

論文

[2071] 鉄筋によるひびわれ抑制

正会員○矢澤英治（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）

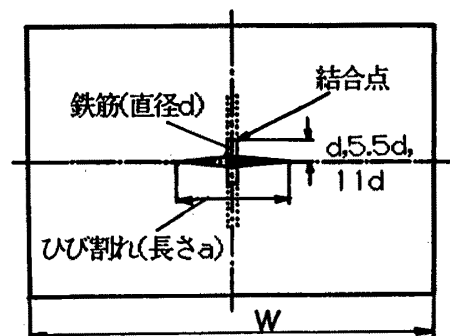
1. 研究目的および対象構造物

土木構造物における温度・乾燥収縮などによるひび割れを抑制するための鉄筋配置の方法は設計方書・指針などにめやすが与えられている。これらは、例えばACI Codeの温度及び収縮に対する用心鉄筋の規定（7.12節）¹⁾に見られるように、部材の全断面に対して一様に鉄筋量を定める形になっている。応力状態等が不均一な場合の局部において、必要鉄筋量を定めるめやすは与えられていない。そこでマスコンクリートにおける、ひび割れ幅とひび割れ進行を抑制するために有効な鉄筋の配置の方法を定めるためなどの一環として、ひび割れ先端の開口挙動に鉄筋の及ぼす影響を、FEMによって数値解析した。ここではモデルとして鉄筋の結合位置の変化、およびひび割れの長さ変化を考慮した、仮想のひび割れとして開口部を設けた一定厚さの矩形平板を考えている。ひび割れの開口の仕方は、面内面外への剪断を伴わない、直応力によるもの（破壊力学におけるモードⅠ）のみを扱った。

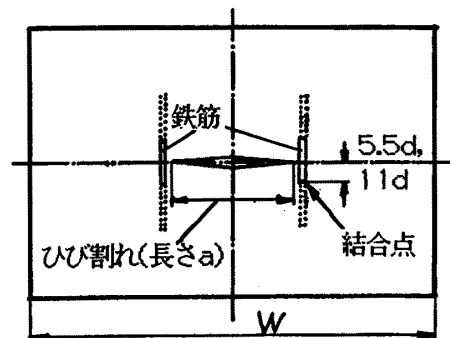
2. モデル化

2-1. 有限要素モデル

想定した供試体を図1に示す。実際の計算にはこの1/4の部分を取り出した、図2のモデルを用いている。鉄筋は仮想したひび割れの中央に配置した場合と、その進行して行く領域に配置した場合、および無筋の場合を考えている。鉄筋の付着の変化は、鉄筋要素をつなぐ点を変更することによって表現し、結合点より先の埋め込み部の影響は無視している。それぞれの点は鉄筋の直径を d とすると、およそ d （図2.1のモデルのみ）、 $5.5d$ 、 $11d$ となる。鉄筋量は仮想のひび割れとして中央に配置した開口部の断面積を基準に決定し、基本的には断面積の1%、図2.2のモデルは2%も考えた。これは図2.2のモデルでは拘束を強くした時の挙動を確認する場合に、鉄筋の結合点を d に設定することが出来なかったためである。ひび割れ長さの設定は、モデルの拘束条件ごとに、要素の幅を単位として行なった。また、ひび割れ先端には中間節点を持つ2次のアイソパラメトリック要素を用い、中間節点を辺長の1/4点に設定して $1/\sqrt{r}$ 特異性を付与した。材料特性としてコンクリート圧縮強度 300kg/cm^2 、ヤング係数 $3.0 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 、



1.1 鉄筋がひび割れ中央



1.2 鉄筋がひび割れ進行領域

図1 想定した供試体

ポアソン比0.17、鉄筋のヤング係数 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比0.3を用いた。

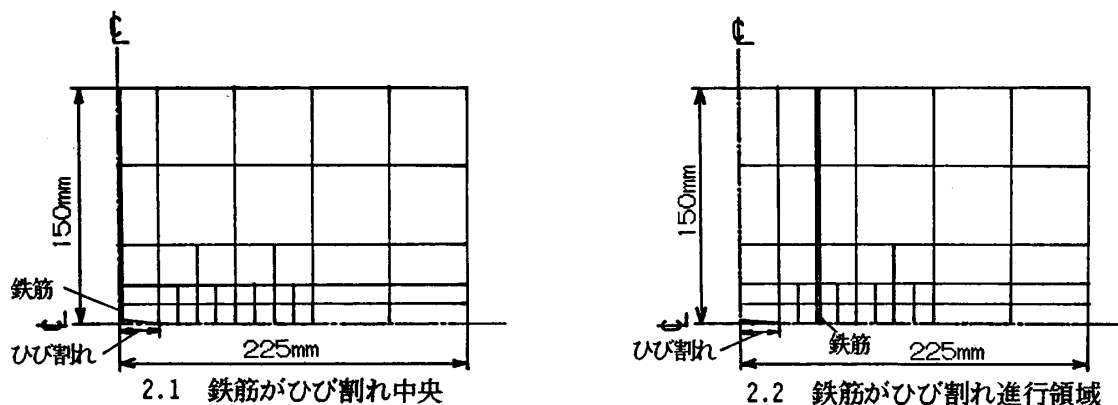


図2 有限要素モデル

2-2. 想定した荷重ケース (図3)

荷重はひび割れ中央に集中荷重として 45 kg/cm 、またモデルの長辺に強制変位として 0.0006 cm を載荷した場合を解析している。強制変位はコンクリートの収縮等に伴う変形を模擬したものである。また集中荷重は、Ingraffeaらの研究²⁾で、無筋板で集中荷重の場合、ひび割れ延長の途中で応力拡大係数に最小値が現われる、とされている結果との比較を考えたものである。それぞれの荷重の値は解析上便宜的に定めたものであるが、今回の解析は完全な線形で行なっているため、定数倍することにより実際の状況に換算することが可能である。さらに鉄筋をひび割れ中央に配置した場合に限り、強制変位との比較のために、分布荷重 10 kg/cm^2 の場合も計算を行なった。いずれの場合もひび割れ先端においては単純な引張による変形のみで、剪断変形を伴わない場合（線形破壊力学におけるモードI）を扱っていることになる。

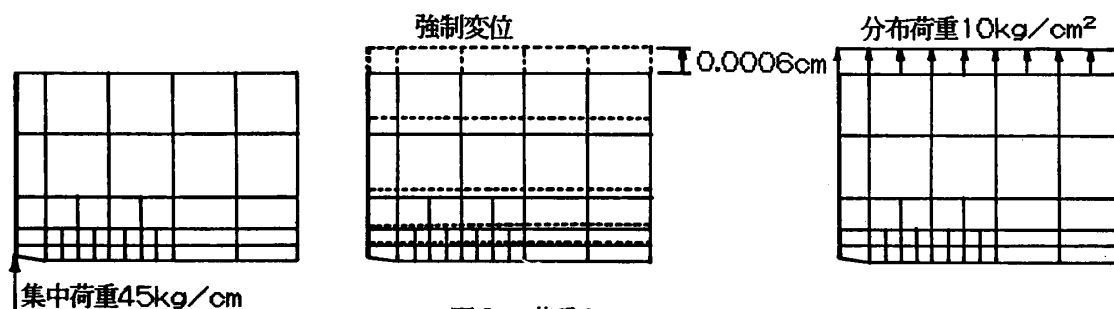


図3 荷重ケース

3. 応力拡大係数および解析手法

3-1. 応力拡大係数の計算とその持つ意味

ひび割れ先端の形状を図4とする。A点・B点のひび割れ開口方向変位をそれぞれ V_A ・ V_B とし、A-B間のひび割れ長軸方向の距離を r_{AB} とすれば、応力拡大係数 K_I は次の式で計算できる。³⁾

$$K_I = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AB}}} \cdot \frac{2G}{(\kappa+1)} (V_B - V_A) \quad \text{但し} \quad \kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu} \quad (\text{平面応力}) \quad \dots (1)$$

ここに G : 剪断弾性係数 ν : ポアソン比

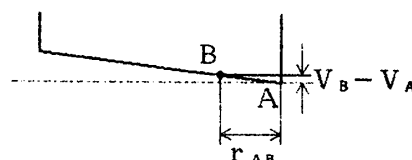


図4 応力拡大係数の計算

線形破壊力学では、 K_I がある一定値に達したときにひび割れが進行するものとしている。この、ひび割れが進行する限界の K_I を「破壊靱性」(K_{Ic})と呼ぶ。ここでコンクリートに線形破壊力学が適用できるとすれば、あるひび割れ長さで K_I が最小を持つことは、以下のことを意味する。

