

II—5 消波ブロックの安定性と透過性潜堤の水利特性について

三井建設(株)札幌支店 正員 ○石倉 建治
岩手大学工学部 助手 正員 界 茂樹

§ 1 まえがき

消波工の中詰材の安定性と透過性潜堤の安定性を、後述の異形ブロックを用い、静水面から消波工天端までの水深と、消波工前面の水深との比を変化させながら数種類の波に対して実験した。実験値の整理は、他の異形ブロックとの比較を容易にするため、Hudson 式および Brebner・Donnelly 式の K_D と N_s を求めることに主眼をおいた。また透過性潜堤についてはブロックの安定性のみならず、波の反射率および透過率についても調べた。

§ 2 消波工の中詰材の安定

防波堤の越波防止あるいは波圧の減殺を目的とした直立堤前面の消波工には、異形ブロックを積層したいわゆる消波ブロック被覆堤が最近数多く建設されている。この種の消波工に使用する消波ブロックの重量は一般に Hudson 式で求められるが、設計基準では水面下 1.5 H 以下の部分の被覆材および中詰材はそれより上のブロックの数分の 1 の重量でよいとされている。しかし中詰材の施工中の安定性についての明確な実験や研究はあまりなく、また施工の安易さから必ずしも内部の中詰材と表層の被覆材を設計基準どおり区分せず、全体を一樣に同じ重量の消波ブロックで積層する消波工も少なくない。

本研究は消波工の中詰材の安定性を調べるものであるが、一般に図 2-1 に示すような消波ブロック被覆堤や図 2-2 に示す傾斜堤の被覆材の所要重量は、次の Hudson 式で求められる。

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (Sr-1)^3 \cot \alpha} \quad (2.1)$$

これに対し、図 2-3 に示すような直立堤前面の根固め工および図 2-4 に示す直立堤の基礎工の安定に対しては、通常次の Brebner・Donnelly が求めた式を用いることが多い。

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{N_s^3 (Sr-1)^3} \quad (2.2)$$

N_s^3 は安定数で d/h とブロックの形状によってきまる係数である。(2.1) と (2.2) の両式より

$$K_D = \tan \alpha \cdot N_s^3 \quad (2.3)$$

本研究の目的は図 2-1 に示すような消波ブロック被覆堤の中詰材の安定重量を求めるのであるから、図 2-3 の直立堤前面の根固め工に相当し、(2.2) 式の N_s^3 を求めることを意味する。

(1) 実験装置および実験方法

実験の断面形状は、図 2-5 に示すものを基本としているが、結果は無次元量で表わしているため、他の断面に対しても広く利用することができる。長さの縮尺は 1/25 とし、フルードの相似則を用いたため、時間の縮尺は 1/5 となる。使用したブロックは図 2-6 (a), (b) に示す 2 種類である。

ブロックの寸法は図示のとおりで、1 個の重量は 122.908

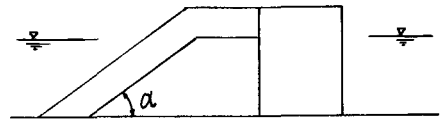


図 2-1 直立堤前面の消波工

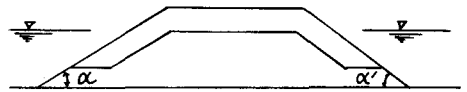


図 2-2 傾斜堤

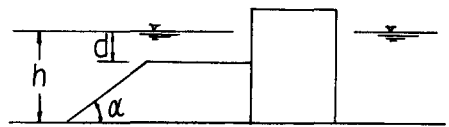


図 2-3 直立堤前面の根固め工



図 2-4 直立堤の基礎工

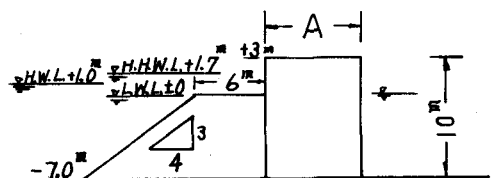


図 2-5 直立堤前面根固め工実験の基本断面

ρ、単位体積重量は 2.241 g/cm^3 である。これを実物に換算すると約 1.92 t に相当し、また実験の結果空隙率は約 51% であった。実験に用いた諸元は図 2-7 に示すとおりで実験は B と α を固定し、 d と h を表 2-1 のように 3 通りに変化させ、その各々に対して周期は $T = 1.2, 1.6, 2.0$ および 2.4 秒とし、数種類の波高の波をあてて行なった。周期の縮尺は $1/5$ となるから現地換算では、 $6, 8, 10$ および 12 秒に相当する。また波高は構造物がないとしたときの構造物設置地点で砕波が起るまでの範囲で変化させた。(注：ブロックは 1 組の型枠で 4 個同時に製作)

