

30,000 DWTバース建設工事と杭の載荷試験

Construction of 30,000 DWT Berth and Load Tests of Piles

山本 省吾*
Shogo Yamamoto

松村 忠彦**
Tadahiko Matsumura

要 約

本工事は、マレーシアのジョホール海峡において最大30,000 DWTタンカーの着棧を行うドルフィンタイプのシーバースを建設する工事である。基礎杭は鋼管杭であるが、風化花崗岩への打撃による打設が困難であり、十分な根入れが確保できない場合もある。これらの杭については鋼管内部を削孔し、鋼管杭先端にBored Pileを施工した。また、本設杭施工に先立ち試験杭を打設し、Bored Pile施工前後において、杭の静的および動的載荷試験を行った。本報は、鋼管杭の施工と試験杭の載荷試験結果ならびに考察について報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 土質条件
- § 4. 鋼管杭の施工方法
- § 5. 試験杭の載荷試験
- § 6. 本設杭の載荷試験
- § 7. おわりに

照)。本工事は、陸上プラントエリアから約450mの沖合地点にドルフィンタイプのシーバースを建設するものであり(図-2参照)、対象船舶は、30,000DWTから1,000DWTまでのタンカーである。鋼管杭は打撃により施工を行うが基礎岩盤への貫入が困難であり、その対策および支持力評価手法の確立が本工事の最も大きな課題であった。

§ 2. 工事概要

工事の全体概要は以下のとおりである。

工 事 名：MSM PROJECT MARINE FACILITIES

企 業 先：出光石油化学株式会社 (マレーシア)

工事場所：マレーシア ジョホール州

工 期：1995. 1. 1～1996. 7. 31

§ 1. はじめに

当該バースの建設地点は、マレーシアとシンガポールの国境であるジョホール海峡に位置している(図-1参

* 土木設計部設計課

** シンガポール(営)

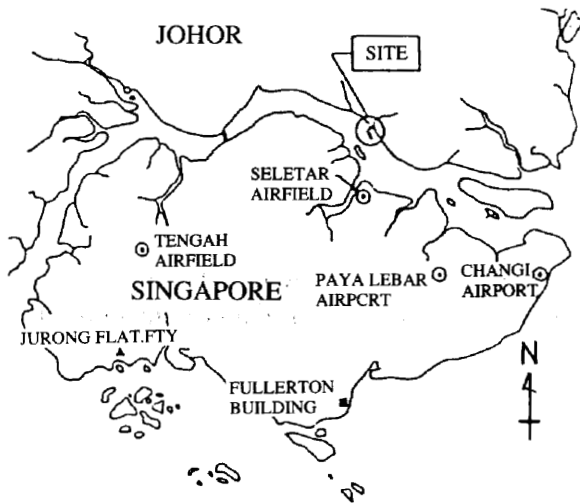


図-1 位置図

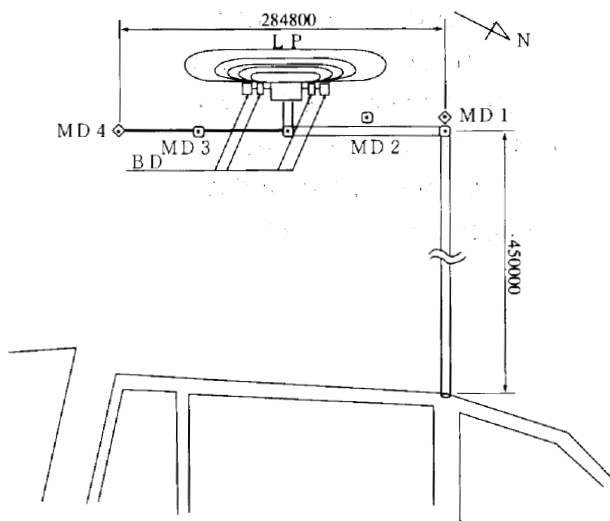


図-2 全体平面図

工事内容：

- ①プレスティングドルフィン (B.D) 4基
 「鋼管杭 ϕ 1016mm, $t=19\sim 21$ mm,
 $L=31.0\sim 33.0$ m」
- ②ムアリングドルフィン (M.D) 4基
 「鋼管杭 ϕ 914mm, $t=14\sim 19$ mm,
 $L=25.0\sim 31.0$ m」
- ③ローディングプラットフォーム (L.P) 1基
 「鋼管杭 ϕ 711mm, $t=14$ mm,
 $L=31.0\sim 36.0$ m」
- ④連絡橋 (トレススル) ピア27基
 「鋼管杭 ϕ 609 \sim 400mm, $t=9.5\sim 14$ mm,
 $L=23.0\sim 30.0$ m」

