

## 論文

## [2131] コンクリート構造のひびわれ開口を抑制する効果

正会員 ○ 矢澤英治 (東京都立大学大学院)

正会員 寺島善宏 (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

コンクリート構造部材がひろがりをもって、応力やひずみが局部的に集中している場合、また、ひびわれの発生によって応力やひずみが解放される場合などに対しては、配筋にあたって、鉄筋がひびわれ開口を抑制する機構をも考慮して、局部に集中して配筋を行なうことが合理的のように思われるが、このような方法の力学的根拠はまだ明らかにされていないと思われる。

壁、スラブ、マッシブな部材などの表面近くには、初期欠陥を生ぜしめない為、また、耐久性の為、乾燥収縮や温度勾配によるひびわれを制御するための配筋が行なわれる。配筋方法の一例としては、たとえば、壁やスラブに対して、鉄筋量をコンクリート部材の断面積に対する比率で規定するACI Codeによる方法などがある[1]。このような方法は、形状、寸法、応力状態などが類似しておりかつ知られている場合について、経験と実績に基づいて決められていると思われるので、このような配筋方法をそれらとは異なった場合にも適用できる一般的法則とは考えられない。

この研究は、上記のような場合の配筋方法の力学上の根拠を考察しようとするものである。構造物としてはスラブなどの平板、マッシブな構造を層状に打継ぐ場合の表層などを想定する。1本のひびわれは、無限の幅を持つくさび形とし、ひびわれ幅の変化は深さ方向にのみ考慮する2次元問題として扱う。ひびわれの間隔、ひびわれ面の形、ひびわれの幅と深さ、ひびわれを横切る鉄筋の応力、付着、鉄筋量、降伏点、ひびわれの成長が安定か不安定か、ひびわれ面を含む周辺領域の応力場、コンクリートの時間依存ひずみを考慮した有効弾性係数などの、現象と影響要因の間の関係を考察の対象とする。

## 2. 検討方法

## 2.1 用語の定義：初期ひずみ

有限要素法などの解析において、乾燥収縮や温度による長さ変化は、定式化上同じ取扱いになる。以後、乾燥収縮と温度を区別せず初期ひずみと称する。初期ひずみの値は、長さ変化の拘束を受けないコンクリートに、領域内で一様な乾燥収縮や温度変化により生ずるひずみの値である。

## 2.2 初期ひずみによるひびわれ周辺領域の変形の定義

コンクリートの変形によるひびわれの表面幅やひびわれた面のかたちを考慮する場合、(1) 周辺外部からの力や変位により起こる変形と、(2) その部分自体の初期ひずみによるひずみが重ね合わされる。以下の検討では、これらを分離し、(1)のみを考慮するものとする。

## 2.3 鉄筋の付着と鉄筋の降伏

鉄筋の付着ならびに鉄筋の降伏がひびわれ開口の抑制に及ぼす効果は重要であるとおもわれる

が、付着の状態の予測のモデル化は著者らの方法ではまだできていない。今回の解析における鉄筋各部の付着の表現は、完全か、全くないか、の二者択一とし、現実での付着の程度の上限と下限の範囲を推定して、上限と下限について計算することとした。すなわち、鉄筋が、ひびわれを中心としてコンクリート内部にある距離だけ入った部分で完全結合されるとし、その距離は、ひびわれの片側に鉄筋直径の1倍と5倍とした。鉄筋の降伏は今回の計算では考慮しない。

#### 2.4 対象構造物の形状、初期ひずみ、および挙動のモデル化

図1に考慮するモデルを示す。スラブの断面を想定し、紙面に垂直な方向の変化は考慮しない2次元問題とする。ひびわれを含む領域1と含まない領域2に、軸に垂直な直線で分ける。ここでは、隣り合った2つのひびわれを含む部分が、領域1、領域2、領域1と連結して示されている。領域2の中心線と、領域1の中心線はいずれも線対称の中心となる。これらの中心線は不動と仮定する(軸方向に長さ変化がないと仮定した)。構造は軸方向の中心線に対して対称とする。

