

論文 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

菊池 康則^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・小室 雅人^{*4}

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, 以下のようなモデル化を提案し工学的な適用性に関する検討を行った。すなわち, 鉄筋は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。押抜きせん断ひび割れ角度は, (1) 実験結果に基づきバイリニア形にモデル化する場合と, (2) 傾斜角を 45° とするリニア形にモデル化する場合を設定する。実験結果と比較することにより, 提案の解析手法の妥当性に関する検討を行った結果, 両解析モデルともに実験結果をほぼ適切に評価可能であることが明らかとなった。

キーワード: RC 版, 押抜きせん断破壊, 三次元弾塑性解析, 耐荷性状

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。現在まで, 押抜きせん断破壊に関する実験的研究は数多く行われているものの, 数値解析的研究は少なく, 未だ RC 版の破壊性状を適切に再現可能な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適切な補修・補強法を確立するためには, 実験的研究のみならず数値解析的検討と併用して, 効率よく実施することが必要であるものと考えられる。

このような背景から, 著者らは RC 版に関する実験結果を基に荷重-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, 三次元弾塑性有限要素法を用いて種々の検討を行ってきた(例えば¹⁾)。既往の研究では鉄筋を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¹⁾を提案し, 実験結果の押抜きせん断ひび割れに基づいて傾斜角を設定し, その妥当性を検討している。本研究では, 既往の研究を踏まえ, 実験を行うことなく数値解析のみで荷重-変位関係および破壊挙動を適切に評価可能とするために, 押抜きせん断ひび割れ形状をバイリニア形(傾斜角: 60°, 45°)にモデル化したモデルと, 土木学会コンクリート標準示方書²⁾に規定されている傾斜角 45° としたリニア形にモデル化する場合について数値解析を実施し, 実験結果と比較することにより, 各モデルの妥当性について検討を行った。なお, 本数値解析は, 構造解析用汎用プログラム DIANA9.3³⁾を用いて行った。

2. 実験概要

表-1には本解析で対象とした実験ケースの一覧を示し

表-1 試験体一覧

試験体名	鉄筋径 (mm)	配筋 間隔 (mm)	鉄筋比 (%)	圧縮強度 f'_c (MPa)	V_{pcd} (kN)
D10-100	D10	100	0.56	36.7	230
D13-100	D13	100	1.00	31.0	256
D13-150		150	0.69	27.7	215
D13-200		200	0.54	34.2	220
D16-100	D16	100	1.56	32.9	307
D16-150		150	1.09	34.9	280
D16-200		200	0.85	31.0	243
D19-100	D19	100	2.25	32.9	347
D19-150		150	1.57	30.4	296
D19-200		200	1.23	27.7	260
D22-150	D22	150	2.12	36.6	359
D22-200		200	1.66	36.6	330

† V_{pcd} : コンクリート標準示方書²⁾の設計押抜きせん断耐力式より算出

ている。解析対象とした試験体は全 12 体であり, 試験体名は主鉄筋径 (mm) と配筋間隔 (mm) をハイフンで結ぶことで表している。また, 表には土木学会コンクリート標準示方書²⁾による押抜きせん断耐力式 V_{pcd} の結果も記している。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, 下端鉄筋は平均芯かぶりが 40 mm となるように配置されている。また, 下端鉄筋は, 版中央部から所定の間隔で格子状に配置している。なお, 各鉄筋は四辺の外縁に配置した溝型鋼に溶接定着し, 定着長を節約している。試験体支持部は, 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境界条

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建設システム工学専攻 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 ぐらし環境領域 工博 (正会員)

*3 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)

*4 室蘭工業大学大学院講師 工学研究科 ぐらし環境領域 博(工) (正会員)

