

マウンド法先部の被覆ブロックの安定性に 及ぼす入射波条件の影響

INFLUENCE OF INCIDENT WAVE CONDITION ON STABILITY OF ARMOR BLOCKS AT TOE OF MOUND FOUNDATION

有光 剛¹・川崎浩司²

Tsuyoshi ARIMITSU and Koji KAWASAKI

¹正会員 博(工) 関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 尼崎市若王寺3-11-20)

²正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

The damage of armor blocks occasionally occurs at the toe of a mound foundation although the block weight is larger than the one calculated by the Hudson equation. This paper aims to elucidate the relationship of incident wave condition and the weight of armor blocks to discuss the stability of the armor blocks at the toe of a rubble mound foundation of a composite caisson-type breakwater by performing hydraulic model experiments and numerical simulations under regular wave actions. The decline of the horizontal velocity due to the existence of the blocks was found to induce the uplift force which exceeds the block weight. Especially, the armor block stability became unstable near the node of standing wave, which was formed in front of the composite breakwater.

Key Words : *Armor block stability, incident wave condition, composite breakwater, hydraulic model experiment, numerical computation*

1. 序論

捨石マウンドの被覆材の所要重量は、一般的に、ハドソン式を用いて算定される。このとき、構造的な弱点である法肩や水平部を対象として所要重量を算定し、安全のために他の箇所へも同じ重量の被覆材を用いることが多い¹⁾。しかしながら、被覆材として、ハドソン式を満足する重量の異形ブロックが用いられている防波堤マウンドにおいて、法肩や水平部ではブロックが移動しないにもかかわらず、法先に設置された同種のブロックのみが被災した事例がある。この被災は数年に一度の高頻度で発生しており、抜本的な対策のためには被覆ブロックの被災メカニズムの解明が急務である。

谷本ら²⁾、大熊ら³⁾は、低マウンドの条件で、法先部の被覆ブロックが最初に移動が生じる実験結果を示しているが、被災メカニズムまでは解明されていない。一方、有光ら⁴⁾は、実際に法先部被覆ブロックが被災している防波堤を対象とした水理模型実験により、ブロック重量を増加させた場合に安定性が低下することを確認するとともに、数値計算結果に基づき、法先部のブロック上の流速増大に起因するブロック上下の圧力差が被災の原因であると推察している。しかしながら、不規則波を用いた検討に基づく定性的な現象の把握にとどまっているうえ、

法先部ブロックの安定性に及ぼす入射波条件の違いによる影響などについては議論されていない。

そこで、本研究では、規則波を用いた水理模型実験と数値波動水路CADMAS-SURF⁵⁾を用いた規則波計算を実施することにより、入射波条件とマウンド法先部に設置された被覆ブロックの安定性の関係を明らかにすることを目的としている。

2. 検討対象の防波堤と被覆ブロック

図-1に、検討対象とした防波堤の標準断面を示す。2列の根固めブロックの沖側に、マウンドの被覆材として20tの異形ブロックが1層、6列で配置され、法先の水平部は2列のブロックで構成されている。

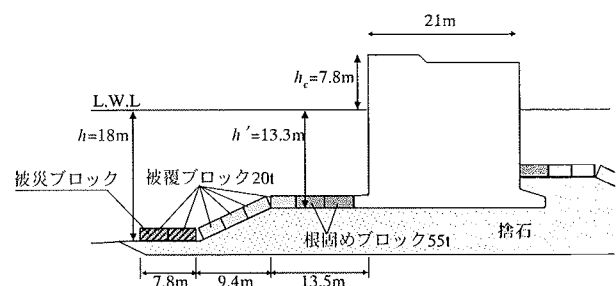


図-1 防波堤標準断面図

図-2に、異形ブロックの形状を示す。原設計で用いられている20t異形ブロック（長さ $L_a=3.332\text{m}$ 、幅 $B_a=2.261\text{m}$ 、高さ $H_a=1.739\text{m}$ ）は、稲垣・片山の式⁶⁾により重量が求められている。このブロックは、安定数 N_s を用いたハドソン式に基づいて計算した場合でも、20年確率波に対して安定な重量といえる。しかしながら、現地では法肩や斜面部の被覆ブロックには被災が生じないものの、マウンド法先部に設置されている2列の被覆ブロックが約3年に1度の高頻度で沖側への移動していることが確認されている。このため、多額の補修費が必要となり、極めて深刻な問題となっている。

