

# 国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1216

July 2022

施工・維持管理段階において入手可能なデータを用いた  
信頼性指標による施設保有性能の時系列的評価の試行  
～ 船舶接岸時における棧橋鋼管杭の応力照査を対象として ～

三上康光・竹信正寛・菅原法城・宮田正史  
辰巳大介・本間翔太・宮島正悟

Trial of time-series evaluation of facility performance using reliability indicators  
based on data available at the construction and maintenance phases  
～ Stress Verification of Pier Steel Pipe Piles for Ship Berthing ～

MIKAMI Yasumitsu, TAKENOBU Masahiro, SUGAHARA Noriki, MIYATA Masafumi  
TATSUMI Daisuke, HONMA Shota, MIYAJIMA Shogo

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

# 施工・維持管理段階において入手可能なデータを用いた 信頼性指標による施設保有性能の時系列的評価の試行 ～ 船舶接岸時における栈橋鋼管杭の応力照査を対象として ～

三上康光<sup>1)</sup>・竹信正寛<sup>2)</sup>・菅原法城<sup>3)</sup>・宮田正史<sup>4)</sup>  
・辰巳大介<sup>5)</sup>・本間翔太<sup>6)</sup>・宮島正悟<sup>7)</sup>

## 要 旨

国内の係留施設の老朽化に伴い、港湾施設の維持管理における補強・補修対策の優先順位を合理的に策定する必要がある。その判断基準となる指標として、港湾施設が有する保有性能（港湾施設が実際に有する性能）が挙げられるが、海外のいくつかの既往研究ではその具体的な指標として信頼性指標 $\beta$ を用いた評価が試みられている。本研究は、船舶接岸時における栈橋鋼管杭の応力照査を対象に、設計段階のみではなく施工から維持管理段階において得られる各種データの保有性能（信頼性指標 $\beta$ ）に対する更新可能性について触れつつ、施工段階に得られる栈橋鋼管杭の降伏応力や、維持管理段階の点検診断結果から得られる栈橋鋼管杭の腐食速度を代表的に選択した際の、設計段階から施工・維持管理段階における信頼性指標 $\beta$ に関する時系列的信頼性解析の試行結果を示すものである。

主要な結論は以下の通りである。

- ・ 施工段階で得られたミルシート（鋼材検査証明書）を参考に、降伏応力の特性値より1.2倍以上の降伏応力を有する鋼材が利用されたことを想定した信頼性更新を行った。その結果、降伏応力に関する不確実性の低減効果も反映され、施工段階における栈橋鋼管杭の信頼性指標 $\beta$ は設計段階の結果と比較して増加した。
- ・ 栈橋鋼管杭の降伏応力と杭の施工位置の関係が明瞭でない場合は、施工段階における施設の保有性能自体に不確実性が生じる要因となる。その不確実性の低減には、設計後に入手できる各種データのトレーサビリティの確保が重要である。
- ・ 施設の保有性能を統一の指標を用いて供用期間中にわたって評価する手法の一例として、栈橋鋼管杭応力に対する時系列的信頼性解析を適用した。栈橋杭応力に関する信頼性指標 $\beta$ の低下速度に及ぼす鋼材腐食速度の影響は大きく、各種点検を通じた維持管理段階における腐食速度の把握も、栈橋鋼管杭の保有性能の評価において重要な要素である。

キーワード：時系列的信頼性評価、信頼性指標、直杭式横栈橋、船舶接岸

- 
- 1) 港湾研究部 港湾施設研究室 交流研究員（三井共同建設コンサルタント）
  - 2) 港湾研究部 港湾施設研究室長
  - 3) 港湾研究部 主任研究官
  - 4) 京都大学経営管理大学院（港湾局 技術企画課 技術監理室長（港湾研究部 併任））
  - 5) 港湾研究部 港湾施工システム・保全研究室長
  - 6) 港湾空港技術研究所
  - 7) 京都大学経営管理大学院

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所  
電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail：nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

# **Trial of time-series evaluation of facility performance using reliability indicators based on data available at the construction and maintenance phases ~ Stress Verification of Pier Steel Pipe Piles for Ship Berthing ~**

**MIKAMI Yasumitsu<sup>1)</sup>, TAKENOBU Masahiro<sup>2)</sup>, SUGAHARA Noriki<sup>3)</sup>,  
MIYATA Masafumi<sup>4)</sup>, TATSUMI Daisuke<sup>5)</sup>, HONMA Shota<sup>6)</sup>, MIYAJIMA Shogo<sup>7)</sup>**

## **Synopsis**

As mooring facilities in Japan are aging, it is necessary to establish priorities for reinforcement and repair measures in the maintenance and management of port facilities. In this study, the reliability index  $\beta$  is used as a concrete index to evaluate the performance of mooring facilities. In this study, the stress verification of pier steel piles at berthing to ships is examined, and the possibility of updating the reliability index  $\beta$  to the performance of pier steel piles is discussed, and the yield stress of pier steel piles obtained in the construction phase and the stress of pier steel piles obtained from the inspection and diagnosis results in the maintenance phase are also examined. The paper presents the trial results of the time-series reliability analysis of the reliability index  $\beta$  from the design phase to the construction and maintenance phases, where the yield stress of pier piles obtained in the construction phase and the corrosion rate of pier piles obtained from the results of inspection and diagnosis in the maintenance phase are selected as representative data.

The main conclusions are as follows

The reliability update was performed based on the mill sheet obtained during the construction phase, assuming that steel with a yield stress 1.2 times higher than the characteristic value of yield stress was utilized. As a result, the reliability index  $\beta$  of the pier steel pipe pile at the construction stage increased compared to the result at the design stage, reflecting the effect of the reduction of uncertainty regarding the yield stress.

The lack of a clear relationship between the yield stress of the pier piles and the location of the piles in the installation phase is a cause of uncertainty in the performance of the facility itself during the installation phase. To reduce this uncertainty, it is important to ensure the traceability of various data available after design.

As an example of a method to evaluate the in-service performance of a facility using a unified index, a time-series reliability analysis of pier pile stresses was applied. The effect of steel corrosion rate on the degradation rate of the reliability index  $\beta$  for pier pile stresses is significant, and understanding the corrosion rate in the maintenance phase through various inspections is also an important factor in evaluating the retentive performance of pier pile.

**Key Words:** Time-dependent reliability analysis, Reliability index, Straight-hanging cross-pier, Ship landing,

---

1) Exchanging Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM (MITSUI CONSULTANTS Co., Ltd.)

2) Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

3) Senior Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

4) Graduate School of Management Kyoto University (Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM)

5) Head, Port Construction Systems and Management Division, Port and Harbor Department, NILIM

6) Senior Researcher, Big Data Technology Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Division, PARI

7) Professor, Graduate School of Management Kyoto University

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-44-5019 Fax : +81-468-42-9265 e-mail : nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 船舶接岸時における鋼管杭応力の性能照査手法および性能更新に活用可能なデータの整理 . 1	
2.1 現行基準による船舶接岸時の鋼管杭応力の性能照査手法 .....	1
2.2 船舶接岸時の鋼管杭応力照査に必要とされる設計条件.....	3
2.3 保有性能（信頼性指標）の更新に活用することができる各種データの整理.....	3
3. 施工・維持管理段階のデータを活用した鋼管杭応力の時系列的信頼性解析の試行..... 6	
3.1 船舶接岸時の鋼管杭応力に対する信頼性解析手法 .....	6
3.2 鋼材の降伏応力の更新に基づく施工段階での信頼性更新.....	9
3.3 鋼管杭の腐食速度の更新に基づく時系列的信頼性解析.....	11
3.4 考察 .....	14
4. おわりに .....	14
参考文献.....	15
付録 A 設計後に入手できる情報によって更新可能な項目及びその情報源の一覧.....	16
付録 B 応答曲面法を適用して定式化した鋼管杭応力の算定式に用いたパラメータの一覧 ...	27



## 1. はじめに

国土交通省港湾局<sup>1)</sup>によれば、建設後50年以上が経過する全国の係留施設数は2040年には約70%に達すると予測されている。厳しい予算制約の中で、港湾施設の予防保全計画や維持管理計画等を合理的に策定する必要があり、特に施設の補強・補修対策の優先順位を策定するために適切な判断基準を設定し、実務に導入していくことは急務である。

港湾施設の維持管理における補強・補修対策の優先順位の策定において有効と考えられる指標の一つとして、港湾施設が有する実際の性能(保有性能)が挙げられる。ただし、現行の港湾の施設の技術上の基準・同解説(以下、技術基準)<sup>2)</sup>においては、その概念の言及にとどまっており、施設や部材の保有性能の把握に関する研究として、国内では加藤ら(2010)<sup>3)</sup>や宇野ら(2018)<sup>4)</sup>の研究があるものの、現時点でその具体的な指標や手法の開発には至っていない。

施設の保有性能の把握に関する研究の国外事例として、Roubosら(2020)<sup>5)</sup>の研究では、観測結果に基づいて設計上の不確実性を軽減する survival information と呼ばれる手法をロッテルダム港に実在する多数の矢板式係船岸に対して適用し、港湾内における鋼矢板の腐食速度を実測値に基づいてモデル化した上で、施設の保有性能を信頼性指標  $\beta$  によって時系列的に評価し、補修等の対策が必要となる施設を抽出する試みがなされている。また、オランダ国内の河川堤防では、破堤した際の社会的な影響を考慮した上で、代表的な堤防区間ごとに堤体の安定性に関する目標信頼性指標  $\beta_T$  を設定している<sup>6)</sup>。このように、信頼性指標  $\beta$  は、施設の保有性能に関する評価指標としての選択肢の一つとなりうると考えられる。

信頼性指標  $\beta$  はレベル2信頼性設計法による信頼性解析、または、レベル3信頼性設計法に基づく限界状態超過確率  $p_f$  の代替指標として得られるものであるが、信頼性設計法が適用されている各種基準類では設計段階(新規構造物を対象)での  $\beta$ 、またはその  $\beta$  が設計段階で確保されることを照査するための部分係数を算定することに重きが置かれている。一方で、既存施設の保有性能の評価を考慮した場合、施工段階や維持管理段階で得られたデータを用いて、供用後の任意時点で信頼性解析を行い、信頼性指標を更新(信頼性更新)する場合の議論も重要である。

本稿はその端緒の研究として、船舶接岸時における棧橋の鋼管杭応力(以下、鋼管杭応力)に関する信頼性解析によって得られる信頼性指標  $\beta$  を、船舶接岸作用に対

する鋼管杭応力に関する保有性能を代表とする指標とし、施工ならびに維持管理段階で得られるデータに基づく信頼性更新に関する試験を行い、その検討結果から得られる知見について整理した。

本稿の構成は以下のとおりである。まず2.において、検討対象とした船舶接岸時の鋼管杭応力に関する一般的な性能照査手法を整理する。その上で、信頼性指標  $\beta$  を、船舶接岸時の鋼管杭応力に関する保有性能を代表する指標とした際に、当該指標を施設設計後の施工段階や維持管理段階において更新する際に活用可能な各種データを整理する。3.では、2.で整理した情報から、施工段階で得られる鋼管杭の実際の降伏応力に基づき、施設供用開始時における保有性能の更新方法やその解析事例を示す。さらに、施設供用後の維持管理段階のデータとして鋼管杭の腐食速度が得られたとして、施設供用開始以降における保有性能の更新方法やその解析事例を示し、解析事例から示唆される点を整理する。そして、本稿の検討によって得られた結論を4.にまとめる。

## 2. 船舶接岸時における鋼管杭応力の性能照査手法および性能更新に活用可能なデータの整理

本章では、船舶接岸時における鋼管杭応力に関する一般的な性能照査手法について概説し、性能照査に必要なとなる設計条件や、性能照査に用いる部分係数設定時に適用された各種確率変数の統計的性質について整理する。さらに、船舶接岸時の鋼管杭応力照査に関する信頼性指標  $\beta$  を設計後に更新する際に活用可能な各種データについて整理する。