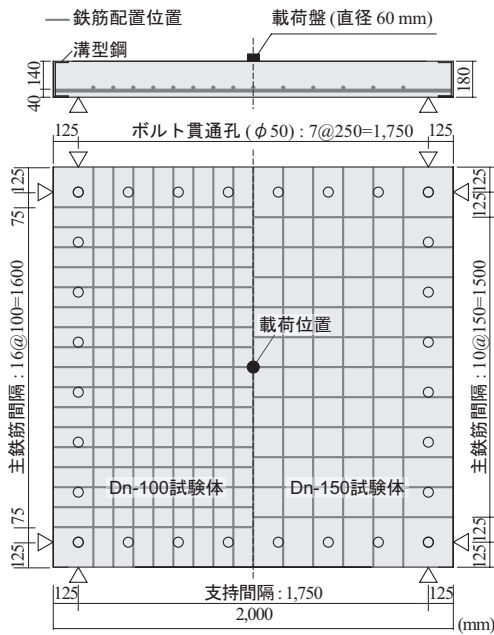


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および荷重位置

件となっている。支持間隔は両方向とも 1,750 mm であり、荷重盤直径は 60 mm とし荷重位置を版中央部に限定している。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 参照)。なお、実験時のコンクリートの圧縮強度は、 $f'_c = 27 \sim 37$ MPa であった。

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、かつ実構造物を想定して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と、図-2に示されるように主鉄筋によるダボ作用も考慮するために、各方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(以降、単に鉄板要素)でモデル化することとした。

なお、鉄板要素に関しては2方向の鉄筋比が等しい場合を対象としていることより等方性材料と仮定した。従って、2方向の鉄筋比が異なる場合には、異方性材料と仮定し別途検討を行う必要がある。また、一般的に鉄筋は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が、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、梁あるいはトラス要素の場合には鉄筋のダボ作用が適切に評価されない可能性があることより、本研究では、鉄筋に対して固体要素を用いてモデル化することとしている。

鉄板は、図-3に示すようにダボ作用等の鉄筋の周辺コンクリートへの影響を考慮して、板厚 t_p を鉄筋径 D_n と等しく取り、軸剛性およびせん断剛性が等価になるよう

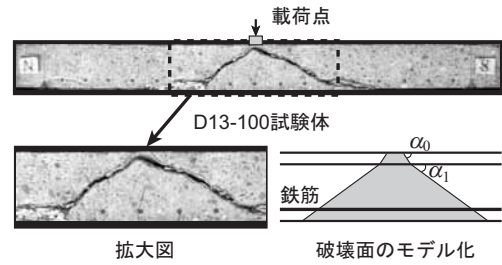


図-2 実験終了後の試験体中央部切断面状況および押抜きせん断破壊面のモデル化

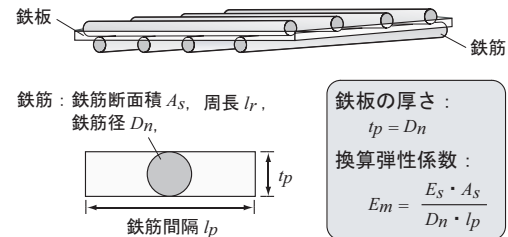


図-3 鉄筋のモデル化

に次式に示す換算弾性係数 E_m を与えている。

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

ここで、 E_s :鉄筋の弾性係数、 A_s :鉄筋の断面積、 l_p :鉄筋間隔である。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が、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。

また、既往の研究¹⁾と同様に、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。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 τ_b 、鉄筋周長 l_r を用いて、次式より算出している。

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

鉄板要素の高さ方向の分割数は、鉄筋径の小さいD10-100試験体の場合には、要素が薄くなるために1分割とし、他の試験体はすべて2分割としている。

(2) 要素分割状況

図-4には、本解析に用いた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モデルとしている。コンクリートおよび鉄板要素は8節点もしくは6節点の固体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。

