

## (4) 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耐荷性状

Structural performance of reinforced concrete slabs subjected to cyclic impact loads

松林 卓\*, 岩波 光保\*\*, 横田 弘\*\*\*, 山田 岳史\*\*\*\*, 竹鼻 直人\*\*\*\*\*

Taku Matsubayashi, Mitsuyasu Iwanami, Hiroshi Yokota, Takeshi Yamada and Naoto Takehana

\* (独) 港湾空港技術研究所 構造・材料研究チーム (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号)  
(所属: 前田建設工業(株))

\*\* 工博 (独) 港湾空港技術研究所 構造・材料研究チーム (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号)

\*\*\* 工博 (独) 港湾空港技術研究所 研究主監 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号)

\*\*\*\* 工博 (株) 神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)

\*\*\*\*\* (株) 神戸製鋼所 鉄構・砂防部 技術室 (〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町4-2-7)

キーワード: 港湾構造物, 繰返し衝撃荷重, 鉄筋コンクリート版, 重錘落下式衝撃載荷試験  
(port structure, cyclic impact loads, RC slab, falling-weight-impact test)

### 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<sup>1)</sup>。

現行の港湾構造物の設計においては、部材の設計において、時間的、空間的変動の大きい衝撃荷重を簡便な分布形状をもつ静的荷重に置き換え、安全性を照査しているのが現状であり<sup>2)</sup>、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多くの研究成果があり<sup>3,4)</sup>、最近では性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法の確立に向けた取り組みも行われている<sup>5)</sup>。しかし、その多くは落石の衝突、爆発などの単発の現象を対象にしており、繰返し衝撃荷重を対象とした例は少ない。

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について、重錘落下による繰返し衝撃載荷試験を実施し、その破壊挙動を把握した<sup>6,7)</sup>。しかし、港湾構造物において衝撃を受ける構造部材の多くは版部材であり、それらの繰返し耐衝撃性能を評価するためには、繰返し衝撃荷重を受ける版部材の破壊挙動を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版(以下、RC版)の破壊挙動の把握を目的に、二辺支持RC版試験体の重錘落下式衝撃載荷実験を実施した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 検討ケースおよび試験体概要

本実験の検討ケースを表-1に示す。試験体の種類は、一般的な防波堤ケーソン壁をモデルとしたRC版(Aシリーズ)と、それと比べて鉄筋比を増加させたRC版(Bシリーズ)の2種類とし、載荷条件をパラメータとした。

載荷方法は、重錘の衝突速度を1m/sから7m/sまで順に増加させる漸増衝撃載荷、重錘の衝突速度を一定(3m/s)として衝撃荷重を繰返し作用させる繰返し衝撃載荷の2種類とした。

試験体の形状および配筋を図-1に示す。試験体は、寸法2,300mm×1,500mm×160mmの二辺支持RC版であり、支間長は2,000mmである。また、コンクリートおよび鉄筋の物性値および静的な荷重に対する試験体の計算耐力(曲げおよび押抜きせん断)をそれぞれ表-2、表-3に示す。なお、耐力計算は、土木学会コンクリート標準示方書<sup>8)</sup>に基づき、材料係数および部材係数は1.0、曲げ耐力算出時の有効幅は考慮せず、押抜きせん断耐力算出時の載荷面は直径100mmの円形と仮定した。

表-1 検討ケース

シリーズ	試験体名	載荷条件	衝突速度 V (m/s)
A	A-1	漸増衝撃載荷	1,2,3,4,5,6,7
	A-2	繰返し衝撃載荷	3
B	B-1	漸増衝撃載荷	1,2,3,4,5,6,7
	B-2	繰返し衝撃載荷	3

