

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

EVALUATION OF RELIABILITY INDICES FOR MEMBERS OF JACKET TYPE WHARVES

中村直志¹・浅野隆司¹・長尾毅²・諸星一信³・石原慎太郎⁴

Naoyuki NAKAMURA, Takashi ASANO, Takashi NAGAO
Kazunobu MOROBOSHI 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 正会員 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 discussing the reliability indices for the members of jacket type wharves designed by conventional design method. First-Order Reliability Method was used for the calculation of the reliability indices for conditions under level-one earthquake ground motion, berthing and traction.

The results of the analyses indicate that the reliability indices for the members of jacket type wharves have larger dispersion than those of the pile-supported wharves. For conditions under level-one earthquake ground motion, the average reliability indices of can, brace and upper-pile are larger than those of pile at undersea and lower-pile. Reliability indices for the latter are less than those for pile supported wharves. For conditions under berthing and traction, the reliability indices are almost the same level as those for the pile-supported wharves.

Key Words : *reliability index, jacket type wharves, FORM, limit state function, probably distributions, level-one earthquake ground motion, berthing and traction*

1. はじめに

港湾の施設の技術上の基準¹⁾(以下、港湾基準)が平成19年に改定され、栈橋のレベル1地震動などに対する性能照査には、信頼性設計法が導入された。これは、直杭式横栈橋を対象とした検討により、従来型の許容応力度法により設計される栈橋の杭が保有する耐震性能を信頼性解析により評価し、部分係数のキャリブレーションを行った結果²⁾を反映したものであるが、直杭式横栈橋以外の栈橋については信頼性設計法による設計手法が確立していない。近年、重要度の高い大水深の係留施設では、耐震性の観点からジャケット式栈橋が採用されつつある状況を踏まえると、同形式栈橋についても信頼性設計法による設計手法の確立が必要と考えられる。

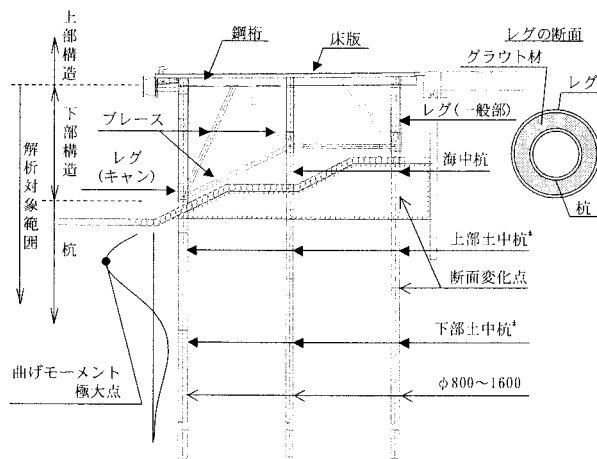
信頼性設計法の確立にあたり、既往の設計方法により設計されたジャケット式栈橋がどの程度の安全性を保有しているかを把握しておくことは、信頼性設計法における目標信頼性指標を設定する上で重要である。このため、本研究では既往の設計方法により設計されたジャケット式栈橋が保有する部材別の

信頼性指標の評価を行った。まず、既往の設計法である許容応力度法に基づき、レベル1地震動作用時、船舶の接岸力・牽引力作用時に対して、それぞれ30ケースおよび10ケースの断面を設計した。次に鋼材降伏強度、震度、接岸力、牽引力および水平地盤反力係数の確率分布を設定して信頼性解析を実施し、既往の研究結果²⁾により示された直杭式横栈橋との比較の観点からジャケット式栈橋の部材別の信頼性指標を評価した。

2. 検討断面の設定

ジャケット式栈橋は、図-1に示すように、床版と鋼桁をレグとブレースにて補剛した杭で支える構造である。レグはブレースとの格点における押し抜きせん断に抵抗するために厚肉としたレグ(キャン)とそれ以外のレグ(一般部)から成る。なお、一般にレグと杭は、その間隙にグラウト材(セメントペーストなど)を現地で充填することで一体化される。ジャケット式栈橋は、杭間隔が10~15mと広く、杭頭

の最大曲げモーメントが大きいことから、杭頭板厚が30mm～40mmと厚くなることが多い。そこで、構造を合理化するため、杭の板厚あるいは材質を深度方向に3段階程度変化させることが一般的である。