境界面における条件は、対称切断面に関しては法線方向変位成分を拘束しており、支点部は3方向変位成分を

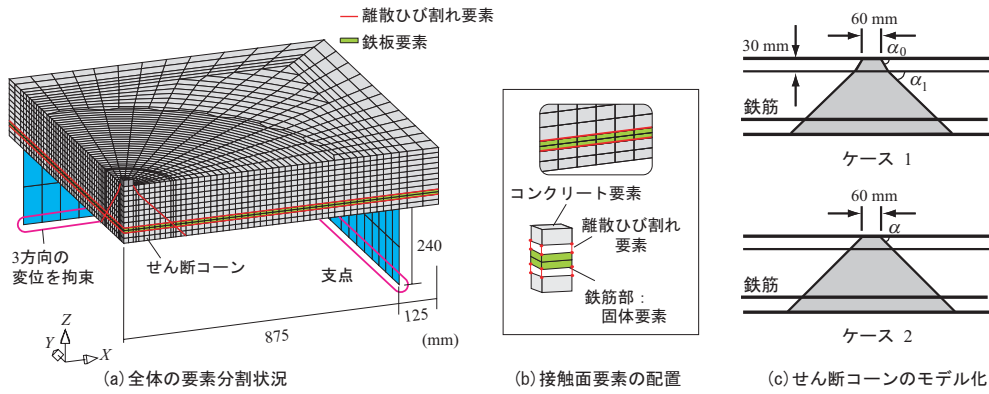


図-4 要素分割状況

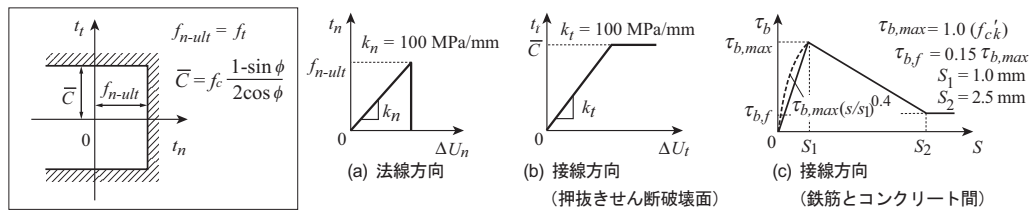


図-5 Coulomb Friction モデル

表-2 押抜きせん断コーンの傾斜角一覧 (ケース0)

試験体名	α_0	α_1	試験体名	α_0	α_1
D10-100	60°	35°	D16-200	60°	35°
D13-100		35°	D19-100		40°
D13-150		35°	D19-150		40°
D13-200		35°	D19-200		35°
D16-100		35°	D22-150		40°
D16-150		35°	D22-200		40°

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。

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押抜けを再現するために、図-4(a)に示すように、離散ひび割れを版中央部円錐型の押抜きせん断ひび割れおよび、鉄板要素の上下面に配置した。

押抜きせん断ひび割れの傾斜角がせん断耐力に大きな影響を与えることより、本研究では既往の研究を参考に以下のように設定した。すなわち、(1) 既往の研究成果¹⁾および実験結果に基づき、上縁から 30 mm までは載荷版外縁から $\alpha_0 = 60^\circ$ の傾斜角とし、その後コンクリート標準示方書²⁾と同様に $\alpha_1 = 45^\circ$ の傾斜角とする場合 (解析ケース 1) と、(2) コンクリート標準示方書²⁾の仮定と同様に載荷盤外縁からの傾斜角を $\alpha = 45^\circ$ とする場合 (解析ケース 2) である。

なお、本研究では、上記の 2 種類の解析結果の他、既往¹⁾の実験結果に基づいて傾斜角度を設定する場合 (解析ケース 0) についても、新たに全 8 体について解析を実施し、それらの結果を比較している。表-2 には、解析ケース 0 に用いた傾斜角度の一覧を示している。

3.2 接触面要素の応力-相対変位関係

離散ひび割れの破壊は、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 モデルを用いて、押抜きせん断破壊および鉄筋のすべりや剥離を再現することとした。

押抜きせん断破壊面には、図-5(a)に示すように、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強度 f_t に達した時点で発生するように設定している。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} に達した時点で発生するものと設定し、破壊後はせん断応力を解放することとした。せん断破壊面における骨材など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⁴⁾。式中の ϕ は内部摩擦角であり、本解析では内部摩擦角 ϕ を 30° と仮定している。

鉄板とコンクリート間の付着や剥離に関しては、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 に達した時点で生ずるものとしている。一方、せん断方向の付着応力-すべり関係には、前述の換算付着応力 $\tau_{b,p}$ を用い、CEB-FIP モデルコード⁴⁾による鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係を適用した。本解析では、(c) 図に示すように、付着応力-すべり関係の 0~ S_1 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耐力低下を再現するために、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、法線方向には $k_n = 100 \text{ MPa/mm}$ で鉄筋の降伏応力 $f_y = 370 \text{ MPa}$ に達した時点、接線方向には $k_t = 100 \text{ MPa/mm}$ で鉄筋のせん

