

支持条件の異なる RC 版の静的耐荷挙動に関する数値解析的検討

Prediction analysis of load carrying behavior of RC slabs with various support conditions

室蘭工業大学大学院 ○ 学生員 朱 柯 (Zhu Ke)
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 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、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。著者らの研究グループは、RC 版の耐荷性状を明らかにするために、種々の条件下で静載荷実験を数多く実施している¹⁾。また、RC 版の耐荷挙動を適切に再現可能な解析手法を確立するために、有限要素法を用いた三次元弾塑性解析も並行して実施してきた。その結果、四辺単純支持 RC 版に関しては、コンクリートの押し抜きせん断破壊面に離散ひび割れを配置し、鉄筋を板状の鉄板要素に置換し、かつ鉄筋のすべりをモデル化することによって、耐荷性状や破壊状況を大略再現できることを明らかにしている²⁾。

一方、実構造を想定した場合には、RC 版の支持条件は必ずしも四辺単純支持状態とはならないことから、より汎用性の高い解析手法を確立するためには、異なる支持条件下における RC 版の耐荷性状も検討する必要がある。

このような背景より、本研究では、種々の支持条件下における RC 版の耐荷性状を適切に再現可能な解析手法の確立を目的として、支持条件の異なる 3 種類の RC 版を対象に三次元弾塑性解析を実施し、別途実施した静載荷実験結果¹⁾との比較により、その妥当性を確認している。なお、本解析には構造解析用汎用プログラムである DIANA9.3³⁾を用いた。

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。試験体は支持条件の異なる 3 体であり、試験体名の S に付随する数字が支持辺の数を意味している。すなわち、S4 は四辺単純支持、S2 は二辺単純支持、S1 は一辺単純支持+二隅角点支持である。

図-1 には、試験体の形状寸法の一例として S4 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。全ての試験体は 2,000 × 2,000 mm の矩形 RC 版であり、版厚は 180 mm である。載荷版直径は 90 mm で、鉄筋は平均芯

かぶりが 40 mm となる位置に D16 を 150 mm 間隔で格子状に配置している。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。また、二辺支持 (S2 試験体) の場合には、RC 版の両支点側の一对辺に溝型鋼を配置して鉄筋を溶接固定し、他対辺では鉄筋を折り曲げて定着させている。一辺+二隅角支持 (S1 試験体) の場合には、一辺支持側の一辺にのみ溝型鋼を配置し、他の三辺では鉄筋を折り曲げて定着を図っている。支持間隔は両方向とも 1,750 mm である。なお、実験時のコンクリートの圧縮強度は、26.6 MPa 程度となっている。実験終了後、RC 版の裏面のひび割れ分布を観察している。

3. 解析概要

3.1 解析手法

既往の研究成果により、RC 版の耐荷性状や破壊形状は、支持条件により異なることが明らかになっている¹⁾。本研究では、既往の研究で提案された手法を基本として、押し抜きせん断破壊をモデル化した離散ひび割れ要素を導入しない解析手法の適用性について検討を行うこととした。すなわち、本解析に用いた手法は、コンクリートに分布ひび割れモデルを適用し、鉄筋を板状の鉄板要素に置換し、かつすべりをモデル化する方法である。また、参考として、鉄筋のすべりを考慮しない場合についても検討を行った。なお、離散ひび割れ要素を導入しない大きな理由は、押し抜きせん断破壊面 (押し抜きせん断コーンの形状) が支持条件に大きく影響を受けることより、適切に定義することが困難であるためである。

3.2 鉄筋のモデル化

本研究では、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は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。

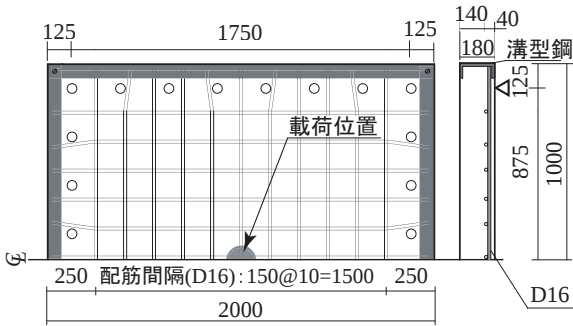


図-1 S4 試験体の形状寸法および配筋状況

表-1 試験体一覧

試験体名	支持条件	版厚 (mm)	鉄筋比 (%)	実測最大荷重 f_c' (MPa)
S1	一辺単純支持+二隅角点支持	180	1.09	296.3
S2	二辺単純支持			292.2
S4	四辺単純支持			278.8

