

風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究 (2)

—— 鉛直堤の越波におよぼす風の影響に関する実験 ——

岩 垣 雄 一*・井 上 雅 夫**・大 堀 晃 一***

1. 緒 言

石原・岩垣らは、10 年前より、海岸堤防、あるいは護岸の天端高を決定するにあたっては越波を許さないという考え方では天端高の非常に高い堤防かあるいは多量の消波ブロックが必要となり、その経費もばく大なものになるので、背後地の状況や堤防の構造、排水設備などにより、越波を差し支えない程度まで許容するという立場から、堤防の天端高を決めるべきであることを主張してきた¹⁾。しかしながら、実際の海岸堤防や護岸の天端高は、多くの場合、計画高潮位に計画波高から求められる波のうちあげ高を加え、さらに若干の余裕高を考慮する、という簡単な方法によって決められているのが現状であって^{2), 3)}、まだ特別な場合を除いては越波量にもとづいて堤防の天端高を決めるという段階には至っていないようである。このことは越波の現象が多くの要素に支配され、その機構がまだ十分究明されないでいることによるものと思われる。

海岸堤防の越波の研究は、1953 年、Saville らによって鉛直堤の実験が行なわれたのが最初であり⁴⁾、彼は 1955 年にも、種々の形状をした堤防の越波について実験を行なった⁵⁾。また、Sibul も傾斜堤を用いて、無風時の場合の実験を行なうとともに⁶⁾、1956 年には、越波量におよぼす風の影響を明らかにするために、勾配 1/10 の模型海浜上に、勾配 1/3 と 1/6 の模型堤防を設置し、送風機だけで起こした波による越波量を調べ、その結果と無風時の実験結果とを比較して、風による付加的な越波量を求め、堤防の傾斜角のゆるいほど風の影響が大きいことを明らかにした⁷⁾。さらに、1961 年、Paape は送風機によって、自然界の波に近い不規則波を起こし、その越波量と規則波による越波量とを比較し、波の不規則性によって越波量がかなり増加することを明らかにしたが、越波量におよぼす風の影響については明らかにしていない⁸⁾。

一方、わが国においても、前述したように 1955 年、石原・岩垣らは、海岸堤防の天端高の決定に際しては、背後地の重要性に応じて、ある程度の越波を許すような

方針をたてるべきであることを主張し¹⁾、鉛直堤や傾斜堤について、系統的に越波量の測定を行ない、実験結果の解析に際しては、従来用いられてきた越波量の無次元量とは異なる新しい無次元量を提案し、Saville らの実験結果^{5), 6)}をも、これにより統一して整理できることを明らかにした⁹⁾。さらに、著者らは、これらの実験結果を用いて、鉛直堤の越波量におよぼす風以外の諸要素の影響について検討を加え、海岸堤防設計の合理化に努めた^{10), 11)}。

このように、海岸堤防の越波の研究は、わが国や米国で行なわれた実験的研究がほとんどであり、無風時の場合については、かなりの成果をあげてきたが、越波量が問題となる台風時のような強い風が吹いている場合の越波については、これまでほとんど見るべき成果が得られていない。こうしたことから、著者らは、高速風洞水槽を用いて、海岸堤防の越波に関する研究を始め、その第 1 報として、高速風洞水槽の概要と鉛直堤の越波量におよぼす風の影響について、二、三の実験を行なった結果について述べたが¹²⁾、当時まだ実験施設の不完全さのために波形勾配と相対堤高との効果を分離することができなかった。さらに、その後、波の不規則性によっても越波量はかなり変動することがわかったので¹³⁾、まず波の不規則性をできるだけ除くことと、風の影響のみを簡単に分離できるよう風洞水槽を改造し、波が堤防を越える付近だけ風を吹かすようにして、いわゆる規則波の越波におよぼす風の影響を明らかにしようとした。

