
コタ・キナバル港拡張工事

Kota Kinabalu Port Expansion Project

古谷 博明(Hiroaki Furuya) 鹿毛 征二(Seiji Kage) 福若 雅一(Masakazu Fukuwaka) 四宮 秀夫(Hideo Shinomiya)

要旨：

当社エンジニアリング事業部は、マレーシア・サバ州コタ・キナバルにおいて港湾拡張工事を1985年5月に受注し、1987年11月に竣工した。本工事においては、腐食環境の非常に厳しい熱帯海洋域での信頼性の高い防食を目的として、当社のポリエチレン被覆重防食鋼管杭 KPP パイルが全面的に採用され、総本数 1429 本（鋼重 11000t）が使用された。このような大量の鋼管杭を海上で密に施工した例は極めて稀であり、North Extension においてはとくに重防食被覆層への損傷防止に主眼を置いて杭打順序が検討された。また、杭打設中の既打設杭の移動については、杭打設による周辺地盤の変位についての計算方法の検討を行い、実測変位と比較した。

Synopsis：

The Kota Kinabalu port expansion project in Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia was started in May 1985 and successfully completed in November 1988 by Kawasaki Steel Corporation. The major feature of this project is that KPP(Kawasaki plastic-coated pipe) piles, a total number of 1429, were used. This method was adopted as the most effective anti-corrosion protection system for the heavy corrosive marine environment which existed in this tropical area. Driving such a large number of piles offshore in close proximity to each other was an unusual undertaking. In addition, the execution plan was carefully considered in order not to damage the high corrosion resistance coating during installation of the piles. The problem of movements of existing piles due to new pile driving was investigated and an evaluation method was utilized for the movements of the adjacent ground. Then the results of this evaluation were compared with actual data.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

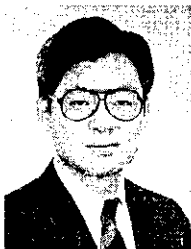
Kota Kinabalu Port Expansion Project



古谷 博明
Hiroaki Furuya
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)



鹿毛 征二
Seiji Kage
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)



福若 雅一
Masakazu Fukuwaka
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)



四宮 秀夫
Hideo Shinomiya
エンジニアリング事業
部 土木技術部土木技
術室

1 まえがき

マレーシア、サバ州のコタ・キナバル港は、サバ州港湾局 (Sabah Ports Authority: SPA) が管理する港湾のひとつであり、サバ州の財源である木材の出荷や一般消費材、工業製品を取り扱う一般商港であり、サバ州の経済拠点となっている (Fig. 1)。本港は 1968 年の供用開始以来、数回の拡張を経て規模が拡大してきたが、年々増加する荷役量に対する港湾の能力不足、施設の老朽化、また世界のすう勢となっている荷役のコンテナ化への対応といった問題を抱えていた。また、半島マレーシア、サラワク州とのフェリーによる海上交通路の強化を目的として同港湾内に可動橋棧橋が建設されたが、これについては川鉄技報 Vol. 19 No. 4 で報告した。本拡張工事は、これらの課題を解決するために計画されたものである。当社は、兼松江商株式会社および現地業者とコンソーシアムを組織し、1985 年 5 月に本工事を受注し、1987 年 11 月に竣工した。

本報文はコタ・キナバルにおいて実施した港湾拡張工事について、KPP パイル (ポリエチレン被覆鋼管杭) の施工およびコンクリート工事を中心にしてその工事概要について報告するものである。

要旨

当社エンジニアリング事業部は、マレーシア・サバ州コタ・キナバルにおいて港湾拡張工事を 1985 年 5 月に受注し、1987 年 11 月に竣工した。

本工事においては、腐食環境の非常に厳しい熱帯海洋域での信頼性の高い防食を目的として、当社のポリエチレン被覆重防食鋼管杭 KPP パイルが全面的に採用され、総本数 1 429 本 (鋼重 11 000 t) が使用された。このような大量の鋼管杭を海上で密に施工した例は極めて稀であり、North Extension においてはとくに重防食被覆層への損傷防止に主眼を置いて杭打順序が検討された。

また、杭打設中の既打設杭の移動については、杭打設による周辺地盤の変位についての計算方法の検討を行い、実測変位と比較した。

Synopsis:

The Kota Kinabalu port expansion project in Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia was started in May 1985 and successfully completed in November 1988 by Kawasaki Steel Corporation. The major feature of this project is that KPP (Kawasaki plastic-coated pipe) piles, a total number of 1 429, were used. This method was adopted as the most effective anti-corrosion protection system for the heavy corrosive marine environment which existed in this tropical area.

Driving such a large number of piles offshore in close proximity to each other was an unusual undertaking. In addition, the execution plan was carefully considered in order not to damage the high corrosion resistance coating during installation of the piles.

The problem of movements of existing piles due to new pile driving was investigated and an evaluation method was utilized for the movements of the adjacent ground. Then the results of this evaluation were compared with actual data.

