

海岸堤防の越波の飛散(水平)分布について

—のり面勾配の影響—

高 田 彰*

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は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海岸堤防あるいは防波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上げ高さを加えたものに基づいて決められてきたが、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十分であり、海岸堤防の機能も十分果たしうると考えられてきた。しかし、年ごとに海岸堤防の背後地の利用度が高まり、海岸堤防に対する期待が非常に大きくなってきた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、よりいっそう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、波圧、越波水量、越波の飛散分布および排水能力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号についてそれぞれ貴重な越波水量の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。しかし、海岸堤防を越える水の飛び方(飛散分布)についてはこれまでに、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。

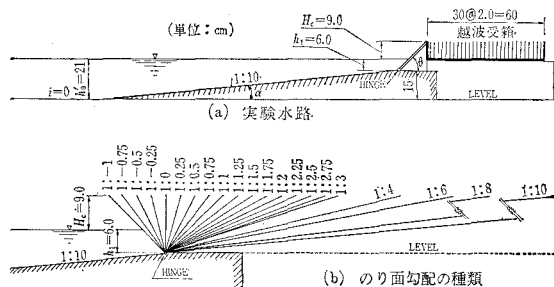
越波が海岸堤防背後へいかなる分布で落下するかということは排水溝の位置と規模、海岸堤防背面の被覆範囲および背後地利用計画などを決めるための基礎資料としてとくに重要である。

本研究はこのような観点から斜面堤の越波の飛散水量(水平方向)分布をとりあげ、のり面勾配が越波水量とその飛散分布にどのような影響をおよぼすかを実験的に調べたものである。今回は砕波領域の波を対象にして越波水量を最大にするのり面勾配、波の打ち上げ高さおよび反射率と越波水量の関係、のり面勾配と飛散水量分布および飛散水量加積曲線(累加飛散水量率)について述べる。

2. 実験装置および方法

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本学の造波可傾水路で実験を行なった。この装置は幅0.3m、高さ0.5m、長さ21.4mの両面ガラス張りであり、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1/50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の長方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往復運動できるようにした。 $H_{max}=9.5$ cm(水深 $h_0'=21$ cm)。

図-1 のり面勾配の実験



* 正会員 工修 中部工業大学助教授 土木工学科

表-1 実験の波

	T_0' (sec)	一様水深 h_0' (cm)	h_0' での値 (cm)		深 水 波 (cm)		H_0/L_0	h_0'/L_0	h_0'/H_0	のり先水深 h_1 (cm)	h_1/L_0	h_1/H_0
			H_0'	L_0'	H_0	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

$T=0.5\sim 1.8$ sec の規則波を発生させることができる。

実験は図-1に示すように一様水深 $h_0'=21$ cm, 海底勾配 $\cot \alpha=10$, のり先(堤脚)水深 $h_1=6.0$ cm および斜面堤の天端高 $H_0=9.0$ cm とし, のり面勾配が可変できるように堤脚部をヒンジにした。のり面勾配は鉛直 ($\cot \theta=0$) $\sim \cot \theta=10$ 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 種類ののり面勾配について調べた。実験波は $T=1.6$ sec と 1.75 sec の 2 種類とし, 表-1に示すように $H_0/L_0=0.019$ の碎波領域の波浪である。

越波水量の測定は多いときは 3 $\sim$ 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。越波の飛散分散の測定は図-1に示すように越波受箱に 2 cm 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ようにした。各スリットにはゴム栓をつけ, それをメスシリンダーに受けて飛散距離と飛散水量との関係を調べた。

3. 実験結果と考察

(1) 波の打ち上げ高さとのり面勾配

波の打ち上げ高さについては多数の研究があり, 種々の影響要素との関係が明らかにされている^{3), 4)}。

ここでは波の打ち上げ高さとのり面勾配の影響を調べることによってのり面勾配が越波水量におよぼす影響とどのような相関性があるかを明らかにする目的で実験を行なったものである。実験の結果は図-2に示される。

この値は第 4 波から第 8 波までの 5 波に対する測定値を平均したもので, 跳波(あるいは水塊)の相対打ち上げ高さ R_s/H_0 を対象とすると $\cot \theta=0$ 前後が最大となり $|\cot \theta|$ が大きくなるほど減少する。波の実質部分(連続体)の相対打ち上げ高さ R_w/H_0 を対象とすると $\cot \theta$

図-2 波の打ち上げ高さとのり面勾配
(著者の実験)

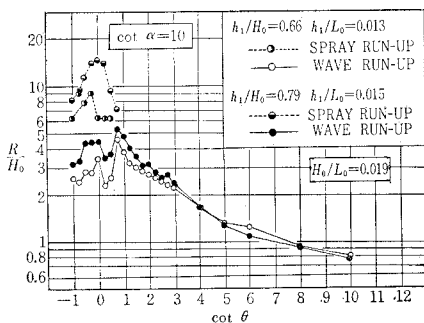
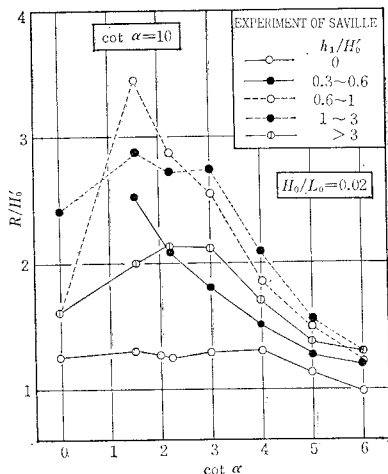


