

消波ブロック被覆堤の施工時安定性照査に用いる 目標安全性水準に関する研究

吉岡 健¹・長尾 毅²

防波堤の施工時に対する安定性照査については、これまで、波高の再現期間を短くしたり、許容安全率を下げる等の措置が取られてきた。しかしながら、これらの根拠は必ずしも明確ではなく、施工期間やその間の波浪の来襲頻度も様々である。本研究では、既往の施工時照査法に関する実態調査を行うとともに、消波ブロック被覆堤のブロック未施工状態を対象とし、施工時のライフサイクルコストを最小化する観点から、最適な目標安全性水準の検討を実施した。さらにこの水準を、各種の設計パラメータによって簡易に推定する方法を提案した。得られた目標信頼性指標に基づき、部分係数を簡易に修正することによって、合理的な施工時照査が可能となる。

1. はじめに

防波堤の建設には期間を要することから、ある一定の間、施工途中の不完全な状態で放置される場合がある。このため防波堤の設計においては、この状態における安定性を施工時として照査している。その場合の照査法としては、これまでのところ、設計者の工学的判断に基づき、波高の再現期間を短くしたり、許容安全率を下げる等の措置が取られてきた。しかしながら、この根拠は必ずしも明確ではなく、かつ施工期間も様々である。施工時の荷重レベルや安全性水準は、施工期間（未完成状態が存置される期間）と波浪の遭遇確率、さらには被災時の損失費用によって決定されるべきである。その際、施工期間に応じたライフサイクルコストにより評価する方法が考えられる（以下、施工時 LCC と称す）。

吉岡ら（2006）は、消波ブロック被覆堤の施工状態（消波ブロック未施工状態）を対象とし、多数の建設事例を対象とした一連の信頼性解析により、施工時 LCC の検討を実施している。その結果、荷重レベルを 10 年確率波とし、吉岡ら（2005a）が提案するケーソン式混成堤の部分係数を用いた照査を行えば、施工時 LCC 最小化の観点から十分安全な設計となることを示した。しかしながら、本照査法（信頼性設計法への移行を踏まえ、以下ではこれを施工時標準照査法と称する）では、設計条件によっては過大となるケースも見られたことから、条件に応じた最適な荷重レベルもしくは安全性水準についての検討が必要であった。

そこで本研究では、まず、既往の施工時照査方法に関する実態調査を行い、考慮する施工状態や、荷重レベルと安全性水準の組合せ、設計結果への影響等についての情報を得た。続いて、消波ブロック被覆堤の施工状態を

対象とし、施工時 LCC を最小化する観点から、最適な目標安全性水準の検討を実施した。さらにこの水準を、各種の設計パラメータによって簡易に推定し、部分係数に応用する方法を検討した。

2. 既往の施工時照査法に関する実態調査

調査対象は国が所有する直轄港湾の重力式防波堤とし、各地方整備局、北海道開発局および沖縄総合事務局にヒアリングを行った。調査項目は、①構造形式、②考慮した施工状態、③施工期間（放置期間、設計上考慮した期間もしくは実績）、④対象波、⑤許容安全率、⑥照査結果等とした。

調査結果を図-1 に示す。分類に使用できたサンプル数は 101 ケースである。本調査範囲では、消波ブロック被覆堤が最も多く施工時照査が行われる構造形式となっている。設計状態としては、消波ブロックなし、上部工なし、暫定上部工の単独もしくはそれらの組合せが考慮されている。ここで、“消波ブロックなし”には不完全被覆が 7 ケース含まれているので注意を要する。施工期間は 1 年未満から 5 年程度と幅広い。対象波は 10 年確率波がほとんどであるが、安全側に完成時と同様の 50 年確率波としている事例もある。これらの事例は全て日本海側に位置しており、冬季風浪により毎年同程度の波浪が来襲し得ることが要因と考えられる。許容安全率は、滑動・転倒ともに完成時と同じく 1.2 とする事例や、滑動 1.0・転倒 1.1 とする事例が大半である。以上の設計条件によって、施工時照査により断面が決定されるケースが全体の 1/4 程度ある。これを、“消波ブロックなし”を施工状態としているケース（不完全被覆除く）のみに限定すると、施工時照査が断面決定要因となる割合が 55 % となった。したがって、消波ブロック未施工状態の照査が設計結果に有意な影響を及ぼしていると言える。

