

# 消波ブロックの繰返し衝突により防波堤 ケーソン壁に生じる局部破壊と防護対策 に関する実験的研究

山口貴之<sup>1</sup>・別府万寿博<sup>2</sup>・大野友則<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 防衛大学校理工学研究科 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 防衛大学校助手 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

<sup>3</sup>正会員 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

ケーソン式消波ブロック被覆堤では、前面に設置された消波ブロックが衝撃的な波力を受けて動揺または移動し、ケーソン壁に繰返し衝突することによって、局部的な損傷や破壊に至ることがある。本研究は、ケーソン式消波ブロック被覆堤の耐衝撃設計の観点から、ケーソン壁の衝撃破壊挙動を把握するために、静的載荷実験および衝突体の繰返し衝突による水平衝撃実験を行い、その破壊状態、衝撃力、衝突速度および載荷面の陥没量について考察を行った。次に、RC板試験体の中央部に剛性の異なるゴム製緩衝材を設置し、その緩衝効果について検討を行ったものである。

**Key Words :** RC caisson breakwater, precast concrete armor unit, local damage, repetitive impact test, rubber pad

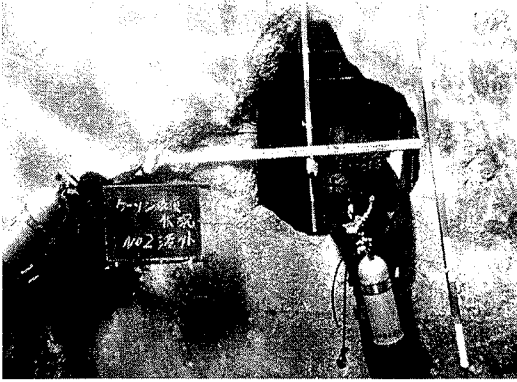
## 1. はじめに

四面を海に囲まれたわが国では、台風による波浪や地震による津波などに起因した自然災害の発生に直面している地域が多い。なかでも、海象条件が厳しい高波浪海域に面した地域には、生活を保全するための防波堤や護岸構造物が建設されている。これまで、港湾や海岸構造物における高マウンドの混成防波堤や急勾配斜面上の鉛直壁に対して、条件によっては衝撃的な力が作用することが知られている。すなわち、海岸付近で海底勾配が急であったり、混成堤のマウンドが高く法面勾配が緩やかな場合に、非常に大きな砕波が発生することがある。これは衝撃砕波と呼ばれており、巻き波砕波の場合に多く見受けられる。この大きな波圧は、砕け始めた波の前面が次第に切り立って水の壁が形成され、勢いを失うことなく鉛直壁あるいは消波ブロックを叩くことによって発生するといわれている<sup>1),2)</sup>。

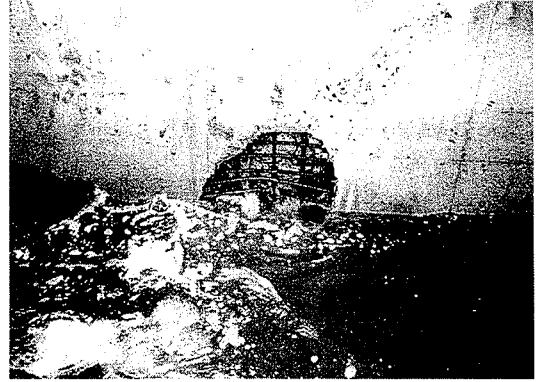
衝撃砕波力は、巨大な水塊が構造物に衝突するこ

とによって発生するので、海岸構造物にとって危険な外力といえる。実際に、衝撃砕波力の大きさは重複波的な波圧や通常の砕波圧に比較して非常に大きく、これによって①防波堤直立部が滑動する、②消波ブロックが沈下および散乱によって崩壊し、防波堤に衝撃砕波力が作用することによって破壊する、③ケーソン壁前面に敷設された消波ブロックがケーソン壁に衝突して壁に穴があく(写真-1参照)、などの被害が生じている<sup>3),4),5)</sup>。①の被害は頻発しており、ケーソン壁が損傷を受ける場合の3倍以上の事例がある。これは、衝撃砕波圧が極めて強大な場合やケーソン本体が比較的軽量である場合に発生する。②の被害は、高マウンド、急勾配斜面など海底勾配の条件に起因する衝撃砕波力が、消波ブロック被覆堤の防波堤端部など消波効果が期待できない位置に作用する場合に生じる。

③の被害は、大重量の消波ブロックを消波工として用いている防波堤の場合で、防波堤前面の消波ブロックが沈下したり散乱している条件のもとで生じ



(a) 局部破壊と中詰め砂の流出



(b) 局部破壊

写真-1 被災事例

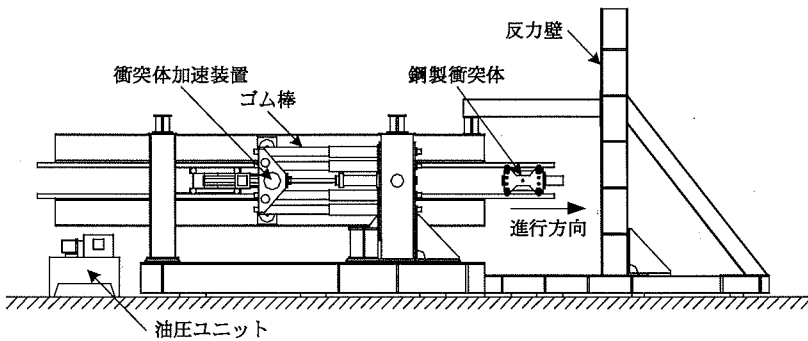


図-1 水平衝撃荷重装置

ているようである。消波ブロックの沈下は、ブロック下部周辺の洗掘が原因と考えられ、その場所はマウンドの法先および下部、ブロック先端などである<sup>6)</sup>。消波ブロックの衝突によるケーソン壁の破壊状況は押し抜きせん断タイプが多く、コンクリートが剥離して鉄筋が露出したり、衝突した消波ブロック脚部と同じ形状の穴があくなどの被害が生じている。この被害原因は現在のところ明らかにされておらず、防護対策に苦慮していることが報告されている<sup>4)</sup>。またこの被害では、穴があかない程度でもケーソン壁のコンクリートが剥落することにより鉄筋が露出するとやがて腐食し、さらにひび割れまたは局部破壊、そして防波堤全体の破壊へ拡大する可能性がある。したがって、効果的な防護対策を講じるには、被災事例に基づいて原因を解明し、従来の設計法を見直すことが重要である。

著者らはこれまでに、波の作用を受けた消波ブロックがケーソン壁に衝突する挙動や衝突力などについて水理模型実験による検討を行った。その結果、波の作用による消波ブロックの衝突挙動やメカニズムについて概ね明らかにすることができた<sup>7)</sup>。本研

究は、消波ブロック被覆堤の耐衝撃設計法の観点から、鉄筋コンクリート製(RC)ケーソン壁に穴があく現象を解明するために、実物を1/6.4縮尺で模擬したRC板試験体に対する水平衝撃実験を行い、破壊の状況、RC板の損傷や破壊におよぼす衝突体の速度や衝突回数の影響などについて検討を行ったものである。さらに、ケーソン壁を防護するためのゴム製緩衝材の緩衝効果についても検討を行っている。

## 2. 実験概要

### (1) 実験装置

本実験で用いた装置は、図-1に示す水平衝撃荷重装置である。本装置は、本体フレーム、ゴム棒、油圧ジャッキ、反力壁および重錘等から構成されている。衝撃力の載荷方法は、衝突体をチャックでつかみ油圧ジャッキで直径100mm、長さ1500mmのゴム棒8本を伸長し、その弾性エネルギーを利用して衝突体を加速させるものであり、重量1.63kNの鋼製衝突体(重錘)を最大約20m/sで衝突させること

表-1 コンクリート配合

粗骨材の 最大寸法 $G_{max}$ (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材比 S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	石粉 C2	減水剤
20	33.3	47.5	160	350	812	895	130	4.8

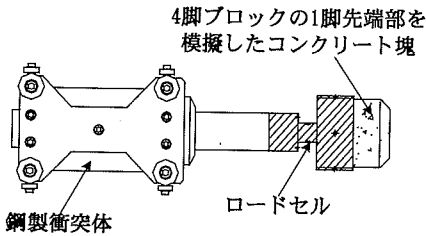


図-2 衝突体の概要

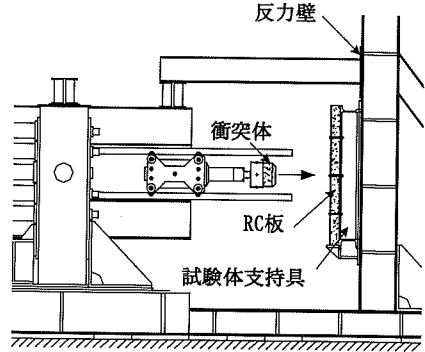


図-3 試験体の設置状況

ができる。衝突体は、4本のガイドレールに沿って走行するので、衝突体を被衝突体の所定の位置に正確に衝突させることができ、ゴムの伸長量を調節することで任意の衝突速度に設定することができる。

本実験で用いた衝突体は、図-2に示すように鋼製衝突体の先端に異形ブロックの1つである4脚形消波ブロック（一般に、テトラポッドという名称で呼ばれているが、以後の文中では便宜上、4脚ブロックと称する。）の1脚先端部を模擬したコンクリート塊（重量；112.8N）を取り付けたものであり、全重量は1.74kNである。通常、4脚ブロックは無筋コンクリート製であり、脚部が折れる破壊、あるいは先端が欠けるといった損傷事例がある。これらの破壊は、衝突条件（衝突体の衝突角度・重量・剛性・形状および衝突速度、被衝突体の剛性や境界条件など）に依存すると考えられるが、これらの要因全てを考慮して破壊現象を再現することは極めて困難である。そこで本研究では、4脚ブロックの1脚先端部がケーソン壁に垂直に衝突するものと想定し、RC板が受ける衝撃力をできるだけ模擬できるように、衝突体を実現現象同様にコンクリート製とした。

図-3に示すように、鋼製の試験体支持具（中詰め砂投入部分の寸法；1000mm×1000mm×150mm）を反力壁にボルトで固定した。次に、RC板試験体を下辺支持具上に縦に設置し、四辺を12個のクランプで固定した。また、実現現象と実験条件を整合させるため、RC板と試験体支持具の間に中詰め砂を投入した。締め固めは、高さ約200mmの分量を投入した後で、突き棒を用いて締め固める作業を繰り返し行い、実際の中詰め材の密度19.6kN/m<sup>3</sup>とほぼ等しい密度

17.3kN/m<sup>3</sup>とした。

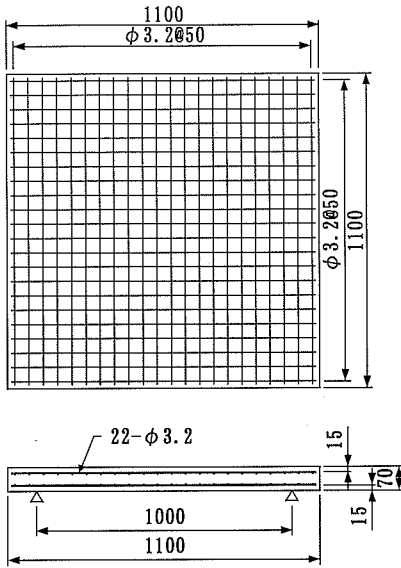
## (2) 試験体等の作製

実際に被災したケーソン式消波ブロック被覆堤のケーソン躯体の壁厚は400~500mm、設置されている4脚ブロックは32~64tf型の範囲であることが報告されている<sup>9),10)</sup>。本研究では、これを参照して壁厚450mmのケーソン版および重量50tf型（実質量46.0t）の4脚ブロックを対象とすることにし、これにレプリカ則を適用して、1/6.4縮尺で模擬したRC板（厚さ70mm、1100mm×1100mmの正方形）を試験体として用いた。

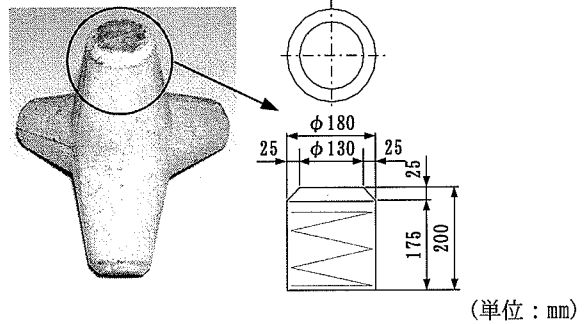
### a) RC板試験体

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>11)</sup>によると、RCケーソン躯体に使用するコンクリート強度は $f_c' \geq 24\text{N/mm}^2$ 以上と示されている。また既往の研究によると、ケーソンに使用されているコンクリートの28日強度は $f_c' = 24\text{N/mm}^2 \sim 37\text{N/mm}^2$ の範囲にあることが報告されている<sup>12)</sup>。また、かぶりコンクリートの厚さは、海水に直接接する部分および海水で洗われる部分などでは70mm以上と定められている<sup>11)</sup>。

以上を参考にして、図-4(a)に示すように実際のケーソン壁を模擬して縮小した寸法1100mm×1100mm×70mmの複鉄筋断面RC板試験体を作製した。本実験で用いたコンクリートの配合を、表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には山砂を、粗骨材には最大粗骨材寸法20mmのものを使用した。試験前に行った静的一軸圧縮試験で得られたコンクリートの圧縮強度は、 $f_c' = 60.5\text{N/mm}^2$ であった。補強鉄筋は、引張側鉄筋は



(a) RC板試験体



(b) 4脚ブロックの1脚先端部を模擬したコンクリート塊

図-4 試験体

表-2 実験パラメータ

実験ケース	中詰め砂		衝突速度 (m/s)								試験体数
	有	無	1.0	2.5	2.7	3.0	4.0	5.5	6.0	7.0	
HP1	○		○								1
r20	○			○							2
r23	○				○						3
r25	○					○					2
r30	○						○				2
r40	○							○			2
r45	○								○		1
r50	○									○	2

が 0.25%となるように  $\phi 3.2\text{mm}$  の普通鉄線 (JIS SWM-B, 引張強さ:  $540 \sim 1130\text{N/mm}^2$ ) を用いて配筋間隔を 50mm とした。また、かぶりコンクリートの厚さは 15mm である。

b) 4脚ブロックの1脚先端部を模擬したコンクリート塊

本実験で用いた衝突体コンクリート部は、図-4(b)に示すように4脚ブロックの1脚先端部を模擬したものである。コンクリート塊の寸法は、直径 180mm, 長さ 200mm の円柱形であり、載荷面側の端部は 25mm の面取りを施した。4脚ブロック模型は、繰り返し衝突実験においてコンクリート塊の損傷・破壊を防止するために普通鉄線 ( $\phi 3.2\text{mm}$ ) をらせん状に埋設して補強を行った。

(3) 実験ケース

表-2に示すように、実験パラメータは、衝突体の衝突速度である。著者らが行った水理模型実験では、4脚ブロックの衝突速度は、 $0.3 \sim 1.3\text{m/s}$  程度であった。本研究では、実際のケーソン壁に生じた局部破壊において、破壊が生じるために必要な衝突速度の推定および衝突速度と繰り返し衝突回数との関係を調べることを目的とすることから、実験における衝突速度は、 $v=1.0 \sim 7.0\text{m/s}$  の8種類とした。水平衝突実験は、それぞれのケースに対して1回から3回 (全試験体数; 15体) 行っている。なお、実際のケーソン躯体内部には中詰め砂が詰まっているので、①RC板の基本的な力学特性、②中詰め砂がRC板の力学特性におよぼす影響、を調べるために中詰め砂を入れた場合と入れない場合について静的実験を各1ケースずつ行った。

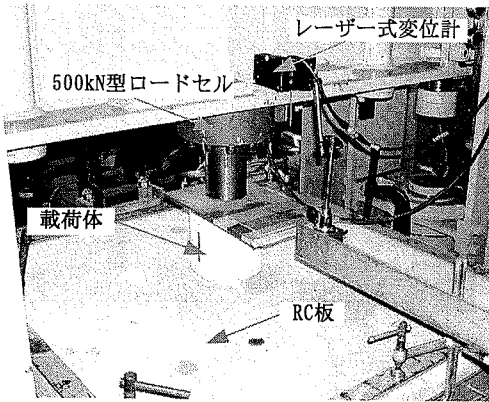


写真-2 静的載荷実験

#### (4) 計測項目

計測項目は、衝突体の衝撃力と衝突速度およびRC板試験体の載荷面の陥没量と板のたわみである。衝撃力の計測は、鋼製衝突体の先端部(図-2)に取り付けた鋼製の円柱起歪部(直径;50mm,長さ;50mm,材質;SS400)にひずみゲージ2枚を貼付し、衝突によって円柱起歪部に生じるひずみ量を2ゲージ法により計測した後衝撃力へ換算した。なお、本ロードセルの校正値は、アムスラー圧縮試験機を用いて検定を行った結果77.1kN/Vであった。また、衝突体の衝突速度は、衝突体の前輪が2組のレーザー光線を横切る時間間隔を計測して速度を検出する光電式速度検出器を用いた。RC板試験体の載荷面の陥没量は、ノギスを用いて円周上等間隔で3点計測し、その平均値とした。載荷面中央部のたわみは、鋼尺とノギスを用いて計測した。また計測データは、サンプリング間隔80 $\mu$ sでデジタルメモリを用いて記録した。なお、計測においては、衝撃波形や応答性を調べる上で不必要とされる高周波成分(便宜上、ノイズと呼んでいる)をシグナルコンディショナーでフィルタリング(ローパスフィルタ)処理を行っており、その値は1kHzである。また、電源ラインに発生するノイズを除去するために、ノイズカットトランス(ELGAR製HIT-1.0R)を使用した。

