

既設の防波堤堤体の被災遭遇確率および期待滑動量

河合弘泰*・藤咲秀可**・鈴木康正***・高山知司****

1. はじめに

現行設計法の下では、防波堤堤体は滑動と転倒のそれぞれについて安全率が1.2以上となるように設計されている。しかし、所要の安全率を満たす堤体であっても、被災に遭遇する確率は0ではない。また、同じ安全率をもつ堤体であっても、防波堤の設置水深、海底勾配、潮位差などの条件によって被災に遭遇する確率は異なる。これらのことについては、高山ら(1991b)が信頼性理論に基づいて計算している。ところが、典型的な防波堤断面を仮定して被災遭遇確率を計算した例(例えば、高山ら1991a, 1991b, 1994)はあるが、実際に設置されている防波堤堤体の安全率と被災遭遇確率との関係は十分に明らかにされていない。

以上のような背景で本研究では、様々な設計条件をもつ実在の防波堤を対象として、安全率と被災遭遇確率との関係を調べるとともに、現行の安全率に対応する被災遭遇確率を調べた。また、「防波堤としての機能を失わない程度の滑動は許容しても良い」という考え方をすれば、防波堤の安全性を期待滑動量(伊藤ら, 1966; 下迫ら, 1994)によって評価することもできる。そこで、安全率と耐用年数間における期待滑動量との関係も明らかにした。

2. 信頼性設計による防波堤の安全性の計算

2.1 現行設計法と信頼性設計法

現行設計法では、設計沖波と呼ばれる仮定の波を定め、波浪変形計算によって堤前波高を計算し、この波が堤体に作用したときの安全率(耐力と外力との比)によって防波堤の安全性を評価している。このとき、波高や波力は計算によって得られた値、堤体の自重や堤体とマウンドの間の摩擦係数は設計値を確定値として扱い、誤差やばらつきは考慮していない。堤体に必要とされる安全率が1.2以上とされているのは、設計沖波よりも高い波が来襲する可能性や、計算の誤差や施工のばらつきに対し

て余裕をとっているためである。

これに対して信頼性設計法では、沖波波高や潮位の発生確率分布、計算の誤差や施工のばらつきを考慮することができる。例えば、現行設計法では防波堤の安定性に最も不利な潮位を用いて設計しているが、信頼性設計法では潮位の発生確率分布を考慮できる。なお、信頼性設計法では、被災に遭遇する確率や変形量の期待値によって防波堤の安全性を評価する。

2.2 前提条件

今回の検討における前提条件は以下の通りである。

- ①外力は波浪のみとし、地震は考慮しない。
- ②堤体の滑動または転倒のみが発生し、被覆ブロック、マウンド、基礎地盤は変形しない(常に安定である)。
- ③堤体が滑動または転倒してもすぐに元の状態に復旧する。

2.3 計算上の仮定および計算式

本研究では、高山ら(1994)の方法に修正を加えた以下の方法によって、防波堤堤体の滑動遭遇確率、期待滑動量、転倒遭遇確率を計算した。

a) 沖波波高の出現確率

設計計算書で採用した極値分布関数もちいる。設計沖波が波浪推算などによって決定された場所で、設計計算書に確率分布関数が記されていない場合には、小舟(1990)がNOWPHAS(全国港湾海洋波浪情報網)のデータによって当てはめた極値分布関数を用いる。小舟によれば、日本沿岸の多くの場所でWeibull分布にしたがい、一部の場所ではGumbel分布にしたがう。以下にそれぞれの極値分布関数を示す。

Weibull分布:

$$p(H_0) = \frac{k}{A} \left(\frac{H_0 - B}{A} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{H_0 - B}{A} \right)^k \right] \quad \dots\dots\dots (1a)$$

Gumbel分布:

$$p(H_0) = \frac{1}{A} \exp \left[- \frac{H_0 - B}{A} - \exp \left(- \frac{H_0 - B}{A} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (1b)$$

ここに、 H_0 は出現波高、 A は尺度母数、 B は位置母数、 k は形状母数である。

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室
 ** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室
 *** 正会員 工博 運輸省港湾局付(トルコ港湾水理センター)
 **** 正会員 工博 京都大学防災研究所海岸災害研究室