*) 上部土中杭：上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図

検討断面を設計する際の設計条件は、過去の実績および既往の研究²⁾より、平成11年版の港湾の施設の技術上の基準³⁾(以下、旧港湾基準)に基づいて、表-1および表-2に示すように設定した。また、検討断面のジャケット骨組みについては、過去の実績を基に図-2とした。原地盤は旧基準におけるⅡ種(中程度の地盤)およびⅢ種地盤(軟弱地盤)相当として、地盤のN値を設定した。海底面標高は-7.5m(耐震強化施設以外)、-10m(耐震強化施設(標準))、-12m(耐震強化施設(標準))、-16m(耐震強化施設(特定))とし、ジャケット式栈橋が重要度の高い大水深の係留施設に採用される傾向が高いことを考慮して、-16mの断面のケースを多く設定した。設計震度は、旧港湾基準において、地域別震度(0.08, 0.11, 0.12, 0.13, 0.15の5種類)、地盤種別係数(1.0および1.2)、重要度係数(1.0, 1.2, 1.5の3種類)の積により求められていたため、対象施設ごとに3パターンの設計震度を設定した。なお、許容応力度の割増しは、過去の実績に基づき1.5として設計を行った。

3. 信頼性解析

(1) 解析手法

ジャケット式栈橋の性能照査に用いる限界状態関数は、作用や耐力に関する確率変数を陽な形式で表現することができないため、骨組み解析プログラムに一次信頼性解析(FORM)のアルゴリズム⁴⁾を組み込むことにより、構造部材別の信頼性指標の計算を行った。解析フローを図-3に示す。ここで解析の対象とするのは、図-1に示すようにジャケット式栈橋の下部構造および杭についてである。なお、本研究にお

ける下部構造とは、ジャケット式栈橋を構成する杭以外の鋼管部材を指す。また、本研究では構造としての機能や断面の異なる部材の相違を明確とするため、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6種類に分類した。上部構造については、既に限界状態設計法に対する検討^{5), 6), 7)}が行われていることもあり、本研究の対象外とした。

表-1 設計条件(レベル1地震動作用時)

対象施設 #1	ケース	水深 (m)	杭 列数	地 盤 種 別 #2	マ ウ ン ド	設計 震 度	図-2 との 対応
耐震以外	1-1	7.5	2	③	あり	0.10	(a)
	1-2					0.15	
	1-3					0.20	
耐震強化 (標準)	1-4	10.0	3	③	あり	0.10	(b)
	1-5					0.15	
	1-6					0.20	
	1-7					0.10	
	1-8					0.15	
	1-9					0.20	
	1-10	12.0	3	②	なし	0.10	(c)
	1-11					0.15	
	1-12					0.20	
	1-13					0.10	
	1-14					0.15	
	1-15					0.20	
耐震強化 (特定)	1-16	12.0	3	③	あり	0.10	(d)
	1-17					0.15	
	1-18					0.20	
	1-19	16.0	3	③	あり	0.15	(e)
	1-20					0.20	
	1-21					0.25	
	1-22					0.15	
	1-23					0.20	
	1-24			②	なし	0.25	(f)
	1-25					0.15	
	1-26					0.20	
	1-27					0.25	
	1-28					0.15	
	1-29			3*	あり	0.20	(g)
	1-30					0.25	

*1: 耐震強化施設以外は旧港湾基準におけるB級相当
耐震強化施設(標準)は旧港湾基準におけるA級相当
耐震強化施設(特定)は旧港湾基準における特定相当

*2: ②は旧港湾基準におけるⅡ種地盤相当

③は旧港湾基準におけるⅢ種地盤相当

*3: 中央の杭は勾配1/8の斜杭

表-2 設計条件(船舶の接岸力・牽引力作用時)

ケース	水深 (m)	杭 列数	地盤 種別	マウ ンド	接岸 力 (kN)	牽引 力 (kN)	図-2 との 対応		
2-1	7.5	2	Ⅲ	あり	617	350	(a)		
2-2	10.0	3			Ⅱ	なし	662	500	(b)
2-3									(c)
2-4			(c)						
2-5	12.0	3	Ⅲ	あり	883	700	(d)		
2-6	Ⅱ		(d)						
2-7	Ⅲ		(e)						
2-8	Ⅱ		(e)						
2-9	16.0	3*	Ⅱ	なし	1840	1000	(f)		
2-10							あり	(g)	

