

テトラポット防波堤に関する実験的研究

北海道開発局土木試験所 古 谷 浩 三
同 上 鴻 上 雄 三
同 上 近 藤 俣 郎

要 旨 テトラポットを防波堤堤体の全部、もしくは混成防波堤の一部として直立堤前面を被覆して使用したとき、波のはいり高さ、透過波高、跳波高、波圧減殺作用について大規模な堤体実験をおこない考察した。

1. 緒 言

近年、港湾、海岸工事に各種の異形方塊を使用する工事例が多くみられる。テトラポットをふくむこれら異形方塊が有する最大の特性は、波力に対する方塊個体の安定性が石材、立方体ブロックなどに比しきわめて大であることであって、この点から防波堤、海岸堤防などの根固めに用いて所期の目的を果たしている。

したがって異形方塊に関するこれまでの実験、研究は安定性をとり扱ったものが多く、それらは一様斜面上の安定重量を求めているものである^{1), 2), 3)} (これら諸研究についても天端部、のり尻部、取付部などの最も不安定な箇所については十分解明されていないうらみがある)。

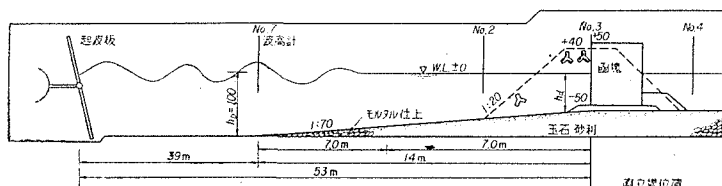
しかるに最近では比較的大きな波力を受ける防波堤などについて、堤体の主要構成にこのような異形方塊を用い波力を減殺させる消波工法として使用した工事例があり、また石積防波堤のごとき使用法も今後考慮されてよい問題である。このような観点から本研究はテトラポットを防波堤に用いた場合について、それらが形成する堤体が波動の諸性に対しどのような効果を示すか実験的な研究を試みたものである。

なお、本研究の一部は第 16 回土木学会年次学術講演会で発表済み⁴⁾ のものと重複していることを付記する。

2. 実験装置および方法

実験水路は 73.4×1.8×1.8(m) で 0.5(m) 巾の還流

図—1 実験水槽の縦断面



部を別に有しており、模型設置部 6(m) は高さが 2.3 (m) で強化ガラス張りとなっている⁵⁾。

この水路に 図—1 に示すように水底部分 14(m) を表面モルタル仕上げの固定床で作製した。

(1) 堤 体 模 型

実験に使用したテトラポットは公称 25, 12.5, 8 t 型のものについて長さの寸法で 1/10 のもの 3 種類であるが、その平均諸寸法を表—1 に示す。

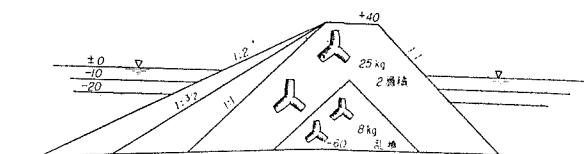
表—1

型	寸法	高さ (cm)	容 積 (l)	空 中 重 量 (kg)	コンクリートの比重
8	(kg)	23	3.2	7.1	2.2
12.5	"	26	5	11.0	
25	"	33	10	22.2	

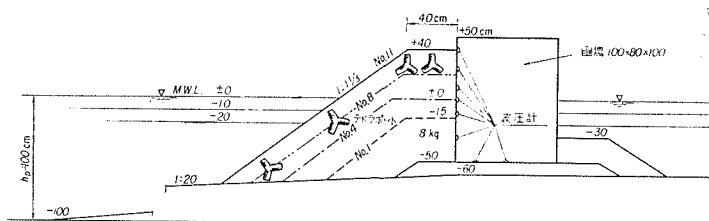
これらテトラポットを所定の形に積重ねた時の空げき率は 50% であった。

実験に供した堤体の断面図を 図—2, 図—3 に示す。

図—2 テトラポット堤断面図



図—3 混成堤断面図



テトラポット堤(図—2)は外の勾配が 1:1, 1:3/2, 1:2 の 3 種とし (内のり勾配は 1:1 に限定する), 表面は 25 kg 型を 2 層積, その内部は 8 kg 型を乱積にした。

