

港湾技研資料

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

No. 524 June 1985

港湾鋼構造物の腐食を考慮した応力計算法について

白 石 修 章

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 腐食直杭式横棧橋の応力計算	3
2.1 検討範囲と計算法	3
2.2 計算条件	7
2.3 計算法の違いが杭応力計算値へ及ぼす影響	12
2.4 杭の腐食度が杭応力に及ぼす影響	23
2.5 腐食杭の応力に大きく寄与する要因	26
3. 腐食矢板式係船岸の応力計算	35
3.1 検討範囲と計算法	35
3.2 計算条件	36
3.3 矢板の腐食と矢板の断面係数, 曲げモーメント, 応力, 及び変位の関係	38
3.4 軟弱地盤の矢板式係船岸の腐食と根入れ長安全率及びタイロッド張力	41
3.5 まとめ	43
4. 結 論	44
4.1 直杭式横棧橋	44
4.2 矢板式係船岸	45
5. あとがき	45
参 考 文 献	45
付録-A 直杭式横棧橋の腐食と各杭の鉛直荷重分担	46
付録-B 上部工はりと杭の曲げこわさと杭頭モーメント	46
付録-C 杭の横抵抗に影響する土層厚	49
付録-D 棧橋杭の応力成分と計算法影響係数	52
付録-E 棧橋杭の応力成分の全応力への寄与率	54
付録-F 単杭の腐食諸元と単位杭頭モーメント, 横方向ばね定数との関係	58
付録-G 杭の塑性的挙動を考慮した棧橋の応力解析	61

Study on the Stress Calculation Methods of Port Facilities Attending Corrosion

Nobuaki SHIRAIISHI*

Synopsis

Some stress calculation methods which are essential for estimation of corrosion of port facilities have been shown by ISHIWATA ¹⁾

This paper makes clear the tendencies of the those methods and effective factors to corroded member stress, calculating the pilestresses of open-type wharves with vertical piles damaged by corrosion.

- 1) Tomoo Ishiwata et.; Estimation System of Corrosion of Port Facilities; Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, No.501, Dec. 1984

* Member of Design Standard Laboratory, Design Standard Division

港湾鋼構造物の腐食を考慮した応力計算法について

白石修章*

要 旨

腐食を受けた港湾鋼構造物の健全度評価手法等に関するマニュアルとして「港湾鋼構造物腐食評価手法について¹⁾」(以降「腐食評価手法」という)が取りまとめられている。

本資料は、「腐食評価手法」の利用上の便を図ることを目的とし、「腐食評価手法」の作成過程で検討された直杭式横棧橋と矢板式係船岸の応力計算法に関する基礎データを取りまとめたものである。

その結果、直杭式横棧橋の腐食杭応力に対して、計算法の簡略化の影響が現れるのは棧橋に偏心水平荷重が作用する場合のみであり、偏心のない水平荷重が作用する場合には、腐食杭のモデル化の影響しか現れないこと。また、棧橋の腐食杭の応力に大きく影響する要因として、杭の最大腐食度(最大腐食箇所の腐食厚の初期肉厚に対する比)、鉛直方向腐食形態、計算法の簡略化、および腐食杭のモデル化の方法が挙げられること。矢板式係船岸については、矢板の腐食により、矢板の曲げモーメントはほとんど影響を受けず、腐食矢板の応力は、断面係数の値のみで定まること。また矢板の断面係数は、腐食度や、矢板横断面の腐食形態の影響を受けること。を明らかにした。

1. まえがき

港湾構造物の鋼材の腐食が、設計・施工時想定した以上に進行し、一部の施設では、機能に支障が出始めているものもある。このような問題に対処すべく、港湾構造物の腐食調査法、応力解析法、健全度の評価法等に関するマニュアルとして「腐食評価手法」が取りまとめられている。

本資料は、「腐食評価手法」の利用上の便を図ることを目的とし、「腐食評価手法」の作成過程で検討された直杭式横棧橋と矢板式係船岸の応力計算法に関する基礎データを取りまとめ、以下の点を明らかにしようとするものである。

直杭式横棧橋について

①「腐食評価手法」に示されている、数種の腐食杭の応力計算法の計算精度。

②最大腐食度(最大腐食量の初期肉厚に対する比)が杭応力に及ぼす影響の程度。

③杭の応力計算値に大きく影響する要因。

鋼矢板式係船岸について

①鋼矢板式係船岸の矢板の応力分布と注意すべき腐食調査箇所。

②矢板の断面係数の設定方法。

③軟弱地盤での矢板の腐食量と矢板の曲げモーメント計算値の関係。

なお、直杭式横棧橋については、「腐食評価手法」に、種々の杭の応力計算法が示されているが、本資料ではおもにその中の、「技術基準を準用する方法」を取りあげ検討を行うこととした。また現行設計法では許容応力度法を用いているので、応力計算の実施に当たっては、原則として杭の塑性的な挙動は考慮せず、降伏応力度を超える領域も弾性領域として取り扱うこととした。なお、杭が許容応力を超えた領域での棧橋の挙動を把握するため、杭の塑性的挙動を考慮した計算例を、参考として付録Gに載せた。

2. 腐食直杭式横棧橋の応力計算

2.1 検討範囲と計算法

腐食杭棧橋の健全度の検討を行うには、杭の腐食が棧橋の安全性に及ぼす影響を、あらかじめ明らかにしてお

* 設計基準部 設計基準研究室

く必要がある。そこで、腐食により栈橋の安全性に影響の出る項目を整理し「腐食調査手法」で検討対象となっている項目の選定根拠を示すとともに、本資料で検討を行う項目を整理することとする。

また、「腐食評価手法」に示されている、直杭式横栈橋の応力計算法のうち技術上の基準を準用する数種の方法の特徴を整理し、本資料で検討を行う計算方法を示す。

(1) 杭の腐食が栈橋の安全性に及ぼす影響

直杭式横栈橋の杭の腐食が、栈橋の安全性に及ぼす影響として、第一に杭そのものの耐力の低下があげられる。腐食による杭の耐力の低下は、許容応力度の低下（特に杭の全体座屈に対する許容応力度や局部座屈に対する許容圧縮応力度の低下、及び弾性せん断許容座屈応力度の低下）と、発生応力の増加として現れる。

腐食による杭の発生応力の増加は、杭に作用する断面力（曲げモーメントや軸力）の変化と、杭の断面諸元（断面係数、純断面積）の変化とが合成された結果として現れる。そのため腐食による杭応力の変化については、腐食による、断面力への影響と、断面諸元への影響の両面から検討する必要がある。

なお、杭の許容応力度の低下については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾（以下「技術基準」という）の第3編 2.3.3 鋼ぐい材、及び 2.3.8 許容応力度の割増しにより、検討すればよい。腐食の進行に従い、杭の全体座屈に対する許容応力度や、局部座屈に対する許容圧縮応力度の低下が大きくなるので、杭の健全度の評価に当たっては、注意を要する。

第二に、上部工はり部材に生じる応力への影響があげられる。はりの応力への影響は、杭の腐食により杭頭モー

メントが変化すること、及び杭の弾性沈下係数が減少することにより生じる。2.4及び2.5で述べるが、一般に杭の腐食が進行するにしたがい水平力による杭頭モーメントは小さくなる傾向がある。（付録-F 参照）そのため、通常の場合杭の腐食は上部工はりの応力に対し、安全側に影響すると考えられる。

第三に、杭の軸力に変化が生じることによる杭の鉛直支持力の変化があげられる。杭の腐食による軸力の変化は、水平荷重による杭頭モーメントと、鉛直荷重の各杭の分担力の変動により生じる。先にも述べたとおり、通常の腐食形態の場合杭頭モーメントは腐食により減少するため水平荷重による軸力は小さくなる。腐食による鉛直荷重の各杭の分担力の変動は、腐食による各杭の弾性沈下係数の相対的な変化により生じるが、通常の場合、栈橋1ブロック内の各杭の腐食量の差は小さいため、各杭の弾性沈下係数の減少量の差も小さい。そのため、各杭の鉛直荷重の分担力の変動はほとんど生じないと考えられる。（付録-A 参照）

以上から、本資料では腐食杭栈橋の安全性の検討は、杭そのものの耐力の低下、おもに腐食による杭応力の増大について、断面力の変化の面と断面諸元の変化の面の2側面から、行うこととした。

(2) 応力の弾性的取り扱い

本資料においては、原則として杭の塑性的挙動は考慮せず、降伏応力度を超える領域でも弾性領域と同様に取り扱い、応力計算を行うこととした。そのため、本資料の応力計算結果において、杭の降伏応力度を超える値が出ていても、それは、杭の塑性的挙動を考慮した値でないことに注意を要する。

表-1 比較計算の方法⁴⁾

Method No.	腐食杭のモデル化	計算の基本的考 え	水平分担力の算定法	水平力による軸力の算 定 性
Method 1.	一様断面杭	「技術基準」 を準用する。	厳密な方法 (港湾技研資料 No. 59)	厳密な方法 (港湾技研資料 No. 59)
Method 5.	変断面杭		厳密な方法 (港湾技研資料 No. 59)	厳密な方法 (港湾技研資料 No. 59)
Method 6.			厳密な方法 ^(注1) (港湾技研資料 No. 59)	簡略化法 (「技術基準」第8編)
Method 8.			簡略化法 (「技術基準」第8編)	簡略化法 (「技術基準」第8編)
Method 9.		有限要素法による。	—	—

(注1) 杭のねじれ応力を無視した。

③ 技術基準を準用する腐食杭の応力計算法

1) 技術基準の方法の仮定と、腐食直杭式横棧橋への適用性

「腐食評価手法」には、直杭式横棧橋の腐食杭の応力計算法として、技術基準を準用する方法と、その他の方

表-2 各計算方法による腐食杭に発生する最大応力の算定結果⁵⁾

Method No.	水平荷重条件 (偏心の有無)	最大応力 ^(注1) kg/cm ²		
		PILE 1	PILE 2	PILE 3
Method 1	無	1430 (1.07)	1370 (1.02)	1400 (0.94)
	有	2550 (1.07)	2210 (1.01)	2340 (0.98)
Method 5	無	1340 (1.00)	1340 (1.00)	1490 (1.00)
	有	2380 (1.00)	2180 (1.00)	2400 (1.00)
Method 6	無	1340 (1.00)	1340 (1.00)	1490 (1.00)
	有	2730 (1.15)	2420 (1.11)	2730 (1.14)
Method 8	無	1340 (1.00)	1340 (1.00)	1490 (1.00)
	有	3290 (1.38)	2870 (1.32)	2870 (1.20)
Method 9	無	1190 (0.89)	1270 (0.95)	1410 (0.95)
	有	2200 (0.92)	2180 (1.00)	2400 (1.00)

(注1) 最大応力の値は、第1位の値を4捨5入したものである。

(注2) ()内の数値は、各計算方法による最大応力のMethod 5による最大応力に対する比を示す。

法の代表として有限要素法が紹介され、表-1, 表-2, 図-1に示すとおり、それぞれの計算法による杭の応力計算例が示されている³⁾。

本資料では、計算法の簡便さ、及び実用性を考え、技術基準を準用する方法を取りあげ、その計算法の特徴について検討を行うこととする。

技術基準による棧橋の杭の応力計算法の特徴は、直杭式横棧橋を上部工はりと、それを支える杭からなるラーメン構造として取り扱い、上部工はりを完全剛体(曲げこわさ (EI) が無限大)と仮定する点にある。そのため、設計計算手順の上では棧橋の上部工の部分と、杭の部分とを、杭頭部で切り離して杭の応力計算を行うことができ、設計が簡便となり、設計実務上、秀れた方法であるといえる。

しかし、この方法の前提とする仮定は、棧橋の上部工はりの剛性に比べ、杭の剛性がかなり小さい場合でないとなしなくなる。杭の腐食は、杭の剛性を上部工はりの剛性に対し、相対的に小さくするため、技術基準の方法の前提としている仮定を満たす方向に影響する。そのため、腐食杭棧橋の応力計算に、技術基準の方法を準用することに問題はないと思われる。(付録-B 参照)

2) 技術基準を準用した腐食直杭式横棧橋の応力計算法

技術基準による直杭式横棧橋の応力計算は、一般に、図-2に示すとおり、次の手順で行われる。

棧橋に作用する外力の設定を行ったのち、

- ① 棧橋の各杭の、横方向ばね定数の算定。
- ② 各杭の水平力分担の算定。
- ③ 水平力により生じる杭頭モーメントの算定。
- ④ 水平力により生じる各杭の軸方向力の算定。
- ⑤ 各杭の鉛直力分担の算定。

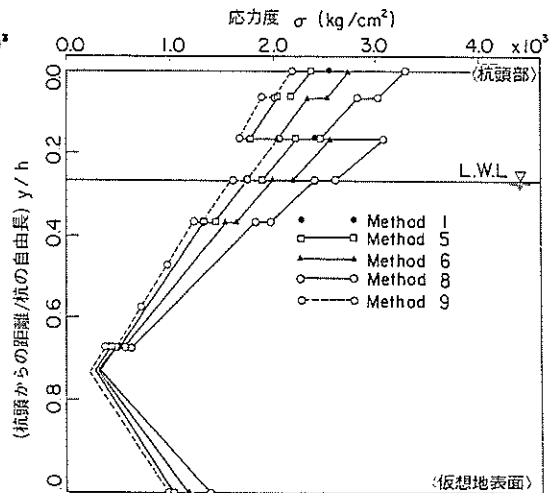
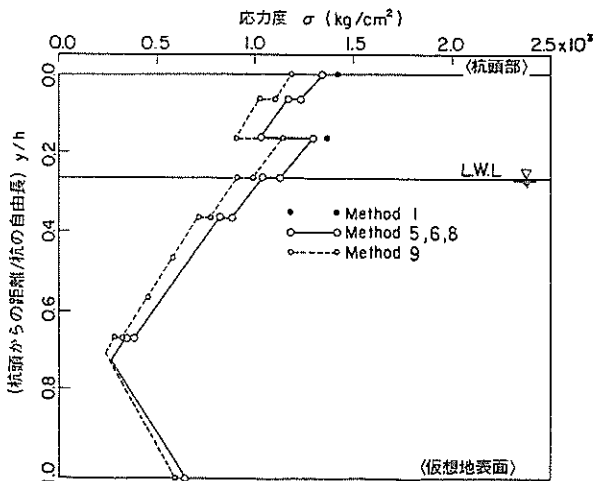


図-1 各種計算法による腐食棧橋杭の応力分布⁶⁾

⑥杭の曲げ応力、及び軸応力の算定。

「腐食評価手法」には、以上に示した計算の各ステップのうち、

⑦水平力分担の算定と、水平力による杭の軸力の算定については、杭の腐食の有無にかかわらず、技術基準に示されている簡略法と、その原式である厳密法のどちらでも、用いることができること。

⑧腐食杭を、鉛直方向に一樣な肉厚を持つ一様杭モデルとするか、杭の鉛直方向の腐食形態に応じ、鉛直方向に杭の肉厚と外径を変化させる変断面杭モデルとするかにより、杭の横方向ばね定数の算定や、杭の曲げモーメントの算定に用いる式の適用条件に違いがあること。

⑨以上から、腐食杭のモデル化の方法（一様杭モデルが、変断面杭か）、及び杭の水平分担力や軸力（以降「部材力」という）の算定法の簡略化の程度により、腐食杭の応力計算法として、表-3に示す8通りの組み合わせが可能であること。

が、示されている。これらの計算法の特徴を、各計算ステップごとに、表-4に示した。

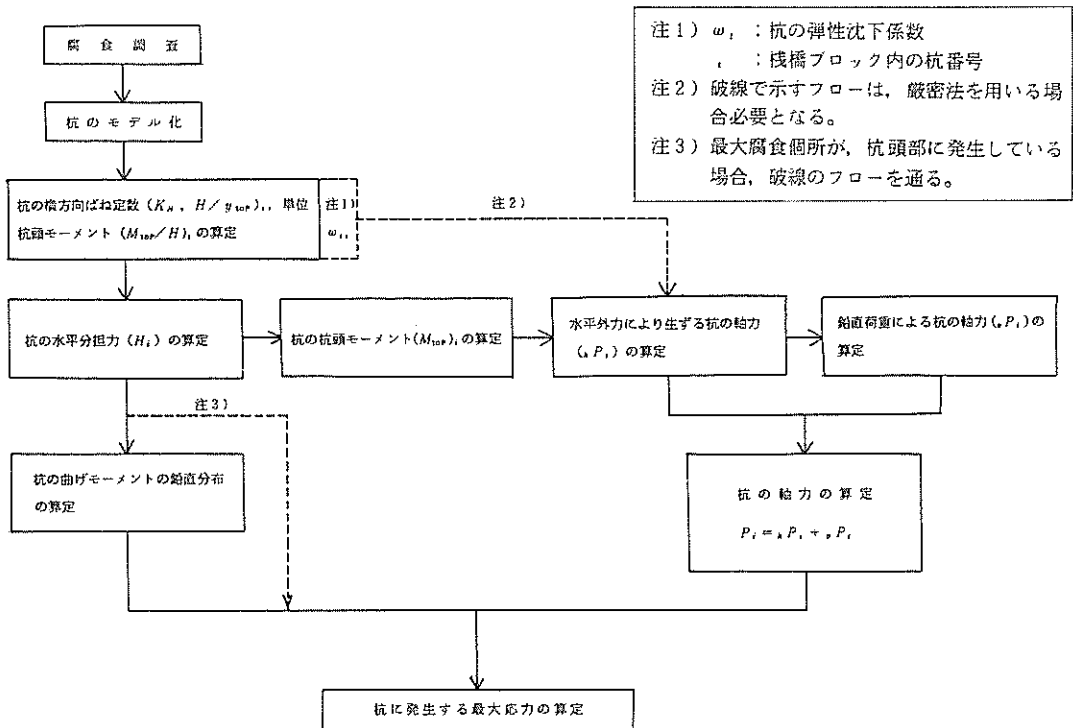
(4) 本資料で比較検討を行う杭の応力計算法

本資料では、表-3に示されている腐食杭の応力計算法のうち、Method 3, Method 7を除く、6通りの計算

表-3 技術基準を準用した直杭式横棧橋の腐食杭の応力計算法⁸⁾

Method No.	杭のモデル化	杭の水平分担力 H_i	水平力による杭の軸力 kP_i	備考
1	一様杭	○	○	
2		○	△	
3		△	○	
4		△	△	「技術基準」第8編 8.5.4の方法
5	変断面杭	○	○	
6		○	△	
7		△	○	
8		△	△	

○：厳密法による。
△：簡略法による。



注1) ω_{ii} : 杭の弾性沈下係数
 i : 棧橋ブロック内の杭番号
 注2) 破線で示すフローは、厳密法を用いる場合必要となる。
 注3) 最大腐食箇所が、杭頭部に発生している場合、破線のフローを通る。

図-2 「技術基準」を準用する直杭式横棧橋の腐食杭の計算手順⁷⁾

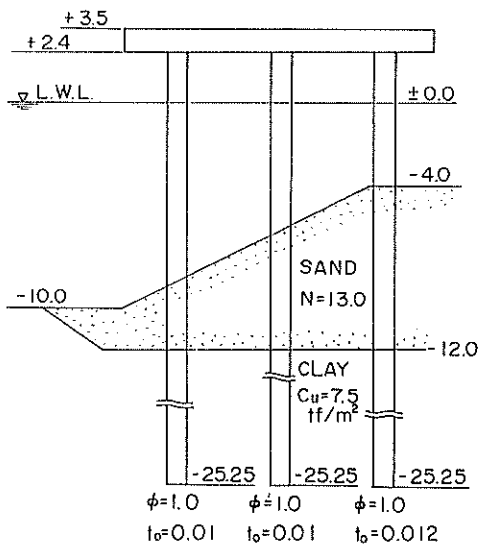
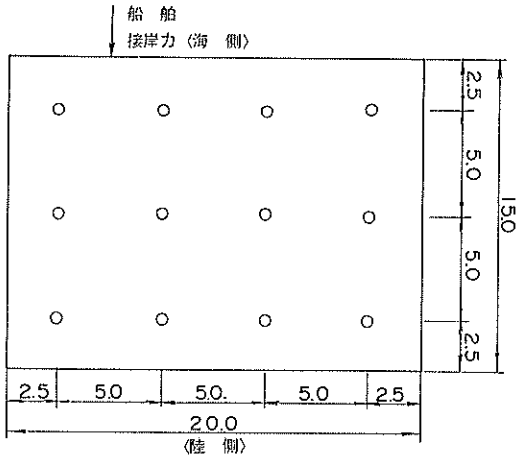


図-3 栈橋 No. 1 の諸元

法について比較検討を行うこととする。Method 3, Method 7については、計算が煩雑となる割に、計算精度がそれほど良くならないため実用的な方法ではないと考え、検討対象から除外した。また、偏心水平荷重作用時の、杭のねじれ応力の影響度合をみるため、Method 1とMethod 5については、杭のねじれ応力を考慮したが、Method 2, 4, 及びMethod 6, 8では、杭のねじれ応力を無視し、それぞれの計算結果の比較検討を行うこととした。

2.2 計算条件

(1) 検討対象栈橋諸元

応力計算の対象とした、No.1からNo.6の栈橋の諸元

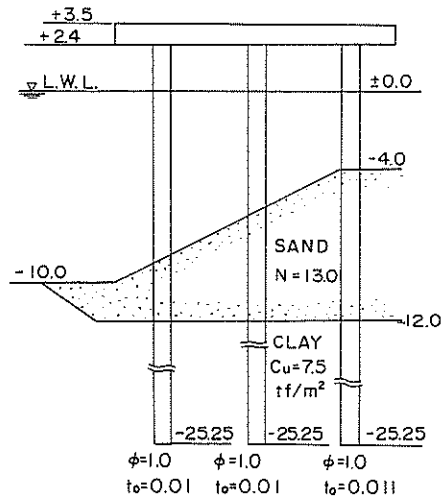
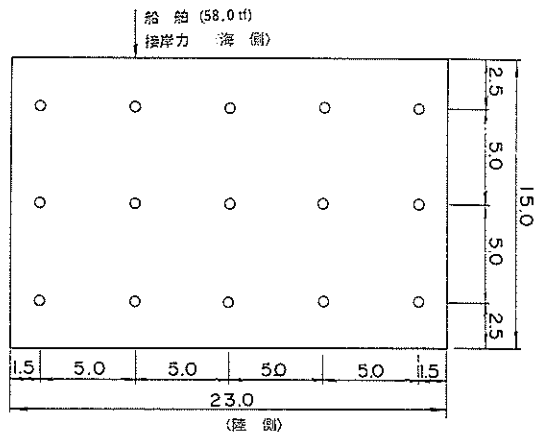


図-4 栈橋 No. 2 の諸元

を図-3～図-8に示す。これらの諸元は、既存の栈橋の中から、代表的な上部工ブロックの平面寸法と杭の配置、及び設計水深を選定し、本資料の検討対象栈橋として設定したものである。設定条件は表-5のケース01～06と同一とし、Method 1で設計した。腐食しは考えていない。なお、上部工の床版厚やりの断面諸元は、図-9に示すとおり、No.1～No.6のすべての栈橋で同一とした。

(2) 土質条件

土質条件は、すべての栈橋に対し、上層はN値13.0の砂層、下層は C_u が7.5 (tf/m²)の粘性土からなる二層地盤とした。砂層と、粘性土の境界は栈橋前面海底面下、2.0 (m)のレベルに設定した。

一様杭の横方向ばね定数算定の際には、横方向地盤反力係数は、N値13.0の砂層の値、 $k_h=2.0$ (kgf/cm³)

表-4 腐食直杭式横棧橋の

杭のモデル化 計算ステップ	一様杭モデル
(1) 棧橋各杭の横方向ばね定数の算定。	<p>チャンの解析解（技術基準 P. 8-62）を使用できる。</p> $K_{Hi} = \frac{12 EI_i}{(h_i + 1/\beta_i)^3} \dots\dots\dots \text{技基 (8.5)}$ <p>h_i : 杭頭から仮想地表面までの長さ。</p> $\beta_i = 4\sqrt{\frac{k_h D}{4EI}} \dots\dots\dots \text{技基 (8.3)}$ <p>EI_i : 杭の曲げこわさ。 k_h : チャンの横方向地盤反力係数。</p>
(2) 各杭の水平力分担力の算定。	<p><簡略法> 偏心水平力が作用したときの、ブロックの回転中心を、杭群の重心と仮定する。（技術基準 P. 8-62）</p> $H_i = \frac{K_{Hi}}{\sum K_{Hi}} \cdot H + \frac{K_{Hi} \cdot x_i}{\sum K_{Hi} \cdot x_i^2} e H \dots\dots\dots \text{技基 (8.5)}$ <p><厳密法> 偏心水平力が作用したときの、ブロックの回転中心は、力学的なつり合い式より算定する。（偏心しない水平力の場合は、簡略法による。）</p> $H_i = \sqrt{H_{xi}^2 + H_{yi}^2}$ $H_{xi} = \alpha K_{Hi} (y_i - Y_0)$ $H_{yi} = \alpha K_{Hi} (x_i - X_0)$ $X_0 = \frac{\alpha \sum K_{Hi} x_i + H_y}{\alpha \sum K_{Hi}}$
(3) 杭頭モーメントの算定。	<p>チャンの解析解（技術基準 P. 8-63）を使用できる。</p> $M_{\text{top } i} = \frac{1}{2} \left(h_i + \frac{1}{\beta_i} \right) H_i \dots\dots\dots \text{技基 (8.9)}$ <p>H_i : 杭 i の水平分担力。</p>
(4) 水平力による杭の軸力の算定。	<p><簡略法> （技術基準 P. 8-63）の式による。</p> ${}_h P_i = S_{i, i-1} + S_{i, i+1} = \frac{M_{i-1, i} + M_{i, i-1} - M_{i+1, i}}{l}$ <p>${}_h P_i$: 杭 i に水平力により生じる軸力。 $S_{i, i-1}$: i 番めの杭頭における $(i-1)$ 番めの杭側のはりの水平力によるせん断力。</p> <p><厳密法> 上部工はりを、杭を支点とする連続ばりとし、連続ばりの各支点上に、杭頭モーメントを作用させたときの、支点反力を求め、それを杭に作用する軸力とする。 なお、各杭の弾性沈下係数をあらかじめ求めておき、連続ばりの計算において支点の弾性</p>
(5) 杭の曲げモーメントの算定。	$M_i(y) = \frac{y}{h_i} (M_{\text{top } i} - M_{\text{Bottom } i}) - M_{\text{Bottom } i}$ <p>$M_i(y)$: 杭 i の杭頭から y の箇所の曲げモーメント。 y : 杭頭からの距離。 h_i : 杭頭から仮想地表面までの長さ。</p> $(M_{\text{Bottom } i}) = \frac{1}{2} \left(h_i - \frac{1}{\beta_i} \right) H_i \dots\dots\dots \text{技基解 (4.63)}$
(6) 杭の最大応力の算定。	$\sigma_{\text{Max } i} = \text{MAX.} \{ M_i(y) / Z_i(y) \pm P_i / A_i(y) \}$ $P_i = {}_h P_i + {}_v P_i$ <p>$\sigma_{\text{MAX. } i}$: 杭 i に発生する最大応力。 $M_i(y)$: 杭 i の杭頭から y の箇所の曲げモーメント。 P_i : 杭 i に作用する軸力。（杭の自重を考慮する場合には、杭頭からの距</p>

杭の応力計算法

変断面杭モデル	備考
<p>チャンの杭の横抵抗に関する弾性方程式（技術基準 P. 5-59）を、杭頭固定のもとで変断面杭として解き、杭頭変位を求め、次式より算定する。</p> $K_{Hi} = \frac{H}{(y_{top})_i}$ <p>H：杭頭へ作用させる水平力。 y_{top}：水平力 H が作用したときの杭頭変位。 （詳細は、腐食評価手法付録 4 参照）</p>	
<p>H：ブロックに作用する水平力。 x_i：杭 i の杭群重心からの距離。 e：水平力 H と杭群重心との距離。</p> <hr/> $Y_0 = \frac{\alpha \sum K_{Hi} y_i - Hx}{\alpha \sum K_{Hi}}$ $\alpha = \frac{Hx \sum K_{Hi} (Y - y_i) + H_y \sum K_{Hi} (x_i - X)}{\sum K_{Hi} (\sum K_{Hi} x_i^2 + \sum K_{Hi} y_i^2) - (\sum K_{Hi} x_i)^2 - (\sum K_{Hi} y_i)^2}$ <p>H_x, H_y：栈橋に作用する X 軸方向（法線直角方向）、Y 軸方向（法線平行方向）の荷重。 X, Y：荷重の作用点の座標。 x_i, y_i：杭 i の座標。 K_{Hi}：杭 i のばね定数。（ねじれ応力考慮していない） α：ブロックの回転角。（詳細は、港研資料 No. 59 pp. 40~49 参照）</p>	<p>一樣杭，変断面杭のどちらにも適用可。</p>
<p>チャンの杭の横抵抗に関する弾性方程式（技術基準 P. 5-59）を、変断面杭の条件で解き、$(M_{top}/H)_i$ を求め次式より算定する。実際には、$(M_{top}/H)_i$ は (1) の横方向ばね定数算定の際に、一語に求めることができる。</p> $(M_{top})_i = (M_{top}/H)_i \times H_i$ <p>H_i：杭 i の水平分担力。</p>	
<p>$S_{i, i+1}$：i 番めの杭頭における $(i+1)$ 番めの杭側のはりの水平力によるせん断力。 $M_{i-1, i}$：$i-1$ 番めの杭頭における i 番めの杭側のはりの水平力による材端モーメント。 $M_{i, i-1}$：i 番めの杭頭における $i-1$ 番めの杭側のはりの水平力による材端モーメント。 $M_{i, i+1}$：i 番めの杭頭における $i+1$ 番めの杭側のはりの水平力による材端モーメント。 $M_{i+1, i}$：$i+1$ 番めの杭頭における i 番めの杭側のはりの水平力による材端モーメント。 （詳細は、技術基準 pp. 8-63~8-64 参照）</p> <hr/> <p>沈下を考慮する。詳細は、（港研資料 No. 59 「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）」北島等，1968年，9月 pp. 27~pp. 36）参照。</p>	<p>一樣杭，変断面杭のどちらにも適用可。</p>
$M_i(y) = \frac{y}{h_i} (M_{top_i} - M_{Bottom_i}) - M_{Bottom_i}$ $M_{Bottom_i} = (M_{Bottom}/H)_i \times H_i$ <p>$(M_{Bottom}/H)_i$ の値は、チャンの杭の横抵抗に関する弾性方程式（技術基準 P. 5-59）を変断面杭の条件で解き算定する。実際には、(1) の杭の横方向ばね定数を算定する際に同時に求めることができる。</p>	
<p>離により変化する。） $Z_i(y), A_i(y)$：杭 i の杭頭から y の箇所の断面係数と純断面積。 ${}_i P_i, {}_v P_i$：杭 i に作用する水平力による軸力と、鉛直荷重による軸力。 一樣杭モデルの場合、使用する断面係数 $Z_i(y)$ と、純断面積 $A_i(y)$ は、モデル化を行う前の、腐食杭の鉛直方向の腐食形態を考慮して、定めなければならない。</p>	<p>一樣杭，変断面杭のどちらにも適用可。</p>

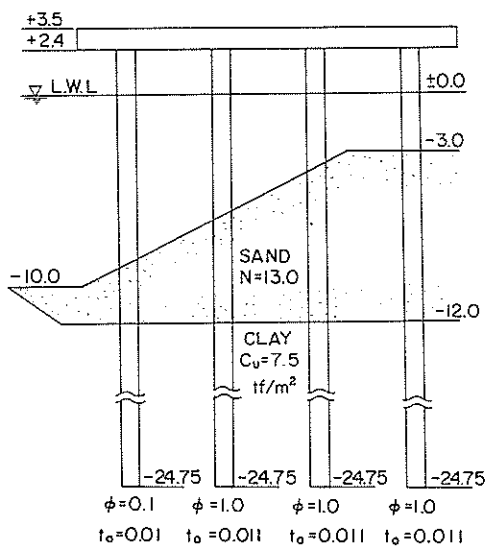
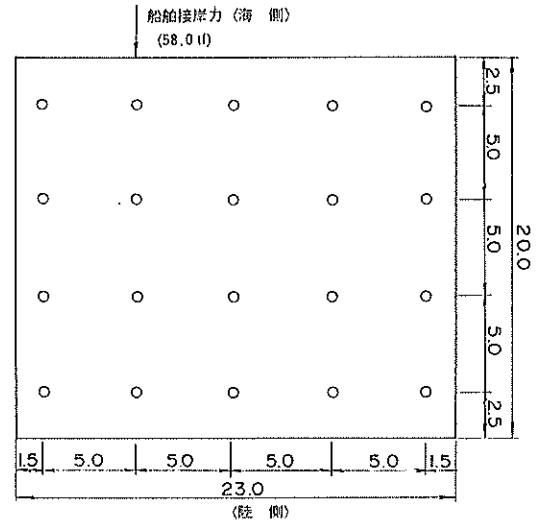
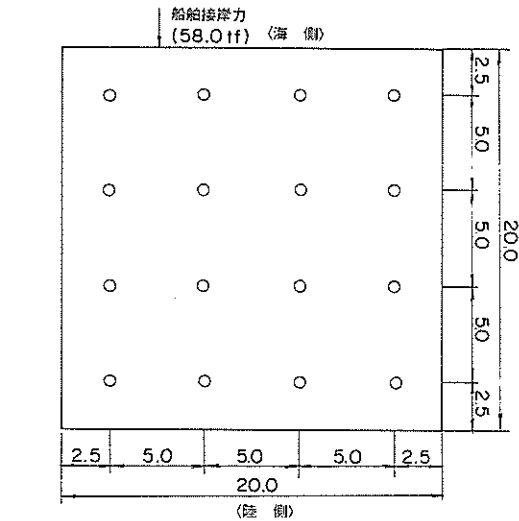


図-5 棧橋No.3の諸元

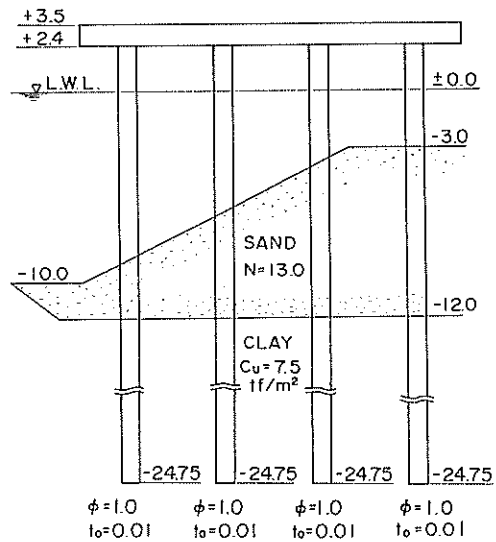


図-6 棧橋No.4の諸元

とした。

(3) 荷重条件

ブロックの回転を生じさせる偏心水平荷重の代表として船舶の接岸力を、偏心なしの水平荷重の代表として地震力を取り上げた。

1) 上載荷重

上載荷重は、等分布荷重とし、上部工ブロックの全面に一樣に作用させた。

- (ア) No.1~No.4の棧橋 常時 ; $q=3.0$ (tf/m²)
地震時 ; $q=1.5$ (tf/m²)
- (イ) No.5~No.6の棧橋 常時 ; $q=2.0$ (tf/m²)
地震時 ; $q=1.0$ (tf/m²)

