

論文 FEM によるスラブの押し抜きせん断破壊性状の解析

八若 幹彦*1 ・ 檜貝 勇*2 ・ 中村 光*3 ・ 斉藤成彦*4

要旨：鉄筋コンクリート構造物を対象とした非線形三次元有限要素法を用いて 2 方向にプレストレスを導入したコンクリートスラブを解析し、スラブの押し抜きせん断破壊性状ならびに耐力に対するプレストレスの効果などを実験結果と比較検討した。その結果、著者等の提案する FEM 解析法により、プレレストコンクリートスラブの押し抜きせん断破壊性状をおおむね評価できることが示された。

キーワード：PC スラブ， 押し抜きせん断破壊， 耐力， 三次元有限要素法

1. はじめに

3次元問題であるコンクリートスラブの押し抜きせん断破壊を FEM で解析した例は極めて少ない。著者等¹⁾は 3次元 FEM を用いて RC スラブの押し抜きせん断破壊の解析を行い、破壊性状の評価が可能であることを示した。しかし、PC スラブの押し抜きせん断破壊に対する適用性は未だ確認出来ていないので、本研究では 3次元 FEM を用い、2方向にプレストレスを導入したコンクリートスラブの押し抜きせん断挙動の解析を行い、その適用性ならびに問題点を検討することとした。

2. 非線形三次元有限要素法

2.1 非線形三次元有限要素法の概要

本解析に用いた有限要素は、8 節点のアイソパラメトリック 6 面体 1 次要素で、数値積分に用いる Gauss 点の数は 8 である。鉄筋には、その特性を要素中に平均化して取り扱う RC 要素を用いた。ポストピーク領域までの挙動を捉えるため、変位制御の増分解析を行い、収束計算には Newton-Raphson 法を用いた。

2.2 コンクリートの主応力-主ひずみ関係

本解析では、3方向の主応力-主ひずみ関係としてそれぞれ一軸応力下での構成則を用いた。従

って、3軸応力下での破壊基準などは特に考慮していない。また、応力-ひずみ関係の除荷経路は原点指向型とした。ここで、構成則で用いている圧縮破壊エネルギー(G_{fc})、引張破壊エネルギー(G_{ft})は Nakamura・Higai²⁾の研究結果によった。実験結果の解析において、圧縮強度(f'_c)は表-1 に示す実験値を用いた。

(1) 圧縮応力を受けるコンクリート

圧縮応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係は、図-1 に示すように最大応力(f'_m)までを二次放物線(式(1))とし、その後応力が直線的に零まで減少するモデルを用いた。

$$\sigma_c = f'_c \left\{ 2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ただし、 $\varepsilon_0 = 0.002$

ここで、応力零時のひずみ(ε_m)は圧縮破壊エネルギー(G_{fc})を考慮して(2)式により決定した。

$$\varepsilon_m = \frac{G_{fc}}{f'_c l_{eq}} + \frac{\varepsilon_0}{2} \quad (2)$$

$$G_{fc} = 8.8 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa} \cdot \text{mm}) \quad (3)$$

*1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

*2 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

*3 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 博(工)(正会員)

*4 山梨大学助手 工学部土木環境工学科 博(工)(正会員)

l_{eq} : 要素の等価長さ (4.1 参照)

なお, 基本的には一軸応力下での構成則を用いているのであるが, 直交方向の引張ひずみ (ϵ_d) の存在によって圧縮強度が低下する Collins³⁾ のモデル (式(4)) は使用している。

$$\sigma_{2max} = f_c' \frac{1}{0.8 + 0.34 \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_0} \right)} \leq f_c' \quad (4)$$

(2) 引張応力を受けるコンクリート

引張応力下でのコンクリートの挙動は, 引張強度 (f_t) までは, 直線的に応力が増加するとし, 軟化域については, コンクリートの引張応力 (σ_t) ~ ひび割れ幅 (w) 関係および引張破壊エネルギー (G_f) を用いて(6)式のように定めた (図-2)。ここで, 引張応力~ひび割れ幅関係は, -3 乗モデルを使用した。

$$f_t = 0.58 f_c'^{1/3} \quad (5)$$

$$\sigma_t = f_t \left\{ 1 + 0.5 \frac{f_t}{G_f} w \right\}^{-3} \quad (6)$$

$$w = l_{eq} (\epsilon_t - \epsilon_{ct}) \quad (7)$$

$$G_f = G_{fc} / 250 \quad (\text{MPa} \cdot \text{mm}) \quad (8)$$

2.3 鉄筋

鉄筋の応力-ひずみ関係は, 図-3 に示すように bi-linear とし, 降伏点以降の第二勾配は初期勾配の 1/100 とし, 除荷時には初期剛性で応力が減少するモデルを使用した。また, 鉄筋の剛性をコンクリートの剛性に重ね合わせた RC 要素を用いているので, 付着は完全に鉄筋のすべりは生じないと仮定したことになる。

2.4 ひび割れモデル

ひび割れモデルとしては, 分散ひび割れモデルの一種である「回転ひび割れモデル」を用いた。これは, ひび割れ方向と応力主軸方向を常に一致させるモデルである。従って, ひび割れたコンクリートのせん断剛性を評価するという困難な問題を避けることができる。また, 本質的にひび割れの局所化が起こりやすいモデルであるため, 少数の斜めひび割れの発達によって破壊が誘起される

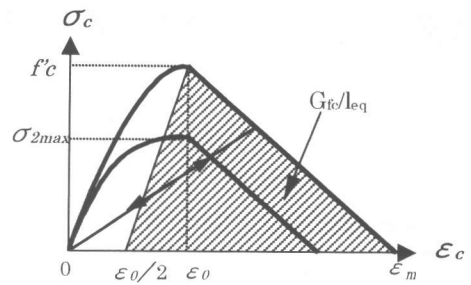


図-1 圧縮応力-ひずみ関係

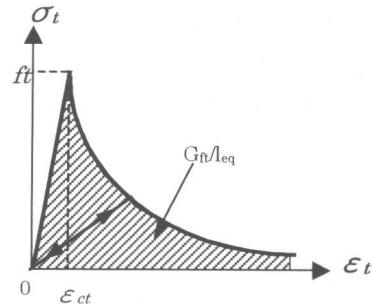


図-2 引張応力-ひずみ関係

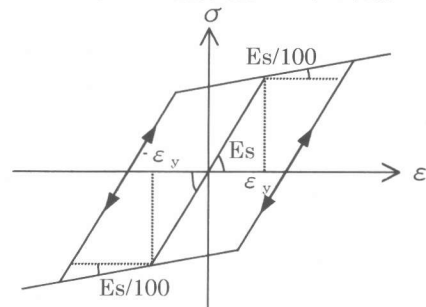


図-3 鉄筋の応力-ひずみ関係

ようなせん断破壊の解析に適用しやすい性質を持っている。回転ひび割れモデルにおけるコンクリートの構成則は式(9)で表されるが, 同式中のせん断応力に関する部分は, 材料特性とは関係なく, 主ひずみと主応力方向を一致させるための係数である。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \epsilon_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial \epsilon_{22}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial \epsilon_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial \epsilon_{33}} & 0 & 0 \\ & & & & G_{12} & 0 \\ sym & & & & & G_{23} \\ & & & & & & G_{31} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \end{Bmatrix} \quad \dots(9)$$

$$G = \frac{d\tau}{dy} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_n - \sigma_t}{\epsilon_n - \epsilon_t} \quad (10)$$

n : ひび割れ直交方向

t : ひび割れ平行方向

3. 実験概要

本研究で用いた実験結果は、末広等⁴⁾が実施したプレストレストコンクリートスラブの押し抜きせん断破壊試験の結果である。

3.1 供試体

実験供試体の寸法は図-4に示したとおり、1650mm×1650mm×200mmの四隅の浮き上がり拘束しない4辺単純支持の正方形スラブで、スパン長は1500mm、2方向の平均有効高さ(d)は162mmである。鉄筋の中心間隔は両方向とも100mmで、2方向の鉄筋比の平均は0.782%である。鉄筋はD13で、降伏応力は402MPaのものを用いている。PC鋼棒はB種SBPR95/120(現行SBPR930/1180)φ17mmで、降伏強度1138MPaのものである。プレストレスは、コンクリートの軸圧縮応力が、0, 1.0, 2.0, 3.9MPaとなるようにPC鋼材を緊張することによって導入してある。なお、PC鋼材の緊張後グラウトを注入してある。載荷板は外形100mm、内径40mm、厚さ45mmの鋼製円板を用いている。実験では、荷重はスラブが破壊に至るまで単調増加させている。

3.2 実験結果

4体の供試体はいずれも、押し抜きせん断破壊を起こしている。耐荷力に着目すると、表-1および図-5に示すように、軸圧縮力の増加に伴う

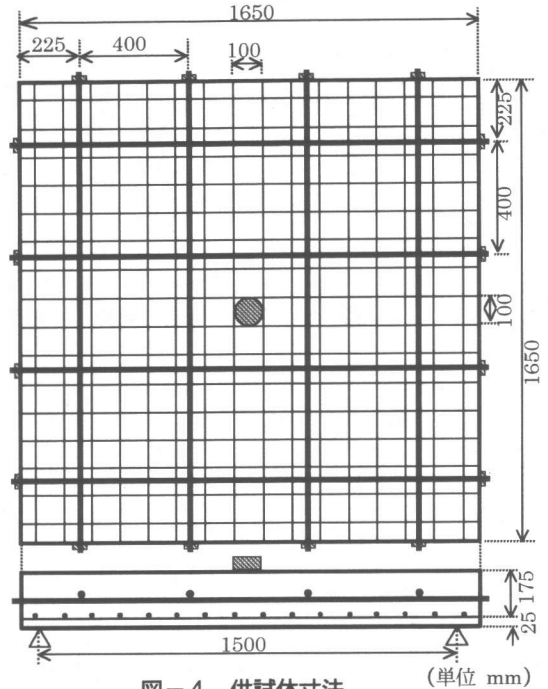


図-4 供試体寸法

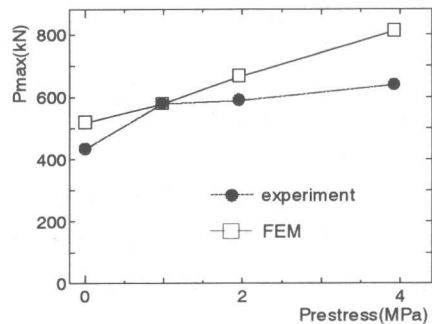


図-5 押し抜きせん断耐力

表-1 実験・解析結果の概要

供試体 番号	コンクリート 圧縮強度 (MPa)	プレストレス σ_p (MPa)	最大荷重		P_n/P_e	軸力の効果		
			実験値 P_e (kN)	解析値 P_n (kN)		P_e/P_{e0}	P_n/P_{n0}	β_n
a-1	52.2	0	433	518	1.20	1.00	1.00	1.00
a-2	44.7	1.0	579	579	1.00	1.33	1.12	1.10
a-3	44.0	2.0	588	665	1.13	1.36	1.28	1.21
a-4	43.2	3.9	637	810	1.27	1.47	1.56	1.42

注) β_n は4.5を参照

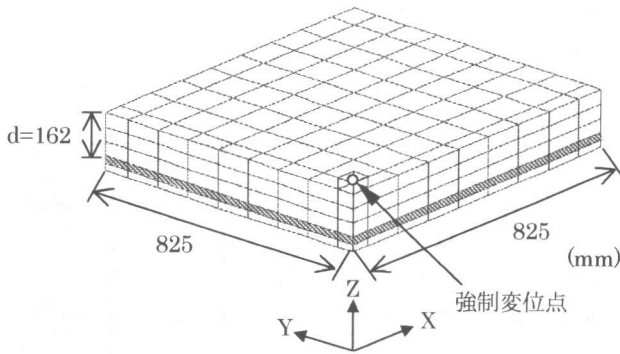


図-6 要素分割図 (対称 1/4 モデル)