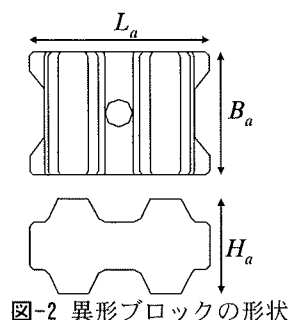


図-2 異形ブロックの形状

3. 法先部被覆ブロック安定性に関する規則波実験

(1) 実験の概要

入射波条件および重量割増が被覆ブロックの安定性に及ぼす影響の把握を目的として、規則波を用いた水理模型実験を行った。実験装置の概要を図-3に示す。模型縮尺は1/60で、造波水路と模型の諸元は有光⁴⁾と同様である。なお、有光⁴⁾では、被覆ブロックの模型は法先部の2列のみに設置し、マウンドの斜面および水平部については実構造物と開口率を一致させた塩化ビニール板を設置したのに対して、本検討では、異形ブロックと根固めブロックを用いて、現地と同様にマウンド全体を被覆した。実験では、斜面部および水平部の被覆ブロックに20t異形ブロックを設置し、法先部の2列には表-1に示す3種類の重量の異形ブロックを用いて被災状況を調べ、波浪条件およびブロック重量による安定性の差異を確認した。

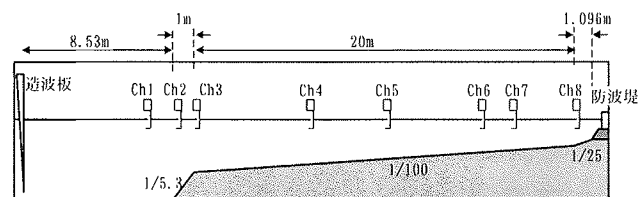


図-3 二次元造波水路を用いた水理模型実験の概要図

波浪条件と法先部被覆ブロック重量の組合せを表-2に示す。図中のブロック重量は、原設計との比

較を容易にするために現地スケールで示す。実験では表-2に示した規則波を30波作用させ、ビデオカメラおよび目視によって観察し、被害状況を確認した。ここで、被覆ブロックの被害は、谷本²⁾に準じ、被覆ブロックがほぼ1個分以上移動した状態とした。造波中は、図-3に示すように、岸沖方向の複数の位置で容量式波高計を用いて水位を計測した。また、一部の条件に対しては、被覆ブロックの移動を抑制するためにマウンド全体にネットを展開したうえで、電磁流速計を用いてマウンド法先部近傍の流速を測定した。

表-1 実験に用いた異形ブロックの諸元(実物値)

	ブロック重量		
	20t (原設計)	50t	85t
L_a	3.332m	4.522m	5.177m
B_a	2.261m	3.069m	3.513m
H_a	1.739m	2.360m	2.702m

表-2 波浪条件とブロック重量（水理実験）

波高 $H(\text{m})$	周期 $T(\text{s})$	ブロック重量(t)
0.117	1.32	20, 50, 85
	1.58	20, 50, 85
	1.79	20, 50, 85
	2.09	20, 50, 85
0.150	1.50	20, 50, 85
	1.79	20, 50, 85
	2.38	20, 50, 85
0.183	1.65	20, 50, 85
	1.79	20, 50, 85
	1.98	20, 50, 85
	2.63	20
0.217	2.16	20, 50

