

消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査

五明美智男* ・ 堺 和彦** ・ 高山知司***
寺内 潔**** ・ 高橋重雄*****

1. はじめに

消波ブロック被覆堤は、我が国の主要な防波堤形式の1つで、水深が比較的浅いところの防波堤として1960年代より多くの現地実績が積み重ねられた。その設計法はほぼ確立されているが、現地における消波ブロック被覆堤の実態を把握し、設計法に反映させていくことも不可欠である。防波堤の被災実態については鹿島ら(1986)、宮井ら(1993)の報告等があるが、鹿島らが消波ブロックを含む被覆層の被災について言及しているのみで、消波ブロックに注目し詳細に解析した例はほとんどない。過去の被災事例を見てみると、消波ブロックのみの被災事例は意外に少ないばかりでなく、被災箇所のごく近傍でも無被災であるような場合も数多く見受けられ、ブロックの安定限界だけでは説明できない実態があるものと考えられる。

本研究では、最近の消波ブロック被覆堤の被災・無被災事例の実態を調査し、主要な被災形態と原因について解析するとともに、被災の実態と各重量算定式との適合性等について検討した。

2. 被災事例の調査方法

(1) 対象事例

各事例の被災原因等を詳細に調べることを主眼としていることから、大きな被災を受けた顕著な気象擾乱を調べた。次に、設計資料、被災時資料、被災後の検討資料が比較的整理されている事例を探し計20件の事例を解析対象として抽出した。

抽出した気象擾乱は、1991年2月の冬期風浪、台風19号、1987年の台風12号などである。

(2) 調査内容

消波ブロックの被災については、ハドソン式に用いられている入射波条件などの他に、場所(堤頭部・隅角部・

堤幹部)、被覆形状(端部・標準断面部)および設置位置の地形、地盤特性により異なった様相を示すものと考えられる。そこで、表-1の被災事例一覧に示す項目等に着目し、被災原因および形態を議論している。

3. 被災事例

表-1は、今回解析した事例についてその概要を示したものであり、ここではその中の典型的な被災事例について詳述する。

(1) 八戸港

八戸港は青森県の太平洋岸に位置する港湾である。外洋第一線防波堤となる消波ブロック被覆構造の中央第1防波堤、中央第2防波堤は、それぞれ1976年、1987年に着工され、1990年には各々1,630 m, 110 mの据え付けが完了した。その後1991年2月の冬期低気圧による高波により、延伸工事中および工事後に被災した。

図-1, 2および写真-1は、中央第2防波堤の被災箇所の平面図および断面図を示したものである。消波工端部では施工途中の暫定天端のケーソンが移動するとともに、これらの被災に伴い基礎工、被覆工、根固め工が洗掘散乱した。被災原因としては、消波工端部での厳しい砕波の作用が考えられる。一方、端部に接続する標準断面部ではブロックの散乱は見られず、既設の防波堤の全延長で天端部分の沈下が見られた程度であった。同じ時期に中央第1防波堤でも、工事中のケーソン5函が暫定断面の2函とともに被災し、ケーソンの移動、ブロックの散乱・沈下、基礎工、被覆工、根固め工の洗掘散乱が生じた。また、隣接する標準断面部では天端部分の沈下が見られ、中央第2防波堤と同じ様な消波ブロックの被災状況となった。

こうした消波工端部におけるケーソンの移動を伴うような複合的な被災事例として、この他にむつ小川原港、長崎港、脇岬港などの例がある。

(2) 亀徳港

鹿児島県奄美諸島の徳之島に位置する亀徳港は、島周辺のリーフによって形成された湾を利用した港である。その外郭施設となる南防波堤はリーフ上に設置され、特に堤頭部は急勾配のリーフの先端に位置している。

* 正会員 水修 東亜建設工業(株)技術研究所
** 正会員 工修 東亜建設工業(株)技術部
*** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
(前運輸省港湾技術研究所水工部長)
**** 正会員 運輸省港湾技術研究所設計基準研究室長
***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所耐波研究室長

