

ケーソン式混成堤の主要な被災パターンについて

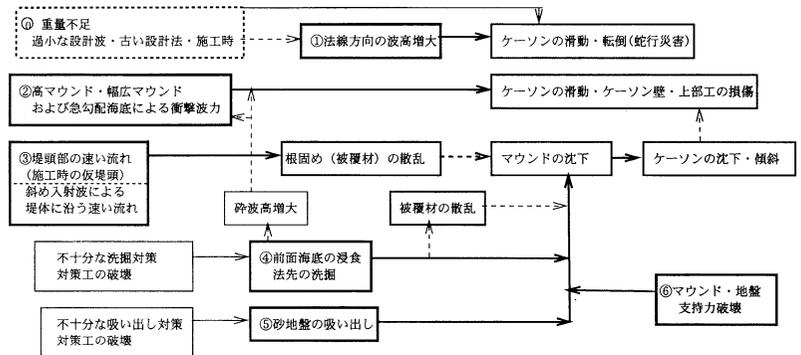
高橋重雄* ・木村克俊** ・下迫健一郎***
鈴木高二朗**** ・五明美智男*****

1. まえがき

混成堤は我が国の主要な防波堤構造で、その設計法はほぼ確立した段階にあり、現在さらに経済性を旨とした信頼性設計法の導入(下迫ら, 1998)が考えられている。しかし、混成堤の被災は少なくなっているとはいえ、毎年のように発生しており、弱点や設計上の問題点が無いわけではない。こうした弱点や問題点は、これまでの設計法が持っている余裕(安全率)のなかで守られ、被災に結びついていないだけかもしれない。新しい設計法は基本的にこの余裕幅を見直して経済性を高めようとするもので、その導入によりこうした弱点や問題点が顕在化し、被災が急に増える危険性がある。本報告は新しい設計法を推進する立場から、混成堤の被災パターンをとりまとめ、弱点や設計法の問題点を検討するものである。

2. 被災の調査

防波堤に重大な災害が発生すると、その報告書がとりまとめられるが、公表されることは比較的少なく、業務資料に留まることが多い。防波堤の被災に関する全体的な調査は古くから行われており、主要港湾における被災は、被災防波堤集覧(1968)としてまとめられ、最近では宮井ら(1993)がその4をまとめている。また鹿島ら(1986)は、消波ブロックで被覆した防波堤や護岸の被災調査を行っており、五明ら(1995)も消波ブロック被覆堤のブロックの沈下・散乱について調査している。こうした調査は、被災の全体像をみるのに貴重であり、多くの有用な情報がまとめられている。ただし、一つ一つの被災事例に関する原因の検討は必ずしも十分ではない。



図一 混成堤の被災パターン

本報告では消波ブロック被覆堤を含むケーソン式混成堤を対象に、最近 20 年ほどの主要な被災事例を種々の被災資料や現地調査から整理し、主要な被災パターンをとりまとめた。特に、この防波堤の弱点や設計上の問題点に関連する主要被災パターンについては、典型的な被災事例をとりまとめ、その具体的な内容を把握している。

3. 通常の混成堤の被災

3.1 被災パターン

図一は、通常の混成堤の被災パターンを示すものである。多くの場合、被災は来襲波が設計波高近くかそれを上回って発生するが、防波堤全体に被災が発生することは少なく、むしろ防波堤の弱点や設計上の問題点に関連する①～⑥が主なパターンである。ただし重量が大きく不足し全体的な被災に至る場合(過小な設計波, 古い波力算定法, 施工時)を⑦として図に示している。

3.2 典型的な被災

① 法線方向の波高増大(防波堤の蛇行災害)

図二は、1992年2月の陸奥小川原港の沖防波堤の滑動災害の状況である。上部工が施工途中であり、ほぼ設計波に近い波が作用してケーソンが滑動しており、伊藤・谷本(1971)が「蛇行災害」と名付けて以来有名となった法線方向の特異な分布をしている。これは防波堤堤頭部からの回折波による影響で、堤前波高が通常の入射波だけの場合に比べ、大きくなることに対応している。

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室長
** 正会員 工博 北海道開発庁開発土木研究所港湾研究室
*** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
**** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室
***** 正会員 水修 東亜建設工業(株)技術研究所水理研究室

