

先端形状が異なる重錘を用いた RC 梁の衝撃挙動に関する数値解析的検討

Numerical Simulation on Impact Behavior of RC Beams in Varying Nose-Shape of Weight

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
三井建設㈱	フェロー	三上 浩	(Hiroshi Mikami)
防衛庁第4研究所	正 員	安藤 智啓	(Tomohiro Ando)
室蘭工業大学	○学生員	千葉 潤一	(Jun-ichi Chiba)

1. はじめに

近年、衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート梁 (RC 梁) の衝撃挙動を精度良く同定可能な数値解析手法を確立するため、各研究機関で RC 梁を用いた衝撃応答解析が盛んに行われている。著者等も、重錘落下衝撃挙動に関する多くの弾塑性衝撃応答解析を実施し、別途実施して得られた実験結果と比較することにより解析結果の妥当性を検討してきた¹⁾。その結果、RC 梁に作用する衝撃力 (以後、重錘衝撃力)、支点部に伝達される衝撃反力 (以後、支点反力) および RC 梁の変位等の衝撃挙動を重錘先端形状の大きさにかかわらず比較的精度良く同定することが可能な三次元弾塑性衝撃応答解析手法²⁾を提案するに至っている。

一方、実構造物の衝撃問題は落石、車両、航空機など様々な形状の衝突体によって作用することが想定されるため、異なる衝突面形状を有する重錘が RC 梁の衝撃挙動に及ぼす影響について検討することが重要である。

このような観点から、本研究では重錘先端形状が RC 梁の衝撃挙動に及ぼす影響を数値解析的に検討することを目的として、衝突速度および重錘先端曲率を変化させた場合の RC 梁の衝撃挙動に関する詳細な数値解析を行った。なお、本研究では静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁を対象として取り扱い、単一載荷時の挙動に限定して検討することとした。また、本数値解析には、陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA (ver.960) を用いている。

2. 解析概要

2.1 試験体の概要

図-1には、本数値解析において対象とした曲げ破壊型 RC 梁の形状寸法および配筋状況を検討項目と合わせ

て示している。解析対象とした梁は、形状寸法 (梁幅×梁高×純スパン長) が 150×250×2,000 mm の複鉄筋矩形 RC 梁である。なお、軸方向鉄筋 D13 は真かぶり 40 mm の位置に、またせん断補強筋 D6 は 100 mm ピッチに配置され、梁端面には厚さ 9 mm の定着鋼板が溶接されている。なお、この試験体は、既往の研究から本数値解析手法により、衝撃挙動を比較的精度よく同定可能であることが確認されている。

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に基づき算定している。また、せん断余裕度 α は、 V_{usc} を P_{usc} で除した値である。本試験体の場合には $\alpha > 1.0$ となっていることより、静載荷時に曲げ破壊が卓越して終局に至ることが分かる。表-2、3には、コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

2.2 解析ケース

表-4には、本研究における解析ケースの一覧を示している。本研究では、工学的に有用な範囲の衝突面形状による影響を検討するため、図-2に示す4種類の重錘先端部形状をモデル化して解析を行った。解析はいずれの場合も単一載荷とし、衝突の初速度および増分速度を 1 m/s として最大 5 m/s までの衝突速度に対して実施した検討を行った。したがって、解析ケースは重錘4種類と衝突速度5種類の計20ケースとなる。なお、解析ケース名の第一項目 F は重錘が扁平な場合を、R は重錘先端部の曲率を有する場合を示しており、R に続く整数は重錘先端部の曲率半径 (cm) を表している。また、第二項目の V に続く整数は重錘の衝突速度 V (m/s) を表している。検討項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、単に支点反力)、載荷点変位 D (以後、単に変位) の各応答値