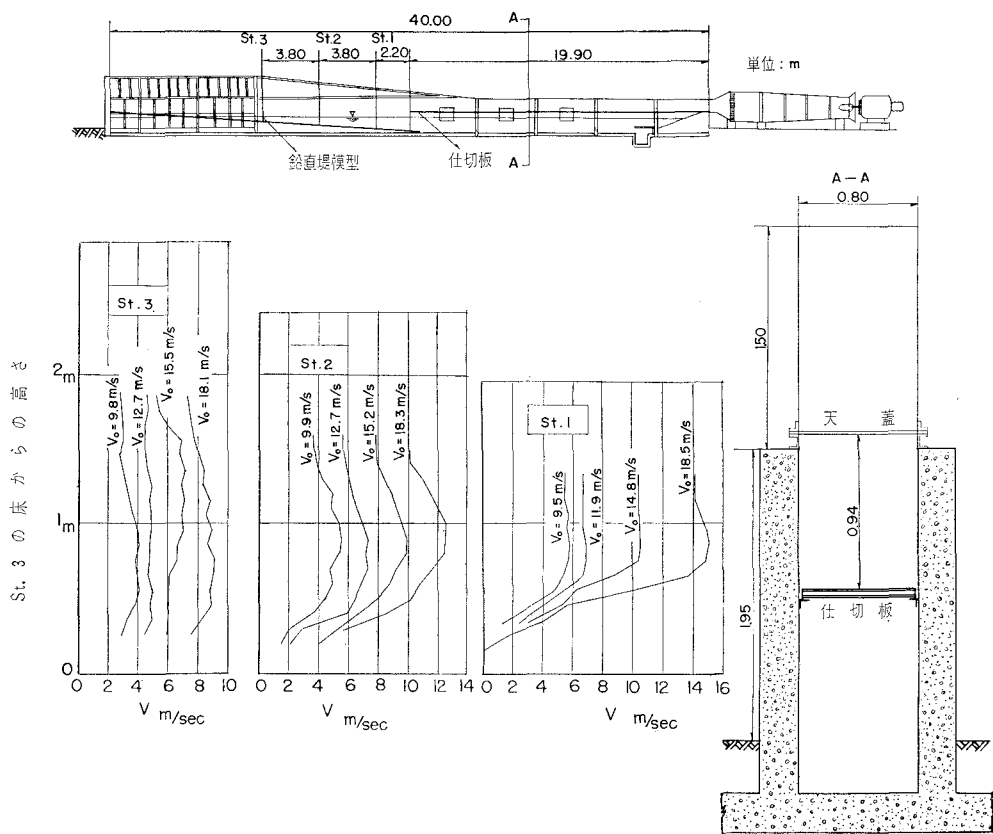
この論文は、こうした方針にもとづき、波形勾配が 0.01 と 0.02 の波について、これらの規則波が鉛直堤に衝突した場合、風の影響によって越波量がどの程度変動するかを定量的に調べた実験の結果を示し、さらに若干の考察を行なったものである。

2. 実験設備および実験方法

実験設備の高速風洞水槽は水槽部の長さ 40 m、幅 0.8 m、高さ 2.3~4.0 m であり、その一端には最大吹口風速 35 m/sec まで起こし得る 100 HP の送風機とピストン型の造波機が設置されている¹²⁾。また水槽の他端には勾配 1/15 の模型海浜があり、その上に鋼製の鉛直堤の模型をとりつけた。模型の幅については、模型を水槽の幅いっぱいにならず、水槽を模型設置付近だけ縦に二分し

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
 ** 正会員 京都大学助手 防災研究所
 *** 学生会員 京都大学大学院学生

図-1 高速風洞水槽内の風速分布の測定結果の一例



て片側の 30 cm の部分に設け、他の 50 cm の部分は入射波が堤防によって反射することなく、自由に消波装置のある奥の方まで進行できるようにした。このようにしたのは入射波高を正しく測定するためである。また、送風機で風を起こすと、造波機で起こした波に風が作用して波高を増大させると同時に波が不規則になる。著者らは、波の不規則性がかなり越波量に影響のあることを、由比海岸堤防の模型実験の結果など^{8), 13)} から知ったので、図-1 に示すように、高速風洞水槽を、風洞吹口の下面から水槽の幅 0.8 m 全体にわたり、長さ 20 m の区間だけアルミ板によって水平に仕切り、堤防の付近のみに風を吹かせ、越波量におよぼす風の直接的な影響を調べ得るようにした。さらに図-1 には、このような仕切り板を入れた場合の風洞水槽内の空水時の鉛直方向の風速分布を測定した例をも示してある。ここに、 V_0 は吹口風速である。模型堤防は風速がほぼ一樣になったと考えられる St. 3 に設置した。波高は電気抵抗線式波高計を用い、自動平衡型の記録計に自記させ、風速は、風洞吹口においてはピトー管とマノメーター、堤防前面ではピトー管を差圧計に連結させ、波高とともに自記させた。越波量は、堤防の背後に小さな水槽をとりつけ、これに入る水を風洞水槽外に導き、その量の多い場合には圧力計を利用して水位変化を知るようにした越波量測定