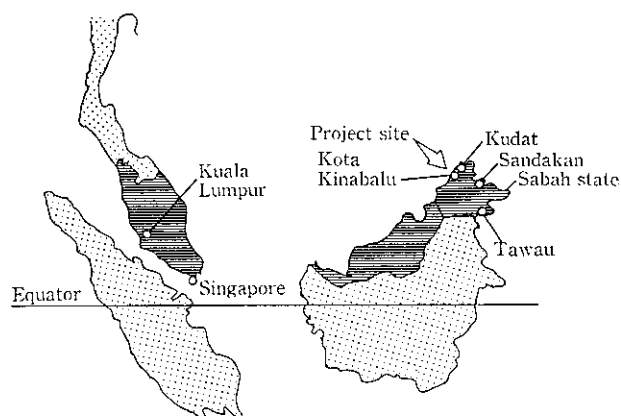


Fig. 1 Major ports in Sabah and project site location

* 昭和63年9月14日原稿受付

2 工事概要

本工事は Fig. 2 の平面図に示すように、新設栈橋 (New South Jetty) の建設、既存栈橋の拡張 (North Extension) および電気・水道施設の建設に大別される。栈橋の一般断面図を Fig. 3 に示す。栈橋のデッキスラブにプレキャストコンクリートユニット (PC ユニ

ット) が採用されている。主要工事数量を Table 1 に示す。

工事は、既設港湾施設内において実施されることから、工事期間中においても港湾荷役機能を低下させることのないよう工期内工期 (Table 2) が定められており、またこれに合わせて工事用占有水域が制限され、時間的にも空間的にもきめ細かい施工管理が要求された。

契約工期は 35 箇月であったが、実際はこれを 5 箇月短縮した 30

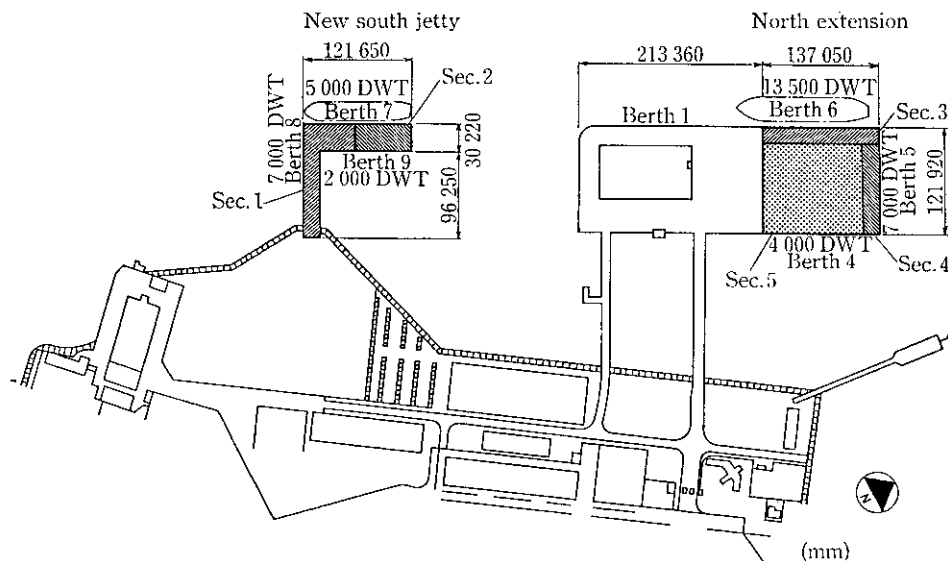


Fig. 2 General plan

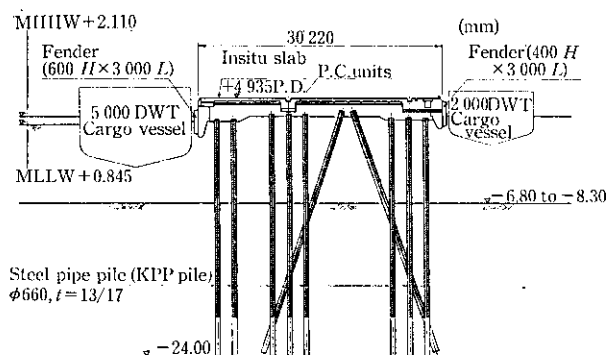


Fig. 3 Typical section

Table 2 Staged completion schedule

Section No.	Project month	Completion date	Location
Sec. 1	13	1986 Jun. 23	Berth 8 New south jetty
Sec. 2	15	1986 Aug. 31	Berth 7, 9 New south jetty
Sec. 3	20	1987 Jan. 31	Berth 6 North extension
Sec. 4	28	1987 Sep. 30	Berth 5 North extension
Sec. 5	35	1988 May 1	Berth 4 North extension

Table 1 Quantities of major items

Item		New south jetty	North extension	Total
KPP pile ^{*1}				
Number of piles		379	1 050	1 429
Weight of pile (t)		2 899	8 030	10 929
Concrete (Total)	(m ³)	7 018	17 628	24 646
Precast unit	(m ³)	1 650	4 706	6 356
Insitu concrete	(m ³)	5 368	12 922	18 290
Ductile iron pipe				
150 mm O.D. for water supply	(m)	400	400	800
200 mm O.D. for fire protection	(m)	240	400	640