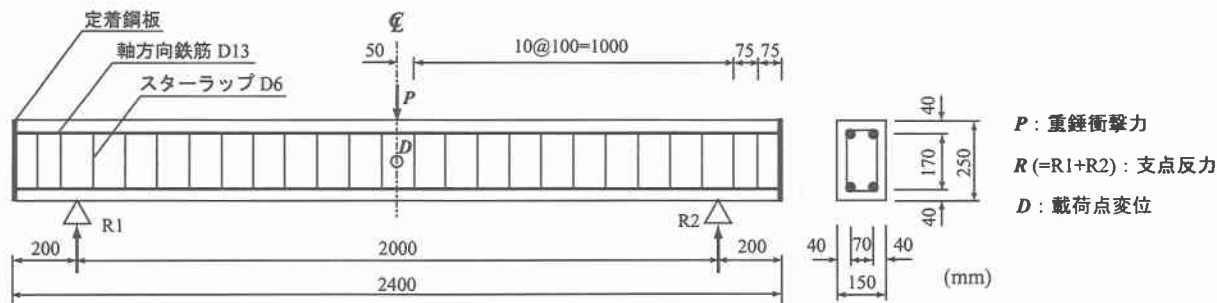


図-1 RC 梁の形状寸法および検討項目

表－１ RC 梁の静的設計値一覧

主鉄筋比 %	せん断 スパン比 a/d	静的 せん断耐力 V_{usc} (kN)	静的 曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断 余裕度 α
0.8	4.76	143.5	39.1	3.6

表－２ コンクリートの力学的特性値

実験時材令 (日)	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
36	41.4	23.1	0.23

表－３ 鉄筋の力学的特性値

鉄筋名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D13	SD345	373	206	0.3
D6	SD295A	368		

表－４ 解析ケース一覧

解析ケース名	曲率半径 r (mm)	衝突速度 V (m/s)
F-V1～F-V5	—	1, 2, 3, 4, 5
R27-V1～R27-V5	270	
R18-V1～R18-V5	180	
R9-V1～R9-V5	90	

である。

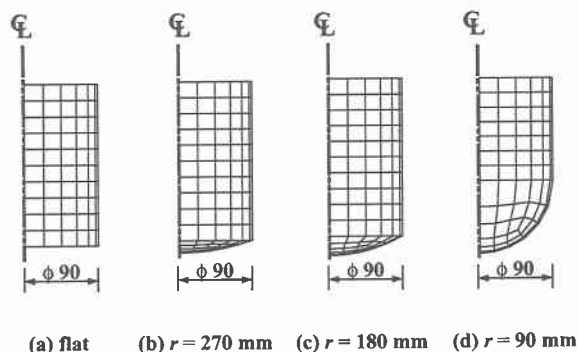
2.3 数値解析モデル

図－３には、R9 試験体に関する有限要素モデルを示している。解析対象は、RC 梁の対称性を考慮してスパン方向および断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである。適用した要素タイプは、8 節点あるいは 6 節点の三次元固体要素である。総節点数および総要素数は、図－３に示すモデルの場合でそれぞれ 9,289, 7,316 である。要素の積分点数は 1 点積分を基本としているが、軸方向鉄筋に関しては断面方向に 1 要素でモデル化しているため、解析精度を考慮して 8 点積分としている。なお、RC 梁は、形状寸法に即して忠実にモデル化している。ただし、軸方向鉄筋は公称断面積と等価な正方形固体要素として簡略化している。重錘は、質量 300 kg、全長 1.0 m かつ直径 180 mm の円柱体を基本とし、衝突部が仮定した先端形状となるよう忠実にモデル化している。なお、RC 梁に作用する衝撃荷重は、この重錘要素の全節点に所定の速度を付加することにより与えている。また、実際に即した数値解析的検討を行うため支点治具は著者等が実験で用いているものをモデル化した。