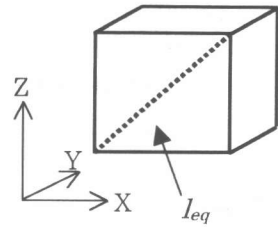


図-7 要素の等価長さ

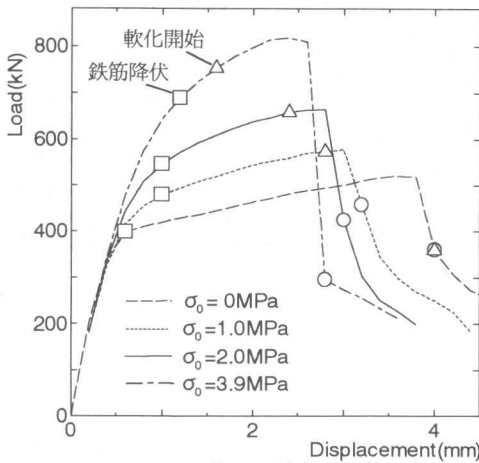


図-8 荷重-載荷点変位関係

耐荷力の増加が認められる。プレストレスを導入していない a-1 の耐力に対する各供試体の耐力比 (P_e/P_{e0}) は、a-2 ($\sigma_0=1.0\text{MPa}$) では、133%で耐力の増加量が大きいが、プレストレスをさらに増加させた a-3 ($\sigma_0=2.0\text{MPa}$) では 136%、a-4 ($\sigma_0=3.9\text{MPa}$) では、147%であって、耐力の増加は緩やかになっている。

4. 解析結果および考察

4.1 解析モデル

(1) 要素分割

本解析で用いた要素分割を図-6に示す。鉄筋は要素中に平均的に存在すると仮定した RC 要素を用いているので、二方向の鉄筋の有効高さの中央点が鉄筋を含む RC 要素 (下から2層目) の図心位置と一致するように分割した。要素分割モデルは、2方向の対称性を考慮した 1/4 モデルであ

る。また、要素分割数ならびに要素サイズは、X 軸方向、Y 軸方向とも同一である。境界条件は支点にあたる $X=750\text{mm}$ かつ $Z=0\text{mm}$ と、 $Y=750\text{mm}$ かつ $Z=0\text{mm}$ の節点を Z 方向に拘束した。プレストレスは、スラブの断面高さ中央位置 ($Z=100\text{mm}$) に外力として作用させた。

(2) 要素の等価長さ

破壊エネルギーを考慮した構成則を用いる場合、要素の等価長さ (l_{eq}) が必要となる。等価長さの決め方には未だ定説が無いので、本解析では、便宜的に X-Z 平面における要素対角線長さ (図-7) を等価長さとして用いた。

4.2 荷重-載荷点変位関係

実験と解析による押し抜きせん断耐力を比較すると、a-1~a-4 供試体においてそれぞれ実験値の 120%、100%、113%、127%となった。解析値は実験値よりやや大きいが、まずまずの精度で評価出来ている。

次に、解析による荷重-載荷点変位曲線を図-8に示す。図-8の□印は載荷板下の鉄筋が降伏した時点を示す。a-1($\sigma_0=0\text{MPa}$)では、約 400kN で鉄筋の降伏とともに急激に剛性が低下し、以後緩やかな勾配で最大荷重に達しているが、プレストレスが大きくなるほど鉄筋の降伏は遅く、剛性の低下も少ない。また、いずれもピーク荷重直後に急激に荷重が低下する押し抜きせん断破壊の特徴を示しているが、プレストレスが大きいほど、より脆性的である。

