

ケーソン式防波堤の滑動破壊における信頼性設計の 制御対象に関する研究

鷲尾 朝昭*・森屋 陽一**・長尾 毅***

本研究では、ケーソン式防波堤の滑動破壊を対象として、信頼性設計法の制御対象の違いによる信頼度の相関性を明らかにした。検討対象として全国の設計資料よりケーソン式混成堤 35 ケース、消波ブロック被覆堤 37 ケースの計 72 ケースを採用し、力の釣合いに基づく破壊確率と変形量に基づく破壊確率を比較した。変形量に基づく破壊確率は、30 cm 以上の変形が生じる確率とした。2 種類の破壊確率の相関の程度は低く、その原因は波高の設定方法の違いと波力作用時間の考慮の有無にあることがわかった。さらに、変形量の許容値を緩和することによる経済的な設計法の構築において、力の釣合いに基づく信頼性設計法による対応の可能性を示した。

1. はじめに

土木および建築構造物に関する国際規格である ISO 2394 (構造物の信頼性に関する一般原則) の中で構造物の設計法として信頼性設計法が位置付けられたことから、信頼性設計法の適用に関する検討が各方面で進められている。信頼性設計法の適用に際しては、力の釣合いに基づき、作用が耐力を上回る確率を破壊確率と考えてこれを制御対象とすることが一般的である。これに対して、構造物の作用に対する応答は非線形であることが多いため、設計に対する制御対象として力の釣合いではなく、変形量にシフトすべきだという議論が行われている。ただし、その場合には変形量の確率的評価を行う必要がある。さらに、通常は代表的な 1 つの作用による破壊可能性のみを考慮するが、ライフサイクルコストを考慮した信頼性設計を行うためには、設計供用期間中の複数の作用や損傷の累積を考慮する必要がある。

ケーソン式防波堤に着目した場合、力の釣合いに基づく信頼性設計法として、長尾 (2001) は、力の釣合いに基づく性能関数により、過去の被災事例に基づく実際の破壊確率を適切に評価できることを示すとともに、滑動・転倒・支持力の 3 つの破壊モードに関するレベル 1 およびレベル 2 の信頼性設計法を提案している。

一方、ケーソン式防波堤の変形量に基づく信頼性設計法としては、滑動量と沈下量に着目した研究がある。滑動量に着目した研究として、下迫・高橋 (1994) は、壁体に作用する波力時系列モデルを用いて滑動に関する運動方程式の数値積分から滑動量を算出する手法により、設計供用期間中に想定される期待滑動量を判定基準として設計を行うことを提案している。沈下量に着目した研究としては、湯・土田 (1998) が簡易ビショップ法を用いて沈下に関する角運動方程式の数値積分から沈下量を算出し、設計供用期間中に想定される期待沈下量を判定

基準として設計を行う方法を提案している。滑動量に基づいた信頼性設計法は、設計実務にも適用され始めている (例えば、中山ら (2002))。しかしながら沈下については、簡易ビショップ法は支持力破壊の安全率については実験結果と整合性が確認されている (小林ら, 1987) もの、沈下の発生メカニズムを精度よく表しているとは言えないという問題点がある。このため、湯・土田 (1998) の検討結果は、実際よりも沈下量をやや過大に評価する傾向が見られ、沈下量に基づく信頼性設計法の整備にあたっては、さらに検討が必要であると考えられる。

このように、ケーソン式防波堤の信頼性設計法としては、様々なアプローチにより研究が行われているが、信頼性設計の制御対象 (力の釣合いか滑動量か) の違いによる信頼度の相関性についてはこれまでに明らかにされていない。そこで、本研究では、滑動破壊を対象として、両者の相関性を明らかにすることを目的とする。

2. 制御対象の違いによる破壊確率の相関性

(1) 検討条件の設定

本研究では、全国のケーソン式防波堤の設計資料より、水深、設計波高などの設計条件が全国的な分布から判断して偏りがないように選んだケーソン式混成堤 35 ケース、消波ブロック被覆堤 37 ケースの計 72 ケースを対象とした。防波堤の堤体幅は現行設計法において許容安全率をすべて満足する堤体幅である。

