

急勾配海底条件下における防波堤の法止めブロックの耐波安定性に関する検討

Stability of Toe Protection Blocks for Breakwaters under Steep Foreshore Conditions

室蘭工業大学大学院 〇学生員 佐藤篤志 (Atsushi SATO)
 室蘭工業大学大学院 フェロー 木村克俊 (Katsutoshi KIMURA)
 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 正会員 上久保勝美 (Katsumi KAMIKUBO)

1. まえがき

海底勾配が急な場所に設置される防波堤には、衝撃的な波力が発生しやすく、直立部における耐波安定性の確保が難しいことが知られている。一方、上久保ら¹⁾は急勾配海底条件下の消波護岸を対象として、消波ブロックの安定性を検討するとともに、法止めブロックの有効性を指摘している。しかし、法止めブロックの必要質量の算定方法は未だ確立されておらず、これまでの経験に基づいて設計されているのが現状である。

本研究は、急勾配海底条件下において施工中の防波堤を対象として、法止めブロックの耐波安定性について水理模型実験および数値波動水路 CADMAS-SURF/2D により明らかにすることを目的としている。

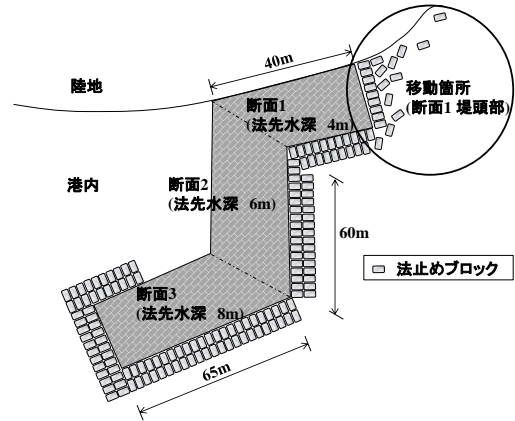


図-1 A 港防波堤の平面配置

2. 急勾配海底条件下の防波堤の事例

図-1 は、日本海側に位置する A 港を示している。A 港は急峻な海底勾配が続いており、防波堤の構造形式は消波ブロック傾斜堤である。本体部には 50t および 60t の消波ブロックが使用され、堤体の法止めブロックには 25t および 40t の平型ブロックが設置されている。

図-2 は、2004 年 9 月 4 日に発生した台風 18 号の進路を示す。台風 18 号は勢力を強めながら日本海側を北上し、8 日 0 時ごろには A 港付近の海域に到達した。近隣のナウファス測定点において、13 時に同日の最大波である、有義波高 $H_{1/3}=7.58\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=11.8\text{s}$ を記録した。A 港防波堤は、前出した図-1 の丸線内に示すように岸側堤頭部の法止めブロックのみが移動した。また、各断面における法先水深は、同図中に示すとおりである。

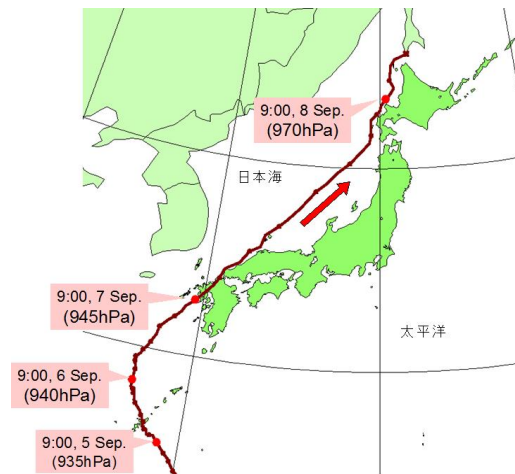


図-2 2004 年台風 18 号の経路

3. 海底勾配の設定方法

A 港周辺の波浪変形に及ぼす海底地形の影響は、非常緩勾配不規則波動方程式モデルを用いて検討した。A 港における沖側の海底地形は、汀線付近が 1/10 勾配で、その後 1/2.5 勾配となる複合勾配である。この複合勾配を図-3 の下段に示すようにモデル化し、上段に示す 1/10 の一様勾配と比較した。データ作成領域は、沿岸方向 2.5km、岸沖方向 3.5km とし、計算領域は同図における赤枠で囲んだ沿岸方向 1.5km、岸沖方向 2.5km とした。設計波は、周期 $T=12.0\text{s}$ で一定とし、沖波換算波高 H_0' は 5.0m、6.0m、7.0m、8.0m および 9.0m の 5 ケースとした。なお、波向は単一方向波とした。

