

論文 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

松林 卓^{*1}・岩波 光保^{*2}・山田 岳史^{*3}・竹鼻 直人^{*4}

要旨：既往の研究において提案した衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの最大支点反力と最大変位の算出方法について、鉄筋コンクリート版への適用性を検討するため、二辺支持鉄筋コンクリート版に対する重錘落下式衝撃載荷実験を行った。その結果、最大変位の計算値については押抜きせん断破壊が顕著とならない範囲で適用できることがわかった。また、最大支点反力の計算値は、鉄筋コンクリート版の損傷が小さい範囲では適用できる見込みがあり、損傷が大きい場合には計算値が実測値よりも大きくなることがわかった。

キーワード：耐衝撃設計, 鉄筋コンクリート版, 重錘落下実験, エネルギー一定則

1. はじめに

各種構造物の設計において仕様規定型設計法から性能照査型設計法への移行が進む中、衝撃作用を受ける構造物に対しても性能照査型設計法の確立に向けた取組みが行われている¹⁾。しかし、衝撃作用を受ける鉄筋コンクリート構造物の挙動は複雑であるため、各技術者や研究者が耐衝撃性評価方法や設計方法について統一した見解を共有するには至っておらず、基本的な構造部材である RC はりでさえ、未だ耐衝撃設計法が確立されているとはいえないのが現状である。

一方、筆者らは、力学的エネルギー保存則とエネルギー一定則を用いることにより、衝撃荷重を受ける RC はりの最大支点反力と最大変位を算定する方法を提案している²⁾。さらに既往の研究において、重錘質量や試験体諸元をパラメータとした RC はりの重錘落下式衝撃載荷実験を行い、最大変位の算定結果の妥当性を確認するとともに、最大支点反力の算定値の精度を向上させるための補正式を提案している³⁾。本研究では、二辺支持した鉄筋コンクリート版（以下、RC 版と呼ぶ）に対する重錘落下式衝撃載荷実験を行い、提案している最大支点反力と最大変位の算定方法の適用性について検討した。

2. 最大支点反力および最大変位算出方法の考え方

文献 2 および文献 3 で提案している最大支点反力および最大変位の算出方法を以下に示す。

衝突直後の重錘速度と RC はりの変形速度が等しいと考えれば、両者の運動エネルギーの総和 U_1 ははりの有効質量を考慮して式(1)となる。ここで有効質量とは、はり全体を一つの質点とみなして同じ速度で変形すると仮定した場合に用いる質量であり、任意の距離におけるはりのたわみの式を用いた運動エネルギーから求まるものである⁴⁾。

$$U_1 = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2} \frac{17}{35}mv^2 \quad (1)$$

M : 重錘質量

m : RC はりの質量

v : 衝突直後の重錘および RC はりの変形速度

また、RC はりの変形が最大となった時のひずみエネルギー U_2 は式(2)となる。

$$U_2 = \frac{1}{2}k\delta^2 = \frac{1}{2} \frac{48EI}{l^3}\delta^2 = \frac{24EI}{l^3}\delta^2 \quad (2)$$

E : コンクリートの弾性係数

I : ひび割れ断面の断面二次モーメント（維ひずみが断面の中立軸からの距離に比例すると仮定し、コンクリートの引張側の応力を無視した応力状態から求めたもの）

δ : 最大変位

ここで、式(2)中の係数 k は、衝撃載荷時のたわみ変形が静的載荷時のたわみ変形と同一形状であると仮定し、式(3)に示す荷重 P_s と変位 δ の関係から定めている。なお、ここでは部材のせん断変形は考慮していない。

$$P_s = k\delta = \frac{48EI}{l^3}\delta \quad (3)$$

力学的エネルギー保存則より、 U_1 と U_2 は等しいと仮定し、衝突前後の速度の関係として式(4)を用い、式(1)式(2)を連立させて最大中央変位 δ について解くと式(5)となる。

$$v = \frac{M}{M + \frac{17}{35}m}V \quad (4)$$

V : 衝突直前の重錘速度

*1 (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)

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

*3 (株) 神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 構造強度研究室 博 (工) (正会員)

