越波の飛散分布について*

高田 彰**

1. まえがき

年ごとに海岸堤防および護岸の背後地の利用度が高まり，海岸堤防および護岸に対する期待度が急速に大きくなっている。それゆえ越波に関する問題が各地で検討されているが，越波量はこれまでの研究によればかなり明らかにされており，算定式および算定図によって越波量を推定できる段階にまで進歩している[2)~7)]。しかし，越波の飛散分布については問題点を提起した程度にとどまっており，まだ十分検討がなされていないようである[1),8)~10)]。

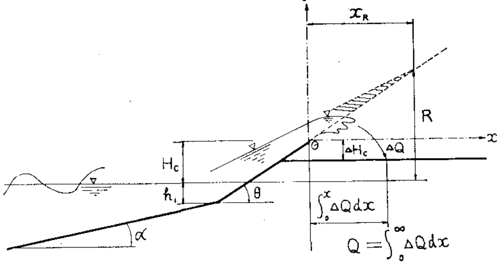
海岸堤防および護岸の越波が背後地へどのような分布で飛散するかということは排水溝の位置と規模，被覆範囲および背後地の利用計画などを決めるための基礎資料となるであろう。

越波におよぼす風の影響は非常に大きく[8)]，また，越波が問題になるのは一般に台風および暴風時のときであるので，越波の飛散と風は密接な関係にあるといえる。したがって，越波の飛散分布を議論する場合に風を考慮した検討が必要であるが，この研究では，第一段階として，無風時における越波を対象にして，鉛直壁および斜面堤の越波の飛散分布が，堤脚水深，波形勾配およびのり勾配によって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。

2. 実験方法

(1) 飛散分布の無次元表示

越波の水平方向の飛散分布は一般に1周期当りの波について考えるが，距離と飛散水量の関係で表わす場合と



図—1 越波量とその飛散分布

距離と累加飛散率の関係で表わす場合がある。いま，**図—1** に示すような一様な壁体における越波の飛散分布を無次元量で表わせば次のようになる[1),11)]。

$$\frac{\Delta Q}{Q}=\phi_1(x/H_0,\ H_0/L_0,\ h_1/L_0,\ \theta,\ \alpha,\ H_c/H_0,\ \Delta H_c/H_0) \cdots\cdots(1)$$

ここに，ΔQ: 天端より水平距離 x における1周期当りの単位面積の飛散水量，Q: 1周期当りの越波量，x: 天端からの水平距離，H_0: 沖波波高，L_0: 沖波波長，h_1: 堤脚水深，θ: のり面傾斜角，α: 海底の傾斜角，H_c: 静水位上の天端高，ΔH_c: 天端より背後地盤までの高さである。

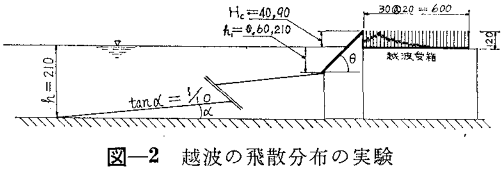
$$\varepsilon=\frac{1}{Q}\int_0^x \Delta Q dx=\phi_2(x/H_0,\ H_0/L_0,\ h_1/L_0,\ \theta,\ \alpha,\ H_c/H_0,\ \Delta H_c/H_0) \cdots\cdots(2)$$

ここに，ε は累加飛散率であり，1周期の越波量に対して水平距離 x 以内に落下する飛散水量の割合を表わす。

(2) 実験方法

式 (1) および式 (2) において，$\tan\alpha=0$ および 1/10，$H_c/H_0=$const.，$\Delta H_c/H_0=0$ として，$\Delta Q/Q$ および ε が，x/H_0，H_0/L_0，h_1/L_0 および θ によってどのように変化するかを調べた。

実験は **図—2** に示すように，一様水深 $h=21$ cm, $\tan\alpha$



図—2 越波の飛散分布の実験

$=1/10$, $\cot\theta=0\sim5$, $H_c=4$, 6 および 9 cm, $h_1=0$, 6 および 21 cm とした。実験波は周期 $T=1.0$, 1.2 および 1.6 sec, 沖波波高 $H_0=7.9$, 7.2 および 7.6 cm としたので，実験条件の諸元は **表—1** に示される。なお，堤脚水深 $h_1=0$ を汀線 (B.L. と略記)，$h_1=6$ cm を砕波水深領域 (B.W.D. と略記)，$h_1=21$ cm を重複波水深領域 (S.W.D. と略記) とした3つの分類の波について考察した。しかし，天端より背後に落下した越波の水塊が，落下の衝撃でさらに飛散したり，あるいは多量の場合は流下するといった落下後の越波の挙動については今回は考慮しないことにした。

