

レベル 3 信頼性設計法を用いた防波堤全体系の最適化手法

An Optimal Design Method for the Entire Breakwater System Using the Level III Reliability Based Design

高木泰士¹

Hiroshi TAKAGI

The main purpose of the present study is to introduce an optimal procedure to consider the economical as well as stability aspects into the current model of the Level III reliability based design. To achieve this purpose, first the entire breakwater system composed of the upright section and the rubble mound is considered as the target domain, whereas the past studies have mainly focused on the upright section only. Secondly, two new failure modes, bearing capacity and circular slip failure, are incorporated into the previous model to evaluate the failure probabilities within the service life time for the entire section of a breakwater. The validity of the procedure proposed was confirmed through trial calculations. It is expected the newly proposed procedure can prevail over current design methods for breakwaters.

1. はじめに

平成 19 年 4 月 1 日, 港湾の施設の技術上の基準は仕様規定から性能規定へと移行した。これに伴って法律上は構造物に要求する性能のみが規定されることになり, 結果に至るための手法やその過程については設計者の創意工夫に基づいた判断が可能となる。信頼性設計法は性能評価のための有力なツールとして以前より認識されており, 多くの研究者により防波堤や消波ブロックの設計手法が提案されている。信頼性設計法の中でも最も上位水準であるレベル 3 の信頼性設計法については, 高山 (1989) がケーソン式防波堤の滑動破壊確率の算定手法を提案しており, 下迫・高橋 (1994) はこの考え方を更に発展させて期待滑動量を指標とした信頼性設計法を提案している。これらの方法を適用することで, 滑動破壊が支配的と考えられる防波堤の断面に関して合理的な設計が可能になると期待されている。

しかし, 防波堤の破壊としては必ずしも滑動のみが問題となるわけではない。高木 (2007) は, 防波堤が大水深域に設置されるに伴い, 滑動から捨石マウンドの破壊を伴ったケーソンの転倒や傾斜に移行していく危険性を指摘している。このため, 滑動以外にも発生する可能性の高い破壊モードについては, その発生確率等をレベル 3 信頼性設計法の中で適切に評価して, これらを反映して最終的な設計断面を決定することが望まれる。

また, これまでの設計では直立ケーソン部が力学的な観点から決定されていたのに対して, 捨石マウンド部の形状や寸法は, 経験的な要素により決定されてきた側面も強く, 直立部と捨石マウンド部の 2 種類より構成される防波堤全体系が必ずしも最適な設計断面になっていない

という課題が残っている。従って, 今後のレベル 3 信頼性設計法は捨石マウンド部を含む防波堤全体系を最適化できるような設計手法であることが望まれる。

そこで本研究では, 滑動に加えて, 転倒, 端趾部破壊, 円形すべり破壊の計 4 種類の破壊モードを評価し, ケーソン式防波堤全体系の安定性と経済性の両面に対して, 最適断面を与えることの可能な新たなレベル 3 信頼性設計法の提案を行っていく。

2. 端趾部破壊・円形すべり破壊を考慮した信頼性設計

本研究で使用する信頼性設計法のモデルは, 性能評価の指標として期待滑動量を用いた下迫・高橋 (1994) の手法を参考にして, 合田・高木 (1999) により開発され, その後, 高木・柴山 (2006) により非碎波状態の波浪が支配的となる大水深域にまで拡張されたレベル 3 信頼性設計法のモデルを基本モデルとして使用する。

但し, 高木・柴山のモデルは, 滑動, 転倒以外の破壊モードを考慮していない。しかし, 既往の被災事例(例えば, 宮井ら, 1993)の中には, 明らかに捨石マウンドの損傷・破壊が起因と考えられる被災も発生しており, このような破壊モードを考慮できるモデルを開発し, 捨石マウンドを含む防波堤全体の被災を検討していく必要があると考える。そのため, 本研究においては, 以降で説明する通り, 滑動, 転倒以外の端趾部破壊, 円形すべり破壊の 2 種類の捨石マウンドの破壊モードを新たに追加したモデルを作成して, 使用した。なお, ここで対象とする滑動, 転倒, 端趾部破壊, 円形すべりの 4 つの破壊モードは全て互いに影響し合うため, その相互依存を考慮した計算が出来ることが望ましい。しかし, 相互依存の物理的メカニズムは極めて複雑であり, またモデル化が可能であったとしても, 確率論的な考察に資するためには極めて膨大な計算時間を要することになり現実的なアプローチではない。そこで, 本研究で

