LCC 最小化を考慮した防波堤の施工時安定性照査における目標安全性水準

（株）日本港湾コンサルタント　技術開発部　　宮脇　周作
電源開発（株）　エンジニアリング事業部　正会員　吉岡　健
国土技術政策総合研究所　港湾施設研究室長　正会員　長尾　毅
（株）日本港湾コンサルタント　技術開発部　正会員　○榊原　芳昭

１．はじめに

防波堤の建設には一般に複数年の期間を要し，ある一定の期間，施工途中の不完全な状態で放置される場合がある．この状態における安定性を施工時として照査しており，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（未完成状態が存置される期間）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，わが国における代表的構造形式である消波ブロック被覆堤（**図-1** 参照）の施工状態として，消波ブロック未施工状態（35 ケース）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，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．

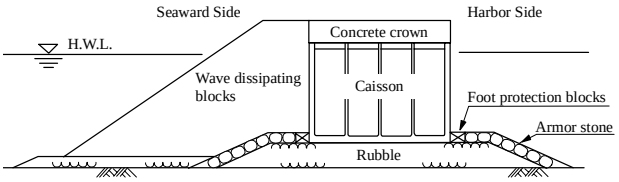

図-1 消波ブロック被覆堤

２．検討内容

2･1　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_f の和によって定義した．期待被災費 EC_f は，長尾・森屋 [1] に従い，式(1)，式(2)によって計算した．

$$E_{Cf} = \sum_{j=1}^{m} E_{fj} C_f \frac{R}{L} \tag{1}$$

$$R = \sum_{k=1}^{L} \frac{1}{(1+i)^k} \tag{2}$$

ここに，m：対象とする荷重ランク数，L：施工期間，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 E_{fj} 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．

$$E_{fj} = \nu_j L P_{fj} \tag{3}$$

ここに，P_{fj} は対象とする荷重の作用による破壊確率，ν_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．

2･2　破壊確率の算出方法

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，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．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．システム破壊確率の算出においては，まず，一次信頼性理論（FORM）を用いて信頼性解析を実施して，滑動・転倒信頼性指標を算出する．得られた滑動・転倒信頼性指標（それぞれ 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．

$$\begin{aligned} p_{f_sys} &= P_S + P_O - P_{SO} \\ &= \Phi(-\beta_S) + \Phi(-\beta_O) - \Phi_2(-\beta_S, -\beta_O, \rho_{SO}) \end{aligned} \tag{4}$$

ここに，Φ_2 は標準正規同時確率分布関数であり Owen[3]のモデルによって算出した．

2･3　被災時費用の算出方法

被災時費用 C_f の算出にあたっては，中規模被災（マ

キーワード　ライフサイクルコスト，施工時安定性照査，消波ブロック被覆堤，信頼性指標
連絡先　〒141-0031　東京都品川区西五反田 8-3-6　TEL 03-5434-5307　FAX 03-5434-5393

ウンド上での滑動）と大規模被災（マウンドからの滑落）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，被災時費用には，直接的な被害費用に加えて，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，既往の研究[4]を参考にして，直接的被害費用を 5 倍および 10 倍することにより，その影響を加味することとした．以上の解析を，堤体幅を 5cm 刻みで変化させて実施した．この際，実態調査に基づき，設計波を 10 年確率波高，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．検討結果

図-2 に，横軸を 10 年確率波高に対するシステム信頼性指標β_{10}とした場合の LCC 曲線を示す．図中×印は施工時 LCC が最小となる設計点であり，本研究ではこれを最適な安全性水準とみなし，この点における信頼性指標を最適信頼性指標β_{opt10}とする．施工期間 L でβ_{opt10}を比較すると，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，続いて砕波領域にある 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．また，直接的被害費用に乗じる倍率は，その値が大きくなるほど復旧費用が増加するため，施工時 LCC 最小設計点は破壊確率が小さくなる方向に移動する．以上のように，施工期間に応じてβ_{opt10} の平均値は変化し，ケース毎すなわち海域条件によるばらつきも大きいことがわかる．また，間接的被害費用をどの程度考慮するかによってもβ_{opt10}は変化する．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，β_{opt10}と設計条件との相関性の議論から，β_{opt10} の簡易算定モデルを検討する．施工期間 L，復旧費 C_f と初期建設費 C_i との比 C_f/C_i，および裾長度パラメータと水深波高比の積$\gamma_{50}\times h/H_{o10}'$を説明変数として，重回帰分析により得られた$\beta_{opt10}$ の簡易推定式を式(5)に示す．なお，H_{o10}'は 10 年確率の換算沖波波高である．

$$\beta_{opt10} = 2.4\left(0.55\log_{10} L + 0.06 C_f / C_i + \kappa\right)$$

$$\kappa = \begin{cases} -0.15\gamma_{50} h/H_{o10}' + 0.77 & : \gamma_{50} h/H_{o10}' \le 4 \\ 0.06\gamma_{50} h/H_{o10}' - 0.07 & : \gamma_{50} h/H_{o10}' > 4 \end{cases} \qquad (5)$$

ただし，$0.7 < \beta_T < 2.4$

推定式には各ケースのβ_{opt10} の分布に基づき，β_{opt10} の上下限値を設けている．特に，β_{opt10}が 2.4（完成時照査における目標信頼性指標）を大きく上回る計算結果となる場合には，構造形式の見直しもしくは施工計画の見直しが必要である．また，式(5)による推定値と計算値の相関係数は 0.92 であり実用上十分な精度を有している．

4．おわりに

本研究で得られたβ_{opt10}の推定式を用いることにより，施工時 LCC を考慮した，防波堤の施工時照査における目標信頼性指標を簡易に算出することが可能となる．

参考文献

1) 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.

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，国土技術政策総合研究所研究報告，No.20，38p，2005.

3) Owen, D. B.: Tables for computing bivariate normal probabilities, Ann, Math. Stat., Vol.27, pp. 1075-1090, 1956.

4) 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，国土技術政策総合研究所資料，No.125，2003.

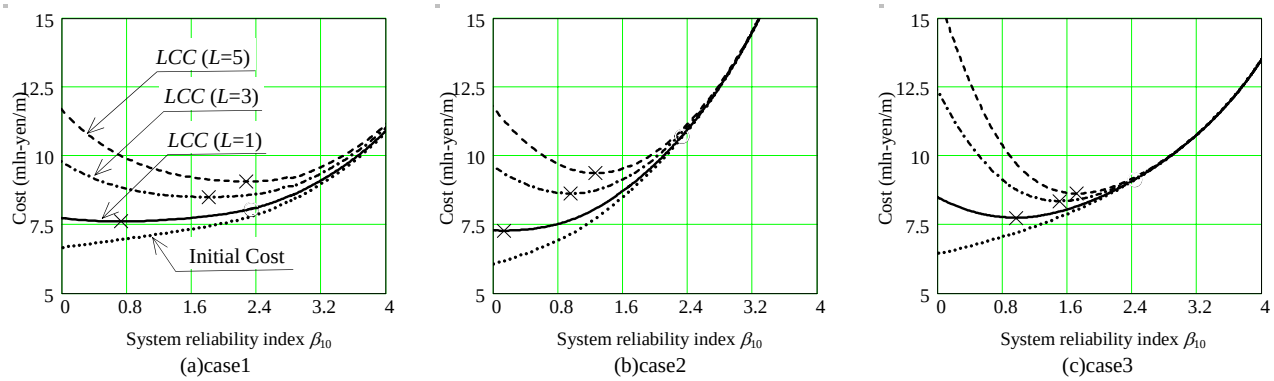

図-2 施工時 LCC 曲線