

不透過壁面の線形および透過斜面の空げきが越波量 におよぼす影響について*

高 田 彰**

1. 緒 言

海岸堤防の越波に関する研究の必要性は、臨海工業地帯の造成およびたび重なる台風による越波の被害によって最近特に重要視されるようになってきた。

たとえば、有義波高 $H_{1/3}$ で設計された海岸堤防では一般に最大波高 $H_{\max}$ 、あるいは $1/10$ 最大波高 $H_{1/10}$ に対しては越波することが予想される。そこで背後地の状況、堤防の構造および排水設備などにより越波をさし支えない程度にまで許容する考えがこれまでなされてきた。

しかし、海岸堤防の破壊の主な原因は越波による堤防裏のり面の欠壊や堤体土砂の流出である^{1),2),3)}。また、最近の臨海工業地帯の発展にともない埋立が急速に進んでいるが越波による堤防背後地の浸水の問題が生じている⁴⁾。

越波に関する研究は Saville-Caldwell (1953)⁵⁾ の鉛直堤の越波の実験(海底勾配 $i=1/10$) が最初であり、主な研究として Sibul-Tickner (1955, 1956)⁶⁾ の不透過壁面の粗度および風と越波量の関係、石原・岩垣・三井 (1957)⁷⁾ の種々な海岸堤防の形状と越波量の関係、Paape (1950)⁸⁾ の風をともなった不規則波における斜面堤 ($1:2 \sim 1:8$) の越波量、岩垣・土屋・井上ら (1962, 1963, 1964, 1965)⁹⁾ の鉛直堤の越波におよぼす波の特性、堤脚水深、風などの各要素の影響を無次元量で定量的に調べた研究、および永井・高田 (1964)¹⁰⁾ の海岸堤防の越波におよぼす消波堤の効果など実験的に研究が行なわれ、かなりの成果が明らかになっている。

しかし、越波の現象がきわめて複雑で、多くの要素に支配され、その機構がまだ十分究明されていないため二、三の要因だけで越波を考えることは一般に困難である。従来の実験結果にはなお明らかにされていない点が数多く指摘されるので実際の海岸堤防の天端高さの合理的な設計指針を十分検討するまでには至っていないようである。

本研究は海岸堤防の越波を防止するに効果的な構造を見出すべく、不透過壁面の線形が越波量におよぼす影響と透過斜面の空げきが越波量におよぼす影響について実

験的に考察を行なったものである。

不透過壁面の線形実験は勾配 $1/10$ の模型海浜に斜面堤、パラペット付斜面堤および鉛直堤を設置し、斜面堤ののり面角度と越波量の関係、パラペット付斜面堤の斜面部の影響、パラペットの形状による影響を調べた。

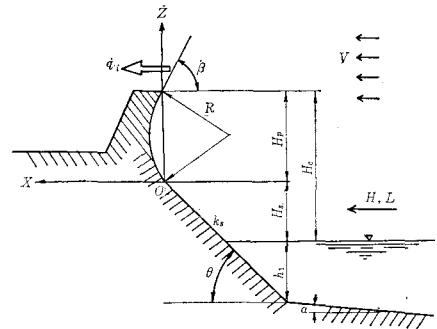
透過斜面の空げき実験は不透過壁面との比較、空げき率の影響を調べ、さらに空げき率 $P_i=0.46$ の消波堤を海底勾配 $i=1/40$ に設置して消波堤および海岸堤防の天端高さとの越波量の関係を明らかにした。以上のことから透過斜面の空げきが越波の減少に著しい効果のあることが検証できた。

なお 実験はすべて風を考慮し、風洞水槽内で、風速 $V=4.5 \text{ m/sec}=\text{const.}$ にして行なったものである。

2. 不透過壁面の線形が越波量におよぼす影響

海岸堤防の形状は設置する地形、構造および形式などが異なるため画一的に論ずることはできないが、海岸堤防の基本形状として図-1 に示すものを取りあげる。

図-1 海岸堤防の基本的形状



(1) 越波量の無次元表示

越波量を表わす方法として越波のエネルギーによる方法と越波水量による方法がある。

越波のエネルギーによる無次元表示は次式で示される⁷⁾。

$$\frac{E_i}{E} = \frac{8 q_i H_c}{H^2 L} \dots\dots\dots (1)$$

ここに E_i : 一周期の越波のエネルギー(単位幅当り)

E : 入射波の全エネルギー、微小振幅波では

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (\text{単位幅当り})$$

q_i : 一周期の単位幅当りの越波水量

越波の水量による無次元表示は次式で示される⁷⁾。

* 第22回(昭和42年5月)土木学会年次学術講演会にて一部発表

** 正会員 中部工業大学助教授 土木工学科

$$\frac{q_i}{q} = \frac{2\pi q_i}{HL} \dots\dots\dots (2)$$

ここに q : 入射波が単位幅当り一周りに岸側へ輸送される水量 (微小振幅波では $q = \frac{HL}{2\pi}$)

越波量の無次元量として式(2)を適用することにし、図-1 に示すような要素について次元解析を行なうと次式で表わされる。

$$\frac{2\pi q_i}{HL} = \phi \left\{ \frac{H}{L}, \frac{h_1}{L}, \frac{H_c}{H}, \frac{H_s}{H_p}, \frac{H_s}{H}, \frac{R}{H_p}, \frac{k_s}{H}, \alpha, \theta, \frac{VH}{r}, \frac{V}{\sqrt{gH}} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに V : 風速

k_s : 壁面の粗度

R : パラペット円弧の半径

H_s : 静水面から斜面部天端までの高さ

H_p : 斜面部上端よりパラペット天端までの高さ

H_c : 静水面から壁面天端までの高さ

(2) 実験装置および実験波浪

実験設備は大阪市立大学土木工学科の永井研究室の風洞付波浪水槽を使用した。

水路は幅 1.0 m, 高さ 1.5 m, 長さ 23.2 m の片面ガラス張り水槽で、その一端には最大吹口風速 $V=15$ m/sec まで起こし得る 15 HP の送風機と周期 $T=1.4\sim 3.0$ sec, 入射波高 $H=3\sim 22$ cm を起こし得るフラップ式の造波機が設置されている¹⁰⁾。

実験波は海底勾配 $i=1/10$ において碎波領域あるいは碎波後の領域の波を対象として $H=8.0\sim 16.0$ cm, $T=1.5\sim 2.4$ sec, $H/L=0.018\sim 0.054$, $h_1/L=0.012\sim 0.040$ である。

