

支持条件を変化させたRC版の重錘落下衝撃挙動に関する数値解析的検討

Numerical analysis of RC slabs with various support condition under falling-weight impact loading

室蘭工業大学大学院 〇フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 三井住友建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 室蘭工業大学大学院 正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
 室蘭工業大学大学院 学生会員 玉木 美帆 (Miho Tamaki)

1. はじめに

我が国における土木構造物に関する設計法は、許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計法に移行しつつある。このような状況下においては、耐衝撃構造物の設計に関しても性能照査型設計に移行していくことが肝要であると考えられる。著者らは過去にRC部材の衝撃挙動解析に関して、小型部材を対象に各種解析手法の妥当性の検討等を実施しており、境界条件や減衰定数に留意することによって信頼性の高い解析を実施することが可能であることを示している¹⁾。また、小型RC梁に関する解析手法を踏襲した場合のRC版への適用性に関する検討も行い、鉄筋要素に梁要素を適用した場合には、固体要素を適用する場合よりも再現性が高いことを示している²⁾。しかしながら、より実構造に近いRC版部材に対する衝撃挙動解析手法に関しては、未だ解析事例が少ないのが現状であり、その支持条件についても四辺支持についての検討のみであった。

このような背景から、本研究では、支持条件を変化させた場合にも適用可能な数値解析を確立することを目的に、重錘落下衝撃実験結果との比較のもとに従来の解析手法の妥当性に関する検討を行った。本研究では、四辺支持、二

辺支持二辺自由(以後、単に二辺支持)、一辺二隅角支持矩形版を対象に検討を行った。

なお、本数値解析には、三次元有限要素法に基づいた衝撃応答解析用汎用プログラムLS-DYNA³⁾を用いている。

2. 試験体概要

図-1には、本数値解析で対象としたRC版の形状寸法および配筋状況を示している。RC版の寸法は2,000×1,800mmであり、下端鉄筋にはD16を用い、平均かぶり厚は40mmとした。また、支点軸を設置した辺に関しては外縁に溝型鋼を配置し溶接することで定着を確保している。試験体の支持条件は、四辺支持、二辺支持、および一辺二隅角支持の3種類とし、辺支持については支持間隔を1,750mmと設定した。各辺における治具は上下方向への変位を抑え回転を許容する単純支持に近い支持状態であり、隅角支持は上下方向への変位を抑え全方向に回転を許容するピン支持の状態になっている。重錘落下位置は重錘直径に対する鉄筋間隔の影響が生じないように、RC版中央部の鉄筋交差位置直上としている。重錘は質量300kg、直径90mmの鋼製円柱を用いた。衝撃載荷実験は、所定の高さから重錘を一度だけ自由落下させる単一載荷とし、実験を行っている。