設計パラメタの従う確率分布は、設定根拠が明確である長尾 (2001) が採用した確率分布を用いた (表一1)。基本的に各設計変数とその設計用値の比の値は正規分布に従うと仮定し、設計変数の平均値と設計用値の比の値 α と、変動係数 V によって分布を表している。ここで、潮位に関するパラメタ R_{WL} は、過去 50 年間の、全国の沿岸域における高潮に基づく既往最高潮位 H.H.W.L. とさく望平均満潮位 H.W.L. の比により定義される値である。

ここで、期待滑動量や滑動量に基づく破壊確率の算定は、基本的には下迫・高橋 (1998) に従い、波力の時系列モデルは谷本ら (1996) のモデルを用い (図一1 参照)、

* 正会員 工修 電源開発(株) 新事業部 風力開発グループ
** 正会員 工博 五洋建設(株) 技術研究所 海岸海洋チーム
*** 正会員 工博 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室長

表一 設計パラメータの従う確率分布 (長尾, 2001)

	α	V
波力 (水平波圧, 揚圧力)		
沖波波高推定精度	1.00	0.10
波浪変形計算精度		
水深変化緩	0.97	0.04
水深変化急	1.06	0.08
砕波変形推定精度	0.87	0.10
波力算定式推定精度		
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
潮位		
$R_{wL}=1.5$	1.00	0.20
$R_{wL}=2.0, 2.5$	1.00	0.40
摩擦係数	1.06	0.15
単位体積重量		
鉄筋コンクリート	0.98	0.02
無筋コンクリート	1.02	0.02
中詰砂	1.02	0.04

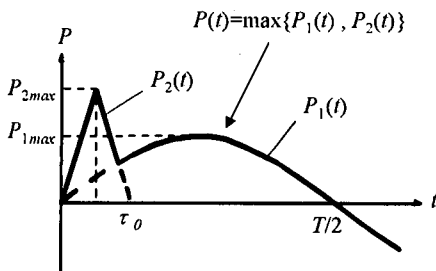
注) α は平均値の偏り (平均値/設計用値), V は変動係数

表一に示した確率変数のばらつきを考慮した試行回数 5000 回のモンテカルロシミュレーションによって行った。また、砕波変形推定精度に関しては、砕波限界の上限値と下限値が表一に示した変動係数をもつものとした。

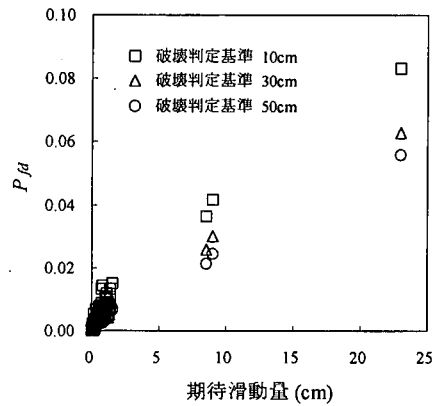
ただし、本研究で対象とする期待滑動量および破壊確率は、通常の防波堤の設計と同じ条件とする観点から、50 年確率波高来襲時の条件付きの期待滑動量および破壊確率とする。そのため、既設防波堤の設計資料より得られる再現期間 50 年の波に対する有義波高 $H_{1/3}$ から、換算沖波波高 H_0 を逆算し、砕波を考慮したレーリー分布に基づいて 1 波ごとの波高を再現した。

(2) 滑動量に基づく破壊確率と期待滑動量の関係

上述のように下迫・高橋 (1994) は変形量に基づく防波堤の信頼性設計法に用いる指標として期待滑動量を提案しているが、信頼性設計法に用いる指標としては破壊の可能性の方が明確であると考えられる。そこで本研究では、滑動量が破壊判定基準を超える確率を滑動量に基づく破壊確率 (以下、 P_{fd} と呼ぶ) と定義し、力の釣合い



図一 波力時系列モデル (谷本ら, 1996)



図二 期待滑動量と滑動量に基づく破壊確率の関係

に基づく破壊確率 (以下、 P_{fd} と呼ぶ) との比較対象にする。

まずは、滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} と期待滑動量の関係について明確にする必要がある。破壊判定基準を 10 cm, 30 cm, 50 cm とした場合の滑動量に基づく破壊確率と期待滑動量の関係の評価した。結果を図二に示す。

