

# 論文 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

内田 雅俊\*1・岸 徳光\*2・張 広鋒\*3・三上 浩\*4

**要旨：** 本論文では、FRPシートを下面接着したRC版の押し抜きせん断耐荷挙動を適切に評価可能な解析手法を確立することを目的に、四辺支持RC版に関する3次元弾塑性有限要素解析を行い、実験結果と比較することによってその妥当性を検討した。検討の結果、1) 実験結果に基づいた接触面要素を定義することにより、実験結果の荷重-版下面中央点変位関係を大略再現可能である、2) 提案の解析手法を用いることにより、実験結果に対応したシートの補強量と破壊性状の関係を大略再現可能である等が明らかになった。

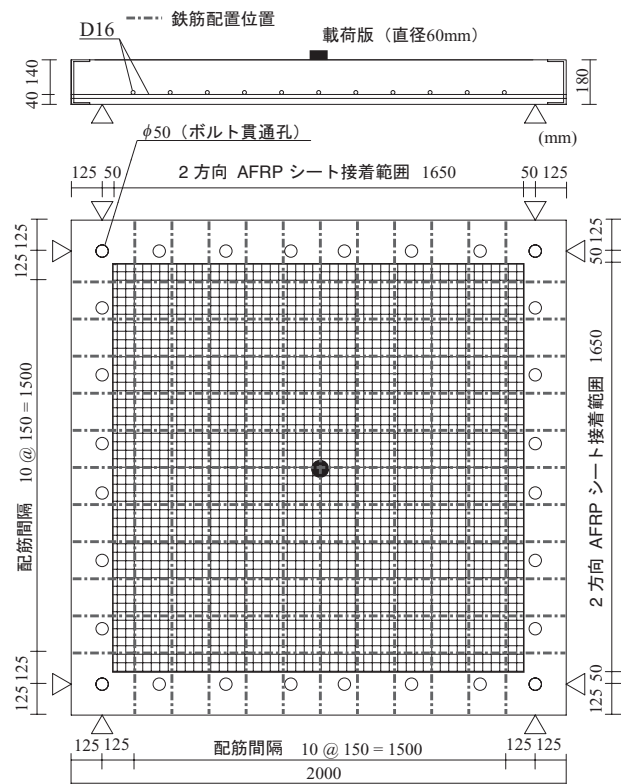
**キーワード：** RC版, 押し抜きせん断破壊, FRPシート, 下面接着, 耐荷性状

## 1. はじめに

道路橋RC床版において、新T活荷重対応や疲労あるいは経年変化による劣化損傷に対応する補修・補強対策の必要性が指摘され、各地で鋼板接着工法、コンクリート吹きつけ/打設増厚工法、連続繊維(FRP)シート接着工法による補修・補強工事が盛んに行われている。その中で、特にFRPシート接着工法は、軽量で施工性に富むことより急速に実用化が進んでいる。しかしながら、合理的な補強設計法が未だ確立されていないことより、実験研究を主にその確立に向けた検討が行われているのが現状である。一般に汎用的で合理的な補強設計法を確立するためには、多くのパラメータ検討が要求されることより、実験的研究のみならず、数値解析的研究も併用して、効率よく検討を行わなければならないものと判断される。しかしながら、この種の構造形式に関する数値解析例は少なく、適切な解析手法は確立されるに至っていない。

このような観点から、本研究では、FRPシートを下面接着したRC版の押し抜きせん断耐荷挙動を適切に再現可能な解析手法を確立することを

目的に、2方向アラミド繊維 (AFRP) シートを下面接着した四辺支持RC版に関する3次元弾塑性有限要素解析を試み、実験結果と比較することにより提案した解析手法の妥当性を検討した。



図一 1 試験体の形状寸法, 配筋状況, 載荷位置

\*1 東京都 建設局 修(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 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 助手 博(工) (正会員)

