

海岸防潮堤の最適計画高潮位の決定方法と その有明海北部沿岸への適用

DETERMINATION OF THE OPTIMAL DESIGN HIGH-TIDE LEVEL OF SEAWALLS AND ITS APPLICATION TO THE COAST OF NORTH ARIAKE SEA

川 北 米 良 *

By Yoneo KAWAKITA

In the planning of a seawall for the protection of storm surges along the coastal area, the determination of the height of the seawall is important. In its main design factors, there is one of "design high-tide level." Generally, the higher the tide level of a storm surge, the greater the damage may become. Therefore, most of the design high-tide levels have usually been determined at the highest-tide level. As this highest-tide level, however, will often become higher when a bigger storm or a bigger tsunami strikes the coast in future, the propriety of the design high-tide level is doubtful. In this paper, a design high-tide level is determined mathematically, according to the probability distribution of the occurrence of storm surges, the construction costs of seawalls, the coastal land utilization, the risk of damage by storm surges, and the social discount rate. Furthermore, this theory has been applied to the determination of the design high-tide level of seawalls along the coast of North Ariake Sea, and its rationality and validity were examined and confirmed.

1. まえがき

海岸地帯の高潮防御のための防潮堤の計画においては、堤防高の決定が重要で、その主要決定要素の1つに計画高潮位がある¹⁾。一般に当該海域で生じうる高潮が高いほど、その海岸地帯の被害は大きくなる傾向がある。もし、その海岸で発生する絶対最高潮位がなんらかの方法で求められれば、この潮位を計画高潮位に用いることができる。しかしこのような絶対最高潮位の推定は現在のところ困難である。

本論文はその海岸における高潮発生頻度、防潮堤の建設費、海岸地帯の土地利用に対応する damage potential の高潮被害の危険性を考慮したオペレーションズ・リサーチによる海岸防潮堤の計画高潮位の決定方法を述べ、この方法を用いて有明海北部沿岸の防潮堤の計画高潮位の試算を行ない、この決定

理論の合理性と妥当性を吟味したものである。

この決定方法は海面埋立地盤高の決定理論^{2),3)}を応用したものである。

2. 最適計画高潮位とその算定モデル

基準面から測った計画高潮位を y 、防潮堤の建設費を M 、海岸地帯の年間高潮被害の期待値を Ψ_0 とすると、 y を高くすれば防潮堤の断面が大きくなるので M は大となり、高潮被害が少なくなるので Ψ_0 は小となる。逆に y を低くすれば M は小となり Ψ_0 は大

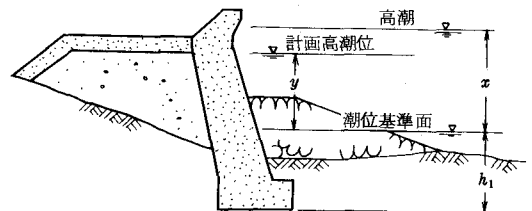


図-1 潮位および防潮堤基礎の深さ

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工
学科 (〒101 千代田区神田駿河台1-8)

となる。高潮防御対策はまれに起こる高潮災害に対して、防備のために費用を費すか、被害のために失うかの問題に帰着する。そこで社会的割引率を年率 r とし、年期末複利計算として、 M と Ψ_0 の累年の和の現在価値 J を求めると investment-risk trade off の状態で、 J の値が最小となる場合の y の値を最適計画高潮位 y_0 と定義する (図-2)。

防潮堤の竣工の年を初年度とすれば、第 t 年度の Ψ_0 の現在価値は $\Psi_0 / (1+r)^t$ であるから、 J は次式のように書ける：

$$J = M + \sum_{i=1}^t \frac{\Psi_0}{(1+r)^i} \\ = M + \frac{\Psi_0}{r} \{1 - (1+r)^{-t}\}$$

