

[184] 面内力を受ける鉄筋コンクリート平板の非線形有限要素解析

正会員 井上 範 夫 (鹿島建設武藤記念研究室)
 正会員 ○小 鹿 紀 英 (鹿島建設武藤記念研究室)
 正会員 鈴 木 紀 雄 (鹿島建設武藤記念研究室)
 正会員 速水 由紀夫 (鹿島建設電子計算センター)

1. 序

鉄筋コンクリート造の平板 (RC 平板) に、一様な面内応力を加え、RC 建物の一要素としての基本的性状を捉えようとする実験及び解析が近年行われるようになってきた。この種の実験では、一様な応力度分布が想定されているので、RC 平板を一様な部材として扱うマクロモデルで、挙動を解析的に予測する方法が考えられるが FEM などのマイクロモデルによって、マクロなモデル化について検証しておくことは有意義である。さらに、実験では、ひびわれが決して同時、かつ一様に発生するわけではなく、ひびわれの進展や鉄筋の局部的な降伏によって、時々刻々塑性化してゆくのが現実であり、ひびわれ幅、ひびわれ間隔に留意する場合や、スケール効果を検討する場合には、やはりマイクロモデルによるアプローチが必要であると考えられる。

本論文は、純せん断加力された RC 平板試験体を FEM モデルによって解析した結果を報告するものである。使用した FEM モデルは、従来より筆者らが開発してきた 3 次元 FEM と同じく、塑性理論に基づいた 2 次元 FEM であり (1) 鉄筋を線材とする、(2) 鉄筋とコンクリートの間には付着リンクを入れる、(3) ひびわれは、各要素内で一様に発生するものとする (いわゆる "Smeared Crack") の 3 点を組み合わせた点に特徴があるが、今回は、付着リンクの特性がひびわれの進展に及ぼす影響を調べることを主な目的とした。

2. 面内せん断力を受ける平板の解析

2.1 解析の対象とした実験の概要

実験は、鹿島技研の大森、高橋らが行ったものであり、実験対象部分は、図-1 に示すように $80 \times 80 \times 8$ cm の平板で、D6 鉄筋を 6.6 cm ピッチのダブルで対角方向に配置している (せん断補強筋比は 1.2%)。材料定数を表-1 に示す。この試験体に図-2 のような加力装置で、X 方向に圧縮力、Y 方向に引張力を加えて、面内に純せん断力が働くようにし、片方向くり返してせん断変形角 3.4×10^{-2} ラジアンまで載荷した。その結果、まず $\tau = 1.8.8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ で初期ひびわれが生じ、最終状態では、ほぼ 3 ~ 6 cm のひびわれ間隔となった。また、鉄筋は $\sigma = 4.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ ですべて降伏したが、コンクリートの圧壊は、最終状態まで起こらなかった。

2.2 解析条件

(1) 解析モデル

本解析では、鉄筋コンクリート部材をコンクリート、鉄筋、付着の各要素より構成されるものとし、平面応力状態と見なしてそれぞれに塑性条件を仮定し、増分方程式を解くことによって弾塑性解析を行っている。解析対象は図-1 に示すように試験体の約 1/4 で、コンクリートと鉄筋を図-3 のようにモデル化し、その間を付着リンクで結合した。ただし、鉄筋の交差部分は、それぞれの鉄筋に独立に自由度を設定している。また、加力側の側面には剛棒を設け、剛棒とコンクリート、鉄筋の各節点を加力方向にのみ剛な

表-1 材料定数

コンクリート			鉄筋
ヤング率	圧縮強度	引張強度	降伏強度
$3.04 \frac{\text{t}}{\text{cm}^2}$	$3.50 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	$3.32 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	$3.550 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