1 正会員 修(工) 横浜国立大学 特別研究教員 大学院環境情報研究院

は4つの破壊モードをそれぞれ独立した物理的事象として取り扱うこととする。

(1) 地盤反力の算定手法と端趾部破壊の発生

ケーソンに作用する波圧分布や揚圧力分布が明らかとなるとき、捨石マウンドからの地盤反力は分布形を直線的であると仮定することにより、荷重の作用位置に応じて以下の三角形分布または台形分布で表すことができる(例えば、合田, 1990)。

$$P_e = \begin{cases} \frac{2W_e}{3t_e} & : t_e \leq \frac{1}{3}B \\ \frac{2W_e}{B} \left(2 - 3\frac{t_e}{B}\right) & : t_e > \frac{1}{3}B \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

P_e は後趾点における地盤反力、 $t_e = M_e/W_e$ 、 $M_e = W \cdot t - M_u - M_p$ 、 $W_e = W - U$ であり、 W は堤体の水中重量、 t は後趾点と堤体重量の作用点の距離、 U は揚圧力、 M_p は水平波力による堤体下端回りのモーメント、 M_u は揚圧力による後趾回りのモーメント、 B はケーソン天端幅である。

高木・柴山(2006)は、堤体位置における個々の波の碎波と非碎波を合田(1975)の碎波指標に基づいて区別している。また、波力の時間変化として、碎波時は合田(1990)の波力算定式から求まる最大波力を用いて三角形パルスで近似するモデル(下迫・高橋, 1994)、非碎波時は有限振幅重複波理論の第4次近似解(合田・柿崎, 1966)をそれぞれ用いている。従って今回提案するモデルでは、碎波時と非碎波時それぞれに対して、式(1)に基づいて端趾圧を計算することができる。

なお、わが国の設計では端趾圧の許容値として400～500 kN/m²が一般に適用され、事例では600 kN/m²までを許容した例があり(合田, 1990)、英国の基準(BS 8004, 1986)では中程度に締め固まった捨石に対しては200～600 kN/m²、また密に締め固まった捨石に対しては600 kN/m²以上を許容できるとしている。本研究では、端趾部破壊の発生限界値を600 kN/m²と仮定して以降の検討を行う。

(2) 円形すべり面での安定解析

ケーソンへの水平波力および揚圧力の作用に伴って、基礎地盤には偏心傾斜荷重が作用する。この荷重に対する基礎地盤の安定性を検討するため、わが国においては次式で示す簡易ビショップ法に基づく円弧すべり解析が実施される(日本港湾協会, 1999)。

$$F_s = \frac{1}{\sum W \sin \alpha + \left(\frac{1}{R}\right) \sum H a} \sum \frac{(cb + W' \tan \phi) \sec \alpha}{1 + (\tan \alpha \tan \phi) / F_s} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 F_s は円弧すべりに対する安全率、 W は分割片の全重量、 W' は分割片の有効重量、 α は分割片底面が水平面と成す角度、 R は円弧すべり円の半径、 H は土塊に作用する水平外力、 c は粘着力、 b は分割片の幅、

ϕ は内部摩擦角である。但し、 W 、 W' はケーソン重量と波浪作用による載荷重を含む。

本研究では、式(2)を使用して円形すべり破壊の発生有無を計算する。載荷重としては、式(1)より求まる三角形または台形分布の荷重分布を与えることとし、慣用的に使用されてきた有効幅に等分布荷重を載荷させる方法はここでは採用していない。なお、水上・小林(1991)は、一軸圧縮強度が30 N/mm²以上の石材であれば、基礎マウンドの強度は粘着力 $c=20$ kN/m²、 $\phi=35^\circ$ を満足することを確認しており、本研究ではこれらの値を地盤強度の設定値として使用する。