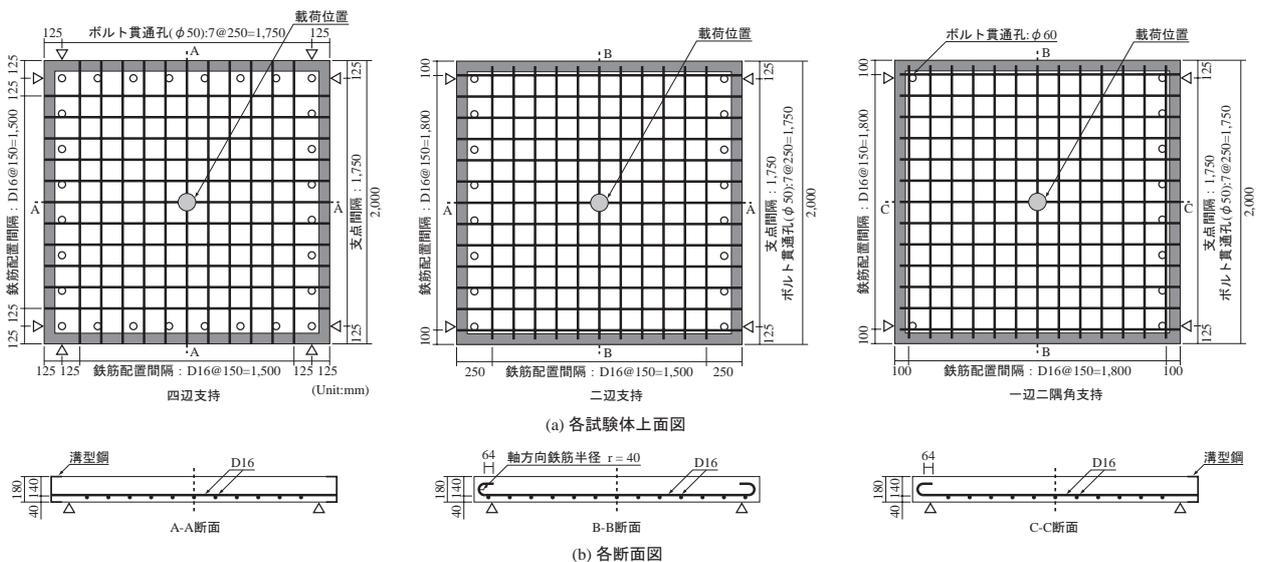


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

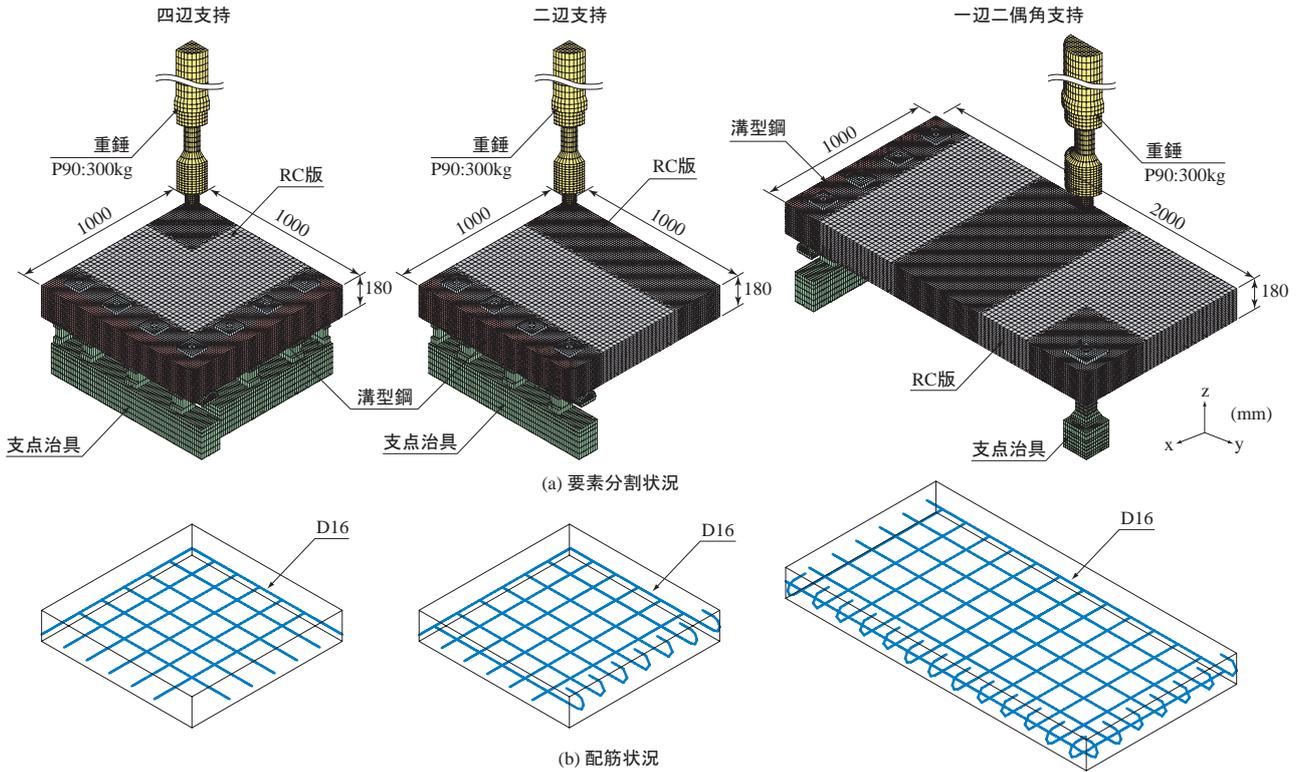


図-2 要素分割状況および配筋状況

表-1 数値解析ケース一覧

ケース名	支持条件
S4	四辺支持
S2	二辺支持二辺自由
S1	一辺二隅角支持

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデル

図-2には、本数値解析で用いたRC版の要素分割状況および配筋状況を示している。解析対象のモデル化は、溝型鋼には4節点版要素、鉄筋要素には2節点梁要素、その他の要素には8節点固体要素を適用した。数値解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮し、四辺支持および二辺支持については1/4モデルとし、一辺二隅角支持については1/2モデルとした。支持部は、実験時と同様に支点の底部において上下方向への変位を抑え回転のみを許容することとした。なお、対称面にはシンメトリー条件を入力している。また、コンクリートと重錘および支点治具間には、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。コンクリートと鉄筋および溝型鋼の間は完全付着としている。衝撃力は衝突位置に配置した重錘に初速度を入力することにより与えている。なお、重錘質量は実験と同様に300kgとしている。

