

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

A STUDY ON THE STABILITY OF CAISSON-TYPE BREAKWATERS COVERED
WITH WAVE-DISSIPATING BLOCKS DURING EXECUTION BY USING THE
LCC EVALUATION TECHNIQUE

吉岡 健¹・長尾 毅²

Takeshi YOSHIOKA, Takashi NAGAO

¹正会員 修 (工) 電源開発 (株) (〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1)

²正会員 博 (工) 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

The stability of a breakwater during execution should be checked as well as that after completion. However, rational specific design methodology has not been established so far as to the stability during execution. We discuss the stability of caisson-type breakwaters covered with wave dissipating blocks during execution. We conducted a series of reliability analyses and showed that the design method using the design wave of ten years return period and partial factors of the caisson-type composite breakwater gave the conservative result from the viewpoint of LCC minimization.

Key Words, stability during execution, caisson-type breakwater, LCC, partial factor

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きた。その場合、対象とする荷重レベルすなわち設計波高を、完成時断面に対して一般に用いられる 50 年確率波高から 10 年確率波高に下げ、それに対する安全性を完成時と同等もしくはそれ以下として照査する事例が多い。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）。

そこで本研究では、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、標準的と想定される照査法による設計断面と施工時 LCC 最小化による設計断面の比較検討を実施する。ここで、現時点では標準的な照査法が確立されていないが、信頼性設計法への移行を考慮すると、荷重レベルとして 10 年確率波高を用い、著者¹⁾が提案するケーソン式混成堤の部分係数を用いる方法の採用が考えられることから、これを仮に標準的な方法とみなして比較検討を行う。

2. 検討方法

(1) 標準照査法による設計

検討対象には、全国広範囲の建設事例より地域的、設計条件的に偏りがないように収集した 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。基礎の支持力については、滑動または転倒に比べて破壊可能性が小さい²⁾ことから、本研究では検討対象外とした。

著者¹⁾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、ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の部分係数を表-1 に示す。

(滑動)

$$\gamma_f f_k \left(\sum_i \gamma_{W_i} W_{ik} - P_{Bd} - \gamma_{P_U} P_{Uk} \right) \geq \gamma_{P_H} P_{Hk} \quad (1)$$

(転倒)

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

$$P_{Bd} = \rho_w g (\gamma_{wf} w l_k + h) B_C \quad (3)$$

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)、 wl : 潮位 (m)、 h : 水深 (m)、 B_C :

表-1 部分係数¹⁾

部分係数 γ		ケーソン式 混成堤	消波ブロック 被覆堤
滑 動	f	0.79	0.77
	P_H, P_U	水深変化 緩 ^{*1}	1.04
		水深変化 急 ^{*1}	1.17
	wl	$r_{wl}^{*2}=1.5$	1.03
		$r_w^{*2}=2.0, 2.5$	1.06
		H.H.W.L.	1.00
	W_{RC}	0.98	0.98
	W_{NC}	1.02	1.02
転 倒	P_H, P_U	水深変化 緩 ^{*1}	1.15
		水深変化 急 ^{*1}	1.31
	wl	$r_{wl}^{*2}=1.5$	1.04
		$r_w^{*2}=2.0, 2.5$	1.09
		H.H.W.L.	1.00
	W_{RC}	0.98	0.98
	W_{NC}	1.02	1.02
	W_{SAND}	1.00	1.00

※1) 水深変化緩/急: 海底勾配 1/30 未満/以上

※2) r_{wl} : 既往最高潮位とさく望平均満潮位の比

表-2 標準照査法

照査法	消波工	設計波	部分係数
完成時	あり	50 年確率波	消波ブロック被覆堤
施工時	なし	10 年確率波	ケーソン式混成堤

堤体幅 (m)

式中の添字 k, d は、それぞれ特性値および設計用値を表し、また式(3)は、ケーソンがフーチングを有しない場合の浮力設計用値の算定式である。表-1 に示した部分係数は、滑動および転倒安全率を 1.2 として設計された既往施設の平均安全性水準として、50 年確率波に対する目標システム信頼性指標を 2.4 と定め、キャリブレーションによって決定した値である。

