

論文 鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひびわれ進展解析

松尾豊史^{*1}・西内達雄^{*2}・松村卓郎^{*3}

要旨： 鉄筋の腐食膨張に伴って発生するコンクリートのひびわれに着目し、鉄筋の腐食量とコンクリートのひび割れ進展の関係について、実験と解析を実施した。

実験では、水セメント比(45%, 55%, 65%)及びかぶり厚さ(20mm, 40mm, 65mm)を変えて、電食実験を実施し、解析では、破壊エネルギー、引張軟化を考慮したコンクリートの破壊力学的な手法を用いて解析を実施した。ひびわれがかぶりを貫通し、コンクリート表面に達した時の限界鉄筋腐食量などを解析によって評価することが可能であり、実験結果との比較においても良好な結果を得られることが確認できた。

キーワード：鉄筋の腐食膨張、限界鉄筋腐食量、破壊エネルギー、引張軟化曲線

1. はじめに

塩害劣化を受ける鉄筋コンクリートは、『鉄筋のかぶりコンクリートにひびわれが発生した時点で耐久性は失われる』と考える場合が多い。これは、ひびわれ発生時点では鉄筋の腐食損傷は軽微であるが、それ以降、鉄筋の腐食損傷が急激に進行すること及び、鉄筋の腐食損傷度と鉄筋コンクリートとしての性能低下の関係が、定量的に不明確であるという理由によっている。

鉄筋が腐食した場合については、種々の方法でシミュレーション解析が実施されているが、実際に内部にどの程度の応力が発生するのかなど明確でなく、また実験値と比較する研究は少ない。

本研究は、鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひびわれ進展現象について実験的、解析的に検討したものである。実験では、既往の研究[1]を参考にして電食試験を実施し、種々の要因による限界鉄筋腐食量を求めた。解析では、破壊力学的な手法を用いて鉄筋の腐食膨張に伴うかぶりコンクリートへのひびわれ進展過程をシミュレートした。解析により、限界鉄筋腐食量を評価可能であり、実験値との比較を行い、解析手法の妥当性の検証を行った。

2. 実験概要

本研究では、塩害、中性化等により鉄筋が腐食した状態を再現する方法として、電食試験を実施した。鉄筋腐食によるコンクリートのひびわれ発生に影響を与える実験要因として、水セメント比(45%, 55%, 65%)及びかぶり厚さ(20mm, 40mm, 65mm)を考えて、コンクリートの配合(表-1)及び試験体の寸法を設定した。実験で用いたコンクリートの強度試験結果を表-2に示す。実験で使用した試験体の寸法は、 $6 \times 6 \times 10$ cm, $10 \times 10 \times 10$ cm, $15 \times 15 \times 10$ cmの鉄筋コンクリート試験体で、その中央にD19, SD345相当の異形鉄筋を埋設したものである。埋設された10 cmのうちの8 cmが腐食区間である(図-1)。

* 1 電力中央研究所・構造部・研究員(正会員)

* 2 電力中央研究所・構造部・主査研究員(正会員)

* 3 電力中央研究所・構造部・主査研究員(正会員)

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	Air (%)	単体量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
4.5	44	10±2.5	3±1	165	367	800	1038	0.92
5.5	46	10±2.5	3±1	165	300	862	1031	0.75
6.5	48	10±2.5	3±1	165	254	919	1014	0.64

表-2 コンクリートの強度物性

W/C	圧縮強度 (kgf/cm ²)		弾性係数 x10 ⁵ (kgf/cm ²)		割裂強度 (kgf/cm ²)	
	28日	試験時	28日	試験時	28日	試験時
45%	475	533	3.97	3.65	35.2	38.3
55%	327	419	3.64	3.30	26.8	30.6
65%	321	395	3.70	3.32	25.7	30.3