1 正会員 修(工) 電源開発(株) 水力エンジニアリング部

2 正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所

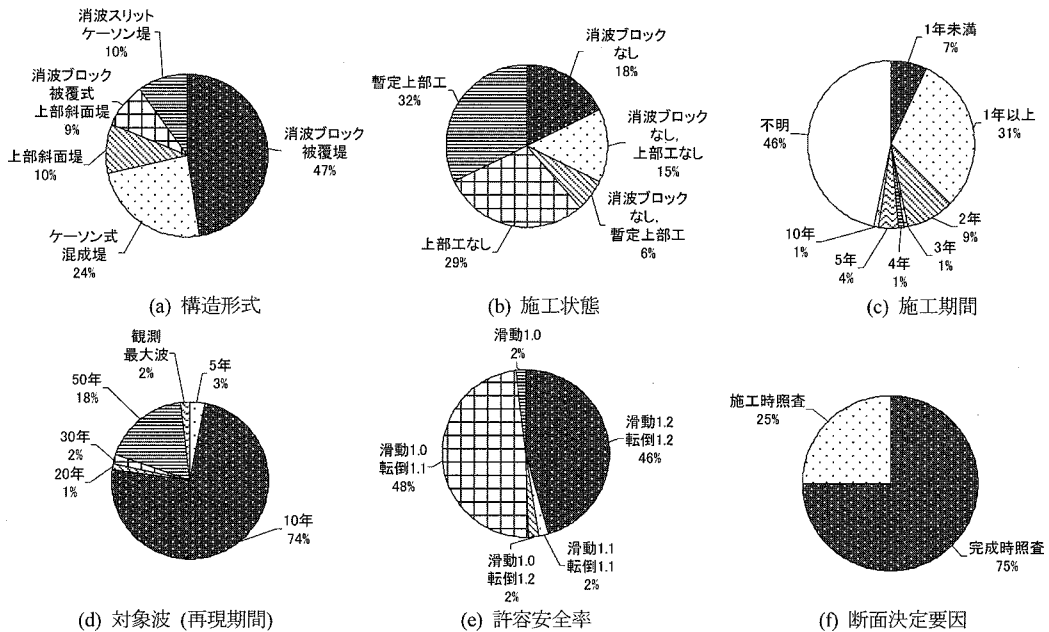


図-1 調査結果

3. 施工時 LCC の評価

まず、吉岡ら (2006) が実施した施工時 LCC の検討結果について概説する。検討は、全国広範囲より収集した消波ブロック被覆堤の建設事例 35 ケースを用い、考慮する破壊モードは堤体の滑動および転倒とした。詳細は、文献を参照されたい。

(1) 施工時標準照査法による設計

吉岡ら (2005a) が提案したレベル 1 信頼性設計法の安全性照査式を下式に、ケーソン式混成堤 (消波ブロックなし) の部分係数を表-1 に示す。

(滑動)

$$\gamma f k \left(\sum_i \gamma w_i W_{ik} - P_{Bd} - \gamma P_U P_{Uk} \right) \geq \gamma P_H P_{Hk} \quad (1)$$

(転倒)

$$a_1 \sum_i \gamma w_i W_{ik} - a_2 P_{Bd} - a_3 \gamma P_U P_{Uk} \geq a_4 \gamma P_H P_{Hk} \quad (2)$$

$$P_{Bd} = \rho_w g (\gamma w_l w_{lk} + h) B_C \quad (3)$$

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 RC, 無筋コンクリート NC, 中詰砂 SAND) 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)、 $a_1 \sim a_5$: 各荷重のアーム長 (m)、 γ : 添字の設計因子に対する部分係数、 ρ_w : 海水の密度 (t/m³)、 g : 重力加速度 (m/s²)、 w_l : 潮位 (m)、 h : 水深 (m)、 B_C : 堤体幅 (m) である。また、式中の添字 k, d は、それぞれ特性値および設計用値を表す。

表-1 に示した部分係数は次式を用いて算定しており、それらの値はコードキャリブレーションにより決定している。

表-1 ケーソン式混成堤の部分係数 (吉岡ら, 2005a)

β_T		2.40		
設計因子		α	V	μ_X/X_k
滑動	$P_H, P_U^{※1}$	-0.704	0.239	0.740
	$w_l^{※2}$	-0.059	0.400	1.000
	f	0.689	0.150	1.060
	W_{RC}	0.030	0.020	0.980
	W_{NC}	0.025	0.020	1.020
	W_{SAND}	0.150	0.040	1.020
転倒	$P_H, P_U^{※1}$	-0.968	0.239	0.740
	$w_l^{※2}$	-0.092	0.400	1.000
	W_{RC}	0.044	0.020	0.980
	W_{NC}	0.040	0.020	1.020
	W_{SAND}	0.232	0.040	1.020

