

規則波の越波量におよぼす風の影響

高 田 彰*

1. ま え が き

風を考慮した越波の研究は Sibul & Tickner (1956)¹⁾ が最初であり、わが国では、伊勢湾台風 (Sep. 26, 1959) 以後、永井・上田 (1960)²⁾ が風洞つき波浪水槽を用いて行った越波の模型実験の重要性が第2室戸台風 (Sep. 18, 1961) で実証されるなどして、この種の研究が盛んになり、海岸堤防および防波護岸の設計に風の影響を考慮するようになってきた³⁾⁻¹³⁾。しかし、未解決な問題も多く残されており、その中でも実用的に解明が急がれていることは、有風時の越波量が無風時の越波量に比較してどの程度増減するかを定量的に示すことであろう¹²⁾。

越波におよぼす風の影響は2つに大別されよう。一つは波の打上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及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^{4), 12)}。本研究は、おもに前者について考察したものであり、侵入波の沖波の (0.5~1.3) 波長程度の吹送距離を有する鉛直壁を対象とし、越波量が風によってどのような影響を受けるかを無風時の越波量を基準量にして比較検討したものである¹²⁾。

2. 研究 方 法

有風時の越波の相似則はまだ十分に検討されておらず、水塊・飛沫の分裂の相似性、越波水脈および波の打上げ波形に作用する風の抗力の相似性、侵入波の波形および不規則性の変化におよぼす相似性など、今後の研究に待つところが多い。そこで、この研究では、風洞内で生ずる越波実験によって、風速と越波量との関係を定量的に明らかにすることから始める。

永井・上田 (1960)²⁾ の実験によれば、波の打上げ高におよぼす風の直接的作用は比較的小さいが、無風時に比較して打上げ高は一般にやや小さい傾向にある。そこで、この研究では、実用的に安全側に考え、波の打上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る

ば、有風時の越波量は無風時の越波量を基準量として式 (1) で近似できる¹²⁾。

$$Q\bar{v}_0 = \varphi Q\bar{v}_{0=0} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $Q\bar{v}_0$: 有風時の一周あたり越波量、 $Q\bar{v}_{0=0}$: 無風時の一周あたり越波量、 φ : 越波の風係数。

この研究では、 φ の特性を実験的に定量化することをおもな目的としているが、 φ に関係するおもな要素の無次元項は式 (2) に示される。

$$\varphi = f\left(\frac{\bar{V}_0}{C_0}, \frac{h}{L_0}, \frac{H_0}{L_0}, \frac{H_c}{H_0}, \tan \alpha, \tan \theta\right), \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\bar{V}_0$: 代表風速 (この研究では、鉛直壁の天端鉛直線上の風洞内の平均風速)、 C_0 : 深水波の波速 ($=gT/2\pi$, T : 波の周期)、 L_0 : 深水波の波長 ($=gT^2/2\pi$)、 h : 堤脚水深、 H_0 : 深水波の波高、 H_c : 静水面上の天端高、 $\tan \alpha$: 海底勾配、 $\tan \theta$: のり面勾配、である。

いま、鉛直壁の h を 図-1 に示されるように、3つの領域に大別して考察を進める¹⁴⁾。すなわち、 $h > h_s$ (h_s : 重複波の碎波水深) の領域、 $h = h_R \sim h_s$ (h_R : 進行波の碎波水深) の領域、 $h = 0 \sim h_R$ の領域に分ける。