*4 (株) 神戸製鋼所 鉄構・砂防部 技術室 (正会員)

$$\delta = V \sqrt{\frac{Ml^3}{48EI} \frac{M}{M + 17/35m}} \quad (5)$$

最大支点反力は式(6)より求める。これは、式(5)で得られた最大中央変位 δ を発生させるために必要な静的最大荷重 P_s (式(3)より求まる) を、最大支点反力に置き換えて考えることを基本とし、はりの質量と重錘質量の比、支間長、およびはりの断面二次モーメントによる影響を考慮して補正したものである³⁾。

$$P = P_s \left(0.31 \frac{m}{M} + 0.84 \right) \left(1.14 \times 10^{-7} \frac{l^4}{I} + 0.91 \right) \quad (6)$$

式(5)による最大中央変位 δ は、はりの変形を弾性変形と仮定しているため、RC はりが塑性域に入った場合の最大中央変位をエネルギー一定則により求める。エネルギー一定則の概念を図-1 に示す。重錘の衝突によってRC はりの支間中央が塑性域に入った場合、 $\triangle OAB$ と $\square OCDE$ の面積が等しくなるように弾塑性応答すると考え、最大中央変位を補正する。すなわち、式(5)により求めた最大中央変位が図-1 中の δ_E であるのに対して、補正した最大中央変位は δ_P となる。上記の考え方を式で表すと、最大中央変位 δ_{max} は式(7)、式(8)のようになる。

$P_s \leq P_y$ の場合

$$\delta_{max} = \delta \quad (\text{式(5)による}) \quad (7)$$

$P_s > P_y$ の場合

$$\delta_{max} = \delta_P = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta \cdot P_s}{P_y} + \delta_y \right) \quad (8)$$

3. 実験概要

3.1 試験体パラメータおよび試験体概要

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。荷重方法は、重錘の衝突速度を 1m/s から 6m/s まで順に増加させる漸増衝撃荷重、および所定の衝突速度 (3m/s, 7m/s) で衝撃荷重を 1 回作用させる単一衝撃荷重の 2 通りとした。試験体の形状および配筋を図-2 に示す。試験体は、寸法 2,300mm × 1,500mm × 160mm の RC 版であ

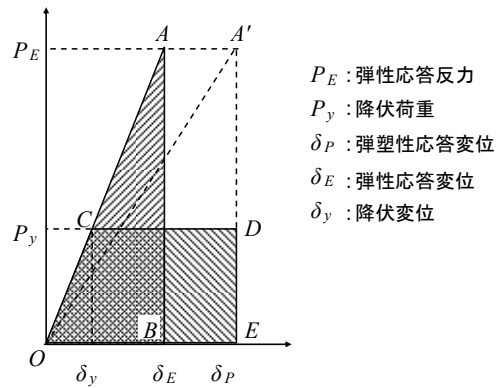
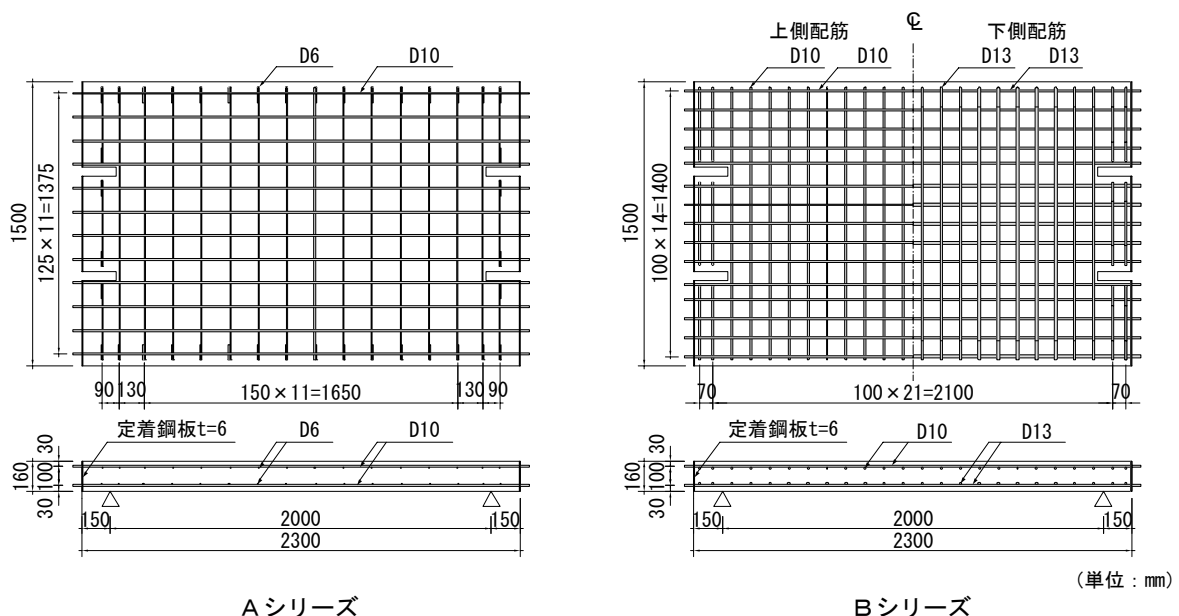


図-1 エネルギー一定則の概念

表-1 試験体一覧

シリーズ	試験体名	荷重条件	衝突速度 V (m/s)
A	A-1	漸増衝撃荷重	1,2,3,4,5,6
	A-2	単一衝撃荷重	3
	A-3	単一衝撃荷重	7
B	B-1	漸増衝撃荷重	1,2,3,4,5,6
	B-2	単一衝撃荷重	3
	B-3	単一衝撃荷重	7



(単位: mm)

図-2 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 ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	試験体名	呼び名	降伏点 (N/mm ²)
21	40.8	30.2	A-1, B-1	D6	365
197	44.3	30.4	A-2, A-3	D10	384
			B-2, B-3	D13	380

表-3 静的な荷重に対する降伏荷重の計算値

試験体名	降伏荷重 (kN)
A-1	79.6
A-2, A-3	79.6
B-1	168.1
B-2, B-3	168.2

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を表-2に、各試験体の静的な荷重に対する降伏荷重の計算値を表-3に示す。本降伏荷重は、版による有効幅は考慮しないで計算したもの、すなわち線載荷した場合と同じ計算値である。

3.2 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400kgで一定とした。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。重錘部の形状および寸法を写真-1内に示す。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。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度のゴムシート(寸法:300mm×300mm×10mm)を敷いて載荷を行った。

3.3 計測方法

主な計測項目は、重錘反力、支点反力、支間中央部におけるRC版の変位(載荷点直下および版端部の2箇所)である。図-3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

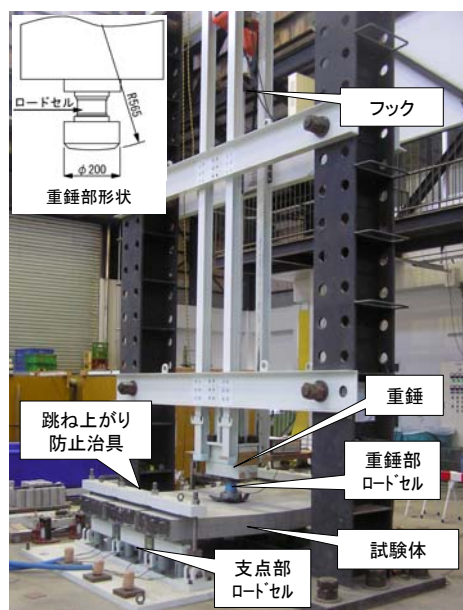


写真-1 試験装置

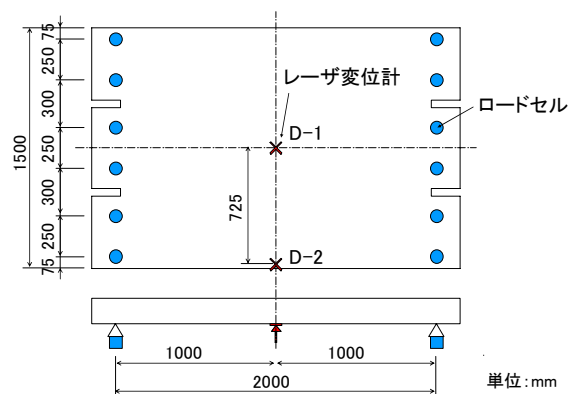


図-3 計測位置

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。

4. 実験結果

4.1 破壊状況

漸増衝撃載荷による支間中央部の最大変位および残留変位の累積値と衝突速度の関係を図-4に示す。ここで、変位計測位置の異なる2箇所(載荷点直下D-1および版端部D-2)についてそれぞれ示している。なお、試験体A-1については衝突速度 $V=1\text{m/s}$ 時のD-2(版端部の変位)を計測しなかったため、衝突速度 $V=1\text{m/s}$ 時の残留変位は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おり、静的荷重下と同様、鉄筋径が大きくなると変形が小さくなることが確認できる。一方、載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 $V=3\text{m/s}$ まではほとんど差がないが、 $V=4\text{m/s}$ 以降は載荷点直下の変位(D-1)の方が、版端部の変位(D-2)よりも大きくなっていることがわかる。

