

# 論文 鉄筋コンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量に関する検討

橘高 義典<sup>\*1</sup>・LE PHONG NGUYEN<sup>\*2</sup>・塚越 雅幸<sup>\*3</sup>・松沢 晃一<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、3種類の異形棒鋼を異なるかぶり厚となるようにコンクリートに埋め込んだ供試体を作製し、それらについて、コンクリート表面にひび割れが発生(0.1mm)するまで鉄筋の電食を行い、その時の鉄筋腐食量と鉄筋径、かぶり厚およびコンクリートの水セメント比の関係について検討を行った。また、非線形FEM解析プログラムを用い、ひび割れ発生時の鉄筋腐食を解析的に求め、実験結果との比較を行い、さらに、解析によりコンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量の推定を行なった。

**キーワード:** コンクリート, 鉄筋腐食, かぶり厚, FEM 解析

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性上重要な問題の1つに、かぶり部分の鉄筋腐食がある。鉄筋腐食によりコンクリート表面にひび割れが発生すると、かぶりコンクリートの剥落に至る。これは、人体に危険が及ぶだけでなく、コンクリートと鉄筋の間の付着力の低下、鉄筋の断面減少などにより、構造物としての機能も低下する。

かぶり部分のひび割れおよび剥落の原因は、コンクリート中の鉄筋が腐食することで体積が膨張し、その膨張圧によりコンクリートに引張破壊が生じることである。鉄筋腐食を生じる劣化要因としては、コンクリートの中酸化、塩害などが挙げられる。このような劣化因子の影響によるコンクリート表面のひび割れを評価するためには、ひび割れ発生時の鉄筋の腐食量を定量的に把握する必要がある。また、このような場合の耐久性の評価手法としては、鉄筋腐食によりコンクリート表面にひび割れが発生した時点を目安とする場合が多い。コンクリート標準示方書によれば、ひび割れ発生時の鉄筋の腐食量(限界腐食量)は10mg/cm<sup>2</sup>とされている<sup>1)</sup>が、実際には10~100mg/cm<sup>2</sup>との報告もあり、コンクリート標準示方書の値と比較して幅広い。

鉄筋の腐食など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次に示すものがある。前田、魚本ら<sup>2)</sup>は、かぶりコンクリート内部のひび割れ発生条件について弾性解析を行なっている。中村、橘高<sup>3)</sup>は、表面ひび割れ幅からの鉄筋腐食減少量の推定について、破壊力学的解析から明らかにしている。また、山田、大城ら<sup>4)</sup>は、破壊力学に基づくFEM解析により、ひび割れ発生条件を検討している。このように、コンクリート表面にひび割れが発生した後のひび割れ幅の変化と鉄筋腐食量に関する研究報告は多い。しかし、ひび割れ発生時の鉄筋腐食量に関する研究報告は少ない。

本研究では、コンクリート構造物の耐久性に関する研究として、数種類の調合、かぶり厚、鉄筋径の組合せによるコンクリート供試体を作製し、それらについて、コンクリート表面にひび割れが発生(0.1mm)するまで鉄筋の電食を行い、ひび割れ発生時の鉄筋腐食量と鉄筋径、かぶり厚およびコンクリートの水セメント比の関係について検討を行った。また、FEM解析プログラムを用い、ひび割れ発生時の鉄筋腐食を解析的に求め、実験結果との比較を行い、さらに、解析によりコンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量の推定を行なった。

## 2. 電食による鉄筋の促進劣化試験

### 2.1 実験概要

#### 2.1.1 供試体概要

表-1に実験の要因と水準を示す。供試体はコンクリートとし、水セメント比は40, 50, 60%の3水準、かぶり厚は10, 20, 30mmの3水準、鉄筋径(鉄筋の呼び名)はD10, D13, D16の3水準とした。なお、D13鉄筋は全ての水セメント比に用いたが、D10およびD16鉄筋は水セメント比50%のみに用いた。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比 (%)	40, 50, 60
かぶり厚 (mm)	10, 20, 30
鉄筋の呼び名	D10*, D13, D16*

\* D10およびD16は水セメント比50%の供試体のみに使用

表-2にコンクリートに用いた使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は山砂および砕砂、粗骨材は砕石、混和剤は高性能AE減水剤およびAE減水剤を用いた。鉄筋はSD295の異形棒鋼(以下、鉄筋)を用いた。

