

論文 鉄筋の腐食膨張に伴う表面ひび割れ開口の破壊力学的実験研究

中村則清*¹ 橘高義典*²

要 旨：かぶり厚の異なる普通強度と高強度のモルタル試験体に埋め込んだ鉄筋について電食実験を行い、モルタル表面のひび割れ開口変位と積算電流量から算出される鉄筋腐食量の関係を把握した。さらに破壊力学的手法により、鉄筋部腐食膨張によるコンクリート表面のひび割れ進展解析を行い、実験結果との比較を行った。

キーワード：鉄筋腐食、耐久性、破壊力学、結合力モデル

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の耐久性は、「鉄筋の腐食あるいは骨材の反応等により、コンクリートが膨張・引張作用を受け、ひび割れの誘発・鉄筋発錆の助長等により、かぶり部を含めた構造耐力上重要なコンクリート部分ならびに鉄筋の強度が低下し、部材の構造耐力が低下すること」と定義できる。したがって、ひび割れを誘発する膨張力・引張力等に対してコンクリートかぶり部がどのように破壊するかを解明することがコンクリートの耐久性研究の重要な基礎になる。

鉄筋の腐食等に伴うかぶりコンクリートのひび割れ発生に関する主な研究には以下がある。森川・関・奥村ら [1] は、ひび割れの発生条件に関する基礎的な実験を行った。松島・堤・村上ら [2] は鉄筋径の無次元量の差によるひび割れ発生パターンを調べた。木村・丸山・濱田ら [3] は鉄筋腐食量とひび割れ発生パターンと幅の傾向を把握した。しかしながらコンクリート表面にひび割れが生じた後の破壊域の進展ならびに、ひび割れ幅の変化についての実験例は少ない。またこのような破壊域を含んだひび割れ進展解析には、コンクリートの軟化特性を組込んだ破壊力学的な解析が有効である。

本研究では鉄筋の電食実験によりモルタル強度およびかぶり厚がひび割れ幅におよぼす影響を実験し、破壊力学的手法を用いた解析結果と比較することを目的とする。

2. 解析方法

本解析では、鉄筋に沿った表面にひび割れがすでに発生している場合を解析する。すなわち、耐久性の観点で、すでにひび割れが生じた状態を想定する。コンクリート等、非線形材料の表面ひび割れ開口後のひび割れ拡張を、仮定のひび割れ面に直行する応力を作用させモデル化する(図-1)。したがってモード I (引張型変形) のみの解析となる。

各節点の応力は、コンクリートの非弾性変形を考慮し引張軟化特性をモデル化した結合力 σ と鉄筋の膨張力に等価な拡張力 P とする。そして各節点の応力により生じる仮想ひび割れ先端での応力拡大係数の和、ならびに応力拡大係数から算出される各節点の開口変位が釣合うように重合せ理論により定式化する(式(1)、式(2))。

*1 東京都立大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京都立大学助教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

ひび割れ先端での応力場を記述する応力拡大係数を用いることにより、引張応力等の釣合による従来の有限要素解析よりも厳密なひび割れ解析結果が得られる。また、単純な形状の試験体の場合、応力拡大係数はハンドブック[6]等から簡便に引用できるという利点もある。

$$K(a) = K_p(a) + K_r(a) = 0 \quad (1)$$

$$\delta(a, x) = \delta_p(a, x) + \delta_r(a, x) \quad (2)$$

ここに、 $K(a)$ 、 $K_p(a)$ 、 $K_r(a)$ ：それぞれ、仮想ひび割れ a の時の仮想ひび割れ先端の応力拡大係数、等価鉄筋膨張力、結合力による仮想ひび割れ先端の応力拡大係数、 $\delta(a, x)$ ： x での開口変位、 $\delta_p(a, x)$ 、 $\delta_r(a, x)$ ：それぞれ x での等価鉄筋膨張力、結合力による開口変位、である。等価鉄筋膨張力 $P(a, x)$ は、鉄筋表面での膨張圧を一定 $P_0(a)$ と仮定し、ひび割れ開口方向の拡張成分のみ抽出し式(3)のようにモデル化した。なお T はかぶり厚、 D は鉄筋径、 $I(x)$ は成分関数である。

$$P(a, x) = P_0(a)I(x), \quad (T \leq x \leq T + D),$$

$$I(x) = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2(x-T)^2}{D}\right)} \quad (3)$$

結合応力(負の値)は式(4)の多直線近似引張軟化曲線で表すことができる。鉄筋位置には結合力は作用しないものとした。

$$\sigma(a, x) = m(\delta, x) \cdot \delta + n(\delta, x), \quad \delta = \delta(a, x) \quad (4)$$

