

SPSによる接岸ドルフィンの残留変形量と累積疲労損傷度
Residual Deformation and Cumulative Fatigue Damage Ratio of Breasting Dolphin
by Single Pile Structures

上田 茂*、白石 悟*
Shigeru, Ueda and Satoru, Shiraishi

Currently, breasting dolphins of deepwater terminals are designed so as ship's berthing energy shall be absorbed mainly by fenders. As for a singel pile structure (SPS) which consists of high-tensile steel, ship's berthing energy shall be absorbed mainly by piles.

Major subjects to be cleared for design of SPS are the lateral load-deflection characteristics of piles against large deformation, estimation of residual deformation under repeated loads and evaluation the safety for fatigue. In this report, both residual deformation and cumulative fatigue damage ratio within a lifetime are computed with consideration of ship's berthing and mooring forces. The lateral load-deflection characteristics of SPS against large lateral repeated loads which are obtained from the field tests and model experiments are taken into consideration in this study.

Keyword: Breasting Dolphin, Single Pile Structure, Cumulative Fatigue Damage Ratio, Residual Deformation

1. まえがき

本論文では、単杭構造 (Single Pile Structure; SPS) を用いた接岸ドルフィンの船舶の接岸時および係留時の荷重に対し、耐用年数内における残留変形量および累積疲労損傷度を検討する。

従来、シーバースの接岸ドルフィンは、船舶の接岸エネルギーを主として防舷材によって吸収するように設計されている。これに対して、SPSは高張力鋼を用いた単杭構造物で、杭自身が大変形することによって接岸エネルギーを吸収する。国内ではSPSを用いた大型構造物の実績はないが、海外では大型原油タンカーの接岸ドルフィンなどが建設されている。しかしながら、海外に建設事例はあるものの、SPSの設計において明らかにしなければならない課題として、①大変形する杭の横抵抗力の計算法、②残留変形量の予測、③累積疲労損傷度の予測、④異種鋼材の溶接性および防食性の検討が挙げられる。

運輸省港湾技術研究所、大成建設株式会社、日本鋼管株式会社は昭和63年度および平成元年度の2年間、上記のSPSの設計に係わる諸課題について共同研究を行った。本論文は上記の課題のうち、筆者らが行った②および③に関する研究内容をとりまとめた¹⁾。

2. 現地実大水平載荷実験および模型杭繰り返し水平載荷実験によるSPSの変位復元力特性

(1) 現地実大水平載荷実験^{2), 3)}

現地実大水平載荷実験は硬質砂質地盤 (地点; 神奈川県横浜市扇島地区) および軟質砂質地盤 (地点; 千葉県習志野市茜浜) で実施された。実験に用いた杭の諸元、地盤条件、載荷条件および最大地表面変形量、最大応力度などを表-1に示す。硬質砂質地盤のN値は20程度、軟質砂質地盤のN値は5~10である。実験では、杭が降伏に達する荷重を載荷した後に除荷し、硬質砂質地盤では0~70tfで10回、軟質砂質地盤では0~80tfで13回の繰り返し載荷を行っている。図-1は硬質砂質地盤における繰り返し載荷時の荷重と杭の地表面変形量との関係である。ただし、繰り返し載荷実験は最初に80tfまで載荷し除荷した後にやっている。

表-1 現地実大水平載荷実験の条件

項目	硬質砂質地盤	軟質砂質地盤
杭径	812.8 mm	812.8 mm
肉厚	15 mm	20 mm
鋼種	SHY685	SHY685
載荷点	+ 5.0 m	+ 4.0 m
根入れ長	12.0 m	13.0 m
土質条件	砂質	細砂または砂質シルト
N値	10~20	10以下
載荷重 (最大) (繰り返し荷重)	80tf 70tf-109tf%	90tf 75tf-139tf%
最大地表面変形量	12.5cm	23.0cm
最大応力度	7211kgf/cm ²	7245kgf/cm ²

