

新しい越波量算定式の提案

A proposal of new computing method of the rate of wave overtopping

山本 吉道*・堀川 清司**
Yoshimichi Yamamoto, Kiyoshi Horikawa

Waterfront development in Japan is remarkably expanded in these days. On the other hand the mean sea level rise due to greenhouse effect is seriously concerned by the governmental agencies and is expected to be 20~110cm in 2030.

Considering the present circumstances the precise evaluation of wave overtopping is of extremely importance for the future planning of coastal protection in Japan.

In this paper a new method is presented to calculate the wave overtopping rate of sea wall which is located on a complicative bottom profile of sea coast. The proposed method was applied to the cases in laboratory as well as in field. The agreement between the expected values and the available data was favourable good.

Keywords : waterfront development, greenhouse effect, wave overtopping

1. はじめに

近年ウォータフロントの開発が注目され、また、地球温暖化による海岸保全条件の悪化が予想され、ますます越波量の合理的な算定が重要になってきたと考えられる。一方、下表に示すように現時点で良く知られている越波量算定法はその適用範囲を限定されている。そこで、海岸断面が比較的複雑な場合にも適用でき、直立堤から緩傾斜堤まで広範囲の条件に対しても適用できる算定式の開発を試みる。

砕波条件	海岸断面一様勾配+直立堤	海岸断面一様勾配+傾斜堤	複雑な海岸断面
非砕波時	高田, 吉川等, 合田等, 高山等	—————	—————
砕波後	富永等, 合田等, 高山等	富永等, 吉川等, 豊島	—————

複雑な断面をもつ海浜での越波量の算定の試みとして、数値計算手法によるKobayashi and others¹⁾による研究がある。前者は浅水理論により有限差分法を用いて越波量の算定を行っているが、砕波を段波で近似しているため、砕け寄せ波砕波か巻き波砕波の場合にしか適用出来ない。一方、水口等²⁾は砕波によるエネルギー逸散を考慮したエネルギー方程式と周期平均量の運動方程式を連立して解いて、遡上波の概略の算定までを行っているが越波量を求めるまでには到っていない。

これらの発展的な研究を精力的に進めるべきであり、適当な算定式の早急な提案が望まれている。一方で、現地事務所においてパーソナルコンピュータを用いて簡便に扱えることも期待されている現状を勘案し、ここでは半理論的な取り扱いを行って、新しい越波量算定式を提案した。

2. 越波量算定式の誘導

2.1 波の打ち上げ高の算定式

次式で示される中村等³⁾の改良仮想勾配角 α を導入することにより、問題の簡単化を図る。

$$\alpha = \tan^{-1} [(R + h_b)^2 / 2A] \quad (1)$$

ここに、Rは波の打ち上げ高、 h_b は砕波水深、Aは図-1に斜線で示す遡上波先端位置から砕波位置までの砕波水深より上部の海岸地盤の断面積である。

α を求めるには砕波水深と波の打ち上げ高の算定が必要であり、以下の様にする。

まず、砕波水深は取扱の簡便さから、越波による砕波波高の低下を無視して求める。図-2は著者

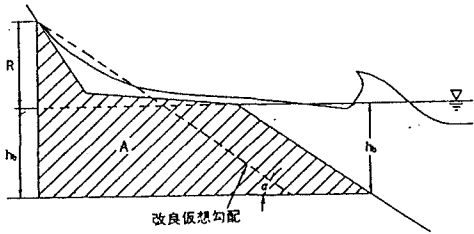


図-1 改良仮想勾配の説明

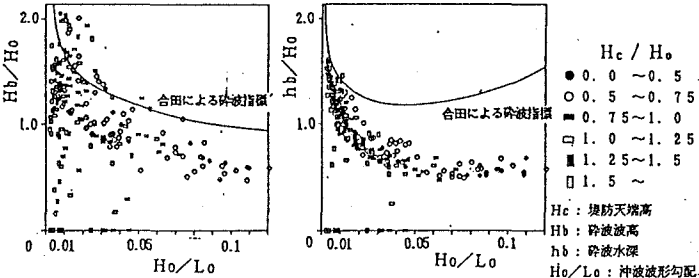


図-2 越波時の砕波諸元

* 正会員 (株)アイ. エヌ. エー新土木研究所 (162 東京都新宿区水道町)

** 正会員 埼玉大学建設基礎工学科

達が行った越波実験から得られた碎波諸元と合田⁴⁾による非越波時の碎波諸元を比較したものであるが、越波時には碎波諸元が低下している。波形勾配が小さな領域で両者が一致する場合があるが、これは越波量が小さな場合である。

次に打ち上げ高は中村等³⁾の算定図を利用して求めるが、そのためには改良仮想勾配角を知る必要がある。すなわち、まず、打ち上げ高を仮定して式(1)から α を求め、次に算定図から打ち上げ高を求め、打ち上げ高の仮定値と算定値が一致するまで繰り返し計算を行う。波の浅水計算と本繰り返し計算は電算処理する事が望まれる。計算に便利のために算定図から著者の一人が提案している実験式⁵⁾は次のようになる。

$$R = 1.25(\cos \alpha)^2 (\tan \alpha)^{0.6} (H_0/L_0)^{-1/4} H_0 \quad [1/3 \leq \tan \alpha \leq 1/50] \quad (2)$$

ここに、 H_0 は沖波波高、 L_0 は沖波波長である。

上式は次の様にして導かれた。まず、打ち上げ高はエネルギー保存則から次のように表せる。

$$R = (1 - k) U_s^2 / 2g \quad (3)$$

ここに、 k は海底摩擦等によるエネルギー損失係数、 U_s は汀線位置の流速である。

今、岩垣等⁶⁾や小川等⁷⁾の研究を参考に、上式の U_s に対して式(4)を仮定すれば、式(5)を得る。

$$U_s = C \sqrt{g \bar{\eta}_s} \cos \alpha \quad (4)$$

$$R = 0.5(1 - k) C^2 \bar{\eta}_s (\cos \alpha)^2 \quad (5)$$

ここに、 C は碎波帯以浅の海底断面地形等による係数、 g は重力加速度、 $\bar{\eta}_s$ は汀線位置の平均水位上昇量である。

著者達は水理模型実験で汀線よりやや沖側の平均水位上昇量をサーボ式水位計で測定し、これを η_s と見なして、打ち上げ高との関係を図-3に示した。これから式(5)の妥当性が認められる。

さらに次の経験式が求められている。

$$\bar{\eta}_s = H_s / [2.4 (\tan \alpha)^{0.3}] = 0.8 (\tan \alpha)^{0.6} H_s \quad (6)$$

また、砂村等により碎波波高 H_s の経験式⁷⁾

$$H_s = (\tan \alpha)^{0.2} (H_0/L_0)^{-1/4} H_0 \quad (7)$$

が求められているので、これを式(6)に代入し、ついでを式(5)に代入し、係数を中村等の算定図と比較することにより決定すれば、式(2)が得られる。

算定式(2)が適用出来るのは碎波後の打ち上げ高に対してであり、非碎波の場合には海底勾配の影響は弱いと考えて、微小振幅波理論による次式を用いる。

$$R = [1.0 + \pi (H/L) \coth(2\pi h/L)] H_0 \quad (8)$$

R については高田の提案した算定式⁸⁾が良く知られているが、波形勾配の小さい場合に計算値が過大になるので、本研究では採用しなかった。

2.2 越波量の算定式

高田⁸⁾は図-4.(1)に示す様な遡上波形を考え、天端より上の仮想の遡上波形面積と一周期当たりの越波量の相関が高いことから、打ち上げ高と越波量 q の間に次式の関係のあることを示した。