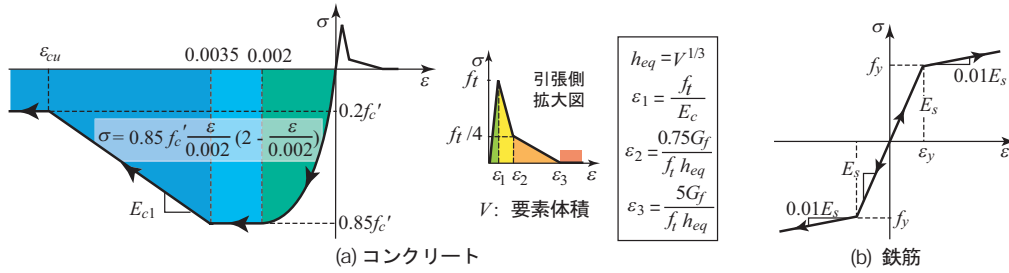


図-6 材料構成則

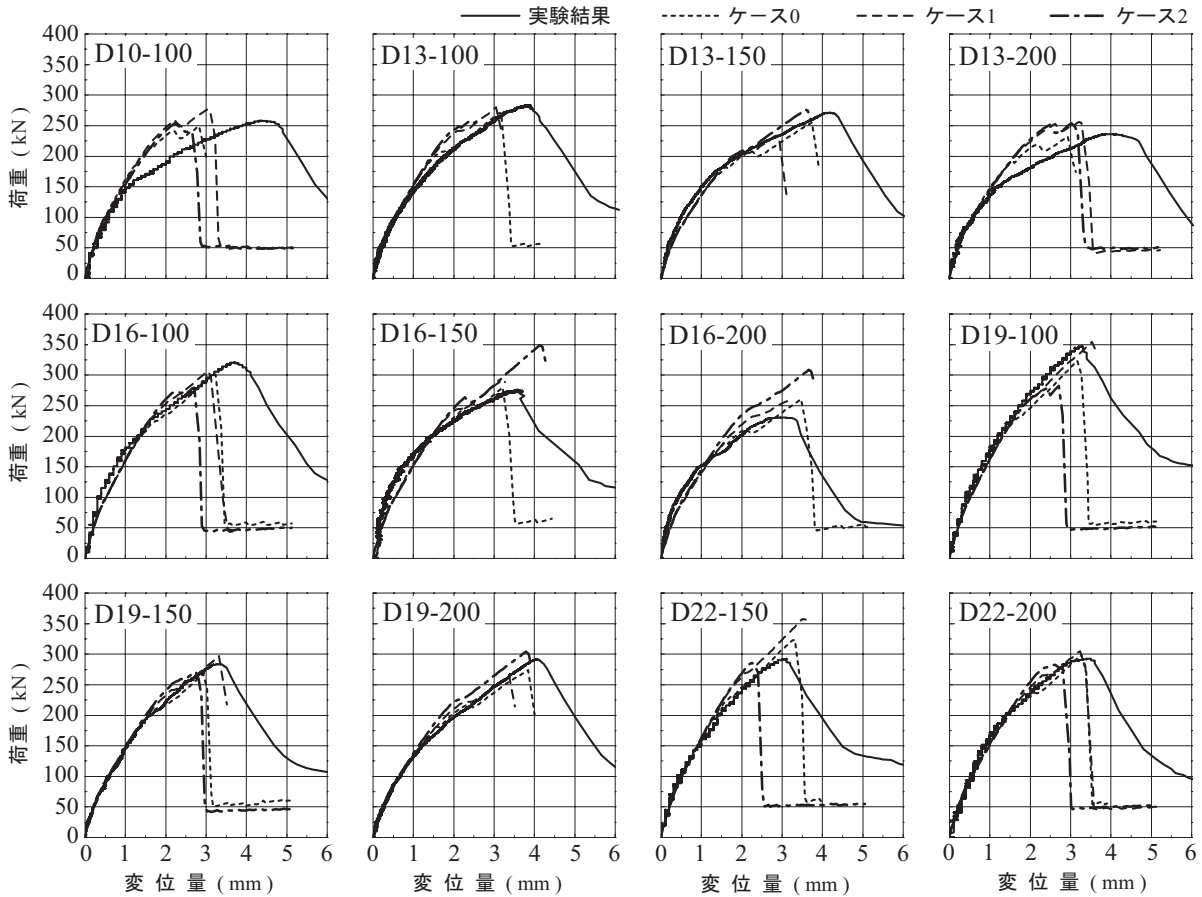


図-7 各試験体の荷重-版下面中央点変位関係

断強さ $\tau_y = 214 \text{ MPa}$ 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 τ_y は鉄筋の降伏応力 f_y 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²⁾に基づいて定式化しており、 $3,500 \mu$ 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° と仮定している。一方、引張側には、コンクリート標準示方書²⁾による引張軟化曲線を適用している。ここで、 h_{eq} は等価長さを意味し、要素体積 V の3

乗根とした。

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、各試験体の荷重-版下面中央点変位関係(以後、単に変位)について、実験結果と解析結果を比較して示している。図より、既往の実験に即してひび割れ傾斜角を設定した解析ケース0および本研究で設定したひび割れ傾斜角を用いた解析ケース1および2の結果と実験結果を比較すると、D10-100試験体とD13-200試験体の場合には、いずれの解析ケースにおいても、荷重150

表-3 実験結果および解析結果の最大荷重値

試験体名	実験値 $P_{e\max}$ (kN)	ケース 0 $P_{0\max}$ (kN)	ケース 1 $P_{1\max}$ (kN)	ケース 2 $P_{2\max}$ (kN)
D10-100	257.9	249.1 (0.88) ^{#1}	276.44 (1.07)	253.82 (0.98)
D13-100	283.3	270.4 (0.83)	279.96 (0.99)	260.55 (0.92)
D13-150	271.2	255.3 (0.94)	233.80 (0.86)	275.99 (1.02)
D13-200	236.5	231.9 (0.98)	255.88 (1.08)	253.82 (1.07)
D16-100	320.9	301.1 (0.93)	306.20 (0.95)	279.52 (0.87)
