

重力式特殊防波堤の外的安定問題に関する信頼性解析

吉 岡 健*・長 尾 毅**・鷺 尾 朝 昭***・森 屋 陽 一****

本研究では、近年、その実用化が目覚ましいにもかかわらず、これまであまり信頼性設計の対象とはならなかった重力式特殊防波堤（上部斜面堤、直立消波ブロック堤、消波ケーソン堤）に対し、その外的安定問題に関する信頼性解析を実施した。信頼性解析に先立ち、各重力式特殊防波堤はそれぞれ異なる波力算定式が用いられていることから、過去の実験結果をもとにその推定精度を評価した。その結果、代表的な構造形式であるケーソン式混成堤や消波ブロック被覆堤に用いられている合田式の波力算定式推定精度に比べ、安全性の余裕度が見込まれていないことがわかった。これを受けて、現行設計法が担保する平均安全性水準も若干低いことを示した。

1. はじめに

ISO2394（構造物の信頼性に関する一般原則）を契機として、土木および建築構造物への信頼性設計法の導入が期待されている（国土交通省，2002）。信頼性設計法の適用により安全性を正しく定量評価するためには、設計に介在する様々な不確定要因の確率分布を適切に定める必要がある。さらに、信頼性設計法においては、安全性の定量評価に加え、その許容値をどの程度にするかという目標安全性水準の設定が必要となる。その際の最も有力な方法のひとつは、現行の設計法が担保する安全性を統計的に定め、その平均値をもって目標安全性水準とする方法である。

ここで重力式混成防波堤の外的安定問題に着目すると、代表的な構造形式であるケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤については、設計因子の従う確率分布を統計的に定め、これを基にした現行設計法の安全性評価が実施されている（長尾，2001）。この際、防波堤の安全性に大きな影響を及ぼす波力算定式推定精度については、合田波力式による計算値と水理模型実験結果との比較結果（Takayama・Ikeda，1993）を用いている。しかしながら、近年、防波堤の沖合化、大水深化に伴い、その耐波性能を高めた上部斜面堤や、浅水域での消波性能を高めた直立消波ブロック堤、両性能を高めた消波ケーソン堤が開発され、実用化に至っている（以下、重力式特殊防波堤と称す）。これら重力式特殊防波堤についてはそれぞれ異なる波力算定式が用いられていることから、その推定精度も異なる可能性がある。このことは、現行設計法が担保する安全性水準も異なることを意味している。

そこで本研究では、重力式特殊防波堤の各種波力算定式推定精度の評価およびこれを用いた外的安定問題に関

する安全性評価を目的とする。

2. 波力算定式の推定精度

（1）重力式特殊防波堤の波力算定式

本研究で扱う重力式特殊防波堤は、図-1 に示すとおり、上部斜面堤および直立消波ブロック堤、消波ケーソン堤の 3 形式である。以下に、各種重力式特殊防波堤に用いられる波力公式の概要について述べる。

a) 上部斜面堤

まず、合田式によって、上部斜面堤の直立壁に作用する波力 P_1 と、斜面壁を直立面に投影した面積に作用する波力 P_2 を算出する。次に、波力 P_2 は斜面平行成分と斜面直交成分に分解され、そのうちの斜面直交成分のみが堤体に作用するというモデルのもと、水平波力 P_h および鉛直下向き波力 P_v を算出する（森平・国田，1979）。以上によって求めた波力は、水理模型実験結果に比べてやや過大な評価となることから、細山田ら（1994）は、 P_h 、 P_v のそれぞれに対する波力低減係数 λ_h 、 λ_v を提案し、これに乗ずることによって上部斜面堤に作用する波力を算出することを提案した。また、消波ブロック被覆上部斜面堤に対する波力低減係数も提案されているが（佐藤ら，1992）、本研究では対象外とする。

b) 直立消波ブロック堤

合田式を準用した簡便な方法により算出する。すなわち、合田式において波圧の補正係数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 を適切に評価することによって波力を計算する。通常は、消波ブロックによる碎波エネルギー分散効果を期待して $\lambda_2=0$ とし、 $\lambda_1=\lambda_3=1.0$ として設計される場合が多い。