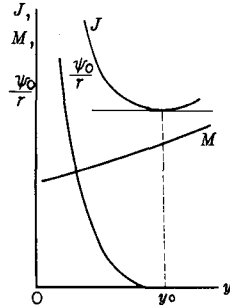


図-2 M, Ψ_0, J および y_0 の関係

防潮堤の耐用年数は $t=40 \sim 60$ 年と、かなり長い。社会的割引率を $r=0.06 \sim 0.1$ と想定すると $(1+r)^{-t}$ の値は 1 に比してはるかに小さいから省略すると

$$J = M + \frac{\Psi_0}{r} \quad (1)$$

を得る。(1)式で与えられる J は y のみの関数である。

次に J を数値計算可能な形にするために、(1)式の構成要素 M および Ψ_0 を定式化する。

3. 建設費

防潮堤の建設費は y の関数で、最適計画高潮位の近傍において近似的に次式で表わせるものと仮定する。

$$\left. \begin{aligned} M &= a_1 l_1 (y + h_1)^2 \\ &= m_2 y^2 + m_1 y + m_0, \\ m_0 &= a_1 l_1 h_1^2, \\ m_1 &= 2 a_1 l_1 h_1, \\ m_2 &= a_1 l_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに a_1 は防潮堤の建設費の係数、 l_1 は防潮堤の延長、 h_1 は潮位基準面から測った防潮堤基礎の平均深さである。

4. 被害関数

防潮堤およびその沿岸背後地域が高潮や波浪あるいは越波の襲来により被害が生ずる場合、その程度が数量評価可能なものと困難なものがある。数量評価可能な場合は、その単位の選択が必要になる。

貨幣単位で被害を統一総合評価できれば便利であるが、貨幣価値に換算するさいに問題がある。被害額の評価のさいは、被災対象物の残存価値で表わす場合と、復旧費で表わす場合がある。このとき被災対象物の効用に対する価値観の変遷や、物価の変動の問題処理がともなう。上記のような被害評価の不確実性のほかに、防潮堤の背後地域の土地利用の変化による damage potential の時間的推移もあるから、高潮や波浪による被害の推定値としては将来を考慮した概数値をとらざるを得ない。またこの被害程度は計画高潮位のほか計画波、水深、波の打ち上げと越波量、海底地形、海岸地形、堤防構造、根固工、消波工等に関係があるが、⁵⁾⁶⁾ 本論文ではこのうち計画高潮位の決定に着目し、他の要因は別途計画されるものとする。すなわち高潮が発生したとき、その潮位 x が計画高潮位 y 以下の場合は高潮被害は生じないものとし、潮位が計画高潮位以上の場合、潮位と計画高潮位との差に比例する高潮被害が生ずるものと仮定し、

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} k(x - y), & (x > y) \\ 0, & (x \leq y) \end{cases} \quad (3)$$

とする (図-1)。ここに $\varphi(x, y)$ は 1 回の高潮の襲来による防潮堤沿岸地帯の想定被害額で、これを被害関数と名づける。 k は被害の程度を表わす係数で、これを被害係数と呼ぶことにする。

5. 高潮の発生頻度分布と再現期間

高潮の発生頻度分布については、その潜在的な存在の理論も分布関数形の定説も未だないが、ここではその分布形を仮定し、高潮の偏差過高値と天文潮位の合成潮位を变量とし、その特定値以上の潮位を母集団とする。仮定する頻度分布はまれに起こる大きな高潮を対象とするから、分布の下限が有限あるいは $-\infty$ で、上限が $+\infty$ の関数形が考えられる。

いま $f(x)$ を高潮の発生確率密度関数、 $F(x)$ を $f(x)$ の累積分布関数とする。ここでは $f(x)$ に指数分布、対数極値分布および Gumbel 分布を仮定し、これらを海域の特性に応じて選択することにする。すなわち：

指数分布

確率密度関数 (PDF)：

$$f(x) = \begin{cases} \lambda \exp \{-\lambda(x - b)\}, & (b \leq x < \infty) \\ 0, & (x < b) \end{cases} \quad (4)$$

累積分布関数 (CDF) :

$$F(x) = \begin{cases} \int_b^x f(u) du = 1 - \exp\{-\lambda(x-b)\}, & (b \leq x < \infty) \\ 0, & (x < b) \end{cases} \quad (5)$$

ここに λ および b は指数分布のパラメータである。

対数極値分布

PDF :

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= \frac{\lambda_l}{x-b_l} \exp(-\xi - e^{-\xi}), \\ \xi &= \lambda_l \ln \frac{x-b_l}{x_l-b_l}, \quad (b_l < x < \infty) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

CDF :

$$F(x) = \int_{b_l}^x f(u) du = \exp(-e^{-\xi}) \quad (7)$$

ここに $\lambda_l > 0$, $b_l > 0$, $x_l > 0$ で, これらは対数極値分布のパラメータである。

Gumbel 分布

PDF :

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= \lambda_g \exp(-\zeta - e^{-\zeta}), \\ \zeta &= \lambda_g (x - x_g), \quad (-\infty < x < \infty) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

CDF :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du = \exp(-e^{-\zeta}) \quad (9)$$

ここに $\lambda_g > 0$, $x_g > 0$ で, これらは Gumbel 分布のパラメータである。

高潮発生の再現期間は(5), (7), (9)のいずれか適合度の良い分布の $F(x)$ を用いて

$$T = \frac{1}{n\{1 - F(x)\}} \quad (10)$$

で計算される。ここに T は潮位 x の再現期間, n は平均年間高潮発生度数である。

指数分布はこの場合のような部分統計値の母集団に対して合理性を有するが, 地域によつては満足な適合度が得られない。対数極値分布および Gumbel 分布は年最大あるいは最小値の母集団に対する分布であり, この場合の潮位資料に対して理論的には適当といえない。しかし, これらの分布は平均年間高潮発生度数が 1~2 回程度となるような, かなり高い潮位以上の高潮統計資料に対して良い適合性を有する。²⁾

6. 年間高潮被害の期待値

防潮堤の竣工後に高潮の襲来により発生する被害の年間期待値 $\Psi_0(y)$ は

$$\Psi_0(y) = n \int_y^{\infty} \varphi(x, y) f(x) dx \quad (11)$$

で与えられる。さらに(11)式に(3)式を用いれば

$$\Psi_0(y) = nk \int_y^{\infty} (x-y) f(x) dx \quad (12)$$

と書ける。年数の経過とともに必要な防潮堤の維持費は, 高潮や波浪による被害額に比べればはるかに少ないので Ψ_0 に含めて考慮されるものとする。

7. 最適計画高潮位の算定式 J

(1)式に(2)および(12)式を用い, さらに高潮の発生確率密度関数 $f(x)$ に(4), (6)および(8)式を与えれば, 式 J は次のように数値計算可能な形に書ける:

指数分布を用いた場合

$$J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + \frac{nk}{\lambda r} \exp\{-\lambda(y-b)\} \quad (13)$$

対数極値分を用いた場合

$$J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + \frac{nk}{r} \left\{ (x_l - b_l) \gamma(\kappa, \eta) - (y - b_l) \{1 - \exp(-\eta)\} \right\} \quad (14)$$

ここに $\gamma(\kappa, \eta)$ は第 1 種不完全ガンマ関数で, 次式で計算される。

$$\begin{aligned} \gamma(\kappa, \eta) &= \frac{\eta^\kappa}{\kappa} - \frac{\eta^{\kappa+1}}{\kappa+1} + \frac{\eta^{\kappa+2}}{2(\kappa+2)} - \frac{\eta^{\kappa+3}}{2 \cdot 3 \cdot (\kappa+3)} + \dots \\ &= \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j \eta^{\kappa+j}}{j! (\kappa+j)}, \quad (j=0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= 1 - \frac{1}{\lambda_l} \\ \eta &= \left(\frac{x_l - b_l}{y - b_l} \right)^{\lambda_l} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Gumbel 分布を用いた場合

$$J = m_2 y^2 + m_1 y + m_0 + \frac{nk}{r} \left[-\frac{g(\sigma)}{\lambda_g} - (y - x_g) \{1 - \exp(-\sigma)\} \right] \quad (17)$$