期待滑動量と滑動量に基づく破壊確率は高い相関性を示すことがわかる。破壊判定基準を 10 cm とした場合、期待滑動量が破壊判定基準である 10 cm となるのは概ね $P_{fd}=0.04$ 程度である。期待滑動量という用語からはその期待値を上回る可能性が 50% であると誤解を受ける可能性があるが、実際には期待値を上回る可能性は 4% でしかない。

(3) 滑動量に基づく破壊確率と実被災事例による破壊確率の関係

長尾 (2001) により、力の釣合いに基づくシステム破壊確率は、防波堤の実被災事例より推定される破壊確率と対応することが確認されている。また、破壊モードのうち支配的なモードは滑動であるため、滑動破壊確率とシステム破壊確率はほぼ対応することが確認されている。よって、本節では滑動量に基づく破壊確率と実被災事例に基づく破壊確率の相関性を検討する。

河合ら (1997) によれば、平成 5 年度末時点で全国に約 16000 函の防波堤ケーソンが設置されており、平成元年から平成 5 年の 5 年間で 30 函程度の滑動による被災が報告されている。平均的には 1 年間に 6 件程度の被災ということになる。さらに被災は波力の集中しやすい消波工端部や隅角部のような場所に集中しており、標準部における被災は全体の約 1/3 であることを考慮すると、実被災事例に基づく防波堤の標準部における設計供用期間 50 年間の破壊確率は式 (1) により $P_{fe}=6.6 \times 10^{-3}$ となる。

$$P_{fe}=1-(1-P)^L \quad (1)$$

ここで、 P_{fe} : 設計供用期間中の破壊確率、 P : 1 年間の被災確率、 L : 設計供用期間である。

また、構造形式別に標準部の設計供用期間 50 年間の破壊確率を算定すると、ケーソン式混成堤では 1.1×10^{-2} 、消波ブロック被覆堤では 1.0×10^{-3} となる。この構造形式別の破壊確率の差は、表-1 に示した波力算定式推定精度の従う確率分布の差に起因しているものと考えられる。

実際の防波堤の被災の判定は、滑動量がある基準値(概ね 30 cm 程度)を上回るか否かによりなされる。そこでまず、破壊判定基準を 5 cm~200 cm の間で変化させて、72 ケースの防波堤の P_{fd} を算出した。さらに、 P_{fd} は 50 年確率波高来襲時の条件付き確率であるので、実被災事例に基づく設計供用期間 50 年間の破壊確率と比較するため、50 年確率波高の 50 年間における遭遇確率 0.636 を P_{fd} に乗じて滑動量に基づく設計供用期間 50 年間の破壊確率 P_{fe} とした。

図-3 に検討対象ケースの滑動破壊判定基準に対する P_{fe} の平均値を示す。図中の直線は実被災事例の破壊確率である。滑動量に基づく破壊確率も実被災事例に対応し、ケーソン式混成堤の破壊確率の方が消波ブロック被覆堤の破壊確率より大きい。また、滑動量に基づく破壊確率と実被災事例の破壊確率に対応するのは、破壊判定基準を 30 cm 以下とした場合である。ただし、30 cm を被災の判断基準とした場合、実被災事例による破壊確率は P_{fe} よりもやや大きな値となるが、実際の被災事例の中には 30 cm より小さい変形量も含まれている可能性があること、調査対象の 5 年間で被災が多く発生した時期であった可能性もある(河合ら, 1997) ことを考慮すると、滑動量に基づく破壊確率により実被災事例の破壊確率を概ね説明できると考えられる。

本節での検討結果を踏まえ、以降では滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} を、50 年再現期間の波作用による 30 cm 以上の滑動量が生じる確率と再定義する。

(4) 力の釣合いに基づく破壊確率と滑動量に基づく破壊確率の関係

力の釣合いに基づく破壊確率 P_{fp} と滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} の相関について検討する。図-4 に両者の相関を示す。 P_{fp} と P_{fd} には相関性が認められるものの、相関の程度は弱い。

