

離散ひび割れモデルを用いた載荷版直径および版厚を変化させた場合のRC版の押抜きせん断耐力評価に関する数値解析的検討

Prediction analysis of punching shear capacity of RC slabs in cases of various loading area and thickness

室蘭工業大学大学院 ○学生会員 菊池 康則 (Yasunori Kikuchi)
 室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 三井住友建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 室蘭工業大学大学院 正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)

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。

このような背景から、著者らは荷重-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、押抜きせん断コーン形状をバイリニア形（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下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とはいいがたい。

このような観点から、本研究では、載荷版直径や版厚を変化させた場合の数値解析を行い、実験結果との比較によりその妥当性を検討した。

本解析では汎用性を考慮して、鉄筋を板状の固体要素にモデル化し、かつ離散ひび割れと分布ひび割れモデルを併用して解析を行っている。なお、本数値解析は、構造解析汎用プログラム DIANA9.3³⁾を用いて行った。

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、載荷版直径が異なる4試験体と版厚が異なる3試験体の全7試験体である。試験体名において、Pは載荷版直径が異なる場合、Hは版厚の異なる場合を意味しており、付随する数字は載荷版直径(mm)もしくは版厚(mm)を意味している。

載荷版直径は、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

表-1 試験体一覧

試験体名	載荷版直径 (mm)	版厚 (mm)	鉄筋比 (%)	圧縮強度 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

mm)を基本とし、150 mm，200 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、下端鉄筋の平均芯かぶり高が40mmとなるように配置されている。また、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、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している。支持間隔は両方向とも1,750 mmである。載荷位置は版中央部に限定している。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。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。

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、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。

鉄板は、周辺コンクリートへの影響を考慮して、板厚を鉄筋径 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。

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

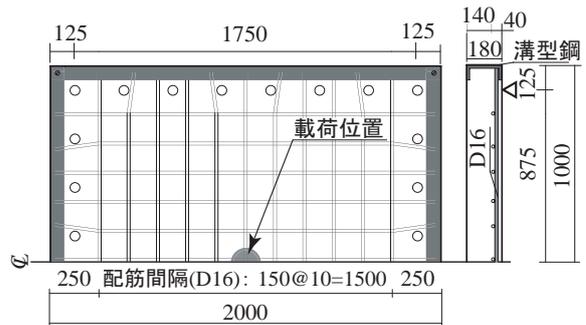
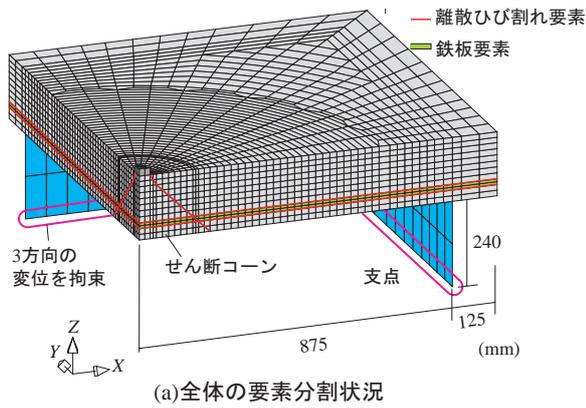
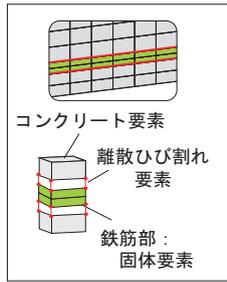


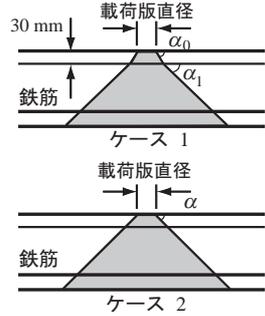
図-1 試験体図(版厚 180mm の場合)



(a)全体の要素分割状況



(b)接触面要素の配置



(c)せん断コーンのモデル化

図-2 要素分割状況

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。

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

3.2 要素分割状況

図-2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。なお、数値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、押抜きせん断破壊および鉄筋のすべりを再現するために、図-2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、既往の解析手法を参考に、図-2(c)に示すように $\alpha_0=60^\circ$ と $\alpha_1=45^\circ$ の2段階とする場合(解析ケース1)と、コンクリート標準示方書¹⁾の仮定と同様に荷重盤外縁から 45° とする場合(解析ケース2)を設定した。