*: 中央の杭は勾配1/8の斜杭

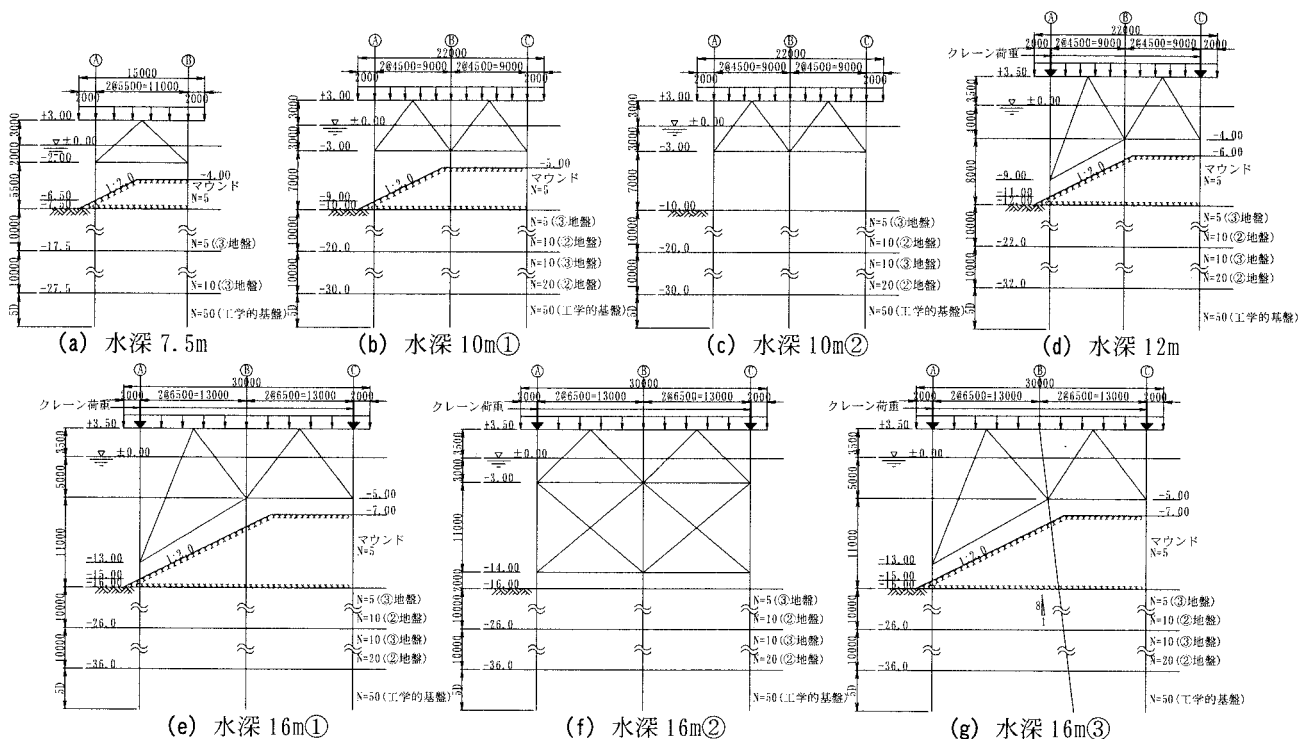


図-2 検討断面の骨組みモデル

(2) 設計パラメータの確率分布

信頼性解析の実施にあたり、ばらつきを考慮する設計パラメータは、鋼材降伏強度、震度、接岸力、牽引力および水平地盤反力係数とした。設計パラメータが従う確率分布は、既往の研究^{2), 8), 9), 10)}を参考に設定した。ここで牽引力については、牽引力に関する既往の研究¹¹⁾より試算した結果、接岸力と同等のばらつきを有していると推測できることから、接岸力と同じ確率分布を持つ変数として取り扱うこととした。旧港湾基準における設計震度には、前述のように構造物の重要度を表す重要度係数が含まれており、設計震度の特性値が同一でも、震度の特性値に対する平均値の比は、対象施設毎に異なる。