この理由としては、以下の 2 つが考えられる。

① 対象波が 1 波か波群かの違い

力の釣合いに基づく方法では、最高波 1 波を対象とし、その確率分布をもとに水平波力が滑動抵抗力を上回る確率を算定する。これに対して、滑動量に基づく方法は、1 回の高波(波群)を対象にしており、 P_{fd} は滑動抵抗力と等しい波力相当の波高(以下、滑動限界波高と呼ぶ)以上の波高の出現確率に依存する。すなわち、 P_{fd} の算定においては、碎波を考慮したレーリー分布の裾形状が大きく影響する。

② 滑動限界波力以上の波力の作用時間

力の釣合いに基づく方法では滑動抵抗力と等しい波力(以下、滑動限界波力と呼ぶ)以上の波力の作用時間は考慮していないが、滑動量に基づく方法は波力の時系列モデルを用いており、滑動限界波力以上の波力の継続作用時間により大きく影響を受ける。

以上の理由を確認するために、①については水深が浅い領域での波の碎波しやすさを表すパラメタである波形勾配 $H_{1/3}/L$ により整理し、②については図-1 に示した水平波力時系列モデルの三角形パルスのピーク (P_{2max}) と正弦波形のピーク (P_{1max}) の比により整理した。

図-5 に滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} と波形勾配の関係を示す。波形勾配が小さいほど、 P_{fd} は大きな値になりやすい傾向があることがわかる。波形勾配は小さいほど碎波しづらく、碎波を考慮したレーリー分布に基づいた個々の波高が滑動限界波高を超える確率が高くなり、 P_{fd}

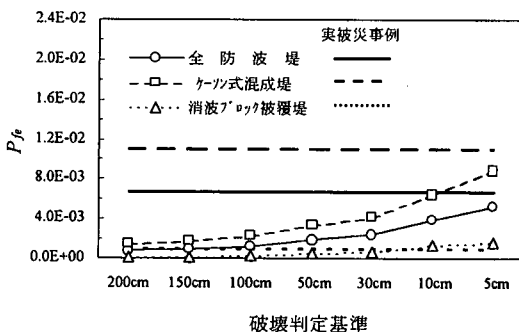


図-3 滑動量に基づく破壊確率と実被災事例の破壊確率の関係

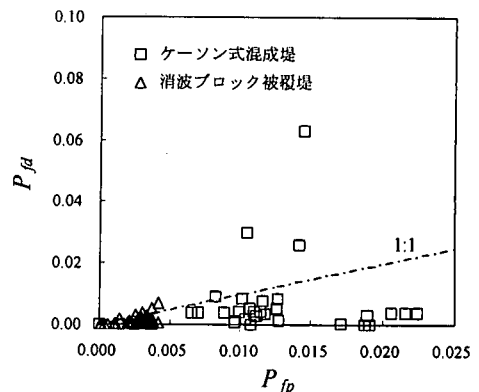


図-4 力の釣合いに基づく破壊確率 P_{fp} と滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} の関係

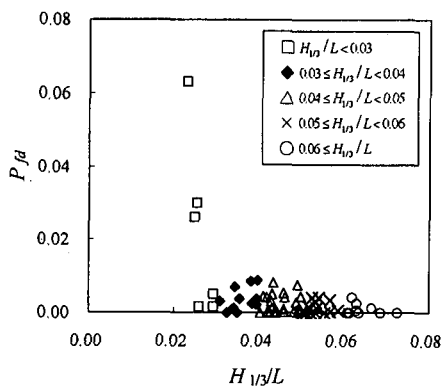


図-5 波形勾配と滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} の関係

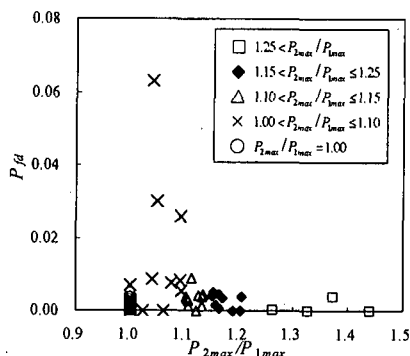


図-7 P_{2max}/P_{1max} と滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} の関係