以下では、表-2 に示した方法を完成時および施工時の標準照査法とし、それらと施工時 LCC 最小化法との比較検討を実施した。

(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 中の期待復旧費 EC_f の和によって定義される。期待復旧費 EC_f は、長尾・森屋³⁾に従い、次式によって計算した。すなわち、被災時の復旧費に、複数の荷重作用における期待被災回数を乗じて算出し、さらにポアソン過程に基づく社会的割引率によって現在価値に換算する。

$$EC_f = \sum_{j=1}^m E_{fj} C_f \frac{R}{L} \quad (4)$$

$$R = \sum_{k=1}^L \frac{1}{(1+i)^k} \quad (5)$$

ここに、 m : 対象とする荷重ランク数、 L : 施工期間 (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 : 被災時の復旧費、 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、結局次式によって計算できる。

$$E_{fj} = v_j L P_{fj} \quad (6)$$

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。

(3) 荷重の算出方法

対象とする荷重ランクすなわち再現期間は、1, 3, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200 年の 9 段階とし、それぞれの設計波高を評価した。まず、高田ら⁴⁾によってまとめられている全国各地の沖波表から、沖波の極値の最適母分布関数を当てはめ、沖波波高を評価した。さらに、同じく高田ら⁴⁾によってまとめられている沿岸係数表を用いて換算沖波波高とした。ここに、沿岸係数 $\alpha =$ 屈折係数 $K_r \times$ 回折係数 K_d である。続いて、合田⁵⁾の浅水変形、砕波変形計算により、堤体位置での有義波高および最高波高 (設計波高) を計算した。

(4) 破壊確率の算出方法

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以下の手順により算出した。まず、一次信頼性理論 (FORM: First-Order Reliability Method) によって、滑動・転倒信頼性指標を算出する。ここで、両破壊モードの性能関数は、力の釣合いに基づき次式により定義している。

(滑動破壊モード)

$$Z = f \left(\sum_i W_i - P_B - P_U \right) - P_H \quad (7)$$

(転倒破壊モード)

$$Z = a_1 \sum_i W_i - a_2 P_B - a_3 P_U - a_4 P_H \quad (8)$$

各設計因子の従う確率分布は全て正規分布を仮定し、部分係数の提案時と同じく、長尾⁶⁾がまとめた値を用いた。また、水平波力および揚圧力は消波ブロックがない場合の合田波力公式に従い算出した。完成状態 (消波ブロックあり) では波力低減係数は $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.8$ 、 $\lambda_3 = 0$ であり、砕波圧成分が作用しないのに対し、施工状態 (消波ブロックなし) では $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1.0$ となり、砕波圧が作用する。

信頼性解析により算出した滑動・転倒信頼性指標

(β_s, β_o) および両破壊モード間の相関係数 ρ_{so} を用いて、次式によりシステム破壊確率 P_{f_sys} を評価する。

$$P_{f_sys} = P_s + P_o - P_{so} \quad (9)$$

$$= \Phi(-\beta_s) + \Phi(-\beta_o) - \Phi_2(-\beta_s, -\beta_o, \rho_{so})$$

ここに、 Φ_2 は2次の標準正規結合確率分布関数であり、以下に示すOwen⁷⁾のモデルによって算出した。

$$\Phi_2(-\beta_s, -\beta_o, \rho_{so}) = \Phi(-\beta_s) \cdot \Phi(-\beta_o) + \int_0^{\rho_{so}} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-t^2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta_s^2 - 2t\beta_s\beta_o + \beta_o^2}{1-t^2}\right)\right) dt \quad (10)$$

破壊モード間の相関係数 ρ_{so} は、FORMによって副次的に算出される感度係数 α を成分に持つ単位ベクトルの内積により算出した。

$$\rho_{so} = \sum_x \alpha_{x,s} \cdot \alpha_{x,o} \quad (11)$$

ここに、 x : 確率変数（設計因子）である。

(5) 被災時費用の算出方法

被災時の復旧費の算出にあたっては、表-3に示す中規模被災と大規模被災を想定し、原型復旧に要するそれぞれの対策費を積算した。しかしながら、力の釣合いに基づく破壊確率では被災規模の判定は不可能であるため、中規模被災と大規模被災の平均復旧費を用いた。初期建設費および被災時の復旧費は直接工事費とし、「港湾土木請負工事積算基準（国土交通省港湾局監修）」を参考に算出した。