§ 3. 土質条件

当該栈橋の建設地点は、ジョホール海峡のマレーシア側に位置する。建設地点における水深は深い所で約12mであり、土層構成は海底面から順に次のようになっている(図-3参照)。

海成粘土 (Marine clay) $C \leq 2tf/m^2$ (19.6kN/m²)

堆積土 (Residual Soil) $N=5\sim 10$

風化花崗岩 (Weathered granite)

風化花崗岩は、その風化の程度によって、2つに分けて考えられた。

Completely Weathered Granite (C.W.G)

Highly Weathered Granite (H.W.G)

C.W.G層はN値が30 \sim 50の層であり、粘着力で $C \geq 10tf/m^2$ (98kN/m²)前後と評価される層である。これに対して、H.W.G層はN値が100以上相当、一軸圧縮強度が $q_u \geq 100kgf/cm^2$ (9.8MN/m²)の層である。したがって、鋼管杭の打設を行う際には、C.W.G層は問題ないものの、H.W.G層に対しては0.5m \sim 1m程度しか打撃貫入できないものと判断された。場所によっては、Residual Soilから急にH.W.G層が現れる所もあり、鋼管杭の打設が困難なことが予想された。

§ 4. 鋼管杭の施工方法

4-1 杭の鉛直支持力と水平抵抗

杭の鉛直支持力は、打撃で打ち込める深さまで打ち込むことにより、杭の根入れ長さには関係なく十分に確保できる。しかしながら、水平力を受ける杭において、十分な水平抵抗を期待するためには、所定の根入れ長さが必要不可欠である。特に、本工事のようなプレスティングドルフィンやムアリングドルフィン等においては、船舶の接岸力や係留力などの水平力が主たる荷重であることから、これらの水平力に対していかに抵抗するかが問

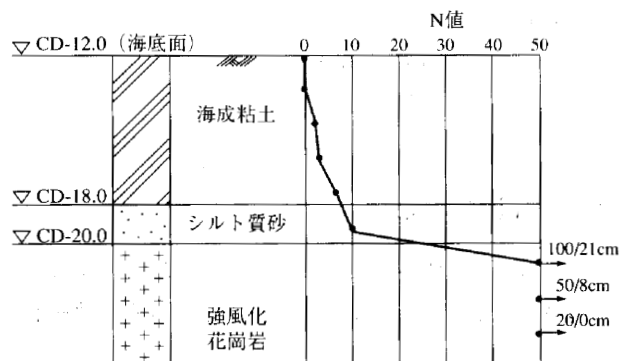


図-3 土質柱状図

題となる。ここで、ムアリングドルフィンやローディングプラットフォームについては、これらの水平力に対して斜杭による組杭で抵抗する構造とした。すなわち、斜杭の鉛直支持力と引抜抵抗により、水平荷重に抵抗することとし、必要根入れ長さを短くした。一方、プレスティングドルフィンに関して斜杭を用いた場合、水平荷重作用時のドルフィンの変位が抑止されることになる。このため、接岸エネルギーの点から不利となるため、直杭構造が望ましく、H.W.G層への根入れ（3～5m）が構造上必要であった。

4-2 Bored Pile 工法の採用

H.W.G層への根入れが必要であるが、打撃工法では1m程度しか貫入できないため、杭の施工方法の検討が必要となった。

当初、企業先からの原案においては、プレボーリング後にコンクリートを充填した上で、鋼管杭の建込みを行うHole in Set工法が計画されていた（図-4参照）。

しかしながら、この工法は以下の理由から本工事での適用が困難と判断した。

- ①C.W.G層以浅の孔壁保持のために用いるケーシングの撤去が、本設鋼管杭とのクリアランスをかなり大きく取らないと難しいこと。
- ②コンクリート充填後のトラブルが生ずると鋼管の建込みができなくなる可能性が高いこと。

