

## 論文 RC版の押し抜きせん断破壊に関する三次元弾塑性有限要素解析

張 広鋒<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>・小室 雅人<sup>\*4</sup>

**要旨：**本論文では，三次元弾塑性有限要素法を用いた押し抜きせん断破壊を含む4辺支持RC版の破壊挙動を適切に再現可能な数値解析手法の確立に関する検討を試みた。解析では，離散ひび割れ手法を用い，押し抜きせん断破壊面の破壊や鉄筋のすべり等の幾何学不連続破壊をモデル化している。解析手法の妥当性検討は，主鉄筋比の異なる2体の4辺支持RC版に関する解析結果を実験結果と比較することにより行った。検討の結果，提案の解析手法を適用することにより実験結果の耐荷性状や破壊挙動を大略再現可能であることが明らかとなった。

**キーワード：**RC版，押し抜きせん断破壊，非線形数値解析，離散ひび割れモデル

## 1. はじめに

面外力を受ける鉄筋コンクリート(RC)面部材は，荷重作用点直下のコンクリートがコーン状に押し出される押し抜きせん断破壊によって終局に至る場合が多い。このようなRC面部材の耐荷性状は，コンクリートや鉄筋等の力学特性の他，押し抜きせん断破壊面におけるコンクリートのせん断抵抗や鉄筋のダウエル作用にも強く依存する。現在のところ，押し抜きせん断破壊に着眼する数値解析的研究事例は少なく，押し抜きせん断破壊を含むRC面部材の破壊挙動を再現可能な数値解析手法は未だ見当たらない。一方，より合理的な設計手法を開発するためには実験的研究は勿論のこと，数値解析的研究も必要不可欠である。また，面部材を有するRC構造物の全体耐荷評価や性能照査にも，押し抜きせん断破壊を適切に再現可能な数値解析手法が必要であると判断される。

このような背景より，本研究では，三次元弾塑性有限要素法に基づき，押し抜きせん断破壊を含むRC版の破壊挙動を適切に再現可能な解

析手法の確立に向けて検討を試みた。解析では，離散ひび割れモデルを用い，押し抜きせん断破壊面のコンクリートの破壊や鉄筋すべり等の幾何学的不連続現象を考慮することとした。また，解析手法の妥当性検討は，主鉄筋比の異なる2体の4辺支持RC版に関する解析結果を実験結果と比較することにより行った。

## 2. 試験体の概要

表-1には，本解析に用いた鉄筋比の異なる2体のRC版を一覧にして示している。図-1には，これらの試験体の形状寸法，配筋状況および載荷位置を示している。RC版の寸法は2,000×2,000×180 mmである。各鉄筋は四辺の外縁に配置した溝型鋼に溶接定着し，定着長を節約し

表-1 試験体一覧

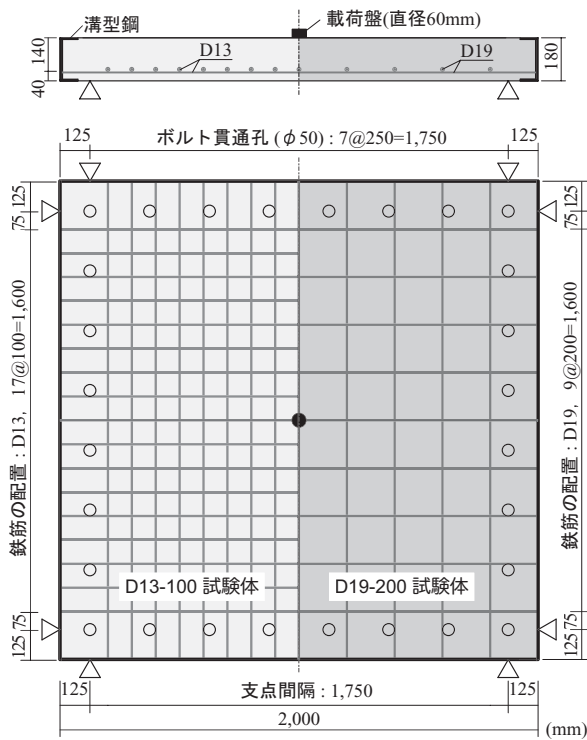
| 試験体名    | 鉄筋呼び径 | 鉄筋間隔(mm) | 鉄筋比(%) | 純かぶり厚(mm) |
|---------|-------|----------|--------|-----------|
| D13-100 | D13   | 100      | 1.00   | 33.5      |
| D19-200 | D19   | 200      | 1.23   | 30.5      |