表-1 解析事例一覧

No	気象擾乱	被災有無	被災種別	港 名	対象箇所	消波工形状	設計波浪 海底勾配	使用ブロック	被災時波浪**	ブロック 被災状況	その他被災状況
1	1991年 2月 16~17日 冬期風浪	被災	間接, 直接	むつ小川 原港 東防波堤	北側隅角部 消波工	端部	$H_{1/3}=7.1\text{ m}$ $T=13.0\text{ s}$ 1/50	シーロック, テトラポッド 50 t 型	$H_{1/3}=9.6\text{ m}$ $T=13.4\text{ s}$ $\beta=-7.1^\circ$	沈下, 散乱	ケーソン移動, 壁欠壊
2		被災(?)				標準断面部		テトラポッド 50 t 型		一部沈下 (0~1.5 m)	
3		被災	直接		南側隅角部 消波工	端部		シーロック 50 t 型	—	沈下, 散乱 (4~5 m)	
4		被災	間接, 直接		堤頭部近接 消波工	端部	$H_{1/3}=6.3\text{ m}$ $T=13.0\text{ s}$ 1/100	テトラポッド 50 t 型	$H_{1/3}=7.5\text{ m}$ $T=11.4\text{ s}$ $\beta=8.9^\circ$	沈下, 散乱	ケーソンの移動
5		被災(?)		八戸港 中央第1 防波堤		標準断面部		テトラポッド 50 t 型		一部沈下	
6		被災	被災	八戸港 中央第2 防波堤	堤頭部消波 (島堤)	端部	$H_{1/3}=6.6\text{ m}$ $T=13.0\text{ s}$ 1/100	テトラポッド 40 t 型	$H_{1/3}=5.9\text{ m}$ $T=11.4\text{ s}$ $\beta=23.8^\circ$	沈下, 散乱	ケーソンの移動
7		被災(?)	間接, 直接			標準断面部				一部沈下	
8		被災	直接	小本港 沖防波堤	堤頭部消波 (島堤)	標準断面部	$H_{1/3}=7.9\text{ m}$ $T=12.0\text{ s}$ 1/30	テトラポッド 64 t 型	$H_{1/3}=9.3\text{ m}$ $T=13.7\text{ s}$ $\beta=31.8^\circ$	散乱, 破損	ケーソンの移動 (蛇行災害) ケーソンの破壊
9	1991年 9月 台風19号	被災	直接	長崎港 小江地区 沖防波堤	堤頭部消波 工	端部(小段)	$H_{1/3}=5.5\text{ m}$ $T=10.7\text{ s}$ 1/30	テトラポッド 20 t 型	$H_{1/3}=7.2\text{ m}$ $T=15.6\text{ s}$ $\beta=36^\circ$	散乱, 破損	ケーソンの移動
10		被災	間接			端部		テトラポッド 20, 40 t 型		崩形, 沈下	ケーソンの移動
11		無被災				標準断面部		テトラポッド 20, 40 t 型		被災無し	
12		被災	間接		臨岸部消波 工	端部	$H_{1/3}=3.9\text{ m}$ $T=10.0\text{ s}$ 1/100	テトラポッド 32 t 型	$H_{1/3}=4.8\text{ m}$ $T=15.1\text{ s}$ $\beta=$	沈下, 散乱	
13		無被災		臨岸部消波 工		標準断面部				被災無し	
14		被災	直接	串木野 新港 防波堤 (西)	堤幹部消波 工(A)	標準断面部	$H_{1/3}=6.0\text{ m}$ $T=13.0\text{ s}$	テトラポッド 50 t 型	—	折損, 散乱, 沈下	
15		被災	直接		堤幹部消波 工(B)	標準断面部	$H_{1/3}=7.7\text{ m}$ $T=13.8\text{ s}$	テトラポッド 64 t 型			
16		被災	間接	茂木港 防波堤 (沖)	堤頭部	標準断面部	$H_{1/3}=4.5\text{ m}$ $T=12.5\text{ s}$	テトラポッド 16 t 型	—	散乱	ケーソンの移動
17		無被災			堤頭部	標準断面部				被災無し	
18	1987年 8月 31~31日 台風12号	被災	間接, 直接	鹿児島港 防波堤 (南)	堤頭部, リーフ上	標準断面部	$H_{1/3}=10.2\text{ m}$ $T=16.0\text{ s}$ 1/50	ドロス 50 T 型 (1:1.3)	$H_{1/3}=5.9\text{ m}$ $T=12.2\text{ s}$ $\beta=39^\circ$	散乱	ケーソンの移動
19		被災	直接		堤頭部	標準断面部	—	テトラポッド 5, 32 t 型	$H_{1/3}=7.0\text{ m}$ $T=14.4\text{ s}$ $\beta=51^\circ$	沈下	ケーソンの沈下, 移動 一部上部工破損
20	1988年 12月~ 1990年 9月	被災	間接	宮崎港 南防波堤	堤頭部	標準断面部	$H_{1/3}=8.9\text{ m}$ $T=14.0\text{ s}$ 1/200	テトラポッド 64 t 型	—	沈下	法先海底地盤の 洗堀

