

異形ブロック消波工に関する二、三の考察

近 藤 俣 郎*

1. ま え が き

消波用異形ブロックが海岸・港湾の防波構造物に目立って使用され始めてから約 15 年が経過した。この間、消波工の普及は目ざましいものがあり、その主要構成材料である各種の異形ブロックの水理的性能の研究も盛んに行なわれてきた。そして最近では消波構造物の効果を一般的、定量的に把握しようとする方向で研究が進められており、筆者らもそれに関連した研究を行なっている。しかしながら異形ブロック消波工に限ってみるならば、形状・構造が複雑なのでその水理的特性が十分明らかにされたとはいえない。上述の基礎的な研究を進展させ、現地構造物への適用性を高めるためには、一方においては実際の消波工の特質をよく認識することが必要である。本文は異形ブロック消波工を直立防波堤の前に設けた場合につき、波力の減殺および越波減少の効果について、従来とは異なった方法で実験データを整理して考察した。また異形ブロックの本来の特徴である安定重量について、一様斜面での実験に基づいてその特性を考察した。

2. 消波工で被覆した直立部の波圧

異形ブロックを不透壁の前においた場合に、碎波の波圧が減殺され、また反射率や打上高さを小さくできることは永井²⁾の先駆的な研究で明らかにされた。波圧減殺に関してはその後、古谷・鴻上・近藤³⁾がテトラポッド消波工で直立堤を被覆した場合につき、大規模な堤体実験を行なって消波工の形状が波圧に与える効果を調べた。そして直立堤での波圧に対する波圧減殺率を求める半実験式を得ている。さらに森平⁴⁾はやはりテトラポッド堤について全波力を測定する実験を行なって直立堤の場合の広井式に見合う波圧式を提案した。その後久保⁵⁾、菅野⁶⁾、鴻上・時川⁷⁾がさらに主として消波工の形状効果について実験的な研究を行なった。ここでは上述の筆者らの波圧実験においてその後得られた結果を示し、消波工の波圧減殺効果について考察を加えることとする。

(1) 実験施設

実験水路は北海道開発局土木試験所港湾研究室の73.4×1.8×1.8(m)の大型造波水路であるが、同水路はその後長さ 102 m に改造されている。水底勾配 1/20 の地形上に図-1 に示すような模型防波堤を設置した。波圧計は共和電業製のストレインゲージ型抵抗式波圧計を用いたもので図-1 に示すようにケーソン前壁に 6 個、底版に 2 個を取付けた。記録は電磁オシログラフで行なわ

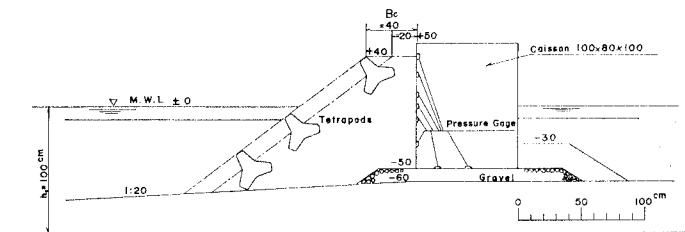


図-1 波圧実験用模型防波堤断面図

れたが、以下に示す波圧強度 p は連続した 5 波の平均値である。消波工はテトラポッドあるいは玉石の乱積を用いたが、テトラポッドは 8 もしくは 25 kg である。

(2) 波圧強度の影響

図-2 は直立堤の場合、数種の入射波について得られた各波圧計の最大波圧強度の鉛直分布を示したものである。重複波圧型から十分発達した碎波圧型まで段階的に表われている。断面全体の最大値は静水面より上に出現しているのが共通点である。十分に発達した碎波圧の鉛直分布はほぼ Minikin 式に近似している。次に図-3 はこの直立堤の前面に図-1 の破線のように 8 kg のテトラポッドを積んだ消波工を設置した後の波圧分布である。これより消波工設置後の波圧は全体にかなり減少し、その度合は直立堤での波圧強度が大きいほど大きい。消波工により衝撃的な碎波圧は静的な重複波圧の波圧に変化しているといえることができる。断面の最大波圧強度は直立堤の場合より下って静水面に現われる。