4.3 コンクリートの圧縮軟化

解析での破壊モードを考察するために、コンク

リートの圧縮軟化について検討する。図-8中の△印は、圧縮軟化が発生した時点を示す。a-1($\sigma_0=0\text{MPa}$)ではピーク以降になって軟化が発生したが、プレストレスが大きくなるにつれて軟化の発生は早くなり、a-4($\sigma_0=3.9\text{MPa}$)では最も早く、ピーク荷重の約92%で発生している。最大荷重時に圧縮軟化を示した Gauss 点の分布を図-9(a)~(b)に示す。a-1~a-3では図-9(a)に示したように、載荷板と隣接する要素の1つの Gauss 点のみ軟化を示しており、主圧縮ひずみも 2500μ 程度に留まっている。プレストレスが最大のa-4(図-9(b))では、載荷板に隣接した3つの Gauss 点軟化しているが、主圧縮ひずみは 2500μ 程度である。いずれの場合もコンクリートの圧縮軟化の程度は小さいことから、スラブの破壊に対する軟化の影響は大きくないと思われる。

4.4 ひび割れ性状

図-10(a)~(d)に、解析によるひび割れ性状を示す。ひび割れ図は、ピーク荷重直後(図-8の○点)におけるX方向切断面での主引張ひずみ(ε_1)の大きさと方向(ε_1 の直交方向)を示したものである。

a-1~a-3($\sigma_0=0\sim 2.0\text{MPa}$)のひび割れ性状(図-10(a)~(c))に着目する。これらにおいては斜めひび割れが卓越しているが、ひび割れの範囲はやや広く分散している。これに対してプレストレスが最大のa-4(図-10(d))では、斜めひび割れが卓越するとともに、a-1~a-3に比べてひび割れが局所化する傾向が明らかである。なお、斜めひび割れの傾斜角に、明らかな変化は見受けられない。

4.5 プレストレスが押し抜きせん断耐力に及ぼす影響

プレストレスが押し抜きせん断耐力に及ぼす効果を図-11に示した。図-11は、プレストレスを作用させていない場合の耐力を基準にして、各供試体の耐力比(P_e/P_{e0} , P_n/P_{n0})を示したものである。実験では、プレストレスが 1.0MPa での耐力増加が大きく、プレストレスがそれ以上になると耐力の増加は緩やかになる傾向が認められる。

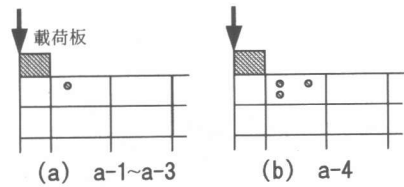


図-9 圧縮軟化点の分布

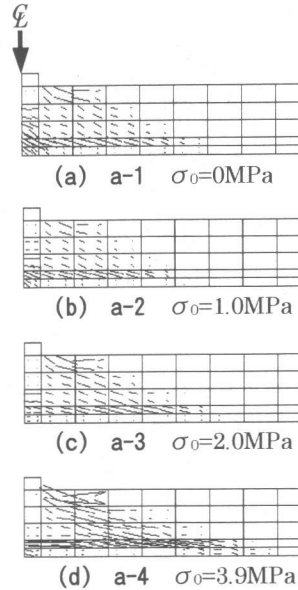


図-10 ひび割れ性状

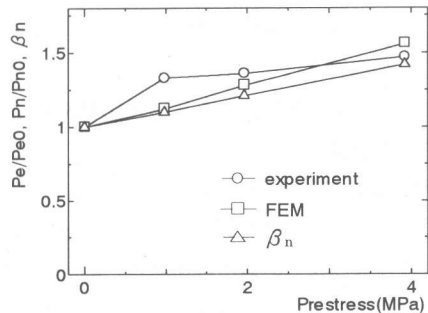


図-11 プレストレスが耐力に及ぼす影響

一方、FEMによる解析結果では、プレストレスの増加に伴ってほぼ直線的に耐力が増加しているのであるが、 $\sigma_0=1.0\text{MPa}$ の場合を除いて実験結果とほぼ一致しているとも言える。PCスラブの押し抜きせん断試験の例は少ないので、実験と解析の傾向が一致しているかどうかは断定できないが、解析によりある程度プレストレスの効果を評価できるものと考えられる。コンクリート標準示

