

論文

[2070] 梁のせん断ひびわれ

正会員○寺島善宏（東京都立大学大学院）

正会員 杉本 優（日興証券）

正会員 長嶋文雄（東京都立大学工学部）

正会員 山崎 淳（東京都立大学工学部）

1. まえがき

ひびわれの進展を数値解析によって追跡しようとする際、進展の基準に対する定説は確立されていないようである。更に、せん断力および曲げモーメントの変化する応力場のひびわれ進展を問題とするときには研究の余地は多いと思われる。

そこで、本報告では、単純支持された梁に2点集中荷重が載荷された状態を想定し、せん断スパン中央付近から発生した斜めひびわれの進展を数値解析によって追跡することを試みる。

2. 解析モデル

I) 図-1に示す様に単純支持の梁に2点集中荷重が載荷された場合を想定する。既に曲げひびわれが、梁せいの3分の1、更に斜めひびわれが、水平軸と45度の傾きをもって梁せいの約60%まで発生した状態から解析を始める。

II) 本報告では、ひびわれ部分の骨材の噛み合わせ作用は考慮しない。従って、ひびわれの開きの大小は解析結果に影響しない。

III) 斜めひびわれが発生した状態では、既にスパン中央付近に曲げひびわれが発生しているはずであるが、本報告では、スパン中央付近は主鉄筋により釣合が保たれていると考えてスパン中央付近のひびわれはモデル化しない。

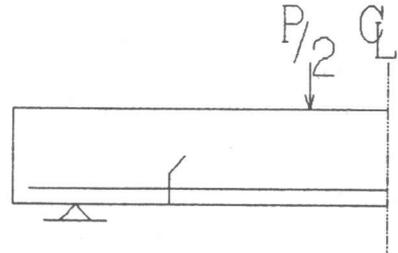


図-1 解析モデル

3. 研究目的

本報告では、梁部材のせん断破壊に至るまでの過程を数値解析によってシミュレーションしようとするものではなく、せん断力および曲げモーメントが変化する応力場を進展するひびわれの追跡を試み、その際に問題となる点を取り上げ考察しようとするものである。

今回の報告で問題とした点は以下の3点である。

I) ひびわれを進展させる際のひびわれ増加長さについて解析によって考察する。

II) 解析モデルに示したように、本報告で問題にする応力状態は曲げとせん断の影響を受ける応力状態である。このような応力状態がひびわれを進展させる際にどのように扱えるのかを解析によって考察する。

III) 曲げひびわれ部分におけるコンクリートと主鉄筋の付着の切れている度合いがひびわれ先端の挙動（進展）に及ぼす影響を考察する。

4. ひびわれの進展予測

ひびわれ進展の予測に用いる理論はErdoganとSihによる $(\sigma_e)_{max}$ 理論¹⁾である。

4. 1 $(\sigma_e)_{max}$ 理論

(σ_θ)_{max}理論は

- (a) ひびわれ進展は、ひびわれ先端で開始する。
- (b) ひびわれは、 $\tau_{r\theta} = 0$ となるような主応力と直角方向へ進展する。
- (c) ひびわれ進展は、(σ_θ)_{max}が物質固有の臨界値 K_{Ic} に達したとき開始する。

ということから成り立つ。(図-2)

(b)より導きだせる式が(1)式であり、(c)より導きだせる式が(2)式である。(1)式を満たす θ の方向へひびわれは進展する可能性をもち、更に(2)式の K^* が1を上回れば、ひびわれは θ の方向に進展を開始する。

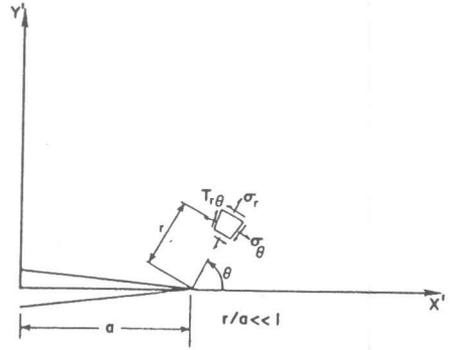


図-2 ひびわれ先端の応力成分

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad (1)$$

K_I, K_{II} ; 応力拡大係数

K^* ; 有効応力拡大係数

K_{Ic} ; 限界応力拡大係数

$$K^* = 1$$

$$K^* = \cos \frac{\theta}{2} \left[\frac{K_I}{K_{Ic}} \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} \frac{K_{II}}{K_{Ic}} \sin \theta \right] \quad (2)$$