\*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助教 博(工)(正会員)

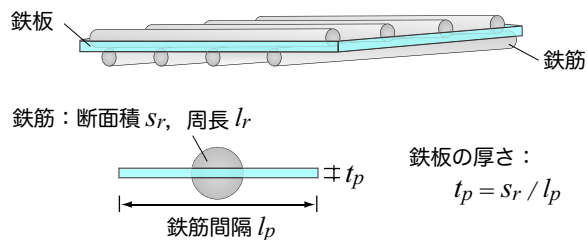
\*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博(正会員)

\*3 三井住友建設(株) 技術研究所主席研究員 博(工)(正会員)

\*4 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科講師 博(工)(正会員)



図－１ 試験体概要



図－２ 鉄筋のモデル化

ている。試験体の支持部は、４辺４隅とも上下方向の変位を抑え回転を許容する単純支持に近い支持状態となっている。支持間隔は 1,750 mm である。荷重は直径 60 mm の載荷盤を用い、版中央部に限定して載荷した。

表－２には実験時に用いたコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。なお、鉄筋の降伏強度、コンクリートの圧縮強度および弾性係数は材料試験により得られたものである。

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析方法および解析ケース

本研究では、押し抜きせん断破壊を適切に再現可能とするために、解析モデルは以下のように工夫している。すなわち、

1) 鉄筋のモデル化には、実構造物のように複雑な配筋状況に対しても簡易に対応可能にするた

表－２ 各材料の力学的特性値

| 材料        | 圧縮<br>強度<br>$f'_c$ (MPa) | 降伏<br>強度<br>$f_y$ (MPa) | 弾性<br>係数<br>$E$ (GPa) | ポアソン<br>比<br>$\nu$ |
|-----------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|
| コンクリート *1 | 27.7                     | -                       | 23.0                  | 0.2                |
| コンクリート *2 | 24.5                     | -                       | 20.8                  | 0.2                |
| 鉄筋        | -                        | 386.4                   | 200                   | 0.3                |

\*1 : D13-100 試験体, \*2 : D19-200 試験体

め、２方向に配置した鉄筋を一枚の等方材料鉄板(以下、単に鉄板と呼ぶ)に平均化することとした。鉄板厚さの決定には、解析手法を簡易化するために、軸剛性のみを等価にするように配慮している。すなわち、図－２に示すように、鉄板の厚さは鉄筋の断面積と等価になるようにして決定した。一方、鉄板とコンクリート間の付着応力は、鉄筋とコンクリート間の全付着力と等価になるように換算付着応力  $\tau_{b,p}$  を用いて評価することとした。すなわち、換算付着応力  $\tau_{b,p}$  は、鉄筋とコンクリート間の付着応力  $\tau_b$  を用いて、以下の式により算出される。

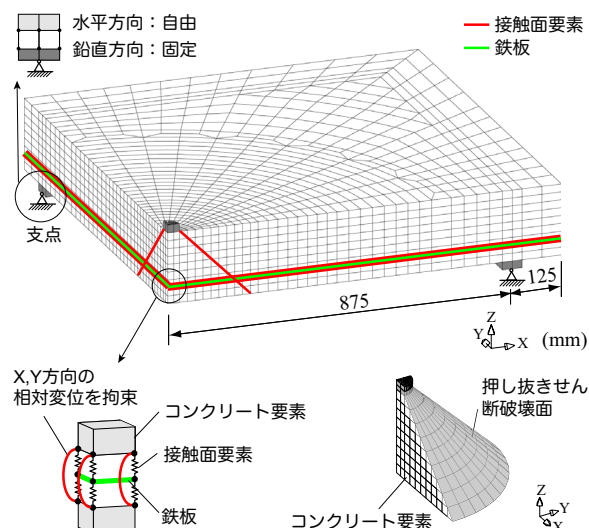
$$\tau_{b,p} = \tau_b \cdot l_r / (2l_p) \quad (1)$$

