
オフショア構造物への大径 UOE 鋼管杭の利用

Application of Large Diameter UOE Steel Pipe Pile to Offshore Structure

富永 真生(Masanari Tominaga) 長野 昌雄(Masao Nagano) 古谷 博明(Hiroaki Furuya) 木村 保(Tamotsu Kimura)

要旨：

台湾電力(株) (中華民国台湾省) は台湾第 1 の工業都市である高雄市の北方約 30km の沿岸地帯に最終計画 400 万 kW の火力発電所を建設中であり、すでに 50 万 kW×2 基の工事が完成し操業態勢に入っている。当社エンジニアリング事業部は、この発電所の操業に必要な石灰輸送設備のうち石灰荷揚げ用栈橋の建設工事を国際入札により受注した。この栈橋は延長 910m のトレススルおよびアンロード基礎であるプラットフォームより成り、基礎杭として約 4400 t の大口径厚肉 UOE 鋼管($\phi 1500\text{mm} \times t 25.36\text{mm} \times l 33 \sim 55\text{m}$) が使用された。本報告は、この建設工事の中から鋼管杭の利用に関する土木技術的成果・特質について述べるものである。

Synopsis：

Taiwan Power Company is constructing a steam power plant of 4 000 000kW at the coastal area situated 30km north of Kaohsiung which is the biggest industrial area in Taiwan, R.O.C. The installation of two generators with a capacity of 5 000 000 kW each was completed and now they are ready for operation. Engineering division of Kawasaki Steel Corporation, through an international tender, was awarded a contract to construct an offshore berth facility for unloading coal required by the plant operation. This facility consists of a 910 m long approach trestle and a platform foundation for the coal unloader. Large diameter and thick wall UOE steel pipe piles were applied to the foundation work. This paper describes the civil engineering aspects of the steel pipe pile foundation used in the above construction project.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

富永 真生*2 長野 昌雄*3 古谷 博明*3 木村 保*4

Application of Large Diameter UOE Steel Pipe Pile to Offshore Structure

Masanari Tominaga, Masao Nagano, Hiroaki Furuya, Tamotsu Kimura

要旨

台湾電力(株)(中華民国台湾省)は台湾第1の工業都市である高雄市の北方約30 kmの沿岸地帯に最終計画400万kWの火力発電所を建設中であり、すでに50万kW×2基の工事が完成し操業態勢に入っている。当社エンジニアリング事業部は、この発電所の操業に必要な石炭輸送設備のうち石炭荷揚げ用棧橋の建設工事を国際入札により受注した。この棧橋は延長910 mのトレスルおよびアンローダ基礎であるプラットフォームより成り、基礎杭として約4 400 tの大口径厚肉UOE 鋼管($\phi 1\,500\text{ mm} \times t\,25.36\text{ mm} \times l\,33\sim 55\text{ m}$)が使用された。本報告は、この建設工事の中から鋼管杭の利用に関する土木技術的成果・特質について述べるものである。

Synopsis:

Taiwan Power Company is constructing a steam power plant of 4 000 000 kW at the coastal area situated 30 km north of Kaohsiung which is the biggest industrial area in Taiwan, R.O.C. The installation of two generators with a capacity of 500 000 kW each was completed and now they are ready for operation. Engineering division of Kawasaki Steel Corporation, through an international tender, was awarded a contract to construct an offshore berth facility for unloading coal required by the plant operation.

This facility consists of a 910 m long approach trestle and a platform foundation for the coal unloader.

Large diameter and thick wall UOE steel pipe piles were applied to the foundation work.

This paper describes the civil engineering aspects of the steel pipe pile foundation used in the above construction project.

1. まえがき

エンジニアリング事業部では、1981年4月国際入札の結果、台湾電力(株)より石炭荷揚げ用棧橋建設工事を受注することができ、かつその工事には、当社の大口径厚肉UOE 鋼管($\phi 1.5\text{ m}$)を棧橋(プラットフォームとトレスルからなる)の基礎杭として約4 400 t使用することとなった。

そこで本報文では海岸より約1 km沖合いのオフショアでの棧橋建設工事の中から鋼管杭利用に関する技術的成果について報告する。

台湾電力はFig. 1に示すように高雄の北約30 kmの興達(Hsinta)地区に火力発電所を建設中であり、すでに第1期工事(500 000 kW×2基)が完成し、操業態勢に入っている。この発電所は第1期時点で石炭を年間3 000 000 tまた、最終第4期の時点(4 000 000 kW)では12 000 000 tを必要とする大発電所となる予定である。台湾電力は第1期時点で高雄(Kaohsiung)に100 000 DWT (dead weight ton) 受入れ可能なコールセンターを建設し、ここから10 000 DWT バージにて興達へ二次輸送する計画をした。したがって高雄には100 000 DWT 受入れと10 000 DWT への積み出し港湾設備、興達には10 000 DWT の受入れ港湾設備を必要とした。本報文は興達火力発電所向け石炭(輸入炭)の10 000 DWT バージ用海上荷揚げ棧橋の建設に関するものである。

まず、本工事には外径1 500 mm、肉厚25および36 mm、長さ33.0~55.0 mの鋼管杭が合計98本使用されることになってい

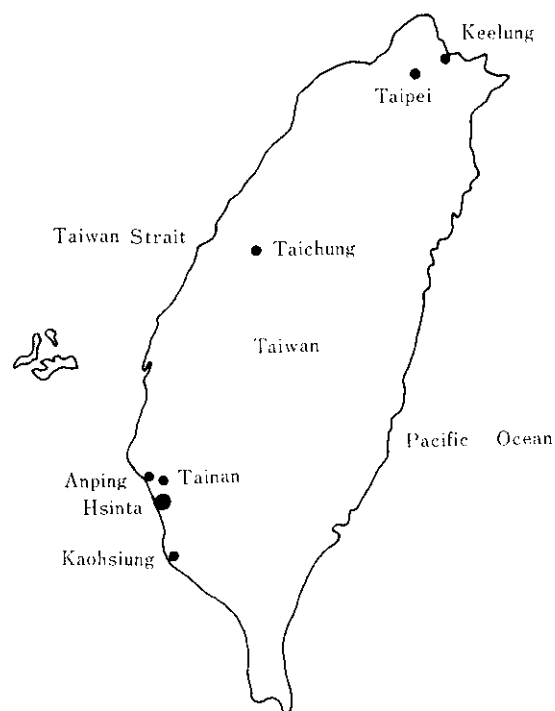


Fig. 1 Project site location

た。オフショアでの鋼管杭打設は経済性や工期の面から施工機械(杭打船とハンマー)能力の許す限り1本ものの鋼管杭を打

*1 昭和58年5月18日原稿受付

*2 エンジニアリング事業部土木技術部土木技術室主査(部長補)