ブロックの波による移動、転落の確認は水槽の両面から目視観測によった。この種のブロックの安定実験においてはブロックの移動の定義が研究者により異っている。Brebner 等は堤延長方向 1 フィート当り 4 個以上のブロックが rocking したときをもって移動と定義している。本実験ではブロックの移動個数と転落個数を各波毎に数えて、全ブロック数に対する比 (%) で表わしたが、観測値の整理に当っては原則として移動個数を延長方向 60 cm 当り 4 個をもって移動とみなした。また異形ブロックの安定実験においては、弱い波でも長時間作用させるとブロック相互のかみ合わせがよくなり、次に波高を大きくしてもブロックは容易には動かない状態となるので、本実験では各実験毎にブロックの傾斜部をこわし、再び積み直して実験を行なった。従って本実験の結果は施工の実態と考えあわせると安全側の値を与えるものといえよう。なお消波ブロックの天端高を水面以下

としているのは、本実験は消波工の中詰材または基礎工としてのブロックの安定を検討するもので、最終的にはこの表面あるいは水面附近の上部は別の大型異形ブロックで被覆することを原則としているからである。また前面の法勾配は現在設計されている消波工の標準的な勾配をとり、 $\cot \alpha = 4/3$ とした。

(2) 実験の結果

消波ブロックの安定の良し悪しは、波浪に対する適切なブロック重量によってきまる。そこで設計波に対する消波ブロックの最小重量を知るためには (2.2) 式の Ns^* が判らなければならない。本実験では $\gamma = 2.241 \text{ g/cm}^3$, $S_r = 2.241$, $W = 122.908 \text{ g}$ であるから、 Ns^* と波高との関係は

$$Ns^* = 0.00954 H^3 \quad (2.4)$$

次に法勾配は $\tan \alpha = 3/4$ であるから、 K_D と Ns^* および H^3 との関係は

$$K_D = 0.75 Ns^* = 0.0715 H^3 \quad (2.5)$$

となる。ここで実験の波高 H を与えると (2.4) 式より Ns^* が計算されるので、 Ns^* を片対数の横軸にとり、ブロックの移動個数を縦軸にとって、移動個数 4 個以上の観測点の一番外側の点を直線で結び、被害率 1% と 2% の場合の Ns^* を求めた。図 2-8 (a), (b), (c) はそれぞれ各 d/h に対し、最小の Ns^* を与える場合の図で、 K_D は (2.5) 式より計算で求めたものである。同一の水理条件で数回の実験を行なっているが図中の白印は落下個数、×印は移動個数で、落下個数も含んでいる。なお前述のように図中の直線が一番外側の観測点を結んだものであるから、この線の外側ではブロックの移動はなかったことを示している。この