(2) 法先部被覆ブロックの移動状況

写真-1に、法先部に設置した被覆ブロックの移動状況を示す。不規則波実験⁴⁾と同様に、押し波時に吸い出されるように岸向きに持ち上がったのちに、引き波時に沖側へ大きく移動することが多かった。造波中に移動するブロックと安定なブロックが混在し、被災状況は横断方向に様ではなかった。これは、捨石を模擬した碎石と被覆ブロックの接触状況や、被覆ブロックの配置のわずかな差異に起因するものである。しかし、法先部被覆ブロックは岸沖方向に主に移動することから、鉛直2次元流況場がブロックの移動に影響を及ぼしていると考えられる。

(3) 入射波条件と被害率の関係

図-4に、入射波条件と各ブロックの被害率の関係を示す。図の横軸は、防波堤ケーソンから法先ブロックまでの距離 L_M をマウンド水深相当波長 L' で除した値である。ハドソン式ではブロック所要重量は波高の3乗に比例し、重量が大きいほど安定性が向上する。これに対して、本検討の実験では、波高が大きい場合（ $H \geq 0.15\text{m}$ ）には、ブロック重量が

大きいほど顕著な被害が生じている。一方、波高が小さい条件 ($H < 0.15\text{m}$) では、20tに比べると50tブロックが不安定であるが、より重量が大きい85tブロックでは被災が生じていない。

また、ブロック重量に関わらず、波高が同じ条件であれば、波長によって被害の大きさは異なり、 L_M/L' が1/4に近い場合、つまりマウンド法先部が重複波の節付近に位置する条件で、被害率が大きくなる傾向が認められた。

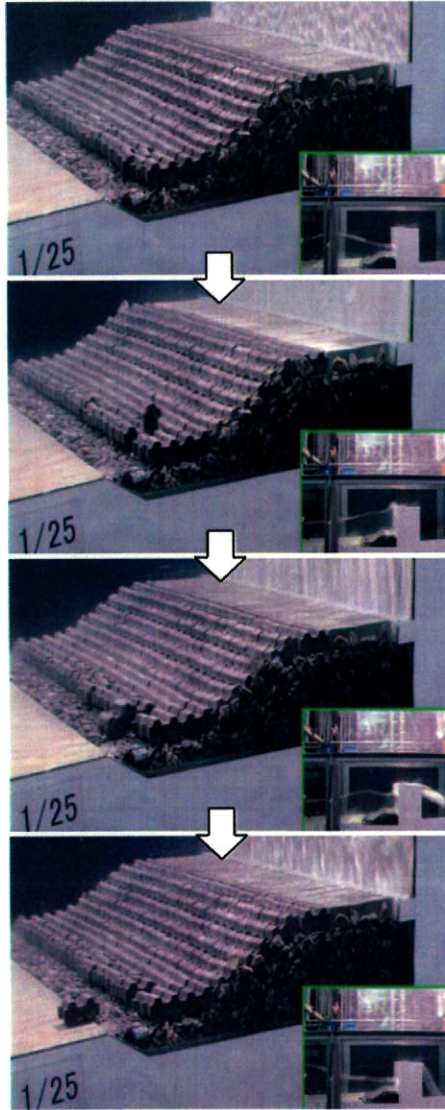
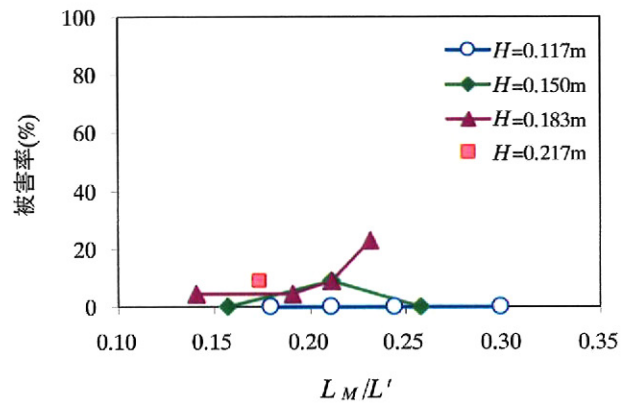