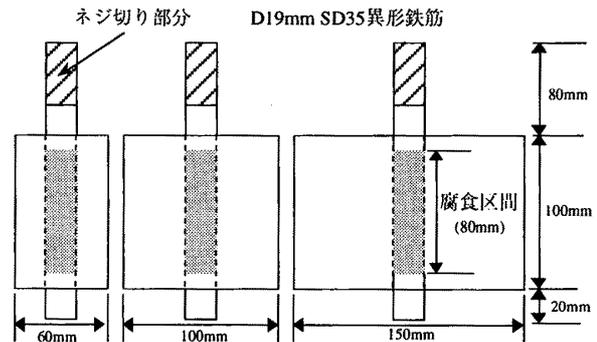


図-1 電食実験で用いた鉄筋コンクリート供試体

実験装置の概略は図-2に示されるようなものである。ポリエチレン製容器に電解液として水道水を満たし、試験体を浸した後、鉄筋をアノード、円筒状に加工した鉄板をカソードとし、直流電源により定電流を負荷した。通電開始後、両極間の電圧降下および目視観察により試験体表面にひびわれ発生を認めた時点で通電を停止した。その後ただちに試験体を割裂し、埋設された鉄筋を取り出し重量測定を行い腐食量を求めた。

腐食量の測定は、日本コンクリート工学協会の「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)」[2]に準拠した。鉄筋を取り出し10%クエン酸二アンモニウム溶液(60℃)に約24時間浸した後、腐食生成物を除去して鉄筋の腐食量を測定し、健全な鉄筋との重量差を腐食量とした。

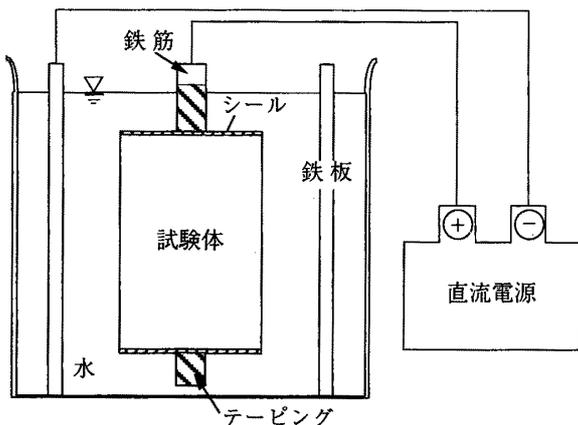


図-2 電食実験装置の概略図

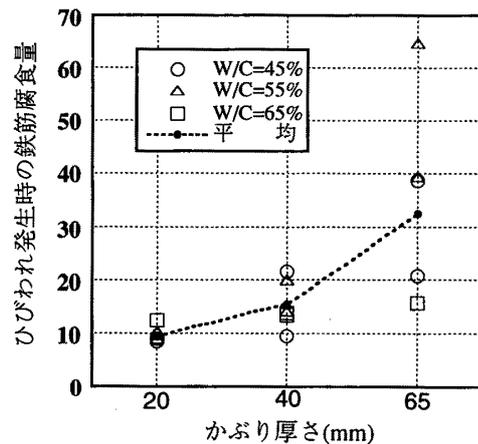


図-3 ひびわれ発生時の鉄筋腐食量

鉄筋腐食に伴うかぶりコンクリートへのひびわれ発生は、鉄筋コンクリートのかぶり厚さによる影響を大きく受けることが判明している。コンクリートかぶり厚さと鉄筋腐食量の関係を図-3に示す。これによると、鉄筋のかぶり厚さが20mmでは腐食量は約9.4mg/cm²、40mmでは腐食量は約15.5mg/cm²、65mmでは腐食量は約32.5mg/cm²となった。

3. 解析概要

3. 1 ひびわれ発生機構のモデル化

鉄筋が腐食膨張した初期段階では、ひびわれはおよそ直角方向に十文字状にはいるが、その後一方のひびわれのみが卓越して進展する。この時の模式図を図-4に示す。このような鉄筋の腐食膨張によるひびわれの進展現象に対して、破壊進行領域(fracture process zone)を仮定し、破壊力学的な手法を用いて、鉄筋腐食によるひびわれの進展現象をシミュレートする。

