

防波堤斜面における共振現象の発生限界と発生確率

榎 木 亨*・岩田好一朗**・小 林 眞***

1. 共振現象とは

捨石防波堤で代表される捨石堤の安全性の論議は、1978年ポルトガルのシネス港の災害を機に急速に高まってきているが、これら海岸構造物の安全性の論議は、外力の不規則性の設計への導入と設計公式のみなおしの二つに大別して考えられよう。前者の考え方は合田の提案する最大波浪の概念の設計への導入で代表されるものであり、後者の考え方については古くは防波堤に対する衝撃波力の導入、近年においては重複波領域、碎波領域を共通した波圧公式で表示しようとした合田の新波圧算定式がある。しかしながら、上述のような安全性の再検討は、いづれも不透過な混成堤を主体とするものであって、防波堤の原型である捨石堤の安定性については1938年に発表されたIribarrenの考え方を改良したHudson公式(1959)に基づくことが多く、その設計条件に対する上述のようなみなおしは行われておらなかった。近年、先述のシネス港災害に対しての再検討において、Per Brunnらは斜面上の共振現象(resonance)が捨石の安定性に重要な要素であることを指摘している¹⁾。

この斜面上の共振現象とは、斜面において打上げ波のrun-upとrun-downの周期(遡上波周期、 T^*)と入射波の周期、 T が一致した時に生じる現象で、打上げ波のrun-downの最も低い位置でsurging breakerに近いplunging breakerが生じて水塊が斜面に垂直に衝突し、その時大きな巻き込みを発生して異常な波力を発生すると報告されている。しかしながら、Brunnにおいてもこの共振現象が捨石堤の安定に対して危険なものであると指摘するのみで、捨石の安定性に直結する水粒子速度の特性及び発生条件については殆んど検討が加えられていない。衆知の様に捨石の安定重量の算定に用いられるハドソン公式は、「波による水粒子速度は入射波高の $1/2$ 乗に比例する」という仮定に基づいている。しかしながら上述の共鳴現象時においてこのような仮定が成立するかどうかは疑問であり、ハドソン公式の妥当性の検討のた

めにも共振時の水粒子速度の実態を明らかにしておかなければならない。一方現地の波は不規則な波であるから共振現象がいつれの波の場合においても生じるとは考えられないが、その共振現象の発生確率を的確に予測することは捨石及び異形ブロックらの防波堤被覆材の合理的な設計に当って重要な事項となろう。したがって本論では、まず防波堤斜面における共振の発生限界と水粒子速度の関連性を規則波に対して明らかにし、従来の捨石重量の算定式であるハドソン公式の妥当性について論じる。ついで、不規則波による共振の発生確率をsurf similarity parameterの連と関連づけて明らかにしようとするものである。

2. 水理実験

本実験は1.でも述べたように規則波の実験と不規則波の実験の二つに大別して行われた。用いた斜面は不透過滑面(ベニヤ板斜面)、不透過性粗面(合成樹脂板に径1.0~2.0cmのシリコン製半球を接着)及び透過性粗面(直径48mm, 6.9mm, 13.8mmの円孔を有するベニヤ板製)の三種類で、それぞれの斜面の斜面角度 25° , 30° , 35° , 40° に変化させて実験が行われた。なお規則波実験は波高3cm~7cmの18種類の波であり、不規則波実験は有義波高 $H_{1/3}$ が3~5.4cm、有義波周期0.75~1.10secの6種類の波を用いている。なお不規則波実験については不透過滑面の斜面のみを用いて実験を行っている。

斜面上の水粒子速度は直径2~3mmのスポンジ・トレーサー(水中での比重1.0)の移動状況を16mm高速シネカメラ(50コマ/sec)で撮影し、その写真解析により求めた。また共振現象と密接な関係をもつ波のrun-up及びrun-downについては、銅のプリント基板をエッチング液に溶かし、2本の線だけを平板上に残る遡上計及びベニヤ板上に1mm程度浮かして抵抗線を張った遡上計を用いて計測した。

3. 規則波における共振現象とその発生限界

3.1 不透過滑面の斜面の場合

共振現象の発生限界を検討するに先だって、防波堤斜

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 株式会社大林組 土木部設計課

面上の波による最大水粒子速度の法面角度 $\tan \theta$, 波の特性, 波高 H , 波長 L , 防波堤の設置水深 h_0 などによる変化を明らかにしておこう。