図-3 Saville の打ち上げ高さの実験



$=0$ と 0.75 で極大, $\cot \theta=0.15$ で極小となり $\cot \theta=0.75$ が最大値となる。 $\cot \theta > 0.75$ では $\cot \theta$ の大きいほど R/H_0 は小さくなる。

一方, 従来の研究成果と比較すると Saville の実験⁹⁾で $H_0/L_0=0.02$ の波については図-3で示される。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 $\cot \theta=2\sim 3$ の間で最大値となる。この図の $h_1/H_0'=0.6\sim 1.0$ の実験値が著者の実験の範囲に相当するが, 波の実質部分を対象とした R_w/H_0 (図-2)の傾向によく似ていることがわかる。しかし, 岩垣らの孤立波の実験¹⁰⁾では周期波と異なり, $\cot \theta$ 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。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) 斜面上で碎波する波

Hunt の実験によれば¹¹⁾

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

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。

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

$\left(\frac{H_0}{L_0} \right)_{\text{crit}}$: 反射率 0.5 となる限界波形勾配

r : 粗度に関する係数 (≤ 1.0)

p : 空げきに関する係数 (≤ 1.0)

Wassing の実験によれば¹²⁾

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

$A: H/L$ と R の傾度による定数

B : 堤防形状, のり面特性, 海浜状態による定数

Freeman-LeMéhauté の特性曲線法によれば¹³⁾

$$\frac{R}{h_0'} = \frac{U_{st}^2}{2gh_0'} \frac{(1+a)(1+2a)}{1 + \frac{f \cot \theta}{a^2}} \dots\dots\dots (4)$$

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

a : 遡上波の先端の係数 $\left(= \frac{\sqrt{g\tau_s}}{U_s} = 0 \sim \frac{1}{2} \right)$

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 が小さくなるほど, 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わかる。

b) 砕波しない波 (surging waves)

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

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

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。

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

$\left(\frac{H_0}{L_0} \right)_{\max}$: 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⁾,

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

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。

$\theta = \pi/2$ のとき Miche の理論では

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

Sainflou の理論では¹¹⁾

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

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, あるのり面勾配までは砕波を生じ, のり面が急になるほど R/H_0 が大きくなる。しかし, あるのり面勾配を境としてそれ以上急なのり面勾配では砕波を生じないいわゆる surging waves の現象を呈し, 逆にのり面が急になるほど R/H_0 が減少する。それゆえ, breaking waves と surging waves の境界にお

表-2 R/H_0 を最大にする臨界のり面勾配

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

いて R/H_0 の極大値が存在する。すなわち breaking waves の R/H_0 は θ が大きいほど, 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, 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, 式 (6) より H_0/L_0 の小さい波ほど緩くなる。各波形勾配に対する $\cot \theta_c$ を求めれば, 表-2 のとおりである。

一方, Granthem の実験によれば $\cot \theta = 0.47 \sim 3.73$, $0.066 < h_1/L < 0.434$, $0.012 < H/L < 0.112$ 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が得られているように思われる¹⁵⁾。

(2) 越波水量

のり面勾配が越波水量にどのような影響をおよぼすかについて, 周期波では, 石原・岩垣・三井¹⁶⁾, Paape¹⁷⁾ 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, 周期波については波の打ち上げ高さと同様越波水量の最大になるのり面勾配が存在することが実験的に指摘されている^{11), 16)}。しかし越波に関係する要素が多いため, 最大越波水量の生ずるのり面勾配を詳細に検討するまでには至っていない。そこでこれを確認するため 21 種類ののり面勾配について実験を行なった。その結果が 図-4 に示される。この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。