---

* 第15回海岸工学講演会講演集[1)] (1968-12) において一部発表

** 正会員 工修 中部工業大学助教授 土木工学教室

表—1 実験条件

Run No.	I			II			III		
水路一様水深 (cm)	21.0			21.0			21.0		
周期 T (sec)	1.6			1.2			1.0		
深水波高 H_0 (cm)	7.6			7.2			7.9		
深水波長 L_0 (cm)	399.4			224.7			156.0		
深水波形勾配 H_0/L_0	0.019			0.032			0.051		
堤脚水深 h_1 (cm)	0	6.0	21.0	0	6.0	21.0	0	6.0	21.0
海底勾配 $\tan\alpha$	1/10	1/10	0	1/10	1/10	0	1/10	1/10	0
比水深 h_1/L_0	0	0.015	0.053	0	0.027	0.093	0	0.038	0.135
相対水深 h_1/H_0	0	0.789	2.75	0	0.833	2.92	0	0.759	2.66
静水位上天端高 H_c (cm)	6.0	9.0	9.0	4.0	9.0	9.0	4.0	9.0	9.0
相対天端高 H_c/H_0	0.789	1.18	1.18	0.556	1.27	1.27	0.506	1.14	1.14

3. 実験結果とその考察

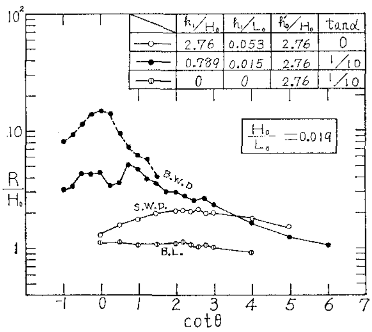
3.1 堤脚水深の影響

(1) 波の打ち上げ高と越波量

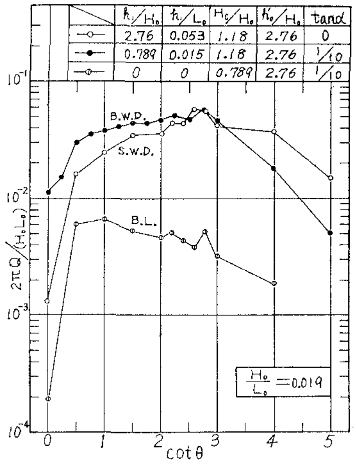
図—3 は $H_0/L_0=0.019$ の重複波水深領域 (S.W.D.), 砕波水深領域 (B.W.D.) および汀線 (B.L.) における波の打ち上げ高とのり勾配の関係を示す。これより，重複波水深領域 (S.W.D.) では $\cot\theta≒2.6$, 砕波水深領域 (B.W.D.) では $\cot\theta≒0$, 汀線 (B.L.) では $\cot\theta≒2.2$ において波の打ち上げ高が最大となることがわかる。一方，越波量については，図—4 のように示される。これより，重複波水深領域 (S.W.D.) では $\cot\theta≒2.6$, 砕波水深領域 (B.W.D.) では $\cot\theta≒2.7$, 汀線 (B.L.) では $\cot\theta≒1.0$ でそれぞれ越波量が最大になることがわかる。また図—3 および 図—4 より重複波水深領域 (S.W.D.) では波の打ち上げ高と越波量を生じるのり勾配はほぼ一致するが，砕波水深領域 (B.W.D.) および汀線 (B.L.) では一致しないことがわかる[12]。

(2) 越波の飛散水量

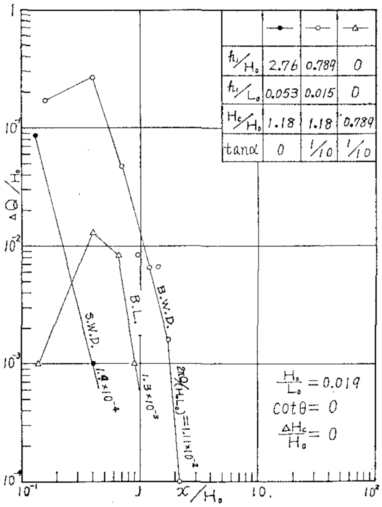
$H_0/L_0=0.019$ の波について，$\cot\theta=0$, 1, 2, 3 および 4 の越波の飛散水量の分布は 図—5 に示される。これらより，越波の飛散水量の分布に二つのパターンがある。一つは天端の飛散水量が最大で，天端を離れると急激に減少する場合と，他の一つは，天端より少し離れた地点に飛散水量の最大になるところがあり，それを離れると急激に減少する場合とがある。前者は一般に越波量の少ない場合に見られ，後者は越波量の多い場合に見られる。また，一般に砕波水深領域が最も飛散水量が距離的に広く分布しており，汀線においては比較的分布が狭いことがわかる。重複波水深領域はのり勾配の影響が大きく，$\cot\theta=0$ および 1 の surging waves 領域では飛散水量の分布は比較的狭いが，



