

波浪による捨石堤施工途中の被災変形特性に関する研究

酒井 大樹¹・辻本 剛三²・金澤 剛³・神田 泰成⁴

¹正会員 熊本大学大学院 自然科学教育部
(〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1)

E-mail: 205d8101@st.kumamoto-u.ac.jp

²フェロー会員 熊本大学大学院 先端科学部
(〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1)

E-mail: tgozo@kumamoto-u.ac.jp

³正会員 東洋建設(株) 土木事業本部総合技術研究所鳴尾研究所
(〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 1-25-1)

⁴東洋建設(株) 土木事業本部総合技術研究所鳴尾研究所
(〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 1-25-1)

施工途中の捨石堤に台風等による高波浪が作用し、被災することが現場で問題となっている。しかし、施工途中の捨石堤に着目した研究は十分ではなく、捨石堤の被災過程や変形特性については不明瞭な点が多い。そこで本研究では、施工途中の捨石堤の被災変形特性について検討した。天端高の低下は、天端幅が広いケースで緩やかになり、沖側への被災は波が作用してから1時間(現地換算)でピークを迎えた。統計学において分布形状の非対称性を示す歪度で捨石堤形状の評価したところ、波形勾配 $H_{1/3}/L > 0.03$ では常に岸側に歪んだ形状となることがわかった。捨石堤の変形形状に関しては、天端幅と波長の比である相対天端幅 $W_T/L \approx 0.025$ で歪度が正となり、 $W_T/L > 0.075$ で歪度が負となることがわかった。本研究結果は、現地において施工中に被災を受けた捨石堤の被災メカニズムを把握するための一助となることを期待する。

Key Words : during construction, damaged deformation characteristics of rubble mound, hydraulic model test, skewness

1. はじめに

埋立事業等の捨石護岸の一般的な施工過程を図-1に示す。初めに盛砂を行い、その上に捨石堤を施工する。その後、捨石堤上に上部工が築造され、捨石堤沖側法面は被覆石あるいは被覆ブロックによって覆われ、更には消波ブロックが設置されることもある。最後に捨石護岸の内側を埋め立てて最終形となる。最終形となった捨石護岸は安定するように設計されているため、想定以上の台風等による高波浪が来襲しない限り被災することはないと考えられる。しかし、捨石護岸の施工途中段階である捨石堤は、石材が剥き出しになっているため、その時期に台風等による高波浪が来襲した場合には、捨石堤の石材は飛ばされ大きく形状を変えて被災し、捨石堤の被災については多くの現場で報告されている。被災後は、必ず設計断面に戻す必要があるため、設計断面から大きく

変形した捨石堤の復旧は大きな手戻りとなり、工費および工期の面でも多大なコストが掛かる。そこで、現場からは施工途中の捨石堤の被災を防ぐ、あるいは緩和させる工法が求められている。

捨石堤の形状変化について、Van der Meerら¹⁾、Ahrens²⁾は水理模型実験を、荒木ら³⁾は実験に加え断面変形計算

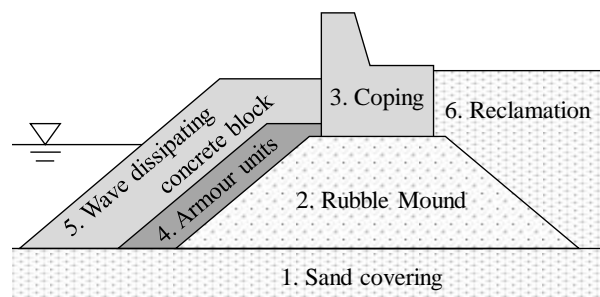


図-1 捨石護岸の施工手順

を実施しているが、捨石堤天端は水面よりも高く、沖側法面の斜面形状変化に着目している。本研究では、施工途中に着目していることから、捨石堤天端は水面以下の場合を想定している。その場合、捨石堤の天端上の石材が移動する要因として石材に作用する流速が考えられるため、酒井ら⁹⁾は天端上の流速評価にオープンソースであるOpenFOAMを利用した数値解析によるアプローチを試みている。また、被災対策に関して、福水ら⁹⁾は捨石堤内に透過性構造物を設置した変形抑制工に関する水理模型実験を実施し、その効果について検討している。しかし、水理模型実験ではその有用性について示されたが、現場への適用に関して実現性に課題を残している。

