

砂地盤に打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

大成建設(株)	正会員	木内 里美
同	同	松下 基也
同	同	高橋 正美
日本鋼管(株)	正会員	掛江 正紀
同	同	磯崎 総一郎
同	同	鈴木 操

1、はじめに

本研究は、単杭構造物(S P S : Single Pile Structure) による係留施設を開発することを最終目的としている。本論文は、一連の研究のうち、水平荷重を受ける S P S に関して、杭-地盤系の挙動を把握する目的で実施された実大載荷実験結果を報告するものである。

S P S は、杭材に高張力鋼(降伏応力 $\sigma_y = 32 \sim 70 \text{ kgf/mm}^2$)を使用し、塑性領域に至るまでの地盤の水平抵抗を利用する構造物である。従来の構造形式と比較して、大きな水平耐力と変形能力を備えているため、接岸ドルフィン等の係留施設に利用した場合、杭1本で大型船舶を接岸させることも可能である。

このような係留施設は、ヨーロッパを中心に砂質系地盤を対象として広く用いられており、最近は大規模なバースにも利用されるに至っている。しかし、杭の大きな変形に伴う地盤の塑性化の影響や、繰返し載荷が S P S に与える影響等を考慮した設計手法が確立されていないこともあって、我が国では未だ実用化されていないのが現状である。本構造形式の実用化にあたっては、これらを考慮した合理的な設計手法を確立することの必要性は大きい。

本研究では、今回報告する載荷実験以前に、杭-地盤系の挙動を把握する目的で N 値 20 程度の砂質地盤における実大水平載荷実験を実施している¹⁾。その結果、以下の結論を得た。

- ・ 従来の解析手法では適用限界とされている地表面変位(3 cm程度)を大きく上回る場合においても、従来の非線形弾性解析法(たとえば港研方式²⁾や p-y 曲線法³⁾)を拡張することにより、杭-地盤系の挙動を把握することができる。
- ・ 繰返し載荷を受ける場合、杭の応力増加はほとんどみられず、変位もある一定値に収束する傾向があることが確認された。

しかし、前回の実験で生じた地表面変位は 12.5 cm であり、実構造物で予想される変位(20 cm 程度)よりもかなり小さく、S P S の設計手法を確立するためには、地盤の変形がさらに大きい場合の杭-地盤系の挙動を把握することが不可欠となる。そこで、本実験では N 値 = 5~10 程度の砂質地盤を対象として前回と同様な実大水平載荷実験を実施した。

2、実大水平載荷実験の概要

(1) 実験目的

S P S の杭-地盤系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。

- ・ 杭の変形、ひずみ分布の確認
- ・ 地盤の塑性領域、影響範囲の確認
- ・ 繰返し載荷が、杭の変形や断面力に及ぼす影響の確認

(2) 実験装置

実験装置を図-1に示す。試験杭は、 $\phi 812.8 \times 20 \text{ t}$ (NK-HITEN 80A : 降伏応力度 $\sigma_{sy} = 70 \text{ kgf/mm}^2$)である。試験杭の載荷点は地表面上 4.0 m、地盤への根入れ長は 13.0 m である。試験杭の内側には、歪ゲージ保護用の軽溝形鋼(150x150x3.2)を 10.0 cm 間隔ですみ肉溶接を施した。また、挿入式傾斜計ガイドパイプ取り付け用に角形鋼管(80x80x2.3)を使用した。反力杭($\phi 900 \times 20 \text{ t}$)は、試験杭から 21.5 m (杭径の約 26 倍)離れた場所に打設した。載荷荷重は油圧ジャッキ(400 tf、ストローク長 1.5 m)を使用し、ケビンデスタブ($\phi 36$ 、2本)を介して試験杭に作用させた。

(3) 計測項目

表-1に示す項目について計測を行った。また、図-2に計器配置図を示す。

(4) 土質条件

図-3に試験杭打設位置の土質柱状図を示す。N 値が 10 以下の細砂あるいは砂質シルトからなり、GL-3.60 m 以浅は埋土層となっている。本地盤は、杭の横抵抗に支配的な影響を及ぼす上層部がほぼ一様な砂質地盤であり、杭-地盤の挙動は、一様地盤における挙動とほぼ一致することが予想される。