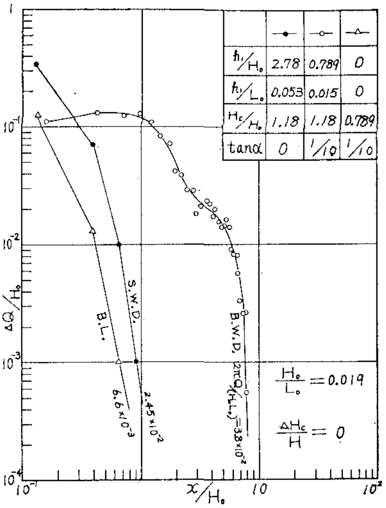
図—3 波の打ち上げ高とのり勾配の関係（のり勾配および堤脚水深の影響）



図—4 越波量とのり勾配の関係（のり勾配および堤脚水深の影響）

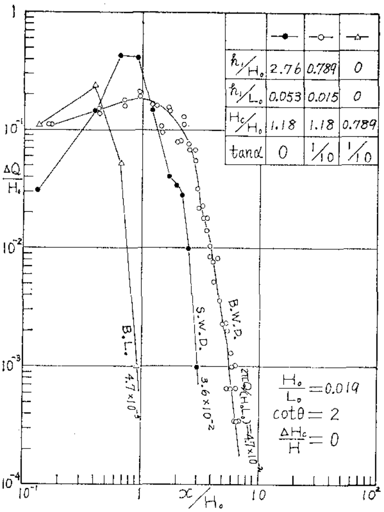


(a) $\cot\theta=0$

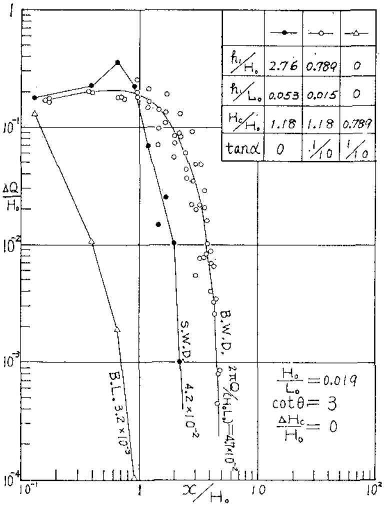


(b) $\cot\theta=1$

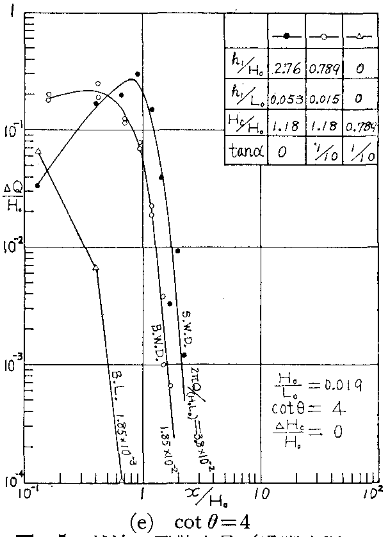
図—5 越波の飛散水量（堤脚水深の影響）



(c)　cot θ=2



(d)　cot θ=3



(e)　cot θ=4

図—5　越波の飛散水量（堤脚水深の影響）

cot θ=3 および 4 の breaking wave 領域では急に広がる傾向にある。これは，砕波水深領域の場合と同様に，壁面で激しく衝突する砕波が跳波となって，多量の水塊が飛び込むためと考えられる。

（3）　越波の飛散水量の累加飛散率

H_0/L_0=0.019 の波について，cot θ=0, 1, 2, 3 および 4 の累加飛散率の分布は図—6 に示される。これらより累加飛散率は一般にほぼ直線的に変化しているので，近似的に対数正規分布をしていることがわかる。

