

### (3) 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の残存押抜きせん断耐荷性能

Residual punching shear capacity of RC slab damaged by repeated impact loads

川端雄一郎\*, 岩波光保\*, 松林卓\*\*

Yuichiro Kawabata, Mitsuyasu Iwanami, Taku Matsubayashi

\*博士(工学), (独) 港湾空港技術研究所, 構造研究チーム (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

\*\*前田建設工業(株), テクノロジーセンター (〒160-0004 東京都千代田区富士見 2-10-26)

キーワード: 繰返し衝撃, 押抜きせん断破壊, 残存耐力

(repeated impact loads, punching shear failure, residual capacity)

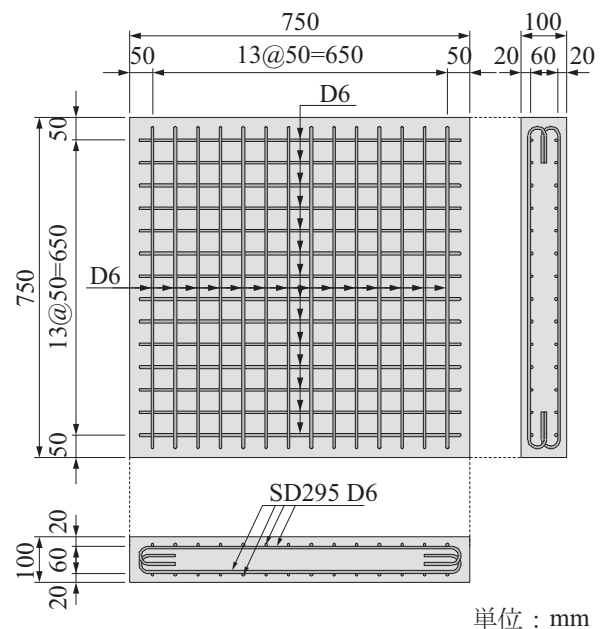
#### 1. はじめに

港湾構造物では, 設計では想定されていない波力や, 消波ブロック, 船舶, 漂流物の衝突のような衝撃力が作用する場合があります, これらによって損傷に至る事例がある<sup>1)</sup>. このうち, 消波ブロック被覆堤では, 消波ブロックがケーソン前壁に繰返し衝突し, 穴あきに至る局部破壊が発生する場合があります. ケーソン壁の穴あき損傷は中詰材の流出を招き, ケーソン本体の重量を減少させるため, 滑動に対する安定性も低下し, 防波堤の機能低下に至るケースもある.

港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>2)</sup>によると, 現行設計ではケーソン前壁の局部破壊については考慮されておらず, 耐衝撃設計の確立が必要不可欠となっている. 一方, 衝撃力を受けるコンクリート部材の挙動については多くの研究成果がある<sup>3)</sup>. しかし, その多くは落石の衝突力や爆発力などの単発的な衝撃力を対象としており, 港湾構造物で見られるような繰返し作用する衝撃力を対象としたものは少ない<sup>4)</sup>.

筆者らは, 既往の研究の中で, 基本的な部材である鉄筋コンクリートはりや二辺支持された鉄筋コンクリート版について, 重錘落下による繰返し衝撃載荷実験を実施し, その破壊挙動を把握するとともに, 主に変位応答や荷重応答を算出する手法について検討を行ってきた<sup>5), 6), 7), 8)</sup>. しかし, ケーソン前壁が押抜きせん断破壊のような破壊形態を呈することを考えると, 曲げ耐荷性能だけでなく押抜きせん断耐荷性能を評価することが必要である.

本論は, 繰返し衝撃荷重を受けた鉄筋コンクリート版(RC 版)の残存押抜きせん断耐荷性能を評価することを目的とし, 繰返し衝撃荷重を作用させた鉄筋コンクリート版の静的載荷試験を行った. また, 短繊維混入による耐衝撃性向上効果についても検討を行った.



単位: mm

図-1 試験体の形状および配筋

#### 2. 実験概要

##### 2.1 試験体および実験ケース

試験体の形状および配筋を図-1 に示す. 試験体寸法は, 750mm×750mm×100mm であり, 支間長 600mm で四辺支持した. 試験体数は全 21 体である. 表-1 に実験ケースを示す. 載荷方法は静的載荷, 衝撃荷重を 1 回作用させた後の静的載荷および繰返し衝撃荷重を作用させた後の静的載荷の 3 種類とした.

