

大変形繰返し荷重を受ける単杭の水平抵抗特性

Lateral Resistance of Single Pile under Large Repeated Load

高橋 邦夫* 菊池 喜昭** 鈴木 操***

By Kunio TAKAHASHI, Yoshiaki KIKUCHI and Misao SUZUKI

In order to evaluate the lateral resistance of single pile for dolphins under repeated load and large deformation, lateral loading tests were carried out for a model piles embedded in sandy soil in a laboratory. The model piles were made of high tensile steel plates 2500 mm in length and 200 mm in width. The conclusions of this study are as follows.

1. The deflections and inclination angles of the pile increased with the loading cycles and converged after some number of cycles while the magnitude of the load was kept constant.
2. The test results on the relationship between soil reaction p and deflection y concurred with the calculated values by Kubo's formula ($p \propto y^{0.5}$), which is applied to the virgin load under 10 cm of y except in the shallow area.
3. The equation of pile behavior under large deflection and repeated loads was obtained by analyzing the test data.

1. まえがき

船舶係留施設のドルフィン単杭にしたわみ性を持たせ、接岸時の船舶のエネルギーを杭の変形で吸収する構造形式(図-1参照)を、国内の同施設へ適用する検討が最近行われている。単杭のドルフィンは従来の組杭(直杭または斜杭)に比べ、構造が単純であるため施工性がよい。また、杭材に高張力鋼を使用することにより杭の変形を有効に利用できるため合理的、経済的である。この構造は、海外の良質砂地盤において数例適用されている。しかし、この構造の杭は、地盤が塑性化するような大変形を繰返して受けるため、このような影響を適切に評価した設計法が確立されているとはいいがたく、国内においては未だ実用に供されていない。このため、砂地盤において模型杭の大変形、繰返し水平載荷試験を実施し、

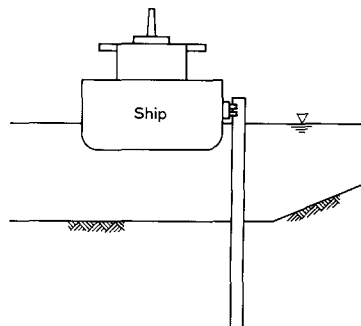


図-1 単杭のドルフィンの例

- ①繰返して水平荷重を受けたときの単杭の挙動の検討
 - ②地盤が塑性化するような大変形時の単杭の挙動の検討
- により単杭の水平抵抗特性を明らかにし、設計法を提案した。

* 工博 運輸省港湾技術研究所 土質部基礎工研究室長 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

** 工修 運輸省港湾技術研究所 土質部主任研究官 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

*** 工修 NKK鉄鋼研究所 都市工学研究部主任研究員 (〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1)

2. 水平载荷試験¹⁾²⁾

2.1 試験状況

ドルフィンに船舶が接岸するとき、通常、接岸速度は比較的遅く、また接岸方向は一方方向である。このため、静的な一方方向载荷試験とした。試験の状況を図-2に示す。試験に用いた土槽は、長さ6m、幅3m、深さ3mのRC製である。まず、空の土槽に模型杭を建込んで固定し、そのあと砂を土槽内に入れて地盤を作成した。载荷に先立ち、模型杭の頭部に载荷用の治具を取付け、この治具に、ワイヤーロープと滑車により、重錘の鉛直方向の荷重を水平方向の荷重に変換して水平力を作用させた。水平力は、ワイヤーロープの途中の模型杭に近い位置に設置したロードセルで計測した。

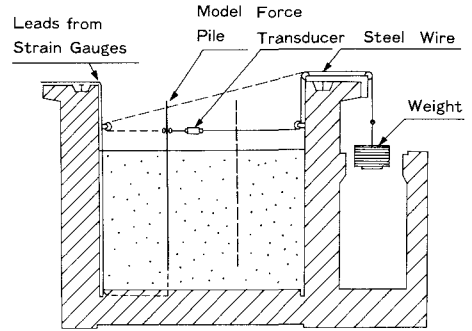


図-2 水平载荷試験の状況

この試験では、杭の水平抵抗特性をより一般的に論じることができるよう、試験のパラメーターとして、地盤条件、杭の曲げ剛性、载荷パターン、载荷高さおよび杭の根入れ長さを選定した。