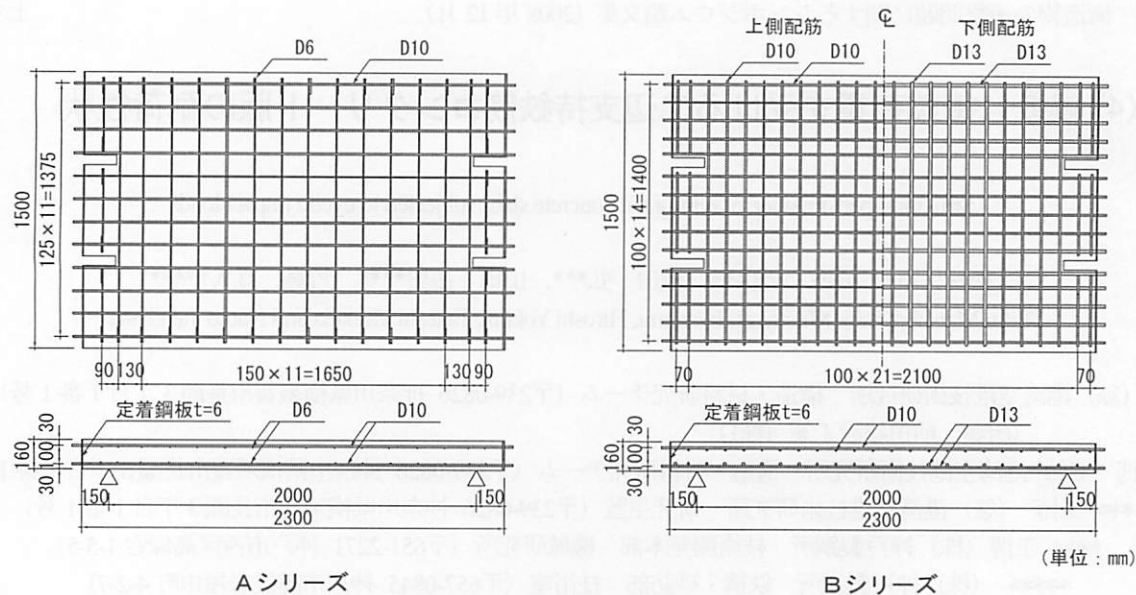


図-1 試験体形状および配筋

表-2 材料物性値

コンクリート物性値			鉄筋物性値		
材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	試験体名	呼び名	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )
21	40.8	30.2	A-1, B-1	D6	365
197	44.3	30.4	A-2, B-2	D10	384
				D13	380

表-3 静的な荷重に対する計算耐力

試験体名	曲げ耐力 (kN)	押抜き せん断耐力 (kN)
A-1	95.1	175.2
A-2	96.5	
B-1	182.7	253.6
B-2	184.6	

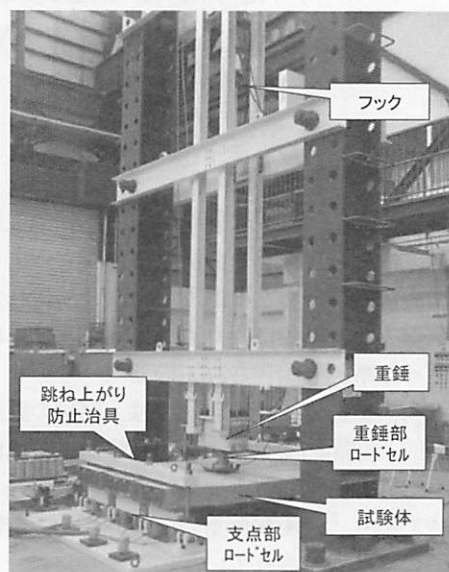


写真-1 試験装置

## 2.2 試験装置

本実験に使用した試験装置を写真-1に示す。本装置の原理は、所定の高さまで重錘をチェーンブロックで引き上げ、ロープを用いて重錘を吊っているフックを解除し、自由落下させるものである。

実験で用いた重錘質量は400kgとした。重錘の先端形状は片当たりを防止するため、半径565mmの球面仕上げとなっている。また、試験体の浮き上がりや脱落を防止するため、跳ね上がり防止治具を備えている。本治具は、支点片側あたり4本のPC鋼棒を介して試験体上面からナットで締付けける構造となっており、この締め付け力は支点片側あたり120kNで一定となるように管理した。また、重錘落下点には、重錘反力応答のばらつきを抑えるため、硬度65度、厚さ10mmのゴムシート(300mm×300mm×10mm)を敷いて载荷を行った。

