

## 離散ひび割れを考慮した RC 版の押し抜きせん断破壊性状に関する数値解析

Numerical Analysis on Punching Shear Behavior of RC Slab by means of Discrete Crack Approach

張 広鋒\*・岸 徳光\*\*・三上 浩\*\*\*・高玉 郁子\*\*\*\*

Guangfeng ZHANG, Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI and Fumiko TAKATAMA

\*正会員 博(工) 室蘭工業大学助教 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*フェロー会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*フェロー会員 博(工) 三井住友建設(株)技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

\*\*\*\*学生会員 室蘭工業大学大学院生 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

This paper aims to establish a nonlinear numerical analysis method based on three-dimensional elasto-plastic FEM for simulating punching shear failure behavior of two-way RC slabs. In this method, rebars were modeled as a piece of plate to enhance the applicability in case of complicated arrangement of rebar. Geometrical discontinuity of punching shear failure surface, bond slipping of main rebar and splitting of concrete cover were considered applying with discrete crack approach. Two slabs that tested using a circular loading-plate were analyzed, in which, diameter of loading-plate is different with each other. The validity of the proposed method was inspected by comparing the analytical load-displacement curves and distribution of cracks with those of the experimental ones. As a result, load-carrying capacity and punching shear failure behavior of two way RC slabs can be simulated with a good agreement of the proposed method.

**Key Words :** RC slab, punching shear failure, nonlinear FEM analysis, discrete crack approach

## 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円錐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<sup>1), 2)</sup>。このような破壊形式は、破壊時の変形量は少なく極めて脆性的な破壊特性を示す。

押し抜きせん断破壊によって終局に至る 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。このような RC 面部材の押し抜きせん断耐力の評価に関しては、設計上では、円錐状の押し抜きせん断破壊面を円筒状に仮定し、円筒面におけるせん断抵抗を用いることにより押し抜きせん断耐力を評価することとしている<sup>3)</sup>。一方、面部材を有する RC 構造物の全体耐荷評価や性能照査の観点から見ると、その面部材の耐力のみではなく、面部材を含む構造全体の耐荷性能の評価も行わなければならない。そのため、面部材を含む構造全体の耐荷性能を評価可能な数値解析手法が必要となっていく。しかしながら、現在のところ、押し抜きせん断破壊に着目した数値解析の研究事例は少なく、押し抜きせん断破壊を含む RC 面部材の破壊挙動を適切

に再現可能な数値解析手法は未だ見当たらない。

そのため、著者らはこれまでも三次元弾塑性有限要素法に基づき、RC 版の押し抜きせん断破壊性状に関する数値解析的な検討を行ってきた<sup>4)</sup>。それらの検討において、離散ひび割れモデルおよび分布ひび割れモデルを併用し、コンクリート要素のひび割れ破壊の他、押し抜きせん断面や主鉄筋のすべりなどの幾何学的不連続現象も再現することを試みている。検討の結果、RC 版の破壊性状および押し抜きせん断破壊を再現することが可能であることが明らかとなった。しかしながら、既往の研究に用いたモデル化手法は、複雑な配筋状況への適用性等の課題を抱えており、より汎用性の高い解析手法の確立が必要であるものと考えられる。

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であり、かつ汎用性のある解析手法の確立に向けて検討を行った。解析では、鉄筋を等方材料の鉄板に平均化することにより、複雑な配筋状況においても対応可能となるようにモデル化することとしている。また、離散ひび割れモデルを用い、押し抜きせん断破壊面の破壊や鉄筋すべり等の幾何学的不連続現象も考慮している。解析は、載荷盤の直径の異なる 2 体の 4 辺支持 RC 版に対して行った。ま

表-1 試験体一覧

| 試験体名 | 載荷盤直径 (mm) | 載荷盤周長 (mm) | 鉄筋呼び径 | 配筋間隔 (mm) | 鉄筋比 (%) |
|------|------------|------------|-------|-----------|---------|
| P60  | 60         | 188        | D16   | 150       | 1.09    |
| P120 | 120        | 378        |       |           |         |