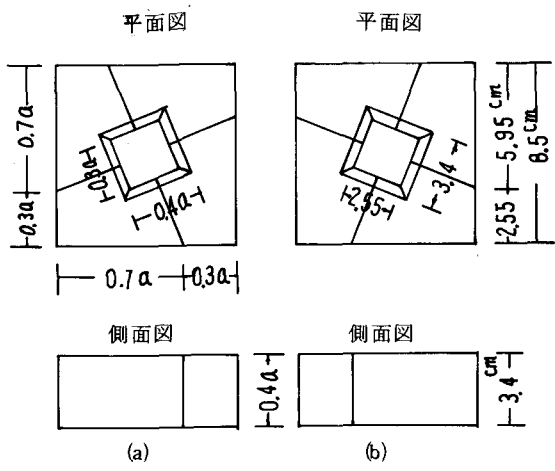


図 2-6 中詰充填用ブロック

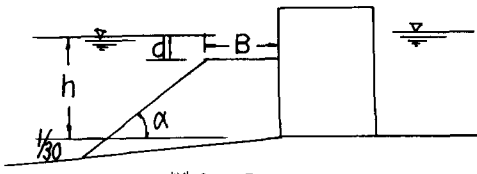


図 2-7

$$B = 24 \text{ cm}, \quad \cot \alpha = 4/3$$

d cm	h cm	d/h	T sec
0	28	0	1.2, 1.6
4	32	0.125	
6.8	34.8	0.195	2.0, 2.4

表 2-1

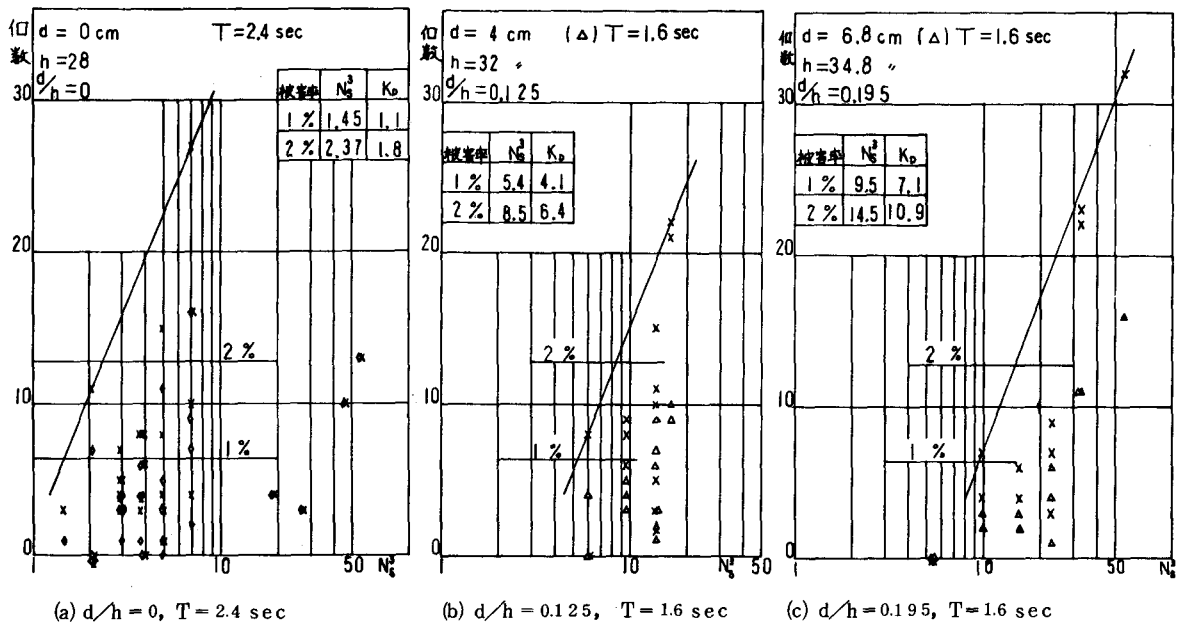


図 2-8 直立堤前面の根固め工の場合のブロックの N_s^* と K_0

$d/h \backslash T$	1.2	1.6	2.0	2.4
0	3.3 (2.5)	4.6 (3.5)	3.5 (2.6)	1.5 (1.1)
0.125	6.9 (5.2)	5.4 (4.1)	6.1 (4.6)	5.8 (4.4)
0.195	2.7 (2.0)	9.5 (7.1)	15.3 (11.5)	2.0 (1.5)

(a) 被害率 1%

$d/h \backslash T$	1.2	1.6	2.0	2.4
0	5.4 (4.1)	6.2 (4.7)	4.6 (3.5)	2.4 (1.8)
0.125	11.4 (8.6)	8.5 (6.4)	10.9 (8.2)	12.2 (9.2)
0.195	3.3 (2.5)	14.5 (10.9)	23.4 (17.6)	27.4 (20.6)

