

海岸堤防の越波に及ぼす風の影響に関する研究（第2報）

岩 垣 雄 一・井 上 雅 夫・大 堀 晃 一

STUDIES ON THE EFFECT OF WIND ON WAVE OVERTOPPING ON SEAWALLS (SECOND REPORT)

by Yuichi IWAGAKI, Masao INOUE and Kouichi OHORI

Synopsis

This paper is the second report of the studies to clear the effect of wind on wave overtopping quantitatively, in which the experimental results of wave overtopping on vertical seawalls by a high-speed wind-wave tunnel are described for the wave steepnesses of 0.01 and 0.02.

The main results obtained from the experiments are summarized as follows.

1) When incident waves do not break in front of the seawall, the quantity of wave overtopping begins to increase suddenly with increase in the wind velocity at a certain wind velocity. The increasing segment of quantity of wave overtopping by wind is considerable compared with in other cases.

2) When incident waves break just in front of the seawall, the quantity of wave overtopping changes complicatedly with increase in the wind velocity for the wave steepness of 0.01, and it becomes approximately constant over a low wind velocity for the wave steepness of 0.02.

3) When incident waves break before they reach the seawall, the effect of wind on wave overtopping is not remarkable, and especially, as the seawall is constructed at the shoreline or on shore, the quantity of wave overtopping rather decreases a little at a high wind velocity.

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、越波を絶対に許さないという考え方では天端高の非常に高い堤防が多量の消波ブロックが必要となり、その経費も莫大なものになるので、背後地の状況や堤防の構造、排水施設などにより、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のようであるが^{2) 3)}、1959年の伊勢湾台風、あるいは、1961年の第二室戸台風によって、伊勢湾や大阪湾の沿岸各地が、また、最近では台風6420号や6523号によって西神戸の海岸地帯が、越波のため大きな災害を被ったわけである。このようなことから、最近では越波量にもとづいた海岸堤防の設計が次第に実施されるようになってきたが、越波については未知の点が多く、とくに越波に及ぼす風の影響については、これまで、二、三の研究^{4) 5)}が行なわれているのみで、まだ見るべき成果は得られていない。

著者らは、昨年、こうした研究の第1報として、海岸堤防の越波に及ぼす風の影響を調べるため、まず、

鉛直堤に波形勾配が0.02の波が衝突した場合について実験を行ない、風の影響によって越波量がどの程度変動するかを明らかにした⁶⁾。

この論文は第2報として、その後、波形勾配 0.01 の波について同様な実験を行なうとともに、波形勾配 0.02 の波については、実際の海岸にもよく見られるような堤防が汀線、あるいは、汀線より陸側に設置された場合についても実験を追加し、二、三の興味ある結果を得たので、それらを合せて示し、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

実験設備および実験方法は、第1報の場合と同じであるが、簡単にその概要を述べる。

実験に用いた高速風洞水槽は、長さ 40 m、幅 0.8 m、高さ 2.3~4.0 m の水槽部をもち、その一端には最大吹口風速 35 m/sec まで起こしうる送風機とピストン型の造波機が設置されている⁷⁾。また水槽の他端には勾配 γ_5 の模型海浜があり、その上に鋼製の鉛直堤模型をとりつけた。模型の幅は 30 cm とし、残りの 50 cm の部分で入射波を測定したこと、また、造波機で起こした波に風が作用して波高が増大したり、波が不規則にならないように、風洞吹口の下面から約 20 m の区間をアルミ板によって仕切り、堤防の波が越える部分だけ風が吹くようにしたことなどは第1報の場合と同じである。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、その量が多い場合には圧力計を利用し水位変化を知るようにした越波量測定器によって、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水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 の位置にも小さな越波量測定容器をとりつけた。

実験に用いた波は、周期 2.0 sec (沖波波長 624 cm) で、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決め、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、各波形勾配について、水深を 8 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

