

# 論文 鉄筋の腐食に伴うコンクリートの表面ひび割れ開口に関する研究

中村則清<sup>\*1</sup> 橋高義典<sup>\*2</sup>

**要旨:** 鉄筋コンクリート部材の耐久性に関する基礎的実験として、コンクリートの種類を高強度・普通強度・繊維混入と変化させ、鉄筋を埋め込んだ試験体の電食実験により、コンクリート表面に発生するひび割れ幅と鉄筋の腐食量との関係を実験検討した。さらに、ひび割れ幅と鉄筋腐食量との関係について解析方法を示し実験結果と比較考察した。

**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

既往の研究[1][2]において、コンクリートに埋め込んだ鉄筋の錆生成量とコンクリート表面のひび割れ開口変位との関係を実験検討した。その結果、材料的な特徴としては、コンクリート強度が大きくなるほど鉄筋の錆の生成量に対する表面ひび割れの発生が脆的になることが考察された。

本報告では、さらに鉄筋錆による表面ひび割れに及ぼすコンクリートの強度、繊維による補強効果、粗骨材の効果などを実験検討する。特にコンクリート表面にひび割れが生じた後のひび割れ進展に着目し、表面ひび割れ量から鉄筋腐食量の評価手法を確立するための基礎資料を得る。コンクリート内部の微細ひび割れ進展のモデル化のために破壊力学的手法を導入し、特に破壊進展量域の定量評価に有効である結合力モデルによる解析方法を示し実験結果との関係を考察する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体及び使用材料

実験で使用した試験体（図-1）は、普通強度プレーンモルタル（記号 NPL）、普通強度繊維混入モルタル（記号 NVF）、高強度プレーンモルタル（記号 HPL）、高強度繊維混入モルタル（記号 HVF）および普通コンクリート（記号 Ncon）の5種類とした。埋め込んだ鉄筋は丸鋼とし、径はすべて20mm φとした。かぶり厚は5mm、15mmと、施工不良等により比較的小さくなる場合を設定した。

モルタル・コンクリートの調合を表-1に示す。表中には圧縮、引張強度の値も示した。セメントはハイフローセメントとし、高強度にはシリカフュームを添加した。高強度用の混和剤には高性能AE減水剤を使用し、繊維にはビニロン（比重1.3、引張強度90kgf/mm<sup>2</sup>）を使用した。

試験体は10×10×15cmの直方体とし、打設時にプラスチック枠により鉄筋を打設方向に沿ってセッティングし、所定のかぶり厚がえられるようにした。

表-1 調合及び強度

試験体名	記号	W/B (%)	水	セメント	SF	砂	砂利	SP	繊維	引張強度	
										(kg/m <sup>3</sup> )	(MPa)
普通強度プレーン	NPL	50	250	500	0	1809	-	0	-	7.1	54.9
普通強度繊維	NVF	50	243	497	0	1479	-	5.0	17.9	8.4	58.3
高強度プレーン	HPL	20	193	964	107	1101	-	21.4	-	8.9	120.0
高強度繊維	HVF	20	182	964	107	1064	-	32.1	18.6	12.7	123.0
普通強度コンクリート	Ncon	50	176	360	0	774	1040	4.0	-	6.3	54.8

SF:シリカフューム SP:高性能AE減水剤

\*1 (財)建材試験センター 中央試験所、工修(正会員)

\*2 東京都立大学工学研究科建築学専攻 助教授、工博(正会員)

## 2.2 実験装置

電食実験に用いた試験体の概要を図-1に示す。丸鋼の露出部は腐食を防ぐためシリコン系防水材を塗装した。試験体表面のひび割れ幅は、表面に設置した2個のパイ型ゲージにより計測した。

電食実験装置を図-2に示す。丸鋼を+極、銅板を-極とし、直流安定化電源にて30V一定の通電を行った。既往の電食実験の多くは、試験体を食塩水に浸せきさせているが、錆の流出が起り誤差が生じるので[2]、試験体下部のみを食塩水(NaCl水溶液10%)に浸し、試験体全体を食塩水を含ませた布で覆った。さらに食塩水の蒸発を防ぐため装置全体を密封した。直列につないだ抵抗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。積算電流量(Ahr)から電気化学当量[3](×1.04)により錆生成量(g)を求め単位面積当たりの錆生成量(mg/cm<sup>2</sup>)に換算した。同一条件で2試験体を実験した。