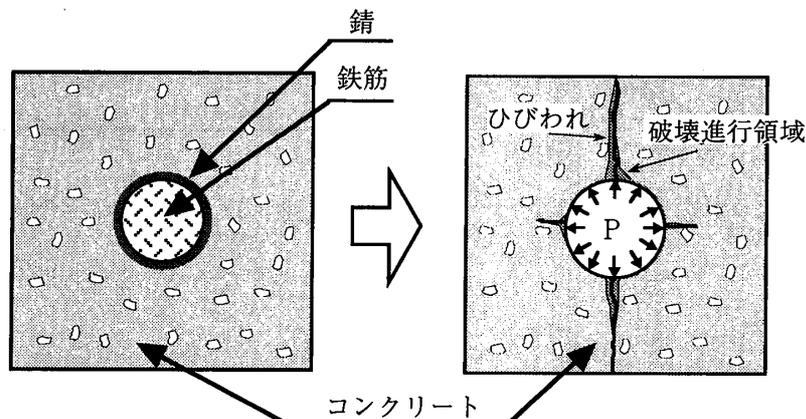


図-4 ひびわれ進展模式図

3. 2 解析手法

本解析ではコンクリートの破壊力学に基づいた「仮想ひびわれモデル」[3]による2次元有限要素解析プログラムを用いた[4]。解析は载荷点に強制変位を与えていく変位制御型の増分解析である。図-5に示すように、ひびわれ面間にロッド要素を配置し、引張軟化曲線から求まる引張応力を等価節点力として作用させた。ひびわれと水平方向剛性については垂直方向の応力が引張強度に達した場合、0になるように設定した。引張軟化曲線のモデルは一般によく用いられる1/4モデルを用いた(図-6)。

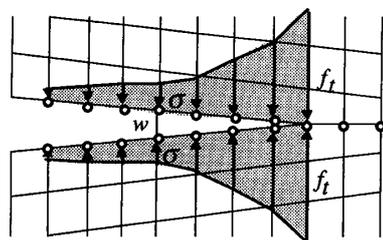


図-5 仮想ひびわれモデル

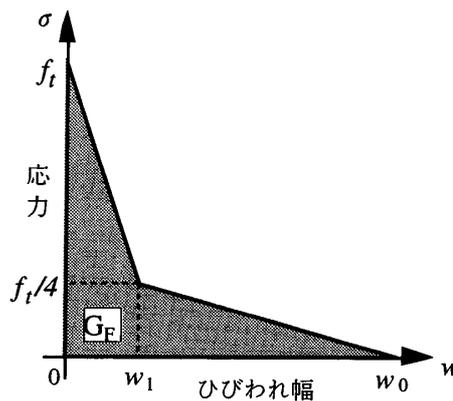


図-6 1/4モデル

解析に用いたコンクリートの物性値は、表-1に示したものをを用いた。但し、破壊エネルギーはCEB-FIP MC90[5]に基づき、圧縮強度より、以下の式(1)を用いて求めた。

$$G_F = 0.0012 \times f_c'^{0.7} \quad (\text{kgf/cm}) \quad (1)$$

また、解析に用いた要素分割図を図-7に示す。解析は対称性を考慮して、供試体の1/4のみをモデル化した。図のY方向に仮想ひびわれを設定した。鉄筋の腐食膨張をモデル化するため円周の放線方向に一樣な強制変位を与えて解析を行った。一般に鉄は体積膨張を生じ、その成分や応力や変形の状態に依存するが、その体積膨張率は約2.5倍とされている[6][7]。そこで、解析では、体積膨張率は常に2.5倍一定と仮定して解析した。

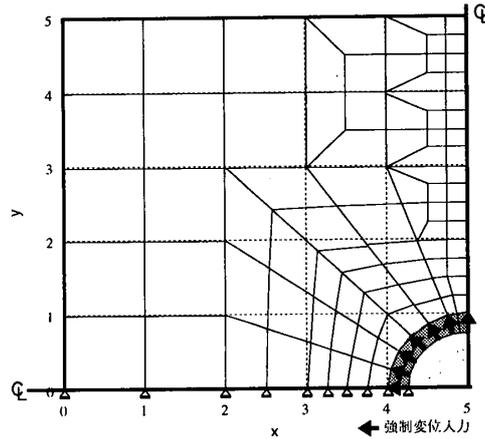


図-7 解析の要素分割図

鉄筋の腐食量を W_r 、鉄筋の密度を $\rho_s (=7.85\text{g/cm}^3)$ とすると、錆になる鉄筋の層の厚さ r_0 は式(2)のように表される。

$$r_0 = \frac{W_r}{\rho_s} \tag{2}$$

解析による強制変位量 U と錆生成による体積増加量が等しいとすると、式(3)が成り立つ。

$$(dV-1) \times r_0 = U \tag{3}$$

従って、鉄筋の腐食量は以下の式(4)によって示すことができる。

$$W_r = \frac{\rho_s \cdot U}{(dV-1)} \tag{4}$$

- W_r ; 鉄筋の腐食量 (g/cm^2)
- ρ_s ; 鉄の密度 (g/cm^3)
- U ; 強制変位量 (cm)
- dV ; 錆の体積膨張率

3.3 実験値と解析値との比較

鉄筋のかぶり厚さが、20mm、40mm、65mmの場合の鉄筋腐食量と割裂荷重との関係の解析結果を図-8に示した。割裂荷重は、鉄筋の腐食膨張により生じる膨張圧の内ひびわれ形成に必要なX方向の力の合力である。

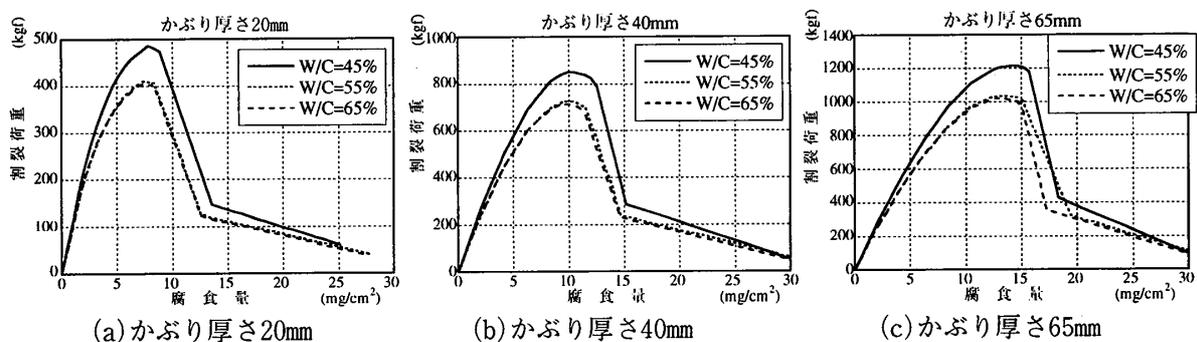


図-8 鉄筋腐食量と割裂荷重の関係(解析結果)

実験結果では、鉄筋のかぶり厚さが20mmでは腐食量は約9.4mg/cm²、40mmでは腐食量は約15.5mg/cm²、65mmでは腐食量は約32.5mg/cm²であった。解析結果では、腐食膨張圧が最大になる鉄筋腐食量は、鉄筋のかぶり厚さが20mmでは腐食量は約7.5mg/cm²、40mmでは腐食量は約10mg/cm²、65mmでは腐食量は約13.8mg/cm²であった。解析結果は実験におけるひびわれ発生時における限界鉄筋腐食量よりも小さめに評価されている。これは、実験における限界鉄筋腐食量は目視でコンクリート表面にひびわれが観察される段階であり、腐食膨張圧が最大になって以降のひびわれがかなり進行した状態に対応するものだと考えられる。

図-9に鉄筋位置からかぶりコンクリート部までの応力分布を示す。これによると、レベル(3)の時に割裂荷重が最大になり、この時曲線下の面積も最大になる。レベル(4)とレベル(5)の間でかぶりコンクリート表面の応力レベルが引張強度に達したと判断できる時点で耐力が大幅に減少する。