3.3 材料構成則

図-3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、(a)図に示すように、材料実験から得られた圧縮強度 f'_c を用い、圧縮ひずみ $3,500 \mu$ 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、 $3,500 \mu$ 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°

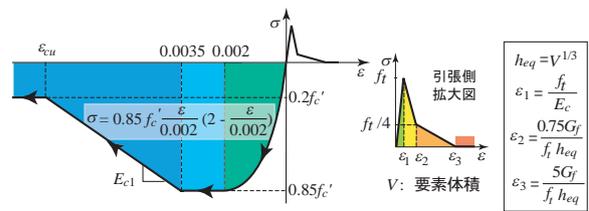


図-3 材料構成則

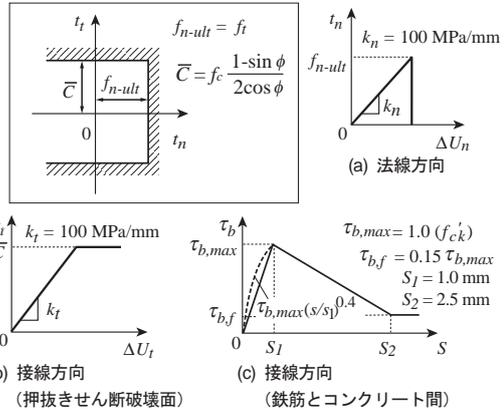


図-4 Coulomb Friction モデル

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、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。

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-4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-4(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、(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は考慮していない。また、粘着力 \bar{C} は図-4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、(c)図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 $k_n = 100 \text{ MPa/mm}$ で降伏応力 370 MPa に達した時点、接線方向には $k_t = 100 \text{ MPa/mm}$ 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。鉄筋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。

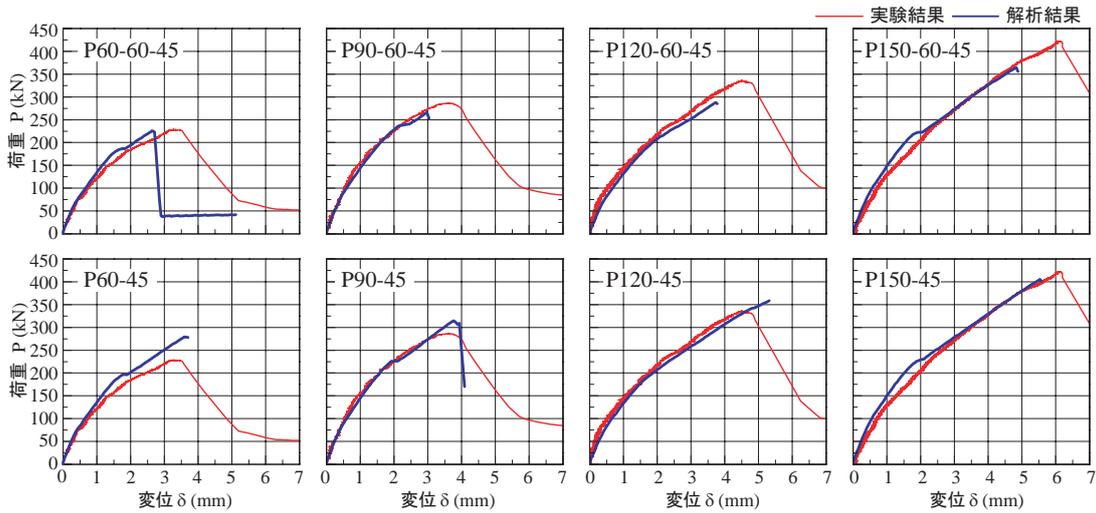


図-5 载荷荷重-スパン中央変位関係の比較(载荷版直径)

