

論文

[1122] 破壊力学に基づく FEM による縦ひびわれ発生腐食量の解析的検討

山田義智^{*1}・大城武^{*2}

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋が腐食すると、鉄筋周囲のコンクリートの状況に応じて腐食反応が進行し、腐食生成物、即ち錆が蓄積される。錆は膨張性を有し、そのため鉄筋周囲のコンクリートに内圧が作用し、図1に示すようにかぶりコンクリートに縦ひびわれを発生させる。

ひびわれ発生後は、腐食に対するコンクリートの保護作用がなくなるため鉄筋腐食は加速される。従って、RC部材の耐久性限界として縦ひびわれ発生時とするのが自然である。

腐食ひびわれ発生時の鉄筋の腐食量を解析的に求めるには、腐食生成物の体積膨張率、ヤング係数等の物理的性質を把握し、腐食膨張に伴うかぶりコンクリートのひびわれ進展を力学的に求める必要がある。本研究では、このひびわれ進展解析を、コンクリートの引張軟化特性をモデル化するに当たり破壊エネルギーの概念を導入するいわゆる破壊力学に基づく有限要素法解析により行なっている。

ここでは、RC部材を鉄筋の占める部分を中空とした断面モデル(図7及び、図8参照)で表し、その内孔に強制変位を与え、破壊力学に基づく有限要素法解析により縦ひびわれ発生時の内孔における膨張圧力及びその膨張変位を求め、この値を平面弾性解析に境界条件として代入することにより縦ひびわれ発生時の腐食量を解析的に求めた。この解析による縦ひびわれ発生腐食量と、既往の電食実験による縦ひびわれ発生腐食量との比較検討を行なったのでその結果について記述する。

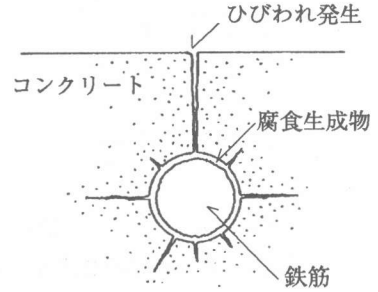
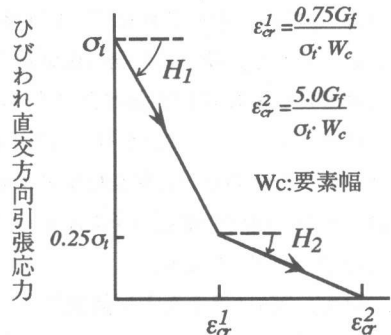


図1. 腐食ひびわれ概念図

2. 破壊力学に基づく有限要素法解析を用いたひびわれ進展解析法

従来の代表的なひびわれモデルとして、Discrete Crack Modelや、Smeared Crack Modelがある。本有限要素法解析で用いるCrack Band Modelは、Smeared Crack Modelにひびわれ生成後の引張軟化特性をモデル化するのに当たり破壊エネルギー G_f を導入したものである。ここでは引張軟化特性を表すモデルとして、引張応力-ひびわれ幅関係を2直線で表した1/4モデルを、図2に示すようにひびわれと直交方向の引張応力-ひびわれひずみに置き換えて、ひびわれ要素の構成則に採用している。

ひびわれは、最大引張主応力の方向と直交方向に発生するものとし、図3に示す局所座標系n-tに対して次式で



ひびわれ直交方向のひびわれひずみ

図2. 引張軟化特性

*1 琉球大学助手 工学部建設工学科, 工修 (正会員)

*2 琉球大学教授 工学部建設工学科, Ph.D. (正会員)

表される応力-ひずみ関係を適用した。

$$\{d\sigma_{cr}\} = [D_{cr}]\{d\varepsilon_{cr}\} \quad (1)$$

ここで、

$$[D_{cr}] = \begin{bmatrix} E_{cr} & 0 & 0 \\ 0 & E_c & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$E_{cr} = \frac{E_c \cdot H_{1 \text{ or } 2}}{H_{1 \text{ or } 2} + E_c} \quad (3)$$