斜面上の最大水粒子速度 V_m の無次元量 $V_m/\sqrt{gH}$ は次元解析の結果, surf similarity parameter $\xi = \tan \theta / (H/L_0)^{1/2}$, $\tan \theta$, 及び H/h_0 によって左右されることが容易に導くことができる。

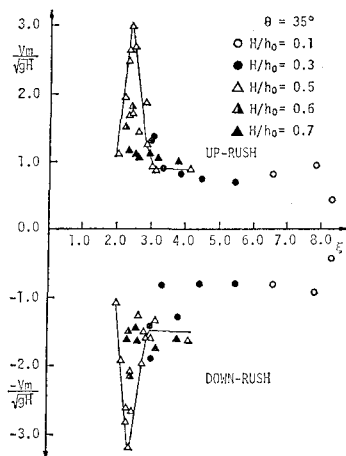


図-1 不透過滑面における最大水粒子速度の ξ に伴う変化

図-1は $\tan \theta$ を一定にした場合の ξ に伴う $V_m/\sqrt{gH}$ の変化を示した1例であって, $2.0 < \xi < 3.0$ の範囲において急激に最大水粒子速度が増加していることがわかる. すなわち $\xi > 2.0$ の範囲では $V_m/\sqrt{gH}$ はほぼ一定であって, ハドソン式の基礎となっている仮定を満足しているけれども, $2 < \xi < 3$ においては V_m は ξ の関数となり, ハドソン式が成立しなくなる. この V_m が急激に増加する領域において先述の斜面上の共振現象も生じている. したがって共振現象が生じる領域においては, ハドソン式による捨石の算定重量は危険側となること, この図からも容易に納得できよう. またこの最大水粒子速度の発生地点は, 非共振時には run-up の場合, $x/H=1.0$ の地点で, run-down の場合には $x=0$ すなわち静水時汀線で生じるが, 共振時の場合 run-up 時, run-down 時共に $-1 < x/H < 0$ の所で発生している. ここに x は汀線より陸側を正とした水平距離である. この事実は従来の捨石堤の崩壊の激しい場所が静水面より若干低い水深で生じる事実と一致しており, 崩壊に対して共振現象が大きく影響をもつ証査といえよう.

一方この場合の共振現象の発生限界を求めてみると, $H/h_0 > 0.45$ の場合には $2 < \xi < 3$ の領域ですべて発生しているが, $0.45 > H/h_0 > 0.3$ の場合には, $2 < \xi < 3$ の領域でも共振を生じない場合もある. したがって不透過滑面の場合の共振の発生限界は $2 < \xi < 3$ という条件以外に

H/h_0 が一つの条件を与えるようである.

3.2 不透過粗面の斜面の場合

不透過滑面の場合には共振, 非共振の区別が明確であるが, 粗度及び透過性を有する斜面では明確な共振状態はあらわれにくくなり, 非共振から共振への遷移過程の状態が多くなる. このような遷移過程の現象を著者らは準共振 (semi-resonance) と呼び共振現象と同じく, 捨石の不安定を招くものと考えている. なおこの準共振においては遡上波の周期 T^* と入射波の周期 T との間には $0.8 < T^*/T < 0.95$ という関係が成立する. 図-2は粗

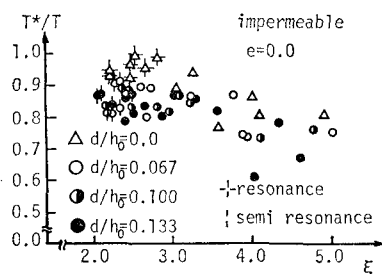


図-2 T^*/T に対する斜面粗度の影響

度の差違に伴う, 共振を規定する T^*/T の変化を示したもので d は粗度をあらわしている. これによると不透過斜面の時の共振の発生限界を示す $2 < \xi < 3$ の領域においてこの粗度効果は著しい.

これは粗度によって斜面上の run-up 高さが低下するとともに run-down 高さも抑制されるため波の遡上周期 T^* が滑面時に比べて短くなったためと考えられる.