$$q = a [(X_0/R) - \cot \theta] (R - H_c)^2 / 2 \quad (9)$$

ここに、 a は越波係数、 X_0 は遡上波形の水平長さ、 θ は堤防の表のり勾配、 H_c は堤防天端高である。

次に碎波時及び非碎波時に分けて検討する。

(1) 碎波時

θ の代わりに改良仮想勾配 α を用いて、複雑な海岸断面の遡上波問題を α による一様勾配の遡上波問題に置き換える。この場合、 R には式(2)を用いれば良い。

実際の遡上波形は、図-4.(1)と比較して上部はかなり痩せており、反対に裾野はかなり広がっているので、 X_0 に真値を用いると遡上

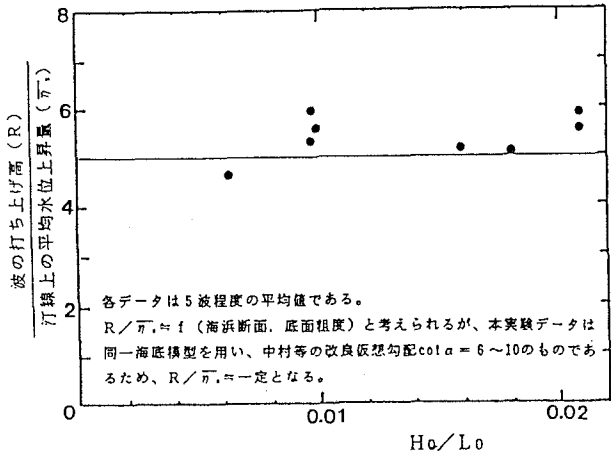


図-3 波の打ち上げ高と平均水位上昇の関係

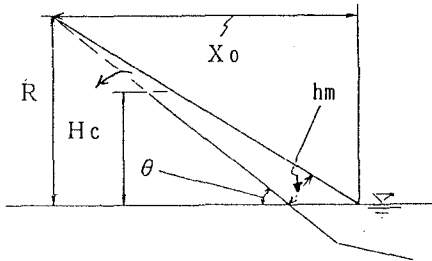


図-4.(1) 遡上波形の模式図

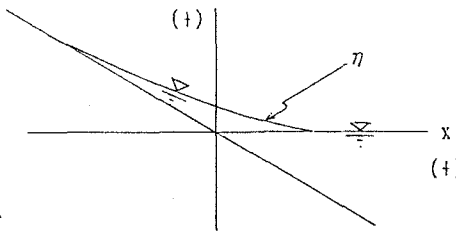


図-4.(2) 遡上波形と座標の説明

波形面積を極めて過大に評価することになる。それゆえ、まず、図-4.(1)に示す遡上波形の最大厚 hm を求め、それから、幾何学的関係より得られる次式を用いて間接的に X_0 を算定する。

$$X_0/R = \cot [\alpha - \tan^{-1}(hm/R/\sin \alpha)] \quad (10)$$

そこで、 hm の算定式を次の様にして求めた。

非碎波時の波浪諸元、海岸勾配 ($i = \tan \alpha$) と hm の関係は、式(11)に示す一様勾配斜面に対する浅水長波理論から簡単に求められる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [u(ix + \eta)] = 0 \quad (11)$$

ここに、 u は水粒子の速度、 η は水位、 t は時間座標、 x は沖方向を正とする空間座標である。本基本式から特性方程式を求め、変数変換を行うと、ベッセルの微分方程式を得るので、解は次のようになる。

$$\eta = \frac{\omega}{8g} C_1 J_0 \left(\frac{\omega}{2ig} \sigma \right) \sin \left(\frac{\omega}{2ig} \lambda \right) - \frac{\omega^2}{8g\sigma^2} C_1^2 J_1^2 \left(\frac{\omega}{2ig} \sigma \right) \cos^2 \left(\frac{\omega}{2ig} \lambda \right) \quad (12)$$

ここに、 $\omega = 2\pi/T$, $\sigma = 4\sqrt{g(ix + \eta)}$, $\lambda = 2(u - git)$ である。