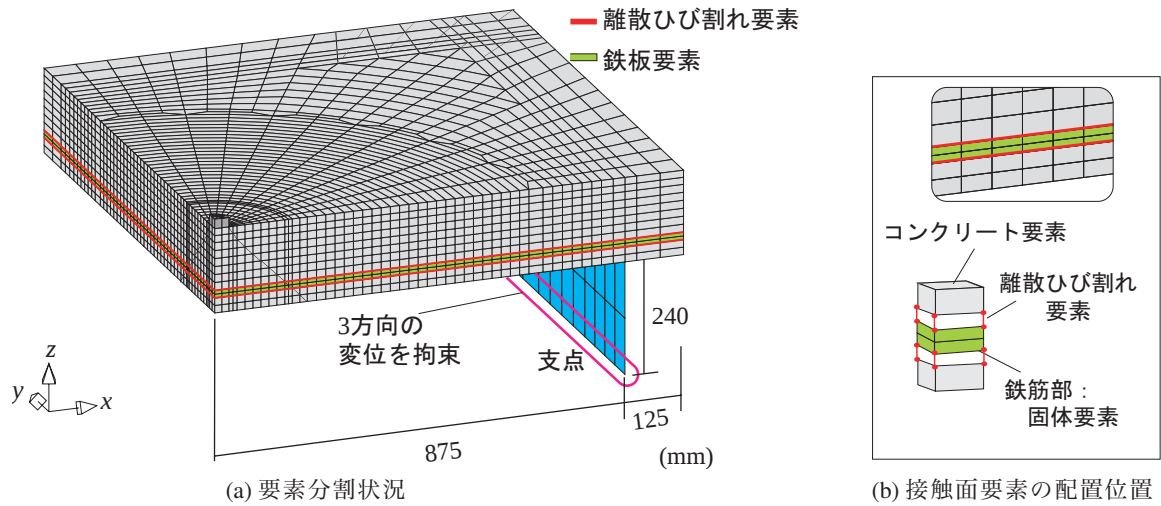


図-2 要素分割状況の一例 (S2 試験体)

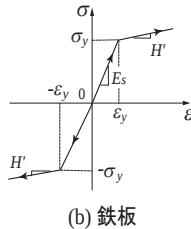
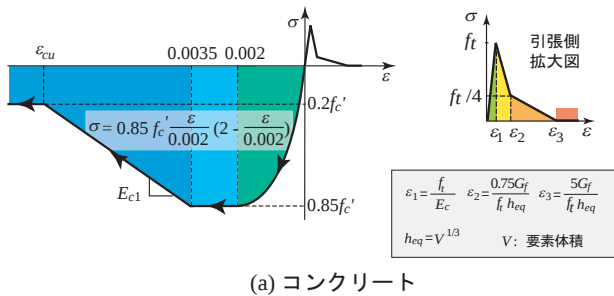


図-3 材料構成則

鉄板は、周辺コンクリートへの影響を考慮し、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となるように (1) 式に示す換算弾性係数 E_m を与えている。

$$E_m = \frac{E_s \cdot A_s \cdot n}{D_n \cdot W_p} \quad (1)$$

ここで、 E_s ：鉄筋の弾性係数、 A_s ：鉄筋の断面積、 W_p ：鉄筋間隔、 n ：一方向の配筋本数である。

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。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 (2) 式より算出している。

