

# 港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

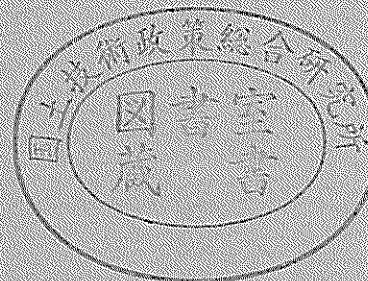
No.645

Mar. 1989

変断面杭棧橋の応力算定手法について

松 井 創  
安 間 清

運輸省港湾技術研究所



# Development of Design Program for Pier with Multi-sectioned Vertical Piles

Hajime MATSUI\*  
Kiyoshi ANMA\*\*

## Synopsis

This study was made to develop a calculating program for piers attending corrosion and to aid an investigation on repair of piles used for piers.

Followings are major conclusions of this study:

- (1) At a small scale of pile span, large variation was observed in corrosion speed of piles used for piers. So corrosion survey must be done closely.
- (2) We developed a calculating program for check on buckling of multi-sectioned piles used for piers, to find that several checking methods we now use are dangerous.
- (3) We developed a calculating program for limit analysis of pier with multi-sectioned piles, and compared it with other models to find a lack of reliability in calculating results of other models. We also show material for investigation on reliability of calculating results under insufficient corrosion survey.
- (4) We investigated changes of horizontal force distributed to each pile, distribution of bending moment on pile axis and bearing capacity of structure, which caused by repair of piles in pier with highly increasing of stiffness. We aimed materials which are used to repair piles of piers.

**Key Words:** Pier with Vertical Steel Piles, Corrosion of Pile, Multi-sectioned Pile, Limit Analysis, Buckling, Repair

---

\* Senior Research Engineer, Planning and Design Standard Division

\*\* Chief of Design and Construction Technology Laboratory, Planning and Design Standard Division

# 変断面杭棧橋の応力算定手法について

松 井 創\*  
安 間 清\*\*

## 要 旨

本研究は、杭腐食の進行した棧橋の応力算定プログラムを開発し、棧橋杭の補修に係る検討に資することを目的として行ったものである。

本研究により得られた主要な結論は、以下の通りである。

- ① 棧橋鋼管杭の、施設内の平面的な位置による腐食速度については、隣接する杭同士で大きな変動が見られる場合があるので、綿密な腐食調査が必要である。
- ② 変断面杭の全体座屈に対する許容圧縮応力度の算定プログラムを開発し、他の便宜的な方法と算定結果の比較を行った。便宜的な方法は両方とも1～2割程度危険側となるので、本法に従って算定するのが望ましいことがわかった。
- ③ 変断面杭棧橋の弾塑性解析プログラムを開発したので、その計算理論を説明する。一樣断面杭モデルや簡易変断面杭モデルは算定応力に誤差が大きく、本モデルによることが望ましいことがわかった。また、杭の腐食調査が十分でないような場合に、計算結果にどの程度の信頼性があるかを推定するための基礎資料を示した。
- ④ 剛性の高い補修工（RCライニング等）の施工に伴う水平分担力・曲げモーメント分布・構造耐力の変化について検討を行い、補修設計の際の参考資料とした。

キーワード：鋼直杭式棧橋、杭腐食、変断面杭、弾塑性解析、座屈、補修

## 1. はじめに

港湾構造物で使用している鋼材は、一般に腐食の影響を受けるが、一部の施設では設計・施工時に予測したよりも腐食が進行しているものもあり、適切に調査及び評価を行い、対策を施す必要がある。

こうした要請から、腐食の進行した棧橋の杭応力を算定するためのプログラムを開発したので、計算法と計算例を紹介するとともに、棧橋における杭腐食の特性、腐食杭の強度評価法等にも言及する。

本プログラムは、以下の点で従来の棧橋杭応力算定法（例えば、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の方法。以下、技術基準の方法と略す。）に対して優れている。

- ① 腐食の進行した杭のねじり剛性・断面積・断面係数等を階段状の変断面杭として算定している。
- ② 変断面杭棧橋について、弾性解析のみならず弾塑性解析が行える。

- ③ 技術基準に示されている、偏心外力を受ける場合の分担水平力算定法は近似式であるが、本法では厳密な分担水平力を求めている。

## 2. 棧橋における杭腐食の特性

### 2.1 海域による腐食速度の変化

現行の技術基準と今次の改訂案における鋼材の腐食速度を比較すると、表-1のようになる。

今次の改訂により、現行基準では（H.W.L.～海底）の区分が（L.W.L.-1m）の境界で二分されるとともに、腐食速度も大きめの値になっている。ここで、腐食速度は平均的な値であり、海域の条件により異なるので幅を持たせている。

表-2は、東京・伊勢・大阪の各湾、九州、日本海（中国地方）の各海域における数施設の棧橋の鋼管杭の腐食速度を統計処理した結果である。杭のサンプルの概数は、それぞれ600, 180, 30, 100, 40である。また、80%

\* 計画設計基準部 主任研究官（最適設計担当）

\*\* 計画設計基準部 設計技術研究室長

表-1 技術基準における鋼材の腐食速度

腐食環境		腐食速度 (mm/年)	
		今次改訂案	現行基準
海側	H.W.L. 以上	0.3	0.3
	H.W.L. ~ (L.W.L. - 1m)	0.1 ~ 0.3	0.1
	L.W.L. - 1m ~ 海底	0.1 ~ 0.2	0.1
	海底泥層中	0.03	0.03
陸側	陸上大気中	0.1	0.1
	土 中 (残留水位上)	0.03	0.03
	土 中 (残留水位下)	0.02	0.02

と記述したものは、80%のサンプルがその値以下となる腐食速度のことである。表によれば、東京・伊勢・大阪の各湾における腐食速度は現行基準の規定値を越える大きな値となっているのに対し、その他の海域では収ま

る程度の値となっている。このように、腐食速度は海域の環境条件等により大きく異なるので、栈橋の設計あるいは補修設計における腐食速度は、当該海域の腐食実績を参考に決定することが望ましい。

表-2 (1) 栈橋鋼管杭の腐食速度 (mm/年) (東京湾)

水深	平均	80%	90%	95%
H.W.L. 以上	(0.25)	(0.30)	(0.40)	(0.45)
H.W.L. ~ DL-1 m	0.35	0.50	0.60	0.67
DL-1 ~ DL-4 m	0.20	0.28	0.37	0.43
DL-4 m 以深	0.12	0.17	0.20	0.23

( ) は測得された範囲での値

表-2 (2) 栈橋鋼管杭の腐食速度 (mm/年) (伊勢湾)

水深	平均	80%	90%	95%
H.W.L. 以上	-	-	-	-
H.W.L. ~ DL-1 m	0.20	0.30	0.40	0.50
DL-1 m 以深	0.17	0.27	0.27	0.35

(-2mのみで測得)

表-2 (3) 栈橋鋼管杭の腐食速度 (mm/年) (大阪湾)

水深	平均	80%	90%	95%
H.W.L. 以上	-	-	-	-
H.W.L. ~ DL-1 m	0.25	0.35	0.45	0.60
DL-1 m 以深	0.20	0.27	0.35	0.35

(-2mのみで測得)

表-2(4) 栈橋鋼管杭の腐食速度(mm/年) (九州)

水深	平均	80%	90%	95%
H.W.L. 以上	-	-	-	-
H.W.L. ~DL-1m	0.08	0.11	0.12	0.15
DL-1m 以深	0.07	0.09	0.11	0.12

(-2mのみで測得)

表-2(5) 栈橋鋼管杭の腐食速度(mm/年) (中国地方・日本海側)

水深	平均	80%	90%	95%
H.W.L. 以上	-	-	-	-
H.W.L. ~DL-1m	0.07	0.10	0.15	0.17
DL-1m 以深	0.04	0.05	0.10	0.14

(-2mのみで測得)

## 2.2 杭軸方向の腐食速度の変化

図-1は、腐食量が比較的密に測定された施設のうち、代表的な腐食パターンを示す三施設の杭軸方向の腐食速度分布図である。各杭の測定深度毎の腐食速度を杭平均腐食速度に対する比で表し、測定された全杭についての平均値と標準偏差の分布を示したものである。

施設毎に腐食パターンの特徴をながめると、以下の点が挙げられる。

- 施設Aは杭頭部の腐食がほとんどなく、L.W.L.直下からDL-2mまで腐食が大きい。

- 施設Bは杭頭部及びL.W.L.付近に大きな腐食速度が現れている(ただし、杭頭部の腐食速度はL.W.L.付近のその6~7割程度である)。

- 施設Cはほぼ一様に腐食しているが、L.W.L.付近に若干大きな腐食速度が現れている。

以上より、杭軸方向における腐食速度の変化は明確であるので、杭腐食の進行した栈橋の応力算定は、変断面杭として行う必要があると考えられる。これについては、5.で若干の考察を加える(図-1の三施設は、5.の三施設と同じである)。

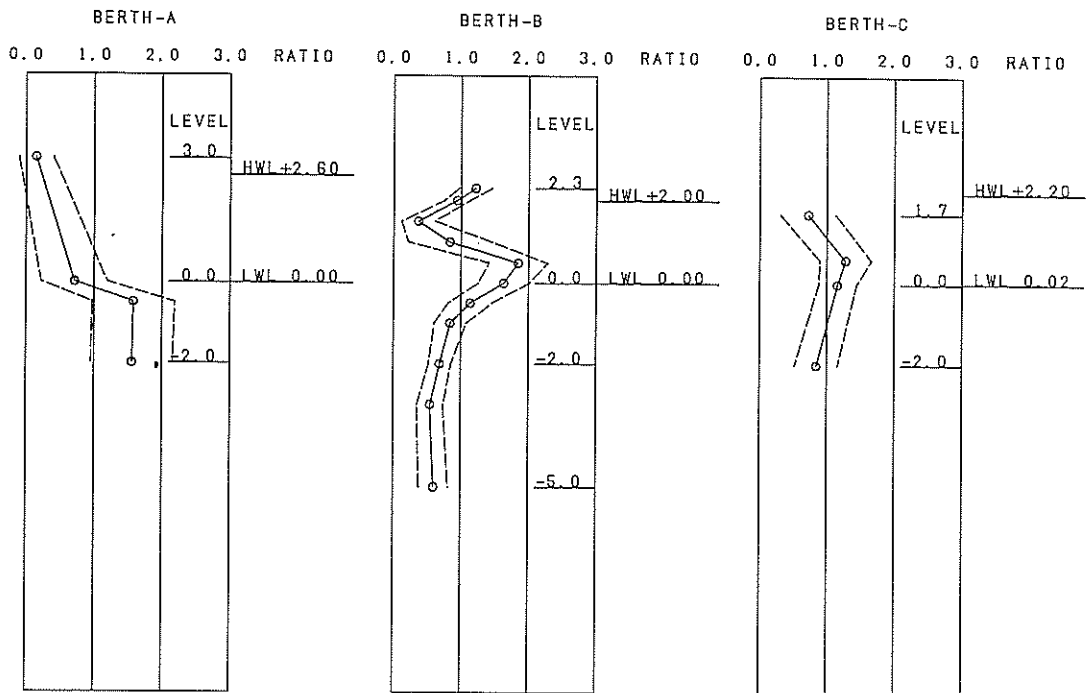


図-1 杭軸方向の腐食速度の変化

### 2.3 棧橋における平面的位置による腐食速度の変化

図-2, 3は前出の三施設について、法線直角・法線平行方向それぞれの腐食速度の変化を示したものである。縦軸は、各杭の腐食速度を測定深度毎の各杭列の平均腐食速度に対する比で表したもので、全深度・全杭列の平均と標準偏差の分布を示したものである。

#### (1) 法線直角方向の変化

図-2によれば、施設によっては海側から陸側に向けて若干の減少傾向が見られるが、おおむね変化傾向はないと言ってよい。

#### (2) 法線平行方向の変化

図-3は、図-2に比して変動が大きくなっているが、これは1点が代表するサンプル数が少なくなったことによる。

施設A, Bについてみると、法線直角方向と同様に変化傾向がないが、施設C（杭の全数調査例。他施設は全数調査ではない）によれば隣接する杭同士で大きな変動が見られる箇所があり、腐食調査はかなり綿密に行う必要が感じられる。

#### 2.4 杭の円周方向の腐食速度のばらつき

文献<sup>1)</sup>によれば、鋼管杭の円周方向に、腐食速度はかなりばらついており、海側より陸側の腐食速度が小さくなる傾向が見られる。6本の杭の十数断面についての、平均腐食量と標準偏差の関係図によれば、標準偏差は平均腐食量の10~30%に相当することが分かる。

なお、文献<sup>1)</sup>における試験や分析に用いられた鋼管杭は、建設後20数年を経て、改修のため取り壊された棧橋に使用されていた、腐食の激しい杭である。

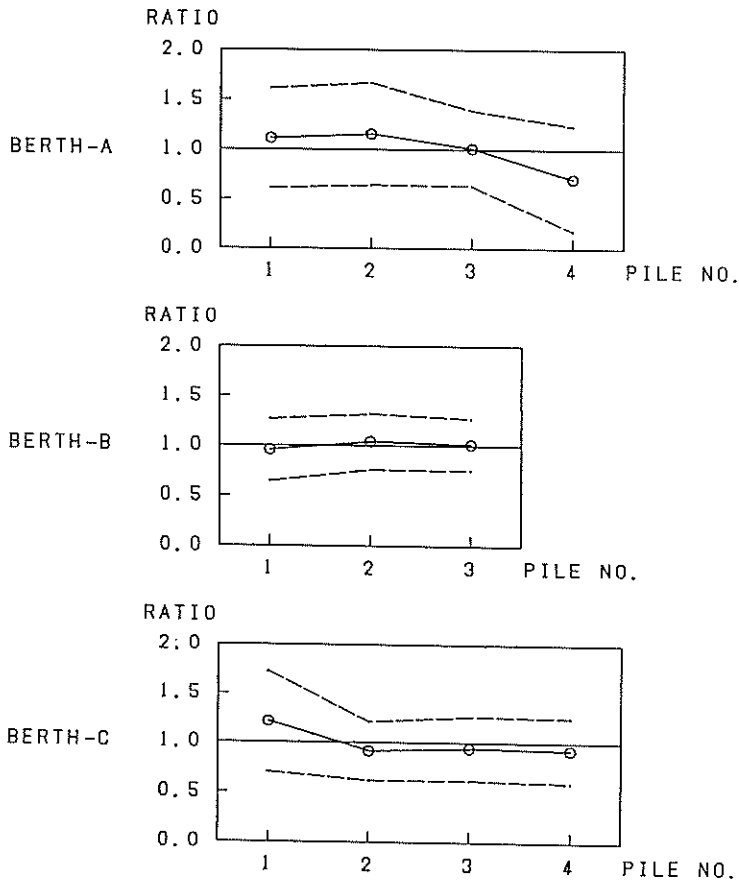


図-2 法線直角方向の腐食速度の変化

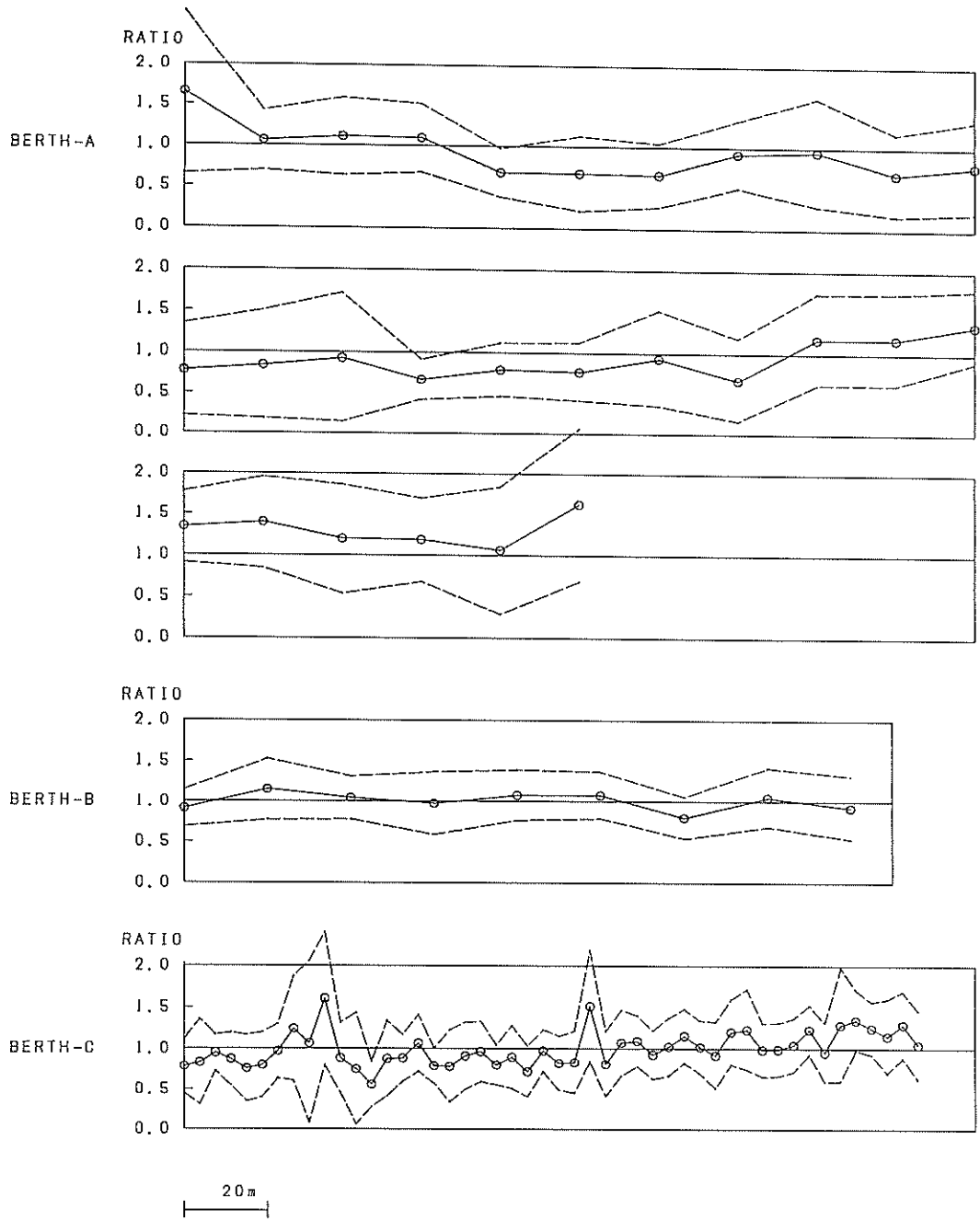


図-3 法線平行方向の腐食速度の変化

### 3. 腐食杭の強度評価

#### 3.1 杭の曲げ剛性

##### (1) 杭の曲げ剛性と平均肉厚の関係

2.4 で述べたように、杭の円周方向の腐食量のばらつきは大きく、その標準偏差は平均腐食量の10～30%にも及ぶものもある。したがって、鋼管杭の曲げ剛性( $EI$ )の評価に平均肉厚を用いて良いかどうか問題となる。

清宮ら<sup>1)</sup>は、腐食の進行した鋼管杭から高さ50mmの円筒試験片を8片切り出し、円周方向の軸圧縮力に対する試験片の変形を測定した。直径の水平及び鉛直変位量( $\Delta dx$ ,  $\Delta dy$ )と軸圧縮力 $P$ には式(1)の関係があるので、これを用いてリングの断面二次モーメントを算定することができる。

$$\Delta dx = 0.137 \frac{PR^3}{EI}$$

$$\left( \frac{\theta}{\pi} = 0.5, 1.5 \right)$$

$$\Delta dy = -0.149 \frac{PR^3}{EI}$$

$$\left( \frac{\theta}{\pi} = 0, 1.0 \right)$$

……………(1)

$\Delta dx$ ,  $\Delta dy$  : 試験片の直径の水平及び鉛直変位 (cm)

$P$  : 軸圧縮力 (kgf)

$R$  : 試験片の直径 (cm)

$I$  : 試験片の断面二次モーメント (cm<sup>4</sup>)

$E$  : 鋼材のヤング率 (kgf/cm<sup>2</sup>)

鋼材が降伏応力度に達する載荷荷重と平均残存板厚(16点測定値の平均)の実験値は、式(1)による計算値(断面二次モーメントを一様断面杭の肉厚に換算)と良く一致しており、平均肉厚を用いて杭の曲げ剛性を評価しても問題がないと結論している。

##### (2) 鋼管杭の平均肉厚と4点平均肉厚

文献<sup>2)</sup>が、鋼管杭の4点平均肉厚をもって平均肉厚とすることの妥当性について言及しているのを、紹介する。

杭の円周方向に16測定点を取り、各測定点では10cm四方の範囲で5点探触子をあて、その最大・最小・平均の各値を求めた。各測定点を通るように、 $x$ 軸を7回ほど回転させ、 $x$ 軸及び $y$ 軸上にそれぞれ2点測定したものと、4点の最大値・最小値・平均値を用いて計算した $x$ 軸まわりの断面二次モーメント、及び16点の肉厚データを用いて計算した $x$ 軸まわりの断面二次モーメント

を比較している。

この例では4点の平均の断面二次モーメントは、16点のデータの断面二次モーメントの-13～+14%の範囲にある。ここで用いたデータは腐食がかなり進行した杭のものであり、腐食がこれほど進行していない杭では両者の差は小さくなることから、解析には4点の平均を用いることができるとしている。

#### 3.2 局部座屈に対する強度

文献<sup>3)</sup>に詳しいので引用する。「腐食により鋼材表面が大きな凹凸を示す場合には局部座屈に対する耐力が低下することが実験的に見出された。」とし、結論として「標準偏差が平均肉厚の10%以上のとき、計算肉厚の補正をすればよい。」と述べている。また、補正の方法については、平均肉厚を標準偏差の1～1.5倍の値だけ低減するようすすめている。

#### 3.3 全体座屈に対する強度

##### (1) 変断面杭の全体座屈に対する許容圧縮応力度の算定法

変断面杭の全体座屈における座屈荷重の算定法に関して文献<sup>4)</sup>があるが、これを参考にして、頭部固定の変断面栈橋杭の座屈荷重(杭頭から仮想地表面までの有効座屈長の2倍の両端固定ばりの座屈荷重)を数値計算により解いた。

栈橋杭の最小座屈荷重を与える座屈モードは図-4の様になるが、これは有効座屈長の2倍の部材長をもつ両端固定ばりの1次座屈モードの下半分を取り出したのと同じである。よって、栈橋杭の杭頭を通る水平線に対して軸対称な両端固定ばりの座屈荷重を解けばよい。

仮想仕事の原理を用いて解くが、外力のなす仕事 $\Delta T$ は(2)式で表される。

$$\Delta T = \frac{P}{2} \int_{-l}^l \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx + 2M_0 \theta_0$$

$$= P \int_0^l \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx + 2M_0 \theta_0$$

……………(2)

$\Delta T$  : 外力のなす仕事 (tf・m)

$P$  : 座屈荷重 (tf)

$\theta_0$  : 両端ピン固定の場合のたわみ角 (rad)

$M_0$  : 両端固定の場合の端モーメント (tf・m)

$l$  : 栈橋杭の有効座屈長 (m)

はりの曲げによる歪エネルギー $\Delta V$ は(3)式で表される。

$$\Delta V = \int_{-l}^l \frac{M^2}{2EI} dx = \int_0^l \frac{M^2}{EI} dx$$

……………(3)



$\Delta V$  : はりに蓄えられる曲げエネルギー  
(tf・m)

$M$  : はりの曲げモーメント分布 (tf・m)  
たわみ曲線の一次近似式を(4)式のように仮定する。

$$y = \frac{\delta}{2} \left( 1 + \cos \frac{\pi x}{l} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\delta$  : 両端固定ばり中央でのたわみ (m)  
曲げモーメントは(5)式で表される。

$$M = M_0 + Py \quad \dots\dots\dots (5)$$

$\Delta T = \Delta V$ とおけば、座屈荷重  $P$  について(6)式のような二次方程式を得る。

$$aP^2 + bP + c = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

$$a = \frac{\delta^2}{4} \sum \frac{1}{EI_i} \left\{ \frac{3}{2} l_i + \frac{l}{4\pi} \left( \sin \frac{2\pi L_i}{l} - \sin \frac{2\pi L_{i-1}}{l} \right) \right.$$

$$\left. + \frac{2l}{\pi} \left( \sin \frac{\pi L_i}{l} - \sin \frac{\pi L_{i-1}}{l} \right) \right\}$$

$$b = M_0 \delta \sum \frac{1}{EI_i} \left\{ l_i + \frac{l}{\pi} \left( \sin \frac{\pi L_i}{l} - \sin \frac{\pi L_{i-1}}{l} \right) - \frac{l}{8} \left( \frac{\delta \pi}{l} \right)^2 \right\}$$

$$c = M_0 \sum \frac{l_i}{EI_i} - 2M_0 \theta_0 = \theta_0 (1 - 2M_0)$$

$l_i$  : 杭頭部から順の各断面の区間長 (m)  
 $L_i$  : 杭頭部から  $i$  断面の下端までの距離 (m)  
 $I_i$  :  $i$  断面の断面二次モーメント ( $m^4$ )

