

## 4 辺支持矩形 RC 版の 3 次元押抜きせん断挙動解析に関する一検討

A consideration on 3D elasto-plastic punching shear analysis of 4-side supported RC slabs

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                      正 会 員      小室      雅人 (Masato Komuro)  
 室蘭工業大学大学院      ○ 学生会員      高玉      郁子 (Fumiko Takatama)

## 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ウエル作用等に強く依存することが知られている。土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>にはせん断耐力評価式が示されている。しかしながら、全ての変数に対して適切な値を与えることができるかについては、未だ疑問の残るところである。一方、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。RC 版の合理的な設計手法の開発あるいは、RC 版の適切な補修・補強法を確立するためには、実験のみならず、数値解析的検討が必要であるものと判断される。

このような観点から、著者らは実験結果を基本にして、荷重-変位関係を適切に評価可能な数値解析手法の確立に向け、種々検討を行ってきた<sup>例え ば 2)</sup>。本研究では、著者らの既往の研究を踏まえ、鉄筋をシェル要素のほか、板状の固体要素に置き換え、かつ、鉄筋要素の接触面要素に関するパラメータを変化させた場合について数値解析を行い、実験結果との比較検討を行ったので報告する。

なお、本解析では、離散ひび割れモデルを用い、押抜きせん断破壊面の破壊挙動、下端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

表-1 には、本解析で対象とした実験ケースを一覧に示している。実験ケースは全 4 ケースであり、試験体名は主鉄筋径 (mm) と主鉄筋間隔 (mm) をハイフンで結ぶことにより表わしている。図-1 には、試験体の形状寸法、配筋状況および荷重位置を示している。RC 版の寸法は  $2,000 \times 2,000 \times 180$  mm であり、下端鉄筋を平均芯かぶり  $40$  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、 $100$  mm あるいは  $200$  mm 間隔で配置して

表-1 試験体一覧

| 試験体名    | 鉄筋径 | 配筋間隔 (mm) | 鉄筋比 (%) | コンクリートの圧縮強度 $f'_c$ (MPa) |
|---------|-----|-----------|---------|--------------------------|
| D13-200 | D13 | 200       | 0.54    | 34.2                     |
| D13-100 | D13 | 100       | 1.00    | 31.0                     |
| D16-100 | D16 | 100       | 1.56    | 32.9                     |
| D19-100 | D19 | 100       | 2.25    | 32.9                     |

いる。なお、各鉄筋は 4 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。荷重盤の直径は  $60$  mm であり、荷重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  $31 \sim 34$  MPa、鉄筋の降伏強度は  $370$  MPa であった。

## 3. 解析概要

本研究では、実構造物のように複雑な鉄筋配置に対しても適用可能とするため、鉄筋を一枚の等方材料鉄板 (以下、鉄板と呼ぶ) と仮定し、それをシェル要素、もしくは固体要素を用いてモデル化することとした。なお、解析ケース 1 は鉄板にシェル要素を用いた場合、解析ケース 2, 3 は固体要素を用いた場合とし、全 3 ケースについて検討を行った。なお、解析ケース 2, 3 では鉄板内部に配置される接触面要素の応力-相対変位関係を変化させている。

## 3.1 解析モデル

図-2 には、本解析に用いたモデル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。鉄板は 4 節点あるいは 3 節点のシェル要素、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、鉄板の配置位置は鉄筋の平均芯かぶり位置とした。