次に碎波によるエネルギー損失の効果の評価方法を考える。泉宮・堀川⁹⁾の提案したエネルギー方程式から、碎波水深 hb での波高 Hb と碎波によるエネルギー損失がほぼ終了する水深 $ha = 0.8 \times hb$ での波高 Ha との関係式を求め、この式により間接的に考慮することにした。 $ha \sim hb$ 間では汀線付近と比較して、平均水位変化量 $\bar{\eta} \approx 0$ と見なせるので、泉宮・堀川のエネルギー方程式は式(13)のようになる。座標は図-4.(2)で統一され、水深 $h = ix$ が用いられている。

$$i^{5/2} \frac{d(\gamma^2 x^{5/2})}{dx} - \frac{i^{3/2}}{2\sqrt{2}} \left[\frac{\gamma^2 x^{3/2}}{100} + 1.8 \left(\frac{\gamma^2}{8} - 0.009 \right)^{1/2} \gamma^2 x^{3/2} \right] = 0 \quad (13)$$

底面摩擦による項 碎波による項

ここに、 γ は波高水深比である。式(13)の碎波による項をテイラー展開して、変数 x がある程度大きな位置で微小項を除去すれば、エネルギー損失は碎波によるもののみとなり、これを $x = x_b$ で $\gamma = \gamma_b$ の条件を使って積分すれば、式(14)を得る。

$$\gamma = 1 / (cx^{5/2} + 0.09/i)^{1/2} \quad (14)$$

ここに、 $c = \left(\frac{1}{\gamma_b^2} - \frac{9}{100i} \right) \left(\frac{1}{x_b} \right)^{5/2}$ である。

$\bar{\eta} = 0$ となる位置を $x_b \approx 0.8x_b$ とすれば、

$$\gamma_b = 1 / \sqrt{0.572 \left(\frac{1}{\gamma_b^2} - \frac{9}{100i} \right) + \frac{9}{100i}} \quad (15)$$

式(12)と式(15)の各々に対して、 $\bar{\eta} = 0$ となる $x = x_b \approx 0.8x_b$ で $H = Ha$ とすれば、

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{Ha}{2} J_0 \left(\frac{\omega}{2ig} \sigma \right) \sin \left(\frac{\omega}{2ig} \lambda \right) - \frac{2gHa^2}{\sigma^2} J_1^2 \left(\frac{\omega}{2ig} \sigma \right) \cos^2 \left(\frac{\omega}{2ig} \lambda \right) \\ Ha &= 0.8hb / \sqrt{0.572 \left(\frac{1}{\gamma_b^2} - \frac{9}{100i} \right) + \frac{9}{100i}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

そして、式(16)の第一式より $x = 0$ での η の最大値を求め、さらに汀線位置での平均水位上昇量も式(6)から考慮すれば、 hm に関する近似式として式(17)を得る。

$$hm/Hb = \frac{1}{2} \frac{Ha}{Hb} \cdot J_0 \left(\frac{4\pi Hb}{\sqrt{gT} i} \sqrt{\frac{hm}{Hb}} \right) + 0.8 i^{0.8} \quad (17)$$

ここに、 i は $1/\cot \alpha$ である。式(17)による計算値を図-5に破線で示す。一緒にプロットされている印は著者達が行った非越波時の実験から求めた hm である。ただし、 Hb には式(7)を用いている。

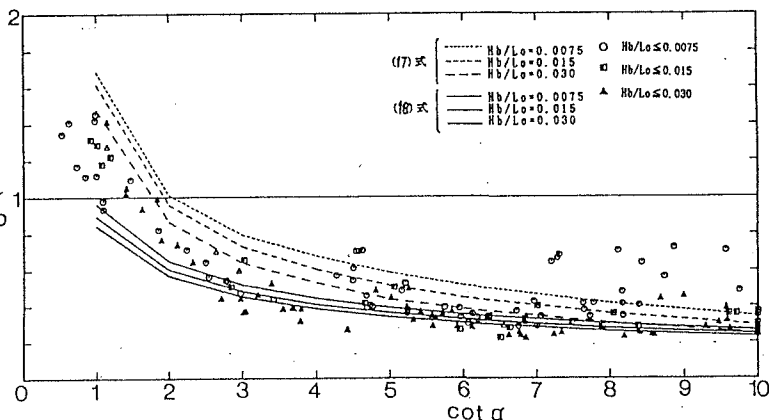


図-5 遡上波形の最大厚と海底勾配の関係

式(17)による計算値はやや大きめの値を与える。また、ベッセル関数 J_0 の計算は多少時間を要する。よって、ベッセル関数を三角関数で近似し、現実的な数値を代入して検討した結果、式(18)のように簡略化出来た。

$$h_m/H_b \approx 0.7 \left\{ \frac{0.375}{\pi^{3/4}} \left(\frac{i}{\sqrt{0.8H_b/L_0}} \right)^{1/2} + 0.8 i^{0.5} \right\} \quad (18)$$

式(18)による計算値を図-5に実線で示す。

次に、越波係数 a の定式化を行う。越波係数は堤防天端高より上に来る仮想の遡上波形の面積の内、何割が実際に堤防を越えて内陸側へ到達するかを表すものであるから、遡上水塊の水平移動成分に関わってくると考えられる。よって、堤防前面の断面勾配が緩いほど、または、波形勾配が緩いほど大きくなると考えられるので、次の二つのパラメータ $(\cos \theta + \cos \alpha)/2$ と $(L_0/H_b)^{1/3}$ を考え、無次元越波量との関係を調べた。その結果を図-6に示す。両パラメータが大きくなるほど無次元越波量も大きくなっている。なお、後者のパラメータに H_b を用いた理由は、砕波後の越波を扱うからである。

以上から、 a に式(18)を用いて越波量を算定し、著者達が行った越波量の実験値との相関を調べた。その結果は図-7に示す通りで良好である。ただし、砕波波高の算定に対しては、取扱の簡便のために越波による砕波波高の低下を考慮していない。また、堤防の表のり勾配が異なる場合として富永等¹⁰⁾及び吉川等¹¹⁾の算定式との相関を図-8に、海底が複断面の場合として井上等¹²⁾の実験値との相関を図-9に示す。概ね良好と判断される。ただし、本論文で用いた富永等の算定式は $(R-H_c)^2$ に比例する形に富永等の実験データを修正したものである。

なお、本研究で著者達が行った実験は、いずれの場合も、二次元水路は長さ18m、幅40cm、高さ75cmであり、海底模型の勾配は1/10、波高、周期、水深を適当に変えて行った。

(2) 非 砕 波 時

砕波しない場合は、砕波する場合に比べて海底の影響は小さいと考えられ、越波量の算定には既往のものを適用でき、本研究では次の高田⁸⁾の実験式を簡便さの点から採用する。