施工途中の捨石堤の被災変形特性に関する知見は、適切な対策を講じるために重要である。施工途中に着目した研究ではないが、Van der Meerら⁹⁾は捨石堤天端が水面以下の場合で水理模型実験を実施しており、著者らが実験から得た被災断面形状と同じような断面形状を示している。荒木ら⁷⁾は個別要素法を用いた断面変形計算を実施している。しかし、施工途中の捨石堤に着目した研究は十分ではなく、特に一定時間間隔で捨石堤の被災過程や変形特性に着目して実験を行った研究は無い。そこで、酒井ら⁹⁾は捨石堤の被災過程について水理模型実験を実施し図-2に示す被災メカニズムを明らかにした。高波浪が作用した捨石堤天端の被災は主に沖側と岸側に分けた。

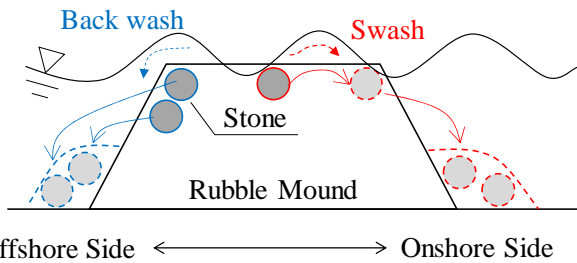


図-2 捨石堤の被災メカニズム

れた。沖側は、引き波が要因となり、岸側は押し波によって被災することがわかった。特に岸側への被災は顕著であり、時間経過とともに天端上の多くの石材が岸側へ運ばれた。高波浪を対象とした実験ケースでは、現地換算で24時間後には初期天端高に対して約4割まで天端高が低下するという結果が得られた。但し、被災過程を基礎的に把握するに留まっており、変形特性を把握するには実験ケース数が十分ではなかった。

そこで本研究では、酒井ら⁹⁾が実施した水理模型実験

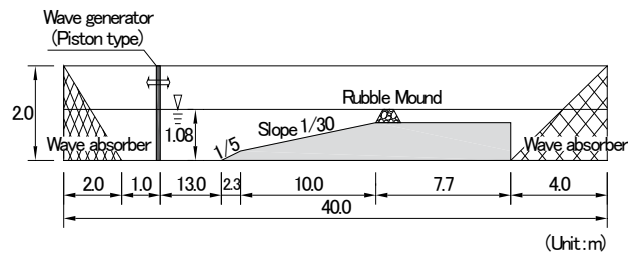


図-3 二次元造波水路

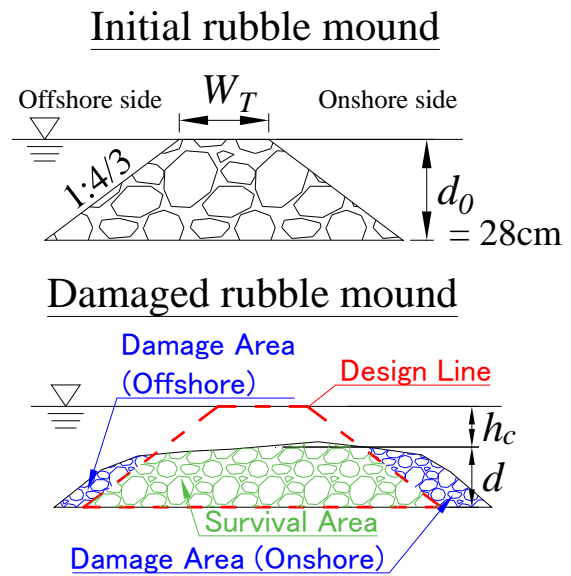


図-4 捨石堤の変数定義 (上段：初期形状, 下段：被災形状)

