

四辺単純支持矩形 RC 版の耐衝撃挙動に関する衝撃応答解析

Impact response analysis on impact resistant behavior of four-side supported rectangular RC slabs

室蘭工業大学大学院 〇 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 学生員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai)
室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

本研究では、衝撃荷重を受ける RC 版の押抜きせん断破壊性状を数値解析的に適切に評価することを目的として、四辺単純支持された矩形 RC 版を対象に三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、別途実施した衝撃荷重載荷実験結果¹⁾と数値解析結果を比較することにより、コンクリート要素に引張軟化を定義し、かつエロージョンを設定した提案の解析手法に関して、押抜きせん断破壊の再現性について検討した。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)²⁾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四辺単純支持矩形 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 × 210 mm であり、各辺の支点間距離は 1750 mm となっている。配筋については鉄筋 D16 を下端のみに、版中央部より 150 mm 間隔で格子状に配置しており、平均かぶり厚は 40 mm としている。また、試験体の鉄筋比は 0.9 % 程度である。なお、

鉄筋は RC 版の側面に設置した厚さ 7 mm の定着鋼板に溶接固定している。

表-1、表-2 には別途実施した材料試験から得られたコンクリートおよび鉄筋の材料物性値を示している。

2.2 実験方法

写真-1には、四辺単純支持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 90 mm の鋼製重錘を所定高さから RC 版中央部に一回のみ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 V は、明瞭な押し抜きせん断破壊が確認された $V = 6.5 \text{ m/s}$ である。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。支持条件では、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、支持底部の回転を許容するピン支持に近い状態となっている。