(b) 被害率 2%

表 2-2 直立堤前面の根固め工の場合のブロックの N_s^* と K_0

ようにして各 d/h と T に対して被害率 1% と 2% の場合の N_s^* を求めると表 2-2 (a), (b) となる。

() 内は K_0 に換算したものである。これから明かなように N_s^* は大きな被害率を許容すれば大きくなり、また d/h が大きくなるにつれて著しく大きくなる。同一の d/h に対しては、一般に $T = 1.6$ 秒で最小値を示す。この種の異形ブロックの安定実験においては実験値のバラツキが大きいのは普通であるが、後節で述べる潜堤の場合にも同様の傾向が現われており、しかも本実験の $T = 1.6$ 秒は現地換算で $T = 8$ 秒に相当し、丁度多くの災害を与える時化の時の波浪の周期に近い。なお不規則波の場合は、規則波にくらべてブロックの安定が悪くなるという結果も示されているところから、 N_s^* 値の採用には十分な安全率を見込む必要がある。

(3) 他の実験結果との比較

根固め工と基礎工の安定に関しては Brebner と Donnelly (1962) の研究がある。その実験条件は、 $h/L = 0.093 \sim 0.222$, $H/h = 0.04 \sim 0.445$, $d/h = 0 \sim 0.75$, $B/h = 0.15 \sim 0.75$ マウンド勾配 1:2 で、堤体前面で砕波しないとしており、図 2-9 のような結果となっている。図中○印は本実験で得られた被害率 2% とした場合の N_s^* の最小値であり、Brebner 等の結果とくらべると小さくなっている。この理由は種々考えられるが、主な原因は本実験では H/h が 0.16 ~ 0.95 までの範囲で、Brebner 等の H/h の約 2 倍になっていること、堤体前面での砕波を含むものであること、さらに法勾配が 3:4 と急であること等である。同様に被害率 1% としたときの N_s^* の最小値は図中の△印である。いずれもほぼ直線上にあり、

この傾向は Brebner 等の結果と対比しても妥当なものといえよう。いま一例として、被害率 2%、 $d/h = 0.3$ としたときの N_s^3 を本実験の結果を応用して求めれば、 $N_s^3 = 2.7$ となる。また被害率を 1%、 $d/h = 0.3$ とすれば、 $N_s = 2.52$ 、従って $N_s^3 = 1.6$ となる。

§ 3 透過性潜堤の安定と反射率および透過率

消波ブロック被覆堤に対する反射率と透過率を調べた研究は数多く発表されているが、いづれも水面上に堤の天端が出ている場合であって、堤の天端が水面下に没している潜堤に対するこの種の実験は極めて少ない。

波のエネルギーは水面近くに集中しているために潜堤により波のエネルギーを反射消散させ、背後の水域の静穏化をはかることは実際にはかなり難しい。しかし水産物養殖場等においては、静穏度がよくなったために新鮮な海水の交流が阻害され、却って水産生物に悪影響を及ぼすことも少なくない。従ってそのようなときには透過性潜堤の方が背後の水域の静穏度では少々劣るが、新鮮な海水の交流をはかることにおいては遙かに優る。

本研究は図 2-6 の異形ブロックを使用し、透過性潜堤の安定と反射率および透過率を調べたものである。

(1) 実験装置と実験方法

実験には図 2-6 に示す 2 種類の異形ブロックを使用した。実験の信頼性から縮尺は $1/25$ とした。従って時間の縮尺は前節同様 $1/5$ となる。異形ブロックの安定性には砕波の形態も大きな影響をもつことから、海底勾配は $S = 1/30$ とした。実験に使用した断面形状は図 3-1 (a), (b) に示すが、両断面の違いは後方の法勾配が異なるだけで、実験の結果両者の間に特別な差異は認められなかった。実験の諸元は図 3-1, 2 および表 3-1 に示すとおりである。

(2) 透過性潜堤の実験

透過性潜堤の異形ブロックの安定についても (a) タイプ $\cot \alpha = \frac{5}{3}$ $\cot \alpha = 4/3$
(2.1) の Hudson 式が成立つものとして、前 (b) " " " $\cot \alpha = 3.5/3$

節の場合と同様に B 、 α 、 d 、 h および T を固定し、波高を変化させながら実験を行ない、(2.1) 式より K_D を求めて各 K_D とブロックの移動個数との関係を調べた。移動個数は潜堤法面の前面と後面および天端の 3 つの部分に分けて観測した。(2.1) 式より $\gamma_r = 2.241 g / cm^3$ 、 $S_r = 2.241$ 、 $W = 12.2908 g$ 、 $\cot \alpha = 5/3$ とすると

$$K_D = 0.00572 H^3 \dots\dots\dots (3.1)$$

となり、対数の横軸に K_D 、縦軸にブロックの移動個数を取り、移動個数 4 個以上の外側の観測点を結ぶ

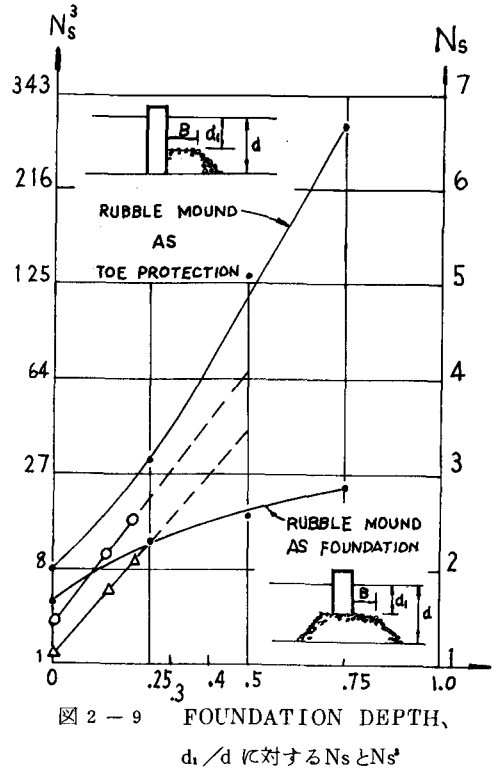


図 2-9 FOUNDATION DEPTH、
 d_1/d に対する N_s と N_s^3

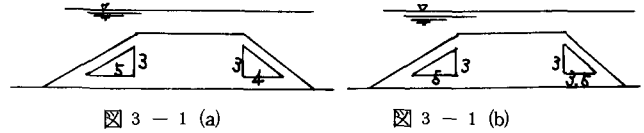


図 3-1 (a) (b)

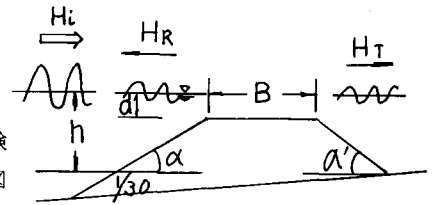


図 3-2

B cm	d cm	h cm	d/h	T sec
40	4	28	0.143	1.2, 1.6, 2.0, 2.4
	8	32	0.25	
	10.8	34.8	0.31	