器で、また少ない場合にはメスシリンダーで直接測定した。また、風によって、飛沫となり落下する量をも測定するために、堤防の背後から 75 cm, 105 cm, 140 cm, 185 cm, 245 cm および 335 cm の位置にも小さな容器をとりつけた。

実験に用いる波は、周期 2.0 sec (沖波波長 624 cm) と決め、沖波波形勾配が 0.01 および 0.02 になるように沖波波高をそれぞれ 6.2 cm および 12.5 cm の 2 種類とした。

実験の方法は、まず、所定の波を造波機で起こし、風がない場合の越波量を測定し、ついで、堤防前面での風速が 10 m/sec までの風を数段階にわけて吹かせ、それぞれについて同じ測定をくり返した。なお、それぞれの波形勾配について、水深を 5 種類変え、またそれぞれの水深について堤防高さを 3~5 種類変えて実験を行なった。

3. 実験結果とその考察

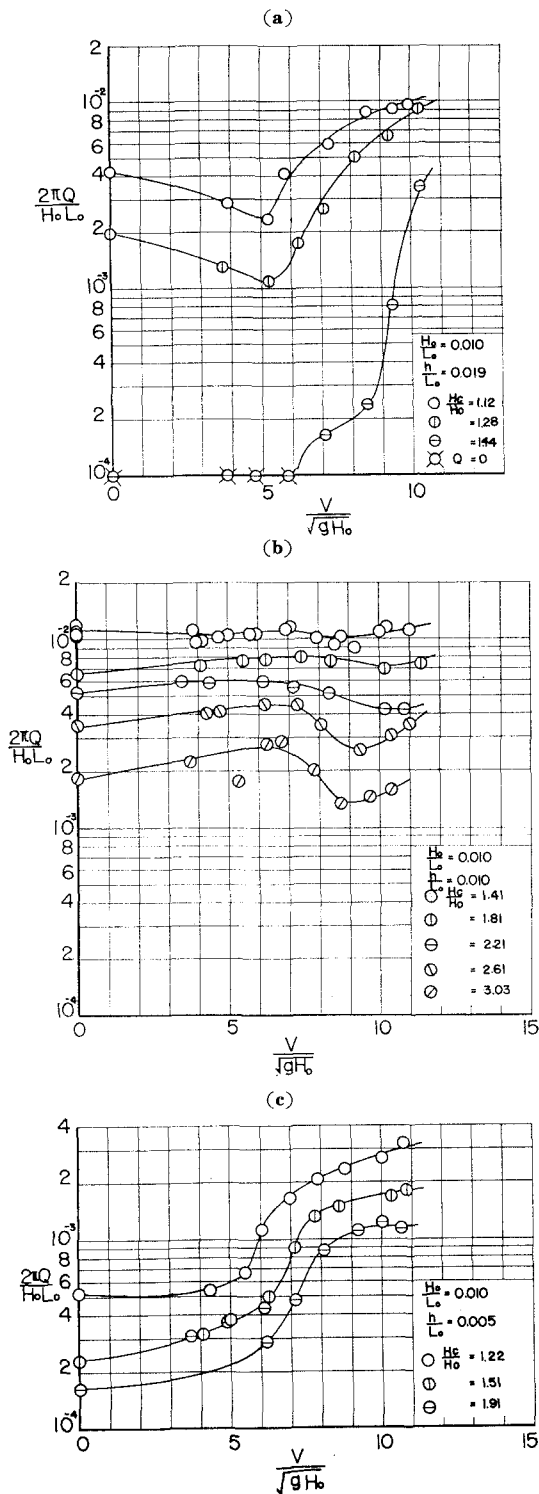
著者らは、さきに風波の場合の越波現象を次元解析し、つぎの関係、

$$2\pi Q/H_0 L_0 = F(H_0/L_0, H_c/H_0, h/L_0, V/\sqrt{gH_0})$$
を導いた¹²⁾。ここに、 Q は風をともなう場合の 1 周期単位幅当りの越波量、 H_0 および L_0 はそれぞれ沖波波高

および沖波波長, H_c は堤防の静水面上の高さ, h は堤防ののり先水深, V は風速, g は重力の加速度であり, $V/\sqrt{gH_c}$ は風速の影響を表す無次元量である。

