

うち上げおよび越波

高 田 彰

1. まえがき

社会生活の高度化と一方では沿岸部の地盤沈下によって防災施設に寄せる期待度が年々高まって来ている。過去において伊勢湾台風(1959)は海岸堤防の構造と天端高を根底より考え直す契機となったが、その考え方の基本となるものは波のうちあげ高と越波量に対する安全性であり、最近では更に高度な越波対策が強く要請されている。

波のうちあげおよび越波は古くて新しい問題であり、これまでも数多くの研究成果の蓄積があつてかなりの水準に達していると考えられる。この研修会においても通算5回(岩垣雄一:海岸堤防論(1964), 細井正延:短周期波のうちあげ(1967), 富永正照:越波と根固め(1970), 橋本宏:越波とはい上がり(1972), 三井宏:海岸堤防の水理(1973))開講され、その時点における最新の成果がまとめられている。そこで、著者はこれまでの研修会の内容との重複を避けつつ、最近の研究成果について述べることにする。

最近の傾向は、規則波のうちあげ高および越波量の算定法の体系化と波の不規則性を考慮したうちあげ高および越波量の定量化に重点が置かれているので、それらを中心に論じ、さらに、越波の飛散分布についても述べたい。

2. うちあげ、越波および反射の関連性

2.1 うちあげ空間波形と越波量との相関特性

図-1に示すように、天端高 H_c がうちあげ高 R より小さい場合は越波を生じる。図-2は一周期の単位幅当りの越波量 Q とうちあげ波形の仮想天端上の容積 S との関係を実験的に調べたものであり、両者はかなりよい相関性のあることがわかる¹⁾。

Q と S を式(1)のように表わし、式中の越波量係数 a の特性を調べることによって越波量算定式を提案することができる²⁾。

$$Q = aS = a \int_0^{x_c} \{ \eta(x) - H_c \} dx, \quad (1)$$

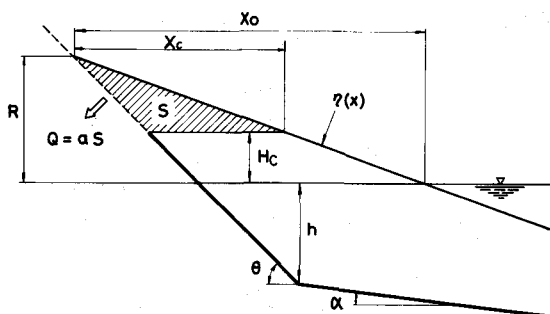


図-1 うちあげ空間波形と越波量との関連

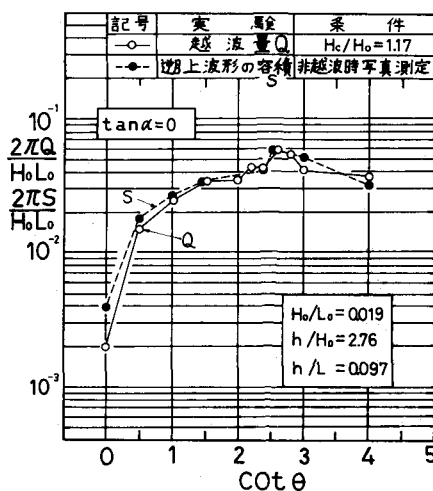


図-2 非越波時のうちあげ空間波形の容積と越波量との関係

重複波領域の鉛直壁について、 $\eta(x)$ に有限振幅重複波理論の第2次近似の式(2)を用いた場合の式(1)は式(3)のように示される。²⁾

$$\eta(x) = H \cos kx + \frac{1}{8} k H^2 (3 \coth^3 kh + \tanh kh) \cos 2kx, \quad (2)$$

$$Q = a \left\{ (H/k) \sin kx_c + (1/16) H^2 (3 \coth^3 kh + \tanh kh) \sin 2kx_c - H_c x_c \right\}, \quad (k = 2\pi/L), \quad (3)$$

ここに、 x_c は $\eta(x_c) = H_c$ において次式で求められる。

$$\cos kx_c = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8\delta(\delta + H_c/H)}}{4\delta} \quad (4)$$

$$\delta = (1/8) k H (3 \coth^3 kh + \tanh kh), \quad (5)$$

重複波水深領域 ($h \geq h_s$: 重複波の碎波水深) の実験によれば、式(3)の a は近似的に式(6)で示される。²⁾

$$a = 9.3 \left\{ (R - H_c) / H \right\}^{1/2} (H_0 / L_0), \quad (6)$$

$$\text{ここに, } \frac{R}{H} = 1 + \delta \quad (7)$$

2.2 うちあげ時間波形と越波量との相関特性

福井・中村・白石・佐々木(1963)³⁾ は津波について、吉川・椎貝・河野(1967, 1970)^{4), 5)} は短周期波について、それぞれ越波を全幅せきの越流に近似できるとして解析しているが、いずれも、うちあげ時間波形と越波を関連づけた研究といえよう。とくに、吉川・椎貝・河野(1967)^{4), 5)} はうちあげ時間波形を三角波形で近似し、刃形せきの流量係数 K_d を与えて仮想波頂高 R_d の特性を調べる画期的な方法を導入して、次のような越波量の算定法を提案した。

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} K \int_{t_u}^{t_d} \left\{ \eta'(t) - H_c \right\}^{3/2} dt, \quad (8)$$

$$= \frac{2}{15} \sqrt{2g} K_d T R_d^{3/2} \left(1 - \frac{H_c}{R_d} \right)^{5/2}, \quad (9)$$

ここに、 T : 波の周期、 g : 重力加速度、 $\eta'(t)$: 越波時のうちあげ時間波形、

しかし、式(9)の R_d に既往のうちあげ高の結果を適用できないことおよび時間波形に三角波形を近似することに問題があるので、著者(1972)⁶⁾

は、その後図-3に示すような台形波形を仮定し、さらに越波時のうちあげ高 R' を用いて次のように越波量係数 C の特性を調べている。

$$Q = (8/15) \sqrt{2g} C (R' - H_c)^{3/2} T \left\{ \left(1 - \frac{H_c}{R'} \right) \times \left(\frac{t_0}{T} - 0.025 \right) + 0.0625 \right\}, \quad (10)$$

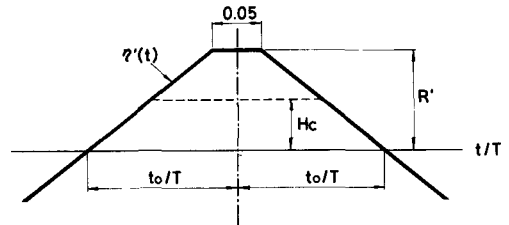


図-3 うちあげ時間波形の台形近似

重複波領域の鉛直壁について、 R' は実験より近似的に式(11)のように示される。⁶⁾

$$R'/R = 1 - 0.173 \left(\frac{R}{H} - \frac{H_c}{H} \right), \quad (11)$$

ここに、 R ：非越波時のうちあげ高で、式(7)より求まる。

式(10)の t_0 は有限重複波理論の第2近似式を用いた場合には、 $\eta(t_0) = 0$ とにおいて、式(12)で求まる。

$$\cos 2\pi \left(t_0/T \right) = \frac{2}{p k H} \left\{ \left(1 + p q k^2 \frac{H^2}{8} \tanh k h \right)^{1/2} - 1 \right\}, \quad (12)$$

ただし、 $t_0 = (0 \sim 0.25) T$ の範囲、

$$\text{ここに、} \quad p = (3 \coth^2 k h - 1) \coth k h, \quad (13)$$

$$q = 3 \coth^4 k h - 2 \coth^2 k h - 1, \quad (14)$$

以上より、 t_0 および R' を求めて、式(10)の C を調べた結果、重複波領域の鉛直壁 ($h \geq h_s$) の実験では近似的に次のように示される。

$$H_c/H \leq 0.7 : \quad C = 0.65, \quad (15)$$

$$H_c/H > 0.7 : \quad \log C = 0.2539 - 0.63 (H_c/H), \quad (16)$$

これらより、 C の値は刃形せきの流量係数 (0.65 ~ 0.83) にほぼ等しいか、やや小さい値であるので、重複波の越波の現象をせきの非定常な溢流に近似できるということの妥当性を示唆している。

2.3 うさあげ高、越波量および反射率の相関特性

一様な海底勾配 $\tan \alpha$ に一様な不透過壁面 $\tan \theta$ を設置したときのうちあげ高 R 、一周期の単位幅当りの越波量 Q および反射率 r に関係する要素は次のように示される。

$$\left. \begin{array}{l} R/H_0 \\ 2\pi Q/H_0 L_0 \\ r \end{array} \right\} = f(\tan \alpha, \tan \theta, H_0/L_0, h/L_0 \text{ (or } h/H_0), H_c/H_0). \quad (17)$$