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

3.3 要素分割状況

図-2 には、解析に用いた要素分割状況の一例として、S2 試験体の場合について示している。解析モデルは、各

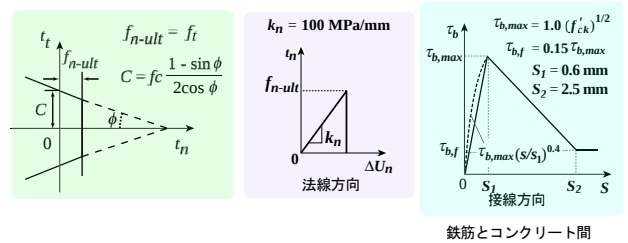


図-4 Coulomb Friction モデル

試験体の支持条件を考慮して、一辺+二隅角支持 (S1 試験体) の場合には 1/2 モデルを、二辺支持と四辺支持 (S2/S4 試験体) の場合は 1/4 モデルとした。

コンクリートは、8 節点あるいは 6 節点の固体要素でモデル化し、配筋は鉄板として 8 節点あるいは 6 節点の固体要素を用いてモデル化している。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。載荷点および支点部には、応力集中を避けるために鉄板要素を配置している。また、解析は載荷点部鋼板要素の上面の節点に強制変位を与えることにより実施し、収束計算には Newton-Raphson 法を採用している。

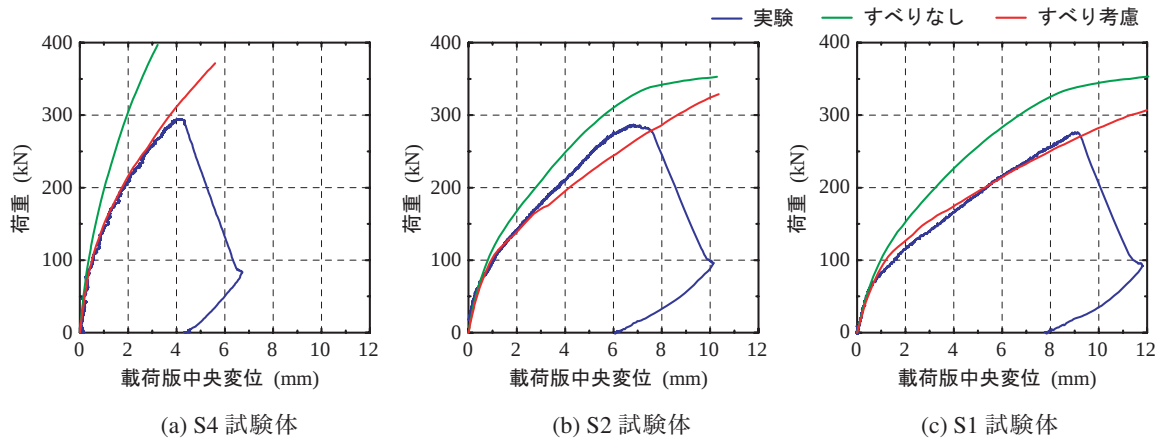
本解析のすべり考慮モデルでは、鉄筋のすべりを再現するために、図-2 (b) に示すように接触面要素を鉄板要素の上下面に配置した。

3.4 材料構成則

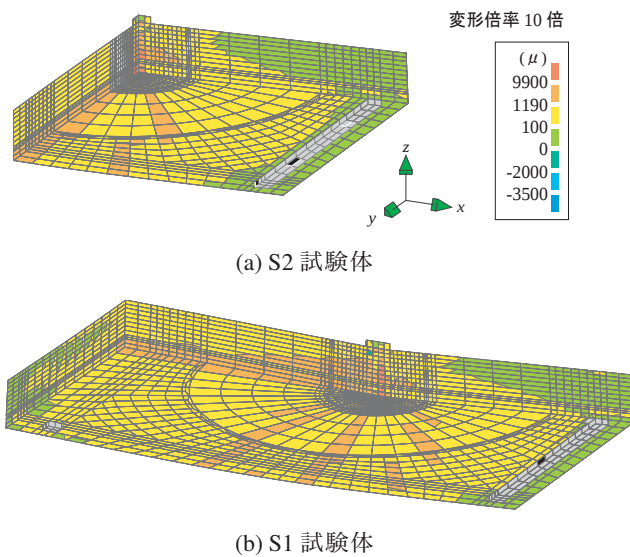
(1) コンクリート

本研究では、コンクリート要素に分布ひび割れモデルを適用して解析を実施している。

図-3 (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、圧縮ひずみ $3,500 \mu$ までは土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾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ており、内部摩擦角を 30° としている。引張側には、標準示方書⁴⁾による引張軟化曲線を適用した。



