

国内初の S P S (単杭ドルフィン) の建設 The First Construction of SPS (Single Pile Structure) in Japan

大森弘一・福島敬三・佐藤峰幸・尾高義夫・柴原信之

Koichi Omori, Keizo Fukushima, Mineyuki Sato, Yoshio Odaka, Nobuyuki Shibahara

SPS is a single pile dolphin which can absorb the most of berthing energy or bear mooring force through its large deflection. The pile of SPS is designed to utilize the lateral resistance of the ground beyond the elastic region. It is generally necessary to use high-tensile steel for the material of pile; however, thanks to its structural simplicity and flexibility, SPS is superior to conventional dolphins consisted of multiple piles in terms of the construction period and cost.

The first SPS in Japan for the use of breasting dolphin has been constructed for an LNG vessel of 130,000m³. This paper describes the characteristics of SPS, its design method, comparison with conventional dolphins. In addition, construction of the SPS and lateral loading experiments for the purpose of design verification are reported.

keywords : single pile structure, dolphin

1. はじめに

SPS (Single Pile Structure : 単杭構造) は、杭材料に高張力鋼を使用し、地盤の塑性領域に至るまでの水平抵抗を利用する1本の杭からなる構造形式である。またSPSは、従来構造に比べて大きな水平耐力と変形能力を有し、工期の短縮およびコストの低減が図れる構造である。

このようなSPSは、海外では実用化されているものの、日本の現行基準内で設計することは難しく、SPSの開発に際して、実大水平載荷試験や模型水平載荷試験が行われた^{1) 2) 3)}。

これらの研究成果をもとに、(財)沿岸開発技術研究センターにて「SPSの設計のてびき」⁴⁾が作成され、その設計法が確立された。

この度、静岡県清水市の東燃(株)清水工場内の棧橋改造工事において、図1に示すように、130,000m³のLNGタンカー用の接岸ドルフィン(D1-1, D3-1)に、国内で初めてのSPSを採用し、昨年12月に無事竣工した(図1、図2、写1)。本論文では、SPSの原理、従来型構造とSPSの比較、設計・工事概要および水平載荷試験について報告するものである。

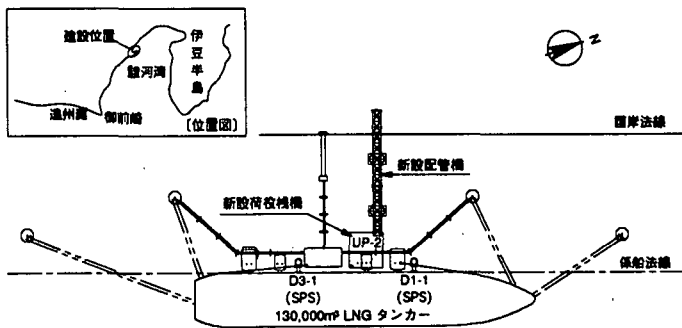


図1 SPS建設位置

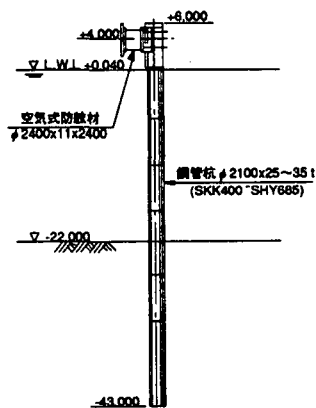


図2 SPS構造図

2. SPSの原理と設計手法

2.1 SPSの原理

SPSは、船舶の接岸力や係留力などの荷重に対して、地盤の塑性領域に至るまでの水平抵抗を利用する1本の杭からなる構造形式である。

従来の直杭式構造の設計法は、地盤が塑性状態となった場合の杭応力の算定手法

- * 東燃テクノロジー(株)技術顧問
- ** 東燃テクノロジー(株)メカニカル技術部
- *** 正会員 大成建設(株)土木設計第2部 (〒163-03 新宿区西新宿1-25-1)
- **** 大成建設(株)名古屋支店

および繰返し荷重による残留変位の累積度の評価に関して未解明の点が多かったため、地盤の変形が弾性状態とみなせる範囲内で行われていた。

SPSの設計法の確立のために、実大水平載荷試験や模型水平載荷試験が行われた^{1) 2) 3)}。これらの研究成果をもとに、地盤の大きな水平抵抗と変形能力を利用するために、地盤の塑性的挙動を考慮した設計法を確立し、(財)沿岸開発技術研究センターにて「SPSの設計のてびき」⁴⁾が作成された。さらに、杭材に引張強さ5000～8000 kgf/cm²の高張力鋼を用いることによって、従来の杭材を用いた場合よりも大きな変形能力を有するようになった。

接岸ドルフィンとは、船舶が棧橋に接岸するときの船舶の運動エネルギーを吸収する役割を有している。図3に示すように、従来の接岸ドルフィンは、防舷材の変形により接岸エネルギーを吸収する構造がほとんどであった。このような接岸ドルフィンにSPSを適用した場合、杭の変形と防舷材の変形により接岸エネルギーを吸収することになる。なお、防舷材を使用せず杭の変形だけで吸収することも可能である。

2.2 設計手法 (SPSの設計のてびき)

SPSの設計に当たっては、特に次の2点を考慮している。

- ①水平力作用時に大変形し、海底の支持地盤が表層で塑性化する。
- ②繰返し荷重が作用する。

SPSの開発に際して実施された載荷試験結果から、次の事項が確認された。

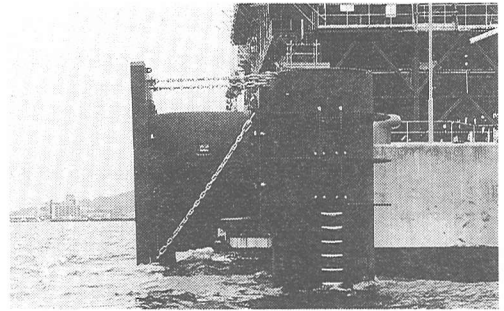
- ・処女荷重時の杭の変形は、大変形領域を含めて、従来より杭の設計に用いられている港研方式⁵⁾によって評価できる。港研方式とは、運輸省港湾技術研究所において開発された杭の横抵抗の解析方法で、地盤の非線型性を考慮した方法である。
- ・繰返し荷重を受けた場合、回数が増加するにつれて最大変位、残留変位および地表面たわみ角は増加するが、ある回数を越えるとそれらは一定値に収束する。
- ・杭に発生するひずみは、繰返し荷重の影響をほとんど受けない。

これらの実験結果をもとに、SPSの挙動は、港研方式に基づき処女載荷時の海底面変位および海底面たわみ角に繰返し荷重による影響係数を乗じて算出する。また、杭に発生する応力は、ほとんど繰返し載荷の影響を受けないので、応力は処女載荷時の値を用いる。

$$y_{top} = A_1 y_0 + A_2 i_0 h + \frac{Ph^3}{3EI} \quad (式1)$$

ここに、

- y_{top} : 載荷点変位(cm)
- y_0 : 処女載荷時の海底面変位(cm)
- i_0 : 処女載荷時の海底面たわみ角(rad)
- P : 水平荷重(kgf)
- h : 載荷高さ(cm)
- EI : 杭の剛性(kgf・cm)
- A_1, A_2 : 繰返し載荷による影響係数



写1 SPS竣工写真

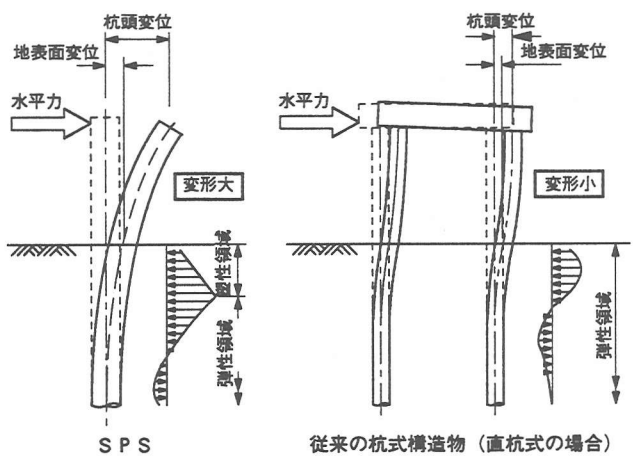


図3 船舶接岸時の挙動 (SPSと従来型)

表1 繰返し載荷による影響係数

影響係数	最大変位の算定	杭の変形による吸収エネルギーの算定	残留変位の算定
A 1	1.4	0.4	0.8
A 2	1.2	0.6	0.5

3. 設計概要

3.1 SPSの建設位置

LNG船の着岸位置は、新設荷役棧橋のローディングアームと船舶側のマニフォールド位置から決定される。この着岸位置とLNG船の船体形状（平行形状）から、図1に示すように新設荷役棧橋の北側と南側に、接岸ドルフィンD1-1、D3-1を新設することとした。これらの接岸ドルフィンの構造は、各種構造型式の比較検討結果からSPS構造とした。

