

論文

[2132] 鉄筋コンクリート梁中のひびわれ進行

正会員 ○ 寺島善宏（東京都立大学大学院）  
 正会員 平尾哲也（東京都立大学大学院）  
 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. はじめに

1.1 鉄筋コンクリート梁中の進行性のひびわれ

鉄筋コンクリート梁中の進行性のひびわれの顕著な例は、剪断補強のない梁において、剪断の影響によって進行する斜めひびわれがよく知られている。その時の強度の計算としては、設計に用いる目的に対して、土木学会コンクリート標準示方書[1]の場合などでは、広範な実験結果の分析から抽出された影響要因の回帰式で与え、実用上の条件に対してよい精度が得られているが、材料力学的理論にもとづく定量的説明は確立されていない。

1.2 斜めひびわれ形成後の剪断補強のない梁の破壊時の抵抗機構

斜めひびわれとその両端への延長線で梁を分断する作用と見なし、それに対する抵抗は、その分断線上で起こる局地的抵抗要因すなわち下記各項の和とする説が知られている。

- (1) 斜めひびわれ先端より上の部分のコンクリート（圧縮領域）
- (2) 斜めひびわれの下端における主鉄筋のダウエルアクション
- (3) 斜めひびわれ面での骨材の噛み合い

いずれもが定量化が確立されておらず、この考え方は設計式には用いられるには至っていない。プレストレスがある場合には、(1)の抵抗の増加で考慮される。

1.3 剪断に対する設計式で想定された耐荷機構と疑問点

国内国外とも設計基準[2]において、梁の耐力 $V$ を、剪断補強鉄筋の耐力 $V_s$ と、剪断補強鉄筋を取り除いた梁の耐力 $V_c$ の和と考える方法が用いられている。すなわち、

$$V = V_c + V_s \quad \dots \dots \dots (1)$$

この式の意味するところは、剪断補強鉄筋で補強された梁においても、剪断補強鉄筋を取り除いた梁と同じ耐力が発揮されるとする考え方であって、材料力学的理論が不明である。就中、剪断補強鉄筋の量が少ない場合には、実際の耐力は、(1)式で算出されるより相当高くなる場合が知られている。すなわち、剪断補強鉄筋で補強された梁においては、(1)式を適用するならば、剪断補強の割合によって、 $V_c$ が変化すると考えるほうがより現象に即している場合があるように思われる。

1.4 剪断に対する補強方法

剪断補強鉄筋としてのスターラップ等によるもの、プレストレスによるもの、鋼繊維補強によるものがある。状況に応じてより望ましい性能を得るためプレストレスを従来の水準より減ずる工法(PRC)の建設も行われ始めている。実務設計においても、強度の統一的解釈が望まれる。

1.5 本研究での着眼点

本研究では、1.2項で引用した説におけるような複数の抵抗要因が同時に発生する場合の和と見なすのではなく、連鎖的に進行するのではないかとの着眼に立ち、その進行の開始の基準として

斜めひびわれの先端部の挙動に着目する。現象の解明とともに、実際構造物において、プレストレス、複合材料、合成構造など補強方法の多様化が進む構造の強度評価の材料力学的理論構成の基礎の一環を目指す。

## 2. 検討方法

### 2.1 手法

既往の多くの実験、および解析[3]により、斜めひびわれの進行により破壊すると思われる構造の梁をひとつ選び、これに、終局限界状態に至る少し以前のひびわれ状態を設定し、これに種々の補強方法を行った場合、また、一方、ひびわれを進行させる要因と考えられる斜めひびわれの下端をつなぐ部分の剛性を変化させた場合につき、ひびわれ進行基準との対比により、以後のひびわれ進行への潜在可能性を推定しようとするものである。

### 2.2 基本の梁

選定した梁は、既往の計算方法で斜めひびわれが進行性となることが推論されたものである[3]。矩形断面単鉄筋梁の断面 $15\text{cm} \times 30\text{cm}$ 、有効高さ $25\text{cm}$ 、鉄筋比 $3.5\%$ 、鉄筋断面積は $12\text{cm}^2$ である。

