

捨石防波堤斜面上の共振現象による破壊機構

榎 木 亨*・柳 青 魯**・大西 明 徳***

1. ま え が き

近年捨石防波堤の安全性における波の周期の影響が取り挙げられ、特に斜面上のそ上波周期、 T^* (打ち上げ波の run-up と run-down の周期) と入射波周期、 T が一致した時生じる斜面上の共振現象が安定条件に重要な支配要素である事が指摘されている^{1),2)}。しかしそれらの研究は斜面上の流況変動から共振の危険性を指摘しただけで共振現象による破壊状況については今までほとんど検討が加えられていない。本研究では水理模型による捨石堤の破壊実験を行い、周期の変化に伴う斜面上の流れ特性の変化と流体力変動、それによる破壊特性を明らかにしようとするものである。特に周期の影響が最も強く現われる共振現象による破壊機構をその流体力変動特性と破壊とを結び付けて考察を進めている。

2. 水理実験と解析方法

2.1 流れ特性と破壊実験

本実験は入射波特性と防波堤斜面上の流れ特性及び捨石堤の破壊状況を同時に測定できるように片面ガラス張りの2次元水槽の中央部に隔壁板を設けて2分割し、ガラス張り側に模型防波堤を作って実験を行ない、他方においては波の特性変化を調べた。

模型は縮尺率を4種類とし Froude 相似則によってそれぞれ 1/126, 1/100, 1/50, 1/40 ($W_{\text{proto}}=20$ ton 砕石) に縮尺した捨石堤を用いた。なお捨石堤の斜面勾配としては 1:1.5, 1:2.0, 1:3.0 の3種類選び、さらに Core 部については透過性のものと不透過性の二種類を設定した。実験条件としては堤防の法先水深 ($h_{\text{proto}}=20$ m) と水底勾配 (1/40) は固定し、入射波周期は 0.6~2.5 sec ($T_{\text{proto}}=6\sim18$ sec) で各周期に対し波高を連続的に増大させて各破壊率に対する破壊限界を求めた。なお破壊が生じる CASE に対して直径 2~3mm のスポンジ製の tracer (水中での比重は 1.0) の斜面上の動きを 16mm 高速 cine camera (50 コマ/sec) で撮影し、その写真解

析によって石の動きと共に水粒子速度を求めている。同時に mini propeller 型の正逆流速計を用い斜面上の水粒子加速度をも算出している。

2.2 破壊率の算定

従来捨石堤被覆工の破壊率 ($D\%$) は式 (1)、または式 (2) のように定義して求める事が多い。

$$D(\%) = \frac{n}{N} \times 100 \\ = \frac{\text{斜面上で移動した被覆工数}}{\text{斜面上の全被覆工数}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$D(\%) = \frac{n_i}{N_i} \times 100 \\ = \frac{\text{任意領域}(i)\text{で移動した被覆工数}}{\text{任意領域}(i)\text{での全被覆工数}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(2)$$

本研究では図-1のような捨石堤の破壊特性を考慮して最も激しい破壊を生ぜしめる入射波によって破壊が core 部まで進行した図-1の①の断面の場合を破壊率 $D=100\%$ と規定する。いま他の波によって図-1の②

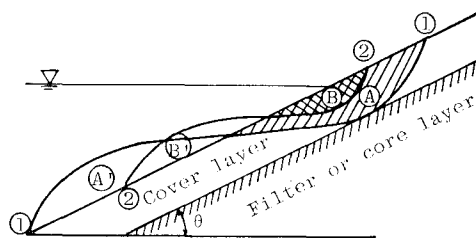


図-1 破壊率の定義

の断面形をとった時その破壊率 $D(\%)$ は図-1の破壊部の断面積 A, B を用いて次のように定義する。

$$D(\%) = (B/A) \times 100 \quad \dots\dots\dots(3)$$

3. 捨石防波堤斜面上の水粒子運動

3.1 最大水粒子速度及び加速度

まず防波堤斜面上の最大水粒子速度の入射波特性 (波高 H , 波長 L), 構造物特性 (法面角度 $\tan \theta$, 斜面の粗度, 透過性) による変化を明らかにしておこう。捨石斜面上の水粒子速度, V の無次元量, $V/\sqrt{gH}$ は次元解