(3) 個体寸法および種類の効果

消波工の断面形の形状効果に関しては天端高が水面上入射波高 H 以上なければ小さく、 $(+)H$ 以上であると断面の厚さの効果が現われてくるということが知られている³⁾。消波工構成個体の寸法および種類が波圧に与える効果は、実用的な興味を引く問題であるが、明瞭になっ

*正会員 室蘭工業大学助教授 土木工学科

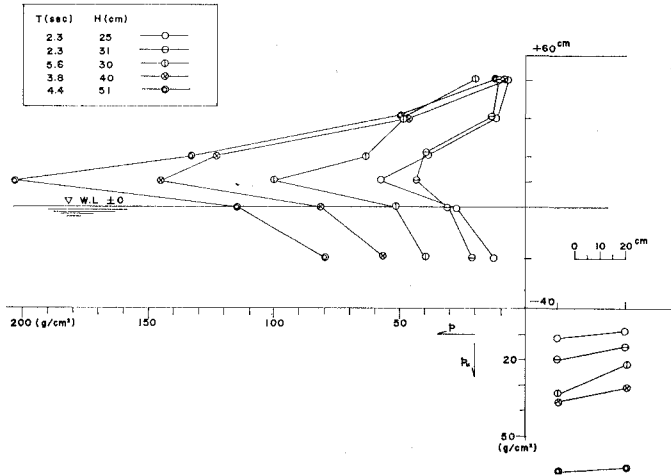


図-2 直立堤の最大波圧分布

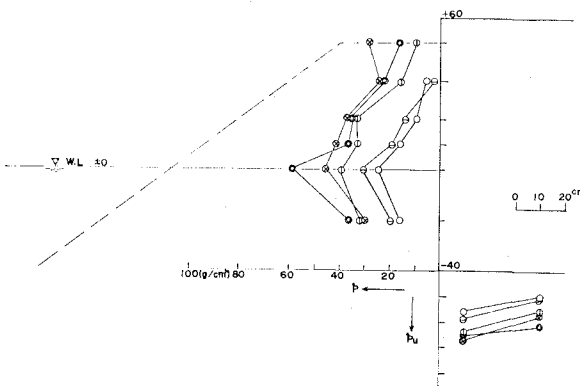


図-3 消波工で被覆された後の波圧分布

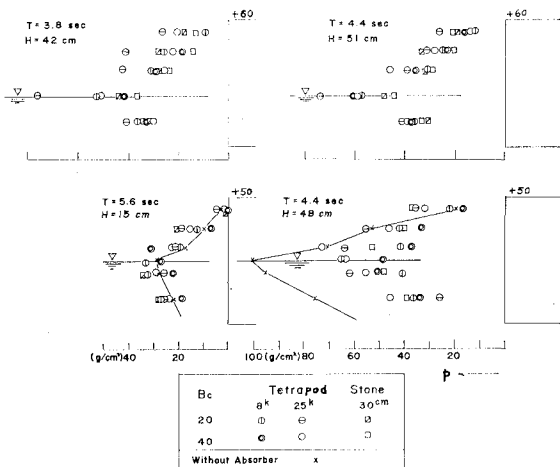


図-4 個体寸法, 厚さ, 種類の波圧におよぼす影響

てはおらない。

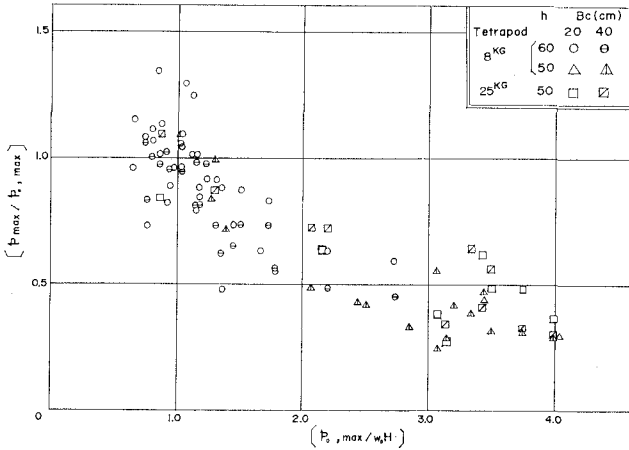
ここでは 8 kg と 25 kg のテトラポッドと、平均径 30 cm の玉石についてそれぞれ実験した結果の一部を図-4 に示す。消波工の断面形は 図-1 の破線と一点鎖線で示した二種である。図-4 は直立堤の場合に重複波圧