c) 消波ケーソン堤

高橋ら（1991）は、遊水室に上床版がない場合の縦スリットケーソンを対象に波力算定式を提案した。これは、ケーソン全体および各部材に作用する波力の特性と位相差の影響、マウンドの影響による波力の増大を考慮したものであり、波力の位相として、押し波時 3 ケース、引き波時 3 ケースの計 6 ケースを考え、各位相時に作用する波力を、合田式を準用した波力の補正係数 λ によって

* 正会員 修(工) 電源開発(株) エンジニアリング事業部 建設技術グループ

** 正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室長

*** 正会員 修(工) 電源開発(株) 新事業部 風力開発グループ

**** 正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所 海岸海洋チーム

表一 波力算定式推定精度の比較

構造形式	B	V
上部斜面堤	0.96	0.18
直立消波ブロック堤	0.97	0.18
消波ケーソン堤	0.97	0.16
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

注) B: 平均値の偏り (平均値/特性値), V: 変動係数

同程度であり、消波ブロック被覆堤に比べてやや大きい。各種波力公式による波力推定時のばらつきの程度には、碎波圧や衝撃碎波圧の推定精度が大きく寄与するものと考えられる。従って、これらの影響をほとんど受けない消波ブロック被覆堤のみ、波力算定式推定精度の変動係数が小さいものと考えられる。また、平均値の偏りは1に近く、近年開発された重力式特殊防波堤の波力算定精度には安全性の余裕度が見込まれていないことがわかる。

3. 信頼性解析

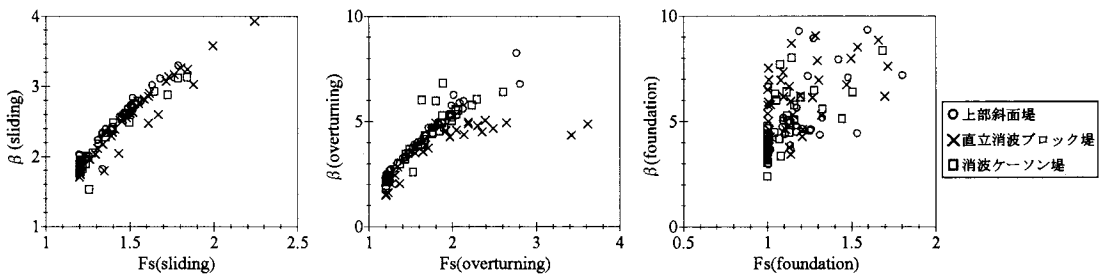
(1) 解析方法

信頼性解析は、今回評価した波力算定式推定精度(表一1)および長尾(2001)が用いた設計因子の従う確率分布をもとに、滑動、転倒、支持力破壊に対して、破壊点周りのテラー展開に基づく1次信頼性理論(FORM: First-Order Reliability Method)によって、安全性指標を算出する。ここで、各破壊モードの性能関数は、「港湾

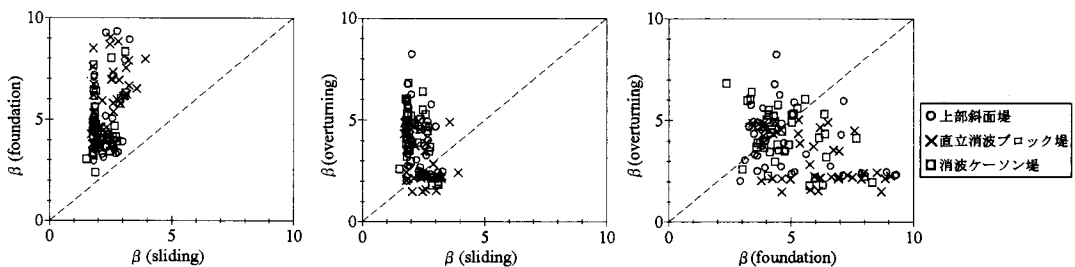
の施設の技術上の基準(運輸省港湾局監修, 1999)」に従い、滑動破壊については水平方向の力の釣合いによって、転倒破壊については堤体前趾回りのモーメントの釣合いによって、支持力破壊については、2層系地盤の偏心傾斜荷重作用時の支持力安全性として、簡易ビショップ法によって定義している。