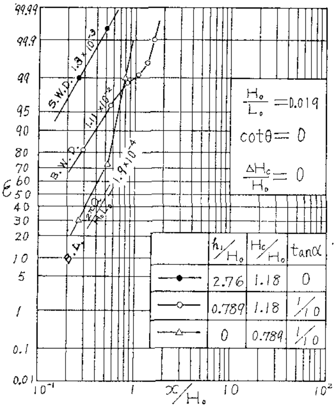
3.2　波形勾配の影響

（1）　波の打ち上げ高と越波量

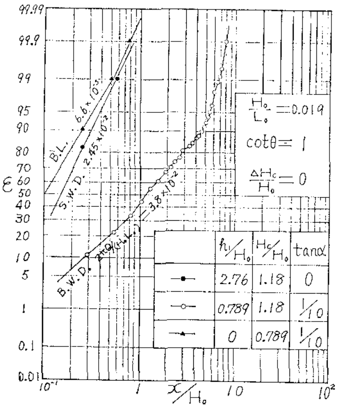
H_0/L_0=0.019 と 0.051 の 2 種類の重複波水深領域における波の打ち上げ高と越波量は 図—7 に示される。これより，H_0/L_0=0.019 は cot θ≒2.6 で，H_0/L_0=0.051 は cot θ≒1.7 で最大になることがわかる。また，そののり勾配は全反射の最緩勾配を表わす Miche の式（3）と近似的に一致する[13]。

$$\frac{H_0}{L_0}=\sqrt{\frac{2\theta_c}{\pi}}\frac{\sin^2\theta_c}{\pi}\cdots(3)$$

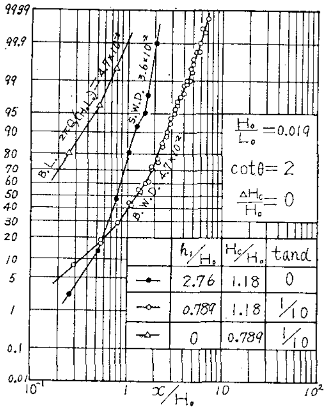
ここに，θ_c: 全反射を生ずる最緩



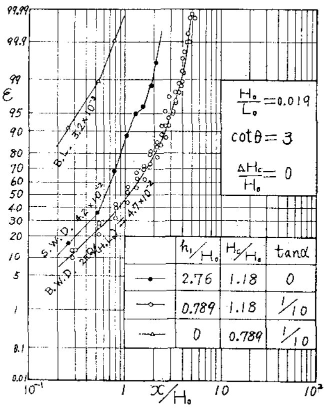
(a)　cot θ=0



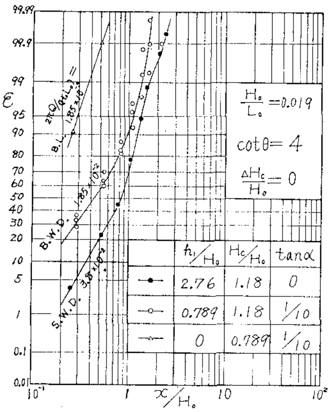
(b)　cot θ=1



(c)　cot θ=2



(d)　cot θ=3



(e)　cot θ=4

図—6　飛散水量累加飛散率（堤脚水深の影響）

傾斜角度である。

(2) 越波の飛散分布

波の打ち上げおよび越波を最大にするのり勾配は重複波水深領域では，図—7 に示すように $H_0/L_0=0.019$ では $\cot\theta≒2.6$, $H_0/L_0=0.051$ では $\cot\theta≒1.7$ であった。そこで，越波の飛散分布を，最大打ち上げ高あるいは最大越波量の生ずるのり勾配において検討した。実験の結果は，飛散水量が図—8，累加飛散率は図—9 でそれぞれ示される。これらより，波形勾配の小さい方が，飛散分布の広がりが大きいことがわかる。これは，波形勾配が小さくなると最大の打ち上げ高あるいは最大の越波量が増大するためと考えられる。

3.3 のり勾配の影響

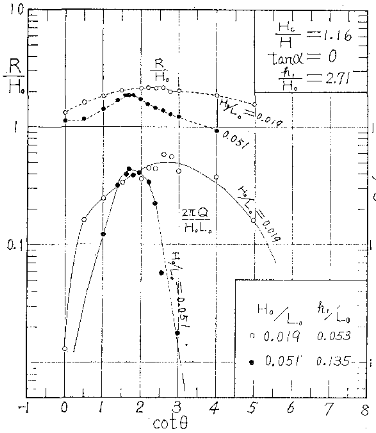
無越波時の波の打ち上げ高について考えると，仮想天端からの水平到達距離は図—1 より次の式で示される。

$$l_R=(R-H_c)\cot\theta \quad \cdots\cdots(4)$$

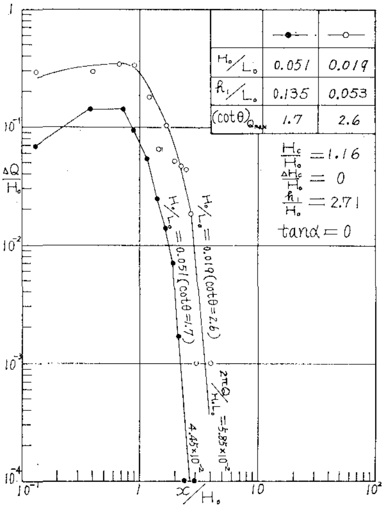
ここに，l_R: 無越波時の打ち上げ高の仮想天端からの水平到達距離，R: 無越波時の波の打ち上げ高を示している。

いま，x/H_0 における ε, l_R および Q が $\cot\theta$ によってどのように変化をするかを調べ，さらに，ε, l_R および Q の相互の関連性について明らかにしたい。

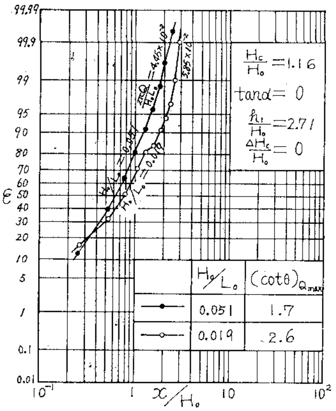
(1) 重複波水深領域



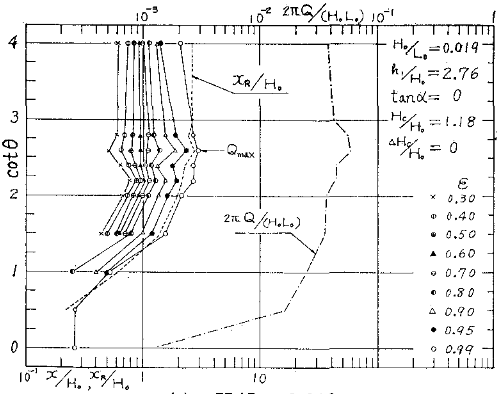
図—7 波の打ち上げ高および越波量とのり勾配の関係（$H_0/L_0=0.019$ と 0.051 の比較）



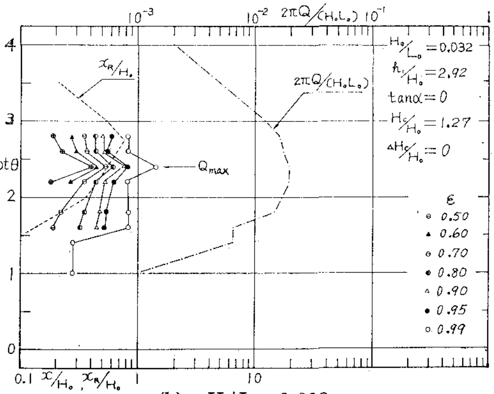
図—8 最大越波を生ずるのり勾配における飛散水量（波形勾配の影響）



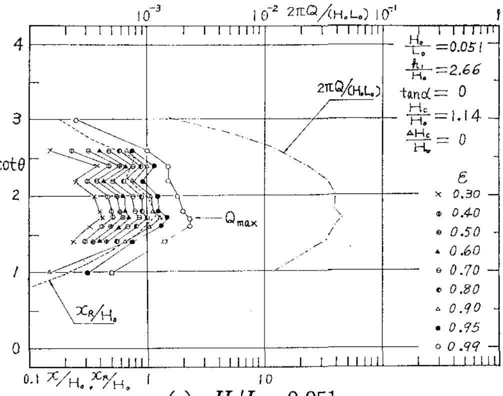
図—9 最大越波を生ずるのり勾配における飛散水量の累加飛散率（波形勾配の影響）



(a) $H_0/L_0=0.019$



(b) $H_0/L_0=0.032$



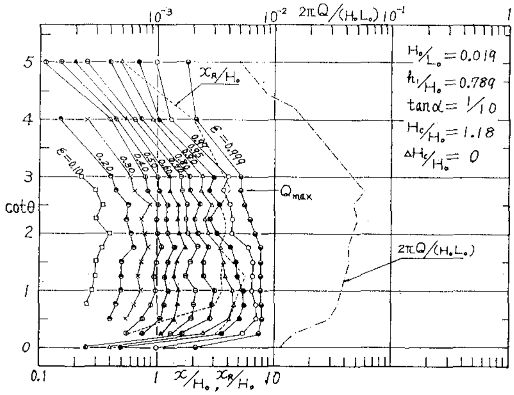
(c) $H_0/L_0=0.051$

図—10 重複波水深領域の累加飛散率と越波量および打ち上げ到達距離の関連（$\cot\theta$ の影響）

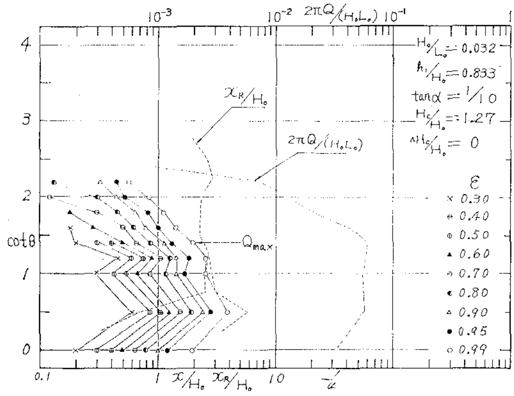
図—10 は種々の ε の距離的分布が $\cot\theta$ によってどのように変化するかを示した実験結果であり，図には l_R および Q が $\cot\theta$ によって変化する様子も併記している。これらより，ε の分布は $\cot\theta$ によってかなり異なるが，l_R および Q と緊密な関連性がある。一般に l_R および Q が最大になる $\cot\theta$ で ε の分布は距離的に最も広くなることがわかる。また総越波量の飛散距離（$\varepsilon=1$ に相当する）は l_R よりも一般にやや大きい。これは，波の打ち上げに伴う仮想天端上の摩擦損失が越波の場合には作用しないこと，および，天端付近に衝突した波が飛沫を生じるためと考えられる。

（2） 砕波水深領域および汀線

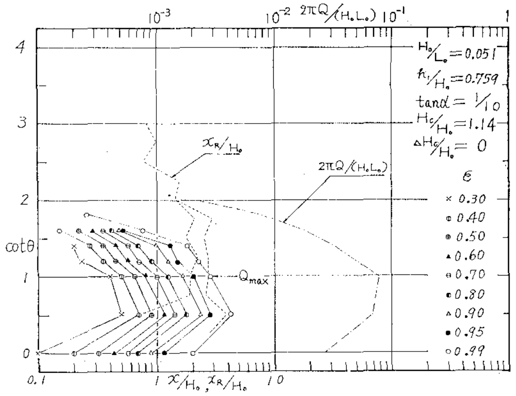
図—11 は砕波水深領域における ε, l_R および Q と $\cot\theta$ の関係を示し，**図—12** は汀線における関係を示す。これらより，汀線の ε は砕波水深領域の ε に比べて距離的に狭い分布であり，天端付近に飛散水量が集中している。しかし，砕波水深領域の ε は **図—10** の重複波水深領域の ε と比べて一般に距離的に広く分布していること