これを解いて、座屈荷重  $P$  の一次近似値を得る。ただし、 $\theta_0$ 、 $M_0$  は両端ピンの場合の端部でのたわみ角とこれをたわみ角 0 とするための曲げモーメントにあたり、前もって求めておく必要がある。

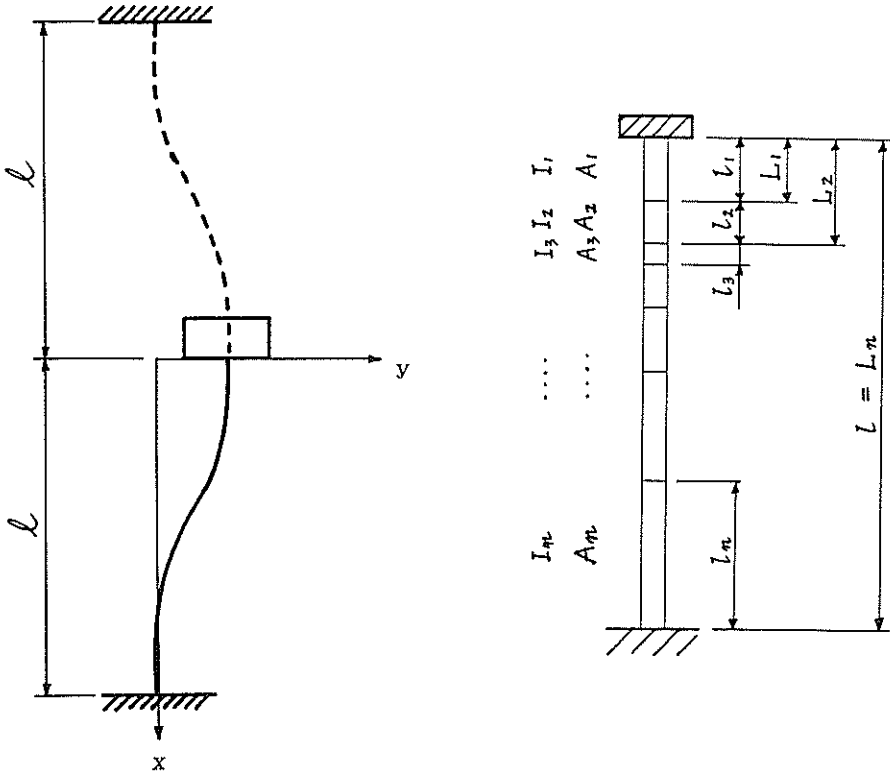


図-4 棧橋杭の座屈モード(1次)

座屈荷重  $P$  の一次近似値をもとに、以下の連立方程式を解く。

① はり端部及び中央部での境界条件

$$\begin{aligned} x=0 \text{ で } & \quad dy_1 / dx = 0 \\ & \quad y_1 = 1 \quad (\text{単位変位を与える}) \\ x=l \text{ で } & \quad dy_n / dx = 0 \\ & \quad y_n = 0 \end{aligned}$$

をもとに、(7) 式が成立する。

$$\begin{aligned} B_1 &= 0 \\ A_1 + C &= 1 \\ -k_n A_n \sin k_n L_n + k_n B_n \cos k_n L_n &= 0 \\ A_n \cos k_n L_n + B_n \sin k_n L_n + C &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、たわみ曲線を (8) 式で表した。

$$y_i = A_i \cos k_i x + B_i \sin k_i x + C \quad (i=1 \sim n) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

$$k_i^2 = \frac{P}{EI_i}$$

② 断面変化点での連続条件

$$\begin{aligned} x=L_i \text{ で } & \quad y_i = y_{i+1} \\ & \quad dy_i / dx = dy_{i+1} / dx \end{aligned}$$

をもとに、(9) 式が成立する。

$$\begin{aligned} A_i \cos k_i L_i - A_{i+1} \cos k_{i+1} L_i & \\ + B_i \sin k_i L_i - B_{i+1} \sin k_{i+1} L_i &= 0 \\ -k_i A_i \sin k_i L_i + k_{i+1} A_{i+1} \sin k_{i+1} L_i & \\ + k_i B_i \cos k_i L_i - k_{i+1} B_{i+1} \cos k_{i+1} L_i &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

③ たわみ曲線の一般式に対して、仮想仕事の原理を適用すると、(10) 式が得られる。

$$aP^2 + bP + c = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、

$$\begin{aligned} a &= \sum \frac{1}{2EI_i} [ (A_i^2 + B_i^2 + 2C^2) l_i \\ &+ \frac{A_i^2 - B_i^2}{2k_i} (\sin 2k_i L_i - \sin 2k_i L_{i-1}) \\ &- \frac{A_i B_i}{k_i} (\cos 2k_i L_i - \cos k_i L_{i-1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{4C}{k_i^2} \{ A_i (\cos k_i L_i - \cos k_i L_{i-1}) \\ &+ B_i (\sin k_i L_i - \sin k_i L_{i-1}) \} \\ b &= \sum \frac{2M_0}{EI_i} \{ \frac{A_i}{k_i} (\sin k_i L_i - \sin k_i L_{i-1}) \\ &- \frac{B_i}{k_i} (\cos k_i L_i - \cos k_i L_{i-1}) + C l_i \} \\ & - \frac{1}{2} \sum k_i^2 \{ (A_i^2 + B_i^2) l_i \\ &- \frac{A_i^2 - B_i^2}{2k_i} (\sin 2k_i L_i - \sin 2k_i L_{i-1}) \\ &+ \frac{A_i B_i}{k_i} (\cos 2k_i L_i - \cos 2k_i L_{i-1}) \} \\ c &= M_0^2 \sum \frac{l_i}{EI_i} - 2M_0 \theta_0 = -M_0 \theta_0 \end{aligned}$$

④ 以上の式(7), (9), (10)を連立させて、数値解析的に収束計算を行えば、変断面杭栈橋の座屈荷重  $P$  を得る。

変断面杭の座屈荷重は求められたものの、技術基準における全体座屈に対する許容圧縮応力度は杭の細長比により算定するようになっており、変断面杭の場合についてはその細長比を求めることが問題となってくる。文献<sup>5)</sup>がこの問題について述べているので、ここに紹介する。

① 座屈長  $l$ 、細長比  $\lambda$  を最小断面を基準にして次のように算定する。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{l^2} = \frac{\pi^2 EA_{\min}}{\lambda^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$P_{cr}$  : 変断面杭の座屈荷重 (kgf)

$I_{\min}$ ,  $A_{\min}$  : 杭の最小断面の断面二次モーメント (cm) 及び断面積 (cm<sup>2</sup>)

$l$  : 一様断面杭としての換算有効座屈長 (cm)

$\lambda$  : 一様断面杭としての換算細長比 ( $\lambda = l / r_{\min}$ )

$r_{\min}$ ,  $r_{\max}$  : 断面二次半径

② ①で得た細長比  $\lambda$  を用いて、一様断面と同様の方法で許容圧縮応力度  $(\sigma_{ea})_{\min}$  を求め、最小断面の応力照査を行う。

③ 最大断面の応力照査に用いる許容圧縮応力度  $(\sigma_{ea})_{\max}$  は次のように算定する。

$$(\sigma_{ea})_{\max} = \frac{P_{cr}}{A_{\max}} = (\sigma_{ea})_{\min} \cdot \frac{A_{\min}}{A_{\max}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$(\sigma_{ea})_{\max}$  : 最大断面の断面検定に用いる許容圧縮応力度 (kgf / cm<sup>2</sup>)

( $\sigma_{ca}$ )<sub>min</sub> : 最小断面の断面検定に用いる許容圧縮応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$A_{max}$ ,  $A_{min}$  : 最大及び最小断面の断面積 (cm<sup>2</sup>)

(2) 計算例

(1)で述べた方法に従って、前出の施設Bの棧橋杭について最小断面の許容圧縮応力度を求め、その他の便宜的な方法による値と比較を行ったので、その結果について述べる。

a) 便宜的な計算手法の説明

その他の便宜的な方法とは、次の二手法である。

① 細長比  $\lambda$  を次式により求める。

$$\lambda = \frac{l}{r} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{r_i} \quad \dots\dots\dots(13)$$

$\lambda$  : 細長比

$l_i$  : 断面  $i$  の区間長 (cm)

$r_i$  : 断面  $i$  の断面二次半径 (cm),

$$I_i = r_i^2 A_i$$

② 等価換算一様杭の細長比を用いる。

等換算一様杭の諸元の求め方は、次の通り。

一様杭について、以下の二次式が成り立つ。

$$\left(\frac{H}{y}\right)_{top} = \frac{12EI}{\left(h + \frac{1}{\beta}\right)^3} \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\left(\frac{M}{H}\right)_{top} = \frac{1}{2} \left(h + \frac{1}{\beta}\right) \quad \dots\dots\dots(15)$$

$(H/y)_{top}$  : 杭頭に働く水平力と杭頭変位の比 (tf/m)

$(M/H)_{top}$  : 杭頭曲げモーメントと杭頭に働く水平力の比 (m)

$h$  : 杭の自由長 (m)。杭頭から仮想地表面までの杭長

$\beta$  : チャンの特性値 (1/m)

(14), (15)式より、杭頭水平ベネ定数  $(H/y)_{top}$  と単位杭頭モーメント  $(M/H)_{top}$  には (16) 式の関係が成り立つ。

$$\left(\frac{H}{y}\right)_{top} = \frac{12EI}{[2(M/H)_{top}]^3} \quad \dots\dots\dots(16)$$

変断面杭における (16) 式の左辺と右辺の分母が求まれば、等価換算一様杭の断面二次モーメントを得る。

また、変断面杭の仮想地表面から仮想固定点 (あるいは、第一不動点) までの長さが、チャンの特性長  $(1/\beta)$  に相当するので (17) 式より等価換算一様杭の外径  $D$  が求められる。

$$\frac{1}{\beta} = \left(\frac{4EI}{k_h D}\right)^{1/4} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$k_h$  : 横方向地盤反力係数 (tf/m<sup>3</sup>)

$D$  : 杭の直径 (m)

同様に、(15)式から等価換算一様杭の自由長  $h$  が求められる。

b) 計算結果の比較

① 腐食の進行した補修前の棧橋杭の場合

ある腐食の進行した棧橋1ブロック (施設B) について、三手法による許容圧縮応力度を算定した。表-3(1)に各杭の許容圧縮応力度のうち法線平行方向杭列毎に最小の値を示した (本法の値は、杭の最小断面における許容値である)。

本法に比較して、手法①が1.15~1.17倍、手法②が0.98~1.08倍と大きめの許容値を与えている。

② 剛性の高い補修工を施工した棧橋杭の場合

①と同じ施設Bの1ブロックについて、RCライニング等の剛性の高い補修工を全杭頭に施工した場合の、全体座屈に対する杭の許容圧縮応力度を三手法により算定した結果を表-3(2)に示す。ここで留意すべき点は、表-3(1)の値は杭の最小断面に対するものであり、(2)の値はライニング下端の断面 (1)の最小断面とは異なる断面) に対するものであるため、両者を比較しても意味がないということである。

表-3(1) 三手法による許容圧縮応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>) の比較 (補修前)

杭列	手法①	手法②	本法
A	1,220 (1.15)	1,147 (1.08)	1,058 (1.0)
B	1,207 (1.17)	1,105 (1.07)	1,032 (1.0)
C	1,151 (1.15)	975 (0.98)	999 (1.0)

表-3(2) 三手法による許容圧縮応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>) の比較 (補修後)

杭列	手法①	手法②	本法
A	1,226 (1.07)	1,400 (1.23)	1,142 (1.0)
B	1,213 (1.07)	1,400 (1.23)	1,134 (1.0)
C	1,157 (1.09)	1,383 (1.31)	1,058 (1.0)

( ) の数値は、各杭列における本法の許容値を基準として示した、他手法による許容値の比。

表一三(2)によれば、本法に比較して、手法①が1.07～1.09倍、手法②が1.23～1.31倍とここでも大きめの許容値を与える。

補修の前後で両手法とも、1～2割程度危険側の許容値を示すため、本法に従って許容圧縮応力度を算定するのが望ましい。

#### 4. 計算法

##### 4.1 計算法

###### (1) 基本的な考え方

###### a) 変断面杭の取り扱い

###### ① 杭頭水平バネ定数

一様断面杭の場合は、前出の(14)式により杭頭水平バネ定数を解析的に求めることができるが、変断面杭の場合は数値解析を用いて解くしか方法がない。本プログラムでは、地盤反力(tf/m<sup>2</sup>)が杭の水平方向の変位に比例するというチャンの方法により、杭の弾性方程式を解いている(多層系地盤。詳細は、付録を参照)。

杭頭水平バネ定数は(18)式により求められ、チャンの方法では水平力の大きさにかかわらず一定である。

$$K_H = \frac{H_0}{y_{top}} \quad \dots\dots\dots(18)$$

$K_H$ : 横方向ばね定数(チャンのばね)(tf/m)

$H_0$ : 杭頭に作用する水平力(tf)

$\delta_0$ : 杭頭固定の変断面杭の杭頭に水平力  $H_0$  が作用した場合の杭頭変位(チャンの方法)(m)

###### ② 杭のねじり剛性

チャンの方法による第一不動点より上の各断面のねじり剛性を変断面杭として(19)式により算定する。

$$\frac{M_i}{\alpha} = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{\sum_i \frac{l_i}{EI_i}} \quad \dots\dots\dots(19)$$

$M_i$ : ねじりモーメント(tf・m)

$EI_i$ : 各断面の曲げ剛性(tf・m<sup>2</sup>)

$l_i$ : 各断面の長さ(m)

$\alpha$ : くい頭の回転角(rad.)

###### ③ 杭頭鉛直バネ定数

各断面のバネが直列に連なったものとして、支持杭・摩擦杭の別、摩擦杭では土性に応じた合成のバネ定数を算定する。詳細は、文献<sup>9)</sup>を参照のこと。

###### b) 水平力の分担について

###### ① 技術基準の方法(図-5参照)

栈橋のブロックの回転を考慮する必要がない場合は、(20)式により分担水平力を算定する。

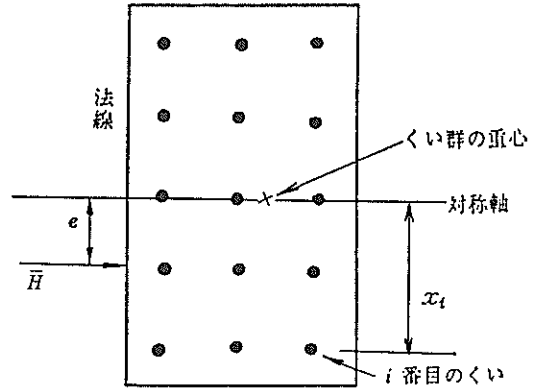
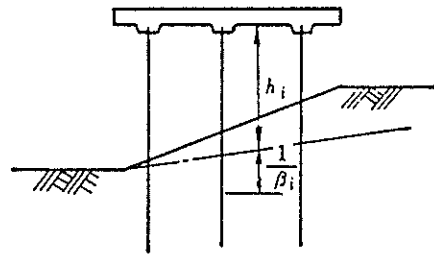


図-5 杭の位置及び作用する水平力

$$H_i = \frac{K_{Hi}}{\sum_i K_{Hi}} \cdot \bar{H} \quad \dots\dots\dots(20)$$

$H_i$ : 杭の水平分担力(tf)

$\bar{H}$ : ブロックに作用する水平力(tf)

栈橋のブロックの回転を考慮する必要がある場合は、(21)式を用いる。

$$H_i = \frac{K_{Hi}}{\sum_i K_{Hi}} \cdot \bar{H} + \frac{K_{Hi} \cdot x_i}{\sum_i K_{Hi} \cdot x_i^2} \cdot e \bar{H} \quad \dots\dots\dots(21)$$

$e$ : 栈橋のブロックの対称軸と水平力の作用線との距離(m)

$x_i$ : 栈橋のブロックの対称軸から各くいまでの距離(m)

###### ② 厳密解(本プログラムの方法、図-6参照)

(21)式はブロック変位を平行移動と回転運動の二成分に分け、 $x$ 方向(法線平行方向)の変位と杭のねじり抵抗を無視した場合の水平分担力算定式である。これに対して、本法は上記の近似を用いることなく厳密に水平分担力を算定するものである。

栈橋ブロック回転角  $\alpha$  を(22)式により求める。

$$\alpha = \frac{A}{B}$$

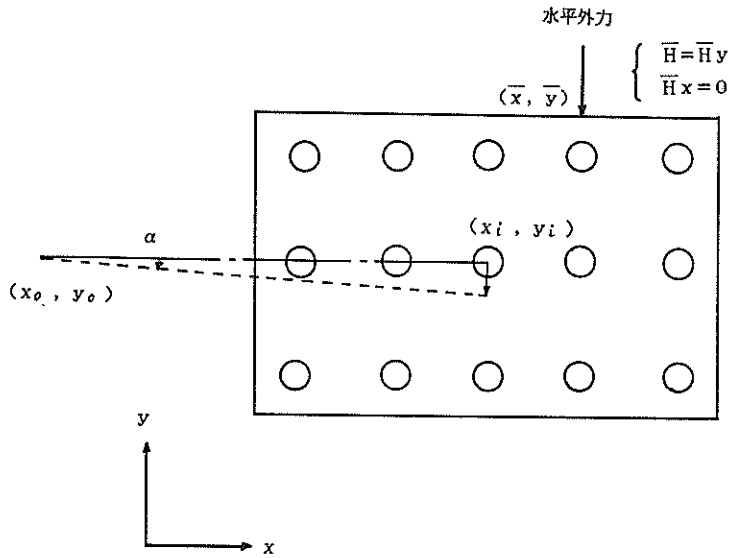


図-6 ブロック回転のイメージ

ただし、

$$\begin{aligned}
 A &= \bar{H}_x \sum_i K_{Hi} (\bar{y} - y_i) \\
 &\quad + \bar{H}_y \sum_i K_{Hi} (x_i - \bar{x}) \\
 B &= \sum_i K_{Hi} (\sum_i K_{Hi} \cdot x_i^2 + \sum_i K_{Hi} \cdot y_i^2) \\
 &\quad - (\sum_i K_{Hi} \cdot x_i)^2 - (\sum_i K_{Hi} \cdot y_i)^2 \\
 &\quad + \sum_i K_{Hi} \sum_i M_{Ti}
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

$\alpha$  : 版の回転角 (rad.)

$K_{Hi}$  : 各杭の横方向ばね定数 (tf/m)

$M_{Ti}$  : 単位回転角が作用した場合の各杭のねじりモーメント (tf・m)

$x_i$  : 各杭の  $x$  座標 (m)

$y_i$  : 各杭の  $y$  座標 (m)

$\bar{H}_x$  : 水平合力  $H$  の  $x$  方向成分 (tf)

$\bar{H}_y$  : 水平合力  $H$  の  $y$  方向成分 (tf)

$\bar{x}$  : 水平合力  $H$  の作用位置の  $x$  座標 (m)

$\bar{y}$  : 水平合力  $H$  の作用位置の  $y$  座標 (m)

(23) 式によりブロック回転中心  $(x_0, y_0)$  を求める。

$$\begin{aligned}
 x_0 &= \frac{\alpha \sum_i K_{Hi} \cdot x_i - \bar{H}_y}{\alpha \sum_i K_{Hi}} \\
 y_0 &= \frac{\alpha \sum_i K_{Hi} \cdot x_i + \bar{H}_x}{\alpha \sum_i K_{Hi}}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

$x_0$  : 回転中心の  $x$  座標 (m)

$y_0$  : 回転中心の  $y$  座標 (m)

(24) 式により各杭の分担水平力を求める。

$$\begin{aligned}
 H_{xi} &= \alpha K_{Hi} (y_i - y_0) \\
 H_{yi} &= -\alpha K_{Hi} (x_i - x_0) \\
 H_i &= (H_{xi}^2 + H_{yi}^2)^{1/2}
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

$H_i$  : 杭の分担水平力 (tf)

$H_{xi}$  :  $H_i$  の  $x$  方向成分 (tf)

$H_{yi}$  :  $H_i$  の  $y$  方向成分 (tf)

c) 杭頭モーメントによる軸力の算定について

① 技術基準の方法 (図-7 参照)

両端の杭については、内側のはりの材端モーメントは杭頭モーメントに等しい。中間支点については杭  $i$  の杭頭モーメントを (25) 式のように分配する。

$$\begin{aligned}
 M_{i, i-1} &= a M_i \\
 M_{i, i+1} &= b M_i
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

$M_{i, i-1}$  : 部材  $i-(i-1)$  における  $i$  端での材端モーメント (tf・m)

$M_{i, i+1}$  : 部材  $i-(i+1)$  における  $i$  端での材端モーメント (tf・m)

$M_i$  : 杭  $i$  の杭頭モーメント (tf・m)

ただし、 $a$ 、 $b$  は以下の値を与える。

2 スパンの場合 中央支点  $a = b = 0.60$

3 スパンの場合

第二支点  $a = 0.50, b = 0.70$

第三支点  $a = 0.70, b = 0.50$

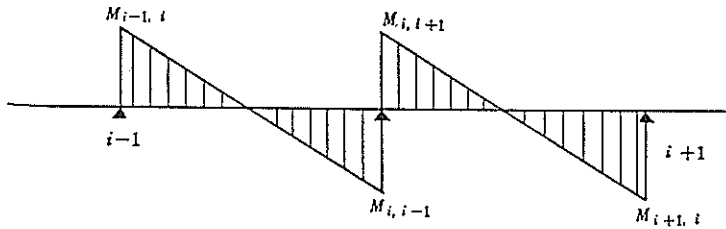


図-7 曲げモーメントの分布

以上の値は、次に述べる厳密解をいくつかの施設で求め、これらを基に安全側で簡便な関係式を与えたものである。

② 厳密解

法線直角・法線平行の両方向について杭間中央で上部工を切った、連続ばりモデルの支점에杭頭モーメントを与えて、たわみ角法により材端モーメントを求めて、軸力を算定する。なお、連続ばりの支点は前出の杭頭鉛直バネ定数のバネとして解いている。

以上の相違により、地震時の様に水平外力が偏心していない場合は、技術基準の方法に問題はないが、接岸時のように水平外力が偏心している場合には両者の計算結果に差が生じる。

・文献<sup>7)</sup>によれば、杭頭変位・モーメント、水平分担力ともに基準の方法が厳密解より約20%大きな値を与える例があった(一様断面杭)。

・文献<sup>8)</sup>によれば、技術基準の方法が厳密解より10~15%程度大きい。そのほとんどが分担水平力算定の簡略化による差であり、軸力算定の簡略化による差は1%以下である(一様杭, 変断面杭とも)。

(2) 弾性解析と弾塑性解析

a) 弾性解析

鋼材の降伏強度にかかわらず、杭応力はひずみに比例するとして、杭の応力を解析する方法である。具体的には、(26)式により各杭の各断面の応力算定及び断面検定を行う。

$$\sigma_{ci} = \frac{|N|}{A_i}, \quad \sigma_{bi} = \frac{|M_i|}{Z_i}$$

$$\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{ca i}} + \frac{\sigma_{bi}}{\sigma_{ba}} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (26)$$

- $\sigma_{ci}$ : 断面*i*の軸応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{bi}$ : 断面*i*の曲げ応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{ca i}$ : 断面*i*の許容軸圧縮応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
Nが負の場合は $\sigma_{ba}$ を用いる。
- $\sigma_{ba}$ : 杭の許容曲げ圧縮応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

- N : 杭の軸力 (kgf)
- $M_i$  : 断面*i*の曲げモーメント (kgf・cm)
- $A_i, Z_i$  : 断面*i*の断面積 (cm<sup>2</sup>),  
断面係数 (cm<sup>3</sup>)

b) 弾塑性解析

図-8に示すような応力-ひずみ曲線に従って、各杭・各断面の応力算定を行う。以下は簡単のため、曲げモーメントだけを受ける(軸力を受けない)場合について説明する。すなわち、図-9(a)に示すように、鋼管杭の緑応力が降伏応力 $\sigma_y$ に達する(このときのひずみを降伏ひずみと呼ぶ)まではひずみに比例した応力が生じるものとする(弾性解析)が、杭断面のうち降伏ひずみ以上のひずみが発生した領域(塑性域)の応力は降伏応力に等しい値のまま変化しない(図-9(b))。そして、図-9(c)に示すように、杭断面のすべての領域が塑性域になった時点で、その断面には塑性ヒンジが生じたという。実際の鋼管杭は曲げだけでなく軸力も受けるので、以下のように処理する。

