

12 海岸堤防の越し波防止効果について

京都大学工学部 工博 石原 藤次郎

京大防災研究所 工博 岩垣 雄一

京大大学院(元) 三井 宏

1. 緒言

従来、海岸堤防の設計にあたっては、堤防壁面上の波の遡上高を求め、それより大きな高さをもつ堤防を建設し、陸地内に侵入する越し波を完全に防止するという見解が取られてきた。この場合は非常に大きな堤体を必要とし、背後地の経済価値を考えあわせた科学的設計は望むべくもない。そこでもし経済効果を考慮した海岸堤防を設計するには、被害のない程度の越し波量と許し、堤防の有効高さを低くすることが考えられる。こうした場合に、背後地の危険度の推定や堤内の排水設備、潮遊びなどの設計に際して、越し波量が重要な問題となってくることは明らかである。この越し波量に影響するものとしては、来襲する波の特性、堤防の型式、静水面よりの堤高、堤防設置位置、海岸地形、および風など非常に多数の要素があり、その現象は複雑をきわめ、二、三の要因で容易に処理することはできないし、また理論的な解析はまだ全然おこなわれていないといっても過言でない。

そこで本文においては、われわれの行った縮尺の異なる2種類の実験およびこれまでに発表された諸種の実験記録に基づいて、越し波量とそれに影響を及ぼす前述の諸要素との関係を実験的に確かめ、同時に越し波量に及ぼす堤防の壁面粗度、天端巾などの影響についても考察をすすめていくことにする。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置 われわれの行なった実験は、屋内水槽による二次元的な実験と屋外扇形水槽による三次元的な、斜めに波が来襲する場合の実験とに分けられる。屋内水槽による実験は、さきに発表した堤防の有効高さ¹⁾を解析した場合の水槽を用い、実験波としては表-1の種類の波を使用した。

堤防の模型としては、表面の滑らかな合成樹脂性の平板を使用し、壁面の角度 θ は 20° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° の5種類で、その各々の傾斜角度をもつ堤防の堤高は2 cmごとに変化できるようにしたのである。堤防の設置場所は、その法先の水深 h が、0、7および10 cmの3種類であって、堤防を置かない場合の碎波突がこれらの

表-1 屋内水槽で用いた実験波

波の種類	波高 H_0	波長 L_0	周期 T	波形勾配 H/L
1	6.70 cm	219.0 cm	1.185 s	0.0306
2	7.46	185.3	1.090	0.0402
3	8.04	160.7	1.015	0.0500
4	8.07	140.8	0.950	0.0573
5	8.26	123.5	0.890	0.0668
6	7.23	110.1	0.840	0.0657
7	7.24	90.1	0.760	0.0803

水深の範囲内に含まれている。

屋外水槽による実験には、波の入射角が自由に变化できる扇形水槽¹⁾を用い、波形勾配 0.0389~0.0827 の波について入射角を 45° とした鉛直壁の場合のみの実験を行った。

(2) 実験方法 屋内水槽においては、3種類の堤防法先水深 h 、5種類の壁面角度 θ 、静水面よりの各堤高 H_c 、および7種類の沖波のすべての組合せに対して、越し波量を測定した。堤防に到達する最初の波は定常状態になっていないと思われるので、平均5回目の波から測定を始め、そのつぎの1回目から5回目までの越し波量を採取した。同時に越し波量に大きな影響を及ぼすものと考えられる反射率を Healy²⁾ の方法で求めた。図-1はその計算結果の一例を示すものであり、縦軸に反射率、横軸に静水面上の堤高 H_c と沖波の波高 H_0 との比 H_c/H_0 をとって、沖波の波形勾配ごとにまとめてプロットしている。これらの結果は相当散らばっているが、 H_c/H_0 の変化が反射率に大して影響しないものと考えてよいであろう。したがって反射波の大きさは、この実験範囲より H_c/H_0 が小さい場合には、主に壁面の型式に支配されるものと考えられる。

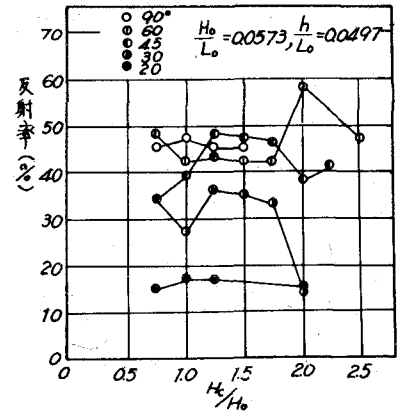


図-1 反射率と H_c/H_0 との関係。

なお、越し波の状態を明らかに観察するため、毎秒 64 駒の高速撮影を行った。その結果壁面が水平に近い場合の越し波では、水分子の水平速度成分が相当大きくなるため、いずれも流れの状態を示しているが、壁面が鉛直に近くなる場合には、水分子の水平速度成分がほとんど認められず、波が堤体に衝突した反動によって堤防前面の水位が高まり、堤頂を越流する状態が観察された。

