

# 論文 鉄筋比の異なる RC 版の押抜きせん断破壊に関する三次元弾塑性解析

高玉 郁子\*1・岸 徳光\*2・三上 浩\*3

**要旨:** 本研究では, RC 版の押抜きせん断破壊性状を適切に評価可能な数値解析手法を確立することを目的に, 鉄筋を固体要素を用いた板状にモデル化し, かつ, 分布ひび割れと離散ひび割れモデルを併用する手法を提案し, 鉄筋をシェル要素でモデル化した場合や実験結果との比較によりその妥当性について検討を行った。その結果, 提案の手法を用いることにより, 荷重-変位曲線のみならず, 押抜きせん断コーンの発生や, 鉄筋のダボ作用に伴ってかぶりコンクリートに発生するひび割れ分布性状等の実験結果を, シェル要素を用いる場合に比較して, より忠実に再現可能であることが明らかになった。

**キーワード:** RC 版, 押抜きせん断破壊, 固体要素, 接触面要素, 換算弾性係数, 三次元弾塑性解析

## 1. はじめに

押抜きせん断破壊によって終局に至る RC 版の耐荷性状は, 押抜きせん断破壊面におけるコンクリートの力学特性や, 下端鉄筋のダボ作用等に強く依存することが知られている。現在まで, 押抜きせん断破壊に関する研究は数多く行われており, 土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>にせん断耐力評価式が示されている。しかしながら, せん断耐力評価式が全ての変数に対して適切な値を与えることができるかについては, 未だ疑問の残るところである。一方, 数値解析的研究に着目すると, 解析事例も少なく, 未だ RC 版の破壊挙動を適切に再現可能な数値解析手法は確立されていないのが現状である。RC 版の合理的な設計手法の開発や, RC 版の適切な補修・補強法を確立するためには, 実験のみならず数値解析的手法を併用して効率的に検討されなければならない。

このような観点から, 著者らは実験結果を基本にして, 荷重-変位関係を適切に評価可能な数値解析手法の確立に向け, 種々検討を行ってきた<sup>(例えば 2)</sup>。本研究では, 著者らの既往の研究を踏まえ, 鉄筋径や鉄筋比の異なる RC 版を対象に, 鉄筋を板状に簡略化し固体要素を用いてモデル化し, かつ分布ひび割れと離散ひび割れモデルを併用した手法を提案し, 鉄筋をシェル要素を用いてモデル化した場合や実験結果と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を行った。なお, 本研究では, 押抜きせん断破壊面と下端鉄筋の上下面に離散ひび割れモデルを適用し, それらの幾何学不連続現象を考慮することにした。また, 本数値解析には構造解析汎用コード DIANA (version 9.1) を用いている。

## 2. 試験体の概要

表-1 には, 本解析で対象とした試験体を一覧にして

示している。試験体は全 4 体であり, 試験体名は主鉄筋径 (mm) と主鉄筋間隔 (mm) をハイフンで結ぶことにより表わしている。図-1 には, 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 であり, 下端鉄筋の平均芯かぶりは 40 mm である。また, 鉄筋は版平面に関する対称軸を原点に取り設定した間隔で配置している。なお, 各鉄筋は 4 辺の外縁に配置した溝型鋼に溶接定着し, 定着長を節約している。試験体の支持部は, 四辺四隅とも上下方向への変位を拘束し回転のみを許容する単純支持に近い支持状態としている。支持間隔は両方向とも 1,750 mm である。載荷盤の直径は 60 mm であり, 載荷位置を版中央部とした。また, 実験終了後には版中央部を主鉄筋方向に切断して断面内のひび割れ分布を観察している (図-2)。

## 3. 解析概要

### 3.1 解析モデル

#### (1) 鉄筋のモデル化

本研究では, 2 方向の鉄筋比が等しく, かつ実構造物のように鉄筋の配筋数が多い場合に対しても適用可能とするため, また 図-2 に示されるように, 主鉄筋によるダボ作用も少なからず発揮されていることより, 各方

