

D 滑走路における杭の支持力試験について  
 ～長尺な大口径鋼管杭の鉛直および水平支持力の確認～

接続部護岸・棧橋工区 ○永谷達也・新原雄二

連絡誘導路工区 森山信

棧橋Ⅰ工区 佐藤純哉

棧橋Ⅱ工区 水野立

ジャケット製作工区 風野裕明

キーワード：支持力試験、大口径鋼管杭、支持力、先端閉塞率、周面摩擦力

## 1. まえがき

D 滑走路の棧橋部および連絡誘導路部の基礎杭は、長尺な大口径鋼管杭（φ900～φ1,600）を1,849本（棧橋部1,165本、連絡誘導路部684本）打設する。大口径鋼管杭の載荷試験は東京湾横断道路（TTB）や東京港臨海道路等で実施されているものの試験実績は少なく、その支持力メカニズムは明確になっているとは言い難い。D 滑走路の棧橋部および連絡誘導路部の基礎杭の実設計では、東京港臨海道路で実施された杭の載荷試験（押し込み試験）の結果を基に、杭の先端閉塞率を50%（支持層への根入れ比 $L/D=3$ ）として杭の支持力を算定している。ここでは、東京港臨海道路での試験結果を最大限生かしつつ、基礎杭の支持力安全性の確認と設計の妥当性の確認、さらには施工時の支持力管理方法の設定を目的として支持力試験（鉛直載荷試験と水平載荷試験）を実施した。

支持力試験の結果、鉛直および水平支持ともに、実設計の支持力安全性が確保されることを確認し、実設計で設定した支持力算定式が安全側に設定されており妥当であることを確認した。本報告は、追加土質調査に基づく棧橋部および連絡誘導路部の地層構成の概要と、基礎杭の支持力試験結果について述べるものである。

## 2. 棧橋部および連絡誘導路部の地盤条件

### 2-1 追加土質調査による地層構成

追加土質調査の調査位置を図2-1に、調査内容を表2-1に示す。また、入札公告資料と追加土質調査結果より作成した滑走路中心断面及び連絡誘導路中心断面の地層構成図を図2-2及び図2-3に、④層の天端高コンター図を図2-4に示す。ここで、基礎杭の支持層となり得る③、④、⑤層の特徴については図2-4の中に記載している。

追加土質調査の結果、実設計において棧橋部の基礎杭の支持層に設定していた⑤層の天端レベルは概ね入札公告資料と同様であった。④層の分布は、図2-3、図2-4に示す通り、連絡誘導路部から棧橋部の現空港側の範囲に分布しており、入札公告資料から想定していた範囲よりも広く分布していることが分かった。

棧橋部の③層はレンズ状に粘性土層を挟みN値の分布に若干のばらつきがあるが、連絡誘導路部では③層が厚く、棧橋部に比べてN値40～50以上の地層が安定して連続している。

### 2-2 東京港臨海道路の地盤条件との比較

D 滑走路（棧橋部 F-1、連絡誘導路部 F-2）と東

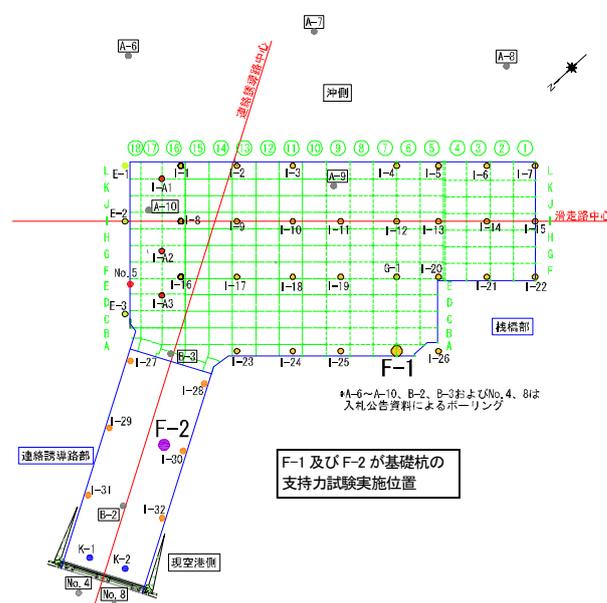


図 2-1 追加土質調査位置

表 2-1 土質調査内容

	接続部	棧橋部・連絡誘導路部			
	E-type	F-type	G-type	I-type	K-type
箇所	3	1+(1)	1	28	2
備考	サンプリング詳細調査	サンプリング詳細調査 杭載荷試験	サンディング 簡易調査 層序構成 杭強度確認 ①②層強度確認	サンプリング 簡易調査 盛砂の 液状化判定	

京港臨海道路の杭載荷試験位置の柱状図<sup>1)2)</sup>を図2-5に示す。東京港臨海道路では、東京礫層(Dg1)に根入れした杭(下端深度AP=73.5m)と江戸川砂層(Ds6)に根入れした杭(下端深度AP=86m)で載荷試験が行われている。N値の分布等から、これらはそれぞれD滑走路における④-G層(あるいは⑤-G層)、⑤-S層に相当すると考えられる。D滑走路のF-1ではAP=69.5mから、F-2ではAP=70.0mから東京砂層と思われるN値50以上の連続した層(④-S層)が出現している。

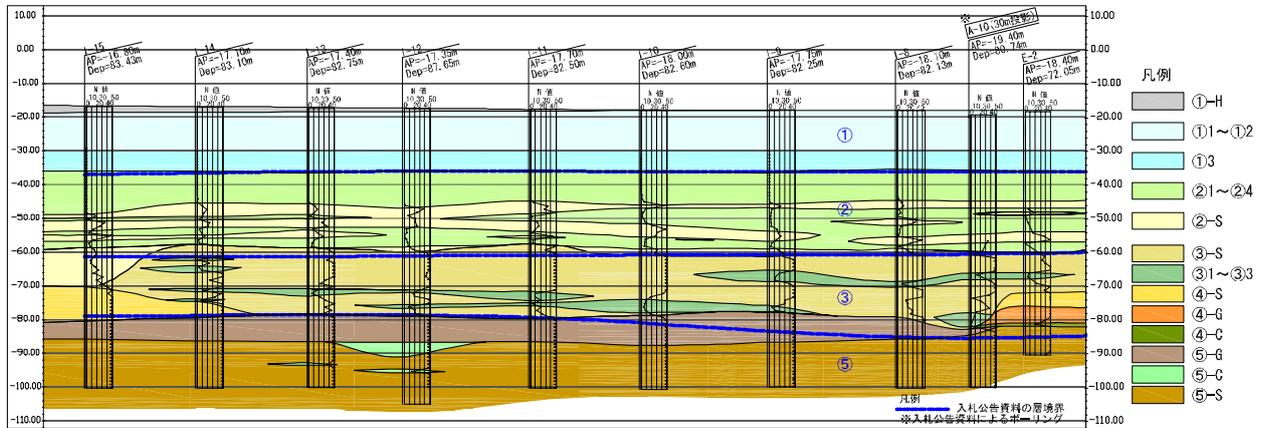


図2-2 地層構成図(滑走路中心断面)

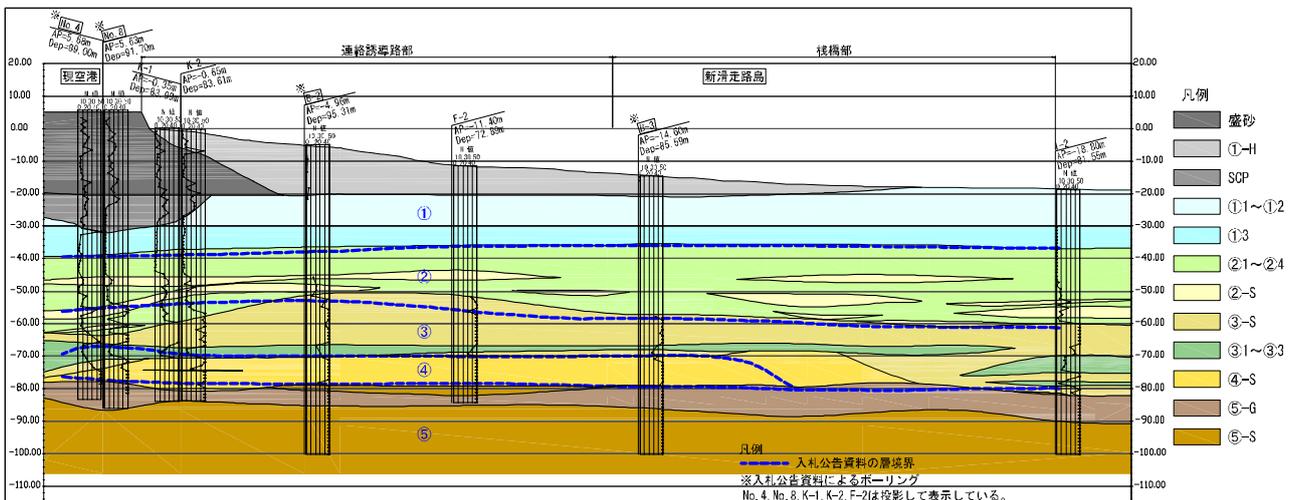


図2-3 地層構成図(連絡誘導路中心断面)