本研究の目的の一つに、領域1の変形を、明確に定義された境界の変形との関係で調べることがあるため、以下のような挙動のモデル化を行なった。

(7) 領域1と領域2の初期ひずみによる変形が領域2のみに生ずると考える。そのときの領域2の境界の変形を、領域1の境界に加える。

(4) 領域2の変形形状・領域1と領域2を結合してある場合の、初期ひずみによる境界の変形形状は、鉄筋の付着の状態や、ひび割れ先端の位置などで異なるため、予備解析を行うことで検討した。初期ひずみは、土木学会示方書の規定を参考にして、最大値が $\epsilon = 400 \times 10^{-6}$ 程度として、領域2に与えている。この時の初期ひずみの厚さ方向の勾配は、表面で最大、中心でゼロ、中間部は2次放物線とし、部材軸方向の分布は一樣とした。その結果をもとに、鉄筋の付着、ひび割れの深さに応じて異なるひずみを、強制変位の形でかけることとした。

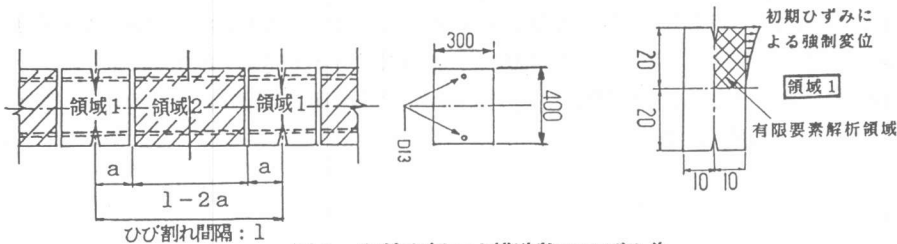


図1 収縮を起こす構造物のモデル化

#### 2.5 有限要素解析

領域1の対称性により、図2に示すような、部材軸、ひびわれ中心線、表面および境界線で仕切られた部分について解析を行なった。荷重は、境界に加える強制変位である。

鉄筋の補強状態としては、鉄筋がない場合、鉄筋とコンクリートの付着する点がひびわれ面から鉄筋直径と等しい距離の場合と5倍の距離の場合の3つの場合である。

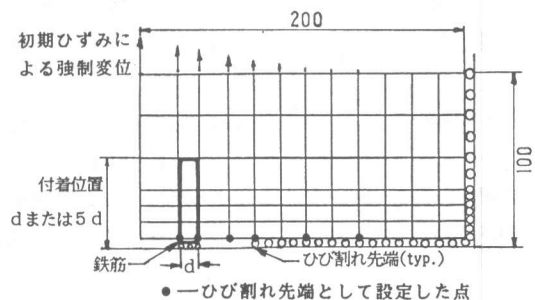


図2 有限要素解析モデル

ひびわれ先端位置は、図2 に黒丸で示した6箇所について、個別にモデルを設定した。

これらの構造モデルに、各ケースに応じて予備解析で求めた強制変位を与え、線形解析により、ひびわれ表面の変位、鉄筋の応力、応力拡大係数、などを求めた。

スラブの温度や乾燥収縮に対する鉄筋の補強比は、ACI Code 318-83 では、コンクリート断面積の 0.2% としている。したがって、スラブ厚さがたとえば、40cmの場合には、D13 であれば最大32cm間隔で、また、D16 であれば最大50cm間隔でスラブ両面に配置されることになる。ここでは、D13 を 30cm間隔と想定したが、一部で2倍の量を配置した場合についても検討している。鉄筋のかぶり高は 3cm とした。ひびわれ間隔は 60cm と想定した。この間隔の検討は3.5節で行う。

図 2の解析領域は、スラブ部材軸方向10cm、部材厚さ方向20cm、奥行方向（紙面垂直。2次元有限要素の厚さ）30cm、である。コンクリートの弾性係数は  $0.3 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  および  $0.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、鉄筋の弾性係数は  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  とした。

### 2.6 応力拡大係数 $K_I$ および限界応力拡大係数 $K_{Ic}$

応力拡大係数は、8節点2次元有限要素でひびわれ先端直近の中間節点を要素辺長の1/4 に位置させ、その節点での変位を用いて算出する周知の方法によった。[2] [3] [4] 計算は、文献[3]に示された計算式を、剪断弾性係数  $G=E/2(1+\nu)$  により展開し、次の形として用いた

$$K_I = \sqrt{\frac{2\pi}{\Gamma_{AB}}} \cdot \frac{E_c}{4} (V_B - V_A) \dots (1)$$