### 2.3 解析に用いた引張軟化特性

ひび割れ進展解析に用いる材料特性としては引張軟化曲線の評価が有効である。各種条件のモルタル・コンクリートについて、切欠き梁試験体(10×10×45cm)の三点曲げ試験を、サーボコントロール式の載荷試験装置により行い、荷重-荷重点変位曲線を求め多直線近似法[4]により引張軟化曲線を求めた。

さらにひび割れ解析を容易にするため、求めた多直線を最小二乗近似し、バイリニア型の引張軟化曲線に変換した。図-3に荷重-荷重点変位曲線の計測結果を、図-4にバイリニア型の引張軟化曲線を、図-5に求めた引張軟化曲線を、表-2に解析用のバイリニアパラメータを示す。ここで、Ec:ヤング係数、 $\sigma_0$ :軟化開始応力、 $\delta_1$ :折れ点の変位、 $\sigma_1$ :折れ点の応力、Wc:限界開口変位、 $\sigma_2$ :Wcでの応力である。 $\sigma_0$ はマトリックス部の引張強度を反映するパラメータである。

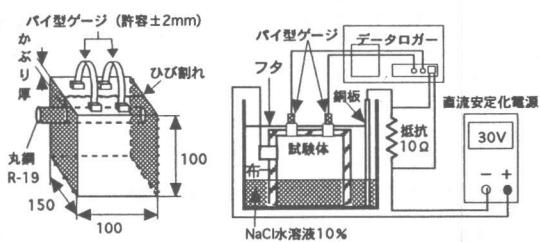


図-1 試験体図

図-2 実験装置

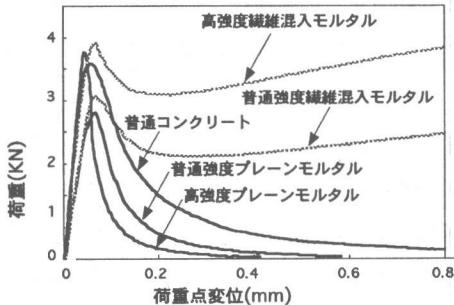


図-3 荷重-荷重点変位曲線

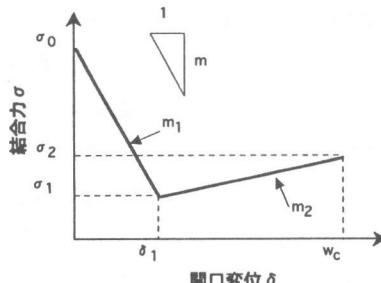


図-4 バイリニア型引張軟化曲線

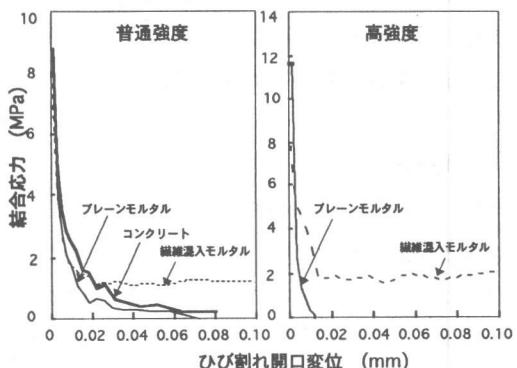


図-5 引張軟化曲線

繊維混入では必ずしも  $\sigma_0$  は増大しないが、この理由には、初期の弾性変形の範囲においては、繊維部分が欠陥部となり初期のひび割れを誘発しているのではないかと推測される。

### 3. 実験結果

各試験体とも、かぶり部表面の鉄筋の真上の位置に主ひび割れがあり、その反対の方向にひび割れが生じた。特にパイ型ゲージでのひび割れ幅の測定には支障がなかった。発生した錆は赤褐色で色から判断すると  $\gamma$ -FeOOH 若しくは  $\alpha$ -FeOOH と推測される[5]。