(5) 載荷条件

載荷試験は、土質工学会基準「杭の水平載荷試験方法・同解説」に基づき実施し、載荷方法は一方向多サイクル方式とした。載荷試験は2日間にわたり実施し図-4に示す2種類の載荷ステップを対象とした。1日目は、杭の降伏が生ずる程度の荷重(90 tf)まで段階的に荷重を増加させる一方向段階載荷を行い、2日目は1日目の荷重の約83%に相当する75 tfで13サイクルの繰返し載荷を行った。

表-1 計測項目一覧

測定項目	着 眼 点	使用計器	測定項目	着 眼 点	使用計器
時 間	載荷時間の確認	時 計	杭体の応力	試験杭に発生する曲げ応力の確認 (歪量を測定し、応力に変換する。)	歪ゲージ貼付
荷 重	載荷荷重の確認	油圧ジャッキ 圧力変換器 ロードセル	反力杭の変位	反力杭杭頭の水平変位を測定し、反力の硬化を確認する。	変位計
載荷点変位	試験杭載荷点の水平変位の確認	変位計	杭近傍地盤内の 変位	試験杭載荷方向の近傍地盤内の側方 変位分布の確認 (0.5mピッチ測点の傾斜角を積分)	挿入型傾斜計
杭体地表面変位	試験杭地表面位置の水平変位の確認				
杭頭傾斜角	試験杭杭頭の傾きの確認	固定式傾斜計	杭近傍地表面の 変位	杭近傍の地表面変位を3次元的に測 定し、杭の変形が周辺地盤に及ぼす 影響を確認する。	摺動式変位計
杭体の変形	試験杭の変位分布の確認 (0.5mピッチ測点の傾斜角を積分)	挿入式傾斜計			