屋外水槽による実験の方法も、屋内水槽の場合とほぼ同様である。

3. 実験結果の解析とその考察

以上の二種類の実験結果を用いて、その越し波防止効果を解析してみる。

(1) 鉛直壁の越し波防止効果

(a) 鉛直壁に直角に波が入射する場合： ここで解析に使用した実験値としては、室内実験の壁面角度が 90° の場合の実験結果および扇形屋外水槽における実験結果を用い、補足的に Beach Erosion Board における実験³⁾ によるものも採用した。これらの模型実験結果を実際の海岸に適用するには、無次元表示をすれば便利であって、ここに越し波量の無次元表示の方法が最も重要な問題となる。従来の研究では、この問題を越浪のエネルギー的考察から解析しようとして、次式に示す無次元表示を採用したものが多いようである。^{3),4)}

$$\frac{\text{越し波の位置エネルギー}}{\text{沖波の全エネルギー}} = \frac{\rho g Q H_c}{\frac{1}{2} \rho g H_0^2 L_0} = \frac{8 Q H_c}{H_0^2 L_0} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 Q は1周期当りの越し波量、 H_c は静水面よりの堤高である。(1)式の沖波の全エネ

ルギーの代りに、沖波の伝達エネルギーを用いても係数8が16となるだけで、結果は同じである。これらのエネルギー的考察のもつ意味は、沖波のエネルギーの一部が越し波の位置エネルギーになるのであるから、これらのエネルギーの相互関係を見出そうとするわけである。しかし、(1)式には H_c が含まれていて、 $H_c=0$ の場合には越し波量の表示が不可能となる欠点をもっている。したがって、われわれは上述の表示法を用いないことにし、潜堤のように H_c が0あるいはそれ以下の場合においても適用可能な、沖波の1周期当りの岸側への水の移動量に対する堤防の越し波量の比をもつて表示した。沖波の1周期当りの岸側への水の移動量は、微小振中波理論を用いるとつきのようにして求めることができる。すなわち、平均水位上に x 軸を波の進行方向にとり、 x 軸と直角に y 軸を上方にとると、 $x=0$ における水分子の水平速度成分 u は次式で表わされる。

$$u = \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{H_0}{2} e^{\frac{2\pi y}{L_0}} \sin\left(\sqrt{\frac{2\pi g}{L_0}} t\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{2\pi g}{L_0}}\right) \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 H_0 は沖波の波高、 L_0 は沖波の波長、 y は水面の平均水位からの高さ、 t は時間、 g は重力加速度である。

いま、 $x=0$ において波の進行方向と直角に無限水深に至る鉛直平面をとり、(2)式を用いてこの平面を岸方向に通過する単位幅当りの水量 Q_0 を一つの波について求めると、次式であらわされる。

$$Q_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} u \, dy \, d\left(\sqrt{\frac{2\pi g}{L_0}} t\right) = \frac{H_0 L_0}{2\pi} \quad \text{----- (3)}$$

(3)式の Q_0 を用いると、堤防単位長の1周期当りの越し波量 Q は、(4)式のように無次元表示をすることができる。

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{2\pi Q}{H_0 L_0} \quad \text{----- (4)}$$

なお、越し波量には沖波の特性、堤防の法先水深、静水面上よりの堤高が関係するが、これらの各変数の影響は次式のような形であらわされるものと考えられる。

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{2\pi Q}{H_0 L_0} = f\left(\frac{H_0}{L_0}, \frac{h}{L_0}, \frac{H_c}{H_0}\right) \quad \text{----- (5)}$$

以上の表示を用いて実験結果をプロットすると、例えば図-2のような曲線の関係がえられる。この図は液形勾配を一定とした場合について、両対数紙の縦軸に $\frac{2\pi Q}{H_0 L_0}$ 、横軸に $\frac{H_0}{H_c}$ をとって、 $\frac{h}{L_0}$ をパラメーターとしてあらわしたものである。

一般に壁面上またはその直前で碎波すると、水分子が衝撃的に堤体にぶつかり、非常に高く飛沫を打ち上げるから、 H_c を相当大きくしても飛沫による越し波が観測される。図-2において相対水深 $\frac{h}{L_0}$ の大きい場合の曲線が小曲率でほぼ鉛直に近い傾斜であるのに対し、 $\frac{h}{L_0}$ が