表-1 実験ケース一覧

	Exp. scale			Wave steepness $H_{1/3}/L$	Exp. scale			Wave steepness $H_{1/3}/L$	Exp. scale			Wave steepness $H_{1/3}/L$		
	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	W_T (cm)		$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	W_T (cm)		$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	W_T (cm)			
CASE1	10	2.0	12	0.032	CASE13	10	2.5	24	0.025	CASE25	10	3.0	36	0.021
CASE2	12	2.0	12	0.038	CASE14	12	2.5	24	0.030	CASE26	12	3.0	36	0.025
CASE3	14	2.0	12	0.044	CASE15	14	2.5	24	0.035	CASE27	14	3.0	36	0.029
CASE4	10	2.5	12	0.025	CASE16	10	3.0	24	0.021	CASE28	10	2.0	48	0.032
CASE5	12	2.5	12	0.030	CASE17	12	3.0	24	0.025	CASE29	12	2.0	48	0.038
CASE6	14	2.5	12	0.035	CASE18	14	3.0	24	0.029	CASE30	14	2.0	48	0.044
CASE7	10	3.0	12	0.021	CASE19	10	2.0	36	0.032	CASE31	10	2.5	48	0.025
CASE8	12	3.0	12	0.025	CASE20	12	2.0	36	0.038	CASE32	12	2.5	48	0.030
CASE9	14	3.0	12	0.029	CASE21	14	2.0	36	0.044	CASE33	14	2.5	48	0.035
CASE10	10	2.0	24	0.032	CASE22	10	2.5	36	0.025	CASE34	10	3.0	48	0.021
CASE11	12	2.0	24	0.038	CASE23	12	2.5	36	0.030	CASE35	12	3.0	48	0.025
CASE12	14	2.0	24	0.044	CASE24	14	2.5	36	0.035	CASE36	14	3.0	48	0.029

をベースに実験ケース数を増やして、高波浪条件下における捨石堤の被災変形特性について検討した。

2. 実験方法

実験は図-3に示す長さ40.0m、高さ2.0m、幅1.0mのピストンタイプの二次元造波水路を使用した。模型縮尺は1/25とし、捨石堤模型は中央粒径1.3 cm、平均質量3.4 gの砕石で成形した。模型位置は1/30勾配の変化点に捨石堤模型の沖側法尻を合わせた。図-4に示す捨石堤の変数定義の上段より、実験に使用した捨石堤模型の初期天端高は $d_0 = 28$ cm、法面勾配は1:4/3、天端幅 W_T は12 cm~48 cmに変化させた。水位は初期天端高 d_0 と同じく仮設床から28cmである。実験条件は表-1に示すように、有義波高 $H_{1/3}$ が3パターン、周期 $T_{1/3}$ が3パターン、天端幅 W_T が4パターンの計36ケースである。また、波形勾配に関する波長 L は、模型設置位置の水深から求めた値である。捨石堤の初期形状4パターンは、法面勾配は1:4/3で共通とし、天端幅 W_T を変化させた。図-4下段に示すように波の作用によって低下した捨石堤の天端高を d 、 d から水面までを天端水深を h_e と定義した。天端高 d は、天端に石材の不陸が見られたため、天端最頂部から3cmの範囲の平均値とした。石材一つが大きいもので約3cmであることからそのように設定した。また、設計断面から外れた石材箇所を被災エリア、設計断面内に留まった石材箇所を残存エリアと定義し、さらに被災エリアは沖側と岸側に分けた。波は修正ブレットシュナイダー光易型スペクトルの不規則波を作用させ、通過波検定は捨石堤模型の沖側法尻の位置で行った。造波継続時間は4.8時間で現地スケールでは24時間に相当する。捨石堤断面形状の計測は、水路側方より水路のガラス面越しにビデオカメラで撮影した動画から0.2時間毎（現地スケールで1時間毎）に静止画像を抽出した。1ケース当たり、初期形状を含

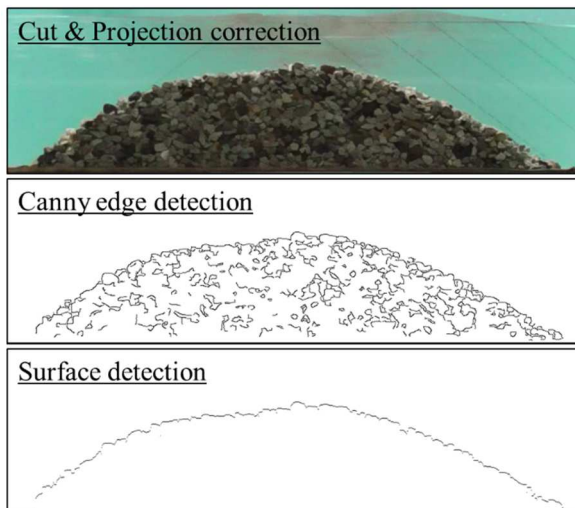


図-5 画像解析手法による捨石堤断面形状計測

む合計25枚の画像を解析して変形過程を検討した。画像解析は、図-5に示す画像から捨石堤の形状のみを抽出可能な画像解析手法で行っており、Canny法をベースに酒井ら⁹が構築した計測手法である。多量のデータを効率的に解析することが可能で、解析結果の妥当性はすでに確認している。