図-2 (a), (b) および (c) は, 波形勾配 0.01 の場

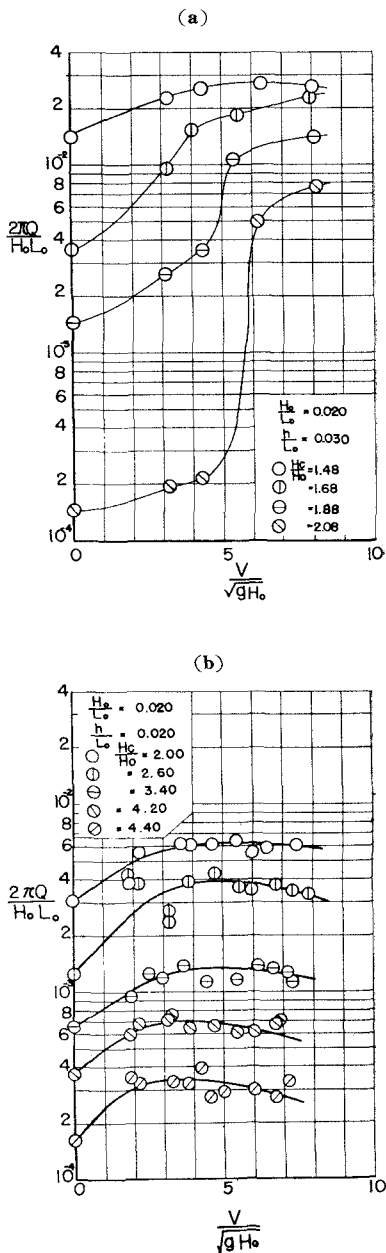
図-2 $2\pi Q/H_0 L_0$ と $V/\sqrt{gH_0}$ との関係
(波形勾配 0.01 の場合)

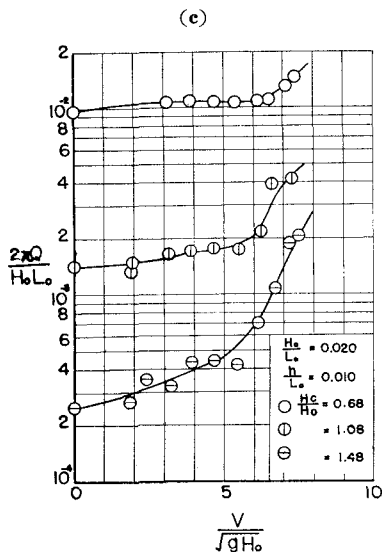


合について, 縦軸に越波量の無次元量 $2\pi Q/H_0 L_0$ を横軸に風速に関する無次元量 $V/\sqrt{gH_0}$ をとり, 比水深 h/L_0 ごとにまとめ, 相対堤高 H_c/H_0 をパラメーターとして, 越波量におよぼす風の影響を示したものである。

図-3 (a), (b) および (c) は波形勾配が 0.02 の場合について, 図-2 と同様に, 実験結果を示したものである。図-4 および 5 は, 図-2 および 3 にもとづいて, 無風時の越波量を基準にとり, 風だけによる越波量の増減分 Q_w の無次元量 $2\pi Q_w/H_0 L_0$ を縦軸に, 横軸には風速に関する無次元量 $V/\sqrt{gH_0}$ をとり, 風による越波

図-3 $2\pi Q/H_0 L_0$ と $V/\sqrt{gH_0}$ との関係
(波形勾配 0.02 の場合)

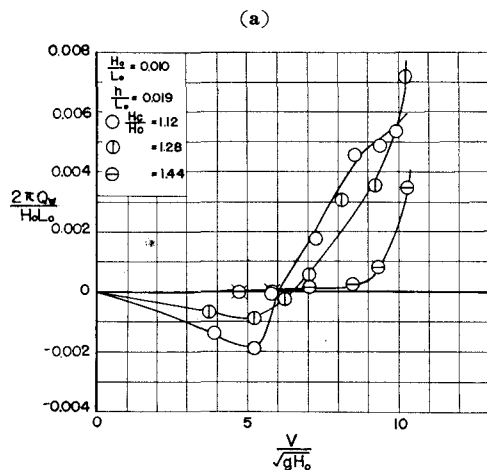




量の増減分の変化の仕方をより明らかに示したものであり、図-4 および 5 は、それぞれ波形勾配が 0.01 および 0.02 のものである。

まず、これらの図からわかるように、波形勾配が一定

図-4 $2\pi Q_w/H_0 L_0$ と $V/\sqrt{gH_0}$ との関係
(波形勾配 0.01 の場合)