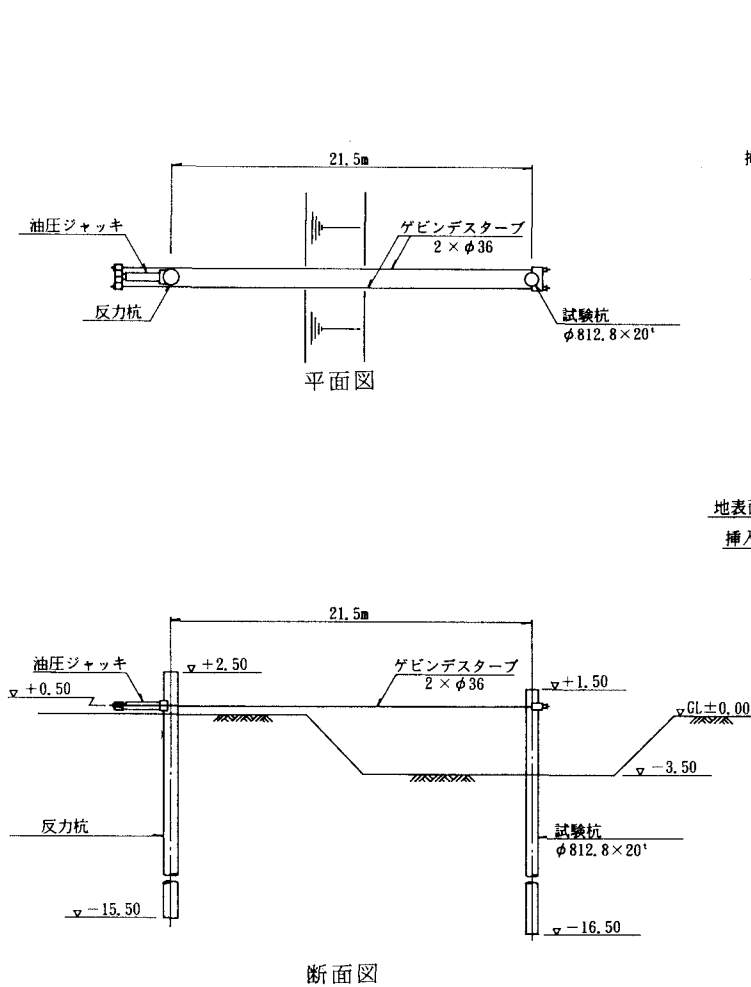


図-1 実験装置

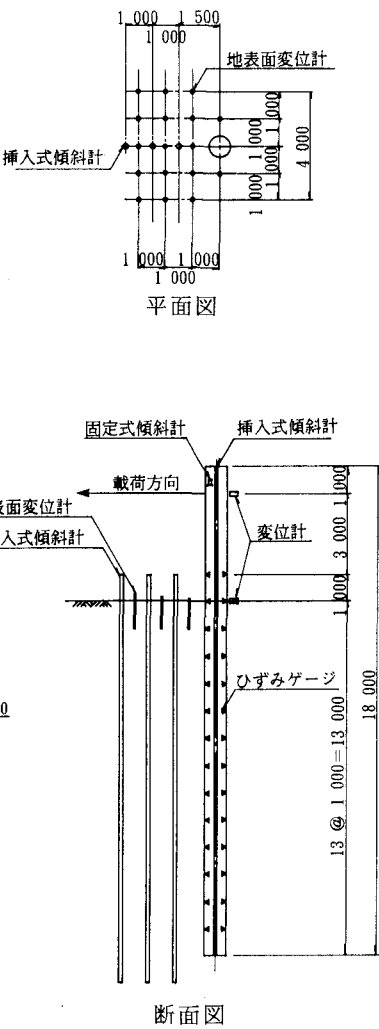
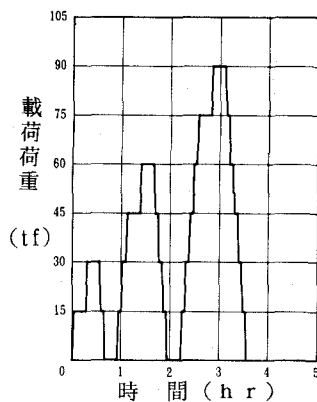
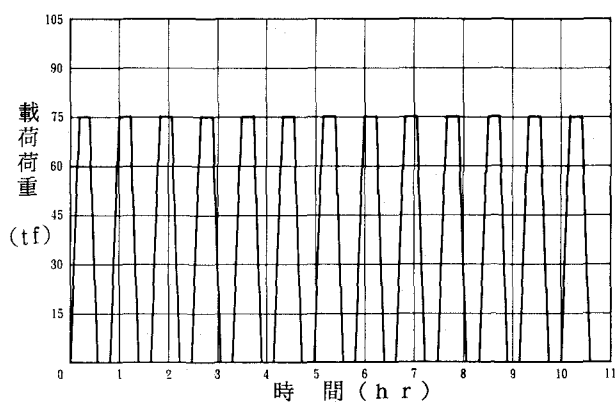


図-2 計器配置図



(a) 一方向段階載荷



(b) 一方向繰返し載荷

図-4 載荷ステップ

3、実験結果および考察

(1) 一方向段階載荷実験

図-5は、荷重～載荷点変位関係、荷重～地表面変位関係を示したものである。載荷点最大変位は488mm、地表面最大変位は254mmであり、前回の実験（地表面最大変位は125mm）と比較して顕著な非線形性を示している。

図-6は、歪分布より算定した変位分布である。地表面下8m付近で杭の変位はゼロとなっている。

図-7は、歪分布より算定した曲げモーメント分布である。最大曲げモーメントは、各荷重レベルともGL-3.0m付近で発生している。載荷荷重90tf時、杭に発生している最大応力は6118kgf/cm²であった。また、載荷荷重が90tf時における曲げモーメント分布を既往の解析法と比較したものが図-8である。解析法としては、港研方式とp-y曲線法(API方式)を示した。港研方式においては、地盤をS型地盤と想定し（一様な密度の砂地盤） $k_s=0.004$ kgf/cm^{3.5}として解析を行った。p-y曲線法では、 $\phi=30^\circ$ の砂地盤として解析を行った。図-8によれば、両解析法とも実験結果をよく表現していると思われるが、特に港研方式は精度の高い結果が得られた。なお、解析に用いた地盤定数は、載荷点変位および地表面変位が実験結果に概略等しくなる様に設定しており、実際にSPSの設計を行う際の地盤定数の設定方法については、十分な検討を要する問題である。