*3 エンジニアリング事業部土木技術部土木技術室主査(課長)

*4 エンジニアリング事業部土木技術部土木技術室主査(掛長)

設することが大原則である。とくに今回の工事のように建設工期が1シーズンに限定されるケースでは、波浪および風の影響を受ける海上での溶接作業は、技術的に様々の困難を強いられるので絶対に避けなければならない。

このため、現地まで単管 (Max. 18 m) で輸送された鋼管を所要の長さをもつ1本ものの杭に溶接製作し、全本数 X-ray 検査に合格するよう技術的配慮を行った。

ついで現地で製作された大径鋼管杭 (最大72 t) を大型杭打船で精度よく打設することが第2の技術的難関であり、とくに、斜杭 (18°26') の打設精度が要求された。さらに標準貫入試験による N 値が40以上の細砂層に5 m 以上の根入れと1000 t 以上の鉛直支持力を確保するという技術的課題が付与されていた。

本工事には、上記のほか海上でのコンクリート打設工、船舶導航設備据付工事、防食工事、なども含まれているが、紙面の関係で割愛し、本報文では上記3点の技術的要点を中心に述べる。

2. 工事概要

2.1 工事規模

石炭荷揚げ橋は、長さ910 m のトレスル (trestle)、アンローダー基礎であるプラットフォーム、10 000 DWT バージ用接岸設備、船舶導航設備から成る。

Fig.2 に橋の平断面図を示し、Photo. 1 に完成した橋を示す。また、Table 1 は設備概要を示したものであり、Table 2 は工事数量を示したものである。

2.2 自然条件

(1) 波 浪

サイトの波浪は10月～3月まで大陸の高気圧により北北東方向から吹く季節風と6月～8月の間熱帯性低気圧により南

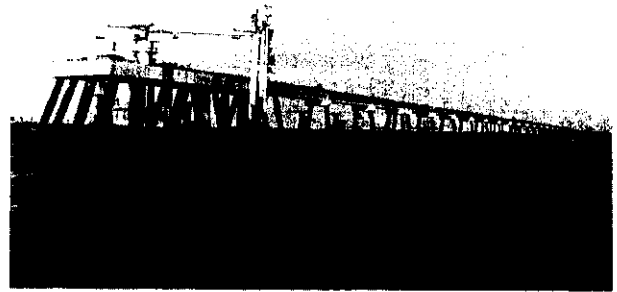


Photo. 1 General view of coal unloading facility

西および西からの風の影響を受ける。4月～5月と9月は風向きの変わり目で気象は比較的穏やかである。北北西の風の波浪に対する影響は余り大きくないが、南西および西の風は吹送距離が長く、波浪はうねりになることが多い。通常の定常風による波高は1 m 以下であるが、台風の影響を受けると波高 (1/3有義波) は2～3 m 程度になる。

(2) 潮 汐

サイト近傍の既往観測資料によれば潮の干満は Table 3 に示すとおりであり、1日の干満の潮差は少ない。

(3) 潮 流

サイト近傍の潮流は、既往観測データによれば、水深7 m 付近で60 cm/s 以下、水深21 m 付近では70 cm/s 以下で、0～30 cm/s が大略値とされている。しかし、1981～1983年の建設期間中プラットフォーム付近 (水深8 m) では潮の変わり目において1 m/s 程度の速い潮流が南および北方向からあり、この頻度は比較的高いことが判明した。

