

棧橋式係船岸のレベル1地震動に対する 信頼性設計法

Reliability-based design method for pile-supported wharves against the level-one earthquake ground motion

長尾 毅*, 菊池喜昭**, 藤田宗久***, 鈴木 誠****, 佐貫哲朗*****

Takashi Nagao, Yoshiaki Kikuchi, Munehisa Fujita, Makoto Suzuki and Tetsuro Sanuki

*工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

**工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

***工博 清水建設 土木技術本部 (〒105-8007 港区芝浦 1-2-3)

****工博 清水建設 技術研究所 (〒135-8530 江東区越中島 3-4-17)

*****復建調査設計 水工技術部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)

This paper aims at establishing the level-one reliability-based design method for pile-supported wharves. Probability distributions of design parameters such as seismic coefficient are evaluated based on the statistical data analyses. Reliability indices are evaluated for the serviceability limit state and the restorability limit state against the level-one earthquake ground motion. Finally, partial factors are proposed in accordance with the importance of the wharves.

Key Words: reliability-based design, partial factor, probability distribution, pile-supported wharf

キーワード: 信頼性設計法, 部分係数, 確率分布, 棧橋式係船岸

1. はじめに

港湾構造物のレベル1地震動に対する耐震設計は、日本全国を5つのブロックに分割してブロックごとに設定された地域別震度をもとに耐震性の照査が行われる¹⁾。この地域別震度は、地震ハザード解析結果をもとに設定されているが、構造物の建設される地点に固有の地震動ではなく、ブロック全体の代表的な地震動強さとなっている。これに対して、土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会が策定した土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)²⁾においては、「地震動強度は、震源特性、伝播経路特性、対象地点周辺の地盤特性に依存するとともに、構造物の地震応答は入力地震動の振幅の大小だけではなく周期成分にも依存するため、設計入力地震動はこれら諸特性を適切に反映したものであることが望ましい」としている。このことから、今後の港湾構造物の耐震設計において用いるレベル1地震動は、従来のブロック毎の地域別震度ではなく、ガイドラインの趣旨に従った確率論的地震ハザード解析による対象港湾毎の工学的基盤における時刻歴波形として設定することとしている³⁾。

また、構造物の設計法が性能設計体系へ移行する流れを踏まえて、土木構造物の性能設計に関する取り組みが本格化しつつある⁴⁾。性能設計の体系において想定される照査方法としては、構造物が限界状態を越える可能性を確率的に制御する信頼性設計法があげられる。信頼性設計法には様々なレベルがあり、設計者の判断によりレベル2以上の信頼性設計法を用いることは何ら問題がないものの、基準類に示す手法としては、ISO2394(構造物の信頼性に関する一般原則)の付属書にも位置付けられたレベル1信頼性設計法(部分係数法)が標準的となることが想定される。

このため本研究においては、時刻歴波形として与えられるレベル1地震動に対する棧橋のレベル1信頼性設計法(部分係数法)について検討した。検討にあたり、まず震度、水平地盤反力係数、鋼材降伏強度の確率分布を設定した。次に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を実施し、これをもとに構造物の重要度毎に目標信頼性指標を定めた。更に、構造物の重要度毎に部分係数を設定して部分係数法により試設計を行い、部分係数の妥当性を確認した。先行する研究事例⁵⁾では

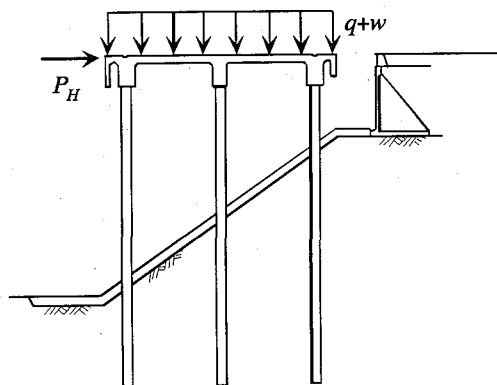


図-1 栈橋式係船岸

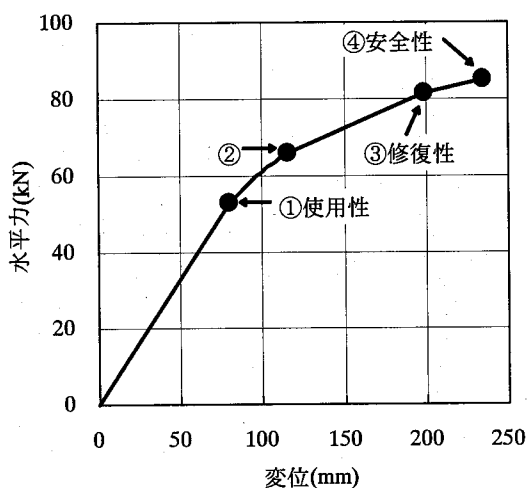


図-2 荷重-変位関係の例

作用震度を確定的に扱っているが、後に示すように栈橋の震度算出には無視し得ない不確定要素が存在する。基準類への適用を考えると、作用のばらつきを考慮した信頼性指標を評価しておくことは重要であると考えられるため、本研究では震度のばらつきを考慮している。