図-9は、載荷荷重90tf時における杭周辺地盤の水平変位の平面分布を示したものである。載荷軸から載荷軸直角方向に少なくとも2m（杭径の約2.5倍）離れた地点まで影響範囲が及んでいる。

図-10は、載荷荷重軸断面における地表面鉛直変位分布を示したものである。載荷荷重の小さい段階から、杭中心から4m程度の距離まで影響範囲が及んでおり、90tf載荷時には、約4.8m（杭径の6倍）まで達した。

(2) 一方向繰返し載荷実験

SPSの設計では、繰返し載荷を受けた杭の最大曲げモーメントや変位がどのように変化するかが問題となる。前述の挙動を把握するために次頁の比率を用いることにする。

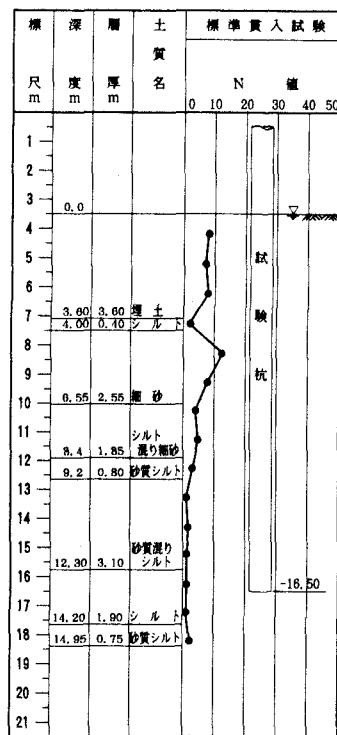


図-3 土質柱状図

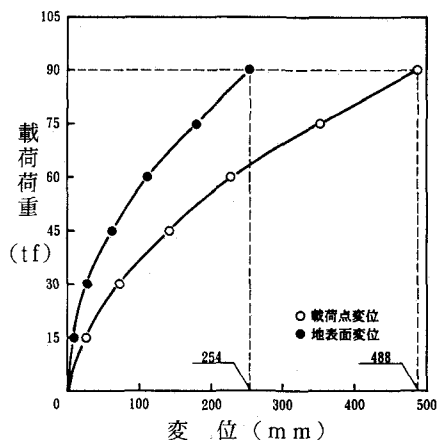


図-5 荷重～変位関係

地表面変位 $r1 = \frac{y_n}{y_1}$ (式-1)

曲げモーメント $r2 = \frac{M_n}{M_1}$ (式-2)

ここで y_n : n サイクル目の地表面変位
 y_1 : 処女荷重載荷時の地表面変位
 M_n : n サイクル目の最大曲げモーメント
 M_1 : 処女荷重載荷時の最大曲げモーメント

図-11は、上記比率の繰返し回数による変化の状況を示したものである。地表面変位に関する比率 $r1$ は、繰返し回数が増加するにつれてある一定値(1.3程度)に収束している。また、最大曲げモーメントに関する比率 $r2$ は、ほぼ1.0で変化が少なく、繰返し回数の影響をほとんど受けていないことを示している。これらの比率を考慮することによって、繰返し荷重を受けるSPSの設計が可能であると考えられる。