また混成堤(図—3)の直立部は 1.0 × 0.8 × 1.0(m) の函塊で側壁厚が 10 (cm), 底板厚 20 (cm), 中詰は砂利填充を行なったもので空中重量は 1.9 t と推算される。この函塊を水路巾員方向の中央におき、その両脇は 1.0 × 0.5 × 0.5(m) の直方体ブロック 2 個を同

じ高さに積上げておいた。これら直立部の前面にテトラポット部分を天端高、天端巾、のり勾配をかえて被覆したものでその種類は 11 とおりである。

(2) 測定方法

波高の測定は抵抗線として、銀線を用いた波高計で図-1に示す位置でおこないペン書オシログラフで自記させた。波圧については函塊の正面壁中央に6個、底面に2個ストレインゲージ型圧力計をあらかじめはめこんでおき電磁オシログラフで測定した。一様水深部における波長測定をおこなうに際しては可動なポイントゲージ2個を用いネオンランプによって同時に波峰位置を確認する方法によった。跳波高さは、はい上り高さについては観測用ガラス窓に付した目盛などから目測した。

(3) 実験波の範囲

実験に用いた波の範囲を表-2に示す。

表-2 実験波

周期: T	2.3 ~ 5.6 (sec)	波形勾配: H_0/L_0	0.0027 ~ 0.045
水深: h_D	0.8 ~ 1.05 (m)	相対水深: h_D/L_0	0.016 ~ 0.121
波高: H_0	15 ~ 51 (cm)		

深水波の波高; H_0 の算出は No. 1 波高計の測定値; H_1 から微小振巾理論によってなされたが、一様水深部(水深: h_D) で波長 L_0 を測定したところ微小振巾波とし計算した値と許容される精度で合致していた。

3. テトラポット堤における波のはい上り高さ

急勾配の斜面上の波のはい上りに関する実験的な研究は滑らかな面については Saville⁹⁾ が、また Grantham⁷⁾ は種々の砂利についておこなっており、最近では Hudson の石積防波堤の模型実験がある^{7), 8)}。われわれは図-1に示す 1:1, 1:3/2, 1:2 のテトラポット堤についてははい上り高さの実験を行なった。これら各勾配について実験結果を図-4(a), (b), (c) に示すが、ここでは相対はい上り高さ; R/H_0 を深水波の波形勾配; H_0/L_0 の関連で対数グラフに示したもので、防波堤設置水深; hd を H_0 で除した hd/H_0 の範囲を parameter としたものである。

写真-1

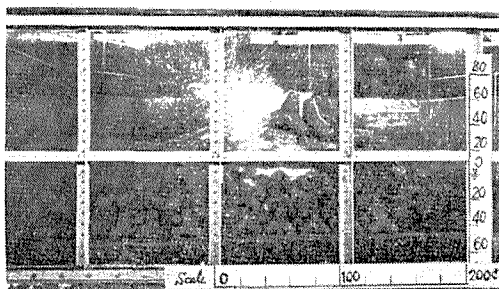


写真-2

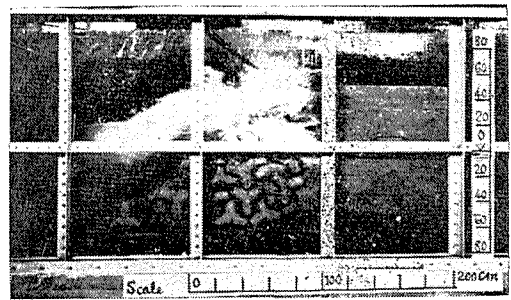
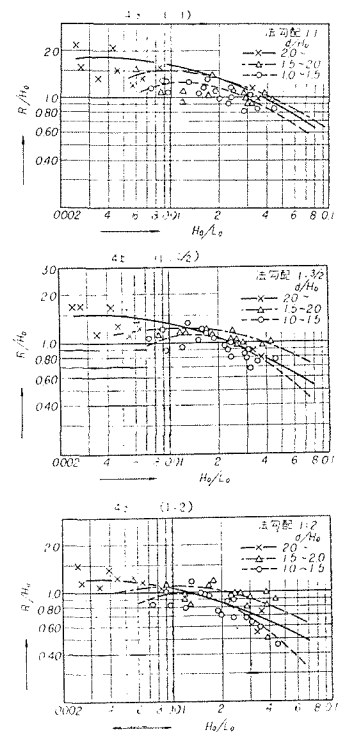