2. 栈橋のレベル1地震動に対する性能照査体系

栈橋式係船岸は図-1に示すように海側へ複数の杭を打設してこの上部を上部工で結合した構造である。荷重変位関係は一般に図-2のようになり、①1つの杭の杭頭降伏、②全杭頭降伏、③1つの杭の地中部降伏、④全杭頭および地中部塑性化という順序で破壊が進行する。ここで、①が使用性に関する限界状態、③が修復性に関する限界状態、④が安全性に関する限界状態と定義できる。なお、③を修復限界状態とするのは、地中部の修復が極めて困難であることによる。

次期港湾基準においては、レベル1地震動は再現期間75年の変動荷重として定義し、これに対しては使用性を求めることとしている⁹⁾。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

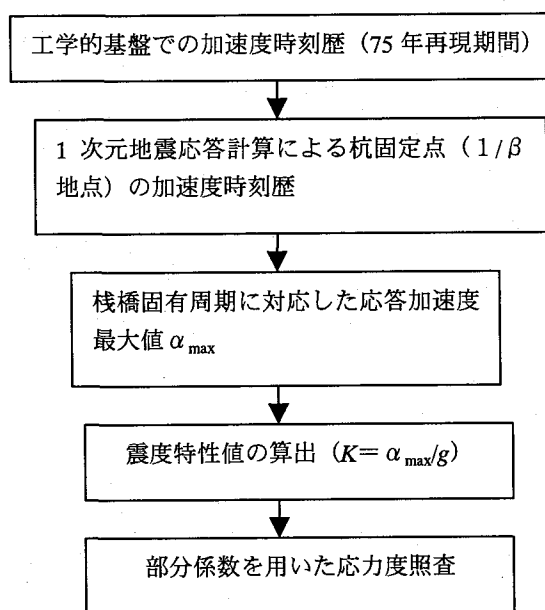


図-3 レベル1地震動に対する耐震性能照査フロー

続使用可能な状態に保つことを意味する。このため、栈橋に求められる応答としては上記①が生じない範囲ということになり、杭頭降伏の確率を制御対象とすることとなる。また、レベル1地震動は上述のように港湾毎に工学的基盤における時刻歴波形として与えられるため、地震応答計算によって震度を算出することとなる。図-3には次期港湾基準において想定されるレベル1地震動に対する耐震性能照査フローを示す。

3. 設計パラメータの従う確率分布

3.1 震度

栈橋の震度算出法は図-3に示したとおりであるが、ばらつきが発生する要因としては、①地震応答解析における地盤のS波速度の推定誤差、②栈橋固有周期の推定誤差、③スペクトル応答加速度算出時の減衰定数の誤差等が大きな要因として考えられる。このため、これら要因を分析して栈橋の震度の推定精度を検討する。

まず地盤のS波速度推定誤差について検討する。設計時に速度検層が実施されている事例は皆無であり、通常はN値などからS波速度を算出することになる。Imai⁷⁾はN値とS波速度のばらつきを地盤種別毎に示している。本研究ではこのデータを読み取ってS波速度推定誤差を検討した。例えば沖積砂質土についての精度は図-4に示すとおりとなった。水平軸はN値によるS波速度換算値と実測値の比である。比の平均値は1.12、標準偏差は0.29と非常にばらつきが大きい。沖積粘性土については比の平均値0.95、標準偏差0.32であった。確率分布としては何れも対数正規分布に従うとみなせることがわかった。

次にこのS波速度推定のばらつきが地震応答解析結果にどのような影響を及ぼすかについて検討した。検討対

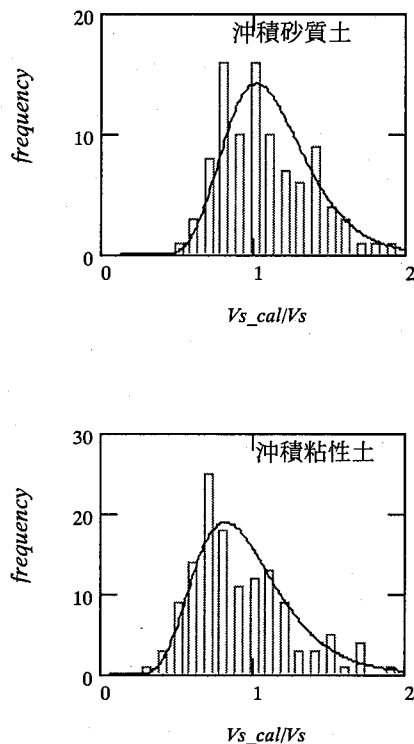


図-4 S波速度推定精度

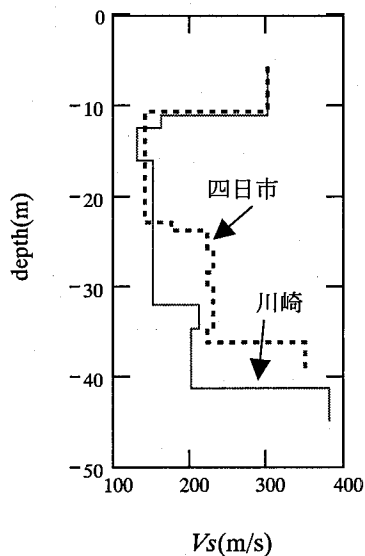


図-5 川崎、四日市港のS波速度構造

表-1 検討ケース

	層1	層2	層3
case1	μ	μ	μ
case2	$\mu + \sigma$	$\mu + \sigma$	$\mu + \sigma$
case3	$\mu - \sigma$	$\mu - \sigma$	$\mu - \sigma$
case4	μ	$\mu + \sigma$	$\mu + \sigma$
case5	$\mu - \sigma$	$\mu - \sigma$	μ
case6	μ	μ	$\mu + \sigma$
case7	$\mu - \sigma$	μ	μ

注：層1～3は各地盤モデルで層厚の厚い層で、
上から順に層1,2,3

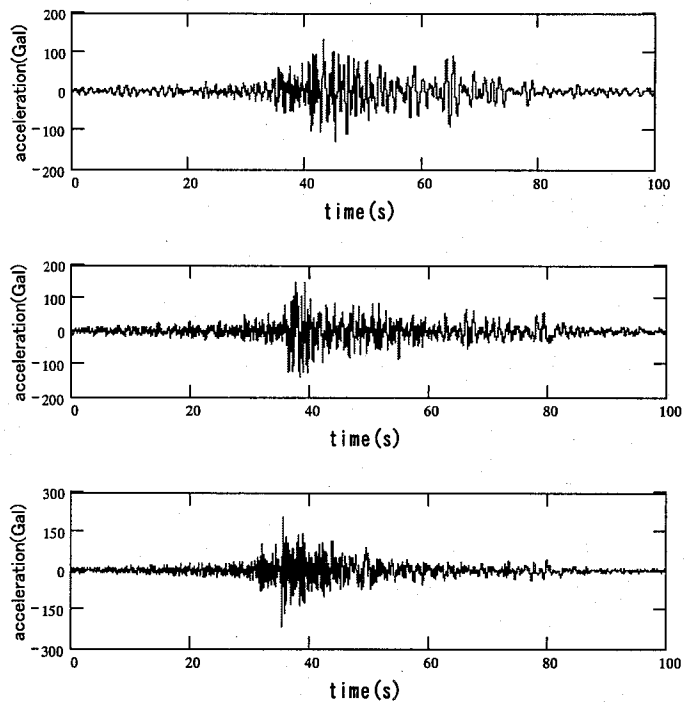


図-6 検討対象地震波形

象地盤は栈橋建設地点の中から図-5に示す川崎及び四日市の2港における地盤とした。設計時に N 値から換算したS波速度を用いる場合を想定し、各地盤モデルにおける層厚の厚い3層について、表-1に示すように平均 $\mu \pm 1\sigma$ (σ :標準偏差)のS波速度を設定した。ばらつきの上限を求める観点から各層における空間相関は考慮していない。設定した各ケースについて1次元の地震応答計算をコードDyneq⁸⁾により実施した。地盤の非線形特性は通常港湾構造物において用いられるもの⁹⁾を使用した。入力地震動は確率論的地震ハザード解析³⁾により得られた港湾毎の波形から、周波数特性などを考慮して代表的な3種類の波形(図-6)を用い、最大振幅を1倍および2倍とした計算を行った。地震応答計算から栈橋固定点における加速度時刻歴を算出し、スペクトル応答加速度を算出した。ここで、固定点は図-9に示す仮想地盤表面より $1/\beta$ 下方の位置で、 $\beta = \{k_h D / (4EI)\}^{1/4}$ (cm^{-1})により算出される¹⁾。なお、 k_h :水平地盤反力係数(N/cm^3)、 D :杭直径(cm)、 EI :杭曲げ剛性($\text{N} \cdot \text{cm}^2$)である。栈橋の固有周期は実績¹⁰⁾をもとに0.5sとした。減衰定数は、地盤がⅢ種地盤と見なせることから港湾基準¹⁾より0.3とした。以上の検討により得られた栈橋上部工の加速度最大値 $\alpha_{\max}$ について、そのばらつきを評価した。ばらつきの評価においては、本研究においては便宜的に、対数正規分布の確率密度を考慮してケースごとに重み付けを行って頻度分布を作成した。その際、case1のすべてが平均値の場合を基準値とした。検討の結果、図-7に示すように基準値($\overline{\alpha_{\max}}$)に対する $\alpha_{\max}$ の比の分布は、平均1.0、標準偏差0.1となった。S波速度の推定精度ほどのばらつきが生じなかった原因としては、複数の層において過大

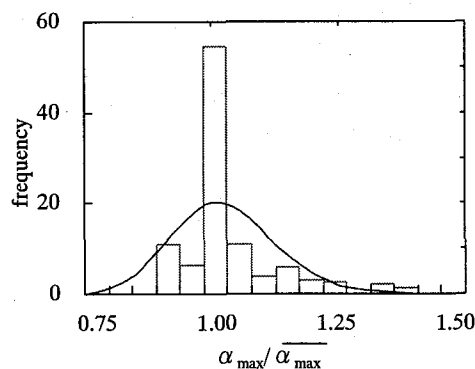


図-7 S波速度推定誤差が $\alpha_{\max}$ に与える影響

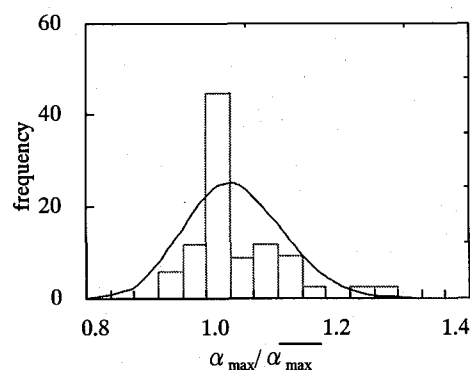


図-8 固有周期の推定誤差の影響

な見積もりと過小な見積もりが混在したことによる相殺の影響や、地盤の非線形の影響により収束地盤剛性の誤差が初期地盤剛性の誤差と比較して相対的に小さくなったことなどが原因と考えられる。なお、本研究では3波形のみの結果から確率分布を検討している。このため得られた標準偏差等には誤差が存在する可能性があるが、この精度の確認は今後の課題としたい。

このほか、固有周期のばらつき、減衰定数のばらつきを評価した検討も実施した。固有周期のばらつきについては、強震観測記録¹¹⁾や微動観測¹²⁾をもとにした測定値と計算値の誤差より推定した。S波速度の推定誤差の影響の検討と同様に、固有周期を平均、平均 $\pm 1\sigma$ とした応答加速度をもとにばらつきを評価した。また、減衰定数の影響については横田ら¹⁰⁾の研究事例をもとにばらつきを評価し、同様にしてその影響を検討した。固有周期のばらつきの影響としては、図-8に示すように基準値に対する比は平均1.03、標準偏差0.08、減衰定数のばらつきの影響は比の平均値0.93、標準偏差0.14となった。

以上の3要素の確率分布が全て対数正規分布と仮定すると、3要素の積で表現される震度の確率分布も対数正規分布とみなせ、最終的に栈橋上部工の震度の確率分布は平均値と特性値の比が1.0、変動係数は変動係数0.2の対数正規分布とみなせる。ここで、平均値は各要素の平均値の積、変動係数は各要素の変動係数の自乗和平方根により得られる。

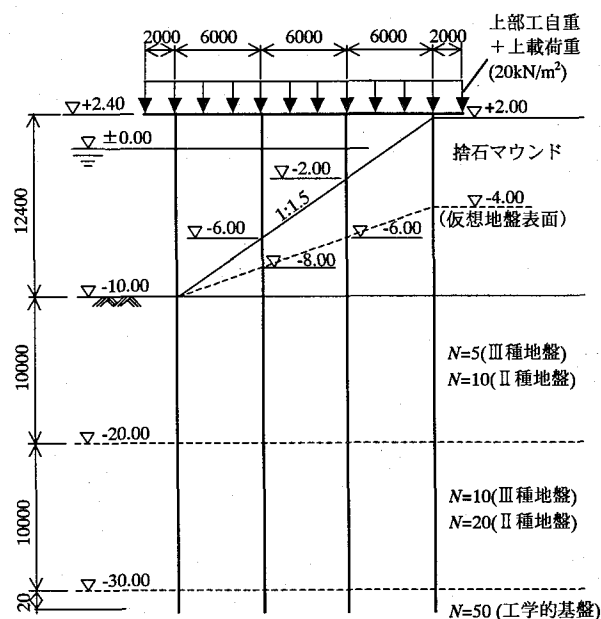


図-9 試設計断面（杭列4の場合）

3. 2 水平地盤反力係数

水平地盤反力係数は標準貫入試験 N 値との相関関係を用いて推定されることが一般的である。菊池ら¹³⁾によれば N 値の平均が4のとき推定誤差や予測誤差が一番小さく、変動係数が0.754で、 N 値が1のときは0.804、 N 値が20のときは0.817と N 値に応じて変化する結果が得られている。本研究では、この検討結果を用いて N 値に応じた水平地盤反力係数の変動係数を設定する。

3. 3 鋼材降伏強度

本研究では鋼管杭は全て栈橋で用いられることの多いSKK400とする。鋼管杭の降伏強度の確率分布は、鉄鋼メーカーが実施した引張試験結果の統計値¹⁴⁾からSS400の平均値と変動係数を用い、それぞれ296(N/mm²)および0.08の正規分布とした。なお、特性値は保証降伏点強度235(N/mm²)とし、平均値と特性値の比は1.26となる。