** : 被災時波浪は, 被災後に実施された波浪推算による報告値を示している

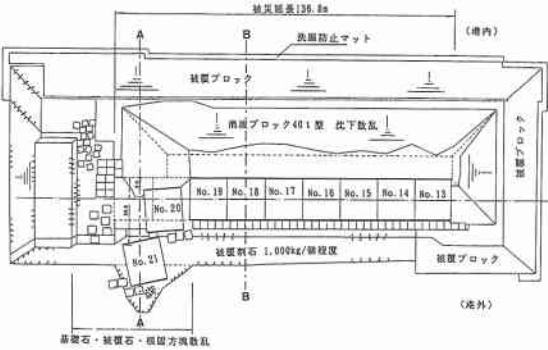


図-1 八戸港中央第2防波堤被災平面図



写真-1 八戸港中央第2防波堤被災状況 (No. 19, 20 ケーソン前面)

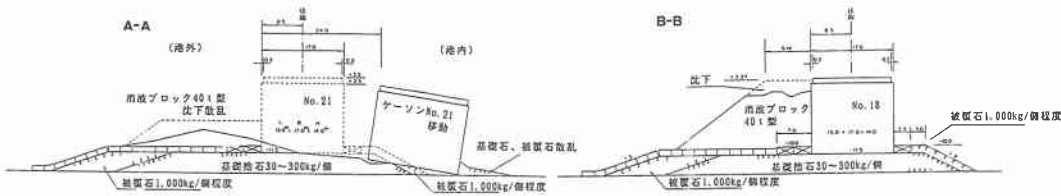


図-2 八戸港中央第2防波堤被災断面図

1987年8月末に沖縄、九州西岸に被害をもたらした台風12号により、当港においても50tドロスが延長46mにわたり飛散する被災を受けた(図-3)。ここでは、1978年の施工途中でも2度の台風で被災を受けているが、当港の設計に先立ち実施された実験結果によれば、リーフの法肩付近で4割程度の波高増大が見られたり、砕波後の噴流により強い流れが発生することが指摘されている(喜田ら, 1979)。また、竹田ら(1995)は、急勾配斜面上の消波ブロック被覆堤の安定性について検討しており、波高水深比 $H_{1/3}/h$ が1を越えると消波ブロック法先の移動が生じ被害が大きくなる可能性があるとして指摘している。このように、急勾配な地形の所やリーフ上では、局部的に増大した波浪が直接作用し、重量不足による散乱が生じる可能性がある。

(3) 宮崎港

宮崎港は、九州南部太平洋岸に位置する重要な港湾である。当地点は台風の常襲地帯でしかも漂砂の顕著な場所であり、南防波堤の着工以前より洗掘対策が検討されてきた経緯がある。

図-4は、1988年3月の竣工後から1990年11月までの消波工の変位状況を示したものであり、防波堤前面の海底地盤が洗掘され基礎工および消波工に沈下と散乱が生じているのがわかる。こうした前面地盤の変形に伴う標準断面部の被災事例として、石狩湾新港などの例があるが、消波工全体に沈下・散乱が生じている点の特徴的である。こうした被災には至らないが、ブロック天端が沈下して問題となる事例は日本海側に数多く見られる。

なお、写真-2は、竣工時および1990年の台風14号通過後に消波工の天端部分を撮影したものである。上部工壁に接していたブロックが全体的に沖側へ移動し空隙が大きくなっている点が指摘できる。

