
8 万 DWT 級の船舶を対象とする製品岸壁の建設

Construction of New Products-Berth for 80000 DWT Vessels

鋌持 叡 (Satoru Kenmochi) 木村 保 (Tamotsu Kimura) 奥村 一郎 (Ichiro Okumura)

要旨：

鉄鋼製品を輸出する船舶の大型化に対応して、千葉製鉄所に大型製品岸壁の建設を行った。当岸壁は、鉄鋼製品を取扱う、延長 300 m、計画水深 15.5 m の鋼管杭に支持された棚式横棧橋である。最大対象船舶は 80000 DWT で、1985 年 10 月に完成した。浚渫工、鋼管杭打設工など各工種で現場の情報に基づいた施工管理を実施し、例えば浚渫工では傾斜計を用いて既存のケーソン護岸の挙動を計測しながら施工した。重防食鋼管杭(KPP パイル)、新しい臨海杭打(KST)工法、波動方程式を用いた支持力管理など新しい技術を導入することによって、岸壁の軽量化、施工効率の向上、杭打設精度の向上、杭支持力管理技術の向上を図ることができた。

Synopsis：

A new products-berth was designed to accommodate vessels up to 80000 DWT, thus providing cost savings in ocean freight charges. In Chiba Works the design of the new products-berth was an absolute necessity, in order to utilize the cargo handling equipment and techniques more effectively and economically. The berth is a quay-type wharf structure supported on steel pipe piles. A structure 300-m long and 41-m wide was designed, with a dredge depth of -15.5 m. In this project, each work of dredging and pile installation was completed by using measuring systems. For example, it was necessary to monitor potential movement of the existing concrete-caisson sea wall. This project has three innovative technological features; the KST cantilevered pile driving system for marine structures, polyethylene film coated steel pipe piles, and pile driving control using the wave equation.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Construction of New Products-Berth for 80 000 DWT Vessels



剣持 徹
Satoru Kenmochi
千葉製鉄所 土建部土
建工事課 課長



木村 保
Tamotsu Kimura
千葉製鉄所 土建部土
建技術室 主査(課長)



奥村 一郎
Ichiro Okumura
千葉製鉄所 土建部土
建技術室

1 はじめに

千葉製鉄所では、コイル、厚板、鋼管などの鉄鋼製品の所内物流コストを低減するために、物流分野における省力化、機械化、大型化および自動化が推進されている。鉄鋼製品に対するユーザーニーズは多様化、高品質化しており、保管ヤードの確保と荷役設備の改善を急ぐ必要があった。また海上輸送費用を低減するために船舶は大型化する傾向にあり、80 000 DWT 級の船舶が接岸できる大型製品岸壁の建設が必要であった。

この大型製品岸壁は千葉製鉄所の西工場に 1985 年 10 月に完成したもので、Fig. 1 に示すように東京湾の東部、千葉港に位置しており、延長 300 m、幅員 41 m、計画水深 15.5 m の鋼管杭によって支持されたコンクリート床版を有する棚式横棧橋である。

本報告では、80 000 DWT 級の船舶を対象とする大型製品岸壁の建設におけるエンジニアリングの概要を、設計、現場計測、新材料(重防食鋼管杭)、新しい臨海杭打(KST)工法を主体として記述する。

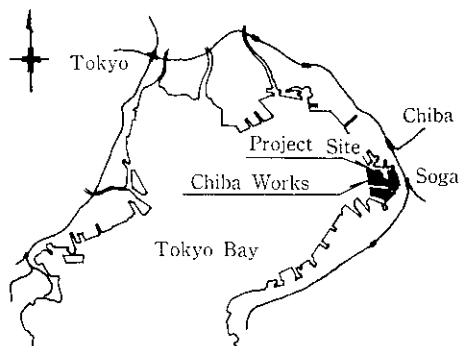


Fig. 1 Location map

要旨

鉄鋼製品を輸出する船舶の大型化に対応して、千葉製鉄所に大型製品岸壁の建設を行った。当岸壁は、鉄鋼製品を取扱う、延長 300 m、計画水深 15.5 m の鋼管杭に支持された棚式横棧橋である。最大対象船舶は 80 000 DWT で、1985 年 10 月に完成した。浚渫工、鋼管杭打設工など各工種で現場の情報に基づいた施工管理を実施し、例えば浚渫工では傾斜計を用いて既存のケーソン護岸の挙動を計測しながら施工した。重防食鋼管杭(KPP パイル)、新しい臨海杭打(KST)工法、波動方程式を用いた支持力管理など新しい技術を導入することによって、岸壁の軽量化、施工効率の向上、杭打設精度の向上、杭支持力管理技術の向上を図ることができた。

Synopsis:

A new products-berth was designed to accommodate vessels up to 80 000 DWT, thus providing cost savings in ocean freight charges. In Chiba Works the design of the new products-berth was an absolute necessity, in order to utilize the cargo handling equipment and techniques more effectively and economically. The berth is a quay-type wharf structure supported on steel pipe piles. A structure 300-m long and 41-m wide was designed, with a dredge depth of -15.5 m. In this project, each work of dredging and pile installation was completed by using measuring systems. For example, it was necessary to monitor potential movement of the existing concrete-caisson sea wall. This project has three innovative technological features: the KST cantilevered pile driving system for marine structures, polyethylene film coated steel pipe piles, and pile driving control using the wave equation.