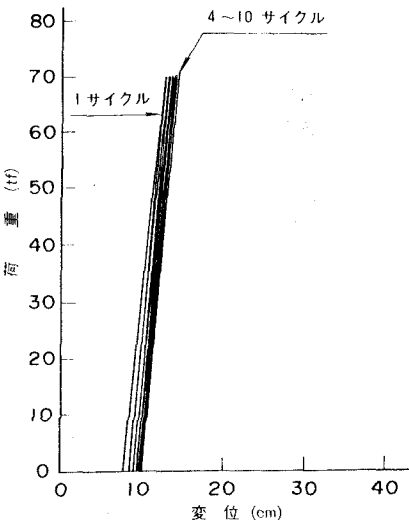


図-1 水平荷重と地表面変形量の関係 (現地実大水平載荷実験)

* 正会員 運輸省港湾技術研究所構造部 (〒239 横須賀市長瀬 3-1-1)

載荷回数の増加とともに、載荷時の変形量および除荷時の残留変形量は増加するが、10サイクルめには両者ともほぼ一定値に収束している。

(2) 模型杭繰返し水平載荷実験⁴⁾

模型杭繰返し水平載荷実験は運輸省港湾技術研究所の土槽内で実施された。地盤は砂を空中で自然落下させて作成した普通地盤（単位体積重量 1.434～1.459tf/m³）、および自然落下後、重錘を用いて締め固めた比較的硬い地盤（単位体積重量1.548tf/m³）の2種、模型杭（長方形断面）の断面二次モーメントは0.5、1.0、2.0 cm⁴ の3種、載荷高さは20、25、40、60cmの4種、繰返し荷重の載荷パターンは5種であり、これらの条件を組合せた合計16ケースの実験が実施された。

図-2は普通地盤における水平荷重と杭頭変形量の関係を示したものである。この実験ケースにおいては荷重は4段階のレベルで作用させているが、各荷重レベルに対して、杭頭変形量がほぼ一定値に収束したとみなせる回数まで荷重を繰返し載荷している。実験結果によると各荷重レベルに対して、杭頭変形量および杭頭残留変形量は10～15回程度の載荷回数でほぼ一定値に収束している。

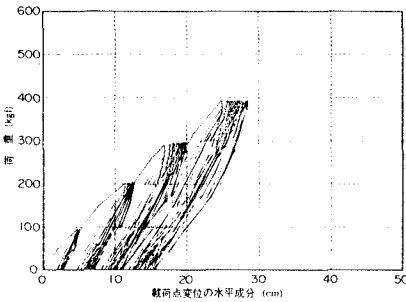


図-2 水平荷重と杭頭変形量の関係
(模型杭繰返し水平載荷実験)

(3) 載荷回数と杭頭変形量および杭頭残留変形量との関係

a) 杭頭変形量および杭頭たわみ角

一定荷重FがN回繰返して作用したときの杭頭変形量 $y_{1,N}$ および杭頭たわみ角 $i_{1,N}$ はそれぞれ、式(1)および式(2)を用いて計算される。式(1)の第1項は杭の地表面変形量の繰返し載荷による増加を、第2項は杭の地表面たわみ角の繰返し載荷による増加を、第3項は杭の自由長による変形量をあらわす。

$$y_{1,N} = B_y \cdot (N) \cdot y_0 + B_i \cdot (N) \cdot i_0 \cdot h + \frac{F h^3}{3 E I} \quad (1)$$

$$i_{1,N} = B_i \cdot (N) \cdot i_0 + \frac{F h^2}{2 E I} \quad (2)$$

ここに、

B_i : 繰返し荷重による杭の地表面たわみ角の増加影響を考慮する係数
($B_i = i_{0,\infty} / i_0$)

$B_i \cdot (N)$: $B_i \cdot (N) = 1 + (B_i - 1) \cdot [1 - \exp\{-\alpha_2(N-1)\}]$

B_y : 繰返し荷重による杭の地表面変形量の増加影響を考慮する係数
($B_y = y_{0,\infty} / y_0$)

$B_y \cdot (N)$: $B_y \cdot (N) = 1 + (B_y - 1) \cdot [1 - \exp\{-\alpha_1(N-1)\}]$

$E I$: 杭の剛性(kgf m²)

F : 杭頭に作用する荷重(kgf)

h : 地表面からの杭頭までの高さ(m)

i_0 : 処女荷重(F)載荷時の杭の地表面たわみ角

$i_{0,\infty}$: 無限大の回数荷重が載荷されたときの杭の地表面たわみ角の収束値

$i_{1,N}$: 一定荷重FがN回繰返して作用したときの杭頭たわみ角

y_0 : 処女荷重(F)載荷時の杭の地表面変形量(m)

