

ケーソン壁面の押し抜きせん断破壊に対する設計手法の提案 および対策の検討

有 川 太 郎*・大 嶋 菜 々 子**・池 辺 将 光***・下 迫 健 一 郎****

ケーソン壁穴あき被災の原因の一つである前面消波ブロックによる衝突に対して、その影響を考慮した設計の考え方の提案と被災に対する対策の検討を行った。穴あきが一旦生じると、ケーソン隔室内の中詰め砂が流出し、ケーソンの滑動等 2 次的な災害につながる。中詰め砂流出によるケーソン重量減少時の滑動安定性について、信頼性設計法も含めた検討を行ったところ、条件によっては滑動の安定性が許容値を下回ることわかり、この結果をふまえ消波ブロックの衝突力を考慮した設計の考え方の提案を行った。さらに衝突に対する中詰め砂やコンクリート強度の影響ならびにゴムの緩衝効果について実験を用いて検討するとともにその経済性を含めた対策の検討を行った。

1. はじめに

防波堤ケーソン壁の局所破壊について、高橋ら(1998)によりまとめられており、その主な原因は衝撃砕波および消波ブロックの衝突によるものであることがわかっている。衝撃砕波に関しては、高橋ら(1992)による衝撃砕波力係数によりその影響を設計に反映させることが可能となっている。

消波ブロックの衝突によるケーソン壁の破壊は、消波ブロックの脚先とケーソン壁との局所的な衝突によるもので、破壊時の形態は図-1のようなコンクリートが押し抜かれたような現象となり、押し抜きせん断破壊と呼ばれる。このような破壊が一旦生じると、ケーソン壁の穴あきにつながり、中詰め砂流出によるケーソン滑動等 2 次的な災害につながる。

消波ブロックの衝突に関して、著者ら(2004)により、コンクリート標準示方書(土木学会, 1996)の押し抜きせん断耐力式が押し抜きせん断破壊の判定に適用可能であることがわかっているが、設計に反映されていないのが現状である。

そこで本研究では、穴あきによる中詰め砂流出時における滑動安定性を検討し、その結果をふまえ消波ブロック衝突による押し抜きせん断破壊を考慮した設計の考え方について提案を行った。さらに破壊に対する対策について実験を用いその経済性を含めた検討を行った。

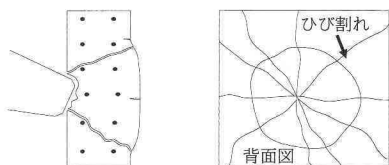


図-1 押し抜きせん断破壊

* 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部耐波研究室
** (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部耐波研究室
*** (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部耐波研究室
**** 正会員 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部耐波研究室
長

2. 被災事例および既往の研究

ケーソン壁の破壊に関する調査・研究は高橋ら(1998)においてもまとめられているが、構造形式を消波ブロック被覆堤に限定し、ケーソンにひび割れや穴あきが生じた被災について、施工に対する被災時期や波浪条件等に注目し、主な被災事例をまとめた。結果を表-1に示す。

表-1 主な被災事例

被災時期	側壁厚 (m)	主な BL	波高 $H_{1/3}$ (m) / 周期 (s)	
			設計	被災時
完成後約 1 年		8 t 型	5.46/11.0	H_{max4} (推定)/不明
施工中	0.4	10 t 型	10.7/15.6	10.8/不明
完成後約半年				6.47 ($H_{max11.3}$)/12.2
施工中	0.5	50 t 型	9.5 ($H_{max12.4}$)/16.0	7.2 ($H_{max12.8}$)/13.0
施工中	0.4	32 t 型	6.3/15.0	5.9/9.9
完成後約 5 年		64 t 型・50 t 型		12.3 ($H_{s12.3}$)/16.8
完成後約 1 年	0.4	50 t 型	8.0/12.0	10.0 ($H_{max18.9}$)
施工中	0.4	12.5 t 型	5.8/10.0	4.76/9.0
完成後約 1 年	0.5	64 t 型	7.9/12.0	10.13 ($H_{s13.3}$)/13.7
完成後約 5 年		50 t 型	5.33/13.0	8.73 ($H_{max13.2}$)/11.4
完成後約 5 年	0.65	40 t 型	6.9/13.0	9.94 ($H_{max14.77}$)/13.4
完成後約 1 ヶ月		50 t 型		7.69 ($H_{max10.76}$)/11.3
完成時				$H_{s5.0}$ /12.7
施工中	0.4	32 t 型~64 t 型	8.0/12.0	7.35 ($H_{max10.0}$)/12.9
完成後約 1 ヶ月		80 t 型		6.31 ($H_{max10.77}$)/10.4
完成後約 10 年	0.5	ドロス 50 t 型		8.3 ($H_{max15.0}$)/12.0
完成後約 5 年		4 t 型	1.85/5.3	2.3 ($H_{max4.2}$)/5.1
完成後約 5 年			1.85/5.3	1.9 ($H_{max3.5}$)/5.1

