

論文 RC はりの耐衝撃性に影響を及ぼす要因の実験的検討

松林 卓^{*1}・岩波 光保^{*2}・横田 弘^{*3}・山田 岳史^{*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、計算値の妥当性および計算値に影響を与える要因を検討するため、断面寸法や引張鉄筋比、支間長等をパラメータとした鉄筋コンクリートはりの重錘落下式衝撃載荷実験を行った。その結果、最大変位の計算値は概ね実験値に対応するのにに対し、最大支点反力の計算値は、はりと重錘の質量比やはりの支間長等によって影響を受け、必ずしも実現象を適切に表せないことが判明した。そこで、実験結果より各要因が最大支点反力へ及ぼす影響を定量的に示し、これらの影響を考慮した最大支点反力の補正式を提案した。

キーワード：耐衝撃設計、鉄筋コンクリートはり、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り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求める方法を提案している^{2) 3)}。しかし、本方法は、ある条件では実現象と精度良く対応するものの、支間長などの条件が異なった場合には精度が低下することが実験的に確認されており、その原因の解明および計算精度の向上が課題となっている。そこで、断面寸法や引張鉄筋比、支間長等をパラメータとした重錘落下式衝撃載荷実験を行い、RC はりの耐衝撃性に影響を及ぼす要因について検討を行った。

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 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 : 最大中央変位

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 構造強度研究室 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 構造強度研究室 主任研究官 博 (工) (正会員)

*3 (独) 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター センター長 博 (工) (正会員)

*4 (株) 神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 博 (工) (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(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 RC 断面の静的最大荷重 P_s を式(3)により求め、これを最大支点反力に置き換えて考える。

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、△OAB と □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 A 点であるのに対して、補正した最大中央変位は A' 点となる。

3. 実験概要

3.1 試験体パラメータおよび試験体概要

試験体は、断面寸法、引張鉄筋比および支間長の異なる 9 種類とした。表-1 に試験体一覧を示す。No.1~No.4 試験体は重錘質量もパラメータとするため 2 体ずつ製作し、計 13 体の衝撃载荷実験を行った。代表的な試験体の形状を図-2 に、各試験体の断面形状を図-3 に示す。なお、試験体はすべて静的荷重下において曲げ破壊するように各鉄筋を設計している。衝突速度は、すべての試験体において $V=2.0\text{m/s}$ を実施後、損傷の軽微な試験体については速度を漸増した载荷を行い、これらの試験結果も検討に用いた。

表-2 にコンクリートの物性値を、表-3 に鉄筋の物性値を示す。コンクリートの圧縮強度は、载荷試験前後に圧縮強度試験を供試体 3 本ずつ行い、6 本の平均の強度とした。

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

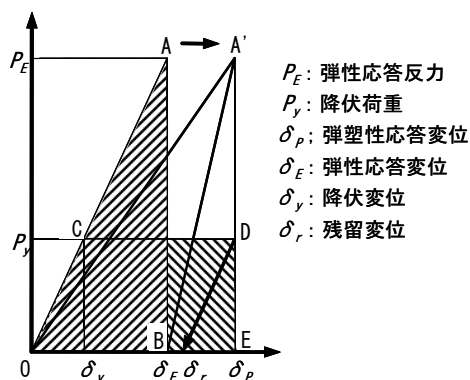


図-1 エネルギー一定則の概念

表-1 試験体一覧

試験体 No.	断面寸法 幅×高さ (mm)	圧縮鉄筋	引張鉄筋	スターラップ 径・ピッチ (mm)	支間長 (m)	重錘質量 (kg)	衝突速度 (m/s)	備考
No.1 -1 -2	250×250	D10 2本	D10 2本	D6 ctc150	3.0	400 200	2.0 2.0, 5.7	基準
No.2 -1 -2	150×200	D13 2本	D13 2本	D6 ctc150	3.0	400 200	2.0 2.0, 5.7	剛性同一 断面寸法小
No.3 -1 -2	250×250	D13 2本	D19 2本	D6 ctc150	3.0	400 200	2.0, 5.5 2.0, 2.8, 5.7	断面寸法同一 鉄筋比大
No.4 -1 -2	350×350	D13 2本	D19 4本	D6 ctc250	3.0	400 200	2.0, 4.0, 5.0 2.0, 2.8, 5.7	断面寸法大 鉄筋比大
No.5	250×250	D13 2本	D19 2本	D6 ctc150	5.0	400	2.0, 4.0	No.3と同一断面 支間長5m
No.6	350×350	D13 2本	D19 4本	D6 ctc250	5.0	400	2.0, 4.0, 5.0	No.4と同一断面 支間長5m
No.7	250×250	D13 2本	D19 2本	D6 ctc150	2.0	400	2.0, 4.0	No.3と同一断面 支間長2m
No.8	150×200	D13 2本	D13 2本	D6 ctc150	2.0	400	2.0, 4.0	No.2と同一断面 支間長2m
No.9	350×350	D13 2本	D19 4本	D6 ctc250	2.0	400	2.0, 4.0, 5.0	No.4と同一断面 支間長2m