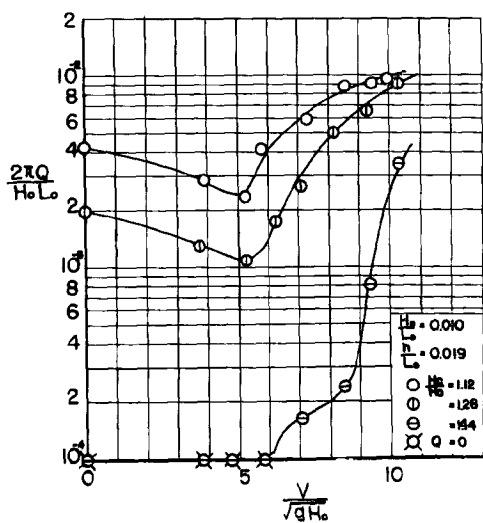
著者らは、さきに風波の場合の越波現象を次元解析し、つぎの関係

$$2\pi Q/H_0 L_0 = F(H_0/L_0, H_c/H_0, h/L_0, V/\sqrt{gH_0})$$

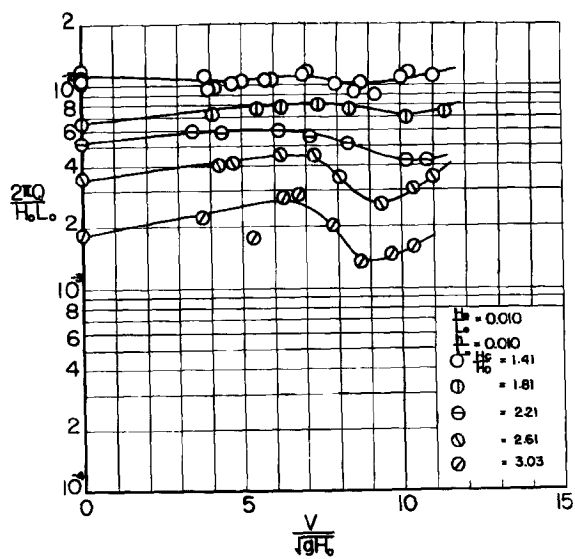
を導いた⁷⁾。ここに、 Q は風をともなう場合の1周期単位幅当りの越波量、 H_0 および L_0 はそれぞれ沖波波高および沖波波長、 H_c は堤防の静水面からの天端高さ、 h は堤防の法先水深、 V は風速、 g は重力の加速度であり、 $V/\sqrt{gH_0}$ は風速の影響を表わす無次元量である。

Fig. 1 (a), (b), (c), (d), (e) および (f) は、波形勾配 0.01 の場合について、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、越波量に及ぼす風の影響を示したものである。Fig. 2 (a), (b), (c), (d), (e) および (f) は波形勾配が 0.02 の場合について、Fig. 1 と同様に実験結果を示したものである。Fig. 3 および 4 は、それぞれ Fig. 1 および 2 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加分 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、風による越波量の増加分の変化の仕方をより明らかに示したものである。

まず、これらの図からわかるように、波形勾配が一定であっても、比水深 h/L_0 あるいは相対堤高 H_c/H_0

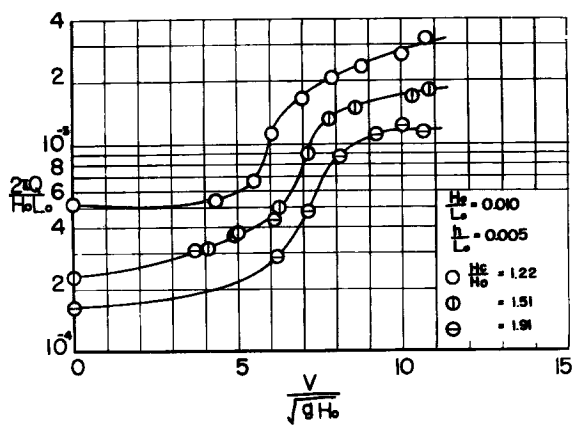


(a)

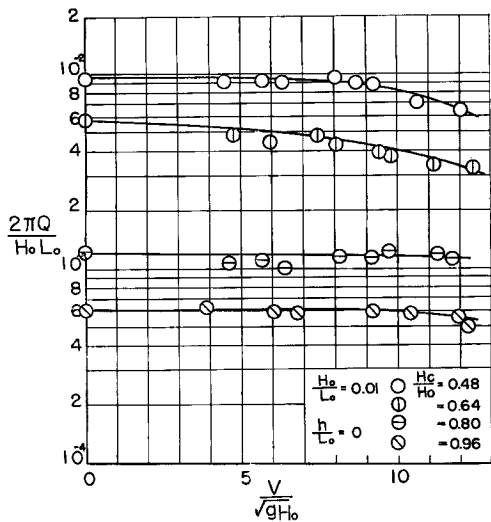


(b)

