

計画外力増大に対する既設離岸堤の補強工法について

Reinforcement Method of Detached Breakwaters for External Force Increase

野畑嘉也¹・渡邊正一²・福濱方哉³・高田保彦⁴

Yoshinari NOBATA, Syouichi WATANABE, Masaya FUKUHAMA and Yasuhiko TAKADA

There are 8,000 detached breakwaters in Japan. Even if the scale of offshore wave does not change, the front water depth of detached breakwaters is enlarged due to the sea level rise caused by the global warming. The necessary mass of blocks composing detached breakwaters, therefore, increases, and the existing detached breakwaters should be enhanced to satisfy the standard. The assumed external force of the Shimonikawa coast was increased in 2008, when a disastrous wave hit a record high. As a result, there is a lack in existing block mass against the assumed external force, and the safety performance cannot be kept under the present condition. The paper shows the results of hydraulic model experiments in regards to the enforcement of existing detached breakwaters according to the increase of the assumed external force.

1. はじめに

我が国には約8,000基の離岸堤が設置されている（海岸統計，2006）．これらの離岸堤は，一般にブロックを積み重ね築造されており，積み重ねられたブロックが来襲する高波を砕くことにより岸への波のうちあげ高を減少させたり，来襲波浪を遮り浜の砂の移動を弱めたりしている．しかしながら，これらの離岸堤は，波浪・潮位など現状の外力を前提に設計されており，将来，外力が増大した場合，既設離岸堤のブロックでは来襲波浪に対し安定しないため，離岸堤は高波により容易に被災する．高波来襲により離岸堤が被災すると来襲する高波を砕くことができず，来襲波は岸にうちあがったり，浜の砂を持ち去ってしまう．

このような背景から，地球温暖化に伴い海面が上昇した場合，水深が増大するため，たとえ沖波の規模が変化しなくても堤前波高が大きくなり，既設の離岸堤ブロックでは来襲波浪に対し安定しない．そのため既存の離岸堤を事前に補強することは喫緊の課題であるが，その工法等対策はこれまで検討されていない．

また，富山県下新川海岸の東部では，計画規模を上回る2008年の高波（中村ら，2008）の来襲を踏まえ，当該海岸の計画外力を上方修正した．その結果，既存の離岸堤ではブロックの必要質量が不足するなど，計画波浪に対して安全性能を確保できないものが存在する．

これらの課題を解決するため，計画外力増大に対する既設離岸堤の補強工法を模型実験により検討した．

2. 下新川海岸東部の計画外力と必要ブロック質量

下新川海岸東部では，2008年の来襲波浪を踏まえ，計画高潮位T.P.+1.07m，沖波有義波高7.4m，有義波周期13.9 sとした．見直された沖波有義波高，有義波周期は2008年の来襲波浪にほぼ相当する．

当該海岸は海底に複雑な凹凸地形を有するため，屈折による波の集中を考慮して10mのメッシュで平面2次元波浪変形計算を行い（福濱ら，2009），各測線での離岸堤の前面波高を算定し，ハドソン式により離岸堤の必要ブロック質量を算定した．測線ごとの算定結果を図-1の棒グラフに示す．実線は既設地点，点線は未設（設置計

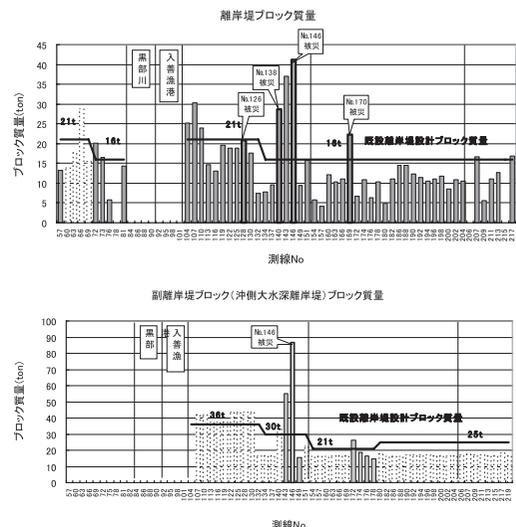


図-1 見直し必要ブロック質量と既設離岸堤設計ブロック質量

1		国土交通省北陸地方整備局 黒部河川事務所
2		国土交通省北陸地方整備局 黒部河川事務所（前）
3	正会員 工修	国土交通省北陸地方整備局 黒部河川事務所
4	正会員 工修	株式会社 建設技術研究所

