

各種先端形状を有する重錘を用いた曲げ破壊型 RC 梁の重錘落下挙動解析

Impact Response Analysis of Flexural-Failure-Type RC Beams using Steel Weight with Various Nose Shapes

室蘭工業大学	正員	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井建設(株)	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

鉄筋コンクリート梁 (RC 梁) の耐衝撃挙動を精度良くシミュレート可能な数値解析手法の確立に向けての研究は、静載荷時の設計概念に基づき主に曲げ破壊型 RC 梁に着目して各研究機関で実施されてきた。著者等も、これまで断面寸法やスパン長が異なる曲げ破壊型 RC 梁に関する三次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を試み、解析結果と実験結果を比較する形で検討を行ってきた。その結果、曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃挙動を簡易な構成則を用いて精度良くシミュレート可能な数値解析手法を提案している¹⁾。

しかしながら、著者らの提案した解析手法の妥当性は、重錘の先端形状が扁平な場合のみを対象として検討されてきた。実際の落石現象や航空機の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様々な曲率を有する場合が想定される。そのため、衝突面曲率の異なる重錘に対しても RC 梁の耐衝撃挙動に関する本数値解析手法の妥当性を検討することが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3種類の重錘を用いた曲げ破壊型 RC 梁の重錘落下挙動解析を行い、実験結果と比較する形で本数値解析手法の妥当性を検討した。なお、本解析には、市販されている衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA (Ver.950) を用いている。

2. 実験概要

図-1には、本数値解析において対象とした RC 梁の形状寸法および配筋状況を測定項目と合わせて示している。用いた RC 梁の形状寸法 (梁幅×梁高×全長) は、150×250×2,400 mm である。また、軸方向鉄筋 (D13) は真かぶり 40 mm の位置に、せん断補強筋 (D6) は 100 mm 間隔に配筋されている。さらに、軸方向鉄筋は梁両端面で厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接されている。

実験は、RC 梁を跳ね上がり防止用治具付の支点治具上に設置し、梁スパン中央部に質量 300 kg の円柱状鋼製重錘を所定の高さより自由落下させることにより行っている。支点治具全体は、RC 梁の回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている。ここでは、曲率半径 r が 1) 1,407 mm (曲率小;CS), 2) 90 mm (曲率中;CM), 3) 30 mm (曲率大;CL) と異なる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、各重錘先端形状に対して $V = 4, 5$ m/s を設定している。従って、実験ケースは、重錘が3種類と衝突速度が2種類の組み合わせからなる計6ケースである。

実験における測定項目は、図-1に示すように重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、支点反力) および載荷点変位 D (以後、変位) に関する応答波形である。表-1には、用いた RC 梁の静的設計値を一覧にして示

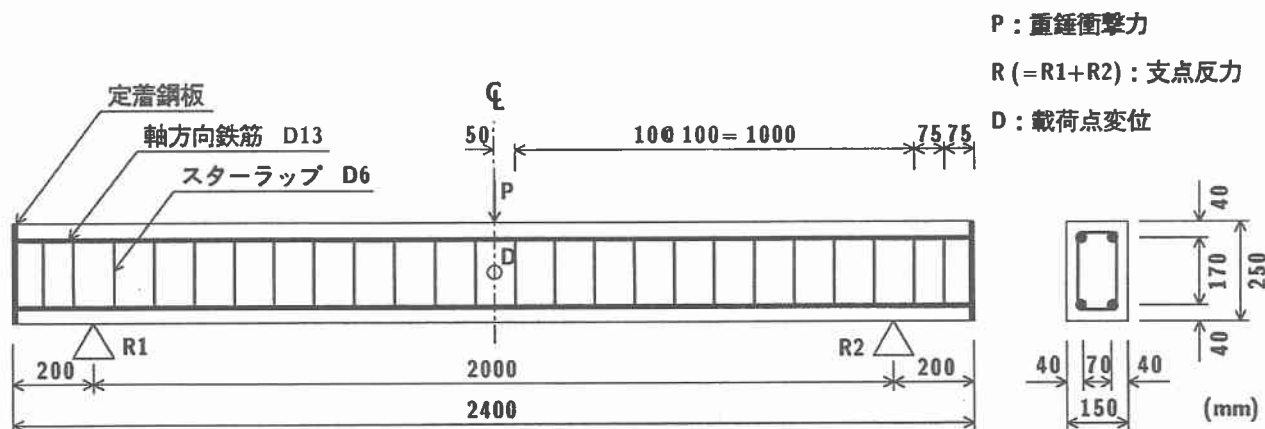
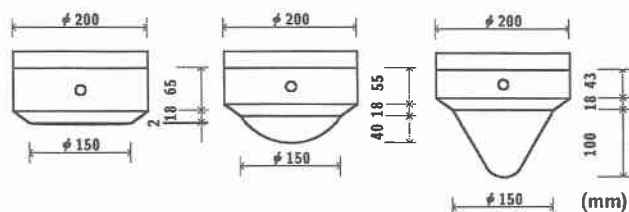


