

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.899

March 2016

直杭式横棧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）

村上 和康・竹信 正寛・宮田 正史

Considerations of Level 1 Reliability Design Method for
Vertically Pile-Supported Wharves under Berthing Condition
(Part 1)

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

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）

村上和康*・竹信正寛**・宮田正史***

要 旨

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年）」（以下、H19基準という）において、防波堤や係留施設の全体安全性の照査に対して、レベル1信頼性設計法（部分係数法）が導入された。著者らは、現行基準の次期改訂に向けて、直杭式横栈橋の鋼管杭の応力照査を対象とした部分係数の再構築を目指している。

本資料では、部分係数の再構築に向けた最初の取り組みとして、以下の検討を行った。

- 1) 栈橋の杭の応力照査に関する過去の港湾基準の設計法を、H19基準を含めて整理し、応力照査上の鋼管降伏応力度に対する安全性水準を基準別に比較して考察を行った。本検討内容は、目標安全性水準を決定する際の基礎資料となる。特に、従来の設計法で船舶接岸時の応力照査を行う場合、鋼材の許容応力度の設定方法によって、杭の有する安全性水準が大きく変化することを確認した。このため、安全性水準の評価に際しては、過去の設計の実態把握として、既往設計事例の収集整理が必要であることを課題に挙げた。
- 2) 一般に、栈橋の応力照査には骨組み解析が用いられ、杭の発生部材力は陽関数として表現できない。そのため、部分係数の算定に必要な信頼性解析では、杭部材力の評価方法が課題となる。この解決手段として、応答曲面法により杭部材力の近似関数式を作成し、その精度を確認した。なお、この近似関数式は、複数の断面条件に対して作成しており、その作成内容を付録として示した。

キーワード：レベル1信頼性設計法，目標安全性水準，直杭式横栈橋，船舶接岸，応答曲面法

* 港湾研究部 港湾施設研究室 交流研究員（日本工営株式会社）
** 港湾研究部 港湾施設研究室 主任研究官
*** 港湾研究部 港湾施設研究室長
〒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：046-844-5029 Fax：046-844-5081 e-mail：takenobu-m83ab@mlit.go.jp

Considerations of Level 1 Reliability Design Method for Vertically Pile-Supported Wharves under Berthing Condition (Part 1)

Kazuyasu MURAKAMI*

Masahiro TAKENOBU**

Masafumi MIYATA***

Synopsis

Level 1 reliability design method (partial factor design method) was introduced as a performance verification method for whole stability of breakwaters and mooring facilities, according to the Japanese design standard for port facilities whose title is "Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan (2007)". For next revision of the standard, the authors strive to reassign the partial safety factors for performance verifications of pile stress of pile-supported wharves.

In this study, as the first effort to reassign the partial factors, the authors examined two issues as shown below.

- 1) The authors comprehensively summarized design methods implemented in past and current standards for verifications of pile stress of vertically pile-supported wharves, and compared safety levels of steel piles designed by the different design methods, with respect to the yield stress (maximum capacity) of the piles under a ship berthing condition. The result of this comparison will be a basic reference data for readjustment of the target safety level.

Especially, with respect to the past design method (allowable stress method) under a berthing condition, it was confirmed that there have been two different concepts of a setting method of allowable stress for steel pile. One is that the allowable stress is set at a safer level with considering a berthing force as a frequent force, the other is that the allowable stress is set nearly at a maximum capacity of pile stress with considering a berthing force as a short-term force. Since such a difference influences extremely the safety level, the authors proposed that it should be sufficiently confirmed how the allowable stress had been practically determined for past constructed structures in advance of the readjustment of the safety level.

- 2) In general, a framework analysis using a Finite Element Method is used for calculation of pile stresses of pile-supported wharves. However, when performing a reliability analysis with using a Monte Carlo simulation basis, such a complex and time-consuming calculation method is not applicable. Therefore, in this study, the authors newly developed a new calculation method that is capable of estimating the stresses easily with a high approximation accuracy, which was based on a response function technique. Such response functions were derived for typical cross-sections of 16 wharves.

Key Words: Level 1 reliability design method, Target safety level, Pile-supported wharf, ship berthing, response surface method

* Exchanging Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
(NIPPON KOEI Co., Ltd.)

** Senior Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

*** Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

目 次

1. 本研究の目的と構成	1
1.1 H19基準改訂に向けた部分係数の見直しの方向性	1
1.2 本研究の全体手順と本稿における検討内容	1
2. 船舶接岸時における杭の応力照査手法の整理	2
2.1 本章の概要	2
2.2 許容応力度法による照査手法	2
2.3 H19基準の部分係数法による照査手法	3
2.4 杭の応力照査における船舶接岸時の許容応力度に関する収集・整理	3
2.5 杭の支持力照査における船舶接岸時の安全率	4
2.6 まとめ	4
3. 船舶接岸時における杭の応力照査を対象とした安全性水準に関する考察	5
3.1 本章の概要	5
3.2 検討条件	5
3.3 杭の断面諸元の比較	7
3.4 降伏応力度に対する安全率を指標とした比較	14
3.5 船舶接岸時の安全性水準に関する考察と今後の課題	16
4. 応答曲面法による杭部材力の近似式の信頼性解析への導入	16
4.1 応答曲面法の導入経緯	16
4.2 応答曲面法による近似化の方法	17
4.3 応答曲面法による近似結果とその精度	22
5. おわりに	26
謝辞	26
参考文献	26
付録 A 直杭式横棧橋の杭の応力照査に係る技術基準の変遷	27
付録 B 応答曲面法による杭部材力の近似結果	30

1. 本研究の目的と構成

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年）」¹⁾（以下、同書の解説部分を「H19基準」とする）において、複数の構造形式の全体安定性・部材安全性の照査に対し、レベル1信頼性設計法（部分係数法）が導入されており、直杭式横棧橋に関する設計もこれに含まれる。本研究の最終目的は、直杭式横棧橋の船舶接岸時の部材安定性を対象に、H19基準の次期改訂における新たな部分係数法を提示することにある。なお、本研究における部材安定性とは、杭の安定性を指すこととする。また、杭の安定性に関する照査には応力照査と支持力照査があるが、本研究では杭の応力照査のみを対象とする。

本稿は、本研究（直杭式横棧橋の部材安定性に係る新たな部分係数法の提案）の達成に向けての第一報であり、本稿における検討内容と資料構成は1.2に示す。

1.1 H19基準改訂に向けた部分係数の見直しの方向性

(1) 見直しの方向性

竹信ら²⁾は、現行の部分係数の特徴やそれに対する設計実務者からの意見を踏まえ、ケーソン式岸壁の永続状態における全体安定性（滑動および転倒）を対象として、基準改訂に向けた部分係数法の見直しの方向性を示している。直杭式横棧橋の杭の応力照査に係る部分係数に関しても、この方向性を踏襲する。なお、部分係数の提案にあたって、竹信ら²⁾は目標安全性水準の精査・再設定を行っており、これに関して、次項で述べる。

(2) 目標安全性水準の精査・再設定に関して

H19基準の部分係数は、従来の設計法（安全率法や許容応力度法）の平均的な安全性水準に基づき設定されたものと、期待総費用最小化の考え方に基づき設定されたものがある。後者についてはH19基準にて、「従来の設計法では過度に安全な断面が設定され、不経済となる場合があるため、そのような場合には期待費用最小化に基づく設定を推奨している」¹⁾とされており、主に永続状態の性能照査を対象に期待総費用最小化に基づく部分係数が設定されている。つまり、従来の設計法から現行の部分係数法への移行に伴い、目標とする安全性水準を変化させている。

これに関連して、竹信ら²⁾は、ケーソン式岸壁の滑動・転倒照査を対象に試設計を行い、現行の永続状態の部分係数により求められる断面がどの程度の水準にあるかを検討している。試設計の結果、永続状態の部分係数より求められる最小断面は安全率法による断面より大きく、震度0.10~0.15の地震力に対する所要断面に相当するとし、目

標安全性水準を従来の安全率法による水準へ見直すことを提案している。

直杭式横棧橋に関しても、船舶接岸時（牽引時）の部分係数が期待総費用最小化に基づき設定されている³⁾。目標安全性水準の設定手法そのものに問題はないものの、設計法の変遷により、所要断面規模にどの程度の差が生じるかを様々な条件下で俯瞰し、場合に応じて目標安全性水準を見直すことも必要と考えられる。

1.2 本研究の全体手順と本稿における検討内容

(1) 本研究の全体手順

本研究全体を通しての検討手順の概略を図-1のフローに示す。このうち、本稿における検討内容（図-1中のハッチング）は次項で示すこととし、ここでは全体手順に関する概要を述べる。

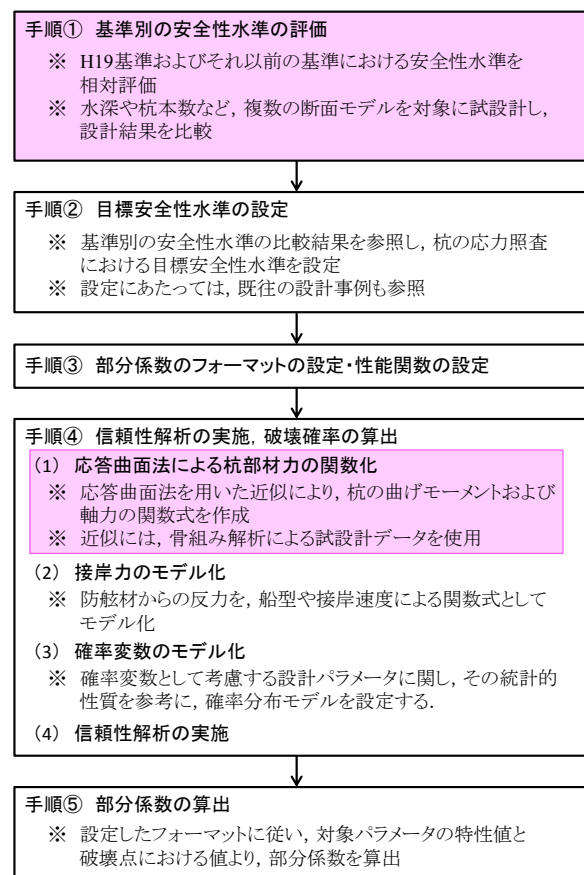


図-1 本研究の全体フロー

部分係数の算定にあたっては、構造物の目標安全性水準を決定する必要がある。重力式岸壁や矢板式岸壁と異なり、棧橋構造では船舶の接岸作用が主要な作用となりうることを踏まえると、船舶接岸に対する目標安全性水準の設定は重要といえる。また、その設定にあたっては、H19基準

または過去の基準類が有していた安全性水準を評価した上で、判断する必要がある。なお、先に述べたとおり、H19基準の船舶接岸時の部分係数は期待費用最小化の考えに基づき設定されており、それ以前の設計法（許容応力度法）とは安全性の目標設定の考え方が異なる。

以上を踏まえ、まずは基準間の安全性水準の違いを、様々な条件下で相対的に評価する（図-1の手順①）。さらに、この評価結果を踏まえた上で、既往の設計事例などを参照しつつ、本研究における安全性水準を設定する（図-1の手順②）。

次に、杭の応力照査式における部分係数のフォーマットを設定し（図-1の手順③）、設定した目標安全性水準に対する信頼性解析を実施して目標破壊確率を算出する（図-1の手順④）。このとき、本研究の信頼性解析手法としては、竹信²⁾の研究を踏襲し、モンテカルロシミュレーションを採用することとする。なお、通常の杭の応力照査において、発生部材力（曲げモーメント・軸方向力）は骨組み解析によって算出されるため、杭の発生応力自体は単純な関数式で表現することができない。そのため、この部材力の評価方法をどのような手法に基づいて実施するかという点が信頼性解析上の課題となる。そこで、代表的な設計条件（船舶接岸力・基礎地盤の地盤反力係数）から部材力を算出することができる近似式を、応答曲面法を用いて作成することを検討する。また、船舶接岸力は防舷材からの反力として棧橋に作用するが、この反力は防舷材の性能に依存するため、複数の防舷材製品の性能を包括的にとらえた反力モデルの作成を試み、信頼性解析に反映させる。信頼性解析の結果、部分係数の対象とするパラメータの特性値と設計点における値より部分係数を算出する（図-1の手順⑤）。

(2) 本稿における検討内容と構成

本稿では、まず、図-1の手順①に関し、従来の設計法（許容応力度法）とH19基準による杭の応力照査方法を第2章で整理し、次に、第3章にて、従来の設計法に基づき決定される杭の断面性能と、H19基準により決定される断面性能の間どの程度の差が生じるかを比較検証する。

また、図-1の手順④(1)に関し、信頼性解析への導入を目的として、応答曲面法を用いた杭部材力の近似式を検討・提案する。この内容については第4章で詳述する。

2. 船舶接岸時における杭の応力照査手法の整理

2.1 本章の概要

本章では、船舶接岸時の杭の応力照査手法について整理する。まず、従来の設計法として許容応力度法を2.2に、次に、H19基準による杭の照査方法を2.3に示す。前者の許容応力度法に関する記載は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成11年）」⁴⁾（以下、同書の解説部分を「H11基準」とする）を参照する。なお、許容応力度法はH11基準以前の全ての基準（昭和25年～）で用いられている手法である。応力照査手法の変遷については、巻末の付録Aに整理する。

許容応力度法による杭の応力照査において、その安全性は杭の発生応力と許容応力度の関係によって考慮される。例えば、SKK400の場合、許容応力度は140N/mm²であり、降伏強度は235N/mm²であるため、鋼材の降伏強度に対する実質的な安全率（以下、「安全率」とする）として、約1.7（≒235/140）が考慮されている。

また、地震等の特別な作用を考慮する場合には、許容応力度の割り増しを行う。許容応力度を割り増すと、許容応力度が降伏強度に近づくため、安全率としては小さくなることを意味する。つまり、従来の設計法では、検討作用に応じて、その生起可能性等を考慮し、鋼材別に定められた許容応力度を割り増すことで安全性の余裕を変化させている。しかし、船舶接岸力に関しては、対応する許容応力度（許容応力度の割増係数）が過去の基準上で明記されていないため、設計者の判断により安全性が設定されていたと考えられる。そこで、その際の判断材料となったと考えられる許容応力度の設定に関する記述を、既往図書等の記載より収集し、その内容を2.4に整理する。また、参考として、杭の支持力照査における船舶接岸時の安全率に関しても、同様に、既往図書の記載内容を収集し、2.5に整理する。

2.2 許容応力度法による照査手法

従来の許容応力度法による杭の応力照査式を式(1)に示す。この式は、杭の軸方向力（以下、「軸力」とする）と曲げモーメントが同時に作用する場合の式であり、かつ、軸力が地盤への押込み側に作用する場合の式である。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{ba}} \leq 1 \quad (1)$$

ここに、

σ_c : 軸力による圧縮応力度 (N/mm²)
(= N/A)

σ_{bc} : 曲げモーメントによる圧縮応力度 (N/mm²)
(= M/Z)

σ_{ca} : 許容軸方向圧縮応力度 (N/mm²)

σ_{ba} : 許容曲げ圧縮応力度 (N/mm²)

N : 杭の軸力 (N)
 A : 杭の断面積 (mm²)
 M : 杭の曲げモーメント (N・mm)
 Z : 杭の断面係数 (mm³)

表-1 許容応力度 (例:SKK400)⁴⁾

鋼種	SKK400
軸方向圧縮応力度	$\ell/r \leq 18$ の場合 140 $18 < \ell/r \leq 92$ の場合 $140 - 0.82(\ell/r - 18)$ $92 < \ell/r$ の場合 $\frac{1,200,000}{6,700 + (\ell/r)^2}$
曲げ圧縮応力度	140

2.3 H19基準の部分係数法による照査手法

H19基準における応力の照査式は式(2)のとおりである。式中の添え字 d は、設計用値を示しており、各パラメータの特性値に対して表-3の部分係数を用いて算出する。

$$\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{cyd}} + \frac{\sigma_{bcd}}{\sigma_{byd}} \leq 1 \quad (2)$$

ここに、

- σ_{cd} : 軸力による圧縮応力度 (N/mm²)
(= N_d/A)
- σ_{bcd} : 曲げモーメントによる圧縮応力度 (N/mm²)
(= M_d/Z)
- σ_{cyd} : 軸方向圧縮降伏応力度 (N/mm²)
- σ_{byd} : 曲げ圧縮降伏応力度 (N/mm²)
- N_d : 杭の軸力 (N)
- A : 杭の断面積 (mm²)
- M_d : 杭の曲げモーメント (N・mm)
- Z : 杭の断面係数 (mm³)