2 設計概要

2.1 設計条件

2.1.1 土質条件

岸壁法線方向の土質柱状図を Fig. 2 に示す。荒川工事基準面 AP (Arakawa Peil) -40 m 以深には成田層砂層からなる N 値 50 以上の洪積砂層が存在し、原則としてこの層を杭の支持層とした。AP-30~-40 m には凝灰石粘土を主流とする洪積粘性土層が砂層と互層状態を呈しており、その一軸圧縮強度は、 3 kgf/cm^2 であり過圧密状態にある。AP-30 m 以浅には上部洪積砂層が岸壁東部で約 20 m、西部で 7~10 m の厚さで分布している。岸壁東部約 60 m の範囲では、 N 値 50 以上の砂層が約 8 m の厚さで分布しており、杭打設時の情報を確認したうえで東部 60 m の範囲はこの層を支持層とした。上部洪積層の上には、 N 値 5~20 の沖積砂層を主体とする土層が在来海底面である AP-5 m 付近まで存在している。 N 値、粒度分布、振動三軸試験結果から沖積砂層の液状化の可能性は

* 昭和61年6月24日原稿受付

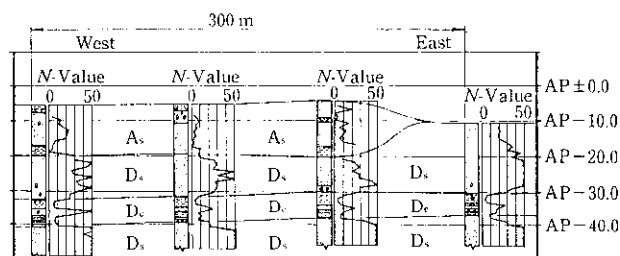


Fig. 2 Subsurface soil profile

低いと判断した。

2.1.2 自然条件

当岸壁は東京湾の東部に位置し、航路に北面しているために海象条件は厳しいものではない。千葉港の HHWL (Higher high water level) は AP+2.7m であり、異常時の設計波高は 1.9m、周期 4 sec と設定されている。当海域の潮流は 0.1 ノットである。

地震時の設計震度は地域性、構造物の重要度から 0.2 とした。

2.1.3 荷重条件

鉄鋼製品を取り扱う性質上、岸壁床版の荷重は大きく、岸壁クレーン軌条間には 150 tf 積トラクタートレーラ 3 台が併走可能、バックリッチ部分は上載荷重 4 tf/m² の仮置場として設定されている。2 台の 50 tf 吊能力を有する岸壁クレーンは 610 tf の重量であり、クレーン同志が隣接する可能性がある。

船舶の接岸力は 80 000 DWT 級の船舶が接岸速度 15 cm/s で 1/4 接点で接岸するものとして求めた。岸壁の両端部には 1 000 DWT 以下の内航船も接岸可能とした。

2.2 構造概要

当岸壁の構造は Fig. 3 に示すように、AP-40 m 以深に存在する N 値 50 以上の洪積砂層を支持層とする杭径 800 mm の直杭と杭径 900~914 mm の斜杭に支持された I 形鋼 (900 mm×300 mm)

を主梁とする鉄筋コンクリート床版で構成した。岸壁天端高は、異常潮位の際に設計波高の波が発生しても越波しないように AP+5 m とした。岸壁前面において計画水深 AP-15.5 m を確保するものとし、海底面の法勾配は 1:2.5 とした。

2.3 浚渫断面の設計

既存ケーソン護岸の円弧すべりに対する安全率は 1.21 と許容安全率にはほぼ等しいうえに、砂質地盤であるために急激な崩壊が考えられる。また背面において倉庫の地盤改良であるスラグコンパクションパイルを打設中であり、振動の影響がある。したがって傾斜計などによる現場計測を実施し、護岸の安全性を確認しながら浚渫するものとした。既存ケーソンへの荷重は安全率の低下につながるためにトラクタートレーラの岸壁上への進入路は杭支持とした。