3. 信頼性設計法に基づく防波堤全体系の最適設計

端趾部破壊と円形すべり破壊の2つの破壊モードを高

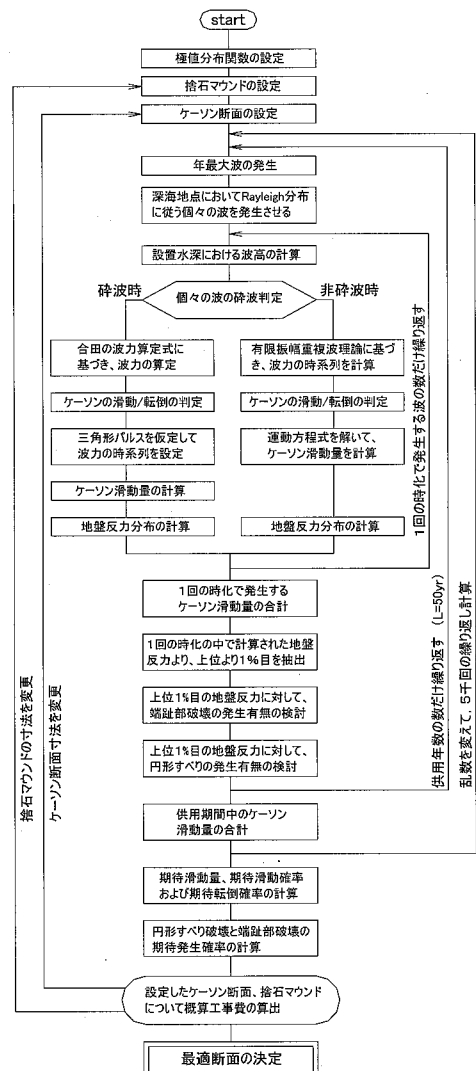


図-1 新たに提案するレベル3信頼性設計法のフロー

木・柴山 (2006) のモデルに追加した新たな信頼性設計手法が図-1 の設計フローである。

(1) 端趾部破壊と円形すべりの発生限界

図-1 で提案する設計手順において、滑動と転倒の2つの破壊モードの取り扱いについては、高木・柴山 (2006) と同一であるが、端趾部破壊と円形すべり破壊の2つの破壊の発生有無を判定して、それぞれの破壊確率の期待値を計算するルーチンを新たに追加している。ここで、端趾部破壊は、式 (1) により計算した端趾圧が 600 kN/m^2 を上回るとき、また円形すべり破壊は式 (2) で計算される安全率が 1.0 を下回るときにそれぞれ発生すると仮定する。但し、小林ら (1987) は捨石マウンドの強度が拘束圧により大きく変化することを指摘しており、また高木ら (2007) は波浪条件が端趾部の破壊状況に及ぼす影響が大きいことを指摘している。一方、長尾ら (1997) は、ビショップ法に基づく安全率 1.0 を指標とした円形すべりの判定基準は、静的な荷重の作用下では成立するが、動的な荷重に対しては隠れた安全性の余裕が含まれている可能性を指摘している。従って、本研究で使用する上記の端趾部破壊と円形すべりの発生限界はあくまで現状での目安であり、今後の研究の進展の中で更に適切な設定を行う必要があると考える。

(2) 端趾部破壊と円形すべりの計算時の対象波浪

計算中では1回の時化を2時間と仮定して、その期間に発生する全ての波が擬似乱数に基づいて計算される。従って、その全波に対して地盤反力を計算することができる。しかし、1時化中で1,000波近く出現する全波に対して円形すべり解析を行うことは計算負荷を考えると現実的ではなく、また実際の被災は波群中の上位数波～数十波の継続作用により発生すると考えられるため、今回は波群中の上位より1%目の波高を持つ波に対して端趾部破壊と円形すべり破壊の検討を行うこととする。したがって、この基準を変更することで、以降に提示する計算結果は変化し得ることに注意を要する。

(3) 建設単価の設定

計算において使用する各工種の単価を表-1に示す。各単価は、代表的な寸法の防波堤 ($H20\text{m} \times W17\text{m}$) の直接工事費をもとに、単位当りの積算単価を算出して設定した。

表-1 計算に使用した概算単価

名 称	単 位	単価(円)	備 考
ケーソン製作・設置	m^3	18,000	FD(3,200 t)使用
基礎捨石投入	m^3	2,900	5～100 kg/個
基礎本均し	m^2	15,000	潜水土作業
〃 荒均し	m^2	8,000	潜水土作業
中詰砂投入	m^3	1,500	ガット船投入
〃 均し	m^2	1,000	
上部コンクリート運搬	m^3	3,300	台船バケット方式
〃 打設	m^3	12,600	台船バケット方式