4.2 応力拡大係数; Kの計算

き裂先端に接する要素に8節点要素を用い、中間節点をき裂先端寄りの辺長の4分の1の位置に移動することにより、特異性を表現する。²⁾ 図-3(a)に示すように節点C、節点Eのき裂先端からの距離を $r_{AC} (= r_{AE})$ 、節点B節点Dのき裂先端からの距離を $r_{AB} (= r_{AD})$ とし、垂直方向変位を V_B, V_C, V_D, V_E 、水平方向変位を U_B, U_C, U_D, U_E とし次式より、各節点に対するモードI、モードIIの応力拡大係数 K_I, K_{II} が求められる。

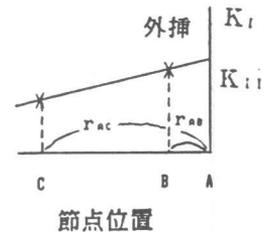
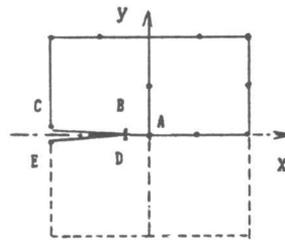


図-3 き裂先端の要素の配置と応力拡大係数の外挿

$$(K_I)_C = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AC}}} \cdot \frac{E}{8} \cdot (v_C - v_E) \quad (K_I)_B = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AB}}} \cdot \frac{E}{8} \cdot (v_B - v_D) \quad (3)$$

$$(K_{II})_C = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AC}}} \cdot \frac{E}{8} \cdot (u_C - u_E) \quad (K_{II})_B = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AB}}} \cdot \frac{E}{8} \cdot (u_B - u_D) \quad (4)$$

こうして得られる $(K_I)_c$, $(K_I)_B$ を用いて図-3 (b) のように外挿して K_I を求めることができる。 K_{II} についても同様である。

4.3 ひびわれ進行予測の手順

ひびわれ進展の予測は、4.1の $(\sigma)_{max}$ 理論に従い行いが、その手順を以下に示す。³⁾

- (a) ひびわれ先端位置での応力拡大係数 K_I , K_{II} を計算する。
- (b) K_I , K_{II} を (1) 式へ代入してひびわれの進行方向を求め、(2) 式によりひびわれの進展を評価する。ひびわれが進展するならば (c) 段階へ進み、進展しないならば (d) 段階へ進む。
- (c) ひびわれを進展させ、メッシュを作成し直す。(a) 段階から (c) 段階まで繰り返す。
- (d) ひびわれが進展しないならば (2) 式により、ひびわれ進展が予測されるまで荷重を増加させる。(c) 段階へもどる。

5 解析結果

5.1 解析対象とする部材断面形状、配筋および材料

計算例に用いる部材形状は長方形断面であり、幅 $b = 15 \text{ cm}$ 、有効高さ $d = 25 \text{ cm}$ 、スパン $L = 200 \text{ cm}$ である。鉄筋比は $3.2 (\%)$ とする。せん断スパン比は 3.0 とする。

曲げ破壊に先行してせん断破壊するようにする。

材料特性として、コンクリートの設計基準強度を 350 kg/cm^2 、鉄筋の降伏点を $3,000 \text{ kg/cm}^2$ とする。コンクリート、鉄筋のヤング率はそれぞれ $300,000 \text{ kg/cm}^2$ 、 $2,100,000 \text{ kg/cm}^2$ とする。ポアソン比はそれぞれ 0.17 , 0.3 とする。

5.2 解析に用いる初期荷重; P

解析に用いる荷重はコンクリート標準示方書の棒部材の設計せん断耐力式⁴⁾より求めた部材のコンクリート部が負担する設計せん断耐力を斜めひびわれが発生する時の荷重と考えて用いる。なお、そのとき部材係数 γ は安全率を考慮しない意味で 1.0 とする。

5.3 解析に用いる限界応力拡大係数; K_{Ic}

本報告ではAE (アコースティックエミッション) 計測により求めた値の一例より K_{Ic} を決定する。⁵⁾

$$\text{コンクリートの限界応力拡大係数} \quad K_{Ic} = 66 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3/2}$$

5.4 解析結果

解析-1

ひびわれを進展させる際のひびわれ増加長さを一律 3.5 cm として解析を行ってみた。その結果、STEP 3で K_{II} の値は負の値になった。STEP 2では正の値であったのでSTEP 2

