論文 載荷盤直径および版厚の異なる RC 版の押抜きせん断耐力評価に関す る数値解析的研究

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,先に著者らによって提案されている簡易な解析手法の載荷盤直径や版厚が異なる場合への適用性につい て,実験結果と比較することにより検討を行った。本解析では,押抜きせん断ひび割れ角度を,バイリニア 型にモデル化する場合と,傾斜角を45°とするリニア型にモデル化する場合を設定した。その結果,1)両解 析モデルともに載荷盤直径や版厚が異なる場合でも耐荷挙動をほぼ適切に評価可能であること,2)耐荷力の 解析精度はバイリニアモデルの方が高く,安全側の評価を与えることなどが明らかになった。 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,設定した境界条件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。RC 版の耐力評価に関する研究において,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が,数値 解析的研究に関しては事例も少なく,未だ破壊挙動を適切 に再現できるまでには至っ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研究を併 用し,効率よく実施することが肝要である。

このような背景から,著者らは RC 版に関する実験的研 究結果を参照しつつ,荷重-変位関係および破壊挙動を適 切に評価可能な数値解析手法を確立することを目的に,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。 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提案手法を基に, 押抜きせん断ひび割れ形状をバイリニア型(傾斜角:60°, 45°)に仮定する場合や,土木学会コンクリート標準示方書¹⁾ に規定されている傾斜角を45°とする場合の数値解析を試 み,それらの妥当性を検討してきた²⁾。しかしながら,こ れらの検討は限定したパラメータの基で実施されたもので あり,未だ汎用性に優れた手法であるかは不明である。

このような観点から、本研究では、異なるパラメータの 検討を行い提案手法の妥当性および汎用性を確認すること を目的に、載荷盤直径および版厚を変化させた四辺支持 RC版に対して提案手法を用いた数値解析を実施し、実験 結果と比較することにより、その妥当性および汎用性を検 討することとした。なお、本数値解析は、構造解析用汎用 プログラム DIANA9.3³⁾を用いて行っている。

*1 駒井鉄工(株) (正会員)

2. 試験体概要

表-1には、本解析で対象とした実験ケースの一覧を示 している。実験ケースは、載荷盤直径が異なる4試験体と 版厚が異なる3試験体の全7試験体である。試験体名につ いては、Pが載荷盤直径が異なる場合、Hが版厚の異なる 場合を示しており、付随する数字は載荷盤直径(mm)もし くは版厚(mm)を示している。

載荷盤直径は,60 mm を基本とし,90 mm,120 mm,150 mm と変化させている。版厚は,180 mm (有効高さ140 mm) を基本とし,150 mm (有効高さ110 mm),200 mm (有効高さ160 mm) と変化させている。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 版は2,000×2,000 mm の正方形状であり,下端鉄筋は平均芯かぶりが40 mm となるように配置している。また,下端鉄筋はすべてD16を用いており,版中央より150 mm 間隔で格子状に配筋している。なお,鉄筋は,RC 版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状態となっている。支持

表-1 試験体一覧

試験	載荷盤直径	版厚	鉄筋比	圧縮強度
体名	(mm)	(mm)	(%)	$f_c'(MPa)$
P60	60	- 180	1.09	27.2
P90	90			27.4
P120	120			21.6
P150	150			26.3
H150	60	150	1.40	32.2
H180		180	1.09	34.9
H200		200	1.00	34.1

*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 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 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 博(工) (正会員)



図-2 鉄筋のモデル化

間隔は両方向とも 1,750 mm である。載荷位置は版中央部 に限定している。また,実験終了後には主鉄筋方向の版中 央部を切断し,断面内のひび割れ分布を観察している。な お,実験時のコンクリートの圧縮強度は 27~35 MPa 程度 となっている。

3. 解析概要

3.1 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 定し配筋数が多い場合に対しても適用可能とするためと、 主鉄筋によるダボ作用を適切に再現するために、 図-2 に 示すように、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, 簡略して鉄板要素) にモデル化す 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から,等方性材料と仮定している。 よって,2方向の鉄筋比が異なる場合には,異方性材料を 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に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が密な場合 に対して適用に限界があること,また,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等から,本研究で は,主鉄筋に対して固体要素を用いて鉄板状にモデル化す ることとしている。

鉄板要素の板厚 tp は、高さ方向のコンクリートの断面欠



損量や各方向への鉄筋のダボ作用を考慮して,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。

$$E_m = \frac{E_s \cdot A_s}{D_n \cdot l_p} \tag{1}$$

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、鉄筋を鉄板要素にモデル化する際に、 鉄筋の格子部分のコンクリートが欠損するが、ここでは簡 略化して断面欠損分を無視することとした。

また,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 および鉄筋間隔 l_p を用いて,次式より算出している。

$$\tau_{b,p} = \tau_b \cdot \frac{l_r}{2l_p} \tag{2}$$

3.2 要素分割状況

図-3には本解析に用いた RC 版の要素分割状況を示し ている。解析モデルは対称性を考慮して 1/4 モデルを用い ている。コンクリートおよび鉄板は 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,鉄板の配置位置は 平均芯かぶり位置としている。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 の部分は,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。定着鋼板に関しては,実験状況 と同様に,厚さ 9 mm のシェル要素にてモデル化している。

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。なお,数値



解析は変位制御法により行い、収束計算には Newton-Raphson 向の

法を採用している。 本解析では,押抜きせん断破壊および鉄筋のすべりを再 現するために,図-3に示すように,離散ひび割れを押抜

きせん断ひび割れ部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面の角度に関しては,既住の解 析手法²⁾を参考に, 図-3(c)に示すように $\alpha_0 = 60^\circ$ と $\alpha_1 = 45^\circ$ のバイリニア型にする場合(解析ケース1)と, コンクリート標準示方書¹⁾の仮定と同様に載荷盤外縁から 45°のリニア型にする場合(解析ケース2)とした。

3.3 材料構成則

図-4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。コンクリートの圧縮側は、図-4(a) に示すように、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 μ までは土木学会コンクリート標準示方 書¹⁾に基づいて定式化し、3,500 μ 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 の降伏条件を適用し、内部摩擦角を 30°とした。一方、引張側には、標準示方書¹⁾による引張 軟化曲線を適用している。鉄板要素には、図-4(b)に示 すように、塑性硬化係数 H'を考慮した等方弾塑性体モデ ルとした。本研究では、塑性硬化係数 H'を弾性係数 E_s の 1% と仮定している。なお、降伏条件には von Mises の降 伏条件式を適用している。

3.4 接触面要素の応力-相対変位関係

離散ひび割れ部の開口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鉄板のす べりや剥離を再現することとした。

押抜きせん断面には, 図-5(a) に示すように, 法線方

向の引張破壊として法線方向応力 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,せん断破壊に関しては, **図**-5(b) に示すよう に,せん断応力が粘着力 \overline{c} に達した時点で破壊するもの と仮定し,破壊後はせん断応力を解放することとした。な お,せん断破壊面の骨材などによる摩擦の影響は考慮して いない。また,粘着力 \overline{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° とした。

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 達した時点で剥離するものとしている。一方、せん断方向 の付着応力-すべり関係には、上述の換算付着応力を用 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、**図**-5 (c)に示すように付着応力-すべり関係の $0\sim S_1$ 間を直線 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、法線方向には $k_n =$ 100 MPa / mm で降伏応力 370 MPa に達した時点、接線方 向には $k_t = 100$ MPa / mm でせん断強度 214 MPa に達した 時点で破壊するものと仮定した。鉄板の降伏時におけるせ ん断強度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。

4. 数値解析結果および考察

4.1 実測荷重-変位関係

図-6および図-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)の実験結果と解析結果を比較



図-6 載荷荷重-スパン中央変位関係の比較(載荷盤直径)



図-7 載荷荷重-スパン中央変位関係の比較(版厚)

して示している。

実験結果に着目すると、いずれの試験体においても2箇 所で変曲点が出現しているのが分かる。まず、図-6の載 荷盤直径が異なる試験体の場合には、P60 試験体では、150 kN 付近で主鉄筋の降伏により剛性が低下し、その後230 kN 程度で最大荷重を示した後、押し抜きせん断破壊によ り急激に荷重が低下し、終局に至っている。その他の試験 体に関しては、200~250 kN 程度までほぼ同様の剛性勾配 を保ち、最大荷重を示した後に荷重低下により終局に至っ ている。

一方, 図-7の版厚が異なる場合には,H150 試験体の 荷重-変位曲線の勾配は,H180 および H200 試験体に比べ て,緩やかになっていることが分かる。これは,他の試験 体に比べて版厚が薄く,曲げ剛性が小さいことに起因して いるものと考えられる。各試験体ともに載荷盤直径の異な る試験体と同様に,最大荷重を示した後に荷重が急激に低 下し終局に至っている。

