

ジェットパイロ工法で施工した栈橋鋼管杭の 支持力とその増大工法について

上 菌 晃¹・竹澤 一彦²・滝口 要之助³・高橋 邦夫⁴・山下 久男⁵・西村 真二⁶

¹正会員 独立行政法人 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部長 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²元 運輸省 第一港湾建設局 伏木富山港湾工事事務所 次長 (〒930-0856 富山市牛島新町 11-3)

³元 運輸省 第一港湾建設局 伏木富山港湾工事事務所 新湊工場長 (〒934-0021 新湊市堀岡新明神字西浜 205-150)

⁴正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 理事 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

⁵正会員 新日本製鐵株式会社 建材開発技術部 マネジャー (〒100-8071 千代田区大手町 2-6-3)

⁶正会員 株式会社 フグロ・ジオサイエンス 取締役 部長 (〒103-0073 千代田区九段北 4-3-16)

伏木富山港の水深-14m岸壁の建設における栈橋鋼管杭の施工にあたっては、近隣の環境を配慮し、ウォータージェット併用のパイロハンマ工法を採用した。この工法は支持力について未解明な点があるため、正確な支持力を把握する目的で静的載荷試験を実施した。その結果、設計支持力を満足しないことが判明したので、杭の支持力を増大するための改良を行った。改良工法として新設杭についてはウォータージェットの水に替えてセメントミルクを注入する新工法(CJV工法)を、既設杭は薬液注入工法(注入工法)を採用した。これら改良工法の試験工事を実施し、静的載荷試験および動的載荷試験の結果より、いずれも所要の支持力を発現することを確認した。

Key Words : vibratory hammer, water jet, cement milk, grouting, static loading test, dynamic loading test, steel pipe pile

1. まえがき

伏木富山港では、コンテナの増大や船舶の大型化に対応するため、新湊地区において水深-14mの岸壁を有する多目的国際ターミナルの整備を進めている。

この岸壁は図-1に示すとおり、控え工にケーソンを採用した栈橋構造となっており、鋼管杭は直径1200mm長さ47mで4列の配置であり支持層は-45mである。

当初の鋼管杭の施工法は、近隣への騒音・振動等の環境と現地の地盤条件を考慮して、ウォータージェット併用パイロハンマ工法(以下JV工法と呼ぶ)を採用した。しかし、JV工法の支持機構については、未だ十分に解明されていないのが現状である。

そこで、本工事の鋼管杭の施工にあたり、JV工法杭の静的載荷試験を実施し正確な支持力を把握した。その結果、設計支持力を満たさないことが判明した。

JV工法の載荷試験結果を受けて、支持力増大のための改良を実施することとした。

改良方法としては、施工簡易性、経済性等種々検討した結果、今後新たに打設する新設杭についてはJV工法のジェット水に替えてセメントミルクを噴射することにより周辺地盤を改良する工法(以下CJV工法と呼ぶ)、施工済みの既設杭については、杭の周囲にセメント系固化材を注入し周辺地盤を改良する工法(以下注入工法と呼ぶ)を採用し、試験工事を実施した。

新設杭のCJV工法に対しては動的載荷試験および静的載荷試験により、また既設杭の注入工法に対しては動的載荷試験により改良効果の検証を行った。その結果、両工法とも設計支持力を満足することが確認できた。

本論文はJV工法による栈橋鋼管杭の支持力載荷試験結果と支持力増大のために採用した2種類の改良工法の紹介と改良効果の解析結果を報告し、今後のJV工法の設計・施工に寄与するものである。

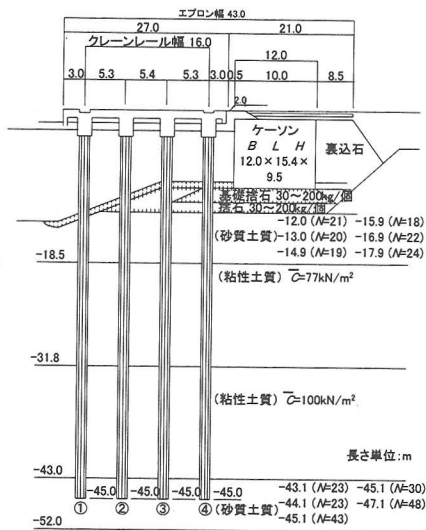


図 - 1 栈橋構造・設計土質条件

表 - 1 鋼管杭の仕様

杭種	先端	杭径 D (mm)	板厚 t (mm)		杭長 ΣL (m)	材質
			上部	下部		
鋼管杭	十字リブ or 開端	1200 or 1100	14~17	12	47.0	SKK 490

表 - 2 杭の設計極限支持力 (1列杭・4列杭の設計荷重)

杭番号	常時 (× 2.5)		地震時 (× 2.0)		設計極限 支持力 (kN)
	軸力 (kN)	支持力 (kN)	軸力 (kN)	支持力 (kN)	
1列杭	3970	9930	4480	8960	9930
4列杭	3600	9000	4640	9280	9280

2. JV 工法による栈橋鋼管杭の設計と施工

(1) 栈橋鋼管杭の設計

a) 栈橋杭の設計支持力の考え方

この -14m 岸壁は、前述したように栈橋構造であり、鋼管杭の仕様、設計上必要な支持力は、それぞれ表-1、表-2 に示すとおりである。なお、設計支持力は、荷重条件の厳しい1、4列杭について示した。

これらの支持力は、それぞれの鋼管杭の周面摩擦力と先端支持力で確保することとしており、港湾構造物の設計支持力の考え方は以下の通りである¹⁾。

・周面摩擦力 R_f (kN)

$$R_f = \sum C_a \cdot A_c + \sum 2N \cdot A_s \quad (1)$$

C_a : 粘性土の粘着力 (kN/m²)

(今回は $C_a = 3.4 \cdot Z + 0.7$ $Z=0$ (TP -2.6m),

ただし 100kN/m² 以下)

N : 砂質土の N 値

A_c : 粘性土に接する杭の周面面積

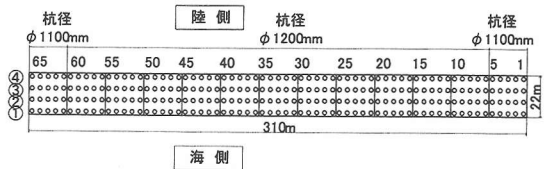


図 - 2 栈橋平面図

表 - 3 周面摩擦力の低減²⁾

施工法	高圧ジェット水を併用する場合 (kN/m ²)		
	水圧・水量を制限する層厚部	水圧・水量を制限しない層厚部	杭打ち完了後ゲグットする場合
砂質土 「低減率*」	2N (≦100) 「1.0」	1N (≦50) 「0.5」	2N (≦100) 「1.0」
粘性土 「低減率*」	0.5C または 5N (≦150) 「0.5」	0.2C または 2N (≦100) 「0.2」	C または 10N (≦150) 「1.0」

* 低減率は、打ち込み杭に対する値

表 - 4 支持力・安全率の計算結果 (4列杭)

	JV 工法を考慮した設計支持力 (十字リブ有り)
砂質土の周面摩擦力 (L=8.5m) $R_{u③}$	736 kN (低減率 0.5)
粘性土の周面摩擦力 (L=24.5m) $R_{u②}$	1616 kN (低減率 0.2)
先端支持力 $R_{u①}$	12204 kN (閉塞率 1.0, N=36)
極限支持力 $R_{u①} + R_{u②} + R_{u③}$	14556 kN
安全率	常時 (2.5) 4.04
F_s	地震時 (2.0) 3.13

A_s : 砂質土に接する杭の周面面積

・先端支持力 R_s (kN)

$$R_s = 300 \alpha \cdot N \cdot A_p \quad (2)$$

N : 先端部の N 値

A_p : 杭の先端面積 (m²)

