

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.379

March 2007

FORMとSORMによる信頼性指標の相互比較

宮脇周作・長尾 毅

Comparison of Reliability Indices Calculated by FORM and SORM

Shusaku MIYAWAKI and Takashi NAGAO

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 and Transport, Japan

FORMとSORMによる信頼性指標の相互比較

宮脇周作*・長尾 毅***

要 旨

FORM(First-Order Reliability Method)とSORM(Second-Order Reliability Method)はともに、近似的に破壊確率を算出する信頼性解析手法であるが、一般的には、取扱いが容易なFORMが用いられることが多い。しかしながら、性能関数の非線形性が強い場合には解析精度が低下する恐れがあるため、FORMの解析精度を向上させたSORM等の方法を用いることが望ましい場合がある。港湾施設においては、FORMを用いて防波堤の信頼性解析が実施されているが、性能関数が非線形であるため、解析精度が低下している可能性がある。そこで本研究では、一般的な防波堤形式であるケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の滑動破壊モードを対象として、FORM、SORM両手法により信頼性解析を実施して、信頼性指標の相互比較を行った。ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の滑動破壊モードを対象とした場合、FORMと、SORMによる信頼性指標の差は僅かであるが、性能関数の耐力項の変動係数が大きくなるようなケース、即ち設計潮位が高いケース、および大水深域のような設計波高が大きく、揚圧力、堤体幅が増加するケースにおいてはFORMの精度が低下する傾向が見られるため注意を要する。

キーワード：FORM, SORM, 信頼性指標, 防波堤, 滑動破壊

*港湾研究部港湾施設研究室交流研究員（株式会社日本港湾コンサルタント）
**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: miyawaki-s92y2@ysk.nilim.go.jp

Comparison of Reliability Indices Calculated by FORM and SORM

Shusaku MIYAWAKI*
Takashi NAGAO**

Synopsis

First-Order Reliability Method (FORM) and Second-Order Reliability Method (SORM) are the reliability analysis method for the calculation of reliability index. FORM is frequently used while SORM is not because FORM is easy to be implemented. Considering the accuracy, however, reliability index calculated by FORM might not be accurate enough in case the performance function is strongly nonlinear. Taking the performance function for the external stability of breakwaters as an example, although that of the sling failure mode is nonlinear, reliability indices was evaluated by FORM in the previous study.

In this study, taking the sliding failure of gravity-type breakwaters (two structural types: caisson-type composite breakwaters, breakwaters covered with wave-dissipating blocks) as the subject of research, we executed the reliability analysis by using FORM and SORM. From comparison of the reliability index obtained by FORM and SORM, it was made clear that the reliability index by FORM is accurate enough in general. However, in case that variation coefficient of bearing term of performance function is large the accuracy of the reliability index by FORM tends to descend.

Key Words: FORM, SORM, reliability index, breakwater, sliding failure

* Exchanging Researcher of Port Facilities Division, Port and Harbor Department
** Head of Port Facilities Division, Port and Harbor Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone: +81-46-844-5029 Fax: +81-46-844-5081 e-mail: miyawaki-s92y2@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 信頼性解析手法の概要	1
2.1 信頼性設計法の設計レベル	1
2.2 一次信頼性理論 (FORM)	2
2.3 二次信頼性理論 (SORM)	3
3. 検討方法	3
3.1 検討対象施設	3
3.2 性能関数	3
4. 検討結果	5
4.1 信頼性指標の比較	5
5. まとめ	8
謝辞	8
参考文献	8
付録A 検討対象施設の設計条件及び設計断面に対する信頼性指標, 破壊確率	9

1. はじめに

信頼性設計法では、目標破壊確率や目標信頼性指標を、構造物の安全性の評価基準として用いる。FORM(First-Order Reliability Method)とSORM(Second-Order Reliability Method)は、破壊確率を近似的に算出する信頼性解析手法であるが、一般的には、取扱いが容易なFORMが用いられることが多い。しかしながら、性能関数の非線形性が強い場合には解析精度が低下する恐れがあるため、FORMの解析精度を向上させたSORM等の方法を用いて解析を行うことが望ましい場合がある。港湾施設においては、FORMを用いて防波堤の信頼性解析が実施されている¹⁾が、外部安定のうち転倒モードを除いては性能関数が非線形であるため、解析精度が低下している可能性がある。そこで本研究では、一般的な防波堤形式であるケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の滑動破壊モードを対象として、FORM、SORM両手法により信頼性解析を実施して、解析結果の比較、検討を行う。

2. 信頼性解析手法の概要

2.1 信頼性設計法の設計レベル

信頼性設計法は構造物の破壊可能性、言い換えれば安全性を確率論に基づく手法によって制御する方法であり、その制御方法に応じて3つの設計水準がある(表-1)。

表-1 信頼性設計法の3つのレベル

レベル	安全性照査式	基準パラメータ
レベル3	$P_f \leq P_{fa}$	破壊確率
レベル2	$\beta \leq \beta_T$	信頼性指標
レベル1	$R_d \geq S_d$ $\Leftrightarrow \gamma_R R_k \geq \gamma_S S_k$	設計用値 部分係数

最も高位に属するレベル3設計法は、構造物の破壊確率 P_f によって安全性を制御する方法である。これは最も精緻な方法であるが、確率変数が多数である場合、その同時確率を解析的に算出するためには、高度な作業を必要とする。また、近年の計算機能力の向上に伴い、モンテカルロシミュレーションによって破壊確率を算出することが可能となり、その高速化に関して多数の研究がなされている(例えば、吉田ら²⁾)。この方法も広義にはレベル3設計法に属する。

レベル2設計法は、信頼性指標 β によって安全性を制御する方法である。信頼性指標(reliability index)は、図-1に示すように破壊領域と安全領域の境界点から平均値がどの程度離れているかを示す尺度であり、1次信頼

性理論(FORM)に基づき次式によって算出される³⁾。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \tag{1}$$

