

# セル式岸壁の板厚のレベル1信頼性設計法

A LEVEL-ONE RELIABILITY BASED DESIGN METHOD FOR PLATE THICKNESS OF CELLULAR-BULKHEAD QUAY WALL

長尾 毅<sup>1</sup>・北村卓也<sup>2</sup>

Takashi NAGAO and Takuya KITAMURA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>正会員 工修 住友金属工業(株) (〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11)

This paper aims at establishing the level-one reliability-based design method for evaluating the necessary plate thickness of the cellular-bulkhead quay wall. We evaluated the probability distribution of design parameters by using the results of experiment and field observation. We then evaluated the reliability indices of the plate of cellular-bulkhead quay wall against tensile yield. It was found that reliability indices were very large compared with other structures. We finally evaluated the partial factors for the level-one reliability-based design method.

*Key Words : cellular-bulkhead quay wall, reliability-based design, partial factor*

## 1. はじめに

設計法に関する動向として, 性能設計に向けた取り組みが各方面で行われている。また, 政府調達協定や TBT 協定などを背景に, ISO 規格などの国際規格と国内規格の整合性・調和性が今後は強く求められるため, 国際標準に対応した設計法の整備が早急に必要となっている。このため, 港湾の施設の技術上の基準についても, 国際標準と整合した性能設計体系へ移行するための検討が行われている<sup>1)</sup>。

性能設計体系においては, 作用に対して構造物が発揮すべき性能が規定され, その性能を達成する方法は設計者の判断により選択されることとなる。従来型の仕様規定型の設計体系においては, 設計において用いる数式や係数が基準として示されており, 設計者はそれに従うことが求められてきた。性能規定型の設計体系と仕様規定型の設計体系は, このように大きく異なる設計体系であるといえる。

ここで, 性能照査方法の採用には大幅な自由度が与えられるとはいえず, 従来用いられてきた安全率を用いた方法は, 基本的に性能設計体系においては許容されない方法であるといえる。なぜなら, 安全率は構造物の安全性を定量的に示す指標とはいえないからである。安全率が同じ値であっても, 設計に用いる特性値の設定方法や設計計算式の精度が異なっていれば, 結果として構造物の破壊確率は同一とはならない。例えば, 長尾<sup>2)</sup>は, ケーソン式防波堤および消波ブロック被覆堤の外的安定を例に取り, 同じ安全率で設計した断面の保有する破壊確率が大きくばらつくことを示した。従って, 性能設計体系における性能規定は, 安全率によるのではなく, 構造物の破壊可能性(破壊確率)や, 作用に対する構造

物の具体的な損傷程度(変形等)によって規定されることとなる<sup>1)</sup>。性能規定が破壊確率で規定される場合は, 用いる照査方法は信頼性設計法が基本となる。信頼性設計法には3つのレベルがあり, 破壊確率を数値積分により算出するレベル3の方法, 破壊確率と対応付けられる信頼性指標を算出するレベル2の方法, 部分係数を用いるレベル1の方法があり, 性能設計の概念からはどの方法を採用しても良いわけであるが, 設計者の便を考慮すると, 最も平易なレベル1の方法について, 具体的な部分係数が示されていることが望ましいといえる。

このような観点から, これまでに, 混成堤および消波ブロック被覆堤の耐波安定性<sup>2)</sup>, 重力式特殊防波堤の耐波安定性<sup>3)4)</sup>, 岸壁の常時の外的安定性<sup>5)</sup>, 防波堤の円弧すべり<sup>6)</sup>, 防舷材<sup>7)</sup>などについて検討が進められている。

本研究では, 港湾構造物のレベル1信頼性設計法の構築の一環として, セル式岸壁のセル板厚の設計法に対するレベル1信頼性設計法の検討を行った。このため, セル式岸壁のセル板厚の設計法に関する設計パラメータとして, 内詰土圧, 鋼材降伏強度, 残留水位の従う確率分布を評価した。さらに, 設計震度や水深を変化させてセルの必要板厚を現行設計法に従って算出し, 信頼性解析を実施して現行設計法によるセル殻およびアークの引張降伏に関する破壊確率を評価した。最後に, 現行設計法の平均的な安全性水準をターゲットとしたレベル1信頼性設計法のキャリブレーションを行った。