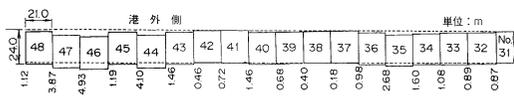


図-2 ケーソンの蛇行災害

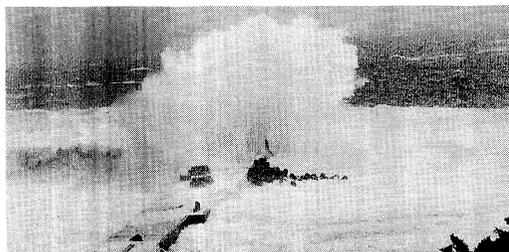


写真-1 急勾配海底上のケーソンに働く衝撃砕波力

特に、堤頭部から0.3~0.5波長の所で2割程度の波高増大があり、3~4mの滑動量となっている。

こうした波高増大についてはすでに計算法が示されているが、実際に考慮して設計された例はほとんどない。そのため設計波に近い異常波浪での滑動災害はこうした波高増大が考えられるケーソンから滑動が生じている。上述のケースでは推定来襲波($H_{1/3}=9.06\text{ m}$)に対する期待滑動量(下迫ら, 1998)は0.03 mだが、2割の波高増大を考えると0.91 mとなり、被災状況にほぼ対応している。ただし、重複波圧で設計されている場合は滑動量が大きくなり、波高増大箇所のケーソンがマウンドから転落する場合もある。なお、同様な波高増大で隅角を有する防波堤では、これを考慮した設計が通常行われている。

② 高マウンドおよび急勾配海底斜面による衝撃砕波力

写真-1は、急勾配の海底斜面上のケーソンに巻き波状の砕波が作用している状態で、ケーソン壁が破壊している。衝撃砕波力はこうした急勾配海底や大きな(高い/広い)捨石マウンドの場合に発生し、ケーソンの滑動や壁の損傷(高橋ら, 1998)に至る。ただし、現象の解明が進み、特にマウンド形状による衝撃波力の大きさを表す衝撃砕波力係数が提案(高橋ら, 1992)され、マウンド上水深 d とそこでの水深 h の比を0.6以下にすると危険なことがわかっており、最近では被災数がかなり減少している。この例は突堤状の防波堤で施工時であったため、仮の堤頭部の側壁に衝撃力が作用した。特殊なケースだが、同様な事例が最近も報告されている。この例では海底勾配1/10、水深 h 10 m、砕波波高 H_b がほぼ15 mで $2.5 u_b H_b$ 以上の衝撃砕波力と考えられる。

③ 堤頭部の速い流れ、斜め入射波による堤体に沿う速い流れによる被覆材の散乱

堤頭部では、波浪によって生じるケーソンの角付近の流れ(波浪による水粒子運動)によりマウンド部が被災

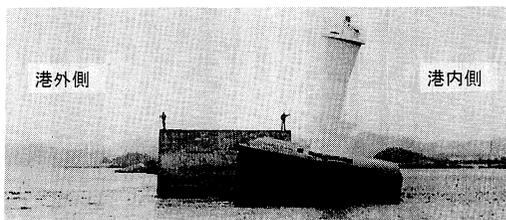


写真-2 堤頭部ケーソンのマウンド散乱による傾斜

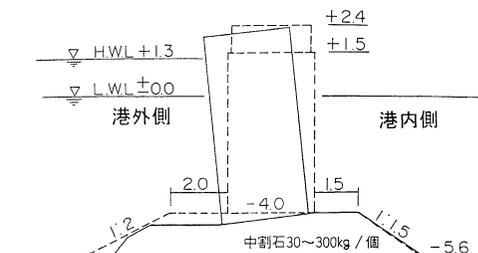


図-3 斜め入射波によるケーソン前面捨石の散乱

ししやすい。特に、施工時の仮堤頭部では、対策が十分でないこともあり被災が多い。

写真-2はS港の事例で、根固め方塊の散乱後、ケーソン下面の基礎捨石が散乱・吸い出しを受けた結果、堤頭部のケーソンが大きく傾斜したものである。木村ら(1996)はその対策法を示しており、外海に面した防波堤に周期の長い波が作用するときに、堤頭部のマウンド近傍に大きな流れのピーク値が発生し、被災が発生する事を示している。また島堤の場合には、波向きによって被災を受ける場所が変化する。

