

論文 スパン長の異なる RC 梁の重錘落下衝撃実験

松岡健一*1・岸 徳光*2・三上 浩*3・安藤智啓*4

要旨: 曲げ破壊型を示す RC 梁の合理的な耐衝撃設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、特にスパン長や断面寸法の異なる RC 梁を用いた衝突速度漸増繰り返し載荷実験法による重錘落下衝撃実験を行った。実験結果より、1) 最大重錘衝撃力と最大支点反力の差は、スパン長が長いほど大きくなる傾向にある。2) RC 梁の耐衝撃設計は、最大支点反力と静的曲げ耐力の関係や、支点反力波形を用いて評価される吸収エネルギー量および設定残留変位量を基に静的曲げ耐力を用いることにより可能である、等を明らかにしている。

キーワード: RC 梁, 耐衝撃性, 曲げ破壊型, 静的曲げ耐力, 重錘衝撃力

1. はじめに

近年、道路落石防護施設、砂防ダムや原子力発電所諸施設ならびに危険物貯蔵施設等に関連して、鉄筋コンクリート (RC) やプレストレストコンクリート (PC) 部材の耐衝撃性に関する研究が盛んに行われている。著者等も落石防護施設の 1 つである RC や PC 落石覆工の耐衝撃安全性に関する実験的な研究を行っている^{1),2)}。また、RC 梁を対象として耐衝撃設計法確立のための基礎資料を得るために鉄筋比等を変化させた小型模型による重錘落下衝撃実験も行っている³⁾。汎用性のある RC 梁の耐衝撃設計法を確立するためには、鉄筋比のみならず、寸法効果や重錘重量の影響に関する検討が必要不可欠である。

本研究では、RC 梁の合理的な耐衝撃設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、特にスパン長、断面寸法および重錘重量の影響に注目して、RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を行った。基準となる載荷実験は重錘が RC 梁に衝突する時の速度 (以後、衝突速度) を 1 m/s から RC 梁が破壊に至るまで 1 m/s ずつ漸増させる繰り返し載荷実験法に基づいて行った。重錘重量が異なる場合の実験は、基準実験における各載

荷実験と入力エネルギーあるいは力積が等しくなるようにして衝突速度を決定して行った。なお、RC 梁の破壊は既往の研究と同様に、累積残留変位量が純スパンの 1/50 程度に達した状態と仮定した。

2. 実験概要

表-1 に試験体および実験結果の一覧を示す。試験体は、断面寸法、純スパン長をそれぞれ 2 種類とし、載荷方法の違いも検討するため合計 8 体製作した。採用した断面寸法はいずれも正方形断面とし、桁高が 25 cm、20 cm の断面をそれぞれ A、B タイプとしている。また、純スパン長 (l) は 2 m および 3 m としている。試験体名は断面の種類および純スパン長、重錘重量、載荷条件を組み合わせで表示している。本研究では基準実験として 300 kg の重錘を用い、重錘衝突の初速度および増分速度を 1 m/s とする繰り返し載荷実験を行うこととした。また、純スパン $l = 2$ m の RC 梁を対象として 400 kg の重錘を用い、各載荷時の入力エネルギーを基準実験と等しくするように衝突速度を設定する場合 (載荷条件: E),

*1 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*2 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

*4 防衛庁 第 4 研究所 工修 (正会員)

表一 試験体および実験結果

試験体名	衝突速度 (m/sec)	補強筋比 (%)	静的曲げ耐力 (kN)	累積残留変位量 (cm)	最終衝突速度での残留変位量 (cm)
A-2-300	1~5	1.09	89.96	2.75	1.34
A-3-300		1.09	59.98	3.62	1.82
B-2-300		3.17	83.89	2.58	1.42
B-3-300		3.17	55.96	3.27	1.75
A-2-400-E	0.87~4.33	1.09	89.96	3.23	1.60
B-2-400-E		3.17	83.89	2.43	1.36
A-2-400-I	0.75~4.50	1.09	89.96	3.83	1.60
B-2-400-I		3.17	83.89	3.55	1.72