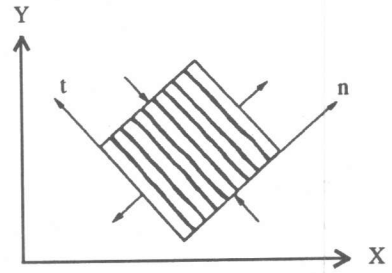


図3. ひびわれ要素モデル

E_c はヤング係数, β はせん断剛性低減係数で $\beta=0.4$ とした。なお, $[D_{cr}]$ は局所座標系 $n-t$ に基づくもので, これを基準座標系 $X-Y$ に変換するとひびわれ要素の剛性マトリックスは次式で表せる。

$$[K_{cr}] = \int_v [B]^T [T]^T [D_{cr}] [T] [B] dv \quad (4)$$

ここで, $[B]$ は変位ひずみ関係マトリックスであり, $[T]$ は座標変換マトリックスである。

本解析の増分は変位増分法であり, 新たに要素の1個にひびわれが生じるように増分の大きさを調節するいわゆる r_{min} 法 [1] を用いている。すでにひびわれの生じた要素については, 増分ベクトルが除荷の方向に向かっていないかどうかを検証し, 除荷過程が含まれている場合には該当する要素の応力-ひずみマトリックスを置き換えて, 同じ増分区間を再び計算し直す方法を採用している。

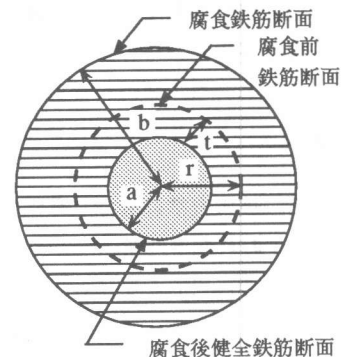
3. ひびわれ発生腐食量の計算方法

ひびわれ発生腐食量を解析的に求めるには以下の手順による。まず, 破壊力学を考慮したFEM解析により中空断面モデルの内孔に腐食膨張変位を仮定した強制変位を与え, ひびわれがコンクリート表面に達した時の内孔における変位 u と平均圧力 P_{av} を求め, 次にこれを以下に示す平面弾性解析に境界条件として適用し, ひびわれ発生腐食量を算定する。なお, 腐食生成物層及び鉄筋は弾性体と仮定する。

図4に示すように元半径 r の鉄筋が無拘束状態で腐食すると, 健全な鉄筋自体は腐食作用により t だけ減少し半径 a となるが, 腐食生成物が膨張性を有するので健全鉄筋と腐食生成物の合計の半径は b となる。

いま, 図5に示すように鉄筋がコンクリート中に埋め込まれ拘束を受けるとき, 無拘束状態で同程度腐食の場合に比べて健全鉄筋と腐食生成物の合計断面半径は δ だけ減少する。ここで, この δ は健全鉄筋部分を円柱, 腐食部分を円筒として扱い平面弾性解析により次式で表せる。

$$\delta = \frac{P_{av}}{E_2(b^2 - a^2)} \left[\frac{4a^2b^3}{a^2(1 - \nu_2) + b^2(1 + \nu_2)} \frac{E_2}{E_1} (b^2 - a^2)(1 - \nu_1) - b\{b^2(1 - \nu_2) + a^2(1 + \nu_2)\} \right] \quad (5)$$



$$t = \frac{\omega}{\rho}$$

$$a = r - t \quad (7.85)$$

$$b = r + t(\alpha - 1) \quad \alpha: \text{体積膨張率}$$

図4. 無拘束時の腐食鉄筋断面

ここで、 E_1, ν_1 は鉄筋のヤング係数，ポアソン比で、 E_2, ν_2 は腐食生成物のヤング係数，ポアソン比である。

ひびわれ発生時の腐食量は図4及び図5から明らかなように、次式を満足する腐食量 ω を求めればよい。今回はこの値を数値計算によって求めている。

$$f(\omega) = b - \delta - u - r = 0 \quad (6)$$

4. 数値計算例及び考察

4-1. 膨張圧によるコンクリートの破壊

腐食量を前章に示す手法により求めるには、中空断面モデルの表面にひびわれが達する時の内孔の膨張挙動を、本FEM解析が正確に捕えているかどうか把握する必要がある。

ここでは、本研究で用いた破壊力学に基づくFEM解析がどの程度膨張挙動を捕えることができるのか、森永 [2] が腐食による膨張圧力を想定して行なった内孔に内圧を受ける中空円筒コンクリートの破壊実験と比較検討する。