表-2 降伏応力度の特性値 (例:SKK400)¹⁾

鋼種	SKK400
軸方向圧縮応力度	$\ell/r \leq 18$ の場合 235 $18 < \ell/r \leq 92$ の場合 $235 - 1.38(\ell/r - 18)$ $92 < \ell/r$ の場合 $\frac{2.01 \times 10^6}{6.7 \times 10^3 + (\ell/r)^2}$
曲げ圧縮応力度	235

表-3 船舶接岸時の部分係数 (例:SKK400)¹⁾

		耐震強化施設					
目標信頼性指標 β_T		3.2					
目標破壊確率 P_{fr}		9.1×10^{-4}					
		γ	α	μ/X_k	V	確率分布	
杭の 応力	γ_{Gv}	鋼材降伏強度	1.00	0.719	1.260	0.08	正規
	γ_{kca}	地盤反力係数	0.60	0.257	1.333	0.76	対数正規
	γ_{Fh}	水平力	1.35	-0.645	0.870	0.25	正規
	γ_Q	載荷重	1.00	—	—	—	—
	γ_a	構造解析係数	1.00	—	—	—	—
		耐震強化施設以外					
目標信頼性指標 β_T		2.9					
目標破壊確率 P_{fr}		1.9×10^{-3}					
		γ	α	μ/X_k	V	確率分布	
杭の 応力	γ_{Gv}	鋼材降伏強度	1.00	0.719	1.260	0.08	正規
	γ_{kca}	地盤反力係数	0.60	0.257	1.333	0.76	対数正規
	γ_{Fh}	水平力	1.30	-0.645	0.870	0.25	正規
	γ_Q	載荷重	1.00	—	—	—	—
	γ_a	構造解析係数	1.00	—	—	—	—

2.4 杭の応力照査における船舶接岸時の許容応力度に関する収集・整理

(1) H11基準における記載内容

H11基準において、船舶接岸時の許容応力度の取扱いに関する記載はない。なお、同基準では、「地震や温度変化を外力とする場合については許容応力度を割り増してよい」と記載されており、その割増係数が示されている(表-4)。なお、この地震時の割増係数は、昭和42年発行の「港湾構造物設計基準」より用いられている値である(付録A)。

表-4 鋼材の許容応力度の割増係数⁴⁾

外力及び荷重の組合せ	割増係数
温度変化の影響を考えた場合	1.15
地震の影響を考えた場合	1.50

(2) 設計事例集における記載内容

H11基準に対応した設計事例集⁵⁾の栈橋の設計例において、船舶接岸による作用は短期荷重として、許容応力度は地震時と同じ値が使用されている。すなわち、鋼材別の基本の許容応力度に対し、表-4に示される割増係数1.5を乗じた値を照査に用いている。

(3) 教科書における記載内容 (その1)

係船岸の設計例を示した昭和45年発行の教科書⁶⁾においては、船舶接岸の作用は衝突力と位置づけられ、異常時荷重として許容応力度の割り増しが行われている。この時の割増係数は、H11基準の地震時と同じ1.5である。

(4) 教科書における記載内容 (その2)

港湾構造物の設計例を示した平成15年発行の教科書⁷⁾においては、船舶接岸時は常時と同じ扱いとされており、許

容応力度の割り増しは行われていない。

2.5 杭の支持力照査における船舶接岸時の安全率

(1) H11基準における記載内容

H11基準において、単杭の軸方向の許容支持力は、極限支持力を表-5に示す安全率で除した値を用いることとしている。この安全率は、昭和42年発行の「港湾構造物設計基準」⁸⁾にて記載されている値であり、地震時の安全率は、その生起確率が小さいことを考慮して、常時よりも小さい値とされている。

表-5 単杭の許容支持力に係る安全率⁴⁾

常時		2.5
地震時	支持杭	1.5
	摩擦杭	2.0

(2) 設計事例集における記載内容

設計事例集⁵⁾の棧橋の設計例において、船舶接岸時の支持力の照査には、表-5に示す地震時と同じ安全率1.5が用いられている。

(3) 教科書における記載内容

港湾構造物の教科書⁷⁾において、応力照査と同様に、支持力照査でも、船舶接岸時は常時と同じ扱いとされており、安全率は表-5に示すとおり2.5が使用されている。

(4) H19基準における支持力照査の部分係数

H19基準における船舶接岸時（変動状態）の支持力照査の部分係数のうち、杭の支持力の特性値に乗じる部分係数は0.4（押込みの場合）とされている。この場合、部分係数は安全率の逆数にあたり、この部分係数はH11基準における常時の安全率2.5の逆数と等しい。

2.6 まとめ

前述で示した船舶接岸時の杭の応力照査、支持力照査に関する許容応力度および安全率の記載内容を表-6に整理する。船舶接岸力を短期荷重とするか、また、生起確率の小さい異常荷重とするかなど、出典により船舶接岸力の扱いに対する考え方は異なるが、船舶接岸時の応力照査に用いる許容応力度や安全率の設定に関しては、地震時と同じ値を用いるか（以下、「地震時と同等」とする）、もしくは、常時と同じ値を用いるか（以下、「常時と同等」とする）のいずれかである。また、上記に示した各出典の発行年に着目すると、H11基準が発行された1999年までは、地震時と同等とされており、それ以降は常時と同等とされて

いるようにみられる。

ここで、老平ら⁹⁾は、平成4年までにとりまとめた全国の直杭式横棧橋の設計事例105例について設計条件や構造諸元別に分類・整理を行っている。このうち、杭の応力照査結果をみると、地震時の条件により断面諸元が決定された事例が全体の74%を占める（図-2）。船舶接岸時の設計の考え方が明確に示されていなかった理由の一つとしては、船舶接岸に係る作用に比べて地震作用の方が支配的となる事例が多かったことが考えられる。ただし、船舶接岸時の条件により杭断面が決定された例も全体の26%と少なくはない。

また、船舶接岸時の許容応力度の考え方を、常時と同等とした場合と地震時と同等とした場合の許容応力度の割増係数には0.5の差があり、設計上考慮する作用が同じであれば、設計結果として得られる杭の断面性能にも明確な差が生じる。以上を踏まえると、船舶接岸時の設計上の取扱い方によりどの程度性能に影響するかを把握しておくことは重要である。

次章では、H19基準による設計結果とH11基準による設計結果の比較を行う。この際、H11基準による設計に関しては、上記の理由により、船舶接岸時の許容応力度を常時と同等とした場合と地震時と同等とした場合との所要性能の差に関しても、比較・整理する。

表-6 出典別の船舶接岸時の許容応力度及び安全率

出典	発行年	許容応力度 (杭の応力照査)	支持力の安全率 (杭の支持力照査)
H11基準 ⁴⁾	1999	記載なし	記載なし
設計事例集 ⁵⁾	1999	割増係数 1.5 (短期荷重として)	安全率 1.5 (地震時と同じ)
教科書(その1) ⁶⁾	1967	割増係数 1.5 (異常時として)	記載なし
教科書(その2) ⁷⁾	2003	割増係数 1.0 (常時として)	安全率 2.5 (常時と同じ)
H19基準 ¹⁾	2007		部分係数 0.4 (=1/2.5) (常時の安全率の逆数)

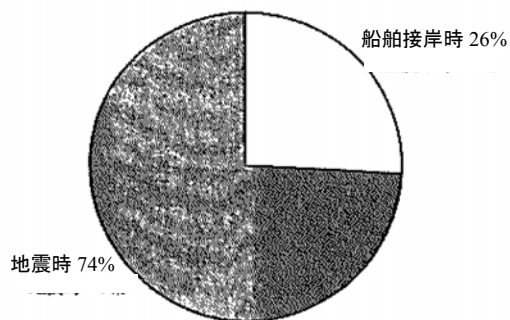


図-2 杭の断面応力度の決定条件⁹⁾

3. 船舶接岸時における杭の応力照査を対象とした安全性水準に関する考察

3.1 本章の概要

本章では、直杭式横棧橋の船舶接岸時の杭の応力照査を対象とし、従来の許容応力度法（常時と同等の許容応力度を用いた場合、地震時と同等の許容応力度を用いた場合）による設計結果と現行の部分係数法による設計結果を比較する。

具体的には、3.2に示す方法により、照査上必要となる杭の最小の断面諸元を水深や杭本数を変化させた複数のケースで算出し、そのときの杭の断面性能（断面係数）を3.3で比較する。また、3.4では、鋼材の降伏強度に対する安全率を指標として比較する。最後に、3.5でこれらの比較結果を整理する。

3.2 検討条件

(1) 照査手法

杭の応力照査には、H11基準による設計に際しては式(1)を、H19基準には式(2)を用いる。また、杭は鋼管杭とし、鋼種は全てSKK400として、許容応力度・降伏応力度を設

定する。また、表-3の部分係数のうち、ここでは、耐震強化施設以外の部分係数を用いることとする。

(2) 検討断面モデル

検討に用いる断面モデルを以下のとおり設定し、表-7に一覧として整理する。

- 【前面水深】 -7.5m, -12.0m, -18.0mの3パターン
- 【杭本数】 水深および杭間隔（5mもしくは10m）に応じて3,4,5,6本の4パターン
- 【捨石マウンド】 有り（勾配は1:2）、無しの2パターン
- 【上部工】 水深-7.5mの場合は21.0kN/m²（H19基準記載値¹⁾）、水深-12.0m・-18.0mの場合は30.0kN/m²（設計事例集記載値¹⁰⁾）の自重
- 【地盤反力】 基礎地盤は砂層とし、地盤反力係数は式(3)より求め、N値は5,15の2パターンでそれぞれ7,500kN/m³と22,500kN/m³
捨石の地盤反力係数は一律3,500kN/m³

表-7 検討断面モデル一覧

断面モデルNo.		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
前面水深	- m	7.5	7.5	7.5	7.5	12.0	12.0	12.0	12.0
捨石マウンド		有	有	無	無	有	有	無	無
背面水深	- m	3.0	3.0	7.5	7.5	5.0	5.0	12.0	12.0
杭本数 ※法線直角方向	本	3	3	3	3	4	4	4	4
杭間隔	m	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
上部工	幅	m	15.0	15.0	15.0	15.0	20.0	20.0	20.0
	自重	kN/m ²	21.0	21.0	21.0	21.0	30.0	30.0	30.0
上載荷重	kN/m ²	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
地盤反力係数 _{k_{CH}}	捨石層 _{k_{CH1}}	kN/m ³	3,500	3,500	/	/	3,500	3,500	/
	砂層 _{k_{CH2}}	kN/m ³	7,500	22,500	7,500	22,500	7,500	22,500	7,500
断面モデルNo.		⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
前面水深	- m	12.0	12.0	12.0	12.0	18.0	18.0	18.0	18.0
捨石マウンド		有	有	無	無	有	有	有	有
背面水深	- m	5.0	5.0	12.0	12.0	9.0	9.0	9.0	9.0
杭本数 ※法線直角方向	本	5	5	5	5	6	6	3	3
杭間隔	m	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	10.0	10.0
上部工	幅	m	25.0	25.0	25.0	25.0	30.0	30.0	25.0
	自重	kN/m ²	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
上載荷重	kN/m ²	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
地盤反力係数 _{k_{CH}}	捨石層 _{k_{CH1}}	kN/m ³	3,500	3,500	/	/	3,500	3,500	3,500
	砂層 _{k_{CH2}}	kN/m ³	7,500	22,500	7,500	22,500	7,500	22,500	7,500

$$k_{CH} = 1500 N$$

ここに、

k_{CH} : 横方向地盤反力係数 (kN/m³)

N : 地盤のN値

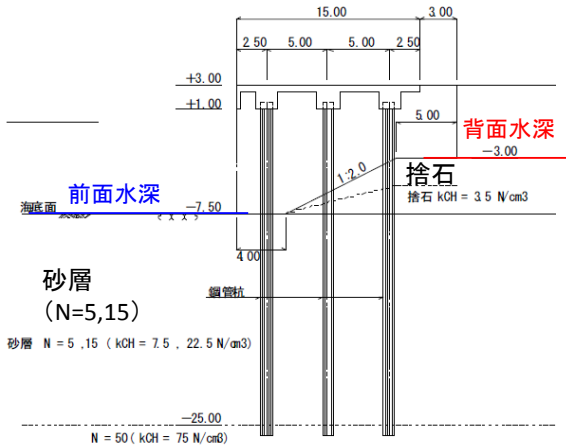


図-3 断面モデル (例: モデル①,②)

(3) 船舶接岸力に関する設計条件

本検討における船舶接岸力は、貨物船が接岸速度10cm/sで接岸した際の接岸力とした。また、船型は、H19基準に記載されている水深別の標準船型より、以下のとおり設定した。

- 7.5 m : 5,000 DWT
- 12.0 m : 30,000 DWT
- 18.0 m : 120,000 DWT

ここで、船舶の接岸力は、ゴム製防舷材等の防衝工を介して棧橋上部工に伝わるものであり、一般に接岸力は、船舶の接岸エネルギーに基づき算定される。式(4)に、接岸エネルギーの算定式を示す。実際の設計では、この接岸エネルギー以上の性能を有する防衝工の型を選定し、その型の反力を接岸力とする。

$$E_f = \frac{1}{2} M_s V_b^2 C_m C_e C_s C_c \quad (4)$$

ここに、

E_f : 船舶の接岸エネルギー (kN・m)

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 (通常1.0)

C_c : パースの形状係数 (通常1.0)

本研究において、法線平行方向の杭列の間隔や上部工1

(3)

ブロックあたりの延長、また、ゴム防舷材の配置は図-4のとおりとし、断面モデルによらず固定とした。通常、棧橋の上部工1ブロックあたりの法線平行方向の長さは20～30m、杭間隔は5mとすることが多いため¹⁾、これは一般的な上部工形状といえ、設計事例集¹⁰⁾でも用いられている形状である。

なお、一般的な座屈型のゴム防舷材の特徴として、圧縮変形がある程度進むと反力は横ばいとなり、さらに変形が進むと再び反力が漸増傾向となる性質を持つ。図-5は、圧縮変位に対する反力および吸収エネルギーの関係をあわせて模式的に図化したものである。通常、防舷材の設計では、接岸エネルギーと防舷材メーカーが公表している1基当たりの吸収エネルギーの性能値（以下、防舷材メーカーが公表する性能値を「公表値」とする）を比較し、吸収エネルギーの公表値が接岸エネルギーを上回ることを確認している。また、船舶が複数の防舷材に接触するよう接岸する場合には、接岸エネルギーをそれぞれの防舷材で分担して吸収することになるが、例えば図-5をみると、吸収するエネルギーが公表値の半分になっても反力は大きく変わらない。そのため、複数の防舷材からの反力に対する安定性を検討する場合、対象の防舷材全てに公表値と同じ反力を想定して照査が行われる。本研究は岸壁法線に対して船舶が水平に接岸することを想定し、上部工1ブロックの全ての防舷材で接岸力が生じるものとする。よって、防舷材3基からの反力を法線平行方向5列（フレーム）の杭列で分担する。

一般的に、防舷材はその性能に対して±10%の公差を有するため、設計上、吸収エネルギーは公表値の90%、反力は110%として計算されることが多い。以上を踏まえ、本研究における接岸力の特徴値を表-8のとおり設定した。

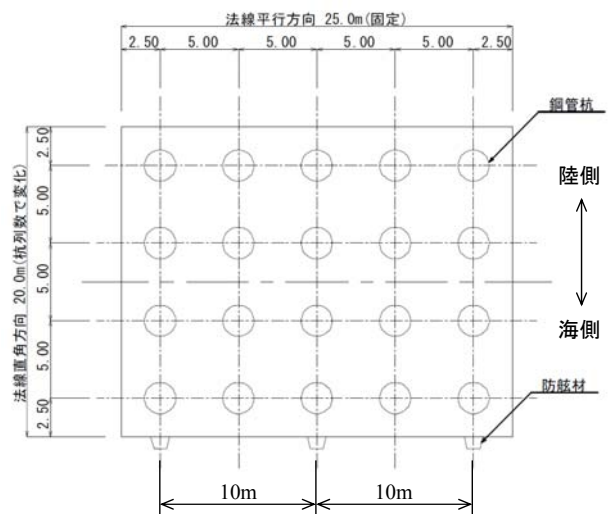


図-4 上部工形状 (例: 断面モデル⑤,⑥,⑦,⑧)

