

論文 繰返し衝撃荷重を受ける四辺支持鉄筋コンクリート版の押抜きせん断耐荷性能評価に関する実験的検討

松林 卓^{*1}・岩波 光保^{*2}・川端 雄一郎^{*3}・三浦 紀明^{*4}

要旨：繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の押抜きせん断破壊に対する破壊挙動の把握および性能評価手法の検討を目的として、四辺支持された鉄筋コンクリート版に対して重錘落下による繰返し衝撃載荷実験および静的載荷実験を実施した。その結果、押抜きせん断によるひび割れが明確に形成されるまでの鉄筋コンクリート版の残留耐力は健全な場合の 8 割程度以上であり、その後ひび割れの開口とともに耐力も急激に低下することが明らかとなった。また、損傷を受けた鉄筋コンクリート版の健全な場合に対する残留耐力の比を用いることで、繰返し衝撃荷重に対する押抜きせん断耐荷性能評価を行える見込みを得た。

キーワード：鉄筋コンクリート版、繰返し衝撃、重錘落下式衝撃実験、押抜きせん断破壊、残留耐力

1. はじめに

港湾構造物では、防波堤の衝撃砕波力、栈橋上部工の揚圧力、消波ブロック・船舶・漂流物の衝突力のように、巨大な衝撃力が作用することは珍しくない。これまでに、これらの衝撃力が構造物に繰返し作用することによって損傷に至った事例も報告されている¹⁾。

現行の港湾構造物の設計では、時間的、空間的変動の大きい衝撃荷重を単純な分布形状をもつ静的荷重に置き換え、部材の安全性を照査しているのが現状であり²⁾、衝撃荷重のばらつきや構造物の動的応答については考慮されていない。一方、衝撃荷重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り、最近では構造物の耐衝撃設計法の確立に向けた提案もされている³⁾。しかし、その多くは落石の衝突力や爆発力などを対象にしており、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。

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、主に曲げ変形に対して評価を行う手法について検討を行ってきた^{4),5),6),7)}。しかし、港湾構造物で対象とする部材の破壊状況を考えれば、曲げ変形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り、これについては十分に検討されていないのが現状である。そこで本研究では、繰返し衝撃荷重による鉄筋コンクリート版の押抜きせん断破壊挙動を把握するとともに、同破壊モードに対する性能評価手法について検討を行うことを目的として、四辺支持された鉄筋コンクリート版（以下、RC 版と呼

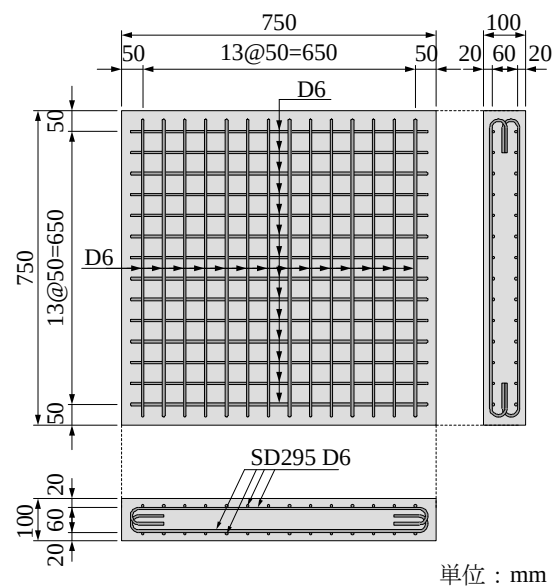


図-1 試験体形状および配筋

ぶ) に対して重錘落下による繰返し衝撃載荷実験を実施し、さらに衝撃載荷実験によって損傷を受けた RC 版に対する静的載荷実験を行った。

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。試験体の種類は 1 種類、試験体数は全 18 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。

*1 (独) 港湾空港技術研究所 構造研究チーム 依頼研修員 (所属: 前田建設工業 (株)) (正会員)

*2 (独) 港湾空港技術研究所 構造研究チーム チームリーダー 博 (工) (正会員)