なお実験風速は $V=4.5$ m/sec=const. とし、風速の無次元量 $\frac{V}{\sqrt{gH}} = 3.2\sim 5.8$ の範囲である。

(3) 実験結果とその考察

a) 斜面堤の越波量 鉛直堤と 1:0.5, 1:1, 1:1.5 および 1:2 の 4 種類の斜面堤について 5 種類の波を作用させた。実験の結果は図-2 に示される。

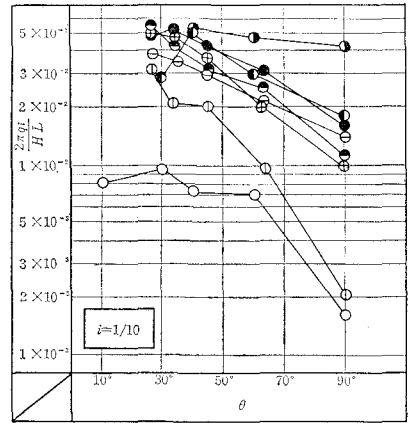
図より実験値の乱れはあるが斜面の角度が $\theta=90^\circ\sim 26^\circ34'$ ($i=1:2$) の範囲では $\theta=90^\circ$ のときの越波量が最小であり、一般に θ が小さいほど越波量は増加する。

このことは B.E.B の実験⁹⁾、石原・岩垣・三井の実験⁷⁾でも明らかにされているし、Miche の研究¹¹⁾によれば、碎波しない波が斜面を遡い上がるときの底面に沿う水分子の最大速度 $u_{\max}$ が次式で示されることから認めることができる。

$$u_{\max} = \frac{H\pi}{\sin\theta} \sqrt{\frac{g}{L}} \dots\dots\dots (4)$$

しかし Paape の実験⁸⁾によればのり面勾配 1:2~1:8 の範囲の越波量は斜面がゆるいほど越波量が減少することを示している。このことは波の遡い上がり高さが斜面がゆるくなるため摩擦損失によって減少することに起

図-2 斜面堤の越波量

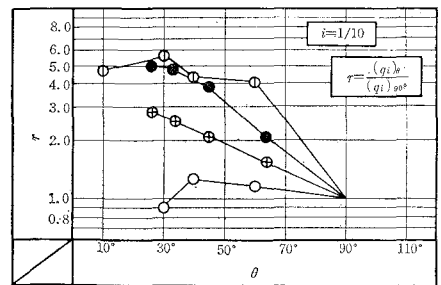


記号	H_s/H	H/L	h_1/L	$V/\sqrt{gH}$	備考
—●—	0.30	0.031	0.0	0	京大の実験
—○—	0.55	0.031	0.0	0	"
—○—	0.63	0.054	0.040	3.60	筆者の実験
—⊕—	0.67	0.041	0.043	3.79	"
—●—	0.71	0.033	0.016	3.92	"
—●—	0.91	0.026	0.014	4.19	"
—⊕—	1.18	0.051	0.011	4.79	"
—●—	1.60	0.061	0.057	0	京大の実験

因している。したがって越波量の最大になる限界斜面勾配が存在することがわかる(筆者および Paape の実験からすれば 1:2 ($\theta=26^\circ34'$) 前後に最大越波量になる勾配があるようである。しかし広い範囲の H/L および h_1/L の実験からさらに検討の余地がある)。

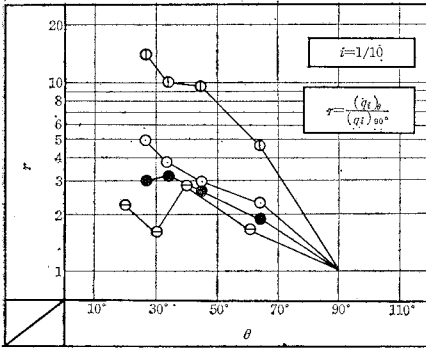
このことは波の打ち上げ高さの実験結果からも推測できる。すなわち、Savage の水深の十分大きいときの実験¹²⁾によれば $H/L > 0.02$ の波では斜面勾配 1:2 ($\theta=26^\circ34'$) 付近で波の打ち上げ高さが最大になりそれより緩急になるほど減少するようである。また H/L の小さい波ほど波の打ち上げ高さが最大になるのり面角度 θ は

図-3 (a) 斜面堤の越波量比



記号	H_s/H	H/L	h_1/L	$\frac{2\pi(q_i)_{90}}{H \cdot L}$	$V/\sqrt{gH}$	備考
—○—	0.30	0.031	0	1.7×10^{-3}	0	京大の実験
—⊕—	0.55	0.031	0	1.7×10^{-3}	0	"
—⊕—	0.63	0.054	0.040	1.4×10^{-3}	3.60	筆者の実験
—●—	0.67	0.041	0.043	9.7×10^{-3}	3.79	"

図-3 (b) 斜面堤の越波量比



記号	H_s/H	H/L	h_1/L	$\frac{2\pi(q_i)_{90^\circ}}{H L}$	$V/\sqrt{gH}$	備考
○	0.71	0.033	0.016	1.1×10^{-2}	3.92	
●	0.91	0.026	0.014	1.6×10^{-2}	4.14	
○	1.18	0.015	0.011	2.1×10^{-2}	4.79	
○	1.60	0.061	0.057	1.8×10^{-2}	0	原大の実験

小さくなるようである。

図-3 (a), (b) は鉛直堤の越波量 $(q_i)_{90^\circ}=1$ とした場合の各斜面堤の越波量 $(q_i)_\theta$ の値を表わしたもので、 r は鉛直堤に対する各斜面堤の越波量の倍率を表わす。

$$r = \frac{(q_i)_\theta}{(q_i)_{90^\circ}} \dots\dots\dots (5)$$

図より r の値はかなりの乱れはあるが $\theta=30^\circ$ では $r=2\sim 12$ 倍、 $\theta=45^\circ$ では $r=2\sim 10$ 倍、 $\theta=60^\circ$ では $r=1.5\sim 5$ 倍といずれも鉛直堤より多く、しかものり面勾配のゆるいほど r は一般に大きい。

なお、風速に関する無次元量が実験では、

$$\frac{V}{\sqrt{gH}} = 3.60 \sim 4.79$$

の範囲であったが、この程度の変化であれば風の影響は一定と見なして差し支えない⁹⁾。以下の考察も同様に取り扱った。

b) パラペット付斜面堤の越波量 海岸堤防を築造する場合に天端前面に直立または曲線状の胸壁（パラペット）あるいは波返しと称するものが用いられている。波返しの機能を左右する要素としてパラペット部の高さ H_p 、曲率半径 R 、頂角 β 、および overhang 量 a, b (図-7) などが考えられる。