写真-1 法先部被覆ブロックの移動状況

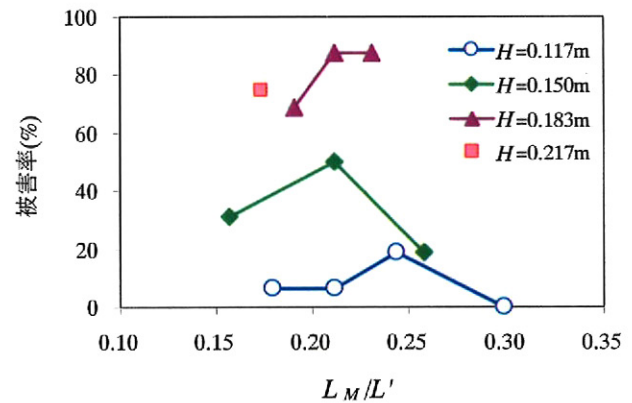
4. 数値波動水路を用いた規則波計算

(1) 計算条件

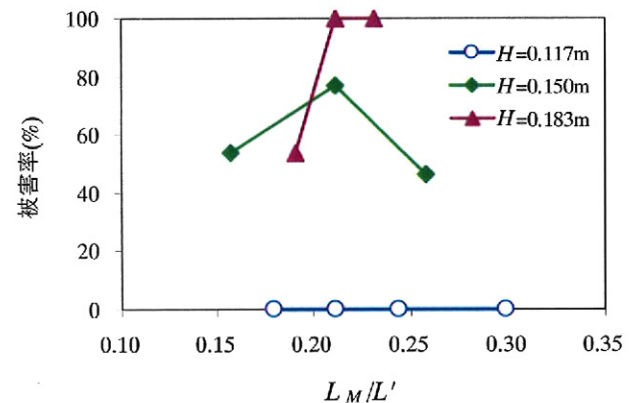
規則波作用時の法先部被覆ブロック周辺の流れを詳細に把握するために、実験と同じ断面条件に対して、数値波動水路CADMAS-SURFを用いた規則波計算を実施した。前述のとおり、実験でみられたブロックの移動には3次元的な流体運動の影響が小さいと考えられるため、ここでは鉛直2次元の計算を



(a)20t異形ブロック



(b)50t異形ブロック



(c)85t異形ブロック

図-4 波高 H およびマウンド水深相当波長 L' とブロック被害率の関係 (実験結果)

行った。これまでにも、数値波動水路を用いた鉛直2次元計算が被覆ブロック安定性の検討に用いられた事例^{3), 4)}があり、その適用性は既に確認されている。

表-3に計算条件を示す。計算条件は有光ら⁴⁾とほぼ同じであるが、造波方法を造波ソースから造波境界へと変更し、沖側の減衰帯に相当する計算領域を削減している。防波堤付近の計算格子間隔は $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ であるが、複雑な異形ブロックの形状を正確に表現することができないため、表-3に示した2種類

の異形ブロックは、それぞれの高さと長さを考慮した透過性矩形構造物として表現した。図-5に、法先部に20t異形ブロックを設置した条件に対する計算メッシュの配置を示す。有光ら⁴⁾では捨石の設定範囲を斜面部までとしていたのに対して、本検討では、実験状況に合わせ2列の法先部被覆ブロックの下方までに変更している。これにより、法先部被覆ブロックの下方の捨石部分における流体運動を考慮することができ、より現地および水理模型実験に近い条件で計算を実施していることになる。