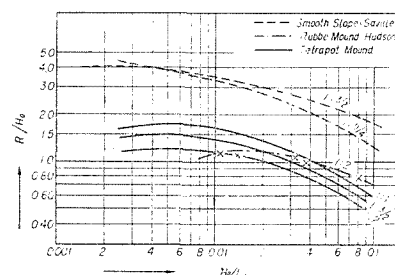
図-4 テトラポット堤のはい上り高



相対水深; d/L_d を parameter とすることは当然考えられることであるが、当実験は防波堤位置に碎波点を有する波を中心にしたもので比較的波高の範囲がせまく、また d/L_d の小さい領域でおこなったものであることから Saville と同様に d/H_0 で区別した。図-4のおおのこのグラフから d/H_0 の影響についてはのり勾配による違いはあるが、一般に H_0/L_0 の小さい領域で顕著に出ているが、 H_0/L_0 の大きい領域では緩勾配になると $d/H_0 < 2$ の方がかえって R/H_0 を大にしている。

図-5は $1 < d/H_0 < 3$ の範囲で、滑らかな面 (Saville), 石積堤 (Hudson) の場合との比較したものである。

図-5 急勾配各種斜面のはい上り高さ



Saville の滑らかな面の実験は 1:10 の Slope 上でさらに各種の急勾配を設けて行なったもので、 $0 < d/H_0 < 3$ 以上の 5 種の範囲ごとに $H_0'/T^2 - R/H_0'$ の相関で示されている (H_0' は深水波換算波高でわれわれの H_0 と同じものであるが (feet) 単位である)。図-5 にはそのうち 3/2 勾配と 5/2 勾配の $1 < d/H_0 < 3$ のものについて、 H_0/L_0 に書きあらためてある。Hudson の実験値は $R/H - H/L$ の関係が、 $d/L = 0.1 \sim 0.5$ の範囲で示されているが、 d/H_0 の大きい領域でなされている (Hudson⁴⁾ の H, L は防波堤位置での値である)。ここではその中から $1 < d/H_0 < 3$ の条件に合うものだけを抜き出して $R/H_0 - H_0/L_0$ の対数グラフに書きあらためたものをかかげてある。これら両者の実験はその規模が本実験より小さく (Saville... $H = 0.17 \sim 0.70$ ft, Hudson... $H = 0.28 \sim 0.69$ ft), また実験方法にも差異があることから本実験との完全な対比はできないとも思われるが比較、対照すれば次のことがいえる。

(a) 透過性で粗な、石積堤やテトラポット堤のはい上り高は、不透過で滑らかな面での値の 30~40% とみて良い。

(b) 石積堤とテトラポット堤を比較すると H_0/L_0 の大きい領域では空げき率が大きく粗であるテトラポット堤のはい上り高さは小さくなるが $H_0/L_0 < 0.01$ では両者の差はなくなる ($H_0/L_0 < 0.01$ では Hudson の資料が不足しているので対照は無理と思われる)。

(c) $H_0/L_0 < 0.01$ では R/H_0 の増加がゆるやかである。

以上がテトラポット堤のはい上り高さに関する実験から得られた結果であるが、混成堤の場合でも天端高が大で越波を許さない程度ならテトラポット堤と同じ程度のはい上り高さになる⁴⁾。

4. テトラポット堤の背後への透過波

テトラポット堤は空げき率が大であることから背後への波の透過は当然考えられるが、それがどの程度であるかは実用性をぬきにして興味ある問題である。本実験では図-1 に示す No. 4 波高計で背面の透過波高 H_t を測定し、それをテトラポット堤前面の進行波高 H_i (No. 2 波高計) と比較してみた (図-6(a), (b), (c))。

