

海岸堤防の越波に及ぼす風の影響 に関する研究（第1報）

岩 垣 雄 一・土 屋 義 人・井 上 雅 夫

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

By Yuichi IWAGAKI, Yoshito TSUCHIYA and Masao INOUE

Synopsis

In designing seawalls and seadikes, it is very important to estimate the quantity of water overtopping on them as exactly as possible. The estimation, however, is difficult because of complicated phenomena of wave overtopping, especially the effect of wind on wave overtopping is unknown entirely.

From this view point, the authors have begun the study to clear the effect of wind on wave overtopping quantitatively. As the first step of the study, the present paper describes the experimental results of wave overtopping on vertical seawalls for the wave steepness of 0.02, accompanied with wind created by a high-speed wind-wave tunnel, which is 0.8 m wide, 2.3 m to 4.0 m deep and 40 m long, having a blower of 100 HP and a wave generator of submerged piston type with a motor of 10 HP.

1. 緒 言

海岸堤防、あるいは護岸の天端高の決定に際しては、越波量を適確に推定し、背後地の状況や堤防の構造、排水設備などから越波量をどの程度まで許容することができるかを決定して、堤防の天端高を決める方法が合理的である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プラスするという簡単な方法によって決められるのが現状であって^{2),3)}、越波量にもとづいて堤防の天端高を決定する段階には至っていない。このことは越波の現象が多く要素に支配され、その機構がまったく未知のまま究明されないで放置されていることによるものと思われる。このようなことから、著者らは海岸堤防や護岸の基本的な形状である単純な鉛直堤の場合について、従来の実験結果⁴⁾を用い、越波量に及ぼす諸要素の影響を考察して、越波の現象をある程度明らかにすることができた⁵⁾。しかし越波量が問題となるのは多くの場合、台風来襲時であって、越波量に及ぼす風の影響は見のがすことのできない重要な要素の一つであるといえる。しかしながら、従来の越波に関する研究は、ほとんど風を考慮していない^{6),7),8)}。また風波を対象とした研究でも^{9),10),11)}越波量に及ぼす風の効果を分離し評価しているものはない。また最近の運輸省の海岸堤防の天端高を決定する方法¹²⁾においては、風の影響は無視するように示されている。こうしたことから、著者らは鉛直堤の越波量に及ぼす風の影響について、二、三の実験を行なったが¹³⁾、それらの結果では波形勾配と相対提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¹⁴⁾、著者らは波の不規則性をできるだけ除くために風洞水槽を改造して、波が堤防を越える部分だけ風を吹かすようにし、越波量に及ぼす風の直接的な影響を明らかにする研究を始めた。この論文は、こうし

た方針にもとづく研究の第1報であって、まず、鉛直堤に波形勾配 0.02 の波が衝突した場合、風の影響がどの程度のものであるかを調べるために行なった実験結果を示し、それに若干の考察を加えたものである。

2. 風を与えない場合の鉛直堤の越波に関する実験

越波量に及ぼす風の影響を調べるには、まず、無風時の越波量を測定しておかなければならない。ここでは、風がない場合の鉛直堤の越波に関する一連の実験結果について述べよう。

(1) 実験設備および実験方法

実験に用いた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¹³⁾。また水路の他端には勾配 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、水槽の幅いっぱいにならず、水槽を模型設置付近だけを縦に二分して片側の 30 cm 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。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、マーカーによって越波量を測定したときの入射波高を区別するようにした。越波量の測定は、堤防の背後で、一定幅の容器により越えた水を直接受け、その水量をメスシリンダーで計測した。実験に用いた波は周期 2.0 sec (沖波波長 624 cm) と決め、沖波波形勾配が 0.03, 0.02 および 0.01 になるように沖波波高をそれぞれ 18.7 cm, 12.5 cm および 6.2 cm の3種類とした。実験は、まず水深を一定にし、所定の周期および波高の波を造波機によって起こし、波が十分定常になってから越波量を測定し、順次堤防高をあげて同様な測定をくり返し、波が越えなくなるまで行なった。なお、それぞれの波形勾配の波について、水深を 6~7 種類変えて実験を行なった。