$y_{0,\infty}$: 無限大の回数荷重が載荷されたときの杭の地表面変形量の収束値(m)

$y_{1,N}$: 一定荷重FがN回繰返して作用したときの杭頭変形量(m)

α_1 : 荷重の繰返し載荷による杭の地表面変形量の漸増影響を考慮する係数

α_2 : 荷重の繰返し載荷による杭の地表面たわみ角の漸増影響を考慮する係数

である。

なお、現地実大水平載荷実験および模型杭繰返し水平載荷実験によれば杭の地表面変形量および地表面たわみ角は10～13回の載荷回数でほぼ一定値に収束することが確認されているので、 $y_{0,\infty}$ 、 $i_{0,\infty}$ としてはこれらの数値を用い、表-2に示すようにパラメータ B_y 、および B_i の数値が提案されている。

b) 杭頭残留変形量および杭頭残留たわみ角

一定荷重FがN回繰返して作用したときの杭頭残留変形量 $y_{1,r,N}$ および杭頭残留たわみ角 $i_{1,r,N}$ は、それぞれ式(3)および式(4)を用いて計算される。

$$y_{1,r,N} = \left(1 - \frac{A_y}{B_y}\right) \cdot B_y \cdot [1 - \exp\{-\alpha_1(N-1)\}] y_0$$

表-2 パラメータの値

項目	実大実験	模型実験
変位 A_y	0.6	0.4
たわみ角 A_i	0.8	0.6
変位 B_y	1.4	1.4
たわみ角 B_i	1.2	1.2

$$+ \left(1 - \frac{A_i}{B_i}\right) \cdot B_i \cdot [1 - \exp\{-\alpha_2(N-1)\}] i_{0,h} \quad (3)$$

$$i_{t,N} = \left(1 - \frac{A_i}{B_i}\right) \cdot B_i \cdot [1 - \exp\{-\alpha_2(N-1)\}] i_0 \quad (4)$$

ここに、

A_i : 繰返し荷重による杭の地表面残留たわみ角の増加影響を考慮する係数 ($A_i = (i_{0,\infty} - i_{0,r,\infty}) / i_0$)

A_y : 繰返し荷重による杭の地表面残留変形量の増加影響を考慮する係数 ($A_y = (y_{0,\infty} - y_{0,r,\infty}) / y_0$)

$i_{0,r,\infty}$: 無限大の回数荷重が載荷されたときの地表面残留たわみ角の収束値

$i_{t,N}$: 一定荷重 F が N 回繰返し作用した時の杭頭残留たわみ角

$y_{0,r,\infty}$: 無限大の回数荷重が載荷されたときの地表面残留変形量の収束値 (m)

$y_{t,N}$: 一定荷重 F が N 回繰返し作用した時の杭頭残留変形量 (m) である。

式(3)および式(4)のパラメータ A_y および A_i については現地実大水平載荷実験および模型杭繰返し水平載荷実験において載荷回数が十分大きく杭の地表面変形量および地表面たわみ角が一定値に収束したときの結果に基づいて、表-2の数値が提案されている。
c) 杭の地表面変形量および地表面たわみ角の漸増を考慮する係数
イ) 杭の地表面変形量に対する係数 α_1

図-3は、 $B_y \cdot (N)$ と載荷回数 N の関係を示したものである。図中の○は現地実大水平載荷実験における $y_{0,N} / y_0$ ($y_{0,N}$: 一定荷重 F が N 回繰返して作用したときの杭の地表面変形量の実測値) を、△、●、×は、それぞれ、係数 α_1 を 0.1, 0.2, 0.3 とした計算値 $B_y \cdot (N)$ を示したものである。このうち、 α_1 を 0.2 とする場合が硬質砂質地盤および軟質砂質地盤の現地実大水平載荷実験結果とよく一致する。

ロ) 杭の地表面たわみ角に対する係数 α_2

図-4は、 $B_i \cdot (N)$ と載荷回数 N の関係を示したものである。図中の○は現地実大水平載荷実験における $i_{0,N} / i_0$ ($i_{0,N}$: 一定荷重 F が N 回繰返して作用したときの杭の地表面変形量の実測値) を、●、△、×は、それぞれ、係数 α_2 を 0.1, 0.2, 0.3 とした計算値 $B_i \cdot (N)$ を示したものである。このうち、 α_2 を 0.1 とする場合が硬質砂質地盤および軟質砂質地盤の現地実大水平載荷実験の結果とよく一致する。