(4) 防波堤全体系の最適断面の決定方法

ケーソンと捨石マウンドの2種類の構成要素からなるケーソン式防波堤全体系の最適断面を決定するため、図-1のフローに示す通り、ケーソンと捨石マウンドのそれぞれの形状・寸法を変更して、組み合わせの数だけ計算を実施する。そして、供用期間中の滑動、転倒、端趾部破壊および円形すべり破壊の4つの破壊モードの期待確率あるいは期待変形量が全て許容範囲以内にある設計断面の中で最も建設コストが安価な設計断面を最適断面と考えることとする。合田・高木 (1999) は、初期建設費と被災発生時の復旧費の合計を期待総費用と定義して、最適断面を決定する方法を提案しているが、本研究では初期建設費のみを対象とする。

ここで、転倒、端趾部破壊および円形すべり破壊の各破壊モードの供用期間中の期待被災確率の許容値としては1%を設定した。これは、河合ら (1997) が混成堤の平成元年度から5年度の5年間の被災事例を対象として推定した供用期間での被災遭遇確率が3%であることを参考とした。また、滑動については、期待被災確率ではなく、期待滑動量で評価すべきであり、供用期間中の期待滑動量の許容値としては、合田・高木 (1999) が使用した10 cmを設定した。

4. 新たな信頼性設計手法に基づく最適断面の計算

(1) 検討条件

図-1の信頼性設計フローに基づいて、水深16m地点に設置するケーソン式防波堤を対象としてケーソンとマウンドからなる防波堤全体系に関する最適断面の選定を行う。計算を行う防波堤断面は図-2に示す通り、ケーソン幅5パターン、マウンド厚4パターン、マウンド後肩幅3パターンを組み合わせた合計60断面である。ケーソン天端高、前肩幅およびマウンド法勾配は固定値を使用する。沖波条件として、50年確率波高8m、確率波周期12秒および裾長さパラメータ $\gamma_{50}=1.25$ を仮定した。

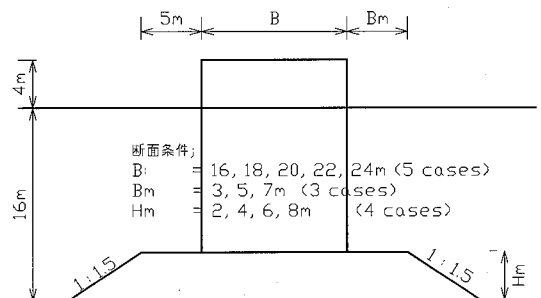


図-2 検討対象断面

(2) 不確定要因のパラメータ

使用する各不確定要因の変動特性値を表-2に示す。

表-2 変動特性の設定値

不確定要因	バイアス	変動係数	分布関数	備考
沖波波高	0.00	0.10	正規分布	中央値は極値分布
個別波高	#	#	レーリー	継続2時間
潮位	-1.00	潮位振幅	三角分布	
波浪変形	-0.13	0.10	正規分布	
波力(碎波)	-0.09	0.19	正規分布	
波力(重複波)	-0.09	0.10	正規分布	
静止摩擦係数	0.00	0.10	正規分布	中央値は、0.65
動摩擦係数	0.00	0.10	正規分布	中央値は、 滑動未経験時：0.60 滑動経験時：0.65

なお、地盤の破壊現象を考慮するため、本来は地盤強度に関係する変動要因についても考慮すべきであるが、本研究では含めていない。この点に関しては、今後十分に対応していく必要がある。

