

混成堤基礎マウンドを被覆するコンクリート方塊の所要重量

鹿 島 遼 一*・斎 藤 昭 三**・長谷川 寛**

1. 序 論

混成堤基礎捨石の所要重量については Brebner & Donnelly (1962)¹⁾ が一連の実験を行なって、設計図表を提案した。Brebner & Donnelly の実験に用いた捨石模型は やや角ばった海浜礫で粒径範囲 1.91~1.59 cm, 1.59~1.27 cm, 1.27~0.95 cm, 0.95~0.64 cm の4種であり、水深30cm, 周期1~2秒, 波高1.2~13.5 cm の条件のもとで実験が行なわれた。彼らは「無被害」の限界波高 $H_{D=0}$ を次のように定義した。

- 1) 直立部基部に接している捨石が動き出して不安定が生じるとき(底面からのマウンド高さが水深の3/4 以下のとき)

基部に接している捨石でわずかに動揺する個数が幅30 cm 当り2個を越えない限界波高。

- 2) 捨石マウンドの港外側斜面で捨石が洗い出されて不安定が生じるとき(底面からのマウンド高さが水深の3/4 以上のとき)

斜面から移動する捨石個数が1%以下である限界波高。ただし波高は構造物がないときにその地点で測られる波高である。

この限界波高を用いて、Brebner & Donnelly は実験結果を整理し、design stability number $r^{1/3} H_{D=0} / \{W^{1/3}(S_r-1)\}$ を前面水深とのり先水深の比の関数として示した。これはマウンド幅および波形勾配の影響は小さいとして、相対水深の効果については最も不安定になる場合に相当する stability number を採ったものである。また設計波としては最大波を採るべきことを提案している。しかしこの実験においては波高水深比 $H/h \leq 0.445$ であった点に注意しておく必要がある。最大波を設計波として採る以上、多くの場合に $H/h > 0.445$ になると考えられる。さらに最終的に提案された設計図表はマウンド高さ一水深比が決まると波高から一義的に捨石所要重量が決められる形式を持つために上記の注意点が見落とされやすいが、とくに低基混成堤においては波高水深比 H/h は本質的な変数と見なすべきではないかと考えられる。

一方、実際の混成堤設計に際しては捨石重量に限界が

あるために、捨石マウンドとしては100~500 kg/個の重量のものをを用い、表面に重量の大きいものを張り、直立部ケーソンを据え付けるとともに基礎マウンドをコンクリートブロックで被覆することが多い。しかしこのコンクリートブロックの所要の大きさについては系統的な研究がなされておらず engineering judgement によって設計し、模型実験によって安定性を確認することが一般的である。

筆者らはこのような形式の混成堤に用いられるコンクリートブロックの安定性に関し、主として立方塊を対象に一連の実験を行なったので以下にこれを報告する。

2. 実験方法

実験は長さ78m, 幅0.9m, 高さ1 mの造波水路の造波機側より約50m のところから1/30勾配の斜面を10m 設けて、斜面を上がった点を基礎捨石マウンドののり先として混成堤模型を設置し、のり先水深を30 cm にして、被覆ブロックの種類を変えながら4種の周期1.5 sec, 2.0 sec, 2.5 sec, 3.0 sec について造波板のストロークを徐々に上げて、ブロックの安定性と被害状況を観察した。明らかに安定である場合を除いて、判定のための標準作用時間は9分間とし、これを造波板からの反射の影響が出る時間より短い継続時間で断続しながらあてた。被害が生じた場合は元の状態におおして再度波を9分間作用させた後被害個数を求めた。マウンドの斜面は2割勾配とし、被覆ブロックの最前列にはやや大きめのブロックを用いて、すばりに抵抗を持たせた。直立部の波の進行方向長さは60 cm で越波は許さない条件とした。本