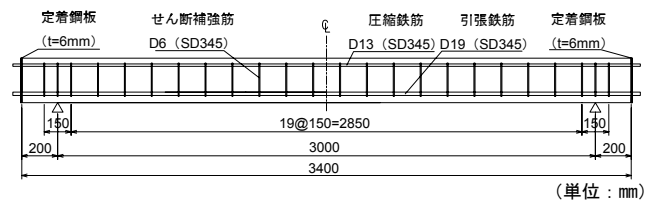


図-2 試験体形状 (No.3 試験体)

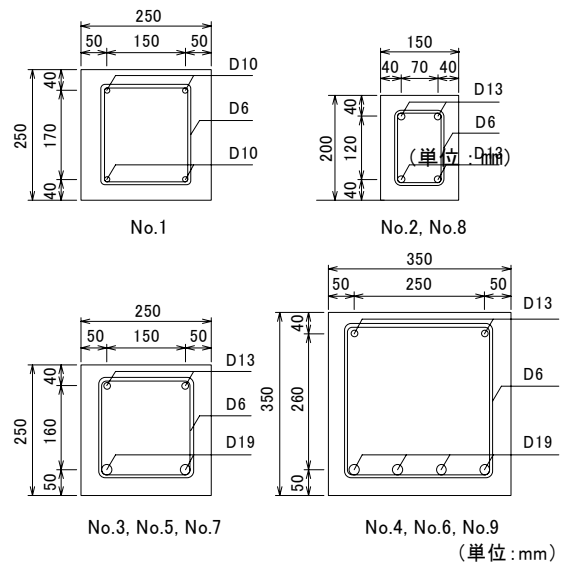


図-3 試験体の断面形状

表-2 コンクリートの物性値

試験体 No.	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
No.1-1 No.3-1,3-2	28.6	24.4
No.2-1,2-2 No.5~9	30.8	24.2
No.1-2 No.4-1,4-2	27.3	23.2

表-3 鉄筋の物性値

呼び名	降伏点 (N/mm ²)	使用部位
D6	349	スターラップ
D10	387	圧縮鉄筋および引張鉄筋
D13	378	圧縮鉄筋および引張鉄筋
D19	396	引張鉄筋

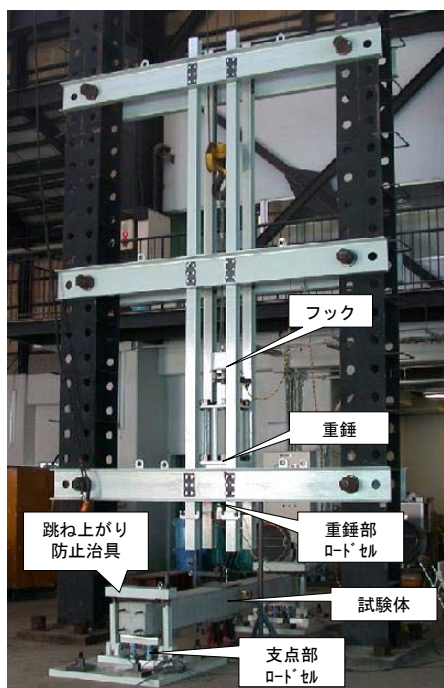


写真-1 試験装置

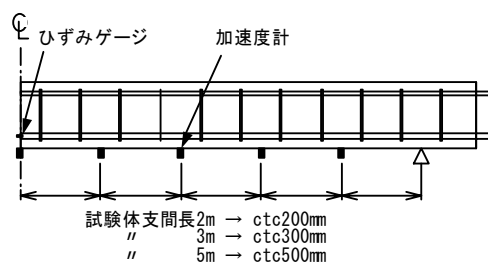
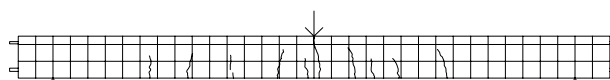