を与える入射波については、消波工の波圧減殺効果は無く、そして個体寸法, 種類による波圧変化の傾向は明白でない。発達した砕波力になると個体寸法の効果が現われ、小寸法の材料を使用するほうが波力軽減に効果がある。そしてその傾向は消波工断面が小さい場合に顕著である。石積の場合もおおよそ上記の特質が現われている。8 kg のテトラポッド積(空げき率 50%)と玉石積(空げき率 45%)とはほぼ同程度の波圧を与えているが、これらの定常流で乱流の場合のエネルギー勾配も、富永・坂本の実験値³⁾より推定するとほぼ等しい。以上のことから直立部に作用する砕波圧を減少する効果は、異形ブロックに限らず適度の抵抗と空げき率を有する消波構造であれば期待できることがわかる。

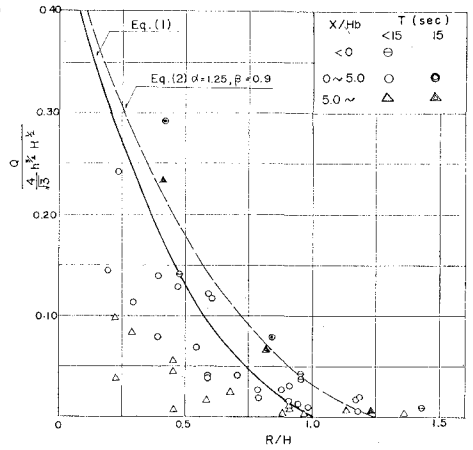
(4) 断面最大波圧強度の減衰

消波工による砕波圧の減衰の度合は、前出のように消波工設置後に鉛直分布が変化するので各点を対象とすると複雑になる。そこで断面全体の最大波圧強度について、直立堤での値 $p_{0,max}$ と消波工設置した後の値 p_{max} との比をとり、それを直立堤での無次元波圧強度($p_{0,max}/w_0H$)の関係でプロットしたのが図-5 である。図-5 から明らかに ($p_{max}/p_{0,max}$) は ($p_{0,max}/w_0H$) と密接な関係がある ($p_{0,max}/w_0H$) が 1.0 より小さいと ($p_{max}/p_{0,max}$) は 1.0 より小さくなることを認められる。こうしてみると消波工による波圧強度の減少は砕波圧の場合に限り有効であり、個体寸法も ($p_{0,max}/w_0H$) が大きいと明らかで、小さいとほとんど効果がない。この結果と断面全体についての波圧との関連について考える。直立堤に広井式程度の平均波圧が作用しているときには、消波工設置後は、森平らの実験値によれば約 50% 波力が減少している。その場合について、砕波圧を対象にした著者らの半実験式に

よって計算してもほぼ等しい値が得られる。この両者の差異は、波圧の鉛直分布に基づいている。直立堤に関する広井式の波圧強度 $p=1.5 w_0H$ は断面全体についての平均波圧強度と解釈すべきであって、波圧分布は静水面付近に p_{max} を持ち静水面上 αH で 0、水底では $w_0\alpha$



図—5 直立堤と消波堤の最大波圧強度の比



図—6 孤立波理論による越波量の無次元表示 (B.E.B. の実験値)

× H の波圧強度をなすくさび形をしている。このような鉛直分布型に広井式をおき換えると $p_0/w_0 H = 2.3 \sim 2.5$ となる。また消波工設置後の α の値は、直立堤に対する 1.25 より小さくなる。したがって全波圧は前記の値と近似している。