2点集中荷重で、剪断力は $4,600\text{kg}$ 、土木学会示方書による終局強度 $V_c$ に等しく、平均剪断応力では $12\text{kg}/\text{cm}^2$ となる値を用いた。単純スパン $200\text{cm}$ 、剪断スパン $75\text{cm}$ である。曲げによる主鉄筋の応力は、荷重直下、斜めひびわれ先端直下、斜めひびわれ下端でそれぞれ $1,329\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $749\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $249\text{kg}/\text{cm}^2$ となっている。

### 2.3 有限要素モデルおよび着目する斜めひびわれ

- 図1に示すような斜めひびわれの発達状態におけるひびわれ先端の挙動に着目した。
- 主鉄筋は斜めひびわれの兩岸をつなぐ要素で表現した。
- スターラップは1本の鋼材として、斜めひびわれの下端と梁の上端で固定した。

### 2.4 応力拡大係数 $K_I, K_{II}$ の計算方法

全体を2次元8節点要素によってメッシュ分割し、特に、ひびわれ先端周りの要素は、図2(a)の様に中間節点をひびわれ先端寄り $1/4$ 点に移動させる方法[5]を用いた。

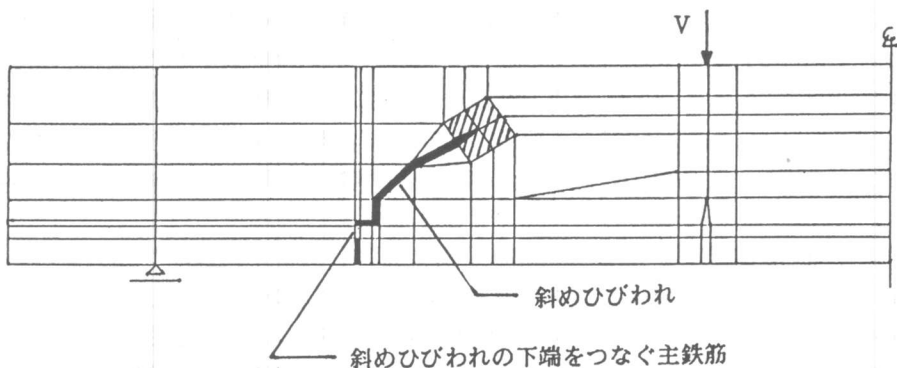


図1 基本梁

B, C点におけるモード I およびモード II の応力拡大係数  $K_I$ 、 $K_{II}$  はそれぞれ (2)、(3) 式より求められる。こうして得られる  $(K_I)_B$ 、 $(K_I)_C$  を用いて図 2(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。ここで、 $v$  はひびわれ軸直角方向変位、 $u$  はひびわれ軸平行方向変位である。これらの方法は、既報 [3] と同様である。E: 弾性係数

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

$$(K_{II})_C = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AC}}} \cdot \frac{E}{8} \cdot (u_C - u_E) \quad (K_{II})_B = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AB}}} \cdot \frac{E}{8} \cdot (u_B - u_D) \quad (3)$$

### 2.5 ひびわれ進行に關与する主鉄筋に関する要因

構造物モデルとひびわれ進行基準に関する設定においては、ひびわれ進行を促進する要因は、斜めひびわれの兩岸の相対変位であると思われる。

斜めひびわれの下端における相対変位の影響要因は主鉄筋の場合は、梁の軸と平行な方向の相対変位に及ぼす要因として、主鉄筋の鉄筋量、付着劣化による引抜け、降伏がある。梁の軸と垂直な方向の相対変位に及ぼす要因には、いわゆるダウエルアクションの低下があるが、今回の構造モデルでは、ひびわれによってコンクリートから剥離した主鉄筋を、コンクリート部分に固定された両端固定梁と見なし、横荷重を受ける梁の横方向変位で表現される。

梁の軸と平行な方向の相対変位に対する抵抗は、主鉄筋が降伏した後は、コンクリートから剥離している長さのうちの降伏領域の長さにもよるが剛性は極度に低下すると思われる。