No.1からNo.4の棧橋の上載荷重は通常の設計値より

やや大きめの値となっている。

2) 船舶の接岸力

船舶の接岸力は、図-3~図-8の平面図の矢印で示す位置に、偏心水平力として各棧橋に作用させた。

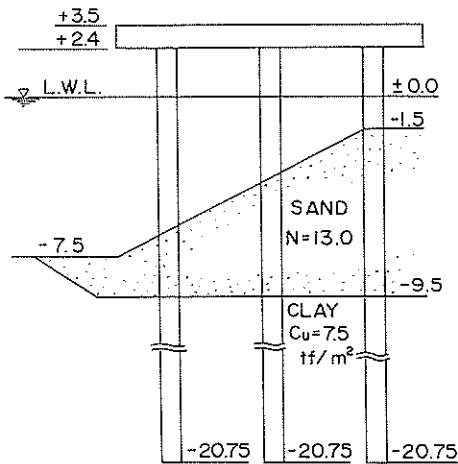
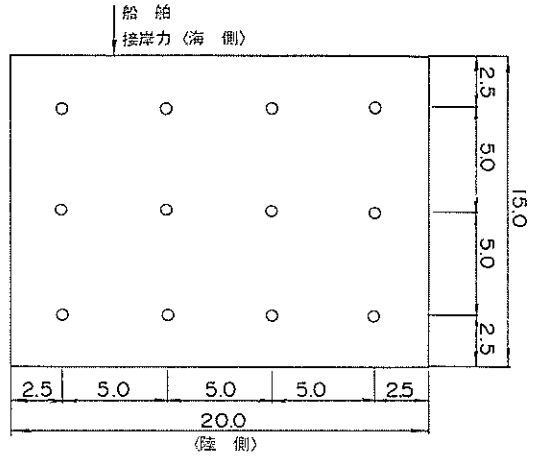
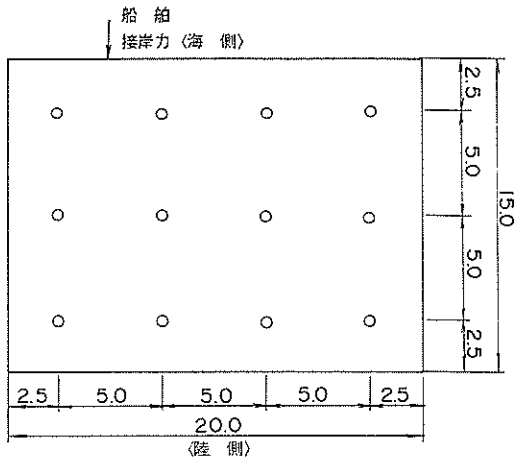
- (ア) No.1~No.4の棧橋 $H=58.0$ (ton)
- (イ) No.5の棧橋 $H=47.0$ (ton)
- (ウ) No.6の棧橋 $H=35.0$ (ton)

3) 地震力

すべての棧橋に対し、震度0.2を作用させた。地震力の作用方向は、棧橋法線直角方向に、陸側から海側方向と、海側から陸側方向の、2ケースを考えた。

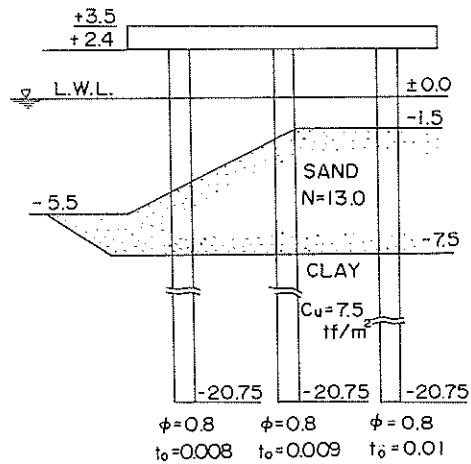
(4) 腐食杭のモデル化

1) 杭の鉛直方向腐食形態



φ=0.9 φ=0.9 φ=0.9
to=0.009 to=0.009 to=0.01

図-7 栈橋 No. 5 の諸元



φ=0.8 φ=0.8 φ=0.8
to=0.008 to=0.009 to=0.01

図-8 栈橋 No. 6 の諸元

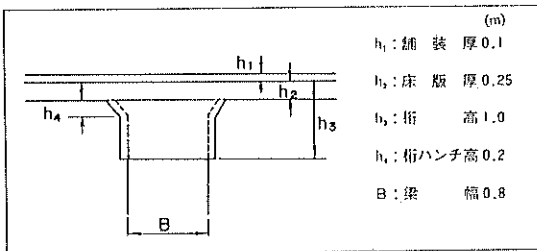


図-9 栈橋上部工の断面諸元

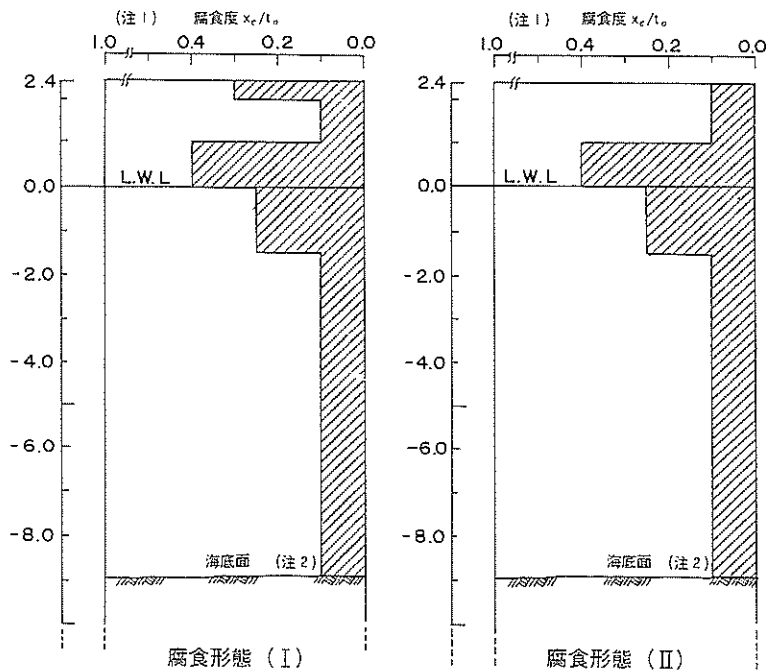
杭の鉛直方向の腐食形態として代表的な2つの腐食形態を設定した。

- (㊦) 腐食形態Ⅰ L.W.L.+0.0~+1.0(m)に最大腐食が発生し、L.W.L.+2.0~+2.4(m)の杭頭部に再び大きな腐食が発生するもの。「腐食評価手法」のP.13、図-5の腐食形態(B)にほぼ対応する。
- (㊦) 腐食形態Ⅱ 杭頭部の腐食量は小さいほかは、腐食形態Ⅰと同一なもの。「腐食評価手法」のP.13、図-5の腐食形態(A)に対応する。

なお、2つの形態とも地中部では、腐食ゼロとした。

2) 最大腐食量

杭の最大腐食度(杭の最大腐食部の腐食量の初期肉厚に対する割合)を、海側の杭の初期肉厚を基準にして設定し、中間杭、陸側杭とも、海側杭と同一の腐食量とした。また、栈橋法線方向の腐食量も一定とした。本節と



- 注1) 栈橋の各杭の腐食量は、海側杭の腐食量と同一とする。
 注2) 海底面の位置は、中間杭、海側杭の場合、変化する。
 注3) 斜線は腐食部を示す。

図-10 杭の腐食形態と変断面杭モデル(計算法検討ケース)

2.3 においては、特にことわらないかぎり、腐食度は、海側杭の初期肉厚を基準とした値を用いている。

3) モデル化

一様モデル杭として、杭頭から杭下端まで(地中部も含む)が最大腐食部の肉厚及び外径の杭を設定した。変断面モデル杭として、地中部の腐食はゼロ、海中部最小腐食度は0.1とし、「腐食評価手法」P.16の図-10～図-11の杭の分割数と計算精度の関係を参考とし、鉛直方向に5～6分割した杭を用いた。

(5) 計算ケース

1) 計算法の差の影響検討のためのケース

No.1～No.6のすべての栈橋を対象とし、各栈橋の最大腐食量は、各栈橋の海側の杭の初期肉厚の40.0%とし、以下の観点から表-5のとおりケース設定を行った。

- (ア)一様杭と変断面杭とでは、計算法の精度に、どのような違いが生じるか。
- (イ)腐食形態により、計算法の精度に違いが生じるか。
- (ウ)地震時(偏心なし)と、接岸時(偏心有り)により、計算法の精度に、どのような違いが生じるか。

2) 腐食度の影響検討ケース

No.1の栈橋に対し、Method 4.を適用し、杭の最大腐食度が応力へ及ぼす影響を検討する目的で、表-6に示すケース設定を行った。腐食形態IIを対象とし、最大腐食度は0.2, 0.4, 0.6, 0.8の4通り、図-11に示すとおり

り設定した。

2.3 計算法の違いが杭応力計算値へ及ぼす影響

腐食杭の応力の変化は、杭の曲げモーメントや軸力に代表される断面力の変化と、杭の断面係数や純断面積に代表される断面諸元の変化により生じる。断面力の変化は杭のモデル化や計算法の簡略化の影響を受ける。そこで腐食直杭式横棧橋の杭の応力計算値が、使用する杭の部材力の計算法により、どの程度影響を受けるか、検討を行った。(表-5)

(1) 計算法

検討対象計算法として、「腐食評価手法」に示されている技術基準を準用する方法の内から、表-7に示す6つの計算方法を選定した。

腐食杭の断面諸元は、杭の応力計算値へ直接大きく影響する。そのため腐食杭の横断面のモデル化の方法、並びに一様杭モデルの応力計算の際に、鉛直方向に変化する断面諸元のうちどの値を用いるか、が重要な問題となる。腐食杭の横断面のモデル化の方法については、2.5で検討することとし、ここでは、一様杭モデルでの計算において用いる断面諸元について述べる。

一様杭モデルの場合、杭の断面力(曲げモーメントや、軸力)の算定には、杭の鉛直方向の断面変化を考慮せず、各杭の代表断面(本資料では最大腐食箇所の断面とした。)の一様な杭を用いる。だが、杭応力の算定にあたり、使

表-5 応力計算精度検討ケース

CASE	腐食形態	栈橋No.	計算方法*	荷重(ケース1)		荷重(ケース2)		海側杭の最大腐食度	備 考	
				水平力	鉛直力	水平力	鉛直力			
01	0	1	Method 1~ Method 3	偏心水平力 58.0 (tf)	等分布荷重 3.0 (tf/m ²)	地震力 K=0.2	等分布荷重 1.5 (tf/m ²)	0.0	Method 4~Method 6は、 変断面杭に対する計算法である ため、腐食前の杭に適用でき ない。	
02		2		"	"	"	"	0.0		
03		3		"	"	"	"	"		0.0
04		4		"	"	"	"	"		0.0
05		5		偏心水平力 47.0 (tf)	等分布荷重 2.0 (tf/m ²)	地震力 K=0.2	等分布荷重 1.0 (tf/m ²)	0.0		
06		6		偏心水平力 35.0 (tf)	"	"	"	"		0.0
11	I	1	Method 1~ Method 6	偏心水平力 58.0 (tf)	等分布荷重 3.0 (tf/m ²)	地震力 K=0.2	等分布荷重 1.5 (tf/m ²)	0.4		
12		2		"	"	"	"	"		0.4
13		3		"	"	"	"	"		0.4
14		4		"	"	"	"	"		0.4
15		5		偏心水平力 47.0 (tf)	等分布荷重 2.0 (tf/m ²)	"	等分布荷重 1.0 (tf/m ²)	0.4		
16		6		偏心水平力 35.0 (tf)	"	"	"	"		0.4
21	II	1	Method 4~ Method 6	偏心水平力 58.0 (tf)	等分布荷重 3.0 (tf/m ²)	地震力 K=0.2	等分布荷重 1.5 (tf/m ²)	0.4	Method 1~Method 3は、 CASE11~CASE13 と同一 となるため除いた。	
22		2		"	"	"	"	"		0.4
23		3		"	"	"	"	"		0.4
24		4		"	"	"	"	"		0.4
25		5		偏心水平力 47.0 (tf)	等分布荷重 2.0 (tf/m ²)	"	等分布荷重 1.0 (tf/m ²)	0.4		
26		6		偏心水平内 35.0 (tf)	"	"	"	"		0.4

* 表-7の計算法番号に対応する。

表-6 杭の最大腐食度が杭応力に及ぼす影響検討ケース

CASE	腐食形態	栈橋No.	計算方法*	荷重(ケース1)		荷重(ケース2)		海側杭の最大腐食度	備 考
				水平力	鉛直力	水平力	鉛直力		
A1	II	1	Method 4	偏心水平力 58.0 (tf)	等分布荷重 3.0 (tf/m ²)	地震力 K=0.2	等分布荷重 1.5 (tf/m ²)	0.2	
A2								0.4	
A3								0.6	
A4								0.8	

* 表-7の計算法番号に対応する。

表-7 比較検討計算方法

Method No.	杭のモデル化	杭の水平分担力 H_i	水平力による杭の軸力	備 考
1	一モ 様デ ル杭	○	○	
2		⊙	△	
3		△	△	「技術基準」第8編8.5.4の方法
4	変断面 杭	○	○	
5		⊙	△	
6		△	△	

○：厳密法による(杭のねじれ応力考慮)

⊙：厳密法による(杭のねじれ応力無視)

△：簡略法による

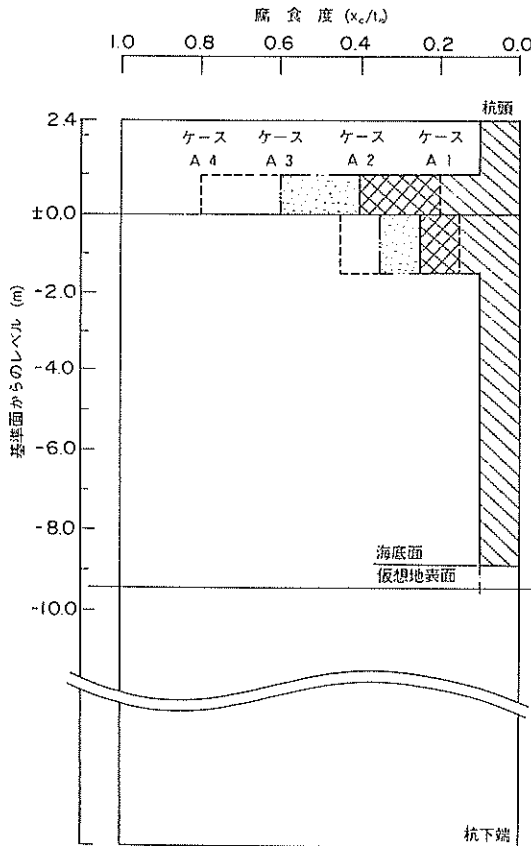


図-11 杭の腐食形態と変断面杭モデル
(最大腐食度検討ケース)

用する断面諸元とし、機械的にこの代表断面の諸元と、杭頭に発生する最大曲げモーメントを用いると、杭の応力計算値の誤差が大きくなることがある。そのため一様杭モデルの応力計算に使用する断面諸元や断面力は、杭の腐食形態を考慮して適切に設定する必要がある。表-8にCASE 11の杭の応力計算値と、使用した断面力 $M(y)$ 、 P と、断面諸元 $Z(y)$ 、 $A(y)$ の組み合わせを示した。

「腐食評価手法」では、

$$\sigma_{\text{Max}} = \text{MAX} \left[\left| \frac{M(y)}{Z(y)} \pm \frac{P}{A(y)} \right| \right] \quad \text{..... (1)}$$

$M(y)$ 、 P ; 一様杭モデルとして求めた y における杭の曲げモーメントと軸力。

$Z(y)$ 、 $A(y)$; モデル化前の杭の y における断面係数と断面積。

としている。⁹⁾

本資料では、「腐食評価手法」に示す方法、式(1)にしたがい応力計算を行った。

なお、先に述べたとおり、本資料で行った応力計算結果は、杭の挙動を弾性的に取り扱ったものであり、降伏応力度を越えた領域の応力計算値も、部材の塑性的挙動を考慮した値ではない。

(2) 計算法の違いの計算値への影響の解析方法

腐食杭の応力と変位の計算値は、大きく分けて栈橋諸元の影響、杭の腐食度の影響、及び計算法の影響の、3つの影響を受けている。そのため、計算法の影響を検討するには、計算結果から他の2つの影響を分離する必要がある。また、計算法の影響の程度を評価するには、他の2つの影響度合との、相対的な比較を行うのが有効な方法となる。

そのため、杭の応力(変位)の計算値を、次の式で表すこととし、

$$a = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot a_0 \quad \text{..... (2)}$$

a_0 ; 基準値

F_1 ; 栈橋諸元影響係数

F_2 ; 腐食度影響係数

F_3 ; 計算法影響係数

F_3 の値を計算法の違いによる影響(計算精度)を示す指標とした。

F_1 、 F_2 、 F_3 の算定方法を表-9にしたがい説明する。栈橋No.1~No.6に対し、Method 1~Method 6により算定した応力や変位の計算結果を(a_{0ij} 、 a_{ij} 、 a_{IIij})とする。これを式(2)の型で表すと、

$$a_{ij} = F_1(j) \cdot F_2(j) \cdot F_3(i, j) \cdot a_{011} \quad \text{..... (3)}$$

i : Method 番号を示す。

j : 栈橋番号を示す。

栈橋諸元影響係数 F_1 は、No. 1の栈橋のMethod 1による腐食前の応力や変位の計算値に対する、各栈橋のMethod 1による腐食前の応力や変位の計算値の比で表すこととする。

$$F_1(j) = a_{01j} / a_{011} \quad \text{..... (4)}$$

$F_1(j)$: No. j の栈橋の栈橋諸元影響係数

a_{01j} : No. j の栈橋の腐食なしのときの、Method 1による応力や変位の計算値。

a_{011} : No. 1の栈橋の腐食なしのときのMethod 1による応力や変位の計算値。

腐食度影響係数 F_2 は、各栈橋のMethod 1による腐食前の応力や変位の計算に対する、腐食後のMethod 4による応力や変位の計算値の比で表すこととする。

$$\left. \begin{aligned} F_2(j) &= a_{4j} / a_{01j} \\ &= a_{II4j} / a_{01j} \end{aligned} \right\} \quad \text{..... (5)}$$

$F_2(j)$: No. j の栈橋の腐食度影響係数

a_{4j} : No. j の栈橋のMethod 4による応力や

表-8 一様杭モデルの杭応力と使用断面力, 断面諸元の関係

(kgf/cm²)

荷重	断面諸元 (Z, A)							
	使用断面力	使用断面諸元	Z _{top} , A _{top} (杭頭)			Z _{zc=max} , A _{zc=max} (最大腐食部)		
			陸側杭	中間杭	海側杭	陸側杭	中間杭	海側杭
船舶接岸時	曲げモーメント・軸力	M _{top} P	1556.0 (1.0)	1324.0 (1.0)	1297.0 (0.963)	1752.0 (1.126)	1515.0 (1.144)	1514.0 (1.124)
		M _{zc=max} P				1492.0 (0.959)	1312.0 (0.991)	1347.0 (1.0)
地震時		M _{top} P	2666.0 (1.0)	2235.0 (1.0)	2091.0 (0.996)	3003.0 (1.126)	2557.0 (1.144)	2442.0 (1.163)
		M _{zc=max} P				2457.0 (0.922)	2124.0 (0.950)	2100.0 (1.0)

- ・ 栈橋 No. 1。
- ・ 腐食パターン I。
- ・ Method 1 (一様杭モデル)。
- ・ 表中, 上段は, 杭応力 (kgf/cm²)。

下段()内は, $\text{Max} \left\{ \left| \frac{M(y)}{Z(y)} \pm \frac{P}{A(g)} \right| \right\}$ に対する応力の割合。

表-9 影響係数算定法

腐食パターン	Method No.	栈橋番号						備考
		1	2	3	4	5	6	
腐食ゼロ	①	a ₀₁₁	a ₀₁₂	·	a _{01j}	·	a ₀₁₆	
	2	a ₀₂₁	·	·	·	·	·	
	3	a ₀₃₁	·	·	·	·	a ₀₃₆	
腐食形態 I	1	a ₁₁	·	·	·	·	a ₁₆	一様杭モデル
	2	·	·	·	·	·	·	
	3	·	·	·	·	·	·	
腐食形態 II	④	a ₄₁	a ₄₂	·	a _{4j}	·	a ₄₆	変断面モデル
	5	·	·	·	a _{ij}	·	·	
	6	a ₆₁	·	·	·	·	a ₆₆	
腐食形態 II	④	a _{II41}	·	·	·	·	a _{II46}	変断面モデル
	5	·	·	·	·	·	·	
	6	a _{II61}	·	·	·	·	a _{II66}	

$$a_{ij} = F_1(j) \cdot F_2(j) \cdot F_3(i, j) \cdot a_{011}$$

i : Method No. を示す。

j : 栈橋番号を示す。

F₁(j) = a_{01j}/a₀₁₁ : 栈橋諸元影響係数

F₂(j) = a_{4j}/a_{01j} : 腐食度影響係数
= a_{II4j}/a_{01j}

F₃(i, j) = a_{ij}/a_{4j} } 計算法影響係数
= a_{IIij}/a_{II4j} }

$$\bar{F}_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_2(j)$$

$$\bar{F}_3(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_3(i, j)$$

腐食度 0.4

変位の計算値（腐食形態Ⅰ）

$a_{II,j}$; No. j の栈橋の Method 4 による応力や

変位の計算値（腐食形態Ⅱ）

$a_{0,j}$; No. j の栈橋の腐食なしのときの

Method 1 による応力や変位の計算値

計算法影響係数 F_3 は、各栈橋に対し Method 4 の応力や変位の計算値に対する各計算法での応力や変位の計算値の比で表すことにする。

$$F_3 = (i, j) = \left. \begin{array}{l} a_{ij} / a_{4j} \\ a_{0ij} / a_{II,j} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$F_3(i, j)$; No. j の栈橋の Method i の計算法影響係数

a_{ij} ; No. j の栈橋の Method i による応力や変位の計算値（腐食形態Ⅰ）

$a_{II,j}$; No. j の栈橋の Method i による応力や変位の計算値（腐食形態Ⅱ）

a_{4j} ; No. j の栈橋の Method 4 による応力や変位の計算値（腐食形態Ⅰ）

$a_{II,j}$; No. j の栈橋の Method 4 による応力や変位の計算値（腐食形態Ⅱ）

なお、 F_2 、 F_3 については、栈橋 No. 1 ~ No. 6 の平均値と、標準偏差を求めた。

$$\bar{F}_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F_2(j)$$

$$\sigma_{F_2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (F_2(j) - \bar{F}_2)^2}$$

$$\bar{F}_3(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F_3(i, j)$$

$$\sigma_{F_3(i)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (F_3(i, j) - \bar{F}_3(i))^2} \dots\dots\dots (7)$$

N : 栈橋数 ($N = 6$, ただし No. 3 と No. 4 の栈橋は 4 列杭であるため中間杭については $N = 8$ となっている。)

(3) 解析結果

1) 栈橋諸元の影響 (F_1)

計算対象栈橋の最大応力（陸側杭）の、栈橋諸元影響係数を、表 - 10、図 - 12 に示した。

地震時の F_1 は、船舶接岸時の F_1 に比べ変動が小さい。これは、No. 1 ~ No. 6 の栈橋の杭の腐食前の諸元が、地震時の荷重条件のもとで定まっているためであり、地震力作用時には、すべての栈橋で、杭の最大応力が、許容応力度付近の値となるためである。船舶接岸時の F_1 については、各栈橋間で変動が大きい。

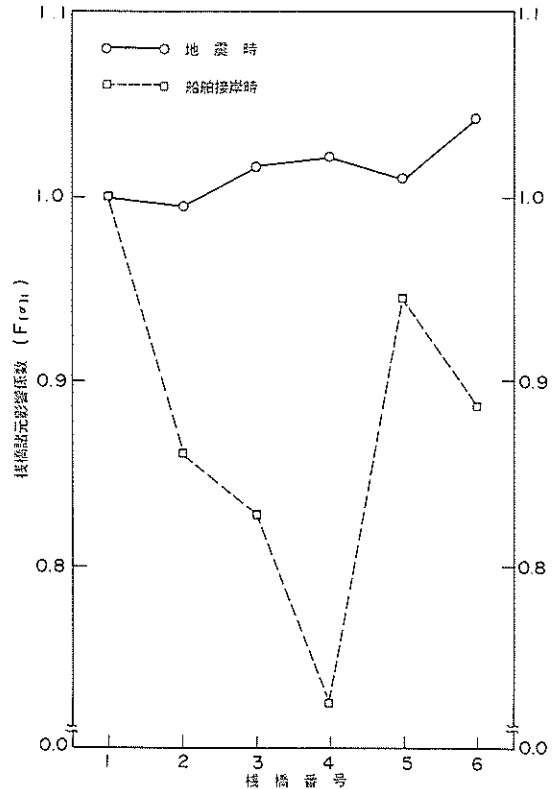


図 - 12 最大応力に関する栈橋諸元影響係数

表 - 10 腐食前の杭の応力と栈橋諸元影響係数 F_{σ_1} 単位 (kgf/cm²)

栈橋項目	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
地震時	1981.0 (1.0)	1971.0 (0.995)	2015.0 (1.017)	2024.0 (1.022)	2001.0 (1.010)	2066.0 (1.043)
接岸時	1154.0 (1.0)	993.0 (0.860)	955.0 (0.828)	837.0 (0.725)	1090.0 (0.945)	1024.0 (0.887)

- ・ () の値は、No. 1 の栈橋の値に対する割合（応力の栈橋諸元影響係数 F_{σ_1} ）を示す。
- ・ 応力は、1 ブロック内で最大のもの（陸側杭の値）を用いた。

表-11 腐食前の栈橋の変位と、栈橋諸元影響係数 F_1

単位 α : ラジアン
 y_{top} : cm

項目	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4		No. 5		No. 6	
	ブロック回転角 α	最大杭頭変位 y_{top}	ブロック回転角 α	最大杭頭変位 y_{top}	ブロック回転角 α	最大杭頭変位 y_{top}	ブロック回転角 α	最大杭頭変位 y_{top}	ブロック回転角 α	最大杭頭変位 y_{top}	ブロック回転角 α	最大杭頭変位 y_{top}
地震時	0.0	2.168	0.0	4.326	0.0	4.099	0.0	4.099	0.0	3.038	0.0	2.729
	-	(1.0)	-	(1.995)	-	(1.891)	-	(1.891)	-	(1.401)	-	(1.259)
接岸時	0.00106	2.168	0.00068	1.773	0.00061	1.443	0.00042	1.210	0.00075	1.459	0.00052	0.997
	(1.0)	(1.0)	(0.64)	(0.818)	(0.575)	(0.666)	(0.396)	(0.558)	(0.708)	(0.673)	(0.491)	(0.460)

・ () の値はNo. 1の栈橋の値に対する割合。(変位の栈橋諸元影響係数 F_{α_1} , F_{y_1})
 ・ y_{top} は、1ブロックの中で最大変位の杭の値を用いた。

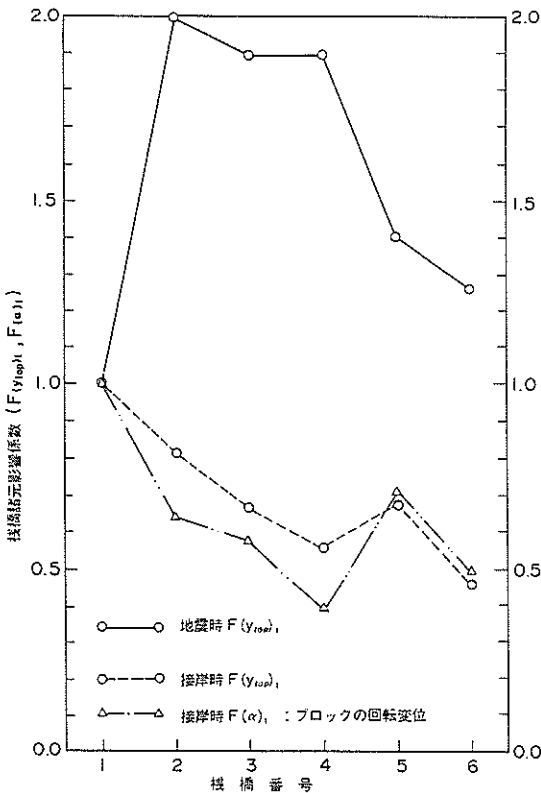


図-13 最大変位に関する栈橋諸元影響係数

表-11, 図-13に各栈橋の変位に対する栈橋諸元影響係数を示した。

栈橋ブロックに回転変位が生じない地震時の場合、各栈橋の杭頭変位は、No. 2の栈橋が最も大きく、No. 3, No. 4, No. 5, No. 6, No. 1の順に小さくなっている。杭の最大応力は各栈橋間で変動が小さくほぼ同一の値となっているが、変位に対しては、各栈橋間で差が大きい。

栈橋ブロックに回転変位の生じる船舶接岸時の場合、各栈橋の変位は、杭頭変位、ブロックの回転変位とも、変動が大きい。なお、最大応力と変位と各栈橋間で同様

の傾向が見られる。船舶接岸時の応力に対する F_1 の値は、偏心のない水平外力に対する杭の応力抵抗値がほぼ同一の栈橋に対する、偏心水平外力に対する杭の抵抗力を示す、と考えることができる。これらの値が大きくばらついていることは、No. 1~No. 6の各栈橋は、構造力学的に見て、変化にとんだものであり、一定の偏向性をもったものでないといえる。よって、 F_2 や、 F_3 の値が各栈橋間でばらつきが小さい場合、それは計算対象栈橋の設定の仕方が原因ではないことを意味する。

2) 腐食度の影響 (F_2)

応力についての腐食度の影響係数 ($F_2(j)$) の、No. 1 から No. 6 の栈橋についての、平均値と標準偏差を、表-12 と図-14 に示した。No. 3 と No. 4 の栈橋は 4 列杭であるため、中間の 2 列の杭の値を、中間杭として取り扱った。

陸側杭と中間杭と海側杭では、荷重条件、腐食形態に関係なく海側の杭が腐食の影響を最も大きく受け、腐食なしのときに比べ、応力が、腐食形態 (I) の場合、地震時 36.0%、船舶接岸時 42.0% 程度、腐食形態 (II) では、地震時 35%、船舶接岸時 44.0% 程度増大している。他方、陸側杭は、受ける腐食の影響は最も小さく、腐食形態 (I) のとき、地震時 30%、船舶接岸時 34% 程度、腐食形態 (II) では、地震時 18%、船舶接岸時 29% 程度の増大となっている。これは、栈橋ブロックの各杭列の腐食厚を、すべて海側の杭の腐食厚と等しくしたため、初期肉厚が小さい海側杭の最大腐食度が最も大きく、初期肉厚の大きい陸側杭の最大腐食度が小さくなったためと思われる。ただし、腐食杭の最大応力の値そのものは、陸側杭が最も大きいことに注意を要する。

地震時と船舶接岸時を比べると、3~10% 程度船舶接岸時の応力のほうが、腐食度の影響を大きく受けている。腐食形態による差は、杭頭部の腐食が大きい腐食形態 I のほうが、腐食の影響を強く受けている。また F_2 のばらつきは、腐食形態 II のほうが大きくなっている。

表-12 応力の腐食影響係数 F_{σ} の平均と標準偏差

腐食形態	地震時			接岸時(偏心)		
	陸側杭	中間杭	海側杭	陸側杭	中間杭	海側杭
I	1.296	1.332	1.358	1.340	1.385	1.416
	0.023	0.031	0.011	0.052	0.050	0.028
II	1.177	1.239	1.345	1.293	1.368	1.440
	0.072	0.080	0.041	0.080	0.075	0.045

- 上段：No. 1～No. 6の栈橋の F_2 の平均値
- 下段： # # の標準偏差
- 接岸時の杭は、荷重作用側の最外側の杭。

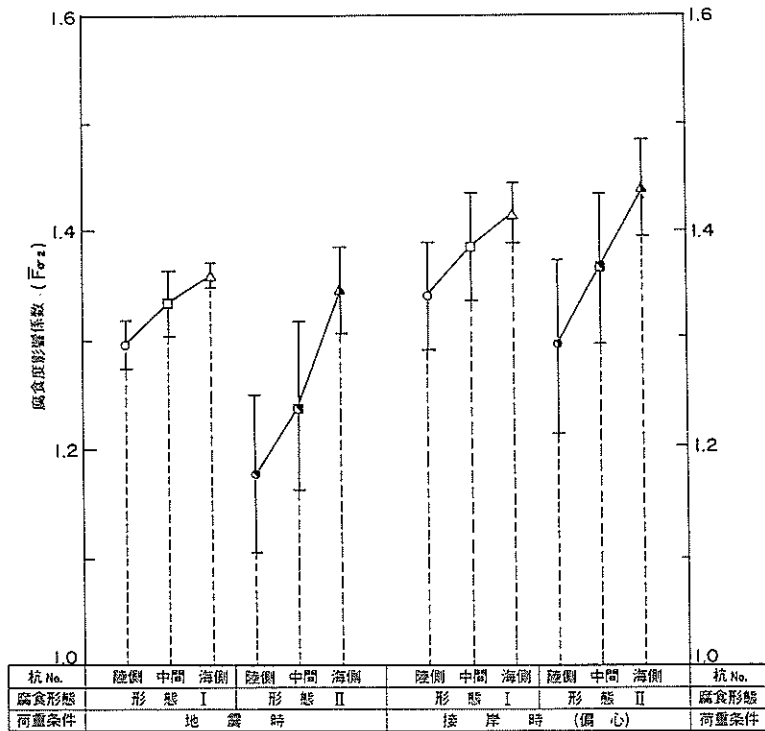


図-14 応力への腐食度影響係数 $F_{\sigma-2}$ (No. 1～No. 6の栈橋の平値と標準偏差)

変位に対する腐食度の影響係数 (F_2) の値を、表-13、図-15に示した。船舶接岸時の杭頭変位には、栈橋1ブロック内の杭のうち最も値の大きいものの値を用いた。杭頭水平変位量は腐食により、17～21%程度増大している。船舶接岸時のブロックの回転変位は腐食により20～23%程度増大しており、杭頭変位の増大率よりやや大きい。また、杭頭部の腐食量の大きい腐食形態Iのほうが腐食による変位の増大量が大きくなっている。

以上の腐食度影響係数の値は最大腐食度0.4の場合の値であり、最大腐食度の値が変化すると、当然これらの値も変化する。これについては、2.3で検討することにする。

3) 計算法影響係数 (F_3)

計算法影響係数の検討を行うまえに、もう一度、各計算法の違いについて整理しておく。

① Method 1とMethod 2とMethod 3、及びMethod 4とMethod 5とMethod 6の違いは、栈橋部材力算定法の簡略化度合の差である。Method 1とMethod 4は、最も厳密な計算法である。Method 2とMethod 5は、水平荷重による杭の軸力の算定時に簡略法を用いている。また、偏心水平力作用時、栈橋ブロックの回転により、杭に生じる「ねじれ応力」を無視している。Method 3とMethod 6は、Method 2、Method 5の簡略化に加え偏心水平

表-13 変位への腐食度影響係数 $F(\alpha)_2, F(y_{top})_2$ (平均値と標準偏差)

腐食形態	地震時		接岸時(偏心)	
	ブロック回転角 α	最大杭頭変位 y_{top}	ブロック回転角 α	最大杭頭変位 y_{top}
I	0.0	1.196	1.231	1.212
	0.0	0.013	0.0125	0.0098
II	0.0	1.172	1.198	1.188
	0.0	0.011	0.0165	0.0077

上段: No.1~No.6の栈橋の $F_{\alpha 2}, F_{y_2}$ の平均値。

下段: " " " " の標準偏差。

接岸時の F_{y_2} は、ブロックの中で最大の y_{top} の値により求めた。

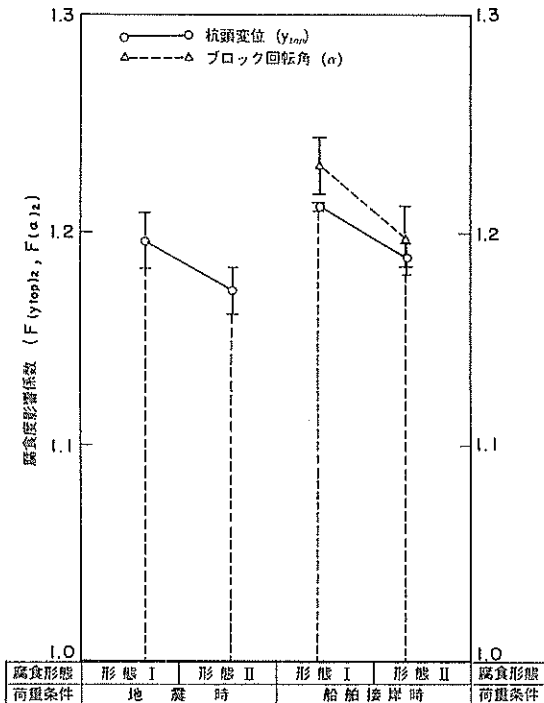


図-15 最大変位に関する腐食度影響係数 (No.1~No.6の栈橋の平均と標準偏差)

力作用時、つまり栈橋ブロックに回転変位が生じるときの各杭の水平力分担力の算定法として簡略法を用いている。なお、Method 3は技術基準の方法である。

②Method 1, 2, 3と、Method 4, 5, 6の差は、栈橋の各杭を一樣杭として取り扱うか、鉛直方向に断面が変化する変断面杭として取り扱うかの違いである。