図-6 に同一試験条件 2 体（計パイゲージ 4 個）での表面ひび割れ開口変位（CMOD）と積算電流量の計測結果とその平均値を示す。CMOD の平均値も示した。各試験体の測定結果は多少のバラツキはあるがほぼ同様の増加傾向を示した。

ひび割れ幅と錆生成量との関係例を図-7、8 に示す。すべての実験結果においてひび割れ幅は錆量の増加に伴い増加する傾向にあった。かぶり厚 15mm での結果を図-7 に示す。普通強度プレーンモルタル（NPL）はひび割れ幅に対するひび割れ幅の増加が少なく、高強度プレーンモルタル（HPL）および高強度繊維混入モルタル（HVF）はひび割れの増加量が大きい。すなわち高強度はひび割れの発生以後、ひび割れ進展速度が早く脆的になるのに対し、普通強度では、鉄筋回りに微細ひび割れ、塑性変形等が起こり応力を緩和しているものと思われる。また、高強度では繊維混入により韌性が増加することで、プレーンの高強度よりもひび割れ増加が少なくなると考えられる。各試験体のかぶり厚による比較を図-8 に示す。NPL、HPL のプレーンにおいてはかぶり厚が少ない方がひび割れ進展量は大きい。普通強度繊維混入モルタル（NVF）では逆の傾向を示した。

表-2 解析に用いた引張軟化パラメータ

記号	$E_c$ (GPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$\delta_1$ (mm)	$\sigma_1$ (MPa)	$w_c$ (mm)	$\sigma_2$ (MPa)
NPL	33.93	7.91	0.010	0.80	0.072	0.00
NVF	27.26	8.13	0.010	1.10	0.613	2.22
Ncon	42.07	8.96	0.015	1.00	0.280	0.00
HPL	46.77	11.61	0.004	1.80	0.012	0.00
HVF	44.36	7.91	0.012	1.90	0.496	3.12

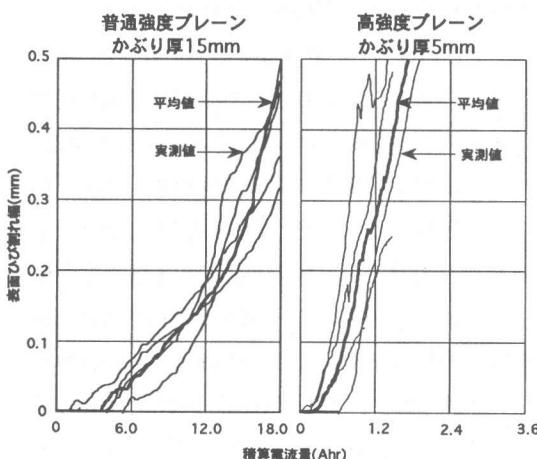


図-6 表面ひび割れ幅と積算電流量の関係

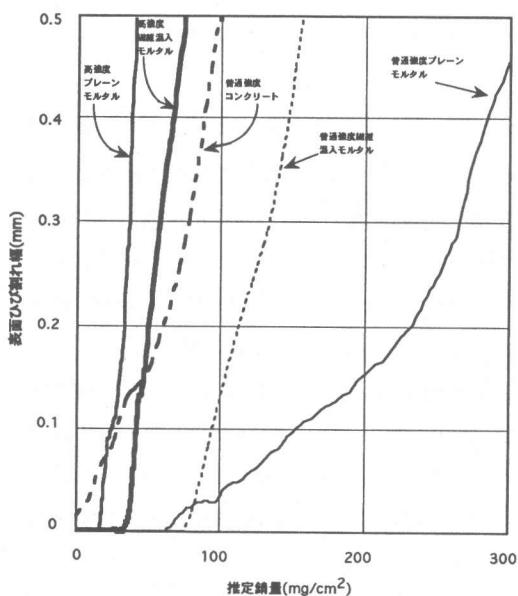


図-7 かぶり厚15mmの比較

#### 4. 解析方法

鉄筋腐食によるモードI（引張型変形）のひび割れ開口を、仮想のひび割れ面に直行する応力を作用させモデル化する（結合力モデル）。図-10のa) b)に示すように、ひび割れが表面に発生するまでと、表面ひび割れ発生後の二種類について表面開口方向のひび割れのみモデル化した。各ひび割れ節点に生じる応力は、コンクリートの非弾性変形を考慮し引張軟化特性による結合力 $\sigma$ 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)）。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。