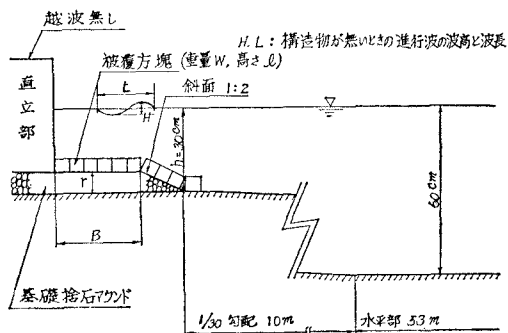


図-1 実験条件説明図

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所技術第二研究所

** (財)電力中央研究所技術第二研究所

論文で用いた記号は次のとおりである。

H : 構造物が無いときのり先地点における波高

L : 微小振幅波理論によって周期およびのり先水深から求めた波長

h : のり先水深=30 cm

r : マウンド高さ, 0, 7.5, 15, 22.5 cm の4種

B : マウンドの港外側水平部分の長さ, 15, 30 cm の2種

γ : ブロックの単位体積重量(空気中) 1.99~2.29 g/cm³

S_r : ブロックの水に対する比重

W : ブロックの重量

N : stability number $\gamma^{1/3} H / \{W^{1/3} (S_r - 1)\}$

T : 波の周期

l : ブロックの高さ

c : 限界値を示す

d : 設計値を示す

D : 被害率を示す

min : 最小値を示す

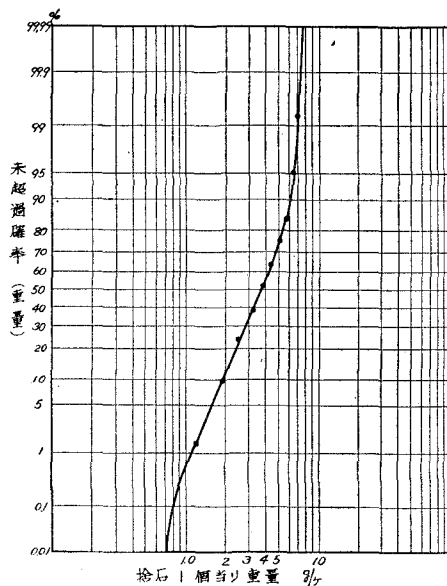


図-2 模型捨石の粒度

表-1 実験に用いた方塊の種類

No.	短辺 × 中辺 × 長辺	重量	比重	辺 比
1	20mm × 20mm × 20mm	17 g	2.21	1 : 1 : 1
2	34 × 34 × 34	88	2.15	1 : 1 : 1
3	41 × 41 × 41	140	2.16	1 : 1 : 1
4	45 × 45 × 45	190	2.29	1 : 1 : 1
5	51 × 51 × 51	296	2.24	1 : 1 : 1
6	73 × 73 × 73	860	2.21	1 : 1 : 1
1'	22 × 39 × 59	103	2.03	1 : 1.8 : 2.7
2'	27 × 50 × 74	200	1.99	1 : 1.8 : 2.7
3'	40 × 74.5 × 112	686	2.05	1 : 1.9 : 2.8
4'	51.5 × 98 × 147	1540	2.07	1 : 1.9 : 2.8
5'	31 × 39 × 59.5	155	2.14	1 : 1.3 : 1.9
6'	39.5 × 50.5 × 74	308	2.08	1 : 1.3 : 1.9
7'	57.5 × 74 × 111	985	2.06	1 : 1.3 : 1.9

なお実験に用いたブロックは表-1 に示したように立方体6種類と直方体7種類であり、立方体は鉄粉入りモルタル製、直方体は通常のモルタル製である。また実験の大部分は立方体について行ない、直方体については補足的に行なったものである。直方体の配列は短辺を高さとし、長辺が直立部の前面と平行になるようにした。また捨石模型の粒度は図-2のとおりである。

3. 実験結果と考察

(1) 立方体の場合

基礎マウンドを被覆するコンクリート立方塊の安定に関与する基本量として、相対水深 h/L , マウンド高・水深比 r/h , マウンド幅・水深比 B/h , 波高・水深比 H/h , 波高・方塊高比 H/l , 方塊比重 S_r の6個が考えられるが、比重については今回の実験では変化の範囲が小さ