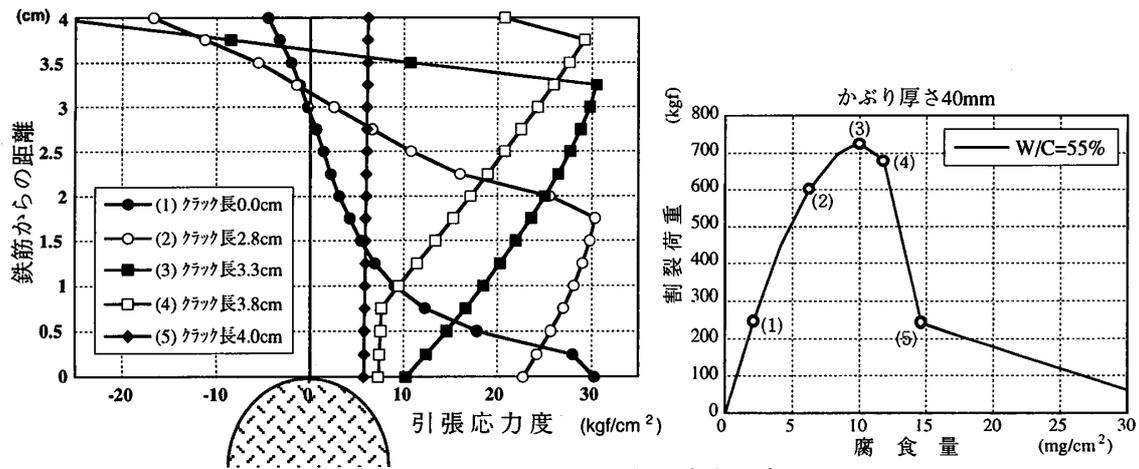


図-9 かぶりコンクリート部の応力分布

そこで、かぶりコンクリートにひびわれが発生する限界鉄筋腐食量に対応する量として、コンクリート表面の応力が引張強度に達した時点(仮想ひびわれがコンクリート表面に達した時点)を限界鉄筋腐食量に対応する量と考えた結果を図-10に示す。なお、W/C=55%のかぶり厚さ65mmのデータの内一点は他のデータ比較してあまりにも大きな値であるので無視した。解析1は割裂荷重最大時の腐食量、解析値2は、かぶりコンクリート表面の応力が引張強度に達したと判断できる時点での腐食量である。鉄筋のかぶり厚さが20mmでは腐食量は約8.5mg/cm²、40mmでは腐食量は約12.0mg/cm²、65mmでは腐食量は約15.7mg/cm²であった。特にかぶりコンクリートが65mmの場合に実験値のばらつきが大きく、65mmでの限界鉄筋腐食量は実験の平均値よりも小さく評価されているものの、その他の場合については比較的良好な結果を与えている。全体的に解析値は実験値よりも小さめに評価されている。これは、解析では錆が鉄筋表面に均等に生じると仮定しており、実際には錆が不均一に生成することの影響及び錆の体積膨張率が実際よりも大きかったことが考えられる。

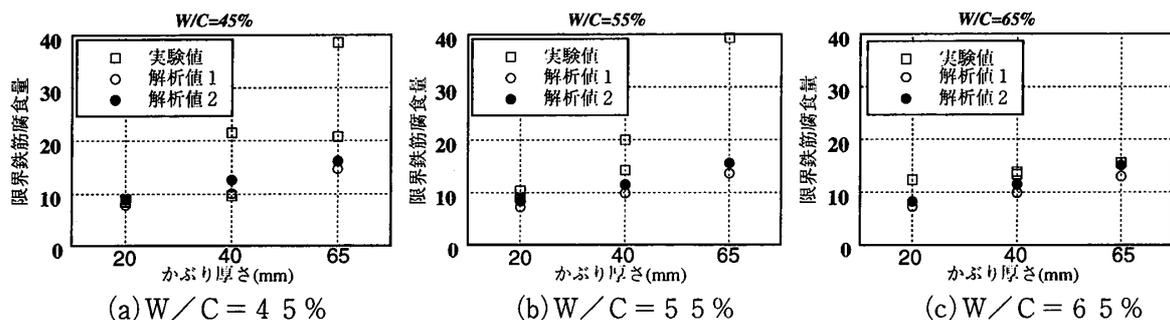


図-10 解析値と実験値の比較

4. パラメータスタディ

限界鉄筋腐食量に与えるコンクリートの物性(弾性係数, 引張強度, 破壊エネルギー-Gf)及びかぶり厚さの影響を調べるために、パラメータスタディを行った。各解析ケースの物性値を表-2に示す。かぶり厚さについては、20mm、40mm、65mmの3通りについて解析を行った。解析の各種条件については、3章と同様である。