*1 660 mm O.D. x 17/13 mm thick

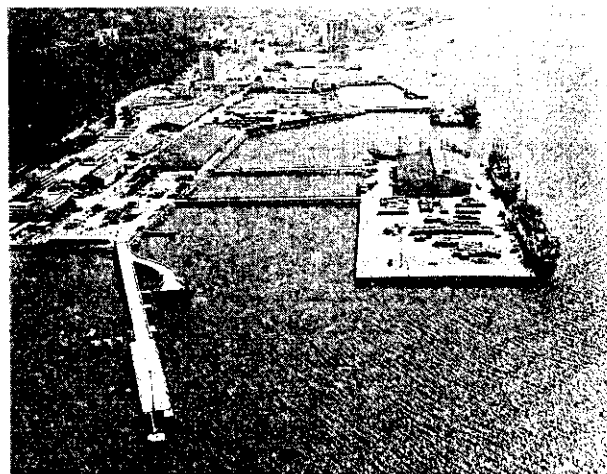


Photo 1 Overall view of Kota Kinabalu port

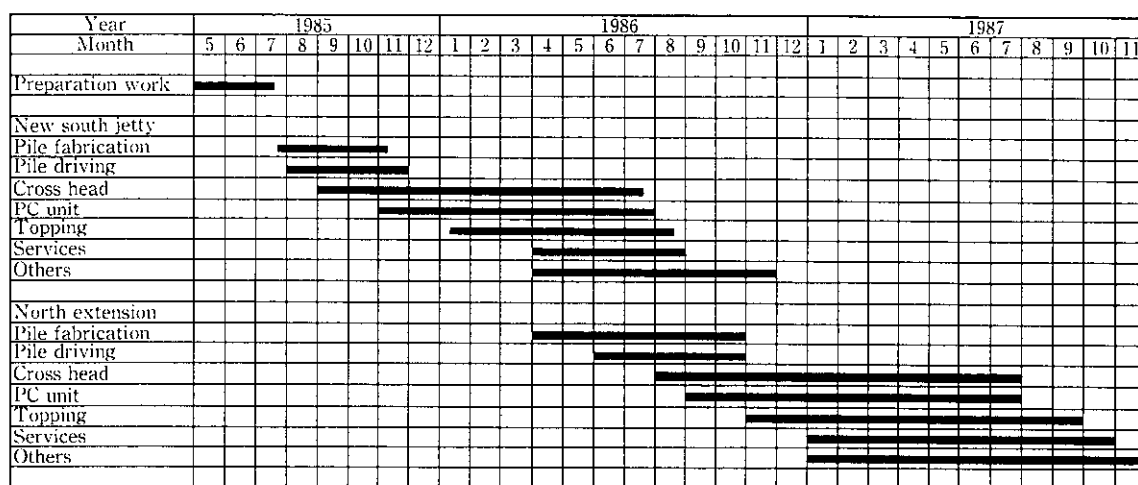


Fig. 4 Actual execution of construction

箇月で完工した。実績工程表を Fig. 4 に示し、また栈橋の完成写真を Photo 1 に示す。

3 KPP パイルの施工

3.1 KPP パイル

海洋構造物の場合、鋼管杭の防食は極めて重要な要因である。当工事においては、原設計ではコールタールエポキシ塗装による防食が考えられていたが、ポリエチレン被覆が施された重防食鋼管杭 KPP パイル (Fig. 5) が全面的に採用されることとなった。

KPP パイルは従来の防食工法と比べてメンテナンスフリーで長期間の防食性能を有することおよび耐久性の高い厚膜ポリエチレンを被覆していることから腐食しを減少することができ、Table 3 に示すように原設計に比べて約 1100t の鋼材を減らすことができた。

3.2 現地製作

本工事で使用した KPP パイルは、長さ 12~18.5 m の鋼管を日本から輸送し、現地で上杭と下杭の円周溶接および杭先端の閉塞加工を行った。現場円周溶接は、杭をターニングローラーで回転させながらサブマージ溶接で行ったが、溶接方法、溶接部の検査については、以下に示すように、British Standards (BS) に基づいた厳しい検査が要求された。

- (1) 試料の破壊検査を含む溶接施工法試験 (BS 4870, BS 709)
- (2) 溶接工の技術試験 (BS 4871)
- (3) 円周溶接部の 100% X線検査 (BS 4870)

この中でも、(3) の現場円周溶接部の検査においては、溶接部の補修が必要な欠陥が発生すると、後工程の現場円周溶接部の防食処理に重大な影響を及ぼし、ひいては杭打設が遅れることとなるので、品質管理には細心の注意を払い万全の対策を施した。

3.3 杭打ち工事

3.3.1 打止め管理

当工事における打止め管理は、以下の手法で行われた。

- (1) コンサルタントの指示による位置での試験杭打設
- (2) 試験打設杭を用いての載荷試験の実施 (4 箇所)
- (3) 載荷試験結果による動的支持力公式の検討と補正

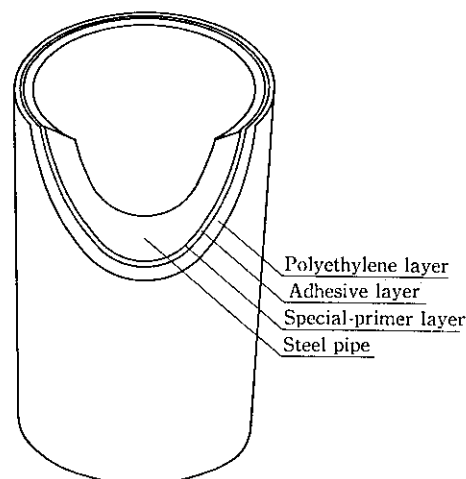


Fig. 5 KPP (Kawasaki plastic-coated pipe) pile

Table 3 Comparison of steel pipe pile foundation system

Item	Original design	Final design using KPP piles
Diameter (mm)	660	660
Thickness of steel pipe pile		
Upper pile	19.0	17.0
Lower pile	14.2	13.0
Weight of steel pipe pile (t)	12 035	10 929
Corrosion protection treatment		
Material	Coal tar-epoxy	Polyethylene
Thickness	450 micron	2.5 mm

- (4) 補正された動的支持力公式を用いての打止め管理

適用する動的支持力公式は、Hiley 公式と決められていたが、具体的には明示されておらず、日本で一般的に用いられている (1) 式の修正式を用いるのか、(2) 式で示される原式を用いるのかコンサルタントと意見の食い違いがあった。しかし、試験杭を打設した時点では、サンプル数が少ないことから、安全性を考慮してコンサルタントの主張する式 (2) が用いられた。

$$R_u = \frac{e_f \cdot 2WH}{S + C/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$R_u = \frac{WH}{S + C/2} \times \frac{1 + e^2(P/W)}{1 + (P/W)} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 R_u : 杭の極限支持力 (t)
 W : ラム重量
 H : ハンマの落高
 S : 一打当たりの貫入量
 C : リバウンド量
 P : 杭とキャップの重量
 e_f : ハンマ効率
 e : 反発係数

