

消波工衝突によるケーソン壁面破壊に関する実験的研究

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

消波ブロックのケーソン壁面衝突に対する衝突力算定式が提案されているが、押し抜きせん断破壊の判定基準を明確にし
ておく必要がある。そこで、既存の静的荷重に対する押し抜きせん断耐力による判定の妥当性、ならびにその荷重を超えた
ときの破壊形態を調べるため、大規模水路にて衝突破壊実験を行った。その結果、衝突力算定式と押し抜きせん断耐力式を
用いることで破壊の判別を行えることがわかった。さらに、ロッキングや転落といった実際に想定されるパターンでの衝突
実験を行い、算定式の適応性を検討するとともに、その破壊状況を確認した。

1. はじめに

消波ブロック被覆堤においてケーソン壁前面に消波ブ
ロック脚部の直径程度の穴があき、ケーソン内の中詰砂
が流出するという被災事例が全国的に報告されている。
その原因のひとつは、消波ブロックが壁面に衝突した際
に生じる、押し抜きせん断破壊によるものと考えられる。
そのため、特に大型のブロックを用いている被覆堤では
押し抜きせん断破壊の判定を行うのがよいと考えられ
る。コンクリートの押し抜きせん断耐力について、静的
荷重の実験より算定式が提案されているものの、水中に
おける適応性や衝突荷重に対する検討の事例は少なく破
壊形態も明らかではない。そこで、本研究では消波ブロッ
クならびに RC 製版を用いた大規模衝突破壊実験を行
い、破壊判定方法の検討を行った。さらに、水中におけ
る吊り下げ実験や想定される衝突パターンでの破壊実験
を通して、実現象における算定式の適応性と破壊判定の
妥当性を確認した。

2. 吊り下げ衝突による破壊実験

(1) 実験方法

RC 製模型は、実際に穴あき被災が生じたケーソンを
模擬して作製し、縮尺を 1/2.2 とした (図-1)。模型の
有効高さは $d=145\text{ mm}$ 、鉄筋比 $P=0.33\%$ 、コンクリー
ト圧縮強度 $f_c=31.9\text{ N/mm}^2$ である。

図-2 および写真-1 に示すように水路内に鋼製のフ
レームを設置し、模型を固定させた。消波ブロックは水
路上の H 型鋼よりワイヤーで吊し、後方から引張り振り
角を与え、初速度なしで壁面へ垂直に衝突させた。実験
は空中と水中で行い、衝突による模型の変位が変化しな
くなるか、破壊が激しくなったところで終了した。表-
1 に振り角、その時の落下高さ、および全衝突回数を括弧
内に示した。測定項目は埋め込み鉄筋歪み量、加速度と
し、1 回衝突させるごとに模型の破壊状況を確認しひび

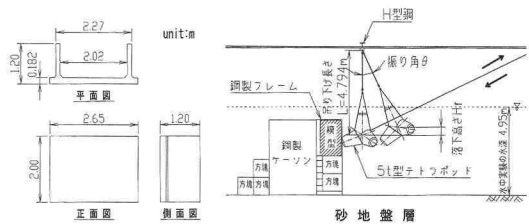


図-1 RC 製模型形状図

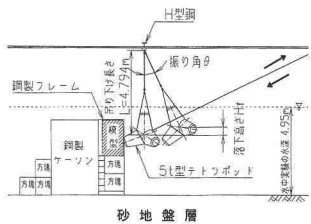


図-2 吊り下げ実験断面図

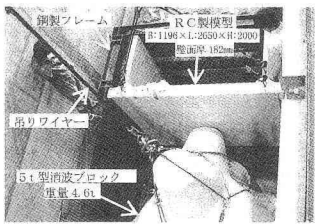


写真-1 模型設置状況

表-1 実験ケース

振り角(度)	落下高さ(m)	全衝突回数(回)
5	0.018	空中(20)
10	0.072	空中(10)・水中(15)
15	0.163	空中(6)・水中(15)
20	0.289	空中(4)
25	0.449	空中(3)・水中(6)

割れ図を作製した。

(2) 実験結果

a) 空中実験

図-3 は各振り角における衝突回数と模型背面の隔壁
間のひびわれの様子の関係をスケッチしたものである。
左側が衝突回数 1 回目、右側が最終回数の破壊状況図で
ある。メッシュ部はコンクリートの剥落箇所を表してお
り、# は剥落した衝突回数を示す。