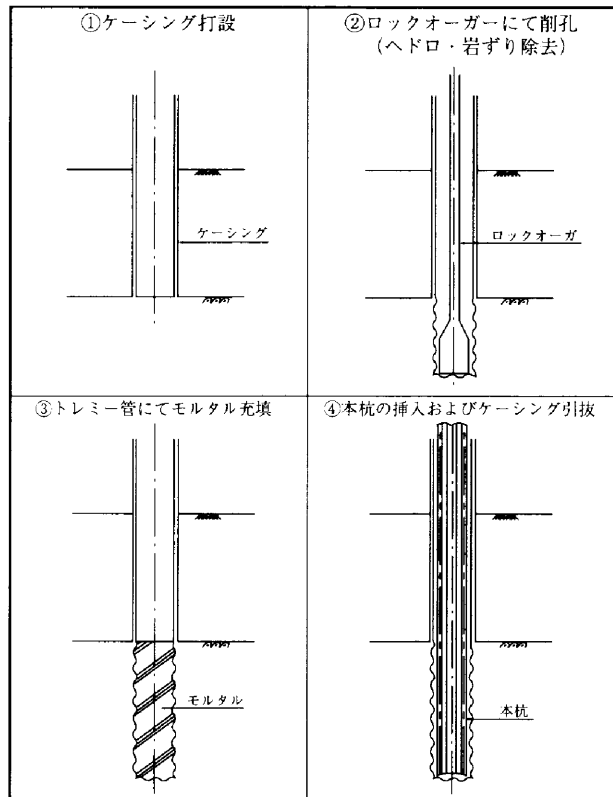


図-4 Hole in Set 工法

そこで、本工事においては香港でも施工実績のあるBored Pile工法を採用することとした。本工法の施工方法は図-5に示すように、

- ①本設鋼管杭を貫入可能な深さまで打ち込む。
 - ②鋼管杭内部を所定の根入れまで削孔する。
 - ③鉄筋カゴを建て込む。
 - ④トレミー管を建て込みコンクリートを充填する。
- という手順で行う。なお、鉄筋コンクリート部分と鋼管部分との荷重伝達を確実にするために、鉄筋コンクリートは鋼管内部にラップさせるものとした。

本工法におけるポイントは、鉛直支持力がBored Pileと鋼管との間で確実に伝達するかどうかであり、特に鋼管内面のコンクリートとの付着が不十分である場合には、杭全体としての鉛直支持力が十分に発揮されないこととなる。

§ 5. 試験杭の載荷試験

5-1 目的

前述した様にBored Pile工法の採用にあたっては、鋼管杭との荷重伝達に関して十分な鉛直支持力が発揮されることを確認する必要があった。また、H.W.G層への打撃貫入が実際にどの程度可能であり、そのときの打撃による鉛直支持力がどのくらいか、さらにそれがBored Pile施工後の鉛直支持力とどのような関係となるかについても事前に確認する必要があった。

このため、陸上において試験杭を施工し、以下の仕様

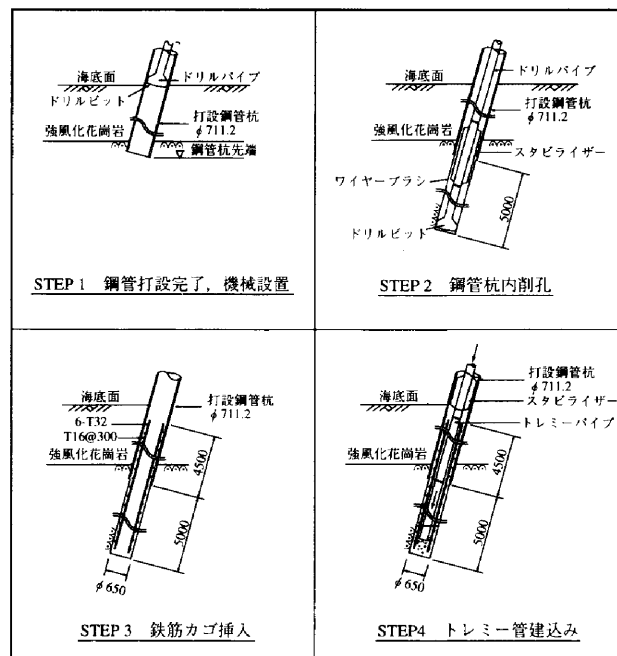


図-5 Bored Pileの施工方法

に従って、鉛直載荷試験を行うこととした。

5-2 試験仕様

試験杭の仕様の概略を図-6に示す。試験杭は陸上で打撃が実際の杭は海上での施工となるため、両者の条件の差異を少なくする必要がある。そこで、仮設のケーシングを海底面レベル相等まで打設し、内部の土を撤去した上で、試験杭を施工するものとした。

今回実施した3種類の試験を以下に示す。

- ①打撃完了後の動的載荷試験
- ②Bored Pile 施工後の静的載荷試験
- ③Bored Pile 施工後の動的載荷試験

5-3 鉛直載荷試験

(1) 打撃完了後の動的載荷試験

試験杭を打撃により所定のレベルまで打込んだ後に打撃杭としての支持力を評価するために、動的載荷試験(PDA試験)を行った。

打撃に使用したハンマー仕様は、以下のとおりである。

タイプ : K45ディーゼル

ラム重量 : 4.5tf (44.1kN)

最大落下高さ : 3.0m

試験結果を以下に示す。

極限支持力 : $R_u = 510 \text{ tf/本}$ (5.00MN/本)

(摩擦力 : $R_f = 284 \text{ tf/本}$ (2.78MN/本))

(先端支持力 : $R_p = 226 \text{ tf/本}$ (2.21MN/本))

また、このときのリバウンド量を用いた杭打ち公式(ハイリー公式)による極限支持力を以下の式から求めた。

$$R_u = \frac{E}{s+c/2} \cdot \frac{W_H + e^2 \cdot W_p}{W_H + W_p} \quad (1)$$

ここで、

R_u : 杭の極限支持力 (tf/本)

E : 打撃エネルギー (tf·m)

s : 貫入量 (=0.1cm)

c : リバウンド量 (=1.1cm)

H : ストローク (230cm)

W_H : ハンマーの重量 (4.5tf) (44.1kN)

W_p : 鋼管杭の重量 (11.2tf) (109.8kN)

e : 反発係数 (=0.45)

である。また、

$$N = \frac{W_H + e \cdot W_p}{W_H + W_p} \quad (2)$$

$$E = W_H \cdot H \quad (3)$$

である。

以上の式から、

$$E = 1035 \text{ tf} \cdot \text{cm} \text{ (10.14MN} \cdot \text{cm)}$$

$$N = 0.43$$

$$R_u = 685 \text{ tf/本} \text{ (6.71MN/本)}$$

を得た。

(2) Bored Pile 施工後の静的載荷試験

Bored Pile 施工後、コンクリートブロックを利用して(図-7参照)静的載荷試験を行った。載荷荷重は、設計上の所要極限支持力420tf (4.12MN)を上回る値として480tf (4.70MN)までとした。荷重載荷のサイクルタイムと沈下との関係を図-8に示し、荷重~沈下曲線を図-9に示す。

図-9から見る限り、480tf (4.41MN)までの載荷荷重では極限支持力は現れていない。450tf (4.70MN)前後で降伏荷重相当と考えれば極限支持力は $450 \times 1.2 =$

