密度を考慮した消波ブロックの耐津波安定性 評価手法に関する研究

水谷 法美¹・中村 友昭²・土井 勇人³

¹フェロー 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: mizutani@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tnakamura@nagoya-u.jp

³正会員 (株)大林組 東京本店外環三郷工事事務所 (〒341-0054 三郷市泉234)

E-mail: doi.hayato@obayashi.co.jp

消波ブロックの耐波安定質量はHudson式に代表されるような算定式により求められるのが一般的であるが、津波に対して使用されるIsbash式も含め、これらの算定式では、流速の2乗に比例する抗力や揚力が卓越波力成分として考えられており、安定質量は流速の6乗に比例する。一方、慣性力が卓越すると、抵抗力となる重力と作用外力のいずれもブロック体積に比例するため、ブロックを大きくすることで安定質量を得ることはできなくなり、密度を大きくする必要がある。本研究では、水理模型実験の結果に基づき、消波ブロックの安定質量を密度とブロック径の関数として表示することを目的とする。本研究で導いた算定式により、慣性力を考慮しないとブロック質量を過小評価する可能性があることが判明した。

Key Words : wave dissipating blocks, stable mass, high density block, tsunami

1. 緒言

消波ブロックや被覆ブロックの安定質量はHudson式¹⁾やvan der Meer式²⁾で算定されることが多いが、津波に対してはこれらの式に変わってIsbash式³⁾によることが多い。いずれの式も移動限界時には流速の2乗に比例する抗力や揚力が卓越することが仮定されている。すなわち、Isbash式では安定質量は流速の6乗に比例する。そのため、設計津波が大きくなると安定な消波ブロックは急激に大きくなることが容易に予想される。一方、ブロックが大きくなると慣性力の影響も無視できなくなる可能性がある。また、津波の場合、前面が切り立った状態で作用すると加速度も大きくなることになり、慣性力も有意な大きさになることが考えられる。ブロック体積に比例する慣性力が卓越すると、抵抗力となる重力も体積に比例することから、安定性を確保するためにはブロックを大きくするのではなく、密度を大きくすることが不可欠になる。密度の影響については、水谷ら⁴⁾、岩田ら⁵⁾が幅広潜堤の被覆材を対象に水理実験に基づいて検討を加えている。彼らは移動限界時における作用波力を計測し、被覆材の所要安定重量の算定手法の提案を行っているが、被覆材を球形で近似しており、そのまま使用することはで

きない。伊藤ら⁶⁾は高比重消波ブロックを使用した水理実験を行ない、安定係数 K_D がブロックの比重の3乗に比例することを示している。しかし、消波ブロックの安定質量をその大きさと密度の関数として表した算定式はなく、早急に対応すべき課題である。

本研究では、大きさと密度の異なるテトラポッド模型を使った水理模型実験を行い、密度を考慮した消波ブロックの耐津波安定性評価手法の構築を目的とするものである。

2. 水理実験

(1) 実験概要

幾何縮尺1/50を想定し、テトラポッド模型を対象に、津波を模擬した長周期波および規則波を作用させ、移動限界を求める水理模型実験を行った。実験は名古屋大学の平面波浪水槽（長さ28 m、幅11 m、深さ0.8 m）を使用した。図-1に実験水槽の概略を示す。水槽内に、先端に勾配1/10と1/7の複合断面勾配をもつ不透過水平床を設置し、水平床の沖側端にブロック模型を設置した。

作用波の水位変動を測定するために、ブロック模型の真横に容量式波高計（KENEK製）を1台設置した。安定

図-1 実験装置の概要

表-1 テトラポッド模型の諸元

ブロック径 D (高さ, mm)	密度 ρ_s (g/cm ³)	質量 m (g)
30	2.5, 2.8, 3.8, 5.5, 7.2	17.5, 19.6, 26.8, 38.7, 50.1
36	2.2, 2.5, 3.7, 5.0, 6.9	28.8, 32.7, 48.4, 65.1, 90.2
42	2.2, 2.7, 3.8, 5.5	54.9, 54.8, 75.1, 109.0
52	2.3, 2.6, 3.6	88.4, 98.2, 135.8

表-2 ブロックの配置

Pattern-1	Pattern-2	Pattern-3
Pattern-1'	Pattern-2'	Pattern-3'

(波は左から右へ入射)

した計測が行えるよう、水平床上に溝を設け、そこに水を満たして水位計を設置するようにした。また、斜面沖側先端と造波板の間にも、3台の容量式波高計を設置した。さらに、ブロック模型設置位置での流速およびブロックへの作用波力を計測するために、プロペラ流速計（KENEK製）とキャンチレバー型波力計を設置した。そして、水位、流速、波力の計測を同時に行い、サンプリング周期0.002 sでPCに取り込んだ。

