

論文 重錘先端形状が RC 梁の衝撃挙動に与える影響

岸 徳光^{*1}・池田憲二^{*2}・三上 浩^{*3}・蟹江俊仁^{*4}

要旨：本研究では、静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の合理的な耐衝撃設計法を確立するために、重錘の先端形状が曲げ破壊型 RC 梁の衝撃挙動に与える影響に着目して、先端形状が 1) 曲率小、2) 曲率中、3) 曲率大、の 3 種類の重錘を用いた重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、1) 載荷点部の損傷度合いを除き、曲げひび割れ分布は先端形状に関わらずほぼ同様である。2) 曲率中の場合には梁の応答変位が若干大きく示されるものの、重錘衝撃力、支点反力、変位波形や荷重-変位曲線は、いずれもほぼ同様の分布性状を示す、等が明らかになった。

キーワード：RC 梁、曲げ破壊型、衝撃挙動、重錘先端形状

1. はじめに

道路落石防護施設や原子力発電所関連施設等の耐衝撃用途鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐衝撃安全性をより向上させるために、近年、各研究機関で、梁、柱、板等の RC 部材の耐衝撃性に関する研究が盛んに行われている^{1), 2)}。著者らも特に静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁に着目して、主鉄筋比、断面寸法、純スパン長および重錘重量を変化させた場合の耐衝撃性に関する実験的・解析的研究を試みてきた^{3), 4)}。その結果、曲げ破壊型 RC 梁に関しては、その耐衝撃性がかなり明らかにされ、簡易な耐衝撃設計手法も提案されるに至っている⁵⁾。しかしながら、これまでの著者らによる RC 梁に関する研究は、重錘の先端形状が扁平な場合に終始してきた。実際の落石現象や航空機衝突問題を考える場合には、衝突体の先端形状が扁平な場合のみならず鋭角な場合等種々の曲率を有する場合が想定されるため、重錘の衝突部形状による RC 梁の衝撃挙動や耐衝撃性への影響を検討することは重要であるものと考えられる。

このような観点より、本研究では先端部曲率が異なる代表的な 3 種類の重錘を用いて、これらの

先端形状が RC 梁の衝撃挙動におよぼす影響について実験的に検討を試みた。実験は、静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁に着目し、重錘落下による単一載荷により実施した。

2. 実験概要

図-1 には、実験に用いた RC 梁試験体の形状寸法および配筋状況を示している。用いた試験体は形状寸法 (梁幅 × 梁高 × 純スパン長) が全て 150 × 250 × 2,000 mm の複鉄筋矩形 RC 梁である。軸方向鉄筋 (D13) は真かぶり 40 mm の位置に配置し、せん断補強筋 (D6) は 100 mm ピッチに配置している。本実験では、軸方向鉄筋を定着するための張出し部の影響をできるだけ小さくするために、梁端面に厚さ 9 mm の鋼板を設置して軸方向鉄筋を溶接し、その定着長を節約している。

実験は、試験体を跳ね上がり防止用治具付の支点上に設置し、梁スパン中央部に質量 300 kg で全長約 1,700 mm の円柱状鋼製重錘を所定の高さから自由落下させることにより行っている。実験時には、治具全体は回転のみを許容する構造となっ

*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 北海道開発局開発土木研究所 室長 構造研究室 (正会員)

*3 三井建設 (株) 技術研究所 主席研究員 工博 (正会員)

*4 大成建設 (株) エンジニアリング本部 課長 工博 (非会員)