1) ひび割れ長さが K_I 最小となる長さより短い場合

ある点で $K_I = K_{Ic}$ となりひび割れが進行しても、進行した後は $K_I < K_{Ic}$ となり、ひび割れ進行が停止することを意味する。これをさらに進行させるには新たな荷重の増加が必要となる。つまり、ひび割れは荷重の増加に伴った、安定した進行をする。

2) ひび割れ長さが K_I 最小となる長さである、またはそれよりも長い場合

その点で $K_I = K_{Ic}$ となりひび割れが進行すると、進行した先では必ず $K_I > K_{Ic}$ となり、現在以上の荷重の増加がなくともひび割れは進行してしまうことを意味している。つまり、ひび割れは荷重と無関係に、不安定な挙動を示す。

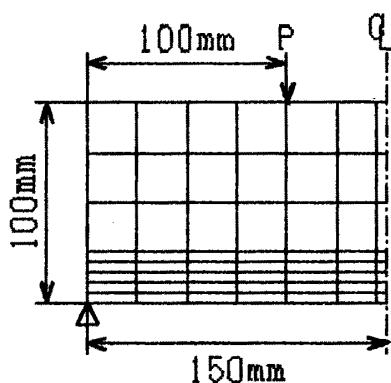
このことから非線形を考慮しない計算であれば、材料特性としての一定である K_{Ic} と、ある荷重の下での K_I 最小を示すひび割れ長さでの K_I が分かっているならば、ここから破壊時の荷重を計算することが可能である。

3-2. 解析手法

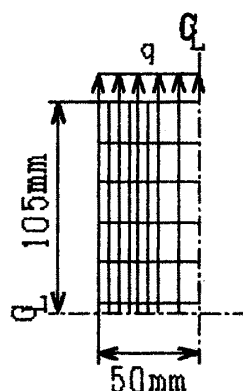
2節で述べた荷重、鉄筋付着の各組み合わせについて、ひび割れ長さを変えてFEM解析を行っている。これらの結果から、ひび割れ先端部で2点の開口変位を求め、その結果から先に示した(1)式により応力拡大係数 K_I を算出、ある荷重・鉄筋配置のもとでのひび割れ長さと K_I の関係を求めた。

3-3. 材料特性としての破壊靱性 (K_{Ic}) の試算

本来破壊靱性は切り欠きを持つ供試体の試験から決定されるものではあるが、ここではJISの試験方法によるコンクリート強度との換算を試みた。まず、荷重が最大となった瞬間、スパン中央に0.5cmのひび割れがはいった、と考えた図5.1のモデルを用い、ここから破壊靱性 (K_{Ic}) との換算ができないかと考えた。ここで圧縮強度 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ より、曲げ強度をその1/6.3の $45\text{kg}/\text{cm}^2$ 、この値を得るための $P = 750\text{kg}$ としている。



5.1 曲げ強度タイプ



5.2 単軸引張タイプ

図5 K_{Ic} 計算モデル

その結果、 $K_{Ic} = 59\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3/2}$ となった。しかし曲げ強度は一般に塑性変形の影響により、単軸

引張強度よりかなり大きい。今回の解析は完全な線形であり、材料非線形が再現されていないため、破壊靱性の実際の値はこれよりかなり小さいと考えられる。ここで線形解析であることを用いて、仮に曲げ強度＝引張強度＝ 25kg/cm^2 （圧縮強度の $1/12$ ）とすれば、 $K_{Ic} = 32\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3/2}$ となる。また図5.2のモデルで $q = 25\text{kg/cm}^2$ として、単軸引張状態の K_{Ic} を計算した場合も $K_{Ic} = 32\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3/2}$ となり、この値は一見妥当であるように思える。しかし4節で述べる結果、例えば強制変位の場合において、 $K_I = 32\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3/2}$ の付近でのコンクリートの応力はひび割れのごく近傍を除いて 12kg/cm^2 前後であり、この段階で一気に不安定な挙動を起こし破壊するとは考えがたい。文献⁴⁾などから判断すると $K_{Ic} = 65 \sim 70\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3/2}$ 程度が妥当と思われるが、現時点でこの差の生じる原因については分からない。

4. 結果

以下の図中の（ ）内の数値は、ひび割れ長さ比0.44での鉄筋応力（ kg/cm^2 ）である。例えば図6において、鉄筋の結合位置を d 、供試体幅に対するひび割れ長さの比を0.44とすると、応力拡大係数は $3.6\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3/2}$ 、鉄筋応力は 1527kg/cm^2 となっている。