これより、衝突速度が大きくなるにつれて載荷点直下の変位が周囲よりも大きくなる、すなわち版断面が一樣に曲げ変形しなくなると考えられる。また、試験体破壊状況の観察より、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いる。これより、載荷点直下と版端部の変位の差には、押抜きせん断破壊の進行によるものも含まれていると考えられる。

単一載荷による試験体下面の破壊状況を図-5 に示す。衝突速度 3m/s の場合は、A-2、B-2 ともに、曲げひび割れと、載荷点を中心とした放射状のひび割れが数本発生しているのに対し、衝突速度 7m/s の場合は、A-3、B-3 ともに、押抜きせん断破壊面が顕著に表れていることが確認できる。これより、漸増載荷のように損傷が蓄積されていなくても、衝突速度が大きくなると1回の載荷で押抜きせん断破壊を生じることがわかる。

4.2 時刻歴応答

図-6 に、衝突速度 $V=1, 3, 7\text{m/s}$ の単一載荷時における、載荷点直下および版端部の変位（図-3 における D-1 および D-2）の時刻歴応答を示す。なお、試験体 A-1 の $V=1\text{m/s}$ 時は D-2 の計測を行っていないため D-1 のみの表示となっている。これによれば、試験体 A、B シリーズともに、版端部の変位 D-2 は、載荷点直下の変位 D-1 に比べて最大値が小さくなるだけでなく、変位が遅れて発生する傾向があり、その傾向は衝突速度が大きくなるほど顕著となることがわかる。これより、衝突速度が大きくなるにつれて載荷点直下の変形が先行する傾向が強くなることがわかる。

図-7 に、同じく衝突速度 $V=1, 3, 7\text{m/s}$ 時における、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、支点到設置した12個のロードセルで計測し

