

日本大学理工学部 正員 色部 誠

東芝(株)日本原子力事業部 正員 平本 誠

日本大学理工学部

黒崎 亮一

1) まえがき 鉄筋コンクリート構造物の破壊予測は構造工学上重要な研究テーマではあるが、コンクリート内での引張りひび割れの発生と伝播、圧壊により生ずる分離面の発達、ひび割れ面におけるせん断力の伝達、鉄筋とコンクリートの間での付着すべりの条件、ひび割れを跨ぐ鉄筋のだば作用など不明の問題が数多く存在する。ここでは、鉄筋コンクリート構造物として最も単純な長方形断面のはりを取り上げ、鉄筋コンクリートはりにおけるひび割れの発生、発達の順序および発達方向の予測法を提案し、それに基づく解析結果2例を報告する。解析は有限要素法によっている。

2) 局部破壊の発生と最大ポテンシャルエネルギー解放率 境界 s に外荷重 T_i と単位容積に物体力 F_i との作用を受ける、初期ひび割れを有する鉄筋コンクリート構造物を考える。現在の応力、ひずみ、変位、の状態をそれぞれ $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}, u_{ij}$ とする。荷重、物体力の増加により T_i が T_i に、 F_i が F_i に変化したとき、初期ひび割れ状態が変化し、その結果、応力、ひずみ、変位の状態が $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}, u_{ij}$ に変化したものとする。初期状態における構造物の全ポテンシャルエネルギー U^0 は次式により得られる。

$$U^0 = \int_V u(\epsilon_{ij}^0) dv - \int_S T_i^0 u_i ds - \int_V F_i^0 u_i dv \quad (1)$$

ここで $u(\epsilon_{ij})$ はひずみエネルギー密度であり、材料が線型弾性なら $u(\epsilon_{ij}) = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij}$ である。第2の状態における全ポテンシャルエネルギーを U とすれば、

$$U = \int_V u(\epsilon_{ij}) dv - \int_S T_i u_i ds - \int_V F_i u_i dv \quad (2)$$

である。ここで、 ΔV はひび割れの連結あるいは圧壊により生じた構造物(コンクリート部分)の体積変化である。引張によりひび割れが伸長するだけであれば、 ΔV は無視することができよう。材料が降伏し、塑性状態にあれば、 $u(\epsilon_{ij})$ に対しては材料の非線型性を考慮する必要がある。

初期状態から第2の状態に移ったとき、ひび割れの発生または伸長により ΔQ の大きさの自由面を生じたとすれば、全ポテンシャルエネルギー解放率 G は近似的に次式によってえられる。

$$G = (U - U^0) / \Delta Q = \Delta U / \Delta Q \quad (3)$$

2個所以上に等しくひび割れ発生、発達の危険性のある場合を考えよう。ひび割れの危険性は、応力またはひずみによるコンクリートの破壊基準によって判定できる。いずれが最も高い危険度を持つか、すなわちどの位置の破壊が最大の可能性を持つかの判定には、全ポテンシャルエネルギー解放率を比較すればよい。局部破壊の直前では構造物は不安定な状態にあるが、その直後では一時的に最も安定な状態が出現する。したがって、ある大きさの荷重増加に対し、比較し得る仮想のひび割れ発生、発達の様式がいくつかあるとすれば、起り得るべき様式に対する G は他の様式のものに比し大きい。よって、仮想ひび割れに対する G を比較し、そのうちの最大値によってひび割れの発生順序、伸長方向を推定し得る。

3) コンクリートの破壊条件と降伏条件 本題では、コンクリートは二軸応力状態にある。用いた二軸応力下のコンクリートの破壊条件と降伏条件を Fig. 1 に示す。引張応力を含む応力状態に対しては破壊条件は直線で表され、二軸圧縮の応力状態に対しては破壊条件は卵形をなすものとする。 f_c は一軸圧縮強度であり、 f_t は一軸引張強度である。曲線式各項の係数 a, b, c は実験曲線との対応によりきめればよい。破壊曲

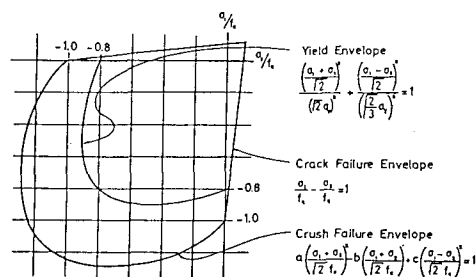


Fig.1 Biaxial Yield and Failure Envelopes

線の内側に示す円曲線は降伏条件を表す。二軸圧縮における降伏条件を定める実験は乏しいが、これをだ円によって表し得るものとした。 σ_y は一軸圧縮による降伏点応力である。圧縮を受けるコンクリートの降伏点 σ_y についての定義はさまざまであるが、ここでは $\sigma_y/f_c = 0.8$ とした。

4) 付着すべりの条件 鉄筋コンクリートはりにおいては、ひび割れは、引張側自由表面から面にはば直交して発生し、中立軸に向かって伸長する。ひび割れが鉄筋を横切って伸長する場合には、ひび割れによってコンクリートには引張方向に収縮が起るのであるから、ひび割れの近傍の鉄筋周面に付着すべりが起ると考えねばならない。付着すべりを鉄筋に沿って生ずるコンクリートのせん断破壊と見なし、遠藤、青柳 が示したコンクリート一面せん断強さに関する試験結果である式(4)を付着すべりの条件とした。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau}{\sqrt{f_c \cdot f_t}} &= -0.0714 \cdot \left(\frac{\sigma_n}{f_c} \right)^2 - 0.475 \cdot \left(\frac{\sigma_n}{f_c} \right) + 0.469 & (\sigma_n < 0) \\ \frac{\tau}{\sqrt{f_c \cdot f_t}} &= -0.782 \cdot \left(\frac{\sigma_n}{f_t} \right) + 0.469 & (\sigma_n > 0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで τ はコンクリート要素の鉄筋軸方向せん断応力、 σ_n はそれに直交する垂直応力である。 f_c, f_t は、コンクリートの一軸強度 f_c, f_t に減少係数 ι を乗じたものである。以下の解析では $\iota=0.8$ とした。

5) コンクリートおよび鉄筋の応力ひずみ関係 はりの有限要素解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の応力ひずみ関係を Fig. 2 に示す。コンクリートは硬化する材料と見なし、その応力ひずみ関係を八面体せん断応力対同せん断ひずみにより表した。 τ_{oct} とは降伏点における八面体せん断応力である。 ν_0 は弾性状態にあるコンクリートのポアソン比であり、 $\nu_0=0.2$ とした。

6) 有限要素解析 対称二点荷重を受けるはりを平面応力問題として解いた。引張鉄筋比は2.11%、圧縮側鉄筋量もこれと同じとした。解析の対象とした一

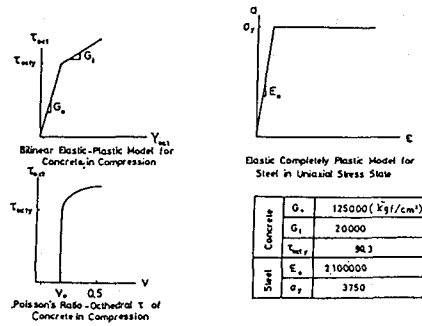


Fig.2 Material Models and Constants

例は Fig. 3 の要素分割図に見られるはり (はり A)、もう一つの例はこれに折り曲げ鉄筋を $1/4$ 点に挿入したはり B である。ある要素の応力状態が破壊条件に到達すれば、その要素と隣接要素の間にひび割れが最大主応力にはば直交して発達する。正しいひび割れ方向は、全ポテンシャルエネルギー解放率を比較してきめられる。そのため、ひび割れ発生、発達の始点にあたる接点を二重接点とし、それを共有する要素の境界を二重境界線とする。解の誘導は全荷重を作用させ、逐次破壊の進行を判定しつつ行なった。塑性の構成法則は全ひずみ理論によっている。Fig. 4 はひび割れと付着すべりの発達状況を示す。詳細は、講演会において報告する。

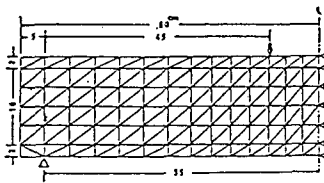
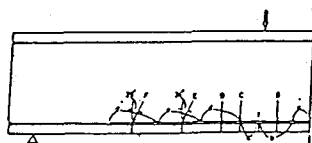


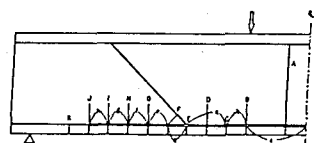
Fig.3 Fundamental Mesh for F.E. Analysis

(Type A)



Crack	Sequence	Bond Slip
A	2 5 12	a
B	5 7	b
C	3	c
D	8 9	d
E	4 10	e
F	11 13	f
	14 15	

Fig.4-a Crack and Bond Slip Advance (Type A)



Crack	Sequence	Bond Slip
A	2 5 7 10 11	a
B	3 8	b
C	4	c
D	6 10	d
E	9	e
F	10 11	f
G	11 12	g
H	12 13	h
I	13 14	
J	14 15	
K	15	

Fig.4-b Crack and Bond Slip Advance (Type B)