計画水深を確保するために岸壁前面の海底の法勾配を 1:2.5 より緩やかにすることは、既存ケーソンの撤去あるいは鋼矢板、鋼管矢板などの土留工の設置、岸壁法線の沖合への拡張などを意味するが、工事費および航路の安全性から現実的ではない。また当海域は比較的静穏であり、漂砂や波浪の影響も潮流や水深の条件から微少となる。岸壁建設中には、台風後などに深浅測量を実施し斜面崩壊や土砂堆積などがないことを確認して、張石工などの表層工を施さない法勾配が、1:2.5 の浚渫断面とした。

浚渫範囲は船舶の接岸および回頭の操船性を考慮して、岸壁両端から 60 m まで浚渫断面としている。

2.4 杭の設計

杭の支持力は港湾協会の「港湾施設の技術上の基準・同解説¹⁾」に従って、N 値に基づき算定し、設計支持力 250 tf とした。支持力管理については 4.3 章で述べるが、波動方程式を用いて杭打設時の杭応力分布を求め、杭先端部分にフリクションカットを兼ねた補強バンドを設置するものとし、ディーゼルハンマの仕様を設定した。法線方向に 5 本間隔で 10 本の杭を打設して支持層の再確認を

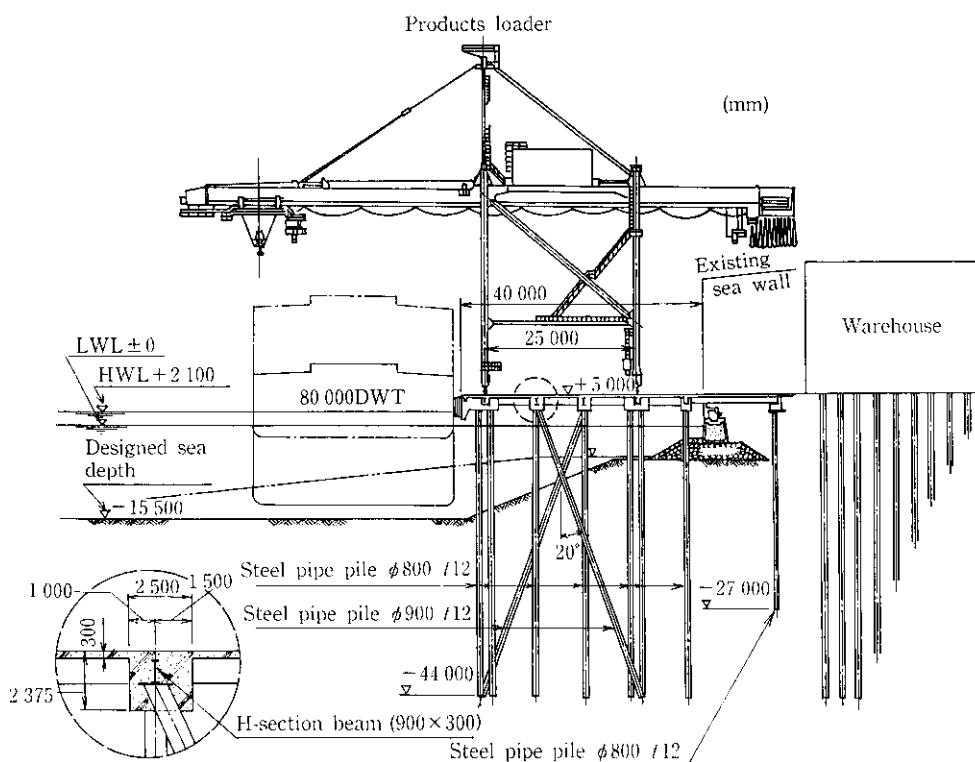


Fig. 3 A typical cross-sectional view of the product berth

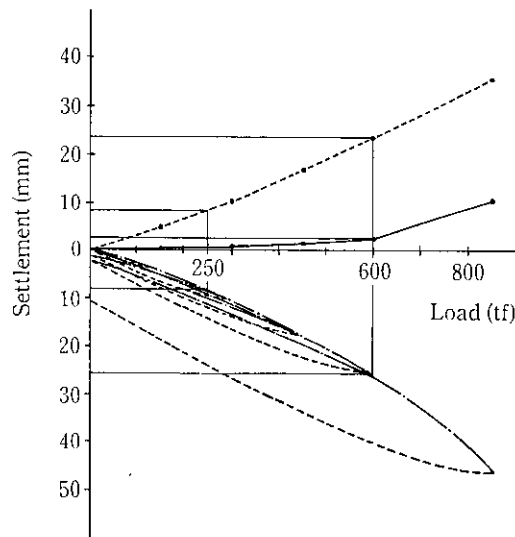


Fig. 4 Pile load test results

行い、東側部分の杭長を決定し西側の一部軟弱な部分には先端杏を取り付けた。

杭打設の初期段階で打撃試験と静的鉛直載荷試験を実施し、杭打設時の応力分布と Fig. 4 に示す試験結果を得た。静的鉛直載荷試験は土質工学会「クイの鉛直載荷試験基準²⁾」多サイクル A 載荷法に従った。当試験では最大載荷荷重 850 tf においても極限が得られなかったために宇都の方法³⁾により極限支持力を 1000 tf とした。設計支持力である 250 tf 載荷時の残留沈下量は 1 mm 以下であり、降伏支持力である 600 tf 載荷時の残留沈下量は 4 mm であった。

2.5 上部工の設計

2.5.1 主梁の設計

主梁は I 形鋼 (900 mm×300 mm) にて構成し、トレーラ走行範囲および仮置場で最大たわみ量 1 cm、クレーン軌条下で最大たわみ量 3 mm とした。クレーン軌条下には I 形鋼を 2 列配している。各主梁と杭は各接点において溶接により結構した。クレーン軌条下および防舷材設置部法線方向の梁は剛性を保つためにコンクリート被覆とした。給水および給電用の配管は主梁ウェブから支持し、一体としてコンクリート被覆した。その他の多数を占める梁は、軽量化のためにガラスフレック入りのエポキシ系塗装によって防食している。塗膜厚は 700 μm である。

進入路部分の梁は支間長が大きい。たわみ量を制限するために、

突起付き H 形鋼を用いた合成桁とした。

2.5.2 床版の設計