3.3.2 杭打ち順序

North Extension では以下の点を考慮して杭打ち順序を計画する必要があった。

- (1) Table 2 に示すように 3 工区に分けて段階的に完成し引き渡すことになっているため、工期面から杭打ち順序の制限を受ける。
- (2) 平面形状が大きいため杭打船のアンカーワイヤが既設杭と錯綜するので、アンカーワイヤの移動を極力少なくするように杭打ち順を考慮しなければならない。
- (3) 隣接する既設棧橋は杭打ち工事中も使用されており、アンカーワイヤを設置できる海域が制限される。

Fig. 6 に実際の杭打ち順序を示す。Sec. 6 の杭打ちを行う際には、Sec. 4 の部分の型枠・鉄筋工が進んでおり、この領域を横断するアンカーワイヤの設置は危険であり作業効率も低下するので、既設の斜杭を利用して簡易ドルフィンを構築し、これを利用してアンカーをとることとした。また、アンカーワイヤが既設の杭と海中で接触し、杭の防食層に損傷を与えるのを防止するためにアンカーの設置位置に工夫し、やむをえない場合は被覆部の保護を行った。Fig. 7 に North Extension の式 (1) で算出した極限支持力を示す。

打止め管理は、設計支持力の 2 倍 (240 t) 以上でなされたが、式 (1) による管理では、平均 280 t であった。

また、1 本当たりの打撃回数は、平均で 618 回で通常の杭打ちと比べて非常に少ない。これは、上層地盤が軟弱であり、支持層である風化頁岩層への杭の根入れ時のみ打撃が行われたことによるものである。

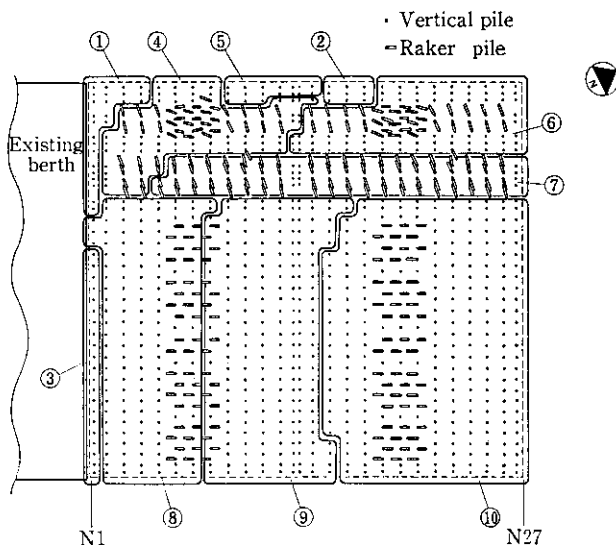


Fig. 6 Sequence of pile driving for north extension

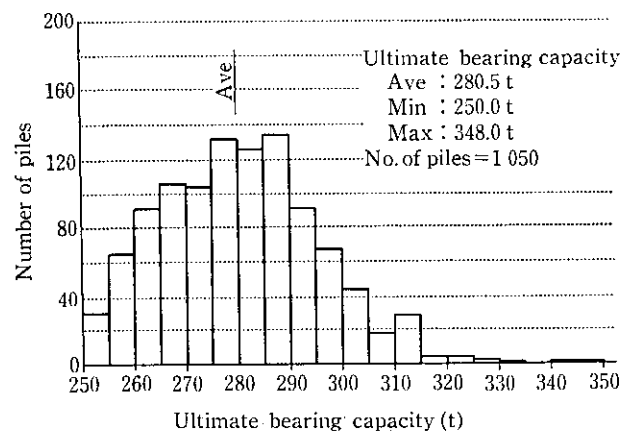


Fig. 7 Ultimate bearing capacity estimated by Hiley formula

打込みは、ディーゼルハンマ KB45 を使用し、杭打歩掛りは実際働日当たり 7 本/日 であった。

3.3.3 載荷試験

先に述べたように、支持力管理の一環として 4 箇所において載荷試験を実施した。試験は同一の試験杭を用いて、最初に引き抜き試験を行い、再打撃の後、押込み試験を行うもので、計 8 回の試験が行われた。代表的な土質柱状図を Fig. 8 に示す。

試験は、BS CP2004 に規定されている Maintain Load 法にしたがって行った。最高載荷重は、設計荷重の 150%、引抜き試験で 88 t、押込み試験で 180 t である。

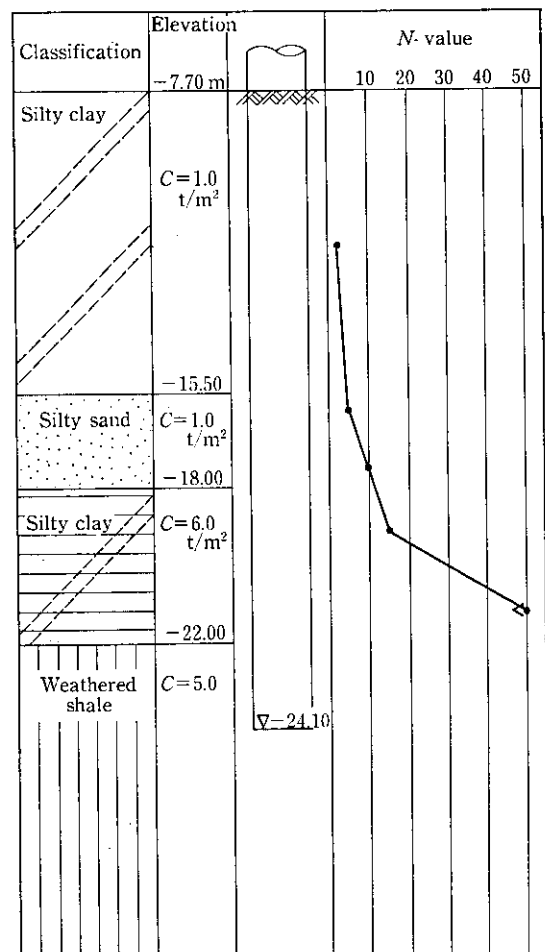


Fig. 8 Soil condition

Table 4 Results of pile load tests

Item	Tension test				Compression test			
	New south jetty		North extension		New south jetty		North extension	
	1st	2nd	T1	T2	1st	2nd	T1	T2
Pile data								
Length (m)	31.89	29.51	33.63	33.24	30.01	27.63	31.86	31.94
Hammer energy (t·m)	10.35	11.03	11.05	10.80	11.30	10.80	10.70	10.90
Final set (mm/blow)	0.83	0.51	0.56	1.32	0.46	0.24	0.60	1.00
Rebound (mm)	24	27	30	27	24	24	27	25
R_u (t)	—	—	—	—	332	329	275	273
Test result								
Max. applied load (t)	110	75	88	88	197	200	180	180
Max. settlement (mm)	11.05	48.00	5.05	5.94	11.63	12.11	13.35	10.07

Table 4 に試験結果と (1) 式による動的支持力公式による推定極限支持力を示す。

引抜き試験では、New South Jetty の第 2 回目の試験杭で最高計画荷重の 85% (75 t) で杭が抜け上り斜杭の支持力が心配されたが、作用引抜き力の大きい斜杭のみ貧配合のコンクリートを杭全長にわたって充填し、杭自重を増加させる対策を行った。

打込み試験では、最高荷重においても明確な降伏荷重に達しておらず、荷重と沈下量の関係はほぼ線形で、十分な支持力を有していると推定される。

3.3.4 先端閉塞杭

本工事においては、Fig. 9 に示すような先端閉塞杭が採用された。これは、杭の支持層が数メートルの風化頁岩層であることから、開端杭では、十分な支持力が発揮されないとのことによるものである。打込みにあたっては、閉塞杭であるため杭に作用する浮力により十分貫入できないのではと心配されたが、結果的には開端杭を用いた場合と顕著な差異は見られなかった。

しかし、完全に杭先端が閉塞されているため、打込み中の排土量が大きく、杭配置も密であったので、先行して打設した杭がその後の杭打設による土の側方移動によって移動する現象が生じた。

Fig. 10 に各杭列ごとの平均杭頭移動量の観測値を示す。杭の打込みは、杭列番号 N1 (南側) から N27 (北側) 方向に進んでいったが、杭頭変位は杭打ちの進行方向と逆向きに平均で約 100 mm 移動していることがわかる。

このような排土量の大きい杭を施工する際に、既設杭が移動するということは定性的には周知のことであるが、ここでは有限要素法による解析を試みた。解析に際しては、杭の打設時の周辺地盤の変形挙動を軸対象問題として扱い、地盤モデルは関口・太田²⁾の構成式を使用した。また、地盤は粘性土地盤と考え、杭打設による非排水挙動だけに注目し、その後の時間経過にともなうクリープや圧密については考慮していない。

Fig. 11 は、地盤中に杭が 4 m 貫入した時点での地表面の鉛直変位 V_r と水平変位 U_r の半径方向変化の解析結果を示したものである。地盤強度は、粘性土の地盤強度 C_u と土かぶり圧 p の比 C_u/p を 3 種類に変化させてある。これより、杭近傍の 2 m 程度以内は、杭の貫入にともなう地盤は大きなせん断力を受けて降伏状態にあり、 C_u/p の大小による解析値のバラツキは大きく、水平方向変位 U_r の低減の様子も大きく異なっていることがわかる。しかし、 $r > 2$ m の範囲では C_u/p の大小による差は小さく、同じような変位傾向を示している。

