A - 49

コンクリート強度の異なる RC 版の押抜きせん断挙動に関する 数値解析的検討

Prediction analysis of punching shear capacity of RC slabs with different concrete strength

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

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 特性や下端鉄筋のダボ作用等に強く依存することが知ら れている. RC 版の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,数値解析的研究に着目する と,解析事例も少なく,未だ RC 版の破壊挙動を適切に 再現可能な数値解析手法は確立されていないのが現状で ある.また, RC 版の合理的な設計手法の開発,あるい は適切な補修・補強法を確立するためには,実験的研究 のみならず,数値解析的検討が必要不可欠であると判断 される.

このような背景から,著者らは RC 版の終局時に形成 される押抜きせん断コーンの形状を,傾斜角 60°,45° に 仮定する場合と,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 45° に仮定する場合について,三次 元弾塑性解析を実施し,提案手法の妥当性の検討を行っ てきた³⁾.しかしながら,より汎用性の高い解析手法を確 立するためには,種々のパラメータの下で提案の手法の 妥当性を検討する必要がある.

このような観点より本研究では、コンクリート強度の 異なる試験体を対象に提案手法を用いた数値解析を実施 し、ついて数値解析を実施し、実験結果との比較により、 その妥当性の検討を行った.なお、数値解析には構造解 析用汎用プログラム DIANA9.3³⁾を用いた.

2. 試験体の概要

表-1には、本解析で対象とした実験ケースを一覧に して示している.実験ケースは全4ケースであり、試験 体名は英文字Cに概略のコンクリート圧縮強度(MPa) を付して示している.**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、下端鉄筋を平均芯かぶり

試験体名	鉄筋径	配筋間隔	鉄筋比	圧縮強度
		(mm)	(%)	f_c' (MPa)
C15	D16	150	1.09	11.3
C30				26.3
C45				39.0
C60				50.9

表-1 試験体一覧

が40 mm となるように配置した.また,鉄筋は版中央部 より配筋し,150 mm 間隔で配置している.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 を確保している.試験体の支持部は,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 い支持状態としている.支持間隔は両方向とも1,750 mm である.載荷盤の直径は90 mm であり,載荷位置を版中 央部とした.なお,材料試験により得られたコンクリー トの圧縮強度は11.3 ~ 50.9 MPa,鉄筋の降伏強度は390 MPa であった.

3. 解析概要

3.1 鉄筋のモデル化

本研究では、実構造物への適用を想定し配筋数が多く 二方向の鉄筋比が等しい場合への適用性と、主鉄筋によ るダボ作用を適切に再現することを目的に、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, 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.

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

ここで, *E_s*:鉄筋の弾性係数, *A_s*:鉄筋の断面積, *n*: 一方向の配筋本数, *W_p*:試験体幅である.

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 うに,換算付着応力を用いて評価している.



図-1 試験体の形状寸法, 配筋状況および載荷位置



図-2 要素分割状況

すなわち,換算付着応力 てんのは,鉄筋とコンクリート 間の付着応力 τ_h,鉄筋周長 l_rを用いて,次式より算出し ている.

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

3.2 要素分割状況

図-2(a)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 とした.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(b)に示すように, 離散ひび割れ 要素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 手法を参考に,図-2(c)に示すようにα₀=60°とα₁=45° 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)の仮定と同様に載荷盤外縁から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、材料実験から得られ た圧縮強度 fc を用い, 圧縮ひずみ 3,500 µ までは土木学



図-3 材料構成則



(c) 押し抜きせん断破壊面 (d)鉄筋-コンクリート間 図-4 Coulomb Friction モデル

会コンクリート標準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 0.2fc 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、 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'(弾性係数の 0.01%) 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, Coulomb Friction モ デルを用い, 押抜きせん断破壊および, コンクリートと 鉄板のすべりや剥離を再現することとした.

押抜きせん断破壊面には、(a)図に示すように、法線方 向作用力 t_t がコンクリートの引張応力 f_t に達した時点で 破壊し、法線方向と接線方向の応力を開放するように設 定している.また、せん断破壊に関しては、(c)図に示 すようにせん断応力が粘着力Cに達した時点で粘着力を 保持し接線方向に変形が進行するものとした. ここで、 粘着力Cは(b)図中の式より算出している³⁾.式中のøは 内部摩擦角であり、本研究では内部摩擦角 ø を 30° と設 定した.

鉄板とコンクリート間の付着や剥離破壊に関しては, 法線方向を上述と同様に,法線方向応力tt 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.一方,せん断方向の付着応力-すべり関係には,上述

平成22年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第67号



図-6 C45 試験体における最大主ひずみコンター図および破壊状況(変形倍率: 10倍)

の換算付着応力を用いることとし, (d) 図に示す 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 カーすべり関係を用いることとした.

4. 数値解析結果および考察

4.1 耐荷性状

図-5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)を示している.また、表-2には各解 析結果および実験結果の最大荷重値 Pmax を一覧にして示 している.なお、C15 試験体に関してはコンクリート強 度が著しく小さいため、本研究においては解析対象外と した.