表-1には、本数値解析で対象とした解析ケースの一覧を示している。

RC版の要素分割に関しては、軸方向要素の基本長を25mmに設定し、支点治具周辺や重錘落下近傍部の様に大きなひび割れが発生すると推察される部分は要素長を12.5mmとし、また重錘落下部の要素長は重錘要素のそれと一致す

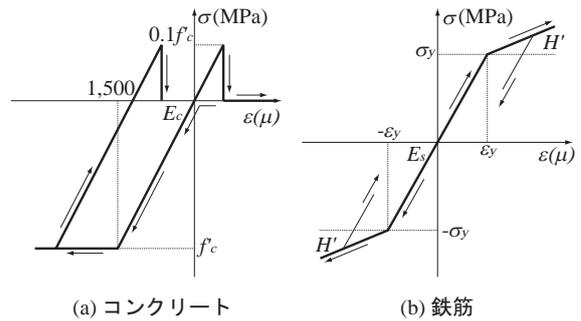


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

表-2 数値解析に用いた各材料の力学的特性値

材料	密度 ρ (kg/m ³)	強度 (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35	26.6	17.7	0.167
鉄筋	7.85	383	206	0.3
重錘	6.38	-	206	0.3

るように6.25mmとした。版厚方向には要素長を約10mmとして分割している。各解析ケースの総節点数および総要素数はS4試験体が98,715, 90,659, S2試験体が94,354, 86,644, またS1試験体が174,099, 161,017である。

減衰定数は、質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数に対して5.0%と設定している。なお、本数値解析は、重錘がRC版に衝突した時点をも0msとし、RC版の挙動が定常状態に至るまでの80ms間について実施した。