堤幹部でも、入射角60度程度の斜め入射では、防波堤に沿う波浪による流れの作用によりケーソン基部のマウンド捨石が散乱しやすい。図-3はM港内の波除堤の被災例で、捨石が散乱(吸い出し)を受け、引き波時の波力によって直立部が港外側に傾斜し、転倒したものである。港内のように比較的設計波高が小さな施設でも、水深や波向きによってはマウンド散乱の危険性がある。

④ 前面の侵食・法先の洗掘

図-4は日本海側の大規模な防波堤の断面図であり、設計波相当の有義波高7 mを越す異常波浪来襲後の海底地形変化を示すものである。水深が15 mと深いにもかかわらず、防波堤前面が100 m以上にわたって侵食され、法先部では3 m以上も掘れている。被災が発生するような異常波浪時には、こうした砂の移動は珍しくない。

このような直立堤前面の海底地形の変化には、全体的な地形変化(侵食)と、局所的な洗掘がある。法先の局所的な洗掘は入江ら(1984)の研究でそのメカニズムが明らかとなり、グラベルや洗掘防止マットなどを敷く対策工もある程度確立されている。しかし、地形変化が大

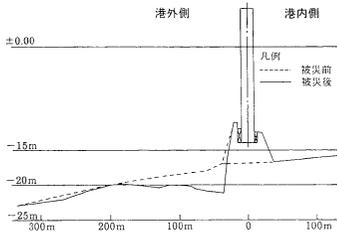


図-4 マウンド前面の海底地形の変化

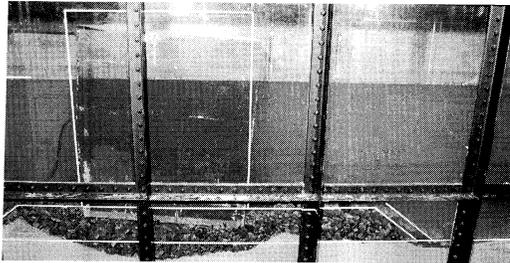


写真-3 マウンド下の洗掘

規模になると対処が難しく、マウンドの散乱・沈下がある程度あったとしても、ケーソンの沈下や傾斜に至らないようにすることが重要である。

なお、前面の海底地形が変化し、堤体の前面水深が増大するような場合には、砕波波高が増大したり、マウンドが相対的に高マウンドとなって②と同様な衝撃砕波が発生しやすくなることもあり、注意が必要である。

⑤ 捨石マウンド下の砂地盤の吸い出し

外海に面した混成堤のマウンドには 200~500 kg の捨石を用いることが多い。こうした粒径の大きい捨石を用いると、マウンド内でも流れが小さくならず、マウンド下部の砂地盤が吸い出される可能性が高い。こうした事実は古くから知られており、マウンド下部に帆布を敷設するなどの吸出防止工が用いられている。西田・田中(1970)は帆布を敷かなかつたために吸出を受け、ケーソンが傾斜した直江津港の例を挙げている。写真-3 はマウンド下部に帆布がない場合の実験であり、中央粒径 0.08 mm の細粒砂地盤上に設けた混成堤模型に波高 55 cm (水深 1.0 m)、周期 3.5 s の規則波を 2000 波作用させた結果である。マウンド下の砂が吸い出され、ケーソンが前のめりに沈下している。最近では昔の経緯が忘れられ、対策工を設けずケーソンの沈下に至

る場合がある。

⑥ 捨石マウンドと地盤のすべり

マウンドや地盤の支持力については、小林ら(1987)がビショップ法による計算を提案しており、設計法がかなり整備されている。ただし、現状では支持力により被災した事例は非常に少ないようであり、土田ら(1996)は、期待滑動量に対応する期待沈下量により、経済性の向上を目指している。しかし、特殊な地盤では、新潟西港第二西防波堤(善ら, 1984)のような波による液状化の危険性がある。また、近年ケーソン底面の摩擦増大工により経済性の向上を図ることが多いが、通常はケーソン底面で滑りが発生していたものが、底面での摩擦係数が大きくなるとマウンド捨石を含んだ滑り破壊に変わることも考えられ、それに対応した設計が必要である。

4. 消波ブロック被覆堤の被災

4.1 被災のパターン

1970 年代の後半から、通常の混成堤より消波ブロック被覆堤が設計されることが多くなり、それにともなって消波ブロック被覆堤の被災が増加している。図-5 は消波ブロック被覆堤の被災パターンである。通常の混成堤に比べブロックがあることで複雑だが、①から⑥までの 6 つの主要な被災パターンがある。①は消波ブロックの散乱につながり、②と③はブロックの散乱と不完全消波による衝撃砕波力の発生要因となる。なお、図-1 と同様、⑩は設計波を大きく上回ったり、施工時の重量不足によるケーソンやブロックの全体的な被災である。