(b)

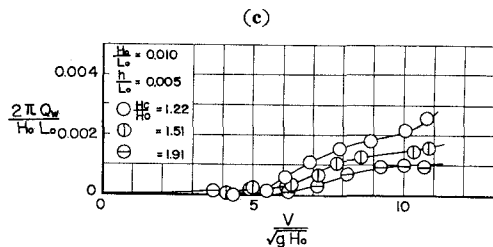
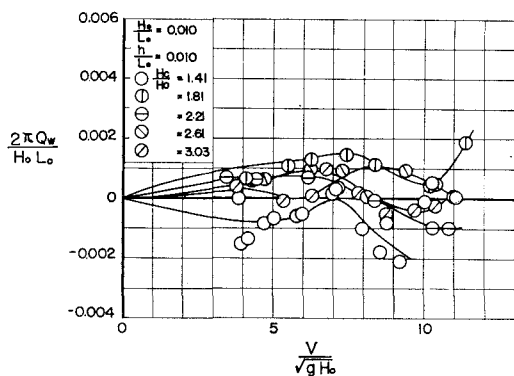
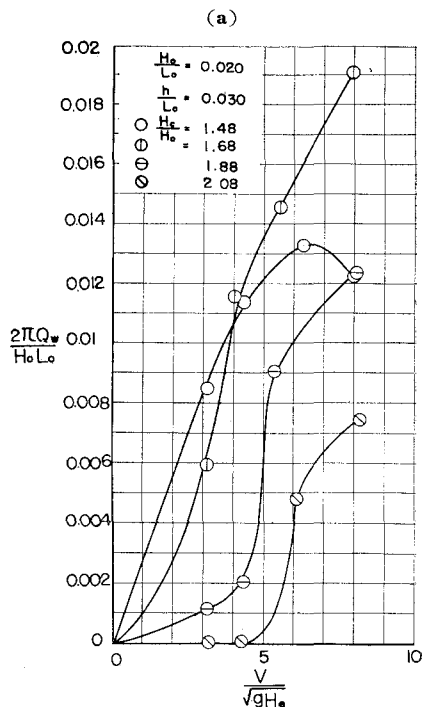
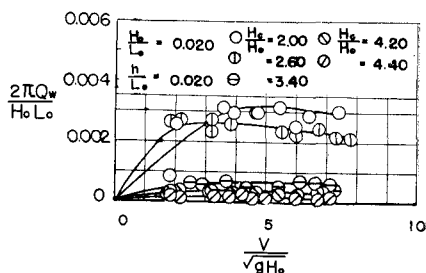


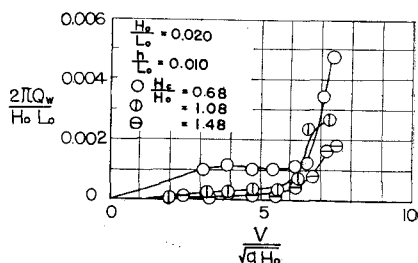
図-5 $2\pi Q_w/H_0 L_0$ と $V/\sqrt{gH_0}$ との関係
(波形勾配 0.02 の場合)



(b)



(c)



であっても、比水深 h/L_0 、あるいは相対堤高 H_c/H_0 の値によって越波量におよぼす風の影響の仕方はかなり違った傾向を示している。

すなわち、入射波高に比べ堤防のり先水深が深く、堤防前面で重複波が発生するような図-4(a) および 5(a) の場合には、 $V/\sqrt{gH_0}$ のある値を境として越波量は急激に増加し、その増加量も一般に多い。また、越波量が急激に増加するときの限界の $V/\sqrt{gH_0}$ の値は、相対堤高 H_c/H_0 の値によって若干異なるが、 H_0/L_0 の値が 0.01 の場合には、6~7、0.02 の場合には 3~5 であることがわかる。このことは、風の越波量におよぼす影響には二つの作用があり、一つは波動運動によって堤防より高くあがった水に、水平方向の速度を与え、後方に吹きとばす、いわゆる局所的な風の作用と、いま一つは堤防前面の波形を変え堤防より高くあがる水量そのものを変化させる作用とであり、風速の小さいときには前者の作用だけであるが、 $V/\sqrt{gH_0}$ がある値を越えると後者の作用が加わるために越波量が急増するものと考えられる。さらに、 H_0/L_0 の値が 0.01 の図-4(a) の場合で、風速が小さいときには、無風時の場合に比べてかえって越波量は減少している。このことは非常に興味深い現象であって、現象を観察した結果によると波形が風のために変形し、峰の部分が平らになることがわかったが、その詳細は明らかでない。