2) 押し抜きせん断による破壊や鉄筋のすべり等の幾何学的不連続現象は離散ひび割れ手法によりモデル化することとした。離散ひび割れ手法は予め規定した場所に離散ひび割れを配置し、そのひび割れに応力－相対変位関係を適用することにより幾何学的不連続破壊を再現するものである。なお、離散ひび割れは接触面要素 (Interface element) によりモデル化する<sup>1)</sup>。本解析に用いた押し抜きせん断破壊面は、実験結果を参考にして便宜的に傾斜角を 45° とする円錐面にモデル化している(図－３を参考)。また、鉄板の上下にも離散ひび割れを配置し、鉄板とコンクリート間の剥離やすべりをモデル化することとする。

また、解析では、表－３に示すような３つの解析ケースを設け、RC 版の耐荷性状に及ぼす鉄筋すべりの影響や押し抜きせん断破壊面のモデル化の有無の影響を定性的に把握することとする。解析ケース１は、押し抜きせん断面をモ

表－3 解析ケース一覧

| 解析<br>ケース | 鉄筋の<br>モデル化 | 鉄筋の<br>すべり | 押し抜きせん断<br>破壊面の離散化 |
|-----------|-------------|------------|--------------------|
| ケース 1     | シェル要素       | 考慮しない      | 考慮しない              |
| ケース 2     | シェル要素       | 考慮する       | 考慮しない              |
| ケース 3     | シェル要素       | 考慮する       | 考慮する               |

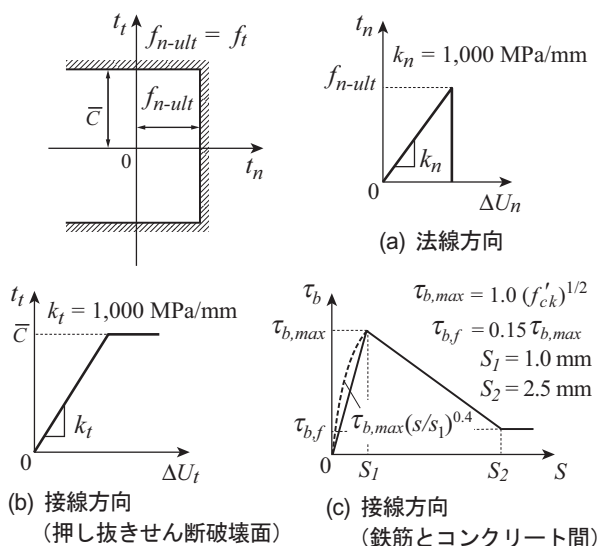


図－3 要素分割状況（解析ケース 3）

デル化せずかつ鉄筋とコンクリートを完全付着とした場合である。解析ケース 2 は鉄筋のすべりを考慮するが、押し抜きせん断断面をモデル化しない場合である。解析ケース 3 は、本研究で提案の鉄筋のすべりを考慮し、かつ押し抜きせん断破壊面を離散化する解析ケースである。

### 3.2 解析モデル

図－3 には、解析ケース 3 に用いた要素分割状況を示している。解析モデルは、RC 版の対称性を考慮した 1/4 モデルである。鉄板はシェル要素を用いてモデル化し、鉄筋の中心位置に配置している。接触面要素は押し抜きせん断破壊面をモデル化する円錐面および鉄板の上下に配置している。また、鉄板要素の配置によって分離されたコンクリート要素の連続性を保持するため、図－3 に示すように、鉄板要素の上下におけるコンクリート要素間の水平 2 方向 (X, Y 方向) 相対変位を拘束している。一方、境界条件に関しては、両対称切断面は法線方向変位成分を拘束している。支点部には、実験時の境界条件に即して上下方向の変位成分を拘束かつ回



図－4 応力－相対変位関係

転を許容するように設定している。すなわち、図に示すように、1) 応力集中を防ぐために設置した鋼製プレートとコンクリート間において鉛直方向のみを固定とし水平方向のずれを許容する；2) 鋼製プレートの下面はピン支持とし回転を許容する。なお、押し抜きせん断破壊が発生する可能性のある領域に関しては長さが 15～25 mm の要素を、また、支点近傍の領域に関しては約 40 mm の要素を用いている。

なお、解析は変位制御により行い、収束計算には一般に広く用いられている Newton-Raphson 法を採用している<sup>1)</sup>。

### 3.3 接触面要素の応力－相対変位関係

本解析では、図－4 に示す Coulomb friction 型の応力－相対変位関係を用い、押し抜きせん断破壊、コンクリートと鉄板間のすべりや剥離を再現することとした<sup>1)</sup>。

押し抜きせん断破壊のモデル化に関しては、本研究では、(a) 図に示すように、押し抜きせん断破壊面における法線方向の引張破壊は、法線方向応力  $f_{n-ult}$  がコンクリートの引張応力  $f_t$  に達した時点で破壊するように設定している。また、接線方向のせん断破壊に関しては、せん断応力が粘着力  $\bar{c}$  に達した後、粘着力  $\bar{c}$  を保持したままでせん断すべりが生じるように設定している ((b) 図)。ここで、粘着力  $\bar{c}$  はコンクリートの圧縮強度  $f'_c$  および内部摩擦角  $\phi$  を用い次



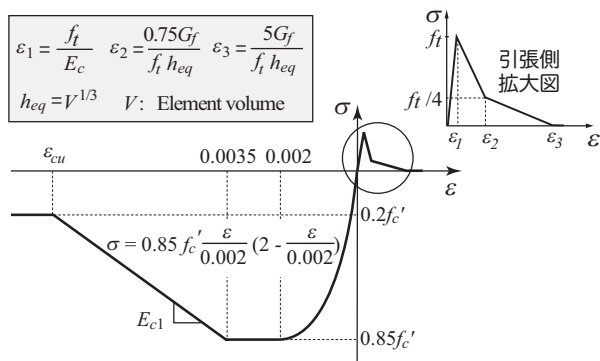


図-5 コンクリートの材料構成則  
の式より算出される。

$$\bar{C} = f'_c \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} \quad (2)$$

また、鉄板とコンクリート間の剥離破壊やすべりに関しては、法線方向の剥離は、上述と同様に法線方向応力  $f_{n-ult}$  がコンクリートの引張応力  $f_t$  に達した時点で剥離するように設定している（(a) 図）。一方、せん断方向の付着応力-相対変位関係は、(c) 図に示す各関係式を式 (1) に代入することにより評価している。ここで、(c) 図は、CEB-FIP モデルコード<sup>2)</sup>による鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係の 0 ～  $S_1$  間の曲線（破線）を直線に簡略化したモデル（実線）である。なお、式中の  $f'_{ck}$  は、 $f'_{ck} = f'_c - 8$  (MPa) により算出される。

### 3.4 材料構成則

図-5 にはコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側には、材料実験から得られた圧縮強度  $f'_c$  を用い、圧縮ひずみが  $3,500 \mu$  まではコンクリート標準示方書<sup>2)</sup>に基づいて定式化し、 $3,500 \mu$  以後は初期弾性係数の 0.05 倍で  $0.2f'_c$  まで線形軟化するモデルとした。また、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件を適用し、内部摩擦角  $\phi$  を  $30^\circ$  とした。一方、引張側には、コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>による引張軟化曲線を適用している。引張強度  $f_t$  は CEB-FIP Model Code<sup>3)</sup>を参考にして定義した。なお、コンクリートのひび割れ破壊は分散ひび割れモデルを用いてモデル化している。

鉄筋には、塑性硬化係数  $H'$  を考慮した等方弾塑性体モデルを適用した。降伏条件は von Mises の降伏条件に従うものとしている。

表-4 最大荷重および最大荷重時変位

| 試験体名    | 解析結果  |                   |                        | 実験結果              |                        |
|---------|-------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
|         | 解析ケース | $P_{max}$<br>(kN) | $\delta_{max}$<br>(mm) | $P_{max}$<br>(kN) | $\delta_{max}$<br>(mm) |
| D13-100 | 1     | 406.0 (1.43)      | 3.81                   | 283.3             | 3.81                   |
|         | 2     | 303.9 (1.07)      | 3.81                   |                   |                        |
|         | 3     | 302.6 (1.07)      | 3.72 (0.98)            |                   |                        |
| D19-200 | 1     | 408.0 (1.40)      | 4.06                   | 291.7             | 4.06                   |
|         | 2     | 292.7 (1.00)      | 4.06                   |                   |                        |
|         | 3     | 249.2 (0.85)      | 3.70 (0.91)            |                   |                        |

† ケース 1, 2, 3 には実験結果の  $\delta_{max}$  を用いている

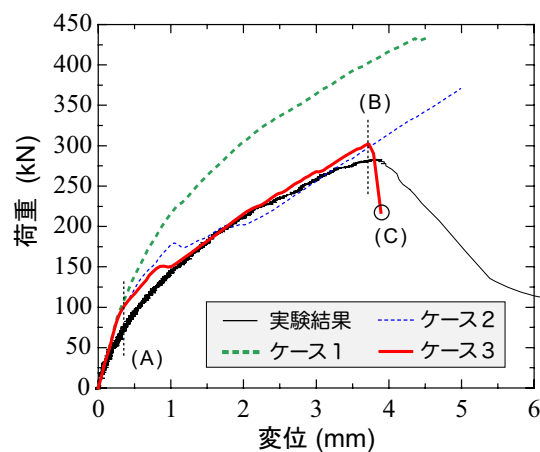
‡ ( ) 内の数値は実験結果との比である

## 4. 数値解析結果および考察

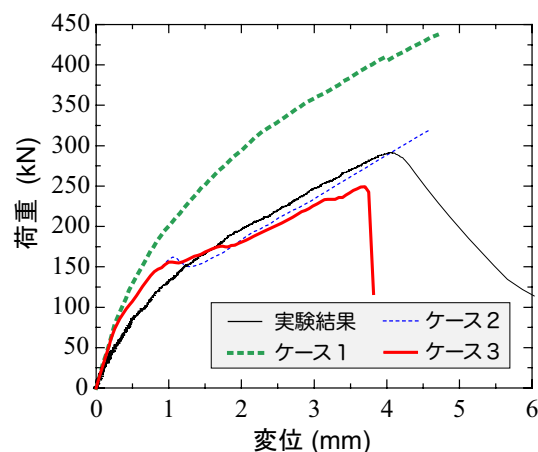
図-6 には、各試験体の荷重-版下面中央点変位関係に関する解析結果と実験結果の比較を示している。各解析において、解析ケース 3 は押し抜きせん断破壊が発生した後に計算を終了した。他の 2 解析ケースは、荷重の低下が見られないことにより、変位 4.5 mm 付近で終了した。一方、実験では、D13-100 試験体は荷重 283.3 kN、D19-200 試験体は荷重 291.7 kN 付近で押し抜きせん断破壊によって終局に至っている。表-4 には最大荷重値  $P_{max}$  と最大荷重時変位  $\delta_{max}$  の一覧を示している。なお、解析ケース 1 と 2 に関する最大荷重は便宜的に実験結果の  $\delta_{max}$  における値とした。

### 4.1 荷重-版下面中央点変位関係

図-6(a) に示す D13-100 試験体に関する比較図より、解析ケース 1 の解析結果は、解析終了時まで荷重の低下が見られず実験結果を大きく上回っていることが分かる。解析ケース 2, 3 の 2 解析結果は、荷重 100 kN 近傍までは解析ケース 1 と同様であるが、その後両解析結果とも鉄板とコンクリート間のすべりが生じたことによって荷重-変位関係の剛性勾配が明瞭に低下している。また、変位 1 mm 近傍では再度鉄板とコンクリート間にすべりが生じ荷重が一時的に低下している。その後、解析ケース 3 は、変位 3.7 mm 近傍で離散ひび割れモデルを適用した押し抜きせん断破壊面が完全に開口すること

