# 押し抜きせん断耐荷性状に関する三次元弾塑性解析

3D elasto-plastic static analysis on punching share behabior of simply supported rectangular RC slabs

室蘭工業大学	正会員	張	広鋒 (Guangfeng Zhang)
室蘭工業大学	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	○学生会員	高玉	郁子 (Fumiko Takatama)

## 1. はじめに

押し抜きせん断破壊によって終局に至る鉄筋コンクリート (RC)版の耐荷性状は,押し抜きせん断破壊面における コンクリートの力学特性や主鉄筋のダウエル作用等に強く 依存する.現在まで,RC版の押し抜きせん断破壊に関す る数値解析的研究事例は少なく,押し抜きせん断破壊を含 むRC版の破壊挙動が再現可能な数値解析手法は未だ見当 たらない.一方で,より合理的な設計手法を開発するため には実験的研究は勿論のこと,数値解析的研究も必要不可 欠である.

このような背景より,本研究では RC 版の押し抜きせん 断破壊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,四辺支持 RC 版に関する三次元弾塑性解析を試 み,実験結果と比較することにより解析手法の妥当性検討 を行った.なお,解析では,離散ひび割れモデルを用い, 押し抜きせん断破壊面の破壊挙動,主鉄筋のすべり等の幾 何学的不連続現象を考慮している.



#### 2. 試験体の概要

本解析で対象とした RC 版は全2体である.試験体名は 主鉄筋径と主鉄筋間隔 (mm) をハイフンで結び表わしてい る.本解析では,D13-100 試験体とD19-200 試験体を対象 とした.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 で下端鉄筋の平均かぶりは40 mm である.また, 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 長を削減している.一方,試験体の支持部は,四辺四隅と も上下方向への変位を抑え回転を許容する単純支持に近い 支持状態となっている.支持間隔は1,750 mm である.載 荷盤径は60 mm であり,荷重は版中央部に限定して載荷 した.

**表-2**には材料試験により得られたコンクリートおよび 鉄筋の力学的特性値を示している.

# 3. 解析概要

本解析では、離散ひび割れモデルを用いることにより、 押し抜きせん断破壊や鉄筋のすべり等の幾何学的不連続 現象を再現することとする.離散ひび割れは接触面要素 (Interface element)によりモデル化している.また、鉄筋は、 実構造物のように複雑な配筋状況に対しても適用可能にす るため、版全体にシェル要素を配置してモデル化すること とした.シェル要素の厚さは、一方向の鉄筋の総断面積と 等価になるようにして決定した.

本研究では,**表-3**に示すような4種類の解析モデルについて検討を行っている.すなわち,ケース1は離散ひび割れと分布ひび割れを併用し,かつ鉄筋の付着すべりを考

表-1 試験体一覧

封除休夕	鉄筋径	配筋間隔	一辺あたりの	鉄筋比	
武殿14-71		(mm)	鉄筋本数	(%)	
D13-100	D13	100	17	1.00	
D19-200	D19	200	9	1.23	

表-2 コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値

		圧縮	降伏	弾性	ポアソン
試験体名	材料	強度	強度	係数	比
		$f_c'$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	E (GPa)	v
D13-100	コンクリート	31.0	-	28.3	0.2
	鉄筋	-	386.4	206	0.3
D19-200	コンクリート	27.7	-	26.9	0.2
	鉄筋	-	386.4	206	0.3

**表-3 解析ケース一覧** 

Ì	解析	ひび割れ	鉄筋の	鉄筋の	押し抜きせん断
	ケース	モデル	モデル化	すべり	破壊面のモデル化
	ケース1	(1) と (2)	シェル要素	考慮する	考慮する
	ケース2	(1) と (2)	シェル要素	考慮する	考慮しない
	ケース3	(2)	シェル要素	考慮しない	考慮しない
	ケース4	(2)	ビーム要素	考慮しない	考慮しない
2	and the second start and the second start and start				

†(1)は離散ひび割れ,(2)は分布ひび割れを表わす



図ー2 要素分割状況(解析ケース1)

慮する場合であり、ケース2は鉄筋のすべりを考慮する が、押し抜きせん断面をモデル化しない場合である.押し 抜きせん断面をモデル化せずかつ鉄筋とコンクリートを完 全付着とし、鉄筋をシェル要素(ケース3)、ビーム要素 (ケース4)を用いてモデル化する場合である.

## 3.1 解析モデル

図-2にはケース1に関する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.鉄筋は4節点あるいは3節点のシェル要素にモデル化している.鉄筋をモデル化したシェル要素の配置位置は鉄筋の中心位置とした.また,シェル要素を用いることにより試験体の外縁に配置した溝型鋼もモデル化している.境界条件に関しては,対称切断面は法線方向変位成分を拘束し,支点部は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い,収束計算には一般に広く用いられている修正 Newton-Raphson 法を採用している.