図-4 は、水深 $h=10.0\text{m}$ 地点における通過波高 $H_{1/3}$ と沖波波高 H_0' の関係を示す。同図より、通過波高には複

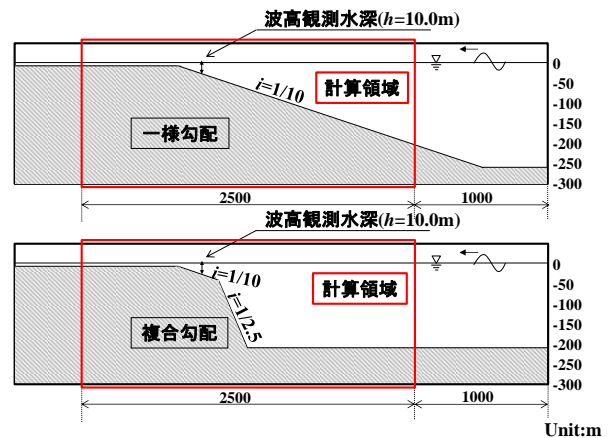


図-3 一様勾配と複合勾配

合勾配の影響が小さいことから、後述する実験については、海底勾配を $i=1/10$ の一様勾配で行うこととした。

4. 実験方法

実験は、図-5 に示す 2 次元造波水路(長さ 22.0m, 幅 0.8m, 高さ 2.0m)内に、縮尺 1/50 のもと、海底勾配 $i=1/10$ のモルタル床を設け、造波機前面の水深 h_0 は 72.3cm で一定とした。また、防波堤の法先水深 h は、8.0cm, 12.0cm および 16.0cm の 3 ケースとし、各水深で通過波高 $H_{1/3}$ を計測した。なお、それぞれの水深を断面 1, 2 および 3 とし、各断面における静水面上の天端高 $h_c=9.4$ cm および天端幅 $B=21.4$ cm を一定とした。使用する法止めブロックの質量は、190g, 240g, 300g および 500g の 4 ケースとした。なお、現地量を同図中に示す。実験波は、Bretschneider・光易型のスペクトルを有する不規則波を用いて、1 波群の作用波数は 200 波とし、有義波周期 $T_{1/3}=1.70$ s, 有義波高 $H_0'=7.0$ cm, 9.0cm, 11.0cm, 13.0cm および 15.0cm の 5 ケースで実施した。

安定実験は、堤幹部および堤頭部を対象に行った。堤幹部は標準部を指し、堤頭部は防波堤の端部を指す。堤頭部の安定実験は、水路幅半分長の消波ブロック堤を設置し、周囲に法止めブロックを設置して行った。安定実験では、ブロックの並び替えを行わず波高を段階的に大きくし、以下に示す式(1)より被害率 $D(\%)$ を算出した。

