

離岸堤消波ブロックの津波に対する安定性について*

株式会社不動テトラ 半沢 稔, 松本 朗, 東北大学大学院 田中 仁

1. はじめに

近年の東海、南海、東南海、宮城沖などの地震による津波発生リスクの高まりや、2004 年末に発生したインド洋大津波を契機に、津波災害軽減に向けた研究が精力的に進められている。例えば、海岸施設に作用する津波波力については、水谷・今村^{1), 2)}、朝倉ら³⁾、池野ら^{4), 5)}、加藤ら⁶⁾などの研究例がある。

しかし、多くの海岸で設置されている離岸堤に関する検討は、1983 年の日本海中部地震津波を契機に宇多ら⁷⁾、その後、中村ら⁸⁾によって津波遡上抑制効果について検討された以外にはほとんどなく、海岸堤防に作用する津波波力の離岸堤による低減効果は未解明である。前述のインド洋大津波の際には、モルディブのマレ島を対象とした解析の結果、島の前面に設置されている離岸堤が浸水域低減に効果を発揮したことが示唆されている(大谷ら⁹⁾) が、離岸堤の効果を設計に反映できるまでには至っていない。また、既往の研究においては、津波による離岸堤の被災は考慮されていないが、実際には津波によるブロックの散乱が報告されており(富樫ら^{10), 11)}、こうした現象を考慮することは離岸堤の防災効果を評価する上で必須である。

こうした背景を踏まえ、著者らは離岸堤の津波防災効果に着目し研究を行ってきた¹²⁾。今回、離岸堤消波ブロックの津波に対する安定性について実験検討を行ったので、ここに結果を報告するものである。

2. 実験方法・実験条件

実験には(株) 不動テトラ総合技術研究所所有の長さ 30m、幅 0.5m、深さ 1.0m の二次元造波水槽を用いた。本水槽はピストンタイプの造波装置を有している。図-1 に水槽内の配置を示す。

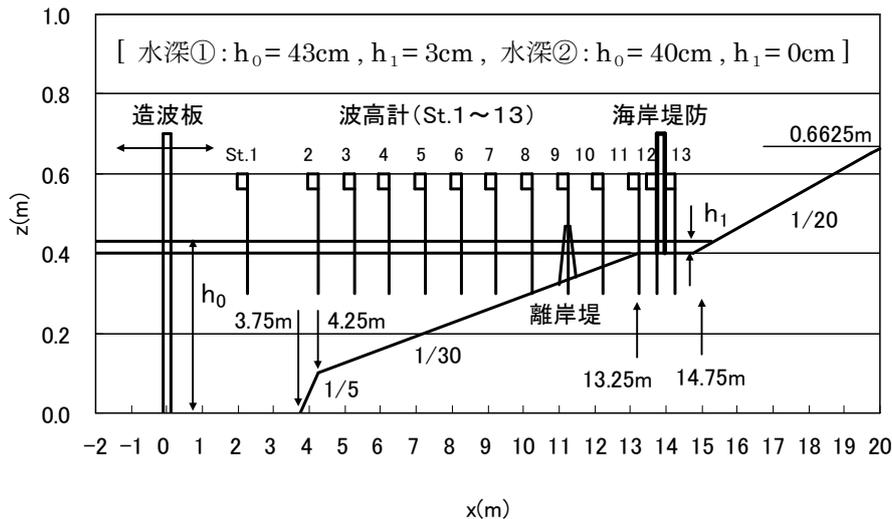


図-1 水槽内配置図

*Stability of detached breakwater against tsunami by Minoru Hanzawa, Akira Matsumoto and Hitoshi Tanaka

造波板の位置を $x=0\text{m}$ とし、 $x=3.75\sim 4.25\text{m}$ の区間を $1/5$ 勾配斜面、 $x=4.25\sim 13.25\text{m}$ の区間を $1/30$ 勾配斜面とした。そこから $x=14.75\text{m}$ までの 1.5m の区間を水平部とし、更に陸側には $1/20$ の斜面を形成した。