(4) 土 質

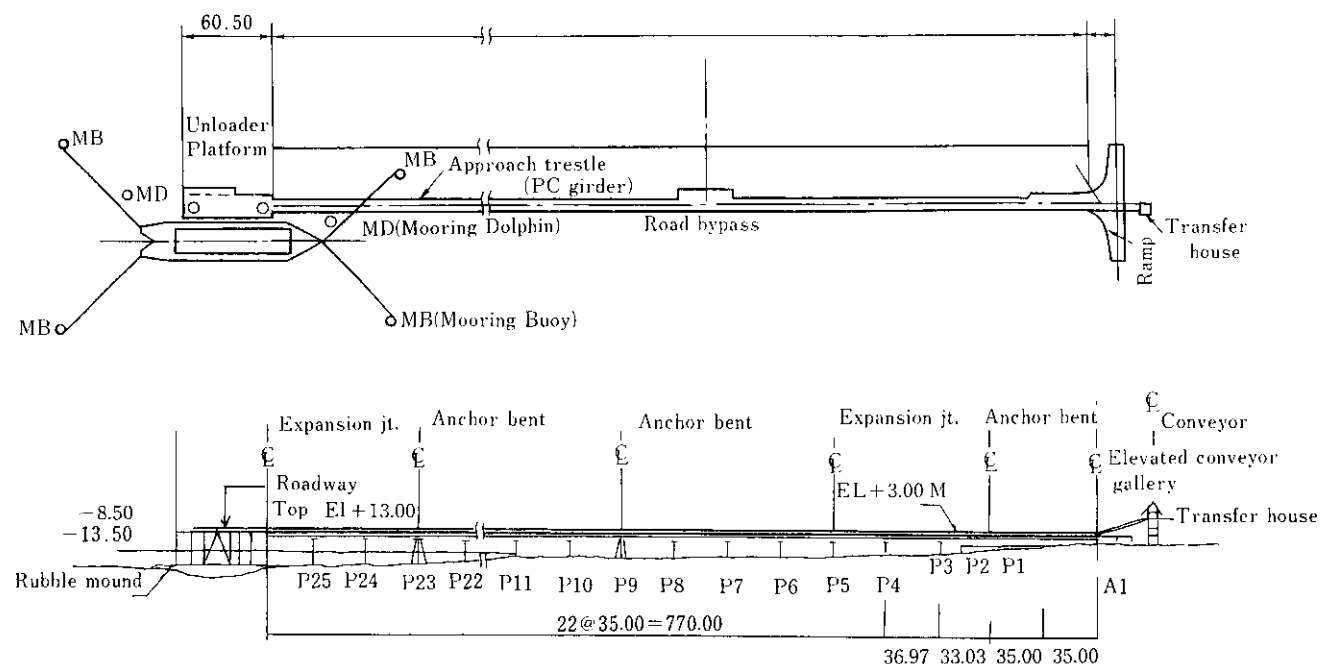


Fig. 2 Layout plan of offshore facility(m)

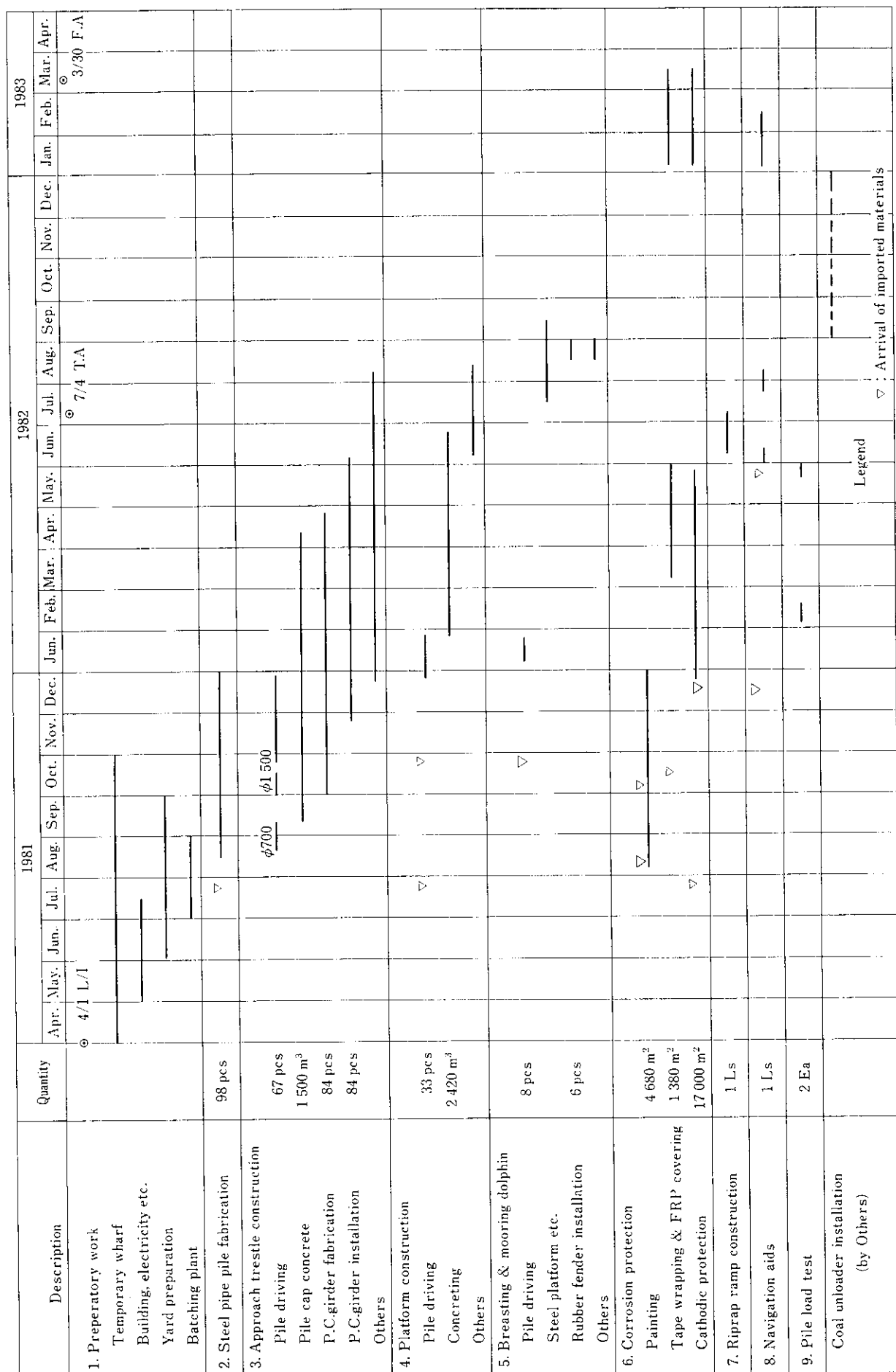


Fig.4 Project schedule

支持層としている。この第5層ではエアハンマー MRB-2000級ではほぼ貫入不能(一打撃当り沈下量3 mm 以下)となった。全般に杭支持力は先端層の支持力よりも中間層の摩擦力が大きいウエイトを占めると想定された。

2.3 工事工程

1981年4月に建設工事は開始された。この工事工程図を Fig. 4 に示す。以下に主要工程を述べる。

(1) 準備工

仮設岸壁の建設は1981年4月～6月の3箇月間でほぼ終了したが、前面の浚渫工事が波浪の影響を受け10月頃まで続いた。事務所、倉庫、電気、水道等の設備は7月末に完成した。