床版鉄筋のかぶり厚は最低 7 cm とし、塩害による腐食を防止するものとした。表面は排水を良くするために勾配を設け、トレーラ走行に対するセメント系の耐摩耗材を 2.5 mm 厚で施すものとした。この耐摩耗材は緑色の顔料を用いて着色し、対岸のポートタワーや航行する船舶からの景観も良いものとした。また耐摩耗材は密実な層を形成するために海水の浸透性も低下させる。床版の底枠にはデッキプレートを用い施工の迅速化を図るものとした。

2.5.3 コンクリートの配合設計

鉄筋の腐食を防止するために、かぶり厚を確保するばかりでなく、密実なコンクリートとなるように配合した。コンクリートの設計強度は 300 kgf/cm²、スランプ 8 cm である。セメントには高炉セメントを使用し、骨材には高炉スラグを使用した。コンクリート打設時にはワーカビリティを確保するために流動化剤を添加し、スランプを 15 cm としてポンプ打設を可能にした。

2.6 付帯工の設計

防舷材は 80 000 DWT 船舶を対象とするものを 12 m 間隔で設置し、岸壁の両側に 1 000 DWT 以下の船舶が接岸できるように防舷材緩衝板下端高を AP-0.2 m まで下げている。目地部分には橋梁などで用いるゴム製品を使用し、トレーラの走行性を確保するものとした。トラップや手摺はステンレス製品を使用し耐候性のあるものとした。岸壁前面および側面の床版上部には、排水可能なように等間隔の切欠きを設けた車止めを設け、車輛の転落を防止した。

岸壁両端には航行の安全性を確保するためにライトビーコンを設置した。

3 工事概要

3.1 工事工程および工事数量

工事工程および工事数量を Table 1 に示す。1984 年 3 月に水域占用許可を取得後、同年 6 月に浚渫工に着手、同年 10 月に杭打工事を開始、翌年 1 月から本格的なコンクリート工事を開始し、同年 10 月防舷材設置などの付帯工事を完了するまで延べ 17 箇月を要した。

打設した杭は 463 本、5 350 tf、コンクリート量は 13 500 m³ であり、浚渫土量は 209 000 m³ に及んだ。

主要機械としては、15 tf 吊から 150 tf 吊までを含めたクレーンは延べ 1495 台、杭打船延べ 354 隻があげられる。就労人員は Fig. 5 に示すように 37 414 人におよび、中でも鋼管溶接や主梁結構を

Table 1 Project schedule

	1984												1985										
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11					
Dredging																							
Mobilization																							
preparatory works																							
Pile fabrication																							
Pile installation																							
Beam fabrication and installation																							
Concrete work for deck structure																							
Miscellaneous works																							