D16-150	276.2	280.2 (1.01)	292.60 (1.06)	348.82 (1.26)
D16-200	230.6	260.7 (1.13)	255.88 (1.11)	308.42 (1.34)
D19-100	347.0	323.2 (0.93)	354.08 (1.02)	282.26 (0.81)
D19-150	283.9	292.7 (1.03)	297.28 (1.05)	270.85 (0.95)
D19-200	291.7	301.1 (0.94)	262.80 (0.90)	304.02 (1.04)
D22-150	292.1	323.6 (1.11)	357.60 (1.22)	285.85 (0.98)
D22-200	292.4	298.1 (1.02)	305.20 (1.04)	282.51 (0.97)
平均値 ^{#2}		0.98	1.03	1.02
標準偏差		0.084	0.092	0.144

#1 () 内の数値は実験結果に対する解析結果の比である

#2 平均値は全試験体の実験結果と解析結果の比の平均である

kN 以降の剛性勾配が実験結果と対応せず、荷重を過大評価する傾向にあることが分かる。しかしながら、その他の試験体に関しては、剛性勾配や押抜きせん断破壊に至るまでの耐荷性状を比較的良好に再現しているものと考えられる。

表-3 には、実験結果と解析結果の最大荷重値およびそれらの比を示している。また、図-8 には、縦軸に数値解析結果、横軸に実験結果の最大荷重値 P_{\max} を取って整理している。また、図には、前述のコンクリート標準示方書²⁾による V_{pcd} もあわせて示している。図中の破線内は、実験結果と解析結果の差が 10% 以内となる領域であり、45° の実線は実験結果と解析結果が等しいことを意味している。表-3 および 図-8 より、既往の研究成果である解析ケース 0 の場合¹⁾ には、すべての試験体において誤差が 10% 以内であるのに対し、解析ケース 1 および 2 の場合には、誤差の大きい試験体がいくつか存在している。しかしながら、大部分の試験体は 10% 以内の領域内に分布していることより、本論文で提案する解析手法は、いずれの場合も、ケース 0 と比較して若干精度的に劣るものの、実験結果の耐力をほぼ適切に評価できるものと考えられる。