(2) 実験結果とその考察

実験結果を述べるまえに波が鉛直堤を越える状況について簡単に述べよう。まず、越波の状況は二つの形式に大きくわけることができる。すなわち、入射波高に比べ、法先水深が浅く波が砕けてから堤防に当たる場合と、法先水深が深く波が砕けずに当たる場合とである。前者の場合には、砕けながら堤防に当たるとさらに沖側で砕けてしまい、エネルギーを消費しながら進行して堤防に当たる場合があり、砕けながら堤防に当たる場合には激しい衝撃とともに飛沫を高くうちあげる。また、波が砕けない場合には、堤防前面で重複波が発生するが、堤防前面の水深がやや浅いときには、局所的な遡上の現象がおこり、薄い水膜となっかなり高くまでは上る場合がある。このように波高が一定でも、堤防の法先水深によってその現象が大きく変化する。このようなことから実験では前述したように水深を 6~7 種類変えることにした。なお、ここで用いる記号を一括して説明すると、 H_0 および L_0 はそれぞれ沖波波高および沖波波長、 h は堤防の法先水深、 H_c は堤防の静水面上の高さ、 Q_0 は無風時の1周期単位幅当りの越波量、 $H_0 L_0 / 2\pi$ は沖波1周期単位幅当たりに輸送される水量である。

実験結果は石原・岩垣らの研究¹⁵⁾と同様な方法によって整理した。**Fig. 1 (a), (b) および (c)** は沖波波形勾配がそれぞれ 0.03, 0.02 および 0.01 の場合の無次元越波量 $2\pi Q_0 / H_0 L_0$ と相対堤高 H_c / H_0 との関係を示す。なお、**Fig. 1 (b)** において◎印で点描した実験値は、後述する風を与えた場合の実験に伴って行なったものであり、両者の間には若干の違いがあるが、風の影響を調べる場合にはこの実験値を基準とした。**Fig. 2 (a), (b) および (c)** は **Fig. 1** から $2\pi Q_0 / H_0 L_0$ の値を一定とし、 H_c / H_0 と h / L_0 の値を沖波波形勾配 0.03, 0.02 および 0.01 について整理しなおしたものである。**Fig. 2 (a)** には、石原・岩垣ら¹⁵⁾や Beach Erosion Board⁶⁾ における実験結果も点描してあるが、これらの値に比べると、著者らの実験結果はかなり越波量が少なく、とくに砕波水深より浅い場合にこの傾向が著しい。このことは、著者らの実験が前浜勾配 1/15 で行なわれたのに対し、他の実験は前浜勾配 1/10 であり、砕けた波が堤防に衝突する場合に、とくに前浜勾配の影響が大きいものと考えら