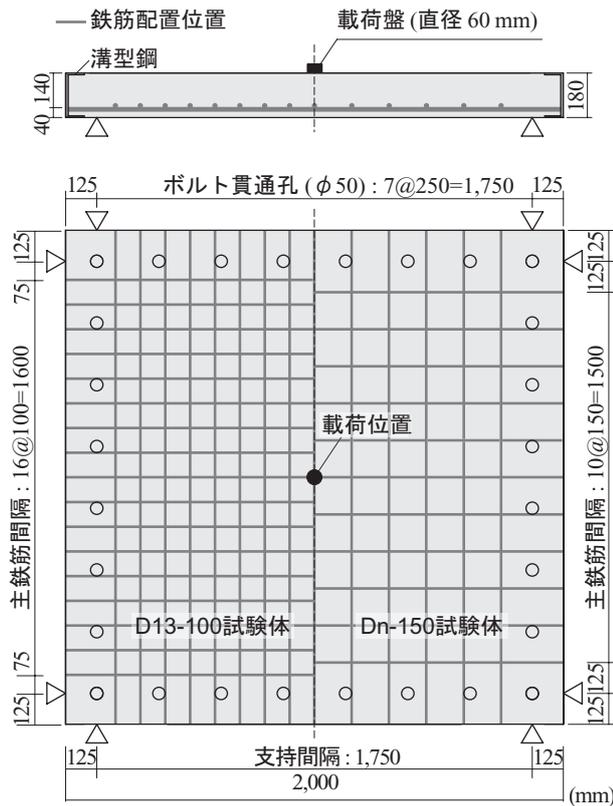
表-1 試験体一覧

試験体名	主鉄筋径	主鉄筋間隔 (mm)	鉄筋比 (%)	コンクリートの圧縮強度 $f'_c$ (MPa)
D13-200	D13	200	0.54	34.2
D13-100	D13	100	1.00	31.0
D19-150	D19	150	1.57	30.4
D22-150	D22	150	2.12	36.6

\*1 室蘭工業大学 工学研究科建設システム工学専攻 (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)



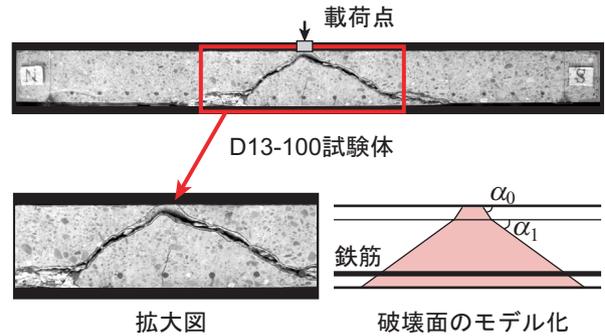
図一 1 試験体の形状寸法、配筋状況および荷重位置

向に配筋されている鉄筋群を固体要素を用いた鉄板要素にモデル化した(以後簡略して固体要素を用いる場合)。また、比較のためにシェル要素を適用する場合(以後、簡略してシェル要素を用いる場合)についても検討を行っている。

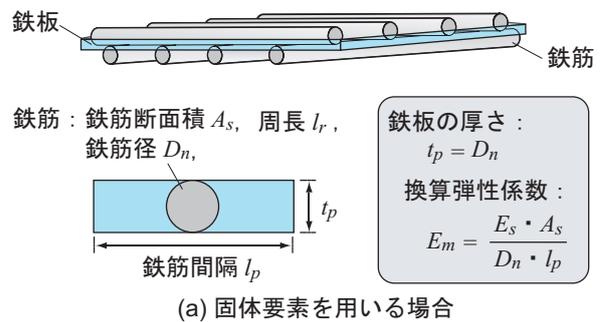
なお、ここでは2方向の鉄筋比が等しい場合を対象としている。2方向の鉄筋比が異なる場合には、別途モデル化の妥当性について検討を行うことが必要である。また、鉄筋は一般的に梁要素あるいはトラス要素を用いてモデル化される場合が多い。しかしながら、これらの要素は、鉄筋の配筋数が多い場合には適用に限界があること、またダボ作用を適切に評価できない可能性がある。これより、本論文では、鉄筋に対して固体要素あるいはシェル要素を用いてモデル化することとした。