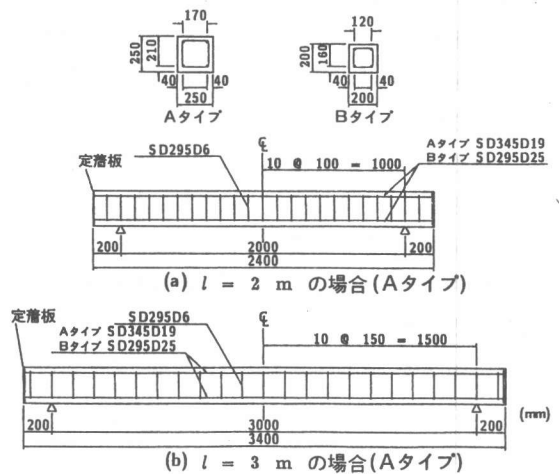
および入力力積を基準実験と等しくするように衝突速度を設定する場合（载荷条件：I）についても実験を行っている。

実験に用いたコンクリートの強度は設計基準強度が $f'_{ck} = 23.5 \text{ MPa}$ で実験時の圧縮強度が $f'_c = 34.7 \text{ MPa}$ ，ポアソン比が $\nu = 0.25$ である。表中の静的曲げ耐力 P_u は、コンクリートの力学的特性および表一に示す鉄筋の材料特性を用いて断面分割法により算出した。なお、表一に示されている鉄筋の力学的特性は規格値である。分割数はほぼ一定の解が得られる分割数以上とし、A，Bタイプで50，41分割とした。また、表一には下端補強筋比，衝撃実験終了後の残留変位量も併せて整理している。破壊形式は全て下端筋降伏による曲げ破壊であり，载荷点直下で角折れしてV字形状となっている。図一に試験体の形状寸法および配筋位置を示す。各タイプの配筋は曲げ耐力が類似の大きさにするように決定した。各梁は鉄筋の定着長を節約するために端面に9mmの鋼板を設置し，この鋼板に鉄筋を溶接している。

本実験では支点部のリバウンドを防止するため，RC梁の両端面から20cmの位置で鋼製の治具を用いて梁の上下を固定している。治具全体はRC梁の回転を許容し，ピン支持に近い構造となっている。なお，重錘および支点部には衝撃荷重測定用に開発した起歪柱型のロードセルを設置して，重錘衝撃力（容量1470kN）ならびに動的支点反力（1支点の容量500kN）を測定した。衝撃荷重は梁のスパン中央部に300kgあるいは400kg

表二 補強筋の材料特性

補強筋名称	D19	D25
材質	SD345	SD295A
公称直径 (mm)	19.1	25.4
公称断面積 (cm ²)	2.87	5.07
引張耐力 (kN)	140.14以上	223.44~302.82
降伏耐力 (kN)	98.98~126.42	148.96以上
ヤング係数 (GPa)	205.8	
弾性伸び率 (%)	0.2	



図一 試験体の形状寸法および配筋位置

の円柱状の鋼製重錘を所定の高さから自由落下させて载荷している。なお，重錘の底部は片当たりを防止するために高さ2mmのテーパを有する球底としている。スパン中央部には最大ストロークが200mmのレーザ式変位計を設置し，変位

応答ならびに残留変位量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 残留変位量

本研究では各梁の耐衝撃性を同一の尺度で比較検討するため、繰り返し載荷時の累積残留変位量が純スパンの $1/50$ ($l = 2\text{ m}$ の場合は 4 cm , $l = 3\text{ m}$ の場合は 6 cm) を破壊と定義した。実験はいずれの試験体においても破壊基準値とほぼ同程度かそれを越えた段階まで行っている。特に基準値を越える場合には結果的に変位が著しく大きくなったため、それより 1 段階低い衝突速度を最終載荷状態としている。