3. 越波量とその伝達波

越波に関する研究は、越波現象が沿岸防災構造物にとって支配的な要素なので、過去 20 年間にわたって行なわれ、今日もなお主要な研究課題となっている。筆者ら⁹⁾は先に特定の入射波に対し越波量が最大となるのは砕波点付近に構造物があるときであることに着目し、孤立波理論を応用して直立堤の最大越波量を推定する式を提案したが、ここでは消波工ある場合も含めて一般化することを試み、また越波による伝達波高についても扱った。

(1) 直立堤の越波量推定式

越波量を支配するものは堤体位置における進行波の諸元と堤体形状・構造である。筆者らは入射波を孤立波として、孤立波の容積のうち堤体天端高以上にある容積に対する越波量の比を B.E.B. の越波量実験データ¹⁰⁾について求めたところその比は約 1/2 であることがわかった。これより Q は下式で推定された。

$$Q = \frac{2}{\sqrt{3}} h^{3/2} H^{1/2} \left[\left(1 - \frac{R}{H} \right)^{1/2} - \frac{R}{H} \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{R}{H} \right)^{1/2} \right] \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Q ：一周期当りの越波量 ($\text{m}^3/\text{sec} \cdot \text{m}$)、 h ：堤体の水深、 H ：堤体への入射波高、 R ：静水面からの天端高。図—6 は B.E.B. のデータのうち $h=0$ を除いたものについてプロットしたものである。その場合入射波の波高は深水波のそれと与えられているので H は微小振幅波理論で求める。堤体に到達する以前に砕波する波については、砕波点での波高 H_b 、水深 h_b を H 、 h の

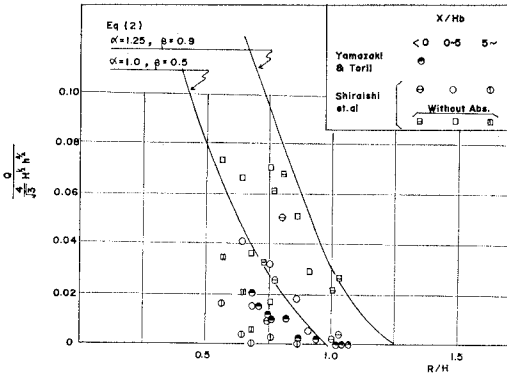
代りを使用しているが、それらは Iversen の実験曲線から計算している。そして Galvin¹¹⁾の提唱する Breaker Travel を参考にして、堤体から砕波点までの距離の無次元数 x/H_b の値で区別している。この図より $x/H_b < 5.0$ の波について、 $R/H > 0.9$ ならば式 (1) は最大越波量算定の近似式として使用し得ると認められる。その他の実験値¹²⁾についてもほぼ同様な結果が得られた。(1) 式は $R/H = 1.0$ で $Q = 0$ となるので、 $R/H < 0.9$ の範囲では過小な Q を与える。また後述する消波工をもつ場合への応用も考慮して、(1) 式の H の代りに αH を代入した (1) 式の右辺に β を乗じて、次式のようない一般化を行なう。

$$\begin{aligned} Q &= \frac{4}{\sqrt{3}} h^{2/3} H^{1/2} \\ &= \frac{\alpha^{1/2} \beta}{2} \left[\left(1 - \frac{R}{\alpha H} \right)^{1/2} - \frac{R}{\alpha H} \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{R}{\alpha H} \right)^{1/2} \right] \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

ただし、 α 、 β は構造物の種類、形状などによる定数とみなされる。直立堤の場合は $\alpha = 1.25$ 、 $\beta = 0.9$ とすると図—6 の破線のように無次元表示した越波量のほぼ上限値を与えている。

(2) 消波工を設けた場合

消波工を直立線の前に設置すると越波量がげん著に減少することはこれまでの多くの研究により認められており、このことが海岸堤防や防波堤に異形ブロック消波工を採用する理由となっている。消波工を有する構造物の越波量は、直立不透過部の天端高 R 、消波工天端高 R_c 、消波工天端幅 B_c 、のり勾配などの要素に支配され一般に複雑である¹³⁾。ここでは R_c が R とほぼ等しいか若干小さい場合のみを対象としてテトラポッドを主材とした白石¹⁴⁾、山崎¹⁵⁾の実験値を前節と同様に整理してみた(図—7)。前者に関しては直立堤の実験も行なっているので同図にはそれらのデータもあげている。この結果が