3. 実験結果

(1) 相対天端高 d/d_0 の時間変化

図-6に天端幅 W_T 別に相対天端高 d/d_0 の時間変化を示す。横軸の時間は現地換算で示している。縦軸 d/d_0 は波が作

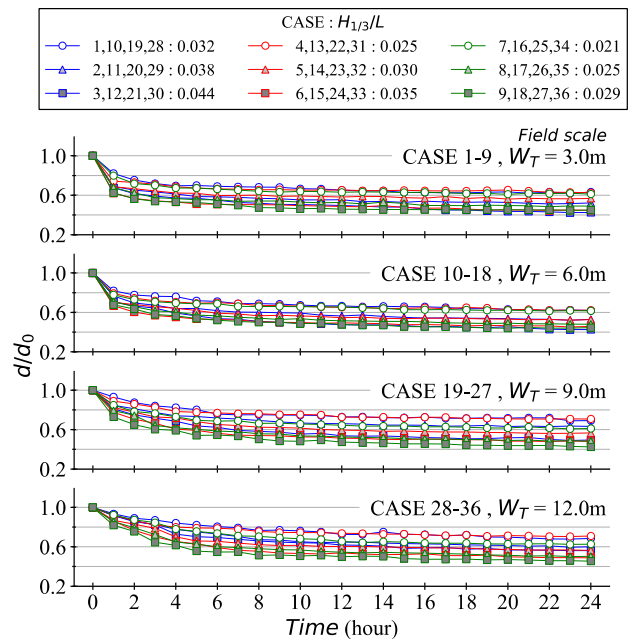


図-6 相対天端高の時間変化（全ケース）

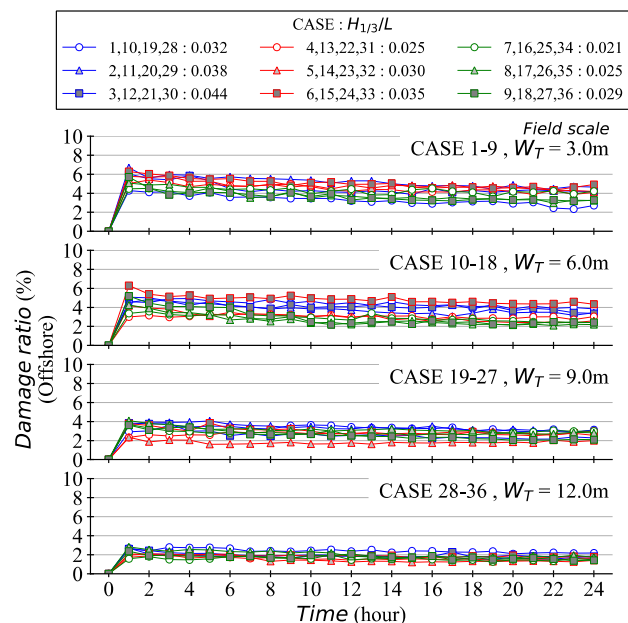


図-7 沖側被災率の時間変化（全ケース）

用した後の捨石堤の天端高 d と初期天端高 d_0 の比である。ここでは天端高の時間経過と天端幅による変化傾向に着目した。全ケースの傾向として、 d/d_0 は波が作用し始めると急激に低下し、その後緩やかに安定するように変化した。0~6時間に注目すると、 W_T が大きいほど d/d_0 の低下が緩やかに進行している。波が作用し始めてから1時間後までは、 $W_T=3.0\text{m}$, 6.0m (CASE1~18)において、 d/d_0 の低下が著しく、 $d/d_0=0.6\sim 0.8$ まで低下した。また、各天端幅 W_T で捨石堤に作用する波高 $H_{1/3}$ が大きいほど相対天端高 d/d_0 は小さくなることがわかった。