ひび割れ面の作用力と開口変位は式(5)の積分方程式で表せる。 E はヤング率、 $H^e(a, x, c)$ は形状関数であり作用力に依存しない。

$$\delta(a, x) = \frac{1}{E} \int_0^a \sigma(a, c) H^e(a, x, c) dc \quad (5)$$

構成式(3)(4)を(5)式に代入し離散化し得られる非線形連立方程式を解くことにより、任意仮想ひび割れ長 a での、開口変位の分布が求められ、さらに結合応力分布、膨張力等が求められる。非線形連立方程式の解法では、各節点の構成関数の傾きが一致するまで連立方程式を繰返し解き最適解を求める(多直線構成関数一致法)。

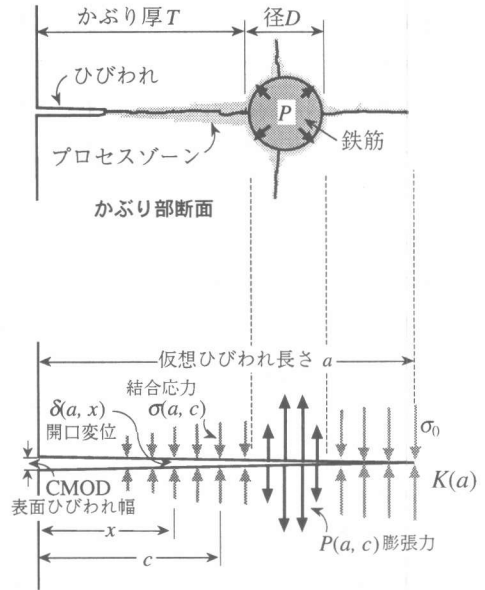


図-1 鉄筋膨張によるひびわれ進展のモデル化

3. 実験方法

3.1 使用材料及び試験体

今回の実験で使用したモルタル試験体(図-2)は、普通強度(記号N)と高強度(記号H)の2種類とし、普通強度のかぶり厚を5, 15, 30mmの3種類、高強度のかぶり厚5mmの合計4種類の試験体を作成した。

モルタルの調合条件及び性質を表-1に示す。高強度では混和剤(Ad)に高性能AE減水剤を用いた。

電食実験に用いた試験体の概要を図-2に示す。丸鋼の露出部は腐食を防ぐため、シーリング材を塗装した。ひび割れ幅は、2個のパイ型ゲージにより計測した。

3.2 実験装置

電食実験装置を図-3に示す。試験体下部を食塩水(NaCl水溶液5%)に浸し、丸鋼を+極、銅板を一極とし、直流安定化電源にて0.3A程度の通電を行った。ひび割れ部からの錆の流出を防ぐために試験体は食塩水を含ませた布で覆った。抵抗部の電圧をデータロガーで測定記録し、電流値を求め積算電流量を算出した。

3.3 解析に用いた引張軟化特性

ひび割れ進展解析を行うためには各モルタル試験体の引張軟化曲線を設定する必要がある。普通強度モルタル試験体の破壊靱性試験は既往の実験結果[5]から調合がほぼ同一の評価値を参考にし、パイリニア 1/4モデルを用いた。また、高強度モルタルに関しては、切欠きはり試験体寸法(10×10×45 cm)の破壊エネルギー試験を行い、荷重変位曲線(図-4)より、逆解析によりバイリニア型の引張軟化曲線を求め(図-5)解析に用いた。各材料の引張軟化特性値を表-2に示す。

表-1 モルタルの調合表および圧縮強度

	W/C	(kg/m ³)				Fc (MPa)
	(%)	W	C	S	Ad	
N	50	185	370	749	0	38.6
H	17	150	882	616	35	105

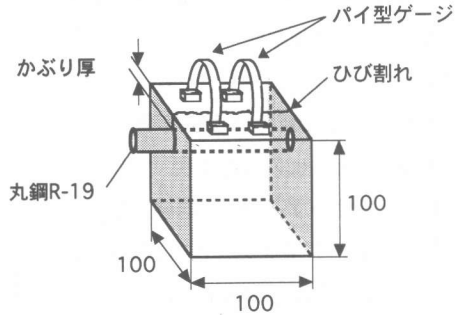


図-2 試験体

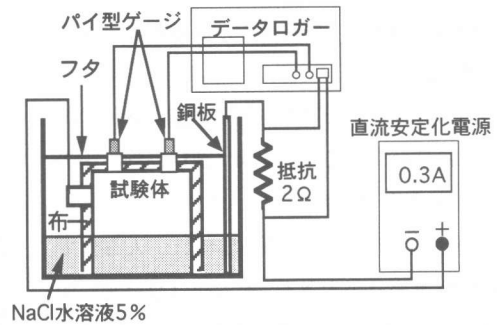


図-3 実験装置

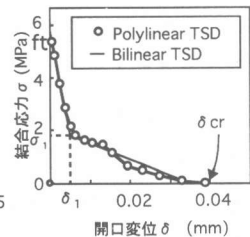
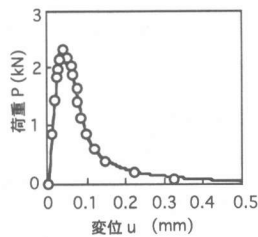