解析供試体の形状及び機械的性質は森永の行なった実験供試体を参考とし、表1に示す様な条件で解析を行なった。

なお、森永の実験供試体の最大骨材粒径が25mmで、今回解析の対象とした供試体の水セメント比が55%であることから、文献 [3] より破壊エネルギー Gr は0.14kgf/cmとした。

図6は P_{max}/f_t と外内径比 K の関係を示したものである。ここに、 P_{max} は最大膨張圧力、 f_t はコンクリートの引張強度である。

佐藤等 [4] は大理石等のぜい性材料は曲線(I),(II)の間で破壊が起こることを示した。また、原田 [5] はコンクリートの破壊もこの曲線内の領域に収まることを、油圧や破砕剤による中空円筒コンクリートの破壊実験により示した。

ここで、曲線(I)は、円筒内の平均引張応力がコンクリートの引張強度に等しくなった時に破壊が起こると仮定して導かれた。また、曲線(II)は、円筒内壁の引張応力がコンクリートの引張強度の1.5倍になった時に破壊が起こると仮定して導かれたものである。

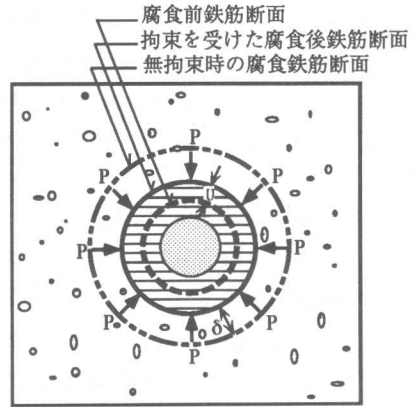


図5. 拘束時の腐食鉄筋断面

表1. 解析供試体の形状及び、機械的性質

解析供試体名*	内径 (mm)	外径 (mm)	引張強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)	かぶり (mm)
E9-100-55	9	100	21.70	260000.00	45.5
E9-150-55	9	150	20.40	260000.00	70.5
E19-100-55	19	100	22.60	260000.00	40.5
E25-200-55	25	200	20.40	260000.00	87.5

*解析供試体高さは全て100mm，ポアソン比は0.2

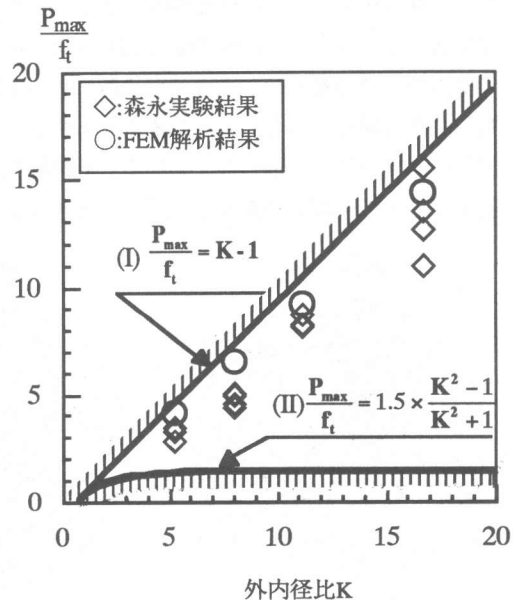


図6. P_{max}/f_t - 外内径比 K の関係

図6から明らかなように、森永の実験結果も本FEM解析結果も共に曲線(I),(II)の間に収まり、実験値とFEM解析値が良く一致していることが分かる。原田は実験結果より、 $K>5$ では K の増加とともに破壊圧力は、曲線(I)から次第にずれるとしている。本FEM解析結果もこの傾向を示している。