ここに、 $E_c$ :コンクリートの弾性係数 である。

破壊のモードは、ずれを伴わないモード I のみ考慮した。

材料の特性値としての限界応力拡大係数は、試験方法によって多様に異なることが知られており、一定値には確立されていない。今回は、丹羽・大津[5]をも参考にして、 $65 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1.5}$  とした。これに関する多少の検討は[2] [3] [4]にみられる。

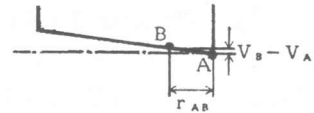


図3 応力拡大係数の計算

## 3. 結果

### 3.1 ひびわれ先端位置と応力拡大係数の関係

3種類の構造、すなわち、無筋の場合、鉄筋とコンクリートの付着する点がひびわれ表面から鉄筋の直径  $d$  の5倍の距離としたもの（通常程度の付着）、および、鉄筋の直径  $d$  に等しい距離としたもの（理想的に付着が強いもの）における、ひびわれ先端の位置と、応力拡大係数との関係を図 4に示す。3種の構造物について、それぞれ1本の曲線が対応する。強制変位は鉄筋の付着、およびひびわれの深さの各ケース毎に、2.4節の予備解析で求めたものを用いている。

### 3.2 ひびわれ進行の安定・不安定

今回の解析では、ひびわれの進行を逐次追跡する方法は用いていないが、図5 によって、曲線が上に凸の場合、ひびわれの進行に不安定な部分と、安定的な部分があることが示される。

図中の曲線の右上がりの部分は、 $K_I$ の値が、ひびわれ先端が図で右寄りの位置（スラブ表面から内部へ向う方向）におけるほど高いことを示し、不安定なひび割れ進行がおけると解釈される。ひびわれ進行の基準として、 $K_I$ の値を $K_{Ic}$ に等しく保つ、という条件を考えると、先端は内部の、再び $K_I < K_{Ic}$ となる点まで進行する。

その後の曲線の右さがりの部分は、 $K_I$ の値が、ひびわれ先端が図で右寄りの位置におけるほど

低いことを示し、この部分では強制変位の増大に依存した、安定的なひび割れ進行をすると解釈される。 $K_I$ の値を $K_{Ic}$ に等しく保つという条件のためには、先端が内部に進むにつれ、強制変位を増大させなければならないからである。

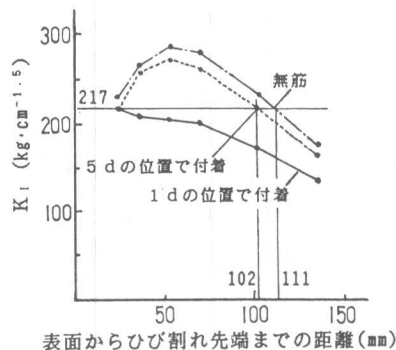


図4 ひびわれ先端の位置と $K_I$ の関係

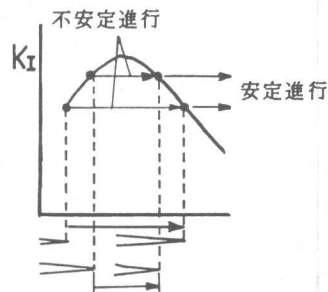


図5 ひび割れの安定・不安定進行

### 3.3 鉄筋の付着と応力拡大係数の関係

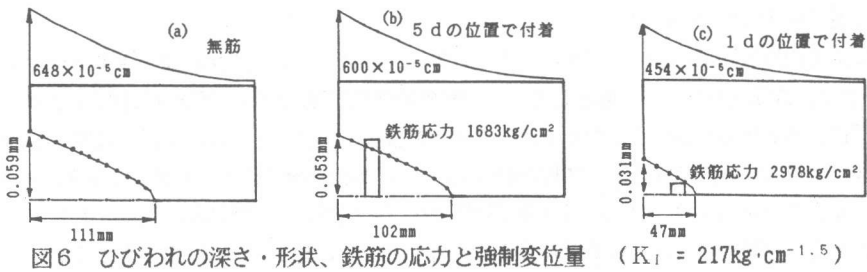
図4より理想的に付着の強い場合(1dの位置で付着:実線)には、曲線は右に下がる一方であり、ひび割れ進行が安定的であることが示される。一般的な付着と無筋の場合には、不安定に進行する部分が存在する。この場合、図5に示したように、ひび割れが進行を始める時点での深さにより、不安定進行となる領域が変わってくるといえる。つまり、深いひび割れほど不安定進行の領域は小さくなる。しかし一方で図5は、深いひび割れは、より小さい強制変位で先端が $K_{Ic}$ に達してしまうという性質も示している。

### 3.4 ひびわれと鉄筋の状態

本来は先に仮定した限界応力拡大係数  $65\text{kg}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot^5$  を基準に、安定した進行に入った点でのひびわれの状態を示すべきであるが、解析結果では、応力拡大係数の値がこれよりかなり大きくなっている。これは(1)式では定式化上、 $K_I$ と $E_c$ が比例しており、ここに  $E_c = 0.3 \times 10^6 \text{kg}/\text{cm}^2$  という、硬化した、かなり硬いコンクリートの値を用いたことから来していると思われる。若材例やクリープを考慮した値を用いれば、例えばクリープ係数 $\phi=2$ とすれば、見かけの弾性係数、そして応力拡大係数も(1)式より、今回の解析値の1/3となるのである。この検討は3.5節で行うことにする。

ここでは付着位置5dの曲線の左端の点( $K_I=217\text{kg}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot^5$ )からひびわれが不安定に進行したとして、安定な進行に入った点での状態を示すことにする。計算で求めた内部のひびわれの形と鉄筋応力、境界での強制変位の一例が図6である。

図4から、無筋と、鉄筋の付着する点が5dの場合に対し、ひびわれの深さはそれぞれ111mm, 102mmとなっていることが読取れる。無筋に対する付着位置5dの深さの比をとると、90%にすぎず、また図6(a), (b)のひびわれ幅の比も92%であり、この2つの間には、ひびわれの形状・幅・深さなどにほとんど差がみられないといえる。また、鉄筋の付着する点が1dの場合は、ひび割れが安定進行するため、 $K_I=217\text{kg}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot^5$ になるまで強制変位を増大させ、ひび割れが進行して行く途中で、SD30程度の鉄筋を想定した場合に、降伏してしまう直前の状態を示した。



鉄筋の付着する位置が1dの場合、これよりひび割れが深くなった場合、図7のように、鉄筋によるひび割れ開口の抑制の効果がみられるが、鉄筋が弾性域であるためには降伏点が5000kg/cm<sup>2</sup>以上でなければならない。鉄筋が降伏する場合の解析は今後の検討課題である。

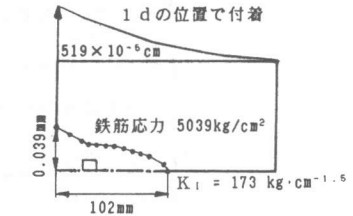


図7 付着強・深いひび割れの形状、鉄筋応力

### 3.5 コンクリートのみかけの弾性係数が変化する場合の検討

図6(b)に示した計算のための予備解析の結果から、ひび割れを含む周辺領域の、部材軸方向の応力を取り出し、図8に示す。Ec = 0.3×10<sup>6</sup>kg/cm<sup>2</sup>の場合、応力拡大係数同様、最大36kg/cm<sup>2</sup>という大きな値が示されており、中間に第2のひび割れが発生することが考えられる。そこで、クリープ係数φ=2に相当するものとして、コンクリートの有効弾性係数を1/3の0.1×10<sup>6</sup>kg/cm<sup>2</sup>とした計算を行った。これにより応力の値は、最大36kg/cm<sup>2</sup>となり、中間に第2のひびわれは発生せず、ひびわれ間隔を60cmとしたことが妥当であることが示される。