\*4 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

なお、本数値解析は構造解析用汎用プログラム DIANA を用いて行っている。

## 2. 試験体の概要

本研究に用いた試験体は、無補強試験体を含め、2方向シートの補強層数を1層から4層に変化させた全5体である。試験体名のNは無補強を、Sはシート補強を示しており、Sに付随する数値は補強層数を示している。図-1には、解析対象とした試験体の形状寸法、配筋状況、載荷位置をシート補強概要とともに示している。RC版の寸法は $2,000 \times 2,000 \times 180$  mm、かぶり厚さは40 mmである。鉄筋にはD16を用い、版中央部から150 mm間隔で下端のみに配置している。シート貼り付け範囲は2方向シートを両支点の50 mm手前までとした。一方、試験体の支持条件は四辺支持で、回転のみを許容するピン支持に近い構造である。また、実験終了後には主鉄筋方向の版中央部を切断して断面内のひび割れ分布性状を観察している(図-2)。表-1, 2には実験時に実施した材料試験結果より得られたコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値と2方向AFRPシートの公称値を示している。

## 3. 解析概要

### 3.1 解析モデル

図-3には、本解析に用いた試験体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。コンクリートおよびFRPシートは8節点、6節点あるいは4節点固体要素を用いてモデル化している。また、解析の簡略化のため、スパン中央の鉄筋のみをビーム要素を用いてモデル化し、その他の鉄筋に関しては埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化している。境界条件は、解析対象の連続性を考慮して、対称切断面においてはその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部においては節点の鉛直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っている。また、収束計算には一般に広く用いられている修正Newton-Raphson法を

表-1 コンクリート、鉄筋の力学的特性値

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	34.9	-	25.2	0.2
鉄筋	-	386.4	206	0.3

表-2 2方向AFRPシートの力学的特性値

繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ $t$ (mm)	弾性係数 $E_f$ (GPa)	引張強度 $f_f$ (GPa)	破断ひずみ $\epsilon$ (%)
435/435	0.24/0.24	118	2.06	1.75

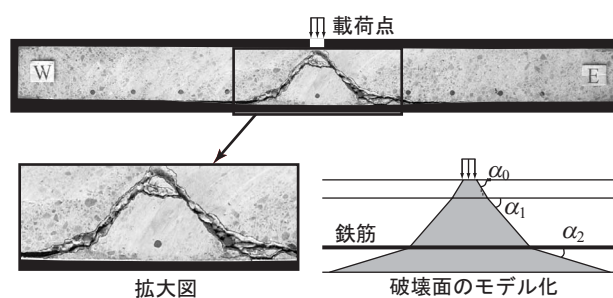


図-2 実験終了後の試験体断面切断状況および押し抜きせん断破壊面のモデル化

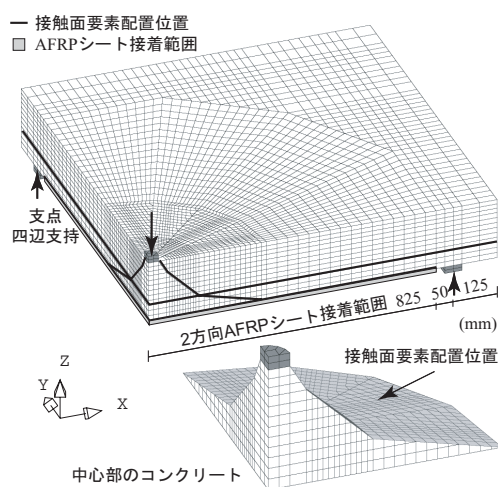


図-3 要素分割状況の一例 (S1 試験体)

採用している。

### 3.2 材料構成則

図-4 (a)にはコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側の構成則に関しては、材料試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

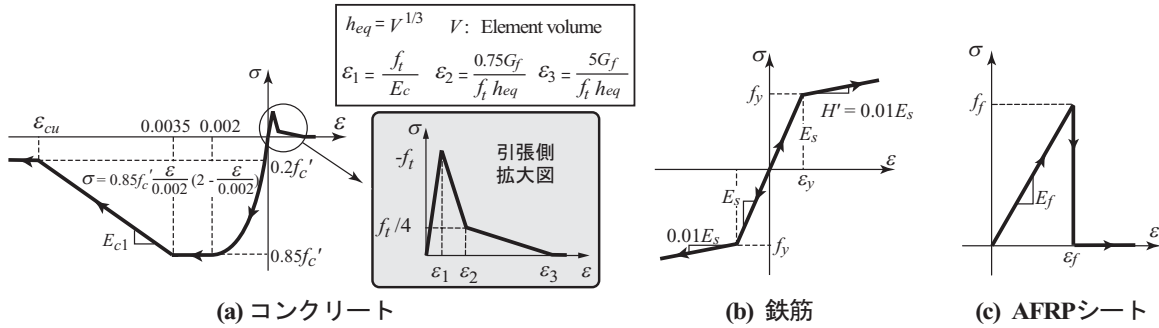


図-4 材料構成則

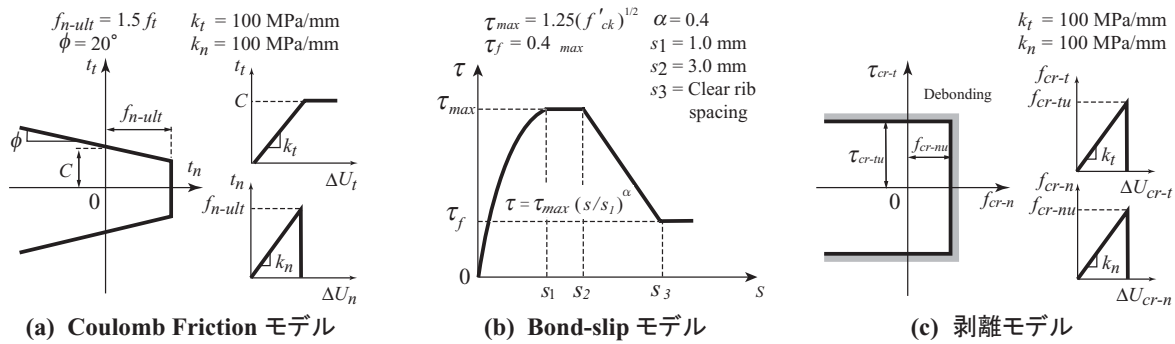


図-5 接触面要素に適用した各応力-相対変位関係

方書（以下、示方書）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 の降伏条件式を適用している。一方、引張側に関しては示方書に示されている引張軟化曲線を適用している。鉄筋には、図-4(b) 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。降伏の判定には von Mises の降伏条件式を適用している。AFRP シートは、図-4(c) に示すように引張力のみを伝達するものとし弾性域は線形と仮定して、引張強度に達した時点で破断したと見なされるモデルを用いている。

### 3.3 接触面要素の配置

本解析では、RC 版の押し抜きせん断破壊を再現するために、図-3 に示されるようなコーン状の接触面要素を仮定して押し抜きせん断破壊面をモデル化することとした。その配置位置やひび割れの角度は実験終了後の切断面のひび割れ状況（図-2）を参考に、 $\alpha_1$  は無補強試験体の場合には  $\alpha_1 = 35^\circ$ 、シート補強試験体の場合には  $\alpha_1 = 45^\circ$  とし、全試験体とも  $\alpha_0 = 60^\circ$ 、 $\alpha_2 = 15^\circ$

と設定した。また、スパン中央部に配置されている鉄筋とコンクリート間にも接触面要素を配置し、主鉄筋のすべりをモデル化した。それ以外の鉄筋に関しては解析の簡略化のため主鉄筋のすべりを考慮していない。コンクリートとシート間にはシートの剥離を考慮するために接触面要素を配置している。

### 3.4 接触面要素の応力-相対変位関係

図-5 には各接触面要素に適用した応力-相対変位関係を示している。

押し抜きせん断破壊面に配置した接触面要素には Coulomb Friction モデルを採用している。ここで、法線方向の破壊強度に関しては、通常  $f_{n-ult} = f_t$  と設定しているが<sup>1)</sup>、本研究では  $f_{n-ult} = 1.5f_t$  と設定することとした。これは、実験時には押し抜きせん断破壊面が凹凸を含んだ複雑な形状となっているのに対し、解析時には平面としてモデル化しており、押し抜きせん断破壊面の面積が実験時よりも小さく評価されている可能性があることを考慮したためである。