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

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

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。

$$P(a, x) = P_0(a) I(x), \quad (T \leq x \leq T + D), \quad (3)$$

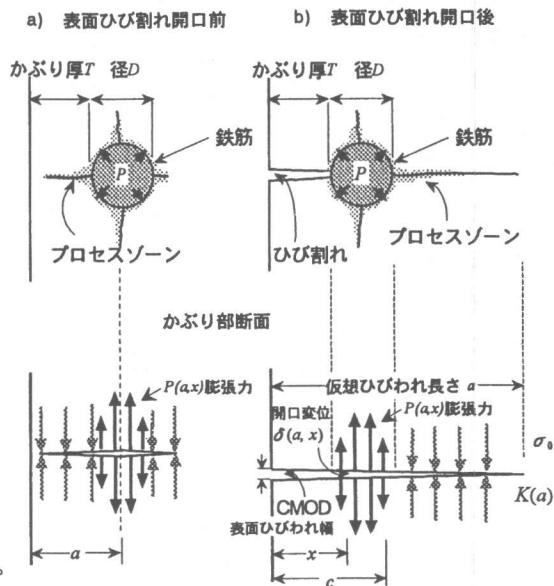


図-10 鉄筋膨張によるひびわれ進展のモデル化

$$\text{ただし, } I(x) = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2(x-T)^2}{D}\right)}$$

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。

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

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。 $H^*(a, x, c)$ は形状関数であり作用力に依存しない。