## 2. 板厚設計に関係するパラメータの従う確率分布

セル板厚設計に関係するパラメータのうち、確率分布を考慮すべきものは、セル材降伏強度、中詰土圧係数、残留水位である。以下、これらのパラメータの従う確率分布について検討した。

### (1) セル材降伏強度

鉄鋼メーカーが1989年に実施した鋼材(SS400, SM400, SM490, SM490Y等)の引張試験の結果によれば、降伏点はそれぞれの保証降伏点を97%以上の確率で上回ることがわかっている<sup>8)</sup>。また、降伏点の変動係数は0.052~0.073程度の小さな値である。本研究では、セル材に用いられることの多い鋼種で、変動係数が最も大きいSS400を対象として、降伏強度の従う確率分布を設定する。降伏強度の平均値と特性値の比は1.26、変動係数は0.073である。現行設計法では許容応力度法が採用されており、許容応力度は保証降伏応力度を1.7程度の安全率で除した値である。

### (2) 中詰土圧係数

セル中詰土圧係数の実測事例は少ないが、これまでに北島ら<sup>9)</sup>による模型実験、才村ら<sup>10)</sup>による現地実験がある。以下これらについて述べる。

北島ら<sup>9)</sup>は、小型および大型の模型実験を行って根入式セルの静的挙動を検討した。用いたセル壁高は、小型及び大型実験でそれぞれ500mmおよび1500~2500mmである。中詰土圧の観測されたケース数は小型実験では10ケースであり、セル根入比(D/H, 根入長とセル壁高の比)が0~1である。大型実験では実験ケース数7、セル根入比が0~1/2である。また、中詰材の内部摩擦角は、小型実験が40.1~42.7°、大型実験が29.1~33.9°である。中詰土圧は、小型実験ではセル殻に取り付けられた歪ゲージにより、大型実験では土圧計および歪ゲージにより観測された。

現行設計法では、中詰に内部摩擦角が大きい材料を用いた場合や締固めを行わない場合はセルの中詰土圧係数  $K$  は0.6とすれば十分で、中詰を締固めた場合は  $\tan \phi$  とする、としている<sup>11)</sup>。小型実験では中詰は締固めを行い、大型実験は締固めを行っていないため、小型実験から得られた中詰土圧係数を中詰の正接で除した値の頻度分布を図-1に、大型実験により得られた中詰土圧係数を0.6で除した値の頻度分布を図-2に示す。締固めを行った場合も締固めを行わない場合も、土圧係数の平均値は現行設計法による特性値の0.6倍程度であり、かなり安全側の設定であることが分かる。

次に、才村ら<sup>10)</sup>は、和歌山下津港西防波堤沖埋立I期護岸において13mの壁高さの根入鋼板セルにおいて中詰土圧の計測実験を行っている。実験位置平面図および断面図を図-3に示す。根入部はSCP改良地盤である。中詰の締固めは行われておらず、計測

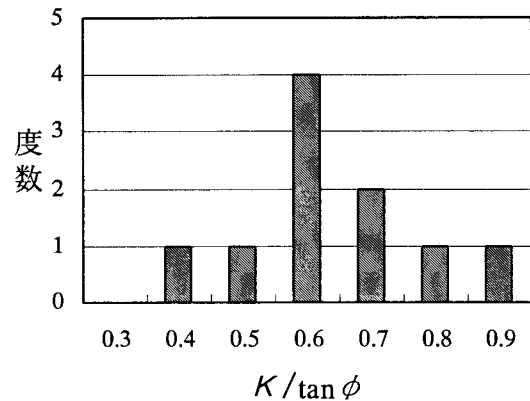


図-1 セル中詰土圧測定結果(締固め)