しかし、波返しの効果を定量的に明らかにした理論的、実験的研究が少ないため波返しの機能を明らかにするまでには至っていないようである。

筆者は斜面部 H_s の上端に付けた直立面あるいは円弧面のパラペットについて天端高さの影響、斜面部ののり面勾配の影響、パラペット形状の影響を調べた。

① 天端高さの影響：図-4 の (a) に示すような直立パラペット付斜面堤について、斜面部 H_s の上端に直立面 $H_p=5, 10, 15$ cm の直立面のパラペットを付け8種

図-4 パラペット付斜面堤
(a) 直立のパラペット (b) 円弧のパラペット
(a) 直立のパラペット (b) 円弧のパラペット

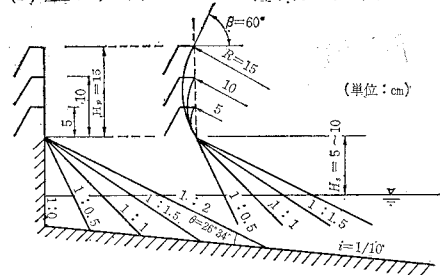
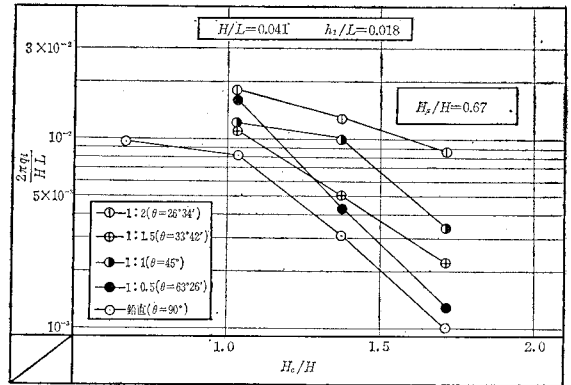
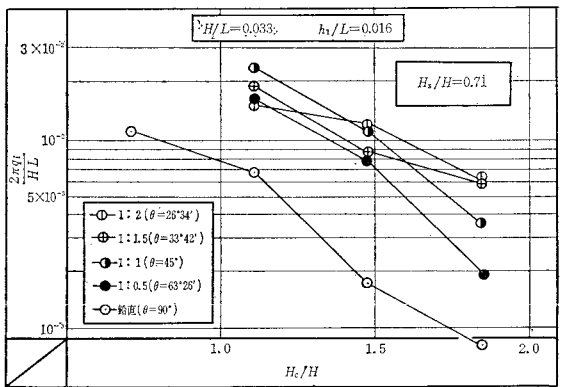


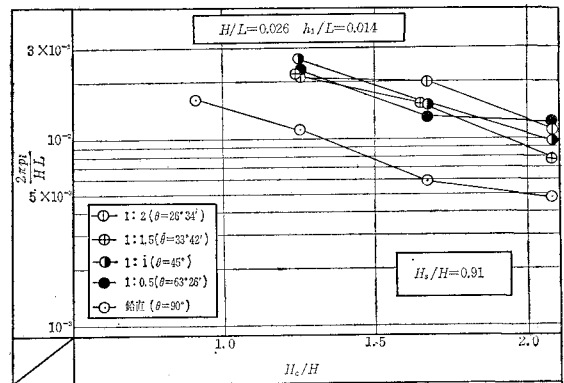
図-5 パラペット（直立）付斜面堤の越波量 (a)



(b)



(c)



類の実験波を作用させた。実験結果は図-5 (a), (b), (c) に示される。

図より H_c/H が大きいほど越波量の減少の割合が大きい。特に H_s/H が小さいほど一般に減少の割合が大きい。これは斜面部の影響が少なくなるためと考えられる。

② 斜面部ののり面勾配の影響：パラペット付斜面堤の斜面部ののり面勾配によって越波量がいかに変化するかを調べた。斜面部ののり面勾配は1:0.5, 1:1, 1:1.5, 1:2 の4種類で、斜面部の上端には円弧のパラペット($R/H_p=1.0$, no overhang ($b=0$)) を付けた。実験の結果は図-6 (a), (b) に示される。

図-6 (a) $H/L=0.026$, $h_1/L=0.014$, $V/\sqrt{gH}=4.13$

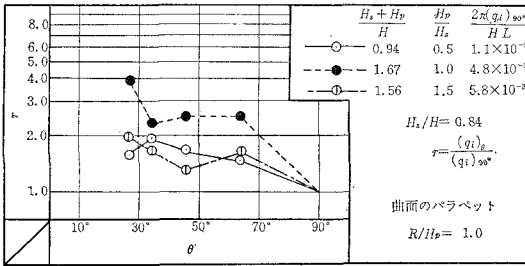
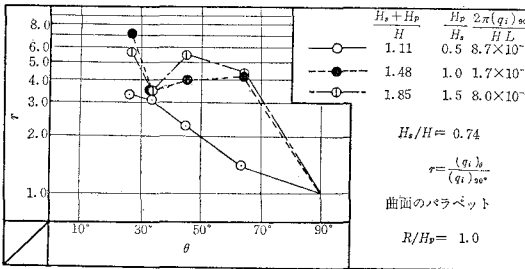


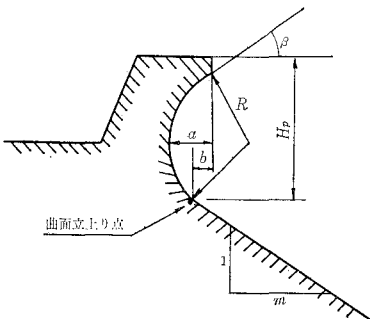
図-6 (b) $H/L=0.033$, $h_1/L=0.016$, $V/\sqrt{gH}=3.91$



図よりパラペットの特性 (H_c/H , H_s/H) および波の特性 (H/L , h_1/L) によって r の値はかなり変動するが一般にのり面勾配が小さくなるほど越波量は増大する。

③ パラペットの形状(直立面, 円弧面)の影響：図-7 に示すように海岸堤防のパラペットは曲面を採用している場合が圧倒的に多い。全国の海岸堤防の調査結

図-7 曲面パラペット



果によると¹³⁾, パラペット高さ H_p は0.5~4.0 m の範囲に含まれ特に 1.0~2.0 m の範囲に集中し全体の約 3/4 を占める。斜面部勾配は 1:3 以下で特に 1:0.5 以下が圧倒的に多く全体の約 3/4 を占めている。曲率半径は $R=0.2\sim 3.5$ m の範囲に含まれ特に $R=1.0$ m, 1.5 m および 2.0 m においてピークを示し, それぞれ全体の 22%, 23% および 13% を占めている。