(a) $H_0/L_0=0.019$

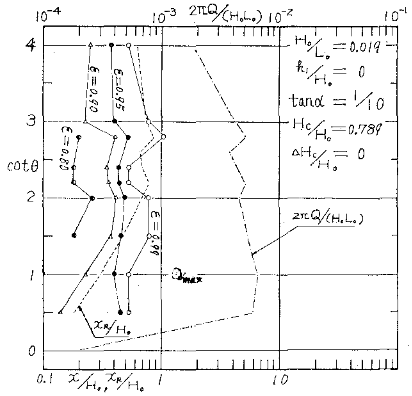


(b) $H_0/L_0=0.032$

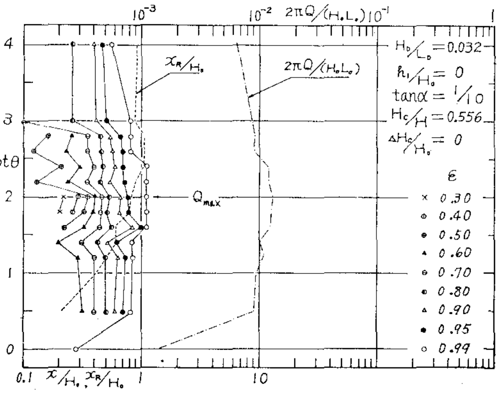


(c) $H_0/L_0=0.051$

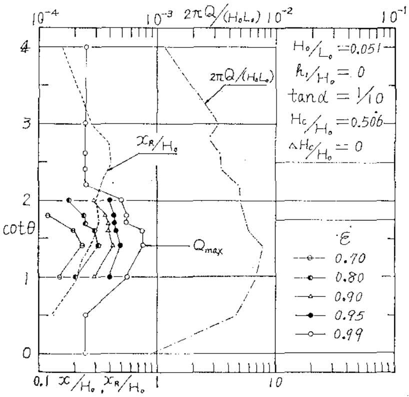
図—11 砕波水深領域の累加飛散率と越波量および打ち上げ到達距離との関係（$\cot\theta$ の影響）



(a) $H_0/L_0=0.019$



(b) $H_0/L_0=0.032$



(c) $H_0/L_0=0.051$

図—12 汀線の累加飛散率と越波量および打ち上げ到達距離との関連（$\cot\theta$ の影響）

とがわかる。

また，砕波水深領域および汀線の ε は l_R よりも Q との関連性が強く，Q_{max} を生ずる $\cot\theta$ において ε の分布が最も広い。なお，l_R と ε の関連性は一般に比較的急勾配 ($\cot\theta=0\sim1$) では l_R よりも広く飛散し，比較的緩勾配 ($\cot\theta>3$) では l_R より狭く飛散する傾向にある。以上より天端水平面上に落下する最大の飛散距離 l_Q と波の打ち上げ高 R との関係は次のような一般式で近似的に示される。

$$l_Q=(R-H_c)\{a\cot\theta+b(\cot\theta_c-\cot\theta)\} \quad \cdots\cdots(5)$$

ここに，a および b は実験定数である。

(3) 越波の軌跡と飛散距離

越波の水脈および水塊がどのような軌道を描くかということは，総越波量の飛散距離を見積ることと関係してくるので，重要な問題である。

越波の水脈および水塊に作用する外力は重力だけであると仮定すれば，質点の放物運動あるいは放射水の運動の原理によって越波の軌跡が説明できると考えられる。

いま，**図—1** に示すように，天端を原点とし，天端水平面を x 軸陸側に正とし，鉛直上向きを y 軸とする。時間 t の間に天端上の越波の水粒子 $\{\eta'(t)-H_c\}$ が水平方向に距離 x だけ移動したとすれば，

$$x=v_c(t)t\cos\beta \quad \cdots\cdots(6)$$

ここに，$v_c(t)$: $x=0$ (天端上) の鉛直線上における流速，β: 天端上の流速 v_c が水平方向となす角であり，壁体の傾斜角 θ，天端高 H_c などと関係がある。同じ時間 t の間にこの水粒子が鉛直方向に距離 y だけ移動したとすれば，

$$y+\eta'(t)-H_c=v_c(t)t\sin\beta-\frac{1}{2}gt^2 \quad \cdots\cdots(7)$$

ここに，$\eta'(t)$: 越波時の壁面の水位上昇高 (静水位上)，H_c: 静水位上の天端高である。

上の2式から t を消去し，天端上における全水頭 E で割って無次元化すると，越波の飛散形状の一般式は次のようになる。

$$\frac{y+\eta'(t)-H_c}{E}=A\left(\frac{x}{E}\right)^2+B\left(\frac{x}{E}\right) \quad \cdots\cdots(8)$$

ここに，E: 天端上における全水頭で，近似的に $E=R-H_c$，$A=-gE/(2v_c^2\cos^2\beta)$，$B=\tan\beta$ である。

天端背後の地盤面 $y=-\Delta H_c$ に落下する越波の飛散距離 l は，式 (8) より，次のように示される。

$$\frac{l}{R-H_c}=(1/2A)\left[\left\{B^2+4A\cdot\frac{\eta'(t)-(H_c+\Delta H_c)}{R-H_c}\right\}^{1/2}-B\right] \quad \cdots\cdots(9)$$