固体要素を用いる場合には、図-3(a)に示すように、ダボ作用等による鉄筋の周辺コンクリートへの影響を考慮して鉄板の要素厚を鉄筋径  $D_n$  と等しく取り、かつ軸剛性が等価になるように換算の弾性係数  $E_m$  を仮定した。

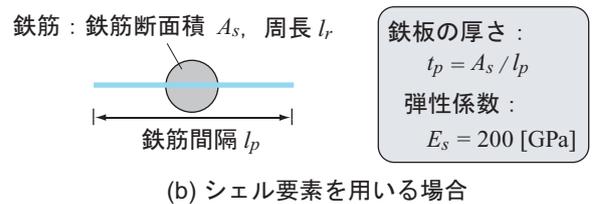
なお、鉄筋のモデル化に固体要素を用いる場合には、コンクリートが断面欠損することとなる。しかしながら、ここでは簡略化のために断面欠損分を無視することとした。シェル要素を用いる場合において、鉄板の要素厚  $t_p$  は、図-3(b)のように鉄筋群と軸剛性が等価になるように決定している。



図一 2 実験終了後の試験体中央部切断面状況および押抜きせん断破壊面のモデル化



(a) 固体要素を用いる場合



(b) シェル要素を用いる場合

図一 3 鉄筋のモデル化

また、いずれの場合においても、鉄板要素の上下面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応力と等価になるように、換算付着応力を用いて評価している<sup>2)</sup>。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  $\tau_b$ 、鉄筋周長  $l_r$  を用いて、次式より算出している。

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

## (2) 要素分割状況

図-4には、本研究に用いた解析モデルの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8節点あるいは6節点の固体要素、4節点あるいは3節点のシェル要素でモデル化している。なお、鉄板の配置位置は鉄筋の平均芯かぶり位置とした。また、支点部の回転中心から反力測定用のロードセルを介したRC版の下面までの高さ240 mm部分は、厚さ10 mmの鋼梁に簡略化しシェル要素でモデル化している。シェル要素には、面外せん断変形