ここに、 Z :性能関数、 μ :平均値、 σ :標準偏差、 V :変動係数

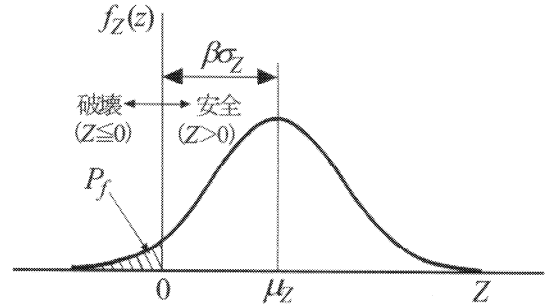


図-1 信頼性指標

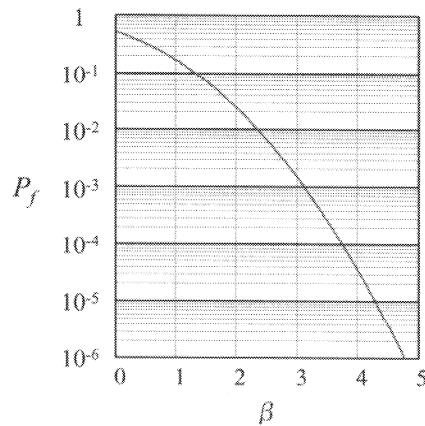


図-2 破壊確率と信頼性指標の関係

式(1)より明らかなように、信頼性指標 β を得るためには、性能関数 Z の標準偏差 σ_Z を求める必要があるが、設計因子(確率変数)が正規分布や対数正規分布以外の確率分布に従う場合や、性能関数が非線形である場合には、性能関数 Z としての確率分布が正規分布に従わないため、 σ_Z を得ることはできない。したがって、FORMでは以下に示す近似を行う。

- ① 性能関数 Z を確率変数 X_i に関してテーラー展開し、1次の項で打ち切り、線形化する(線形化近似)。
- ② 正規確率密度関数以外の分布を持つ確率変数を、正規確率変数で近似する(正規化近似)。
- ③ 確率変数間に相関がある場合は、変数変換によって独立な確率変数とする(変数変換)。

以上の近似により、性能関数 Z の確率分布が正規分布に近

似され、 σ_z を得ることが可能となる。

このような性能関数の正規化近似により、破壊確率 P_f と信頼性指標 β には式(2)に示す関係式が得られ、この関係を図示すると図-2となる。図より、信頼性指標が大きくなるほど破壊確率は小さくなることがわかる。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (2)$$

ここに、 Φ ：標準正規確率分布関数

最も平易なレベル1設計法は、部分係数 γ を用いた安全性照査式によって安全性を制御する方法である。各設計因子の特性値に部分係数を乗じて得られる値は、設計用値と呼ばれる。設計計算においては、耐力の設計用値 R_d が荷重効果の設計用値 S_d を上回ることを確認する。部分係数の設定においてはレベル2以上の確率統計解析が必要であるが、設計者にとっては、設定された部分係数を用いて設計を実施すればよいから、直接確率統計手法を必要としない。したがってレベル1設計法は、言わば準確率論的な設計法である。

2.2 一次信頼性理論 (FORM)

FORM(First-Order Reliability Method)は破壊確率を近似的に求める信頼性解析手法の一つで、比較的簡便に信頼性指標、破壊確率を算出できるため標準的な信頼性解析手法となっている。

ここで、性能関数を $Z = g(R, S)$ (R ：耐力、 S ：作用効果)と定義し、 R と S を互いに独立な正規確率変数とする。 R と S を式(3)を用いて平均値0、標準偏差1に標準化すると、標準化空間(以下、 X_i によって表される空間をこう呼ぶ)における破壊確率 P_f と信頼性指標 β との関係は、図-3のように表される。

$$X_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (i = 1, 2 \dots n) \quad (3)$$

標準化空間図中の原点を中心とする同心円は、 R と S の等同時確率密度線である。破壊領域($Z < 0$)における同時確率が破壊確率 P_f であり、 R と S が独立な場合、標準化空間では次式によって定義される。

$$P_f = \iint_{Z \leq 0} \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{1}{2}(R'^2 + S'^2)\right) dR' dS' \quad (4)$$

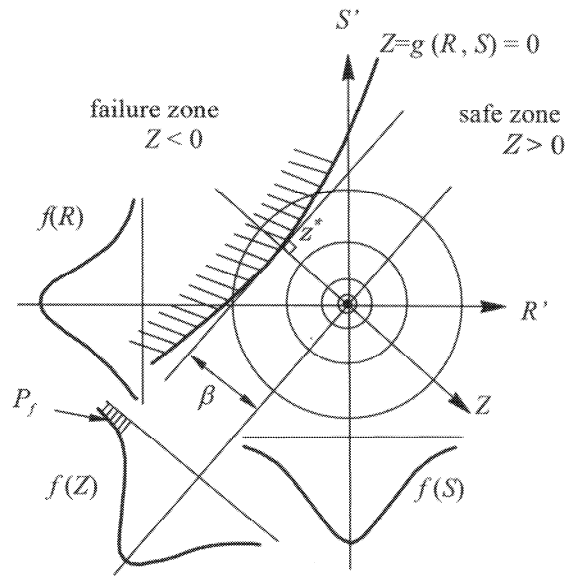


図-3 2変数の場合の標準化空間

Z が非線形である場合には、式(4)は必ずしも解析的に解ける問題のみではないため、 Z を線形化近似し、さらに破壊線($Z=0$)に対して座標軸が直交するように座標変換することによって、式(2)が導かれる。したがって、信頼性指標 β は式(2)に示す標準正規確率分布関数の説明変数であるとともに、標準化空間においては原点すなわち平均値から破壊点までの距離を表す。信頼性指標の算出方法は、平均値周りの線形化近似に基づくCornell⁴⁾タイプと、破壊点周りの線形化近似に基づくHasofer-Lind⁵⁾タイプに大別される。前者はFOSM法(First-Order Second-Moment method)あるいは2次モーメント法とも呼ばれ、後者はAFOSM法(Advanced First-Order Second-Moment method)とも呼ばれる。評価精度としては、破壊点周辺の近似精度を高めたHasofer-Lindタイプの信頼性指標の方が安全性を正確に評価できることが知られており、正規確率変数間に相関がない場合には式(5)によって定義される⁶⁾。なお、本研究ではHasofer-Lindタイプの信頼性指標を用いる。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) (\mu_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right)^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (5)$$

ここに、 X^* ：確率変数 X の破壊点における値

式(5)における破壊点は一意的には定まらないため、収束計算によって算出される。

感度係数 α は、性能関数の線形化近似における標準偏微分係数であり、確率変数間に相関がない場合には、次式によって定義される。

$$\alpha_{X_i} = \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \cdot \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Z} \quad (i=1, 2 \dots n) \quad (6a)$$

$$= - \left(\frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \right) / \beta \quad (6b)$$

式(6b)は、標準化空間における信頼性指標の各確率変数軸への方向余弦を表し、性能関数が $Z = g(R, S)$ によって定義される場合には、**図-4**に示す関係となる。

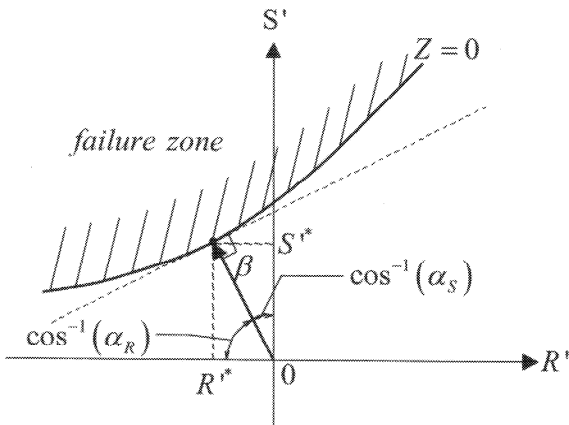


図-4 2変数の場合の標準化空間

感度係数は、確率変数間に相関がない場合には、耐力に対しては正值、荷重効果に対しては負値となり、その自乗和は1となる。また、**図-4**より明らかなように、感度係数の絶対値が1に近い確率変数ほど、破壊点における標準化した値が信頼性指標に一致する傾向となり、信頼性指標におよぼす影響が大きいことを意味する。

2.3 二次信頼性理論 (SORM)

前述したように、FORMでは性能関数を線形近似することにより破壊確率を算出するため、性能関数の非線形性が強くなると解析精度が低下する恐れがある。この問題に対処するため、性能関数を二次まで近似してFORMの精度を向上させた手法がSORM(Second-Order Reliability Method)である(**図-5**参照)。基本的な解析方法はFORMに準じるが、破壊点の探索および破壊確率を

求める際に、破壊曲面の曲率を算出する必要があるため、解析はFORMより複雑となる。SORMによる破壊確率、および信頼性指標は式(7)、式(8)より求められる⁷⁾。

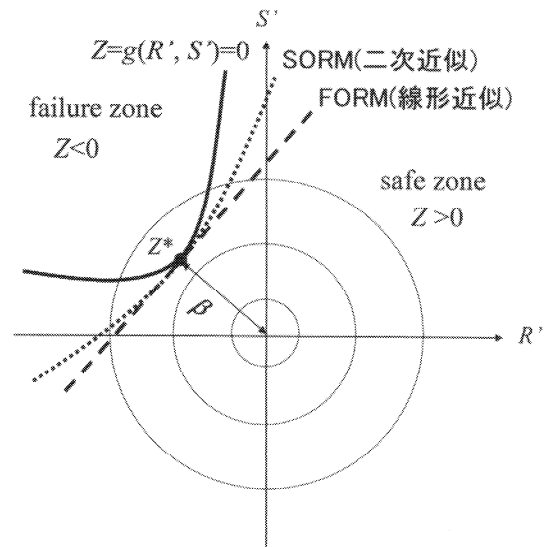


図-5 性能関数の近似

$$P_f = \Phi(-\beta_{\text{FORM}}) \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \kappa_i \beta_{\text{FORM}})^{-1/2} \quad (7)$$

$$\beta_{\text{SORM}} = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (8)$$

ここに、 Φ ：標準正規確率分布関数、 β_{FORM} ：FORMによる信頼性指標、 κ_i ：破壊曲面の主曲率

3. 検討方法

3.1 検討対象施設

検討対象施設は、一般的な防波堤形式であるケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤とする(**図-6**)。検討ケースは、長尾⁸⁾によって全国広範囲より設計条件的に偏りがないように収集された76ケース(ケーソン式混成堤38ケース、消波ブロック被覆堤38ケース)とした。長尾⁸⁾が収集した建設事例の分布を**図-7**に、各ケースの主な設計条件を付録-Aに示す。

3.2 性能関数

対象とする破壊モードは堤体の滑動(**図-8**)とし、性能関数は港湾の施設の技術上の基準⁹⁾に従い式(10)のように表される。なお、本研究では、既往の研究¹⁾により得られている、現行設計法(許容滑動安全率1.2, 許容転倒

安全率1.2, 許容支持力安全率1.0) による設計断面 (検討76ケース) に対してFORM, SORM両手法を用いて信頼性指標を算出する。また, 波力算定式の推定精度, お

よびその他の設計因子の従う確率分布は, 既往の研究による表-2, 表-3に示す値を用いる。

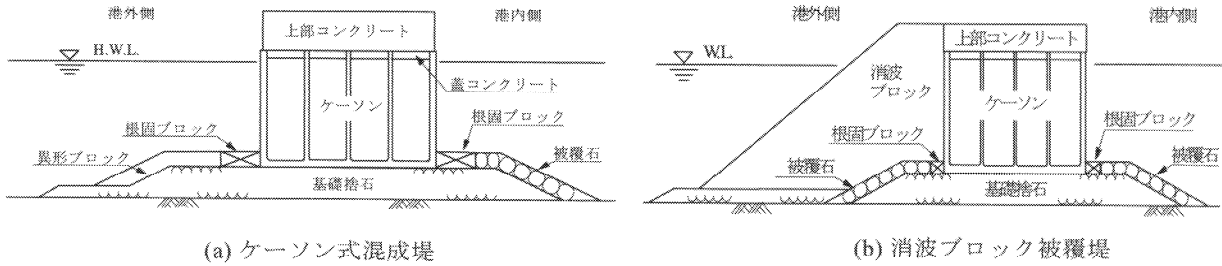


図-6 検討対象施設



図-7 検討対象施設の分布

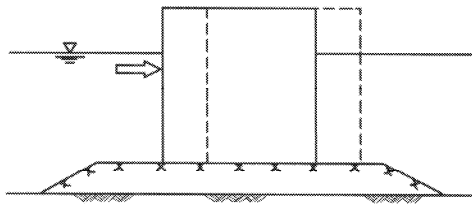


図-8 堤体の滑動

$$Z = f \left\{ \sum_i W_i - P_B - P_U \right\} - P_H \quad (9)$$

ここに、

- f : 堤体底面と基礎との摩擦係数
- W_i : 堤体を構成する材料（鉄筋コンクリート、無筋コンクリート、中詰砂）の重量 (kN/m)
- P_B : 堤体に作用する浮力 (kN/m)
- P_U : 堤体に作用する揚圧力 (kN/m)
- P_H : 堤体に作用する水平波力 (kN/m)