表-2 各解析ケースの条件

解析ケース	弾性係数 E_c ($\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$)	引張強度 f_t (kgf/cm^2)	破壊エネルギー-Gf (kgf/cm)
#1	2.0	30.0	0.1
#2	3.0	30.0	0.1
#3	4.0	30.0	0.1
#4	3.0	20.0	0.1
#5	3.0	40.0	0.1
#6	3.0	30.0	0.05
#7	3.0	30.0	0.3

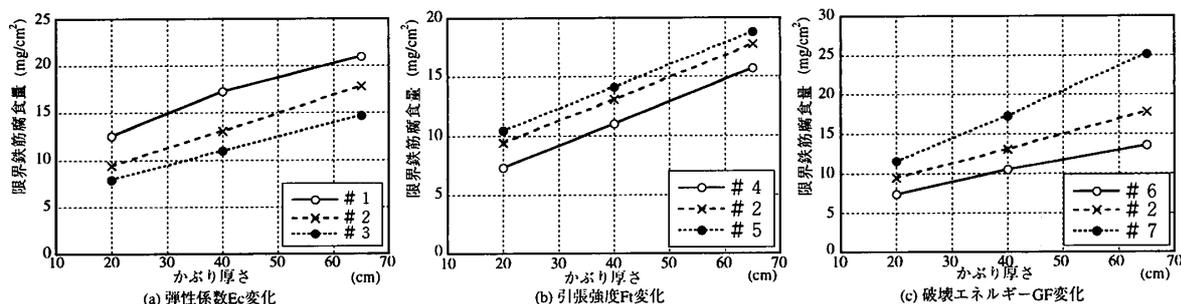


図-1-1 限界鉄筋腐食量に与える各種パラメータの影響

解析結果を図-1-1に示した。これは、それぞれ弾性係数、引張強度、破壊エネルギーが各かぶり厚さで鉄筋限界鉄筋腐食量にどのように影響するかを示すものである。これよると、弾性係数が低いほど、引張強度が高いほど、破壊エネルギーが大きいほど鉄筋の限界鉄筋腐食量は増加することが認められる。特に注目すべきは、破壊エネルギーはかぶり厚さが大きくなればなるほど有効に作用すると思われる点である。

5. おわりに

本研究では、鉄筋の腐食度とかぶりコンクリートへのひびわれ発生を明らかにするために、電食実験を実施し、解析により、鉄筋腐食膨張によるコンクリートのひびわれ発生、鉄筋コンクリートの耐力低下、かぶりコンクリートへのひびわれの発生過程をシミュレートし、実験値との比較においても良好な結果を得た。鉄筋の腐食量を非破壊検査などで推定出来れば、本手法により、ひびわれの発生・進展及び限界鉄筋腐食量を適切に評価可能である。今後、鉄筋コンクリートの耐久性評価などに適用可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 森川, 関, 兵村: 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/V-6, 1987.2.
- [2] コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案); JCI, 1987.4.
- [3] コンクリートの破壊力学研究委員会: コンクリート構造物の破壊力学に関するコキョム; JCI, 1990.3.
- [4] 二羽: 非線形ロッド要素を用いたコンクリートはりの曲げ強度寸法効果解析; JCI年次論文報告集, 1993.6.
- [5] CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin D'infomation No.213/214, 1993.5.
- [6] 小林一輔: 鉄筋の腐食とコンクリート構造物の耐久性, 最新コンクリート工学(第3版), 森北出版, 1992
- [7] 須田ら: 腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的研究, JCI年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992.6