

海岸堤防の越波の飛散（水平）分布について

高 田 彰*

On the Flying Distribution of Wave Overtopping on Seawalls

Akira TAKATA*

(Received September 20, 1968)

Accurate information on the flying distribution of horizontal direction of wave overtopping on seawalls is needed to determine the structures of seawalls and the utilization of the background.

For this reason, four influential factors which are concerned with the flying distribution are experimentally investigated in this paper; (1) the slopes of seawalls, (2) the wind velocity, (3) the crest elevation of seawalls on the still water level, (4) the absorbent bank for wave energy.

Principal results are as follows,

- (1) There are certain slopes which make the biggest wave overtopping and the widest flying distribution of the horizontal direction.
- (2) The wind increases wave overtopping and spreads the flying distribution.
- (3) The absorbent bank for wave energy is effective for the prevention of the flying of wave overtopping.

1. 緒 言

臨海工業地帯が急速に発展し、海岸付近に人口が集中するようになり、海岸堤防あるいは防波護岸の果たす役割が非常に重要になってきた。それゆえ、大阪湾、東京湾および伊勢湾をはじめ、各地で高潮対策あるいは高波対策が進展し、全国的に次第に整備されつつある。

しかし、水工学的に未解決の問題が数多く残されており、中でも一番大きな問題点は堤防あるいは護岸からの越波があげられる。⁽¹⁾

堤防あるいは護岸の天端高さは、計画潮位に有義波の打ちあげ高さを加えたものに基いて決められて来たが、一般に越波を防止するのに十分な天端高さが採用されていないのが実情である。

伊勢湾台風（昭和34年9月26日）以後、海岸堤防を三面張り（完全被覆）にすればある程度の越波に対して強度的に充分であり、堤防の機能も充分果しうると考えられて来た。しかし、年毎に堤防の背後地の利用率が高まり、堤防に対する期待が非常に大きくなって来ている。⁽²⁾

それゆえ、産業の集中地域および人口密度の高い地域の海岸堤防あるいは防波護岸については越波の観点より再検討し、より一層の安全度の高い高潮対策ならびに高波対策が望まれる。

しかし、波の不規則性、風の影響などから越波を完全に防止することは経済的に困難な場合が多く、一般にある程度の越波を前提とした許容越波水量の考え方が基準とならざるをえない。したがって海岸堤防あるいは防波護岸の規模および構造を決定する場合に、波圧、越波水量、越波の飛散分布および排水能力などが主な設計条件としてあげられる。

その中で波圧および越波水量については模型実験を含め種々の研究が発表され、かなり定量的な資料が蓄積されてきている。⁽³⁾⁽⁴⁾ 一方、運輸省において昭和39年より別府、徳島、長島（尾鷲市）および富山の各海岸において越波水量に関する実測が行なわれ、別府海岸では昭和39年台風14号について、和歌山海岸（和歌山北港防波護岸）では昭和40年台風23号について貴重な実測データが得られている。⁽⁵⁾ このように越波水量に関しては現地と模型実験の相似性も検討されつつある現状からして、次第に種々の問題点が解決されようとしている。

*本学土木工学科 (Department of Civil Engineering)

しかし、堤防を越える水の飛び方（飛散分布）についてはこれまでは、永井（1960）⁽⁶⁾、岩垣ら（1962）⁽⁷⁾の研究、および建設省の由比海岸での現地測定（昭和40年台風24号）⁽⁸⁾のみで、それらは問題点を提起した程度にとどまっており未解決のまま残されている。

越波が堤内地へいかなる分布で落下するかということは排水溝の位置と規模、堤防背面の被覆範囲および背後地利用計画などを決めるための基礎資料として重要である。

本研究はこのような観点から海岸堤防の越波の飛散（水平方向）分布をとりあげ、法面勾配、風、堤防天端高さ、および消波堤が越波の飛散（あるいは拡散）にどのような影響を及ぼすかを実験的に調べ、水平方向の飛散水量および飛散水量加積曲線（累加飛散水量百分率）を

明らかにした。

2. 実験装置および方法

2.1 造波可傾水路における実験

斜面勾配の変化が越波水量および飛散分布にどのように影響するかを調べるために造波可傾水路で実験を行った。この装置は幅 0.3m、高さ 0.5m、長さ 21.4mの両面がガラス張りであり、水路全体がジャッキの上に設置され、モーターに接続されているので海底勾配を水平から $1/60$ まで自動的に可変できる。造波部は幅 0.6m、高さ 0.6m、長さ 1.5mの矩形水槽の中に下をヒンジにしたフラップ式の造波板を取りつけて振動できるようにした。 $H_{max}=9.5\text{cm}$ （水深 $h_0'=21\text{cm}$ ）、 $T=0.5\sim 1.8\text{sec}$ の規則波を発生させることができる。実験は図-1 に示すよ

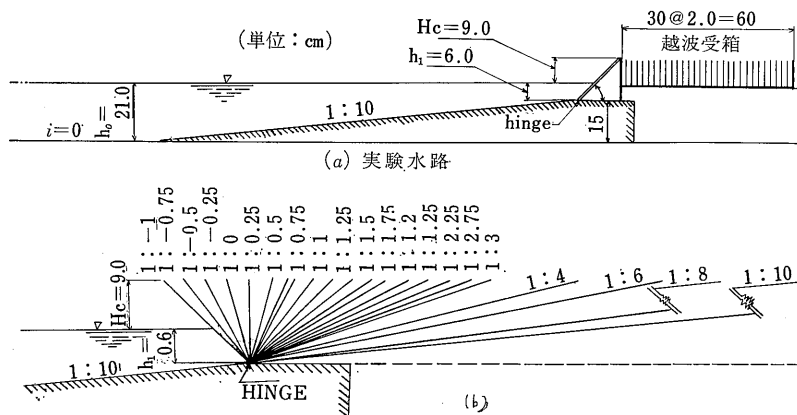


図-1 法面勾配の実験

うに一樣水深 $h_0'=21\text{cm}$ 、海底勾配 $\cot\alpha=10$ 、法先（堤脚）水深 $h_1=6.0\text{cm}$ および斜面堤の天端高 $H_c=9.0\text{cm}$ とし、法面勾配は鉛直（ $\cot\theta=0$ ）～ $\cot\theta=10$ の間で17種類、 $\cot\theta=0\sim 1$ （逆勾配）の間で4種類とし、合計21種類の法面勾配について調べた。実験波は $T=1.6\text{sec}$ と 1.75sec の2種類とし、表-1 に示す様に碎波領域の波浪である。

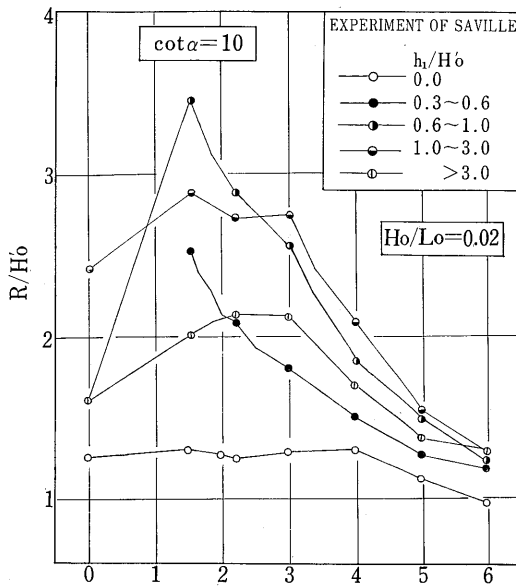
表-1 実験の波

	T ₀ (sec)	一樣水深 h ₀ (cm)		h _a での値 (cm)		深波深 (cm)		H ₀ /L ₀	h ₁ /L ₀	h ₀ /h ₁	池先水深 h _i (cm)		h _i /L ₀	h ₁ /h _i
		H ₀	L ₀	H ₀	L ₀	H ₀	L ₀				h _i	h _i /L ₀		
I	1.6	21.0	7.7	216	7.6	399	0.019	0.053	2.76	6.0	0.015	0.789		
II	1.75	21.0	9.5	239	9.1	478	0.019	0.044	2.31	6.0	0.013	0.659		

越波水量の測定は多いときは3～5波、少ないときは15波の平均をとって1周期の越波水量とした。越波の飛散分布の測定は越波受箱に2cm間隔の仕切り板を取り付け、30個のスリットがそれぞれ独立して越波受箱となる様にした。各スリットにはゴム栓をつけそれをメスシリンドラーに受けて飛散距離と水量との関係を調べた。