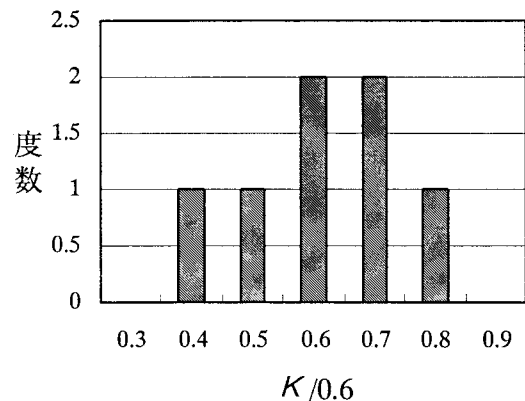
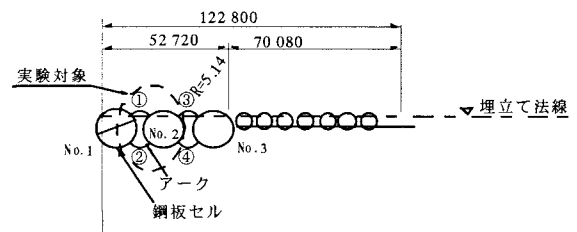
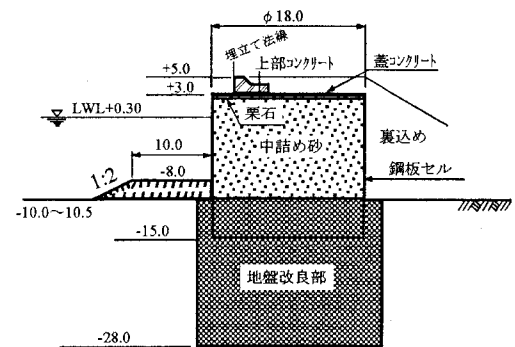


図-2 セル中詰土圧測定結果(締固めなし)



(a)平面図



(b)断面図

図-3 実験位置図(単位:m)