① 降伏曲げモーメントと塑性曲げモーメント

軸力を受けない場合の図-9(a)の状態の曲げモーメントを降伏曲げモーメント、また、図-9(c)の状態の曲げモーメントを塑性曲げモーメントと呼ぶ。

軸力を受けた場合には、杭断面のどちらかの縁(圧縮側あるいは引張側)の発生応力が降伏応力に達していても、反対側の縁は軸応力の分だけ降伏応力には余裕があ

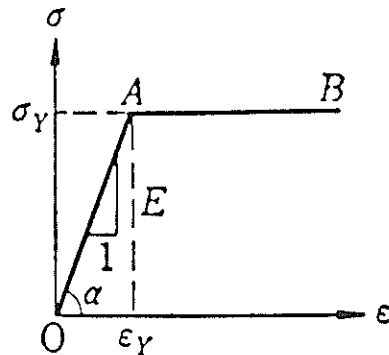


図-8 応力-ひずみ曲線モデル

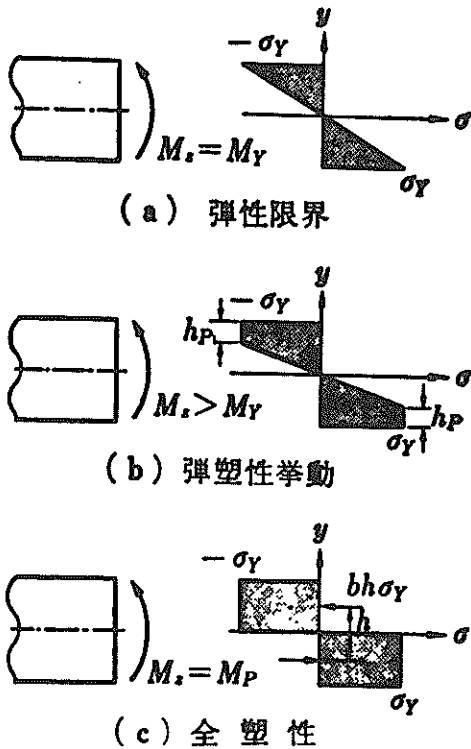


図-9 降伏モーメントと塑性モーメント(短形ばりの例)

るはずである。したがって、降伏曲げモーメントを算定する際に、便宜的に(27)式に示す曲げ降伏応力 $\sigma_{byi}$ を設定する。

$$\sigma_{byi} = \sigma_y - \sigma_{ci} \quad \dots\dots\dots(27)$$

- $\sigma_{byi}$ : 断面*i*の曲げ降伏応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)
- $\sigma_y$ : 鋼材の降伏点強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{ci}$ : 断面*i*の軸圧縮応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

これを用いて、各杭・各断面の降伏曲げモーメントは(28)式により算定される。

$$M_{syyi} = \frac{\pi(D_i^4 - d_i^4)}{32D_i} \cdot \sigma_{byi} \quad \dots\dots\dots(28)$$

$M_{syyi}$ : 断面*i*の降伏曲げモーメント (kgf・cm)

$D_i, d_i$ : 断面*i*の外径・内径 (cm)

次に、塑性曲げモーメントは(29)式で算定する。

$$M_{sypi} = \frac{(D_i^3 - d_i^3)}{6} \cdot \sigma_{byi} \quad \dots\dots\dots(29)$$

$M_{sypi}$ : 断面*i*の塑性曲げモーメント (kgf・cm)

前に述べたように、軸力の影響で圧縮・引張両側の縁応力が同時に降伏応力に達することはない。すなわち、軸力が圧縮の場合を考えると、圧縮側の曲げ降伏応力は $\sigma_{byi}$ であるが、反対側のそれは $(\sigma_y + \sigma_{ci}) = (\sigma_{byi} + 2 \cdot \sigma_{ci})$ となり、曲げの中立軸は杭中心を通らない。(29)式は、中立軸が杭中心を通り、また両縁の曲げ降伏応力度が $\sigma_{byi}$ に等しいとして導かれたものである。

しかし、栈橋の杭応力のうち軸力力の占める割合が小さいため、厳密に塑性曲げモーメントを算定する意義が弱いと考え、上式で近似している。

② 塑性ヒンジ発生後の杭の曲げモーメント・杭頭水平バネ定数・ねじり剛性

塑性ヒンジ発生前は、弾性解析と同様の計算を行うが、発生後の曲げモーメント・杭頭水平バネ定数は以下のように変更して計算を行う。

イ) 塑性ヒンジが杭頭に発生した場合(図-10(a)参照)

杭頭自由杭とみなし、曲げモーメント・杭頭水平バネ定数を算定する。

ロ) 塑性ヒンジが地表部(杭頭と仮想地表面の間)に発生した場合(図-10(b)参照)

ヒンジより下は杭頭自由杭、上は片持ばりとして曲げモーメントを算定する。杭頭水平バネ定数については、杭頭自由杭と片持ばりのバネ定数を(30)式により合成する。

$$\frac{1}{K_H} = \frac{1}{K_{H1}} + \frac{1}{K_{H2}} \quad \dots\dots\dots(30)$$

$K_H$ : 杭全体のバネ定数 (tf/m)

$K_{H1}$ : ヒンジより上の片持ばりのバネ定数 (tf/m)

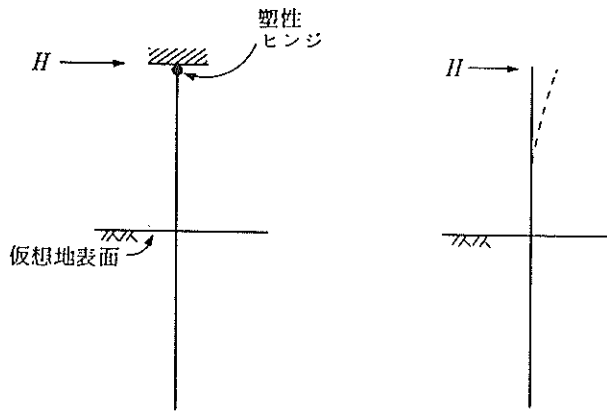
$K_{H2}$ : ヒンジより下の杭頭自由杭のバネ定数 (tf/m)

ハ) 塑性ヒンジが地中部に発生した場合(図-10(c)参照)

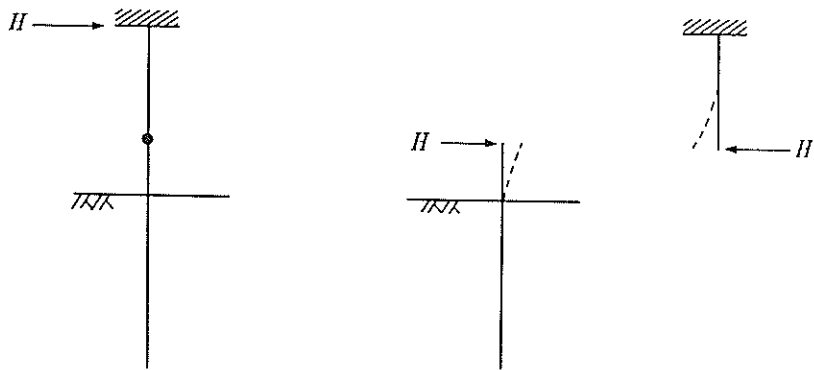
地表部にヒンジが発生した場合と同様である。ただし、ヒンジより上の地盤は無視して計算する。

塑性ヒンジ発生後のねじり剛性については、以下の選択肢が用意されている。

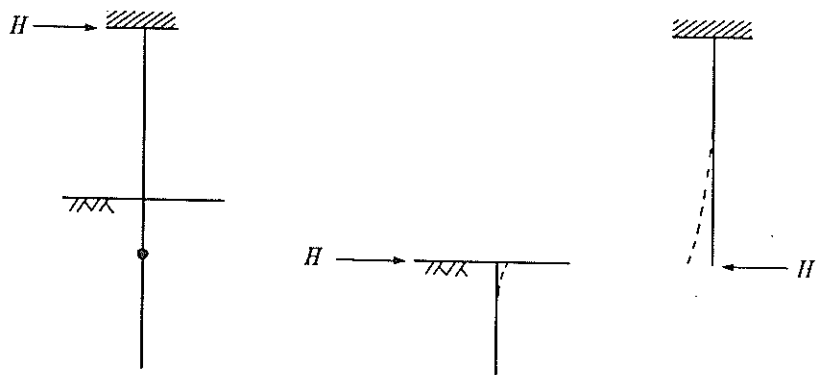
- 弾性解析と同様の方法にて算定する。
- 塑性ヒンジが発生するまでは弾性解析と同様、以後はねじり剛性を無視して計算する。
- 塑性ヒンジが2個発生するまでは弾性解析と同様、以後ねじり剛性を無視して計算する。



(a) くい頭に発生した場合



(b) 地表面（中間部）に発生した場合



(c) 地中部に発生した場合

図-10 塑性ヒンジ発生後のモデル



### (3) 杭のモデル化について

腐食杭のモデル化は、肉厚が階段状に変化する変断面杭としている。その形状による応力集中については考慮していない。断面変化数は9個までとしているが、腐食が進行したある栈橋（前出の施設B）の鋼管杭を例に、断面変化数と杭頭水平バネ定数の関係を調べたところ、図-11のようになった（断面数3以下のケースは複数のモデルを設定した）。この施設は腐食速度の杭軸方向の変化が激しい施設であるが、断面数が7以上でバネ定数の値が一定となる。このことから、断面変化数は最大

9個の入力ができれば、十分と言える。

### 4.2 計算フロー

図-12に、弾塑性解析の計算フローを示す。破壊過程の計算は、弾性解析に用いた水平外力を初期値として、一定量づつ水平力を増加させて繰り返し計算を行う。その際に、塑性ヒンジの発生の有無を考慮した杭頭水平バネ定数・曲げモーメントの算定を行い、すべての杭に塑性ヒンジが2個発生するまで計算を続行する（塑性ヒンジが2個発生した杭は破壊とみなし、以降は水平力を分担しない）。

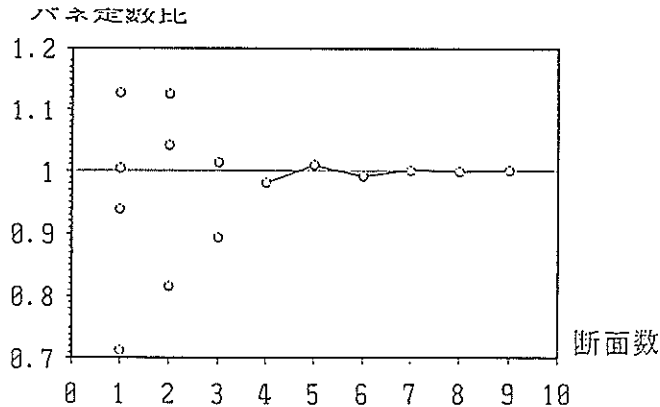


図-11 杭の断面数と杭頭水平バネ定数の変化  
（断面数9の場合のバネ定数を基準）

## 5. 計算例

### 5.1 弾性解析

弾性解析の範囲で、杭モデルの設定が計算結果（杭頭モーメント、軸力、杭応力）に与える影響を調べた。

#### (1) 対象施設の選定

2.2で述べた、代表的な腐食パターンの3施設を対象施設とし、それぞれ1ブロックを無作為に採り出して、計算を行った（施設Cは杭の全数調査データが得られていたので、1ブロックの生データを用いたが、他施設においては法線直角方向杭列数に1列の割合の調査データしか得られなかったため、1ブロック分の杭列数だけ寄せ集めて架空の栈橋を作成した）。以下に、各ブロックの腐食パターンの特徴を説明する（図-13参照）。

#### ① 施設 A

- 杭頭部の腐食がほとんどない。
- L.W.L.直下に最大腐食量が現れているが、DL-2mでも若干低減するのみである（DL-2m以深の腐食データがほとんどなかったため、DL-4m以深の海中部はDL-2mの腐食量を半減した値を与えた）。

#### ② 施設 B

- 杭頭部、L.W.L.直上に大きな腐食量が現れている。ただし、杭頭部の値はL.W.L.直上のその6割程度である。

- どの深度においても、各杭の腐食量のばらつきが少ない。

#### ③ 施設 C

- 杭頭部の腐食量がL.W.L.付近のそれと同等か、大きな杭が半数以上ある。

- 杭頭部の腐食量のばらつきが大きい。

また、三施設の平面図及び断面図を図-14に示す。

#### ① 施設 A

（4×5）の杭配置。（-12m）岸壁で、杭の径・肉厚は標準的な組み合わせである。岸壁天端高が若干標準より大きい。

#### ② 施設 B

（3×3）の杭配置。（-10m）岸壁であるが、基礎地盤が堅固なため、杭の根入れが小さい。

#### ③ 施設 C

（4×4）の杭配置。（-10m）岸壁で、海側に行くほど杭の曲げ剛性が大きくなる杭配置となっている。若干杭間隔が小さい。

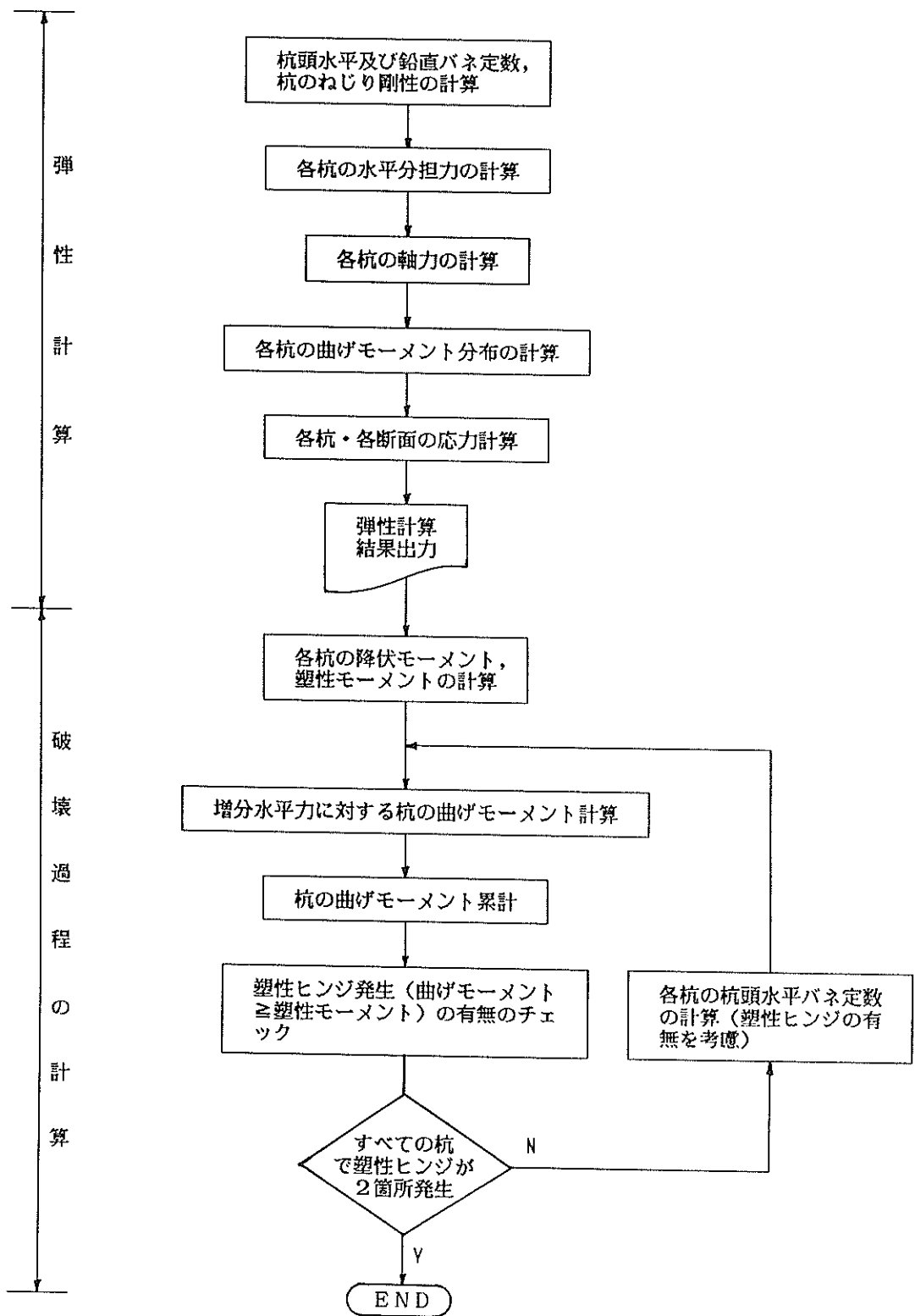


図-12 計算フロー

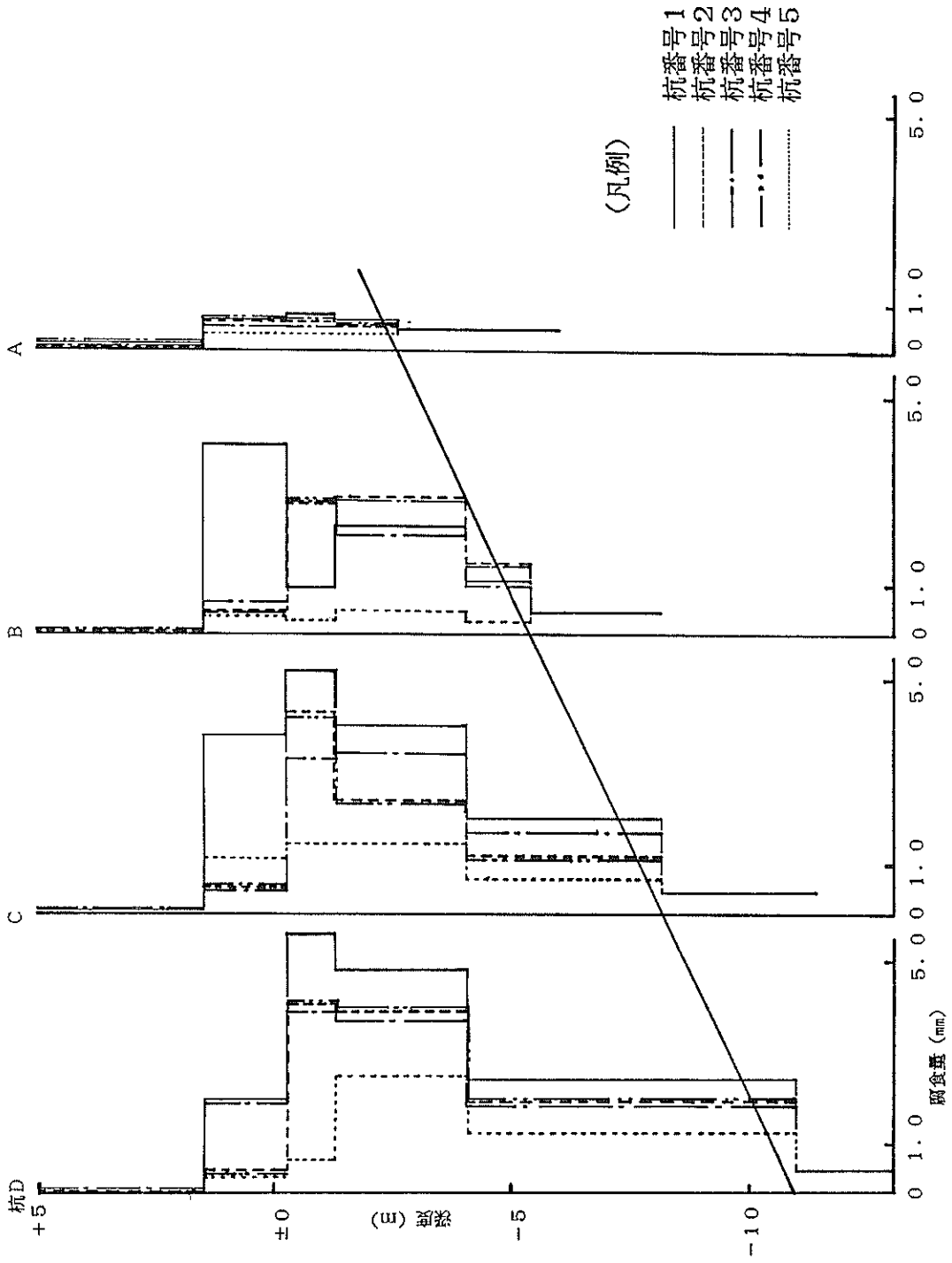


図-13 (1) 施設Aの対象ブロックの杭腐食量

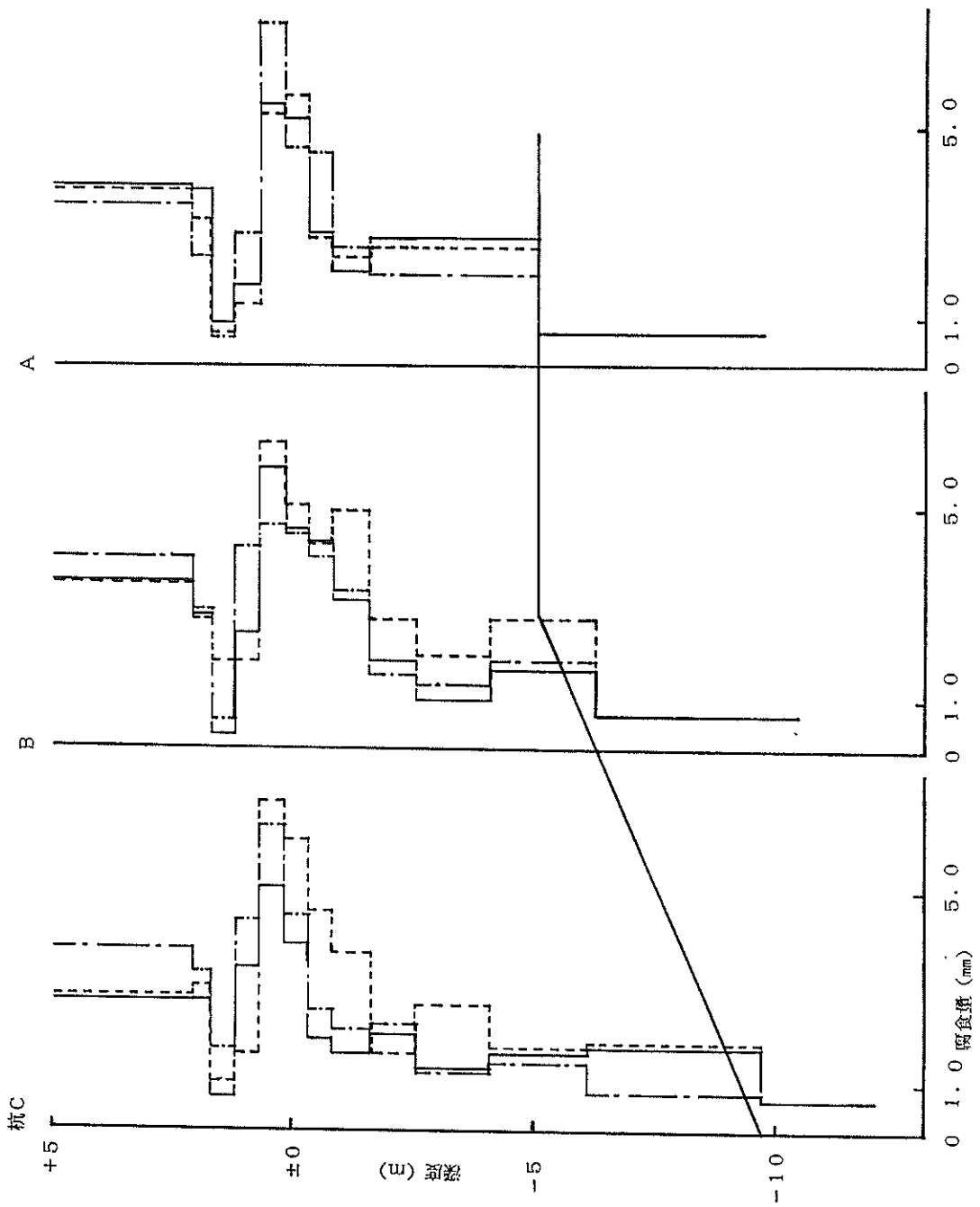
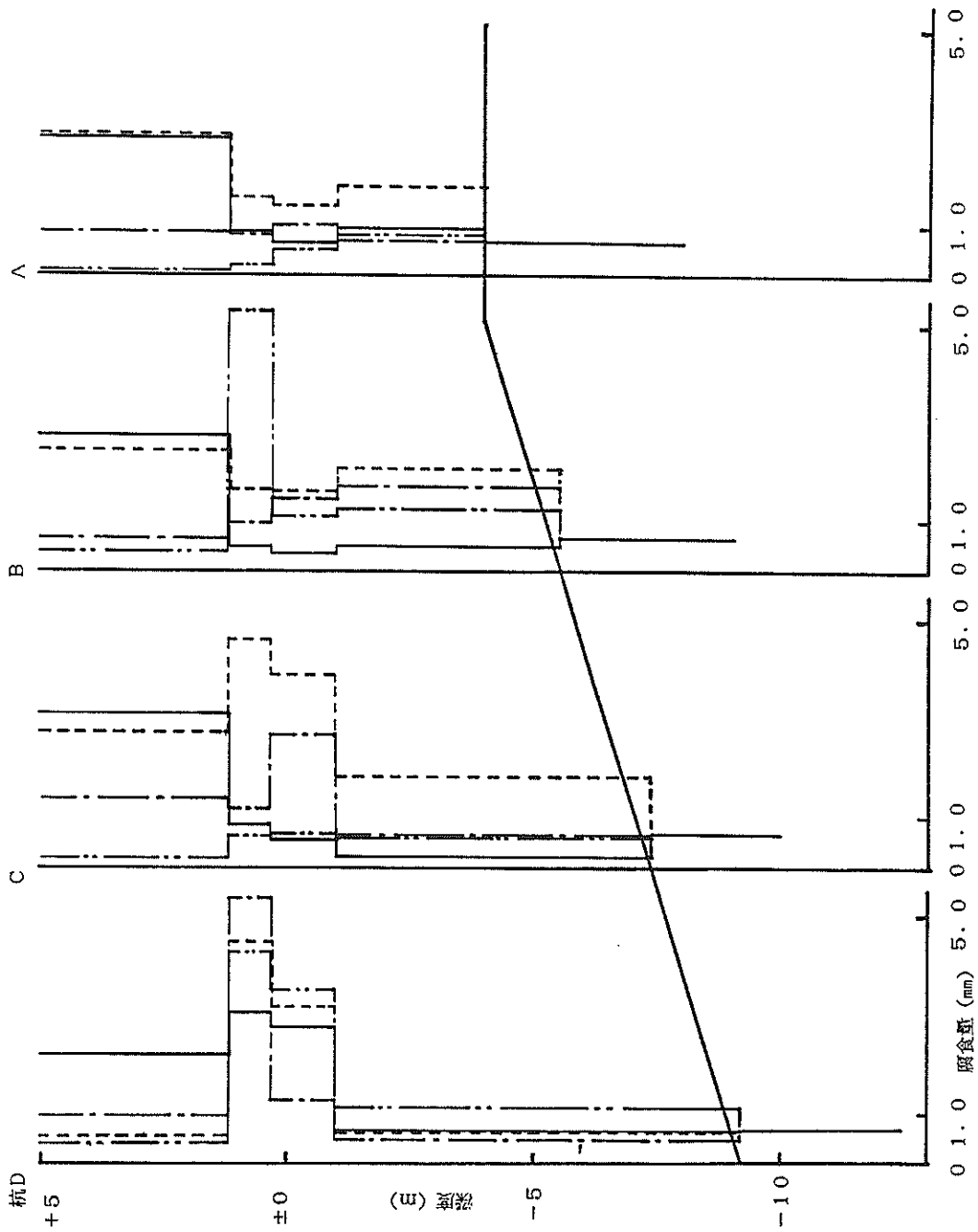