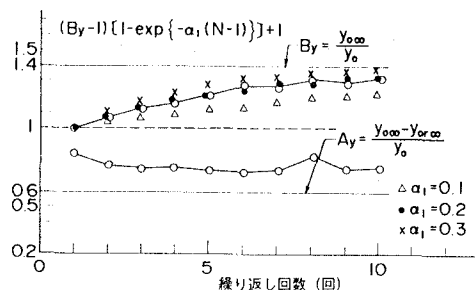
3. SPSの残留変形量と累積疲労損傷度の計算法

(1) 検討手法の概要

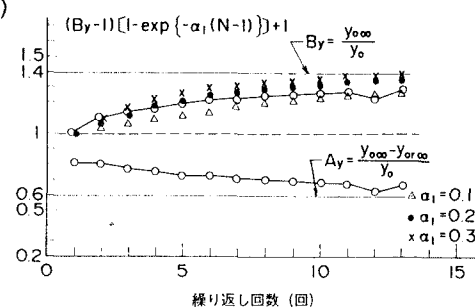
シーバースの接岸ドルフィンが受ける荷重は、船舶の接岸時および係留時の荷重、地震荷重、波浪荷重、流れによる荷重などである。接岸ドルフィンの設計では、船舶の接岸時および係留時の荷重が支配的であるが、これらの荷重は繰返し作用するのでこれを考慮し、SPSの耐用年数内における最大変形量、最大発生応力度、残留変形量、累積疲労損傷度を計算する。

本論文では、以下の限界状態に対してSPSの最大変形量、最大発生応力度、残留変形量および累積疲労損傷度を評価する。

- ① [終局限界状態] 杭の部材断面に降伏応力度が発生する状態
- ② [使用限界状態] 杭の最大変形量および残留変形量が許容値を超え、構造物の機能に影響が生ずる状態
- ③ [疲労限界状態] 繰返し荷重の作用による杭の疲労限界状態

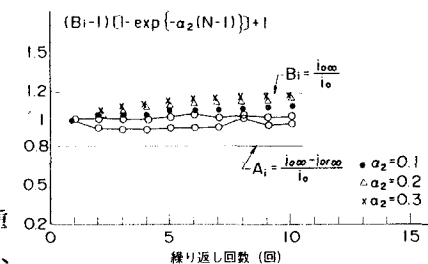


(a) 硬質砂質地盤

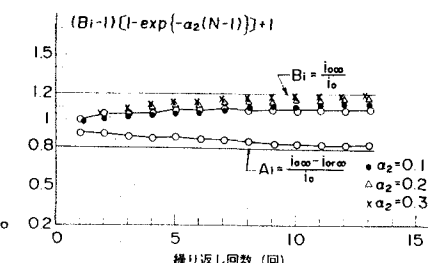


(b) 軟質砂質地盤

図-3 繰返し載荷による地表面変形量



(a) 硬質砂質地盤



(b) 軟質砂質地盤

図-4 繰返し載荷による地表面たわみ角

(2) 考慮する変数とその確率分布

S P S の最大変形量、最大発生応力度、残留変形量および累積疲労損傷度を計算する際には以下の諸変数を考慮する。

- ①材料の強度および構造物の変位復元力特性等に関する変数 部材の降伏点強度、土質定数（N 値）
- ②接岸時の荷重に関する変数 船舶の諸元（載荷重量トン、喫水）、接岸速度、偏心係数
- ③係留時の荷重に関する変数 船舶の諸元（載荷重量トン、喫水）、波高、周期、波向、風速、風向

図-5～図-10はこれらの変数のうち、船舶の載荷重量トン、満載喫水に対する喫水比、接岸速度、偏心係数、鋼材の降伏点強度、土質定数の度数分布を示す¹⁾。これらの度数分布より、船舶の載荷重量トン、満載喫水に対する喫水比、鋼材の降伏点強度、土質定数は正規分布を、接岸速度は対数正規分布を、偏心係数は一様分布を用いる。