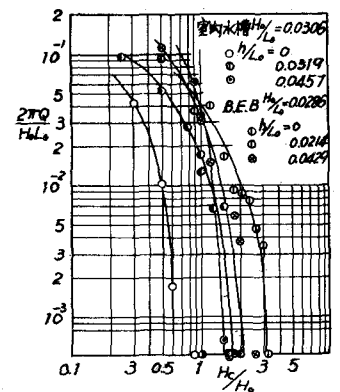


図-2 越し波量を無次元表示した $\frac{2\pi Q}{H_0 L_0}$ と相対堤高 $\frac{H_0}{H_c}$ との関係

小さく碎波状態で越える場合の曲線が大曲率で、ある程度の傾斜をもっているのは、上述の飛沫の影響のためである。

相対水深 h/L_0 と相対堤高 H_c/H_0 との関係を見出すために、図-2 から一定の $2\pi Q/H_0 L_0$ に対する h/L_0 および H_c/H_0 の値を求めてプロットした一例が図-3 である。この図は波形勾配も一定とした場合について、縦軸に H_c/H_0 、横軸に h/L_0 をとって、 $2\pi Q/H_0 L_0$ をパラメーターとしてあらわしたものであるが、プロットした実点を波形勾配の変化にともなう変動傾向を考慮して滑らかな曲線で結ぶと、相対堤高の最大実が碎波指標による相対碎波水深 h_b/L_0 (図に B.P. と記入) よりある程度左側に存在することがわかる。なお、図中×印のものは、越し波量が 0、すなわち波の打上げ高さに相当するものであるが、碎波実付近で特にばらついているのは、飛沫の影響によるものと考えられる。

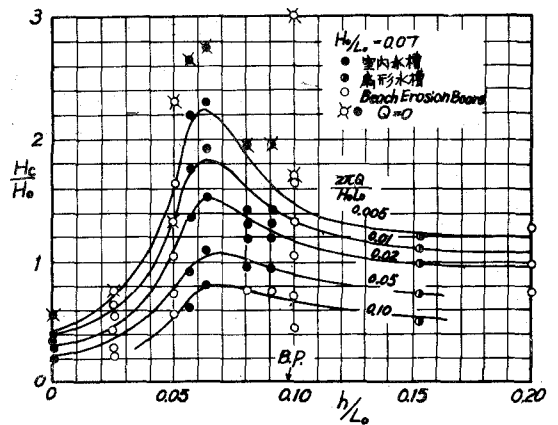


図-3 相対水深 h/L_0 と相対堤高 H_c/H_0 との関係。

図-2 および図-3 においては、模型縮尺の異なる種々の実験値を同様の無次元表示で一緒にプロットしたが、実験値の変化の傾向がよく一致している。このように、実際海岸の波とほぼ大きさの等しい波を使った前記 B.E.B. における実験結果が、われわれの行った比較的小さい模型による実験結果とよく一致した傾向を示すことは、上述の無次元表示法の妥当性を裏証するものといえよう。

以上の実験結果からわかるように、沖波の特性および静水面以上の堤高が一定の場合の越し波量を支配する最も重要な要因は、堤防の法先水深であって、既設の海岸堤防では潮位が越し波量を左右するものと考えてよい。したがって、実際の海岸堤防では、潮位が非常に重要な設計条件になってくる。従来の設計では朔望平均満潮位に既往最大偏差を加えたものを計画高潮位にしているが、最近しばしばわが国を襲った異常高潮に対して、これらの既往最大高潮位を採用して越流を完全に防ぐように海岸堤防を設計すれば、非常に高い堤防と必要とし、経済的にほとんど実行が不可能となるから、ここに未襲波浪に対しある程度の越し波を許すという考え方とともに、高潮位に対する経済的な取扱いが必要になってくる。

海岸堤防における計画高潮位に相当する河川堤防の場合の計画高水位が、従来の既往最大洪水水位を対象とするという考え方から、近年は確率洪水水位を対象とする方向に移行してきていることからみても、上述のことは当然と思われる。この場合、河川で確率洪水を研究するために過去の多数の洪水記録を必要としたように、海岸堤防においても過去の多数の高潮記録が必要になってくる。ところが過去 10 年間に相ついで大きい台風がわが国を襲い、その都度高潮によって各所に大災害をもたらし、苦い経験を重ねさせられたので、近年は全国の検潮施設が急速に整備され、正確な記録が集められている。したがって高潮の

統計的な取扱いもようやく可能になってきているが、このように新しい記録を取り入れ
に高潮の研究については、最近宮崎正衛氏⁵⁾や岸力氏⁶⁾の注目すべき成果が発表されてい
る。

(b) 鉛直壁に斜めに波が入射する場合： この解析に用いた実験値は、沖波の進行方向と
海岸線のなす角度が 45° の場合について、前に述べた扇形水槽でわねわれが行った実験に
よるものである。この場合、波は屈折して海岸線に未襲してくるから、(a)と同様の無次元
表示をするためには、堤防設置位置の波をそれがそのまま沖から直進してきたと見なすとき
の相当沖波に換算し、越し波量もこの相当沖波の進行方向に直角な堤防単位長当りの越し
波量に換算する必要がある。したがって H_0 の代りに相当沖波の波高 H_0' を用い、この沖波の
進行方向に直角な堤防単位長当りの越し波量を $Q \sec \alpha$ として(4)式に代入すると、斜めに波
が入射する場合の越し波量はつきのように無次元表示される。

$$\frac{Q'}{Q_0} = \frac{2\pi Q'}{H_0' L_0} = \frac{2\pi Q \sec \alpha}{K H_0 L_0} \quad \text{----- (5)}$$

ここに、 α は入射角であり、ダッシュは屈折しない場合の波に対する記号である。

堤防に直角に波が入射する場合の $2\pi Q/H_0 L_0$ 、 H_0/H_0' 、 H_0/L_0 の代りに、 $2\pi Q/K H_0 L_0$ 、 $H_0/K H_0'$ 、 $K H_0/L_0$ を用い、
図-2 および図-3 と同様にしてプロットすると、
例えば図-4 および図-5 がえられる。この解析に
用いた屈折係数 K および波の入射角 α は微小緩中波
理論により計算したものである。ただし碎波後の
波の特性はすべて碎波の条件に支配されるものと考
え、碎波より岸側における K および α は碎波後の
それらに等しいとして計算している。したがって碎
波より岸側に堤防を置いた場合に、図-4 および
図-5 を適用するには、碎波後における入射角 α_0 、
屈折係数 K_0 を使用しなければならない。

堤防に斜めに波が入射する場合の越し波量を解析
するには、いろいろな入射角の沖波を用いた実験結
果によるべきであるが、現在は $1/10$ の勾配の海岸に
 45° の入射角をもつ沖波の実験値しかえられていな
いので、この結果をできるだけ一般化する方針で上
述の無次元表示を行ったのである。この実験におい
て堤防設置位置における波の入射角度は約 20° から
 40° までであったから 図-5 はこの範囲の角度で
入射する海岸の波に対して適用できるだろう。

図-3 と図-5 を比較してみると、すべての場合図-5 に示す越し波量は図-3 のそれ
より小さくなっていることが認められる。この越し波量の減少する原因はつきのように考

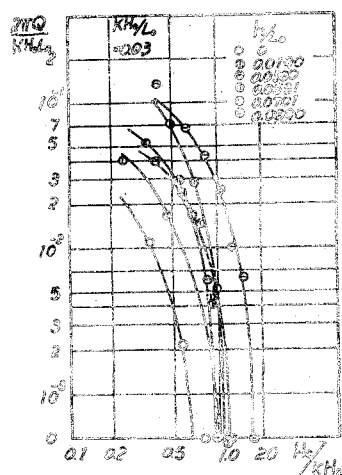


図-4 屈折波の無次元越し波量 $2\pi Q/KH_0 L_0$ と
相対波高 H_0/KH_0 との関係

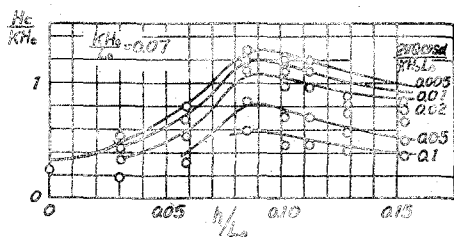


図-5 屈折波の越し波量に対する相対
波高 H_0/KH_0 と相対水深 h/L_0 との関係

えられる。すなわち、ある角度で入射した波は堤防に衝突して壁面上に打ち上げるのであるが、斜めに入射したためにこの場合の水分子は横方向の速度成分をもっている。越し波のもつエネルギーの一部がこのような水分子の横方向の速度成分として消費され、したがって堤防に直前に波が入射する場合にくらべて、この場合の越し波量は減少するものと考えられる。図-3 および図-5 によれば、上述の現象は碎波突より岸側において特に著しいようである。ゆえに波の来襲方向が限定されている海岸においては（例えば狭い湾口をもつ湾内の海岸）、図-5 の曲線により堤高を算出すれば、その工費も相当節約できるだろう。ただし水分子や波形の堤防沿いの進行を防げるような条件が堤防前面に存在する場合は、その地変において局部的に越し波量が大きくなって災害の原因となる例があるから注意を要する。例えば巨大な防砂堤などと堤防法先に設置する場合は、その附近の堤高を若干高くしなければならない。

(2) 傾斜壁の越し波防止効果 鉛直壁と同様に、傾斜壁の場合の越し波量と、法先水深、波形勾配、堤高、角度の関係を明らかにするため無次元表示した一例が図-6 である。この図は縦軸に $2\pi Q/H_0 L_0$ 、横軸に H_0/H_0 ととり、一定の沖波の波形勾配ごとにまとめて、堤防の壁面角度 θ をパラメーターとして両対数紙にプロットしたものである。これらを滑らかな曲線で結んだ結果から内挿して、壁面角度 θ の効果を吟味したが、その結果の一例を示したのが図-7 である。これは各波形勾配および相対水深 h/L_0 ごとにまとめ、縦軸に相対

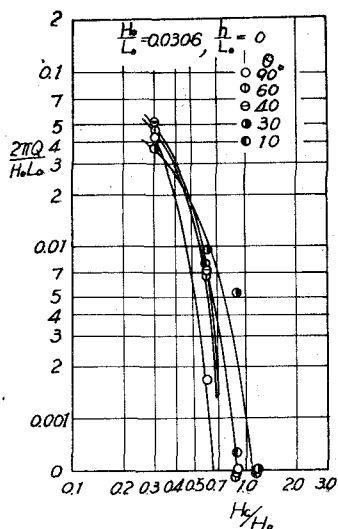


図-6 傾斜壁の相対堤高が無次元越し波量に及ぼす影響

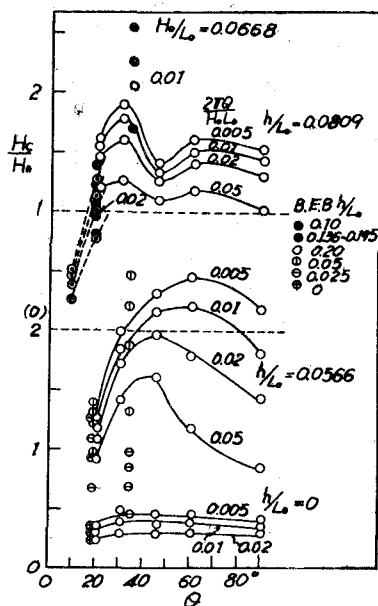


図-7 傾斜壁の相対堤高および壁面角度が無次元越し波量に及ぼす影響

堤高 H_0/H_0 、横軸に壁面角度 θ ととり、 $2\pi Q/H_0 L_0$ をパラメーターとしたものである。なお参考のため、1:1.5, 1:3, 1:6 の傾斜壁に対する B.E.B. の実験値をあわせあわせた。

これによると、汀線に堤防を置いた場合、すなわち $h/L_0 = 0$ では、沖波の波形勾配のいかにかわらず、壁面角度 30° 附近において越し波量の最大が生じているが、 h/L_0 が 0 でない他の相対堤防位置の場合に比較すれば、壁面角度 θ による影響が小さい。碎波指標による碎波突より若干岸側に堤防を置いた場合は、壁面角度が $30^\circ \sim 45^\circ$ のときに越し波量が非常に大きくなっている。したがって越し波量が相対的に小さいのは壁面角度が 90° に近いときか、 20° 以下のときであって、その中間の θ をもつ堤防では大きい越し波量を生じるから、このような断面型式の堤防を使用すれば、大きな堤防が必要になる。 θ が 20° 以下のときの越し波量は、碎波突附近および沖側に堤防を置いた場合比較的一定の値を示し、 θ が 30° 以上のときよりも、堤防法先水深の越し波量に対する影響が小さくなっており、また鉛直壁のときよりかえって越し波量は小さくなる傾向が認められる。

以上の現象はつぎのような原因によるものと推定される。すなわち、鉛直壁の場合堤防前面の水分子はほとんど鉛直方向の上下運動をするのみであるから、波頂と堤頂との水位差または飛沫のもつ若干の岸方向の水平速度成分によって水が堤頂を越えることになり、その越し波量は比較的小さいが、これに反し、傾斜壁の場合は壁面上の水分子が岸方向の水平速度成分とかなりもっているから、その越し波量は鉛直壁の場合より大きくなるものと考えられる。しかし、さらに壁面角度が小さくなれば、堤防前面における波高も減少し、波の打ち上げる距離も長くなって、エネルギー消散の程度が大きくなるから、越し波量は減少することになるのであろう。また、壁面角度が小さい場合には、壁面上の水はかなり長い距離にわたって流れの状態で運動するため、その越し波量に対して堤防の法先水深の変化はほとんど影響を及ぼさないことになるものと推定される。今までに述べた考え方は碎波前の波に対するものであり、碎波後は波のエネルギーが減少しているため、越し波量は急減するようである。

以上のように越し波量の少ないのは、 θ が 90° に近いときか 20° より小さいときであるという結果が得られたが、外力および堤防法先の洗堀を考えると、鉛直に近い壁面はあまり感心できない。なぜならば、鉛直壁に波が衝突すれば、そのエネルギーの一部は下方に向って法先を洗堀し、一部は堤体に大きな波圧となって伝くからである。このことは、碎波突より岸側に堤防があって、堤体に波が流れの状態で衝突する場合にとくに著しいはずである。これに反し、 θ が小さいときは波のエネルギーを壁面上で徐々に消費せしめ、また下方に向うエネルギーがほとんどないので波圧も小さく、法先の洗堀はあまり起らないであろうが、鉛直壁にくらべると堤体の断面積が大きくなるから、その建設費が高くなる欠点をもっている。しかし、作用する波圧が小さいので安い材料で簡単な構造とすることができるとし、また相対堤高 h/H_0 が小さくてすむ汀線附近に設置すれば、断面積が大きくなるという欠点を補うこともできよう。もし堤防の基礎が岩盤などのような良好な地盤であれば、建設費および越し波防止の立場からみて、鉛直壁またはそれに近い型式の堤防断面を用いれば効果的であると思われる。