(2) 実験条件

実験では消波ブロックとしてテトラポッドを使用した。

図-2 水平方向最大流速と遡上水位の関係

(a) Pattern-1

(b) Pattern-1'

図-3 移動限界時の水平方向最大波力と質量の関係

テトラポッド模型の大きさを4種類、それぞれに対して密度を3～5種類変化させた。その諸元を表-1に示す。これらのブロックを水平床先端部に設置し、津波を模擬した長周期波（周期 $T=6, 8, 10$ s）と規則波（ $T=1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8$ s）を波高を徐々に増大させながら作用させ、移動限界を求めた。なお、ブロックの並べ方は表-2に示す3種類とし、波向きに対し配置をそれぞれ2種類変化させた。また、ブロックの移動は、目視によりブロックの1/4程度の移動が確認された場合とした。

3. 実験の考察

(1) 移動限界時の水理特性

Pattern-1'に対する移動限界時の水平方向の最大流速と波峰高の関係を図-2に示す。最大流速はほぼ波峰高に比例しており、したがって、流速が波高の平方根に比例す

るHudson式で仮定されている状況とは異なることが確認された。

図-3に移動限界時の水平方向の最大波力とブロック質量の関係を示す。図中には比較のために傾き1の直線も示している。結果には若干ばらつきがあるもののほぼ傾き1の直線に沿って分布している。実験によると移動状況はほとんど全ての場合で滑動であったことから、重力にともなう摩擦力を水平方向波力が上回ることによって滑動が生じたと考えられる。なお、ブロック設置時のわずかなずれ等で滑動時に若干鉛直軸周りの回転が生じることもあり、実験結果のばらつきに寄与していると思われる。

波向きの効果に着目すると、Pattern-1'のように、一般的には一つの足の頂点から波が入射するケースで移動限界時の波力が若干小さくなる傾向があることが確認された。Pattern-1のように一つの足が岸向きになる場合は、波力に対して足の先端に作用する摩擦力がモーメントの成分により大きくなって抵抗力が若干大きくなることが寄与していると考えられる。

つぎに波力と流速の関係に着目する。移動限界時の水平方向の最大波力と最大流速の関係を図-4に示す。図には比較のために傾き2の直線も示している。全体的には最大波力は最大流速のほぼ2乗に比例していると思わせる。この結果は、移動限界時には流速の2乗に比例する波力が卓越していることを示唆するものである。ただし、特

にブロック径が大きい場合で全体的に波力が大きい傾向が認められる。ブロック径が大きくなると移動限界時の水位も大きく、非線形性の強い波が作用することになる。このため、作用波は前面の切り立った波になる傾向があり、したがって加速度も大きくなるため、卓越しないまでも慣性力の寄与も有意な大きさになりやすく、全体的に波力が大きくなったことが考えられる。

移動限界時の最大流速とブロック質量の関係を図-5に示す。図には比較のために傾き2と傾き6の直線を示してある。既述したように、移動限界の条件ではブロック質量と最大波力が比例しており、さらに最大波力は流速の2乗に比例していることから、移動限界時のブロック質量は最大流速の2乗に比例することが予想される。図より、同一のブロック径に対してはブロック質量が流速の2乗に比例していることが確認できる。傾き2より若干小さい場合も認められるが、これは慣性力の寄与も有意な大きさであったことによることが考えられる。一方、人工リーフの被覆材の安定質量に関する宇多ら⁷⁾の式やIsbashの式のように、流速の2乗に比例する波力が支配的な場合は、安定質量は流速の6乗に比例する。同図で、密度一定の条件に着目すると、これらの式と同様、ブロック質量が流速の6乗にほぼ比例していることが確認できる。すなわち、本実験の範囲では、同一のブロック径に着目すると移動限界質量は流速の2乗に比例し、密度一定の

(a) Pattern-1

(b) Pattern-1'

図-4 移動限界時の最大波力と最大流速の関係

(a) Pattern-1

(b) Pattern-1'

図-5 移動限界質量と最大流速の関係

条件では移動限界質量は流速の6乗に比例しているといえる。

紙面の都合上図示していないが、規則波に対しても同様の結果が得られていることを付記する。

(2) ブロックの作用波力の算定

一般に波動場に設置された小型構造物に作用する直方向力は式(1)に示すMorison式で算定されることが多い。

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_D A u |u| + \rho_w C_M V \frac{du}{dt} \quad (1)$$

