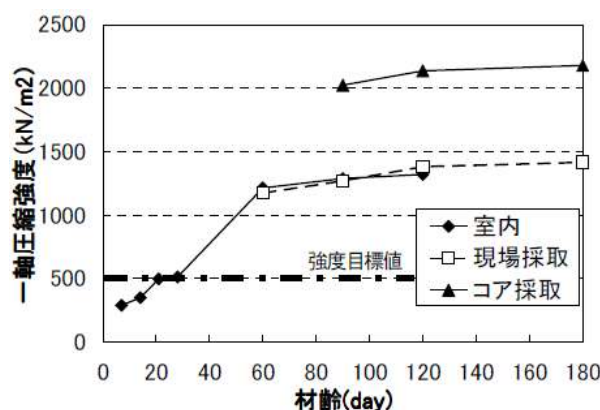


図-5 一軸圧縮強度経時変化（特殊地盤用）

表-4 試験杭造成時間

	内容	造成時間	ロッド継足し時間	合計時間 (平均時間)
No. I 8.0m	貫入時	7.9min	13.2min	43.0min (5.4min/m)
	引抜き時	9.1min	12.8min	
No. II 10.5m	貫入時	21.2min	31.1min	78.0min (7.4min/m)
	引抜き時	10.9min	14.8min	
No. III 10.5m	貫入時	24.0min	28.8min	77.0min (7.3min/m)
	引抜き時	12.2min	12.0min	

量にて実施した。

試験杭3本の造成時間を表-4に示す。

改良体造成は、No. I 杭は貫入時1.1min/m、引き抜き時1.2min/mとほぼ設計どおりの時間で実施したが、No. II・No. III 杭の引抜き時はNo. I 杭と同様に設計どおりとなったが、貫入時に2.0~2.3min/mの時間を要した。

No. II 杭とNo. III 杭で時間を要したのは、No. II 杭は排泥に使用するバキュームポンプの詰まりの発生、No. III 杭は先行して打設したNo. II 杭の改良体を部分的に切削しながら造成する状況となったことが原因

である。

今回の結果より、通常想定されるトラブルがあった場合でも1mあたりの平均造成時間4分程度、ロッド継足し時間を考慮しても8分程度であり、線路内施工時の実作業時間約2.5時間で20m程度までは造成可能である結果が得られた。

b) 試験杭芯材挿入結果

H形鋼芯材の挿入は、改良体造成完了後に所定の時間を空けて実施した。

H形鋼の挿入性は、H-300材を用いたNo. I 杭はテーブルフロー値が130mm程度と若干の流動性の低下が影響し、3m程度までは自沈可能であったがそれ以降は多少のバイブロを併用して所定の8mまでの挿入となった（写真-3参照）。H-400材を用いたNo. II 杭は全長に渡りバイブロを併用して挿入を行ったが、所定の10.5mより短い7.75mで挿入不可能となった。No. III 杭は、No. I ・No. II 杭と異なり固化材に高炉セメントを用いたが、挿入時のテーブルフロー値が同程度であったため、他の杭と同様に多少のバイブロを併用することで所定の10.5mまで挿入することが可能であった。

また、No. II 杭が挿入不可能になった理由としては、杭材を掘り出して確認した結果より削孔の鉛直精度の影響が大きいと考えられる。また、改良径はφ800mmと十分であるが機械攪拌翼はφ500mmであり、通常H-400材の挿入に必要なφ600mmを下回っていた点も影響したのではないかと考えられる。

H形鋼の挿入時間は、施工条件は異なっているが3本とも10.0min/m程度で挿入が可能であるという結果が得られた（表-5参照）。

3本のH形鋼挿入試験結果より、自沈にて芯材を挿入するためには目標値の150mmのテーブルフロー値の確保が必要であるが、130mm程度のテーブルフロー値であってもバイブロを多少併用することにより芯材を挿入することが可能であることが確認できた。

その理由として、バイブロの振動が芯材と改良体の付着を低減することが大きい理由として考えられるが、テーブルフロー値に関しても振動により若干の改善が見込めるものと考えられる。

挿入時間に関しては、3本の試験結果より1mあたりの挿入時間は10分程度であり、造成作業と同様に線路内施工時の実作業時間約2.5時間で15m程度までは施工可能である結果が得られた。