図-13(2) 施設Bの対象ブロックの杭腐食量



図一13 (3) 施設Cの対象ブロックの杭腐食量

【施設A】

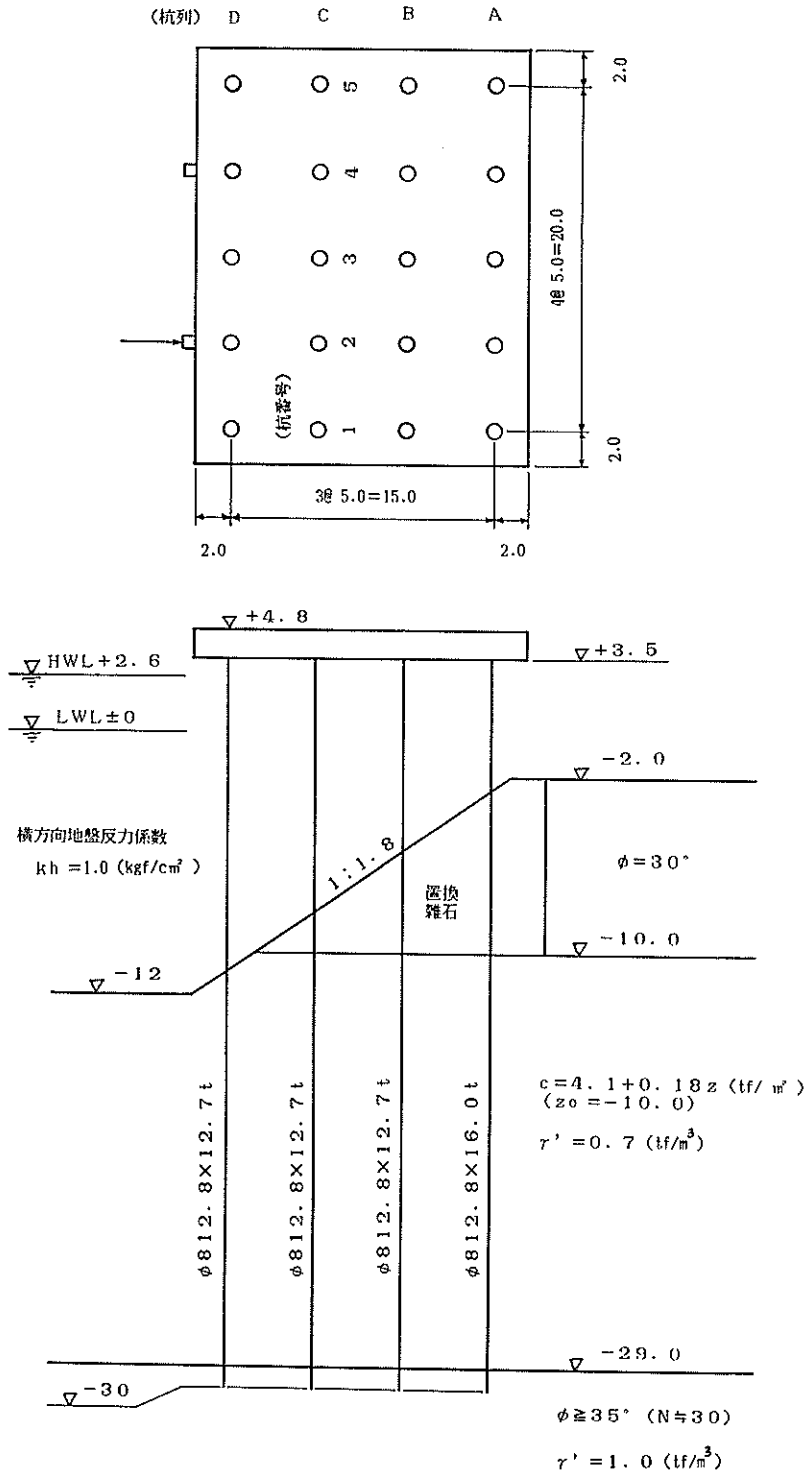


図-14 (1) 施設Aの平面図と断面図

【施設B】

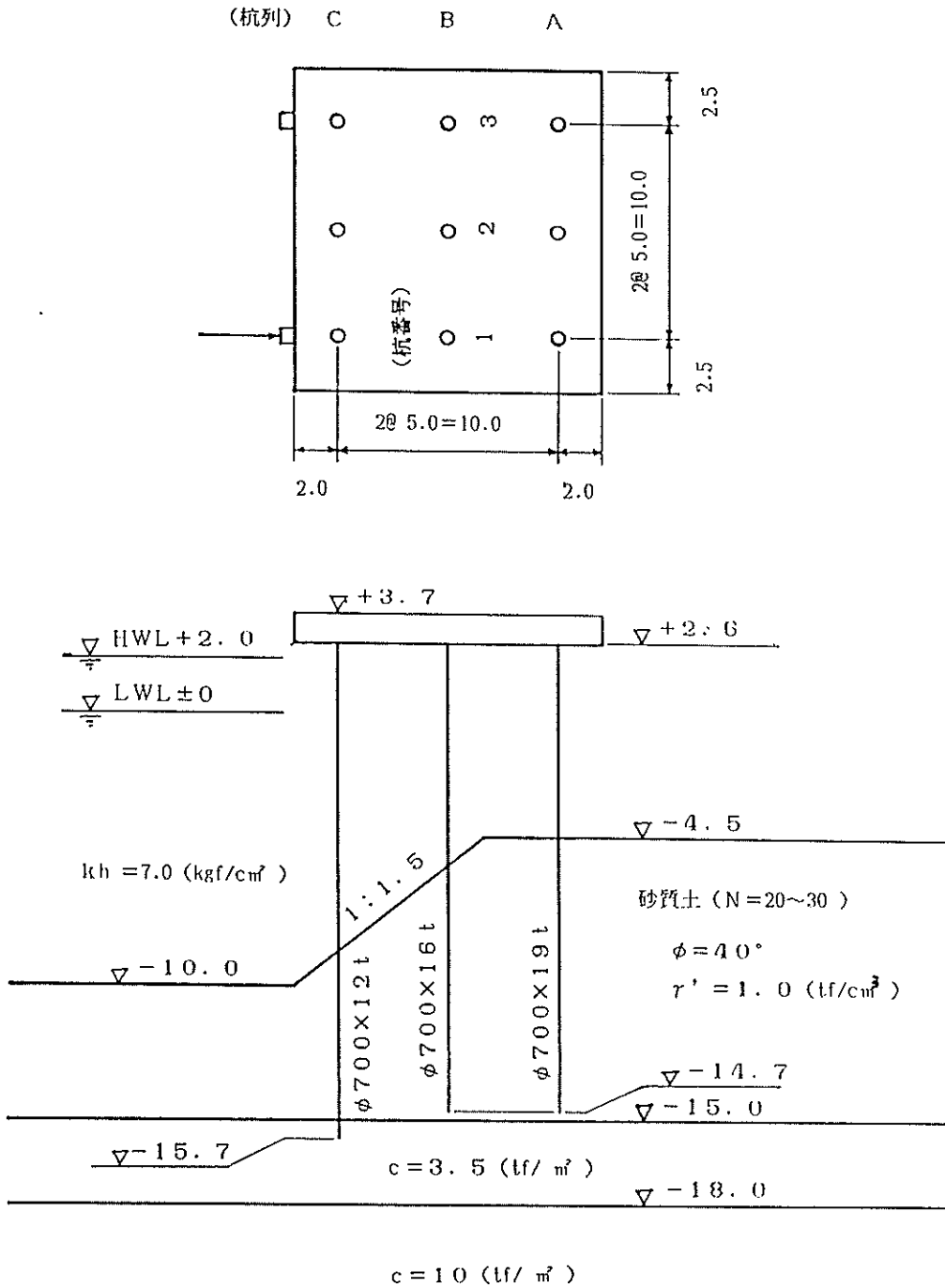


図-14 (2) 施設Bの平面図と断面図

【施設C】

(杭列) D C B A

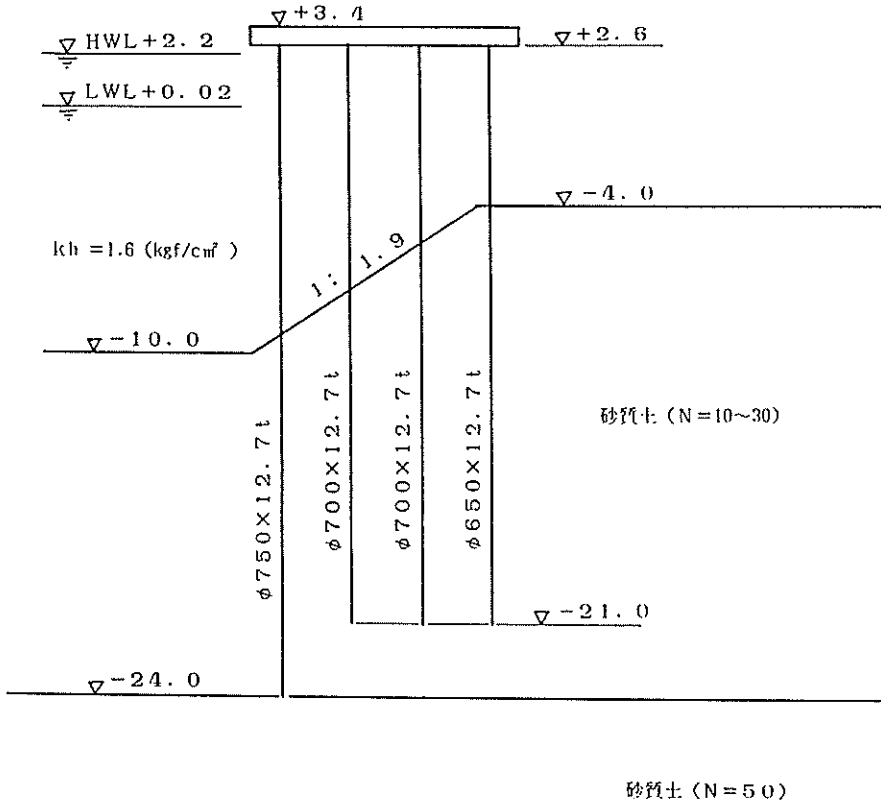
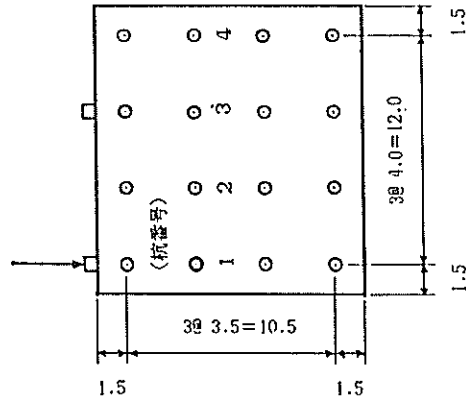


図-14 (3) 施設Cの平面図と断面図



② 杭モデルの設定

変断面杭モデル、一様断面杭モデルそれぞれについて杭モデルを表-4のように設定した。つまり、変断面杭では法線平行方向に杭諸元の変化を考慮できるMODEL-1に対して、杭諸元を変化させることができないMODEL-21, 22。一様断面杭では、MODEL-21, 22の変断面杭をもとに杭最大あるいは杭頭での腐食量を用いた各モデルを設定した。

(3) 計算モデルが計算結果(杭応力, 杭頭モーメント・軸力)に与える影響

a) 影響評価手法

・(MODEL-1)による計算値を基準とし、他の6モデルの計算値の比をもって、これらの計算精度を評価するための指標とした。

・上記指標において、95~110%の範囲を計算誤差の許容限度の目安とした。

b) 各計算モデルの評価

三施設について、それぞれ接岸時及び地震時の外力を設定して、計算を行った。

① 杭頭モーメント(図-15, 表-5(1)参照)

図の説明をすると、杭列A, B, C, ……は法線平行方向の杭列の番号で、陸側から順に付けたものである。

・MODEL-1に対する計算誤差が三施設とも-5%~+10%の範囲に収まるモデルはない。施設C以外では、MODEL-21, 33, 34が該当する。

・三施設における計算誤差が±10%の範囲に収まるのはMODEL-21である。

施設C以外では、MODEL-21, 22, 33, 34が該当する。

・計算誤差の範囲を+10~-15%とすれば、三施設ともこの内に収まるのはMODEL-21, 22, 33, 34である。

② 軸力(表-5(2)参照)

・軸力はMODEL-31, 32以外は、±10%と精度良く算定されている(図-16参照)。

・MODEL-1に対する計算誤差が三施設とも±5%内に収まるのは、MODEL-21, 22である。

・三施設の計算誤差を±10%まで許容すれば、MODEL-33, 34が限度内に収まる。

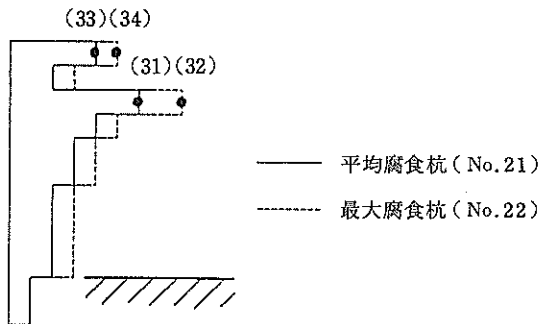
・MODEL-31, 32では、三施設全体の計算誤差は+10%~-20%の範囲となる。

以後の杭応力算定誤差の評価にあたって、誤差が大きいMODEL-31, 32は対象から除外する。

表-4 杭モデルの設定

モデル	No.	説明
変断面杭	1	各杭毎に測定された腐食量を用いる。
	21	深度毎に法線平行方向杭列の腐食量を平均する。
	22	深度毎に法線平行方向杭列の最大腐食量を用いる。
一様断面杭	31	No. 21の杭最大の腐食量を用いる。
	32	No. 22の杭最大の腐食量を用いる。
	33	No. 21の杭頭腐食量を用いる。
	34	No. 22の杭頭腐食量を用いる。

(参考図)



上段：接岸時

表-5(1) 杭頭モーメントの計算誤差(%)

(下段)：地震時

MODEL	2 1		2 2		3 1		3 2		3 3		3 4	
施設名	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
A	+8 (-1)	-5 (-5)	+2 (+2)	-8 (-8)	+9 (+9)	-14 (-16)	+20 (+19)	-22 (-25)	+12 (+1)	-3 (-3)	+12 (+1)	-3 (-3)
B	+4 (-1)	-4 (-5)	+1 (-1)	-10 (-10)	+8 (+6)	-15 (-18)	+11 (+6)	-18 (-22)	+11 (+3)	+2 (+2)	+7 (+5)	-3 (-4)
C	+10 (-1)	-10 (-7)	+4 (-2)	-15 (-15)	+18 (-1)	-13 (-14)	+20 (+8)	-15 (-13)	+9 (+9)	-13 (-10)	+8 (+9)	-14 (-12)
全 体	-10 (-1)	-10 (-7)	+4 (+2)	-15 (-15)	+18 (+9)	-15 (-18)	+20 (+19)	-22 (-25)	+12 (+9)	-13 (-10)	+12 (+9)	-14 (-12)

表-5(2) 軸力の計算誤差(%)

MODEL	2 1		2 2		3 1		3 2		3 3		3 4	
施設名	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
A	+1 (0)	-2 (-1)	+2 (+2)	-2 (-3)	+4 (+5)	-5 (-2)	+6 (+8)	-7 (-12)	+3 (+2)	-3 (-2)	+3 (+2)	-3 (-2)
B	+1 (0)	-1 (-1)	+1 (0)	-1 (-2)	+3 (+1)	-2 (-2)	+5 (+2)	-3 (-3)	+1 (+1)	-1 (-3)	+1 (+1)	-1 (-2)
C	+2 (0)	-5 (-5)	+5 (0)	-6 (-2)	+7 (+4)	-18 (-10)	+10 (+5)	-19 (-8)	+5 (+3)	-8 (-12)	+10 (+6)	-9 (-10)
全 体	+2 (0)	-5 (-5)	+5 (+2)	-6 (-3)	+7 (+5)	-18 (-10)	+10 (+8)	-19 (-12)	+5 (+3)	-8 (-12)	+10 (+6)	-9 (-10)

表-5(3) 杭最大応力の計算誤差(%)

MODEL	2 1		2 2		3 3		3 4		2 0		3 0	
施設名	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
A	0 (0)	-13 (-7)	+22 (+5)	0 (+2)	+4 (+2)	-9 (-3)	+4 (+2)	-9 (-3)	/	/	+12	-3
B	+14 (-2)	-11 (-11)	+25 (0)	-2 (-3)	+5 (+2)	-24 (-19)	+8 (+5)	-20 (-16)	+3	-3	+8	+2
C	+7 (-6)	-21 (-14)	+22 (+5)	-8 (-5)	+7 (-8)	-20 (-17)	+18 (+3)	-12 (-8)	+10	-9	+9	-12
全 体	+14 (0)	-21 (-14)	+25 (+5)	-8 (-5)	+7 (+2)	-24 (-19)	+18 (+5)	-20 (-16)	+10	-9	+12	-12

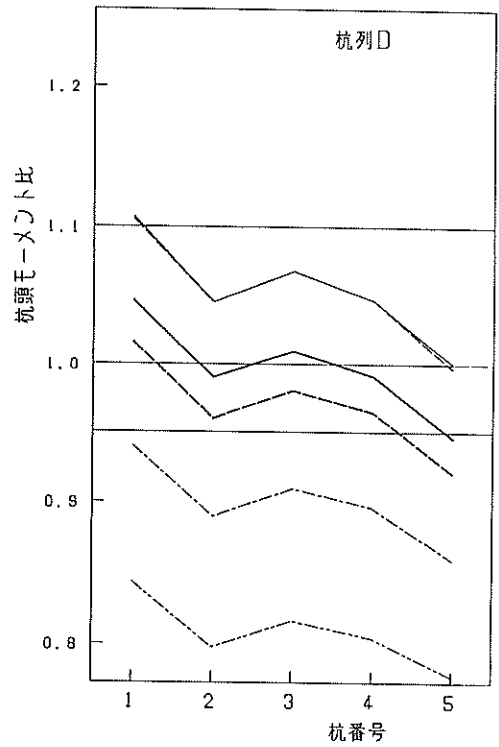
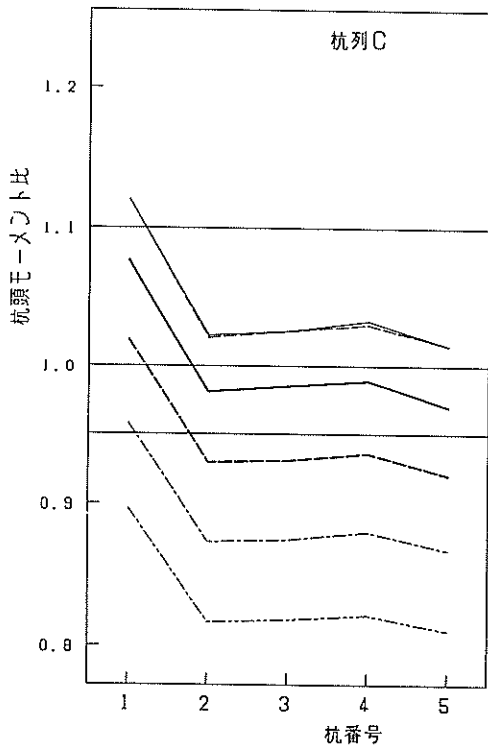
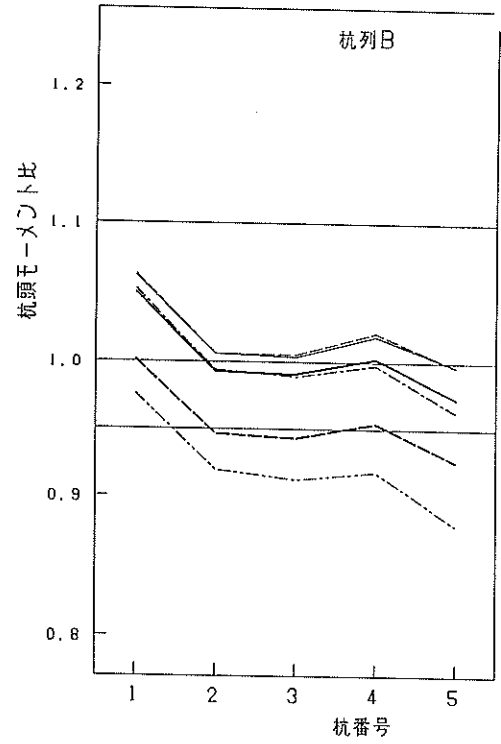
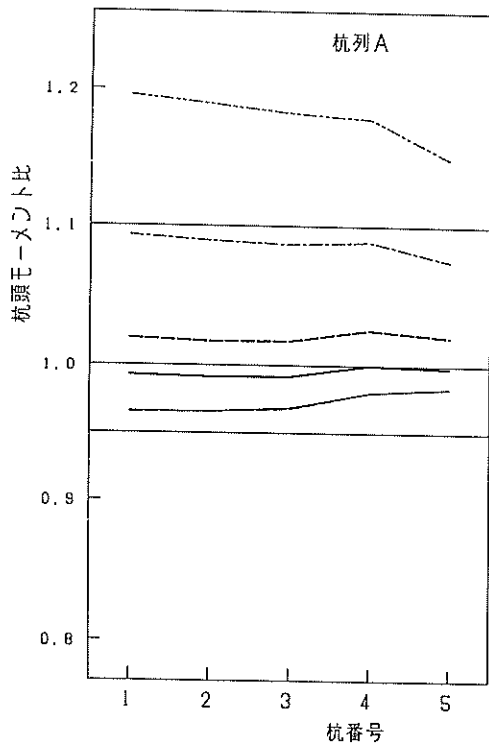


図-15 (1) 各モデルによる杭頭モーメントの計算精度  
(MODEL-1を基準とした値, 施設A・接岸時)