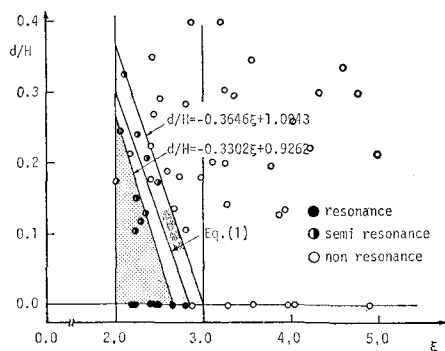


図-3 不透過粗面における共振の発生限界

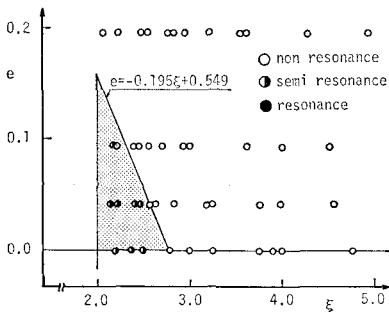
図-3は滑面状態を含めた不透過堤の共振の発生限界を ξ と d/H の関係において求めたものである. これによると粗度の増加にともなって共振の発生領域を示す ξ は 2.0 に近づいていく. 図中の d/H と ξ の関係式は共振現象の発生限界を示す上限値及び下限値であるが, この発生限界は (1) 式で近似できる.

$$d/H = -0.35\xi + 1.0 \dots\dots\dots (1)$$

3.3 透過性斜面の場合

この場合の透過性斜面は 3.2 で述べた粗面粗度 ($d=1.5$ cm) の中間点に 4.8 mm, 6.9 mm, 13.8 mm の孔をあけたもので, 異形ブロック堤をモデル化したものである。

この透過性斜面の場合も波の遡上高さは不透過滑面に比して小さくなり, 特に $2 < \xi < 3$ の領域でその差は著しい。したがって遡上波周期も小さくなり, 不透過粗面と同様共振現象は生じにくくなるが, 準共振の状態は発生する。なおこの透過性斜面及び不透過粗面においてはトレーサーによる流速測定は極めて難しく, その流速変化はとらえていない。



図—4 透過性斜面における共振の発生限界

図—4 は透過性斜面の面積空隙率 e と ξ との関係において共振現象の発生限界を求めたものであって, 粗度と同様, 空隙率 e が増加するにともなって共振の発生領域は狭くなっており, その発生限界は次式で近似することができる。

$$e = -0.195\xi + 0.549 \dots\dots\dots(2)$$

なおここでの面積空隙率は従来使用されている異形ブロックの体積空隙率といかなる関係にあるか充分明らかでないが, 異形ブロック堤が不透過堤にくらべて共振が生じにくいと断定してよからう。

4. 不規則波による共振現象の発生確率

4.1 共振現象の発生確率

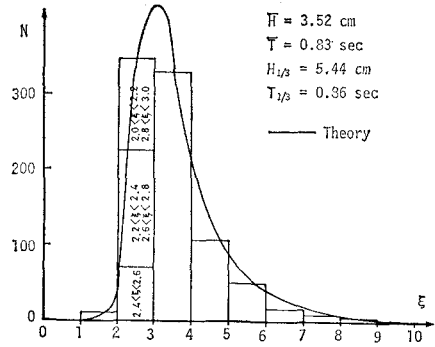
規則波において共振の現象は surf similarity parameter ξ に左右されることが明かにされたので, 不規則波の共振現象を論議するに先だって不規則波における ξ の頻度分布についてまづ考察を加える。

Brunn¹⁾ 及び Günbak²⁾ は Overvik 及び Houmb³⁾ が求めた狭帯域スペクトルに対する波形勾配の分布式を変形して ξ の頻度分布を次のようにあらわした。

$$p(\xi) = \frac{8\xi a}{\xi^5} \exp(-2\xi a^4/\xi^4) \dots\dots\dots(3)$$

ここに

$$\xi a = \tan \theta / \sqrt{(2\pi/g)(H_s/T_z^2)} \dots\dots\dots(4)$$

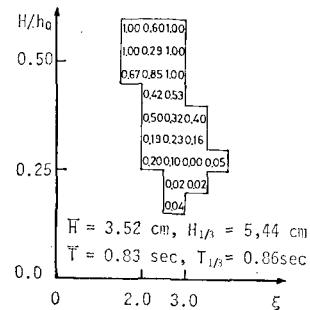


図—5 不規則波における ξ の頻度分布

で H_s は有義波高, T_z は zero-up cross 法で求めた波の平均周期である。

図—5 は実験によって求めた ξ の頻度分布の 1 例であり, 図中の実線は (3) 式で求められる値である。ここに N は波数を示す。この図によると (3) 式は実験値とよく一致しているが, 不規則波中の ξ は $2 < \xi < 4$ の間に集中しており, 規則波で求めた共振の発生限界である $2 < \xi < 3$ の波の発生頻度は極めて大きいことがわかる。