4.2 典型的な被災

① リーフや急勾配海底における消波ブロックの散乱

リーフ海域や離島のように、急勾配の海底がある場所では消波ブロックの散乱が発生しやすい。竹田ら(1995)の海底勾配 1/10, 1/2.5 の複合勾配の実験では、砕波領域で波高が 10-50% 増大することや、入射波が巻き波となり法先付近で崩れ落ちることで消波ブロックの散乱が法

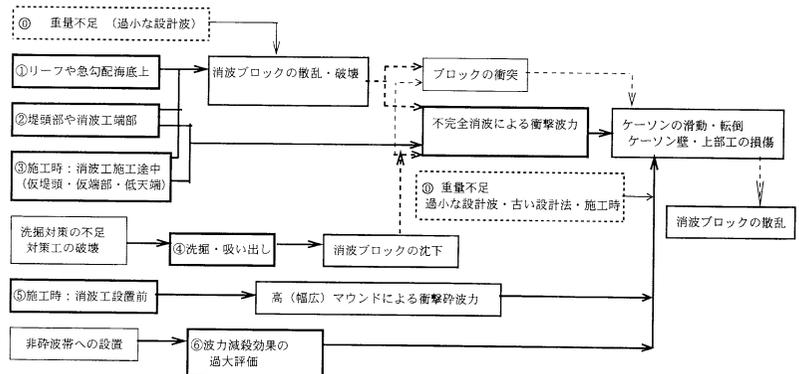


図-5 消波ブロック被覆堤の被災パターン

先に集中して生じている。喜田ら(1979)が示した亀徳港の事例では、急勾配のリーフ先端に防波堤堤頭部が存在し波高増大と碎波後の強い流れによって、消波ブロック重量が不足して散乱に至っている。

② 堤頭部や消波工端部における消波ブロックの散乱と不完全消波による衝撃碎波力の発生

堤頭部では波浪による流れで消波ブロックが不安定になり易い。散乱した消波ブロックが航路に達すると船舶航行に支障を来す恐れある。また消波ブロック天端が下がると、直立部の波力増大が生じケーソンが滑動することがある。木村ら(1997)は平面実験で堤頭部のブロックに働く波力自体が堤幹部に比べて大きいことを示すとともに、ブロック重量の割増率について検討している。

消波ブロック被覆堤から通常の混成堤に断面形状が変化する区間(消波工端部)では、不完全消波状態となり、直立部に衝撃波力が作用する。塩見ら(1994)は陸奥小川原港における被災事例を分析するとともに、こうした条件下の衝撃波力が高橋ら(1992)らの衝撃碎波力係数により算定できること示した。なお消波工端部では、堤頭部と同様に消波ブロックが不安定になり易い。

③ 消波工施工時における消波ブロックの散乱と不完全消波による衝撃碎波力の発生

五明ら(1995)は施工途中の防波堤(八戸港中央第2防波堤)の被災事例を示している。消波工端部の不完全消波となった北側仮堤頭ケーソンが衝撃碎波力を受けて滑動すると、消波ブロックの散乱が進み、隣接したケーソンも不完全消波となって滑動している。一方、消波工の巻止めが十分になされていた南側の堤頭ケーソンでは、対照的にわずかに消波工が沈下した程度であった。

上久保ら(1998)は、1994~96年にかけて北海道内で発生した消波ブロック被覆堤の施工時の被災事例(7件)について被災再現実験を含めて検討し、消波工端部だけでなく静水面付近までしか被覆していない場合にも被災が発生することを示している。消波工施工時に被災が多いことは、古くから指摘(鴻上ら,1970)されているが、消波工の巻き止めなどの対策は、工費や時間がかかるためあまり行われておらず、最近でも被災が少なくない。

④ 消波ブロックの洗掘や吸い出しによる沈下

砂地盤上に設置された消波ブロック被覆堤のブロックの沈下問題は、消波ブロック被覆堤が採用されて以来、絶えず発生しており、五明ら(1997)も事例を多数紹介している。しかし、一般的にブロック沈下後にブロックを追加設置すると沈下がおさまる傾向にあるため、あまり問題とはされていなかった。