図-4 計測位置



a) No. 3-1 衝突速度 $V=2.0\text{m/s}$



a) No. 3-1 衝突速度 $V=5.5\text{m/s}$

図-5 ひび割れ性状

錘を自由落下させるものである。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、支点部に跳ね上がり防止治具を備え、試験体上面をナットで締め付ける構造となっている。この締め付ける力は片側 20kN で一定とした。また、重錘落下点には、重錘反力応答のばらつきを避けるため、硬度 65 度、厚さ 10mm のゴムシートを敷いて載荷を行った。

3.3 計測方法

計測項目は、衝突速度を求めるための重錘変位、重錘反力、支点反力、はり中央変位、はり中央引張鉄筋ひずみ、はり下面における加速度である。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、支点反力の計測には支点部に組み込まれた容量 500kN のひずみゲージ式ロードセルを片側 2 点ずつ使用した。重錘変位およびはり中央変位の計測には非接触型レーザ式変位計（サンプリング周期 20～1000 μs ）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 50 μs とし、計測データのフィルタ処理は施していない。図-4 にひずみゲージおよび加速度計の設置位置を示す。

4. 実験結果

4.1 実験結果一覧

代表的な試験体のひび割れ性状を図-5 に示す。ひび割れ性状は、衝突速度が小さい場合には曲げひび割れが発生しただけであったが、速度が大きい場合には曲げひ

表-4 実験結果一覧

試験体 No.	重錘質量 (kg)	衝突速度 (m/s)	最大支点反力 (kN)		最大中央変位 (mm)	
			計算値 $P_{s,cal}$	実験値 $P_{s,exp}$	計算値 δ_{cal}	実験値 δ_{exp}
No.1 -1	400	2.0	39.2	34.9	36.6	31.2
No.1 -2	200	2.0	23.2	39.1	17.4	12.3
		5.7	66.2	145.2	99.4	80.8
No.2 -1	400	2.0	39.0	49.9	41.1	32.7
No.2 -2	200	2.0	25.1	28.0	21.7	16.3
		5.7	71.5	112.0	119.5	107.0
No.3 -1	400	2.0	66.0	76.0	15.9	13.2
		5.5	181.6	203.6	77.9	72.4
No.3 -2	200	2.0	40.1	70.9	9.5	7.0
		2.8	56.2	104.5	13.3	10.8
		5.7	114.4	178.8	34.8	30.6
No.4 -1	400	2.0	118.9	196.8	6.5	4.6
		4.0	237.9	391.3	13.9	11.6
		5.0	297.3	424.6	19.1	17.4
No.4 -2	200	2.0	68.3	145.3	3.7	2.5
		2.8	95.6	208.7	5.2	4.3
		5.7	194.6	378.5	10.8	10.3
No.5	400	2.0	27.5	64.0	30.5	27.2
		4.0	55.0	176.3	68.9	80.4
No.6	400	2.0	48.7	107.0	11.8	9.3
		4.0	97.4	307.7	23.6	20.4
		5.0	121.7	362.9	30.1	25.9
No.7	400	2.0	128.6	116.9	10.0	7.5
		4.0	257.3	210.6	31.3	24.1
No.8	400	2.0	74.3	54.6	27.3	19.3
		4.0	148.5	113.2	98.5	71.0
No.9	400	2.0	245.3	294.2	3.8	2.8
		4.0	490.6	604.4	9.4	7.9
		5.0	613.2	619.7	13.6	14.2

び割れとともに圧縮側コンクリートの剥離を伴う傾向が見られた。表-4 に各試験体の実験結果のうち、最大支点反力および最大中央変位を示す。同表には 2 で述べた方法による計算値を併せて示した。図-6 および図-7 に最大中央変位および最大支点反力についてそれぞれ衝突速度との関係の一例を計算値とともに示す。なお、

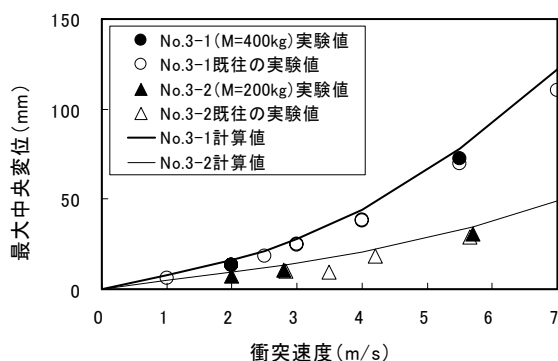


図-6 最大中央変位と衝突速度の関係 (No. 3 試験体)