本研究では、既往の研究²⁾を参考に、対象施設ごとの震度の特性値に対する平均値の比は、旧港湾基準における重要度係数の逆数とし、耐震強化施設以外を1.0の標準として、耐震強化施設(標準)は0.833、耐震強化施設(特定)は0.667とした。

したがって、本研究で議論する信頼性指標は、旧港湾基準における重要度ごとの条件付信頼性指標である。本研究において、ばらつきを考慮する設計パラメータの確率分布を表-3に示す。

(3) 限界状態関数

港湾基準においては、レベル1地震動および船舶の接岸・牽引に関する変動状態に対して、使用性を求めている。ここで使用性とは、作用に対する損傷の程度を低く抑えることにより、構造物を継続使用可能な状態に保つことを意味する。このため、ジャケット式栈橋における使用性に関する限界状態は、栈橋を構成するいずれかの部材の降伏あるいは、

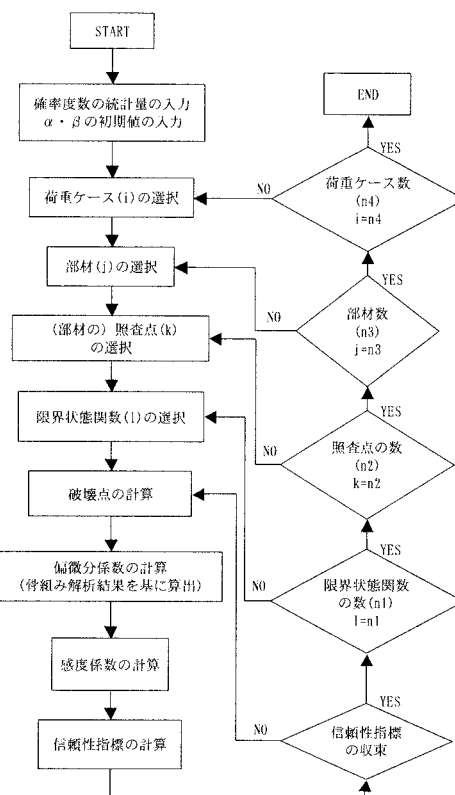


図-3 信頼性解析フロー

いずれかの格点の押し抜きせん断破壊と定義することができる。

したがって、本研究においてはジャケット工法技術マニュアル¹²⁾を参考に、ジャケット式栈橋の使用性に関する限界状態関数を以下のように設定した。

表-3 設計パラメータの確率分布

確率変数	平均値/特性値	変動係数	確率分布
鋼材の降伏応力	SKK400 STK400 SM400	1.260	正規
	SKK490 STK490 SM490	1.196	
	SM490Y	1.20	
		0.08	
接岸力・牽引力	0.87	0.25	正規
設計震度	耐震強化 施設以外	1.000	対数正規
	耐震強化 (標準)	0.833	
	耐震強化 (特定)	0.667	
水平地盤反力係数	1.333	0.76	対数正規

a) 土中以外の部材の降伏

軸力が引張の場合

$$g_1 = \sigma_y - \frac{N}{A} - \frac{M}{Z} \quad (1)$$

$$g_2 = \sigma_y + \frac{N}{A} - \frac{M}{Z} \quad (2)$$

$$g_3 = b\sigma_y + \frac{N}{A} - \frac{M}{Z} \quad (0 < b \leq 1) \quad (3)$$

軸力が圧縮の場合

$$g_4 = \sigma_y + \frac{N}{abA} - \frac{A\sigma_e M}{Z(A\sigma_e + N)} \quad (0 < a, b \leq 1) \quad (4)$$

$$g_5 = b\sigma_y + \frac{N}{A} - \frac{A\sigma_e M}{Z(A\sigma_e + N)} \quad (0 < b \leq 1) \quad (5)$$

b) 土中部杭の降伏

軸力が引張の場合

$$g_6 = \sigma_y - \frac{N}{A} - \frac{M}{Z} \quad (6)$$

軸力が圧縮の場合

$$g_7 = \sigma_y + \frac{N}{A} - \frac{M}{Z} \quad (7)$$

c) 格点の押し抜きせん断耐力

$$g_8 = 1 - \left(\frac{M_i}{M_{yipb}} \right)^2 - \left(\frac{M_o}{M_{yopb}} \right)^2 \quad (8)$$

$$g_9 = 1 - \left| \frac{P}{P_y} \right| - \frac{2}{\pi} \arcsin \sqrt{\left(\frac{M_i}{M_{yipb}} \right)^2 + \left(\frac{M_o}{M_{yopb}} \right)^2} \quad (9)$$