4. 目標信頼性指標

4. 1 検討断面の設定

信頼性設計法の検討にあたり、目標とする信頼性指標は許容応力度法により設計された栈橋の信頼性指標の平均値とする。このためまず代表的な設計条件を対象に許容応力度法による試設計を行った。図-9に示すように原地盤をⅡ種およびⅢ種地盤とし、地盤の N 値を設定した。なお、臨海部ではⅠ種地盤が現れることはほとんどないが、その場合も構造形式として栈橋が採用されることは皆無であるためⅠ種地盤は検討対象外としている。水深は-7.5m (B級)、-10m (A級)、-12m (A級)、-15m (特定)の範囲とした。括弧内の表記は栈橋の重要度である。検討ケース数は後に表-3として示すように30ケース

ースを設定した。ここで、設計震度は地域別震度 (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るため、重要度毎に後に表-3 として示すとおり設計震度を設定している。

4. 2 信頼性指標の評価

レベル 1 地震動に対する鋼管杭の曲げ降伏に関して、使用限界状態と修復限界状態を設定し、信頼性評価を行った。前述のように、新基準においてはレベル 1 地震動に対する性能は使用限界状態により規定されるが、使用限界状態と修復限界状態のそれぞれについて栈橋の保有する信頼性指標の違いを把握しておくことは、栈橋の構造口バスト性確保の観点からも重要であると考えられる。

使用限界状態および修復限界状態では、縁部降伏する部位の着目点異なるが、限界状態関数は同一であり、次式で表される。

$$g = f_y - s_d(K, k_h) \geq 0 \quad (1)$$

ここで、

f_y : 鋼管杭の降伏強度

K : 震度

k_h : 水平地盤反力係数

s_d : 鋼管杭に発生する応力度 ($s_d = N/A \pm M/Z$)

信頼性解析に用いる確率変数の統計量と分布形は、3 章の検討に基づいて、表-2 のように設定した。ここで、許容応力度法体系における設計震度には上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いる。このため、作用としての震度の大きさは同一であっても、設計で用いる設計震度が重要度毎に異なるため、設計震度に対する震度の平均値は重要度毎に異なった値を持つ。本研究では、栈橋の重要度ごとの震度の平均値は、現行設計法の重要度係数 B 級の 1.0 を標準として、A 級および特定については重要度係数の逆数により設定している。また、従って、本研究で議論する信頼性指標は、許容応力度法の設計体系における重要度ごとの条件付信頼性指標である。

信頼性解析は骨組解析をもとに FORM (First Order Reliability Method) ¹⁵⁾ を用いて実施した。鋼管杭の $M-\phi$ 関係はバイリニアモデルとした。信頼性解析で得られた信頼性指標を表-3 に示す。

解析結果を見ると、B 級→A 級→特定と重要度が上がると、2 つの限界状態共に、信頼性指標が大きくなっている。特に修復限界状態に関する信頼性指標は、各重要度の平均値でそれぞれ 4.890, 5.155, 5.588 と大きな値となっており、十分安全性に余裕があることがわかる。また、それらの信頼性指標は、使用限界状態の値に比べれば、それぞれ 2.7, 2.5, 2.0 大きく、使用限界状態から修

復限界状態に至るまでの間に大きな安全性余裕があることがわかる。

また、設計条件と使用限界に対応する信頼性指標の相関性について検討すると、設計震度と信頼性指標の間に負の相関がある。両者の関係を、図-10 に設計震度以外の条件が同じケースの結果を線で結んで示した。いま、作用震度は平均的には設計震度と等しい状態を検討しているため、この原因は作用震度と設計震度の大小関係に起因するものではない。栈橋に対する作用震度が大きくなると、栈橋の杭の変形量が増加する。このために水平地盤反力係数の影響度合いが高まると考えられる。水平地盤反力係数はばらつきが非常に大きいために、作用震度が大きい状態では信頼性指標が低下するものと考えられる。なお、設計震度が大きい条件では杭の剛性が高いためにばね定数は大きくなり同一の荷重作用条件では変形が小さくなるが、設計震度相当の荷重作用条件下では図-11 に示すように設計震度が大きい方が変形量が多い。図-12 には設計震度と各確率変数の感度係数絶対値の関係を示す。設計震度が増加するほど水平地盤反力係数の感度係数が増加しており、限界状態関数に占める影響度合いが高まることわかる。なお、修復限界については必ずしも設計震度と信頼性指標が負の相関にあるわけではないが、これは鋼材の諸元などにより、修復限界対応の震度と設計震度の比や変形量などが一定ではないことが原因と考えられる。