2.2 地盤条件

試験に使用した砂は、千葉県の上総から採取したものを2mmふるいでふるい分けし、このふるいを通過したもので、真比重は $G_s = 2.764$ である。三軸圧縮試験の結果、内部摩擦角 ϕ 、間隙比 e は、それぞれ緩い状態で $\phi = 36 \sim 38^\circ$ 、 $e = 0.84 \sim 0.87$ 、普通の状態では $\phi = 40 \sim 42^\circ$ 、 $e = 0.74 \sim 0.75$ 、密な状態で $\phi = 42 \sim 45^\circ$ 、 $e = 0.68 \sim 0.69$ である。

実際のドルフィンでは、完全飽和状態の地盤中に設置されているが、船舶による荷重は静的に载荷されるので、この荷重条件では杭の挙動に与える砂の性質は飽和状態と乾燥状態ではほとんど差がないとされている³⁾。このため、本実験では、扱いが容易な乾燥状態の砂を用いた。

地盤条件は2種類とした。1つは普通の地盤で、砂を空中自然落下させて地盤を作成したが、この際には、作成地盤の再現性を考慮し、落下高さや砂の落下によってできる落下地点の砂の山の高さの制限など事前に決めた方法に従った。この方法によって作成した地盤の単位体積重量は $1.434 \sim 1.459 \text{ tf/m}^3$ である。もう1つは比較的硬い地盤で、前述の方法と同じように砂を空中自然落下させて地盤を作成したが、作成地盤の層の20cm程度ごとに約9kgfの重錘を用いて地盤を締め固めながら作成した。この方法によって作成した地盤の単位体積重量は 1.548 tf/m^3 である。

2.3 模型杭

模型杭は、図-3に示すように、長さ2500mm、幅200mmの板状であり、杭の曲げ剛性を試験のパラメーターとしたため、厚さ6.7mm、8.4mm、10.6mmの3種類を作成した。地盤が塑性化したときの杭の挙動の把握が試験の目的であり、そのために杭と地盤に大きな変形を与える必要があるが、杭材は弾性範囲にしなければならない。このため、模型杭の材料は、降伏点が高いSHY685の高張力鋼板（降伏点 $685 \text{ N/mm}^2 = 70 \text{ kgf/mm}^2$ ）とした。

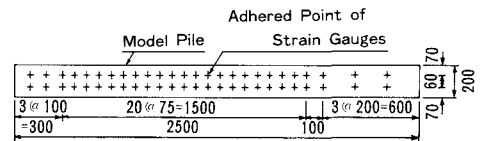


図-3 模型杭

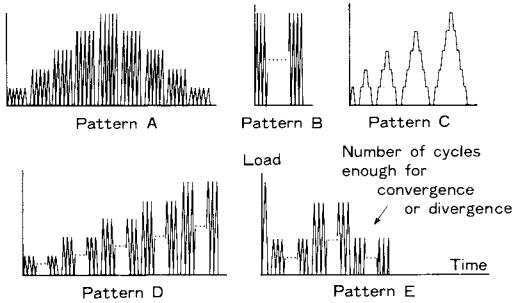
杭に発生する曲げ応力を測定するため、ひずみゲージを1測定点あたり片側2枚ずつ、計4枚貼付け、4ゲージ法による回路を組んだ。貼付けたひずみゲージとリード線は、ポリエステル系樹脂でコーティングし、

模型杭表面をなめらかにした。作成した全模型杭に対し、載荷試験を行う前に検定試験を実施し、曲げ剛性の校正を行った。

2.4 荷重パターン

載荷パターンは、図－4に示すような5種類とした。Aパターンは、規定回数同一荷重を繰返してかけ、その後次の荷重段階に移るもの、Bパターンは、計画最大荷重を杭の最終的な挙動が把握できるまでかけたもの、Cパターンは、土質工学会基準⁴⁾に準じたもの、Dパターンは、同一荷重を繰返してかけ、その荷重での杭の最終的な挙動が把握できたら次の荷重段階に移るもの、Eパターンは、最初に計画最大荷重を1回かけ、その後Dパターンと同様な方法で載荷するものである。