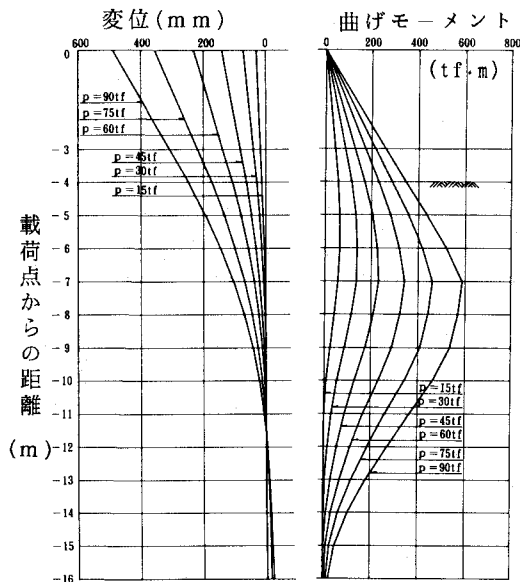


図-6

図-7

変位分布

曲げモーメント分布

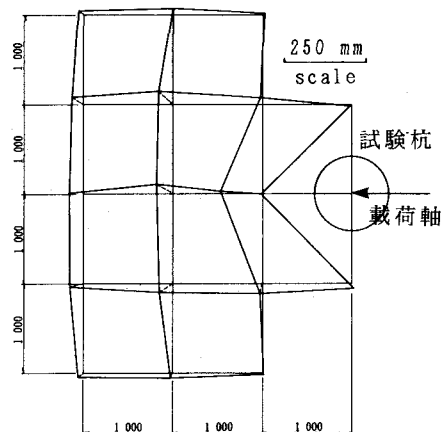


図-9 水平変位の平面分布

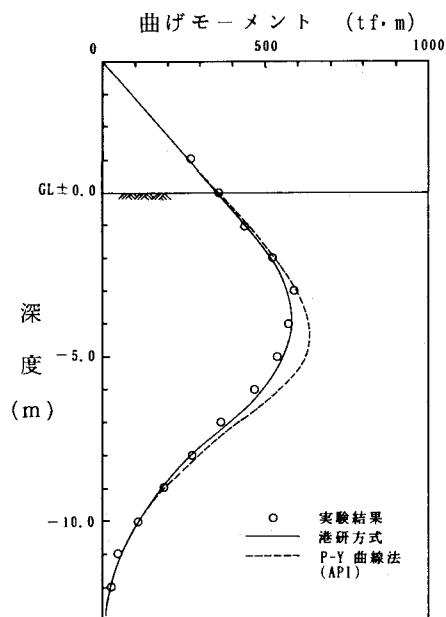


図-8 既往の解析法との比較

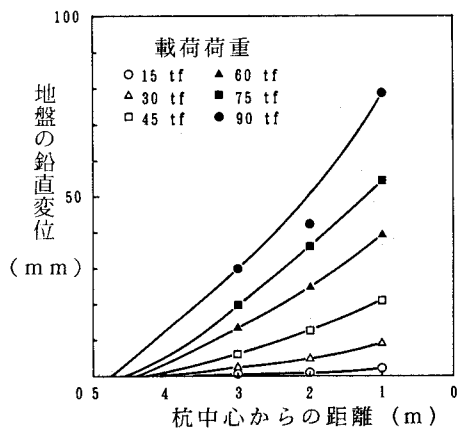


図-10 地表面鉛直変位分布

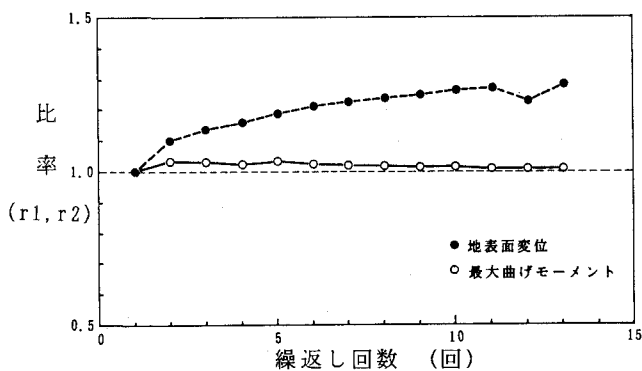


図-11 繰返し荷重が及ぼす影響

4、p-y 関係の推定

実験で得られた地盤反力～杭体水平変位関係(p-y関係)から地盤の非線形性についての検討を行う。図-12は、段階載荷時の各深度におけるp-y関係(縦軸のBは杭径)を示したものである。この図からも明らかな様に、p-y関係は強い非線形性を示す。そこで、実大載荷実験で得られたp-y関係に下式が成立するものと仮定して最小自乗法を用いてm、nの算定を行う。