法先部被覆ブロック周辺の流況場の計算に先立ち、防波堤を設置しない条件で通過波検定を行い、水理実験で実施した通過波検定の結果と比較し、防波堤設置位置付近の波高分布が実験と同等となるように入力波高値を設定した。

表-3 計算条件

実験縮尺	1/60
造波方法	造波境界
差分スキーム	VP-DONOR-0.2
境界条件	流速・圧力：スリップ条件 VOF関数：フリー条件
ボース下限値	0.1
慣性力係数 C_M	ブロック：1.0, マウンド：1.0
抗力係数 C_D	ブロック：1.0, マウンド：1.2
空隙率 e	ブロック：0.28, マウンド：0.44

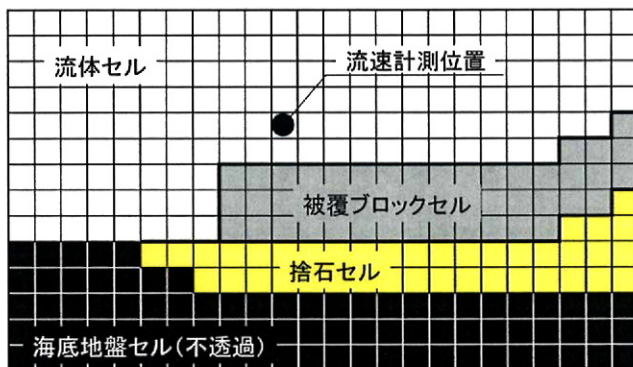


図-5 法先部周辺の計算メッシュ

表-4 波浪条件とブロック重量（計算条件）

波高 H (m)	周期 T (s)	ブロック重量(t)
0.183	1.65	20, 50
	1.98	20, 50

(2) 流速の計算結果と実験結果との比較

図-6に、法先部に20t異形ブロックを設置し、 $H=0.183\text{m}$ 、 $T=1.65\text{s}$ の規則波を作用させた条件下における、法先部被覆ブロック近傍（図-5中の●の位置）の水平流速の計算結果と実験結果の比較を示す。図には、同じ位置における水位の計算結果もあわせて示す。計算結果は実験結果を精度よく再現できていることが確認できる。なお、水平流速の最大値は、岸向きに比べて沖向きの方が大きく、実験で見られた引き波時に大きく沖向きに移動する被災状況と一致する結果となっている。

(3) 入射波条件による法先部近傍の流況場の差異

図-7に、法先部被覆ブロックに20t異形ブロックを設置した際の、防波堤付近における波高計算結果の岸沖方向分布を示す。図には、水理実験で計測したマウンド法肩・法先付近の波高もあわせて示す。比較できるのは2点のみであるが、計算結果が実験結果とよく一致していることが確認できる。波高が極小となる位置、すなわち重複波の節が生じる位置は周期によって若干異なり、 $T=1.65\text{s}$ ($L_M/L'=0.23$) の条件の方が、 $T=1.89\text{s}$ ($L_M/L'=0.19$) と比べると法先部の近くに節が生じている。図-4(a)に示した被覆ブロック被害率の実験結果では $T=1.65\text{s}$ のケースの被害率が大きくなっており、波高が同じ条件の場合には、重複波の節の位置が法先部に近いほど、法先部被覆ブロックが不安定になると考えられる。