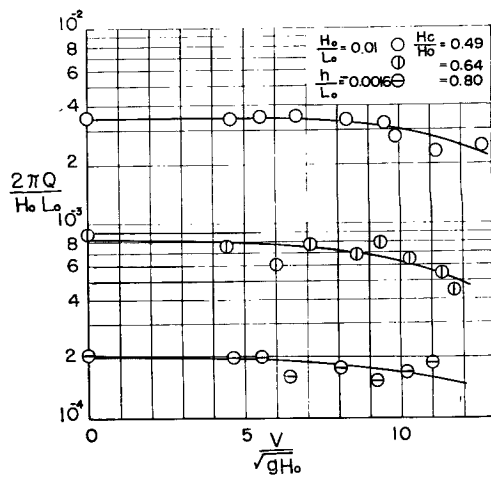
Fig. 1 Effect of wind on rate of wave overtopping for the case of $H_0/L_0=0.01$.



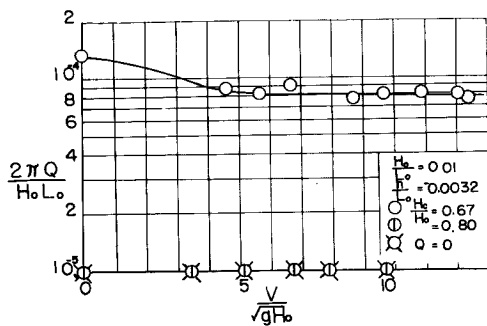
(c)



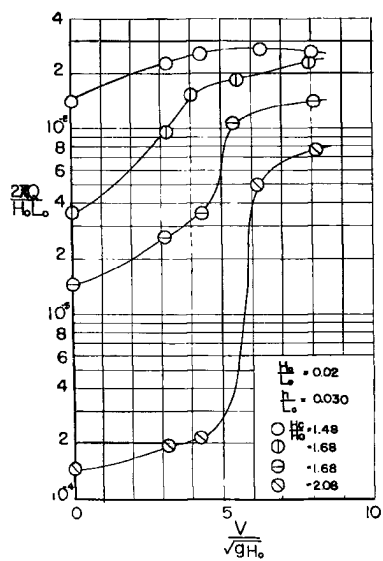
(d)



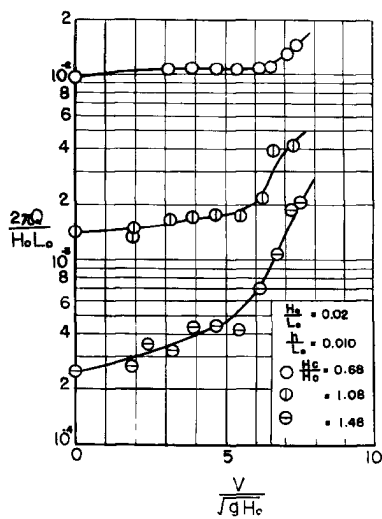
(e)



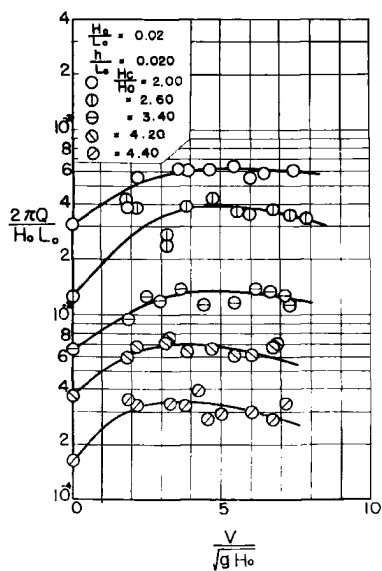
(f)