振り角 5 度は、模型裏面に縦方向のひび割れが生じ、
衝突回数を増しても大きな変化は生じなかった。振り角
10 度では、衝突回数 4 回目から (a) 右図のような斜め
のひびが生じたが、それ以上の大きな変化はなかった。ま
た、振り角 15 度では、衝突回数 1~3 回目で縦方向ひび割

* 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所
** (独法)港湾空港技術研究所
*** (独法)港湾空港技術研究所
**** 正会員 (独法)港湾空港技術研究所

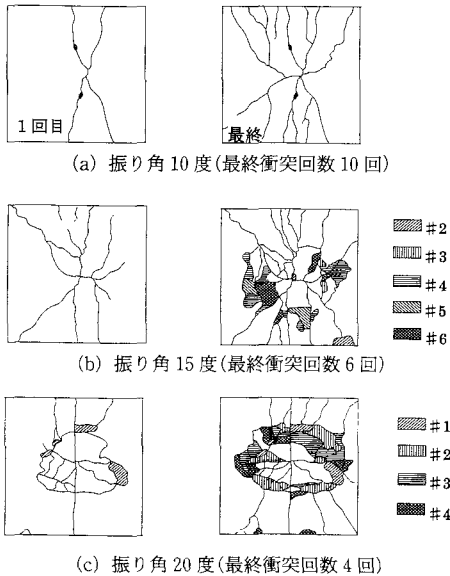


図-3 模型背面のひび割れ図(空中)

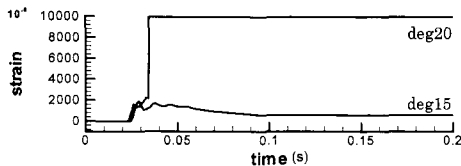


図-4 同位置における衝突時のひずみ時刻歴波形

れが生じ、衝突回数4回目にて裏面に円形状のひび割れが生じた。一方、振り角20・25度では、衝突回数1回目で円形状のひび割れが生じ、衝突回数を増すと、裏面のコンクリートが剥落し埋め込み鉄筋の露出が確認された。また、衝突回数1回目における模型中心部の裏側縦鉄筋ひずみの時刻歴波形(図-4)より、振り角15度では弾塑性変形しているのに対して振り角20度では降伏し、塑性変形をしていることがわかる。

円形状のひび割れは押し抜きせん断破壊によるもの、縦方向のひび割れは曲げによるものと推察され、今回の実験では、振り角15度付近において、押し抜きせん断破壊が生じていると考えられる。

次に、測定した加速度から $F=ma$ を用いて算出した衝突速度と最大衝突荷重の関係を示したものが図-5である。振り角10度では加速度を計測できなかったため、デジタルビデオの映像を解析して衝突速度を算出し、次式の有川ら(2003)の衝突力算定式より衝突荷重を求めた。

$$F_{\max} = 0.25 \left(\frac{2E\sqrt{a}}{3(1-\nu^2)} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{5m}{4} \right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 a は消波ブロック脚部先端の半径/2、 E と ν はコ

ンクリートのヤング率およびポアソン比である。また、 m は衝突体の質量、 v は衝突体の重心位置における衝突速度である。振り角15度、20度の平均最大衝突荷重は約494 kN、539 kNの値を示した。

一方、模型のせん断耐力をコンクリートスラブの静的押し抜きせん断耐力式(土木学会, 1996),

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_b \cdot \beta_r \cdot f_{pc} \cdot u_p d / \gamma_b \dots\dots\dots (2)$$

公称せん断強度: $f_{pc} = 0.6\sqrt{f_k}$

d の寸法効果: $\beta_d > \sqrt[4]{1/d}$ $\beta_d > 1.5$ のとき $\beta_d = 1.5$

p の影響係数: $\beta_p > \sqrt[3]{100p}$ $\beta_p > 1.5$ のとき $\beta_p = 1.5$

u/d の影響係数: $\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$

仮想面の周長: $u_p = u + 2\pi \cdot d/2$

より求めると、耐力 V_{pcd} は約461 kNであった。図-5より算出された耐力は15度を越えた辺りであることがわかる。ここで、実設計では部材係数 γ_b を1.3としているが、本実験では模型本来の耐力を算出するため、 γ_b を1.0とした。また、載荷周長はブロック端面全体の $u = 1.33$ mとしたが、実験の衝突面積は最大で端面の1/2程度であるから、載荷周長は端面の7割程度と推測される。そこで、その値を破線で図に示す。しかし、ひずみやひび割れの結果から $u = 1.33$ mの方が判定基準として適当であると考え $u = 1.33$ mとした。なお、耐力が一見増大しているように見えるこの現象は荷重が動的である影響もあると考えられるが現段階では、明確ではない。図-3から図-5の結果と合わせて考察すると、破壊の判定に押し抜きせん断耐力式を適用できると考えられる。

また、衝突速度が増すにつれて実験値と算定値との差が大きくなっているが、これは、衝突時の破壊によるエネルギーの解放や曲げ破壊、またはせん断破壊に起因する版の剛性の減少によると考えられ、Hertzの弾性衝突理論より導いた有川らの算定式では、塑性変形が生じる条件下では実験値と一致しなかったと推測される。ただし、押し抜きせん断破壊に至るまでを弾性域と見做すことで、衝突力算定式を用いて衝突荷重を算出できると考える。

b) 水中実験

水中における衝突速度を求めるため、消波ブロックにかかる力の釣り合い式は方向および y 方向において、

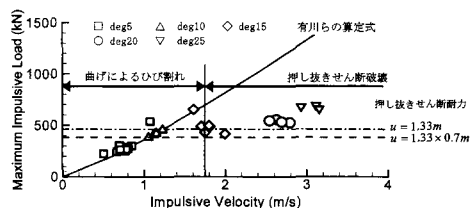


図-5 衝突速度と最大衝突荷重の関係

図-6より式(3)となる。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{\theta}R\sin\theta &= T\cos\theta + B + D\sin\theta - M_0g \\ M\ddot{\theta}R\cos\theta &= -T\sin\theta + D\cos\theta \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここで、 B は浮力で ρgV であり、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 V は球の体積である。 M_0 は消波ブロックの元の質量、 R はつり下げ長さ、 θ は衝突壁との角度、 T は張力、 D は抗力であり $D=0.5C_D A \rho (\dot{\theta}R)^2$ とした。 C_D は抗力係数、 A は投影面積でブロックを同一の質量を持つ三角錐として考えた。また、質量 M は付加質量係数を考慮し、 $C_M M_0$ とした。

以上より、水中の衝突速度を求めるには、 C_D および C_M を定める必要がある。付加質量係数 C_M は、榊山ら(1989)による実験を参照し、代表速度1~2m/sおよび消波ブロック高さ1.93mとして、レイノルズ数が約 10^6 のときの付加質量係数を図より読み取り、 $C_M=1.6$ とした。また、 C_D は榊山らの図より0.8程度であることがわかる。そこで、 C_D 値を動かして式(3)より速度を求め、それをデジタルビデオの映像から解析して求めた結果の平均衝突速度と比較することにより、 $C_D=0.88$ とした。

図-7に質量を

$$m = C_M(M_0 - \rho V) \dots (4)$$

より求め、速度に式(3)から求めた値を式(1)に代入したときの衝突速度と衝突荷重の関係を示した。図中の白抜き点は各角度における荷重であり、一点鎖線は式(2)より求められるせん断耐力である。図より15度付近で押し抜きせん断破壊していると考えられる。

次に、図-8および図-9に水中実験の振り角10度と15度の最終回数における模型背面のひび割れ図を示す。振り角15度では衝突回数10回程度でせん断破壊に至っ

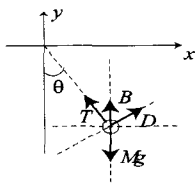


図-6 水中のブロックにおける力の釣り合い

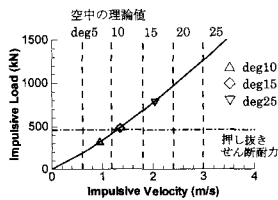


図-7 水中における衝突速度と衝突荷重の関係

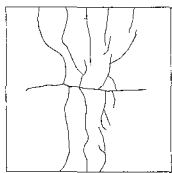


図-8 背面ひび割れ図(振り角10度、水中)

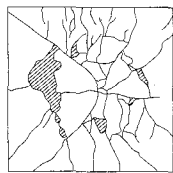


図-9 背面ひび割れ図(振り角15度、水中)