検討ケースには、全国広範囲より地域的、設計条件的に偏りがないように収集した多数の事例(上部斜面堤38ケース、直立消波ブロック堤40ケース、消波ケーソン堤39ケース)を用いた。ここで、上部斜面堤や消波ケーソン堤については十分な事例数が入手困難であったため、長尾(2001)が用いたケーソン式混成堤の設計諸元をこれに適用して、検討ケースに追加した。

計算はまず、各ケースについて現行設計法(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)による試設計を実施し、設計された断面について安全性指標を計算した。試設計における特記事項として、上部斜面堤の傾斜面は静水面より45度とした。直立消波ブロック堤は、柳生・湯坐(1980)に基づく統計解析により空隙率40%、重心位置を断面中心とし、また、直立部の堤体は全て無筋コンクリートと見なした。消波ケーソン堤は全て縦スリット型とし、遊水部の断面諸元は谷本・吉本(1982)を参照し、十分な消波効果が得られるように決定した。波力の位相は、外的安定上問題となる押し波3ケースのみを対象とし、水平波圧合力が最大となる位相を採用した。安全性指標の計算においては、波力および鉛直波圧合力は同様の確率分布に従うことから



図一4 安全率と安全性指標の関係



図一5 各破壊モード安全性指標の相互関係

完全相関を仮定した。また、支持力破壊に関しては、複数のすべり円弧により算出される最小の安全性指標を用いることとし、上載荷重は、鉛直・水平各々の荷重平均値より得られる載荷幅をもとに設定した。さらに、水平波力と上載荷重との相関性についても考慮している。

(2) 現行設計法による安全性水準

図-4に、各破壊モードにおける現行設計法による安全率と安全性指標の関係を示す。滑動および転倒については概ね正の相関にあるが、支持力についてはばらつきが大きく、このことは安全率が構造物の安全性を定量評価する指標ではないことを意味する。この傾向は、長尾(2001)がケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤を対象に実施した結果と一致しているものの、相違点として、滑動安全率と滑動安全性指標が広く分散していることが挙げられる。これは、現行設計において滑動が支配的とならないケースがあることを表している。この理由として、重力式特殊防波堤は鉛直下向き波力や消波性能によって滑動安定性を高めたことにより、通常のケーソン式混成堤や消波ブロック被覆堤に比べて堤体幅を縮減できるため、相対的に転倒、支持力の安定性が低下したものと考えられる。また、構造形式別に比較すると、直立消波ブロック堤の転倒安全性指標が全体的に低いことが挙げられる。これは、直立消波ブロック堤のみ鉛直下向き波力が作用せず、抵抗モーメントとして寄与しないためと考えられる。

図-5は、破壊モード間の安全性指標の相互関係を示したものである。滑動が支配モードであるケースが多い

こと、支持力が支配モードとなるケースはないことは長尾(2001)の結果と一致する。しかしながら、転倒が支配モードとなるケースは、ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤では76ケース中4ケースのみであったのに対し、上部斜面堤および消波ケーソン堤は6ケース、直立消波ブロック堤に至っては18ケースとなっている。この理由は上述した通りである。以上のことから、重力式特殊防波堤は一般的なケーソン式混成堤や消波ブロック被覆堤のように滑動安全性のみが極端に低いのではなく、転倒安全性もやや低いと言える。

次に各破壊モードの安全性指標をもとにシステム破壊確率を算出する。構造系が複数の破壊モードの和事象で表される場合のシステム破壊確率は次式となる。

$$P_f = \sum_{i=1}^m P(E_i) - \sum_{i < j}^m P(E_i \cap E_j) + \sum_{i < j < k}^m P(E_i \cap E_j \cap E_k) - \dots \quad (1)$$