図-1 RC 梁の形状寸法および測定項目



(1)曲率小;CS (2)曲率中;CM (3)曲率大;CL

図-2 重錘先端形状一覧

表-1 試験体一覧

試験体名	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	衝突速度 V (m/s)
CS-4, 5	137.4	38.2	3.6	4, 5
CM-4, 5				
CL-4, 5				

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		

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。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 $\alpha > 1.0$ であることより、RC梁は静載荷時には曲げ型で破壊することが予想される。表-2, 3には、実験時におけるコンクリートおよび鉄筋（上下端鉄筋、せん断補強筋）の力学的特性値を示している。

3. 数値解析条件および仮定

3.1 数値解析モデル

図-3には、曲率大の重錘を用いた場合の全体の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。しかしながら、せん断補強筋要素には、解析時間の短縮を考慮して、剛性、断面積、重量が等価な梁要素を適用した。全節点数および全要素数は、図-3に示すモデルの場合でそれぞれ10263、8395である。なお、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。

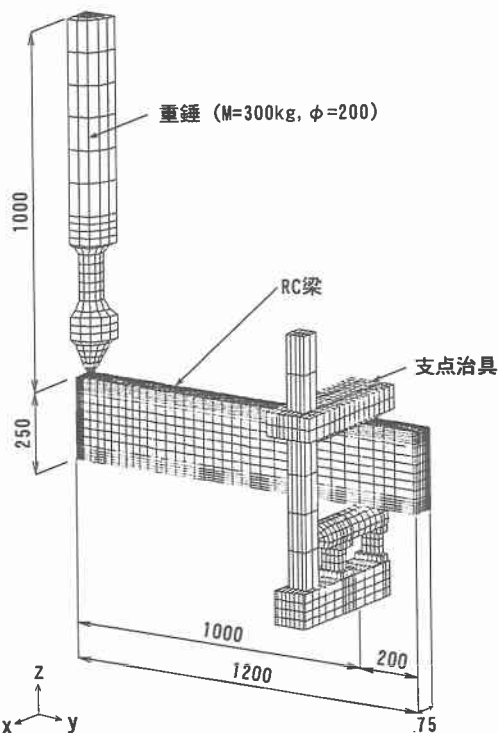


図-3 有限要素モデルの一例 (CL試験体)

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・剝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およびせん断補強筋要素間には、完全付着を仮定している。衝撃荷重は、重錘要素の全節点に設定した衝突速度を付加することにより RC 梁上に設置した形で与えている。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。

3.2 材料物性モデル

コンクリート要素は、圧縮領域に対しては相当歪が $1,500 \mu$ に達した状態で降伏するものと仮定し、完全弾塑性のバイリニア型にモデル化している。一方、引張領域に関しては破壊圧力に達した段階で圧力が零に除荷されるカットオフモデルを用いている。なお、降伏応力には圧縮強度 f'_c を、また引張側の破壊圧力には降伏応力の $1/10 (= 0.1 f'_c)$ を仮定している。降伏条件には von Mises の降伏条件を採用している。

軸方向鉄筋要素には、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを採用している。降伏応力 σ_y 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、材料試験結果に基づき表-3に示す値を採用している。降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うこととし、予備解析結果に基づき塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の 1% と仮定した。

その他の要素（せん断補強筋、重錘、支点治具および定着鋼板）には弾性体モデルを適用している。弾性係数およびポアソン比には、それぞれ $E = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.3$ を用いている。なお、質量に比例する粘性減衰定数は、RC梁の最低次固有振動数に対して0.5%を設定している。

