

論文 支持条件の異なる RC 版の静的耐荷挙動に関する三次元弾塑性解析

氏家 友哉^{*1}・小室 雅人^{*2}・岸 徳光^{*3}・三上 浩^{*4}

要旨: 本研究では、種々の支持条件下における RC 版の耐荷性状を適切に再現可能な解析手法の確立を目的として、支持条件の異なる 3 種類の RC 版を対象に三次元弾塑性解析を実施し、実験結果との比較によりその妥当性に関する検討を行った。その結果、(1) コンクリートに分布ひび割れモデルを適用して、鉄筋を板状の固体要素にモデル化し、かつ鉄筋のすべりを考慮する解析手法を用いることにより、支持条件にかかわらず、押抜きせん断破壊による耐力低下を除き、RC 版の耐荷性状を精度よく再現可能であること、および (2) 実験終了時における RC 版裏面のひび割れ分布性状に関しても大略再現が可能であることが、明らかになった。

キーワード: RC 版, 耐荷性状, 三次元弾塑性解析, 分布ひび割れモデル, 鉄筋すべり

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、コンクリートの力学的特性や下端鉄筋のダボ作用に強く依存することが知られている。著者らの研究グループでは、既往の研究において RC 版の耐荷性状に及ぼす種々の影響を明らかにするために、数多くの静載荷実験を実施してきた^{1)~3)}。また、RC 版の耐荷挙動を適切に再現可能な解析手法を確立するために、実験的検討と並行して有限要素法を用いた三次元弾塑性解析も実施してきた。その結果、四辺単純支持 RC 版に関しては、コンクリートの押抜きせん断破壊面に離散ひび割れ要素を配置し、鉄筋を板状の固体要素にモデル化し、かつ鉄筋のすべりを考慮することによって、耐荷性状や破壊状況を大略再現できることを明らかにしている⁴⁾。

一方、実構造を想定した場合には、RC 版の支持条件は必ずしも四辺単純支持状態とはならないことから、より汎用性の高い解析手法を確立するためには、異なる支持条件下における RC 版の耐荷性状に関しても検討する必要がある。

このような背景より、本研究では、種々の支持条件下における RC 版の耐荷性状を適切に再現可能な解析手法の確立を目的として、支持条件の異なる 3 種類の RC 版を対象に有限要素法を用いた三次元弾塑性解析を実施し、別途実施した静載荷実験結果³⁾との比較により、その妥当性を検討した。なお、本解析には構造解析汎用プログラム DIANA9.3⁵⁾を用いている。