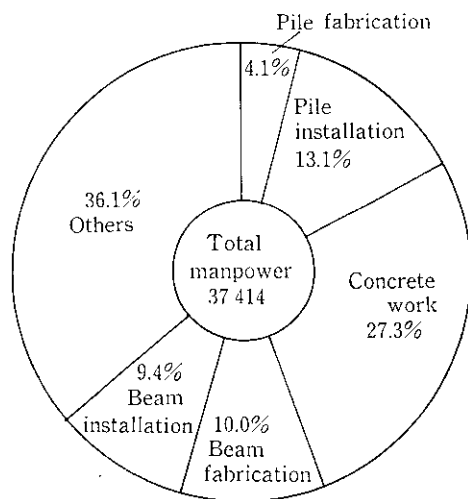


Fig. 5 Actual project manpower utilization

施工する鍛冶工が約 7 800 人、篤工が約 5 000 人と大きな比率を占めた。

3.2 浚渫工、準備工

浚渫工は 1984 年 6～8 月に実施し、12 m³ のグラブ浚渫船と 1 000 m³ の土運船を使用した。護岸の安定性を確認しながら施工するとともに深浅測量を実施しながら浚渫深度を把握し、計画水深に対して余掘 60 cm 以内で施工した。

測量、ヤード造成、仮設事務所設置、仮設電源設置などの準備工は 1984 年 7 月に着手した。杭や梁位置を視準するために岸壁両端から 60 m 外側に測量台を設置した。鋼管杭、鉄筋、梁などの加工、製作および製品ヤードとして約 50 000 m² の土地を造成した。仮設電源は鋼管杭加工溶接用に 500 kW、他作業用に 600 kW を設置した。

3.3 鋼管杭溶接工

鋼管杭は、12～17 m の単管を溶接して 31～51 m の 1 本ものの鋼管杭として打設した。溶接は Table 2 に示す溶接条件に従い、全自動サブマージ溶接により実施した。溶接部の品質管理は X 線検査によるものとし、JIS 2 級以上を合格としたが、溶接作業の留意事項として下記の事項があげられる。

- (1) 溶接部の水分を除去するために、幅 15 cm にわたり 100～200℃ となるまで十分に予熱する。
- (2) フラックスおよび溶接棒は乾燥器で常に乾燥させる。
- (3) 風の影響を防火シートにより防ぎ、雨天の日や湿度 80% 以上の日には作業を中止する。

Table 2 Welding specifications

Voltage	34 V
Current	600～650 A
Welding speed	32～36 cm/min
Number of layers	2
Welding wire	KW-50 C
Flux	KB-120

1984 年 9 月から翌年 2 月までに載荷試験杭を含む 451 本の鋼管杭を製作した。歴日当りの出来高は 3 本/日、稼働日当りの出来高は 4 本/日であった。

3.4 鋼管杭打設工

既存ケーソン護岸背面の 12 本の杭を陸上から KB 45 のディーゼルハンマにより、海上の 451 本の杭を杭打船と KST 工法を用いて打設した。杭打船は主として KB 70 および MH-72B のディーゼルハンマを搭載させた。

既存のケーソン護岸の捨石部を貫通する鋼管杭は打設時の振動がケーソンの安定性に悪影響を及ぼす恐れがあるうえに、杭本体や重防食被覆部分が損傷する可能性がある。杭打設前にケーソン護岸の捨石分布状況および捨石層厚を調査し、1 列の杭は、オレンジピールバケットによる張石撤去後、オーガー掘削機による捨石撤去した後に打設するものとした。捨石撤去には、ケーシングパイプ (φ1066 mm) とオーガー掘削機 (スクリー径 940 mm) を使用し、ケーシングとスクリーを逆転させることにより、鉛直精度を高めた施工を行った。

海上の杭打設にあたり、海上に設置した測量台と陸上から視準するものとした。杭が密に存在するために杭打船が施工可能な杭打設順序とした。杭打船の稼働率は 65% であり、歴日当りの出来高は 2.7 本/日、稼働日当りの出来高は 4.1 本/日であった。

3.5 上部工

3.5.1 主梁加工、架設工

主梁 (I 形鋼 900 mm×300 mm) はコンクリート被覆梁と重防食塗装梁で構成される。ユーティリティ配管など一体化する梁を除いて、コンクリート被覆梁は原則としてプレキャスト化し品質と安全性の向上を図った。重防食塗装梁も陸上にて塗装するものとした。

主梁架設には陸上から自走式クレーンを用いたが梁重量と仮設位置の関係から 1 本ずつ施工するものとした。KST 工法施工範囲の梁は、大組みして架設し工事の迅速化を図った。主梁は杭頭にあら