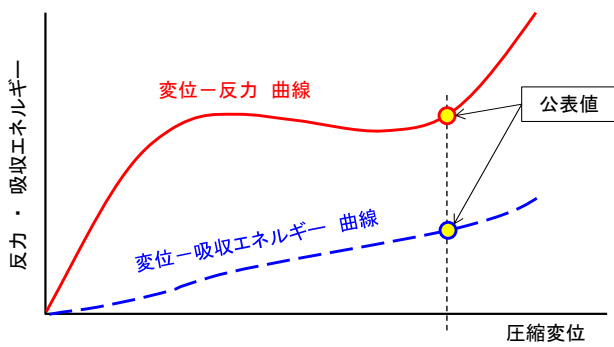
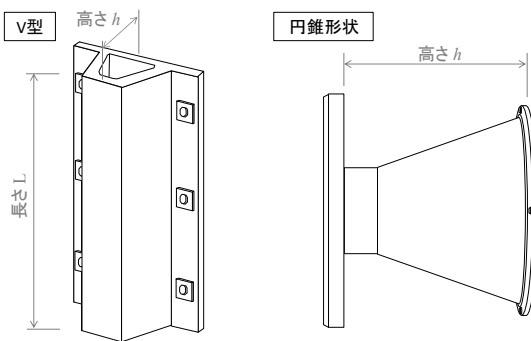


図-5 ゴム防舷材の性能曲線

表-8 接岸力の特性値

断面モデル	①～④	⑤～⑫	⑬～⑯
水深 (- m)	7.5	12.0	18.0
船型 (DWT)	5,000	30,000	120,000
接岸力 (kN/ブロック)	1339.8	2098.8	4389.0
接岸力 (kN/ラメン)	268.0	419.8	877.8
検討に用いた防舷材の仕様	V型 h: 400 mm L: 1500 mm	円錐形状 h: 900 mm	円錐形状 h: 1300 mm

【備考】



(4) 杭の断面諸元の設定

杭の応力照査には、杭の断面諸元（杭径・肉厚）を設定する必要がある。本研究は、以下に示す項目を基本として杭の断面諸元を設定し、応力計算を行った。杭の断面諸元を変化させ、2.2及び2.3で示した式(1)(2)の左辺が1を超えない最大値となるものを所要の断面諸元とした。なお、肉厚に関しては、腐食は考慮していない。通常の設計においては、設計供用期間を設定し、腐食後の断面諸元を用いて応力照査を実施するが、本研究では経過年数をパラメータとして用いず、船舶接岸力に対して必要な断面諸元を求めている。また、応力照査の際、杭の径および肉厚は以下のとおり変化させる。

【杭 径】 全ての杭で同一径（外径）とし、100mm間隔で変化させる。

【肉 厚】 腐食は考慮せず0.1mm間隔で変化させる。肉厚については、杭毎に異なる場合もある。

3.3 杭の断面諸元の比較

(1) 所要断面諸元の算出結果

前節までの検討方法に従い算出した船舶接岸時の杭の断面諸元を準拠基準別に、表-9に示す。杭の列数は海側を起点としており、1列目は最も海側の杭を指す。

また、船舶接岸時の断面諸元の比較対象として、水平震度0.05の地震慣性力を検討作用とした場合の所要断面諸元を、準拠基準および慣性力の作用方向別に表-10および表-11に示す。H11基準およびH19基準において震度 $kh=0.05$ はわが国の耐震設計における最小の設計震度であるため、これらの諸元は地震時の照査によって求められる最小の断面諸元である。

【設計基準・設計作用の検討ケース（全7ケース、I～VII）】

- I. H11基準，船舶接岸時（常時と同等の許容応力度）
- II. H11基準，船舶接岸時（地震時と同等の許容応力度）
- III. H19基準，船舶接岸時
- IV. H11基準，地震時 震度 $kh=0.05$ （作用方向：海から陸）
- V. H19基準，地震時 震度 $kh=0.05$ （作用方向：海から陸）
- VI. H11基準，地震時 震度 $kh=0.05$ （作用方向：陸から海）
- VII. H19基準，地震時 震度 $kh=0.05$ （作用方向：陸から海）

直杭式横棧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）
/村上和康・竹信正寛・宮田正史

表-9 所要断面諸元（船舶接岸時）

断面 モデル	杭列	H11基準 船舶接岸時（常時と同等）					H11基準 船舶接岸時（地震時と同等）					H19基準 船舶接岸時				
		杭諸元		断面性能		作用耐力比	杭諸元		断面性能		作用耐力比	杭諸元		断面性能		作用耐力比
		杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)		杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)		杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)	
①	1列目	700	11.4	246.62	4,180	0.999	600	9.5	176.24	2,560	1.000	600	10.6	196.28	2,840	0.999
	2列目	700	12.8	276.34	4,660	0.999	600	10.6	196.28	2,840	0.999	600	12.6	232.52	3,340	1.000
	3列目	700	18.3	391.92	6,510	0.998	600	16.2	297.12	4,220	0.999	600	18.8	343.27	4,840	0.998
②	1列目	700	11.8	255.12	4,320	0.998	600	10.0	185.35	2,690	1.000	600	11.0	203.54	2,940	1.000
	2列目	700	12.4	267.86	4,520	0.999	600	10.2	189.00	2,740	0.999	600	12.2	225.29	3,240	1.000
	3列目	700	16.4	352.21	5,880	1.000	600	14.7	270.30	3,860	0.997	600	16.6	304.25	4,320	1.000
③	1列目	700	13.6	293.27	4,940	0.998	600	11.7	216.24	3,120	0.997	600	13.2	243.34	3,490	0.999
	2列目	700	14.7	316.48	5,310	1.000	600	12.6	232.52	3,340	0.999	600	14.7	270.30	3,860	0.998
	3列目	700	16.4	352.21	5,880	0.999	600	14.2	261.33	3,740	0.996	600	16.5	302.46	4,290	0.999
④	1列目	700	12.7	274.22	4,630	0.999	600	10.9	201.73	2,920	0.998	600	12.2	225.29	3,240	0.999
	2列目	700	13.8	297.50	5,000	1.000	600	12.0	221.67	3,190	0.999	600	13.6	250.54	3,590	0.998
	3列目	700	15.3	329.11	5,510	1.000	600	13.2	243.34	3,490	1.000	600	15.3	281.04	4,010	0.999
⑤	1列目	900	10.0	279.60	6,150	0.998	700	9.7	210.36	3,580	1.000	700	10.6	229.58	3,900	1.000
	2列目	900	11.5	321.00	7,040	0.999	700	11.2	242.36	4,110	0.998	700	13.1	282.69	4,770	1.000
	3列目	900	15.0	417.05	9,080	0.999	700	16.0	343.82	5,750	0.998	700	18.3	391.92	6,510	1.000
	4列目	900	17.1	474.30	10,300	0.999	700	18.8	402.33	6,670	0.998	700	22.2	472.72	7,760	0.999
⑥	1列目	900	10.7	298.94	6,570	0.999	700	10.7	231.71	3,930	1.000	700	11.8	255.12	4,320	0.997
	2列目	900	11.3	315.49	6,920	0.999	700	11.0	238.10	4,040	0.998	700	13.0	280.58	4,730	0.998
	3列目	900	14.2	395.16	8,610	1.000	700	15.2	327.01	5,480	0.998	700	17.2	368.95	6,150	0.998
	4列目	900	16.3	452.52	9,820	0.998	700	17.8	381.49	6,350	0.998	700	20.6	439.69	7,250	0.999
⑦	1列目	900	13.1	365.00	7,980	0.999	700	13.8	297.50	5,000	1.000	700	15.5	333.32	5,580	0.999
	2列目	900	14.3	397.90	8,670	0.999	700	14.9	320.69	5,380	0.998	700	17.0	364.77	6,080	1.000
	3列目	900	14.9	414.31	9,020	0.998	700	15.6	335.42	5,610	0.998	700	18.0	385.66	6,410	0.999
	4列目	900	16.2	449.80	9,760	1.000	700	17.3	371.04	6,180	0.999	700	20.2	431.40	7,130	0.999
⑧	1列目	900	12.4	345.77	7,570	1.000	700	13.1	282.69	4,770	0.998	700	14.5	312.27	5,240	0.999
	2列目	900	13.7	381.46	8,330	0.998	700	14.2	305.94	5,140	0.998	700	16.0	343.82	5,750	0.998
	3列目	900	14.0	389.68	8,500	0.999	700	14.8	318.59	5,340	0.998	700	16.9	362.68	6,050	0.998
	4列目	900	15.4	427.97	9,310	0.999	700	16.5	354.30	5,910	0.999	700	19.1	408.57	6,770	0.999
⑨	1列目	900	9.5	265.77	5,850	1.000	700	9.6	208.22	3,550	0.999	700	10.2	221.04	3,760	1.000
	2列目	900	8.7	243.61	5,380	0.998	700	8.1	176.07	3,010	0.999	700	9.4	203.94	3,470	0.999
	3列目	900	10.5	293.42	6,450	1.000	700	10.3	223.18	3,790	0.999	700	11.8	255.12	4,320	0.999
	4列目	900	13.5	375.98	8,210	1.000	700	14.5	312.27	5,240	0.999	700	16.3	350.11	5,850	0.999
	5列目	900	15.0	417.05	9,080	0.999	700	16.4	352.21	5,880	0.999	700	19.0	406.49	6,740	1.000
⑩	1列目	800	12.2	301.94	5,860	0.999	700	10.1	218.91	3,720	1.000	700	10.9	235.97	4,000	1.000
	2列目	800	11.5	284.87	5,540	0.999	700	9.0	195.38	3,330	0.999	700	10.2	221.04	3,760	1.000
	3列目	800	12.8	316.55	6,130	0.998	700	10.0	216.77	3,690	0.997	700	11.5	248.74	4,210	1.000
	4列目	800	15.5	382.01	7,350	1.000	700	13.5	291.15	4,900	0.998	700	15.0	322.80	5,410	0.999
	5列目	800	17.7	435.01	8,320	0.998	700	15.2	327.01	5,480	0.999	700	17.3	371.04	6,180	1.000
⑪	1列目	800	14.2	350.55	6,770	1.000	700	11.8	255.12	4,320	1.000	700	13.1	282.69	4,770	0.998
	2列目	800	15.1	372.34	7,170	1.000	700	12.5	269.98	4,560	0.999	700	14.0	301.72	5,070	1.000
	3列目	800	15.2	374.76	7,220	1.000	700	12.8	276.34	4,660	0.998	700	14.3	308.05	5,180	0.999
	4列目	800	15.5	382.01	7,350	0.999	700	12.8	276.34	4,660	0.999	700	14.8	318.59	5,340	0.998
	5列目	800	16.8	413.36	7,930	0.999	700	14.1	303.83	5,110	0.998	700	16.1	345.91	5,780	0.998
⑫	1列目	800	13.5	333.57	6,450	1.000	700	11.3	244.49	4,140	1.000	700	12.3	265.74	4,490	1.000
	2列目	800	14.5	357.82	6,900	0.999	700	12.0	259.37	4,390	0.999	700	13.3	286.93	4,830	1.000
	3列目	800	14.5	357.82	6,900	1.000	700	12.1	261.49	4,420	1.000	700	13.6	293.27	4,940	0.999
	4列目	800	14.5	357.82	6,900	1.000	700	12.2	263.62	4,460	0.999	700	13.8	297.50	5,000	0.999
	5列目	800	16.2	398.91	7,660	0.998	700	13.5	291.15	4,900	1.000	700	15.3	329.11	5,510	1.000
⑬	1列目	1,100	10.5	359.39	9,700	0.998	900	9.7	271.31	5,970	0.999	900	10.5	293.42	6,450	0.999
	2列目	1,100	10.9	372.94	10,100	0.997	900	9.4	263.00	5,800	0.998	900	11.0	307.22	6,750	0.999
	3列目	1,100	13.3	454.06	12,200	1.000	900	11.6	323.75	7,100	1.000	900	14.0	389.68	8,500	0.998
	4列目	1,100	16.4	558.29	14,900	0.998	900	15.1	419.78	9,130	0.999	900	17.6	487.90	10,600	0.997
	5列目	1,100	21.3	721.82	19,100	1.000	900	22.0	606.83	13,000	0.998	900	24.9	684.55	14,600	1.000
	6列目	1,100	22.5	761.64	20,100	1.000	900	23.1	636.37	13,600	0.999	900	28.0	767.05	16,200	0.999
⑭	1列目	1,100	11.2	383.10	10,300	0.998	900	10.5	293.42	6,450	0.999	1,000	9.5	295.62	7,250	0.996
	2列目	1,100	12.2	416.93	11,200	0.998	900	10.5	293.42	6,450	0.999	1,000	10.1	314.10	7,700	0.998
	3列目	1,100	13.8	470.91	12,600	0.998	900	12.0	334.77	7,330	0.998	1,000	11.5	357.13	8,730	0.998
	4列目	1,100	15.6	531.45	14,200	0.997	900	14.4	400.64	8,730	0.998	1,000	14.1	436.72	10,600	0.996
	5列目	1,100	19.6	665.26	17,700	0.998	900	20.5	566.42	12,200	0.997	1,000	18.5	570.44	13,700	1.000
	6列目	1,100	20.9	708.53	18,800	0.998	900	21.6	596.07	12,800	0.998	1,000	19.8	609.72	14,700	0.999
⑮	1列目	1,400	11.2	488.66	16,800	1.000	1,200	9.4	351.60	10,400	1.000	1,300	9.5	385.15	12,300	1.000
	2列目	1,400	23.5	1016.23	34,400	0.999	1,200	19.8	734.13	21,300	0.999	1,300	19.3	776.52	24,500	1.000
	3列目	1,400	25.7	1109.60	37,400	0.999	1,200	23.1	854.09	24,700	1.000	1,300	23.2	930.60	29,200	0.999
⑯	1列目	1,300	13.9	561.62	17,900	0.999	1,200	10.3	384.97	11,400	1.000	1,300	10.4	421.35	13,500	0.999
	2列目	1,300	26.4	1056.30	33,000	1.000	1,200	19.1	708.59	20,600	1.000	1,300	18.7	752.74	23,800	0.999
	3列目	1,300	27.8	1111.09	34,600	0.999	1,200	21.8	806.91	23,300	1.000	1,300	21.4	859.60	27,000	1.000