* 正会員 大阪大学教授 工学部土木工学教室

** 学生員 大阪大学大学院工学研究科

*** 正会員 愛媛県土木部

析によって次のように種々の無次元量によって影響をうける。

$$V/\sqrt{gH}=f_1(H/h, \tan \theta/\sqrt{H/L_0}(\xi), \theta, d/h, e) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに ξ は surf similarity parameter であり, H は波高, h は法先水深, θ は法面角度, d は粗度高さ, e は防波堤の透過性, g は重力加速度である。

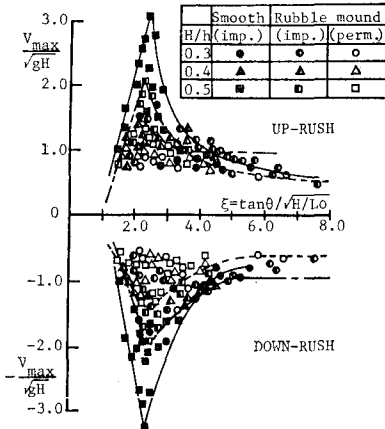


図-2 最大水粒子速度の ξ に伴う変化

図-2 は不透過滑面上, 不透過捨石斜面上及び透過性捨石防波堤斜面上の最大水粒子速度の ξ に伴う変化を示したものである。その値は各構造形式によって異なるが, $2.0 < \xi < 3.0$ の範囲において急激に増大していることが認められる。著者らは先に不透過斜面において $2.0 < \xi < 3.0$ で共振現象を生じることを指摘したが²⁾, 透過性においてもその共振の発生領域は変化せず, その斜面特性によって peak 値が減少していることがわかる。すなわち不透過滑面の場合は 3.0, 不透過捨石斜面で 2.0, 透過性捨石斜面上で 1.3 という値を示す。また同図の H/h の効果も明示してあるがいずれの場合も $H/h=0.5$ で最大値を示し, 波高水深比 (H/h) も斜面上の水粒子速度に大きく影響してくるのがわかる。その事実は共振現象の一つの発生条件 $H/h \geq 0.45$ とも密接な関係をもつものであろう。また ξ の増大に伴ってこの $V_{\max}/\sqrt{gH}$ は除除に減少し, $3.0 < \xi < 4.0$ 領域の不透過性斜面では滑面, 粗面ともほぼ同一値に近くなって斜面粗度による影響がほとんど見出されなくなっている。しかし透過性捨石斜面の場合この領域においても明瞭な差が生じており, 特に down-rush 時における差が著しい。これは斜面上のもどり流れの効果が大きいと考えてよかろう。さらに ξ が増大して $\xi \geq 4.0$ になると $V_{\max}/\sqrt{gH}$ は ξ によって殆んど変化しなくなる。これらの事実は前報でも指摘したように Hudson 式の基礎となっている仮定, $V_{\max} \propto \sqrt{gH}$ は $\xi > 4.0$ では満足しているが $2.0 < \xi < 3.0$ においては $V_{\max}$ は ξ の関数となり Hudson 式の仮定が

成立しなくなること示している。したがってこの共振領域においてほかの共振発生条件 ($H/h > 0.45$, 斜面勾配 θ , 透過性 e の変化, 相対粗度 d/h) を考慮してその $V_{\max}/\sqrt{gH}$ の変化を十分に検討することが必要となる。