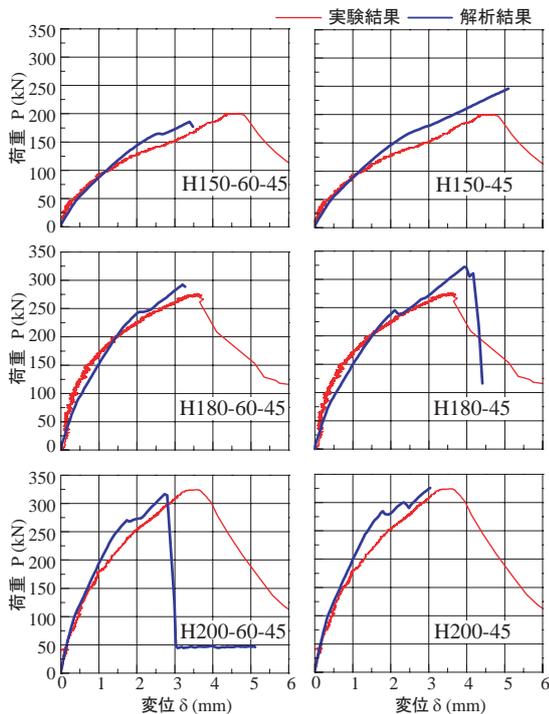


図-6 载荷荷重-スパン中央変位関係の比較(版厚)

4. 数値解析結果および考察

図-5 および 図-6 には、各試験体の荷重-版下面中央変位関係(以後、単に変位)を示している。

実験結果について見てみる。いずれの試験体においても2箇所で剛性勾配に変曲点が出現している。载荷版直径が異なる試験体の場合には、载荷版直径が大きくなるにつれて、最大荷重値、変位が増加する傾向にあることがわかる。一方、版厚が異なる場合は、版厚が大きくなるほど最大荷重が増加するものの、変位は減少する傾向にあることがわかる。

4.1 耐力性状

(1) 载荷版直径が異なる場合

载荷版直径の異なる解析結果を見ると、せん断破壊面の仮定に関わらず、全ケースとも载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

表-2 最大荷重および最大荷重時変位

試験体名	実験値 P_{max} (kN)	ケース	
		ケース 1 P_{max} (kN)	ケース 2 P_{max} (kN)
P60	228.1	225.8 (0.99)	278.8 (1.22)
P90	286.0	266.2 (0.93)	314.7 (1.10)
P120	336.2	288.1 (0.86)	328.6 (1.07)
P150	421.3	365.2 (0.86)	405.4 (0.96)
H150	200.7	185.6 (0.92)	246.0 (1.22)
H180	276.2	292.6 (1.06)	321.9 (1.17)
H200	324.5	316.4 (0.98)	326.1 (1.00)

†()内の数値は実験結果との比である

収束しないことによって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(ケース1)は、実験結果をほぼ再現している。また、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わかる。

破壊面をリニアに仮定する場合(ケース2)には、P150試験体を除き、実験結果よりも過大な評価をしていることがわかる。P90試験体の場合には最大荷重に達した後に押抜きせん断面に配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。

(2) 版厚が異なる場合

版厚の異なる解析結果を見てみると、全ケースともひび割れ発生後の荷重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わかる。

ケース1の場合には、H150およびH200試験体は実験結果よりも早期に終局に至っている。また、H150試験体の場合には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等の値となっており、大略実験結果を再現しているものと考えられる。

ケース2の場合には、いずれの試験体においても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、剛性勾配もケース1に比較して大きく評価される傾向にあることがわかる。H150試験体の場合には、実験結果よりも過大に評価している。しかしながら、H200試験体

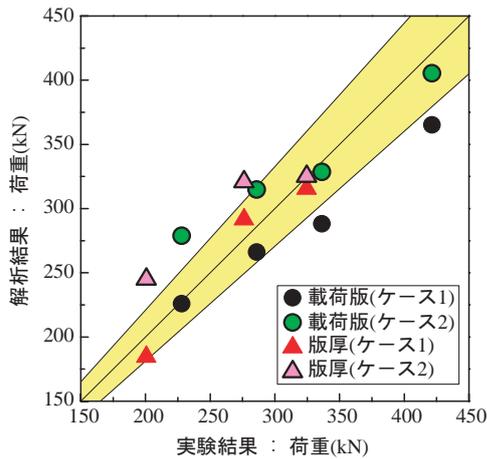


図-7 最大荷重値に関する実験結果と解析結果の比較

の場合には、最大荷重は実験結果とほぼ同等の値となっていることが見て取れる。

(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れぞれの比を示している。また、図-7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、縦軸には数値解析結果、横軸には実験結果を取って整理している。図中の黄色の領域は互いの誤差が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。