2.2 造波風洞水槽における実験

越波の飛散分布が風、堤防の天端高および消波堤の有無によりどのように変化するかを調べるため図-2 に示す2次元造波風洞水槽において実験を行った。この水槽は長さ 27.9m、高さ 2.2m、幅 0.8mの鋼鉄製で片側ガラス張りになっており、一端に造波装置、風洞装置および高潮発生（給排水調節）装置がある。造波装置はフラップ型（5HP）で $H_{max}=50\text{cm}$ （ $h_0'=100\text{cm}$ ） $T=1.5\sim 6.0\text{sec}$ の波を発生できる。風洞装置は15HPモーターで直径 1.0mの水平軸流ファン（風量毎分 600m³。静圧水柱 45mm、回転数 1280r.p.m）を回転させ水槽内の風速を最大 15m/sec（ $h_0'=60\text{cm}$ ）にすることができる。高潮発生装置は7.5HPと19HPの2台の揚水ポンプで低水槽（120m³）から高架水槽（6m³）に最大 160ℓ/sec でくみあげて、風洞水槽内の水位を毎秒 0.1cm上昇させる給水装置と、逆に0.1cm/secの速さで水位を下降させる排水装置からなる。越波した水は低水槽に戻るよう廻流水路（1m×1m×25m）で接続されている。



図—5 Saville の打ち上げ高さの実験
($H_0/L_0=0.02$)

で $H_0/L_0=0.02$ の波については図—5 で示される⁽⁹⁾。これより h_1/H_0' によって R/H_0' の最大値を有する $\cot\theta$ の値が異なるが、 $h_1/H_0' < 3$ では $\cot\theta=1.5$ 、 $h_1/H_0' > 3$ では $\cot\theta=2\sim3$ の間で最大値となる。 $h_1/H_0'=0.6\sim1.0$ の実験値が著者の実験の範囲に相当するが、図—4 の波の実質部分を対象とした R_w/H_0 の傾向に良く似ていることが分る。しかし、岩垣らの孤立波の実験では周期波と異り $\cot\theta$ の大きいほど R/H_0 が大きくなることを明らかにしている⁽¹⁰⁾。これは引き波の干渉がないので逆の結果が得られたものと考えられる。

a) 斜面上で砕波する波

Hunt の実験によれば⁽¹¹⁾

$$\frac{R}{H_0} = 1.01 \frac{\tan\theta}{\sqrt{H_0/L_0}} \cdot r_s \cdot p \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし $H_0 \approx H$ とし、適用範囲は Iribarren-Nogales により次式で示される。

$$\frac{H_0}{L_0} > \left(\frac{H_0}{L_0}\right)_{crit} = \frac{\tan^2\theta}{5.1} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$(H_0/L_0)_{crit}$: 反射率 $r=0.5$ となる限界波形勾配

r_s : 粗度に関する係数 (≤ 1.0)

p : 空隙に関する係数 (≤ 1.0)

Wassing の実験によれば⁽¹²⁾

$$\frac{R}{H} = A \cdot B \cdot \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中 A : H/L と R の頻度による定数

B : 堤防形状、法面特性、海浜状態による定数

Freeman-Le Méhauté の特性曲線法によれば⁽¹³⁾

$$\frac{R}{h'} = \frac{u_{st}^2}{2gh'_0} \frac{(1+a)(1+2a)}{1 + \frac{f \cot\theta}{a^2}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中 f : 摩擦係数 $\left(= \frac{\tau_s}{\rho u_s^2} \right)$

a : 遡上波の先端の係数

$$\left(\sqrt{g\eta_s} u_s = 0 \sim \frac{1}{2} \right)$$

u_{st} : 汀線において斜面上に平行な流速

以上の結果から斜面上で砕波する場合は θ が小さくなる程、また H_0/L_0 が大きくなるほど波の打ち上げ高さは減少することが分る。

b) 砕波しない波 (SURGING WAVES)

斜面上でも砕波しない波は Surging 現象を生じる。このような波の打ち上げ高さは Miche の理論によれば⁽¹⁴⁾

$$\frac{R}{H_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2\theta}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 H_0/L_0 の適用範囲は斜面上で完全反射を生ずる波に限られ、Miche により次式で示される。

$$\frac{H_0}{L_0} \leq r \left(\frac{H_0}{L_0} \right)_{max} = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \frac{\sin^2\theta}{\pi} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$r \left(\frac{H_0}{L_0} \right)_{max}$: 任意の θ に対し完全反射 ($r=$

1.0)を生ずる最大波形勾配

非線形の影響を考慮して補正すれば⁽¹⁵⁾

$$\frac{R}{H_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2\theta}} + \pi \frac{H_0}{L_0} \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。これは Granthem および Savage の実験によってほぼ一致することが検証されている。⁽¹⁵⁾

$\theta = \frac{\pi}{2}$ のとき、Miche の理論では⁽¹⁵⁾

$$\frac{R}{H} = 1 + \pi \frac{H}{L} \frac{1}{\tanh \frac{2\pi h}{L}} \left\{ 1 + \frac{3}{4 \sinh^2 \frac{2\pi h}{L}} - \frac{1}{4 \cosh^2 \frac{2\pi h}{L}} \right\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

Sainflou の理論では⁽¹¹⁾

$$\frac{R}{H} = 1 + \frac{H}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。

以上、a)、b) の結果を総合すると任意の与えられた H_0/L_0 の波についてある法面勾配までは砕波を生じ、法面が急になるほど R/H_0 が大きくなる。しかしある法面勾配を境としてそれ以上急な法面勾配では砕波を生じないいわゆる Surging Waves の現象を呈し、法面が急になるほど R/H_0 が減少する。それゆえ、Breaking Waves と Surging Waves の境界において R/H_0 の極大値が存在する。Breaking Waves の R/H_0 は θ が大きいほど、また H_0/L_0 が小さいほど増大

する。Surging Waves の R/H_0 は逆に θ が小さいほどまた H_0/L_0 が大きいほど増大する。

R/H_0 の最大値を有する臨界傾斜角度 θ_c は (6) 式より H_0/L_0 の小さい波ほど減少する。各波形勾配に対する $\cot\theta_c$ を求めれば表-2 の通りである。

一方, Granthem の実験によれば $\cot\theta=0.47\sim3.73$, $0.066 < h_1/L < 0.434$, $0.012 < H/L < 0.112$ の条件に対して $\cot\theta_c$ の平均値は 1.73 としているので表-2 の値と比較してかなり良い近似値が得られている様に思われる。⁽¹⁵⁾

H_0/L_0	$\cot\theta_c$
0.01	3.49
0.02	2.67
0.04	1.88
0.06	1.51
0.08	1.28
0.10	1.09
0.12	0.95
0.14	0.84

表-2 R/H_0 を最大にする臨界面勾配

(2) 越波水量

法面勾配が越波水量にどのような影響を及ぼすかについて, 周期波では石原・岩垣・三井⁽¹⁶⁾, Paape⁽¹⁷⁾ および高田¹⁾ による研究, 孤立波では岩垣らの研究⁽¹⁸⁾ があるが, 波の打ち上げ高さと同様越波水量の最大になる法面勾配が存在することが実験的に指摘されている。しかし, 越波に関係する要素が多いため最大越波の生ずる法面勾配を詳細に検討するまでには至っていない。