$$D = \frac{n}{N} \times 100 \quad (1)$$

ここに N は法止めブロックの設置個数、 n は法止めブロックの基準幅以上を移動した個数と定義した。

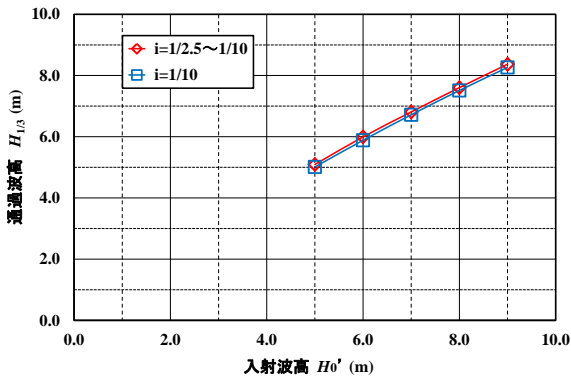


図-4 波浪変形の計算結果

5. 堤幹部の法止めブロックの耐波安定性

(1) 法止めブロックの被害率

写真-1 は、断面 2 における法止めブロック質量 30t の移動状況を示す。被害率は $H_{1/3}=6.6$ m の場合では 0% であるが、 $H_{1/3}=7.1$ m の場合では 15% となる。このことから安定限界波高 H_c は、2 つの波高の中間値である $H_c=6.9$ m を用いた。

図-6~8 は、各断面における被害率を示す。法先水深が浅い断面ほど小さい波高で被害が起こるとともに、被害率の増大傾向が顕著となる。これは急勾配条件下では、防波堤前面で砕波が生じやすく、水深の浅い地点では砕波の影響が大きくなるためと考えられる。

(2) ブロック質量の基本式

一般にブロックの必要質量 M は、以下に示す式(2)の安定数 N_s を用いたハドソン式から求められる。

$$M = \frac{\rho H_{1/3}}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (2)$$

ここで、 ρ はコンクリートの密度(t/m^3)、 $H_{1/3}$ は有義波高(m)、 S_r はコンクリートの海水に対する比重、 N_s は主としてブロック形状や勾配、被災度(被害率から求まる値)等により定まる係数である。また、基準安定数 N_{s0} はブロックに対する固有値であり、一般のブロックについては以下に示す式(3)から算定できる。

$$N_{s0} = (K_D \cot \theta)^{1/3} \quad (3)$$

ここで、 K_D はブロックのかみ合わせなどによる固有定数、 θ はブロック法面と水平面がなす角度である。なお、本実験で使用した法止めブロックは $K_D=11$ 、 $N_{s0}=4.8$ である。

(3) 堤幹部の安定数

高橋ら²⁾は被災度、砕波及び斜面勾配等の効果を考慮したマウンド被覆材の N_s 値の式を提案している。

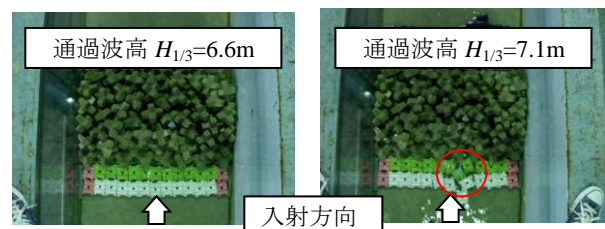


写真-1 法止めブロック安定実験(断面2 堤幹部)

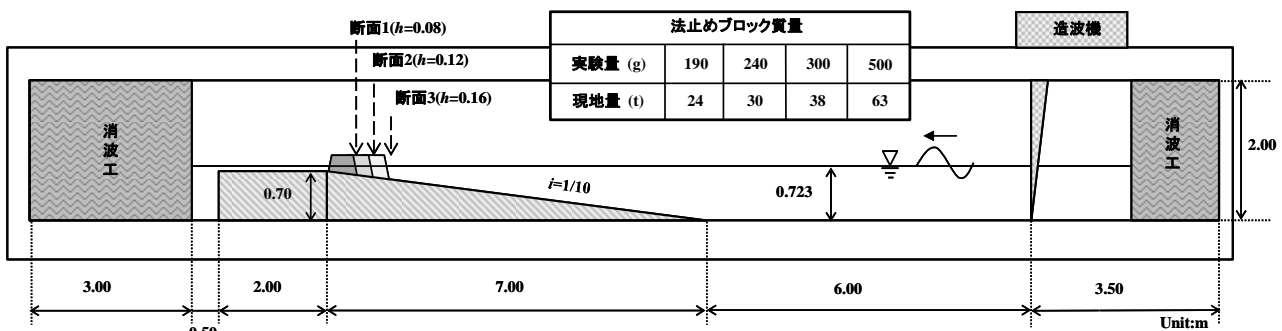


図-5 実験水路

本研究では、この式を準用し、急勾配海底条件下における法止めブロックの安定数を、水深波高比 $h/H_{1/3}$ と水深波長比 $h/L_{1/3}$ を考慮し以下に示す式(4)を提案する。

$$\frac{Ns}{Ns_0} = 0.45 \times \exp\left(\frac{h}{H_{1/3}} \times \frac{h}{L_{1/3}}\right) \quad (4)$$