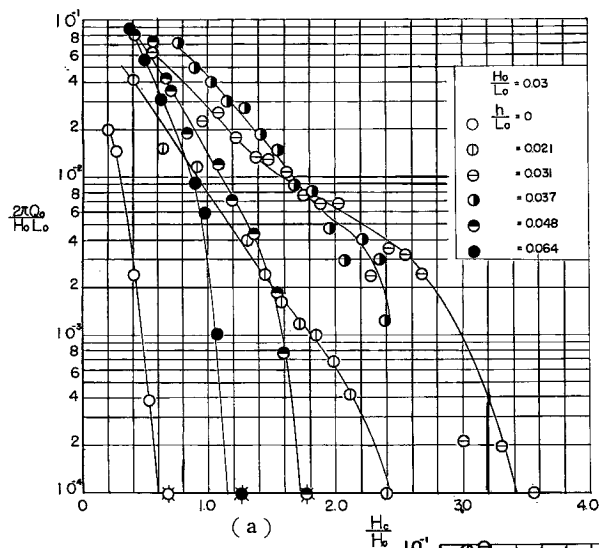
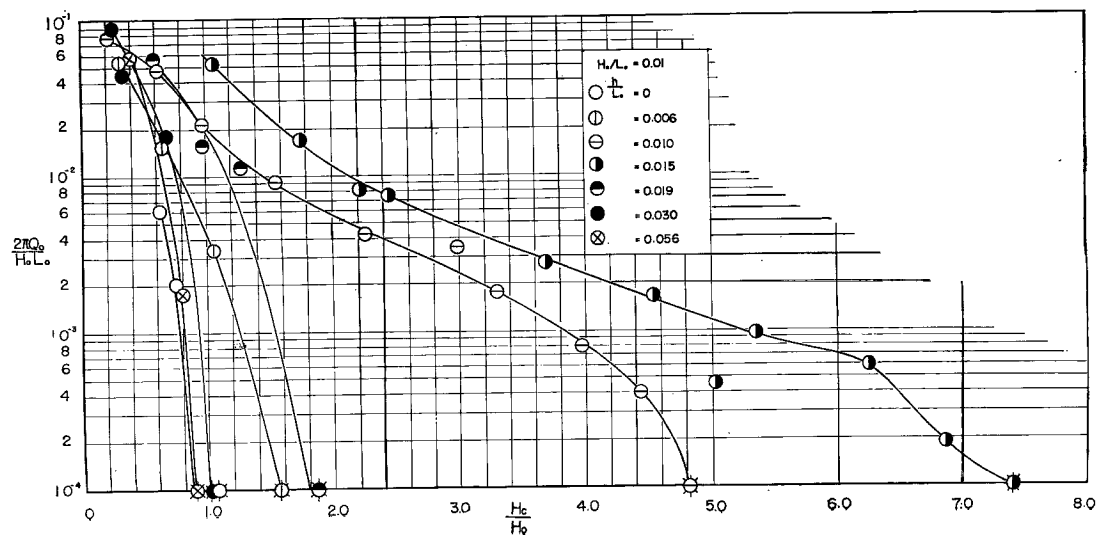
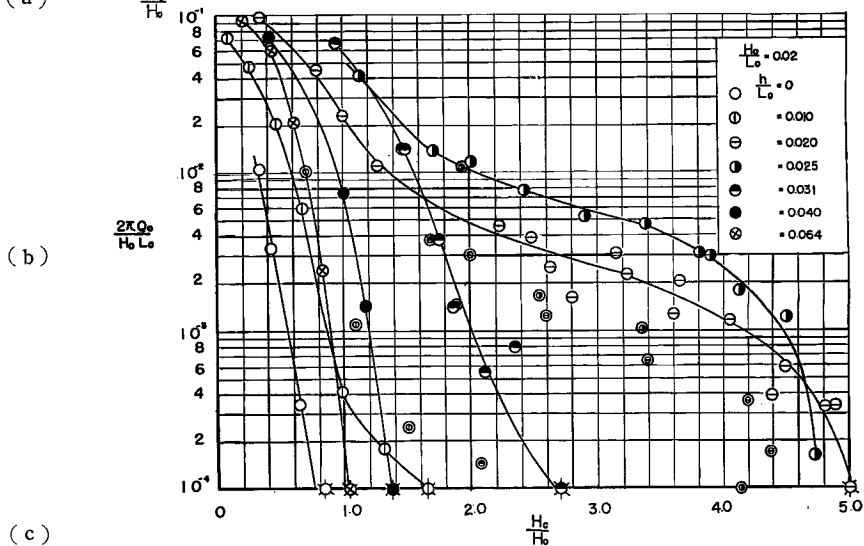


Fig. 1
Relations between $2\pi Q_0/H_0 L_0$ and H_e/H_0 with a parameter of h/L_0 .