今回の計算では、この要因に対する感度を把握することを主目的として、主鉄筋部分の剛性を 2 種類に変化させた。I シリーズでは、使用限界状態における場合を表現する意図で、鉄筋が降伏せず、付着剥離長さが鉄筋直径の 5 倍とした場合を想定した剛性とし、II シリーズでは、I シリーズの場合の 1/10 の剛性とした。

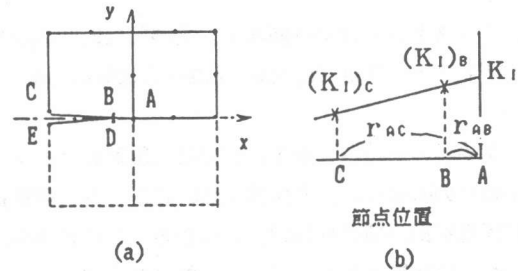


図 2 ひびわれ先端要素の配置と応力拡大係数の外挿

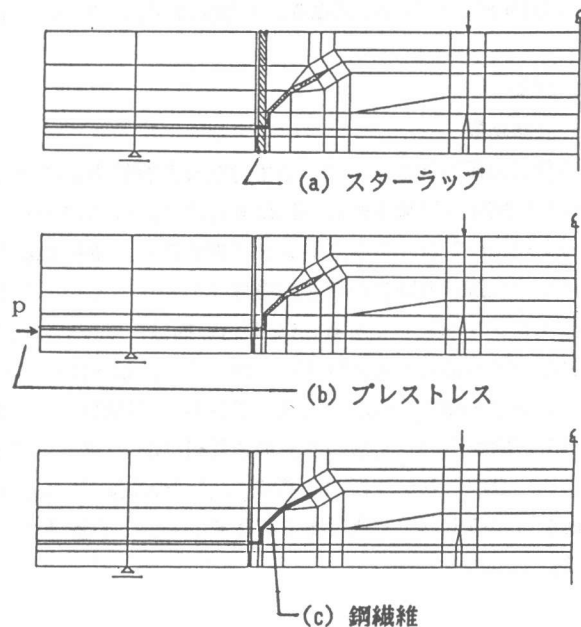


図 3 各種の補強方法

## 2.6 ひびわれ進行に関する主鉄筋以外の要因

前項2.5の斜めひびわれの兩岸の相対変位に関する要因として、スターラップ、プレストレス、鋼繊維を考えた。その解析モデルを図3に示す。

(a) スターラップはその量を、 $V_s = V_o / 2$ 、および $V_s = 2V_o$ 、となるような2種類を想定し、これを1本の鋼材で、斜めひびわれの下端と梁の上端で固定した。1本脚のスターラップとしたときの断面積は、 $1.91\text{cm}^2$ および $7.64\text{cm}^2$ となる。

実際のスターラップはコンクリートと付着により結合されているが、その状況は種々に変化するとと思われること、また、スターラップ結合による近傍の応力状態の変化を避けるのが応力の検討上より目的に適すると考えられたためである。スターラップは付着のない長さが梁高さ30cmとなるが、実際に付着の切れる長さは、想定した寸法の鉄筋では直径の5倍程度、約6cmと考え、軸剛性を5倍して補正した。

(b) プレストレスは主鉄筋線上、梁端部に9,000kgの外力として表現した。平均プレストレスは $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 、下端応力は $60\text{kg}/\text{cm}^2$ となる。

(c) 鋼繊維の体積混入率を0.6%程度と想定した。ランダム配向の有効性を1/6とすれば[4]、斜めひびわれの断面における面積比は0.1%となる。有限要素の厚さをコンクリート断面と同じにし、弾性係数を鋼の値の1/1000、すなわち、ひびわれ部分の要素の弾性係数 $E_{sr}$ を、 $E_{sr} = 2,100\text{kg}/\text{cm}^2$ の等方性物質として表現した。更に鋼繊維の拔出しを考慮して、今回の解析では $E_{sr}$ を更に1/5倍にした場合( $E_{sr} = 420\text{kg}/\text{cm}^2$ )の2種類の解析を行った。斜めひびわれの垂直投影面積( $25\text{cm} \times 15\text{cm} = 375\text{cm}^2$ )における鋼繊維の有効断面積は $0.38\text{cm}^2$ となる。