なお、Cパターン以外は、荷重保持時間、載荷速度とも計測作業などに要する時間だけとし、可能な限り短くした。



図－4 載荷パターン

2.5 載荷高さおよび杭の根入れ長

載荷高さは、20cm、25cm、40cm、60cmの4種類とした。杭の根入れ長は、杭の挙動が半無限長のものとなるように考慮して、180cmと210cmの2種類とした。

載荷試験は、それぞれの試験のパラメーターが杭の水平抵抗特性に与える影響を把握することができるよう、表－1に示す12ケースを行った。

表－1 試験のケース

Case No.	地盤条件	杭の曲げ剛性 (MN・cm ²)	載荷パターン	載荷高さ (cm)	根入れ長 (cm)
1	普通	29	A	20	180
2	普通	29	A	40	180
3	普通	29	A	60	180
4	普通	29	B	25	210
5	普通	29	C	25	210
6	普通	29	A	25	210
7	普通	29	B	25	210
8	普通	29	E	25	210
9	普通	29	D	25	210
10	比較的硬い	29	D	25	210
11	比較的硬い	15	D	25	210
12	比較的硬い	49	D	25	210

3. 試験結果とその考察¹⁾

3.1 繰返し荷重を受けたときの挙動

荷重・載荷点変位曲線の例を図－5に示す。この図では、載荷パターンの影響を説明するため、載荷パターン以外は同一の試験条件となる Case No. 5, 6, 8, 9について示した。図－5(a)は、Cパターンによる載荷のものである。この曲線は、繰返し荷重の影響を受けないものであり、この曲線の基本となるものである。図－5(b)は、Aパターンによる載荷のものである。この図は、同一荷重レベルで各5回繰返し載荷している。それぞれの荷重レベルにおける最初の載荷時の変位は、(a)の繰返し載荷の影響のないときの値とほぼ一致している。また、最大荷重をかけたあとに、それよりも小さな荷重レベルでの5回の繰返し載荷した場合の荷重・変位曲線は、最大荷重時における曲線のループ内すべておさまっている。図－5(c)は、Eパターンによる載荷のものである。この図も(b)と同様に、最大荷重をかけたあとにそれよりも小さな荷重レベルで繰返し載荷しているが、最終的な杭の挙動を推定することができるくらいの繰返し荷重を受けて

も、荷重・変位曲線は最大荷重時における曲線のループから外にでない。図-5(d)は、Dパターンによる载荷のものである。この図は、荷重レベルが低いところから高いところまでの繰返し载荷のものであるが、荷重レベルにかかわらず、繰返し回数の増加とともにやがて荷重・変位曲線はほとんど同じループを描いてくる。すなわち、杭の挙動は発散せずにある一定のところに収束している。そして、この現象は、荷重レベルが低いほど、少ない繰返し回数でみられる。以上の結果から、次のことがいえる。

- ① 载荷パターンが異なっても、処女荷重時の変位はほとんど変わらない。
- ② 大きな荷重を受けたあとに小さな荷重を受けた場合の荷重・変位曲線のループは、大きな荷重を受けたときのループの外側にはでない。
- ③ 荷重レベルが同一の場合、繰返し载荷によって変位は増加していくが、やがてその増加はほとんどなくなり、ある一定のところに収束する。
- ④ 杭の挙動が収束するまでの繰返し荷重の回数は、荷重レベルが低いほど少ない。

ここで、繰返し荷重を受ける杭の挙動の推定を行うために、繰返し载荷の影響を定量的に評価する目的で処女载荷時の杭の地表面の変位 y_{t1} に対する比に注目した。すなわち、 n 回目の繰返し载荷時の杭の地表面における変位 y_{tn} 、 n 回目の繰返し载荷前の杭の地表面における残留変位 y_{rn-1} およびそれらの差 $(y_{tn} - y_{rn-1})$ の y_{t1} に対する比である。それぞれの記号を、図-6 に示す。