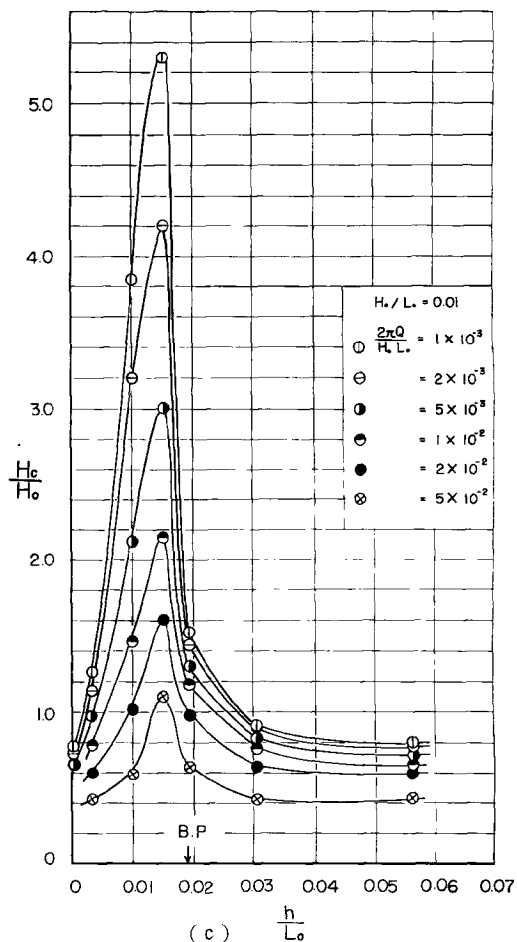
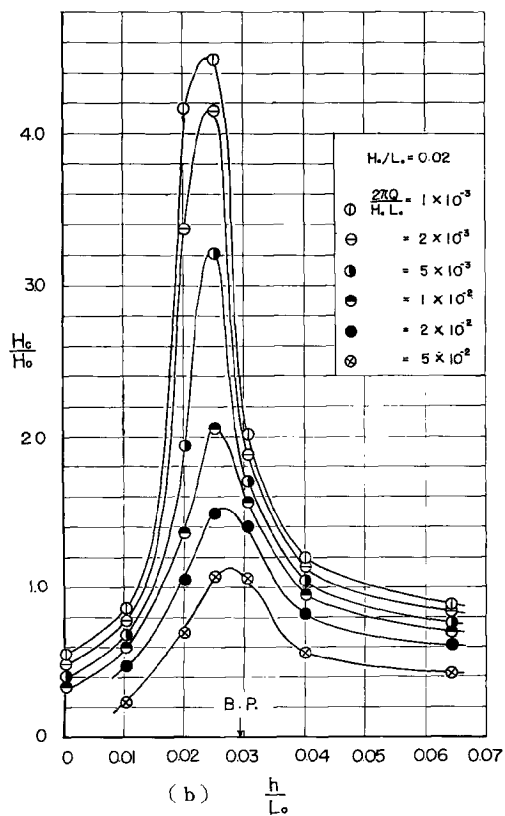
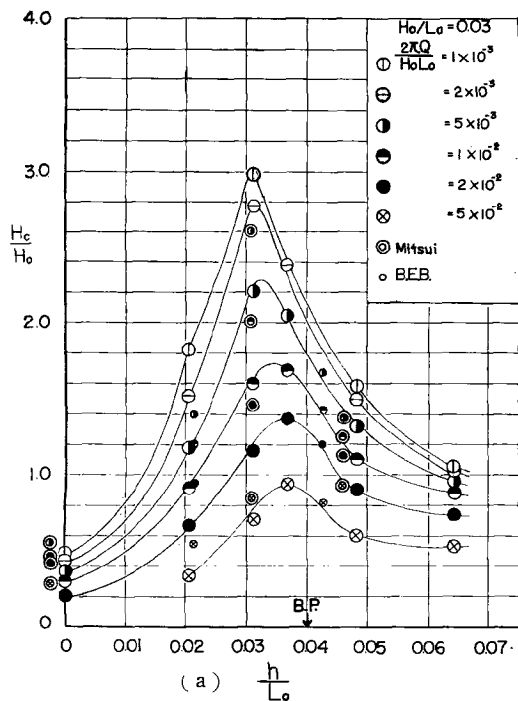


Fig. 2 Relations between H_c/H_0 and h/L_0 with a parameter of $2\pi Q_0/H_0 L_0$.

れる。また、これらの図からわかるように $2\pi Q_0/H_0L_0$ の値を一定としたときに、 H_c/H_0 が最大となるのは、 h/L_0 の値が砕波指標による砕波水深（図中では B.P. で示す）よりやや浅いところにおいてである。このことから、波が砕けながら堤体に当たる場合に越波量が最大となることがわかる。このことは、前浜勾配 1/10 で行なわれた波形勾配の大きい波を対象とした実験の場合でも、まったく同じことが見出される。さらに波形勾配の小さい波ほど、越波量に及ぼす水深の影響が顕著であるが、こうした越波量に及ぼす風以外の諸要素の影響についてはすでに報告した^{5),16)}ので、ここではとくにふれないことにする。

3. 鉛直堤の越波に及ぼす風の影響に関する実験

(1) 実験設備および実験方法

実験設備は前述した高速風洞水槽であるが、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¹⁴⁾から知ったので、Fig. 3 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、水平に長さ約 20 m の区間をアルミ板によって仕切り、堤防の付近だけ風が吹くようにして、越波量に及ぼす局所的な風の影響を調べ得るようにした。さらに、Fig. 3 には、このような仕切りを入れた場合の鉛直方向の風速分布を測定した例を示した。なお、堤防は St. 3 に設置した。風速はピトー管と傾斜型のマノメーターで測定した。実験に用いる波は沖波波形勾配が 0.02 となるような周期 2.0 sec、沖波波高 12.5 cm と決めた。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。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用いた越波量測定器で、また少ない場合にはメスシリンダーで