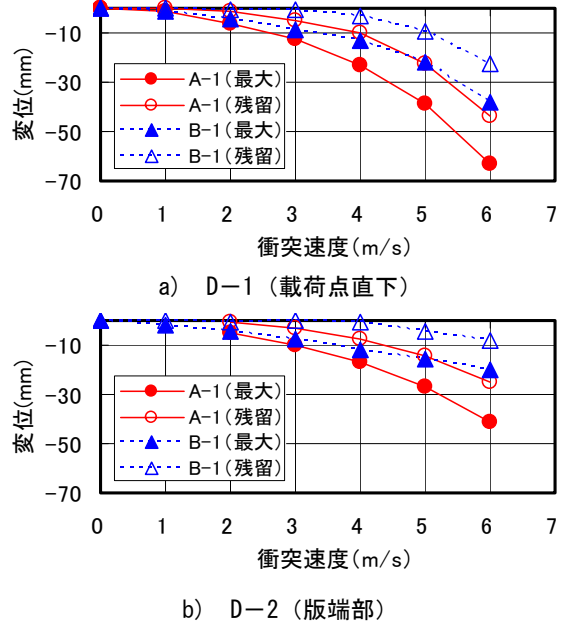


図-4 漸増衝撃載荷時の変位と衝突速度の関係

※斜線は剥落部を示す。

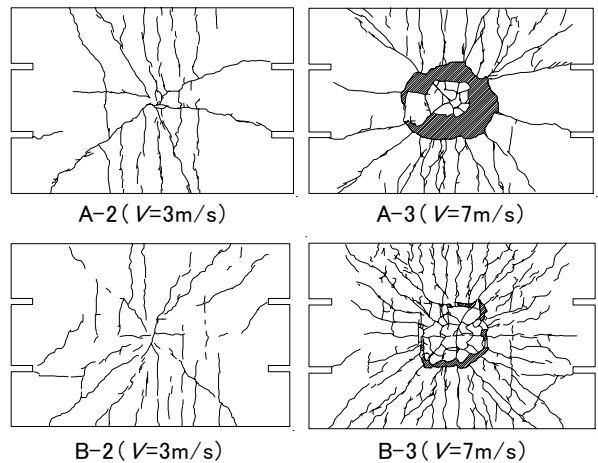


図-5 試験体下面の破壊状況

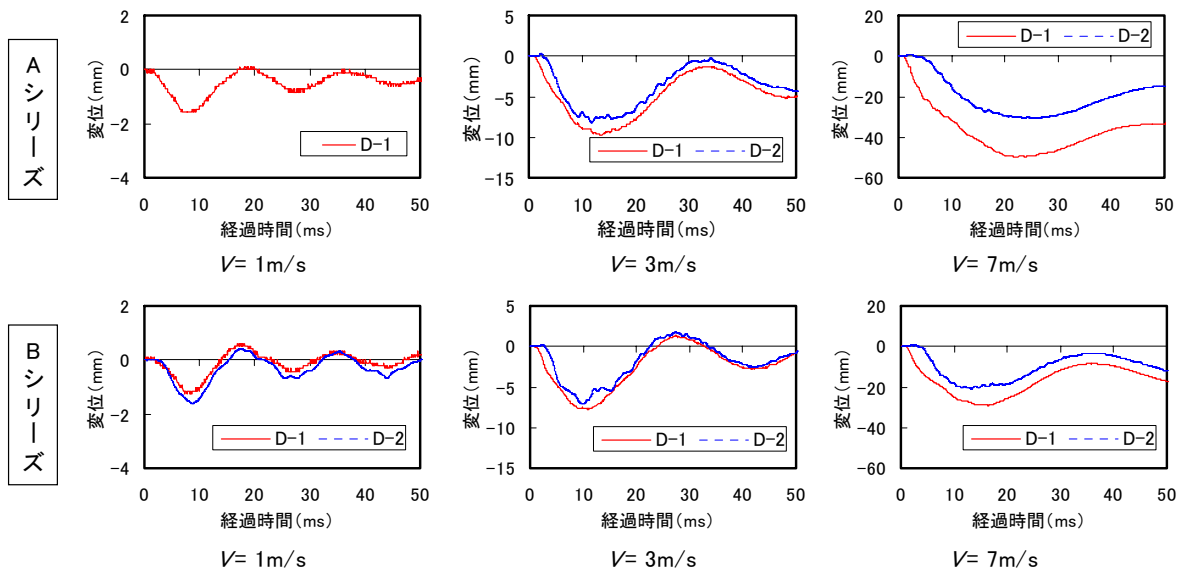


図-6 載荷点直下および版端部における変位の時刻歴応答

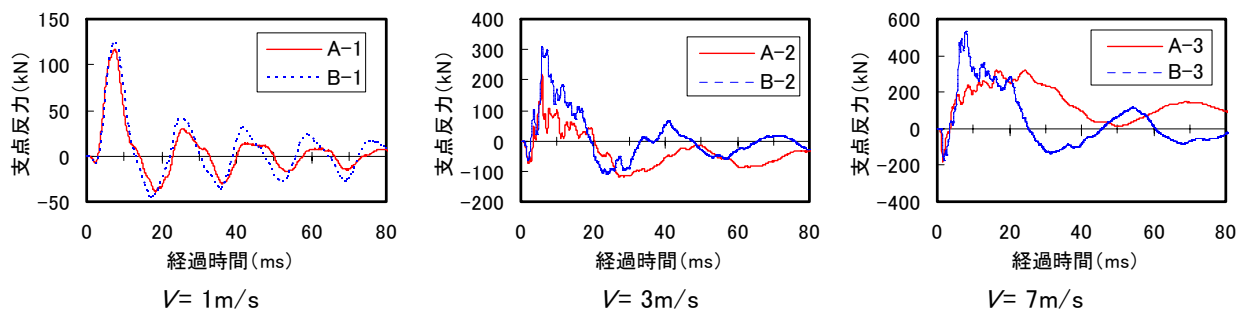


図-7 支点反力の時刻歴応答

た値の合計を示している。支点反力の時刻歴応答を見ると、A-3を除く全ての試験体において、7~8ms程度にかけて反力が急激に増加していることがわかる。発生時刻が変わらないことから、衝突直後に見られる支点反力の急激な増加は試験体の変形状態とは直接関係していないと考えられる。一方、図-8に、A-2およびA-3について、載荷点変位と支点反力の時刻歴応答を示す。これによれば、衝突直後以外は支点反力の増減と試験体の変形は対応しており、両者は関係していることがわかる。以上より、支点反力には、重錘の衝突に伴い瞬間的に発生する反力と、試験体の変形に伴い発生する反力の2種類が存在すると考えられる。既往の研究より、同じ衝突速度で繰返し衝撃荷重を与えた場合、試験体の損傷の進展に伴って支点反力の急激な増加が減少することが確認されており⁵⁾、重錘の衝突に伴い瞬間的に発生する反力は、衝突点の損傷状態と関係していると考えられる。また、A-3においても衝突直後の支点反力の急激な増加が顕著には見られなかったことから、健全なRC版の場合でも、速度が大きい場合のように衝突点の損傷が顕著となる衝撃を受ける場合には、瞬間的に発生する支点反力は小さくなると推測される。

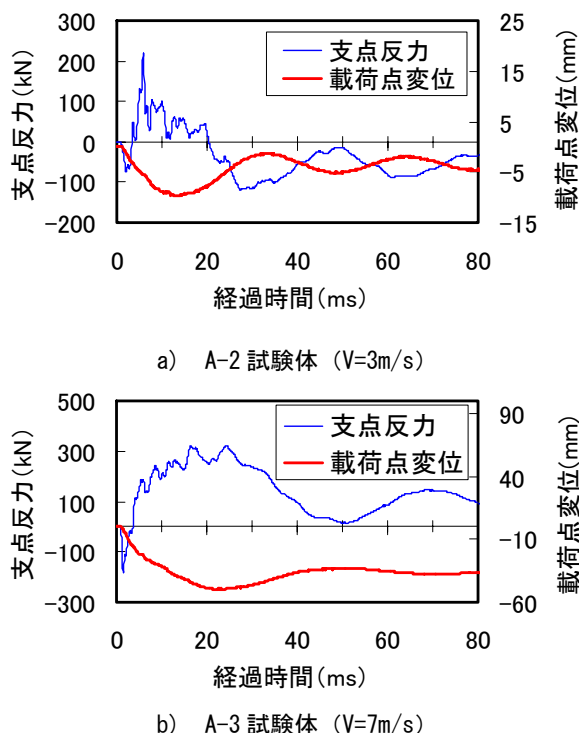