$$q = 0.65 (R - H_c)^2 \quad (19)$$

R の算定には式(8)を用いる。

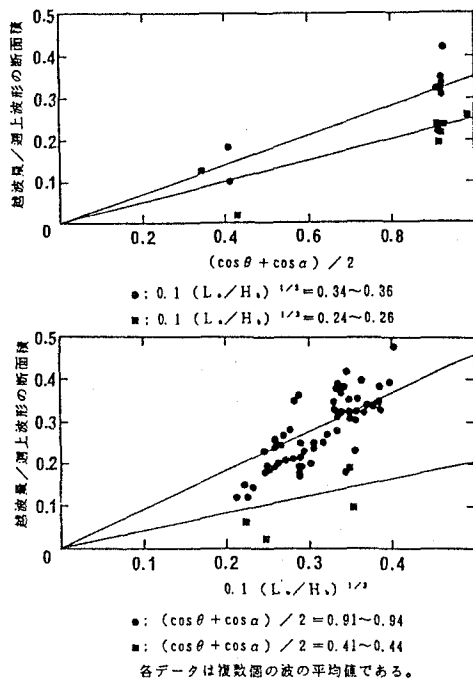


図-6 越波係数と無次元越波量の関係

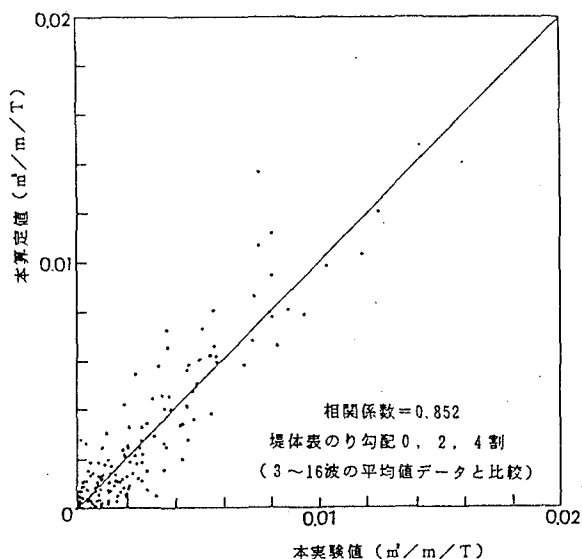
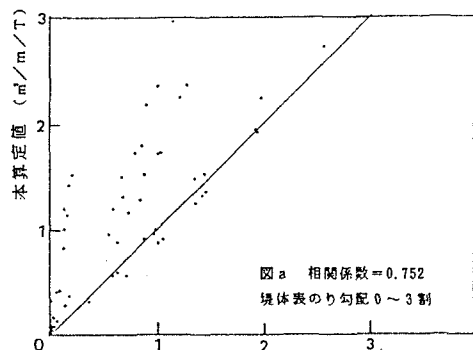
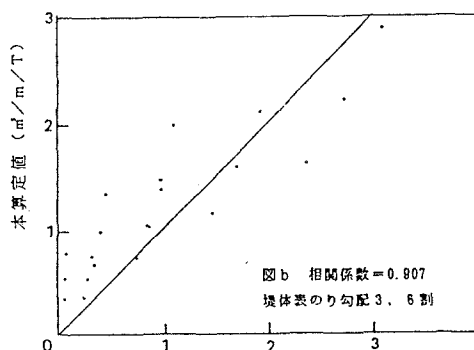


図-7 本算定値と本実験値との相関

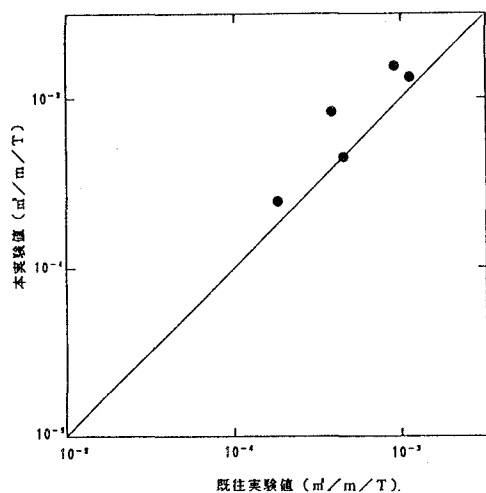


富永らの算定式による値 (m³/m/T)



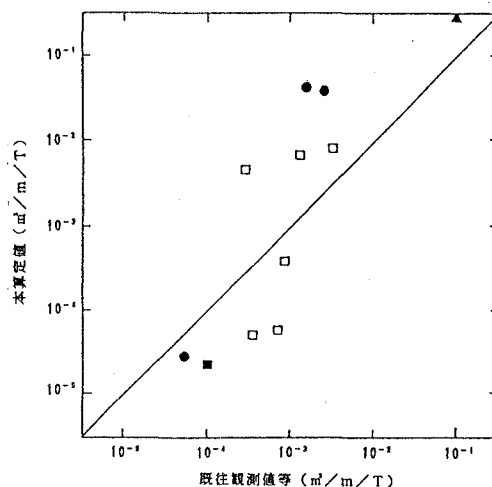
吉川らの算定式による値 (m³/m/T)

図-8
本算定値と
他算定式に
よる値との
相関



実験値は井上らが複断面海底+直立堤模型で行ったもの

図-9 複断面海底での実験値との比較



▲は高知県高知市（砂浜海岸+複断面堤）

■は高知県安芸市（砂浜海岸+傾斜堤）

図-10 現地観測値及び不規則波観測値との比較

(3) 不規則波の越波量算定法

越波量は $(R - H_c)^2$ に比例すると考えて良いが、このことは打ち上げ高の小さな変化が越波量を大きく変えることを、さらには波高の小さな変化が越波量を大きく変えることを意味しており、越波量を不規則波で求める必要性は高い。