4. 米国洪水食局の実験資料とその考察

以上は滑らかな壁面をもった鉛直壁および傾斜壁の越し波防止効果について、京大で行ったわれわれの実験結果に基づいて考察したものであるが、さらに堤防型式や海岸の条件その他が異なれば、越し波がどのように変化するかということが問題になる。幸にも米国のB.E.B.においてこの問題に対する実験が行われ、その結果が発表されているので、これらをわれわれの採用した無次元表示法によってあらわし、若干の考察を加えてみよう。これらの実験では使用した波の特性や法先水深などが狭い範囲の値に限られていたもので、実験範囲外の条件に対して考察することができなかつたが、前節に述べた鉛直壁および傾斜壁についてのわれわれの解析結果と比較すれば、それらの示す傾向から大過のない値と推定することができよう。

(1) 堤防の断面型式の影響 ここで採用した実験値は主としてB.E.B.で行われた実験^{3),7)}によるものであって、使用した波の特性は沖波に換算して波高は90~360cm、周期は2.90~15.00sである。堤防模型としては図-8に示す型式のものを使用し、これらを海岸に相当する1/10勾配の斜面に設置して、各堤防法先水深および沖波に対して越し波量を測定している。たゞI型については、浜勾配の影響を調べるために、1/25の浜勾配に対しても実験を行っている。

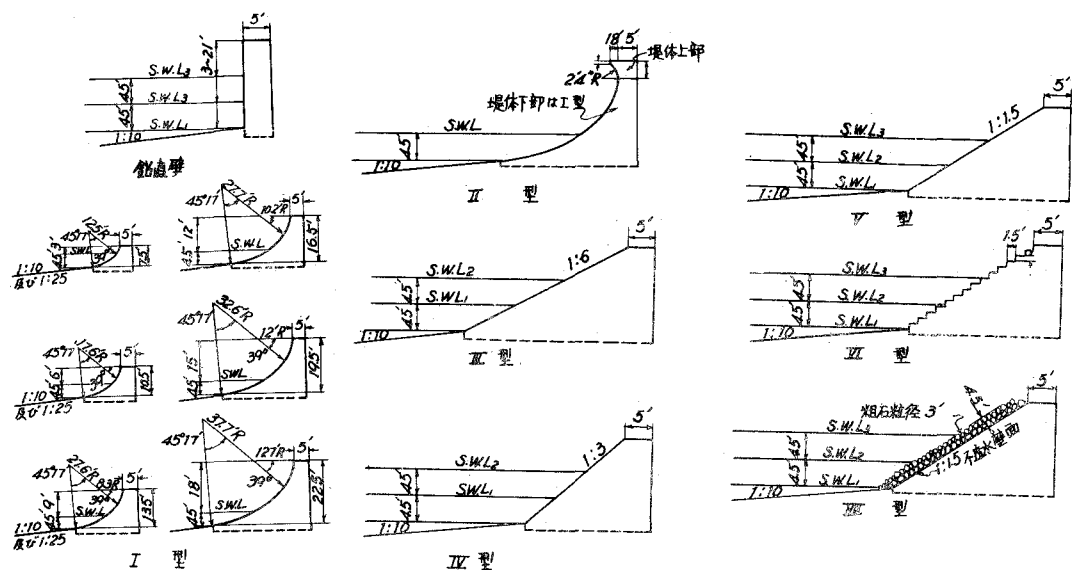


図-8 米国浜浸食局で用いた堤防模型

これらの実験値と前節の無次元量を用いてあらわした一例が図-9である。この図は各堤防型式の越し波量を鉛直壁および傾斜壁の場合と比較するのに都合がよいように、横軸に H_0/H_0 、縦軸に $2\pi Q_0/H_0L_0$ をとって、各沖波の波形勾配 H_0/L_0 および相対水深 h/L_0 ごとにまとめたものであるが、VIおよびVII型については波形勾配が等しく波高の異なる大小2種の沖波を用いたので、小型の沖波に対するものを破線でおいた。各波形勾配および相対水深ごとにまとめた一連の関係図から、堤防の断面形状が越し波量に及ぼす影響を