### 2.1 現行基準による船舶接岸時の鋼管杭応力の性能照査手法

現行基準における船舶接岸時の鋼管杭応力の性能照査手法、および性能照査に用いる部分係数の設定根拠は村上ら(2016)<sup>7)</sup>および勝俣ら(2016)<sup>8)</sup>に詳しいが、以降の議論のためそれぞれ概説する。

一般的には、船舶の接岸エネルギーを吸収可能な防舷材を選定し、防舷材の吸収エネルギーに対応する防舷材反力を船舶接岸力による棧橋上部工への作用として評価した上で、当該作用による鋼管杭に発生する応力に関する作用耐力比が1.0以下となることを満たす必要がある。作用の設定から性能照査までの流れを以下に整理する。

(1) 棧橋上部工へ作用する船舶接岸力

棧橋上部工に作用する船舶接岸力は、船舶接岸時の防舷材に発生する反力によって評価する。防舷材の選定にあたっては、式(1)によって算定される接岸エネルギーよりも大きな吸収エネルギーを有する防舷材を選定する(式(2))。選定された防舷材の性能曲線(図-2.1参照)より、当該防舷材における吸収エネルギーに対応する圧縮率の際の反力を算定し、これを船舶接岸力による防舷材反力、すなわち棧橋上部工への作用とする。図-2.1に、圧縮率に対する反力および吸収エネルギーの関係を示す性能曲線を模式的に図化したものを示す。性能曲線は各防舷材メーカーによって異なるため、各メーカーのカタログを参照する必要がある。

$$E_f = \frac{1}{2} M_s V_b^2 C_m C_e C_s C_c \quad \text{式(1)}$$

ここに、

- $E_f$  : 船舶の接岸エネルギー(kJ)
- $M_s$  : 船舶の質量(t)
- $V_b$  : 船舶の接岸速度(m/s)
- $C_m$  : 仮想質量係数
- $C_e$  : 偏心係数
- $C_s$  : 柔軟性係数 (1.0)
- $C_c$  : バースの形状係数 (1.0)

$$E_s = \phi E_{cat} \geq E_f \quad \text{式(2)}$$

ここに、

- $E_s$  : 防舷材の吸収エネルギー(kN・m)
- $\phi$  : 防舷材の製造上の誤差(公差)
- $E_{cat}$  : 防舷材の吸収エネルギー(kN・m)

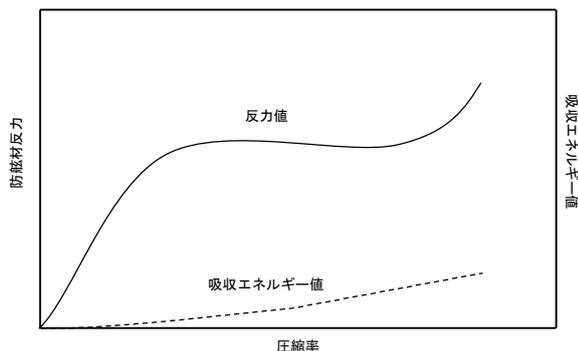


図-2.1 防舷材の圧縮率に対する反力および吸収エネルギーの関係(模式図)

(2) 船舶接岸時における棧橋鋼管杭の発生応力の評価

(1)で求めた防舷材反力(船舶接岸力)が棧橋上部工に伝達されると考え、一般的にはフレーム解析によって各

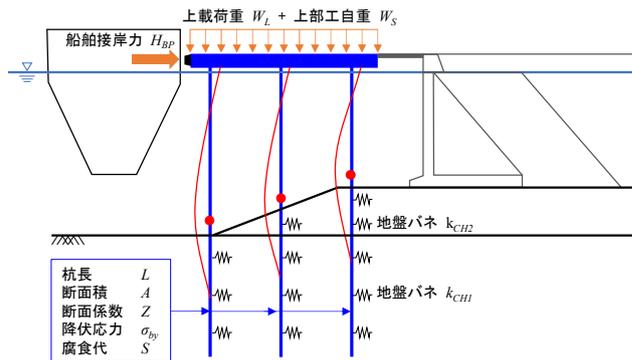


図-2.2 フレーム解析による

鋼管杭応力に関する評価手法(模式図)

列の杭に発生する軸力や曲げモーメントを算定する。この手法を模式的に表したものが図-2.2である。フレーム解析に用いる設計パラメータとしては、上述の防舷材反力や杭諸元のほか、杭前面の地盤および捨石の横方向地盤反力係数(地盤バネ定数)、棧橋上部工への上載荷重、上部工の自重がある。図中にはこれらの要素を模式化して示している。

(3) 作用耐力比の評価

(2)で得られた各杭列の発生応力を用いて、式(3)によって鋼管杭応力に対する作用耐力比を各杭に対して照査する。ここでは、杭の軸方向力が圧縮の場合の照査式に限定して記載した。なお、添え字  $k$  および  $d$  はそれぞれ特性値及び設計用値を示す。

$$\left. \begin{aligned} m \left( \frac{S_d}{R_d} \right) &\leq 1.0 \\ S_d &= \gamma_s \cdot S_k & R_d &= \gamma_R \cdot R_k \\ S_k &= \left( \frac{\sigma_{ck}}{red} + \sigma_{bc} \right) & R_k &= \sigma_{byk} \end{aligned} \right\} \quad \text{式(3)}$$

ここに、

- $red$  : 軸方向圧縮降伏応力度を降伏応力度の特性値で除した値として定義される係数。部材の座屈長や鋼材の材質によって変化する。
- $\sigma_c$  : 軸方向圧縮力による圧縮応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{bc}$  : 杭の断面に作用する曲げモーメントによる最大圧縮応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{by}$  : 曲げ圧縮降伏応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $R_k$  : 抵抗項に関する特性値(N/mm<sup>2</sup>)
- $S_k$  : 荷重項に関する特性値(N/mm<sup>2</sup>)
- $\gamma_R$  : 抵抗項に乗じる部分係数
- $\gamma_s$  : 荷重項に乗じる部分係数
- $m$  : 調整係数

鋼管杭応力の照査に用いる部分係数は、表-2.1に示すものを用いることができる。

表-2.1 鋼管杭応力の照査（船舶接岸力による変動作用）に用いる部分係数の一覧

照査対象	設置水深	抵抗項に乗じる部分係数 $\gamma_R$	荷重項に乗じる部分係数 $\gamma_S$	調整係数 $m$
栈橋杭の発生応力 (船舶接岸力による変動作用)	12.0m 未満	0.97	1.34	— (1.00)
	12.0m 以上	1.01	1.29	

## 2.2 船舶接岸時の鋼管杭応力照査に必要とされる設計条件

上述の性能照査手法に基づき、船舶接岸時の鋼管杭応力の性能照査において、一般的に設定が必要となる各種の設計条件を一覧表として表-2.2 に示す。設計条件は可能な限り網羅的に挙げ、2.1 に示した性能照査内容に対応する項目に○印を付した。これにより、設計条件の変更によって影響を受けるパラメータを把握することができる。

また、鋼管杭応力に対する作用耐力比の算定時に適用する部分係数は、信頼性解析に基づいて求められている。その算定時に確率変数とされたパラメータ、およびその統計的性質は以下の表-2.3 および表-2.4 のとおりである。表-2.3 の平均値の偏り  $\mu/X_k$  とは、確率変数の平均値  $\mu$  を特性値  $X_k$  で除した値である。

船舶接岸時の鋼管杭応力に関する保有性能を、1. に示した先行研究事例のように信頼性指標  $\beta$  に基づいて評価する場合、上記条件を用いて算定することができる。しかし、設計段階での算定結果は当然ながらその段階での想定条件下での結果であることに留意する必要がある。このため、既存施設の保有性能を評価する場合、その施設の状況や作用の特性に応じ、設計段階での想定条件を見直して再評価（更新）するとともに、作用や材料特性が時間的に変化する設計条件については、その特性を踏まえて保有性能を時系列的に評価することが必要と考えられる。

## 2.3 保有性能（信頼性指標）の更新に活用することができる各種データの整理

各種施設の設計後は施工・維持管理（供用）の各段階に移行するが、各段階において作成される工事完成図書や維持管理計画書、または維持管理計画書に基づく施設点検結果等は、必ずしも施設の保有性能（本稿での具体的指標としては信頼性指標  $\beta$ ）を更新する目的で作成、または整理されているわけではない。しかし、保有性能の更新に有用となるデータが数多く含まれていると考えら

れる。

このため、表-2.2 で整理した船舶接岸時の鋼管杭応力の性能照査に必要となる設計条件に対して、施設設計後の各段階での鋼管杭応力に関する保有性能の更新に有用となるデータが含まれていると考えられる代表的な情報源を以下の表-2.4 に整理した。

表-2.4 の情報源は一例であり、例えば地盤の N 値は、施工段階において地質・土質調査が行われた場合、工事完成図書に取りまとめられている地盤・土質調査成果内のボーリング柱状図などから入手できる。また、鋼材の腐食速度は、維持管理計画書内にある、鋼材の肉厚及び腐食速度に対する劣化予測結果などから得ることが出来る。これ以外の具体的な事例は、付録 A にまとめて示した。

このように、施設の保有性能の把握に活用可能なデータは多岐にわたっているものの、設計段階での保有性能は設計後に入手できる各種データを用いて本来更新が可能であると考えられる。

表-2.2 船舶接岸時の鋼管杭応力の性能照査において設定する各種設計条件及び各種パラメータとの対応表

大項目	設計条件		性能照査に必要な設定							船舶の接岸エネルギー	防舷材の吸収エネルギー		
	小項目	記号	地盤反力係数	地盤ばねの設定	杭長さ	杭断面積	断面係数	杭の特性長	鋼材の特性			降伏応力	Red
自然条件	地盤N値	N	○					○					
	腐食速度	$\delta_t$						○					
作用条件	上載荷重	$W_L$				○					○		
	船舶の質量	$M_s$									○		
構造諸元	接岸速度	$V_b$									○		
	接岸角度	$\theta_s$									○		
	水深	$h_w$		○									
	杭長	$L_s$		○						○			
	直径	$D_s$				○				○			
	肉厚	$t_s$				○				○			
	鋼材のヤング率	E								○			
	鋼材の材質	-									○		
	鋼材の降伏応力	$\sigma$									○		
	上部工単位体積重量	$W_D$										○	
	上部工幅	$b_D$										○	
	上部工高	$h_D$										○	
	上部工奥行き幅	$d_D$										○	
	防舷材の高さ	$H_f$											○
防舷材の長さ	$L_f$											○	
その他	捨石層の厚さ	$h_R$		○									
	捨石層の傾斜	$\theta_R$		○									
	防舷材の公差	$\Phi$											○
	設計供用期間	$P_d$				○							
	偏心係数	$C_e$											○
	仮想質量係数	$C_m$											○

表-2.3 信頼性解析において設定されている確率変数およびその統計的性質

確率変数		特性値 $X_k$	平均値の偏り $\mu/X_k$	変動係数 $V$	分布形
地盤反力係数 $k_{CH}$ (kN/m <sup>3</sup> )	砂層	7500	1.333	0.76	対数正規
	捨石層	3500			
鋼材降伏強度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )		235	1.2	0.09	正規
確率変数		特性値 $X_k$	平均値 $\mu$ または中央値 $M_e$	標準偏差	分布形
船舶の排水トン数(DT)		1.174DWT =5870(DT)	1.139DWT =5695(DT)	0.052DWT=260	正規
接岸速度 $V$ (m/s)		0.1	0.061	0.034	対数正規
仮想質量係数 $C_m$		2.118	1.77	0.105	正規
偏心係数 $C_e$		0.665	0.62	0.023	正規