表-2 各材料の力学的特性値

| 材料     | 圧縮強度 $f'_c$ (MPa) | 降伏強度 $f_y$ (MPa) | 弾性係数 $E$ (GPa) | ポアソン比 $\nu$ |
|--------|-------------------|------------------|----------------|-------------|
| コンクリート | 26.3              | -                | 26.1           | 0.2         |
| 鉄筋     | -                 | 423              | 200            | 0.3         |

た、荷重一版下面中央点変位関係およびひび割れ破壊性状に関する解析結果を実験結果と比較することにより、鉄筋のモデル化方法および適用した各材料物性の妥当性検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

表-1 には、本実験の実験ケースを一覧にして示している。表には、載荷版の直径および周長、配筋状況および鉄筋比を一覧にして示している。本実験の試験体名は、英文字 P に載荷版の直径 (mm) を組み合わせて示している。

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。試験体は、2,000 × 2,000 × 180 mm、有効高さ 140 mm となるように下端鉄筋を配筋した単鉄筋矩形 RC 版である。下端鉄筋には D16 を用い、版中央部より 150 mm 間隔で格子状に配筋した。なお、下端鉄筋は定着長を確保するため、RC 版の 4 辺に設置した溝型鋼に溶接している。

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、コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度は材料試験により得られたものである。

### 2.2 実験方法

図-2 には、実験時の設置状況を示している。支持条件は、純スパン長 1.75 m の 4 辺支持としている。また、支点部は回転を許容し試験体の浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。荷重の載荷位置はいずれの場合も RC 版の中央としている。また、載荷版には鋼製の載荷治具を用いることとし、載荷面は片当たりを防止するため 2 mm のテーパを付けた球面状としている。実験では、RC 版の押し抜きせん断面

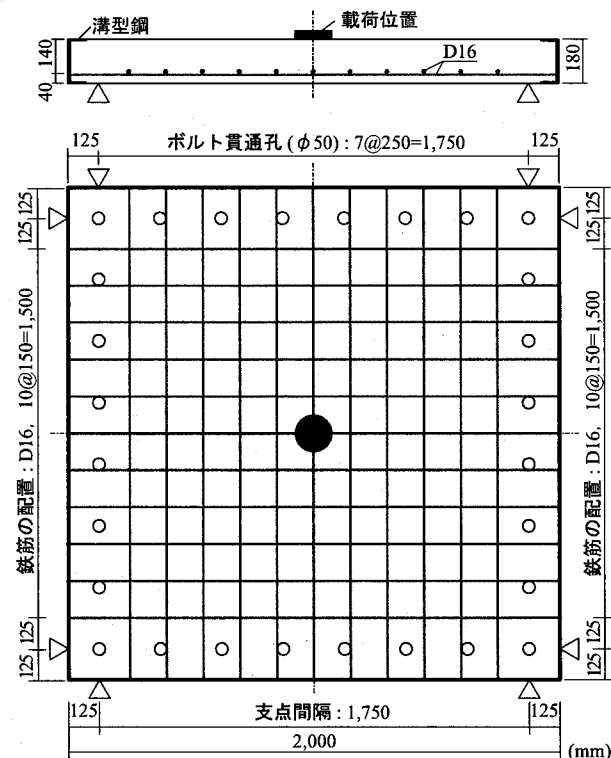


図-1 試験体概要

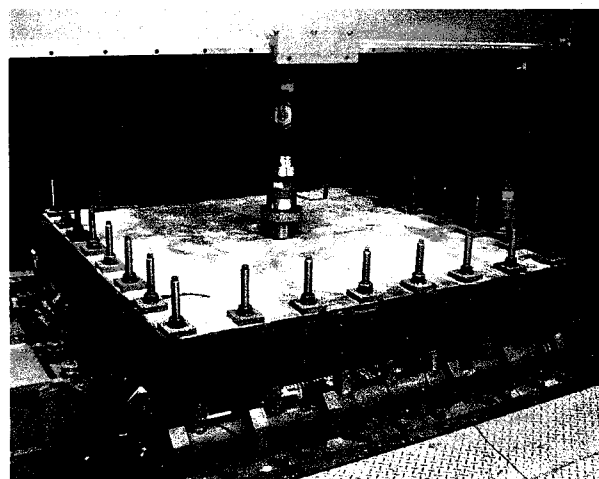


図-2 実験状況写真 (P120 試験体)

