

現地海岸堤防に対する越波評価法に関する研究

山本吉道*・Vu Thanh Ca**・浅野 剛***・有村盾一***

1. 研究目的

現地海岸の堤防・護岸に対する越波計算を、公的な基準書の類に従って、正しいと考えられる波高・周期・潮位および波向を用いて行っても、算定値が実測値からかけ離れている場合がしばしば有る。その原因としては、水深データに高波による短期的な海浜地形変化が正しく考慮されない場合が多いこと、既往の基準書では波の不規則性や風の影響の適切な評価方法が明記されていなかったことが考えられる。前者の原因については海浜地形変化予測の研究として別途検討するものとし、本研究では波の不規則性と風が越波に及ぼす影響について検討し、適切な評価方法を提案する。

2. 研究内容

(1) 波の不規則性の影響

a) 打ち上げ波の長周期性

入射波高と同程度以上の堤脚水深を有する場合や、堤脚水深が浅くても海底勾配が急な場合は、打ち上げ波が入射波と一波一波対応しており、有義打ち上げ高（一連の入射波に対応した打ち上げ高の上位 1/3 の平均値）に近い値を得られることを期待して、規則波による算定法に有義波データを入力し計算している場合が多い。

しかし、図-1（間瀬ら, 1985, 1993）に見られるように、砕波点より陸側の海底勾配が緩くなってくると、砕波後の打ち上げ波（遡上波）は入射波の一波一波との対応関係が崩れ長周期化してくる。これは、岩田（1982）などが指摘し、山本・谷本（1994a, b）が整理したように、海の波は波群性を有する不規則波で、砕波点から打ち上げ高（遡上高）までの平均海底勾配が 1/10 より緩くなると、波の吸収・追い付き現象による長周期化が打ち上げ波に及ぼす影響が無視できなくなり、同海底勾配が 1/20 より緩くなると、通常周期波の砕波・減衰が強まるにつれて、surf beat が打ち上げ波に及ぼす影響が無視できなくなるからである。

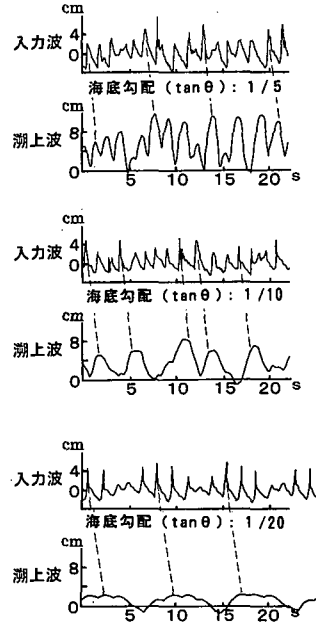


図-1 遡上・打ち上げ波形の変化

山本ら（1996）に倣って、打ち上げ波に占める長周期波成分の大きさを水深 0 m における長周期波の有義波高 (H_L) の 1/2 で近似的に評価し、これと規則波による打ち上げ高 (R) を換算沖波波高 (H_0) で無次元化した値を図-2 に示す。長周期波高の算定には山本・谷本（1994a）の式を、打ち上げ高の算定には Hunt（1959）の式を用い、波形勾配を 0.01~0.05 の範囲で計算し、長周期波成分の存在範囲を斜線帯で、規則波打ち上げ高の存在範囲をドット帯で示した。本図より海底勾配が 1/10~1/20 より緩くなると、打ち上げ高内の長周期波成分を無視すべきでないことが判る。

さらに、山本・谷本（1994a）自身、および、彼等が引用している不規則波模型実験と現地観測（業務として行われた未公開データも含む）による実測の有義打ち上げ高と、中村ら（1972）の改良仮想勾配法（主に規則波データから構成）に有義波データを入力して得られた計算打ち上げ高との比を図-3 に示す。本図より、砕波点から打