*3 (独) 港湾空港技術研究所 構造研究チーム 研究官 博 (工) (正会員)

*4 国土交通省 東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所

表-1 実験ケース

試験体 No.	载荷方法	重錘質量 M (kg)	衝突速度 V (m/s)	衝突エネルギー (J)	衝突回数 (回)
1	静的载荷	—	—	—	—
2	単一衝撃载荷後に静的载荷	400	2.0	800	1
3			2.5	1250	
4			3.0	1800	
5	繰返し衝撃载荷後に静的载荷	400	1.5	450	100
6			1.5	450	300
7			1.7	578	140
8			1.7	578	203
9			1.7	578	270
10			1.8	648	12
11			1.8	648	29
12			1.8	648	40
13			1.8	648	60
14			1.8	648	244
15			1.9	722	14
16			1.9	722	19
17			2.0	800	4
18		200	2.69	724	27

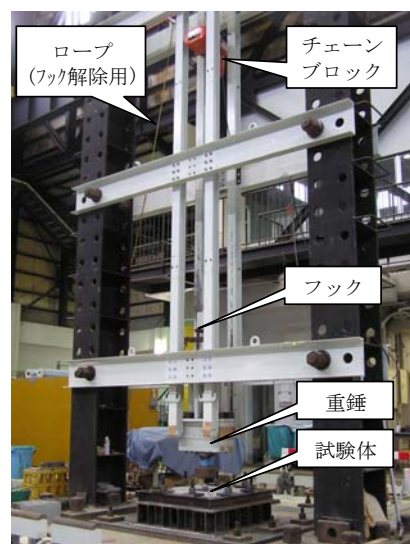


写真-1 衝撃試験装置全景

表-2 材料物性値および押抜きせん断耐力の計算値

コンクリート		鉄筋	押抜きせん断耐力計算値
圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	(kN)
46.1 (44.2~47.6)	31.3 (30.9~31.6)	366	90.9

表-2 に使用した材料の物性値および試験体の押抜きせん断耐力の計算値を示す。ここで、コンクリートの物性値については、試験期間中に実施した4回の圧縮強度試験により得られた試験値の平均を示しており、括弧内の数字は試験値の範囲を示している。また、押抜きせん断耐力は、コンクリート標準示方書⁸⁾に基づき、载荷面の形状は直径50mmの円形、コンクリート強度は材料試験より得られた特性値を用い（ただし、 $f_{pcd} \leq 1.2$ ）、 $\gamma_b = 1.0$ として算出した。

2.2 試験装置

本実験に使用した衝撃試験装置の全景を写真-1に、試験体設置部の詳細を図-2に示す。本装置の原理は、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の载荷板（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、载荷板と試験体の間には、衝撃荷重が载荷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）を敷いた。試