## 2.3 計測方法

計測項目は、重錘反力、支点反力、支間中央部における版の変位(中心部および端部の2箇所)、試験体下面の加速度、鉄筋のひずみである。図-2に支点反力および変位の計測位置を示す。重錘反力の計測には重錘部に組み込まれた容量2MNのロードセルを、支点反力の計測には支点部に組み込まれた容量200kNのロードセル(片側6点ずつ)を使用した。いずれのロードセルもひずみゲージ式となっている。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20~1000μs)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用パソコンへデータ収録した。計測間隔は50μsとし、取得データのフィルタ処理は施さなかった。また、RC版に発生したひび割れ状況を適宜観察した。

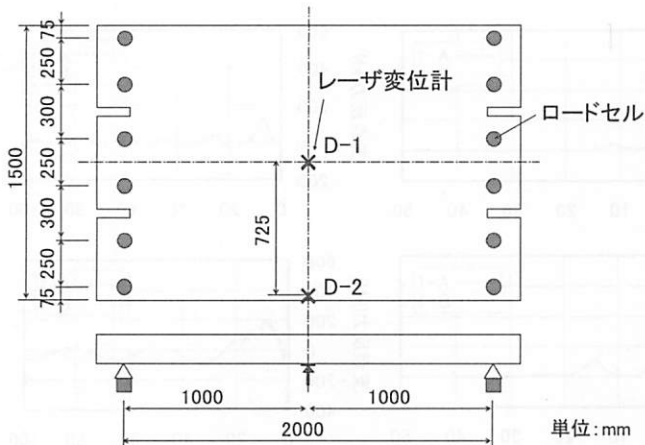
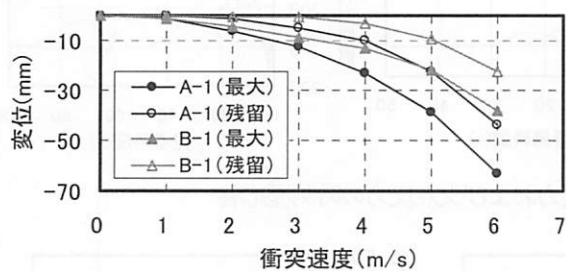
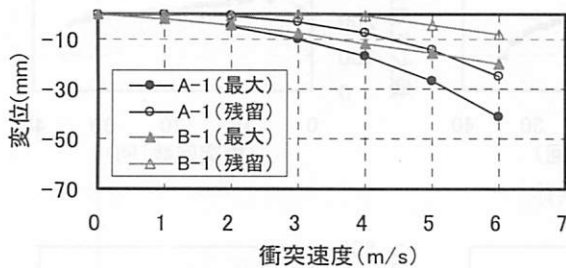


図-2 計測位置図



a) D-1 (荷点直下)



b) D-2 (版端部)

図-3 漸増衝撃载荷時の変位と衝突速度の関係



V=3m/s 終了時

V=6m/s 終了時

a) A-1 試験体



V=3m/s 終了時

V=6m/s 終了時

b) B-1 試験体

写真-2 試験体破壊状況 (RC 版下面)

### 3. 実験結果

#### 3.1 漸増衝撃载荷

##### (1) 破壊状況

漸増衝撃载荷による支間中央部の最大変位および残留変位と衝突速度の関係を図-3 に示す. ここで, 支間中央部の変位計測位置について, 荷点直下および版端部 (図-2 における D-1 および D-2) の 2 箇所について示している. なお, 試験体 A-1 については荷速度  $V=1\text{m/s}$  時の D-2 (版端部の変位) を計測しなかったため, 荷速度  $V=1\text{m/s}$  時の残留変位を 0 と仮定している. これによれば, 試験体 A-1 よりも B-1 の方が, 最大変位および残留変位ともに小さくなっていることが確認できる. 一方, 荷点直下と版端部の変位を比べると, A-1, B-1 ともに衝突速度  $V=3\text{m/s}$  まではほとんど変わらず,  $V=4\text{m/s}$  以降は荷点直下の変位の方が大きくなっていることがわかる. 試験体破壊状況の観察の結果, A-1, B-1 ともに衝突速度  $V=5\text{m/s}$  において押抜きせん断破壊面が形成されたことが確認されており, 荷点直下と版端部の変位の差は押抜きせん断破壊の進行によるものと考えられる. 写真-2 に, 試験体 A-1, B-2 の衝突速度  $V=3\text{m/s}$  および  $6\text{m/s}$  終了時の試験体下面の破壊状況を示す.