2. 試験体概要

図-1 には、本研究で対象とした試験体の形状寸法、配

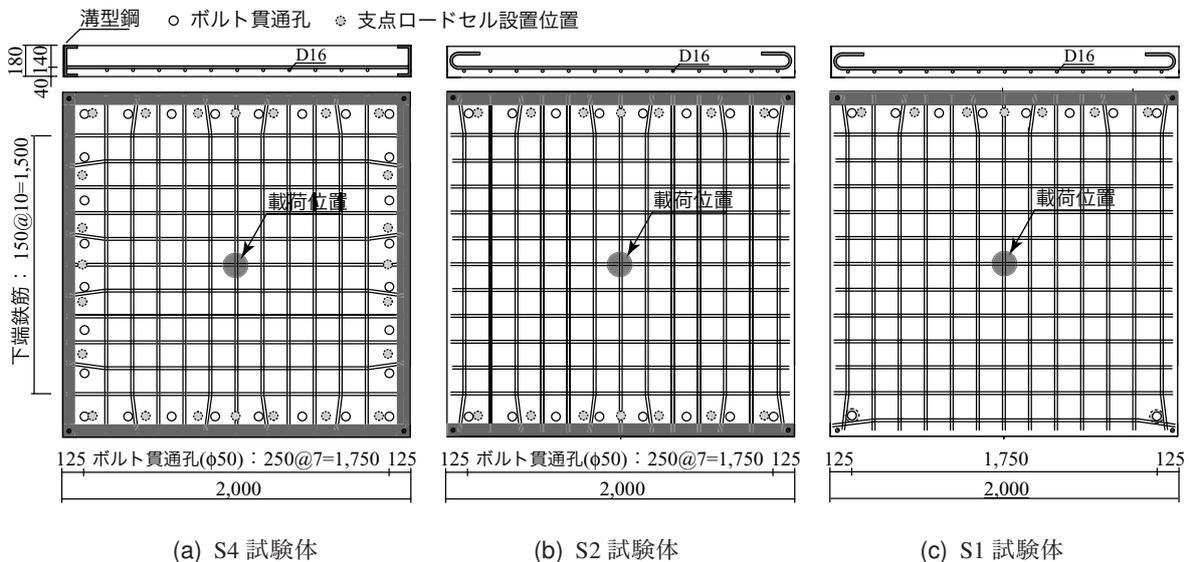


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (正会員)
 *2 室蘭工業大学大学院講師 工学研究科 暮らし環境系領域 博(工) (正会員)
 *3 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 暮らし環境系領域 工博 (正会員)
 *4 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