(2) 被災率の時間変化

ここでの被災率とは、初期断面積に対する被災エリアの面積比で、沖側と岸側に分けられる。図-7に沖側の被災率の時間変化を示す。全ケースにおいて、1時間後にピーク値が見られる。その後緩やかに低下しているが、

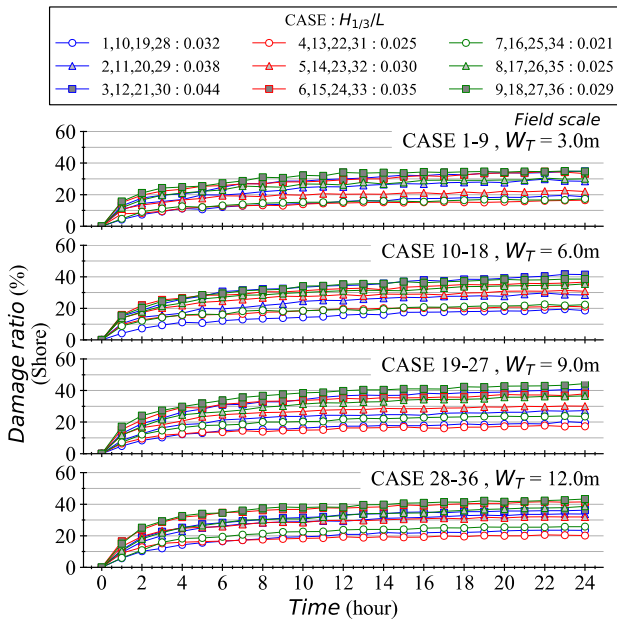


図-8 岸側被災率の時間変化 (全ケース)

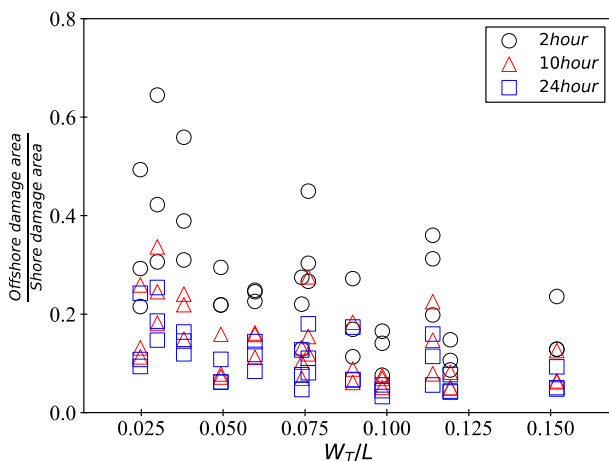


図-9 被災面積比と相対天端幅の関係

波の作用によって沖側法面が締まっていく様子が実験から確認できた。また、 W_T が小さいと沖側の被災率は大きくなった。図-8に岸側の被災率の時間変化を示す。全ケースにおいて時間経過とともに徐々に被災率が大きくなった。 $W_T=3.0\text{m}$ のケースでは、岸側被災率が40%を超えるケースはなかった。 $W_T \geq 6.0\text{m}$ では捨石堤に作用する波高 $H_{1/3}$ が大きいケース (CASE12, 21, 27, 33, 36) で24時間後の岸側被災率が40%を超えた。図-9に沖側と岸側の被災面積比と天端幅 W_T と波長 L の比である相対天端幅 W_T/L の関係を示す。波を作用させてから2時間、10時間、24時間後のデータをプロットした。 W_T/L が小さいほど被災面積比は大きくなった。また、いずれのケースにおいても時間経過とともに被災面積比は小さくなる傾向となった。これは、図-7より沖側被災率は波が作用し始めて早い段階で値が一定になったのに対して、図-8より岸側被災率は時間経過とともに徐々に値が大きくなったためである。

(3) 歪度を用いた捨石堤変形状の評価

捨石堤の変形状を特徴付けるために統計学において分布形状の非対称性を示す歪度 S_k を用いた。図-10にイメージ図で歪度について示す。統計学では、ヒストグラムの形状が左に歪んでいると $S_k > 0$ となり、右に歪んでいると $S_k < 0$ となる。また、左右対称の場合は $S_k = 0$ となる。本研究では、捨石堤の断面形状が沖側に歪んでいれば $S_k > 0$ となり、岸側に歪んでいれば $S_k < 0$ となる。捨石堤の初期形状に関しては、左右対称となっているので $S_k = 0$ となる。