水粒子速度の変化と同様に入射波特性 (ξ) による透過性捨石防波堤斜面上の水粒子加速度の変化を示したのが図-3 である。図中の実線は浅海波理論から求めた最大

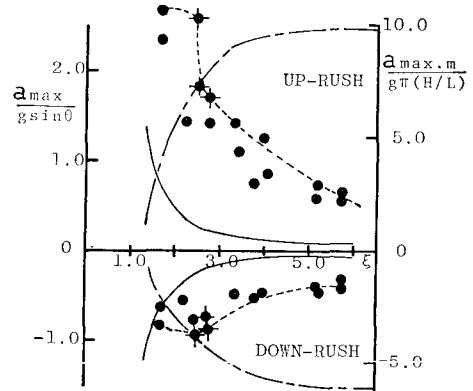


図-3 最大水粒子加速度の ξ に伴う変化

水粒子加速度の無次元量 ($a_{\max}/g \sin \theta$) であり, 一点鎖線は実測値と理論値の割合 ($a_{\max-\text{measured}}/g\pi(H/L)$) を示す。● は共振現象が生じた場合を示している。全体的にみて ξ が小さくなるに従って $a_{\max}/g \sin \theta$ は大きくなる傾向を見せ斜面上の碎波による加速度項の増大を現わしているが down-rush 時において $2.0 < \xi < 3.0$ で Peak 値を示し斜面上の共振現象における加速度変化の特徴をあらわしていると考えられる。先の水粒子速度変化と併せ考えるとこのような現象は不透過堤の場合更に強く現われると考えられる。なお加速度の絶対値が大きくなり破壊現象に大きく寄与すると考えられるのもこの図からみると $2.0 < \xi < 3.0$ の領域であり, またこの領域では理論的に求めた値 (実線) との差も大きくなっている。すなわちその差は up-rush の場合 6~9 倍, down-rush 時においては 4 倍にも達する。このように共振領域においては水粒子速度の急激な変化のみならず水粒子加速度の増大が認められ, この点からも共振現象は破壊に極めて重要な要素をもつことが推定できる。さらにこの領域に対しては水粒子運動をあらわすのに浅海波理論を用いると作用流体力が過少評価され危険側の設計になることは明らかである。

3.2 斜面上の水粒子速度及び加速度分布

斜面上の位置による水粒子運動の変動は破壊の場所的特性と極めて密接な関係をもつであろう。図-4 (a), 図-4 (b) はそれぞれ最大水粒子速度及び加速度の斜面上の変動を示したものであり同一場所での data のばら

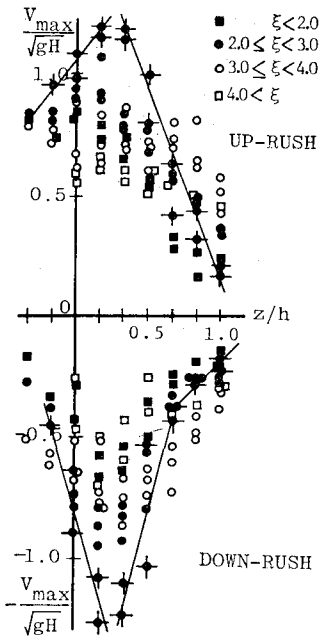


図-4 (a) 透過性捨石堤斜面上の最大水粒子速度分布

つきは入射波特性による差である。図中の $\bullet$ 記号は図-3と同様共振現象が生じた場合の変動特性であり、図中の実線はこの共振時の値を結んだものである。この図から up-rush, down-rush とも S.W.L. 直下部において peak を示す。したがってこのような分布から破壊は S.W.L. より少し低い $z/h=0.1\sim 0.2$ の箇所が破壊をうけ易いと推定できる。この傾向は共振時非共振時ともに共通している。

4. 共振現象による捨石堤の破壊特性

4.1 捨石堤の破壊に作用する流体力の変動特性

捨石堤の安定を論ずる際、一般的に波による作用外力と斜面上の被覆工の抵抗力との釣り合いをもって限界としている。すなわち

$$F_{(t,a)} \leq R_{(t,a)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに $F_{(t,a)}$ は各外力成分の任意時間 t における vector 和であり、 $R_{(t,a)}$ はそれに対する抵抗力である。

$$F_{(t,a)} = (F_d + F_m)_t \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$R_{(t,a)} = (R_p + R_n)_t \quad \dots\dots\dots (7)$$

(6) 式の各分力は次のように表現できる。

$$F_d = \rho_w / 2 \cdot C_D A U |U| \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$F_m = \rho_w C_M V (dU/dt) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに A は被覆工の単位面積、 V は体積であり、 A 、 V の算定に当たっては形状係数 k をも考慮しなければならない。一方式 (7) における R_p は斜面平行力成分に対する被覆工の抵抗力であり主として底面との摩擦力によって決定される。また R_n は斜面直角方向力成分に対す

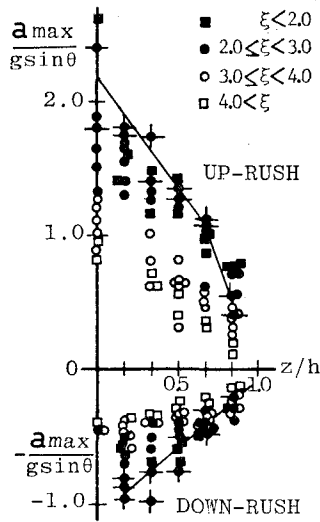


図-4 (b) 透過性捨石堤斜面上の最大水粒子加速度分布

る抵抗力で被覆工間の側面摩擦力によって左右される件である。したがって件の摩擦係数 (μ_a) が求められると次のように抵抗力があらわされる。

$$R_{(t)} = W(\mu_a \cos \theta - \sin \theta) \quad \text{for down-rush} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$R_{(t)} = W(\mu_a \cos \theta + \sin \theta) \quad \text{for up-rush} \quad \dots\dots\dots (11)$$