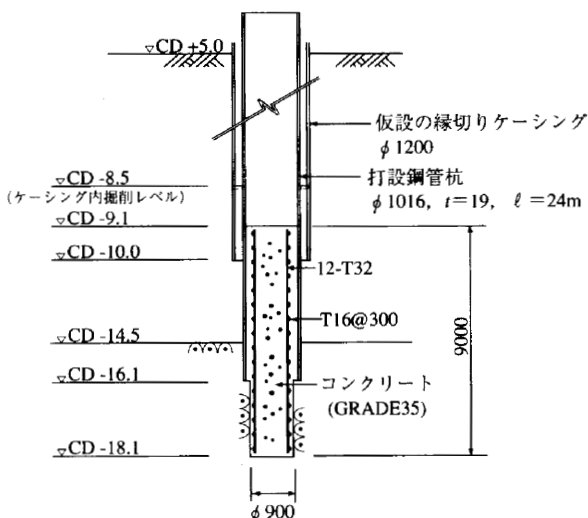


図-6 試験杭の仕様

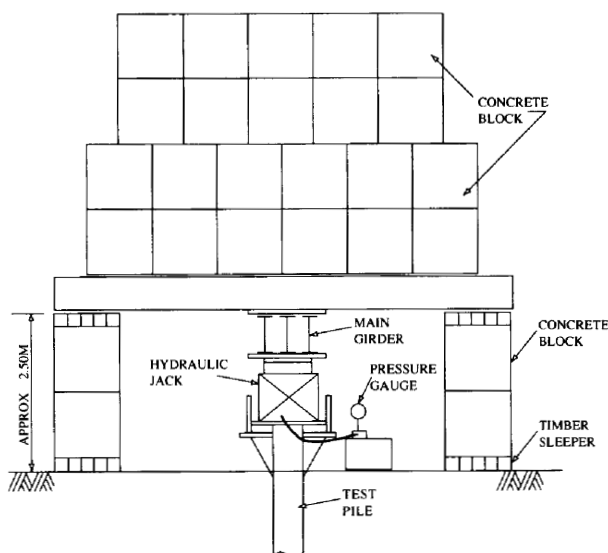


図-7 静的載荷試験

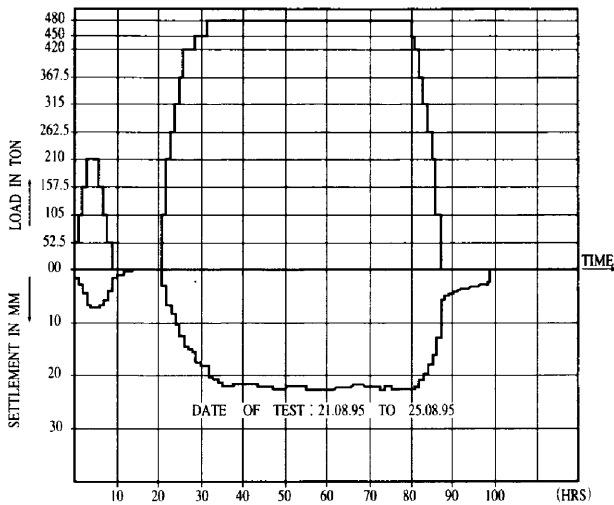


図-8 荷重、変位-時間関係図

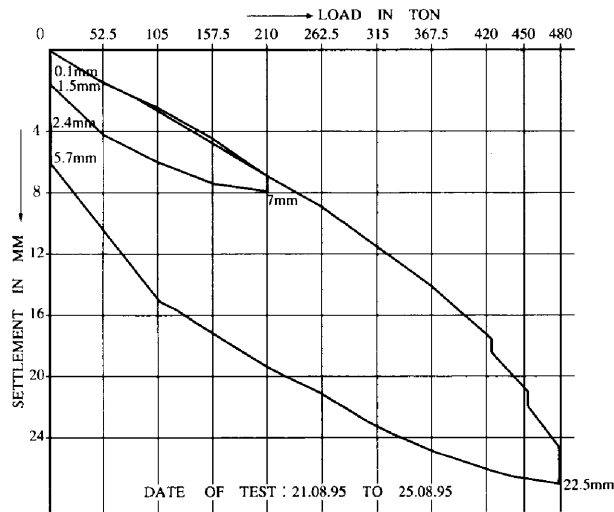


図-9 荷重-変位関係図

540tf (5.29MN) と推定される。

(3) Bored Pile 施工後の動的載荷試験

静的載荷試験終了の3日後、動的載荷試験を行った。試験結果を以下に示す。

極限支持力 $R_u = 635$ tf/本 (6.22MN/本)
 (摩 擦 力 $R_f = 369$ tf/本 (3.62MN/本)
 先端支持力 $R_p = 266$ tf/本 (2.61MN/本))

また、杭打ち公式による極限支持力を適用した場合 ($W_H = 4.5$ tf (=44.1kN), $H = 221$ cm, $s = 0$ cm, $c = 1.0$ cm) は $R_u = 856$ tf (8.39MN) となる。

5-4 各載荷試験結果および考察

静的載荷と動的載荷およびBored Pile 施工前後の支持

表-1 極限支持力に関する試験結果

| | | 打撃完了時 (tf) | Bored Pile施工後(tf) |
|------------|-------|------------|-------------------|
| PDA | R_u | 510 (795) | 635 (586) |
| | R_f | 284 (147) | 369 (204) |
| | R_p | 226 (648) | 266 (382) |
| 杭打公式 R_u | | 685 (795) | 856 (586) |
| 静的載荷試験 | | — | 540 ^{※1} |