(3) シミュレーションの手順

①数値シミュレーション法

S P S は船舶の接岸時および係留時の繰り返し荷重を受けるので図-1および図-2に示すように杭の変位復元力特性には履歴が生ずる。すなわち、荷重の載荷ごとに杭の変位復元力特性が変化するので、S P S の最大変形量、最大応力度、残留変形量、累積疲労損傷度はこのことを考慮して求めねばならない。また、S P S に作用する荷重は先に示した諸変数の確率分布を考慮して求める必要がある。そこで、本論文では、数値シミュレーションを行なって S P S の最大変形量、最大応力度、残留変形量、累積疲労損傷度を求める。

図-11は数値シミュレーションのブロックチャートであるが、耐用年数内に着岸する船舶の接岸時および係留時の荷重に対し、S P S の最大変形量、最大応力度、残留変形量および累積疲労損傷度を計算する。このとき、部材の降伏点強度、土質定数（N 値）、着岸船舶の接岸速度、偏心係数、排水量を乱数発生させ、複数の回数（m 回）の数値シミュレーションを行ない、それぞれのシミュレーションにおいて、耐用年数内における k 回の船舶の接岸時および係留時の S P S の最大変形量、最大発生応力度、残留変形量、累積疲労損傷度を計算する。ただし、船舶係留時の荷重については、気象海象条件および船舶の条件、荷重の繰り返し載荷による S P S の変位復元力特性の履歴などの各パラメータをそれぞれ 2～3 設定し、事前に船舶係留時の荷重を数値シミュレーションを行って求め、これらの結果を用いて乱数発生させたパラメータの諸値に対する S P S の係留反力を内外挿して求める。なお、信頼性理論に基づいて S P S の最適断面を検討するに当たっては、N 個の異なる断面の S P S について、上記の数値シミュレーションを行ない、建設費、破壊に伴う損失等を計算し、これらをもとに最適断面を選定するが、本論文においては $N=1$ とし、最適断面形状の選定は行っていない。荷重列については、乱数初期値を変えた m 回の荷重列を与える。各シミュレーションでは耐用年数内の各接岸船舶に対応する k 回の荷重が作用することとする。耐用年数内における構造物の破壊確率 P_f は、m 回の数値シミュレーションに対する構造物の破壊回数 n の比、すなわち $P_f = n/m$ である。