4.2 荷重-変位関係の比較

(1) 載荷盤直径が異なる場合

図-6の載荷盤直径が異なる場合の解析結果より,せん 断破壊面の仮定に関わらず,全ケースとも載荷初期から剛 性低下に至るまで実験結果と大略一致していることが分か る。また,ほとんどの試験体の解析結果は,最大値に達し た後に解が発散したことにより解析を終了している。

破壊面をバイリニアに仮定する場合(解析ケース1)は, 実験結果をほぼ再現しているものと考えられる。ただし, 最大荷重値は実験結果よりも若干過小に評価する傾向にあ ることが分かる。P60 試験体では,最大荷重に達した後, 離散ひび割れが完全に開口することにより終局に至って いる。

破壊面をリニアに仮定する場合(解析ケース2)には, P150 試験体を除き,実験結果よりも最大荷重値を過大に評価し ていることが分かる。P90 試験体では,最大荷重に達した 後に押抜きせん断面に配置した離散ひび割れが完全に開口 することにより終局に至っている。

なお、両解析ケースを比較すると、荷重-変位関係に関 してはほぼ類似の分布性状を示しているものの、最大荷重 値は解析ケース1の場合が解析ケース2よりも小さく評価 する傾向にあることが分かる。

試験	実験値	解析 ケース 1	解析 ケース ?	$V_{pcd}^{\#2}$
体名	P _{max} (kN)	$P_{max}(kN)$	$P_{max}(kN)$	P _{max} (kN)
D60	228.1	225.8	278.8	247.6
POU		$(0.99)^{\#1}$	(1.22)	(1.09)
P00	286.0	266.2	314.7	272.1
190		(0.93)	(1.10)	(0.95)
P120	336.2	288.1	328.6	262.2
1120		(0.86)	(1.07)	(0.78)
P150	421.3	365.2	405.4	311.6
1150		(0.86)	(0.96)	(0.74)
11150	200.7	185.6	246.0	190.2
H150		(0.92)	(1.22)	(0.95)
LI190	276.2	292.6	321.9	280.5
H160		(1.06)	(1.17)	(1.02)
H200	324.5	316.4	326.1	343.4
H200		(0.98)	(1.00)	(1.06)
平均值#3		0.94	1.11	0.94
標準偏差		0.067	0.096	0.125

表-2 最大荷重値の比較

#1()内の数値は実験結果と解析結果の比である #2V_{pcd}:標準示方書²⁾の設計押抜きせん断耐力式より算出

#3 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



図-8 最大荷重値に関する実験結果と解析結果の比較

(2) 版厚が異なる場合

図-7の版厚が異なる場合の解析結果より,荷重-変位 関係は全ケースともひび割れ発生後の剛性勾配を若干過大 に評価する傾向にあるものの,大略実験結果と一致してい ることが分かる。

解析ケース1の場合には,H150およびH200試験体において実験結果よりも小さな変位で終局に至っている。また,H150試験体では100kN近傍,H200試験体では150kN近傍から解析結果の剛性勾配が実験結果よりも若干大きくなる傾向を示している。しかしながら,最大荷重は実験結果とほぼ同程度の値となっており,大略実験結果を再現しているものと考えられる。

解析ケース2の場合には,H180 試験体を除き最大荷重 値に到達後すぐに解が発散し解析が終了している。また,



解析ケース2(45°):最大荷重時変位 3.76 mm (μ) 1250 100 0-2000 1-3500 (変形倍率:10倍) 解析ケース2(45°):終局時変位 4.09 mm

剛性勾配は解析ケース1に比較して大きく評価される傾向 にあることが分かる。H150 および H180 試験体の最大荷重 値は実験結果よりも多少大きいものの H200 試験体の最大 荷重値は実測値とほぼ同等となっている。

なお,両解析ケースを比較すると,載荷盤直径が異なる 場合と同様に荷重-変位関係に関してはほぼ類似の分布性 状を示していることが分かる。

(3) 最大荷重値の比較

表-2には、実験結果と解析結果の最大荷重値およびその比を示し、併せてコンクリート標準示方書¹⁾の設計押抜きせん断耐力式より算出した設計押抜きせん断耐力 V_{pcd} も示している。なお、部材係数 $\gamma_b = 1.0$ としている。また、 図-8には、各解析結果および実験結果の最大荷重値 P_{max} について、横軸には実験結果、縦軸には数値解析結果を取って整理している。図中の黄色の領域は実験結果に対する誤差が 10%以内の部分であり、対角線は実験結果と解析結果が等しいことを意味している。

