

越波量におよぼす堤防前面地形の影響

井上雅夫*・菊岡敏**

1. 緒 言

海岸堤防の越波量には、波の特性、潮位、堤防の設置位置および形状、風などが影響し、これらの要素の影響の仕方についてはかなり明らかになってきた。しかし、越波量には、これらの要素のほかに堤防の前面地形が影響するはずであるが、これについての研究はあまり行なわれていないようである。このことは、堤防の前面地形がそれぞれの海岸で特有の形状を示し、しかもそれが絶えず変化するため、その影響を一般的に論じることができないためであろう。しかし、こうした問題は、台風 6626 号による吉原海岸の被災例などにも見られるように、防災上非常に重要なことであるばかりでなく、海浜利用上からも養浜する場合、それに越波防止効果を期待するならば、その設計にも利用できるものである。

従来、越波量におよぼす前面地形の影響、たとえば海底勾配の影響については、Saville¹⁾、永井ら²⁾および富永ら³⁾の研究があるが明確な結論は得られていないようである。榎木らは⁴⁾離岸堤の合理的配置計画を検討するために、離岸堤設置によって生じるトンボロ地形の越波量におよぼす影響を実験的に調べ、興味ある結果を発表している。

この論文では、越波量におよぼす影響をできるだけ系統的に論じようとするものであって、前面地形を表わす代表的量として堤防のり先水深、海底勾配をとりあげ、その影響を従来の実験結果によって検討するとともに、前浜形状の影響については、現象を 2 次元とした実験を行ない、若干の考察を行なうつもりである。

2. 越波量におよぼすのり先水深と海底勾配の影響

(1) 鉛直堤の越波量におよぼすのり先水深の影響

岩垣ら⁵⁾は、勾配 1/10 の海浜上に設置した鉛直堤の実験結果を用い、のり先水深の影響を検討している。図-1 には、縦軸に無次元越波量、横軸にのり先水深・波長比をとり、波形勾配をパラメーターとしてのり先水深の影響を示した。ここに、 Q は 1 周期単位幅当たりの越波量、 H_0 および L_0 は沖波波高および波長、 h はのり先

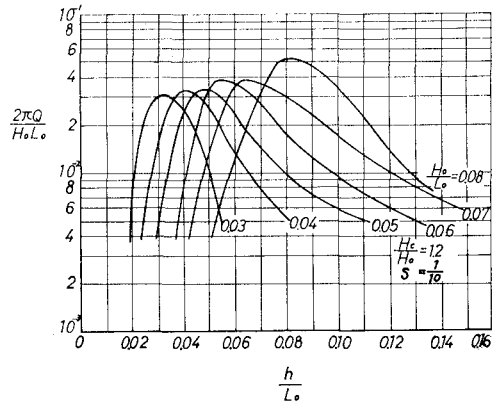


図-1 越波量におよぼすのり先水深の影響
(岩垣ら⁵⁾による、海底勾配 1/10)

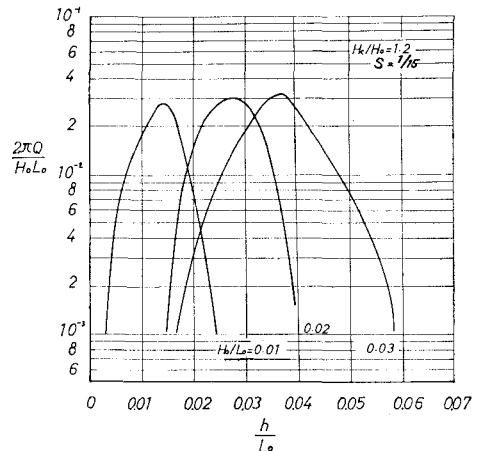


図-2 越波量におよぼすのり先水深の影響
(海底勾配 1/15)