α : 先端閉塞率

本工事の、クレーン荷重がかかる1、4列杭は設計荷重が大きいため、杭先端部に十字リブで補強を行い、先端閉塞率を確保することとした。

極限支持力 R は、次式で与えられる。

・極限支持力 R (kN)

$$R = R_f + R_s \quad (3)$$

b) JV 工法の支持力

JV 工法は杭の打設中に周辺地盤を乱すことから、前記の設計支持力に対して経験的に表-3 のとおり周面摩擦力を低減している。

設計に用いた地盤条件は図-1 に示す通りであり、これに基づく JV 工法による4列杭の極限支持力・設計支持力に対する安全率の計算結果を表-4 に示す。

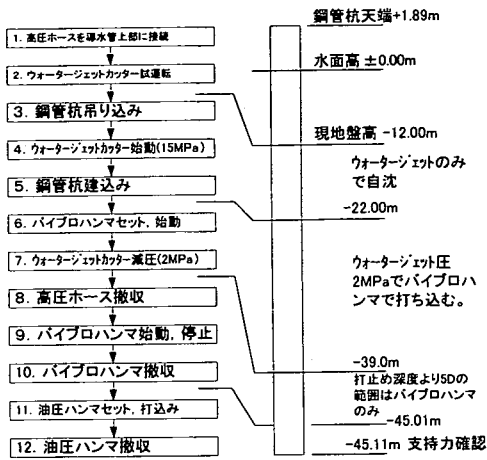


図 - 3 JV工法施工手順

(2) JV工法の施工

a) JV工法の施工方法

JV工法による杭の打設方法は、**図-3**に示すとおり海底面より圧力15MPaのウォータージェットのみにより砂地盤を貫通させ杭が自立する約-22mまで打設した。その下の粘性土からは、ジェット圧2MPaに下げてパイプロハンマを併用し、杭先端の打止め深度から5D(Dは杭の直径1200mm)上方の約-39mまで打設した。残りの5D区間についてはパイプロハンマのみの打設とした。

JV工法杭の動的支持力の確認方法は、確立されたものがないので、提案されているパイプロハンマの打撃エネルギーより求めるパイプロ式²⁾による方法と、打ち止め時に油圧ハンマを用いてハイリー式で求める従来の方法の、両方を用いて確認した。

このJV工法で施工できるか、また所定の支持力が確保できているかを確認するため本工事に先立ち、試験杭5本を用いて試験施工を実施した。

なお、油圧ハンマによる確認は、打設直後と2週間経過後で実施した。

b) JV工法の試験施工結果

試験杭の施工結果を表-5に示す。ハイリー式による支持力が打設直後には8450~10100kNであったが、2週間経過後は12440~13910kNに強度回復(セットアップ)し設計値の9280kNを満足した。また、JV工法で所定の深度まで杭打設が可能であったことから本工事をJV工法で実施することにした。

一方、パイプロ式による支持力は3590~6200kNと小さくハイリー式との相関が認められなかった。これは両式の誤差とパイプロ式がジェット水を用いるJV工法を対象としてないこともひとつの理由と考えられる。

c) 本工事の施工

本工事は、平成9年11月から10年6月にかけて、4列杭および3列杭の打設を行った。

表 - 5 試験杭施工結果

杭 No.	打設日	最終支持力 確認日(経過日数)	支持力(kN)			判定
			パイロ式	M式 打設直後	M式 14日後	
4-9	10/29	11/12(14)	6200	10100	13200	○
4-10	10/30	11/13(14)	5550	9580	12560	○
4-11	10/30	11/13(14)	3590	8510	13760	○
4-12	10/31	11/14(14)	5330	9510	13910	○
4-13	11/4	11/18(14)	5240	8450	12440	○

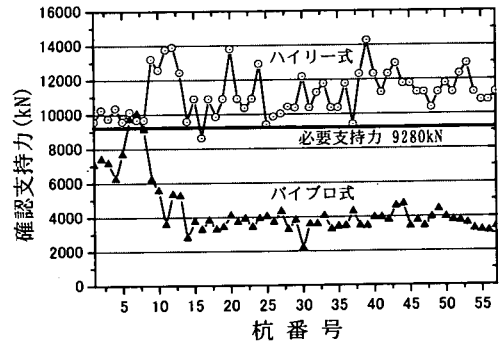


図 - 4 支持力測定結果(4列杭)

杭の支持力管理方法は、打設直後のパイプロ式と、打設1ヶ月後のハイリー式で行った。本工事では十分に地盤を回復させるために、養生期間を1ヶ月とした。

図-4に4列杭の支持力確認結果を示す。

このハイリー式による結果では設計支持力を満足している。しかし、元来ハイリー式は打ち込み工法における施工打ち止め時のリバウンド・貫入量に基づいて、施工により乱れた地盤が経時的にセットアップした後の供用時における杭の支持力を推定する施工管理式であり、今回のように地盤を1ヶ月間養生し、既に強度回復した後の杭に対するハイリー式が与える値については、貫入量が小さくなるために支持力を過大評価している可能性があり、支持力確認方法の見直しの必要性が生じた。

(3) 動的載荷試験による支持力確認

a) 動的載荷試験の実施目的

JV工法の正確な支持力を把握するためには、載荷試験を実施する必要がある。しかし、正確な支持力が把握できる静的載荷試験(Static load test: SLT)は、その実施に多くの費用と時間を必要とすることから、まず、簡易に実施できる動的載荷試験(Dynamic load test: DLT)を実施し、その結果に基づいて静的載荷試験実施の要否を検討することとした。

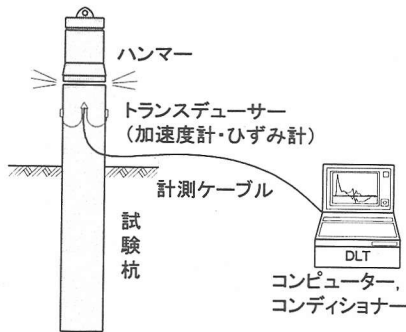


図 - 5 動的載荷試験の試験イメージ

表 - 6 動的載荷試験結果

杭NO	4-6	4-17
養生期間 (日)	243	224
周面 (kN)	3829	4297
先端 (kN)	1419	2019
合計 (kN)	5248	6316

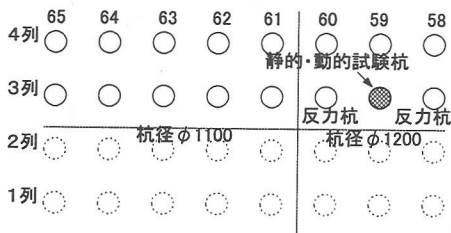


図 - 6 試験杭配置

b) 動的載荷試験結果

動的載荷試験は、杭頭付近にひずみ計と加速度計を取り付け、油圧ハンマで杭頭を打撃したときの杭の挙動を一次元波動理論に基づいて解析し、杭の支持力を評価する方法で、簡易に実施できるが静的載荷試験よりは精度が落ちる試験方法である。動的載荷試験の試験イメージを図-5に示す。

代表的な杭に対して動的載荷試験を実施した結果を表-6に示す。この表が示すように8ヶ月経過した杭においても所定の設計支持力 9280kN を満足していない可能性があることが判明した。

このため、JV 工法で施工した杭のより正確な支持力を確認する目的で、試験杭（本杭兼用）で静的載荷試験を実施することにした。

3. JV 工法に対する静的載荷試験結果と考察

(1) 静的載荷試験方法の概要

JV 工法で施工した鋼管杭の正確な支持力の把握、既存の設計提案式の妥当性の検討、およびハイリー式、パイプ式と動的載荷試験結果との比較による、支持力管理

表 - 7 試験工程

試験	実施時期
静的載荷試験	杭打設後 40 日
動的載荷試験	杭打設後 53 日
ハイリー式	杭打設後 53 日

表 - 8 試験杭仕様

杭NO	先端	杭径 D (mm)	板厚 t (mm)	断面積 A (cm ²)	杭長 L (m)	全杭長 ΣL (m)	材質
3-59	十字リブ	1200	15	558.4	22.0	47.0	SKK
			12	447.9	25.0		

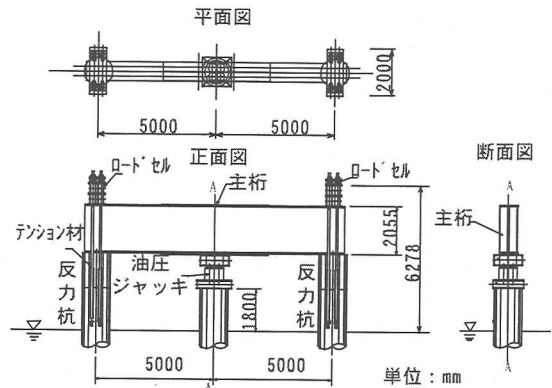


図 - 7 試験装置

方法の検討を行う目的で、本工事の杭を用いて静的載荷試験を実施した。

静的載荷試験は、図-6に示す本工事で施工する3列杭の3-59杭で実施し、反力杭は隣接の3-58 および3-60の2本の杭を使用した。試験工程を表-7に、試験杭仕様を表-8に示す。