ここに、 P_f はシステム破壊確率、 E は各モードの破壊事

表-2 システム安全性指標の比較

構造形式	平均値	標準偏差
上部斜面堤	2.16	0.34
直立消波ブロック堤	2.04	0.38
消波ケーソン堤	2.05	0.32
ケーソン式混成堤	2.11	0.14
消波ブロック被覆堤	2.64	0.15

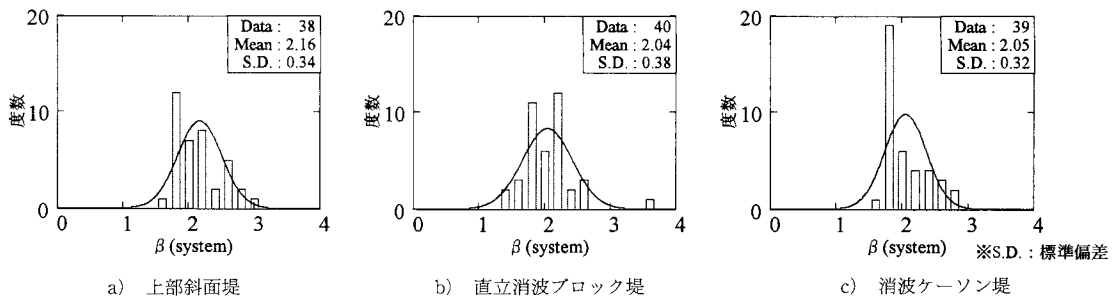


図-6 システム安全性指標のばらつき

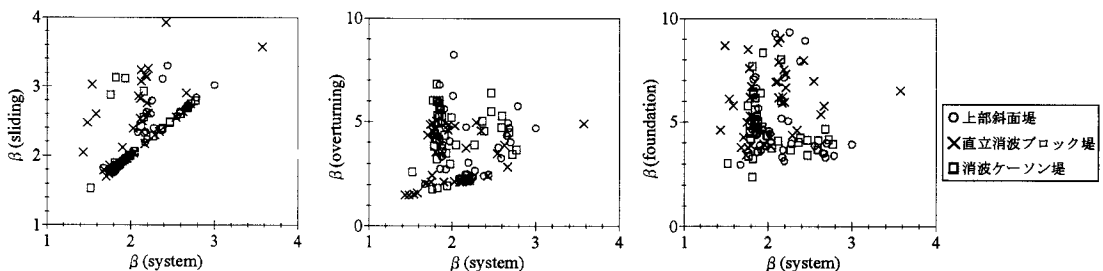


図-7 システム安全性指標と各破壊モード安全性指標の相関

象である。

式(1)の右辺第3項に示すように、システム破壊確率を精度良く算出するためには、高次の結合破壊確率を計算する必要があるが、これを解析的に算出することは困難である。本研究では、次式に示す2次の範囲の上限値(Ditlevsen, 1979)によってシステム破壊確率を評価した。

$$P_f \leq \sum_{i=1}^m P(E_i) - \sum_{i=2}^m \max_{j < i} P(E_i \cap E_j) \dots\dots\dots (2)$$

本研究で対象とする重力式特殊防波堤の場合、図-5に示したように、転倒および支持力安全性指標は概して高いため、3次の結合破壊確率は極めて小さいものと判断される。このことから、これを無視した式(2)によっても十分な精度が得られるものと考えられる。また、2次の結合破壊確率はOwen(1956)に従って算出した。ここで、破壊モード間の相関係数は、FORMによって副次的に算出される感度係数によって評価している(吉岡・長尾, 2004)。