水深、 H_0 は静水面からの堤防の高さである。図-2 は、勾配 1/15 の海浜上に設置した鉛直堤の著者の実験結果⁶⁾を 図-1 と同様にプロットしなおしたものである。これらの図によると、いずれの波形勾配や海底勾配についてもある水深で越波量が最大となり、それ以上水深が大きくなると越波量が減少している。このことは、岩垣らがすでに指摘したように砕波点よりやや岸側に堤防を設置したとき、越波量が最大になるためである⁵⁾。図-3 には、図-1 および 2 などから、0.01~0.08 までの各波形勾配における最大越波量の包絡線を示した。したがって、波形勾配が 0.01~0.08 であれば、最大越波量はこ

* 正会員 関西大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 関西大学副手 工学部土木工学科

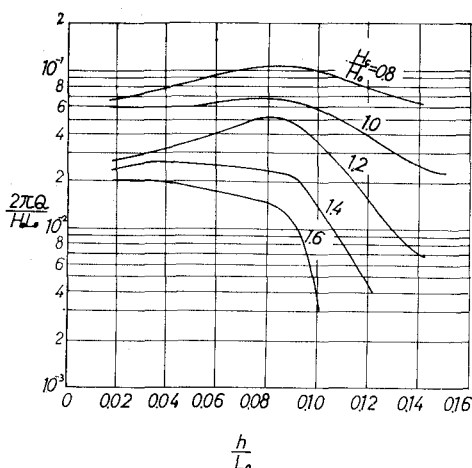


図-3 最大越波量におよぼすのり先水深の影響

の曲線上の値として与えられる。この場合、対象とした波形勾配の最大値が 0.08 であるため、相対堤高が 1.4 および 1.6 のときには、水深・波長比が 0.08 以上になると急激に減少し、相対堤高が 0.8~1.2 ときには、水深・波長比が 0.08 で極大値を示している。進行波の碎波限界は各理論によって異なるが、いずれにしても波形勾配が 0.12~0.14 であるため、こうした図を作成するには、波形勾配を 0.14 までを対象とした方が望ましい。しかし、一般に越波が問題となる入射波の波形勾配は 0.06 程度までであり、ちなみに、堤防天端高算定に関する運輸省試案⁷⁾では 0.03 までを対象としており、いちおう 図-3 から波形勾配に関係なく、各のり先水深における最大越波量を推定することができよう。

図-4 は、波形勾配が 0.01 と 0.02 の場合、海底勾配が 1/15, 0.03~0.08 の場合は 1/10 勾配上にそれぞれ設置した鉛直堤の実験結果について、入射波の波形勾配とその波形勾配における最大越波

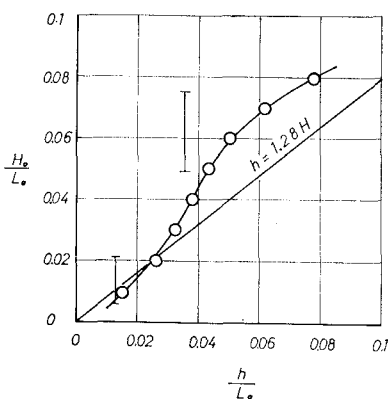


図-4 波形勾配と水深・波長比との関係

量を示す水深・波長比との関係を示し、水深を小さくすることによって越波量が減少する限界を明らかにしたものである。水深を小さくすることによって曲線の左上部では越波量が減少し、右下部はかえって増加する領域である。図中には Munk による孤立波の碎波限界 h/H

$=1.28$ を記入してあるが、水深減少による越波防止効果の限界曲線は Munk の碎波水深よりもやや小さい。これは前述したように、碎波点より岸側に堤防を設置した場合に越波量が最大になることに対応するわけである。

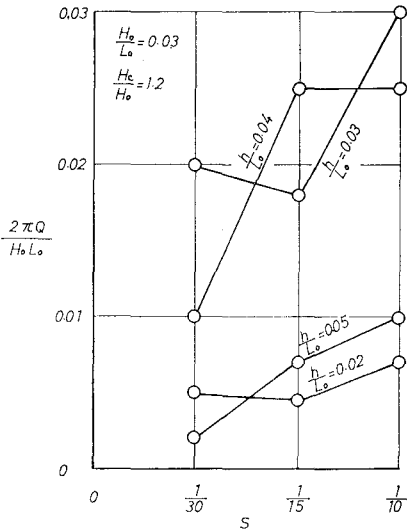
以上、越波量におよぼす水深の影響について検討したが、碎波点付近でその影響の仕方が著しく異なるので、海岸堤防の設計には、計画潮位の適確な推定とともに、のり先の地盤変動が著しいときには、その変動量を明らかにしておくことが特に必要であろう。