* 正会員 工博 (株)アイ・エヌ・ユー 海岸部
** 正会員 学博 埼玉大学 工学部建設工学科
*** (株)アイ・エヌ・ユー 海岸部

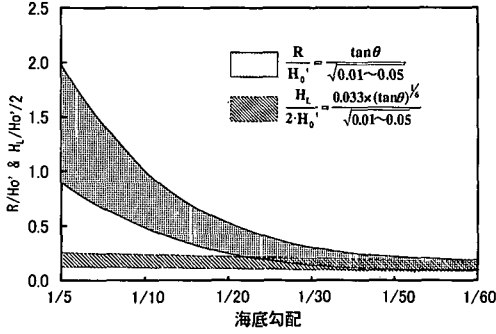


図-2 規則波打ち上げ高と長周期波成分との関係

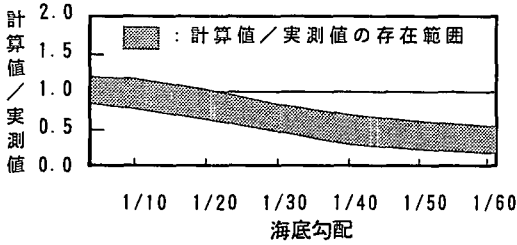


図-3 波の打ち上げ高の実測値と計算値の比較

打ち上げ高までの平均海底勾配が1/10より緩くなると計算打ち上げ高が過小評価される傾向が明瞭となり、同海底勾配が1/20より緩くなると計算打ち上げ高が実測値より小さくなるのが判る。

b) 打ち上げ波数値モデルの構築

長周期化現象を精度良く計算するために式(1)に示す Boussinesq 方程式と式(2)に示す連続式を基本方程式とする。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{d^3}{3} \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial t} \left(\frac{q}{d} \right) - \frac{h^2}{2} \frac{\partial^3 q}{\partial t \partial x^2} - W_b + \frac{f_c}{d^2} |q|q = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 q は線流量、 d は平均水深、 g は重力加速度、 η は水位変動、 W_b は砕波減衰項、 f_c は海底摩擦係数、 t は時間、 x は岸沖方向の座標である。

砕波減衰項には佐藤・鈴木 (1990) が提案した渦動粘性係数を用いるモデル、砕波点位置には合田 (1975) の経験式を採用した。海底摩擦係数には山本ら (1996) の経験式を用いた。

空間微分は staggered grid、非線形項は風上差分、時間微分は Crank-Nicolson 法で計算している。陸側境界では岡安ら (1998) と同じような処理を行い、越波量計算時には越流量をそのまま抜いている。

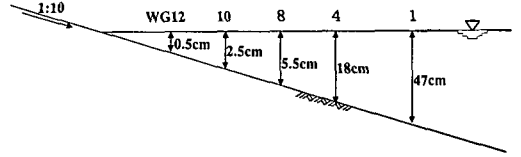


図-4 勾配 1/10 の一様海底断面の説明図

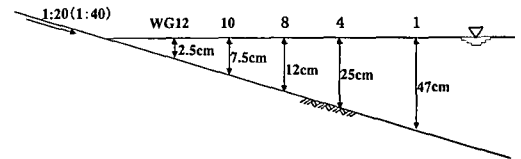


図-5 勾配 1/20, 1/40 の一様海底断面の説明図

間瀬・小林 (1993) の実験の内、最大波高 5 cm、周波数 0.6 Hz の beat 波を勾配 1/10, 1/20, 1/40 の一様な海底勾配断面(図-4, 5 参照)に入力した場合の計算を行った。

図-6 は海底勾配 1/20 の場合で、図-6(1)は運動方程式として式(1)を用いた場合、図-6(2)は式(1)で波頂曲率の補正項を除いたものを用いた場合、図-6(3)は式(1)で波頂曲率の補正項と砕波項を除いた場合である。図-1の海底勾配 1/20 の場合が同じ入力条件であり、図-6(1)と比較すれば、式(1)で波群性を有する不規則波の打ち上げを精度良く計算できることが判る。図-6(3)も良く合っているように見えるが、非砕波時であるため、波の吸収・追い付き現象を過大評価し、surf beat の影響を過小評価している。

図-7 は海底勾配 1/10 の場合で、図-7(1)は式(1)を用いた場合、図-7(2)は式(1)で波頂曲率の補正項を除いた場合、図-7(3)は式(1)で波頂曲率の補正項と砕波項を除いた場合である。図-1の海底勾配 1/10 の場合は beat 波でなく不規則波であるが、比較することにより、図-7(1)の打ち上げ波に長周期化が適切に現れると判断できる。

図-8 は海底勾配 1/40 で式(1)を用いた場合であるが、surf beat による典型的な長周期化が現れている。

c) 越波量の数値計算

図-9 に示す直立堤を有する勾配 1/30 の海底断面に、平均波高が 4.11~4.68 cm、平均周波数が 0.51~0.78 Hz の beat 波を入力した場合の平均越波量を前出の数値モデルから求めて、実験値との相関を図-10 に黒丸印で示す。また、直立堤を有する勾配 1/30 と 1/10 の断面に、前出の最大波高 5 cm、周波数 0.6 Hz の beat 波を入力した場合の同様な相関を図-10 に白丸印で示し、それぞれの累加越波量の計算結果を図-11 に示す。