表より被災時期は、施工途中や完成直後であることが多く、また設計波高を越えていない場合にも被災が発生していることがわかる。これは施工途中や完成直後はブロックの噛み合わせが不安定であるためと考えられる。被災写真を写真-1示す。穴あきの大きさは消波ブロック脚先の直径にほぼ等しいことが調査より確認されてい

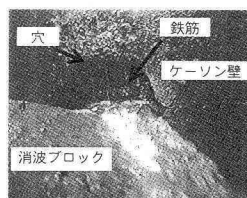


写真-1 被災事例

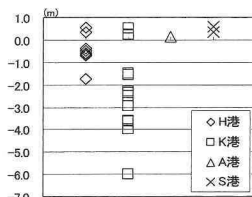


図-2 穴あき発生位置

る。また水深方向発生位置を図-2にまとめた。縦軸は基本水準面(C.D.L.)からの水深で、穴あきの多くは静水面付近で発生しているが、一方でK港のように比較的水深の深い場所でも穴あきが生じる可能性があることがわかった。

3. 中詰め砂流出によるケーソン滑動への影響

ケーソンの滑動の安定性はケーソン重量に依存する。穴あき時のケーソン重量の減少はケーソンの隔室内砂の流出が原因であるため、1隔室当たりの中詰め砂体積減少率と滑動安全率の関係を検討した。対象とした断面図を図-3に示す。ケーソンの隔室数が 3×4 個、単位幅堤体重量が約5259 kN/mで、設計波は有義波高7.0 m、有義波周期13.0 s、最高波高11.1 mである。

また信頼性設計法で設計された場合についても検討を行った。検討の方法は、下迫ら(1998)により提案されている方法より滑動量を算出した。表-1より被災が完成直後に多いことから完成後すぐ穴があいたと仮定し、耐用年数は50年とした。また設計指標には下迫ら(2003)における滑動量が0.3 mを越える確率を用い、許容値は10%とした。このときの堤体重量は図-3の断面における0.3 m滑動超過確率計算10%における重量とし、その値は単位幅当たり5057 kN/mである。

図-4に1隔室の中詰め砂体積減少率と堤体重量減少率の関係を示す。今回の対象断面では1隔室全て中詰め砂が流出した場合の堤体重量減少率は約5%となる。

図-5に1隔室の中詰め砂体積減少率と滑動安全率の関係を示す。実線は現行設計法における安全率1.2で設計された断面、点線は信頼性設計法により0.3 m滑動超過確率10%で設計された場合の断面における結果である。現行設計法の断面では、1隔室の中詰め砂が全て流出しても設計波に対する安全率は約1.07で1.0を下回ることはない。一方、信頼性設計法においては体積減少率約80%で安全率1.0を下回る結果となった。

また図-6に堤体重量減少率と0.3 m滑動超過確率の関係を示した。安全率1.2で設計された断面については、1隔室相当分の堤体重量が減少した場合の0.3 m滑動超過確率は11%程度である。一方で超過確率を10%とし