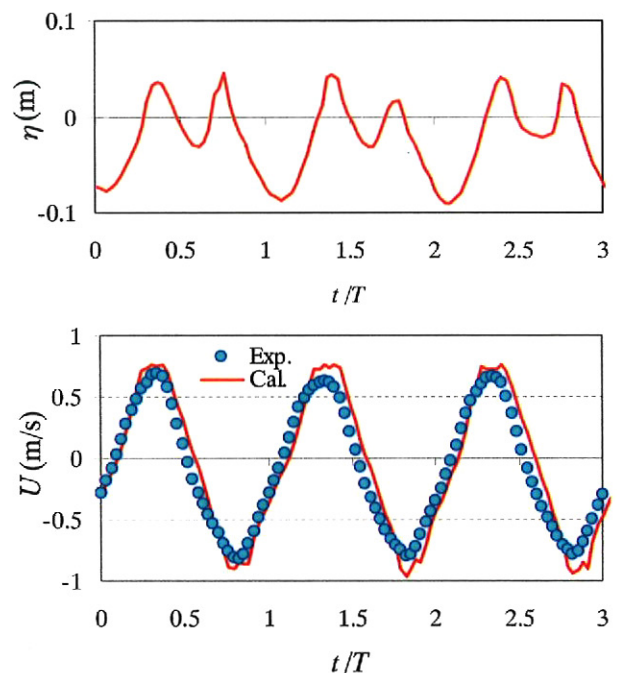


図-6 法先部被覆ブロック近傍における水位流速の実験結果と計算結果の比較

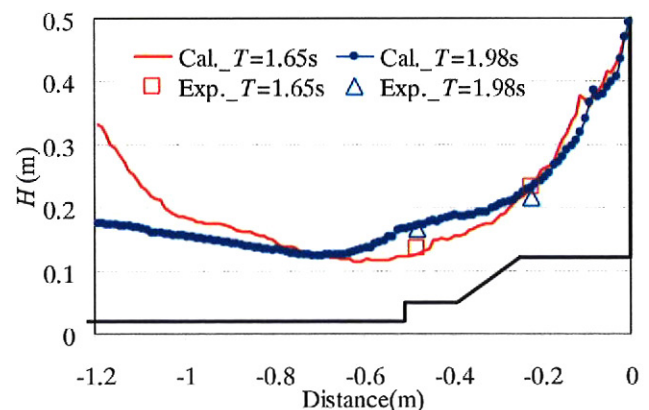


図-7 防波堤前面の波高分布（計算結果）

図-8に、法先部被覆ブロックの1つ沖側の計算メッシュにおけるブロック上面と底面に相当する高さの波動圧差 $P_U - P_L$ の時系列の計算結果を示す。なお、ここでは、全圧力から静水圧を差し引いた圧力成分を波動圧と定義している。通常、押し波時の波動圧の鉛直分布は静水面に近いほど大きくなるのに対して、 $P_U - P_L$ は押し波時に負の値であり、底面付近の波動圧がブロック上面と比べて大きくなっている。

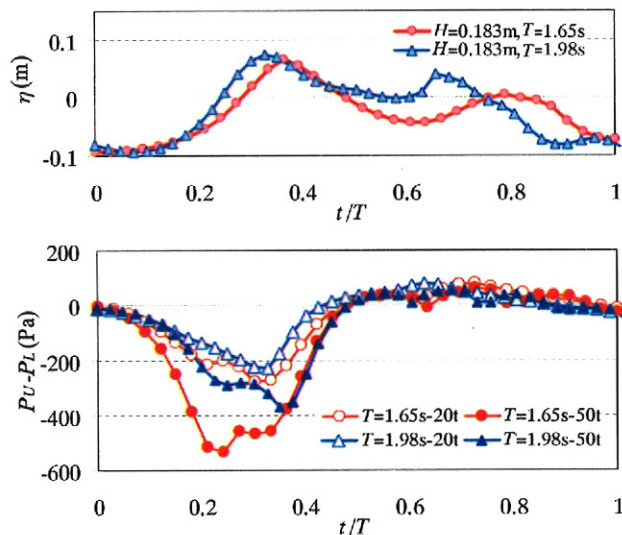


図-8 法先部被覆ブロックの上面と底面の波動圧差（計算結果）

20tと50tの異形ブロックを比較すると、波浪条件が同じ場合、ブロック重量が大きいほどブロック上下の圧力差が大きい。このことから、水理実験でブロック重量が大きいほど被害率が大きかったケースでは、異形ブロックの上下の圧力差の増大が、ブロック重量割増の効果を上回ったためであると考えられる。