く、ほぼ一定と考えて H/l とまとめて R. Y. Hudson²⁾ の導入した stability number $N = \gamma^{1/3} H / \{W^{1/3} (S_r - 1)\} = H / \{l(S_r - 1)\}$ を基本量に採ることとする。したがって実験結果は次の5個の量の関数関係として整理する。

$$\frac{h}{L}, \frac{H}{h}, \frac{r}{h}, \frac{B}{h}, N = \frac{\gamma^{1/3} H}{W^{1/3} (S_r - 1)}.$$

実験を行なったマウンド形状の種類は $B/h = 0.5$ と 1.0 および $r/h = 0.00, 0.25, 0.50, 0.75$ の計8種であり、1個のマウンド形状にたいして4~6種の立方塊を一層に敷き、周期 T を1.5, 2.0, 2.5, 3.0 sec のいずれかに固定して、順次ストロークを増しながら安定性または被害の観測を行ない、被害率が10~20%に達した後周期を変えて同様のことをくり返す方式で実験をすすめた。

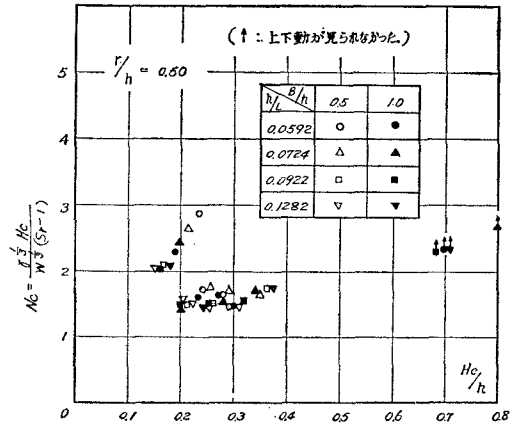
初めは安定であるが、ある波高に達すると一部で方塊の小さな揺れが見られるようになる。さらに波高を大きくして行くとこの揺れの範囲がひろがって来るとともに、多くの場合直立部に接している方塊の一部が上下運動を始める。さらに波高を大きくすると、方塊全体の揺れがますます大きくなり、上下運動を示す方塊の個数が増えて、1個2個と抜け出て行くようになり、斜面部もずれて来る。この上下運動は直立部直前から始まることが多いが、斜面においてマウンド面から直角に離れて行くこともある。最初に観察される方塊の不安定は動揺として表われるのであるが、この現象の発生はマウンド表面のならし具合や方塊の置き方等の違いによってかなりばらつきがあるのに対して、上下運動の発生は、ばらつきが小さく、かつ被害(方塊の移動)発生の直接的な徴

候と認められたので筆者らは「被害無し」の限界波高 H_c を

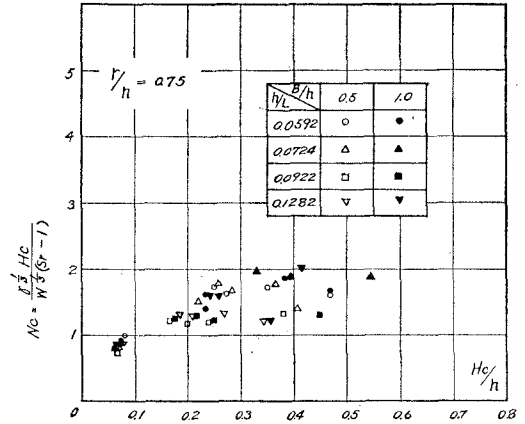
「水路幅 90cm につき、最小のブロック No. 1 の場合には 2～3 個その他のブロックの場合には 1 個が上下運動を開始する波高」