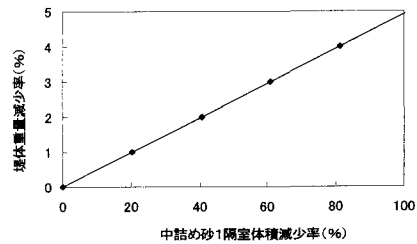


図-4 堤体重量減少率と1隔室の中詰め砂体積減少率

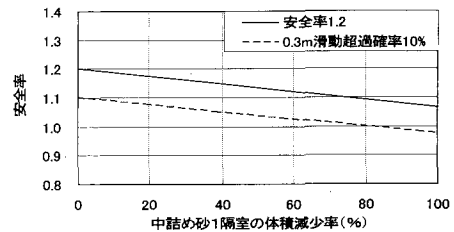


図-5 滑動安全率と中詰め砂1隔室の体積減少率

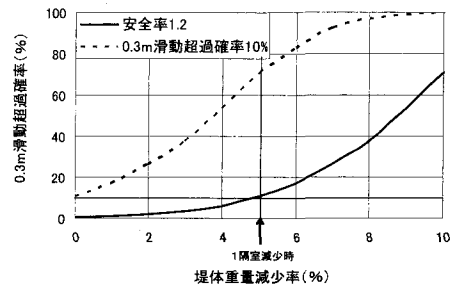


図-6 0.3 m 滑動超過確率と堤体重量減少率

た断面では、少しの重量減少で滑動超過確率が大きく変化し、1隔室分の重量減少で滑動超過確率は70%以上となる。

現行の設計の考え方では、原則として滑動安全率1.2以上を確保しなければならず、穴あきによって少しでも重量が減少した場合には何らかの対策が必要となる。ただし、実際には、滑動安全率1.2で設計された断面であれば中詰め砂の流出によって大きな滑動が生じる可能性は比較的小さいことがわかる。一方、より経済性を追求して当初からある程度滑動を許容した断面では、中詰め砂の流出が大きな滑動につながる危険性が高い。

4. 押し抜きせん断破壊を考慮した設計の考え方の提案

3.での結果をふまえ、押し抜きせん断破壊を考慮した設計の考え方の提案を行う。図-7にフロー図を示す。設計手順は以下の通りである。

- ① 現行の設計手法に従い各諸元を決定する。
- ② 消波ブロック衝突による穴あきの可能性について検討する。穴あきの判定は、有川ら(2003)から算定

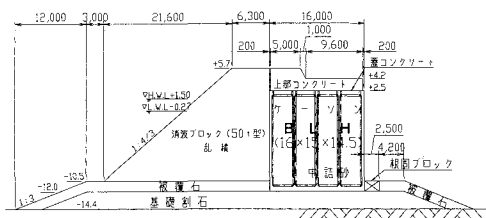


図-3 防波堤断面図

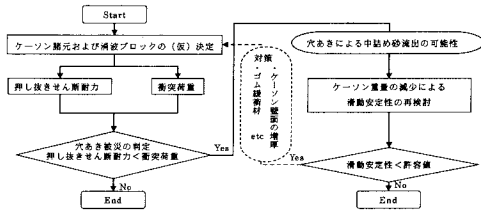


図-7 押し抜きせん断破壊を考慮した設計フロー

される衝突荷重とコンクリート標準示方書の押し抜きせん断耐力式との比較により行う。

- ③ ②にて穴あきの判定があった場合、穴あき発生後におけるケーソン重量での滑動安全性を検討する。
- ④ ③にて許容値を下回った場合、ケーソンに対策を行う。

手順③について、穴あきが発生しても滑動の危険性がなければ防波堤の機能は維持できると考え、事前対策ではなく、事後対策でよいとした。

ここで図-3の断面を対象に試設計を行う。手順②より、計算の結果消波ブロックの衝突荷重は5012 kN、ケーソン壁の押し抜きせん断耐力は1329 kNとなり、穴あきの可能性が判断でき、手順③を行う。穴あきの発生位置は図-2より水深の深い場所でも発生する可能性があるため、穴あき後の重量は中詰め砂1隔室全てが流出した場合とした。前述のとおり現行の設計の考え方では滑動安定性の判断基準は安全率1.2であり、これを下回る場合には対策が必要となる。ただし、今後は信頼性設計法を用いて大きな滑動が生じる可能性が小さいことが明らかであれば、特に対策を要しないことも考えられる。また、安定性が施工時(消波ブロック設置前)で決まる場合で完成時の安全率が1.2よりも大きければ、中詰め砂が流出しても安全率が1.2以下とならない場合も考えられる。なお、信頼性設計法を適用する場合は、穴あき位置を確率的に与えることが必要となる。

5. 対策の検討

(1) 衝突に対する中詰め砂およびコンクリート強度による影響

中詰め砂およびコンクリート強度の破壊に対する影響について、実験にて検討を行った。実験は図-3の断面を参考に相似比2.2の鉄筋コンクリート版模型を作製し、消波ブロック5t型を約8m/sの速さで衝突させた。また鉄筋にはひずみ量を測定するため、ひずみゲージを取り付けた。

実験ケースは表-2に示すとおりである。

図-8は衝突1回目および2回目における衝突背面の破壊状況である。ケース3は1回目の観察ができなかつ

表-2 実験ケース

条件	ケース名		
	ケース1	ケース2	ケース3
中詰め砂	無	無	有
コンクリート強度(N/mm ²)	32	41	32

ため2回のみ記載している。ケース2について、ケース1より縦ひび割れが多くみられ、せん断強度の増加が確認できる。またケース3について、中詰め砂の影響でコンクリート剥離が起きず、押し抜き円も大きくなっていることから中詰め砂は衝突荷重に対し緩和効果があることがわかる。

図-9に背面側縦鉄筋中央部に取り付けたひずみゲージの残留ひずみ量の結果を示した。図中の横軸は残留ひずみ量、縦軸はひずみゲージ取り付け位置で、縦軸の丸印の数字は消波ブロックの衝突位置を示している。また上段は衝突1回目、下段は2回目の結果である。なお、衝突2回目の残留ひずみ量は1回目との総和である。

衝突1回目について、ケース1およびケース2とも衝突位置において鉄筋は降伏状態にあり、模型は破壊状態

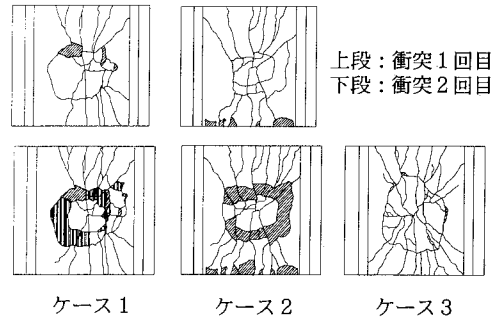


図-8 衝突背面破壊状況

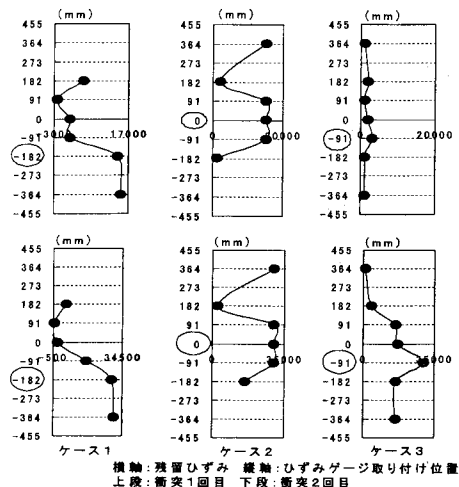


図-9 各ケースにおける残留ひずみの比較

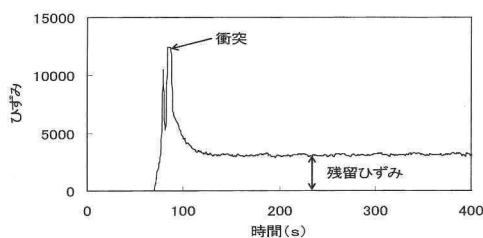


図-10 ひずみ波形

であることがわかる。ケース3について、衝突位置でのひずみ波形は図-10のようになっており、鉄筋は弾塑性域にありケース3は降伏状態にないことがわかる。また衝突2回目はケース3においても鉄筋は降伏状態にあり模型が破壊したことがわかる。

以上の結果より、衝突による中詰め砂およびコンクリート強度の影響による緩衝効果は期待できることが確認できた。特に中詰め砂はコンクリート剥離の抑制効果もあり、穴あきに対する緩衝効果は大きいことがわかった。しかし今回は衝突速度1ケースのみの検討で明確な破壊状況の違いを確認できなかったため、その効果を定量的に明確にするためには今後より多くのケースでの検討が必要である。