ここに、 g ：限界状態関数、 σ_y ：鋼材降伏強度、 A ：断面積、 Z ：断面係数、 N ：軸力、 M ：曲げモーメント、 a ：長柱座屈に関する低減係数、 b ：局部座屈に関する低減係数、 σ_e ：オイラー座屈応力、 M_i ：ブレースの面内曲げモーメント、 M_o ：ブレースの面外曲げモーメント、 M_{yipb} ：面内抵抗曲げモーメント、 M_{yopb} ：面外抵抗曲げモーメント、 P_y ：軸耐力

FORMのアルゴリズム⁴⁾は、限界状態関数が強い非線形性を示す場合には誤差が大きくなるが、設計パラメータのうち、鋼材降伏強度、震度、接岸力、牽

引力に対して、限界状態関数はすべて線形応答を示すため適用可能である。水平地盤反力係数に対する限界状態関数の応答は図-4に示すように弱い非線形性を示すものの、FORMが十分に適用できる範囲であると考えられる。

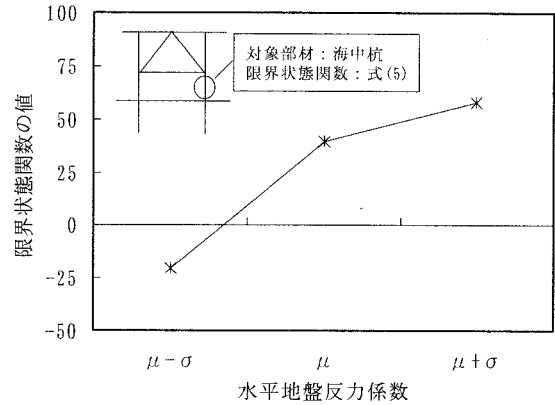


図-4 限界状態関数の応答曲面

4. 信頼性指標の評価

レベル1地震動作用時の信頼性解析結果を表-4に示す。ここで、強度が決定根拠とならない部材（例えば、トラス剛性確保のために配す水平ブレースなど）は除外した。具体的には、許容応力度法の設計で応力度比（発生応力度／許容応力度）が0.9以上の部材のみを抽出し、部材別の平均値を解析結果として示した。

表-4に示すように、耐震強化施設以外→耐震強化施設（標準）→耐震強化施設（特定）と施設の重要性が上がると部材毎の平均的な信頼性指標は大きくなっている。これは、直杭式横栈橋に関する検討結果²⁾と同様であり、対象施設ごとの震度の特性値に対する平均値の比が旧港湾基準における重要度係数の逆数により設定されていることに大きく依存する。

次に、今回の解析結果を直杭式横栈橋における既往の研究結果²⁾と比較する。図-5に耐震強化施設（特定）の信頼性指標をジャケット式栈橋の部材別に示す。ここで、図-5内の数値は部材別の平均値である。ジャケット式栈橋の信頼性指標は、直杭式横栈橋に比べばらつきが大きいだが、これは、直杭式横栈橋では、概ね陸側杭の杭頭降伏が支配的になるのに対して、ジャケット式栈橋では、様々な損傷イベントが存在するためである。部材別に信頼性指標をみると、ばらつきの程度は直杭式横栈橋とほとんど変わらないことから、本研究では、部材別に評価する。

図-5によると、ジャケット式栈橋の部材別の平均的な信頼性指標は、直杭式横栈橋と同程度となっているが、海中杭および下部土中杭でやや小さく、レグ（一般部）でやや大きい結果となった。