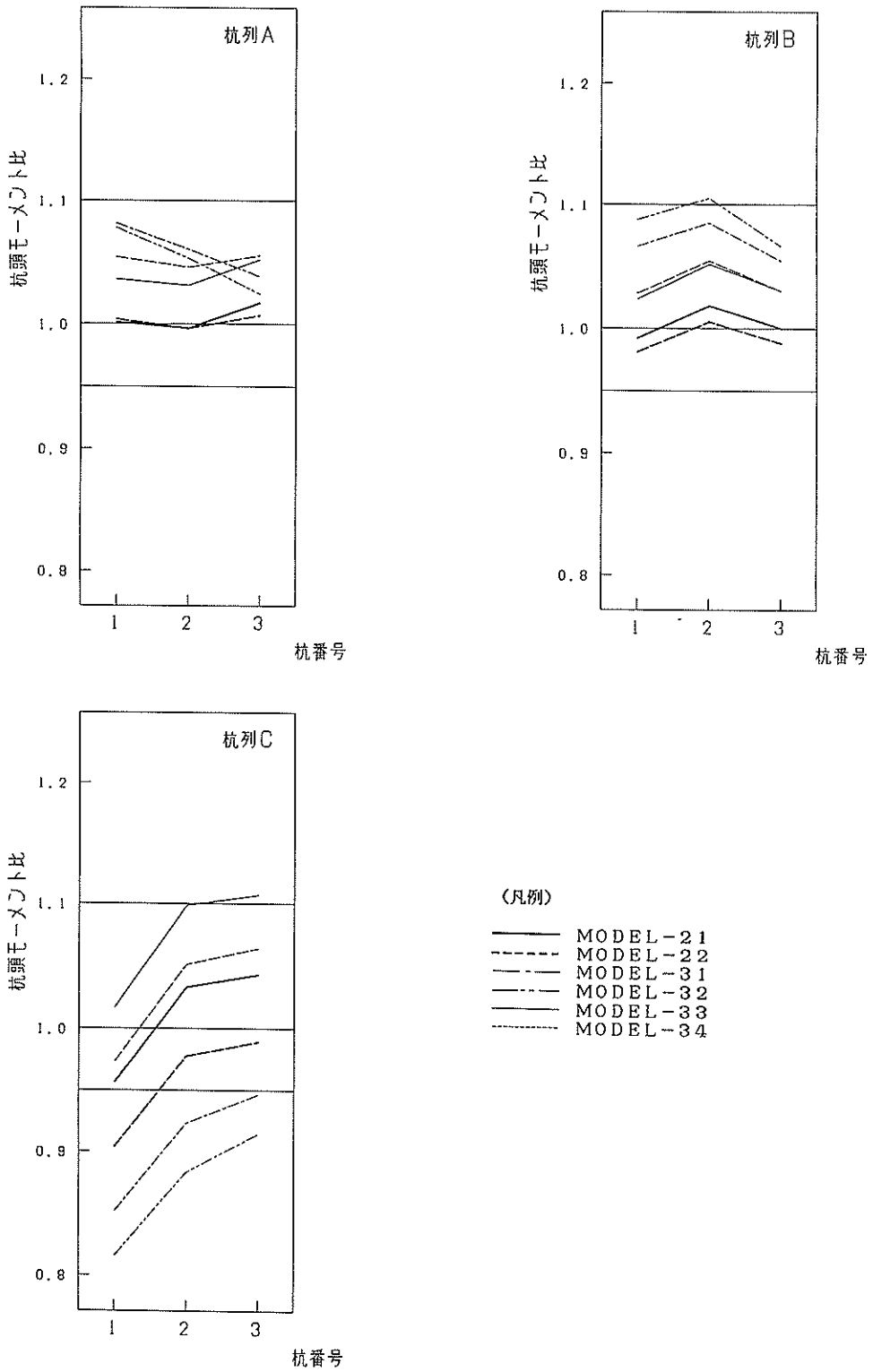


図-15(2) 各モデルによる杭頭モーメントの計算精度  
(MODEL-1を基準とした値, 施設B・接岸時)

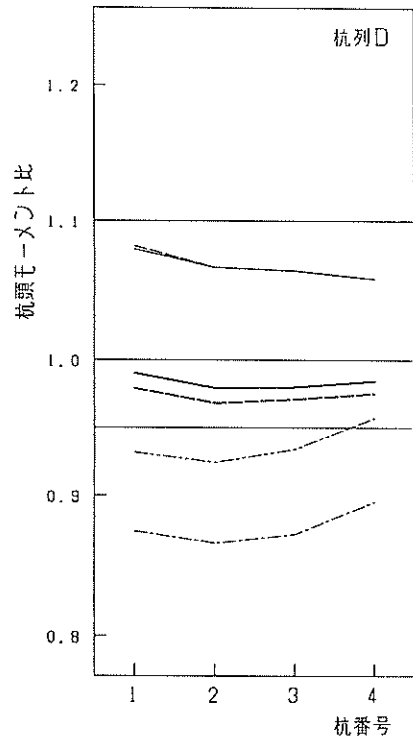
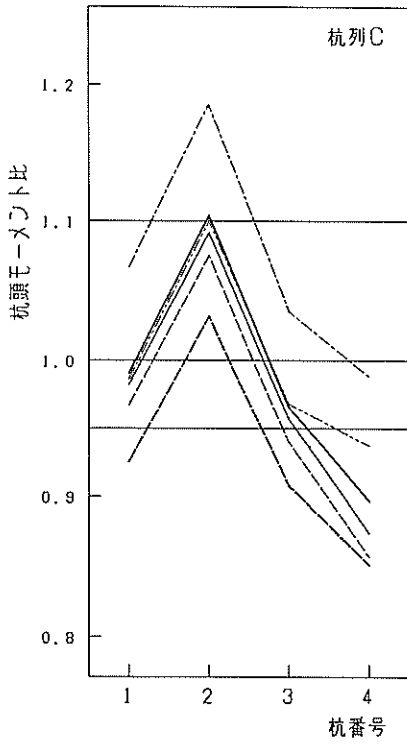
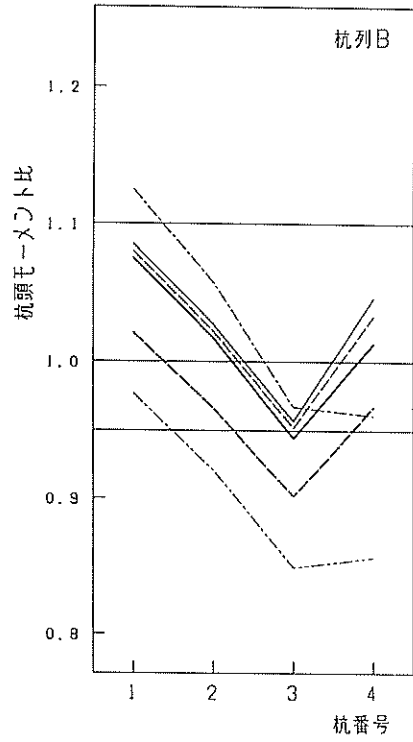
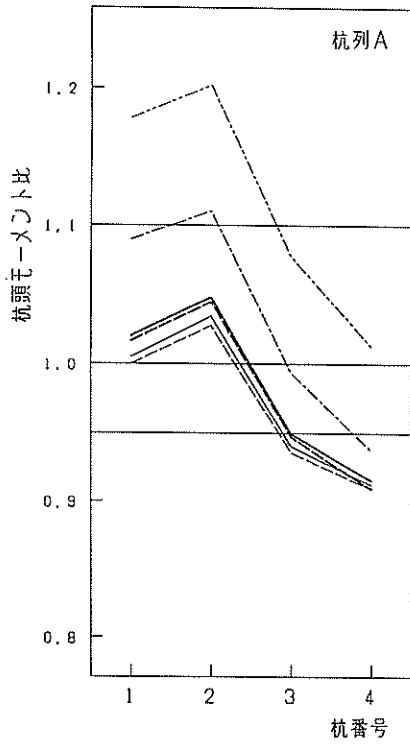
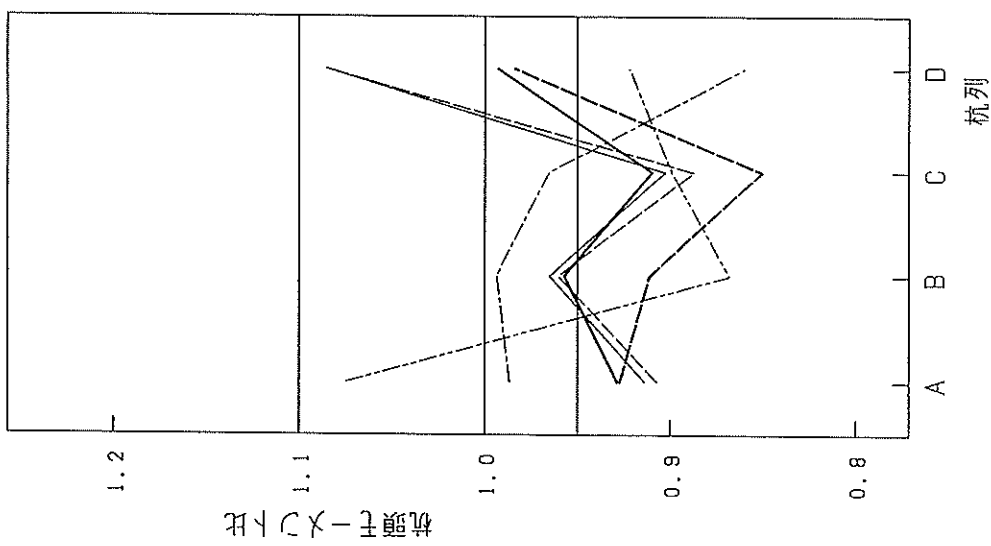
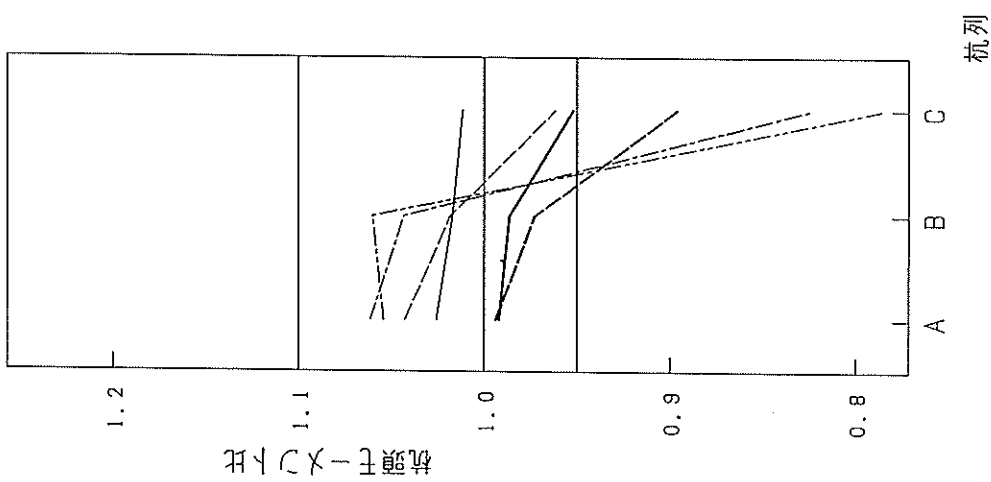
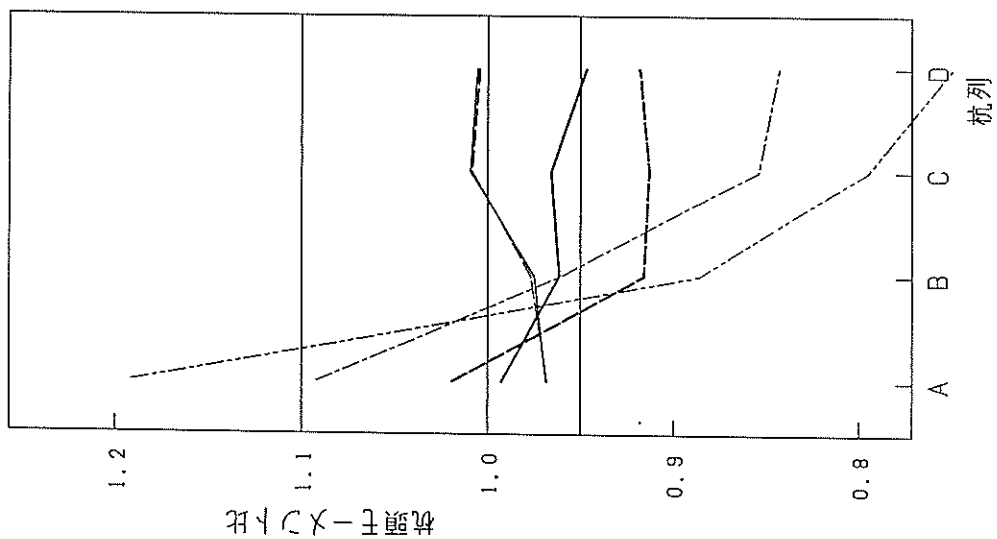


図-15(3) 各モデルによる杭頭モーメントの計算精度  
(MODEL-1を基準とした値, 施設C・接岸時)



図一15(4) 各モデルによる杭頭モーメントの計算精度 (MODEL-1を基準とした値, 地震時)

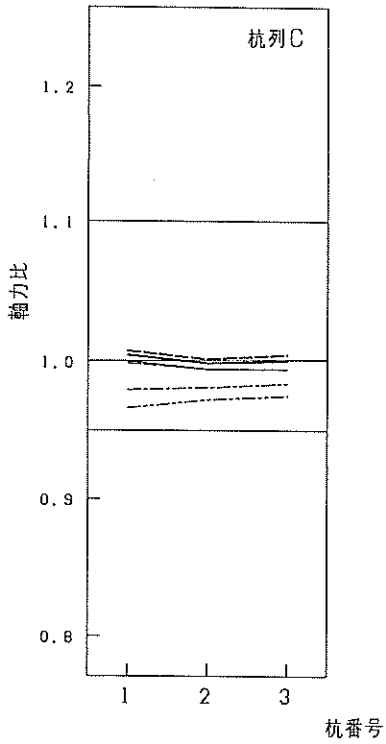
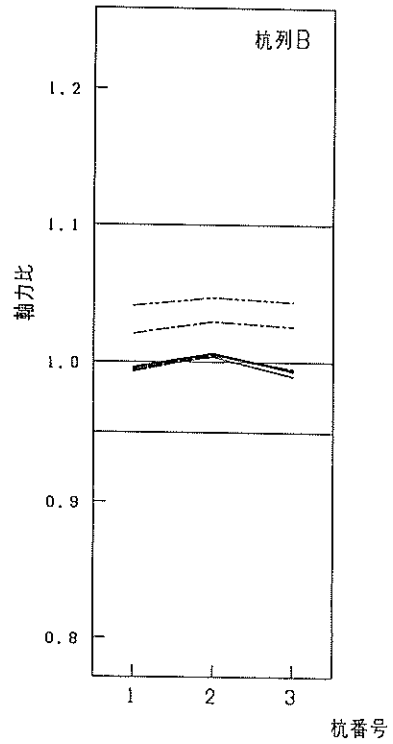
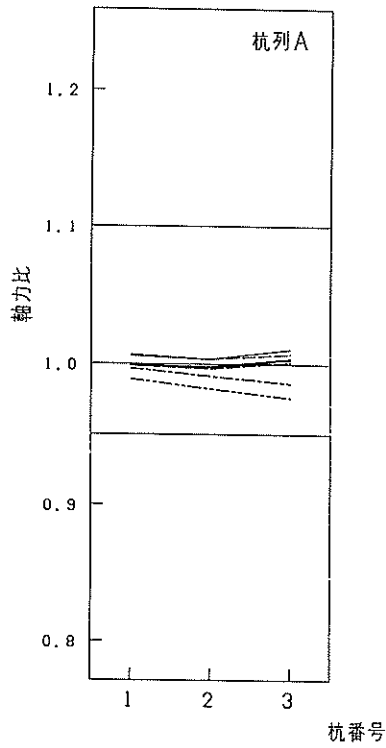


図-16 各モデルによる軸力の計算精度の一例。  
 (MODEL-1を基準とした値, 施設B・接岸時)  
 凡例は図-15(2)を参照。

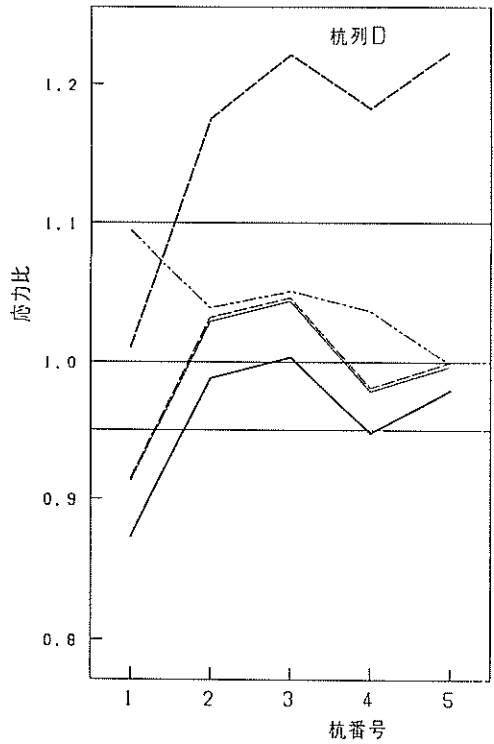
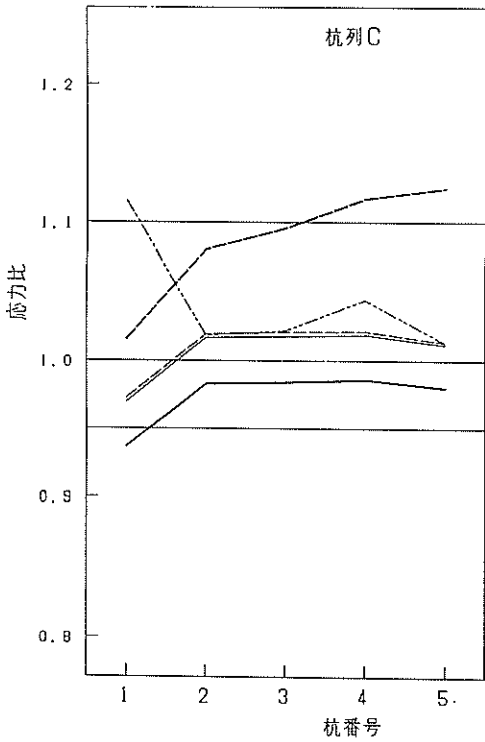
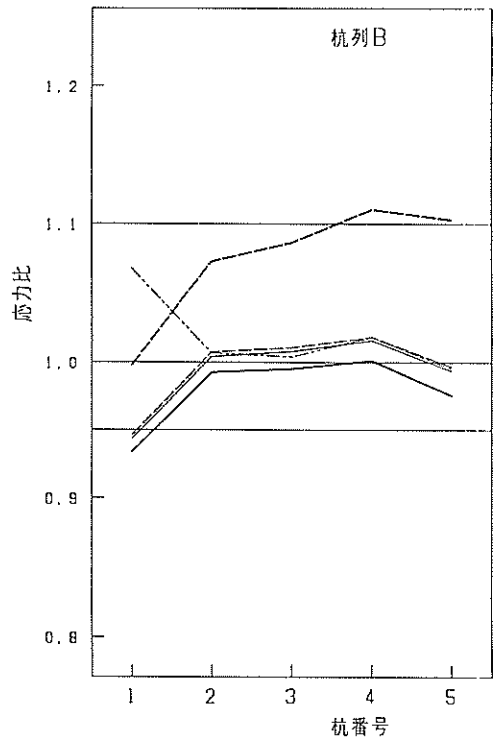
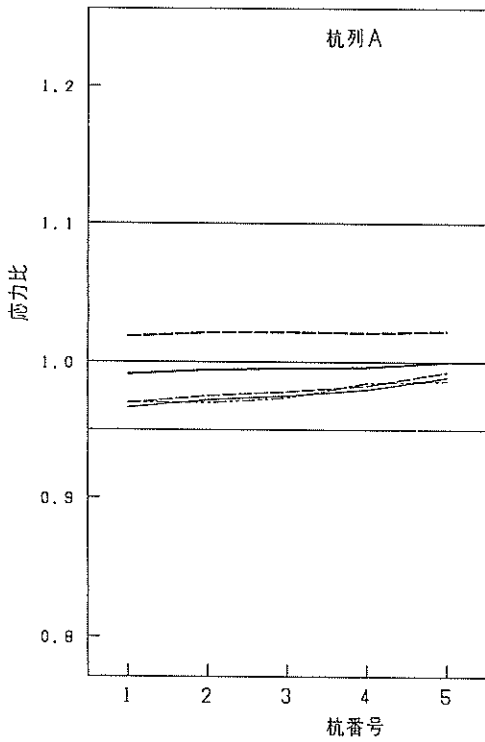
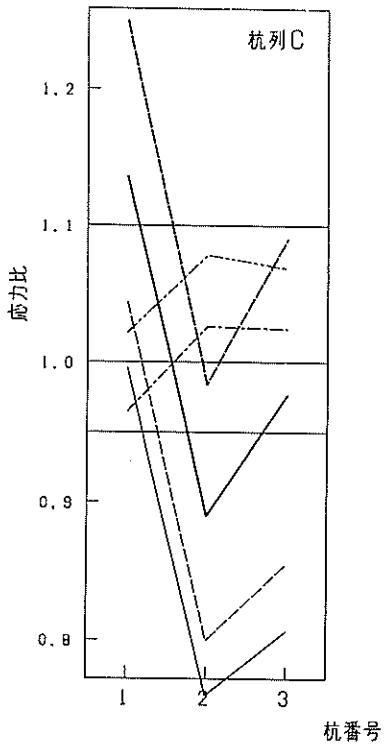
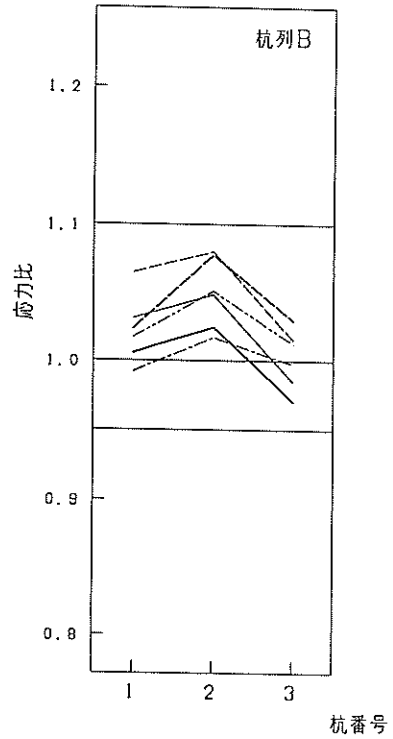
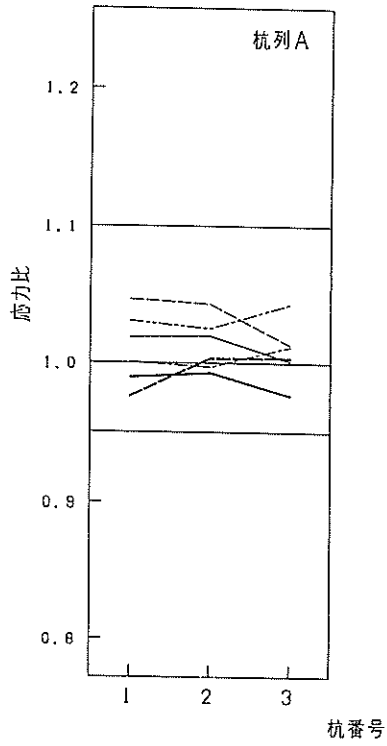


図-17 (1) 各モデルによる杭最大応力の計算精度  
 (MODEL-1を基準とした値, 施設A・接岸時)  
 凡例は(2)を参照。





(凡例)

- MODEL-21
- MODEL-22
- MODEL-33
- MODEL-34
- MODEL-20
- MODEL-30

図-17(2) 各モデルによる杭最大応力の計算精度  
(MODEL-1を基準とした値, 施設B・接岸時)