(2) ゴム緩衝材における検討

ゴムにおける緩衝効果について実験を行った。実験方法は図-11に示すとおりで、吊り下げた消波ブロック0.5t型の振角を変えて壁面に衝突させ、衝突面に取り付けたロードセルで衝突荷重を測定した。ゴムは、図中の写真にみられるようにロードセル前面にボルトで固定し取り付けた。実験に使用したゴムは硬度64の天然系で、形状は縦15cm×横15cm×厚1.2cmで、ゴムにはロードセルへの取り付けのため約0.3cm厚の鉄板が取り付けられている。また、園田ら(2002)によると、硬度の違いによる衝撃荷重の影響はほとんどないとしており、緩衝効果は寸法の違いによるもののみと考えてよい。

実験ケースは緩衝材のない場合、ゴムを1枚(ゴム厚1.2cm)および3枚(ゴム厚3.6cm)積層した場合の3ケース行い、衝突荷重を比較した。結果を図-12に示す。

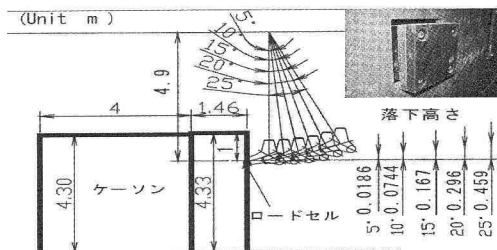


図-11 実験状況図

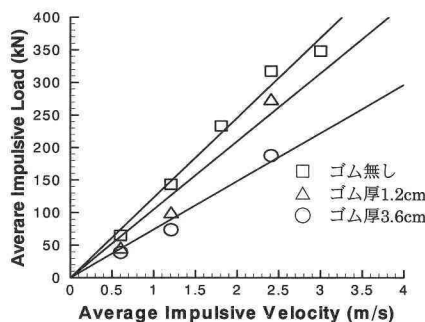


図-12 ゴム厚による衝突荷重の違い

ゴム緩衝材を1枚用いたケースでは、7～8割程度の緩衝効果が、また3枚のケースでは6～7割程度の緩衝効果がえられた。実験で用いた厚さ3.6cmのゴムを現地サイズに単純に幾何学倍すると12～13cm相当のゴム厚となり、コスト面からの検討も必要と考えられる。

(3) 新規ケーソンに対する経済的検討

コスト面における検討を行う。押し抜きせん断耐力のパラメタを用い、各パラメタを増加させた際のコストと強度の関係を検討した。算定式中のパラメタはコンクリート強度、鉄筋比、有効高であり、また実験にて緩衝効果が確認されたゴムも含めて検討を行った。

検討の対象とした断面は図-3で、各パラメタの値を表-3に示す。まず各パラメタを増加させた場合における押し抜きせん断耐力の比較を行った。初期値は倍率×1.0に示す値で、各パラメタを1.5倍、2倍に増加したときの押し抜きせん断耐力を算定した。ただし、コンクリート強度について、36 N/mm²を越えると強度が増加してもせん断強度は増加しない場合があり(土木学会, 1996)1.5倍のみ検討とした。表からせん断耐力が最も増加したケースは壁面厚を増加させた場合であり、初期値の1.5倍で強度は1.64倍増加した。

表-3 各パラメタにおける押し抜きせん断耐力

対策項目	値		押し抜きせん断耐力(kN)	
		倍率		倍率
コンクリート設計圧縮強度 N/mm ²	24	×1.0	1330	×1.00
	36	×1.5	1628	×1.22
有効高 m	0.33	×1.0	1330	×1.00
	0.475	×1.5	2185	×1.64
	0.66	×2.0	3182	×2.39
鉄筋比 %	0.26	×1.0	1330	×1.00
	0.39	×1.5	1522	×1.14
	0.52	×2.0	1675	×1.26

次にコストと押し抜きせん断耐力の関係について検討を行った。各パラメタの増加に対し要する費用と押し抜きせん断耐力との関係を図-13にまとめた。図の横軸はケーソン港外側側壁の製作に必要な材料費、縦軸は材料