表-1 コンクリートの材料物性値

圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
28.9	2.89	19.26	0.167

表-2 鉄筋の材料物性値

呼び径	降伏強度 f_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D16	389	206	0.3

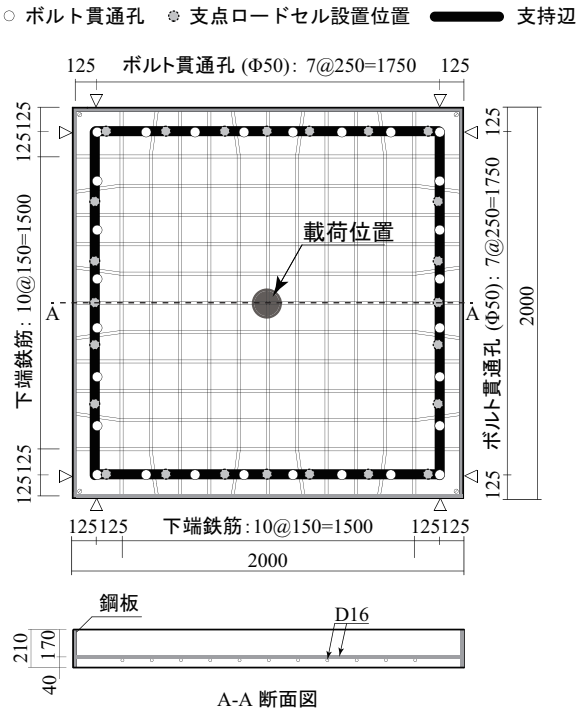


図-1 試験体概要

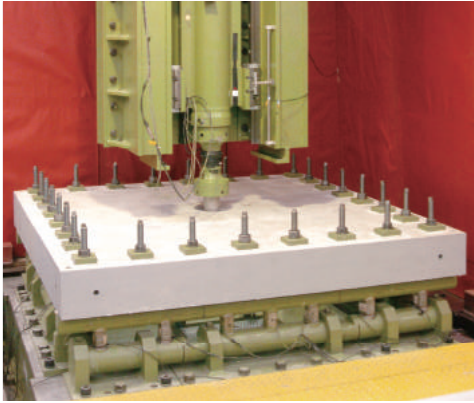


写真-1 衝撃載荷実験の状況

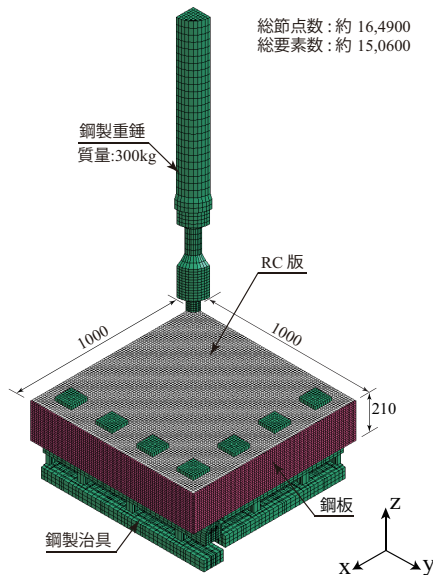


図-2 数値解析モデル

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 P 、(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 R (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 版底部中央の載荷点変位 δ (以後、載荷点変位) である。また、実験終了後には RC 版の裏面および載荷点位置における切断面を撮影し、ひび割れ性状を観察している。

3. 数値解析概要

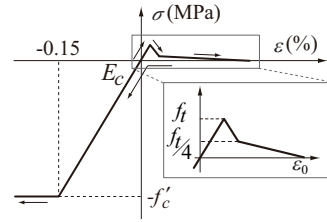
3.1 有限要素モデル

図-2には、本数値解析で用いた四辺単純支持 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、鋼製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、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 12.5 mm、厚さ方向の要素長を 10 mm としている。総節点数および総要素数は、それぞれ 16 万 5 千、15 万程度である。

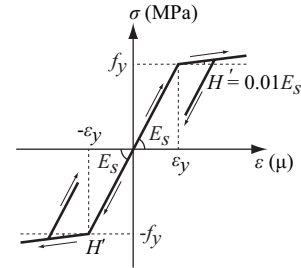
境界条件は、RC 版の対称切断面において法線方向変位成分を拘束している。また、実験条件と同様に各辺の支持部においては回転のみ許容したピン支持条件となっている。コンクリートと鉄筋および鋼板間には完全付着を、コンクリートと重錘、貫通ボルト、ナットおよび支点治具間には面と面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義した。なお、摩擦係数は、事前解析結果に基づき 0.2 と仮定した。

衝撃荷重は、重錘モデルを RC 版に接触する形で配置し、その全節点に実験時の実測衝突速度 ($V = 6.5$ m/s) を付加することにより作用させている。また、減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、予備解析より鉛直方向最低次固有振動数に対して 5 % と設定した。

3.2 材料構成則



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

図-3 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。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)には引張軟化およびひずみ速度効果を考慮したコンクリートモデル (LS-DYNA²⁾ で規定している材料物性番号 mat84) の応力-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、せん断破壊基準には Ottosen の破壊基準を採用している。なお、圧縮強度 f'_c は表-1 に示す材料試験結果の値を採用した。

引張側は相当応力が線形に引張強度 f_t に到達し、 $f_t/4$ まで応力が低下した後、勾配が小さくなり、応力が零になる 2 直線型の引張軟化を考慮している。引張強度に関しては圧縮強度 f'_c の 1/10 と仮定し、単位体積質量 ρ_c およびポアソン比 ν_c はそれぞれ公称値を用い、 $\rho_c = 2.35 \times 10^3$ kg/m³、 $\nu_c = 0.167$ とした。また、本モデルでは引張軟化挙動に関してコンクリートのクラックが発生する単位面積あたりの散逸エネルギー G_F を入力しており、コンクリート標準示方書³⁾を参考に、下式より算出している。

$$G_F = 10(d_{max})^{1/3} \cdot (f'_c)^{1/3} \quad (\text{N/m}) \quad (1)$$

ここに、 d_{max} : 粗骨材の最大寸法 (= 25 mm)、 f'_c : コンクリート圧縮強度の特性値 (N/mm²)