3.2 地盤条件

建設地にて実施したボーリング結果の一例を図4に示す。海底面から2m程度は、軟弱なシルト層がありその下部に厚さ15m程度のN値50以上のシルト混り砂礫（シルト混り細砂）、さらにその下部にN値50以上の砂混り固結シルトがある。

SPSの設計においては、安全側に立って、上部の軟弱なシルト層を無視した。その結果、N値が深度によらずほぼ一定なので、地盤を港研方式のC型地盤とした⁵⁾。ここで港研方式のC型地盤とは、地盤反力が杭の変位の1/2乗に比例すると仮定したものである。杭の横抵抗の支配的な範囲における平均N値を求め、地盤反力係数 K_c を、N値と K_c の関係図⁵⁾から 5.0kgf/cm^2 に設定した。

3.2 対象船舶および接岸エネルギー

対象船舶は、 $130,000\text{m}^3$ 積みのLNGタンカーである。対象船舶の中で、最も有効接岸エネルギーの大きい船舶諸元とそのエネルギーの算定結果を一例として、表2、3に掲げる。

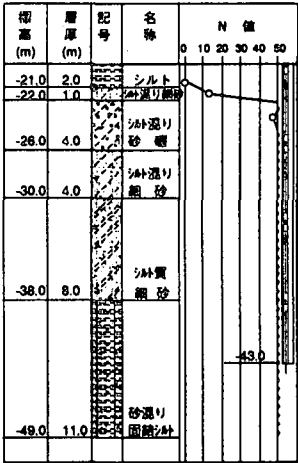


図4 土質柱状図

表2 対象船舶の一例

項目	諸元
載荷容量 (m3)	130,000
全長 (m)	293.74
垂線間長 (m)	281.25
型幅 (m)	41.60
型深 (m)	25.00
満載吃水 (m)	11.70
バラスト吃水 (m)	9.70
満載排水量 (tf)	99,600

表3 有効接岸エネルギーの算定

設計接岸速度 V (cm/sec)	15
接岸時偏心距離	全長の5%
ブロック係数 Cb	0.706
仮想質量係数 Cm	1.625
偏心係数 Ce	0.880
柔軟性係数 Cs	1.0
バースの形状係数 Cc	1.0
接岸エネルギー Ef (tfm)	163.6

3.3 SPSの設計

杭の変形によるエネルギーの算定に当たっては、防舷材の反力は性能公差（-10%）を考慮して、防舷材のカタログ値の90%の反力を考慮する。一方、最大変位および残留変位の算定に当たっては、防舷材反力の性能公差（+10%）とともに、係船法線平行方向のシフト力（防舷材反力の30%）を考慮する。表4、5にそれぞれエネルギー吸収結果および最大変位および残留変位の算定結果を示す。なお、表5中の最大変位には、残留変位も含まれている。

SPSの断面は、直径2.1mの鋼管杭を使用し、杭に発生する曲げモーメントに応じて肉厚と材質を変化させた。

表4 接岸エネルギーの吸収

防舷材			反 力 (t)	172.1
			吸収エネルギー Ef(tfm)	116.6
杭	諸元		杭 諸 元	φ 2100×35t (SHY685)
			断面2次モーメント I (cm ⁴)	1.21×10 ⁷
	処女 載荷時	解析 結果	地表面変位 y ₀ (cm)	4.19
			地表面たわみ角 i ₀ (rad)	1.20×10 ⁻²
	繰返し載荷時	接岸点変位 y _{0d} (cm)	60.1	
		吸収エネルギー E _p (tfm)	51.7	
全吸収エネルギー E _a = E _f + E _p (tfm)			168.3	

表5 最大変位および残留変位

防舷材反力 (t)				219.6
杭	諸元		杭 諸 元	φ 2100×35t (SHY685)
			断面2次モーメント I (cm ⁴)	1.21×10 ⁷
	処女載荷時	解析結果	地表面変位 y ₀ (cm)	5.87
			地表面たわみ角 i ₀ (rad)	1.61×10 ⁻²
	繰返し載荷時	最大変位	接岸点変位 y _{0d} (cm)	109.1
			地表面変位 y ₀ (cm)	8.2
		残留変位	接岸点変位 y _{0d} (cm)	25.6
			地表面変位 y ₀ (cm)	4.7

