支持条件の異なる矩形 RC 版の耐衝撃挙動に関する数値解析

Numerical analysis on impact resistant behavior of rectangular RC slabs with various supporting conditions

室蘭工業大学大学院	○ 学生員	鄭	丹丹 (Dandan Zheng)
室蘭工業大学大学院	正 員	小室	雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院	正 員	栗橋	祐介 (Yusuke Kurihashi)
釧路工業高等専門学校	フェロー	岸	徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

本研究では、落石などの衝撃荷重を受ける落石覆工(ロッ クシェッド) 頂版部や竜巻飛来物などの偶発荷重を受ける 鉄筋コンクリート版(RC版)を対象に、有限要素法を用い た三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した.また、数値解析 結果と別途実施した衝撃荷重載荷実験結果¹⁾を比較するこ とにより、これまで主に RC はり部材での妥当性が確認さ れている既往の解析手法²⁾の2次元部材への適用性につい て検討を行った. ここでは, 支持条件および衝突速度を変 化させた計6ケースを対象としている。なお、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.R9) を用いた.

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、本数値解析で対象とした矩形 RC 版の形状 寸法および配筋状況を示している. 試験体の形状寸法(幅 ×長さ×版厚)は2000×2000×180 mm であり,各辺の支点 間距離は 1750 mm となっている. 配筋については D16 を 下端のみに、版中央部より150mm間隔で格子状に配置し

表-	1 実験:	ケース一覧	
		per play the play	

試験 体名	支持条件	版厚 t (mm)	衝突速度 V(m/s)	コンクリート 強度 <i>f</i> ['] _c (MPa)
S4	四辺単純支持	180	4.0,4.5,5.0	26.3
S2	二辺単純支持			26.2

125 ボルト貫通孔 (Ф50): 7@250=1750 125 125 25 125 7@250=1750 下端鉄筋: 10@150=1500 12@150=1800 載荷位置 ボルト貫通孔 (Ф50): 2000 Ā 下端鉄筋: 25 25 25 下端鉄筋:10@150=1500 125 125 125125 250 2000 溝型鋼 D16 $\begin{array}{c}180\\40&140\end{array}$ $180 \\ 140$ 40 A-A 断面図 (a) 四辺単純支持

ており、平均かぶり厚は40mmとしている。鉄筋の定着 方法は図に示すように支持条件によって異なっている。す なわち,支持辺がある場合は,端部に設置した溝型鋼に鉄 筋を溶接固定し、定着長を節約している。その他の端部で は鉄筋を折り曲げて圧縮側に定着を図っている。

表-1には、本解析で対象とした実験ケースを一覧にし て示している.実験ケースは支持条件(四辺支持,二辺支 持)および衝突速度 V (= 4.0, 4.5, 5.0 m/s)を変化させた計 6試験体である.また、表中の試験体名のSに付随する数 値は支持条件(4:四辺単純支持,2:二辺単純支持)を表し ている.なお,表中に示すコンクリートの圧縮強度 f' は 別途実施した材料試験から得られた値である.

2.2 実験方法

写真-1には、四辺単純支持(S4 試験体)における衝撃載 荷実験状況を示している.実験は質量 300 kg, 衝突部直径



衝撃載荷実験の状況(四辺単純支持) **写真-1**



図-1 試験体概要



図-2 数値解析モデル

90 mm の重錘を所定高さから RC 版中央部に一度だけ自由 落下させる単一載荷法に基づいて行っている.なお,重錘 の落下高さは事前に重錘の衝突時速度を計測し,所定の衝 突速度になる落下高さに換算している.本解析に用いた試 験体の衝突速度は支持条件にかかわらず,最小で4.0 m/s, 最大で5.0 m/s とした.重錘底部は,片当たりを防止する ため2 mm のテーパを有する球面状となっている.各支点 部では,支持条件によらず RC 版の浮き上がりを貫通ボル トとナットを用いて拘束するものの,回転を許容するピン 支持に近い状態となっている.