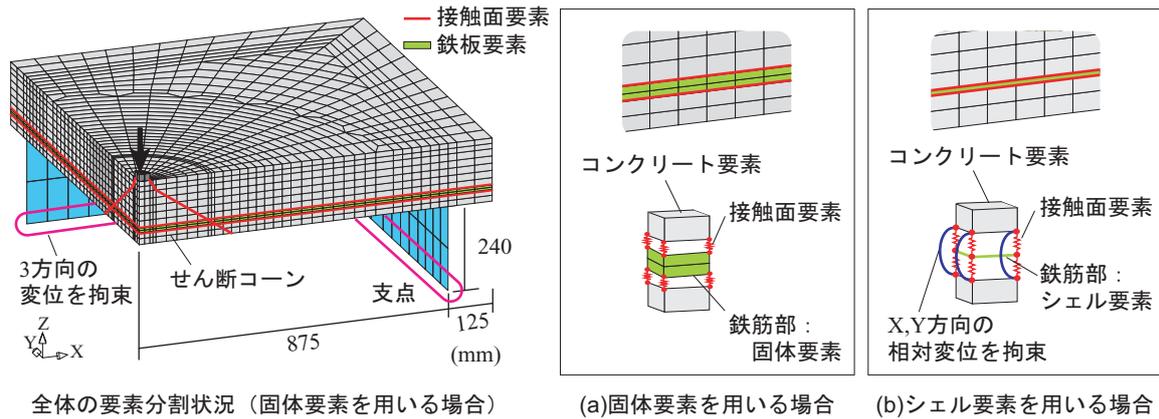


図-4 要素分割状況

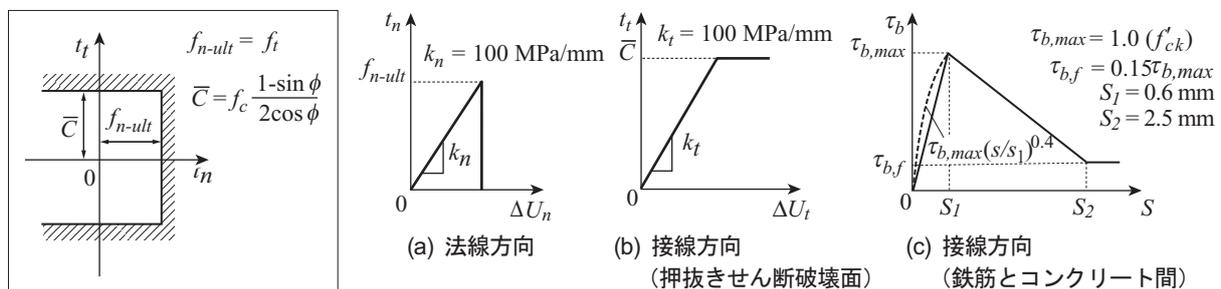


図-5 Coulomb Friction モデル

を考慮するために Mindlin-Reissner 理論に則し、かつせん断ロッキング現象を抑制するために自動的にせん断ひずみ場を修正する4節点四辺形アイソパラメトリックシェル要素 (Q20SH) を使用している。

境界面における条件は、対称切断面については法線方向変位成分を拘束し、支点部については3方向変位成分を拘束している。なお、解析は変位制御により行い、収束計算には Newton-Raphson 法を採用している。

### (3) 接触面要素の配置

本解析では、押抜きせん断破壊、鉄筋のすべりおよびコンクリートの剥離を再現するために、図-4に示すように離散ひび割れを載荷点部のせん断コーンおよび鉄板要素の上下に配置した。その配置位置やひび割れ角は実験終了後の切断面のひび割れ状況 (図-2) を参考に、D13-200, D13-100 試験体の場合には  $\alpha_1 = 35^\circ$ 、D19-150, D22-150 試験体の場合には  $\alpha_1 = 40^\circ$  とし、 $\alpha_0$  は全試験体とも  $\alpha_0 = 60^\circ$  と設定した。

### 3.2 接触面要素の応力-相対変位関係

離散ひび割れモデルは接触面要素の応力-相対変位関係によって規定される。本解析では、図-5に示す Coulomb Friction モデルを用い、押抜きせん断破壊およびコンクリート鉄板間のすべりや剥離を再現することとした。

押抜きせん断破壊は、押抜きせん断面上における法線方

向の引張破壊と接線方向のせん断破壊の連成によるものと考えられる。本研究では、押抜きせん断破壊面には、図-5 (a) に示すように、法線方向の引張破壊を法線方向応力  $f_{n-ult}$  がコンクリートの引張応力  $f_t$  に達した時点、また、せん断破壊に関しては、(b) 図に示すようにせん断応力が粘着力  $\bar{c}$  に達した時点で破壊するものと設定した。破壊後はせん断応力を解放することとしている。せん断破壊面の骨材等による摩擦は考慮していない。ここで、粘着力  $\bar{c}$  は図-5中の式より算出している<sup>3)</sup>。式中の  $\phi$  は内部摩擦角であり、本研究では、 $\phi = 30^\circ$  と設定した。

鉄板とコンクリート間の付着や剥離破壊において、法線方向の剥離に関しては、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  $f_t$  に達した時点で発生するように設定している。一方、せん断方向の付着応力-すべり関係には、上述の換算付着応力を用いることとし、CEB - FIP モデルコード<sup>4)</sup>による鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係を用いることとした。本解析では、(c) 図に示すように付着応力-すべり関係の  $0 \sim S_1$  の間の曲線 (破線) を直線に簡略化したモデル (実線) を用いている。

なお、実験結果におけるせん断破壊後の急激な除荷状態を再現するために、せん断コーンの延長線上にある鉄板要素にも接触面要素を適用することとし、法線方向に

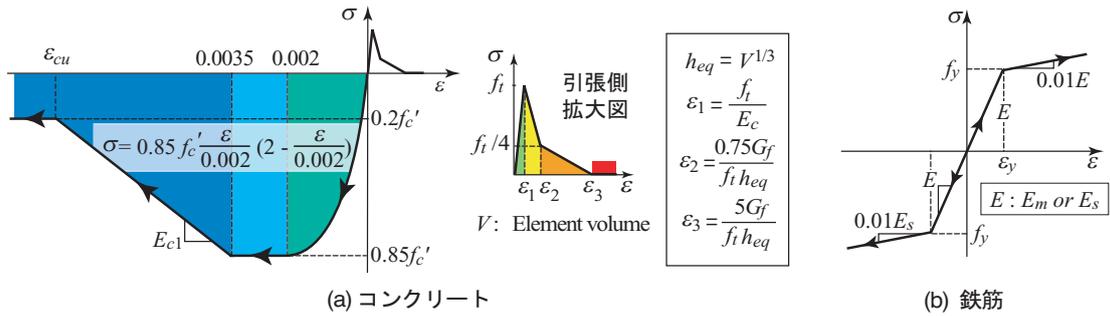


図-6 材料構成則

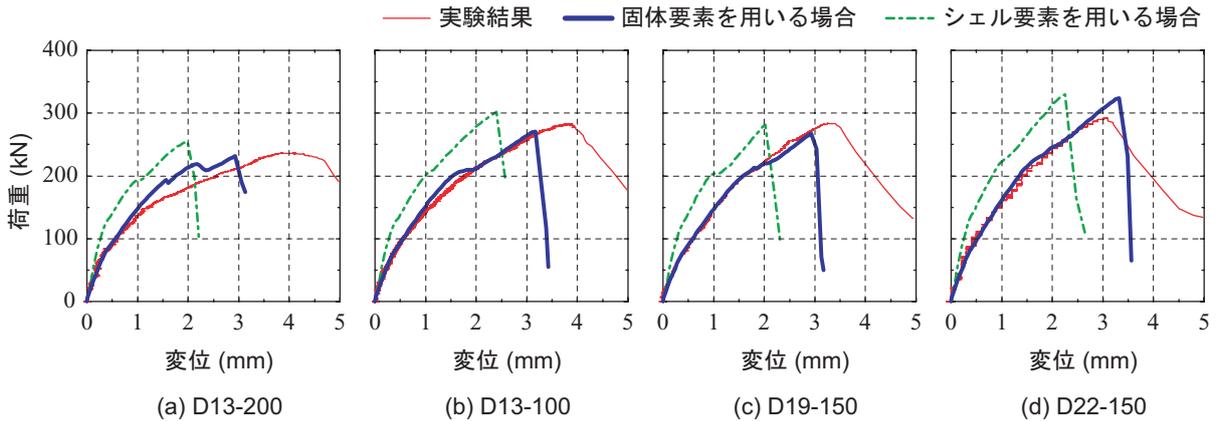


図-7 荷重-版中央点変位関係

は  $k_n = 100 \text{ MPa/mm}$  で鉄筋の降伏応力  $370 \text{ MPa}$  に達した時点、接線方向には  $k_t = 100 \text{ MPa/mm}$  で鉄筋のせん断強さ  $214 \text{ MPa}$  に達した時点で破壊するものとして設定した。ここで、鉄筋のせん断強さは鉄筋の降伏応力を用いて von Mises の降伏条件より算出した。

### 3.3 材料構成則

図-6には、コンクリートおよび鉄板要素の応力-ひずみ関係を示している。(a)図に示すように、コンクリートの圧縮側には、材料実験から得られた圧縮強度  $f_c'$  を用い、圧縮ひずみ  $3,500 \mu$  までは土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</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。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件を適用し、内部摩擦角を  $30^\circ$  とした。一方、引張側には、コンクリート標準示方書による引張軟化曲線を適用している。鉄板要素には、(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とした。なお、降伏条件には von Mises の降伏条件式を適用している。

## 4. 数値解析結果および考察

### 4.1 耐荷性状

図-7には、各試験体毎に荷重-版下面中央点変位(以後、単に変位)関係の解析結果を実験結果と比較して示している。また、表-2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  $\delta_{max}$  を一覧にして示している。なお、いずれの計算においても数値解析は、押抜きせん断破壊発生後に終了している。