2.3.1 のり勾配の影響

(1) 堤脚部が重複波水深領域の場合

R 、 Q および r はのり勾配によって著しく変化するが、図-4(a)は R 、 Q および r の相互の関連性を調べたものである。¹⁾ なお、 r の計算値は実験値との適合性のよいつぎの Miche (1951)⁸⁾ の式を用いている。

i) 全反射 ($\cot \theta \leq \cot \theta_c$) 領域、

$$r/\zeta = 1, \quad (\zeta : \text{エネルギー損失係数}) \quad (18)$$

ii) のり面砕波 ($\cot \theta > \cot \theta_c$) 領域、

$$r/\zeta = \frac{r_{=1}(H_0/L_0)_{\max}}{H_0/L_0} = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi} \cdot \frac{1}{H_0/L_0}, \quad (19)$$

ここに、 $r_{=1}(H_0/L_0)_{\max}$ ：のり面で全反射を生じる最大波形勾配であり、式(20)で示される。

$$r_{=1} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)_{\max} = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi}, \quad (20)$$

$\cot \theta_c$ ：ある波形勾配の波が全反射を生じる最緩のり勾配であり、式(20)を書き換えた式(21)で

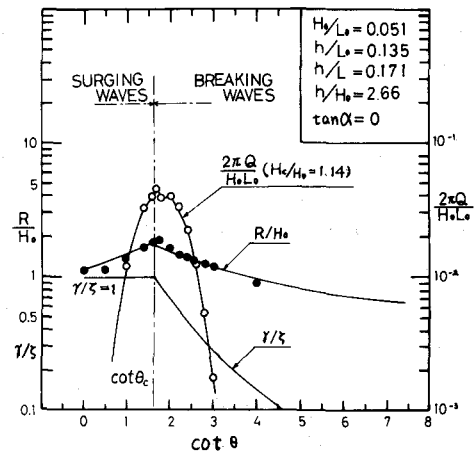


図-4 うちあげ高、越波量および反射率に
およぼす勾配の影響

(a) 堤脚部が重複波水深領域の場合

示される。

$$\sqrt{\frac{2\theta_c}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta_c}{\pi} = \frac{H_0}{L_0} \quad (21)$$

図-4(a)より、式(21)で示される surging waves 領域と breaking waves 領域との境界 $\cot \theta_c$ で R および Q が最大になりさらに r の変化点であることが注目される。

(2) 堤脚部が砕波以浅領域の場合

図-4(b)は $h/H_0 = 0$ と 0.76 のときの R, Q および r/ζ と $\cot \theta$ との関係を調べたものである。

これより R はのり勾配が急なほど大きいのにに対し、Q は式(21)で求まる $\cot \theta_c$ よりやや小さい値で最大値をとることがわかる。

このように、砕波以浅領域では、R と Q の傾向がかなり異なることから、波のうちあげ高を基準に堤防のり勾配を決めていた従来の設計法は不正確であることが指摘できる。⁹⁾

2.3.2 堤脚水深 h の影響

図-5 は、鉛直壁の R, Q および r と h との関係を調べたものである。これより、Rmax と Qmax を生じる h はほぼ一致しており、砕波水深よりやや浅いところであることがわかる。また、 r/ζ は砕波水深よりやや浅い領域から急激に減少するので、 r は R および Q とかなり密接な関連性のあることがわかる。

一方、Rmax を生じる h_R は、図-6(a)に示されるように、のり勾配がゆるい程 h_R は漸次大きくなる傾向にある。

2.3.3 Rmax および Qmax の発生条件

Miche (1944)¹⁰⁾ の進行波の砕波条件式と合田 (1970)¹¹⁾ の砕波指標を参考に、Rmax および Qmax を生じる堤脚水深 h_R は式(22)のように仮定できる。¹²⁾

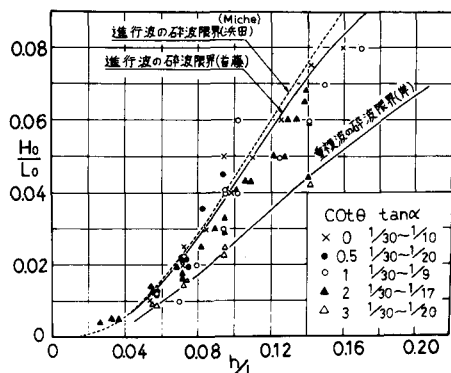


図-6(a) 堤脚部が重複波水深領域の場合

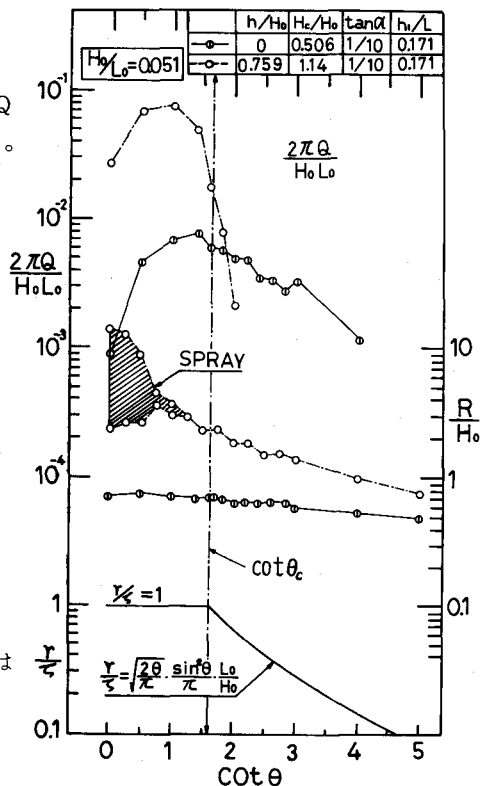


図-4 うちあげ高、越波量および反射率におよぼすのり勾配の影響
(b) 堤脚部が砕波以浅領域の場合

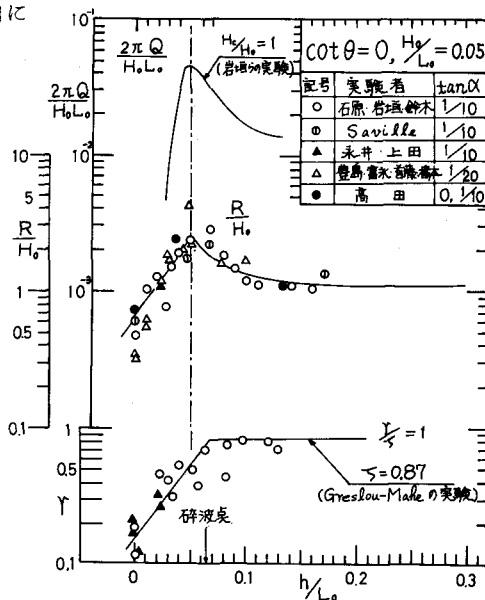


図-5 うちあげ高、越波量および反射率におよぼす堤脚水深の影響

$$H_0/L_0 = (1 - d_1 \cot \theta) (0.6 \tan \alpha + 0.12) \left(\tanh 2\pi \frac{h_R}{L_R} \right)^{5/2} \times \left(\frac{\sinh 4\pi \frac{h_R}{L_R} + 4\pi \frac{h_R}{L_R}}{\sinh 4\pi \frac{h_R}{L_R}} \right)^{1/2}, \quad (22)$$

ここに, $h_R/L_0 = (h_R/L_R) \tanh 2\pi h_R/L_R$,

d_1 : 実験定数で, 豊島ら (1967) の実験 および 著者ら (1976) の実験より $\cot \theta \leq 3$ では近似的に 0.09 前後の値である。

鉛直壁 ($\cot \theta = 0$) における式 (22) の計算値は 図-6(b) に示される。

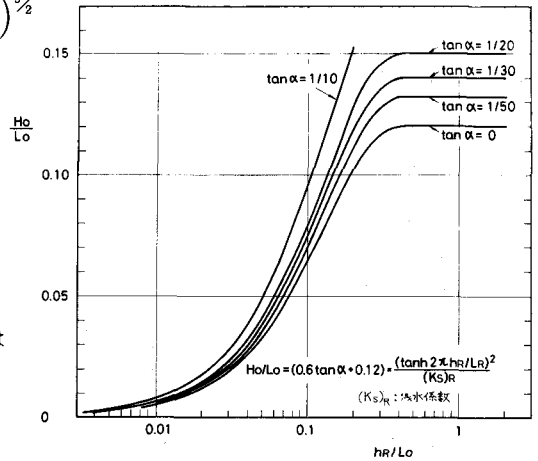


図-6(b) 鉛直壁の h_R の推算図

3. 波のうちあげ高の算定法

3.1 規則波のうちあげ高の推算式

うちあげ高の一般式は, Le Méhauté, Koh & Hwang (1968) によれば, 式 (23) で示される。

$$R/H_0 = f\left(\theta, \frac{2\pi h}{L}\right) + g\left(\frac{H}{L}, \frac{2\pi h}{L}\right) - k\left(\theta, \frac{2\pi h}{L}, \frac{H}{L}\right), \quad (23)$$