頂角(曲面上部において水面となす角) β は港湾工事設計要覧¹⁴⁾で $\beta=60^\circ\sim 75^\circ$ と規定しているが実際は $30^\circ\sim 75^\circ$ の範囲に含まれ, 特に $60^\circ\sim 65^\circ$ の間が最も多く全体の 1/3 を占め規定による $60^\circ\sim 75^\circ$ の間は約 2/3 である。

曲面上端から凹量 $a=0\sim 60$ cm で特に $0\sim 30$ cm に集中している。また曲面上端が立上り点との overhang の量 $b=0\sim \pm 60$ cm ($\ominus$ は立上り点から陸側にある場合) で特に曲面上端が立上り点の鉛直上方にある場合 ($b=0$) が最も多い。

以上が全国の統計的な傾向であり, 曲面を採用した理由も打ち上げ高さおよび越波の減少を目的としている。

しかし曲面のパラペット(具体的には H_p/H , H_p/H_s , R/H , β , 凹量 a , overhang 量 b , 斜面勾配 m) が越波量の減少効果にどの程度有効であるか, またどのような曲面の構造が最もすぐれているかという実験的, 理論的資料が少ないためその効果を定量的に比較することはむずかしい現状である。

筆者は従来用いられてきた設計基準の範囲の曲面パラペットが越波の減少にどの程度効果があるかを定量的に明らかにするため図-4 (a) に示す直立面のパラメータと図-4 (b) に示すような $R=H_p$, $\beta=60^\circ$ で overhang しない(天端と曲面立上り点が同一鉛直線上にあるタイプ ($b=0$)) 円弧面のパラペットについて比較実験を行った。

この実験は堤脚水深が比較的浅く碎波後の波を対象としており実験の結果は図-8 (a)~(g) に示される。これらの図より円弧面のパラペットは必ずしも直立面より越波は少ないとはいえないけれども大部分は円弧面の方が越波量が少ない。しかしその減少の割合は直立面の越波量にくらべ最高 56%, 一般に 10~30% 程度で減少効果はあまり大きくない。

図-8 (a) $H/L=0.004$, $h_1/L=0.019$

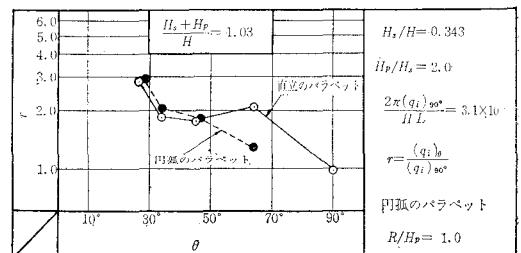
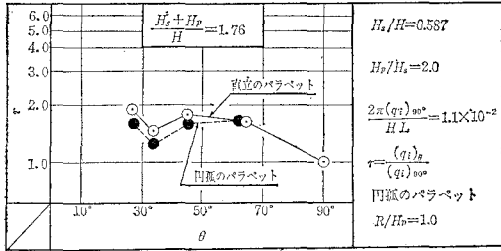
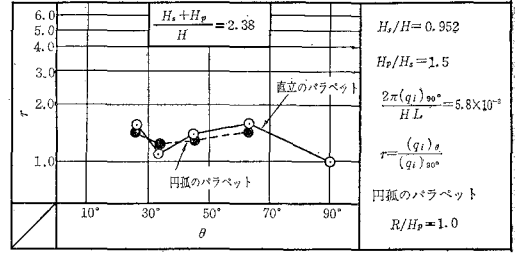
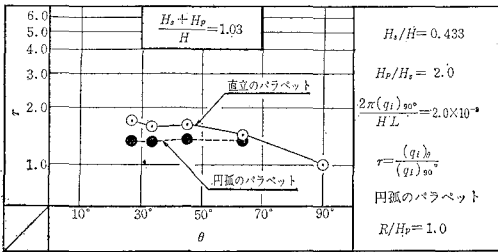
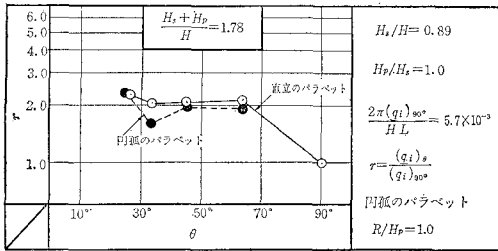
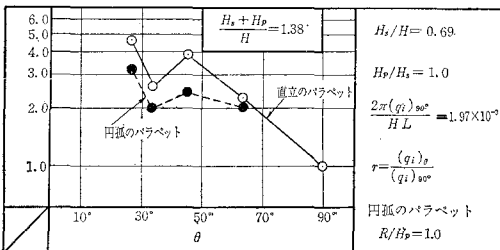
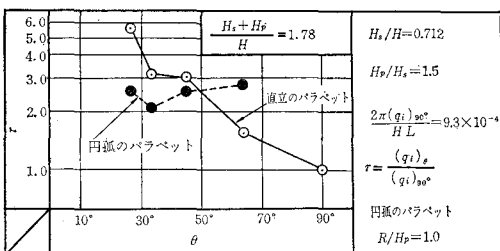


図-8 (b) $H/L=0.022$, $h_1/L=0.029$, $V/\sqrt{gH}=4.95$ 図-8 (g) $H/L=0.022$, $h_1/L=0.013$ 図-8 (c) $H/L=0.0395$, $h_1/L=0.040$, $V/\sqrt{gH}=4.23$ 図-8 (d) $H/L=0.022$, $h_1/L=0.013$ 図-8 (e) $H/L=0.044$, $h_1/L=0.019$ 図-8 (f) $H/L=0.044$, $h_1/L=0.019$ 

これは実験の対象とする越波量が割合少ない ($2\pi q_i/HL < 4 \times 10^{-2}$) ため曲面の効果が十分現われなかったものとも考えられるが、それよりも頂角 β と overhang 量 b が特に関係しているように思われる。

これはすでに永井博士¹⁵⁾も指摘しているように、風速がかなりある場合に頂角 β があまり小さくなく ($\beta=60^\circ$)、かつ overhang しない ($b=0$) 曲線の波返しの効果が少ないことを示唆するものである。