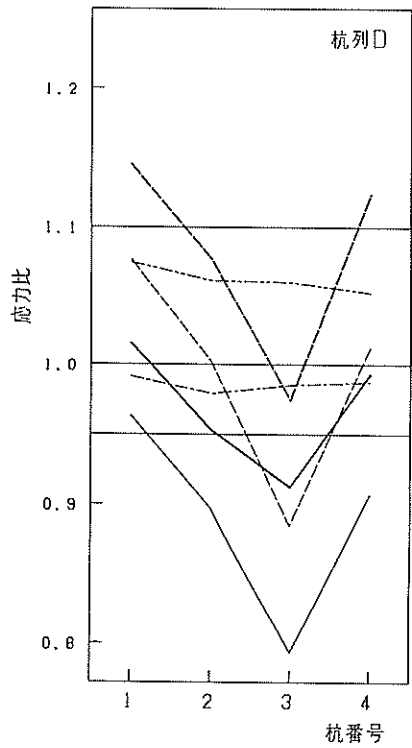
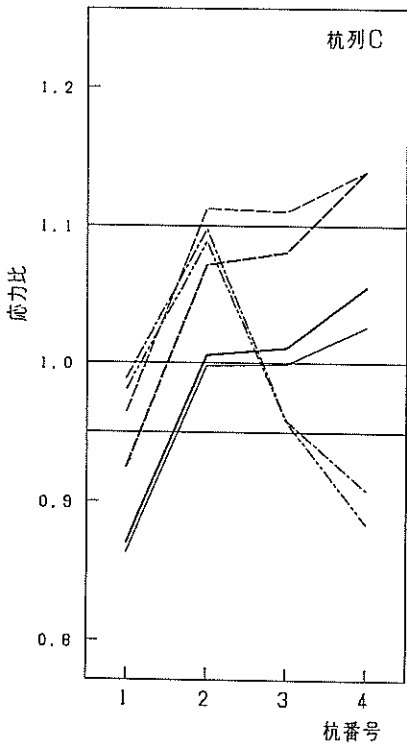
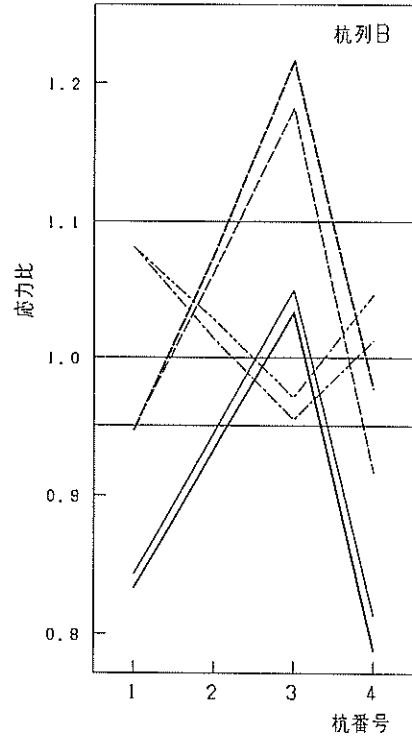
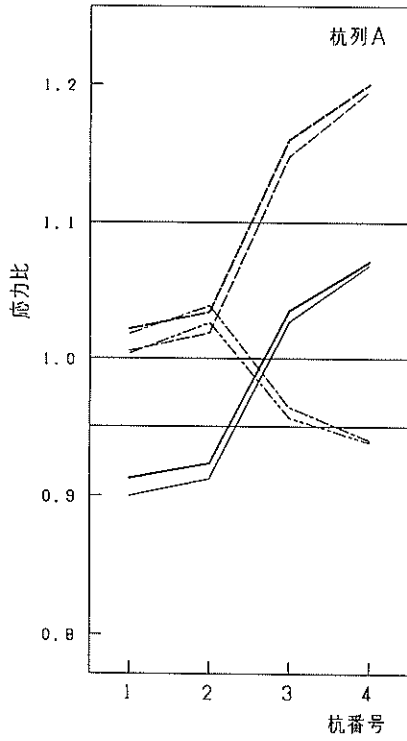
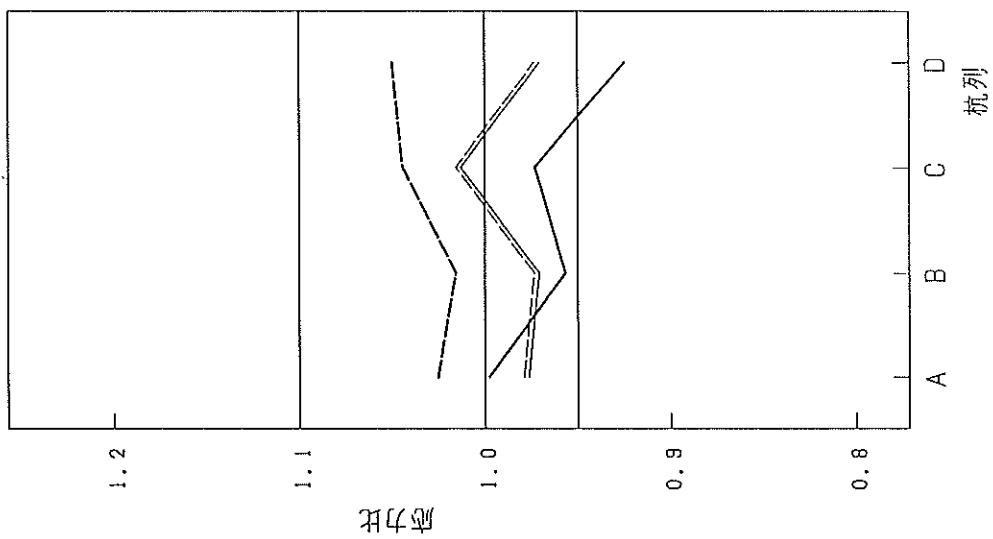
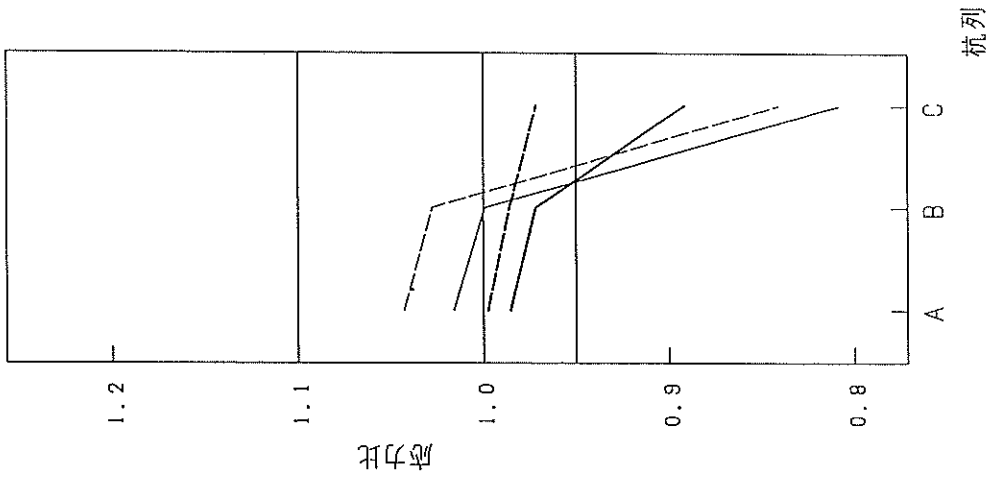
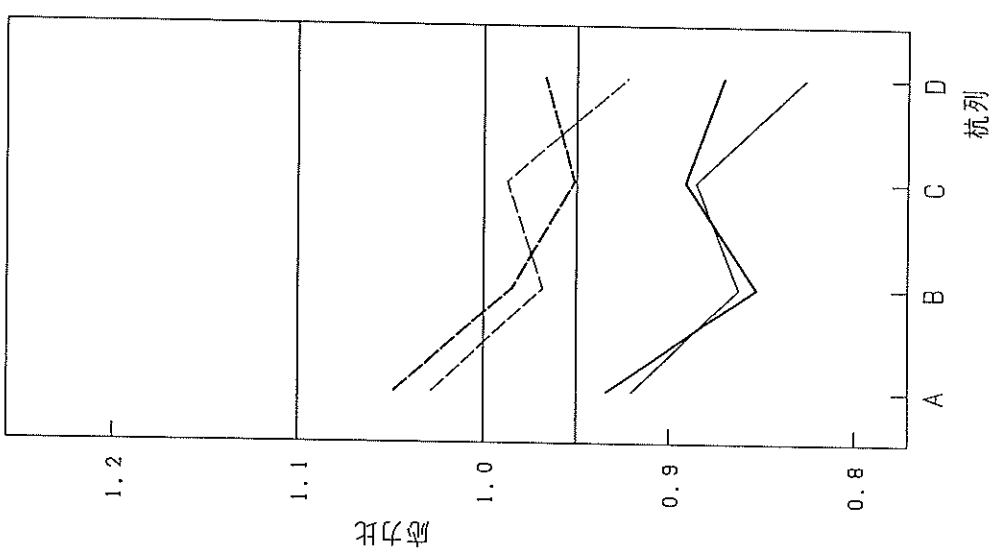


図-17(3) 各モデルによる杭最大応力の計算精度  
(MODEL-1を基準とした値, 施設C・接岸時)



図一17(4) 各モデルによる杭最大応力の計算精度  
(MODEL-1を基準とした値, 地震時)

③ 杭最大応力(図-17, 表-5(3)参照)

・変断面杭モデルの計算誤差は, MODEL-21では+15~-20%, MODEL-22では+25~-10%となっている。

これより, 法線方向杭列の杭諸元を一定とする変断面杭モデルにおいては, 過小側の誤差を抑えるために深度毎の最大腐食量を用いても-10%の誤差を生じ, 逆に過大側は+25%になってしまう。

よって, 変断面杭モデルを用いる場合は, 全杭の杭諸元を変化させることが可能なモデルが望ましい。また, MODEL-21による曲げモーメント・軸力に対して, 応力算定には実際の各杭の断面係数・断面積を用いるMODEL-20を新設し, 計算してみたところ±10%の計算誤差を生じた。

・一様断面杭モデルの計算誤差は, MODEL-33では+10~-25%, MODEL-34では±20%となり, この精度を上げるためにMODEL-30を追加した(これはMODEL-33で求めた曲げモーメント及び軸力に対して, 実際の各杭の深度毎の断面係数及び断面積を用いて応力算定したものである)。MODEL-30の計算誤差は±10%である。

・MODEL-20, 30とも±10%の計算誤差はさげられない。これは, 曲げモーメントの計算誤差に支配されるため, これ以上の計算精度向上は望めない。これ以上の精度向上にはMODEL-1を用いるしかない。

(4) 腐食量のばらつき(法線平行方向)による杭応力の変動について

MODEL-1の場合は, 各杭毎の腐食量を深度別に入力できるので, 杭の全数について腐食量調査を行った場合(全数調査)に対応すると考えることができる。これに対してMODEL-21は, 法線平行方向には杭諸元が変化しない変断面杭モデルなので, 例えば1ブロックのうち法線直角方向の1杭列だけ腐食量調査を行って, そのデータで1ブロックを代表させる場合等(サンプリング調査)に対応すると考えることができる。

したがって, MODEL-1による計算値を真の値として, MODEL-21による計算値の誤差を評価することができる。つまり, 法線平行方向杭列の腐食量を平均値で代表すると, 実際には腐食量は最小値から最大値までのばらつきを有しているので, MODEL-21による計算値は腐食量誤差の影響を受ける。よって, ここにMODEL-21, 1の比較を通して, 腐食量誤差と杭応力誤差との関係を分析する。

a) 腐食のばらつきと杭応力誤差の関係式

鋼管の管径 $D$ の微小変化 $\Delta D$ による断面積 $A$ 及び断面

係数 $Z$ の変化率は(31)式のようにになる。

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{t} \cdot \frac{\Delta D}{2}$$

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{d}{tD} \cdot \frac{\Delta D}{2} \approx \frac{1}{t} \cdot \frac{\Delta D}{2}$$

……………(31)

ここに,  $d$  : 内径 (cm)

$t$  : 元肉厚 (cm)

$A$  : 断面積 (cm<sup>2</sup>)

$Z$  : 断面係数 (cm<sup>3</sup>)

$D$  : 管径 (cm)

$\Delta D$  : 管径の微小変化 (cm)

$\Delta A, \Delta Z$  :  $\Delta D$ による $A, Z$ の変化

(31)式によれば, 断面積と断面係数の変化率はほぼ同一である。よって, 以下は断面積の変化率についてのみ考察する。

ここで, 以下のような記号の定義を行う。

断面積の減少率 :  $B \equiv -(\Delta A / A)$

腐食量 :  $F \equiv -(\Delta D / 2)$

この記号を用いて(31)式の第一式を書き直すと, (32)式のようにになる。

$$B = F / t \quad \text{……………(32)}$$

また, 腐食量の誤差 $\Delta F$ による断面積減少率 $B$ の変化率は(33)式のように表される((32)式の $t$ は定数扱いとなる)。

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta F}{F} \quad \text{……………(33)}$$

杭応力の算定式は(34)式で表される。

$$\sigma = \frac{M}{Z} + \frac{N}{A} \quad \text{……………(34)}$$

ここで,  $\sigma$  : 杭応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$M$  : 曲げモーメント (kgf·cm)

$N$  : 軸力 (kgf)

$\alpha = A / Z$ とおくと式(35)が導かれるので, 杭の腐食度にかかわらず $\alpha$ は一定である。

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\Delta A}{A} - \frac{\Delta Z}{Z} \approx 0$$

……………(35)

$\alpha$ を用いて(34)式は(36)式のように書き直すことができる。

$$\sigma = \frac{\alpha M + N}{A} = \frac{C}{A} \quad \text{……………(36)}$$

ただし,  $C = \alpha M + N$

いま、断面積の微小な変化  $\Delta A$  に対して曲げモーメント・軸力の変化を無視できると仮定すれば、(37)式が成り立つ。

$$\sigma' = \frac{C}{A'} \quad \dots\dots\dots(37)$$

ただし、 $A'$ ：誤差  $\Delta A$  を含んだ断面積

$$(A' = A + \Delta A)$$

$\sigma'$ ：断面積  $A'$  に対して算定された杭応力  
式(36)及び(37)より(38)式を得る。

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \frac{\sigma' - \sigma}{\sigma} = \frac{\sigma'}{\sigma} - 1 = \frac{A}{A'} - 1 = H - 1$$

$$\dots\dots\dots(38)$$

ここに、 $\Delta \sigma$ ：杭応力誤差 ( $= \sigma' - \sigma$ )

$H$ ：残存断面積比 ( $= A / A'$ )

b) 実例への適用

MODEL-21 と 1 の比較において、施設 A ~ C で杭最大応力が 10% 程度以上過小に算定された杭のいくつかに対して、a) で導いた式(32)、(33)、(37)を適用した結果を表-6に示す。また、施設 A ~ C の計算対象ブロックにおける法線平行方向の腐食量のばらつきを表-7に示す。表-6によれば、曲げモーメント・軸力の誤差を無視した結果ではあるが、杭最大応力誤差率(1)、(2)を比較すると非常に近い値となっていることがわかる。絶対値で比較して、誤差率(2)の方が(1)よりも必ず大きく、せいぜい数%程度の差となっていることから、これは曲げモーメント・軸力の誤差によるものである(対象杭に

おける実際の杭頭モーメント・軸力の誤差を調べてみると、大体±5%程度の誤差内に収まっている)。また、杭応力が過小となる杭では、問題となる杭頭モーメントは通常過大に算定されるため、杭応力誤差と腐食量誤差の関係を調べる際には杭頭モーメント・軸力の誤差は無視した方が安全側である。

c) 腐食量変動率と杭応力変動率の関係

腐食量変動率と杭応力変動率の関係は断面積減少率  $B$  の値により変化する。図-18は断面積減少率  $B$  をパラメータとして腐食量変動率と杭応力変動率の関係を図化したものである。

この図を用いて腐食量の変動と腐食量調査の関係を考察する。例えば、腐食量調査を1ブロックに1列(法線直角方向)の割で実施し、そのデータで1ブロックを代表させて杭応力を算定したとする。この場合、1パス全体での腐食量のばらつきの度合はわかっている。これをもとに1ブロックでの腐食量のばらつきの範囲を設定する。このときの上限値を  $F_1$  とし、実際に用いた腐食量を  $F_0$  (法線平行方向杭列毎に異なる値)とすると、この上限値が現れた場合の杭応力の変動を求めるためには、図-18の横軸の値は以下のように求める。

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{F_1 - F_0}{F_0} \quad \dots\dots\dots(39)$$

したがって、縦軸の定義も以下の通り。

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_0} \quad \dots\dots\dots(40)$$

表-6 杭最大応力誤差率の算定例

杭 番 号	施 設 A		施 設 B		施 設 C	
	(D, 1)	(C, 2)	(A, 1)	(B, 4)	(C, 1)	(D, 3)
杭最大応力誤差率(1)	-0.13 ① (-0.18)	-0.11	-0.09	-0.21 ① (-0.29)	-0.13	-0.09
最大応力発生断面番号(MODEL-1)	3	4	1	2	1	2
腐食量誤差率 $\Delta F / F (= \Delta B / B)$	(1-1.52)/1.52 =-0.34	(1-1.13)/1.13 =-0.12	(1-1.68)/1.68 =-0.40	(1-2.49)/2.49 =-0.60	(1-2.09)/2.09 =-0.52	(1-1.24)/1.24 =-0.19
断面積減少率 $B$ (真値) $= F / t$	0.44	0.58	0.22	0.42	0.25	0.42
断面積減少率 $B'$ (算定値) $= B + \Delta B$	0.66 $B$ = 0.29	0.88 $B$ = 0.51	0.60 $B$ = 0.13	0.40 $B$ = 0.17	0.48 $B$ = 0.12	0.81 $B$ = 0.34
残存断面積比(真値/算定値) $H = (1 - B) / (1 - B')$	0.789	0.857	0.897	0.699	0.852	0.879
杭最大応力誤差率(2) ( $H-1$ )	(-0.21)	-0.14	-0.10	(-0.30)	-0.15	-0.12

杭最大応力誤差率(1)：MODEL-21による場合のMODEL-1に対する誤差。

数値の右に付した○囲みの番号は、MODEL-21の最大応力発生断面を表す(MODEL-1と異なる場合のみ)。

下段の( )書きの数値は、MODEL-1の最大応力発生断面の応力誤差。

杭最大応力誤差率(2)：MODEL-21において、MODEL-1に対するモーメント分布・軸力の誤差を無視した場合の、腐食量誤差による杭最大応力の誤差(概略値)。

( )書きの数値は、杭最大応力誤差率(1)の欄の( )内の数値に対応する。

表一7(1) 杭列毎の平均値に対する腐食量のばらつき(施設A)

断面	杭列 A		杭列 B		杭列 C		杭列 D	
1	-0.29	0.43	-0.58	0.39	-0.39	0.22	0	0.61
	0.72		0.97		0.61		0.61	
2	-0.35	0.13	-0.67	2.28	-0.63	1.84	-0.62	0.92
	0.48		2.95		2.47		1.54	
3	-0.37	0.25	-0.84	0.46	-0.59	0.41	-0.81	0.52
	0.62		1.30		1		1.33	
4	-0.03	0.13	-0.77	0.36	-0.46	0.46	-0.34	0.28
	0.16		1.13		0.91		0.62	

凡 例

最 小	最 大
レ ン ジ	

杭列平均腐食量を基準(1.0)として、  
これからのかい離を示す。

表一7(2) 杭列毎の平均値に対する腐食量のばらつき(施設B)

断面	杭列 A		杭列 B		杭列 C	
1	-0.06	0.05	-0.05	0.09	-0.13	0.23
	0.11		0.14		0.36	
2	-0.27	0.23	-0.47	0.41	-0.38	0.50
	0.5		0.88		0.88	
3	-0.33	0.93	-0.36	0.50	-0.49	0.40
	1.26		0.86		0.89	
4	-0.12	0.20	-0.17	0.13	-0.17	0.13
	0.32		0.3		0.3	
5	-0.11	0.10	-0.05	0.08	-0.19	0.26
	0.21		0.13		0.45	
6	-0.19	0.35	-0.05	0.02	-0.37	0.50
	0.54		0.07		0.87	
7	-0.12	0.10	-0.18	0.32	-0.40	0.50
	0.22		0.5		0.9	
8	-0.20	0.14	-0.25	0.35	-0.25	0.31
	0.34		0.6		0.56	

表一7(3) 杭列毎の平均値に対する腐食量のばらつき(施設C)

断面	杭列 A		杭列 B		杭列 C		杭列 D	
1	-0.60	1.11	-0.06	1.09	-0.74	0.76	-0.49	0.68
	1.71		1.15		1.5		1.17	
2	-0.28	0.24	-0.64	1.52	-0.75	1.49	-0.76	0.78
	0.52		2.16		2.24		1.54	
3	-0.4	0.64	-0.71	1.00	-0.70	0.43	-0.43	0.57
	1.04		1.71		1.13		1.00	
4	-0.20	0.97	-0.75	1.22	-0.65	0.50	-0.34	0.67
	1.17		1.97		1.15		1.01	

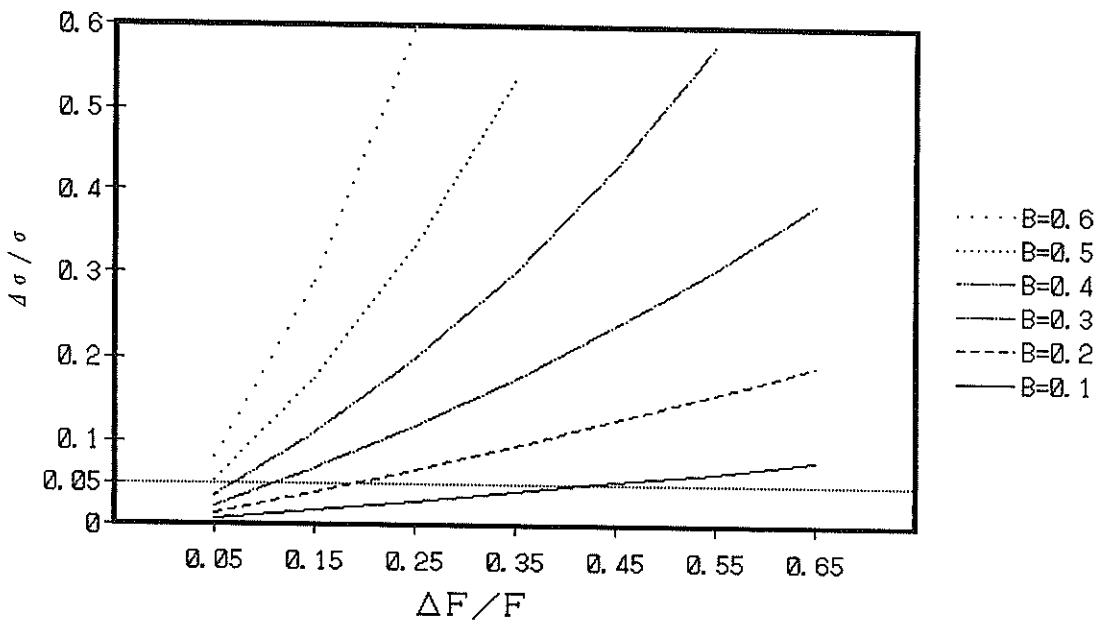


図-18 腐食量変動率と杭応力変動率の関係

ここに、 $\sigma_0$ ：腐食量  $F_0$  に対する杭応力

$\sigma_1$ ：腐食量  $F_1$  に対する杭応力

図から各断面変化率について、杭応力変動率が5%となる腐食量変動率を求めたのが表-8である。表によれば、 $B=0.1$ と腐食度が小さい段階では、約40%の腐食量変動率があっても杭応力変動率は5%と、腐食量変動率に対する杭応力変動率の感度は1/8程度の低さであるが、腐食の進行について加速度的に大きくなり、 $B=0.5$ では腐食量変動率がそのまま杭応力変動率に現れる状況である。

よって、何らかの理由により杭の腐食量調査において全数調査を行うことができず、1ブロックを杭列で代表させるような場合、腐食の進行度合と腐食量のばらつきをもとに、本法により杭応力算定値に内在する誤差を推定することが可能である。

しかし、表-7における腐食量変動率をみても、1ブロックで数十%程度の誤差は通常であり、図-18の横

軸が30%の場合を調べると、 $B \geq 0.15$ の場合に杭応力誤差が5%を越える。

$B=0.15$ なる腐食度とは以下のようなものである。すなわち、(32)式より  $F=Bt$ 。仮に  $t=12$ (mm)として  $F=1.8$ (mm)、 $t=19$ (mm)として  $F=2.85$ (mm)ほどの腐食度に相当する。通常、補修が問題となるのはもう少し腐食度が進んだ段階と考えられるし、1ブロック当たりの腐食量のばらつきも30%を越える場合があるため、杭応力誤差を5%未満に抑えるためには、MODEL-1による応力計算、従って、杭の全数についての腐食調査を実施することが望ましい。

## 5.2 弾塑性解析

施設Bについて弾塑性解析を行った結果を図-19に示す。変断面・一樣断面の杭モデルを比較すると以下のことが言える。

- 最初の杭が降伏応力に達する水平外力は一樣杭モデルの方が小さいが、最後の杭列Cのうちの1本が降伏

表-8 杭応力変動率が5%となる腐食量変動率

断面減少率 $B$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
腐食量変動率 (%)	41	18	11	7	5	5未満
感度 ( $\Delta\sigma/\sigma$ ) / ( $\Delta F/F$ )	0.12	0.28	0.45	0.71	1.0	1.0以上

