

ジャケット式栈橋のレベル1信頼性設計法

RELIABILITY-BASED DESIGN METHOD FOR JACKET TYPE WHARVES

浅野隆司¹・中村直志¹・長尾毅²・渡部昌治³・石原慎太郎⁴

Takashi ASANO, Naoyuki NAKAMURA, Takashi NAGAO

Masaharu WATANABE and Shintaro ISHIHARA

¹ 新日鉄エンジニアリング(株) 海洋・エネルギー事業部 (〒229-1131 相模原市西橋本 5-9-1)

² 正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³ 横浜港湾空港技術調査事務所 (〒221-0053 横浜市神奈川区橋本町 2-1-4)

⁴ 正会員 (財) 沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16 住友半蔵門ビル 6F)

This paper aims at establishing the level-one reliability-based design method for jacket type wharves. The target reliability indices for jacket type wharves were set as the same level of pile-supported wharves. Then, the sensitivity factors of the members of jacket type wharves were classified into four categories from the viewpoint of similarity of the values of sensitivity factors. Furthermore, the partial factors were evaluated by using the target reliability indices, sensitivity factors, mean and standard variation of parameters. Finally, the applicability of partial factors was assessed by checking the result of partial factors design method.

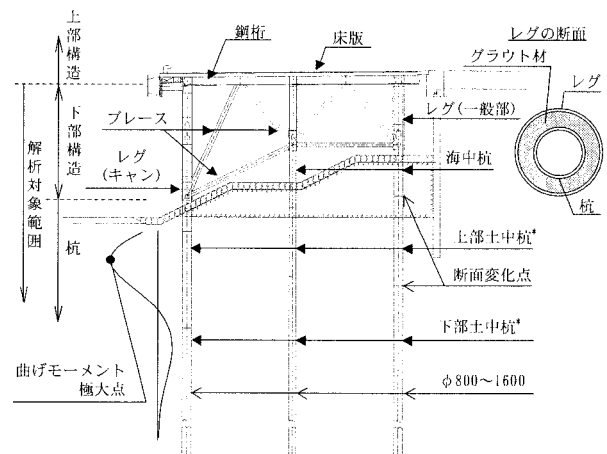
Key Words : level-one reliability-based design, jacket type wharf, sensitivity factor, partial factor, target reliability index

1. はじめに

ジャケット式栈橋は、特に下部構造における高い水平剛性と耐震性が評価され、近年重要度の高い係留施設での採用件数が増えつつある栈橋形式である。図-1 に標準的なジャケット式栈橋の断面を示す。本研究では、平成 19 年に改定された港湾の施設の技術上の基準¹⁾(以下、港湾基準)における直杭式横栈橋と同様に、ジャケット式栈橋を対象としたレベル1 信頼性設計法(部分係数法)の確立を目的とした検討を行った。

目標安全性水準を定める方法として、港湾基準では、過去の設計基準類へのキャリブレーションに基づく方法とライフサイクルコスト最小化に基づく方法が適用可能であるとしている。本研究で対象とする変動状態に対する目標安全性水準については、港湾基準では基本的に前者が採用されている。このため、本研究においても過去の設計基準類へのキャリブレーションに基づく方法を用いた。

まず、過去の基準において採用されていた許容応力度法により設計されたジャケット式栈橋の信頼性解析結果²⁾と、直杭式横栈橋の既往の研究結果³⁾に基づいて、目標信頼性指標の設定を行った。次に、部材毎の感度係数の相違を考慮した上で部分係数の設定を行い、最後に、設定した部分係数を用いた試設計により部分係数の妥当性を検証した。



*) 上部土中杭：土中における曲げモーメントの第一極大点を含む杭断面
下部土中杭：それ以下で継ぎ杭した場合の杭断面

図-1 ジャケット式栈橋の標準断面

2. ジャケット式栈橋の性能照査体系

ジャケット式栈橋の性能照査体系は、鋼管格点部の照査が加わることを除き直杭式横栈橋と同じである。図-2 に、レベル1 地震動および船舶の接岸・牽引力に関する変動状態に対する、ジャケット式栈橋の性能照査フローを示す。