図-7における実験結果を見ると、いずれの試験体も、荷重が  $70 \sim 100 \text{ kN}$  程度で剛性勾配に若干の低下が見られる。これは、ひび割れの発生によるものと考えられる。その後、荷重の増加とともに変位も増加し、変位  $3 \sim 4 \text{ mm}$  程度で最大荷重を示した後に押抜きせん断破壊により荷重が低下している。

鉄板要素に固体要素を用いる場合には、初期剛性から最大荷重時まで実験結果とほぼ同様の性状を示している。剛性勾配は、初期剛性が低下した後も実験結果と良好に対応しており、いずれの試験体においても実験結果の最大荷重をほぼ再現していることが分かる。D13-200試験体の場合には、変位が小さく示されているものの、最大荷重値はほぼ対応している。他の3試験体の場合には、いずれの試験体においても実験結果の最大荷重および最大荷重時変位をほぼ再現していることが分かる。

一方、シェル要素を用いる場合には、いずれも実験結果とほぼ同様の約  $100 \text{ kN}$  程度で剛性勾配が低下しているものの、全体的に剛性勾配が実験結果よりも大きく示されている。これは、図-4(b)に示されているように鉄板要素を介した上下コンクリート要素の相対変位を拘束していることや、鉄筋によるダボ作用が適切に再現

表-2 最大荷重および最大荷重時変位

試験体名	換算弾性係数 $E_m$ (GPa)	実験結果		固体要素を用いる場合		シェル要素を用いる場合	
		$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)
D13-200	10.03	236.5	4.12	231.9 (0.98)	2.93 (0.71)	254.8 (1.08)	1.99 (0.48)
D13-100	20.07	283.3	3.81	270.4 (0.95)	3.17 (0.83)	301.7 (1.06)	2.40 (0.63)
D19-150	20.71	283.9	3.26	267.6 (0.94)	2.93 (0.90)	281.3 (1.01)	2.02 (0.61)
D22-150	24.16	292.1	3.10	323.6 (1.11)	3.32 (1.07)	329.5 (1.12)	2.25 (0.73)