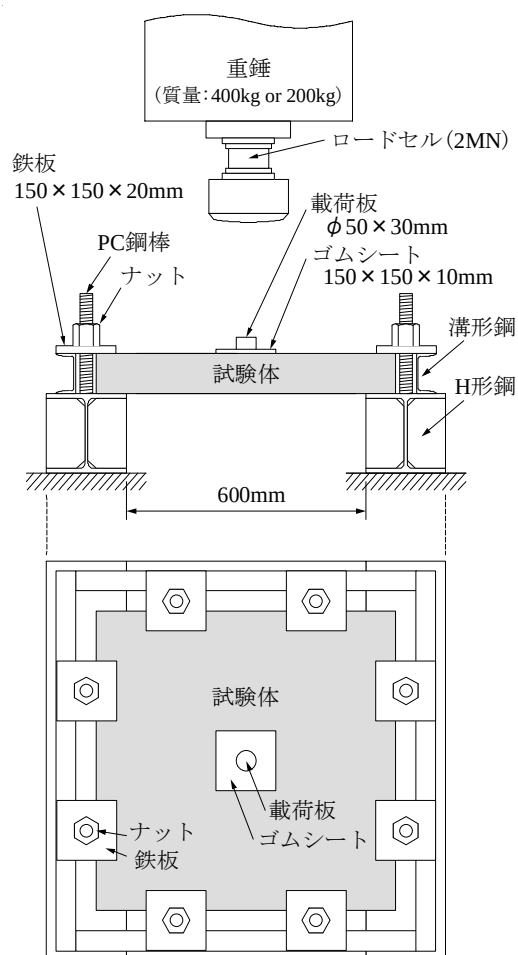


図-2 試験体設置部詳細

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×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。すなわち、単純支持に近いが部分的に固定された状態となっている。静的载荷については、試験体の支持条件および使用する载荷板は

衝撃载荷と同じとし、ゴムシートは用いずに载荷板を RC 版上面に設置して静的に荷重を作用させた。なお、载荷板は、試験体へ一様な荷重が作用するように、石膏を介して試験体に設置した。静的载荷試験の状況を写真-2 に示す。

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 μ 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 μ 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

3.1 単一衝撃载荷による破壊状況および残留耐力

(1) 破壊状況

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部の破壊状況を写真-3 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は多かったが、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。これらの試験体の衝撃载荷時に発生した重錘反力の時刻歴応答を図-4 に、同試験体の衝突点変位の時刻歴応答を図-5 にそれぞれ示す。重錘反力については、衝突速度が大きくなるほど最大値が大きくなり、その発生時刻は早くなる傾向が見られた。 $V=3.0\text{m/s}$ 場合には、ピーク付近における反力の継続時間が他の 2 体と比べて短く、その後 50kN 程度の荷重が数 ms 保持された後に低下する波形となった。これは、荷重がピークに達すると