ここに、 ρ_w ：水の密度、 C_D ：抗力係数、 C_M ：慣性力係数、 A ：ブロックの投影面積、 V ：ブロックの体積である。

本研究では、計測した流速とそこから求めた加速度の時間変化を式(1)に代入して得られる波力が実験で計測した波力に最もよく合うよう最小自乗法により抗力係数と慣性力係数を求めるとともに、計測した波力を抗力

と慣性力に分離し、それぞれの寄与について検討した。

図-6に上記の手法で求めた抗力 F_D 、慣性力 F_I とその和 F_{cal} を実験結果 F_{mea} とともに例示する。ほとんどの場合で抗力の最大値は慣性力の最大値よりも大きく、図-4に示される結果が裏付けされる。しかし、波力が最大となる瞬間に着目した場合に、図-6(b)に示すように慣性力が支配的となる場合も認められ、慣性力の寄与も考慮する必要があることが示唆される。なお、いずれの場合も式(1)による計算値は計測値に近く、また、最大波力の比較例を示した図-7からも式(1)による算定は有効であるといえる。

式(1)で波力を算定するためには、式中の抗力係数と慣性力係数の特性を明らかにしておく必要がある。図-8にKC数 (UT/D) にともなう抗力係数と慣性力係数の変動特性を示す。図より若干のばらつきはあるものの両係数のKC数の変化にともなう変動は小さく、抗力係数は1前後、慣性力係数は2.5前後の値となった。

3. 安定質量算定式

(1) Morison式と移動限界重量

既述したように水平床上で行った本実験の移動限界は、作用波力と重力 W にともなう摩擦力のバランスにより支配されていると考えられ、さらに作用波力がMorison式で表されることが確認された。そこで、これらの関係に基づいてブロックの移動限界時の力の釣り合いを考えると式(2)が得られる。

(a) 抗力が支配的な場合

(b) 慣性力が有意な場合

図-6 算定波力と計測波力の時間波形の比較例

図-7 算定波力と計測波力の最大値の比較例 (Pattern-1)

(a) Pattern-1

(b) Pattern-1'

図-8 抗力係数と慣性力係数の特性

$$\mu W \geq \frac{1}{2} \rho_w C_D A u |u| + \rho_w C_M V \frac{du}{dt} \quad (2)$$

ここに、 μ ：摩擦係数である。ここで、ブロックの投影面積 A 、体積 V 、重量 W を投影面積と体積に関する形状係数 K_A と K_V を使って次式のようにブロック径 D で表す。

$$A = K_A D^2, \quad V = K_V D^3, \quad W = \rho_s g K_V D^3 \quad (3)$$

これらの式を式(2)に代入すると次式を得る。

$$\mu \rho_s K_V D^3 g \geq \frac{1}{2} \rho_w C_D K_A D^2 u |u| + \rho_w C_M K_V D^3 \frac{du}{dt} \quad (4)$$

上式を無次元表示すると次式を得る。

図-9 比重とフルード数 Fr の関係 (式(5), Pattern-1)

(a) Pattern-1

(b) Pattern-1'

図-10 比重とフルード数 Fr の関係 (式(6))

$$\frac{\rho_s}{\rho_w} \geq \frac{C_D K_A}{2 \mu K_V} \cdot \frac{u^2}{g D} + \frac{C_M}{\mu} \cdot \frac{du/dt}{g} \quad (5)$$

上式の右辺第1項は、ブロック径を使ったフルード数、第2項は無次元加速度の寄与に相当する。

移動限界時の最大波力が流速の2乗に比例していたことから、式(5)では右辺第1項が卓越することが予想される。図-9は式(5)の右辺に実験で得られた流速と加速度の時間波形を代入した結果を例示したもので、比較のため傾き2の直線も示している。結果はほぼ傾き2の直線に近いが、フルード数 Fr が小さくなると直線からのずれが大きくなる。移動限界時はブロックの大部分、あるいは全てが水没しており、浮力が作用しているのに対し、上式では浮力を考慮していないので、その差が原因として考えられる。そこで、式(5)に浮力の効果を考慮すると次式となる。

$$\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \geq \frac{C_D K_A}{2 \mu K_V} \cdot \frac{u^2}{g D} + \frac{C_M}{\mu} \cdot \frac{du/dt}{g} \quad (6)$$

式(6)に対して図-9と同様の比較を示した結果を図-10に示す。浮力を考慮することで移動限界時の無次元密度(比重)はほぼフルード数の2乗に比例することが確認できる。