一方 3.1 で述べた様に不透過滑面における共振の発生限界は ξ 以外に H/h_0 によっても左右されるので, $\xi - H/h_0$ 平面上に共振の発生確率を示すと 図—6 のよう



図—6 共振の発生確率の分布の 1 例

になる。図—6 中実線で囲んだ部分は共振現象が発生した領域を示し, 図中の数字は H/h_0 を 0.05 間隔, ξ を 0.5 間隔で分割した場合の各ブロックごとの共振発生確率を求めたものである。この図によると不規則波においても共振を起す ξ は $2 < \xi < 3$ において最も確率が大きい, 規則波において必ず共振が生じた $2 < \xi < 3$, $H/h_0 > 0.30$ を満足する波でも, 不規則波の場合必ずしも共振を起すとは限っていない。しかしながら H/h_0 が 0.3 より増加するにともなって共振の発生確率は増加している。

またこれらの発生域を規定する ξ の値において平均波の ξ 値 ($\bar{\xi}$) なのか, 有義波の ξ 値 ($\xi_{1/3}$) なのかを調査したところ, 発生領域の波はすべて $\bar{\xi} > 3.0$ であり, 一

方 $\xi_{1/3}$ の値をとると発生域は、 $\xi_{1/3} < 3.0$ となっている。このことから規則波の発生限界を不規則波に適用する場合には、その代表値として $\xi_{1/3}$ を用いて予測しなければならないことがわかった。

つぎに共振の発生限界を波高と周期の結合分布の面から示したのが 図-7 であって、図中の数字はその波数

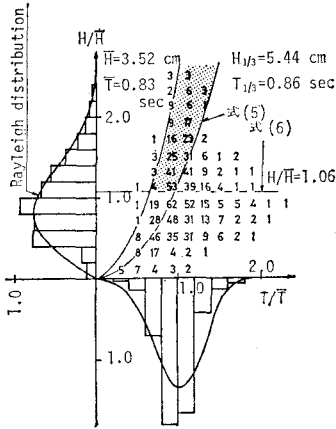


図-7 波高と周期の結合分布における共振の発生限界

を示す。図-6を参照して共振の発生限界が $2 < \xi < 3$ 、 $H/h_0 > 5.25$ で示されるとすると、 $\theta = 30^\circ$ の場合の波高と周期の結合分布における共振の発生限界は次式で表すことができる。

$$\frac{5.772}{\bar{H}} \left(\frac{T}{\bar{T}} \right)^2 < \frac{H}{\bar{H}} < \frac{12.995}{\bar{H}} \left(\frac{T}{\bar{T}} \right)^2, \quad \text{for } \theta = 30^\circ \quad (5)$$

$$H/\bar{H} > 0.25 h_0/\bar{H} \quad (6)$$

図-7の影の部分は(5)式、(6)式で示される共振の発生領域を示す。

4.2 共振現象に与える ξ の連の影響

いままでの共振現象の解析から判るように共振は前後波の干渉により起る現象であるから、波の連の概念を導入して確率を予測することが必要と思われる。波の連のうち波高の連の概念は合田⁴⁾によって提案され、防波堤の安定論に導入されてきている。しかしながら、先述してきた様に共振現象の発生限界は $2 < \xi < 3$ で規定されるので、ここでは新たに $2 < \xi < 3$ の ξ の連の概念を導入する。すなわち 図-8 に示すような ξ に関する不規則

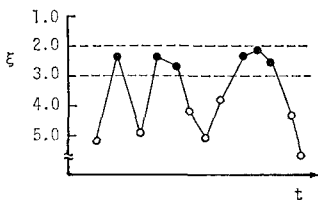


図-8 ξ の連の説明図

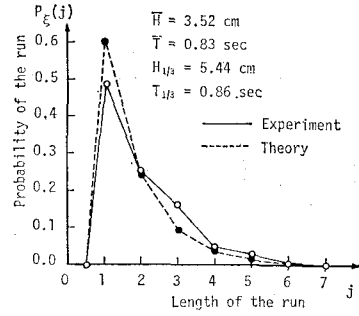


図-9 連長とその発生確率の関係

波の時系列の模式図において、黒丸はその ξ 値が $2.0 \sim 3.0$ の範囲に入っているが、左側から順に連長 1, 連長 2, 連長 3 の連を示している。不規則波の ξ の連の中で、 ξ の連長とその発生確率との関係を求めてみると、図-9 のようになる。これからわかる様に連長が大きくなるとその連長の発生確率は小さくなる。ここで $P_{\xi}(j)$ は連の発生確率で次式で与えられる。また図中の理論値は波高の連に関する合田の理論⁴⁾を ξ の連に適用したものである。

$$P_{\xi}(j) = N_j / \sum N_j \quad (7)$$

(N_j : 連長の j における連の個数)