先に述べたように式 (8)、式 (9) における斜面上の水粒子速度 (U) 及び加速度 (dU/dt) は浅海波理論によって求めることはできないが、これに任意の関数 c_1 、 c_2 を乗じて修正し次式のように表わすことができるものと仮定する。ここに c_1 、 c_2 は ξ によって変動する関数である。

$$U|U| = c_1 h H \sin \phi |\phi| \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$dU/dt = c_2 \sigma H C / 2h \cdot \cos \phi \\ = c_2 g \pi (H/L) \cos \phi \quad \dots\dots\dots (13)$$

これらの式を式 (5) に代入すると斜面平行方向力のみを考慮する場合の力の釣り合い式は down-rush 及び up-rush に対してそれぞれ次式をうる。

$$\rho_w / 2 \cdot C_D A c_1 g H \sin \phi |\phi| + \rho_w C_M V c_2 g \pi (H/L) \cos \phi \\ \leq W(\mu_a \cos \theta - \sin \theta) (\rho_r - \rho_w) / \rho_r \quad \text{(for down-rush)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\rho_w / 2 \cdot C_D A c_1 g H \sin \phi |\phi| + \rho_w C_M V c_2 g \pi (H/L) \cos \phi \\ \leq W(\mu_a \cos \theta + \sin \theta) (\rho_r - \rho_w) / \rho_r \quad \text{(for up-rush)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

従来の Hudson 公式においては式 (14) のような down-rush 時の釣り合い式から外力の第 2 項 (慣性力項) を無視し、第 1 項の抗力 (F_d) のみが破壊に影響すると仮定したものであり、図-3 に示したように共振現象が生じる時の加速度項の急増する事実を考慮すると共振時の破壊条件としては過少評価をしているといわざるをえない。Hudson 公式において無視されている慣性力 (F_m)

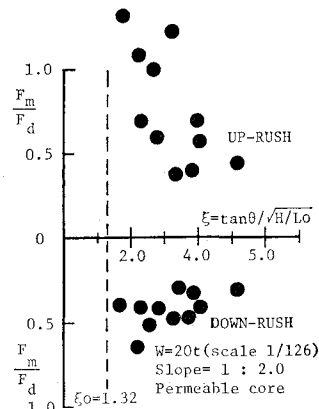


図-5 慣性力 (F_m) の ξ に伴う変化

を定量的に評価したのが図-5であって $\xi=2$ 近傍では抗力 (F_a) と同程度あるいはそれ以上値を示すことがわかる。ここに F_a 及び F_m は実測の斜面平行方向の水粒子速度及び加速度を用い式 (8), 式 (9) から求めたのである。

4.2 捨石防波堤の破壊と共振現象

以上明らかにしてきた流れ特性及び流体力変動特性と捨石堤の破壊限界の結果とを対比せしめることによって共振現象と破壊限界との関係をさらに明らかにしていく。図-6 (a) と図-6 (b) は透過及び不透透性防波堤