図一 消波工ある場合の越波量

ら消波工をもつ場合は、直立堤にくらべると天端高が大きいほど越波量が減少することが知れる。 $R/H < 0.5$ のデータが無いので全体的には不明であるが、実験値のある範囲で(2)式の形式で表現しようとすれば、図中の実線のように $\alpha=1.0, \beta=0.5$ とするのがよいと思われる。

(3) 越波による伝達波高

越波による伝達波については直立堤、混成堤については近藤・佐藤³⁾、合田・竹田¹⁶⁾が研究し伝達波高を求める式および図表を得ている。またテトラポッド消波工のある場合については上出の著者らが実験を行なっている(図-8)。ここでは先に直立堤について行なった⁹⁾のと同じ方法で、(2)式のように越波量が一般的に表現されるときに、越波による伝達波高率 H_t/H を求めてみる。

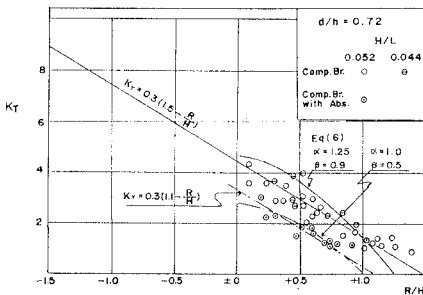


図-8 越波による波高伝達率

越波量に相当する部分の持つポテンシャルエネルギー $E'_{p,I}$ は

$$E'_{p,I} = \frac{\beta}{3^{3/2}} w_0 (\alpha H)^{3/2} h^{3/2} \left[\left(1 - \frac{R}{\alpha H} \right)^{1/2} \times \left(2 + \frac{R}{\alpha H} \right) - 3 \left(\frac{R}{\alpha H} \right)^2 \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{R}{\alpha H} \right)^{1/2} \right] \dots \dots \dots (3)$$

伝達波の全エネルギーは

$$E_{t,T} = \frac{8 w_0}{2^{3/2}} H_t^{3/2} h_t^{3/2} \dots \dots \dots (4)$$

ただし下付 t は伝達波を意味する。

$$E'_{p,I} = E_{t,T} \\ \frac{H_t}{H} = \frac{\alpha \beta^{2/3}}{4} \left(\frac{h}{h_t} \right) \left[\left(1 - \frac{R}{\alpha H} \right)^{1/2} \left(2 + \frac{R}{\alpha H} \right) - 3 \left(\frac{R}{\alpha H} \right)^2 \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{R}{\alpha H} \right)^{1/2} \right]^{2/3} \dots \dots \dots (5)$$

上式において $h_t = h$ とし、直立堤 ($\alpha=1.25, \beta=0.9$)、消波工のある場合 ($\alpha=1.0, \beta=0.5$) につきそれぞれ求めた伝達率 $K_T = (H_t/H)$ を図-8 に示してある。これよりいずれの場合も $K_T > 0.1$ については実験値のおよそ上限を与えている。