表-10 所要断面諸元（地震時（作用方向：海から陸））

断面 モデル	杭列	H11基準 地震時（作用方向：海から陸）					H19基準 地震時（作用方向：海から陸）				
		杭諸元		断面性能		作用耐力 比	杭諸元		断面性能		作用耐力 比
		杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)		杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)	
①	1列目	500	7.1	109.94	1,340	1.000	500	7.0	108.42	1,320	0.997
	2列目	500	6.6	102.30	1,250	1.000	500	7.0	108.42	1,320	0.997
	3列目	500	10.6	162.97	1,950	1.000	500	11.0	168.99	2,020	0.997
②	1列目	500	7.5	116.04	1,410	0.995	500	7.4	114.52	1,390	0.998
	2列目	500	6.5	100.77	1,230	0.995	500	6.8	105.36	1,280	1.000
	3列目	500	9.8	150.92	1,810	0.997	500	10.0	153.94	1,850	1.000
③	1列目	500	8.2	126.69	1,530	0.999	500	8.3	128.21	1,550	0.997
	2列目	500	8.4	129.73	1,570	1.000	500	8.7	134.28	1,620	0.999
	3列目	500	9.3	143.37	1,730	0.997	500	9.6	147.90	1,780	0.997
④	1列目	500	7.9	122.13	1,480	0.994	500	7.9	122.13	1,480	0.994
	2列目	500	8.0	123.65	1,500	0.997	500	8.3	128.21	1,550	0.996
	3列目	500	8.9	137.31	1,660	0.996	500	9.1	140.34	1,690	0.997
⑤	1列目	600	7.8	145.12	2,120	0.999	600	7.6	141.44	2,070	0.998
	2列目	600	7.6	141.44	2,070	1.000	600	7.8	145.12	2,120	1.000
	3列目	600	11.2	207.17	2,990	0.998	600	11.6	214.43	3,090	0.997
	4列目	600	12.3	227.10	3,270	0.999	600	13.0	239.73	3,440	0.998
⑥	1列目	600	8.5	157.95	2,300	1.000	600	8.5	157.95	2,300	0.997
	2列目	600	7.3	135.93	1,990	0.999	600	7.4	137.77	2,020	1.000
	3列目	600	10.7	198.09	2,870	0.996	600	10.9	201.73	2,920	0.999
	4列目	600	12.0	221.67	3,190	0.999	600	12.6	232.52	3,340	1.000
⑦	1列目	600	10.2	189.00	2,740	0.997	600	10.3	190.82	2,770	0.997
	2列目	600	10.4	192.64	2,790	0.998	600	10.7	198.09	2,870	0.998
	3列目	600	11.0	203.54	2,940	0.997	600	11.2	207.17	2,990	0.999
	4列目	600	11.8	218.05	3,140	0.999	600	12.3	227.10	3,270	0.998
⑧	1列目	600	9.8	181.71	2,640	0.999	600	9.9	183.53	2,660	0.999
	2列目	600	10.0	185.35	2,690	0.999	600	10.2	189.00	2,740	0.999
	3列目	600	10.5	194.46	2,820	0.997	600	10.7	198.09	2,870	0.998
	4列目	600	11.4	210.80	3,040	1.000	600	11.8	218.05	3,140	1.000
⑨	1列目	600	8.8	163.44	2,380	0.996	600	8.5	157.95	2,300	1.000
	2列目	600	6.6	123.04	1,810	0.998	600	6.8	126.72	1,860	0.998
	3列目	600	8.4	156.12	2,280	0.999	600	8.6	159.78	2,330	0.998
	4列目	600	12.3	227.10	3,270	0.998	600	12.7	234.32	3,370	0.996
	5列目	600	13.4	246.94	3,540	1.000	600	14.3	263.12	3,760	0.997
⑩	1列目	600	9.2	170.76	2,480	0.997	600	9.0	167.10	2,430	1.000
	2列目	600	7.4	137.77	2,020	0.998	600	7.6	141.44	2,070	0.999
	3列目	600	8.1	150.62	2,200	0.999	600	8.3	154.29	2,250	0.999
	4列目	600	11.4	210.80	3,040	1.000	600	11.8	218.05	3,140	0.998
	5列目	600	12.7	234.32	3,370	1.000	600	13.3	245.14	3,520	0.998
⑪	1列目	600	10.3	190.82	2,770	0.997	600	10.4	192.64	2,790	0.999
	2列目	600	10.5	194.46	2,820	0.998	600	10.8	199.91	2,890	1.000
	3列目	600	10.7	198.09	2,870	0.998	600	11.0	203.54	2,940	0.999
	4列目	600	10.9	201.73	2,920	0.997	600	11.2	207.17	2,990	0.999
	5列目	600	11.8	218.05	3,140	0.999	600	12.2	225.29	3,240	1.000
⑫	1列目	600	9.9	183.53	2,660	0.999	600	10.0	185.35	2,690	0.997
	2列目	600	10.2	189.00	2,740	0.998	600	10.4	192.64	2,790	0.998
	3列目	600	10.2	189.00	2,740	0.998	600	10.5	194.46	2,820	0.998
	4列目	600	10.4	192.64	2,790	0.998	600	10.6	196.28	2,840	1.000
	5列目	600	11.5	212.62	3,070	0.996	600	11.8	218.05	3,140	0.999
⑬	1列目	700	8.1	176.07	3,010	1.000	700	7.9	171.77	2,940	1.000
	2列目	700	6.9	150.24	2,580	0.997	700	6.8	148.09	2,540	0.998
	3列目	700	7.6	165.32	2,830	0.999	700	7.6	165.32	2,830	0.998
	4列目	700	9.5	206.08	3,510	0.999	700	9.9	214.63	3,650	0.997
	5列目	700	13.6	293.27	4,940	1.000	700	14.2	305.94	5,140	0.999
	6列目	700	12.5	269.98	4,560	0.999	700	13.4	289.04	4,870	0.998
⑭	1列目	700	8.6	186.80	3,190	0.997	700	8.4	182.51	3,120	0.999
	2列目	700	7.4	161.01	2,760	0.997	700	7.4	161.01	2,760	0.999
	3列目	700	7.5	163.17	2,790	0.999	700	7.6	165.32	2,830	0.998
	4列目	700	9.1	197.52	3,370	0.998	700	9.3	201.80	3,440	0.999
	5列目	700	13.2	284.81	4,800	0.999	700	13.7	295.38	4,970	0.999
	6列目	700	12.0	259.37	4,390	0.998	700	12.8	276.34	4,660	0.999
⑮	1列目	800	8.5	211.36	4,140	0.997	800	8.4	208.90	4,090	1.000
	2列目	800	15.2	374.76	7,220	0.998	800	15.3	377.18	7,260	0.999
	3列目	800	14.9	367.50	7,080	0.999	800	15.9	391.67	7,530	0.998
⑯	1列目	800	9.1	226.11	4,420	0.999	800	9.2	228.56	4,470	0.998
	2列目	800	14.8	365.08	7,040	0.997	800	14.7	362.66	6,990	0.999
	3列目	800	14.3	352.97	6,810	0.999	800	15.2	374.76	7,220	0.997

直杭式横棧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）
/村上和康・竹信正寛・宮田正史

表-11 所要断面諸元（地震時（作用方向：陸から海））

断面モデル	杭列	H11基準 地震時（作用方向：陸から海）					H19基準 地震時（作用方向：陸から海）				
		杭諸元		断面性能		作用耐力比	杭諸元		断面性能		作用耐力比
		杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)		杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)	
①	1列目	500	8.0	123.65	1,500	0.997	500	8.0	123.65	1,500	1.000
	2列目	500	6.6	102.30	1,250	0.997	500	6.9	106.89	1,300	1.000
	3列目	500	9.5	146.39	1,760	1.000	500	9.8	150.92	1,810	0.999
②	1列目	500	8.5	131.25	1,590	0.993	500	8.6	132.76	1,600	0.999
	2列目	500	6.4	99.24	1,210	0.995	500	6.6	102.30	1,250	0.998
	3列目	500	8.8	135.80	1,640	0.995	500	8.9	137.31	1,660	0.998
③	1列目	500	9.3	143.37	1,730	0.997	500	9.6	147.90	1,780	0.997
	2列目	500	8.4	129.73	1,570	1.000	500	8.7	134.28	1,620	0.999
	3列目	500	8.2	126.69	1,530	0.999	500	8.3	128.21	1,550	0.997
④	1列目	500	8.8	135.80	1,640	0.997	500	9.1	140.34	1,690	0.997
	2列目	500	8.2	126.69	1,530	0.997	500	8.3	128.21	1,550	0.996
	3列目	500	7.8	120.61	1,460	0.997	500	7.9	122.13	1,480	0.994
⑤	1列目	600	8.8	163.44	2,380	0.999	600	8.8	163.44	2,380	1.000
	2列目	600	8.0	148.79	2,170	1.000	600	8.2	152.45	2,230	1.000
	3列目	600	10.8	199.91	2,890	0.999	600	11.2	207.17	2,990	1.000
	4列目	600	11.0	203.54	2,940	0.999	600	11.4	210.80	3,040	0.999
⑥	1列目	600	9.7	179.88	2,610	0.999	600	9.8	181.71	2,640	0.997
	2列目	600	7.8	145.12	2,120	0.998	600	8.1	150.62	2,200	0.996
	3列目	600	10.2	189.00	2,740	0.998	600	10.5	194.46	2,820	0.996
	4列目	600	10.6	196.28	2,840	1.000	600	10.9	201.73	2,920	0.997
⑦	1列目	600	11.8	218.05	3,140	0.999	600	12.3	227.10	3,270	0.998
	2列目	600	11.0	203.54	2,940	0.997	600	11.2	207.17	2,990	0.999
	3列目	600	10.4	192.64	2,790	0.998	600	10.7	198.09	2,870	0.998
	4列目	600	10.2	189.00	2,740	0.997	600	10.3	190.82	2,770	0.997
⑧	1列目	600	11.4	210.80	3,040	1.000	600	11.8	218.05	3,140	1.000
	2列目	600	10.5	194.46	2,820	0.997	600	10.7	198.09	2,870	0.998
	3列目	600	10.0	185.35	2,690	0.999	600	10.2	189.00	2,740	0.999
	4列目	600	9.8	181.71	2,640	0.999	600	9.9	183.53	2,660	0.999
⑨	1列目	600	9.8	181.71	2,640	0.998	600	9.7	179.88	2,610	1.000
	2列目	600	7.3	135.93	1,990	1.000	600	7.4	137.77	2,020	0.998
	3列目	600	8.4	156.12	2,280	1.000	600	8.8	163.44	2,380	1.000
	4列目	600	11.8	218.05	3,140	0.999	600	12.2	225.29	3,240	1.000
	5列目	600	11.9	219.86	3,170	0.997	600	12.4	228.90	3,290	0.999
⑩	1列目	600	10.4	192.64	2,790	0.997	600	10.5	194.46	2,820	0.997
	2列目	600	8.2	152.45	2,230	0.998	600	8.3	154.29	2,250	1.000
	3列目	600	8.1	150.62	2,200	0.998	600	8.4	156.12	2,280	0.999
	4列目	600	10.8	199.91	2,890	0.999	600	11.1	205.36	2,970	0.999
	5列目	600	11.2	207.17	2,990	0.998	600	11.5	212.62	3,070	0.999
⑪	1列目	600	11.8	218.05	3,140	0.999	600	12.2	225.29	3,240	0.999
	2列目	600	10.9	201.73	2,920	0.997	600	11.2	207.17	2,990	0.999
	3列目	600	10.7	198.09	2,870	0.998	600	11.0	203.54	2,940	0.999
	4列目	600	10.5	194.46	2,820	0.998	600	10.9	201.73	2,920	0.998
	5列目	600	10.3	190.82	2,770	0.997	600	10.3	190.82	2,770	0.999
⑫	1列目	600	11.5	212.62	3,070	0.996	600	11.7	216.24	3,120	1.000
	2列目	600	10.4	192.64	2,790	0.998	600	10.7	198.09	2,870	0.999
	3列目	600	10.2	189.00	2,740	0.998	600	10.5	194.46	2,820	0.999
	4列目	600	10.2	189.00	2,740	0.998	600	10.3	190.82	2,770	0.999
	5列目	600	9.9	183.53	2,660	0.999	600	10.0	185.35	2,690	0.999
⑬	1列目	700	9.4	203.94	3,470	0.999	700	9.4	203.94	3,470	0.999
	2列目	700	7.3	158.86	2,720	0.998	700	7.2	156.71	2,690	0.998
	3列目	700	8.0	173.92	2,970	0.997	700	8.1	176.07	3,010	0.999
	4列目	700	9.5	206.08	3,510	0.999	700	10.0	216.77	3,690	1.000
	5列目	700	13.7	295.38	4,970	0.997	700	14.1	303.83	5,110	1.000
	6列目	700	10.3	223.18	3,790	0.998	700	10.8	233.84	3,970	0.999
⑭	1列目	700	10.1	218.91	3,720	0.999	700	10.2	221.04	3,760	0.998
	2列目	700	7.9	171.77	2,940	0.998	700	8.0	173.92	2,970	0.999
	3列目	700	7.8	169.62	2,900	0.997	700	7.9	171.77	2,940	0.998
	4列目	700	9.1	197.52	3,370	0.998	700	9.5	206.08	3,510	0.998
	5列目	700	13.0	280.58	4,730	0.997	700	13.3	286.93	4,830	0.999
	6列目	700	9.9	214.63	3,650	0.998	700	10.3	223.18	3,790	0.998
⑮	1列目	800	10.4	257.98	5,030	0.998	800	10.6	262.88	5,120	1.000
	2列目	800	16.0	394.08	7,570	0.998	800	16.1	396.49	7,620	1.000
	3列目	800	12.1	299.51	5,810	0.998	800	12.7	314.12	6,090	0.999
⑯	1列目	800	11.5	284.87	5,540	1.000	800	12.0	297.07	5,770	0.997
	2列目	800	15.2	374.76	7,220	0.998	800	15.2	374.76	7,220	0.998
	3列目	800	11.4	282.43	5,490	1.000	800	11.9	294.63	5,720	0.996

(2) 断面係数の比較

ここでは、杭の断面性能の代表指標として断面係数を用い、設計基準・設計作用の検討ケース（Ⅰ～Ⅶ）に対し、必要となる断面係数を、断面モデル毎に図-6のグラフに示す。図中の左側のグラフは断面モデル上で最も海側の杭の断面係数を、右側のグラフは最も陸側の杭の断面係数を示している。また、図-6中の全プロットの詳細値を表-12に示す。ここでは、これらの結果を用いて、断面係数に関する比較を行う。

a) 断面モデルによる断面係数の違い

まずは、設計基準・設計作用の検討ケース（Ⅰ～Ⅶ）による断面係数の差には触れず、断面モデルの違い（水深・捨石マウンドの有無・地盤反力係数など）に起因する断面係数の差について述べる。なお、断面モデルの違いに伴う断面係数の大小関係は、設計基準・設計作用を問わず同じである。つまり、以下で述べる内容は、設計基準・設計作用の検討ケース（Ⅰ～Ⅶ）の全てに共通する。

【水深の違いによる比較】

一般に、水深が大きくなると杭長が長くなり、杭の曲げ

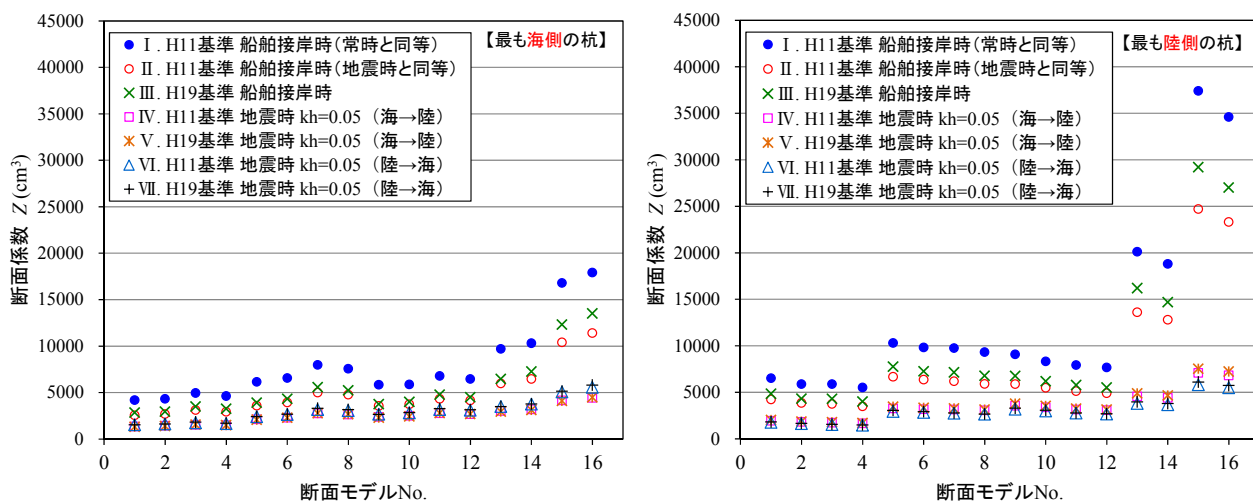


図-6 断面係数の比較

表-12 所要断面係数一覧（最も海側・陸側の杭列）

設計基準・設計作用		断面係数（最も海側の杭列）															
		断面モデル															
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
H11基準	船舶接岸時(常時と同等)	4,180	4,320	4,940	4,630	6,150	6,570	7,980	7,570	5,850	5,860	6,770	6,450	9,700	10,300	16,800	17,900
H11基準	船舶接岸時(地震時と同等)	2,560	2,690	3,120	2,920	3,580	3,930	5,000	4,770	3,550	3,720	4,320	4,140	5,970	6,450	10,400	11,400
H19基準	船舶接岸時	2,840	2,940	3,490	3,240	3,900	4,320	5,580	5,240	3,760	4,000	4,770	4,490	6,450	7,250	12,300	13,500
H11基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:海から陸)	1,340	1,410	1,530	1,480	2,120	2,300	2,740	2,640	2,380	2,480	2,770	2,660	3,010	3,190	4,140	4,420
H19基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:海から陸)	1,320	1,390	1,550	1,480	2,070	2,300	2,770	2,660	2,300	2,430	2,790	2,690	2,940	3,120	4,090	4,470
H11基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:陸から海)	1,500	1,590	1,730	1,640	2,380	2,610	3,140	3,040	2,640	2,790	3,140	3,070	3,470	3,720	5,030	5,540
H19基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:陸から海)	1,500	1,600	1,780	1,690	2,380	2,640	3,270	3,140	2,610	2,820	3,240	3,120	3,470	3,760	5,120	5,770
設計基準・設計作用		断面係数（最も陸側の杭列）															
		断面モデル															
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
H11基準	船舶接岸時(常時と同等)	6,510	5,880	5,880	5,510	10,300	9,820	9,760	9,310	9,080	8,320	7,930	7,660	20,100	18,800	37,400	34,600
H11基準	船舶接岸時(地震時と同等)	4,220	3,860	3,740	3,490	6,670	6,350	6,180	5,910	5,880	5,480	5,110	4,900	13,600	12,800	24,700	23,300
H19基準	船舶接岸時	4,840	4,320	4,290	4,010	7,760	7,250	7,130	6,770	6,740	6,180	5,780	5,510	16,200	14,700	29,200	27,000
H11基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:海から陸)	1,950	1,810	1,730	1,660	3,270	3,190	3,140	3,040	3,540	3,370	3,140	3,070	4,560	4,390	7,080	6,810
H19基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:海から陸)	2,020	1,850	1,780	1,690	3,440	3,340	3,270	3,140	3,760	3,520	3,240	3,140	4,870	4,660	7,530	7,220
H11基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:陸から海)	1,760	1,640	1,530	1,460	2,940	2,840	2,740	2,640	3,170	2,990	2,770	2,660	3,790	3,650	5,810	5,490
H19基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:陸から海)	1,810	1,660	1,550	1,480	3,040	2,920	2,770	2,660	3,290	3,070	2,770	2,690	3,970	3,790	6,090	5,720