また、佐藤・岸岡博士の研究¹⁶⁾によれば、 H_p が同一でも $\beta=47^\circ$ は $\beta=62^\circ$ の円弧のパラペットの打ち上げ高さの 10~20% 減少 (ただし無風時) するが、 H/L が大きくなるにつれてあるいは H_p/H が小さくなるにつれて β による効果が小さくなることを指摘している。

以上のことから、曲面の波返しの効果をさらに大きくするには β を小さくし overhang 量 b を海側に適当な幅にとれば効果が増大すると考えられる。しかし反面パラペットの波圧が増大し直立面の波圧の 2 倍近く (最大時) になると考えられるので安定性の面からも検討して慎重に曲面の構造を決定しなければならない。

3. 透過斜面の空けきが越波量におよぼす影響

不透過な壁面の前面に捨石あるいは異型ブロックなどの透過斜面を設けると、波の打ち上げ高さ、反射率、および越波量が減少することは、Savage¹²⁾、Hunt¹⁷⁾、Straub-Bowers-Herbich¹⁸⁾、永井¹⁹⁾、永井・高田¹⁰⁾を始め数多くの研究者によってすでに明らかにされている。また実際の海岸堤防に透過斜面の消波堤が各地でさかんに用いられ今日では一般化されている。しかし、透過斜面の越波の力学的特性や越波の定量的な資料など一般的な基準となる研究はまだ十分解明されていない。

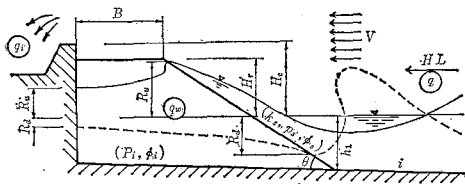
(1) 透過斜面堤の越波量の次元解析

図-9 に示すように不透過な鉛直壁面の前面に層内の空けき率 P_i 、表面の間けき率 P_s を有する透過斜面堤を設置した場合を考える。

越波に関係する要素を無次元量で表わすとつぎの式で示される。

$$\frac{2\pi q_i}{HL} = f\left(P_s, \frac{\phi_s}{H}, P_i, \frac{\phi_i}{H}, \frac{k_s}{H}, \theta, \frac{H_c}{H}\right),$$

図-9 透過斜面堤の波の挙動



$$\frac{H_r}{H}, \frac{B}{H}, \alpha, \frac{h_1}{L}, \frac{H}{L}, \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad \dots (6)$$

ここに H_r : 静水面から透過斜面天端までの高さ

B : 透過斜面堤の天端幅

θ : のり面勾配

k_s : のり面の粗度

P_s : のり面の間げき率

P_i : 層内の空げき率

ϕ_s : のり面の間げきの大きさ

ϕ_i : 層内の空げきの大きさ

(2) 実験結果と考察

a) 不透過壁面と透過斜面の比較 1:1.5 の不透過

斜面堤は不透過鉛直堤より越波量はかなり多いことは前述のとおりであるが、もし不透過な斜面に適当な空げき

図-10 不透過壁面と透過斜面

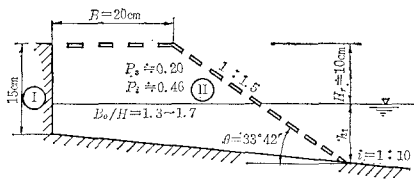


図-11 (a) 不透過壁面と透過斜面の比較

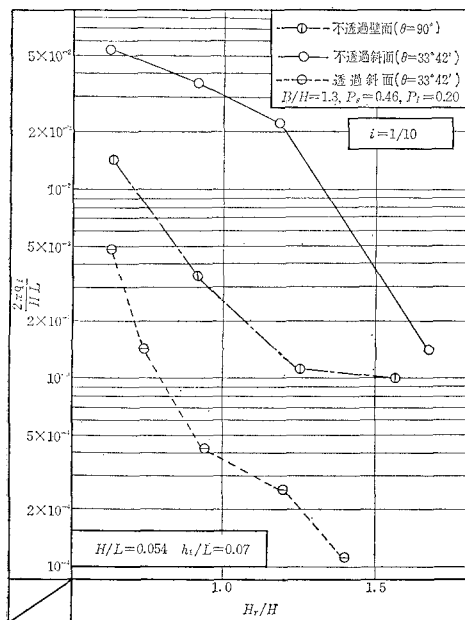
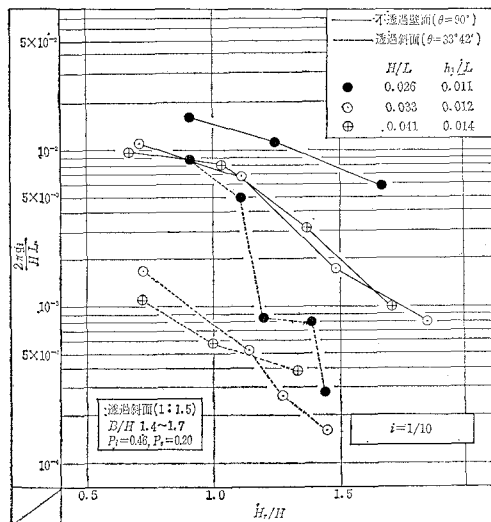


図-11 (b) 不透過壁面と透過斜面の比較



を与えれば越波量が減少するはずである。

図-10 に示すように斜面の層内の空げき率 $P_i=0.46$, のり面の間げき率 $P_s=0.20$ の斜面堤 (1:1.5) と不透過な斜面堤 (1:1.5) および鉛直堤と比較した。その結果が図-11 (a), (b) に示される。

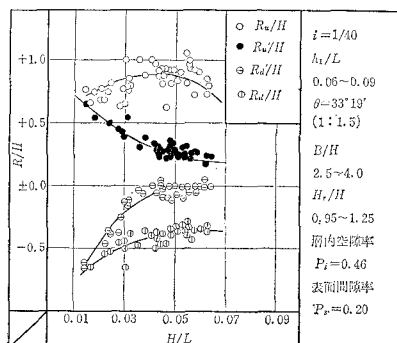
図よりこの程度の空げきでは不透過鉛直堤よりも 1:1.5 の透過斜面の方が著しく越波量が減少している。特に H_r/H の大きいほど越波の減少の割合が大きい。