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

構成式(3)および(4)を(5)式に代入し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）。

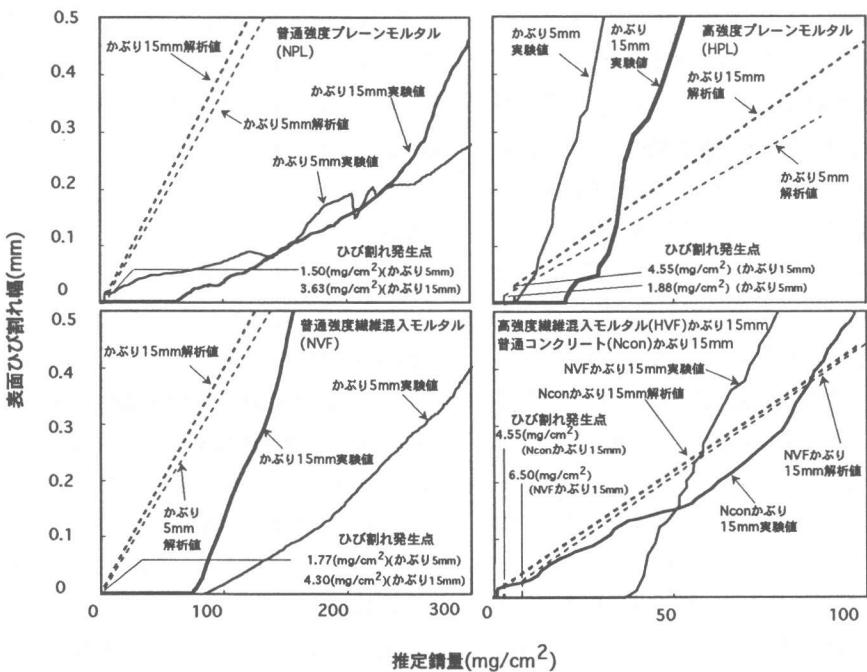


図-8 表面ひびわれ幅と推定錆量との関係

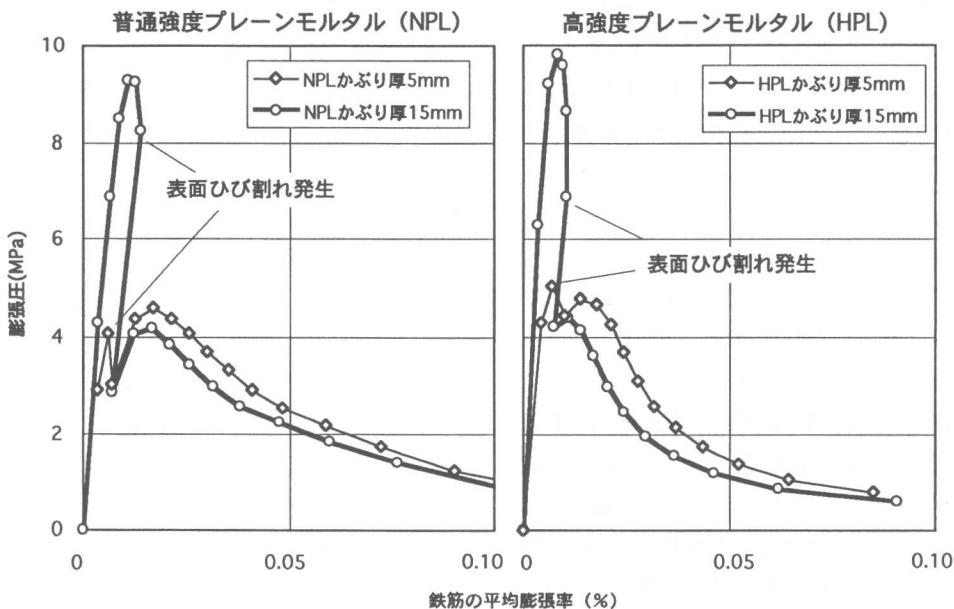


図-9 膨張圧と鉄筋の平均膨張率との関係

## 5. 解析結果

表-2に示した各試験体のバイリニア・パラメータによる解析結果を図-8に示した。なお、鉛生成量は鉄筋部の膨張量（開口変位）の解析結果から、鉛のヤング率（250MPa）、鉛比重（3.0）、鉛の体積膨張率（2.5）等を基に算定した。

解析値と実験値の対応は、普通強度試験体では解析値の方がひび割れ開口が大きくなる傾向がある。試験体によっては、ひび割れ発生点がずれる場合が見られる。普通強度プレーンモルタル（NPL）においては、解析結果よりも、鉛の生成量が多い傾向にある。

図-9は、表面ひび割れ発生前後での鉄筋の膨張圧と平均的な膨張率との解析結果を示す。かぶり15mmの結果をみると、高強度と普通強度とも、表面ひび割れが発生する以前での内部膨張圧は、約10MPaでほぼ同じ値を示している。特に普通強度では引張強度よりも高い高応力が生じており、このことで、鉄筋回りに多くの塑性域が形成されている可能性がある。したがって、普通強度プレーンモルタル（NPL）では腐食量の割りにはひび割れが進展しないものと考えられる。本解析では鉄筋回りはすべて弾性と仮定しているが、今後は塑性域のモデル化を考慮する必要がある。

## 6. まとめ

- 1) ひび割れの発生を抑制するには高強度化は有效であるが、ひび割れ発生後はひび割れ幅が急激に増加する傾向を示した。
- 2) 繊維混入による鉄筋腐食ひび割れの低減効果は高強度の場合に有効であることが分かった。
- 3) ひび割れ幅と鉄筋腐食量との関係の解析方法を示した。高強度の場合は実験結果と比較的良い対応関係が得られた。しかしながら普通強度モルタルの解析では鉄筋回りの微細ひび割れ、欠陥部分などを考慮する必要性が示唆された。

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。実験に協力いただきました都立大大学院生高橋仁智氏に感謝致します。

## 参考文献

- [1] 橋高義典：鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリート表面のひび割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.
- [2] 中村則清、橋高義典：鉄筋の腐食膨張に伴う表面のひび割れ開口の破壊力学的実験研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19 ,No.2, pp.93 -98, 1997.
- [3] コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3 鉄筋腐食の診断、pp203-213、森北出版株式会社（1993）
- [4] 橋高義典、上村克郎、中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析、日本建築学会構造系論文報告集、No.453, pp.15-25, 1993.11
- [5] コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3 鉄筋腐食の診断、pp63-66、森北出版株式会社（1993）
- [6] Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R. : The Stress Analysis of Crack Handbook, Second Edition, Paris Productions Incorporated, 1985