そこでそれらを確認するため21種類の法面勾配について実験を行った。その結果が図-6 に示される。

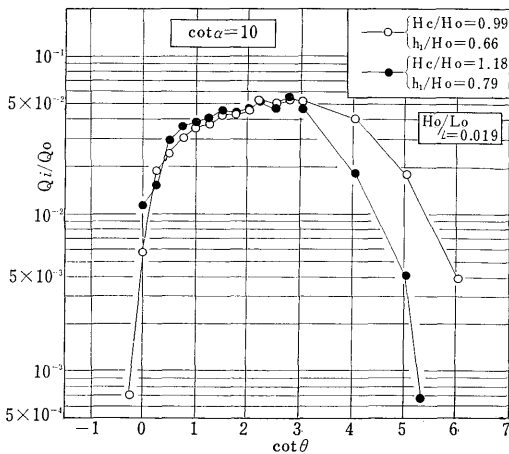


図-6 無次元越波水量と法面勾配

図に示される無次元越波水量は深水波の移動水量に対する割合を示したもので, 次式で求めたものである。

$$\frac{Q_i}{Q_0} = \frac{2\pi Q_i}{H_0 \cdot L_0} \dots\dots\dots (10)$$

式中 Q_i : 1 周期の単位幅当りの越波水量

Q_0 : 深水波の 1 周期の単位幅当りの 移動水量
微小振幅波として

$$Q_0 = H_0 \cdot L_0 / 2\pi \dots\dots\dots (11)$$

図より越波水量の最大は $\cot\theta=2.75$ であり, また $\cot\theta=1\sim3$ の間は非常に越波水量が多い。

越波をエネルギー量で示すと図-7 に示され図-6 と

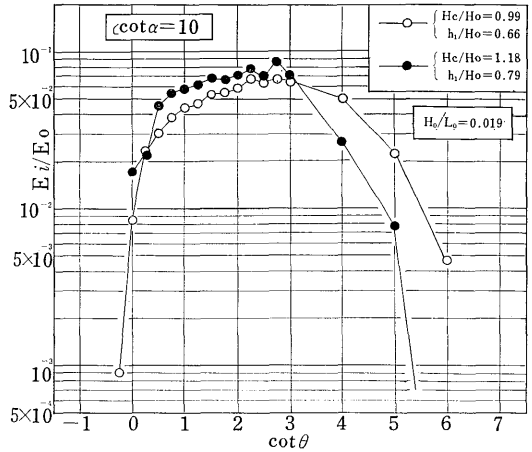


図-7 無次元越波エネルギーと法面勾配

同様 $\cot\theta=2.75$ で無次元越波 エネルギーが最大になる。無次元越波エネルギーとは深水波の全エネルギーに対する越波のエネルギーの割合を表わしたもので, 図-8 より次の方法で求めたものである。

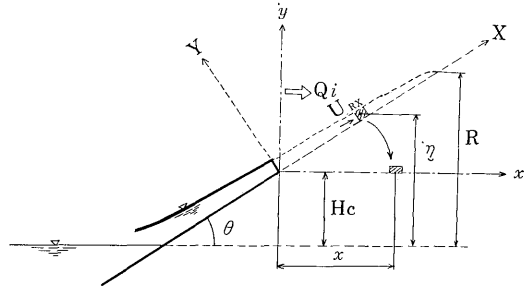


図-8 越波エネルギー

$$E_i = \int_{H_c}^R \rho g \eta dQ_i = \rho g H_c Q_i + \int_0^{t_R} \rho \frac{V \dot{H}_c}{2} dt \propto \rho g H_c Q_i \dots\dots\dots (12)$$

$$\therefore \frac{E_i}{E_0} = \frac{8Q_i H_c}{H_0^2 L_0} \dots\dots\dots (13)$$

E_i : 一周期の越波のエネルギー

E_0 : 深水波の一周期の全エネルギー

微小振幅波として

$$E_0 = \frac{1}{8} \rho g H_0^2 L_0$$

H_c : 静水位上天端までの高さ

越波と打ち上げ高さの間にどのような相関があるかを調べるため $\cot\theta=0$ の越波水量および打ち上げ高さを 1 とした場合の各法面勾配の越波水量を ζ_Q , 打ち上げ高さを ζ_R として表わしたものが図-9, 10 である。なお

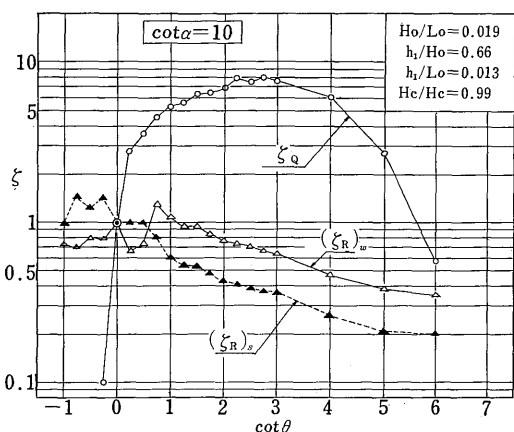


図-9 越波水量と波の打ち上げ高さの比較
($H_c/H_o=0.99$)

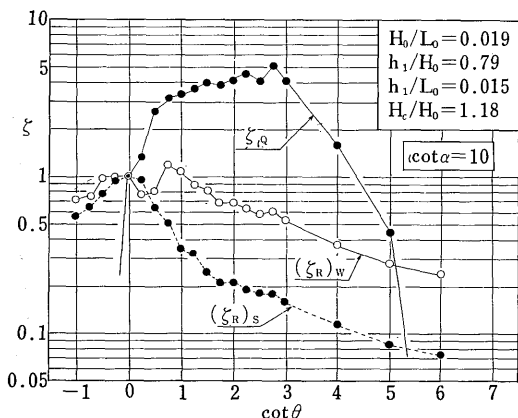


図-10 越波水量と波の打ち上げ高さの比較
($H_c/H_o=1.18$)

打ち上げ高さについては波の実質部分を対象とする場合を $(\zeta_R)_w$ 、跳波（水塊）を対象とする場合を $(\zeta_R)_s$ として示した。図より ζ_Q と θ の関係は ζ_R のそれとは著しく相違し、 ζ_Q を最大にする θ では ζ_R は最大にならず、 $(\zeta_R)_s$ は $\cot\theta$ の減少関数である。このことは図-5 の Saville の実験値と比較しても明らかであり、砕波領域の波は打ち上げ高さの最大になる法面勾配では越波水量は最大にならず $\cot\theta=2\sim3$ の範囲で越波水量が最大になることが分る。したがって砕波後の波あるいは砕波領域の波について、打ち上げ高さで堤防天端高を決定しようとする誤った結果を与えることが明らかになった。しかし、Saville の実験で堤脚水深が深く、 $h_1/H_o > 3$ の波になると、 $H_o/L_o=0.02$ の打ち上げ高さは $\cot\theta=2\sim3$ の間で最大になり Miche の理論値では $\cot\theta=2.67$ である。これらは越波水量の最大値を有する $\cot\theta=2.75$ とほぼ一致する。

それゆえ、砕波領域の波の越波水量はその条件の打ち上げ高さの傾向と一致せず、むしろ重複波領域の波の打ち上げ高さの傾向と非常に良く似た現象を示すことが分る。したがって越波は堤防に衝突する波形に関係することが考えられる。また越波水量と法面勾配の関係は法先水深 h_1 に無関係にある法面勾配で最大になり、その越波を最大にする法面勾配は h_1 が重複波水深で打ち上げ高さを最大にする法面勾配と一致すると考えられる。

(3) 波の反射率と越波水量の関係

Miche の理論によれば波の反射率 r は次の式で表わされる。⁽¹¹⁾

$$r = \rho_r r \left(\frac{H_o}{L_o} \right)_{\max} = \rho_r \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi} \cdot \frac{1}{H_o/L_o} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ρ_r : エネルギー損失係数 (≤ 1.0)

$r \left(\frac{H_o}{L_o} \right)_{\max}$: 任意の θ に対して全反射する波の最大波形勾配で (6) 式で示される。

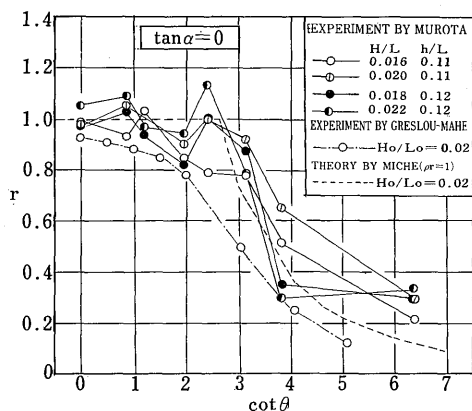


図-11 波の反射率と法面勾配($H_o/L_o=0.02$)

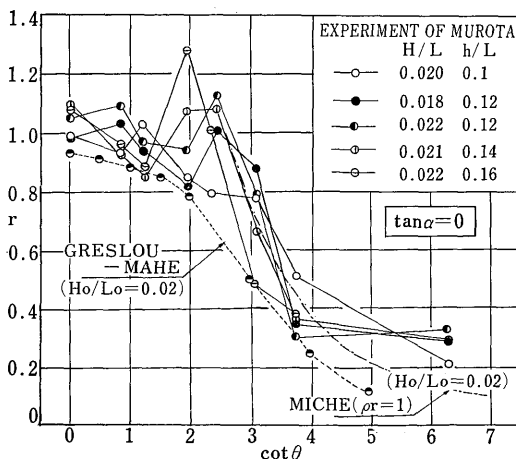
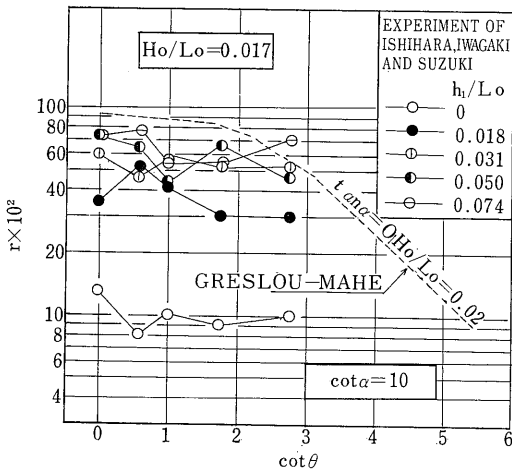