表-3 の備考欄に○を付したケースは、許容応力度法によって設計した際に安全性の余裕が大きいケースである。これは鋼材規格の不連続性に起因する現象であるが、目標信頼性指標を設定するにあたり安全性の余裕の大きいケースを含めることは適切ではないと判断されるため、目標信頼性指標の計算には含めず、○を付した以外のケースの平均値を求め、これを目標信頼性指標とする。なお、表-3 においてケース 13, 19 などの信頼性指標が大きな条件が除外ケースに相当しない理由は、図-11, 図-12 における考察で検討したように、許容応力度法における安全性の余裕と信頼性指標の相関が必ずしも高くない場合があるためである。また、信頼性指標の平均値を目標値とした理由は、使用限界状態と比較して修復限界状態の信頼性指標が十分に高く、構造口バスト性が高いため、安全側の最小値を取る必要はないと判断したためである。

5. レベル 1 信頼性設計法の検討

5. 1 部分係数の設定

設計照査式として式(2)を想定する。

$$g = R(\gamma_m \cdot f_k) - S(\gamma_f \cdot F_k) \quad (2)$$

ここで、 R は抵抗関数、 S は荷重効果関数を表し、

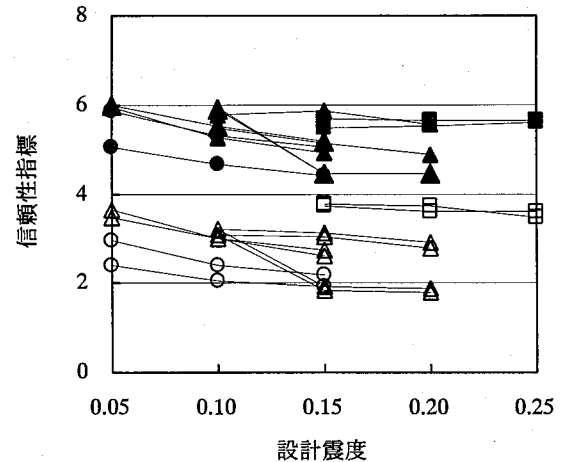
表-2 確率分布

確率変数	平均値	特性値	変動係数	分布形
鋼材降伏強度(SKK400)	296	235	0.08	正規
水平地盤反力係数	2000N	1500N	0.76 (N=5) 0.77 (N=10)	対数正規
震度(B級)	1.000	平均値	0.20	対数正規
震度(A級)	0.833	平均値	0.20	対数正規
震度(特定)	0.667	平均値	0.20	対数正規

注：鋼材降伏強度は N/mm^2 ，水平地盤反力係数は kN/m^3

表-3 信頼性解析結果

重要度	case	水深	杭列数	地盤種別	設計震度	信頼性指標		備考		
						使用限界状態	修復限界状態			
B級	1	-7.5m	3	Ⅲ	0.05	2.959	5.845	○		
	2				0.10	2.396	5.295			
	3				0.15	2.201	5.053			
	4			Ⅱ	0.05	2.380	5.030			
	5				0.10	2.050	4.648			
	6				0.15	1.940	4.425			
	平均値					2.193	4.890			
A級	7	-10m	3	Ⅲ	0.05	3.486	5.998	○		
	8				0.10	2.998	5.526			
	9				0.15	2.733	5.192			
	10			Ⅱ	0.05	3.623	5.933	○		
	11				0.10	2.996	5.266			
	12				0.15	2.623	4.930			
	13			-12m	4	Ⅲ	0.10	3.068	5.924	
	14						0.15	1.845	4.448	
	15						0.20	1.807	4.467	
	16					Ⅱ	0.10	3.197	5.955	○
	17						0.15	1.937	4.454	
	18						0.20	1.899	4.459	
	19	-12m	4	Ⅲ	0.10	3.216	5.755			
	20				0.15	3.123	5.872			
	21				0.20	2.924	5.556			
	22			Ⅱ	0.10	3.083	5.457			
	23				0.15	3.028	5.123			
	24				0.20	2.792	4.892			
平均値					2.671	5.155				
特定	25	-15m	5	Ⅲ	0.15	3.703	5.686			
	26				0.20	3.602	5.634			
	27				0.25	3.591	5.642			
	28			Ⅱ	0.15	3.786	5.474			
	29				0.20	3.742	5.502			
	30				0.25	3.444	5.592			
	平均値					3.645	5.588			



使用限界：○—B級 △—A級 □—特定
修復限界：●—B級 ▲—A級 ■—特定

図-10 設計震度と信頼性指標の関係

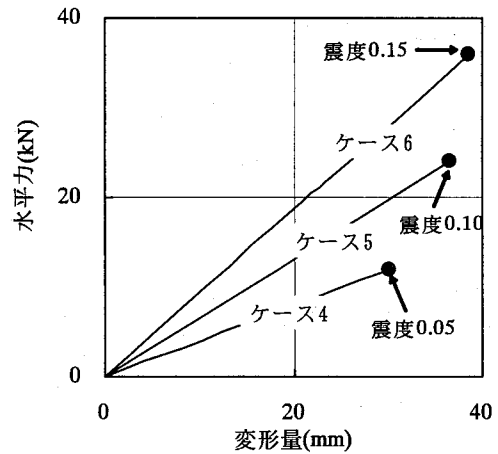
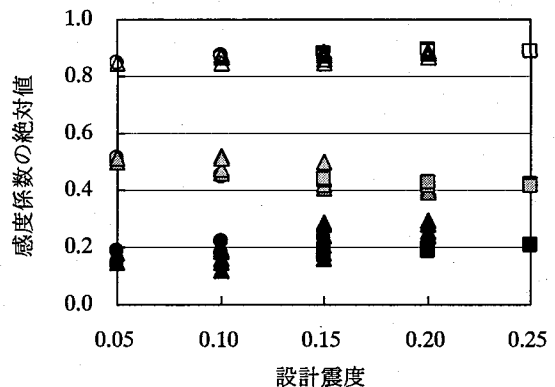