図-8 載荷点変位および支点反力の時刻歴応答

5. 計算値との比較および考察

表-4に各試験体における最大支点反力および最大支間中央変位の実験値、図-9に最大支間中央変位と衝突速度の関係、図-10に最大支点反力と衝突速度の関係をそれぞれ示す。なお、図-9および図-10は、実験値のうち、漸増載荷の結果は白抜きマークで示し、単一載荷の結果は塗りつぶしのマークで示しており、2で示した計算方法による計算値を実線で示している。また、エネルギー一定則で変位を補正する前の計算値を点線で示している。ここで計算に用いた試験体質量は、支点の外側を無視した質量(1,152kg)とした。また、図-9において、同一載荷における載荷点直下の変位(D-1)と版端部の変位(D-2)は縦方向の実線で結んでいる。

図-9によれば、衝突速度 $V=4\text{m/s}$ 以下の場合には、載荷点直下の変位と版端部の変位の差が小さく、実験値と

表-4 実験値一覧

試験体	衝突速度 (m/s)	最大支点反力 P_{exp} (kN)	最大支間中央変位 δ_{exp} (mm)	
			載荷点直下 D-1	版端部 D-2
A-1	1	116.7	1.56	計測せず
	2	161.1	5.94	4.78
	3	199.6	11.39	9.56
	4	218.9	17.78	14.09
	5	286.6	29.10	19.78
	6	329.3	40.33	26.37
A-2	3	219.7	9.78	8.17
A-3	7	320.4	49.92	30.64
B-1	1	125.5	1.25	1.60
	2	202.3	4.27	4.19
	3	289.1	8.24	7.07
	4	415.9	12.00	11.36
	5	455.4	18.74	14.97
	6	414.7	28.86	15.78
B-2	3	310.9	7.80	7.07
B-3	7	534.1	29.07	20.73