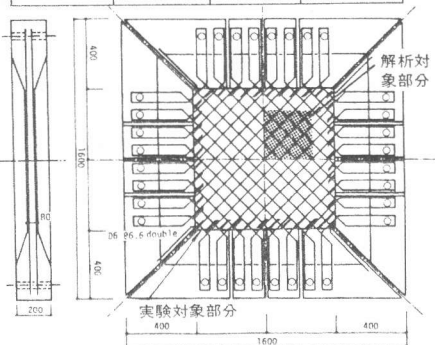


図-1 試験体の形状

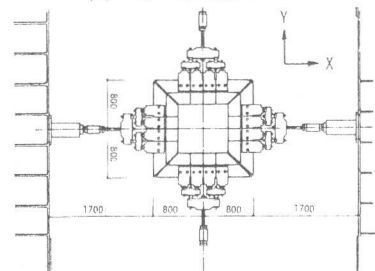


図-2 加力装置

リンクばねで結んで、それを介して、加力を行うことにより、各要素の塑性後も剛性に比例した力がモデルにかかるようにした。加力はX方向に圧縮力を、Y方向に引張力を剛棒上の各節点に加える。境界条件は、コンクリートについては、中心軸が対称軸となるので中心軸上各節点をローラー支持する。また、鉄筋に関しては、中心軸が一般に対称軸ではないので、付1に示す方法により、連続条件を満足させた。

(2) 材料特性

1) コンクリート

コンクリートは、4節点アイソパラメトリック要素でモデル化しDrucker-Pragerの降伏条件式を基本とした塑性理論により、構成方程式を求めている。一次の不変量の定数 α は、黒正らの研究⁵⁾により $\alpha = 0.07$ とした。降伏条件式を主応力面について描くと、図-4のようになる。復元力特性は、相当応力について、図-5のTri-linearを仮定する。引張強度については割裂強度を用いるが図-3の中に示す3列には、以下に述べる理由により小さめの値を設定している。すなわち、コンクリートの引張強度を一定として解析すると一斉にひびわれが生じる結果となるが、実現象では局部的に弱い部分に生じたひびわれが主応力方向に進展して数本の初期ひびわれとなり、その後順次新たなひびわれが発生してゆく。そこで解析では実験で初期ひびわれが発生した位置に強制的に初期ひびわれを生じさせ、その後の挙動を解明することを目的とした。

2) 鉄筋

鉄筋は、実際の配筋通りにモデル化し、Bi-linearの復元力特性を仮定する。初期剛性は、 $2.16 \times 10^3 \text{ t/cm}^2$ 、弾性限は 3.55 t/cm^2 とする。

3) 付着リンク

ひびわれと付着特性の関係を調べた実験結果では、ひびわれ面からの距離によって付着強度が違うことが指摘され^{6), 7), 8), 11)}てあり、解析でもこの性状を取り入れているものもある^{3), 8), 11)}。また、付着の剛性については、距離によってあまり差がないと言われている^{7), 8), 11)}。そこで、ここでは、 τ - S 関係について、初期剛性一定、付着強度はひびわれ面からの距離によって変えることを基本とした。

付着特性に関する予備検討

まず、付着強度がコンクリートの応力分布に及ぼす影響を明らかにするために、森田ら⁹⁾によって実験された図-6の両引試験体(コンクリート強度 32.2 kg/cm^2 、引張強度 2.4 kg/cm^2)について予備検討を行った。解析では図-7のように試験体の1/4部分をモデル化し、表-2に示すように、ひびわれからの距離に注目して付着強度を変化させた3ケースを検討する。解析結果のうち、荷重とコンクリート端部における鉄筋の伸びの関係(以下 P - δ 関係)を図-8に、鉄筋の横のコンクリート要素の軸方向応力分布を図-9に示す。これらの図より次のことがわかる。(a)付着特性を線形としたケース1と、付着強度を1種類としたケース2では、ひびわれ近傍のコンクリート応力が大きくなるので、ひびわれの近傍に次のひびわれが生じることになる。一方ひびわれ近傍のみ付着耐力を低下させたケース3では、その傾向がなくなり、ひびわれの中間で応力が最大となるので、ひびわれ