以上のことより、本FEM解析は中空供試体の膨張挙動を表すのに有効であると言える。

4-2. ひびわれ発生腐食量

ひびわれ発生腐食量は、前章で示した方法で求めるのであるが、この時間問題となるのは腐食生成物の物理的性質を示す弾性係数と腐食体積膨張係数の値である。

弾性係数は、吉岡等 [6] によると拘束条件下で生成した腐食生成物は比較的弾性的性質の強い固体であり、その弾性係数の値は $2000\sim 3000\text{kgf/cm}^2$ であると言われている。体積膨張率については、須田等 [7] が求め、その値は $3.0\sim 3.2$ であるとした。

本研究では、吉岡等や、須田等の研究を参考に腐食生成物の弾性係数を 3000kgf/cm^2 、腐食体積膨張率を 3.2 として、ひびわれ発生腐食量の解析を行なった。

ひびわれ発生時の腐食量に関する実験的研究は、武若等 [8] や、森川等 [9] がコンクリート中の鉄筋を電食により腐食を促進させる方法で行なっている。本研究では、これらの実験供試体の形状、機械的性質を参考に要素分割を行なった。武若等の行なった円筒供試体では、内径 13mm 、外径 50mm 、 100mm 、 150mm で要素分割を行ない、引張強度 35.0kgf/cm^2 、ヤング係数 320000.0kgf/cm^2 、破壊エネルギー G_f は 0.16kgf/cm でFEM解析を行なった。また、森川等の行なった正方形断面角柱供試体では内径 25mm 、断面の一辺を 85mm 、 125mm 、 165mm として要素分割を行ない、引張強度 25.0kgf/cm^2 、 32.0kgf/cm^2 、 40.0kgf/cm^2 、ヤング係数 300000.0kgf/cm^2 、破壊エネルギー G_f は 0.13kgf/cm でFEM解析を行なった。これらのFEM解析によりコンクリート表面にひびわれが発生した時の膨張変位及び膨張圧力を求め、これを(6)式に代入し腐食量を求めた。

図7、図8に円筒供試体及び正方形断面角柱供試体の本FEM解析によるひびわれ進展の状況を腐食初期、腐食中期、ひびわれ発生時の三段階に分けて示す。両図とも、ひびわれを要素分割図上に示している。ひびわれはFEM解析より得られた方向に、要素のほぼ中央を通るようプロットしている。

実環境下での腐食は、その初期段階において鉄筋の一部に生じるが、本解析では短時間で比較的均一に腐食が生じると考えられる電食を想定しており、腐食は鉄筋周囲に均一に生じると仮定し、膨張変位を内孔に一律に与えている。その結果、ひびわれは、図7、図8に示す様に初め放射状に進展する。さらに腐食が進むと上下左右方向のひびわれ進展が卓越し十文字形になり、ついにはコンク

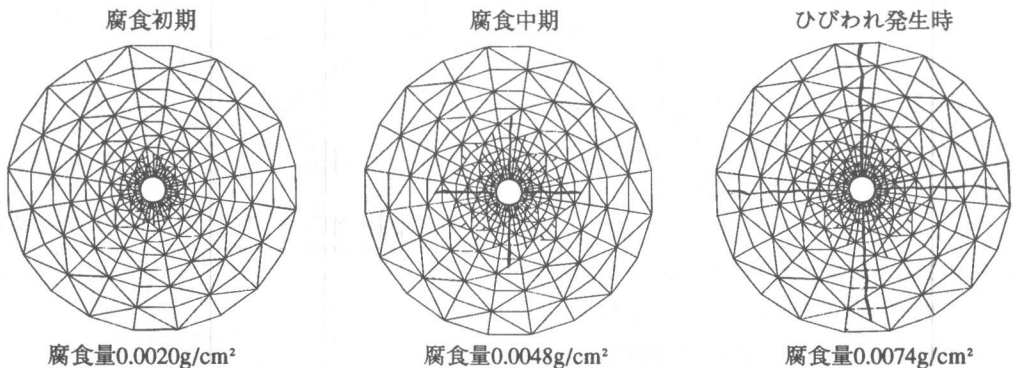


図7. ひびわれ進展状況(円筒供試体モデル)