本実験の測定項目は,(1) 重錘に内蔵されたロードセル から得られた重錘衝撃力,(2)支点治具に設置されたロー ドセルから得られた支点反力の合計値(以後,単に支点反 力)および(3)レーザ式非接触型変位計による RC 版の載荷 点変位(以後,載荷点変位)である.また,実験終了後には 版裏面のひび割れを観察している.

3. 数值解析概要

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 を示している。本解析では、構造および荷重条件の対称性 を考慮した 1/4 モデルを採用し、RC 版、重錘および支点 治具も実形状を極力再現する形で詳細にモデル化してい る。また、鉄筋には2節点梁要素、溝型鋼には4節点シェ ル要素、その他の要素には全て8節点の三次元個体要素を 用いてモデル化している。要素の積分点数に関しては、固 体要素は1点積分、梁要素は2×2 Gauss 積分とした。RC 版の要素分割に関しては、幅方向および長さ方向の要素長 を 25 mm、厚さ方向の要素長を 10 mm としている。

境界条件は, RC版の対称切断面において法線方向変位 成分を拘束している.また,各辺の支持部においては回転 のみ許容したピン支持条件となっている.なお,コンク リートと鉄筋および溝型鋼間には完全付着を,コンクリー トと重錘,貫通ボルト,ナットおよび支点治具間には面と 面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義した. なお,摩擦係数は,事前解析結果に基づき0.2と仮定した. 衝撃荷重は,重錘モデルを RC版に接触する形で配置し,



図-3 材料構成則

その全節点に初速度を付加することにより作用させること とした.減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし, 鉛直方向最低固有振動数に対して5%と設定している. 3.2 材料構成則

図-3には、本数値解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係を示している.なお、全ての材料においてひずみ速度効果は考慮していない。以下に、各材料物性モデルの概要を述べる.

(1) コンクリート

図-3(a)には、コンクリート要素の応力一ひずみ関係を示 している。圧縮側に関しては、相当塑性ひずみが 0.15% に 達した段階でコンクリートが降伏する完全弾塑性体のバイリ ニア型モデルを用いており、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。引張側は相当応力がその値 に到達した時点でカットオフされるものとしており、引 張強度に関しては既往の研究²⁾を参考に**表**-1に示す圧縮 強度 f'_c の 1/10と仮定した。なお、コンクリートの内部摩 擦角は 30度と設定している。また、単位体積質量 ρ_c およ びポアソン比 v_c はそれぞれ公称値を用い、 $\rho_c = 2.35 \times 10^3$ kg/m³、 $v_c = 0.167$ とした。

(2) 鉄筋

図-3(b)には,鉄筋要素に用いた応力一ひずみ関係を示 している.鉄筋要素に用いた物性モデルは,降伏後の塑性 硬化係数 H'を考慮した等方弾塑性モデルを採用し,塑性硬 化係数 H'は弾性係数 E_s の1%と仮定している.降伏の判 定は von Mises の降伏条件に従うこととした.また,鉄筋 の降伏応力 f_y は材料試験により得られた値(f_y = 374 MPa) を採用し,単位体積質量 ρ_s は ρ_s = 7.85×10³ kg/m³,弾性 係数 E_s は E_s = 206 GPa,ポアソン比 v_s は v_s = 0.3 とした. (3) **重毎.支点治具および溝型鋼**

重錘,支点治具および溝型鋼の全要素に関しては,実験時に塑性変形が確認されていないことより,弾性体モデルを適用している.弾性係数 E_s 及びポアソン比 v_s については鋼材の公称値を用いることとし,それぞれ $E_s = 206$ GPa, $v_s = 0.3$ と仮定している.また,単位体積質量 ρ_s は支点治具および定着鋼板には公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³を用いることとし,重錘には質量300 kgを解析モデルの体積で除した値を用いた.

