

SPS（単杭構造）の設計法に関する基礎的研究

大成建設(株)	正会員	木内	里美
同		森永	勝登
同	正会員	○高橋	正美
日本鋼管(株)		廣瀬	鉄蔵
同	正会員	榊	信昭
同	正会員	鈴木	操

1. はじめに

SPS (Single Pile Structure = 単杭構造) は、杭材に高張力鋼（降伏応力 $\sigma_{sy}=32\sim70\text{kgf/mm}^2$ ）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構造物である。本研究は、SPS による係留施設の設計法の確立を最終目的とし、本論文は、一連の研究の内、実大水平載荷実験の結果を報告するものである。

本構造形式による係留施設（接岸ドルフィン、網取りドルフィン）は、Mono Pile Dolphin、Single Pile Dolphin などと呼ばれ、ヨーロッパを中心に砂層系地盤を対象として建設されており、近年は、V.L.C.C を対象とした大型バースにも採用されるようになってきた。接岸ドルフィンとして用いられた例を図-1、写真-1 に示す。

SPS による係留施設の構造的な特徴は、船舶の接岸力や係留力を杭の大きな変形能力と水平耐力により吸収することにある。高張力鋼を使用することにより、普通鋼（降伏応力 $\sigma_{sy}=24\text{kgf/mm}^2$ ）に比べ杭に大きな変形能力と水平耐力を与えることができ、杭の変形による吸収エネルギーだけで、V.L.C.C を接岸させることも可能となる。ただし、杭の変形による地盤の変形も当然大きく、ある範囲の地盤は塑性領域に至り、杭-地盤の挙動は非線形性を示す。従って、SPS の設計にあたっては、地盤の塑性を考慮した設計法を採用する必要がある。

国内の基準等に示される設計法で地盤の非線形性を考慮したものには、港研方式^{2) 3)}がある。しかし、この方法も地表面変位が数cmまでの適用については検証されているが、10cm以上変位する場合の適用性は明らかにされていない。現段階では、設計法が確立していないこともあり、SPS による係留施設の国内での実績はない。類似な構造形式としては、小型船舶を対象とした単杭式ドルフィン、パーシングビーム等があるが、いずれも普通鋼を使用し、地盤を弾性体として扱える範囲で設計するため、杭のフレキシビリティが生かされず、必ずしも経済効果が高いものではない。

SPS による係留施設を国内で実用化するためには、地表面に大きな変形が生じる場合にも適用できる設計法を確立する必要がある。ところが、従来行われてきた水平載荷実験の多くは、杭-地盤が弾性的に挙動を示す範囲での実験であり、地盤が塑性化し非線形挙動を示す範囲までを対象とした実験はほとんどない。設計法の確立には、地盤を塑性領域に至るまで変形させた場合の杭-地盤の挙動を把握することが必要である。そこで、本研究では、杭に高張力鋼を使用し、地盤が塑性領域に至るまでの範囲を対象とした実大水平載荷実験を行い、杭-地盤の挙動および解析法についての検討を行った。