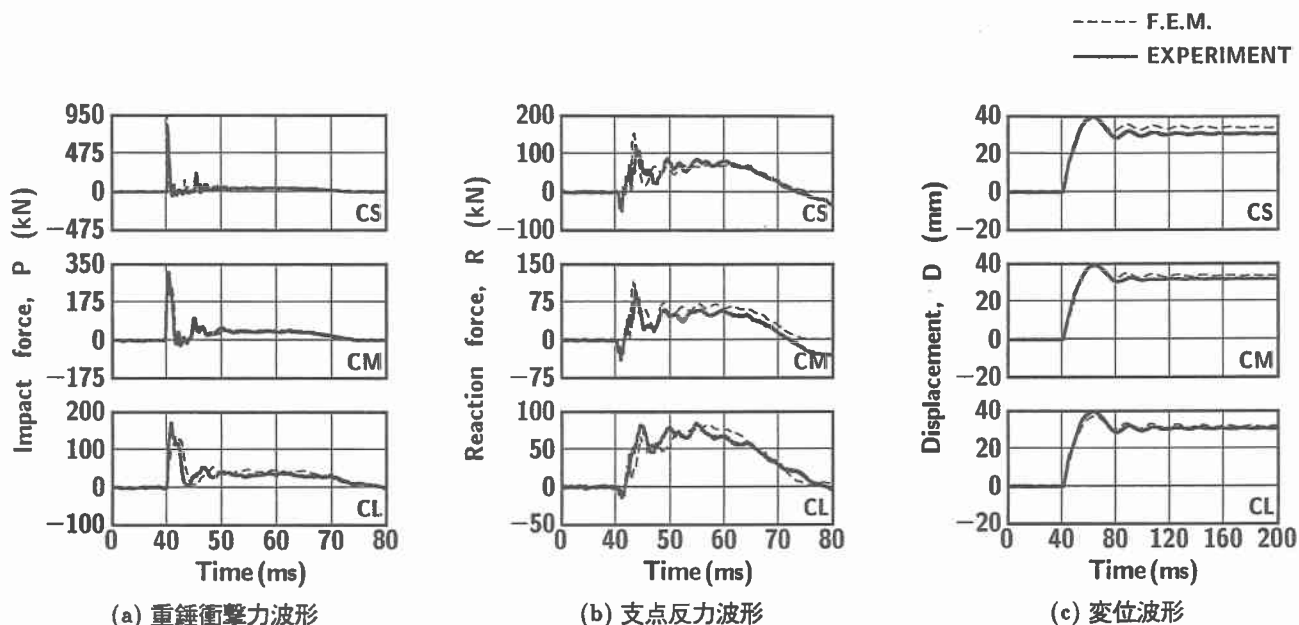


図-4 各種応答波形に関する比較 ($V = 4 \text{ m/s}$)