ここで, 右辺の第1項は線形解, 第2項は非線形効果, 第3項はエネルギー損失によるうちあげ高の減少効果を示している。

著者 (1975) は, 式 (22) で求められる h_R を境に, $h > h_R$ と $h = 0 \sim h_R$ との2領域に分けて考察したので, それらについて述べる。

(1) $h > h_R$, (重複波水深領域)

a) $H_0/L_0 < (2\theta/\pi)^{1/2} (\sin^2 \theta/\pi)$, (非碎波のとき)

Miche (1944)¹⁰⁾ の線形理論解のうちあげ高の式 $R/H = (\pi/2\theta)^{1/2}$ に, 非線形効果の項 δ を考慮すれば, 式 (24) で示される。

$$R/H_0 = \left(\frac{\pi}{2\theta} + \delta \right)^{1/2} \frac{H}{H_0}, \quad (24)$$

δ は, 有限振幅重複波理論の第2次近似式¹⁰⁾ を用いることにすれば, 式 (25) で示される。

$$\delta = \frac{\pi}{4} \frac{H_0}{L_0} \frac{H}{H_0} \coth 2\pi \frac{h}{L} \left(3 \coth^2 2\pi \frac{h}{L} + \tanh 2\pi \frac{h}{L} \right), \quad (25)$$

ここに, $h/L_0 = (h/L) \tanh 2\pi h/L$,

$$H/H_0 = \left(\frac{\sinh 4\pi h/L \coth 2\pi h/L}{\sinh 4\pi h/L + 4\pi h/L} \right)^{1/2},$$

b) $H_0/L_0 > (2\theta/\pi)^{1/2} (\sin^2 \theta/\pi)$, (のり面碎波のとき)

これまでの実験から, $R/H_0 \propto (\tan \theta)^m$ (m : 実験指数) とおき, 式 (24) との連続性を考慮すれば, 式 (26) で示される。

$$R/H_0 = \left\{ (\pi/2\theta_c)^{1/2} + \delta \right\} \left(\frac{\tan \theta}{\tan \theta_c} \right)^m \frac{H}{H_0}, \quad (26)$$

ここに, m は実験的に $2/3 \sim 1$ であり, Hunt (1959) は $m = 1$, 著者は (1970) は $m = 2/3$ (ただし $\cot \theta < 8$) を提案している。

(2) $h = 0 \sim h_R$, (碎波以浅領域)

これまでの実験から, $R \propto h$ とおき, 式 (24) および式 (26) との連続性を考慮すれば, 式 (27)

で示される。

$$R/H_0 = \left(R_{max}/H_0 - R_0/H_0 \right) h/h_R + R_0/H_0, \quad (27)$$

ここに、 R_0/H_0 は汀線 ($h = 0$) の壁体のうちあげ高であり、鉛直壁の場合は、実験より、近似的に次のように示される。

$$\tan \alpha = 1/10 : R/H_0 = 0.18 (H_0/L_0)^{-1/2}, \quad (28)$$

$$\tan \alpha = 1/20 : R/H_0 = 0.075 (H_0/L_0)^{-1/2}, \quad (29)$$

$$\tan \alpha = 1/30 : R/H_0 = 0.046 (H_0/L_0)^{-1/2}, \quad (30)$$

ただし、適用範囲は海底面上で碎波する領域であり、式 (21) より、式 (31) で示される。

$$H_0/L_0 > \sqrt{2\alpha/\pi} \cdot \sin^2 \alpha/\pi, \quad (31)$$

なお、式 (27) の R_{max}/H_0 は式 (22) で求まる h_R/L_R (あるいは h_R/L_0) における値であり、式 (24) あるいは (26) に代入して計算する。

図-7 は以上のような方法で計算した $\tan \alpha = 1/10$ の鉛直壁 ($\cot \theta = 0$) の R/H_0 の計算結果を示す。

なお、この算定図は実験結果をかなりよく説明できることが分っている。¹²⁾

3.2 不規則波のうちあげ高の分布特性

3.2.1 のり面碎波の不規則波

(1) Saville (1962) の研究¹⁵⁾

Saville は、不規則波の波連の各成分波のうちあげ高が波高と周期の等しい規則波のうちあげ高に等しいと仮定して、Bretschneider (1959) の波高・周期分布関数 (無相関のレーリー分布) の式 (32) を用いて、のり面で常に碎波する場合のうちあげ分布を計算している。

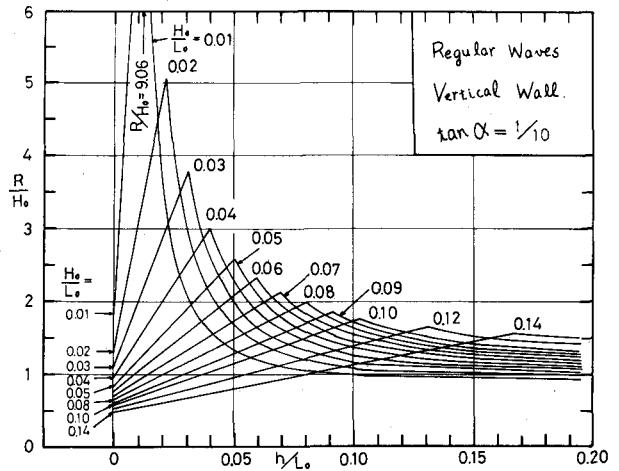
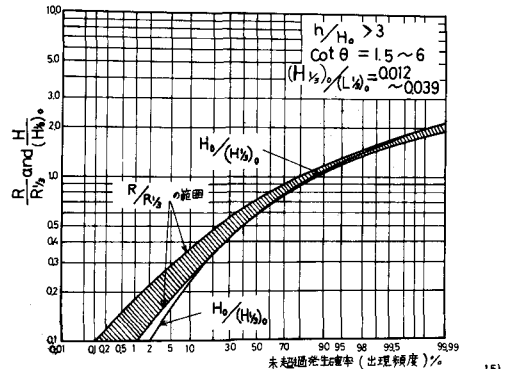


図-7 海底勾配 1/10 における鉛直壁のうちあげ高の推算図

$$P(H_*, T_*) = P(H_*) \cdot P(T_*) = \exp\left(-\frac{\pi}{4} H_*^2\right) \cdot \exp(-0.675 T_*^4), \quad (32)$$

ここに、 $H_* = H_0/\bar{H}_0$ ($\bar{H}$: 平均波高), $T_* = T/\bar{T}$ ($\bar{T}$: 平均周期), $P(H_*, T_*)$: (H_*, T_*) の超過発生確率, $P(H_*)$ および $P(T_*)$: H_* および T_* の超過発生確率, 図-8 は、 $h/H_0 > 3$,

$\cot \theta = 1.5 \sim 6$ の斜面堤について、規則波のうちあげ高の曲線を用いて計算した $R/R_{1/3}$ ($R_{1/3}$: 1/3 最大うちあげ高) の出現頻度をレーリー分布と比較したものである。これより、うちあげ分布はレーリー分布よりやや分布幅は狭いが、超過確率の小さい ($R/R_{1/3}$ の大きい) 領域はかなりレーリー分布に近似している。また、Saville の計算によれば、波形勾配の影響は比較的小さく、のり勾配については、ゆるい程同一超過確率に対する $R/R_{1/3}$ の値はやや大きくなる (分布幅が広い) 傾向を示している。 図-8 のり面碎波の不規則波のうちあげ高の分布特性



これらのことは、樫木・岩田ら（1976）¹⁶⁾の実験においても検証されている。

(2) Battjes（1971）の研究¹⁷⁾

a) 成分波のうちあげ高 R

堤脚水深が大きく、また、のり面で碎波する場合を対象とし、近似的に Hunt（1959）の式（33）を用いる。

$$R = 0.4 T \sqrt{gH} \tan \theta = \sqrt{HL_0} \tan \theta, \quad (33)$$

b) 波の確率密度関数 $\sigma(H_*, L_*)$

H と T^2 との相関係数 σ を式（34）のように定義する。

$$\sigma(H_*, L_*) = \frac{H_* L_* - 1}{\sqrt{(H_*^2 - 1)(L_*^2 - 1)}}, \quad (34)$$

ここに、 $L_* = T^2 / \bar{T}^2 = L_0 / \bar{L}_0$, $H_* = \frac{H}{\bar{H}}$,

一方、 H_* と L_* の確率密度関数 $p(H_*, L_*)$ として、2変数レーリー分布を用いることにすれば、式（35）で示される。

なお、式（35）より、 $\sigma = 0$ においては $T_{1/3} / \bar{T} = 1.0$, $\sigma = 0.4$ では $T_{1/3} / \bar{T} = 1.12$, $\sigma = 1.0$ では、 $T_{1/3} / \bar{T} = 1.26$ である。

$$p(H_*, L_*) = \frac{\pi}{4} \frac{H_* L_*}{1 - k^2} I_0 \left(\frac{\pi}{2} \frac{k}{1 - k^2} H_* L_* \right) \exp \left(- \frac{\pi}{4} \frac{H_*^2 + L_*^2}{1 - k^2} \right), \quad (35)$$