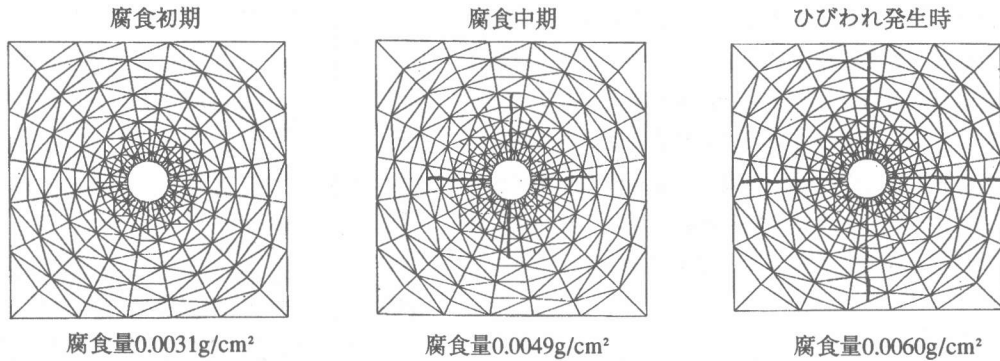


図8. ひびわれ進展状況(正方形断面角柱供試体モデル)

リート表面にひびわれが発生する様子が図7, 図8より分かる。文献 [10] によると, 供試体形状は異なるが電食による腐食ひびわれパターンは十文字形に進展する傾向があると報告されており, 本FEM解析結果と一致している。

図9に武若等の円筒供試体電食実験によるひびわれ発生時の腐食量に関する実験結果と本解析により得られたひびわれ発生腐食量を比較する。ここで縦軸はひびわれ発生時の鉄筋表面1cm²あたりの腐食量であり, 横軸は円筒供試体の外径を示す。

図9より, 供試体外径が小さくかぶりの薄い供試体では, 解析値が実験値より小さいが, 他は実験値と解析値が良く一致していることが分かる。

図10は, 森川等の行なった正方形断面角柱供試体電食実験によるひびわれ発生時の腐食量を本解析値と比較したものである。図中の白抜き記号は電食実験値であり, 各添加NaCl量ごとに示す。また, 図中の黒塗り記号は解析値であり, 黒丸記号はクリープを考慮しない場合, 黒菱形記号はコンクリートのクリープを考慮してクリープ係数2.0として解析を行なった場合である。図10より, NaClが添加され短時間(約12時間~約170時間)でひびわれが発生する場合とクリープを考慮しない解析値とは, 解析値が若干低めではあるが良く一致している。また, NaClが添加されず長時間(約500時間~約1300時間)でひびわれが発生する場合は, コンクリートのクリープを考慮した解析結果と類似していることが分かる。また, 図9及び図10より, かぶり厚さが鉄筋の腐食によるひびわれ発生に影響することが分かる。