$$p = k x^m y^n \quad (\text{式-3})$$

上式中、k、m、nは定数、xは深度、yは水平変位を示している。

(1) nの推定

(式-3)は、両辺の対数をとることにより下式に変形される。

$$\log p = n \log y + \log k x^m \quad (\text{式-4})$$

すなわち、 $\log p \sim \log y$ 関係における直線の勾配がnとなる。図-14は、上記 $\log p \sim \log y$ 関係を各深度について描いたものである。また、平均勾配nの深度分布を図-15に示した。実験で得られたnの平均値は、0.44である。地表面付近(x=1m)の値はやや離れているが、他の深度については、nの値はほぼ港研方式による係数(n=0.5)に近い値となっている。

(2) mの推定

nの場合と同様な考え方でmの値を推定する。(式-3)は、

$$\log p = m \log x + \log k y^n \quad (\text{式-5})$$

とも書き換えることができるので、 $\log p \sim \log x$ 関係を各yについて求めることによりmの値を推定できる。図-16は、 $\log p \sim \log x$ 関係を示したものである。図中には、m=1(港研方式のS型地盤に対応する値)も併記したが本実験結果に関する限りmの値はかなりばらつくようである。これは、本実験対象地盤が厳密には一様地盤ではないことに起因していると思われる。