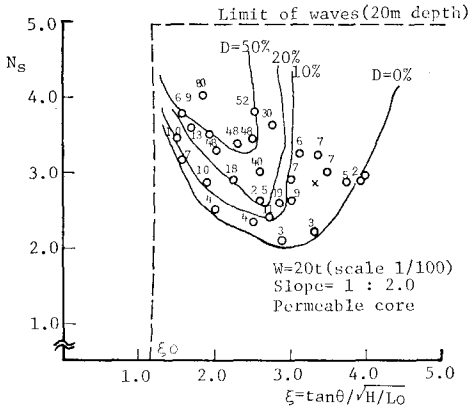


図-6 (a) 透過性捨石堤の破壊特性

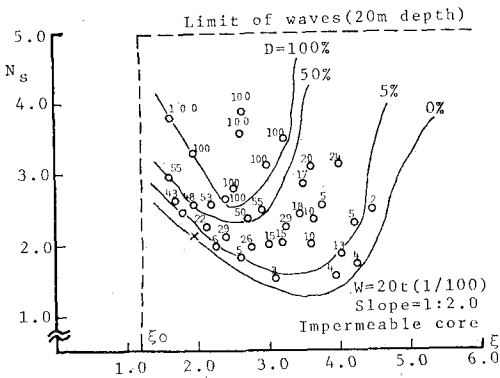


図-6 (b) 不透透性捨石堤の破壊特性

の破壊実験の結果をその破壊率 ($D\%$) ごとにとりまとめた $\xi-N_s$ 曲線で示した一例である。ここに $N_s = (K_D \cot \theta)^{1/3} = \rho_r^{1/3} H_D / (\rho_r \rho_w - 1) W^{1/3}$ である。図中の ξ_0 は斜面勾配における Michell らの与えられた砕波限界で次式で与えられる値である。

$$H_0 = 0.266T^2 \quad (T: \text{sec}, H_0: \text{m}) \quad \text{for } h/L > 0.5 \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$H_0 = 0.142L \tanh(2\pi h/L) \quad \text{for } 0.1 < h/L < 0.5 \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$H_0 = 0.78h \quad \text{for } h/L < 0.1 \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$\xi_0 = 2.65 \tan \theta [(H/L_0)_{\max} = 0.142] \quad \dots\dots\dots(19)$$

流体力変動特性を示した図-5と同様に波の周期の変化によって同じ波高でも破壊率は大きく変化し、同じ破壊率に対するもっとも低い安定係数 (N_s) はいずれも共振領域 ($2.0 < \xi < 3.0$) に存在していることがわかる。ただ図-6 (b) において破壊の初期 ($D=0\%$, 5%) 領域が $3.0 < \xi < 4.0$ になったのは不透透性による反射波の影響及び斜面上のもどり流れの水量に支配される要因と考えられる。他方著者らは透過性防波堤に対する ξ の変化にともなう反射率の変化を明らかにしたが、これによる共振領域においては反射率の差がほとんどないことがわかった。この事実から激しい破壊は反射率の変化に依存するのではなく、共振現象の強さが破壊の程度を左右するものと考えることができる。図-6 (a) 及び図-6 (b) において破壊率が大きい場合は ξ の小さい方に移行していている。この事実は図-5の慣性力の変動特性と一致する。この点から激しい破壊状況になると慣性力の影響がかなり支配的なものとなることが推定できよう。

なお破壊状況に対する斜面勾配の影響を観察すると当然のことながら勾配が緩やかな時には up-rush 時の破壊が卓越し、急勾配のときには down-rush 時の破壊が進行し易い。また共振現象による破壊は斜面勾配が $1:3.0$ よりゆるくなると著しく弱められる。一方斜面勾配が $1:1.5$ より急になると共振現象はおこりにくくなり、斜面上の砕波衝撃力による破壊が卓越する。これらのことをあわせ考えると共振現象の発生条件から捨石堤の断面構造特性を工夫することによって捨石堤崩壊を防ぐことが可能となるであろう。

4.3 破壊の進行における波の持続時間の効果

捨石防波堤の破壊特性において重要な要素として考えられるものに高波 ($H_i > H_D$) の持続時間があげられる。波の持続時間と破壊率の変化の関係を求めてみたのが図-7 である。図-7 (a) は透過性捨石堤、図-7 (b) は不透透性捨石防波堤を対象としたものである。この実験は zero damage 波高 (H_D) の 1.7 倍となる入射波高

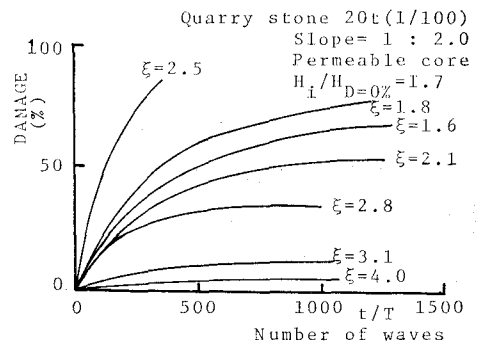


図-7 (a) 破壊率における波の持続時間効果 (透過性捨石堤)