ここに、 I_0 : 0 次の第1種ベッセル関数

$$k^2 \approx \sigma/a - (1/16)\sigma^2/a^2 - (1/128)\sigma^3/a^3, \quad (36)$$

ここに、 $a = \pi/(16 - 4\pi)$,

c) うちあげ高の確率密度関数 $p(R_*)$

$p(R_*)$ は式（33）と式（35）を組み合わせることによって式（37）で示される。

$$p(R_*) = \frac{\pi^2}{2} \frac{R_*^3}{1 - k^2} I_0 \left(\frac{\pi}{2} \frac{k R_*^2}{1 - k^2} \right) K_0 \left(\frac{\pi}{2} \frac{R_*^2}{1 - k^2} \right), \quad (37)$$

ここに、 $R_* = R/\bar{R}$ ($\bar{R}$: 平均うちあげ高), K_0 : 0 次の第3種ベッセル関数,

$\sigma = 0, 0.4$ および 1.0 の場合の式（37）の計算値は図-9に示される。

とくに、 $T = \text{const.}$ の場合は、 $R_* = \sqrt{H_*}$

であるので、

$$p(R_*) = \pi R_*^3 \exp \left(- \frac{\pi}{4} R_*^4 \right) \quad (38)$$

式（38）の計算値は図-9の $T = \text{const.}$ の曲線で示される。

d) うちあげ高の超過発生確率 $P(R_*)$

$P(R_*)$ は、式（37）および（38）を積分することによって、次のように示される。まず、式（37）については、

$$P(R_*) = x I_0(kx) K_1(x) - kx I_1(kx) \times K_0(x), \quad (39)$$

ここに、 $x = (\pi/2) R_*^2 / (1 - k^2)$, K_1 : 1 次の

第3種ベッセル関数, I_1 : 1 次の第1種ベッセル関数,

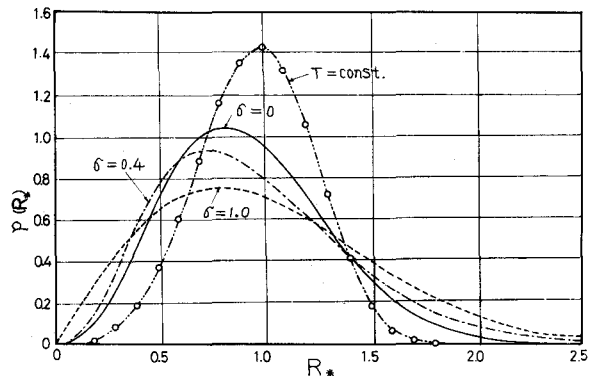


図-9 うちあげ高の確率密度関数 $p(R_*)$

とくに、 $\sigma = k = 0$ (無相関) ならば、Saville (1962) の研究¹⁵⁾ に対応し、

$$P(R_*) = (\pi/2) R_*^2 K_1(\pi R_*^2/2), \quad (40)$$

$\sigma = k = 1$ (1 相関) ならば、レーリー分布と一致し、

$$P(R_*) = \exp(-\pi R_*^2/4) \quad (41)$$

次に、 $T = \text{const.}$ の式 (38) の場合は、

$$P(R_*) = \exp(-\pi R_*^4/4) \quad (42)$$

図-10 は $\sigma = 0 \sim 1.0$ および $T = \text{const.}$ における $P(R_*)$ の計算値と実験値の比較を示す。これより、実験値の大部分は $\sigma = 0 \sim 1.0$ の間にプロットされることがわかる。

3.2.2 鉛直壁の不規則波 (堤脚水深の影響)

著者 (1976) は砕波と非砕波が混合している場合のうちあげ分布について Saville (1962) の方法を用いて研究しているので、種々の堤脚水深の鉛直壁について述べる。¹⁸⁾

(1) 波の超過発生確率 $P(\eta, \xi)$

H_0 はレーリー分布とし、 T が一定の場合 (うねり) と変化する場合 (T^2 がレーリー分布) について考え、 H_0 と T^2 との結合分布を次の3種数に限定して検討する。

a) $\xi = 1$ のとき、($\xi = T/T_{1/3}$)

$$P(\eta) = \exp\left(-\frac{\pi}{4} \alpha^2 \eta^2\right), \quad (43)$$

ここに、レーリー分布より $\alpha = (H_{1/3})_0 / \bar{H}_0 \div 1.60$, $\eta = H_0 / (H_{1/3})_0$, $P(\eta)$: η の超過発生確率、

なお、波の存在範囲を $H_0 / L_0 \leq 0.142$ とし、計算上 $H_0 / L_0 > 0.142$ の波の出現確率は、すべて $H_0 / L_0 = 0.142$ の波に出現すると仮定する。

b) $\sigma = 0$ (Bretschneider (1959) の分布) のとき

$$P(\eta, \xi) = \exp\left(-\frac{\pi}{4} \alpha^2 \eta^2\right) \exp(-0.675 \beta^4 \xi^4), \quad (44)$$

ここに、 $\beta = T_{1/3} / \bar{T} \div 1.1$ (現地の資料より), $H_0 / L_0 \leq 0.142$, $P(\eta, \xi)$: (η, ξ) の超過発生確率

c) $\sigma = 1$ のとき

$$P(\eta, \xi) = \exp\left(-\frac{\pi}{4} \alpha^2 \eta^2\right), \quad (45)$$

ここに、 $\xi = T / T_{1/3} = \{L_0 / (L_{1/3})_0\}^{1/2} = \eta^{1/2}$, $H_0 / L_0 = \text{const.}$ (46)

(2) うちあげ高の分布特性

a) $R/R_{\eta=\xi=1}$ の超過発生確率 $P(R/R_{\eta=\xi=1})$

有義波のうちあげ高 $R_{\eta=\xi=1}$ を基準量とし、 $(H_{1/3})_0 / (L_{1/3})_0 = 0.04$ の鉛直壁の場合について検討する。いま、各成分波の R を著者の推算式で求め、 $P(R/R_{\eta=\xi=1})$ を Saville の方法で計算すれば、図-11(a)~(b) に示される。これらより、 $h=0$ および $h \geq 0.2$ ではレーリー分布に近似しているが、砕波領域および砕波以浅領域ではレーリー分布と著るしく異なる分布を示しており、堤脚水深による分布特性がよくわかる。

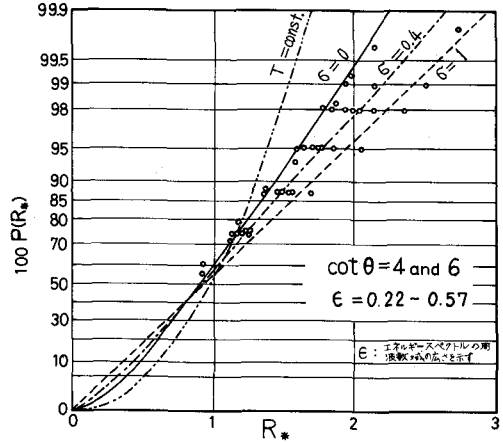


図-10 うちあげ高の超過発生確率¹⁷⁾ $P(R_*)$

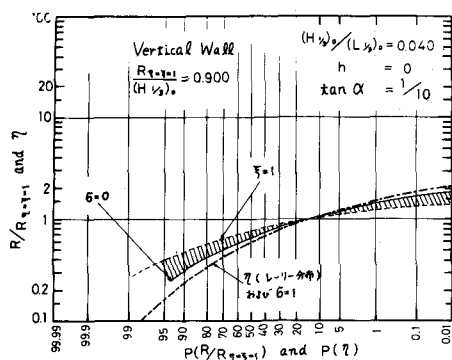


図-11 鉛直壁における不規則波のうちあげ高の分布特性
(a) $h = 0$ (汀線) の場合

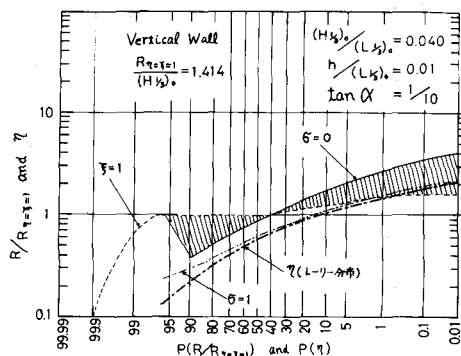


図-11 鉛直壁における不規則波のうちあげ高の分布特性
(b) $h/(L_{1/2})_0 = 0.01$ の場合

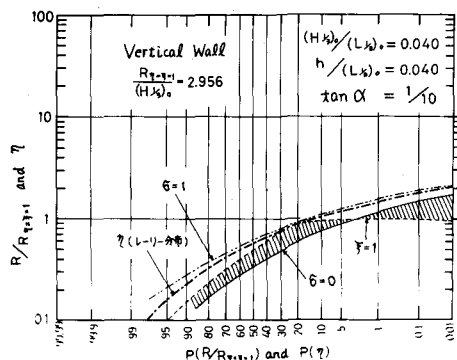


図-11 鉛直壁における不規則波のうちあげ高の分布特性
(c) $h/(L_{1/2})_0 = 0.04$ の場合

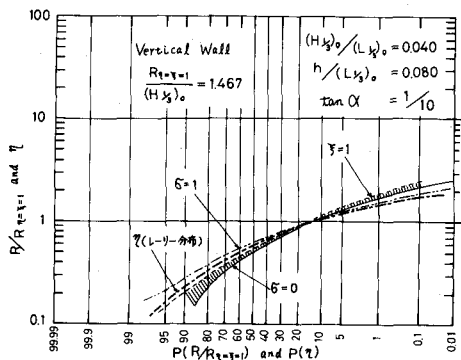


図-11 鉛直壁における不規則波のうちあげ高の分布特性
(d) $h/(L_{1/2})_0 = 0.08$ の場合

b) $R_{\eta=\xi=1}$ および $R_{1/3}$ より大きい R の出現確率

$R_{\eta=\xi=1}$ より大きい R の出現確率 $P(R_{\eta=\xi=1})$ は図-12 に示される。これより、堤脚水深の影響が大きく、有義波のうちあげ高を設計に用いることは、堤防の防災機能の基準に何ら統一した見解を与えないことが分るので、実際問題としても再検討しなければならないことを示唆している。一方、 $R_{1/3}$ より大きい R の出現確率 $P(R_{1/3})$ は図-13 に示される。

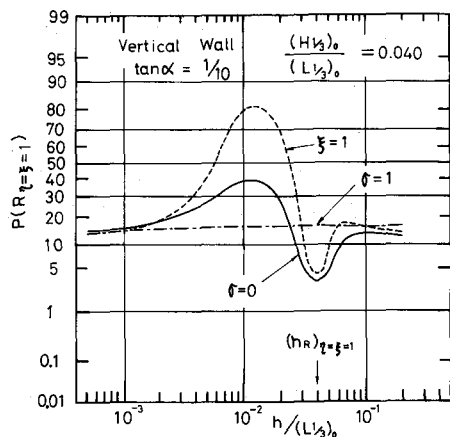


図-12 有義波のうちあげ高より大きいうちあげ高の出現確率 $P(R_{\eta=\xi=1})$

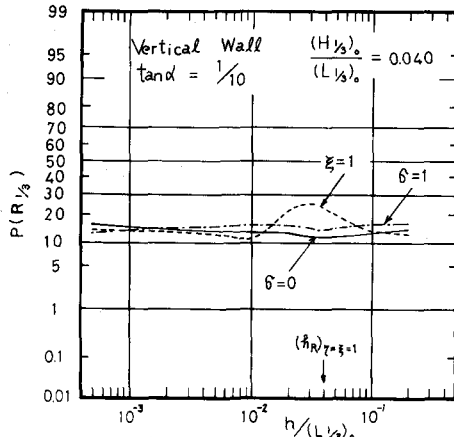


図-13 $1/3$ 最大うちあげ高より大きいうちあげ高の出現確率 $P(R_{1/3})$

これを図-12と比較すると堤脚水深の影響が比較的小さいので、堤防の安全基準をかなり統一して議論ができると考えられる。以上のことから、波の分布特性を示す統計処理の方法と同様、 $R_{\max}$, $R_{1/1000}$, $R_{1/10}$, $R_{1/3}$ および $\bar{R}$ などを定量化すると同時に、それに対応する確率越波量との関連を体系化することが今後の研究課題といえよう。また、砕波以浅領域のサーフビートの影響についても不規則波の実験より検討する必要がある。²⁴⁾

4. 越波量の算定法

4.1 規則波の越波量の定式化

4.1.1 無風時の越波量の推算式

越波量の推算法には次の3つの方法がある。(i)波のうちあげ時間波形を用い、越波をせきの非定常な溢流に近似する「せき流量計算法」⁴⁾、(ii)うちあげ時間波形を用い、越波を開水路の非定常流に近似できるとして、水位と流速の積から越波量を累積する方法¹⁹⁾、(iii)うちあげ空間波形を用い、仮想天端上のうちあげ波形容積と一周期当りの越波量とを関連づける「うちあげ波形容積計算法」⁸⁾である。

ここでは、実用性を考慮して(iii)の方法について述べる。²⁾

(1) 越波量算定の一般式

図-1に示すように非越波時のうちあげ空間波形を3角形で近似すると²⁰⁾、一周期当りの越波量 Q は次式で示される。

$$Q = aS = a \frac{(R - H_c)^2}{2} \left(\frac{x_0}{R} - \cot \theta \right), \quad (47)$$

ここで、 a : 越波量係数、実験結果については文献¹²⁾を参照されたい。しかし、 x_0 の値を決めることが面倒であることおよび x_0/R の変化が Q におよぼす影響が比較的小さいことが鉛直壁の実験で分っているので、式(48)のように簡略化して、式中の越波量係数 A の特性をのり勾配別に定式化することも考えられる。²⁰⁾

$$Q = A(R - H_c)^2, \quad (48)$$

ここに、

$$A = \frac{a}{2} \left(\frac{x_0}{R} - \cot \theta \right),$$

(2) 鉛直壁の越波量係数 A

$\tan \alpha = 1/10$ の鉛直壁における A の特性は、堤脚水深を図-14に示すような3領域に分けることによって、種々の実験より、近似的に次のように定式化できる。

a) $h \geq h_s$, (h_s : 重複波の砕波水深)

$$A = 0.65, \quad (49)$$

b) $h = h_R \sim h_s$

$$A = (0.65 - A_R) \left(\frac{h - h_R}{h_s - h_R} \right) + A_R, \quad (50)$$

ここに、

$$\log_{10} A_R = - \left\{ 0.824 + 0.477(H_c/H_0) \right\}, \quad (51)$$

c) $h = 0 \sim h_R$

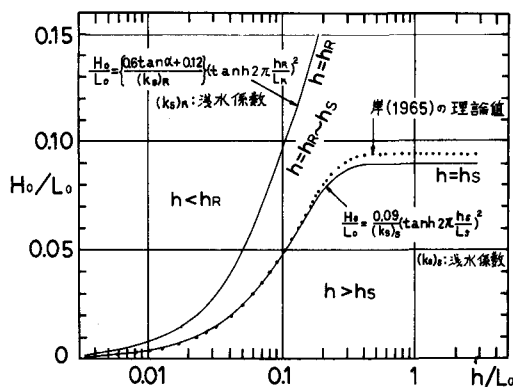


図-14 鉛直壁における堤脚水深の分類

$$A = (A_R - A_0) \left(\frac{h}{h_R} \right)^{1/4} + A_0, \quad (52)$$

ここに,

$$\log_{10} A_0 = - \{ 0.301 + 0.886 (H_c / H_0) \}, \quad (53)$$

なお、式 (49) ~ (53) は実験値の概略を示す程度であり、精度を高めることが今後の課題であろう。

4. 1. 2 越波量におよぼす風の影響

越波におよぼす風の影響は2つに大別される。一つは波のうちあげ波形に風が作用して越波を増減させる風の直接的作用と一つは侵入波の波形に風が作用して波高および波形に変化をおよぼすことによって越波量を増減させる風の間接的作用に分けられる。ここでは、後者について考え、侵入波の沖波1波長程度の吹送距離の風洞実験の結果について述べよう。²¹⁾

うちあげ高におよぼす風の影響を近似的に無視できるものとすれば、有風時の越波量は無風時の値を基準量として近似的に式 (54) で近似できる。

$$Q_v = \varphi Q_{v=0}, \quad (54)$$

ここに、 Q_v および $Q_{v=0}$: 有風時および無風時の越波量、 φ : 越波量の風係数、 φ に関係するおもな要素は次式で示される。

$$\varphi = f(V/C_0, h/L_0 \text{ (or } h/H_0), H_0/L_0, H_c/H_0, \tan \alpha, \tan \theta), \quad (55)$$