3.2 衝突速度と衝撃力の関係

図-2 にスパン長を変化させた場合の衝突速度と最大重錘衝撃力 P および最大合支点反力 R (以後、これらを単にそれぞれ重錘衝撃力、支点反力と呼ぶ) の関係を比較して示している。図より、A タイプ、B タイプともに $l = 3\text{ m}$ の場合は $l = 2\text{ m}$ の場合と比較して重錘衝撃力と支点反力の差が大きいがわかる。また、その差は衝突速度の増加とともに大きく示されている。これは、本研究に用いられている RC 梁が全て曲げ破壊型であり、 $l = 3\text{ m}$ の場合には $l = 2\text{ m}$ の場合に比較してたわみ剛性が小さく、衝撃力が載荷点から支点到に伝播する間に減衰する傾向にあるためや、繰り返し載荷によって損傷が蓄積されその損傷によってエネルギーが吸収されるためと推察される。また、衝突速度が大きくなると若干の差がでてくるが、重錘衝撃力はスパン長に関わらず両ケースともほぼ同様の値を示している。これは、RC 梁の衝撃荷重載荷点部における桁高方向の軸剛性が衝撃力に抵抗し、その剛性が繰り返し載荷によっても著しく減少しないことを意味しているものと推察される。

3.3 静的曲げ耐力と支点反力の関係

図-3 に各梁の支点反力 R と静的曲げ耐力 P_u の比を示す。図中の破線は全試験体の平均値を示

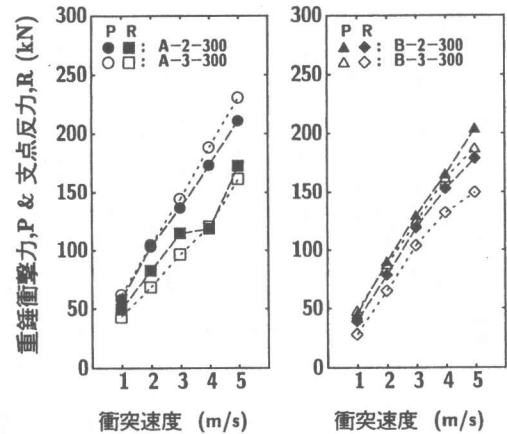


図-2 衝突速度と衝撃力の関係

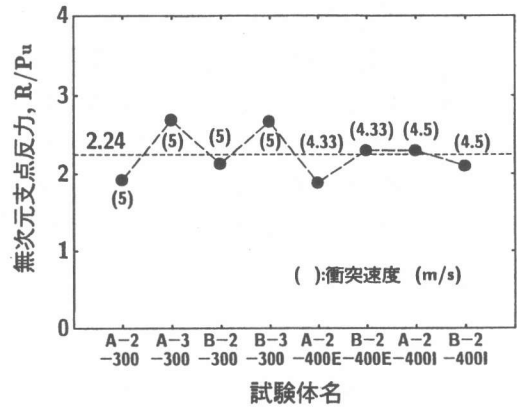


図-3 最終衝突速度における無次元支点反力

している。図より、最終載荷時の支点反力は静的曲げ耐力の2.24倍程度であることがわかる。また、 $l = 3\text{ m}$ の試験体の支点反力が平均値よりやや大きく示されている。静的曲げ耐力を用いて断面設計を行う場合には、大きな耐力を要求することで安全側の設計が可能となることより、支点反力の静的曲げ耐力に対する倍率を2程度と評価することは工学的に妥当なものと判断される。

3.4 載荷条件と応答性状の関係

図-4 に載荷条件と重錘衝撃力および支点反力の関係を示した。(a), (b) 図は A/B-2-300 と A/B-2-400-E の実験結果を運動エネルギーを横軸に取って整理したものである。一方 (c), (d) 図は、A/B-2-300 と A/B-2-400-I との実験結果