※1 降伏荷重からの推定値

() 内は静的支持力公式による推定値

力に関して、試験を行った結果を表-1にまとめるとともに確認された事項を以下に示す。

なお、所要極限支持力は420tf (4.12MN) である。

(1) 打撃杭の先端支持力

打撃完了時のPDA試験結果から見ると、先端支持力の実測値 (226tf (2.21MN)) が設計推定値 (730tf (7.15MN)) に比べてかなり小さい。設計では、先端支持力を $q_d = 8 \times c = 800$ tf/m² (7.84MN/m²) とし、杭の先端閉塞面積を乗じて支持力を算出した。しかしながら、PDA試験における先端支持力は、杭の実肉断面に対する支持力相当になっているため、杭の先端閉塞効果が支持力には現れていない。このため、杭の実肉断面に関連付けた評価を適用してみる。

実肉断面を考慮する手法として以下の2つの方法を参考とする。

①道路橋示方書の軟岩への打撃鋼管杭

$$R_p = 140 \times q_u^{1/2} \times A_t^{2/5} \times A_i^{1/3} \quad (4)$$

ここに、

R_p : 杭の先端支持力

(岩部分の周面摩擦力も含む) (tf)

q_u : 岩の一軸圧縮強度 (tf/m²) (max1000tf/m²)

A_t : 杭の先端実肉断面積 (=0.0595m²)

A_i : 杭の先端閉塞面積 (=0.817m²)

$$q_u \approx N/5 \quad (5)$$

である。

ここで $N = 100$ とすると、

$q_u = 200$ tf/m² (1.96MN/m²) であるので、

R_p は (4) 式より $R_p = 598$ tf (5.86MN/m²) となる。

②山肩らの提案式¹⁾

山肩らは開端鋼管杭の先端支持力を杭の実肉断面の先端支持力と管内、外面の摩擦支持力の和で表せるとしているが、このうち実肉断面に対する先端支持力を次式で提案している。

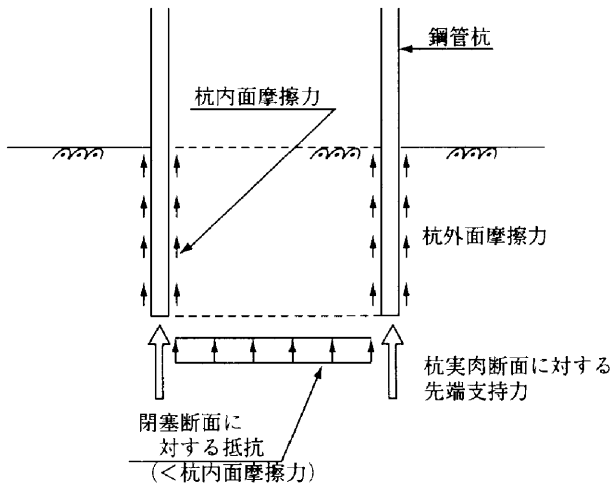


図-10 先端支持力の抵抗機構

$$R_p = 40N \cdot A, \tag{6}$$

R_p : 杭の実肉断面に対する先端支持力
(ただし, $N < 50$)

ここで, $N \approx 100$ を適用すると

$$R_p = 238 \text{ tf (2.33MN)}$$

となる。

山肩らの式は, 適用 N 値には多少問題はあるものの, 今回の場合実測値と良く合致している。

杭の実肉断面に対する先端支持力に, 杭内面の摩擦力を加えた値が, 一般の先端支持力相当と考えられるが(図-10参照), PDA試験の摩擦力を杭の内面および外面に分割することは難しい。簡単のために, 内面の抵抗を全摩擦力の1/2とすれば打撃完了時における一般の先端支持力相当の値は次のようになる。

$$R_p = 226 + \frac{1}{2} \times 284 = 368 \text{ tf (3.61MN)}$$

(cf. 設計値 : 648tf (6.35MN))

この場合でも, 設計値の約1/2であり, 先端支持力としては予想していた値よりも小さい。このため, 基本的には, 今回の杭仕様 ($\phi 1000$) および地盤条件 (風化花崗岩) においては, 杭径が大きいために杭先端の閉塞効果が十分でなかったと判断される。したがって, 杭の先端支持力は(6)式に示したような実肉断面を用いた評価式を適用することが妥当であると考えられる。

(2) 打撃杭と Bored Pile の支持力比較

Bored Pile 施工後の鉛直支持力については, 先端支持力が場所打ち杭相当 ($q_d = 300 \text{ tf/m}^2$ (2.94MN)) とすると打込み杭 ($q_d = 800 \text{ tf/m}^2$ (7.84MN)) より小さくなること, 鋼管より Bored Pile の径が一回り小さいことから, 打撃後の支持力より小さくなる可能性があると考えられる。しかしながら, 試験の結果を見る限り, Bored