透過斜面の効果はのり面の粗度による摩擦損失と空げきによる水の吸収および層内の turbulence によるエネルギーの減殺にある。

筆者の実験では粗面と空げきの効果を分離することはできなかったが実験に用いた透過斜面堤 ($P_i=0.46$, $P_s=0.20$) ののり面粗度はマンニング粗度係数の値にして $n=0.020$ である。また足立博士の研究²²⁾にあるイボ型粗度 (点粗度) に相当するものであり実験に用いた粗度の抵抗則は次式で示される。

$$\frac{U}{u_*} = 10.6 \log_{10} \frac{h}{k} + 5.40 \log_{10} \frac{S}{F} - 5.47$$

図-12 消波堤のり面および層内の水の移動



ここに $S/F=13.3$ (S : 粗度支配面積, F : シャヘい面積), 突起高 $k=1.0$ cm

図-11 (a), (b) の実験結果は粗面と空げきの合成された減少効果を表わしているが (a) 図よりのり面が円滑な不透過斜面よりも越波量が 90~98% 減少している。

Sibul の実験⁶⁾に, 斜面勾配 1:3 の不透過のり面が粗面の場合は円滑な場合より最大越波量が 13~17%, 1:2 については 21~26% 減少することを示している。このことと比較すれば空げきの効果が非常に大きいことがわかる。

また Ir.A. Hunt の打ち上げ高さの実験¹⁷⁾によれば空げきの効果は粗度の効果に比して著しく大きいことが明らかにされている。

b) 透過斜面堤層内の波の挙動 図-9 は層内の波の挙動を模式的に示したものである。透過斜面堤の越波は $H_r > R_u$ (打ち上げ高さ) の場合と $H_r < R_u$ の場合の 2 種類がある。本実験では $H_r > R_u$ の場合について調べる。

層内の水の動きを知る一つの指標として層内を透過し不透過壁面に到達する水の変位 R_u' , R_d' 透過斜面のり面の水の変位 R_u , R_d を測定した。

R_u'/H , R_d'/H , R_u/H および R_d/H と H/L の関係を表わしたのが図-12 に示される。図より $R_u/H > R_u'/H$, $R_d/H > R_d'/H$ であり, しかも一周期 T の層内の水の流入流出量は H/L の小さい波ほど大きいことがわかる。このことは同一の H であっても H/L の小

さい波ほど越波を防止するに必要な透過斜面堤の断面は大きくしなければならないことを示している。換言すれば消波堤の必要な有効断面の大きさは波が消波堤に衝突して $1/2 \cdot T$ の間に層内の空げきがちょうど流入水で充たされるや否や引き波に移る状態の空げき量の断面といえる。

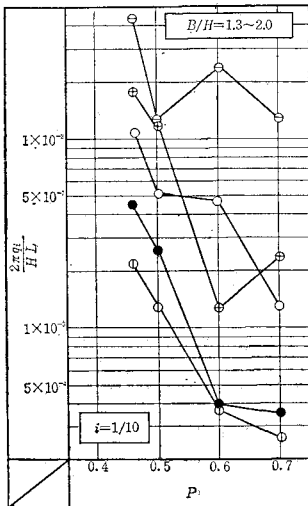
e) 空げき率と越波量の関係 透過斜面堤の空げき率によって越波量がいかに変化するかを調べるため空げき率 $P_i=0.46, 0.50, 0.60$ および 0.70 の 4 種類について比較実験を行なった。実験は $H_r=H_c$ とし, 斜面堤の断面の大きさ (天端幅 $B=20$ cm, $B/H=1.3\sim 2.0$, のり面勾配 (1:1.5)) を同一にした。実験の結果は図-13 (a), (b) に示される。

図より空げき率の大きいほど越波量が一般に減少しており, たとえば $P_i=0.70$ の場合は 0.46 に比して $1/6\sim 1/20$ に減少している。

d) 消波堤の天端高さとの越波量の関係 海岸堤防の前面に設ける異型ブロックの消波堤は透過斜面堤の代表的な例である。消波堤を設計する場合に, 消波堤の断面の大きさ (特に天端高さ H_r および海岸堤防の天端高さ H_c) によって越波量がいかに変化するかを定量的に把握する必要がある。

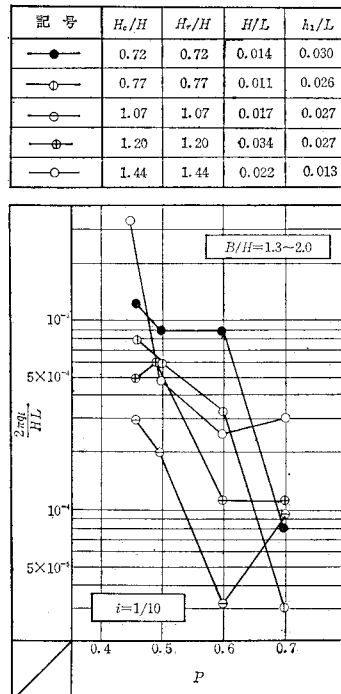
本実験は海底勾配 $i=1/40$ について不透過鉛直堤 (天端高さ 5 種類変化) の前面にのり面勾配 1:1.5 の透過斜面堤を設置して, H_c/H および H_r/H による越波量の変化を調べた。

図-13 (a) 空げき率の影響



記号	H_c/H	H_r/H	H/L	h_1/L
○	0.56	0.56	0.023	0.038
○	0.80	0.68	0.018	0.033
○	0.80	0.82	0.030	0.096
●	0.94	0.94	0.025	0.033
○	1.33	1.33	0.028	0.025

図-13 (b) 空げき率の影響

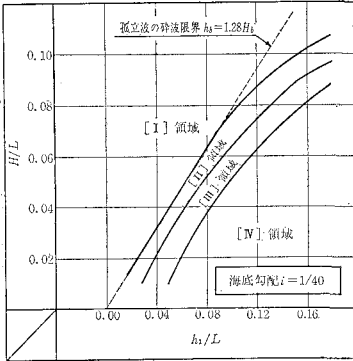


透過斜面堤の天端幅 $B=30$ cm = const. として天端高さを 3 種類変え, 消波堤のマウンドは平均粒径 $\phi_i=2.0$ cm の小砂利 ($P_i=0.46$) のマウンドを造りその被覆に 250 g/個の中空 4 脚ブロック (ホロスケヤー)¹⁹⁾²⁰⁾ の 2 層積 ($P_i=0.46$, $P_s=0.20$) を用いた。

実験波浪は周期 $T=1.0\sim 3.0$ sec, 波高 $H=3\sim 22$ cm, 堤脚水深 $h_1=4\sim 32$ cm で広範囲の H/L および h_1/L の波について行なった。なお風速は $V=4.5$ m/sec = const. であり $\frac{V}{\sqrt{gH}}=3.2\sim 5.8$ の範囲である。実験の結果と考察はつぎのとおりである。