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

Q_i : 1 周期の単位幅当りの越波水量

図-4 無次元越波水量とのり面勾配

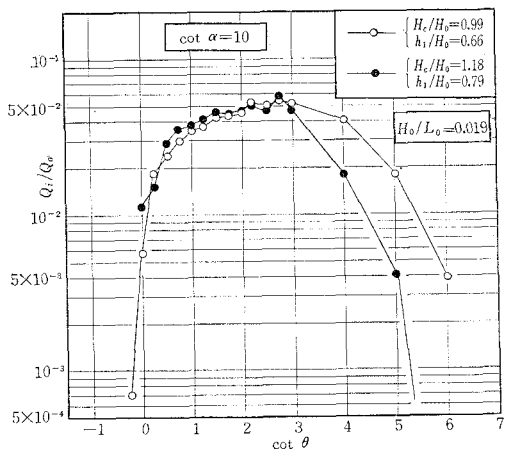


図-5 無次元越波エネルギーとの面勾配

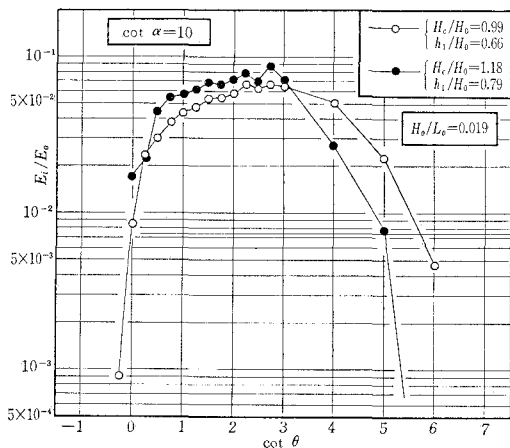
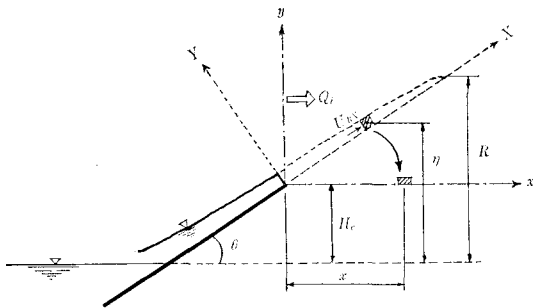


図-6 越波エネルギー



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

$$Q_0 = \frac{H_0 L_0}{2\pi} \quad (11)$$

図より越波水量の最大は $\cot \theta = 2.75$ であり, $\cot \theta = 1 \sim 3$ の間は $\cot \theta = 0$ に比して非常に越波水量が多い。

越波をエネルギー量で示すと 図-5 に示され, 図-4 と同様 $\cot \theta = 2.75$ 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-6 よりつぎの方法で求めたものである。

$$E_i = \int_{H_c}^R \rho g \eta dQ_i + \int_0^{x_R} \rho \frac{U_{Rx}^2}{2} dQ_i \\ \propto \rho g H_c Q_i \quad (12)$$

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

E_i : 一周期の越波のエネルギー (単位幅当り)

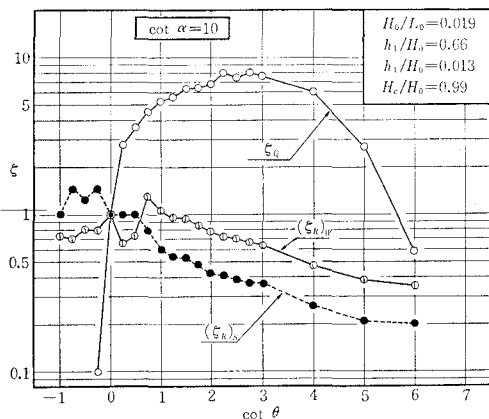
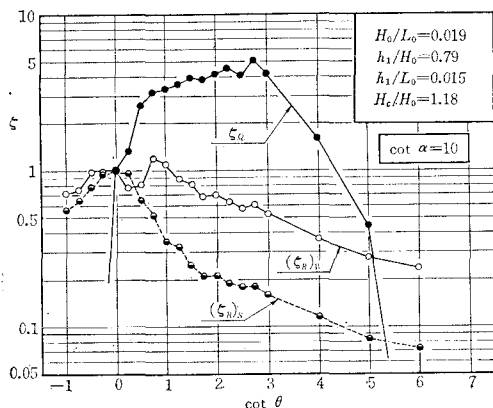
E_0 : 深水波の一周期の全エネルギー

(単位幅当り)

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

図-7 越波水量と波の打ち上げ高さの比較
($H_c/H_0=0.99$)図-8 越波水量と波の打ち上げ高さの比較
($H_c/H_0=1.18$)

一方, 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とした場合の各のり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-7, 8 である。なお, 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 $\cot \theta$ 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-3の Saville の実験値と比較しても明らかであり, 碎波領域の波は打ち上げ高さの最大になるのり面勾配では越波水量は最大にならず $H_0/L_0=0.02$ の波は $\cot \theta = 2.75$ 前後で越波水量が最大になることがわかる。したがって碎波後の波あるいは碎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は明らかである。しかし, Saville の実験で堤脚水深が深く, $h_1/H_0 > 3$ の波になると $H_0/L_0=0.02$ の打ち上げ高さは $\cot \theta = 2 \sim 3$ 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状態の打ち上げ高さ(越波しないとした場合)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わかる。したがって、越波水量は堤防に衝突する波形に関係していることが考えられる。また越波水量とのり面勾配の関係はのり先水深 h_1 に無関係にあるのり面勾配で最大になり、その越波を最大にするのり面勾配は重複波水深で打ち上げ高さを最大にするのり面勾配と一致すると考えられる。これらについては現在実験的に詳細に検討している。

(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 はつぎの式で表わされる¹¹⁾。

$$r = \zeta \frac{r \left(\frac{H_0}{L_0} \right)_{\max}}{\frac{H_0}{L_0}} = \zeta \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi} \frac{1}{\frac{H_0}{L_0}} \quad \dots (14)$$

ζ : エネルギー損失係数 (≤ 1.0)

$r \left(\frac{H_0}{L_0} \right)_{\max}$: 任意の θ に対して全反射する波の最大波形勾配で、式 (6) で示される。

図-9 波の反射率とのり面勾配
(室田, Greslou-Mahe, および Miche より)