図-12 波の反射率と法面勾配
($h/L=0.10\sim0.16, H/L\approx0.02$)

$H_o/L_o=0.02$ の波について(14)式と室田の実験値⁽¹⁹⁾ および Greslou-Mahe の実験値⁽²⁰⁾ を比較したのが図—11, 12である。Miche の理論値は $\cot\theta=0\sim 2.67$ の間は r が最大（一定値 $r=1.0$ ）となり $\cot\theta>2.67$ で急激に r が減少するのに対して、室田の実験値では $\cot\theta=0\sim 3.1$ の反射が $\cot\theta<3.1$ よりも非常に大きく、特に $\cot\theta=2.4$ 前後に極大値があり、特異点であることを指摘している。また、岩垣らの打ち上げ高さの実験⁽¹⁰⁾においても H_o/L_o の関数として $\cot\theta=1.73\sim 2.75$ に極大点が存在することを明らかにしている。これらの事は越波水量の実験で図—4, 5に示すように $\cot=2.75$ 前後で最大値を有することと比較して非常に良く一致しており注目される事実である。

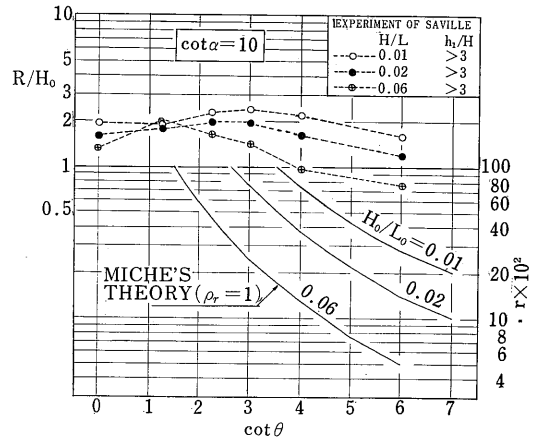
図—13は海底勾配 $1/10$ の砕波領域の波について石原・岩垣らの実験値である。実験は $\cot\theta=0\sim 2.75$ の範囲しか行われていないが、この範囲での法面勾配に対する r



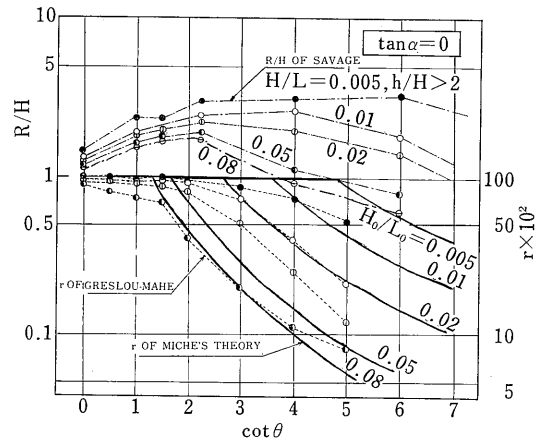
図—13 砕波領域の反射率($H_o/L_o \approx 0.02, \cot\alpha=10$)

の増減は非常に少く近似的にほぼ一定とみなすことができる。このように $\cot\theta=2\sim 3$ の反射波が鉛直堤の反射波とそれほど変わらないとすれば斜面が緩い程水平の速度成分が大きくなる事実を越波水量が増大する理由にあげることができる。

図—14は重複波水深領域の反射率と打ち上げ高さの関係を(14)式の反射率の式と Saville の打ち上げ高さの実験値⁽⁶⁾で示したものである。図—15は同様に Savage の打ち上げ高さの実験値⁽²¹⁾と比較したものである。これらより、与えられた H_o/L_o に対し全反射する最小法面勾配において R/H_o が最大になること、そして H_o/L_o の小さくなる程全反射する最小法面勾配は緩くなりそれにつれて R/H_o の最大点も緩勾配へ移動することが分る。これらのことは越波水量についても同様のことがいえると考えられる。



図—14 反射率と打ち上げ高さの相関性 (Saville の実験値)



図—15 反射率と打ち上げ高さの相関性 (Savage の実験値)

以上のことを総合すると越波水量と反射率は密接な関係があり、越波水量の最大になる法面勾配の存在することは反射率からも検証することができる。なお現象的に考えれば堤防前面の波形が越波水量に大きな影響を及ぼしていると推測される。

(4) 越波の飛散（水平）分布と法面勾配

一周期に入る全越波水量 Q_i が天端からどのような軌跡を描いて落下し、どのような飛散水量分布になるかを調べる。

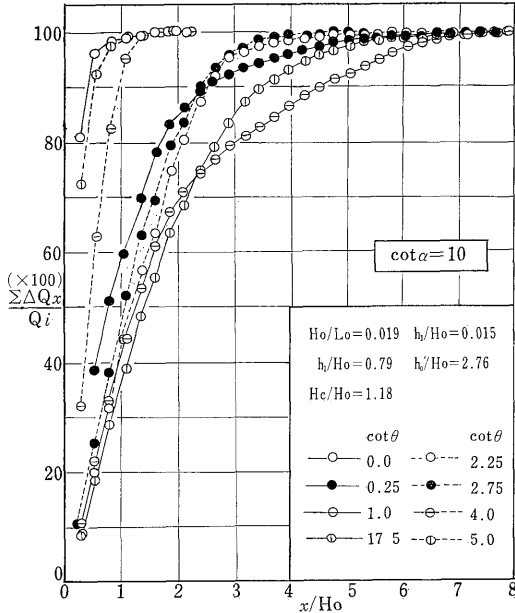
図—16に示すような斜面堤の越波について考える。

一周期の飛散水量分布に関係する要素を無次元量で示せば次式のようなになる。

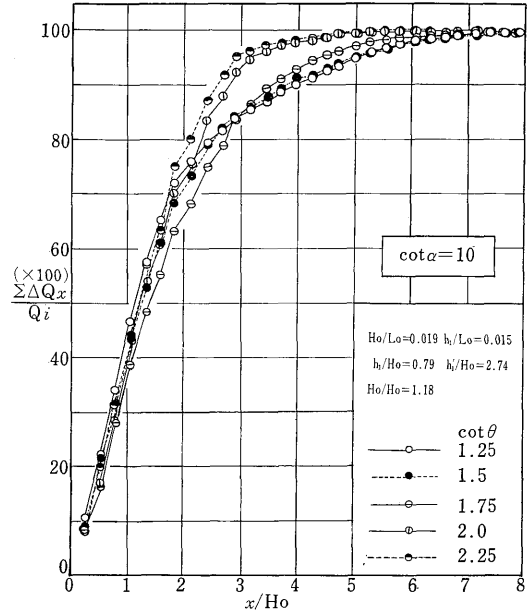
$$\frac{\Delta Q_x}{H_o} = \phi \left(\frac{x}{H_o}, \frac{H_o}{L_o}, \frac{h_1}{H_o}, \cot\alpha, \cot\theta, \frac{V}{\sqrt{gH_o}}, \frac{H_c}{H_o}, \frac{\Delta H_c}{H_o}, \frac{Q_i}{Q_o} \right) \dots \dots \dots (15)$$

本実験は $H_c/H_o = \text{一定}$, $\Delta H_c/H_o = 0$, $V/\sqrt{gH_o} = 0\text{m/sec}$ (無風), $\cot\alpha = 10$, として表一の I の波について $\Delta Q_x/H_o$ と x/H_o の関係を $\cot\theta$ のパラメーターで調べた。実験の結果は図17~20に示される。図一17は代表的な θ について, 図18~20は小区分した θ について比較したものである。図一17より越波は $\cot\theta = 1$ 前後が最も広く飛散し, $\cot\theta = 0$ および 5 付近が最もせまい飛