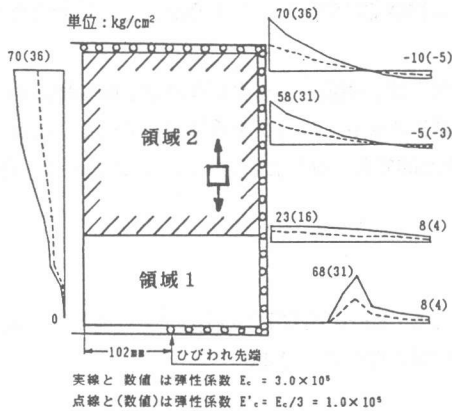


図8 部材軸方向の応力

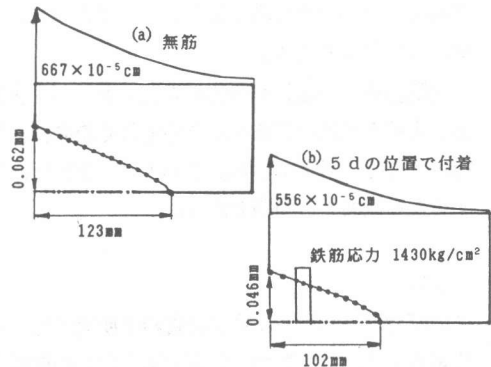


図9 ひび割れ形状・深さと鉄筋応力、強制変位

図9にこのときのひび割れの状態を示す。3.4節の解析と比べると、応力拡大係数は217kg·cm<sup>-1.5</sup>から、65kg·cm<sup>-1.5</sup>に低下している。この値は当初仮定した限界値である。無筋の場合に対し、付着位置5dのひび割れ幅は74%、深さは83%と差が開いた。付着位置5dの場合の、解析領域の境界の変位量も小さくなっている。これはコンクリートの弾性係数が小さくなった分、相対的に鉄筋による拘束の効果が大きくなったためと思われる。

### 3.6 鉄筋量を変えた場合の検討

鉄筋による拘束の効果の違いを調べる一環として、コンクリートの弾性係数 $E_c = 0.3 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ の場合に、鉄筋量を2倍の0.4%とした。この解析結果を図10に示す。図6(b), 図7に比べ、ひびわれ開口、鉄筋応力とも小さくなってはいるが、顕著な差とはいえない。ひびわれの深さについては図4より、付着位置 $5d$ 、深さ $102\text{mm}$ と同じ $K_1 = 205 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1.5}$ で、無筋では深さ $118\text{mm}$ まで進行する。その比は86%となり、3.4節の計算に比べ差が現れてきたと思われる。また、付着位置 $d$ の場合、鉄筋の応力は、鉄筋量0.2%である図7に比べて著しく低下していると言える。

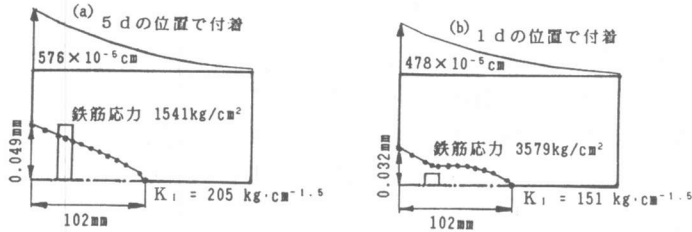


図10 鉄筋量を増加したときのひびわれの深さ・形状、鉄筋の応力と強制変位量

### 4. まとめ

上記の方法により、設計基準などによって配筋され、収縮の条件があたえられた構造物に対し、スラブの深さ方向の2次元モデルを考慮する本研究の方法で予測されるひびわれの状態は、クリープなどを有効弾性係数で考慮した解析を行うことによって得られた結果は、実際の場合に経験され、知られている挙動に関する諸値の範囲の値と思われる。これを考慮しない場合、高い応力、鉄筋の有無による効果の違いが認められなくなった。

また、付着が理想的によいとした計算では、ひびわれの進行の途中、比較的深さの浅い段階で鉄筋の応力がかなり高くなることが示された。SD30程度では降伏してしまうが、その挙動の検討は今後の課題である。

実験結果との比較も今後の課題であるが、実験の方法、測定すべき事柄などは多岐多様にわたる。実験の計画と方法をかためて行くために、数値シミュレーションを繰り返して行くことは、有用であると考えている。その上で、実際には3次元的存在であるひびわれの挙動を、どのように再現するかも直面する問題である。

### 謝辞

この研究は、昭和62年度文部省科学研究（総合研究A）No.61312057との関連でおこなった。研究代表者・長瀧重義教授（東京工業大学）の御指導に厚く御礼申上げる。

### 参考文献

- 1) Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83), 1983, p.27
- 2) V.E.Saouma, A.R.Ingraffea and D.M.Catano: Fracture Toughness of Concrete, Proc. ASCE Vol. 108, No. EM6, 1982, pp. 1152-1166
- 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) 矢澤, 杉本, 長嶋, 山崎: 鉄筋によるひびわれ抑制, コンクリート工学年次講演論文集, 11-2, 日本コンクリート工学協会, 1989, pp. 429-434
- 5) 丹羽義次, 大津康政: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 1988, pp. 100-101