図-10 において、計算時間が入力波 50 波程度であっ

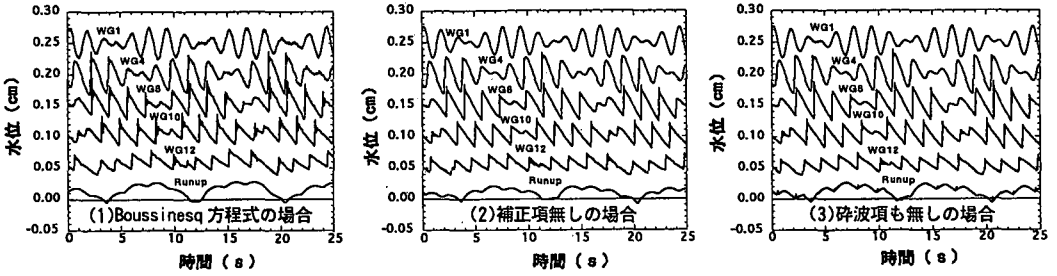


図-6 海底勾配 1/20 での伝達波形

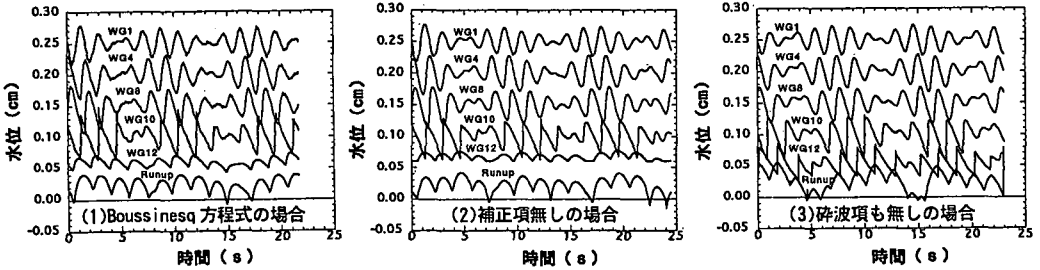


図-7 海底勾配 1/10 での伝達波形

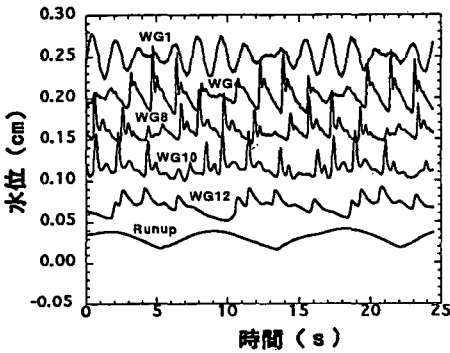


図-8 海底勾配 1/40 での伝達波形

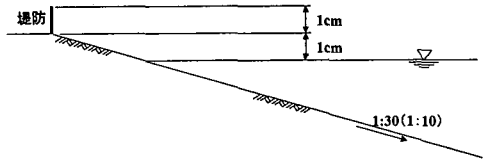


図-9 直立堤の有る一様海底勾配断面の説明

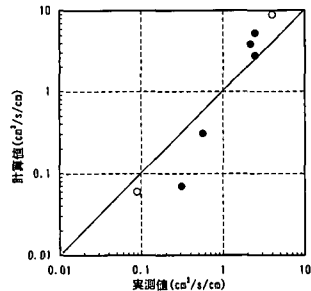


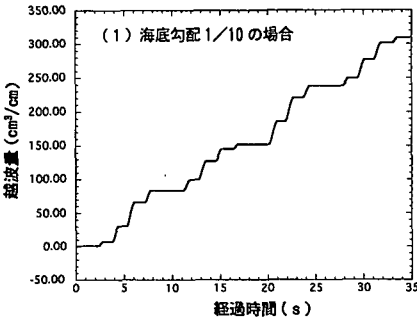
図-10 平均越波量の実測値と計算値の相関

たことを考え合わせると、砕波後の越波量の計算精度は良いと評価できる。これらの平均越波量が、合田ら(1975)の越波流量算定図から求める算定値と、合田らが同論文で示している想定誤差内でほぼ一致していることも確認した。

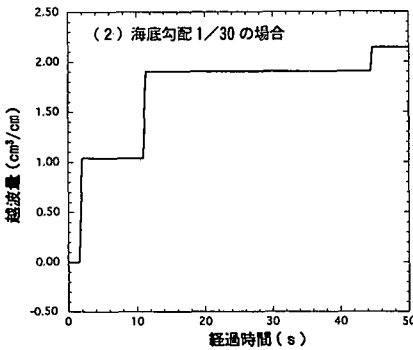
図-11(1)と(2)を見比べると、海底勾配 1/10 の場合は断続的に越波しているため、全計測時間の平均越波量で堤防・護岸の安全性を評価して特に問題無いが、海底勾配 1/30 の場合は各波群の中の最大波に対して間欠的に越波しているため、全計測時間の平均値では安全性を十分に評価できないと考えられる。基準書で良く採用されている合田の被災限界越波量は、主に堤脚水深が波高と同程度かそれ以上の場合のデータに基づいて決定され

ており、図-11(2)のような場合には、そのまま適用することはできないと考えるべきである。

すなわち、海底勾配が 1/20 程度より緩い場合の安全性は、井上ら(1989)や木村・瀬山(1982)などが指摘しているように、堤内地の重要度に応じて、最大越波量や越流時間のみでの平均越波量で評価すべきと考えられる。これらの越波諸量が適切に求められない場合であつ



(1) 海底勾配 1/10 の場合



(2) 海底勾配 1/30 の場合

図-11 累加越波量の特性比較

でも、長周期波の水位が1周期内において平均水位より高い時間内に、越波は生じていると考えて、「越波量に合田らの算定図から求まる値の2倍を用いる」程度の考慮は必要と考えられる。

(2) 強風時の打ち上げ高評価

風が打ち上げ波そのものに及ぼす影響は、井上ら(1992)などが指摘するように比較的小さいと考えられる。また、吹き寄せによる水位上昇も含まれていると見なせる既往の越波実験結果(例えば、Sibul・Tickner, 1955)であっても、Froude 則で現地換算すると、風速が30 m/s 以下では風の影響を無視できることになるため、現地での越波検討において風の影響を過小評価しがちであった。

単純化した吹き寄せ・遡上の運動方程式を沖から岸方向に積分すると、式(3)の相似則を得る。

$$\frac{R_p}{R_m} = \left(\frac{C_p}{C_m}\right) \left(\frac{V_p}{V_m}\right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 R は風による岸端での吹き寄せ・遡上高、 C は風による接線摩擦係数、 V は風速、また、添字の p と m はそれぞれ現地と模型を意味する。

接線摩擦係数 C が定数であれば、Froude 則が成立するが、鶴谷ら(1983)などの研究によると、接線摩擦係数

は Reynolds 数の関数として式(4)で表され、風速を大きい領域に限れば、指数 n は限りなく1に近づく。

$$c = c_0 \left[\frac{V_{z0}}{\nu} \right]^n \dots\dots\dots (4)$$

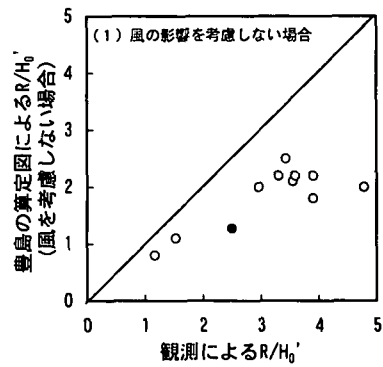
ここに、 C_0 は比例定数、 Z_0 は水面粗度などの高さを表す量、 ν は空気動粘性係数である。

すなわち、実験風速の利用範囲を選べば、風速の相似比は限りなく1に近づくのである。言いかえるなら、指数 n が1に近い実験成果を用いる限り、模型における風速と遡上高の増加率との関係を現地にそのまま適用できることを意味する。

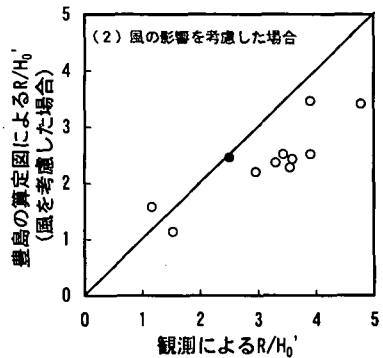
この結論の妥当性を、富山県下新川海岸での豊島(1987)と建設省(1990)の現地観測データ(護岸表のり勾配1/5)を元に確認してみた。

まず、本海岸の無風時の観測データで計算精度の妥当性が確認されている豊島(1987)の緩傾斜堤用算定図を用いて、同海岸における5 m/s以上の風が吹いている時の打ち上げ高を求め、実測値と比較したところ、図-12(1)に白丸印で示すように過小評価している。