図-11に被災変形過程の一例を示す。(a)はCASE28, (b)はCASE3の結果である。両図において、設計断面および初期の捨石堤形状は、上述の説明のとおり左右対称であるため、 $S_k=0$ となった。(a)では、捨石堤は、波の作用時間が長くなるにつれて天端高が低くなり、それに伴って岸側に伸びていき、岸側で積み重なるように形状を変えた。捨石堤変形状の歪度は、1時間後に $S_k = -0.12$, 24時間後は $S_k = -0.10$ であった。いずれも負の値となったため、岸側に歪んだ形状に変形したことがわかる。(b)では、波が作用してから1時間後は $S_k = 0.02$ で時間経過とともに、12時間後は $S_k = 0.06$, 24時間後は $S_k = 0.15$ と値が増加した。被災変形過程の様子から、波の継続的な作用によって天

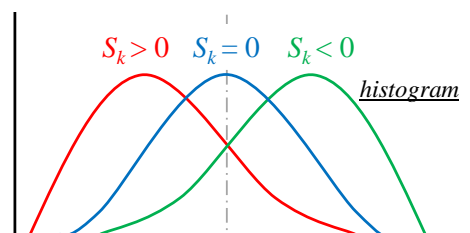
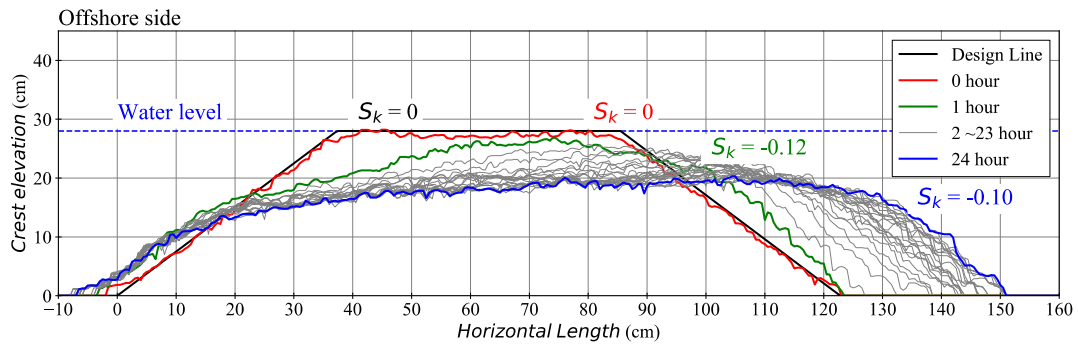
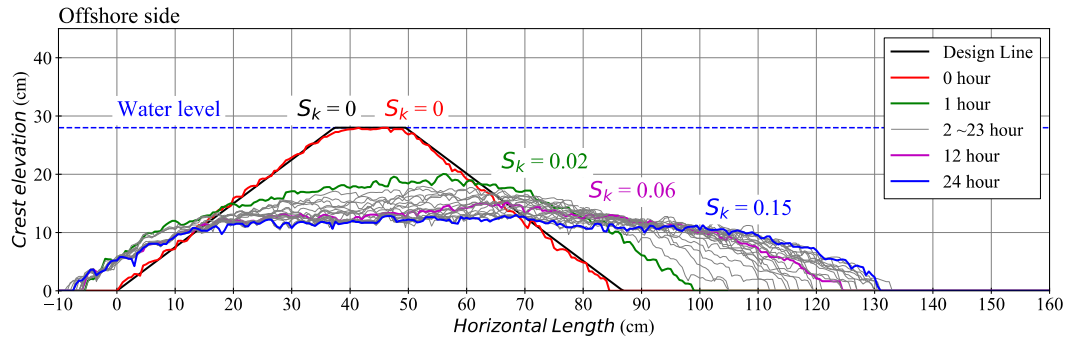