\*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 教授 工博(正会員)

\*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 博士前期課程(H23.3まで) 修士(工学)

\*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 助教 博士(工学)

\*4 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 助教 修士(工学)(正会員)

表-2 使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	山砂 (君津産)	S1	表乾密度 2.52g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.45% 粗粒率 2.12
	砕砂 (相模原産)	S2	表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> 吸水率 1.13% 粗粒率 3.06
粗骨材	砕石 (相模原産)	G	表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup> 吸水率 1.08% 実積率 58.9%
混和剤	高性能 AE 減水剤	Ad1	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE 減水剤	Ad2	リグニンスルホン酸とポリオールとの複合体

表-3に調合, 表-4にフレッシュ性状および強度試験結果を示す。いずれの調合においても, 目標スランブは18cm, 目標空気量は4.5%とした。水セメント比40および50%の練混ぜには高性能AE減水剤, 水セメント比60%の練混ぜにはAE減水剤を使用した。また, 圧縮強度およびヤング係数は標準養生を行った材齢2週時のφ100×200mm 供試体により求めた。

コンクリートの練混ぜには容量50リットルのパン形ミキサを使用した。ミキサにセメント, 細骨材, 粗骨材を投入し30秒間の練混ぜを行い, 水および混和剤を投入し30秒間練混ぜた後に掻き落としを行い, さらに60秒間練混ぜ, 型枠に打ち込んだ。供試体は打ち込み後, 24時間で脱型し, 2週間の標準養生を行なった後に, 鉄筋部などに各処理を行ない, 試験に用いることとした。

図-1に電食に用いた供試体概要を示す。供試体寸法は100×100×100mmとし, コンクリート打込み下面からのかぶり厚が所定の寸法となるように鉄筋を埋め込んだ。鉄筋の露出部分は, 腐食を防ぐためにエポキシ樹脂によりシーリングを行なった。なお, 供試体は各試験条件につき2体とした。

2.1.2 電食による鉄筋腐食促進方法

図-2に電食による鉄筋腐食促進方法を示す。供試体は, ひび割れ測定面(打込み下面)が上面になるように水槽内に設置し, 5%NaCl水溶液に浸し, 鉄筋を陽極, 銅板を陰極として直流安定化電源により30V一定の通電を行なった。試験期間はコンクリート表面にひび割れが発生するまでとし, 本研究では, ひび割れ発生時のひび割れ幅を0.1mmと定義した。表面ひび割れ発生の確認は顕微鏡による目視によったが, ひび割れ発生面に設置したパイゲージ(測定範囲-2~+2mm)により, ひび割れ発生部分の変位の経時変化も同時に測定した。なお, 本研究では, 鉄筋は均一に腐食するものとして扱った。

2.1.3 鉄筋の腐食減量の測定方法

鉄筋の腐食減量の測定は, 図-2に示すとおり直列に配線した抵抗部の電圧をデータロガーにより測定, 収録し, 電流値を求め, 積算電流量I<sub>m</sub>を算出した。しかし, 実際の腐食減量を積算電流量から確定するのは困難であったため, 実験に用いた鉄筋の腐食前および腐食後の鉄筋重量を測定し, 腐食減量を算出した。

表-3 調合

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					Ad1 (C×%)	Ad2 (C×%)
	W	C	S1	S2	G		
40	170	424	247	597	829	1.0	
50	175	350	227	553	938	0.9	
60	182	303	229	558	949		0.25

表-4 フレッシュ性状および強度試験結果

W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度* (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数* (kN/mm <sup>2</sup> )
40	18.0	5.0	71.3	32.9
50	18.5	4.6	50.3	29.1
60	18.0	5.0	35.8	22.7