図-7 に、それぞれ、 y_{tn}/y_{t1} 、 y_{rn}/y_{t1} および $(y_{tn} - y_{rn-1})/y_{t1}$ と繰返し回数 n との関係を示す。ここで示したデータは、繰返し载荷時の杭の最終的な挙動を把握することができた载荷パターンDのCase No. 9, 10, 11 および 12 と载荷パターンBのうちCase No. 7 についてのものである。それぞれ、ある幅をもってはいるが、全体的な曲線の傾向はほぼ一致している。したがって、杭の曲げ剛性、地盤条件、载荷パターンと荷重レベルにかかわらず、

y_{tn}/y_{t1} の値は1.1~1.3の間に、
 y_{rn}/y_{t1} の値は0.6~0.8の間に、
 $(y_{tn} - y_{rn-1})/y_{t1}$ の値は0.4~0.6の間にそれぞれ収束することが今回の試験からわかった。

同様な方法により、地表面におけるたわみ角の評価をした。図-8 は、それぞれ、 i_{tn}/i_{t1} 、 i_{rn}/i_{t1} および $(i_{tn} - i_{rn-1})/i_{t1}$ と繰返し回数 n との関係を示している。これより、
 i_{tn}/i_{t1} の値は1.0~1.2の間に、
 i_{rn}/i_{t1} の値は0.3~0.5の間に、

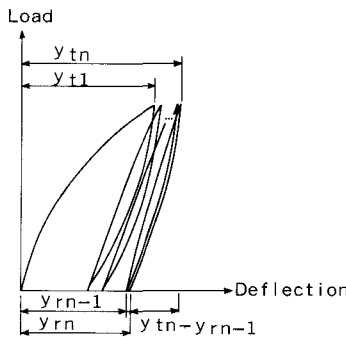
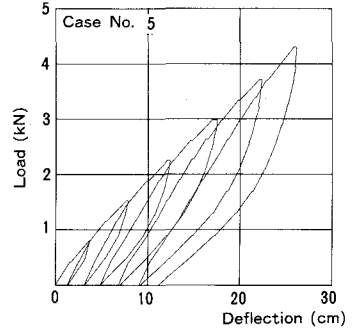
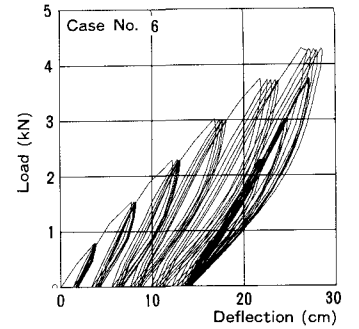