また、押し抜きせん断破壊、鉄筋のすべりおよびコンク リートとの剥離を再現するために、図-2に示すように載 荷点部(版中央部)に傾斜角が45°のコーンおよびシェル 要素の上下に離散ひび割れを配置した.なお、鉄筋をモデ ル化したシェル要素の上下におけるコンクリート要素の連 続性を保持するために、図-2に示すようにコンクリート 要素の水平二方向(X,Y 方向)の相対変位を拘束している. 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-3に示す Coulomb Friction

(a):押し抜きせん断破壊面の接触面要素に適用 (b):鉄板上下の接触面要素に適用



図-3 Coulomb Friction モデル





 $E_s$ 

 $0.01E_{2}$ 

モデルを用い,押し抜きせん断破壊,コンクリートと鉄筋 をモデル化したシェル要素間のすべりや剥離を再現するこ ととした.

押し抜きせん断破壊は、押し抜きせん断面における法線 方向の引張破壊と接線方向のせん断破壊の連成によるもの と推察される.本研究では、 $\mathbf{2}-3$ 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、せん断応力が粘着力  $\overline{c}$  に達し た時点で破壊したものと設定し、せん断応力を解放してい る。また、せん断破壊面の骨材等による摩擦はないものと している。ここで、粘着力  $\overline{c}$  は次の式より算出される<sup>1)</sup>.

$$\overline{C} = f_c' \frac{1 - \sin\phi}{2\cos\phi} \tag{1}$$



式中の φ は内部摩擦角である.後述のように,本研究で は,内部摩擦角 φ を 30° とした.

鉄筋をモデル化したシェル要素とコンクリート間の付着や剥離破壊において、法線方向の剥離に関しては、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ように設定している.付着に関しては便宜的に無視することとした.

#### 3.3 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.また,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,コンクリート標準示方書<sup>2)</sup> による引張軟化曲線を適用している.引張強度  $f_t$  は CEB-FIP Model Code<sup>3)</sup> を参考にして定義した.

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. 降伏条件は von Mises の降伏条件に従うものとしている.

#### 4. 数値解析結果および考察

図-5には、各試験体の荷重-版下面中央点変位関係に 関する解析結果と実験結果の比較を示している。各ケース の解析において、解析ケース1は押し抜きせん断破壊が 発生した後に計算を終了した。他の3解析ケースは、荷重 の低下が見られないことにより、変位4.5 mm 付近で終了

表-4 最大荷重および最大荷重時変位

	解析結果			実験結果	
試験体名	解析	$P_{max}$ $\delta_{max}$		$P_{max}$	$\delta_{max}$
	ケース	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
D13-100	1	285.3 (1.01)	4.03 (1.05)		3.81
	2	292.3 (1.02)	3.81	282.2	
	3	386.0 (1.36)	3.81	285.5	
	4	373.0 (1.32)	3.81		
D19-200	1	294.7 (1.01)	4.41 (1.09)		4.06
	2	312.5 (1.06)	4.06	201.7	
	3	408.9 (1.40)	4.06	291.7	
	4	373.4 (1.28)	4.06		

†解析ケース 2, 3, 4 には実験結果の δ<sub>max</sub> を用いている ‡()内の数値は実験結果との比である

した. **表**-4 には各解析結果および実験結果の最大荷重 値  $P_{max}$  と最大荷重時変位  $\delta_{max}$  の一覧を示している. なお, 解析ケース 2~4 の最大荷重は便宜的に実験結果の  $\delta_{max}$  に おける値を用いている.

## 4.1 荷重-版下面中央点変位関係

図-5(a), (b) に示す実験結果より,両試験体とも荷重100 kN 程度で荷重-変位関係の剛性勾配が低下している.こ れは,ひび割れが発生したことによるものと推察される. その後,荷重の増加と共に変形も増加傾向を示し,D13-100 試験体は荷重283.3 kN,D19-200 試験体は荷重291.7 kN 付 近で押し抜きせん断破壊によって終局に至っている.

解析ケース3,4の解析結果を実験結果と比較すると,い ずれも終局時まで実験結果より大きい荷重レベルを示して いることが分かる.これは、分布ひび割れのみを用いたこ とにより、実現象に即した鉄筋のすべりや押し抜きせん断 破壊面をモデル化していないことによるものと推察され る.また、両試験体とも、荷重150kN付近より、解析ケー ス3の解析結果は解析ケース4を上回っている.