実際に発生する沖波波高 H_R はこれらの式により算出された沖波波高 H_0 に対してばらつきがある。本研究では高山ら (1991a, 1991b, 1994) にしたがって、平均 $\overline{H_R} = 1.00H_0$ 、標準偏差 $\sigma_R = 0.10H_0$ の正規分布をなすものと仮定した。

$$p_R(H_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} \exp\left[-\frac{(H_R - \overline{H_R})^2}{2\sigma_R^2}\right] \dots\dots(2)$$

このばらつきはプロットング公式による誤差などを想定したものである。

なお、沖波の周期は、設計沖波と波形勾配が同じになるように波高に運動して変化させた。また、防波堤の被災に絡むような高波浪が発生するときの波向は、防波堤設置地点によって概ね定まっていると考え、沖波の波向は設計計算書にある向きで常に一定とした。

b) 高潮偏差

通常、設計潮位には朔望平均満潮面 H.W.L. が用いられているが、一部の場所では朔望平均満潮面に高潮偏差を加えた潮位が設計潮位として用いられている。高潮偏差を沖波波高の関数として与える方法も考えられるが、高潮偏差と沖波波高の結合確率分布が明らかでないことから、今回の検討では高潮偏差を無視した。なお、今回対象とした防波堤断面のほとんどが高潮偏差を考慮せずに設計されたものである。

c) 潮位の発生確率分布

高山ら (1991b, 1994) は、潮位が朔望平均干潮面 L.W.L. と朔望平均満潮面 H.W.L. との間で正弦波で変化すると仮定した。しかし、河合ら (1996) によれば、図-1 に示すように、正弦波で近似した場合と主要 4 分潮を考慮した場合とでは潮位の発生確率分布に大きな違いがある。

そこで、本研究では、主要 4 分潮を用いて潮位を計算

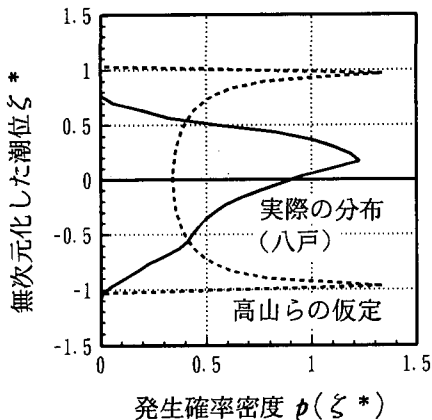


図-1 潮位の発生確率分布 (河合ら, 1996 を一部修正)
(注) 潮位は、平均海面 M.S.L. が 0、基本水準面 C.D.L. が -1 となるように無次元化してある。

し、耐用年数間における潮位の発生確率分布 $p_t(\xi)$ を求めた。主要 4 分潮を考慮した潮位 ξ は次式によって与えられる。

$$\xi(t) = \sum_{i=1}^4 f_i H_i \cos\left[V_i + u_i + \phi_i + \omega_i\left(t - \frac{\phi_A}{360} \times 24\right) - \kappa_i\right] \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 i は分潮の番号、 f_i は天文常数、 H_i は平均半潮差、 $V_i + u_i$ は天文引数、 ϕ_i は経度による位相の補正、 ω_i は角速度、 t は時刻、 ϕ_A は対象地点が属する標準子午線の経度、 κ_i は遅角である。今回の検討では、平均半潮差 H_i や遅角 κ_i の値を海上保安庁 (1992) や気象庁 (1995) の発行する資料から引用した。

d) 波浪変形計算

沖波波高 H_R から合田の提案した略算式によって堤前波高 H_m を求める。高山ら (1991a) によれば、実際の堤前波高 H_m はこの堤前波高 H_m に対してばらつきがあり、平均 $\overline{H_m} = 0.87H_m$ 、標準偏差 $\sigma_m = 0.09H_m$ の正規分布をなす。

$$p_M(H_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \exp\left[-\frac{(H_m - \overline{H_m})^2}{2\sigma_m^2}\right] \dots\dots(4)$$