図-4(b) および 5(b) は、さきの場合より水深が浅く、入射波が堤防のり先で完全に砕け、飛沫を高くうちあげるような場合であり、堤防の天端より上にはねあがる水は小さな水滴となる。波形勾配が 0.01 の図-4(b) の場合には、越波量は風速の増加とともに複雑に変動し、はっきりした傾向を見出すことはできないが、風による越波量の変動の絶対値は小さい。また、波形勾配が 0.02 の図-5(b) の場合には、 $V/\sqrt{gH_0}$ の値が 2~3 で越波量は一定値に近づくようである。このことは前述したように、砕波した波は細かな水滴となり、小さな風速で、そのほとんどが越波するためである。図-4(b) および 5(b) において、風速が大きくなり $V/\sqrt{gH_0}$ の値が 5~7 を越えると、多くの場合に、越波量はわずかながら減少する傾向が見出される。これは堤防前面にうちあがった水滴が風のために、さらに小さな水滴となり、越波量の測定に際して、こうした小さな水滴まで捕えられなかったことに起因しているものと考えられる。

図-4(c) および 5(c) は、のり先水深がさらに浅く、入射波が堤防よりかなり沖側で砕けてから堤防に衝突する場合であって、前述した二つの場合とはかなり異なった傾向を示している。この場合、 $V/\sqrt{gH_0}$ の値がほぼ 6 以上にならないと風の影響

による越波量の顕著な増大は見られない。なお、実験の範囲内では、風による越波量の増加分の最大は、波が堤防前面で砕ける場合とほぼ同じ程度である。

以上、越波量におよぼす風の影響を実験結果にもとづいて述べたが、さらに詳細な検討を進めて、適確なものとしたい。

図-6 は、図-2 などから、風速に関する無次元量 $V/\sqrt{gH_0}$ の値を一定として、無次元越波量 $2\pi Q/H_0 L_0$ と相対堤高 H_c/H_0 との関係を、比水深 h/L_0 をパラメーターとして図示し、風が吹いている場合の越波量におよぼす堤防天端高さの効果を調べたもので、図-6 の (a) および (b) はそれぞれ波形勾配が 0.01 で、 $V/\sqrt{gH_0}$ の値が 3 および 7 の場合を示す。これらの図によると、風が吹いている場合についても、無風時のときの結果¹⁰⁾と同様に、堤防前面より沖の方で砕波するような波や、砕波しない堤防まで進行するような波に対しては堤防のかさ上げは効果的であるが、堤防前面付近で砕けるよう

図-6 $2\pi Q/H_0 L_0$ と H_c/H_0 との関係 (波形勾配 0.01 の場合)

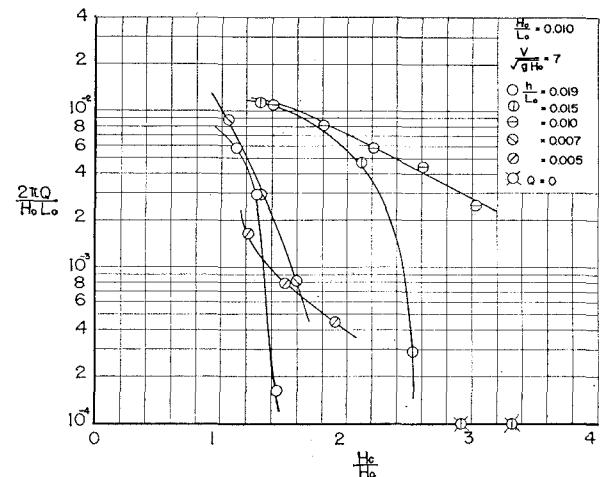
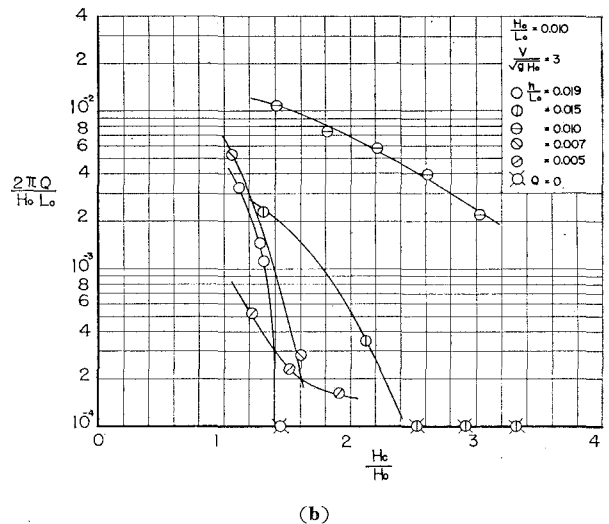
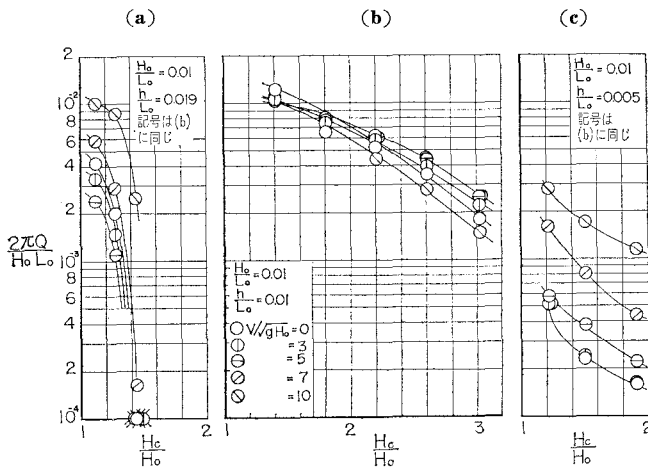