4. 数値解析結果および考察

4.1 各種応答波形

図-4, 図-5には, S4 および S2 試験体に関する衝突 速度 V(=4.0, 4.5, 5.0 m/s)を変化させた全ケースに対する

平成29年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第74号



重錘衝撃力,支点反力,および載荷点変位波形の数値解析 結果を,実験結果と比較する形で示している.なお,横軸 は重錘が RC 版に衝突した時点を原点に取っている.

(a)図に示す重錘衝撃力波形に着目すると,S4 試験体の 場合には,実験結果では最大振幅を示す継続時間が2.5 ms 程度の第1波に振幅が小さい第2波が後続する性状を示し ており,S2試験体ではその性状に加え,10 ms時に第3波 が励起されている.解析結果においても同様な波形性状を 見て取れるが,S4・S2試験体ともに第1波の最大応答値 は衝突速度が大きくなるにつれて,実験結果よりも小さく なる傾向にある.また,第2波,第3波の立ち上がり時刻 は実験結果よりも若干遅く,その継続時間も長い.

(b) 図に示す支点反力波形に着目すると、いずれのケースにおいても、最大支点反力や継続時間に関して解析結果は実験結果を精度良く再現していることが分かる。

(c)図に示す載荷点変位波形に着目すると,実験結果では いずれのケースにおいても継続時間が10~20 ms 程度の正 弦半波状の主波動が励起した後,減衰自由振動に至ってい る.また,衝突速度Vが大きくなるにつれ残留変位も大き くなる傾向にある. 解析結果においても実験結果の最大載 荷点変位や残留変位を大略再現可能であることが分かる. 4.2 ひび割れ分布

図-6には、実験終了後の試験体の裏面ひび割れ分布性 状と各解析ケースの第一主応力コンター図を比較して示し ている.なお、図-3で示したようにコンクリート要素に は、ひび割れ発生荷重に到達した時点でカットオフされる 設定としていることより、第一主応力が零近傍の要素を赤

色で示し、ひび割れを評価している.

まず,実験結果に着目すると,四辺単純支持(S4)の場合 は,いずれの衝突速度においても中心部から対角方向に 沿ってひび割れが進展している.また,衝突速度が大きく なるにつれて損傷も大きくなる傾向にあることが分かる. 二辺単純支持(S2)の場合にも同様な傾向が見て取れるが, 支持条件の影響よりS4試験体には見られない自由辺に直 交する方向に進展するひび割れが分布していることが分 かる

数値解析結果に着目すると,実験結果では確認されてい ない支点部近傍に生じるひび割れが確認できるものの,い



図-6 裏面におけるひび割れ分布比較

ずれの支持条件,衝突速度においても実験結果の放射状に 進展するひび割れや,二辺単純支持条件特有の自由辺に直 交する方向に進展するひび割れを大略再現していることが 分かる.

5. **まとめ**

本研究では鉄筋コンクリート版(RC)を対象に支持条件 および衝突速度を変化させた全6ケースの重錘落下衝撃載 荷実験を対象に、その耐衝撃挙動を適切に評価可能な解析 手法の確立を目的とし、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施 した.本研究で得られた事項を整理すると、以下の通りで ある.

 既往の研究より提案されている解析手法を用いること により、支持条件および衝突速度にかかわらず、実験 結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位波形を概ね 再現可能である.

2) ひび割れ分布に関しても、実験結果には見られない支 点部近傍の損傷が確認されるものの、裏面に放射状に 広がるひび割れや二辺支持条件特有の長さ方向に生じ るひび割れを大略再現可能である。

参考文献

- 岸徳光,三上浩,栗橋祐介:支持条件と版厚を変 化させた RC版の重錘落下衝撃実験と耐衝撃設計法の 提案,構造工学論文集, Vol.59A, No.2, pp.1025-1036, 2013.3.
- 2)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 梁の耐衝撃設計法に関する一 提案,土木学会論文集, No. 647/I-51, pp. 177-190, 2000.