※1) 水深変化綫: 海底勾配 1/30 未満の場合

※2) 既往最高潮位 H. H. W. L. / なく望平均満潮位 H. W. L. ≥ 2.0 の場合

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) \mu_X / X_k \quad (4)$$

ここで、 $\alpha_X, V_X, \mu_X/X_k$ はそれぞれ設計因子 X の感度係数、変動係数および平均値の偏り (平均値 μ_X と特性値 X_k の比)、 β_T は目標信頼性指標である。

つまり、ケーソン式混成堤の既往施設の平均安全性水準を信頼性指標で 2.40 と定め、これを目標値として部分係数を決定している。以下では、設計波を 10 年確率波とし、上記の部分係数を用いた照査を施工時標準照査法とする。

(2) 施工時 LCC の算出方法

施工時 LCC は、消波ブロックを除く初期建設費 C_i と施工期間 L 中の期待被災費 EC_i の和によって定義し

た。期待被災費 EC_f は、被災時費用に複数の荷重作用による期待被災回数を乗じて算出し、これを現在価値に換算する。

$$EC_f = \sum_{j=1}^m E_{fj} C_f \frac{R}{L} \quad (5)$$

$$R = \sum_{k=1}^L \frac{1}{(1+i)^k} \quad (6)$$

ここに、 m ：対象とする荷重ランク数、 L ：施工期間(消波ブロック未施工状態が存置される期間)、 E_{fj} ：対象とする荷重による期待被災回数、 C_f ：被災時費用、 i ：社会的割引率(一般的な4%を使用)である。対象とする荷重作用による期待被災回数は、荷重作用がポアソン過程に従うと仮定すると、次式によって計算できる。

$$E_{fj} = v_j LP_{fj} \quad (7)$$

ここに、 P_{fj} は対象とする荷重の作用による破壊確率、 v_j は対象とする荷重の年平均発生率 ($=1/r_j - 1/r_{j+1}$ 、ただし最長の再現期間荷重に対しては $1/r_j$)、 r_j は対象とする荷重の再現期間である。

期待被災費 EC_f を計算するためには複数の荷重ランクを考慮する必要があることから、再現期間 1, 3, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200 年の 9 段階の設計波高を評価した。各設計波高に対する破壊確率 P_{fj} は、滑動および転倒破壊に基づくシステム破壊確率とした。システム破壊確率は、一次信頼性理論 (FORM: First-Order Reliability Method) によって得られる滑動・転倒信頼性指標および破壊モード間の相関係数より算出した。ここで、各設計波高に対する水平波力は、消波ブロックがない場合の合田波力公式に従い、碎波圧係数 α_2 を考慮し、波力低減係数 λ_1, λ_2 を 1 として計算した。初期建設費 C_i および被災時費用 C_f は、「港湾土木請負工事積算基準 (国土交通省港湾局監修)」に基づき積算した。被災時費用のうち、直接的被害費用は大規模被災と中規模被災を想定し、その平均復旧費とした。さらに、社会経済面における間接的被害費用を考慮するために柴崎ら (2003) を参照し、直接的被害費を 5 倍して被災時費用 C_f とした。

以上の解析を、堤体幅を 5 cm 刻みで変化させて実施した。この際、前章の実態調査に基づき、施工期間 L を 1, 3, 5 年として、それぞれ施工時 LCC を算出した。

(3) 計算結果

図-2 は、水深に大差のない 3 ケースを抽出し、沖波の極値分布および浅水変形・碎波変形計算によって算出した再現期間別の堤前波高 (有義波高 $H_{1/3}$ 、最高波高 H_{max}) と水深波高比 h/H_o' (h ：堤前水深、 H_o' ：換算沖波波高) を比較したものである。3 ケースの主な設計条件を表-2 に示す。ここに、 γ_{50} は合田 (2002) が提案する裾長さパラメータ (50 年確率波高に対する 10 年確率波高の比) であり、沖波の極値分布形の裾の広がり具合

表-2 抽出 3 ケースの計算条件

ケース名	Case 1	Case 2	Case 3
h	16.6	17.2	13.8
h'	11.6	14.5	8.5
B_M	9.5	5.7	9.0
S	1/100	1/50	1/150
H_{max50}	11.6	12.7	7.5
T_{50}	12.0	12.0	13.0
γ_{50}	1.330	1.283	1.237