表-2.4 保有性能の更新に活用することができる各種データ及びその情報源の一覧

設計条件		段階	情報源
大項目	小項目		
自然条件	地盤N値	施工段階	工事完成図書-地盤土質調査成果
	腐食速度	維持管理段階	維持管理計画書や点検結果報告書
作用条件	上載荷重	供用段階	-
	船舶の質量	供用段階	船舶の接岸に関する調査結果※
	接岸速度	供用段階	船舶の接岸に関する調査結果※
	接岸角度	供用段階	船舶の接岸に関する調査結果※
構造諸元	水深	施工段階	工事完成図書-地盤土質調査成果
	杭長	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	直径	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	肉厚	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	鋼材のヤング率	-	-
	鋼材の材質	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	鋼材の降伏応力	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	上部工単位体積重量	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	上部工幅	施工段階	工事完成図書-出来形管理資料
	上部工高	施工段階	工事完成図書-出来形管理資料
	上部工奥行き幅	施工段階	工事完成図書-出来形管理資料
	防舷材の高さ	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	防舷材の長さ	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	捨石層の厚さ	施工段階	工事完成図書-出来形管理資料
	捨石層の傾斜	施工段階	工事完成図書-出来形管理資料
その他	防舷材の公差	-	各メーカーカタログ
	設計供用期間	-	維持管理計画書
	偏心係数	-	設計図書
	仮想質量係数	-	設計図書

※港内において調査実績がある場合

### 3. 施工・維持管理段階のデータを活用した鋼管杭応力の時系列的信頼性解析の試行

本章では、船舶接岸時の鋼管杭応力を対象に、施工段階で得られる鋼管杭の実際の降伏応力に基づき、施設供用開始時における保有性能としての信頼性指標  $\beta$  の更新方法やその解析事例を示す。さらに、供用開始以降の維持管理段階のデータとして鋼管杭の腐食速度が得られたとして、供用開始以降における保有性能としての信頼性指標  $\beta$  の更新方法やその解析事例を示し、検討結果から得られた知見を整理する。

#### 3.1 船舶接岸時の鋼管杭応力に対する信頼性解析手法

##### (1) 検討断面

本検討では、現行基準における船舶接岸時の鋼管杭応力の照査に用いる部分係数の設定に用いた断面のうち、代表1断面（図-3.1に示す仮想断面）を用いた。棧橋鋼管杭の肉厚や直径などの杭諸元は、村上ら（2016）<sup>7)</sup>で適用されている条件と同じものとした。代表的な設計条件は、図中に示した。

##### (2) 信頼性解析手法

2.で概説したように、棧橋の設計では一般的に2次元フレーム解析を用いて、棧橋鋼管杭に発生する曲げモーメントや軸力を用いて鋼管杭応力を照査する。この鋼管杭応力に対する信頼性解析を実施する場合は、設計パラメータを確率変数として設定し、性能関数（一般的には、 $Z = \text{抵抗項 } R - \text{作用項 } S$ として表現される。）を定式化した上で、鋼管杭の降伏応力を超過する確率（限界状態超過確率  $p_f$ ）をモンテカルロシミュレーション（MCS）によって算定する。現行基準の部分係数を設定した際の各種条件を基に、設計段階での限界状態超過確率  $p_f$  および信頼性指標  $\beta$  を得る手順を概説すると以下の通りである。

##### a) 応答曲面法の適用によるフレーム解析における軸力及び曲げモーメントの定式化

フレーム解析の場合、鋼管杭応力に関する性能関数を簡易に定式化することができないことから、応力の算定に必要な杭の軸力と曲げモーメントの算定式が、応答曲面法の考え方を適用して提案されている。その詳細は村上ら（2016）<sup>7)</sup>に詳しいが、船舶接岸力  $H$  を用いて軸力  $N$  や曲げモーメント  $M$  を算定する方法が適用され、

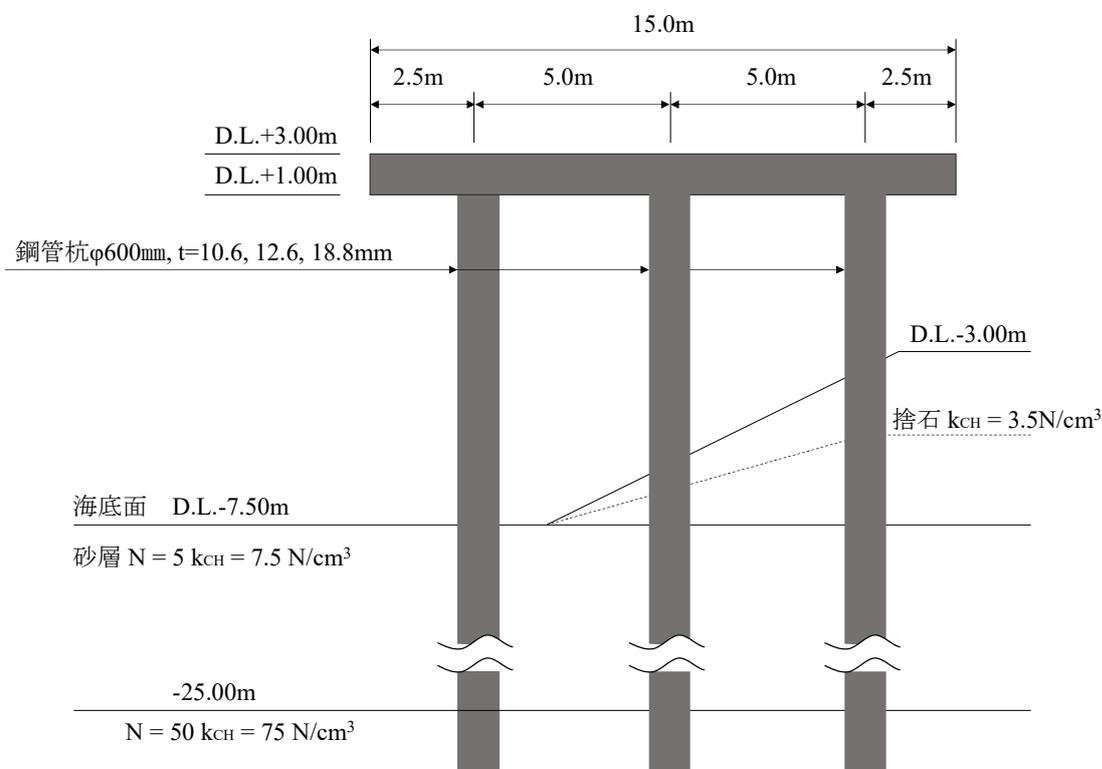


図-3.1 検討断面（仮想断面）

更に軸力  $N$  や曲げモーメント  $M$  は地盤反力係数  $k_{ch}$  を説明変数とした関数が提案されている。この定式化は解析対象となる杭列ごとになされており、本検討断面における船舶接岸力と杭の軸力および曲げモーメントの関係を表-3.1 に示す。

表-3.1 応答曲面法に基づく鋼管杭の軸力及び曲げモーメントの算定式

曲げモーメント	軸力
$M = X_1 + X_2 \cdot H$	$N = X_3 + X_4 \cdot M$
$X_1 = A_1 \cdot k_{CH1}^{B_1}$	$X_3 = A_3 \cdot k_{CH1}^{B_3}$
$X_2 = A_2 \cdot k_{CH1}^{B_2}$	$X_4 = A_4 \cdot k_{CH1}^{B_4}$
$A_1 = a_1 \cdot k_{CH2}^{b_1}$	$A_3 = a_5 \cdot k_{CH2}^{b_5}$
$B_1 = a_2 \cdot k_{CH2}^{b_2}$	$B_3 = a_6 \cdot k_{CH2}^{b_6}$
$A_2 = a_3 \cdot k_{CH2}^{b_3}$	$A_4 = a_7 \cdot k_{CH2}^{b_7}$
$B_2 = a_4 \cdot k_{CH2}^{b_4}$	$B_4 = a_8 \cdot k_{CH2}^{b_8}$

ここに、

$M$  : 曲げモーメント(N・mm)

$N$  : 軸力(N)

$H$  : 接岸力(N)

$k_{CH1}$  : 捨石層の横方向地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)

$k_{CH2}$  : 砂層の横方向地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)

$X_i$  : 変数

$A_i, B_i, a_i, b_i$  : パラメータ

なお、解析に用いた実際のパラメータの値については、付録Bに示す。

信頼性解析において各杭の軸力と曲げモーメントの値を求める際は、船舶接岸力  $H$  と地盤反力係数  $k_{ch}$  を確率変数として設定する。地盤反力係数  $k_{ch}$  に関する統計的性質は以下の表-3.2 を用いた。船舶接岸力の設定は以下のb)で述べる。

b) 船舶接岸力の評価

船舶接岸力  $H$  の算定には、2.1 で述べた通り、接岸エネルギーよりも大きな防舷材反力を有する防舷材を選定し、その性能曲線より防舷材反力を算定する。信頼性解析では、接岸エネルギーの算定式(式(1))における接

岸速度  $V_b$  や船舶質量  $M_s$  およびその他係数を確率変数として設定するため、算定される接岸エネルギーは分布をもって得られる。その接岸エネルギーに対応する防舷材反力を何らかの形でモデル化する必要がある。

そこで、勝俣ら(2016)は、国内に流通する各防舷材の性能を整理して、各々の防舷材の性能の差異を踏まえた、防舷材反力と接岸エネルギーの関係を図-3.2のようにモデル化している。また、信頼性解析においては各確率変数の分布により、防舷材の限界圧縮率を超過する接岸エネルギーが生じることが想定されるが、限界圧縮率を超過した際の反力特性については根拠となり得る資料が確認できないことから、限界圧縮率以降のモデル防舷材の反力は、限界圧縮率時の値を準用することとしている。なお、図-3.2 に示す関係は、図-3.1 の検討断面においてモデル化した防舷材を対象としている。図-3.2 に示す設計圧縮率は、各防舷材の公表値の吸収エネルギーや防舷材反力に対応する圧縮率を指しており、限界圧縮率は防舷材が取り得る最大の吸収エネルギーにおける圧縮率に相当する。

グラフの横軸の接岸エネルギーが算定できれば縦軸の防舷材反力、すなわち船舶接岸力を算定することができる。本稿における信頼性解析においては、接岸エネルギーの算定に際して表-3.3の統計的性質を適用した。(表-2.3の再掲)

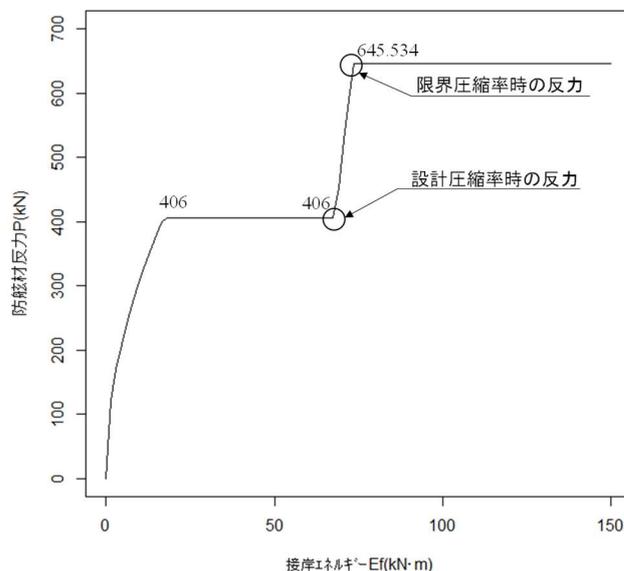


図-3.2 接岸エネルギーと防舷材反力関係のモデル化例

表-3.2 本検討に用いた地盤反力係数の統計的性質

確率変数	特性値 $X_k$	平均値の偏り $\mu/X_k$	変動係数 $V$	分布形	
地盤反力係数 $k_{CH}$ (kN/m <sup>3</sup> )	砂層	7500	1.333	0.76	対数正規
	捨石層	3500			

c) MCSに基づく鋼材降伏応力の超過確率の算定

上記 a), b), および各確率変数の統計的性質を用いて MCS (試行回数 200,000 回) を実行することにより, 接岸速度等を確率変数として与えた場合の船舶接岸力によって鋼管杭に発生する軸力や曲げモーメントの値が得られ, 鋼管杭応力の値も得られる. この応力を性能関数の作用項  $S$  として設定する. 鋼管杭応力に関する式は以下の式 (4) で示される.

$$S_k = \left( \frac{\sigma_c}{red} + \sigma_{bc} \right) \quad \text{式 (4)}$$

ここで,

- $S_k$  : 作用項に関する特性値(N/mm<sup>2</sup>)
- $red$  : 軸方向圧縮降伏応力度を降伏応力度の特性値で除した値として定義される係数. 部材の座屈長や鋼材の材質によって変化する.
- $\sigma_c$  : 断面に作用する軸方向圧縮力による圧縮応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{bc}$  : 断面に作用する曲げモーメントによる最大圧縮応力度(N/mm<sup>2</sup>)

算定された作用項  $S$  の度数分布図を図-3.3 に示す. その分布は, 左側に高いピークを有するとともに, 右側に低いピークを有している. これは, 接岸エネルギーの度数分布 (図-3.4) が接岸速度の影響を受けて対数正規分布に近い分布となっていること, および接岸エネルギーと防舷材反力関係のモデル (図-3.2) において反力一定の箇所が 2 箇所存在し, 当該箇所分布が集中する影響を受けたものであると考えられる.