波の特性によって越波量が著しく変化し, 碎波点付近で越波が増大することは波の打ち上げ高さの状態と同様である。 H/L と h_1/L の組み合わせによる多数の波についての越波の実験の結果図-14 に示すように H/L と h_1/L によって波を 4 種類に分けて考察する。

図-14 H/L と h_1/L による越波領域の分類 ($i=1/40$)

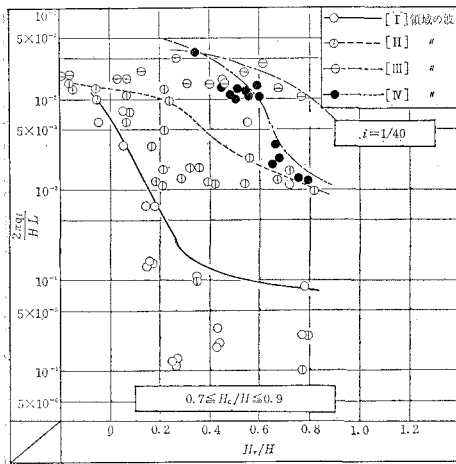


ことが越波の特性を説明するのに便利であることがわかった。

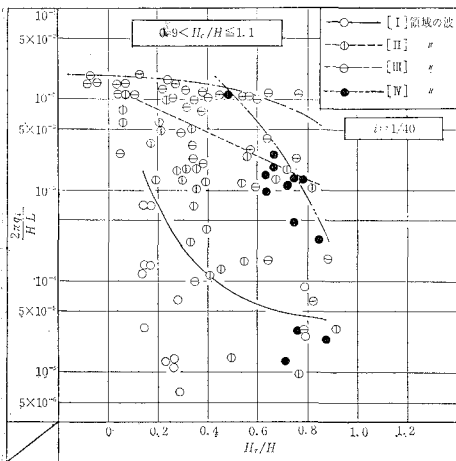
すなわち図において [I] 領域は砕波後の波, [II], [III] 領域は砕波, [IV] 領域はまだ砕波しない波を表わす。

消波堤の天端高さ H_r/H と越波量 $2\pi q_i/HL$ の関係

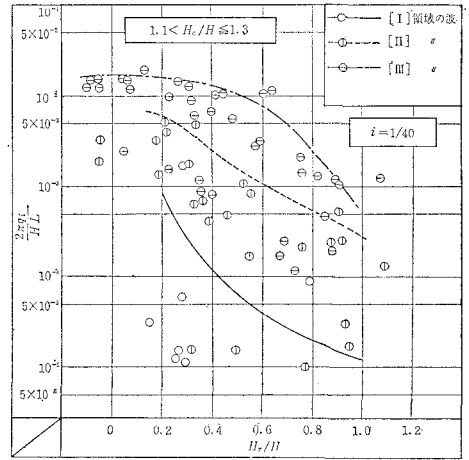
図-15 消波堤天端高さの影響
(a)



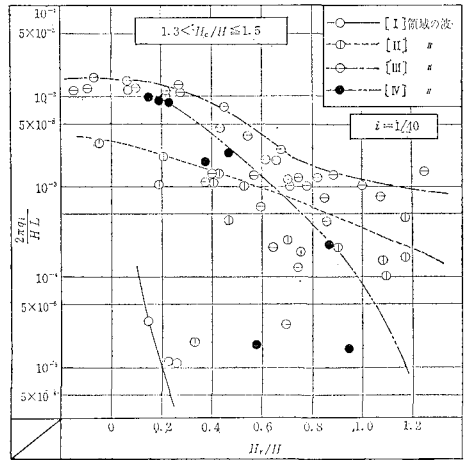
(b)



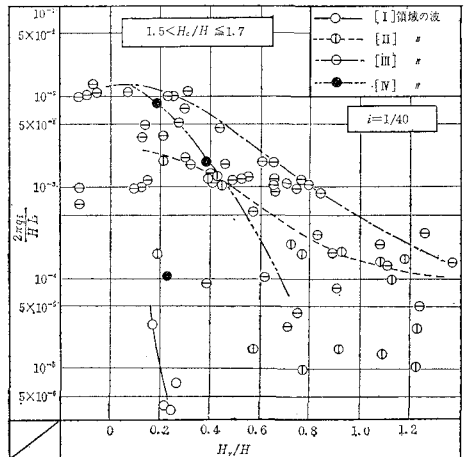
(c)



(d)

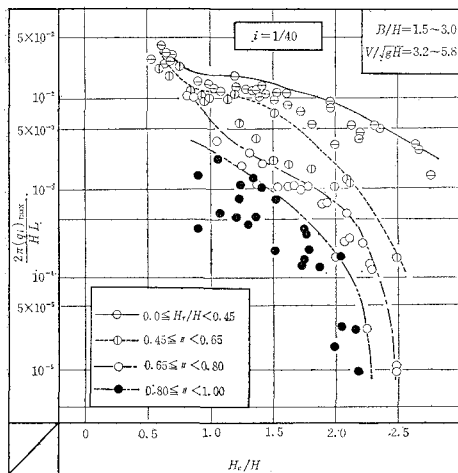


(e)



は図-15 (a), (b), (c), (d), (e) に示される。図中の包絡線は各領域の波の最大越波量を示す。図より H_r/H が同一であっても波の領域によって著しく越波が異なる

図-16 海岸堤防天端高さの影響 (最大越波量)



ことがわかる。一般に [Ⅲ] 領域 (碎波直前の波) の場合が最も越波量が多く、ついで [Ⅳ] 領域, [Ⅱ] 領域, [Ⅰ] 領域の順序である。

図-16 は海岸堤防の天端高さ H_c/H と最大越波量 (起こり得る最大の越波量) $(2\pi q_i/HL)_{\max}$ の関係を表わしたものである。

図より H_r/H の値によって H_c/H の効果は異なりはするがいずれの場合も H_c/H の変化が越波量に非常に影響することがわかる。特に $H_r/H=0.65\sim 1.0$ では H_c/H の変化が越波量におよぼす減少効果が大きいことがわかる。すなわち消波堤の天端高さが $H_r/H \geq 0.65$ になると越波の減少効果が著しくなることを示している。