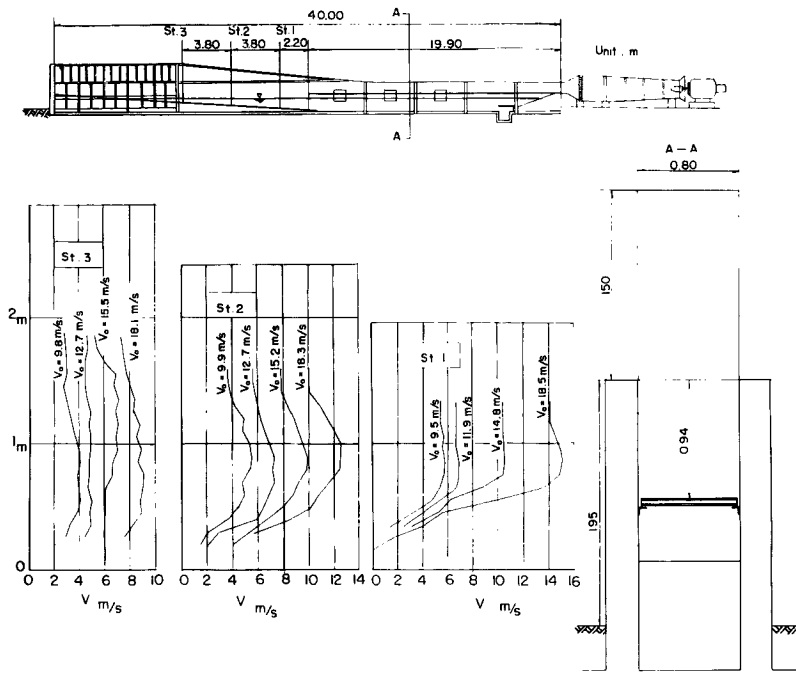


Fig. 3 High-speed wind-wave tunnel and vertical distributions of wind velocity in it.

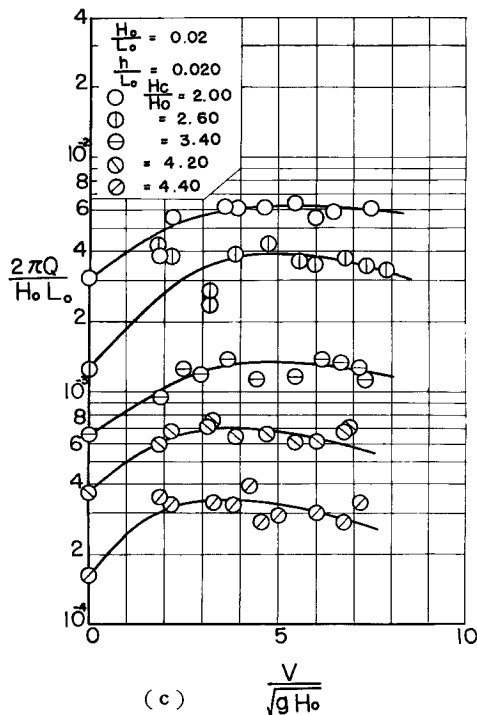
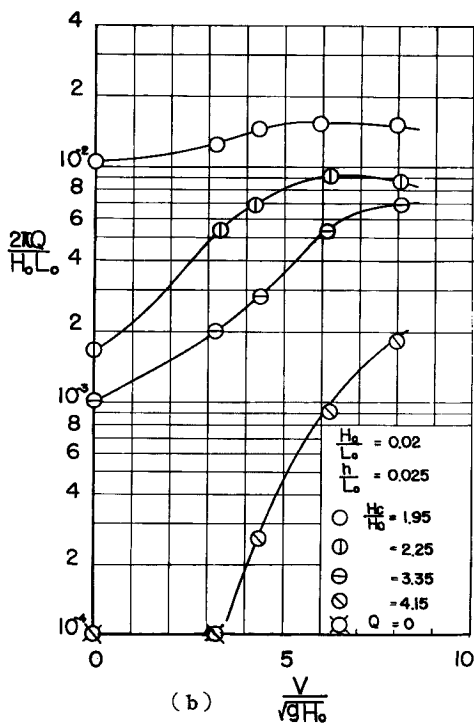
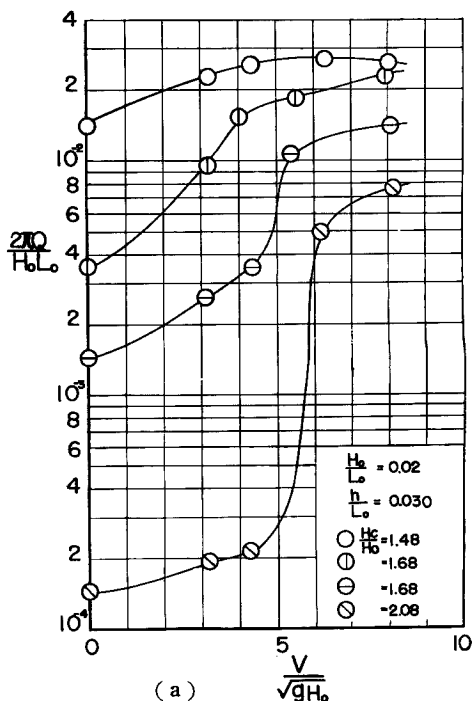
直接測定した。また越波量の水平方向の分布を測定するため、堤防背後 75 cm, 105 cm, 140 cm, 185 cm, 245 cm および 335 cm の位置に小さな容器をとりつけ、これに入る水量を測定した。なお、水深は5種類変え、それぞれについて堤防の高さを3~5種類変えて実験を行なった。