図-9 に式(4)を用いた安定数 Ns の計算値と実験値を示す。同図より、 $h/H_{1/3} \times h/L_{1/3}$ が小さくなると Ns も小さくなり、法止めブロックの安定性において厳しい条件になることが確認された。また計算値は実験値とおおむね一致し、かつ安全側に評価することができた。

設計波を台風 18 号による波浪と同等の規模とし、式(4)を用いて各断面の安定質量を求めた。断面 1, 2 および 3 では 28t, 41t および 61t が必要となる。なお、現地では、断面 1 に 25t, 断面 2 および断面 3 に 40t が設置されており、移動は確認されていない。また、断面 3 のように水深が深い場合は安定質量をやや大きく評価する傾向があるが、断面 1 および 2 はおおむね一致した。

6. 数値波動水路(CADMAS-SURF/2D)による検討

(1) 計算方法

高橋ら³⁾はマウンド被覆材の安定質量はマウンド近傍流速に依存し、6 乗に比例することを示している。水理模型実験では、周期の影響を考慮することができなかつたため、底面近傍流速の計算では、周期を考慮して検討した。

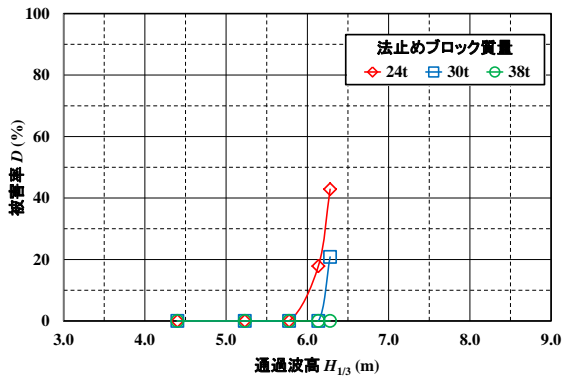


図-6 堤幹部の被害率 (断面 1)

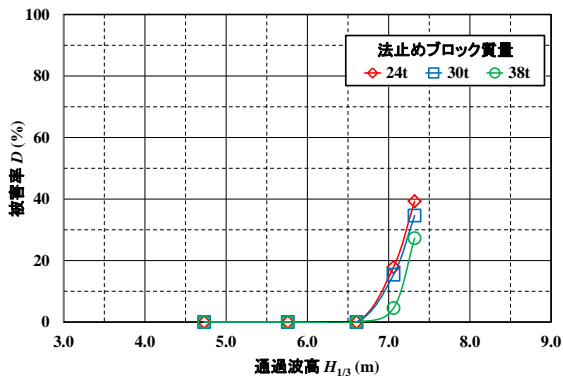


図-7 堤幹部の被害率 (断面 2)

CADMAS-SURF/2D の計算領域の設定は、前出した図-5 の 2 次元造波水路と同様にし、通過波高も同様の水深にした。なお、底面近傍流速 v (m/s)は各断面の底面から高さ 2.0cm の位置における流速とした。また、波浪条件は、周期 $T=1.27s, 1.70s$ および $2.12s$ の 3 ケースとし、波高 $H_0=7.0cm, 9.0cm, 11.0cm, 13.0cm$ および $15.0cm$ の 5 ケースとした全 15 ケースを規則波で実施した。