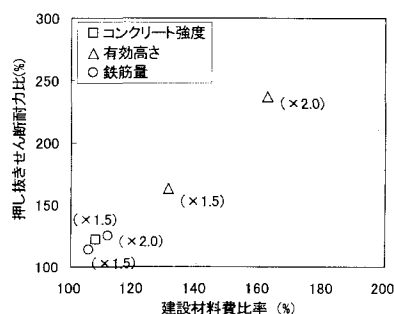


図-13 各パラメタにおける押し抜きせん断耐力と材料費

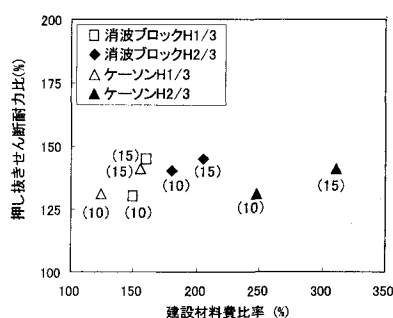


図-14 ゴム緩衝材による押し抜きせん断耐力と材料費

が増加した際の押し抜きせん断耐力を示し、両軸とも基準を100%とした比率で表した。図中括弧内の数字は基準との材料増加比率を示している。また材料費の算出は、建設物価2003年12月号を使用し、被災のあった地区における単価を用いて積算を行った。積算は港外側ケーソン壁の製作に要する材料費のみとし、加工費や施工費等は含まれていない。

図-13から各パラメタで材料費に対し押し抜きせん断耐力に大きな違いは見られなかった。しかし有効厚は少しの材料の増加で大きく耐力が増加し、他のパラメタと比較しても大幅な耐力の向上が期待でき、新規ケーソンを製作する際の対策として今回比較の範囲内では最も良い方法であると考えられる。また鉄筋量について、今回は港外側内側鉄筋の全量を増加の対象としたが、穴あきが最も多い静水面隔壁中央付近を局部的に増加することで対策としては十分効果が期待できコスト面においても安価となると考えられる。ただし、極度な増加は施工時のコンクリートの流動性を悪くするため増加量には限度があるものと考えられる。

また図-14にゴム緩衝材におけるコストと押し抜きせん断耐力との関係を示した。ケーソン壁面のみにゴムを取り付けた場合または消波ブロックの脚先のみにゴムを取り付けた場合に対しゴム厚を10cmおよび15cmとした場合について検討を行った。さらに取り付け位置について、ケーソン天端よりケーソン高さの1/3までおよび2/3までの2ケースを行った。凡例の H はゴムの取り付け位置を、図中括弧内はゴム厚を示す。

図より消波ブロック脚先に取り付ける方が経済的となったが、全体的な対策として用いる場合はコスト高となることがわかった。したがって、局所的な使用に有効であると考えられる。

6. まとめ

消波ブロックの衝突による押し抜きせん断破壊に対す

る設計の考え方の提案およびゴムの影響等による実験を含めた対策の検討を行った。穴あき被災による問題は、重量減少時の滑動であるとして設計に反映させた。また、実験により衝突に対する中詰め砂、コンクリート強度、ゴムによる影響を確認するとともに経済性を含めた対策を検討した。本研究の範囲内では壁厚を厚くすることが最も有効な方法であることがわかった。今後の課題の一つとして、確率論的な衝突位置の検討を行い、設計へ反映していくことがあげられる。

本研究の実施にあたっては、早稲田大学の清宮理教授および当所の横田弘構造振動研究室長、岩波光保主任研究官から適切な助言を頂いている。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 有川太郎・池辺将光・大嵯葉々子・下迫健一郎 (2004): 消波工による壁面破壊に関する実験的研究, 海工論文集, Vol. 51, pp. 741-745.
- 有川太郎・織田朋哉・黒田豊和・下迫健一郎 (2003): 消波工によるケーソン壁面衝突力に関する大規模実験, 海工論文集, Vol. 50, pp. 716-720.
- 運輸省港湾局 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上), 日本港湾協会.
- (財)建設物価調査委員会 (2003): 建設物価, 12月
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1998): 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港研報告, Vol. 37, No. 3, pp. 3-30.
- 下迫健一郎・多田清富 (2003): 混成堤の性能照査型設計法における滑動量の許容値設定に関する検討, 海工論文集, Vol. 50, pp. 766-770.
- 園田佳巨・西本安志・彦坂照 (2003): ゴム製緩衝材の衝撃緩衝効果に関する解析的考察, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp. 169-174.
- 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波力係数の提案, 海工論文集, Vol. 39, pp. 676-680.
- 高橋重雄・津田宗男・下迫健一郎・横田弘・清宮理 (1998): 防波堤ケーソン壁の破壊と衝撃破砕力について, 海工論文集, Vol. 45, pp. 751-755.
- 土木学会: コンクリート標準示方書 [平成8年度制定] 設計編, pp. 65-104.