

V-4

非線形有限要素解析を用いた RCスラブのせん断強度に関する研究

北海道大学大学院 学生員 風野 裕明
北海道大学大学院 学生員 佐藤 靖彦
北海道大学工学部 正 員 上田 多門
北海道大学工学部 正 員 角田与史雄

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート部材のせん断問題に対し、有限要素解析を利用した研究が精力的に進められている。特に、RC壁、RCはりといった2次元問題に対しては、除荷、載荷、再載荷といった荷重経路において、その変形及び耐力を精度良く追跡できることが示されている⁽¹⁾⁽²⁾。

しかし、RCスラブの押抜きせん断破壊のような、3次元問題に対しては、あまり例を見ない。この大きな理由として、3次元応力下での鉄筋コンクリートの非線形性を表現できる精度良い構成則が存在しないことが挙げられ、この構成則の開発が早期に望まれるところである。よって厳密に言えば、精度良い3次元構成則を用いなければ、有限要素解析により押抜きせん断問題を取り扱うことはできないといえるが、本研究ではRCはりのせん断問題に対して開発された非線形有限要素プログラムの平面応力構成則を、軸対称構成則へ拡張することにより、RCスラブの押抜きせん断破壊性状を解析的に評価する事を目的とし、軸対称非線形有限要素プログラムの開発を行うものである。

2. 有限要素プログラムの概要

RCはりのせん断問題に対して開発された2次元の非線形有限要素プログラム⁽¹⁾は、鉄筋とコンクリートの構成則を重ね合わせた鉄筋コンクリート板要素を組み立てることにより解析を行う。

この、鉄筋コンクリート板要素⁽²⁾は、ひびわれと鉄筋とを含んだ有限の領域を連続体として考える分散ひびわれモデルで表現されている。この鉄筋コンクリート板要素は、ひびわれ発生前のコンクリートの構成則として、弾塑性破壊モデルに基づいた平面応力構成則を採用している。また、ひびわれたコンクリートの構成則は、ひびわれ面に対し、引張剛性モデル、圧縮剛性モデル、及びせん断剛性モデルを組み合わせたものであり、これにコンクリート中の鉄筋の引張剛性モデルを重ね合わせたものである。

本研究では、以上の様なRCはりの2次元有限要素解析プログラムを、3次元の軸対称RCスラブに適用できるように拡張するため次章のように鉄筋コンクリート板要素モデルに修正を加えた。

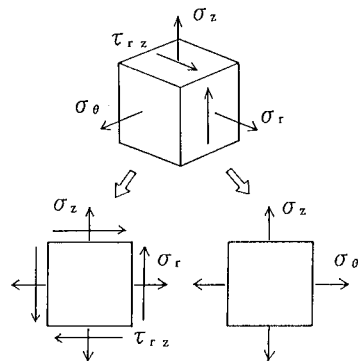


図-1 座標系

3. 鉄筋コンクリート板要素モデルの修正

3.1 基本仮定

基準座標は、高さ方向(z 方向)、半径方向(r 方向)、周方向(θ 方向)の3つの軸を取る。よって各点での応力は、 σ_z 、 σ_r 、 σ_θ の3成分が存在する。この3軸応力に対する構成則として、

A Study on shear Strength of RC Slabs with Nonlinear Finite Element Analysis.

By Hiroaki Kazeno, Yasuhiko Satou, Tamon Ueda and Yoshuo Kakuta

本研究では、図-1に示すように $z-r$ 面と $z-\theta$ 面の2組の平面応力面を組み合わせることにより、軸対称応力状態を表現する。

3.2 ひびわれ発生前の軸対称構成則

ひびわれ発生前の構成則は、基本仮定に基づいて図-1のように3軸状態を2組の平面応力状態に分け、それぞれに平面応力状態における等価応力-等価ひずみ関係(式-1)を適用することにより算出される。

$$S = E_0 K_0 (E - E_P) \cdots \cdots (\text{式-1})$$

(ここで、 S :等価応力、 E :等価全ひずみ、 E_P :等価塑性ひずみ、 E_0 :初期弾性係数、 K_0 :破壊パラメーター)。

3.3 ひびわれ発生基準

コンクリートは、ひびわれの発生により著しい非線形性を示すため、ひびわれの発生基準は解析上、重要な問題の1つである。

本研究においては図-2に示すように、発生するひびわれを2種類に仮定した。1つは、 $z-r$ 面に直交する周方向のひびわれで、これは任意の角度を取る。もう1つは、 $z-\theta$ 面に直交する半径方向のひびわれで、これは z 軸に平行な角度を取るものとする。