⑦最大応力の計算法影響係数

陸側杭の応力についての計算法影響係数 ($F_3(i, j)$) を、No.1からNo.6の栈橋について平均したものを、標準偏差とともに表-14、図-16に示した。陸側杭の値

を選定したのは、陸側杭の最大応力が、最も大きくなるためである。

①地震時

(i)部材力算定法簡略化の影響

地震時について見ると、Method 2とMethod 3、及びMethod 5とMethod 6の値は、同一であり、計算法の違いの影響はなく、Method 1やMethod 4に比べ、0.6~1%程度大きな値となっている。これは、地震時には、栈橋ブロックの重心に水平力を作用させたため、ブロックに回転変位が生じない。そのため、ブロックに回転変位が生じる場合に対する計算法の簡略化の影響は、現れないためである。Method 1とMethod 2, 3、及びMethod 4とMethod 5, 6の差は、水平力による杭に生じる軸力の算定法の簡略化により生じたものであり、その差は非常に小さい値となっている。

(ii)杭のモデル化の影響

Method 1, 2, 3とMethod 4, 5, 6の F_3 の差は、腐食形態(I)で、5%程度、腐食形態(II)で、15%程度となっている。つまり腐食杭を、最大腐食部の肉厚の一樣杭として取り扱う、一樣杭モデルでは、変断面モデルに比べ5%~15%杭の最大応力値が大きくなっている。また、杭頭部の腐食量が、最大腐食箇所の値に比べ小さい腐食形態(II)の場合、腐食形態(I)に比べその増大量が大きい。

②船舶接岸時

(i)部材力算定法簡略化の影響

船舶接岸時には、Method 1とMethod 2とMethod 3、及びMethod 4とMethod 5とMethod 6における F_3 の値の間に、大きな差が生じている。これは、船舶の接岸力は、偏心水平荷重として作用させているため、栈橋ブロックが回転する場合の、部材力の算定法の簡略化の影響がすべて現れたためと考えられる。Method 1やMethod 4に比べMethod 2やMethod 5の値が、5%程度大きく

表-14 応力の計算法影響係数 F_{α_s} の平均値と標準偏差

腐食度	METHOD	地震時						接岸時 (偏心)						備考	
		腐食形態 (I)			腐食形態 (II)			腐食形態 (I)			腐食形態 (II)				
		陸側杭	中間杭	海側杭	陸側杭	中間杭	海側杭	陸側杭	中間杭	海側杭	陸側杭	中間杭	海側杭		
0.0	1	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	同	左	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	同	左		厳密法		
	2	1.0029 0.0002	1.0054 0.0147	1.0050 0.0005			1.067 0.034	1.035 0.015	1.026 0.011					簡略法 (技術基準法)	
	3	同上	同上	同上			1.194 0.072	1.169 0.064	1.099 0.035						
0.4	1	1.0507 0.0051	1.0286 0.0098	0.9926 0.0142	1.157 0.0567	1.103 0.059	1.003 0.022	1.035 0.006	1.021 0.020	0.996 0.009	1.075 0.039	1.036 0.032	0.993 0.007	厳密法	
	2	1.0563 0.0043	1.0290 0.0112	0.9999 0.0150	1.163 0.057	1.104 0.062	1.011 0.021	1.095 0.026	1.041 0.011	1.033 0.027	1.136 0.052	1.055 0.031	1.030 0.026	簡略法 (技術基準法)	
	3	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1.223 0.068	1.165 0.065	1.086 0.033	1.270 0.089	1.182 0.076	1.081 0.032		
	4	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	1.0 0.0	厳密法
	5	1.0066 0.0006	1.0008 0.0039	1.0077 0.0059	1.0087 0.0039	0.9998 0.0109	1.0055 0.0033	1.055 0.020	1.023 0.014	1.022 0.010	1.055 0.019	1.019 0.010	1.022 0.011	簡略法	
	6	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1.176 0.062	1.146 0.062	1.089 0.034	1.166 0.057	1.132 0.054	1.084 0.031		

上段: No. 1~No. 6の栈橋の F_2 の平均値。
下段: " " " " 標準偏差。

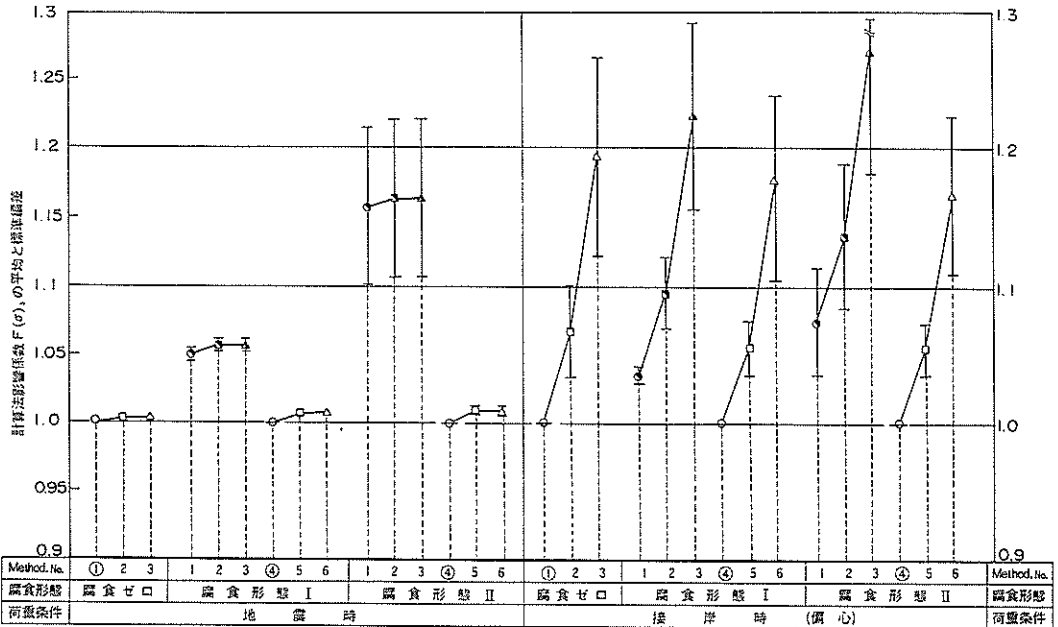


図-16 最大応力の計算法影響係数 (F_{α_s}) (No. 1~No. 6の栈橋の平均と標準偏差)

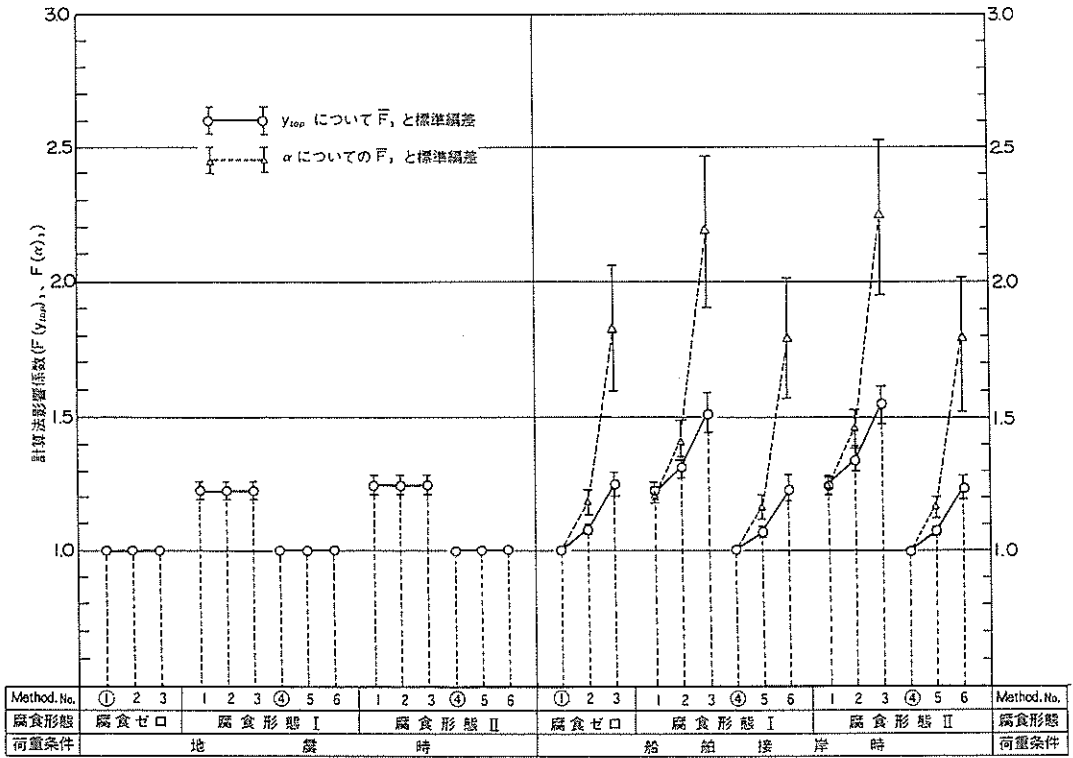


図-17 最大変位に関する計算法影響係数 (No. 1~No. 6の栈橋の平均と標準偏差)

23~30%程度差が生じている。これは、腐食杭のモデル化の違いによるもので応力の場合と異なり、計算法の簡略化の影響よりモデル化の影響のほうが、大きくなっている。

また、以上に共通する特徴として、応力に対する計算法の違いによる増大量に対し、杭頭変位の増大量のほうが大きくなっていることがあげられる。腐食栈橋の安全性の検討の際には、変位の許容値にも注意を配る必要がある。

(4) とりまとめ

本節で検討したおまな結果を以下にとりまとめた。

① No. 1~No. 6の栈橋の応力についての腐食度影響係数の平均値は、最大応力の値が最も大きい陸側杭で、地震時 1.2~1.3、船舶接岸時 1.3~1.35 となり、船舶接岸時のほうが大きくなった。また、腐食形態 (I) のほうが、腐食形態 (II) に比べ、腐食度の影響は大きい。標準偏差を見ると腐食形態 (I) のほうが腐食形態 (II) より小さく、 $\sigma_{F_2} = 0.02 \sim 0.04$ 程度である。

変位に対する腐食度影響係数の No. 1~No. 6の栈橋の平均値も応力と同様の傾向を示している。ブロックの回転変位のほうが杭頭水平変位より、腐食度影響係数が大

きくなっている。

② 地震時 (水平力偏心なしの場合) の No. 1~No. 6の栈橋の応力についての計算法影響係数の平均値を見ると、部材力算定法の簡略化の影響はほとんどなく、腐食杭のモデル化の影響のみ現れている。変断面杭モデルに比べ、一様杭モデルのほうが 5~15%、最大応力が大きくなる。

なお、栈橋間での計算法影響係数のばらつきは非常に小さい。

また、変位については、部材力算定法の簡略化の影響は、全くない。ただし一様杭モデルの場合、変断面杭モデルに比べ、23~25%大きくなっている。また、栈橋間の変位のばらつきも非常に小さい。

③ 船舶接岸時 (水平力偏心する場合) の No. 1~No. 6の栈橋の応力についての計算法影響係数の平均値を見ると、杭のねじれ抵抗を考慮しない影響が 4~5%、水平分担力算定法の簡略化の影響は 10~15%程度あり、水平力による軸力の算定法簡略化の影響は 1%以下と非常に小さい。杭のモデル化の影響は、4~9%程度生じている。なお、応力に関する計算法影響係数の標準偏差は $\sigma_{F_2} = 0.06$ 程度となっている。

変位についても、応力と同様の傾向が見られるが、応

力に比べ変位のほうが計算法影響係数が大きくなっている。

なお、本節での応力解析では、杭の塑性的挙動を考慮しなかった。そのため、各影響係数の値は杭の塑性的挙動を考慮した場合に比べ、若干異なった値となっていると思われる。

2.4 杭の腐食度が杭応力に及ぼす影響

(1) 計算条件

栈橋の腐食の進行度合と、杭の応力算定値の関係について、検討することを目的とし、以下の計算条件で解析を行った。(表-6)

- 栈橋諸元 栈橋 No.1 (図-3)
- 計算法 Method 4 (表-7)
- 腐食形態 腐食形態(II)をもとに、腐食度により、図-11に示すとおり最大腐食量を変化させた。

- 応力の取り扱い すべての領域を弾性的に取り扱った。

(2) 解析結果

1) 腐食度と杭応力の関係

栈橋の各杭の、杭頭部と最大腐食箇所の応力算定値と腐食度との関係を図-18と図-19に示した。船舶接岸時の値には、ブロック内での応力の最も大きい接岸力作用側の端列の杭(陸側杭,中間杭,海側杭)の値を用いた。

地震時、船舶接岸時ともに、杭頭部の応力は、腐食度の増大に従って減少しているのに対し、最大腐食箇所の応力は、腐食度の増加にしたがって増大している。これは、図-11に示したとおり杭頭部の腐食量は、最大腐食度の増大に関係なく一定値に設定したためである。つまり、本節の計算対象腐食杭の杭頭部の断面諸元は、最大

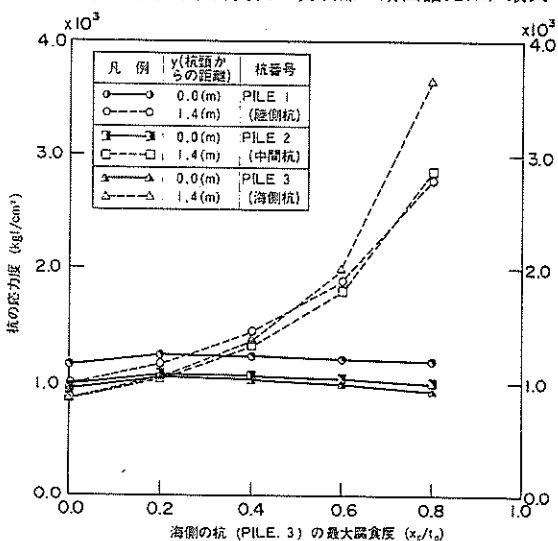


図-18 最大腐食度と杭頭部の最大腐食部の応力関係(船舶接岸時)

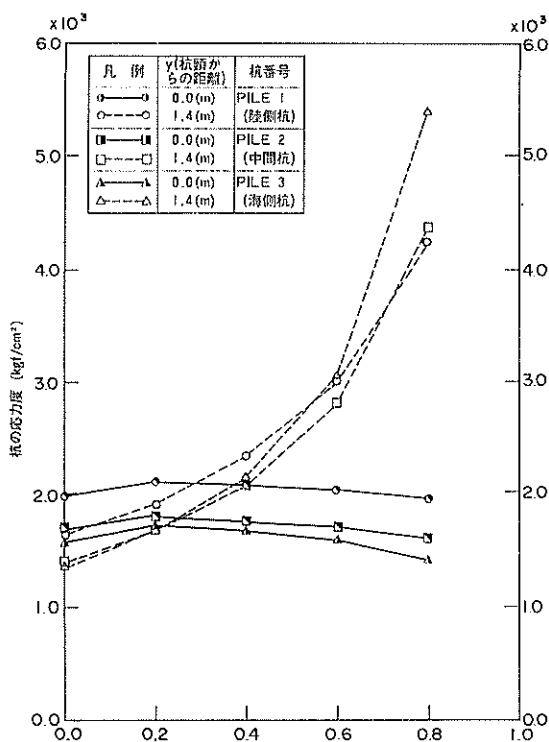


図-19 最大腐食度と杭頭部の最大腐食部の応力関係(地震時)

腐食度に関係なく一定とし、変化させなかったため、 $x_c/t_c \approx 0.0$ のときの杭頭部の算定値には、断面力の影響しか現れなかったためである。通常の腐食形態の場合、腐食の進行により、単位杭頭モーメント (M_{top}/H) が減少する。(付録-F参照)そのため、杭の水平分担力が大きく変化しなければ、杭の曲げモーメントは、腐食により小さくなる。

腐食度が0.2程度までは、杭頭部の応力の値のほうが大きい。腐食度が0.3程度より大きくなると、最大腐食箇所の応力の値のほうが大きくなっている。このように、腐食形態や腐食度、及び荷重条件により、杭の最大応力の発生箇所が鉛直方向に変化する。一様杭モデルにより腐食杭の応力計算を行う場合、使用すべき杭の断面諸元と、断面力に注意を要する。(表-8)

腐食度と各杭の最大応力値との関係を図-20と図-21に示した。腐食度が0.4程度までは、杭の最大応力の増加率は50%程度であるが、腐食度が0.5より大きくなると急激に杭応力が大きくなっている。また、地震時、船舶接岸時とも、海側杭の応力の増大率が大きくなっている。これは、先にも述べたとおり、

- ① 杭の初期肉厚が、陸側杭が最も大きく海側杭が最も

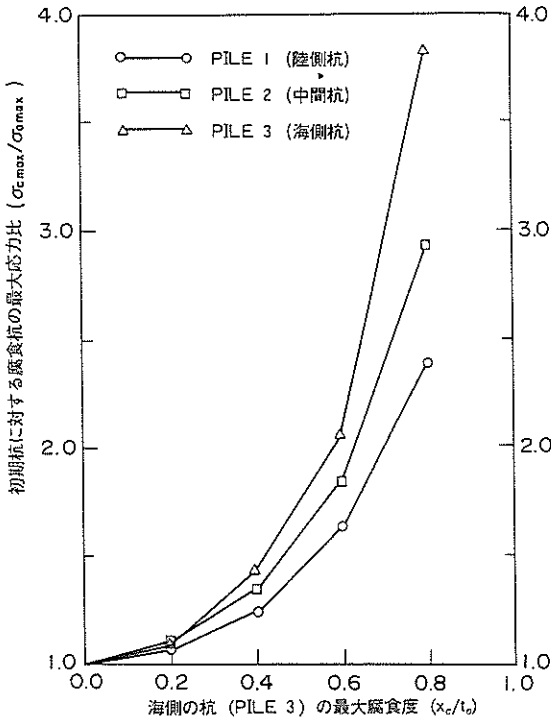


図-20 杭の最大応力と最大腐食度（船舶接岸時）

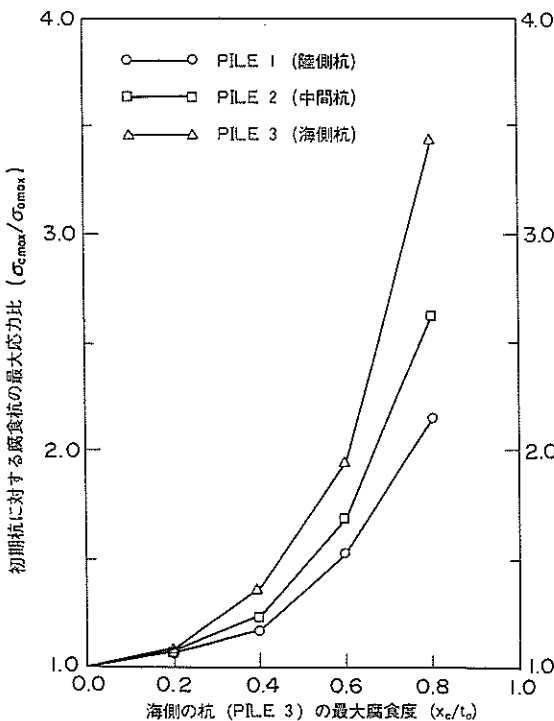


図-21 杭の最大応力と最大腐食度（地震時）

小さいこと。

②腐食度を海側杭の初期肉厚を基準とし定め、各杭の腐食量は同一としていること。

のため、陸側杭や中間杭の実際の最大腐食度は、図-20、図-21の横軸の値より小さいためである。

2) 計算法の違いによる杭応力への影響の最大腐食度への換算

2.2で検討した計算法の違いによる栈橋杭応力への影響を、杭の腐食度に換算して表すと、どの程度となるか検討する。

まず、2.2の計算条件と、本節の計算条件を合わせる必要がある。2.2では、杭の腐食度を0.4に固定し、陸側杭を取りあげ計算法による応力計算値への影響力について比較検討を行った。本節では、腐食形態が(II)の場合について腐食度の応力への影響の検討を行っている。そこで、腐食形態(II)の陸側杭について、腐食度0.4付近での計算法の差と腐食度の応力算定値への影響度について比較する。

2.2での計算法の違いによる応力への影響は、図-16に示したとおり杭のモデル化の差により、地震時15%程度、船舶接岸時7~10%程度であった。また、栈橋部材力算定法の簡略化の影響は、地震時で1.0%弱、船舶接岸時17~20%程度あった。またそれらを総合した、最も厳密な方法のMethod 4と、最も簡略な方法のMethod 3の差は、地震時16%程度、船舶接岸時27%程度であった。これらの値を、図-20と図-21の腐食度0.4の陸側杭の応力度比をもとに、最大腐食度に換算する。地震時について、杭のモデル化の影響15%は、腐食度の増分0.1程度、部材力簡略化の影響1.0%は、腐食度の増分0.01%弱程度となり、最も厳密な方法のMethod 4と最も簡略な方法のMethod 3の差16%は、腐食度の増分0.1%程度となる。船舶接岸時については、杭のモデル化の影響7~10%は、腐食度の増分0.05%程度、計算法簡略化の影響17~20%は、腐食度の増分0.1%程度、Method 4とMethod 3の差27%は、腐食度の増分0.14%程度となる。なお、これらの数値は、杭の最大腐食度が0.4付近での値である。よって腐食度が0.4より小さい場合には、計算法の違いの影響は最大腐食度の影響に比べ相対的に大きくなる。

3) 単位杭頭モーメント (M_{top}/H)、杭の横方向ばね定数 (K_H) と腐食度の関係

図-22と図-23に腐食度と、栈橋各杭の杭頭モーメントの関係を示した。腐食度の増大に従って、杭頭モーメントの値が減少し、その減少傾向は、腐食度の増大とともに大きくなっている。陸側杭と海側杭では、陸側杭

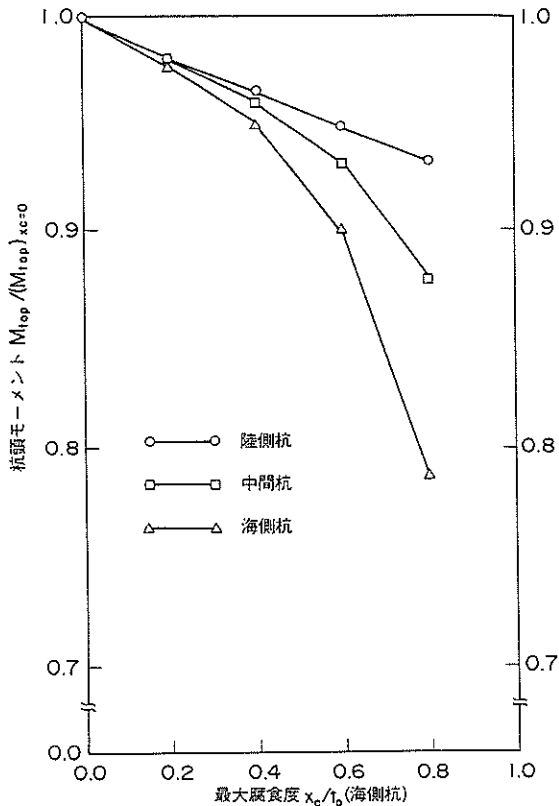


図-22 最大腐食度と杭頭モーメントの関係 (船舶接岸時)

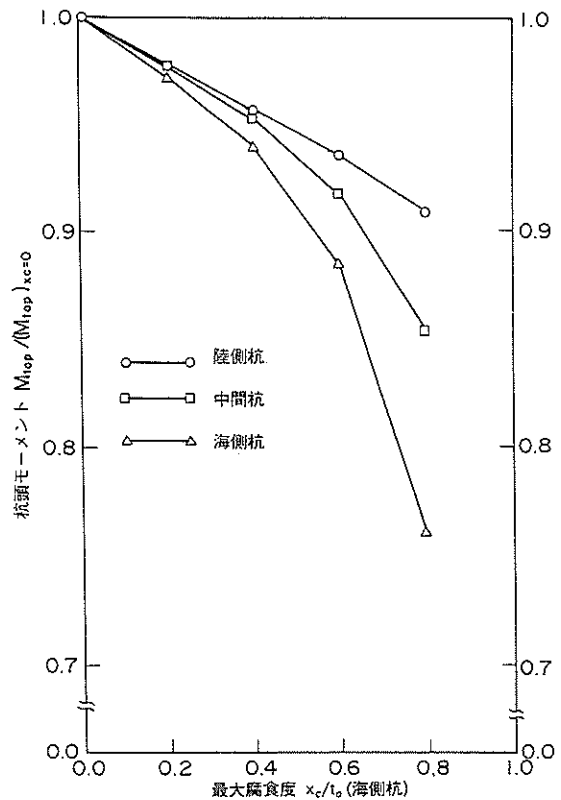


図-23 最大腐食度と杭頭モーメントの関係 (地震時)

の減少量が少ないのは、先に述べたとおり、陸側杭の実際の腐食度は、図中の腐食度より小さいためと考えられる。

腐食度の増大により、単位杭頭モーメントが減少することは、腐食の進行に伴い、水平力分担の変動が小さいと、杭に生じる曲げモーメントの値が減少することを意味する。(付録-F参照)

4) 単位杭頭モーメントと最大応力の関係

図-24に、各腐食度における単位杭頭モーメントと、杭の応力の関係を示した。最大腐食度の値については、地震時、船舶接岸時とも、単位杭頭モーメントと応力の間に、明確な相関が見られ、荷重条件の違いによる差は小さい。杭頭部については、既に述べたとおり、腐食度による応力の変化は小さいため、単位杭頭モーメントの相関性については不明確である。

図-25に、単位杭頭モーメントと横方向ばね定数の積と杭の応力との関係を示した。図-24とほぼ同様な結果になっているが、腐食度が小さい領域では、図-24の単位杭頭モーメントと応力の関係のほうが相関がよくなっている。

杭頭部の応力と単位杭頭曲げモーメントの関係を明らかにするため、腐食度0.2のときのそれぞれの値を基準として、両者の関係を示したのが図-26である。各杭ごとに応力と単位曲げモーメントの関係の傾きは異なっているが、個々の杭については明確な相関が見られる。杭頭部の場合、最大腐食度の増大に関係なく断面諸元を一定としたため、腐食による応力への影響として断面力への影響のみ現れている。そのため各杭の諸元(長さ、自由長等)の影響が腐食の影響に比べ相対的に強く応力へ影響したため各杭ごとに、図-26の傾きが異なると考えられる。

5) 断面諸元と腐食度の関係

腐食度と断面諸元(断面係数、純断面積)の逆数の関係を図-27に示す。腐食度の増大に伴い断面諸元の逆数(1/Z, 1/A)が増加し、その増加割合は、腐食度の増加にしたがい大きくなっている。また、断面積と断面係数の腐食による増加率の値はほとんど同じである。腐食度0.4のとき、1/Zと1/Aの値は、40~60%増加しており、単位杭頭モーメントの減少率4~6%の10倍

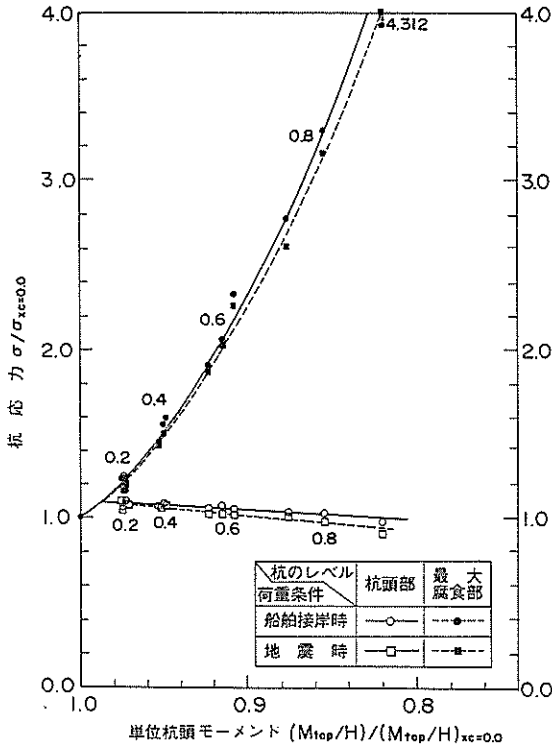


図-24 単位杭頭モーメントと杭の応力
(栈橋 No.1, 腐食形態Ⅱ)

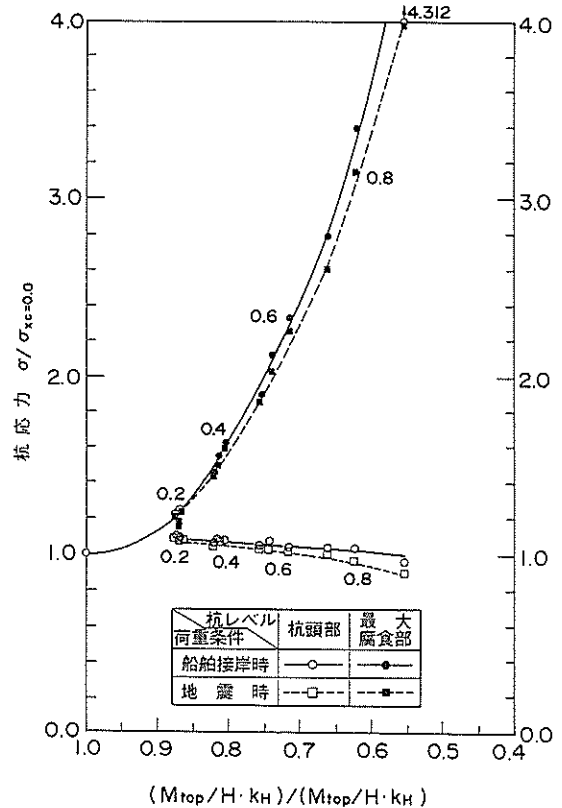


図-25 単位杭頭モーメントと横方向ばね定数の積と杭応力 (栈橋 No.1 腐食形態Ⅱ)

程度になっている。

断面係数と杭応力の関係を図-28に示した。地震時と船舶接岸時では、若干の違いがあるが、ともに両者の間に明確な相関が見られる。

(3) まとめ

本節で検討したおもな結果を以下にとりまとめる。

①通常の腐食形態の場合、単位杭頭モーメントは、腐食の進行にしたがって減少する。そのため、杭の水平分担力が大きく変化しなければ、杭の曲げモーメントは腐食により小さくなる。

②腐食形態や腐食度、荷重条件により杭の最大応力発生箇所が鉛直方向に変動する。

③最大腐食度の増大により、杭の最大応力が増加する。その増加度合は、最大腐食度が大きくなるに従って大きくなる。

④前節で検討した計算法の違いの応力への影響量を、最大腐食度 0.4 付近の腐食度に換算してみた。地震時の杭のモデル化の影響 15% は、杭の腐食度 0.1 程度に相当し、船舶接岸時の杭のモデル化の影響 7~10% は、腐食度 0.05 程度、計算法の簡略化の影響 16% は腐食度 0.1 程度に相当する。

⑤単位杭頭モーメントや断面係数の逆数と、杭の最大応力との間に明確な相関が見られた。

⑥腐食が、杭の断面力(曲げモーメントや軸力)に及ぼす影響に比べ、断面諸係数へ及ぼす影響のほうが、はるかに大きい。

2.5 腐食杭の応力に大きく寄与する要因

腐食直杭式横栈橋の杭の応力の計算値に大きく影響する要因として、

①杭の腐食諸元(腐食度、腐食箇所のレベル、腐食箇所の長さ、腐食形態)

②腐食杭の断面諸元(腐食杭の純断面積、断面係数)の設定方法

③腐食杭のモデル化の方法(一様杭モデル、変断面モデル)

④栈橋部材力の計算法の簡略化の度合

⑤栈橋の諸元(ブロック形状、杭の配置等)

⑥地盤条件

が挙げられる。これらの要因のうち、①、②、③については杭の腐食により生ずる腐食固有の問題であるが、他

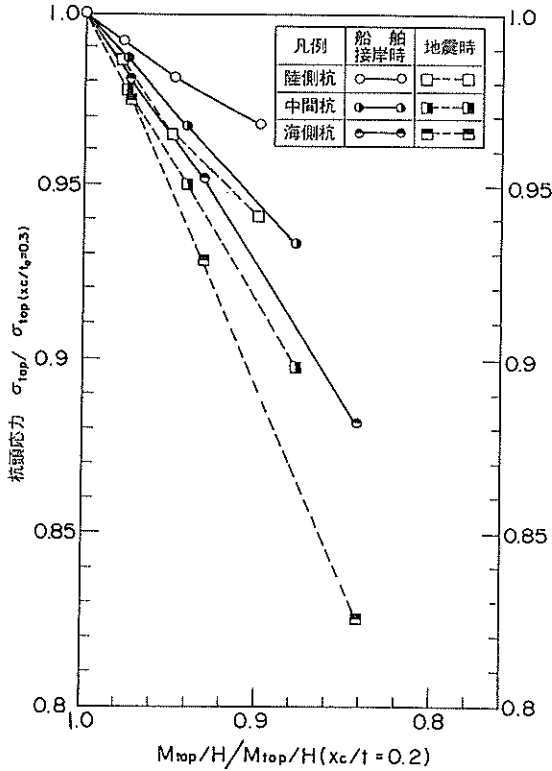


図-26 単位杭頭モーメントと杭頭応力
(栈橋 No. 1, 腐食形態 II)

の④, ⑤, ⑥は, 杭の腐食の有無に関係なく直杭式横栈橋の杭の応力計算値に影響する要因である。これらの要因のうち,

- ①の腐食度の影響, 腐食形態の影響,
- ③の腐食杭のモデル化の方法の影響,
- ④の栈橋部材力の計算法の簡略化の影響,
- ⑤の栈橋諸元の影響,

については既に検討を行った。本節では,

- ①の杭の腐食諸元の影響,
- ②の腐食杭の断面諸元の設定方法の影響,
- ⑥の地盤条件の影響,

について検討したのち, ①~⑥の各要因の腐食杭の応力計算値に及ぼす影響の度合について解析することとする。

(1) 腐食諸元の部材力への影響

栈橋の各杭の応力に対する各要因の影響を検討するには, 前節まで行ってきたように, 実際の栈橋モデルで, 応力計算を行うのが望ましい方法である。しかし, すべての要因について, 以上のような検討を行うには, 非常に多くの時間と労力を要する。そのため, 実際の栈橋モデルの応力計算値に代用できる簡便な「指標」を選定し, その指標により, 各要因の栈橋の応力計算値への影響を

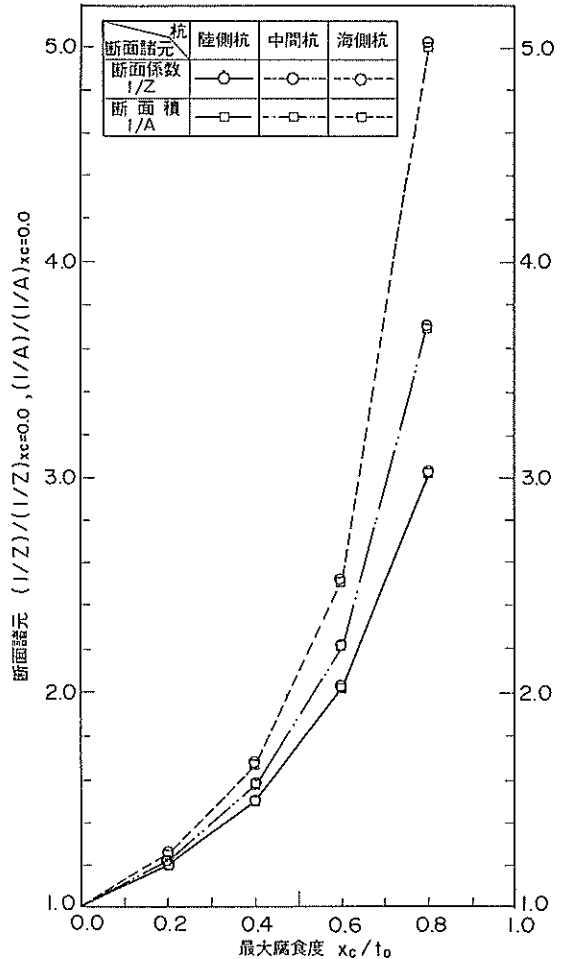


図-27 最大腐食度と断面諸元の関係
(栈橋 No. 1, 腐食形態 II)

検討するのが有効な方法となる。杭の腐食が, 栈橋の杭応力へ及ぼす影響は, 杭の断面力(曲げモーメントや軸力)への影響と, 杭の断面諸元(断面係数, 断面積)への影響とが合成されたかたちで現れる。そこで, 杭応力の指標を, 杭の断面力の指標と, 杭の断面諸元の指標に分けて, 各要因の影響について検討することとする。