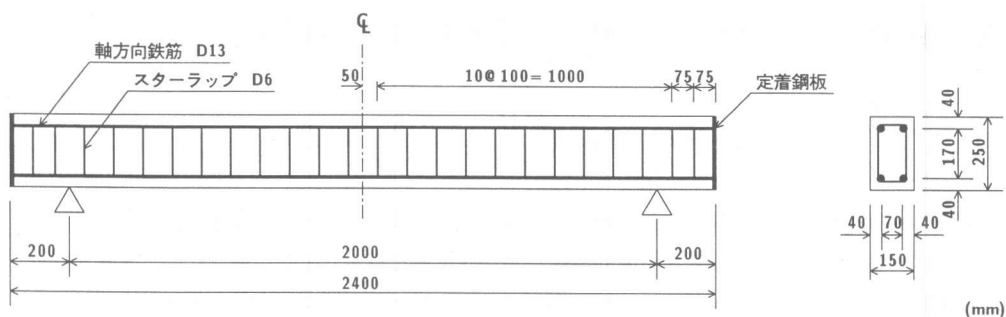
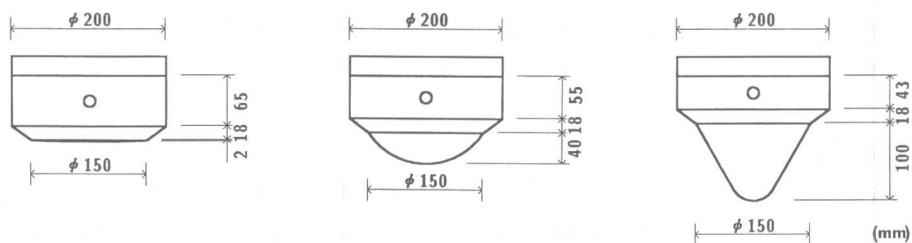


図-1 RC 梁試験体の形状寸法および配筋状況



(a) $r = 1,407 \text{ mm}$ (曲率小)

(b) $r = 90 \text{ mm}$ (曲率中)

(c) $r = 30 \text{ mm}$ (曲率大)

図-2 重錘の先端形状

ている。重錘は実験に応じて先端部の取り替えが可能な構造となっている。ここでは、工学的に有用なできるだけ広い範囲の衝突部曲率による影響を検討するため、曲率半径 r が i) 1,407 mm (曲率小), ii) 90 mm (曲率中), iii) 30 mm (曲率大) と異なる代表的な 3 種類の重錘先端部を製作し実験に採用している (図-2)。重錘の衝突速度 V は、初速度および増分速度を 1 m/s として別途行った各重錘先端形状に対する漸増繰り返し載荷実験において RC 梁が破壊に至った衝突速度と同一およびその + 1 m/s としている。本実験の場合は、繰り返し載荷実験において RC 梁が重錘先端形状に関わらず全て $V = 4 \text{ m/s}$ で破壊に至ったため、衝突速度を各重錘先端形状に対して $V = 4, 5 \text{ m/s}$ に設定している。従って、実験ケースは、重錘 3 種類と衝突速度 2 種類の組み合わせから成る計 6 ケースである。なお、漸増繰り返し載荷実験では累積残留変位が純スパンの 2% 前後に達した状態を破壊と定義している。

測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以

表-1 試験体の設計値一覧

主鉄筋比 P_t	せん断 スパン比 a/d	静的せん断 耐力 $V_{usc} \text{ (kN)}$	静的曲げ 耐力 $P_{usc} \text{ (kN)}$	せん断 余裕度 α
0.008	4.76	137.4	38.2	3.6

表-2 コンクリートの力学的特性

実験時材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
26	32.3	20.9	0.17

表-3 鉄筋の力学的特性

鉄筋 呼び径	材質	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
D13	SD345	373	535	206	0.3
D6	SD295A	366	540	206	0.3

下、単に支点反力)、変位 δ (中心より 200 mm ピッチに 5 点) の各応答波形である。 P, R の測定にはそれぞれ容量および応答周波数が 1,470 kN, DC ~ 4.0 kHz および 490 kN, DC ~ 2.4 kHz の