荷重版直径の異なる場合について見てみると、ケース1に関しては、全試験体において実験値よりも過小に評価しているが、その差はほぼ10%程度になっている。ケース2について見てみると、実験結果よりも過大に評価する傾向が見られる。しかしながら、実験結果との差が、ほぼ10%程度となっている。これらのことから、提案の解析手法を用いることにより、数値解析結果は、荷重版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。

版厚の異なる場合について見てみると、ケース1に関しては、実験結果とほぼ同等の値となっており、実験結果をよく再現しているものと考えられる。ケース2の場合には、最大荷重は実験結果およびケース1よりも過大に評価する傾向にある。特に図-2に示されているように、H150およびH180試験体は実験結果よりも荷重値が大きく示されている。これらのことから、ケース2の場合においてもH150およびH180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。

4.2 破壊性状

図-8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、100, 1250, 8370 μ は、図-3(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。

まず、最大荷重時には、いずれも押し抜きせん断ひび割れ部および鉄板要素上面付近にひび割れが生じているのが見て取れる。これは、鉄板上下面に配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たことによるものと考えられる。また、版下面に対角線上に曲げひび割れが生じている。

終局時には、ケース2に関しては、押し抜きせん断ひび

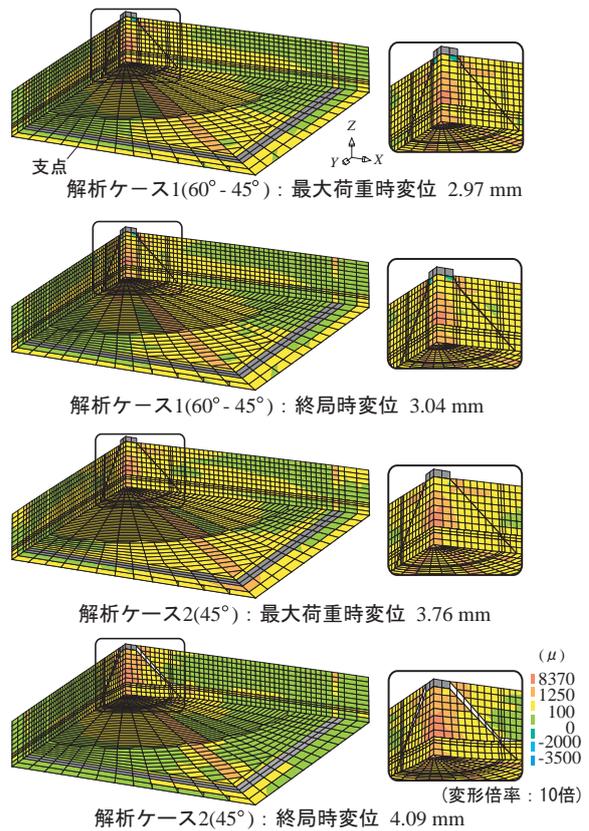


図-8 最大主ひずみコンター図 (P90 試験体)

割れ面に配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、終局に至っているのがわかる。また、ケース1に関しては、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、押し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。

5. まとめ

本研究では、四辺支持RC版の押し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に、既往の研究で提案した手法を用い、荷重版直径および版厚の異なる試験体に対して数値解析を行い、実験結果と比較することにより、その妥当性を検討した。提案の手法は、押し抜きせん断面に離散ひび割れを仮定し、その形状を1)バイリニア状に仮定する場合(ケース1)、2)リニア状に仮定する場合(ケース2)である。

検討の結果、いずれの試験体に関してもいずれの仮定を用いる場合においても、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。また、ケース1の場合は、ケース2の場合に比較して実験結果よりも過小に評価する傾向があることから、荷重版直径および版厚が異なる場合においては、ケース1のモデルを採用する場合は設計的に安全側の評価を与えるものと推察される。

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, pp487-492, 2009。
- 3) Nolinear Analysis User's Manual (9.3), TNO Building and Construction Research.
- 4) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.