図-7 $V/\sqrt{gH_0}$ をパラメーターとした $2\pi Q/H_0L_0$ と H_c/H_0 との関係

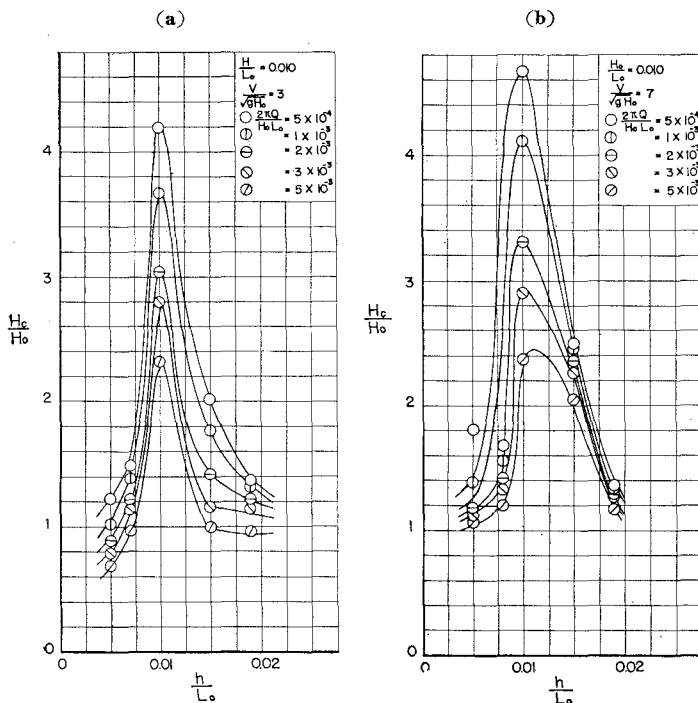
な波については、その効果があまり期待できないことがわかる。

図-7 は、図-2 から越波量におよぼす堤防天端高の効果が風速とともに、どのように変化するかを調べるために、 $V/\sqrt{gH_0}$ をパラメーターとして、無次元越波量 $2\pi Q/H_0L_0$ と相対堤高 H_c/H_0 との関係を示したもので、図-7の (a), (b) および (c) は図-2 の場合と同じである。入射波高に比べ、のり先水深が深い (a) の場合には、 H_c/H_0 の値が小さな 1.1~1.3 までの範囲についてしか議論できないが、 $V/\sqrt{gH_0}$ の値が7までは、越波量におよぼす堤防天端高の効果はほとんど同じ程度

である。しかし、 $V/\sqrt{gH_0}$ の値が10になると、その効果が若干劣ってくる。また、入射波が堤防前面で完全に砕ける (b) の場合には、 $V/\sqrt{gH_0}$ の値が 0~7 までは、 $V/\sqrt{gH_0}$ の増大とともにわずかながら、堤防の天端高の効果が劣ってくるようであるが、全般的に大きな相違は見られない。砕けた後の波が衝突する (c) の場合にも、越波量におよぼす堤防天端高の効果は風速とともに顕著に変わることはないようである。