画) 地点である。

なお、図には外力見直し前の離岸堤の設計ブロック質量を太線で示し、また、あわせて2008年高波による被災実績を示している。被災離岸堤と、既設設計ブロック質量が見直した必要ブロック質量に不足している箇所がほぼ一致しており、ブロック質量の不足が被災の原因であると推測される。

3. 模型実験の概要

(1) 実験装置

実験で使用した二次元造波水路は図-2に示すように、水路長35m、水路幅0.5m、水路高1.0mの鋼製水路で、片面20m部分には海浜地形や波浪状況が横から観察できるように透明アクリル製になっている。造波装置は吸収制御のピストン型造波方式で、規則波および不規則波の発生装置を有しており、造波水路の両端部には消波装置を設置している。海浜地形は海底勾配、地形に合わせモルタルの固定床で実験条件ごとに製作した。離岸堤は底部のマウンド部分はベニヤ板で製作し、その上にブロック模型を積み上げて所定の離岸堤を設置した。模型縮尺は実験波高10cm以上と実験周期1.0s以上を確保して1/80とした。

(2) 実験条件および実験方法

a) 実験条件

検討対象地点は、計画外力の見直しにより既設離岸堤のブロック質量が不足する箇所と、2008年高波で被災した離岸堤とした。表-1、図-3に対象離岸堤の諸元を示す。

海浜勾配については、現地の深淺測量をグループ化して1/90、1/36、1/18の4海浜縦断形状に代表させた。

離岸堤のブロックは突起形状の異なる2種類の既設ブ

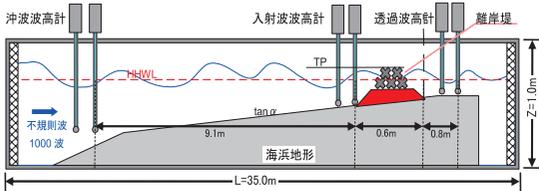


図-2 実験水路の概要諸元

ロックを使用した。タイプ1は三角型で、タイプ2は六角十字型である。

堤前波高 H_i は1000波の有義波高であり、ブロック必要質量は設計波に対して、合田の碎波帯の波高変化(海岸保全施設の技術上の基準・同解説, 2004)から $K_D=9.0$ のり勾配1:1としてハドソン式により算定した値を参考として記した。

b) 実験方法

沖波の設定は検討対象地点の換算沖波相当の有義波で、技術基準(2007)にない、不規則波1000波を造波した。なお、これは2008年高波時に、田中観測所地点での有義波高6mを越えるピーク発生継続波浪時間(図-4参照)の波数にほぼ相当する。また、スペクトル形式は

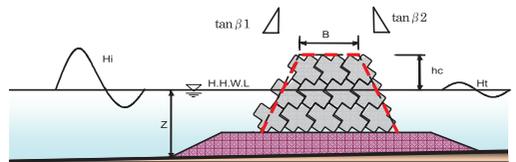


図-3 離岸堤の諸元模式図

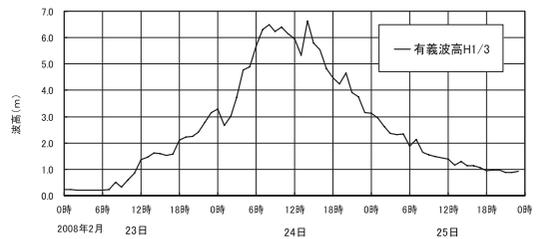


図-4 波浪継続時間 (H20.2月被災時)

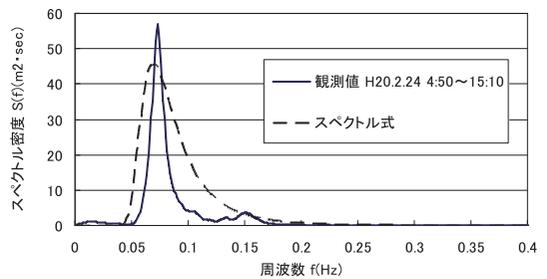
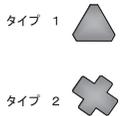