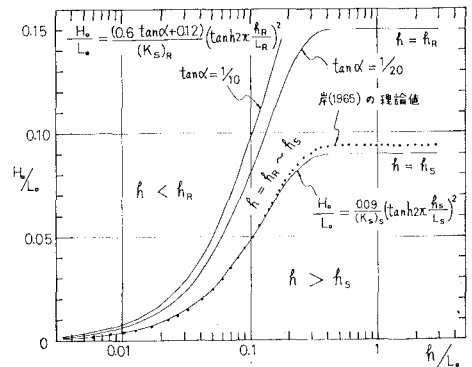


図-1 鉛直壁の堤脚水深の分類

3. 実験装置および実験範囲

(1) 実験装置

実験に用いた造波・風洞水槽は 図-2 に示すように、

* 正会員 工博 中部工業大学教授 土木工学科

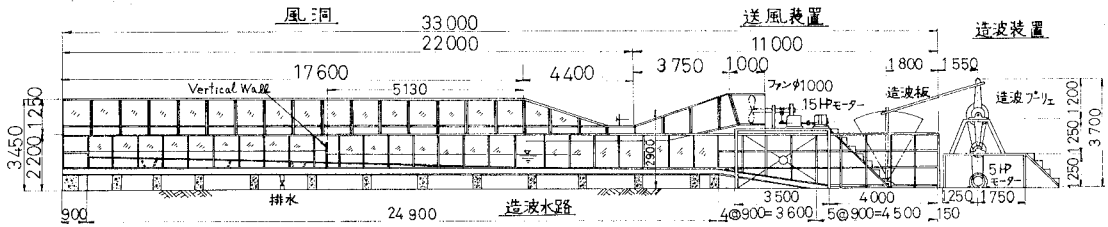


図-2 造波・風洞水槽

長さ 33m、深さ 1.2m (造波部 2.2m)、幅 0.8m の片面ガラス張り造波水槽とその上部に高さ 1.3m、幅 0.8m の矩形断面の風洞とからなっている¹⁰⁾。造波水槽の一端に規則波発生装置 (3.75 kW フラップ式, $T=1.5 \sim 3$ sec, $H_{\max}=25$ cm) と風洞の一端に水平軸流ファン (径 1 000 mm, $V_{\max}=15$ m/sec) が設置されている。風洞の有効吹送距離は 17.6m であり、静水面に平行に吹くようにしてある。鉛直壁をファン吐出口より 5.13 m のところに設置したので、風は鉛直壁海側に (0.5~1.3) L_0 程度の実験吹送距離とした。

(2) 実験範囲

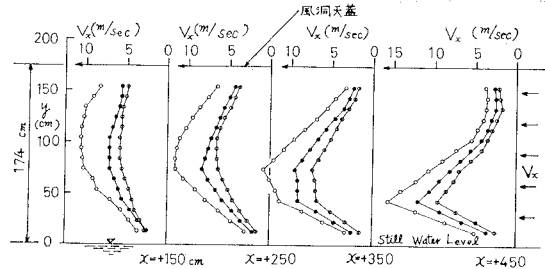
水路の一樣水深を 70.7 cm とし、 $\tan \alpha=1/10$ および $1/20$ に設置された汀線より海側の鉛直壁を対象とする。実験範囲を列記すると次のとおりである。

- a) 波: $T=1.6 \sim 2.6$ sec, $H_0=9.5 \sim 22$ cm, $H_0/L_0=0.009 \sim 0.055$, $h=0 \sim 56$ cm, $h/H_0=0 \sim 5.83$,
- b) 天端高: $H_c=6 \sim 40$ cm, $H_c/H_0=0.27 \sim 3.54$,
- c) 風: 波向きと同一方向とし、 $\bar{V}_0=4.7 \sim 8.4$ m/sec, $\bar{V}_0/C_0=1.1 \sim 5$, 静水面に平行な吹送距離は (0.5~1.3) L_0 .