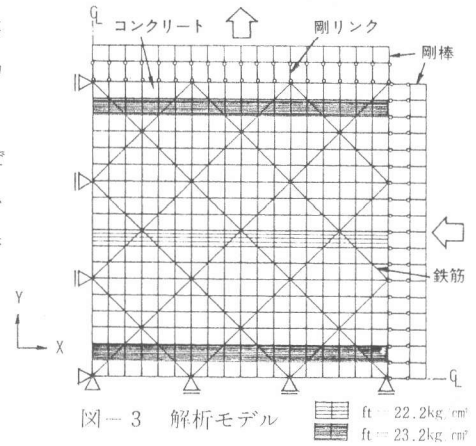


図-3 解析モデル

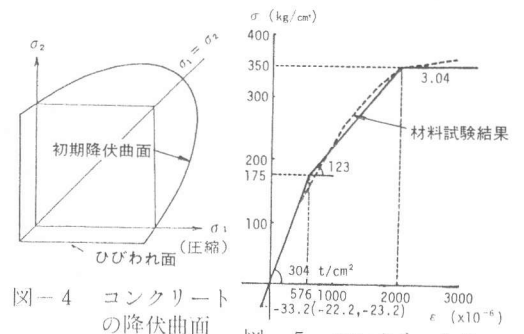


図-4 コンクリートの降伏曲面

図-5 コンクリートの一軸特性

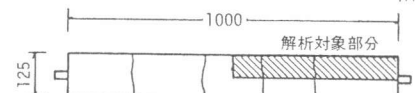


図-6 両引試験体(森田ら)⁹⁾

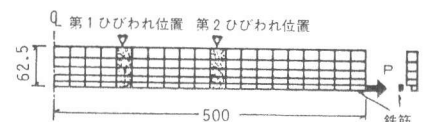


図-7 解析モデル

表-2 解析ケース *ひびわれコンクリートの中心からの距離で定義

ケース1	ケース2	ケース3	
すべての付着リンク τ (kg/cm) 10 t/cm ³	すべての付着リンク τ (kg/cm) 60 0.1 10 t/cm ³	ひびわれから0.8D* τ (kg/cm) 30 0.1 10 t/cm ³	その他 τ (kg/cm) 60 0.1 10 t/cm ³

がある間隔で生じる，という実験現象を表現しうることを示している。よって，ケース3が，より妥当な分布と考えられる¹⁰⁾。
 (b) $P-\delta$ 関係は各ケースで大差ない。付着特性の違いは， $P-\delta$ 関係にあまり大きな影響を及ぼさない。

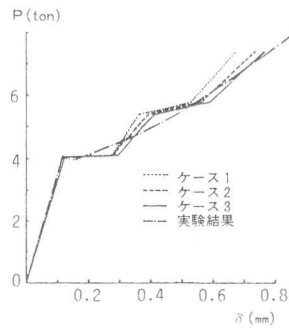


図-8 $P-\delta$ 関係

付着特性の設定

付着強度の相違による影響を見るために，2ケースの平板の解析を行う。

ケースAでは，図-10のような付着特性を総てに仮定する。ケースBでは，予備検討の結果を踏まえて，図-11に示すように，●印の位置（ひびわれ面から1.3D）では，付着強度を 30 kg/cm^2 とし，ひびわれ時にこれを越えている場合には，次のステップで超過応力を解除する。また○印の位置（ひびわれ面から3.9D）では，付着強度を 50 kg/cm^2 とし，やはり超過応力は解除する。

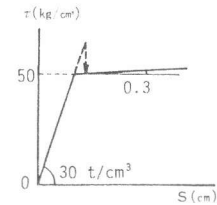
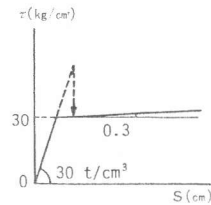
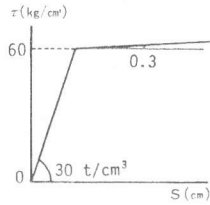


図-10 付着特性

(a) ひびわれより1.3D* (b) ひびわれより3.9D*

*ひびわれコンクリートの中心からの距離で定義

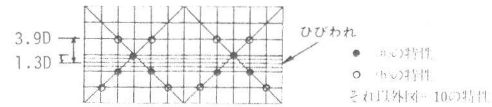


図-11 ひびわれ近傍の付着特性

2.3 解析結果

(1) ひびわれ

図-12に $\tau = 50 \text{ kg/cm}^2$ におけるひびわれの発生状態を示す。ケースAでは，あらかじめコンクリート強度を低下させておいた3列にひびわれが発生した後，ほぼ全域にわたってひびわれが発生してしまい，実験結果との対応は悪くなっている。これは，ひびわれの発生した要素に接続した付着リンクにより隣接した要素に大きな引張力が伝えられるためである。これに対して，ケースBでは，あらかじめコンクリート強度を低下させておいた3列と，その中間のみにひびわれが発生する。その位置は実験で発生したひびわれにほぼ対応しており，解析は実験をかなりよく再現している。

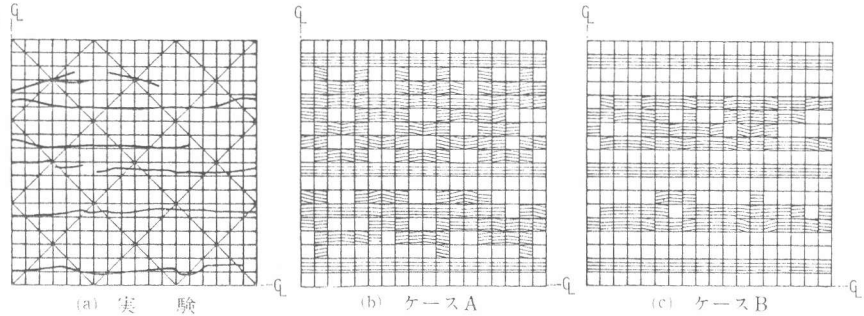


図-12 ひびわれ図 ($\tau = 50 \text{ kg/cm}^2$)

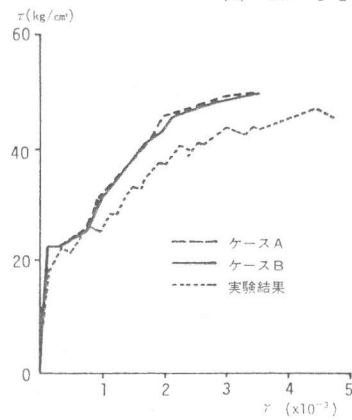


図-13 $\tau-\gamma$ 関係

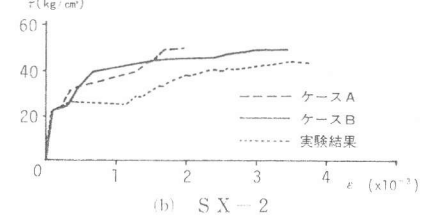
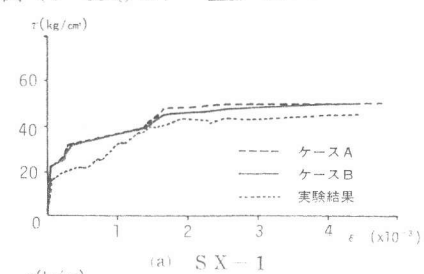


図-14 鉄筋のひずみ

(2) $\tau-\sigma$ 関係

図-3にケースA，ケースBの $\tau-\sigma$ 関係をそれぞれ破線と実線で示す。ケースAとケースBの結果は良く似たものとなり，いずれも実験結果の定性的な傾向を良く表しているが若干の問題点とその原因を挙げると次の点

が考えられる。(a) 解析では、ひびわれの発生した $\tau = 2.2 \sim 2.5 \text{ kg/cm}^2$ で変形が急速に大きくなるが、実験では徐々に剛性が低下してゆく。これは、解析では一列に一斉にひびわれが入るのに対し、実験では、ひびわれが1ステップで貫通せず、徐々に進展してゆくためと考えられる。(b) 解析では、実験よりも若干硬めの結果となっているがこれは、i) 実験では繰返し加力のため劣化が生じている、ii) 解析では、各要素の復元力特性上で、剛性変化時の応力の超過分を修正していない、ことが原因と考えられる。なお、コンクリート要素はいずれも、引張-圧縮状態となり、この領域では、圧縮強度が F_c より低下する領域が広く存在するといわれているので、今後コンクリートで耐力が決まる供試体については、この影響を考慮する必要がある。

(3) 鉄筋のひずみ

図-14に鉄筋SX-1, SX-2のひずみとせん断応力度の関係を示すが、これらは、実験結果の定性的傾向を捉えている。なお、ケースAとケースBを比較すると、SX-1のひずみは、ほとんど違いがないが、SX-2では違いが見られる。

3. まとめ

純せん断力を受けるRC平板の解析を、FEMによって行った。ここでは、鉄筋の隆伏によって耐力が決まった試験体を例とし、ひびわれと付着特性の関係に注目して解析を行い実験結果と比較した結果次のことが分かった。

(1) ひびわれの発生状況は、付着特性の違いにより大きく変化する。実験結果を再現するには、ひびわれ近傍の付着強度を低下させる必要がある。

(2) τ - γ 関係は、本試験体の場合には付着特性を変えても、ほとんど影響を受けない。

本論文で使用したFEMモデルにより、RC平板の挙動をかなり詳細に解析できることが確認できた。今後は2軸引張やその他のいろいろな応力状態に対して解析を行い、マクロなモデルにおける構成方程式の確立を図ってゆきたい。

謝 辞 鹿島建設技術研究所の大森信次博士、高橋敏夫氏および関係諸氏には、RC平板の純せん断加力実験の結果を頂きました。ここに深謝します。また、武藤記念研究室の菅野忠博士、電算センターの宮下丘氏には終始御指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

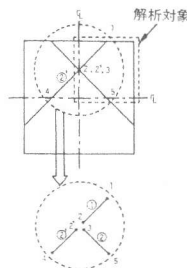
付1. 鉄筋の境界条件の処理

全体の1/4を解析する場合、解析モデル中の鉄筋節点の変位には次の関係がある。

鉄筋要素①と②の対称性により

$$\begin{Bmatrix} 2'u_x \\ 2'u_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 3'u_x \\ 3'u_y \end{Bmatrix} \quad (1)$$

鉄筋要素①と②の連続性により

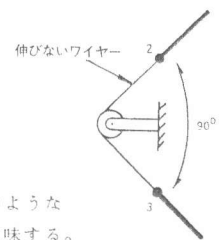


$$\begin{Bmatrix} 2'u_x \\ 2'u_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 2'u_x \\ 2'u_y \end{Bmatrix} \quad (2)$$

従って節点2と節点3の変位の関係は

$$\begin{Bmatrix} 2'u_x \\ 2'u_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 3'u_x \\ 3'u_y \end{Bmatrix} \quad (3)$$

これは、節点2と節点3の間を右図のような伸びない「ワイヤー」でつなぐ事を意味する。



参考文献

- Collins, M.P., Vecchio, F., "Stress-Strain Characteristics of Reinforced Concrete in Pure Shear", IABSE Colloquium, Delft, 1981, pp. 211~225
- Perdikaris, P.C., White, R.N., and Gergely, P., "Strength and Stiffness of Tensioned Reinforced Concrete Panels Subjected to Membrane Shear, Two-Way Reinforcing", Cornell Univ. NUREG/CR-1602 July 1980, pp. 395
- 野口, 長沼, 「RCパネルの非線形パラメータ解析」, RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム, 1983年10月, pp. 147~154
- 菅野, 井上, 小池, 広中, 速水, 「繰返し曲げ変形を受けるRC柱の3次元弾塑性解析」, せん断コロキウム, 1983年10月, pp. 87~94
- 黒正, 滝口, 「有限要素法による鉄筋コンクリート部材の二次元非線形解析(その1)」, 日本建築学会論文報告集, 第189号, 昭和46年11月, pp. 51~57
- 森田, 藤井, 「異形鉄筋の付着応力-すべり関係に関する考察」, せん断コロキウム, 1983年10月, pp. 37~44
- Nilson, A.H., "Internal Measurement of Bond Slip", ACI Journal, Vol. 69, No. 7 July 1972, pp. 439~441
- Plauk, G. and Hees, G., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams with Special Regard to Bond", IABSE Colloquium, Delft 1981, pp. 655~670
- 森田, 「鉄筋コンクリート部材の引張試験による付着効果の研究」, セメント技術年報, 昭和38年, Vol. XIII, pp. 468~473
- 六市, 森田, 富田, 「鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究(II)」, 日本建築学会論文報告集, 昭和42年2月, pp. 1~6
- 黒正, 林, 小林, 吉田, 「異形鉄筋とコンクリートの付着に関する基礎的研究(その3)」, 建築学会大会, 昭和57年10月, pp. 1329~1330