表-2 に使用材料の物性値を示す. 使用したコンクリートは普通コンクリートが 1 種類 (No.1~No.18), PVA 短繊維補強コンクリートが 1 種類 (体積混入率 外割

表-1 実験ケース

試験体	荷重方法	重錘質量 (kg)	衝突速度 (m/s)	衝突エネルギー (J)	衝突回数 (回)
1	静的荷重	-	-	-	-
2	単一衝撃 荷重後に 静的荷重	400	2.0	800	1
3			2.5	1250	
4			3.0	1800	
5	繰返し衝撃 荷重後に 静的荷重	400	1.5	450	100
6					300
7					140
8					203
9			1.7	578	270
10					12
11			1.8	648	29
12					40
13					60
14					244
15			1.9	722	14
16					19
17			2.0	800	4
18			200	2.69	724
19	静的荷重	-	-	-	-
20	繰返し衝撃 荷重後に 静的荷重	400	2.0	800	34
21					38

表-2 使用材料の物理的性質

試験体	コンクリート		鉄筋
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )
No.1~No.18	46.1	31.3	366
No.19~No.21	33.6	28.8	359

1.0% (No.19, 20, 21) の2種類とした。

## 2.2 試験装置

衝撃荷重試験に用いた試験装置の原理は、重錘を所定の高さまでチェーンブロックで引き上げ、ロープを用いてフックを解除することにより重錘を自由落下させるものである。実験で用いた重錘の質量は400kgを基本とし、1ケースのみ200kgとした。重錘による衝撃荷重は、直径50mmの荷重板（厚さ30mm）を介して試験体上面中央部に作用させた。これは、試験体の支間内に押抜きせん断破壊面が形成されるよう考慮したものである。また、荷重板と試験体の間には、衝撃荷重が荷重面に一様に作用するように、硬度65度のゴムシート（寸法150mm×150mm×10mm）を1枚敷いた。試験体は、浮き上がりや設置位置のずれを防止するため、寸法150mm