モーメントが増大するため、杭の所要断面も大きくなると考えられる。本研究の設計結果においても、陸側・海側の杭列を問わず、水深が大きい方が断面係数も大きい（例えば、断面モデル②と⑥の比較）。なお、本研究の検討モデルでは水深により接岸力を変更しており、検討水深に応じた標準船型の船舶の接岸を想定している。大水深の棧橋ほど大型の船舶が接岸し、船舶接岸力が大きくなることを踏まえると、水深は杭の断面係数に対して大きく寄与するといえる。

【捨石マウンドの有無による比較】

捨石マウンドの有無による断面係数への影響は、海側の杭と陸側の杭で傾向が異なる。海側の杭では、捨石マウンドを有する断面モデルと比べて、捨石マウンドが無い断面モデルの方が断面係数は大きい（例えば、断面モデル⑨と⑩の比較）。一方、陸側の杭では、捨石マウンドが無い方が断面係数は若干小さい。なお、海側の杭と陸側の杭の断面係数の差は、捨石マウンドが有る場合に比べて、捨石マウンドが無い方が小さくなっており、捨石マウンドが存在することによって、設計作用に対する各杭列の負担の割合が変化しているためと考えられる。

【基礎地盤の地盤反力係数の違いによる比較】

基礎地盤の地盤反力係数に関しては、杭列（海側・陸側）の他、捨石マウンドの有無にも影響を受ける。捨石マウンドが無い場合は、海側・陸側の杭を問わず、基礎地盤（砂層）の地盤反力係数が大きい方が断面係数は小さくなる（例えば、断面モデル⑦と⑧の比較）。対して、捨石マウンドが有る場合、海側の杭では基礎地盤の地盤反力係数が大きい方が断面係数は大きく、逆に、海側の杭では基礎地盤の地盤反力係数が大きい方が断面係数は小さくなる（例えば、断面モデル⑤と⑥の比較）。このように、捨石マウンドと基礎地盤の二層より地盤反力を受ける場合、基礎地盤の地盤反力係数の大小のみで断面係数への影響を述べることは難しい。ただし、地盤反力係数の違いに起因する断面係数の変化は、水深の違いや捨石マウンドの有無による変化と比べて小さく、その寄与率は小さいと考えられる。

b) 設計基準・設計作用による断面係数の違い

次に、設計基準・設計作用の検討ケース（Ⅰ～Ⅶ）間の断面係数の差について述べる。まず、船舶接岸時に関しては、H11基準で許容応力度を常時と同等にした場合が最も断面係数が大きく、次いで、H19基準に従った場合、H11基準で許容応力度を地震時と同等にした場合という順番となる。これは、断面モデルによらず、全てのケースでいえる。また、地震時に関しては、H19基準に従った場合とH11基準に従った場合に大きな差はない。これは、H19基

準の地震時の部分係数の目標安全性水準が、許容応力度法に基づき設計された断面に対する信頼性解析によって求められたためと考えられる¹¹⁾。

なお、いずれの断面モデルにおいても、地震時（設計震度 $kh=0.05$ ）の所要断面係数と比べ、船舶接岸時の断面係数の方が大きい。震度0.05の地震時の所要断面は耐震設計に要求される最小断面であることを踏まえると、図-2に示した平成4年までの設計事例と同様に、H19基準による直杭式横棧橋の設計の設計においても、船舶接岸力が主要外力となり得ることを示している。

ここで、船舶接岸時のH19基準に従った場合の断面係数を基準(1.0)とした際の相対比を図-7に示す。この図より、H19基準の船舶接岸時に比べて、H11基準（常時と同等）の場合は1.3～1.5倍程度、H11基準（地震時と同等）の場合は0.9倍程度の断面性能を要することがわかる。また、地震時に関しては、平均して0.5倍程度の断面係数となっている。ただし、これは震度0.05の地震慣性力に対する断面係数であり、震度が異なるとこの関係性も変化する。

上記で述べた断面係数は、杭の応力照査のみを対象とした所要性能である。設計上、杭諸元の決定に関係する照査項目としては、代表的な応力照査および支持力照査のほか、上部工の変位量照査が考えられる。ここでは、参考として、船舶接岸時の応力照査によって杭諸元が決定された場合の杭頭および仮想地表面位置における杭の水平変位量を図-8～図-9に示す。いずれの位置においても、断面係数が小さい検討ケースの方が変位量は大きくなる。つまり、H11基準で許容応力度を地震時と同等にした場合の変位量が最も大きく、次いで、H19基準に従った場合、H11基準で許容応力度を常時と同等にした場合という順番となる。杭頭における水平変位量に関しては、各杭が上部工に接合しているため、海側と陸側の杭での変位量はほぼ同じとなる。また、水深が大きく、杭の自由長が長い方が変位量も大きい。仮想地表面位置における水平変位量に関しては、捨石マウンドが無い断面では、海側と陸側の杭の変位量が同程度となり、捨石マウンドを有する断面では、陸側の杭の変位量が大きくなる。なお、上部工の変位量は杭頭位置の杭の変位量とほぼ同じとみなすと、その値は4cm～15cm程度の範囲に分布しており、本研究の検討範囲内では、応力照査のみで杭諸元を決定しても極端に大きな変位はみられなかった。ただし、上部工の変位量の制約は設計案件によって異なるため、特に水深が大きい場合には注意が必要である。

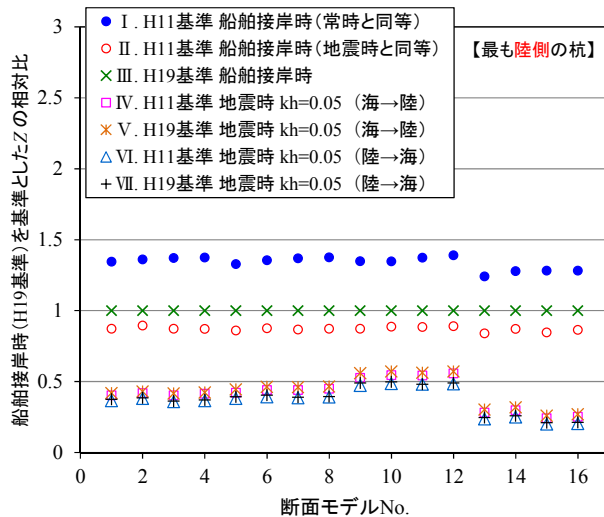
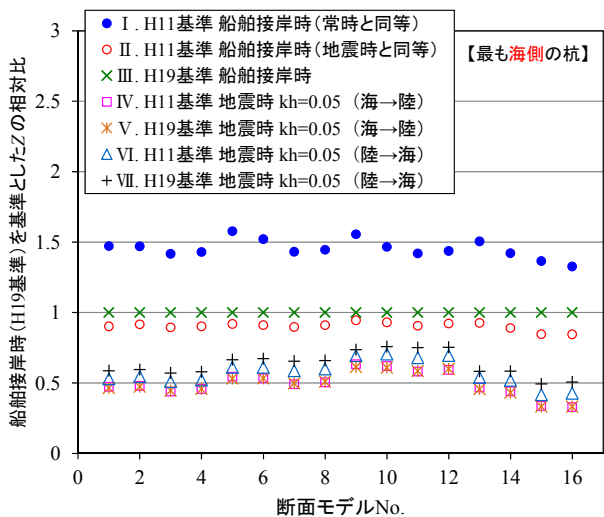


図-7 断面係数の相対比の比較

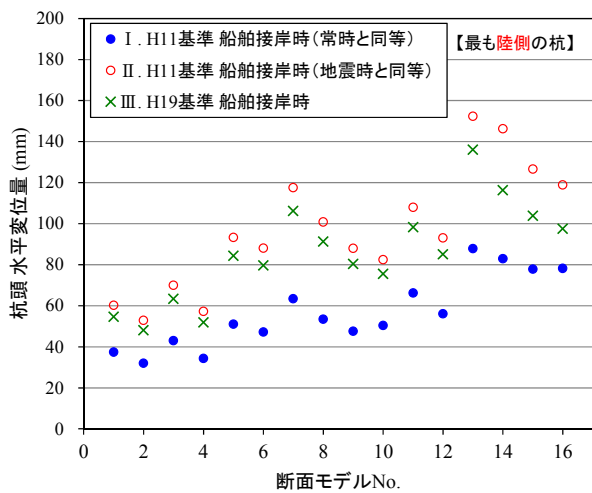
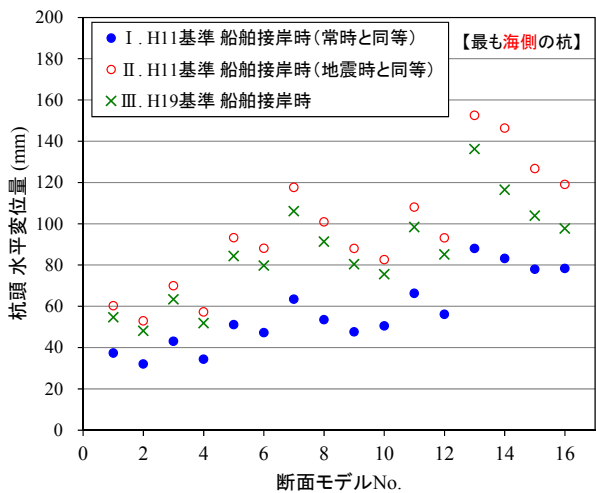


図-8 杭頭位置における杭の水平変位量

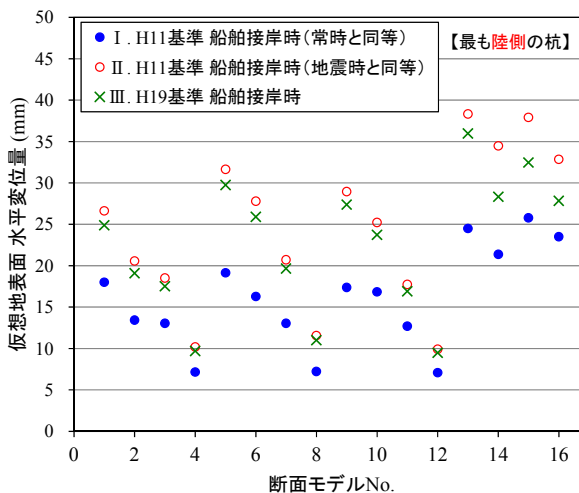
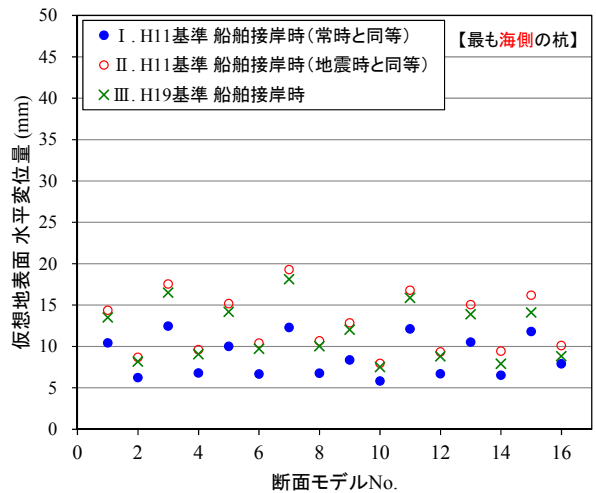


図-9 仮想地表面位置における杭の水平変位量

3.4 降伏応力度に対する安全率を指標とした比較

(1) 降伏応力度に対する実質安全率の比較

従来の杭の応力照査において用いられていた許容応力度には、鋼材の降伏強度に対する実質的な安全率が考慮されていることは2.5で述べた。ここでは、この安全率を「実質安全率」と称し、杭の降伏限界に対する安全性水準を示す指標として比較に用いる。実質安全率は式(5)より求められ、船舶接岸時および地震時の各ケースにおける実質安全率を図-10および表-13に示す。なお、H11基準より杭の断面諸元を求めたケースに関しては、許容応力度を用いるため、断面モデル・杭列を問わず、実質安全率は一定である。また、H19基準より杭の断面諸元を求めたケースに関しては、表-9～表-11に示した杭の断面諸元を用いて骨組み解析を再度実施し、杭の部材力の特性値を算出している。

$$F_s = \left(\frac{\sigma_{ck}}{\sigma_{cy}} + \frac{\sigma_{bck}}{\sigma_{by}} \right)^{-1} \quad (5)$$

ここに、

- F_s : 実質安全率
- σ_{ck} : 軸力による圧縮応力度の特性値 (N/mm²)
- σ_{bck} : 曲げモーメントによる圧縮応力度の特性値 (N/mm²)
- σ_{cy} : 軸方向圧縮降伏応力度の特性値 (N/mm²)
- σ_{by} : 曲げ圧縮降伏応力度の特性値 (N/mm²)

比較の結果、地震時の照査に対する実質安全率（ここでは、設計震度 $kh = 0.05$ として比較）に関しては、断面係数と同様に、H19基準とH11基準に大きな差はなく、1.1～1.2程度の実質安全率となる。

なお、船舶接岸時をH11基準の地震時と同等として取り扱い、地震時と同じ許容応力度を用いた場合の実質安全率は、H11基準における地震時の実質安全率と同値となる。一方で、船舶接岸時を常時と同等とした場合の許容応力度を用いた場合の実質安全率が最も大きく、1.7程度の実質安全率となる。

また、H19基準の船舶接岸時に適用する部分係数を用いて応力照査した場合の実質安全率は1.2～1.3と算定された。各設計基準及び設計作用について、実質安全率の断面モデル毎の違いは、図-10に示すとおり、ほとんどない。

(2) 杭諸元に対する実質安全率の変化

前項では、設計基準・設計作用の検討ケース（Ⅰ～Ⅶ）による実質安全率の差について述べたが、この差が設計結果にどの程度影響するかは直観的には判断できない。ここでは、参考として、杭諸元等の変化により実質安全率がどの程度変動するかを試算した。船舶接岸時の断面モデル②

⑧⑭⑯を例に、以下の3ケースの実質安全率を算出し、その結果を図-11に示す。なお、本検討では杭の肉厚を0.1mm単位で検討しているが、実際の設計では1mm単位で肉厚を決定するため、小数点以下の切り上げにより最大で0.9mmの差が生じる可能性がある。ケース i はこれを想定したものである。また、鋼管杭の日本工業規格（JIS A 5525）において、肉厚は-0.6mm～-1.0mmの許容差が認められており、ケース ii はこれを想定したものである。

- i) H19基準の部分係数法による杭諸元（表-9参照）に対し、全ての杭の肉厚が1mm増厚したケース
- ii) H19基準の部分係数法による杭諸元に対し、全ての杭の肉厚が1mm減厚したケース
- iii) 耐震強化施設の部分係数（表-3参照）を使用したケース

実質安全率は、ケース i で1.32～1.37、ケース ii で1.16～1.21、ケース iii で1.28～1.33となった。また、H19基準の部分係数法による実質安全率（1.24～1.38）を基準とした場合、各ケースの実質安全率の変動幅は、ケース i で0.06～0.10（平均で0.08）、ケース ii で-0.07～-0.10（平均で-0.08）、ケース iii で0.03～0.05（平均で0.04）となった。

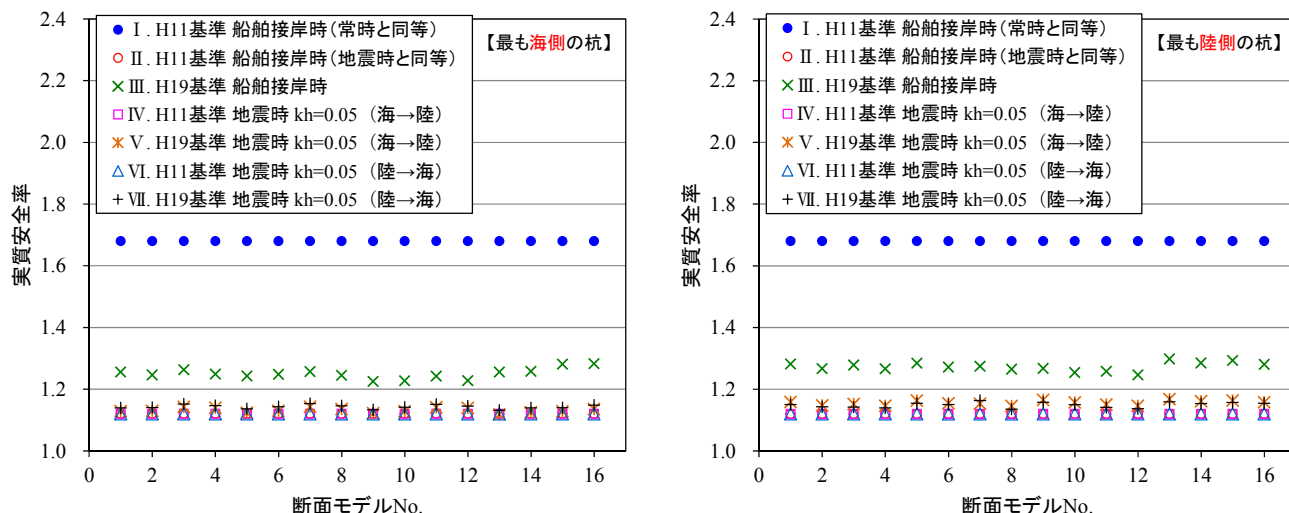


図-10 実質安全率の比較

表-13 実質安全率一覧 (最も海側・陸側の杭列)