図-10 歪度について



(a) CASE28 : $H_{1/3}=10\text{cm}$, $T_{1/3}=2.0\text{s}$, $W_T=48\text{cm}$



(b) CASE3 : $H_{1/3}=14\text{cm}$, $T_{1/3}=2.0\text{s}$, $W_T=12\text{cm}$

図-11 被災変形過程および歪度の一例

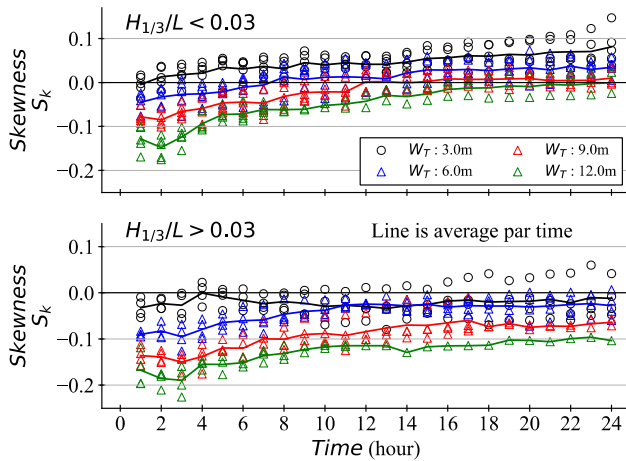


図-12 歪度の時間変化 (上段 : $H_{1/3}/L < 0.03$, 下段 : $H_{1/3}/L > 0.03$)

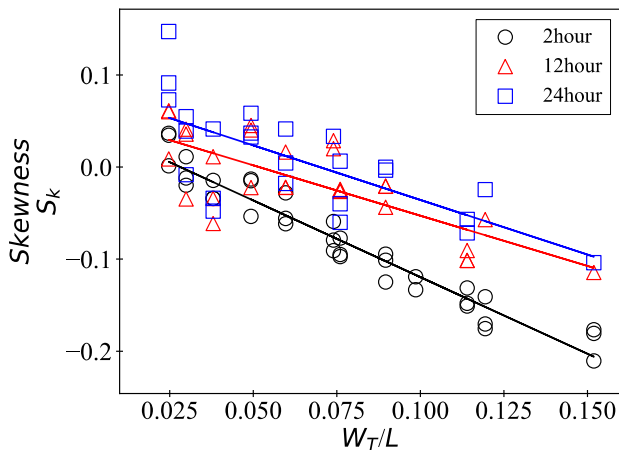


図-13 歪度と相対天端幅の関係

端上の石材は徐々に岸側に移動していく。その過程で岸側法尻の勾配は緩くなるため、断面形状としては左側に歪み、 S_k は増加したと考えられる。

図-12に歪度 S_k の時間変化を示す。分類として波形勾配で分けており、上段は $H_{1/3}/L < 0.03$ 、下段は $H_{1/3}/L > 0.03$ の結果を示す。色は天端幅 W_T で分けており、実線は各時刻のデータの平均値を示す。両図において W_T は大きいほど S_k の値は小さくなる結果となった。これは、図-7の結果から、 W_T が小さいと捨石堤沖側の被災が大きくなることが影響していると考えられる。 $H_{1/3}/L < 0.03$ に注目すると、 $W_T = 3.0\text{m}$ では波が作用してから常に S_k は正の値となり沖側に歪んだ形状を維持したということがわかる。 $W_T = 3.0\text{m}$ では波が作用してから7時間後までは S_k の値は負の値だったが、8時間後を境に正の値に遷移していった。 $W_T = 9.0\text{m}$ 、 12.0m について、データは右肩上がりとなっているが、 S_k は徐々に0に漸近する形に留まった。次に $H_{1/3}/L > 0.03$ に注目すると、 $W_T = 3.0\text{m}$ で一部のケースで S_k が正の値となっているが、ほとんどのケースで S_k は負の値となり、岸側に歪んだ形状を維持したことがわかった。その結果として、図-13に歪度 S_k と相対天端幅 W_T/L の関係について、波が作用してから2時間、12時間、24時間後のデータを示す。全体の傾向として W_T/L が大きくなると S_k は負の値となり、岸側に歪んだ形状に変化することがわかった。また、時間経過に伴い W_T/L に関係なく、歪度は負から正に変化している。さらに分類として、多くのケースにおいて $W_T/L \approx 0.025$ で $S_k > 0$ となり、 $W_T/L > 0.075$ で $S_k < 0$ になった。