表-2 波力算定式推定精度¹⁰⁾

構造形式	B^{*1}	V^{*2}
ケーソン式混成堤	0.91	0.19
消波ブロック被覆堤	0.84	0.12

※1) B : 平均値の偏り (平均値/特性値)

※2) V : 変動係数 (標準偏差/平均値)

表-3 他の設計因子の従う確率分布⁸⁾

	B	V
波力(P_B, P_U)		
沖波波高推定精度	1.00	0.10
波浪変形計算精度		
水深変化緩	0.97	0.04
水深変化急	1.06	0.08
砕波変形推定精度	0.87	0.10
潮位 (w_l)		
$r_{wl}=1.5$	1.00	0.20
$r_{wl}=2.0, 2.5$	1.00	0.40
摩擦係数 (f)	1.06	0.15
単位体積重量 (W_i, w')		
鉄筋コンクリート (W_{RC})	0.98	0.02
無筋コンクリート (W_{NC})	1.02	0.02
中詰砂 (W_{SAND})	1.02	0.04

※) 水深変化緩/急: 海底勾配 1/30 未満/以上

※) r_{wl} : 既往最高潮位 (H.H.W.L.) とさく望平均満潮位 (H.W.L.) の比

4. 検討結果

4.1 信頼性指標の比較

FORM, SORM 両手法による信頼性指標, 破壊確率の全 76 ケースの平均値は, FORM による信頼性指標 β_{FORM} が 2.425, 破壊確率 P_{fFORM} が 0.0107, SORM による信頼性指標 β_{SORM} が 2.409, 破壊確率 P_{fSORM} が 0.0111 となり, その差は信頼性指標で 0.016, 破壊確率で 0.4×10^{-3} と僅かであった (各ケースの信頼性指標, 破壊確率は付録-A に示す)。また, β_{FORM} と β_{SORM} を目標値として得られた滑動破壊モードの部分係数の比較を表-4 に示すが, 消波ブロック被覆堤の水平波力部分係数で僅かに 0.01 差が生じた程度で, その他の設計因子に関しては同じ値となった。なお, 表-4 に示す部分係数は, 既往の研究⁵⁾による各設計因子の感度係数, 変動係数, 平均値の偏りを用いて式(10)により算出した。

表-4 部分係数の比較

構造形式	ケーソン式混成堤		消波ブロック被覆堤			
	FORM	SORM	FORM	SORM		
γ 計算に用いる目標信頼性指標	2.43	2.41	2.43	2.41		
	γ		γ			
滑動	摩擦係数	0.79	0.79	0.77	0.77	
	水平波力 水深変化緩	1.04	1.04	0.91	0.91	
	揚圧力 水深変化急	1.18	1.18	1.02	1.01	
	潮位	$r_{wl}=1.5$	1.03	1.03	1.04	1.04
		$r_{wl}=2.0, 2.5$	1.06	1.06	1.08	1.08
		H.H.W.L.	1.00	1.00	1.00	1.00
	自重	鉄筋コンクリート	0.98	0.98	0.98	0.98
		無筋コンクリート	1.02	1.02	1.02	1.02
		中詰砂	1.01	1.01	1.01	1.01

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) \mu / X_k \quad (10)$$

ここに, α_X, V_X, μ_X : それぞれ設計因子 X の感度係数, 変動係数および平均値, X_k : 設計因子 X の特性値, β_T : 目標信頼性指標

ここで, β_{FORM} と β_{SORM} との差を $\delta\beta$ ($\delta\beta = \beta_{FORM} - \beta_{SORM}$) と定義して, 各ケースの $\delta\beta$ を図-9 に示す。構造形式別に $\delta\beta$ の平均値, 標準偏差を比較すると, ケーソン式混成堤の $\delta\beta$ の平均値は 0.016, 標準偏差は 0.004, 消波ブロック被覆堤の $\delta\beta$ の平均値は 0.017, 標準偏差は 0.004 であり, 構造形式の違いによる差は僅かであった。

図中の CASE71, CASE74, CASE75 は, $\delta\beta$ が他のケースと比較して大きいケースであるが, これらのケースの特徴として, CASE71 は最も設計波高が大きいケースであること, CASE74, CASE75 は設計潮位 (H.W.L.) が高く, かつ設計には H.H.W.L.ではなく H.W.L.を用いていることが挙げられる (設計に H.H.W.L.を用いる場合は潮位

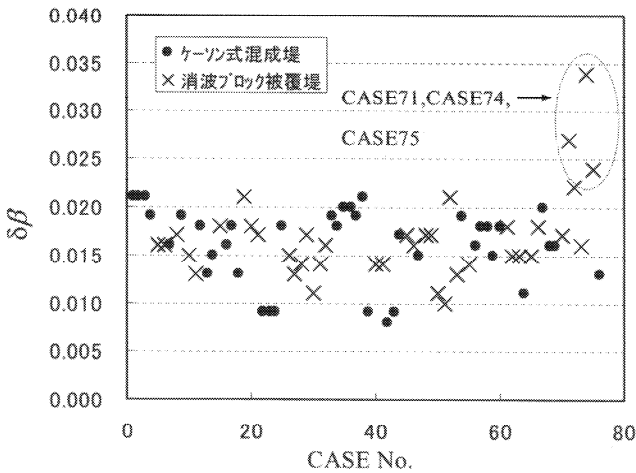
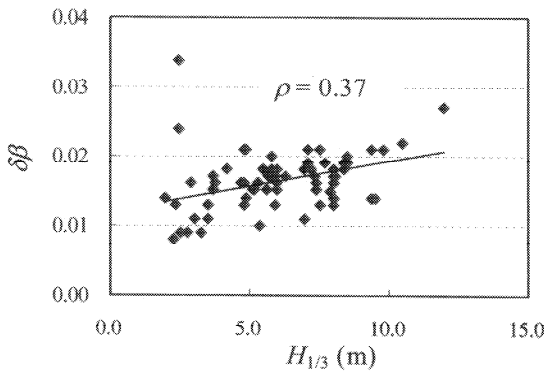