また、接線方向の破壊は Mohr-Coulomb の降伏条件を参考に、次式より算定することとした。な

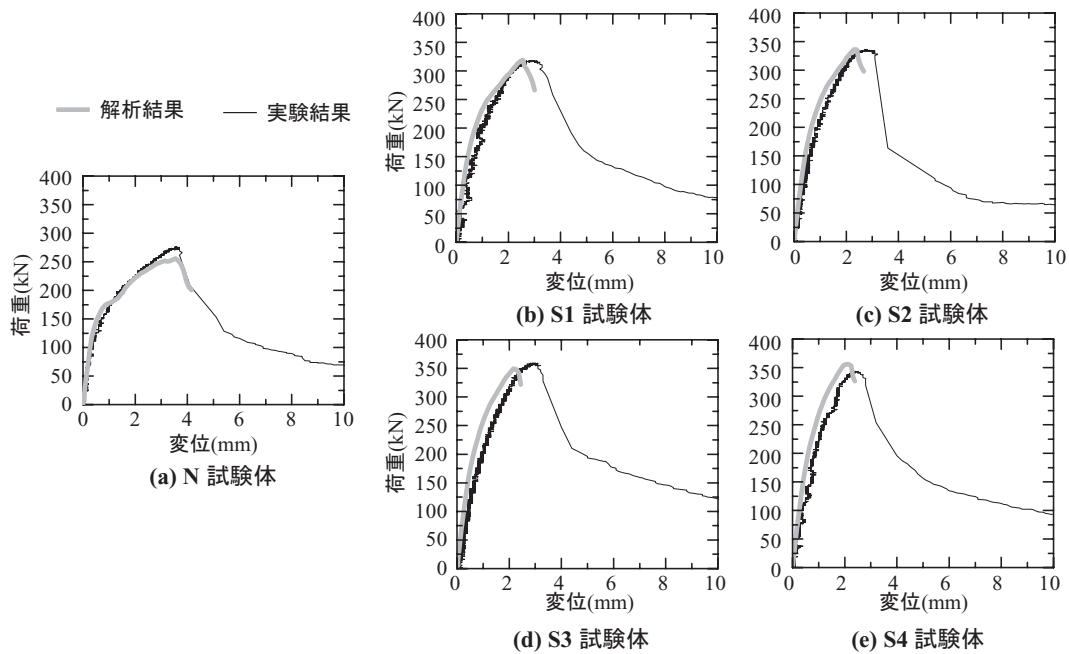


図-6 荷重-版下面中央点変位関係

お、内部摩擦角に関しては各研究機関において  $10^{\circ} \sim 50^{\circ}$  間で種々の値が提案されている。本論文では、予備解析において  $20^{\circ}$  と設定した場合に実験を大略再現可能であることを確認していることにより、ここではこの値を採用することとした。 $C$  は次式を用いて評価している。

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

スパン中央部の主鉄筋要素周囲に配置した接触面要素には Bond-Slip モデルを適用した。本研究では、CEB-FIP Model Code を参考にして 図-5(b) に示すモデルを適用している<sup>2)</sup>。

また、シートの剥離を再現するために、シートとコンクリート間には Coulomb Friction モデルを参考に、著者らが過去に提案した剥離モデルを適用している。剥離モデルの詳細は文献 1) に譲ることとする。

#### 4. 数値解析結果および考察

##### 4.1 荷重-版下面中央変位関係

図-6 には、各試験体の荷重-版下面中央点変位曲線に関する解析結果と実験結果の比較図、表-3 には各結果の最大荷重  $P_{max}$  と最大荷重時変位  $\delta_{max}$  の一覧を比較して示している。各解析

表-3 最大荷重および最大荷重時変位

試験体名	実験結果		解析結果	
	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)
N	276.2	3.6	256.01 (1.07)	3.55 (1.01)
S1	318.5	2.8	318.96 (1.00)	2.56 (1.09)
S2	336.2	2.8	336.20 (1.00)	2.30 (1.18)
S3	359.0	3.0	349.35 (1.03)	2.17 (1.28)
S4	343.8	2.4	355.78 (0.96)	2.06 (1.14)

( ) 内の数値は解析結果と実験結果の比を示す。

結果の終局原因は、全て押し抜きせん断破壊面の離散ひび割れが開口したことによるものである。

図-6(a) に示す N 試験体の実験結果を見ると、100 kN 程度でひび割れが発生することにより版の剛性が低下している。その後、徐々に版の剛性が低下し、変位 3.6 mm 程度で押し抜きせん断破壊によって終局に至った。解析結果を見ると、最大荷重は実験結果に比べて若干小さくなっているものの、載荷初期から押し抜きせん断破壊により終局に至るまで実験結果と大略一致している。

図-6(b), (c) に示す S1 / S2 試験体に関する解析結果を見ると、いずれの場合も解析結果は実験結果に比べて最大荷重時変位が若干小さく評価されている。これは、実験時には押し抜きせん断破壊面が徐々に形成されるのに対し、数値解析時には押し抜きせん断破壊面を平面と仮定してい



