

# 論文 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

岩波 光保<sup>\*1</sup>・松林 卓<sup>\*2</sup>・横田 弘<sup>\*3</sup>・小野寺 美昭<sup>\*4</sup>

**要旨:** 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の破壊性状を把握するため、鉄筋比の異なる2種類の鉄筋コンクリート版に対し、繰返し衝撃荷重を作用させる重錘落下式衝撃載荷実験を実施した。その結果、曲げ変形から押抜きせん断破壊に移行する破壊挙動を確認できた。また、繰返し衝撃荷重が、版の載荷点変位、重錘反力、支点反力に与える影響を、これらの最大値の推移や時刻歴応答波形より考察した。

**キーワード:** 繰返し衝撃荷重, 鉄筋コンクリート版, 重錘落下実験, 押抜きせん断破壊

## 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<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は多くの研究成果があり<sup>3)</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組みも行われている。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>4)</sup>。しかし、ケーソン等の港湾構造物でより多く用いられている版部材については、繰返し衝撃荷重による破壊挙動が未だ明らかになっていないといえない。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）の破壊挙動を把握することを目的に、二辺単純支持されたRC版試験体に対して重錘落下による繰返し衝撃載荷試験を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 検討ケースおよび試験体概要

試験体の形状および配筋を図-1に示す。試験体寸法は、2300mm×1500mm×160mmであり、支間長2000mmで二辺単純支持した。ケーソンの側壁は、図-2に示す

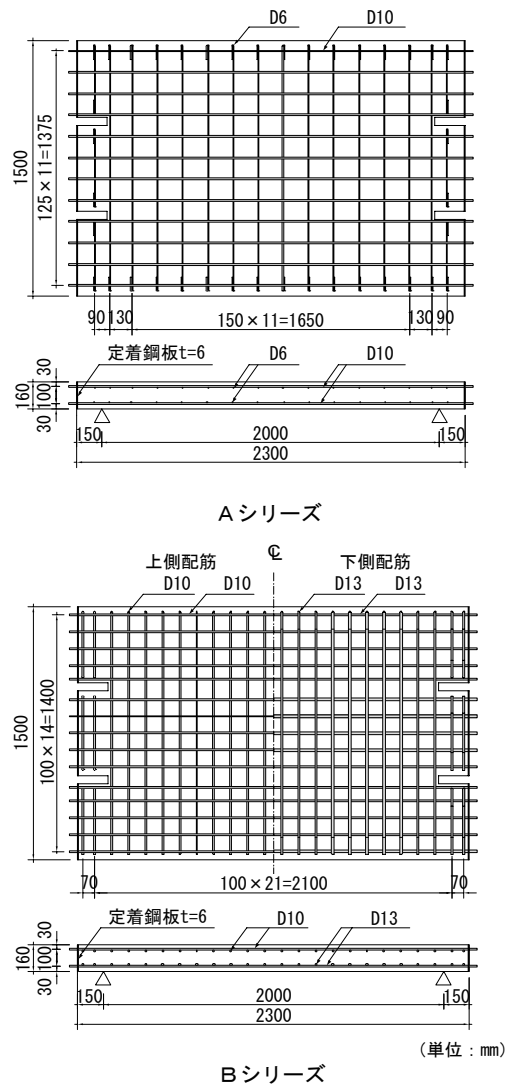


図-1 試験体形状および配筋

ように、隣接する側壁、隔壁や底版によって三辺支持された部材であるが、辺長比が大きいため底版による拘束の影響は小さいものと考え、本研究では図-2の灰色部分のような二辺支持された版部材としてモデル化を行

\*1 (独) 港湾空港技術研究所 構造・材料研究チームリーダー 博(工) (正会員)

\*2 (独) 港湾空港技術研究所 構造・材料研究チーム 依頼研修員 (前田建設工業(株)) (正会員)