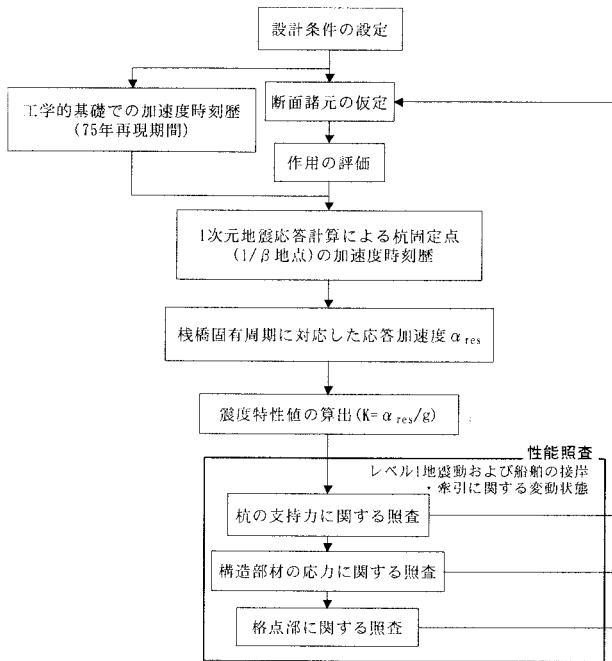


図-2 性能照査フロー

3. 目標信頼性指標

表-1 に示すような、レベル1 地震動作用時 30 ケース、船舶の接岸力・牽引力作用時 10 ケースに対して、別途実施した信頼性指標の検討結果²⁾を表-2 に示す。ここで直杭式横栈橋の値は既往の研究³⁾により示されている値であり、港湾基準に示される標準的な目標信頼性指標である。

表-2 によれば、ジャケット式栈橋の信頼性指標は概ね直杭式横栈橋の目標信頼性指標と同等であるものの、海中杭、下部土中杭の信頼性指標が若干低いことが分かる。

まず、ジャケット式栈橋の部材別の保有する信頼性指標の違いについて議論する。例えば、港湾基準では、防波堤の外部安定に関する目標信頼性指標は滑動・転倒・支持力の3つの破壊モードに対して同じ値が設定されている。これは、従来の設計法により担保されてきた安全性水準の違いは単に設計法の違いによるものであり、限界状態に達したときの不都合さを考慮して差がつけられているわけではないという点を考慮した結果⁴⁾である。ジャケット式栈橋についても同様の議論が成り立つと考えられる。ジャケット式栈橋の各部材において、どの部材が限界状態に達したとしても基本的に復旧が行われると考えられる。さらに、最初に限界状態に達する部材はある特定の部材という訳ではなく、様々な場合がある²⁾ことから、特定の部材に損傷イベントを誘導するような手法の適用は困難と考えられる。以上の理由により、部材ごとに目標信頼性指標を別の値に設定することは適切ではないと考えられる。

次に、同じ栈橋構造である直杭式横栈橋との比較という観点では、ジャケット式栈橋において最も信

頼性指標が低い海中杭、下部土中杭は構造を支持する重要部位であり、目視点検や損傷が生じた場合に補修が困難な事情を踏まえると、目標信頼性指標は直杭式横栈橋と同等以上であることが望ましいと考えられる。

表-1 信頼性指標の検討概要

タイプ	対象施設	ケース数		水深 (m)	クレイン	上載荷重 (kN/m ²)		骨組みモデル
		地震動	接岸・牽引			地震動	接岸・牽引	
1 段直杭式	耐震強化以外	3	1	7.5	無	15	30	
	耐震強化 (標準)	9	3	10	無	15	30	
		6	2	12	有	5	10	
		6	2	16	有	5	10	
	耐震強化 (特定)	3	1	16	有	5	10	
	斜杭式	3	1	16	有	5	10	