また、本研究では、RC 版の載荷点から裏面に広がる押抜きせん断破壊性状をより忠実に再現するために、破壊基準を設定することで要素が削除されるエロージョンについても検討も行っている。ここでは、文献 4) と予備解析の結果から第一主ひずみが 0.04 あるいは 0.03 に到達した段階で要素を削除する場合について検討を行っている。

(2) 鉄筋

図-3 (b)には、鉄筋要素に用いた応力-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

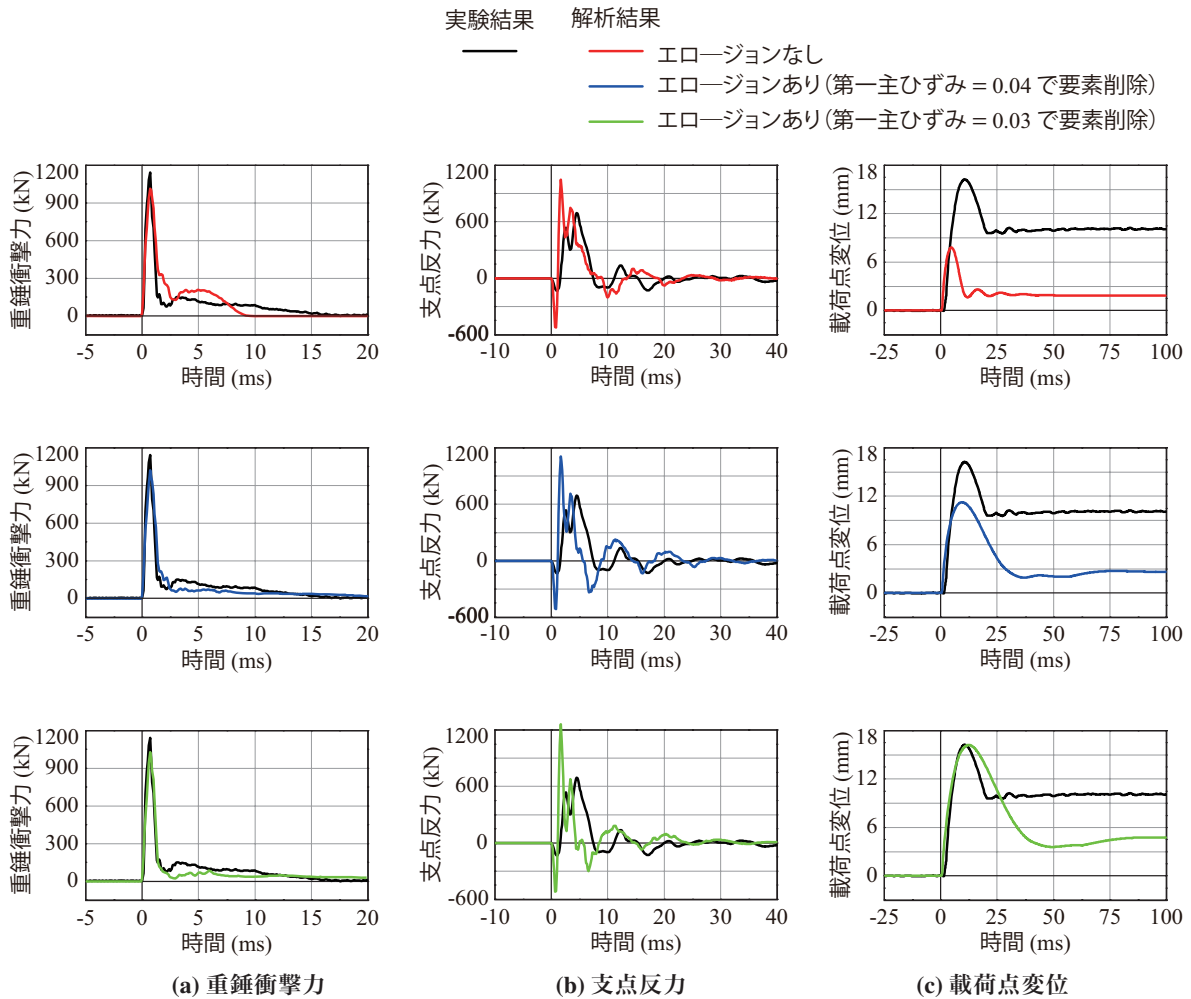


図-4 各種時刻応答波形

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 ($f_y = 389$ MPa) を採用し、単位体積質量 ρ_s 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s はそれぞれ公称値を用い、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³、 $E_s = 206$ GPa、 $\nu_s = 0.3$ とした。