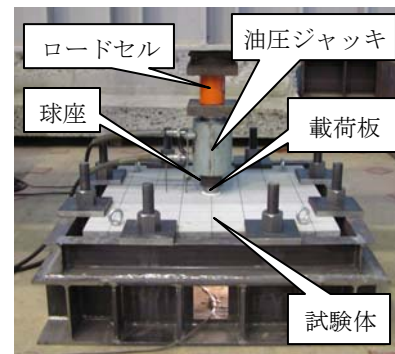


写真-2 静的载荷試験状況

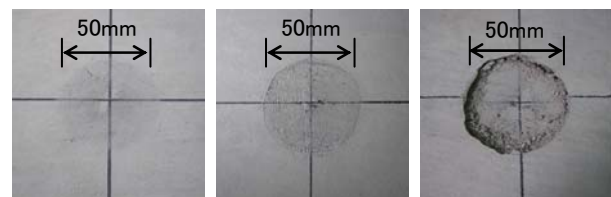


写真-3 衝突部の破壊状況（拡大写真）

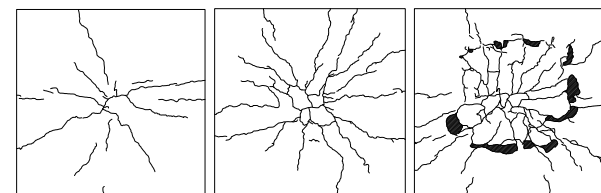


図-3 試験体下面の破壊状況（単一衝撃）

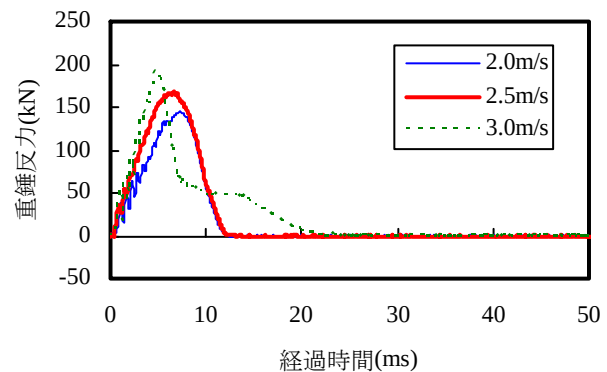


図-4 重錘反力の時刻歴応答

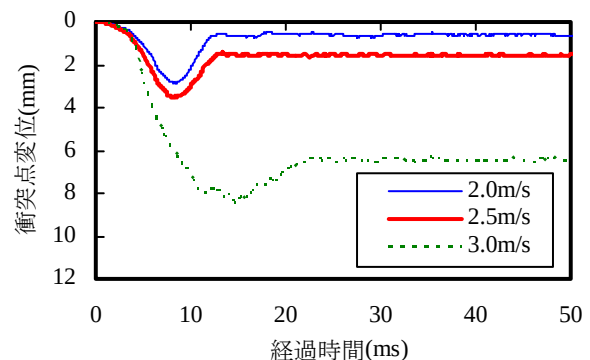


図-5 衝突点変位の時刻歴応答

もに押抜きせん断破壊面が形成され、荷重が保持されなくなったためと考えられる。一方、衝突点変位は、最大値に達した後に変位が 0 まで戻っておらず、試験体の損傷により残留変位が発生していることが確認できる。 $V=3.0\text{m/s}$ 時には、残留変位が他に比べて急激に大きくなっており、押抜きせん断破壊面の形成と対応していることがわかる。

(2) 残留耐力

単一衝撃载荷により損傷を与えた試験体 No.2, 3, 4 に対し、静的载荷試験を実施した結果得られた荷重と変位の関係を、無損傷の試験体 No.1 の場合とともに図-6 に示す。無損傷の試験体の場合、最大荷重 148.9kN で押抜きせん断破壊が発生し、荷重が急激に低下した。その後は変位が 15mm に達して試験を終了するまで 40kN 程度の荷重を保持した。 $V=2.0\text{m/s}$ および 2.5m/s の場合、最大荷重はそれぞれ 137.1kN , 114.1kN と、無損傷の場合よりも小さいが、押抜きせん断破壊面の形成に伴い荷重が急激に低下する傾向は無損傷の場合と同様であった。また、最大荷重に達するまでに荷重が増加する勾配は、無損傷の場合と概ね同様であった。 $V=3.0\text{m/s}$ の場合は、他の試験体に比べて荷重の増加勾配が緩やかであり、 40kN 程度まで増加した後に頭打ちとなった。

図-7 に、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（以下、残留耐力比と呼ぶ）と衝突速度の関係を示す。これによれば、衝撃载荷により押抜きせん断破壊面が明確に形成されなかった $V=2.0\text{m/s}$ および 2.5m/s の場合の残留耐力比が 0.8 程度以上であるのに対し、押抜きせん断破壊面が明確に形成された $V=3.0\text{m/s}$ の場合には 0.3 程度となっている。以上より、衝撃荷重により損傷を受けた RC 版の残留耐力は、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ことが確認された。

3.2 繰返し衝撃载荷に対する破壊状況および残留耐力

(1) 破壊状況

繰返し衝撃载荷を行った試験体のうち代表的なものについて、衝撃载荷後における試験体下面のひび割れ発生状況を図-8 に示す。 $V=2.0\text{m/s}$ の衝撃载荷では 4 回の衝突で押抜きせん断破壊面が明確に形成された一方で、 $V=1.5\text{m/s}$ の場合には 300 回衝突後においてもひび割れが十分に分散していない状態であった。これより、この実験条件の場合、 $V=1.5\text{m/s}$ から 2.0m/s の間において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に大きな差があることがわかる。また、代表的な試験体の繰返し衝撃载荷時における残留変位と衝突回数の関係を図-9 に示す。ここで示した試験体は目視観察の結果、押抜きせん断ひび割れが試験体下面に発生し始めるま