一連の試験結果より、線路内で施工する際の適応杭長は、芯材の挿入で決まる15mの杭長を適用範囲とすることが適切である。この杭長は、一般的に線路内で用いられる一次仮土留めの杭長に対して十分満足する長さである。



写真-3 H形鋼挿入状況

表-5 H形鋼挿入時間

	仕様	挿入時間	継手時間 (箇所数)	合計時間 (平均時間)
No. I 8.0m	H-300 6本継ぎ	15.1min	64.0min (5箇所)	79.1min (9.9min/m)
No. II 10.5m	H-400 7本継ぎ	19.2min	60.7min (6箇所)	79.9min (10.3min/m)
No. III 10.5m	H-400 7本継ぎ	22.5min	64.8min (6箇所)	97.3min (9.7min/m)



写真-4 改良体ラップ状況



写真-5 改良体・H形鋼芯材状況

(4) 改良体目視確認結果

試験で打設した3本の杭は、試験実施後に掘起しを行い目視により改良体の確認を行った。

改良体の目視確認は、改良体の出来形、改良体同士のラップ状況、改良体とH形鋼の密着性に関して実施した。改良体の出来形は、全深度において設計径の1.1倍程度の径が確保され著しい出来形不足や偏りは確認されなかった。

改良体のラップ状況は、全深度においてラップ部でのひび割れや未改良箇所が発生もなく良好であった。

改良体とH形鋼との密着性は、全深度において良好であることが確認された（写真-4、写真-5参照）。とくに造成時間が経過した改良体であっても、所定の流動性状を有していればH形鋼との密着性を確保できることが確認された。

5. 載荷試験

載荷試験は、今回の地盤改良を用いた仮土留め杭が所定の性能を確保しているか確認するために実施した。

実施した試験は、急速載荷試験と水平載荷試験であり、それぞれの試験にて杭としての支持力、土留杭としての性能の確認を行った。

(1) 急速載荷試験

a) 試験概要

急速載荷試験⁴⁾は、No. I の試験杭を使用して行い、試験方式として、軟クッション重錐落方式を採用し、落下高さを変化させることで必要な荷重を杭に載荷させた（写真-6参照）。計測は、ひずみ計により荷重値、PSDカメラとレベルにより変位量、加速度計にて杭頭加速度を測定した。

載荷方法は、最大荷重を1000kNとして段階的に荷重を増加させる多サイクル法にて行った。載荷する最大荷重は、設計で想定される最大の荷重を満足するものとし、地盤改良体を場所打ち杭として評価した地震時終局限界状態での792kN以上の荷重を設定した。

本試験により荷重-変位関係を得ることができるが、動的な試験であるため、得られた試験値より速度に起因する抵抗成分を除いて静的な支持力の評価を行う。

b) 試験結果

本試験で得られた結果を図-6に示す。本グラフ中



写真-6 急速載荷試験状況

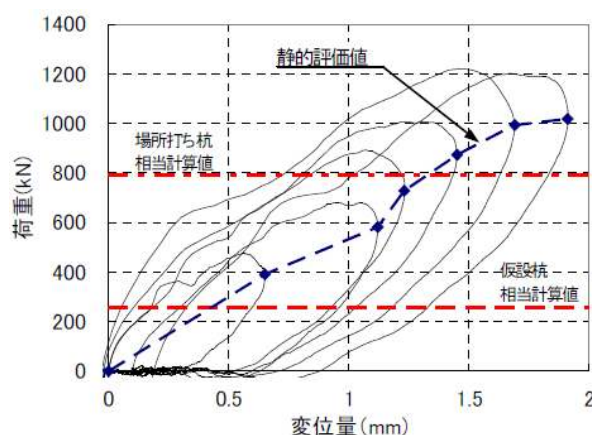


図-6 荷重-変位図（急速載荷試験）

においては、速度に起因する抵抗成分を除いた各サイクルの静的成分の最大荷重点を合わせて示す。

試験時の杭の挙動は、最大荷重1000kN程度の載荷においても最大変位量は1.7mm程度であり、一般的に極限支持力に達すると言われる杭径の10%に対しても大きく下回る結果となった。また、除荷時の残留変位も微少であり、今回の載荷レベルでは十分弾性的な挙動の範囲内であることが確認された。

設計値としては、H形鋼のみを有効とする仮設杭（プレボーリング工法）の支持力算出⁵⁾において $F_s=2.0$ の安全率を見込まないものとしても257kN（先端36kN，周面221kN），前述の改良体を有効として場所打ち杭相当として評価した地震時終局限界状態で算出⁶⁾を行っても792kN（先端151kN，周面641kN）となり、両者の荷重は今回の試験の弾性的な範囲内であり、支持力としては十分満足する結果が得られた。

本試験より、載荷試験が今回の1本のみであるため断定は出来ないが、鉛直支持力に関しては、改良体を有効として評価した設計を適用することが可能ではないかと考えられる。

(2) 水平載荷試験

a) 試験概要

水平載荷試験は、ラップ施工したNo.Ⅱ，No.Ⅲ杭に対して、試験実施現場の土留杭を反力杭として使用し、3000kN油圧ジャッキを用いて水平方向荷重を杭頭部に載荷させて行った（図-7、写真-7参照）。計測は、ロードセルによる荷重値と、ダイヤルゲージにて試験杭・反力杭変位量の測定を行った。

載荷方法は最大変位を40mmとした変位制御にて行い、10mmの変位量を1ステップとした多サイクル試験にて行った。

試験杭は、No.Ⅱが7.75m、No.Ⅲが10.5mまでH形鋼の挿入を行ったが、挿入完了後No.Ⅲ杭を7.75mまで引上げ、試験杭長を同条件に揃えて行った。

b) 試験結果

本試験で得られた結果を図-8に示す。

試験杭の挙動は、荷重増加に伴い地表面付近より地盤が塑性化するため、荷重増加に対して変位増加の割合が大きくなり、950kN程度の荷重で所定の40mmに達した。また、最終ステップの除荷時の残留変位は10mm程度の値となった。

地表面付近の改良体は、載荷試験完了後に確認したところ多少のひび割れが目視で確認される状態であった。

設計水平支持力と計算値を比較した試験杭1本あたりの荷重-変位図を図-9に示す。

設計水平支持力の計算手法として、設計バネ値を用いた弾性解析と地盤の塑性化を考慮した弾塑性解析の両手法で評価を行った。また、弾塑性解析では、塑性部分の杭の有効載荷幅にH形鋼フランジ幅を用いた場合と、改良体全幅を用いた場合の2ケースで行った。

試験値は、弾性解析値と2ケースの弾塑性解析の間に収まる結果を示した。弾性解析で評価した場合、地盤の地表面付近が弾性範囲と想定される微小変位（10mm程度）では解析値に近い値を示すが、その後の地盤の塑性化の進行に伴い変位が増加し弾塑性解析の計算値に近づく傾向を示した。弾塑性解析で評価した場合、通常の親杭式土留の設計であるH形鋼フランジ幅から有効載荷幅を算出した結果だけでなく、改良体幅から有効載荷幅を算出した結果に対しても非常に小さい変位量であり、本工法の仮土留め杭への適用に問題ないことが確認された（図-9参照）。

また、本試験結果から、本工法で想定している柱列壁として設計を行っても問題ないと考えられる。

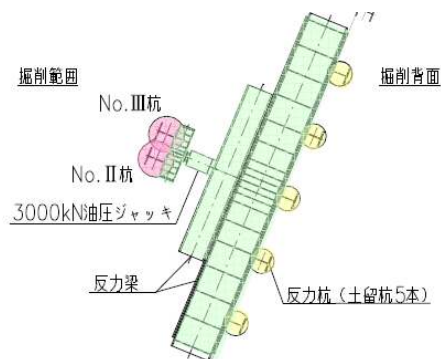


図-7 水平載荷試験装置平面図



写真-7 水平載荷試験装置

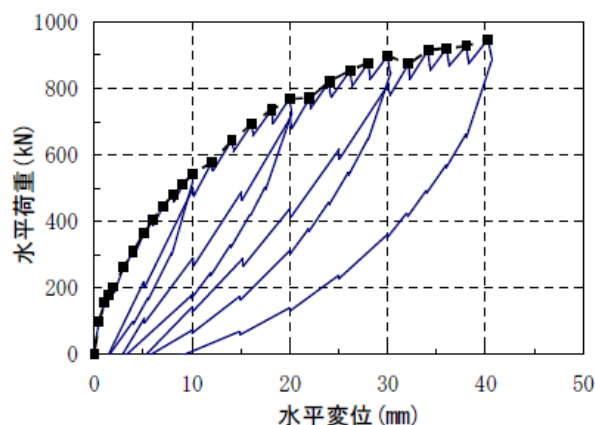


図-8 荷重-変位図（水平載荷試験計測値）

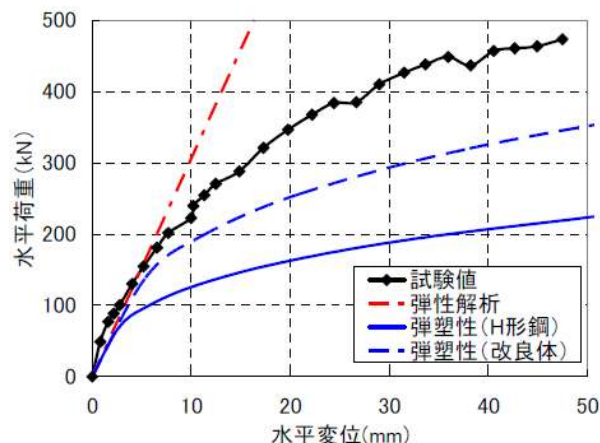


図-9 荷重-変位図（杭1本あたり）

6. まとめ

噴射付機械攪拌地盤改良を利用した仮土留め工への適用に関する各種試験で得られた結果を以下に示す。

- ① 改良体に用いるスラリーは、遅延剤を使用することでH形鋼挿入が想定される造成後48時間程度まで流動性のコントロールは可能である。ただし、施工環境により流動性の低下が生じる可能性があるため、室内試験でのテーブルフロー値150mmの確保が必要である。
- ② H形鋼挿入の施工性試験より、自沈による挿入はテーブルフロー値を150mm程度確保する必要があるが、パイプロを多少併用することで130mm程度のテーブルフロー値までは挿入可能である。
- ③ 改良体造成・H形鋼挿入の施工性試験より、線路閉鎖時間での実作業時間約2.5時間で15m程度の杭長までは施工可能である。
- ④ 固化材強度は、遅延材の添加率によって強度発現が長期に渡る可能性があるため、掘削までの工程を考慮して管理材齢・配合を決定する必要がある。
- ⑤ 鉛直支持力は、仮設杭（プレボーリング工法）および改良体を有効として場所打ち杭相当として得られる計算値に対して十分満足する結果が得られた。試験を重ねることにより改良体を有効として評価できる可能性が大きい。
- ⑥ 水平支持力は、弾塑性解析で求めた計算値に対して十分満足する結果が得られ、仮土留め杭への適用に問題ないことが確認された。また、試験結果より、柱列壁としても十分適用可能であると考えられる。

上記の試験結果より、噴射付機械攪拌地盤改良杭を利用した仮土留め工は、線路内で使用しても十分施工可能であり、現行の設計法に対して十分な性能を有していることから実施工に適用可能なことが確認された。

今後施工面では、遅延材の有無による配合での強度確認による管理材齢の設定の実施、各種土質および施工条件毎の配合の標準化を行うことで配合選定の合理化が可能である。設計面では、更なる試験での確認により、改良体を有効とした合理的な設計が可能になると考えられる。

また、これらの合理化を行うことで仮土留だけでなく乗降場や工事桁仮橋脚の支持杭への適用も可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本総合防水株式会社 メカジェット工法（噴射付機械攪拌工法）技術資料 2006.
- 2) TRD工法協会 TRD工法技術資料 2005. 7
- 3) 日本材料学会 ソイルミキシングウォール（SMW）設計施工指針（改訂版） 2002. 1
- 4) （社）地盤工学会 杭の鉛直載荷試験方法・同解説 第一回改訂版 2004. 5
- 5) 鉄道総合研究所 鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル 2001. 3
- 6) 鉄道総合研究所 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 2002. 6