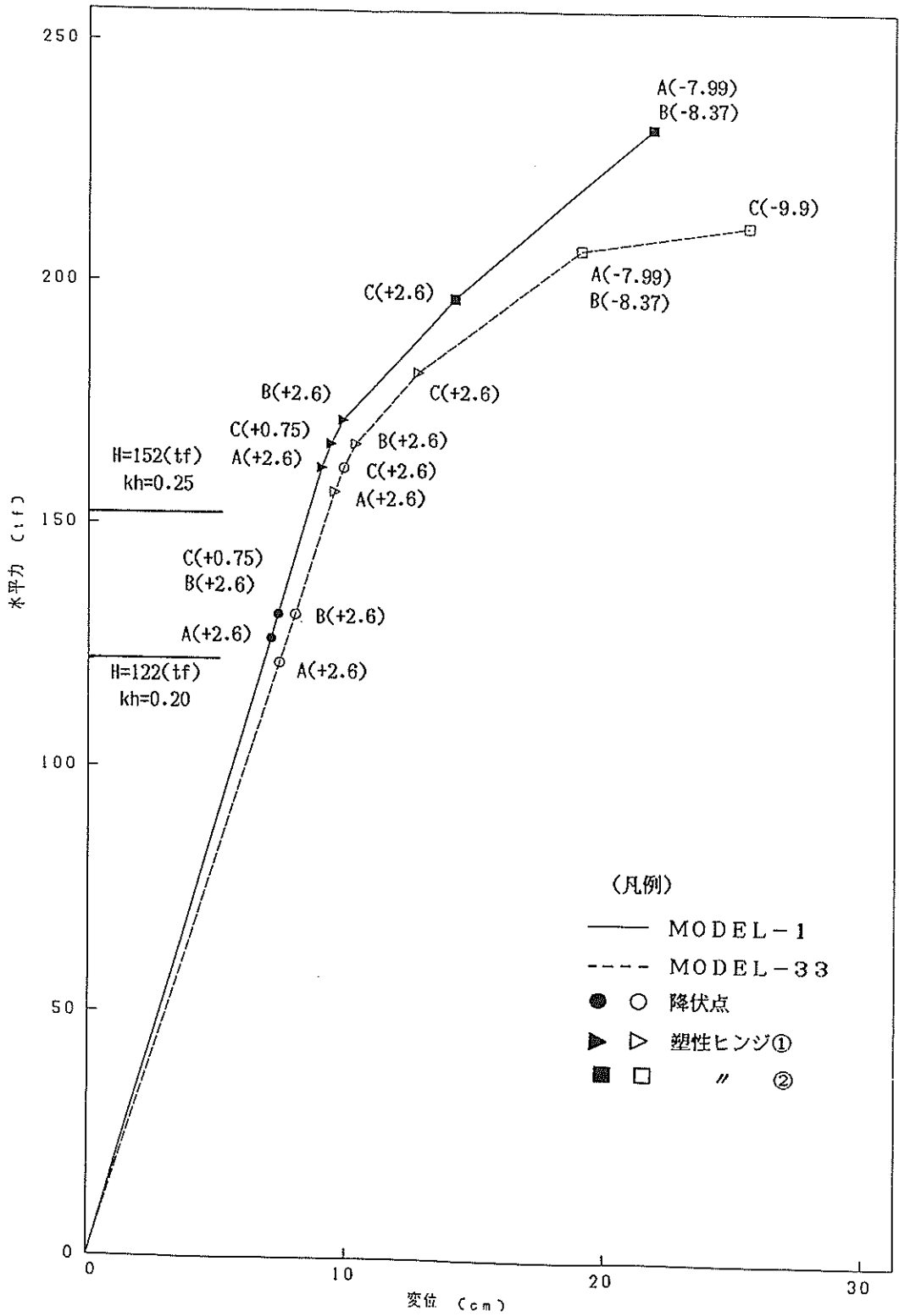


図-19 弾塑性解析による計算例



応力に達する水平外力は変断面杭モデルの方が小さい。

・ 1 個目の塑性ヒンジについても同様の事が言える。

以上の二点は、変断面杭モデルの杭列 C で最初に降伏する、あるいは最初の塑性ヒンジが生じる断面位置が杭頭ではなく DL+0.75 m (最大腐食部) であることに起因すると考えられる。したがって、最大腐食部を弱点として正當に評価することが可能な、変断面杭モデルによる解析が必要である。

・ 2 個目のヒンジ発生は杭列 C を除けば、一様杭モデルの方が早い。これは、杭列 C 以外は地中部にヒンジが生じており、一様杭モデルの地中部肉厚が過小なためである。また、杭列 C の 2 個目のヒンジの発生位置は杭頭となっており他の杭列と異なるが、これは 1 個目のヒンジが DL+0.75 m の位置に生じたことによるものである。

・ 変断面杭モデルの方が変位が 1 割程度小さい。これは、一様断面杭モデルにおいて杭頭部平均肉厚を用いることによる杭頭水平ベネ定数の過小評価に起因する。以上の二点から、変断面杭モデルを用いた解析により、合理的な耐力評価が可能となる。

### 5.3 補修工設計への適用

三施設の現況評価(ただし、外力は仮想のものである)を行ったところ、施設 A は健全、施設 B は接岸時は問題

ないが地震時に全杭が不健全、施設 C については地震時は問題ないが接岸時に陸側のブロック端の杭 1 本が不健全と判定された。

補修工として、図-20 に示すような RC ライニングを想定し、補修後の計算を行った。RC ライニング部分については、曲げ剛性が等しくなるような鋼管杭(内径は連続させる)に換算した。

(1) 地震時外力に対する補強(施設 B。図-21 参照)

a) 全杭頭に RC ライニング等による補修工を施工した場合

施工前に比べて、曲げモーメントは杭頭で 1.15~1.40 倍、ライニング下端(-1.5 m)で 1.6~1.8 倍となった。これは、分担水平力が 0.95~1.1 倍とそれほど変化しないのに対して、単位水平力により生じる杭頭モーメントが 1.22~1.25 倍と大きくなったことによる。また、同様の理由により杭頭よりもライニング下端の曲げモーメントの方が変化率が大きい(曲げモーメント鉛直分布の傾きは杭頭水平力に等しい。杭頭水平力はあまり変化せずに、杭頭モーメントが大きく変化すると、曲げモーメントの増分だけ平行移動した形に近くなるためである)。

b) 杭列 A, B の杭頭だけ RC ライニング等の補修工を施工した場合

補修前に比べて、杭列 C の曲げモーメントは杭頭、ラ

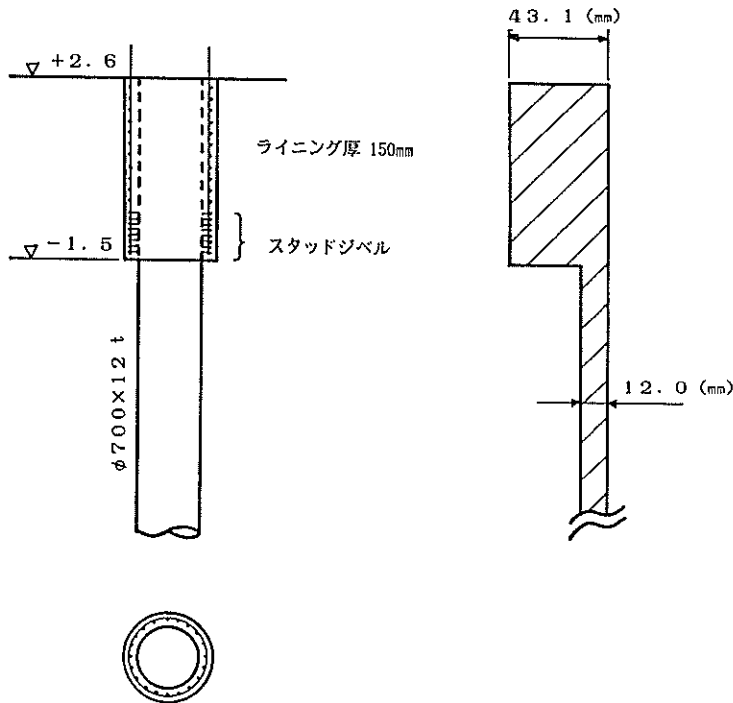
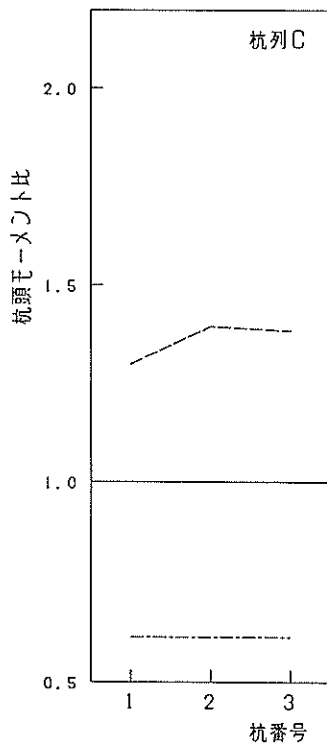
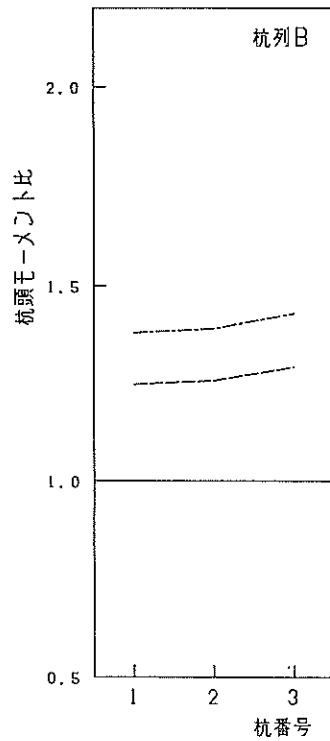
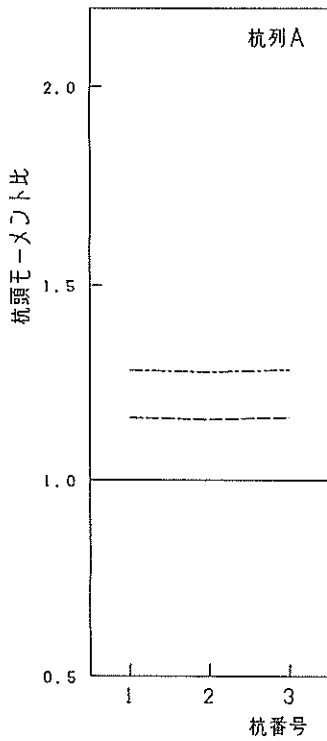


図-20 RC ライニングのモデル化



(凡例)

- 全杭頭を補修
- 杭列A, Bを補修

図-21 (1) 補修による杭頭モーメントの変化  
(補修前の値を基準, 施設B・地震時)

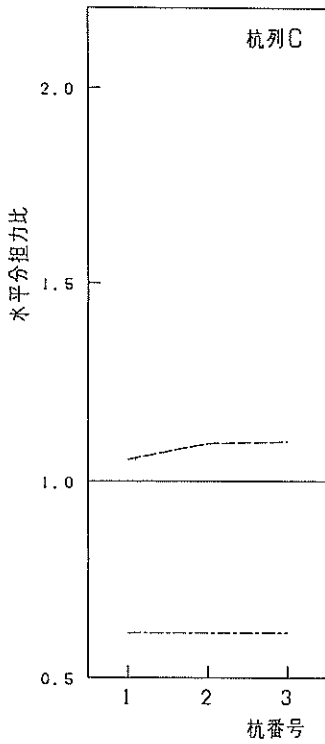
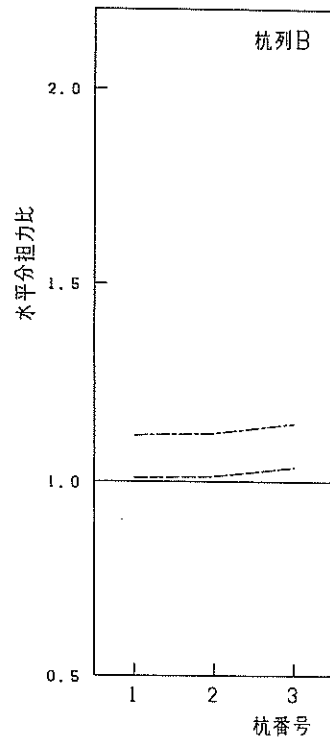
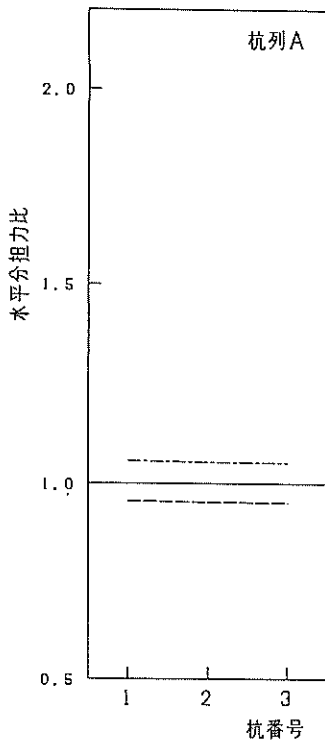


図-21 (2) 補修による水平分担力の変化  
(補修前の値を基準, 施設B・地震時)

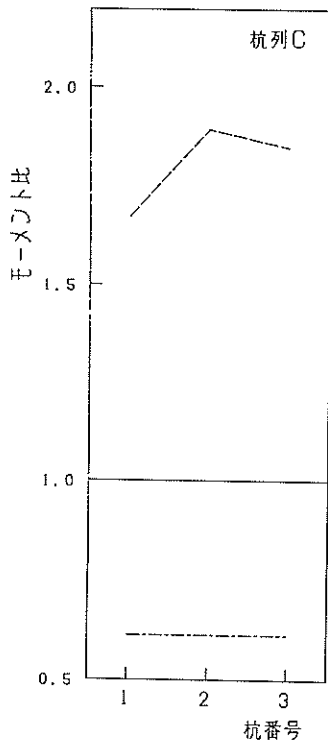
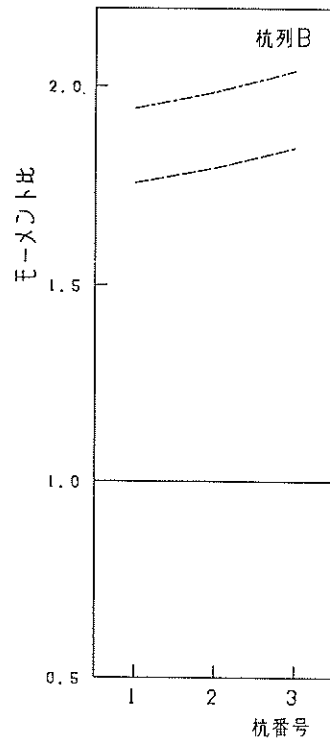
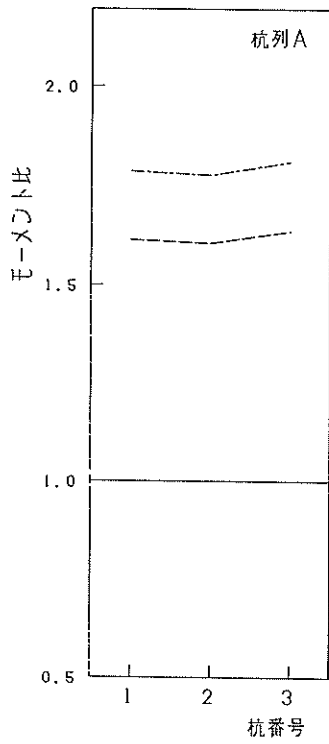


図-21 (3) 補修によるライニング下端モーメントの変化  
(補修前の値を基準, 施設B・地震時)

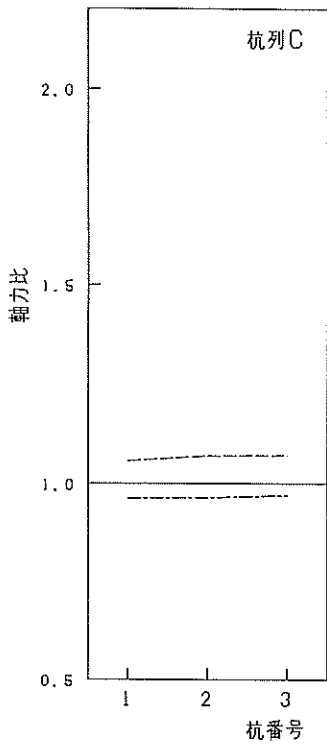
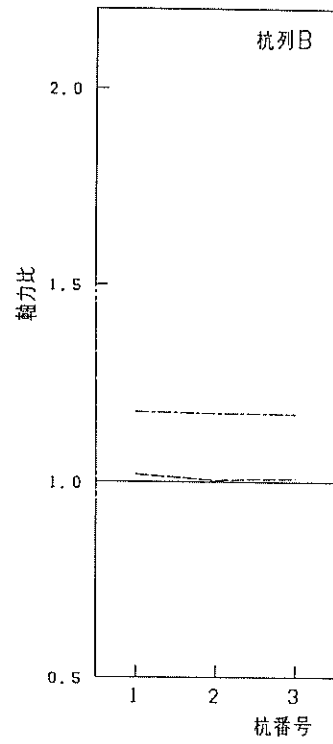
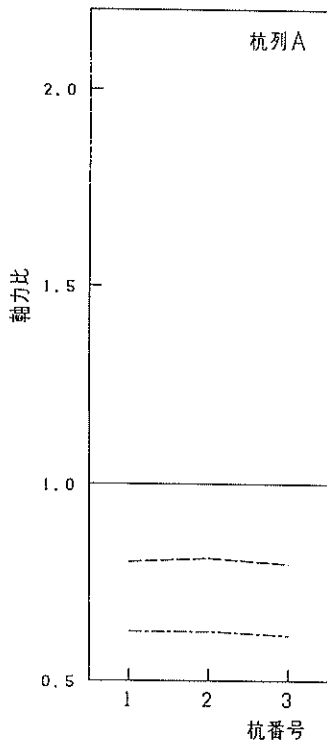


図-21 (4) 補修による軸力の変化(補修前の値を基準, 施設B・地震時)

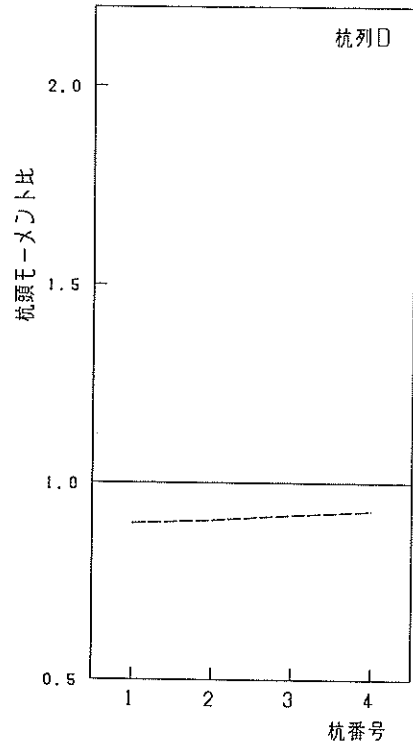
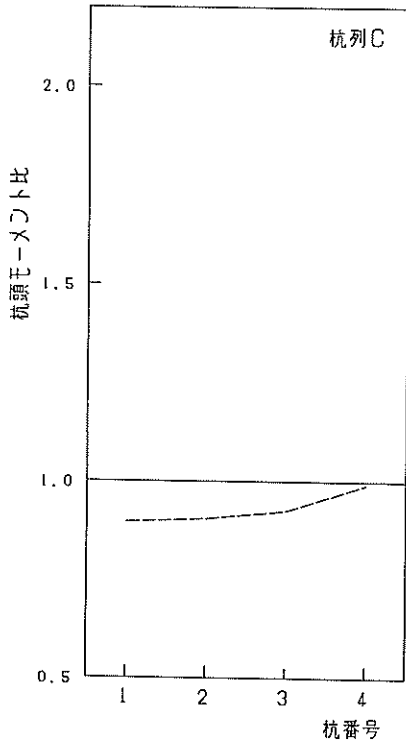
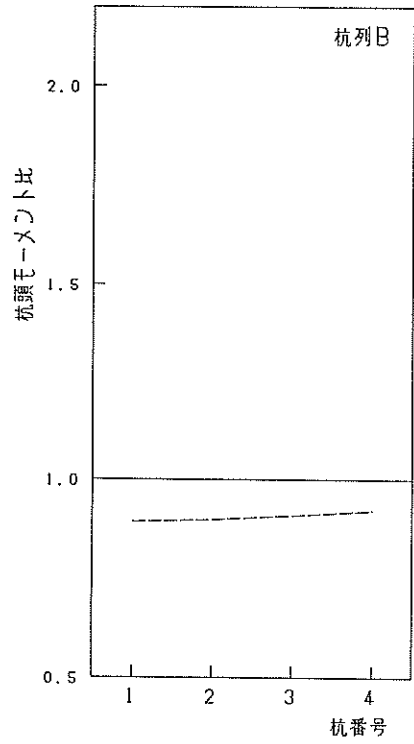
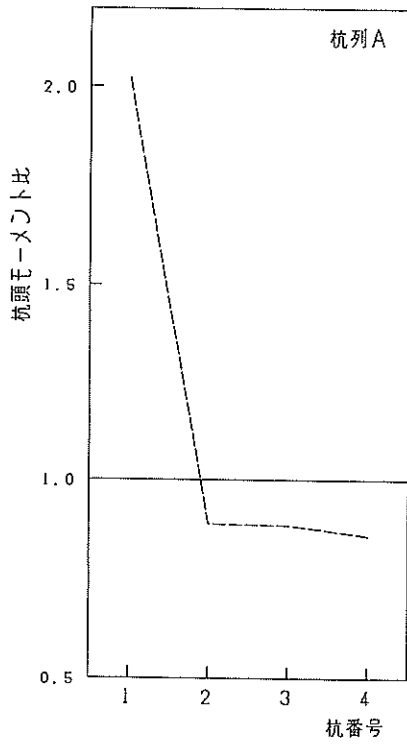


図-22 (1) 補修による杭頭モーメントの変化  
 (補修前の値を基準, 施設C・接岸時)

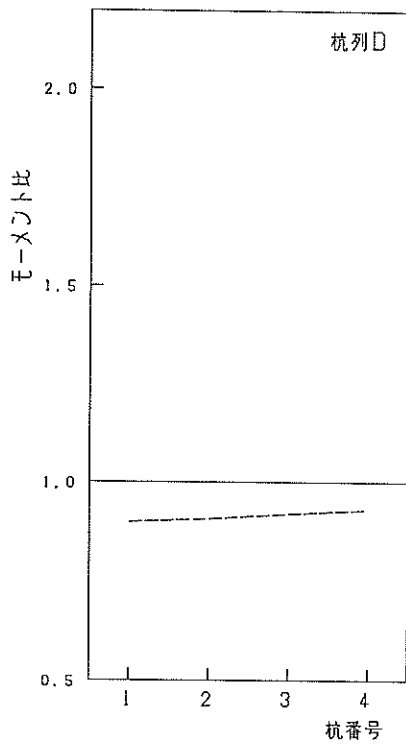
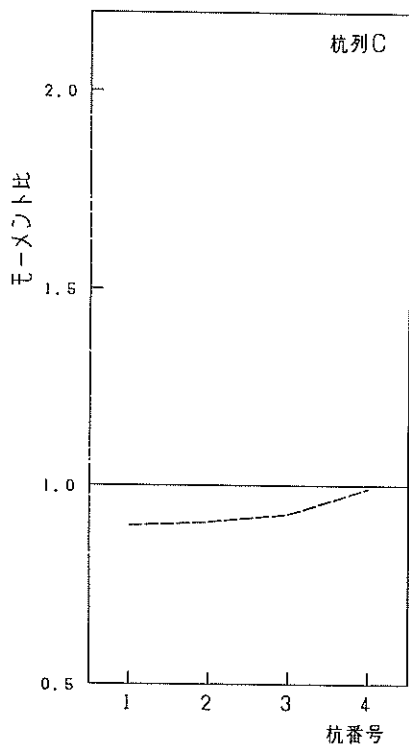
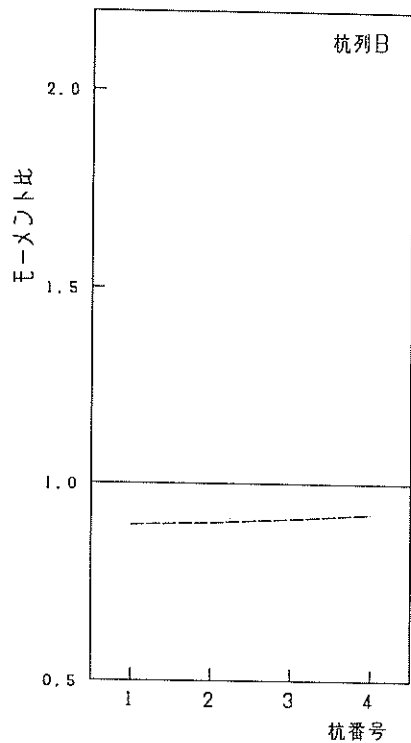
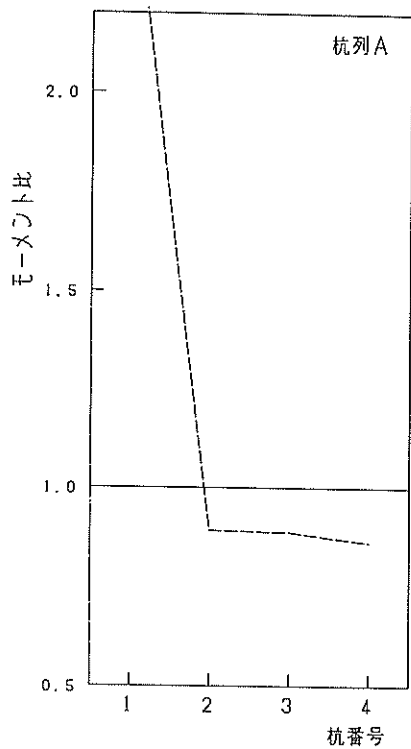


図-22 (2) 補修によるライニング下端モーメントの変化  
(補修前の値を基準, 施設C・接岸時)