なお最大曲げモーメントが発生する海底面付近の杭の断面は、引張強さ8000kgf/cm²の高張力鋼（SHY685）を使用した。

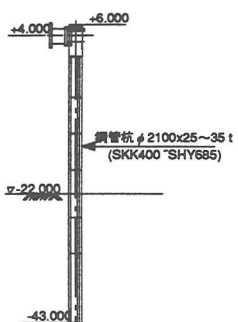
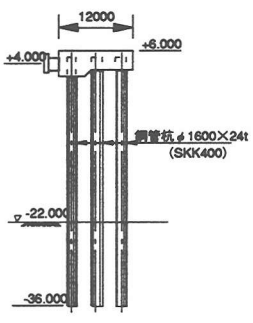
3.4 従来型構造との比較

表6は、本工事のSPSと従来型の直杭式の接岸ドルフィンの比較を行ったものである。

今回のSPSは、船舶接岸時のエネルギーの約30%を杭によって吸収することができる。そのため、従来型の直杭式に比べて、約70%のエネルギー吸収能力の防舷材で済むことになる。

SPSの施工は、杭1本を打設し、上部工をプレキャスト化して取り付けるだけなので、従来の杭式構造に比較して極めて単純であり、海上工事期間が約40%低減できる。一方、建設費は、施工期間の短縮および鋼材重量の削減によって、従来型の直杭構造の約65%になる。

表6 SPSと従来型の比較

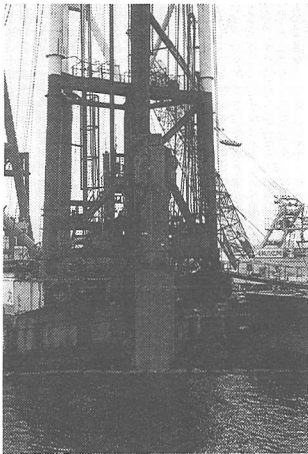
項目	SPS	従来型
構造図		
防舷材	空気式防舷材 φ 2400×H2400	セル型防舷材 φ 2000×H2000
防舷材反力(tf)	219.6	282.6
接岸点最大変位(cm)	253.1	119.9
防舷材の変形量	144.0	105.0
杭の変形量	109.1	14.9
有効接岸エネルギー(tfm)	163.6	同 左
吸収エネルギー(tfm)	168.3	169.3
防舷材の変形	116.6	169.3
杭の変形	51.7	-
鋼管杭重量(tf)	74.7	229.8
海上工事期間 (ヵ月)	1	2.5
コスト	0.65 (従来型を1.0)	1.0

4. 施工概要

SPSの建設位置の海底土質は、図4に示すように、-22.0m以深の4m程度がシルト混り砂礫層があり、また-25.0m以深のN値は50以上である。そこで、杭打設は、ウォータージェットを併用した油圧ハンマー工法（ハンマー重量15tf）にて行った。

杭打設1ヵ月後、次章で述べる水平載荷試験を実施して、接岸ドルフィンとしての機能および安全性の確認を行った。

その後、プレキャスト化した防舷材取付部を杭頭部に設置した。



写2 杭打設状況

5. 水平載荷試験

5.1 試験方法

(1) 試験概要

図5、6に示すように、SPSに隣接している既設の接岸ドルフィンを利用して、D1-1とD3-1の2基のSPSの水平載荷試験を行った。

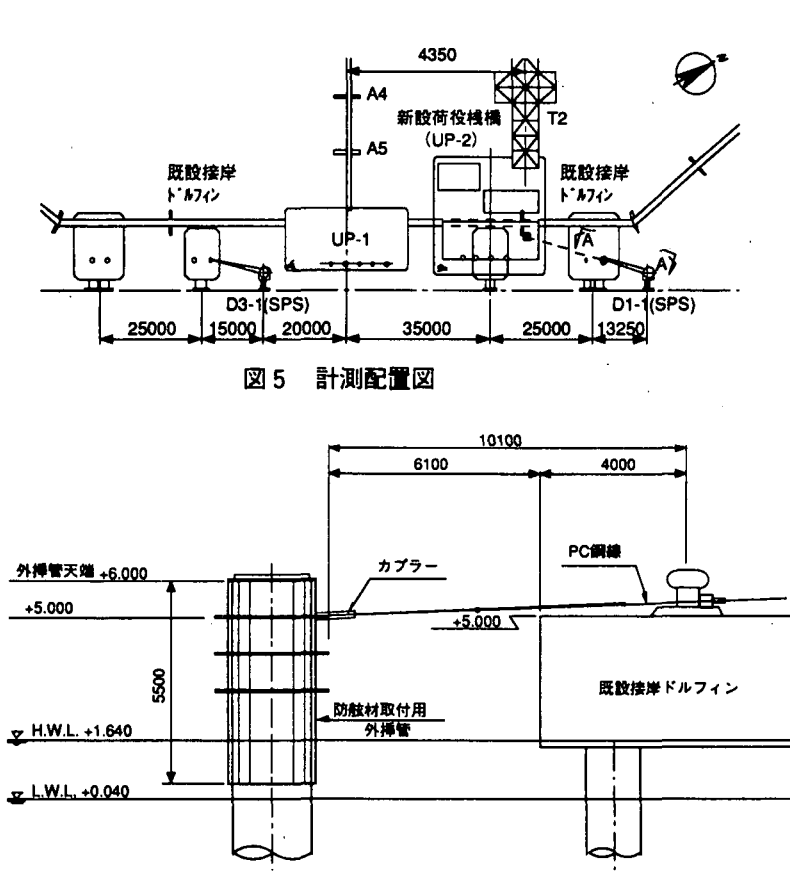


図5 計測配置図

図6 計測要領図 A-A断面図

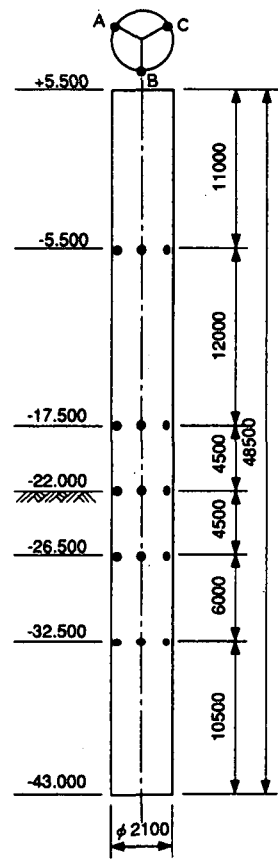


図7 ひずみゲージ設置図

(2) 計測項目および計測方法

計測項目および計測方法を表7に示す。D1-1は、杭の載荷点変位とともに、図7に示す位置の曲げひずみを計測した。一方、D3-1は杭の載荷点変位のみを計測し、曲げひずみはD1-1の計測結果から推定した。

表7 計測項目および計測方法

計測項目	計測目的	計測計器	備考
荷 重	載荷重の確認	油圧ジャッキ、圧力変換器	
杭の載荷点変位	載荷点の水平変位の確認	光波測量、巻込型変位計	
杭体ひずみ	杭体に発生するひずみを測定し、応力および曲げモーメントの算出	ストレインゲージ	D-1のみ計測

(3) 載荷方法

載荷方法は、土質工学会基準「杭の水平載荷試験方法・同解説」⁶⁾に準じて行った。載荷方法は一方向多サイクル方式とする。表8に荷重載荷サイクルを示す。

5.2 試験結果

(1) 横方向地盤反力係数の推定

図8にD1-1の荷重変位曲線を示す。図9に両対数表示した荷重変位曲線をD1-1とD3-1の結果を示す。これらの図に

表8 荷重載荷サイクル (段階載荷)

サイクル (No.)	最大荷重 (tf)	荷重ステップ (tf)
1	40	0～10～20～30～40～30～20～10～0
2	80	0～10～20～30～40～50～60～70～80～70～60～50～40～30～20～10～0

は、横方向地盤反力係数 K_c を 5kgf/cm^2 と 8kgf/cm^2 にした場合の港研方式による解析値も合わせて示してある。これらの結果から、港研方式によるC型地盤によく一致していることが分かる。また地盤反力係数 K_c は、 $5 \sim 8\text{kgf/cm}^2$ 程度になっており、設計上設定している値 5kgf/cm^2 に比べてやや硬めの地盤であることが分かる。

(2) 曲げモーメント分布

D-1 における 80tf の荷重を載荷した状態における曲げひずみの計測結果から算定した曲げモーメントの深度分布を図10に示す。実大実証試験結果と同様に、載荷試験の計測値に港研方式に基づく解析値が良く一致することがわかる。

(3) 所要の機能と安全性の確認

水平載荷試験結果から、設計上仮定した地盤に比べてやや硬めであったので、所要の接岸エネルギーの吸収および杭の検討を行い、接岸ドルフィンとしての所要の機能と安全性の確認を行った。

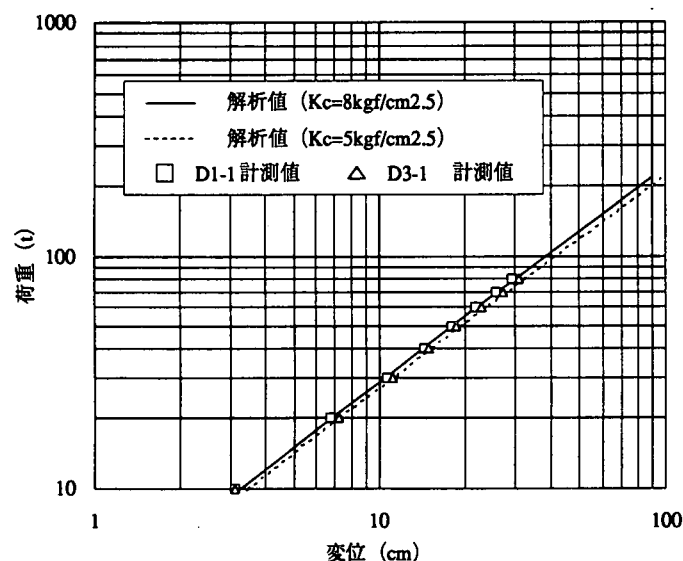


図9 荷重変位曲線

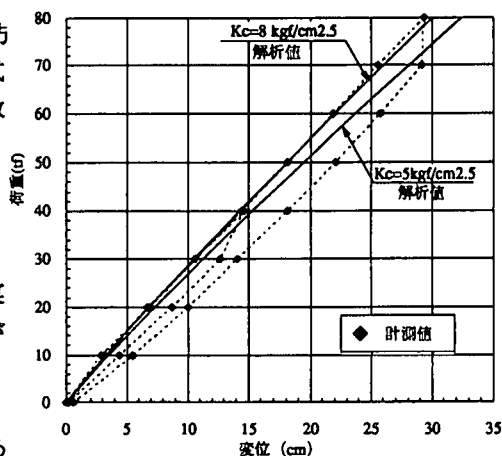


図8 荷重変位曲線 (D1-1)

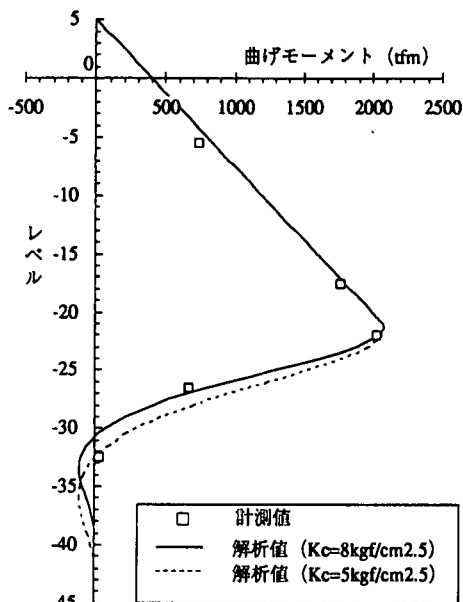


図10 曲げモーメント分布図

6. おわりに

130,000 m^3 のLNGタンカー用の接岸ドルフィンに、国内初のSPSを採用し、昨年12月に無事竣工した。杭打設終了後、水平載荷試験を実施して接岸ドルフィンとしての機能と安全性が確保されていることを確認した。

SPSの設計、工事および水平載荷試験にあたっては、鳥取大学工学部の上田 茂教授、広島大学工学部の日下部 治教授には貴重な御意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木内里美、森永勝登、高橋正美、廣瀬鉄蔵、榊信昭、鈴木操：SPS（単杭構造）の設計法に関する基礎的研究、第13回海洋開発シンポジウム発表論文集、1988。
- 2) 木内里美、松下基也、高橋正美、掛江正紀、磯崎総一郎、鈴木操：砂地盤に打ち込まれた水平荷重を受ける単杭構造物の挙動に関する実大載荷実験、海洋開発論文集、Vol.6、1990。
- 3) Sigeru Ueda, Kunio Takahashi, Satomi Kiuchi, Hiroshi Shiratani, Hisatoshi Shimaoka, Soichiro Isozaki: The Behavior of a Pile Sustaining Repeated Lateral Loads, PACON 93 China Symposium Proceedings, 1993。
- 4) 沿岸開発技術センター：SPS（単杭構造）の設計の手びき、1992。
- 5) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、1989
- 6) 土質工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説、1983。