(2) 鉛直堤の越波量におよぼす海底勾配の影響

越波量におよぼす海底勾配の影響については、Saville¹⁾が表のり面が曲線状の堤防について、海底勾配を 1/10 と 1/25 に変化させて検討し、堤防より沖側で碎波する場合には、1/10 勾配に対する越波量が多いことを明らかにしている。また永井²⁾は、勾配 1/10 および 1/40 の海底に設置した消波堤の越波量を調べ、のり面碎波や沖側碎波のときは 1/10 勾配の場合の越波量が多いことを見出している。しかし、この結果は天端高や消波堤の幅などがそれぞれの範囲で示されているため、これらの影響がどの程度あるのか不明であり、定量的な検討ができない。さらに、富永³⁾は海底勾配 1/10 と 1/30 の場合の鉛直堤の越波量を比較して、一般には 1/10 勾配の越波量が多く、多い場合には 1/30 勾配の 40 倍にも達すると述べている。また、この原因が碎波形式の相違によって、越波の仕方が異なるためと興味ある説明を行なっている。しかし、いずれの結果も 2 種類の勾配に対する実験結果を直接比較しており、海底勾配の影響が波形勾配や水深・波長比との関係において調べられていないため、その全般的な傾向は明らかにされていない。そのため、合田⁴⁾は期待越波流量の算定に際し直立護岸の越波流量曲線の作成にあたっては、こうした影響を考慮していないようである。

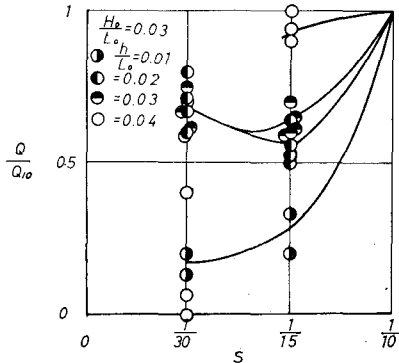
ここでは、富永らの結果に 1/15 勾配の実験結果を追加し、海底勾配の影響を調べることにした。そのほか、傾斜海浜上の鉛直堤の実験結果としては、1/10 勾配の Saville¹⁾、1/20 勾配の合田⁴⁾および 1/400 勾配の土屋⁵⁾のものがあるが、Saville のものは石原、岩垣らの結果¹⁰⁾と同一の図にまとめられており、合田、土屋らのものは実験結果の整理方法が異なるため、同一条件の結果を求めることは困難であったので、ここでは使用しなかった。

図-5 は、波形勾配 0.03、相対堤高 1.2 の場合の無次元越波量と海底勾配 S との関係を示したものである。これによると、一般に越波量は海底勾配がゆるやかになるにつれて減少することがわかる。図-6 にはこれらの傾向を明確にするために、相対堤高が 0.6~2.0 の範囲の実験値について、各勾配における越波量 Q と 1/10 勾配における越波量 Q_{10} との比 Q/Q_{10} を縦軸に、海底勾配を横軸にとり、水



図—5 越波量と海底勾配との関係

深・波長比をパラメーターとして、海底勾配による越波量の変化を示した。なお、図中の曲線は各相対堤高における値の平均値を連ねたもので



図—6 越波量におよぼす海底勾配の影響

あって、これから減少比は多少のばらつきはあるが、相対堤高によってはあまり変化しないようである。一方、水深・波長比によっては明らかに変化し、ばらつきの大きい 1/30 勾配の水深・波長比が 0.04 の実験値を除くと、それぞれの実験の規模、特に水平部水深すなわち斜面の長さが異なるにもかかわらず、水深・波長比が小さいほど海底勾配の影響が大きく、越波量は大幅に減少することがわかる。なお、1/15 勾配の水深・波長比が 0.02～0.03 の値は 1/30 勾配の場合に比べ、若干小さいようであるが、越波実験のばらつきを考慮すると、いずれも 0.55～0.70 程度と考えてよいようである。このように海底勾配がゆるやかになると越波量が減少する原因は、富永らが指摘したような砕波形式の相連のほか、海底勾配がゆるやかなほど砕波点から堤防までの距離が長くなり、その間の波のエネルギー損失が大きい、堤防への衝撃が弱まって、越波量が減少するものと考えられる。