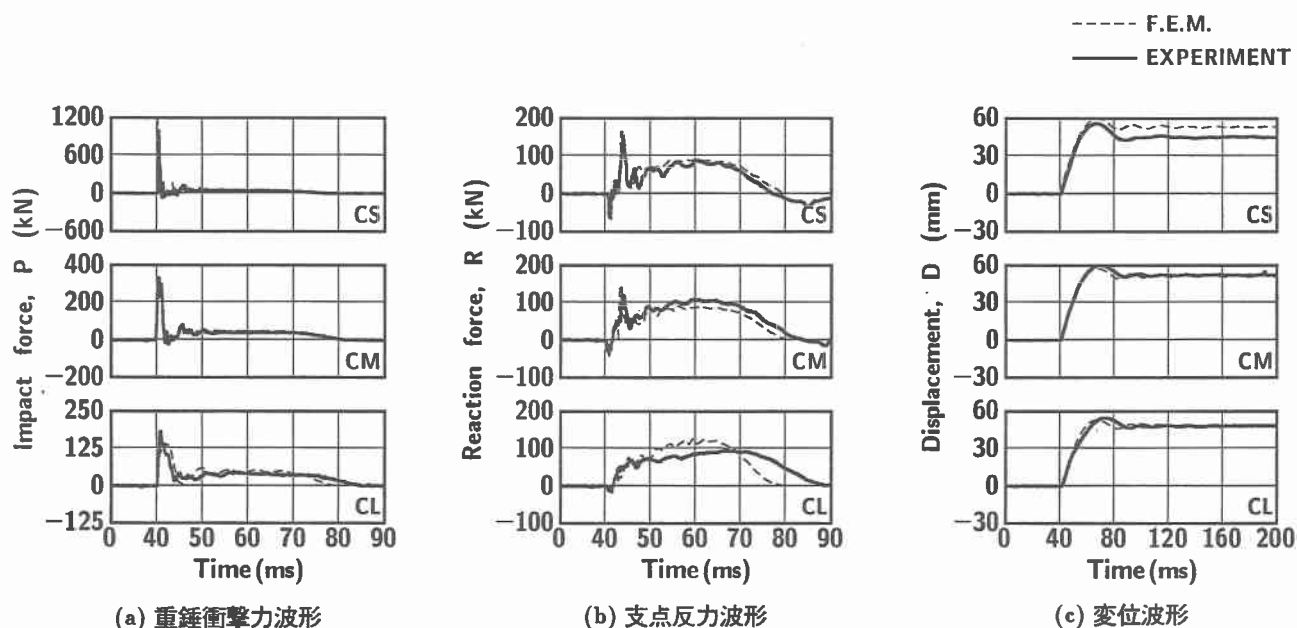


図-5 各種応答波形に関する比較 ($V = 5 \text{ m/s}$)

4. 数値解析結果と実験結果の比較

4.1 各応答波形の比較

図-4 および図-5 には、衝突速度 $V = 4, 5 \text{ m/s}$ における重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 D の各応答波形に関する数値解析結果を実験結果と比較して示している。なお、各波形は原波形を用いて整理している。また、数値解析における重錘衝撃力および支点反力は、重錘および支点治具とコンクリートの要素間に定義した接触面に生じる鉛直方向の接触反力を集積することにより算定している。

最初に、図-4 の衝突速度 $V = 4 \text{ m/s}$ の結果について検討を行う。(a)図の重錘衝撃力波形 P について見ると、数値解析結果と実験結果は、重錘先端部の曲率の大きさ

に拘わらず、最大振幅値には若干の差異が見られるものの、波動の立ち上がりから減衰に至るまで両者で良く対応した分布性状を示していることが分かる。すなわち、両波動は衝撃初期の振幅が大きく継続時間の短い波形成分（第一波）と、その後の振幅が小さく継続時間の比較的長い波形成分（第二波）の二波から成る分布性状を示している。また、曲率の大きさの影響に着目すると、第一波の最大振幅が曲率の増大に伴い大幅に減少していることが分かる。しかしながら、第二波目のピーク値は、曲率の大きさに拘わらずほぼ同様となっている。

(b)図の支点反力波形 R について見ると、ここでも数値解析結果と実験結果は、曲率の大きさに拘わらず両者で大略類似した分布性状となっていることが分かる。すなわち、波動が最大応答値まで比較的急勾配で増加した