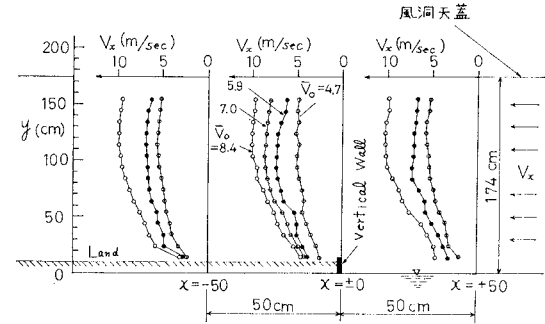
4. 風洞の特性 (風速分布)

風洞内の風速分布は 図-3 (a), (b) および (c) に示される。なお、鉛直壁を $x=\pm 0$ とし、海側へ $+4.5$ m、陸側へ -6.0 m の範囲を、また、静水面を $y=0$ として風洞天蓋 $y=1.74$ m までの範囲を 3 段階 ($x=\pm 0$ では 4 段階) の風速について測定したものである。図-3 (a) は $x=+1.5 \sim +4.5$ m について、図-3 (b) は $x=-0.5 \sim +0.5$ m について、図-3 (c) は $x=-1.1 \sim -6.0$ m について、風速分布を示す。これらより、ファンの吐出口付近は水面付近の風速が大きく、ファンを離れるにつれて風は漸次拡散している。そして、鉛直壁の前方で風速が一様化し、実際の風速分布に近似していることがわかる。

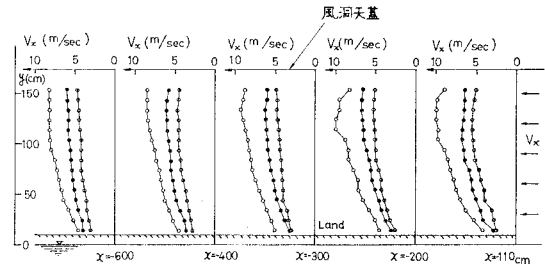
図-4 は風洞の特性を明らかにするために、 $\bar{V}_x/\bar{V}_0$ ($\bar{V}_x$: x における平均風速), $(V_x)_c/\bar{V}_0$ ($(V_x)_c$: $y=H_c$ の水平面上 (ここでは 14 cm) における風速), $(V_x)_{\max}/\bar{V}_0$ および $y_{\max}/y_B$ ($y_{\max}$: $(V_x)_{\max}$ を生ずる y の値, y_B : 風洞の高さ (ここでは 174 cm)) を示す。これらよ



(a) 鉛直壁より海側



(b) 鉛直壁前後



(c) 鉛直壁より陸側

図-3 風洞の風速分布

り、 $\bar{V}_x$ および $(V_x)_{\max}$ はファンの吐出口より風下に行くにつれて漸次減少し、 $y_{\max}$ および $(V_x)_c$ は漸次増加することがわかる。

5. 風による碎波点の移動

2次元の波の変形において、無風時の海浜における碎波点は、無風時の場合はおもに H_0/L_0 と $\tan \alpha$ との関連によって決まるが、図-5 (a) に示すように、鉛直壁

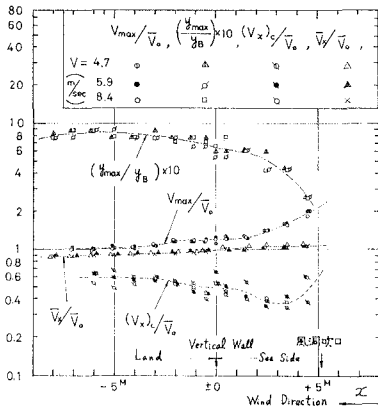
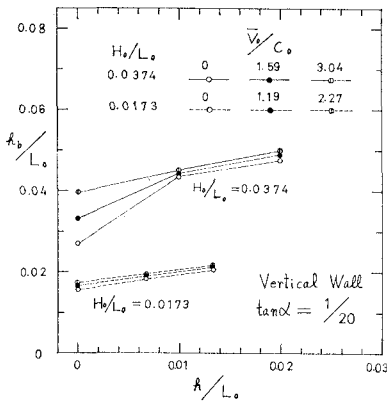
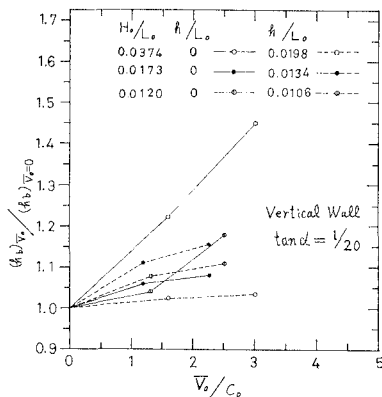