(2) 鋼管杭の製作

鋼管および溶接機器が到着して1箇月後の8月13日に溶接を開始し、杭本数98本、溶接継手数201箇所の溶接を12月31日までに完了した。溶接作業実績は0.7本/日であった。

(3) 杭 打 工

大型杭打船は日本から台湾(高雄)まで、台風の影響により約20日間の廻航日数を要し、高雄港にて杭打準備に15日間の期間を要した。杭打開始は10月1日、完了は1982年1月23日で、98本の杭打に115日を要した。打設実績は0.85本/日であった。

(4) コンクリート工

杭頭コンクリートの工事は杭打工事を追いかける形で進められた。1981年10月より開始し、プラットホームのコンクリート打設が完了したのは1982年6月であり、約4 000 m³のコンクリート打ちに合計8箇月を要した。

(5) P.C.桁

P.C.桁の製作は1981年10月より1982年4月、架設は1981年11月より1982年6月まで8箇月を要した。工事出来高は製作では0.42本/日、架設では0.42本/日であった。

3. 鋼管杭の製作

本工事に使用する鋼管杭は長さが33 m～55 m と長尺であり、日本で製作して輸送するには輸送方法、コスト面において不利になることから単管(11 m～18 m)を輸送し、現地において工場溶接とはほぼ同様の技術をもって杭を製作できる工法を採用した。Photo. 2 は現場溶接の状況を示したものである。

接合方法はリバージョイント-AN (Fig. 5 参照)を採用し、

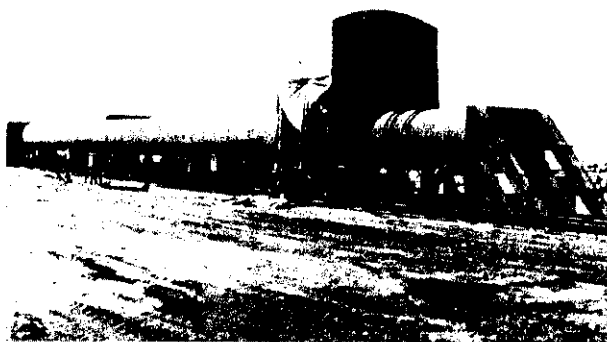


Photo. 2 Steel pipe pile welding

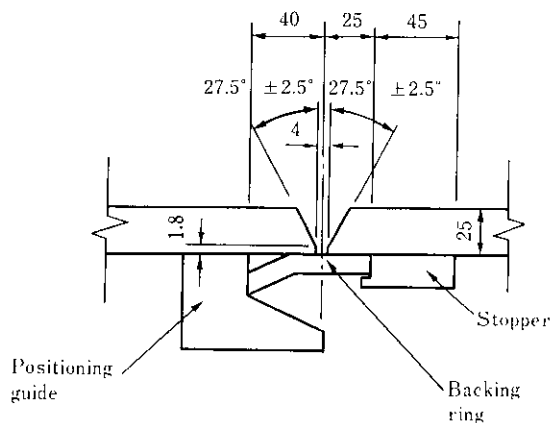


Fig. 5 River joint AN

溶接はタンデムサブマージドアーク溶接を採用した。この溶接法の採用に当っては、事前に構造技術研究所における室内実験、千葉工場内での現場実験を行い、その妥当性を確認して実施にふみきった。溶接技術の詳細については文献⁹⁾を参照されたい。

3.1 鋼管杭溶接の出来高

鋼管杭の溶接箇所数は Table 4 のとおりである。

溶接作業は現地における溶接機器の作動実験ののち1981年8月13日に開始し、同年12月31日に98本すべての鋼管杭の製作を完了した。溶接作業に関する稼働率および作業実績を Table 5 および Fig. 6 に示す。

溶接作業の初期の段階では作業員が作業および溶接機器に対し不慣れであったことおよび調整作業等のために、1箇所の溶接に1日以上要していたが、その後作業に習熟したため、能率がよくなり、1日当り2箇所の溶接が可能となった。

11月に1日当りの杭製作速度(pcs/working day)が低下しているのは5本継手の鋼管杭、しかも肉厚が36 mmのものが4本含まれていることによるものであり、また12月に1日当りの溶接継手数(joint/working day)が低下しているのはドルフィンに使用される2本継手の杭の溶接がこの時期に集中したことにより、杭のハンドリングに時間を要したためである。

3.2 X線検査

鋼管杭溶接部の品質検査はX-rayにより実施した。X-ray Filmの撮影は各継手4箇所としており、全溶接長の約25%のサンプリングテストとなっている。

Table 6 は検査結果を示したものである。これによれば JIS 規格1級という合格基準に対し93.5%という高い合格率を示しており、このことは本プロジェクトにおける鋼管杭溶接が非常によい品質管理のもとに実施されたことを示している。

Table 4 Number of welds for the steel pipe piles

Description	No. of piles	No. of joints
Five-section pile with joints	4	16 joints ($t=36$ mm)
Four-section pile with joints	5	15 joints ($t=25$ mm)
Three-section pile with joints	81	162 joints ($t=25$ mm)
Two-section pile with joints	8	8 joints ($t=25$ mm)
Total	98	201 joints

Table 5 Rate of pipe joint fabrication

Description		Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total	
Working period		Calendar day	19	30	31	30	31	141
		Working day	16	29	20	28	21	114
Accomplishment	Quantity of piles (pcs.)		7	21	20	24	26	98
	Rate of fabrication	pcs. Calendar day	0.37	0.70	0.65	0.80	0.84	0.70
		pcs. Working day	0.44	0.72	1.00	0.86	1.24	0.86
	Quantity of Joint (joint)		14	47	40	59	41	201
	Rate of fabrication	joint Calendar day	0.74	1.57	1.29	1.97	1.32	1.43
		Joint Working day	0.88	1.62	2.00	2.11	1.95	1.76