4. まとめ

本研究では、高波浪条件下を対象とした施工途中の捨石堤の被災変形特性について検討した。本研究から得られた結果を以下に示す。

- (1) 天端高の低下は、天端幅が広いケースで緩やかになることがわかった、また、各天端幅において捨石堤に作用する波高が大きいかほど天端高は低下することがわかった。
- (2) 沖側への被災は高波浪が作用してから現地換算で1時間後にはピークを迎えることがわかった。
- (3) 天端幅の最も狭いケース $W_T = 3.0\text{m}$ では岸側被災率が40%を超えることは無かった。しかし、 $W_T \geq 6.0\text{m}$ では波高が高いケースでは24時間後の被災率が40%を超えることがあった。
- (4) 相対天端幅 W_T/L が小さいほど被災面積比は大きくなった。また、時間経過とともに沖側と岸側の被災面積比は小さくなった。
- (5) 統計学において分布形状の非対称性を示す歪度で捨石堤形状の評価を行った。波形勾配 $H_{1/3}/L > 0.03$ では多くのケースで、波が作用し続けても歪度は負の値となっており、常に岸側に歪んだ形状となることがわかった。
- (6) 捨石堤の変形形状に関しては、相対天端幅 $W_T/L \doteq 0.025$ で歪度が正となり、 $W_T/L > 0.075$ で歪度が負となることがわかった。また、時間経過に伴い、歪度は相対天端幅 W_T/L に関係なく負から正に変化することがわかった。

本研究結果は、現地において施工中に被災を受けた捨石堤の被災メカニズムを把握するための一助となることを期待する。また、施工途中において台風等による高波

浪が予測される場合には被災低減対策を講じることが重要である。しかし、現地で効果が期待できる対策工法については確立されていないため、本研究から得られた結果を考慮し、今後は現場への適用性の高い対策工法の提案に繋がりたいと考えている。

参考文献

- 1) Van der Meer, J.W.: Stability of breakwater armour layers – design formulae, *Coastal Engineering*, Vol.11, pp.219-239, 1987.
- 2) Ahrens, J.P.: Stability of reef breakwaters, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 115, No.2, PP.221-234, 1989.
- 3) 荒木進歩, 出口一郎: 捨石防波堤の断面変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.531-535, 1997.
- 4) 酒井大樹, 金澤剛, 辻本剛三: 捨石堤越波時の流速に対する OpenFOAM の適用性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 75, No. 2, pp. I_13-18, 2019.
- 5) 福水啓太郎, 酒井大樹, 金澤剛, 荒木進歩: 人工島捨石護岸施工時の変形抑制工に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I_1105-1110, 2017.
- 6) Van der Meer, J.W. and Daemen: Stability and wave transmission at low - crested rubble - mound structures, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 120, No.1, PP.1-19, 1994.
- 7) 荒木進歩, 藤原由康, 宮崎敏弘, 出口一郎: 個別要素法を用いた捨石潜堤の断面変形計算, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.761-765, 2000.
- 8) 酒井大樹, 金澤剛, 辻本剛三: 施工途中における捨石堤の波浪による被災過程に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 75, No. 2, pp. I_925-930, 2019.
- 9) 酒井大樹, 金澤剛, 辻本剛三: 捨石堤実験における断面形状画像計測手法の構築と実験の効率化, 土木学会全国大会第74回年次学術講演会, II-189, 2019.

(Received March 16, 2020)

(Accepted July 27, 2020)

A STUDY ON THE DAMAGE CHARACTERISTICS OF RUBBLE MOUND DURING CONSTRUCTION BY WAVES

Daiki SAKAI, Gozo TSUJIMOTO, Tsuyoshi KANAZAWA and Taisei KANDA

It is a problem at the site that high waves act on the rubble mound during construction and damage is caused. However, the research focusing on the rubble mound during construction is not enough, and there are many unclear points about the damage process and deformation characteristics of the rubble mound. In this study, therefore, we investigated the damage deformation characteristics of the rubble mound during construction. The decrease in mound height moderated when the mound width was wide, and the damage to the offshore peaked one hour after the waves acted. Regarding the deformed shape of the rubble mound, it was found that the skewness is positive when the relative mound width $W_T/L \doteq 0.025$, which is the ratio of the mound width to the wavelength, and is negative when $W_T/L > 0.075$. It is hoped that the results of this study will be helpful in understanding the damage mechanism of the rubble mound that was damaged during construction in the field.