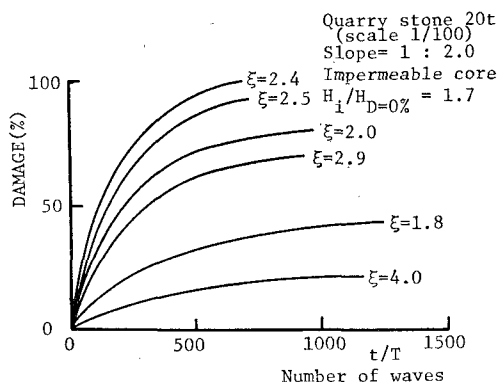


図-7 (b) 破壊率における波の持続時間効果 (不透水性捨石堤)

を作用させ、周期を変化させて作用波数 (t/T) による破壊の進行を測定した結果である。これによると透過性の有無に関係なしに共振現象が生じる $2.0 < \xi < 3.0$ において破壊率は急激に増大し波の作用時間が短時間でも破壊は進行する。なお共振現象の生じない ξ の大きい値では破壊の進行は緩やかであり長時間波を作用させても破壊率は増大しない傾向が示されている。同じく波高増大 (H_i/H_D) に伴う破壊率の変化も共振の発生領域で急激でありわずかな波高の増大により激しい破壊が生じることが図-8から容易に納得できる。また破壊が進行して任意の安定な斜面になると破壊はそれ以上進行しない性質をもっているがその破壊が限界に達した地点での断面の構造的特性の一例が図-9に示されている。図-9は初期断面上に周期 2.5 sec, 波高 17.5 cm の波を 1000 波

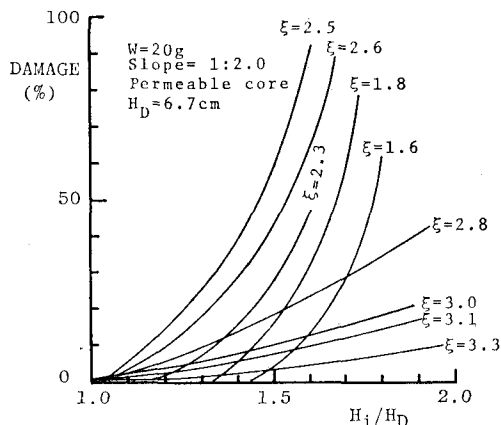


図-8 波高増大による破壊率の変化

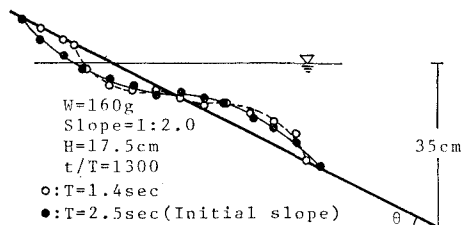


図-9 入射特性による破壊の場所的特性

程度作用させて破壊しなかった防波堤につづいて同一波高に周期を 1.4 sec に変化させ共振現象が生じるような状態で点線のような破壊後の平衡断面が得られた。さらに先に作用せしめた周期 2.5 sec 波高 17.5 cm の波を再度作用させたら実線のような最終断面になったものであり共振現象によって水粒子運動特性と同じく S.W.L. 附近が集中的に深く破壊されその平衡勾配は静水面において急峻となり非共振時の初期断面で破壊しなかった波によって今度は構造的に不安定な S.W.L. 上部に広がっていく様子がみうけられる。この事実は共振現象による破壊がその破壊型式の面でも捨石堤の破壊の原因にもなりと同時に静水面上部の断面を破壊に導くこととなる。

5. 結 語

以上著者らはまず水粒子の速度変動及び加速度変動の実態解明から流体力変動を明らかにし、ついで破壊の実態との関係を考察してきた。その結果破壊は共振現象時にもっとも大きく現われることを言及した。

さらにその波の持続時間と破壊の進行度及び破壊後の安定断面についても考察を加えたが今後この安定断面をさらに詳細に検討し、その断面内で共振現象がおこらない方法について研究を進めていきたいと考えている。最後に本研究の実験に協力していただいた現在大阪大学大学院楠見正人君に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Bruun, P. and P. Johannesson: Parameters affecting stability of rubble mounds, closure. ASCE, Jour. of Waterway, Port and Coastal Ocean Div., WW4, pp. 533~566, 1977.
- 2) 榎木 亨・岩田好一郎・小林 眞: 防波堤斜面における共振現象の発生限界と発生確率, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 352~356, 1981.
- 3) Hudson, R. Y.: Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, ASCE, Jour. of Waterways and Harbor Div., WW3, pp. 93~121, 1959.