つぎに共振を発生すると考えられる $2 < \xi < 3$ の連における共振の発生確率 $P_{\text{res}}(j)$ を検討するために、各連長に対する共振の発生確率を求めてみたのが 図-10 であ

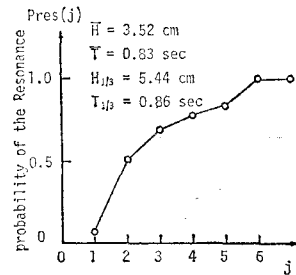


図-10 各連長における共振の発生確率

る。ここで $P_{\text{res}}(j)$ は次式で与えられる値である。

$$P_{\text{res}}(j) = r_j / N_j \quad (8)$$

ここに r_j は各連長 j における共振の発生度数を示す。この図によると連長の増加にともなって共振の発生確率が増加しており、共振が単発の波で発生しにくく、数波の干渉で生じ易いことを示している。図-9、図-10 からわかるように連長の大きいものはその発生確率は小さく、一方連長の大きいものは共振の発生確率は小さいという相反する性質を有するため、この連長の発生確率 $P_{\xi}(j)$ と各連長に対する共振の発生確率 $P_{\text{res}}(j)$ の結合確率を次式のように定義してその結合確率の各連長に対する変化を求めてみたのが 図-11 である。

$$P_{\xi}(j) P_{\text{res}}(j) = N_j / \sum N_j \cdot r_j / N_j = r_j / \sum N_j \quad (9)$$

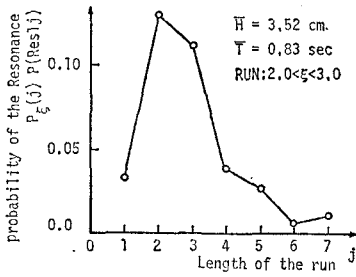


図-11 結合確率の変化

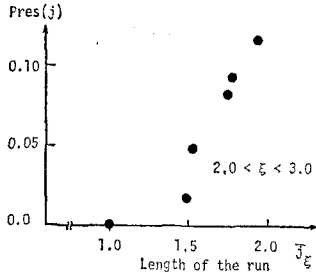


図-12 平均連長と共振の発生確率の関係

図-11 からわかるように連長 2 で最も共振現象が生じ易い。

一方 $2 < \xi < 3$ の範囲にある次の平均連長 $\bar{j}_\xi$ として、その $\bar{j}_\xi$ と共振の発生確率との関係を求めたのが図-12であって、明らかに強い相関がみられる。

ここに

$$\bar{j}_\xi = \sum P_\xi(j) \cdot j = \sum j \cdot N_j / \sum N_j \dots \dots \dots (10)$$

である。

この平均連長は波高の連の確率分布において合田が理

論的に求めているが⁴⁾、その理論値は実験値と極めてよい一致をみた。この平均連長を用いると共振現象を予測する上で極めて有効となると考えられる。

5. 結 語

以上捨石堤の崩壊に重要な意味をもつといわれている斜面上の波の共振現象を論議し、主としてその発生限界及び発生確率を明らかにした。しかしながら実際の捨石(ブロック)の崩壊実験においてこの共鳴現象がいかなる作用を示すかを明確にしておらず、その破壊の危険性のみを指摘するにとどまっている。今後ブロックの崩壊現象とこの共鳴現象との関連性について研究を進めていきたいと考えている。最後に本研究は文部省自然災害特別研究(岩垣雄一教授代表)の一環として行ったものであり、実験に協力していただいた現在阪大大学院大西明德君、大阪府の岩田直也君に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Brunn, 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) Brunn, P. and A. R. Gunbak: Stability of sloping structures in relation to $\xi = \tan \alpha / (H/L_0)^{1/2}$ risk criteria in design, Coastal Eng., 1 (4), pp. 287~322, 1978.
- 3) Overvik, T. and O. G. Houmb: A note on the distribution of wave steepness, Div. of Port and Ocean Eng., the Norwegian Inst. of Technology, Rep. 11, 1977.
- 4) Goda, Y.: On wave groups, Proc. Int. Conf. on Behavior of Offshore Structures, Trondheim, 1976.