今、式(20)で不規則性を考慮するものとする。

$$Q = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} q \cdot p \, d\chi \, d\tau \quad (20)$$

ここに、 Q は不規則波の越波量、 H は波高、 T は周期、 q は成分波の越波量である。また、 p は渡辺等¹³⁾による波高周期結合分布式であり、 $\chi = H/\bar{H}$ 、 $\tau = T/\bar{T}$ （ここに $\bar{}$ は平均値を意味する）を用いれば次の様に表わせる。

$$\left. \begin{aligned} p &= p(\tau) p(\chi | \tau) / \chi_m(\tau) \\ p(\tau) &= \frac{\sqrt{1+\nu^2}}{1+\sqrt{1+\nu^2}} \frac{\nu^2}{[\nu^2 + (\tau-1)^2]^{3/2}}, \quad \nu = \sqrt{(m_0 m_2 / m_1^2) - 1} \\ p(\chi | \tau) &= (32/\pi^2) \chi^2 \exp[-4\chi^2/\pi], \quad \chi = \chi / \chi_m(\tau) \\ \chi_m(\tau) &= \sqrt{S(f) f} / \int_0^{\infty} \sqrt{S(f) f} p(\tau) d\tau \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

ここに、 f は周波数、 $S(f)$ はブレットシュナイダー-光易型スペクトルであり、 m_k は本スペクトルを用いた k 次モーメントである。

また、成分波の越波量 q の算定式を整理すると次の通りである。

碎波時の場合は、

$$\left. \begin{aligned} q &= a [(X_0/R) - \cot \alpha] (R - H_c)^2 / 2 \\ a &= 0.1 (L_0/H_b)^{1/3} (\cos \theta + \cos \alpha) / 2, \quad X_0/R = \cot [\alpha - \tan^{-1} (hm/R \sin \alpha)] \\ hm &= 0.7 [0.1589 (\tan \alpha)^{0.5} / (0.8 H_b / L_0)^{1/4} + 0.8 (\tan \alpha)^{0.5}] H_b \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

ただし、 H_b には非越波時の式(7)を用いるものとし、越波による波高低下を考慮した値を用いてはならない。

そして、非碎波時は式(8)及び式(19)より q を求める。

本算定法と現地観測データまたは不規則波での実験データとの比較を図-10に示す。他に適当な算定法が見当たらない現時点では、実用性の高いものと判断される。なお、図中の●印は新潟市で観測されたデータ¹⁴⁾であり（ただし、本地点には消波工が有るので、打ち上げ高の算定値を三割低減した値を用いて計算した）、□印は高山等の実験データ¹⁵⁾である。また、それ以外のデータは著者の一人が高知県で収集したデータである。

3. 環境問題への適用

地球温暖化による海岸水位の上昇のために、海岸保全の環境が悪化することが予想されているが、台風の強さも増加することが考えられる。Emanuel¹⁶⁾は地球温暖化により海面温度が3度上がれば、台風の中心気圧の低下が30~40%増加し、最大風速が15~20%増加すると予測した。この台風条件で、図-11に示す我国太平洋側の代表的な海岸を模式化した断面A、Bタイプについての越波量を算定した結果、図-12のようになった。ただし、堤防天端高は10mとした。

本図から、地球温暖化により台風の強度が増加するならば、越波量は台風の強度の多少の増加により大幅に増加することが予想される。また、海岸タイプA（途中から緩勾配）の場合は、波高が大きくなれば、砕波位置が沖へ移動するため、波高の増加による影響は潮位の上昇に比べて小さい。一方、タイプB（急勾配）の場合は、波高が大きくなろうとも、岸近くで砕波するため、波高による影響は大である。