付録-Eに示すとおり, 栈橋の杭応力への寄与率の高い断面力は, 杭の曲げモーメントである。また杭の腐食により大きく影響されるのも曲げモーメントである。そこで, 杭の断面力の指標として, 単杭の単位杭頭モーメント(M_{top}/H), を主要指標とし, また横方向ばね定数(K_H), 及び単位杭頭モーメントと横方向ばね定数の積($M_{top}/H \cdot K_H$), を補足指標とし, 杭の腐食諸元の断面力(曲げモーメント)への影響の検討を行う。腐食の断面諸元への影響については, 2.4で図-27に示すとおり検

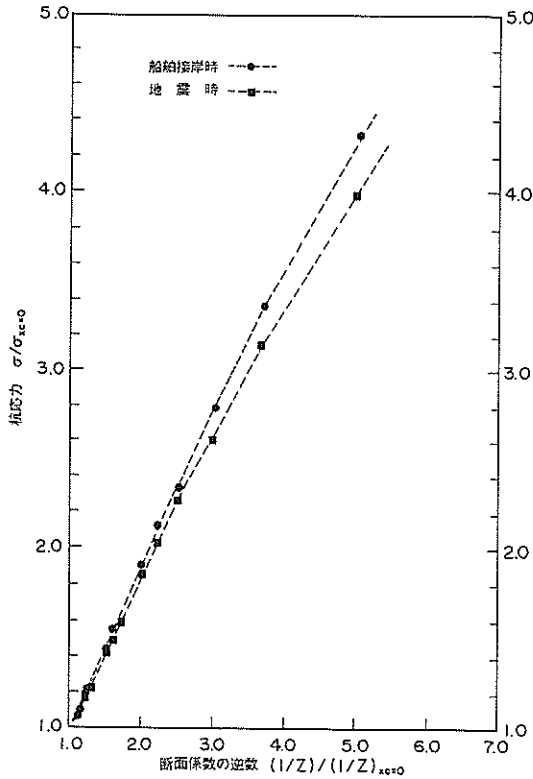


図-28 断面係数と杭応力(栈橋No.1, 腐食形態II)
(最大腐食部)

討を行っているので、ここでは検討しないこととする。

杭の鉛直方向腐食形態(および杭のモデル化)、及び杭の腐食度により、単杭の単位杭頭モーメント、横方向ばね定数、及び杭の鉛直方向曲げモーメント分布、曲げ応力分布にどのような変化が生じるか検討を行った。

(7) 計算条件

計算法 杭頭回転変位固定条件で、チャンの杭の弾性方程式を解く。

地盤条件 横方向地盤反力係数 $2.0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ の一様地盤。

杭の諸元 初期外径; 900.0 (mm)
初期肉厚; 10.0 (mm)
杭の全長; 23.2 (m)
杭の地表長; 12.1 (m)

腐食諸元 腐食形態は、「腐食評価手法」に示されている通常の腐食形態をもとに、図-29に示す(A)~(F)を設定した。
鉛直方向の腐食量は、最大腐食量の変動に応じ同一の割合で変化させた。

(1) 計算結果

④ 単位杭頭モーメント

図-30に、単位杭頭モーメントと、最大腐食度の関係を示す。腐食形態に関係なく、腐食度の増大にしたがって、単位杭頭モーメントは減少している。その減少の割合は、腐食度が0.5で10%程度であるが、腐食度が0.5より大きくなると急激に大きくなる。また、腐食形態については、(D)が最も変化が大きく、(B)、(A)、(C)、(E)、(F)の順に小さくなっている。杭の下部に比べ、杭頭部の腐食量が相対的に大きいほど、単位杭頭モーメントの減少が大きくなり、杭頭部と杭下部の腐食量が等しくなるにしたがい、単位杭頭モーメントの減少が小さくなる傾向がある。(付録-F参照)

⑤ 横方向ばね定数

図-31に横方向ばね定数と最大腐食度の関係を示す。腐食形態に関係なく、腐食度の増大に従って杭の横方向ばね定数は減少している。その減少の割合は、腐食度に関係なくほぼ一定で、単位杭頭曲げモーメントより大き

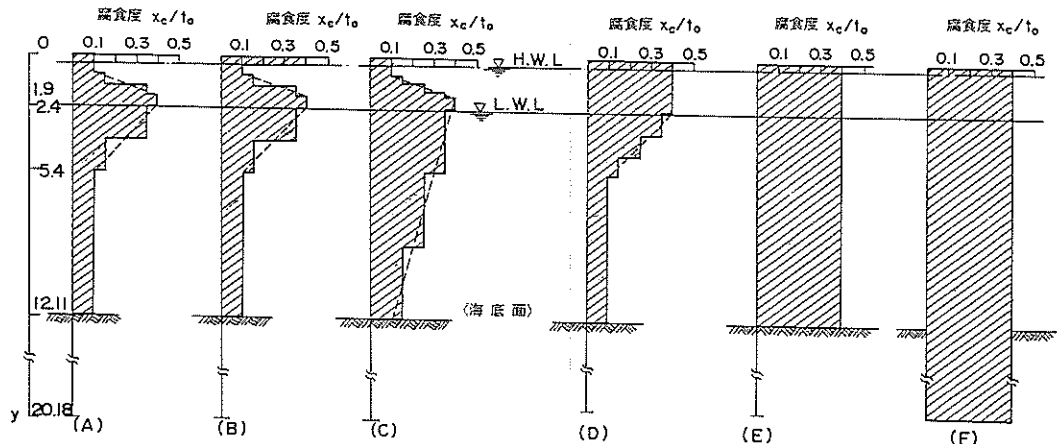


図-29 鉛直方向腐食形態(単杭による検討) — 斜線は腐食部を示す —

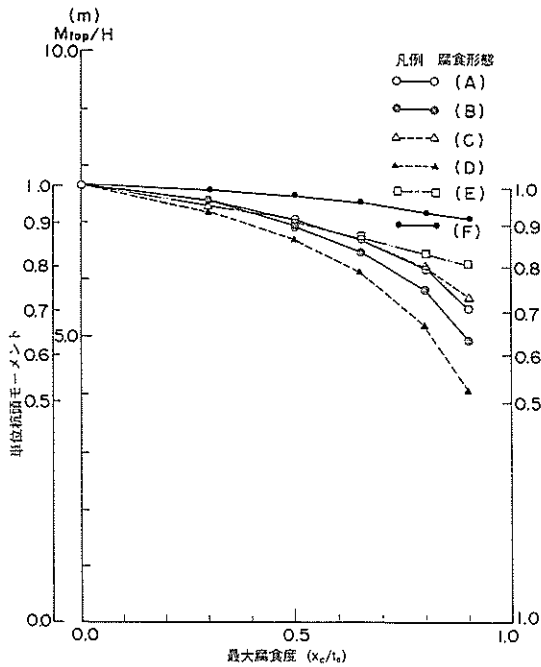


図-30 最大腐食度と単位杭頭モーメントの関係

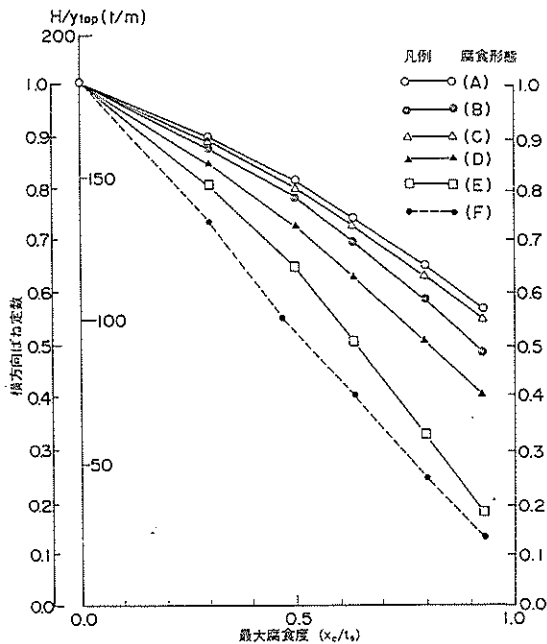


図-31 最大腐食度と横方向ばね定数の関係

い。腐食形態別に見ると、形態 (F) が、減少度合が最も大きく、(E)、(D)、(B)、(C)、(A) の順に減少度合が小さくなっている。

杭全体の腐食量が大きいほど、また、杭頭部の腐食量

が大きいほど横方向ばね定数への影響が大きい。

㊦ 単位杭頭モーメントと横方向ばね定数の積

図-32 に単位杭頭モーメントと横方向ばね定数の積と、最大腐食度の関係を示す。腐食形態に関係なく、腐食度の増大に従って、減少している。その減少の度合は、腐食形態 (F) が最も大きく、(E)、(D)、(B)、(C)、(A) の順に小さくなっている。

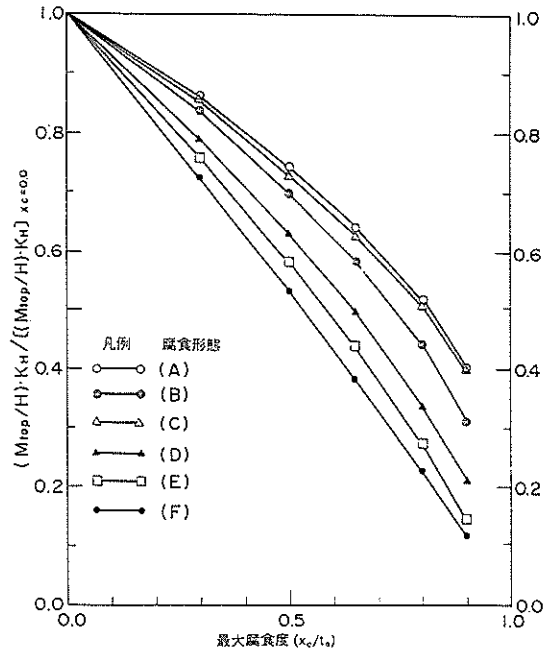


図-32 最大腐食度と $K_H \times (M_{top}/H)$ の関係

㊧ 曲げモーメントの鉛直分布

腐食形態 (A) から (E) について、腐食が非常に進んだ腐食度 0.9 の場合の単位曲げモーメントの鉛直分布を図-33 に示した。地表部での杭の単位曲げモーメント分布は、杭の腐食に関係なく単位曲げモーメントの鉛直分布の傾きは同じで、ただ単位杭頭モーメントの値にしたがって平行移動する特性を持っている。そのため、腐食杭の地表部の鉛直方向の曲げモーメント分布は、次の手順で求めることができる。

①腐食前の杭(一樣杭)の単位曲げモーメント分布を、

$$M_{top}/H = \frac{1}{2} \left(h + \frac{1}{\beta} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$M_{Bottom}/H = \frac{1}{2} \left(h - \frac{1}{\beta} \right)$$

より求める。(図-34 中の直線㊦)

②腐食杭の、単位杭頭モーメント (M_{top}/H) を算定する。

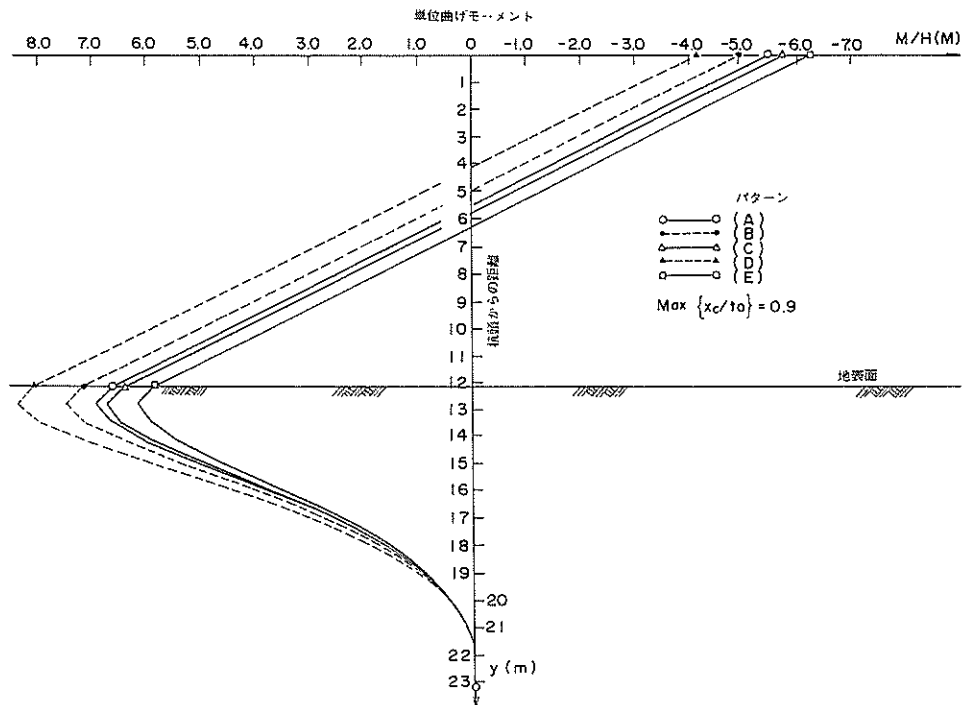


図-33 単位曲げモーメント (M_{top}/H) の鉛直分布

③腐食前の単位曲げモーメント分布に、平行に、杭頭の値が、②で求めた (M_{top}/H) となるよう直線を引く。(図-34中の直線①)

④③で求めた腐食杭の単位曲げモーメント分布の値を杭頭に作用する水平力 H が作用したときの杭の曲げモーメント鉛直分布が求まる。(図-34中の直線③)

⑥ 曲げ応力の鉛直分布

「腐食評価手法」に単杭の曲げ応力の鉛直分布の計算例が以下のとおり示されている。

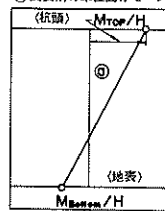
図-35に示す主要な腐食形態 (A), (B), (C) の3つと、腐食杭を一様杭として取り扱うケースの4ケースについて、単杭の曲げ応力の鉛直分布を算定している。

計算条件は、図-36の中に示されており、最大腐食度は、0.42となっている。腐食形態の違いによる曲げモーメントの減少割合の違いによる応力への影響は、図-36のL.W.L.直上部の杭の断面係数が、4つの腐食形態で同じとなる区間に現れている。その影響の程度は数%程度で小さい。(図-30参照)

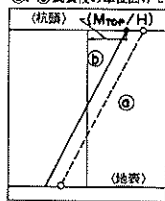
(2) 腐食杭の断面諸元の設定方法の影響

「腐食評価手法」では、杭の内厚測定は鋼管杭一断面内で、4測定点を設けることとしている¹¹⁾。腐食杭の断面諸元を設定するには、この4つの測定点データをどう処理し、用いるかが重要となる。

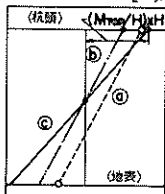
①腐食前の単位曲げモーメント分布の算定



②、③腐食後の単位曲げモーメント分布の算定



④腐食杭に水平力H作用時の曲げモーメント分布の算定



- (凡例)
 直線①：腐食前の杭の単位曲げモーメント分布
 直線②：腐食杭の単位曲げモーメント分布
 直線③：腐食杭の曲げモーメント分布

図-34 曲げモーメントの鉛直分布の算定手順

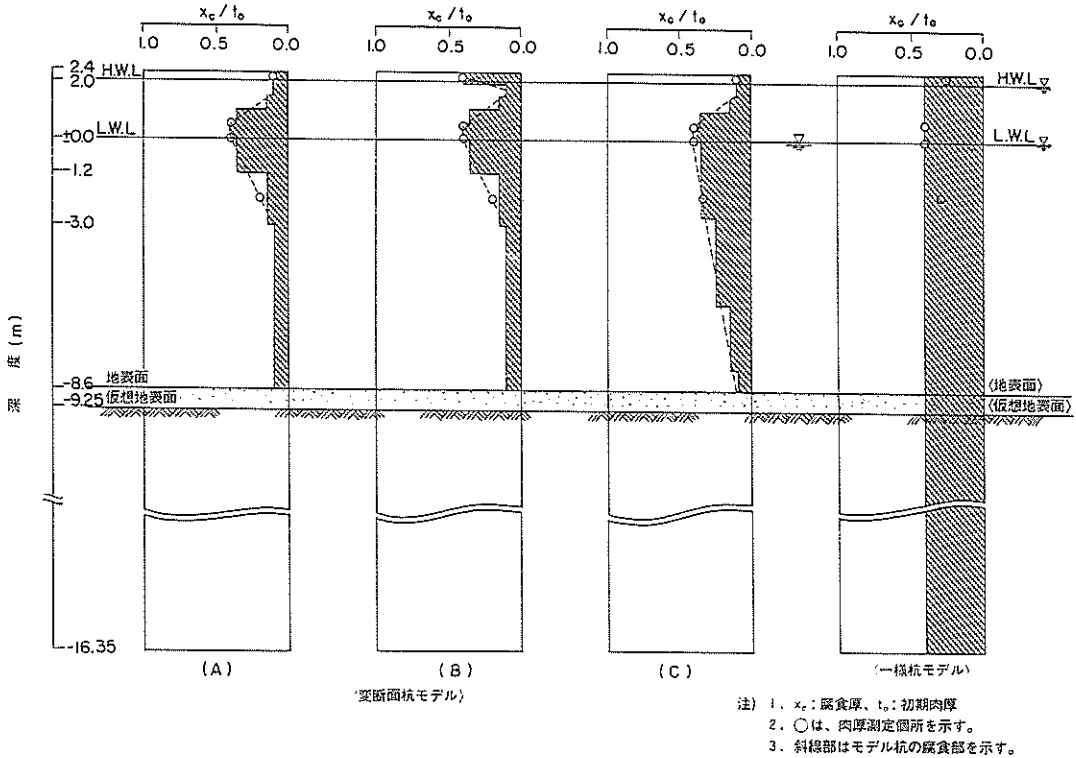


図-35 杭の鉛直方向腐食形態とモデル化¹⁰⁾ (単杭計算用)

「腐食評価手法」に、杭の円周方向に16測定点を取った詳細な肉厚調査結果が図-37のとおり示されている。実際には、肉厚測定点は4点あるので、図-37の16測定点データのうち4測定点以外の12測定点の肉厚は不明となる。そのため、4点の測定値から最も妥当な腐食杭の断面諸元を設定しなければいけなくなる。「腐食評価手法」では、4点の平均値と最大値、及び最小値のそれぞれを用いた断面2次モーメントと、16点の測定点を結んだ16角形の外面を持つ杭の断面2次モーメントが、図-38のとおり示され、4点の平均値を用いる場合が、最も妥当な値となることが示されている¹³⁾。

通常栈橋に用いられている鋼管杭の初期肉厚は、10mm～15mm程度である。腐食杭の断面諸元の設定時、腐食量が1mm異なるだけで、腐食度が0.1程度異なってくる。杭の腐食度が、杭の断面力や、断面諸元に及ぼす影響は、今まで検討してきたとおり非常に大きい。そのため、腐食杭の断面諸元の設定には、十分な注意を払うことが必要である。

(3) 地盤条件の影響

杭頭固定の単杭について(1)項と同様の解析を、地盤条件を変化させて行った。杭諸元は(付録-C)と同一で

ある。腐食はゼロとした。

横方向地盤反力係数が、単位杭頭モーメントや横方向ばね定数に及ぼす影響を、図-39に示した。単位杭頭モーメントは、地盤反力係数が大きくなるにしたがい減少するが、その度合は、地盤反力係数が大きくなるほど、小さくなっている。他方、横方向ばね定数は、地盤反力係数の増大にともないかなり大きくなっているが、その増大の度合は、地盤反力係数が大きくなるにしたがい減少している。

地盤反力係数0.5～3.0(kgf/cm³)は、N値で2.5から15.0程度に相当する。この値は、砂質土地盤では、非常にゆるい砂地盤から、中ぐらいの砂地盤に対応する。また粘性度土盤では、やわらかい地盤から硬い地盤に対応する。この範囲の地盤条件で、単位杭頭モーメントの変化は、12%程度であるのに対し、横方向ばね定数の変化は、50%程度ある。

多層系地盤における地表地盤厚の、単位杭頭モーメントや、横方向ばね定数への影響については、付録-Cが参考になる。地表地盤厚は、地表地盤が砂質土の場合、 $2/3 \times 1/\beta$ 程度、地表地質が粘性度土盤の場合には $1/\beta$ 程度、までは、下層地盤の影響をかなり強く受け

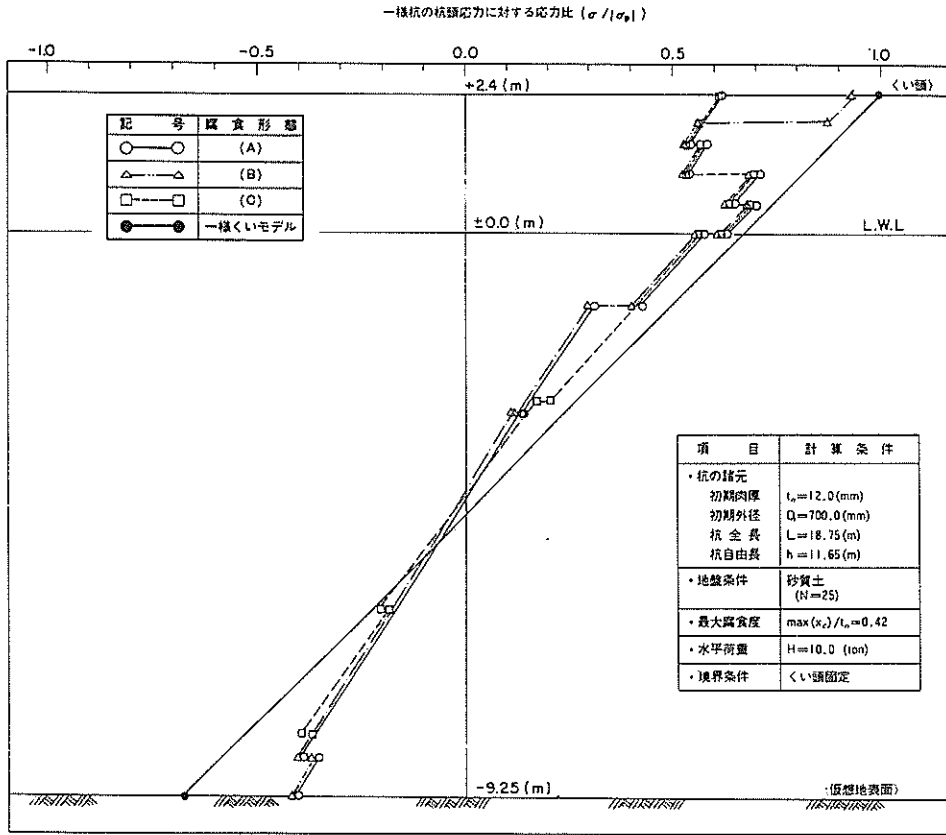


図-36 腐食形態と曲げ応力鉛直分布¹⁰⁾ (単杭)

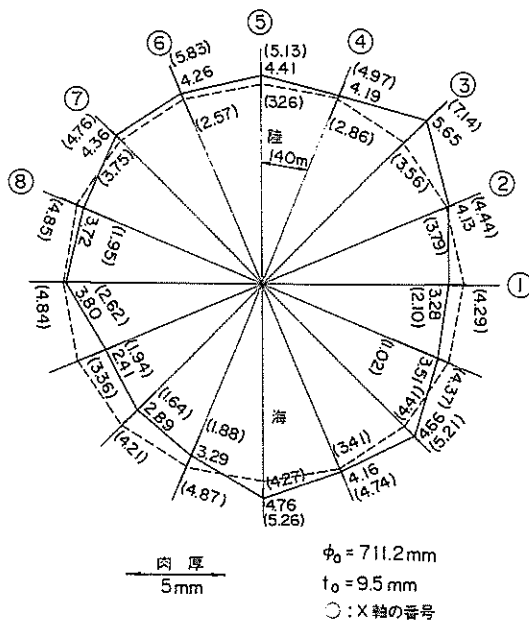


図-37 鋼管断面の肉厚測定例¹²⁾

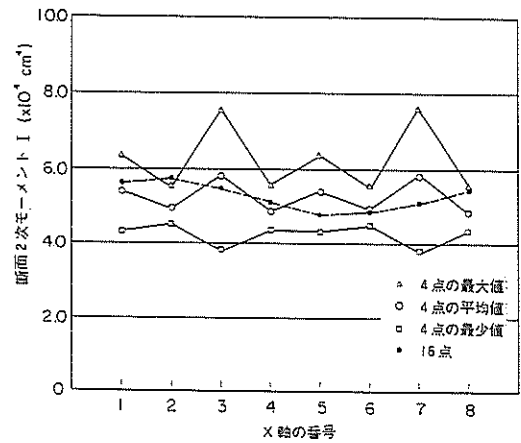


図-38 x軸まわりの断面二次モーメント¹⁴⁾

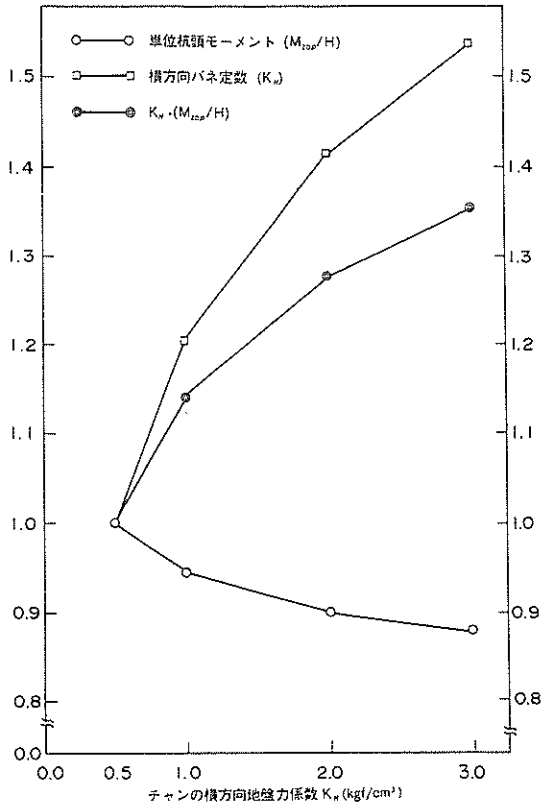


図-39 地盤条件の単杭部材力への影響

るが、表層地盤の厚さが $1/\beta$ 以上となると、下層地盤の影響をほとんど受けない。

(4) 各要因の腐食直杭式横棧橋の杭応力への影響度

本章で検討を行った腐食直杭式横棧橋の杭応力の計算値に大きく影響する要因と、その影響度を、表-16にとりまとめた。なお、表中の腐食に関連する値は最大腐食度が0.4の値のものを原則として用いてある。

1) 杭応力への影響(棧橋計算による)

表-16の中から、棧橋モデルで杭の応力計算を行い解析検討した要因と、その影響度を取り出して、図-40に両者の関係を示した。図中の要因の中には、偏心水平荷重が作用し、ブロックに回転変位が生じる場合のみ影響が出るものがある。また、杭の断面力にのみ影響する要因がほとんどであるが、最大腐食度のように杭の断面力と断面諸元の両方に影響する要因もある。

① 棧橋ブロックに回転変位が生じない場合

杭応力に及ぼす影響度の高い要因は、最大腐食度、腐食杭のモデル化、腐食形態、計算法の簡略化(水平力による軸力計算法の簡略化)の順になっている。計算法の簡略化の影響は、他の要因と比べ非常に小さい。

最大腐食度の影響が最も大きくなっていることから、腐食調査にあたっては、杭の最大腐食箇所と、その腐食量を的確に把握することが重要である。

② 棧橋ブロックに回転変位が生じる場合

影響度の最も大きい要因は、最大腐食度であり、棧橋諸元の影響、水平分担力算定法の簡略化、腐食杭のモデル化、腐食形態の差、杭のねじれ応力の無視、水平力による軸力算定法の簡略化の順に小さくなっている。この場合も、最大腐食度の影響が最も大きくなっている。棧橋ブロックの回転時の特徴として、計算法の簡略化(水平力分担の算定法の簡略化)の影響が大きいことが挙げられる。

2) 単位杭頭曲げモーメントへの影響

図-24に示したとおり、単位杭頭曲げモーメントと最大応力間に相関がある。そこで、単位杭頭曲げモーメントを杭応力の指標として、各要因と単位杭頭曲げモーメントの関係を図-41に示した。図中には、棧橋計算の過程で算出された値と、単杭計算により求めた値とを区分して示したが、両者の値には、それほど大きな差がない。また、最大腐食度と、腐食形態、杭のモデル化については、図-40で示したとおり応力への影響度も算定してあるが、これらの要因の、応力への影響度と同様の結果が、単位杭頭曲げモーメントへの影響度にも現れている。以上から、通常の腐食杭棧橋に対しては、単位杭頭モーメントを杭応力に代わる指標として用いることに大きな問題がないと考えられる。

単位杭頭モーメントへの影響度の最も大きい要因として、チャンの横方向地盤反力係数があげられる。横方向地盤反力係数は腐食の有無とは関係のない影響要因である。そのため、他の要因の影響度合を評価する際の尺度として使用できる。次に、影響の大きい要因は、最大腐食度で、変断面杭の分割数、杭のモデル化、腐食形態の順に小さくなっている。変断面杭の分割数については、5分割にし、最大腐食部の分割数を1つ増すことにより、単位杭頭モーメントへの影響度が4%程度減少する。変断面杭のモデル化の際には、最大腐食部近傍、及び杭頭部の分割数を増すと精度が高くなる。

3) 断面諸元への影響

断面諸元へ影響する要因は、表-16に示すとおり杭の腐食度と腐食杭断面のモデル化の方法である。腐食度の影響は、 $\alpha_c/t=0.4$ で、 $1/Z$ 、 $1/A$ が40~60%それぞれ増大している。腐食杭断面のモデル化による影響は、4測定点での値の平均値を用いた場合、実際の断面係数に比べ-13~+15%程度変動する例があるが、腐食度による影響のほうが大きく、杭断面のモデル化の影響

表-16 直杭式横棧橋の杭応力に大きく寄与する要因

要因		検討方法	部材力への影響			断面諸元への影響	杭応力への影響
大項目	小項目		単位杭頭曲げモーメント (M_{top}/H)	横方向ばね定数 (K_H)	(M_{top}/H) $\cdot K_H$		
腐食諸元	最大腐食度	棧橋計算	$x_c/t=0.4$ で4~6%の減少。	$x_c/t=0.4$ で14~15%の減少。	$x_c/t=0.4$ で15~20%の減少。	$x_c/t=0.4$ で、40~60% $1/Z$, $1/A$ の増大。	$x_c/t_0=0.4$ で、20~40%増。船舶接岸時のほうが地震時より3~10%影響を強く受ける。
		単杭計算 ($h=120m$)	$x_c/t=0.4$ で5~7%の減少。 $k_A=2.0$ (kgf/cm^2)	$x_c/t=0.4$ で15~30%の減少。 $k_A=2.0$ (kgf/cm^2)	$x_c/t=0.4$ で、20~33%の減少。 $k_A=2.0$ (kgf/cm^2)		
	腐食形態	棧橋計算	$x_c/t=0.4$ で、2%程度の変動。	$x_c/t=0.4$ で、2%程度の変動。	$x_c/t=0.4$ で、5%程度の変動。	-	杭頭部の腐食量が大きいほうが、5~10%応力増加率が高い。
		単杭計算 ($h=120m$)	$x_c/t=0.4$ で2%程度の変動。 $k_A=2.0$ (kgf/cm^2)	$x_c/t=0.4$ で7~8%の変動。 $k_A=2.0$ (kgf/cm^2)	$x_c/t=0.4$ で、10%程度の変動。 $k_A=2.0$ (kgf/cm^2)		
腐食杭のモデル化	腐食杭断面のモデル化	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 4測定点の平均値の一樣腐食厚とすると-13~15%の変動。 偏心用モデルとすると、$x_c/t=0.4$で±4~6%の変動。 	-
	突断面杭の鉛直方向分割数	単杭計算 ($h=120m$)	8分割杭と4分割杭の差は6%程度 $x_c/t=0.8$	-	-	-	-
	腐食杭の鉛直方向のモデル化 (一樣杭モデルと突断面杭モデル)	棧橋計算	$x_c/t=0.4$ で3%程度 一樣杭モデルのほうが大きい。	$x_c/t=0.4$ で15~17% 一樣杭モデルのほうが小さい。	$x_c/t=0.4$ で15%程度 一樣杭モデルのほうが小さい。	-	$x_c/t=0.4$ で一樣杭モデルのほうが船舶接岸時4~10%の応力増。
単杭計算 ($h=120m$)		$x_c/t=0.4$ で4%程度 一樣杭モデルのほうが大きい。 $k_A=2.0$ (kgf/cm^2)	$x_c/t=0.4$ で15~16% 一樣杭モデルのほうが小さい。 $k_A=2.0$ (kgf/cm^2)	$x_c/t=0.4$ で15~16% 一樣杭モデルのほうが小さい。 $k_A=2.0$ (kgf/cm^2)	-	-	
部材力計算法の簡略化	水平力による軸力計算の簡略化	棧橋計算	-	-	-	-	$x_c/t=0.4$ で1%程度の応力増。
	棧橋ブロック回転時のねじれ応力無視	棧橋計算	-	-	-	-	$x_c/t=0.4$ で4~5%の応力増。
	偏心水平力作用時の水平力分相計算の簡略化。	棧橋計算	-	-	-	-	$x_c/t=0.4$ で10~15%応力が増大する。
地盤条件	チャンの横方向地盤反力係数	単杭計算 ($h=10.0m$)	$k_A=0.5\sim3.0$ (kgf/cm^2)で腐食なしの杭で12%程度の変動。	$k_A=0.5\sim3.0$ (kgf/cm^2)で50%程度の変動。	-	-	-
棧橋の諸元		棧橋計算	-	-	-	-	地震時で諸元が定まっている場合偏心水平力作用時5~30%の変動。

は、その1/4程度である。これは、腐食形態の応力への影響と同程度の値である。

(4) まとめ

本節では、単杭の単位杭頭モーメントへの各要因の影響度を調べ、2.2, 2.3で検討した棧橋計算結果と併せて、棧橋の杭応力に大きく影響する要因について検討

を行った。以下にそのおもな結果をとりまとめる。

①偏心のない水平力が棧橋に作用する場合、杭の応力に対する影響は、最大腐食度、腐食杭のモデル化、杭の腐食形態、計算法の簡略化の順に小さくなっており、計算法の簡略化の影響は非常に小さい。

②偏心水平力が棧橋に作用する場合、杭の応力に対す

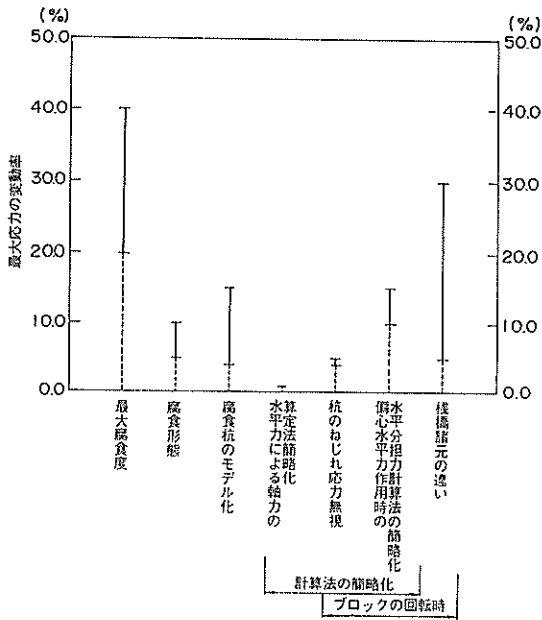


図-40 杭の最大応力の変動率と各要因 (棧橋計算)

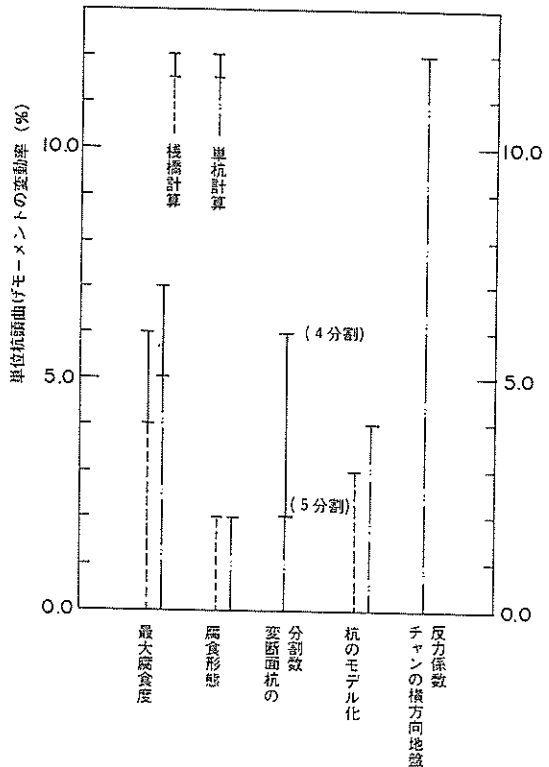


図-41 単位杭頭曲げモーメントの変動率と各要因 (棧橋計算と単杭計算)

る影響は、最大腐食度、水平分担力の算定法の簡略化、腐食杭のモデル化、杭の腐食形態、杭のねじれ応力の考慮の有無、水平力による軸力算定法の簡略化の順に小さくなっている。

③単杭の単位杭頭モーメントへの影響は、チャンの地盤反力係数、最大腐食度、腐食杭のモデル化、腐食形態の順に、小さくなっている。

④腐食杭の断面係数への影響は、杭の腐食度、肉厚測定点数(4測定点と1.6測定点の差)、腐食杭断面のモデル化(同心円の円管断面とするか、偏心円の円管断面とするか)、の順に小さくなっている。

腐食杭断面のモデル化の、杭応力に及ぼす影響は、腐食形態の影響と同程度となった。

⑤以上の結果より、杭の最大腐食箇所を適確に捉えること、および肉厚測定を正確に行うことが、杭の応力計算や棧橋の健全度評価に大きく影響するといえる。

3. 腐食矢板式係船岸の応力計算

3.1 検討範囲と計算法

- (1) 矢板の腐食が矢板式係船岸に及ぼす影響と検討範囲

腐食した矢板式係船岸の健全度の検討を行うには、あらかじめ矢板の腐食が矢板式係船岸の安全性に及ぼす影響について整理しておく必要がある。そこで矢板の腐食により影響の出る項目を抽出し、「腐食評価手法」で検討対象となった項目の選定根拠を示すとともに、本資料で取り扱う項目を整理する。

矢板の腐食が、矢板式係船岸の安全性に及ぼす影響として、第一に、矢板そのものの耐力の低下があげられる。矢板の耐力の低下は、腐食による矢板断面の減少による断面係数の減少、及び矢板の曲げモーメントの変化(軟弱地盤の矢板)による矢板の曲げ応力の増大として現れる。また、腐食により軟弱粘性土地盤の矢板の根入れ長の安全率が低下することが考えられる。

次に、矢板に穴があくことによる裏埋め土の流出、及びエプロン下部の空洞化があげられる。

第三に、軟弱粘性土地盤の矢板のタイロッド張力の変化があげられる。

第四に、矢板の変位の増大による裏込め土の主働土圧の変化があげられる。矢板の曲げ変位と主働土圧とは、互いに影響し合ってそれぞれの値が決まる。そのため、本来なら腐食による矢板の曲げモーメントや、根入れ長

の安全率、及びタイロッド張力への影響の検討も、腐食による矢板の変位と主動土圧の変動との相互関係の中で行う必要がある。上記問題の解明には、F.E.M等による数値解析や、模型実験、あるいは現地試験等の研究の積みかさねが必要である。しかし、現在までの設計、施工実績や、矢板の被災例の解析結果等を考え合わせると矢板の曲げ変位がそれほど大きくなければ、矢板の変位による土圧の変化を特別に考慮しなくても矢板の健全度評価にあまり影響しないと考えられる。このため、本資料では、矢板の腐食による主動土圧への影響については考慮しないことにした。ただし、矢板の曲げ変位が、著しく大きくなる場合には、F.E.M等の数値解析等による検討が必要である。

本資料では、おもに腐食と、矢板の曲げモーメント、断面係数、及び矢板の根入れ長の安全率の関係について検討を行うことにする。

(2) 技術基準を準用する腐食矢板の安定計算法と本資料の計算法

「腐食評価手法」には、腐食矢板式係船岸の矢板の応力計算法として、技術基準を準用する方法と、有限要素法が紹介されている¹⁶⁾。また技術基準を準用する矢板の曲げモーメントの算定法として、普通の砂質土盤や硬い粘性度地盤に打ち込まれた鋼矢板については仮想ばり法が、軟弱地盤に打ち込まれた鋼矢板についてはたわみ曲線法が示されている。本項では、計算法の簡便さ、及び実用性を考え技術基準を準用する方法を取りあげ、その計算法の特徴について検討を行う。

技術基準による仮想ばり法では、矢板をタイロッド取付点、及び海底面を支点とする単純ばりと仮想し、矢板に作用する最大曲げモーメントを求める。矢板の剛性が大きい場合や海底地盤の地盤反力係数が小さい場合には、矢板の曲げモーメントがゼロとなる点は海底面より下がり、上記仮想ばり法が適用できなくなる。ところが腐食により矢板の剛性は小さくなるため、設計時に仮想ばり法を用いている腐食矢板式係船岸の健全度評価に仮想ばり法を準用することについて特に問題は生じないと考えられる。なお、砂質土盤の場合、技術基準の方法によれば矢板の根入れ長の安全率や、矢板の最大曲げモーメント、及びタイロッド張力は、矢板へ作用する土圧に変化がなければ、腐食による影響を受けない。そのため、矢板式係船岸の健全度の評価に当たって、矢板の断面係数の変化による曲げ応力の検討のみを行えばよい。

軟弱地盤へ打ち込まれた矢板式係船岸については、たわみ曲線法を用いるため、矢板の腐食により矢板の根入れ長、曲げモーメント、及びタイロッド張力が変化する。

矢板への作用土圧と、矢板の変位との相互関係を考慮しなくてもよければ、軟弱地盤の腐食矢板に、たわみ曲線法を準用することに特に問題はない。

本章では、砂質土盤の矢板に対しては、仮想ばり法を、軟弱地盤の矢板についてはたわみ曲線法を用いて、

- ①砂質土盤の矢板式係船岸の海中中部肉厚測定箇所の設定法
- ②軟弱地盤の矢板式係船岸に対し
 - ①腐食と曲げモーメントの関係。
 - ②腐食と矢板の最大変位の関係。
 - ③矢板の海中中部肉厚測定箇所の設定法。
 - ④腐食と矢板の根入れ長安全率、タイロッド張力の関係。

の検討を行うこととする。

3.2 計算条件

検討対象係船岸は、今回の検討のために特別に設定したものである。砂質土盤上の断面は、仮想ばり法により、軟弱地盤上での断面はたわみ曲線法により算定した。

(1) 計算対象断面

- (ア)天端高 ; + 3.5 (m)
- (イ)タイロッド取付点 ; + 2.0 (m)
- (ウ) R.W.L. ; + 1.33 (m)

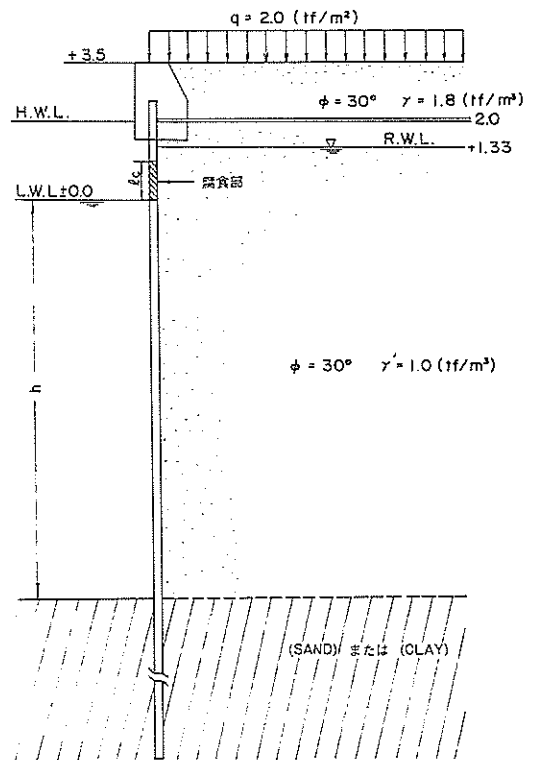


図-42 矢板式係船岸の断面諸元

表-17 腐食鋼、矢板の曲げモーメント検討ケース

CASE	設計水深 h (m)	砂質地盤			軟弱地盤			
		矢板の諸元		腐食の諸元	矢板の諸元		腐食の諸元	
		種類	EI ($t \cdot m^2$)	腐食度	種類	EI ($t \cdot m^2$)	腐食部レベル l_c (m)	腐食度 (x_c/t_0)
1-0	-5.0	YSP Z-14 (YS-30)	3,402.0	-	YSP Z-38 (YS 40)	1,453.20	-	0.0
1-1							+1.0~±0.0	0.2
1-2							+1.5~1.5	0.4
1-3							+1.5~5.0	0.6
2-0	-7.5	YSP Z-32 (YS-30)	1,155.00	-	$\phi=812.8$ (mm) $t_0=13.0$ (mm) (STK 50) 鋼管矢板 (二建型)	6,279.00	-	0.0
2-1							+1.0~±0.0	0.2
2-2							+1.5~1.5	0.4
2-3							+1.5~7.5	0.6
3-0	-10.0	YSP Z-38 (YS-40)	1,453.20	-	$\phi=900.0$ (mm) $t_0=18.0$ (mm) (STK 50) 鋼管矢板 (二建型)	10,605.00	-	0.0
3-1							+0.0~±0.0	0.2
3-2							+1.5~1.5	0.4
3-3							+1.5~10.0	0.6

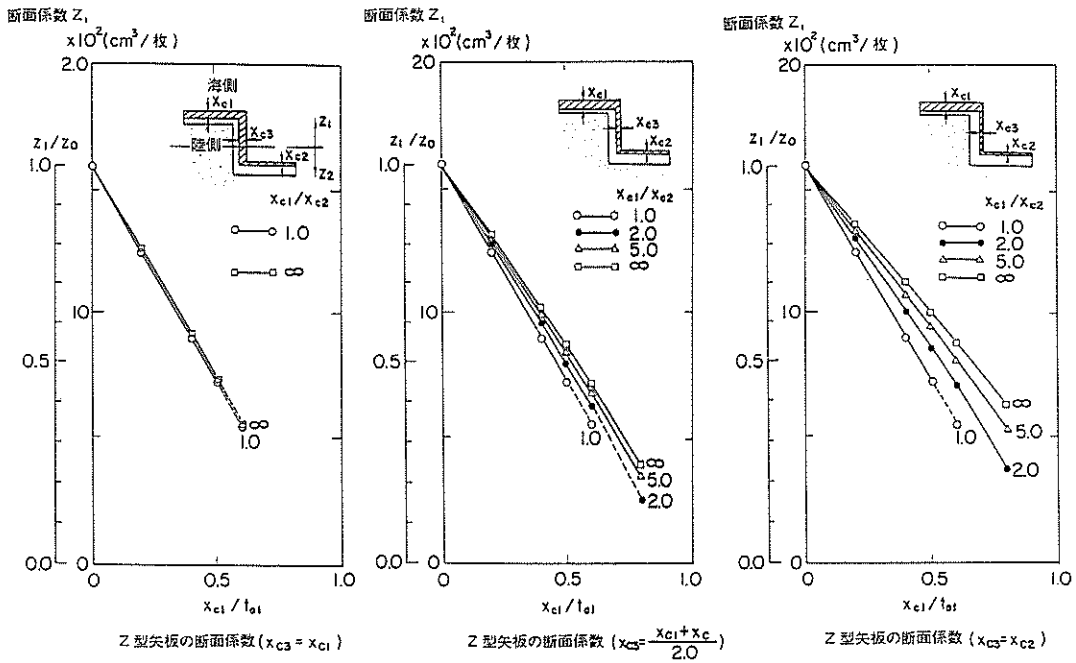


図-43 Z型矢板 (YSP Z 45) 相当の断面係数¹⁷⁾

- (イ) L.W.L. ; + 0.0 (m)
- (ロ) H.W.L. ; + 2.0 (m)
- (ハ) 設計水深 ; $h = 5.0, 7.5, 10.0$ (m)

(2) 土質条件

(ア) 砂質土地盤

- ① 単位体積重量 $\gamma = 1.8$ (tf/m³) … 地下水面上
 $\gamma' = 1.0$ (tf/m³) … 地下水面下
- ② 内部摩擦角 $\phi = 30.0^\circ$ (裏埋め土), 35.0°
 (海底面下)

(イ) 軟弱地盤

海底面より上の裏埋め部分は、砂質土地盤と同じ土質条件とし、海底面下は、次のような粘性土地盤とした。

- ① 単位体積重量 $\gamma = 0.6$ (tf/m³)
- ② 粘着力 $C_u = 0.25 Z + 1.0$ (tf/m)

(3) 荷重条件

- (ア) 上載荷重 常時 $q = 2.0$ (tf/m²) の等分布荷重
 地震時 $q = 1.0$ (tf/m²) の等分布荷重

(イ) 地震力

- ① 砂質土地盤
 - ② 軟弱地盤
- $$\left. \begin{array}{l} \text{① 砂質土地盤} \\ \text{② 軟弱地盤} \end{array} \right\} K_h = 0.1$$

(4) 腐食諸元

腐食矢板のモデル化は、矢板を鉛直方向に、腐食を受けた区間と、腐食なしの区間に分け、2～3区間に分割した。なお、腐食部の区間では、腐食量は一定値とした。

(ア) 腐食部範囲 (l_c)

腐食部区間として、次の3つのケースを設定した。

- ① $l_c = \pm 0.0 \sim + 1.0$ (m)
- ② $l_c = - 1.5 \sim + 1.5$ (m)
- ③ $l_c =$ 海底面 $\sim + 1.5$ (m)

(イ) 腐食度

腐食度は、次の4ケースを設定した。

$$x_c / t_c = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$$

(5) 計算ケース

計算ケースを、表-17に示した。

3.3 矢板の腐食と矢板の断面係数、曲げモーメント、応力、及び変位の関係

(1) 腐食矢板 (U型とZ型矢板) の断面係数

矢板の断面内の腐食形態の特徴として、一般に矢板凸面の腐食量は、凹面及び側面の腐食量より大きくなる傾向がある。「腐食評価手法」に、Z型矢板の凸部と凹部の腐食量の割合、及び矢板側面の腐食量の設定方法をパラメーターとした矢板の腐食度と断面係数の関係が示されている。凸部と凹部の腐食量に差が生じると、凸部端に対する断面係数と、凹部端に対する断面係数の値が違ってくる。一般に腐食量の大きい凸部端に対する断面係数

のほうが小さな値となり、発生応力が凹部端より大きくなる。そのため、「腐食評価手法」では、凸部端に対する断面係数の値を用いて図表等の整理を行っている。また、矢板の側面 (Z型矢板ではウェブ部) の腐食量については、凸部と凹部の腐食量の平均値を用いている¹⁶⁾。これは、

- ① 側面部の肉厚測定が行いにくいこと。
- ② U型矢板では側面部にテーパがついており、腐食量の設定が難しいこと。
- ③ 既往の調査結果では側面の腐食は凹部とほぼ同じ程度であったこと¹⁸⁾。
- ④ 図-43によれば凹部と同一腐食量とした場合と、凸部と凹部の平均値とした場合で、断面係数がそれほど変化しないこと。

に基づいている。

図-43に示すとおり断面係数の値は、腐食度の影響を強く受けており、腐食度0.4では、腐食のないときに比べ40%程度小さな値となっている。矢板の応力計算値に及ぼす影響は大きい。

(2) 砂質土地盤の矢板の肉厚測定箇所

砂質土地盤に打ち込まれた矢板の最大曲げモーメントの算定には、通常仮想ばり法が用いられる。3.1でも述べたとおり仮想ばり法を用いた場合、腐食による矢板の曲げモーメント算定値への影響は現れない。矢板の曲げ応力の変化は断面係数の変化によってのみ生じる。断面係数の鉛直方向への変化は、矢板の鉛直方向の腐食形態により定まる。そのため、矢板の肉厚測定を適確に行うことが、砂質土地盤の矢板の健全度評価のため最も重要となる。

「腐食評価手法」では、矢板の肉厚測定箇所を、集中腐食の発生しやすい箇所2点と、矢板の最大曲げモーメント発生点付近2点にとることになっている¹⁹⁾。そのうち、海中部の最大応力の発生する2つの調査箇所が、矢板の設計水深や、鉛直方向の腐食形態によりどう変化するかの検討を行った。

腐食評価手法に示されている鋼矢板の鉛直方向腐食形態のうち、矢板の最大曲げモーメント発生点付近の腐食量が鉛直方向に一様な形態(「腐食評価手法」の図-23の(A),(C),(E)²⁰⁾)では、最大曲げモーメント発生点で肉厚測定を行えばよい。だが、腐食量が、海中部で鉛直方向に変化する形態(「腐食評価手法」の図-23の(B)²¹⁾)では、ピーク応力発生箇所が、最大曲げモーメント発生点からずれる。そこで、図-44に示す腐食形態について、矢板の応力分布と曲げモーメント分布を算定した結果を図-45～図-47に示す。図-44に示す腐食形態では、最大腐食量は、海中部の最小腐食量の3倍

に設定した。これは通常の腐食形態では、かなり大きめの値である。なお、応力算定に当たり断面係数は、凸部と凹部の腐食量の比が1:2のケースの値を用いた。最大応力の発生箇所が最大曲げモーメントの発生箇所より0.5~1.0 m程度上へずれている。このずれの割合は、設計水深に関係なくほぼ一定である。

以上を総合すると、矢板の海中部の肉厚測定は、最大曲げモーメント発生箇所と、その上側0.5 m程度の箇所を実施すればよいといえる。ただし、矢板の初期剛性が大きいときや、海底地盤の地盤反力係数が小さい場合には、仮想ばり法で求めた最大曲げモーメント発生箇所よりやや深い位置で実際の曲げモーメント最大値が現れるので注意を要する。

(3) 軟弱地盤の矢板式係船岸

1) 腐食と曲げモーメントの関係

たわみ曲線法により求めた軟弱地盤の矢板の曲げモーメント分布を図-48~図-50に示す。

腐食区間が±0.0~+1.0 mの場合、腐食度0.8のときでも曲げモーメント分布は、腐食なしの場合とほとんど変わらない。また、腐食区間が+1.0 mから海底面までの場合、腐食度0.4でやや小さな曲げモーメント分布となっている。ただし、最大モーメント発生箇所は腐食により変化していない。

図-51, 図-52に、腐食度と矢板の最大曲げモーメントの関係を示した。腐食区間が+1.5 mから海底面の場合では、腐食度0.4で、腐食なしに比べ、2.0~5.0%最大曲げモーメントが減少し設計水深が大きいほどその割合が大きくなっている。また、地震時と常時で減少割合にあまり変化はない。しかし、腐食区間が±0.0~+

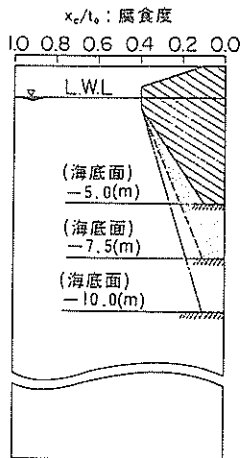


図-44 矢板の鉛直方向腐食形態

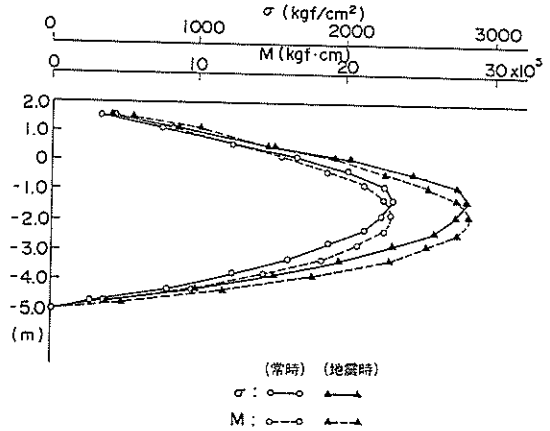


図-45 矢板の曲げモーメント分布と腐食時の応力分布(1) (砂質土地盤) h = 5.0 m

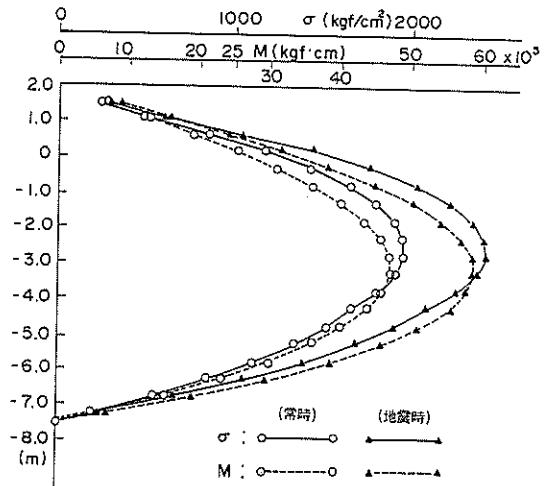


図-46 矢板の曲げモーメント分布と腐食時の応力分布(2) (砂質土地盤) h = 7.5 m

1.0 mのケースや-1.5~+1.5 mのケースでは腐食度が大きくなっても、最大曲げモーメントは、極めてわずかしか、減少していない。

以上から、矢板の腐食形態のうち、海中部の腐食量が一樣に大きくなる形態以外では、矢板の最大腐食度が大きくなっても、曲げモーメント分布はあまり変化しないと推察される。

2) 腐食と矢板の変位

地震時における腐食度と、矢板に生じる最大変位の関係を図-53に示した。腐食区間が±0.0~+1.0 mのケースや、-1.5~+1.5 mのケースでは、腐食度が大きくなっても、矢板に生じる最大変位はほとんど増大しない。腐食区間が+1.5 mから海底面のケースでは、腐食

度の増加にしたがい矢板に生じる変位が大きくなり、腐食度 0.4 で腐食なしのときに比べ 20~40% 最大変位量が増大している。また、設計水深の大きい場合ほど変位の増加割合が大きい。

以上から、変位についても、海中部の腐食量が一樣に大きくなる形態以外では、腐食の影響はあまりないと考えられる。

3) 海中部の肉厚測定箇所

砂質土地盤における矢板に対して行った海中部の肉厚

測定箇所の検討を、軟弱地盤の矢板に対しても行う。海中部での腐食量が一樣な腐食形態の場合、ピーク応力は、最大曲げモーメント発生箇所で見られる。よって、ここでも海中部での腐食量が変化する場合、図-44 の腐食形態について検討を行う。この腐食形態の場合、図-48~図-50 に示したとおり、腐食による曲げモーメント分布への影響は小さいと考えられる。そこで、鉛直方向の曲げモーメント分布は腐食なしのときのものを用いて、鉛直方向の応力分布を算定した。曲げモーメントと曲げ応力

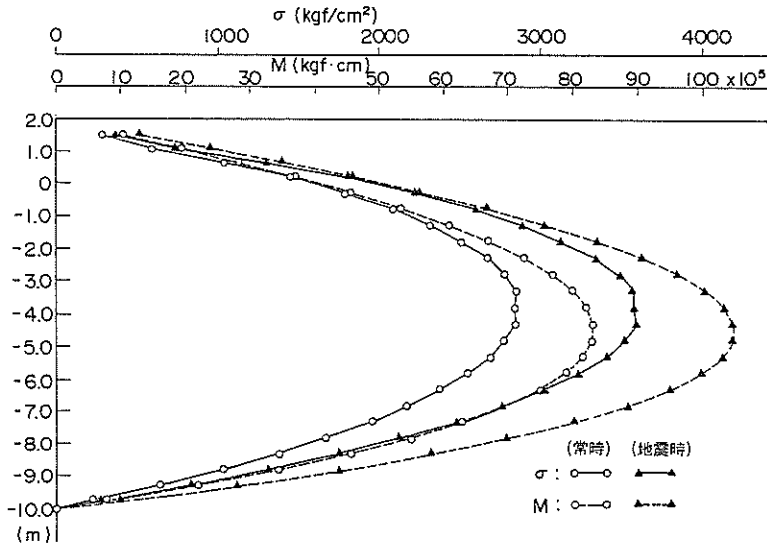


図-47 矢板の曲げモーメント分布と腐食時の応力分布(3) (砂質土地盤) h=10.0m

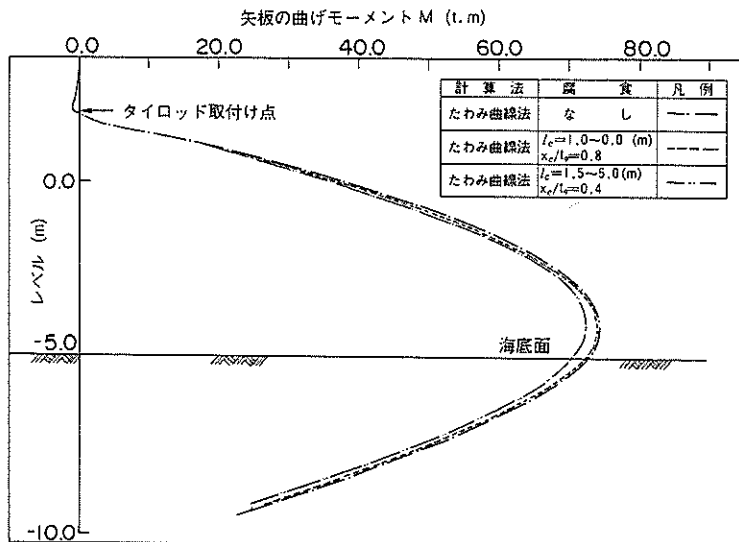


図-48 腐食が矢板の曲げモーメント分布に及ぼす影響(1) (-5.0m, 軟弱粘性土地盤, 常時)

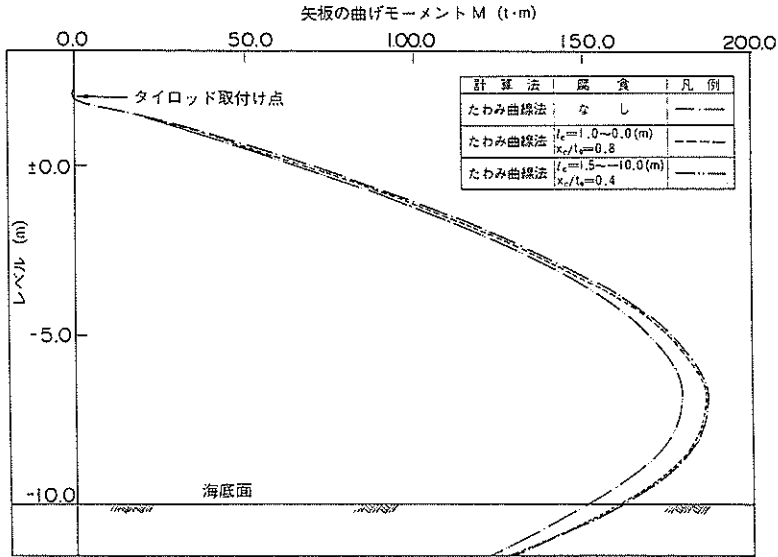


図-49 腐食が矢板の曲げモーメント分布に及ぼす影響(2)
(-10.0 m 軟弱粘性土地盤, 常時)

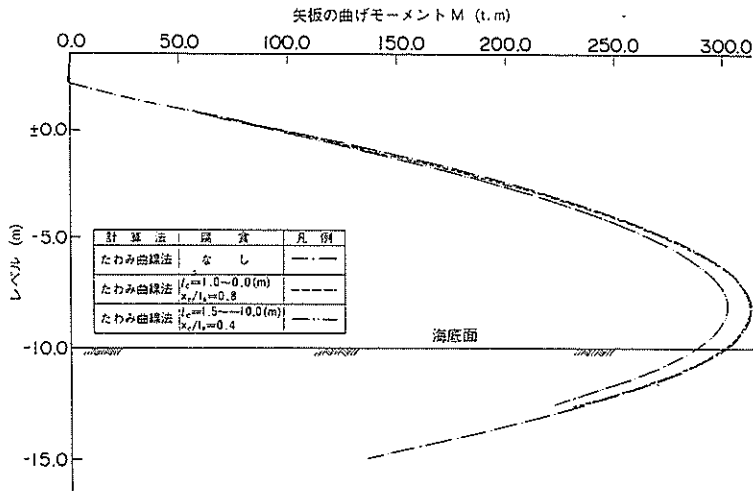


図-50 腐食が矢板の曲げモーメント分布に及ぼす影響(3)
(10.0 m, 軟弱粘性土地盤, 地震時)

の鉛直分布を図-54に示した。砂質地盤での結果と同様、軟弱地盤の矢板についても、最大応力の発生箇所が、最大曲げモーメントの発生箇所より、0.5～1.0 m程度上へずれている。

3.4 軟弱地盤の矢板式係船岸の腐食と根入れ長安全率及びタイロッド張力

(1) 腐食と根入れ長安全率

軟弱地盤に打ち込まれた矢板の腐食と根入れ長安全率の関係について検討を行った。

たわみ曲線法による矢板の根入れ長は、矢板のたわみ

曲線がタイロッド取付点で鉛直線と交わるときの根入れ長を求め、それに「技術基準」で定められた安全率1.2をかけた値として設定される。

①腐食矢板の根入れ長安全率の設定法

矢板は腐食すると、設計時の根入れ長では、矢板のタイロッド取付点での変位がゼロとならなくなる。そのため根入れ長を仮定しなおし、タイロッド取付点での矢板の変位がゼロとなるときに根入れ長を求め、必要根入れ長とした。そして腐食矢板の根入れ長安全率を、次式により算定した。

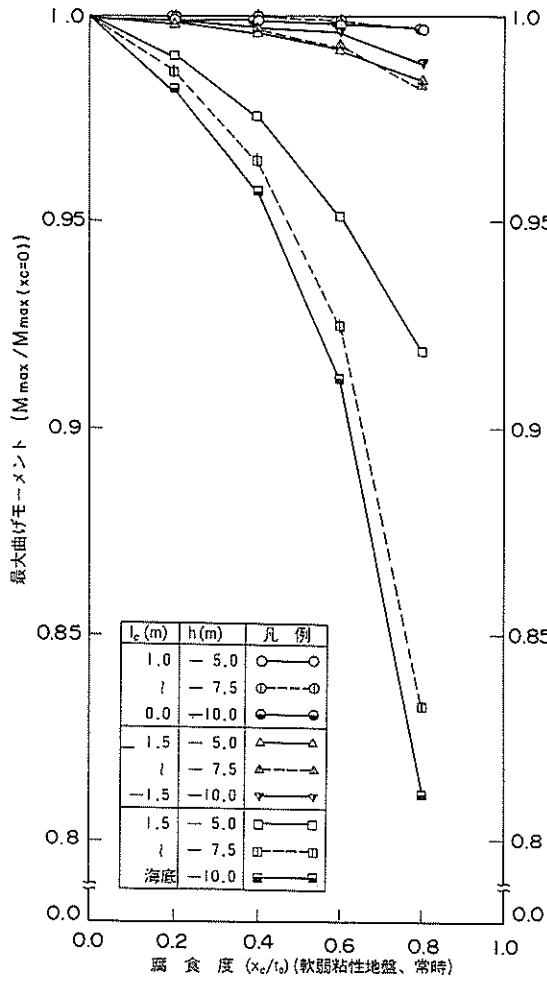


図-51 腐食度と矢板の最大曲げモーメント (1)

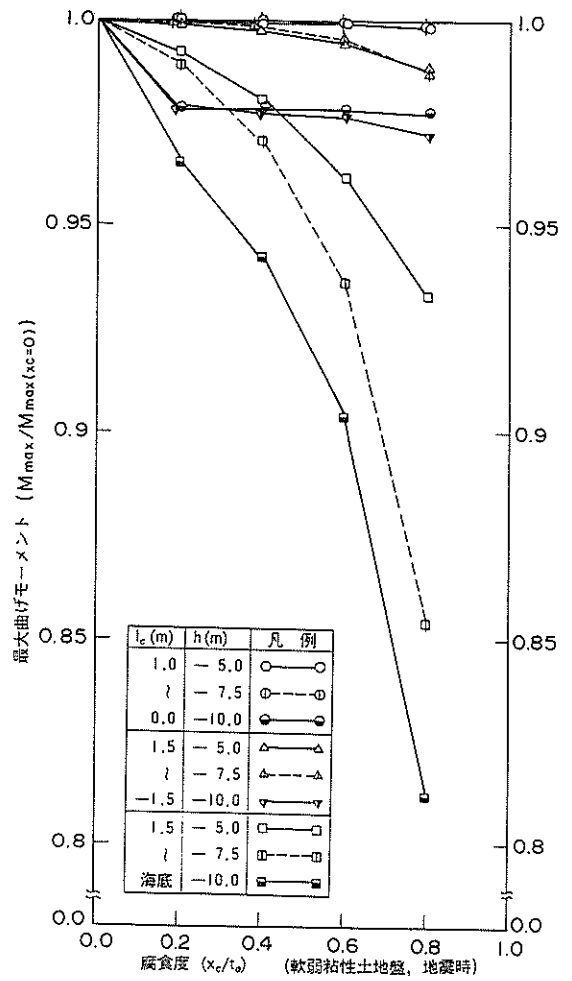


図-52 腐食度と矢板の最大曲げモーメント (2)

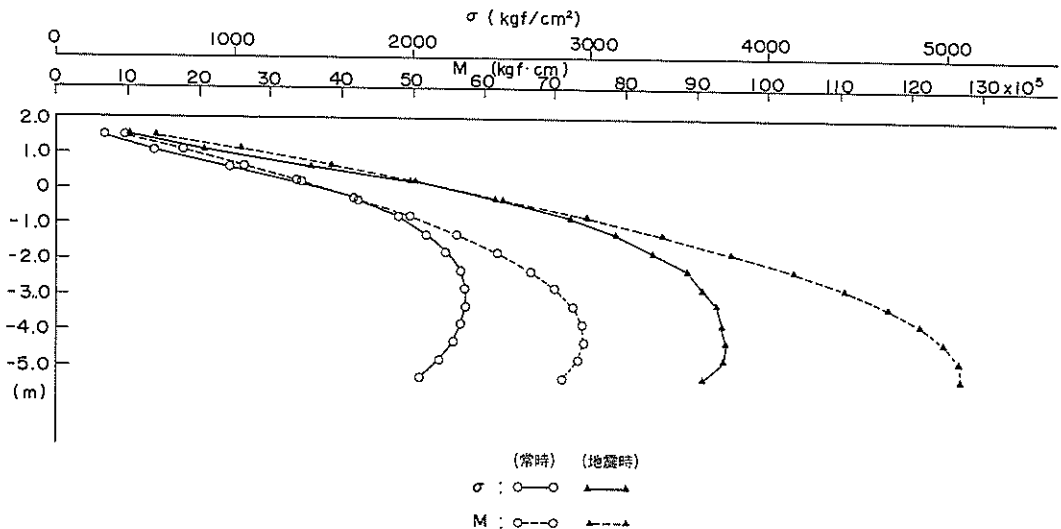


図-54 腐食矢板の曲げモーメント分布と応力分布 (軟弱粘性土地盤)

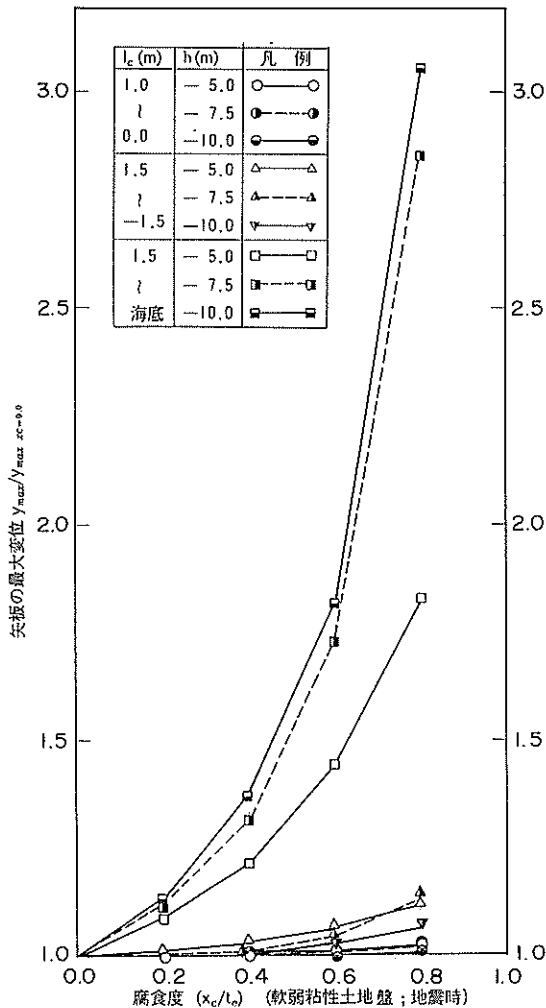


図-53 腐食度と矢板の最大変位

$$SF = \frac{l_0}{l_c} \dots\dots\dots (9)$$

l_0 : 腐食なしのときの施工根入れ長

l_c : 腐食矢板の必要根入れ長

②腐食と根入れ長安全率の関係

地震時の根入れ長の安全率と腐食度の関係を図-55に示した。腐食区間が±0.0～+1.0 mのケースや+1.5～-1.5 mのケースについては、腐食による根入れ長安全率への影響はほとんどない。腐食区間が+1.5から海底面のケースについては、腐食度の増大にしたがい根入れ長安全率が減少しており、腐食度0.4で安全率が1.17から1.18程度になった。また、水深の大きい係船岸ほど、その減少度合が大きくなっている。