本論文で提案するケース 1 とケース 2 を比較すると、前

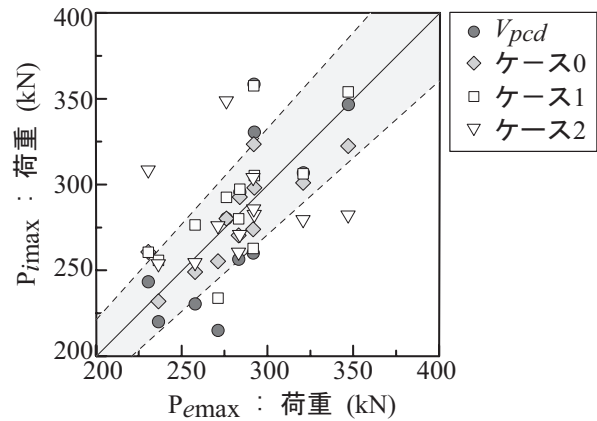


図-8 実験結果と解析結果の比較

者が後者よりも標準偏差が小さく実験結果により近似した結果を示していることが分かる。しかしながら、傾斜角の設定や標準示方書²⁾との対応等を考慮すると、傾斜角を 45° とする解析ケース 2 はより実務的であるものと判断される。

4.2 破壊性状

図-9 には、一例として D16-100 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、最大荷重および終局時における結果を示している。なお、最大主ひずみの引張側のコンターレベル、100, 1250, 8370 μ は、図-6(a) に示す ϵ_1 (ひび割れ発生ひずみ)、 ϵ_2 および ϵ_3 (ひび割れ開口ひずみ) の概略値である。

図より、ケース 1、ケース 2 とともに剛性低下時には、鉄筋上面近傍部 (図中、I 部分) にひび割れが発生していることが確認できる。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。

最大荷重時には、いずれの場合においても、押抜きせん断ひび割れ近傍にひずみが集中し、ひび割れが開口していることが分かる。また、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とともに、対称切断面の鉄筋上面近傍部において、載荷点である版中央部から支点方向に伸びるひび割れ (図中、II 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。

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、押抜きせん断コーンを形成して終局に至っていることが見て取れる。また、版下面中央部に大きなひずみが生じている。

図-10 には、D16-100 試験体に関する実験終了後の裏面のひび割れ分布を、ケース 1 の場合の最大主ひずみコンター図と重ねて示している。なお、ケース 2 についてはケース 1 と類似した分布性状を示すことを確認している。また、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、実験結果は、面外方向に押し出されたかぶり