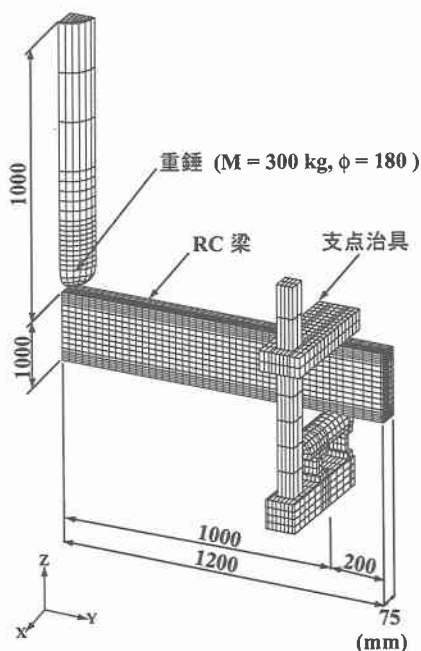
コンクリートと重錘および支点治具の要素間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリートと軸方向鉄筋要素間には、完全付着を仮定している。なお、全数値解析時間は、重錘が RC 梁に衝突した時点から RC 梁がほぼ定常状態に至るまでの 160 ms 間とした。

2.4 材料物性モデル

コンクリート要素および鉄筋要素に用いた物性モデルは、既往の研究¹⁾により提案されたものを採用している。また、重錘、支点治具、スターラップおよび定着鋼板の要素に関しては弾性体モデルを適用している。これ



図－２ 重錘先端形状モデル一覧



図－３ 有限要素モデル (R9 試験体)

らの要素の弾性係数 E 、ポアソン比 ν には公称値を用いることとし、それぞれ $E = 206$ GPa、 $\nu = 0.3$ としている。

本研究では、市販の汎用コードに組み込まれている単純な構成則を用いた弾塑性衝撃応答解析手法による RC 梁の数値解析的検討を目的としていることより、コンクリートおよび鉄筋のひずみ速度効果やコンクリートのひずみ軟化現象は考慮していない。また、質量に比例する粘性減衰定数は、予備解析を行い RC 梁の最低次固有振動数に対して 0.5 % と仮定している。

3. 数値解析的検討

3.1 先端部曲率が異なる場合の各最大応答値の比較

図－４(a)には、全解析ケースの最大重錘衝撃力 P と衝突速度 V の関係を示している。なお、図中の □ は先端部形状が F、▲ は R27、● は R18、☆ は R9 の結果を示している。図より、いずれの先端形状に関しても衝突速度 V の増加にともない最大重錘衝撃力 P はほぼ線形的に増加しており、特に先端形状が扁平な場合に関しては衝撃力の増加率が大きいことが分かる。これは、先端形状が扁平な場合には、重錘先端部の載荷面積が大きいことにより、荷重が集中しないため載荷点部のコンクリートの塑性化が抑制され、衝突速度の増大とともに発生衝撃力も