離岸堤は天端中心位置が $x=11.25\text{m}$ (St.9) となるように、テトラポッド (質量 $M=59\text{g}$) により天端3個並びで形成した。天端高はクリアランス (静水面上高さ) hc を 4cm とした場合をベースとした。図-2 (a) は沖水深 $h_0=43\text{cm}$ (離岸堤設置位置水深 $h=9.7\text{cm}$) の場合、(b) は $h_0=40\text{cm}$ ($h=6.7\text{cm}$) の場合の離岸堤断面を示しているが、両者共に天端幅および、クリアランスは同一としている。本断面は離岸堤断面として標準的なものを想定している。すなわち、クリアランスは使用したテトラポッド模型に対して、通常設計で用いられる KD 値 8.3 よりハドソン式¹³⁾にて計算される安定限界波高 8cm の $1/2$ として設定したものである。

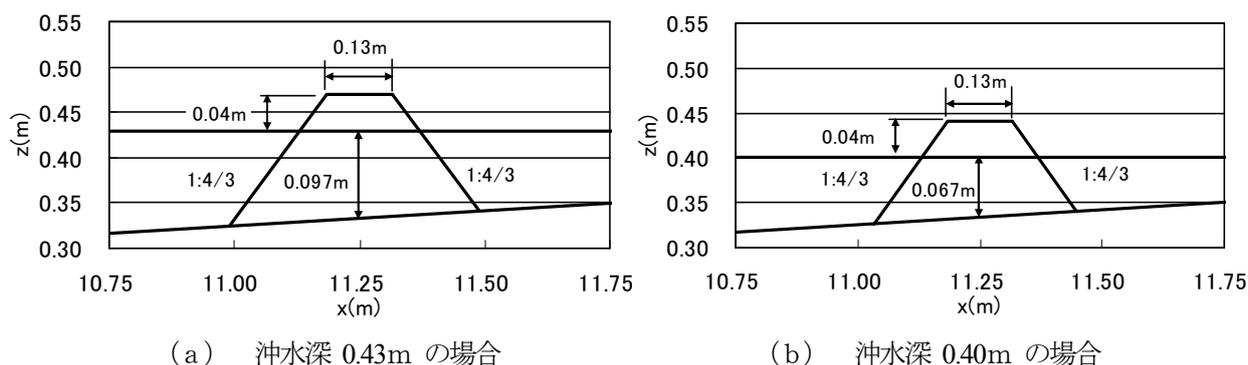


図-2 離岸堤断面図

表-1に実験ケースを示す。ケースAは離岸堤設置水深 $h=9.7\text{cm}$ の場合、Bは $h=6.7\text{cm}$ の場合である。ケースAについては、安定性に対する天端高の影響を見るため $hc=4\text{cm}$ のベースケースに加えて、 $hc=8\text{cm}$ および、 12cm の2ケースも対象とした。更に、安定性に対するブロック質量の影響を見るため、テトラポッドの質量を大きくした場合 ($M=98.6\text{g}$, 125g) についても実験を行った。

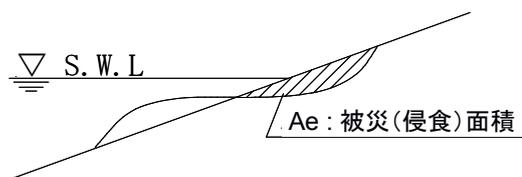
今回、実験波浪は津波の一形態として孤立波を対象とした。堤体は1波高ランクの波当て終了後に初期状態に戻して実験を行っている。

表-1 実験ケース表

ケース	離岸堤位置水深	天端高	テトラポッド質量
	h (cm)	hc (cm)	M (g)
A-1-1	9.7	4.0	58.9
A-1-2			98.6
A-1-3			125.0
A-2-1		8.0	58.9
A-2-2			98.6
A-2-3			125.0
A-3-1		12.0	58.9
A-3-2			98.6
A-3-3			125.0
B-1-1	6.7	4.0	58.9