と定義した。

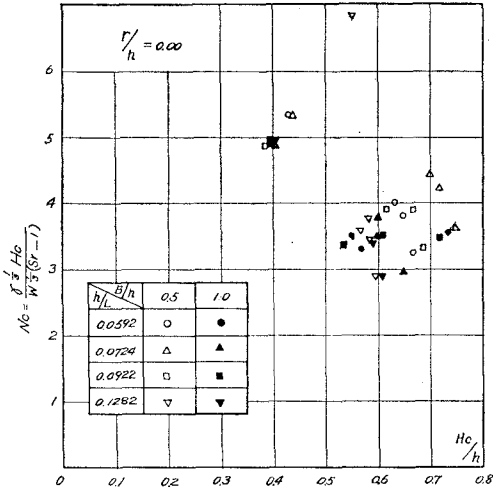
図—3～6 は r/h の値 4 種に対して、上記の限界波高から求めた限界 stability number N_c と H_c/h の関係を B/h および h/L をパラメーターとしてプロットしたものである。 B/h の差に関しては系統的な変化が見られず、Brebner & Donnelly の結果と同じくマウンド幅の影響は無視できる。また N_c が r/h の増すとともに、すなわちマウンド高さが増すとともに減少していることが明らかである。さらに H_c/h が増すにしたがって N_c は大体減少する傾向にあることが認められる。一方 h/L の効果を見るにはこのままでは不便であるので、各マウ



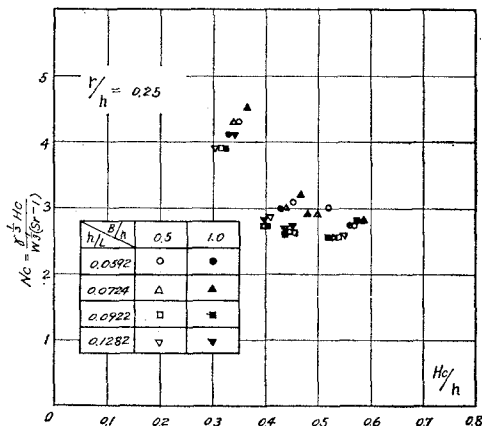
図—5 限界 Stability number ($r/h=0.50$)



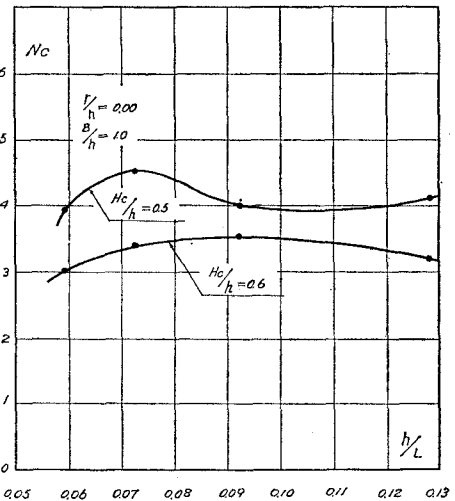
図—6 限界 Stability number ($r/h=0.75$)



図—3 限界 Stability number ($r/h=0.00$)



図—4 限界 Stability number ($r/h=0.25$)



図—7 限界 Stability number に対する周期の影響 ($r/h=0.00$)

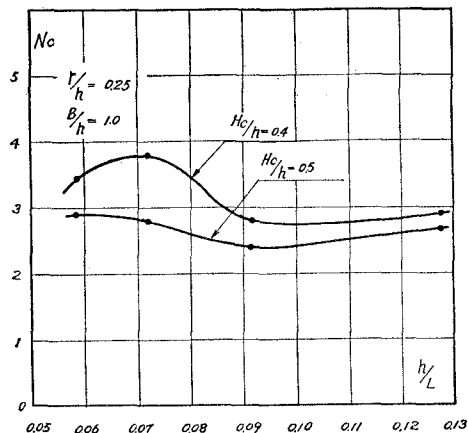


図-8 限界 Stability number に対する周期の影響
($r/h=0.25$)