反力杭はJV 工法杭では反力が確保できない懸念があるため、周面摩擦を増大する目的でJV 工法のジェット水に替えてセメントミルクを注入し改良を行った。改良の試験杭に与える影響については、杭間隔が5mであり、問題が少ないと判断した。

載荷方法は図-7に示すように4台の油圧ジャッキを使用し、2本の反力杭の荷重の偏心による事故防止のため反力杭にはロードセルを設置して荷重管理を行いながら実施した。

杭の沈下変位は杭先端と海底面の2断面、応力の測定は図-8に示す7断面で行った。試験は杭先端変位量を、杭径の約10%沈下させることを目標に実施した。

また、静的載荷試験結果と油圧ハンマによるハイリー式や動的載荷試験との比較を行うため、静的載荷試験実施杭について、静的載荷試験の約2週間後にこれらの試験を実施した。

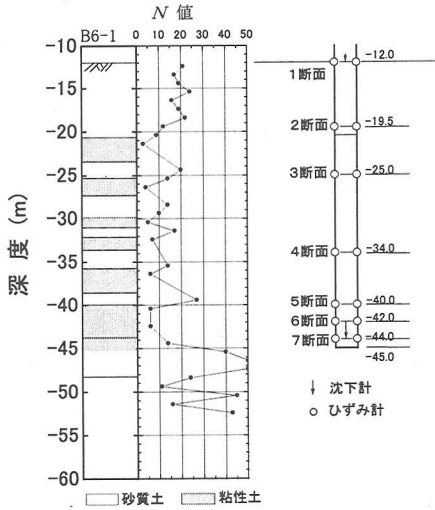


図 - 8 計測装置取り付け位置図

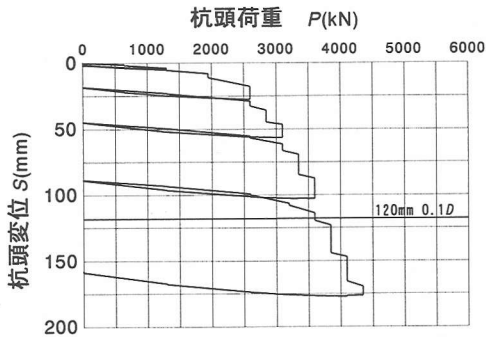


図 - 9 杭頭荷重 P~変位 S

(2) 静的載荷試験結果

載荷試験の計画最大荷重は 6500kN に設定したが、試験では荷重が低い段階から変位が増大したため載荷荷重 4350kN で試験を終了した。

その荷重～沈下曲線を図-9 に示す。

a) 第1限界・第2限界荷重

杭頭の $\log P - \log S$ 法の結果を図-10 に示す。この図からの第1限界荷重は 2660 kN となる。

また、 $\Delta S - \Delta \log t$ 法の結果を図-11 に示す。この図からの、それは 2540 kN となる。

載荷試験の第2限界荷重は、地盤工学会基準の杭の鉛直載荷試験方法・同解説⁹⁾に従い、杭頭の最大荷重から 4350 kN、先端沈下量が杭径の10%時から 3700 kN となる。

ひずみゲージの測定結果より軸力を計算したものを図-12 に示す。この図より第2限界荷重 (4350 kN) 時の周面摩擦力は 1480 kN であった。

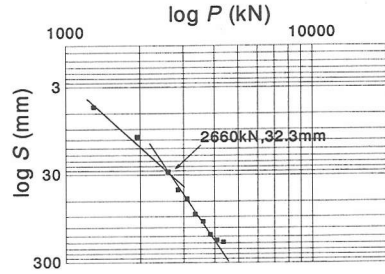


図 - 10 杭頭の $\log P \sim \log S$

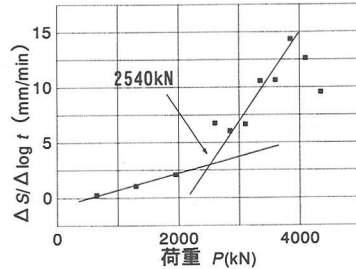


図 - 11 杭頭の荷重 P ~ $\Delta S / \Delta \log t$

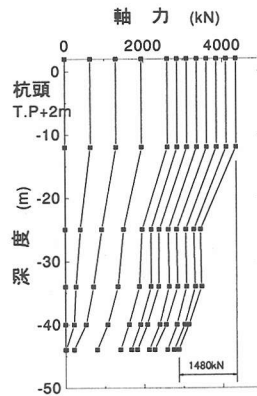


図 - 12 軸力分布

b) 周面摩擦力

また、各層別の最大周面摩擦力度を計算した結果を表-9 および図-13 に示す。なお、表-9 には、地盤の N 値を参考として併記した。

c) 先端支持力

先端ゲージの測定結果より杭先端軸力の荷重と杭先端変位を示したものを図-14 に示す。この図より第2限界荷重の先端支持力は杭径 10% 沈下時の伝達荷重で 2546kN、最大荷重時の伝達荷重で 2870 kN となる。この値は、設計値を下回り、閉塞効果の増大対策として実施した十字リブの効果は発揮されなかった。

表 - 9 各層の最大周面摩擦力度

深度(TP,m)	土質	τ (kN/m ²)	N 値
-12.0~-19.5	細砂	17	18.8
-19.5~-25.0	シルト混り粘土	17	10.7
-25.0~-34.0	シルト系	6	10.1
-34.0~-40.0	シルト混り細砂	15	15.7
-40.0~-42.0	粘土質シルト	23	6.0
-42.0~-44.0	粘土質シルト	23	14.0
-44.0~-45.0	シルト質細砂	23	14.0

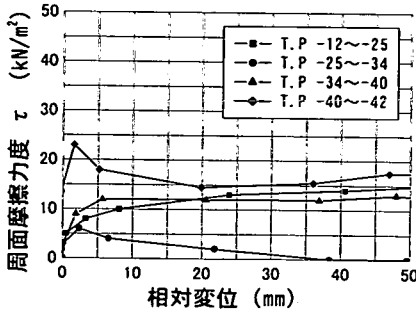


図 - 13 各層の周面摩擦力度～相対変位

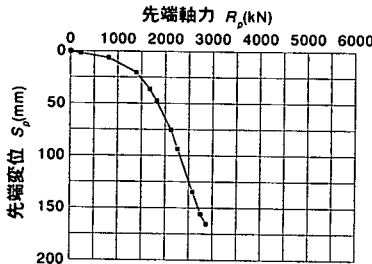


図 - 14 杭先端の荷重 R_p ～変位 S_p

表 - 10 動的載荷試験とハイリー式の結果

	DLT	ハイリー式
周面 (kN)	2064	—
先端 (kN)	875	—
合計 (kN)	2939	6160

表 - 11 動的載荷試験結果との比較

地盤	SLT			DLT	
	層厚 (m)	摩擦力度 τ (kN/m ²)		層厚 (m)	τ (kN/m ²)
		第1限界	第2限界 10%沈下時		
細砂	7.5	13.1	15.8	8.7	17.3
シルト混り粘土	5.5	13.1	15.8	17.9	15.3
シルト系	9.0	0.2	0.0		
シルト混り細砂	6.0	11.7	9.6	1.4	15.3
粘土質シルト	2.0	14.4	14.6	3.8	20.4
粘土質シルト	2.0	14.4	14.6	1.5	20.4
周面計 (kN)		1227	1228		2064
先端 (kN)		1443	2546		875
合計 (kN)		2660	3774		2939

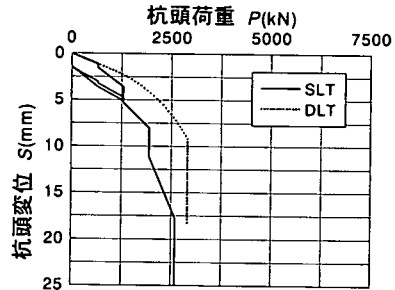


図 - 15 SLT と DLT 荷重～沈下曲線

(3) 動的載荷試験等との比較

a) 動的載荷試験とハイリー式の結果

静的載荷試験の約2週間後に実施した動的載荷試験とハイリー式の支持力測定の結果を表-10に示す。

この表より、動的載荷試験による極限支持力は2939 kN（周面摩擦2064 kN、先端支持力875 kN）であり、ハイリー式による極限支持力は6160 kNであった。

b) 静的載荷試験とハイリー式の比較

ハイリー式での極限支持力は、静的載荷試験結果より大きい値となった。これは、2.(2)c)で述べたように2週間後にセットアップしたので地盤の剛性が回復したことによると考えられる。セットアップの影響を含むハイリー式は、これまでの施工の結果をみても高めの値を与える傾向があり、このような場合は何らかの低減を考慮する必要があることを再確認することができた。

c) 静的載荷試験と動的載荷試験結果の比較

静的載荷試験と動的載荷試験の試験結果の比較を表-11に示す。静的載荷試験結果は、杭先端の変位が10% (120mm)の第2限界荷重と第1限界荷重(2660kN)の時の

値である。また、図-15に動的載荷試験のシグナルマッチング解析から換算した静的な荷重～沈下曲線と静的載荷試験のそれを比較したものを示す。

これらの結果より、動的載荷試験の周面、先端を合わせた全体の確認支持力は静的載荷試験の第2限界荷重と比較して低い値を示し、ほぼ第1限界荷重に相当する値であることが分かった。それは動的載荷試験時の杭頭の変位量が静的載荷試験時の120mmと比較して21mm（貫入量10mm、リバウンド11mm）と1/6程度と小さく、支持力をモビライズできなかったことによるものと考えられる。

また、表-11によると、静的と動的で周面と先端の支持力の分担比が異なっている。この原因としては、動的載荷試験の解析のバラツキ、パイロハンマ施工時の残留応力などによる軸力計測の誤差などが考えられるが、この結果のみで判断することは難しく、動的載荷試験の周面と先端の分離精度など、今後のデータ蓄積が必要であると考えられる。

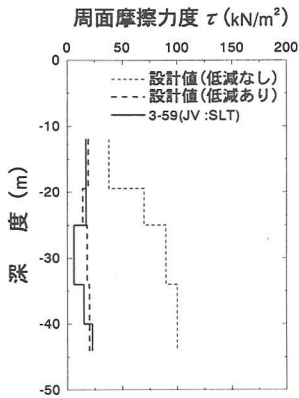


図 - 16 設計値と載荷試験結果の比較

(4) JV 工法の設計支持力の検討

a) 周面摩擦力度

2. (1) で述べた JV 工法の設計周面摩擦力の低減の有無の周面摩擦力度曲線と、静的載荷試験の結果を比較したものを図-16 に示す。

これまで提案された算定式²⁾は JV 工法の地盤を乱す影響を考慮し、打ち込み杭の周面摩擦力に対し砂地盤で 0.5、粘性土地盤で 0.2 の低減率を乗ずるものであった。図-16 に示す静的載荷試験の結果は、上部粘性土区間で設計値を下回る箇所があるが概ねこの方法で周面摩擦力を低減した場合と傾向は一致している。

b) 先端支持力度

十字リブを取り付けた場合の先端支持力度は、設計上完全閉塞（閉塞率 1.0）としたが、載荷試験の結果は設計の 1/4 程度の支持力しか得られなかった。この原因としては、先端地盤が互層であったこと、大口径杭の支持層としては N 値が小さいこと等により十字リブの効果が十分発揮されなかったものと考えられる。したがって、先端地盤条件に対する強度メカニズムが特定できず、十字リブの効果を評価するのは困難であった。

4. 支持力増大のための改良工法の検討

静的載荷試験の結果、杭の支持力を増大させるための改良の必要が生じたが、杭の改良は設計荷重の大きいクレーン基礎の 1 列杭、4 列杭それぞれ 65 本を対象とした。4 列杭についてはすでに 57 本を打設していることから、主に 1 列杭を対象とした新設杭の改良と 4 列杭を対象とした既設杭の改良の 2 種類で検討を行うこととした。

(1) 新設杭に対する改良工法の検討

新設杭の改良工法として、

A：杭の周面に薬液等を注入し周面摩擦を増大する工法

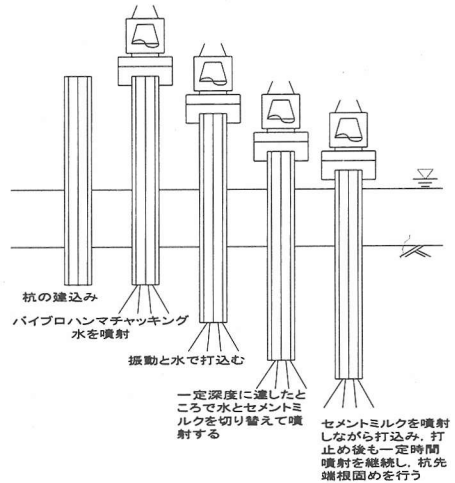


図 - 17 CJV 工法施工手順

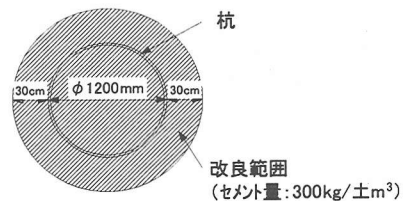


図 - 18 CJV 工法による想定改良範囲

B：杭の先端を固めて先端支持力を増大する工法

C：JV 工法のジェット水に替えセメントを噴射し周面摩擦を増大する工法（CJV 工法）

等が考えられ、このうち現場での簡易性・経済性より、試験工事としては C の CJV 工法を採用することとした。

CJV 工法の施工手順を図-17 に示すが、この工法はこれまで実績がなく初めての実施である。

(2) CJV 工法の改良の考え方

CJV 工法は実績がなく設計法も確立したものはない。よって今回の改良の考え方は、JV 工法でジェット水およびパイロで乱す杭周面の地盤にセメントミルクを注入し、周面地盤強度を元の強度まで回復させるとともに、セメント系固化地盤を形成することにより、杭径の増大効果も期待した。

未経験な工法であるが施工にあたっては注入セメント量を定める必要があり、改良率は、類似の工法と思われる鋼管ソイルセメント杭³⁾で使用する $300\text{kg}/\text{土}\text{m}^3$ を基本とし、改良範囲は杭半径プラス 30cm の範囲が、管内も含め改良されることを想定した（図-18 参照）。

(3) 既設杭に対する改良工法の検討

既設杭の改良工法として、

A：杭の周面にセメント系固化材を注入し周面摩擦を増大

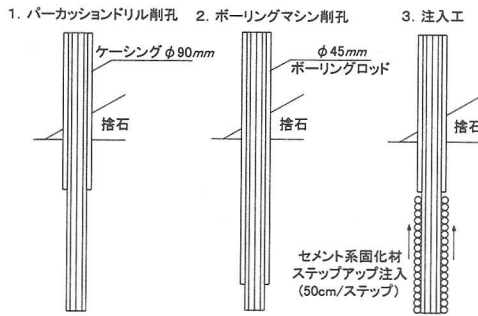


図 - 19 注入工法の施工手順

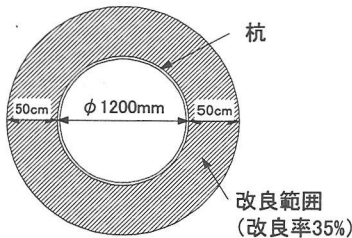


図 - 20 注入工法による想定改良範囲

する工法

B：杭の先端を固め先端支持力を増大する工法等が考えられ、現場での施工性・経済性より、試験工事としてAの工法（注入工法）を採用することとした。

なお、ケーソン基礎用に捨石マウンドが既に設置されていることから、捨て石層を削孔するロータリーパーカッションドリルによる補助工法も併用することとした。注入工法の施工手順を図-19に示す。

(4) 注入工法の改良の考え方

既設杭の改良工法はセメント系固化材を注入する工法であるが、これまで今回のような栈橋鋼管杭の支持力の増大を目的とした事例は少なく、設計法として確定的なものではなかった。そこで、これまでの薬液注入による実績を参考にして杭の周面摩擦の増加を想定した。

改良は、杭半径プラス 50cm の範囲が 35% の改良率で改良されると想定した（図-20 参照）。

5. C J V工法の施工法と支持力確認試験

(1) C J V工法の試験概要

a) 施工手順

新設杭は、杭が自立する深度-22m以深の粘土地盤層を対象にセメントミルクを噴射するものとした。施工手順は、上部の砂地盤は本工事と同様に海底面下-22mまではジェット水圧 15MPa のみで鋼管杭を自立させ、それ以深