3. 被災度の定義および測定方法

従来、消波ブロックの被災は被害率D (%) (ブロック全個数に対する被災ブロック個数の比率) で定義されることが多かった。今回はかなり大きな被災状況まで想定され、その際に被災ブロック個数特定に困難が伴うことが考えられた。そこで、van der Meer¹⁴⁾ が捨石堤に対して定義した被災パラメータSを用いることにした。Sは図-3で示される初期断面から被災を受けて減少した断面積Aeをブロックの代表長Dn (体積の3乗根) の2乗で除して算定される。すなわち、 $S = Ae / Dn^2$ である。



$$S = Ae / Dn^2$$

$$Dn = V^{1/3} \quad (V: \text{体積})$$

図-3 被災度の定義

被災断面積Aeの測定方法を以下に示す。水槽幅50cmの中に図-4に示すように4側線を設定した。すなわち、水槽壁に接する部分は消波ブロックのかみ合わせ状況が異なることから、幅5cmをダミーとした。残り40cm幅を検討対象範囲とし、5等分する形で4側線を設定したものである。岸沖方向には間隔1cmとして砂面計を用いて断面形を測定した。計測は波当ての前後に各点において行い、その差から被災断面積を算定した。なお、4側線のデータを平均して1断面のデータとした。

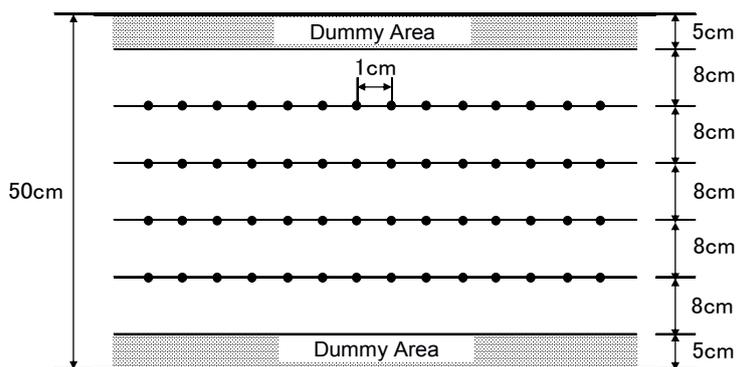


図-4 断面変化測定点

4. 実験結果

図-5は離岸堤設置水深 $h=6.7\text{cm}$ の場合を例にとり、断面変化の測定結果の一部を示したものである。(a)は入射津波高 η_{\max} が6.9cm、(b)は11.4cmである。 η_{\max} は図-1におけるSt.9における通過波状態(離岸堤が無い場合)での入射津波高で定義している。

図中、実線は波当前、破線は波当後の断面形状であり、点線は増減を示している。岸側法肩のブロックが下方へ移動している様子がわかる。先に定義した被災度パラメータSは(a)で1.27、(b)で3.74と算定される。従来の被災の定義に従い被害率D (%)で見ると、それぞれ $D=4.1\%$ および、 19.7% となる。また、入射津波高を風波の場合と同様にハドソン式¹³⁾に当てはめてKDを逆算してみると、(a)、(b)それぞれ、 $KD=4.1$ および、 19.7 と算定される。これらの値は図-5の各図の上にも記載している。

通常の風波に対しては $KD=8.3$ 相当の波高に対して、被害率Dは1%程度とされている。今回の結果からすると、(a)からわかるように、それよりも小さい波高レベル($KD=4.0$ 相当)に対して既に被害率4%

が生じており、風波に比べて津波の方がより大きな被災を生じることがわかる。

被災の発生形態について見ると、津波（孤立波）の波頂部が通過した後にブロックの被災が生じる傾向が見られた。また、通常、風波に対しては来襲波1波1波毎に不安定なブロックが抜け出るような形で被害が生じることが多いが、津波に対しては離岸堤岸側部のブロック部分が、あたかもすべり破壊を生じるような形で被害が生じることも特徴的である。津波の波頂部が通過するタイミングでブロックのかみ合わせが緩み、その後で一気に崩れるようなイメージである。こうした状況は特に津波高が大きい場合に顕著に見られた。以上の現象の物理的な解釈については今後の課題としたい。