\*3 (独) 港湾空港技術研究所 研究主監 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 技術開発課 技術開発第一係長

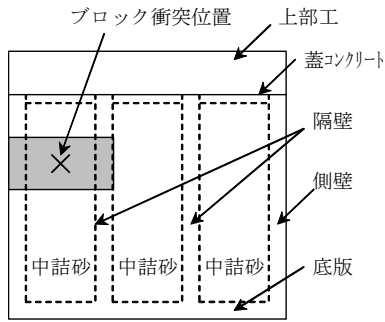


図-2 試験体のモデル化

表-1 実験ケース

シリーズ (鉄筋比)	試験体名	载荷条件	衝突速度 $V$ (m/s)
A (0.44%)	A-1	単一衝撃载荷	1
	A-2	繰返し衝撃载荷	3
	A-3	繰返し衝撃载荷	7
B (0.97%)	B-2	繰返し衝撃载荷	3
	B-3	繰返し衝撃载荷	7

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> )	ヤング係数 (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	D6	365
197	44.3	30.4	A-2,A-3	D10	384
			B-2,B-3	D13	380

った。試験体端部の切欠きは、後述する衝撃载荷試験装置の跳ね上がり防止治具を設置するためのものである。

試験体の種類は鉄筋比の違いによりAシリーズとBシリーズの2種類とした。Aシリーズは、一般的な防波堤ケーソンの側壁と同程度の鉄筋比とし、支間長および版厚が実スケールの2/5程度となっている。Bシリーズは、RC版の耐衝撃性に及ぼす鉄筋比の影響を調べるため、前者に比べ、鉄筋比を2倍程度に増加させたものである。

表-1に実験ケースを、表-2にコンクリートおよび鉄筋の物性値を示す。载荷条件は、衝突速度を $V=3\text{m/s}$ または $V=7\text{m/s}$ で一定として繰返し重錘を落下させる繰返し衝撃载荷とした。なお、Aシリーズについては、比較的小さい衝突速度で重錘が衝突した場合のRC版の変形過程を把握するために、 $V=1\text{m/s}$ で衝撃荷重を1回作用させる単一衝撃载荷も実施した。

## 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、重錘を所定の高さまでチェ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、すべての载荷条件において400kgで一定とした。重錘の先端形状は片当たりを防

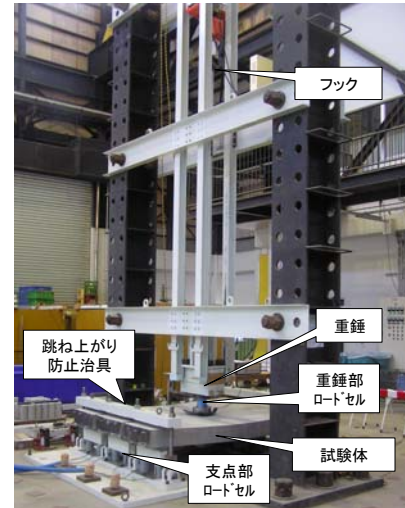


写真-1 試験装置

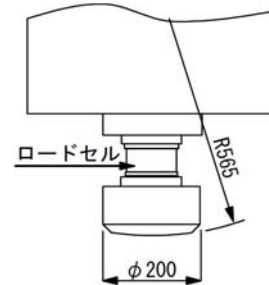


図-3 重錘の形状

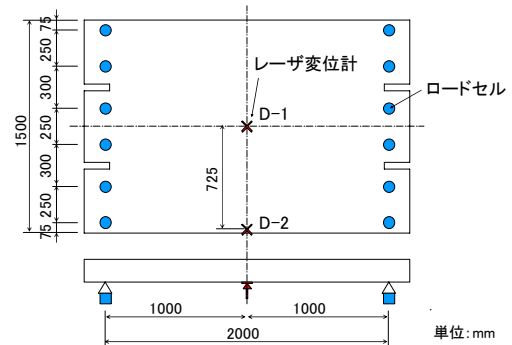


図-4 計測位置

止するため、図-3に示すように、半径565mmの球面仕上げが施されている。また、試験体の浮き上がりや脱落を防止するため、支点部に跳ね上がり防止治具を備えている。この治具は、支点片側あたり4本のPC鋼棒を介して試験体上面をナットで締め付ける構造となっており、この締め付ける力は片側120kNとなるように調整した。なお、支点部における試験体の回転は自由としている。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)を敷いた。