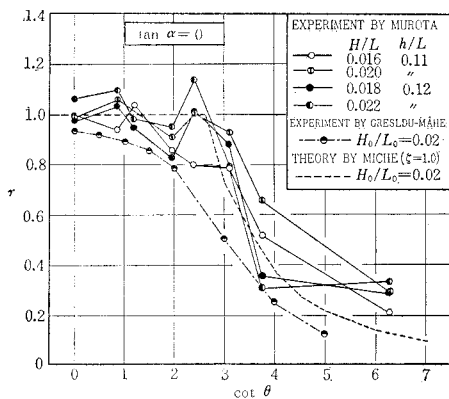


図-10 波の反射率とのり面勾配
(室田, Greslou-Mahe, および Miche より)

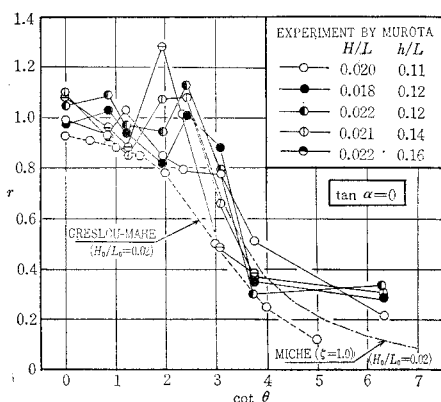
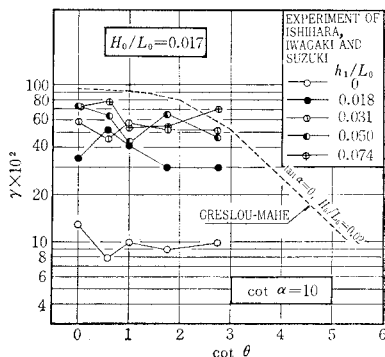


図-11 砕波領域の波の反射率
(石原・岩垣・鈴木より)



$H_0/L_0 = 0.02$ の波について式 (14) と室田の実験値¹⁹⁾ および Greslou-Mahe の実験値²⁰⁾ を比較したものが 図-9, 10 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 $\cot \theta = 0 \sim 3.1$ における反射が $\cot \theta < 3.1$ よりも非常に大きく、とくに $\cot \theta = 2.4$ 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_0/L_0 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。これらのことは筆者の越波水量の実験で 図-4, 5 に示したように $\cot \theta = 2.75$ 前後で最大値を有することと比較して非常によく一致しており注目される事実である。

図-11 は海底勾配 1/10 の砕波領域の波について石原・岩垣らの反射率の実験値である。実験は $\cot \theta = 0 \sim 2.75$ の範囲しか行なわれていないが、この範囲内ののり面勾配に対する r の増減は非常に少なく近似的にはば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ゆるいほど水平の速度成分が大きくなる事実を越

図-12 波の反射率と打ち上げ高さの相関性
(Miche, および Saville より)

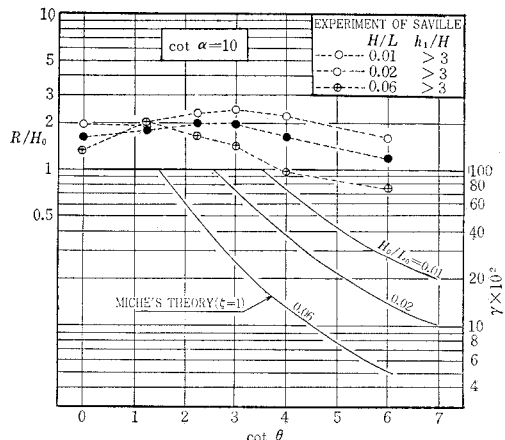
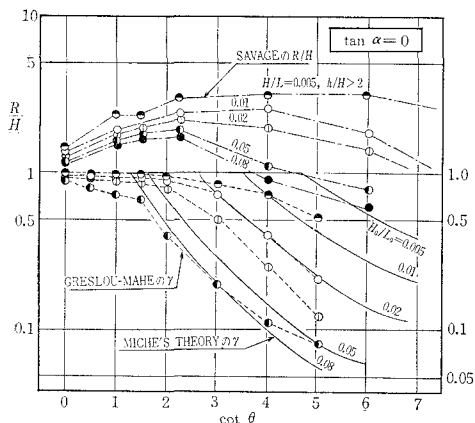


図-13 波の打ち上げ高さと反射率の相関性
(Savage, Miche および Greslou-Mahe より)



波水量が増大する理由にあげることができると考えられる。

図-12 は重複波水深領域の波の反射率と打ち上げ高さの関係を式(14)の反射率の式と Saville の打ち上げ高さの実験値⁹⁾で示したものである。図-13 は同様に Savage の打ち上げ高さの実験値²¹⁾と反射率を比較したものである。これらより与えられた H_0/L_0 に対し全反射する最小のり面勾配において R/H が最大になること、そして H_0/L_0 の大きくなるほど全反射する最小のり面勾配は緩くなり、それにつれて R/H_0 の最大点も緩勾配へ移動することがわかる。これらのことは越波水量についても同様なことがいえると考えられる(これについては現在実験中である)。

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のり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およぼしていることが推測される。

(4) 越波の飛散(水平)分布とのり面勾配

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-14 に示すような斜面堤の越波について考える。

飛散水量分布に關係する要素を無次元量で示せば次式のようにになる。

$$\frac{\Delta Q_x}{H_0} = f\left(\frac{x}{H_0}, \frac{H_0}{L_0}, \frac{h_1}{H_0}, \cot \alpha, \cot \theta, \frac{V}{\sqrt{gH_0}}, \frac{H_c}{H_0}, \frac{\Delta H_c}{H_0}, \frac{Q_i}{Q_0}\right) \quad (15)$$