図11はコンクリート引張強度とひびわれ発生腐食量との関係を示した。図中の黒丸は解析値, 白抜き記号は,

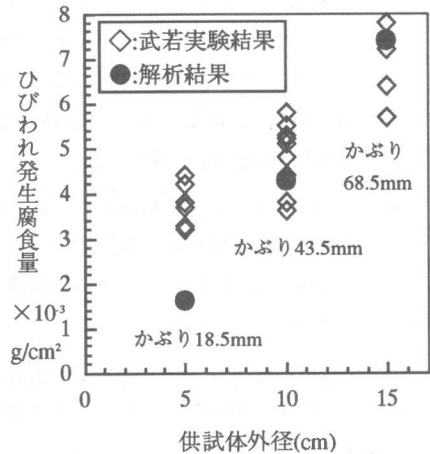


図9. ひびわれ発生時腐食量と供試体外径関係

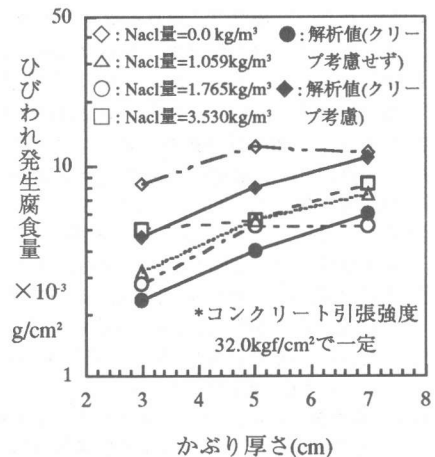


図10. ひびわれ発生腐食量とかぶり厚関係

ひびわれが短時間(80時間以内)で生じた森川等の実験値であり、各電流量毎に示す。この図より、引張強度が高くなればひびわれ発生腐食量も高くなることが分かる。しかし、文献 [11] によれば強度が低く疎なコンクリートの方が、強度が高く密なものより腐食生成物がコンクリート中に染み込み易く、ひびわれ発生腐食量が高くなる可能性が指摘されている。

5. まとめ

本研究は、破壊力学に基づいたFEM解析と、平面弾性解析との併用によりひびわれ発生時の腐食量を求め、既往の電食実験との比較検討を行なった。その結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 内圧を受ける中空円筒コンクリートの破壊実験結果と、本FEM解析値を比較した結果良く一致する。これより、本FEM解析は膨張挙動を良く表すことが分かる。
- (2) 本解析により得られたひびわれ発生腐食量は、既往の電食実験値と比較的良好一致する。
- (3) ひびわれ発生が長期の場合、クリープを考慮するとひびわれ発生腐食量は比較的一致する。
- (4) コンクリートの引張強度が高くなればひびわれ発生腐食量も高くなる。

以上のように、本研究の解析手法により得られた結果は、既往の電食実験結果を良く説明していることが分かる。但し、今回は、電食実験との比較であり、実際の自然腐食現象による結果とは多少異なることも考えられる。

[謝辞] 本研究は平成4年度科学研究費奨励研究(A)によりました。記して感謝の意を表します。実験データを引用させて頂いた研究者の方々や、解析に協力頂いた琉球大学4年次東迎育博君には厚くお礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) Y.Yamada,N.Yoshimura,T.Sakurai: Plastic Strees-strain Matrix and Its Application for the Solution of Elastic-PlasticProblem by Finite Element method, Mechanical Science,Vol.10,pp.343-354,1968
- 2) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学学位論文, 1986.11
- 3) 野村希昌, 三橋博三, 和泉正哲: コンクリートの引張軟化挙動と破壊エネルギー吸収機構に関する一考察, 建築学会論文報告集, 第438号,pp.9-14,1992.8
- 4) 佐藤和郎, 茂村達也, 永井文雄: ぜい性材料からなる円筒の内圧破壊に及ぼす延性に影響, 日本機械学会論文集(A編), 45巻, 391号, pp.220-226,1979
- 5) 原田哲夫: 静的破砕剤を用いたコンクリート構造物の解体に関する基礎的研究, 東京大学学位論文, 1988
- 6) 吉岡保彦, 米澤敏男: 鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する基礎的な検討, 土木学会年次学術講演会, 第37回, 第V部門, pp.271-272,1982
- 7) 須田久美子, MISRA Sudhir, 本橋賢一: 腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次講演会論文集, 第14回, pp.751-756,1992
- 8) 武若耕司, 松本進: 鉄筋腐食によって生じるRC構造物の劣化に関する研究, 土木学会年次学術講演会, 第38回, 第V部門, pp.259-260,1983
- 9) 森川雅行, 関博, 奥村隆: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれ発生機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第378号, pp.97-105,1987
- 10) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次講演会論文集, 第10回, pp.505-510,1988
- 11) 榊田佳寛, ほか:塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, No.435,pp.19-27, 1992.5

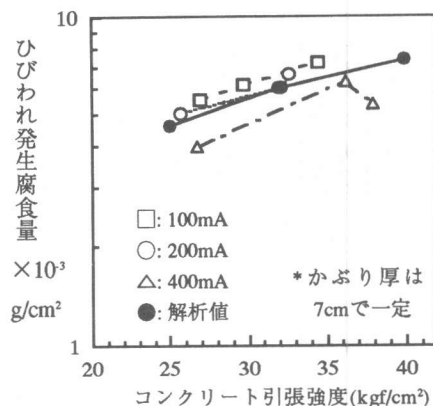


図11.引張強度とひびわれ発生腐食量との関係