(3) 計算結果

合計 60 断面に対して、供用期間 50 年での期待滑動量、転倒、円形すべり破壊および端趾部破壊の期待発生確率の計算結果を図-3 に示す。

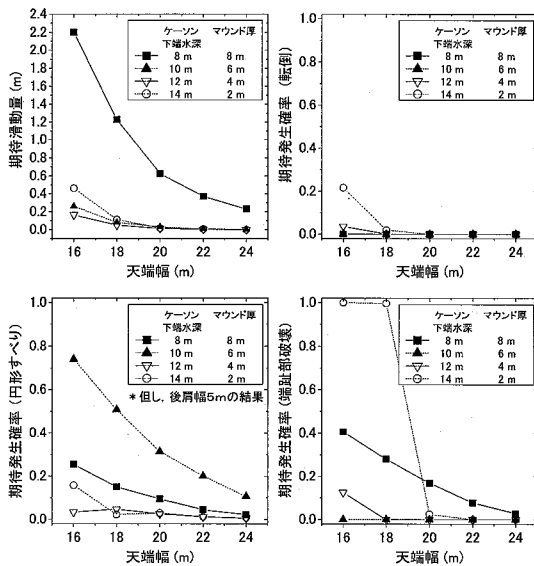


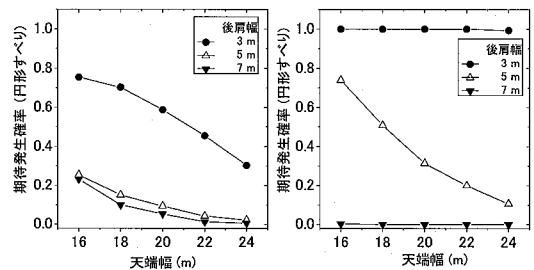
図-3 期待滑動量と期待発生確率の計算結果

全般的な傾向としては、天端幅が大きくなるにつれて、全ての破壊モードに関して被災の程度が小さくなっていく傾向にあることがわかる。これは天端幅が増加して重量が増すに従って、安定性が増し、加えて接地面積が増えて反力分布が穏やかになるためである。

これに対して、ケーソン下端水深の変化に対する各被災モードの発生程度の変化は、天端幅とは異なり一方ではなく、かなり複雑に変化していると言える。天端幅と同様、ケーソン下端水深が深くなるほどケーソン自体の重量は増加していくが、同時に波力も増加していくこ

ととなり、結局両者のバランスで被災の程度が決定されることになる。加えて、碎波時で合田の波力算定式が適用される場合では、マウンド上水深の違いで波圧が変化し、また非碎波時で有限振幅重複波理論による波力が適用される場合では、水深方向の波圧分布が位相ごとに複雑に変化したりすることも複雑さを生む要因になっていると考えられる。このように、ケーソン下端水深をどこにとれば安定性が高くなるかは、破壊モードごとに様々であり、一概に安定性を論じることは困難である。

次に、マウンド肩幅と円形すべり破壊の関係性を示す結果を図-4 に示す。マウンド肩幅のサイズは、滑動、転倒および端趾部破壊の3つの破壊モードの計算結果には影響を与えず、円形すべり破壊の結果のみに影響を及ぼす。マウンド肩幅の違いが円形すべりの発生確率に及ぼす影響は非常に明瞭である。すなわち、マウンド肩幅が広いほどカウターウェイトが大きくなり、発生確率が減少していく。また一方で、天端幅が広いほど反力分布が穏やかになり、発生確率が減少していく。



ケーソン下端水深8m (マウンド厚:8m) ケーソン下端水深:10m (マウンド厚:6m)

図-4 マウンド肩幅と円形すべり破壊の発生確率

(4) 最適断面

従来のケーソン式防波堤の信頼性設計法では、ケーソンの滑動と転倒の2つの破壊モードを対象としていた。このため、直立ケーソン部自体の最適断面を選定することはできるが、捨石マウンド部やそれを含む防波堤全体系の最適断面を選定することは不可能であった。これに対して、本研究の方法では、端趾部破壊と円形すべり破壊の2つの破壊モードについても対象に加えたため、全体系の最適化が可能となる。

図-5 は、検討対象とした全 60 断面について 1 函当たり (延長 20m) の概算工事費を示している。黒塗りのシンボルは、このうち 4 つの破壊モード全てが許容安全性、すなわち期待滑動量 10cm 以内および期待発生確率 1% 以内を満たす断面を示している。従って、安定性と経済性の両面を考慮した最適断面は、黒塗りシンボルの中で最も工事費が安価な断面ということとなり、今回の検討では天端幅 18m、ケーソン下端水深 10m (マウンド厚 6m)、マウン

ド後肩幅7mの断面が最適断面であると判断できる。

図-5の結果を全体的に眺めてみると、マウンド肩幅の違いが最適断面の選定に大きな影響を及ぼしていることがわかる。このことより、マウンド肩幅の違いは、工事費にさほど大きな影響を及ぼさないが、安定性には大きな影響を及ぼし、その結果最適断面を決定する際のキーフクターになる可能性があるといえる。これは、図-4で示した通り、円形すべりに対する安定性がマウンド肩幅と密接に関連しているためである。マウンド肩幅の例は端的な例であるが、他にも直立ケーソン部と捨石マウンド部の両者のバランスが安定性と経済性の両面に深く影響を及ぼすことは明白である。従って、直立ケーソン部に加えて、捨石マウンド部も含めた防波堤全体系を信頼性設計法の中で取り扱うことにより、設計の合理化を一段と向上することができると期待される。