図-4 風洞の特性 $(V_x, (\bar{V}_x)_{\max}, (V_x)_c$ および $y_{\max}$ の場所的变化

がある場合には反射波の影響で砕波点が漸次沖側に移動し、 $h \rightarrow h_s$ に対し、砕波点は重複波の砕波点に近づく。一方、砕波におよぼす風の影響は図-5(b)に示すように、波向きと同一方向に風が吹く場合に、砕波点は無風時のそれよりも沖側へ少し移動し、風速が大きいほどその傾向が著しい。なお、この実験は吹送距離が(0.5~



(a) 鉛直壁の堤脚水深の影響



(b) 波向きと同一方向の風の影響

図-5 砕波点の移動

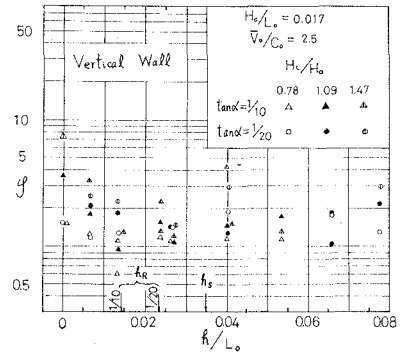
1.3) L_0 である。このように、実際の場合と比較してきわめて短い吹送距離においても、砕波点が沖側へ少し移動することが認められるので、実際の海岸においては、その変化はもっと大きいことが推測される。

この種の問題は、今後の研究課題として注目されよう。

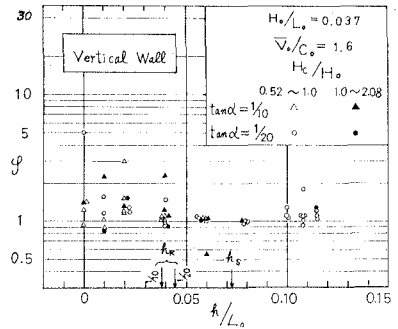
6. 越波の係数 φ の特性

(1) 堤脚水深の影響

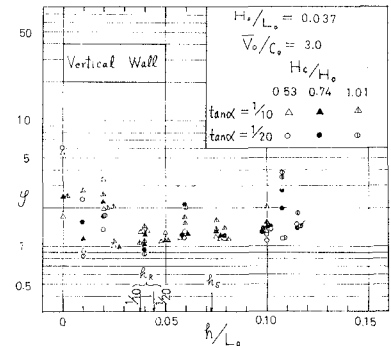
φ と h/L_0 との関係は図-6(a), (b) および (c) に示される。これらより、実験値のばらつきが大きい、



(a) $H_0/L_0=0.017$, $\bar{V}_0/C_0=2.5$ のとき



(b) $H_0/L_0=0.037$, $\bar{V}_0/C_0=1.6$ のとき



(c) $H_0/L_0=0.037$, $\bar{V}_0/C_0=3.0$ のとき

図-6 φ と堤脚水深との関係

実験値の大部分は $\varphi > 1$ であり、一般に、 $h=0 \sim h_R$ の領域の φ が大きく、次いで、 $h > h_S$ 、 $h=h_R \sim h_S$ の順である。なお、岩垣・土屋・井上らの実験 (1966)⁵⁾ によれば、侵入波が碎波しない場合は一般に $\varphi > 1$ であり、著者の実験結果と定性的に一致する。しかし碎波後（特に汀線より陸側）の場合には、 $\varphi \leq 1$ となる例が多いとしており、著者の実験結果とはかなり異なる傾向を示しているため、今後さらに検討したい。