からSTEP 3へひびわれを進展させた結果 K_{II} の符号が逆転したことになった。同様に、STEP 3からSTEP 4へ進展させた結果 K_{II} の符号は今度は逆に負から正へ逆転した(表-1(a))。図-4に示すように、ひびわれはあたかも振動しながら進展するかのよう結果になった。

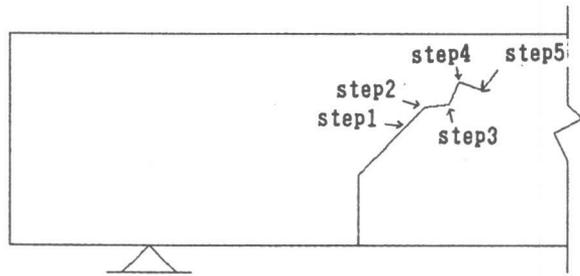


図-4 解析-1の結果

解析-2

(I) ひびわれ増加長さ

解析-2では、解析-1の結果を踏まえてひびわれ増加長さを随時検討しながら解析を進めた。すなわち、符号の逆転が起こった時点でひびわれ増加長さを短くして解析を行った。

その結果、符号の逆転が起こるひびわれ増加長さの間には符号の逆転を起こさずにひびわれを進展させる位置があることが分かった。解析-1と解析-2の結果より、解析-1の符号の逆転はひびわれ増加長さが不適切であるために起こるエラーの表示であると考えられる。(図-5、表-1(b))

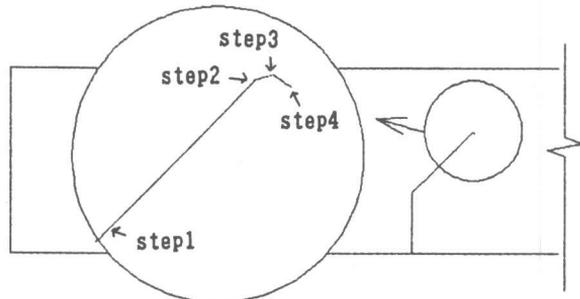
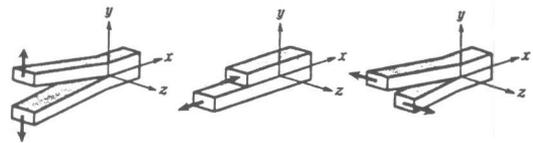


図-5 解析-2の結果

(II) 変形モード

一般にき裂先端近傍の変形はモードI(引っ張り型)、モードII(面内せん断型)、モードIII(面外せん断型)と呼ばれる三つの独立な変形様式の和として与えられる。(図-6(a))

STEP 1からSTEP 4までのひびわれ進行に寄与する引っ張り型とせん断の割合を示すのが図-6(b)である。STEP 1からSTEP 3へと進むにつれて K_I/K_{IC} の割合が減少し、 K_{II}/K_{IC} の割合が増加しているのが分かる。これは、引っ張り型から引っ張り型とせん断型の混合型へと変形様式が変化したことを意味すると思われる。



モードI(開口型) モードII(面内せん断型) モードIII(面外せん断型)

図-6(a) 変形様式²⁾

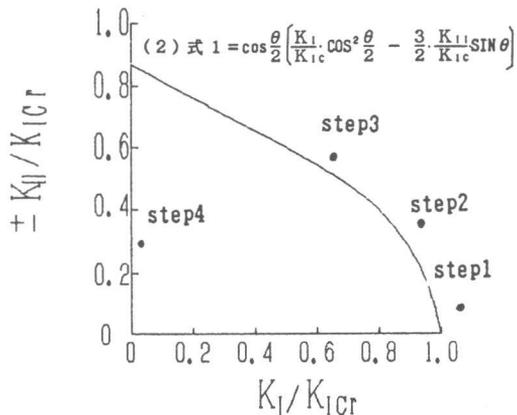


図-6(b) 変形モードの変化

解析-3

ひびわれ部分の主鉄筋の付着

ひびわれ部分における付着の切れたことの効果の一部を表現するために、図-7の様にひびわれ部分の主鉄筋のヤング率を変化させて表現した。ひびわれによって鉄筋の付着は鉄筋径の10倍位切れると考えて、この解析ではひびわれ部分の主鉄筋要素⑦のヤング率を10分の1にして表現した。