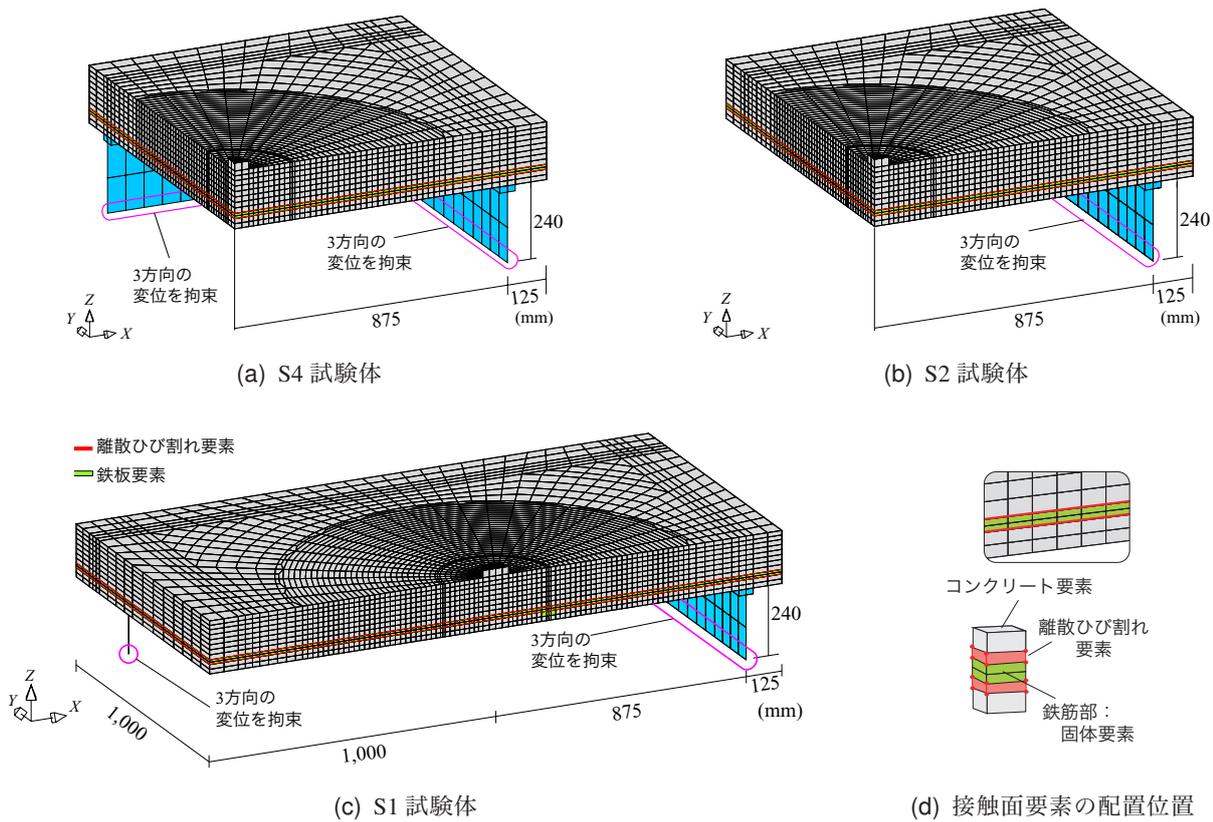


図-2 要素分割状況

表-1 試験体一覧

試験体名	支持条件	版厚 (mm)	鉄筋比 ^{#1} (%)	実測最大荷重 P_{max} (kN)
S4	四辺単純支持	180	1.09	296.3
S2	二辺単純支持			292.2
S1	一辺単純支持 + 二隅角点支持			278.8

#1 主筋方向のみを考慮した鉄筋比

筋状況および荷重位置を示している。試験体は支持条件の異なる3体である。全ての試験体は2,000×2,000 mmの矩形RC版であり、版厚は180 mmである。また、鉄筋は、各方向鉄筋の芯かぶりの平均値(以降、平均芯かぶり)が40 mmとなる位置にD16を150 mm間隔で格子状に配置している。なお、鉄筋の定着に関しては、四辺単純支持(S4試験体、図-1(a)参照)の場合には、RC版の外縁に配した溝型鋼に溶接定着し、定着長を節約している。また、図-1(b)に示す二辺単純支持(S2試験体)の場合には、RC版の両支点側の一对辺に溝型鋼を配置して鉄筋を溶接固定し、他対辺では鉄筋を圧縮側に折り曲げて定着させている。図-1(c)に示す一辺単純支持+二隅角点支持(S1試験体)の場合には、単純支持側の一辺にのみ溝型鋼を配置し、他の三辺では鉄筋を圧縮側に折り曲げて定着を図っている。支点間隔はいずれも1,750 mmである。荷重盤直径

は90 mmであり、荷重位置を版中央部とした。

なお、実験時におけるコンクリートの圧縮強度 f'_c は、26.6 MPa程度、鉄筋の降伏強度 σ_y は383 MPaであった。実験終了後、RC版の裏面および荷重点中心を通る軸方向切断面のひび割れ分布を確認している。

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。試験体名のSに付随する数字が支持辺の数を意味している。すなわち、S4は四辺単純支持、S2は二辺単純支持、S1は一辺単純支持+二隅角点支持である。

3. 数値解析概要

3.1 解析手法

既往の研究成果により、RC版の耐荷性状や破壊形状は、支持条件により異なることが明らかになっている³⁾。本研究では、既往の研究で提案された解析手法⁴⁾を基本とするものの、コンクリートの押抜きせん断破壊面をモデル化するための離散ひび割れ要素を導入しない解析手法の適用性について検討を行うこととした。すなわち、本解析に用いた手法は、コンクリートに分布ひび割れモデルを適用し、鉄筋を板状の固体要素に置換し、かつ鉄筋のすべりを考慮するものである。また、参考として、鉄筋のすべりを考慮しない場合についても検討を行っている。なお、押抜きせん断破壊面をモデル化するためにコンクリート要素に離散ひび割れ要素を導入しない大きな理由は、押抜きせん断破