ここに、関数 $\vartheta(\sigma)$ は次式で与えられる。

$$\vartheta(\sigma) = \int_0^{\sigma} \exp(-u) \ln u \, du \quad (18)$$

$$\sigma = \exp\{-\lambda g(y - x_g)\} \quad (19)$$

$\vartheta(\sigma)$ の値は図-3に示すような値をとり

$$\vartheta(0) = 0, \quad \vartheta(\infty) = -C = -0.5772156649 \dots$$

である。CはEuler定数である。

本論文で必要となる σ の範囲は、一般に $0 < \sigma < 1$ である。この場合の $\vartheta(\sigma)$ の値は

$$\begin{aligned} \vartheta(\sigma) &= (\ln \sigma - 1)\sigma - (\ln \sigma - \frac{1}{2}) \frac{\sigma^2}{2!} \\ &\quad + (\ln \sigma - \frac{1}{3}) \frac{\sigma^3}{3!} - (\ln \sigma - \frac{1}{4}) \frac{\sigma^4}{4!} + \dots \\ &= \sum_{j=1}^{\infty} (\ln \sigma - \frac{1}{j}) \frac{(-1)^{j+1} \sigma^j}{j!} \quad (20) \end{aligned}$$

で求めることができる。

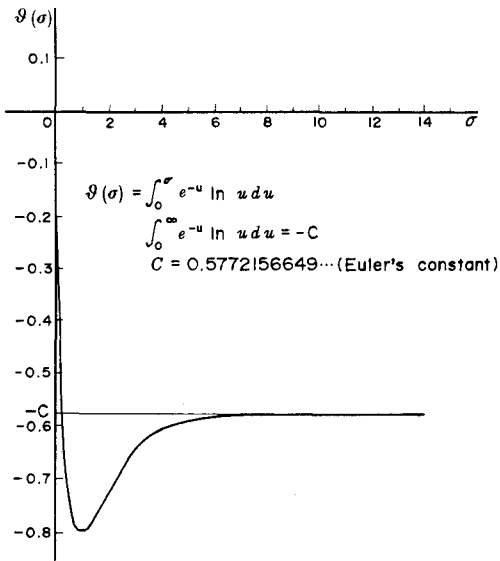


図-3 関数 $\vartheta(\sigma)$

8. 有明海北部沿岸の防潮堤の最適計画高潮位

(1) 潮位観測記録

有明海北部沿岸の海域における異常高潮の発生状況を調べるために、この地方で比較的観測資料の整っている佐賀県佐賀郡肥前町大浦の検潮所（以下、大浦と呼ぶ）における1964～1983年の20年間の潮位観測資料を用い、これをこの海域の潮位観測値と

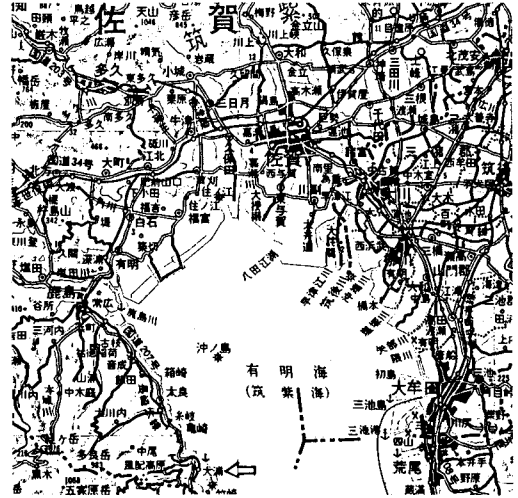


図-4 有明海北部沿岸と肥前町大浦の検潮所みなすこととする（図-4）。

朔望平均満潮位（HWL）は1983年の資料⁴⁾から、 $TP + 2.353 \text{ m}$ である。HWL以上の高潮の平均年間高潮発生度数は $n = 10.03$ 回/年である。このうち $HWL + 0.3965 \text{ m}$ ($= TP + 2.7495 \text{ m}$) 以上の高潮については $n = 1.28$ 回/年である。

潮位基準面は東京湾平均海面（TP）に定める。

大浦で観測された既往最高潮位は1966年8月18日の台風襲来の際に発生した高潮による潮位で、その高さは $TP + 3.019 \text{ m}$ である。

(2) 高潮の発生確率密度関数と再現期間

異常高潮位の発生統計の資料として $HWL + 0.3965 \text{ m}$ ($= TP + 2.7495 \text{ m}$) 以上の潮位観測値を用いることとする。そして高潮災害の起こる可能性の高い大きな高潮の発生頻度分布を求めると図-5のようである。この頻度分布に指数分布、対数極値分布およびGumbel分布を適用すると、各分布の確率密度関数のパラメータの数値およびK. Pearsonの適合度検定値 (χ^2) は、次のようになる。