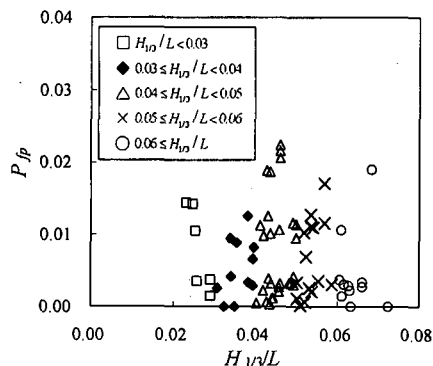


図-6 波形勾配と力の釣合いに基づく P_{fp} の関係

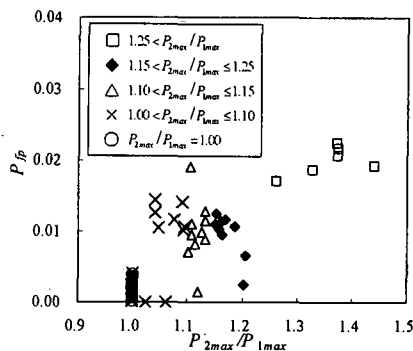


図-8 P_{2max}/P_{1max} と力の釣合いに基づく P_{fp} の関係

が大きくなるといえる。特に波形勾配が0.03より小さいときに P_{fd} が非常に大きくなることもある。次に、力の釣合いに基づく破壊確率 P_{fp} についても波形勾配との関係を整理した。結果を図-6に示す。 P_{fp} と波形勾配の間には明瞭な関係が認められない。 P_{fp} は最高波高 H_{max} の確率分布に依存するが、滑動限界波高以上の波高の出現頻度の確率は反映されていないことがこの理由であるといえる。以上より、上述の理由①が確認された。

図-7に滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} と P_{2max}/P_{1max} の関係を示す。 P_{2max}/P_{1max} が小さいほど、 P_{fd} が大きくなる傾向があることがわかる。これは、 P_{2max}/P_{1max} が小さいほど正弦波が滑動限界波高を超える確率が高くなるため、滑動限界波力以上の波力の作用時間が長くなる傾向にあり、 P_{fd} が大きくなるためである。また、下迫・高橋(1998)により、同じ安全率の場合、重複波力作用時の滑動量は碎波波力作用時の滑動量に比べて大きくなるということがわかっているが、それも同じ理由によると考えられる。次に、力の釣合いに基づく破壊確率 P_{fp} についても P_{2max}/P_{1max} との関係を整理した。結果を図-8に示す。両者には若干の相関が見られるが、一義的な関係にあるとはいえない。この理由は、 P_{fp} は P_{2max} の値にのみ依存

する傾向が強いためであるといえる。以上より、上述の理由②が確認された。

このように滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} の大小は、波形勾配や P_{1max} と P_{2max} の大きさの比など、複数の要因の影響を受けている。また、波高水深比や波力の作用時間による影響も十分に考えられる。ゆえに、力の釣合いによる破壊確率 P_{fp} と滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} を直接結び付けて整理することは難しいといえる。

3. 許容滑動量の変更による設計の合理化の検討

一般にケーソン式防波堤は捨石マウンド上で変形が生じて直ちに港内の静穏度の低下という機能の損失に結びつくわけではない。そこで、滑動量の許容値を緩和することで、より経済的な設計を行うことが考えられる。ここでは、力の釣合いに基づいた破壊確率を用いながら、滑動量の許容値の変更に対応した経済的な設計が可能であるかどうかを検討する。

検討対象として、検討に用いている72ケースの内、力の釣合いに基づく破壊確率 P_{fp} と滑動量に基づく破壊確率 P_{fd} が同程度の値となったケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の断面を1例ずつ取り上げる。