以上から、海中部の腐食量が一様に増大する場合以外の腐食形態では、腐食による根入れ長安全率への影響は

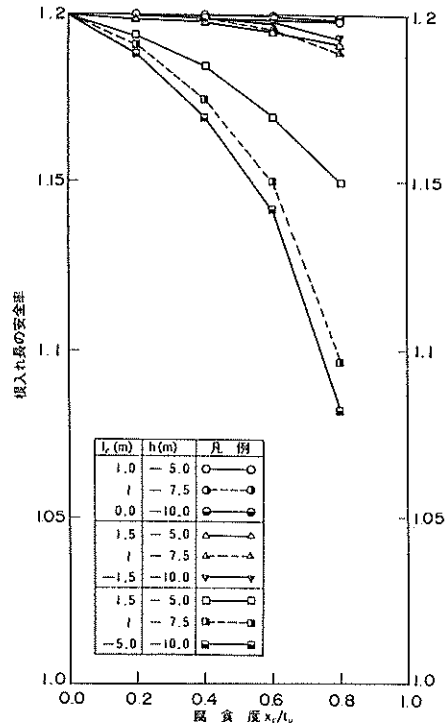


図-55 腐食度と矢板の根入れ長安全率 (軟弱粘性土地盤、地震時)

ほとんどないと言える。

(2) 腐食とタイロッド張力

腐食度とタイロッド張力の関係を図-56に示した。腐食区間が±0.0～+1.0 mのケースや、+1.5～-1.5 mのケースについては、腐食によるタイロッド張力への影響はほとんどない。しかし、腐食区間が+1.5 mから海底面のケースでは、腐食にしたがってタイロッド張力が減少し、その減少の度合は、腐食度が大きいほど、係船岸の水深が大きいほど大きい。なお、腐食度0.4のとき、タイロッド張力は、腐食なしのときに比べ2～6%減少している。

以上から、矢板の腐食は、タイロッド張力を若干減少させ、海中部の腐食量が多い腐食形態ほど減少度合が大きくなるといえる。

3.5 まとめ

腐食した矢板式係船岸の安全性の検討により得られたおもな結果を以下にとりまとめた。

①腐食矢板の断面係数は、腐食の影響を大きく受け腐食度0.4のとき、腐食なしのときの値に比べ40%程度小さくなった。

②矢板の海中部でのピーク応力の発生箇所は、矢板の

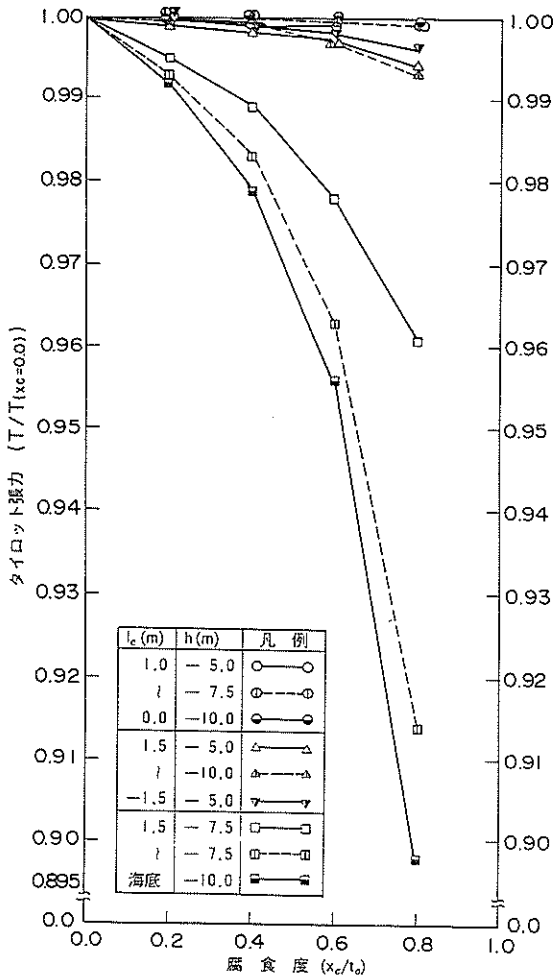


図-56 腐食度と矢板タイロッド張力

鉛直方向腐食形態によっては、最大曲げモーメント発生箇所から、0.5～1.0 m上側にずれる場合があった。

軟弱地盤の矢板に対しては、以上のほかに次のような結果が得られた。

③最大曲げモーメント発生箇所付近の腐食量が多い場合以外では、最大変位、及び矢板の根入れ長の安全率は、腐食の影響をほとんど受けなかった。

④海中部（特に矢板の曲げモーメント最大の箇所）の腐食量が多い場合には、軟弱地盤の矢板については、腐食なしのときに比べ、腐食度0.4で最大曲げモーメントは、2～5%減少、最大変位は、20～30%の増大、矢板根入れ長安全率は0.02～0.03減少した。そして各項目すべてが設計水深が大きいほど腐食による影響が大きかった。

⑤矢板式係船岸のタイロッド張力の値は、矢板の腐食

が進行すると減少した。

以上の結果より、次のことが言える。

(1)腐食矢板の健全度に、矢板の断面係数の値が大きく影響する。腐食調査を適確かつ精度よく実施することが重要である。

(2)海中部の矢板の肉厚測定箇所は、矢板の最大モーメント発生点と、その上方0.5～1.0 mとすればよい。ただし、砂質土地盤や硬い粘性土地盤の矢板では、地盤の地盤反力係数が小さい場合や、矢板の剛性が大きい場合には、仮想ばり法で求めた最大モーメント発生点よりやや下側で、曲げモーメントが最大となるので注意する必要がある。

(3)腐食により軟弱地盤の矢板のタイロッド張力は、若干小さくなる。

(4)海中部、特に最大曲げモーメント発生点付近の腐食量が多い腐食形態以外では、腐食による軟弱地盤の、矢板の曲げモーメントや、最大変位、及び矢板の根入れ長の安全率への影響は非常に小さい。

4. 結論

「腐食評価手法」に示されている応力解析法に対する基礎データを取りまとめた結果、得られたおもな結論は以下のとおりである。なお、以下の結論は本資料での試算モデルで得られたものであり、その解釈に当たっては、計算条件等に充分注意する必要がある。

4.1 直杭式横棧橋

①偏心のない水平力が棧橋に作用する場合には、杭の応力計算精度に対し、計算法の簡略化の影響はほとんど現れず、腐食杭のモデル化の影響のみ現れる。

偏心水平力が棧橋に作用する場合には、杭の応力計算精度に対し、腐食杭のモデル化の影響の他に、水平分担力算定法簡略化および杭のねじれ応力を考慮しないことの影響が現れるが、水平力による杭軸力の算定法簡略化の応力計算精度への影響はほとんど現れなかった。

以上から、腐食杭の応力計算に対して、次のことが言える。偏心のない水平荷重が棧橋に作用する場合には、腐食杭を変断面モデルとすれば、部材力の計算は簡略法を用いても十分な計算精度が確保される。棧橋の上載荷重の設定の仕方にもよるが、地震時についての健全度評価の場合、このようなケースが多いと思われる。棧橋に偏心水平荷重が作用する場合には、精度のよい計算値を得るには、腐食杭を変断面モデルとし、杭のねじれ応力を考慮した。厳密な水平分担計算法を用いる必要がある。ただし、この場合も、水平荷重による杭の軸力の算定は簡略法で行えば充分である。

②杭の最大腐食度が大きくなるにしたがい、杭の単位杭頭モーメント (M_{top}/H) が減少する。しかし、その減少割合以上に断面諸係数の値の減少が著しいため、杭の最大応力の値が大きくなる。杭の最大腐食度の杭応力に及ぼす影響は大きい。また、杭の最大腐食度が大きくなると座屈に対する許容応力度がかなり低下するため、杭の耐力が減少する。

③腐食杭の応力の値に影響する要因を、影響度の大きいものから記述すると、(Ⅰ)最大腐食度、(Ⅱ)水平分担力算定法の簡略化(偏心水平力作用時のみ)、(Ⅲ)腐食杭のモデル化、(Ⅳ)杭の鉛直方向腐食形態、(Ⅴ)杭のねじれ応力考慮の有無(偏心水平力作用時のみ)、(Ⅵ)水平力による軸力算定法の簡略化、の順となった。この各要因の応力への影響の大きさの順序は計算条件によって多少変動すると思われるが、ほぼ一般的な傾向を示していると考えられる。

最大腐食度が、杭の応力に大きく影響している。腐食栈橋の健全度評価に当たり、杭の応力計算を厳密な方法で行うことの前提として、杭の最大腐食部の位置を適確に捕え、肉厚測定を精度よく実施し、適切な杭断面諸元を設定することが、重要な要件であると考えられる。

4.2 矢板式係船岸

①腐食矢板の健全度に、矢板の断面係数の値が大きき影響する。腐食調査を適確かつ精度よく実施することが必要である。

②海中部の矢板の肉厚測定箇所は、矢板の最大モーメント発生点と、その上方0.5～1.0mとすればよい。ただし、砂質土地盤や硬い粘性土地盤の矢板では、地盤の地盤反力係数が小さい場合や、矢板の剛性が大きい場合には、仮想ばり法で求めた最大モーメント発生点よりやや下側で、曲げモーメントが最大となるので注意する必要がある。

③腐食により軟弱地盤の矢板のタイロッド張力は、若干小さくなる。

④海中部、特に最大曲げモーメント発生点付近の腐食量が大きい腐食形態以外では、軟弱地盤の矢板の曲げモーメントや、最大変位、および矢板の根入れ長の安全率への、腐食の影響は非常に小さい。

5. あとがき

直杭式横栈橋と矢板式係船岸をとりあげ、「腐食評価手法」に示されている各種応力計算法の計算精度、腐食部材応力に大きく影響する要因等の、とりまとめを行った。その結果、腐食を受けた港湾鋼構造物の各種計算法の特性や、腐食部材応力に大きく影響する要因が明らか

になった。

しかし、本資料での応力解析は、「技術基準」に準拠して行ったため、構造部材の塑性的挙動は考慮していない。また、腐食杭の座屈強度や腐食矢板の応力計算法に対する現行の「技術基準」の方法の適用性について、実際の構造物の挙動データに基づいた検討はなされていない。今後の調査、研究が持たれる。

本資料が、今後、腐食を受けた港湾鋼構造物の健全度評価の実施に当たり、参考となれば幸いである。

本資料は、「腐食評価手法」を作成する過程で出された多くの方々の御意見を参考にし、とりまとめたものである。付録-Gの栈橋の塑性計算は、斉田和成技官(設計基準研究室)に実施して頂いたものである。また、資料の最終的なとりまとめに当たり、石渡設計基準部長、片岡設計基準研究室長、安間設計基準部主任研究官から、種々の御教示を賜わった。ここに、関係者の皆様には深甚なる感謝の意を表します。(1985年3月30日受付)

参考文献

- 1) 石渡 友夫(他7名); 港湾鋼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, 57 p.
- 2) 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年3月。
- 3) 文献1) pp. 21～24。
- 4) 文献1) p. 21
- 5) 文献1) p. 24
- 6) 文献1) p. 24
- 7) 文献1) p. 16
- 8) 文献1) p. 17
- 9) 文献1) p. 21
- 10) 文献1) p. 14
- 11) 文献1) p. 15
- 12) 文献1) p. 13
- 13) 文献1) p. 13
- 14) 文献1) p. 13
- 15) 文献1) p. 26
- 16) 文献1) pp. 26～27。
- 17) 文献1) p. 26
- 18) 善 一章; 海洋環境における鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.15, No.3, 1976年9月, pp.163～177。
- 19) 文献1) pp. 8～9。
- 20) 文献1) p. 25
- 21) 文献1) p. 25

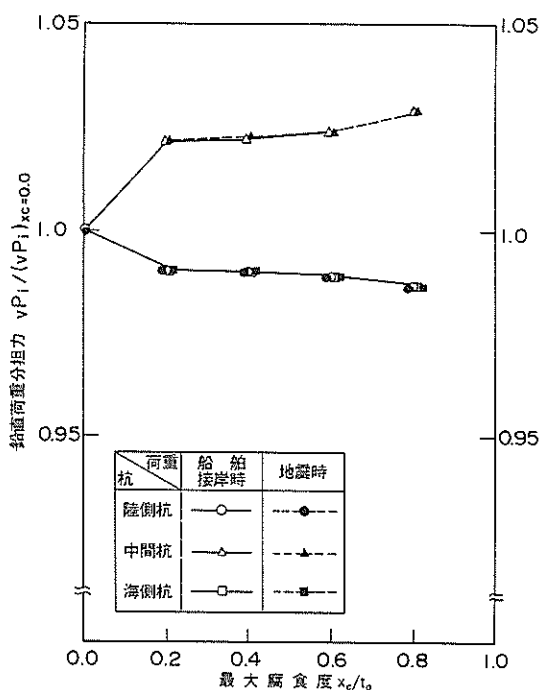
付録A 直杭式横棧橋の腐食と各杭の鉛直荷重分担

直杭式横棧橋の杭の腐食による、杭の軸力への影響を明らかにすることを目的として、本文2.3で解析した棧橋の計算データを用いて、杭の腐食による各杭の鉛直荷重分担力の変動量を調べた。

各杭の鉛直荷重分担力は、杭の鉛直方向の弾性沈下も考慮し、杭頭部を支点とする弾性支承上の連続ばりに鉛直荷重を作用させ、はりの支点反力を求める方法により算出した。そのため、杭の、腐食による鉛直方向沈下係数への影響も考慮した値が得られている。

付図A-1に、杭の最大腐食度と各杭の鉛直荷重分担力の関係を示した。杭の腐食の進行にしたがい、中間杭の分担力が、若干大きくなるが、海側杭、陸側杭の分担力は少し減少している。しかし、各杭の鉛直荷重分担力の腐食による変動は小さく、最大腐食度0.4のときの鉛直荷重分担力の変動量は、腐食なしのときの分担力の値の+2.0~-1.0%程度となっている。

杭の腐食による各杭の鉛直荷重分担力の変動量については、直杭式横棧橋の健全度評価にほとんど影響しないと考えられる。



付図A-1 杭の最大腐食度と各杭の鉛直荷重分担力

付録B 上部工はりと杭の曲げこわさと杭頭モーメント

上部工はりの剛性を無限大と仮定する「技術基準」の棧橋の応力計算法を腐食杭へ適用することの妥当性について検討を行った。検討のための計算方法として、次の2つを取り上げた。

①本文の表-7に示すMethod 1 (技術基準の方法)

②棧橋法線直角方向断面を門型ラーメンとし、たわみ角法を用い、応力計算を行う方法。(技術基準以外の方法)

(1) 計算条件

1) 検討対象棧橋

本文、図-3に示すNo.1の棧橋を検討対象とした。門型ラーメンは、杭長を $(h+1/\beta)$ とし、杭下端固定とした。

2) 土質条件

本文、2.2の、No.1棧橋に対する土質条件と同じ値を設定した。

3) 荷重

(ア) 上載荷重

技術基準の方法に対しては、本文2.2と同じ値とした。門型ラーメンに対しては、棧橋ブロックの法線方向幅5.0mに作用する等分布荷重と、死荷重をそれぞれ次のとおり線荷重に換算した値を用いた。

①常時 ; 等分布荷重 24.5 (tf/m)

・ 棧橋の上載荷重の3.0 (tf/m²) と死荷重の1.9 (tf/m²) を、線荷重に換算すると、 $(3.0+1.9) \times 5.0 = 24.5$ となる。

②地震時 ; 等分布荷重 17.0 (tf/m)

・ 上載荷重の1.5 (tf/m²) と死荷重の1.9 (tf/m²) より換算した。

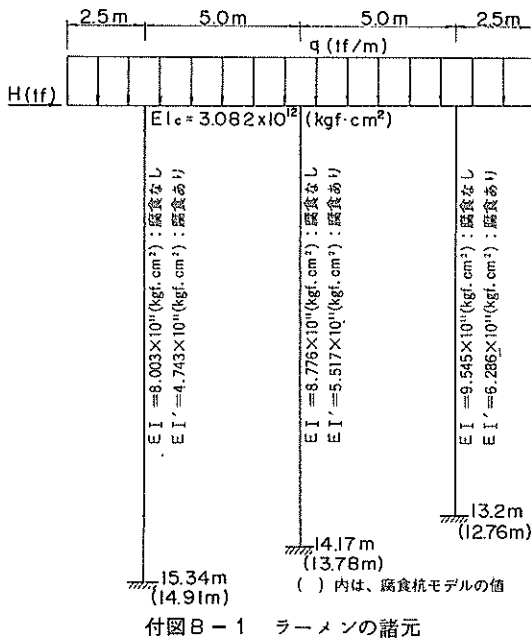
(イ) 水平荷重

①船舶接岸時

・ 技術基準の方法については、船舶接岸力として58.0 (tf)を偏心させずに棧橋に作用させた。
・ 門型ラーメンについては、No.1の棧橋の法線方向の4列の杭がそれぞれ等しく水平力を分担するため上記荷重の1/4の14.5 (tf)を水平荷重として作用させた。

②地震時

・ 震度0.2のときNo.1の棧橋に作用する水平力204 (tf)を作用させた。
・ 門型ラーメンについては、上記荷重の1/4の51 (tf)を水平力として作用させた。



4) 腐食杭のモデル化

腐食杭として、腐食度0.4の一様杭モデルを用いた。一様杭モデルの場合、杭の外径は小さくなるため、門型ラーメンの杭長 $(h + 1/\beta)$ の値も小さくした。

5) 計算ケース

計算ケースの設定は、船舶接岸時と、地震時のそれぞれに対し、腐食なしと腐食ありの2ケースを設定し、付表B-1に示すとおりとした。付表B-1には、門型ラーメンの計算時に使用する杭と上部工の、曲げ剛性も併

せて載せてある。

(8) 計算結果

付表B-2に各ケースの、計算結果を示した。

①地震時は技術基準の方法とラーメンによる方法の差は小さく、杭と上部工の応力に直接影響する杭頭モーメントで、1%以下となっている。

船舶接岸時には、差は大きくなり、陸側の杭の水平力分担、杭頭モーメントについては門型ラーメンによる結果のほうが技術基準の方法による値より10.0~20.0%大きくなっている。これは、船舶接岸時のケースでは、上載荷重が地震時の2倍であること、水平力が1/4程度であることから、鉛直荷重により生じる杭頭モーメントの全杭頭モーメントに寄与する割合が地震時に比べ相対的に大きくなったためと思われる。

また、腐食がない場合より腐食のある場合のほうが、2つの計算法による計算値の差が小さくなっている。腐食杭では、杭の曲げこわさ(EI)が腐食前にくらべ小さくなる。そのため、上部工はりの曲げこわさ(EI)に対し、杭の曲げこわさが相対的に小さくなり、技術基準の仮定に近づくため、技術基準の方法とラーメンの方法の計算結果の差も小さくなったと考えられる。

(4) 結論

①腐食杭のほうが、腐食前の杭より技術基準の仮定に近づく。そのため腐食杭栈橋に技術基準の方法を準用することに問題はない。

②船舶接岸時の杭頭モーメントについては、たわみ角法によるラーメン解析のほうが技術基準の方法による値より10~20%大きくなった。これは、船舶接岸時には、

付表B-1 門型ラーメンの計算ケース

CASE	外力		曲げこわさ $EI (\times 10^{11} \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2)$				備考	
	水平力 $H (\text{tf})$	鉛直荷重 $q (\text{tf}/\text{m})$	上部はり	海側杭	中間杭	陸側杭		
1-1	51.0 (204.0)*	17.0 (1.5+1.9)* tf/m ²	30.82 (1.0)	8.003 (0.26)	8.776 (0.285)	9.545 (0.310)	腐食なし (Method 1による)	地震時 想定
1-1'	0.0	17.0 (1.5+1.9)* tf/m ²	30.82 (1.0)	"	"	"		
1-2	51.0 (204.0)*	17.0 (1.5+1.9)* tf/m ²	30.82 (1.0)	4.743 (0.15)	5.517 (0.18)	6.286 (0.204)	腐食度0.4の一様杭 モデル	
2-1	14.5 (58.0)*	2.45 (3.0+1.9)* tf/m ²	30.82 (1.0)	8.003 (0.26)	8.776 (0.285)	9.545 (0.310)	腐食なし (Method 1による)	船航接岸 時(偏心 なし)を 想定
2-2	14.5 (58.0)*	2.45 (3.0+1.9)* tf/m ²	30.82 (1.0)	4.743 (0.15)	5.517 (0.18)	6.286 (0.204)	腐食度0.4の一様杭 モデル	

(*) 内は栈橋の荷重に換算した値。

() 内は、上部工はりの曲げこわさに対する各杭の曲げこわさの割合を示す。

付表B-2 技術基準の方法と門型ラーメンによる栈橋の杭頭モーメント計算結果

杭 No.	CASE 1-1			CASE 1-2			CASE 2-1			CASE 2-2			CASE 1-1'	
	水平 分担力 $H_i(t)$	水平力に よる軸力 $\lambda P_i(t)$	杭頭モー メント $M_{top}(tm)$	水平力 分担 $H_i(t)$	水平力に よる軸力 $\lambda P_i(t)$	杭頭モー メント $M_{top}(tm)$	水平力 分担 $H_i(t)$	水平力に よる軸力 $\lambda P_i(t)$	杭頭モー メント $M_{top}(tm)$	水平力 分担 $H_i(t)$	水平力に よる軸力 $\lambda P_i(t)$	杭頭モー メント $M_{top}(tm)$	杭頭モー メント $M_{top}(tm)$	
基準 基準 の方法	海側杭	1187 (1.0)	(-) 29.69 (1.0)	91.01 (1.0)	11.11 (1.0)	(-) 2839 (1.0)	8284 (1.0)	337 (1.0)	(-) 844 (1.0)	2588 (1.0)	316 (1.0)	(-) 807 (1.0)	2355 (1.0)	0.0
	中間杭	1651 (1.0)	(-) 1189 (1.0)	11693 (1.0)	1637 (1.0)	(-) 1234 (1.0)	11280 (1.0)	469 (1.0)	(-) 338 (1.0)	3324 (1.0)	466 (1.0)	(-) 351 (1.0)	3207 (1.0)	0.0
	陸側杭	2263 (1.0)	4158 (1.0)	14841 (1.0)	2351 (1.0)	4073 (1.0)	14995 (1.0)	644 (1.0)	1182 (1.0)	4219 (1.0)	668 (1.0)	1158 (1.0)	4263 (1.0)	0.0
ラー メン (た わ み 角 法)	海側杭	1183 (0.997)	(-) 27.65 (0.93)	89.61 (0.985)	11.06 (0.995)	(-) 3040 (1.07)	8183 (0.988)	334 (0.991)	(-) 786 (0.93)	2603 (1.006)	312 (0.99)	(-) 864 (1.07)	2358 (1.001)	0.475
	中間杭	1672 (1.013)	(-) 1406 (1.18)	11757 (1.005)	1647 (1.006)	(-) 1200 (0.97)	11306 (1.002)	394 (0.84)	(-) 428 (1.266)	2679 (0.806)	410 (0.88)	(-) 341 (0.97)	2757 (0.86)	-5.74
	陸側杭	2245 (0.992)	4270 (1.027)	14696 (0.990)	2347 (0.998)	4240 (1.04)	14879 (0.992)	723 (1.12)	1214 (1.027)	5061 (1.200)	728 (1.09)	1205 (1.04)	4844 (1.14)	7.63
備 考	腐食なし			腐食あり(一様杭モデル)			腐食なし			腐食あり(一様杭モデル)			鉛直荷重 のみ。	
	地震時						船舶接岸時(偏心なし)							

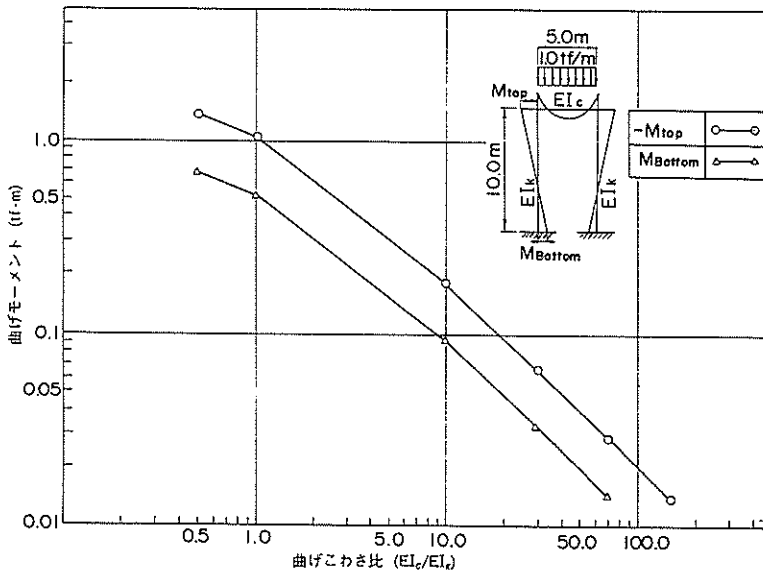
()の中の値は、技術基準の方法による値に対する割合を示す。

地震時に比べ、水平荷重が小さく、逆に鉛直荷重が大きくなる。そのため、技術基準の方法では、考慮しない鉛直荷重により生じる杭頭モーメントの値が、大きくなったことが原因と思われる。

通常の場合、栈橋の杭の諸元は、地震時で定まることが多いので、2つの計算方法の結果には大きな差は生じないと推察される。

(追加)

付図B-2に、門型ラーメンの柱とはり部材の曲げごわさの比を変化させたときの、たわみ角法で求めた柱の頭部曲げモーメントと、固定端曲げモーメントの値を示した。なお、ラーメンの諸元は、柱長10.0m、はり長さ5.0m、であり、1.0tf/mの等分布荷重を作用させた。



付図B-2 門型ラーメンの柱とはりの曲げごわさと鉛直荷重による柱部材の曲げモーメント

柱とはりの曲げこわさの比 (EI_c/EI_k) が大きくなるに従い、柱部材の曲げモーメントの値が小さくなっているのが分かる。以上からも、腐食により杭の曲げこわさが小さくなると鉛直荷重による杭に生じる曲げモーメントの値は小さくなり、技術基準の仮定に近くなることが分かる。

付録一 C 杭の横抵抗に影響する土層厚

多層系地盤に打ち込まれた杭の、横方向ばね定数や単位杭頭モーメント (M_{top}/H) の算定にあたり、技術基準 P. 8-62 に示されているチャンの解析式を使用するには、横方向地盤反力係数の代表値を設定しなければならない。地盤条件の代表値は、杭の横抵抗に影響のある土層厚はどの程度が明らかにし、その土層内の地盤条件により適切に設定する必要がある。

そこで、砂質土と粘性土からなる 2 層系の地盤に打ち込まれた単杭に、杭頭固定の条件で、水平力を作用させ、チャンの杭の弾力方程式を解き、杭の挙動を調べた。

(1) 基礎方程式

$$\text{地上部: } EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} = 0 \quad (0 \geq x \geq -h)$$

$$\text{地中部: } EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_{s1} y_2 = 0 \quad (x_1 \geq x \geq 0)$$

$$EI \frac{d^4 y_3}{dx^4} + E_{s2} y_3 = 0 \quad (x \geq x_1)$$

EI ; 杭の曲げこわさ

E_{s1} ; 上層地盤の弾性係数

E_{s2} ; 下層地盤の弾性係数

x_1 ; 上層地盤厚 (m)

(2) 計算条件

1) 杭の諸元

外径 ; 1,000.0 (mm)

肉厚 ; 10.0 (mm)

空中部長さ ; 10.0 (m)

地中部長さ ; 20.0 (m)

2) 土質条件

砂質土 ; N 値 13.0 (横方向地盤反力係数 2.0 (kgf/cm³))

; N 値 27.0 (横方向地盤反力係数 4.0 (kgf/cm³))

粘性土 ; $C_u = 0.4$ (kgf/cm²) (横方向地盤反力係数 0.4 (kgf/cm³))

$C_u = 0.5$ (kgf/cm²) (横方向地盤反力係数 0.6 (kgf/cm³))

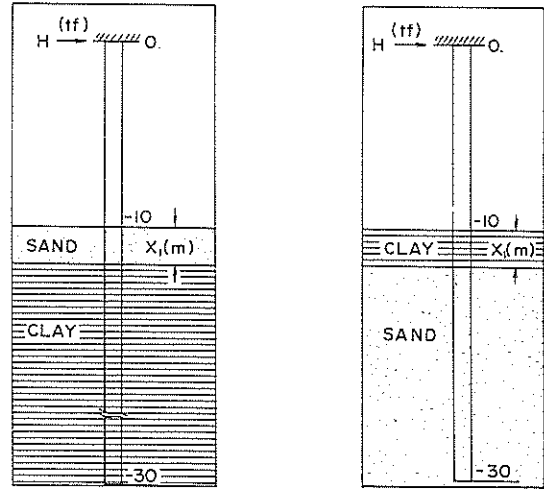
$C_u = 0.6$ (kgf/cm²) (横方向地盤反力係数 0.8 (kgf/cm³))

$C_u = 7.5$ (kgf/cm²) (横方向地盤反力係数 1.1 (kgf/cm³))

3) 土層ケース

ケース 1 ; 粘性土上に、厚さ x_1 (m) の砂質土層がある。

ケース 2 ; 砂質土上に、厚さ x_1 (m) の粘性土層がある。



付図 C-1 地盤条件

4) 計算ケース

各土層ケースにおいて、土質条件、上層の土層厚 (x_1) を、付表 C-1 のとおり変化させ、杭の第一不動点の位置、横方向ばね定数 (K_H)、単位杭頭モーメント (M_{top}/H) を算定した。

(3) 計算結果

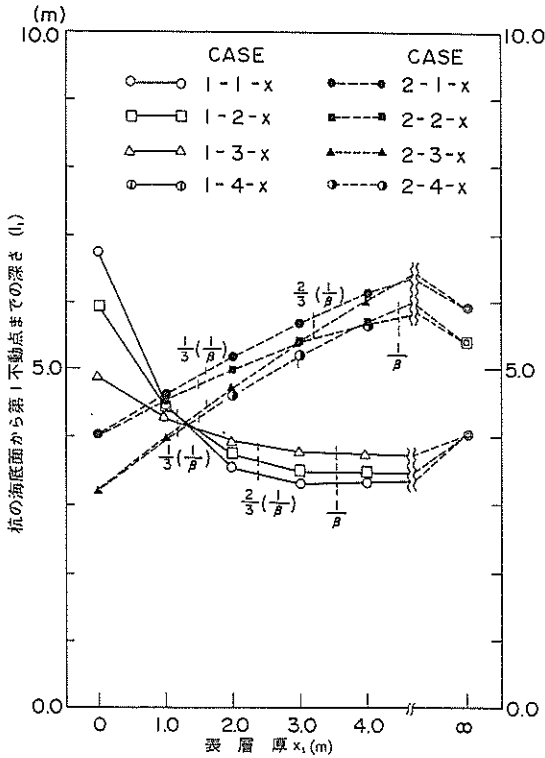
1) 第 1 不動点の発生位置

上層厚 x_1 と、杭の第 1 不動点の地中深さ l_1 の関係を、付図 C-2 に示す。上層が砂質土層の場合、層厚 x_1 が、砂質土層の $1/\beta$ より大きくなって、第 1 不動点の深さ l_1 は変化しなくなる。だが、上層が、粘性土の場合には、粘性土の $1/\beta$ より大きな層厚 x_1 となっても、 x_1 の増大に従い第 1 不動点 l_1 も大きくなっている。また、どちらの土層ケースにおいても、上層の厚さ x_1 が無限に大きいときの l_1 の値より、層厚 x_1 が $1/\beta$ 付近では、 l_1 の値が小さくなったり、大きくなっている。付図 C-3 は、第 1 不動点の深さを、CASE 1-1 の l_1 の値で無次元化したものである。

通常の栈橋の最上層は砂質土層であるので、杭の第 1

付表C-1 2層地盤の横方向地盤反力係数検討計算(k)

土層の条件	計 算 条 件						計 算 結 果			
	CASE	SAND		CLAY		x (m)	$1/\beta$ (m)	第1不動点 (m)	M_{top}/H	H/y_{top}
		N 値	k_h (kgf/cm ³)	C_u (kgf/cm ²)	k_k (kgf/cm ³)					
ケ 1 ス (砂層が上)	1-1-1	13程度	2.0	0.4程度	0.4	0.0	SAND	6.74	7.663	246.3
	2	"	"	"	"	1.0	(3.56)	4.47	6.954	338.7
	3	"	"	"	"	2.0	CLAY	3.55	6.889	358.4
	4	"	"	"	"	3.0		3.32	6.895	360.9
	5	"	"	"	"	4.0		(5.32)	3.34	6.891
	6	"	"	"	"	∞		4.01	6.778	372.0
	1-2-1	13程度	2.0	0.5程度	0.6	0.0	SAND	5.91	7.405	276.8
	2	"	"	"	"	1.0	(3.56)	4.41	6.916	345.1
	3	"	"	"	"	2.0	CLAY	3.74	6.854	361.8
	4	"	"	"	"	3.0		3.50	6.856	364.4
	5	"	"	"	"	4.0		(4.81)	3.49	6.855
	6	"	"	"	"	5.0		3.59	6.842	365.4
	7	"	"	"	"	∞		4.01	6.778	372.0
	1-3-1	13程度	2.0	0.75程度	1.1	0.0	SAND	4.87	7.066	324.1
	2	"	"	"	"	1.0	(3.56)	4.28	6.853	357.0
	3	"	"	"	"	2.0	CLAY	3.93	6.812	366.7
	4	"	"	"	"	3.0		3.78	6.810	368.7
	5	"	"	"	"	4.0		(4.13)	3.75	6.811
6	"	"	"	"	∞		4.01	6.778	372.0	
ケ 1 ス 2 (粘土層が上)	2-1-1	13程度	2.0	0.5程度	0.6	0.0	CLAY	4.01	6.778	372.0
	2	"	"	"	"	1.0	(4.81)	4.63	7.073	327.6
	3	"	"	"	"	2.0		5.18	7.253	301.6
	4	"	"	"	"	3.0		SAND	5.69	7.337
	5	"	"	"	"	4.0	(3.56)	6.12	7.363	282.1
	6	"	"	"	"	∞		5.91	7.405	276.8
	2-2-1	13程度	2.0	0.6程度	0.8	0.0		CLAY	4.01	6.778
	2	"	"	"	"	1.0	(4.47)	4.54	7.018	335.1
	3	"	"	"	"	2.0		4.99	7.146	315.1
	4	"	"	"	"	3.0		SAND	5.41	7.195
	5	"	"	"	"	4.0	(3.56)	5.68	7.204	302.5
	6	"	"	"	"	∞		5.39	7.238	299.0
	2-3-1	27程度	4.0	0.5程度	0.6	0.0		CLAY	3.24	6.495
	2	"	"	"	"	1.0	(4.81)	4.00	6.875	360.9
	3	"	"	"	"	2.0		4.72	7.141	319.8
	4	"	"	"	"	3.0		SAND	5.41	7.287
	5	"	"	"	"	4.0	(2.99)	6.02	7.343	286.0
	6	"	"	"	"	∞		5.91	7.405	276.8
2-4-1	27程度	4.0	0.6程度	0.8	0.0	CLAY		3.24	6.495	427.6
2	"	"	"	"	1.0	(4.47)	4.31	6.840	366.1	
3	"	"	"	"	2.0		4.61	7.058	330.5	
4	"	"	"	"	3.0		SAND	5.21	7.159	312.6
5	"	"	"	"	4.0	(2.99)	5.73	7.188	305.3	
6	"	"	"	"	∞		5.39	7.238	299.0	