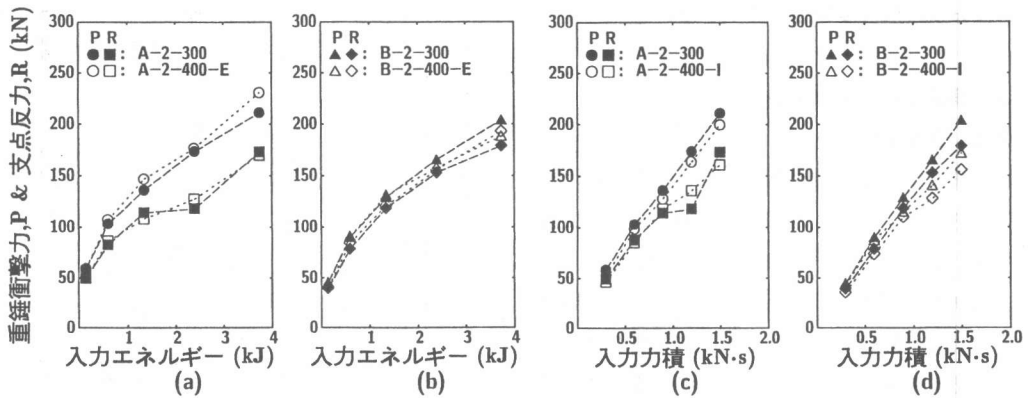


図-4 載荷条件別の重錘衝撃力および支点反力

に対し力積を横軸に取って整理している。(a),(b) 図より、最終載荷時に若干差があるもののA、B タイプともによく対応していることがわかる。一方(c),(d) 図より、特にBタイプの実験結果において重錘重量が小さい場合は大きい場合より大きな応答値を示していることがわかる。これは、RC 梁の衝撃耐力は入力力積よりも入力エネルギーを用いて評価可能であることを示唆している。

3.5 スパン長と累積残留変位量の関係

図-5には、静的曲げ耐力がほぼ等しいA-2、B-2とA-3、B-3に関する累積残留変位量分布を示している。図より衝突速度の大きい場合にはAタイプがBタイプよりも多少大きい値を示しているが、工学的にはいずれのスパン長に対しても類似であることがわかる。これより、弾性状態における断面剛性が異なる場合においても、静的曲げ耐力が類似の場合には同様の累積残留変位量を示すことがわかる。この結果はRC梁の衝撃耐力は弾性的な曲げ剛性よりも静的曲げ耐力を用いて評価可能であることを示唆している。

3.6 衝撃力と載荷点変位の関係

図-6には最終載荷時の衝突速度における重錘衝撃力Pおよび支点反力Rと載荷点変位の関係を示している。図中、実線は支点反力、破線は重錘衝撃力を示している。また、図下段には重錘衝撃力および支点反力と載荷点変位のなすループの

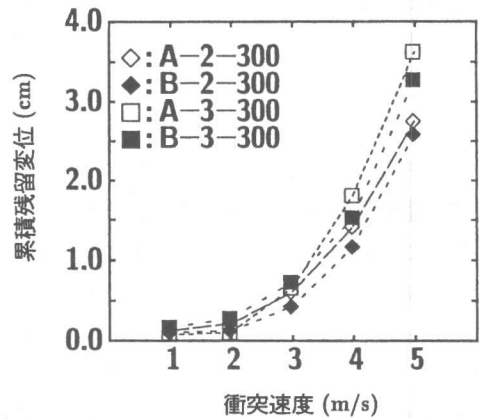


図-5 衝突速度と累積残留変位量

面積として求まる吸収エネルギー値を示した。まず、各衝撃力と変位のヒステリシスループをみると、重錘衝撃力と載荷点変位のなすループにおいて $l = 2\text{ m}$ と 3 m の場合における分布性状が異なっているのがわかる。 $l = 2\text{ m}$ のループは極めて小さい変形状態で大きな重錘衝撃力が励起され、変形の増加とともに急速に減少し一度完全に除荷状態となる。その後2波目が励起され、その振幅は初期の1/2強になっている。一方、 $l = 3\text{ m}$ の場合における重錘衝撃力は衝撃初期には $l = 2\text{ m}$ と同様であるが、完全に除荷状態になる前に2波目が励起されている。しかしながら、荷重強度の増加は小さくほぼゆるやかな除荷状態となっている。支点反力に関しては、 $l = 2\text{ m}$ の場合には初期の重錘衝撃力によって第1ピークの支点反力が励起され、2波目の衝撃力によっても第1ピー