図－5 版下面中央点における荷重－変位関係



図－6 最大主ひずみ分布（実験最大荷重時）

なお、本研究で適用した分布ひび割れモデルの場合、引張側の軸方向ひずみのコンターレベルが図中の ε_1 に達した時点でひび割れが発生し、 ε_3 に達した時点でひび割れが開口していることを意味している。

(2) 鉄板

鉄板要素には、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、弾性係数 E_s の 1 % と仮定している。降伏は von Mises の降伏条件に従うものとした。

3.5 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、鉄板のすべりや剥離を再現することとした。鉄板とコンクリート間の付着や剥離に関しては、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。一方、せん断方向の付着応力には、前述の換算付着応力を用いることとし、図－4 に示す CEB-FIP モデルコード⁵⁾による鉄筋とコンクリート間の付着応力－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 耐力性状

図－5 には、数値解析結果より得られる荷重と載荷点変位の関係を実験結果と比較して示している。まず、実験結果（青線）に着目すると、いずれの試験体も荷重が $P = 70$ kN 程度までは、ほぼ線形に増大するものの、その後ひび割れの発生により、剛性勾配が低下していることが分かる。その低下割合は、S1 試験体で最も大きく、次いで S2, S4 試験体の順となっている。また、終局時変位は支持条件により大きく異なるものの、最大荷重値に関してはほぼ等しいことが分かる。

次に、すべりを考慮した数値解析結果（赤線）に着目する。(a) 図に示す S4 試験体では、実験結果と同様に 70 kN 程度で剛性勾配が低下しており、実験結果の耐力性状を精度よく再現できることが分かる。また、(b) 図の S2 試験体の場合には、変位が 3 mm を超えた領域では荷重を若干低く評価しているものの、載荷初期から変位が 3 mm 程度までは実験結果と非常に良く対応している。(c) 図に示す S1 試験体の場合には、初期剛性時の荷重が実験結果より若干大きく評価されているものの、最大荷重値に至るまでの分布性状は概ね一致していることが分かる。

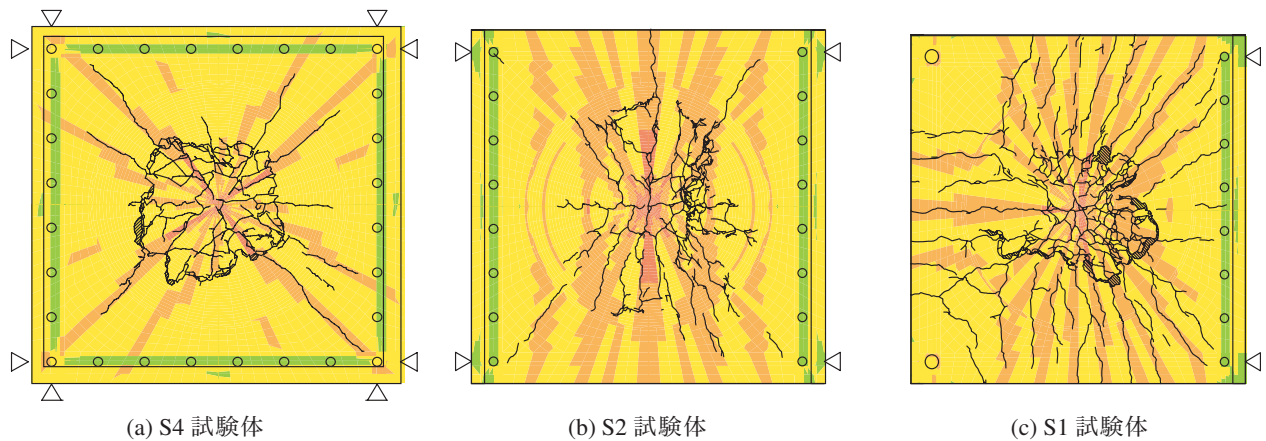
なお、鉄筋のすべりを考慮しない数値解析結果（緑線）は、いずれの試験体においても実験結果の剛性低下を再現できず、荷重を過大に評価している。