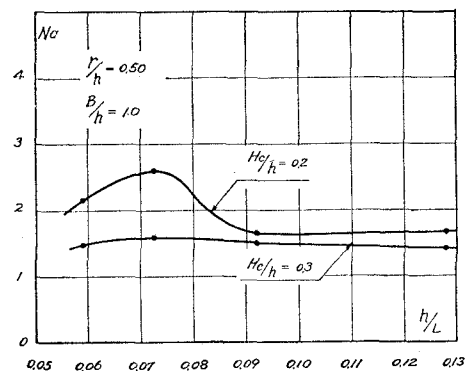


図-9 限界 Stability number に対する周期の影響
($r/h=0.50$)

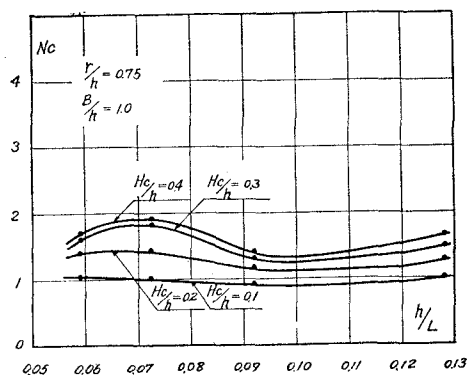


図-10 限界 Stability number に対する周期の影響
($r/h=0.75$)

ンド高さにつき、 $B/h=1.0$ の場合のデータから一定 H_c/h について h/L ごとに N_c の値を内そうして求め、これをプロットして図-7~10に示した。明らかに N_c

は h/L の関数となっており、周期の影響が見られる。 H_c/h が小さい方が h/L による N_c の変化は大きく、 $h/L=0.07$ 付近に N_c の極大と $h/L=0.10$ 付近に N_c の極小が表われるが、 H_c/h が大きくなると N_c の値の差は少なくなり、極大が極小のどちらかがなくなっている。しかし N_c の変化は H_c/h による方が大きいことが認められる。また H_c/h に関する N_c の変化傾向の方が単純であり、通常、構造物の設計に際しては、港内の静穏度を除けばほとんど設計波高だけが問題になるので、設計図表にまとめる段階では各 H_c/h に対して N_c の下限を採る必要がある。 N_c の下限を r/h をパラメーターとして H_c/h に対して示したのが図-11である。

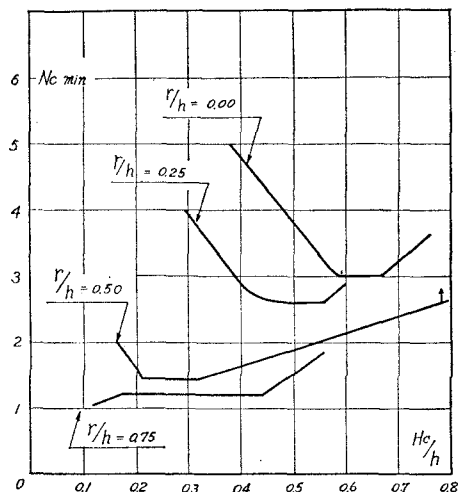
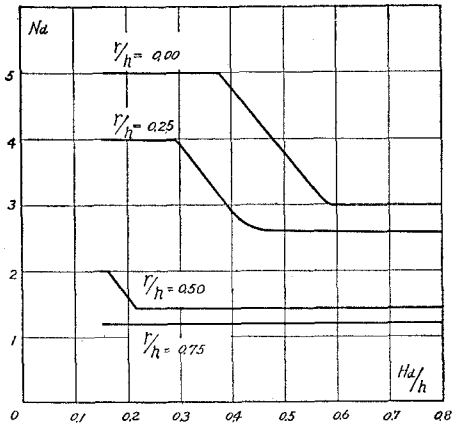


