RC 版の押し抜きせん断破壊に関する数値解析的研究

Numerical analysis of punching shear behavior of RC slab

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	学生員	張	広鋒 (Guangfeng Zhang)
室蘭工業大学	○学生員	内田	雅俊 (Masatoshi Uchida)

1. はじめに

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お ける数値解析的研究事例は少なく,押し抜きせん断破壊 を数値解析的に再現可能な解析手法は未だ確立に至ってい ない.しかしながら,より合理的な設計手法を開発するた めには実験的研究が勿論のこと数値解析的研究も必要不可 欠である.

このような観点から、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、2方向に鉄筋を配置した4辺支持RC版に対して3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を検討した.なお、解析では、押し抜きせん断破壊面の破壊挙動や主鉄筋のすべり等を離散ひび割れ手法を用いてモデル化している.

2. 試験体の概要

図-1には、解析対象とした試験体の形状寸法、配筋状



況,載荷位置を示している. RC版の寸法は2,000×2,000 ×180 mm,かぶり厚さは40 mm である.鉄筋にはD16 を 用い,版中央部から150 mm 間隔で下端のみに配置してい る.一方,試験体の支持条件は,4辺単純支持で,支持間 隔が1,750 mm であり,支点部は回転を許容するピン支持 に近い構造である.なお,載荷板は直径60 mmの鋼製圧肉 円板としRC版中央に設置した.また,実験終了後には主 鉄筋方向の版中央部を切断して界面の観察を行っている.

表-1には実験時に実施したコンクリートおよび鉄筋の 材料試験により得られた力学的特性値を示している¹⁾.

3. 解析概要

3.1 解析モデル

図-2には、本解析に用いた試験体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 モデルである.コンクリートは8節点、6節点および4節 点3次元固体要素を用いてモデル化し、鉄筋にはビーム要 素を用いている.境界条件は、解析対象の連続性を考慮し て、対称切断面においてはその面に対する法線方向変位成

表-1 コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値





図-4 接触面要素に適用した各応力-相対変位関係

分を拘束し、支点部においては節点の鉛直方向変位成分を 拘束している.なお、解析では強制変位により載荷し、収 束計算には一般に広く用いられている Newton-Raphson 法 を採用している.

3.2 材料構成則

図-3(a) にはコンクリートの応力-歪関係を示している. 圧縮側の構成則に関しては、材料実験から得られた圧縮強度 f'_c を用いて、圧縮歪 3,500 μ までは土木学会コンクリート示方書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ている.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 20° としている.一方、引張側に関しては、線形軟化モデルを適用し、ひび割れ開口歪 ϵ_{tu} は CEB-FIP Model Code³⁾に従い、破壊エネルギー G_f を用いて図示のように定義している.鉄筋には 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た.降伏条件は von Mises の降伏条件に従うものとしている.

3.3 接触面要素の配置および応力-相対変位関係

本解析では, RC版の押し抜きせん断破壊を再現するために,接触面要素を用いて押し抜きせん断破壊面をモデル化している.これらの接触面要素は, 図-2に示すように,版中央部にコーン状に配置している.配置位置やひび

割れの角度は全て**写真-1**に示す実験終了後のひび割れ状 況を参考にして決定している.また,主鉄筋とコンクリー ト間にも接触面要素を配置し,主鉄筋のすべりをモデル化 している.なお,解析では剥離モデルおよび Bond-Slip モ デルの2つのモデルを適用することにより,押し抜きせん 断破壊面の破壊挙動や主鉄筋すべりを再現している.

(1) 剥離モデル

剥離モデルは、Coulomb Friction モデルに基づいて著者 らが提案したものである. 図-4(a) に示すように、このモ デルには、押し抜きせん断破壊面の法線方向引張応力と面 内せん断応力間の相互作用を無視し、法線方向およびせん 断方向の破壊基準を簡易に次のように定義した.

$$f_{cr-n} > f_{cr-nu} \tag{1}$$

$$\tau_{cr-t} = \sqrt{\tau_{cr-ts}^2 + \tau_{cr-tt}^2} > \tau_{cr-tu} \tag{2}$$

ここで、 f_{cr-n} 、 τ_{cr-ts} 、 τ_{cr-tt} は、それぞれ押し抜きせん 断破壊面の面外法線方向応力、面内両せん断応力であり、 f_{cr-nu} 、 τ_{cr-tu} はそれぞれ法線方向、せん断応力の限界応力 である.なお、 τ_{cr-tu} は、便宜的に $\sqrt{f'_c}$ としている.