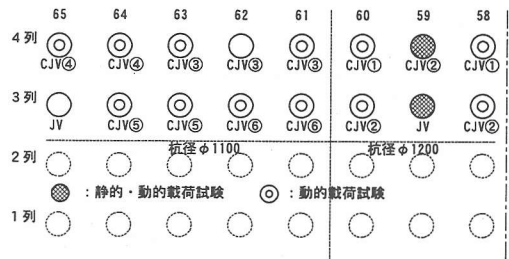


図 - 21 試験杭の配列

表 - 12 C J V工法の施工条件

工法	改良範囲 (深度)	注入 速度 (m ³ /min)	貫入 速度 (m/min)	注入量 (m ³ /m)	総 注入量 (m ³ /本)	W/C (%)	セメント 量 (kg/土 m ³)	杭径 (mm)
CJV ①	20m (-25~45)	1.0	0.5	2.0	40	100	591	1200
CJV ②	20m (-25~45)	1.0	1.0	1.0	20	100	296	1200
CJV ③	20m (-25~45)	1.0	1.0	1.0	20	100	330	1100
CJV ④	20m (-25~45)	1.0	1.0	1.0	20	150	216	1100
CJV ⑤	20m (-25~45)	1.0	2.0	0.5	10	100	165	1100
CJV ⑥	10m (-35~45)	1.0	1.0	1.0	10	100	330	1100

-25mまでジェット水圧 2MPa に下げてパイプロハンマ併用にて打設し、-25m以深についてはジェット水をセメントミルクに替えて圧力 4MPa で噴射し、パイプロハンマを併用しながら最終深度の-45mまで打設した。

b) 改良施工の試験方法

改良工法杭の試験は4列杭の4-58~65杭および3列杭の3-58~64杭で施工条件を変えたケースで実施した。全体の試験杭の配列を図-21に示す。

4-58~60杭および3-58~60杭は、栈橋の標準部のφ1200mmの杭であり、4-61~65杭および3-61~64杭は栈橋の取り付け部でφ1100mmの杭である。

このうち標準部の4-59杭(CJV②)のCJV工法の杭、および隣接する3-59杭のJV工法の杭について静的載荷試験を実施し、両者を比較することにより改良効果の確認を行った。

施工条件は、改良土 1m³ 当たりの目標セメント注入量の標準を 300kg/土 m³ に設定して 600kg/土 m³、150kg/土 m³ など数種類の条件の杭を作成した。また、改良範囲を下半分にしたケースや、杭の貫入速度を変えた条件についても実施した。CJV工法の施工条件と試験杭の仕様を表-12、表-13に示す。

CJV工法による試験杭の支持力は、4-59杭は静的載荷試験および動的載荷試験で、その他の杭は動的載荷試験により確認した。

各載荷試験の実施時期を表-14に示す。

表 - 13 試験杭の仕様

工法	杭番号	先端	杭径 D (mm)	板厚 t (mm)	断面積 A (cm ²)	杭長 L (m)	全杭長 ΣL (m)	材質	
CJV ①	4-58	十字 リブ	1200	15	558.4	22.0	47.0	SKK 490	
	4-60			12	447.9	25.0			
CJV ②	4-59	十字 リブ		1100	16	544.9			22.5
	3-58				開端	12			410.2
3-60	15	511.3		22.0					
CJV ③	4-61	十字 リブ		1100	12	410.2			25.0
CJV ④	4-63	十字 リブ	15		511.3	22.0			
CJV ⑤	3-63	開端	1100	12	410.2	25.0			
CJV ⑥	3-61			十字 リブ	15	511.3	22.0		
	3-64	十字 リブ							
	3-62	十字 リブ							

表 - 14 CJV 工法の載荷試験時期

工法	杭番号	試験	実施時期 (杭打設後)
CJV①	4-58	DLT	50日
	4-60	DLT	48日
CJV②	3-58	DLT	53日
	4-59	SLT	35日
		DLT	50日
CJV③	3-60	DLT	50日
	4-61	DLT	47日
CJV④	4-63	DLT	37日
	4-64	DLT	36日
CJV⑤	4-65	DLT	32日
	3-63	DLT	34日
CJV⑥	3-64	DLT	35日
	3-61	DLT	39日
	3-62	DLT	35日

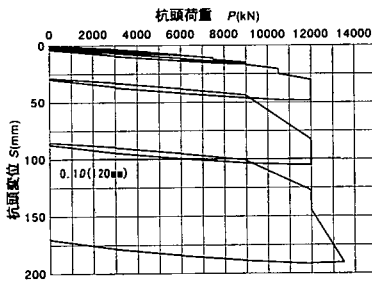


図 - 22 荷重～沈下曲線

(2) CJV 工法の静的載荷試験結果

a) 支持力

4-59 杭 (CJV②) の静的載荷試験結果の荷重～変位の関係を図-22 に示す。最大荷重 13500kN 時の最大沈下量は 190.6mm であった。

杭頭の logP - logS の結果を図-23 に示す。この図から、第 1 限界荷重は 10300 kN とする。

また、ΔS - Δlog t 法の結果を図-24 に示す。この図からの、それは 10250 kN とする。

第 2 限界荷重は、杭先端部の変位量が杭径の 10%(120mm)沈下時で、12000kN (先端支持 2160kN, 周面摩擦 9840kN), 載荷試験の最大載荷荷重からは 13500kN (先端支持 2540kN, 周面摩擦 10960kN) であった。

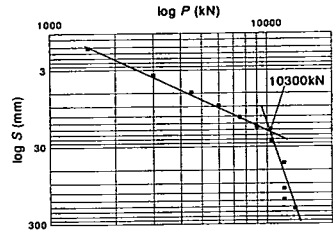


図 - 23 杭頭の logP～logS

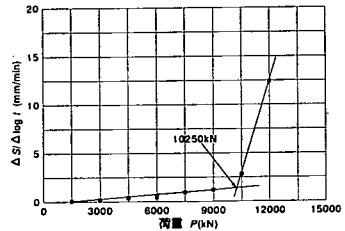
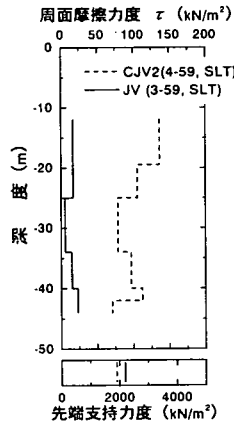


図 - 24 杭頭の荷重 P～ΔS/Δlog t



項目	CJV② 4-59 杭	JV 3-59 杭
最大荷重 (kN)	13500	4350
最大沈下量 (mm)	190.6	176.2
第 1 限界 (kN)	logP～logS	10300
	P～ΔS / Δlog t	10250
第 2 限界 (kN)	0.1D 沈下	12000
	最大荷重	13500

図 - 25 JV 工法と CJV 工法の静的載荷試験結果の比較

これらを改良しない JV 工法の結果と比較したものを図-25 の表に示す。CJV 工法の支持力は、JV 工法に比べて第 2 限界荷重で、約 8000kN の大幅な増加を示した。

b) 周面摩擦力度および先端支持力度の改良効果の把握

ひずみゲージの測定結果より層別周面摩擦力度、先端支持力度について JV 工法の結果と比較したものを図-25 に示す。

この図が示すようにセメントミルクを噴射しなかった上部の砂地盤についても約 6～8 倍の改良効果が表れていた。下層の粘土地盤については -25～-34m の粘土地盤で約 13 倍、-34～-45m の層で約 3～6.5 倍の改良効果が発揮されていることが確認できた。

一方、先端支持力については改良の効果は顕著に現れなかった。これらが示すようにセメントミルク注入により周面摩擦力の改良効果が十分発揮され、これにより設計支持力を満足することが確認できた。

表 - 15 動的載荷試験結果

(kN)