システム破壊確率より算出されるシステム安全性指標のばらつきを図-6に、ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤との比較を表-2に示す。いずれの構造形式もケーソン式混成堤や消波ブロック被覆堤に比べてシステム安全性指標のばらつきが大きい。これは、図-4および図-5に示したように、滑動安全性指標が広く分散していることや、これによって転倒や支持力の安全性が低下しているためである。さらにシステム安全性指標の平均値に着目すると、いずれの構造形式も消波ブロック被覆堤に比べて若干低い。この要因は、表-1に示した波力算定式に見込まれる安全性の余裕度の違いによるものである。図-7は、システム安全性指標と各破壊モードの安全性指標との相関を示したものである。滑動が支配モードであるケースが多いことから、システム安全性指標との相関は強い。ただし、直立消波ブロック堤については転倒が支配モードとなるケースが多いため、転倒安全性指標との相関も見受けられる。

以上のことから、現行設計法が担保する安全性水準は、設計条件によって大きく変化するとともに、その平均水準は構造形式によって異なっていることがわかった。

4. ま と め

重力式特殊防波堤の外的安定問題に関する信頼性解析によって、以下の結論を得た。

- ① 近年開発された重力式特殊防波堤の波力算定精度には安全性の余裕度があまり見込まれていない。
- ② 鉛直下向き波力の作用や消波性能によって、滑動安全性を向上させ、堤体幅縮減が可能となった反面、転倒安定性が若干低下している。

- ③ これらによって、現行設計法が担保する安全性水準は、一般的なケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤に比べてばらつきが大きくなっていると同時に、その平均水準もやや低い。

今後は、本研究で得られた現行設計法による平均安全性水準を目標値とした部分安全係数のキャリブレーションを実施し、重力式特殊防波堤の外的安定に関するレベル1信頼性設計法を構築する予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、既往の研究事例の収集および評価について、(株)ドラムエンジニアリング 小堀共生氏他の協力を得た。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 運輸省港湾局監修 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 1181 p.
- 大堀晃一・森川雅行・大野光嘉・石田国夫 (1986): 上部斜面堤に作用する波力に関する実験的研究, 第33回海講論文集, pp. 357-361.
- 国土交通省 (2002): 土木・建築にかかる設計の基本, 31 p.
- 佐藤孝夫・山縣延文・古川正美・高橋重雄・細山田得三 (1992): 消波ブロック被覆上部斜面堤の水利特性—那覇港大水深域における新構造防波堤の開発—, 海工論文集, 第39巻, pp. 556-560.
- 高橋重雄・谷本勝利 (1984): 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力(第2報)—現地観測波圧データの解析—, 港研報告, Vol. 23, No. 2, pp. 3-25.
- 高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均 (1991): 直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法, 港研報告, Vol. 30, No. 4, pp. 3-34.
- 竹中秀夫・西田 稔・榊原 弘・殿最浩司・佐藤広章 (1999): 現地観測結果を用いた波浪変形計算および波力の推定精度に関する研究, 海工論文集, 第46巻, pp. 826-830.
- 谷本勝利・吉本靖俊 (1982): 直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究, 港研報告, Vol. 21, No. 3, pp. 43-77.
- 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.
- 中田邦夫・池田龍彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田 隆 (1983): 上部斜面堤の現地建設に伴う水利模型実験, 第30回海講論文集, pp. 313-316.
- 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利 (1994): 離島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海工論文集, 第41巻, pp. 706-710.
- 森平倫生・国田 治 (1979): 斜面壁堤の水利特性に関する模型実験, 第26回海講論文集, pp. 295-298.
- 柳生忠彦・湯坐美幸 (1980): 直立消波ブロック式防波堤構造集覧, 港研資料, No. 358, 314 p.
- 吉岡 健・長尾 毅 (2004): ケーソン式防波堤の外的安定に関する安全性指標と感度係数の関係, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 197-202.
- Ditlevsen, O. (1979): Narrow reliability bounds for structural systems, Jour. of Struct. Mechanics, Vol. 7, No. 4, pp. 453-472.
- Owen, D. B. (1956): Tables for computing bivariate normal probabilities, Ann. Math. Stat., Vol. 27, pp. 1075-1090.
- Takayama, T. and N. Ikeda (1993): Estimation of sliding failure probability of present breakwaters for probabilistic design, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 31, No. 5, pp. 3-32.