表-2 信頼性指標の検討結果
(a) レベル1 地震動作用時

対象施設	信頼性指標						
	(キャンレグ)	ブレース	(一般部レグ)	海中杭	土中杭上部	土中杭下部	平均値
耐震強化以外	2.31	2.67	-	1.93	2.52	2.06	2.31
耐震強化 (標準)	2.91	2.88	2.88	2.63	3.10	2.66	2.83
耐震強化 (特定)	3.62	3.67	4.15	3.15	3.93	3.05	3.54

注) 直杭式横栈橋は既往の研究結果による参考値

(b) 船舶の接岸力・牽引力作用時

信頼性指標						
(キャンレグ)	ブレース	(一般部レグ)	海中杭	土中杭上部	土中杭下部	平均値
3.11	3.29	3.05	2.67	3.41	3.12	3.12

注) 直杭式横栈橋は既往の研究結果による参考値

以上の考察を踏まえ、本研究では、ジャケット式栈橋の目標信頼性指標は各部材について同じ目標値とし、施設の種類（耐震強化施設、それ以外など）毎に直杭式横栈橋と同じ値とする。

4. レベル1 信頼性設計法の検討

(1) 感度係数の分析

図-3 にレベル1 地震動作用時（耐震強化施設（特定））の感度係数を部位別に示す。

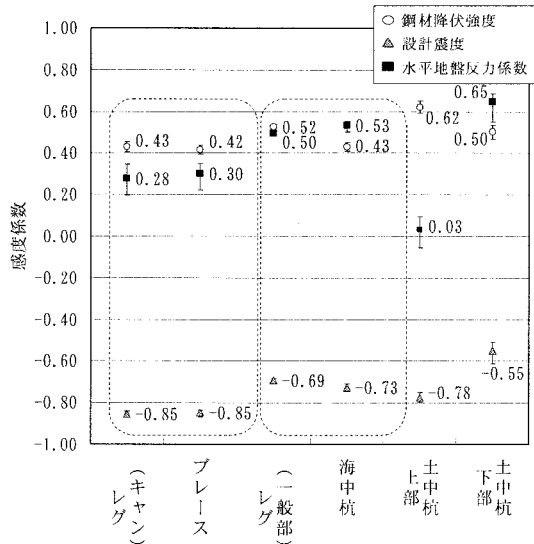


図-3 部位別の感度係数（耐震強化施設（特定））

レグ（キャン）とブレースにおける確率変数ごとの感度係数の平均値は同程度の値を示している。これは、レグ（キャン）とブレースはいずれも、ブレース端部に発生する断面力が断面決定の支配要因となるためである。

レグ（一般部）と海中杭においても、確率変数ごとの感度係数の平均値は同程度の値となった。これは、レグ（一般部）と海中杭はいずれも、水平力により発生する最大曲げモーメントが断面決定の支配要因となるためである。

上部土中杭については、水平地盤反力係数に関する感度係数が極めて小さいことがわかる。図-4 より、水平地盤反力係数のみを変動させたときの上部土中杭に発生する第一極大曲げモーメントの値はほとんど変化しないことがわかる。水平地盤反力係数の影響度合いが低いことから、感度係数も極めて小さい結果となった。

下部土中杭は、水平地盤反力係数に関する感度係数が他の部位に比べて大きいことがわかる。図-4 に示すように、杭の断面変化点における曲げモーメントは水平地盤反力係数が変動すると大きな影響を受ける。水平地盤反力係数の影響度合いが高まり、感度係数も大きい結果となった。