また、同じ重量のブロックに対しては周期により圧力差に差異が生じ、 $T=1.65s$ の波動圧差の方が大きくなっている。これは、図-6に示したとおり、 $T=1.65s$ の方が重複波の節の位置が法先部に近く、水平流速が大きいため、ブロック上下に顕著な圧力差が生じたためであると考えられる。

図-9に、図-8に示した1周期間のブロック上下の波動圧差が最大となったときの波動圧差の値 $(P_U - P_L)_{MAX}$ と被覆ブロックの水中重量をブロック底面積で除したブロック接地圧 P_B の比と、水理実験における被害率の関係を示す。全体的に、横軸の値が-1より小さい場合、すなわち重力よりも揚圧力が大きい条件では、被覆ブロックの被害率が大きいことがわかる。また、同じ波浪条件であれば、20t異形ブロックに比べて50t異形ブロックに作用する揚圧力の影響が大きく被害率が大きくなっている。また、同じ重量の異形ブロックに対しては、 $T=1.65s$ のケースの方が揚圧力の影響が大きくなっている。

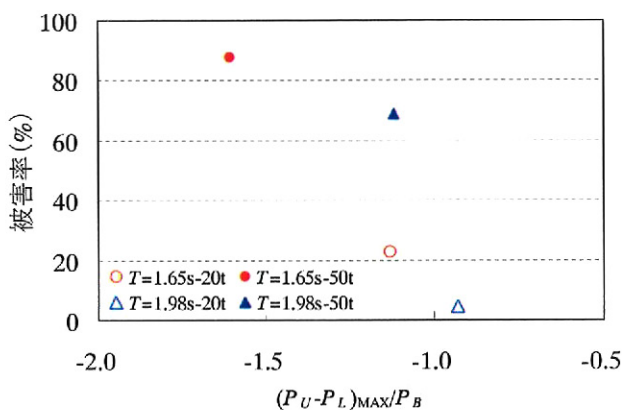
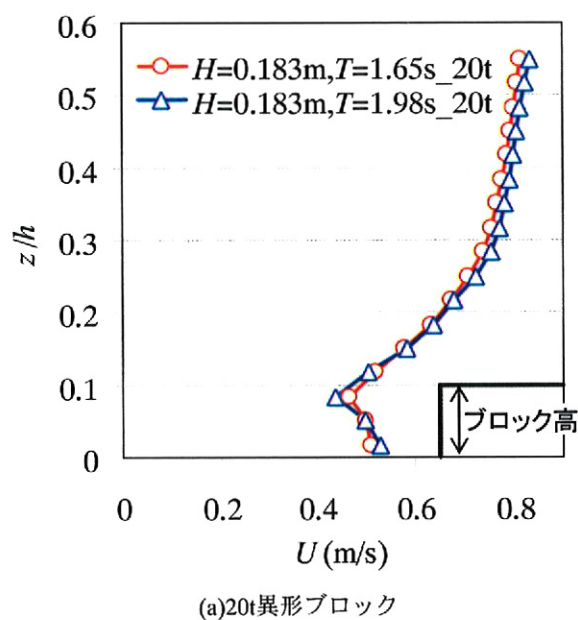
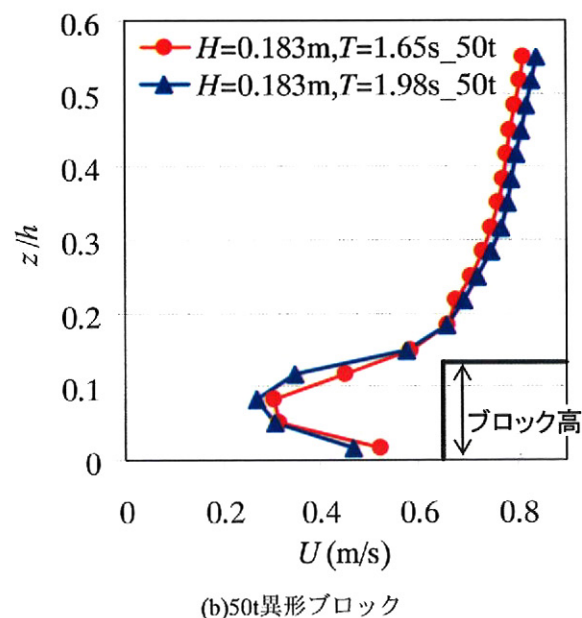