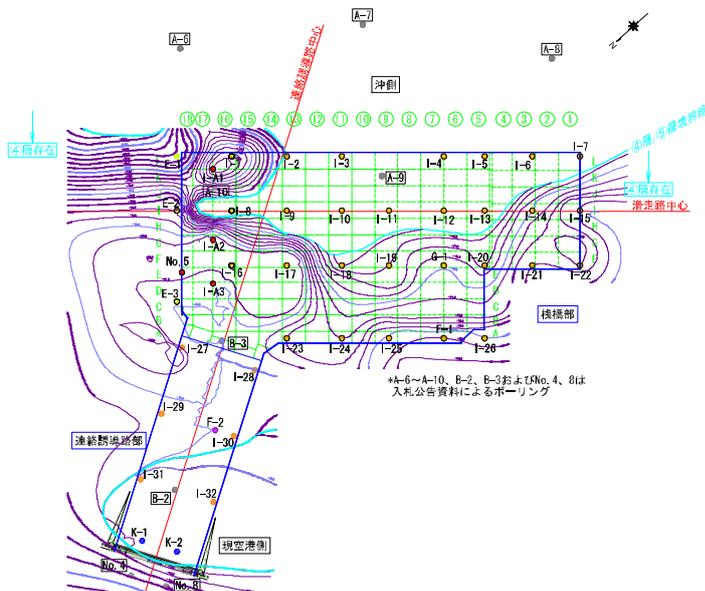


図2-4 ④層の天端レベルのコンター図

各土層の特徴は以下の通り。

【③層】

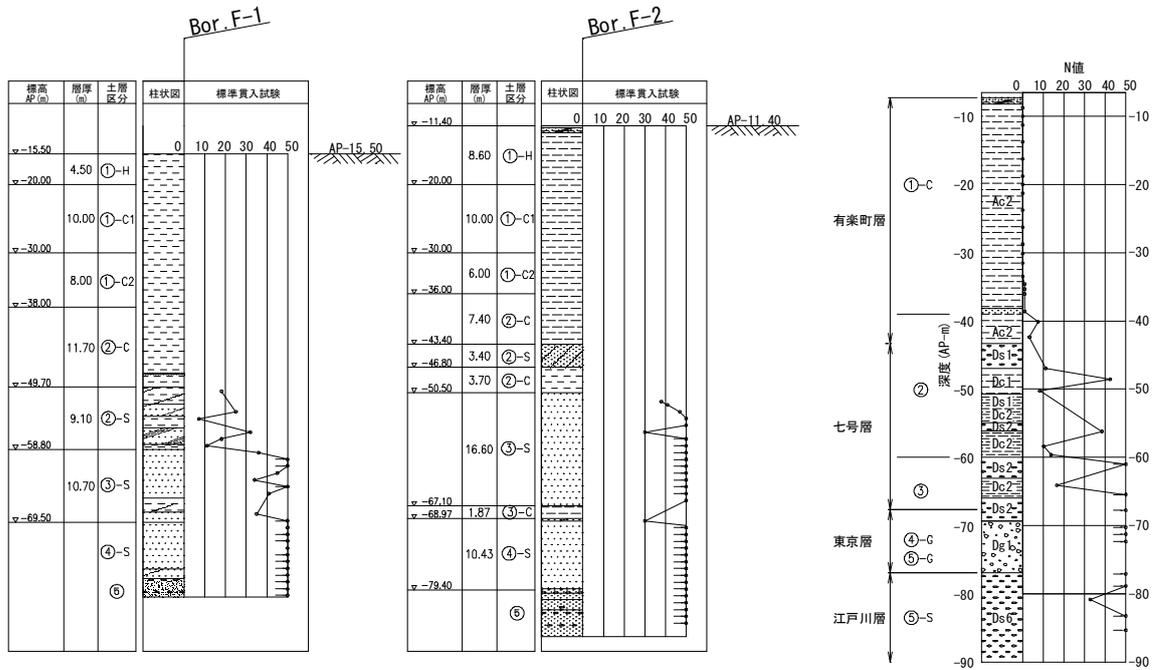
A.P.=50m~-75m 程度に分布する地層であり、砂礫・粘性土・砂質土の互層地盤である。N値 50 以上の箇所もあり、小規模構造物の支持層となり得る層である。③-S層のN値は概ね 30 程度以上が連続する。

【④層】

A.P.=70m~-95m 程度に分布する地層であり、一部小さなN値を有する粘土が挟在しているが、N値 50 以上の連続した層が存在し、中規模~大規模構造物の支持層となり得る層である。④-S層のN値は概ね 40 以上が連続する。

【⑤層】

A.P.=80m 程度以深に分布する地層であり、N値 50 以上の連続した層が存在し、大規模構造物の支持層になり得る層である。せん断波速度は、概ね 400m/s 以上である。



D滑走路試験位置 (F-1、F-2)

東京港臨海道路 杭載荷試験位置

図 2-5 D滑走路と東京港臨海道路の土質柱状図比較

### 3. 基礎杭の支持力試験の目的

基礎杭の支持力試験の目的と確認内容を表 3-1 に示す。

表 3-1 試験目的と確認内容

試験目的		確認内容	
1	支持力安全性の確認	鉛直	鉛直載荷試験により求まる支持力が、設計反力あるいは地盤から求まる確認支持力以上であることを確認する。載荷試験による支持力>確認支持力であれば支持力安全性が確保されると考える。
		水平	水平載荷試験により求まる地盤パネを適用した場合の各構造部位の発生応力の変化を確認することにより安全性を確認する。
2	設計の妥当性の確認	鉛直	鉛直載荷試験により求まる先端閉塞率 ( $\alpha$ ) と周面摩擦力度 ( $f$ ) を、実施設計で設定した支持力算定式の先端閉塞率 ( $\alpha=50\%$ ) と周面摩擦力度 ( $f=2N$ (砂質土)、 $c$ (粘性土)) と比較して設計の妥当性を確認する。
3	支持力管理式の設定	鉛直	基礎杭施工時に支持力の確認のために用いる支持力管理式を鉛直載荷試験結果から設定する。

### 4. 支持力試験の内容

#### 4-1 載荷試験数, 試験位置と試験杭仕様

載荷試験数と試験位置は、以下の通り地層構成、杭径、支持層および支持層の土質を考慮して決定した。

- ・地層構成：棧橋部と連絡誘導路部の地層構成は、追加土質調査の結果により比較すると、③層および④層の分布状況が異なっている。このため載荷試験は、棧橋部と連絡誘導路部のそれぞれで実施する。
- ・杭径：鋼管杭の先端閉塞率は大口径であるほど小さくなるため、安全側を考慮して棧橋部と連絡誘導路部のそれぞれで最大径の鋼管杭（棧橋部： $\phi 1,600$ 、連絡誘導路部： $\phi 1,422.4$ ）で試験する。
- ・杭の支持層：追加土質調査結果から杭の支持層は、棧橋部で④層、⑤層、連絡誘導路部で④層と考えられる。⑤層は④層より堅固な地盤であるため、④層で試験を実施して結果を⑤層に適用すれば安全側であると考えられる。
- ・支持層の土質：支持層の土質は砂と礫である。東京港臨海道路の杭径 $\phi 1,500$ に対する砂層と礫層の載荷