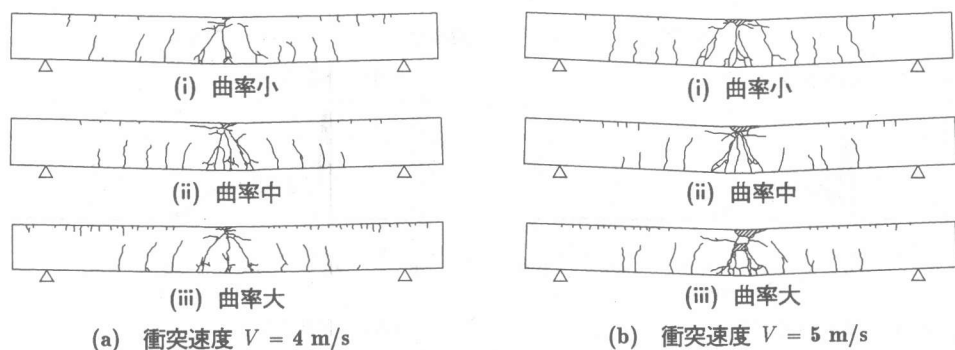


図-3 実験終了後のひび割れ分布

起歪柱型のロードセルを、 δ の測定にはストローク 200 mm、応答周波数 915 Hz のレーザ式変位計を用いている。なお、実験終了後には梁側面に生じたひび割れも記録している。

表-1 には、用いた試験体の設計値一覧を示している。表中、静的せん断耐力 V_{usc} および静的曲げ耐力 P_{usc} は、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾に基づき算定している。このうち P_{usc} の算定には断面分割法を適用している。せん断余裕度 α はこの V_{usc} を P_{usc} で除した値であり、本試験体の場合には $\alpha > 1.0$ であることより、RC 梁は静載荷時に曲げ型で破壊する。表-2、3 には、実験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的特性を示している。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ分布

図-3 には、衝突速度 $V = 4, 5$ m/s における実験終了後の各 RC 梁のひび割れ分布を示している。図より、 $V = 4$ m/s では、各梁には載荷点部から支点部にかけて梁下縁から上縁に向かう曲げひび割れが進展していることが分かる。また、載荷点部では梁下縁から載荷点に向かう斜めひび割れも形成されている。全般的に各試験体のひび割れ分布は、曲率中の場合で載荷点部に微細なひび割れが多数発生していることを除くと、大略類似しているものと考えられる。

衝突速度 $V = 5$ m/s では、いずれの梁においても載荷点部の損傷が $V = 4$ m/s の場合に比べて

より顕著に示されていることが分かる。また、載荷点部に形成される斜めひび割れは、重錘先端部の曲率が大きい場合ほど載荷点に近い位置で発生している。さらに、載荷点部にはコンクリートの剝離が見られ、曲率が大きい場合ほどその度合いも大きくなっている。しかしながら、この載荷点部の損傷度合いを除き、曲げひび割れの分布は各梁でほぼ対応しており、かつ $V = 4$ m/s の場合における結果と類似した性状を示している。なお、曲率大の場合には衝突速度に関わらず、コンクリート上縁に多数の微少なひび割れが発生している。

3.2 重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位に関する応答波形

図-4 には、各実験より得られた重錘衝撃力 P 、支点反力 R 、載荷点変位 δ に関する応答波形を示している。図より、衝突速度 $V = 4$ m/s の場合には曲率中の載荷点変位 δ 、 $V = 5$ m/s の場合には支点反力 R と載荷点変位 δ の最大波動振幅が他のケースに比べて多少大きく示されている。しかしながら、この振幅の違いを除くと、いずれの応答波形に関しても、各実験結果は重錘の先端形状に関わらず波動の立ち上がりから周波数特性まで良く対応した分布を示していることが分かる。

詳細に見ると、重錘衝撃力 P の場合には、衝撃初期に振幅が大きくかつ継続時間の短い波形成分（第1波）が励起されている。その後は第1波の $1/2$ 程度の振幅が 20 msec 程度継続する台形状の分布（第2波）を示している。この2波目の