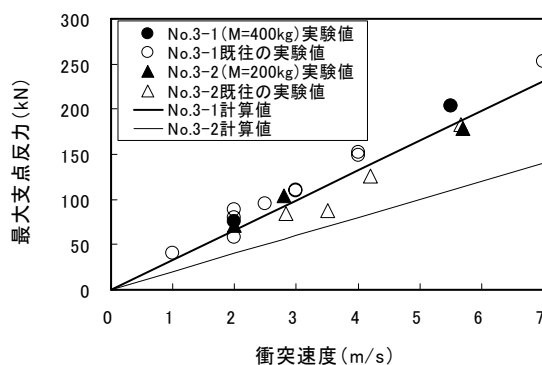


図-7 最大支点反力と衝突速度の関係 (No. 3 試験体)

同図には、既往の実験で得たデータ^{2) 3)}も参考までにプロットした。また、図-8 に各試験体における最大支点反力および最大中央変位の計算値に対する実験値の比 $P_{s,exp}/P_{s,cal}$ 、 $\delta_{exp}/\delta_{cal}$ を示す。これによると、最大中央変位については、実験値が計算値をやや下回る傾向が見られるものの、概ね計算値が実験値と対応しているのに対し、最大支点反力については、特に断面の大きい試験体や支間長の長い試験体 (Nos.4,5,6) などにおいて、計算値に対して実験値が大きい傾向が強く、最も大きいもので $P_{s,exp}/P_{s,cal}=3.21$ となった。

4.2 実験結果の考察

図-9 に重錘衝突後 50ms までの支間中央変位の時刻歴応答の一例を、図-10 に同試験体の重錘反力および支点反力の時刻歴応答を示す。この場合、中央変位が最大に達する時間が約 35ms であるのに対して支点反力が最大に達する時間は約 8ms であり、支点反力が最大値に達する時点で、はりの変位は最大値に達していないことがわかる。また、衝撃荷重を受けてから最大変位に到達するまでの同試験体の変形過程を図-11 に示す。なお、同図は、見易さのため、縦軸の尺度を変えて2つ並べて示している。ここで、変位は、はり下面に取り付けた加速度計で得られた波形を2回積分することで算出している。これによれば、例えば図-11 b)において経過時間 2ms の変形状態を見ると、たわみ変形の範囲は、支間中央から 900mm 程度までであることがわかる。すなわち、