† ( ) 内の数値は (解析結果) / (実験結果) である

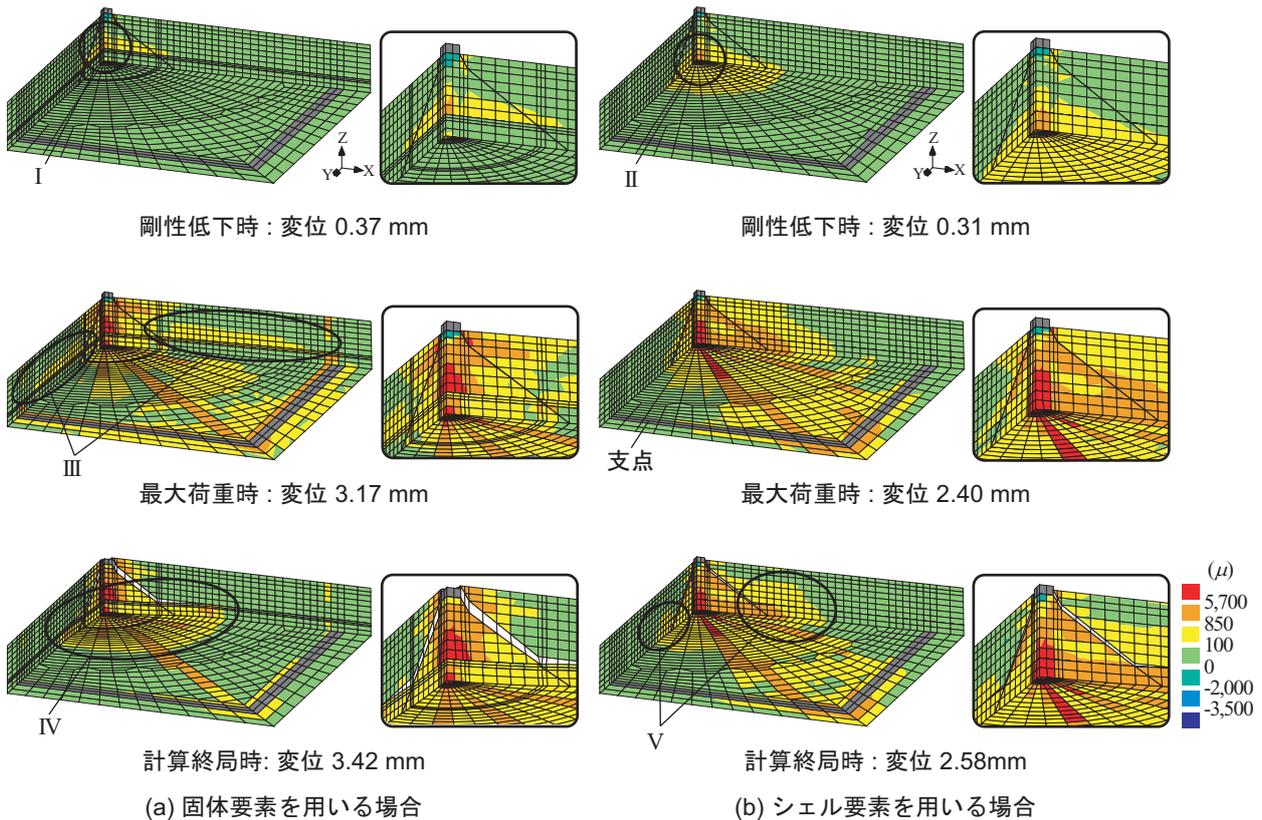


図-8 D13-100 試験体における最大主ひずみコンター図および破壊状況 (変形倍率: 10 倍)

されていないこと等によるものと推察される。その後、いずれの試験体においても実験結果よりも小さな変位で押抜きせん断破壊が生じ、計算を終了している。

表-2 より、シェル要素を用いる場合では、解析結果と実験結果の最大荷重値の差が 10% 程度であるものの、変位の差は 30~50% と大きい。これに対し、固体要素を用いる場合には、変位の差が 10~30% 程度であり、多少のばらつきが見られるものの、最大荷重値では 10% 程度となっており、大略実験結果と対応していることが分かる。これより、鉄筋を板状に簡略化し固体要素を用いてモデル化する場合には、実験結果を大略再現できるものと判断される。

#### 4.2 破壊性状

図-8 には、一例として D13-100 試験体の各荷重ステップにおける最大主ひずみコンター図および破壊状況を示している。図には、解析結果の剛性低下時、最大荷重時および終局時におけるコンター図を示している。最大主ひずみのコンターレベル: 100, 850, 5,700  $\mu$  は、それぞれ 図-6(a) に示す  $\epsilon_1$  (ひび割れ発生ひずみ),  $\epsilon_2$  および  $\epsilon_3$  (ひび割れ開口ひずみ) の概略値である。

図より、鉄筋を固体要素でモデル化する場合には、鉄筋上面近傍部にひび割れが発生している (図中, I 部分)。これは、鉄板上面に配置した接触面要素のすべりによるものと推察される。シェル要素を用いる場合には、載荷点直下の版下面にひび割れが発生している (図中,

II 部分)。なお、この時点では、いずれ場合にも押抜きせん断面に配置した接触面要素は開口していない。

最大荷重時の場合には、いずれの場合においても、押抜きせん断コーンの内部でひび割れが開口し、RC 版の下面に対角線上に伸びる曲げひび割れが発生している。ここで、固体要素を用いる場合には、対称切断面の鉄筋上面近傍部において、荷重点である版中央部から支点方向に伸びるひび割れ(図中、III 部分)や、版下面で支点に沿って進展するひび割れが発生している。これらのひび割れ分布からも、固体要素を用いる場合の版の変形状況は、シェル要素を用いる場合に比較して大きいことが推察される。

計算終局時には、いずれの場合においても、押抜きせん断面に配置した接触面要素が完全に開口していることが分かる。このことより、本解析の場合には、押抜きせん断破壊が生じたことにより荷重が急激に低下し終局に至ったことが分かる。固体要素を用いる場合におけるコンター図を見ると、鉄板およびかぶりコンクリート部に大きなひずみが発生している(図中、IV 部分)。このことより、固体要素を用いる場合には、鉄筋のダボ作用が再現されているものと推察される。シェル要素を用いる場合には、かぶりコンクリート部のみならず下面から版の高さの半分程度までひび割れが発生している(図中、V 部分)。