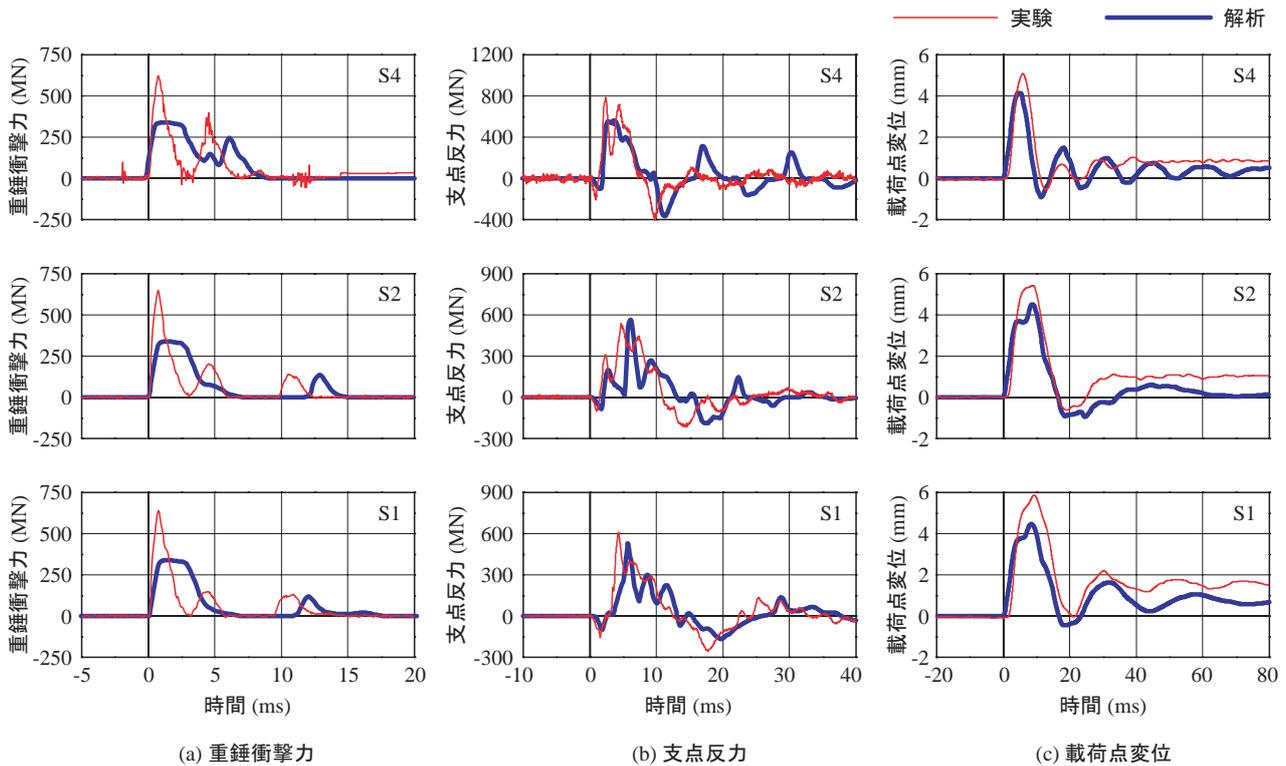


図-4 各種応答波形

3.2 材料物性モデル

図-3には、各材料の等価一軸応力-ひずみ関係を示している。

図-3(a)に示すように、コンクリート要素の等価一軸応力-ひずみ関係は、圧縮側に関しては折線近似による相当応力-相当ひずみ関係を仮定し、圧縮強度を降伏強度とする完全弾塑性のバイリニア型を適用している。すなわち、圧縮側に関しては、相当ひずみが $1,500\mu$ に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定している。また、引張側に関しては線形の相当応力-相当ひずみ関係を仮定し、応力が引張強度に達した時点で引張応力を伝達しないとするカットオフを定義している。なお、引張強度は既往の研究¹⁾の場合と同様に圧縮強度の1/10と仮定している。また、降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。

図-3(b)に示すように、鉄筋要素に用いた等価一軸応力-ひずみ関係は、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である。降伏の判定には、von Mises の降伏条件を適用している。塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の1%と仮定している。

表-2には、本数値解析に用いた各材料の力学的特性値を示している。

4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 各種応答波形

(1) 重錘衝撃力波形

図-4には、実験結果および解析結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位に関する各応答波形を示している。図中、実験結果を赤色、解析結果を青色で示している。

図-4(a)より、重錘衝撃力波形における実験結果は、載

荷初期の振幅が大きい第1波と、その後の振幅が小さい第2波および第3波で構成されていることが分かる。また、最大重錘衝撃力は支持条件に関わらず同程度の値を示している。実験結果と解析結果を比較すると、いずれの解析結果においても、重錘衝撃力の最大値は実験結果と比較して小さい値を示している。また、解析結果の衝撃力波形を見ると、実験結果よりも緩やかな形状を示しており、実験結果を再現するには至っていないことが分かる。

(2) 支点反力波形

図-4(b)より、支点反力波形における実験結果は、最大支点反力について見ると、S4の場合にはS2およびS1の場合よりも大きな値を示している。次に実験結果と解析結果を比較すると、最大支点反力はS4およびS1の場合においては実験結果よりも大きな値を示しているものの、実験結果と近似していることが分かる。S2の場合には実験結果と同程度の値を示している。また、時刻歴の分布性状に関しては、S4の場合には実験結果よりも周期が長く示され、振幅は大きく示されている。S2の解析結果においては振動が明確に現れていない。一方、S1の場合には、周期および振幅共に実験結果と同程度となっており実験結果を良く再現していることが分かる。

(3) 載荷点変位波形

図-4(c)より、実験結果の載荷点変位波形は、重錘重載荷初期に正弦半波状の第1波が励起した後、減衰自由振動を呈している。その自由振動成分の周期はS4、S1、S2の順に大きくなっていることがわかる。また、最大載荷点変位に関しては、支持条件に関わらず同程度の値を示している。実験結果と解析結果を比較すると、最大載荷点変位に関してはいずれの支持条件においても、解析結果が実験