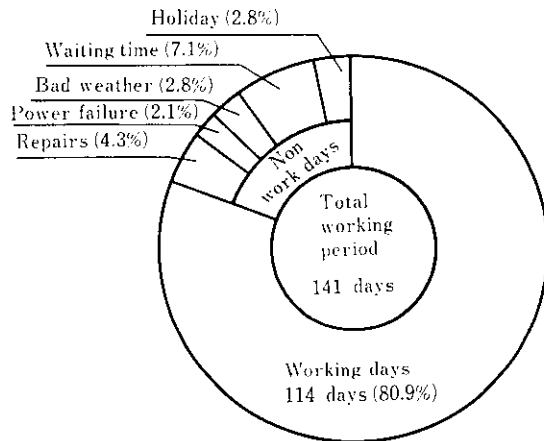


Fig. 6 Working ratio of welding operation

Table 6 Result of the X-ray test

Description	Pile	Joint	Film
(1) Total quantity be submitted	98	201	804
(2) Success (at 1st inspection)	83	182	771
(3) Failure due to film itself	4	6	11
(4) Failure due to defects	11	13	14
Ratio of success ((2) + (3))/(1)	88.8%	93.5%	97.3%

3.3 歩掛および使用材料

鋼管杭の製作作業に従事した作業員の総数は1903人・日であり、内訳は59.5%が杭の溶接、28.4%がシューの取付、12.1%が吊りピースの取付である。Fig. 7はその構成を示したもので

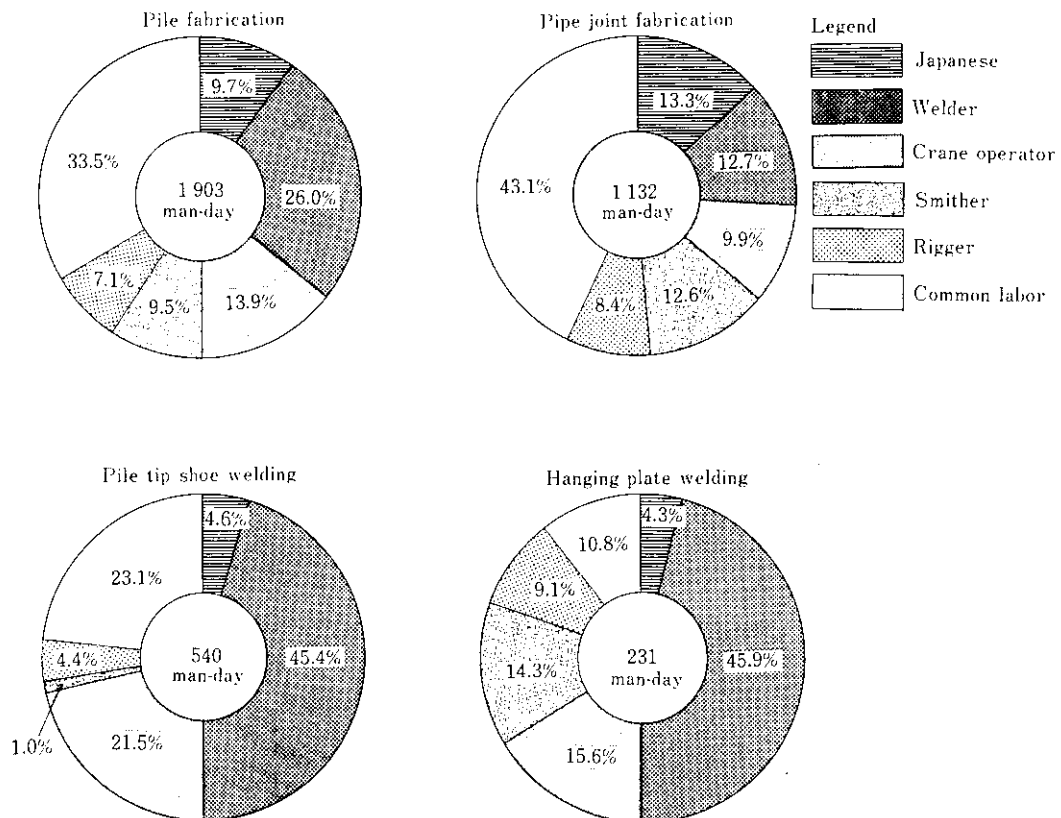


Fig. 7 Manpower distribution for each work item

ある。

また、それぞれの作業項目について、単位作業当りのmanpowerは下記のとおりである。

For pipe jointing	: 11.55 man·day/pile
	5.63 man·day/joint
	1.20 man·day/meter
For pile tip shoe welding	: 5.51 man·day/pile
For hanging plate welding	: 2.36 man·day/pile

また、鋼管杭の継手溶接作業に使用した溶接材料の使用量は下記のとおりである。

- ・溶接ワイヤー (KW-50C) 18.9kg/joint
- ・フラックス (KB-120) 24.9 kg/joint
- ・溶接棒 (KS-76) 2.8 kg/joint

この溶接ワイヤー、溶接棒の使用量は設計値の約1.3倍に相当する。

4. 鋼管杭の打設（海上施工）

杭打工事にあたっての大きな技術上の問題としては海象条件、杭打精度、杭打設能力の3点が挙げられる。

海象条件について言えば、この海域は南シナ海に面しているが台風シーズンを除けば比較的穏やかである。既往資料によると1 m以下の有義波 (Significant wave height) の発生頻度は年間89%であるが、吹送距離が長いためうねりが多い。波はその発生から大別して風波とうねりに分けられる。うねりは波の周期が大きくエネルギーが大であり、かつ減衰も大変遅いのが特徴である。海上杭打ち工事においてはうねりが大きな影響を

及ぼしこれを克服することが1つのポイントであった。

次の問題は杭打精度である。陸から1 km先までのトレスルの杭を精度の高いものに仕上げることが要求された。上部構造は杭打許容値10~20 cmの範囲で設計されており、これを満たすことが必要であった。