4. 結 論

海岸堤防の壁面の形態に着目し、不透過壁面の線形が越波量におよぼす影響と、透過斜面の空げきが越波量におよぼす影響について二、三の重要な結果を明らかにして、空げき率の大きい透過斜面は越波の防止に非常に効果的であることを示した。不透過壁面については斜面堤およびパラペット付斜面堤と鉛直堤の比較、パラペット形状 (円弧面, 直立面) の影響について、透過斜面においては不透過壁面との比較、斜面堤層内の波の挙動、空げき率の影響および消波堤の天端高さの影響について実験的に考察した。

実験の結果を要約するとつぎのとおりである。

(1) 斜面堤の越波量はのり面勾配が $\theta=90^\circ\sim 26^\circ 34'$ (1:2) の範囲においてゆるいほど一般に多く、鉛直堤の越波量が最小となる。

(2) パラペット付斜面堤の越波量は特に斜面部 H_s ののり面勾配に影響される。斜面部ののり面勾配が $\theta=90^\circ\sim 26^\circ 34'$ (1:2) の範囲ではゆるいほど一般に越波量が多い。

(3) $R/H_p=1$, $\beta=60^\circ$ の overhang しない ($b=0$) 円弧面のパラペットは直立面のパラペットに比して越波量が最高 56%, 一般に 10~30% 減少する。しかしこの程度の曲率で overhang しない曲面のパラペットの越波量減少効果はあまり大きな期待ができないので $\beta < 60^\circ$ とし overhang する ($b > 0$) 曲面パラペットについて考える必要がある (しかしパラペットに働く波圧が増大するので安定性の検討を要する)。

(4) 1:1.5 の透過斜面堤 ($P_i=0.46$, $P_s=0.20$) の越波量は同一勾配の不透過斜面堤 (のり面円滑) より 90~98% 減少し、不透過鉛直堤にくらべると 44~90% 減少する。

(5) 斜面堤層内の一周期ごとの水の流入流出量は H/L の小さい波ほど大きい。したがって越波量を減少させるに必要な空げき量 (消波堤の断面) は H/L の小さい波ほど大きくしなければならない。

(6) のり面勾配 1:1.5 の斜面堤において空げき率の大きいのり面ほど越波量が少ない。ただし空げき率は 0~70% の範囲についてである。

(7) 消波堤付海岸堤防について消波堤および海岸堤防の天端高さおよび越波量の関係を明らかにしたものが図-15(a)~(e) 図-16 に示される。ただし消波堤の層内の空げき率 $P_i=0.46$, のり面の間げき率 $P_s=0.20$, のり面勾配 1:1.5 であり、海底勾配は $i=1/40$ である。

〔付記〕 本実験は著者が大阪市立大学大学院に在学中 (昭和 35 年 4 月~昭和 40 年 3 月まで) 永井荘七郎教授の御指導のもとに行なったものである。また、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。ここにあらためて厚く感謝の意を表わす次第であります。なお本研究の一部に昭和 41, 42 年度文部省科学研究 (特定研究, 各個研究) 費を使用した。

参 考 文 献

- 1) 鶴田千里・合田良実: 伊勢湾台風による構造物の被害とその特性, 第 7 回海岸工学講演会講演集, 昭和 35 年 11 月。
- 2) 矢野勝正: 伊勢湾台風による海岸災害について, 京都大学防災研究所年報, 第 3 号, 昭和 34 年 12 月。
- 3) 加藤重一・満田雅男: 波浪越波による堤防盛土の洗掘について, 土木学会論文集, 第 106 号, 1964。
- 4) 山崎 博・鳥居幸雄: 西神戸高潮対策事業における消波護岸構造決定について, 第 13 回海岸工学講演会講演集, 昭和 41 年 12 月。
- 5) Thorndike Saville, Jr. and J.M. Caldwell: Experimental study of wave overtopping on shore structures, Proc. of Minnesota Intern. Hydraulics Convention, IAHR, 1953。
- 6) Sibul O.J.: Flow over structures by wave action, Trans. Amer. Geophys. Union, vol. 36, 1955
Sibul and E.G. Tickner: A model study of the run-up of wind-generated waves on levees with slopes of 1:3 and 1:6, U.S. Army Corps of Engineers, B. E.B., Tech. Memo. No. 67, 1955。
- 7) 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 年 11 月。

- 8) A. Paape, : Experimental data on the overtopping of seawalls by waves, Hydraulics Laboratory Delft, Publication, No. 23, 1960
- 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 9 回海岸工学講演会講演集, 昭和 37 年 10 月.
岩垣・土屋・井上 : 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, 昭和 38 年 11 月.
岩垣・島・井上 : 波高と潮位が越波と波のうちあげにおよぼす影響, 第 11 回海岸工学講演会講演集, 昭和 39 年 11 月.
岩垣・井上・土堀 : 風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究 (2), 第 12 回海岸工学講演会講演集, 昭和 40 年 11 月.
- 10) 永井莊七郎・高田 彰 : 海岸堤防の越波に及ぼす消波堤の効果, 第 11 回海岸工学講演会講演集, 昭和 39 年 11 月.
- 11) M. Miche, : Undulatory movement of the sea, Annals des ponts et chaussées, Paris, 1944.
- 12) Rudolph P. Savage, : Wave run-up roughened and permeable slope, Proc. of ASCE W.W. 1958 Aug.
- 13) 運輸省港湾局調査設計室 : 波返し標準化について (暫定基準), 調査設計室報告 (第 1 報) 昭和 38 年 3 月.
- 14) 日本港湾協会 : 港湾工事設計要覧, pp. 45, 46, 昭和 35 年版.
- 15) 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 35 年 11 月.
- 16) 佐藤清一・岸 力 : 海岸堤防の形状特性ならびに波の陸岸への遡上, 第 3 回海岸工学講演会講演集, 昭和 31 年 11 月.
- 17) Ira A. Hunt, : Design of sea-walls and breakwaters, Proc. of ASCE WW. Sept. 1959.
- 18) Straub, L.G., C.E. Bowers and J.B. Herbach, : Laboratory tests of permeable wave absorbers, Proc. of 6th Conf. on Coastal Engineering, 1958.
- 19) 永井莊七郎 : 消波用中空ブロックに関する研究, 第 6 回海岸工学講演会講演集, 昭和 34 年 11 月.
- 20) 永井莊七郎・高田 彰 : 新しい消波用コンクリートブロックについて, 第 8 回海岸工学講演会講演集, 昭和 36 年 9 月.
- 21) S. Nagai, : Stable concrete blocks on rubblemounds, Trans. of ASCE, Vol. 128, 1963, Part IV,
- 22) 足立昭平 : 人工粗度の実験的研究—イボ型粗度—京都大学防災研究所年報, 第 5 号 A, 昭和 37 年.