以上より, 鉄筋量を増やして静的な曲げ耐力および押抜きせん断耐力を大きくした場合, 変形量は小さく抑えることができるが, 衝突速度が大きくなると, 変形の程度によらず押抜きせん断破壊を起こすことがわかった.

##### (2) 時刻歴応答

図-4 に, 衝突速度  $V=1, 3, 6\text{m/s}$  における, 1 回の衝撃荷重に対する荷点直下の変位 (以下, 荷点変位と呼ぶ), 重錘反力および支点反力の時刻歴応答を示す. なお, 本論文における支点反力は, 支点に設置した 12 個のロードセルにより計測した値の合計を示している. これによれば, 荷点変位の最大値については, 衝突速度が増加するにつれて試験体 A-1 と B-1 の差が顕著となったのに対し, 重錘反力および支点反力については B-1 の方が A-1 よりも若干大きい程度であった. 鉄筋比が異なっても重錘反力および支点反力応答は同程度であるとする既往の研究成果もあり<sup>9)</sup>, 鉄筋比の違いによる重錘反力および支点反力への影響は小さいと思われる. 本実験結果において, B-1 の重錘反力および支点反力の方が A-1 のそれよりも若干大きくなった原因の一つとして, 本実験が漸増载荷であり, 試験体が累積して受けた損傷の程度が B-1 の方が小さかったことが考えられる.

#### 3.2 繰返し衝撃载荷

##### (1) 破壊状況

漸増衝撃载荷においては, 試験体 A-2, B-2 ともに押抜きせん断破壊に至らなかった衝突速度である  $V=3\text{m/s}$  で繰返し衝撃载荷を行った結果について述べる.