図-11 設計震度と栈橋変形量の関係



設計震度：○B級 △A級 □特定
水平地盤反力係数：●B級 ▲A級 ■特定
鋼材降伏強度：○B級 △A級 ■特定

図-12 設計震度と感度係数絶対値の関係

表-4 部分係数

重要度	確率変数	目標信頼性指標	感度係数	部分係数
B級	鋼材降伏強度 (SKK400)	2.193	0.455	1.00
	水平地盤反力係数		0.195	0.80
	震度		-0.869	1.23
A級	鋼材降伏強度 (SKK400)	2.671	0.443	1.00
	水平地盤反力係数		0.215	0.72
	震度		-0.870	1.36
特定	鋼材降伏強度 (SKK400)	3.645	0.423	1.00
	水平地盤反力係数		0.194	0.66
	震度		-0.885	1.68

f_k : 材料特性の特性値

γ_m : 材料係数

F_k : 荷重の特性値

γ_f : 荷重係数

信頼性解析で求められる設計点 (β point) に対応する材料特性の設計値を f_d , 荷重の設計値を F_d とすると, それぞれの部分係数は次式で算定できる.

$$\gamma_m = \frac{f_d}{f_k}, \quad \gamma_f = \frac{F_d}{F_k} \quad (3)$$

本検討で用いた確率変数の分布形は, 正規分布と対数正規分布であり, それぞれの分布形の場合の設計値 (f_d または F_d) は次のように算定できる.

a) 正規分布の場合

$$f_d(F_d) = \mu(1 - \alpha \cdot \beta_i \cdot V) \quad (4)$$

ここに,

$f_d(F_d)$: 設計値

μ : 確率変数の平均値

V : 確率変数の変動係数

α : 確率変数の感度係数

β_i : 目標信頼性指標

b) 対数正規分布の場合

$$f_d(F_d) = \exp(\lambda - \alpha \cdot \beta_i \cdot \xi) \quad (5)$$

ここに,

λ : 確率変数の自然対数の平均値

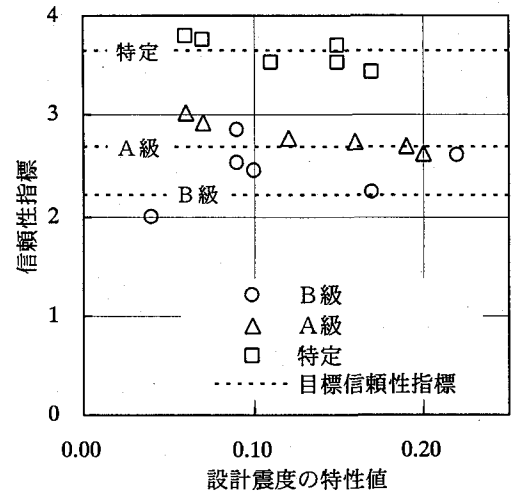


図-13 レベル1 信頼性設計の結果

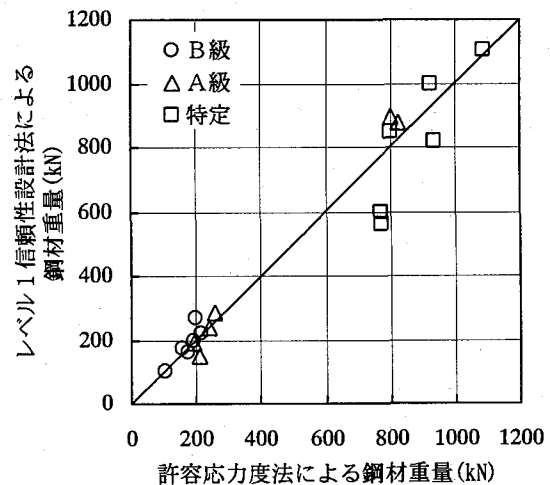


図-14 鋼材重量の比較

$$\lambda = \ln\left(\frac{\mu}{\sqrt{1+V^2}}\right) \quad (6)$$

ξ : 確率変数の自然対数の標準偏差

$$\xi = \sqrt{\ln(1+V^2)} \quad (7)$$

上述の式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, 本研究では鋼材降伏強度に対する部分係数を 1.0 とし, 震度に対する部分係数を鋼材降伏強度に対する係数で除した値とすることにより同等の結果が得られるように調整を行うこととする. なお, 水平地盤反力係数については, ばらつきは大きいものの感度係数は低いことから, 上述の式により得られる値をそのまま用いる. 以上により, 部分係数は表-4 のようになる.