## 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

※斜線はかぶりコンクリートの剥落部を示す。

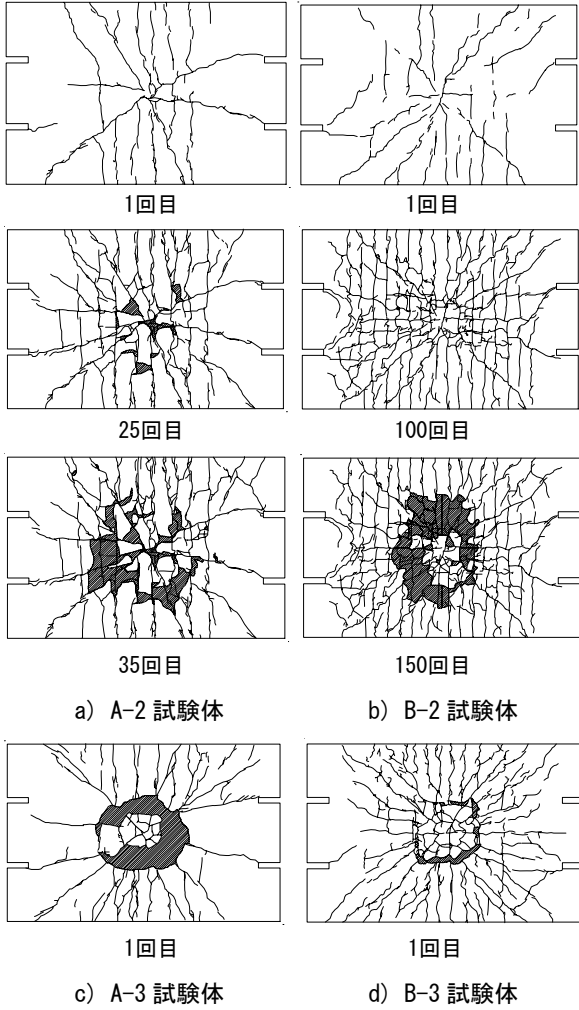


図-5 試験体下面の破壊状況

る版の変位などとした。図-4に支点反力および変位の計測位置を示す。支間中央部における版の変位の計測は、荷重点直下D-1および版端部D-2の2箇所を基本とし、

A-1試験体のみ、D-2は計測せずに重錘の変位を測定した。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である。版および重錘の変位の計測には非接触型レーザー変位計(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・記録用パソコンへデータ収録した。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、RC版に発生したひび割れ状況を適宜観察し、スケッチした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊状況

図-5に、A-1試験体を除く各試験体の下面でのひび割れ発生状況を示す。また、図-6に、A-2試験体およびB-2試験体の荷重点変位、最大重錘反力および最大支点反力の推移を示す。ここで、支点反力は、計12個のロードセルによって計測された値の合計である。なお、目視観察の結果、A-1試験体ではひび割れの発生は確認されなかった。

A-2試験体は、衝突回数1回目から曲げひび割れおよび荷重点を中心とした放射状のひび割れが発生し、衝突回数の増加とともにひび割れ本数も増加した。これらのひび割れの発生は衝突回数10回程度で概ね収束し、その後は既に発生したひび割れ幅が版の曲げ変形とともに大きくなった。衝突回数25回目には、荷重点直下付近のかぶりコンクリートが剥落し始め、35回目には完全に押抜きせん断破壊した。荷重点変位は、衝突回数10回目程度以降(図-6中のb), 増加の勾配が一旦緩やかとなり、