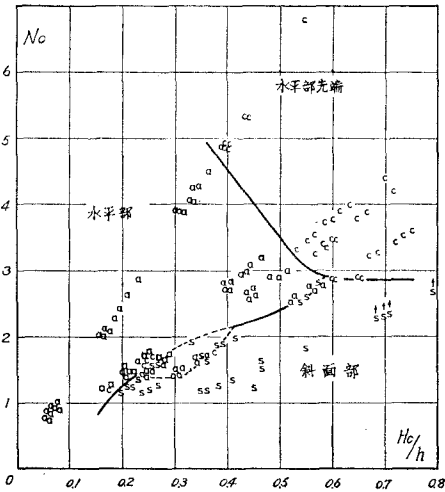
図-11 限界 Stability number の下限値

限られた大きさの立方体による実験であったためにマウンド高さの大きいところでは H_c/h の大きい範囲、またマウンド高さの小さい範囲では H_c/h の小さい範囲のデータが不足しているが、設計には安全側に見積もるように H_c/h の大きいところでは中間の $N_{c \min} = \text{const.}$ となる値をそのまま用い、 H_c/h の小さいところでは、実験できた範囲の最高の $N_{c \min}$ を用いて、 $r/h=0.75$ の場合の $H_c/h < 0.15$ で $N_{c \min}$ が減少しているところは本実験から導く設計図表では $H_c/h \geq 0.15$ の範囲だけを対象とすればほとんどの設計条件に十分利用できるのでこれを除くものとする。このような外そうによって求めた design stability number を図-12に示す。マウンド高さが高くなるにしたがって波高水深比 r/h の影響がなくなる形を示している。

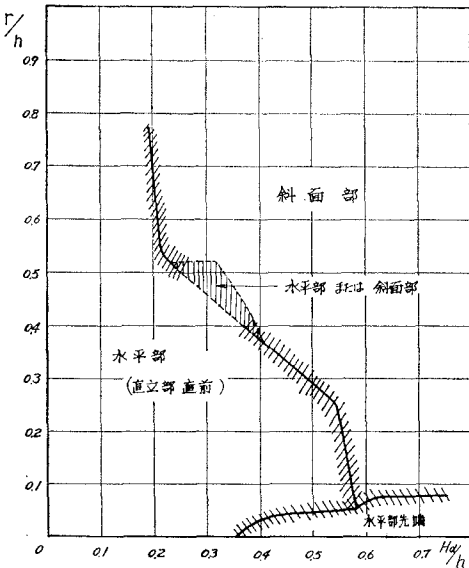
一方図-3~6にプロットした限界条件がどの部分で生じたかを示すと図-13のようになり、これを $r/h-H_c/h$ 面に書きなおして図-14に示した。これは被害の初生個所とほとんどの場合一致している。これによると



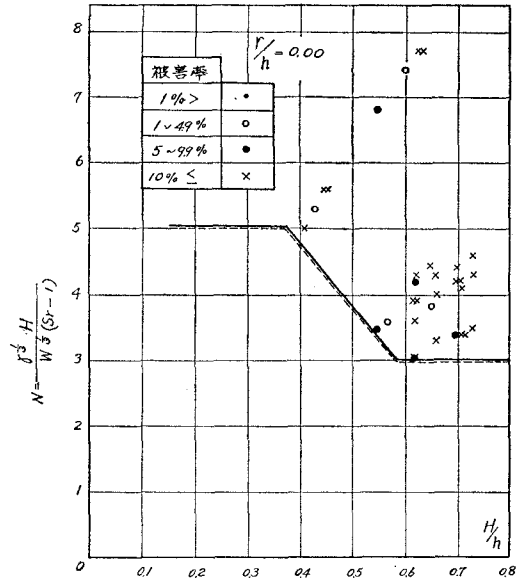
図一12 設計 Stability number とマウンド高比、比波高の関係



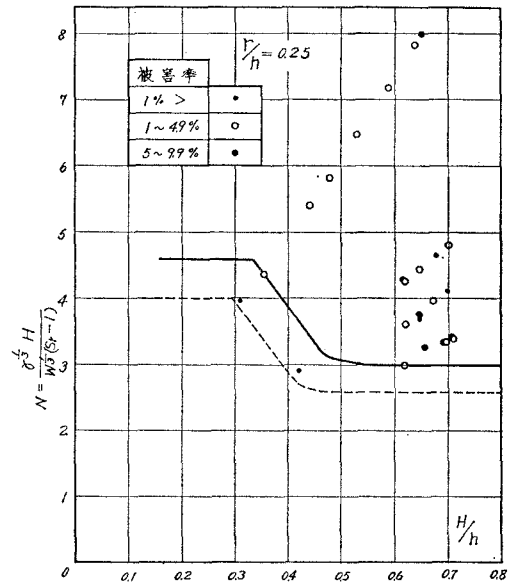
図一13 限界状態の初生部位



図一14 本設計法による時の不安定初生部位


 図一15 被害率と Stability number 比波高の関係 ($r/h=0.00$)