設計基準・設計作用		実質安全率 (最も海側の杭列)															
		断面モデル															
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
H11基準	船舶接岸時 (常時と同等)	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
H11基準	船舶接岸時 (地震時と同等)	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
H19基準	船舶接岸時	1.26	1.25	1.26	1.25	1.24	1.25	1.26	1.24	1.22	1.23	1.24	1.23	1.26	1.26	1.28	1.28
H11基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:海から陸)	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
H19基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:海から陸)	1.13	1.13	1.14	1.14	1.12	1.13	1.14	1.14	1.12	1.13	1.14	1.14	1.12	1.12	1.13	1.14
H11基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:陸から海)	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
H19基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:陸から海)	1.14	1.14	1.15	1.15	1.14	1.14	1.15	1.15	1.13	1.14	1.15	1.14	1.13	1.14	1.14	1.15
設計基準・設計作用		実質安全率 (最も陸側の杭列)															
		断面モデル															
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
H11基準	船舶接岸時 (常時と同等)	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
H11基準	船舶接岸時 (地震時と同等)	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
H19基準	船舶接岸時	1.28	1.27	1.28	1.27	1.28	1.27	1.27	1.26	1.27	1.25	1.26	1.25	1.30	1.28	1.29	1.28
H11基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:海から陸)	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
H19基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:海から陸)	1.16	1.15	1.15	1.15	1.16	1.15	1.15	1.15	1.17	1.16	1.15	1.15	1.17	1.16	1.16	1.16
H11基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:陸から海)	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
H19基準	地震時 震度kh=0.05 (作用方向:陸から海)	1.15	1.14	1.14	1.14	1.15	1.15	1.16	1.14	1.16	1.15	1.14	1.14	1.16	1.15	1.16	1.15

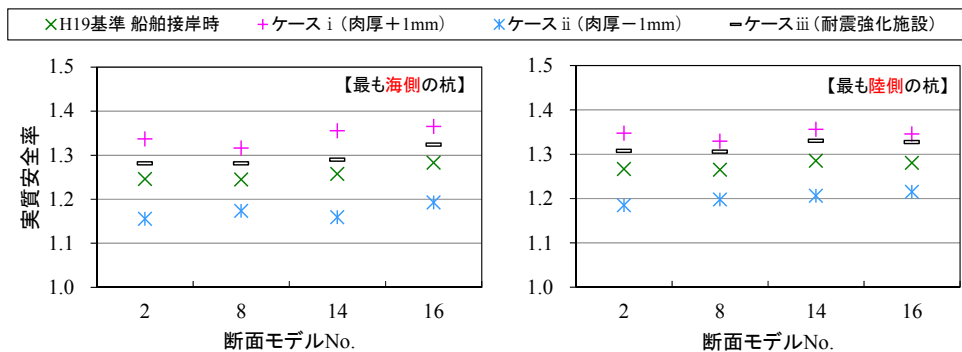


図-11 実質安全率の変動の目安

3.5 船舶接岸時の安全性水準に関する考察と今後の課題

前節までに杭の断面係数や安全率に関する比較を行ったが、いずれの比較においても、船舶接岸時の杭応力に対しては、H11基準で常時と同等とする場合が最も高い安全性水準が求められ、所要断面も大きくなる。次いで、H19基準に従う場合、H11基準で地震時と同等とする場合の順番となるが、これら2つの水準と、H11基準で常時と同等とする場合が有する安全性水準との間には比較的大きな差があり、所要断面性能も大きく異なる。

以上を踏まえると、H11基準からH19基準にかけての目標安全性水準の変化に関しては、H11基準において許容応力度をどのように設定していたかによって、その評価が大きく異なる（図-12）。船舶接岸時の照査において常時と同等の許容応力度が用いられていた場合、H19基準への移行にかけて安全性水準は大きく低下したといえる。これは、1.1で述べた「従来の許容応力度法では過度に安全側の断面が設定されており、期待総費用最小化に基づき安全性水準が下がった」という内容とも一致する。しかしながら、地震時と同等の許容応力度が過去に用いられていた場合には、逆に、H11基準からH19基準にかけて安全性水準が上がったこととなる。そのため、基準改訂による安全性水準の変化とそれによる影響の評価、また、それらを踏まえた本研究における目標安全性水準の設定を行うには、まず、過去の設計において船舶接岸時の許容応力度がどのように設定されていたかという実態について、既往の設計事例に関する情報収集を中心として、把握する必要があるといえる。

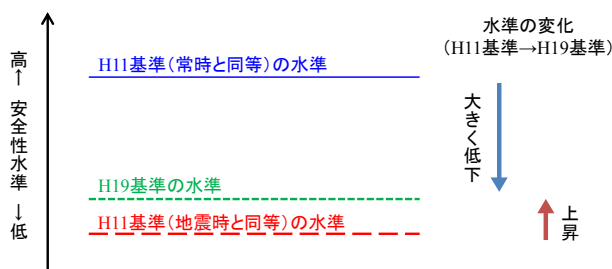


図-12 安全性水準の位置関係

4. 応答曲面法による杭部材力の近似式の信頼性解析への導入

4.1 応答曲面法の導入経緯

本研究の全体としての目的は、第1章に示したとおり、前章で整理を行った船舶接岸時に対する安全性水準について検討した上で、最終的には棧橋構造における船舶接岸時の発生応力の照査に適用する新しい部分係数を構築することにある。この部分係数を算定するためには、信頼性解析に基づいて決定する必要がある。

しかし、棧橋構造の信頼性解析の実施にあたっては、一つ大きな課題がある。棧橋杭の設計においては、杭の応力照査に用いる杭の曲げモーメントおよび軸力は骨組み解析結果より求められることが一般的であることから、水平力や地盤反力等の設計パラメータとの関係性を関数化できないために、信頼性解析に必要となる棧橋の発生応力に関する性能関数を、簡単に定式化することができないという点である。このため、H19基準の部分係数の算定に用いられている1次信頼性理論(FORM)による解析は容易には実行することが出来ない。

この課題を解決するための手法として、竹信ら²⁾と同様に、モンテカルロシミュレーション（以下、「MCS」とする）による解析手法を用いることが考えられる。しかし、MCSを利用する場合においても、杭部材力の評価手法に関する解析上の取り扱いを工夫しなければ、作業効率が非常に悪くなる。

例えば、解析の試行回数を100万回とした場合、水平力や地盤反力といった各条件の組合せも100万通りとなり、杭の部材力はこの条件の組合せによって異なる。これは100万回の骨組み解析を実施すれば解析は可能であるが、膨大な作業量を伴うため、現実的ではない。

そこで、本研究では、骨組み解析を行うことなく、より簡易に信頼性解析を実施する方法として、代表的な設計パラメータを変化させた場合の杭の発生部材力をあらかじめ感度分析し、その結果を用いて、杭毎の発生部材力に関する近似関数式を立式しておく方法を提案した。この近似関数式（およびその誤差）を用いれば、この関数式に対してMCSを実行することによって、容易に信頼性解析を実施することが可能である。

上記に示すような手法によって信頼性解析を実施する方法は、特に応答曲面法と呼ばれている。事例としては、文献12)や文献13)が挙げられる。なお、本稿では、感度分析に関しては、種々のケースに対する骨組み解析結果を基に実施している。

本章において、4.2では、応答曲面法による近似化の方

法を述べる。4.3では、近似化の結果として近似式を整理し、その推定精度を骨組み解析結果と比較して示す。

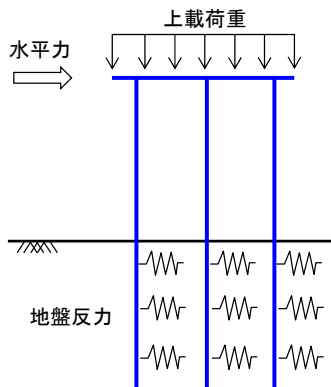


図-13 一般的な骨組み解析モデル

4.2 応答曲面法による近似化の方法

(1) 応答曲面法の概要と近似式の変数

応答曲面とは、複数の入力変数から予測される応答を関数で近似化したものである(式(6))。この近似には、変数のある入力パターンに対する応答結果が既知のデータとして必要であり、変数の種類が多く、近似関数が高次元であるほど、必要データ数は多くなる。なお、応答曲面法において、この近似式の関数形には、特に制約はない。

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (6)$$

ここに、

- y : 応答
- x_n : 入力変数 ($n > 1$)
- f : 近似関数
- ε : 誤差

本研究では、応答曲面法を杭の部材力の近似式の作成に用いるため、杭の曲げモーメントおよび軸力を近似式の目的変数(式(6)における応答)とする。また、杭の部材力に影響を与える要素として、栈橋にかかる船舶接岸力と杭にかかる地盤反力係数を説明変数(式(6)における入力変数)とする。なお、信頼性解析に用いる栈橋構造の断面モデルには、第3章で用いた表-7のモデルを用いることとし、各モデルの杭列毎に部材力の近似式を作成してMCSに用いる。

本研究で検討する近似式では、表-14に示す変数を対象とする。なお、捨石マウンドを有する断面モデルに関しては、地盤反力係数を捨石層のもの(k_{CH1})とその直下の砂層のもの(k_{CH2})とで区別し、それぞれ別の変数として使用する。

表-14 近似式に用いる変数

近似式の変数		記号
目的変数	曲げモーメント	M
	軸力	N
説明変数	接岸力	H
	地盤反力係数	砂層: k_{CH}
	(捨石マウンドを有する場合)	捨石層: k_{CH1} 砂層: k_{CH2}

(2) 近似のための入力・応答データの作成

前述したとおり、応答曲面法による近似にあたっては、複数の入力パターンに対する応答結果が既知のデータとして必要となる。つまり、表-14に示す説明変数の入力の組合せに対応する曲げモーメントと軸力の骨組み解析結果がいくつか必要となる。このとき、入力値は $\mu \pm n\sigma$ (μ : 平均, n : 正の整数, σ : 標準偏差)で変化させることが多いとされており¹²⁾、本研究でもこの手法を踏襲する。H19基準の杭の応力照査に係る部分係数法においては、水平力と地盤反力係数の平均の偏り(= μ/X , X : 特性値)および変動係数(= σ/μ)が表-15のとおり設定されている。ここでは、この平均の偏りと変動係数を用いて、本研究における入力値の目安を算出し(表-16)、これらの組合せを基本に、入力ケースを設定している。断面モデル別の入力ケース数は表-17のとおりであり、これに対応する応答データを骨組み解析により算出・記録した。入力ケースおよび応答データの詳細は付録Bを参照されたい。

表-15 各変数の確率分布¹⁾

変数	平均の偏り μ/X	変動係数 $V (= \sigma/\mu)$	分布形
水平力	0.87	0.25	正規
地盤反力係数	1.333	0.76	対数正規

表-16 近似に用いる入力値の目安

変数		特性値 X	平均 μ	標準偏差 σ	$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma$	$\mu + 2\sigma$	$\mu + 3\sigma$
接岸力 (kN/ラメン)	7.5m岸壁	268.0	233.2	58.3	174.9	291.5	349.7	408.0
	12.0m岸壁	419.8	365.2	91.3	273.9	456.5	547.8	639.1
	18.0m岸壁	877.8	763.7	190.9	572.8	954.6	1,145.5	1,336.5
地盤反力係数 (kN/m ³)	砂層 N=5	7,500	9,998	7,598	2,399	17,596	25,194	32,792
	砂層 N=15	22,500	29,993	22,794	7,198	52,787	75,581	98,375
	捨石層	3,500	4,666	3,546	1,120	8,211	11,757	15,303

表-17 近似に用いる入力ケース数

断面 モデル	水深 (-m)	地盤反力係数 (kN/m ³)		入力 ケース数
		捨石層	砂層	
①	7.5	3,500	7,500	48
②			22,500	48
③		無し	7,500	17
④			22,500	17
⑤	12.0	3,500	7,500	48
⑥			22,500	48
⑦		無し	7,500	17
⑧			22,500	17
⑨		3,500	7,500	48
⑩			22,500	48
⑪		無し	7,500	17
⑫			22,500	17
⑬	18.0	3,500	7,500	48
⑭			22,500	48
⑮			7,500	48
⑯			22,500	48
合 計				582

(3) 近似関数の形式

まず、杭の曲げモーメントの近似関数式について述べる。
 図-14は、実際の骨組み解析データのうち、曲げモーメントと接岸力のデータを地盤反力係数別にプロットしたものである。このデータ分布を概観すると、接岸力と曲げモーメントの直線関係が確認できる。よって、曲げモーメントは接岸力で線形近似できるものとし、関数式を式(7)のとおり設定する。ただし、図-14のとおり、このときの接岸力と曲げモーメントの関係性は、地盤反力係数に影響を受ける。

$$M = X_1 + X_2 \cdot H \quad (7)$$

ここに、

- M : 杭の曲げモーメント (kN・m)
- H : 接岸力 (kN/ラメン)
- X_1, X_2 : 係数

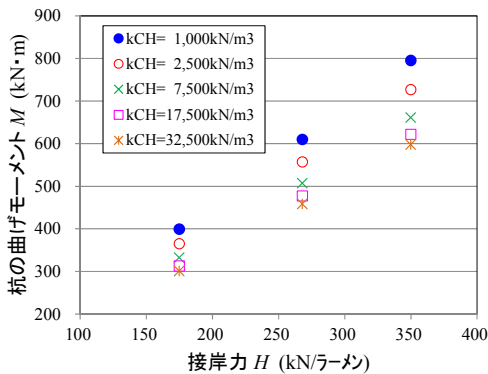


図-14 接岸力Hと曲げモーメントMの関係
 (例：断面モデル③，海側から1列目の杭)

そのため、式(7)における係数 X_1, X_2 を、地盤反力係数 k_{CH} (捨石マウンドを有するモデルの場合は k_{CH1})を用いて、式(8)もしくは式(8)'のとおり、関数化することとする。なお、このときの関数形に工学的な意味はなく、係数 X_1, X_2 と地盤反力係数のデータの分布形状(図-15)と回帰計算の容易さから累乗関数を採用したものである。

【捨石マウンド無しの場合】

$$\begin{aligned} X_1 &= A_1 \times k_{CH}^{B_1} \\ X_2 &= A_2 \times k_{CH}^{B_2} \end{aligned} \quad (8)$$

【捨石マウンド有りの場合】

$$\begin{aligned} X_1 &= A_1 \times k_{CH1}^{B_1} \\ X_2 &= A_2 \times k_{CH1}^{B_2} \end{aligned} \quad (8)'$$

ここに、

- k_{CH} : 地盤反力係数 (kN/m³)
- k_{CH1} : 捨石マウンドを有する断面における捨石層の地盤反力係数 (kN/m³)
- A_1, B_1, A_2, B_2 : 係数

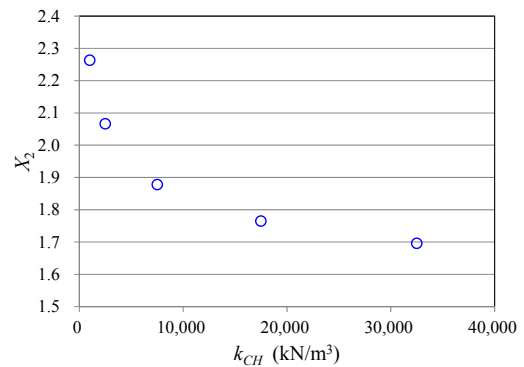
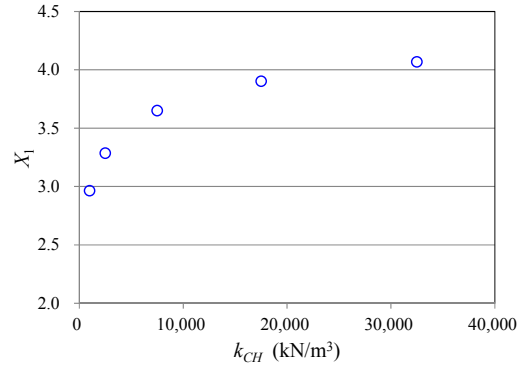