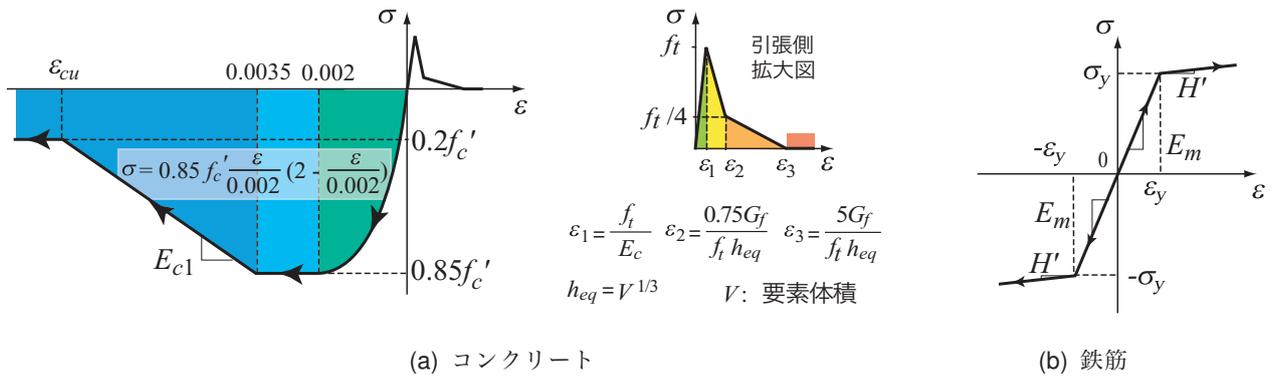


図-3 材料構成則

壊面(押抜きせん断コーンの形状)が支持条件によって大きく異なることより、それらを適切にモデル化することが困難であったためである。

3.2 鉄筋のモデル化

本研究では、主鉄筋によるダボ作用を適切に再現するために、各方向に配筋されている鉄筋群を板状の固体要素(以降、鉄板要素)にモデル化することとした。

鉄板要素は、周辺コンクリートへの影響を考慮し、板厚 t を鉄筋径 D_n と等しく取り、軸剛性が等価となるように次式に示す換算弾性係数 E_m を与えている。

$$E_m = \frac{E_s \cdot A_s \cdot n}{D_n \cdot W_p} \quad (1)$$

ここで、 E_s : 鉄筋の弾性係数、 A_s : 鉄筋の断面積、 W_p : 版幅、 n : 一方向の配筋本数である。

3.3 要素分割状況

図-2には、解析に用いた要素分割状況を示している。解析モデルは、各試験体の支持条件を考慮して、四辺単純支持および二辺単純支持(S4/S2試験体)の場合は1/4モデル、一辺単純支持+二隅角点支持(S1試験体)の場合には1/2モデルとした。RC版は、8節点あるいは6節点の固体要素でモデル化している。なお、鉄板要素の配置位置は平均芯かぶり位置とした。

境界条件は、対称切断面に関しては法線方向変位成分を拘束し、支点部は3方向変位成分を拘束している。載荷点および支点部には、応力集中を避けるために剛体要素を配置している。また、解析は載荷点部鋼板要素上面の節点に強制変位を与えることにより実施し、収束計算にはNewton-Raphson法を採用している。

本解析のすべりを考慮するモデルでは、鉄筋のすべりを再現するために、図-2(d)に示すように接触面要素を鉄板要素の上下面に配置している。

3.4 材料構成則

(1) コンクリート

図-3(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、材料試験結果から

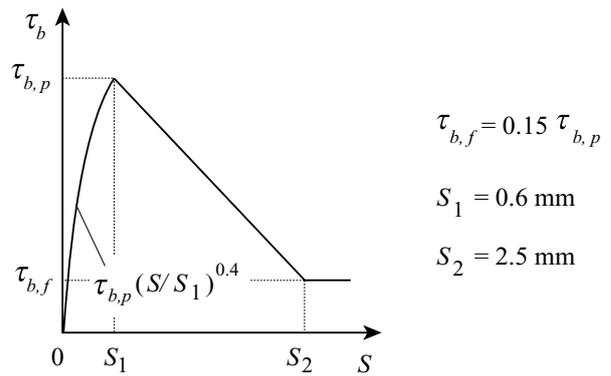


図-4 応力-相対変位関係

得られた圧縮強度 f'_c を用い、圧縮ひずみが $-3,500 \mu$ までは土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾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 $0.2 f'_c$ まで線形軟化するモデルとした。降伏の判定にはDrucker-Pragerの降伏条件式を適用しており、内部摩擦角を 30° と仮定している。引張側には、標準示方書⁶⁾による引張軟化曲線を適用した。