計算値もほぼ一致した。一方、衝突速度 $V=4\text{m/s}$ 以上の場合、4.1 で述べたとおり、載荷点直下の変位と版端部の変位の差が大きくなっており、これには押抜きせん断破壊面の形成が影響していると考えられる。この場合、載荷点直下の変位は計算値よりも大きくなり、版端部の変位は計算値よりも小さくなる結果となった。特に衝突速度 $V=5\text{m/s}$ および 6m/s においては、載荷点直下の変位が計算値を大きく上回る傾向が見られたが、これは、既に押抜きせん断破壊面が形成され始めている試験体に対して漸増载荷を行ったため、載荷点直下の変位が大きくなりやすくなったものと考えられる。以上の結果より、2 で示した最大中央変位の算定方法は、押抜きせん断破壊が顕著とならない範囲においては二辺支持鉄筋コンクリート版についても適用できると考えられる。ただし、今回の実験条件では考慮しなかった版の有効幅には適用範囲が存在すると思われる、防波堤ケーソンの側壁のような幅の広い版構造に対しては検討の余地がある。押抜きせん断破壊が顕著となる場合には、版の有効幅の影響は小さいと思われるが、別途押抜きせん断破壊に対する抵抗性の評価が必要と考えられる。

図-10 はマークで示した実験値および実線で示した計算値に加え、式(3)により求まる補正前の計算値も点線で併記した。これによれば、A シリーズについては衝突速度 $V=3\text{m/s}$ まで、B シリーズについては $V=4\text{m/s}$ までは計算値と実測値がほぼ一致したが、衝突速度が大きくなると実験値が補正前の計算値程度まで小さくなる傾向が見られた。これは 4.2 で述べたように、支点反力は、衝突に伴い瞬間的に発生する反力と、試験体の変形に伴い発生する反力の2種類が存在すると考えられ、試験体の損傷により衝突直後の急激な反力増加の程度が小さくなると、支点反力の最大値は小さくなる場合がある。これが計算値よりも実験値の方が下回った原因の一つと考えられる。なお、衝突速度が大きい場合の実験値と補正前の計算値との関連性は明らかでなく、今後の検討課題である。以上より、2 で示した最大支点反力の算定方法は、鉄筋コンクリート版の損傷が軽微である範囲内では適用できる見込みがあると考えられる。ただし、損傷が大きくなる場合には、発生する最大支点反力よりも算定値の方が大きくなると考えられる。

6. まとめ

本研究で実施した重錘落下式衝撃载荷実験において設定した、試験体形状、重錘質量および衝突速度の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 既往の研究で提案した最大変位の算定方法は、押抜きせん断破壊が顕著とならない範囲においては二辺支持鉄筋コンクリート版についても適用できる

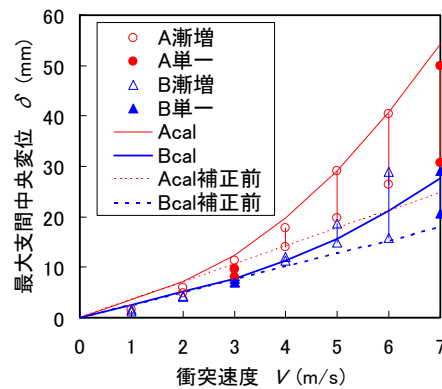


図-9 最大支間中央変位と衝突速度の関係

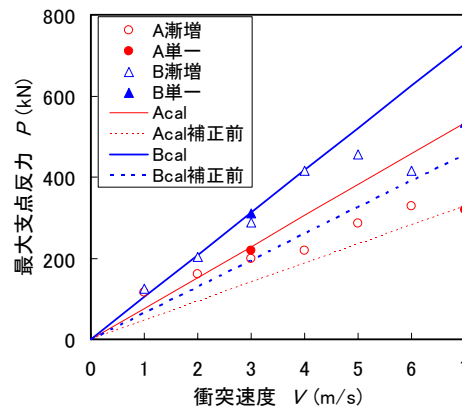


図-10 最大支点反力と衝突速度の関係

と考えられる。

- 2) 既往の研究で提案した最大支点反力の算定方法は、鉄筋コンクリート版の損傷が軽微である時には適用できると考えられる。ただし、損傷が大きくなる場合には、発生する最大支点反力よりも算定値の方が大きくなると考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 松林卓，岩波光保，横田弘，山田岳史：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
- 4) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，2004
- 5) 松林卓，岩波光保，横田弘，山田岳史，竹鼻直人：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，第9回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.19-24，2008.12