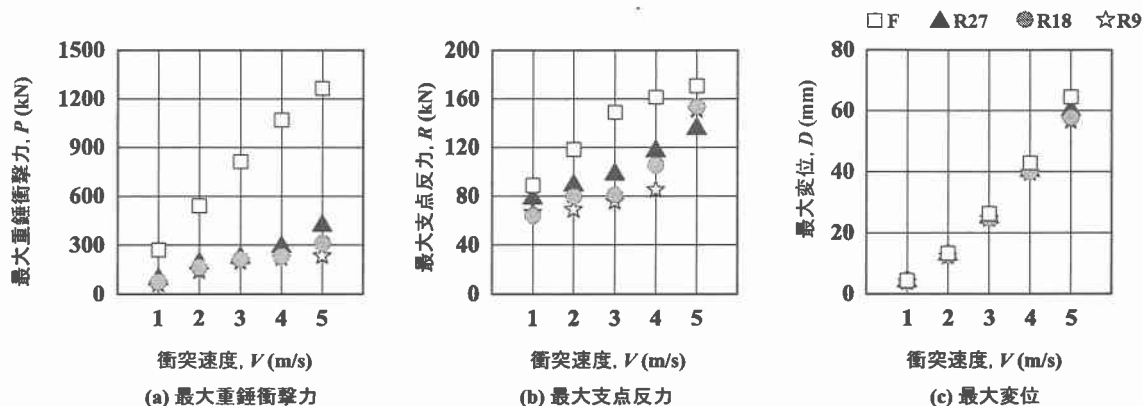
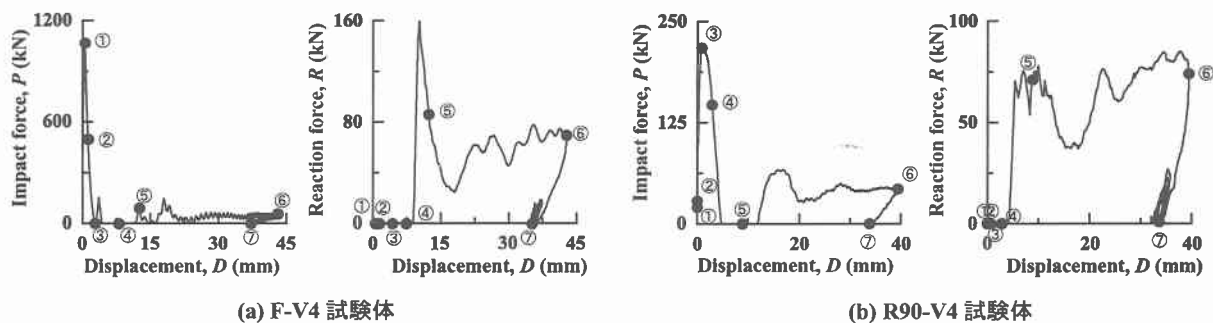
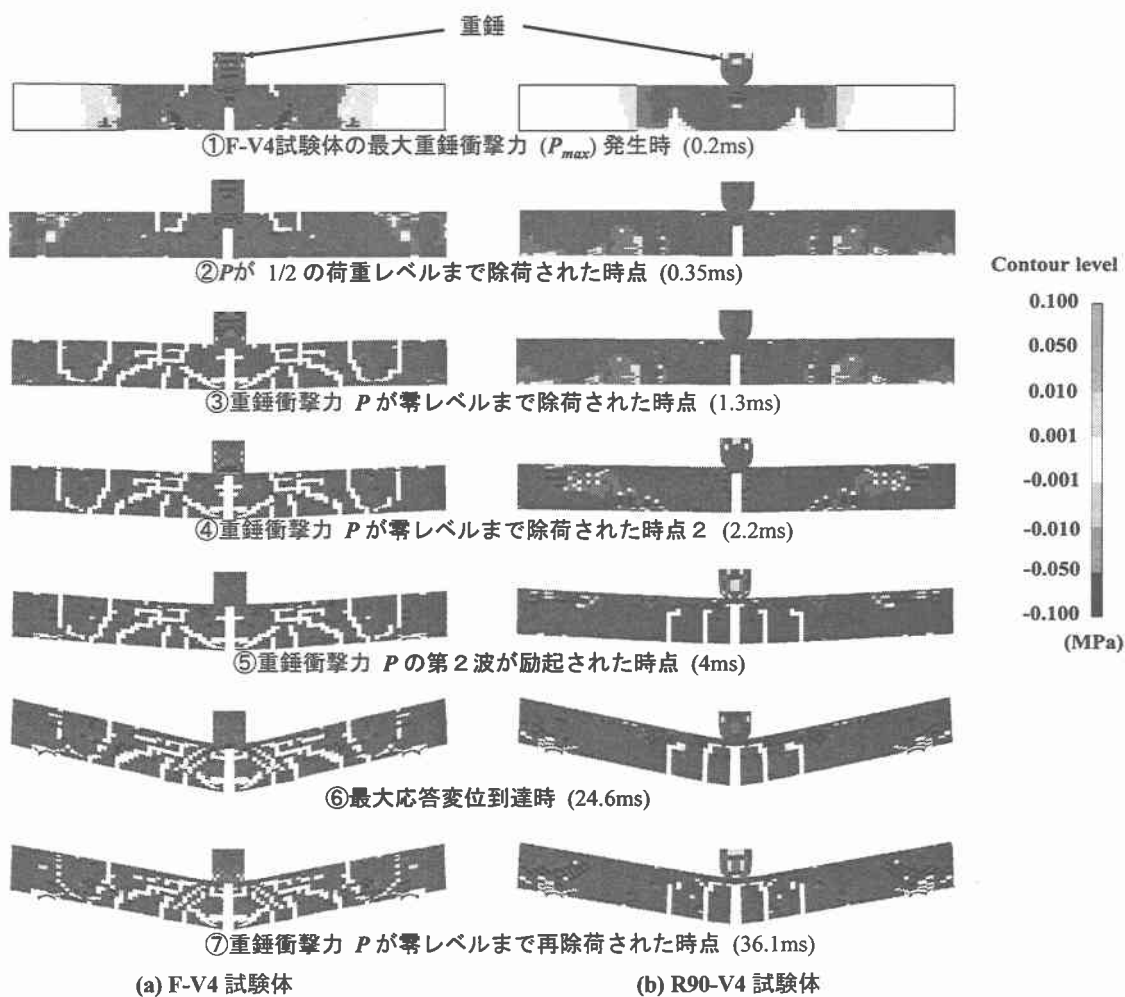