5.2 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

以上の部分係数を用いて、各重要度についてそれぞれ6ケースを抽出して試設計を行い、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。ここで、震度については、現在想定しているレベル1地震動³⁾を用いて地震応答計算を行った結果をもとにした。具体的には、従来の地域別震度ブロック内の地点のレベル1地震動を用いて震度を地盤種別毎に算出し、この平均値を特性値とした。なお、本研究において考慮している震度のばらつきは、3.1で示したように75年再現期間の地震動が作用した条件に対する算出震度のばらつきであり、地震動そのもののばらつきではない。

試設計結果の栈橋が保有する信頼性指標（使用限界）を図-13に示す。重要度別に目標信頼性指標を概ね達成していることがわかる。また、許容応力度法において見られた設計震度の増加に伴う信頼性指標の低下という傾向も概ね回避されている。図-14には使用する鋼材重量を許容応力度法と比較した結果を示す。鋼材重量は平均的には概ね許容応力度法と一致しており、平均的な建設コストは同程度に保ちながら、目標とする信頼性指標を満足できることがわかる。

6. おわりに

本研究では、今後想定される港湾基準におけるレベル1地震動の設定変更に伴い、信頼性設計法によって耐震性能照査を行う方法について検討した。本研究により得られた主要な結論は以下のとおりである。

- ①栈橋の耐震性能照査に関係する確率変数である震度、水平地盤反力係数、鋼材降伏強度の確率分布について検討した。現状では地震応答計算にあたり地盤のS波速度をN値から換算することが一般的であり、換算式は大きなばらつきを有するが、栈橋の震度の変動係数としては他の要因を考慮しても0.20程度である。これに対して、水平地盤反力係数は0.76~0.77と非常に大きな変動係数である。ただし、感度係数は0.2以下であり、限界状態関数に占める影響度合いは他のパラメータより低い。
- ②許容応力度法による栈橋の保有する信頼性指標を、使用限界および修復限界のそれぞれについて求めた。修復限界に対する信頼性指標は使用限界に対する値と比較して2.0~2.7程度大きく、使用限界状態から修復限界状態に至るまでの間に大きな安全性余裕があることがわかった。また、許容応力度法による栈橋の保有信頼性指標は、使用限界については設計震度が大きいほど低下することがわかった。これは、作用震度が大きいほど水平地盤反力係数の影響が相対的に高くなることに対応している。
- ③信頼性設計法において用いる部分係数を設定し、試設計を行うことにより、平均的には従来と同程度の建設コストでありながら目標とする信頼性指標を満足する断面

を設計可能であることを確認した。

本研究のとりまとめにあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所・横田弘博士、鋼管杭協会・塩崎禎郎氏をはじめとする方々に貴重なご意見を賜りました。ここに感謝します。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局監修、日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、1999
- 2) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）－耐震基準作成のための手引き－、2001
- 3) 長尾 毅、山田雅行、野津 厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析、土木学会論文集、No.801、I-73、pp.141-158、2005
- 4) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本、2002
- 5) 安間 清・菊池喜昭・鈴木 誠・辻岡信也・吉浪康行：性能設計を考慮した直杭式横栈橋の部分係数法、第49回地盤工学シンポジウム平成16年度論文集、pp.149-156、2004
- 6) 長尾 毅、川名 太：港湾構造物の設計法の性能規定化について、第60回土木学会年次学術講演会、2005
- 7) Imai, T. : P and S wave velocities of the ground in Japan, *Proc. IXth ICSMFE*, 1977
- 8) 吉田 望、末富岩雄：DYNEQ：等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム、佐藤工業（株）技術研究所報、pp.61-70、1996
- 9) 運輸省港湾局監修：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）、沿岸開発技術研究センター、1996
- 10) 横田 弘、竹花直人、南 兼一郎、高橋邦夫、川端規之：鋼管杭式栈橋の地震応答解析に基づく設計水平震度の考察、港湾技術研究所報告、第37巻第2号、pp.75-130、1998
- 11) 長尾 毅、田代聡一：栈橋式岸壁の耐震性照査手法に関する解析的研究、土木学会論文集、No.710、I-60、pp.385-398、2002
- 12) 長尾 毅、岩田直樹、岡田達彦、上田 茂：栈橋式岸壁の船舶接岸時における変形に関する研究、海岸工学論文集、第50巻、pp.811-815、2003
- 13) 菊池喜昭、安間 清、鈴木 誠、辻岡信也、吉浪康行：N値から杭の水平地盤反力係数の統計的評価、土木学会第59回年次学術講演会、pp.843-844、2004
- 14) 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
- 15) Rackwitz, R. and Fiessler, B. : Structural Reliability under Combined Random Load Sequences, *Computers & Structures*, Vol. 9, pp.489-494, 1978

(2005.9.10 受付)