注) h ：ケーソン前面水深(m)、 h' ：ケーソン設置水深(m)、 B_M ：港内側マウンド肩幅(m)、 S ：海底勾配、 H_{max50} ：50 年確率最高波高(m)、 T_{50} ：50 年確率有義波周期(s)、 γ_{50} ：裾長さパラメータ

を表す指標である。一般に水深波高比 $h/H_{1/3}$ が 3 を下回る場合に碎波影響が顕著になることから、Case1 の重複波領域では再現期間に比例して最高波高は増大するのに対し、Case2、Case3 の碎波領域では最高波高は頭打ちとなっている。

図-3 に、上記 3 ケースの施工時 LCC 曲線を示す。吉岡ら (2006) の検討では、横軸を完成時の設計断面に対する堤体重量比とし、設計結果への影響を比較した。一方、本研究では施工時の目標安全性水準を検討するため、横軸を 10 年確率波高に対するシステム信頼性指標 β_{10} としている。 β_{10} が小さくなるほど、すなわち堤体重量が小さくなるほど初期建設費は減少するが、その分期待被災回数に伴う復旧費の項が増加し、施工時 LCC は下に凸の曲線となる。図中 × 印は施工時 LCC が最小となる設計点であり、これが最適な安全性水準ということになる。以下ではこれを最適信頼性指標 β_{opt10} とする。

また、図中○印は施工時標準照査法による設計点を表わしており、いずれのケースも β_{10} は 2.4 程度となっている。施工時標準照査法は、目標信頼性指標 $\beta_T=2.4$ に基づく部分係数を用いたものであるから、その保有信頼性指標が 2.4 周辺に集中することは当然の結果である。いずれのケースも β_{opt10} (×印) は 2.4 以下の値となっており、施工時標準照査法は安全側の設計となっている。施工期間 L で比較すると、 L が長くなるほど期待被災回数が増加するため、 β_{opt10} は高い値となっている。また、ケース毎に比較すると、重複波領域にある Case1 が最も β_{opt10} が高く、続いて碎波領域にある Case3 が、両者の中間の海域条件にある Case2 は最も低い値となっている。

4. 施工時 LCC に基づく目標安全性水準

(1) 重回帰分析

図-4 に、各施工期間 L に対する β_{opt10} の分布を示す。施工期間に応じて β_{opt10} の平均値は変化するし、ケース毎すなわち海域条件によるばらつきも大きい。このような有意に異なる条件に対し、全国一律の安全性水準を定めることは困難であるため、以下では、 β_{opt10} と設計条