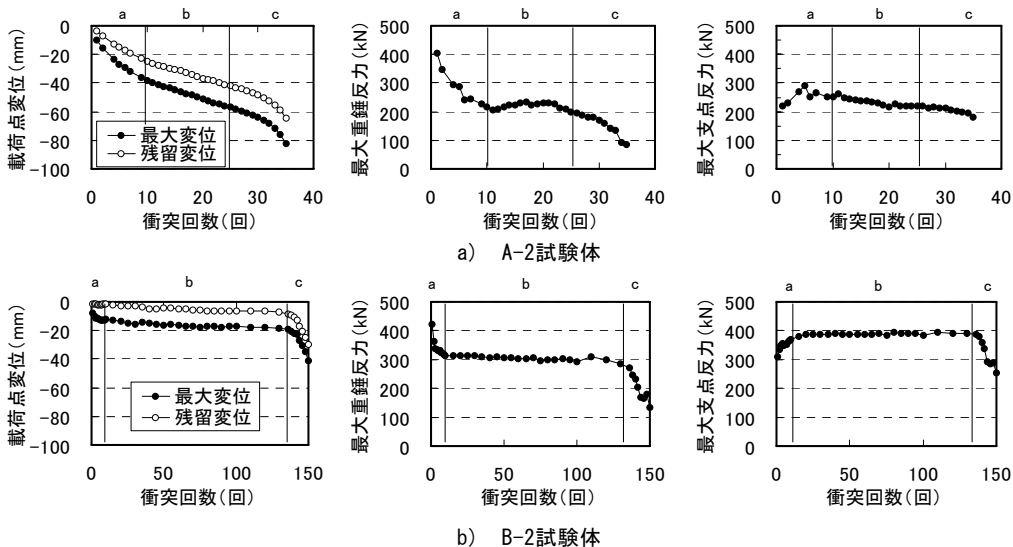


図-6 荷重点変位、最大重錘反力および最大支点反力と衝突回数との関係

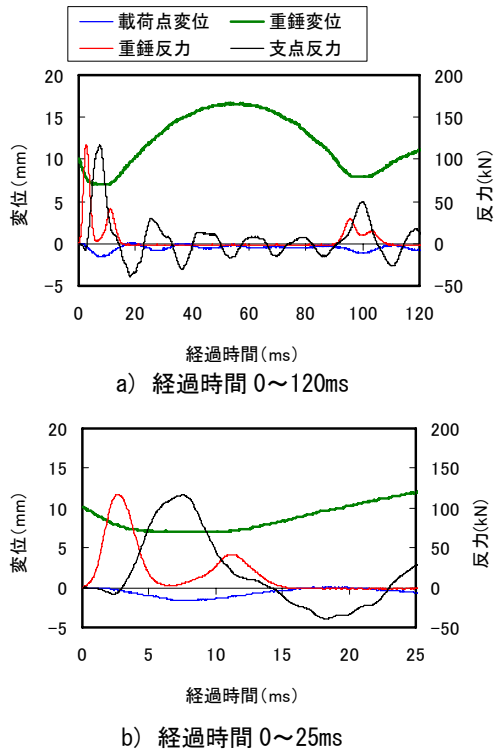


図-7 載荷点変位、重錘変位、重錘反力および支点反力の時刻歴応答 (A-1 試験体)