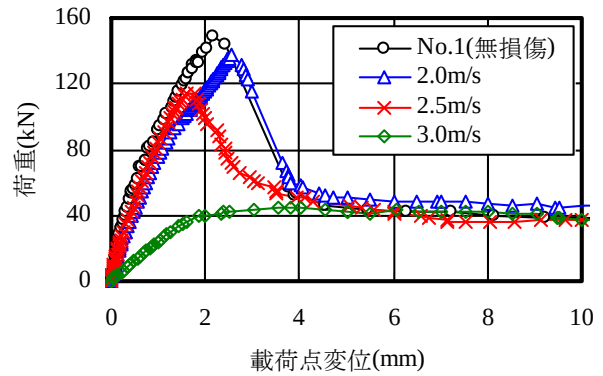


図-6 静的载荷実験による荷重と変位の関係

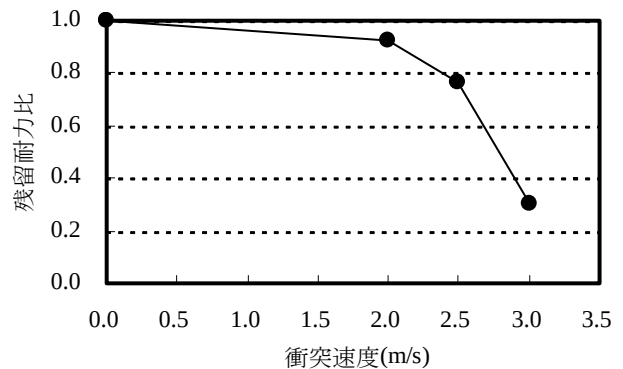


図-7 残留耐力比と衝突速度の関係

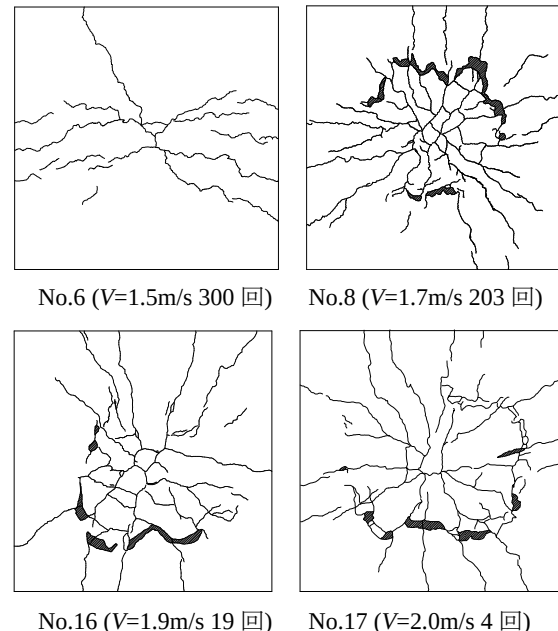


図-8 試験体下面のひび割れ発生状況（繰返し衝撃）

での衝突回数が 3 回程度から 200 回程度まで 50 倍程度の差があったが、いずれの試験体も押抜きせん断ひび割れが発生するまでの残留変位の進展は緩やかであり、同ひび割れが発生してから 1 回から数回の衝突で急激に残留変位が増加した。これより、繰返し衝突回数によらず、押抜きせん断破壊面は急激に形成されることがわかる。