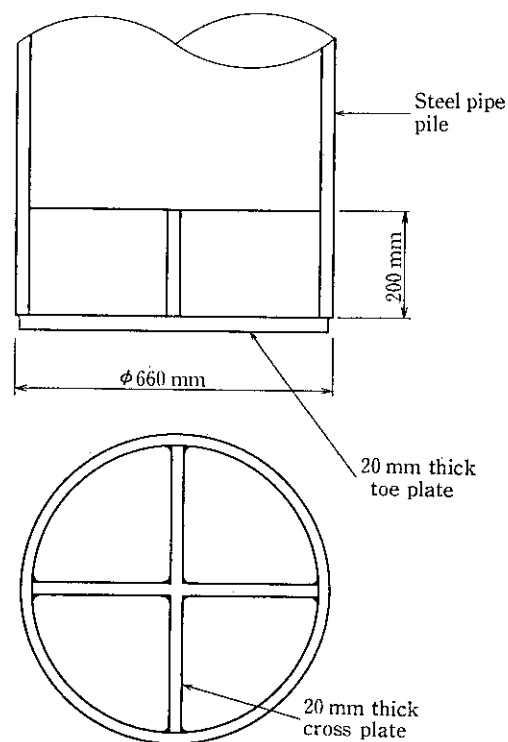


Fig. 9 Closed end pile

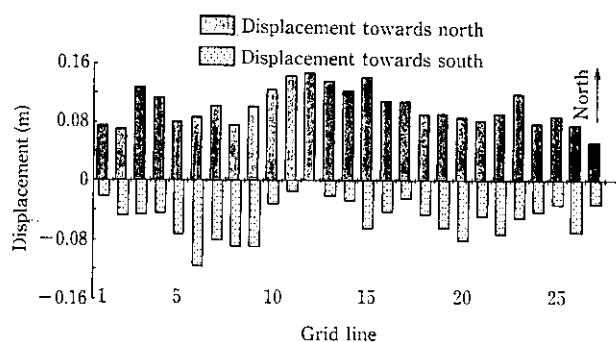


Fig. 10 Displacement of pile position caused by adjacent piling

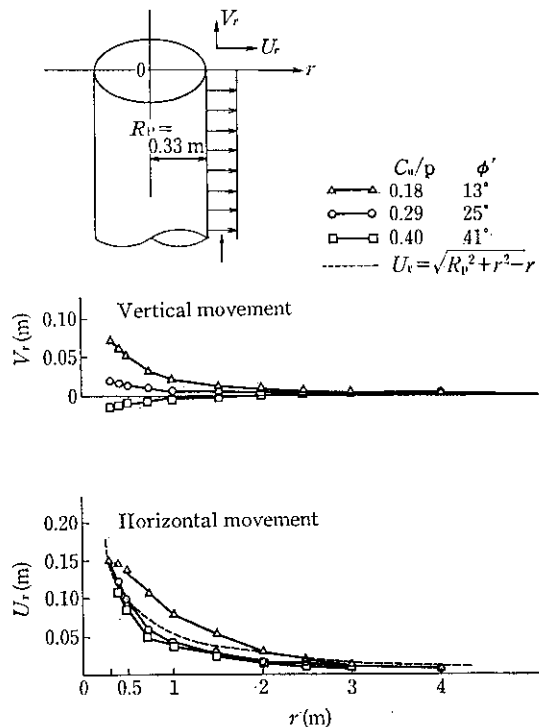


Fig. 11 Analysis of pile movement

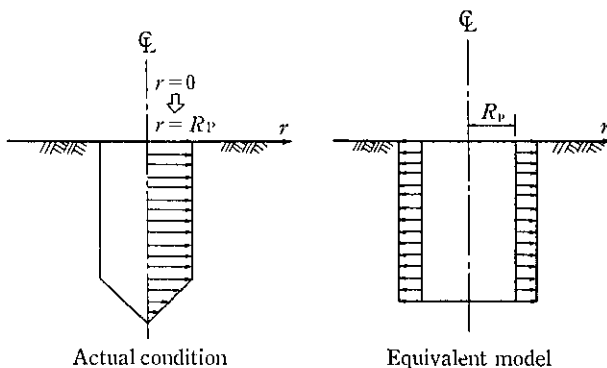


Fig. 12 Equivalent model for analysis

一方、Fig. 12 に示すように、杭の貫入による地盤の変位を等価な円筒押し抜け問題として取り扱えば、等価な地盤の水平変位量は、式(3)で表される。

$$U_r = \sqrt{R_p^2 + r^2} - r \quad (r > R_p) \quad (3)$$

ここに、 U_r : 等価地盤水平変位量

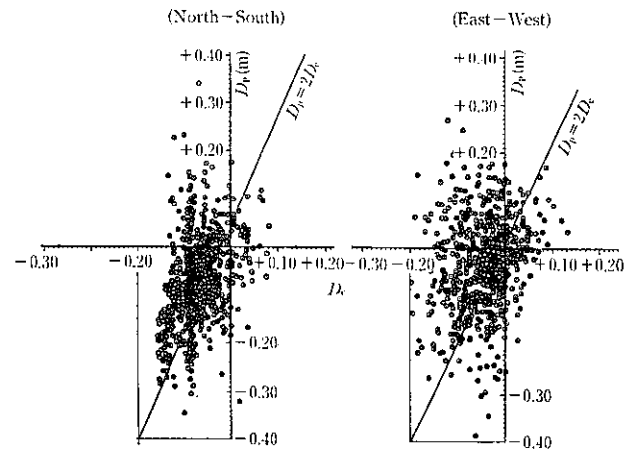
R_p : 杭の半径

r : 杭中心からの距離

Fig. 11 の中に式(3)で求めた水平変位も示してあるが、 $r > 2$ m の範囲では、有限要素法で求めた値とほとんど一致している。

Fig. 13 は、式(3)を用いて実際の杭打ちをシミュレートした結果と観測値との比較を示したものである。バラツキは非常に大きい。杭頭変位量の観測値を D_p とし、地盤変位の計算値を D_e ($D_e = \sum U_r$) とすると、杭打進行方向およびその直角方向ともに $D_p \approx 2D_e$ の関係がみられる。

杭頭変位量が地盤の変位量より大きいのは、実際の地盤では地盤表面が深部に比して変位量が大きく、杭が若干傾斜し杭頭部の変位が地盤変位より大きくなるためであると考えられる。

Fig. 13 Comparison between observed pile displacement D_p and calculated ground displacement D_e

4 コンクリート工事

4.1 支保工

当工事で工程上重要であるのは、杭打工事と杭を結合するクロスヘッドと称するコンクリートビームの構築である。

クロスヘッドの構築は、すべて海上作業であり、とくに North Extension では平面形状が大きく作業台船等の重機の使用可能範囲が限られていることから、コンクリート工事のための支保工の設置方法が重要な役割を有している。