図-4 荷重-変位曲線

図-5 引張軟化曲線

表-2 解析に用いた材料の引張軟化特性

	普通 : N	高強度 : H
ヤング率 (GPa)	25.0	42.47
f_t (MPa)	2.60	5.80
σ_1 (MPa)	0.65	1.8
δ_1 (mm)	0.009	0.005
δ_{cr} (mm)	0.057	0.035

4. 実験結果及び考察

図-6に鉄筋腐食実験での、モルタル表面のひび割れ開口変位 (CMOD) と積算電流量との関係を試験条件別に示す。各試験条件とも、ひび割れが発生してからは積算電流量が増加するほど、ひび割れ開口変位は増加する傾向にある。

モルタル試験体の圧縮強度の影響に関して、かぶり厚5mmにの普通強度 (N) と高強度 (H) とを比較すると、普通強度に比べ高強度は開口変位の増加が大きい。この理由は、普通強度モルタルでは表面方向以外の鉄筋の周辺に微細なひび割れ多くでき、応力を緩和するが、高強度モルタルでは脆性的にひび割れが進展し、表面部のひび割れのみが成長する。

かぶり厚による影響を普通強度 (N) の試験体について見ると、5mm がひび割れ幅の最も大きな増加を示す。またかぶり厚が30mm の場合には表面ひび割れが入るまでの積算電流量が大きく、その後はひび割れ開口が大きく進む傾向がある。かぶり厚が5mm の場合には表面ひび割れの発生する時期が早く、その後の発錆も促進され、ひび割れ幅が大きくなるものと思われる。

図-7に解析結果から求めた鉄筋表面の膨張圧とモルタル表面のひび割れ幅 (CMOD) との関係を示す。膨張圧は徐々に大きくなりその後減少する。膨張圧が大きいということは、開口に対して抵抗がありひび割れ幅が大きくなりにくいことを示している。図-7より、高強度モルタルは抵抗値が大きくなる傾向が見られる。また普通強度では大きな差はないが、かぶり厚が小さい場合にひび割れ抵抗性はやや大きくなっている。