付図C-2 表層土層厚と単杭の第1不動点の深さ(1)

不動点の発生位置 l_1 に影響を及ぼすのは、海底面下 $1/\beta$ 程度までの層の地盤であるといえる。

2) 杭の横方向ばね定数

栈橋の杭の設計において、重要なパラメータである杭の横方向ばね定数と、上層厚 x_1 の関係を付図C-4に示した。

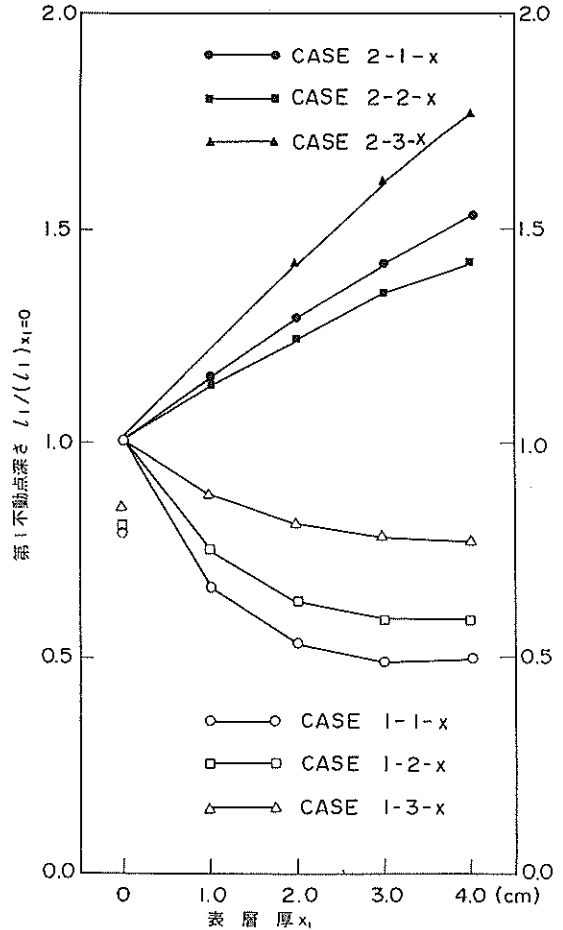
ケース1の上層が砂質土の場合、 x_1 の増加に従い杭の横方向ばね定数 K_H も増大してゆくが、 x_1 が砂質土の $1/\beta$ の $2/3$ から $1/\beta$ の値になると、それ以上、上層砂質土層厚 x_1 が大きくなっても、 K_H が変化しなくなる。一方、ケース2の上層が粘性土層の場合には、 x_1 の値が、粘性土層の $1/\beta$ 程度になっても、 K_H は減少している。

通常の栈橋では、先に述べたとおり、上層が砂層であることから、杭の横方向ばね定数に影響する土層は、海底面から $1/\beta$ 程度までの層であるといえる。

3) 単位杭頭モーメント (M_{top}/H)

単位杭頭モーメントの値と、上層厚 x_1 の関係を付図C-5に示す。

上層が砂質土の場合、 x_1 が、砂質土層に対する $1/\beta$ の $2/3$ 程度以上になると、 x_1 が増大しても M_{top}/H の値が変化しなくなる。一方、上層が粘性土の場合でも、



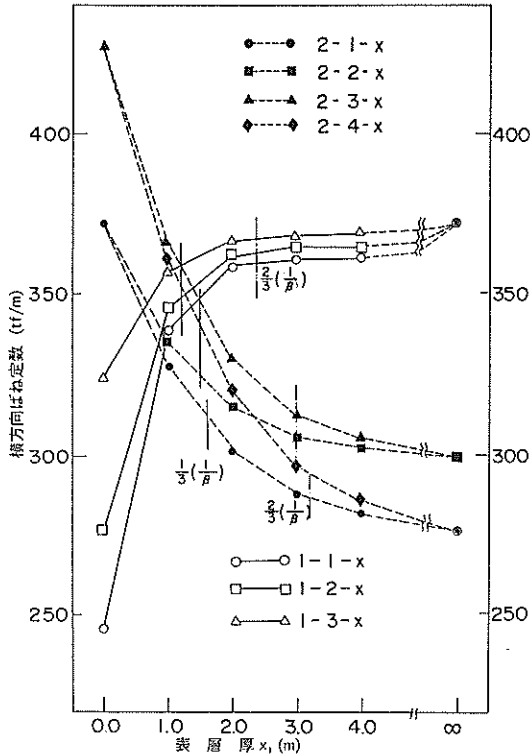
付図C-3 表層土層厚と単杭の第1不動点の深さ(2)

x_1 の値が、粘性土層に対する $1/\beta$ 程度になると (M_{top}/H) の値が変化しなくなっている。

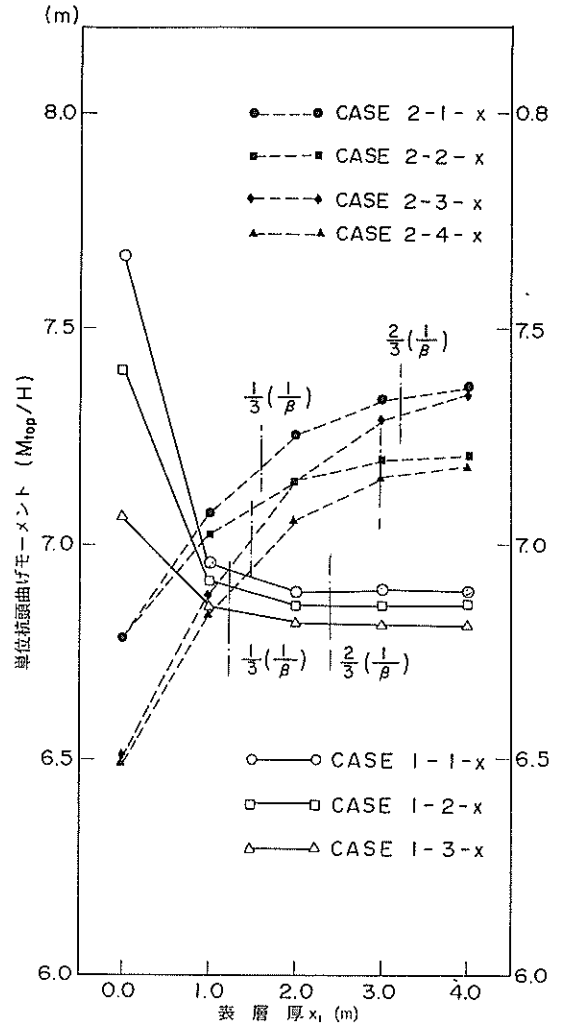
栈橋の単位杭頭モーメント (M_{top}/H) に影響する土層は、海底面から $1/\beta$ 程度までの層であるといえる。

(4) 結論

最上層が砂質土層である多層系地盤の杭の横抵抗は、上層の砂質土層厚が、その砂質土に対する $1/\beta$ の値程度以上あれば、ほぼ最上層の砂質土層の土性により定まる。



付図C-4 表層土層厚と単杭の横方向ばね定数



付図C-5 表層土層厚と単杭の単位杭頭モーメント

付録-D 棧橋杭の応力成分と計算法影響係数

計算法の違いが腐食直杭式横棧橋の杭の応力計算値に及ぼす影響については、本文 2.2 で検討を行った。ここでは、杭の応力を、曲げ応力と、水平荷重による軸応力と、鉛直荷重による軸応力の 3 成分に分け、それぞれの応力成分ごとに、計算法影響係数の検討を行った。なお、解析データには本文 2.2 の No. 1 の棧橋の計算値を用いた。

(1) 解析結果

付図 D-1、付図 D-2 に、陸側杭の応力成分の計算法影響係数を示した。

1) 地震時（偏心のない水平力作用時）

付図 D-1 に、地震時の陸側杭の応力成分の計算法影響係数を示した。地震時には、水平力による軸応力のみが計算法の簡略化の影響を受け、5~10%程度変動している。他の応力成分は、計算法の簡略化の影響を受けていない。

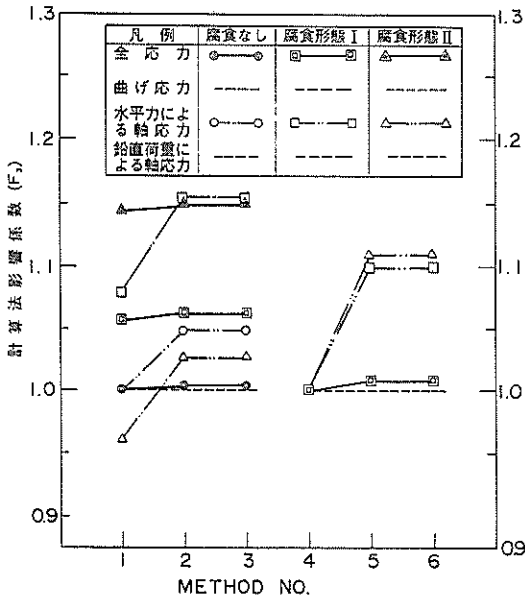
2) 船舶接岸時（偏心水平力作用時）

付図 D-2 に、船舶接岸時の陸側杭の応力成分の計算法影響係数を示した。船舶接岸時には、鉛直荷重による

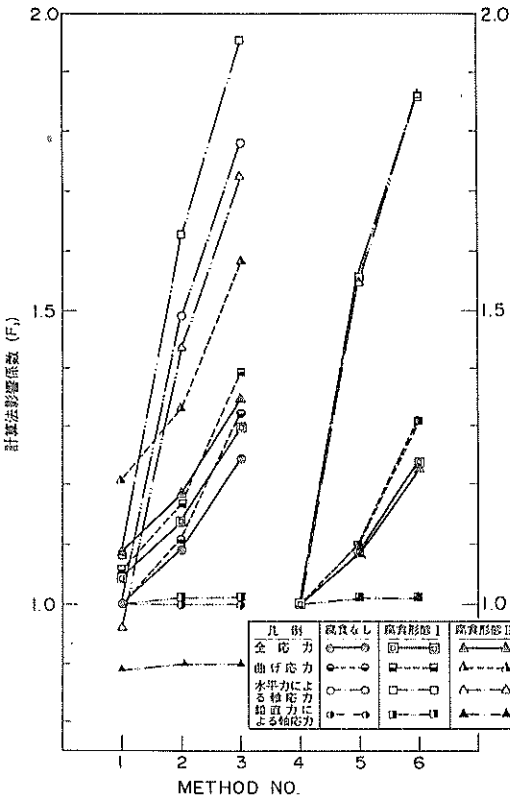
軸応力は、計算法の簡略化の影響をほとんど受けていないが、水平荷重による軸応力と、曲げ応力は、計算法の簡略化の影響を強く受けている。特に、水平荷重による軸応力の変動は大きい。そこで、水平荷重による軸応力成分と、曲げ応力成分に対し、計算法の簡略化の影響について検討することとする。

① 水平荷重による軸応力成分

付図 D-2 をみると、Method 1,4 に比べ、Method 2,5 の値が、40~60%増大している。これは、水平荷重による軸力の算定法を簡略化したこと、及び棧橋のブロックの回転変位に対する各杭のねじれ応力による抵抗を考慮しなかったことが原因である。地震時の Method 1,4 と Method 2,5 の差が 5~10% であることから、水平荷重による軸応力についても、算定法の簡略化の影響より杭



付図D-1 最大応力の応力成分と計算法影響係数(1)



付図D-2 最大応力の応力成分と計算法影響係数(2)

のねじれ応力を考慮しないことのほうが、大きく影響していると考えられる。つまりブロックの回転変位に対する杭のねじれ抵抗を無視することにより、各杭の水平分担力の差が大きくなり、杭頭モーメントの値が変化することの影響が現れてくると考えられる。

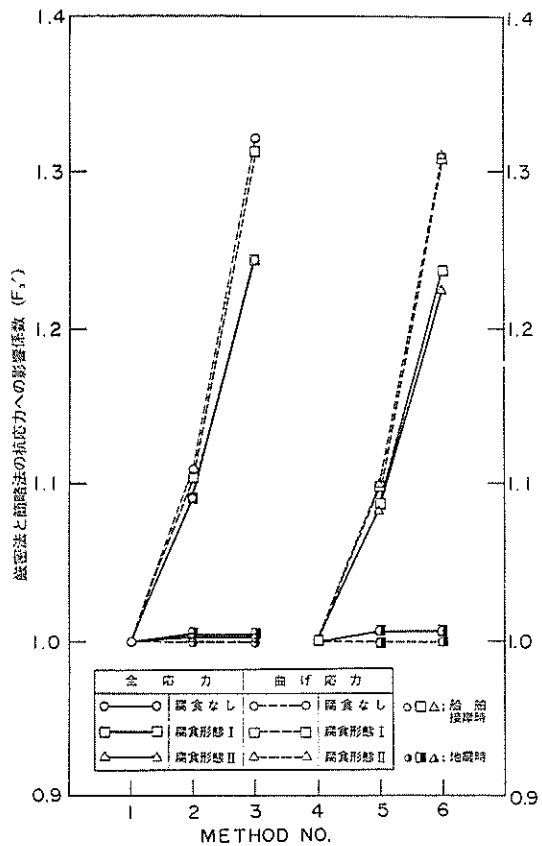
Method 2, 5 に比べ、Method 3, 6 の値が 30% 程度大きくなっている。本文でも述べたとおり、偏心水平荷重を受ける場合の各杭の水平分担の算定法の簡略化により、ブロック内の各杭の水平分担力の差が大きくなったことが、原因と考えられる。

④曲げ応力成分

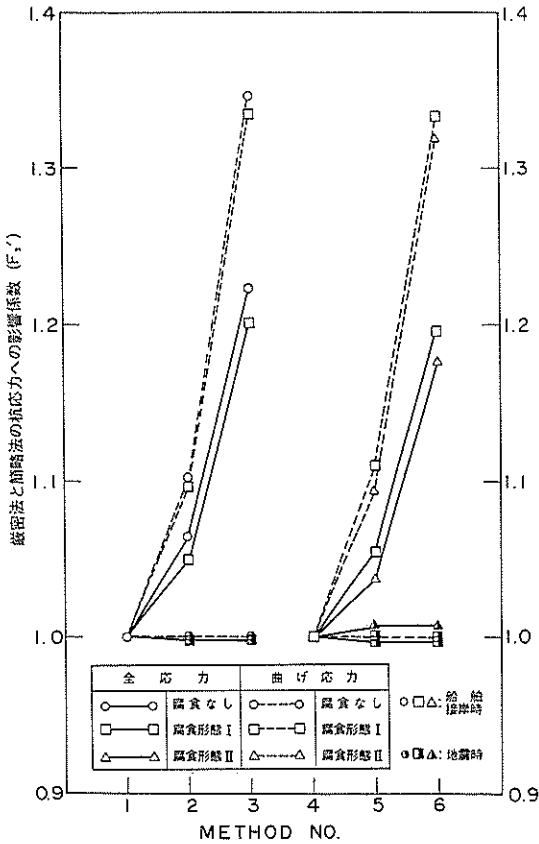
計算法簡略化の影響を明確にするため、腐食杭のモデル化の影響を徐いた計算法影響係数 (F_s) を、付図D-3~付図D-5に示した。

地震時には、既に述べたとおり曲げ応力は、計算法の簡略化の影響を受けていない。

船舶接岸時には、Method 1, 4 に比べMethod 2, 5の曲げ応力のほうが10%程度大きくなっている。原因は、ブロックの回転変位に対し各杭のねじれ応力による抵抗を



付図D-3 厳密法と簡略法の杭応力への影響係数(1)



付図D-4 厳密法と簡略法の杭応力への影響係数(2)

考慮しなかったことによる。

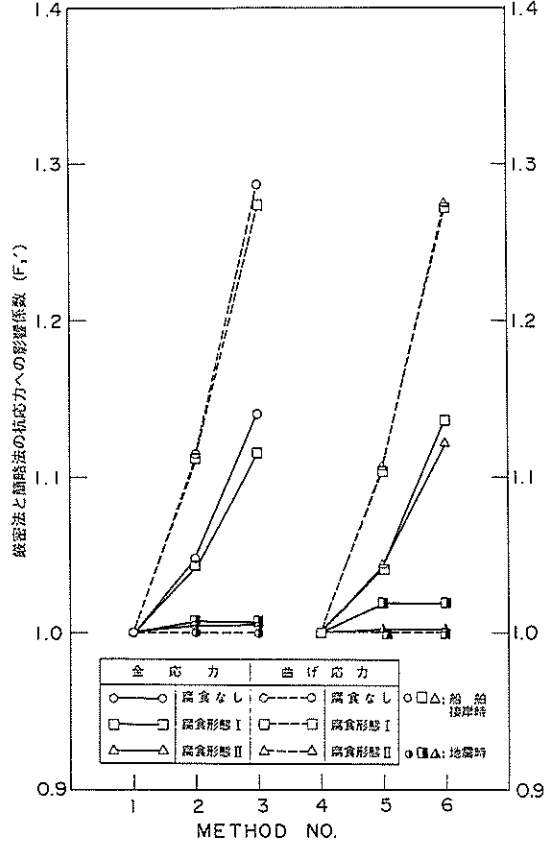
Method 2, 5 に比べ Method 3, 6 の曲げ応力は、20%程度大きくなっている。これは全応力の15%より大きい増大量である。水平分担力の算定法の簡略化が原因である。

(2) 結 論

各応力成分ごとに部材力計算法の簡略化の影響を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

① 偏心のない水平荷重作用時には、水平荷重による軸力の算定法の簡略化の影響しか現れない。水平荷重による杭の軸力算定法簡略化の、水平荷重による軸応力成分に対する影響は、5~10%ある。しかし、杭の全応力に占める水平荷重による軸応力成分の割合が5~7%程度と小さいため、杭の全応力に対しては、影響は1%弱程度しか現れない。以上から、水平荷重条件下では、計算法の簡略化の影響はほとんど無視できるといえる。

② 偏心水平荷重が栈橋に作用するとき、杭のねじれ応力を無視することにより最大杭応力が8%程度大きくなる。



付図D-5 厳密法と簡略法の杭応力への影響係数(3)

③ 偏心水平荷重が栈橋に作用するとき、水平分担の算定法の簡略化の杭応力への影響は、15%程度あるが、おもに、曲げ応力成分の増大によりもたらされている。

付録-E 栈橋杭の応力成分の全応力への寄与率

腐食直杭式横栈橋の杭応力計算値への、各応力成分の寄与率の検討を行った。

(1) 栈橋の杭応力と応力成分の寄与率の定義。

栈橋の杭の全応力(σ)は、水平荷重による曲げ応力(σ_M)と、水平荷重による軸応力(σ_{HP})と、鉛直荷重による軸応力(σ_{VP})の3つの成分に分けることができる。

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_{HP} + \sigma_{VP} \quad \dots\dots\dots (E-1)$$

3つの応力成分の全応力に対する寄与率を次のとおり定める。

$$f_M = \frac{\sigma_M}{\sigma} \times 100 \quad ; \text{水平荷重による曲げ応力の寄与率}$$

$$f_{HP} = \frac{\sigma_{HP}}{\sigma} \times 100 \quad ; \text{水平荷重による軸応力の寄与率}$$

$$f_{VP} = \frac{\sigma_{VP}}{\sigma} \times 100 \quad ; \quad \text{鉛直荷重による軸応力の寄与率}$$

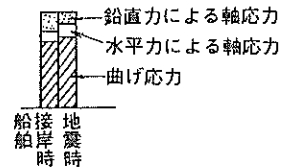
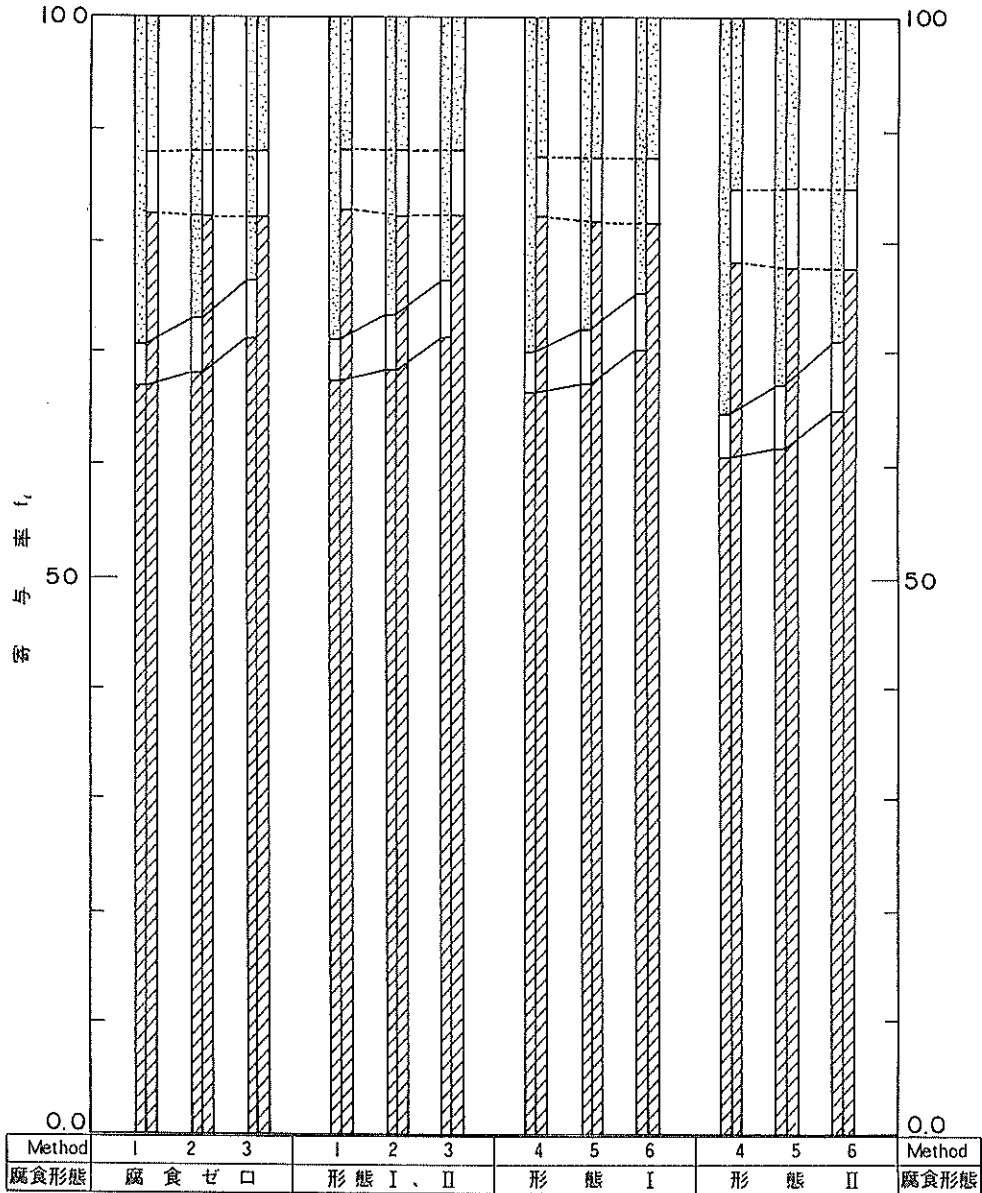
$$100.0 = f_M + f_{HP} + f_{VP} \quad \dots\dots\dots (E-2)$$

となる。

(2) 各応力成分の寄与率の計算結果

① 計算法と各応力成分の寄与率

そこで

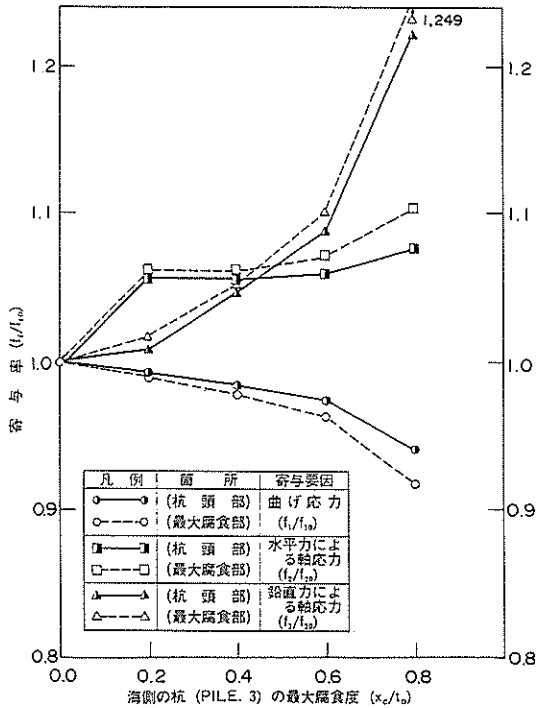


付図E-1 計算法と杭の最大応力に対する各応力成分の寄与率

付表E-1 杭の最大腐食度と各応力成分の全応力に占める割合

CASE	最大腐食度 (σ_d/t_0) PILE 3	PILE 1 (陸側杭)				PILE 2 (中間杭)				PILE 3 (海側杭)						
		杭頭部		最大腐食部		杭頭部		最大腐食部		杭頭部		最大腐食部				
		全応力 σ (kgf/cm ²) σ_M	σ_{HP} σ_{VP}	全応力 σ (kgf/cm ²) σ_M	σ_{HP} σ_{VP}	全応力 σ (kgf/cm ²) σ_M	σ_{HP} σ_{VP}	全応力 σ (kgf/cm ²) σ_M	σ_{HP} σ_{VP}	全応力 σ (kgf/cm ²) σ_M	σ_{HP} σ_{VP}	全応力 σ (kgf/cm ²) σ_M	σ_{HP} σ_{VP}			
0.4	0.0	11540 (1.0)	9890 (1.0)	9710 (1.0)	8420 (1.0)	9550 (1.0)	8490 (1.0)	7730 (0.670)	6080 (0.615)	6500 (0.670)	5220 (0.619)	5810 (0.608)	4750 (0.559)	330 (0.480)	4080 (0.480)	
		410 (0.035)	410 (0.041)	130 (0.013)	130 (0.015)	330 (0.033)	330 (0.039)	330 (0.039)	330 (0.039)	330 (0.039)	330 (0.039)	330 (0.039)	330 (0.039)	330 (0.039)	330 (0.039)	330 (0.039)
A1	0.2	12320 (1.0)	11570 (1.0)	10680 (1.0)	10290 (1.0)	10430 (1.0)	10420 (1.0)	8250 (0.670)	7090 (0.613)	7020 (0.657)	6220 (0.604)	6310 (0.605)	5780 (0.555)	420 (0.485)	5060 (0.485)	
		390 (0.032)	3680 (0.298)	430 (0.037)	4050 (0.350)	3750 (0.352)	3750 (0.352)	3750 (0.352)	3750 (0.352)	3750 (0.352)	3750 (0.352)	3750 (0.352)	3750 (0.352)	3750 (0.352)	3750 (0.352)	3750 (0.352)
A2	0.4	12230 (1.0)	14360 (1.0)	10540 (1.0)	13050 (1.0)	10230 (1.0)	13620 (1.0)	8140 (0.666)	8710 (0.607)	6870 (0.652)	7800 (0.598)	6130 (0.599)	7440 (0.547)	580 (0.496)	6750 (0.496)	
		410 (0.034)	570 (0.039)	5070 (0.354)	5070 (0.356)	3750 (0.356)	3750 (0.356)	3750 (0.356)	3750 (0.356)	3750 (0.356)	3750 (0.356)	3750 (0.356)	3750 (0.356)	3750 (0.356)	3750 (0.356)	3750 (0.356)
A3	0.6	12080 (1.0)	18850 (1.0)	10330 (1.0)	17870 (1.0)	9930 (1.0)	19810 (1.0)	8010 (0.653)	11340 (0.601)	6660 (0.645)	10500 (0.588)	5810 (0.586)	10500 (0.530)	840 (0.512)	10140 (0.512)	
		400 (0.033)	3680 (0.304)	740 (0.039)	6780 (0.360)	3760 (0.364)	3760 (0.364)	3760 (0.364)	3760 (0.364)	3760 (0.364)	3760 (0.364)	3760 (0.364)	3760 (0.364)	3760 (0.364)	3760 (0.364)	3760 (0.364)
A4	0.8	11930 (1.0)	27610 (1.0)	9950 (1.0)	28530 (1.0)	9210 (1.0)	36610 (1.0)	7870 (0.650)	380 (0.032)	3670 (0.308)	1060 (0.039)	10160 (0.368)	6280 (0.631)	110 (0.011)	1080 (0.011)	
		380 (0.032)	19810 (1.0)	16320 (1.0)	16320 (1.0)	16640 (1.0)	16640 (1.0)	16640 (1.0)	16640 (1.0)	16640 (1.0)	16640 (1.0)	16640 (1.0)	16640 (1.0)	16640 (1.0)	16640 (1.0)	16640 (1.0)
0.4	0.0	16330 (0.824)	1120 (0.056)	2370 (0.120)	12840 (0.187)	13990 (0.0841)	13990 (0.0841)	16330 (0.824)	350 (0.021)	2300 (0.138)	2300 (0.138)	2300 (0.138)	2300 (0.138)	2300 (0.138)	2300 (0.138)	2300 (0.138)
		21030 (1.0)	18930 (1.0)	17880 (1.0)	16490 (1.0)	17130 (1.0)	16570 (1.0)	17130 (1.0)	17130 (1.0)	17130 (1.0)	17130 (1.0)	17130 (1.0)	17130 (1.0)	17130 (1.0)	17130 (1.0)	17130 (1.0)
A1	0.2	17330 (0.824)	1140 (0.054)	2560 (0.122)	14900 (0.085)	1250 (0.049)	1250 (0.049)	17330 (0.824)	260 (0.015)	2500 (0.122)	2500 (0.122)	2500 (0.122)	2500 (0.122)	2500 (0.122)	2500 (0.122)	2500 (0.122)
		20730 (1.0)	23330 (1.0)	17460 (1.0)	20550 (1.0)	16700 (1.0)	16700 (1.0)	16700 (1.0)	16700 (1.0)	16700 (1.0)	16700 (1.0)	16700 (1.0)	16700 (1.0)	16700 (1.0)	16700 (1.0)	16700 (1.0)
A2	0.4	17040 (0.822)	1100 (0.053)	2590 (0.125)	18240 (0.082)	1520 (0.065)	1520 (0.065)	17040 (0.822)	270 (0.015)	2530 (0.145)	2530 (0.145)	2530 (0.145)	2530 (0.145)	2530 (0.145)	2530 (0.145)	2530 (0.145)
		20300 (1.0)	30300 (1.0)	16990 (1.0)	38020 (1.0)	15890 (1.0)	30590 (1.0)	15890 (1.0)	15890 (1.0)	15890 (1.0)	15890 (1.0)	15890 (1.0)	15890 (1.0)	15890 (1.0)	15890 (1.0)	15890 (1.0)
A3	0.6	16660 (0.821)	1080 (0.053)	2560 (0.126)	23600 (0.0779)	1980 (0.086)	1980 (0.086)	16660 (0.821)	270 (0.016)	2530 (0.153)	2530 (0.153)	2530 (0.153)	2530 (0.153)	2530 (0.153)	2530 (0.153)	2530 (0.153)
		19790 (1.0)	42420 (1.0)	16060 (1.0)	43720 (1.0)	14140 (1.0)	53890 (1.0)	14140 (1.0)	14140 (1.0)	14140 (1.0)	14140 (1.0)	14140 (1.0)	14140 (1.0)	14140 (1.0)	14140 (1.0)	14140 (1.0)
A4	0.8	16210 (0.819)	1030 (0.052)	2550 (0.129)	32500 (0.0766)	2850 (0.067)	2850 (0.067)	16210 (0.819)	300 (0.019)	2610 (0.162)	2610 (0.162)	2610 (0.162)	2610 (0.162)	2610 (0.162)	2610 (0.162)	2610 (0.162)
		14110 (0.962)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)	4160 (0.077)

()内は、各応力の全応力に占める割合を示す。
 σ_M : 曲げ応力度 (kgf/cm²)。
 σ_{HP} : 水平力による軸応力 (kgf/cm²)。
 σ_{VP} : 鉛直力による軸応力 (kgf/cm²)。



付図E-2 最大腐食度と寄与率の関係(1) (海側杭)

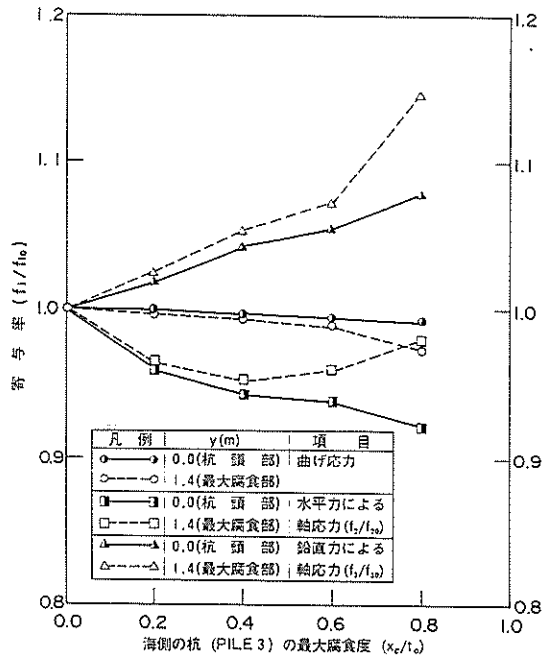
本文2.2の栈橋No.1の陸側杭の最大応力計算値の各成分の寄与率を、付図E-1に示す。計算法により多少の変動があるが、船舶接岸時においては、水平荷重による曲げ応力の寄与率(f_M)が、65~70%、水平荷重による軸応力の寄与率(f_{HP})が5%程度、鉛直荷重による軸応力の寄与率(f_{VP})が、25~30%となっている。地震時では f_M が、80%程度、 f_{HP} が5~7%、 f_{VP} が13~15%となっている。

②最大腐食度と各応力成分の寄与率

本文2.3の栈橋No.1の杭の最大腐食度と杭応力成分を付表E-1に示した。各杭別に見ると、船舶接岸時においては腐食度による各応力成分の全応力に対する割合は、それほど変化しない。地震時について付図E-2と付図E-3に、陸側杭と海側杭の各応力成分の寄与率と、腐食度の関係を示した。鉛直荷重による軸応力の寄与率(f_{VP})は、腐食度の増大に従い大きくなる。曲げ応力の寄与率(f_M)は、腐食度の増大に従って、減少する傾向が見られる。また、杭頭部と最大腐食部では、各寄与率に多少の変動があり、杭頭部の応力のほうが、 f_M の値が大きく、 f_{HP} 、 f_{VP} の値が、最大腐食部に比べ小さい。

(3) 結論

各応力成分の杭の全応力への寄与率は、荷重条件や栈



付図E-3 最大腐食度と寄与率の関係(2) (陸側杭)

橋の諸元によって変化すると考えられるが、本資料で検討を行ったNo.1の栈橋では、以下のような結果が得られた。

①水平荷重による曲げ応力の寄与率(f_M)は、地震時で約80%、船舶接岸時で約65%程度あり、杭の全応力に占める曲げ応力の寄与率は大きい。

②水平荷重による軸応力の寄与率(f_{HP})は、地震時で6%程度、船舶接岸時では5%程度であり、小さな値となっている。

③鉛直荷重による軸応力の寄与率(f_{VP})は、地震時で14%程度、船舶接岸時では30%程度である。

④船舶接岸時、すなわち偏心水平力作用時には、栈橋部材力計算法の簡略化により、曲げ応力の寄与率が5%程度増大し、鉛直荷重による軸力の寄与率が4~5%減少する。地震時には、計算法の簡略化による寄与率の変動はほとんどない。

⑤腐食度の増大により、鉛直荷重による軸応力の寄与率は大きくなり、曲げ応力の寄与率はやや減少する傾向が見られた。だが、腐食度による各応力成分の寄与率の変動は非常に小さい。

付録－F 単杭の腐食諸元と単位杭頭モーメント、横方向ばね定数との関係

本文 2.5 において、代表的な腐食形態に対し、単杭の腐食諸元と部材力の関係を検討した。ここでは栈橋の設計水深と潮位の関係等により、杭の最大腐食箇所の位置が、特異な腐食形態の杭の腐食諸元と部材力の関係を明確にすることを目的として、以下の検討を行った。