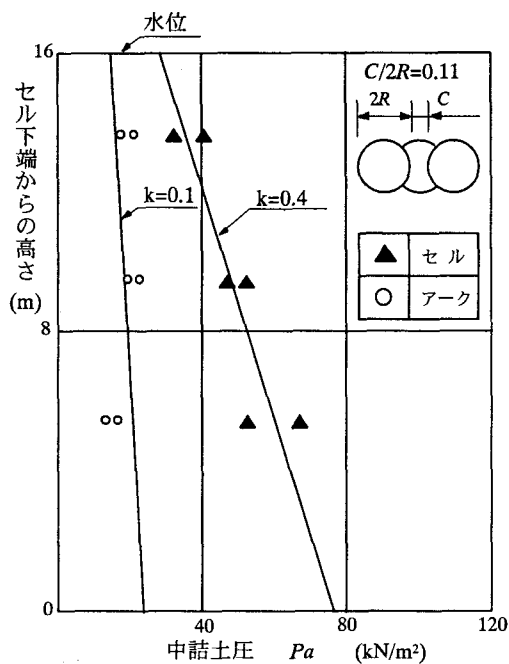


図-4 実験結果

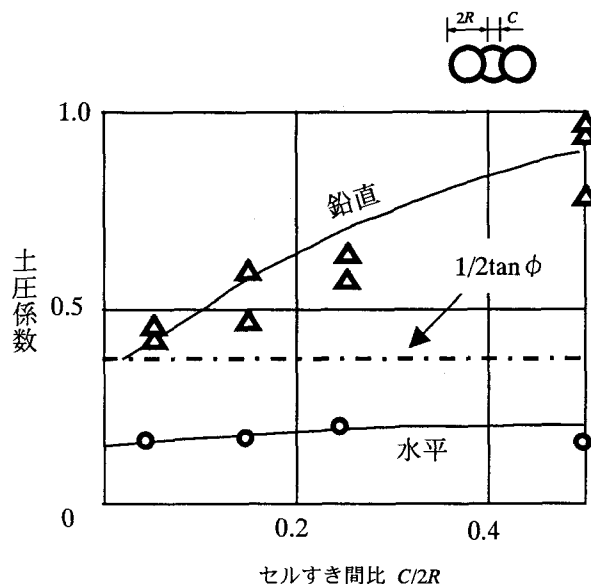


図-5 模型実験結果

された中詰の内部摩擦角は $\phi=30^\circ$ である。本実験ではセル殻およびアーク部にも土圧計が設置されており、土圧の計測結果は図-4 に示すとおりである。水位面はセル下端から16mの高さにある。セル中詰土圧係数は0.4程度であり、現行設計法の0.6に対して0.67倍程度である。また、アーク部の土圧係数は非常に小さく、0.1程度である。現行設計法ではアーク部の土圧係数は $1/2\tan\phi$ であるが、計測された値は現行設計法の0.6倍以下である。なお、才村ら<sup>10)</sup>の検討では、実構造物のみならず、模型実験によってアーク部の土圧が計測されている。図-5に示すように、アーク部の水平土圧係数は、やはり現行設計法の $1/2\tan\phi$ の0.6倍程度である。以上により、セル殻およびアークの土圧係数は、平均的には現行設計法の設定の0.6倍とする。変動係数はこれらの実験結果から、0.2とする。なお鉛直土圧についてはセル板厚に関係しないパラメータであり、本研究の対象外である。

### (3) 残留水位

才村ら<sup>10)</sup>が実施した和歌山下津港西防波堤沖埋立I期護岸における現地実験においては、土圧とともに水位の観測も実施された。観測結果を図-6に示す。前面海面の潮位変動と比較して、セル内の水位変動はかなり小さく、セル内水位変動は前面海面と比較して4時間程度の位相遅れが認められる。セル内と前面海面の水位差の最大値は、現行設計法の潮位変動の2/3倍とほぼ等しい。このため、残留水位については、セル以外の岸壁<sup>9)</sup>と同様に、平均値は現行設計法と一致し、変動係数として0.05を見込むこととする。

以上の結果をまとめて、確率変数の従う確率分布を表-1に示す。確率分布形については適合度検定を実施するほどのデータがないが、ここでは正規分布と仮定した。

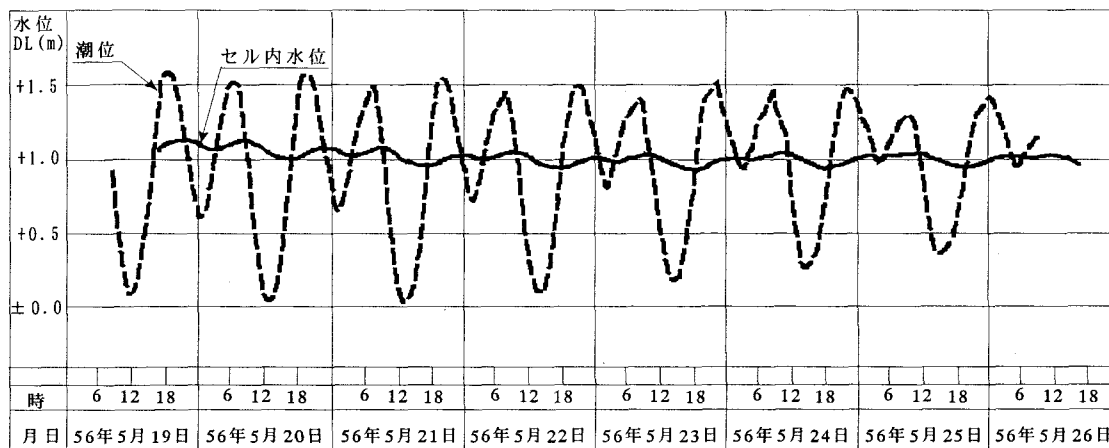


図-6 水位変動

表-1 確率変数の従う確率分布

		特性値	平均値	変動係数
鋼材の引張り降伏応力度 $\sigma$		235N/mm <sup>2</sup>	296N/mm <sup>2</sup>	0.073
内詰土圧係数 $K$	セル	$\tan \phi$	$0.6 \cdot \tan \phi$	0.200
	アーケ	$0.5 \cdot \tan \phi$	$0.3 \cdot \tan \phi$	0.200
残留水位 $CF_{RWL}$		-	1.000	0.050