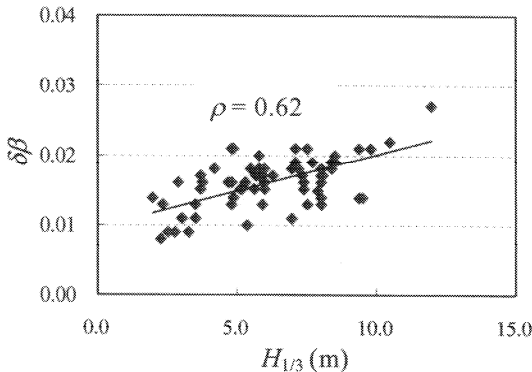
図-9 各ケースの $\delta\beta$

のばらつきは考慮しないり)。

ここで、図-10(a)に、全 76 ケースについての $\delta\beta$ と $H_{1/3}$ との相関を示すが、あまり高い相関はみられない。しかし、 $H_{1/3}$ が小さく $\delta\beta$ が大きい 2 ケースは、前述の設計潮位が高い特異なケース (CASE74, CASE75) であるため、この 2 ケースを除いて、再度相関をとると相関係数は 0.62 と高い正の相関がみられた (図-10(b))。



(a) 全 76 ケース



(b) 特異ケースを除いた場合

図-10 $\delta\beta$ と設計有義波高 $H_{1/3}$ の相関

同様に、 $\delta\beta$ と揚圧力 P_U 、および $\delta\beta$ とフーチングを除いた堤体幅 BC との間にも高い正の相関がみられた (図-11, 図-12)。また、表-3 に示すように設計潮位 wl の変動係数 V_{wl} は r_{wl} の値により異なるため、 wl に V_{wl} を乗じた $V_{wl} \cdot wl$ と $\delta\beta$ との相関を見たものが図-12 である (設計に H.H.W.L. を用いるケースは除く)。 $\delta\beta$ と $V_{wl} \cdot wl$ には正の相関が見られるが、ばらつきが大きいことがわかる。

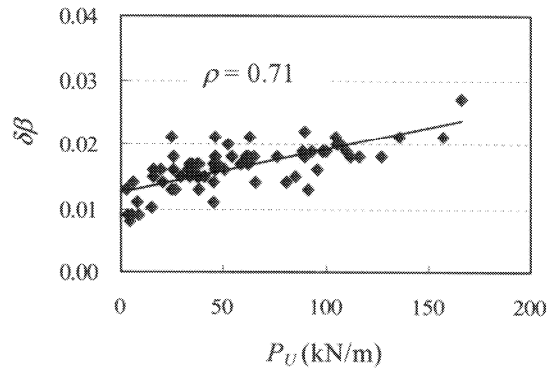


図-11 $\delta\beta$ と揚圧力 P_U の相関 (特異ケース除く)

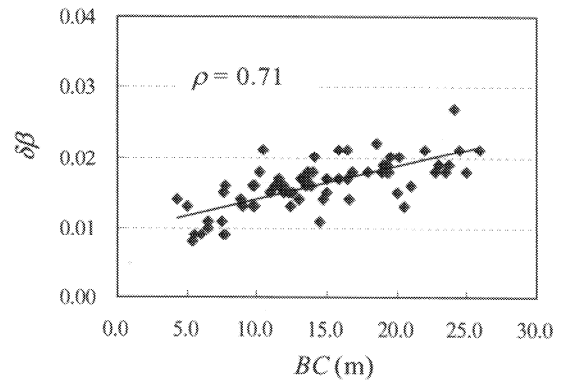


図-12 $\delta\beta$ とケーソン幅 BC の相関 (特異ケース除く)

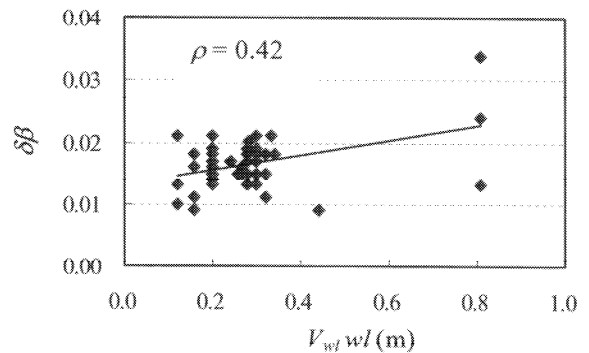


図-13 $\delta\beta$ と $V_{wl} \cdot wl$ の相関

次に、 $\delta\beta$ と性能関数 (式(10)) の耐力項 ($\Sigma W_i - P_B - P_U$) の変動係数 V_R の相関 (全 76 ケース) を図-14 に示す。変動係数 V_R は式(11)により求められる。

$$V_R = \frac{\sqrt{\sum \sigma_{W_i}^2 + \sigma_{P_B}^2 + \sigma_{P_U}^2}}{\mu_{W_i} - \mu_{P_B} - \mu_{P_U}} \quad (11)$$

ここに、 σ : 標準偏差, μ : 平均値, W_i, P_B, P_U : 式(9)参照

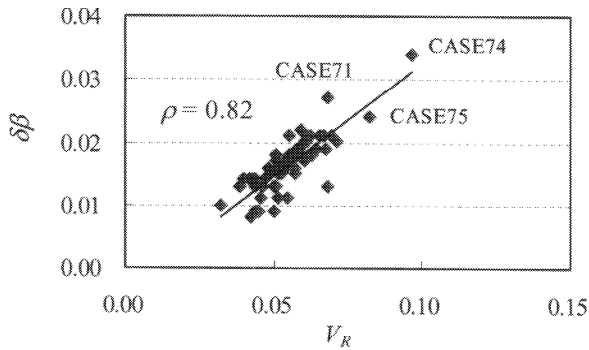


図-14 $\delta\beta$ と耐力の変動係数 V_R の相関

図-14より、 $\delta\beta$ と V_R は高い正の相関をもち、図-9に示す $\delta\beta$ が大きい3ケース (CASE71, CASE74, CASE75) の V_R も大きな値となっていることがわかる。耐力項は、摩擦係数 f との積で非線形項を形成しているため、耐力項の変動係数 V_R が増加するに伴い、非線形項が β に及ぼす影響が強くなり、結果として $\delta\beta$ が増加しているものと考えられる。

図-15には V_R と $H_{1/3}$ 、図-16には V_R と P_U との相関を示す。図より $H_{1/3}$ 、 P_U ともに $\delta\beta$ と正の相関を持つが、 P_U の方が相関性が高い。図-17には V_R と BC 、図-18には V_R と $V_{wl} \cdot wl$ との相関を示すが、同様に正の相関が見られる。また、図-19には V_R と、 $V_{wl} \cdot wl$ を海底水深 h で除した $V_{wl} \cdot wl/h$ の相関を示すが、図-18に示す V_R と $V_{wl} \cdot wl$ との相関性と同程度となっている。このことから、海底水深 h が V_R に及ぼす影響は小さいと考えられる。