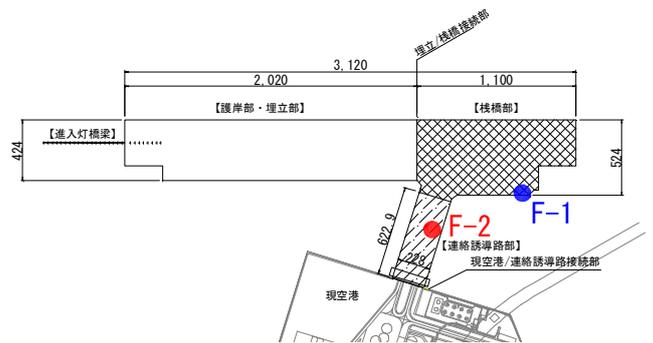


図 4-1 支持力試験位置図

試験結果では、砂層の先端閉塞率の方が礫層に比べて小さいという報告<sup>3)</sup>がなされている。(砂層 53%、礫層 74%)  
 このため、砂層で試験を実施して礫層に適用すれば安全側と考えられる。

以上より、載荷試験は栈橋部と連絡誘導路部のそれぞれで1箇所、最大径の杭を④層の砂層に打設して実施することにした。試験位置は栈橋部F-1と連絡誘導路部F-2で、図4-1の通りである。また、試験杭の配置を図4-2、写真4-1に、試験杭の仕様を表4-1に示す。杭の支持層への根入れ長は、実施設計の考え方に合わせて3D(D:杭径)とした。上杭の板厚および板厚変化点は急速載荷試験の載荷荷重により杭体に発生する応力度が短期許容応力度以内になるよう決定し、下杭の板厚は本杭と同様とした。

#### 4-2 地盤条件と計器取付位置

試験位置の地盤条件と試験で使用する計器の取付位置を図4-3に示す。また表4-2に土性値を示す。海底面より軟弱な粘性土層(①-H, ①-C, ②-C)が30m以上続き、その後、砂層(②-S)が出現する。比較的N値が大きな③-S層は、F-1に比べてF-2で層厚が厚くN値も大きくなっている。杭の支持層は④-S層以深である。試験に使用した計測機器は

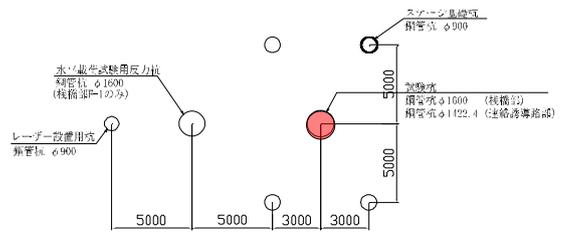


図4-2 試験杭配置図



写真4-1 試験杭打設状況

表4-1 試験杭の仕様

	分類	材質	杭径 (mm)	板厚 (mm)	杭長 (m)	杭先端レベル
F-1 栈橋部	上杭	SM490YA	1600	23	63.0	—
	下杭	SKK400	1600	18	16.3	—
	全長	—	—	—	79.3	AP-74.3m
F-2 連絡誘導路部	上杭	SM490YA	1422.4	22	69.0	—
	下杭	SKK400	1422.4	16	10.3	—
	全長	—	—	—	79.3	AP-74.3m

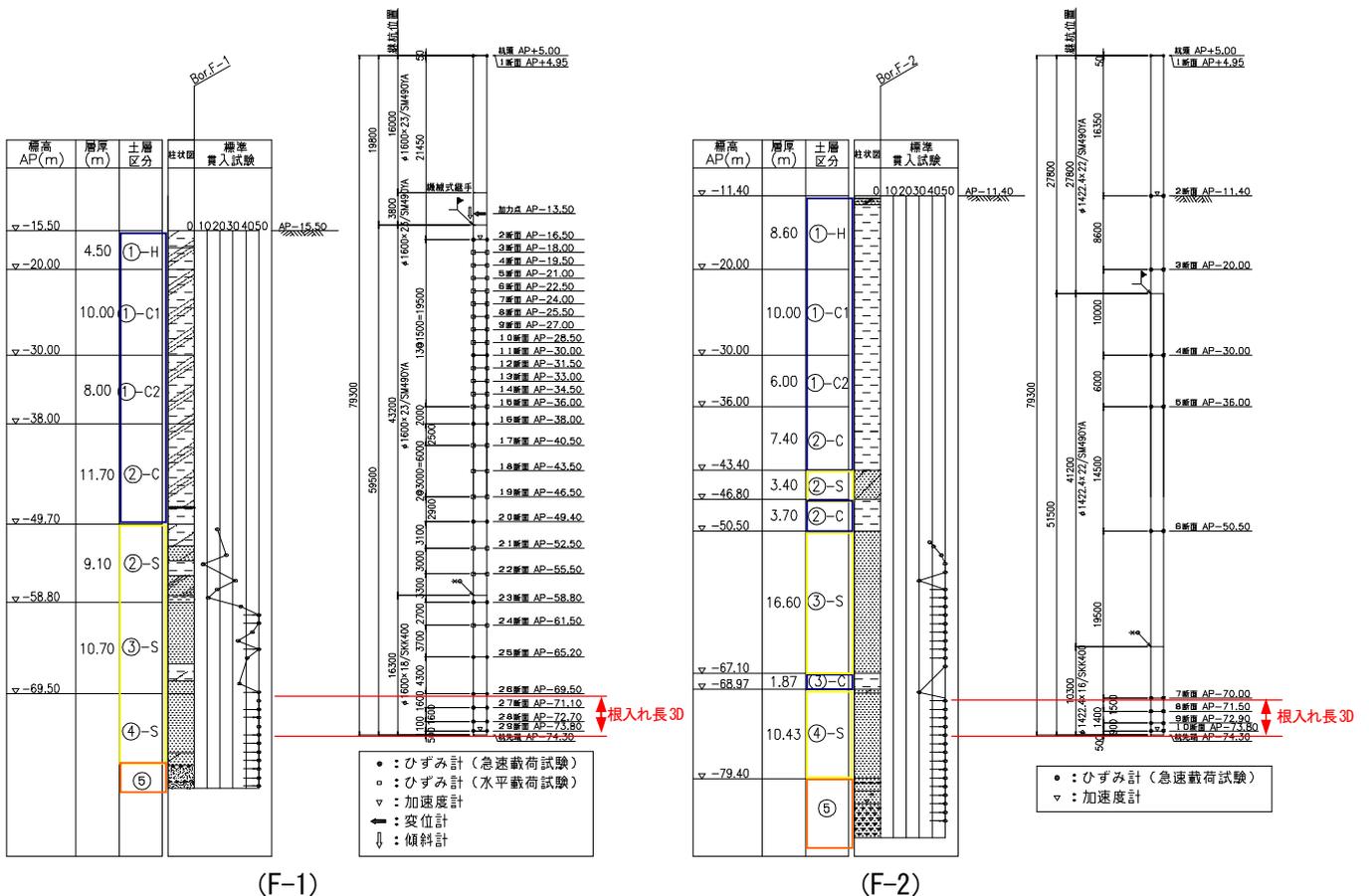


図4-3 試験位置の地盤条件と計器の取付位置

ひずみ計と加速度計であり、試験目的に応じて配置した。鉛直載荷試験用のひずみ計は周面摩擦力度を計測するために土層境界に設置し、さらに杭先端の周面摩擦力が先端閉塞率に関係することから、先端付近の周面摩擦力度の変化を詳細に把握するため杭先端部にはひずみ計を密に配置した。水平載荷試験の計測機器は地盤表層で密に、深くなるに従って疎になるよう配置している。

#### 4-3 実施した載荷試験の種類

鉛直載荷試験の試験種類および方法は、地盤工学会「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」<sup>4)</sup>および「杭の水平載荷試験方法・同解説」<sup>5)</sup>に準拠した。支持力確認を目的として杭の鉛直載荷

試験を行う場合、試験方法は押込み試験あるいは急速載荷試験を採用することが多い。海上で載荷試験を行う場合、急速載荷試験は反力装置が不要となる利点があるが、動的載荷試験に分類されるため、静的載荷試験に分類される押込み試験とは載荷荷重の性質が異なる。動的載荷試験は、ひずみ速度依存性などの変位速度に依存する地盤抵抗の動的効果や杭体の慣性力等を考慮する必要があり、静的載荷試験と異なって直接的に支持力を求めることができない。しかし、東京港臨海道路の載荷試験等により、急速載荷試験による支持力は押込み試験結果と整合していることが確認されていることから、本工事における鉛直載荷試験には急速載荷試験を採用することとした。また、打設中の杭体の挙動を計測して支持力管理式を作成するためのデータを取得することを目的に衝撃載荷試験も実施した。さらに、栈橋部 F-1 では試験杭と同径の反力杭を打設し、試験杭と反力杭の間にジャッキを設置して水平方向に加力する水平載荷試験も行った。表 4-3 に実施した試験種類と施工方法を示す。