なお、堤体に対する入射角は確定値として扱う。

e) 波力算定

高山ら (1991a) によれば、実際に堤体に作用する波力 P は合田式を用いて算定した波力 P_c に対してばらつきがあり、混成堤では平均 $\bar{P} = 0.91P_c$ 、標準偏差 $\sigma_P = 0.17P_c$ 、消波工被覆堤では平均 $\bar{P} = 0.84P_c$ 、標準偏差 $\sigma_P = 0.10P_c$ の正規分布をなす。

本研究では、混成堤に対しては、高橋ら (1992) の衝撃波力係数 α^* をもちいた波力公式によって算定した。図-2 は、模型実験によって得られた波力 P と高橋らの波力公式によって計算した波力 P_c の比の分布を示したものである。実験 (A~D) によって波力比の平均値に達

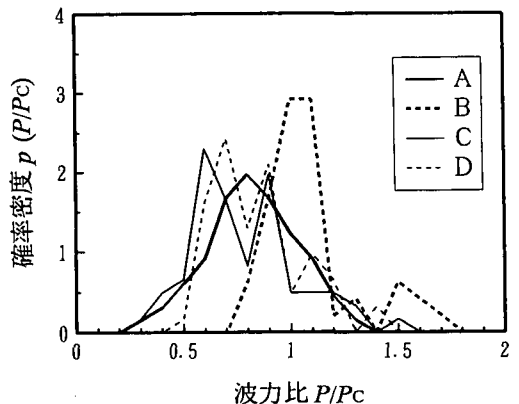


図-2 波力のばらつき

いはあるが、何れも正規分布に近い分布をしており、標準偏差も同程度である。そこで、本研究においては、4つの分布の平均値および標準偏差を平均し、実際の波力 P が、平均 $\bar{P}=0.88P_c$ 、標準偏差 $\sigma_P=0.22P_c$ の正規分布をなすと仮定した。

$$p_P(P)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_P}\exp\left[-\frac{(P-\bar{P})^2}{2\sigma_P^2}\right] \quad \cdots\cdots\cdots(5)$$

f) 自重

中詰め砂などの単位体積重量が設計値に対してばらつくことにより、堤体全体の自重も設計値に対してばらつく。そこで、高山ら(1994)は自重のばらつきを考慮して堤体の滑動遭遇確率を計算した。しかし、自重のばらつきが堤体の滑動遭遇確率などにおよぼす影響は小さいので、今回の検討においては計算時間を短縮するために確定値として扱った。

g) 摩擦係数

堤体とマウンドの間の摩擦係数 f_0 は通常0.6として設計されている。高山ら(1991a)によれば、実際の摩擦係数 f にはばらつきがあり、平均 $\bar{f}=1.06f_0$ 、標準偏差 $\sigma_f=0.16f_0$ の正規分布をなしている。

$$p_f(f)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f}\exp\left[-\frac{(f-\bar{f})^2}{2\sigma_f^2}\right] \quad \cdots\cdots\cdots(6)$$

h) 滑動の判定

滑動安全率 F_s は次式によって求められる。

$$F_s=\frac{f(W-U)}{P} \quad \cdots\cdots\cdots(7)$$

ここに、 W は堤体の空中重量、 U および P はそれぞれ堤体に作用する浮力および水平波力である。式(7)で定義した滑動安全率が1未満になった(堤体に作用する波力が堤体とマウンドの間の摩擦抵抗力を上回った)ときに、堤体が滑動すると仮定する。したがって、ここでいう滑動には、防波堤としての機能に影響がないような微小な滑動も含まれる。

耐用年数間における堤体の滑動遭遇確率 P_s は次式により求められる。

$$P_s=\int_{-\infty}^{\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{f_0}\{p_f(f)p_P(P) \cdot p_M(H_M)p_R(H_R)p_0(H_0)p_\zeta(\zeta) \cdot dfdPdH_MdH_RdH_0d\zeta \quad \cdots\cdots\cdots(8)$$