(2) 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、次の関係

$$\frac{2\pi Q}{H_0 L_0} = F \left\{ \frac{H_0}{L_0}, \frac{H_c}{H_0}, \frac{h}{L_0}, \frac{V}{\sqrt{g H_0}} \right\}$$

を導いた¹³⁾。ここに、 Q ：風を伴う場合の1周期、単位幅当たりの越波量、 V ：風速、 g ：重力の加速度であり、 $V/\sqrt{g H_0}$ は風速の影響を表す無次元量である。ここでは前述の方法によって得られた実験結果を上式にもとづいて整理することにする。いまの場合、全実験を通じて H_0/L_0 は 0.02 であるから、相対水深 h/L_0 ごとに相対堤高 H_c/H_0 をパラメーターとして実験結果を示してみよう。Fig. 4 (a), (b), (c), (d) および (e)



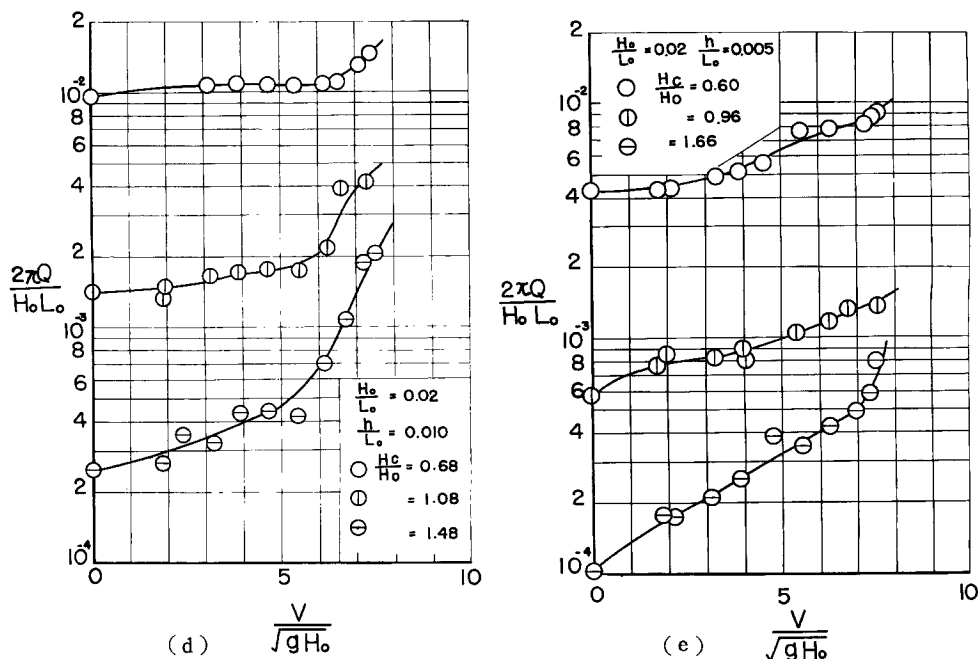


Fig. 4 Effect of wind on rate of wave overtopping.

