

V-184

鉄筋の腐食膨張によるコンクリートひびわれの有限要素解析

千代田化工建設(株)	正会員	○	小西 裕一郎
早稲田大学	正会員		関 博
東京電機大学	正会員		松井 邦人
東電設計(株)	正会員		松島 学

1. まえがき

土木構造物の海洋進出や凍結防止用の融氷塩散布等によりコンクリート中鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートにひびわれを発生させる現象が多数報告されている。この現象は腐食生成物の膨張圧によるものと考えられ、コンクリート構造物の耐久性を著しく損なうものである。本研究では腐食生成物の膨張量とひびわれの進展を、有限要素法を用いて検討するものである。また、コンクリート中に埋込んだ鉄筋をアノード電極とした定電流電食試験を併せて行ない、腐食生成物の膨張量とその膨張圧による供試体のひずみを解析による結果と比較検討した。

2. 解析方法

解析モデルは、電食試験用供試体の対称性を考慮し、供試体を4分割したモデル(図1)を用いた。実現象は三次元であるが、本解析では二次元の平面ひずみ問題として有限要素法を用いた。ひびわれのモデルには、現在"Discrete Crack Model"と"Smearred Crack Model"の二通りが考えられるが、本解析では適用が比較的簡便な後者のモデルを適用した。このモデルは要素の応力状態がある破壊基準に達した時点で、その要素のひびわれに対して直角方向の剛性を零に低減することで、ひびわれを評価するものである。ひびわれに伴う応力の解放は、ひびわれた要素の持っていたひずみエネルギーを、等価節点力に変換して行なった。破壊基準には、二軸応力下において実験的に求められた"Kupferの破壊包絡線"を使用し、腐食生成物の膨張圧はモデルが無筋であることを考慮して、膨張量を強制的な変位として与える方法を用いた。解析に用いた諸元を表1に示すが、これらコンクリート関係の諸元は管理供試体試験から得られた値を使用した。

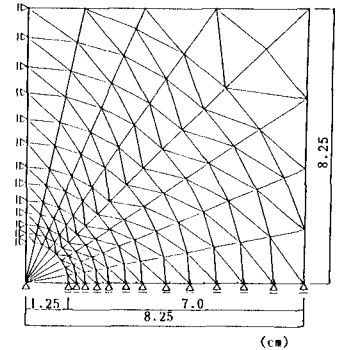


図1 解析モデル

表1 解析に用いた材料諸元

材 料	弾性係数 (kg/cm ²)	ポアソン比	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)
コンクリート	2.66×10 ⁵	0.158	408.2	35.2
鉄 筋	2.10×10 ⁶	0.333	—	—

3. 電食試験

試験の概要を図2に示す。供試体は16.5cm×16.5cm×19.0cmの角柱とし、鉄筋(SS41, φ25mmみがき棒鋼)を中心に埋込み、かぶり厚を7cmとした。水セメント比は55%で、腐食促進のため練り混ぜ水中に、単位セメント重量当り0.5%(1.765kg/m³)の塩化ナトリウムを混入した。実験は直流電源により400mAの定電流を負荷して、供試体側面にひびわれが確認されるまで通電した。また、供試体上面及び側面にひずみゲージを貼付して一定時間(15分)毎にひずみを測定し、側面上部のひずみをひびわれ発生の確認に使った。通電終了後、取出した鉄筋を10%クエン酸2アンモニウム溶液に24時間浸して錆を除去し、腐食重量減を算出した。

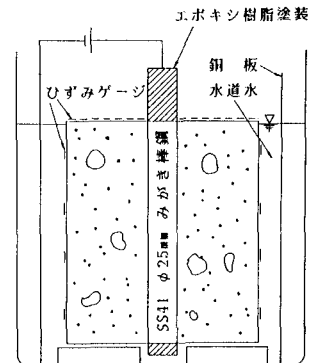


図2 電食試験概要図

3. 解析及び実験結果と考察

解析は強制変位の増分量 $\delta = 0.1 \times 10^{-4} (\text{cm})$ として計算を進めた。解析による結果を図3、4に示す。図3は鉄筋からの距離とその位置の主引張応力度を計算ステップ毎にプロットしたものであり、ひびわれの進行状況がわかる。図中の実線は、厚肉円筒弾塑性解析による理論解と比較のために載せたものであり、有限要素法による結果が妥当なものであると考えられる。図4は解析において破壊直前のひびわれパターンを示したものである。“Smeared Crack Model”を用いた場合、ひびわれがかぶり表面にまで達する状況を追うことはできなかったが、ひびわれの進行方向が実際のひびわれ方向に進む傾向はみられた。