2. SPS の設計法の現状

(1) 水平力が作用する杭の設計法

SPS の設計は、杭の変形とこれに伴う地盤反力をどのような関係で考えるかが要点となる。地盤の変形と反力については多くの提案がなされ

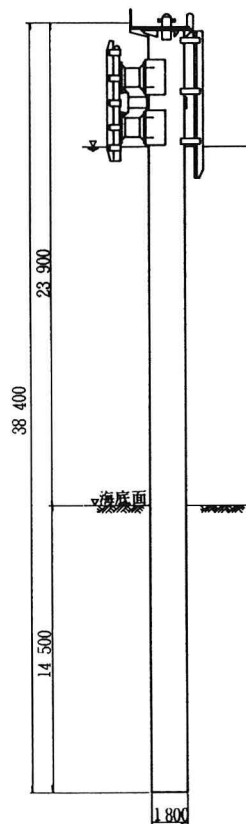


図-1 SPS接岸ドルフィン例

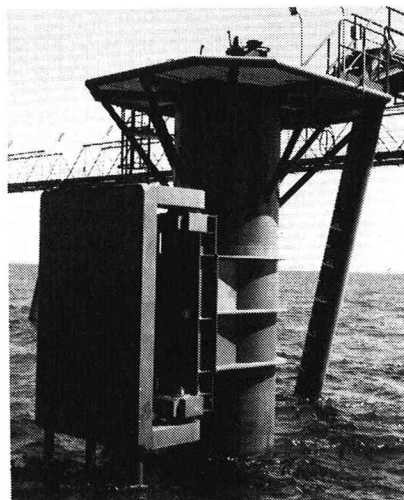


写真-1 SPS接岸ドルフィン例

ているが、この関係より設計法を分類すると、図-2のような3つの方法に大別することができる。

地盤反力の考え方による設計法の特色を以下に示す。

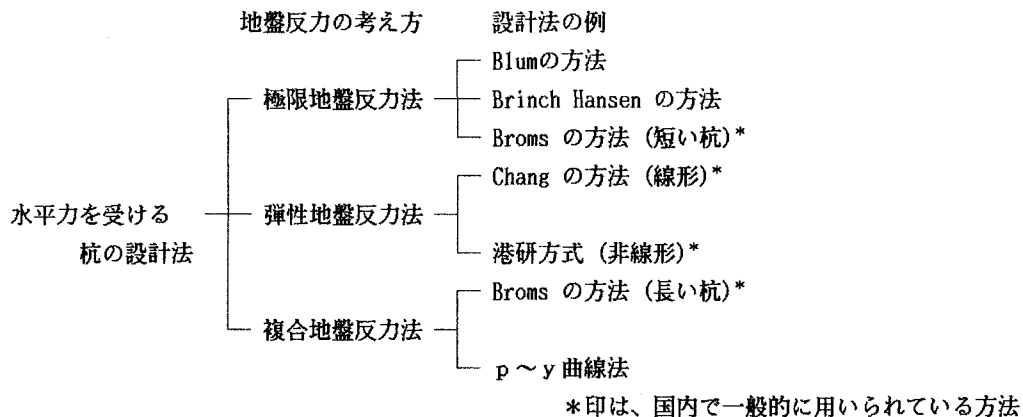


図-2 水平力を受ける杭の設計法

1) 極限地盤反力法

極限状態における地盤反力と外力のつり合いから杭の横抵抗を求める方法であり、地盤反力 p は、

$$p = f(x)$$

のように地表面からの深さ x のみの関数で表され、杭の変形 y には関係しない。一般に根入れ長が短く相対的に剛な杭で、杭よりも地盤が先に破壊するような杭-地盤系に適用される。Blumの方法⁵⁾、Brinch Hansen の方法⁶⁾は、地盤反力を Rankine土圧をもとに、地盤の破壊領域を仮定し、杭の横抵抗を計算する。

2) 弾性地盤反力法

地盤を弾性体と仮定し、はりの曲げ理論を用いて杭の横抵抗を求める方法であり、地盤反力 p は、

$$p = k x^m y^n$$

のような形で表される。ここに k は、地盤の弾性的性質により決まる係数である。

弾性地盤反力法は、杭の変形 y の指数の取り方により、線形地盤反力法 ($n = 1$) と非線形地盤反力法 ($n \neq 1$) に大別される。前者には Changの方法⁴⁾ ($m = 0, n = 1$)、後者には港研方式^{2) 3)} ($m = 0$ または $m = 1, n = 0.5$) 等がある。

3) 複合地盤反力法

変形の大きな地表面近くの地盤は塑性領域にあり、その下の地盤は弾性領域にあるものと仮定し、塑性領域は極限地盤反力法を使用し、弾性領域は弾性地盤反力法を使用する方法である。なお、API RP 2A に採用されている $p \sim y$ 曲線法⁸⁾は、繰返し荷重を受ける杭構造物を対象とする設計法としては、現在唯一のものである。

(2) SPSの設計法

SPSは、杭の大きな変形能力を利用した構造であるため、地盤が塑性した状態、すなわち、杭-地盤系が非線形性を示す状態を想定した杭の解析法を用いて設計する必要がある。このような条件から、海外の実施例では、前述した設計法のうち、極限地盤反力法に属する Blum の方法を採用した例が多い。また、PIANC 防舷材研究委員会は、SPS (委員会では Flexible Breasting Dolphin と表現) の設計法として Blum の方法で杭の諸元を決定し、Brinch Hansen の方法、 $p \sim y$ 曲線法でチェックを行う方法を提唱している。⁹⁾