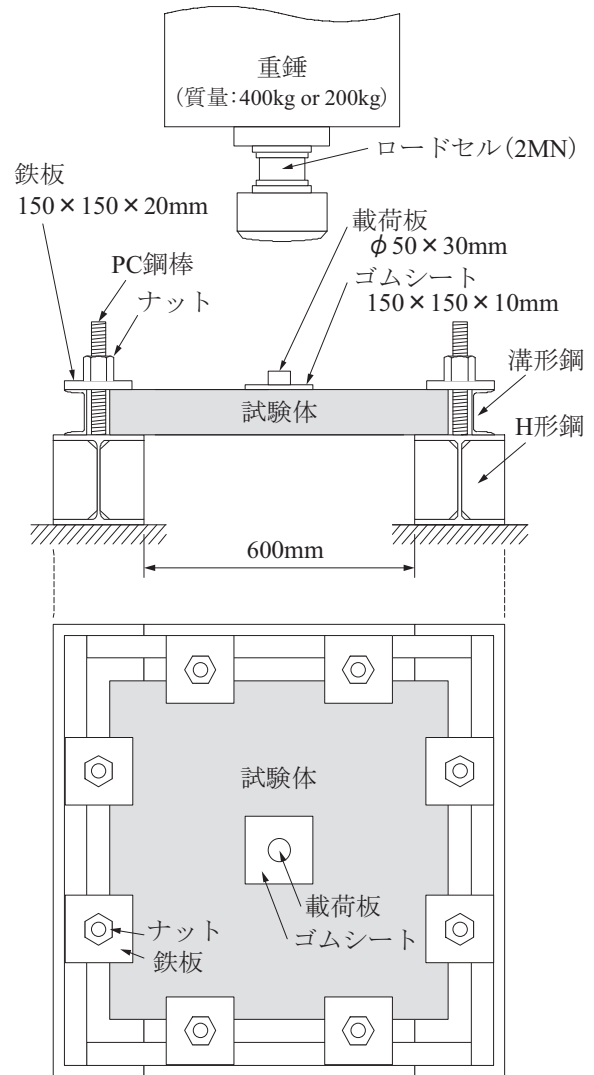


図-2 試験体設置部の詳細

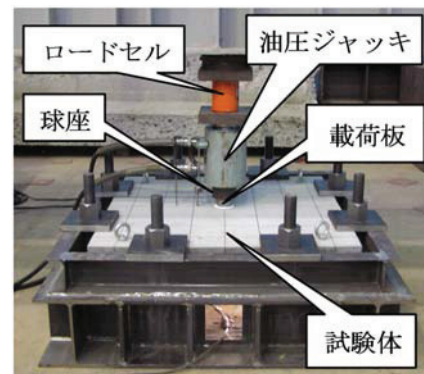


写真-1 静的荷重試験状況

×150mm×20mmの鉄板を試験体上面に8箇所設置し、ナットで締め付けた。本実験に使用した試験体設置部の詳細を図-2に示す。静的荷重については、試験体の支持条件および使用する荷重板は衝撃荷重と同じとし、ゴムシートは用いずに荷重板をRC版上面に設置して静的に荷重を作用させた。なお、荷重板は、試験体へ一様に荷重が作用するように、石膏を介して試験体に設置した。写真-1に静的荷重試験の状況を示す。

### 2.3 計測方法

衝撃载荷時の計測項目は、重錘部に作用する反力（以下、重錘反力と呼ぶ）および衝突点直下における試験体下面の鉛直変位（以下、衝突点変位と呼ぶ）とした。重錘反力の計測には重錘部に組み込まれた容量 2MN のひずみゲージ式ロードセルを使用し、衝突点変位の計測には非接触型レーザ変位計（最大計測レンジ 750mm、サンプリング周期 20~1000 $\mu$ s）を使用した。計測機器には、A/D 変換器を内蔵したデジタル動ひずみ計を使用し、専用ソフトを用いて計測・記録用パソコンでデータ収録した。計測間隔は 50 $\mu$ s とし、計測データのフィルタ処理は施さなかった。また、衝撃载荷の終了後、静的载荷を行う前に RC 版に発生したひび割れ状況を観察し、スケッチした。

静的载荷時の計測項目は、荷重および载荷点直下における試験体下面の鉛直変位（以下、载荷点変位と呼ぶ）とした。荷重の計測には容量 300kN のひずみゲージ式ロードセルを使用し、载荷点変位の計測には容量 25mm の変位計を使用した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 衝撃荷重を受けた RC 版の残存押抜きせん断耐荷性能

#### (1) 単一衝撃载荷による破壊状況および残存耐力

単一衝撃载荷を行った試験体 (No.2, 3, 4) の衝撃载荷後における衝突面の破壊状況を写真-2 に、試験体下面のひび割れ発生状況を図-3 に示す。衝突速度  $V=2.0\text{m/s}$  の場合、衝突点における試験体表面のひび割れは認められず、試験体下面には衝突点を中心とする放射状のひび割れが確認された。 $V=2.5\text{m/s}$  の場合は、衝突点に载荷板とほぼ同じ大きさの円形状のひび割れが発生し、 $V=2.0\text{m/s}$  の場合と比べて試験体下面のひび割れ本数も多かったが、押抜きせん断破壊面の形成は確認されなかった。 $V=3.0\text{m/s}$  の場合には、衝突点の陥没が顕著となり、試験体下面に明確な押抜きせん断破壊面が確認された。図-4 に衝突点変位の時刻歴応答を示す。载荷速度の増加に伴い残留変位が大きくなり、特に  $V=3.0\text{m/s}$  における残留変位が急激に大きくなっている。これは試験体下面のひび割れ発生状況と対応していることが分かる。

衝撃荷重により損傷を与えた試験体に対して静的载荷試験を行い、残存耐力を求めた。図-5 に静的载荷試験における荷重-変位関係を示す。無損傷の No.1 では、最大荷重 148.9kN にて押抜きせん断破壊面の形成によって荷重が急激に低下し、その後は荷重 40kN 程度で一定となった。 $V=2.0\text{m/s}$  (No.2) および  $2.5\text{m/s}$  (No.3) では、最大荷重はそれぞれ 137.1kN, 114.1kN となり、無損傷の試験体よりも小さくなった。一方、 $V=3.0\text{m/s}$  (No.4) では、約 40kN まで増加した後に頭打ちとなった。