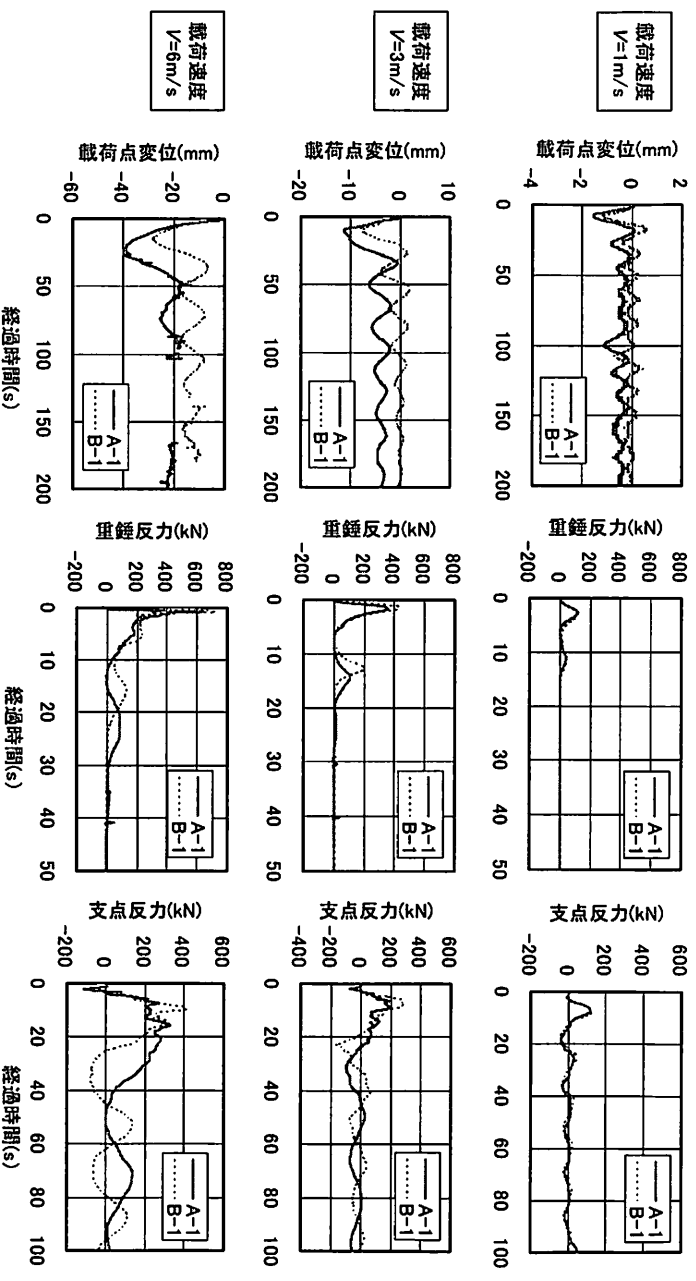


図-4 漸増衝撃載荷時時の載荷点変位、重錘反力および支点反力の時刻歴応答

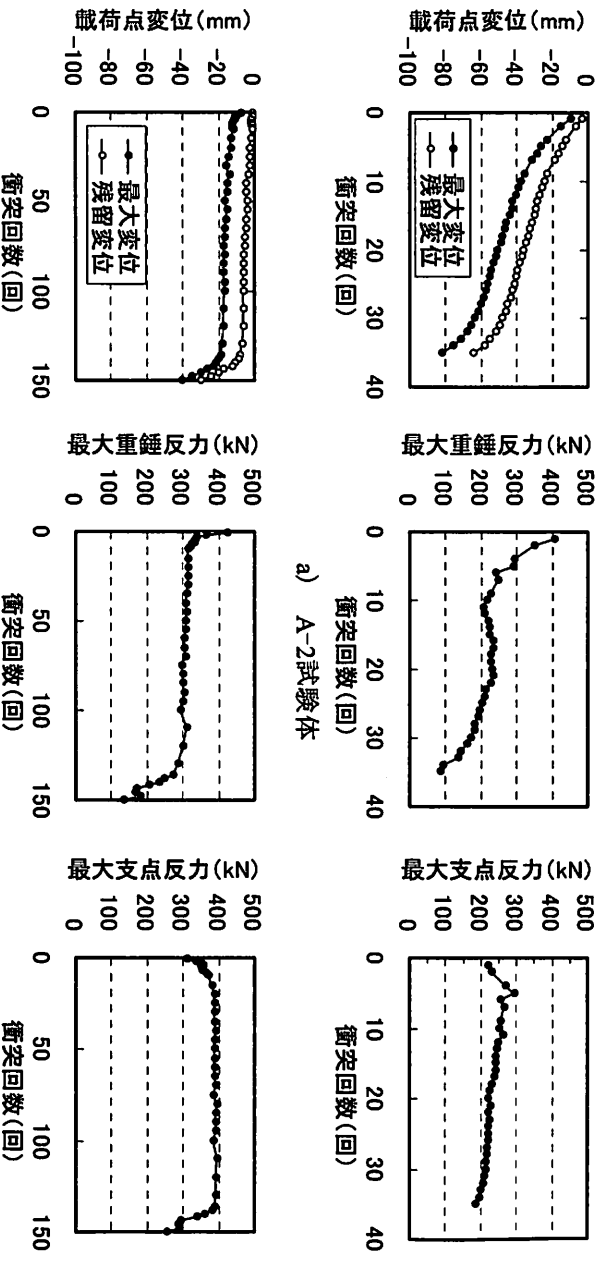
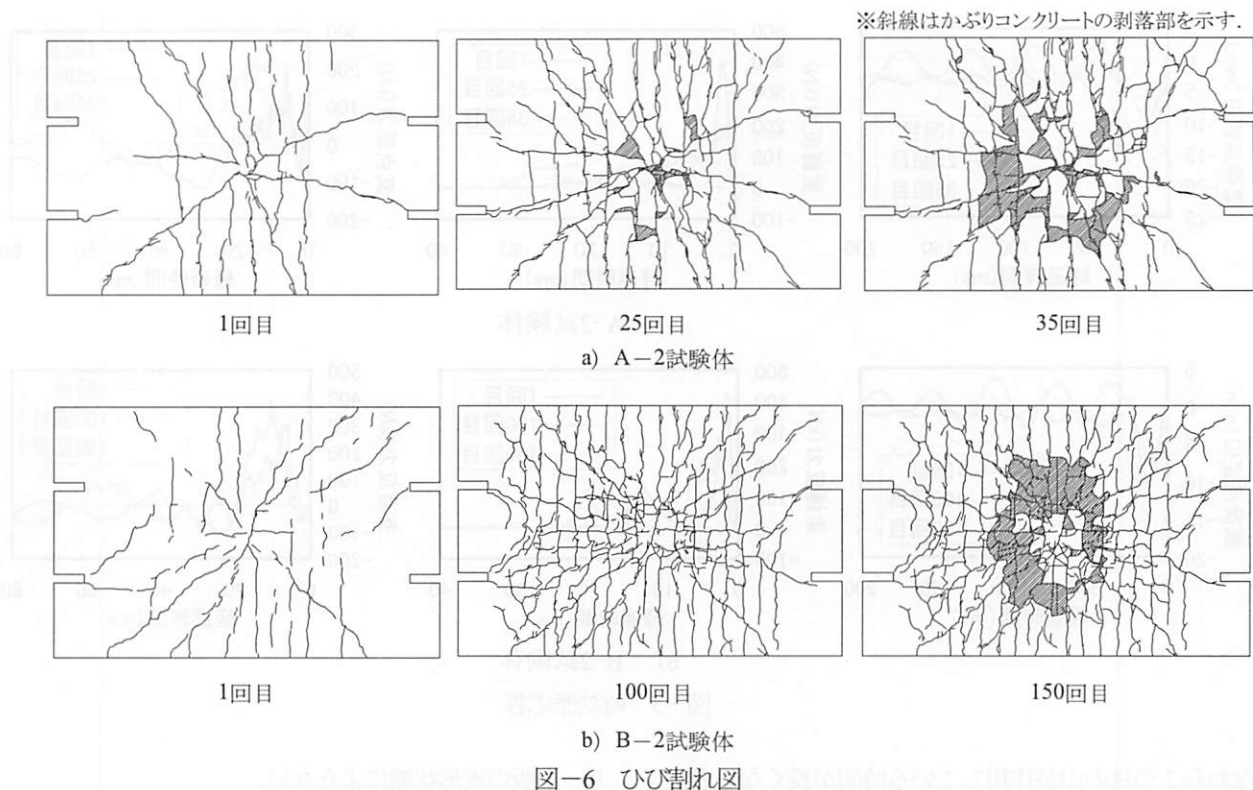