### 3. 静的載荷実験

水平衝撃実験に先立ち、被衝突体であるRC板試験体の基本的な力学特性を調べるために静的載荷実験を行った。通常、静的載荷実験には、アムスラー試験機が用いられるが、RC板を設置する空間に制

約を受けるため静的アムスラー試験機に代えて、写真-2に示す油圧制御型的高速変形負荷装置を用いた。高速変形負荷装置は、通常、急速載荷を受ける部材の挙動を調べるための装置である。この装置は、載荷速度を0~4m/sの範囲で任意に設定できるので静的載荷も可能であり、本実験における載荷速度は6~18mm/minである。計測項目は、載荷荷重と載荷体の貫入量であり、荷重は500kNロードセルを用いて計測し、貫入量はレーザー式変位計を用いて計測した。なお、実験終了後にRC板中央部のたわみについても計測を行った。

#### (1) 中詰め砂を入れてない場合

##### a) 破壊状況

中詰め砂を入れてない場合の、RC板の表面および裏面の破壊状況を写真-3に示す。RC板の破壊状況は、載荷部中央部において約8~10mmのたわみが生じていた。また載荷表面には短径210~220mm,長径280~300mmの楕円形状の穴があき、さらに裏面には直径約510~530mmの押し抜きによる膨らみが形成されていた。

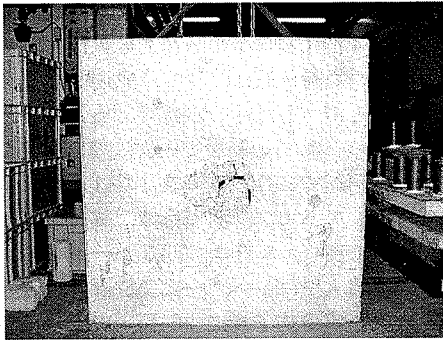
##### b) 荷重~変位関係

図-5は、中詰め砂を入れてない場合の荷重~変位関係である。図から、RC板は47.1kNまでほぼ線形的に荷重が増加している。その後、載荷部に載荷体の貫入が生じて抵抗力が減少するが、引張側鉄筋の効果によって耐力は57.6kNまでだらかに増加した。なお、引張鉄筋側の破断・抜け出しにともなう急激な荷重低下が生じた時点を終局とみなして載荷を終了した。このとき、終局変位量は24.4mmであった。終局に至るまでの荷重~変位関係に基づいて吸収エネルギー量を求めると、1.13kN・mであった。

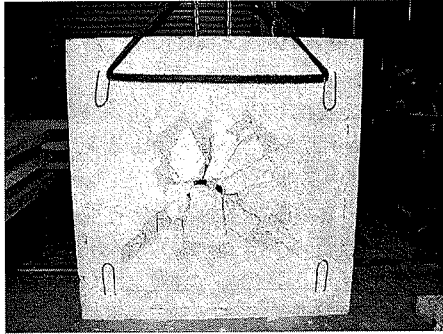
#### (2) 中詰め砂を入れてある場合

##### a) 破壊状況

写真-4に、中詰め砂を入れてある場合の表面および裏面の破壊状況を示す。RC板のたわみ量は、載荷面において約2mmであった。このときの破壊孔の大きさは、載荷体の最大径と同じ180mmであり、裏面には短径360mm,長径430mmの楕円形の膨らみが形成されていた。破壊状況の結果から、中詰め砂を入れてある場合は、載荷面だけが局部的に破壊する押し抜きせん断破壊であることがわかる。すなわち、中詰め砂はRC板全体を支えるように作用し、曲げ変形を抑制する効果が働いていると考えられる。



表面



裏面

写真-3 破壊状況

(中詰め砂を入れてない場合)

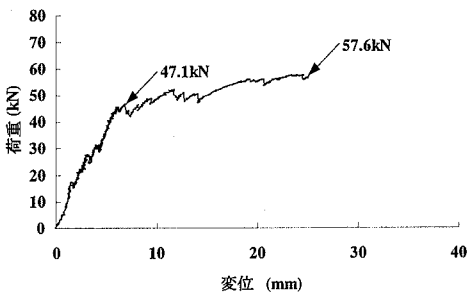
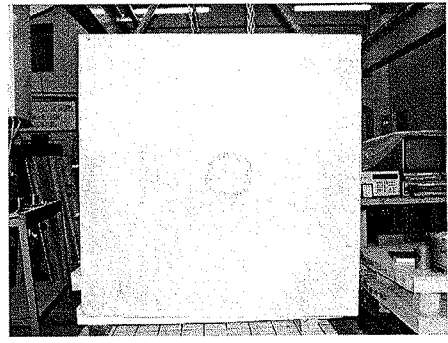
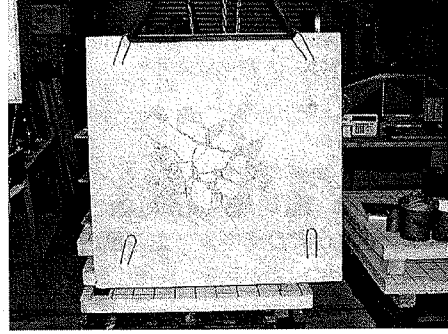


図-5 荷重～変位関係

(中詰め砂を入れてない場合)



表面



裏面

写真-4 破壊状況

(中詰め砂を入れてある場合)

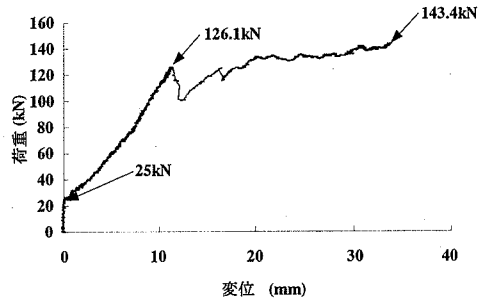


図-6 荷重～変位関係

(中詰め砂を入れてある場合)

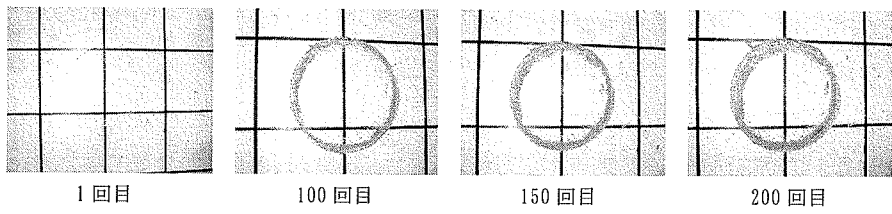
#### b) 荷重～変位関係

図-6 に荷重～変位関係を示す。図から、初期荷重は 25kN まで急激に増加するが、変位の増加はみられない。これは、中詰め砂が大きな支持力を発現し、RC 板の剛性が見かけ上大きくなったためと考えられる。その後は、中詰め砂を入れてない場合と同様に線形に増加し、126.1kN で急激な低下が生じたが、その後は荷重の低下はなく耐力 143.4kN で局部的な押し抜きせん断破壊に至った。ここで、中詰め砂を入れてない場合の耐力と比較すると約 2.5 倍大きいことがわかる。変位量については、終局時点で約 1.4 倍 (34.2mm) 大きくなった。また、

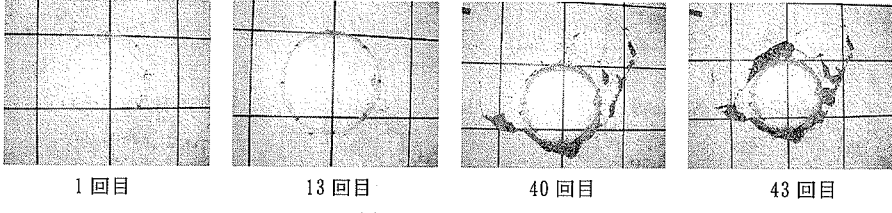
吸収エネルギー量について算出したところ 3.68kN・m であり、中詰め砂を入れてない場合の約 3.3 倍の吸収エネルギー量である。すなわち、砂を詰めることによって、RC 板の支持条件が変化し、耐力・変形性能が見かけ上大きくなったと考えられる。

#### 4. 水平衝撃実験

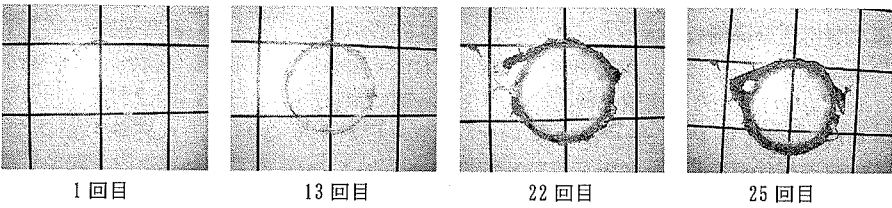
静的荷重実験の結果、中詰め砂の存在によって破壊状況や耐力・変形性能が大きく変化することが