図-6 に衝突速度と残留耐力比の関係を示す。なお、

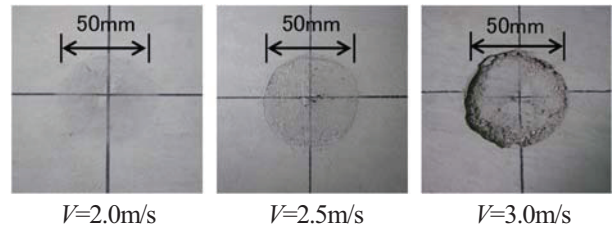


写真-2 衝突部の破壊状況

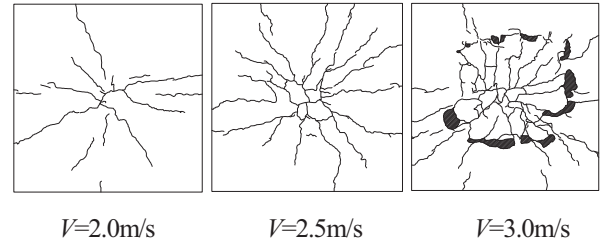


図-3 試験体下面の破壊状況（単一衝撃）

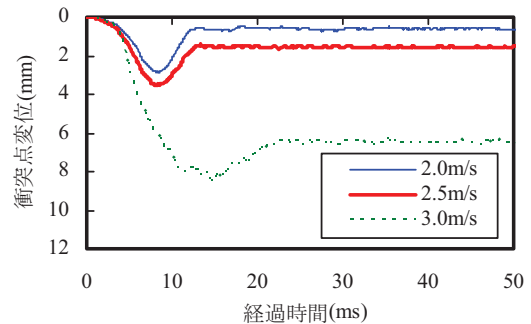


図-4 衝突点変位の時刻歴応答

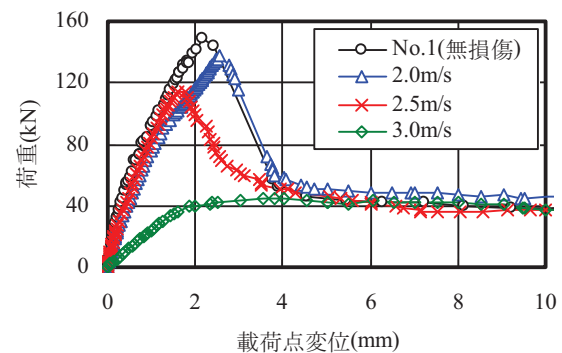


図-5 荷重-载荷点変位関係（静的载荷）

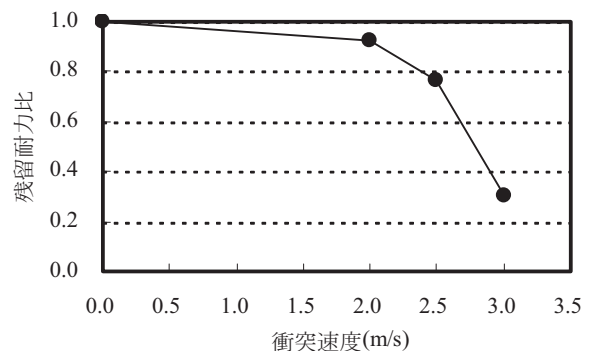


図-6 衝突速度と残留耐力比の関係

残留耐力比とは、各試験体の最大荷重を無損傷の試験体の最大荷重で除した値である。図-3 にて明確な押抜きせん断破壊面が認められなかった  $V=2.0\text{m/s}$  (No.2) および  $2.5\text{m/s}$  (No.3) では、残留耐力比が約 0.8 以上となっており、 $V=3.0\text{m/s}$  (No.4) のような押抜きせん断破壊面の形成後には急激に残留耐力が低下した。