(3) 重錘、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 およびポアソン比 ν_s はそれぞれ公称値を用い、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³、 $E_s = 206$ GPa、 $\nu_s = 0.3$ とした。単位体積質量 ρ_s に関しては、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、鋼製重錘には質量 300 kg を解析モデルの全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 各種時刻応答波形

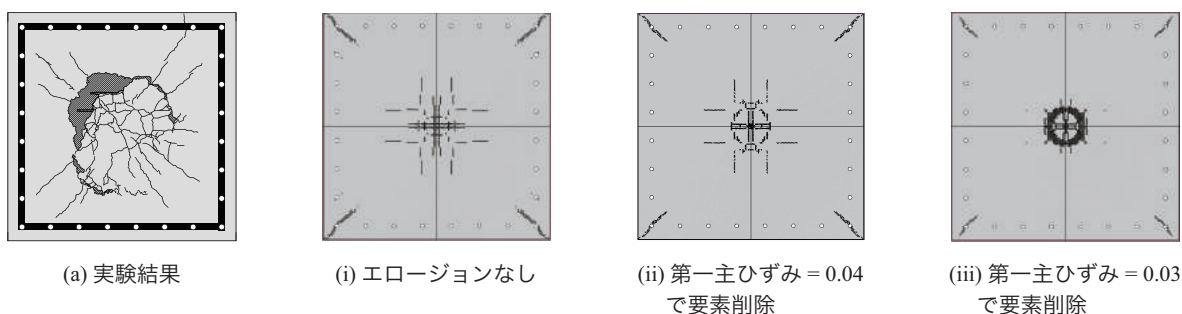
図-4 には、エロージョンを考慮しない場合とエロージョンを考慮し第一主ひずみが 0.04 あるいは 0.03 に到達時要素が削除される場合の 3 ケースについて重錘衝撃力、支点反力、および載荷点変位波形の数値解析結果を、実験

結果と比較する形で示している。なお、横軸は重錘が RC 版に衝突した時点の原点を取っている。

図-4 (a) に示す重錘衝撃力波形に着目すると、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、継続時間 10 ms 程度の後続する性状を示していることが分かる。解析結果においても同様な波形性状を見て取れるが、エロージョンを考慮しない場合には後続波形を実験結果より過大評価しており、波形の継続時間も短い。また、第 1 波目が示す最大衝撃力はエロージョンの有無によらず若干実験結果よりも小さいことが分かる。

(b) 図に示す支点反力波形に着目すると、実験結果では継続時間 7 ms 程度半正弦主要波形と後続自由振動性状を示していることが分かる。解析結果に着目すると、実験結果と同様な波形性状を示しているが、いずれも最大支点反力が実験結果よりも大きく、エロージョンの破壊基準を下げていくにつれて、主要波形の継続時間が短くなることが分かる。

(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おり、残留変位は 10 mm 程度である。解析結果に着目すると、いずれの解析ケースにおいても実験結果と同様に最大変位到達度に自由減衰振動状態に至る性状を示している。最大載荷点変位に関して



図－5 裏面のひび割れ性状

は、エロージョンを設定しない場合には実験結果の 1/2 程度の値を示しているものの、第一主ひずみが 0.03 に到達した段階をエロージョンの破壊基準とした場合には実験結果をほぼ適切に評価している。なお、残留変位に関してはいずれのケースも実験結果よりも過小評価していることが分かる。