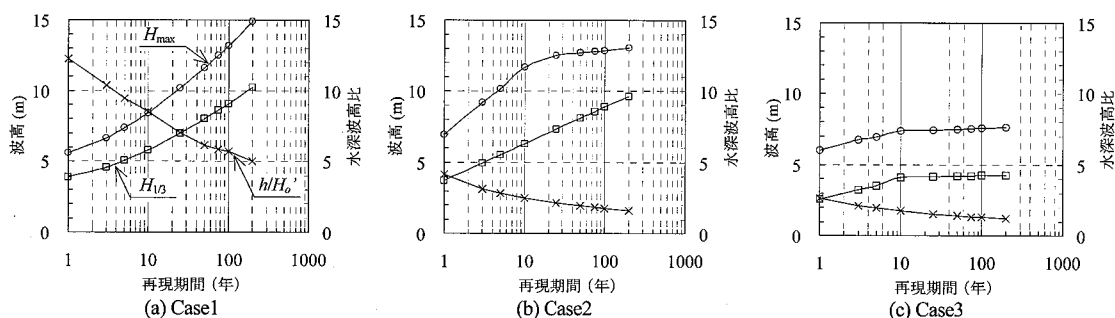


図-2 再現期間別の堤前波高と水深波高比

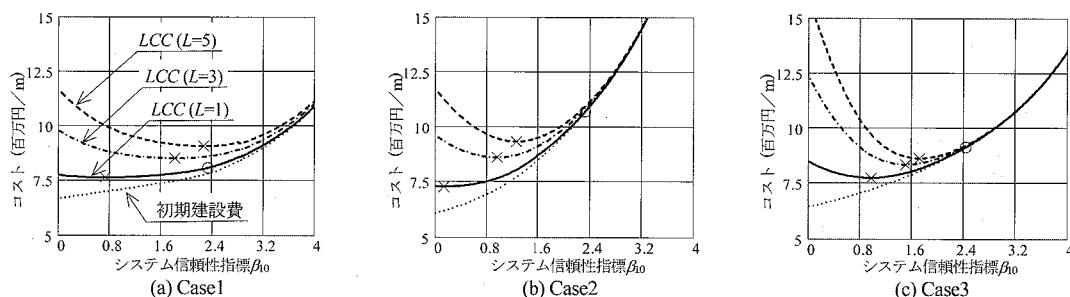


図-3 施工時 LCC 曲線

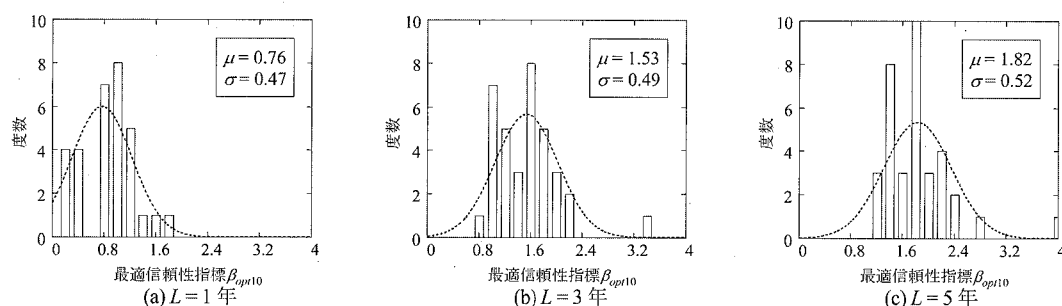


図-4 最適信頼性指標の分布

件との相関性の議論から、 β_{opt10} の簡易算定モデルを検討し、レベル1信頼性設計法への適用を試みる。なお、施工時照査に用いる荷重レベルとしては、実態調査の結果(図-1)、使用実績が圧倒的に多い10年確率波高とする。

前述したとおり、 β_{opt10} との相関性が高い因子としては、第一に施工期間 L が挙げられる。図-4に示した各施工期間に対する β_{opt10} の平均値と L の対数値とは、極めて良い比例関係にある。さらに、初期建設費 C_i と被災時費用 C_f の大小関係 C_f/C_i もLCCに影響し得る。そこでまず、これらを説明変数とした重回帰分析により、その線形重回帰式を得た。回帰分析にあたり、 β_{opt10} が2.4を上回るケースが小数あるが、このように完成時断面よりも高い安全性水準を求めるケースについては、消波ブロック被覆堤として設計すること自体が適切ではないと考えられるため、検討対象から除外した。回帰式に

よる推定値と実際の計算値との誤差 $\delta\beta_{opt10}$ が、残りの海域条件による影響分ということになる。

図-5に、裾長さパラメータと水深波高比の積 $\gamma_{50} \times h/H_{010}'$ と、誤差 $\delta\beta_{opt10}$ との関係を示す。ここで、 H_{010}' は10年確率の換算沖波波高である。図より、 $\gamma_{50} \times h/H_{010}' = 4$ 程度を境として誤差の傾向が反転していることがわかる。 $\gamma_{50} \times h/H_{010}'$ が大きいケースは、高波浪の来襲可能性がありながら防波堤が重複波領域に位置しており、このようなケースは極大波浪の到達による期待被災回数が大きくなるため、より高い安全性が求められることを意味している。一方、 $\gamma_{50} \times h/H_{010}'$ が小さいケースは、毎年同程度の波浪が来襲しつつ防波堤が碎波領域に位置しており、このようなケースは、毎年同規模の波浪が到達することによって期待被災回数が大きくなり、同様に高い安全性が求められる。したがって、

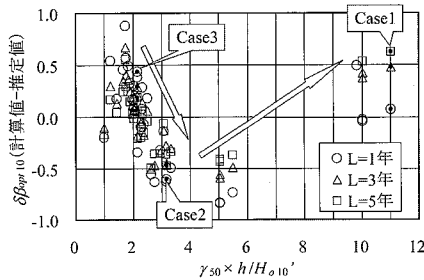
図-5 海域条件と誤差 $\delta\beta_{opt10}$ との関係

図-3に示したケース毎の β_{opt10} の相違は、裾長さパラメータと水深波高比の影響によるものと考えられる。

以上の相関性の検討により、得られた β_{opt10} の簡易推定式を以下に示す。

$$\beta_{opt10} = 2.4(0.59\log_{10}L + 0.04C_f/C_i + \kappa)$$

$$\kappa = \begin{cases} -0.19\gamma_{50}h/H_{010}' + 0.86 : \gamma_{50}h/H_{010}' \leq 4 \\ 0.08\gamma_{50}h/H_{010}' - 0.22 : \gamma_{50}h/H_{010}' > 4 \end{cases} \quad (8)$$