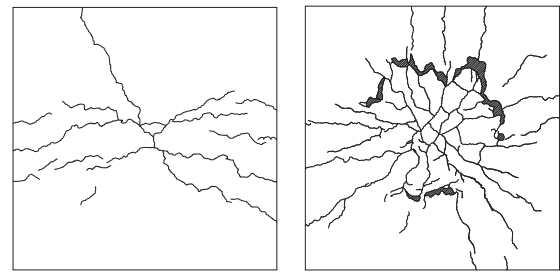
## (2) 繰返し衝撃载荷による破壊状況および残存耐力

図-7 に繰返し衝撃载荷試験を行った試験体のうち代表的なものの試験体下面のひび割れ発生状況を示す。また、図-8 に衝突回数と残留変位の関係を示す。No.6 ( $V=1.5\text{m/s}$ , 300 回) では、衝撃载荷試験終了後においても明確な押抜きせん断破壊面は形成されず、最終的な残留変位も 0.1mm 程度であった。No.8 ( $V=1.7\text{m/s}$ , 203 回) では、残留変位が衝突回数約 100 回から徐々に大きくなった。その後、衝突回数約 200 回で残留変位が約 1.0mm となり、それ以上の衝突回数では残留変位が急激に大きくなった。No.16, No.17 も同様に残留変位 1.0mm 程度となる衝突回数をしきい値として、それ以上では急激に残留変位が大きくなった。今回の実験の範囲では、残留変位が 1.0mm 程度で試験体下面に明確な押抜きせん断破壊面が形成されたことが分かる。

図-9 に繰返し衝撃载荷後の残留変位と残留耐力比の関係を示す。残留変位が 3.5mm 程度までは残留変位と残留耐力比には負の相関が認められ、それ以上の残留変位では残留耐力比がほぼ一定値に収束した。ここで、明確な押抜きせん断破壊面が形成される残留変位が約 1.0mm の時点では残留耐力比は 0.8 程度を示していることが分かる。残留変位が 1.0mm 以上となると押抜きせん断破壊面の形成が急激に進行するため、残留耐力比が 0.8 程度を下回ると急激に押抜きせん断耐荷性能が低下すると言い換えることができる。

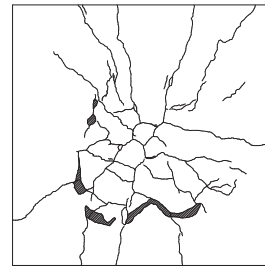
図-10 に衝突回数と残留耐力比の関係を示す。残留変位と同様に、残留耐力比 0.8 程度となる衝突回数をしきい値として、それ以上では急激に耐荷力が低下することが分かる。また、衝突速度  $1.70\text{m/s}$  では残留耐力比 0.8 となるために衝突回数 150 回程度必要であるのに対して、衝突速度  $1.90\text{m/s}$  では 15 回程度で残留耐力比が 0.8 以下となっている。衝突速度  $1.80\text{m/s}$  程度をしきい値として、残留耐力比が急激に低下するまでの衝突回数が大きく変化していることがわかる。

また、No.18 ( $M=200\text{kg}$ ,  $V=2.69\text{m/s}$ ) に着目すると、衝突エネルギーが同じである No.16 ( $M=400\text{kg}$ ,  $V=1.9\text{m/s}$ ) の場合と概ね同等な衝突回数で押抜きせん断破壊が生じ、残留耐力比が急激に低下した。よって、重錘質量が異なっても衝突エネルギーが一定であれば、押抜きせん断破壊面が明確に形成されるまでの衝突回数は概ね同等と考えられる。



No.6 ( $V=1.5\text{m/s}$  300 回)

No.8 ( $V=1.7\text{m/s}$  203 回)



No.16 ( $V=1.9\text{m/s}$  19 回)

No.17 ( $V=2.0\text{m/s}$  4 回)

図-7 試験体下面のひび割れ発生状況 (繰返し衝撃)