ジャケット式栈橋は、直杭式横栈橋に比べ杭の本数が少ないため、一本の杭が分担する水平力が相対

表-4 信頼性解析結果（レベル1地震動作用時）

対象施設	ケース	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	直横式 横杭式橋
耐震以外	1-1	2.73	3.50	-	2.21	3.17	-	2.19
	1-2	2.15	2.37	-	1.83	2.38	2.22	
	1-3	2.06	2.15	-	1.74	2.16	1.97	
	平均	2.31	2.67	-	1.93	2.52	2.06	
	1-4	3.43	3.55	-	2.82	3.42	3.45	
耐震強化（標準）	1-5	3.06	2.93	3.15	2.56	-	2.79	2.67
	1-6	2.69	2.68	-	2.51	3.10	2.33	
	1-7	3.37	3.62	-	2.90	3.41	3.17	
	1-8	3.10	2.97	3.04	2.71	3.19	2.66	
	1-9	2.90	2.68	-	2.53	2.86	2.19	
	1-10	3.28	3.73	-	2.89	-	3.13	
	1-11	2.71	2.84	-	2.82	2.96	2.57	
	1-12	2.69	2.69	2.86	2.57	2.84	2.14	
	1-13	3.12	2.86	-	2.63	3.43	3.15	
	1-14	2.75	2.63	2.85	2.47	3.18	2.55	
	1-15	2.49	2.58	2.66	2.33	2.90	2.34	
	1-16	2.85	2.90	3.07	2.81	3.26	2.94	
	1-17	2.53	2.63	2.85	2.50	3.14	2.45	
	1-18	2.65	2.54	2.83	2.40	2.87	2.55	
	平均	2.91	2.88	2.88	2.63	3.10	2.66	
耐震強化（特定）	1-19	3.50	3.59	4.46	3.16	3.96	3.01	3.65
	1-20	3.36	3.48	4.11	2.98	3.90	2.92	
	1-21	3.53	3.49	4.33	3.05	4.08	3.19	
	1-22	3.59	3.69	-	3.35	3.87	2.94	
	1-23	3.49	3.59	4.29	3.04	3.88	3.12	
	1-24	3.34	3.55	4.08	2.97	3.76	2.86	
	1-25	3.79	3.85	4.58	3.32	4.04	3.31	
	1-26	3.71	3.69	4.10	3.15	3.88	2.93	
	1-27	3.62	3.72	-	3.21	3.98	3.46	
	1-28	3.77	4.10	3.73	3.17	4.08	3.12	
	1-29	3.70	3.87	4.15	3.35	4.11	3.08	
	1-30	3.62	3.53	3.74	3.04	3.75	2.74	
	平均	3.62	3.67	4.15	3.15	3.93	3.05	

注）直杭式横杭橋は既往の研究結果による参考値

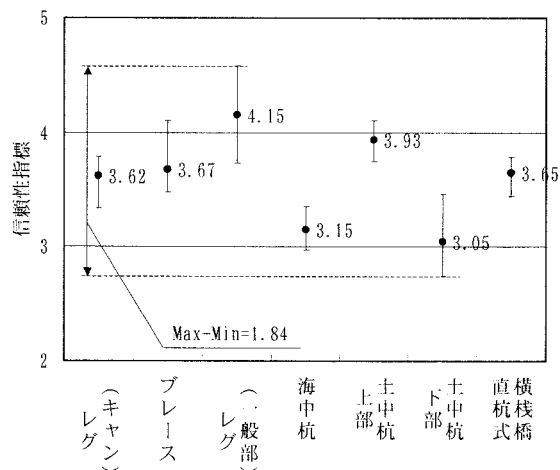


図-5 部材別の信頼性指標（耐震強化施設（特定））

的に大きい。このため、図-6に示すように、直杭式横杭橋に比べて海中杭および下部土中杭の水平地盤反力係数の感度係数が大きく、信頼性指標が小さくなったと考えられる。なお、図-6によると、レグ（一般部）も同様に感度係数が大きいことがわかる。レグ（一般部）はレグ-杭の二重管構造であり、杭に比べて断面係数が大きいことから、低材質の鋼材を適用することが多い。つまり、レグ（一般部）は、応力度比が杭と同じでも、発生応力、許容応力ともに小さくなる。そのため、水平地盤反力係数の変動に