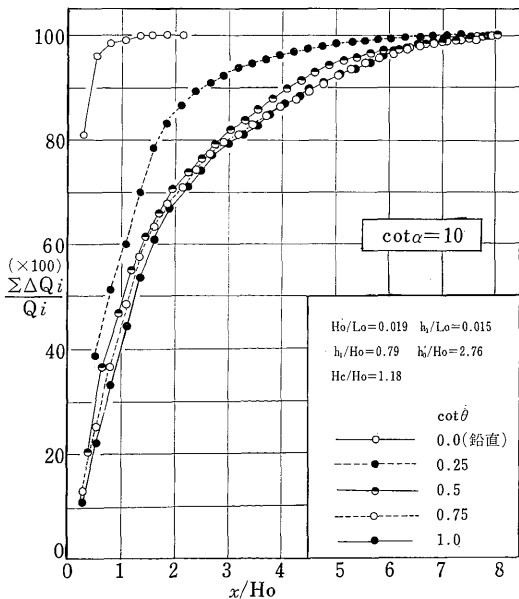
散分布となる。越波の少ない法面勾配 ($\cot\theta = 0.4$ および 5) では直線的に急激に減少し, 越波の大部分が $x/H_o = 0 \sim 2$ の間に落下する。越波の多い法面勾配 ($\cot\theta = 1 \sim 2.75$) は飛散水量が $x/H_o = 1.0$ 前後で極大点であり, $x/H_o > 2$ ではほぼ直線的に減少し大部分は $x/H_o = 0 \sim 8$ の間に落下する。これらより越波の飛散水量分布形は指数関数的に次式で表現できる。



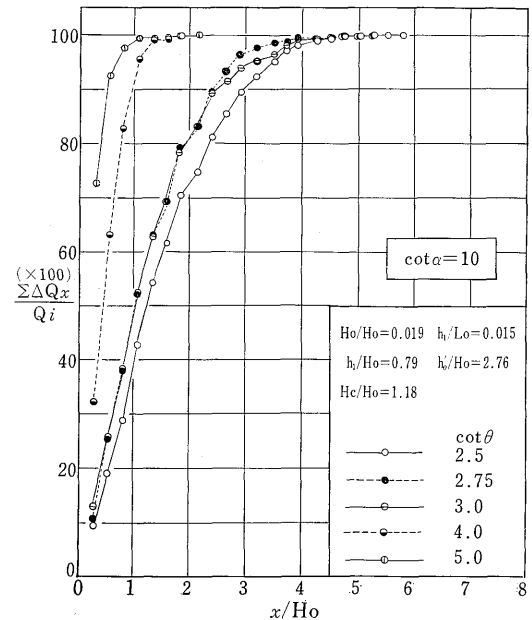
図一21 越波の飛散水量加積曲線と法面勾配 ($\cot\theta = 0 \sim 5.0$)



図一23 越波の飛散水量加積曲線と法面勾配 ($\cot\theta = 1.25 \sim 2.25$)



図一22 越波の飛散水量加積曲線と法面勾配 ($\cot\theta = 0 \sim 1.0$)



図一24 飛散水量加積曲線と法面勾配 ($\cot\theta = 2.5 \sim 5.0$)

$$\frac{\Delta Q_x}{H_0} = m e^{n \left(\frac{x}{H_0} \right)} \dots \dots \dots (16)$$

$m \cdot n$: 実験定数 (正の値)

図-18より $\cot\theta = 0 \sim 1.0$ の範囲では $\cot\theta$ の大きいほど飛散分布は広がる。図-19より $\cot\theta = 1.25 \sim 2.25$ の範囲は部分的に例外はあるが $\cot\theta$ が大きい程狭くなる。また $x/H_0 = 1.0$ で飛散水量強度が最大になる。図-20より $\cot\theta = 2.5 \sim 5.0$ の範囲は部分的に例外はあるが、 $\cot\theta$ が大きくなる程狭くなることが分る。また $x/H_0 = 0.5 \sim 1.0$ に飛散強度の最大点がある。

このような越波水量強度を全越波水量に対する飛散水量加積曲線 (累加飛散水量百分率) で示したものが図-21~24である。

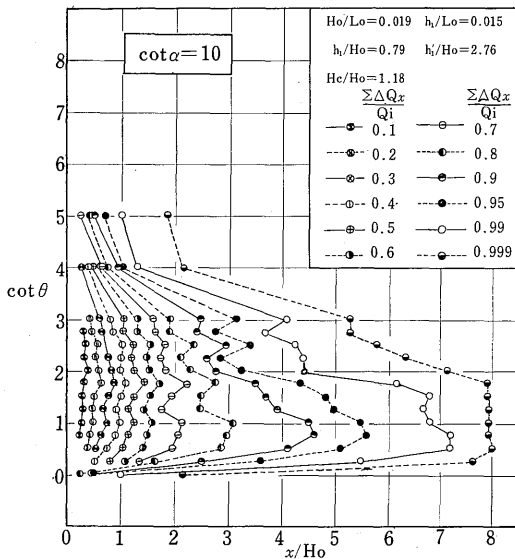


図-25 累加飛散率と法面勾配の関係

図-25は以上の結果を更に明確に示す目的で12種類の累加飛散率をパラメーターにして、 $\cot\theta$ と x/H_0 の関係を表わしたものである。これらより、 $\cot\theta = 0.5 \sim 1.5$ が最も飛散する範囲が広く、全越波水量の99%が $x/H_0 \leq 7.2$ に落下し、 $\cot\theta = 0.4$ および5が最も狭く $x/H_0 \leq 1.3$ に落下する。また、最大越波量を示す $\cot\theta = 2.75$ は $\cot\theta = 1.0$ に比して飛散する範囲が狭く、全越波水量の99%は $x/H_0 \leq 4.0$ に落下する。このことは天端付近に飛散水量が集中することを意味する。また、累加飛散率が0.6までは飛散の程度にそれほど差がないが0.6より大きくなると非常に異なってくる。特に0.9以上になると $\cot\theta = 0.5 \sim 1.75$ の飛散率は大きい。

越波の飛散分布の広がりを実験的に $\cot\theta = 1.0$ 前後で最大になることは質点の放物線運動の最大水平到達角度 ($\theta = \frac{\pi}{4}$) と一致する。したがって越波の飛散の軌跡は次式で表わすことができる。

$$y = \frac{g}{2U_{R0}^2 \cos^2 \theta} \left(\frac{U_{R0} \sin 2\theta}{g} - x \right) x \dots \dots \dots (17)$$

U_{R0} : 斜面堤の天端における打ち上げ波の流速 (斜面に平行)

x, y : 斜面堤の天端を原点として水平、垂直方向をそれぞれ x, y とする。

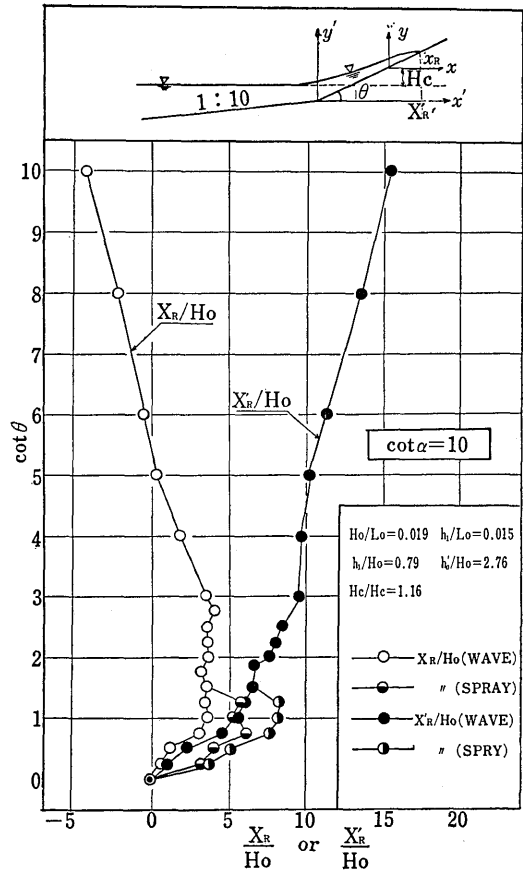


図-26 打ち上げ高さの水平到達距離

図-26は天端を高くして越波をさせない場合の波の打ち上げ高さの水平到達距離を表わしたもので越波の場合とはほぼ同様な結果が得られる。天端からの距離 x_R/H_0 について比較すると $\cot\theta = 0.75 \sim 3.0$ の間は波の実質部分の到達距離はほぼ一定で、 $\cot\theta = 2.75$ で最大であるが跳波 (水塊) を対象とすると $\cot\theta = 1.0$ 前後が最大となる。法先 (堤脚部) からの距離 x'_R/H_0 について比較すると $\cot\theta$ の大きい程水平到達距離は大きくなる。一方、図-27, 28は越波した場合の $\Delta Q/H_0$ と x'_R/L_0 の関係を示す。これより緩勾配にすることが背後地利用および経済性の観点から得策でないことは明らかである。