#### 4-4 試験方法

##### (1) 急速載荷試験

急速載荷試験の方法は、東京港臨海道路で 35,000kN の実績があるスタナミック試験とした。スタナミック試験の概要を図 4-4 に、試験状況を写真 4-2 に示す。スタナミック試験は、杭頭に載せた反力マスを特殊な推進剤の燃焼ガス圧力により打ち上げ、その時に発生する慣性反力を杭頭に載荷する急速載荷試験方法で、大きな加速度で反力マスを打ち上げるため反力マスを小さくでき、反力杭が不要という利点がある。試験は海上にステージを設置して実施した。本試験の杭打設から急速載荷試験実施までの養生期間は、F-1 で 35 日、F-2 で 58 日となった。

##### (2) 衝撃載荷試験

衝撃載荷試験の概要を図 4-5 に示す。衝撃載荷試験は、荷重として杭頭にハンマーで打撃力を与え、その時の杭頭での発生応力、速度を求め、一次元波動理論に基づいて解析することにより、地盤の静的な貫入抵抗力を推定する載荷試験である。計測にはオランダ応用科学研究所建設工学研究所 (TNO) 製の試験システムを用いた。

表 4-2 各土層の土質定数

土層名	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	設計N値		粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	
			F-1	F-2	F-1	F-2
①-H	16.0	5.9	—	—	5.2	9.7
①-C1	13.5	3.4	—	—	17.0	26.3
①-C2	15.0	4.9	—	—	31.3	38.6
②-C	18.0	7.9	—	—	73.0	85.4
②-S	18.0	7.9	18	—	—	—
③-S	18.0	7.9	43	47	—	—
③-C	18.0	7.9	—	—	—	185.5
④-S	18.0	7.9	50	50	—	—

表 4-3 試験種類と施工方法

試験杭	杭径	試験種類*	確認項目	施工方法
栈橋部 F-1	φ1600	DLT, RLT, HLT	<ul style="list-style-type: none"> <li>・極限支持力の確認</li> <li>・④-S 層の先端支持力の確認</li> <li>・周面摩擦力の確認</li> <li>・地盤パネの確認 (F-1 のみ)</li> <li>・セットアップ率の確認</li> </ul>	打撃工法 船舶：550t 吊り杭打ち船 ハンマー：IHC-S280
連絡誘導路部 F-2	φ1422.4	DLT, RLT		

※) DLT：衝撃載荷試験，RLT：急速載荷試験，HLT：水平載荷試験

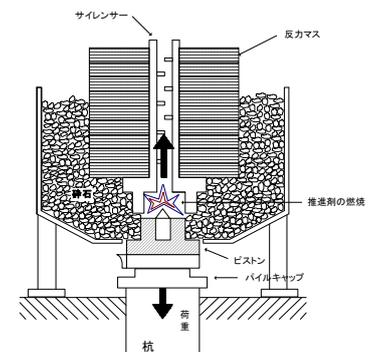


図 4-4 スタナミック試験概要



写真 4-2 スタナミック試験状況

### (3) 水平載荷試験

水平載荷試験の概要を図4-6に示す。反力杭方式で一方向多サイクル方式の載荷とした。加力装置は2500kNの油圧ジャッキを1台用いた。計画最大変位は、地盤バネを確認するために杭の仮想固定点位置 AP-26m（地表面下  $1/\beta$  の位置）で地盤が降伏（杭径  $\phi 1,600$  の1%以上）する変位以上とし、また、東京港臨海道路の試験実績（ $\phi 1,500$  の鋼管杭を加力点位置で250mm変形）<sup>6)</sup>を考慮して地盤の大変形を再現できる  $\delta_{max} = 250\text{mm}$  と設定した。水平載荷試験は海上で試験を実施した場合、突出長が長くなり海底面付近で大きなモーメントが発生して試験目的を達成する前に試験杭に発生する応力度が許容応力度を越える可能性がある。このため、加力点は海底面から2.0m上りとした。

#### 4-5 確認支持力と載荷荷重

確認支持力は、設計反力に安全率を考慮して極限支持力レベルとした値あるいは地盤から求まる設計の極限支持力とする。急速載荷試験は動的載荷試験で、地盤抵抗の動的効果等により発生する動的抵抗を確認支持力に考慮して載荷荷重を決める必要がある。急速載荷試験の鋼管杭の実績を整理した結果<sup>4)</sup>、確認支持力は載荷荷重の90%であった。このため、載荷荷重は確認支持力の1.1倍以上とした。また、F-1では確実に極限支持力を確認できるように、試験装置の限界の載荷荷重とした。表4-4に確認支持力と載荷荷重を示す。

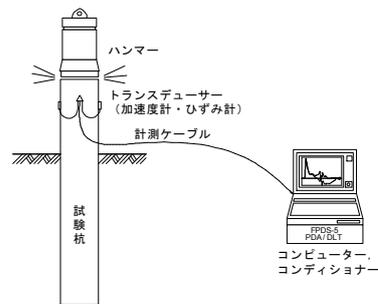


図4-5 衝撃載荷試験概要

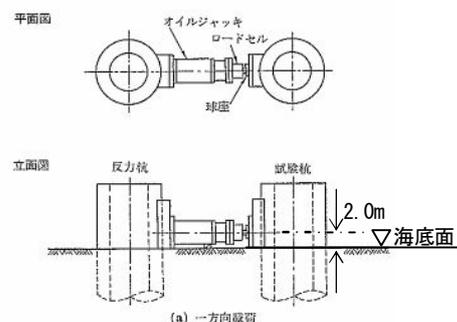


図4-6 水平載荷試験概要

表4-4 確認支持力と載荷荷重

	確認支持力	載荷荷重
栈橋部 F-1	27,269 kN	38,000 kN
連絡誘導路部 F-2	22,967 kN	30,000 kN

### 5. 急速載荷試験結果

#### 5-1 試験結果

##### (1) 波形マッチング解析

急速載荷試験結果から静的な支持力を求めるには、試験結果を解析して動的抵抗成分を除く必要がある。解析方法には、除荷点法解析、波形マッチング解析がある。除荷点法解析は杭を剛体と仮定した解析方法で、波形マッチング解析は杭を弾性体として波動現象を考慮できる解析方法である。相対載荷時間 ( $Tr = t_L / (2L/c)$ ):  $t_L$  は載荷時間で本試験では0.1秒,  $L$  は杭長,  $c$  は縦波伝播速度で5,120m/s) は載荷時間の長さを表し、相対載

表5-1 波形マッチング解析結果 (栈橋部 F-1)

土層	層厚 (m)	クレーク (mm)	ハネ定数 (kN/m <sup>3</sup> )	減衰定数 (kNs/m <sup>3</sup> )	周面摩擦抵抗力(kN/m <sup>2</sup> )			周面摩擦抵抗 (kN)
					解析値	初期値*	周面摩擦抵抗力度	
①-H ①-C1	14.5	0	0	0	20.2	20.2	1,471	
①-C2 ②-C	19.4	15	4667	16	70	3.3	7,148	
②-S	9.4	15	3333	25	50	2.0	2,457	
③-S	6.4	15	8000	30	121	6.1	4,057	
	4.3	15	8000	30	120	10.0	2,810	
④-S	1.6	15	8000	30	120	0.3	968	
	1.6	15	8667	30	130	5.3	1,088	
	1.1	15	8667	30	130	9.2	770	
	0.5	15	8667	30	130	22.9	384	
計	58.8				周面摩擦力合計			21,153
先端	35	2,574,429	6,000	先端抵抗力度(kN/m <sup>2</sup> )			先端抵抗 (kN)	
				解析値	初期値	先端抵抗力度		
				90,105	0	90,105		12,164
合計							33,317	