次に、Sibul・Tickner(1955)の表のり勾配1/3、1/6の緩傾斜堤に対する風洞模型実験から得られた実験風速



(1) 風の影響を考慮しない場合



(2) 風の影響を考慮した場合

図-12 波の打ち上げ高の実測値と計算値の比較

に対する打ち上げ高の増加率を、そのまま現地風速に当てはめて、打ち上げ高の計算値を補正したところ、図-12(2)に白丸印で示されるように、改善されたことが認められる。ただし、現地風速は観測地点が内陸部であるため、20%割増により海上風に換算してある。また、図-12の黒丸印は石川県五十洲海岸での越波事例(1995(平成7)年11月8日)に対するものであり、波高は輪島港(約15km東側)の観測値を屈折計算して求め、換算沖波有義波高で4.0m(周期は11.8s)であった。潮汐表から求まる輪島港の潮位(T.P.+0.66cm)を使う限り、図-12(1)の黒丸印のようになる。当時、西側から28.8m/sの海上風が吹いており、輪島港の潮位と風速の過去5年間のデータから求めた水位上昇量の関係を当てはめると、水位上昇量1.22mが得られ、これを打ち上げ高計算に考慮すると、図-12(2)の黒丸印のようになり、相当に改善されている。

3. 主要な結論

(1) 砕波点から打ち上げ高までの海底勾配が1/10程度より緩くなると、打ち上げ波の長周期化が無視できなくなる。この場合の越波量は、砕波項と海底摩擦項を有するBoussinesq方程式の数値モデルで比較的精度良く評価できる。また、同海底勾配が1/20より緩い場合の安全性は、堤内地の重要度に応じて最大越波量や越波期間の平均越波量などで評価すべきである。

(2) 風が越波に及ぼす影響は軽視すべきでなく、実験風速を用いたReynolds数による接線摩擦係数の式(4)の指数が1に十分近ければ、実験における風速と打ち上げ高の増加率との関係を現地へそのまま適用しても良い。

参 考 文 献

井上雅夫・島田広昭・殿最浩司(1989): 不規則波における越波

- 量の出現分布特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 618-622.
 井上雅夫・島田広昭・円間弘起(1992): 緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす風の影響, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 586-590.
 岩田好一郎(1982): 斜面上への不規則波の遡上, 第18回水工学に関する夏期研修会講義集, B-3.
 岡安章夫・鈴木康之・花田昌幸(1998): 砕波帯内長周期波の現地観測と数値計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 286-290.
 木村 晃・瀬山 明(1982): 越波の排水能力と浸水被害の発生確率について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 375-379.
 建設省(1990): 海岸保全計画の立案に関する研究, 第44回建設省技術研究会, pp. 879-924.
 合田良実(1975): 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, pp. 59-106.
 合田良実・岸良安治・神山 豊(1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.
 佐藤慎司・鈴木秀典(1990): 砕波帯における底面流速変動波の評価法, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 51-56.
 鶴谷広一・中野 晋・加藤 始・一戸秀久(1983): 吹送流に関する風洞実験, 港湾技術研究所報告第22-2号, pp. 127-174.
 豊島 修(1987): 緩傾斜護岸工法, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 447-451.
 中村 充・佐々木泰雄・山田譲二(1972): 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, pp. 309-312.
 間瀬 肇(1985): 不規則波による遡上波のスペクトル, 土木学会論文集, No. 357, II-3, pp. 197-205.
 間瀬 肇・小林信久(1993): Swash Oscillationの長周期変動, 土木学会論文集, No. 461, II-22, pp. 49-57.
 山本吉道・谷本勝利(1994a): 波群性に起因する長周期波と海岸への遡上に関する研究, 土木学会論文集, No. 503, II-29, pp. 109-118.
 山本吉道・山路功祐・浅野 剛(1996): 越波計算における波の波群性の重要性とその工学的な評価法, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 741-744.
 Hunt, I. A. (1959): Design of seawalls and breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW3, pp. 123-152.
 Sibul, J., O. and E., G., Tickner, (1955): A model study of the run-up of wind generated waves on levees with slope of 1:3 and 1:6, Technical Memorandum, No. 67, B. E. B., Corps of Eng., 19p.
 Yamamoto, Y., K., Tanimoto and K., G., Harshinie, (1994b): Run-up of irregular waves on gently sloping beach, Proc. 24th ICCE., ASCE, pp. 689-703.