シェル要素を用いる場合 (解析ケース 1) には、鉄板の厚さ  $t_s$  を、鉄筋の断面積  $A_s$ 、鉄筋間隔  $l_p$  を用いて、以下の

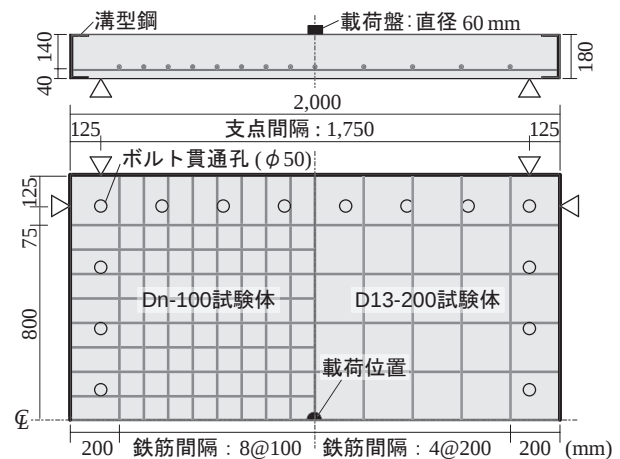


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および荷重位置



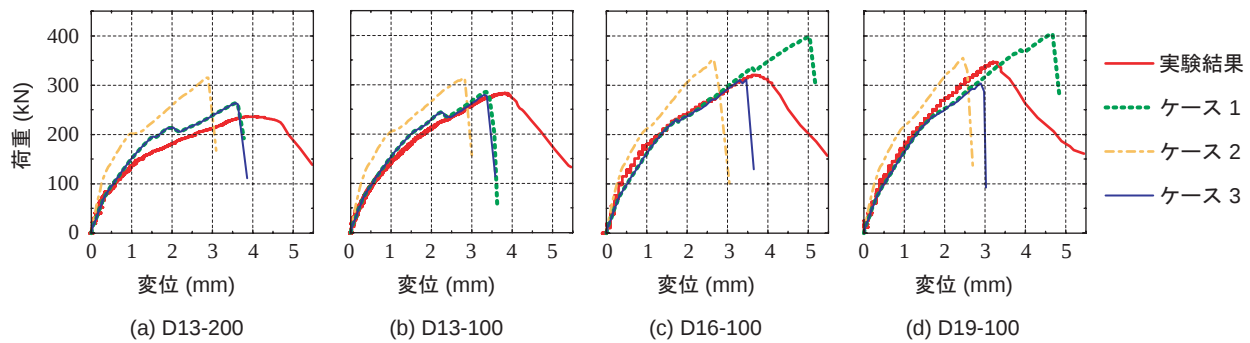


図-5 荷重－版中央点変位関係

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。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ることとし、CEB－FIP モデルコード<sup>4)</sup>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。本解析では(c)図に示すように、付着応力－すべり関係の0～ $S_1$ の間の曲線(破線)を直線に簡略化したモデル(実線)を用いている。

なお、鉄板内部に配置されている接触面要素には、解析ケース2では、法線方向は  $k_n = 100 \text{ MPa/mm}$  で鉄筋の降伏応力  $370 \text{ MPa}$  に達した時点、接線方向は  $k_t = 100 \text{ MPa/mm}$  で鉄筋のせん断強さ  $214 \text{ MPa}$  に達した時点で破壊するものとして設定した。一方、解析ケース3では、鉄筋量がコンクリートに比べて非常に小さいことから、鉄板内部であっても、押抜きせん断破壊においてはコンクリートの破壊が支配的になるという仮定に基づき接触面要素にコンクリートと同様の接触面要素の応力－相対変位関係を用いて解析を行うこととした。

### 3.3 材料構成則

図-4には、コンクリートおよび鉄板の応力－ひずみ関係を示している。(a)図に示すように、コンクリートの圧縮側には、材料実験から得られた圧縮強度  $f'_c$  を使い、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<sup>1)</sup>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  $30^\circ$  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。鉄板には、(b)図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とした。なお、降伏条件には von Mises の降伏条件を適用した。

## 4. 数値解析結果および考察

### 4.1 耐荷性状

図-5には、各試験体毎に荷重－版下面中央点変位関係(以後、単に変位)の解析結果を実験結果と比較して示している。また、表-2には、各解析結果および実験結果の最大荷重値  $P_{max}$  と最大荷重時変位  $\delta_{max}$  を一覧にして示している。なお、いずれの計算においても数値解析は、押抜きせん断破壊発生後に計算を終了している。

実験結果を見ると、いずれの試験体も、荷重が70～100 kN 程度で剛性勾配に若干の低下が見られる。これは、ひび割れの発生によるものと考えられる。その後、荷重の増加