本実験は $H_c/H_0 = \text{一定}$, $\Delta H_c/H_0 = 0$, $V/\sqrt{gH_0} = 0$ (無風), $\cot \alpha = 10$ として表-1 の ① の波について $\Delta Q_x/H_0$ と x/H_0 の関係を $\cot \theta$ のパラメーターで調べた。実験の結果は図-15~18 に示される。図-15 は代表的な θ ($\cot \theta = 0 \sim 5$) について、図-16~18 は小区分

した θ について比較したものである。図-15 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

図-14 越波の飛散分布

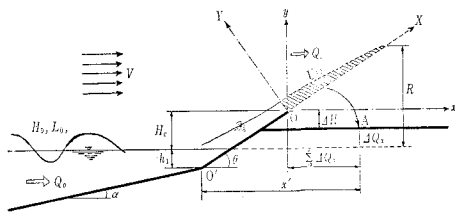


図-15 飛散水量分布およびのり面勾配
($\cot \theta = 0 \sim 5.0$)

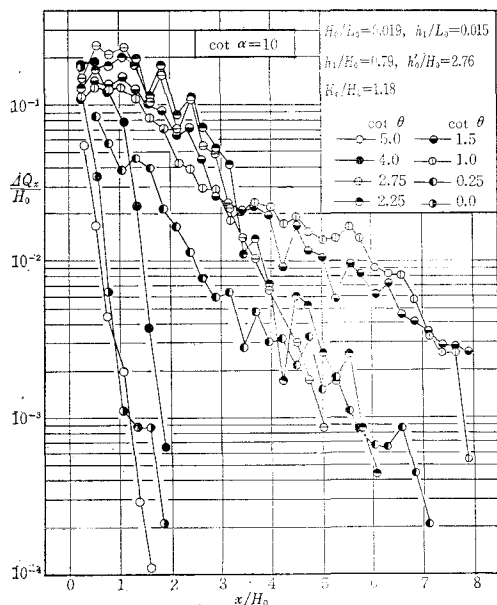


図-16 飛散水量分布とのり面勾配
($\cot \theta = 0 \sim 1.9$)

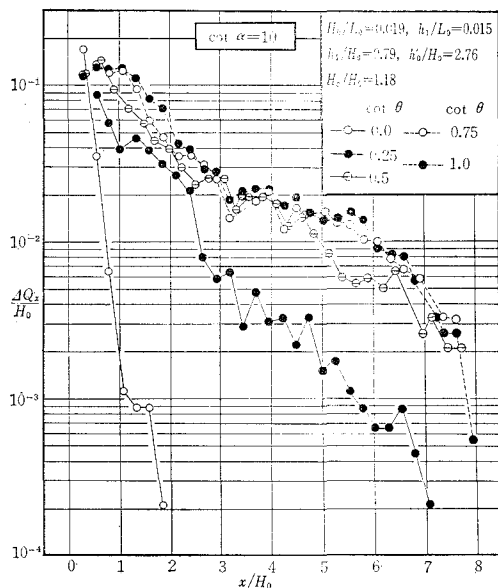


図-17 飛散水量分布とりの面勾配
($\cot \theta = 1.25 \sim 2.25$)

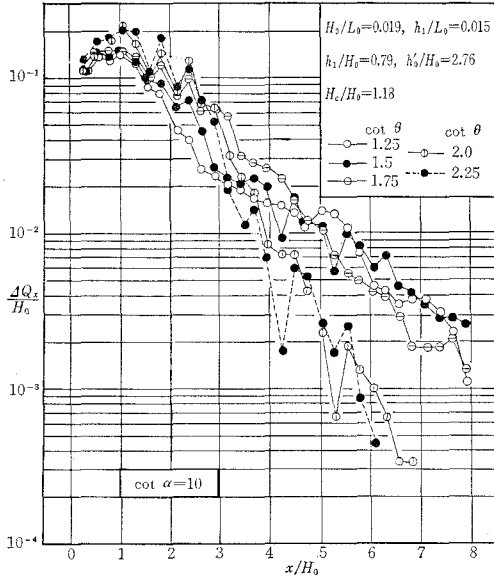


図-18 飛散水量分布とりの面勾配
($\cot \theta = 2.5 \sim 5.0$)

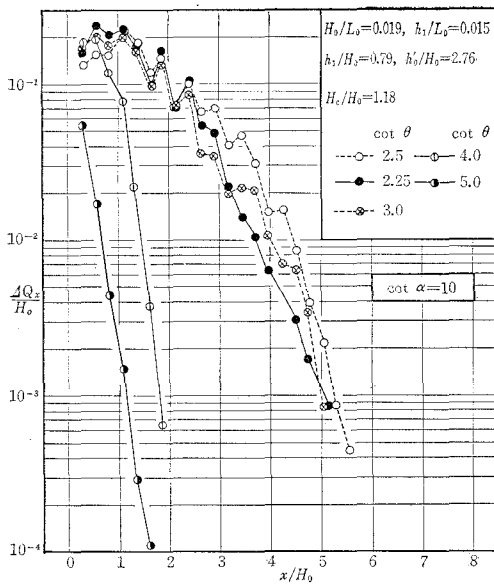


図-19 飛散水量加積曲線とりの面勾配
($\cot \theta = 0 \sim 5.0$)

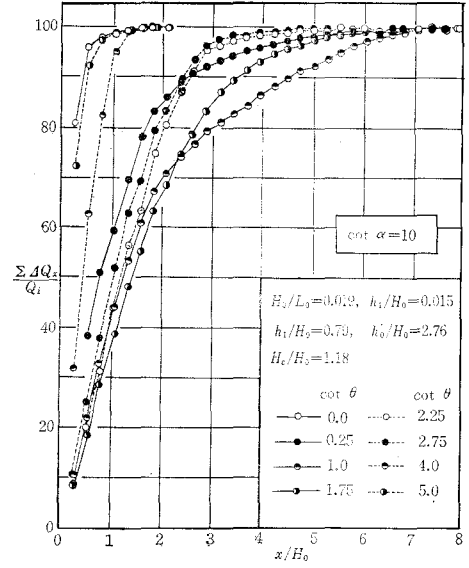
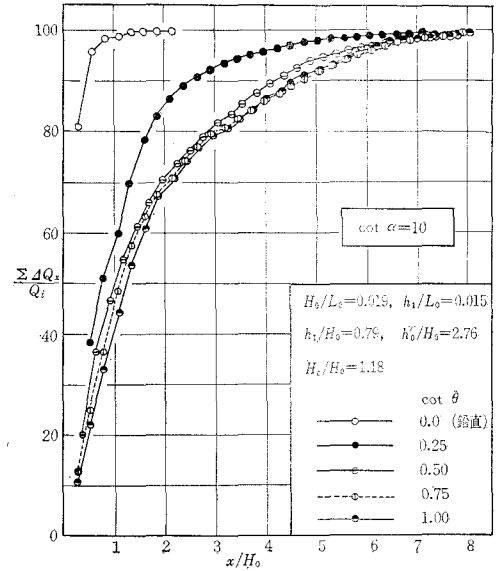


図-20 飛散水量加積曲線とりの面勾配
($\cot \theta = 0 \sim 1.0$)



m, n : 実験定数

付近が最もせまい飛散分布となる。越波の少ないのり面勾配 ($\cot \theta = 0, 4$ および 5) では、直線的に急激に減少し、越波の大部分が $x/H_0 = 0 \sim 2$ の間に落下する。越波の多いのり面勾配 ($\cot \theta = 1.0 \sim 3.0$) は飛散水量が $x/H_0 = 1.0$ 前後で極大点であり、 $x/H_0 > 2$ でほぼ直線的に減少しほとんど大部分は $x/H_0 = 0 \sim 8$ 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。

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

図-16 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くなる。図-17 より $\cot \theta = 1.25 \sim 2.25$ の範囲は部分的に例外はあるが $\cot \theta$ が大きいほど狭くなる。また $x/H_0 = 1.0$ で飛散水量強度が最大になる。図-18 より $\cot \theta = 2.5 \sim 5.0$ の範囲は部分的に例外はあるが、 $\cot \theta$ が大きくなるほど狭くなることがわかる。また $x/H_0 = 0.5 \sim 0.1$ に飛散水量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(累加飛散率)で示したものが図-19~22で

図-21 飛散水量加積曲線とのり面勾配
($\cot \theta = 1.25 \sim 2.25$)

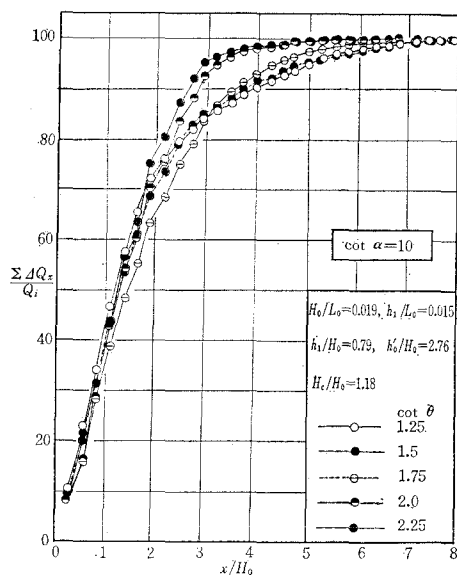
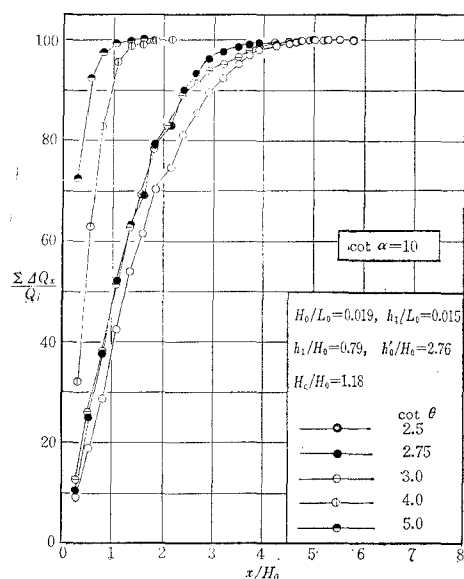