指数分布

$$b = 2.774 \text{ m}, \quad \lambda = 12.217$$

$$\chi^2 = 29.172, \quad C_{0.05} = 7.81$$

対数極値分布

$$x_l = 2.817 \text{ m}, \quad b_l = 0.002 \text{ m},$$

$$\lambda_l = 32.520$$

$$\chi^2 = 3.607, \quad C_{0.05} = 5.99$$

Gumbel 分布

$$\alpha_g = 2.817 \text{ m}, \quad \lambda_g = 11.320$$

$$\chi^2 = 3.465, \quad C_{0.05} = 7.81$$

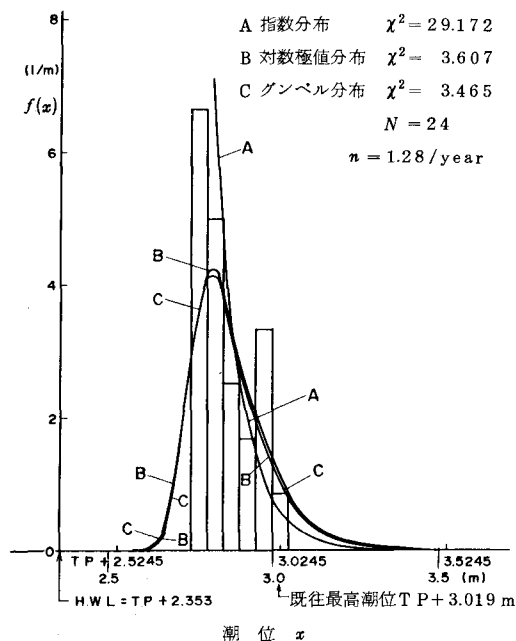


図-5 大浦における $HWL + 0.3965 \text{ m}$ ($TP + 2.7495 \text{ m}$) 以上の高潮発生頻度分布

図-5によると有明海北部沿岸海域においては対数極値分布とGumbel分布は酷似し、ともに良い適合度を有するが、指数分布の適合度は劣る。そこで高潮の発生頻度分布に対数極値分布と指数分布を採用して、それぞれの分布の場合の最適計画高潮位 y_0 を計算し、両分布形による y_0 の値を比較検討することにする。Gumbel分布を採用した場合の y_0 の計算結果は本論文とは別に発表する。

高潮発生の再現期間 T については潮位 x の観測値が既往最高潮位($TP + 3.019 \text{ m}$)付近より低い値に対しては、 T は対数極値分布を用いた場合も指数分布を用いた場合もほぼ近似した計算値となるが、 x が既往最高潮位付近より高い値になると T の計算値は対数極値分布の場合に比べて指数分布の場合は極端に大きな値となる(表-1)。この傾向は他の海域の異常高潮位の発生頻度分布についても見られる²⁾。

確率密度関数の適合度から見て T の値は対数極値分布による計算値の方が指数分布のそれより妥当性

が高い。そして x が既往最高潮位付近以下において、さらにこの妥当性が高くなるものと考えられる。

(3) 建設費の定数、被害係数および社会的割引率

有明海北部沿岸に総延長 $l_1 = 158500 \text{ m}$ の防潮堤の建設計画を仮想する。潮位基準面から測った防潮堤基礎の平均深さは $h_1 = TP - 5.4 \text{ m}$ であるとする。