表-2 最大荷重および最大荷重時変位

| 試験体名    | 実験結果              |                        | 解析ケース1            |                        | 解析ケース2            |                        | 解析ケース3            |                        |
|---------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
|         | $P_{max}$<br>(kN) | $\delta_{max}$<br>(mm) | $P_{max}$<br>(kN) | $\delta_{max}$<br>(mm) | $P_{max}$<br>(kN) | $\delta_{max}$<br>(mm) | $P_{max}$<br>(kN) | $\delta_{max}$<br>(mm) |
| D13-200 | 236.5             | 4.12                   | 315.4<br>(1.33)   | 2.89<br>(0.70)         | 263.7<br>(1.11)   | 3.57<br>(0.87)         | 263.7<br>(1.11)   | 3.57<br>(0.87)         |
| D13-100 | 283.3             | 3.81                   | 312.8<br>(1.10)   | 2.83<br>(0.74)         | 285.5<br>(1.00)   | 3.36<br>(0.88)         | 279.6<br>(0.99)   | 3.30<br>(0.87)         |
| D16-100 | 320.9             | 3.70                   | 351.1<br>(1.09)   | 2.66<br>(0.72)         | 397.8<br>(1.24)   | 5.03<br>(1.36)         | 310.7<br>(0.97)   | 3.47<br>(0.94)         |
| D19-100 | 347.0             | 3.20                   | 355.1<br>(1.02)   | 2.45<br>(0.76)         | 403.5<br>(1.16)   | 4.67<br>(1.46)         | 303.9<br>(0.88)   | 2.99<br>(0.90)         |

† ( ) 内の数値は実験結果との比である

とともに変位も増加し、変位3～4 mm 程度で最大荷重を示した後に押抜きせん断破壊により荷重が低下している。

図-5より、解析ケース1の各解析結果を見ると、いずれも実験結果とほぼ同様の約100 kN 程度で剛性勾配が低下しているものの、全体的に剛性勾配が実験結果よりも大きく示されている。その後、実験結果よりも小さな変位で押抜きせん断破壊が生じ、計算を終了している。

一方、鉄板のモデル化に固体要素を用いる解析ケース2の場合には、初期剛性から最大荷重時まで実験結果と同様の性状を示している。鉄筋比の小さいD13-200、D13-100試験体においては、実験結果と同程度の荷重および変位で押抜きせん断が生じることにより計算を終了している。しかしながら、鉄筋比の大きいD16-100、D19-100試験体では、荷重および変位が実験結果よりも大きい状態で押抜きせん断破壊が生じている。これは、押抜きせん断断面が形成されるものの、鉄板の剛性が大きいことにより、未だ鉄板が荷重を負担するように評価されるためと推察される。

これに対して鉄板内部の押抜きせん断面にコンクリートと同じ接触面要素の応力－相対変位関係を適用した解析ケース3では、初期剛性が低下した後も、剛性勾配は実験結果と良好に対応しており、いずれの試験体においても実験結果の最大荷重をほぼ再現している。表-2より、解析ケース3の場合における解析結果と実験結果の差は、最大荷重値および変位値ともに10%程度であることが分かる。これより、数値解析結果は実験結果を大略再現しているものと判断される。

以上より、鉄筋を固体要素にモデル化し、軸剛性を等価とする換算弾性係数を用いる場合には、鉄板内部に配置される接触面要素にコンクリートと同様の接触面要素の応力－相対変位関係を用いることで、耐荷性状を大略再現可能であることが明らかになった。