## 3. 結果

### 3.1 計算結果

11種類の構造物モデルについて行なった有限要素解析結果にもとずいて計算したひびわれ先端の進行に関する諸値を表1、表2にまとめた。2.2項で述べた鉛直荷重に対する値であるが、構造物番号I-2、II-2は、プレストレス荷重のみで、鉛直荷重は加えていない。表1は、ひびわれ下端をつなぐ主鉄筋の剛性が普通の場合(Iシリーズ)、表2は主鉄筋の剛性がIシリーズの1/10の場合(IIシリーズ)である。(1)欄(2)欄は、ひびわれの開き(モードI)および、ずれ(モードII)に対する応力拡大係数( $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1.5}$ )、開きに対する限界応力拡大係数は既報[3]での検討をもとに $66\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1.5}$ 程度を想定している。(3)欄は、ひびわれが、次に進行する角度を現在のひびわれの方向から計ったもので、半時計周りが正(度)、(4)欄は、開きとずれとが共存している場合も含め、ひびわれが進行する基準で、1.0の時進行する。1.0以上の場合、荷重が過大であって、今回解析の荷重以下で進行することを示す。この基準は、既報[3]でも引用したIngraffeaら[5]による。

表1 ひびわれ先端に関する計算結果 Iシリーズ（主鉄筋の剛性が普通の場合）

構造物番号	特徴	(1) K <sub>I</sub>	(2) K <sub>II</sub>	(3) θ	(4) K*
I-1	基本梁	34.0	-4.8	15.5	0.53
I-2	プレストレスのみ	-11.1	24.1	-79.5	0.34
I-3	プレストレス	22.6	18.9	-50.3	0.55
I-4	スターラップ	29.7	-6.5	22.7	0.48
I-4A	スターラップ(4倍)	26.4	-7.7	28.4	0.44
I-5	鋼繊維	14.5	-2.2	16.3	0.23
I-5A	鋼繊維(1/5倍)	27.6	-4.7	18.2	0.43

表2 ひびわれ先端に関する計算結果 IIシリーズ（主鉄筋の剛性がIシリーズの1/10の場合）

構造物番号	特徴	K <sub>I</sub>	K <sub>II</sub>	θ	K*
II-1	基本梁	79.4	-25.5	30.6	1.36
II-2	プレストレスのみ	-45.6	49.0	-88.7	0.54
II-3	プレストレス	34.7	24.0	-46.8	0.77
II-4	スターラップ	45.4	-28.9	45.2	0.97
II-4A	スターラップ(4倍)	32.9	-31.8	52.6	0.87
II-5	鋼繊維	16.2	-9.2	42.8	0.33
II-5A	鋼繊維(1/5倍)	52.9	-19.2	33.2	0.93

$$K^* = \cos \theta \left[ \frac{K_I}{K_{Ic}} \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{K_{II}}{K_{Ic}} \sin \theta \right] \dots \dots \dots (4)$$

3.2 ひびわれ進行の可能性

ひびわれ進行の可能性の程度を構造物相互で比較する根拠として、ひびわれ進行基準のモードI、IIの相互作用線図と計算結果をプロットした図4を用いる。相互作用線図の内側は、進行の可能性が低いことを示す。横軸に近い場合は、ひびわれの開き（モードI）の傾向が強く、縦軸に近い場合は、ずれ（モードII）の傾向を示す。結果の解釈を次節、まとめに記す。