4. 斜面上の異形ブロックの安定

消波工の主要材料である石や異形ブロックの波に対する安定は、基本的には個体に作用する波力とそれに対応する抵抗力によって定まるものである。しかしながら消波工の中の個体に作用する波力や抵抗力を求めることはきわめて困難であり、安定限界重量を実験的に定める方法がとられている。石積やブロック積のような斜面上に敷並べられた個体に作用する波力をモデル的に扱ったものに球について行なった Sigurdsson¹⁷⁾の実験がある。しかしながら斜面の表層を形成している個体に作用する波力は入射波の特性のほかに、i) 個体の形状、位置、ii) 空げきの寸法、空げき率、iii) 斜面勾配、iv) 下層の構造などの要素によって支配され、複雑である。これら4つの条件のうちの一つでも異なれば波力の大きさ、性質が相当に変化してしまうことは推定に難くない。したがって実際の各種の構造物については模型実験に負うところが大きい。近藤・松山¹⁸⁾は板張りの斜面上に厚さ60 cm の碎石の下層を設けその上に中空四脚ブロック(Hollow Square)を一層整積にした斜面の安定実験を行なった。実験結果は Stability Number N_s を縦軸にとり横軸に斜面勾配 $\cot \theta$ をとって図-9 に表現されている。Hollow Square 一層整積の N_s は割石やテトラポッドの乱積に関する Hudson の実験とは異なって緩勾配になるにつれて N_s は急に大きくなっている。同図

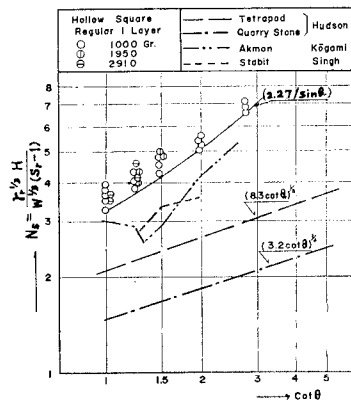


図-9 Hollow Square 一層整積の N_s 値

中には鴻上¹⁹⁾の行なった Akmon のやはり一層整積、および Stabit についての Singh²⁰⁾の実験値の平均値をとったものをそれぞれ折線で示している。ほぼ類似の形状をしている Akmon 堤の場合 $\cot \theta \geq 1.5$ では Hollow Square と同じ傾向を示している。なお、両者の安定限界基準は“斜面を構成するブロックが1個でも原位置より脱落する”を採用している。このような方形の異形ブロックを整積した斜面は、通常かなり高い安定性を有し、特に二層積では一層よりもさらに安定がよい。しかしながら整積の欠点は斜面の表層を構成するブロックの1個が脱落すればその周囲のブロックが移動し、斜面全体の崩壊に発達する危険が生じやすいことである。Hollow Square は、この種のブロックに共通するように斜面上に平行方向の波力に対しては移動し難いめ込まれたような状態になっている。したがってこのブロックが脱落するのは斜面上に直角上向に作用する揚圧力を受けることによる。しかしながら一般の石積、異形ブロック積で特に乱積の場合は斜面と直角方向の安定が支配的であるとは限らない。異形ブロックは大低、平行方向の波力に対し十分抵抗できるようにめ込み、噛合せの作用を持っているのであるが、斜面上に突出している部分に作用する平行方向の波力は揚圧力に比してはるかに大きいからである。図-10 は Hollow Square の一層整積について、

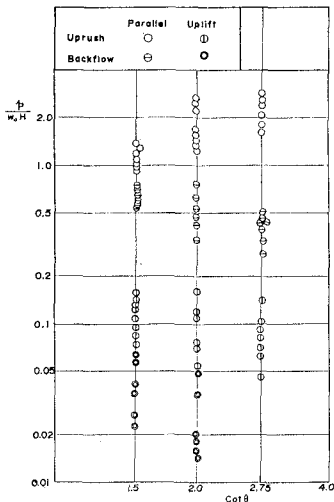


図-10 斜面上の個体に作用する波力

斜面上での平行方向の寄波時と引き波時の波圧強度および揚圧力の強度を波圧計を用いて測定した結果である。平行方向の波圧強度は斜面上に波圧計を受圧板を斜面方向に、下向きおよび上向きにして固定して測定した。また揚圧力はブロックの上下面での圧力強度をそれぞれ波圧計で測定しその差から計算したものである。Hollow Square については図-10の寄せ波時の揚圧力強度を用いた直角方向の安定条件式から N_s を導いたのが図-9の実線である。この場合の揚圧力強度 $p_n = 0.12 \sin 2\alpha$

は Sigurdsson の球に関する値の約 $1/2$ である。図-10の波圧強度と図-10の N_s の傾向から割石やテトラポッドの安定は、揚圧力のみでなく斜面と平行方向の波力も影響していることが知れる。