25回目程度以降 (同図中のc), 再び急になった。最大重錘反力は、衝突回数10回程度まで (同図中のa) の低下が顕著であり、その後は一旦横ばいとなり (同図中のb), 25回目程度以降 (同図中のc) 再び大きく低下した。最大支点反力は、衝突回数の少ない段階 (同図中のa) で一旦増加し、その後横ばいとなり (同図中のb), 25回目程度以降 (同図中のc) 若干低下する傾向が見られた。載荷点変位、最大重錘反力および最大支点反力ともに、衝突回数10回程度と25回程度で、計測値の発生傾向が変化している。ひび割れ発生状況の観察結果と比較すると、前者は新たなひび割れの発生が収まる時期と一致しており (同図中のaとbの境界), 新たなひび割れの発生に伴い試験体の剛性が徐々に低下したことで最大重錘反力と最大支点反力の発生傾向が変化したものと推測される。また、後者 (同図中のbとcの境界) は押抜きせん断破壊面の形成時期と一致していることから、これが影響要因の1つと考えられる。

B-2試験体は、A-2試験体と比較して全般的にひび割れの本数が多く、また、衝突回数130回程度から押抜きせん断破壊に移行していることがわかる。押抜きせん断破壊に移行した衝突回数は、A-2試験体より4倍程度多く、そのときの曲げ変形量は1/3程度であった。しかし、新たなひび割れ発生収束 (同図中のaとbの境界) および押抜きせん断破壊面の形成 (同図中のbとcの境界) とともに載荷点変位、最大重錘反力および最大支点反力が

表-3 重錘とRC版の運動過程 (A-1 試験体)

a	重錘衝突時 (1ms)		$v_1 > v_2 = 0$ $P > 0$ $R = 0$
b	RC版変形開始直後 (2ms)		$v_1 = v_2 > 0$ $P > 0$ $R < 0$
c	重錘反力最大時 (2.5ms)		$v_1 = v_2 > 0$ $P = P_{max}$ $R < 0$
d	RC版変形途中 (6ms)		$v_2 > v_1 > 0$ $P = 0$ $R > 0$
e	中央変位最大時 (7.5ms)		$v_1 = v_2 = 0$ $P > 0$ $R = R_{max}$
f	RC版復元途中 (11ms)		$v_1 = v_2 < 0$ $P > 0$ $R > 0$
g	RC版復元変位最大時 (19ms)		$v_1 < v_2 = 0$ $P = 0$ $R = R_{min}$
h	RC版自由振動後、再衝突 (aに戻る)		

$v_1$ : 重錘落下速度,  $v_2$ : RC版変形速度,  $P$ : 重錘反力,  $R$ : 支点反力

変化する傾向はA-2試験体と同様であった。

A-3試験体およびB-3試験体は、いずれも1回の載荷により押抜きせん断破壊に至ったが、A-3試験体の方が破壊の程度は顕著であった。

### 3.2 重錘の衝突を受けるRC版の変形過程

重錘衝突を受ける部材は、極めて短時間に衝撃荷重が作用し、応力波の発生や振動を伴う変形をするため、反力応答や変位応答は非常に複雑な挙動となり、静的荷重下における応答とは全く異なる傾向を示す。したがって、RC版の衝撃的な挙動を把握するためには、衝突体と被衝突体が時間の経過とともにどのように挙動しているかを把握することが重要である。そこで、まず、衝突速度の小さい重錘衝突を1回作用させたA-1試験体について、衝撃荷重作用時の各応答を時系列で整理した。

図-7に、載荷点変位、重錘変位、重錘反力および支点反力の時刻歴応答を示す。なお、同図は比較のため、横軸の尺度を変えたものを2つ並べて示している。ここで、衝突からの経過時間0msの時の重錘変位が10mmとなっているのは、試験体の上面に敷いたゴム板の厚さが10mmであるためである。また、表-3に、各段階における重錘とRC版の位置、速度および反力応答の関係を示す。表中の矢印 (↓など) は重錘や版の変位を、太い矢印は加速度 (反力) を表している。図-7より、重錘反力は、衝突後2.5ms程度で最大値に達しており、極めて短時間で衝撃荷重が作用していることが確認できる。しかし、RC版はこの時点でまだほとんど変形していない。また、重錘衝突直後に重錘反力が増加しているとき、支点には負の反力が発生していることがわかる (表-3のb, c)。これ

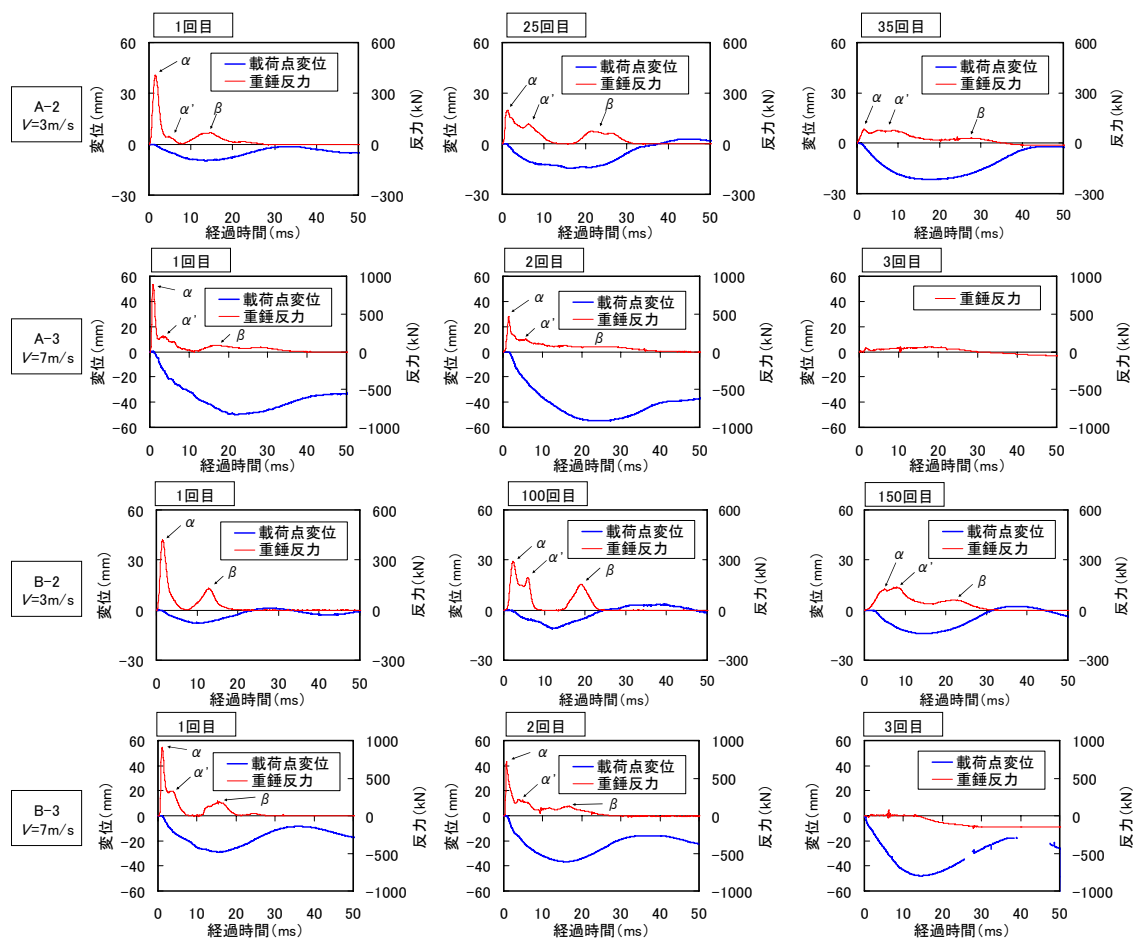


図-8 重錘反力および載荷点変位の時刻歴応答

は、重錘の衝突による瞬間的な版の曲げ変形によって版端部の支点近傍に上向きの慣性力が作用したためと考えられる。その後、重錘の衝突により、試験体は下向きに突き飛ばされ、重錘と試験体は一旦離れて運動する(表-3のd)。これは、図-7で、経過時間6~7ms程度のとき重錘反力が0になっていることから判断できる。その後、突き飛ばされた試験体は、版の復元力によって変形速度が減少し、重錘と試験体は再び接触する。これは、図-7で、経過時間が11ms程度にかけて再び重錘反力が生じていることから判断できる。その後重錘は、版の復元力により上方へ跳ね返される。