なお、本研究で適用した分布ひび割れモデルの場合には、引張側の軸方向ひずみのコンターレベルが図中の ϵ_1 に達した時点でひび割れが発生し、 ϵ_3 に達した時点でひび割れが開くことを意味している。

(2) 鋼材

鉄板要素には、図-3(b)に示すような塑性硬化係数 H' を考慮した弾塑性体モデルを適用している。塑性硬化係数 H' は、換算弾性係数 E_m の1%と設定している。硬化則には等方便化則を適用し、降伏はvon Misesの降伏条件式に従うものとした。

3.5 接触面要素の応力-相対変位関係

本解析では図-4に示す応力-相対変位関係を用いて、鉄筋のすべりを再現することとした。すなわち、せん断方向に関しては、CEB-FIPモデルコード⁷⁾に準拠した鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係を適用することと

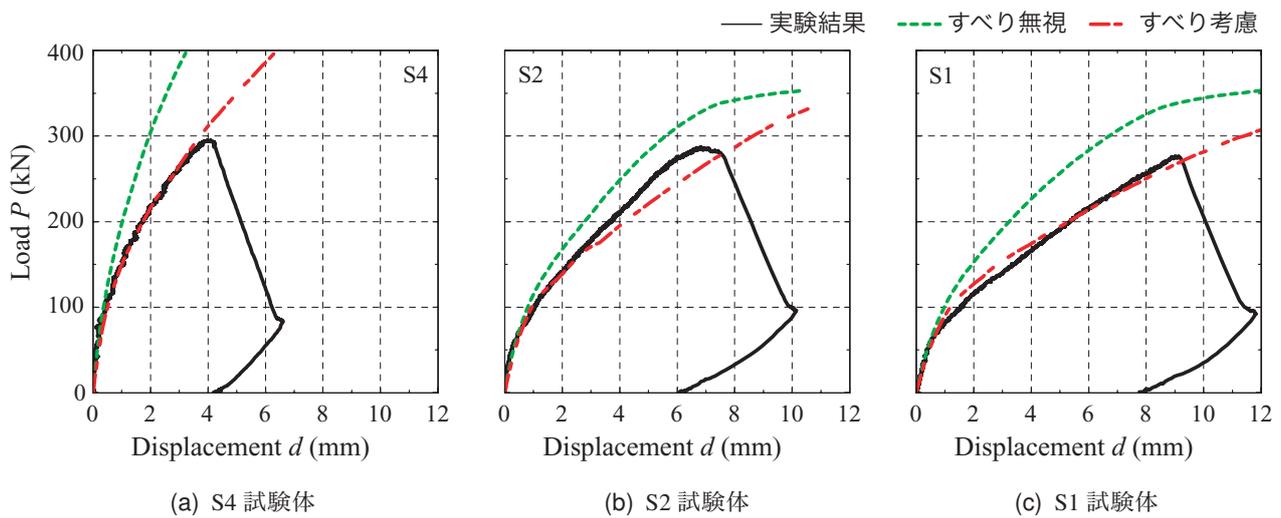


図-5 荷重と版表面中央点の変位関係

した。なお、図中の換算最大付着応力 $\tau_{b,p}$ は、次式を用いて算出している。

$$\tau_{b,p} = \frac{\tau_{b,\max} \cdot l_r \cdot n}{2 \cdot W_p} \quad (2)$$

ここで、 l_r ：鉄筋周長、 $\tau_{b,\max}$ ：1本あたりの鉄筋とコンクリート間の最大付着応力であり、次式で与えられる⁷⁾。

$$\tau_{b,\max} = 1.0 (f'_{ck})^{1/2} \quad (3)$$

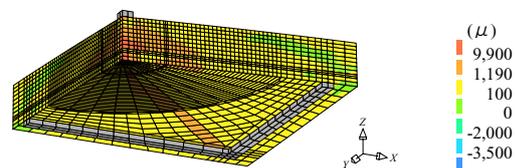
ここで、 f'_{ck} ：コンクリートの基準強度であり、CEB-FIPモデルコードでは $f'_{ck} = f'_c - 8$ (MPa) として与えられる。