図-5 および図-6 にはそれぞれ耐震強化施設（標

準）および耐震強化施設以外の感度係数を示す。対象施設が変わっても、感度係数の平均値を部位別に比べると、その値は耐震強化施設（特定）と同様である。

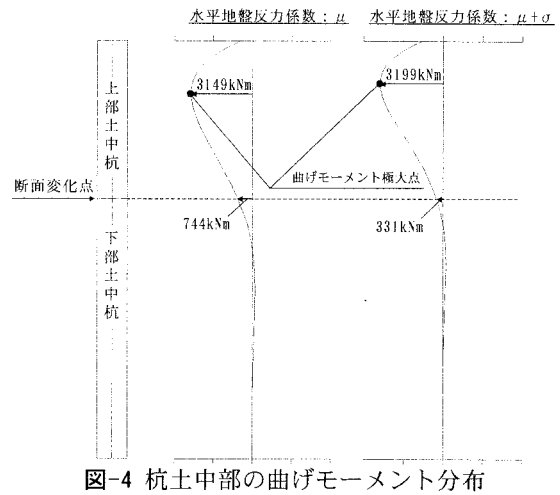


図-4 杭土中部の曲げモーメント分布

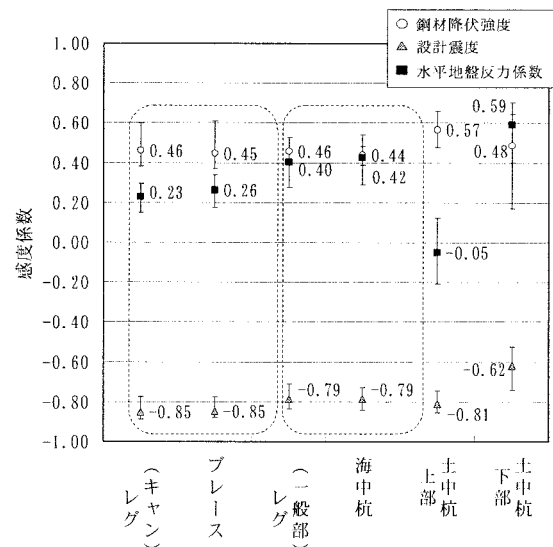


図-5 部位別の感度係数（耐震強化施設（標準））

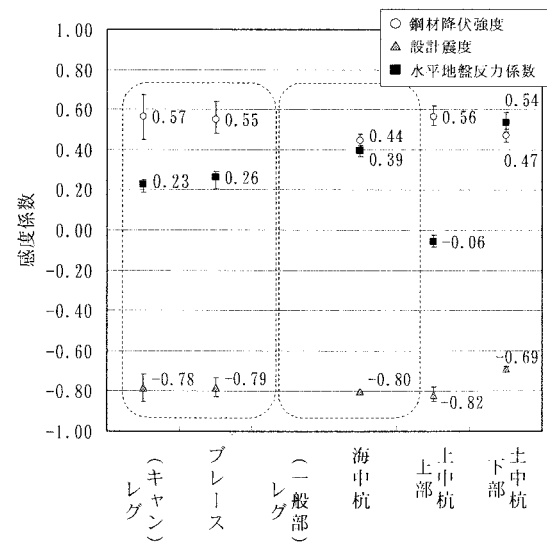


図-6 部位別の感度係数（耐震強化施設以外）

次に、船舶の接岸力・牽引力作用時の感度係数を図-7に示す。

船舶の接岸力・牽引力作用時においても、感度係数の平均値を部位別に比べると、その大小関係はレベル1地震動作用時と同様である。ただし、レグ(キャン)とブレースの感度係数は、ややばらつきが大きい。表-1に示したように、船舶の接岸力・牽引力作用時の検討には、様々な設計条件が混在しているが、そのうち、クレーンの有無が上記のばらつきに大きく影響している。レグ(キャン)とブレースの断面決定要因は、前述したようにブレース端部の断面力となる。クレーン有りの場合の上乗荷重は10kN/m²であるのに対し、クレーン無しの場合には30kN/m²であるため、ブレース端部の断面力を水平力成分と上乗荷重成分に分解すると、クレーン有りの方がクレーン無しに比べて水平力成分の割合が大きくなる。このため、図-7に示したようにクレーン有りの水平力に対する感度係数が大きくなったと考えられる。このことは、耐震強化施設(標準)におけるレベル1地震動作用時でも同様であるが、上乗荷重自体が小さいため、この影響は比較的小さくなったと考えられる。

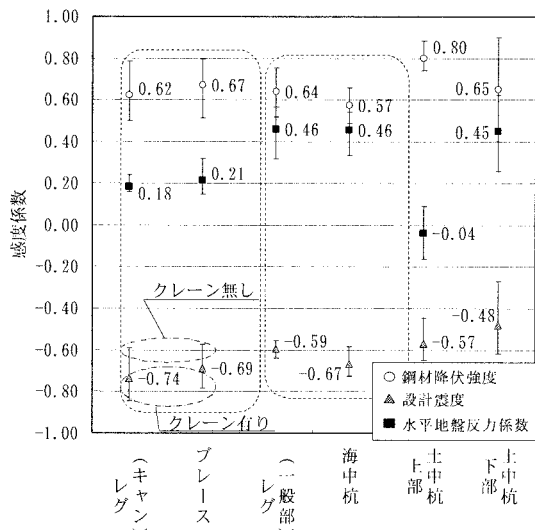


図-7 部位別の感度係数(船舶の接岸力・牽引力作用時)

前述の感度係数の議論では、構造の決定要因とならない信頼性指標の大きな部材は評価対象から除外している。また、表-1に示した2段式および斜杭式のケースについては、感度係数の傾向が若干異なるため、以下で議論することとする。

2段式のケースでは、図-8に示すように下段トラス(図中⑤~⑧)に比べ、上段トラス(図中①~④)の水平地盤反力係数に関する感度係数は極めて小さい。水平地盤反力係数が変動すると杭頭の曲げモーメントが変化するが、上段トラスはこの影響をほとんど受けないため、その感度係数は極めて小さくなったと考えられる。下段トラスでは、水平地盤反力係数の影響を1段式と同様に受けるため、その感度

係数もほぼ同程度の値になったと考えられる。

斜杭式のケースでは、図-9に示すように海側トラス(図中①, ②)に比べ、陸側トラス(図中③, ④)の水平地盤反力係数に関する感度係数が小さい値を示している。これは、中央の杭が傾斜していることにより、3列の杭が分担する水平力の比率が変化したためと考えられる。

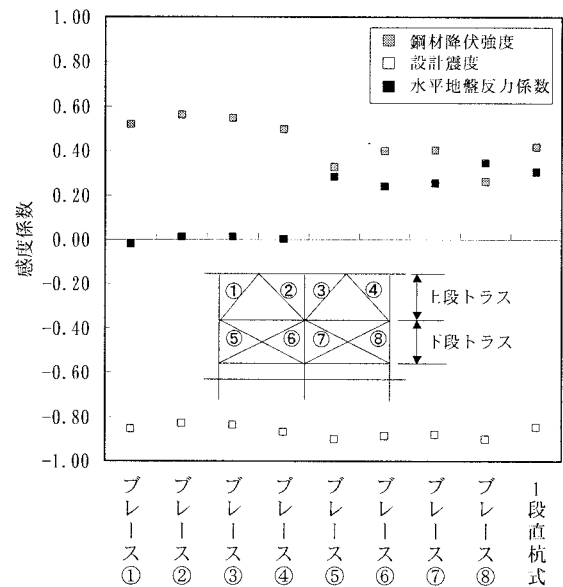


図-8 感度係数(2段式)

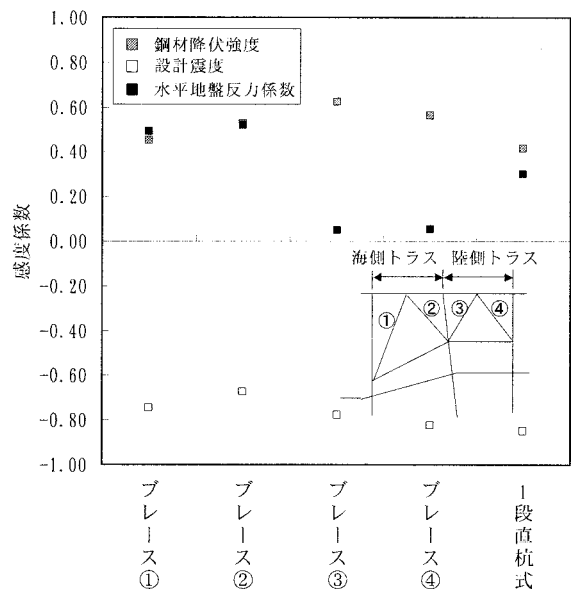


図-9 感度係数(斜杭式)