ている。したがって、水中実験の衝突荷重の算定結果と模型の破壊状況から、水中におけるコンクリート版の押し抜きせん断耐力の低下は見られず、水中においても押し抜きせん断耐力式(式(2))ならびに衝突力算定式(式(1))を用いることで、押し抜きせん断破壊の判定を行うことが可能であることがわかった。

3. 想定衝突パターンによる破壊実験

想定される衝突は有川ら(2003)のように3パターンに分け、ここではロッキング衝突および転落衝突について検討を行った。

(1) ロッキング衝突実験

a) 実験方法

5t型消波ブロックを方塊の上に設置し、人工的にロッキング衝突が起きやすい状態とし、波の作用にて衝突させた(図-10)。実験の波浪条件は水深 $h=4.55$ m、周期 $T=6.00$ s、波高 $H=0.850$ mの規則波であり、模型縮尺が1/2.2であるから現地換算すると $h=10.0$ m、 $T=8.90$ s、 $H=1.87$ mとなる。実験ケースは衝突回数が1000回、5000回、10000回、20000回の4ケースで行った。

b) 実験結果

加速度計から得た衝突速度は衝突位置での値であるため、回転支点から衝突位置と重心位置の比 $r=1/\sqrt{6}$ をかけて重心位置の衝突速度とした。図-11にロッキング衝突実験の衝突速度と衝突荷重の関係を示す。ここで、衝突荷重は $F=ma$ から求め、 m は消波ブロックの約半分が水中にあるので、浮力を考慮し質量を3.6tとした。また、算定式の結果も同様の質量を用いた。衝突荷重は押

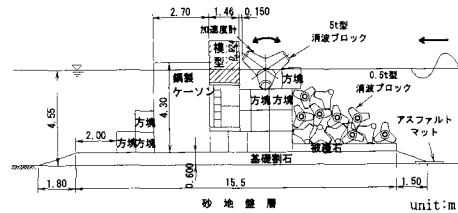


図-10 ロッキング衝突実験断面図

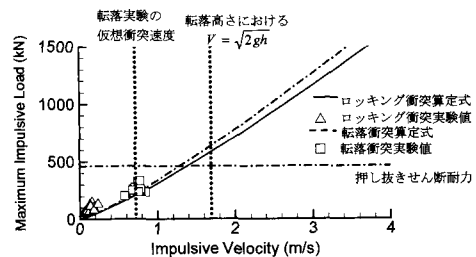


図-11 衝突速度と最大衝突荷重の関係

し抜きせん断耐力の2割程度と小さく、1回の衝突ではせん断破壊に至らないことがわかる。なお、図-11には後述する転落衝突実験の結果を合わせて表記した。

次に、押し抜きせん断疲労耐力 V_{rpd} を式(5)から求め、衝突荷重と比較を行った(図-12)。

$$V_{rpd} = V_{pcd} \left(1 - \frac{V_{pd}}{V_{pcd}} \right) \left(1 - \frac{\log N}{14} \right) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 V_{pcd} は式(2)の押し抜きせん断耐力、 V_{pd} は永久荷重作用時における設計せん断耐力であるが、本研究では考慮しない。

図-12に示す結果より、本実験条件では 10^6 回程度の衝突を繰り返しても、押し抜きせん断破壊が生じる可能性は低いことがわかる。図中の破線はある繰り返し回数で疲労破壊に至るのに必要な衝突速度を示している。これより、重心位置において 10^4 回では 1.05 m/s 、 10^6 回では 0.87 m/s の衝突速度が必要となる。ロッキング衝突の砕波時の仮想衝突速度は衝突位置において波速の0.1倍とし(有川ら、2003)、 10^4 回では波速が 25.7 m/s 、 10^6 回では 21.3 m/s の砕波が必要となり、水深5m程度の本実験では、その状況を作り出すことは困難であり、本実験ではロッキング衝突による押し抜きせん断破壊が生じないことを示唆している。

また、衝突回数20000回後のひび割れ図(図-13(a))を見ても、せん断破壊は起きておらず、垂直のひび割れのみが生じていることがわかる。

c) ロッキング衝突の持続性

衝突回数20000回における模型前面の衝突部は、幅約50cm、高さ約25cm、深さ約2cmの貫入となった(図-13(b))。貫入面積がブロック脚部の衝突面積より広がっ