各防波堤で堤体幅を変化させた場合の力の釣合いによ

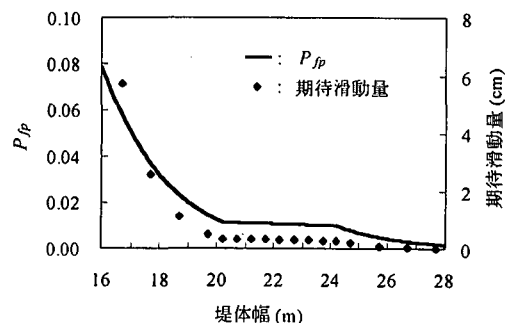


図-9 力の釣合いに基づく破壊確率 P_{fp} と期待滑動量の関係 (ケーソン式混成堤)

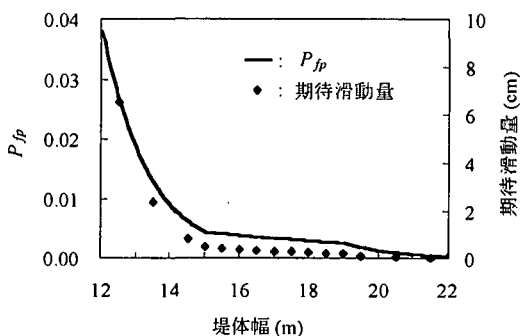


図-10 力の釣合いに基づく破壊確率 P_{fp} と期待滑動量の関係 (消波ブロック被覆堤)

る破壊確率と期待滑動量を比較した結果を図-9 および図-10 に示す。図の右縦軸は期待滑動量 (cm)、左縦軸は力の釣合いに基づく破壊確率 P_{fp} であり、横軸は堤体幅 (m) である。両者の相関性は高いことがわかる。 P_{fp} と P_{fd} の相関が高いときには、堤体幅が変化しても両者の相関性は依然として高く、このため P_{fp} と期待滑動量が高い相関を示すことを確認できた。この図より許容滑動量の変更による設計の合理化を行うには、許容滑動量を図の右縦軸で決め、それに対応する力の釣合いに基づく破壊確率の目標値を左縦軸の値に設定すればよい。しかしながら、より普遍的に滑動量と破壊確率を結びつけるには、レベル1信頼性設計法に適用可能な滑動量算定モデル (森屋ら, 2003) を構築する必要があるといえる。

4. ま と め

本研究では、ケーソン式防波堤の滑動破壊を対象として、信頼性設計の制御対象 (力の釣合いか滑動量か) の違いによる信頼度の相関性を明らかにした。得られた結論を要約すると以下のとおりである。

- ①滑動量に基づく破壊確率について実被災事例に基づく破壊確率との相関を検討したところ、概ね 30 cm を破壊の基準と考えた場合の破壊確率が実際の破壊確率と整合することがわかった。
- ②力の釣合いに基づく破壊確率と滑動量に基づく破壊確率を比較したところ、相関性は低いことが分かった。この原因は設計法に内在するものであり、波群や滑動限界波力以上の波力作用時間により整理可能である。
- ③2種類の破壊確率に相関性が強い場合には、堤体幅を変化させても力の釣合いに基づく破壊確率と期待滑動量の高い相関性を示した。これにより、力の釣合いに基づいた信頼性設計法によっても許容滑動量を緩和した経済的な設計への対応が可能である。

参 考 文 献

- 河合弘泰・高山知司・鈴木康正・平石哲也 (1997): 潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率, 港湾技術研究所報告, Vol. 36, No. 4, pp. 3-41.
- 小林正樹・寺師昌明・高橋邦夫・中島謙二郎・小谷 拓 (1987): 捨石マウンド支持力の新しい計算法, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 2, pp. 371-411.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1994): 混成防波堤の期待滑動量の計算法, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 756-760.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1998): 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, Vol. 37, No. 3, pp. 3-30.
- 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭 (1996): 混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 846-850.
- 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.
- 中山康二・山口邦彦・石貫国郎・柳田和喜・中山政勝・滑川伸孝 (2002): 周期のばらつきを考慮した半没水型上部斜面堤の期待滑動量, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 353-358.
- 森屋陽一・鷲尾朝昭・長尾 毅 (2003): ケーソン式混成堤の滑動量に基づくレベル1信頼性設計法, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 901-905.
- 湯 怡新・土田 孝 (1998): 波圧作用時における防波堤基礎の支持力不足に伴う沈下量の計算法, 土木学会論文集, No. 645, III-50, pp. 91-102.