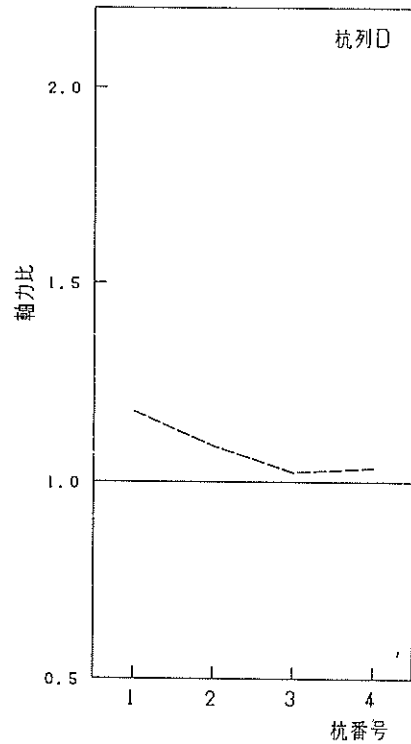
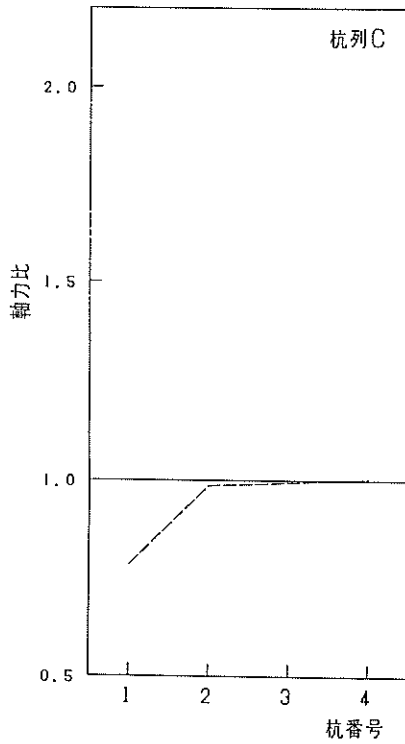
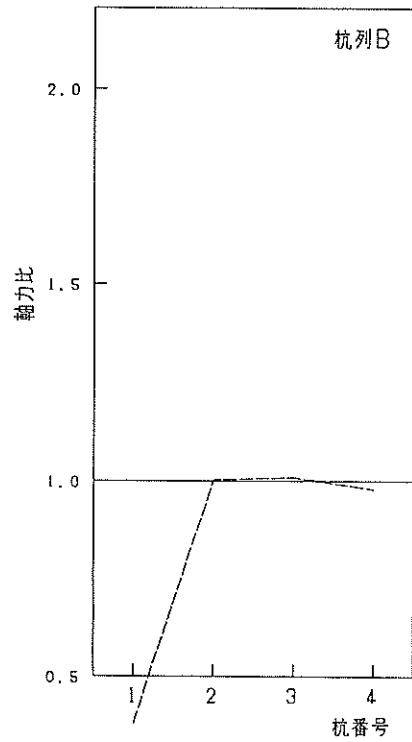
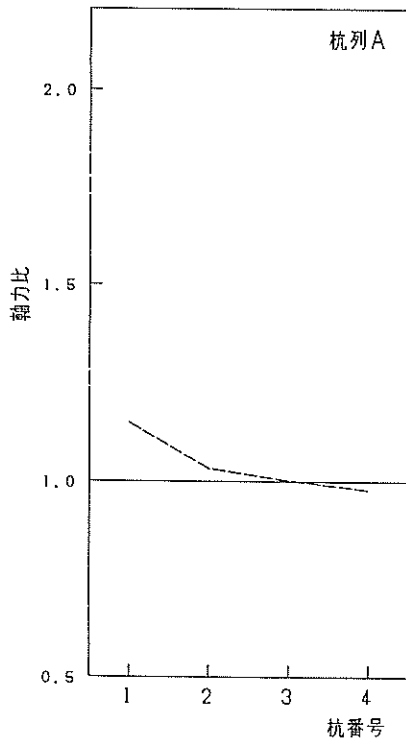


図-22 (8) 補修による軸力の変化(補修前の値を基準, 施設C・接岸時)



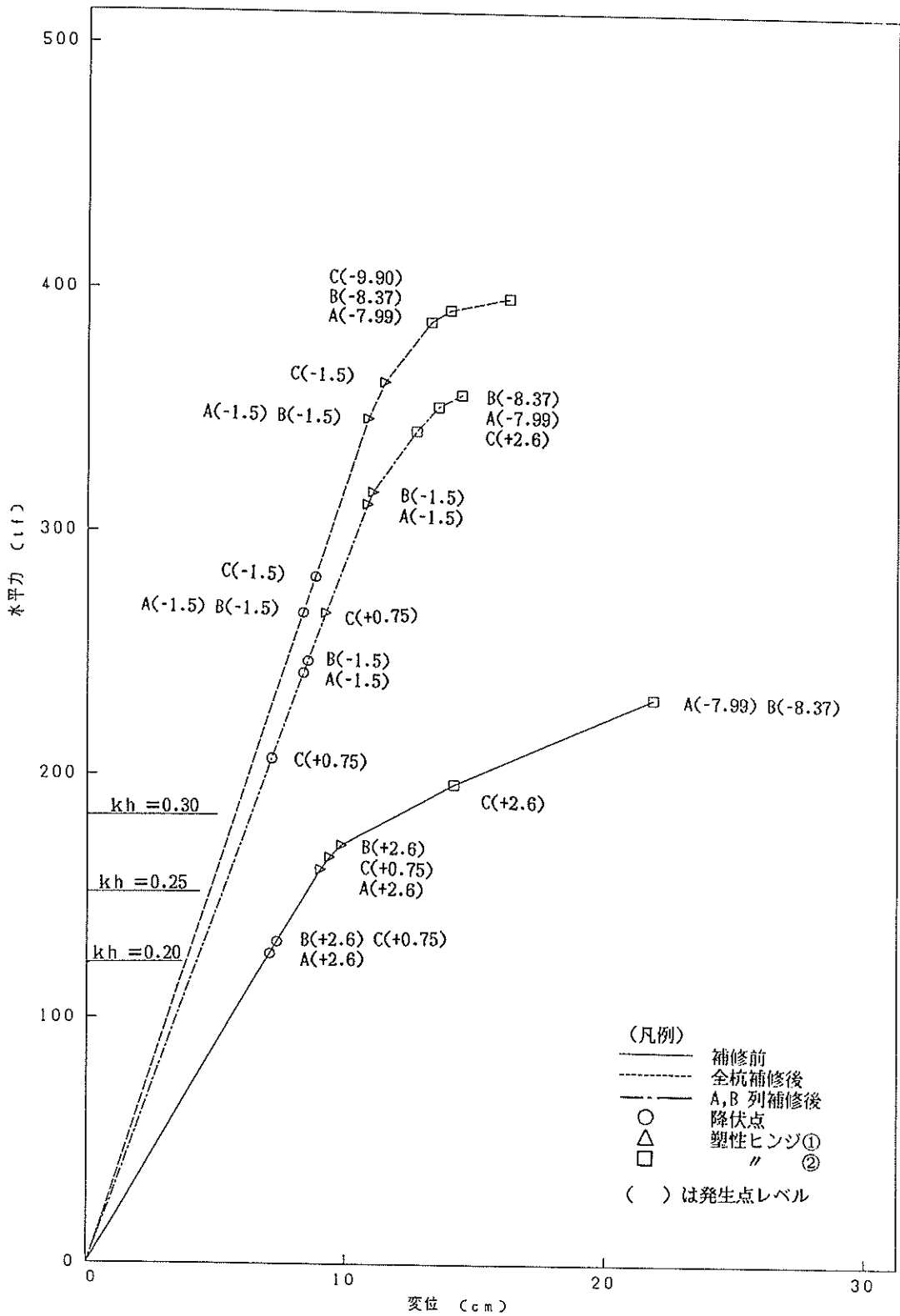


図-23 補修による破壊過程曲線の変化(施設B・地震時)

表一 9 (1) 補修による構造耐力の変化 (地震時, 海→陸)

上段: 耐力 (tf)  
中段: 該当震度  
下段: 変位 (cm)

	破壊基準の設定				
	許容応力度	降伏点強度	塑性ヒンジ (1)	塑性ヒンジ (2)	塑性ヒンジ (3)
補修前	100.8 (0.165) 5.63	126.8 (0.208) 7.08	161.8 (0.266) 9.03	186.8 (0.307) 12.22	196.8 (0.323) 14.18
全杭 補修後	191.5 (0.314) 5.99	266.8 (0.438) 8.34	346.8 (0.569) 10.84	371.8 (0.611) 12.12	386.8 (0.635) 13.27
杭列 A, B 補修後	147.8 (0.243) 5.11	206.8 (0.340) 7.15	266.8 (0.438) 9.22	336.8 (0.553) 12.30	341.8 (0.561) 12.71

(想定震度: 0.20)

- (凡例) 許容応力度: ある杭のある断面の応力が許容応力度に達した。  
降伏点強度: ある杭のある断面の応力が降伏点強度に達した。  
塑性ヒンジ (1): ある杭に1個目の塑性ヒンジが発生した。  
塑性ヒンジ (2): 全杭に1個目の塑性ヒンジが発生した。  
塑性ヒンジ (3): ある杭に2個目の塑性ヒンジが発生した。

表一 9 (2) 補修による構造耐力の変化 (接岸時)

上段: 耐力 (tf)  
下段: 変位 (cm)

	破壊基準の設定			
	許容応力度	降伏点強度	塑性ヒンジ (1)	塑性ヒンジ (3)
補修前	57.9 5.37	75.0 6.96	100.0 9.26	130.0 15.36
全杭 補修後	97.7 5.59	150.0 8.58	190.0 10.87	235.0 13.65
A, B列 補修後	80.5 5.40	135.0 9.05	170.0 11.40	205.0 13.42

(想定接岸力: 55 tf)

イニング下端とも0.6倍となった(水平分担力も同じ変化率である)。他の杭列の曲げモーメントは杭頭で1.3~1.4倍、ライニング下端で1.8~2.0倍となるが、ライニング下端での杭応力は許容限度内に収まった。このように杭群中で相対的に杭頭水平バネ定数の大きな杭を設けると、それらの杭への外力集中が起こることを利用しての、経済的な補修設計の可能性が見出せる。

#### (2) 接岸力に対する補強(施設C, 図-22参照)

杭列Aのブロック端の1本の杭だけをRCライニング等により補修した場合、その杭の曲げモーメントは杭頭で2.0倍、ライニング下端(DL-1.0m)で2.5倍と非常に大きな変化を示し、ライニング下端での杭応力は許容限度外となった。このように、一部の杭だけに剛性の大きな補修工を実施する場合、特に偏心外力に対する補強である場合には、極度な外力の集中が起こりやすいので、適切な位置にライニング下端を設けるか、または他の杭にもライニングを行い、応力の分散を図る方法を検討する必要がある。

#### (3) 補修による構造耐力の変化(図-23, 表-9参照)

図-23は施設Bの補修前、全杭頭RCライニング補修時、A・B列RCライニング補修時のおおの地震時について弾塑性解析を行った結果をまとめたものである。各マークはおおの杭列A~Cのうち、最初に杭応力が降伏点に達した杭、あるいは塑性ヒンジが発生した杭に対応している。

栈橋の破壊の判定基準として種々のものが考えられるが、表-9は5種の破壊基準を設定して、図-23を基に補修による構造耐力の変化を示したものである。表-9(1)によれば、許容応力度を破壊基準とした場合、補修前は耐力100.8tf(該当震度0.165)と想定震度0.20に耐えられない状態であったが、全杭頭補修時には191.5tf、杭列A・B補修時には147.8tfとそれぞれ補修前の約1.9、1.5倍の耐力を備えるようになる。

また、補修前の状態であっても、破壊基準として降伏点強度や塑性ヒンジ(1)を採用すれば、それぞれ震度0.20、0.25の地震時慣性力を上回る耐力を有することとなる。

表-9(2)は接岸時の耐力の変化を示す。施設Bの想定接岸力は55tfなので、現時点では許容応力度を破壊基準としても、これを上回る耐力を有する。

## 6. 結論

本研究により得られた主要な結論は、以下の通りである。

#### (1) 海域における杭の腐食速度、施設単位での腐食速

度の変化傾向及び腐食杭の強度評価法についてとりまとめた。主要な事項は次の通りである。

① 海域によって腐食速度が大きく変化するので、栈橋の設計や補修設計にあたっては当該海域での実績を参考にすべきである。また、施設単位での杭の平面的な位置による腐食速度の変化については、一定の傾向は見られないが、小範囲での大きな変動が見られる箇所があるので、綿密な腐食調査が必要である。杭軸方向における腐食速度の変化は明白なので、杭応力は変断面杭として算定する必要がある。

② 変断面杭の全体屈服に対する許容圧縮応力度の算定プログラムを開発し、他の便宜的な方法と算定結果の比較を行った。便宜的な方法は両方とも1~2割程度危険側の許容値を示すので、本法にしたがって算定するのが望ましい。

(2) 変断面杭栈橋の弾塑性解析プログラムを開発したので、その計算理論を説明した。

(3) 腐食パターンの代表的な三施設において、本法による弾性解析を行った。うち一施設については弾塑性解析を行い、許容応力度による耐力、極限強度に対する耐力を算定した。また、簡易な変断面杭モデルと一様断面杭モデル(ともに、法線平行方向に杭諸元の変化を考慮できない)でも弾性解析を行い、本法による計算結果を真値として、他モデルの計算誤差を評価するとともに、法線平行方向の腐食量のばらつきと杭応力度の変動の関係について考察した。

① 弾性設計における杭モデルの設定による計算誤差について

・三施設における軸力の計算誤差は、簡易変断面杭モデルでは±5%、一様断面杭モデルでは±10%と小さいが、杭頭モーメントの計算誤差は、簡易変断面杭モデルでは±10%、一様断面杭モデルでは±15%程度は避けられない。

・弾性解析における杭モデルの設定は、法線平行方向杭列の諸元を一定とすると(応力算定には実際の各杭の断面積、断面係数を用いても)±10%程度の杭最大応力の計算誤差を生じる場合があるので法線平行方向にも杭諸元を変化させることが可能なモデルとすることが望ましい。

② 腐食量変動率に対する杭応力変動率の感度

上記感度は鋼管の断面減少率により大きく変化し、断面減少率の増加により非常に敏感となる。得られた図表から、一部の杭の腐食データをもとに算定された栈橋杭応力に内在する誤差が推定可能である。

③ RCライニング等による補修前後の構造耐力の変化

を弾塑性解析により算定したところ、許容応力度による耐力は全杭補修時で約2倍となる。また、破壊基準を降伏点強度や塑性ヒンジ発生時点に設定することにより、それぞれ1.3、1.6倍となる（偏心のない水平外力に対して）。

(4) 剛性の高い補修工（RCライニング等）の設計に本法を適用したところ、以下の点に留意すべきことが分かった。

#### ① 地震時外力に対する補強

・RCライニングのような剛性の高い補修工を全杭頭に施工した場合、分担水平力はほとんど変化しないが、単位水平力により生じる杭頭モーメントが数割増加するため、杭頭モーメントは数割増加する。ライニング下端モーメントの増加率は杭頭のそれより大きい。

・同施設において、海側の杭列だけRCライニングを施工しなかった場合について計算を行ったところ、陸寄りの杭2列に荷重分担が集中するが、ライニング下端での杭応力は許容限度内に収まった。このように杭群中で相対的に杭頭水平バネ定数の大きな杭に外力が集中するのを利用することにより、経済的な補修設計の可能性がある。

#### ② 接岸時外力に対する補強

応力が許容限度内に収まらない1本の杭だけをRCライニング等により補修した場合、ライニング下端での杭応力は許容限度外となった。よって、ライニング下端についても杭応力が許容限度内となる位置を探す、あるいは他の杭にライニングして応力を分散させる方法を検討する必要がある。

## 7. あとがき

綿密な腐食調査の下に本法による応力算定を行えば、安全で合理的な栈橋の耐力評価あるいは補修設計が可能となる。また、杭の腐食調査が十分でないような場合でも、本報の成果により、どの程度の信頼性があるかが推定でき、設計に有効に役立つ。次に、全体座屈に対して便宜的に行われている検討方法の妥当性を評価した結果、危険側の許容値を与えるため、本法によれば合理的な設計ができる。今後の課題としては、腐食調査の適切な密度の算定法の開発、港研方式により杭頭水平バネ定数や曲げモーメントの算定を行うことによる計算精度の向上、動的解析への対応などが挙げられる。

（1988年11月30日受付）

## 参考文献

- 1) 清宮理（他3名）；栈橋に用いられた鋼管杭の腐食状況と残存強度、港湾技研資料No.593, 1987年9月, pp.6~8, pp.14~18.
- 2) 石渡友夫（他7名）；港湾構造物腐食評価手法について、港湾技研資料No.501, 1984年12月, p.13.
- 3) 沿岸開発技術研究センター；港湾構造物補修マニュアル, 1986年, pp.2-22~26.
- 4) チモシェンコ；挫屈理論, 仲ほか2名共訳, コロナ社, 1936年, pp.88~89.
- 5) 日本建築学会；鋼構造座屈設計指針, 1987年, pp.124~131.
- 6) 福井正幸（他3名）；鋼直杭式栈橋の極限状態を考慮した解析の自動化, 港湾技研資料No.447, 1983年6月, p.8.
- 7) 北島昭一（他5名）；港湾構造物設計基準作成にあたっての諸問題について（その2）, 港湾技研資料No.59, 1968年6月, pp.44~49.
- 8) 白石修章；港湾構造物の腐食を考慮した応力計算法について, 港湾技研資料No.524, 1985年6月, pp.18~21.

付録 くいの横抵抗（チャンの方法）

1. 概要

直ぐい式さん橋やドルフィンの建設において、くいの断面を変化させ、水平反力、変位等に有効に対処し、フレキシブルな構造物でしかも経済的なものを作るために、くいの横抵抗を計算する。横抵抗の計算はチャン（Y. L. Chang）の方法により、多層地盤変断面くいにも適用できる。

2. 計算理論

付図-1において地表面に座標軸の原点をとり、杭の深さ方向に  $x$  軸、杭のたわむ方向に  $y$  軸をとると、杭の満足すべき微分方程式として次式が得られる。

$$\text{地上部分 } EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} = 0 \quad \dots\dots\dots (\text{A.1})$$

$$\text{地中部分 } EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + P = 0 \quad \dots\dots\dots (\text{A.2})$$

2.1 チャンの仮定

(A.2)式においてチャンの仮定が成立すると、土の反力  $P$  が地盤の横方向たわみ  $y$  に近似的に比例して生ずるものとするので次式が得られる。

$$P = E_s y \quad \dots\dots\dots (\text{A.3})$$

$E_s = K_k \cdot B$  : 地盤弾性係数 (kgf/cm<sup>3</sup>)

$K_k$  : 横方向地盤反力係数 (kgf/cm<sup>3</sup>)

$B$  : 杭の幅 (cm)

(A.3)式を(A.2)式に代入すると(A.4)式を得る。

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_s y = 0 \quad \dots\dots\dots (\text{A.4})$$

2.2 多層地盤、変断面杭における弾性方程式の境界条件（付図-2参照）

(1) 地上部

弾性方程式

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = 0$$

一般解

$$\left. \begin{aligned} -h_1 \leq x \leq -h_2 \\ y_1 = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \\ -h_2 \leq x \leq 0 \\ y_2 = b_0 + b_1 + b_2 x^2 + b_3 x^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (\text{A.5})$$

境界条件

$x = -h_1$  において

杭頭固定の場合

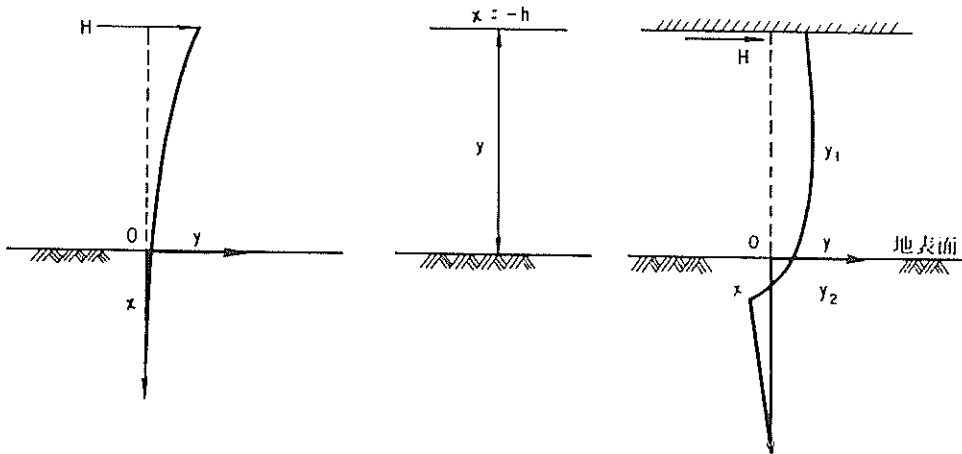
$$\left. \begin{aligned} y_1' = 0 \\ y_1''' = -H \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (\text{A.6})$$

杭頭自由の場合

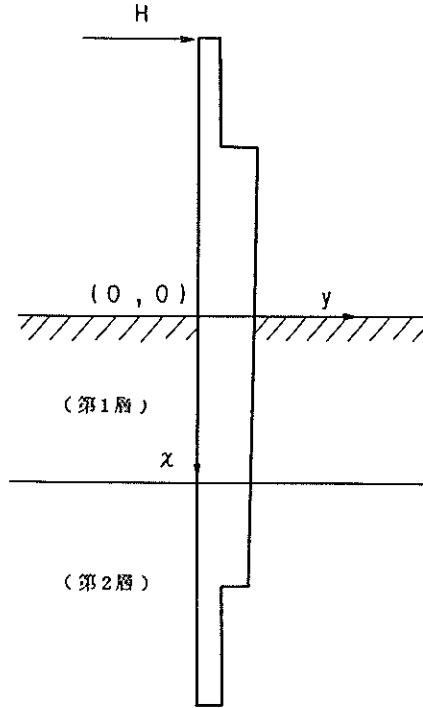
$$\left. \begin{aligned} y_1'' = 0 \\ y_1''' = -H \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (\text{A.7})$$

$x = -h_2$  において

$$y_1 = y_2$$



付図-1 座標系



付図-2 地層と断面変化に伴う境界条件

$$\left. \begin{aligned} y_1' &= y_2' \\ I_1 y_1'' &= I_2 y_2'' \\ I_1 y_1''' &= I_2 y_2''' \end{aligned} \right\} \dots\dots (A. 8)$$

(2) 地中部  
弾性方程式

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s i y = 0$$

一般解

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq x \leq h_3 \\ y_3 &= e^{\beta_3 x} (A_3 \cos \beta_3 x + B_3 \sin \beta_3 x) \\ &\quad + e^{-\beta_3 x} (C_3 \cos \beta_3 x + D_3 \sin \beta_3 x) \\ h_3 \leq x \leq h_4 \\ y_4 &= e^{\beta_4 x} (A_4 \cos \beta_4 x + B_4 \sin \beta_4 x) \\ &\quad + e^{-\beta_4 x} (C_4 \cos \beta_4 x + D_4 \sin \beta_4 x) \\ h_4 \leq x \leq h_5 \\ y_5 &= e^{\beta_5 x} (A_5 \cos \beta_5 x + B_5 \sin \beta_5 x) \\ &\quad + e^{-\beta_5 x} (C_5 \cos \beta_5 x + D_5 \sin \beta_5 x) \end{aligned} \right\} \dots\dots (4. 9)$$

ただし,  $\beta_i = \sqrt[4]{\frac{E_s i}{4 E I_i}}$

境界条件

$x = 0$  において

$$\left. \begin{aligned} y_2 &= y_3 \\ y_2' &= y_3' \\ I_2 y_2'' &= I_3 y_3'' \\ I_2 y_2''' &= I_3 y_3''' \end{aligned} \right\} \dots\dots (A. 10)$$

$x = h_3$  において

$$\left. \begin{aligned} y_3 &= y_4 \\ y_3' &= y_4' \\ I_3 y_3'' &= I_4 y_4'' \\ I_3 y_3''' &= I_4 y_4''' \end{aligned} \right\} \dots\dots (A. 11)$$

$x = h_4$  において

$$\left. \begin{aligned} y_4 &= y_5 \\ y_4' &= y_5' \\ I_4 y_4'' &= I_5 y_5'' \\ I_4 y_4''' &= I_5 y_5''' \end{aligned} \right\} \dots\dots (A. 12)$$

$x = h_5$  において

$x = \infty$  と出来る場合

$$\left. \begin{aligned} y_5 &= 0 \\ y_5' &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (A. 13)$$

有限長とする場合

$$x = h_s$$

$$\left. \begin{array}{l} I y_s'' = 0 \\ I y_s''' = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (A.14)$$

以上より未知係数に対して連立方程式を解き、未知係数を求め、変位量、たわみ角、曲げモーメント、せん断力を求めればよい。

港湾技研資料 No. 645

1989・3

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.