実験結果を見ると、いずれの試験体もひび割れ発生位 置、および鉄筋降伏位置の2箇所で剛性勾配の低下が見 られる.また、圧縮強度が大きい試験体ほど耐荷力が大 きく、剛性勾配も大きくなっていることが分かる.

図-5より,全ての試験体を通じて,解析ケース1およびケース2は実験結果の初期勾配を大略再現できている ものと考えられる.また,(a)図に示すC30試験体の解 析結果について見ると,解析ケース1の場合には,実験結 果に比べ耐荷力を控えめに評価していることが分かる.

一方,解析ケース2の場合には,耐荷力を大きく評価 する傾向にある.両解析ケースともにひび割れ発生後の

表-2 最大荷重値一覧						
試験	実験値	ケース1	ケース2			
体名	$P_{max}(kN)$	$P_{max}(kN)$	$P_{max}(kN)$			
C30	287.1	257.3	303.5			
C45	416.3	370.3	388.6			
C60	447.1	422.4	425.6			

剛性勾配や,鉄筋降伏後の剛性勾配が実験結果に類似していることより,解析結果は実験結果をほぼ再現できているものと考えられる.

C45 試験体およびC60 試験体の場合に着目すると,解 析ケース1およびケース2ともに,ひび割れ発生後の剛 性勾配を実験結果に比べ,大きく評価していることが分 かる.しかしながら,耐荷力に着目すると,いずれの解 析ケースにおいても,解析結果は実験結果を大略再現で きているものと考えられる.

4.2 破壊性状

図-6には、C45 試験体の各解析ケースに関する最大荷 重時および、計算終局時における最大主ひずみコンター 図を示している.また、最大主ひずみのコンターレベル の正の値は、小さい値から 図-3 (a) に示す各試験体の 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)の概略値を意味している.

最大荷重時の場合には、いずれの解析ケースにおいて も、押抜きせん断コーンの内部および境界面付近にひび 割れ開口程度のひずみが発生していることや、版中央点 から対角線上に曲げひび割れが発生していることが分か る.さらに、鉄板要素の上下面にひび割れ発生ひずみが 発生し、コンクリート要素間にずれが確認できることか ら、鉄筋のすべりが発生しているものと考えられる.

計算終局時には、すべての解析ケースにおいて、押抜 きせん断面の開口がみられることや、鉄板 – コンクリー ト間の接触面要素が開口していることから、押抜きせん 断破壊が発生したことにより荷重が急激に低下し、終局 に至っていることが分かる。

図-7にはC45 試験体の各解析ケースにおける版裏面 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 て示している.図中の太線が実験結果のひび割れである. 図より,実験においては,押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, 最終的には,押し抜きせん断破壊によって終局に至って いる.解析結果においても,押抜きせん断破壊の他,対 角線に沿う分布ひび割れが発生していることが確認でき る.また,押しぬきせん断コーンの周囲にひび割れ開口 ひずみが発生しており,その分布が実験におけるひび割 れの分布に近似していることより,解析結果は実験結果 にみられる押し抜きせん断破壊によるひび割れ分布も再 現できているものと考えられる.

以上より,コンクリート圧縮強度が異なる試験体を対象に提案の解析手法を適用することにより,押し抜きせん断破壊現象も含め,版裏面のひび割れ分布についても実験結果をほぼ再現可能であることが分かった.

5. まとめ

本研究では, 圧縮強度の異なる四辺支持 RC 版の耐荷 性状, および破壊性状を適切に評価可能な解析手法の確 立を目的とし, 三次元弾塑性解析を実施し, 実験結果と の比較により, 提案手法の妥当性の検討を行った. それ らの結果をまとめると以下のようである.

- 提案手法を適用することにより, 圧縮強度の増加と ともに, 解析結果における剛性勾配や最大荷重値も 増大しており,実験結果と同様の傾向を示している ことから, 圧縮強度が異なる RC 版に対しても, 解 析結果は実験結果の耐荷力を大略再現可能であるこ とが分かった.
- 2)押し抜きせん断面に配置した接触面要素が開口し、 荷重が低下することにより終局に至ることから、解 析結果は実験結果の破壊性状を再現可能である。
- 3) RC版の裏面ひび割れ性状は実験結果と同様に、版中 央点から対角線に沿うようにひび割れが分布してい ることや、押し抜きせん断コーン周辺のひび割れ分 布が実験結果に類似していることから、裏面のひび 割れ分布も再現可能であること等が明らかとなった。



図-7 C45 試験体における裏面ひずみ分布図

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.
- 張 広鋒,岸 徳光,三上 浩,小室 雅人:RC版の押し 抜きせん断破壊に関する三次元弾塑性有限要素解析,コン クリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp397-402, 2007.
- Nolinear Analysis User's Manual (7.2), TNO Building and Construction Research.
- 4) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.