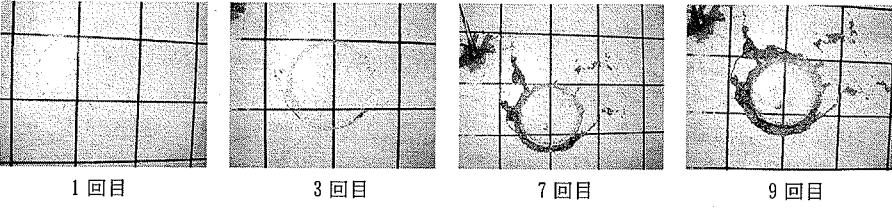
1回目                      100回目                      150回目                      200回目  
(a)  $r20; V=2.27\text{m/s}$



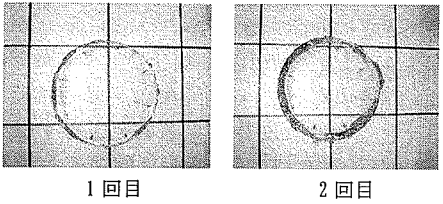
1回目                      13回目                      40回目                      43回目  
(b)  $r23; V=2.73\text{m/s}$



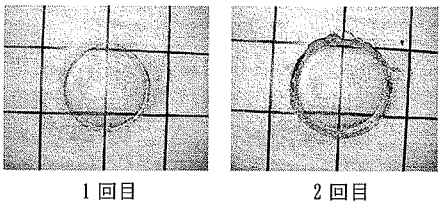
1回目                      13回目                      22回目                      25回目  
(c)  $r25; V=2.94\text{m/s}$



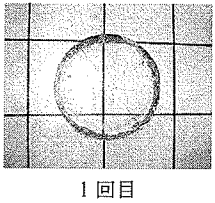
1回目                      3回目                      7回目                      9回目  
(d)  $r30; V=3.82\text{m/s}$



1回目                      2回目  
(e)  $r40; V=5.38\text{m/s}$



1回目                      2回目  
(f)  $r45; V=6.17\text{m/s}$

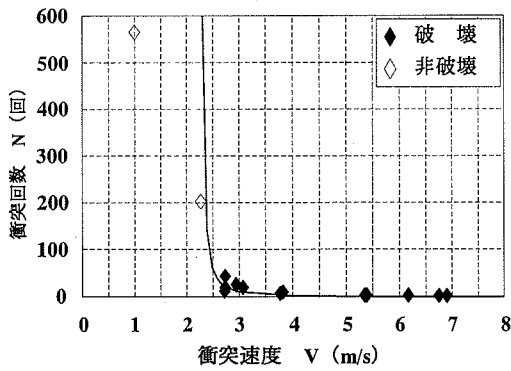


1回目  
(g)  $r50; V=6.75\text{m/s}$

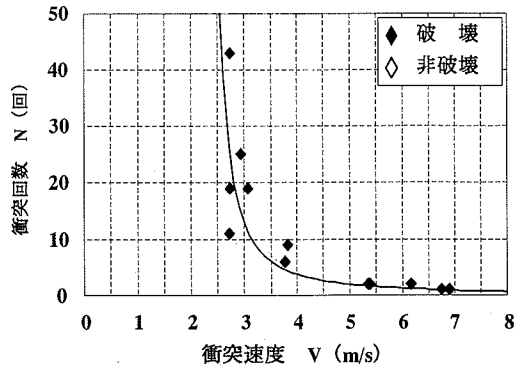
写真-5 水平衝撃実験における破壊進行状況

わかった。そこで、実際に近い中詰め砂がある条件の RC 板に対して、4 脚ブロックを模擬した衝突体を繰り返し衝突させ、RC 板の損傷および破壊におよぼす衝突体の速度、衝突回数について検討した。

(1) 破壊進行状況  
写真-5 に、各実験ケースにおける破壊進行状況を示す。写真-5(a)は衝突速度  $V=2.27\text{m/s}$  のケースで、1~99 回目の衝突までは RC 板の載荷面に衝突



(a) 全ケース



(b) r23~r50

図-7 衝突回数と衝突速度の関係

体先端部による衝突痕だけが生じ、100 回目の衝突で載荷面に微小な円周ひび割れが入った。その後、200 回目まで衝突を繰り返したが、ひび割れと陥没は目立つほど進行しなかったため実験を終了した。

写真-5(b)~(d)に衝突速度  $V=2.73\sim 3.82\text{m/s}$  のケースにおける破壊進行状況を示す。破壊の進行状況は、いずれも 1 回目の衝突で衝突痕が生じる程度である。その後、衝突回数の増加にともない載荷面の一部にひび割れが入り、コンクリートの剥落も生じた。さらに、衝突を繰り返して行くと載荷面が周囲のコンクリート破壊をともないながら押し抜かれた。写真-5(e), (f)に示す衝突速度  $V=5.38\text{m/s}$ ,  $6.17\text{m/s}$  のケースにおいては、2 回の衝突で破壊に至った。写真-5(g)の衝突速度  $V=6.75\text{m/s}$  のケースでは、1 回の衝突で陥没量が  $6\sim 8\text{mm}$  に達し、載荷面全周にひび割れが入り局部破壊に至った。

以上のことから、穴あき現象は、①衝突速度が  $V=2.27\text{m/s}$  では 200 回の衝突に対して載荷面に衝突痕が付く程度、②衝突速度  $V=2.73\sim 3.82\text{m/s}$  では、載荷面周囲のコンクリートの破壊とともに、全体的な曲げ変形を伴うことのない局部的な押し抜きせん断破壊、③衝突速度  $V=5.38\text{m/s}$  以上においては、局部的な貫入による押し抜きせん断破壊、である。また、破壊の状況は、速度が大きくなるにつれて、より局部的になることが確認できた。なお、衝突体の先端に取り付けたコンクリート塊の衝突部は、損傷・破壊あるいは衝突体から外れたり、ずれたりすることはない。

## (2) 衝突回数と衝突速度の関係

図-7 に、衝突速度  $V$  と局部破壊が生じるまでの衝突回数  $N$  の関係を示す。なお、図-7(b)は図-7(a)における衝突回数 1~50 回の範囲を拡大して表示したものである。衝突速度  $V=0.99\text{m/s}$  では 565 回、

衝突速度  $V=2.27\text{m/s}$  では 202 回の衝突でも RC 板には破壊が生じなかった。衝突速度が  $V=2.72\text{m/s}$  より大きくなると、衝突回数に違いはあるが 6~43 回で破壊に至り、 $V=6.75\text{m/s}$  以上では 1 回の衝突で破壊が生じた。すなわち、本実験の条件では、速度  $V=2.5\sim 2.7\text{m/s}$  が局部破壊を引き起こす最小速度と推定される。また、衝突速度  $V=2\sim 4\text{m/s}$  の範囲では衝突速度の増大にしたがって破壊に至る衝突回数が急に低下する、衝突速度  $V=4\sim 7\text{m/s}$  では破壊に至る衝突回数にさほど大きな違いがない、ことがわかった。ただし、本実験で使用した RC 板のコンクリート強度 ( $=60.5\text{N/mm}^2$ ) は、実際の RC ケーソンに用いられるコンクリート強度 ( $=24\sim 37\text{N/mm}^2$ ) より約 2 倍近く大きかった。衝撃による局部的な穴あき現象は、コンクリートのせん断強度あるいは圧縮強度の大きさに依存すると考えられる。したがって、コンクリート強度が小さい場合には本実験で得られた衝突速度より小さい値で破壊に至ると推定できる。図-7 に示した曲線は、破壊を引き起こす最小速度を  $2.27\text{m/s}$ 、また 1 回の衝突で破壊する衝突速度を  $V=6.75\text{m/s}$  として導いた回帰式であり、次式で表される。

$$N=8.2(V-2.27)^{-1.4} \quad (1)$$

ここに、 $N$  は RC 板が局部破壊に至る衝突回数、 $V$  は衝突体の衝突速度である。

## (3) 衝突回数と最大衝撃力および陥没量の関係

図-8 に、衝突速度  $V=2.75\text{m/s}$  における衝撃力の時刻歴波形を示す。図には、1 回目の衝突における衝撃力波形と RC 板の載荷面全周にひび割れが生じた 9 回目の波形を重ねて示している。図から、1 回目の衝撃力波形にはピークが 2 つ出現しているが、



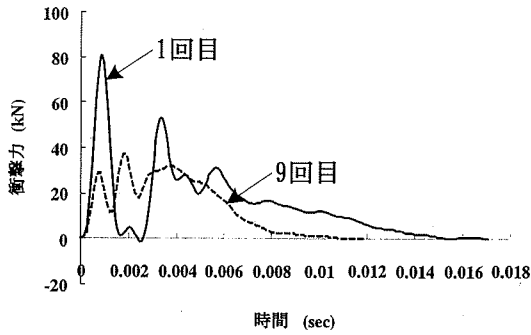
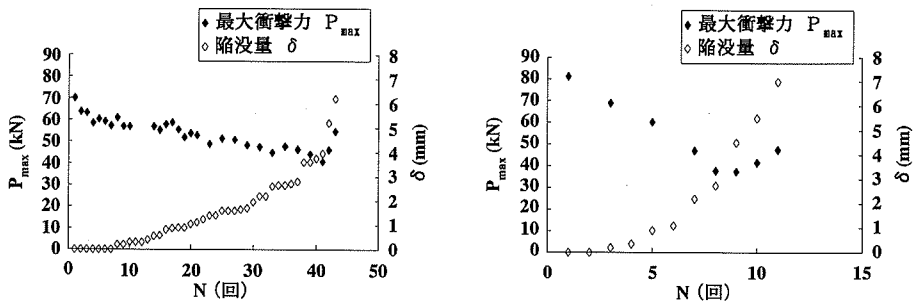


図-8 衝突速度  $V=2.75\text{m/s}$  における衝撃力の時刻歴波形



(a) r23-1 (衝突速度  $V=2.73\text{m/s}$ )

(b) r23-2 (衝突速度  $V=2.75\text{m/s}$ )

図-9 実験ケース r23 の衝突回数と最大衝撃力および陥没量の関係

9 回目の波形には目立ったピークはなく台形状となっている。これは、繰り返し衝突による RC 板内部の損傷や局部破壊と関係していると考えられる。

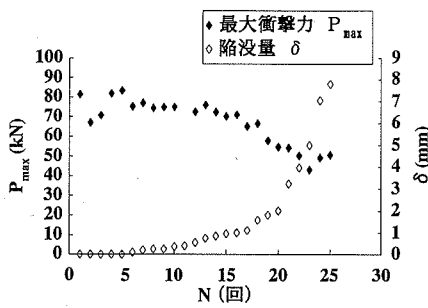
図-9~13 は、衝突回数  $N$  と最大衝撃力  $P_{max}$  および陥没量  $\delta$  の関係を示したものである。図中の◆は最大衝撃力  $P_{max}$  で、◇は陥没量  $\delta$  を示す。図-9(a) に示す実験ケース r23-1 (衝突速度  $V=2.73\text{m/s}$ ) の場合、1 回目の衝突時点での最大衝撃力は  $70.1\text{kN}$  で、破壊直前での最大衝撃力は  $40.7\text{kN}$  である。載荷部の陥没破壊が生じた後もさらに衝突させると、最大衝撃力は 41 回目まで逆に増加する傾向に転じた。これは、載荷面陥没部が押し抜きせん断により完全に破壊した後は、締め固められた砂の支持によって衝撃抵抗力が増加したと考えられる。一方、陥没は 7 回目まではほとんど認められず、8 回目から徐々に陥没量が計測できる程度になった。ところが、この間の最大衝撃力と比較すると、陥没は発生していないにもかかわらず衝撃力が低下している。これは、実際には 1 回の衝突によって、目視では観測できないような微細な損傷（マイクロあるいはナノレベルのクラック）が発生していると考えられ、繰り返し衝撃を受けるコンクリートの疲労破壊に関して詳細に検討を行う必要があると考える。なお、最大衝撃

力が最小値を示す 41 回目における陥没量は約  $4.0\text{mm}$  であり、実験終了時で約  $6.2\text{mm}$  であった。

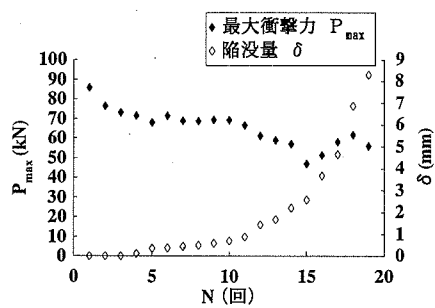
ここで、r23-1 (衝突速度  $2.73\text{m/s}$ ) より衝突速度がやや大きい図-9(b) r23-2 (衝突速度  $2.75\text{m/s}$ ) の第 1 回目の衝突による最大衝撃力をみると  $81.2\text{kN}$  で、r23-1 に比べ 10% 以上も大きいことがわかる。また、破壊に至る衝突回数についても r23-2 では 9 回であり、r23-1 の半分以下である。ちなみに、他の実験ケース (図-10~13) においても、衝突速度が少しでも大きい方が 1 回目の衝突荷重も大きく、また少ない衝突回数で局部破壊している傾向が認められる。すなわち、衝突条件の微小な差異が最大衝撃力や破壊に至るまでの回数に大きく影響していると考えられる。

図-10 は、衝突速度  $V=2.94\text{m/s}$  および  $3.07\text{m/s}$  に対する結果である。図-10(a) から、最大衝撃力は 1 回目 ( $81.5\text{kN}$ ) に比べ 23 回目の衝突 ( $43.2\text{kN}$ ) では、低下率が 47% である。また、図-10(b) の場合は、1 回目の最大衝撃力に対して局部破壊に至った時点 (15 回目) の低下率は 45% である。

図-11 は、衝突速度  $V=3.77\text{m/s}$  および  $3.82\text{m/s}$  に対する結果である。図-11(a) から、最大衝撃力は 1 回目 ( $114.6\text{kN}$ ) に比べ 4 回目の衝突 ( $52.8\text{kN}$ )

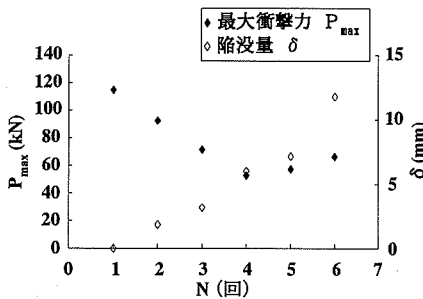


(a) r25-1 (衝突速度  $V=2.94\text{m/s}$ )

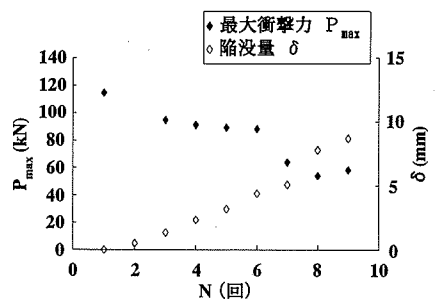


(b) r25-2 (衝突速度  $V=3.07\text{m/s}$ )

図-10 実験ケース r25 の衝突回数と最大衝撃力および陥没量の関係

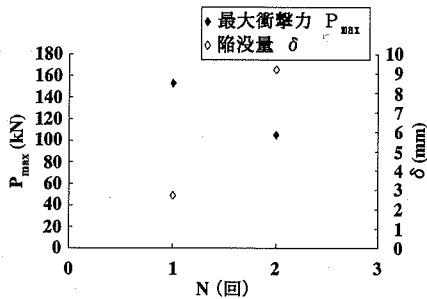


(a) r30-1 (衝突速度  $V=3.77\text{m/s}$ )

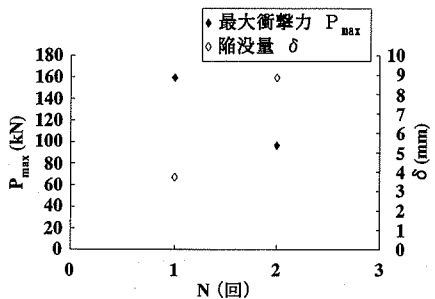


(b) r30-2 (衝突速度  $V=3.82\text{m/s}$ )

図-11 実験ケース r30 の衝突回数と最大衝撃力および陥没量の関係



(a) r40-1 (衝突速度  $V=5.38\text{m/s}$ )



(b) r40-2 (衝突速度  $V=5.35\text{m/s}$ )

図-12 実験ケース r40 の衝突回数と最大衝撃力および陥没量の関係

では、低下率が54%であることがわかる。

図-12は、衝突速度が $V=5.38\text{m/s}$ と $5.35\text{m/s}$ に対する結果である。この場合は、2回目の衝突で破壊に至っており、最大衝撃力の低下率はそれぞれ31.2%、39.4%である。

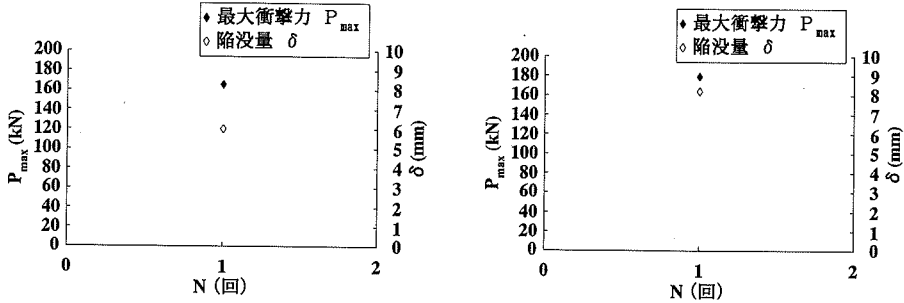
図-13は、衝突速度が $V=6.75\text{m/s}$ および $6.90\text{m/s}$ に対する結果であり、1回の衝突によって局部破壊に至った結果である。図-13(a)は、最大衝撃力165.4kNで陥没量6.0mmに達している。また、図-13(b)は、最大衝撃力が179.1kNで、陥没量が8.2mmであった。

以上のことから、衝突回数 $N$ と最大衝撃力 $P_{max}$ および陥没量 $\delta$ の関係は、衝突速度の相違によらずほぼ

同様の傾向を示すことがわかる。すなわち、最大衝撃力は、衝突が繰り返される毎に徐々に減少する。この値は、載荷位置にせん断破壊面が形成された時点で最小値を示すが、さらに衝突を繰り返すと増加に転じる傾向がある。一方陥没量は、衝突を繰り返す毎にせん断破壊面が徐々に大きくなり、載荷部が完全に押し抜かれた時点から急激に増加する傾向にあることがわかった。

表-3 ゴム製緩衝材と衝突速度

供試体		ゴム製緩衝材の諸元			衝突速度; $V$ (m/s)			試験体数
		硬度 50	硬度 65	硬度 50+鋼板	3.0	4.0	7.0	
①	Hs50	○			○	○	○	3
②	Hs65		○		○	○	○	3
③	Hs50-Fe			○	○	○	○	3



(a) r50-1 (衝突速度  $V=6.75\text{m/s}$ )

(b) r50-2 (衝突速度  $V=6.90\text{m/s}$ )

図-13 実験ケース r50 の衝突回数と最大衝撃力および陥没量の関係

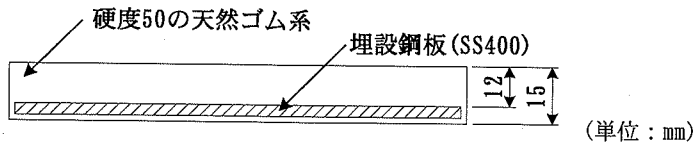


図-14 複合ゴム板の断面

## 5. ゴム製緩衝材の緩衝効果に関する水平衝撃実験

一般に、外的な衝撃力の作用によって構造物に生じる局部破壊の防護方法には、①壁厚や鉄筋量を増やし剛性を高める、②壁前面を鋼板で補強する、③ケーソン壁の前面に緩衝材を設置して弾性機能を高め緩衝防護する、などの方法が有効と考えられる。

本研究で対象としている防波堤ケーソン壁は、①海象・気象条件の影響を強く受けるため耐候性が高い方法が好ましいこと、②本実験の結果、繰り返し衝突を受けるコンクリートの破壊メカニズムについてさらに詳細な検討が必要であること、からケーソン壁を防護する対策法の一つとしてゴム製緩衝材を用いることが考えられる。そこで、この緩衝効果を検討するため、RC板の中央部にゴム製緩衝材を取り付けて繰り返し衝突実験を行った。

### (1) 実験の概要

衝突体の衝突速度は表-3に示すように、3.0m/s、4.0m/s および 7.0m/s の 3種類である。計測項目はこれまでと同様に、衝突体の衝撃力と衝突速度およ

び RC板の載荷面陥没量とたわみである。なお、RC板の載荷面陥没量とたわみの計測は、衝突後にゴム製緩衝材を RC板から取り外して計測を行い、計測終了後には再度元の位置に取り付けて実験を続けた。また、それぞれのケースに対して1回ずつ(試験体数; 9体)実験を行った。

### (2) ゴム製緩衝材の種類

水平衝撃実験において使用したゴム製緩衝材(天然系ゴム)は、500mm×500mm×15mmの正方形板である。また、ゴム製緩衝材の種類は表-3に示すように、硬度50の総ゴム、硬度65の総ゴムおよび硬度50の総ゴム内部に厚さ1.2mmの鋼板(SS400)を埋設した複合ゴム(図-14)の3種類である。以下、それぞれ硬度50、硬度65、複合ゴムと略して記す。なお、供試体番号③の複合ゴムは、埋設鋼板がRC板側となるように設置したものである。

### (3) 実験結果

#### a) 破壊進行状況

写真-6に、衝突速度約  $V=3.0\text{m/s}$  のケースにおける RC板衝突部の破壊進行状況を示す。いずれの

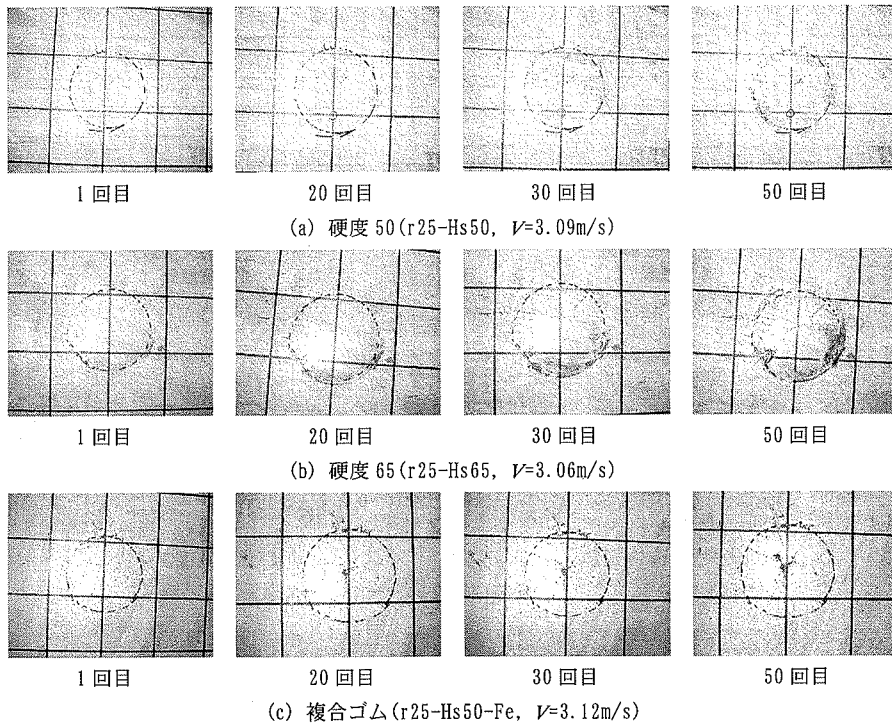


写真-6 実験ケース r25 の破壊進行状況

ケースにおいても、10回目以降の衝突でコンクリート面に微小なひび割れが生じたが、実験終了時の衝突回数50回においても衝突部の陥没は全く生じなかった。すなわち、ゴム製緩衝材は局所的な破壊の抑止に極めて有効であることがわかる。ひび割れは、複合ゴム、硬度65、50の順に多く発生している。

衝突速度  $V=4.0\text{m/s}$  のケースでは硬度50のゴム板を設置した場合は、3回目の衝突で載荷位置中央部に微小ひび割れが発生し、その後ひび割れが徐々に放射状に進行していくことが確認された。また、局所的な陥没は衝突30回目以降にも確認できなかった。硬度65の場合では、3回目の衝突で載荷位置より20~30mm下方にひび割れが入り、最終的にRC板の全体的な曲げ変形が生じていた。この際、中央部でのたわみが8mmとなった時点で載荷を中止した。複合ゴムのケースでは、大きなひび割れが15回目の衝突で生じたが、破壊には至らなかった。すなわち、3つの中では最も柔らかい硬度50の場合は、ゴム表面に作用する局所的な衝撃力がゴムによって効果的に低減、分散されてRC板に伝達されたものと考えられる。一方硬度65は、剛性が比較的大きいため荷重の低減や分散効果が小さく、局所的な陥没は防いでも全体的に大きな変形を生じている。複合ゴムの場合、当初は内部の鋼板により荷重の分散

効果が期待できるが、衝突によって鋼板自体が塑性変形すると衝突近傍部に荷重が伝達される。

写真-7に、衝突速度が約7.0m/sのケースにおける破壊進行状況を示す。写真から、いずれも1回目の衝突でひび割れが発生するが、局所的な押し抜きせん断破壊には至っていない。硬度50のゴム板を用いた場合、5回目の衝突で載荷位置全周にひび割れが入り押し抜きせん断破壊が生じたが、硬度65や複合ゴムの場合は載荷面のコンクリートが剥落する程度の損傷であった。

以上の結果から、衝突速度が3~4m/sの場合はゴムの剛性が小さいほど緩衝効果が大きい、衝突速度が7m/sになると逆にゴムの剛性が大きいほど局部的損傷・破壊に対して効果があると言える。

#### b) 衝突回数と衝突速度の関係

図-15は、衝突速度  $V$  と破壊に至るまでの衝突回数  $N$  の関係を示している。図には参考のため、ゴムなしの場合の結果も示している。この図から、ゴムなしの場合は衝突速度  $V=2.5\sim 3.0\text{m/s}$  に対して11~43回の衝突によってRC板が破壊に至っているが、ゴム製緩衝材を設置した場合は衝突体を50回繰り返し衝突させても破壊していない。衝突速度  $V=3.8\text{m/s}$  の場合、ゴムなしでは衝突回数6~9回で局部破壊に至ったが、硬度50および複合ゴムは30回の衝突においても局部破壊には至らなかった。た

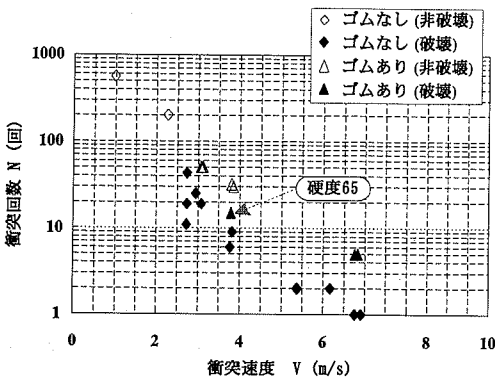
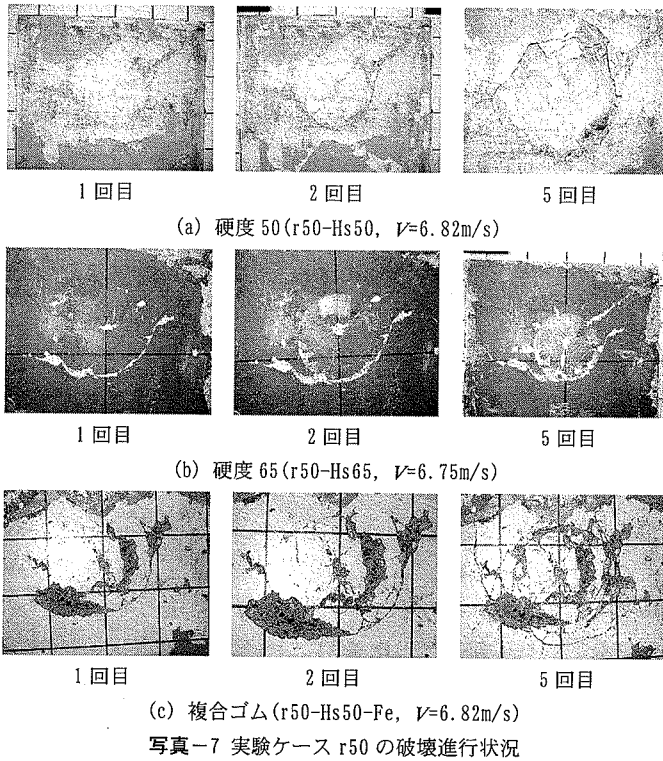


図-15 衝突回数と衝突速度の関係

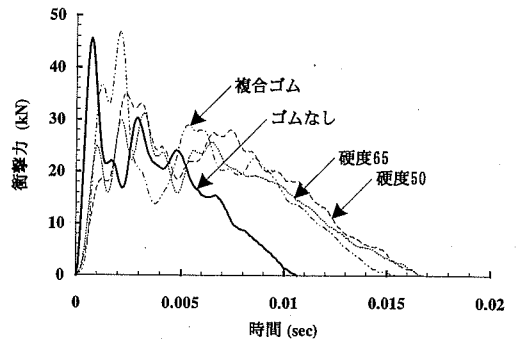


図-16 衝突速度  $V=3.0\text{m/s}$  に対する衝撃力波形

だし、硬度 65 は板中央部において曲げ、たわみが卓越し、15 回目の衝突で局部破壊が生じた。衝突速度  $V=6.75\text{m/s}$  以上の場合、ゴムなしは1回の衝突で局部破壊に至ったが、ゴム製緩衝材を設置することにより、破壊に至ったのは5回目の衝突であった。

c) 衝撃力の時刻歴波形

図-16 に、衝突速度  $V=3.0\text{m/s}$  の実験ケースにおいて、RC 板前面にゴムなし、硬度 50、硬度 65 および複合ゴムを設置した場合の1回目の衝突によって発生した衝撃力の時刻歴波形を重ねて示す。ゴムなしの場合の最大衝撃力は  $46\text{kN}$  であったが、硬度 50

と硬度 65 の最大衝撃力は、いずれも約  $32\text{kN}$  であった。このことから、ゴム製緩衝材は衝突体の衝突によって発生する衝撃力を低減させる効果があるといえる。しかしながら、複合ゴムの最大衝撃力は  $47\text{kN}$  であり、ゴムなしの場合とほぼ同じであった。この理由として、鋼板を埋設したことによってゴム製緩衝材の剛性が大きくなったためと考えられる。また、衝撃力の作用時間は、ゴムなしでは  $10.6\text{ms}$  であったが、硬度 50 と硬度 65 は約  $16.5\text{ms}$ 、複合ゴムは  $15.5\text{ms}$  であった。なお、衝突現象における力積（衝撃力～時間関係で囲まれる面積）は、構造

物の衝撃挙動に大きな影響を与える指標であることがわかっている<sup>13)</sup>、参考のために力積を算出した。ゴムなしでは  $0.176\text{kN}\cdot\text{s}$  で最も小さい値を示したが、硬度 65、複合ゴム、硬度 50 はそれぞれ  $0.258\text{kN}\cdot\text{s}$ 、 $0.264\text{kN}\cdot\text{s}$ 、 $0.286\text{kN}\cdot\text{s}$  の順に大きくなった。

以上より、ゴム製緩衝材は、衝突体の衝突作用時間を長くして発生する衝撃力を小さくする緩衝効果があることがわかる。一方、複合ゴムを設置した場合の衝撃力はゴムなしの場合と変わらないが、衝撃の作用時間はゴムなしの場合より長くなる。

#### d) 最大衝撃力と衝突回数との関係

図-17 は、衝突速度  $V=3.1\text{m/s}$ 、 $3.81\text{m/s}$  および  $6.8\text{m/s}$  における衝突回数  $N$  と最大衝撃力  $P_{\text{max}}$  の関係を示している。

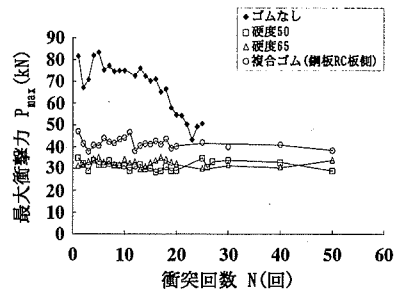
図-17(a)の衝突速度  $V=3.1\text{m/s}$  の場合、ゴムなしの場合の最大衝撃力は、衝突を繰り返す毎に減少し、22 回目の衝突で載荷位置にせん断破壊面が形成されて局部破壊に至っている。これに対して、硬度 50 と硬度 65 の最大衝撃力は、1 回目から実験終了時までほぼ一定値を示し、その大きさは約  $30\text{kN}$  とゴムなしに比べて約  $1/2$  であり、安定した緩衝効果が確認できる。複合ゴムの場合、初期の衝突においてやや大きな衝撃力を示した後、10 回目以降でほぼ一定値 (約  $40\text{kN}$ ) に収束することがわかる。

図-17(b)に示す衝突速度  $V=3.81\text{m/s}$  に対するゴム製緩衝材の最大衝撃力は、緩衝材の種類によらず 1 回目の衝突から実験終了時までほぼ一定で、その値はゴムなしのときの破壊荷重とほぼ等しい。いずれのケースも板の全体変形によるひび割れが発生したが、局部的な損傷は発生せず、 $4\text{m/s}$  程度の衝突速度に対しても緩衝効果が認められる。

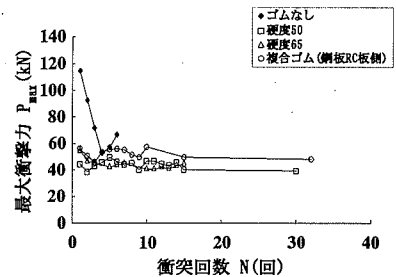
図-17(c)は衝突速度  $V=6.8\text{m/s}$  の場合を示している。硬度 50 のゴム製緩衝材を用いた場合は 1 回目の衝突に対して最大衝撃力は  $69.4\text{kN}$  であった。同じ条件での 2 回目の衝突による荷重は  $90\text{kN}$  と増加した。この理由は明らかでないが、局部破壊が生じたことと何らかの関係があると考えられる。また、硬度 65 および複合ゴムを設置した場合の衝突力の大きさは、繰り返し衝突によらずほぼ一定値を示している。

#### e) たわみ量と衝突回数との関係

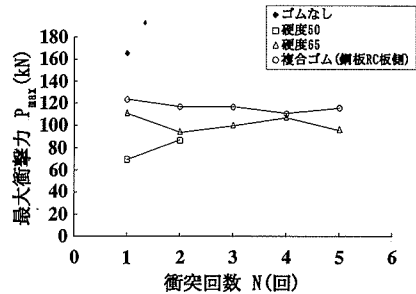
図-18 は、衝突速度が  $V=3.1\text{m/s}$ 、 $3.81\text{m/s}$  および  $6.8\text{m/s}$  の場合における衝突回数  $N$  と RC 板中央部 (衝突位置) におけるたわみ量  $y$  の関係を示している。なお、図中にはゴムなしの場合の陥没量  $\delta$  も示している。