図-5 載荷点変位、最大重錘反力および最大支点反力と繰返し回数との関係

載荷点直下(計測点:D-1)における最大変位および残留変位の累積値、最大重錘反力、最大支点反力それぞれについて、衝突回数との関係を図-5に示す。また、代表的な衝突回数における試験体下面のひび割れ発生状況を図-6に示す。

試験体A-2は、衝突回数1回目から試験体下面に曲げひび割れおよび載荷点を中心とした放射状のひび割れが発生し、10回目程度までそれらのひび割れ本数が増加した。その後、新たなひび割れの発生は少なくなつたが、ひび割れ幅は大きくなりながら曲げ変形が進んだ。衝突

回数25回目程度以降は、かぶりコンクリートの浮きが確認されるなど、押抜きせん断破壊の兆候が現れ、30回目以降は急速に押抜きせん断破壊が進行し、破壊に至つた。なお、押抜きせん断破壊の兆候が現れた30回目における載荷点変位は累積の残留変位で48mm程度であった。試験体A-2の載荷点変位と衝突回数との関係を見ると、一定に変位が進行していかないことがわかる。変位の増加の程度は、衝突回数10回目程度以降一旦緩やかになっており、これは新たなひび割れの発生が収まったことに関係していると推測される。また、衝突回数30回目以降は再



び変位の増加が顕著となっており、これは押抜きせん断破壊面の形成によるものと考えられる。最大重錘反力は衝突回数10回目程度までは減少傾向にあるが、その後横ばいの状態になっている。これは、衝突回数10回目程度で新たなひび割れの発生が収まり、RC版の剛性の低下が緩やかに進行するようになったものと推測される。また、衝突回数30回目程度以降は、再び減少傾向が顕著となっており、これは押抜きせん断破壊面の形成により剛性の低下が急速に進行したものと推測される。最大支点反力は、数回目の衝突までは一旦増加し、その後緩やかに減少し、30回目以降さらに減少する結果となった。数回目の衝突まで一旦増加することに対して想定される原因については後述する。30回目以降の減少は押抜きせん断破壊面の形成が関係していると推測される。