(2) 安定質量算定式

式(5)あるいは浮力を考慮した式(6)は、ブロックの形状に起因する係数を含んでいる。ここで、形状に関する K_A と K_V について、テトラポッドの諸元⁸⁾から求めた値 $K_A = 2.69$ 、 $K_V = 0.279$ を使用し、また、抗力係数と慣性力係数には本実験で得られた代表的な値 $C_D = 1.0$ 、 $C_M = 2.5$ を使用し、また、摩擦係数には、移動限界時の作用波力の関係から求めた値 $\mu = 0.914$ を使用した結果について検討する。

図-11は、式(7)にこれらの係数を代入し、実験で得られた流速と加速度を代入して求めた比重を実際の値と比較した結果を示したものである。計算値は若干ばらつい

図-11 算定式と実験値の比較例 (式(7), Pattern-1)

図-12 慣性力を考慮しない場合の算定式と実験値の比較例
(式(7), Pattern-1)

ているが、ほぼ1:1の直線付近に集中しており、本算定式で求めた結果の有効性が確認できる。いくつかの値は実際の値を過小評価しているが、式(5)では浮力の効果を考慮していないことが主要な原因であると考えられる。また、ばらつきのある抗力係数や慣性力係数を代表値で評価していることも原因の一つとして考えられる。図-12は比較のため、式(5)の第2項を考慮しない場合の結果を示したものである。図-11に比べ、過小評価する傾向が強くなることがわかる。したがって、加速度の寄与を考慮することが重要であるといえる。

5. 結言

- (1) 本実験ではほとんどのケースで滑動移動が確認され、また、移動限界時の水平波力とブロック質量はほぼ比例関係にあり、したがって、移動限界時には摩擦力と波力がほぼ釣り合った状態であったと考えられる。
- (2) D が一定の場合、ブロック質量は移動限界時の流速の2乗に比例するが、密度が一定の場合、ブロック質量は流速の6乗に比例する。
- (3) ブロックへの作用波力はMorison式で算定可能である。
- (4) Morison式による波力と摩擦力のバランスから移動限

界時の釣合式を導いた。また、慣性力を考慮しないと実験値を過小評価する場合があることも確認した。本実験では、津波を模擬した長周期波を作用させているため段波状の波の作用までは実施できなかったが、数値計算により津波を発生させ、より厳しい作用波の条件に対する安定質量の算定についても検討を行った。この結果については別途稿を改めて報告させていただく所存である。

謝辞：本研究は、中部電力(株)原子力安全技術研究所公募研究の助成を得て行ったものであることを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Hudson, R.Y.: Laboratory investigation of rubble-mound breakwater, Jour. of Waterways and Harbor Div., Vol. 85, W.W.3., pp. 93-121, 1959.
- 2) van der Meer, J.W.: Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers, J. Waterway, Port, Offshore and Coastal Engineering, Vol. 114, No. 1, pp. 66-80, 1988.
- 3) Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, U.S.Army Corps of Engineers, Vol. II, pp. 7-213-7-216, 1984.
- 4) 水谷法美, 岩田好一朗, Teofilo M. Rufin Jr.: 幅広潜堤の被覆材の耐波安定重量の算定法に関する研究—球状被覆材の場合—, 土木学会論文集, 503号, pp. 119-128, 1994.
- 5) 岩田好一朗, 水谷法美, Teofilo Monge Rufin Jr., 戸塚奈津子, 倉田克彦: 作用波力を考慮した幅広潜堤の被覆材の所要安定重量算定手法に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.661-665, 1992.
- 6) 伊藤政博, 岩垣雄一, 山田卓生, 根本健治, 山本方人, 半沢稔: 高比重ブロックの安定性に及ぼす碎波帯相似パラメータの影響, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.666-670, 1992.
- 7) 宇多高明, 小俣篤, 横山揚久: 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, No. 2696, 79p., 1989.
- 8) <http://www.fudotetra.co.jp/products/tetrapod.html> (2015.5.3 参照)

(2015.3.18 受付)

STUDY ON AN ESTIMATION METHOD OF STABLE MASS OF A WAVE DISSIPATING BLOCK CONSIDERING ITS DENSITY

Norimi MIZUTANI, Tomoaki NAKAMURA and Hayato DOI

Stability mass of concrete blocks is usually estimated with an empirical formula like Hudson equation. Such formulae including Isbash formula used for tsunami assume that force component proportional to velocity squared dominates over the inertia force, and therefore the stable mass is proportional to the sixth-power of velocity. On the other hand, once the inertia force dominates over the other force components, then it is difficult to get the stable mass by increasing the size of blocks. This paper aims to develop the estimation method of the stable mass of wave dissipating blocks as a function of the size and density of blocks so that it is applicable even in the condition that the inertia force cannot be ignored.