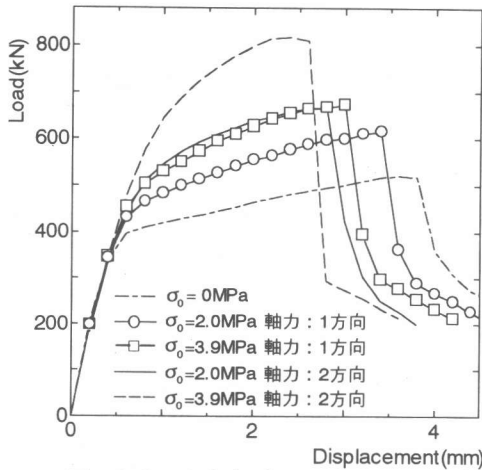


図-1 2 1方向プレストレスと2方向プレストレスの比較

方書⁵⁾のPCはりの耐力算定法である β_n を準用した簡便な方法による結果も図-1 1に△印で示したが、FEM解析による耐力の増加傾向とおおむね一致していることが分かる。

$$\beta_n = 1 + 2 \frac{M_0}{M_u} \quad (11)$$

M_0 : スラブの単位幅あたりのデコンプレッションモーメント (2方向の平均値)

M_u : スラブの単位幅あたりの曲げ耐力 (2方向の平均値)

4.6 1方向にのみプレストレスを導入したスラブによる試算

道路橋などで用いられているスラブには、1方向にのみプレストレスを導入したものも多いので、そのようなスラブへの適用性を見るための試算を行った。試算に用いたスラブは、プレストレスが1方向から与えられていることを除き、a-1~a-4と全く同一である。

荷重-変位関係は、図-1 2に示したとおりで、プレストレスが1方向のみの場合は、2方向の場合に比べて、剛性および耐荷力の低下が明らかに認められる。プレストレスによる耐荷力増加率を示した図-1 3より、プレストレスを1方向に導入した効果は、2方向の場合の約50%に低下することが分かる。

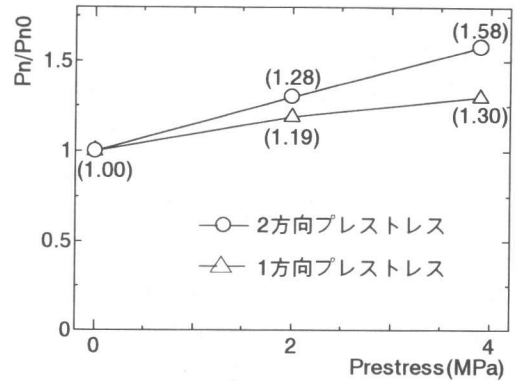


図-1 3 プレストレスの効果の比較

5. まとめ

- (1)プレストレスが作用しているスラブでも、押し抜きせん断破壊に及ぼすコンクリートの圧縮軟化の影響は少なく、破壊は主として斜めひび割れの発生、発達によって支配されていると考えられる。
- (2)PCスラブの押し抜きせん断破壊は実験例が少なく不明確な点も多いが、FEM解析によって耐力をおおむね評価することができると思われる。また、 β_n を用いた簡便な方法による耐力評価も可能であると思われる。

参考文献

- 1)八若幹彦・檜貝 勇・中村 光・斉藤成彦:3D-FEMによるRCスラブの押し抜きせん断破壊性状の解析, 構造工学論文集 vol.47A, 2001年4月
- 2)Nakamura, H. and Higai, T.:Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, pp.259-272, 1999, JCI
- 3)Collins, M. P and Mitchell, D.:Prestressed Concrete Basics, Canadian Prestressed Concrete Institute, 1987
- 4)末広 保・石橋忠良・佐藤春雄・大庭光商:PCスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 11-2, pp.149~152, 1989
- 5)コンクリート標準示方書設計編〔平成8年制定〕, 土木学会