は h/L_0 の値がそれぞれ 0.030, 0.025, 0.020, 0.010 および 0.005 の場合のものであり、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 Froude 数 $V/\sqrt{gH_0}$ をとり、越波量に及ぼす風の影響を示したものである。また、Fig. 5 (a), (b), (c), (d) および (e) は Fig. 4 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をとって、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。Fig. 4 および Fig. 5 から越波量に及ぼす風の影響は、 H_0/L_0 が一定であっても、 h/L_0 あるいは H_c/H_0 の値によってかなり違った傾向を示すことがわかる。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できるような Fig. 4 (a) の場合には、 H_c/H_0 の値によって若干異なるが、 $V/\sqrt{gH_0}$ の値が 3~4 付近から風による越波量の増加量が急激に増大する。このことは、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増加させる作用とであり、風速が波速よりも小さいような $V/\sqrt{gH_0}$ の値が 3~4 までは、むしろ越波量に及ぼす風の影響は前者だけであって、その効果が少ないが、風速が波速よりも大きくなると、両者の影響が加わり、その効果が急激に現われるためではないかと考えられる。

Fig. 4 (b) あるいは 5 (b) は、Fig. 4 (a) の場合よりもやや浅く、波の峰がくずれかけるような場合であって、一般に越波量が一番多い場合である。Fig. 5 (b) の傾向は、Fig. 5 (a) の場合とかなりよく似ており、堤防が低く越波量が多いような場合には、ある風速で越波量が最大値を示し、それ以上の風速では若干越波量が減少するようであり、この傾向はいずれの場合にも見られ、興味深いことである。

さらに、Fig. 4 (c) あるいは Fig. 5 (c) は水深が浅くなり、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る。このような場合には、堤防の天端より上にはねあがる水は小さな水滴となるので、 $V/\sqrt{gH_0}$ の値がさきの場合よりも小さい 2~3 で越波量は一定値に近づくようである。ま