一方、波の遡上高におよぼす海底勾配の影響について

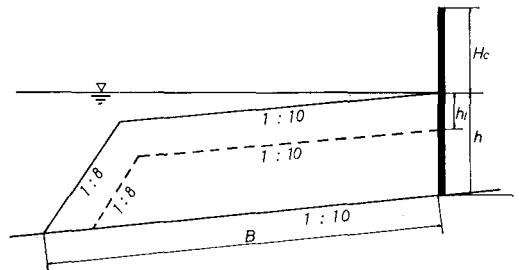
は、豊島ら¹¹⁾が海底勾配が 1/17, 1/20, 1/30 および 1/60 の斜面上に設置した 2 割堤の場合について検討している。その結果によれば、のり先水深が 0 以外はあまり海底勾配の影響はない。2 割堤への波の遡上と鉛直堤の越波とでは、かなり現象が異なるが、その関連については明らかでなく、今後さらに検討しなければならない。

3. 越波量におよぼす前浜形状の影響

前浜幅やその高さが越波量に影響を与えることは十分考えられ、たとえば 6626 号台風時の吉原海岸の災害に関連して、当時堤防前面に砂が堆積していたことが災害を大きくしたのではないかと社会問題にも発展したことがある。また、最近わが国においても、養浜が実施されるようになったが、これに越波防止効果を期待するならば、その形状が越波量におよぼす影響を明確にしておかなければならない。しかし、前浜形状は非常に多様であり、その影響を系統的に論じることはいくつかできないので、ここでは主として越波量に及ぼす前浜幅の影響について実験を行ない、養浜の越波防止効果を考察することにした。

(1) 実験装置および実験方法

実験水槽は長さ 24 m、幅 0.5 m、深さ 0.6 m の片面一部ガラス張りの鋼製で、その一端には multi-purpose 型造波機があり、他端には 1/10 勾配上に鉛直堤を設置した。前浜断面は図—7 に示す形状の固定床とした。実



図—7 前浜断面概略図

験波の周期 1.2 sec および 1.8 sec、沖波波高 10.9～15.8 cm、前浜がないときののり先水深は 8.0 cm、前浜の高さは 5.0 cm および 8.0 cm とした。なお、図—4 に I 印で示した範囲はこの実験条件であり、いずれも水深を浅くすることによって越波量が減少する領域に含まれている。波高は一樣水深部に電気抵抗線式波高計で、自動平衡型記録計に記録し、越波量は堤防背後の小容器に入る水量を直接測定した。また、越波するときの波の挙動を 16 mm カメラで毎秒 32 コマで撮影した。実験はまず堤防を取り除き、入射波を測定したのち、堤防をふたたび設置して波高が一樣な造波機始動後の 5～10 波までの越波量を測定した。

(2) 実験結果とその考察

図-8は、無次元越波量と図-7に示した前浜幅 B と沖波波長の比 B/L_0 との関係を波形勾配をパラメーターとして示したものであり、全般的には前浜幅の増加とともに越波量は減少している。図-9には、縦軸に各前浜幅における越波量 Q と前浜がないときの越波量 Q_0 との比をとり、前浜幅の影響を示した。これによると、ほとんどの場合 B/L_0 が 0.05~0.15 程度までは越波量が増加し、0.15 以上になると急激に減少し、0.3 以上では 1/10 以下に減少している。これらの傾向は、前浜の高さが変化してもあまり変わらない。この B/L_0 が 0.3 以上では越波量が急激に減少することは、小段をもつ堤防へ