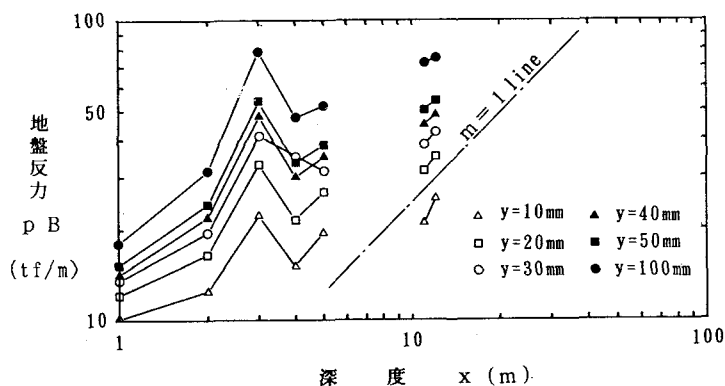


図-15 $\log p \sim \log x$ 関係

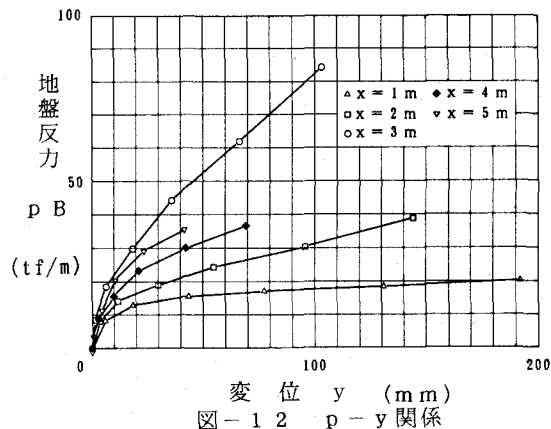


図-12 p-y 関係

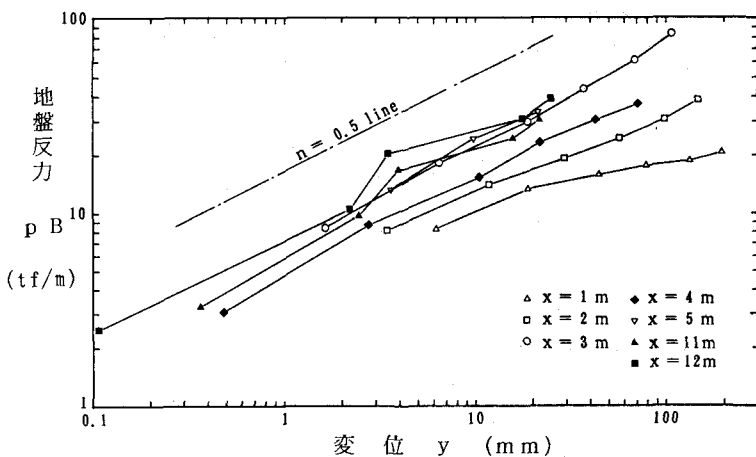


図-13 $\log p \sim \log y$ 関係

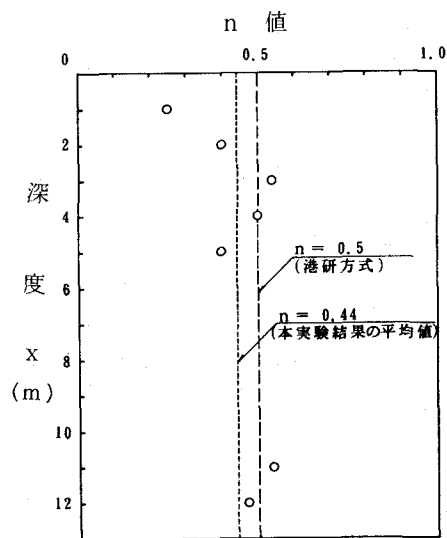


図-14 nの値の深度分布

5、結論

本論文は、地盤の非線形性が顕著になる領域まで杭を変形させて実施されたSPSの実大水平載荷実験結果を報告したものである。本実験の成果を以下にまとめる。

- ・ 地盤の非線形性が顕著になるまでSPSの載荷実験を実施し、杭－地盤系の挙動を把握することができた。このときの挙動は、従来の非線形弾性解析法(港研方式、 $p-y$ 曲線法)で十分表現可能である。特に港研方式については、高い精度で近似することができる。
- ・ 繰返し載荷を受けるSPSに関して、杭の最大曲げモーメントは、繰返し回数の影響をほとんど受けなかった。地表面変位は、ある程度の繰返し回数で平衡状態に達し、この時の値は処女載荷時の約1.3倍であった。平衡状態に到達するに必要な繰返し回数は、繰返し荷重レベルに依存しているものと思われるが、平衡状態における増加比率を適用することにより、繰返し載荷を受けるSPSの設計は可能であると思われる。
- ・ 載荷実験で得られた $p-y$ 関係より $p = k x^m y^n$ における係数 m 、 n を推定した。その結果、 n の値は0.44となり港研方式に採用されている値(0.5)に非常に近い値であった。 m に関しては地盤が厳密には均一でないこともあり、その推定値はばらついた。

6、おわりに

2回にわたり実施されたSPSの載荷実験結果により、地盤に大変形を与えた場合のSPSの挙動を把握することができた。これらの実験結果から明らかなように、SPSを設計する際には、地盤の非線形挙動の評価のみではなく、繰返し載荷が杭の変位や断面力に及ぼす影響も的確に評価することが重要なポイントとなる。本実験では、13サイクルの繰返し載荷実験を実施したが、他の載荷パターン(荷重強度、繰返し回数等)がSPSに及ぼす影響を把握するために、模型実験による検証も併せて行った。今後は、これらのデータを基に、設計手法を確立するための研究を進める方針である。

なお、本研究は、運輸省港湾技術研究所との共同研究で進められた。本研究では、実大載荷実験のほかに、模型繰返し載荷実験、異種鋼材の溶接性や溶接継手の防食性の検討、信頼性理論に基づく係留施設の設計法の検討等を実施し、SPSの設計法の確立を目指している。研究にあたっては、港湾技術研究所土質部基礎工研究室 高橋邦夫室長、同 菊池喜昭主任研究官、構造部海洋構造研究室 上田茂室長、同 白石悟主任研究官には、数々の貴重な御意見をいただき、ここに感謝の意を表する次第です。

参考文献

- 1) 木内里美、廣瀬鉄蔵 他、“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、pp.331～pp.336、1988.
- 2) 日本港湾協会、“港湾の施設の技術上の基準・同解説”、pp.376～pp.380、1989.
- 3) American Petroleum Institute、“API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms”、API RP 2A 18th ed.、pp.52～pp.55、1989.