

ジャケット式栈橋の部分係数に関する研究

石原慎太郎*・松井 創**・長尾 毅***・千葉 仁****

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (財) 沿岸技術研究センター 審議役

*** 国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室 室長

**** 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 前任建設管理官

平成 19 年に改正された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」^{1) 2)}では、信頼性設計法³⁾が導入され、代表的な構造形式の防波堤や係留施設についてはレベル 1 信頼性設計法で用いる「部分係数」が設定されている。しかし、大水深係留施設の有力な構造形式であるジャケット式栈橋には「部分係数」が示されていない。本報告は、ジャケット式栈橋の部分係数算出について検討した概要について述べるものである。

キーワード：ジャケット式栈橋、部分係数、信頼性設計法、大水深係留施設、耐震強化岸壁、

1. はじめに

平成 19 年に改正された、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（以下「技術基準」という）」^{1) 2)}では、性能設計体系及び信頼性設計法³⁾が導入された。係留施設では、重力式、直杭式横栈橋、斜め組杭式横栈橋、矢板式係船岸（控え直杭式、控え組杭式）については、レベル 1 信頼性設計法で用いる「部分係数」が設定されている。しかし、大水深係留施設の有力な構造形式であるジャケット式栈橋については「部分係数」が示されていない。また、ジャケットと他の構造形式を比較検討するためには、同様の手法で行う必要があり、部分係数の設定は急務であった。

本報告では、ジャケット式栈橋の信頼性設計法を確立するため、部分係数算出について検討した概要を述べる。

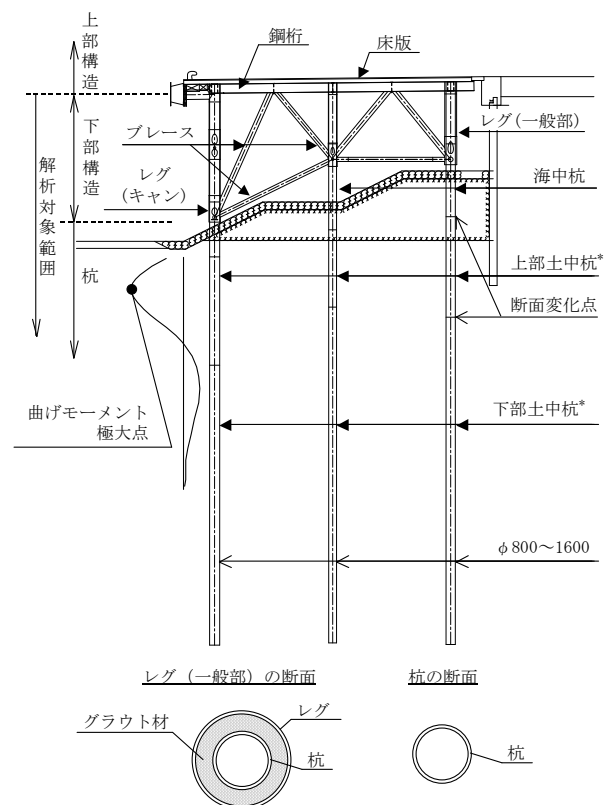
2. レベル 1 信頼性設計法の検討方法

ジャケット式栈橋は、高い水平剛性と耐震性に優れた点が評価され、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。

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⁴⁾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が、後者は部材補修箇所の推定や補修費用の算出が困難なことから、本研究では比較的簡便な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、許容応力度法⁵⁾により設計されたジャケット式栈橋の信頼性解析結果^{6) 7)}と、直杭式横栈橋の既往の研究結果⁸⁾に基づいて、目標信頼性指標の設定を行っ

た。次に、部位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

3. 目標信頼性指標

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、その隙間にグラウト材（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。

検討断面を設計する際の設計条件は、過去の実績等より、表-1 に示すように設定した。

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^{6) 7)}を表-2 に示す。ここで直杭式横栈橋の値は既往の研究⁸⁾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⁹⁾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^{6) 7)}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。