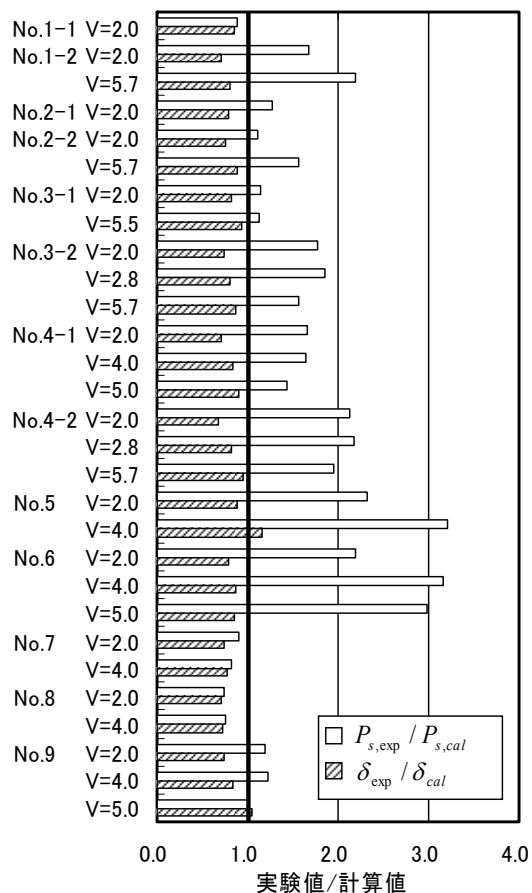


図-8 実験値と計算値の比較

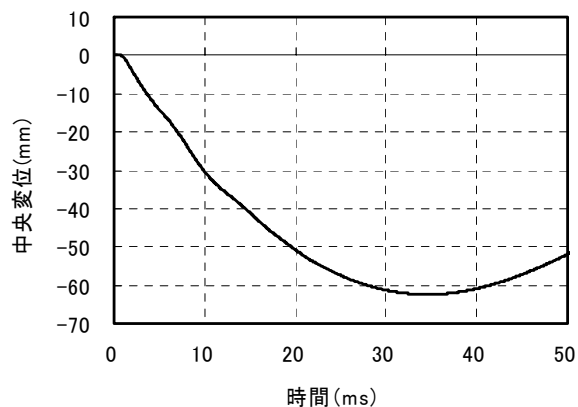


図-9 支間中央変位の時刻歴応答の一例
(No. 3-1, $V=5.5$ m/s)

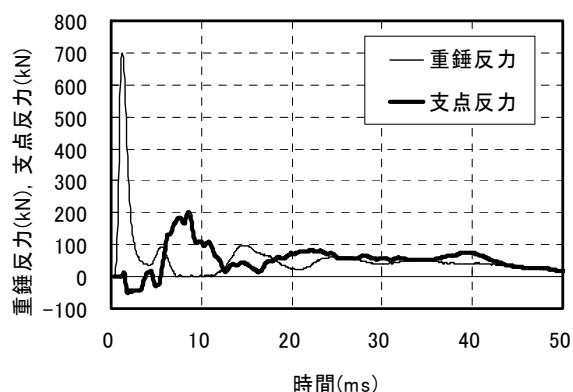


図-10 重錘反力および支点反力の時刻歴応答の一例

重錘衝突直後の RC はりには、載荷点を中心とした局部的な変形が生じていると考えられる。これらのデータより、最大支点反力は、重錘からの衝撃荷重が RC はりの局部的な変形を通して支点へ伝達されたものであり、式(3)において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とした仮定が成り立っていないことが、計算値と実験値の間に差異が生じた原因の一つであると考えられる。しかし、中央変位が最大値に到達する時点では、上述の局部的変形はほぼ無視できる程度になっており、最大変位を生じさせるエネルギーは静的載荷による変形の場合と同等と考えられる。すなわち、エネルギー一定則を用いて RC はりの塑性域における最大中央変位を補正する過程において、式(3)に示した荷重 P_s を仮に設定することは、結果として実現象と同等の結果をもたらすこととなり、これが最大中央変位の計算値が実験値と概ね対応していた理由であると考えられる。最大中央変位の実験値が計算値に対してやや小さくなる傾向が見られた原因の一つとして、ゴムシートや跳ね上がり防止治具におけるエネルギーのロスが考えられる。

5. 最大支点反力の補正

実験の結果、必ずしも式(3)による荷重を最大支点反力に置き換えて表すことができないことが判明した。そこで、実験結果から最大支点反力に影響を与える要因を検討し、最大支点反力の計算値を補正する方法を検討した。

5.1 RC はりと重錘の質量比の影響

図-7 より、No.3 における最大支点反力は、重錘質量 400kg の時には計算値と概ね一致するものの、200kg の時には計算値に対して大きくなる傾向が見られた。これより、最大支点反力は重錘質量 M の影響を受けることが推測される。また、No.3 に対して試験体質量の大きい No.4 の最大支点反力と衝突速度の関係を図-12 に示す。この場合、いずれの重錘質量とも最大支点反力の実験値は計算値を上回り、重錘質量が小さい方がその傾向が強い結果となった。これより、最大支点反力は重錘質量 M と試験体質量 m との比にも関係していることが推測される。そこで、支間長が一定 (3m) の試験体について、最大支点反力の計算値 $P_{s,cal}$ に対する実験値 $P_{s,exp}$ の比 $P_{s,exp}/P_{s,cal}$ と試験体と重錘の質量比 m/M の関係を図-13 に示す。これによれば、 m/M が大きくなるほど $P_{s,exp}/P_{s,cal}$ が増加する傾向が確認できる。 m/M が大きい場合には、はりの横振動や衝撃点における局部的変形の影響が強くなると考えられ、これが支点反力に影響を与えていると思われる。