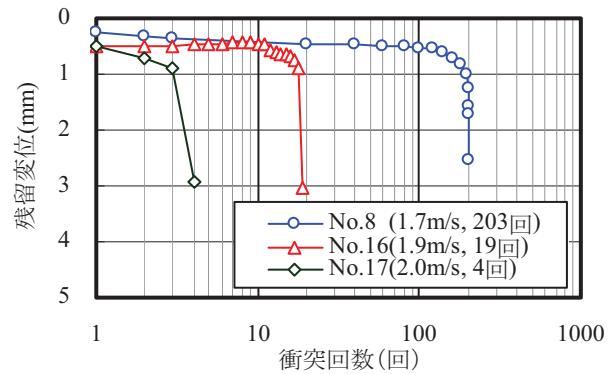


図-8 衝突回数と残留変位の関係

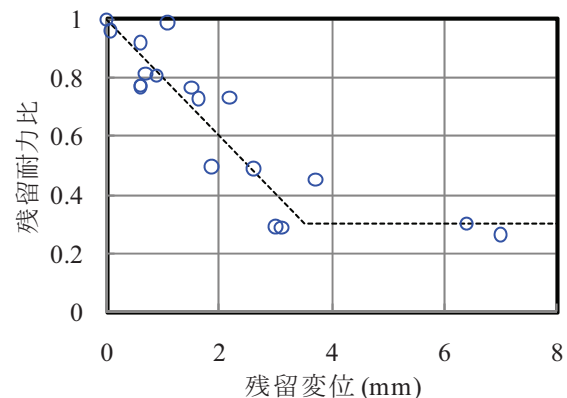


図-9 残留変位と残留耐力比の関係

## 3.2 繰返し衝撃を受ける RC 版の残存押抜きせん断耐荷性能に関する考察

ケーソン前壁に押抜きせん断破壊面が形成されると、隔室内の中詰砂が流出することによりケーソン本体の重量を減少させるため、滑動に対する安定性も低下し、防

波堤の機能低下に至る。よって、ケーソン前壁の局部破壊に対しては、中詰砂が流出しない程度の押抜きせん断破壊面の開口幅もしくはそれに対応した部材の変位を限界値とすることが理想と考えられる。しかしながら、計算によるひび割れ幅や変位の算出は容易ではない。ここで、最大荷重後においても押抜きせん断破壊面が明確に形成されなければ中詰砂の流出は抑制できると思われる。そこで本研究では押抜きせん断破壊面が明確に形成されていない残留耐力比 0.8 を限界値に設定し、外力作用である衝撃エネルギーを設定することで、残留耐力比 0.8 を担保するための限界衝突回数を定めることができると考えた。

図-9 にプロットした各点のうち、押抜きせん断破壊面が明確に形成されていない点として、残留耐力比が 0.7 以上の点を図-11 に示す。また、それぞれの衝突速度について、縦軸の切片を 1.0 (衝突回数 0 回の時の残留耐力比が 1.0) とした場合の近似直線をあわせて示している。これは、押抜きせん断破壊面が明確に形成されるまでは残留耐力比と衝突回数に間に線形関係が成り立つと仮定したものである。ここで、残留耐力比の限界値を仮に 0.8 に設定すると、これに至るまでの衝突回数、すなわち限界衝突回数がそれぞれの近似直線より求まる。

一方、実験の結果、衝突エネルギーを一定とした場合、押抜きせん断破壊面が明確に形成されるまでの繰返し衝突回数は概ね同等であったことから、RC 版の限界衝突回数の評価に衝突エネルギーとコンクリートの破壊エネルギーを用いることができると考えた。具体的には衝突エネルギーが、押抜きせん断破壊による押抜きせん断破壊面が開くための破壊エネルギーに変換されると考え、破壊エネルギーに対する衝突エネルギーの比 (エネルギー比) を用いることとした。

ここで、破壊エネルギー  $G_F$  は、図-12 に示すように載荷面から 45° の破壊面を仮定し、コンクリート上面から 2 方向の平均の有効高さ  $d$  の範囲におけるコーン破壊面の面積を算出し、式(1)の土木学会コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に示された単位面積あたりのコンクリートの破壊エネルギーを乗じることにより求めた。

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f'_{ck}{}^{1/3} \quad (\text{N/m}) \quad (1)$$

ここに、 $d_{\max}$  : 粗骨材の最大寸法 (mm)  
 $f'_{ck}$  : 圧縮強度の特性値 (N/mm<sup>2</sup>)

図-13 にエネルギー比と限界衝突回数の関係を示す。エネルギー比と限界衝突回数には高い相関が認められる。ここで、エネルギー比は 100~200 程度となっている。これは、ゴムシートや試験治具等によるエネルギー吸収のほか、鉄筋によるダウエル抵抗やひび割れ面によるせん断伝達等が考えられる。本研究では同一寸法・配筋の試験体による結果であるため、鉄筋比の影響や部材寸法の影響については今後の検討課題としたい。