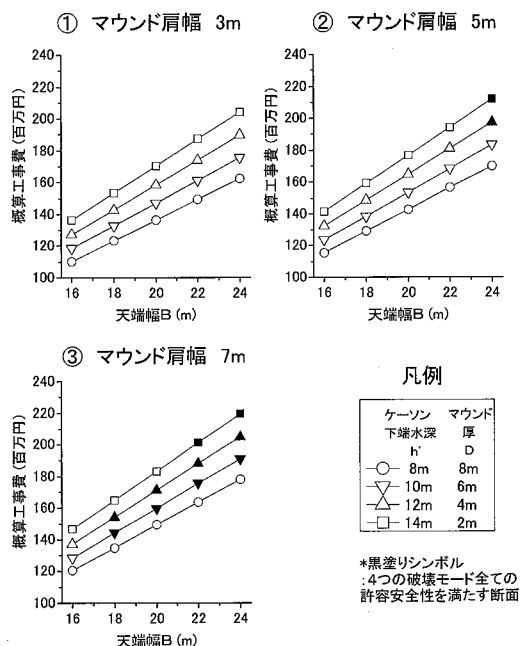


図-5 各断面の概算工事費と其中で許容安全性を満たす断面

5. 結 論

本研究の主要な結論を以下に示す。

- (1) 従来、直立ケーソン部のみを設計対象としていたレベル3信頼性設計法に端趾部破壊と円形すべり破壊の2種類の破壊モードを新規に加えて、捨石マウンド部を含む防波堤全体系を対象としたレベル3信頼性設計法の設計手順を新たに提案した。
- (2) 新たな設計手順に基づいてモデル計算を実施し、安定性と経済性の両面を考慮した防波堤全体系の最適化が可能であることを示した。

- (3) 供用期間中の各破壊モードの期待発生確率は、ケーソン下端水深、天端幅、マウンド肩幅等の断面要素により様々に変化し、破壊モード毎に最も影響を与える断面要素も様々に変化する。従って、捨石マウンド部を含む防波堤全体系を対象とする場合、一部の破壊モードのみではなく、考慮する破壊モード全ての期待発生確率や期待変形量を総括的に比較し、検討することが重要であることが認識された。
- (4) マウンド肩幅の拡張は比較的安価に実施することができるが、防波堤全体系の安定性に大きな効果を発揮し、その結果最適断面の決定に際してキーフクターになりうることが指摘された。
- (5) 安定性を向上するための方策は幾通りもあるが、本手法を適用することで、その中でも最も経済的な方策を選択することが可能となる。すなわち、設計の合理化を一段と向上することができる。

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, 港研報告, 第36巻, 第4号, pp. 3-40.
- 小林正樹・寺師昌明・高橋邦夫・中島謙二郎・小谷 拓(1987): 捨石マウンドの支持力の新しい計算法, 港研報告, 第26巻, 第2号, pp. 371-411.
- 合田良実, 柿崎秀作(1966): 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港研報告, 第5巻, 第10号, pp. 1-49.
- 合田良実(1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 14巻, 3号, pp. 59-106.
- 合田良実(1990): 増補改訂港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 333p.
- 合田良実・高木泰士(1999): 信頼性設計法におけるケーソン式防波堤設計波高の再現期間の選定, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 921-925.
- 下迫健一郎・高橋重雄(1994): 混成防波堤の期待滑動量の計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 785-760.
- 高木泰士・柴山知也(2006): 大水深地点におけるケーソン式防波堤の信頼性設計手法の提案, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 901-905.
- 高木泰士(2007): ケーソン式防波堤の被災事例に基づくレベル3信頼性設計法の妥当性の検証, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 835-840.
- 高木泰士・竹内邦夫・柴山知也(2007): ケーソン式防波堤の捨石マウンドに発生する地盤反力と支持力破壊に関する解析的研究, 第42回地盤工学研究発表会, pp. 977-978.
- 高山知司(1989): 信頼性理論による防波堤滑動の安定性に関する検討, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 673-677.
- 長尾 毅・門脇陽治・土田 孝・寺内 潔(1997): 信頼性設計法による防波堤の全体安全性(第2報)～支持力安全性に関する検討～, 港研報告, 第36巻, 第1号, pp. 25-57.
- 日本港湾協会編(1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1181p.
- 水上純一・小林正樹(1991): マウンド用捨石材の大型三軸試験による強度特性, 港研資料, No.699, 23 p.
- 宮井真一郎・大平勝司・塩見雅樹(1993): 被災防波堤集覧(その4), 港研資料, No.765.
- British Standards(1986): BS 8004:1986 Code of practice for foundations, British Standards Institution, 144p.