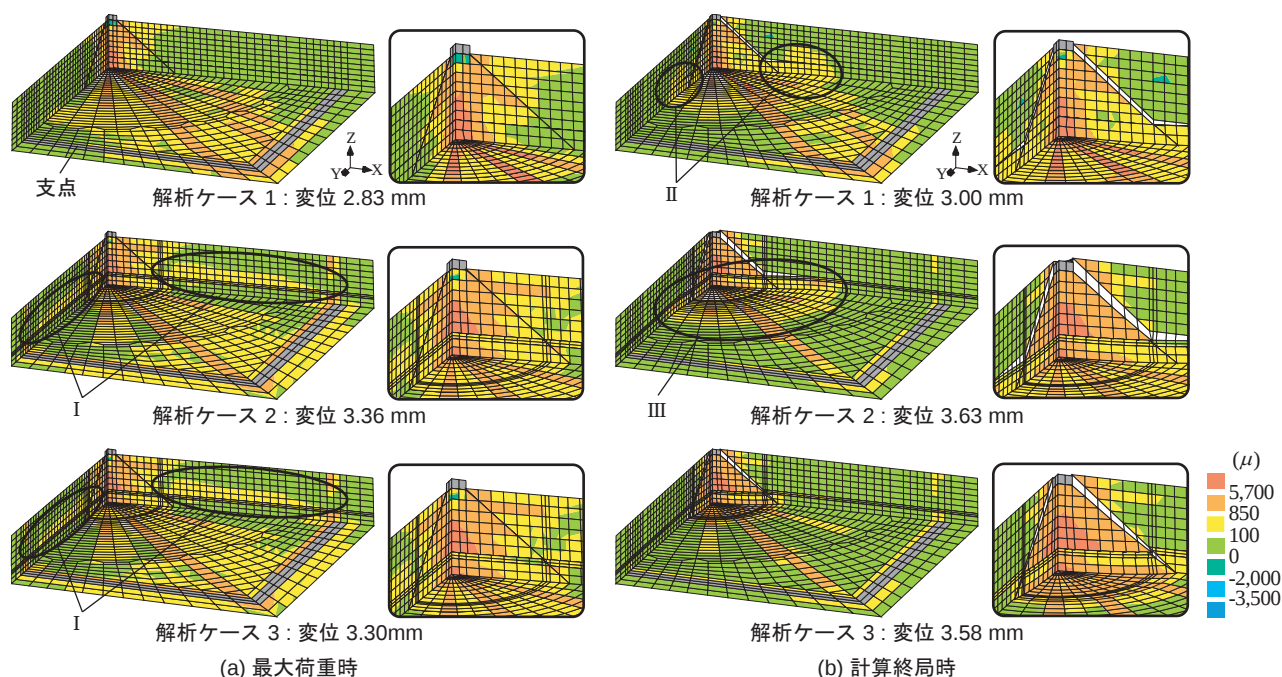


図-6 D13-100 試験体における最大主ひずみコンター図および破壊状況（変形倍率：10 倍）

#### 4.2 破壊性状

図-6 には、D13-100 試験体の各解析ケースに関する最大主ひずみコンター図および破壊状況を示している。図には、各解析ケースにおける最大荷重時および終局時の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 100, 850, 5,700  $\mu$  は、それぞれ図-4(a) に示す  $\varepsilon_1$  (ひび割れ発生ひずみ),  $\varepsilon_2$  および  $\varepsilon_3$  (ひび割れ開口ひずみ) の概略値である。

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にひび割れが開口し、RC 版の下面に対角線上に伸びる曲げひび割れが発生している。ここで、解析ケース 2, 3 の場合には、対称切断面の鉄筋上面近傍部において版中央部から荷点付近から支点方向に伸びるひび割れ(図中、I 部分)や、版下面で支点に沿って進展するひび割れが発生している。これらのひび割れの発生からも、解析ケース 2, 3 における解析結果の変形が解析ケース 1 の場合と比較して大きく示されることが推察される。

計算終局時には、いずれのケースにおいても、押抜きせん断面に配置した接触面要素が完全に開口していることが分かる。このことより、押抜きせん断破壊が生じたことにより荷重が急激に低下し、終局に至ったことが分かる。解析ケース 1 の場合には、下面から版の高さの半分程度までひび割れが発生している(図中、II 部分)。解析ケース 2 の場合におけるコンター図を見ると、鉄板およびかぶりコンクリート部に大きなひずみが発生している(図中、III 部分)。このことより、解析ケース 2 の場合において、鉄板がかぶりコンクリートを下方に押し出すダボ作用を再現していることが分かる。一方、解析ケース 3 の場合には、コンクリート部分に押抜きせん断破壊が生じると同時に、鉄板内部に配置した接触面も破壊に至り、かぶりコンクリート部のひび割れ発生領域が小さくなっていることが分かる。

以上のことより、押抜きせん断面に離散ひび割れモデルを適用することで、押抜きせん断破壊が再現可能であることが明らかになった。また、鉄板のモデル化に固体要素を用い、鉄板内部の接触面に鉄筋の破壊規定を設定することにより、鉄筋のダボ作用を再現可能であることが明らかになった。

#### 5. まとめ

本研究では、4 辺支持矩形 RC 版の鉄筋をシェル要素あるいは、板状の固体要素に置き換え、かつ、鉄筋要素の接触面要素に関するパラメーターを変化させた場合について数値解析を行い、実験結果との比較検討を行った。本検討で得られた結果を整理すると以下の通りである。

- 1) 鉄筋を固体要素を用いて板状にモデル化を行い、軸剛性が等価となるように換算弾性係数を考慮する場合には、鉄板内部に配置した押抜きせん断面の破壊規定に鉄筋の降伏強度を用いることでダボ作用が再現可能である。
- 2) 鉄板内部に配置した接触面要素にコンクリートと同様な破壊を規定する場合には、鉄筋も破断することとなり、実現現象とは異なるものの、実験結果と類似の荷重-変位分布性状を示し、かつ安全側に耐力を評価可能であることが明らかになった。

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