鈴木ら(1998)はブロック前面の洗掘より、ブロックや捨石マウンド下からの砂の吸い出しが、沈下の原因として重要であることを指摘している。特に砂の粒径が細

かい場合には被災規模が大きい。図-6は、吸出防止工として捨石類(石籠)を用いたT港の防波堤の例である。中央粒径が0.11mmと小さかったため、周期17.8sと異常に長い。設計波(5.9m)よりはるかに小さな波($H_{1/3}=3.6m$)で石籠の下が砂が吸い出され、天端部は約2.3m沈下している。ブロックが大きく沈下すると、衝撃碎波力が発生し易くなり、この場合にはケーソン自体も滑動している。また、沈下に伴ってブロックが動くとき、ブロックが折れたり、ケーソン壁を損傷することがある。

洗掘防止工として古くから①捨石類(石かご、グラベルマット等)、②洗掘防止マット類、③①と②の組み合わせといった工法があるが、捨石類では砂地盤の粒径に対してのフィルター効果、マット類では施工時の安定性、施工後の強度を考慮した上での設計が必要である。

⑤ 消波工設置前の幅広(高)マウンドの衝撃碎波力

消波ブロック被覆堤は、消波ブロック設置前には、幅の広い捨石基礎マウンドを持つ。特に、このマウンドが高い場合には、3.2②で述べたようにマウンド上で波が砕け衝撃碎波力の発生の危険性がある。

⑥ 消波ブロックの波力減殺効果の過大評価

図-7は、ケーソンが滑動し、その結果消波ブロックが散乱してしまった事例で、設計波の85%の波高で被災している。この防波堤の設置水深 h は19mで設計有義波高は4.5mと波高に比して水深が大きく、消波ブロックによる波力減殺効果があまり期待できない条件(高橋ら1990)で、重複波圧が作用していたものと考えられる。水深波高比を考慮した波力減殺係数 λ は来襲波に対して0.98であり、滑動安全率はほぼ1.0である。また、堤頭函から3箇目のケーソンが転落しており、3.2①で述べた堤頭からの回折波の影響も考えられ、2割の波高増大で、安全率は0.79で12.9mの期待滑動量となる。

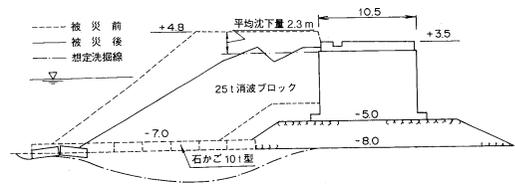


図-6 ブロック下の吸い出し

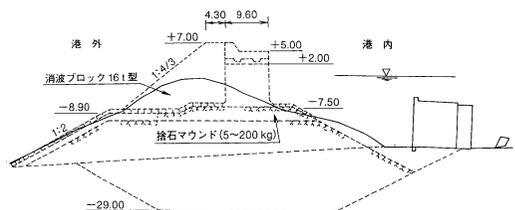


図-7 ケーソンの滑動によるブロックの散乱

表-1 被災別の件数 (函数)

堤体	通常の混成堤						消波ブロック被覆堤							
	原因	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	
宮井	5	18	3	6	1	0	0	3	3	6	6	3	0	2
直轄	0	17	0	1	0	0	0	0	0	7	7	0	0	0

5. 最近の被災の傾向と被災確率

宮井ら (1993) は 1983~91 年の間に被災した全国の防波堤のうち、被害金額の大きいものなど主要な 69 件について被災状況をまとめている。これら 69 件の内訳は通常の混成堤 32 件、消波ブロック被覆堤 23 件、その他 14 件である。また、設計有義波高が 5 m 以上のものは 32 件で、被災時に設計波以上の波が来襲したのは 58 件であった。また、全国の直轄工事の混成堤約 9000 函、消波ブロック被覆堤約 7000 函について、1989~93 年までの被災調査が実施されている (河合ら, 1997)。その結果、滑動または転倒した混成堤が 18 函、被覆堤が 14 函であった。

表-1 はこれらの被災の原因別件数 (あるいは函数) をみたものである。混成堤では①の法線方向の波高増大が多いが、一つの台風で一つの港の複数の防波堤が同じように被災した事例が複数あったためである。また、比較的波高の小さい重複波堤では⑩や⑪の大規模滑動災害が多いことに注意が必要であり、重複波領域では期待滑動量が大きくなり、期待滑動量に基づく設計でも滑動安全率をそれほど低減できないという下迫ら (1998) の指摘と一致する。一方消波ブロック被覆堤では、堤頭部および消波工端部と、消波工施工途中が多く、単純な滑動は無い。なお、件数が少ないものには被災金額が小さくて調査対象からはずれたものもあり、注意が必要である。