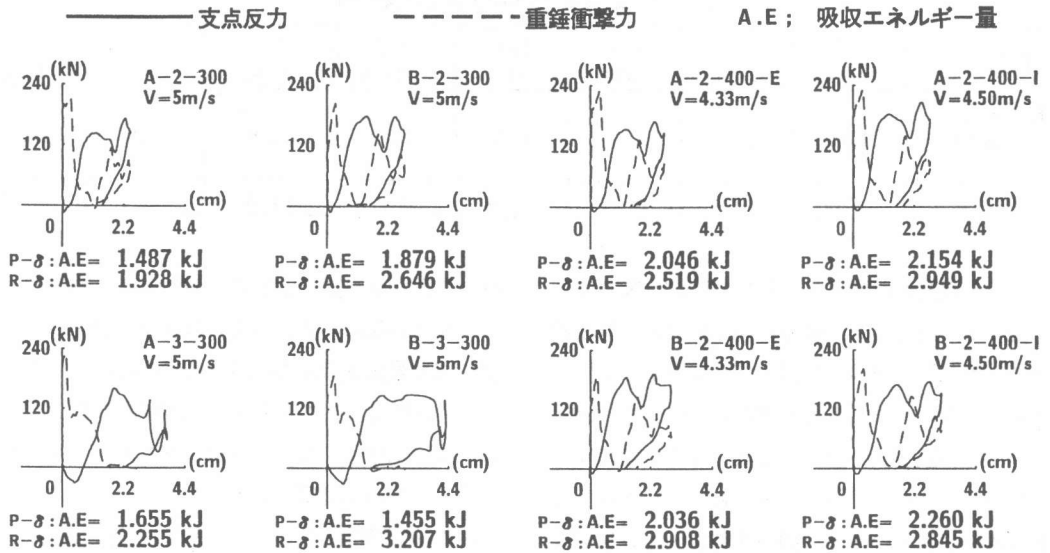


図-6 重錘衝撃力および支点反力と載荷点変位の関係

クと同程度の反力が生じている。一方、 $l = 3 \text{ m}$ の場合には初期および第 2 波目の合衝撃力によって支点反力が励起されている。これは、 $l = 2 \text{ m}$ の場合にはたわみ剛性が大きいため重錘のリバウンドも大きく、従って第 2 波目の衝撃力も大きくなるものと考えられる。 $l = 3 \text{ m}$ の場合にはスパンが長いたためたわみ剛性が小さく、低次固有振動周期も長くなることより重錘のリバウンド量が小さくなり、あたかも一波の衝撃力が作用したかのように挙動したものと推察される。

3.7 吸収エネルギーと載荷エネルギーの関係

図-7に、最終載荷時の重錘衝撃力 P および支点反力 R と載荷点変位を用いて評価した吸収エネルギーとその時の入力エネルギー（衝突時の重錘の運動エネルギー E_k ）の比率を示す。図中、○、●印はそれぞれ支点反力、重錘衝撃力を用いて求めた吸収エネルギー比率を示している。本実験結果を平均すると、最終載荷時の支点反力より求めた吸収エネルギーは載荷エネルギー E_k の 70% 程度、重錘衝撃力より求めた吸収エネルギーは載荷エネルギーの約 50% となる。