4-1. ひび割れ中央に鉄筋を配置した平板

この解析においては、図6～8に示すように、鉄筋の付着による拘束が効いているほど、つまり鉄筋の結合位置までの距離が小さいほど K_I は小さくなるのが分かる。対して鉄筋の応力は、この解析では鉄筋断面積を変化させていないため、ひび割れの開口を強く拘束するほど大きくなっている。

4-1-1. 集中荷重載荷（図6）

無筋および結合位置 $11d$ の場合は K_I に最小値が現われることが確認できる。また鉄筋の拘束が強くなると、最小値の現われる点がよりひび割れの長いところへ移る傾向が認められる。今回の解析の範囲では、付着破壊長さが d および $5.5d$ の場合はグラフは単調減少のままであり、さらにひび割れの進んだ時点で最小値が現われると考えられる。この解析の場合、結合位置 d の場合の鉄筋の効果は非常に大きなものがあるが、それだけ鉄筋応力も大きい。実際にはこれだけの応力がかかると付着が切れてしまい、より付着による拘束の弱い方向へ結果が移動すると考えられる。解析と同じ効果を得るには鉄筋断面積を増やすことが必要となろう。

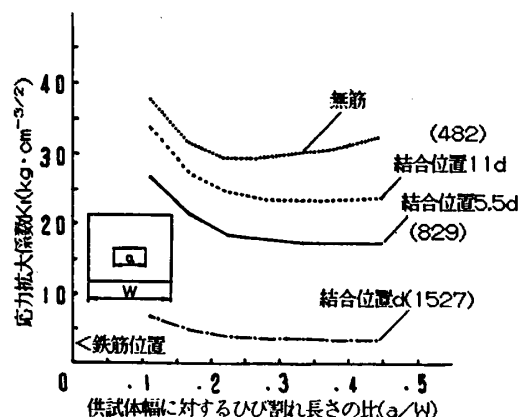


図6 鉄筋位置：ひび割れ中央
集中荷重載荷時の応力拡大係数

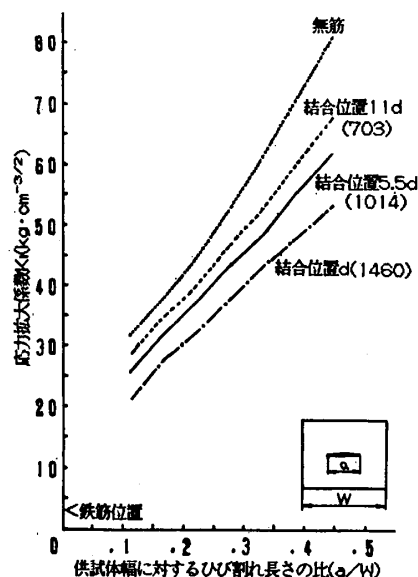


図7 鉄筋位置：ひび割れ中央
分布荷重載荷時の応力拡大係数

4-1-2. 分布荷重載荷 (図7)

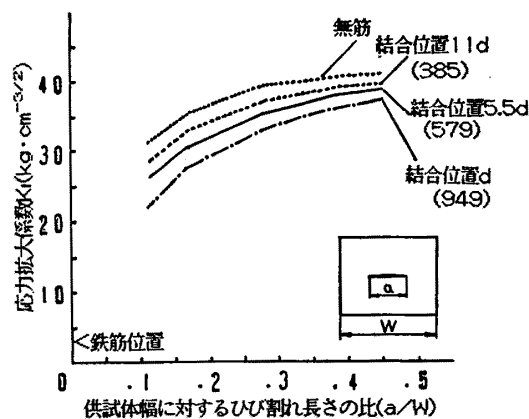
この解析では、分布荷重載荷で K_I に最小値は見られず、単調に増加した。ひび割れ進行に伴い変形はとめどなく大きくなり、 K_I がほぼ直線状に増加する傾向がみられる。

4-1-3. 強制変位 (図8)

今回の解析では、強制変位の場合、分布荷重載荷と同様、 K_I に最小値は見られず、単調に増加した。しかしひび割れの進行に伴い曲線の傾きが小さくなり、 K_I の増加が鈍ることが分かる。これは一様な強制変位を与えていることに起因していると考えられる。