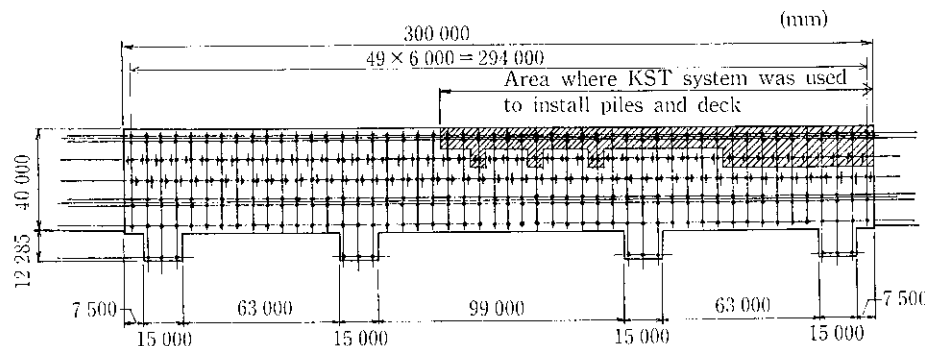


Fig. 6 Pile arrangement

はじめ設置した鋼板に仮置きし、各杭頭、各梁間で溶接により結構するものとし超音波検査により品質管理を行った。

3.5.2 鉄筋コンクリート工

杭頭部および場所打コンクリート梁のコンクリートは KPP (Kawasaki Plastic Coated Pipe) パイルのポリエチレン被覆部の損傷を防止するために、主梁から吊ボルト形式の支保工を作成して打設した。床版コンクリートの打設ではデッキプレートを底枠として使用したが、デッキプレートが主梁の鋼面や鉄筋と接触しないように留意し、5 cm 以上のかぶり厚を確保するものとした。

コンクリート打設前に鉄筋検査および鉄筋と型枠の水洗による塩分除去を実施し、ミキサー車ごとのスランプ管理、150 m³ ごとのコンクリート供試体の作成を実施するものとした。

4 新材料, 新工法

4.1 重防食鋼管杭

当岸壁の鋼管杭は川崎製鉄で開発された重防食鋼管杭 KPP パイルを用いた。KPP パイルとは、ショットブラストにより下地処理した鋼管表面に溶融ポリエチレンシートをゲートル状に巻き立てたものであり、防食ポリエチレンの膜厚はスパイラルビード部分で 2.5 mm 以上、耐用年数 40 年と設定している。

ポリエチレン被覆範囲は上部工のコンクリート下端から海底面下 3~4 m までであり、腐食は考慮していない。従来鋼管杭は防食のために MWL (Mean water level) までコンクリート被覆していたが、KPP パイルを使用することによってコンクリート下端レベルを HWL 以上とすることが可能となり、上部工を軽量化することができた。上部工の軽量化は地震時の自重による水平力の低減につながり、杭数量、杭断面の低減に寄与することとなる。また潮間作業が不要となり、工程管理が容易で品質および安全性が向上した。

重防食鋼管杭の運搬や仮置では、ポリエチレン被覆部分の損傷を防止するために、ゴム板やナイロンスリングを使用した。杭打設時には杭打船などのアンカーワイヤーによる損傷を防止するために、既に打設した杭を防護管で覆う方法やアンカーワイヤーを補助クレーンで吊り上げる方法を用いた。ポリエチレン被覆部に発生した微少な傷は、同材質の棒を溶着して損傷部を閉塞させた。溶接継手部分は溶接時の熱影響を考慮してポリエチレン被覆を施していないために、溶接後に鋼管表面をケレンし、ポリエチレン製熱収縮チューブ

で被覆するものとした。Photo 1 に KPP パイルの打設状況を示す。

4.2 臨海杭打工法 (KST 工法)⁴⁾

4.2.1 KST 工法の概要

KST 工法は、海象条件の影響を受けにくいこと、任意の方向に斜杭打設が可能であること、杭打設精度が向上できることを目的として川崎製鉄、清水建設株式会社および東亜建設工業株式会社の 3 社で開発された臨海杭打工法であり、自ら打設した杭の上に設置した梁上を順次移動しながら杭を連続打設する。当工事に使用した KST 杭打装置を Fig. 7 に、KST 工法による杭打設状況を Photo 2 に示す。

パイルホルダーは杭を所定の位置に保持する装置で全方向に最大斜角 20° まで傾動可能であり、パイルキーパの杭と接する部分には

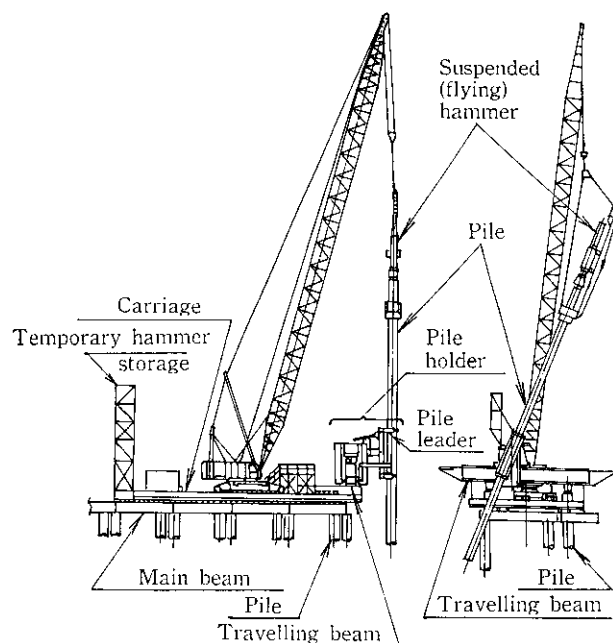


Fig. 7 KST pile driving equipment

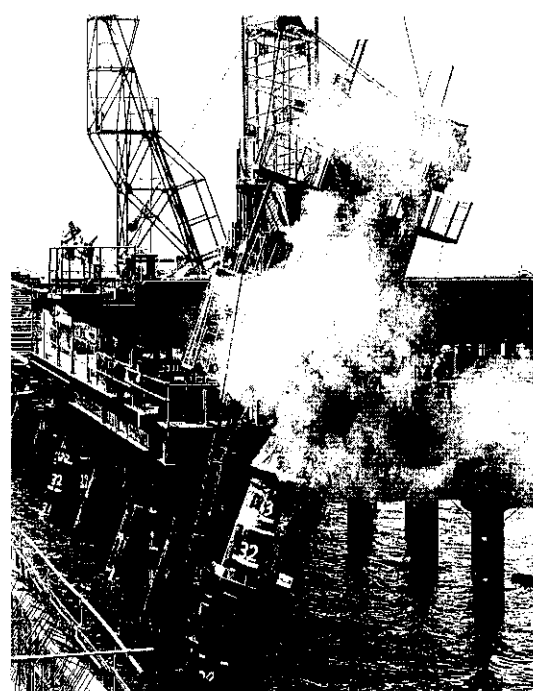


Photo 2 Batter pile driving by KST system

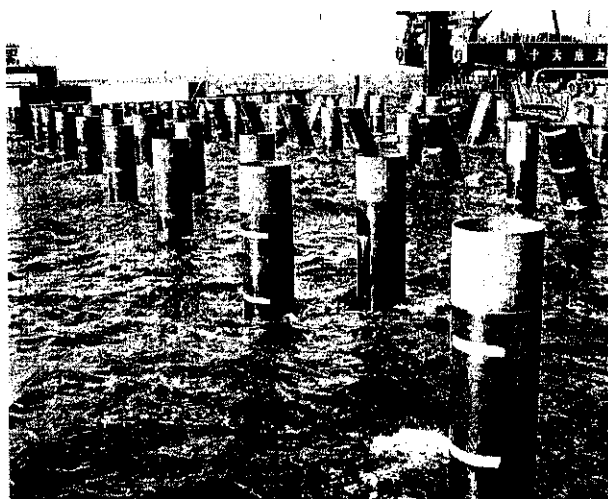


Photo 1 Appearance of KPP piles driven at the construction site

KPP パイルの損傷を防止するためにゴム製のローラーを装着している。フライングハンマはロープ吊り下げ式でディーゼルハンマ KB45 を装着させた。トラベリングワゴンは各機器を搭載し、杭打装置全体の移動の母体をなすものである。

4.2.2 施工実績

KST 工法による杭打設範囲を Fig. 6 に、杭仕様を Table 3 に示す。84 本の杭打設のみの所要日数は 34 日であり 2.47 本/日の出来高であった。また波高 0.8~1.2m の荒天時でも杭打作業は可能であり、稼働率は 74% であった。杭打設精度は 75% の杭が所定の位置から 5cm 以内にあり、すべての杭が 10cm 以内であった。海象条件の影響を受けにくく、打設精度が向上でき、全方向に 20° まで斜杭打設が可能であることを実証することができた。

同時に現場計測を実施し、杭打設時、ワゴン移動時の KST 杭打装置の加速度、部材応力を測定し、杭打設時にワゴン全体が共振する可能性はないこと、杭打設時に各部材に発生する動的応力は微少であることが検証された。ワゴン移動時の各部材応力や杭傾動時のパイルホルダシャフトに発生する応力は設計値とほぼ等しい値であった。

Table 3 Pile specifications by KST pile driving system

	Dia-meter (mm)	Thick-ness (mm)	Length (m)	Number of piles (piles)	Total number (piles)
Vertical pile	800.0 800.0	12.0 12.0	48.0 31.0	41 30	84
Batter pile	914.4 914.4	15.88 15.88	49.0 34.0	3 10	