(2) 部分係数の設定

前述のように、ジャケット式栈橋では部位ごとに感度係数の値が異なるため、部分係数も細分化して設定することが望ましいが、これは設計実務の煩雑化を招くこととなるため、前述の分析結果より構造部材としての機能、感度係数の類似した部位をグルーピングした。具体的には、レグ(キャン)・ブレース

ス、レグ(一般部)・海中杭、上部土中杭、下部土中杭の4グループに分類した。

本検討で用いた設計パラメータの確率分布は、正規分布と対数正規分布であり、それぞれの確率分布に対応する部分係数 γ は、次のように算定できる。

a) 正規分布の場合

$$\gamma = (1 - \alpha\beta_T V) \frac{\mu}{X_k} \quad (1)$$

ここに、

α : 確率変数の感度係数

β_T : 目標信頼性指標

V : 確率変数の変動係数

μ : 確率変数の平均値

X_k : 確率変数の特性値

b) 対数正規分布の場合

$$\gamma = \frac{\exp\left(-\alpha\beta_T \sqrt{\ln(1-V^2)}\right)}{\sqrt{1+V^2}} \frac{\mu}{X_k} \quad (2)$$

既往の研究結果³⁾にも示されているように、式(1)、(2)を用いた場合には、鋼材降伏強度に乘じる部分係数が1.0以上となることがあり、耐力側の特性値に対して設計用値はこれを上回ることになる。このような取り扱いが設計者に混乱を与えることを回避する観点から、本研究では港湾基準¹⁾における材質が混在する場合の取り扱いと同様に、鋼材降伏強度に対する部分係数を1.0とし、骨組み解析等により算定される断面力を、断面力に関する係数で除すことにより同等の結果が得られるように調整した。ここで断面力に関する係数とは、目標信頼性指標、感度係数および鋼材降伏強度の確率分布より算定される部分係数と同値である。また、耐震強化施設以外と耐震強化施設(標準)の感度係数は、前者の検討ケースが3ケースと少ないため、共通の値を用いた。なお、感度係数は本来二乗和が1となるが、平均値を用いた場合1とならない場合がある。この場合は1となるように感度係数の調整を行った。以上により、部分係数および断面力に関する係数はそれぞれ表-3および表-4のようになる。ただし、2段式および斜杭式のケースについては、感度係数を異にする部材を含んでいること、骨組みの実績も少ないことから、部分係数の設定からは除外し、後述する試設計により妥当性を検証することとした。

(3) レベル1信頼性設計法による試設計と部分係数の妥当性の検討

表-3に示した部分係数を用いて試設計を行い、試設計結果に対して再度信頼性解析を実施して妥当性の確認を行った。

試設計結果のジャケット式栈橋の各部位が保有する信頼性指標を図-10に示す。対象施設別に目標値

を概ね満足していることがわかる。次に、2段式および斜杭式の試設計結果を部材別に図-11および図-12に示す。感度係数の異なっていた部材についても概ね目標値を満足していることがわかる。