試験体B-2は、A-2同様、衝突回数1回目から試験体下面に曲げひび割れおよび載荷点を中心とした放射状のひび割れが発生したが、A-2に比べて変形が小さく、ひび割れが細かく分散する傾向が見られた。衝突回数130回目程度以降かぶりコンクリートの剥離など押抜きせん断破壊の兆候が現れ、その後急速に押抜きせん断破壊が進行し破壊に至った。押抜きせん断破壊が急速に進行し始めた変位は累積の残留変位で8mm程度であり、試験体A-2の1/6程度であった。また、衝突回数が少ない段階で新たなひび割れの発生が収まり、それに伴って変位の増加の程度および最大重錘反力の減少の程度が一旦緩やかとなり、再び押抜きせん断破壊面の形成とともに顕著となる傾向はA-2と同様であった。最大支点反力は、衝突回数が少ない段階で一旦増加し、押抜きせん

断破壊の進行とともに減少する傾向は試験体A-2と同じであったが、その間はほぼ横ばいの状態であった。

以上より、1回の衝突では曲げ変形し、押抜きせん断破壊に至らない程度の衝撃荷重でも、繰返し作用することにより、曲げ変形から押抜きせん断破壊に移行する可能性があることが確認された。また、押抜きせん断破壊の発生は鉄筋コンクリート版の変形状態によらないことが確認された。

## (2) 時刻歴応答

図-7に、代表的な衝突回数における載荷点変位、重錘反力、支点反力それぞれの時刻歴応答を示す。載荷点変位の時刻歴応答によれば、衝突回数が増加するにつれて変位の最大値が大きくなり、振動周期が長くなる傾向が見られた。これは、繰返し衝撃荷重による損傷により、試験体の剛性が低下したことが原因と推測される。

重錘反力は、例えば試験体A-2の衝突回数25回目の時刻歴応答を見ると、重錘反力が0から最大値まで増加し、13ms程度で再び0になるまでに、波形の山に2つのピークがあることが確認できる。この2つの山のピークは、重錘が試験体に衝突した瞬間に発生する反力と、試験体の曲げ変形とともに重錘が試験体と接している間に発生する反力の2つであると推測している。衝突回数1回目のように試験体が健全な状態では、衝突した瞬間に生じる反力、すなわち1つ目の山のピークが卓越して2つ目の山はほとんど生じなかった。また、35回目のように試験体の損傷の程度が大きい状態では、衝突した瞬間に生じる反力は小さく、試験体の曲げ変形とともに重錘が試験体と接している間に発生する反力が長く作用する、