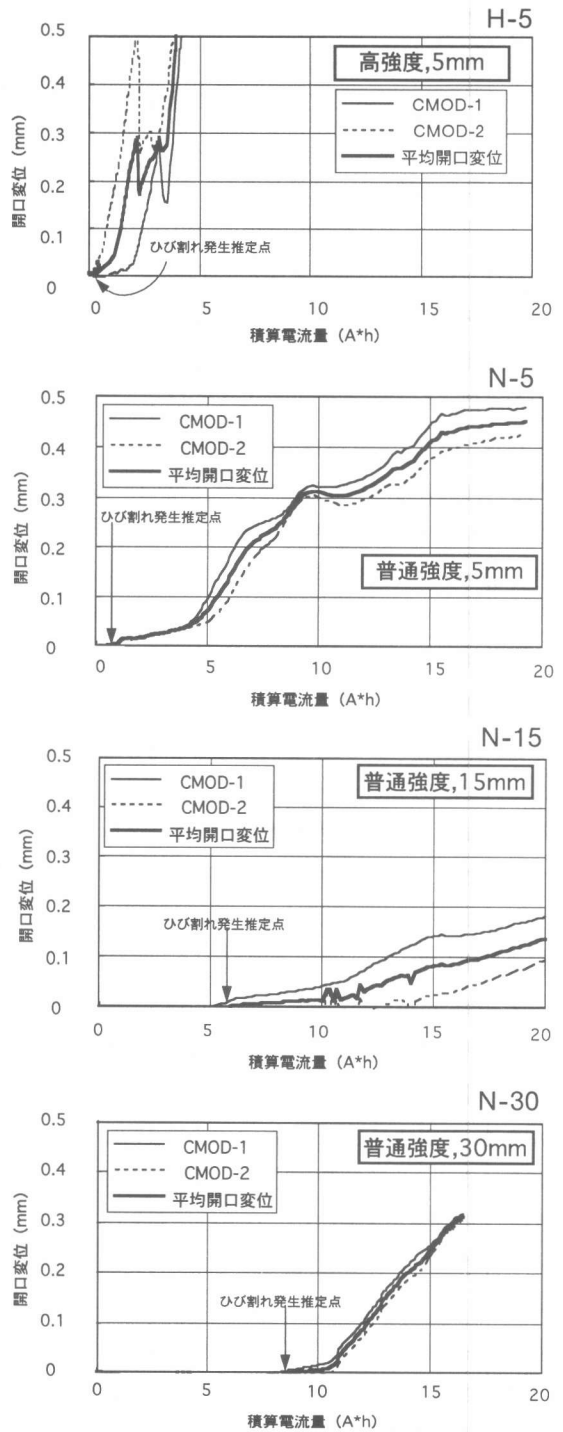


図-6 CMODと積算電流の関係

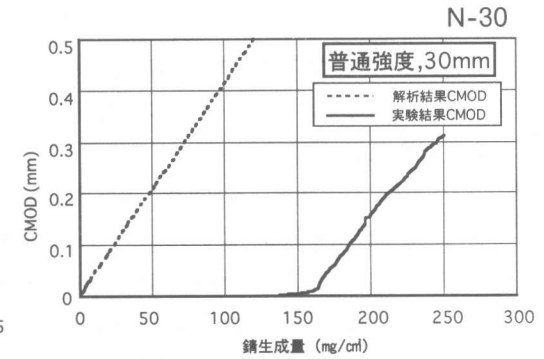
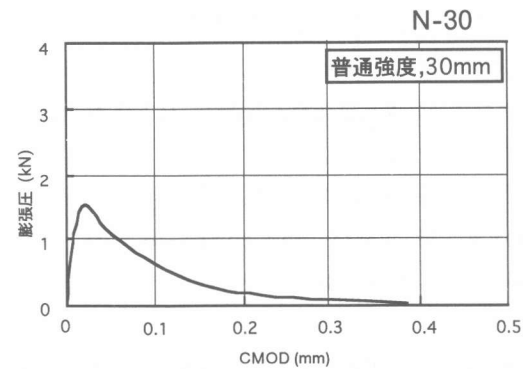
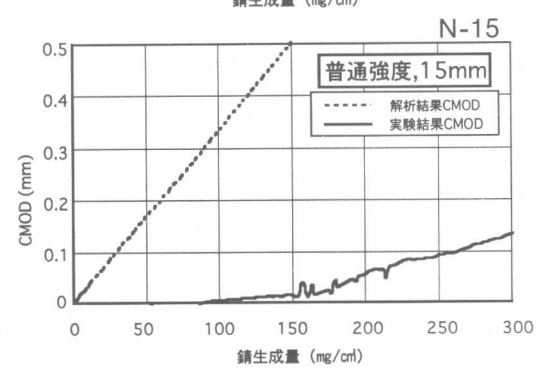
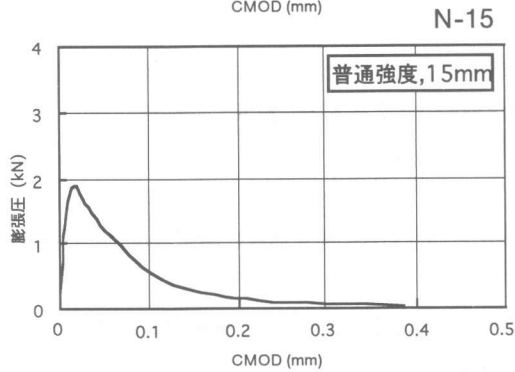
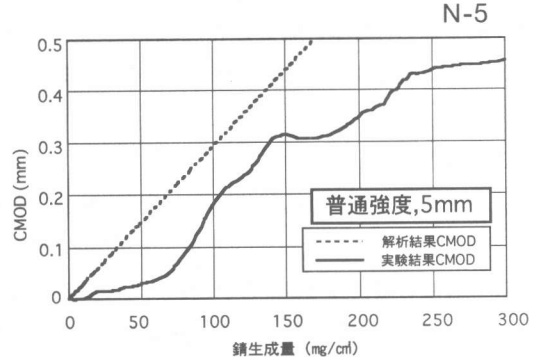
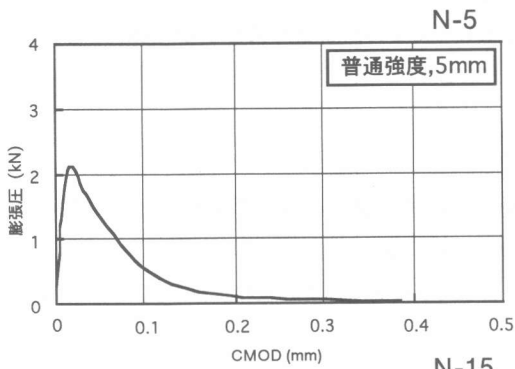
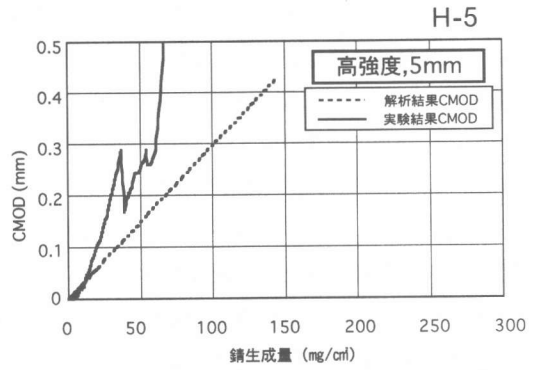
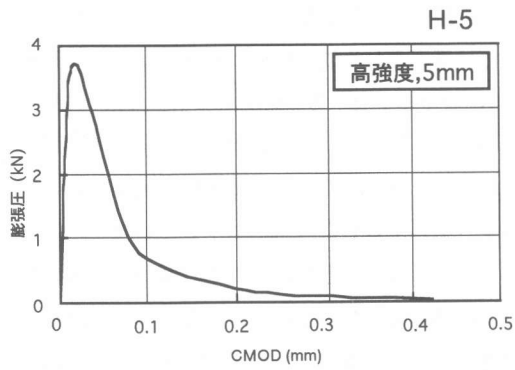