なお，式 (8) および (9) の $\eta'(t)$，実験係数 A および B についてまだ十分検討していないが，$\eta'(t)$，$v_c(t)$ および β の算定式を求めることが先決問題であるので，次の機会に報告したい。一方，越波をせきの越流として近似的に取り扱うことができるので[6),14)]，せきの自由ナップの考え方を越波の飛散軌跡に応用できると考えられる。そこで，刃形ぜきの自由ナップに関する研究成果 (たとえば，U.S. Bureau of Reclamation[15)] の図表および Blaisdell[16)] の実験式) の適用が期待できるが，これらの比較検討についても今後の課題となろう。

4. 結　　論

越波の水平方向の飛散水量と累加飛散率の分布について実験的に調べた結果，波の打ち上げ高および越波量と緊密な関連性のあることを確かめた。また，越波の飛散距離については，越波の状況がせきの越流と類似の現象と考えられるが，越波の軌跡とせきの自由ナップの形状との関連性を検討する必要がある。

おもな実験結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 越波の飛散分布は波の打ち上げ高および越波量と密接な関連性が認められ，特に越波量との相関関係が大きい。一般に，砕波水深領域の飛散分布は重複波水深領域および汀線における飛散分布より距離的に広く分布する。

(2) 飛散水量の分布に二つのタイプがある。一つは天端で飛散水量が最大となり，天端を離れると指数関数的に減少する場合，他の一つは天端より少し離れた地点に飛散水量の最大になるところがあって，それより遠ざかると急激に減少する場合である。前者は，一般に越波量の少ない場合，後者は一般に越波量の多い場合に生じる傾向にある。

(3) 累加飛散率の距離的分布は近似的に対数正規分布をしており，越波量が多いほど距離的に分布は広くなる。

(4) 最大越波量を生ずるのり勾配において，波形勾配の小さい波ほど飛散水量および累加飛散率は距離的に分布が広くなる。

(5) 波の打ち上げ高の大きいのり勾配および越波量の多いのり勾配の飛散水量および累加飛散率は距離的に分布が一般に広い。

(6) 最大飛散距離は越波量および無越波時の波の打ち上げ高の水平到達距離と関連性が大きいが，一般式は式 (5) で示される。

(7) 越波の軌跡および飛散距離は式 (8) および式 (9) で示されるが，式の中の越波時の波形 $\eta'(t)$，天端上の流速 $v_c(t)$ およびその作用角度 β について未解決であるので，今後の課題として残される。また，背後地盤に落下した飛散水の挙動については考慮しなかったので，今後検討しなければならない。

参 考 文 献

1) 高田　彰: 海岸堤防の越波の飛散水平分布について——のり勾配の影響——, 第 15 回海岸工学講演会講演集, pp. 267～276, 1968-12.
2) 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, pp. 26～34, 1964-7.
3) 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, pp. 129～138, 1967-10.
4) 合田良実: 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 9, No. 4, 1970-12.
5) 富永正照・佐久間襄: 海岸堤防の越波量について, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 133～140, 1970-11.
6) 高田　彰: 有限振幅重複波の時間波形と越波量の相関特性, 土木学会論文報告集, No. 201, pp. 61～76, 1972-5.
7) 高田　彰: 越波量の近似計算法について, 土木学会第27回年次学術講演会講演集, 第 2 部, 1972-10.
8) 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, pp. 245～273, 1960-11.
9) 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 10 回海岸工学講演会講演集, pp. 153～158, 1962-10.
10) 建設省中部地方建設局: 由比海岸工事誌, pp. 124～133, pp. 187～281, pp. 352～356, pp. 1036～1045, 1966-3.
11) 高田　彰: 越波の飛散分布におよぼす風の影響 (1)——風速と水平飛散分布——, 第 16 回海岸工学講演会講演集, pp. 277～288, 1969-12.
12) 高田　彰: 波の遡上, 越波および反射の関連性について (第 2 報)——堤脚水深の影響——, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 113～123, 1970-11.
13) 高田　彰: 波の遡上, 越波および反射の関連性について, 土木学会論文報告集, No. 182, pp. 19～30, 1970-10.
14) 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫: 海岸堤防の越波に関する基礎的研究 (1), 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp. 118～122, 1967-10.
15) U. S. Bureau of Reclamation: Studies of crests for overfall dams, Boulder Cauyon Project, Final Report, Part VI, Bull, 3, 1948, あるいは, 石原藤次郎・本間仁編: 応用水理学, 中 I, pp. 132～137, 丸善, 1965.
16) Fred W. Blaisdell: Equation of the free-falling nappe, Proc., American Society of Civil Engineers, Vol. 80, separate, No. 482, 1954-8, あるいは, Ven Te Cow: Open channel hydraulics, McGraw-Hill, 1959.