直轄の調査結果からは、耐用期間を 50 年とした場合の被災遭遇確率は、混成堤と消波ブロック被覆堤ともに約 2% となる。また、信頼性理論による滑動遭遇確率の計算では混成堤で 9.9%、被覆堤で 1.2% となっている。ただし、計算では波力が抵抗力を少しでも上回ると被災と見なしているが、実際は、滑動量がある程度の大きさにならないと被災と認められない。ちなみに、期待滑動量を計算すると、50 年間の滑動量が 30 cm 以上となる確率は混成堤で 3% 程度となり、実際の値に近くなる。ただし、上述したように実際の被災には単純な滑動被災は少ないことにも留意する必要がある。すなわち、設計上の弱点や問題点に十分注意して設計すれば、被災はさらに少なくなると思われる。

参 考 文 献

伊藤喜行・谷本勝利 (1971): 混成防波堤の蛇行災害, 港研資料, No. 112, 20 p.
 入江 功・近藤隆道・赤石正廣・寺崎賢次 (1984): 重複波によ

る防波堤前面での海底洗掘, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 350-354.
 運輸省港湾技術研究所設計基準部設計基準課 (1968): 被災防波堤集覧, 港研資料, No. 58, 239 p.
 鹿島達一・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.
 片岡真二・斎田和成 (1986): 防波堤構造収攬, 港湾技研資料, No. 556, 150 p.
 上久保勝美・木村克俊ら (1998): 消波ブロック被覆堤の施工時における滑動特性, 海洋開発論文集 Vol. 14, pp. 339-344.
 河合弘泰・高山知司ら (1997): 潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率, 港研報告, 第 36 巻 4 号, pp. 3-41.
 喜田健一郎・里島正一ら (1979): 龜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.
 木村克俊・上久保勝美・坂本洋一・水野雄三・竹田英章 (1997): 消波ブロック被覆堤の堤頭部におけるブロックの耐波安定性, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 956-960.
 木村克俊・水野雄三・須藤賢哉・桑原伸司・林 倫史 (1996): 混成堤堤頭部のマウンド被災特性と被覆材の安定重量算定法, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 806-810.
 鴻上雄三・時川和夫 (1970): 施工段階における消波工の波圧減殺効果に関する実験的研究, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 205-210.
 小林正樹・寺師昌明・中島謙二郎・小谷 拓 (1987): 捨石マウンドの支持力の新しい計算法, 港研報告, 第 26 巻 2 号, pp. 371-411.
 五明美智男・堺 和彦・高山知司・寺内 潔・高橋重雄 (1995): 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, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 886-890.
 五明美智男・高橋重雄・鈴木高二朗・姜 閔求 (1997): 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 (第 2 報), 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 961-965.
 塩見雅樹・山本 浩・津川昭博・黒沢忠男・永松宏一 (1994): 消波ブロック不連続部の波力増大による防波堤の被災とその対策に関する研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 791-795.
 下迫健一郎・高橋重雄・高山知司・谷本勝利 (1998): 変形を許容した混成防波堤の新設計法の提案—期待滑動量を用いた信頼性設計—, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 801-805.
 鈴木高二朗・高橋重雄 (1998): 消波ブロック被覆堤のブロック沈下に関する一実験, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 821-825.
 善 功企 (1984): 海洋開発における波と地盤の動的問題, 昭和 59 年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 77-134.
 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎 (1990): 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重, 港研報告, 第 29 巻 1 号, pp. 54-75.
 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三 (1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃碎波力係数の提案, 海岸工学論文集, Vol. 89, pp. 676-680.
 高橋重雄・津田宗男・下迫健一郎・横田 弘・清宮 理 (1998): 防波堤ケーソンの破壊と衝撃碎波力について, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 751-755.
 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.
 土田 孝・湯 怡新 (1996): 港湾構造物の円弧すべり解析における最適な安全率, 港研報告, 第 35 巻 1 号, pp. 117-146.
 西田俊策・田中則男 (1970): 昭和 45 年冬期異常気象による海象と構造物の被害について, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 185-190.
 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.