(2) Bond-Slip モデル

鉄筋要素周囲に配置した Bond-Slip モデルから成る接触 面要素において,鉄筋方向の付着応力 τ と相対変位関係 S

解析	モデル化手法		
ケース	主鉄筋のすべり	ひび割れ破壊	
ケース1	考慮せず	分布ひび割れモデル	
ケース2	考慮せず	離散ひび割れモデルと分	
		布ひび割れモデルを併用	
ケース3	離散ひび割れモデル	離散ひび割れモデルと分	
		布ひび割れモデルを併用	

表-2 解析ケースの一覧

は、CEB-FIP Model Code ³⁾ を参考にして 図-4(b) のよう に定義した.すなわち、付着応力 τ がすべりの増大ととも に最大値 τ_{max} まで非線形に増大して τ_{max} を保った後、線 形に減少して $\tau_f(=0.4\tau_{max})$ に収束するように定義されて いる.

4. 数値解析結果および考察

本研究では,RC版の押し抜きせん断破壊をより合理的 に再現するために,押し抜きせん断破壊面の破壊挙動や主 鉄筋のすべり等の不連続破壊現象を離散化ひび割れ手法を 用いてモデル化することの有無を検討している.検討で は,**表-2**に示している3つの解析ケースを設定して解析 を行った.各解析ケースに関しては,ケース1は主鉄筋の すべりおよび押し抜きせん断破壊面の破壊をモデル化しな い場合,ケース2は押し抜きせん断破壊面を離散ひび割れ 手法を用いてモデル化しているが,主鉄筋のすべりを無視 している場合,ケース3は両方を離散化ひび割れ手法によ りモデル化している場合である.これらの各解析ケースに ついて比較検討を行うことにより,主鉄筋すべりや押し抜 きせん断破壊面の力学挙動の押し抜きせん断破壊への影響 を定性的に把握可能であるものと考えられる.

4.1 荷重-変位関係

図-5には、荷重-版中央変位関係における各解析ケースの解析結果を実験結果と比較して示している。各解析ケースの終局原因に関しては、解析ケース1および解析ケース2の場合には荷重と変位が単調に増加するため終局に至らないものとして45mm付近で計算を強制終了している。解析ケース3の場合は押し抜きせん断破壊が発生したことにより計算が終了している。図に示す実験結果を見ると、荷重100kN程度でひび割れが発生して版の剛性が低下し、変位が増加する傾向を示していることが分かる。その後、変位1mm付近から版の剛性がさらに低下し、変位3.6mm程度で押し抜きせん断破壊によって終局に至った。

主鉄筋のすべりや押し抜きせん断破壊面の破壊を離散化 していない解析ケース1の結果を見ると,解析結果は荷重 100 kN までは解析結果は実験結果と大略対応しているこ とが分かる.その後,実験結果や解析ケース3の結果より も高い剛性勾配を示し,変位4.5 mm 付近まで荷重の低下 が見られないことよりに解析を強制終了している.

一方,主鉄筋のすべりや押し抜きせん断破壊面を離散ひ び割れを用いてモデル化する解析ケース3の結果を見る と,解析結果は実験結果のひび割れ発生時までは,実験結 果を精度良く再現していることが分かる.その後の解析結 果は,実験結果より高い剛性勾配を示し,変位0.9mm付近 で急激に荷重が低下している.これは,押し抜きせん断破



図-5荷重-版中央変位関係

壊面に配置している接触面要素の部分的な破壊によるもの と考えられる.実験時にはひび割れの発生が徐々に進行す るため,荷重の急激な低下は見られない.しかしながら, それ以後の解析結果は実験結果と大略対応していることが 分かる.