図-7 膨張圧とCMODの関係の解析結果

図-8 CMOD錆生成量の関係

図-8は、錆生成量と表面ひび割れ幅の関係であり、実験値と解析値を比較して示した。実験値での錆生成量は、積算電流量から推定した。また、解析では算出される鉄筋位置の平均開口変位（鉄筋膨張による変位の推定値）から、膨張圧がない場合での錆層の厚さを求め、錆生成量(mg/cm²)に換算した。この場合の錆層の厚さは、鉄筋位置の開口変位と膨張圧Pから、腐食部分の弾性係数（文献[7]より250N/mm²とした）により求めた。かぶり厚5mmでは、普通、高強度とも実験値と解析値とは近似する。しかし、かぶり厚が大きい場合には実験結果とは必ずしも良い対応は示していない。この原因として、実際の鉄筋の錆量は積算電流量に必ずしも比例しないと思われること、錆がひび割れから流出し膨張に関与する錆量が少なくなっていること、鉄筋に沿ったひび割れ以外の方向にも微細なひび割れが生じ誤差の原因となっていること、などが考えられる。また、本解析では表面にひび割れが生じた後のひび割れ開口を求めており、ひび割れが生じるまでの期間は対象としていないことより初期の変化を説明できない。今後詳しく検討する予定である。

5. まとめ

- 1) モルタルに埋め込んだ鉄筋の腐食実験を行い表面ひび割れの開口幅に及ぼすモルタル母材の影響を検討した結果、かぶり厚が大きいほどひび割れが開口しにくい傾向があった。
- 2) 鉄筋の腐食量と表面ひび割れ幅との関係を説明するためには、錆生成量の正確な把握、実際の破壊進展に合致するモデルの確立等が必要である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費（総合研究A、研究代表者：友沢史紀）の補助を受けました。また、実験方法の資料等にご協力頂いた長岡技術科学大学の丸山久一先生に謝意を表します。

参考文献

- [1] 森川雅行, 関 博, 奥村 隆：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387号, pp.97-105, 1987.
- [2] 松島 学, 堤 知明, 村上祐治：鉄筋腐食膨張による表面コンクリートのひび割れモデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp. 799-804, 1994.
- [3] 木村哲士, 丸山久一, 濱田 宏：RC部材における鉄筋腐食量の定量的評価方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.771-770, 1996.
- [4] 前田孝一：かぶりコンクリートのひび割れに必要な鉄筋の腐食量に関する研究, 日本建築学会大会梗概集, pp.147-148, 1983.
- [5] 中村成春, 橘高義典, 上村克郎：高強度コンクリートの破壊エネルギーに及ぼす骨材マトリックスの相互作用の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.411-416, 1993.
- [6] Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R. : The Stress Analysis of Crack Handbook, Second Edition, Paris Productions Incorporated, 1985.
- [7] 橘高義典：鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリート表面のひびわれ開口の破壊力学的解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.449-454, 1996.