が明瞭に形成されるまで荷重を載荷した。本実験の測定項目は、載荷荷重、RC 版下面の変位および下端鉄筋のひずみである。これらのデータは、アンプ内蔵式デジタルレコーダにより一括収録を行っている。また、実験終了後には、RC 版の裏面のひび割れおよび版中央部を主鉄筋方向に切断して切断面のひび割れをスケッチし、破壊性状の観察を行っている。

## 3. 解析概要

本研究では、RC 版の押し抜きせん断破壊を適切に再現可能とするために、押し抜きせん断破壊面の破壊、鉄筋とコンクリート間のすべりおよび面外方向の剥離

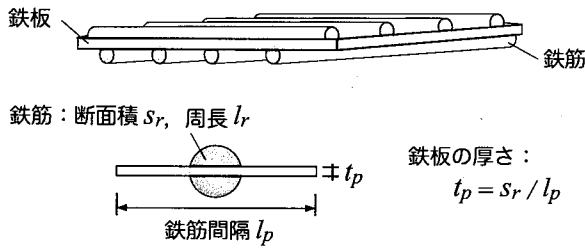


図-3 鉄筋のモデル化

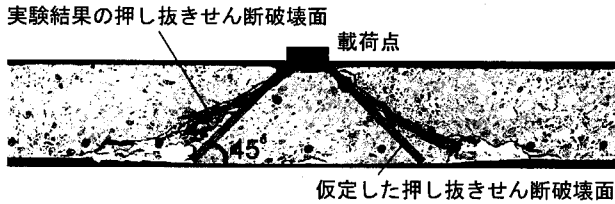


図-4 押し抜きせん断破壊面のモデル化

等の幾何学的不連続現象は離散ひび割れ手法によって配慮している。離散ひび割れ手法は予め規定した箇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>5)</sup>。また、解析では、押し抜きせん断破壊面の離散化や主鉄筋すべりのモデル化の有無による解析ケースも設け、RC版の耐荷性状に及ぼすこれらの幾何学的不連続性の影響を検討することとする。なお、解析では、コンクリートの圧縮破壊およびひび割れ破壊、鉄筋の降伏も適切に考慮することとしている。以下には解析手法の詳細を述べる。

### 3.1 解析モデル

#### (1) 鉄筋のモデル化

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とするため、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、軸剛性のみを等価するように配慮している。すなわち、図-3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。ここで、2方向に配置した鉄筋を鉄板に平均化するには、厳密的には軸剛性および曲げ剛性の両方の等価を考慮すべきであるが、本研究では、以下の理由によって上述のように軸剛性のみを等価を考慮することとした。1) 本研究の解析対象であるRC版部材の場合には、押し抜きせん断破壊によって終局に至るまでの版変形は小さく、押し抜きせん断耐力は、曲げ剛性より軸剛性に強く依存するものと考えられる；2) また、軸剛性と曲げ剛性の両方を等しいとする場合に

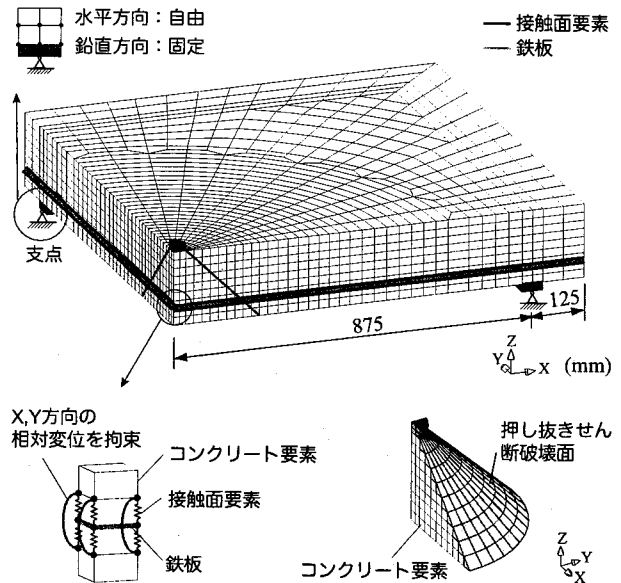


図-5 要素分割状況, P60 試験体 (解析ケース3)