ここに、 f_0 は滑動安全率が1となる摩擦係数 f である。

i) 期待滑動量

下迫ら(1994)によれば、個々の波に対する滑動量 S は次式によって求められる。

$$S=\frac{g\tau_0^2(P-fW)^3(P+fW)}{8fWW^2P^2} \quad \cdots\cdots\cdots(9)$$

ここに、 W および W' は堤体の空中重量および水中重量、 τ_0 は衝撃力の作用時間、 P は滑動合成波力である。ただ

し、この式の算定精度が明確でないことから、この式で得られた滑動量のばらつきは考慮しない。

また、耐用年数間における期待滑動量 $\bar{S}$ は次式により求められる。

$$\bar{S}=\int_{-\infty}^{\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{f_0}\{S \cdot p_f(f)p_P(P) \cdot p_M(H_M)p_R(H_R)p_0(H_0)p_\zeta(\zeta) \cdot dfdPdH_MdH_RdH_0d\zeta \quad \cdots\cdots\cdots(10)$$

j) 転倒の判定

転倒安全率 F_o は次式により求められる。

$$F_o=\frac{W't-M_U}{M_P} \quad \cdots\cdots\cdots(11)$$

ここに、 t は堤体の後端から重心までの腕の長さ、 M_U および M_P は揚圧力および水平波力によるモーメントである。滑動の判定と同様、安全率が1未満になったときに転倒したとみなす。

耐用年数間における堤体の転倒遭遇確率 P_o は次式により求められる。

$$P_o=\int_{-\infty}^{\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{t_0}\{p_t(t)p_P(P) \cdot p_M(H_M)p_R(H_R)p_0(H_0)p_\zeta(\zeta) \cdot dtddPdH_MdH_RdH_0d\zeta \quad \cdots\cdots\cdots(12)$$

ここに、 t_0 は転倒に対する安全率が1となる堤体の後端から重心までのうでの長さである。

3. 対象とした防波堤

本研究では、現在共用中の混成堤19断面および消波工被覆堤9断面を対象とした。堤頭部、隅角部、消波工設置端部など特殊な断面は含まれていない。表-1は、対象とした防波堤の諸元の範囲を示したものである。

表-1 対象とした防波堤の諸元の範囲

防波堤形式	混成堤, 消波工被覆堤
沖波の発生確率分布	Weibull 分布 (一部は Gumbel 分布)
設計沖波の波高	2.4 ~ 11.4 m
〃 周期	4.9 ~ 14.0 s
海底勾配	0.001 ~ 0.014
潮位差	0.6 ~ 2.4 m
設置位置の水深	5.3 ~ 26.1 m
〃 相対水深	0.91 ~ 3.77
マウンド高さ	1.7 ~ 8.8 m
〃 冠幅	5.7 ~ 30.9 m
堤体幅	4.5 ~ 23.4 m
摩擦係数	0.6 (一部は 0.7)

4. 計算結果

4.1 滑動や転倒に対する安全率

図-3は滑動に対する安全率, 図-4は転倒に対する安全率について, それぞれ設計計算書の値(F_s' , F_o')と今回の再計算した値(F_s , F_o)を比較したものである。設計計算書と今回の計算とに差があるのは, 主として以下の理由によるものである。

a) 高潮偏差

設計計算書では朔望平均満潮位またはこれに高潮偏差を加えた水面で安全率が計算されている。これに対して今回の計算では, 高潮偏差を無視し, 朔望平均満潮位で安全率を計算した。

b) 波浪変形計算

設計計算書では, 合田の碎波帯内波高算定図から値を直接読みとったもの, 合田の提案した略算式によるもの, エネルギー平衡方程式をコンピュータで計算したものがある。今回の検討では, 合田の略算式に統一した。

c) 波力公式

設計計算書では広井式, サンプル式, 森平式, 従来の合田式が用いられている。今回の検討では衝撃波力係数 α^* を導入した式に統一した。

4.2 滑動遭遇確率

図-5は, 滑動安全率(今回再計算したもの) F_s と耐用年数間における滑動遭遇確率 P_s との関係を示したものである。滑動安全率と滑動遭遇確率とは平均的に次式に示す関係がある。

混成堤:

$$P_s = 10^{(1.62 - 1.85 F_s)} \quad (13a)$$

消波工被覆堤:

$$P_s = 10^{(4.32 - 4.89 F_s)} \quad (13b)$$

同じ滑動安全率であっても, 防波堤形式によって滑動遭遇確率は異なる。ただし, 消波工被覆堤の滑動遭遇確率は, 波力の低減係数の与え方によって大きく変わる可能性がある。一方, 潮位差, 設置水深など設計条件が異なっても, 防波堤形式の違いほど滑動遭遇確率は変わらないことがわかる。