図-4 各最大応答値と衝突速度に関する数値解析結果の比較



重錘衝撃力および支点反力-変位履歴曲線



衝撃挙動および第 1 主応力分布の推移状況 (変形倍率 5 倍)

図-5 荷重-変位曲線と第一主応力分布に関する数値解析結果の比較

増大するためと推察される。一方、曲率の大きい場合には、重錘先端部の載荷面積が小さいことより、衝突速度の小さい段階から載荷点部のコンクリートに荷重が集中化して塑性化が進行するため、発生衝撃力も小さく増加率も小さくなるものと考えられる。

図-4(b)には、全解析ケースの最大支点反力 R と衝突速度 V の関係を示している。図より、最大支点反力の場合には、図-4(a)図の最大重錘衝撃力と衝突速度の関係に比べて先端部曲率の影響が小さく、比較的類似した分布性状を示している。また、 $V=5\text{ m/s}$ の場合を除き同一衝突速度の場合には、先端部曲率が大きく(曲率半径が小さく)なるにつれて最大支点反力も小さくなる傾向は最大重錘衝撃力の場合と同様である。なお、R18およびR9の $V=4\text{ m/s}$ から 5 m/s において最大支点反力が急激に増加しているのは、この衝突速度近傍から耐荷機構が変化し、最大支点反力の励起される時間が異なってくることに関連しているものと考えられる。

図-4(c)には、全解析ケースの最大変位 D と衝突速度 V の関係を示している。図より、衝突速度が大きくなるにつれて先端部曲率の影響が若干見られるが、最大変位は先端部形状にかかわらず良く一致していることが分かる。このことより、衝突速度が同じ場合には先端部形状にかかわらずほぼ同程度の最大変位を示すことが分かる。

3.2 第1主応力分布の推移状況の比較

図-5には、紙面の都合上ひび割れが発生して塑性化進行が著しい場合であるF-V4およびR9-V4試験体に着目し、重錘衝撃力-変位履歴曲線($P-\delta$ 曲線)、支点反力-変位履歴曲線($R-\delta$ 曲線)および第1主応力分布に関する数値解析結果を示している。図中、各第1主応力分布図は、 $P-\delta$ 曲線および $R-\delta$ 曲線中に付記されている番号①~⑦の状態に対応した分布図である。いずれも、F-V4試験体の各応答状態を基本に整理してある。すなわち、図-5の場合は、①F-V4試験体の最大重錘衝撃力(P_{max})発生時(0.2 ms)、② P が1/2の荷重レベルまで除荷された時点(0.35 ms)、③ P が零レベルまで除荷された時点(1.3 ms)、④ P が零レベルまで除荷された時点2(2.2 ms)、⑤ P の第2波目が励起された時点(4 ms)、⑥最大応答変位到達時(26.4 ms)、⑦ P が零レベルまで再除荷された時点(36.1 ms)である。