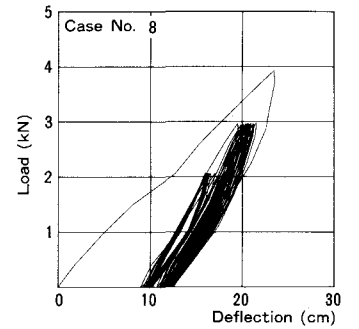
図-6 荷重・変位曲線の記号の説明



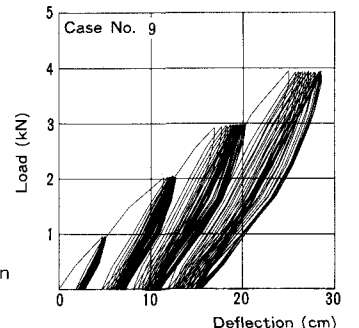
(a) Loading Pattern : C



(b) Loading Pattern : A



(c) Loading Pattern : E



(d) Loading Pattern : D

図-5 荷重・载荷点変位曲線

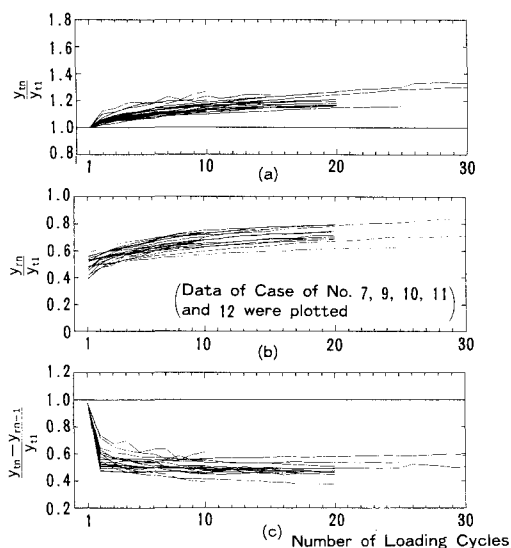


図-7 変位比と繰返し荷重の回数の関係

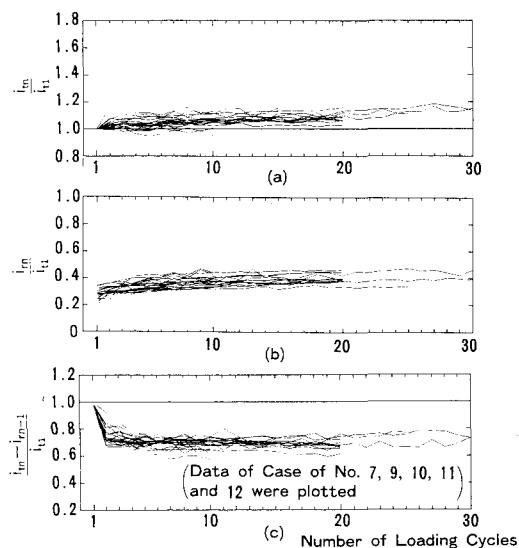


図-8 たわみ角比と繰返し荷重の回数の関係

$(i_{tn} - i_{rn-1}) / i_{t1}$
の値は0.6~0.8の間に
それぞれ収束すること
が試験によりわかった。

以上の結果より、繰
返し荷重を受けたとき
の単杭の水平挙動は、
処女荷重時の挙動を適
切に推定し、この推定
値にこれらの繰返し荷
重の影響を係数として
加味してやれば評価で
きることが試験の結果
より確認された。

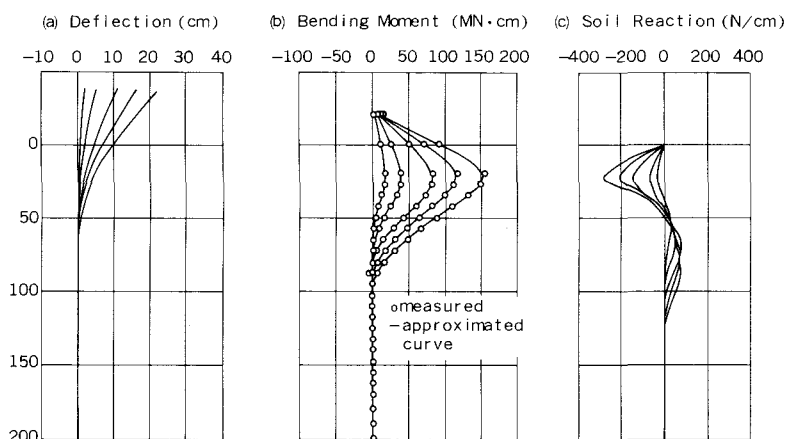


図-9 変位、曲げモーメントおよび地盤反力分布 (Case No. 11)

なお、すべての試験において、杭の根入れ長が曲げモー
メント第一ゼロ点の1.5倍以下になったものはなく、半無
限長の杭の挙動をしていたと考えている。

3.2 大変形時の挙動

測定されたそれぞれの杭のひずみ分布から曲げモー
メント分布を求める。図-9(b)の○印は、その一例として
CaseNo. 11 の 載 荷 試 験 に よ り 求 め ら れ た 処 女 載 荷 時 の 曲 げ
モーメントの分布を示している。これらの点をスプライン
関数⁵⁾を用いた多項式により曲線近似を行い、この曲げ
モーメントの近似曲線を2回積分することにより杭の変位を
求め、その結果を(a)に示した。ただし、積分にあたって