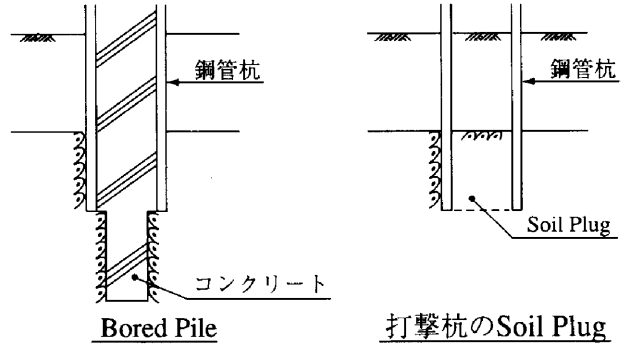


図-11 Bored Pile と Soil Plug の比較

Pile 後の支持力の方が大きいことから, Bored Pile の施工による極限支持力の低下はないものと推測される。また, 鋼管杭内の Bored Pile が打撃杭の Soil Plug 相当の役目を果たしており, 打撃杭と同等の先端支持力を保っているものと考えられる。すなわち, 前述した杭の実肉断面に対する先端支持力が乱されずに打撃時のまま保持された上, 杭内面の摩擦がコンクリートに置き換わることにより, さらに大きくなったと考えられる。

(3) PDA試験と杭打公式による推定値

PDA試験と杭打公式による推定値を比較した場合, Bored Pile 施工前後とも杭打公式による値の方が大きな値となっており, その比率はともに杭打公式の値がPDAの値の約35%増であった。両者の関係が安定した値となったことから, 今回のような杭構造においてもPDA試験の適用は十分可能であると考えられる。

(4) 静的試験とPDA試験

今回の静的試験では極限荷重までは載荷していないため, 極限支持力は明らかではないが, 降伏荷重の1.2倍相当として推定すると540tf (5.29MN) となる。PDA試験による極限支持力635tf (6.22MN) の約85%にあたり, 比較的良く一致していると評価できる。

§ 6. 本設杭の載荷試験

6-1 試験結果

陸上試験杭の載荷試験により, 所定の支持力が得られることが明らかになったため, 本設杭の施工を行った。本設杭についても打撃後およびBored Pile 施工後に対して, PDA試験により支持力の確認を行った。その結果を表-2に示す。

6-2 考察

陸上試験杭の結果とも合わせて, 本設杭の支持力試験結果について考察する。

表-2 本設杭のPDA試験結果

| 構造物 (杭仕様) | 杭 No | PDA試験による極限支持力 | | | 杭打公式による極限 支持力 (tf) | 静的支持力 公式による 推定値 (tf) | 所要極限 支持力 (tf) | 備考 |
|----------------------------------|-------|---------------|------------|------------|-----------------------|----------------------------|------------------|------------|
| | | R_f (tf) | R_p (tf) | R_u (tf) | | | | |
| SIBD (ϕ 1016 , $t=19$) | No.1 | 518 | 142 | 660 | 765 | 841 | 396 | 打撃後 |
| NIBD (ϕ 1016 , $t=19$) | No.3 | 375 | 322 | 697 | 984 | 818 | 386 | " |
| SOBD (ϕ 1100 , $t=19$) | No.5 | 401 | 167 | 568 | 929 | 978 | 420 | " |
| NOBD (ϕ 1016 , $t=19$) | No.4 | 451 | 259 | 710 | 886 | 804 | 422 | " |
| P27 (ϕ 406 , $t=9.5$) | No.2 | 26 | 162 | 188 | 494 | 176 | 32 | " |
| NIBD (ϕ 1016 , $t=19$) | No.4 | 461 | 137 | 598 | - | 631 | 386 | Bored pile |
| NIBD (ϕ 1016 , $t=19$) | No.1 | 335 | 212 | 547 | - | 631 | 386 | " |
| NOBD (ϕ 1016 , $t=21$) | No.2 | 346 | 223 | 569 | - | 598 | 422 | " |
| LP (ϕ 711 , $t=14$) | No.A2 | 226 | 92 | 318 | - | 390 | 260 | " |
| LP (ϕ 711 , $t=14$) | No.B2 | 209 | 86 | 295 | - | 390 | 260 | " |
| LP (ϕ 711 , $t=14$) | No.D2 | 437 | 68 | 505 | - | 390 | 260 | " |
| LP (ϕ 711 , $t=14$) | No.E2 | 392 | 103 | 495 | - | 390 | 260 | " |