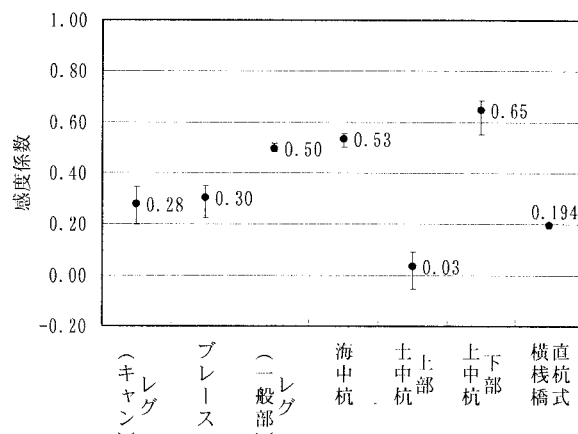


図-6 水平地盤反力係数に関する感度係数（耐震強化施設（特定））

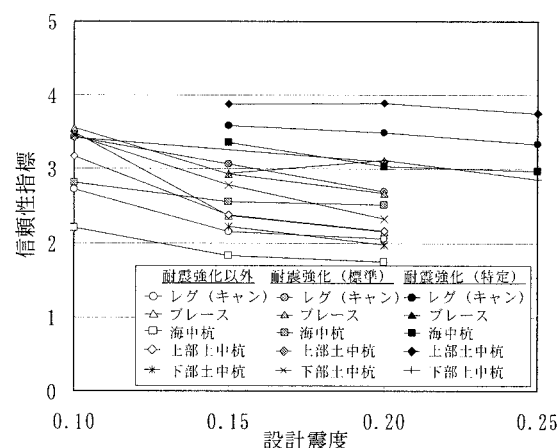


図-7 信頼性指標と設計震度の関係

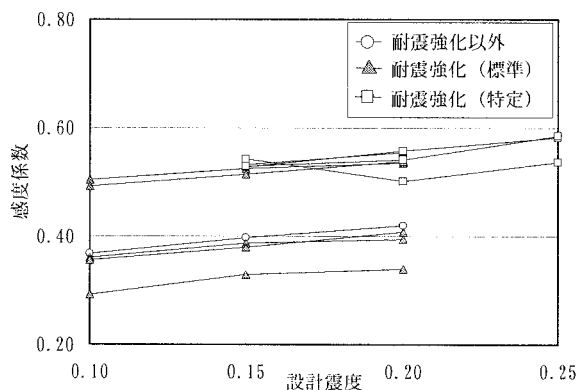


図-8 水平地盤反力係数に関する感度係数と設計震度の関係（海中杭）

よる応力変動幅が相対的に小さく、信頼性指標が大きくなったと考えられる。

ジャケット式栈橋における部材毎の設計震度と信頼性指標の関係を図-7に示す。直杭式横杭橋における検討²⁾では、許容応力度法による設計体系において、両者に負の相関があることが明らかにされているが、ジャケット式栈橋においても同様の相関があることがわかる。これは、震度増加に伴い栈橋の変

表-5 信頼性解析結果（船舶の接岸力・牽引力作用時）

ケース	信頼性指標							直横杭式 橋
	（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	土中杭 上中杭	
2-1	3.46	3.40	-	2.49	3.69	3.00		耐震強化施設 (2・3・9)
2-2	3.55	3.60	-	2.77	3.79	3.11		
2-3	3.71	3.52	-	2.71	3.39	3.22		
2-4	3.71	3.19	-	2.74	2.96	3.27		
2-5	2.65	3.19	-	3.12	3.69	3.90		
2-6	3.71	3.30	-	3.08	3.73	3.65		
2-7	2.36	3.03	2.99	2.39	2.99	2.62		
2-8	2.41	3.20	3.18	2.41	3.24	2.82		
2-9	2.66	3.30	-	2.65	3.47	3.03		
2-10	2.52	3.27	-	2.75	3.18	2.96		
平均	3.11	3.29	3.05	2.67	3.41	3.12		