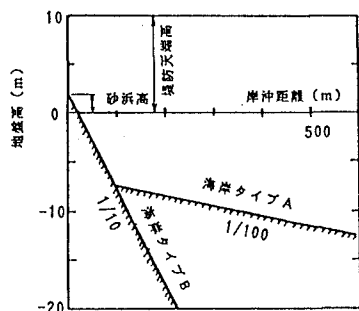


図-11 太平洋側の代表的海岸断面

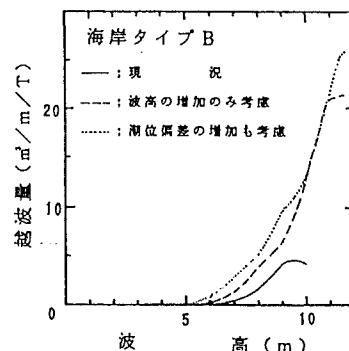
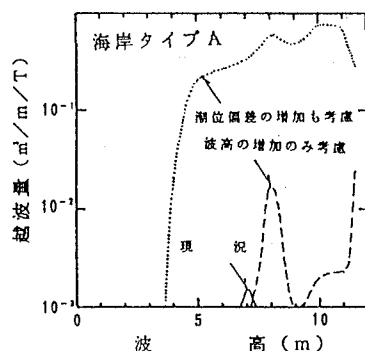


図-12 台風の強度の増加が越波量に及ぼす影響

4. 主要な結論

- (1) 越波量算定のための本格的な数値手法の開発が望まれるが、適当な方法が無い現時点では、本算定法の実用性は低いと判断され、越波量算定の可能な範囲が広がったと考えられる。
- (2) 地球温暖化により台風の強度が増加するならば、越波量は台風の強度の多少の増加により大幅に増加する。

また、海底勾配が途中から緩くなる海岸では潮位偏差の影響が、急勾配の海岸では波高の影響が大きい。

最後に、本研究に対して惜しめない御助言を賜った埼玉大学助手中村広昭氏、実験を手伝って頂いた川田工業の本宮雅弘氏、また、本研究を進めるに際して、惜しめない御支援を頂いたアイ・エヌ・エー海岸海洋部の諸氏に対して深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) Kobayashi, N. et al. : Wave Overtopping on Coastal Structures, P. C. O. Engrg., ASCE, Vol. 115, No. 2, 1989.
- 2) 水口 優等：複雑な断面をもつ海浜での波高、平均水位の変化と遡上、第35回海講論文集, pp133 ~ 137, 1988.
- 3) 中村 充等：複合断面における波の打上げに関する研究、第19回海講論文集, pp309 ~ 312, 1972.
- 4) 合田良実：浅海域における波浪の砕波変形、港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, 1975.
- 5) 山本吉道：複雑な海浜断面に対する砕波後の波の打ち上げ高について、海洋開発論文集第4巻, pp295 ~ 299, 1988.
- 6) 岩垣雄一等：のり面上の波の遡上機構に関する実験的研究、第13回海講論文集, pp198 ~ 205, 1966.
- 7) 小川由信等：非一様斜面上への規則波のうちあげについて、第31回海講論文集, pp88 ~ 92, 1984.
- 8) 高田 彰：うちあげおよび越波、第13回水工学夏期研修講演集, B-2, 1977.
- 9) 泉宮尊司等：砕波帯における波のエネルギー方程式のモデリング、第30回海講論文集, pp15 ~ 19, 1983.
- 10) 富永正照等：海岸堤防に関する研究(11)、建設省土木研究所報告, 第143号, pp59 ~ 94, 1971.
- 11) 吉川秀夫等：海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1)、第14回海岸工学講演会, pp118 ~ 122, 1967.
- 12) 井上雅夫等：越波量におよぼす堤防前面地形の影響、第19回海岸工学講演会, pp283 ~ 288, 1972.
- 13) 渡辺 晃等：不規則波のスペクトルと波高周期分布の関係、第31回海岸工学講演会, pp153 ~ 157, 1984.
- 14) 福田伸男等：防波護岸の越波に関する観測値、第20回海岸工学講演会, pp113 ~ 118, 1973.
- 15) 高山知司等：複断面海岸における護岸越波流量に関する模型実験、運輸省港湾技研資料No. 592, 1987.
- 16) Emanuel, K. A. : The dependence of hurricane intensity on climate, NATURE Vol. 326, PP483 ~ 485, 1987.