図-29は図-25と26の比較、すなわち越波する場合の累加飛散率と、越波させない場合の打ち上げ高さの水平到達距離を比較したものである。これより $\cot\theta = 0.25 \sim 1.75$ の間の水平到達距離は累加飛散率が0.95の x/H_0 に

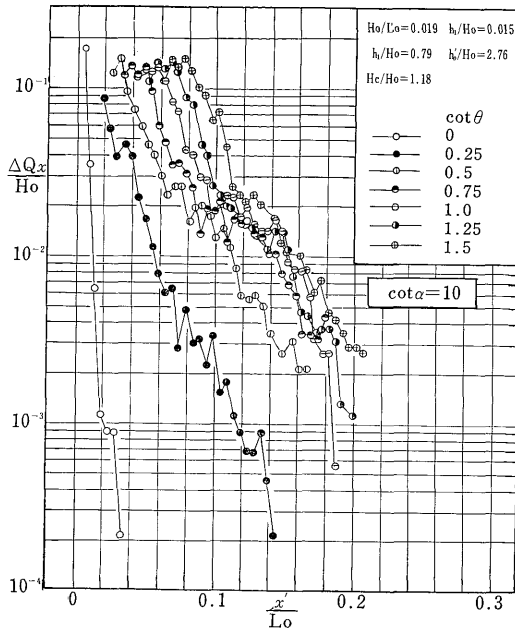


図-27 堤脚(法先)を原点とする飛散水量分布 ($\cot\theta=0\sim1.5$)

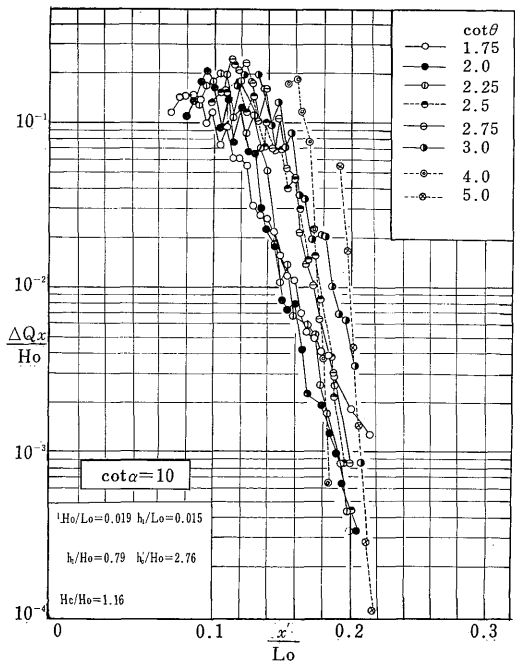


図-28 堤脚(法先)を原点とする飛散水量分布 ($\cot\theta=1.75\sim5.0$)

近似し, $\cot\theta=2\sim5$ の間は 0.97 の x/H_o に相当しているので, 越波の最大飛散距離は打ち上げ高さから計算される水塊の天端からの水平到達距離よりもやや遠方に飛散することが分る。

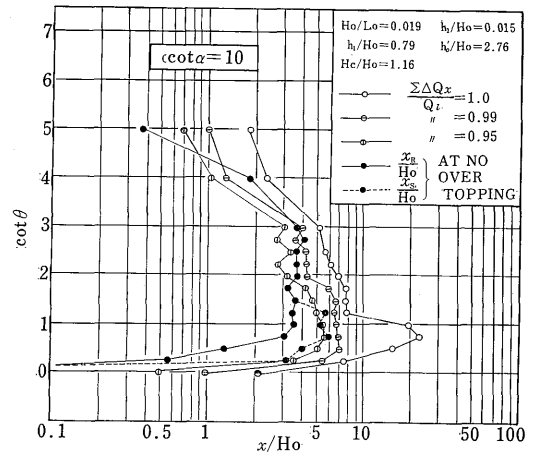


図-29 打ち上げ高さの水平到達距離と越波の飛散分布の関係

3.2 飛散水量分布に及ぼす風の影響

越波に及ぼす風の影響は非常に大きく, 波の変形, 越波量の増大および飛散距離の増大をもたらす。越波水量に及ぼす風の影響については, 岩垣博士らの研究があり定量的にもかなり明らかにされている。⁽²²⁾ しかし飛散水量分布におよぼす風の影響については充分検討されるまでには至っていない。そこで飛散水量分布に及ぼす風の影響を調べる実験を行った。図-30, 31 は無風の場合と, 風のある場合 (実験風速 $V=4.5\text{m/sec}$, $V/\sqrt{gH_o}=3.31\sim3.36$) を比較したものである。図-32は越波水量について比較したものである。これらより

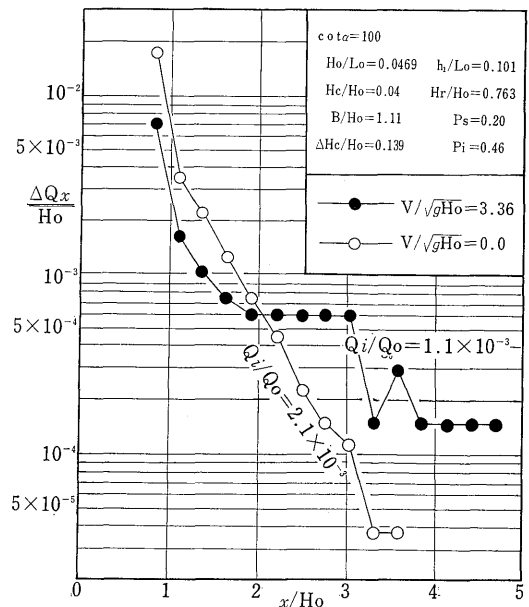


図-30 飛散分布に及ぼす風の影響 (消波堤のある場合)

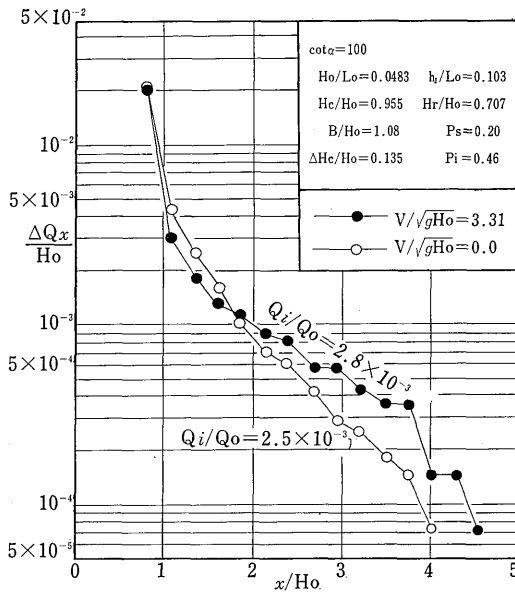


図-31 飛散分布に及ぼす風の影響
(消波堤のある場合)

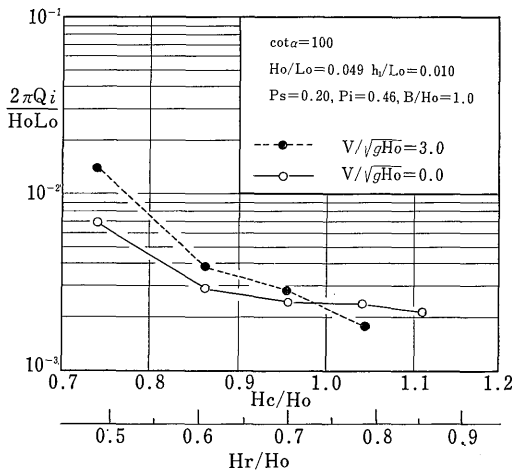


図-32 越波水量に及ぼす風の影響
(消波堤のある場合)

越波水量が無風に比べて一般に多く、飛散する分布はかなり広がることが分る。また無風と同程度の越波水量であれば $x/H_0=0\sim 2$ において無風の方が飛散水量が多く $x/H_0>2$ では逆に風のある方が飛散水量が多くなることが分る。