表 3-1 透過性潜堤の実験の諸元

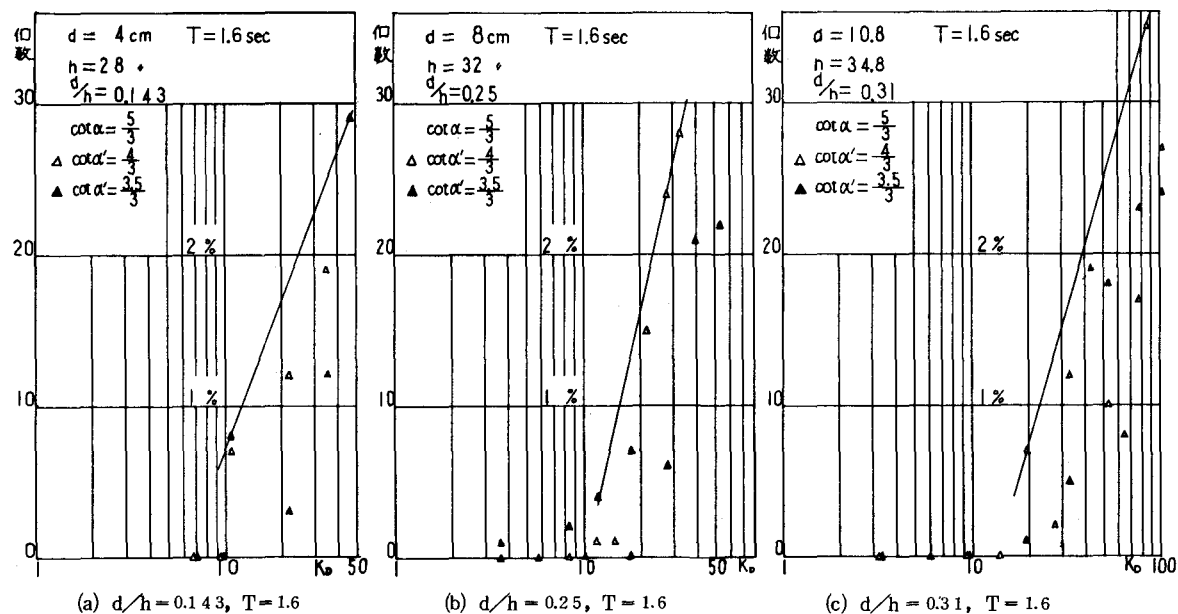


図 3-3 透過性潜堤の場合のブロックの K_D

直線を引き被害率 1% と 2% のときの K_D を求めた。

図 3-3 (a), (b), (c) は各 d/h に対し最小の K_D を与える $T = 1.6$ 秒の場合の図で、白印は表 3-1 の(a)、黒印は(b)タイプである。

このようにして全体を整理したものが表 3-2 (a), (b) である。被害率を大きくとれば K_D も大きくなり、同一の d/h に対しては $T = 1.6$ 秒で最小値を示す。一般に K_D は d/h の増加とともに増大の傾向を示すが、被害率 2%、 $T = 1.6$ 秒のときに反対の結果が出るところもあった。

(3) 透過性潜堤の反射率と透過率

透過性潜堤の設計は、堤背後の波高とそれに対応する潜堤の天端高 ($h-d$) と天端幅 B をきめるものであるが、その際潜堤前面の反射率と背後の透過率を知る必要がある。この反射率と透過率を求めるには、通常 Healy の方法によるが、最近の有限振幅波理論によると、完全反射の場合でも Healy の方法では反射率が 1 より小さくなることが知られており、従って Healy の方法は線形重複波理論の範囲が適用できないことが合田や佐伯等の結果から明らかとなっている。しかし他の消波工あるいは消波構造物の場合では一般にこの Healy の方法によっているので、この実験も他の結果との比較の都合上 Healy の方法によって反射率を計算した。実験の結果、 $\cot \alpha' = 4/3$ と $3.5/5$ の間に大差はないので、 $\cot \alpha' = 4/3$ の場合の K_R , K_T を各 d/h について整理したものを図 3-4 に示す。黒印が反射率 K_R , 白印が透過率 K_T である。透過率は $H/L > 0.04$ の範囲では d/h が小さい程、即ち潜堤の天端高が高い程小さくなり消波効果も高くなる。各 d/h に対しては H/L が小さくなる程 K_T は大きくなり消波効果は減ずるが、一般に H/L が小さくなれば H も小さくなるから実用上はあまり問題とならない。また d/h および H/L が一定ならば、一般に周期が大きいの程 K_T は小さくなる傾向を示す。実用的な例として、透過性潜堤に対し最も危険な波は表 3-2 から $T = 1.6$ 秒である。そこで $T = 1.6$ 秒の波のうち、ブロックの移動個数の多かった波高について H/L を求め、図 3-4 より K_T を求めると表 3-3 が得られる。ただし実際の設計に当っては他の周期の波についても検討を要

$d/h \backslash T$	1.2	1.6	2.0	2.4
0.143	13.5	12	18	17
0.25	21	15.5	17	22
0.31	37	23	40	27

(a) 被害率 1%

$d/h \backslash T$	1.2	1.6	2.0	2.4
0.143	28	25	32	42
0.25	86	23.5	31	55
0.31	100	39	50	50

(b) 被害率 2%

表 3-2 透過性潜堤の場合のブロックの K_D

する。つぎに反射率 K_R は d/h が一定ならば H/L が大きくなるにつれて小さくなる傾向を示すが、 $H/L > 0.06$ の範囲ではほぼ一定値に近づく。反射率は測定の難しさから観測値はバラツキが大きい、 d/h による差はそれ程ない。

以上の結果は、合田・竹田あるいは三井等の不透過潜堤の透過率についての実験結果と比較して大差なく、また堀川等による不規則波の結果、Johnson・Fucks、Morison の規則波の K_T

d/h	H/L	K_T
0.143	0.074 ~0.083	0.5 ~0.4
0.25	0.06 ~0.076	0.7 ~0.6
0.31	0.067 ~0.092	0.75 ~0.5