図-9 重力と揚圧力の比（計算結果）と被覆ブロック被害率（実験結果）の関係



(a)20t異形ブロック



(b)50t異形ブロック

図-10 岸向き最大流速の鉛直方向分布（計算結果）

図-10に、法先部被覆ブロック付近における岸向きの最大水平流速の鉛直分布（計算結果）を示す。ブロック上での顕著な流速増大がみられないように、20tと50tの被覆ブロックを比較しても、ブロック上方（ $z/h \geq 0.2$ ）の流速分布にはブロック高による差異は認められない。一方で、海底面からブロック高までの範囲では、20t異形ブロックと比べると50t異形ブロックの場合に顕著な流速低減が認められる。このことから、図-7に示したブロック上下の波動圧差は、ブロックがもたらす流れの阻害による岸向き流速の低減に起因していると考えられる。

以上のことから、水理実験においてみられた、ブロック重量を増加した場合の被害率の増加は、ブロック高の増加による岸向き流速の低減に起因する底面付近の圧力増大の影響が、重量割増の効果を上回ったためであると考えられる。

5. 結論

本研究では、入射波条件とマウンド法先部に設置された被覆ブロックの安定性の関係を明らかにするために、規則波動場における水理実験と数値波動水路CADMAS-SURFを用いた規則波計算を実施した。得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- ①水理実験の結果から、波高が小さい条件ではブロックの重量割増による安定性向上効果がみられるものの、高波浪に対しては重量割増が安定性を低下させることが明らかとなった。
- ②ブロック重量が同じ場合、入射波の波長が防波堤から法先部までの距離の4倍に相当する条件で、最も不安定となることが認められた。
- ③数値計算の結果から、法先部被覆ブロックの被災は、端部の被覆ブロックが岸向きの流れを阻害することによる流速低減に伴う底面付近の圧力増大に起因するものであると判断される。重量割増し

た法先部被覆ブロックが被災するのは、流れの阻害による圧力増大の影響が重量割増の効果を上回ったためであると考えられる。

- ④水理実験と数値計算の結果より、法先部被覆ブロックの重量割増には、ブロック高の増加による安定性低下の影響と、重量増加による安定性向上の効果が混在し、波高が大きい場合には安定性低下の影響が大きいといえる。

謝辞：水理実験にあたっては、（株）日本工業試験所・新幸弘行氏の協力を得たことを記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、1485p., 2007.
- 2) 谷本勝利，柳生忠彦，村永努，柴田鋼三，合田良実：不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究，港湾技術研究所報告，第 29 巻，第 2 号，pp.3-42, 1982.
- 3) 大熊義夫，興野俊也，柴崎尚史，安田勝則，中野修：流速場における混成堤断面の被災状況の相違によるブロック安定性検討，海岸工学論文集，第 50 巻，pp.751-755, 2003.
- 4) 有光剛，安岡恒人，川崎浩司：防波堤マウンド法先部被覆ブロックの被災メカニズムの検討，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.946-950, 2008.
- 5) (財)沿岸開発技術センター：数値波動水路（CADMAS-SURF）の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリーNo.12, 457p, 2001.
- 6) 稲垣鉦史，片山猛雄：被災例による混成堤マウンド被覆石の安定限界の検討，港湾技研資料，No.127, 22p, 1971.