表-3 解析ケース一覧

| 解析ケース | 鉄筋のモデル化 | 鉄筋のすべり | 押し抜きせん断破壊面の離散化 |
|-------|---------|--------|----------------|
| 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           |

は、鉄板の弾性係数と厚さの両方を変化させる必要がある。しかしながら、弾性係数は軸剛性や曲げ剛性のみではなくせん断剛性とも関わることより、その値を決定することは非常に困難である。

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、以下の式により決定することとした。

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

ここで、 $l_r$  は鉄筋の周長であり、 $l_p$  は鉄筋の配筋間隔である。

#### (2) 押し抜きせん断破壊面のモデル化

図-4には、解析に用いた押し抜きせん断破壊面のモデル化の方法を示している。図中の写真は、実験終了後におけるP120試験体の中央部切断面におけるひび割れ分布を示している。図に示すように、本研究では、押し抜きせん断破壊面は45°の傾斜角を有する円錐面と仮定することとした。ここで、押し抜きせん断破壊面の角度は、解析手法の汎用性を高めるために一律に45°とした。

解析モデルでは、仮定した円錐面に接触面要素を配

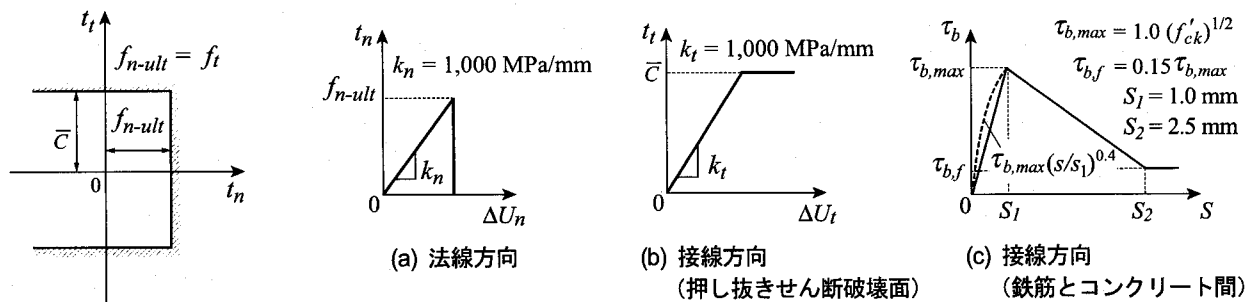


図-6 接触面要素の応力-相対変位関係

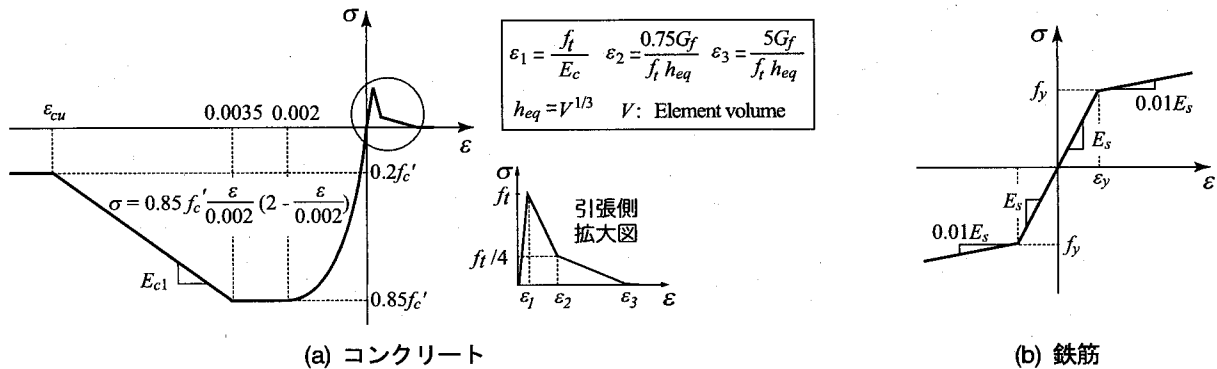


図-7 材料構成則

置することによってこの押し抜きせん断破壊面をモデルしている。また、押し抜きせん断破壊面の法線方向の引張破壊およびせん断方向のすべり破壊を適切に考慮可能とするため、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。