(2) 波形勾配および天端高の影響

φ と H_c/H_0 との関係を H_0/L_0 のパラメーターで示せば、図-7 (a), (b) および (c) のようになる。これらより、実験値のばらつきが大きい（とくに、 H_c/H_0 が大きいと著しい）が、一般に、 H_c/H_0 および H_0/L_0 の

影響は小さく、 φ は近似的に一定の値を与えると思なすことができる。

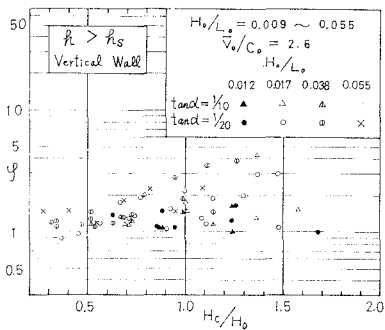
(3) 風速の影響

a) $h > h_S$ の領域：この領域の $\bar{V}_0/C_0$ と φ との関係は、 $H_c/H_0=0.27 \sim 1.95$ の範囲で H_0/L_0 をパラメーターにして、図-8 (a), (b) のように示される。これより、実験値のばらつきがかなり大きい、 $\bar{V}_0/C_0 \leq 5$ では、一般に $\bar{V}_0/C_0$ が大きいほど φ は大きく、 $\varphi > 1$ である¹²⁾。このような傾向を定式化することには現段階では無理があるが、近似的に、図に示すように、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、 φ の実験式は $\bar{V}_0/C_0 \leq 5$ の範囲で式 (3) および (4) のように示される。なお、精度をさらに高めることが今後の課題であろう。

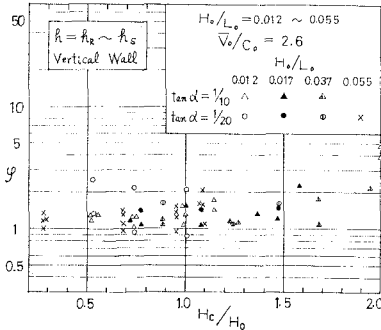
$$\bar{\varphi} = \exp(0.112 \bar{V}_0/C_0), \dots\dots\dots (3)$$

$$\varphi_{\max} = \exp(0.537 \bar{V}_0/C_0), \dots\dots\dots (4)$$

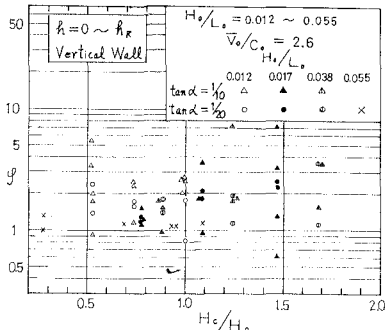
b) $h=h_R \sim h_S$ の領域：この領域の $\bar{V}_0/C_0$ と φ との関係は、 $H_c/H_0=0.27 \sim 1.95$ の範囲で H_0/L_0 をパラメーターにして、図-9 (a), (b) のように示される。これより、実験値のばらつきがかなり大きい、 $\bar{V}_0/C_0 < 3.5$ では、一般に $\bar{V}_0/C_0$ が大きいほど φ は大きく、