(a)  $r25$  (衝突速度  $V=3.10\text{m/s}$ )



(b)  $r30$  (衝突速度  $V=3.81\text{m/s}$ )

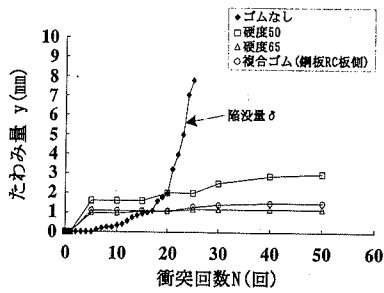


(c)  $r50$  (衝突速度  $V=6.80\text{m/s}$ )

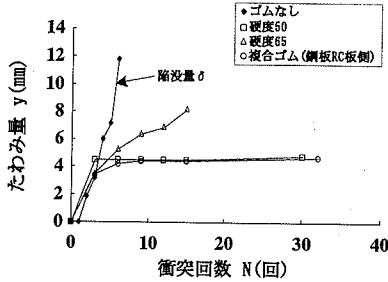
図-17 最大衝撃力と衝突回数との関係

図-18(a)は、衝突速度  $V=3.1\text{m/s}$  の場合を示している。ゴムなしの場合、陥没量は衝突初期から徐々に増加し、破壊とともに急激に増加する。一方、ゴムが設置してある場合はいずれも目視で確認できる陥没は生じなかった。ただし、RC 板の全体変形によるたわみが RC 板中央部に生じていた。その大きさは図に示すように、初期の衝突によって  $1\sim 2\text{mm}$  程度まで増加するが、10 回目以降はほぼ一定値を示す。ちなみに、硬度 50 は 15 回目以降も少しずつたわみ量が増大しているが、これはゴムが衝撃力を分散して伝達することにより生じる板全体のたわみ変形によるものと考えられる。

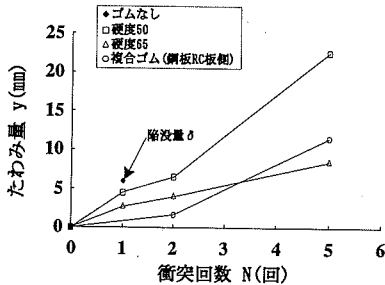
図-18(b)は衝突速度  $V=3.81\text{m/s}$  の場合を示している。図から、硬度 50 と複合ゴムのたわみ量は、3 回目の衝突以降ほぼ一定の  $4\text{mm}$  程度であることがわかる。しかし、硬度 65 は、15 回目の衝突によって



(a) r25 (衝突速度  $V=3.10\text{m/s}$ )



(b) r30 (衝突速度  $V=3.81\text{m/s}$ )



(c) r50 (衝突速度  $V=6.80\text{m/s}$ )

図-18 たわみ量と衝突回数との関係

たわみ量が 8mm に達している。したがって、剛性の高いゴムを用いた場合は荷重を広い範囲に分散できないため、このような局所的なたわみが生じると考えられる。つまり、緩衝材としては適していないと考えられる。

図-18(c)は、衝突速度  $V=6.8\text{m/s}$  の場合を示している。ゴムなしの場合、1回の衝突で陥没量が 6mm である。硬度 50 のゴム板を設置した場合は、2回目の衝突でたわみ量 7.1mm、硬度 65 と複合ゴムは 4回目の衝突でたわみ量が 6mm に達している。したがって、衝突速度が大きくなるとゴム製緩衝材による荷重の低減や分散効果は、さほど期待できなくなると言える。

これまでの考察より、ゴム製緩衝材を用いる場合は、硬度 50 程度の低い剛性のゴムが最も緩衝効果が

大きいと考えられる。また、硬度 65 のように硬いゴムは、荷重の分散効果が小さいため好ましくない。複合ゴムは、この中間と考えられるが、埋設した鋼板厚や埋設位置の影響など、今後検討する必要がある。

## 6. まとめ

本研究は、消波ブロックの繰り返し衝突による防波堤ケーソン壁の穴あき現象を解明するため、ケーソン壁を模擬した RC 板に対する水平衝撃実験を行ったものである。特に、RC 板の破壊状況、衝突速度・衝突回数と局部破壊の関係について調べ、さらにゴム製緩衝材の緩衝効果についても検討を行った。本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 繰返し水平衝撃実験により、消波ブロックの衝突によって生じるケーソン壁の局部破壊を再現できた。その局部破壊は、繰返し衝突によって生じる押し抜きせん断破壊であることがわかった。
- (2) 一定の衝突速度で破壊に至るまでの衝突回数を調べたところ、破壊を引き起す最小速度は 2.5 ~ 2.7m/s であることがわかった。また、衝突回数と衝突速度の関係を定式化した。ただし、本研究で用いた供試体のコンクリート強度が実際の約 2 倍程度大きかったため、実際はこれよりも低い速度で局部破壊が生じると考えられる。
- (3) 実験データの観察により、1回の衝突によって、目視では観測できないような微細な損傷（マイクロあるいはナノレベルのクラック）が発生していると考えられる。また、繰返し衝突時における衝突速度の差異は、衝撃力や破壊に至る衝突回数に大きな影響を与えていると考えられる。
- (4) ゴム製緩衝材を消波ブロック混成堤のケーソン壁前面に設置することで、効果的な荷重低減や荷重分散効果が得られることがわかった。とくに、硬度 50 程度の剛性のゴムが、緩衝性能が高いことがわかった。

なお本実験は、限られた条件のもとで行ったものであり、実現象は極めて複雑なものと思われる。今後、繰返し衝撃を受けるコンクリートの疲労破壊、

コンクリート強度の違いが衝突回数と速度の關係に与える影響、ゴム製緩衝材の厚みや硬さの違いが緩衝効果に与える影響、などについて継続的研究が必要であると考えている。

謝辞：防衛大学校理工学研究科学生 江田智氏には実験を行うにあたりご協力を頂きました。さらに、国土交通省東北地方整備局および独立行政法人港湾空港技術研究所 耐波研究室の關係各位に被災事例などに関する資料を提供していただきました。ここに記して深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 合田良実, 原中祐人：衝撃碎波圧に関する一考察, 港研資料, No. 32, pp. 1-18, 1967.
- 2) 高橋重雄, 谷本勝利, 鈴木諭司：直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察, 港研報告, 第 22 卷, 第 4 号, pp. 3-31, 1983. 12.
- 3) 塩見雅樹, 山本 浩, 津川昭博, 黒沢忠男, 永松宏一：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 卷, pp. 791-795, 1994.
- 4) 高橋重雄, 津田宗男, 下迫健一郎, 横田 弘, 清宮理：防波堤ケーソン壁の破壊と衝撃碎波力について, 海岸工学論文集, 第 45 卷, pp. 751-755, 1998.
- 5) 高橋重雄, 木村克俊, 下迫健一郎, 鈴木高二郎, 五明美智男：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 卷, pp. 816-820, 1999.
- 6) 鈴木高二郎, 高橋重雄：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, 1998.
- 7) 山口貴之, 上野紗代, 林 建二郎, 大野友則：消波ブロック被覆堤におけるブロックの動揺・衝突現象の解明のための水理模型実験, 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 404-412, 2002. 6.
- 8) 坂本達弥, 足立一郎, 吉田秀典：衝撃荷重を受けるコンクリートブロックの破壊に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 1537-1546, 1997. 3.
- 9) 服部千佳志, 柴田鋼三, 大堀晃一：防波堤被災集覧(その 3), 港湾技研資料, No. 485, p. 281, 1984.
- 10) 宮井真一郎, 大平勝司, 塩見雅樹：防波堤被災集覧(その 4), 港湾技研資料, No. 765, p. 179, 1993.
- 11) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 平成 11 年 4 月.
- 12) 長尾 毅：ケーソン式防波堤の終局曲げ安全性照査に関する信頼性設計手法の提案, 土木学会論文集, No. 696/I-58, pp. 173-184, 2002. 1.
- 13) 別府万寿博, 小暮幹太, 酒巻 勝, 大野友則：RC はり部材の衝撃実験における衝撃荷重の計測と波形処理法, No. 724/I-62, pp. 141-156, 2003. 1.

(2003. 4. 14 受付)

## AN EXPERIMENTAL STUDY TO TAKE A PROTECTIVE MEASURE FOR LOCAL DAMAGE IN RC CAISSON BREAKWATER CAUSED BY COLLISION OF A PRECAST CONCRETE ARMOR UNIT

Takayuki YAMAGUCHI, Masuhiro BEPPU and Tomonori OHNO

Of RC caisson breakwaters located in the sea area of severe wave conditions, the local damage with holes has been occasionally caused by the repetitive collision of precast concrete armor units. To take an effective measure of protecting local damage in the RC wall of breakwater, the colliding behaviors should be investigated. Thus the static and horizontal impact tests for RC plates, scaled by 1/6.4 of caisson breakwater, were executed. Based on test results, the damage mechanism was examined by the relation between colliding velocity and number of repetition of impactor. And, it can be found that attaching the rubber pad to impact face is of effective to protect RC plate from local damage.