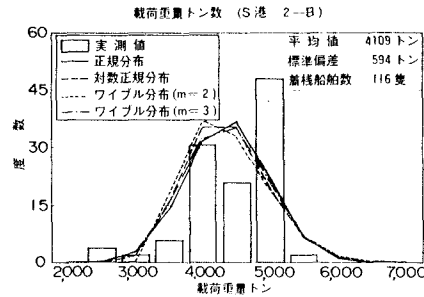


図-5 載荷重量トンの確率分布

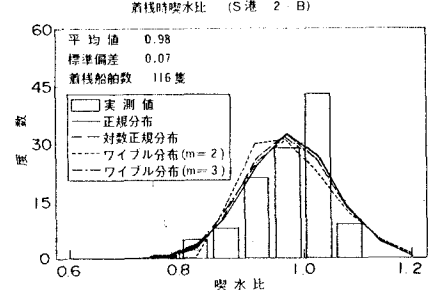


図-6 着岸時喫水比の確率分布

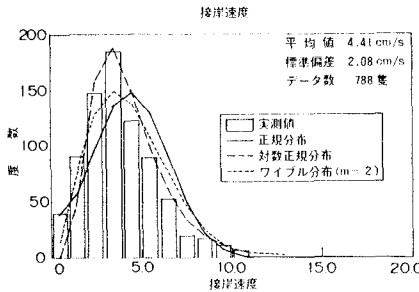


図-7 接岸速度の確率分布

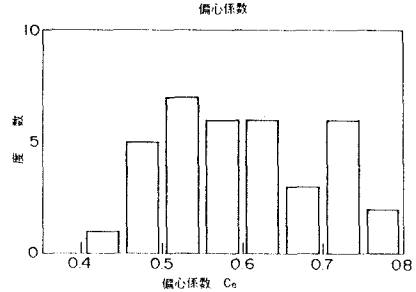


図-8 偏心係数の確率分布

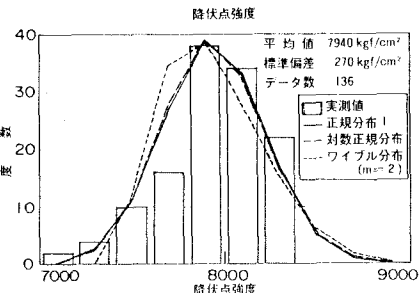


図-9 降伏点強度の確率分布

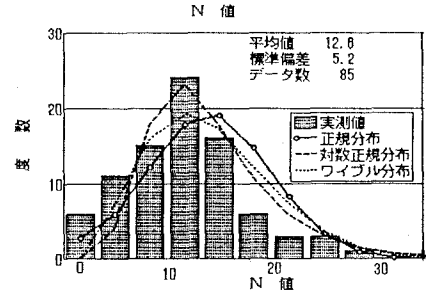


図-10 N 値の確率分布

②累積疲労損傷度の計算

耐用年数における各船舶（k 回）の接岸および係留時に対し発生応力度の計算を行いマイナーの線形累積損傷則^{*)}を用い、累積疲労損傷度を式(5)で計算する。

D = Σ ($\frac{n_i}{N_i}$) > 1 (疲労破壊が発生) (5)
D < 1 (疲労破壊せず)

ここに、 n_i : 応力振幅 S_i (単位MPa)における載荷回数、 N_i : 応力振幅 S_i における疲労寿命回数である。

累積疲労損傷度を計算する際の S-N 線図としては、図-12に示すように船級協会等の各種機関が海洋構造物の設計基準に定めたものがある。DNV (ノルウェー船級協会) の Cカーブ^{*)}、JSSC (日本鋼構造協会) の Dカーブ^{*)}、API (アメリカ石油協会) の X'カーブ^{*)}を比較検討したが、継手の種類等の条件から、式(6)で示される DNV の Cカーブが適当と考えられるので、これを用いて累積疲労損傷度を計算する。また、一般に板厚が厚くなると疲労強度が低下すると言われているので、板厚 22mm を超える場合には、式(7)を用いて補正する。

log N_i = 13.63 - 3.5 log S_i (6)

$S_i' = S_i \left(\frac{22}{t} \right)^{1/4}$ (7)

ここに、 t : 板厚 (mm)、 S_i' : 板厚 t に対する応力振幅の補正值 (MPa) である。

4. SPS の残留変形量および累積疲労損傷度の計算結果

(1) 計算対象構造物

5,000dwt級の内航タンカーおよび200,000dwt級の原油タンカーを対象とするSPSによる単杭ドルフィンについて残留変形量および累積疲労損傷度の計算を行なう。いずれも、接岸時のみを検討し、設計接岸エネルギーをSPSの杭自身の変形による吸収エネルギーで吸収するものとして設計した断面について検討する。設計接岸速度を5,000 dwtバースでは0.20m/s、200,000dwtバースでは0.12m/sとすると、設計接岸エネルギーは5,000dwtバースでは21.2tfm、200,000dwtバースでは231.7tfmである。杭の設計には港研方式を用い、地盤はC型地盤とし $k_c = 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ である。使用する鋼材はSHY685 (降伏点強度 $\sigma_y = 7000 \text{ kgf/m}^2$ 、許容応力度 $\sigma_a = 6000 \text{ kgf/cm}^2$)である。なお、係留索はナイロン索を用い、200,000dwtバースについては $\phi = 70 \text{ mm}$ 、5,000 dwt バースについては $\phi = 35 \text{ mm}$ とする。表-3には数値シミュレーションにおける載荷重量トン、喫水比、接岸速度、偏心係数、鋼材の降伏点強度および地盤のN値の平均値と標準偏差を示したものである。

(2) 船舶接岸時に対する計算および考察

(a) シミュレーション回数の検討

まず、数値シミュレーションの回数 m の検討を行なう。5,000dwtバースについて、数値シミュレーションの回数を $m = 10, 25, 50, 100, 200, 400$ として計算を行い、鋼材に生ずる最大応力度、杭頭の最大変形量、残留変形量、累積疲労損傷度を計算し、これらの結果を比較して適切なシミュレーション回数すなわち荷重列の個数 m を検討する。表-4はシミュレーション回数と残留変形量と累積疲労損傷度の計算値との関係を示している。シミュレーション回数によって残留変形量と累積疲労損傷度の計算値は変化するが、 $m = 100$ 以上では計算値の平均値および標準偏差はほぼ一定である。したがって、シミュレーション回数は $m = 100$ 回が適当であると考える。