### 3. セル式岸壁の板厚の設計法

セル式岸壁の板厚の設計法は、常時の土圧に対してセル殻およびアーケが引張降伏しないことを照査するものである<sup>11)</sup>。照査式は以下のとおりである。なお、パラメータ  $CF_{RWL}$  は、信頼性設計において部分係数を考慮するために導入したものであり、現行設計法では 1.0 である。

$$T = \left\{ (\gamma_0 H_d' + q) K + \gamma_w h_w \right\} R \quad (1)$$

$$H_d' = \frac{1}{\gamma_0} \sum \gamma_i h_i \quad (2)$$

$$h_w = RWL - LWL \quad (3)$$

$$RWL = CF_{RWL} \times \left\{ LWL + \frac{2}{3} (HWL - LWL) \right\} \quad (4)$$

ここに、

$T$  ; 水平方向張力 (kN/m)

$R$  ; セル殻の半径 (m)

$H_d'$  ; 海底面から上の換算壁高 (m)

$h_w$  ; セル内とセル前面との水位差 (m)

$\gamma_0$  ; 中詰土の換算単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma_w$  ; 海水の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$\phi$  ; 中詰土の内部摩擦角 (°)

$q$  ; 載荷重 (kN/m<sup>2</sup>)

$K$  ; 内詰土圧係数

$\gamma_i$  ; 海底面から上の  $i$  層の中詰の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$h_i$  ; 海底面から上の  $i$  層の層厚 (m)

$RWL$  ; 残留水位 (m)

$LWL$  ; 朔望平均干潮位 (m)

$HWL$  ; 朔望平均満潮位 (m)

$CF_{RWL}$  ; 残留水位の算出に用いる係数

### 4. 現行設計法による破壊確率

#### (1) 信頼性指標

現行設計法による安全性水準は、信頼性指標  $\beta$  を算出することにより評価する。信頼性指標とは、図-7 に示すように破壊をもたらす破壊点 ( $Z=0$ ,  $Z$ : 性能関数) 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: First-Order Reliability Method) に基づき算出される。本研究では、破壊確率を正確に評価できる破壊点周りの線形

化近似に基づく Hasofer-Lind タイプ<sup>12)</sup>の信頼性指標を用いる。なお、信頼性指標は、その値が大きいかほど破壊確率が小さいことを示す。

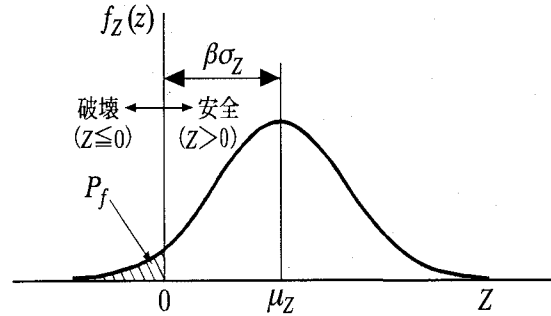


図-7 信頼性指標  $\beta$

#### (2) 現行設計法による安全性水準

現行設計法による安全性水準を評価するため、水深や設計震度を変化させて表-2 に示す 20 ケースについて、現行設計法によりセル板厚の算出を行った。セル半径は 3.65~13.25m の範囲となり、セル板厚は 2.86~18.22mm (50 年間の腐食代を見込まない値)、アーケ板厚は 0.91~5.61mm (同上) となった。現行設計法では、最小板厚の規定があり、8mm 以上が基本となっているが、ここでは純粋に現行設計法の設計計算式を用いた場合の信頼性指標の分布を見る観点から、最小板厚の規定を考慮する場合と、その規定を考慮しない場合の 2 通りについて検討を行った。

表-2 には信頼性指標の分布も示してある。最小板厚の規定がない場合は、セル殻の信頼性指標は 7.745~7.808, アーケは 7.775~7.846 となった。