図-5 沖波のスペクトル密度

表-1 対象離岸堤の諸元

対象離岸堤	既設ブロックタイプ	既設ブロック質量 M(ton)	既設離岸堤天端高 TP(m)	沖側のり勾配 $\tan \beta_1$	岸側のり勾配 $\tan \beta_2$	海浜勾配 $\tan \alpha$	堤前水深 Z(m)	換算沖波波高 $H_0'(m)$	堤前波高 $H_i(m)$	ハドソン式によるブロック必要質量 (ton)
1	タイプ 1	15.8	3.5	1:1.0	1:1.0	1/90	8.0	8.2	4.3	22
2	タイプ 1	15.8	3.2	1:1.0	1:1.0	1/90	4.7	9.4	2.5	22
3	タイプ 2	21	3.6	1:0.7	1:0.7	1/36	6.6	13.5	4.5	29
4	タイプ 2	21	3.3	1:1.5	1:1.5	1/36	8.9	13.5	5.9	41
5	タイプ 2	21	2.7	1:0.7	1:0.7	1/36	7.0	12.4	5.0	23
6	タイプ 1	16	3.1	1:1.0	1:1.0	1/18	6.7	6.0	4.2	20
7	タイプ 2	21	2.8	1:2.0	1:0.7	1/18	7.9	12.4	7.2	30
8	タイプ 2	31	4.2	1:1.0	1:1.0	1/36	12.3	13.5	7.8	87



ブレットシュナイダー・光易型を採用した。図-5に観測スペクトルと採用スペクトルを示す。

造波水路内には図-2に示したように、沖側と離岸堤前面、離岸堤後面にそれぞれ2台の容量式波高計を設置した。沖側の波高測定位置にて所定のスペクトル形式を用いて、換算沖波有義波高と有義波周期が目標値となるように造波調整を行った。また、2台の波高計測データの位相差から入反射分離推定法を用いて沖波波高、離岸堤前面波高、透過波高を算定した。また、造波中のブロック被災状況や造波後のブロック被災の有無の把握のためにビデオ撮影を実施した。

4. 既設離岸堤の被災メカニズム

対策工法設定の前に、見直された波浪による既設離岸堤の被災メカニズムを確認するため、対象離岸堤1に計画波を作用させて離岸堤の挙動を把握した。

写真-1に示すように、離岸堤上の波群中の高越波によって天端ブロックに過大な流体力が作用し、天端背後ブロックが陸側へ移動した。その後、造波中の引き波時での戻り流れで離岸堤内の不安定なブロックは沖側にも移動散乱した。海浜勾配が1/90の緩勾配であり、砕波後の押し波流れの状態では越波する頻度が多い。また高越波時には砕波波頂付近に空気の混入が見られ、離岸堤内の空気が急激な水位上昇に伴って陸側へ押し出される水理現象が見られることから、天端ブロックには水の流体力その他、乱れによる作用も働き、背後に押さえのないブロックが移動したものと考えられる。

図-6に示す現地の離岸堤被災後の測量結果でも陸側のブロックが移動散乱した状況と一致する。離岸堤の実態調査の既往報告(1986)や曾我部ら(1982)でも「越波の著しい場合には岸側ブロックに散乱が集中し K_D の値も小さくなる」ことが指摘されている。



写真-1 離岸堤単独の越波時の背後ブロック移動状況

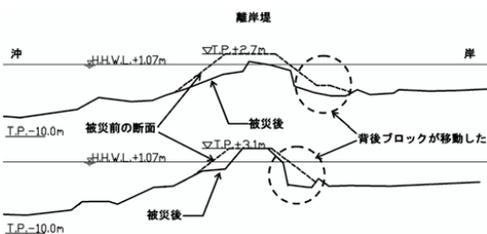


図-6 現地被災後の測量結果

5. 既設離岸堤の補強対策の選定

(1) 補強対策工法の検討

既設離岸堤単独では高越波時に天端ブロックが散乱し被災に至るので、補強対策工法を検討した。離岸堤背後にハドソン式から求まる所要質量以上の補強ブロックを腹付けしたが、既設ブロックとのかみ合わせが小さく、腹付けブロックが陸側へ列ごと移動した(写真-2参照)。また、越波量の低減を目的として、天端幅拡幅のために離岸堤前面に1:1.8の緩勾配で既設と同質量のブロックを前腹付けした結果、越波状態に大幅な改善とならず背後ブロックが移動した(写真-3参照)。同じく、越波量の低減と天端ブロックの補強のために、既設離岸堤の天端部に所要質量以上のタイプ2のブロックを1層嵩上げる対策を実施した。造波中には大きな被災とはならないが高上げブロックと下層ブロックがかみ合い、群体となって岸沖方向に振動する挙動が見られ離岸堤断面として不安定になる。(写真-4参照)。