第3の問題は杭打設能力である。直径1.5 m、杭長約50 mの杭を良く締った砂質土に十分根入れさせ、所定の支持力を得ることが必要である。これをみたすために、杭の建込みをリーダー付きのディーゼルハンマー MH-80 Bで行い、打止めをエアーハンマー MRB-2000で実施した。単動式のエアーハンマーはディーゼルハンマーに比して当初想定した打撃力より極めて大きい値を示した。

Table 7 は海上杭打工事に使用した主要機器、船舶の一覧表を示したものであり、Photo. 3 は大型杭打船による杭打ちの状況を示したものである。

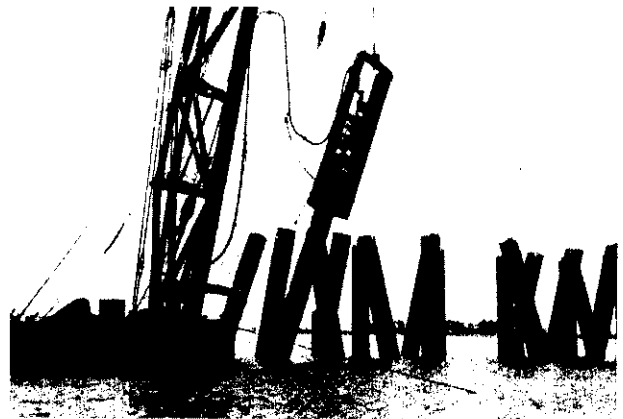


Photo. 3 Steel pipe pile driving

Table 7 Pile driving vessel

Description	Name of vessel	Specification	Quantity	
Pile driving barge	HAKUSHIN GO	300 t (Hanging capacity)	1	Pile driving
Tug boat with anchors	SHINKYOSHIN MARU	1 700 PS	1	Moving and Anchoring of the pile driving barge
Crew boat	YK-12	35 PS	1	Pile transportation, assistance for anchoring work and other miscellaneous duties
Diesel hammer	MH-80B	Ram weight 8 t	1	Pile driving
Air hammer	MRB-2 000	Ram weight 20 t	1	Pile driving
Floating crane	BOSHI JYUU	80 t (Hanging capacity)	1	Pile positioning movement of survey platform
Crew ship		35 PS	1	Transportation for survey crew
Tug boat		90 PS	1	Floating crane movement
Hammer cap		Weight=15 t	4	
Movable survey platform		Height=15 m	3	Surveying

4・1 杭打工事の出来高

杭の打設能率を上げることは本プロジェクトの建設を計画どおり進めるための最も重要な要素であったが、杭打工事を制約した条件は次の事項である。

- ① 6月～9月の台風シーズンおよび12月のモンスーン時期は杭打工事はほとんど実施できない。
- ② 実施できるシーズンでも午後になるとうねりが出てきて杭打が難しくなる。
- ③ 杭の取込みは杭積み出し地点の地形的制約より台船積み込みが難しい。
- ④ 大口径杭打のため、所定の根入れ長を確保するには、ディーゼルハンマー (MH-80 B) とエアハンマー (MRB-2 000) を併用することが必要である。(ディーゼルハンマーによる打止め規準は1打撃当り貫入量が3 mm 以下か根入れ長15 m 以上とした)

Fig. 8 は杭打ち工事のサイクルタイムを示したものである。杭の打設には Fig. 8 に示すように1本当り約4時間を要し、

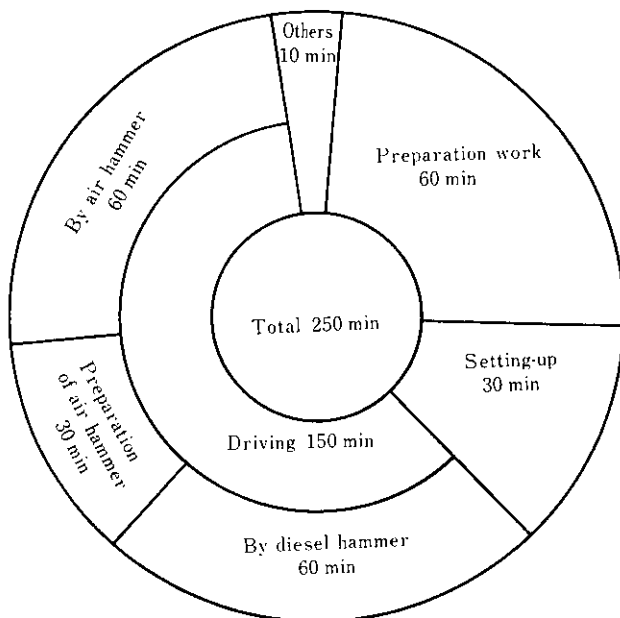


Fig. 8 Standard time cycle of pile driving work

机上計算では1日当り2本の打設が可能である。しかしながら海象条件が1日のうち午前と比較的穏やかであるが午後にはうねりが出、また、風も強まり海上での杭の建て込みができない日が多かった。そのため杭打船シフトがウィンチ操作で打設可能な範囲ではディーゼルハンマーによる建て込みを午前中2本行い、午後から海象条件の影響をうけることが比較的少ないエアハンマーにて打下げを行うという稼働時間を増やす方法を取り、結果として杭打の歩掛りは暦日当り、0.85本/日、稼働日当り、1.63本/日であった。

Table 8 は杭打工事に関する稼働率、出来高を示したものである。

4・2 杭打ち精度

杭打設に先立って、打込み精度 (平面位置) はオフショアにおける杭打ちという特殊性を考慮して設計位置より30 cm の目標値を設定した。また、杭鉛直軸の傾斜については杭長の4 % を最大値とした。一方、上部構造の設計は杭打設許容値10～20 cm の範囲で設計されているため、この値を超えた杭については上部構造の設計チェックを行うこととした。