(2)底面近傍における流速

図-10 は、底面近傍流速と水深波長比の関係を示す。各断面において、水深に対して波長が長くなるほど流速が大きくなるのがわかる。

図-11 は、底面近傍流速と水深波高比の関係を示す。各断面において、水深に対して波高が大きくなるほど流速が大きくなるのがわかる。

以上のことから、数値解析で得られた結果は水理模型実験と同様の傾向を示しており、法止めブロックの安定性は水深波長比と水深波高比に依存していることを明らかにした。

7. 堤頭部における法止めブロックの耐波安定性

(1)法止めブロックの被害率

図-12 は、断面 1 の堤頭部における被害率を示す。法止めブロックの移動状況を同図中の写真に示す。同図より断面 1 の堤幹部に比べて小さい通過波高 $H_{1/3}$ で被害が起こることがわかる。また前出した図-1 に示す法止めブロックの移動箇所と同様に、法先水深の浅い堤頭部周辺の法止めブロックが岸側に移動することが確認された。

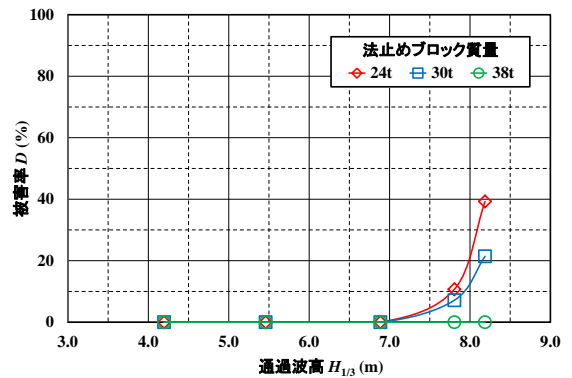


図-8 堤幹部の被害率(断面 3)

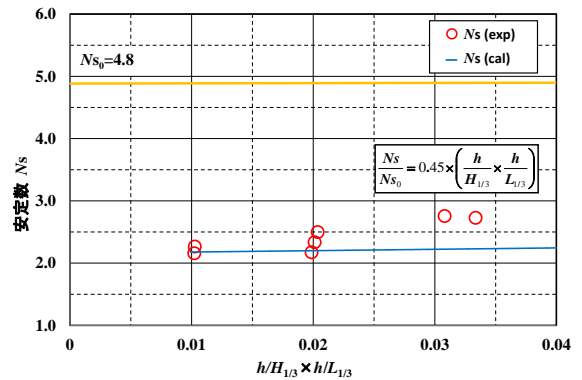


図-9 安定数の実験値と計算値

(2)堤頭部の安定数

図-13 は、堤頭部および堤幹部における安定数の比較を示す。なお、堤頭部の安定数は、式(4)を準用し以下に示す式(5)で評価する。

$$\frac{Ns}{Ns_0} = 0.3 \times \exp\left(\frac{h}{H_{1/3}} \times \frac{h}{L_{1/3}}\right) \quad (5)$$

堤幹部と比較した場合、堤頭部の Ns が 3 割程度小さくなることが確認された。これをハドソン式に適用すると、堤頭部の安定質量は、堤幹部の安定質量に対して割増しする必要性が確認された。

堤頭部は、波の回り込みなどの影響により、堤幹部の安定質量より重くする必要がある。木村ら⁴⁾は堤頭部の消波ブロックの安定質量を堤幹部の安定質量の 5 割増しにすることを指摘している。そこで 5. (3)で求めた断面 1 の堤幹部の安定質量 26t を、5 割増した結果、断面 1 における堤頭部の安定質量は 39t となる。

8 まとめ

急勾配海底条件下における法止めブロックの耐波安定性について、得られた結論は以下のとおりである。

- ① 堤幹部および堤頭部の法止めブロックの安定数 Ns を $h/H_{1/3} \times h/L_{1/3}$ の関数で評価した。
- ② 安定実験で得られた安定数から、堤頭部に対しては堤幹部の質量を割り増しする必要があることを示した。
- ③ 数値解析で得られた流速場の特性から、法止めブロックの安定性に水深波高比と水深波長比が影響していることを明らかにした。