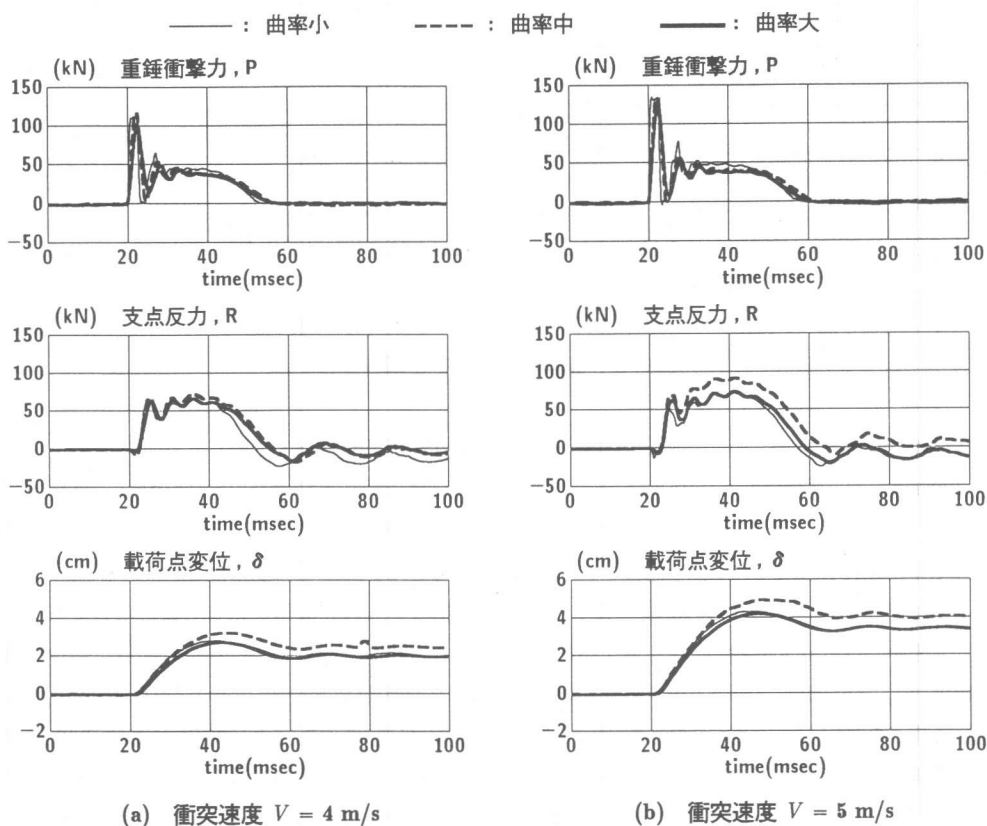


図-4 重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位に関する応答波形

継続時間は1波目のその6～7倍である。なお、最大重錘衝撃力(第1波の最大振幅値)および波動の継続時間は、衝突速度 V の増加に伴い増大している。

一方、支点反力 R の場合には、重錘衝撃力 P の場合のような周波数の高い波形成分が出現しない。すなわち、波形はほぼ一定の振幅を有する台形状となっている。荷重除荷後は変位波形に対応した振動状態が示されている。ここでも、最大支点反力および波動の継続時間は、衝突速度 V の増加に伴い増大している。また、この波動の継続時間は P のそれに良く対応している。

載荷点変位 δ の場合には、重錘衝撃力 P の第2波および支点反力 R の波動が減少に転じる時点にほぼ対応して最大値に達していることが分かる。また、荷重除荷後の波動は変位が零まで減少せず、残留成分を生じた状態で微かに振動している。な

お、ここでも最大変位や振動周期が衝突速度の増加に伴い増大している。

3.3 重錘衝撃力および支点反力と載荷点変位の関係

図-5には、各実験より得られた重錘衝撃力および支点反力の載荷点変位に関する $P-\delta$, $R-\delta$ 履歴曲線を示している。図より、重錘の先端形状が曲率小および曲率大の場合における $P-\delta$, $R-\delta$ 曲線は、いずれの衝突速度においても、荷重の立ち上がりから減衰に至るまで両者で非常に良く対応した分布性状を示していることが分かる。一方、曲率中の場合には、最大変位および残留変位が他の場合に比べて多少大きく示されている。しかしながら、曲率中の最大変位値に達するまでの挙動は、曲率小および曲率大のそれらと良く対応している。