(a) $h > h_S$ のとき

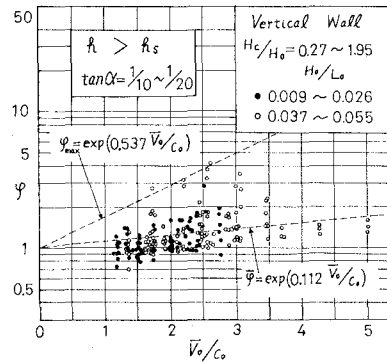


(b) $h=h_R \sim h_S$ のとき

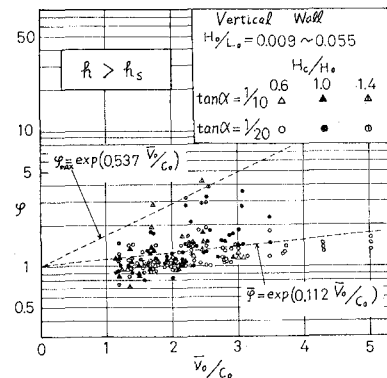


(c) $h=0 \sim h_R$ のとき

図-7 φ と天端高との関係

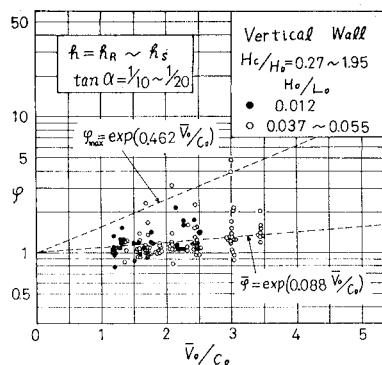
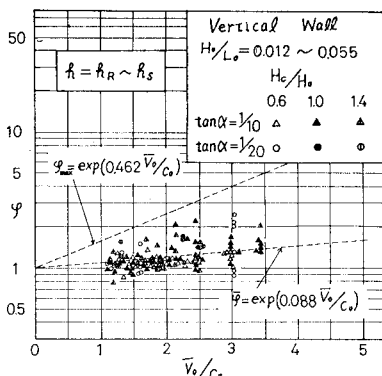


(a) $H_c/H_0=0.27 \sim 1.95$ のとき



(b) $H_0/L_0=0.009 \sim 0.055$ のとき

図-8 $h > h_S$ における φ と風速との関係

(a) $H_c/H_0=0.27\sim1.95$ のとき(b) $H_0/L_0=0.012\sim0.055$ のとき図-9 $h=h_R\sim h_S$ における φ と風速との関係

$\varphi > 1$ である¹²⁾。図に示すように、近似的に、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、 φ の実験式は $\bar{V}_0/C_0 < 3.5$ の範囲で、式(5)および(6)のように示される。なお、精度をより高めることが今後の課題であろう。

$$\bar{\varphi} = \exp(0.088 \bar{V}_0/C_0), \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\varphi_{\max} = \exp(0.462 \bar{V}_0/C_0), \quad \dots\dots\dots (6)$$

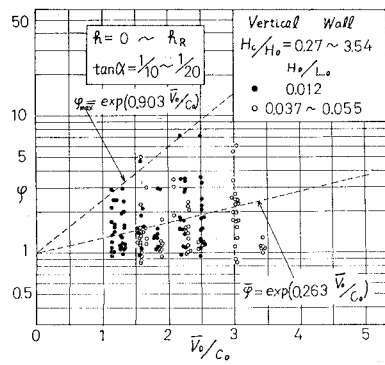
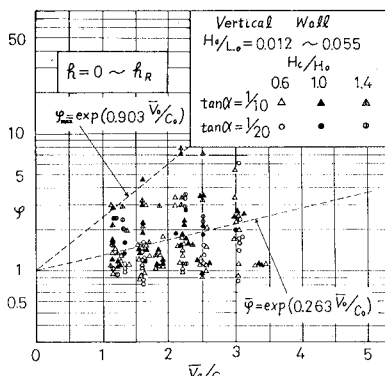
c) $h=0\sim h_R$ の領域: この領域の $\bar{V}_0/C_0$ と φ との関係は、 $H_c/H_0=0.27\sim3.54$ の範囲で H_0/L_0 をパラメーターにして、図-10(a), (b) のように示される。これより、実験値のばらつきがかなり大きい、 $\bar{V}_0/C_0 < 3.5$ では、一般に $\bar{V}_0/C_0$ が大きいほど φ は大きく、 $\varphi > 1$ である。図に示すように、近似的に、実験値を内挿する $\bar{\varphi}$ の直線および最大値を示す $\varphi_{\max}$ の直線で代表させれば、 φ の実験式は $\bar{V}_0/C_0 < 3.5$ の範囲で、式(7)および(8)のように示される。なお、精度をより高めることが今後の課題であろう。

$$\bar{\varphi} = \exp(0.231 \bar{V}_0/C_0), \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\varphi_{\max} = \exp(0.931 \bar{V}_0/C_0), \quad \dots\dots\dots (8)$$

7. あとがき

越波は不安定現象の一つであり、風を伴うとともに不

(a) $H_c/H_0=0.27\sim3.54$ のとき(b) $H_0/L_0=0.012\sim0.055$ のとき図-10 $h=0\sim h_R$ における φ と風速との関係

安定性が助長されて、同一条件の実験でも測定値のばらつきが非常に大きい。また、実験方法、風洞の吹送距離および風域の大きさによっても微妙に変化するようであり、再検討すべき問題も多い^{4), 5)}。本研究のように非常に短い吹送距離でも砕波点が沖側へ移動することがわかったので、風による波そのものの変形についても今後検討しなければならないであろう。越波におよぼす風の影響は複雑ではあるが、汀線より海側にある鉛直壁の有風時の越波量は無風時よりも一般に多く、 $\bar{V}_0/C_0 \leq 5$ では、風速が大きいほど φ は大きい傾向にある。なお、測定値の数は少ないが、 $\varphi < 1$ となるケースもあるので⁵⁾、その原因などを今後検討する必要がある。また、これまでの研究によれば^{4), 10)}、ある風速で φ が極大値をとる場合もあるので、このことについても今後の課題であろう。

鉛直壁の堤脚水深によって風の影響はかなり異なる傾向を示すが^{4), 5), 12)}、波形勾配および天端高による影響はあまり大きくないようである。

φ については、 $V_0/C_0 \leq 5$ の範囲で、おおよその概算値を示す実験式として、式(3)~(8)を提案したが、さらに精度を高めるとともに、風洞の吹送距離、風を伴う越波の相似性、風の乱れおよび海岸堤防の断面形状など

についても検討しなければならないであろう。

参 考 文 献

- 1) Sibul, O.J. and F.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, pp. 1~27, 1956.
- 2) 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, pp. 245~273, 1960.
- 3) Paape, A.: Experimental data on the overtopping of seawalls by waves, Proc. 7th Conf. Coastal Engg., Vol. 2, pp. 674~681, 1961.
- 4) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫ら: 風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究(1), (2), 第9, 12回海岸工学講演会講演集, 1962, 1965. 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, 1963.
- 5) Iwagaki, Y., Y. Tuchiya and M. Inoue: On the effect of wind on wave overtopping on vertical seawalls, Bull. DPRT, Kyoto Univ., 16-1, No.105, pp. 11~30, 1966.
- 6) 永井莊七郎ら: 防波堤および海岸堤防前面におかれた消波ブロックの効果について, 海岸堤防の越波におよぼす消波堤の効果, 深い水深における消波堤に関する研究, 第8, 11, 14回海岸工学講演会講演集, 1961, 1964, 1967. Researches on sea-walls, Proc. 12th Coastal Engg. Conf., Vol. III, pp. 1431~1450, 1970.
- 7) 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, pp. 138~143, 1963.
- 8) 富永正照・佐久間襄: 海岸堤防の越波について, 第15, 17回海岸工学講演会講演集, 1968, 1970.
- 9) 岩崎敏夫・沼田 淳: 海波工の越波防止効果に関する一実験, 第14回海岸工学講演会講演集, pp. 123~128, 1969.
- 10) 高田 彰: 越波の飛散分布におよぼす風の影響, 第16回海岸工学講演会講演集, pp. 277~288, 1969.
- 11) Shiraishi, N., A. Numata and T. Endo: On the effect of armour block facing on the quantity of wave overtopping, Proc. 11th Conf. Coastal Engg., Vol. II, pp. 853~869, 1968.
- 12) 高田 彰: 越波量の近似計算法, 土木学会第27回年次学術講演会概要集, pp. 47~50, 1970.
- 13) 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, pp. 429~433, 1974.
- 14) 高田 彰: 規則波の打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, pp. 377~386, 1975.