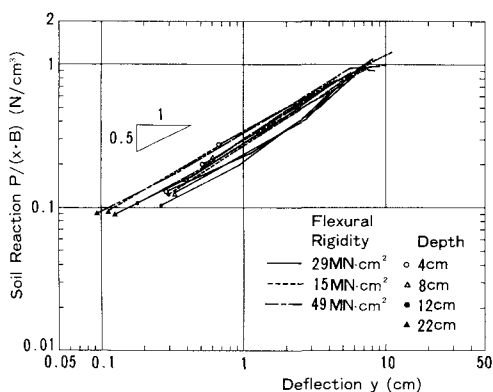


図-10 p-y関係 (両対数表示)

は、杭の最下端におけるたわみ角と変位はともに0であるという境界条件を与えた。一方、曲げモーメントの近似曲線を2回微分することにより地盤反力を求め、その結果を(c)に示した。ほかの試験ケースについても同様な手法により、処女載荷時に測定された杭のひずみから杭の変位と地盤反力を求めた。

図-10は、上述した方法で求めた地盤反力と杭の変位の関係を両対数表示した例である。この図は、杭の曲げ剛性と深さの異なるものを合せて示している。また、プロットしてあるデータはすべて処女載荷時のものであり、縦軸の地盤反力は、深さと杭幅の積で割った値としている。この図より、両対数表示で示した地盤反力と変位の関係は、変位が約10cmまではほぼ直線関係を示しており、その直線の傾きは0.5に近いことがわかる。地盤条件の異なるものについても図-10と同様なまとめかたをして、ほぼ同じ傾向が得られた。したがって、地表面付近の浅い部分では、一部地盤反力が飽和している例がみられるが、杭全体の挙動からみれば、 y が10cm以内では、久保の式⁶⁾(港研方式)、すなわち、 $p \propto y^{0.5}$ が成立つことが試験の結果からわかった。

図-11は、Case No.11の荷重・載荷点変位の関係について、試験の結果と港研方式のS型地盤、C型地盤それぞれによる計算の結果を比較したものである。荷重・載荷点変位の関係は、特にS型地盤として計算した結果と良い対応を示しており、このことから、大変形時の杭の水平挙動は港研方式で推定することができるといえる。

なお、曲げモーメントについては、大変形時でもほとんど繰返し載荷の影響を受けず、設計上無視しても差支えない程度であった。

3.3 大変形、繰返し荷重を受けた単杭の挙動の推定

数は少ないが、同様な試験を実大杭を用いて実施した例⁷⁾⁸⁾があり、その結果として、3.1や3.2と同様な傾向が得られている。

したがって、大変形、繰返し荷重を受けた単杭の挙動の推定方法として、繰返し載荷による影響係数 A_1 、 A_2 を用いた(1)式が考えられる。

$$y_{top} = A_1 y_0 + A_2 i_0 h + \frac{F h^3}{3 E I} \quad (1)$$

ここで、 y_{top} : 載荷点の変位

y_0 : 処女載荷時の地表面の変位

i_0 : 処女載荷時の地表面のたわみ角

h : 載荷高さ

F : 水平荷重

$E I$: 杭の曲げ剛性

A_1 、 A_2 : 表-2による

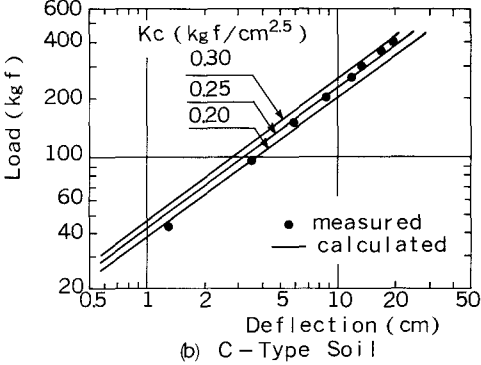
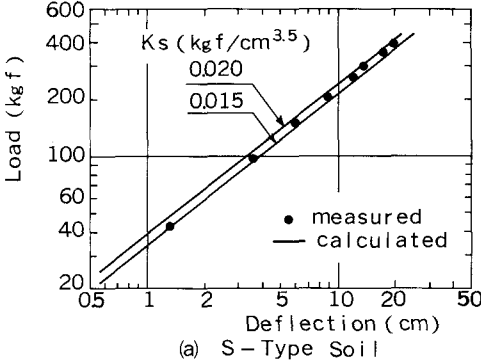