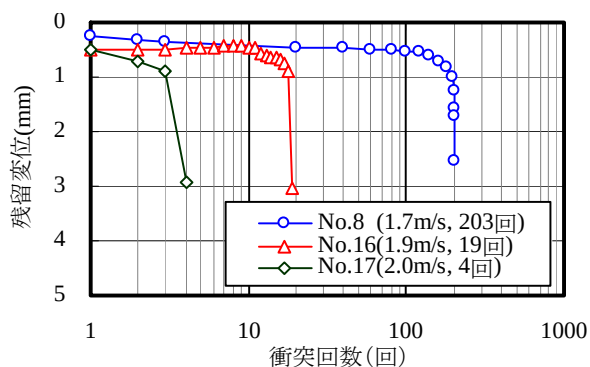


図-9 残留変位と衝突回数の関係

(2) 残留耐力

繰返し衝撃荷重により損傷を与えた各試験体に対し、静的荷重試験を実施した結果得られた残留耐力比と衝突回数の関係を図-10に示す。これによれば、 $V=1.9\text{m/s}$ の場合と $V=1.7\text{m/s}$ の場合の間で、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わっており、 $V=1.8\text{m/s}$ の場合は、その間を大きくばらつく結果となった。これより、この実験条件の場合、 $V=1.8\text{m/s}$ 程度を境に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に大きな差が生じることがわかる。また、 $V=1.7\sim 1.9\text{m/s}$ の実験結果より、押抜きせん断破壊の明確な形成に至る直前までの残留耐力比は、単一衝撃荷重の場合と同様に0.7～0.8程度以上であり、これが押抜きせん断破壊面の形成とともに急激に低下することが明らかとなった。

重錘質量 $M=200\text{kg}$ 、 $V=2.69\text{m/s}$ の場合は、衝突エネルギーが同じである $M=400\text{kg}$ 、 $V=1.9\text{m/s}$ 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。これより、データは少ないが、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推測される。

4. 繰返し衝撃荷重を受ける RC 版の性能評価に関する考察

実験の結果、押抜きせん断破壊面が明確に形成されるまでに RC 版が受ける衝撃荷重の繰返し回数と RC 版の残留耐力には相関関係があることが明らかとなった。そこで、RC 版の残留耐力比に限界値を設定し、RC 版がこの限界値を保持しなくなるまでの衝突回数（以下、限界衝突回数と呼ぶ）を評価することにより、RC 版の押抜きせん断耐荷性能を評価できる可能性があると考え、その方法について考察した。実験の結果、残留耐力比が0.7～0.8程度を下回ると押抜きせん断破壊の急激な進行が見られたことから、残留耐力比の限界値を0.8と設定して、この状態に至るまでの衝突回数を考えた。図-10にプロットした各点から、押抜きせん断破壊面が明確に形

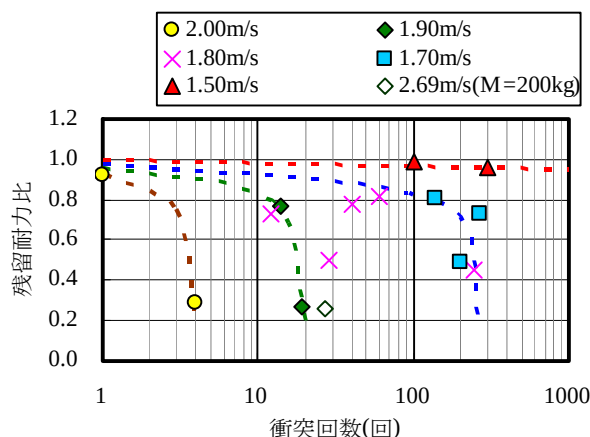


図-10 残留耐力比と衝突回数の関係

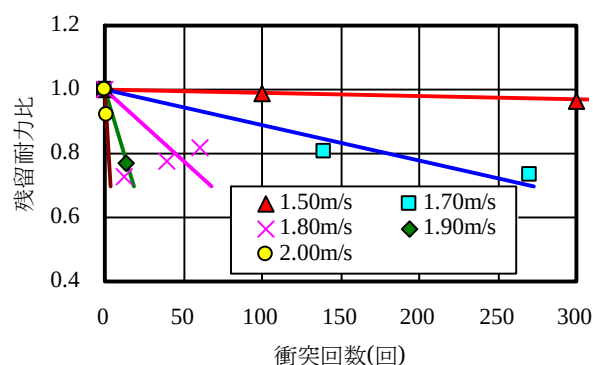


図-11 残留耐力比と衝突回数の関係

成されていない点として残留耐力比0.7以上の点のみを考え、図-11に示すような、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）とした近似直線から、残留耐力比が0.8に至るまでの衝突回数を求めた。ここで、残留耐力比と衝突回数の関係は厳密には直線関係にないと思われるが、残留耐力比が0.8に至るまでの大まかな衝突回数を表すことができると考えた。