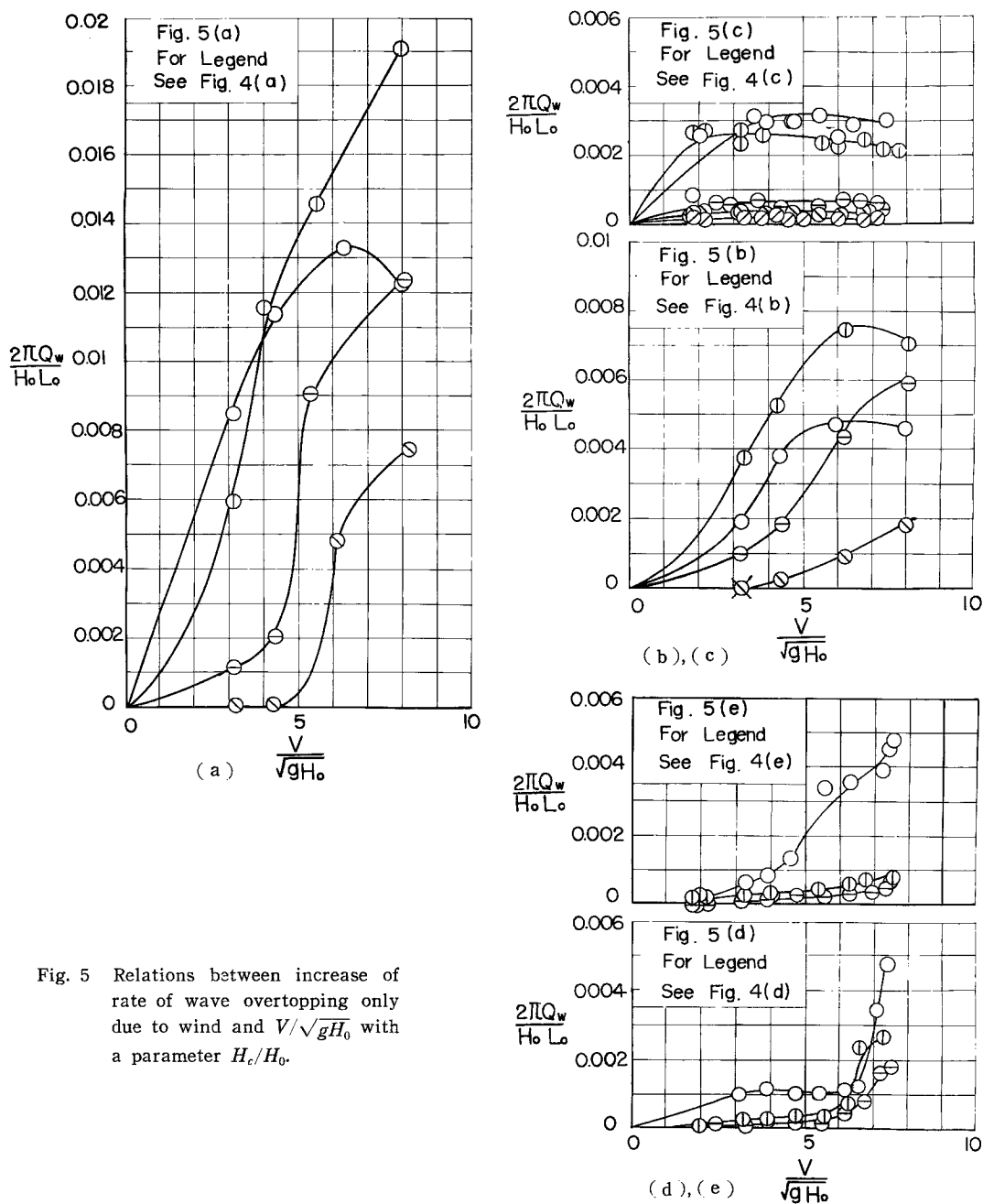


Fig. 5 Relations between increase of rate of wave overtopping only due to wind and $V/\sqrt{gH_0}$ with a parameter H_c/H_0 .

た、このことは Fig. 4 (c) においても見られるように堤防が低く大量に越波する場合には、堤防が高く越波量の少ない場合に比べ、越波量が一定に近づく $V/\sqrt{gH_0}$ の値が大きいことによっても裏付けされよう。しかしながら、 $V/\sqrt{gH_0}$ の値が 5 ~ 6 よりも大きくなると、越波量はわずかながら減少する傾向がいずれ

の場合にも見出される。このことはうちあげられた飛沫が風によってさらに小さな雨滴のような状態になり、越波量の測定に際しこうした小さな水滴まで測定できなかったことに起因していると思われる。Fig. 4 (d) および (e) あるいは Fig. 5 (d) および (e) は、水深が浅く堤防よりかなり沖側で波が碎けてしまってから堤防に当たる場合であって、前述の場合とはかなり異なった傾向を示しており、 $V/\sqrt{gH_0}$ 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増加はあまりない。このことは波が碎けてしまうと波形が平らになり、前述の場合よりも風の影響を受けにくいためであろう。以上、越波量に及ぼす風の影響は H_0/L_0 が一定でも、 h/L_0 や H_c/H_0 の値によってもかなり相違し、その変化の仕方について若干考察を行ったが、今後は $V/\sqrt{gH_0}$ の値が 8 以上の場合についても実験値が得られるようにして、多くの波形勾配についてこうした実験を進めていきたい。

4. 結 語

以上、著者は海岸堤防の設計に際して、越波量を適確に推定しなければならないこと、および、従来、未知の問題であった越波量に及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た。こうしたことから、まず、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、越波量に及ぼす風だけの直接的な影響について二、三の重要な結果を得た。しかしながら、その実験結果は波形勾配が 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波形勾配の波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にするとともに、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、本研究に際し実験や資料整理に大いに助力していただいた大学院学生大堀晃一君、学部学生山岡礼三君に感謝の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) 三井宏: 海岸堤防の越し波防止効果に関する研究, 京都大学大学院工学研究科修士論文, 昭32.3.
- 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, 京都大学防災研究所年報, 第7号, 昭39.3, pp. 387~399.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Sibul, O.J.: Flow over Reefs and Structures by Wave Action, Trans. A.G.U. Vol. 36, No. 1, 1955, pp. 61~71.
- 9) 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.
- 10) Paape, A: Experimental Data on the Overtopping of Seawalls by Waves, Proc. of 7th. Conf. on Coastal Engineering, Vol. 2, 1961, pp. 674~681.
- 11) 永井荘七郎, 上田伸三: 風と波を考慮した海岸堤防の形状と構造に関する研究, 第7回海岸工学講演会講演集, 昭35.11, pp. 245~273.
- 12) 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, 昭37.10, pp. 138~142.

- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.