(1) 測量方法

鋼管杭を打設位置へ誘導するには杭打船の正面と側面の2方向から視準するのを原則とした。海上にはあらかじめ海上測量台を設置しておき陸上の基準点より誘導用のポイントを出しておく。鋼管杭の視準は海上測量台よりトランシットを使用してトランシーバーにて杭打船を誘導した。また、チェックのために陸上より正面、側面の誘導点に対して45°方向からトランシットにて確認するとともにトレスル上の適当な位置から光波測距儀による測距をも実施した。

なお、海上測量台は杭打船の作業に支障をきたさないようにするため3基製作し、効率よく転用するとともに、ポイントの設定作業も杭打誘導とは全く別の人員・設備で実施できるように配慮した。

Fig. 9 は杭打設後測定した杭打ち精度の分布を示したものである。

4・3 杭打設能力

杭打設にあたってはハンマーの選択が重要なポイントである。

Table 8 Operation record of pile driving

		1981				1982	Total	Remark
		Oct.	Nov.	Dec.	Jan.			
A	Calendar day	31	30	31	23	115 days		
B	Working day	15	14	13	18	60 days		B/A=53 %
C	No working day	16	16	18	5	55 days		
D	Reason for non-working day	Bad weather	8	13	15	4	40 days	D/A=35 %
E		Other reasons (Maintenance etc.)	8	3	3	1	15 days	E/A=13 %
F	No. of driven piles (pcs)	18	27	17	36	98 piles		
G	No. of driven piles Calendar day	0.58	0.90	0.55	1.5	0.85 piles/day		
H	No. of driven piles Working day	1.20	1.93	1.31	1.89	1.63 piles/day		

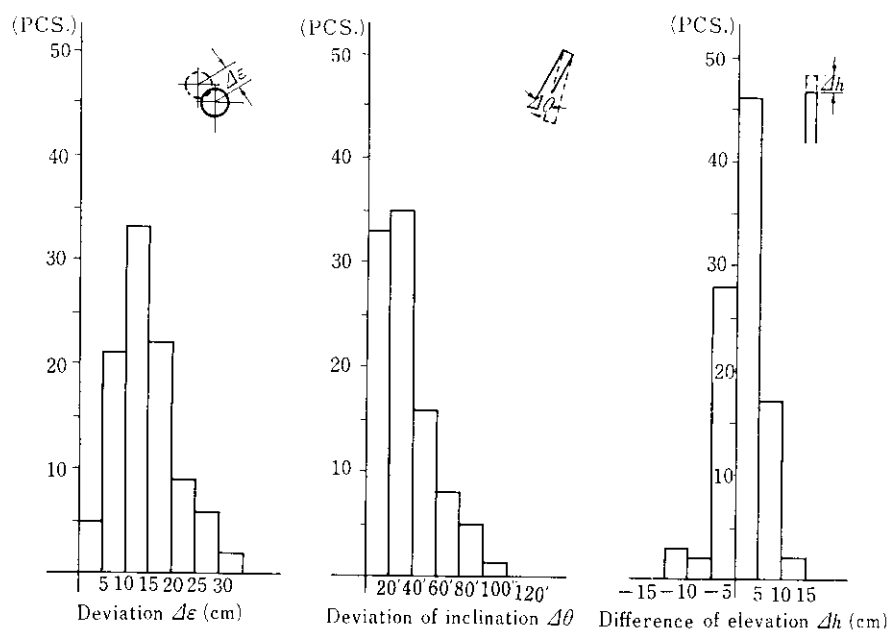


Fig. 9 Deviation obtained by measuring after pile driving

このプロジェクトでのハンマー選択に当っては次の条件より判断した。

- ①最長杭のサイズ： $\phi 1500 \text{ mm} \times t 36 \text{ mm} \times l 55 \text{ m}$
(重量=71.5 t)
- ②杭の根入れ長：最長38 m
- ③土質条件：中間砂層 $N=14 \sim 36$ 、支持層 $N=43 \sim 50$ の良く締った細砂

これよりハンマーの構成を中間砂層への根入れをディーゼルハンマー MH-80B、支持層への根入れをエアハンマー MRB-2000で行う複合型とした。

Table 9 は打設杭総本数の杭長別のハンマー最終打撃沈下量 (20 cm 当りの打撃回数より求めている) とそれに対応する波動方程式²⁾より求めた極限支持力を示す。ディーゼルハンマー MH-80 B による貫入量は中間支持層の値である。

4.4 大口径鋼管杭の支持力

施工中における鋼管杭の支持力管理は波動方程式によるものとした。Fig. 10 はその一例を示したものである。貫入量としては最終20 cm 当りの平均貫入量を用いた。また、この推定値を検証するためトレスルのほぼ中央にあたる P-16において最大載荷量815t、プラットフォームにおいて最大載荷重1470 tの載荷試験を実施した。

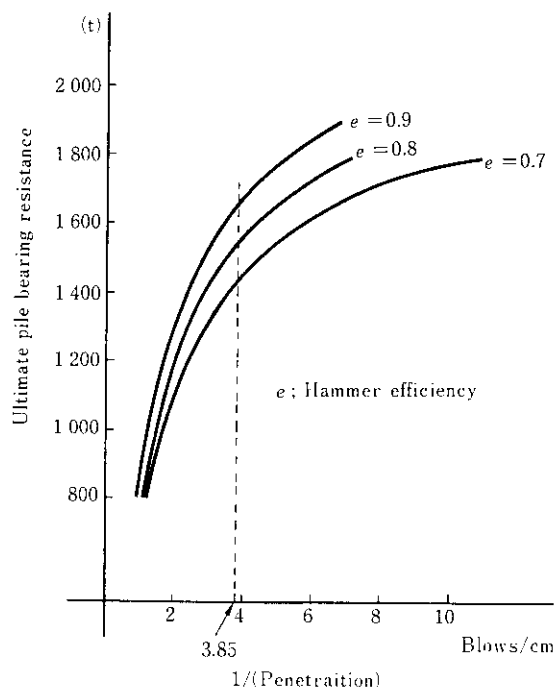


Fig. 10 Ultimate pile bearing resistance by wave equation

Table 9 Penetration per blow

Pile length	Driving with MH-80		Driving with MRB 2000		Pile bearing capacity from wave equation (Average)
	Number of piles	Average penetration	Number of piles	Average penetration	
$L=33, 35 \text{ m}$	8	0.361 cm	2	0.565 cm	1 520 t
$L=41.5, 43, 45 \text{ m}$	63	0.528 cm	61	0.497 cm	1 663 t
$L=54, 54.5 \text{ m}$	23	0.249 cm	23	0.357 cm	1 764 t
$L=55 \text{ m}$	4	0.393 cm	4	0.375 cm	2 320 t
$L=33 \sim 55 \text{ m}$ (Total piles)	98	0.444 cm	90	0.457 cm	1 715 t