5.2 支間長の影響

支間長が長い場合、はりは図-14 に示すような高次の振動モードを形成しやすくなり、これが最大支点反力に

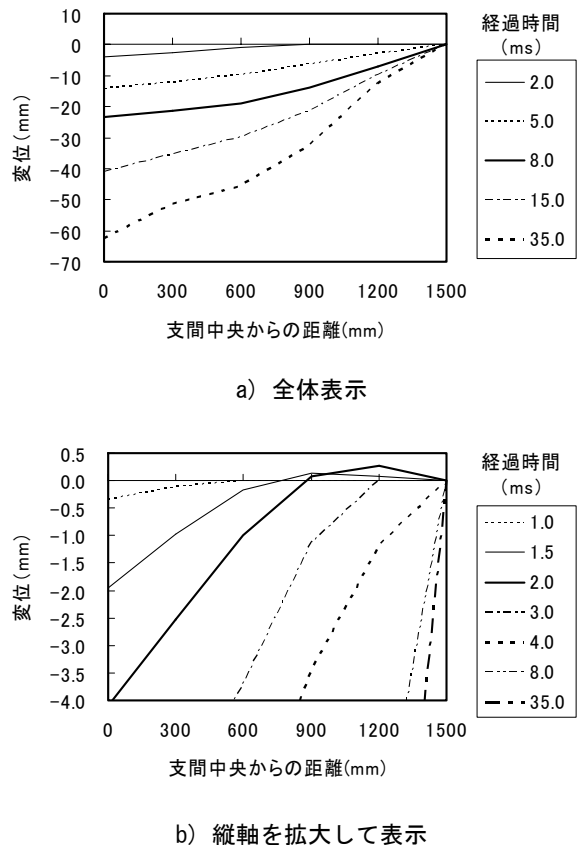


図-11 試験体の変形過程の一例 (No. 3-1, $V=5.5\text{m/s}$)

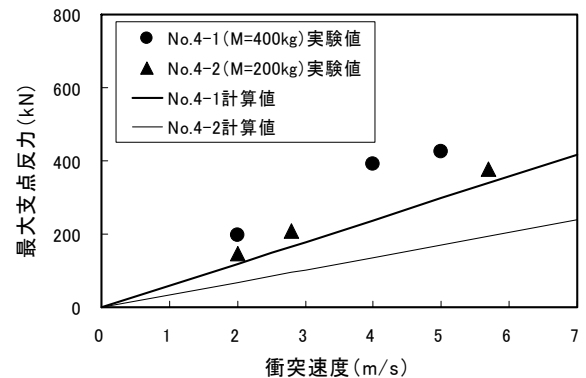


図-12 最大支点反力と衝突速度の関係 (No. 4 試験体)

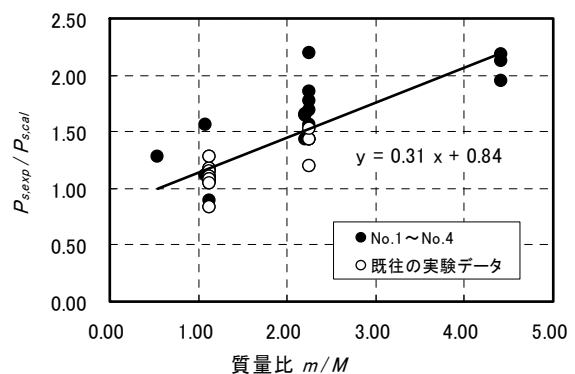


図-13 $P_{s,exp}/P_{s,cal}$ と質量比の関係

影響を与えると考えられる。そこで、支間長の影響について検討するため、重錘質量および衝突速度を一定とし（400kg, 2.0m/s）、支間長の異なる試験体の実験結果を比較した。ここで、5.1において示した質量比の影響を除いて考えるため、図-13のデータを線形近似した式から求めた、式(6)に示す最大支点反力の補正計算値 $P_{s,cal2}$ を用い、これに対する実験値の比 $P_{s,exp}/P_{s,cal2}$ と支間長 L との関係を図-15に示す。なお、データは同じ断面（同じ曲げ剛性）を持つ試験体ごとに示している。

$$P_{s,cal2} = P_{s,cal} (0.31 \frac{m}{M} + 0.84) \quad (6)$$

これより、いずれの断面の試験体も、支間長の増加とともに $P_{s,exp}/P_{s,cal2}$ が増加する傾向が見られ、その増加の勾配は曲げ剛性の小さい試験体ほど急となる傾向が見られた。そこで、曲げ剛性に影響を与える断面二次モーメント I とそれに次元を合わせた支間長 L^4 の比 L^4/I を横軸にとり、 $P_{s,exp}/P_{s,cal2}$ との関係を図-16に示す。これより、 L^4/I の増加とともに $P_{s,exp}/P_{s,cal2}$ が増加する傾向が見られる。このデータを線形近似させた式と式(6)を用いて、式(7)に示す補正式を構築した。

$$P_{s,cal3} = P_{s,cal} (0.31 \frac{m}{M} + 0.84) (1.14 \times 10^{-7} \frac{L^4}{I} + 0.91) \quad (7)$$