また、被災時の復旧費には、直接的な被害費用（物理的な復旧に要する費用）に加えて、社会経済面における間接的な被害費用を考慮する必要があるが、これは背後圏の状況によって複雑に変化するため算定困難である。したがって本検討では、直接的被害費用を複数倍することにより、その影響を加味することとした。港湾構造物に対する間接被害費用の研究例として、柴崎ら⁸⁾が行った重力式岸壁の地震災害に対する検討によると、その間接被害費用は直接被害費用の1~8倍程度である。そこでここでは、その中間的な値である5倍を用いることとした。

表-3 想定被災程度と対策工

	中規模被災	大規模被災
被災程度	マウンド上での滑動	マウンドからの滑落
対策工	①撤去工（上部工，中詰砂，根固・被覆ブロック，消波ブロック），②ケーソン浮揚，③基礎工（基礎捨石本均し，荒均し），④本体工，⑤根固・被覆工，⑥上部工，⑦消波工	①撤去工（同左，水中作業），②ケーソン浮揚（大型起重機船使用），③基礎工（基礎捨石投入，本均し，荒均し），④本体工，⑤根固・被覆工，⑥上部工，⑦消波工

注）下線部は消波ブロックがある場合

以上の解析を、ケーソン幅もしくはフーチング幅を5cm刻みで変化させて実施した。このとき、施工期間 L を1, 3, 5年として、それぞれ施工時LCCを比較した。なお、以降に示す費用は全て、単位奥行当りの価格である。

4. 検討結果および考察

(1) 標準照査法による設計断面の比較

各照査法による設計断面（ケーソン幅）の比較を図-1に示す。完成時標準照査法による設計断面よりも施工時標準設計法による設計断面が大となるケースが、35ケース中31ケースある。その理由について以下に考察する。

図-2は、堤前位置における50年確率波高（最高波）に対する10年確率波高の低下率と、消波ブロックのなし／ありによる水平波力の増加率を比較したものである。最高波高比については、沖波の極値分布の裾が短い、すなわち毎年同程度の波浪が来襲する海域や、碎波によって波高の上限が規定される海域では、最高波高の低下度が小さい。一方、水平波力比については、消波ブロックのなし／ありによる水平波力の増加率が総じて大きい。これは、前述したとおり、消波ブロックありの場合は碎波圧が作用