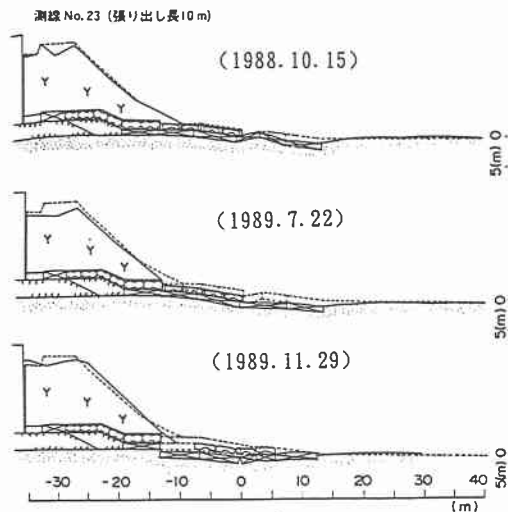


図-4 宮崎港南防波堤被災箇所断面図



写真-2 宮崎港被災状況

4. 被災事例の解析

(1) 消波ブロックの被災形態・原因

今回解析した事例および従来の知見から被災形態・原因を分類すると、表-2に示すように概ね6形態に分類することができる。この表には、国内では少ないものの海外の被災例で良く見られるブロックの破損(足折れ)もあわせて示した。主要な被災形態・原因としては、「重量不足による沈下・散乱」および「法尻部の沈下による全体の沈下・散乱」の2つが考えられる。

なお、重量不足となる要因としては、設計波より大きな異常波浪が作用する場合はもちろんであるが、急勾配斜面やリーフ上あるいは消波工端部や不完全被覆部で厳しい砕波が作用する場合などが考えられる。また法尻部

表-2 被災形態および原因

【被災形態】	【被災要因】
直接(単独)	設置場所
1 重量不足による沈下散乱	1 海底地形: リーフ上・急勾配
2 破壊(足折れ)	2 海底底質: 砂地盤
3 その他	3 設置場所: 堤頭部, 隅角部
間接(複合)	4 消破工形状: 端部, 不完全消波
4 ケーソン移動等を伴う沈下散乱	
5 法尻部沈下による全体の沈下散乱	
6 その他(複合被災時の破壊)	

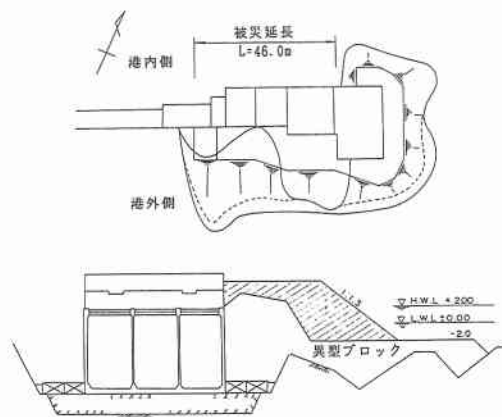


図-3 亀徳港被災状況図(宮井ら, 1993)

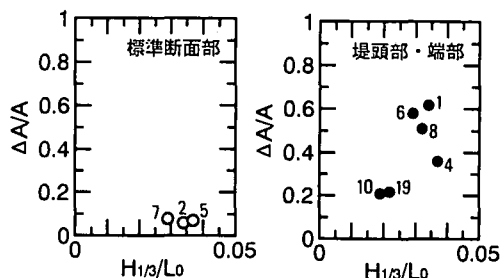


図-5 波形勾配と被害率の関係

の沈下による全体の沈下・散乱の要因としては、前面海底地盤の洗掘および液状化が考えられる。

(2) 消波ブロックの被災規模

表-1 に示した事例の中から、消波ブロックの沈下あるいは散乱部分の面積が推定できるものについて、鹿島ら (1986) と同様に被災前の消波工断面面積に対する沈下・散乱面積の比として消波工の変形量を算定した。

図-5 は、堤設置位置の入射波高を用いた波形勾配と変形量の関係を場所別に示したものである。この図より、消波工端部や堤頭部での変形量が大きく最大 60 % 程度となり、特にケーソンの移動を伴うような場合に大きくなる傾向が見られた。一方、標準断面部での沈下・散乱による変形量は他の場所に比べて小さく 6~8 % 程度である。ただし、宮崎港で見られた法先の洗掘などに伴う消波工全体の沈下・散乱の場合には最大 30 % 前後の変形量と算定された。

以上のことから、施工後に大きな被災を受ける可能性がある箇所は、堤頭部や端部、次いで法先の洗掘が見られるような標準断面部であり、通常の標準断面部での被災規模は小さいことがわかった。