表 3-3 $T = 1.6$ の K_T

(H_T/H_i) とも比較的良好一致を示している

ところから、本実験

の透過率 K_T は不規則波に対しても妥当な値を与えるものとする。

§ 4 あとがき

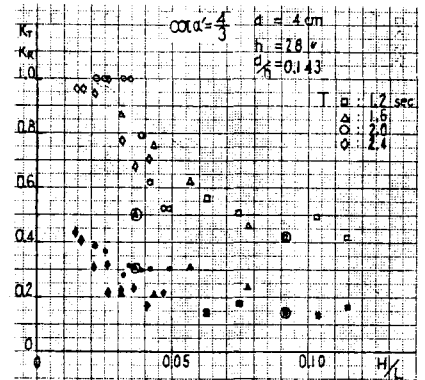
直立堤前面の消波工の中詰材の安定と透過性潜堤の安定について簡単なブロックを用いて調べた。一般に d/h の増大および被害率の範囲の拡

大によって N_s^3 や K_D も増大する。ただし透過性潜堤の一部にこれと反対の観測結果もあり、今後検討を要しよう。最終的に表 2-2 および表 3-3 から各 d/h に対する N_s^3 と K_D の最小値を図に表わせれば図 4-1 が得られる。直立堤根固の場合は $d/h = 0.195$ より先はそのまま延長し点線で示した。Ex. 被害率 2%、 $d/h = 0.3$ のときの N_s^3 は、 $N_s^3 = 23$ となり、図 2-9 の $N_s^3 = 27$ より小さい。

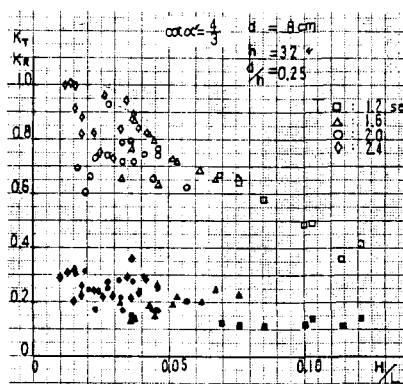
本実験研究には、北大工学部佐伯浩助教授の懇切な指導を受けたものである。感謝の意を表します。

参考文献

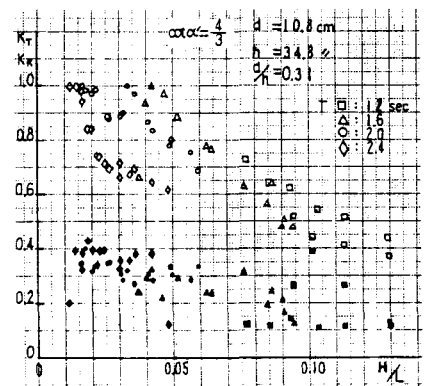
1. A. Brebner & P. Donnelly "Laboratory study of rubble foundations for vertical breakwaters" Proc. 8th conf. coastal Eng. New Mexico City. 1962 p408~429
2. 合田・竹田 "越波による防波堤背後への波高伝達率" 第 13 回海岸講 1966 p87~92
3. 堀川・小森 "潜堤による風波の減衰機構について" 第 15 回海岸講、他



(a) $d/h = 0.143$



(b) $d/h = 0.25$



(c) $d/h = 0.31$

図 3-4 透過性潜堤の K_R と K_T

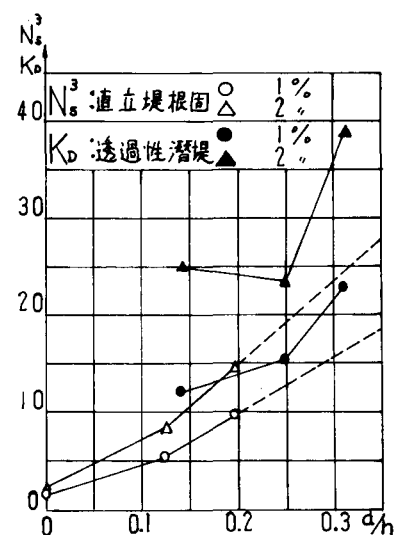


図 4-1 直立堤根固の N_s^3 と潜堤の K_D