支保工の設計・計画においては以下の条件を考慮した。

- (1) 潮位とクロスヘッド下端レベル
- (2) 波浪
- (3) 杭の設計中心からの偏差とコンクリート打設時の安定性
- (4) 支保工の組立、解体の方法、手順
- (5) 仮設用鋼材の転用

波浪は、乾期(5~10月)と雨期(11~4月)とでかなり差がある。過去1年間の観測では、乾期で波高0~15 cm、雨期で0~50 cm となっており、とくに12月~1月の3箇月間は季節風が強く海上作業が非常に困難となる。

支保工構造の選定は前述の条件を考慮して行ったが、検討対象とした構造の比較を Table 5 に示す。

当初は、コンクリートに埋め込まれる鋼材量の少ない吊支保工(1)を採用していたが、3.3.4 で述べたように杭打設後の杭の移動が生じたため、杭の偏心に対する許容幅の大きい吊支保工(2)に変更した。Photo 2 に支保工の架設状況を示す。

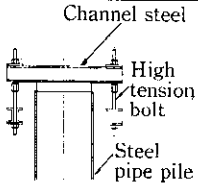
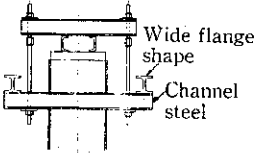
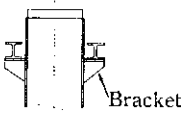
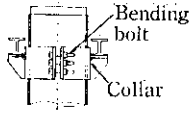
4.2 コンクリートの配合

コタ・キナバルにおいてはレディミックスコンクリートが使用可能であったが、コンクリートの打設量が多いこと、品質管理および供給能力に不安があったことで、現場内にバッチャープラントを建設し、すべてのコンクリートをここから供給することにした。使用したコンクリートの配合を Table 6 に示す。

4.3 暑中コンクリート

コタ・キナバルは北緯約6度の熱帯地域に位置するためコンクリートの温度管理は非常に厳しく、当工事の仕様書においてもコン

Table 5 Comparison of supporting systems

Type of support	Sketch	Advantages	Shortcomings
Hanger type (1)		• Less temporary embedded steel than hanger type (2). • Easy installation.	• Application to raker pile is difficult. • Small allowance for pile deviation.
Hanger type (2)		• Large allowance for pile deviation. • Location of hanger bolt can be selected at any point.	• Large quantity of temporary embedded steel. • Takes time for installation.
Bracket type		• No embedded steel. • Easy installation.	• Removal and repair of coating is required. • Application to raker pile is difficult. • Welding of bracket is affected by tide level.
Pre-fabricated bracket type		• No coating removal. • No embedded steel.	• Fabrication of steel bracket is expensive. • Bearing share capacity between bracket and pile has to be investigated.