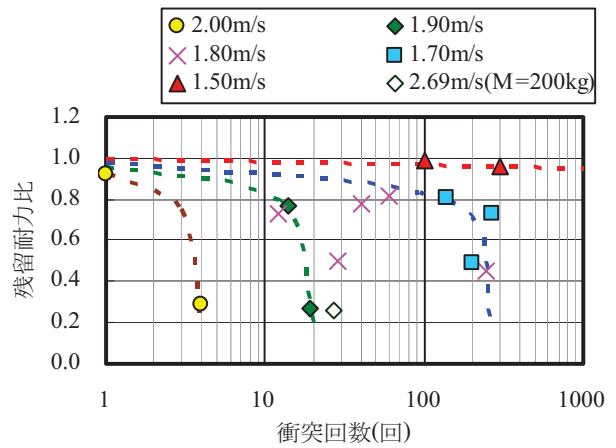


図-10 衝突回数と残留耐力比の関係

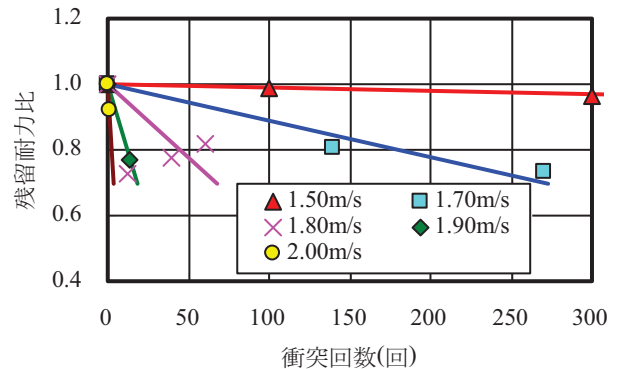


図-11 衝突回数と残留耐力比の関係 (残留耐力比 0.7 以上)

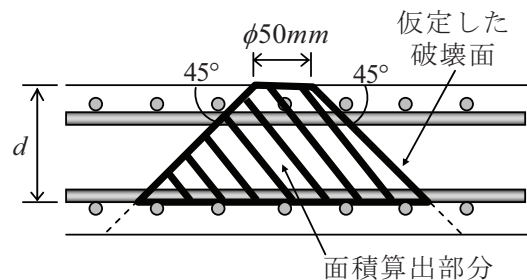


図-12 仮定した押抜きせん断破壊面

### 3.3 PVA 短繊維補強コンクリートの耐衝撃性向上効果

短繊維補強コンクリートは引張強度やせん断強度、耐衝撃性の向上に効果的であることが知られている。本研究では、繰返し衝撃荷重に対する PVA 短繊維補強コンクリートの有効性について検証した。なお、静的載荷試験による結果、短繊維混入率 1.0% では 171.7kN であった。

図-14 に衝突回数と残留耐力比の関係を示す。図より、普通コンクリートと比較して短繊維補強コンクリートの向上効果が高いことが分かる。図-15 に、図-9 に対して短繊維補強コンクリートのデータをプロットしたものを示す。普通コンクリートと短繊維補強コンクリートを比較すると、ほぼ同じ領域にプロットされていることが分かる。よって、短繊維補強コンクリートについても普通コンクリートと同様に限界衝突回数の設定が可能であるといえる。本実験の範囲では、普通コンクリートと比

較して、残留耐力比 0.8 を限界値とした場合の衝突回数は短繊維混入率 1.0%では 25 倍となり、非常に高い向上効果があることが分かる。

実際には PVA 短繊維補強コンクリートは終局後もひび割れの開口が抑制されるため、中詰砂の流出という観点からはより大きなひび割れを許容できると考えられる。この場合、普通コンクリートよりも小さな残留耐力比を設定することで短繊維補強コンクリートの優位性が大きくなると思われる。この点については今後の検討課題としたい。

#### 4. 結論

本研究では、衝撃荷重により損傷を受けた四辺支持RC版の残存押抜きせん断耐荷性能について検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 衝撃荷重を受けた RC 版の残存押抜きせん断耐力は、押抜きせん断破壊面が明確に形成される前においては健全な場合の 8 割程度以上であり、押抜きせん断破壊面の形成とともに急激に低下する。
- (2) 繰返し衝撃により押抜きせん断破壊面が形成される場合、破壊面が明確に形成され始めるまでの衝突回数が急激に増加する衝突速度が存在する。また、押抜きせん断破壊面が形成され始めるまでは 8 割程度以上の残留耐力比を有している。
- (3) 健全な RC 版の押抜きせん断耐力に対する損傷を受けた RC 版の残留耐力比を用いることで、繰返し衝撃荷重を受ける RC 版の残存性能評価ができる可能性がある。
- (4) PVA 短繊維を混入することで、繰返し衝撃荷重を受ける RC 版の残存押抜きせん断耐荷性能は向上する。