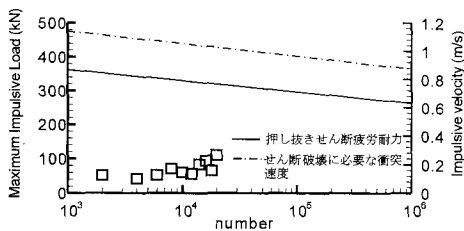


図-12 最大衝突荷重と押し抜きせん断疲労耐力の比較と疲労破壊必要衝突速度

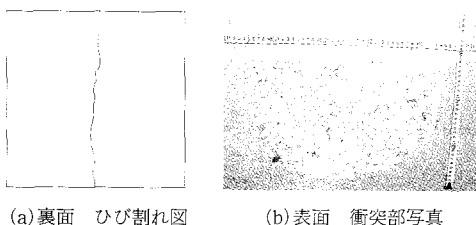


図-13 衝突回数20000回後の破壊状況

ているのは、ブロックが衝突を繰り返す間に少しずつ支点が移動したことによる。

支点部においてはブロック脚部と台座の方塊との摩擦により摩擦し、早いものでは数百回でロッキング衝突が静止した。

本研究において、ロッキング衝突とはケーソンとブロックの20~30cm程度の隙間に対して、支点を持って反復する衝突現象と定義しており、上述のことから何万回もの繰り返し衝突が現地で生じることは考えにくい。

また、支点をもつためには、ブロックに作用する波力はその摩擦力以下でなければならず、実験観察より非砕波の際にはブロックの高さの半分以下の波高となる必要があることがわかった。また、作用する波力は流速に比例していると思われることから、砕波時においても非砕波時の速度を上回ることはないと考えた。そこで、ブロック高さの半分の波高による速度をロッキング限界速度とする。

(2) 転落実験

a) 実験方法

消波ブロックを方塊の上に設置し、転落衝突が生じやすくした断面にて実験を行った(図-14)。消波ブロックは、波の作用によって設置位置から約50度回転し、弧を描きながら転落して模型のほぼ中心に衝突するようにした。消波ブロックの落下高さは0.146mである。波浪条件は $h=4.50 \text{ m}$ 、 $T=6.00 \text{ s}$ 、 $H=2.00 \text{ m}$ の規則波とし、現地換算では、 $h=9.90 \text{ m}$ 、 $T=8.90 \text{ s}$ 、 $H=4.40 \text{ m}$ となる。

転落実験の実験ケースは、疲労した箇所には大きな衝突荷重が作用することも考えられるので、ロッキング衝突で疲労させたコンクリート版(n(衝突回数)版)の4ケースと未使用の模型(n0版)を合わせた全5ケースとした。

b) 実験結果

図-15は転落実験後のひび割れ図である。n0版は衝突回数1回目縦方向のひび割れが生じ、その後、回数を重ねても大きな変化はなかった。ロッキング疲労させたn20000版においても押し抜きせん断破壊は生じず、破壊状況はn0版と比較して大差はなかった。このことから、今回のロッキング衝突回数程度の疲労では模型の強度に大きな影響を与えていないことがわかった。これ

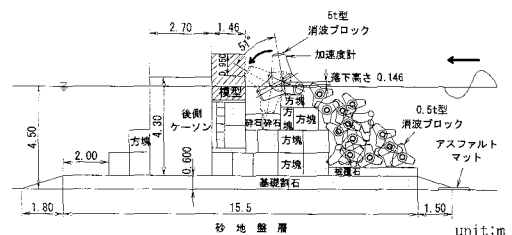


図-14 転落衝突実験断面図

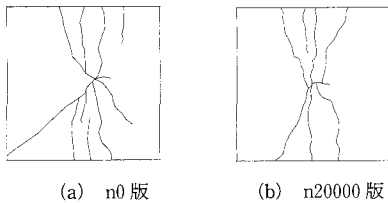


図-15 転落実験後のひび割れ図（衝突回数3回目）

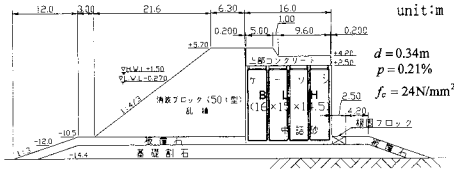


図-16 A港の標準断面図

は、図-12を見ても明らかである。

次に、加速度計から求めた速度を重心位置に換算したものと得られた測定データを消波ブロックの重心位置に換算した衝突速度と $F=ma$ から得られる最大衝突荷重の関係を図-11に示す。実験値と算定式が整合しており、算定式の妥当性がわかる。