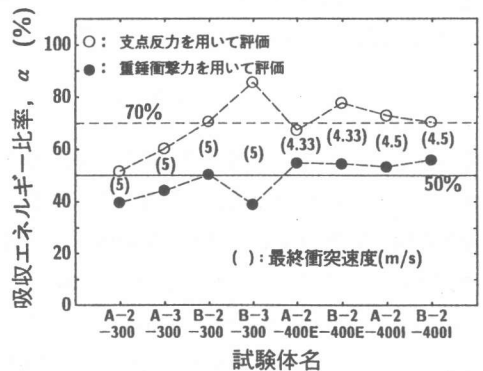


図-7 エネルギー比率

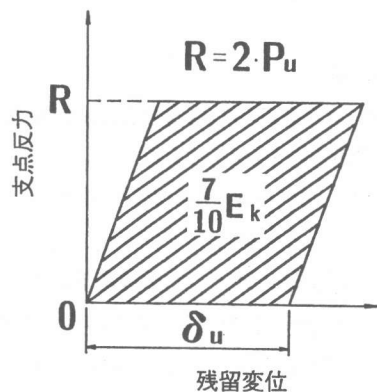


図-8 RC 梁の衝撃エネルギー模式図

表一三 最終載荷時の残留変位置一覧

試験体名	A-2 -300	A-3 -300	B-2 -300	B-3 -300	A-2 -400-E	B-2 -400-E	A-2 -400-I	B-2 -400-I
最終載荷時の 残留変位 δ_u (cm)	1.34	1.82	1.42	1.75	1.60	1.36	1.60	1.72
l/δ_u	149.3	164.8	140.9	171.4	125.0	147.1	125.0	116.3

3.8 最終載荷時の支点反力・変位の模式化

図一六の支点反力-変位曲線をもとに、最終載荷時の支点反力 R と残留変位置量 δ_u を用いて模式化すると図一八のように示すことができる。なお、このときの残留変位置量 δ_u は表一三からほぼ純スパンの $1/150$ 程度であることがわかる。支点反力と静的曲げ耐力の関係は図一三で示しているように、スパン長によって若干異なる傾向にあるが、安全側に評価することとしてその比率を 2.0 と仮定すると、吸収エネルギーと入力エネルギー E_K の関係は模式図を用いて次式のように示される。

$$2.0 P_u \times \delta_u = 0.7 E_K \quad (1)$$

これより、上式に最終衝突速度における入力エネルギーおよびその時の残留変位置量を代入すると、衝撃荷重載荷に対する設計のための静的曲げ耐力が求まる。ここで、 δ_u を上述のように純スパンの $1/150$ 、最終衝突速度を 5 m/s として P_u を求めると、A-2-300、A-3-300 に対して 98 kN 、 65.7 kN が得られ、表一の値にほぼ対応していることがわかる。

4. まとめ

RC 梁の合理的な耐衝撃設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的としてスパン長、断面寸法および重錘重量の影響に注目し、曲げ破壊型 RC 梁を対象として衝突速度を漸増させる繰り返し載荷法に基づいた重錘落下衝撃実験を行った。本研究の範囲内で得られた事項を要約すると、

(1) スパン長の異なる RC 梁において、重錘衝撃力と支点反力の差は、スパンが長いほど大きくなる傾向にある。

- (2) 断面寸法が異なる場合においても、静的曲げ耐力が類似の梁は同様の耐衝撃性状を示す。
- (3) 梁の最大支点反力は設計的に静的曲げ耐力の 2 倍程度として安全側で評価可能である。
- (4) 梁の衝撃耐力は入力力積よりも入力エネルギーを用いて評価する方が合理的である。
- (5) 最終載荷時の吸収エネルギーは、重錘衝撃力、支点反力で評価するとそれぞれ載荷エネルギーの 50% 、 70% 程度である。
- (6) 上述の最大支点反力と静的耐力の関係や支点反力を用いて評価される吸収エネルギー量および最終載荷時の残留変位置量を規定することにより、静的曲げ耐力を用いた RC 梁の耐衝撃設計が可能となる。

なお、本研究結果は漸増繰り返し載荷実験によって得られたものである。今後、実現象に即して単一載荷実験も行い、実設計への適用性について検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 岸徳光・三上浩・田村富雄・松岡健一：RC 梁の衝撃挙動におよぼす補強筋特性の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.1105-1110，1994。
- 2) 松岡健一・三上浩・岸徳光：低補強筋比 RC 梁の耐衝撃性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.929-934，1995。
- 3) 三上浩・岸徳光・松岡健一・田村富雄：低速度衝撃を受ける RC 梁の耐衝撃設計法の一提案，構造工学論文集，Vol.42A，pp.1255-1260，1996。