以上より、提案の解析手法を用いることで重錘衝撃力および最大変位に関しては概ね実験結果を評価可能であることが明らかとなった。

4.2 裏面のひび割れ性状

図－5には、実験終了後の試験体の裏面のひび割れ分布性状と各解析ケースから評価されるひび割れを比較して示している。なお、図に示すように、本モデルはひび割れを可視化することが可能であり、解析結果の黒線はひび割れを示している。

まず、実験結果に着目すると、四辺単純支持特有の対角線上の45度に生じるひび割れや载荷点を中心に円状に押し抜きせん断破壊が発生していることが分かる。一方、数値解析結果に着目すると、いずれの解析ケースにおいても損傷を過小に評価しており、また、隅角部近傍にのみ対角線上にひび割れが生じていることが確認できる。しかしながら、エロージョンを適用することで、押し抜きせん断破壊により生じる円状のひび割れは明確に再現可能であることが分かる。

4.3 切断面のひび割れ性状

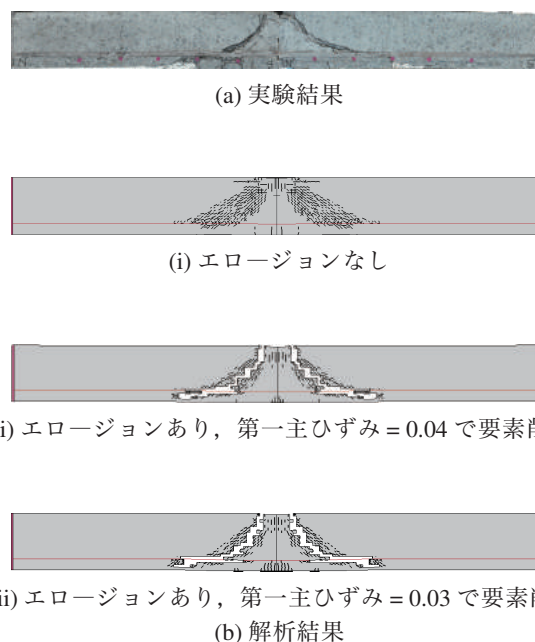
図－6には、実験終了後の試験体の中央切断面のひび割れ分布性状と各解析ケースから評価されるひび割れを比較して示している。

まず、実験結果に着目すると、実験結果のひび割れ分布は载荷点から版下部に配筋している鉄筋まで斜め45度の押し抜きせん断ひび割れが生じ、かぶりコンクリートの剥落も確認できる。また、試験体上面の载荷点近傍部はコンクリートの圧壊が生じていることが分かる。

数値解析結果に着目すると、いずれの解析ケースにおいても実験結果の斜め45度の押し抜きせん断ひび割れを大略再現していることが分かる。特に、エロージョンを設定している場合には実験結果のひび割れ幅も概ね再現しており、かぶりコンクリートにおいて実験結果より確認できる剥落のような傾向も再現可能であることが分かる。

5. まとめ

本研究では、衝撃荷重を受ける四辺単純支持された矩形RC版を対象に、押し抜きせん断破壊性状を適切に評価可能



図－6 切断面のひび割れ性状

な解析手法の確立を目的として、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。また、数値解析結果と実験結果を比較することにより、提案の解析手法の適用性について検討した。本研究で得られた事項を整理すると、以下の通りである。

- 1) 提案の解析手法は適切な要素削除の破壊基準を設定することでRC版の実験結果の重錘衝撃力、载荷点変位波形を概ね再現可能である。
- 2) また、提案の解析手法はRC版の切断面の押し抜きせん断破壊性状を概ね再現可能である。

参考文献

- 1) 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) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.
- 3) 土木学会，コンクリート標準示方書 [設計編]，2012.
- 4) Genadijs Sagals, Nebojsa Orbovic, Andrei Blahoianu : Sensitivity Studies of Reinforced Concrete Slabs under Impact Loading, SMiRT 21, 6-11 November, 2011, New Delhi, India.