Blumの方法は、設計水平力に対し、杭頭変位、最大曲げモーメントおよびその発生位置、必要根入れ長が容易に算定されるため、設計法としては有効な方法である。しかし、現段階では地盤の極限状態での杭-地盤の挙動を確認した例は少なく、また、繰返し荷重の影響も確認されていない。Blumの方法をSPSの設計法として採用するためには、これらの不明な点を明らかにする必要がある。また、Brinch Hansenの方法や $p \sim y$ 曲線法においても、地盤に大変形が生じる場合の適用性は検証されていないため、現時点ではSPSの設計法として採用することには疑問が残る。

このような状況から、国内で既往の解析法を用いて直ちにSPSの実施設計を行うことは難しい。SPSの実施にあたっては、水平荷重実験等により杭-地盤の挙動を明らかにし、この結果と既往の解析法による計算結果を比較する等の方法により、より現実的な設計法を確立する必要がある。

3. 実大水平荷重実験の概要

(1) 実験目的

SPSの杭-地盤の挙動を把握することを目的とし、以下に示す項目を確認する実験を行った。

- ① 杭の変形、ひずみ分布の確認
- ② 地盤の塑性領域、影響範囲の確認
- ③ 繰返し載荷による影響の確認

(2) 計測項目

計測項目を表-1に示す。また、計測器の配置を図-4に示す。

表-1 計測項目

計測項目	計測目的	使用計器	計測項目	計測目的	使用計器
荷重	載荷重の確認	油圧ジャッキ 圧力変換器	杭体ひずみ	杭体が発生するひずみを測定し、応力、 曲げモーメント、変位等を計算する。	ストレインゲージ
杭体載荷点変位	実験杭載荷点の水平変位の確認	ポテンショメータ式 変位計	杭体に作用する土圧	杭体に作用する土圧の変化を測定し、 地盤の塑性化の範囲を確認する。	土圧計
杭体地表変位	実験杭地表位置での水平変位の 確認	ポテンショメータ式 変位計	杭近傍地盤内の変位	実験杭載荷方向の杭近傍の地盤内の変位 を測定し、地盤への影響範囲を確認 する。 測定は1.0 mピッチ	挿入式傾斜計
杭頭傾斜角	実験杭杭頭部の傾きの確認	固定式傾斜計	杭近傍地表の変位	実験杭近傍の地表の変位を3次元的 に測定し、杭の変形による周辺地盤へ の影響を確認する。	摺動式変位計
杭体傾斜角 (変位)	実験杭体の傾斜角の分布(変位 分布)の確認 測定は、1.0 mピッチ、変位は 傾斜角を積分	挿入式傾斜計	反力杭の変位	反力杭載荷点の変位を測定し、反力杭 の安全性を確認する。	摺動式変位計

(3) 実験装置

実験装置を図-3に示す。実験杭は、 $\phi 812.8 \times 15$ t (HITEN 80B) 降伏応力 72 kgf/mm^2 である。実験杭の載荷点は地表面より5.0mであり、根入れ長は12.0mである。実験杭の内側にはひずみゲージ保護用の溝形鋼(150×75×6.5×10)を18cmピッチですみ肉溶接した。また、挿入式傾斜計ガイドパイプ取付用の角形鋼管(75×75)が取付けてある。反力杭 $\phi 900 \times 12$ t×2本は、実験杭から34.0m離れた地点に打設した。荷重は、ケビンスタープ $\phi 32$ を2本使用し、100tf 油圧ジャッキ2基により実験杭に載荷した。

(4) 土質条件

図-5に実験杭打設位置の土質柱状図を示す。G.L.-11.10より上部は、埋立て砂層であり、N値は10~20程度のほぼ均質な砂層である。実験杭の根入れ長は12.0mであり、実験杭は単一砂層に打込まれた状態と考えることができる。