図-22 飛散水量加積曲線とのり面勾配
($\cot \theta = 2.5 \sim 5.0$)



ある。

図-23 は以上の結果をさらに明確に示す目的で 12 種類の累加飛散率をパラメータにして、 $\cot \theta$ と x/H_0 の関係を表わしたものである。これらより、 $\cot \theta = 0.5 \sim 1.5$ で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

図-23 累加飛散率とのり面勾配

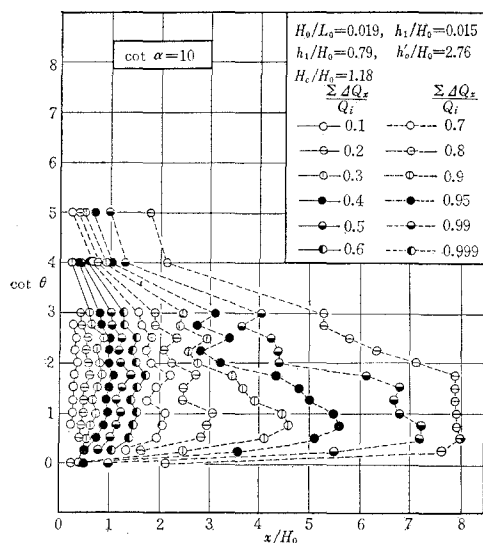
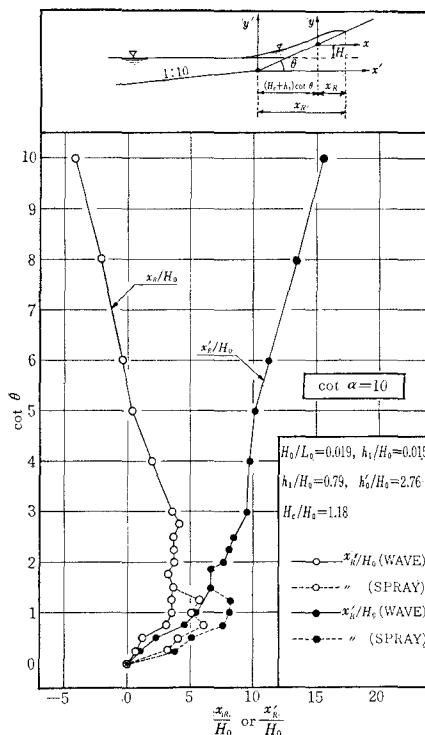


図-24 打ち上げ高さの水平到達距離



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。とくに 0.9 以上になると $\cot \theta = 0.5 \sim 1.75$ の飛散率は非常に大きい。

著者の実験で越波の飛散分布の広がり方が $\cot \theta = 1.0$ 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($\theta = \pi/4$)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ることができる。

図-25 堤脚(のり先)を原点とする飛散水量分布
($\cot \theta = 0 \sim 1.5$)

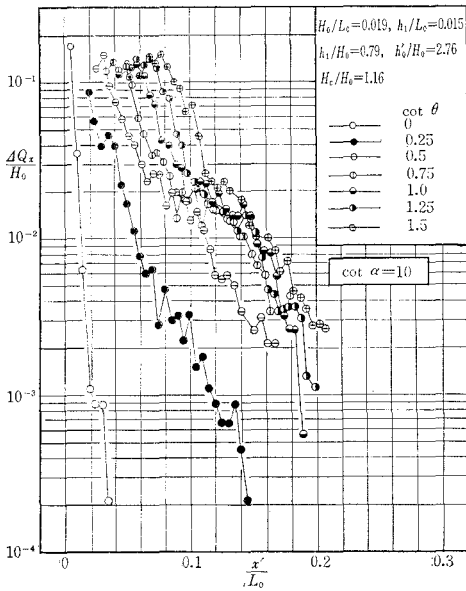
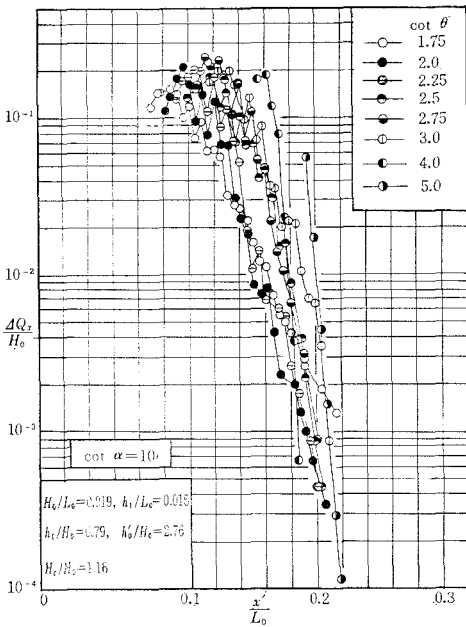


図-26 堤脚(のり先)を原点とする飛散水量分布
($\cot \theta = 1.75 \sim 5.0$)