(2) 補強工法の提案

越波量の低減と離岸堤前面の補強を目的に図-7のような、前面腹付けと天端嵩上げの複合方式の補強対策を行ったところ離岸堤断面は安定することが判った。複合方式の補強対策ではハドソン式から算定した質量以上のブロック1層を既設離岸堤に嵩上げるため、離岸堤天端高が増大され越波量も低減する。

6. 複合方式の補強工法のブロック特性

表-2に複合方式による補強工法の実験結果を示す。実

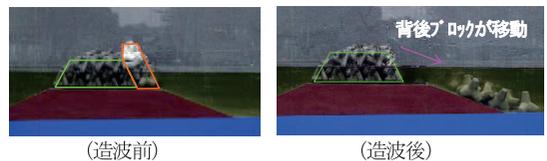


写真-2 背後腹付け対策離岸堤ブロックの挙動

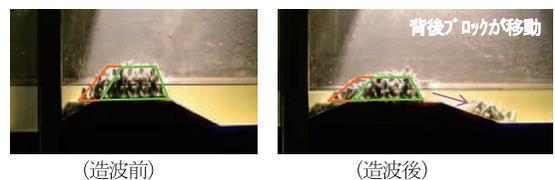


写真-3 前腹付け対策離岸堤ブロックの挙動

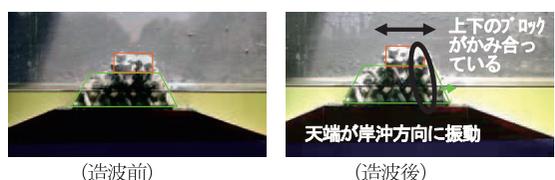


写真-4 天端嵩上げ対策離岸堤ブロックの挙動

験は既設離岸堤単独の結果を踏まえ、補強に用いるブロック質量を順次重くして、補強後の離岸堤ブロックの移動状況と1000波造波後のブロックの移動個数を計測した。ハドソン式によるブロック必要質量(表-1参照)を満たす場合にはほぼ安定するものの、必ずしも十分でない場合がある。

そのため、補強後離岸堤の安定性を評価する指標について以下のように検討した。離岸堤の安全性を確保するためには、所要断面の確保が必要であり、特にブロック質量の算定には以下に示す安定数 N_s によるハドソン公式(海岸保全施設技術研究会編, 2004)が用いられている。

$$M = \frac{\rho_r \times H^3}{N_s^3 \times (Sr - 1)^3} \dots\dots\dots(1)$$

ここに M はブロック質量、 ρ_r はブロック密度、 Sr はブロックの流体に対する比重である。

今回の複合方式の補強工法で腹付けしたブロック質量

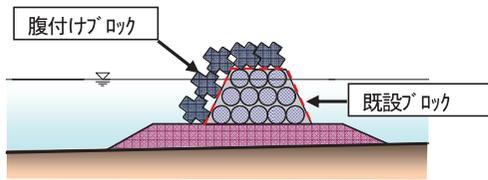


図-7 複合方式の補強対策案

から、(1)式を用いて複合腹付けブロックの N_s 値を逆算した。表-2の中で、離岸堤ブロックの被災有無の判定では1000波造波後のブロック移動数が全体ブロック総数の3%以内を被災無しと定義して対策効果を評価した。これは離岸堤の効果および安全性に関する研究(建設省河川局海岸課, 土木研究所, 1986)では、「使用されているブロックの数%に散乱が生じても、離岸堤の機能効果が著しく低下することは考えられない」との指摘からである。

佐藤ら(1994)にならない、天端高上げに伴う離岸堤の相対天端高 hc/H_i (H_i は離岸堤前面の入射波高)と N_s との関係を示すと図-8となる。図中の●印■印は離岸堤単独(原型)および複合方式で被災したケースで、□印は複