(1) 計算方法

杭の一定区間だけ、一様厚の腐食を受けた単杭モデルを用い、腐食箇所の位置、腐食部長さ、腐食度の 3 要因を変化させ、単位杭頭モーメントや横方向ばね定数を算定し、腐食諸元と部材力の関係を調べた。

①杭の諸元

- 全長 ; 30 (m)
- 地表部長 (h) ; 10 (m)
- 外径 ; 1000.0 (mm)
- 初期肉厚 ; 10.0 (mm)

②腐食諸元

- 腐食箇所の位置 ; y (m) (杭頭からの距離)
- 腐食箇所長さ ; l_c (m)
- 腐食厚 ; x_c (mm)

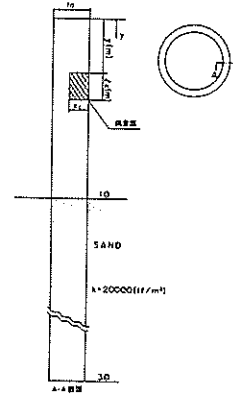
③地盤条件

横方向地盤反力係数 ; 2.0 (kgf/cm³)
(砂質土地盤)

(2) 計算結果

1) 腐食度と腐食箇所の位置の影響

腐食箇所長さ (l_c) を一定とし、腐食度 (x_c/t_0) と、腐食箇所 (y) を変化させたときの、単位杭頭モーメント (M_{top}/H) と横方向ばね定数 (K_H) の値を、付表 F-1、付図 F-2 ~ 図 F-3 に示した。



付図 F-1 杭の腐食諸元

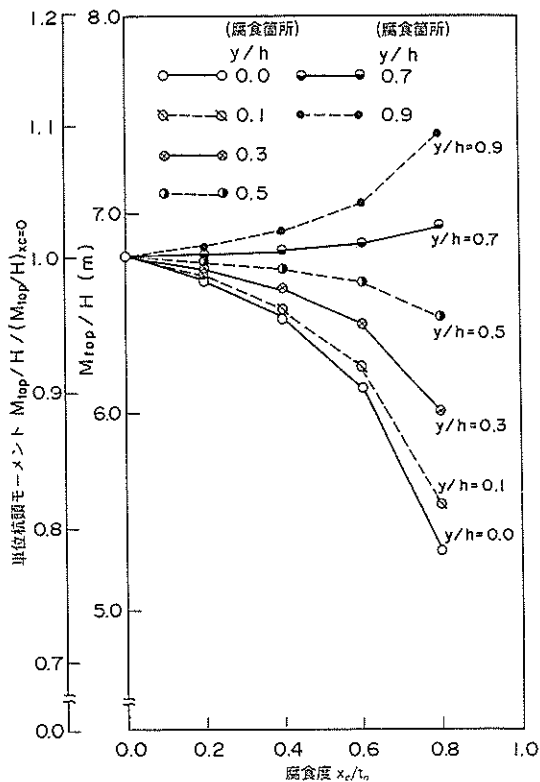
付表 F-1 単杭の腐食度、腐食箇所レベルと部材力の関係

$l_c = 1.0$ (m)

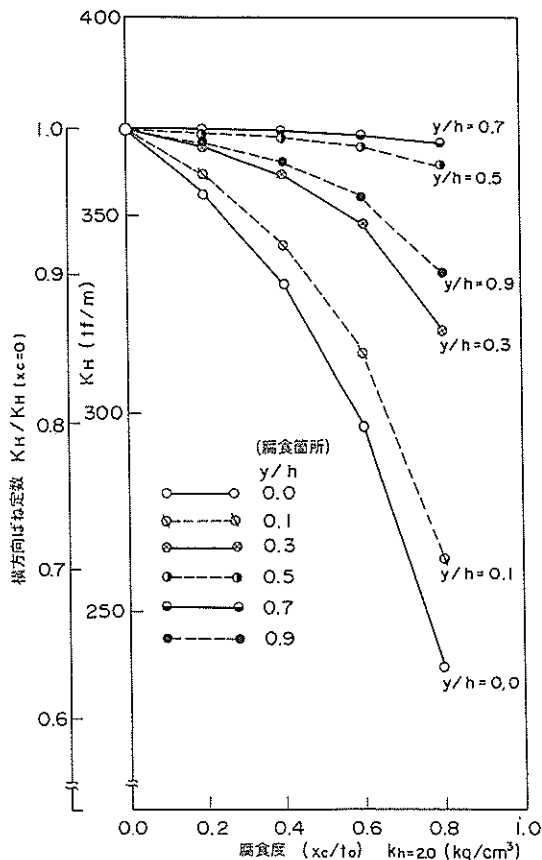
x_c/t_0 \ y (m)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	6.778 (372.0)	6.661 (355.4)	6.476 (332.1)	6.136 (296.4)	5.314 (235.3)
1.0		6.680 (360.1)	6.524 (342.8)	6.238 (315.2)	5.547 (263.6)
3.0		6.717 (367.3)	6.620 (360.1)	6.443 (347.7)	6.014 (320.8)
5.0		6.755 (371.2)	6.717 (370.0)	6.648 (367.9)	6.480 (362.7)
7.0		6.792 (371.7)	6.813 (371.3)	6.852 (370.5)	6.947 (368.6)
9.0		6.829 (368.7)	6.910 (363.7)	7.057 (354.8)	7.413 (335.0)

上段は、 M_{top}/H (m)。

() 内は、横方向ばね定数。(tf/m)。



付図F-2 単杭の腐食度及び腐食箇所レベルと単位杭頭モーメント



付図F-3 単杭の腐食度及び腐食箇所レベルと横方向ばね定数

①単位杭頭モーメント

単位杭頭モーメントは、腐食箇所が、 $y/h = 0.5$ より上の部分にある場合、腐食度の増大にしたがって、減少している。減少の割合は、腐食度が大きくなるほど大きい。また腐食箇所の位置が杭頭に近いほど減少割合が大きい。ところが、腐食箇所が、 $y/h = 0.7$ より下の部分では、腐食度の増大にともない単位杭頭モーメントが大きくなる。その増大の割合は腐食度が大きくなるほど大きくなっている。また、腐食箇所が地表に近づくほど増大の割合が大きい。

腐食度の影響は、 $x_c/t_0 = 0.4$ 程度では、+2.0から-5.0%程度である。腐食箇所の影響は、 y/h が0.0から0.3の範囲では、腐食度の影響の1/2程度である。

②横方向ばね定数

横方向ばね定数は、腐食箇所に関係なく、腐食度の増大に従い減少し、その減少の割合も、腐食度が大きいほど大きくなっている。腐食箇所が $y/h = 0.7$ より上の部分では、杭頭に近いほど、減少割合が大きく、腐食箇所が

$y/h = 0.7$ より下の部分では、地表に近いほど減少割合が大きくなっている。腐食度の影響は、 $x_c/t_0 = 0.4$ 程度で、最大10%程度である。腐食箇所の影響は、 y/h が0.0から0.3の範囲では、腐食度の影響の2/3程度である。腐食度の影響、腐食箇所の影響とも、単位杭頭曲げモーメントより大きくなっている。

③単位杭頭モーメントとばね定数の積

単位杭頭モーメントと横方向ばね定数の積については、腐食箇所が $y/h = 0.7$ 付近以外では、腐食度の増大に従い減少しており、腐食度が大きくなるほど、その減少傾向が強くなっている。腐食度の影響は、 $x_c/t_0 = 0.4$ 程度で、最大15%程度である。腐食箇所の影響は、 $y/h = 0.0 \sim 0.3$ の範囲で、腐食度の3/5程度となっている。

2) 腐食度と腐食部長さの影響

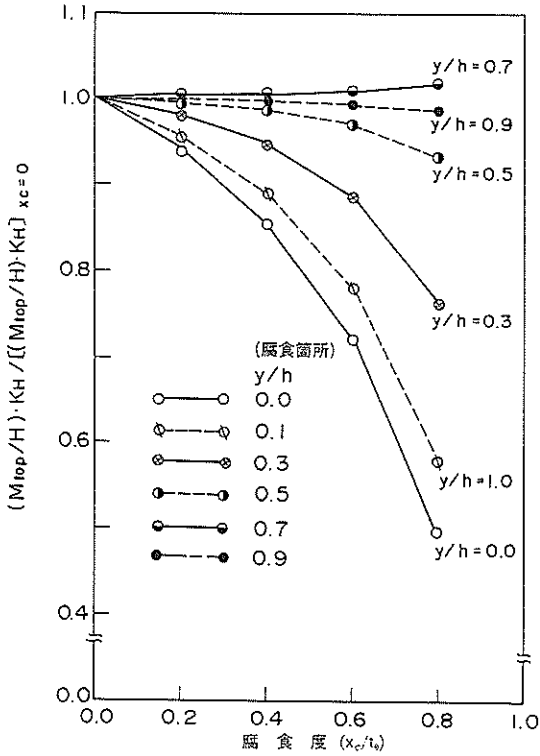
腐食箇所が、 $y/h = 0.1$ と、 $y/h = 0.3$ の2つのケースに対し、腐食部長さ (l_c) と、腐食度 (x_c/t_0) を変化させたときの、単位杭頭モーメントの値と、横方向ばね定数の値を、付表F-2と、付図F-4～付図F-7

付表F-2 単杭の腐食度，腐食部長さと部材力の関係

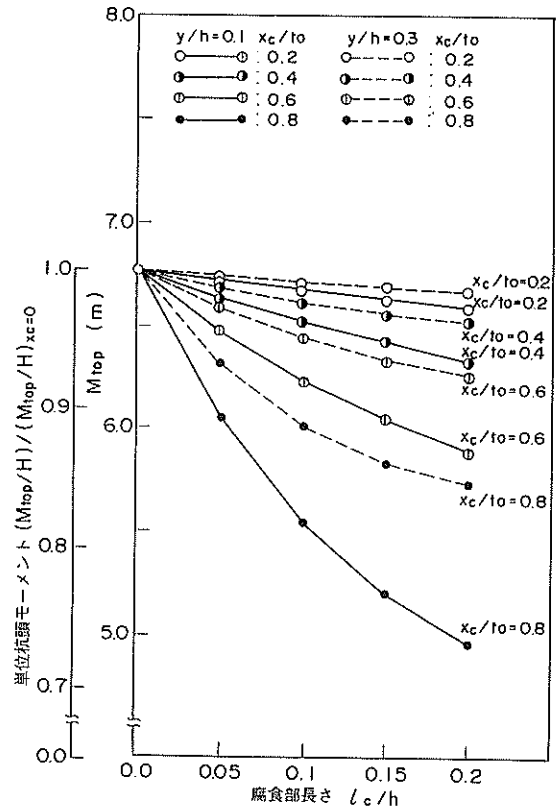
y/h	x_c/t_0 l_c/h	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
		0.1	6.778 (372.0)	6.726 (365.4)	6.642 (355.1)	6.480 (336.9)
0.0	6.680 (360.1)	6.524 (342.8)		6.238 (315.2)	5.547 (263.6)	
0.15	6.639 (356.1)	6.423 (334.1)		6.044 (301.2)	5.203 (247.2)	
0.2	6.603 (353.1)	6.339 (327.9)		5.891 (292.4)	4.971 (238.9)	
0.3	0.05	6.778 (372.0)	6.745 (369.2)	6.691 (364.9)	6.588 (356.8)	6.313 (337.0)
	0.1		6.717 (367.3)	6.620 (360.1)	6.443 (347.7)	6.014 (320.8)
	0.15		6.695 (366.0)	6.564 (357.1)	6.336 (342.6)	5.830 (313.5)
	0.2		6.677 (365.2)	6.523 (355.3)	6.262 (339.7)	5.728 (310.8)

上段： M_{top}/H (m)

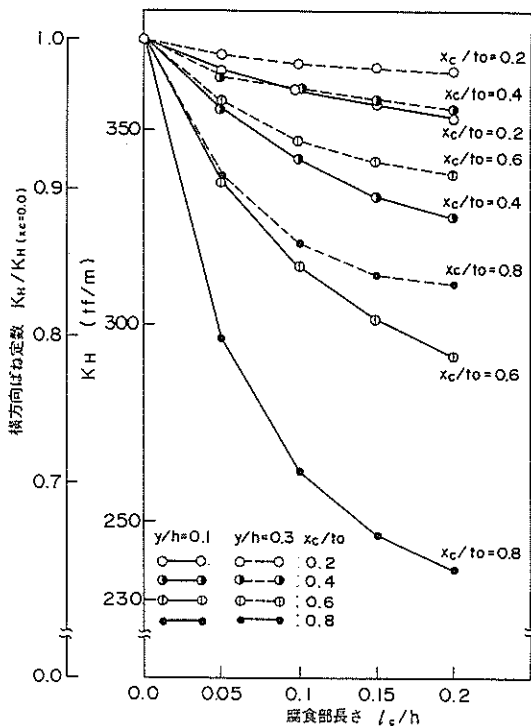
下段 ()： H/y_{top} (tf/m)



付図F-4 単杭の単位杭頭モーメントと横方向ばね定数の積と腐食度及び腐食箇所レベル



付図F-5 単杭の腐食度及び腐食部長さと単位杭頭モーメント



付図F-6 単杭の腐食度及び腐食部長さと横方向ばね定数

に示した。

単位杭頭モーメントは、腐食部長さの増大に従って減少するが、その減少割合は、腐食部長さ (l_c/h) が大きくなるに従い小さくなっている。また、横方向ばね定数、単位杭頭モーメントと横方向ばね定数の積についても、同様の結果となっている。

(3) 結論

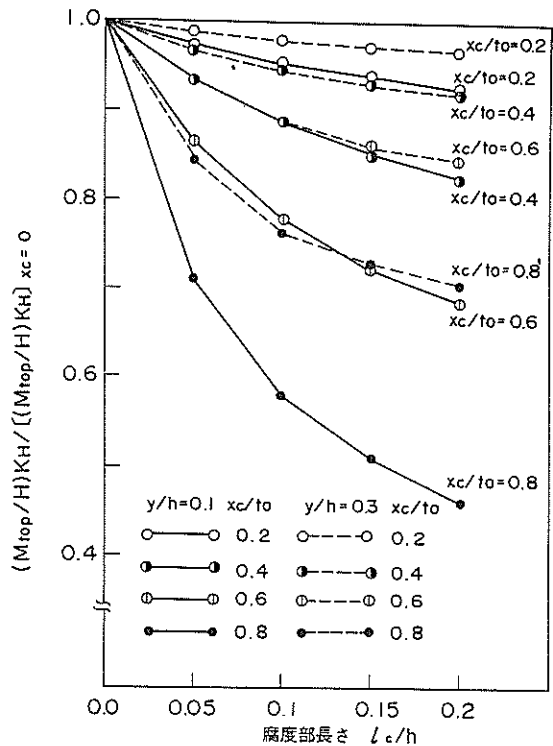
①単位杭頭モーメントは、腐食箇所が杭の上部にある場合、腐食度の増大にしたがって減少するが、腐食箇所が杭の下部 ($y/h > 0.7$) にある場合は、逆に増大する。

②通常の腐食形態では単位杭頭モーメントへの腐食箇所の影響は、最大腐食度の1/2程度と推察され、腐食箇所が杭頭部に近くなるほど影響は大きい。

③腐食箇所の長さが大きくなるに従い、単位杭頭モーメント及び横方向ばね定数は、減少するが、減少割合は腐食部の長さが大きくなるにしたがい小さくなる。

④横方向ばね定数は、腐食箇所のレベルに関係なく腐食度の増大とともに小さくなる。その割合は腐食度が大きくなるほど大きい。

⑤通常の腐食形態では、腐食箇所が杭頭部に近くなるほど、横方向ばね定数への影響は大きくなる。腐食箇所の横方向ばね定数への影響は、最大腐食度の2/3程度と



付図F-7 単杭の単位杭頭モーメントと横方向ばね定数の積と腐食度及び腐食部長さ

推察される。

付録-G 杭の塑性的挙動を考慮した栈橋の応力解析

技術基準では、栈橋の設計法として許容応力度法を用いているため、本文では、腐食栈橋の応力計算として、弾性解析を行った。つまり、降伏応力度を超える応力度領域も弾性的に取り扱ったため、杭の応力が降伏応力度を超えているケースでは、実際の栈橋の挙動とかなり異なった計算結果になっている。

そこで、腐食度の大きい栈橋の実際の挙動を明確にすることを目的とし、杭の塑性領域も考慮した腐食杭栈橋の応力解析を行った。

(1) 直杭式横栈橋の弾塑性解析法

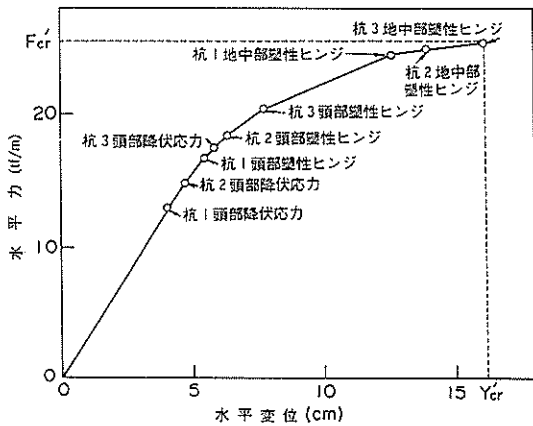
直杭式横栈橋の杭の弾塑性挙動を考慮した解析法については、「鋼直杭式栈橋の極限状態を考慮した解析の自動化」(港湾技研資料No.447)¹⁾等に、詳しく記載されているので、ここではその概要説明を行う。

①破壊過程曲線の算定

栈橋の上部工ブロックに偏心のない水平荷重を作用させ、ブロックの水平変位を算定し、水平力と変位の関係

図を作成する。これを破壊過程曲線と呼ぶ。付図G-1に示すとおり、破壊過程曲線は杭の塑性的挙動を考慮したものである。一様杭の場合、水平力の増大にしたがい、杭頭部がまず降伏応力度に達し、それが塑性ヒンジとなり、それから、杭地中部にも塑性ヒンジができ、栈橋が崩壊する過程を表している。破壊過程曲線を算定する際、杭の降伏応力度には栈橋の鉛直荷重による軸応力を差し引いたものを使用し、鉛直荷重の影響をあらかじめ除いている。

破壊過程曲線は、以後の解析の基礎となる非常に重要な



付図G-1 破壊過程曲線¹⁾

な曲線である。

②静的解析

栈橋に作用する水平荷重を、静的な外力として取り扱う場合(地震力を、静的な外力として取り扱う震度法も、これに該当する)には、栈橋へ作用する水平外力に対応する破壊過程曲線上の位置を求めることにより、そのときの栈橋の状態が明らかになる。

③動的解析

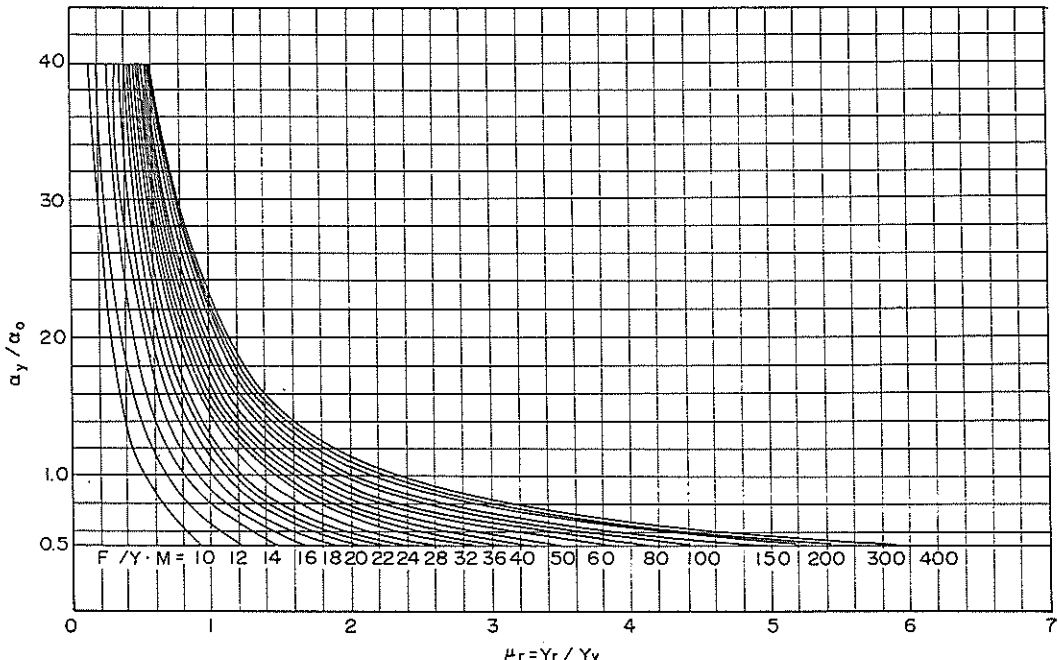
一般に、直杭式横栈橋は、可とう性の大きい構造物であるため、地震時には、栈橋の上部工ブロックは、地盤加速度波形にตอบสนองする動的挙動を示す。このときの、上部工ブロックに作用する最大水平力や水平変位を求めるには、対象栈橋について、動的応答計算を行うのが望ましいが、これには、多くの労力と計算時間がかかる。ところが、既往の研究²⁾によって、栈橋の質量、及び栈橋の降伏変位と降伏水平力が分かれば、地盤の最大加速度に対する栈橋上部工ブロックの最大応答変位と降伏変位の比(じん性率)が、付図G-2より求めることができ、次式により栈橋ブロックの最大応答変位を算定することができる。

$$Y_r = \mu_r \cdot Y_y \dots\dots\dots (G-1)$$

Y_r ; 栈橋の最大応答変位 (cm)

μ_r ; じん性率

Y_y ; 栈橋の降伏変位 (cm)



付図G-2 じん性率 μ_r ¹⁾

そして、式 (G-1) で算定した最大応答変位に対する破壊過程曲線上の位置を求めれば、最大地盤加速度発生時の、動的応答を考慮した栈橋の状態、及び上部工ブロックに作用している水平力が明らかになる。

付図 G-2 を用いて、特定の地盤最大加速度に対するじん性率 (μ_r) を算定するには、以下の手順で行えばよい。

ア) 地盤最大加速度を次式により、震度の形で表す。

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_{\max}}{g} \dots\dots\dots (G-2)$$

α_{\max} : 地盤最大加速度 (gal)

g : 重力加速度 (980 gal)

イ) 栈橋の降伏水平力を次式により、震度の形で表す。

$$\alpha_y = \frac{F_y}{W} \dots\dots\dots (G-3)$$

F_y : 栈橋の降伏水平力 (kgf)

W : 栈橋の上部工自重と載荷重の和 (kgf)

ハ) 栈橋の質量を算定する。

$$M = \frac{W}{g} \dots\dots\dots (G-4)$$

ニ) 付図 G-2 の各指標 (α_y/α_0 , $F_y/(Y_y \cdot M)$) を算定し、じん性率 μ_r を求める。

(2) 計算条件

①対象栈橋; 本文 2.3 で用いた No. 1 の栈橋。

②荷重条件; 鉛直荷重は、本文 2.3 と同一。

水平荷重は、偏心のない水平力を上部工ブロックに陸側から海側方向と、海側から陸側方向に作用させた。

この水平力を一定の割合 (震度の形で表すと 0.05 となるピッチ) で増加させ、破壊過程曲線を求めた。

③腐食条件; 海側杭の腐食度が、0.0, 0.2, 0.4, 0.6 となる 4 ケースの腐食量を設定した。なお、腐食杭は一様杭モデルとした。

(3) 計算方法

計算法は、港湾技研資料 No. 447 pp. 5 ~ 13³⁾ に示す方法によった。また杭の横抵抗は、港研式 (S 型地盤) を使用している。

(4) 計算結果

1) 破壊過程曲線と腐食度の関係

付図 G-3 と付図 G-4 に腐食度が 0.0, 0.4 のそれぞれのケースでの栈橋の破壊過程曲線を示した。腐食が進行すると、降伏変位、降伏水平力が減少しており、栈橋の耐力が低下している。

杭の腐食の有無に関係なく、地中部にヒンジができ始めるときの水平力は、杭頭部が降伏応力度に達するときの水平力の、約 1.7 ~ 1.8 倍程度となっており、腐食により杭の応力が許容応力度を超える栈橋でも、かなりの耐力があると推察される。しかし、腐食度が大きくなると、座屈に対する杭の耐力の低下が著しくなり、杭の座屈による栈橋の崩壊が生じることも考えられるため注意を要する。

2) 静的解析と動的解析

①設計震度と栈橋に作用する水平力

腐食を受けた栈橋が安全性を確保できる地震力の程度を明らかにするため付図 G-5 に腐食度 0.4 のケースでの震度と水平力の関係を示した。図中に、極限水平力と最大地震応答水平力の比を数値で示している。極限水平力には、栈橋のすべての杭の、杭頭部と地中部に塑性ヒンジが生じるときの水平力を用いた。また付図 G-5 には、腐食度 0.4 のときの破壊過程曲線より求めた水平力と栈橋の状況との関係を併わせて示してある。

静的解析結果によると、震度 0.2 で杭頭部が塑性域に入っているが、塑性ヒンジは生じてなく、震度 0.2 の地震力が作用しても栈橋の崩壊には至らないことが分かる。また震度 0.15 になるとすべての杭が弾性域に入っており腐食度 0.4 の場合でも、震度 0.15 までは充分安全であることが分かる。

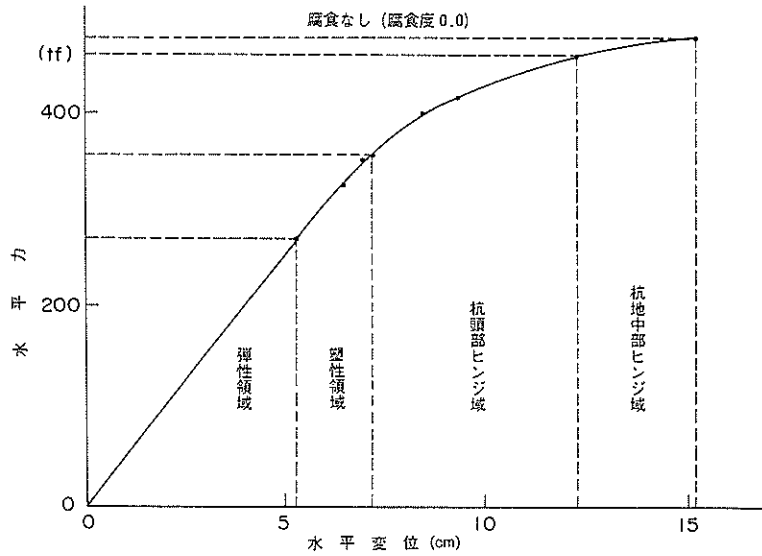
動的解析結果では、震度 (動的解析の場合、最大地盤加速度を震度の形で表したものを意味する。) が 0.2 のとき、杭頭部に塑性ヒンジが生じているが、地中部には塑性ヒンジは生じていない。震度 0.2 の地震力が作用すると、栈橋が倒壊直前の状態になっていることが分かる。また、震度 0.1 では、すべての杭が弾性域に入っており、腐食度 0.4 の場合でも、震度 0.1 までは充分安全であることが分かる。

静的解析結果と動的解析結果を比べると、今回の栈橋では、動的解析による場合のほうが、大きな水平力が栈橋に作用することになっている。

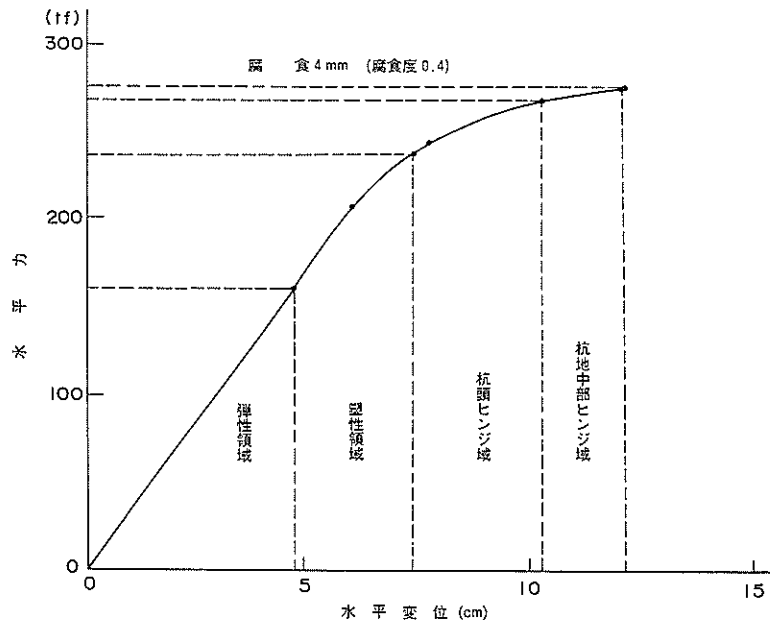
②腐食度と栈橋に作用する水平力

付図 G-6 に震度 0.2 のときの栈橋の上部工ブロックに作用する水平力と腐食度の関係を示した。また、杭頭部応力が、降伏応力をこえる領域 (破線(1))、杭頭部に塑性ヒンジが生じる領域 (破線(2))、杭地中部に塑性ヒンジが生じる領域 (破線(3))、及びすべての杭の杭頭部と地中部に塑性ヒンジができる領域 (破線(4)) も、あわせて示している。

震度法を用いた静的解析では、腐食度係関係なく上部ブロックに作用する外力は 204.0 tf となり一定値とな



付図G-3 破壊過程曲線 (1)



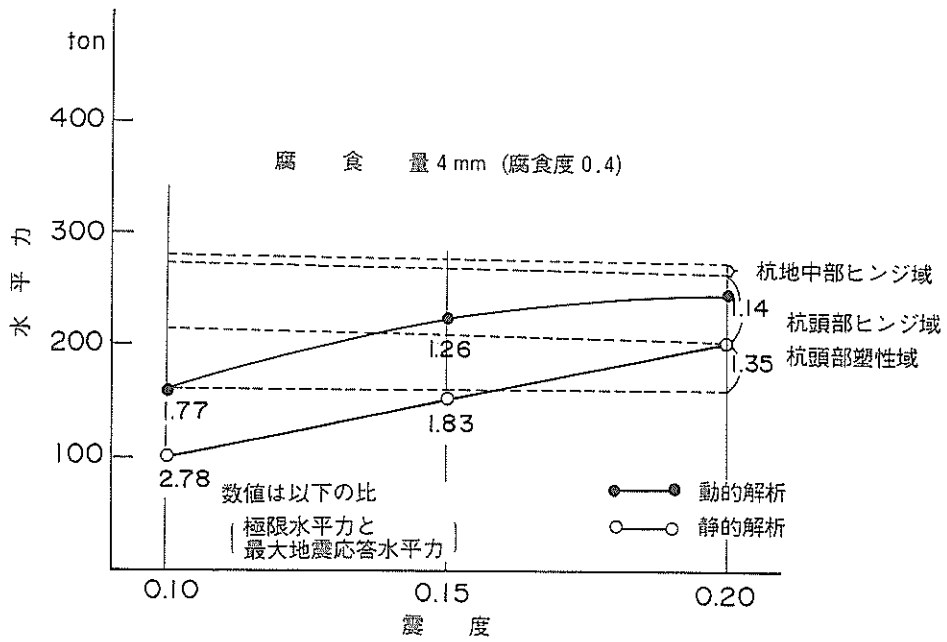
付図G-4 破壊過程曲線 (2)

っている。しかし、動的解析では、腐食度の増大にしたがい上部ブロックに作用する水平外力は小さくなっている。これは、杭の腐食により栈橋の降伏水平力と降伏変位の比 (F_p/Y_p) が小さくなり、じん性率が減少したためである。つまり、栈橋の固有周期が、杭の腐食により大きくなり、地盤加速度と上部工ブロックの間の応答特性に変化が生じたためと考えられる。

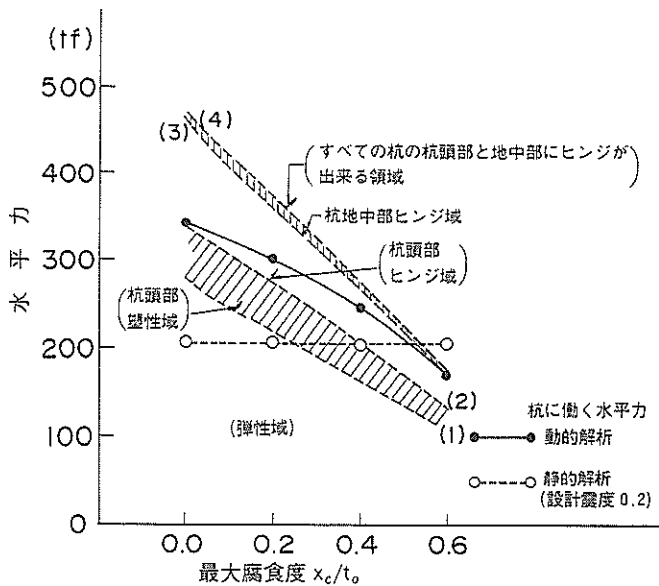
杭の腐食度が0.5程度までは、静的解析に比べ動的解

析による栈橋上部工ブロックに作用する水平力の値のほうが大きく、腐食度が、それ以上になると、逆に小さくなっている。

動的解析では、腐食度に関係なく、地盤加速度が震度の形で表したとき0.2となる今回の検討結果では、杭頭部に塑性ヒンジが生じる領域に入っている。これは、付図G-4～G-7で示したように、腐食の進行にしたがい、栈橋の降伏応力や、降伏変位等が小さくなるため



付図G-5 震度と棧橋に作用する水平力の関係



付図G-6 杭の最大腐食度と極限状態を考慮したときの杭の応力状態

である。つまり、腐食により、上部工ブロックに作用する応答水平力が減少する度合と、杭頭部に塑性ヒンジが生じる破壊過程曲線の水平力の値の減少度合がほぼ等しいためである。ただ腐食なしのケースでも、杭頭部にヒンジが生じる結果になっていることには問題が残る。つまり、震度法で設計した栈橋が、動的解析によると杭頭部に塑性ヒンジが発生することになっている。

このような事例は、設計震度相当の最大地盤加速度が作用するときの、じん性率が1.0以上となるケースで生じやすい。港湾技研資料No.447では、41個の栈橋に対し、設計震度相当の最大地盤加速度が作用するときの、じん性率を求めている⁴⁾。それによるとじん性率が1.0以上となる栈橋が41例中10例ある。

静的解析では、腐食度が0.2程度までは、栈橋は、弾性領域にあり、腐食度が0.4以上になると、杭頭部に塑性ヒンジが生じる杭が出始め、腐食度が0.6になると、すべての杭の杭頭部・地中部ともに塑性ヒンジができ、栈橋が崩壊する結果になっている。

ただし、栈橋の固有周期は栈橋の諸元等により、大きく異なるため、動的解析の結果は、個々の計算ケースで大きく異なったものとなると考えられる。

(5) 結論

本文2.3で取り扱ったNo.1の栈橋を対象とし、弾塑性解析を行い、杭の応力が降伏応力度を超える領域での、栈橋の挙動の検討を行った。そのおもな結果を以下にとりまとめた。ただし、結果の解釈にあたっては、検討に用いた弾塑性解析法の、前提としている仮定条件⁵⁾、本

文2.5(2)で検討したとおり地盤条件により、杭の横方向ばね定数が大きく影響を受けること、栈橋の諸元により栈橋の地震応答特性が異なること、及び腐食杭を変断面杭とした場合には、一様杭とした今回の結果、破壊過程曲線等が異なること。等を充分考慮する必要がある。

①杭の腐食度に関係なく、地中部に塑性ヒンジがで始めるときの水平力は、杭頭部が降伏応力に達し始めるときの水平力の、約1.7～1.8倍程度となった。腐食により、杭の応力が許容応力度を超える栈橋でも、崩壊に至るまでには、耐力にかなりの余裕があると推察される。ただし、腐食による杭の座屈に対する耐力の低下に注意を払う必要がある。

②地震時の腐食栈橋杭の応力は、腐食度によっては、動的解析結果の値のほうが、震度法による値より小さくなることもある。

参 考 文 献

- 1) 福井正幸・内田豊彦・岩崎正二・外山進一；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) pp.3～14。
- 2) 山本隆一・林 聰・土田肇・山下生比古・小蔵絃一郎；鋼直杭栈橋の耐震性に関する研究、港湾技術研究所報告、Vol.9, No.1(1970) pp.208～214。
- 3) 文献1)
- 4) 文献1) pp.14～17。
- 5) 文献1) pp.11～12。

港湾技研資料 No. 524

1985・6

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.