### (3) 要素分割状況

図-5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。鉄板はシェル要素に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、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>5)</sup>。

### 3.2 解析ケース

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デル化せずかつ鉄筋とコンクリート間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手法による解析ケースである。

### 3.3 接触面要素の応力-相対変位関係

本解析では、図-6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>5)</sup>。

押し抜きせん断破壊のモデル化に関しては、(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 $\bar{C}$ を保持した状態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 $\phi$ を用いて次式のように算出するものとする<sup>5)</sup>。

表-4 最大荷重および最大荷重時変位の一覧

| 試験体名 | 解析結果  |                |                               | 実験結果           |                     |
|------|-------|----------------|-------------------------------|----------------|---------------------|
|      | 解析ケース | $P_{max}$ (kN) | $\delta_{max}^{\dagger}$ (mm) | $P_{max}$ (kN) | $\delta_{max}$ (mm) |
| P60  | 1     | 400.6 (1.75)   | 3.30                          | 229.3          | 3.30                |
|      | 2     | 265.9 (1.16)   | 3.30                          |                |                     |
|      | 3     | 243.5 (1.06)   | 2.99 (0.91)                   |                |                     |
| P120 | 1     | 466.9 (1.39)   | 4.50                          | 336.2          | 4.50                |
|      | 2     | 328.3 (0.98)   | 4.50                          |                |                     |
|      | 3     | 338.7 (1.01)   | 4.99 (1.11)                   |                |                     |

† ケース 1, 2 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

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

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することとした。ここで、(c) 図は、CEB-FIP モデルコード<sup>6)</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  $0 \sim S_1$  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

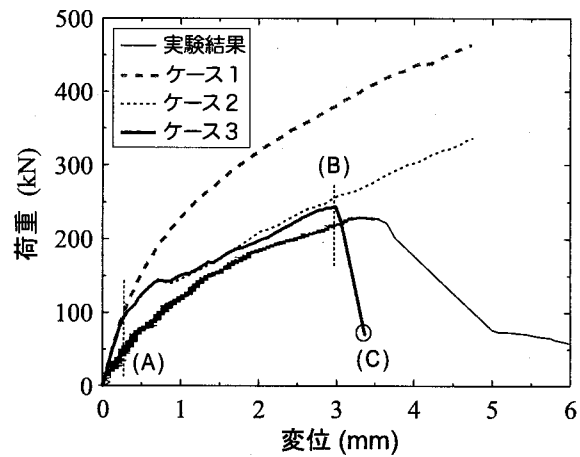
図-7(a) にはコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側には、材料実験から得られた圧縮強度  $f'_c$  を用い、圧縮ひずみ  $3,500 \mu$  まではコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に基づいて定式化し、 $3,500 \mu$  以後は初期弾性係数の  $0.05$  倍で  $0.2f'_c$  まで線形軟化するモデルとした。また、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件を適用し、内部摩擦角  $\phi$  を  $30^\circ$  とした。一方、引張側には、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>による引張軟化曲線を適用している。引張強度  $f_t$  および破壊エネルギー  $G_f$  は CEB-FIP Model Code<sup>6)</sup>を参考にして、以下のように算出された。

$$f_t = 1.4 \cdot (f'_{ck}/10)^{2/3} \quad (3)$$

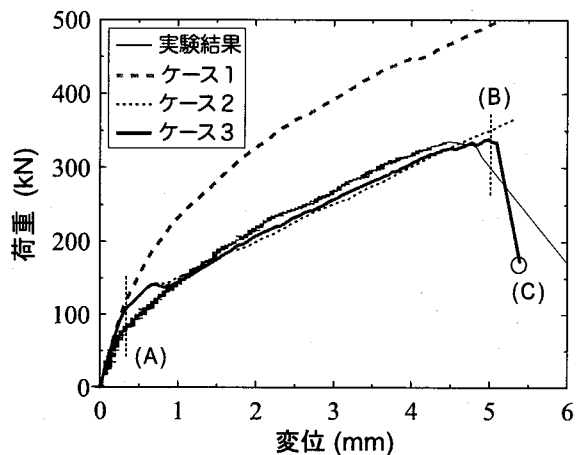
$$G_f = G_{f0} (f'_c/10)^{0.7} \quad (4)$$