ぎのように要約することができる。

1. 堤防法先水深の変化による越し波量の増減については、どの堤防型式でも鉛直壁の場合とほぼ同様の傾向が認められる。

2. 越し波量が鉛直壁と同程度かまたはそれ以下である型式は、小堤高ではI, II, VII型、比較的大堤高ではII, VII型である。越し波量が鉛直壁より大きい型式は、小堤高ではIV, V, VI型、比較的大堤高ではI, V型である。全体を通じて鉛直壁より越し波量の大きいのはV型であり、鉛直壁と同程度かまたはそれ以下の越し波量であるのはII, VII型である。ただI型では、小堤高のときは鉛直壁と同程度の越し波量であるが、比較的大堤高のときは鉛直壁よりも越し波量が増加する。これは、水位の変化に対し静水面より上の堤防断面の形状が相似でないためと考えられる。すなわち、大堤高のときは波の打ち上げる壁面の形状が傾斜壁に似てきて、越し波量が鉛直壁より大きくなるが、小堤高のときは静水面が堤頂に接近し、波の打ち上げる壁面の形状が鉛直壁に近くなり、越し波量も鉛直壁と同程度になるのであろう。このことから、越し波量は反射率の場合とは逆に、静水面以上の壁面形状に主として影響されるといってよいようである。

3. II型はI型の頂部にパラベットをつけたものであるが、越し波量がI型よりかなり小さくなっている。こうして頂部が若干沖側に弯曲しただけでも、越し波量が相当減少するから、パラベットの越し波防止効果は著しいと考えられ、上に述べた静水面以上の壁面形状が越し波量に大きい影響を与えるという事実を裏書するものといえよう。

4. 大きい壁面粗度をもつVI型およびVII型の越し波量は、これと同じ壁面勾配をもつV型のそれよりも小さいことが確かめられた。したがって越し波防止に対する壁面粗度の効果は明らかであるが、波の大きさによって相対粗度が変化するから、厳密には相対粗度を考慮した実験によることが必要であり、改めて次項において考察する。

5. $1/10$ および $1/25$ の浜勾配の同一水深部に堤防をおいた場合、堤防位置が碎波突およびその沖側にあるときは、 $1/25$ 勾配に対する越し波量の方が少し大きいが大差はないから、浜勾配の影響はあまりないようである。しかし、碎波突より岸側に堤防があるときは、 $1/10$ 勾配に対する越し波量の方が相当大きく、その原因はつぎのように考えられる。すなわち碎波後の波は流れに近い状態で進行して堤防に達するが、碎波突から堤防までの距離は $1/25$ 勾配のときの方が長く、それだけ流れのもつエネルギーの損失が大きいから、 $1/25$ 勾配に対する越し波量が $1/10$ 勾配に対するものより小さくなるのであろう。

(2) 壁面粗度の影響 この問題については、Sibul の実験結果⁷⁾ をわれわれの無次元表示法を用いて換算し、考察を進めることにした。この実験は一定水深 1.69 ft の水路の一端

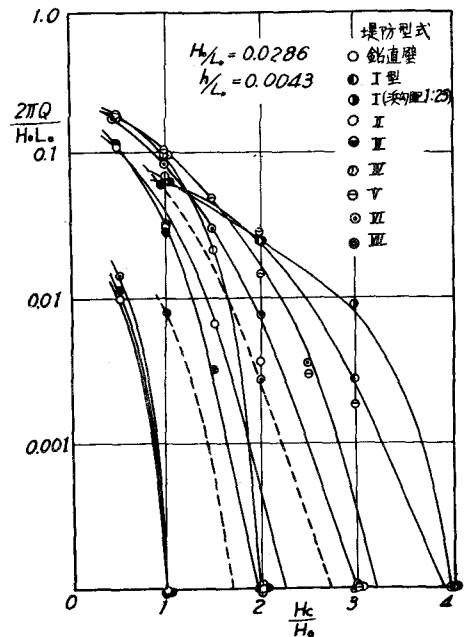


図-9 各種型式の堤防における越し波量と相対堤高との関係。

にフラッター型波起し機を据えて行ったもので、使用した波は沖波に換算して、波高は $0.0841 \sim 0.271 \text{ ft}$ 、周期は $0.75 \sim 1.25 \text{ s}$ である。模型堤防は壁面勾配 $1/2$ および $1/3$ の2種類であって、壁面に粗度を与えるときは、図-10のように角材を水平に並べている。堤頂が静水面以下にある場合の越し波量は、堤防の岸側および沖側の水位が等しいという条件の下で測定したものである。図-11は上述の実験結果とわれわれの方法で無次元表示した一例であるが、図中の k は Johnson⁸⁾ の実験による開水路の相対粗度に換算した値である。この図からわかるように、壁面粗度の越し波量に対する影響は、堤防の有効高さ H_c の大きい場合に