以上より、コンクリートに分布ひび割れモデルを適用し、鉄筋を鉄板に置換し、かつ鉄筋のすべりを考慮した解析手法は、支持条件の異なる RC 版の耐力性状を大略再現できるものと判断される。

4.2 破壊性状

図－6 には、すべりを考慮した解析モデル（S1 および S2 試験体）における実験最大荷重時の最大主ひずみ分布を示している。図中の引張側のコンターレベル（100, 1190, 9900）は、図－3(a) に示す $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ に対応している。なお、変形倍率は 10 倍である。

(a) 図より、S2 試験体の場合には、支持部の二辺に平行した曲げひび割れが発生し、かつ載荷点直下にも大きなひずみが発生していることが分かる。一方、(b) 図に示す S1 試験体の場合には、版中央から二隅角支点に向かう対角線状のひび割れと一辺支持辺に平行する曲げひび割れ



図－7 実験最大荷重時における最大主ひずみ分布図と実験終了後におけるひび割れ分布の比較

が発生している。また、載荷点直下のひずみ分布を見ると、一辺支持方向よりも二隅角支持方向に大きなひずみが発生していることが分かる。

図－7は、実験終了後のひび割れ分布と実験最大荷重時におけるRC版下面の最大主ひずみ分布を比較して示している。

(a) 図より、S4試験体における実験終了後のひび割れ分布性状を見ると、版中央部において円形状のひび割れが明瞭に発生していることが分かる。これは、押抜きせん断コーンの形成によるものである。また、ねじりモーメントによる対角線状のひび割れが発生していることが分かる。一方、数値解析結果では、円形状のひび割れは再現できていないものの、対角線状のひび割れに関しては大略再現しているものと考えられる。

(b) 図に示すS2試験体に着目すると、支持部の二辺に平行したひび割れが多く発生していることが分かる。これは、単純梁のような曲げ変形が卓越していることによるものと考えられる。なお、版中央部には楕円形状のひび割れが形成されており、最終的には押抜きせん断破壊に至ったことが伺われる。一方、数値解析結果においても曲げひび割れの分布状況など、実験結果のひび割れをほぼ再現している。

(c) 図に示すS1試験体の場合には、自由端部近傍において支点間の曲げ変形に起因するひび割れが発生し、一辺支持部近傍においてねじりモーメントに起因する対角線状のひび割れが発生している。また、版中央部には、押抜きせん断コーンの形成に伴う円形状のひび割れも見られる。数値解析結果においても、円形状のひび割れ分布は再現できないものの、実験結果の曲げ変形あるいはねじりモーメントに起因するひび割れ分布性状を大略再現できていることが分かる。

以上より、提案の手法を用いることにより、支持条件にかかわらず、版裏面のひび割れ分布性状を大略再現可

能であることが分かる。

5. まとめ

本研究では、支持条件が異なるRC版が静載荷を受ける場合の耐荷性状を再現可能な解析手法の確立を目的として、四辺単純支持、二辺単純支持および一辺＋二隅角支持の3種類の支持条件を有するRC版を対象に、三次元弾塑性解析を実施した。本研究の範囲内で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 提案の解析手法を用いることにより、支持条件の異なるRC版の耐荷性状を精度よく再現可能であること
 - (2) また、実験終了時におけるRC版裏面のひび割れ分布性状に関しても大略再現が可能であること
- 等が明らかになった。

今後は、終局時に形成される押し抜きせん断コーンのモデル化を試み、終局挙動までを含めた再現可能な解析手法を提案したいと考えている。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: 支持条件の異なるRC版の静的および衝撃荷重実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 487-492, 2009.
- 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.
- 3) Nolinear Analysis User's Manual (9.3), TNO Building and Construction Research.
- 4) 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.
- 5) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.