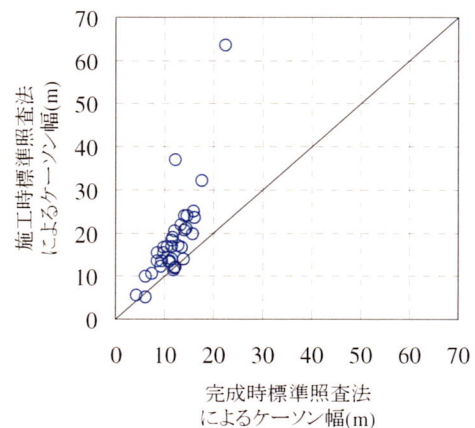


図-1 ケーソン幅の比較

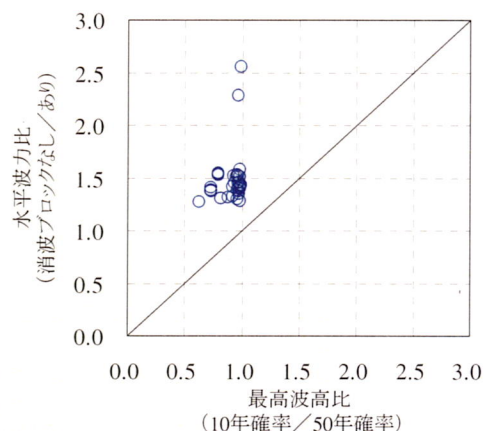


図-2 最高波高低下率と水平波力増加率の比較

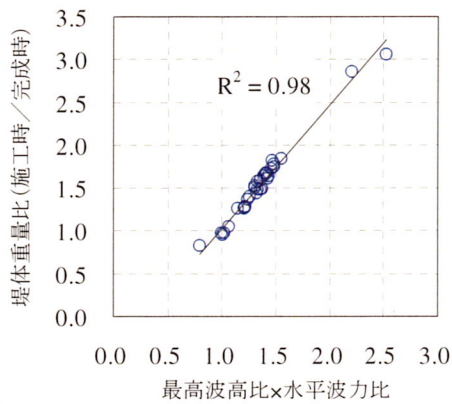


図-3 堤体重量比との関係

表-4 抽出3ケースの計算条件

ケース名	Case1	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
$H_{\max 50}$	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, $H_{\max 50}$: 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

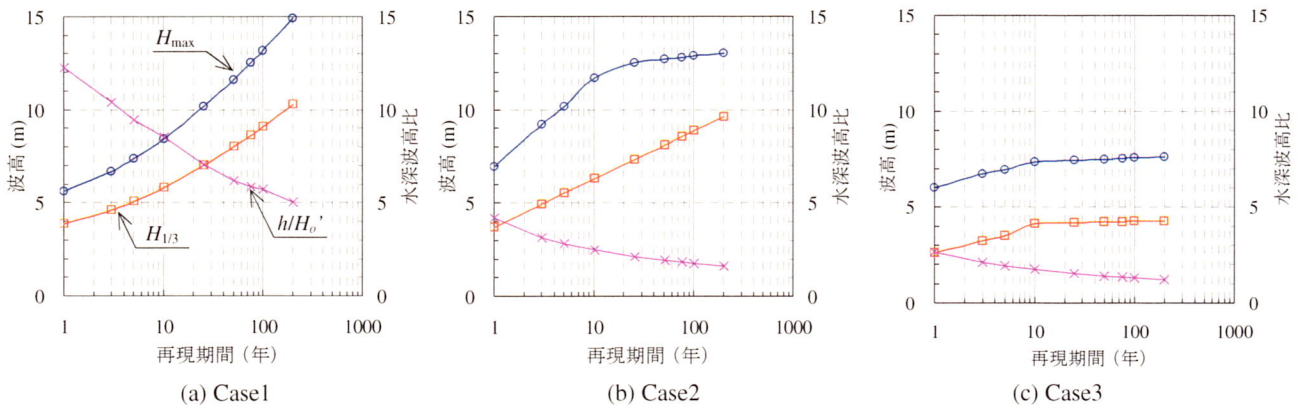


図-4 再現期間別の堤前波高と水深波高比

しないのに対し、消波ブロックなしの場合は碎波圧が作用するためである。図-3 は、これら最高波高比と水平波力比の積に対する堤体重量比（施工時／完成時）との関係を見たものである。図より、両者は極めて良い比例関係にあり、最高波高の低下率に比べて、水平波力の増加率が大きいために、完成時標準照査よりも施工時標準照査の方が支配的となることがわかる。

(2) 再現期間別の設計波高

図-4 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。抽出した3ケースの主な設計条件を表-4 に示す。ここに、 γ_{50} は合田⁹⁾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を表す指標である。

一般に水深波高比 h/H_o' 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。

(3) 信頼性指標とシステム破壊確率

一次信頼性理論 FORM より算出した、10年確率波高に対する滑動・転倒信頼性指標 $\beta_s \cdot \beta_o$ および両破壊モード間の相関係数 ρ_{so} を図-5 に示す。基本的に転倒 β_o よりも滑動 β_s の方が小さい、つまり滑動が支配モードとなるケースや断面が多い。さらに、滑動よりも転倒の方が堤体幅に対する β の増加度が大きい。また、再現期間や堤体幅に対する各信頼性指標の変化度はケースによって様々である。破壊モード間の相関係数 ρ_{so} については、両破壊モードに含まれる波力の感度係数の影響により、基本的に高い正の相関を示す。しかしながら、堤体幅が増加するにつれ、滑動モードにのみ含まれる摩擦係数の感度係数が増加するため、相関係数は低下する。なお、 β や ρ の変化が緩やかになっている区間は、ケーソン幅ではなく、フーチング幅を変化させた領域である。