有川ら（2003）は、転落衝突の仮想衝突速度を自由落下速度の0.5倍としたが、実験の観測から波による初速を考慮する必要があると考え、波速 $\times 0.1$ + 自由落下速度とした。さらに、重心位置の衝突速度とするため、衝突位置と重心位置の比である r を $1/4$ とした。本実験の波速は $v = \sqrt{g(h+H)}$ より 7.98 m/s 、落下高さ 0.146 m の自由落下速度は 1.69 m/s であり、仮想衝突速度は 0.722 m/s となる。図より仮想衝突速度と実験結果が整合しており、仮想衝突速度から衝突速度を算定できることがわかる。

4. 現地での適用

(1) A港における穴あき被災の可能性

実験結果より、衝突力と耐力の算定から破壊の判定が可能であることがわかったので、実際に穴あき被災の生じたA港にて適用を行った。

図-16はA港の標準断面図であり、前面壁の押し抜きせん断耐力は式(2)より、約 1350 kN となる。一方、被災が生じたと思われる時期に有義波高 3.5 m 、最高波高 $H=8 \text{ m}$ 程度の波が来襲していた。ケーソン前面の水深がH.W.L時で 15.9 m であるから砕波していたと思われる。

各衝突パターンでの衝突速度と衝突荷重は、有川ら（2003）より表-2となる。ただし、ロッキングに関しては3, (1), c)の考察から $H \leq H_{BL}/2$ のときの速度を限界速度とした。消波ブロックの質量は浮力と C_M を考慮

表-2 A港の被災時における衝突速度と衝突荷重

衝突パターン	衝突位置の仮想衝突速度	γ	浮力の考慮	C_M	v m/s	F kN
ロッキング	砕波：波速 $\times 0.1$	$1/\sqrt{6}$	全体	1.6	0.339	428
	(非砕波： $4H/T$ $H \leq H_{BL}/2$)		半分	1.0	0.339	393
転落	波速 $\times 0.1$ + 自由落下速度	$1/4$	全体	1.6	0.883	1350
水平移動	波速 $\times 0.15$	1	全体	1.6	2.30	4250

し、式(4)を用いて m 質量を求め、衝突速度 v は r を用いて重心位置に換算し、衝突荷重は F 式(1)を用いて算出した。また、転落衝突の落下高さは 0.637 m とした。

結果として、水平移動衝突、もしくは重心位置の落下高さが約 0.637 m 以上となる転落衝突により押し抜きせん断破壊が生じる可能性があることがわかる。

(2) 大水深域防波堤におけるロッキング衝突による穴あき被災の可能性

最後にロッキング衝突による破壊の可能性であるが、A港より水深の深い場所では非砕波の波高は大きくなるが、実験よりロッキングが安定して生じる波高は、ブロック高さ H_{BL} の半分程度あることを考えると、 50 t 型消波ブロックでは 2 m 程度と推察される。波高 2 m の場合、表より $0.3 \sim 0.4 \text{ m/s}$ 程度の衝突速度となることから 40 cm の壁厚では破壊に至らないと考えられる。よって、転落や水平移動衝突によりせん断破壊に至っている可能性の方が高いと推察される。しかし、波力を受けたブロックの挙動の詳細を明らかにすることは今後の課題である。

5. まとめ

ケーソン壁のせん断破壊の判定には、有川らの算定式および押し抜きせん断耐力式により評価できる。また、水中および各衝突パターンにおいても条件にあった質量および衝突速度を用いて衝突荷重を算定できることがわかった。ロッキング衝突では、実験結果より大きな衝突荷重をもって何万回も繰り返し衝突をすることは困難であり、破壊に至る可能性は低いと推測される。

参考文献

- 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，海岸工学論文集，第50巻，pp. 716-720.
- 柿山 勉・鹿島達一（1989）：消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果，海岸工学論文集，第36巻，pp. 653-657.
- 高橋重雄・木村克俊・下迫健一郎・鈴木高二朗・五明美智男（1999）：ケーソン式混成堤の主要な被災パターンについて，海岸工学論文集，第46巻，pp. 816-820.
- 独立行政法人港湾空港技術研究所：港湾技研資料，No. 200, 1975.
- 土木学会編（1996）：コンクリート標準示方書 [平成8年制定] 設計編，pp. 65-104.