図-15 係数 X_1, X_2 と地盤反力係数 k_{CH} の関係
 (例：断面モデル③，海側から1列目の杭)

さらに、捨石マウンドを有する断面モデルに限っては、式(8)'中の係数 A_1, B_1, A_2, B_2 を、式(9)のとおり、砂層の地盤反力係数の関数とする。この関数化についても、式(8)'と同様の理由により、累乗関数を採用している。

【捨石マウンド有りの場合】

$$\begin{aligned} A_1 &= a_1 \times k_{CH2}^{b_1} \\ B_1 &= a_2 \times k_{CH2}^{b_2} \\ A_2 &= a_3 \times k_{CH2}^{b_3} \\ B_2 &= a_4 \times k_{CH2}^{b_4} \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、

- k_{CH2} : 捨石マウンドを有する断面における砂層の地盤反力係数 (kN/m³)
- a_i, b_i : 係数 ($1 \leq i \leq 4$)

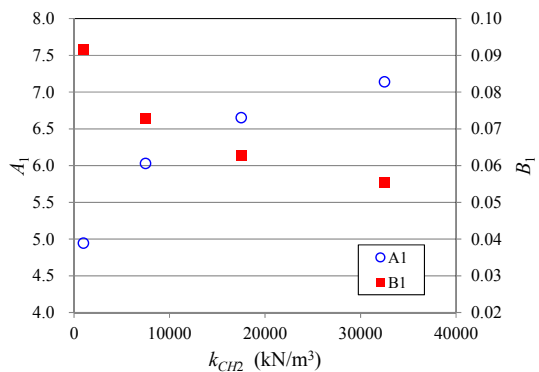


図-16 係数 A_1, B_1, A_2, B_2 と地盤反力係数 k_{CH2} の関係
 (例：断面モデル⑤，海側から2列目の杭)

次に、杭の軸力を目的変数とした近似式の形式について述べる。杭の軸力は、式(10)のとおり、曲げモーメントの一次関数として設定することとする。

$$N = X_3 + X_4 \cdot M \quad (10)$$

ここに、

- N : 杭の軸力 (kN)
- M : 杭の曲げモーメント (kN・m)
- X_3, X_4 : 係数

捨石マウンドが無い断面モデルの場合、曲げモーメントと軸力は直線上に分布しており（図-17）、式(10)における係数 X_3, X_4 を定数としても、ある程度精度良く近似できると判断される。

対して、捨石マウンドを有する断面モデルの場合は、曲げモーメントと軸力の間には単純な直線関係はみられず（図-18）、両者の関係には捨石マウンドの存在が影響しているものと考えられる。ここで、係数 X_3, X_4 と捨石層の地盤反力係数 k_{CH1} の関係をみると（図-19）、やはり、累乗関数による近似が有効と考えられるため、式(11)のとおり関数化し、さらに、その係数 A_3, B_3, A_4, B_4 を砂層の地盤反力係数 k_{CH2} で累乗関数化することとする（式(12)）。

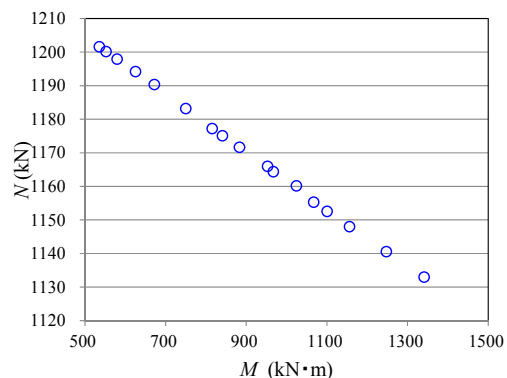


図-17 曲げモーメント M と軸力 N の関係
 (例：断面モデル⑦，海側から2列目の杭)

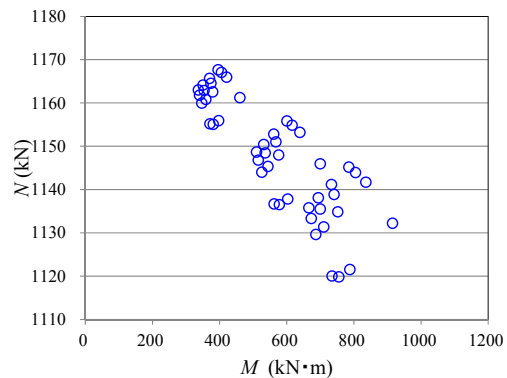


図-18 曲げモーメント M と軸力 N の関係
 (例：断面モデル⑨，海側から3列目の杭)

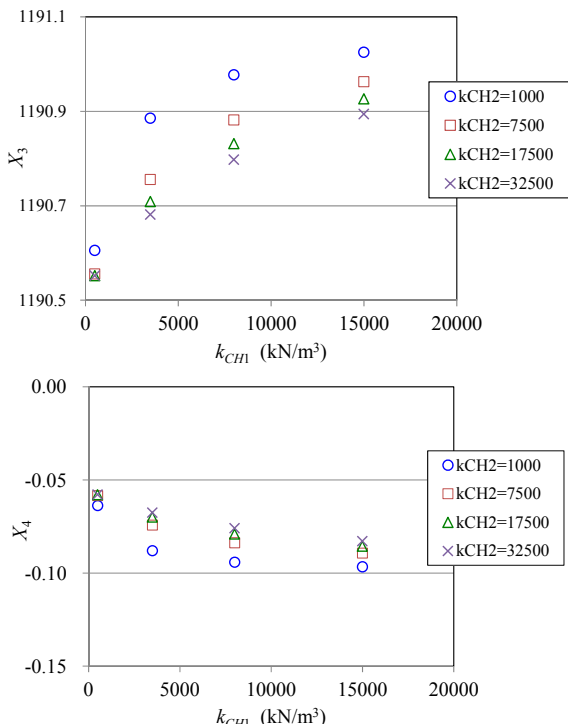


図-19 係数 X_3, X_4 と地盤反力係数 k_{CH1} の関係
(例：断面モデル⑨，海側から3列目の杭)

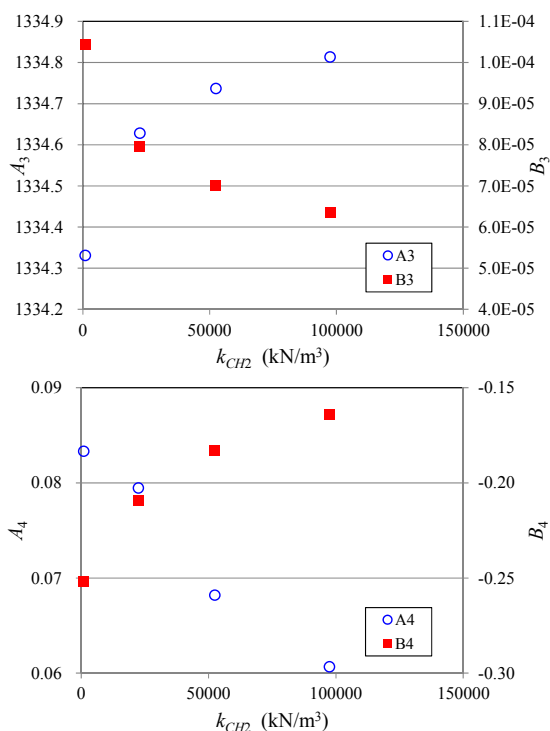


図-20 係数 A_3, B_3, A_4, B_4 と地盤反力係数 k_{CH2} の関係
(例：断面モデル⑭，海側から5列目の杭)

ここに

k_{CH1} : 捨石マウンドを有する断面における捨石層の地盤反力係数 (kN/m³)
 A_3, B_3, A_4, B_4 : 係数

【捨石マウンド有りの場合】

$$\begin{aligned} A_3 &= a_5 \times k_{CH2}^{b_5} \\ B_3 &= a_6 \times k_{CH2}^{b_6} \\ A_4 &= a_7 \times k_{CH2}^{b_7} \\ B_4 &= a_8 \times k_{CH2}^{b_8} \end{aligned} \tag{12}$$

ここに

k_{CH2} : 捨石マウンドを有する断面における砂層の地盤反力係数 (kN/m³)
 a_i, b_i : 係数 ($5 \leq i \leq 8$)

以上に示した全ての近似式を表-18に整理する。

表-18 近似関数式一覧

目的変数	近似関数式	
	捨石マウンド有り (断面モデル①,②,⑤,⑥,⑨, ⑩,⑬,⑭,⑮,⑰)	捨石マウンド無し (断面モデル③,④,⑦, ⑧,⑪,⑫)
曲げモーメント	$M = X_1 + X_2 \cdot H$ $X_1 = A_1 \times k_{CH1}^{B_1}$ $X_2 = A_2 \times k_{CH1}^{B_2}$ $A_1 = a_1 \times k_{CH2}^{b_1}$ $B_1 = a_2 \times k_{CH2}^{b_2}$ $A_2 = a_3 \times k_{CH2}^{b_3}$ $B_2 = a_4 \times k_{CH2}^{b_4}$	$M = X_1 + X_2 \cdot H$ $X_1 = A_1 \times k_{CH}^{B_1}$ $X_2 = A_2 \times k_{CH}^{B_2}$
軸力	$N = X_3 + X_4 \cdot M$ $X_3 = A_3 \times k_{CH1}^{B_3}$ $X_4 = A_4 \times k_{CH1}^{B_4}$ $A_3 = a_5 \times k_{CH2}^{b_5}$ $B_3 = a_6 \times k_{CH2}^{b_6}$ $A_4 = a_7 \times k_{CH2}^{b_7}$ $B_4 = a_8 \times k_{CH2}^{b_8}$	$N = X_3 + X_4 \cdot M$
記号		
M	杭の曲げモーメント(kN・m)	
N	杭の軸力(kN)	
H	接岸力(kN/ラーメン)	
k_{CH1}	捨石層の地盤反力係数(kN/m ³)	
k_{CH2}	砂層の地盤反力係数(kN/m ³)	
k_{CH}		砂層の地盤反力係数(kN/m ³)
X_i, A_i, B_i, a_i, b_i	回帰係数	

【捨石マウンド有りの場合】

$$\begin{aligned} X_3 &= A_3 \times k_{CH1}^{B_3} \\ X_4 &= A_4 \times k_{CH1}^{B_4} \end{aligned} \tag{11}$$

4.3 応答曲面法による近似結果とその精度

ここでは、一部の断面モデル・杭列を例に挙げ、前述した関数式による杭部材力の近似結果を示す。その他の近似結果は、巻末の付録Bに収録しているため、そちらを参照されたい。

図-21～図-24は、曲げモーメントおよび軸力の近似値と解析値を比較したグラフである。ここでいう解析値とは、骨組み解析より求めた計算値であり、近似値とは前述の近似関数式を用いて算出した値である。よって、図中のデータプロットが傾き1の直線上に分布するほど近似精度が良く、断面モデルにより優劣はあるもののある程度の精度が確認された。

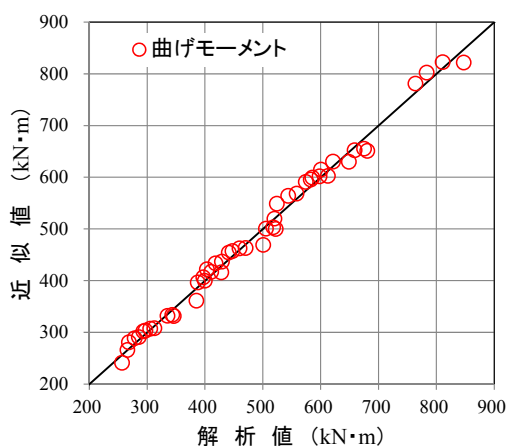


図-21 曲げモーメントの近似値と解析値の比較
(例：断面モデル⑤，海側から1列目の杭)

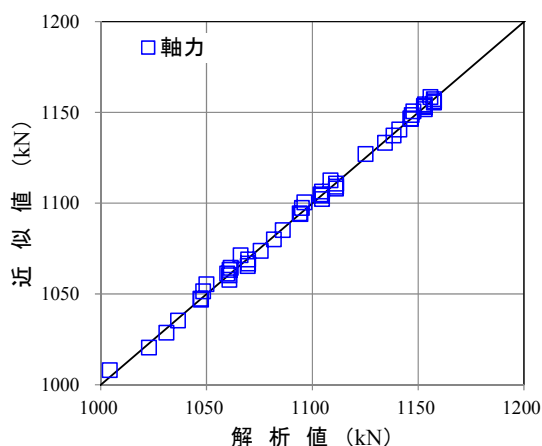


図-22 軸力の近似値と解析値の比較
(例：断面モデル⑤，海側から1列目の杭)

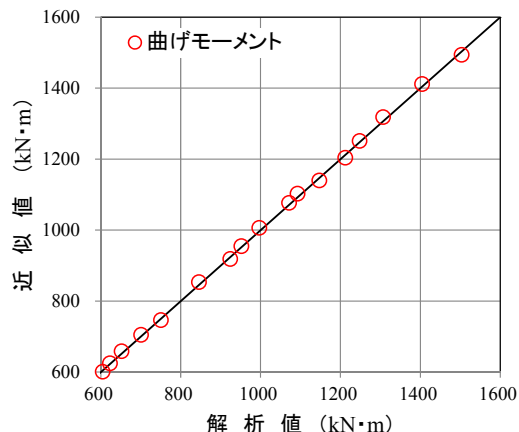


図-23 曲げモーメントの近似値と解析値の比較
(例：断面モデル⑦，海側から4列目の杭)

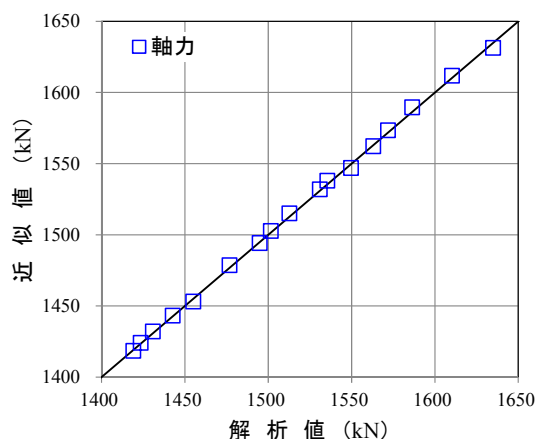


図-24 軸力の近似値と解析値の比較
(例：断面モデル⑦，海側から4列目の杭)

表-19～表-22では、図-21～図-24で例に挙げた断面モデル・杭列の近似値を解析値で除して基準化し、その値（以下、「基準化した近似値」とする）の平均と標準偏差を算出している。基準化した近似値は、曲げモーメント・軸力ともに、平均が1に近く、標準偏差も小さいことから、今回作成した近似関数式はある程度高い精度を有していると判断できる。

最後に、全ての断面モデル・杭列について、曲げモーメントと軸力の基準化した近似値の平均・標準偏差・変動係数を表-23に示す。このうち変動係数に着目すると、曲げモーメントに関しては最大で0.091，最小で0.006となっている。対して、軸力に関しては最大でも0.007程度である。よって、全体的な傾向としては、曲げモーメントよりも軸力の方が解析値に対する近似値のバラツキが小さく、近似式の精度が高いといえる。

表-19 曲げモーメントの近似値の基準化
(例：断面モデル⑤，海側から1列目の杭)

水平力 (kN/ラーメン)	地盤反力係数		曲げモーメント			
	k_{CH1} (kN/m ³)	k_{CH2} (kN/m ³)	解析値 (kN・m)	近似値 (kN・m)	近似値 /解析値	
275.0	500	1,000	428.6	415.7	0.9700	
419.8			649.2	629.5	0.9697	
550.0			847.6	821.7	0.9695	
275.0	3,500		297.2	303.2	1.0202	
419.8			447.7	456.9	1.0205	
550.0			583.1	595.1	1.0206	
275.0	8,000		266.3	265.8	0.9984	
419.8			400.1	399.4	0.9983	
550.0			520.4	519.5	0.9982	
275.0	15,000		256.9	240.8	0.9375	
419.8			385.5	360.9	0.9361	
550.0			501.2	468.8	0.9355	
275.0	500		7,500	410.8	416.4	1.0136
419.8				621.6	630.1	1.0138
550.0				811.1	822.3	1.0139
275.0	3,500	335.4		331.8	0.9891	
419.8		505.8		500.3	0.9890	
550.0		659.0		651.8	0.9890	
275.0	8,000	293.6		301.6	1.0273	
419.8		441.6		453.9	1.0280	
550.0		574.6		590.9	1.0283	
275.0	15,000	268.9		280.7	1.0438	
419.8		403.6		421.8	1.0449	
550.0		524.7		548.6	1.0454	
275.0	500	17,500		397.3	406.3	1.0227
419.8				600.7	614.6	1.0230
550.0				783.7	801.8	1.0231
275.0	3,500		343.7	333.5	0.9705	
419.8			518.3	502.8	0.9700	
550.0			675.4	655.0	0.9698	
275.0	8,000		305.6	307.0	1.0045	
419.8			459.9	462.0	1.0046	
550.0			598.5	601.3	1.0047	
275.0	15,000		278.7	288.4	1.0348	
419.8			418.4	433.3	1.0356	
550.0			544.1	563.6	1.0359	
275.0	500		32,500	387.7	396.1	1.0218
419.8				585.9	598.7	1.0220
550.0				764.1	781.0	1.0221
275.0	3,500	346.5		331.5	0.9567	
419.8		522.5		499.5	0.9559	
550.0		680.8		650.6	0.9555	
275.0	8,000	312.7		307.6	0.9835	
419.8		470.7		462.7	0.9831	
550.0		612.7		602.2	0.9829	
275.0	15,000	285.9		290.7	1.0165	
419.8		429.5		436.7	1.0168	
550.0		558.6		568.0	1.0170	
平均値					1.0007	
標準偏差					0.0297	