(点線は安定限界、実線は被害率5%以下の限界を示す)


 図一16 被害率と Stability number 比波高の関係 ($r/h=0.25$)

H_d/h が大きいと斜面部から不安定になり始めること、またマウンド高さが高くなるにしたがって、 H_d/h が小さい場合でも斜面部から不安定になることが認められる。マウンド高さが低いときは、直立部直前から被害が出やすい傾向もうかがえる。

次に被害率について図一15~18に示した。ここに示した設計法を用いた場合に、被害率がせいぜい5%であ

る限界波高は設計波高の何倍と見れば良いかという観点で限界を定めるとマウンド高さにより1~2倍となる(図-19)。これから見ても少なくとも $r/h \leq 0.25$ のときには、設計波として最大波を採るべきであるといえよう。

図-13は設計図表としては方塊の大きさから限界波高を見出すのに不便であるので図-20を提案する。なお筆者らの実験における周期の範囲は現地に換算すると、現地水深により図-21のとおりである。

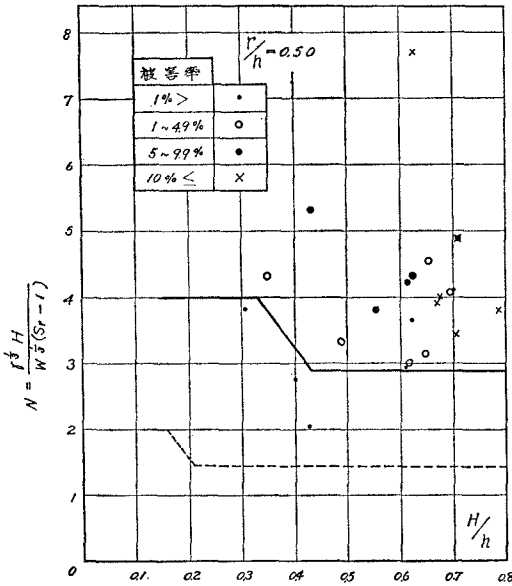


図-17 被害率と Stability number 比波高の関係 ($r/h=0.50$)

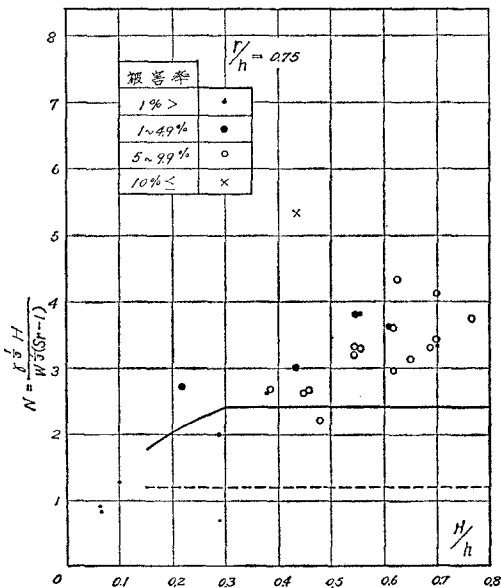


図-18 被害率と Stability number 比波高の関係 ($r/h=0.75$)