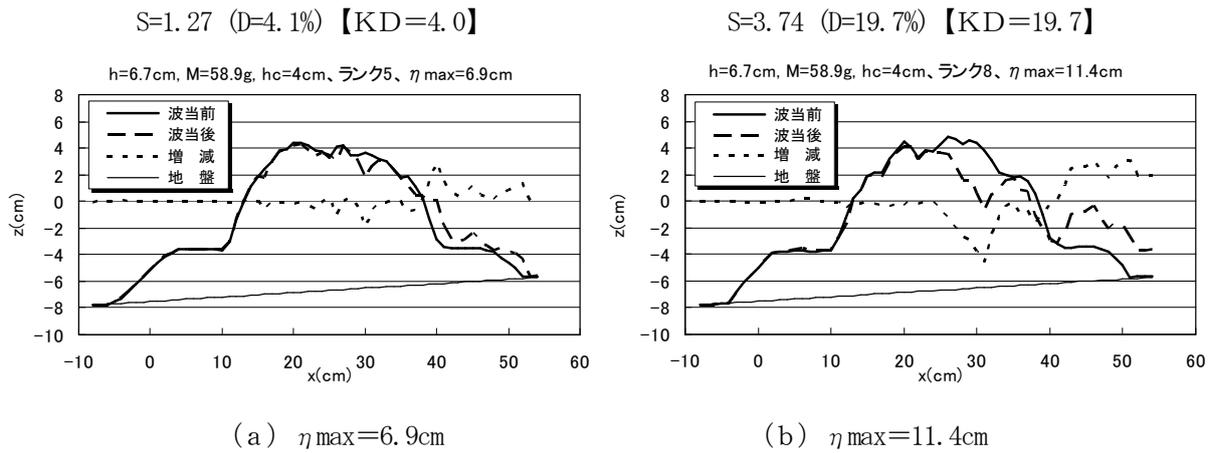


図-5 断面変化測定結果例（離岸堤設置 $h=6.7\text{cm}$ の場合）

図-6は設置水深 $h=9.7\text{cm}$ の場合の実験結果について、入射津波高 η_{\max} と被災度 S の関係をプロットしたものである。横軸は入射津波高 η_{\max} をブロックの代表長 Dn で無次元化してある。(a)、(b)、(c)はそれぞれクリアランス（天端高） $hc=4\text{cm}$ 、 8cm 、 12cm に対応している。各図中にはベースとなるブロック質量 58.9g の結果に加えて、 98.6g 並びに、 125g に対する結果も併せて示している。

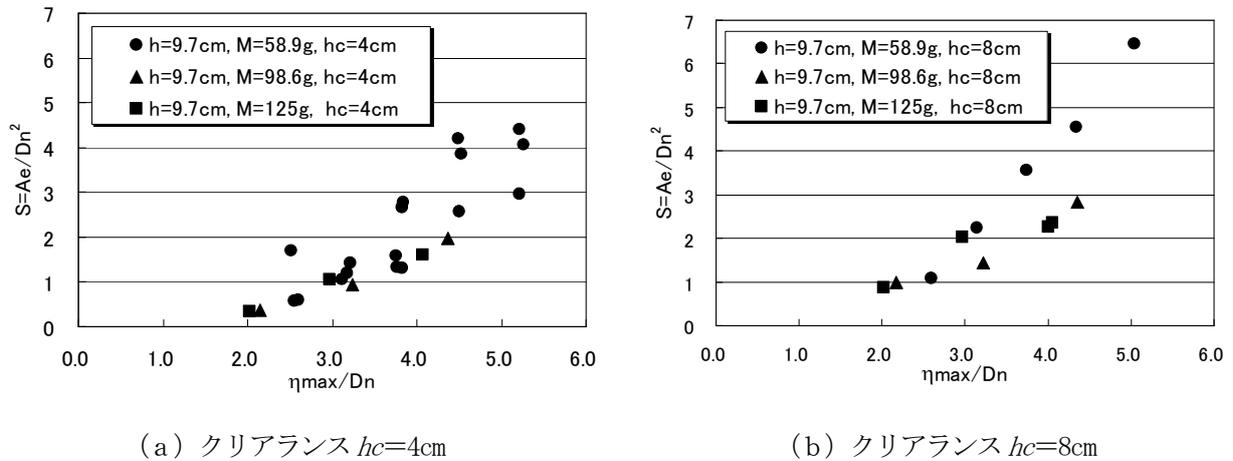
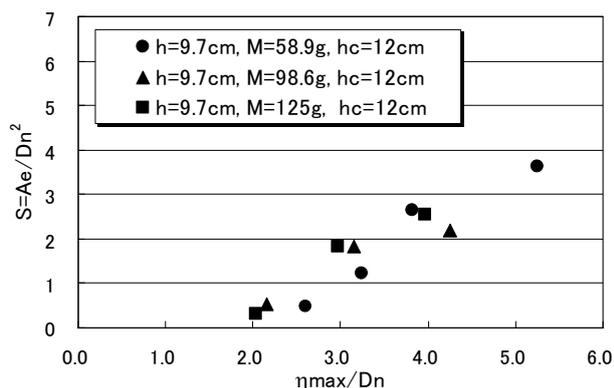