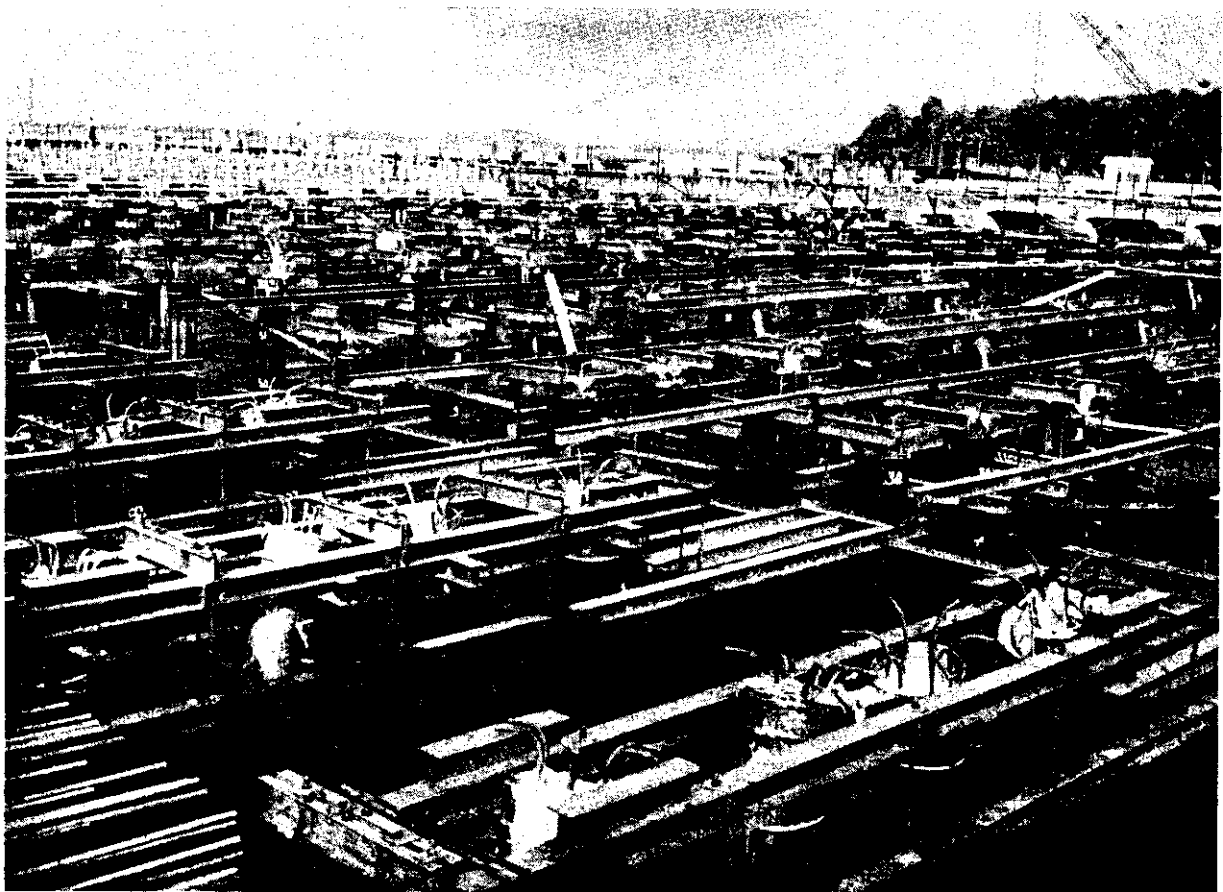


Photo 2 Support system for superstructure

Table 6 Concrete design mix

28 days strength	(N/mm ²)	30
Max. coarse aggregate size	(mm)	20
Slump	(mm)	75-100
Water/cement ratio	(%)	45
Fine/coarse aggregate ratio	(%)	42
Unit weight	(kg/m ³)	
Water		180
Cement		400
Fine aggregate		742
Coarse aggregate		1 014

リート温度は打設地点において30°C以下であることと明記されていた。試験練りの段階から、コンクリートの打設温度を下げるための対策を行ったが、現場に搬入される骨材、練り混ぜ水（上水道）およびセメントの温度が高く、より効果的な対策が必要となった。

そこで、Fig. 14に示すような冷却水設備を設置し、2~4°Cの練り混ぜ水を使用することにした。また、日中のコンクリート打設をできるだけ避け、早朝、夜間に打設することとしたが、打設量が多く日中に打設せざるを得ない場合は練り混ぜ水の一次冷却用に砕氷を使用した。

Fig. 15は、冷却水を用いたコンクリートと用いない場合のコンクリートの打設温度と28日圧縮強度の関係を示したものである。強度のパラッキは大きい、コンクリートの打設温度の上昇に反比例して圧縮強度が低下する傾向が認められる。しかし、温度上昇による強度低下の割合は小さく打設後の養生が十分なされる限りにおいては、この程度の温度差では圧縮強度についての問題は少ない。

5 まとめ

本報文では、マレーシアのコタ・キナバルで行われた港湾拡張工事について報告した。この結果は以下のとおりである。

- (1) 熱帯海洋域という腐食環境の厳しい地域において、原設計の防食工法であるタールエポキシ塗装+腐食しろに代わって、現在最も信頼性が高いとされている重防食鋼管杭 (KPP パイル) を代替案として提出し、これが全面的に採用された。
- (2) 海上で大量の KPP パイルを密に施工した例は少ないが、本工事では、被覆材の損傷を防止するため杭打順序、杭打船の配置およびアンカーワイヤに注意して施工することにより損傷を最小限に抑えることができた。
- (3) 被覆鋼管杭を施工する際は、杭打中のみならず完成まで損傷

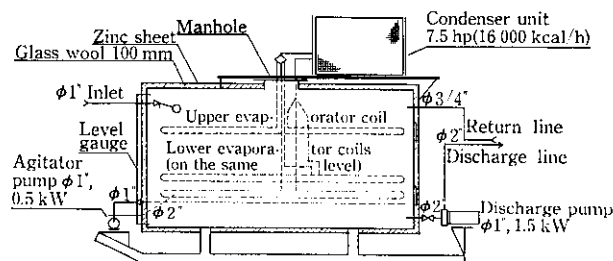


Fig. 14 Chilled water supply system (Tank capacity: 8 000 l)

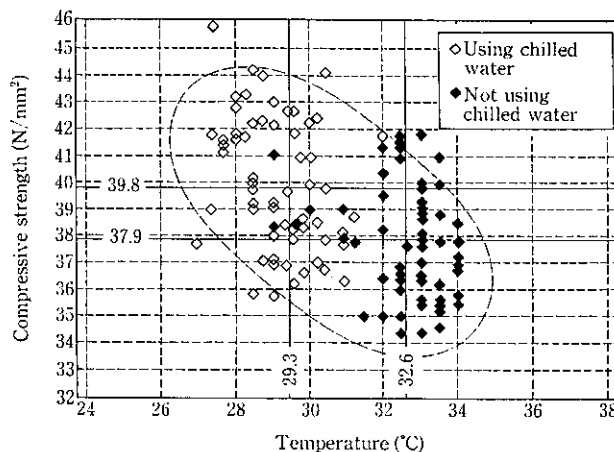


Fig. 15 Relation between concrete temperature and compressive strength

を防止する対策が必要であるが、これらの対策による作業速度の低下は見られなかった。

- (4) 閉塞杭の打設中の既打設杭の変位に対する影響を定量的に把握することができ、地盤変位を予測するひとつの考え方を示した。
- (5) 暑中コンクリートについては、数々の制約があったにもかかわらず簡易な冷却水設備を導入することにより所定の温度でコンクリートを打設することができた。

本文中では触れなかったが、英国コンサルタントの厳格な施工管理下での工事で、当初は工期的にも余裕がなかったが、関係者の努力により最終的には約5箇月工期を短縮して工事を終えることができた。これはひとえに国内外の関係各社のご協力のたまものであり、最後となりましたが、関係各位へ深甚の謝意を表します。

参考文献

- (1) 越後勇吉, 榑 豊和, 中村茂樹, 西口 明, 小林徳寿: 「コタ・キナバル可動橋樑橋施設」, 川崎製鉄技報, 19 (1987) 4, 268-273
- (2) H. Sekiguchi, H. Ohta: "Induced Anisotropy and Time Dependency

in Clays", The 9th ICSMFE, Speciality Session 9, Tokyo (Japan), (1977), 229-238