したがって、風速を増大すればさらに飛散する水塊が加速されて飛散分布は広がると考えられる。

3.3 堤防天端高さの影響

天端高さを漸次高くすれば越波水量も漸次減少することは種々の実験で明らかにされている。⁽¹⁾⁽⁴⁾ しかし、飛散分布がどうなるかはまだ分っていない。そこで天端高

さの影響を調べる実験を行い、図-33~35の結果を得た。これは風のある場合に天端高さを3~4種類に変化させた飛散分布である。図より天端高さの高いほど飛散

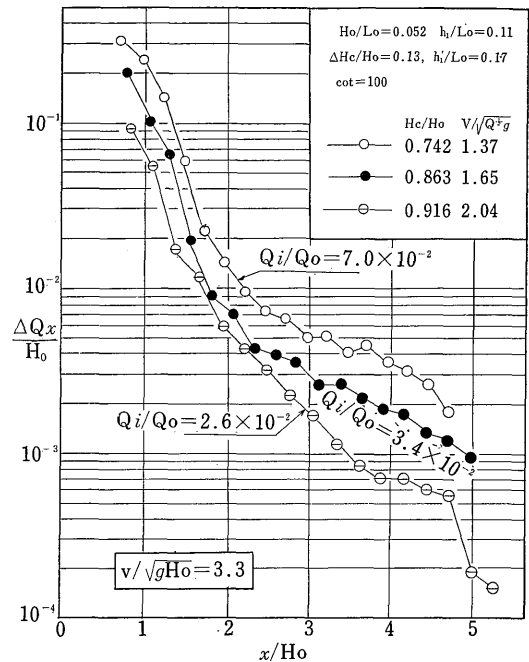


図-33 飛散分布に及ぼす海岸堤防の天端高さの影響(消波堤のない場合)

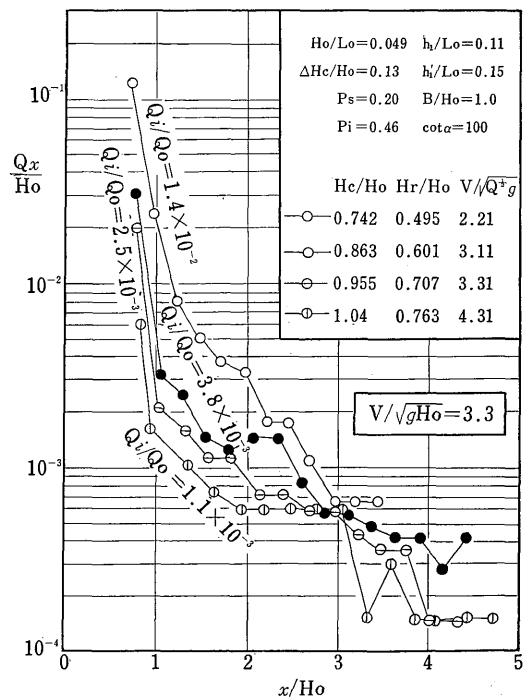


図-34 飛散分布に及ぼす海岸堤防の天端高さの影響(消波堤のある場合)

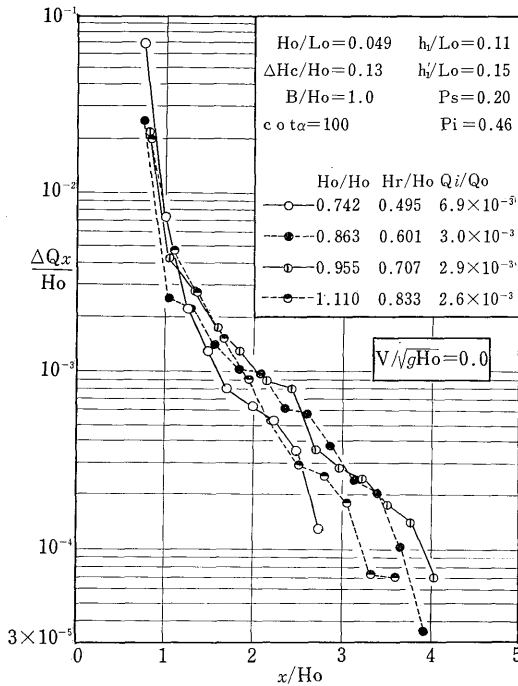


図-35 飛散分布に及ぼす海岸堤防の天端高さの影響(消波堤のある場合)

分布は縮小されるが、海岸堤防の前面に消波堤のある場合が特に著しいことが分る。すなわち越波水量の減少と

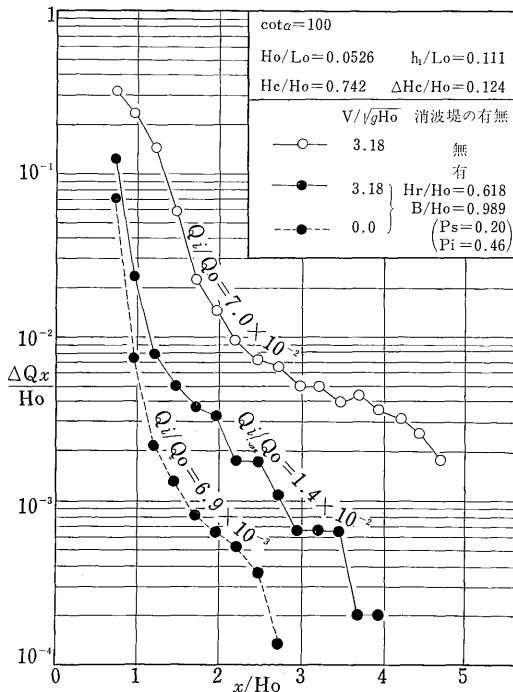


図-36 飛散分布に及ぼす消波堤の影響

飛散分布の縮小との間に相関性があると考えられる。

3.4 消波堤の影響

越波水量を防止するために海岸堤防の前面に消波堤を設置することは今日では一般化された工法であり、越波の模型実験にもとずき施工されて各地でその効果を発揮している。しかし、越波の飛散水量分布が消波堤の設置でどのように変化するかはまだ研究された事がなく未解決の問題点として残されている。そこで消波堤の設置に

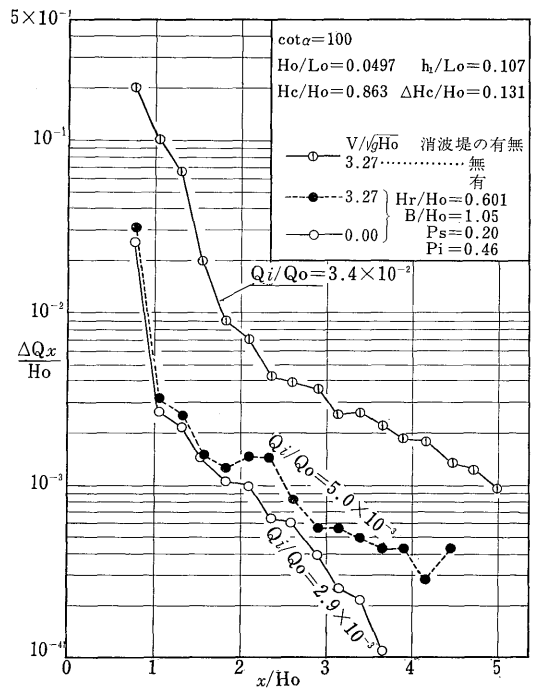


図-37 飛散分布に及ぼす消波堤の影響

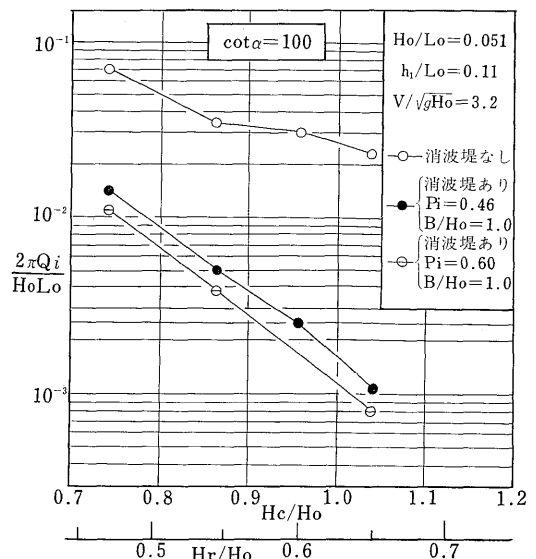


図-38 越波水量に及ぼす消波堤の影響

より飛散水量分布におよぼす影響を調べる実験で図-36 37の結果を得た。また図-38は消波堤の有無による越波水量の比較である。これらの図より風のある場合には消波堤を設置することにより越波水量は $\frac{1}{2}$ に減少し飛散水量分布も著しく縮小され約 $\frac{1}{2}$ の距離内に落下することが分る。