(3) 消波ブロックの重量

上述のように被災状況が異なる各場所に対し、現設計法ではハドソン式により算定される重量を堤頭部で割り増すことにより対処している。こうした取り扱いの妥当性について検討するため、実際に使用されたブロック重量と被災時波高に対してハドソン式より算定される必要重量との比から、消波ブロック安定性の安全率を計算した。なお、堤頭部として使用重量が 5 割増しされているのは、事例 4, 9, 10, 18 である。

図-6 は、波形勾配を横軸にとって、その安全率を示したものである。消波工端部や堤頭部では、厳しい砕波の作用によりケーソンが滑動しブロック移動も激しくなるため、必要重量の 1.5 倍の場合でも重量不足による散乱が生じている。一方、標準断面部では高波浪の作用によりハドソン式必要重量の 0.5 倍程度の重量となっても、天端付近の沈下・散乱程度の被災となっている。これらのことから、ハドソン式は堤幹部や標準断面部では安全

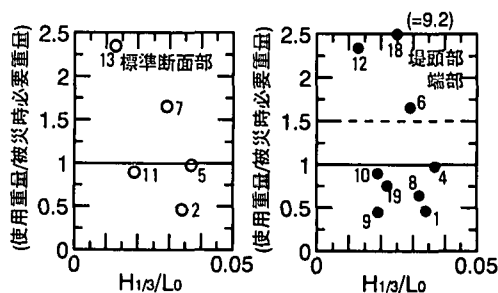


図-6 波形勾配と安全率の関係

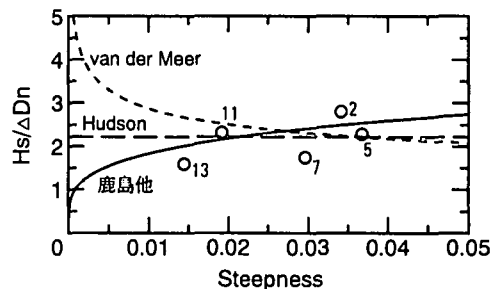


図-7 波形勾配と安定数の関係

側に、堤頭部や端部、不完全消波部ではやや危険側となっているものと考えられる。

(4) 各重量算定式の適合性

次に、従来用いられてきたハドソン式および最近提案されたファンデルメーア式 (van der Meer, 1988)、鹿島らの式 (鹿島ら, 1993) の相互の関連性と被災の実態との整合性について検討する。各式の詳細については、半沢ら (1995) を参照されたい。ファンデルメーア式、鹿島らの式では、それぞれ被災規模を表す相対的ダメージレベル N_0 と変形レベル S を設定する必要がある。ここでは、半沢ら (1995) を参考に被害率 1 % に相当する $N_0 = 0.2$, $S = 1.2$ を用いた。

図-7 は、作用波数を 1000 波とした場合の波形勾配と安定数の関係を示したものである。各式は波形勾配に対し異なった傾向を示すが、波形勾配 0.025 付近で 3 者の相違は小さくなる。また、被災時の波高と実際の重量を用い、標準断面部の事例の安定数を図に示したが、無被災 (1 % 以下の被災) であれば計算式の下側に、被災であれば上側に分布することになる。どの式においても長崎港、脇坪港は無被災、むつ小川原港は被災となり現地の状況と一致するものの、八戸港の現地状況については説明できていない。データ数が少ないこともあるが、現地の被災状況との整合性について、3 者の相違は顕著ではない。