注) 直杭式横杭橋は既往の研究結果による参考値

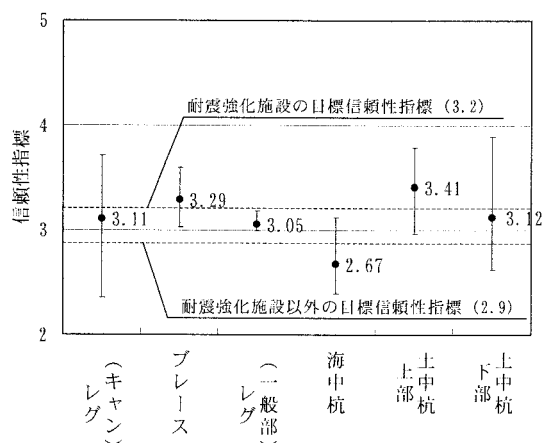


図-9 部材別の信頼性指標（船舶の接岸力・牽引力作用時）

形量が増加し、水平地盤反力係数の影響度が高まるためである。図-8 に海中杭における設計震度と水平地盤反力係数に関する感度係数の関係を示す。

船舶の接岸力・牽引力作用時の信頼性解析結果を表-5 および図-9 に示す。部材ごとに保有する平均的な信頼性指標の値の大小関係は、レベル1地震動作用時とほぼ同様である。港湾基準において、直杭式横杭橋の船舶の接岸・牽引に対する標準的な目標信頼性指標は、ライフサイクルコストを考慮した検討¹³⁾に基づき、耐震強化施設およびそれ以外について、それぞれ3.2および2.9とされている。許容応力度法体系において設計されたジャケット式栈橋の各部材の信頼性指標は、この目標値とほぼ同等の値を有していることがわかった。

5. 結論

本研究では、ジャケット式栈橋の信頼性設計法を確立するための基礎研究として、既往の設計法（許容応力度法）により設計されるジャケット式栈橋の部材別の信頼性指標を評価した。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ジャケット式栈橋における限界状態関数(使用限界状態)を設定し、骨組み解析プログラムにFORMの

アルゴリズムを組み込むことで、ジャケット式栈橋が保有する信頼性指標を評価した。

②ジャケット式栈橋の下部構造の部材および杭が保有する信頼性指標は、直杭式横杭橋と比較するとばらつきが大きい。これは、直杭式横杭橋では、陸側の杭の杭頭降伏が支配的となることが多いのに対して、ジャケット式栈橋では、損傷イベントとして様々なケースが存在することが原因である。

③レベル1地震動作用時に対する部材別の平均的な信頼性指標は、レグ(キャン)、ブレースおよび上部土中杭に比べ、海中杭、下部土中杭において小さな値となっている。また、直杭式横杭橋と比較しても、海中杭、下部土中杭の平均的な信頼性指標は小さな値となっている。海中杭と下部土中杭においては、直杭式横杭橋やジャケット式栈橋のその他の部材に比べ、水平地盤反力係数の影響度合いが高いことが主な要因である。

④船舶の接岸力・牽引力作用時に対する部材別の平均的な信頼性指標の値の大小関係は、レベル1地震動作用時とほぼ同様である。また、港湾基準に示される直杭式横杭橋の標準的な目標信頼性指標と同程度の信頼性指標を有していることがわかった。

今後は、係留施設以外の構造や、より大水深の施設などの信頼性指標の評価が望まれる。

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) 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
- 3) 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，1999
- 4) Rackwitz, R. and Fiessler, B.: Structural Reliability under Combined Random Load Sequences, Computers & Structures, Vol. 9, pp.489~494, 1978
- 5) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART-A 一般構造物，土木学会，1997
- 6) 土木学会：鋼構造物設計指針 A 一般構造物，土木学会，1987
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書，土木学会，2007
- 8) 奈良 敬，中村聖三，安波博通，川端文丸，塩飽豊明：橋梁向け構造用鋼板の板厚および強度に関する統計調査，土木学会論文集，N0.752，I-66，pp.299-310，2004
- 9) 長尾毅，佐貫哲朗，尾崎竜三：防舷材反力の確率分布に関する研究，海洋開発論文集，第20巻，pp.209-214
- 10) 土木学会鋼構造委員会：鋼構造シリーズ(6) 鋼構造物の終局強度と設計，土木学会，1994
- 11) 福田功，柳生忠彦：係船柱にかかるけん引力について，港湾技研資料，No.427，1982
- 12) 沿岸開発技術研究センター：ジャケット工法技術マニュアル，沿岸開発技術研究センター，2000
- 13) 長尾毅，柴崎隆一，尾崎竜三：経済損失を考慮した期待総費用最小化のための岸壁の常時のレベル1信頼性設計法，構造工学論文集，Vol.51A，2005