防潮堤の建設費は建設箇所の地形に応じて堤防断面が異なるので、それに対応できるように延長 1 m 当りの防潮堤の想定建設費から建設費の式の係数をパラメータとして

$$\alpha_1 = 10000, 15000, 20000 \text{ (yen/m}^3\text{)}$$

のように3通りに変化させて試算する。

被害係数は沿岸地区により土地利用の程度が異なり、そのdamage potentialも経年変化することを考慮して

$$k = 1 \times 10^{12}, 5 \times 10^{12}, 1 \times 10^{13} \text{ (yen/m)}$$

と大きく3通りに変化させて検討する。

社会的割引率は経済変動が y_0 の計算結果に及ぼす影響を吟味するために

$$r = 0.07, 0.09$$

の2通りを考える。

(4) 曲線 J と最適計画高潮位の計算結果

α_1 , k および r に以上のような数値を与え、高潮の発生頻度分布の形を対数極値分布と指数分布に選定し、これらを組み合わせ、その代表的な36通りの場合を作り、(13)および(14)式を用いて J の値の計算を行なった。このようにして計算された曲線 J のうち、対数極値分布を用いた場合と指数分布を用いた場合のそれぞれの J の曲線を6通りづつ示せば図-6および図-7のようである。

これらの図によってパラメータ α_1 , k および r が実用的な数値をとる場合、対数極値分布を用いる場合でも指数分布を用いる場合でも、 J は y の変化に関して唯一の極小値、すなわちこの場合は最小値を有する単調な関数であることが実証された。

最適計画高潮位 y_0 は y を変化させて、 J を最小ならしめる y の値として数値計算によって求めた。その結果を一括表示すれば表-1のようである。表-1を見ると有明海北部沿岸の防潮堤の最適計画高潮位の計算値は、いずれの場合も大浦検潮所で観測された既往最高潮位 $TP + 3.019 \text{ m}$ より約 $0.2 \sim 0.6 \text{ m}$ 高い $TP + 3.2 \sim$

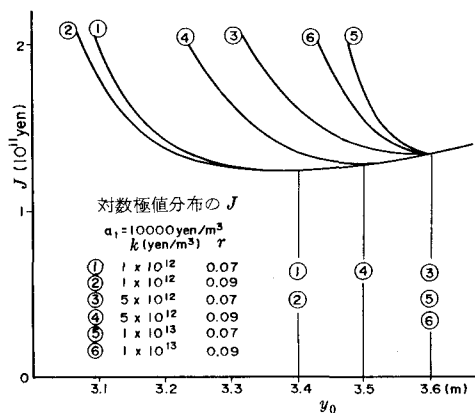


図-6 対数極値分布を用いた場合の曲線 J
(有明海北部沿岸海域)

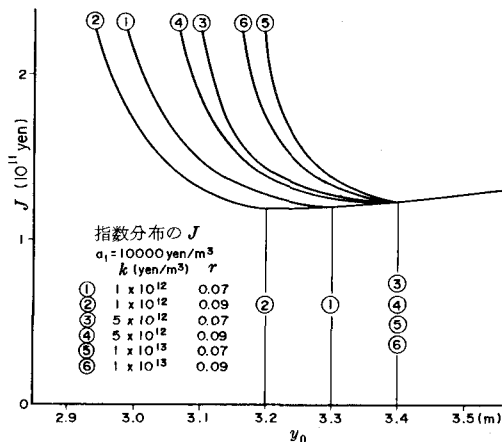


図-7 指数分布を用いた場合の曲線 J
(有明海北部沿岸海域)

表-1 有明海北部沿岸の防潮堤の最適計画高潮位 (y_0)

表-1 有明海北部沿岸の防潮堤の最適計画高潮位 (y_0)		凡例		指数分布	対数極値分布
		0.07	○	□	
		0.09	●	■	
最適計画高潮位 y_0 既往最高潮位 TP + 3.019 m	TP 4.4 m				1638400 ()
					728178 ()
					344926 ()
					157918 ()
					70469 ()
					30913 ()
					13266 ()
					5575 (63938)
					2285 (18859)
					914 (5556)
Parameter k (yen/m)	1×10^{12}				356 (1638)
	5×10^{12}				135 (483)
	1×10^{13}				50 (142)
	1×10^{12}				18 (42)
	5×10^{12}				6 (12)
	1×10^{13}				2 (4)
	1×10^{12}				1 (1)
	5×10^{12}				
	1×10^{13}				
	Parameter a_1 (yen/m ³)	$a_1 = 10000$	$a_1 = 15000$	$a_1 = 20000$	
				T (year)	