図-5より、ひび割れが発生し、塑性化の進行が著しい衝突速度 $V=4\text{ m/s}$ の場合における両試験体の衝撃挙動および第1主応力分布の推移状況について見ると、①では、F-V4試験体に曲げひび割れがスパン中心部の梁下縁から上縁に向かって進展していることが分かる。また、載荷点部から斜め下方に向かってひび割れが僅かに発生している。R9-V4試験体では衝撃力の伝播は見られるもののひび割れは発生していない。②では、F-V4試験体において①の時点で発生した斜めひび割れがアーチ状にスパン中央と支点部の中間付近に向けて進展している。R9-V4試験体は載荷点直下に曲げひび割れが発生している。③では、F-V4試験体のアーチ状のひび割れが梁下縁まで達しており、梁下縁や上縁に新たな曲げひび割れが発生している。上縁からの曲げひび割れの進展は、重錘先端部が扁平な場合には軸方向の載荷幅が広いことにコンクリートとの接触周辺部の拘束が大きいかつそ

の周辺部に応力が集中する傾向を示すため、載荷点近傍が固定端に類似した境界条件になるためと推察される。これに対してR9-V4試験体は②で発生した曲げひび割れとほぼ同様である。これは、重錘先端部の曲率が大きい場合には、軸方向の載荷幅が小さく衝撃力が集中荷重的に作用するため、衝撃初期から静的な曲げ載荷と類似の挙動を示すためと判断される。④では、F-V4試験体の③で発生したひび割れの進展が若干見られる。R9-V4試験体においても③で発生した曲げひび割れに若干の進展が見られる。なお、いずれの試験体も①~④の時点で支点反力は未だ励起されていない。⑤ではF-V4試験体は④で発生した曲げひび割れとほぼ同様である。R9-V4試験体は新たにスパン中央部分に2本の曲げひび割れが発生している。この時点でF-V4試験体の支点反力は最大値から除荷に移行しており、R9-V4試験体の支点反力は最大値が付近まで励起されている。なお、両試験体とも支点反力は一旦減少し、再度増大する傾向を示している。⑥では、F-V4試験体には斜めひび割れと曲げひび割れが混在したひび割れ分布が明瞭に形成されている。R9-V4試験体もスパン中央に集中する曲げひび割れが明瞭に形成されている。⑦では両試験体とも⑥で励起されたひび割れ分布と類似の分布性状を示している。なお、支点反力も重錘衝撃力に対応して除荷に至っている。

以上の数値解析結果より、重錘の先端部形状が異なる場合には、同一質量の重錘が同一速度で衝突した場合においてもひび割れ性状が異なることが明らかとなった。さらに、重錘先端曲率の増大とともにRC梁の破壊性状は、より曲げ破壊が卓越する傾向にあることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、重錘先端形状がRC梁の衝撃挙動に与える影響を数値解析的に検討することを目的として、衝突速度および重錘の衝突面先端形状が異なる場合のRC梁の衝撃挙動に関する数値解析的な検討を行った。本研究より得られた結果を要約すると、以下の通りである。

- 1) 同一衝突速度の場合には、重錘先端部曲率が大きくなるにつれて、最大重錘衝撃力および最大支点反力は小さくなる傾向を示す。一方最大変位は、先端部曲率の大きさにかかわらず、ほぼ同程度の値を示す。
- 2) 同一質量の重錘が同一速度で衝突した場合においても、重錘の先端部曲率の大きさによってひび割れ分布性状が異なることが明らかとなった。RC梁の破壊性状は、重錘の先端部曲率の増大と共により曲げ破壊が卓越する傾向にあることが明らかになった。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げが卓越するRC梁の弾塑性応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999
- 2) 小室雅人, 岸 徳光, 三上 浩, 安藤智啓: 先端形状の異なる重錘を用いた曲げ破壊型RC梁の重錘衝突実験とその解析, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム, No.26, pp.203-208, 2002