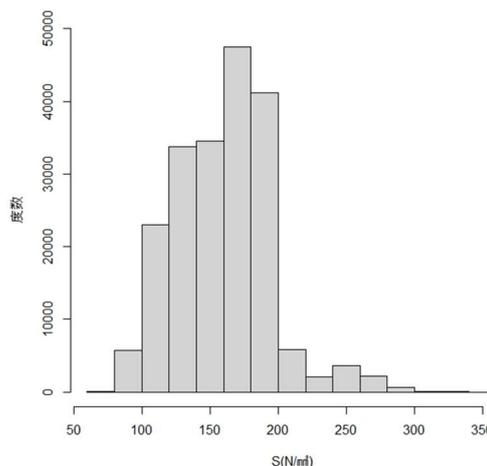


図-3.3 作用項  $S$  の度数分布図

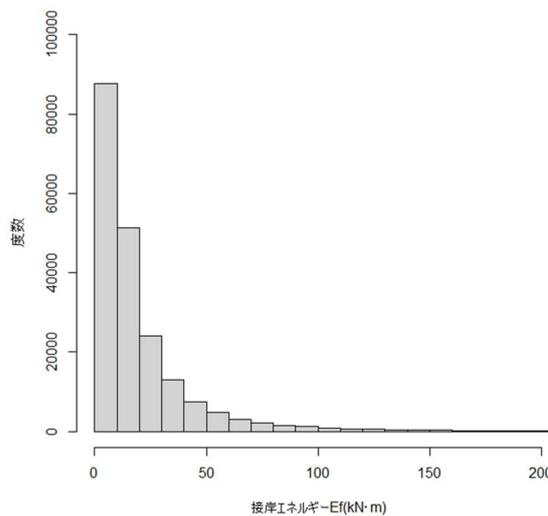


図-3.4 接岸エネルギー  $E_f$  の度数分布図

表-3.3 本検討に用いた船舶接岸力の統計的性質

確率変数	特性値 $X_k$	平均値 $\mu$ または中央値 $M_e$	標準偏差	分布形
船舶の排水トン数(DT)	1.174DWT =5870(DT)	1.139DWT =5695(DT)	0.052DWT=260	正規
接岸速度 $V$ (m/s)	0.1	0.061	0.034	対数正規
仮想質量係数 $C_m$	2.118	1.77	0.105	正規
偏心率係数 $C_e$	0.665	0.62	0.023	正規

また、性能関数の抵抗項  $R$  は各杭の鋼材の降伏応力であり、その統計的性質を表-3.4 に示す。これらの統計的性質は、村上ら (2016)<sup>7)</sup> の検討において、村越ら (2008)<sup>9)</sup> が整理した全国の鋼種板厚分類別の統計値から設定したものである。

MCS においては、性能関数  $Z$  を  $R-S$  として設定した上で、 $Z$  が負値となる試行回数を全試行回数で除すれば限界状態超過確率  $p_f$  が算定できる。また、限界状態超過確率  $p_f$  と信頼性指標  $\beta$  の関係は以下の式 (5) のとおりとなる。

$$p_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad \text{式 (5)}$$

ここに、 $\Phi$  は標準正規分布の累積分布関数である。

上記各種条件に対し、MCS (試行回数 200,000 回) を行った際の抵抗項  $R$  と作用項  $S$  の関係を図-3.5 に示した。図中の斜線は、限界状態線 (栈橋杭の応力に関する性能照査式において、鋼管杭の降伏が発生するか否かを示す境界線) として性能関数  $Z$  が 0 となる線であり、同線より上部に位置する場合は限界状態を超過したケースであることを示している。上記の条件に対する鋼材降伏応力の限界状態超過確率  $p_f$  は約 0.75% と算定され、この値を用いて得られる信頼性指標  $\beta$  は約 2.43 となった。なお、図-3.5 によると  $S$  側の分布が二峰性の分布を示しているが、これは、図-3.3 に示す作用項  $S$  の度数分布の特徴によるものである。

### 3.2 鋼材の降伏応力の更新に基づく施工段階での信頼性更新

2.3 で言及したように、施設設計後に入手できるデータによって、設計段階での各種条件は更新可能なものが多い。ここでは、施工段階で得られる鋼管杭の実際の降伏応力に基づき、施設供用開始時における保有性能の更新方法やその解析事例を示す。

#### (1) 施工段階で入手可能な鋼管杭の降伏応力に関するデータ

鋼材が用いられる構造形式においては通常、施工完了時に施工者から発注者に提出される工事完成図書内のミルシートに、実際の施工に用いた鋼材の降伏応力(以降、

施工時降伏応力) が明記されている。本研究では、国内のある栈橋の工事完成図書の一例を入手し、ミルシートの内容を分析した。

収集した工事事例の栈橋鋼管杭の材質は SKK490 であり、その材質に対する技術基準上の降伏応力の特性値は  $315\text{N/mm}^2$  である。図-3.6 に収集事例とした施工時降伏応力の度数分布、および降伏応力の特性値を 1.0 とした場合の施工時降伏応力の比率に関する度数分布を示す。本収集事例の施工時降伏応力は設計段階の特性値より、全て 1.2 倍以上の強度を有していることが分かる。通常、鋼管杭の降伏応力は少なくとも特性値以上の強度を有するものが納入されることから、実際の施設に対する鋼管杭応力に関する保有性能は、設計段階の想定よりも高い可能性があることを示唆している。

本検討に用いた応答曲面には、鋼管杭の材質として SKK400 が適用されているため、以下では SKK400 材の降伏応力の特性値 ( $235\text{N/mm}^2$ ) に対して図-3.6 の関係を満たすような施工時降伏応力が入手できたと想定した解析結果を示す。解析に用いた施工時降伏応力の値を表-3.5 に示す。

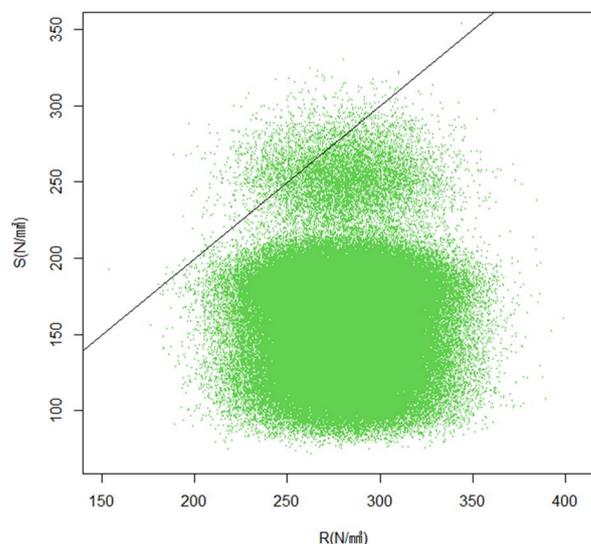
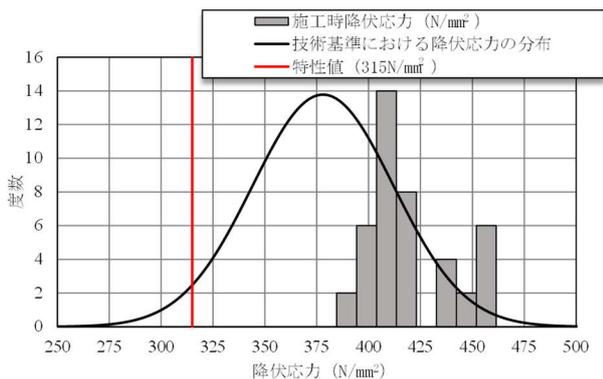


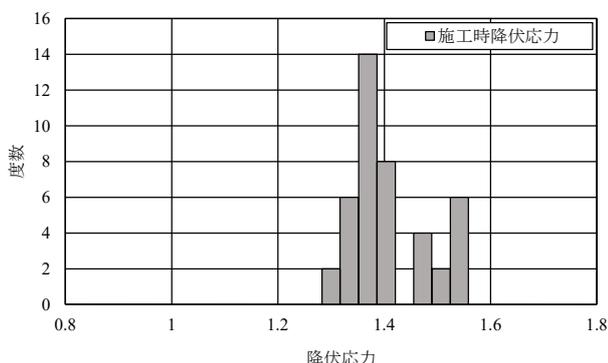
図-3.5 MCS の結果  
(抵抗項  $R$  と作用項  $S$  の関係)

表-3.4 本検討に用いた鋼材降伏強度の統計的性質

確率変数	特性値 $X_k$	平均値の偏り $\mu/X_k$	変動係数 $V$	分布形
鋼材降伏強度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	235	1.2	0.09	正規



(a) 収集事例の施工時降伏応力の度数分布図



(b) 降伏応力の特性値を 1.0 とした場合の  
 施工時降伏応力の比率に関する度数分布

図-3.6 鋼材の施工時降伏応力の度数分布図

表-3.5 解析に用いた施工時降伏応力の値

整理番号	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	整理番号	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	整理番号	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )
1	323	15	336	29	301
2	323	16	304	30	301
3	341	17	304	31	341
4	294	18	285	32	305
5	305	19	311	33	307
6	305	20	301	34	352
7	294	21	294	35	304
8	294	22	306	36	336
9	305	23	294	37	304
10	328	24	294	38	311
11	285	25	305	39	312
12	352	26	305	40	305
13	352	27	301	41	331
14	304	28	331	42	331

(2) 鋼材の降伏応力に関する不確実性の除去の効果

実際に用いられる鋼材が確定できない設計段階では、表-3.4 で示したような確率分布を仮定して、降伏応力の不確実性を考慮した信頼性解析を行う必要がある。しかし、施工時降伏応力がミルシートの納入により確定できれば、その不確実性は除去される。

図-3.7 は、その状況を MCS による信頼性解析結果の一例として示したものである。当該図は、本検討に用いた施工時降伏応力の最小値である 285N/mm<sup>2</sup>を確定値として栈橋海側杭に適用した上で、他の計算条件を設計段階に対して不変とした場合の MCS の実行結果を図-3.5 と同様に示したものである。設計段階の結果である図-3.5 の結果と比較すると、限界状態超過確率  $p_f$  の値は約 0.75% から約 0.21% に減少(信頼性指標  $\beta$  が 2.43 から 2.86 に増加)した。

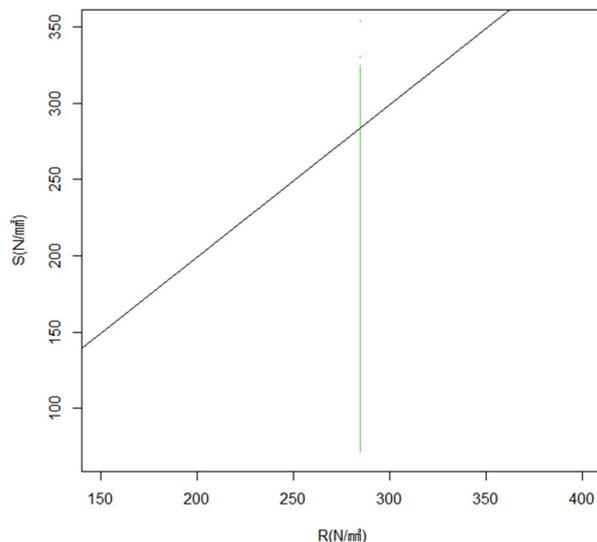


図-3.7 降伏応力の不確実性を除去した場合の  
 MCS の結果 (抵抗項 R と作用項 S の関係)

限界状態超過確率  $p_f$  が減少する(信頼性指標  $\beta$  が増加する)要因は、栈橋鋼管杭の降伏応力に関する不確実性を除去することによる影響の他、施工時降伏応力として設計段階での特性値よりも大きい値が用いられていることによる。なお、確定値として得られる施工時降伏応力が、設計段階の特性値と全く同様であった場合も想定して同様な解析を行った場合、信頼性指標  $\beta$  は反対に 2.43 から 1.80 に減少した。このように、単に鋼材の降伏応力の不確実性(物性値のばらつき)が低減されるのみでは、必ずしも信頼性指標  $\beta$  が大きくなるとは限らない。すなわち、信頼性解析に用いる物性値(ここでは鋼材の降伏応力)の平均値に加え、標準偏差に代表される物性値のばらつきの双方が信頼性解析結果に影響を及ぼすことか

ら、施設の保有性能を信頼性解析に基づいて評価する場合は、これらの数値を可能な限り正確に把握する必要がある。

(3) 施工時降伏応力に関する信頼性解析上の設定

栈橋鋼管杭の打設位置とミルシートの施工時降伏応力の対応関係が明らかな場合は、栈橋鋼管杭の降伏応力は上述のように確定値とみなすことができる。しかしながら、建設年代が古い施設の場合には、そもそも建設当時の資料が逸散している可能性があり、例えば、ミルシートは入手できたが、そのミルシートと施工された杭の位置の対応関係が追跡できない場合などが考えられる。そこで、本検討では、入手した施工時降伏応力と、栈橋鋼管杭の位置の対応関係が不明な場合を想定した解析を実施した。

この際、施工時降伏応力は上述の 42 データを利用することとし、検討断面は法線直角方向に 3 本の鋼管杭を有していることから、信頼性解析のケース数としては 42 データの降伏応力から任意の 3 種類の降伏応力を組合せ（順列）た 68,880 (= 42P<sub>3</sub>) 通りのケース数に対して解析を行うこととした。

本来は、施工時降伏応力と施工された杭の位置関係が不明な場合、法線直角方向の杭に加えて、法線方向の杭の扱いについても考え、3 次元の組合せについて考慮しなければならない。しかしながら、栈橋の設計は一般的には 2 次元で実施されているため、本稿においても 2 次元の組合せのみ考慮して検討することとした。

(4) 鋼材の降伏応力の更新による施工段階での信頼性更新結果

上述した、栈橋鋼管杭 3 本と施工時降伏応力 42 データの組合せを考慮した 68,880 通りの信頼性解析を行い、3 本の栈橋鋼管杭のうち信頼性指標  $\beta$  が最小となる杭に対する  $\beta$  の度数分布図を図-3.8 に示す。鋼材の施工時降伏応力が技術基準で示されている特性値よりも大きく、その分布も技術基準で想定している降伏応力の分布よりも右側に位置している（図-3.6 (a)）こと、また、施工時降伏応力を確定値として取り扱ったことから、更新された信頼性指標  $\beta$  は設計段階の結果 ( $\beta=2.43$ ) と比較して大きくなる傾向にある。ただし、その幅は施工時降伏応力の値によって大きく左右され、2.8~4.6 の範囲でばらつきが生じている。なお、その分布形状は、施工時降伏応力の分布（図-3.6）および図-3.3 の作用項  $S$  の分布の影響を受けているものと考えられる。

以上の結果は、施工時降伏応力を用いることによって、

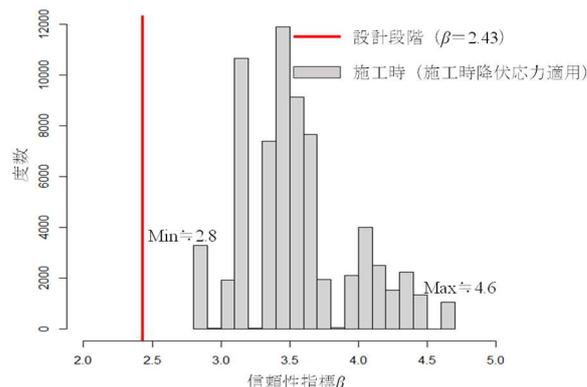


図-3.8 施工時降伏応力を適用した場合の信頼性指標  $\beta$  の評価結果

実際の鋼管杭応力に関する保有性能を設計段階の想定より高く評価できる可能性がある一方、施工時降伏応力と施工された栈橋鋼管杭の位置関係が明瞭でない場合、その評価結果にはかなりのばらつきが生じる可能性もあることを示唆している。ただし、施工時降伏応力が設計上の特性値周辺で分布した場合には、信頼性指標  $\beta$  は設計時の想定よりも低く評価される可能性もあるため、全ての場合において信頼性指標  $\beta$  が高くなる保証はない。

3.3 鋼管杭の腐食速度の更新に基づく時系列的信頼性解析

1. でも言及したとおり、Roubos らはロッテルダム港の矢板式係船岸の鋼材応力を対象として、施設供用後の矢板の性能を信頼性指標  $\beta$  によって時系列的に把握する手法（時系列的信頼性解析）を通じ、補修などの対応が必要な時期を合理的に把握する手法を提案している。提案された手法は、保有性能の相対比較に基づく施設の補強・補修対策の優先順位の策定にも有用な方法であると考えられる。

そこで、本節では当該手法を参考として、維持管理段階で入手可能となる、鋼材の腐食速度を考慮した場合の鋼管杭応力に関する保有性能の更新手法について、3.2 を踏まえて検討する。

(1) 腐食速度の更新可能性

施設の維持管理段階においては、維持管理計画書に定められる点検診断結果に関する各種データが得られる。その一つが鋼構造物の肉厚測定調査結果であり、その調査結果によって実際の腐食速度が推定できる場合がある。

技術基準では防食状態における鋼材の腐食速度の標準値として 0.03mm/year (L.W.L.-1m~H.W.L.) の値が示されており、一般的にはこの値に基づいて設計が行われ

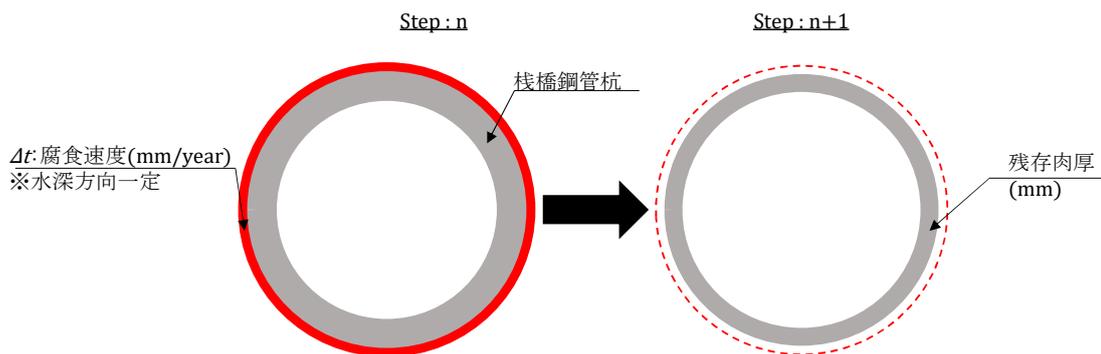


図-3.9 本検討における腐食速度の考え方

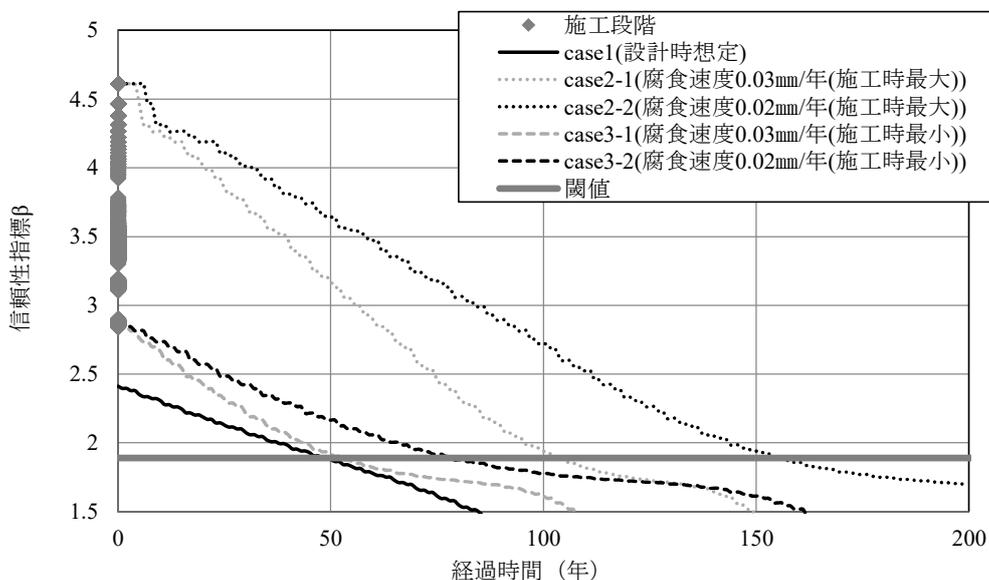


図-3.10 信頼性指標  $\beta$  の時系列的信頼性解析結果

る。今回入手した国内のある鋼構造物（防食状態）を対象とした実際の肉厚測定結果によれば、腐食速度は  $0.02\text{mm/year}$  と推定された。これは技術基準で示されている標準値よりも小さな値であり、両者を時系列的信頼性解析に組み込むことによる比較検討を行った。

(2) 信頼性解析への適用方法

本検討では、腐食速度を 1) 技術基準の標準値 ( $0.03\text{mm/year}$ ) とする場合、2) 腐食速度の実測値 ( $0.02\text{mm/year}$ ) とした 2 パターンで、鋼管杭応力に関する信頼性指標  $\beta$  を時系列的に更新する解析を行った。なお、図-3.1 に示した対象断面が実際に施工されたと想定し、同図中に示した肉厚が初期肉厚として 50 年分の腐食代を有していると仮定した。

図-3.9 に本検討における腐食速度の考え方について図化したものを示す。1 年を 1step とし、各 step で鋼管杭

の肉厚量を減少させた上で鋼管杭に対する信頼性解析を行う。この際の信頼性解析は 3.1 の手法を適用し、施工時降伏応力以外の解析条件も、3.1 に示した条件と同様である。

また、肉厚減少は鋼管杭の外周から一律に発生するものとし、鋼管杭の深度方向の肉厚も一律に減少するという条件で解析を行った。これは、3.1 に示した鋼管杭の応力算定に用いる応答曲面が、鋼管杭深度方向の局所的な断面変化に対応していないためである。実際の栈橋鋼管杭の肉厚減少量は、飛沫帯で相対的に大きいことが知られており、このことを詳細に考慮するためには応力算定に用いる応答曲面を再検討する必要がある。このため、本稿では既往の応答曲面を用いた試算例を示し、比較結果から示唆される定性的な考察を行うにとどめている。

(3) 時系列的信頼性解析の結果

図-3.10 に上記の手法を適用した信頼性指標  $\beta$  の時系列的信頼性解析結果を示す。case1 は鋼管杭の降伏応力の統計的性質を設計時の想定のまま(表-3.4)とし、腐食速度も技術基準の標準値を適用した場合の結果である。経過年数 0 年目の信頼性指標  $\beta$  は設計時に対応する  $\beta$  (3 列杭の最小値)であり、3.1 に示したとおり 2.43 である。肉厚が 0.03mm/year の割合で減少し、それ以外の統計的性質は不変として取扱ったため、信頼性指標  $\beta$  は単調に減少する。

また、図-3.10 の経過年数 0 年目には、3.2 で示した施工時降伏応力が得られた場合の状況を反映した(図中の◆印で示すプロット)。図-3.8 に示すように施工時降伏応力によって、0 年目(施工時)において既に信頼性指標  $\beta$  は 2.8~4.6 の範囲でばらつく。これらの最大の信頼性指標  $\beta$  に対応するケースを case2(海側杭の施工時降伏応力: 352N/mm<sup>2</sup>)、最小の信頼性指標  $\beta$  に対応するケースを case3(海側杭の施工時降伏応力: 285N/mm<sup>2</sup>)とし、これらに対して上述(2)に示した 2 パターンの腐食速度を適用し、信頼性指標  $\beta$  を時系列的に解析(更新)した。腐食速度は case2, case3 に対してそれぞれ 2 パターン

(0.03mm/year および 0.02mm/year) で解析し、図中の凡例にはそれぞれ枝番として case2-1, case2-2, case3-1, case3-2 として記載した。なお、腐食速度が 0.02mm/year、つまり点検診断結果から得られる腐食速度の実測値は、実際には施工後数年経過してから判明することとなるが、判明した鋼材の腐食速度は施工直後からその数値であったという考え方をを用いて比較を行っている。

各ケースとも時間経過とともに信頼性指標  $\beta$  が低下する傾向にあるが、case2 や 3 の低下速度には緩急が見られる。この要因について検討するため、図-3.11 に case3-1 における 20 年ごとの作用項  $S$  の分布を示した。

鋼管杭の肉厚減少によって鋼管杭の発生応力が増加するため、その分布は経過年ごとに右側へ移動する。また、図中には性能関数  $Z$  が 0 (限界状態  $R-S=0$ ) となる作用の値 (285N/mm<sup>2</sup>) も示した。case2 および 3 は施工時降伏応力を確定値としていることにより抵抗項  $R$  が一定値であるため、性能関数  $Z$  が 0 となる際の作用の値も一定値となる。このとき、信頼性指標  $\beta$  の低下速度は、図-3.11 中の限界状態線を超える作用項  $S$  の分布形に依存する。作用項  $S$  の分布形状は図-3.3 に示すようにいびつな形状をしており、それが case2 と case3 における信頼性

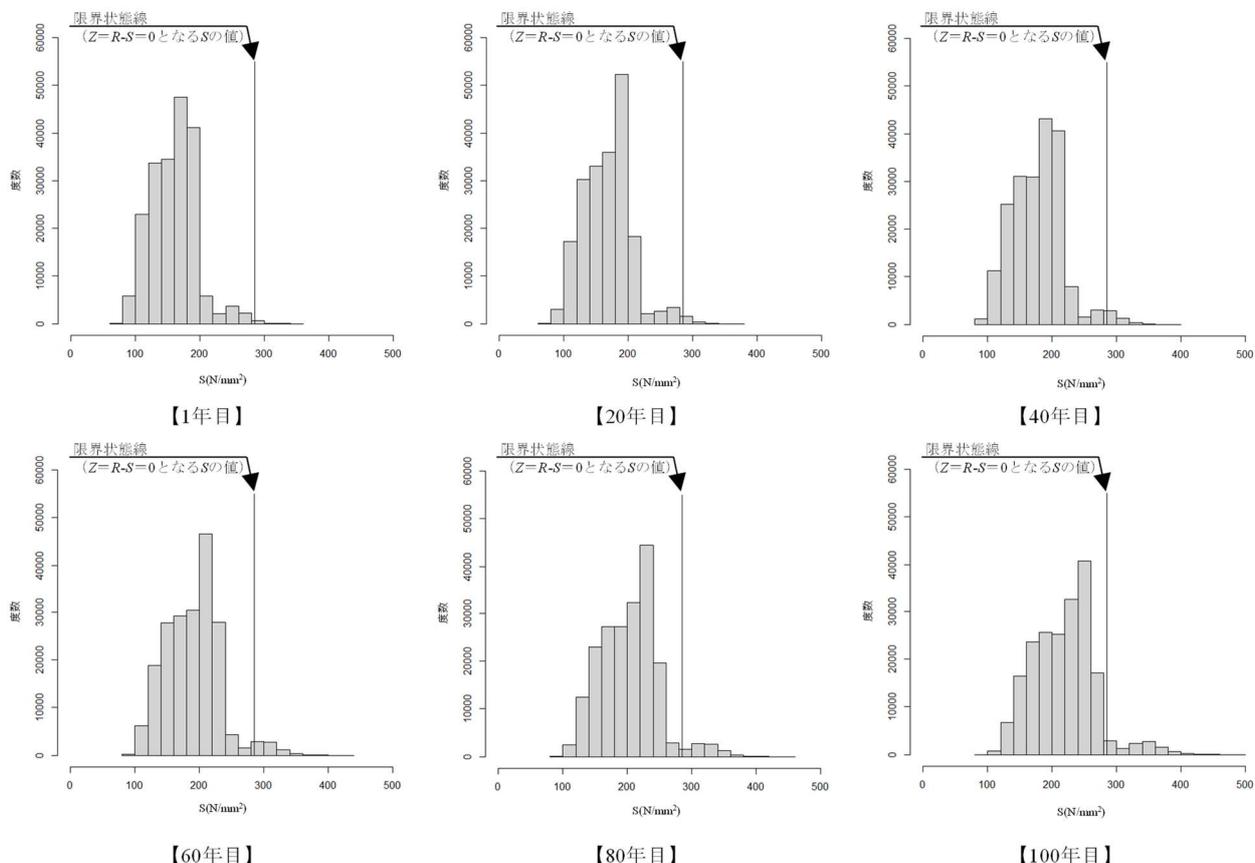


図-3.11 作用項  $S$  の度数分布図と限界状態線 ( $Z=R-S=0$ ) に対する作用項  $S$  の施設供用後 20 年毎の位置関係

指標  $\beta$  の低下速度のグラフ形状にも反映されている。

また、施設性能を時系列的に評価するメリットの一つは、施設の補修時期を合理的に判断することにあるため、**図-3.10** 中には何らかの対策が必要と判断する性能の閾値も記載した。本検討では設計時想定(case1)の条件に対して、一般的な施設の設計供用期間である 50 年後の鋼管杭の肉厚を考慮した解析結果 ( $\beta \approx 1.88$ ) を閾値として設定した。

### 3.4 考察

**図-3.9** より、施工時降伏応力の適用によって施工後（供用開始直後）の信頼性指標  $\beta$  が高くなることに起因して、設計段階で想定する鋼管杭の降伏強度やその不確実性をそのまま用いるよりも、鋼管杭応力に関する保有性能が閾値に達するまでの時間は長くなる傾向にあることがわかる。しかし、その時間は施工時降伏応力に対応する信頼性指標  $\beta$  の値（**図-3.9** 中の 0 年目の値に対応）に大きく依存し、その情報自体が逸散等によって曖昧になった場合、閾値に達する時間にも大きな不確実性を与え、補修時期等の意思決定にも大きな影響を与えることが示唆される。したがって、施工材料等のトレーサビリティの確保は、施設性能の把握を行う際の重要な観点となる。また、信頼性指標  $\beta$  の値に及ぼす腐食速度の影響も大きく、各種点検等を通じた維持管理段階における腐食速度の把握も鋼管杭の性能評価にあたっての重要な要素である。

本稿では船舶接岸時の栈橋鋼管杭の応力に関する保有性能にのみ着目した検討結果を示すのみにとどまったものの、今後、港湾内における多数の施設の補修・補強優先度を相対的に評価するための判断基準を策定する場合には、本検討で例示した信頼性指標  $\beta$  を用いた施設の保有性能の評価手法はその一つとなり得ると考えられる。この際、意思決定を合理的に行うためには、上述の検討結果に示したように施工・維持管理段階において得られたデータを最大限に活用した上で、設計段階のみではなく施設の保有性能を統一の指標を用いて供用期間中にわたって時系列的に評価することが重要である。

なお、本章に示した検討では、施設に何らかの対策が必要と判断する性能の閾値として、一般的な施設の設計供用期間である 50 年後の鋼管杭の肉厚を考慮した値を設定したが、この閾値の設定の考え方は今後の重要な検討事項の一つである。また、信頼性解析上の課題として、腐食速度を水深方向に対して一律に与えているなど、信頼性解析の手法としては改良すべき点も多く存在すると

ともに、実際の適用にあたっては **2.3** で整理したようなデータを網羅的に解析に組み込む必要がある。

## 4. おわりに

本稿では、港湾内における多数の施設の補修・補強優先順位を統一的な指標による相対的な判断基準によって策定するための端緒の研究として、船舶接岸時における栈橋鋼管杭の応力を対象に、施工・維持管理段階で得られるデータに基づいて、保有性能としての信頼性指標  $\beta$  を更新する時系列的性能評価の試行結果を示した。主な結論は以下のとおりである。

- 船舶接岸力に対する栈橋鋼管杭の応力照査を対象に、施設設計後の栈橋鋼管杭の保有性能の更新にあたって活用可能な情報源について整理した。当該性能照査項目において設定される設計条件のほとんどは、設計後に入手できる情報によって更新可能であり、設計段階での保有性能は設計後に入手できる各種データを用いて本来更新が可能であると考えられる。
- 設計段階で得られた栈橋鋼管杭の応力に関する信頼性指標  $\beta$  に対し、栈橋の施工に用いられたミルシートを参考に、技術基準上の降伏応力の特性値より 1.2 倍以上の降伏応力を有する鋼材が施工段階で利用されたことを想定した信頼性更新を行った。その結果、降伏応力を確定値として取り扱うことによる不確実性の低減効果も反映され、施工段階における栈橋鋼管杭の信頼性指標  $\beta$  は設計段階での結果と比較して増加する結果が得られた。
- 施工時降伏応力の値によって算定される信頼性指標  $\beta$  の値は大きくばらつく。したがって、施工時降伏応力と施工された栈橋鋼管杭の位置関係が明瞭でない場合は、施工時（供用開始時）の段階における施設の保有性能自体に不確実性が生じる要因となる。その不確実性の低減には、設計後に入手できる各種データのトレーサビリティの確保が重要であることが示唆された。
- 施設の保有性能を設計段階のみではなく統一の指標を用いて供用期間中にわたって評価する手法の一例として、栈橋鋼管杭応力に対する時系列的信頼性解析を適用した。栈橋杭応力に関する信頼性指標  $\beta$  の低下速度に及ぼす鋼材腐食速度の影響は大きく、各種点検等を通じた維持管理段階における腐食速度の把握も、栈橋鋼管杭の保有性能の評価において重要な要素である。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：数字でみる港湾，2021.
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018.
- 3) 加藤絵万，川端雄一郎，岩波光保：港湾 RC 構造物の確率論に基づく保有性能評価，港湾空港技術研究所資料，No.1225，2010.
- 4) 宇野州彦，岩波光保：劣化度判定結果を活用した残存耐力評価手法の実栈橋への適用，土木学会論文集 B3（海洋開発），vol.74，2018.
- 5) Alfred A. Roubos, Diego L.Allaix, Timo Schweckendiek, Raphael D.J.M.Steenbergen, Sebastiaan N.Jonkman : Time-dependent reliability analysis of service-proven quay walls subject to corrosion-induced degradation, Reliability Engineer and System Safety 203(2020)107085, 2020.
- 6) Mark G. van der Krogt, Timo Schweckendiek, Matthijs Kok : Improving dike reliability estimates by incorporating construction survival, Engineering Geology 280(2021)105937, 2021.
- 7) 村上和康，竹信正寛，宮田正史：直杭式横栈橋の船舶接岸時のレベル 1 信頼性設計法に関する諸考察(その 1)，国土技術政策総合研究所資料，No.899，2016.
- 8) 勝俣優，竹信正寛，宮田正史，村上和康：直杭式横栈橋の船舶接岸時のレベル 1 信頼性設計法に関する諸考察(その 2)，国土技術政策総合研究所資料，No.931，2016.
- 9) 村越潤，梁取直樹，有馬敬育，清水英樹，小森大資：鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査，土木研究所資料，第 4090 号，2008.

## 付録 A 設計後に入手できる情報によって更新可能な項目及びその情報源の一覧

ここでは、施設の設計後における各段階での鋼管杭応力に関する保有性能の更新に有用となるデータが含まれていると考えられる代表的な情報源の具体例について整理する。なお、一部の図表は付録と本文とで全く同一であることに留意されたい。

付表 A-1 に保有性能の更新に活用することができる各種情報及びその情報源の一覧を示す。以下に、代表的に選定した設計条件の情報源の具体例を示す。

### (1) 地盤 N 値

船舶接岸時の鋼管杭応力の性能照査において、地盤  $N$  値は砂層の横方向地盤反力係数  $k_{CH}$  の算定に用いられる

(A-1)。

$$k_{CH} = 1,500N$$

(A-1)

ここに、

$k_{CH}$  : 横方向地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)

$N$  : 砂層の平均  $N$  値

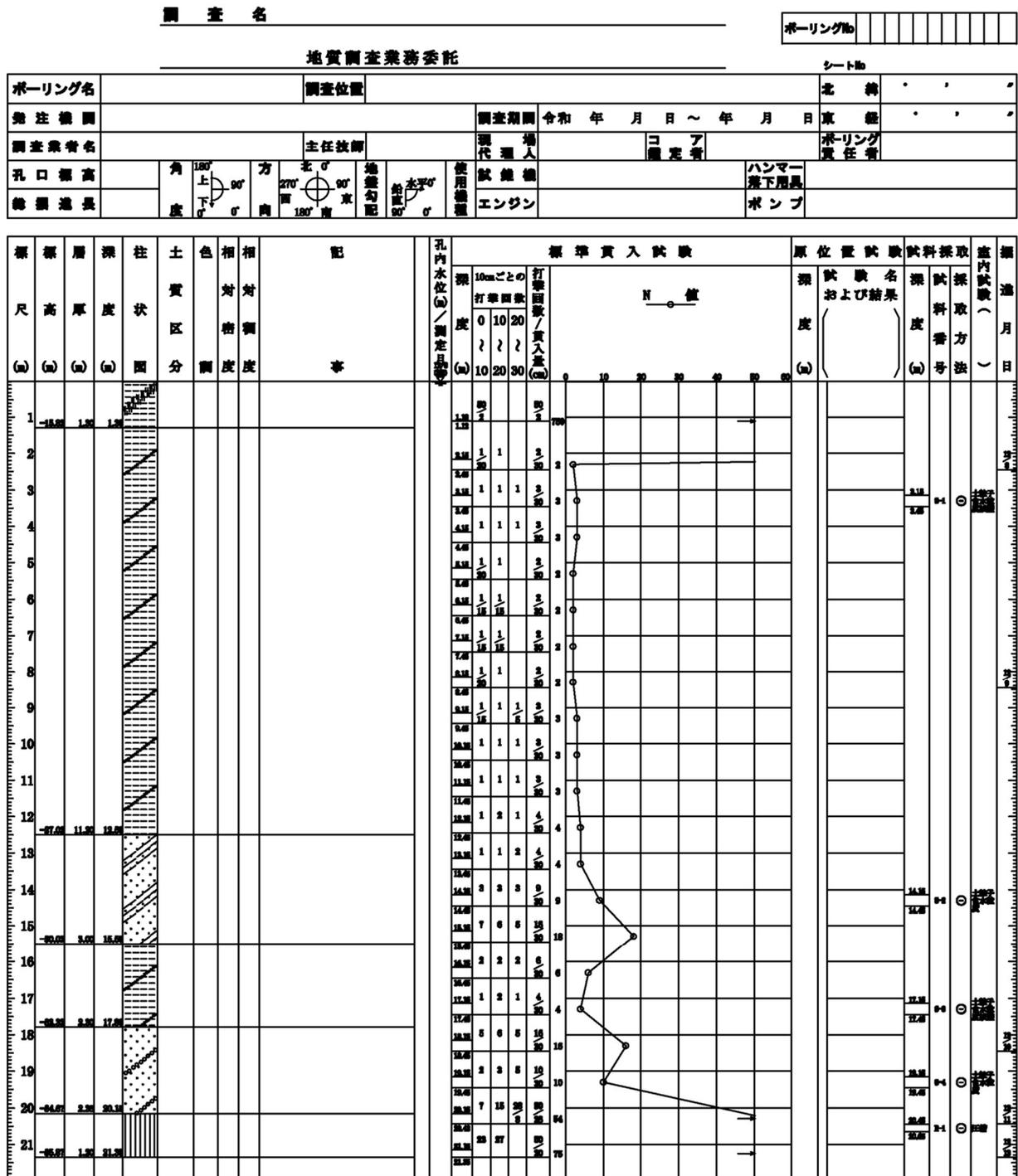
地盤  $N$  値は、施工段階において地質・土質調査が行われた場合、工事完成図書に取りまとめられている地盤・土質調査成果内のボーリング柱状図からなどから入手できる。ボーリング柱状図の例を付図 A-1 に示す。

付表 A-1 保有性能の更新に活用することができる各種情報及びその情報源の一覧

設計条件		段階	情報源
大項目	小項目		
自然条件	地盤N値	施工段階	工事完成図書-地盤土質調査成果
	腐食速度	維持管理段階	維持管理計画書や点検結果報告書
作用条件	上部工単体体積重量	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	船舶の質量	供用段階	船舶の接岸に関する調査結果 <sup>※</sup>
	接岸速度	供用段階	船舶の接岸に関する調査結果 <sup>※</sup>
	接岸角度	供用段階	船舶の接岸に関する調査結果 <sup>※</sup>
構造諸元	水深	施工段階	工事完成図書-地盤土質調査成果
	杭長	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	直径	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	肉厚	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	鋼材のヤング率	-	-
	鋼材の材質	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	鋼材の降伏応力	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	上載荷重	供用段階	-
	上部工幅	施工段階	工事完成図書-出来形管理資料
	上部工高	施工段階	工事完成図書-出来形管理資料
	上部工奥行き幅	施工段階	工事完成図書-出来形管理資料
	防舷材の高さ	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	防舷材の長さ	施工段階	工事完成図書-品質管理資料
	捨石層の厚さ	施工段階	工事完成図書-出来形管理資料
捨石層の傾斜	施工段階	工事完成図書-出来形管理資料	
その他	防舷材の公差	-	各メーカーカタログ
	設計供用期間	-	維持管理計画書
	偏心係数	-	設計図書
	仮想質量係数	-	設計図書

※港内において調査実績がある場合

### ボーリング柱状図



付図 A-1 ボーリング柱状図の例

## (2) 腐食速度

当該性能照査において、鋼管杭の腐食速度は腐食代を考慮した鋼管杭の肉厚の設定に用いられる。

鋼材の腐食速度の情報源は、一例として維持管理計画書内にある鋼材の肉厚及び腐食速度に対する劣化予測結果が挙げられる。付図 A-2 に一般的な維持管理計画書に掲載されている「鋼材の肉厚及び腐食速度の劣化予測結果」の例を示す。

## (3) 上部工単位体積重量

当該性能照査において、上部工単位体積重量は、上載荷重の設定の際の上部コンクリートの自重の算定に用いられる。

上部工単位体積重量の情報源の一例として、工事完成図書に取りまとめられている品質管理資料のうちコンクリート試験成績表が挙げられる。付図 A-3 に品質管理資料として納品される「コンクリート試験成績表」の様式例を示す。

## (4) 鋼管杭の諸元

当該性能照査において、鋼管杭の諸元は、設計に用いるその鋼管杭の特性を設定する際に用いられる。

鋼管杭の諸元の情報源の一例として、工事完成図書に取りまとめられている品質管理資料のうちミルシートが挙げられる。代表例として付図 A-4, 5 に「機械試験成績表」および「寸法検査成績表」の例を示す。

## (5) 上部工の諸元

当該性能照査において、上部工の諸元は、上載荷重の設定の際の上部コンクリートの自重の算定に用いられる。

上部工の諸元の情報源の一例として、工事完成図書に取りまとめられている出来形管理資料のうち上部工コンクリート(岸壁)出来形管理表が挙げられる。付図 A-6 に「上部工コンクリート(岸壁)出来形管理表」の様式例を示す。

## (6) 防舷材の諸元

当該性能照査において、防舷材の諸元は、防舷材の吸収エネルギー、すなわち船舶接岸力の算定に用いられる。

防舷材の諸元の情報源の一例として、工事完成図書に取りまとめられている出来形管理資料のうち防舷材形状管理表が挙げられる。付図 A-7 に「防舷材形状管理表」の様式例を示す。

## (7) 捨石層の諸元

当該性能照査において、捨石層の諸元は、地盤ばねの設定に用いられる。

捨石層の諸元の情報源の一例として、工事完成図書に取りまとめられている出来形管理資料のうち基礎石均し出来形管理図が挙げられる。付図 A-8 に「基礎石均し出来形管理図」の例を示す。

## (8) 施設の基本情報

施設の設計供用期間や構造形式等の基本情報は、設計後に作成される維持管理計画書に掲載される。

維持管理計画書に掲載されている施設の情報の一覧表の例を付表 A-2 に示す。



施工・維持管理段階において入手可能なデータを用いた信頼性指標による施設保有性能の時系列的評価の試行  
 ～ 船舶接岸時における棧橋鋼管杭の応力照査を対象として ～  
 /三上康光・竹信正寛・菅原法城・宮田正史・辰巳大介・本間翔太・宮島正悟

コンクリート試験成績表(試験練用)

様式・品質16-1

工事名 \_\_\_\_\_ 工種 \_\_\_\_\_ プラント名 \_\_\_\_\_

試験日 \_\_\_\_\_ 立会者 \_\_\_\_\_ 測定者 \_\_\_\_\_

試験場所 \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 現場代理人 \_\_\_\_\_

1 示方配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプの 範囲 (cm)	空気量の 範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水, W	セメント, C	細骨材, S	粗骨材, G	混和剤 ( )

2 現場配合表

コンクリート量 (mm)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	混和剤 (ml, g)	表面水 (%)		概要
						S	G	

3 試験採取及び養生 (JIS A 1115 及び1132)

採取年月日	
採取場所	
採取時刻	
天候	
気湿	
コンクリート温度	
スランプ	
空気量	
養生方法	
養生湿度	
材令	

4 試験成績表 (JIS A 1108 又は 1106)

供試体番号	No.	1	2	3	平均
供試体の直径	cm				
" 幅	"				
" 高さ	"				
" 長さ	"				
" スパン	"				
最大荷重	kN				
圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>				
曲げ強度	"				
破壊状況					
その他					

付図 A-3 コンクリート試験成績表



施工・維持管理段階において入手可能なデータを用いた信頼性指標による施設保有性能の時系列的評価の試行  
 ～ 船舶接岸時における棧橋鋼管杭の応力照査を対象として ～  
 /三上康光・竹信正寛・菅原法城・宮田正史・辰巳大介・本間翔太・宮島正悟

寸法検査成績表

注文番号		製造番号										
需要家												
行番	品名	杭種		規格		数量						
寸法												
規定寸法 許容範囲	外径		長さ			曲り L×1/1000 ≤25	端面 直角度	平面度	目違い	真円度		備考
	頭部	先端部	頭部	中央部	先端部					頭部	先端部	
	1200.0	1200.0	15.0	15.0	25500							
	+0.5%	+0.5%	+規定せず	+規定せず	+規定せず							
	-0.5%	-0.5%	-0.8	-0.8	0							
A												
B												
C												
D												
E												
F												

付図 A-5 寸法検査成績表



施工・維持管理段階において入手可能なデータを用いた信頼性指標による施設保有性能の時系列的評価の試行  
 ～ 船舶接岸時における栈橋鋼管杭の応力照査を対象として ～  
 /三上康光・竹信正寛・菅原法城・宮田正史・辰巳大介・本間翔太・宮島正悟

様式・品質12-1

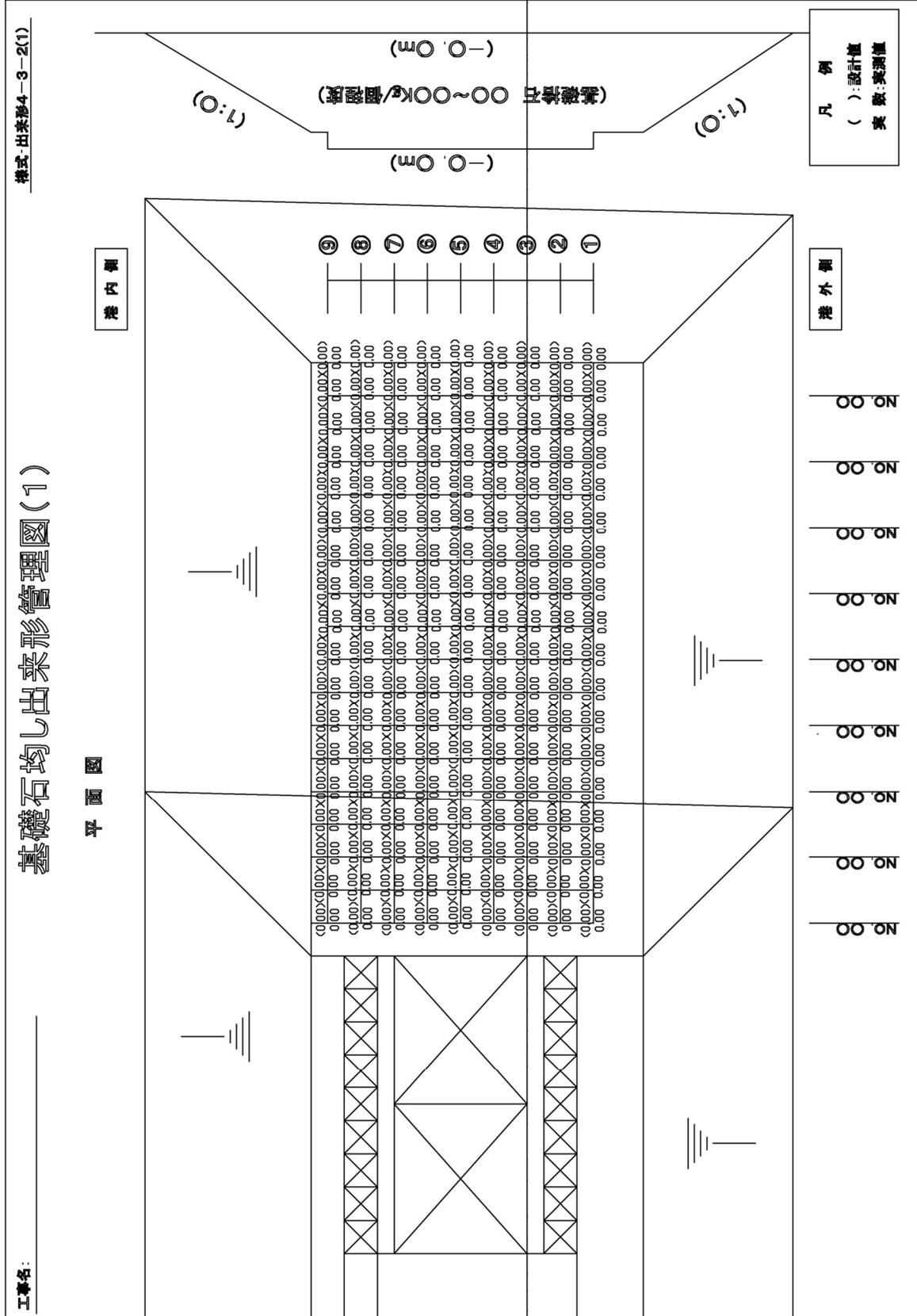
防舷材形状管理表

工事名	型式
年月日	現場代理人

単位 mm

測定箇所	標準寸法	No.	No.	No.	備考
長さ	L <sub>1</sub>				
	L <sub>2</sub>				
幅	A				
	B				
高さ	H				
ボルト穴径					
ボルト穴の中心間隔	C				
	l <sub>1</sub>				
	l <sub>2</sub>				
その他					

付図 A-7 防舷材形状管理表



付図 A-8 基礎石均し出来形管理図

施工・維持管理段階において入手可能なデータを用いた信頼性指標による施設保有性能の時系列的評価の試行  
 ～ 船舶接岸時における棧橋鋼管杭の応力照査を対象として ～  
 /三上康光・竹信正寛・菅原法城・宮田正史・辰巳大介・本間翔太・宮島正悟

付表 A-2 施設の基本情報一覧

項目		内容	備考	
港湾名		**港		
港格		重要港湾		
地区名		-		
施設名称	設置者の施設名称	**棧橋		
	港湾管理者の施設名称	**棧橋		
施設番号		C-4-*		
施設の種類		係留施設（棧橋）		
構造形式		直杭式横棧橋		
設計供用期間		****年～****年（50年間）		
供用期間		****年～****年（50年間）	維持管理期間	
通常点検診断施設または重点点検診断施設の設定		重点点検診断施設		
劣化度の判定の実施単位		上部工1ブロックごと	12ブロック	
施設全体の性能低下度の評価の実施単位		1バース全体	1施設	
点検診断等の留意点（現場条件等）				
維持工事等の留意点（施工条件等）				
維持管理に必要な書類等の保管場所	測量・設計 図書	測量	平成**年度**深淺測量	**事務所に保管
		土質調査	平成**年度**土質調査	**事務所に保管
		設計	平成**年度**設計	**事務所に保管
	工事関係 図書	下部工	平成**年度**築造工事	**事務所に保管
		上部工	平成**年度**築造工事	**事務所に保管
		その他	平成**年度**築造工事	**事務所に保管
初回点検診断等の点検診断結果		平成**年度**調査	**事務所に保管	

付録 B 応答曲面法を適用して定式化した鋼管杭応力の算定式に用いたパラメータの一覧

一般的には、船舶接岸時の鋼管杭応力の性能照査において、鋼管杭応力の算定に必要な杭の軸力と曲げモーメントは、フレーム解析によって算定する。しかし、フレーム解析の場合は、鋼管杭応力に関する性能関数を簡易に定式化することができない。このことから、杭の軸力と曲げモーメントの算定式が応答曲面法の考え方を適用して提案されている（村上ら（2016）<sup>6)</sup>）。提案された算定式として、船舶接岸力  $H$  を用いて軸力  $N$  や曲げモーメント  $M$  を算定する方法が適用され、さらに軸力  $N$  や曲げモーメント  $M$  は地盤反力係数  $k_{CH}$  を説明変数とした関数が提案されている。この定式化は解析対象となる杭列ごとに なされており、本検討に用いている船舶接岸力  $H$  と杭の軸力および曲げモーメントの関係を付表 B-1 に示す。

付表 B-1 応答曲面法に基づく鋼管杭の軸力及び曲げモーメントの算定式

曲げモーメント	軸力
$M = X_1 + X_2 \cdot H$	$N = X_3 + X_4 \cdot M$
$X_1 = A_1 \cdot k_{CH1}^{B_1}$	$X_3 = A_3 \cdot k_{CH1}^{B_3}$
$X_2 = A_2 \cdot k_{CH1}^{B_2}$	$X_4 = A_4 \cdot k_{CH1}^{B_4}$
$A_1 = a_1 \cdot k_{CH2}^{b_1}$	$A_3 = a_5 \cdot k_{CH2}^{b_5}$
$B_1 = a_2 \cdot k_{CH2}^{b_2}$	$B_3 = a_6 \cdot k_{CH2}^{b_6}$
$A_2 = a_3 \cdot k_{CH2}^{b_3}$	$A_4 = a_7 \cdot k_{CH2}^{b_7}$
$B_2 = a_4 \cdot k_{CH2}^{b_4}$	$B_4 = a_8 \cdot k_{CH2}^{b_8}$

ここに、

$M$  : 曲げモーメント(N・mm)

$N$  : 軸力(N)

$H$  : 接岸力(N)

$k_{CH1}$  : 捨石層の横方向地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)

$k_{CH2}$  : 砂層の横方向地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)

$X_i$  : 変数

$A_i, B_i, a_i, b_i$  : パラメータ

解析に用いた実際のパラメータの値を付表 B-2 に示す。

付表 B-2 解析に用いた実際のパラメータの値

パラメータ	杭1列目	杭2列目	杭3列目
$A_1$	3.66147	3.66299	6.46259
$A_2$	3.62090	2.66483	2.60764
$A_3$	1050.26230	970.71489	1051.37820
$A_4$	-0.20502	-0.04487	0.33990
$B_1$	0.07204	0.06047	-0.01689
$B_2$	-0.11114	-0.05412	0.00000
$B_3$	0.00028	0.00005	0.00015
$B_4$	0.06719	0.05363	-0.04212
$a_1$	0.82482	1.06104	3.16280
$a_2$	0.55760	0.35196	-0.00918
$a_3$	114.33890	9.64664	4.76016
$a_4$	-3.62097	-0.39110	0.00000
$a_5$	1042.04800	970.33300	1050.15000
$a_6$	0.01008	0.00018	0.00052
$a_7$	-0.03028	-0.02902	0.56761
$a_8$	2.94844	0.24419	-0.32917
$b_1$	0.16704	0.13886	0.08009
$b_2$	-0.22935	-0.19740	0.06836
$b_3$	-0.38693	-0.14418	-0.06745
$b_4$	-0.39043	-0.22165	0.00000
$b_5$	0.00088	0.00004	0.00013
$b_6$	-0.40275	-0.14475	-0.14025
$b_7$	0.21436	0.04884	-0.05747
$b_8$	-0.42381	-0.16988	-0.23043

---

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1216

July 2022

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

---

本資料の転載・複写のお問い合わせは  
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1  
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕  
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

施工・維持管理段階において入手可能なデータを用いた信頼性指標による施設保有性能の時系列的評価の試行  
）船舶接岸時における栈橋鋼管杭の応力照査を対象として）