なお,主鉄筋すべりをモデル化していない解析ケース2 の結果より,変位0.9mm 付近まで解析ケース3とほぼ同 様な耐荷性状を示している.しかしながら,その後,主鉄 筋のすべりをモデル化していないため,ひび割れの開口幅 が小さく,ひび割れの開口による荷重の低下も小さく,荷 重レベルは実験結果や解析ケース3の結果よりも高くなっ ていることが分かる.

以上の検討より,押し抜きせん断破壊面や主鉄筋のすべ りを離散ひび割れ手法を用いてモデル化することにより, RC版の押し抜きせん断破壊を数値解析的に大略再現可能 であることが分かった.また,押し抜きせん断破壊面や主 鉄筋のすべりを離散しない場合には,RC版の耐荷性状を 過大に評価し,かつ破壊挙動を適切に再現できない可能性 のあることが推察される.

4.2 主歪分布および破壊状況

図-6,7には、図-5に示す A,B時点において解析ケース1と解析ケース3の主歪分布および破壊状況を比較して示している.ここで、A,B時点はそれぞれ、ケース3における荷重低下時、および実験結果の最大荷重時を示している.また、主歪分布のコンターレベルにおいて、100、2,000 μ の引張歪は、それぞれ 図-4 におけるコンクリートのひび割れ発生歪 ϵ_{ty} およびひび割れ開口歪 ϵ_{tu} の概略値である.

図-6には、変位時点A,Bにおけるケース1に関する解 析結果を示している.(a)図より、この時点までの版には 載荷点直下に2本の分布ひび割れが版高さの1/3程度まで に開口している(赤色の領域)ことが分かる.一方、実験 結果の最大荷重時における(b)図より、載荷点直下付近に 数本の分布ひび割れが明瞭に発生している他、版中央部か ら隅角に向かって1本のひび割れが大きく発生し、曲げ破 壊に近い性状を示している.

図-7には、解析ケース3の両結果を示している。ケー



図-6 最大主歪コンター図および変形図(ケース1) 変形倍率:10



図-7 最大主歪コンター図および変形図(ケース3) 変形倍率:20

ス3の解析では離散ひび割れの開口状況にも注目している ことにより,押し抜きせん断破壊面を中心とする拡大図も 示している.(a)図より,この変位時点まで分布ひび割れ の他,押し抜きせん断破壊面に配置している離散ひび割れ も開口している様子が見受けられる.また,(b)図に示す 実験結果の最大荷重時における結果を見ると,離散ひび割 れは大きく開口しており,数本の分布ひび割れも発生して いる状況が示されている.図-6(b)の分布ひび割れ発生 状況と比べると,分布ひび割れの本数が少なく,対角線に そう分布ひび割れも発生していないことが分かる.一方, その後の解析は,主鉄筋の降伏により押し抜きせん断破壊 面の離散ひび割れの開口が急に大きく増加し,荷重が低下 することにより解析が終局に至った.

以上の結果より,解析ケース3を適用することにより実 験結果の破壊挙動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, RC版における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提案するため,4辺支持 RC 版に対して数値解析を行い,実験結果と比較することによ り解析結果の妥当性を検討した。本研究内で得られた知見 を要約すると下記の通りである。

- 本研究に提案している解析手法を用いることにより、 RC版の耐荷性状や押し抜きせん断破壊挙動を大略再 現可能であることが明らかとなった。
- 2) 押し抜きせん断破壊面や主鉄筋のすべりを離散しない 場合には、RC版の耐荷性状を過大に評価し、かつ破 壊挙動を適切に再現できない可能性のあることが明ら かとなった。

参考文献

- 三上浩,藤田学,岸徳光:AFRPシート補強RC 版の押し抜きせん断性状に与える補強方法と補強量 の影響,土木学会北海道支部論文報告集,第60号, pp.772-775,2001.
- 2)岸 徳光,三上 浩,張 広鋒:FRPシート曲げ補強 RC梁に関するシートの剥離挙動解析,土木学会論文 集,No. 725/V-58, pp.255-272, 2003.
- 3) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford