

越波実験による消波ブロックの roughness factor の算定及び波の遡上状況

株式会社不動テトラ（正）○渡部未樹久，（正）久保田真一，（正）三井順
大阪大学 大学院工学研究科（正）荒木進歩，（学）菊崎郁人，（学）渡邊真子
株式会社大林組（正）渡邊大輝

1. はじめに

我が国の設計基準においては，消波ブロックの安定数を用いて耐波安定性の評価が可能であるが，各ブロックの水力機能についての違いを直接評価できないのが現状である．一方，欧州の越波設計基準（EurOtop）¹⁾では，各消波ブロックの roughness factor（以降 γ_f と略記）を用いて越波量が算定可能であり，各ブロックの水力特性を反映した設計手法が確立されているといえる．消波ブロックの水力機能の評価し，各ブロックの性能を示すことは，消波ブロックを用いた構造物の合理的な設計を行うため重要になると考えられる．

本研究では，消波ブロックの水力特性として越波量に着目し，傾斜堤を対象とした越波実験を行い，消波ブロック（テトラポッド，テトラネオ）の γ_f を得るとともに，傾斜堤法面の遡上状況の比較を行った．

2. 実験方法

実験は不動テトラ総合技術研究所の長さ 50 m，幅 1.0 m，高さ 1.3 m の二次元造波水路で行った．模型ブロックの諸元を表-1 に示す．テトラポッド，テトラネオの設計波高 H_0 が同じになるように模型ブロックを選定した．実験断面を図-1 に示す．堤脚水深は有義波高 H_0 の 2.5，3.0 倍を確保し，波浪が堤体に作用するまで碎波しない条件とした．天端幅は $3D_n$ (D_n :ブロックの代表径) で，消波工の法面勾配は 1 : 1.5 とした．

上記の実験条件は Bruce ら²⁾を参考に設定した．越波流量は，天端上部工の岸側端部に幅 10 cm の導水路を設置し，背後の越波枳に集水し計測した．層厚は 2 層厚に設定し，天端高 R_c を変化させるために 2 種類の水深を設定した．実験条件を表-2 に示す．

作用させた波は JONSWAP 型スペクトル ($\gamma=3.3$) を有する不規則波で，波高 H_{m0} は $0.5H_0$ ， $0.75H_0$ ， $1.0H_0$ の 3 種類，周期 T_p は 1.0 s，1.1 s，1.3 s，1.5 s，2.0 s の 5 種類を設定し，波群を 2 種類とした．

3. γ_f の算定方法

実験で計測した越波量をもとに EurOtop¹⁾に示されている越波流量算定式 (1) から γ_f を算定した．

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}}=0.09\exp\left[-\left(1.5\frac{R_c}{H_{m0}\gamma_f\gamma_\beta}\right)^{1.3}\right]$$

(1)

ここに， q ：越波流量， g :重力加速度， R_c :天端高， γ_β ：入射角に伴う補正係数 ($\gamma_\beta=1$) である．Bruce ら²⁾では $\xi_{m-1.0}$ (surf similarity parameter) が 2.0~4.0 の範囲において一定の γ_f 値を示していることから，その範囲における γ_f を得ると共に， $\xi_{m-1.0}$ が 4.0 よりも大きい範囲についても検討することとした． γ_f は最小二乗法を用いて求めた．

表-1 模型ブロック諸元

名称	姿図	質量 M (g)	体積 V (cm ³)	代表径 D_n (cm)	空隙率 ε (%)
テトラポッド		184.3	80.1	4.3	50
テトラネオ		145.5	63.3	4.0	60

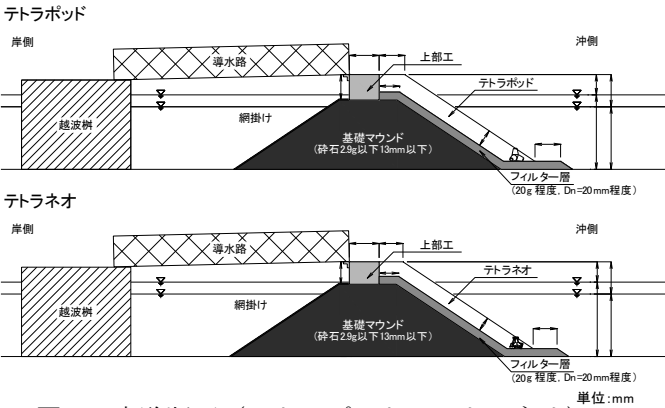


図-1 実験断面（テトラポッド，テトラネオ）

表-2 実験条件

使用ブロック	テトラポッド	テトラネオ	備考
模型質量 M (g)	184.3	145.5	-
代表径 D_n (cm)	4.3	4.0	-
設計波高 H_0 (cm)	12.5		-
堤脚水深 h (cm)	2.52 H_0 , 3.0 H_0		2種類
2.5 $H_0 \sim 3.0H_0$	31.5, 37.5		
天端高 R_c (cm)	0.82 H_0 , 1.30 H_0		2種類
0.8 $H_0 \sim 1.3H_0$	10.2, 16.2		
層厚 (cm)	8.8	7.3	2層厚
天端幅 B (cm)	12.9	12.0	3 D_n
法面勾配	1:1.5		-

キーワード 越波，消波ブロック，EurOtop，roughness factor，遡上

連絡先 〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町 2-7 （株）不動テトラ総合技術研究所 TEL 029-831-7411

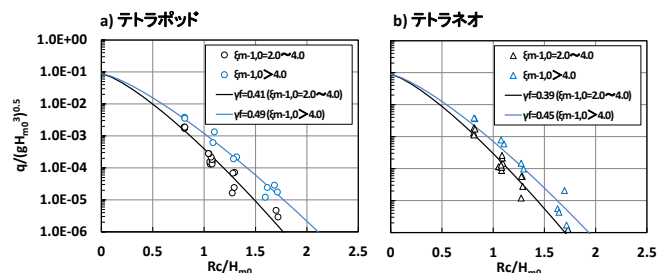


図-2 無次元越波流量と相対天端高の関係

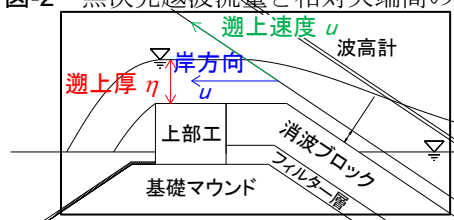


図-3 越波状況のモデル化

4. γ_f の算定結果

実験で得られた越波流量からテトラポッド、テトラネオの γ_f を求めた。テトラポッドにおいて、 $\xi_{m-1.0} = 2.0 \sim 4.0$ の範囲で $\gamma_f = 0.41$ 、 $\xi_{m-1.0} > 4.0$ の範囲では $\gamma_f = 0.49$ となった。 $\xi_{m-1.0} = 2.0 \sim 4.0$ の範囲の値については Bruce ら²⁾のテトラポッドの実験値と一致した。一方、テトラネオにおいては、 $\xi_{m-1.0} = 2.0 \sim 4.0$ の範囲で $\gamma_f = 0.39$ 、 $\xi_{m-1.0} > 4.0$ の範囲では $\gamma_f = 0.45$ となった。

無次元越波流量と相対天端高の関係を図-2 に示す。図中の黒と青の実線は、それぞれ $\xi_{m-1.0} = 2.0 \sim 4.0$ と $\xi_{m-1.0} > 4.0$ の範囲の γ_f の値を式 (1) に代入したものである。

一般的に、層厚の薄い1層積みよりも層の厚い2層積みの方が γ_f の値は小さい傾向となる²⁾。しかしながら、今回の実験を行ったテトラネオの断面はテトラポッドの断面に比べて層厚は薄く、かつ天端幅も狭いが、 γ_f の値はテトラポッドよりも小さい値となった。