4.3 杭の支持力管理

杭打設時の情報に基づいて杭の支持力を適正に推定することは施工の品質管理上重要なことである。当工事では Fig. 8 に示す波動方程式による支持力推定⁵⁾を主体とするフローで支持力管理を実施した。

初めに土質調査結果や N 値による算定式から周面摩擦力、先端支持力比などのパラメータを設定し、杭打設時の応力分布を推定しハンマや杭肉厚を決定する。同時に杭の最終貫入量と支持力の関係を示した支持力仮管理図を作成する。次に杭打撃時の応力分布を計測し、波動方程式による応力分布が実測値に整合するように各パラメータを設定し動的極限支持力を求めた後、支持力管理図を作成する。最後に静的鉛直載荷試験による静的極限支持力と動的極限支持力の関係から地盤の回復度を考慮した修正率を求め、修正支持力管理図を作成し以後の支持力管理を実施した。

5 まとめ

千葉港本航路に北面する川崎製鉄千葉製鉄所の大規模製品岸壁の建

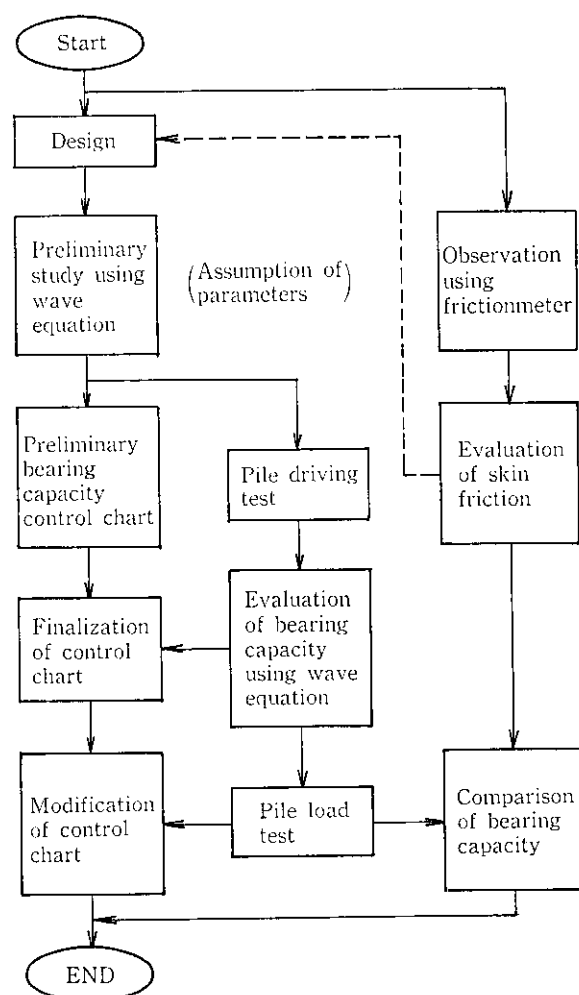


Fig. 8 Flowchart for bearing capacity control

設概要を紹介した。本建設における特徴は以下のとおりである。

- (1) 重防鋼管杭 KPP パイルを使用することによって上部工の軽量化および、維持管理の軽減を図り、潮間作業が不要となり工程、品質および安全面での向上を図ることができた。
- (2) KST 臨海杭打工法は荒天時でも作業が可能であり、海象条件の影響を受けにくいこと、打設精度が向上することなど現場への適用性が確認された。
- (3) 波動方程式を用いた杭の支持力管理、浚渫工におけるケーソン護岸の挙動測定など、現場の情報を反映させながら施工管理を行った。

最後に、杭の支持力管理についてご指導をいただいた名古屋大学松尾徳教授、名城大学堀内孝英教授、当建設工事を担当していただいた清水建設株式会社、株式会社大林組、大成建設株式会社、東亜建設工業株式会社の関係各位に心より感謝します。

参考文献

- 1) 社団法人日本港湾協会:「港湾の施設の技術上の基準・同解説」, (1979)
- 2) 社団法人土質工学会:「クイの鉛直載荷試験基準・同解説」, (1972)
- 3) 宇都一馬, 冬木 衛, 桜井 学:「杭の載荷試験結果の整理方法」, 基礎工, 10 (1982) 9, 21~30
- 4) 富永眞生, 源波修一郎および小城 了:「臨海杭打工法 (KST 工法) の開発」, 建設の機械化, No. 432 (1986), 21~26

- 5) E. A. L. Smith: "Pile Driving Analysis by the Wave Equation", ASCE, 86 (1960) SM4
- 6) 富永眞生, 鋼持 敬, 木村 保, 奥村一郎および門田耕二:「波動方程式を利用した杭の支持力管理方法について」, 第 20 回土質工学研究発表会昭和 60 年度発表講演集, (1985), P 1135~1138