それぞれのひびわれの発生基準は、2つの面について、それぞれ2軸応力下のひびわれ発生基準を適用する。

3.4 ひびわれ発生後の軸対称構成則

いずれか1つのひびわれのみが発生した場合、ひびわれに垂直な方向(X 方向)の応力は、引張剛性モデルとせん断剛性モデルを重ね合わせて算定する。また、ひびわれに平行な方向(Y 方向)については、ひびわっていないコンクリートの2次元問題としてとらえ、平面応力構成則より応力を算定する(図-3)。

また、2種類のひびわれが同時に発生した場合、 θ 方向、 X 方向の応力については、引張剛性モデルを用いて応力を算定し、 Y 方向は圧縮剛性モデル適用する(図-4)。

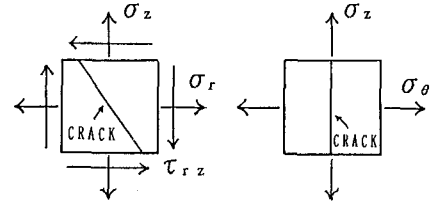
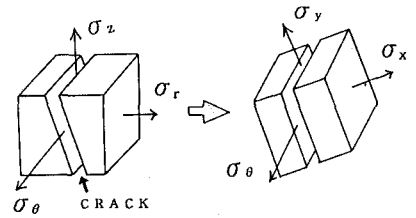
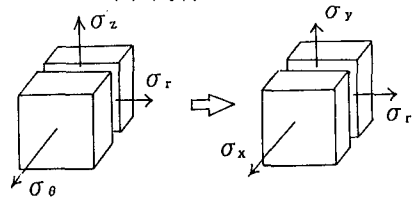


図-2 ひびわれの仮定



(a) 周方向のひびわれ



(b) 半径方向のひびわれ

図-3 ひびわれ発生後のモデル(1)

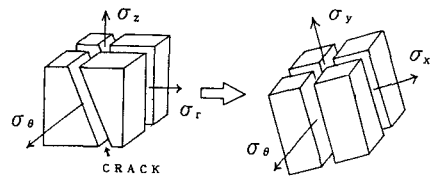


図-4 ひびわれ発生後のモデル(2)

表-1 供試体諸元

補強筋の種類	コンクリート強度 (MPa)	補強筋比 (%)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)
鉄筋 (焼入れ加工)	36.2	1.54	142	931	569
CFRP (炭素繊維)	32.3	1.48	121	1105	—
AFRP (アラミド繊維)	30.4	1.03	64	1225	—

4. 実験結果との比較

4.1 実験概要

実験を行った供試体の諸元を表-1に示す。実験供試体の形状は、全長1600mm、スパン長1000mm、スラブ厚100mm、の円形

スラブである⁽³⁾。補強筋は、直交2方向配筋としており、有効厚は2方向の平均で75mmとしている。載荷は、スラブ中央点に直径200mmの円形鋼板を介して静的単調載荷を加えた。支承は鋼性の円形リングを用い単純支持としている。

4.2 解析概要

本解析における要素分割を図-5に示す。図に示すように鋼板要素とコンクリート要素の境界には接合要素を入れている。接合要素は、r方向とz方向の応力のみを伝え、r方向の応力は鋼材とコンクリートの間の最大摩擦力以下とする。また、z方向のひずみが引張ひずみとなったときは、応力の伝達を行わないモデルとした。載荷は、鋼材要素の1点に強制変位を加えた。また補強筋については、半径方向の補強筋比と周方向の補強筋比は同一の補強筋比を持つものとして解析を行った。

4.3 結果の比較

本解析プログラムの妥当性を評価するために、ここでは荷重-変位曲線及び補強筋の荷重-応力曲線の比較を行う。

図-6、図-7及び図-8はそれぞれ、補強筋に鉄筋（焼き入れ加工）、CFRP（炭素繊維）及びAFRP（アラミド繊維）を用いた場合のスパン中央部の荷重-変位曲線を示したものである。また、図-9、図-10及び図-11はそれぞれ、鉄筋とCFRPとAFRPを用いた場合のスパン中央部での半径方向の補強筋の荷重-応力の関係を示したものである。これらの結果をみると、どちらも補強筋の弾性係数が大きい場合は解析結果は実験結果を概ね捉えていると思われるが、