4. 数値解析結果および考察

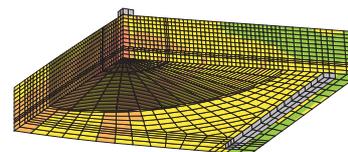
4.1 耐荷性状

図-5には、数値解析結果より得られる荷重と版表面中央点変位の関係を実験結果と比較して示している。まず、実験結果(実線)に着目すると、いずれの試験体も、荷重が $P = 70$ kN 程度まではほぼ線形に増大するものの、その後ひび割れの発生によって剛性勾配が低下していることが分かる。その低下割合は、S1 試験体で最も大きく、次いでS2, S4 試験体の順となっている。また、終局時の変位は支持条件によって大きく異なるものの、最大荷重値 P_{\max} に関しては $280 \sim 300$ kN とほぼ等しいことが分かる。

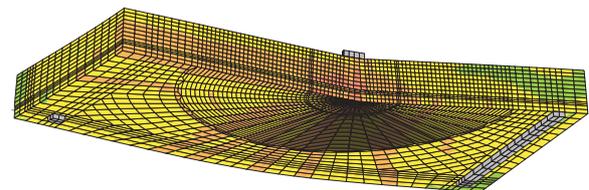
次に、鉄筋のすべりを考慮した数値解析結果(一点鎖線)に着目する。図-5(a)に示すS4 試験体の場合には、実験結果と同様に 70 kN 程度で剛性勾配が低下しており、実験結果の耐荷性状を精度よく再現できることが分かる。また、図-5(b)のS2 試験体の場合には、変位が 3 mm を超えた領域では荷重を若干低く評価しているものの、荷重初期から変位が 3 mm 程度までは実験結果と非常に良く対応している。図-5(c)に示すS1 試験体の場合には、変位 $1 \sim 5$ mm 程度までは荷重が実験結果より若干大きく評価さ



(a) S4 試験体



(b) S2 試験体



(c) S1 試験体

図-6 最大主ひずみ分布(実験最大荷重時)

れているものの、荷重初期から最大荷重値に至るまでの耐荷性状は概ね一致していることが分かる。

なお、鉄筋のすべりを考慮しない数値解析結果(点線)は、いずれの試験体においても、初期勾配は実験結果と一致しているものの、実験時のひび割れ発生荷重以降は荷重を過大に評価している。

以上より、コンクリートに分布ひび割れモデルを適用し、鉄筋を鉄板要素に置換し、かつ鉄筋のすべりを考慮した解析手法は、支持条件にかかわらず押抜きせん断破壊による荷重低下を除き、RC版の耐荷性状を大略再現できることが明らかになった。