工法	杭番号	試験	周面抵抗	先端抵抗	合計	工法	杭番号	試験	周面抵抗	先端抵抗	合計
CJV②	4-59	静的	10961	2539	13500	CJV④	4-64	動的	8147	3383	11530
CJV①	4-58	動的	5633	3827	9460		4-65	動的	8425	3075	11500
	4-60	動的	6280	3280	9560		平均		8290	3230	11520
	平均		5960	3550	9510	φ1200換算		9049	3521	12570	
CJV②	3-58	動的	8754	2416	11170	CJV⑤	3-63	動的	7087	2583	9670
	4-59	動的	11772	1968	13740		3-64	動的	6897	2583	9480
	3-60	動的	7634	2416	10050		平均		6997	2583	9580
	平均		8950	2700	11650		φ1200換算		7635	2815	10450
CJV③	4-61	動的	7005	3075	10080	CJV⑥	3-61	動的	6869	4101	10970
	4-63	動的	9596	2974	12570		3-62	動的	5609	4101	9710
	平均		8310	3020	11330		平均		7239	4101	11340
	φ1200換算		9068	3292	12360		φ1200換算		7901	4469	12370

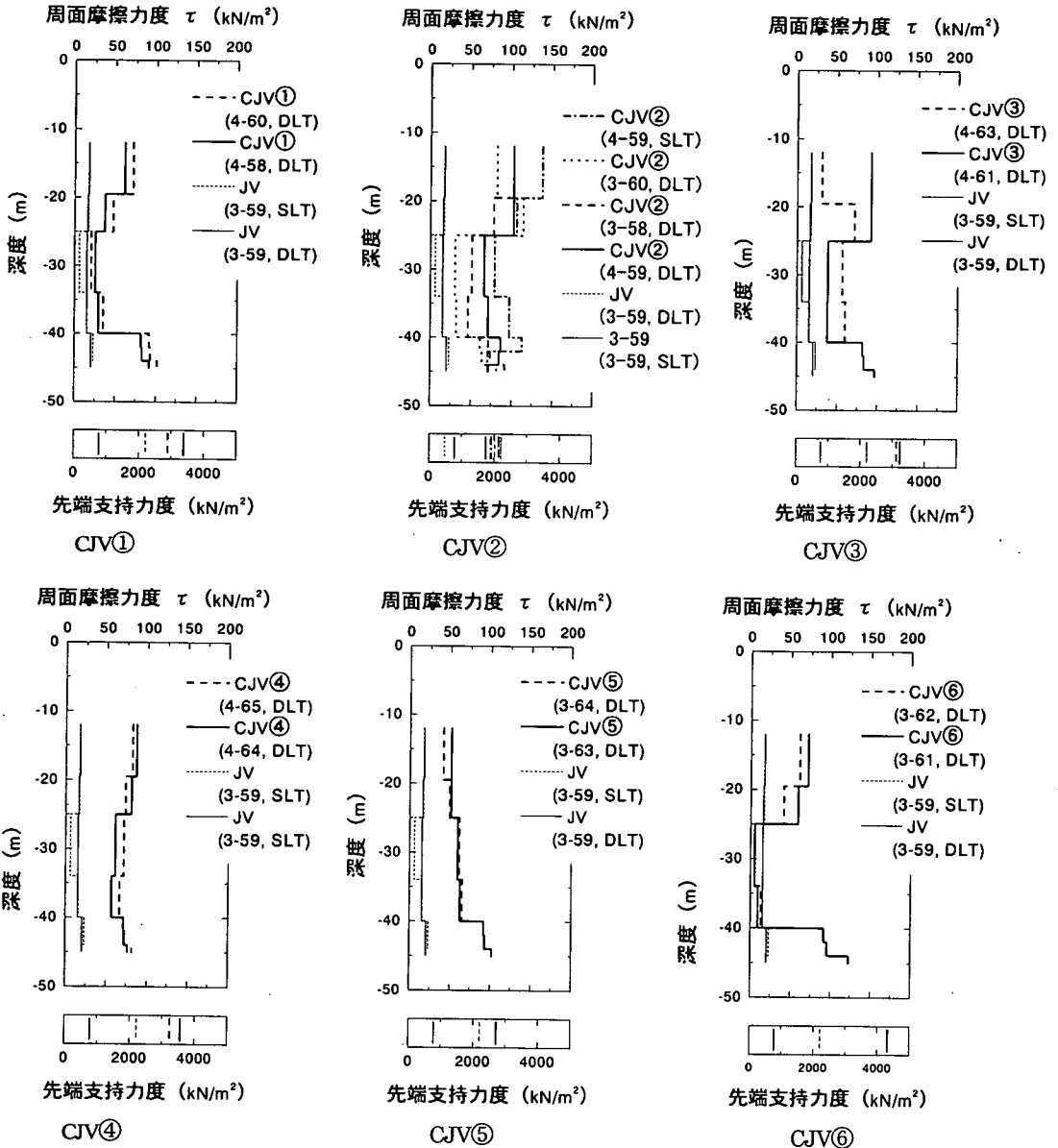


図 - 26 C J V工法の動的載荷試験結果

表 - 16 注入工法の載荷試験時期

杭番号	試験	実施時期 (杭打設後)	実施時期 (改良後)
4-30	DLT	364日	22日
4-50	DLT	194日	16日

(3) 施工条件の相違による比較 (動的載荷試験結果)

a) 支持力

セメントミルクの施工条件を変えて施工した各試験杭の動的載荷試験結果を表-15に示す。

杭径がφ1100については、φ1200と比較するために、周面摩擦力は周面積で、先端支持力は閉塞面積で換算したものを併記した。

b) 周面摩擦力度および先端支持力度の改良効果

各試験杭の動的載荷試験で得られた層別周面摩擦力度および先端支持力度の分布結果を図-26に示す。

これらの図からCJV工法の改良効果について以下のことがわかった。

- ・ CJV工法は、JV工法の支持力を設計支持力以上の十分な支持力に改良することができる。
- ・ 改良範囲の周面摩擦力度の改良効果は、JV工法に対し、中間部(-25~40m)のシルト系地盤で3~14倍、先端付近(-40~45m)の粘土系砂質地盤で3~5倍の効果が見られた。また、改良範囲が35~45mの条件(CJV⑥)の条件では、改良範囲の上部での改良効果が見られない。
- ・ 改良範囲以浅の砂質系、シルト質系地盤とも、セメントミルクの回り込みと考えられる改良効果が見られ、JV工法の4~8倍の改良効果であった。
- ・ セメントミルクの配合の違いと支持力の関係については明確にならなかった。
- ・ 先端支持力度に関しては、ハンマの能力が低く、降伏に至っていないと考えられるが、N値26.6に対し2540kN/m²の支持力度が得られており、100N(kN)程度は期待できることが確認された。

(4) CJV工法の試験結果の評価

今回はじめて実施したジェット水に替えてセメントミルクを噴射する工法は、支持力の大幅な増大が認められ、JV工法の改良工法としては非常に有効な工法と評価される。改良の範囲としては下部の粘土層を対象としたが、上部の砂質土層の改良も現れる結果となり下部で注入したセメントが上部に上昇したものと考えられる。

セメント注入量の変化については標準とした300kg/土m³で所定の設計支持力を得られ、これより多いケースでも同程度の支持力であり、半分や改良長を半分にしたケースでも若干の支持力低下が見られる程度であった。この結果は、当初の改良の考え方と異なる傾向を示した。

表 - 17 セメント系固化材の配合 (m³あたり)

	A液 (0.5m ³)	B液 (0.5m ³)
混合材	75kg (0.026m ³)	普通セメント 300kg(0.095m ³)
混和剤	1.5kg(0.0007m ³)	
海水	0.473m ³	海水 0.405m ³
ゲルタイム 3 ~ 3.5 min		

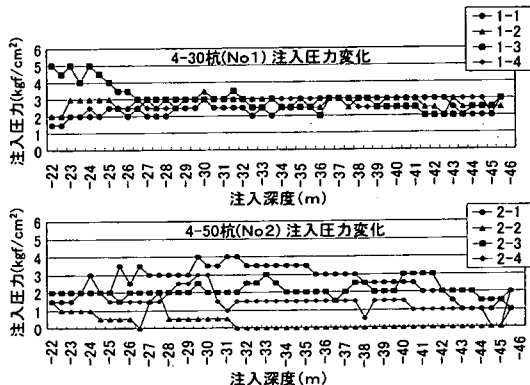


図 - 27 注入工法施工結果

6. 注入工法の施工法と支持力確認試験

(1) 注入工法の試験概要

a) 施工手順

この工法は打設された鋼管杭の周囲にセメント系固化材を注入するため、まず基礎捨石マウンドをロータリーパーカッションドリルで穿孔しガイドとなる孔壁を築き上方への漏出防止のためのベントナイトを注入のうえ、次に注入管を杭先端まで押し込んだ後、注入管を引き抜きながら、先端より所定量の固化材を注入する方法で実施した。杭1本当たり4個所の注入で注入改良範囲は深度-45m~-25mまでとした。注入量は22.5m³(改良率35%)で実施する計画とした。

b) 改良施工の試験方法

試験施工は既に打設された4-30,4-50(φ1200mm, L47m)の2本の杭を用いて実施し、動的載荷試験で支持力を確認した。JV工法と注入工法の載荷試験までの養生期間を表-16、固化材の配合を表-17に示す。

(2) 注入工法の施工結果

注入工法は4-30杭から実施し、施工時の薬液注入量と注入圧力の結果は図-27に示す通りである。

通常固化材の浸透が進み飽和に達すれば注入圧力の上昇が見られるが、今回の施工においては、このような傾向は見られなかった。

このため4-50杭の施工にあたっては固化材注入量を32.2m³に増加して実施した。鋼管1本当たり4個所の注入作業は、1個所当たり概ね8時間の施工時間であり、鋼管1本の改良に基礎捨石の穿孔を含め1週間を要した。

表 - 18 動的載荷試験結果

	4-30		4-50	
	改良前	改良後	改良前	改良後
周面摩擦力(kN)	3974	7440	3658	7741
先端支持力(kN)	1473	3280	601	3280
静的支持力(kN)	5447	10720	4259	11021

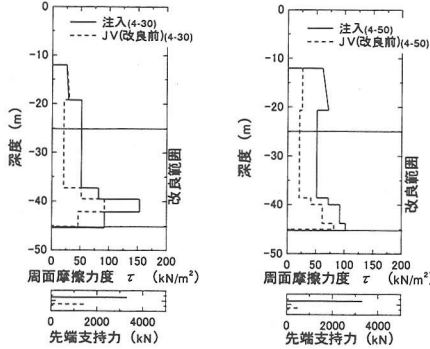


図 - 28 注入工法の改良効果

(3) 注入工法の動的載荷試験結果

a) 支持力

動的載荷試験で得られた静的な支持力を改良前 (JV 工法) 後で比較したものを表-18 に示す。

この結果、4-30 杭で改良前 (施工後 364 日) の 5447kN に対し改良後は 10720kN、4-50 杭では改良前 (施工後 194 日) 4259kN に対し 11021kN となり、設計支持力を十分満足する改良効果が確保できた。

b) 周面摩擦力と先端支持力の改良効果

4-30 杭および 4-50 杭の改良前後の周面摩擦と先端支持力の結果を比較したものを図-28 に示す。

この図より改良効果は注入を実施した粘土層のみでなく全層にわたっていることが把握できた。

また、先端支持力についても 2.2~2.5 倍の改良効果が見られた。

(4) 注入工法の試験結果の評価

今回実施したセメント系固化材注入による栈橋鋼管杭の支持力増大対策工法は初めての試みであったが、改良の結果、所定の設計支持力を上回る支持力が得られ有効な改良工法であることが実証できた。

また、固化材の注入量についてもこれまで施工実績が少なく試行錯誤で実施したが、所定の支持力が得られる結果となった。

動的載荷試験結果によると、図-28 に示す通り深度方向の改良範囲については想定と異なる結果となり、この改良のメカニズムについては今後詳細な検討が必要であろう。

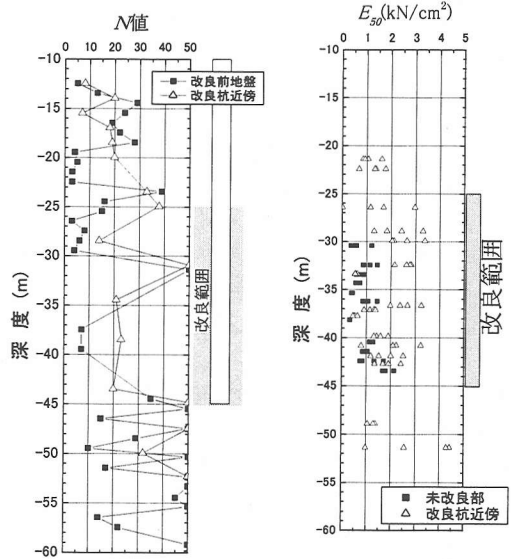


図 - 29 改良杭近傍の N 値の比較

図 - 30 改良杭近傍の

ヤング係数の変化

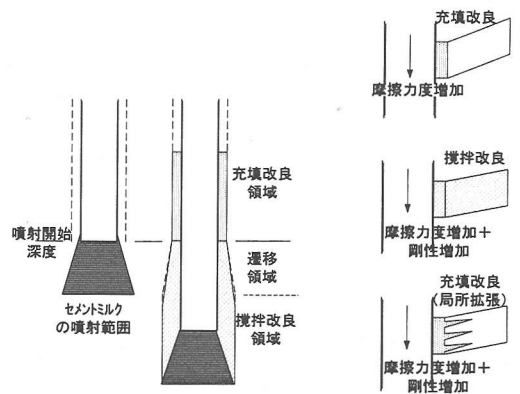


図 - 31 CJV 工法の改良イメージ

図 - 32 CJV 工法の周面抵抗メカニズム

7. 試験結果の考察

(1) 改良工法の支持力発現メカニズムの推定

a) CJV 工法

載荷試験結果から、CJV 工法の改良の特徴として、改良範囲のみならず、改良範囲以浅の地盤についても周面摩擦力の増加が見られた。

また、改良状況を把握するために、載荷試験後、試験杭近傍 (杭壁から 0.2m) でボーリング調査を実施した。その結果を未改良部のものと比較すると、改良範囲での N 値、ヤング係数の増加が確認された。しかし、改良範囲以浅では、N 値の増加は見られないことが分かった (図

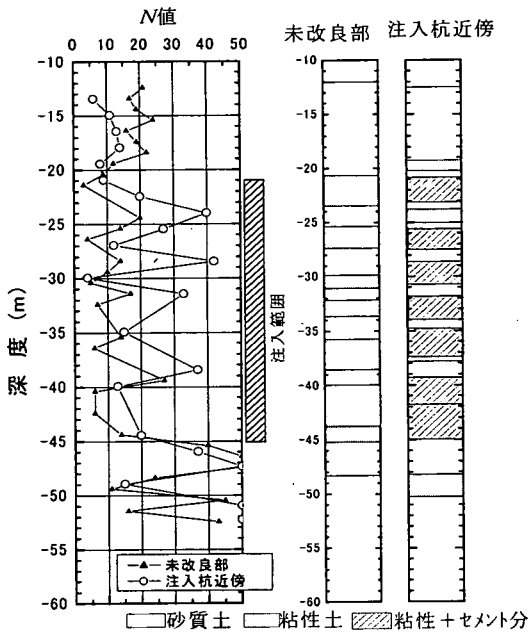


図 - 33 注入工法の土質の変化

表 - 19 CJV 工法の周面摩擦力度の比較

土質	載荷試験結果 (kN/m^2)	N値	設計値 (kN/m^2)
砂質土	110 (92~137)	19	38
粘性土	67 (38~97)	6.4	100

-29, 図-30) .

これらのことから改良工法検討時に想定した杭半径プラス 30cm 程度の範囲が均一に円筒状に改良されるという形態にはなっていないことが推定される。

載荷試験結果とボーリング調査結果から、改良範囲と改良範囲が浅い実際の改良状態を推定すると、改良範囲はセメントミルクの噴射により、杭径より広い範囲がある程度均一に改良されていると考えられる(攪拌改良状態)。また、改良範囲が浅くは、セメントミルクが、ジェット水の影響で生じた杭壁に沿った空隙に、噴射圧とパイロハンマの振動により、充填されているものと考えられる(充填改良状態)。これらの改良イメージを図-31に示す。

これらのことから支持力発現メカニズムについてはそれぞれ以下のことが考えられる。

・攪拌改良(図-32中)

攪拌改良された地盤は、改良範囲が広く、杭周辺地盤の変形剛性、周面摩擦力度ともに増加する。

・充填改良(図-32上)

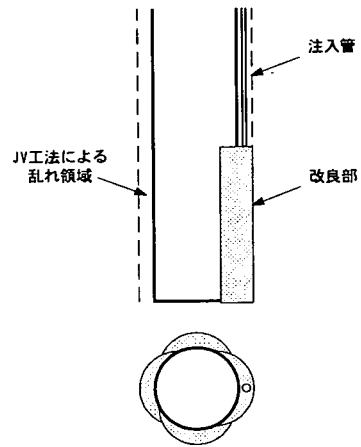


図 - 34 注入工法の改良イメージ

表 - 20 注入工法の周面摩擦力度の比較

土質	載荷試験結果 (kN/m^2)	N値	設計値 (kN/m^2)
砂質土	66 (66)	19	38
粘性土	64 (56~71)	6.4	100

充填改良の場合は、周面摩擦力度のみ増加する。

さらに、充填改良の場合に、杭周囲に充填されたセメントミルクが、パイロハンマによる施工で乱された地盤の、局所的な弱い箇所にも充填されることが起こると推定される。

・充填改良(局所拡張)(図-32下)

充填改良に加え、局所的に広い範囲の充填が生じ、変形剛性も増加する。

b) 注入工法

注入工法の載荷試験杭(4-50)の近傍0.2mのボーリングの結果、コンクリート状の固化物が確認され、ボーリング位置まで、改良の範囲が及んでいることが確認された。(図-33参照)

注入工法の場合もCJV工法の場合と同様に、実際の施工結果は、工法検討時に想定した改良形態にはなっていないと考えられる。

載荷試験とボーリング調査の結果から推定した注入工法における改良イメージを図-34に示す。注入工法においては、注入管から吐出された注入材が注入圧により杭と地盤の間隙(JV工法により乱され弱くなった部分)に充填されたと考えられる。したがって、支持力発現メカニズムは充填改良(局所拡張)の特徴を有すると考えられる。

(2) 設計支持力との比較

a) CJV 工法の設計支持力との比較

CJV 工法による改良杭載荷試験の結果、支持力全体については設計支持力（安全率常時 2.5、地震時 2.0）を満足する結果が得られた。

周面摩擦力度について、載荷試験結果と設計値との比較を表-19 に示す。なお、設計値は以下の式による。

砂質土： $\tau_s = 2N$ (kN/m²)

粘性土： $\tau_c = 3.4 \cdot Z + 0.7$ (kN/m²) (Z=0 (TP -2.6m))

ここで、 τ_s ：砂質土地盤の設計摩擦力度

τ_c ：粘性土地盤の設計摩擦力度

この結果、砂質土については、設計値の 3 倍近い支持力が得られたが、粘性土については、設計値を下回る結果になった。

また先端支持力については先端地盤に明確な支持層がなく評価が困難であるが、前述の通り 100N (kN/m²) 程度の支持力度が期待できると考えられる。

CJV 工法の支持力を評価すると、支持力全体としては、設計値を上回る結果が得られたが、当初期待していなかった改良範囲以浅での改良効果が現れており、本工法により設計を行う場合は、改良範囲を十分に検討する必要がある。

b) 注入工法の設計支持力との比較

注入工法についても、改良の結果、設計支持力を満足する結果が得られた。

周面摩擦力度について、載荷試験結果と設計値との比較を表-20 に示す。

この結果は、CJV 工法と同様の傾向を示した。また、先端支持力についても CJV 工法と同様の傾向であった。

c) 今後の設計への適用

CJV 工法および注入工法は、本地盤条件では改良効果が確認されたが、周面摩擦力度について当初想定した現地盤に戻す設計の考え方は、土質により異なることがわかった。他の地盤・施工条件においても改良効果が期待できるかどうかはデータが少なく不明である。したがって、設計へ適用する場合は試験施工を行う等、設計に当たっては慎重に検討する必要があると考えられる。

また、安全率については、載荷試験の結果、設計荷重に対し、従来の値を低減する必要のないことが確認されたが、今回のように詳細な支持力確認を実施した場合は、港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾の「土質調査や載荷試験が綿密に実施された場合は、土質基礎工学の専門家の判断を得た上で、安全率を低減することが許される。」という考え方にしたがって、安全率を見直すことができると考えられる。その姿勢が新しい設計・施工技術の開発を促し、建設コストの低減につながるものとする。

8. まとめ

JV 工法に対する載荷試験結果および JV 工法で施工した栈橋鋼管杭の支持力増大のための改良工法としての、新設杭に対する CJV 工法と、既設杭に対する注入工法の試験工事を実施し、それらの支持力を静的および動的載荷試験で確認した結果、以下のことが確認できた。

(1) JV 工法に対する載荷試験結果の評価

- JV 工法の周面摩擦力は、提案されている低減設計値と一部粘性土を除きおおむね傾向は一致することが確認できた。
- 本工事の地盤条件においては、先端十字リブの効果が十分発揮されなかった。
- 設計荷重の大きい 1、4 列杭については、支持力不足が判明したので、増強のための改良工法を検討する必要があることが分かった。
- 支持力確認方法としての施工後養生期間を経て実施するハイリリー式は過大な結果を与えることが分かった。
- 動的載荷試験は、大きな沈下量が与えられない等の問題はあがるが、静的載荷試験の第 1 限界荷重付近の支持力確認手段としては妥当な方法であることが分かった。

(2) JV 工法の支持力増大工法の評価

- 新設杭の CJV 工法は、初めて施工された工法であったが、載荷試験で、設計支持力を満足する結果が得られ、簡易で経済的な工法として有効であることが実証できた。
- CJV 工法の施工条件を変えた場合の改良効果の差は、今回の試験工事では明確にできなかったが、今後のデータの蓄積が望まれる。
- 注入工法についても、栈橋鋼管杭への適用は初めてであったが、所要の改良効果が得られ有効な工法であることが実証できた。
- 周面摩擦応力度の改良効果（強度増加）については、砂地盤と粘性土地盤とは異なり、打ち込み杭の設計値との関係も異なることが把握でき、今後の設計施工の適用にあたっては、試験施工での確認など事前の検討が必要である。
- 改良効果の深度方向分布についても、改良範囲だけでなく、上部の未改良部分も改良されることが把握できたが、他の地盤での適用については不明瞭であるので、慎重に検討すべきである。

9. あとがき

以上, JV 工法による栈橋鋼管杭の支持力載荷試験結果と支持力増大のために採用した2種類の改良工法の紹介と改良効果の解析結果について述べてきた。

JV 工法は, 騒音・振動が少なく環境への配慮を要する現場では有望な工法であるが, 支持力について未解明な点が多い工法である。今回, JV 工法の載荷試験を実施することにより, 本工法の支持力に関して貴重なデータを得ることができた。

また JV 工法で施工した杭の支持力増大工法として, CJV 工法および注入工法の試験工事および載荷試験を実施した。これは初めての施工であり試行錯誤の取り組みであったが, 載荷試験結果から所用の改善効果が得られ, 有効な工法であることが実証できた。

特にCJV 工法は簡易で経済的であり現場で有力な工法の一つであることが確認できた。

今後, 環境に配慮すべき施工を求められる機会が増すと予想され, このような工法の適用事例が多くなると考えられる。それに伴い, 工法開発が進展し, 改良のメカニズムの解析や設計法の確立が進むことを期待したい。

謝辞:最後に, 今回の論文をまとめるにあたりご協力いただいた, 東京工業大学日下部教授, 九州大学善教授, 運輸省港湾技術研究所菊池室長に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1995.
- 2) パイプロハンマ研究会: パイプロハンマ工法, 1993.
- 3) 国土開発技術センター: 一般土木工法・技術審査証明 報告書 同時埋設合成鋼管杭工法 (ガンテツパイル), 1995.
- 4) 地盤工学会: 地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 1993.

(2000. 8. 10 受付)

THE BEARING CAPACITIES OF STEEL PIPE PILES INSTALLED BY WATER JET VIBRATORY TECHNIQUE AND NEW IMPROVING METHODS FOR THE CAPACITIES

Akira UEZONO, Kazuhiko TAKEZAWA, Younosuke TAKIGUCHI, Kunio TAKAHASHI, Hisao YAMASHITA and Shinji NISHIMURA

At the port of Fushiki Toyama a quay with 14 m depth of water was constructed. This quay was designed on the steel pipe piles installed by water jet vibratory (JV) technique. The static load test performed on the JV pile showed the shortage of the bearing capacity. To increase the bearing capacity new technique using cement milk in place of water (CJV method) was developed to use for improving the soil. For the existed piles where JV method was used, cement grouting method was carried out. The results of the static load test and dynamic load test showed that the designed bearing capacity was achieved.