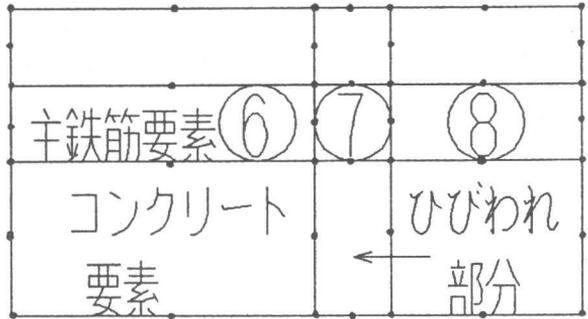


図-7 鉄筋の付着

その結果、図-8に示すように、解析-3は解析-2と比べて K_{II} に対する K_{II} の値が小さく、その為、解析-2とはひびわれの進展方向 θ が大きく違っている。

(表-1)

STEP5で主鉄筋要素⑦ヤング率を15分の1にした結果と5分の1にした結果の進展方向はそれぞれ $\theta = -33$ 度 $\theta = -40$ 度であった。

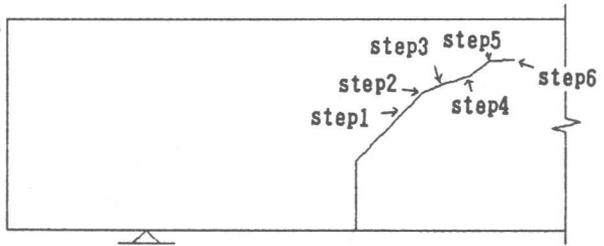


図-8 解析-3の進展結果

ひびわれ部分の付着の切れたことの効果、特にこの解析で示した様に付着が切れることによる、鉄筋がひびわれの両側を引きつける力の剛性 (AE/L) の低下はひびわれの進展方向に大きな影響をもつことが分かった。

表-1 応力拡大係数に関する諸値

(a) 解析-1

(c) 解析-3

ST	K_I	K_{II}	K^*	θ	ST	K_I	K_{II}	K^*	θ
1	77	1	1.17	-2	1	117	-1.7	1.76	2
2	67	28	1.23	-36	2	105	21	1.68	-21
3	48	-39	1.16	50	3	93	6.2	1.41	-7
4	-29	77	1.13	-78	4	94	-17	1.49	19
5	-0.3	-61	1.07	71	5	67	26	1.19	-34
(b) 解析-2					6	64	-40	1.35	45
ST	K_I	K_{II}	K^*	θ					
1	76	6.2	1.16	-9					
2	69	28	1.25	-35					
3	51	40	1.20	-40					
4	2.5	20	0.36	-68					

6. 結論

6. 1 ひびわれを進展させた結果、応力拡大係数 K の符号が逆転した時にはその時のひびわれ増加長さが適切であるかどうかを確認するために、ひびわれ増加長さを変化させて解析を行う必要があることが分かった。

6. 2 斜めひびわれ発生当初では、変形様式は線形弾性破壊力学における引っ張り型であるのに対し、斜めひびわれが進展するに従って引っ張り型とせん断型の混合様式 (Mixed Mode) の変形様式となることが分かった。

6. 3 ひびわれによって鉄筋の付着が切れることは、ひびわれの進展方向を大きく左右することが分かった。したがって、ひびわれの進展を追跡する際には付着の切れることによる効果を正しく盛り込まなければならないと思われる。

7. 今後の課題

現在、応力拡大係数のせん断モードの限界応力拡大係数 K_{IIC} なるものは実験から求めるのが困難であるために、変形様式が引っ張り型とせん断型の混合様式であっても引っ張り型の限界応力拡大係数 K_{IC} で代用しているのが現状である。しかし、今回の解析のように、せん断と曲げの影響を受ける応力状態では、変形様式が混合型となる。その場合にはひびわれの進展基準にコンクリートのせん断と引っ張りに対する強さの違いなどを考慮してやる必要があると思われる。

参考文献

- 1) Erdogan, F. and Sih, G.C. : On The Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverses Shear, ASME Journal of Basic Engineering, Vol. 85, 1963, pp. 519-527
- 2) 鷲津久一郎、宮本博、山田嘉昭、山本善之、川井忠彦：有限要素ハンドブックII応用編 1983, pp. 468-470
- 3) A.R.Ingraffea and V.Saouma: Numerical Modeling of Discrete Crack Propagation in Reinforced and Plain Concrete, G.C.Sih and A.Ditommaso, Fracture Mechanics of Concrete, Martinus Nijhoff Publishers, 1985, pp, 171-225
- 4) 土木学会編：コンクリート標準示方書、pp50-51
- 5) 丹波義次、大津政康：アコースティックエミッションの特性と理論、1988、pp. 100-101