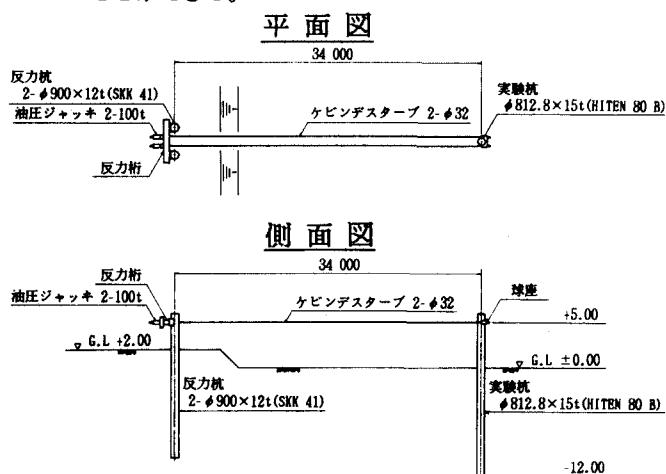


図-3 実験装置配置

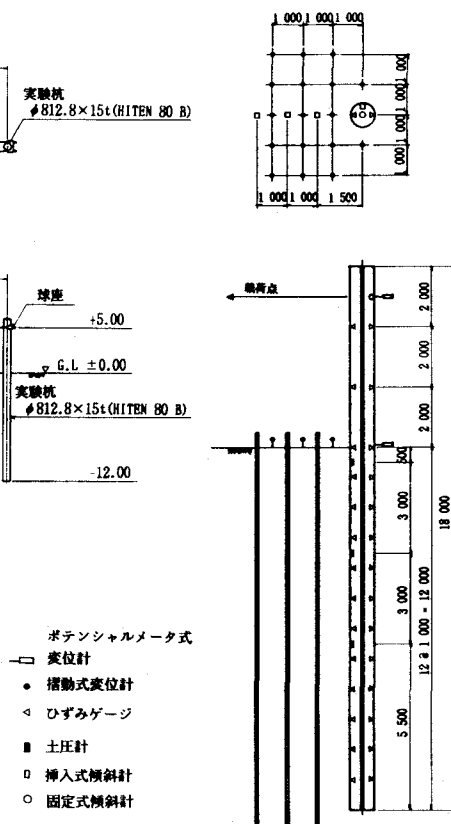


図-4 計器配置

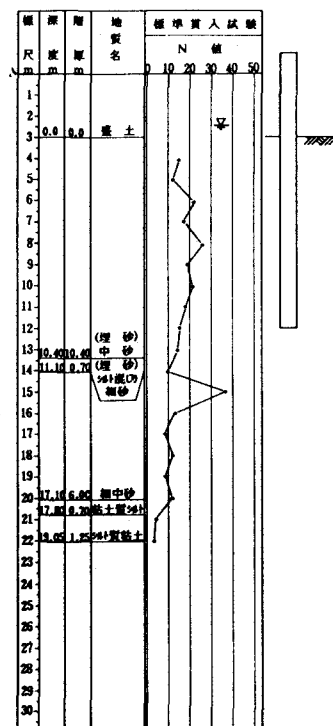


図-5 土質柱状図

(5) 荷重条件

水平荷重実験は2日間にわたり、2タイプの荷重パターンで行った。1日目の荷重は、杭の応力が降伏応力に達するまで10tf毎に増加させる一方向段階荷重を行った。杭は荷重重80tfで降伏応力に達した。2日目は1日目の降伏荷重の約9割の70tfでの一方向繰返し荷重を行った。図-6(a)(b)に荷重パターンを示す。

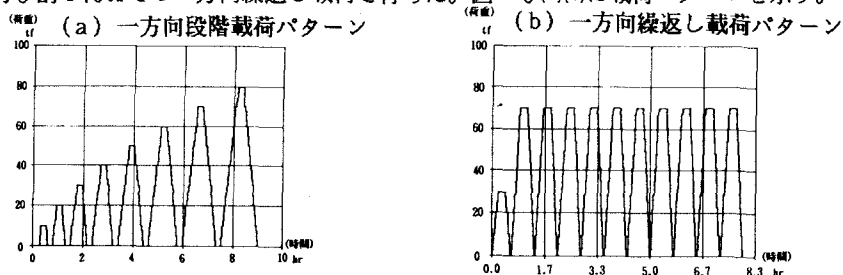


図-6 荷重パターン

4. 実験結果

(1) 一方向段階水平荷重実験

図-7に荷重-載荷点変位、荷重-地表面変位を示す。

荷重-変位の関係は非線形性を示しているものの、それほど強い非線形性ではない。この結果からは、①杭-地盤の関係は、地盤に大変形を与えた場合でもこの程度の非線形性しか示さない。②地盤の変形がまだ小さく地盤の塑性範囲が狭いため、それほど強い非線形性は示さない。という2つの状況が考えられる。この結論を得るためには、地盤にさらに大きな変位を与えた場合の杭-地盤の挙動を把握する必要がある。