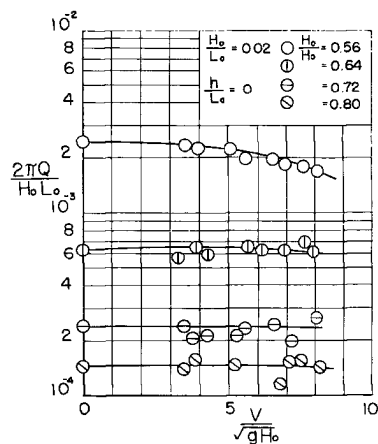
(a)



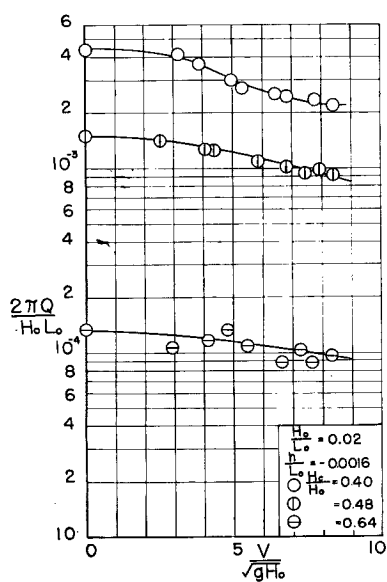
(c)



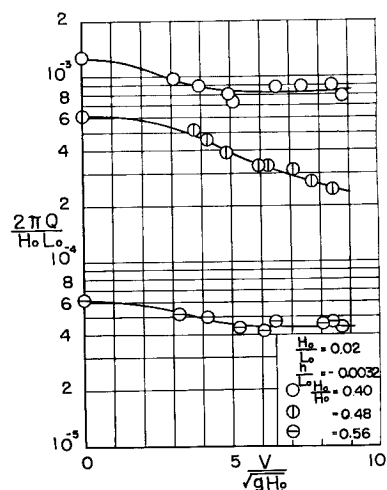
(b)



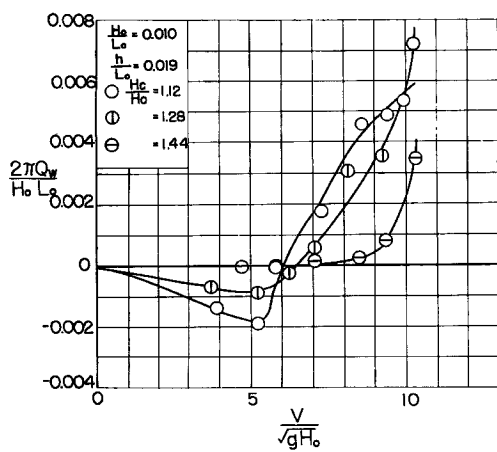
(d)



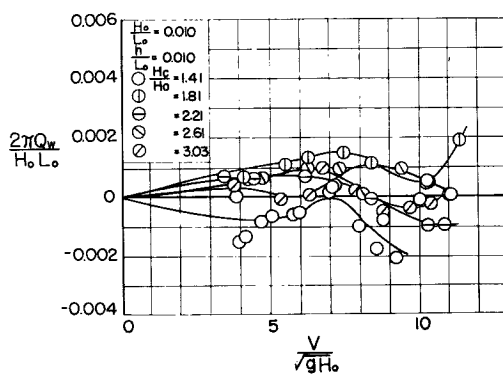
(e)



(f)

Fig. 2 Effect of wind on rate of wave overtopping for the case of $H_0/L_0=0.02$.

(a)



(b)

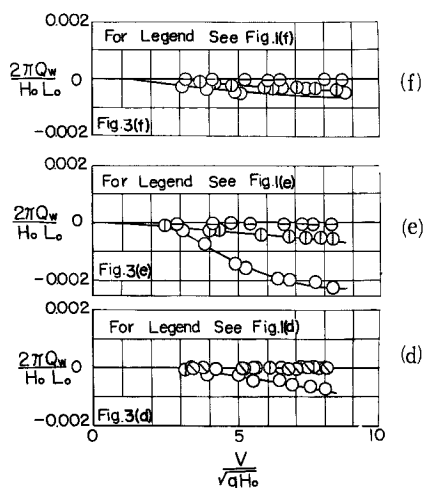
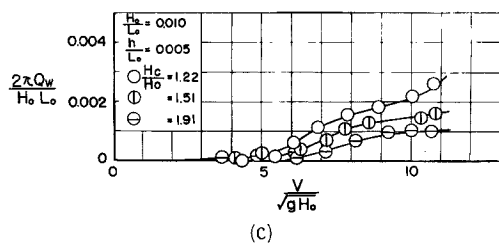
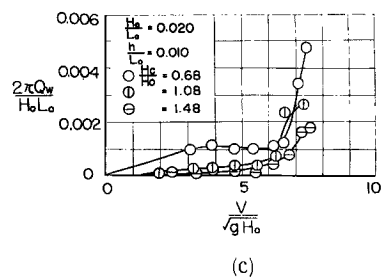
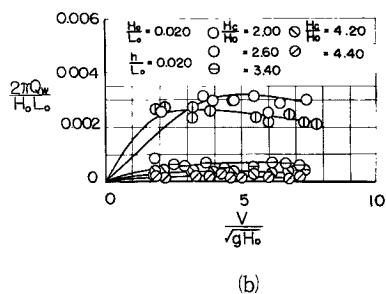
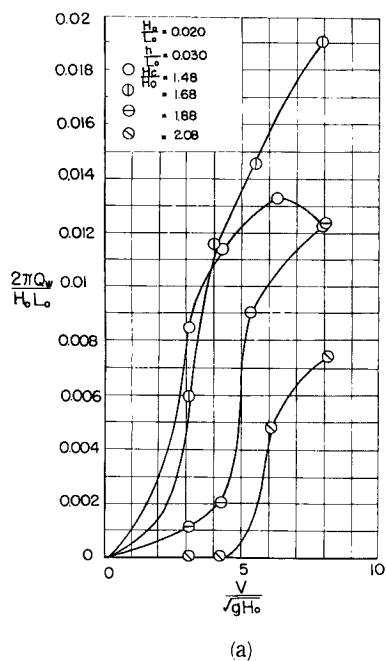


Fig. 3 Relation between increasing segment of rate of wave overtopping by wind $2\pi Q_w/H_0 L_0$ and $V/\sqrt{gH_0}$ with a parameter of H_c/H_0 for the case of $H_0/L_0=0.01$.



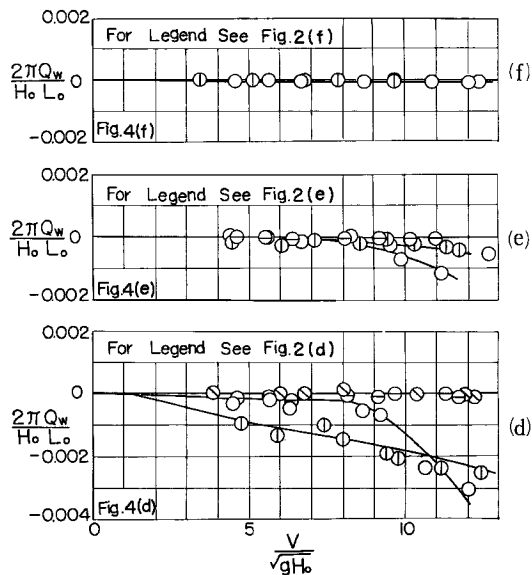


Fig. 4 Relation between increasing segment of rate of wave overtopping by wind $2\pi Q_w/H_0 L_0$ and $V/\sqrt{gH_0}$ with a parameter of H_c/H_0 for the case of $H_0/L_0=0.02$.

の値によって越波量に及ぼす風の影響の仕方はかなり違った傾向を示している。

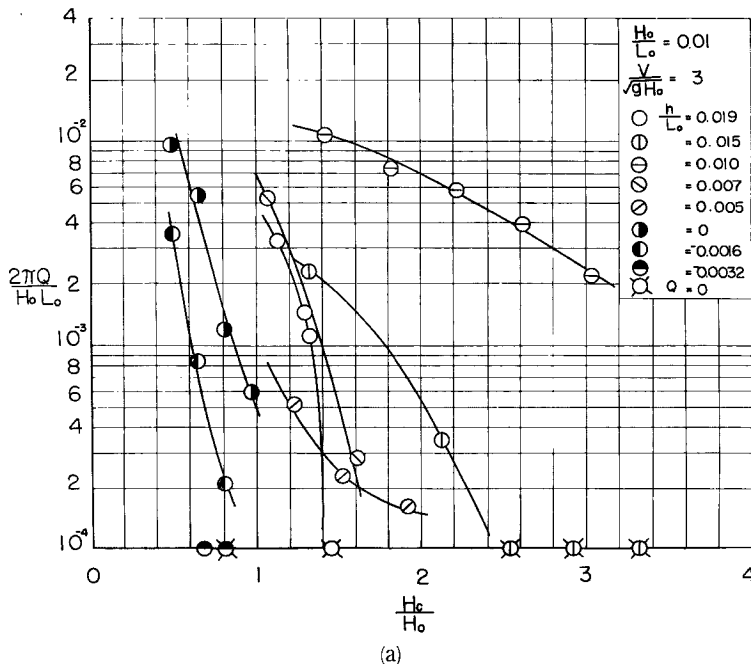
すなわち、入射波高に比べ堤防の法先水深が深く、堤防前面で重複波が発生するような Fig. 3 (a) および 4 (a) の場合には、 $V/\sqrt{gH_0}$ のある値を境として越波量は急激に増加し、その増加量も一般に多い。また、越波量が急激に増加するときの限界の $V/\sqrt{gH_0}$ の値は、相対堤高 H_c/H_0 の値によって若干異なるが、 H_0/L_0 の値が 0.01 の場合には、6～7、0.02 の場合には 3～5 であることがわかる。このことは、第 1 報で述べたように、風の越波量に及ぼす影響には二つの作用があり、一つは波動運動によって堤防より高くあがった水に、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 Fig. 3 (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、実験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。

Fig. 3 (b) および 4 (b) は、さきの場合より水深が浅く、入射波が堤防の法先で完全に砕け、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 Fig. 3 (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 Fig. 4 (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ろう。Fig. 3 (b) および 4 (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によって、さらに小さな水滴となるため、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。

Fig. 3 (c) および 4 (c) は、法先水深がさらに浅く、入射波が堤防よ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。さらに、Fig. 3 (d) および 4 (d) は、堤防が汀線に、また、Fig. 3 (e) と 4 (e)、ならびに 3 (f) と 4 (f) は汀線より陸側に設置され、砕けた波が模型海浜上を遡上し、堤防に衝突するような場合である。これらは、波形勾配が 0.01 の Fig. 3、あるいは、波形勾配が 0.02 の Fig. 4 のいずれの場合にも、風速が大きくなると越波量はかえって減少する傾向が見られ、この傾向は同一の比水深 h/L_0 のものについては、 H_c/H_0 の値が小さく、越波量が多いものほど顕著である。このことは、実験の観察によれば、風速が大きくなると、砕波する際に、あるいは、砕波した後、模型海浜上を遡上する際に、波の峰の部分部分が風によって攪乱され、エネルギーを失って堤防への衝突の仕方が弱まることに起因しているように考えられる。なお、このような場合には、越波した水は、風速が大きくなっても堤防背後 50 cm の小水槽内に落下し、越波量の距離的な分布についても、風の影響があまりないことが考えられるが、こうしたことについては別の機会に報告したい。

以上、越波量に及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。

Fig. 5 は、Fig. 1 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及ぼす堤防天端高さの効果を調べたもので、同図 (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、無風時の結果^{8) 9)} と同様に、堤防前面より沖の方で砕波するような波や、砕波しないで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。



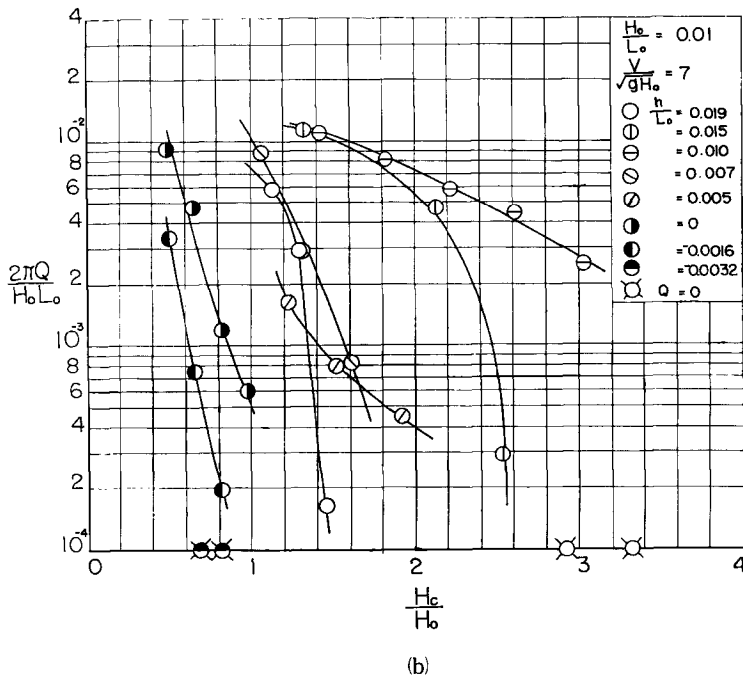


Fig. 5 Relation between rate of wave overtopping $2\pi Q/H_0 L_0$ and relative height of the wall H_c/H_0 with a parameter of h/L_0 for the case of $H_0/L_0=0.01$.

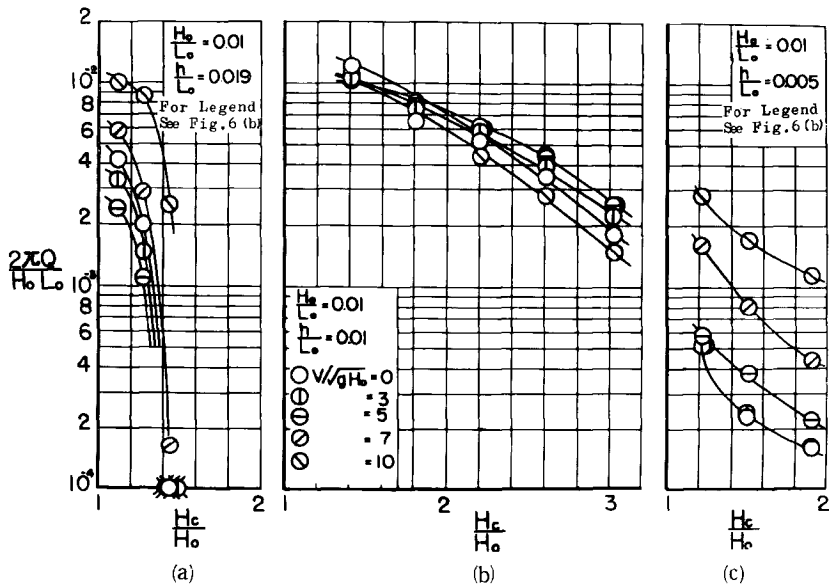
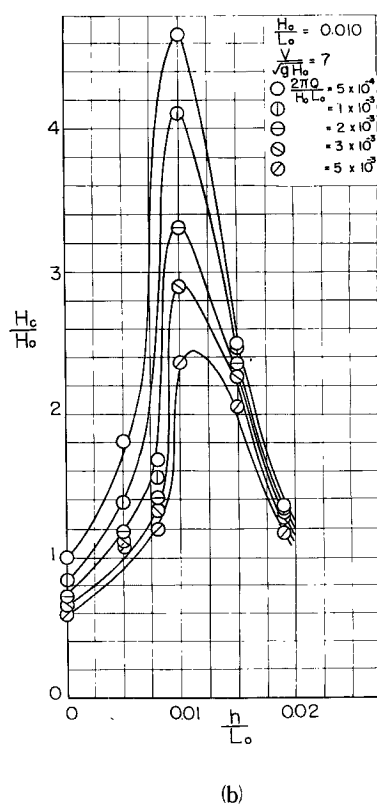
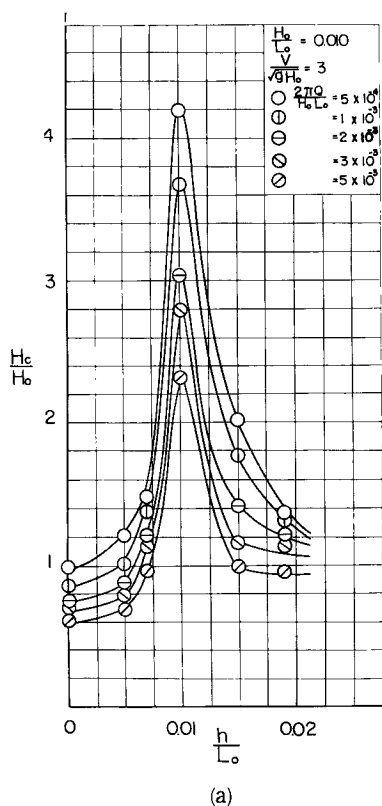