### 3.3 繰返し衝撃による時刻歴応答の変化

図-8に、A-1を除く各試験体の、代表的な衝突回数載荷時における載荷点変位および重錘反力の時刻歴応答を示す。また、図-9に、同一載荷時における載荷点変位および支点反力の時刻歴応答を示す。なお、A-3試験体の衝突回数3回目については、計測機の破損を避けるため変位の計測は行わなかった。

重錘反力の時刻歴応答について、A-2試験体の衝突回数1回目に着目すると、試験体が1回たわむ間に図-7で示した波形同様、反力のピークが2回生じていることが

わかる。これらのピークを図中に $\alpha$ 、 $\beta$ で示す。ここで、 $\alpha$ の後に反力がゼロ付近まで低下するまでに、図-6では確認されなかった反力のわずかな増加が生じていることがわかる。これを $\alpha'$ とする。A-2試験体の25回載荷時には $\alpha$ の値が小さくなり、 $\alpha'$ が明確になっている。また、35回載荷時には、 $\alpha$ はさらに小さく、 $\alpha'$ を含むピークの作用時間は長くなり、 $\beta$ とつながるような波形となっている。衝突速度の小さい図-7において $\alpha'$ が発生しなかったことを考慮すれば、 $\alpha'$ は重錘の衝突に伴う試験体の局所的な損傷により重錘の接触時間が長くなったことで発生したものと考えられる。損傷の大きいA-3試験体では、1回目の載荷から $\alpha'$ が明確に表れており、2回目の載荷で $\alpha'$ と $\beta$ の区別がつかないほどになっていることが確認できる。Bシリーズにおいても、Aシリーズとほぼ同様の傾向がみられた。

一方、支点反力の時刻歴応答について、図-7では、支点反力波形のピークの時間と試験体の変位波形のピークの時間がほぼ一致していたが、図-9では、A-2試験体の衝突回数1回目を見ると、それらは一致せず、支点反力の方が早くピークを迎えている。これより、最大支点反力は、必ずしも試験体の変形によってもたらされ