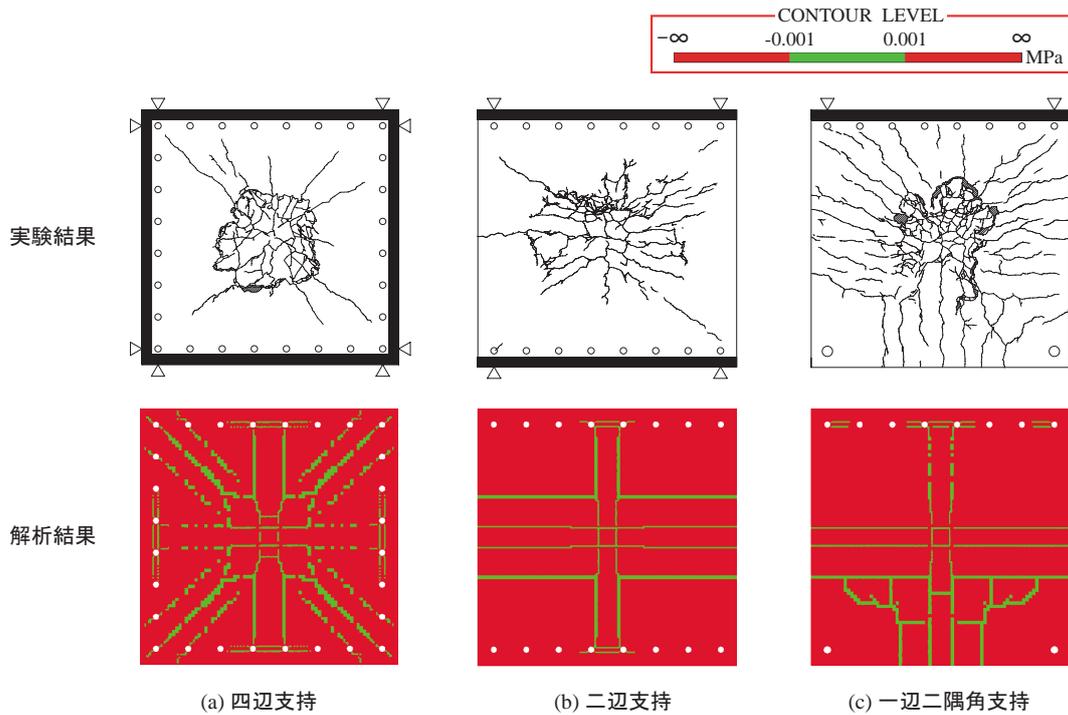


図-5 ひび割れ分布性状

結果よりも小さい値を示している。時刻歴の分布性状に関しては、支持条件に関わらず解析結果の周期は実験結果よりも大きい。残留変位を見ると、いずれの支持条件においても解析結果は過小に評価していることが分かる。

4.2 ひび割れ分布性状

図-5には、各ケースの数値解析結果から得られる最大変位時におけるRC版裏面の第一主応力分布図とひび割れ分布図を示している。図中、緑色の領域(コンクリート要素の第一主応力が $-0.001 \sim 0.001$ MPaの範囲)は応力零近傍要素を示しており、最大変位時にはひび割れが発生しているものとして評価することが可能である。

実験結果に関しては、図-5(a)の四辺支持の場合には、荷重点を中心として円形状にひび割れが発生していることより、押し抜きせん断破壊に至っていることが推察される。図-5(b)の二辺支持の場合には、支持方向と平行に曲げひび割れが多く発生していることが分かる。また、図-5(c)を見ると、一辺二隅角支持の場合には、荷重点近傍にせん断ひび割れが発生し、自由辺に向かって曲げひび割れが進展している。解析結果を見ると、図-5(a)よりS4の場合に関しては、荷重点を囲む押し抜きせん断ひび割れが発生しており、それらの周辺ひび割れから放射状に曲げひび割れが広がっている。数値解析から得られる曲げひび割れは実験結果より多く分布していることが分かる。また、図-5(b)を見ると、S2の場合には自由辺に向かう曲げひび割れが顕在化して発生している。実験結果と比較すると、荷重点部の押し抜き型のひび割れや曲げひび割れが過小に評価されている。また、図-5(c)より、S1の場合には辺支持に平行な方向および自由辺に向かってひび割れが発生しており、S1の場合と同様にひび割れの発生が少なく、過小に評価される傾向にあることが分かる。

5. まとめ

本研究では、耐衝撃用途RC構造部材の性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた検討の一環として、各種の支持条件を有するRC版を対象に破壊挙動を適切に再現可能な数値解析手法の確立を目的として、重錘落下衝撃荷重実験結果との比較により、その妥当性を検討した。以下に本研究で得られた事項を整理する。

- (1) 重錘衝撃力波形に関しては、実験結果を適切に再現するには至っていない。
- (2) 支点反力波形および荷重点変位波形において、最大応答値や除荷後の減衰自由振動特性は概ね実験結果を再現可能である。
- (3) ひび割れ分布性状に関しては、四辺支持の場合は概ね実験値を再現しているが、二辺支持および一辺二隅角支持の場合には、実験結果と比較して過小評価となる傾向がある。

今後、荷重点変位波形およびひび割れ分布性状について、更に検討を重ね、解析手法の精度向上に向けて研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静荷重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
- 2) 岸 徳光, 三上浩, 岡田慎哉, 鈴木健之: RC版の衝撃応答解析における主鉄筋のモデル化に関する一検討, 土木学会北海道支部論文報告集, No.64(CD-ROM), A-53, 2008.3
- 3) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.6