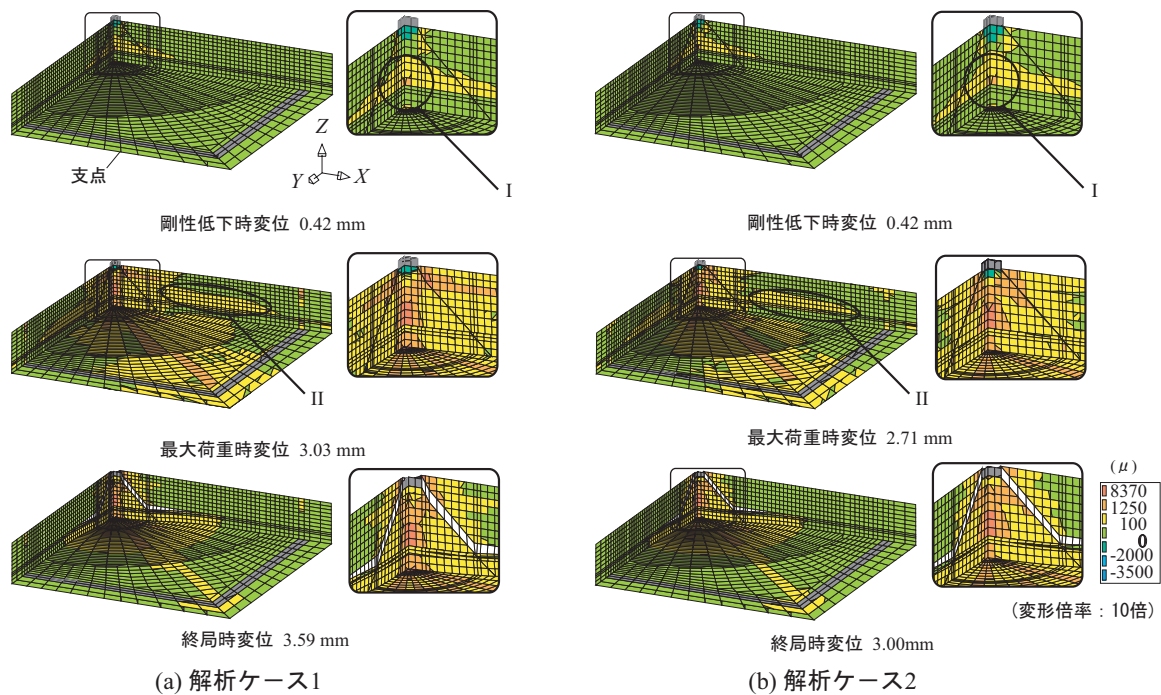


図-9 最大主ひずみコンター図および破壊状況 (D16-100 試験体)

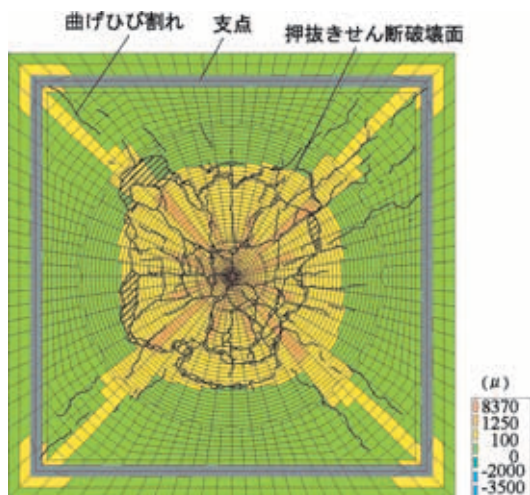


図-10 版下面ひび割れ分布性状

コンクリートに多数のひび割れが生じ、さらに対角線上に曲げひび割れも生じていることが分かる。一方、解析結果も、実験結果と同様に、かぶりコンクリートに生ずる多数のひび割れや、対角線上に発生している曲げひび割れなどの分布も発生していることより、ケース1、ケース2ともに、実験結果の破壊性状を大略再現可能であるといえる。

5. まとめ

本研究では、三次元弾塑性有限要素解析より押抜きせん断破壊を含む四辺支持 RC 版の押抜きせん断耐力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、鉄筋は固体要素を用いて板状にモデル化し、かつコンクリート要素には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、実験結果との比較により、その妥当性を検討した。特に、離散ひび割れモデルは、押抜きせん断ひび割れ部に適用することとし、その傾斜角を1) 実験結果に対応させてバイリニア型に仮定する場合と、2) せん断耐力評価時と同様に45°の傾斜角を有するリニア型に仮定する場合を設定した。

検討の結果、いずれの試験体に関しても、本論文で提案の2つの押抜きせん断ひび割れモデルを適用することにより、RC版の耐荷性状を大略再現可能であることが明らかになった。これより、4辺支持RC版の場合には本解析手法を適用することにより、実験を行うことなく、RC版の耐荷性状や破壊状況を推定することが可能であるものと考えられる。特に傾斜角を45°とする場合には、作業の効率化やコンクリート標準示方書²⁾との対応を含めて、より汎用性の高い手法であるものと考えられる。

今後は、版厚の影響や載荷版周長の異なる場合などについて、本提案手法の妥当性検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 高玉郁子, 岸 徳光, 三上 浩: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp493-498, 2008.
- 2) 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.
- 3) Nolinear Analysis User's Manual (9.3), TNO Building and Construction Research.
- 4) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.