Fig. 11 にブラットホーム部における試験結果を示す。この結果、降伏荷重1100 t、極限荷重は1400～1470 t、また、試験杭の弾性ちぢみ量の測定結果から最大荷重(1400 t) 荷重時における支持力の分担は摩擦抵抗が800 t(54%) 先端支持力が670 t(46%)と推定された。これらの値は、波動方程式による推定(Fig. 10 参照)、および Meyerhof の静的支持力公式³⁾とも非常に一致をみた。

5. まとめ

以上、台湾における石炭桟橋建設工事の事例をもとにオフショア構造物への大径鋼管杭の利用について述べてきたが、これらをまとめると下記ようになる。

(1) 鋼管杭の現地溶接

タンデムサブマージドアーク溶接の採用により効率よく、かつ高度な品質を有する施工が可能であった。

(2) 鋼管杭の打設

南シナ海に面した厳しい海象条件のもとではあったが、ディーゼルハンマーとエアーハンマーの併用により、工期、杭打精度ともに、満足できる成果を得た。

(3) 鋼管杭の支持力

鋼管杭の支持力管理を、施工中は波動方程式理論をもとに推定し、それを荷重試験により検証するという方法で実施した。荷重試験においては、降伏荷重、極限荷重を確認するとともに、支持力機構をも解明することができ、大口径開端鋼管杭の支持力究明に貴重なデータを提供し得たと考えられる。

本工事は当初の工期に対し、発注者側の事情や他業者による周辺の関連工事、追加工事などのために工期が延びて本年3月、竣工のはこびとなった。当社エンジニアリング事業部として処女地での本格的なオフショア構造物の建設に対し、プライムコントラクターとして施主、コンサルタントおよび現地業者との協調をも含めて無事完了することができたことを喜ぶとともに、御指導ならびに御協力をいただいた台湾および日本の関係各位に深謝するしだいである。

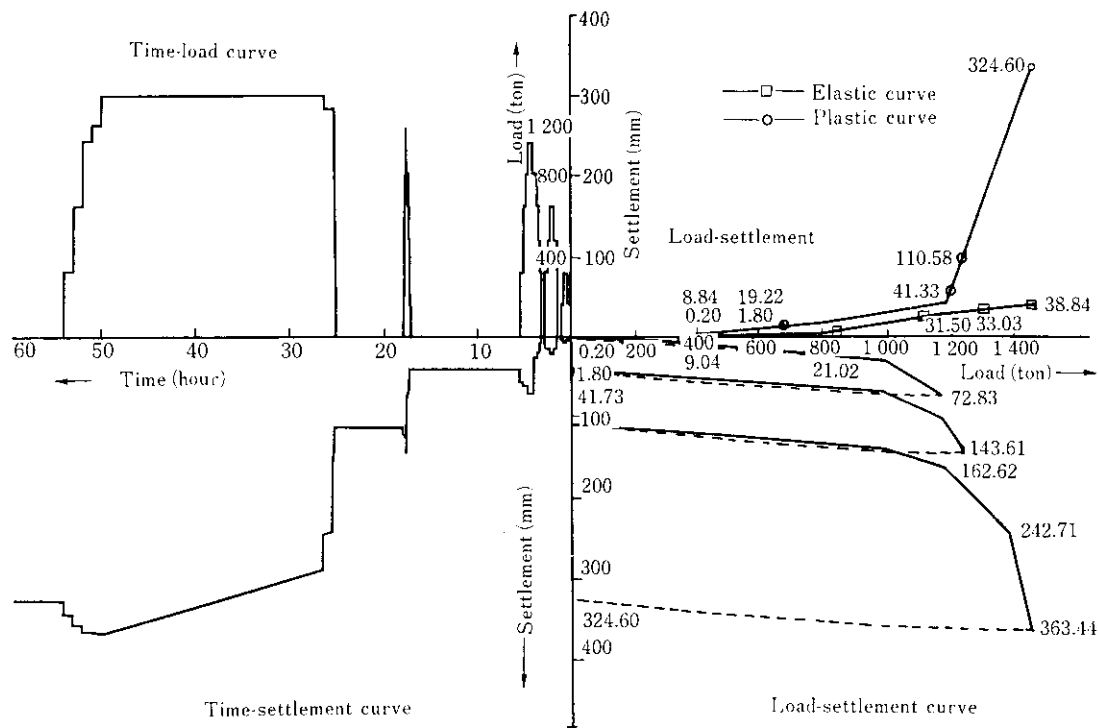


Fig. 11 Load-settlement curve

参考文献

- 1) 赤秀, 占谷, 石田: 「高能率円周サブマージアーク溶接技術の確立」, 川崎製鉄技報, 15(1983)4, 318-326
- 2) P.W. Forehand and J.L. Reese, Jr.: "Prediction of pile capacity by the wave equation", Journal of the soil mechanics

and foundation division, ASCE, 90, No. SM2, Proc. paper 3820, 1-25, (1964)

- 3) Meyerhof, G.G.: "The ultimate bearing capacity of foundations", Geotechnique, 2(1951)4, 301-332,