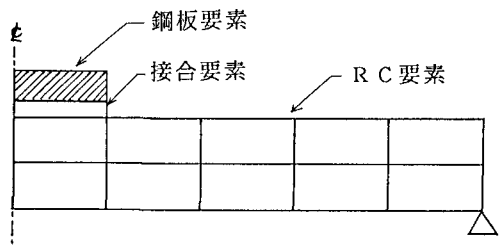


図-5 要素分割

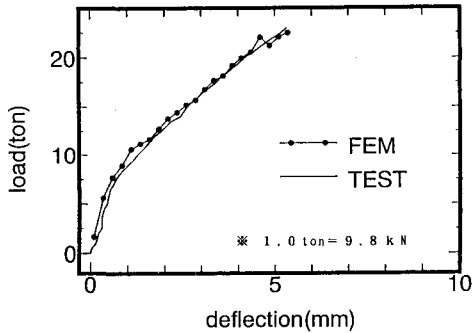


図-6 荷重-変位（鉄筋）

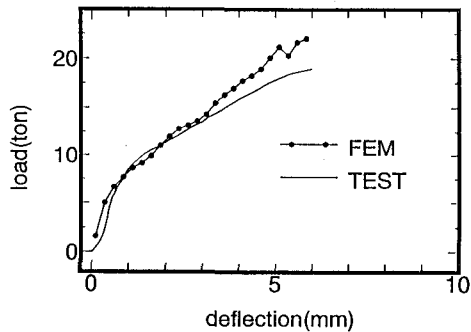


図-7 荷重-変位（CFRP）

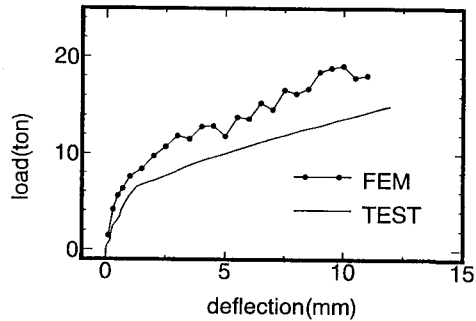


図-8 荷重-変位（AFRP）

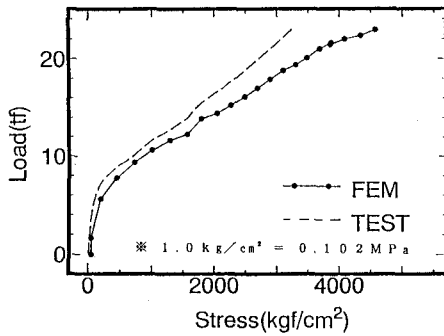


図-9 主筋の荷重-応力 (鉄筋)

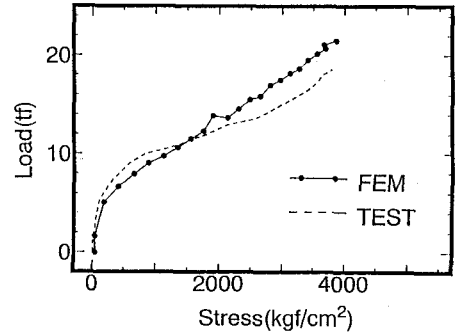


図-10 主筋の荷重-応力 (CFRP)

弾性係数の大きさの差異による変位及び補強筋の差異は実験結果の方が有限要素解析の結果より大きくなっている。この原因については、更に検討を進めているところである。

5. まとめ

本論文をまとめると以下になる。

- [1] 補強筋の弾性係数が大きい場合については、荷重-変位曲線、及び補強筋の荷重-応力曲線の有限要素解析結果と実験結果は概ね一致していた。
- [2] 実験結果と同様に、有限要素解析の結果においても、補強筋の弾性係数が小さくなるにつれて、変位及び補強筋の応力は大きくなることが示された。

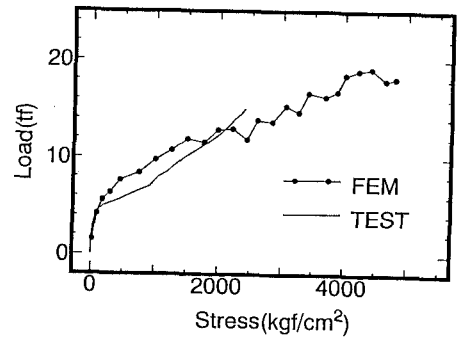


図-11 主筋の荷重-応力 (AFRP)

参考文献

- (1) 岡村 甫・前川宏一：『鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則』
技報堂出版 1991年 5月
- (2) フス パンタートン：『鉄筋コンクリート梁におけるせん断抵抗機構の有限要素解析』
東京大学大学院学位論文 1991年 3月
- (3) 出雲 淳一：『正負繰り返し載荷を受ける鉄筋コンクリート要素の解析モデルとその評価』
東京大学大学院学位論文
- (4) 佐藤靖彦・上田多門・角田与史雄：『連続繊維補強材を用いたRCスラブの押抜きせん断強度に与える補強材剛性の影響について』 コンクリート工学年次報告論文集 Vol.14 NO.2 1992年