α_1 の値の変化に対する ν_0 の変化は軽微で、その傾向は α_1 が大となるほど ν_0 が小となる。

社会的割引率 r の変化に対する ν_0 の影響も軽微である。そして r が大なるほど ν_0 はやや小となる傾向がある。

9. 結 言

海岸防潮防の計画高は計画高潮位と波浪防御高および余裕高の和であると考える。本論文においてはこれらの計画要素のうち計画高潮位を決定するために、高潮の発生頻度確率、防潮堤の建設費、海岸土地利用の状況に対応する高潮被害および社会的割引率を考慮した計算式 J を誘導し、この J を用いて最適計画高潮位を決定する方法を開発した。

ここに言う波浪防御高は波の打ち上げ、および越波を防御するために計画高潮位の上に加えられる高さである。これについては別途求められるものとしてここでは論及しない。

仮定した高潮の発生頻度分布および被害関数の形は妥当であることが試算例からわかった。また社会的割引率の変化に対して最適計画高潮位の計算値は、試算例においては安定した結果を得た。計画段階において不確定なことの多いパラメータ α_1 および k には概数値を与えれば充分であることが試算例で実証された。なお高潮発生の再現期間の計算値は概略の目安を与えるものとする。以上に記した最適計画高潮位の決定方法は海岸防潮堤のみならず海岸護岸の最適計画高潮位にも適用できるものとする。

記 号

x : 潮位(m)
 y : 計画高潮位(m)
 ν_0 : 最適計画高潮位(m)
 M : 防潮堤の建設費(yen)
 α_1 : 防潮堤の建設費の式の係数(yen/m³)
 l_1 : 防潮堤の延長(m)
 ν_0 : 海岸地帯の年間高潮被害の期待値(yen/year)
 h_1 : 潮位基準面から測った防潮堤基礎の平均深さ(m)
 J : 防潮堤の建設費と年間高潮被害の期待値の累年の和の現在価値(yen)
 t : 防潮堤の竣工の年からかぞえた経過年数(year)
 r : 社会的割引率(年率)

φ : 被害関数(1回の高潮の襲来による防潮堤および海岸地帯の想定被害額(yen))

k : 被害係数(yen/m)

$f(x)$: 高潮の発生確率密度関数(1/m)

$F(x)$: $f(x)$ の累積分布関数

T : 高潮発生の再現期間(year)

n : 平均年間高潮発生度数(1/year)

N : 観測潮位の sample size

b, λ : 指数分布のパラメータ

b_l, x_l, λ_l : 対数極値分布のパラメータ

x_g, λ_g : Gumbel 分布のパラメータ

ξ : 対数極値分布の規準極値変量

ζ : Gumbel 分布の規準極値変量

PDF : probability density function

CDF : cumulative distribution function

χ^2 : K.Pearsonの適合度検定値

$C_{0.05}$: 有意水準0.05に対する χ^2 分布値

C : Euler定数, $C = 0.5772156649 \dots$

κ : 第1種不完全ガンマ関数のパラメータ(13式)

η : 第1種不完全ガンマ関数のパラメータ(13式)

$\gamma(\kappa, \eta)$: 第1種不完全ガンマ関数

$\vartheta(\sigma)$: この論文で必要とする関数(13式)

σ : 関数 $\vartheta(\sigma)$ のパラメータ(13式)

TP : 東京湾平均海面(Tokyo Peil)

HWL : 朔望平均満潮位(high water level) (m)

参 考 文 献

- 1) Yoshimi Goda : Random Seas and Design of Maritime Structures, Univ. of Tokyo Press, pp. 145 ~ 164, 1985.
- 2) 川北米良 : 海面埋立土地造成における最適地盤高のオペレーションズ・リサーチによる決定法, 第4回土木計画学, 土木学会, 1982.
- 3) 川北米良 : 海面埋立土地造成における埋立地盤高の決定方法とその泉州沖埋立への適用について, 第10回海洋開発シンポ, 土木学会, 1985.
- 4) 気象庁 : 昭和59年 潮位表, 1983.
- 5) 堀川清司 : 海岸工学 海洋工学への序説 一, 東大出版会, pp.91 ~ 101, 1981.
- 6) 豊島 修 : 現場のための海岸工学 高潮編, 森北出版, PP.147 ~ 352, 1970.