続いて、 $\beta_s \cdot \beta_o$ および ρ_{so} からシステム破壊確率 $P_{f,sys}$ を算出した。再現期間別のシステム破壊確率を図-6 に示す。システム破壊確率は堤体幅の増加に伴って純減するが、荷重ランクつまり再現期間別の設計波高に対するシステム破壊確率の分布には、ケースによって大きな違いが見られる。これは、図-4 に示した設計波高の分布によるものであり、設計波高が碎波によって頭打ちされるケースでは、再現期間別のシステム破壊確率の差は小さく、重複波領域

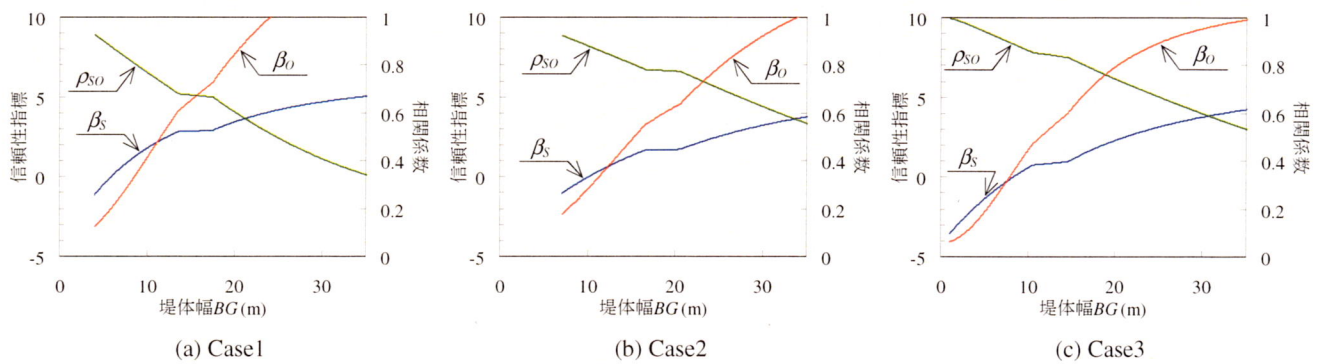


図-5 10年確率波に対する信頼性指標と相関係数

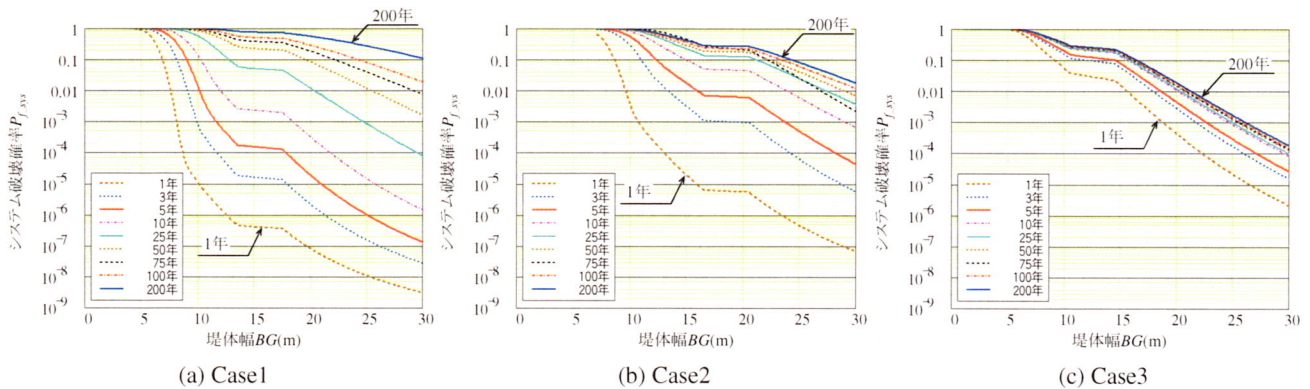