設計押抜きせん断耐力の結果は,載荷盤直径が大きくな るにつれて耐荷力を過小に評価する傾向にある。一方,版 厚が異なる場合には,厚くなるにつれ若干過大に評価する 傾向が認められる。

載荷盤直径の異なる場合の解析結果において,解析ケース1の場合には,全試験体に対して実験値よりも過小に評価しているが,その差はほぼ10%程度以内になっている。

図-9 最大主ひずみコンター図(P90 試験体)



図-10 最大主ひずみコンター図 (P90 試験体:裏面)

一方,解析ケース2に関しては,実験結果よりも過大に評価する傾向が認められる。しかしながら,実験結果との差は P60 試験体を除いて 10 %程度以内となっている。これらのことより,提案の解析手法を用いることにより,数値 解析結果は載荷盤直径の異なる場合においても荷重-変位 関係を大略再現できるものと判断される。

版厚の異なる場合の解析結果において,解析ケース1の 場合には,実験結果とほぼ同程度の値を示しており,実験 結果をよく再現しているものと考えられる。解析ケース2 の場合には,実験結果および解析ケース1よりも過大に 評価する傾向にある。表-2に示したように,版厚の薄い H150 および H180 試験体で,この傾向は顕著である。これ らのことから,解析ケース2の場合においても,版厚の薄 い試験体を除き,概ね実験結果を再現できるものと判断さ れる。

解析ケース1および2の結果を比較すると,前者が後者 よりも耐荷力を控えめに評価する傾向にあることが分か る。また,**表-2**に示されているように,前者は後者より 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。また,解析ケース1および2を設計せん断耐力式と 比較すると,両者共に設計せん断耐力よりも標準偏差が小 さく,実験結果をよく再現しているものと判断される。

4.3 破壊性状

図-9には、一例として P90 試験体の各解析ケースに関 する最大荷重時および終局時の最大主ひずみコンター図を 示している。最大主ひずみの引張側コンターレベルとして 示した 100, 1250, 8370 μ は、 図-4(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。

最大荷重時には、いずれの解析ケースとも鉄板上下面に 配置した接触面要素により、コンクリート-鉄板間ですべ りが生じていることを確認している。また、版下面には対 角線上にねじりによるひび割れが生じている。

終局時には,解析ケース2の場合には,押し抜きせん断 ひび割れ面に配置した接触面要素が完全に開口して押し抜 きせん断破壊が生じ,終局に至っている状況が示されてい る。また,解析ケース1の場合には,接触面要素が完全に 開口する前に計算が終了しているものの,荷重が低下して いることから,押抜きせん断破壊によって終局に至ってい るものと推察される。

図-10には、一例として P90 試験体の解析ケース1の計 算終了時における版裏面の主ひずみコンター図を示してい る。図中の黒線は実験のひび割れ、ハッチング部はコンク リートが剥落した部分を示している。なお、解析ケース2 の場合においてもケース1とほぼ同様の傾向を示している ことを確認している。実験結果と解析結果を比較すると、 解析結果は曲げやねじりによるひび割れの発生位置および コンクリートの押抜け範囲が実験結果とよく対応している ものと判断される。これらのことから、破壊性状に関して も解析結果は実験結果を大略再現可能であるものと考えら れる。

5. まとめ

本研究では,四辺支持 RC 版の押抜きせん断破壊性状を 適切に再現可能な数値解析手法を確立することを目的とし て,既往の研究で提案した手法を用いて,載荷盤直径およ び版厚の異なる試験体に対して数値解析を実施し,実験結 果との比較によって,その妥当性および汎用性について検 討を行った。

提案の手法は、下端鉄筋を固体要素の鉄板にモデル化 し、かつ押抜きせん断面に離散ひび割れを配置するもので ある.本研究では、その形状をバイリニア型(解析ケース 1)とリニア型(解析ケース 2)にモデル化する場合について 検討を行った。

検討の結果,いずれの試験体に関しても上記の提案手法 を用いることにより,RC版の耐荷性状を大略再現可能で あることが明らかとなった。解析ケース1の場合には,耐 荷力を実験値よりも控えめに評価する傾向にあることか ら,載荷盤直径および版厚が異なる場合においては,解析 ケース1のモデルを採用する方が設計的に安全側の評価を 与えるものと考えられる。

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) 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.
- Nolinear Analysis User's Manual (9.3), TNO Building and Construction Research.
- 4) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.