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コーン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（以下、エネルギー比と呼ぶ）を用いることを考えた。ここで、破壊エネルギーは、設計の照査により求めることを想定し、土木学会コンクリート標準示方書⁸⁾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用いた。具体的には、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)に示される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/mm²)

図-11 の近似直線より求めた限界衝突回数と、エネルギー比の関係を図-13 に示す。なお、本研究で用いた粗骨材の最大寸法は 20mm である。これによれば、限界衝突回数とエネルギー比の間には高い相関関係が期待できることがわかる。ここで、エネルギー比に着目すると、100～180 程度となっており、コンクリートの破壊エネルギーに対して衝突エネルギーが非常に大きくなっていることがわかる。破壊エネルギーの方が大きいにも関わらず繰返し衝撃荷重に耐えられるのは鉄筋が存在しているからであり、鉄筋比が異なれば両者の関係も異なると考えられる。したがって、図-13 に示したような限界衝突回数とエネルギー比の関係、鉄筋比の異なる複数の場合について求めることにより、対象とした RC 版の鉄筋比とエネルギー比から限界衝突回数を評価し、これによって RC 版の押抜きせん断耐荷性能を評価できると思われる。

なお、ここで述べた性能評価方法は、1 種類の RC 版の実験結果を用いて述べたものであり、鉄筋比が異なった場合や版厚が異なった場合にも同様の関係が成り立つことを実験で確認したわけではない。また、現状ではゴムシートによる緩衝効果も考慮されていない。したがって、本評価方法の妥当性の検証については今後の課題であるが、残留耐力比を RC 版の押抜きせん断耐荷性能評価に用いることができる見込みは得られたと考えている。

5. まとめ

本研究では、四辺支持された RC 版の衝撃載荷実験および衝撃載荷により損傷を受けた RC 版の静的載荷実験を行うことにより、RC 版の押抜きせん断破壊に対する破壊挙動の把握および性能評価手法の検討を行った。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 衝撃荷重を受けた RC 版に残留した耐力は、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) 繰返し衝撃載荷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

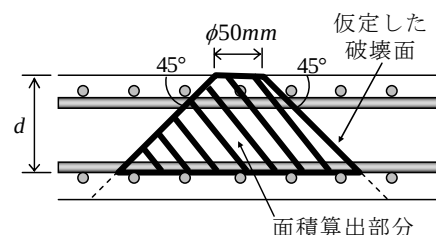


図-12 コーン破壊面の面積の考え方

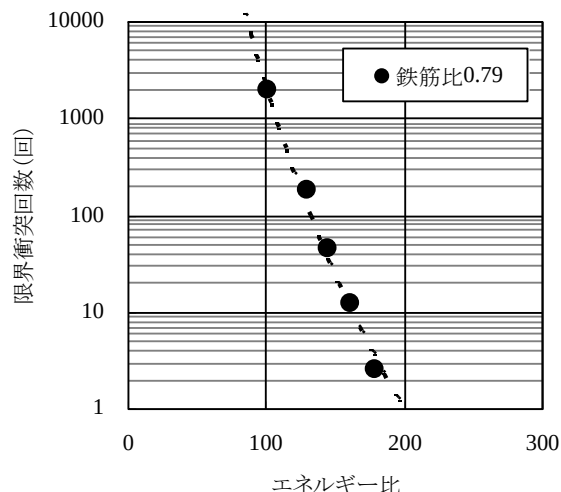


図-13 限界衝突回数とエネルギー比の関係

けた RC 版の残留耐力比を用いることで、繰返し衝撃を受ける RC 版の性能評価を行える見込みがある。

参考文献

- 1) 平山克也他：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.1101，2005.6
- 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，2007.7
- 3) 例えば，岸徳光他：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.1327-1338，2009.3
- 4) 山田岳史他：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.799-804，2007.7
- 5) 松林卓他：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，No.3，pp.841-846，2008.7
- 6) 岩波光保他：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.799-804，2009.7
- 7) 松林卓他：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.805-810，2009.7
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，2007