○△×の印は B/H_i の範囲で区別したものが、ここで B は静水面が堤体を切る巾員である。このうち●印はテトラポット堤の斜面上で砕波したものである。これによれば斜面上で砕波する波のはい上り高さは一般にそれ以外の波に比し大であるがこれは急勾配の時にいちじるしく、1:2 のときには砕波しない波との差異はあまりなくなる。斜面上で砕波する波の H_t/H_i は B/H_i の要素が少なくなる。また H_t/H_i が H_0/L_0 のある値で最小値をもつ傾向があるのは、はい上り高さの R/H_0 の場合とち

ょうど逆の関係にあることを示している。 H_t/H_i は実験の範囲では 15~40% (1:1), 10~25% (1:2) の範囲にある。

透過波の波形についてオッシログラフから測定したところでは透過波高の静水面から上の部分の比率は入射波のそれとはほとんど同じである。そして透過波の波形勾配は入射波の波形勾配に透過率; H_t/H_i を乗じた値になる。

5. 混成堤における跳波高

ここでは跳波高さ H_s は衝突する波がもたらす水滴の飛び上った最高の高さを静水面から測ったものとする。本実験では図-3 の混成堤について天端巾; B_0 を 40(cm) に固定し、漸次天端高 H_c を上げた場合の H_s の変化を追った。図-7 に $H_s/H - H_c/H$ の関係で示している。ここで H は堤体の全くない水底勾配のみのときの直立前面位置 (No. 3 波高計) での波高である。

実験の対象とした波は、無堤時において砕波点が防波堤のごく近い範囲にあるものに限ったものでこれらは当然砕波にともなう跳波である。

この図から直立堤の直前 (図-7 の砕波点の符号の波の進行方向に逆方向が正である)、直後で砕波する波は天端高が上るにつれて跳波高が小さくなるが、静水面上に天端があるとき効果がいちじるしい。また防波堤よりかなり後に砕波点があるときは静水面下にあっても効果がないばかりか、かえて跳波高は増す。静水面上 H 程度の天端高があれば跳波高は直立堤の場合の約 1/3 に減少することは注目される。テトラポット堤 (図-2) についても $H_s/H < 5$ にとどまった。

6. 波圧減殺効果

図-6

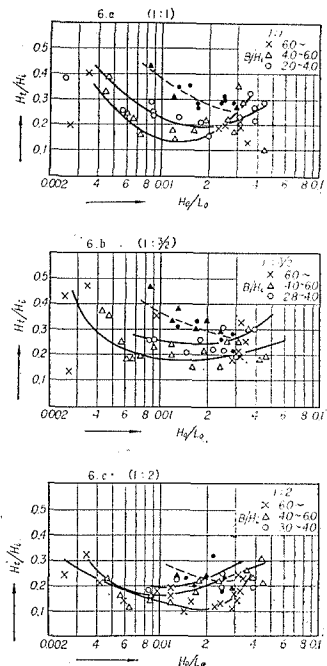
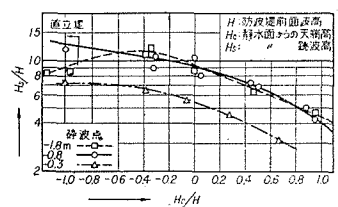


図-7 混成堤の跳波高と天端高



混成防波堤においてテトラポットなどの異形方塊で直立部を被覆した際にみられる波圧減殺効果が大であることは永井博士の研究^{9), 10)}においても知られているところである。われわれは 図-3 に示すように前面におくテトラポット部分の天端高, 巾を変えて函塊にうめ込んである8個の波圧計により測定した。当然考えられることは直立堤のみの場合でも砕波圧をもたらすような波に限り波圧の減殺効果があるのであって, 直立堤で重複波圧となる波については前面を被覆することによる波圧減少はないばかりか静水面下は天端をおくときには適当な砕波水深を与えることになり, かえって波圧の増大をみることになる。砕波のみを取扱う場合でも砕波圧の大きさが砕波状態により異なることは知られているとおりで一括して扱うことは無理がある。

本実験の直立堤のみの最大波圧強度: $p_{\max}$ と砕波高: H との関係は $p_{\max}/wH_b = 2.0 \sim 5.0$ にあって, したがってこの範囲の砕波圧を対象にしたものである。図-8 には一例として $T=3.3(\text{sec})$, $H_b=50(\text{cm})$ の砕波についてテトラポット被覆状況によって波圧分布, 強度がどのようになるか示したものである。

図-8(a) 天端高と波圧分布

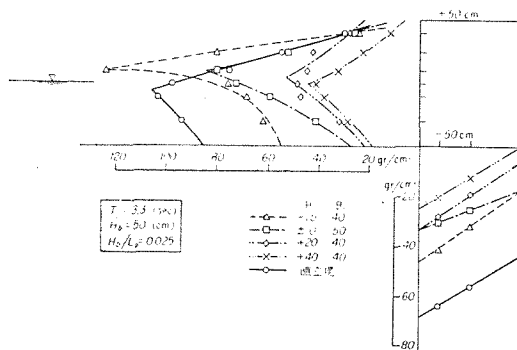


図-8(a) は天端巾を 40(cm) に固定し天端高を 4 段階にかえた (のり勾配は 1:4/3) 場合の波圧の推移をあらわしており, これによれば一般にテトラポットで被覆された部分の波圧は減少しており, ことに揚圧力の減衰は天端高が低くてもかなりの程度にあらわれ, この点から考えて根固めとしての効果をあげていることが知られる。しかし静水面より下に天端高があるならば $p_{\max}$ の減少は期待できないし, しかも $p_{\max}$ の作用点が高くなる特徴がみられる。

図-8(b) には (a) と同じ波について天端巾; B_0 をかえた場合について示している (天端高は 2 種類)。

この図より静水面に天端がある場合の被覆厚増加の効果は明瞭にあらわれていないが, 天端高が $+H_b$ 程度であるときは被覆厚さの増加による減殺効果が明らかにみられる。いまテトラポットなどの透過性の大きな異形方塊で直立堤の前面を被覆し, しかもその天端が十分に高

図-8(b) 天端高と波圧分布

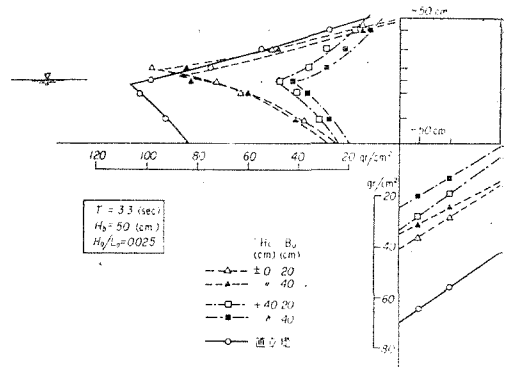
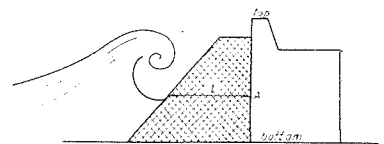


図-9



く波が天端を越えることがない状態で波圧減殺作用について考える (図-9)。

これらテトラポットなどの異形方塊で形成される透過性の堤体は, それら個体が波力で動くことがなくかつ個体の大きさが同じであるならば, 連続でかつ規則的な変化をする多くの空けきを有する構造物とみなされる。そうすればテトラポット堤の斜面上で砕波した後の水流は空けきが形成する流路を通して直立部に到達するものであり, その中の一つの流路をとりだしてこれを管路と仮定すれば水流のおもなる損失水頭は流入, 摩擦, 屈曲, 断面変化, 分合流などである (ここでは定常流としてあつかうものとする)。

この損失水頭を圧力強度の減少で示すと, 屈曲, 断面変化, 分合流については流路の中にある個体の数に比例するからこれらをまとめて

$$p_d = f_i \cdot \frac{wv_m^2}{2g} + f \cdot (l'/d') \cdot \frac{wv_m^2}{2g} + N \cdot f_c \cdot \frac{wv_m^2}{2g} \quad (1)$$

$$p_d = p_0 - p_a \quad (1')$$

ここで

p_0 : 直立堤のみの波圧強度

p_a : 被覆後の波圧強度

l' : 流れの通過する距離

d' : 空けきの平均径

v_m : 空けきを通る流れの平均速度

f_i : 流入の損失係数

f : 摩擦損失係数

f_c : 個体形状による損失係数

N : 考える流路中の個体の数

w : 水の単位重量

g : 重力の加速度

(1) 式で流入後の速度は v_m をそのまま用いる。

l' は複雑な径路をもつ長さであるがこれは被覆厚: l (図-9) に比例するし、空げきの平均径: d' は個体の大きさ: d に比例する。したがってまた N は l/d であらわしてよい。つぎに (1) 式の $wv_m^2/2g$ の項を圧力に書き改めると

$$k \cdot \frac{wv_m^2}{2g} = \frac{p_0 + p_a}{2} \dots\dots\dots (2)$$

k : 係数

(2) 式および上述のことから (1) 式は次式のようになる。

$$\frac{2p_d}{p_0 + p_a} = C_0 + C_1(l/d) \dots\dots\dots (3)$$

ここで C_0, C_1 は (1) 式の損失係数を整理したもので、(2) 式の k をもふくめたものである。

$$\text{いま } p_d/p_0 = D_p \dots\dots\dots (4)$$

とおくと D_p は波圧減殺の割合を示す。

(4), (1) 式から (3) 式は

$$\frac{2D_p}{2-D_p} = C_0 + C_1(l/d) \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式によって l, d の各種について p_a を測定し、直立堤の場合の p_0 から実験的に C_0, C_1 を求めることができる。

図-10 はその結果を示したものである。

図-10 波圧減殺率: D_p と (l/d)

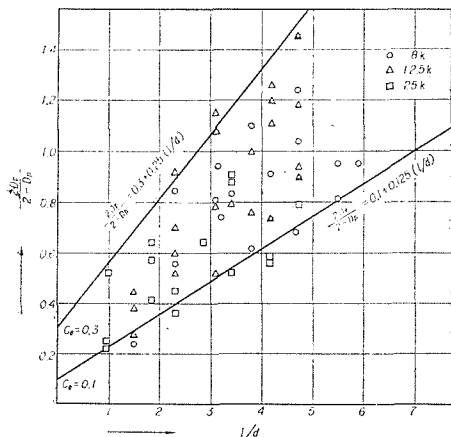


図-10 からわかるように実験で得られた値はかなりのばらつきがあるが、これは p_0 の大きさによって変動があるもので、 p_0 が大であれば D_p も大になる。

図-10 で対象となった波圧強度: p_0 はおよそ $1 < p_0/wH < 5$ 程度である。図に示した上限、下限の線からこの場合の C_0, C_1 の限界値を得たものを表-3に示す。

表-3

p_0/wH	C_0	C_1
1	0.1	0.125
5	0.3	0.25

得たものを表-3に示す。 p_0/wH がこの中間にある場合は C_0, C_1 が両値の中にあるとしてよい。

(5) 式を D_p について書き改めると

$$D_p = 2 \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{2 + C_0 + C_1(l/d)} \right\} \dots\dots\dots (5')$$

l, d が与えられれば各点での波圧減殺率: D_p が、 C_0, C_1 を推定することによってきめられる (図-11)。

テトラポットと直立堤との接触面積は無視できるほど小さいとしてよいから、堤体の単位長断面については、直立堤脚の波圧強度、分布が実測または波圧式で与えられるならば、被覆後の減殺全波圧: P_d は堤底部より堤頂部まで (5') 式を積分することにより得られる。

$$P_d = \int_b^t 2p_0 \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{2 + C_0 + C_1(l/d)} \right\} dh \dots\dots\dots (6)$$

実際には静水面をふくむ上下3点ほどで D_p を求め、 p_a を算出すれば、被覆後の被圧分布の概略が察知できることは 図-8(a), (b) 分布図より知られる。

7. 結 言

これまで各項目ごとに実験で得られた結果から考察したがこれを簡略にまとめると以下のようである。

(1) 波のはい上りについてもテトラポット堤の効果は H_0/L_0 の大なる領域でいちじるしい。

(2) 背後への透過は急勾配で砕波点か堤内にある波については砕波しない波よりかなり大きい $1:1, 1:1.5$ で 30%, $1:2$ で 20% 程度である。

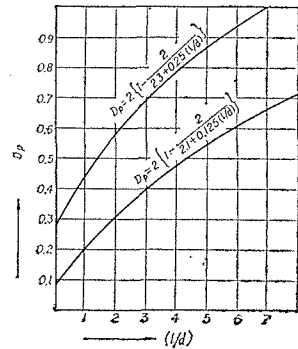
(3) 混成防波堤における跳波高さ、および波圧とテトラポット部分との関連は、いずれも天端が静水面より上にないと顕著な効果はない。しかし根固めの意味では静水面下でも、揚圧力の減殺が大であることから目的を果たしている。天端が $+H$ 程度あれば波圧減殺については各点の波圧強度の減少と被覆厚: l 、個体の大きさ: d から推定できる。

今後これら異形方塊の研究は、いまだ基礎的な実験をともなして進められる必要があると思われる。

本研究は運輸省港湾調査費、水産庁漁港施設調査費でなされたものであり、実験をおこなうにあたり北海道開発局港湾部、同農業水産部水産課から御好意と御助言をいただいた。記して謝意を表す。

また当所 山岡木工研究室長から受けた御指導と、実験ならびに資料整理にあたられた佐藤 功、洞内 怜、田中義一、成田友弥君ら室員の労に深く感謝する。

図-11 波圧減殺率



参 考 文 献

- 1) Danel. P; Tetrapods, Proceedings IV th Conference on Coastal Engrg, (1952)
- 2) 堀井正延・三井 宏; テトラポットの安定限界, 第6回海岸工学講演集, (1959)
- 3) Hudson. R. Y.; Laboratory Investigation of Rubble Mound Breakwater, Proceeding ASCE, Vol 85, WW 3, (1959)
- 4) 鴻上雄三・近藤俊郎; テトラポットの消波効果, 第16回土木学会年次学術講演概要, 第Ⅲ部, (1961)
- 5) 村木義男; 大型造波水路・造波機械の構造設計, 北海道開発局土木試験所月報第82号, (1960)
- 6) Saville. T; Wave Run-up on Shore Structures, Proceedings, ASCE, Vol 85, WW 2, (1956)
- 7) Granthem. K. N; Wave Run-up on Sloping Structure, Transaction AGU, Vol 34, 1953
- 8) Saville, T; Discussion on 3).; Proceedings ASCE, Vol. 86 WW3, (1960)
- 9) 永井荘七郎; 消波用中空ブロックに関する研究, 第6回海岸工学講演集, (1959)
- 10) 永井荘七郎; 海岸堤防の消波に関する研究他, 第16回土木学会年次学術講演概要, 第Ⅲ部, (1960)

最新の技術と完備せる試験設備

地質調査

土質関係工事
道路土質調査
現場土質調査
各種ボーリング

各種試験

アスファルト試験
コンクリート試験
土質試験全般

測量

地籍測量 其他
都市計画測量
河川測量
路線測量
地形測量

設計

都市計画其他
建築基礎構造
土木構造物
道路・飛行場

建設工事の総合調査

梶谷調査工事株式会社

取締役社長 梶 谷 正 孝

本社及試験場	東京都渋谷区桜が丘 5	電話(461) 1044・1048・1981	
東北支店	仙台市青町 1 8	電話(5) 1 2 8 3	
関西支店	神戸市葺合区磯上通 7-3 (梶谷ビル)	電話(2) 3 3 3 6	
札幌連絡所	札幌市南九条西 3 - 10	電話(4) 3 4 3 6	