図5はひずみゲージ貼付位置に相当する要素のひずみを計算ステップ毎にプロットしたもので、図6は供試体上面のひびわれ面におけるひずみの上昇を示したものである。実験により得られた、ひびわれ発生時の鉄筋付近のひずみは 516×10^{-6} であり、解析による値 384×10^{-6} に近い値となった。解析によるひびわれ発生時の強制変位量は $1.8 \times 10^{-4} (\text{cm})$ であったのに対して、実験により得られた腐食重量減から求めた膨張量は $3.6 \times 10^{-4} (\text{cm})$ であり、解析結果の倍近い値となった。これは図4よりわかるように、解析による値はひびわれが約1.3(cm)進んだ場合の変位量(膨張量)で、実験により求められた値はひびわれがかぶりに達した時点の膨張量であること等によるものと思われる。

4. あとがき

本研究を行なった範囲において、判明した事項を以下にまとめる。

- 1) 解析によるひびわれ発生時の強制変位量(膨張量)は $1.8 \times 10^{-4} (\text{cm})$ で、その時点における鉄筋近傍のひずみは 384×10^{-6} であった。
- 2) 実験によるひびわれがかぶり表面に達するに必要な腐食生成物の膨張量は $3.6 \times 10^{-4} (\text{cm})$ であり、その時の鉄筋近傍におけるひずみは 516×10^{-6} であった。

今後は、ひびわれた要素の応力を一挙に解放するのではなく、徐々に変化させていく方法(ひずみ軟化)や、現象が長期にわたるためクリープ等の影響を考慮した方法を用いて解析を進めていく必要がある。また、実験から腐食生成物の膨張量を求める場合に、錆の力学的特性等を明らかにする必要性もある。

本解析を行なうにあたり、貴重な助言を下された清水建設(株)技術研究所 長谷川俊昭様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小堀、吉田：有限要素法による構造解析プログラム 丸善 1980
- 2) 森川、関、奥村：鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究 土木学会論文集 第378号 1987.2

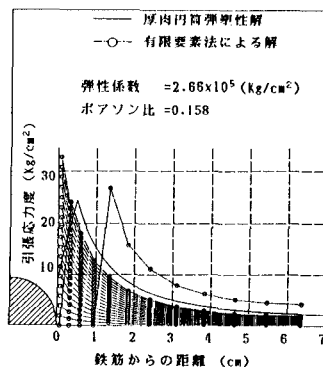


図3 鉄筋からの距離と引張応力度

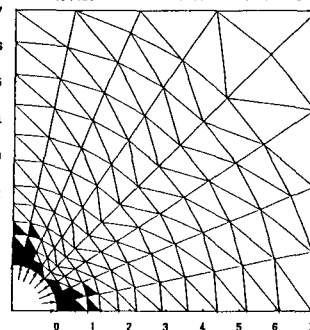


図4 ひびわれパターン

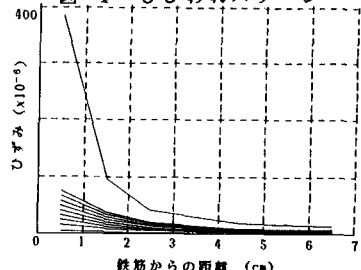


図5 供試体上面のひずみ(解析値)

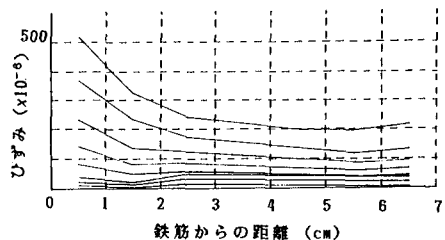


図6 供試体上面のひずみ(実験値)