さらに、図-8 は図-6 などから、無次元越波量 $2\pi Q/H_0L_0$ をパラメーターとして、相対堤高 H_c/H_0 と比水深 h/L_0 との関係を示したもので、図の (a) および (b)

は図-6 の場合と同じである。これらの図によると、越波量が最大となるのは、やはり、無風時のときと同様、堤防前面よりやや沖側で砕ける場合である。また図中の曲線は、実験資料が少ないため、適確なものではないが、波形勾配が 0.01 の場合の $2\pi Q/H_0L_0$ の値を一定とした曲線の勾配は、風速の増加とともにややゆるくなるようである。したがって、台風時のように風速が大きいときには、無風時の場合に比べ、のり先水深の広い範囲にわたって越波量が多いということがいえる。このことは、実際の問題としては危険な結果を招くものとして考えられる。

図-8 H_c/H_0 と h/L_0 との関係 (波形勾配 0.01 の場合)

以上、鉛直堤の越波量におよぼす風の影響を波の特性、堤防の高さおよびのり先水深などの関係において調べてきたが、今後はこうした検討をさらに進めていくとともに、実際問題としても重要な越波量の距離的分布、あるいは飛散距離について考察を行なっていきたい。

4. 結 語

以上、著者らは海岸堤防を設計するには、越波量を適確に推定することが重要であって、そのためには、従来、未知の問題であった越波量におよぼす風の影響を明らかにしなければならないことを述べ、高速風洞水槽を用いて、鉛直堤を対象とした海岸堤防の越波に関する実験を行ない、越波量におよぼす風の直接的な影響を調べ、得られた二、三の重要な結果を示した。とくに、波形勾配が一定の波であっても、堤防ののり先水深によって、越波量におよぼす風の影響が非常に異なることは、興味深いことであり、こ

のことは、海岸堤防の天端高さの決定をいっそう慎重に行なわねばならないことを示している。なお、ここで得られた結果は、鉛直堤について、波形勾配が 0.01 および 0.02 の場合だけであり、まだ十分なものとはいえない。今後はこうした実験をさらに多くの場合について系統的に行ない、海岸堤防の合理的設計のための基礎資料とし、越波現象の機構解明への手がかりとしていきたい。

最後に、この研究を行なうにあたり有益な討議をしていただいた京都大学土屋義人助教授、および実験や資料整理に助力していただいた、KK 大林組の山岡礼三氏や海岸災害研究室の諸氏に謝意を表するとともに、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明記して謝意を表する。

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) 日本港湾協会：港湾工事設計要覧，昭 34.6, pp. 42-43.
- 3) 日本港湾協会他：海岸保全施設築造基準解説，昭 35.1, pp. 62-72.
- 4) Saville, T. Jr. and J.M. Caldwell: Experimental Study of Wave Overtopping on Shore Structures, Proc. of Minnesota Intern. Hydraulics Convention,

1953, pp. 261-269.

- 5) Saville, T. Jr.: Laboratory Data on Wave Run-up and Overtopping on Shore Structures, B.E.B. Tech. Memo. No. 64, 1955, pp. 1-32.
- 6) Sibul, O.J.: Flow over Reefs and Structures by Wave Action, Trans. A.G.U. Vol. 36, No. 1, 1955, pp. 61-71.
- 7) Sibul, O.J. and E.G. Tickner: Model Study of Overtopping of Wind Generated Waves on Levees with Slopes of 1:3 and 1:6, B.E.B.Tech. Memo. No. 80, 1956, pp. 1-27.
- 8) Paae, A.: Experimental Data on the Overtopping of Seawalls by Waves, Proc. of 7th Conf. on Coastal Engineering, Vol. 2, 1961, pp. 674-681.
- 9) 石原藤次郎・岩垣雄一・三井 宏：海岸堤防の越波防止効果について，第4回海岸工学講演会講演集，昭 32.11, pp. 99-109.
- 10) 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，京都大学防災研究所年報，第7号，昭 39.3, pp. 387-399.
- 11) 岩垣雄一・島 昭・井上雅夫：波高と潮位が越波と波のうちあげにおよぼす影響，第11回海岸工学講演会講演集，昭 39.11, pp. 253-259.
- 12) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫：風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究(1)，第9回海岸工学講演会講演集，昭 37.10, pp. 153-158.
- 13) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫：由比海岸堤防の越波に関する模型実験，第10回海岸工学講演会講演集，昭 38. 10, pp. 132-137.