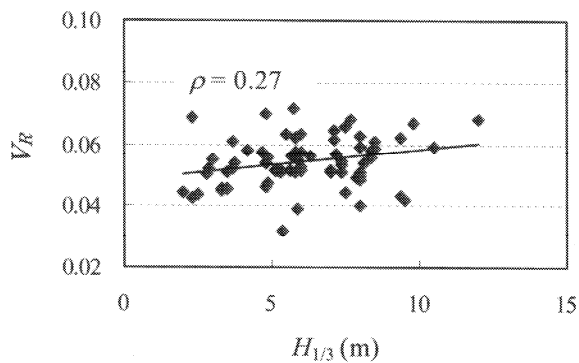


図-15 V_R と設計有義波高 $H_{1/3}$ の相関 (特異ケース除く)

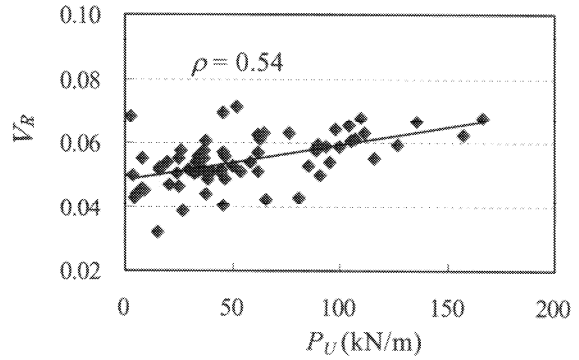


図-16 V_R と揚圧力 P_U の相関 (特異ケース除く)

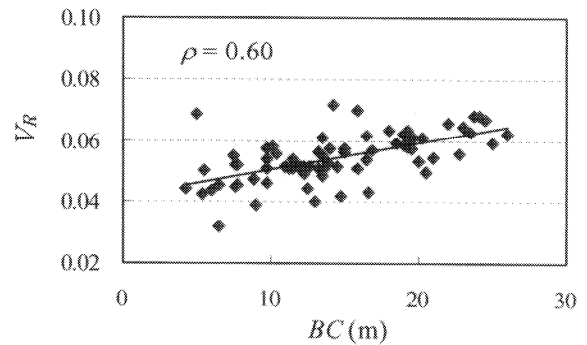


図-17 V_R とケーソン幅 BC の相関 (特異ケース除く)

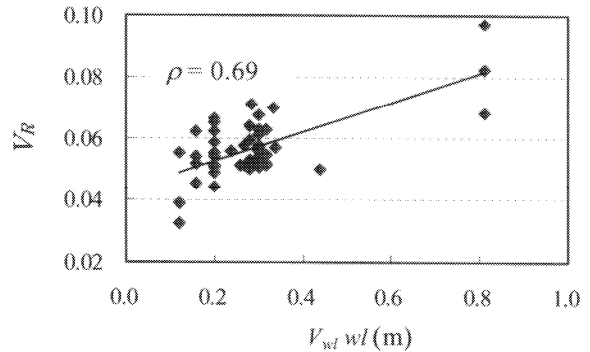


図-18 $\delta\beta$ と $V_{wl} \cdot wl$ の相関

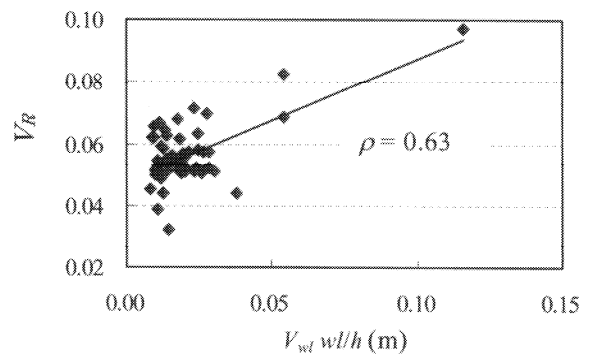


図-19 $\delta\beta$ と $V_{wl} \cdot wl/h$ の相関

以上の結果から、 $H_{1/3}$ が大きいケース、即ち揚圧力 P_U 、堤体幅 BC が大きくなるケースは耐力項の変動係数 V_R が大きくなる傾向にあるため、非線形項が β に及ぼす影響が強くなり、これに伴い $\delta\beta$ が増加しているものと考えられる。

5. まとめ

ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の滑動破壊モードを対象とした場合、FORMによる信頼性指標 β_{FORM} と、SORMによる信頼性指標 β_{SORM} の差 $\delta\beta$ ($\delta\beta = \beta_{\text{FORM}} - \beta_{\text{SORM}}$)は、全ケース平均で0.016と僅かであった。これは、性能関数の耐力項 ($\Sigma W_i - P_B - P_U$) の変動係数 V_R が小さく、性能関数の非線形項が信頼性指標に及ぼす影響が小さいためと考えられる。また、FORMとSORMにより得られた滑動破壊モードの部分係数の差も僅かであった。以上のことから、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の滑動破壊モードを対象とした場合、一般的な設計条件におけるFORMによる解析結果は十分な精度を有していることが確認された。

しかしながら、変動係数 V_R が大きくなるようなケース、即ち設計潮位 (H.W.L.) が高く、かつ設計にH.H.W.L.ではなくH.W.L.を用いるケース、および大水深域のような設計波高が大きく、揚圧力、堤体幅が増加するケースにおいてはFORMの精度が低下する ($\delta\beta$ が大きくなる) 傾向が見られるため注意を要する。

(2007年2月14日受付)

謝辞

本研究を行うにあたり、港湾施設研究室の方々に貴重な意見を多く頂きました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1)吉岡健, 長尾 毅: 重力式防波堤の外的安定に関するレベル1信頼性設計法の提案, 国土技術政策総合研究所研究報告, 2005, No.20.
- 2)吉田郁政, 鈴木修一: 限界地震動指標を用いた損傷確率の効率的な算定方法, 構造工学論文集, Vol.49A, 2003, pp.201-206.
- 3)Rackwitz, R., and Fiessler, B.: Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences, Computers and Structures, Vol.9, 1978, pp.489-494.
- 4)Cornell, C. A.: A Probability-Based Structural code, Journal of the American Concrete Institute, Vol.66, No.12, 1969, pp.974-985.
- 5)Hasofer, A. M. and Lind, N. C.: Exact and Invariant Second moment Code Format, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.100, No.EM1, 1974, pp.111-121.
- 6)星谷 勝, 石井 清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
- 7)Breitung, K.: Asymptotic Approximation for Multinormal Integrals, J. Engineering Mechanics, ASCE, 110(3), 1984, pp.357-366.
- 8)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, 2001, pp.173-182.
- 9)運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 1999.
- 10)Takayama, T. and N. Ikeda: Estimation of sliding failure probability of present breakwaters for probabilistic design, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol.31, No.5, 1993, pp.3-32.