式(7)により補正された最大支点反力 $P_{s,cal3}$ と実験値 $P_{s,exp}$ との関係を図-17に示す。これによれば、 m/M 、 L 、 I によって補正した最大支点反力の計算値は、実験値に概ね対応していることがわかる。

6. まとめ

筆者らが既往の研究において提案した、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って衝撃荷重を受ける RC はりの最大支点反力と最大変位を求める方法について、計算値の妥当性および計算値に影響を与える要因を検討することを目的として、断面寸法や引張鉄筋比、支間長等をパラメータとした重錘落下式衝撃載荷実験を行った。実験の範囲（引張鉄筋比 0.27～1.15%、支間長 2～5m）で得られた知見を以下に示す。

- (1) 最大変位の計算値は、断面寸法、引張鉄筋比および支間長によらず概ね実験値に対応する。
- (2) 最大支点反力の計算値は、重錘と RC はりの質量比、支間長、断面二次モーメントの影響を受けて必ずしも実現象を精度良く表すことはできないが、これらの影響を考慮した補正式を用いることにより、その精度を向上させることが可能である。

なお、本検討は、現象を簡便な方法により評価することを目的としており、厳密には波動問題など他の要因が鉄筋コンクリートの衝撃挙動に複雑に作用していると考えられる。これらの評価については今後の課題である。

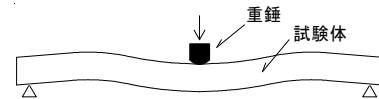


図-14 長支間試験体の変形概念

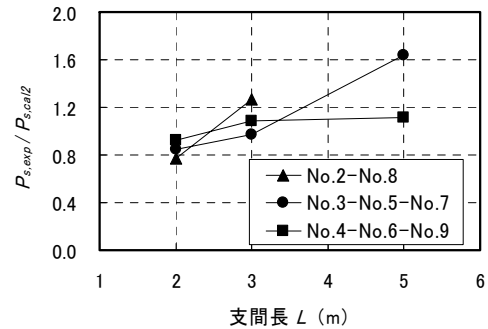


図-15 $P_{s,exp}/P_{s,cal2}$ と支間長 L の関係

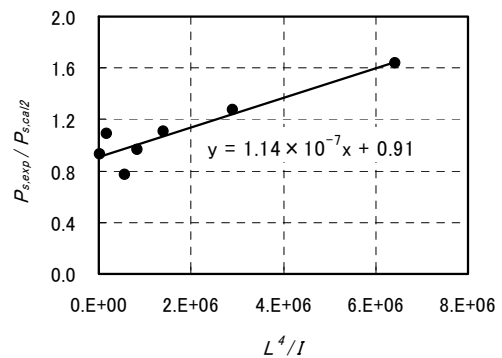


図-16 $P_{s,exp}/P_{s,cal2}$ と L^4/I の関係

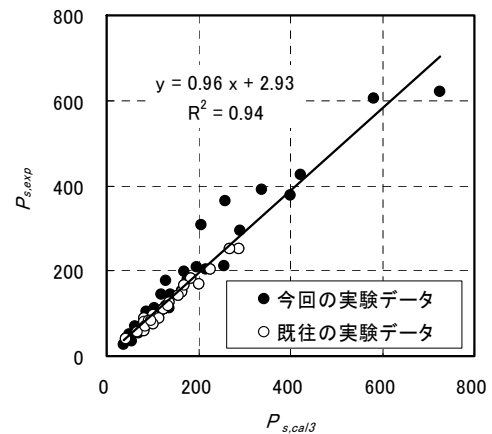


図-17 $P_{s,exp}$ と $P_{s,cal3}$ の関係

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) 岩波光保，白根勇二，横田弘：繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの破壊性状，港湾空港技術研究所資料，No.1152，2007.6
- 3) 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
- 4) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，2004