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。

表-1 信頼性指標の検討概要

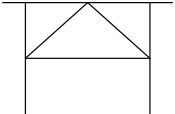
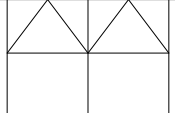
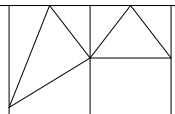
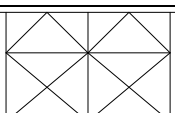
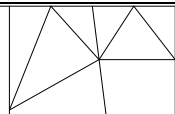
タイプ	対象施設	ケース数		水深 (m)	クレーン	上載荷重 (kN/m ²)		骨組みモデル
		地震動	接岸・牽引			地震動	接岸・牽引	
1 段直杭式	耐震強化以外	3	1	7.5	無	15	30	
	耐震強化（標準）	9	3	10	無	15	30	
		6	2	12	有	5	10	
		6	2	16	有	5	10	
2 段式	耐震強化（特定）	3	1	16	有	5	10	
斜杭式		3	1	16	有	5	10	

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)	ブレース	(一般部)	海中杭	土中杭上部	土中杭下部	平均値	直杭式横栈橋
耐震強化以外	2.31	2.67	-	1.93	2.52	2.06	2.31	2.19
耐震強化（標準）	2.91	2.88	2.88	2.63	3.10	2.66	2.83	2.67
耐震強化（特定）	3.62	3.67	4.15	3.15	3.93	3.05	3.54	3.65

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

(キャン)	信頼性指標						
	ブレース	(一般部)	海中杭	土中杭上部	土中杭下部	平均値	直杭式横栈橋
3.11	3.29	3.05	2.67	3.41	3.12	3.12	3.2or2.9

注) 直杭式横栈橋は既往の研究結果による参考値

4. ジャケット式栈橋の性能照査

4.1 ジャケット式栈橋の性能照査フロー

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。

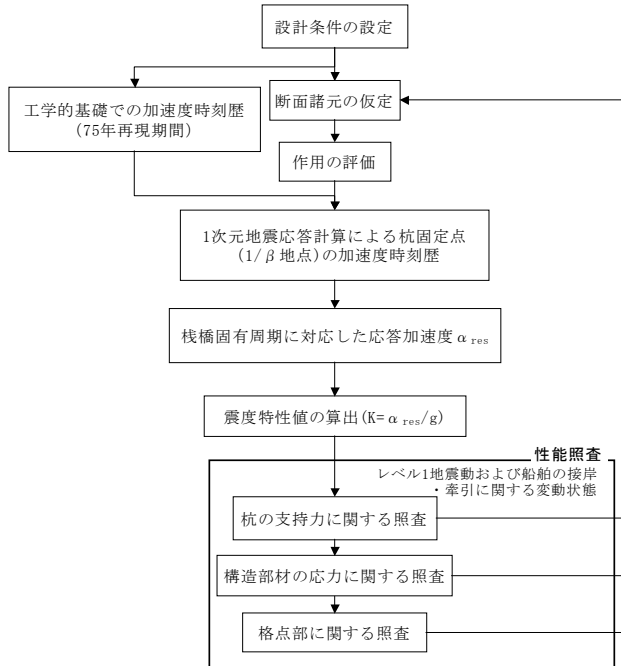


図-2 性能照査フロー

4.2 部分係数の設定と試設計による妥当性の検討

別途実施した信頼性解析の結果をもとに、構造部材としての機能および感度係数の類似した部位をグルーピングして表-3に示す部分係数を設定した。また、本研究では、鋼材降伏強度に乘じる部分係数が1以上となることから、設計者に混乱を与えることを回避する観点から、鋼材降伏強度に対する部分係数を1とし、骨組み解析等により算定される断面力を表-4に示す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。

次に、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。また、図-4に各部位別の部分係数の一例を示す。

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-5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。

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	目標信頼指標	感度係数*				部分係数*			
			A	B	C	D	A	B	C	D
耐震以外	鋼材降伏強度	2.19	0.46	0.45	0.58	0.48	1.00	1.00	1.00	1.00
	震度		-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	2.67	0.46	0.45	0.58	0.48	1.00	1.00	1.00	1.00
	震度		-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	3.65	0.42	0.47	0.62	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00
	震度		-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

*: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	目標信頼指標	感度係数*				部分係数*			
			A	B	C	D	A	B	C	D
耐震以外	鋼材降伏強度	2.9	0.65	0.60	0.80	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00
	水平力		-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
耐震強化	鋼材降伏強度	3.2	0.65	0.60	0.80	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00
	水平力		-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

*: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

*: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

*: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

部分係数を
表-3 と同じ
値に修正頂
きたく、お願
いします。

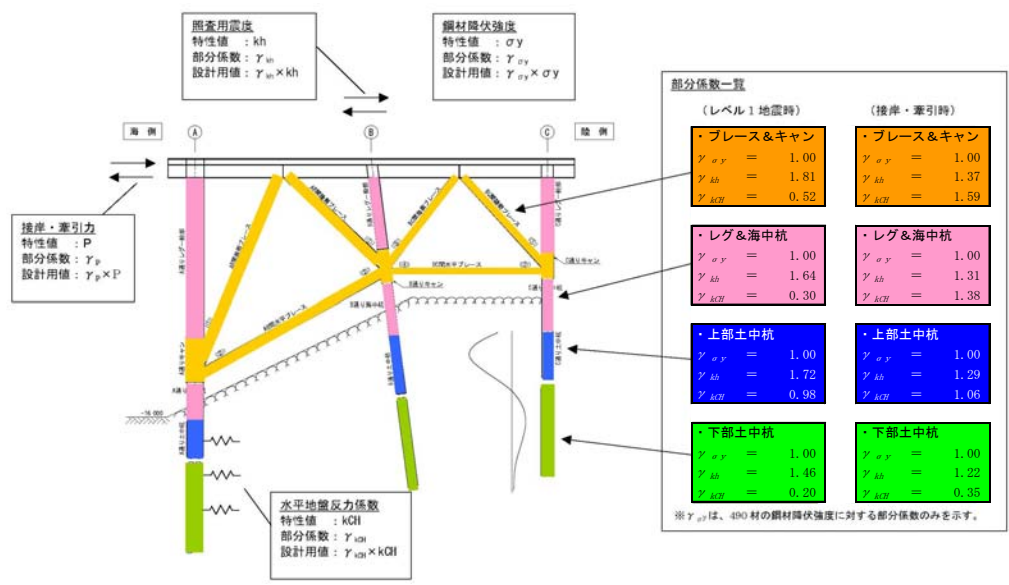


図-4 各部位別の部分係数 (耐震強化岸壁 (特定))

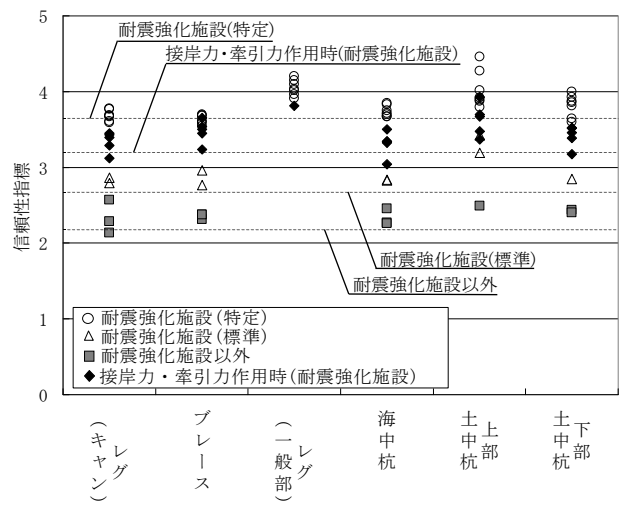


図-5 試設計結果

5. 結論

本検討では、ジャケット式栈橋のレベル1地震動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。得られた主要な結論は以下の通りである。

- ①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、直杭式横栈橋と比較しても、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。
- ②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。
- ③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。

④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。

6. おわりに

スーパー中枢港湾の整備を始めとして、今後とも大水深岸壁の需要は増えると考えられる。本研究で示したジャケット式栈橋の部分係数を実際の設計に適用し実用性等を検証していきたい。

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、平成19年。
- 2) 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、平成11年。
- 3) 星野勝+石井清=共著，鹿島出版会：構造物の信頼性設計法
- 4) 財団法人 沿岸技術研究センター，港湾構造物設計事例集 (平成19年 改訂版)，平成19年3月
- 5) 財団法人 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，平成12年1月
- 6) 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，pp.477-482，2008。
- 7) 浅野隆司，中村直志，長尾毅，渡部昌治，石原慎太郎：ジャケット式栈橋のレベル1信頼性設計法，海洋開発論文集，第24巻，pp.471-476，2008。
- 8) 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
- 9) 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