付録 A 検討対象施設の設計条件及び設計断面に対する信頼性指標、破壊確率

表-A.1 ケーソン式混成堤

CASE No.	設計波高 (H_D) m	有義波高 ($H_{1/3}$) m	周期 (T) s	入射角 (θ) °	海底勾配 —	設計 潮位 (wf) m	摩擦 係数 (f) —	前面 水深 (h) m	設置 水深 (h') m	港外側 マウント層幅 (BM_1) m	上部工 天端高 (C_T) m	現行設計 堤体幅 (BC) m	信頼性指標 (β)		破壊確率 (P_f)	
													FORM	SORM	FORM	SORM
1	13.4	7.5	13.5	15	0.0077	0.5	0.75	21	16	10.6	5	22	2.296	2.275	0.0108	0.0114
2	16.68	9.4	14	10.3	0.01	0.5	0.75	21.5	17	12.6	6.5	26	2.351	2.330	0.0094	0.0099
3	14.05	9.8	14	0	0.009	0.5	0.75	17.5	13.5	11.5	6.4	24.5	2.165	2.144	0.0152	0.0160
4	12.5	7.1	13.5	0	0.008	0.7	0.6	21	16	12.5	5	22.95	2.053	2.034	0.0201	0.0210
7	6.73	3.74	14	20	0.005	0.5	0.6	13	8.5	9	4.5	11.5	2.023	2.007	0.0216	0.0224
9	13.07	8.5	13.5	25	0.013	0.5	0.75	16	13	7	6	19	2.311	2.292	0.0104	0.0110
12	14.3	8	13	7	0.014	1.5	0.6	22	16.5	8	6	23.45	2.040	2.022	0.0207	0.0216
13	14.3	8	13	0	0.005	1.4	0.6	27.5	18.5	33	6	20.55	2.094	2.081	0.0181	0.0187
14	13.3	7.4	13	0	0.005	1.4	0.6	26.5	16.5	28	6	20	2.113	2.098	0.0173	0.0179
16	13.3	7.4	11	0	0.023	0.4	0.6	14.7	12.5	13.5	5.5	21	2.126	2.110	0.0167	0.0174
17	14.36	8	14	7	0.002	1.4	0.6	23.2	16.5	10	6.2	25	2.091	2.073	0.0183	0.0191
18	6.4	3.5	13	23	0.01	1.5	0.6	12.7	9.5	10	5	9.75	2.024	2.011	0.0215	0.0222
22	5.9	3.3	7	0	0.01	0.8	0.6	19.5	10.7	6.5	2.8	7.65	2.084	2.075	0.0186	0.0190
23	5.94	3.3	7	5.5	0.01	0.8	0.6	19.5	10.7	6.5	2.8	7.75	2.094	2.085	0.0181	0.0186
24	5.9	3.3	7	0	0.01	0.8	0.6	19.5	10.7	6.5	2.8	7.7	2.087	2.078	0.0184	0.0189
25	9.6	5.5	12	12	0.009	1.6	0.6	13.1	10.5	12	5	18	2.046	2.028	0.0204	0.0213
33	13	8.4	12.5	0	0.01	1.3	0.75	18.5	13	15.8	6	19.3	2.334	2.315	0.0098	0.0103
34	13	8.4	13.5	0	0.02	3.5	0.6	13.5	10	15.5	8	22.75	2.111	2.093	0.0174	0.0182
35	13.05	8.5	14	0	0.01	0.9	0.75	14.5	12	11	5.5	19.6	2.207	2.187	0.0137	0.0144
36	13.05	8.5	14	0	0.01	0.9	0.75	15.6	12	15.6	5.5	20.2	2.309	2.289	0.0105	0.0110
37	13.05	8.5	14	0	0.01	0.9	0.75	17	13	15.6	5.5	19.3	2.294	2.275	0.0109	0.0115
38	8.64	4.8	10.8	30	0.01	1.67	0.6	12	9	7.5	4.5	15.9	2.004	1.983	0.0226	0.0237
39	4.95	2.8	5.9	30	0.005	2.2	0.6	17.2	10	6.5	4.8	5.5	2.730	2.721	0.0032	0.0033
42	4.1	2.3	7.5	43	0.004	2.1	0.6	12.6	9	11.1	3.5	5.4	3.378	3.370	0.0004	0.0004
43	4.5	2.5	7.6	42	0.004	2.1	0.6	12.2	9	7	3.5	6	3.042	3.033	0.0012	0.0012
44	6.6	3.7	14.8	0	0.01	3.1	0.6	13	9	8	5.5	13.45	1.994	1.977	0.0231	0.0240
47	7.5	5.1	11.1	38	0.01	1.3	0.6	8.6	6.5	5	9.2	12.25	2.202	2.187	0.0138	0.0144
54	12.7	7.7	13	0	0.003	1.5	0.6	17	14	9.6	6.5	23.7	2.020	2.001	0.0217	0.0227
56	5.3	2.9	11	43	0.02	0.4	0.6	6.6	5	9.4	3	7.75	2.039	2.023	0.0207	0.0215
57	10.5	5.8	11	15	0.01	0.4	0.6	18.7	13.5	13.65	4	18.95	2.025	2.007	0.0214	0.0224
58	10.6	6	15	0	0.01	1.5	0.6	14.1	10	13.2	6.5	19.45	2.087	2.069	0.0184	0.0193
59	10.8	6	8.7	25	0.0091	0.9	0.6	18.4	13	10.1	4.5	15.05	2.016	2.001	0.0219	0.0227
60	12	6	11.3	7	0.0167	0.9	0.75	18.5	12	9.6	4.5	19.3	2.083	2.065	0.0186	0.0195
64	5.4	3	7.3	0	0.01	0.8	0.6	19	11	6	2.6	7.5	2.289	2.278	0.0110	0.0114
67	10.08	5.78	13	40	0.0346	1.42	0.75	12.1	9	10	4.9	14.2	1.673	1.653	0.0472	0.0491
68	8.02	4.71	13	59	0.0033	1.33	0.6	10	7.5	8	4.2	9.8	1.998	1.982	0.0229	0.0237
69	8.02	4.71	13	59	0.0033	1.33	0.6	10	7.5	8	4.2	9.8	1.998	1.982	0.0229	0.0237
76	4.21	2.34	4.7	14	0.01	4.05	0.6	15	7	7	5.6	5	2.109	2.096	0.0175	0.0181