ただし $0.7 < \beta_{opt10} < 2.4$

式中の第1項が施工条件を、第2項が被災規模条件を、第3項が海域条件を表している。また、推定式には図-4の結果に基づき、 β_{opt10} の上下限値を設けている。特に、 β_{opt10} が 2.4 を大きく上回る計算結果となる場合には、構造形式の見直しが必要である。式(8)を用いた β_{opt10} の推定値と実際の計算値との相関係数は 0.92 であり、実用上十分な精度を有している。

(2) 部分係数設定方法の提案

式(4)、(8)および表-1に示す値を用いた部分係数の計算例を表-3に示す。ここで、式(8)は10年確率波高に対する目標システム信頼性指標 β_{opt10} を定める式であり、式(4)に用いるべき目標値 β_T とは厳密には異なる。しかし、式(8)が1~2割程度の安全側の値を与える式としていることから、式(8)による計算値をそのまま β_T としてよいこととした。さらに、より厳密に言えば、 β_T の値によって感度係数を再評価する必要がある。しかしながら、感度係数を再評価しない簡易な方法によってもレベル1信頼性設計の合理性は維持される(吉岡ら, 2005b)ことから、表-1に示す値をそのまま用いてよいこととした。

図-6に、本提案法と施工時標準照査法による設計結果の比較を示す。図の縦軸は、施工時LCC最小化設計に対する堤体重量比としている。これより、施工時標準照査法に比べ、本提案法はLCC最小となる断面とのズレが小さく、より合理的な照査となっていることがわかる。

5. ま と め

消波ブロック被覆堤の施工時安定性照査に用いる目標安全性水準について、施工時のLCCを最小化する観点

表-3 提案法による部分係数の計算例

計算条件	Case2		Case3	
	L	5	1	
	γ_{50}	1.28	1.24	
	h/H_{010}'	2.48	1.74	
部分係数	C_f/C_i	2.3	1.5	
	$\beta_{opt10}(\beta_T)$	1.83	1.22	
	破壊モード	滑動	転倒	滑動
	P_H, P_U	0.97	1.05	0.89
部分係数	wl	1.04	1.07	1.03
	f	0.85	—	0.92
	W_{EC}	0.98	0.98	0.98
	W_{NC}	1.02	1.02	1.02
部分係数	W_{SAND}	1.01	1.00	1.01

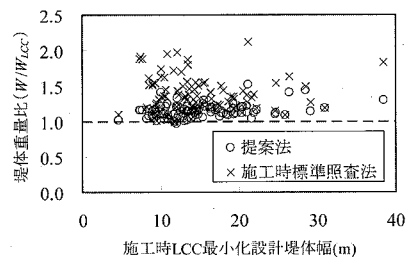


図-6 堤体重量比の比較

から設定する方法を検討した。

得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- ①実態調査により、考慮する施工状態や施工期間、対象波、許容安全率は様々であり、これらが設計結果に有意な影響を及ぼしていることがわかった。
- ②消波ブロック被覆堤の施工時LCCが最小となる最適安全性水準は、施工期間や波浪の来襲頻度、初期建設費と被災時費用の比によって大きく変化する。
- ③これらを説明変数とした最適信頼性指標の評価式を提案した。提案式を用いれば、設計者がレベル1信頼性設計法に用いる部分係数を簡易に修正し、合理的な施工時の照査を行うことが可能となる。

参 考 文 献

- 合田良実(2002):設計波高に係わる極値統計分布の裾長さパラメータとその意義, 海工論文集, 第49巻, pp. 171-175.
- 柴崎隆一・森屋陽一・渡部富博・安間 清(2003):貨物輸送費用も考慮した港湾施設の耐震設計における経済評価手法の構築, 国総研資料, No.125, 27p.
- 長尾 毅(2001):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.
- 吉岡 健・長尾 毅(2005a):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, 国総研報告, No.20, 38p.
- 吉岡 健・長尾 毅(2005b):信頼性の変化に対応した部分安全係数の設定方法, 構造工学論文集, Vol.51A, pp. 401-412.
- 吉岡 健・長尾 毅(2006):LCC評価手法を用いた消波ブロック被覆堤の施工時安定性に関する研究, 海洋開発論文集, 第22巻, pp. 703-708.