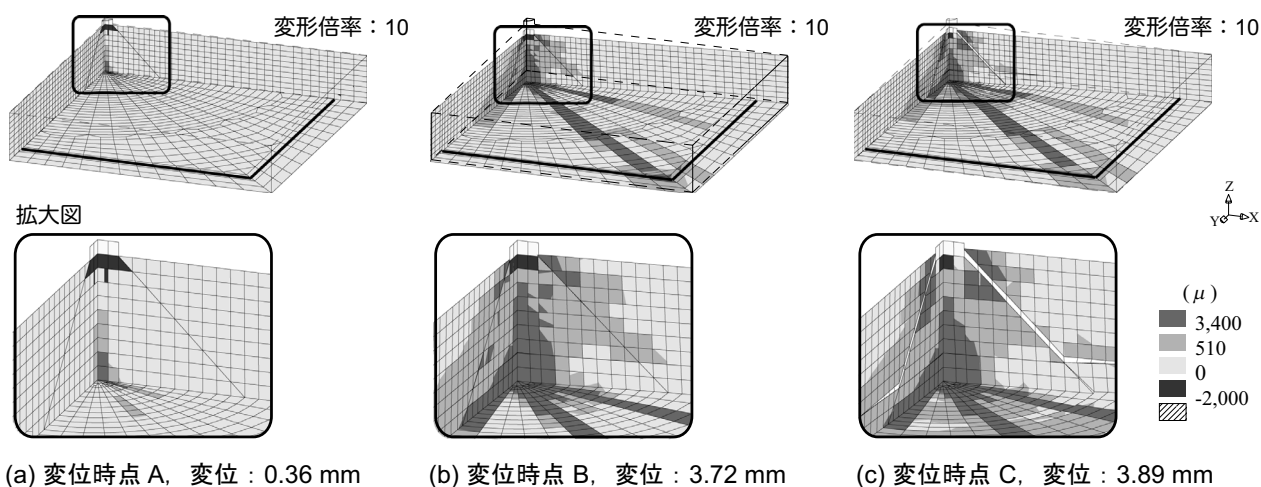


(a) D13-100 試験体



(b) D19-200 試験体

図－6 荷重－変位関係



図－7 解析ケース 3 の離散ひび割れ開口状況および最大主ひずみコンター図( D13-100 試験体)

により、荷重が急激に低下し終局に至っている。なお、解析ケース 2 は、変位 3.7 mm 近傍までは解析ケース 3 とほぼ同様な荷重－変位関係を示すが、その後も、荷重が低下せず押し抜きせん断破壊が発生していないことが確認できる。

一方、図－6(b) に示す D19-200 試験体に関する比較図より、各解析結果は D13-100 試験体と類似な荷重－変位関係を示していることが分かる。なお、表－4 より、最大荷重および最大荷重時変位を見ると、D13-100 試験体の場合は、解析ケース 3 の解析結果は実験結果とほぼ対応している。一方、D19-200 試験体の場合には、両者の差異が最大荷重で 15 %、最大荷重時変位で 9 % 程度となっており、D13-100 試験体の場合より差異が大きく示されている。この点に関しては、実験誤差の可能性もあることより、今後実験データを増し検討を続けて行いたいと考え

ている。

以上より、両試験体とも解析ケース 3 の解析結果は実験結果の耐荷性状を大略再現しているものと判断される。一方、解析ケース 2 の場合には押し抜きせん断破壊が発生しないため、実験結果の終局状態を再現できない。これらの結果より、鉄筋を等方材料の鉄板に平均化するモデル化手法を用いて数値解析を行う場合において、鉄筋のすべりを無視する場合には、解析は実験結果の耐荷性能を過大に評価するが、鉄筋のすべりを適切に考慮することによっては実験結果の耐荷性状を大略再現可能であることが明らかとなった。

#### 4.2 破壊性状

本節では、D13-100 試験体の解析ケース 3 を例として、解析結果における破壊性状を検討することとする。図－7 には、図－6(a) に示す A～C

変位時点における離散ひび割れ開口状況および最大主ひずみ分布を示している。ここで、変位時点 A～C は、それぞれひび割れの発生時 (0.36 mm)、最大荷重時 (3.72 mm) および終局時 (3.89 mm) である。また、最大主ひずみのコンターレベルの 100, 510, 3,400  $\mu$  は、それぞれ 図-5(a) に示す  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  および  $\varepsilon_3$  の概略値である。