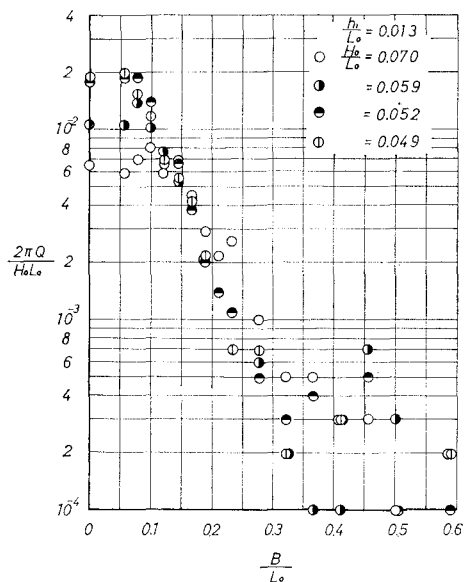


図-8 越波量と前浜幅との関係

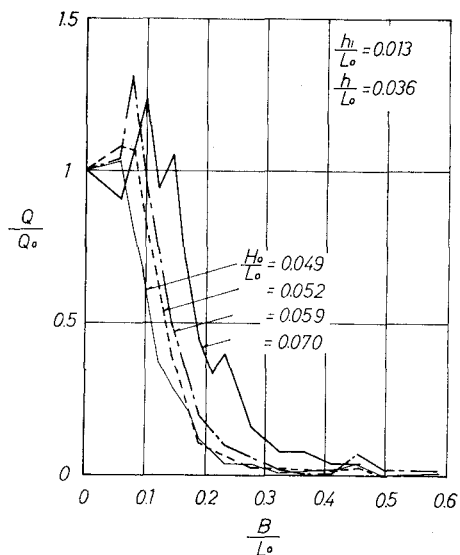


図-9 越波量におよぼす前浜幅の影響

の波の遡上高に關しても類似の結果であり、たとえば Wassing¹²⁾ や Herbach¹³⁾ は小段の幅は 1/4 波長程度が望ましいと述べている。さらに越波に關しても、二色の浜海岸の模型実験の結果¹⁴⁾によれば、 B/L_0 が 0.45 であり、養浜後の最大越波量は養浜前の約 1/300 に減少している。これに対して、前述した吉原海岸では被災時の B/L_0 は 0.2 程度であって¹⁵⁾、砂浜の存在が越波防止の面からはあまり効果的でなかったと推察できる。

以上の実験結果においては、前浜幅を変化させたために

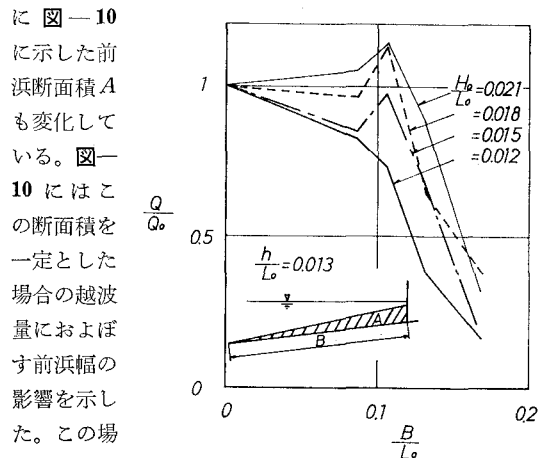


図-10 前浜断面を一定としたときの越波量におよぼす前浜幅の影響

水深・波長比は大きくなるにもかかわらず、図-9 とほぼ同様な傾向を示し、 B/L_0 が 0.1 程度までは越波量はあまり減少しないか逆に増加するが、それ以上になると急激に減少し、前浜幅の影響が非常に大きいことがわかる。いずれにしても、 B/L_0 が約 0.1 までは越波量はかえって増加することは興味深い。この原因を明らかにする