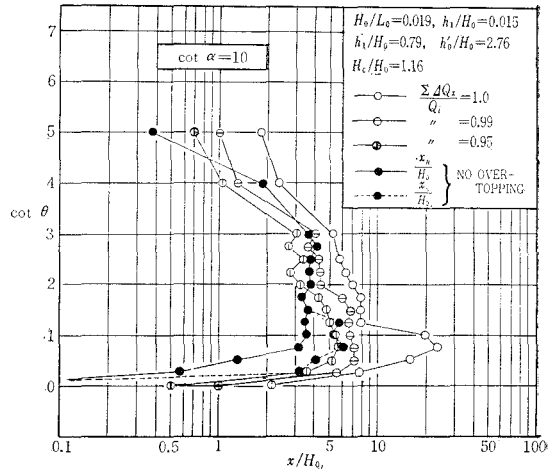
$$y = \frac{g x}{2 U_{R0}^2 \cos^2 \theta} \left(\frac{U_{R0} \sin 2 \theta}{g} - x \right) \dots \dots \dots (18)$$

U_{R0} : 斜面堤の天端における打ち上げ波の流速。

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-24 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する場合とはほぼ同様な結果が得られる。天端からの水平到達

図-27 打ち上げ高さの水平到達距離と飛散分布の関係



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がほぼ一定で, $\cot \theta = 2.75$ において最大であるが, 跳波(水塊)を対象とすると $\cot \theta = 1.0$ 前後が最大となる。のり先(堤脚部)からの水平到達距離 x_R'/H_0 について比較すると $\cot \theta$ の大きいほど到達距離は大きくなる。一方, 図-25, 26 は越波した場合の $4Q/H_0$ 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-27 は 図-23, 図-24 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 $\cot \theta = 0.25 \sim 1.75$ の間は累加飛散率が 0.95 の x/H_0 に近似し, $\cot \theta = 2 \sim 5$ の間は 0.97 の x/H_0 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さらに遠方に飛散することがわかる。

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, 本研究でのり面勾配の影響を実験的に検討し, 最大越波を生ずるのり面勾配, 打ち上げ高さおよび反射率と越波水量の関係, 飛散水量分布, および飛散水量加積曲積(累加飛散率)について二, 三の新しい知見を得ることができた。主な実験結果はつぎのとおりである。

(1) $H_0/L_0 = 0.02$ の波の越波水量は $\cot \theta = 2.75$ 前後で最大になる。

(2) 碎波後または碎波領域にあるのり面勾配が越波におよぼす影響と打ち上げ高さにおよぼす影響とは一致せず相関性がない。

(3) 任意の波形勾配に対応する越波水量の最大になるのり面勾配が存在し, 重複波水深の打ち上げ高さの最大値を与えるのり面勾配とほぼ一致する。

(4) 越波水量の最大になるのり面勾配と Mische の理論で完全反射を生ずる最小のり面勾配および室田博士の実験の反射率の極大値を示すのり面勾配とほぼ一致する。

(5) 最も越波が少なく、飛散水量分布の狭いのり面勾配は、鉛直または逆勾配 ($\cot \theta < 0$) である。

(6) $\cot \theta = 1.0$ 前後のり面勾配 ($\cot \theta = 0.25 \sim 1.75$) の越波が最も飛散しやすく飛散分布が広い。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% はのり面勾配 (ただし $\cot \theta = 0.5 \sim 3.0$) にほとんど無関係に $x/H_0 = 0 \sim 1.7$ の範囲に飛散して落下する。しかし、90% 以上の飛散水量はのり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) 越波水量の多いのり面勾配の場合は $x/H_0 = 0.5 \sim 1.0$ の間に飛散水量強度の最大点が存在する。

(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。波の打ち上げ高さの水平到達距離は一般に累加飛散率 95% の値に近似している。

[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。また、実験の一部に昭和 42 年度文部省科学研究費 (特定, 各個研究) を使用した。ここに記して深く感謝の意を表します。

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 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 巻第 12 号, 昭 42.12.
- 3) 土木学会, 水理公式集, 昭 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 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 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 35.11.
- 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 (I), 第 9 回海岸工学講演会講演集, 昭 37.10.
- 8) 建設省中部地方建設局: 由比海岸工事誌, 昭 41.3.
- 9) Saville, T. Jr.: Wave run-up shore structures, Trans., A.S.C.E., Vol. 123, Paper No. 2915, 1958.
- 10) 岩垣雄一・井上雅夫, 大堀晃一: のり面上の波の遇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 41.12.
- 11) Hunt, I.A.: Design of seawalls and breakwaters, Jour. 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 Le Méhauté, B.: Wave breakers on a beach and surge on a dry bed, Jour. of the Hydraulics Div., A.S.C.E., Vol. 90, No. HY 2, Proc., Mar. 1964.
- 14) Mische, R.: Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes, Annales des Ponts et Chaussées, May-June., 1951.
- 15) Le Méhauté, B., Koh, R.C.Y., and Hwang Li-San: A synthesis on wave run-up, Jour. 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 32.11.
- 17) Paape, A.: Experimental data on the overtopping of seawalls by waves, Hydraulics Laboratory Delft, Publication, No. 23, 1960.
- 18) 岩垣雄一・井上雅夫・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 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 42.10.
- 20) Greslou, L. et Y. Mahe: Etude du coefficient de reflexion d'une houle sur un obstacle constituée par un plane incline, Proc. 5th Conf. on Coastal Eng., 1954.
- 21) Rudolph P. Savage: Wave run-up roughened and permeable slope, Proc. of A.S.C.E., WW, Aug., 1958.