ここで、 $G_{f0}$  は粗骨材の大きさに基づいて決定される定数である。本研究では、粗骨材径を実験に即して  $15 \text{ mm}$  と設定し、 $G_{f0} = 0.029 \text{ N/mm}$  としている。

一方、コンクリートのひび割れ破壊は、コンクリートの引張強度を用い、Fixed Orthogonal Crack モデル<sup>2)</sup>によって判定することとした。すなわち、主応力がコンクリートの引張強度に達すると、この主応力の方向



(a) P60 試験体



(b) P120 試験体

図-8 荷重-変位関係

に対して直交する方向に分布ひび割れが発生すると定義している。また、分布ひび割れが発生した要素のひび割れ面に沿うせん断剛性は、コンクリートの初期せん断剛性  $G$  の  $5\%$  と設定した。その詳細は文献 5) に譲る。

鉄板には、(b) 図に示すような塑性硬化係数  $H'$  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。

## 4. 数値解析結果および考察

以下には、荷重-版下面中央点変位 (以後、単に変位) 関係やひび割れ破壊状況に関する数値解析結果を実験結果と比較し、解析手法の妥当性検討を行うこととする。各解析において、解析ケース 3 の場合に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  $5 \text{ mm}$  付近で計算を終了した。

### 4.1 荷重-変位関係

図-8 には、両試験体の荷重-変位関係に関する各

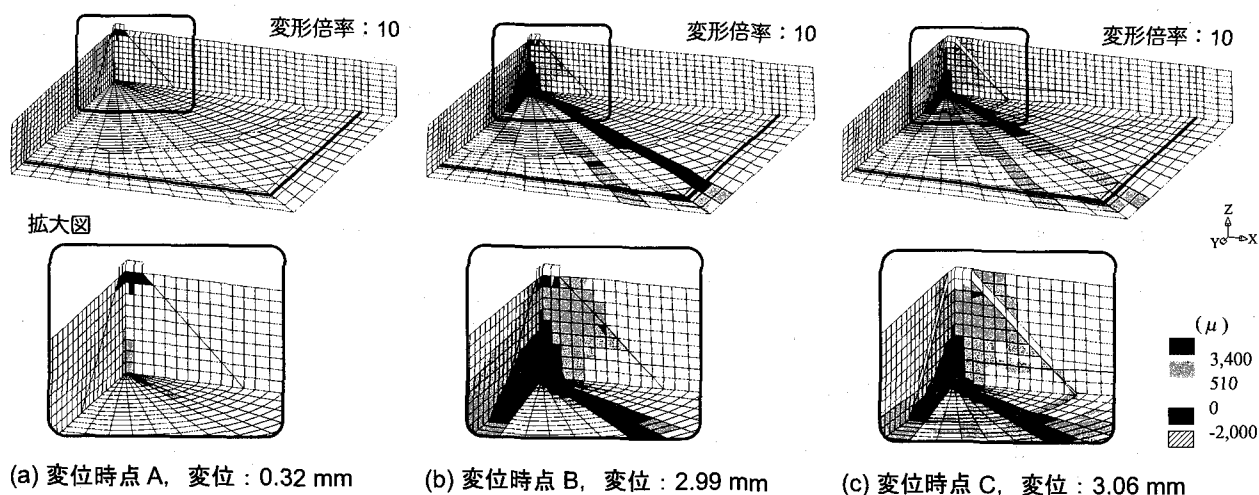


図-9 解析ケース 3 の離散ひび割れ開口状況および最大主ひずみコンター図(P60 試験体)