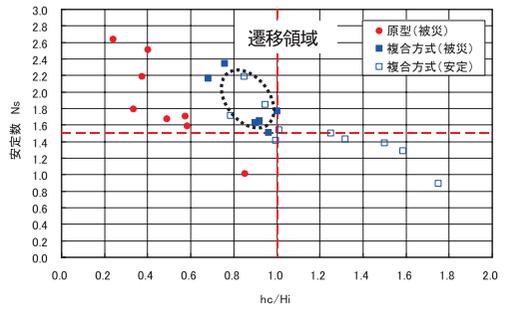
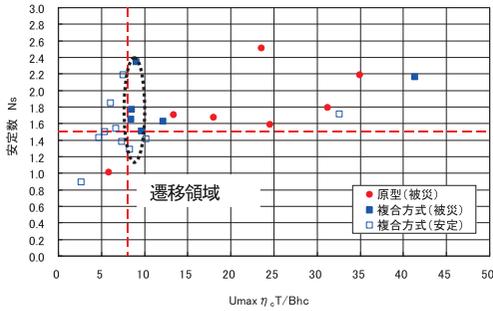
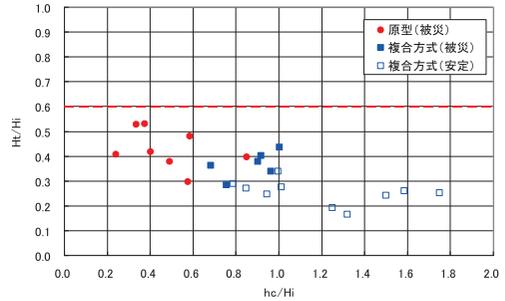


図-8 $hc/H_i \sim N_s$ との実験結果

表-2 複合方式の離岸堤補強対策の実験結果一覧

case	形態	補強ブロック諸元			補強対象離岸堤諸元					被災の有(×) 無(○)
		補強 ブロック タイプ	質量 M (ton)	安定数 Ns	天端高 hc (m)	無次元天端高 hc/Hi	天端幅 B (m)	無次元越流量 $U_{max} \eta_c T/Bhc$	透過率 Ht/Hi	
1-1	原型	—	15.8	1.71	2.43	0.58	6.53	13.4	0.30	×
1-2	複合方式	タイプ2	24.0	1.50	5.33	1.25	7.60	5.4	0.19	○
1-3	複合方式	タイプ2	30.9	1.43	5.83	1.32	8.88	4.7	0.17	○
2-1	原型	—	15.8	1.01	2.13	0.85	7.56	5.8	0.40	×
2-2	複合方式	タイプ2	24.0	0.89	4.43	1.75	8.32	2.6	0.25	○
3-1	原型	—	21.0	1.59	2.53	0.59	5.00	24.5	0.48	×
3-2	複合方式	タイプ2	38.9	1.38	6.93	1.50	7.60	7.4	0.24	○
3-3	複合方式	タイプ2	48.1	1.29	7.33	1.59	6.40	8.3	0.26	○
4-1	原型	—	21.0	2.19	2.23	0.38	5.00	34.9	0.53	×
4-2	複合方式	タイプ2	38.9	1.77	5.43	0.92	8.30	8.5	0.40	×
4-3	複合方式	タイプ2	48.1	1.65	5.93	1.00	7.70	8.4	0.44	×
5-1	原型	—	21.0	1.79	1.63	0.34	8.20	31.2	0.53	×
5-2	複合方式	タイプ2	30.9	1.62	4.53	0.90	8.50	12.1	0.38	×
5-3	複合方式	タイプ2	38.9	1.50	4.83	0.96	10.00	9.7	0.34	×
5-4	複合方式	タイプ2	48.1	1.41	5.03	1.00	9.30	10.2	0.34	○
6-1	原型	—	15.8	1.68	2.03	0.49	7.20	18.0	0.38	×
6-2	複合方式	タイプ2	21.0	1.54	4.23	1.01	9.60	6.7	0.28	○
7-1	原型	—	21.0	2.64	1.73	0.24	5.40	147.6	0.41	×
7-2	複合方式	タイプ2	38.9	2.17	4.93	0.68	7.00	41.3	0.36	×
7-3	複合方式	タイプ2	80.7	1.71	5.73	0.79	7.90	32.6	0.29	○
8-1	原型	—	30.9	2.51	3.13	0.40	7.40	23.5	0.42	×
8-2	複合方式	タイプ2	38.9	2.35	5.93	0.76	10.40	9.1	0.28	×
8-3	複合方式	タイプ2	48.1	2.18	6.63	0.85	11.20	7.5	0.27	○
8-4	複合方式	タイプ2	80.7	1.84	7.43	0.95	12.40	6.1	0.25	○

図-9 $U_{max} \cdot \eta_c \cdot T / (B \cdot hc) \sim N_s$ の実験結果図-10 $hc/Hi \sim Ht/Hi$ の実験結果