るため、ひび割れの開口が急激に進展するためと考えられる。しかしながら、最大荷重は実験結果と同程度の値を示しており、大略一致している。

図-6(d), (e) に示す S3/S4 試験体に関する解析結果は、いずれも荷重 100 kN 程度において版の剛性が低下した後、実験結果に比べて大きな剛性を有した状態で終局に至っている。これは、シートの補強層数が多いために版の変形が抑制され、曲げひび割れが殆ど発生しない状態で急激に押し抜きせん断破壊に至ったためと推察される。しかしながら、最大荷重は実験結果とほぼ一致しており、実験結果を大略再現できているものと判断される。

また、各試験体の解析結果を比較すると、シートを接着した S<sub>n</sub> 試験体（添字 *n* はシート補強層数）は N 試験体よりも最大荷重が大きく、最大荷重時変位が小さい。また、実験結果には多少のばらつきがみられるものの、既往の研究<sup>3)</sup>においてもシート補強層数を増加させることにより最大荷重が増加し、最大荷重時変位は低下する傾向にあることを確認しており、本数値解析においても同様の傾向を示すことが明らかになった。

#### 4.2 最大主ひずみ分布およびひび割れ状況

図-7~9 には S1 試験体の各荷重レベルにおけるコンクリートの最大主ひずみ分布およびひび割れ状況と共に、押し抜きせん断破壊面に配置した接触面要素の法線方向応力分布も併せて示している。最大主ひずみ分布図において、100 μ、5,500 μ の引張ひずみはそれぞれコンクリートのひび割れ発生およびひび割れ開口時の概略値である。また、押し抜きせん断破壊面の接触面要素には、破壊応力に達した後、法線方向応力が開放されるモデルを適用していることより、接触面要素の法線方向応力分布図の応力零領域では離散ひび割れが開口していることを示唆している。

図-7 には、初期剛性から若干剛性が低下した時点における解析結果を示している。この時点では、荷重点直下に分散ひび割れの開口を示す黒色の領域が 1 本のみ発生している。しかしながら、押し抜きせん断破壊面の離散ひび割れは未だ

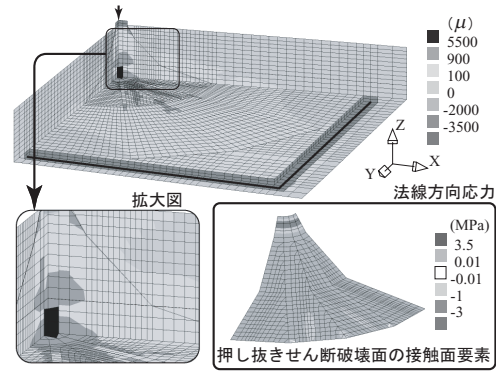


図-7 最大主ひずみ分布図およびひび割れ状況 S1 試験体：剛性低下時，変位 0.99 mm（変形倍率：40）

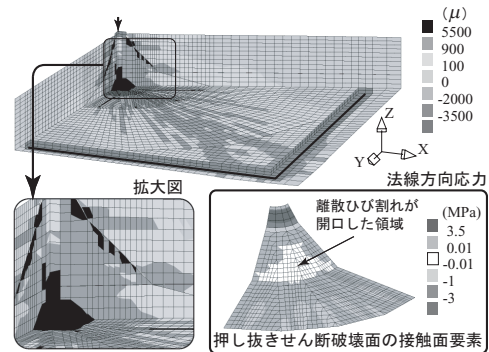


図-8 最大主ひずみ分布図およびひび割れ状況 S1 試験体：最大荷重時，変位 2.56 mm（変形倍率：40）

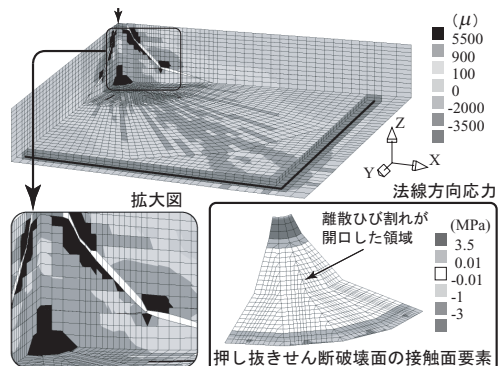


図-9 最大主ひずみ分布図およびひび割れ状況 S1 試験体：終局時，変位 3.01 mm（変形倍率：20）

開口していないことが確認できる。

図-8 には最大荷重時の解析結果を示している。この時点では荷重点直下付近の分散ひび割れの領域が拡大し、押し抜きせん断破壊面付近にも分散ひび割れの発生が確認できる。押し抜きせん断破壊面に着目すると、中央に接触面要素の破壊を示す白色の領域が分布しており、離散ひび