※) 初期値: 初期荷重 (試験装置が組みあがった時点の載荷荷重) 状態における値

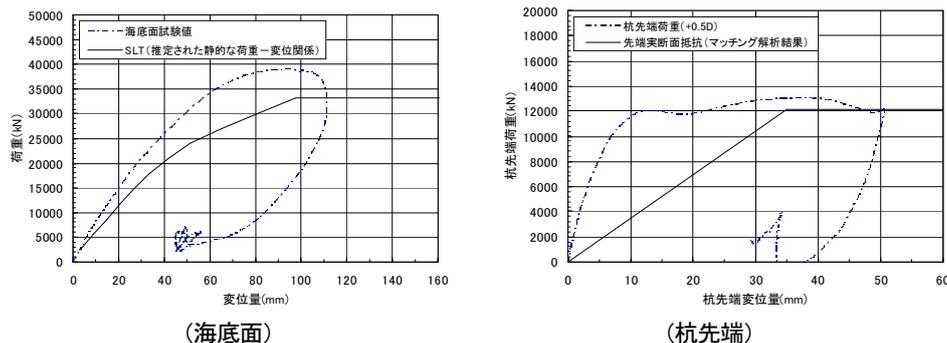


図5-1 静的荷重—変位量関係 (栈橋部 F-1)

荷時間 (Tr) が5以下になると杭体の波動現象等による載荷試験への影響が避けられなくなるが、本試験は試験杭が長く (F-1, F-2 とも 79.3m)、相対載荷時間が  $Tr=3.2 (=0.1/(2 \times 79.3/5, 120))$  となる。このため、本試験の解析は波動現象を考慮できる波形マッチング解析により実施した。波形マッチング解析の結果を表 5-1, 5-2 に示す。急速載荷試験で確認された支持力は、棧橋部 F-1 が 33,317kN、連絡誘導路部 F-2 が 32,242kN である。また、海底面および杭先端の静的荷重-変位量関係を図 5-1、図 5-2 に示す。荷重-変位量関係より、F-1 は杭先端の最大変位量が約 50mm で地盤が降伏する挙動がみられる。一方、F-2 は杭先端の最大変位量は約 8mm と小さく弾性挙動をしていると考えられる。

表 5-2 波形マッチング解析結果 (連絡誘導路 F-2)

土層	層厚 (m)	クエーク (mm)	パネ定数 (kN/m <sup>3</sup> )	減衰定数 (kNs/m <sup>3</sup> )	周面摩擦抵抗力度(kN/m <sup>2</sup> )			周面摩擦抵抗 (kN)
					解析値	初期値※	周面摩擦抵抗力度	
①-H	8.55	15	2,000	2	30	1.3	31.3	1,196
①-C1	10.3	15	2,333	2	35	1.1	36.1	1,661
①-C2	5.75	15	2,667	2	40	3.3	43.3	1,112
②-C	14.6	5	3,333	2	50	10.3	60.3	3,932
③-S	19.5	5	36,000	3	180	11.1	191.1	16,647
③-C								
④-S	1.5	5	40,000	3	200	14.2	214.2	1,435
	1.4	5	56,000	3	280	5.2	285.2	1,784
	0.9	5	54,000	3	270	1.0	271.0	1,090
	0.5	5	54,000	3	270	3.0	273.0	610
計	63.0				周面摩擦力合計			29,467
先端	4	6,250,000	500	先端抵抗力度(kN/m <sup>2</sup> )			先端抵抗 (kN)	
				解析値	初期値	先端抵抗力度		
				25,000	0	25,000		2,775
合計								32,242

※) 初期値: 初期荷重 (試験装置が組みあがった時点の載荷荷重) 状態における値

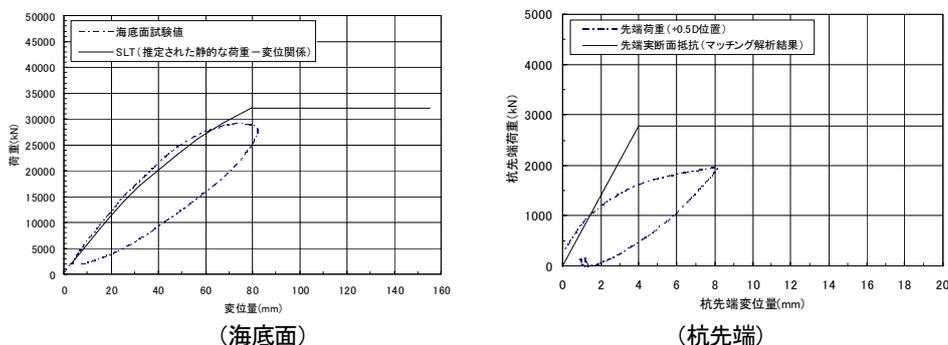


図 5-2 静的荷重-変位量関係 (連絡誘導路部 F-2)

## (2) 極限支持力の推定

計画した最大荷重まで載荷しても地盤の降伏がみられない場合は、港湾基準<sup>7)</sup>より以下の通り極限支持力を推定した。

- ・荷重-沈下曲線から第一限界抵抗 (降伏荷重) が求まる場合は、第一限界抵抗の 1.2 倍を第二限界抵抗 (極限支持力) とする。
- ・地盤の降伏が生じなかった場合は、試験最大荷重の 1.2 倍を第二限界抵抗 (極限支持力) とする。

図 5-1 に示した通り、F-1 は地盤が降伏していると考えられるため、試験で確認された支持力 ( $R_u=33,317$  kN) を極限支持力とする。一方、図 5-2 に示した通り、F-2 は地盤が降伏していないと考えられるため、試験で確認された支持力の 1.2 倍を極限支持力 ( $R_u=1.2 \times 32,242=38,690$  kN) とする。

なお、極限支持力の推定による支持力増分 (1.2 倍の分) は、③、④層の周面摩擦力度 ( $f_i=191$  kN/m<sup>2</sup>~) が比較的大きく摩擦抵抗は十分に発揮していると考えられること、杭先端の変位量が小さく先端抵抗は十分に発揮していないと考えられることから、先端支持力分と考えられる。よって、F-2 の先端支持力の寄与分は以下の通りとなる。

## F-2 の先端支持力の寄与分

$$\Delta R_{tip} = 38,690 - 32,242 = 6,448 \text{ kN}$$

### (3) 先端支持力の推定

大口径鋼管杭の先端支持力は、杭先端の実断面積による抵抗と杭内周面摩擦力の合計と考えられている。

載荷試験において周面摩擦力度は土層境界に取り付けたひずみ計によって得られ、杭内外の周面摩擦力が一体で求まるため、杭内周面摩擦力を分離することができない。よって、波形マッチング解析により得られる先端支持力の大部分が、杭先端の実断面積による抵抗に相当すると考えられる。杭の先端閉塞率を求める場合、杭内周面摩擦力を推定する必要がある。

東京港臨海道路では、押込み試験、急速載荷試験、コーン貫入試験等の結果を元に、杭内周面摩擦力の大きさや作用範囲について詳細な検討を行っている。東京港臨海道路の押込み試験結果では、図 5-3 に示すように支持層内で杭先端の軸力が減少する挙動が見られた<sup>3)</sup>。このように、同一層内で、周面摩擦力度が大きく変わっているのは、内周面摩擦力が寄与しているためと考えられ、試験後に行われた杭内のコーン貫入試験により杭先端付近で大きい貫入抵抗を確認したことが報告されている<sup>8)</sup>。この結果を受けて、内周面摩擦力の作用範囲は図 5-3 のように軸力が減少する深度で深とし、軸力の減少分を内周面摩擦力とした。

以下に、東京港臨海道路の考え方に合わせて検討した内周面摩擦力の大きさを示す。軸力分布を図 5-4 に、杭先端付近の軸力分布を図 5-5 に示す。F-1 の杭先端で軸力が減少するような挙動は見られなかったが、F-2 では杭先端の軸力の減少が見られた。このことから先端支持力は、F-1 で波形マッチング解析から得られた値(12,164kN)とし、F-2 で波形マッチング解析結果に杭内周面摩擦力を足し合わせた値とする。F-2 の杭内周面摩擦力は、軸力の減少が見られる支持層内を内周面摩擦力の作用範囲と考えて算定する。F-2 の③-S 層の周面摩擦力度は 191.1kN/m<sup>2</sup> で、F-1 の④-S 層の 133.0kN/m<sup>2</sup> (平均値) と比べて大きい。F-2 の③-S 層は、換算 N 値の大きさや衝撃載荷試験結果から④-S 層と同等の周面摩擦抵抗があると考えられる。このことから、F-2 の④-S 層の杭外周面摩擦力度を③-S 層と同等と考えた。杭内周面摩擦力は、波形マッチング解析結果から、この杭外周面摩擦力度分を差し引いた値とする。結果を表 5-3 に示す。杭内周面摩擦力の算定結果は、1,248kN となり、外周面の 12~50%程度であった。極限支持力による推定分も含めた先端支持力は次

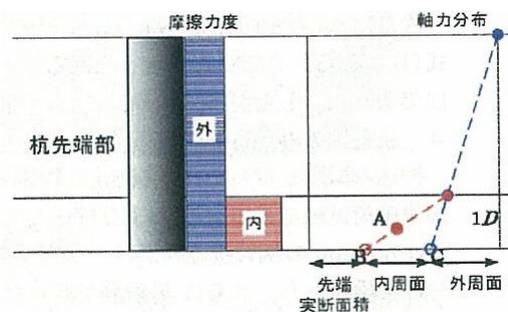


図 5-3 軸力分布と摩擦の関係

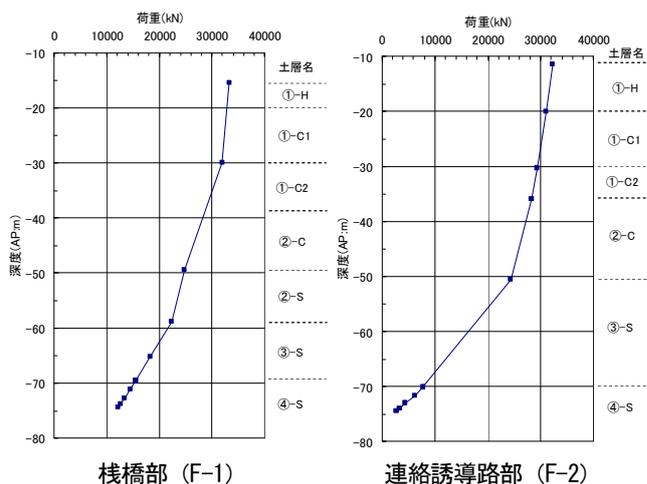


図 5-4 杭の軸力分布

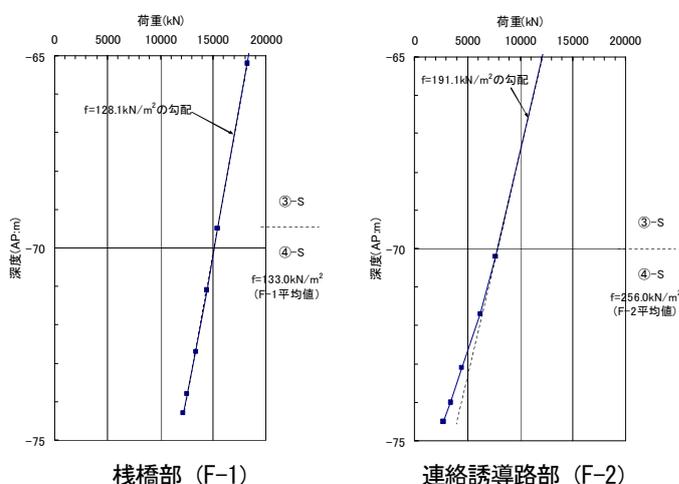


図 5-5 杭先端付近の軸力分布

表 5-3 内周面摩擦力の分離結果

土層	層厚 (m)	周面摩擦力度 (kN/m <sup>2</sup> )			内周面 摩擦力 (kN)
		波形マッチング 解析	外周面	内周面	
支持層 (④-S)	1.5	214.2	191.1	23.1	154
	1.4	285.2	191.1	94.1	589
	0.9	271.0	191.1	79.9	322
	0.5	273.0	191.1	81.9	183
合計	4.3	—	—	—	1,248

の結果は、1,248kN となり、外周面の 12~50%程度であった。極限支持力による推定分も含めた先端支持力は次

の通りとなる。

$$2,775 \text{ (波形マッチング解析結果)} + 1,248 \text{ (杭内周面摩擦力)} = 4,023 \text{ kN}$$

$$F-2 \text{ の先端支持力 } R_{tip} = 4,023 + 6,448 = 10,471 \text{ kN}$$

### 5-2 支持力安全性の確認

急速载荷試験で確認された支持力は、F-1 が 33,317kN、F-2 が 32,242kN で、以下の通り、確認支持力（極限支持力レベル）を満足し、④層の支持力安全性を確認することができた。

$$F-1 : \text{ 载荷試験結果 } R_u = 33,317\text{kN} > \text{ 確認支持力 } R = 27,269\text{kN} \cdot \cdot \cdot \text{ OK}$$

$$F-2 : \text{ 载荷試験結果 } R_u = 32,242\text{kN} > \text{ 確認支持力 } R = 22,967\text{kN} \cdot \cdot \cdot \text{ OK}$$

（なお、F-2 の極限支持力（推定値）は、载荷試験で地盤が降伏しなかったため 38,690kN となる。）

### 5-3 設計の妥当性の確認

#### (1) 先端閉塞率

支持力試験による棧橋部 F-1 と連絡誘導路部 F-2 の杭の先端閉塞率（みかけの閉塞率）を表 5-4 に示す。

表 5-4 支持力試験による先端閉塞率

	羽田D滑走路		東京港臨海道路		
	棧橋部 F-1	連絡誘導路 F-2	試験杭③	試験杭④	試験杭⑤
杭径	φ1600	φ1422.4	φ1200	φ1500	φ1500
土質	砂層 (④層)	砂層 (④層)	礫層 (⑤層)	礫層 (⑤層)	砂層 (⑤層)
支持層への根入れ長	3D (4.8m)	3D (4.3m)	3D (3.6m)	3D (4.5m)	3D (4.5m)
先端支持力 (α=100%)	24,127kN	19,068kN	13,560kN	21,204kN	21,204kN
先端支持力 (試験値)	12,164kN	10,471kN	10,800kN	15,700kN	11,300kN
杭先端閉塞率 (α)	50.4%	54.9%	80%	74%	53%

先端閉塞率（みかけの閉塞率）は、载荷試験で得られた先端支持力を  $300 \cdot N \cdot A_p$  ( $N : N$  値で本試験では  $N=40$ ,  $A_p$  : 杭断面積) で除した値である。東京港臨海道路の結果<sup>3)9)</sup>も併せて示した。F-1, F-2 の試験から得られた先端閉塞率は、実施設計で設定した  $\alpha = 50\%$  を満足した。

図 5-6 は、東京湾横断道路 (TTB) と東京港臨海道路の载荷試験結果より得られたみかけの閉塞率と杭径の関係<sup>3)</sup>に、D滑走路の結果をプロットしたものである。D滑走路の結果は、東京港臨海道路の砂層で得られたみかけの閉塞率と同様の傾向となった。

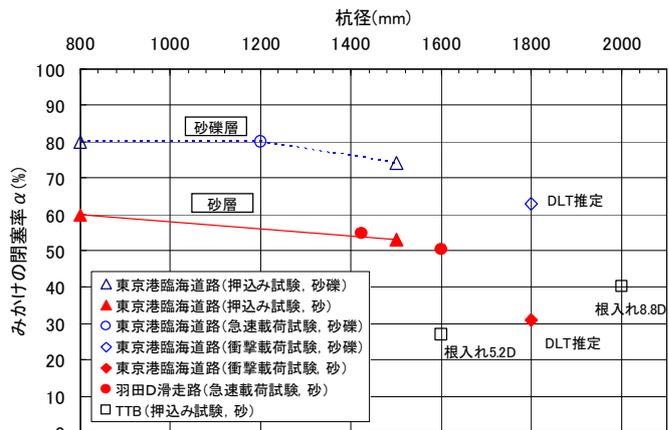


図 5-6 みかけの閉塞率と杭径の関係

#### (2) 周面摩擦力度

载荷試験より得られた周面摩擦力度を  $N$  値および粘着力  $C$  と関連付けて整理した。東京港臨海道路の試験結果<sup>10)</sup>と併せて表 5-5 に示す。

表 5-5 周面摩擦力度の比較結果

土層名	羽田D滑走路		東京港臨海道路		
	棧橋部 F-1	連絡誘導路部 F-2	試験杭③	試験杭④	試験杭⑤
	急速载荷試験	急速载荷試験	急速载荷試験	押し込み試験	押し込み試験
①-H	1.5C	3.2C	—	—	—
①-C1		1.4C	—	—	—
①-C2	1.3C	1.1C	—	—	—
②-C		0.7C	1.0C	(100kN/m <sup>2</sup> )	(100kN/m <sup>2</sup> )
②-S	2.9N	—	2.6N~3.3N (平均 3.0N)	1.9N~2.0N (平均 2.0N)	2.7N~5.6N (平均 3.7N)
③-S	2.9N~3.0N (平均 2.9N)	4.0N	3.9N~5.0N (平均 4.5N)	1.7N~5.4N (平均 3.6N)	2.7N~3.1N (平均 2.9N)
④-S	2.4N~3.1N (平均 2.7N)	3.8N	— (④層なし)	— (④層なし)	— (④層なし)