表-2 検討条件及び信頼性指標の分布

No.	検討条件			セル殻		アーケ		
	計画水深 (m)	設計震度	中詰 $\phi$ (°)	板厚 mm	$\beta$	板厚 mm	$\beta$	
1	-7.5	0.00	30.0	2.86	7.808	0.91	7.819	
2			40.0	3.49	7.760	1.09	7.820	
3		0.10	30.0	2.86	7.808	0.91	7.819	
4			40.0	4.07	7.770	1.27	7.821	
5		0.15	30.0	3.36	7.800	1.07	7.817	
6			40.0	4.78	7.759	1.50	7.846	
7	-11.0	0.00	30.0	4.41	7.793	1.39	7.806	
8			40.0	5.48	7.753	1.70	7.814	
9		0.10	30.0	4.49	7.790	1.41	7.782	
10			40.0	6.41	7.751	1.99	7.815	
11		0.15	30.0	5.51	7.790	1.73	7.780	
12			40.0	7.87	7.753	2.44	7.810	
13		0.20	30.0	6.93	7.783	2.18	7.785	
14			40.0	9.91	7.753	3.07	7.805	
15		-14.5	0.00	30.0	6.29	7.781	1.97	7.798
16				40.0	7.77	7.746	2.40	7.811
17	0.20		30.0	10.32	7.779	3.22	7.773	
18			40.0	14.79	7.749	4.56	7.802	
19	0.25		30.0	12.72	7.779	3.97	7.775	
20			40.0	18.22	7.745	5.61	7.791	

信頼性指標の値は非常に大きく、かつ変動が少ないことが特徴である。ただし、信頼性指標の大きい領域では、信頼性指標の僅かな違いが破壊確率の大きな変化をもたらす。上記の信頼性指標の分布を破壊確率の分布に換算すると、セル殻では  $2.89 \times 10^{-15} \sim 4.77 \times 10^{-15}$  の範囲となり、アークでは  $2.22 \times 10^{-15} \sim 3.78 \times 10^{-15}$  の範囲であり、いずれも最大破壊確率と最小破壊確率は 1.7 倍程度の差がある。最小板厚の規定を考慮すると、セル殻の信頼性指標は 7.745 ~ 11.511, アークは 9.01 ~ 13.048 の範囲となり、さらに安全側の結果となる。

ここで得られた信頼性指標の値を、他の港湾構造物の有する信頼性指標<sup>2)3)5)6)7)</sup>と比較し、図-8に示す。最も小さな信頼性指標の値は防波堤の波浪時の外的安定であり、逆に最も大きな信頼性指標を示すのは円弧すべりに対する信頼性指標である。セルの板厚に関する信頼性指標は、円弧すべりに次いで大きな値といえる。図には、現行設計法における安全率を併せて示してある。これを見ると、基本的に安全率の設定が破壊確率の水準に大きな影響を及ぼしているといえる。安全率が 1.3 と中程度の円弧すべりが非常に大きな信頼性指標となっているのは、地盤強度の自己相関性に起因するもので、詳細は文献6)を参照されたい。

セル板厚に関する信頼性指標は、値が大きく、かつそのばらつきが少ないことが特徴である。これは、上述のように信頼性指標の値が大きいことが一つの理由であるが、この他の理由として、破壊モードが一つであること、設計パラメータの従う確率分布が条件により異ならないことがあげられる。例えば、防波堤の外的安定では、滑動・転倒・支持力の3つの破壊モードがあり、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤で波力算定精度に違いがある。

このようにセル板厚の信頼性指標は非常に大きいですが、これは地震動などの荷重作用時にセルが剛体と

して挙動することを保証するために工学的判断により高い信頼性を求めてきたのだと考えられる。このため、本研究では、検討より得られた平均的な破壊確率に基づく信頼性指標を目標信頼性指標とする。目標信頼性指標は、最小板厚の規定のない条件における値の平均値とし、セル殻については 7.77, アークについては 7.80 とした。

## 5. 信頼性設計法の検討

レベル1信頼性設計法において用いる部分係数  $\gamma$  は、式(5)により得られる。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) B_X \quad (5)$$

ここに、

$\beta_T$  : 目標安全性指標

$\alpha_X$  : 確率変数  $X$  の感度係数

$V_X$  : 確率変数  $X$  の変動係数

$B_X$  : 確率変数  $X$  の平均値と特性値の比

感度係数とは、性能関数における各パラメータの影響度合いを表す指標であり、FORMによる解析時に信頼性指標と同時に算出される。感度係数は絶対値が 1.0 に近いほど影響度合いが高いことを示す。目標信頼性指標における感度係数を各ケースで算出し、これを平均することにより、感度係数は表-3に示すように設定した。なお、ケース別の感度係数のばらつきは小さいものであった。

表-3 感度係数

	鋼材降伏強度	中詰土圧係数	残留水位
セル殻	0.805	-0.593	-0.012
アーク	0.817	-0.576	-0.023

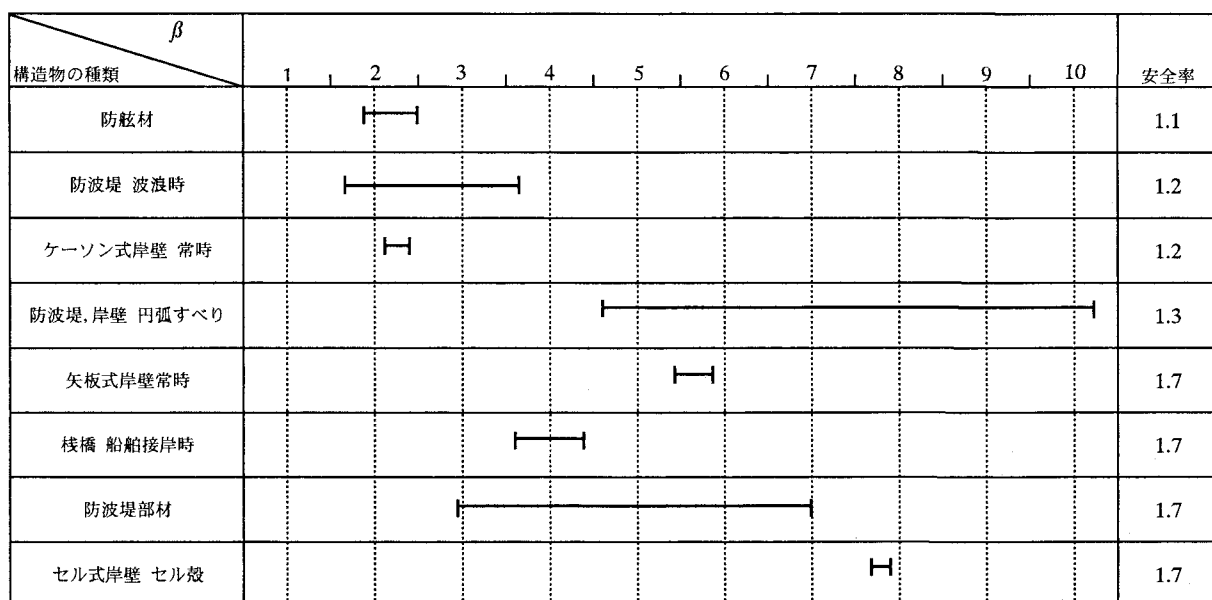


図-8 信頼性指標の比較

次に、設定した感度係数と表-1に示した確率分布をもとに、式(5)に従って部分係数を算出した。最適値の探索をするために、式(5)で用いる $\beta_T$ は4。(2)で求めた値を中心に0.2刻みで変化させ、設計結果から破壊確率を求め、式(6)に示すように目標破壊確率に対する分散が最小となる値を検討した。なおその際、部分係数は0.05ピッチで丸めた値とした。