図-7(a) より、この時点まで荷重点直下に分散ひび割れ (3,400  $\mu$  を超えた領域) が発生していることが確認できる。なお、この時点では、押し抜きせん断破壊面に配置した離散ひび割れは未だ開口していない。(b) 図に示す最大荷重時には、分散ひび割れが対角線方向に沿って大きく進行し、押し抜きせん断破壊面に配置した離散ひび割れが部分的に開口していることが確認できる。その後、(c) 図に示すように、変位 3.89 mm までは、押し抜きせん断破壊面に配置した接触面要素が完全に開口し、鉄筋をモデル化したシェル要素の上面に配置した離散ひび割れも開口している。

図-8 には、実験終了後の RC 版の切断面におけるひび割れ分布、版裏面における解析結果の最大主ひずみコンターと実験結果のひび割れ分布を重ねて示している。図中の太線が実験結果のひび割れである。図より、D13-100 試験体は実験時には押し抜きせん断破壊によって終局に至り、対角線に沿って曲げひび割れが数本発生していることが分かる。これに対して、解析結果は、押し抜きせん断破壊の他、対角線に沿う分散ひび割れが明瞭に発生していることが確認できる。これより、数値解析は、押し抜きせん断破壊と共に版全体の変形性状も大略再現できているものと判断される。

以上より、1) 傾斜角度を 45° とした押し抜きせん断破壊面を離散化することによって、押し抜きせん断破壊挙動を大略再現出来るものと判断される。また、2) 離散ひび割れモデルと共に分散ひび割れモデルを併用することにより、曲げひび割れの挙動性状もある程度把握出来るものと判断される。

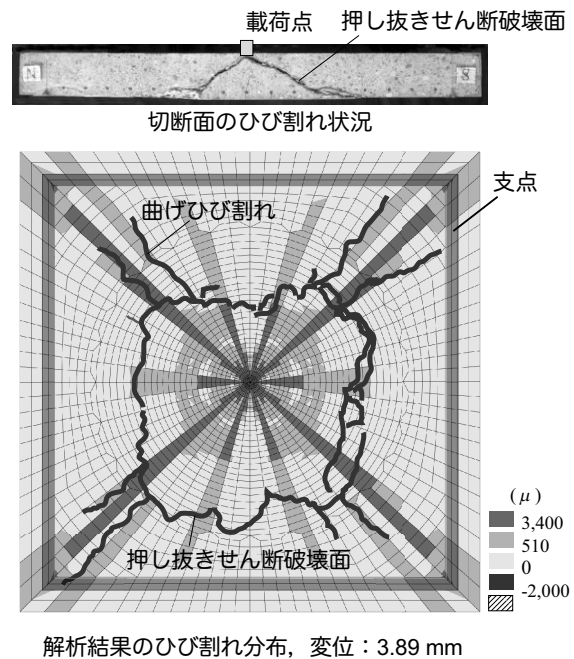


図-8 解析結果の最大主ひずみコンターと実験結果のひび割れ分布との比較 (D13-100 試験体の解析ケース 3)

## 5. まとめ

本研究では、三次元弾塑性有限要素法を用い、押し抜きせん断破壊を含む 4 辺支持 RC 版の耐荷性状を適切に再現可能な数値解析手法の確立を目的に検討を試みた。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) 分散ひび割れモデルと離散ひび割れモデルを併用する解析手法を用い、押し抜きせん断破壊面を 45° の傾斜角を有する円錐面に離散化することによって、4 辺支持 RC 版の押し抜きせん断破壊や曲げひび割れ破壊性状を適切に把握可能であることが明らかとなった。
- 2) 2 方向に配置した鉄筋を等方材料の鉄板に平均化し、かつ鉄筋のすべりを考慮する場合の解析は、実験結果の耐荷性状を適切に評価可能であることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) DIANA User's Manual (9.1), TNO DIANA BV.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書【構造性能照査編】，2002，土木学会。
- 3) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.