割れが部分的に開口していることが分かる。

図-9には終局時の解析結果を示している。この時点では最大荷重時からの分散ひび割れの進展は殆ど見られない。しかしながら、押し抜きせん断破壊面に着目すると、離散ひび割れの開口が押し抜きせん断破壊面全体に進展しており、離散ひび割れが大きく開口することによって終局に至っている状況が、拡大図からも確認できる。

図-10, 11には、N試験体とS4試験体に関する終局時での解析結果を比較して示している。N試験体の場合には、版下面において載荷点直下付近から隅角部に向かって曲げに伴う分散ひび割れの開口が示されている。実験時においても解析結果と同様、版下面に曲げひび割れが発生した後に、押し抜きせん断破壊に至っている状況を確認している。一方、S4試験体の場合には、版下面に分散ひび割れの開口が示されていないものの、開口に至らない分散ひび割れが広範囲に発生している。これは前述のように、シートを接着したことにより曲げ剛性が向上し、曲げ変形が抑制されたためと推察される。また、N, S1試験体のいずれにおいても押し抜きせん断コーンの形成が確認できる。

## 5. まとめ

FRPシートを下面接着したRC版の押し抜きせん断挙動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、2方向アラミド繊維シートを下面接着した四辺支持RC版に関する3次元弾塑性有限要素解析を行った。

本研究で得られた結果を整理すると、以下の通りである。

- (1) コンクリートとシート間、および実験結果の押し抜きせん断破壊面を参考に設定したコーン状の面にそれぞれ特性の異なる Coulomb Friction 型の接触面要素を定義することにより、実験結果の荷重-載荷点変位関係を大略再現することができる。
- (2) 提案の解析手法を用いることにより、実験結果に対応したシート補強量とひび割れの

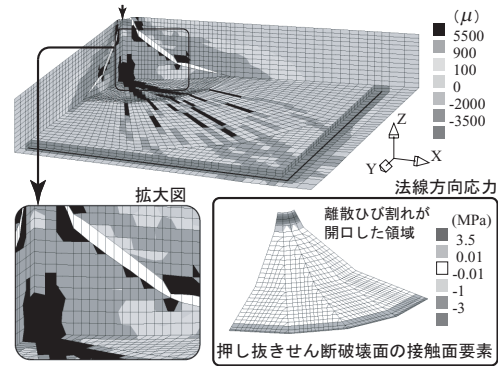


図-10 最大主ひずみ分布図およびひび割れ状況 N試験体：終局時、変位 3.55 mm (変形倍率：20)

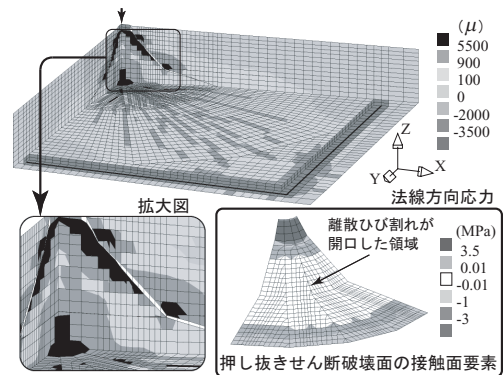


図-11 最大主ひずみ分布図およびひび割れ状況 S4試験体：終局時、変位 2.06 mm (変形倍率：20)

発生や変形性状および押し抜きせん断破壊に至る挙動の関係が大略再現可能である。

- (3) しかしながら、内部摩擦角や押し抜きせん断破壊面の配置位置等の各種パラメータは、版のアスペクト比、鉄筋比等によって影響されるものと考えられるため、今後も詳細な検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 張 広鋒: FRPシート曲げ補強 RC 梁に関するシートの剥離挙動解析, 土木学会論文集, No. 725/V-58, pp.255-272, 2003.
- 2) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.
- 3) 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一検討, 土木学会北海道支部論文集 (CD-ROM), V-8, 2006