図-11 試験結果と港研方式による計算結果との比較(Case No.11)
(港研方式が従来単位系であるため、それに従った表示とした)

表-2 繰返し載荷による影響係数

	最大変位を求めるとき	杭の変形による吸収エネルギーを求めるとき	残留変位を求めるとき
A_1	1.1~1.3	0.4~0.6	0.6~0.8
A_2	1.0~1.2	0.6~0.8	0.3~0.5

3.4 杭の変形によるエネルギー吸収量の計算法

杭の変形によるエネルギー吸収量 E_a は、(2) 式により得ることができる。ただし、杭の変形によるみかけのばね定数は本来非線形であるが、(3) 式のように線形で近似してやることにより、設計上安全側となり、計算も容易となる。

$$E_a = \frac{1}{2} C \cdot y_{\text{top}}^2 \quad (2)$$

$$C = \frac{F}{y_{\text{top}}} \quad (3)$$

ここで、 E_a ：エネルギー吸収量

C ：杭の変形によるみかけのばね定数

F ：作用水平荷重

y_{top} ：(1) 式により求まる

(計算例)

ここで提案した方法で、杭の変形によるエネルギー吸収の計算の一例を示す。計算条件はつぎのとおり。

地盤反力係数： $k_c = 3.5 \text{ kgf/cm}^2 \cdot 5 \text{ (34 N/cm}^2 \cdot 5)$

杭の直径：1900 mm

杭の板厚：32 mm

作用水平力：200 tf (1960kN)

載荷高さ：21 m

杭の曲げ剛性： $1.72 \times 10^{13} \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2 \text{ (1.69} \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{cm}^2)$

最初に、港研方式により、処女載荷時の地表面の変位 y_0 と処女載荷時の地表面のたわみ角 i_0 を求める。この計算は、港湾の施設の技術上の基準・同解説⁹⁾に計算方法と計算例が掲載されているので、ここで計算例は省略するが、 $y_0 = 7.40 \text{ cm}$ 、 $i_0 = 1.89 \times 10^{-2} \text{ rad}$ という結果が得られる。参考までに、このときの杭の最大応力度は 5010 kgf/cm^2 であり、SHY685の鋼種を用いれば $1.5 \times$ 長期許容応力度（上部構造設計基準・同解説¹⁰⁾ より $1.5 \times 3600 \text{ kgf/cm}^2$ とする）の0.93程度である。

つぎに、(1) 式により、繰返し荷重を受けた杭の載荷点の変位 y_{top} を求める。

$$y_{\text{top}} = 0.4 \times 7.40 + 0.6 \times 1.89 \times 10^{-2} \times 2100 + \frac{200 \times 10^3 \times 2100^3}{3 \times 1.72 \times 10^{13}} = 62.7 \text{ (cm)}$$

ただし、ここでは安全側とするため、繰返し荷重の影響係数 A_1 、 A_2 をそれぞれ $A_1 = 0.4$ 、 $A_2 = 0.6$ とした。

そのつぎに、杭の変形によるみかけのばね定数 C を(3) 式により求める。

$$C = \frac{F}{y_{\text{top}}} = \frac{200}{0.627} = 319 \text{ (tf/m)}$$

最後に、杭の変形による吸収エネルギー E_a を(2) 式により求める。

$$E_a = \frac{1}{2} C \cdot y_{\text{top}}^2 = \frac{1}{2} \times 319 \times 0.627^2 = 63 \text{ (tf} \cdot \text{m)}$$