※)  $N$  値は、設計  $N$  値 ( $\leq 50$ ) による

東京港臨海道路の②-C層の摩擦力度は、100kN/m<sup>2</sup> と仮定している。

・砂質土層

②-S 層： 載荷試験の結果、設計値 (2.0N) 以上の周面摩擦力度が得られている。F-1 の結果は東京港臨海道路の結果と整合している。

③-S 層： 載荷試験の結果、設計値 (2.0N) 以上の周面摩擦力度が得られている。F-1, F-2 の結果は東京港臨海道路の結果と整合している。

④-S 層： 載荷試験の結果、設計値 (2.0N) 以上の周面摩擦力度が得られている。

・粘性土層

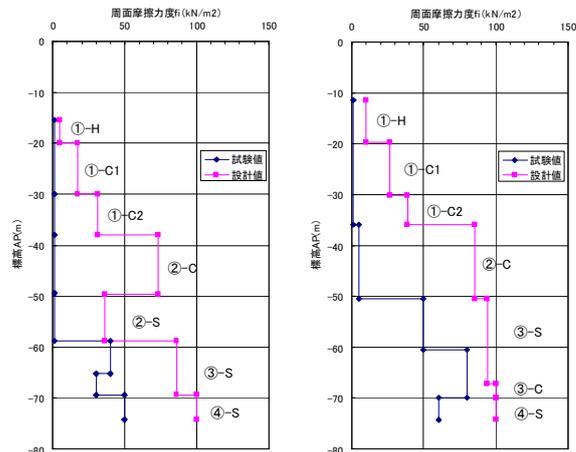
載荷試験の結果、F-1 で設計値 (1.0C) 以上の周面摩擦力度が得られている。F-2 は一部で設計値より小さい値となったが、粘性土全体で評価すると約 1.0C となり設計値と同等となった。以上より、周面摩擦力度についても、設計値が妥当であることを確認した。

6. 衝撃載荷試験結果

衝撃載荷試験は、ハンマーで杭に打撃を与える試験方法で、載荷時間が短く杭体の波動現象を無視できないため、波形マッチング解析による解析を行う。表 6-1 に打止め時の衝撃載荷試験結果を示す。本試験で油圧ハンマーは IHC-S280 を用いた。F-2 の杭先端の静的抵抗成分が小さいのは、図 6-1 に示す通り F-2 施工時の周面摩擦力度が大きく打撃エネルギーが杭先端まで伝わらなかったためである。

表 6-1 衝撃載荷試験結果

杭 No.	栈橋部 F-1	連絡誘導路部 F-2	
Blow No.	2893	6958	
試験日	2007/4/11	2007/4/23	
杭先端地盤	④-S	④-S	
杭先端深度 A. P. (m)	-74.30	-74.30	
根入長 (m)	57.80	62.90	
貫入量 (mm)	3.6	0.9	
打撃エネルギー (kN・m)	139	164	
伝達エネルギー (kN・m)	90	80	
ハンマー効率	0.65	0.49	
全抵抗 (kN)	14,920	13,540	
静的抵抗成分 (kN)	周面	3,355	7,238
	先端	4,858	3
	合計	8,213	7,241



栈橋部 (F-1) 連絡誘導路部 (F-2)  
図 6-1 施工時の周面摩擦力度

7. 水平載荷試験結果

7-1 試験結果

加力点位置の荷重-変位置関係を図 7-1 に示す。水平荷重はジャッキに取付けたロードセル、変位置はダイヤルゲージの読み値である。水平荷重は 5 サイクルで、最大変位置  $\delta_{max} = 250\text{mm}$  まで載荷した。

杭体に取り付けたひずみ計の結果から、杭の深度方向の水平変位、曲げモーメント、地盤反力を求めたものを図 7-2 に示す。杭の水平変位は、①-C 層と②-C 層の境界にあたる GL-20m 付近で概ね 0 となっている。

実施設計では、港研方式の杭軸直角方向の地盤バネ (C 型地盤) を用いている。試験結果より、杭の深度方向の横抵抗定数  $k_c$  および地盤バネ (地盤反力と水平変位の関係) を求め、実施設計値と比較した結果を図 7-3 および図 7-4 に示す。横抵抗係数  $k_c$  は実施設計と比較して、海底面付近で小さく、深くなるに従って大きくなり、0.6~1.5 倍程度となっている。

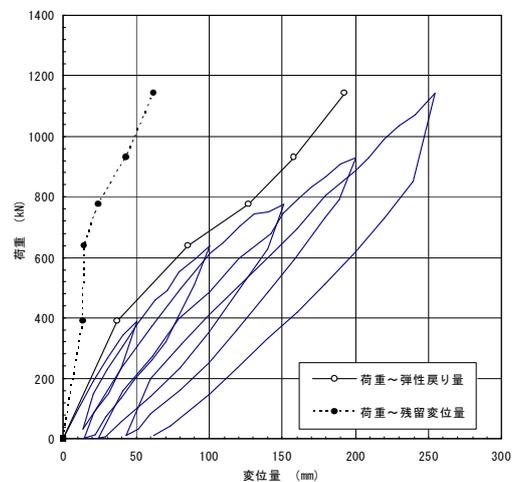


図 7-1 水平載荷試験における荷重-水平変位置 (加力点位置)

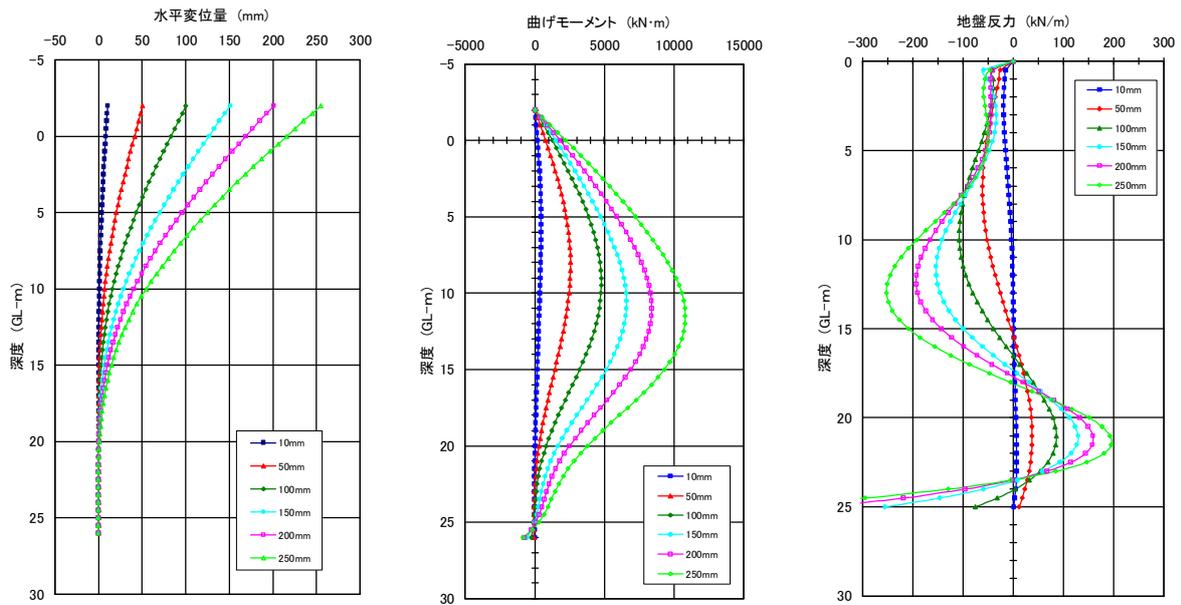


図 7-2 水平載荷試験による水平変位量, 曲げモーメント, 地盤反力の深度分布 (栈橋部 F-1)