図8

鉄筋位置：ひび割れ中央
強制変位時の応力拡大係数



4-2. ひび割れの進行領域に鉄筋を配置した平板

図9・10に示したように、今回の結果では、鉄筋を挟んだ左右で、応力拡大係数とひび割れ長さ比の関係には違いが見られる。この曲線の食い違いは鉄筋による拘束が強くなるほど大きくなっている。これは鉄筋位置にひび割れが達しない間は無筋板に近い挙動をし、達した後は鉄筋の拘束の効果が発揮されることを示すように思われる。

4-2-1. 集中荷重載荷 (図9)

今回の解析結果では曲線は不連続となったが、鉄筋位置がひび割れ中央の時と同様、無筋および鉄筋量1%・結合位置11dの場合は K_I に最小値が現われ、それより拘束が強くなると単調減少となることが分かる。

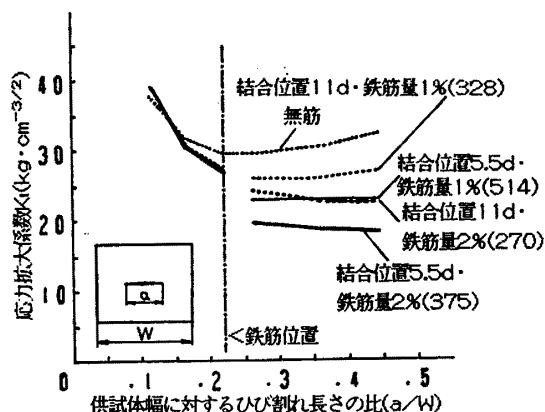


図9 鉄筋位置：ひび割れ進行領域
集中荷重載荷時の応力拡大係数

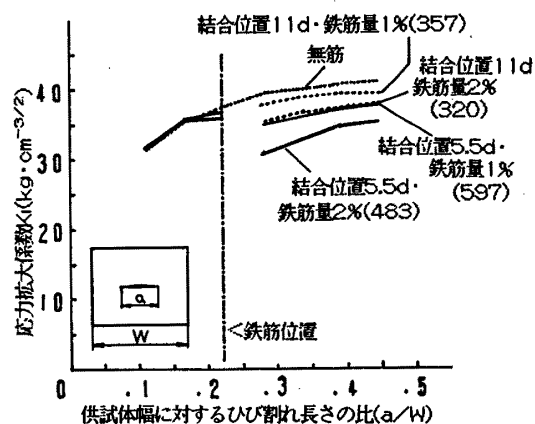


図10 鉄筋位置：ひび割れ進行領域
強制変位時の応力拡大係数

4-2-2. 強制変位 (図10)

ひび割れ中央に鉄筋を配置した場合とは異なり、増加傾向ではあるものの、ひび割れが鉄筋位置に達すると一旦 K_I 値が低下するため、単調な増加とはなっていない。今回の解析では特に、一番拘束の強い鉄筋量2%・結合位置5.5dの場合、ひび割れ長さ比0.11の点ではなく、鉄筋を越えた後の K_I が最小値となることが示された。これは鉄筋の位置でひび割れ進行が停止できることを示していると考えられる。

5. 結論

本手法により、鉄筋の拘束度および荷重条件によるひび割れ先端の挙動の違いを見ることができた。特に鉄筋により適切な拘束が確保されている場合には、温度荷重・乾燥収縮を模擬した強制変位に対して、鉄筋によるひび割れ進行抑制の効果も見られ、定性的に良く知られていると思われる結果を概ね再現できたと考える。このように、部分的なひび割れを、部分的な鉄筋により抑制する状況を確認、その条件下で必要な鉄筋量を求めることができるという点で、本手法を実際に応用できる可能性が示されていると思う。

6. 今後の課題

今回の解析結果では、鉄筋量2%・結合位置5.5dの場合に限り、ひび割れ進行を止めることが可能、という解釈になるが、今回結果を出せなかった鉄筋の近傍の挙動によっては、より拘束が弱い場合でもひび割れ進行を停止できることになると思われる。また、今回の鉄筋付着モデルでは、ひび割れが鉄筋に達すると急に鉄筋拘束の効果が現われるように見えるが、実際にはひび割れが鉄筋に達する手前から徐々に拘束の効果が現われることが想像される。さらに4-1-1で触れた鉄筋応力と付着の関係の問題もある。いずれにせよモデル化の方法をさらに検討の上、鉄筋近傍のひび割れ進行挙動を細かく調べる必要があると思われる。

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.61302057の一環として行なった。研究代表者長滝重義教授（東京工業大学）の御指導に厚く御礼申し上げる。

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.Catarano: 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) 丹羽義次、大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論、森北出版、1988、pp.100-101