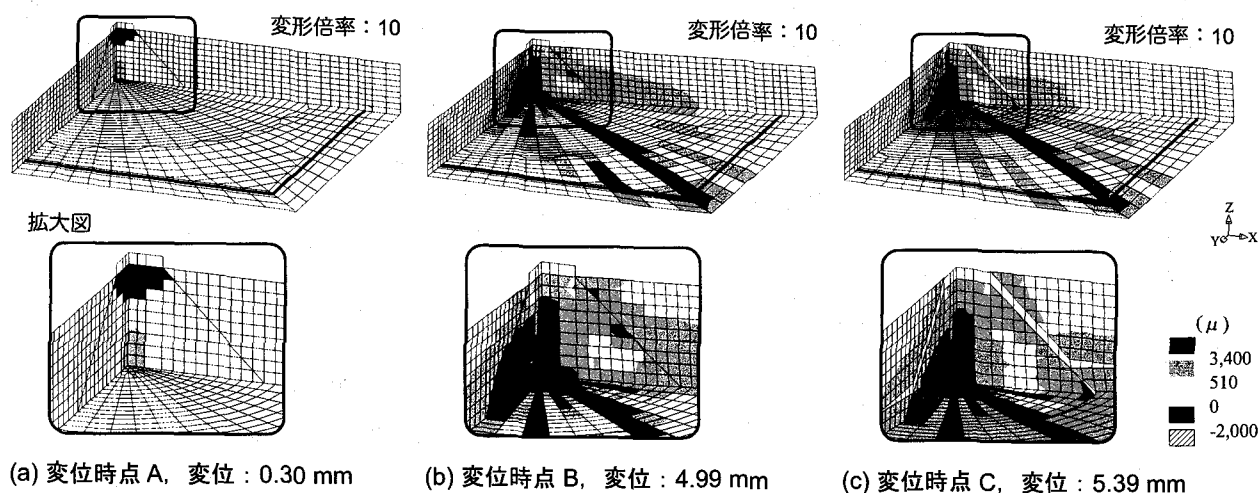


図-10 解析ケース 3 の離散ひび割れ開口状況および最大主ひずみコンター図(P120 試験体)

解析ケースの解析結果と実験結果の比較を示している。図より、実験では、P60 試験体は変位 3.3 mm 近傍、P120 試験体は変位 4.5 mm 近傍より押し抜きせん断破壊の発生によって荷重が急激に低下していることが分かる。

図-8(a) に示す P60 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 0.7 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、変位 3.3 mm 近傍で、離散ひび割れモデルを適用した解析ケース 3 の場合は押し抜きせん断破壊面が完全に開口することにより、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、解析ケース 3 と

ほぼ同様な荷重レベルを示すものの、計算終了時まで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-8(b) に示す P120 試験体に関する比較図より、各解析結果は P60 試験体と類似している荷重-変位関係を示していることが分かる。

表-4 には各解析結果および実験結果の最大荷重値  $P_{max}$  と最大荷重時変位  $\delta_{max}$  の一覧を示している。表中の解析ケース 1 と 2 の最大荷重は、便宜的に実験結果の  $\delta_{max}$  における値を用いている。表より、提案の解析ケース 3 の場合における解析結果は、両試験体のいずれにおいても、実験結果に対して最大荷重で 6 %、最大荷重時変位で 11 % 程度以内となっていることが分かる。

以上の結果より、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(解析ケース 1)には、解析は実験結果の耐荷性能を過大に評価する。一方、鉄筋のすべりおよび押し抜きせん断破壊面を離散化する

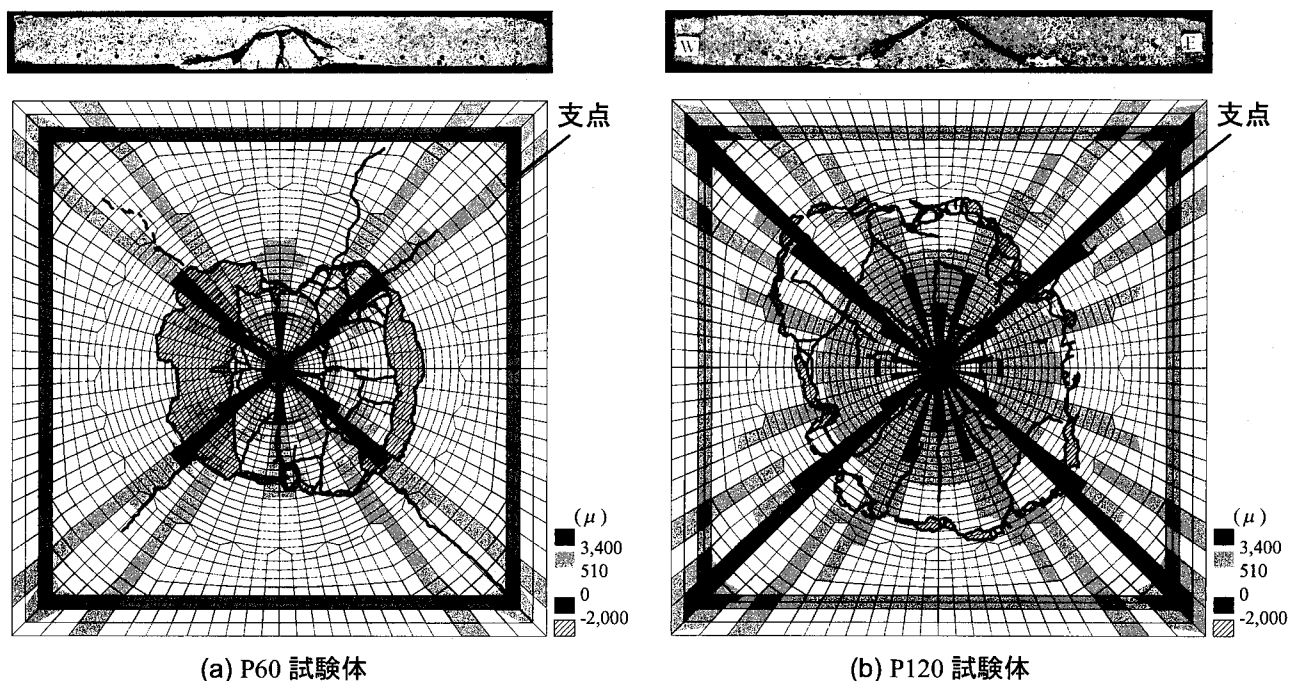


図-11 解析ケース3の解析結果の最大主ひずみコンターと実験結果のひび割れ分布との比較

手法（解析ケース3）の場合には，最大荷重や最大荷重時変位を含め実験時の耐荷性状を大略再現可能である．なお，鉄筋のすべりのみを考慮し押し抜きせん断破壊面を離散化しない場合（解析ケース2）には，実験結果の最大荷重時変位までの荷重－変位曲線を適切に評価可能であるが，最大荷重および最大荷重時変位は再現できないことが明らかとなった．

#### 4.2 破壊性状

図-9, 10 には，図-8(a) に示す A～C 変位時点における両試験体の解析ケース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，最大荷重時および終局時である．また，最大主ひずみのコンターレベルの 510 と 3,400  $\mu$  は，それぞれ図-7(a) に示す  $\varepsilon_2$  と  $\varepsilon_3$  の概略値である．

図-9(a) より，この時点まで載荷点直下に分布ひび割れ (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．図-9(b) 図に示す最大荷重時には，分布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，図-9(c) 図に示すように，変位 3.06 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．

一方，図-10 に示す P120 試験体の各結果より，いずれの変位時点でも P60 試験体と類似なひび割れ分布

性状を示していることが分かる．

図-11 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分布である．図より，両試験体とも実験時には押し抜きせん断破壊によって終局に至り，対角線に沿って分布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，対角線に沿う分布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状も大略再現できているものと考えられる．

以上より，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．

#### 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，載荷盤直径の異なる RC 版に関する実験結果を基本として提案の数値解析手法に関する妥当性検討を行った．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) 分布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° の傾斜角度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

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、実験結果の荷重－変位曲線を適切に評価可能であるが、押し抜きせん断破壊面を離散化していないことより、実験結果の最大荷重や最大荷重時変位は評価できない。

#### 参考文献

- 1) 三上浩，岸徳光，藤田学，澤田純之：AFRP シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断性状に関する一考案，構造工学論文集，vol51A，pp1299-1307，2005.
- 2) 三上浩，岸徳光，藤田学，澤田純之：鉄筋比の異なる AFRP シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，vol26，no.2，pp1459-1464，2006.
- 3) 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.
- 4) 内田雅俊，岸徳光，張広鋒，三上浩：FRP シート下面接着 RC 版の耐荷性状に関する数値解析的検討，コンクリート工学年次論文集，vol26，no.2，pp1435-1440，2006.
- 5) DIANA User's Manual (9.1)，TNO DIANA BV.
- 6) CEB-FIP Model Code 1990，Thomas Telford.

(2007 年 4 月 12 日受付)