(b) SPS の残留変形量と累積疲労損傷度

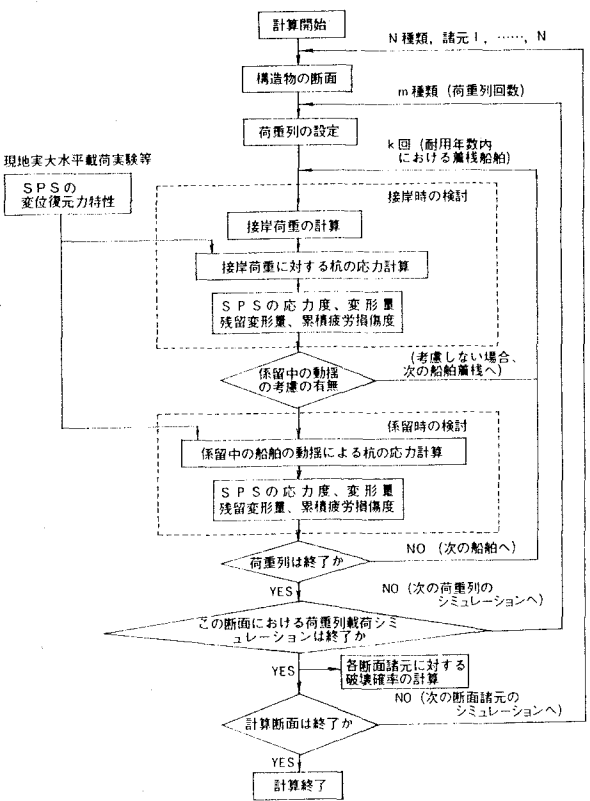


図-11 数値シミュレーションのフローチャート

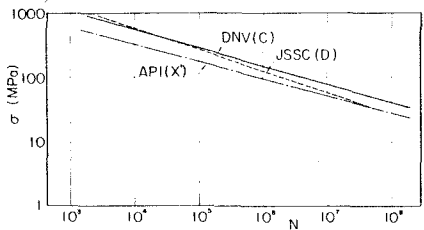


図-12 S-N線図

表-3 数値シミュレーションにおける変数

船型 (dwt)	5,000		200,000	
確率変数	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
載荷重量トン(dwt)	4000	600	180000	16000
喫水比	0.9	0.05	0.8	0.08
接岸速度(m/s)	0.044	0.021	0.044	0.021
偏心係数	0.6	(一様分布)	0.6	(一様分布)
降伏点強度(kgf/cm ²)	7940	270	7940	270
N値	20	5	20	5

5,000dwtバースおよび200,000dwtバースの接岸ドルフィンについて、船舶接岸荷重に対する、SPSの残留変形量と累積疲労損傷度を表-5に示す。100回の計算結果のうちの接岸ドルフィンの残留変形量の最大値は5,000dwtバースでは0.080m、200,000dwtバースでは0.267mであり、いずれのバースにおいても施設配置計画およびバース運用上支障はないと考えられる。また、累積疲労損傷度の100回の計算の最大値は5,000dwtバースでは0.0011、200,000dwtバースでは0.0013であり、接岸時荷重に対しては疲労破壊の恐れはないと言える。

(3) 船舶係留時に対する計算および考察

表-6は5,000dwtタンカーバースについて船舶係留時の荷重に対するSPSの残留変形量、および累積疲労損傷度の計算結果を示す。ただし、船舶は係船岸前面において波高0.5m以下、風速は5.0m/s以下の条件で係留するものとする。また、係船岸前面の波向は60°および90°とする。100回の計算結果のうちSPSの残留変形量の最大値は、波向60°のとき0.226m、波向90°のとき0.315mであり、接岸力のみを考慮して検討したときの残留変形量0.080mより大きい。しかしながら、これらの値も、バースの運用上支障をきたすことはないと考えられる。また、100回の計算のうちの累積疲労損傷度の最大値は、波向60°のときには0.55であるが、波向90°のときには2.41であり、また100回の計算の平均値でも1.51である。接岸時の荷重に対して設計した断面について、係船岸前面の波向が60°であれば係留時の動揺を考慮してもSPSが疲労破壊する恐れはないと考えられる。しかしながら、波向90°の場合にはSPSが疲労破壊する恐れがある。小型タンカーバースにおいてはSPSの前面に防衛工を設置し船舶の動揺による変形量の一部を吸収するなどの配慮が必要となる。