図-6 入射津波高と被災度の関係 ($h=9.7\text{cm}$)

どの質量についても入射波高が大きくなれば被災も大きくなるという結果であるが、その傾向は大まかには直線的である。また、データのばらつきはみられるものの、天端高によらずブロック質量増加による被災低減の効果も確認される。天端高を高くすることによっても、被災が低減できているように見えるが、その効果はブロック質量増加によるそれほど明確ではない。この辺りの現象の物理的な意味合いについても今後の課題としたい。

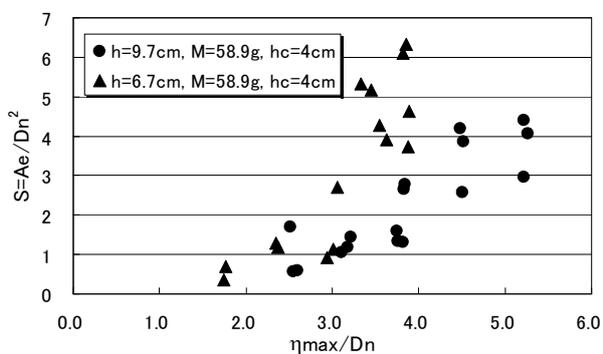


(c) クリアランス $hc=12\text{cm}$

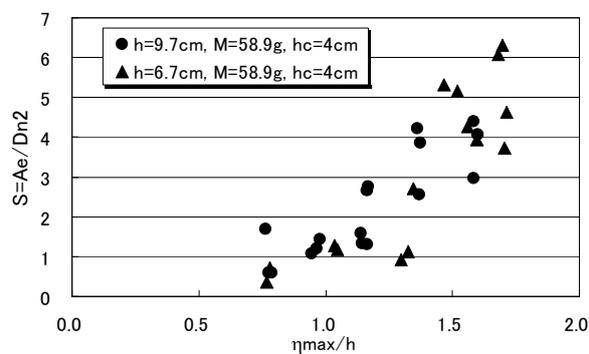
図-6 入射津波高と被災度の関係 (つづき)

図-7は離岸堤設置水深 $h=9.7\text{cm}$ と 6.7cm の結果を比較したものである。天端高はどちらも $hc=4\text{cm}$ である。(a)は横軸を図-6と同様に入射津波高 η_{\max} とブロックの代表長 Dn の比とした場合である。図から同じ津波高に対して、水深が小さい(浅い)方が被害は大きいことがわかる。これは、津波高が同じ、すなわち流入量の規模が同程度と考えれば、浅い方が通水面積が小さい分、流速が大きくなるためと考えられる。