図-6 再現期間別のシステム破壊確率

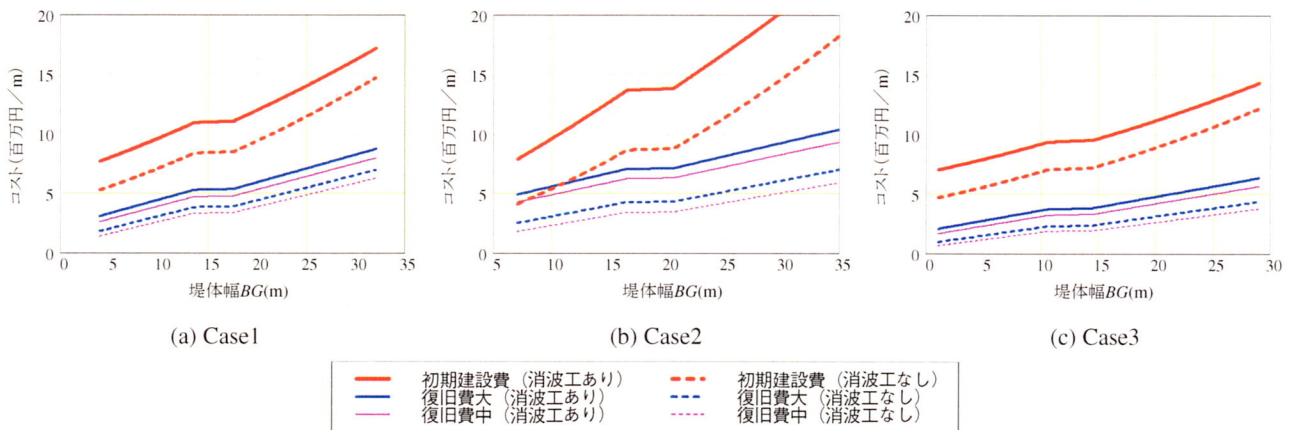


図-7 初期建設費と復旧費

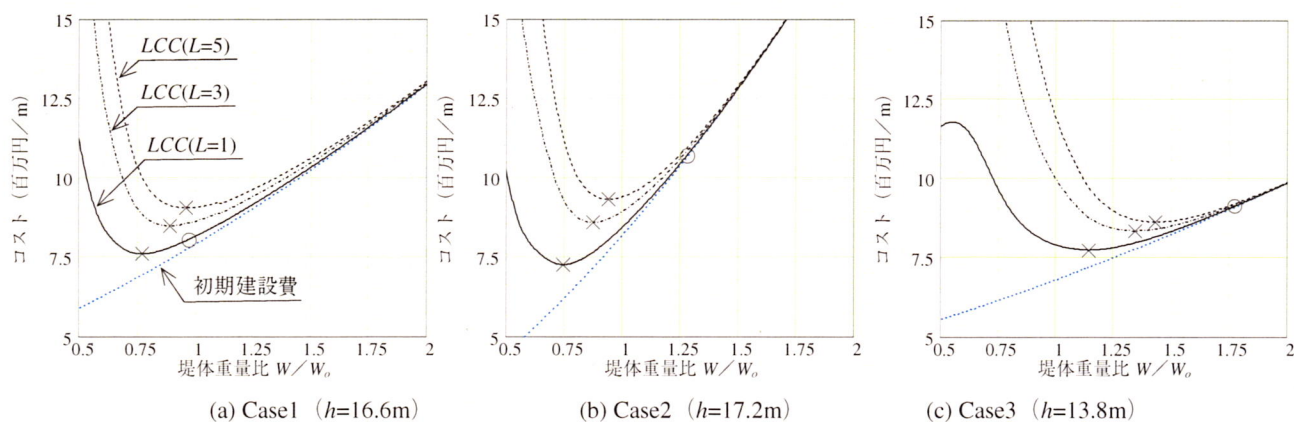
のケースではシステム破壊確率の差が大きくなっている。

(4) 初期建設費および被災時費用

図-7 に、各堤体幅に対する初期建設費と復旧費（想定被災程度：大、中）を示す。消波ブロックがある場合を実線で、ない場合を破線で示している。次項の施工時 LCC の算定においては、消波ブロックがない場合のコストを用い、被災時費用は被災程度大中の平均復旧費用をもとに、間接的被害費用を考慮して5倍した値を被災時費用としている。