(5) 宮崎港被災形態の再現実験

宮崎港の被災事例より、法尻部の沈下により消波プロ

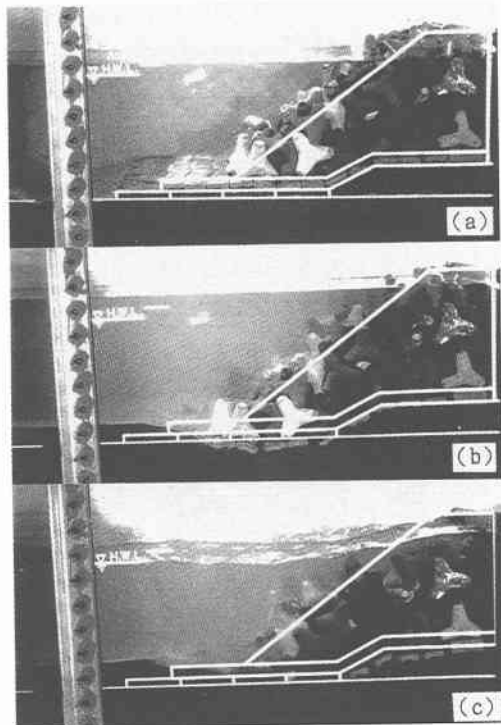


写真-3 宮崎港被災形態の再現状況

ック全体が沈下する被災形態が見られることを示した。しかしながら、その原因については法先の洗掘が指摘されているものの詳細は不明である。高橋ら(1994)は、通常の混成堤において、その法尻部が波による液状化で沈下する可能性があることを示した。消波ブロック被覆堤についても同じような液状化の可能性も考えられることから、地盤を液状化させた状態で造波が可能な小型の2次元水槽内に現地の1/55模型を設置して、被災形態の再現実験を行った。

写真-3は、消波ブロックおよび法先の変状を示したものである。(a)設計波相当の波のみを連続させて作用させた場合、石かご前面で洗掘が進むものの消波工の変形は発生しない。(b)次に、地盤を液状化させ波を作用させると、ブロック法尻が沈下し、消波ブロック天端の沈下が見られるようになる。また、ケーソン壁に対し消波ブロックは沖側へ移動し空隙が大きくなる。(c)この後、継続的に波を作用させると、沈下の範囲はブロック法尻から全体に広がり、基礎マウンドにも一部沈下が生じる。

ここで注目すべき点は、(b)においてブロックの法尻部の砂地盤にめり込むように沈下していることと、それによってブロック全体がひきづられるように沈下していることである。特に、ブロックとケーソンが離れており、これが先に述べた宮崎港の場合の変形と非常に良く一致

している。

以上、定性的な実験ではあるが、ブロック法先部分の液状化によって、現地の被災形態と類似した変形が再現されることが示された。この現象は、ブロックの変形に大きく影響しているものと思われ、さらに検討する予定である。

5. おわりに

消波ブロック被覆堤の消波ブロックの現地被災事例について解析を行い、以下のような結論を得た。

- 1) 被災の形態を整理し、「重量不足による散乱・沈下」および「法尻部の沈下による全体の沈下・散乱」が主要な形態であることを示すとともに、その原因について示した。
- 2) 従来から用いられているハドソン式は、堤幹部で安全側であり、堤頭部や端部、リーフ上、急勾配斜面などではやや危険側となっていることがわかった。
- 3) また、最近提案されている新しい重量算定式について検討した結果、標準断面部の被災事例との適合性には顕著な差は見られなかった。
- 4) 消波ブロックの沈下散乱の1つの大きな原因として、「洗掘」だけでなく「波による液状化」の可能性を水理実験により示した。

最後に、本文をまとめるにあたり貴重な資料を提供していただき、また御助言を頂いた運輸省各港湾建設局、北海道開発局開発土木研究所の関係者の方々に謝意を表する。

参考文献

- 鹿島遼一・今泉正次・戸田泰和(1986): 被災事例から見た防波堤・防波護岸の波浪被災特性, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 626-630.
- 鹿島遼一・礪山 勉・清水琢三・関本恒浩・国栖広志・京谷 修(1993): 不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形量評価式について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 795-799.
- 喜田健一郎・里島正一・遠藤泰司・加藤久徳・岡崎克美(1979): 亀徳港南防波堤の安定性について, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 367-371.
- 高橋重雄・下迫健一郎・山本 悟・三浦裕信(1994): 液状化した砂地盤の特性とそれによる消波に関する基礎実験, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 611-615.
- 竹田英章・山本泰司・木村克俊・笹島隆彦(1995): 急勾配斜面上の防波堤に作用する衝撃波力と消波ブロックの安定性について, 海洋開発論文集, 第11巻, pp. 287-290.
- 土木学会海岸工学委員会(1994): 海岸波動, 波・構造物・地盤の相互作用の解析法, V-4 構造物およびその周辺地盤の挙動, 土木学会, 520 p.
- 半沢 稔・佐藤弘和・高山知司・高橋重雄・谷本勝利(1995): 消波ブロックの安定性評価式に関する研究, 海岸工学論文集, 第42巻, 投稿中.
- 宮井真一郎・大平勝司・塩見雅樹(1993): 被災防波堤集覧(その4), 港湾技研資料, No. 765, 248 p.
- J. W. van der MEER(1988): Stability of cubes, tetrapods and accropode, Design of Breakwater, ICE, pp. 71-80.