一方、(b)は η_{\max} と設置水深 h の比として整理したものである。(a)に比べてデータのまとまりがよくなっている。このことより、前述の流速の大小が η_{\max}/h によって表現できる可能性が示唆される。



(a) η_{\max}/Dn と S の関係



(b) η_{\max}/h と S の関係

図-7 入射津波高と被災度の関係 (水深の影響)

5. まとめ

離岸堤の津波防災効果検討の一環として、消波ブロックの津波に対する安定実験を行い以下のような結果を得た。

- 1) 離岸堤は津波に対しては、前面斜面よりは岸側肩部分での被災が顕著となる。
- 2) 離岸堤消波ブロックの被災は、波の峰が通過した後に生じる傾向が見られた。
- 3) 風波と津波を比較した場合、同一の波高(津波高)に対しては、津波の方が風波よりも被害は大きくなる傾向が見られた。

- 4) 風波に対するのと同様に津波に対しても、ブロック質量を大きくすることでより安定（被災を小さく）な結果となった。
- 5) 離岸堤天端高を高くすることによっても、安定性を高めることができそうであるが、その効果は質量増大の効果ほどに顕著ではなかった。
- 6) 同じ波高（津波高）に対しては、離岸堤設置水深が小さい方が被災は大きくなる傾向が見られた。
- 7) 消波ブロックの被災度は、設置水深と入射津波高の比率で表現できる可能性が示唆された。

以上、今回の検討結果をまとめたが、消波ブロックの津波に対する安定検討は未だ端緒に付いた段階である。今後、より詳細な検討を行い、設計手法の提案を目指して研究を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 水谷将、今村文彦（2000）：構造物に作用する段波波力の実験、海工論文集、第47巻、pp.946-950.
- 2) 水谷将・今村文彦（2002）：津波段波の衝撃性および越流を考慮した設計外力算定フローの提案、海岸工学論文集、第49巻、pp.731-735.
- 3) 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷毅・高尾誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則（2000）：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究、海工論文集、第47巻、pp.911-915.
- 4) 池野正明・森 信人・田中寛好（2001）：砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究、海岸工学論文集、第48巻、pp.846-850.
- 5) 池野正明・田中寛好（2003）：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究、海岸工学論文集、第50巻、pp.721-725.
- 6) 加藤史訓・稲垣茂樹・福濱方哉（2005）：津波により海岸堤防に作用する波力に関する大型模型実験、海工論文集、第52巻、pp.756-750.
- 7) 宇多高明・小俣 篤・横山揚久（1986）：離岸堤の津波遡上抑制効果、第33回海岸工学講演会論文集、pp.461-465.
- 8) 中村克彦・佐々木崇之・中山哲巖（1998）：海岸構造物の津波遡上抑制効果に関する実験的研究、海洋開発論文集、vol.14、pp.293-298.
- 9) 大谷英夫・藤間功司・嶋原良典・富田孝史・本多和彦・信岡直道・越村俊一・折下定夫・辰巳正弘・半沢 稔・藤井裕之（2005）：インド洋大津波によるモルディブ共和国マレ島・空港島の浸水特性とそれに及ぼす護岸・離岸堤の影響、海岸工学論文集、第52巻、pp.1376-1380.
- 10) 富樫宏由・平山康志・川野 徹・早田佳朗（1986）：ソリトン分裂遡上津波による消波ブロック散乱のメカニズムについて、第33回海岸工学講演会論文集、pp.466-470.
- 11) 富樫宏由・平山康志・杉山正弘（1987）：ソリトン分裂遡上津波による消波ブロック堤の破壊機構、第34回海岸工学講演会論文集、pp.517-521.
- 12) 半沢稔、松本朗、田中仁、山本方人（2010）：離岸堤の津波防災効果に関する実験的研究、土木学会論文集 B2（海岸工学）、第66巻、pp.886-890.
- 13) Hudson, R. Y.（1959）：Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, W. W. 3, pp. 93-121.
- 14) van der Meer, J. W.（1987）：Stability of breakwater armor layers - Design formulae, Coastal Engineering, 11, pp. 219-239.