ために、比重がほぼ 1 に近い直径約 3 mm の中立粒子を水中に入れ、その動きを 16mm カメラによって撮影して、越波に伴う水粒子の移動を調べた。

図-11 は、その粒子の走時曲線を示したものであるが、この場合

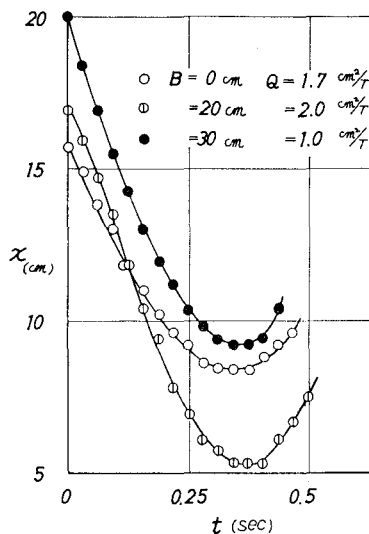


図-11 堤防前面の中立粒子の走時曲線

を再整理し、その影響が非常に大きいことを再確認するとともに、水深を浅くすることによって、越波量が減少する範囲を波形勾配と水深・波長比との関係によって明らかにした。また、海底勾配の影響については、海底勾配が 1/10 の場合の越波量を基準にして、勾配が 1/15 および 1/30 の場合の越波量の減少比を調べ、これは波形勾配が一定であっても水深・波長比によって変化することを明らかにした。

さらに前浜幅の影響については、前浜幅が 1/10 波長程度では越波量がかえって増加し、約 1/4 波長で急激に減少することを見出すとともに、越波防止の観点から前浜幅と堤防天端高との合理的組合せを求める方法を提示した。

最後に、この研究を進めるにあたり、終始ご指導いただいた京大工学部 岩垣雄一教授および同 防災研究所 土屋義人教授に謝意を表わすとともに、この研究は文部省特定研究費による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Saville, T. Jr.: Laboratory Data on Wave Run-up and Overtopping on Shore Structures, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 64, pp. 1~32, 1955.
- 2) 永井莊七郎・高田 彰: 海岸堤防の越波におよぼす消波堤の効果, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp. 279~286, 1964.
- 3) 富永正照・佐久間襄: 海岸堤防の越波について, 第 15 回海岸工学講演会講演集, pp. 277~281, 1968.
- 4) 榎木 亨・岩田好一朗: 堤防越波量に及ぼす離岸堤背後地形の効果に関する実験的研究, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 269~273, 1971.
- 5) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫: 海岸堤防の越波防止に関する二、三の問題, 京大防災研究所年報, 第 7 号, pp. 387~399, 1964.
- 6) Iwagaki, Y., Y. Tsuchiya and M. Inoue: On the Effect of Wind on Wave Overtopping on Vertical Seawalls, Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., Vol. 16, Part 1, No. 105, pp. 11~30, 1966.
- 7) 井島武士・川上善久: 日本沿岸の海岸保全のための自然条件と海岸堤防の天端高算定について, 第 9 回海岸工学講演会講演集, pp. 138~142, 1962.
- 8) 合田良実・竹田英章: 不規則波に対する護岸の期待越波流量について, 第 15 回海岸工学講演会講演集, pp. 259~266, 1968.
- 9) 土屋義人・山口正隆: 越波のある場合の重複波の特性について, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 79~84, 1970.
- 10) 石原藤次郎・岩垣雄一・三井 宏: 海岸堤防の越し波防止効果について, 第 4 回海岸工学講演会講演集, pp. 99~109, 1957.
- 11) 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏: 海岸堤防への波のうちあげ高, 一海底勾配 1/20—, 第 12 回海岸工学講演会講演集, pp. 180~185, 1965.
- 12) Wassing, F.: Model Investigation on Wave Run-up Carried out in the Netherlands During the Past Twenty Years, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., pp. 700~714, 1958.
- 13) Herbich, J. B., R. M. Sorensen and J. H. Willenbrock: Effect of Berm on Wave Run-up on Composite Beaches, Proc. ASCE, Vol. 89, No. WW2, pp. 52~72, 1963.
- 14) 井上雅夫・岩垣雄一・土屋義人: 海岸堤防の越波防止効果に関する二、三の問題, 京大防災研究所年報, 第 14 号 B, pp. 361~372, 1971.
- 15) 富永正照・橋本 宏・中村 隆: 台風 26 号による吉原海岸の災害について, 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp. 206~213, 1967.