一方、消波堤を設置した場合の風の影響を調べたところ無風に比べ越波水量が約2倍に増大し、飛散水量分布も約1.4~1.7倍に広がること分る。(しかし、図-30, 31のように同程度の越波水量のときは風によって飛散される水量はそれ程多くはなく飛沫状になって遠方へ運ばれる程度である)。

3.5 消波堤の空隙率の影響

消波堤の空隙率が大きいほど越波水量は減少することは明らかにされているが、空隙率の飛散分布に及ぼす影響についてはまだ分っていない。⁽¹⁾そこで消波堤の空隙率を46%と60%の2種類に変化させて飛散分布がどうなるかを調べた。実験結果は図-39に示され越波水量については図-38に示される。

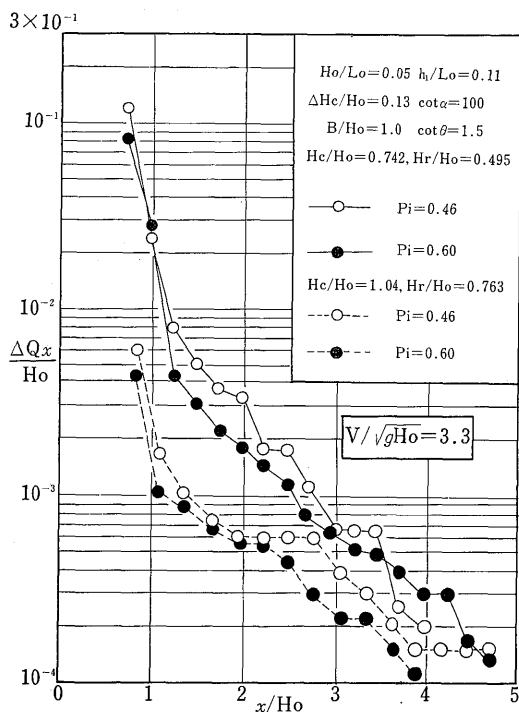


図-39 飛散分布に及ぼす消波堤の空隙率の影響

これらより消波堤の空隙率の大きい方が越波水量は少なく飛散分布も狭いことが明らかになった。

以上の風洞水槽の模型実験で共通して言えることは一般に越波水量が多い程、飛散水量分布も拡大される。そして、風の影響が加わると越波が加速されてさらに広い

範囲に分布することである。それゆえ越波の飛散を防止するには消波堤の設置が非常に効果的であると考えられる。

4. 結 論

越波の飛散水量(水平)分布は種々の要素に支配されるが、本研究で法面勾配, 風, 堤防天端高さおよび消波堤の影響を実験的に検討し, 二三の新しい知見を得ることができた。主な実験結果は次の通りである。

(I) 法面勾配の影響について

- (1) $H_o/L_o=0.02$ の波は $\cot\theta=2.75$ 前後で越波水量が最大になる。
- (2) 砕波後または砕波領域の法面勾配が越波に及ぼす影響と打ち上げ高さに及ぼす影響とは一致しない。
- (3) 波形勾配に対応して越波水量の最大になる法面勾配が存在し, 重複波水深の打ち上げ高さの最大値を与える法面勾配とはほぼ一致する。
- (4) 越波水量の最大になる法面勾配と Miche の理論で完全反射を生ずる最小法面勾配および室田博士の実験の反射率の極大値を示す法面勾配とはほぼ一致する。
- (5) 最も越波が少く, 飛散水量分布の狭い法面勾配は鉛直または逆勾配 ($\cot\theta<0$) である。
- (6) $\cot\theta=1.0$ 前後の法面勾配 ($\cot\theta=0.25\sim1.75$) の越波が最も飛散しやすく飛散分布が最も広い。これは質点の放物線運動の最大水平到達角度とほぼ一致する。
- (7) 全越波水量の60%は法面勾配(ただし $\cot\theta=0.5\sim3.0$) にほとんど無関係に $x/H_o=0\sim1.7$ の範囲に飛散して落下する。しかし, 90%以上の飛散水量は法面勾配により著しく異なり, $\cot\theta=1.0$ 前後が最大の飛散分布を示す。

- (8) 越波水量の多い法面勾配の場合は $x/H_o=0.5\sim1.0$ の間に飛散水量強度の極大点が存在する。
- (9) 越波する場合の最大飛散水平距離は波の打ち上げ高さの水平到達距離よりも遠方へ飛散する。一般に累加飛散率95%の値に近似している。

(II) 風の影響について

- (1) 風によって越波の水塊は加速されて無風に比べてかなり遠方まで飛散する。しかし, 無風の場合の飛散分布より遠方へ飛散する水量は全越波水量に比べてそれほど多くはない。
- (2) 無風と同一程度の越波水量の場合に $x/H_o=0\sim2$ の範囲の飛散水量は無風のときが多く, $x/H_o>2$ では有風のときが多い。
- (3) 無風の場合より越波が多いときは全体的に飛散水量が多く, 分布も広がる。

(III) 堤防天端高さの影響について

天端高さの高い程越波水量が少く、飛散水量強度は減少し飛散分布は縮小される。

（IV）消波堤の影響について

越波の飛散を防止するために海岸堤防前面に消波堤を設置することが非常に効果的であり、消波堤の空隙率の大きいものほど効果が大きい。

「付記」本研究をまとめるにあたり名古屋大学足立昭平教授に終始御指導を賜った。実験の一部に昭和42年度文部省科学研究費（特定研究、各個研究）を使用した。また、2次元造波風洞水槽を新設するにあたり本学の三浦幸平学長、結城朝恭副学長、河津彦一主任教授の絶大な御援助を戴いた。ここに記して深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 高田彰：不透過壁面の線形および透過斜面の空隙が越波量におよぼす影響について，第14回海岸工学講演会講演集，昭和42.10.
- 2) 土木学会誌編集委員会：特集1967年の土木界/その13，高くなる海岸堤防，土木学会誌，第52巻12号，昭和42.12.
- 3) 土木学会，水理公式集，昭和38.8.
- 4) 岩垣雄一，海岸堤防論，水工学シリーズ，64—08土木学会水理委員会，昭和39.7.
- 5) 運輸省港湾局防災課：海岸調査報告書（海岸構造物の機能効果について），昭和42.3.
- 6) 永井莊七郎，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，昭和31.11.
- 7) 岩垣雄一，土屋義人，井上雅雄：風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究（I），第9回海岸工学講演会講演集，昭和37.10.
- 8) 建設省中部地方建設局：由比海岸工事誌，昭和41.3.
- 9) Saville, T. Jr.: Wave run-up shore structures, Transaction, ASCE, Vol. 123, Paper No. 2915, 1958.
- 10) 岩垣雄一，井上雅雄，大堀晃一：のり面上の波の遡上機構に関する実験的研究，第13回海岸工学講演会講演集，昭和41.12.
- 11) Hunt, I.A.: Design of seawalls and breakwaters, Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 85, No. WW 3, Proc. Sept., 1959.
- 12) Wassing, F.: Model investigation on wave run-up carried out in the Netherlands during the past twenty years, Proc. of 6th Conf. on Coastal Engineering, 1958.
- 13) Freeman, J.C. and LeMéhauté, B.: Wave breakers on a beach and surge on a dry bed, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 90, No. HY2, Proc. Mar., 1964.
- 14) Miche, R.: Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes, Annales des Ponts et Chaussées, May-June 1951.
- 15) LeMéhauté, B., Koh R.C.Y. and Hwang Li-San.: A synthesis on wave run-up, Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 94, No. WW 1, Proc. Feb., 1968.
- 16) 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，昭和32.12.
- 17) A. Paape: Experimental data on the overtopping of seawalls by waves, Hydraulics Laboratory Delft, Publication, No. 23, 1960.
- 18) 岩垣雄一，井上雅雄，太田隆義：傾斜堤の越波機構に関する実験的研究（その2）：関西支部年次学術講演会講演概要，昭和43.5.
- 19) 室田明：粗な斜面からの反射に関する実験的研究，第14回海岸工学講演会講演集，昭和42.10.
- 20) Greslou, L. et Y. Mahe: Etude du coefficient de reflexion d'une houle sur un obstacle constitue par un plane incline, Proc. 5th Conf. on Coastal Eng., 1954.
- 21) Rudolph P. Savage: Wave run-up roughened and permeable slope, Proc. of ASCE, WW. Aug., 1958.
- 22) 岩垣雄一，土屋義人，井上雅雄：風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究（その1）第9回海岸工学講演会講演集，昭和37.10.