図-8は、ひずみより計算した変位分布図である。G.L-8mで変位はほぼゼロとなる。

図-9は、ひずみより計算した曲げモーメント分布図である。最大曲げモーメントは、各荷重レベルともG.L-2.0mで発生している。また、G.L-11.0mで曲げモーメントはほぼゼロとなる。

図-10は、杭周辺地盤の水平変位分布図である。地盤にある程度大きな変形を与えた場合でも、杭中心から約3.7D(D:杭の直径)離れた点での地盤の動きはわずかである。

(2) 一方向繰返し水平荷重実験

図-11は、繰返し載荷時の荷重-地表面変位図である。1日目の実験により、地表面には7.5cmの残留変形が残っている。これは、1日目の最大変形の40%にあたる。繰返し載荷により変形量は増加するが、4サイクル以降の変形量の増加はほとんどなく、ほぼ平衡状態となった。

図-12は、繰返し載荷時の曲げモーメント分布図である。繰返し載荷による曲げモーメント分布形状の変化は、それほど大きくない。しかし、1日目の曲げモーメント分布と比べた場合、最大曲げモーメントは70tfと80tfの間にあるものの、G.L-4.0m以下の曲げモーメントは、1日目の80tf載荷時の曲げモーメントよりも大きな値となっている。これは、繰返しにより地盤の塑性領域が下方に進行したためと考えられる。

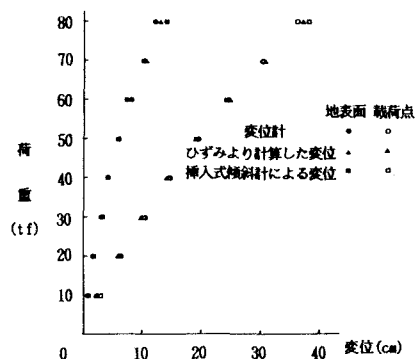


図-7 荷重-載荷点変位

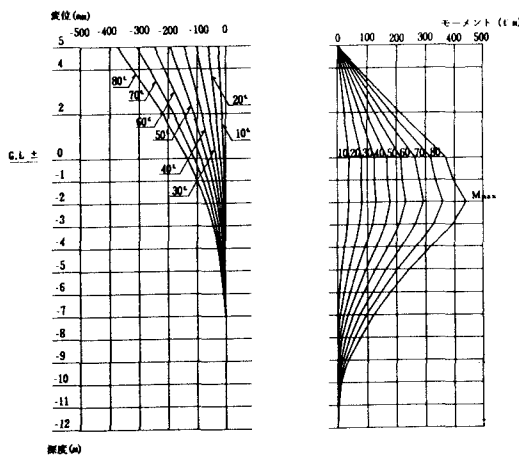


図-8 変位分布 図-9 曲げモーメント分布

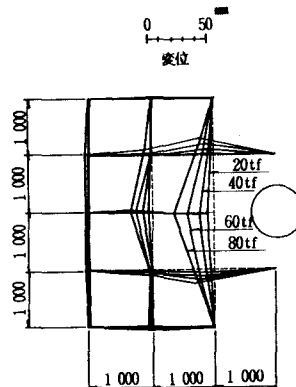


図-10 杭周辺地盤水平変位分布

5. 既往解析法のSPS設計法としての適用性の検討

従来、杭の設計に用いられている解析法のうち、極限地盤反力法に属する Blum の方法、弾性地盤反力法に属する Changの方法（線形）・港研方式（非線形）、複合地盤反力法に属する $p \sim y$ 曲線法（API RP 2A）により解析法の適用性を検討した。

実験値との比較に用いた計算値は、地盤定数をパラメータとして計算した結果のうち、最も実験値に近い結果を採用した。従って、設定された地盤定数は、実験現場の土質条件から推定される地盤定数とは必ずしも一致していない。