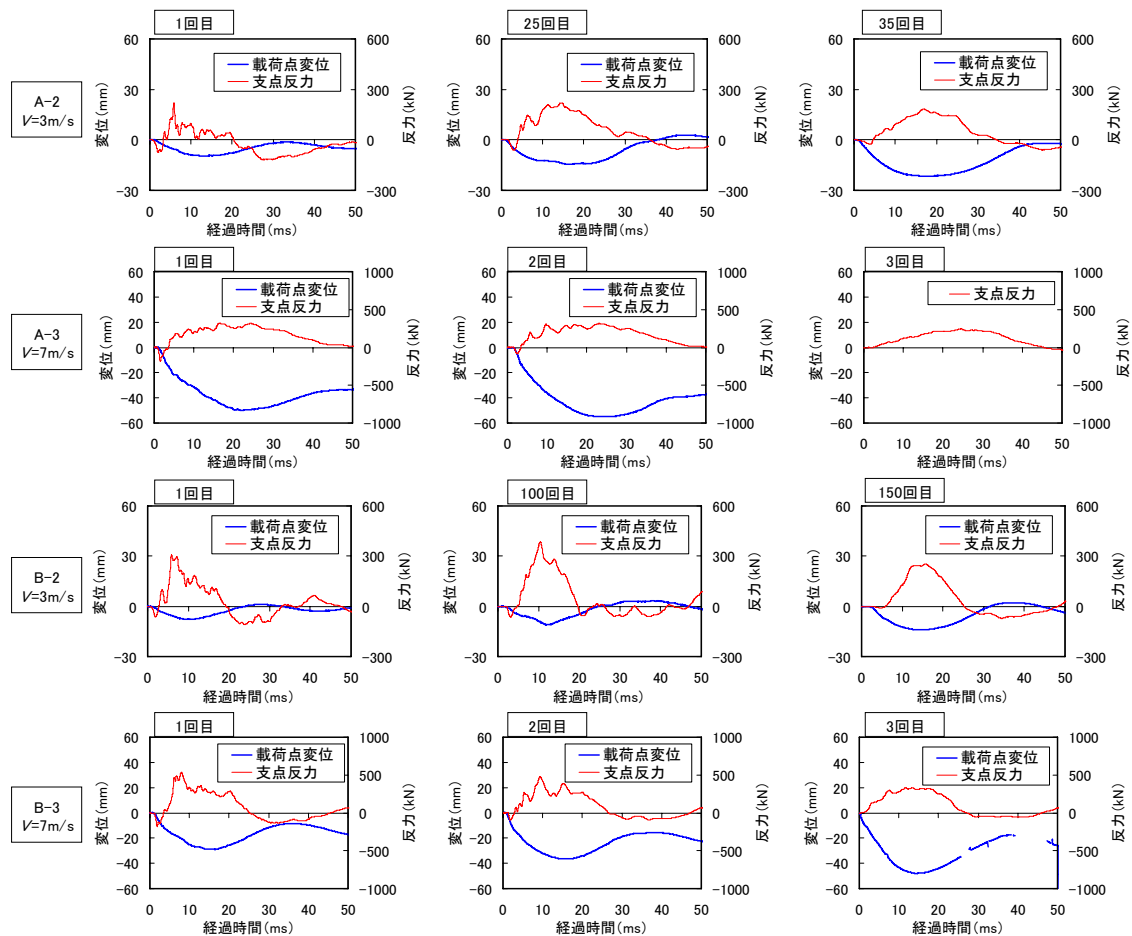


図-9 支点反力および载荷点変位の時刻歴応答

るものではないことがわかる。同試験体の衝突回数25回目および35回目を見ると、試験体の損傷が進むにつれて、支点反力のピークの時間と変位のピークの時間が近くなっていることがわかる。また、1回目の衝突から損傷が大きいA-3試験体では、1回目から支点反力のピークと試験体変位のピークの時間がほぼ一致していることがわかる。以上より、図-7のように衝突速度が十分に小さければ、静的荷重下における変形と同様、試験体の変形に対応して支点反力が生じるが、衝突速度が大きくなると、重錘の衝突直後に見られる支点反力波形のピーク値が試験体の変形により生じる支点反力波形のピーク値を上回り、支点反力の最大値となる。ただし、繰返し载荷により局所的な損傷が蓄積される、あるいは1回の载荷でもある程度以上の損傷状態に達する場合には、試験体の変形によって生じる支点反力のピーク値が衝突直後の支点反力のピーク値を上回り、支点反力の最大値となる。図-6において、最大支点反力が試験体の損傷の蓄積により一旦増加したのは、支点反力の最大値をもたらす要因が、ここで述べたように試験体の損傷程度によって変化したことが原因の1つと考えられる。

## 6. まとめ

二辺支持された鉄筋コンクリート版の繰返し衝撃载荷実験の結果、曲げ変形から押抜きせん断破壊に移行する鉄筋コンクリート版の破壊挙動を確認できた。また、繰返し衝撃荷重が、版の载荷点変位、重錘反力および支点反力に与える影響について、それらの最大値の推移や時刻歴応答波形を比較・考察することで、版の変形過程や損傷状態が反力応答に及ぼす影響を明らかにした。

## 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：静的载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) 白根勇二他：繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの耐荷性状，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