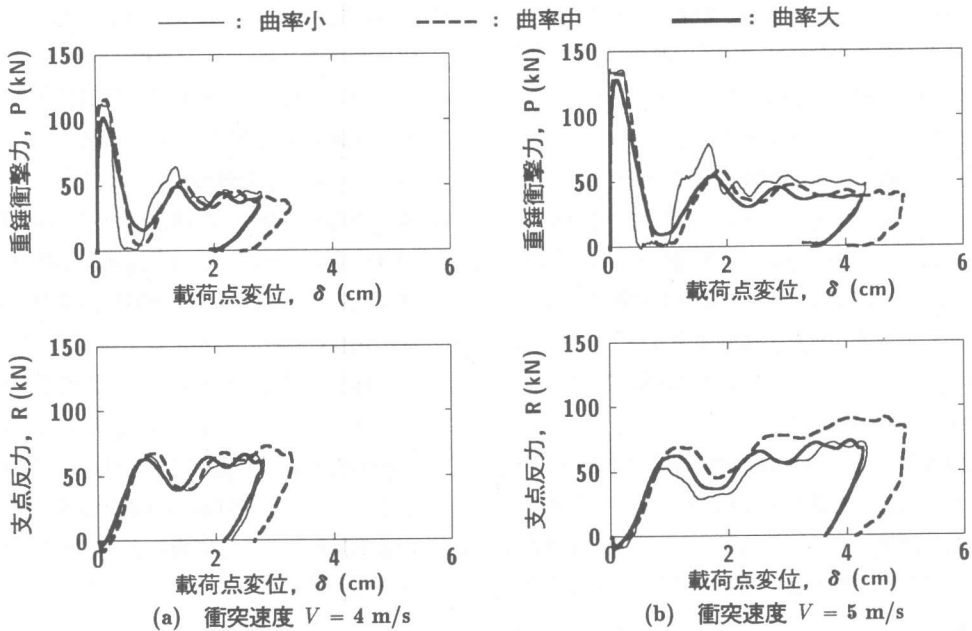


図-5 重錘衝撃力および支点反力と載荷点変位の履歴曲線

詳細に見ると、 P - δ 曲線の場合には、重錘衝撃力 P は変位 δ のほとんど生じていない段階で急激に励起され最大値に達し、一旦零レベルまで減少している。その後、再度増大し最大値の $1/2$ 程度の荷重が持続した状態で最大変位まで達し除荷されている。一方、 R - δ 曲線の場合には、支点反力 R は変位 δ の増加とともに単調に増大し、重錘衝撃力 P が零レベルに達した変位で一旦減少に転じている。しかしながら、最大変位の $1/3 \sim 1/2$ 程度に達した時点で δ の増加とともに再度最大変位まで緩やかに増大している。最大変位到達後の R は、初期剛性と類似の勾配で除荷されている。

衝突速度の違いに着目すると、衝突速度 V の増加に伴い重錘衝撃力 P 、支点反力 R および残留変位とも増加しており、対応して P - δ 、 R - δ 曲線の囲む面積も増加していることが分かる。