合方式で被災無しの安定したケースをプロットした。

実験の結果から、複合方式による補強対策では嵩上げ天端高は前面波高比で hc/Hi が1.0以上で、かつ腹付けブロックの安定数 N_s 値を1.5程度に設定することで概ねブロックの被災のないことが判る。図中に遷移領域があるが、原因としてブロック同士の組合せや実験精度のばらつきなどが考えられる。

次に、離岸堤ブロックの岸側への移動や流出は、離岸堤を越流する流れにより生じることから、最大水平粒子速度 U_{max} を手引き書(1986)に示されている合田の二つの実験式から求め、沼田(1975)にならぬ無次元越流量($U_{max} \cdot \eta_c \cdot T / (B \cdot hc)$)と安定数 N_s の関係を実験結果から整理した結果を図-9に示す。ここに η_c は堤前面の波頂高、 B は天端幅、 T は周期である。この結果、複合方式で安定する場合の無次元越流量は概ね8以下であり、ブロックの岸側流出の目安となる。

離岸堤の目的性能の変化を確認するため、図-10に離岸堤相対天端高 hc/Hi と離岸堤透過率 Ht/Hi の関係を示す。一般に、離岸堤天端高(hc)は入射波高(Hi)より大きい場合に天端高に関係なく高い消波効果が期待できる。

本実験では、補強対策により天端の嵩上げを行うことで波を遮断する効果が高まるため、離岸堤の透過率は低減しており、越波量が低減した効果と評価できる。設計基準(海岸保全施設技術研究会編, 2004)によると、 hc/Hi は0.5以上であることが推奨されている。

今回の複合方式での補強対策の実験では離岸堤の堤体が安定していることを確認し、波高透過率も0.4以下であり、通常目標とされる0.6以下を満足している。

7. まとめ

計画外力増大に対する既設離岸堤の補強対策の断面と必要なブロック質量の算定について検討を行った。

以下に、本研究により得られた知見をまとめる。

- 1) 計画外力が増加すると、当然、既設離岸堤は被災する。無対策の離岸堤は天端背後ブロックが岸側方向に、被災後は沖側方向にも散乱することを確認した。

- 2) 必要質量を持つブロックで前面腹付けや背面腹付けを行っただけでは岸側離岸堤ブロックが岸側方向へ移動散乱する。越流量低減のために天端を嵩上げただけでは、天端ブロックが振動するなど安定しない。
- 3) 前面腹付け天端嵩上げの複合方式の対策は、波浪に対しは安定であり、対策工法として採用できることが確認できた。
- 4) 用いるブロックの安定条件は hc/Hi が概ね1.0以上で、安定数 N_s は概ね1.5以下である。
- 5) 離岸堤ブロックの岸側への流出限界は、無次元越流量($U_{max} \cdot \eta_c \cdot T / (B \cdot hc)$)で評価すると概ね8以下で安定である。
- 6) 複合方式の対策では、堤体が安定するとともに、波高透過率も0.4以下であり、通常目標とされる0.6以下を満足する。

参考文献

- 海岸保全施設技術研究会編(2004): 海岸保全施設の技術上の基準・同解説, pp. 3-57.
- 建設省河川局海岸課・土木研究所(1986): 離岸堤の効果及び安全性に関する研究, 第39回建設省技術研究会報告, pp. 741-818.
- 建設省河川局編(1986): 離岸堤設計の手引き, pp. 26.
- 国土交通省河川局編(2006): (平成17年度) 海岸統計平成18年度版, p. 22.
- 佐藤道郎・浅川 勉・大山綱治(1994): 離岸堤背面捨石被覆の耐波安定性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 776-780.
- 曾我部隆久・伊東司郎・浅川 昭・西田芳浩(1982): 離岸堤(消波ブロック堤)の被災原因に関する考察, 海岸工学論文集, 第29巻, pp. 423-427.
- 中村伸也・西川 一・山田秀夫・原 文宏・神保正暢・平野宜一(2008): 平成20年2月24日の高波による下新川海岸の被災実態について, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 176-180.
- 社団法人 日本港湾協会(2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻), p. 557.
- 沼田 淳(1975): ブロック堤の消波効果に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第22巻, pp. 501-505.
- 福濱方哉・渡邊正一・平野宜一(2009): 下新川海岸生地以東地区における越波対策施設の性能評価と計画留意について, 海岸工学論文集, 第56巻, pp. 771-775.