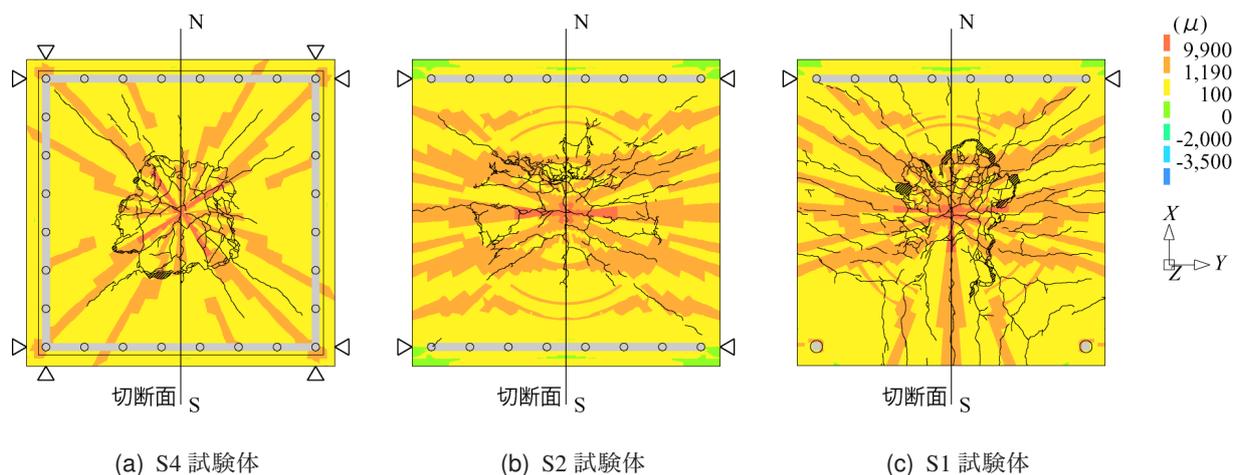


図-7 実験最大変位時における最大主ひずみ分布と実験終了後における版裏面のひび割れ分布の比較

4.2 破壊性状

図-6には、鉄筋のすべりを考慮した場合において、全ての解析モデルに対する実験最大荷重時の最大主ひずみ分布を示している。図中の引張側のコンターレベル(100 μ , 1,190 μ , 9,900 μ)は、図-3 (a) に示す $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ に対応している。なお、変形倍率は10倍である。

図-6 (a) より、S4 試験体の場合には、ねじりモーメントによる対角線状のひび割れが発生し、かつ荷点直下にも大きなひずみが発生していることが分かる。図-6 (b) に示す S2 試験体の場合には、支持部の二辺に平行した曲げひび割れが発生している。また、荷点直下のひずみは非対称な分布性状を示し、自由辺に向かって大きなひずみが発生していることが分かる。一方、図-6 (c) に示す S1 試験体の場合には、版中央から二隅角支点間に向かう曲げひび割れと支持辺に平行な曲げひび割れが発生している。また、荷点直下のひずみ分布を見ると、支持辺方向よりも二隅角点支持方向に大きなひずみが発生していることが分かる。

図-7には、実験終了後のひび割れ分布と実験最大変位時におけるRC版裏面の最大主ひずみ分布を比較して示している。

図-7 (a) より、S4 試験体における実験終了後のひび割れ分布を見ると、版中央部に明瞭な円形状のひび割れが発生していることが分かる。これは、押抜きせん断コーンの形成によるものである。また、ねじりモーメントによる対角線状のひび割れが発生していることも確認できる。一方、数値解析結果では、円形状のひび割れは再現できていないものの、対角線状のひび割れに関しては大略再現しているものと考えられる。

次に図-7 (b) に示す S2 試験体に着目すると、実験結果では支持部の二辺に平行したひび割れが多く発生している。これは、単純梁のような一方方向の曲げ変形が卓越していることによるものと考えられる。なお、版中央部には楕

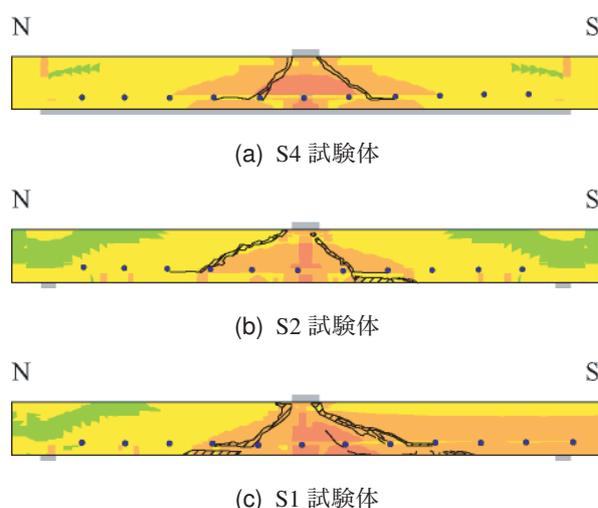


図-8 最大主ひずみ分布と断面のひび割れ分布状況の比較

円形状のひび割れが発生しており、最終的には押抜きせん断破壊に至ったことがうかがわれる。数値解析結果においても、実験結果に見られる支持部の二辺に平行した曲げひび割れをほぼ再現していることが分かる。