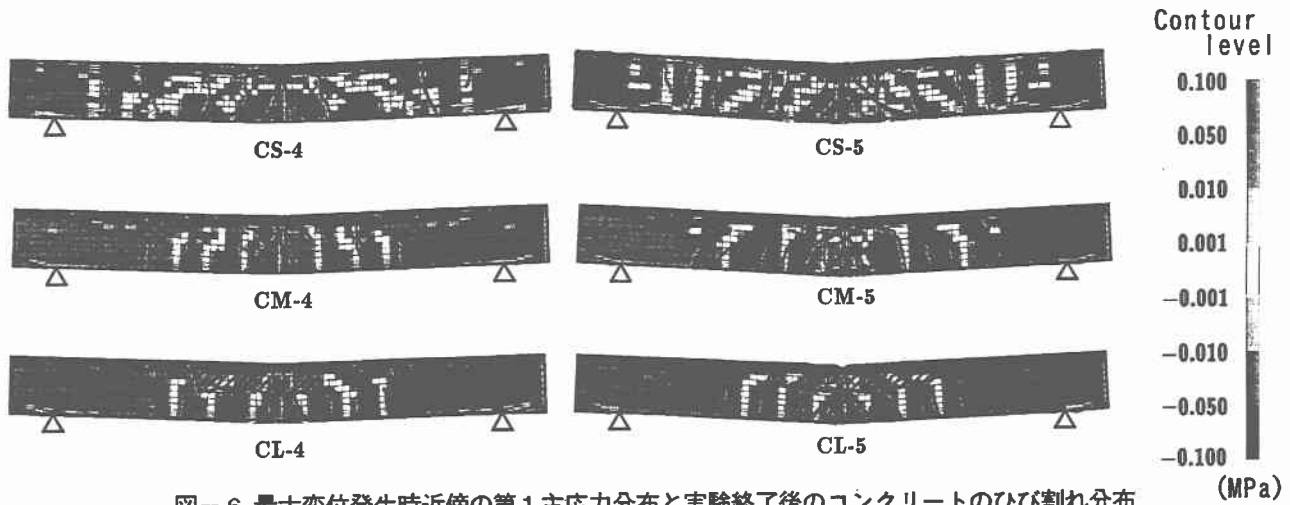


図-6 最大変位発生時近傍の第1主応力分布と実験終了後のコンクリートのひび割れ分布

後一旦減少し、その後再度増大し第2ピーク値に達した後ほぼ同程度の値を持続し、やがて緩やかな勾配で零レベルに減少している。(c)図の変位波形 D に関しても、CS, CM, CL 試験体のいずれの場合においても、最大応答値までは、その立ち上がり勾配や最大値が数値解析結果と実験結果で非常によく対応していることが分かる。また、最大応答値以降に関しても、その振動特性や残留変位値が比較的良く対応している。

図-5には衝突速度 $V=5$ m/s の結果について示している。図より、衝突速度 V が大きく梁の塑性化がより顕著になる場合においても、重錘衝撃力 P 、支点反力 R 、変位 D の各応答波形は、曲率大における R の分布性状を除くと、重錘先端部曲率の大小に拘わらず、数値解析結果と実験結果は比較的良く対応していることが確認できる。なお、曲率大の場合において R の分布性状が異なるのは、実験では後述の図-6に見られるように、載荷点近傍部のコンクリートが著しく剥落し、エネルギーが大きく吸収されたことによるものと推察される。

衝突速度 $V=4$ m/s における波形との差異に着目すると、 $V=5$ m/s の場合には P 、 R の最大振幅が増加し、荷重の作用時間が延長していることが分かる。また、 D の最大振幅および振動周期も増大している。しかしながら、全体的な分布性状は $V=4$ m/s の場合と類似である。

以上より、本数値解析手法を用いることにより、重錘落下衝撃を受ける RC 梁の重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形が、重錘の先端部曲率の大きさに拘わらず、精度良く推定できることが明らかになった。

4.3 第1主応力分布と実験終了後のひび割れ分布の比較

コンクリート要素に適用した材料構成則の考え方に基くと、最大応答変位発生時近傍におけるコンクリート要素の第1主応力が零応力を示している場合には、その要素にひび割れが発生していることを意味している。ここでは、このようにして得られるひび割れ分布予測と実験より得られるひび割れ分布を比較することにより、本評価方法の妥当性について検討を行った。

図-6には、RC 梁の最大変位発生時近傍における RC 梁側面の第1主応力分布を実験終了後の RC 梁側面のひび割れ分布と比較して示している。図より、曲率小 (CS) の場合について見ると、衝突速度 $V=4$ m/s における実験終了後の曲げひび割れはスパン全体に渡って発生している。解析結果では、載荷点部から梁下縁の斜め方向に進展するひび割れを除くと、このような曲げひび割れ分布を大略再現しているものと判断される。 $V=5$ m/s においても、実験終了後の曲げひび割れの分布は $V=4$ m/s の場合とほぼ同様であり、解析結果もこれらの分布を大略再現していることが分かる。

一方、曲率中 (CM) および曲率大 (CL) の場合について見ると、実験終了後の曲げひび割れは、衝突速度 V に拘わらず、曲率小の場合に比べてスパン中央部に集中して発生している。数値解析においても、このような傾向を良くシミュレートしていることが分かる。なお、CM, CL に関する解析結果には、曲率小の場合に見られた斜めひび割れが現れず、実験結果と対応した傾向を示している。

5. まとめ

本研究では、先端部曲率が異なる3種類の重錘を用いた曲げ破壊型 RC 梁の重錘落下挙動解析を行い、実験結果と比較する形で本数値解析手法の妥当性を検討した。本研究より得られた結果を要約すると、

- 1) 本数値解析手法を用いることにより、重錘落下衝撃を受ける RC 梁の重錘衝撃力、支点反力、変位に関する応答波形を、重錘先端形状に拘わらず精度良くシミュレートすることが可能である。
- 2) 最大変位発生時の第1主応力分布図を用いて、RC 梁に発生するひび割れ分布を、重錘先端形状に拘わらず比較的精度良く予測することができる。

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.