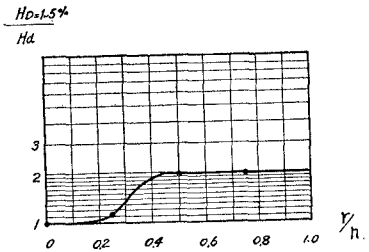


図-19 設計波高と被害率5%以下となる限界波高の比

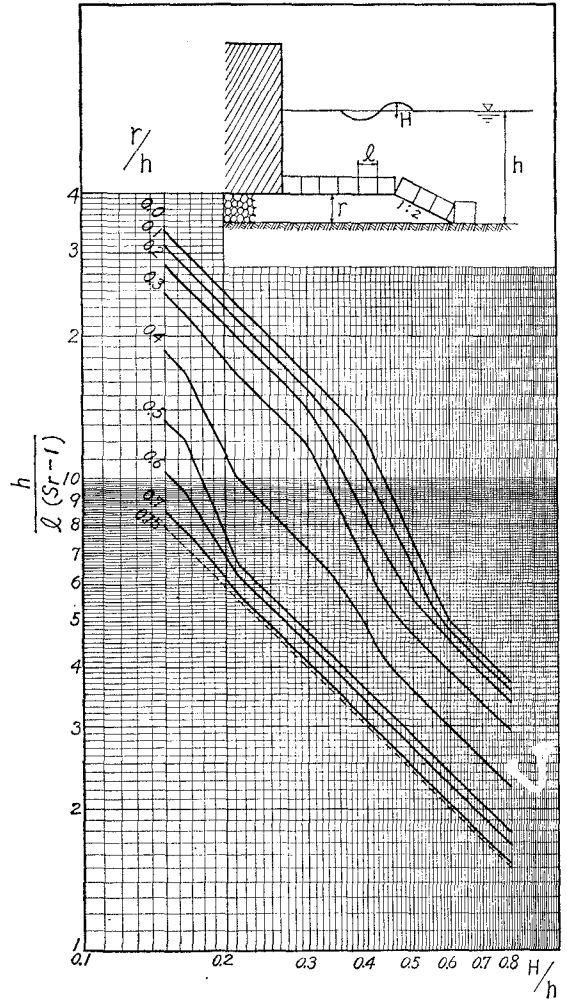


図-20 混成堤基礎マウンドを被覆する立方塊の設計図表 (Sr 方塊比重)

(2) 直方体の場合

前節に述べた実験を直方体1'~7'についても補足的に行なった。筆者らは立方体を数個一体にすれば当然上下運動の発生限界波高は高くなると考えていたのであるが、辺比約1:2:3および1.5:2:3の2種の形状について立方体のときと同じく N_c 下限条件を採ると、同じ

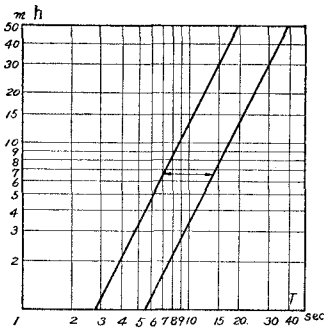


図-21 実験を行なった周期範囲に
相当する現地周期範囲

厚さの立方体にくらべて $r/h=0.0$ のとき、 $0.75 \sim 1.0$ 倍、 $r/h=0.25$ のとき 0.65 倍の限界波高を示したことは意外であった。 $r/h=0.5$ および 0.75 については検討していないが、このような傾向が見られることは少数ケースの実験から予想できる。

4. 結 論

(1) 立方塊の混成堤基礎マウンド被覆材としての設計に関し 図-20 を設計図表として提案する。

(2) 筆者らの実験周期範囲は 図-21 に示したとおりであり設計条件が範囲外にある場合は別途検討を要すると思われる。

(3) 筆者らが補足実験を行なった限りでは辺比 $1:2:3$ ないし $1.5:2:3$ の直方体の短辺を厚さ方向として被覆材に用いることは経済的に不利である。

参 考 文 献

- 1) Brebner, A. & P. Donnelly : Laboratory Study of Rubble Foundations for Vertical Breakwaters, 8th Conf. Coastal Engineering (1962)
- 2) Hudson, R. Y. : Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters, Proc. ASCE, Vol 85, WW3 (1959)