謝辞：本研究における波浪変形に関する数値解析の実施においては、日本データサービス株式会社の葛西弘行氏の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 上久保勝美, 山本泰司, 木村克俊, 清水敏明, 吉野真史: 急勾配海底条件下における消波護岸のブロックの安定性, 海洋開発論文集, 第 26 巻, pp.489-494, 2010.
- 2) 高橋重雄, 半沢稔, 佐藤弘和, 五明美智男, 下迫健一郎, 寺内潔, 高山知司, 谷本勝利: 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量-消波ブロック被覆堤の設計法の再検討, 第 1 報-港湾技術研究所報告, 第 37 巻, 第 1 号, pp.3-32, 1998.
- 3) 高橋重雄, 木村克俊, 谷本勝利: 斜め入射波による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 29 巻, 第 2 号, pp.3-36, 1990.
- 4) 木村克俊, 上久保勝美, 坂本洋一, 水野雄三, 竹田英章, 林倫史: 消波ブロック被覆堤の堤頭部におけるブロックの耐波安定性, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.956-960, 1997.

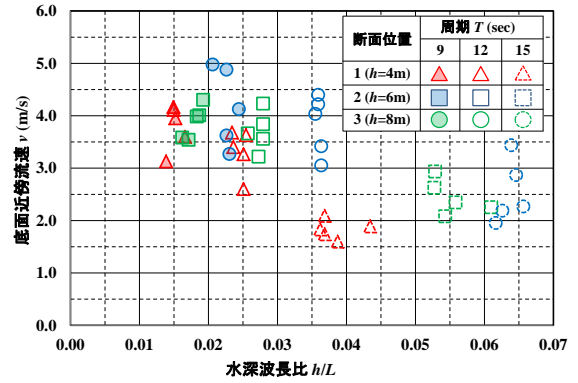


図-10 底面近傍流速と水深波長比の関係

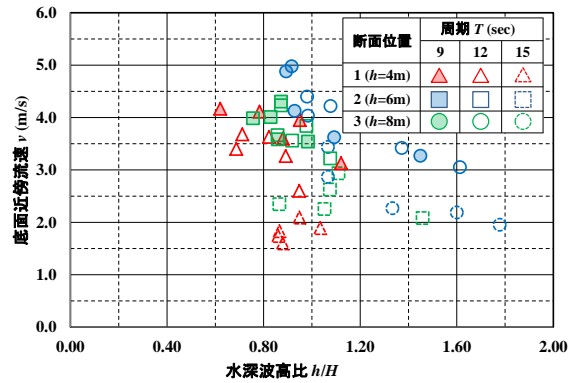


図-11 底面近傍流速と水深波高比の関係

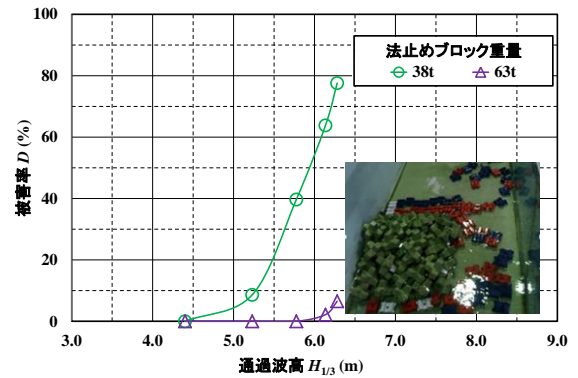


図-12 堤頭部の被害率 (断面 1)

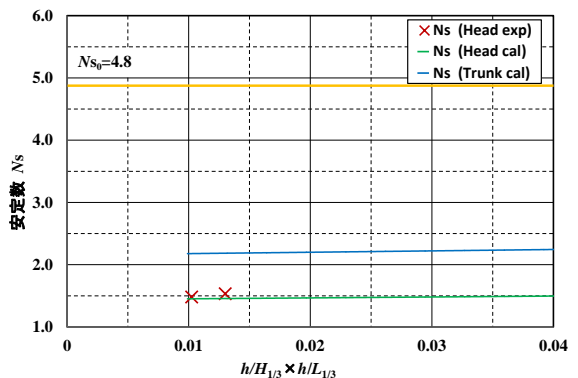


図-13 安定数の比較