一方,図-5(a)に示す D13-100 試験体に関する解析ケース1 および2の解析結果は、荷重 110 kN 近傍まで解析ケース3,4の解析結果と同様であるが、その後、ひび割れの発生および鉄筋要素のすべりによって実験結果と同様に剛性が明瞭に低下している。また、解析ケース1は、変位4.03 mm 近傍で離散ひび割れモデルを適用した押し抜きせん断破壊面が完全に開口することにより、荷重が急激に低下し終局に至っている。なお、解析ケース2は、計算終了時まで荷重が低下せず押し抜きせん断破壊が発生していないことが確認できる。一方、(b)図に示す D19-200 試験体に関する各解析結果は、D13-100 試験体と同様な分布性状を示していることが分かる。

**表**-4には,最大荷重  $P_{max}$  および最大荷重時変位  $\delta_{max}$  を実験結果と比較して一覧にして示している.表より解析 ケース1の解析結果は実験結果の差異が,いずれも 10% 以 内となっていることが分かる.

以上より,鉄筋を等方材料のシェル要素にモデル化して 数値解析を行う場合において,鉄筋のすべりを無視する場 合には,解析は実験結果の耐荷性能を過大に評価するが, 鉄筋のすべりを考慮することによって実験結果の耐荷性状 を大略再現可能であることが明らかとなった. 平成18年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第63号



(a) 変位時点 A, 変位: 0.38 mm (b) 変位時点 B, 変位: 4.03 mm (c) 変位時点 C, 変位: 4.22 mm 図ー 6 解析ケース1より得られる変形図,離散ひび割れ開口状況および最大主ひずみコンター図(D13-100 試験体)

#### 4.2 破壊性状

本節では、D13-100 試験体の解析ケース1の解析結果を 例として、破壊性状に関する解析結果を実験結果と比較す ることとする. **図**-6 には、**図**-5(a) に示す3つの変位 時点における変形図、離散ひび割れ開口状況およびコンク リート部の最大主ひずみ分布を示している.ここで、変位 時点 A~C は、それぞれひび割れの発生時(0.38 mm)、最 大荷重時(4.03 mm)および終局時(4.22 mm)である.ま た、最大主ひずみのコンターレベルの100,660,4,400  $\mu$  は、 それぞれ **図**-4(a) に示す $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  および $\varepsilon_3$ の概略値である. なお、図中の破線は変形前の位置である.

図-6(a)より、この時点まで載荷点直下に分布ひび割れ (赤色の領域)が発生していることが確認できる.なお、 この時点では、押し抜きせん断破壊面に配置した離散ひび 割れは未だ開口していない.(b)図より、最大荷重時点で は、分布ひび割れが対角線方向に沿って大きく進行し、押 し抜きせん断破壊面に配置した離散ひび割れも版厚の中央 付近から明瞭に開口していることが分かる.その後、(c) 図に示すように、変位4.22 mm までは、押し抜きせん断破 壊面に配置した接触面要素が完全に開口し、鉄筋をモデル 化したシェル要素の上面に配置した離散ひび割れも開口し ている.

図-7には、RC版の切断面のひび割れ分布、版裏面にお ける解析結果の分布ひび割れと実験結果のひび割れ分布を 重ね合わせ示している. 図中の太線が実験結果のひび割れ である. 図より、D13-100 試験体は実験時には押し抜きせ ん断破壊によって終局に至り、対角線に沿って曲げひび割 れが数本発生していることが分かる. これに対して、解析 結果は、押し抜きせん断破壊の他、対角線に沿う分布ひび 割れが明瞭に発生していることが確認できる. これより、 数値解析は、押し抜きせん断破壊と共に版全体の変形性状 も大略再現できているものと考えられる.

以上より,1)傾斜角度を45°とした押し抜きせん断破壊 面を離散化することによって,押し抜きせん断破壊挙動を 大略再現出来るものと判断される.また,2)離散ひび割れ モデルと共に分布ひび割れモデルを併用することにより, 曲げひび割れの挙動性状もある程度把握出来るものと判断 される.



載荷点

押し抜きせん断破壊面

変位時点 C における解析結果のひび割れ分布, 変位: 4.22 mm

# 図-7 解析ケース1より得られる D13-100 試験 体に関するひび割れ状況の比較

## 5. まとめ

本研究では、三次元有限要素法を用いた押し抜きせん断 破壊を含む四辺支持 RC版の耐荷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、鉄筋をシェル要素 にモデル化し、かつ離散ひび割れモデルと分布ひび割れモ デルを併用する手法を提案した。提案の手法を適用し、か つ鉄筋のすべりを適切に考慮することによって、RC版の 耐荷性能を大略再現可能であることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) Nolinear Analysis User's Manual (7.2), TNO Building and Construction Research.
- 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) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.