ここに、 C_0 : 深水波の波速 ($= gT/2\pi$),

V : 天端上の平均風速,

(1) φ の特性

$\tan \alpha = 1/10$ と $1/20$ の鉛直壁について、図-14 に示すように堤脚水深を3領域にわけて検討する。

a) $h > h_s$: φ の実験は図-15 に示される。実験値のばらつきは大きい、 $V/C_0 \leq 5$ では一般に $\varphi \geq 1$ であり、 V/C_0 が大きいほど φ は一般に大きい。近似的に図に示すような実験値を内挿する $\bar{\varphi}$ の直線および最大値を示す $\varphi_{\max}$ の直線で代表させれば、 $V/C_0 \leq 5$ の範囲でつぎのように示される。

$$\bar{\varphi} = \exp(0.112 V/C_0), \quad (56)$$

$$\varphi_{\max} = \exp(0.537 V/C_0), \quad (57)$$

b) $h = h_R \sim h_s$: $V/C_0 \leq 3.5$ の実験では、一般に $\varphi \geq 1$ であり、近似的につぎのように示される。

$$\bar{\varphi} = \exp(0.088 V/C_0), \quad (58)$$

$$\varphi_{\max} = \exp(0.462 V/C_0), \quad (59)$$

c) $h = 0 \sim h_R$: $V/C_0 < 3.5$ の実験では、一般に $\varphi \geq 1$ であり、近似的に次のように示される。

$$\bar{\varphi} = \exp(0.231 V/C_0), \quad (60)$$

$$\varphi_{\max} = \exp(0.931 V/C_0), \quad (61)$$

なお、式 (56) ~ (61) は概算を示す程度であり、精度を高めることが今後の課題であろう。

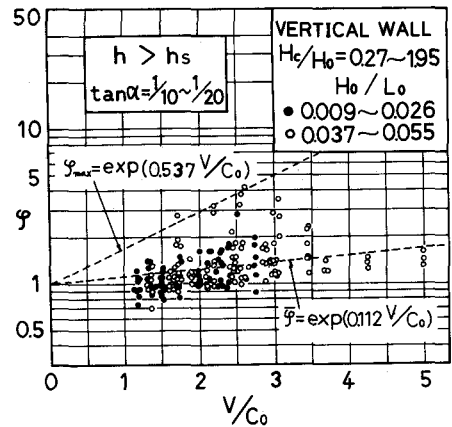


図-15 越波量の風係数 φ と風速との関係

(2) 風による碎波点の移動

波向きと同一方向に風が吹く場合に、碎波水深は図-16に示すように、無風時よりも沖側へ移動し、風速が大きいほどその傾向が著しい²¹⁾。このように、深水波の一波長程度の吹送距離でも碎波点が沖側へ移動することは、実際の海岸においてもその変化はもっと大きいことを示唆している。また、風による碎波点の移動は波のうちあげおよび越波に影響をおよぼすと考えられるので、今後の研究課題として注目されよう。

(3) 模型実験における風速の相似則

海岸堤防付近の空気の流れを風洞実験において再現する場合に、レイノルズ数 VL/ν の一致はほとんど不可能であるので、これまではフルードの相似則の考え方を応用して、 $V/\sqrt{gH_0}$ を一致させることで模型と実物の相似を考慮して来た。すなわち、模型縮尺を n とすれば式(62)で模型風速 V_m を決めて来た。

$$V_m/V_P = n^{1/2}, \quad (V_P: \text{実物風速}) \quad (62)$$

しかし、根本(1963)²²⁾ および大熊(1974)²³⁾ らは自然風を対象とした風洞実験の相似則として風の乱子拡散係数に着目し、渦動レイノルズ数を一致させる方法を提案している。すなわち $V/\ell^{1/3}$ を一致させることを意味しており、風速の相似則は式(63)で示される。

$$V_m/V_P = n^{1/3}, \quad (63)$$

以上より、従来の越波の模型実験は風の影響を過小に評価($n^{1/2}$ と $n^{1/3}$ との相違)をしていたことになり、今後再検討しなければならない研究課題といえよう。

4.2 不規則波の越波流量の定量化

合田ら(1976)²⁴⁾は、Saville(1962)¹⁵⁾の不規則のうちあげ分布の計算法を応用して、不規則波の期待越波流量の算定法を提案している。すなわち、各成分波の越波流量に各成分波の波高の出現確率を重みとして乗じ、越波流量の平均値を用いて無次元化している。そこで、合田らの方法について述べる。

(1) 成分波の越波流量 $q(H_0)$

基本式として、吉川・椎貝・河野(1967)⁴⁾による越波モデルを若干変形した次式を用いる。

$$\frac{q(H_0)}{\sqrt{2g} H_0^3} = \frac{4}{15} C \left(\frac{K}{1+K} \right)^{3/2} \left(1 - \frac{H_c}{KH_0} \right)^{5/2}, \quad (64)$$

ここに、 C ：越波流量係数、刃形せきでは0.6～0.7程度であるが、実験値との適合性より $C = 0.375$ とする。

$K = R_c/H_0$ ：越波流量の計算用のうちあげ高、実用性を考慮して次式を仮定する。

$$K = \min \left\{ \left[1.0 + i \frac{\eta \cdot (H_{1/3})_0}{h} + \frac{j}{(K_s)^{1/3}} \left\{ \frac{\eta \cdot (H_{1/3})_0}{h} \right\}^2 \right], b \right\} \quad (65)$$

ここに、 $(K_s)_{1/3} = H_{1/3}/(H_{1/3})_0$ ：非線形浅水効果および碎波減衰による1/3最大波高の変化率、 $\eta = H_0/(H_{1/3})_0$ 、式中の i 、 j および b は、これまでの実験より、鉛直壁については $i = 1.0$ 、 $j = 0.8$ 、 $b = 10$ と決める。 $\min \{ [\quad], b \}$ は $[\quad]$ または、 $b = 10$ のいずれか小さい値を採用する。

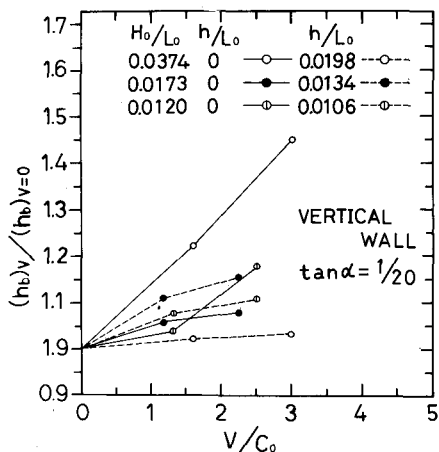


図-16 風による碎波点の移動と風速との関係

(2) 期待越波流量 q_{exp}

周期が一定で、波高がレーリー分布するとして、次式で求める。

$$\frac{q_{exp}}{\sqrt{2g(H_{1/3})_0^3}} = \int_0^\infty \frac{q(\eta)}{\sqrt{2g(H_{1/3})_0^3}} p(\eta) d\eta, \quad (66)$$

ここに、

$$q(\eta) = 0.10 \left(\frac{K}{1+K} \right)^{3/2} \eta^{3/2} \left[1 - \frac{H_c}{(H_{1/3})_0} \frac{1}{K\eta} \right]^{5/2}, \quad (67)$$

$p(\eta)$ ：無次元波高 η の確率密度，実際の計算は η を 50 区間に分けて，式 (66) の積分を 50 区間の級数和に置き換えて行う。

$\tan \alpha = 1/10$ ， $(H_{1/3})_0/(L_{1/3})_0 = 0.036$ の鉛直壁の計算結果は図-17 に示される。

これは，計算結果の一部であり，海底勾配，波形勾配の影響および消波護岸の q_{exp} についても詳細に計算されているので文献^{24), 25)}を参照されたい。

なお，これらの計算値は不規則波の実験結果をかなりよく説明できることが検証されているが，実際に適用する場合にはかなりの誤差が含まれることを考えておく必要がある²⁵⁾。この種の研究はかなり体系化されてきているが，さらに算定法の精度を高めることが今後の課題であろう。

4.3 許容越波量および許容越波流量

海岸堤防および護岸の設計において，越波量および越波流量をどの程度許容するかが重要な問題となる。その場合の考え方として，構造物の安全性の問題と防災機能上の問題（背後地の地形と利用状況および排水処理能力など）があげられる。しかし，現地資料が少なく，今後の研究に待つところが多いのが実状である。

これまで明らかにされていることは次の通りである。

(1) 越波の状況と越波量との関係

表-1 に示すように，越波の状況を 4 段階に分けて，それに対する無次元越波量 $2\pi Q/(H_0 L_0)$ との関係^{26), 27)}を概略推定できる。

(2) 構造物の被災限界と許容越波流量との関係

合田ら²⁸⁾(1970)は伊勢湾台風など既往の災害事例について構造物の被災程度とそのときの期待越波流量との関係を図-18 のように推定し，その結果，表-2 のような構造物の破壊が生じる越波流量の限界値を提案している。なお，

表-2 は台風による被災例に基づいているので，季節風などによる場合の被災限界値は図-18 に併記される記号(1)，(2)の被災例のようにさらに低くなると考えられる²⁹⁾。

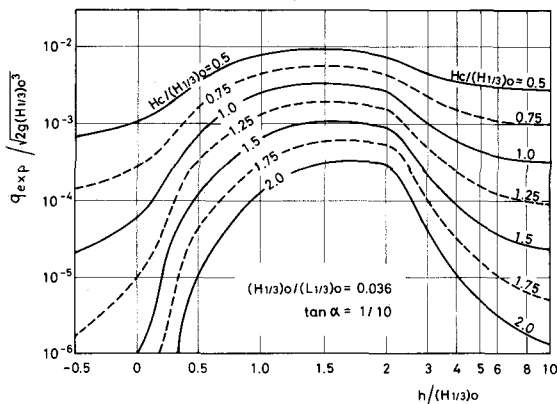


図-17 $\tan \alpha = 1/10$ の鉛直壁の期待越波流量²⁴⁾
 $\{(H_{1/3})_0 / (L_{1/3})_0 = 0.036 \text{ の場合} \}$

表-1 越波の状況と越波量との関係^{26), 27)}

越波の状況	一周期の越波量 $2\pi Q / (H_0 L_0)$
飛沫（水塊）が越える。	$< 10^{-4}$
飛沫，跳波（かなりの水塊）が越える。 （波の実質部分がわずかに溢流）	$10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$
波の実質部分が連続流となって溢流する。	$5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$
波形そのものが乗り越えるような状況 で多量に溢流する。	$> 10^{-2}$

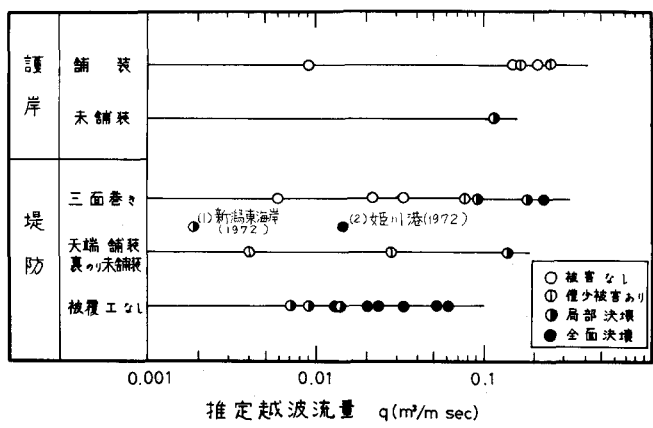


図-18 構造物の被災限界と許容越波流量との関係^{28), 29)}

表-2 海岸堤防および護岸の被災限界越波流量²⁸⁾

種 別	被 覆 工	越波流量 q ($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$)
護 岸	背後舗装済み	0.2
	背後舗装なし	0.05
堤 防	コンクリート三面巻き	0.05
	天端舗装, 裏法未施工	0.02
	天端舗装なし	0.005 以下

注) 護岸は裏法面がないもの、堤防は裏法面があって背後地が天端よりも低いものとして分類した。

(3) 背後地の利用状況と許容越波流量との関係²⁹⁾

福田・宇野・入江(1973)は平均越波流量を測定し、さらにそのときの状況を8ミリフィルムで撮影し、それを指導的立場にある8人の技術者に映写して、背後地の利用状況に対応する安全性を判定してもらった結果と平均越波流量とを関連づけている。それらを要約すれば、次のようになる。

a) 海岸道路の歩行の安全性 海岸堤防および護岸パラベットのすぐ背後を歩行する場合に、 $q \approx 3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 以下、パラベットより約13m離れたところを歩行する場合は、 $q \approx 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 以下であれば50%以上の人が安全(ただしこわいと感じる程度)と判断している。

b) 海岸道路の自動車走行 パラベット背後を自動車が行走する場合 $q \approx 2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 以下、約13m離れたところを走行する場合 $q \approx 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 以下で50%以上の人が安全(ただし、速度を落とす程度)と判断している。

c) パラベット背後の家屋 パラベット背後に家屋がある場合 $q \approx 7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 以下、約13m離れているところでは $q \approx 3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 以下であれば、50%以上の人が安全であると判断している。

以上のことから、パラベット背後では $q \approx 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ のオーダー、約13m離れたところでは、 $q \approx 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ のオーダーで背後地の利用に何らかの障害が出てくる可能性の大きいことを示唆している。また、これらの値は構造物の被災限界を示す表-2と比較して極めて小さい。すなわち、これらの越波状況は常に越波しているのではなく、ときどき越波する量はかなりあるが、時間的に平

均して少ないという越波状況であろう。

一方、東北地方建設局（1965）では庄内海岸の海岸道路の越波量を測定し、図-19のような結果を得ている。³⁰⁾これより、 $R_{1/3}$ が堤防上1 m程度越えるようであれば、 $q \approx 10 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 前後の値、3~4 m越えるようであれば $q \approx 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 、6 mでは $q \approx 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 前後の値であることを調べている。また、静岡県由比海岸堤防（ただし、表-2では護岸に分類される）の建設（昭和39年）は背後に高速道路を通す目的で $q_{max} \approx 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 以下になるよう消波堤の設計をした貴重な実施例の1つである。

d) 今後の問題点 許容越波流量に何を根拠にして限界値を決めるかが重要な問題である。また、許容越波流量の他に一周期の成分波越波量をどの程度許容するかも重要であり、その際に、 Q_{max} 、 $Q_{1/10}$ 、 $Q_{1/3}$ および $\bar{Q}$ などと一波当りの許容越波量との関係を十分考慮する必要がある。³¹⁾それゆえ、堤体の構造、背後地の利用状況、地形、排水能力や波の特性、越波の継続時間、風の作用などが関係しているので、広い範囲の研究成果の蓄積が必要であろう。とくに、構造物が波のうちあげや越波によって破壊・決壊するメカニズムを究明することが今後の重要な研究課題となろう。

5. 越波の飛散分布

越波が水平方向にどのように分布して落下するかを知ることは、背後地の利用計画および排水対策を考える場合に非常に重要である。越波の水平方向の飛散分布は一波についてパラペットからの飛散距離と飛散水量との関係および累加飛散率の関係で表わすことができる。いま図-20に示すような一様な壁体を対象にすれば、一周期の越波の水平飛散水量（ここでは、飛散水深 h_{s0} とする）および累加飛散率 ϵ は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_{s0}}{H_0} \\ \epsilon = \frac{1}{Q} \int_0^x \Delta Q_{ax} \end{aligned} \right\} = \varphi(x/H_0, H_0/L_0, h/L_0, \cot \theta, \tan \alpha, H_c/H_0, \Delta H_c/H_0, V/\sqrt{gH_0},), \quad (68)$$

(1) 堤脚水深の影響

無風時において、 $H_0/L_0 = 0.019$ 、 $\cot \theta = 2$ 、 $\tan \alpha = 1/10$ で堤脚水深が重複波、碎波および汀線の3領域の h_{s0}/H_0 および ϵ の実験結果が図-21、22に示される。これらより、パラペットを離れるに従い飛散水量が急激に減少するが、越波量の多い場合はパラペットより少し離れた地点に極大値がある。また、碎波領域ではとくに広く分布しており、次いで重複波領域、汀線の順に狭くなる。さらに、 ϵ は近似的に対数正規分布をしていることがわかる。⁸²⁾

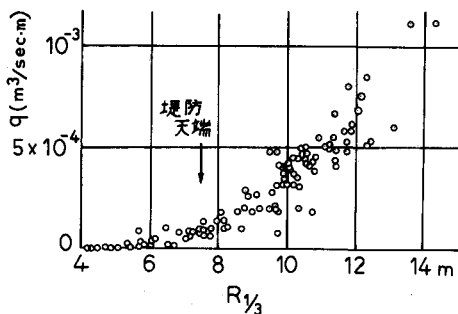


図-19 現地における越波流量と $1/3$ 最大うちあげ高との関係を調べた実測例³⁰⁾

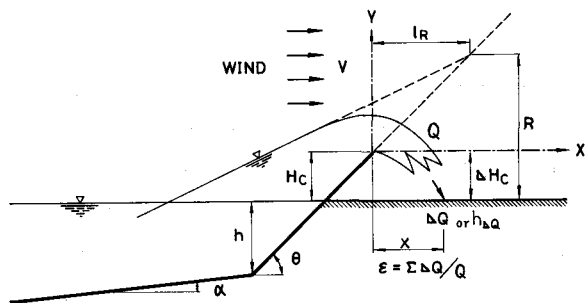


図-20 越波の飛散率と累加飛散率

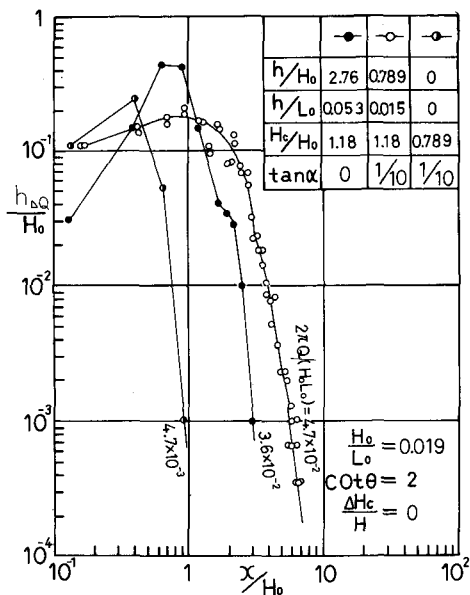


図-21 水平飛散水量（飛散水深）におよぼす堤脚水深の影響

(2) 風速の影響

Q が大きいほど一般に飛散分布が広く、風が加わるとさらに広がる。図-23 は風速の影響を調べたものであり、風速が大きいほど飛散分布は広がる³³⁾ことがわかる。また、越波量が少ないほど風の影響が大きく、飛散分布の勾配が緩やかであることが現地観測より明らかにされている²²⁾。

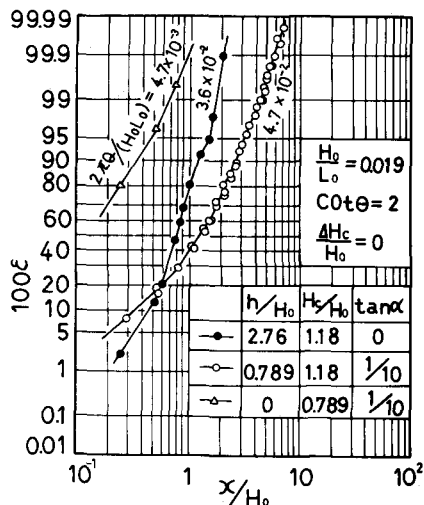


図-22 累加飛散率 ϵ におよぼす堤脚水深の影響

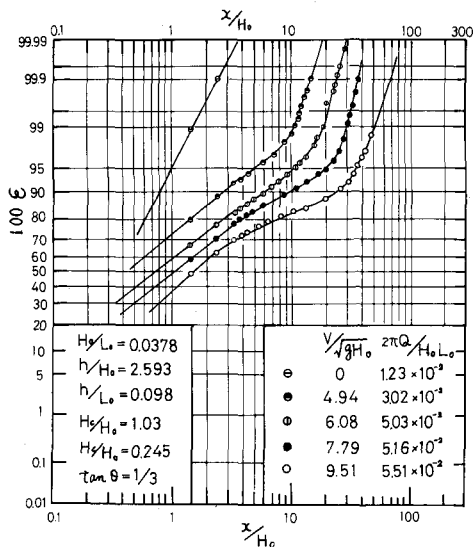


図-23 越波の累加飛散率 ϵ におよぼす風速の影響

6. 越波に伴う砂礫などの飛込み

越波に伴って持ち込まれる砂礫、捨石、異型ブロックおよび漂流物などについてその挙動を検讨することは防災工学的にも意義のあることと考えられる。海岸道路の場合には交通事故を誘発し、防波堤および導流堤の場合には港内埋没や河口閉塞の原因にもなる。一方、越波に伴う越砂現象を利用して、防波堤および導流堤の背後のサンドトラップで漂砂を捕そくし、港口および河口の閉塞を防止することもできる。しかし、この種の研究は、著者（1975）³⁴⁾の2.3の実験例がある程度であり、ほとんど行われていないので、今後の課題といえよう。

7・あとがき

今回の著者の講義は比較的短周期波を対象とした実験結果を中心に述べたが、やや実用性を強調した内容となったきらいがある。波のうちあげ機構や越波の機構に関する理論的成果について、もっと突込んだ検討をすべきであったと反省しているが、それらについては著者の不得意とするところであるので、最近の種々の文献を参照されたい。また、津波のうちあげおよび越波については、短周期波の研究成果と共通する部分もあるが、やはり別の観点からの考察が必要であろう。

謝辞：本講をまとめるにあたり、資料の整理、図面の作成などに、中部工業大学土木工学教室の職員（小川君、須賀君、加藤さん、榊原さん）および大学院学生（吉田君、大野君、藤川君）の助力を得た。ここに記して謝意を表する。

〔 参 考 文 献 〕

- 1) 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 182，1970.
- 2) 高田彰：波の打ち上げ空間波形と越波量の相関特性、土木学会論文報告集，No 212，1973.
- 3) 福井芳郎・中村充・白石英彦・佐々木泰雄：津波の研究Ⅱ——一般津波の堤防におよぼす影響——，第9回海岸工学講演会講演集，1962，PP.50～54，堤防の津波対策に関する水理学的研究、農林省農業土木試験場報告，No 1，1963 PP. 281～328.
- 4) 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，1967，PP. 118～122.
- 5) Shi-igai, H. and T. Kono : Analytical approach on wave overtopping on levees, Proc. 12th Coastal Engrg. Conference, Vol. 1, 1970, PP. 563～573.
- 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 201，1972，PP. 61～76.
- 7) 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，1967，PP. 45～49.
- 8) Miche, M. : Le pouvoir reflechissant des ouvrages maritimes, Annales des Ponts et Chaussées, 128-3, 1951, PP. 285～319.
- 9) 高田彰：波のうちあげ，越波および反射の関連性について（第2報），第17回海岸工学講演会論文集，1967，PP.113～123.
- 10) Miche, M. : Mouvements ondulatoires de ea mer ln Profondeur constante on de creissante (I～IV), Annales des Ponts et chausseese, 121, 1944, PP. 25～78, 131～164, 270～292, 369～406.
- 11) 合田良実：碎波指標の整理について，土木学会論文報告集，No 180，1970，PP. 39～49.
- 12) 高田彰：規則波の打ち上げ高および越波量の定式化について，第22回海岸工学講演会論文集，1975，PP.377～386.
- 13) 豊島修・富永正照・橋本宏：海岸堤防に関する研究(8)——波のうちあげ高——，建設省土木研究所報告，No 111，1976，PP. 101～102.
- 14) 高田彰・藤川浩生：最大打ち上げ高および最大越波量の発生条件，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，1977，PP. 101～102.
- 15) Saville, T. Jr : An approximation of the wave run-up frequency distribution, Proc. 8th Cnf. on Coastal Engrg., 1962, PP. 48～59.
- 16) 樫木亨・岩田好一郎・森野彰夫：緩斜面上への波の遡上特性について，第23回海岸工学講演会論文集，1976，PP. 164～169.
- 17) Battjes, J. A. : Run-up distributions of waves breaking on slopes, Proc. ASCE, 97 WWI, 1971,

PP. 91 ~ 113.

- 18 高田彰：不規則波のうちあげ高の推算法について，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集，Ⅱ，PP. 91 ~ 92.
1975，不規則波のうちあげ高の分布特性，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集，Ⅰ，1976，PP. 94 ~ 95.
- 19 井上雅夫：海岸堤防の越波機構について，第20回海岸工学講演会論文集，1973，PP. 107 ~ 112.
- 20 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，1970，PP. 133 ~ 140.
- 21 高田彰：規則波の越波量におよぼす風の影響，第23回海岸工学講演会論文集，1976，PP. 170 ~ 175.
- 22 根本茂：自然風を対象とした風洞実験の相似則，航空学会誌，第11巻，第116号，1963.
- 23 大熊武司：自然風を対象とした風洞実験の相似則，構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム論文集，1974，
PP. 185 ~ 191.
- 24 合田良実・岸良安治・神山豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第14
巻第4号，1976.
- 25 沼田淳：消波護岸の越波と天端高に関する研究，第21回海岸工学講演会論文集，1974，PP. 429 ~ 433.
- 26 白石直文・遠藤泰司：消波工に関する二、三の問題，第10回海岸工学講演会講演集，1963，PP. 138 ~ 143.
- 27 永井莊七郎・高田彰：海岸堤防の越波におよぼす影響について，第11回海岸工学講演会講演集，1961，PP. 279 ~
286.
- 28 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，第9巻第4号，1970.
- 29 福田伸男・宇野俊泰・入江功：防波護岸の越波に関する現地観測（第2報），第20回海岸工学講演会論文集，1973.
PP. 113 ~ 118.
- 30 橋本宏：許容越波量の設計資料，（建設省）土木技術資料，16-10，1974，PP. 526 ~ 527，庄内海岸波浪調査中間
報告書，東北地建酒田工事事務所，1965，由比海岸堤防模型実験報告書，建設省土木研究所，1963.
- 31 高田彰：木曾三川河口堤防の越波の考察，第13回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，1976，PP. 347 ~ 348.
- 32 高田彰：越波の飛散分布について，第19回海岸工学講演会論文集，1972，PP. 289 ~ 295.
- 33 高田彰：越波の飛散分布におよぼす風の影響(1)，第16回海岸工学講演会講演集，1969，PP. 277 ~ 288.
- 34 高田彰：越波に伴う越砂量について，第12回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，1975，PP. 431 ~ 432.