図-7 (c) に示す S1 試験体の実験終了後のひび割れ分布を見ると、自由端部近傍において支点間の曲げ変形に起因するひび割れが発生し、支持辺近傍においてねじりモーメントに起因する対角線状のひび割れが発生している。また、版中央部には、押抜きせん断コーンの形成に伴う円形状のひび割れも見られる。一方、数値解析結果では、円形状のひび割れ分布は再現できていないものの、実験結果の曲げ変形およびねじりモーメントに起因する対角線状のひび割れ分布を大略再現できていることが分かる。

図-8には、実験終了後のRC版断面におけるひび割れ分布状況と最大主ひずみ分布を比較して示している。なお、図中のコンターレベルおよび断面は、図-7に示す

とおりである。

図-8(a)より、S4試験体の場合には、数値解析によるひずみ分布は実験結果に見られる押抜きせん断コーンの形状と必ずしも一致していないものの、9,900 μ 以上のひずみ領域は、実験結果のひび割れ発生域と概ね一致している。一方、S2試験体の場合(図-8(b)参照)には、数値解析結果のひずみ領域はS4試験体と比較して小さく示されている。また、実験結果を適切に再現するまでには至っていない。図-8(c)に示すS1試験体の場合には、数値解析によるひずみは非対称な分布性状を示し、二隅角点支持方向(S方向)に大きなひずみが発生している。実験結果においてもせん断コーンの形状は非対称な分布となっており、数値解析結果は実験結果を定性的には再現できているものと判断される。

以上より、提案の手法を用いることにより、支持条件にかかわらず、押抜きせん断破壊を示す円形状のひび割れを除き、版裏面のひび割れ分布性状を大略再現可能であることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、支持条件が異なるRC版が静荷重を受ける場合の耐荷性状を再現可能な解析手法の確立を目的として、四辺単純支持、二辺単純支持および一辺単純支持+二隅角点支持の3種類の支持条件を有するRC版を対象に、有限要素法を用いた三次元弾塑性解析を実施した。本研究の範囲内で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 提案の解析手法を用いることにより、支持条件にかかわらずRC版の耐荷性状は、押抜きせん断破壊による荷重低下を除き、精度よく再現可能であること
- (2) また、実験終了時におけるRC版裏面のひび割れ分布

性状に関しても、押抜きせん断破壊による円形状のひび割れを除き、大略再現が可能であること

等が明らかになった。

今後は、支持条件および版厚が異なる試験体に対する本解析手法の適用性の検討や、終局時に形成される押抜きせん断コーンに対して離散ひび割れ要素によるモデル化を試み、終局時の耐力低下までを含めた挙動特性や、円形状のひび割れ分布が再現可能な解析手法の確立を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 三上 浩, 岸 徳光, 今野久志, 岡田慎哉: RC版の静的・衝撃押抜きせん断性状に与える上端鉄筋の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, pp. 745-750, 2007.
- 2) 三上 浩, 岸 徳光, 澤田純之, 栗橋祐介: AFRPシート下面接着RC版の押抜きせん断耐力評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 1531-1536, 2008.
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: 支持条件の異なるRC版の静的および衝撃荷重載荷実験, 構造工学論文集A, Vol. 56A, pp. 1160-1168, 2009.
- 4) 菊池康則, 岸 徳光, 三上 浩, 小室雅人: 4辺支持RC版のせん断耐力評価に関する数値解析手法の妥当性検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 487-492, 2009.
- 5) Nonlinear Analysis User's Manual (9.3), TNO Building and Construction Research.
- 6) 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.
- 7) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.