図-9 には、D13-100 試験体に関する実験終了後の主鉄筋方向中央部切断面および裏面のひび割れ分布を固体要素を用いる場合の最大主ひずみコンター図と重ねて示している。図中の太線は、実験結果のひび割れ分布を示している。図より、実験結果を見ると、版切断面に押抜きせん断コーンが形成され、鉄筋のダボ作用によってかぶり部のひび割れ角度が、せん断コーンの角度より小さくなっていることが分かる。また、版裏面には面外方向に押し出されたかぶりコンクリートに多数のひび割れが発生し、さらに対角線状に曲げひび割れも発生している。

一方、解析結果の場合には、実験結果の場合と同様に、切断面には押抜きせん断コーンや下端鉄筋に沿うひび割れの発生が再現されている。また、版裏面においては、かぶりコンクリートが押し出されひび割れが多数発生する状況や、対角線状に発生した曲げひび割れ等の性状も実験結果に対応したものとなっている。

## 5. まとめ

本研究では、4 辺支持矩形 RC 版の耐荷性状を適切に再現可能な数値解析手法を確立することを目的に、鉄筋を板状の固体要素に置き換えた場合について三次元弾塑性解析を実施し、鉄筋をシェル要素に置き換えた場合も含め、数値解析結果と実験結果を比較することにより、

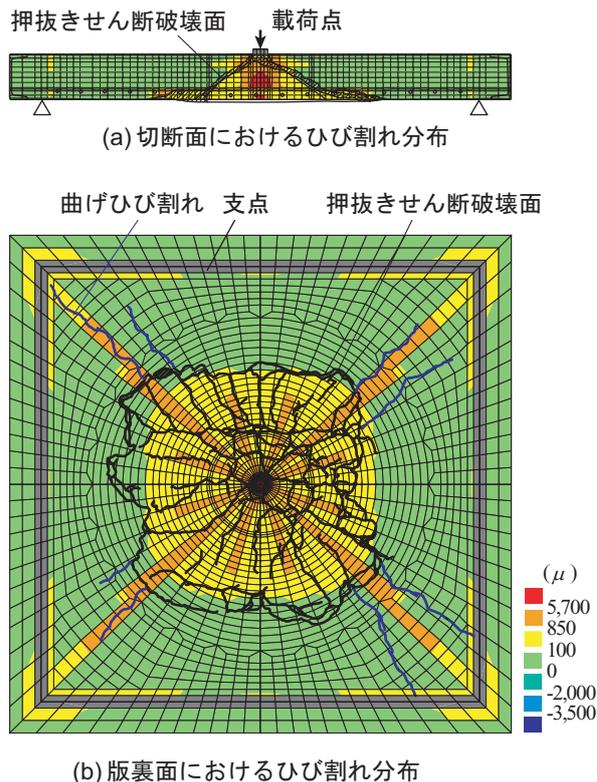


図-9 最大主ひずみコンター図と実験結果のひび割れ分布との比較  
(固体要素を用いる場合：D13-100 試験体)

提案の解析手法の妥当性を検討した。

検討の結果、提案の手法を用いることにより、押抜きせん断コーンの発生や、鉄筋のダボ作用に伴ってかぶりコンクリートに発生するひび割れ分布、荷重-変位関係等を含め、鉄筋にシェル要素を適用する場合に比較して、実験結果をより忠実に再現可能であることが明らかになった。

今後、版厚、荷重径、内部摩擦角等のパラメータを変化させた場合に関する検討を行い、より汎用性の高い数値解析手法を確立したいと考えている。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書(2002 年制定) 構造性能照査編，2002.
- 2) 張 広鋒，岸 徳光，三上 浩，小室 雅人：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp397-402，2007.
- 3) Nonlinear Analysis User's Manual(7.2)，TNO Building and Construction Research.
- 4) CEB-FIP Model Code 1990，Thomas Telford.