(5) 施工時 LCC

図-8 に、施工期間 L を 1, 3, 5 年とした場合の、施工時 LCC 曲線を示す。図において横軸は、完成時標準照査法による堤体重量との比を表しており、図中×印は施工時 LCC が最小となる設計点、○印は施工時標準照査法による設計点を表す。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。すなわち、施工時 LCC が最小となる設計点（×印）が最適な設計断面ということになる。LCC 曲線の形状はケース毎に大きく異なっているが、施工期間が長くなるほど期待被災回数が増加するため、いずれのケースにおいても施工時



※ W_0 ：完成時標準照査法による堤体重量

図-8 施工時 LCC 曲線（施工期間 $L=1, 3, 5$ 年）

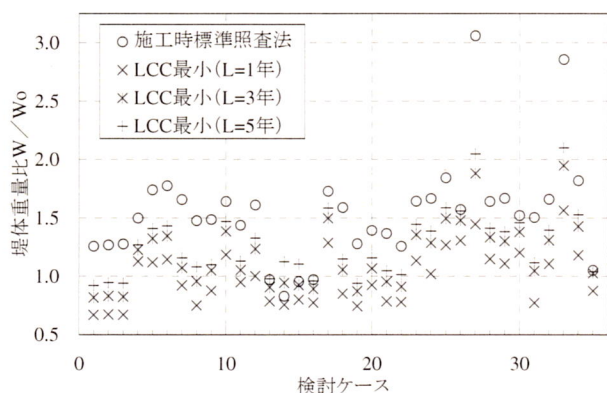


図-9 堤体重量比の比較

LCC 最小設計点（×印）は重量が増加する傾向にある。このように LCC 評価手法を用いれば、施工期間に応じた構造物の破壊可能性や必要な安全性を適切に評価できる。

図-9 は、LCC 曲線より抽出した各設計点の堤体重量比をケース毎に比較したものである。ほとんどのケースについて、施工時 LCC 最小設計点より標準照査法設計点の方が堤体重量は大きく、安全側の設計となっている。このようなケースは 35 ケース中 33 ケースあり、このことから施工時の照査法として、10 年確率波高およびケーソン式混成堤の部分係数を用いれば、施工時 LCC 最小化の観点から十分安全な照査になると言える。ただし、前述したとおり、標準照査法を用いると完成時よりも施工時照査で断面が決まるケースが多い。施工時照査が支配的となること自体は必ずしも不合理ではないものの、過大な設計となる場合もあることから、今後、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る。

5. まとめ

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）に対する検討により、以下のことが明らかとなった。

- ① 完成時標準照査法（50 年確率波、消波ブロック被覆堤の部分係数）よりも施工時標準照査法（10 年確率波、ケーソン式混成堤の部分係数）の方が設計断面が大となるケースが多い。これは、10 年確率波を用いることによる波高の減分よりも、消波ブロックがないことによる波圧の増分が大きいからである。
- ② 施工時標準照査法を用いることにより、施工時 LCC 最小化の観点から十分安全な照査が可能となる。ただし、施工期間が短い等のケースでは、過度に安全な照査ともなり得ることから、今後、より合理的な設計法の検討が必要である。

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, pp.779-784, 2005.
- 2) 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, 国総研報告, No.20, 2005.
- 3) 長尾 毅, 森屋陽一：港湾構造物の目標安全性水準に関する研究, 構造工学論文集, 第 50 巻 A, pp.187-197, 2004.
- 4) 高田悦子, 諸星一信, 平石哲也, 永井紀彦, 竹村慎治：我が国沿岸の波浪外力の分布（海象外力検討調査）, 国総研資料, No.88, 2003.
- 5) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, Vol.14, No.3, 1975.
- 6) 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手法の適用, 土木学会論文集 No.689, I -57, pp.173-182, 2001.
- 7) Owen, D. B.: Tables for computing bivariate normal probabilities, Ann. Math. Stat., Vol.27, pp. 1075-1090, 1956.
- 8) 柴崎隆一, 森屋陽一, 渡部富博, 安間 清：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, 2003.
- 9) 合田良実：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, 2002.