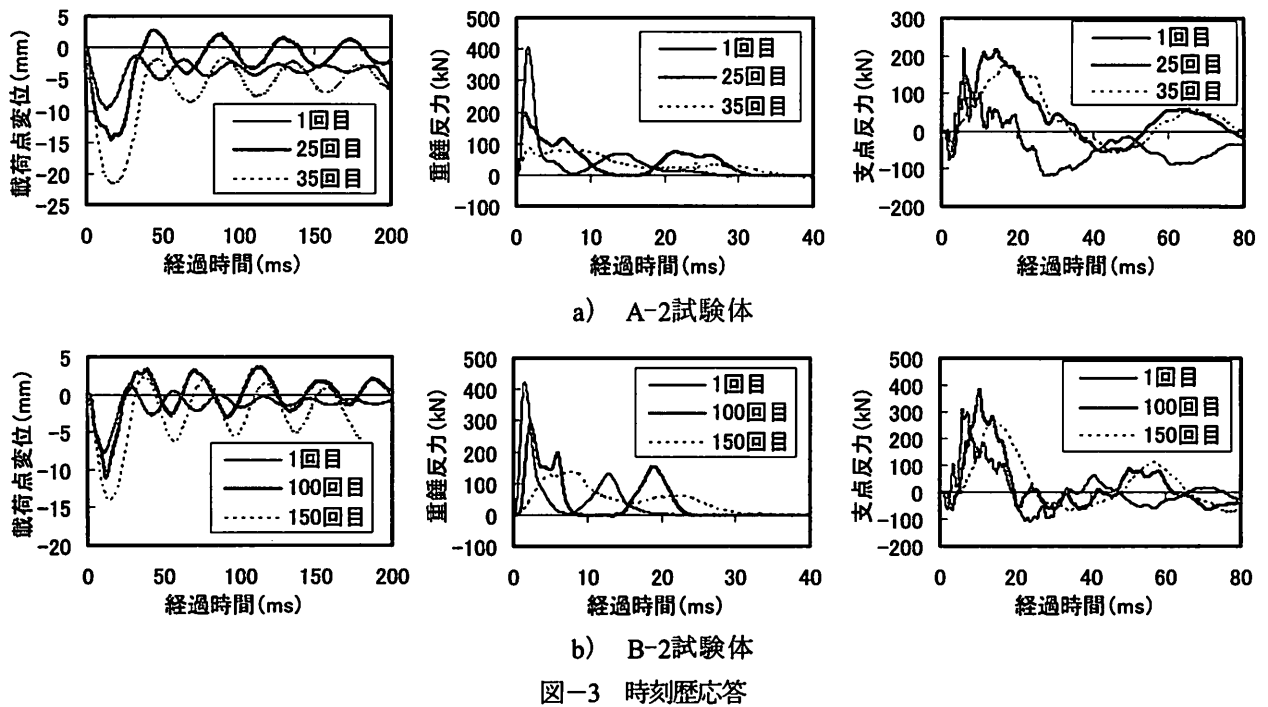


図-3 時刻歴応答

すなわち2つ目の山が作用している時間が長くなると推測される。これは試験体 B-2 においても同様の傾向が見られる。

支点反力は、重錘反力が支点到伝わったものと考えれば、例えば試験体 A-2 の衝突回数 1 回目では、衝突の瞬間に発生した重錘反力 (1 つ目の山) が支点反力の最大値をもたらしており、25 回目および 30 回目では、試験体の曲げ変形とともに重錘が試験体と接している間に発生した重錘反力 (2 つ目の山) が支点反力の最大値をもたらしていると推測される。最大支点反力が、繰返し載荷の開始から一旦増加する傾向を示した (図-5) のは、支点反力の最大値に対応する重錘反力の種類が異なることが原因の一つであると推測される。これらの現象の解明については今後の課題である。

#### 4. まとめ

本研究は、繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版部材の破壊挙動の把握を目的として、重錘落下による二辺支持鉄筋コンクリート版の衝撃載荷実験を実施した。以下に本実験で得られた知見をまとめる。

- (1) 漸増衝撃載荷試験の結果、鉄筋量を増やして静的な曲げ耐力および押抜きせん断耐力を大きくした場合、変形量は小さく抑えることができるが、衝突速度が大きくなると、変形の程度によらず押抜きせん断破壊を起こす。
- (2) 繰返し衝撃載荷試験の結果、1 回の衝突では曲げ変形し、押抜きせん断破壊に至らない程度の衝撃荷重でも、繰返し作用することにより、曲げ変形から押抜きせん断破壊に移行する場合がある。また、曲げ変形から押抜きせん断破壊への移行は鉄筋コンク

リート版の変形状態によらない。

#### 参考文献

- 1) 平山克也, 南靖彦, 奥野光洋, 峯村浩治, 河合弘泰, 平石哲也: 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, 三上浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静的載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.177-190, 2000.4
- 4) 例えば, 森下政浩, 田中秀明: 繰返し爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.317-322, 2004.1
- 5) 土木学会構造工学委員会: 性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法, 2007.10
- 6) 白根勇二, 岩波光保, 横田弘: 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の耐荷性状, 第 8 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.81-86, 2006.11
- 7) 山田岳史, 岩波光保, 白根勇二, 竹ヶ鼻直人: 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
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編, 2007
- 9) 三上浩, 岸徳光, 栗橋祐介, 小澤靖: 四辺支持 RC 版の耐衝撃性に与える鉄筋径の影響, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集, I 部門, pp.1059-1060, 2008.9