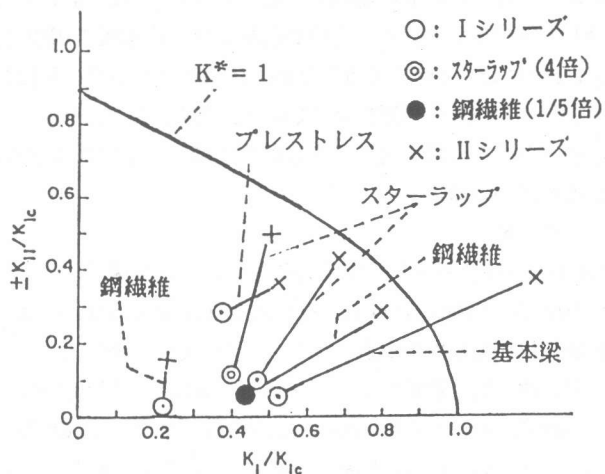


図4 ひびわれ進行の可能性の程度

#### 4. ま と め

本研究は、斜めひびわれ進行の開始基準としてひびわれ先端部の挙動に着目し、ひびわれ進行に関与する各種要因を取り上げ、各要因がひびわれ先端部に及ぼす影響を調べた。図4にもとづき、ひびわれ進行に関して今回の手法の結果を以下に示す。

Iシリーズは、ひびわれによる付着剥離長さが鉄筋直径の5倍を想定した主鉄筋剛性であり、IIシリーズはひびわれ先端の挙動に及ぼすこの要因の感度を把握するためにIシリーズの剛性を更に1/10にしたものである。

プレストレスは、平均プレストレス,  $20\text{kg/cm}^2$ , 下端応力,  $60\text{kg/cm}^2$ , となるように主鉄筋線上、梁端部に外力として表現した。

スターラップはその量を,  $V_s = V_c / 2$ , およびその4倍の  $V_s = 2V_c$ , となるような2種類を想定している。

ひびわれ部分の鋼繊維コンクリートは、等方性物質としてモデル化しており、体積混入率は0.6%程度を想定している。鋼繊維の拔出しを全く考慮していない場合と、考慮して弾性係数を1/5倍した場合の解析を行った。

- (1) 斜めひびわれ進行の傾向は、斜めひびわれの下端を繋ぐ主鉄筋の剛性の低下で顕著に増大する。
- (2) 基本梁は、Iシリーズの条件ではひびわれは進展しないが、主鉄筋の剛性が低下するIIシリーズでは、進行基準を40%超える。横軸に近いことから、ひびわれの開きが支配的である。
- (3) スターラップを加えることにより、進行の可能性は基本梁より減少しており、スターラップにより、コンクリート部分の抵抗を増すことを示すと考えられる。
- (4) スターラップを4倍に増量した効果は、Iシリーズの場合はさほど現れていないが、IIシリーズでは開きを抑える効果が示されている。
- (5) プレストレスを加えることによって、ひびわれ進行を抑える効果は、スターラップの場合と同等以上である。
- (6) 鋼繊維を体積混入率0.6%加えた場合の効果は、 $E_{sr}$ を $2,100\text{kg/cm}^2$ とした場合は、ひびわれの進行を抑える著しい効果が現れている。 $E_{sr}$ を $420\text{kg/cm}^2$ とした場合は、その効果はスターラップの場合とほぼ同等であった。今回の解析では、鋼繊維の周辺コンクリートからの拔出しを、弾性係数を1/5倍に減少させて表現したが、この点については更に検討する必要があると思われる。
- (7) 前項(1)の挙動は、橋脚の中間部などの構造物で、モーメントの減少に応じて主鉄筋を減少させる場合、曲げと剪断に対して十分余力を持たせなければならないとする設計の規定の一つの説明になると思われる。

#### 参 考 文 献

- 1)) 土木学会コンクリート標準示方書61年版、設計編
- 2) Building Code Requirements for Reinforced Concrete ACI 318-83
- 3) 寺島他：梁の剪断ひびわれ、コンクリート工学年次論文報告集 11-2, 1989, pp.423-428
- 4) ハナハ著、横谷訳：繊維コンクリート、森北出版、1980, 13P.
- 5) A.R.Ingraffea and V.Saouma : Numerical Modeling of Discrete Crack Propagation in Reinforced Concrete and Plain Concrete, G.C.Sih and A.Ditommaso, Fracture Mechanics of Concrete, Martinus Nijhoff Publishers, 1985, pp.171-225