図-13は、荷重-載荷点変位を比較したものである。また図-14は、載荷重80tf時の曲げモーメント分布を比較したものである。

Blumの方法は、地盤の内部摩擦角を $\phi = 40^\circ$ と仮定した場合でも、変位、曲げモーメント共にかなり大きな値を与える。これは、地盤が Blum が仮定している地盤の極限状態に達していないためと考えられる。

Changの方法は、実験値に比較的近い値を与える。横方向地盤反力係数 k_h は「道路橋示方書・同解説」¹⁰⁾に示される k_h の修正式を用いて修正した場合、実験値を比較的良く近似する。載荷重80tfの場合、地表面変位は $y = 12.5\text{cm}$ であり、基準 k 値を N 値15~20という条件より $k_0 = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$ と設定すれば、 $k = 3.0 \times 12.5^{-0.5} = 0.85 \text{ kgf/cm}^2$ となり、 $k = 0.8 \text{ kgf/cm}^2$ に近い値となる。

港研方式C型地盤による計算結果は、実験値と良く一致する。「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示された k_c と N 値の関係²⁾によれば、 $k_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^{2.5}$ の値は、 N 値10程度に相当する。実験場所の N 値は10~20であるので、地盤との相関も比較的良好い。本実験のような地盤条件においては、地表面変位が 12.5cm となる場合でも、港研方式により杭の挙動を解析できることが明らかとなった。

API RP 2A に示された $p \sim y$ 関係を用いた $p \sim y$ 曲線法による計算結果は、荷重-載荷点変位の近似度は比較的良好いが、曲げモーメント分布はやや大きな値を与える。ただし、この計算結果は地盤の内部摩擦角を $\phi = 40^\circ$ と仮定した計算である。

SPSを接岸ドルフィンとして使用し、接岸エネルギーを杭の変形で吸収する場合は、水平耐力および載荷点変位を適切に評価できる設計法が必要である。水平耐力に関しては、各解析法ともに曲げモーメントの値が実験値とほぼ等しいか大きな値を与えるので、設計法としては各解析法とも安全側の杭断面を与える。載荷点変位に関しては、港研方式、Changの方法、 $p \sim y$ 曲線法の値はほぼ実験値と一致しているが、Blumの方法は大きな値を与える。杭の変形による吸収エネルギーは、変形が大きいほど大きな値となるので、

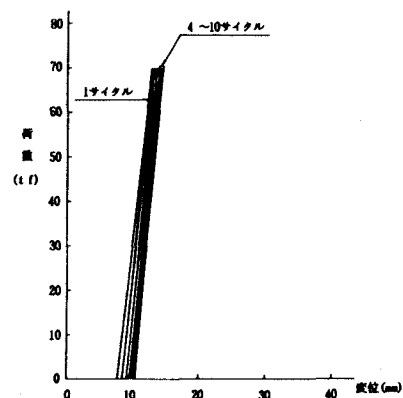


図-1-1 荷重-地表面変位（繰返し載荷）

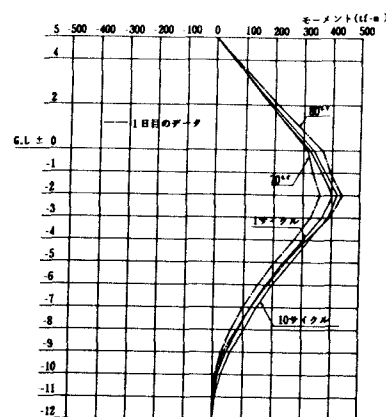


図-1-2 曲げモーメント分布（繰返し載荷）

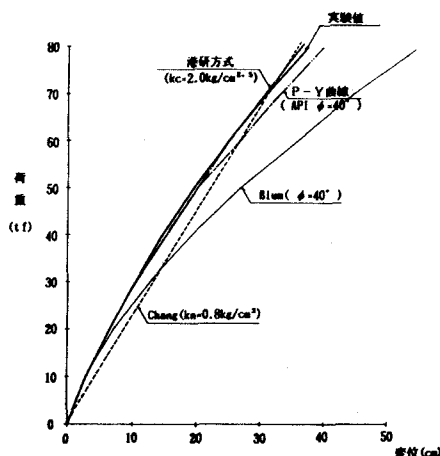


図-1-3 荷重-載荷点変位（既往解析法との比較）

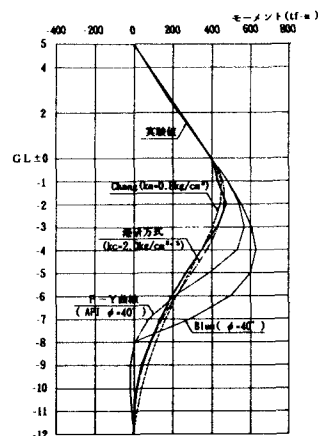


図-1-4 曲げモーメント分布（既往解析法との比較）

Blumの方法は実際の吸収エネルギーよりも大きな値をあたえる。これは危険側の設計となる。

以上の結果より、港研方式、Changの方法、 $p \sim y$ 曲線法 (API RP 2A)は、SPSの設計法として適用の可能性が示された。ただし、API RP 2Aの $p \sim y$ 関係は、比較計算に用いた内部摩擦角が実際の地盤条件と差があるため、この点に関してはさらに検討を進める必要がある。

6. 結 論

本研究では、SPSの設計法の確立を目的とし、その第一段階として、砂地盤における杭-地盤の挙動を実大水平載荷実験で把握するとともに、既往の設計法の適用性を検討した。以下に本研究で得られた結論を示す。

- ① 杭-地盤系の挙動は、それほど強い非線形性は示さなかった。地盤にさらに大きな変形が生じた場合、同様な傾向を示すのか、非線形性が強く表れるのかは、現段階で判断することはできない。
- ② 繰返し載荷により、杭の変形は増加する。ただし、4サイクル以上の載荷ではほぼ平衡状態となるので、SPSを繰返し載荷を受ける構造物に適用することは可能であると考ええる。
- ③ 今回の実験で発生した程度の地表面変位 ($y = 12.5\text{cm}$) の場合でも、杭中心から直径の約3.7倍離れた点での地盤の動きは、わずかである。
- ④ SPSの設計法として、従来杭の設計に用いられている Changの方法、港研方式、 $p \sim y$ 曲線法 (API RP 2A)の適用の可能性が示された。ただし、この結果は、地表面変位が $y = 12.5\text{cm}$ の場合のものであり、SPSの設計法を確立するためには、地盤にさらに大きな変形を与えた場合の杭-地盤の挙動を把握し、設計法の検討を行う必要がある。

7. おわりに

本研究では、SPSの設計法の確立に向けて、ある程度方向性は得ることができた。しかし、地盤にさらに大きな変形を与えた場合の杭-地盤の挙動の把握、この状態で繰返し載荷を行った場合の杭-地盤の挙動の把握等残された課題はまだ多くある。今後は、このような項目について研究を進める必要がある。

なお、本研究は、運輸省港湾技術研究所の技術指導を受けて行った。研究にあたっては、港湾技術研究所土質部 梅原靖文部長、同基礎工研究室 高橋邦夫室長、構造部 横井聡之部長、同海洋構造研究室 上田茂室長には、貴重なお意見をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

〈参考文献〉

- 1) Mannesmann, "Mannesmann Dolphins Hamburg-Finkenwerder Berthing Bain for Large Vessels", Catalogue
- 2) 日本港湾協会, "港湾の施設の技術上の基準・同解説" pp. 5-44~5-67, 1979
- 3) 久保浩一, "くい横抵抗の新しい計算法", 港研報告, Vol. 2, No. 3, 1964
- 4) Chang, Y.L., "Lateral pile loading tests", Trans. ASCE, Vol. 102, pp. 272~278, 1937
- 5) Blum, "Wirtschaftliche Dalbenformen und deren Berechnung", 1932
- 6) Brinch Hansen, J "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces", Danish Geotechnical Inst. Bull. 12, 1961
- 7) Broms, B.B., "Design of laterally loaded piles", Proc. ASCE J. Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 91 SM3, 1965
- 8) API RP 2A, "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore on Platforms", pp. 52~54, 1987
- 9) PIANC, "Report of the International Commission for Improving the Design of Fender System", pp. 112~134, 1984
- 10) 日本道路協会, "道路橋示方書・同解説、下部構造編", 1980