$$\sum(P_{ft} - P_{fr})^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

ここに、

$P_{ft}$  : 破壊確率の目標値

$P_{fr}$  : 信頼性設計法による破壊確率

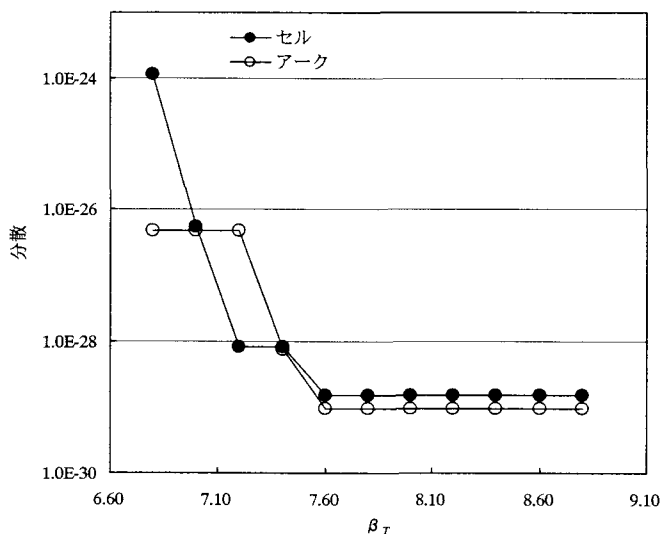


図-9 検討結果

表-4 部分係数

鋼材降伏強度	中詰土圧係数	残留水位
0.65	1.15	1.05

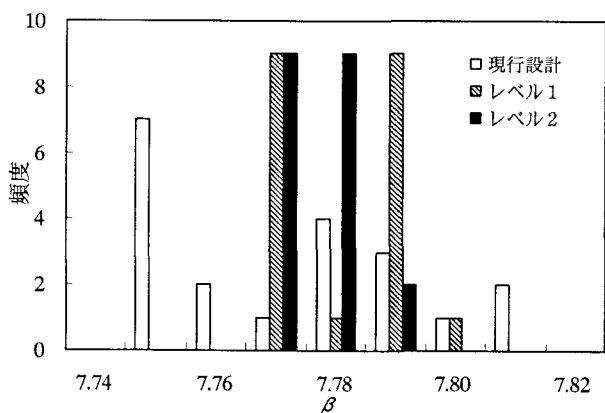


図-10 信頼性指標の分布

検討結果を図-9に、最適な部分係数を表-4に示す。分散の評価は式(6)のように破壊確率で行っているが、式(5)で用いる $\beta_T$ の最適値を検討するために図-9の水平軸は信頼性指標により示している。 $\beta_T$ が

7.6以上の範囲では分散はほぼ一定となり、部分係数は表-4に示すようにセル殻、アークともに同じ値が最適となった。図-10には最適な部分係数を用いた際の信頼性指標の分布を示す。参考のために信頼性指標を直接求めるレベル2の方法による値とも比較しているが、レベル2と遜色ない結果が得られている。

## 6. まとめ

本研究による主要な結論は以下のとおりである。

- ①セル板厚の設計法に関する設計パラメータの従う確率分布を評価した。特に中詰土圧は非常に安全側に設定されていることが分かった。
- ②セル殻およびアークの引張降伏に関する破壊確率は非常に小さい。これは、地震時においてセルが剛体として挙動することを期待しているために非常に安全に設定されているものと考えられる。
- ③現行設計法による平均的な安全性水準をターゲットとした部分係数を提案した。提案した部分係数により、目標とする信頼性指標と一致する結果が得られることを確認した。

## 参考文献

- 1) 長尾 毅, 菊地喜昭: 港湾分野における性能設計の考え方, 第39回地盤工学研究発表会, 2004
- 2) 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
- 3) 吉岡 健, 長尾 毅, 鷺尾朝昭, 森屋陽一: 重力式特殊防波堤の外的安定問題に関する信頼性解析, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.751-755, 2004
- 4) 吉岡 健, 長尾 毅: 重力式防波堤の外的安定に関する部分係数のコードキャリブレーション, 海洋開発論文集, 第21巻, 2005, 投稿中
- 5) 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, pp.389-400, 2005
- 6) 尾崎竜三, 長尾 毅: 防波堤を対象とした円弧すべりに関する信頼性設計法の適用, 海洋開発論文集, 第21巻, 2005, 投稿中
- 7) 上田 茂, 岡田達彦, 長尾 毅: パースの重要度を考慮した船舶接岸用防舷材の信頼性設計に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.846-850, 2004
- 8) 土木学会鋼構造シリーズ6, 鋼構造物の終局強度と設計, 1994
- 9) 北島昭一, 野田節男, 中山種清: 根入れ式鋼板セルの静的挙動, 港湾技研資料, No.375, 1981
- 10) 才村幸生, 森本精洋, 高瀬幸紀: 根入れ式鋼板セル中詰土圧の現場計測結果, 土木学会第36回年次学術講演会, III-282, pp.562-563, 1981
- 11) 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
- 12) 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, pp.111-121, 1974