3.4 変位分布

図-6には、衝突速度 $V = 4, 5$ m/s における各実験ケースの変位分布を示している。図中、横軸にはスパン中心からの距離を取っている。

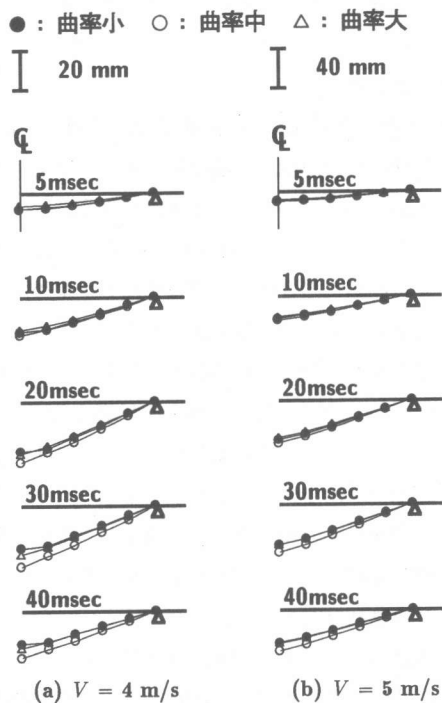


図-6 変位分布

図より、曲率中の場合の各測定点の変位値が、各時間において他の場合と比較して若干大きく示されていることが分かる。これは、図-2のひび

割れ分布に照らして、曲率小の場合には載荷点部の斜めひび割れの分布幅が広く、載荷点部の損傷が比較的広い範囲に分散されたこと、曲率大の場合には載荷点部コンクリート上縁のコンクリートが著しく剝離し、この損傷に比較的多くの入力エネルギーが費やされたことに起因しているものと考えられる。しかしながら、変位分布はいずれも中心部より支点部に向かって直線的に減少する傾向を示している。また、振動周期も各ケースで類似していることより、梁全体の損傷度合いは同程度であることが分かる。

以上より、曲率中の場合の応答変位が他のケースに比べて若干大きく示されているが、上述の変位分布や前述した各応答波形および荷重-変位曲線は、重錘の先端形状に関わらず非常に類似した性状を示していることより、本実験の範囲内の衝突速度においては、重錘の先端形状は衝撃挙動に大きな影響を与えていないものと判断される。

4. まとめ

本研究では、静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の合理的な耐衝撃設計法を確立することを目的に、重錘の先端形状が RC 梁の衝撃挙動に与える影響に着目して、先端形状が i) 曲率小、ii) 曲率中、iii) 曲率大の 3 種類の重錘を用いた重錘落下衝撃実験を実施した。本実験結果を要約すると、

- (1) 載荷点部に形成される斜めひび割れは、重錘先端部の曲率が大きい場合ほど載荷点に近い位置で発生し、かつ載荷点部のコンクリート上縁の損傷も大きくなる。しかしながら、この載荷点部の損傷度合いを除くと、重錘先端部の曲率の大小に関わらず大略類似した曲げひび割れ分布を示す。
- (2) 重錘衝撃力波形は、重錘先端部の曲率の大小に関わらず、衝撃初期に励起される高周波成分と、その後に励起される周波数の低い台形状の分布から成る類似の分布性状を示す。
- (3) 支点反力波形は、重錘先端部の曲率の大小に関わらず、ほぼ一定振幅部を有する台形状の分布性状を示す。
- (4) 荷重-載荷点変位曲線は、重錘先端形状の曲率半径が $r = 90 \text{ mm}$ の重錘（曲率中）の場合における最大変位値および残留変位値を除き、重錘先端部の曲率の大小に関わらず、非常に良く対応した分布性状を示す。
- (5) 重錘先端形状の曲率半径が $r = 90 \text{ mm}$ の重錘（曲率中）を用いる場合には、重錘衝突により励起される変位値が先端形状の曲率が小、大の場合に比較して大きい。しかしながら、最大変位の差は最大でも 20 % 程度とそれほど大きくないこと、また変位波形および変位の軸方向分布の形状や周期等が良く一致していることより、衝突体の先端形状が RC 梁の衝撃挙動に与える影響は小さいものと推察される。

参考文献

- 1) 井元勝慶，大野友則，佐々木晃，小暮幹太：重錘落下衝突を受ける RC はり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性，構造工学論文集，Vol.41A，pp.1201-1212，1995.3
- 2) 中田吉彦，榎谷 浩，梶川康男，森嶋芳大：個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1761-1771，1998.3
- 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.1255-1260，1996.3
- 4) 岸 徳光，三上 浩，松岡健一，安藤智啓：静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析，土木学会論文集，No.619/I-47，pp.215-233，1999.4
- 5) 松岡健一，岸 徳光，三上 浩，安藤智啓：スパン長の異なる RC 梁の重錘落下衝撃実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.1069-1074，1998.6
- 6) コンクリート標準示方書（平成 8 年制定）設計編，土木学会，1996