表-3 部分係数

(a) レベル1地震動作用時

対象施設	確率変数	目標信頼性指標	感度係数 ^{*1}				部分係数 ^{*1}			
			A	B	C	D	A	B	C	D
耐震以外	鋼材降伏強度		0.46	0.45	0.58	0.48	1.00	1.00	1.00	1.00
	震度	2.19	-0.84	-0.79	-0.81	-0.63	1.41	1.38	1.39	1.29
	水平地盤反力係数		0.24	0.41	0.00	0.61	0.74	0.58	1.06	0.43
耐震(標準)	鋼材降伏強度		0.46	0.45	0.58	0.48	1.00	1.00	1.00	1.00
	震度	2.67	-0.84	-0.79	-0.81	-0.63	1.53	1.49	1.51	1.36
	水平地盤反力係数		0.24	0.41	0.00	0.61	0.68	0.50	1.06	0.35
耐震(特定)	鋼材降伏強度		0.42	0.47	0.62	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00
	震度	3.65	-0.85	-0.71	-0.78	-0.55	1.81	1.64	1.72	1.46
	水平地盤反力係数		0.29	0.52	0.03	0.67	0.52	0.30	0.98	0.20

*1: Aレグ(キャン)&ブレース, Bレグ(一般部)&海中杭, C上部土中杭, D下部土中杭

(b) 船舶の接岸力・牽引力作用時

対象施設	確率変数	目標信頼性指標	感度係数 ^{*1}				部分係数 ^{*1}			
			A	B	C	D	A	B	C	D
耐震以外	鋼材降伏強度		0.65	0.60	0.80	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00
	水平力	2.9	-0.71	-0.64	-0.60	-0.51	1.37	1.31	1.29	1.22
	水平地盤反力係数		0.27	0.48	0.00	0.51	0.59	0.38	1.06	0.35
耐震強化	鋼材降伏強度		0.65	0.60	0.80	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00
	水平力	3.2	-0.71	-0.64	-0.60	-0.51	1.32	1.27	1.25	1.19
	水平地盤反力係数		0.27	0.48	0.00	0.51	0.63	0.41	1.06	0.39

*1: Aレグ(キャン)&ブレース, Bレグ(一般部)&海中杭, C上部土中杭, D下部土中杭

表-4 断面力に関する係数

(a) レベル1地震動作用時

対象施設	鋼種	断面力に関する係数			
		A	B	C	D
耐震以外	SKK400, STK400, SM400	1.16	1.16	1.13	1.15
	SKK490, STK490, SM490	1.10	1.10	1.07	1.09
	SM490Y	1.10	1.11	1.08	1.10
耐震(標準)	SKK400, STK400, SM400	1.14	1.14	1.10	1.13
	SKK490, STK490, SM490	1.08	1.08	1.05	1.07
	SM490Y	1.08	1.09	1.05	1.08
耐震(特定)	SKK400, STK400, SM400	1.10	1.09	1.03	1.08
	SKK490, STK490, SM490	1.05	1.03	0.98	1.02
	SM490Y	1.05	1.04	0.98	1.02

*1: Aレグ(キャン)&ブレース, Bレグ(一般部)&海中杭, C上部土中杭, D下部土中杭

(b) 船舶の接岸力・牽引力作用時

対象施設	鋼種	断面力に関する係数			
		A	B	C	D
耐震以外	SKK400, STK400, SM400	1.05	1.07	1.00	1.04
	SKK490, STK490, SM490	1.00	1.01	0.95	0.98
	SM490Y	1.00	1.01	0.95	0.99
耐震強化	SKK400, STK400, SM400	1.07	1.08	1.03	1.06
	SKK490, STK490, SM490	1.02	1.03	0.97	1.00
	SM490Y	1.02	1.03	0.98	1.01