表-20 軸力の近似値の基準化
(例：断面モデル⑤，海側から1列目の杭)

水平力 (kN/ラーメン)	地盤反力係数		軸力			
	k_{CH1} (kN/m ³)	k_{CH2} (kN/m ³)	解析値 (kN)	近似値 (kN)	近似値 /解析値	
275.0	500	1,000	1,125.2	1,127.0	1.0016	
419.8			1,061.5	1,064.3	1.0026	
550.0			1,004.3	1,007.9	1.0035	
275.0	3,500		1,146.6	1,146.3	0.9997	
419.8			1,094.4	1,093.8	0.9994	
550.0			1,047.5	1,046.7	0.9992	
275.0	8,000		1,152.8	1,153.4	1.0005	
419.8			1,103.9	1,104.8	1.0008	
550.0			1,059.9	1,061.1	1.0011	
275.0	15,000		1,155.9	1,158.3	1.0021	
419.8			1,108.7	1,112.5	1.0034	
550.0			1,066.2	1,071.2	1.0047	
275.0	500		7,500	1,134.4	1,133.1	0.9989
419.8				1,075.7	1,073.7	0.9982
550.0				1,022.9	1,020.3	0.9975
275.0	3,500	1,146.4		1,146.5	1.0001	
419.8		1,094.2		1,094.3	1.0001	
550.0		1,047.2		1,047.3	1.0001	
275.0	8,000	1,153.3		1,151.7	0.9986	
419.8		1,104.6		1,102.2	0.9978	
550.0		1,060.9		1,057.7	0.9970	
275.0	15,000	1,157.5		1,155.4	0.9981	
419.8		1,111.2		1,107.9	0.9970	
550.0		1,069.6		1,065.2	0.9959	
275.0	500	17,500		1,138.5	1,137.2	0.9988
419.8				1,081.9	1,079.9	0.9982
550.0				1,031.1	1,028.5	0.9975
275.0	3,500		1,147.1	1,148.5	1.0012	
419.8			1,095.2	1,097.3	1.0020	
550.0			1,048.5	1,051.3	1.0027	
275.0	8,000		1,153.2	1,152.9	0.9997	
419.8			1,104.6	1,104.1	0.9995	
550.0			1,060.8	1,060.2	0.9994	
275.0	15,000		1,157.6	1,156.1	0.9987	
419.8			1,111.4	1,109.0	0.9978	
550.0			1,069.8	1,066.6	0.9971	
275.0	500		32,500	1,141.2	1,140.5	0.9994
419.8				1,086.1	1,085.1	0.9990
550.0				1,036.6	1,035.2	0.9987
275.0	3,500	1,147.8		1,150.4	1.0023	
419.8		1,096.3		1,100.3	1.0036	
550.0		1,050.0		1,055.3	1.0050	
275.0	8,000	1,153.3		1,154.3	1.0009	
419.8		1,104.7		1,106.3	1.0015	
550.0		1,061.0		1,063.1	1.0020	
275.0	15,000	1,157.6		1,157.2	0.9996	
419.8		1,111.3		1,110.7	0.9994	
550.0		1,069.7		1,068.9	0.9992	
平均値					1.0000	
標準偏差					0.0021	

表-21 曲げモーメントの近似値の基準化
 (例：断面モデル⑦，海側から4列目の杭)

水平力 (kN/ラーメン)	地盤反力 係数 (kN/m ³)	曲げモーメント		
		解析値 (kN・m)	近似値 (kN・m)	近似値 /解析値
275.0	1,000	751.0	745.8	0.9930
419.8		1,147.4	1,139.4	0.9930
550.0		1,503.8	1,493.4	0.9930
275.0	2,500	701.3	704.5	1.0045
419.8		1,071.7	1,076.5	1.0044
550.0		1,404.7	1,410.9	1.0044
275.0	7,500	652.5	657.9	1.0082
356.2		845.9	852.8	1.0082
419.8		997.3	1,005.5	1.0082
460.0		1,093.0	1,102.0	1.0082
550.0		1,307.3	1,318.0	1.0082
275.0	17,500	622.9	624.0	1.0018
419.8		952.2	953.9	1.0018
550.0		1,248.3	1,250.5	1.0018
275.0	32,500	604.9	600.4	0.9926
419.8		924.7	917.9	0.9926
550.0		1,212.3	1,203.4	0.9927
平均値				1.0010
標準偏差				0.0064

表-22 軸力の近似値の基準化
 (例：断面モデル⑦，海側から4列目の杭)

水平力 (kN/ラーメン)	地盤反力 係数 (kN/m ³)	軸力		
		真値 (kN)	近似値 (kN)	近似値 /解析値
275.0	1,000	1,455.1	1,452.9	0.9985
419.8		1,549.8	1,546.8	0.9981
550.0		1,634.9	1,631.3	0.9978
275.0	2,500	1,442.9	1,443.1	1.0001
419.8		1,531.1	1,531.8	1.0005
550.0		1,610.4	1,611.6	1.0007
275.0	7,500	1,430.9	1,432.0	1.0008
356.2		1,476.8	1,478.5	1.0011
419.8		1,512.8	1,514.9	1.0014
460.0		1,535.6	1,537.9	1.0015
550.0		1,586.5	1,589.4	1.0019
275.0	17,500	1,423.6	1,423.9	1.0002
419.8		1,501.7	1,502.6	1.0006
550.0		1,572.0	1,573.3	1.0009
275.0	32,500	1,419.2	1,418.3	0.9993
419.8		1,495.0	1,494.0	0.9993
550.0		1,563.1	1,562.1	0.9994
平均値				1.0001
標準偏差				0.0012

表-23 基準化した近似値の統計量

断面 モデル	杭列	基準化した近似値 (近似値/解析値)					
		曲げモーメント			軸力		
		平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数
①	1列目	1.0010	0.0803	0.0802	1.0001	0.0041	0.0041
	2列目	1.0000	0.0207	0.0207	1.0000	0.0004	0.0004
	3列目	1.0001	0.0107	0.0107	1.0000	0.0024	0.0024
②	1列目	1.0014	0.0915	0.0914	1.0001	0.0051	0.0051
	2列目	0.9998	0.0250	0.0250	1.0000	0.0003	0.0003
	3列目	1.0002	0.0140	0.0140	1.0000	0.0029	0.0029
③	1列目	1.0012	0.0080	0.0080	0.9998	0.0015	0.0015
	2列目	1.0012	0.0079	0.0079	1.0000	0.0001	0.0001
	3列目	1.0012	0.0076	0.0076	1.0002	0.0013	0.0013
④	1列目	1.0016	0.0136	0.0135	0.9998	0.0024	0.0024
	2列目	1.0016	0.0132	0.0131	1.0000	0.0002	0.0002
	3列目	1.0015	0.0127	0.0127	1.0002	0.0020	0.0020
⑤	1列目	1.0007	0.0297	0.0297	1.0000	0.0021	0.0021
	2列目	1.0002	0.0137	0.0137	1.0000	0.0007	0.0007
	3列目	0.9999	0.0116	0.0116	0.9999	0.0039	0.0039
	4列目	0.9984	0.0253	0.0253	0.9997	0.0043	0.0043
⑥	1列目	1.0002	0.0348	0.0348	1.0001	0.0028	0.0028
	2列目	1.0002	0.0179	0.0179	1.0001	0.0009	0.0009
	3列目	1.0000	0.0158	0.0158	1.0001	0.0013	0.0013
	4列目	1.0005	0.0212	0.0212	1.0000	0.0037	0.0037
⑦	1列目	1.0011	0.0069	0.0069	0.9998	0.0014	0.0014
	2列目	1.0010	0.0067	0.0067	0.9999	0.0005	0.0005
	3列目	1.0010	0.0066	0.0066	1.0000	0.0004	0.0004
	4列目	1.0010	0.0064	0.0064	1.0001	0.0012	0.0012
⑧	1列目	1.0014	0.0117	0.0117	0.9998	0.0022	0.0022
	2列目	1.0013	0.0113	0.0113	0.9999	0.0007	0.0007
	3列目	1.0013	0.0111	0.0111	1.0000	0.0006	0.0006
	4列目	1.0013	0.0107	0.0107	1.0002	0.0019	0.0019
⑨	1列目	1.0000	0.0374	0.0374	1.0000	0.0014	0.0014
	2列目	1.0007	0.0260	0.0259	1.0000	0.0005	0.0005
	3列目	1.0002	0.0102	0.0102	1.0000	0.0007	0.0007
	4列目	1.0001	0.0101	0.0101	1.0001	0.0012	0.0012
	5列目	1.0001	0.0123	0.0123	1.0000	0.0015	0.0015
⑩	1列目	1.0001	0.0455	0.0455	1.0001	0.0019	0.0019
	2列目	1.0003	0.0297	0.0297	1.0000	0.0006	0.0006
	3列目	1.0002	0.0135	0.0135	1.0000	0.0009	0.0009
	4列目	1.0005	0.0140	0.0140	1.0000	0.0009	0.0009
	5列目	1.0003	0.0167	0.0167	1.0000	0.0019	0.0019
⑪	1列目	1.0010	0.0068	0.0068	0.9999	0.0009	0.0009
	2列目	1.0010	0.0067	0.0067	1.0000	0.0003	0.0003
	3列目	1.0010	0.0067	0.0067	1.0000	0.0002	0.0002
	4列目	1.0010	0.0066	0.0066	1.0000	0.0003	0.0003
	5列目	1.0010	0.0065	0.0065	1.0001	0.0008	0.0008
⑫	1列目	1.0013	0.0114	0.0114	0.9999	0.0014	0.0014
	2列目	1.0013	0.0111	0.0111	0.9999	0.0006	0.0006
	3列目	1.0013	0.0111	0.0110	1.0000	0.0002	0.0002
	4列目	1.0013	0.0111	0.0110	1.0000	0.0005	0.0005
	5列目	1.0013	0.0107	0.0107	1.0001	0.0013	0.0013
⑬	1列目	0.9999	0.0259	0.0259	0.9998	0.0031	0.0031
	2列目	1.0011	0.0216	0.0215	1.0000	0.0007	0.0007
	3列目	1.0003	0.0104	0.0104	1.0001	0.0012	0.0012
	4列目	1.0000	0.0062	0.0062	1.0001	0.0020	0.0020
	5列目	0.9993	0.0153	0.0154	1.0000	0.0071	0.0071
	6列目	0.9992	0.0150	0.0150	0.9997	0.0045	0.0045
⑭	1列目	0.9998	0.0325	0.0325	0.9996	0.0036	0.0036
	2列目	1.0009	0.0245	0.0245	1.0000	0.0009	0.0009
	3列目	1.0004	0.0133	0.0133	1.0001	0.0016	0.0016
	4列目	1.0000	0.0084	0.0084	1.0001	0.0022	0.0022
	5列目	1.0002	0.0146	0.0146	1.0000	0.0013	0.0013
	6列目	1.0002	0.0135	0.0135	1.0000	0.0040	0.0040
⑮	1列目	0.9999	0.0401	0.0401	1.0001	0.0042	0.0042
	2列目	1.0003	0.0084	0.0084	1.0000	0.0012	0.0012
	3列目	0.9996	0.0115	0.0115	0.9999	0.0032	0.0032
⑯	1列目	0.9997	0.0499	0.0499	1.0001	0.0058	0.0058
	2列目	1.0006	0.0112	0.0112	1.0000	0.0017	0.0017
	3列目	0.9952	0.0271	0.0272	0.9987	0.0072	0.0072
		平均		0.0182		平均	0.0019
		最大		0.0914		最大	0.0072
		最小		0.0062		最小	0.0001

5. おわりに

1.2に示した新たな部分係数の構築までの全手順に対し、本研究はその最初の検討として、以下の成果を得た。

【杭の応力照査の安全性水準に関して】

- ・直杭式横棧橋の試設計を様々な条件下で実施し、断面係数や安全率などの複数の指標を用いて、設計基準（設計法）別・検討状態別の比較を行った。この結果は、今後、目標安全性水準を決定する際の基礎資料となる。
- ・応力照査において従来用いられていた許容応力度法では、船舶接岸時の許容応力度の設定方法が過去の基準上に明記されておらず、関連図書によっても記載内容が異なることを、資料を収集・整理して示した。「常時と同等」として許容応力度の割り増しは行っていないか、もしくは、「地震時と同等」として許容応力度を5割り増ししたかのいずれかと考えられる。
- ・「常時と同等」もしくは「地震時と同等」の許容応力度を用いた場合と現行の部分係数を用いた場合の安全性水準の関係性を示した。さらに、いずれの許容応力度を用いていたかによって、従来の設計法から現行の部分係数法にかけての安全性水準の推移の評価が異なることを課題として挙げた。

【杭部材力の近似関数式に関して】

- ・骨組み解析結果を基に、複数の断面モデルを対象として杭別の部材力（曲げモーメント・軸力）の近似関数式を作成した。この関数式により求められる近似値は、実際の解析値と比較して、ある程度高い精度を有していると判断でき、関数式の使用により、棧橋杭の応力照査に係る信頼性解析を容易に実施することが可能となる。
- ・本研究で対象とした断面条件に合致しない場合でも、本稿で示した近似方法を参照することで、関数式の作成が可能である。

なお、本研究における目標安全性水準の設定にあたっては、今後、既往の設計事例を収集し、許容応力度がどのような考えに基づき設定されているかを実態として把握する必要がある。

(2016年2月16日受付)

謝辞

本稿をとりまとめるにあたり、信頼性設計法および解析手法について、岐阜大学の本城勇介名誉教授、新潟大学の竹雄准教授より、懇切丁寧なご指導および適切なお助言、様々な参考情報を頂きました。また、港湾施設研究室の交流研究員である松原弘晃氏、佐藤健彦氏、西岡悟史氏、川俣秀樹氏、高野向後氏、および松本英雄港湾情報システム研究官、福永勇介主任研究官には、本稿の執筆方針および検討内容に対して貴重なご意見を頂きました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007。
- 2) 竹信正寛，西岡悟史，佐藤健彦，宮田正史：荷重抵抗係数アプローチによるレベル1信頼性設計法に関する基礎的研究～永続状態におけるケーソン式岸壁の滑動および転倒照査を対象に～，国土技術政策総合研究所資料，No.880，2015。
- 3) 尾崎竜三，長尾 毅，柴崎隆一：経済損失を考慮した期待総費用最小化に基づく港湾構造物の常時のレベル1信頼性設計法，国土技術政策総合研究所資料，No.217，2005。
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999。
- 5) 沿岸開発技術研究センター：港湾構造物設計事例集，1999。
- 6) 北村浩行：繫船岸設計の要点と計算例，鹿島出版会，1970。
- 7) 新・土木設計の要点⑥ 海洋・港湾構造物，鹿島出版会，2003。
- 8) 日本港湾協会：港湾構造物設計基準，1967。
- 9) 老平武弘，塩見雅樹：直ぐい式横棧橋の構造諸元の統計的分析，港湾技術研究所資料，No.749，1993。
- 10) 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集，2007。
- 11) 長尾 毅，菊池喜昭，藤田宗久，鈴木 誠，佐貫哲朗：棧橋式係船岸のレベル1地震動に対する信頼性設計法，構造工学論文集，Vol.52A，2006。
- 12) 長尾 毅，藤森修吾，築地健太郎：直杭式棧橋の信頼性指標の応答曲面法等による評価に関する研究，海洋開発論文集，第24巻，2008。
- 13) 大竹 雄，本城勇介：応答曲面を用いた実用的な地盤構造物の信頼性設計法：液状化地盤上水路の耐震設計への適用，土木学会論文集C(地圏工学)，Vol.68，No.1，68-83，2012。

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 899 March 2016

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