※) 堤体幅 BC : フーチングを含まないケーソン幅

※) CASE No.は長尾⁸⁾によるもので、本研究でもこれを踏襲する。

※) 信頼性指標、破壊確率は滑動破壊モードに対する値

表-A.2 消波ブロック被覆堤

CASE No.	設計波高 (H_D) m	有義波高 ($H_{1/10}$) m	周期 (T) s	入射角 (θ) °	海底勾配 —	設計潮位 (wl) m	摩擦係数 (f) —	前面水深 (h) m	設置水深 (h') m	上部工 天端高 (C_T) m	現行設計 堤体幅 ($B_{C_Current}$) m	信頼性指標 (β)		破壊確率 (P_f)	
												FORM	SORM	FORM	SORM
5	9.1	5.3	12	0	0.01	0.5	0.6	11.5	8.5	4	11.9	2.544	2.528	0.0055	0.0057
6	8.60	5.3	12	0	0.01	0.5	0.6	10.5	8	4	11.3	2.556	2.540	0.0053	0.0055
8	8.7	5.8	12	0	0.01	0.5	0.6	10.5	8	4	11.5	2.552	2.535	0.0054	0.0056
10	12.85	7.9	13	54	0.011	0.5	0.75	16.5	12.5	7	12.3	2.917	2.902	0.0018	0.0019
11	12.40	7.5	12.5	52	0.011	0.5	0.6	15.5	11.5	6.5	12.45	2.576	2.563	0.0050	0.0052
15	7.50	4.2	13	0	0.007	1.5	0.6	12.3	7	4	10.15	2.526	2.508	0.0058	0.0061
19	12.8	7.1	13	13.5	0.005	1.5	0.75	16.5	11.5	5.8	16.45	2.793	2.772	0.0026	0.0028
20	12.7	7.2	13	28.5	0.005	1.5	0.6	15.3	11.5	5.7	16.85	2.538	2.520	0.0056	0.0059
21	11.2	6.3	13	20	0.002	1.5	0.6	19	13	5.3	15	2.582	2.565	0.0049	0.0052
26	9.96	6.01	14	0	0.004	1.33	0.6	12.6	9.5	5	11.95	2.544	2.529	0.0055	0.0057
27	8.4	4.8	12.5	14.6	0.033	1.1	0.6	14.5	10	3.6	9.8	2.514	2.501	0.0060	0.0062
28	7.5	4.9	10.5	8	0.01	0.8	0.6	10.6	7	3	8.85	2.529	2.515	0.0057	0.0060
29	11.3	8	12	0	0.009	3.6	0.75	11.5	8	7	13.2	2.709	2.692	0.0034	0.0036
30	5.7	3.5	7.4	0	0.01	4.4	0.6	7.2	4.5	5.7	6.5	2.600	2.589	0.0047	0.0048
31	11.6	8	12	0	0.01	3.6	0.75	11.5	8	7	13	2.810	2.796	0.0025	0.0026
32	11.6	8	12	0	0.01	3.6	0.75	13	8	7	13.5	2.830	2.814	0.0023	0.0025
40	12.4	9.5	16	0	0.006	2.1	0.6	13.4	9	7.6	14.7	2.571	2.557	0.0051	0.0053
41	15.5	9.4	17.4	35	0.01	2.2	0.6	21.1	12	8	16.65	2.562	2.548	0.0052	0.0054
45	12.7	8.1	12	3	0.02	1.5	0.6	15.7	13	6.4	16.5	2.599	2.582	0.0047	0.0049
46	8.2	4.8	11.5	58	0.01	0.4	0.6	11.3	9	3.2	9.75	2.614	2.598	0.0045	0.0047
48	9.3	5.7	12.1	40	0.01	1.2	0.6	12.1	10	5.8	13.3	2.553	2.536	0.0053	0.0056
49	9.8	5.9	11	0	0.01	0.5	0.6	14.2	11.5	4.1	13.55	2.523	2.506	0.0058	0.0061
50	11.5	7	11	0	0.02	0.4	0.6	16.3	12	4.6	14.5	2.565	2.554	0.0052	0.0053
51	7	5.4	10	0	0.01	0.3	0.6	8.4	5.5	5.2	6.5	2.720	2.710	0.0033	0.0034
52	6.4	4.9	13	25	0.01	0.3	0.6	6	4	4.5	10.4	2.660	2.639	0.0039	0.0042
53	8.7	5.9	12	9	0.01	0.3	0.6	11.3	6.5	5.1	9	2.612	2.599	0.0045	0.0047
55	3.7	2	11	0	0.01	0.5	0.6	5.3	3.5	2.3	4.3	2.437	2.423	0.0074	0.0077
61	11.63	7	14	0	0.01	0.5	0.75	14.5	10	6	13.6	2.801	2.783	0.0025	0.0027
62	8.8	5.2	12	15	0.0091	1.6	0.6	11.8	9.5	4.8	10.95	2.521	2.506	0.0059	0.0061
63	9.9	5.6	12	20	0.0091	1.6	0.6	12.8	10	5	12.6	2.693	2.678	0.0035	0.0037
65	6.6	3.7	13	34	0.01	1.5	0.6	10.5	7	4	7.65	2.524	2.509	0.0058	0.0060
66	10.02	5.83	13	0	0.002	1.7	0.6	12.1	9	5.2	14	2.538	2.520	0.0056	0.0059
70	11.51	7.36	15	15	0.002	1.4	0.6	14	10	6	15.85	2.989	2.972	0.0014	0.0015
71	20.09	12	16	0	0.001	3.5	0.75	17	8	7	24.1	2.605	2.578	0.0046	0.0050
72	14	10.5	16	2.5	0.01	3.5	0.75	14.2	10	7	18.55	2.561	2.539	0.0052	0.0056
73	10.8	6	16.5	0	0.01	3.5	0.75	17.2	12.5	6	13.9	2.816	2.800	0.0024	0.0026
74	4.39	2.44	5	0	0.01	4.05	0.6	7	5	5.6	5	3.288	3.254	0.0005	0.0006
75	4.39	2.44	5	0	0.01	4.05	0.6	15	7	5.6	5	3.486	3.462	0.0002	0.0003

※) 堤体幅 BC : フーチングを含まないケーソン幅

※) CASE No.は長尾⁸⁾によるもので、本研究でもこれを踏襲する。

※) 信頼性指標、破壊確率は滑動破壊モードに対する値

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 379

March 2007

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:046-844-5018