*1: Aレグ(キャン)&ブレース, Bレグ(一般部)&海中杭, C上部土中杭, D下部土中杭

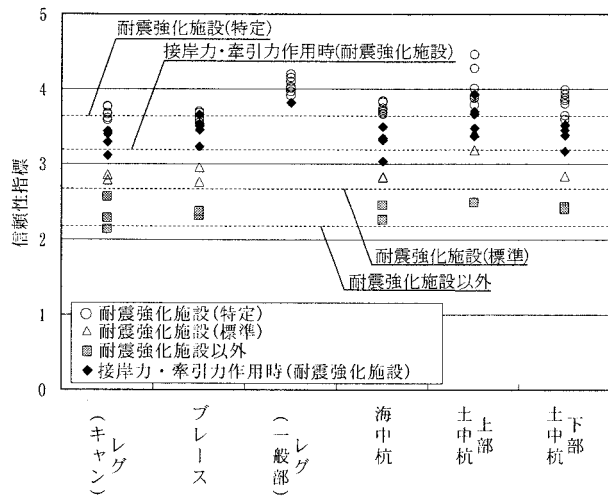


図-10 試設計結果

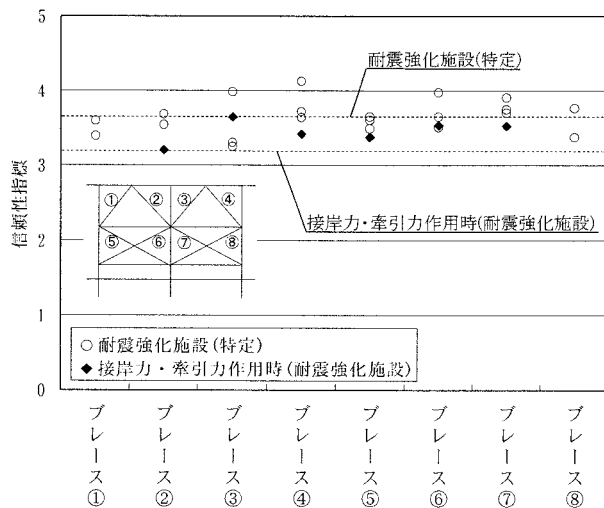


図-11 試設計結果 (2 段式)

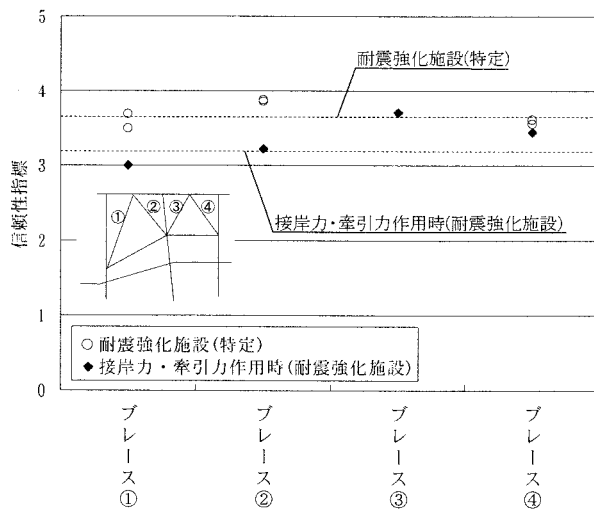


図-12 試設計結果 (斜杭式)

5. 結論

本研究では、ジャケット式栈橋のレベル1地震動および船舶の接岸・牽引による変動状態に対するレベル1信頼性設計法について検討を行った。本研究により得られた主要な結論は以下の通りである。

①ジャケット式栈橋の目標信頼性指標は、栈橋形式の係留施設における調和性の観点から直杭式横栈橋の標準的な目標値に準拠することとした。

②ジャケット式栈橋の構造部材としての機能、感度係数の類似した部材のグルーピングとして、レグ(キャン)・ブレース、レグ(一般部)・海中杭、上部土中杭、下部土中杭の4グループに分類し、部分係数を設定した。

③設定した部分係数を用いて試設計を行うことで、目標とする信頼性指標を満足する断面が設計可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修，日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007
- 2) 中村直志，浅野隆司，長尾毅，諸星一信，石原慎太郎：ジャケット式栈橋が保有する部材別の信頼性指標の評価，海洋開発論文集，第24巻，2008，投稿中
- 3) 長尾毅，菊池喜昭，藤田宗久，鈴木誠，佐貫哲朗：栈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，pp.201-208，2006
- 4) 長尾毅：ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計法の適用，土木学会論文集 No.689，I-57，pp.173-182，2001