5. 結論

本論文で得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 船舶の接岸時および係留時の荷重の確率分布、土および鋼材等の材料強度の確率分布ならびに繰り返し荷重によるSPSの変位復元力特性の履歴を考慮して、SPSの耐用年数内における破壊確率、残留変形量および累積疲労損傷度などを計算する手法を示した。

(2) 乱数初期値を変えて行った100回の計算の結果、接岸時の荷重に対し接岸ドルフィンの残留変形量の最大値は、5,000dwtタンカーバースでは0.080m、200,000dwtタンカーバースでは0.267mである。

(3) 乱数初期値を変えて行った100回の計算の結果、接岸時の荷重に対し接岸ドルフィンの累積疲労損傷度の最大値は、5,000dwtタンカーバースでは0.0011、200,000dwtタンカーバースでは0.0013である。

(4) 乱数初期値を変えて行った100回の計算の結果、接岸時を主たる設計荷重とする5,000dwtタンカーバースの接岸ドルフィンでは係留時荷重に対し、波向60°の場合には累積疲労損傷度の最大値は0.55である。また、波向が90°の場合には累積疲労損傷度の最大値は2.41であり、この場合には防衛工の設置などの措置が必要である。

参考文献

1) 上田茂、白石悟：大変形する単杭構造物における接岸ドルフィンの残留変形量と累積疲労損傷度、港湾技術研究所報告、第30巻第1号、1991.3
2) 木内里美他：SPS(単杭構造)の設計法に関する基礎的研究、海洋開発論文集Vol.4, 1988.11, pp.331~336
3) 木内里美他：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、海洋開発論文集Vol.6, 1990.6, pp.107~112
4) Takahashi et al: Lateral Resistance of Piles under Large Repeated Load, Proc. of International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development (GEO-COAST '91), Sept.1991 (in press)
5) 例えば岡村弘之、板垣浩：強度の統計的取扱いは構造強度信頼性工学＝、培風館、1979.4, pp.105~116
6) DNV: Fatigue Strength Analysis for Mobil Offshore Units, Note No.30.2, 1984.8, pp.19~25
7) 日本鋼構造協会(JSSC): 疲労設計指針(案)、JSSCレポートNo.14、1989.11, pp.5~13
8) API: API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, API RP 2A 18th ed., 1989.12, pp.45~47

表-4 シミュレーション回数と計算値の関係

(残留変形量)			
シミュレーション回数	最大値(m)	平均値(m)	標準偏差(m)
10	0.067	0.059	0.0043
25	0.080	0.061	0.0062
50	0.080	0.059	0.0054
100	0.080	0.059	0.0047
200	0.080	0.059	0.0045
400	0.080	0.059	0.0045

(累積疲労損傷度)			
シミュレーション回数	最大値	平均値	標準偏差
10	0.0011	0.0008	0.00012
25	0.0011	0.0008	0.00014
50	0.0011	0.0008	0.00013
100	0.0011	0.0008	0.00012
200	0.0011	0.0008	0.00011
400	0.0011	0.0008	0.00011

表-5 船舶接岸時の計算結果

(残留変形量)			
船型(dwt)	最大値(m)	平均値(m)	標準偏差(m)
5,000	0.080	0.059	0.0047
20,000	0.267	0.141	0.0308

(累積疲労損傷度)			
船型(dwt)	最大値	平均値	標準偏差
5,000	0.0011	0.0008	0.00012
200,000	0.0013	0.0009	0.00017

表-6 船舶係留時の計算結果

(残留変形量)			
波向(°)	最大値(m)	平均値(m)	標準偏差(m)
60	0.226	0.145	0.0155
90	0.315	0.198	0.0186

(累積疲労損傷度)			
波向(°)	最大値	平均値	標準偏差
60	0.545	0.461	0.074
90	2.414	1.510	0.245

(係留限界波高0.5m、係留限界風速5m/s)