(1) 打撃杭の先端支持力

陸上試験杭と同様にPDAによる先端支持力 (R_p) は設計推定値より小さい。 ϕ 1016級の4本の杭ではバラツキがあるものの平均値で見た場合には222tf (2.18MN) であり、陸上試験の値226t (2.21MN) あるいは実肉断面の支持力 (238tf (2.33MN)) と良く一致している。

これに対して、P27の杭 (ϕ 406) については、PDA試験値 (162tf (1.59MN)) は設計推定値 (104tf (1.02MN)) より大きな値が得られた。これは、杭径が ϕ 406と小さいサイズであることから、大口径開端杭とは異なり、先端閉塞杭相当の支持力特性を示したものと考えられる。

(2) 打撃杭とBored Pile

陸上試験杭ではBored Pileの支持力は打撃後の値を上回ったが、本設杭では、平均的に見て打撃後の値を下回った。 ϕ 1016級の杭について表-3に比較を示す。

これによれば本設杭の打撃杭は、陸上試験杭より大きな支持力を示しているものの (特に摩擦力の差による)、Bored Pile 施工により、周面摩擦力および先端支持力とも10~15%ダウンした。これは、Bored Pileの施工により杭の中には先端部が多少乱されたものや、鋼管杭内面とコンクリートとの摩擦が陸上試験杭より小さかったものがあつたためと推測される。陸上試験とは異なり、本

表-3 打撃杭とBored Pileの支持力比較 (ϕ 1016杭)

| | 打撃杭 (tf) | | | Bored Pile (tf) | | |
|----------|----------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| | R_f | R_p | R_u | R_f | R_p | R_u |
| 陸上試験杭 | 284 | 226 | 510 | 369 | 266 | 635 |
| 本設杭 (海上) | 437 | 222 | 659 | 380 | 190 | 571 |

註) 本設杭の値は、打撃杭については4本の平均値
Bored Pileについては3本の平均値

設杭は海上での施工であつたため、施工性の良否が支持力に影響したと考えられる。

(3) PDA試験と杭打公式

Bored pile施工前の打撃杭において、杭打公式による推定支持力およびPDA試験による支持力に関する比較・検討を行った。対象とした杭は、 ϕ 1016級以上の4本 (表-2中のSIBD No.1, NIBD No.3, SOBD No.5およびNOBD No.4) であり、杭打公式およびPDA試験による支持力の平均値は、それぞれ891tf (8.7MN) および659tf (6.5MN) となった。

したがって、前者は後者の1.35倍となり、陸上試験杭と同じ値となっていることが分かる。

なお、Bored Pileの支持力が小さかつたものの、基本的にすべての試験値が所要支持力を上回っており、構造物としての強度は問題ないことが確認できた。

§ 7. おわりに

岩盤に打撃により打ち込まれた鋼管杭と、その内部を削孔して先端にBored Pileを施工した杭の支持力について試験結果と考察を述べてきた。

今回の試験で得られた主な知見は次の4点である。

- ①岩盤への杭の根入れ確保のために、打撃杭の先端にBored Pileを設ける構造は、支持力の面からも十分有効である。
- ②岩盤に打ち込まれた大口径開端杭の支持力は、先端面積ではなく実肉断面を用いた評価が適している。今回の杭仕様、地盤状況では $R_p = 40N \cdot A_r$ が良い一致を示した。
- ③Bored Pileを設けたときの支持力についても鋼管杭先端の実肉断面を用いた評価を準用することが可能であ

り、基本的に打撃時の支持力が保持できると考えられる。ただし、Bored Pileの施工性が悪い場合には支持力の低下も考えられることに注意を要する。

- ④動的載荷のPDA試験は今回の様なBored Pileを有する杭においても十分適用可能である。

なお、栈橋工事自体は1996年11月に設備を含めたすべての作業が完了し、同年12月に第1船が無事着栈した。

最後に本工事にあたり御協力、ご指導いただいた関係各位の方々に感謝の意を表する次第です。

参考文献

- 1) 山肩邦男 他：開端鋼管ぐいの支持力に関する考察(その2)、日本建築学会論文報告集、日本建築学会、第213号、1973。