#### 参考文献

- 1) 平山克也ほか:2004 年に来襲した台風による波浪災害事例, 港湾空港技術研究所資料, No.1101, 2005.
- 2) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2007.
- 3) 例えば, 岸徳光ほか: 低速度衝撃を受ける四辺支持 RC 版の耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1327-1338, 2009.
- 4) 例えば, 山口貴之, 別府万寿博, 大野友則: 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, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.381-396, 2004.
- 5) 山田岳史ほか: 曲げ破壊型 RC はりの耐衝撃設計法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.799-804, 2007.
- 6) 松林卓ほか: RC はりの耐衝撃性に影響を及ぼす要因の実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30,

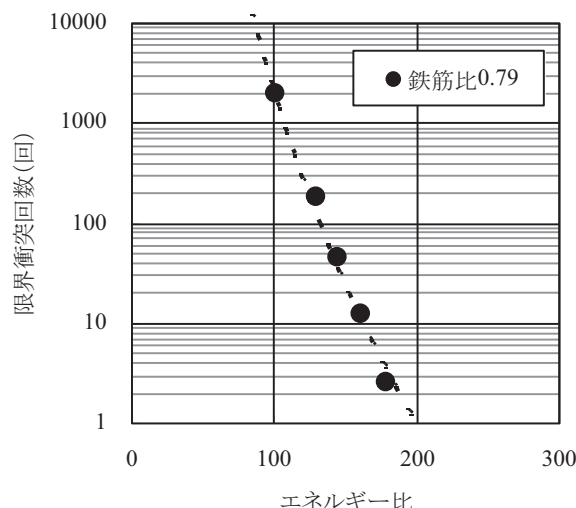


図-13 エネルギー比と限界衝突回数の関係

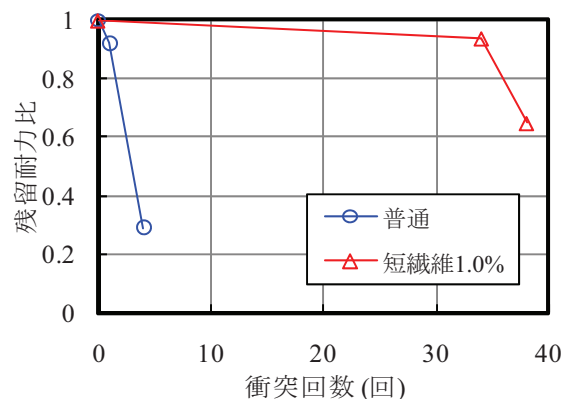


図-14 衝突回数と残留耐力比の関係

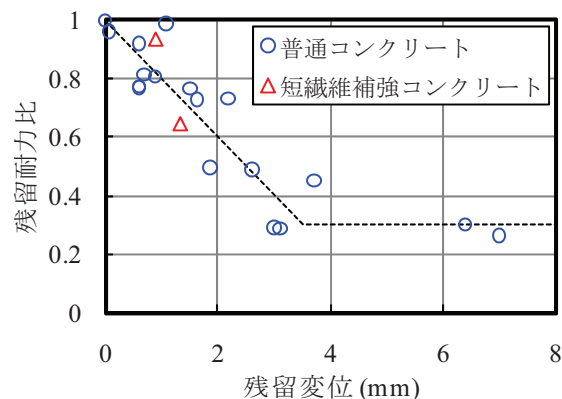


図-15 残留変位と残留耐力比の関係

- No.3, pp.841-846, 2008.
- 7) 岩波光保ほか: 繰返し衝撃荷重を受ける二辺支持鉄筋コンクリート版の破壊挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.799-804, 2009.
- 8) 松林卓ほか: 二辺支持鉄筋コンクリート版の耐衝撃性評価に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.805-810, 2009.
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編, 2007. (2010年11月5日受付)