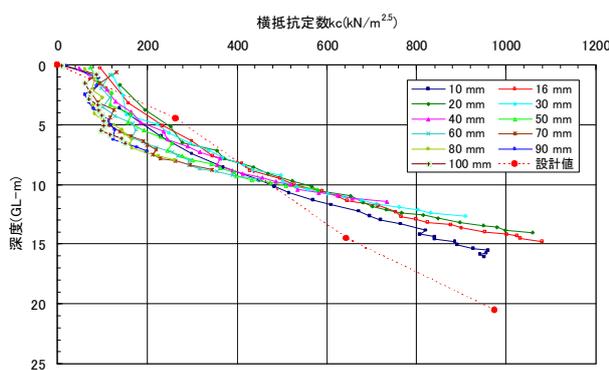


図 7-3 横抵抗定数  $k_c$  の深度分布

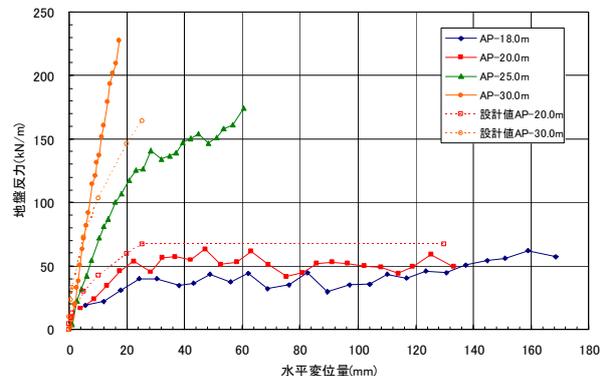


図 7-4 地盤反力-水平変位量の関係

地盤バネの試験結果は、実施設計の値と比較的よく一致している。

### 7-2 支持力安全性の確認

水平支持に関して、横抵抗定数  $k_c$  が実施設計の 0.6 倍と 1.5 倍になった場合の影響度を求め、構造物の安全性を確認する。栈橋各部の発生応力度への影響度を表 7-1 に示す。横抵抗係数  $k_c$  が 1.5 倍にな

っても各部位の応力に与える影響は 10%程度と小さい。図 7-3 より、横抵抗に寄与する海底面付近の横抵抗定数  $k_c$  が小さいため、全体として地盤バネ値は実施設計値より小さくなると思われる。このため、栈橋各部の発生応力度は実施設計より小さくなる傾向にある。変形 (=プッシュオーバー) に対しては、応力影響よりも影響度が小さく問題はない。以上より、水平支持に関する安全性を確認した。

表 7-1 栈橋各部の発生応力度への影響度

部位	発生応力度の比率 (実施設計を 1.0 とした場合の比率)	
	$k_c$ が 0.6 倍	$k_c$ が 1.5 倍
杭	0.94	0.99
レグ	0.88	1.04
ブレース	0.96	1.00
上部桁	0.88	1.02

### 8. 支持力管理式の設定

栈橋部及び連絡誘導路部の基礎杭は、それぞれ支持層に 3D 根入れすることにより所要の支持力が確保できることが確認されたことから、施工管理においては支持層への根入れ長 3D を管理することが基本となる。これに加えて、載荷試験結果を基に設定した支持力管理式による支持力の管理も行う。支持力管理式の作成フローを図 8-1 に示す。支持力管理式は、Hiley の簡略式を基にした先端抵抗力に、載荷試験結果による周

面摩擦力を組み合わせた式とした。 $R_s$ は極限支持力に相当する。

$$R_s = e \times \frac{Eh}{S} \times C_f \times S_r \times S_t + \sum f_s$$

先端抵抗力
周面摩擦力

ここに、

- $R_s$  : 静的抵抗力 (支持力)
- $e$  : ハンマー効率
- $Eh$  : ハンマーエネルギー
- $S$  : 貫入量
- $C_f$  : 換算係数
- $S_r$  : 先端静的抵抗比
- $S_t$  : 先端支持力のセットアップ率
- $\sum f_s$  : 地盤回復後の急速载荷試験結果より求めた周面摩擦力の合計

F-1 の载荷試験結果を用いて作成した杭径  $\phi 1,600$  の杭を④-S層に打ち止める場合の支

持力管理式の例を表 8-1 に示す。設定した支持力管理式により施工時の各杭の支持力を算定して、基礎杭の品質を確保する。

### 9. おわりに

本報告では、D滑走路の基礎杭の支持力試験結果と設計の妥当性について述べた。本試験により大口径鋼管杭の支持力に関する貴重なデータを得ることができた。今後、棧橋部および連絡誘導路部の基礎杭の打設が始まるが、作成した支持力管理式の活用と施工データの蓄積により基礎杭の品質を確実に確保していく考えである。今後とも関係各位のご指導・ご協力を賜りますようお願い申し上げます。

### 参考文献

- 1)千葉、日下部、菊池、福井、下司、佐々木、才村:東京港臨海道路における载荷試験の概要,第40回地盤工学研究発表会,2005
- 2)菊池、日下部、福井、下司、佐々木、才村、西村、酒井:東京港臨海道路载荷試験に伴う地盤調査概要,第40回地盤工学研究発表会,2005
- 3)才村、日下部、菊池、福井、佐々木、下司:東京港臨海道路における大口径鋼管杭の鉛直支持力,第40回地盤工学研究発表会,2005
- 4)社地盤工学会:杭の鉛直载荷試験方法・同解説(第一回改訂版),平成14年5月
- 5)社土質工学会:杭の水平载荷試験方法・同解説,昭和58年10月
- 6)名嘉、日下部、菊池、福井、佐々木、下司、山下、高野:東京港臨海道路における大口径鋼管杭の水平载荷試験,第40回地盤工学研究発表会,2005
- 7)社日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻),平成11年4月
- 8)西村、日下部、菊池、福井、佐々木、下司、才村:東京港臨海道路におけるコーン貫入試験,第40回地盤工学研究発表会,2005
- 9)児島、日下部、菊池、福井、佐々木、下司、山下:東京港臨海道路における急速载荷試験,第40回地盤工学研究発表会,2005
- 10)関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所:平成16年度東京港臨海道路地盤検討調査,2005.3

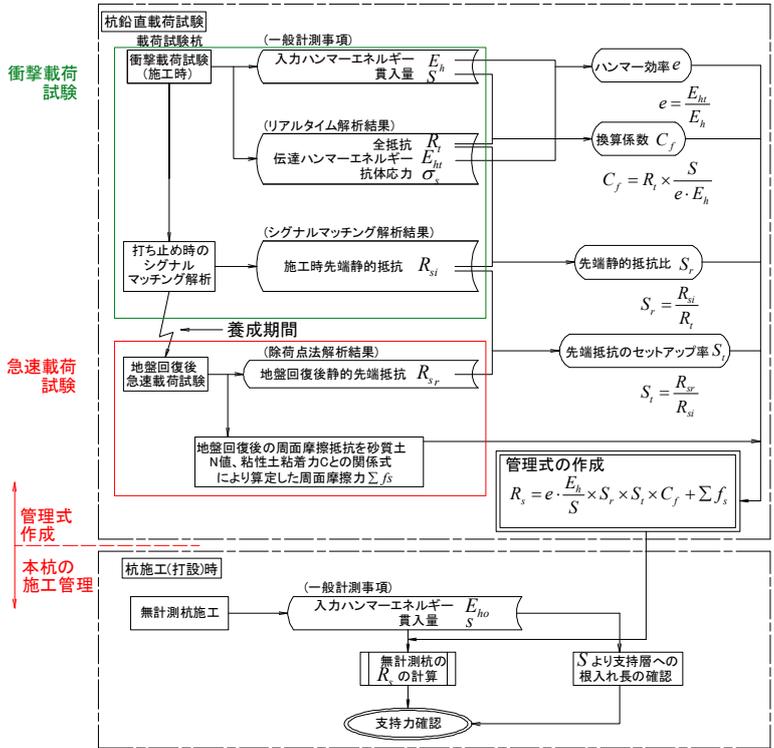


図 8-1 支持力管理式の作成フロー

表 8-1 支持力管理式 ( $\phi 1,600$ 、④-S)

	F-1 試験結果
杭径	$\phi 1600$
地盤	砂層(④-S)
Eh(kN·m)	139
S(mm)	3.6
Rt(kN)	14,920
Eht(kN·m)	90
Rsi(kN)	4,858 (先端のみ)
ハンマー効率 e	0.65
換算係数 Cf	0.59 (= 14,920 × (0.0036 / (0.65 × 139)))
静的抵抗比 Sr	0.33 (= 4,858 / 14,920)
セットアップ率 St	2.5 (先端分) (= 12,164 / 4,858)
支持力管理式	$R_s = 0.32 \times Eh / S + \sum f_s$