5. む す び

以上の考察で得た主要な点は次のとおりである。

(1) 直立部の前においた消波工の効果は直立堤での最大波圧強度が大きいほど大で、 $(p_{\max}/p_{0,\max})$ は $(p_{0,\max}/w_0H)$ が 1.0 から 4.0 の間でほぼ 1.0 から 0.5 に減少している。

(2) 最大越波量は直立堤、消波堤を含めて、孤立波理論を応用した (2) 式でおよその推定が可能である。

(3) 一樣斜面上の異形ブロックの安定は個体形状、積み方などによって斜面と平行あるいは直角のいずれの方向の安定条件が支配的になるか異なる。

以上異形ブロック消波工に関して、波圧減殺、越波量の減少、斜面の安定性などを考察したが、関連する要素が多く今後の研究にまところが多い。特に現地観測による調査研究が望まれる。

本文は筆者が北海道開発局土木試験所港湾研究室に在職中大型造波水路を用いて行なった実験資料をもととして考察したものである。本文を発表するに際し寄せられた同所 村木義男第一研究部長、鴻上雄三港湾研究室長の好意に感謝の意を表します。また当時筆者とともに実験を行なった同研究室の佐藤 功主任研究員、成田友弥、洞内 玲技官、松山方彦同局室蘭港所長、田中義一同局港湾部技官ら諸氏の協力に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 尾崎 晃：消波構造論、1965 年度水工学に関する夏期研修会講義集、土木学会水理委員会、1965。
- 2) 永井莊七郎：消波用中空ブロックに関する研究、第 6 回海講、1959。
- 3) 古谷浩三・鴻上雄三・近藤徹郎：テトラポッド防波堤に関する実験的研究、第 8 回海講、1961。
- 4) 森平倫生・柿崎秀作・菊谷 徹：異形ブロックの波圧減殺効果に関する研究、港湾技研報告 Vol. 6, No. 4, 1967。
- 5) 久保弘一：透過性構造物内部における波力の減衰について、第 23 回年講概要 (II)、1968。
- 6) 管野 一・桜井輝男・塩谷 清：透過工法による波圧減少に関する実験的研究、第 17 回海講、1970。
- 7) 鴻上雄三・時川和夫：施工段階における消波工の波圧減殺効果に関する実験的研究、第 17 回海講、1970。
- 8) 富永正照・坂本忠彦：異形ブロックの抵抗係数について、第 25 回年講第 2 部、1970。
- 9) 近藤徹郎・佐藤 功：防波堤先端高に関する研究、道開発局土木試験所月報、第 117 号、1963。
- 10) Beach Erosion Board: Laboratory Data on Wave Run-Up and Overtopping on Shore Structures, Tech. Memo. No. 64, 1955。
- 11) Galvin, Jr., C.J.: Breaker Travel and Choice of Design Wave Height, Jr. of W & H Div., Proc. of ASCE, WW 2, 1969。
- 12) 合田良実：防波護岸の越波流量に関する研究、港湾技研報告, Vol. 9, No. 4, 1970。

- 13) 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回海講，1964.
 - 14) Shiraishi, N., A. Numata and T. Endo : On the Effect of Armor Block Facing on the Quantity of Wave Overtopping, Proc. of 11th Conf. on Coastal Engrg., Vol. II, 1968.
 - 15) 山崎 博・鳥井幸雄：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回海講，1966.
 - 16) 合田良実・竹田英章：越波による防波堤背後への波高伝達率，第13回海講，1966.
 - 17) Sigurdsson, G. : Wave Force to Breakwater Capstones, Proc. of ASCE, WW 3, 1962.
 - 18) 近藤徹郎・松山方彦：中空四脚ブロックの安定限界，道開発局土木試験所月報，第132号，1964.
 - 19) 鴻上雄三：2, 3の異形ブロックの水理的特性について，道開発局土木試験所報告，第42号，1966.
 - 20) Singh, K.Y. : "STABIT"—A New Armour Block, Proc. of 11th Conf. on Coastal Engrg., Vol. II, 1968.
-