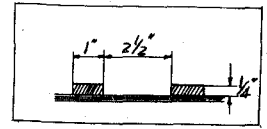


図-10 壁面粗度を与える方法

顕著であるが、堤高が小さい場合にはあまり影響が認められず、堤頂が静水面以下になると、粗面の越し波量は滑面のそれと同程度か、あるいはかえって大きくなっている。堤高と越し波量との関係に着目すれば、越し波量の最大となる限界堤高が明らかに存在し、この値は壁面粗度の存否に関係せず、 $H_c/H_0 = 0.1 \sim 0.2$ であることがわかる。

以上は一定水深における実験であって、波が碎けずに堤防を越える場合であり、堤防の壁面勾配が $1/2$ および $1/3$ であるために、壁面上では常に Reynolds 数が十分大きい流れの状態になっている。したがって上の結果をそのまま碎波して越える場合に適用しても、壁面粗度による越し波防止効果はほとんど変わらないものと考えられ、その大体の値を図-11によって推定することができよう。

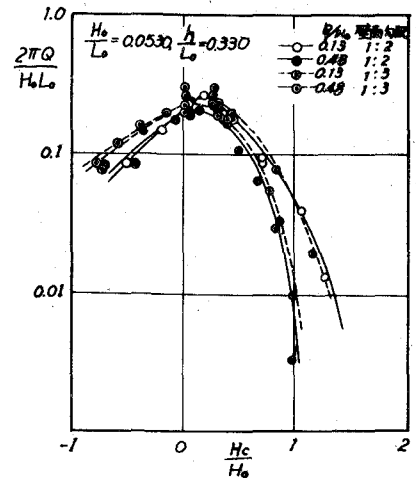


図-11 越し波量に対する壁面粗度の影響

(3) 天端中およびパラベットの影響 越し波量に対する天端中の影響については、Sibul⁷⁾の実験があり、パラベットの影響については、Sibul⁷⁾や佐藤・岸⁹⁾の実験が発表されている。Sibulは天端中と沖波波高の比の増加による越し波量の減少率が、パラベットの高さとは波高の比の函数であらわされるという興味ある結果をえている。しかし、これらの実験は前項と同様に一定水深における結果であり、傾斜した海岸面上を波が遡上する場合に適用できるかどうかについては、なお問題となる疑が少なくないようである。

(4) 越し波量に対する風の影響 波が堤防を越える場合、風の影響によって越し波量が増加するであろうことが予想される。このような風の越し波量に及ぼす影響に関しては California 大学の実験⁴⁾があり、この結果とわれわれのえた風を考慮していない場合の結果と比較すれば、壁面傾斜角度の小さい堤防ほど風による影響が大きいことがわかる。しかしながらこの California 大学の値は風速 $6 \sim 15 \text{ m/s}$ における実験値であり、その値を直ちに自然界の風速に適用できるかどうかは疑問であり、その相似性が明らかにされていないかぎり、この結果をそのまま実際の海岸において用いるわけにはいかないであろう。

5. 結論

われわれは1.~4.において京大および米国の資料にもとづいて、海岸堤防の越し波量に変化を与えると考えられる数多くの因子の効果について考察を進め、越し波量に対する新たな無次元表示方法を提唱してその妥当性を確かめるとともに、越し波量に最も大きな影響を与えるものが堤防前面の水深、すなわち潮位であることを明らかにした。なお、実際の海岸に適用する場合には、堤防前面の水深のほかに堤防の形状、海岸の特性、風の特性などについても慎重な考慮を要することはいうまでもないが、これらについてもある程度の考察を進めることができた。

最後にこの研究に終始協力していただいた榎木亨、網島博の両君に謝意を表するとともに、この研究が文部省科学研究費による総合研究の一部として行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 鈴木雄太: 海岸堤防の設計, 特にその有効高について, 海岸工学講演会講演集, 昭. 30. 11, pp. 57~70.
- 2) J.J. Healy: Wave damping effect of beaches, *Proc. Minnesota Intern. Hydraulics Convention*, 1953, pp. 213~220.
- 3) Thorndike Saville, Jr.: Laboratory Data on Wave Run-up and Overtopping on shore Structures, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 64, 1955, pp. 1~32.
- 4) O.J. Sibul and E.G. Tickner: Model Study of Overtopping of Wind Generated Waves on Levees with Slopes of 1:3 and 1:6, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 80, 1956, pp. 1~27.
- 5) 宮崎正衛: 近年日本沿岸に來襲した高潮について, 海岸工学講演会講演集, 昭. 31. 11, pp. 1~8.
- 6) 岸 力, 富永正照, 大出 哲: 利根川河口の氣象と潮位偏差, 同上, pp. 27~32.
- 7) O.J. Sibul: Flow over reefs and structures by wave action, *Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol. 36, No. 1, 1955.
- 8) J. W. Johnson: Rectangular Artificial Roughness in Open Channel, *Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol. 34, 1944.
- 9) 佐藤清一, 岸 力: 海岸堤防の形状特性ならびに陸岸への遡上, 海岸工学講演会講演集, 昭. 31. 11, pp. 127~138.