安全率1.2に対応する平均的な滑動遭遇確率を求めると, 混成堤では0.25, 消波工被覆堤では0.028である。現行の安全率と同程度の安全性をもつ防波堤を設計するためには, 滑動遭遇確率がこれらの値となるようにすればよい。なお, ここでいう滑動とは「安全率が1を切る」という意味であり, 防波堤としての機能を失うほど大きな滑動が起きる確率はこれらの値よりも小さいものと考えられる。

4.3 期待滑動量

図-6は, 滑動に対する安全率(再計算した値) F_s と

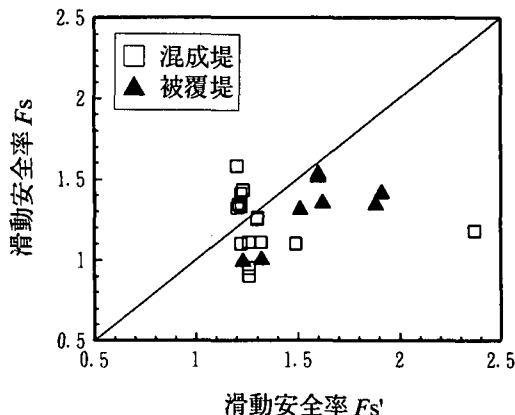


図-3 滑動安全率の比較

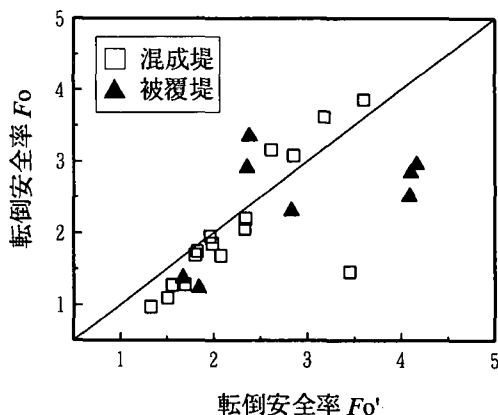


図-4 転倒安全率の比較

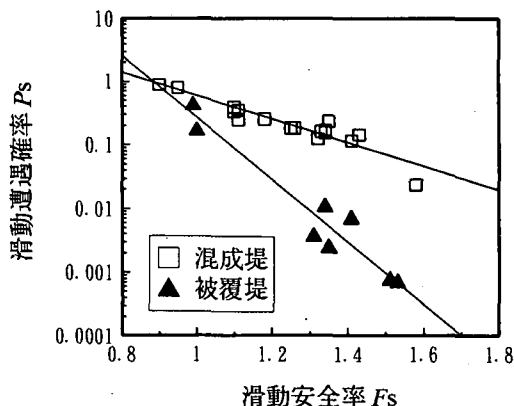


図-5 滑動安全率と滑動遭遇確率

耐用年数間における期待滑動量 $\bar{S}$ (cm) の関係を示したものである。両者には平均的に次式に示す関係がある。

混成堤:

$$\bar{S} = 10^{(4.20 - 2.80 F_s)} \quad (14a)$$

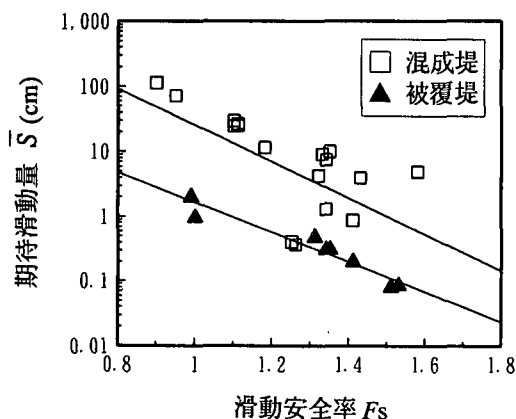


図-6 滑動安全率と期待滑動率

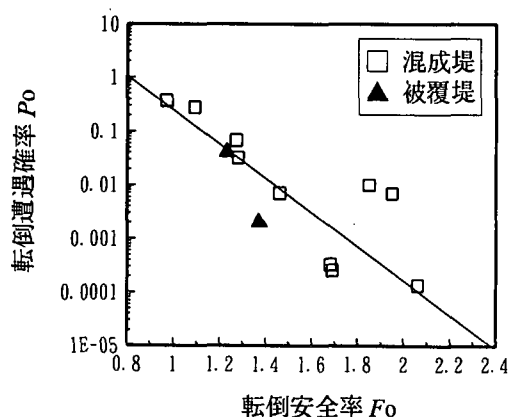


図-7 転倒安全率と転倒遭遇確率

消波工被覆堤:

$$\bar{S} = 10^{(2.53 - 2.31 F_s)} \quad (14b)$$

この式によれば、安全率 1.2 に対応する期待滑動量は、混成堤で 7.0 cm、消波工被覆堤で 0.6 cm である。

耐用年数間における滑動量の許容値を 30 cm と仮定すれば、混成堤で必要とされる安全率は 0.97 となる。ただし、滑動量の許容値は、その防波堤が有する機能や重要度によって定めるべきである。

4.4 転倒遭遇確率

図-7 は、転倒に対する安全率 (再計算した値) F_o と耐用年数間における転倒遭遇確率 P_o の関係を示したものである。安全率が 2 より小さい範囲では、次式に示す関係がある。

混成堤:

$$P_o = 10^{(2.57 - 3.18 F_o)} \quad (15)$$

この式によれば、安全率 1.2 に対応する転倒遭遇確率は 0.058 である。図-4 で示したように、現行防波堤の転倒

安全率は 2 よりも大きな値をとることが少なくない。このような防波堤の転倒遭遇確率は極めて小さいことがわかる。

高山ら (1994) は、混成堤について、転倒安全率が 1.2 となる転倒遭遇確率が、滑動安全率が 1.2 となる滑動遭遇確率の 1/30 程度になることを示唆した。今回の計算でも、転倒遭遇確率が滑動遭遇確率の約 1/4 であることがわかった。つまり、必ずしも現行の安全率は滑動と転倒とで同じ安全性を保証していない。ただし、堤体が若干滑動したときと転倒したときとは復旧費用が異なるので、必ずしも滑動遭遇確率と転倒遭遇確率を等しくするような設計をする必要はないと考えられる。

5. おわりに

本研究では、実際に設置されている防波堤堤体を対象として、耐用年数間における滑動遭遇確率、転倒遭遇確率、期待滑動量を計算した。そして、現行設計法で定める安全率に対応するこれらの値を求めた。今後の課題としては、以下のことが考えられる。

- ① 高潮偏差、沖波の波向、堤体への入射角の分布など、考慮していないものがある。これらを考慮することによって滑動遭遇確率などの値がどの程度変化するのか調べる必要がある。
- ② 隅角部、堤頭部、消波工設置端部など、特殊な断面の計算方法についても検討する必要がある。

参考文献

- 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄 (1966): 防波堤の安定性に関する研究, 港研報告, Vol. 5, No. 14, 134 p.
- 河合弘泰・藤咲秀可・鈴木康正 (1996): 潮位の発生確率分布と防波堤の安定性について, 海洋開発論文集, Vol. 12 (投稿中).
- 小舟浩治 (1990): わが国沿岸域における波浪観測手法と出現波浪の特性に関する研究, 港研資料, Vol. 668, 183 p.
- 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, 海岸論文集, 第 41 巻, pp. 756-760.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三 (1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案, 海岸論文集, 第 39 巻, pp. 676-680.
- 高山知司・池田直太 (1991a): 現行設計法における防波堤の滑動安定性, 海岸論文集, 第 38 巻, pp. 641-645.
- 高山知司・藤井 久 (1991b): 信頼性理論による防波堤の滑動安定性に関する理論的検討, 港研報告, 第 30 巻, 第 4 号, pp. 35-64.
- 高山知司・鈴木康正・河合弘泰 (1994): 滑動と転倒による被災確率を考慮した防波堤の経済性設計の検討, 海岸論文集, 第 41 巻, pp. 1066-1070.
- 日本沿岸潮汐調和定数表, 海上保安庁, 平成 4 年 2 月 (1992), 267 p.
- 平成 8 年潮位表, 気象庁, 1995, 271 p.