5. 遡上状況の比較

テトラポッドとテトラネオの越波量の違いを考察するために、遡上状況の比較を行った。越波状況を図-3 に示すようにモデル化して考えると、1波あたりの越波量 Q は上部工天端を越える遡上厚と遡上速度を用いて、次式のように模式的に表すことができる。

$$Q = \eta \cdot u_x \cdot t \quad (2)$$

ここに η : 遡上厚、 u_x : 遡上速度 (岸方向)、 t : 1波あたりの越波時間である。規則波を用いて遡上速度と遡上厚を測定することで、テトラポッドとテトラネオの比較を行った。法面に対して平行にして3 cm 離れた位置に波高計を設置して遡上する波面を測定した。

水深 37.5 cm、周期 2.0 s、波高 16 cm での遡上距離の時系列を図-4 に示す。波形の安定した5波を対象とし、

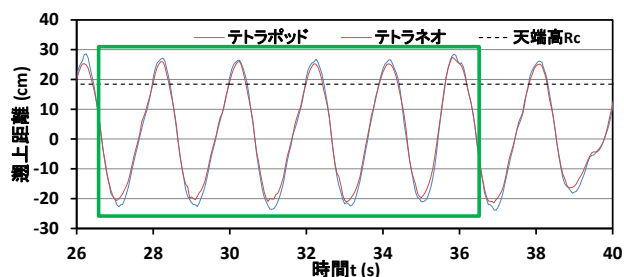


図-4 遡上距離の時系列

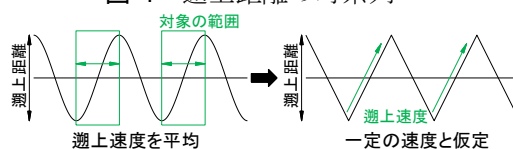


図-5 遡上速度の仮定

表-3 遡上状況から越波量の算出

模型ブロック	遡上厚 η (cm) 5波平均値	遡上速度 u (cm/s) 5波平均値	遡上速度 (岸方向) u_x (cm/s) 5波平均値	1波あたりの 越波時間 t (s) 5波平均値	1波あたりの 越波量 Q (cm ²) $\eta \cdot u_x \cdot t$	1波あたりの 越波量 Q (cm ²) 計測値
テトラポッド	4.74	47.31	39.37	0.70	130.6	146.4
テトラネオ	4.14	43.21	35.96	0.65	96.8	126.2

遡上厚、遡上速度 (岸方向)、1波あたりの越波時間の平均値を求めた。遡上速度は図-5 に示すように、水位が上昇する範囲で一定の速度と仮定して求めた。算定結果を表-3 に示す。遡上厚、遡上速度ともにテトラネオの方が小さく、また本モデルより算出した越波量は計測値と近い値となった。以上より、テトラネオはテトラポッドと比較して遡上厚や遡上速度が小さいため、越波量が相対的に小さくなったと考えられる。

6. まとめ

本実験ではテトラポッドおよびテトラネオの γ_f を取得した。テトラポッドの断面と比較してテトラネオの断面は層厚が薄く天端幅が狭いにも関わらず、越波量が少ないことが確認された。この要因に関して、遡上厚と遡上速度を用いた簡易的な越波モデルにより考察を行った。

テトラネオの越波量が少ない要因として、空隙率が高いこと及びブロック形状が角張っていることも考えられ継続して検討を行う予定である。また EurOtop¹⁾に記載されている γ_f は不透過滑面の実験に基づいて補正を行っているため、今回得られた γ_f についても今後同様の補正を行う予定である。

参考文献

- 1) EurOtop(2018) : Manual on wave overtopping of sea defences and related structures, p304.
- 2) Bruce et al.(2009):Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters, Coastal Engineering, 56 (2), pp.166-179.