4. 結論

砂地盤における大変形繰返し荷重を受ける杭の水平抵抗特性として、今回の水平載荷試験により以下の結論を得ることができた。

① 杭の変位とたわみ角は、同一荷重レベルで繰返し載荷されると、繰返し回数とともにそれぞれ増加する。

- しかし、増加の割合は繰返し回数とともに減少し、最終的にはほとんど0となる。すなわち、半無限長の杭とみなせる範囲であれば、繰返し荷重を受けても杭の挙動は発散せず、一定のところに収束する。
- ②繰返し載荷時の地表面における杭の変位 y_{tn} 、繰返し載荷前の地表面における残留変位 y_{rn-1} およびその差 $(y_{tn} - y_{rn-1})$ のそれぞれに対する処女載荷時の地表面における杭の変位 y_{t1} との比 y_{tn}/y_{t1} 、 y_{rn}/y_{t1} および $(y_{tn} - y_{rn-1})/y_{t1}$ は、1.1~1.3、0.6~0.8 および 0.4~0.6 の間になる。
- ③繰返し載荷時の地表面における杭のたわみ角 i_{tn} 、繰返し載荷前の地表面における残留たわみ角 i_{rn-1} およびその差 $(i_{tn} - i_{rn-1})$ のそれぞれに対する処女載荷時の地表面における杭のたわみ角 i_{t1} との比 i_{tn}/i_{t1} 、 i_{rn}/i_{t1} および $(i_{tn} - i_{rn-1})/i_{t1}$ は、1.0~1.2、0.3~0.5 および 0.6~0.8 の間になる。
- ④①~③の結論より、繰返し荷重を受ける単杭の水平抵抗特性は、処女荷重時の挙動に対して繰返し荷重の影響を係数として加味してやれば、把握することができる。
- ⑤地盤反力 p と杭の変位 y との関係は、一部の浅いところを除いて、 y が10cm以内であれば $p \propto y^{0.5}$ の関係が成立つ。すなわち、地表面変位が10cm以内では、港研方式で杭の挙動を推定できる。
- ⑥砂地盤における大変形繰返し荷重を受けた杭の挙動の推定方法は、港研方式で大変形時の処女荷重時における挙動を計算し、これに、繰返し荷重の影響を係数で加味することにより行うことができることを水平載荷試験とその解析によって提案した。

5. あとがき

本研究において、実験的手法により、単杭のドルフィンの杭の設計法の検討を行った。今後、国内においてこの型式のドルフィンが設置されるときに、ここで提案した設計法が役立てば幸いである。

なお、本研究は、運輸省港湾技術研究所、NKKKおよび大成建設（株）の共同研究として実施されたものである。

参考文献

- 1) Takahashi K., Kikuchi Y. and Suzuki M.: Lateral Resistance of Single Pile under Large Repeated Load, GEO-COAST'91, 1991
- 2) 高橋邦夫、他：大変形繰返し荷重を受ける模型杭の水平抵抗、第26回土質工学研究発表会、1991.
- 3) 土質工学会：土質工学会基準 杭の水平載荷試験方法・同解説、1983.
- 4) 篠原登美雄、久保浩一：杭の横抵抗に関する実験的研究（その1）～垂直自由端単杭の横抵抗～、運輸技術研究所報告、Vol. 11, No. 6、1961
- 5) 桜井 明編著：スプライン関数入門、東京電気大学出版局、1981.
- 6) 久保浩一：杭の水平抵抗の新しい計算法、港湾技術研究所報告、Vol. 2, No. 3、1964.
- 7) 木内里美、廣瀬鉄蔵、他：SPS（単杭構造）による係留施設の開発に関する研究、第13回海洋開発シンポジウム海洋開発論文集、1988.
- 8) 木内里美、掛江正紀、他：砂地盤に打込まれた水平荷重を受ける単杭構造の挙動に関する実大載荷試験、第15回海洋開発シンポジウム海洋開発論文集、1990.
- 9) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、1979.
- 10) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説、1980.

（1991年9月30日受付）