Fig. 6 Relation between rate of wave overtopping $2\pi Q/H_0 L_0$ and relative height of the wall H_c/H_0 with a parameter of $V/\sqrt{gH_0}$ for the case of $H_0/L_0=0.01$.

Fig. 6 は、**Fig. 1** から越波量に及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 $2\pi Q/H_0 L_0$ と相対堤高 H_c/H_0 との関係を示したもので、**Fig. 6** (a), (b) および (c) は **Fig. 1** の場合と同じである。入射波高に比べ、法先水深が深い (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、越波量に及ぼす堤防天端高の効果は無風時のときと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、越波量に及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。

Fig. 7 は **Fig. 5** などから、無次元越波量 $2\pi Q/H_0 L_0$ 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ある。**Fig. 7** (a) および (b) は **Fig. 5** (a) および (b) に対応し、**Fig. 7** (c) および (d) は、それぞれ (a) および (b) のときの h/L_0 の値が 0 よりも小さく、結局、堤防が汀線より陸側にある場合について横軸を 5 倍にひきのばして描いたものである。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^{8) 9)} と同様、堤防前面よりやや沖側で砕ける場合である。また、越波量に及ぼす法先水深の影響については、越波量が多い砕波点付近と、砕波した波が海浜上でエネルギーを失いながら遡上するような h/L_0 の値が負の場合が顕著である。さらに、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 $2\pi Q/H_0 L_0$ 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、法先水深の広い範囲にわたって越波量が多いということになる。このことは、実際問題としては危険な結果を



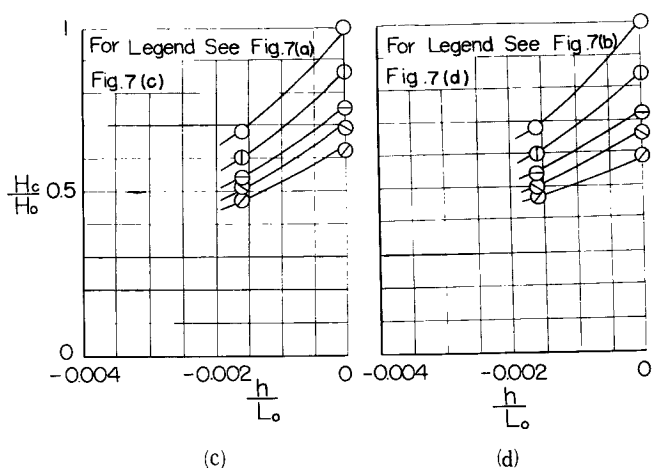


Fig. 7 Relation between relative height of wall H_c/H_0 and relative water depth h/L_0 with a parameter of $2\pi Q/H_0 L_0$ for the case of $H_0/L_0=0.01$.

招くものといえる。

以上、鉛直堤の越波量に及ぼす風の影響を波の特性、堤防の高さおよび法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、この論文では、第1報に引き続いて、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、越波量に及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、堤防の法先水深によって、越波量に及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、また、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、これまでに得られた結果は、鉛直堤に波形勾配0.01および0.02の波が衝突した場合のみであって、まだ十分なものではない。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するとともに、越波現象の機構解明への手がかりとしたい。

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(当時学部学生)の山岡礼三氏、学部学生太田隆義君、海岸災害研究室の平井正雄君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) 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.
- 5) Paape, A. : Experimental Data on the Overtopping of Seawalls by Waves, Proc. of 7th. Conf. on Coastal Engineering, Vol. 2, 1961, pp. 674~681.
 - 6) 岩垣雄一, 土屋義人, 井上雅夫：海岸堤防の越波に及ぼす風の影響に関する研究（第1報）, 京都大学防災研究所年報, 第8号, 昭40. 3, pp. 397~406.
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.