\* 圧縮強度およびヤング係数は材齢2週, 標準養生供試体による

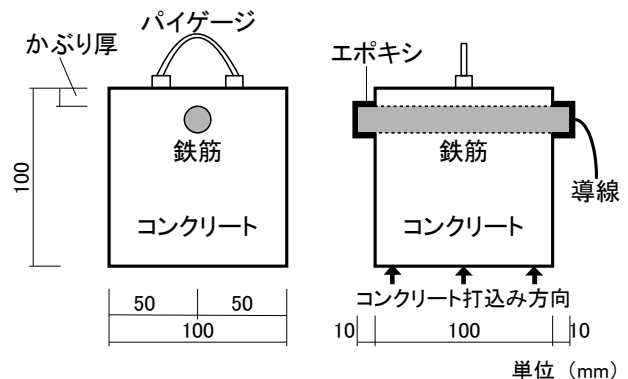


図-1 供試体概要

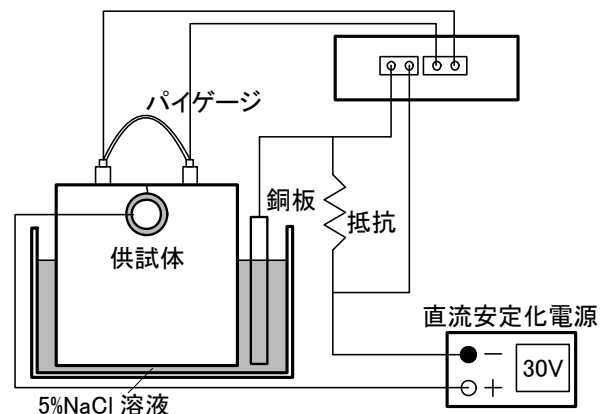


図-2 電食による鉄筋腐食促進方法

腐食促進試験は表面ひび割れ幅が約 0.1mm に達した時点で終了し、供試体から鉄筋を取り出し、10%クエン酸アンモニウム水溶液浸漬にて錆を除去し、重量変化を計測、単位面積当たりの重量減少に換算し、腐食減量とした。また、積算電流量と腐食減量は比例関係にある<sup>3)</sup>ことから、各供試体の積算電流量と腐食減量の関係式(1)から換算係数 $\alpha$  (表-5)を算出した。

$$w = \alpha \times I_m \quad (1)$$

ここで、 $w$  : 腐食減量 (mg/cm<sup>2</sup>)

$\alpha$  : 換算係数 (mg/A・h・cm<sup>2</sup>)

$I_m$  : 積算電流量 (A・h)

## 2.2 実験結果および考察

鉄筋腐食促進後のひび割れは、かぶり部表面の鉄筋上部と、その反対方向に確認された。また、ひび割れはパイゲージの測定範囲内に収まっていた。ただし、観測値 0.1mm に対し、パイゲージ変位が約 0.2mm と大きかった。これは、鉄筋膨張によるコンクリート表面の弾性変形が考えられる。

図-3 に水セメント比 50%、D13 鉄筋を用いた供試体のパイゲージによるひび割れ発生までの変位量と積算電流量より式(1)から換算して求めた腐食減量推定値の関係を示す。腐食減量の増加に伴い変位が増加し、かぶり厚が大きくなるに伴い、グラフの立ち上がり位置が腐食

減量の増加する方へシフトしている。ただし、かぶり厚が大きくなるに伴い、変位増加後のグラフの傾きが急勾配となっていることから、かぶり厚が大きくなるに伴い、初期の微細ひび割れ発生までの鉄筋腐食量が增多するが、微細ひび割れが発生すると、その後のひび割れ進展が早くなる。かぶりコンクリート表面が引張応力に達するまでの時間は、かぶり厚が大きいほど遅いが、到達後は、応力の増加が大きいために、ひび割れ幅も増加していると考えられる。

表-5 各供試体の腐食減量測定結果

記号	積算電流量 $I_m$ (A・h)	換算係数 $\alpha$ (mg/A・h・cm <sup>2</sup> )	腐食減量 $w$ (mg/cm <sup>2</sup> )
40-D13-10	8.66	5.41	32.84
40-D13-20	7.55	5.30	25.37
40-D13-30	5.77	4.31	24.07
50-D10-10	5.99	6.02	36.07
50-D10-20	6.98	7.37	35.09
50-D10-30	8.24	9.57	30.38
50-D13-10	10.34	5.09	33.16
50-D13-20	8.32	5.82	30.38
50-D13-30	9.34	5.12	24.31
50-D16-10	4.90	4.97	24.31
50-D16-20	9.21	7.28	40.78
60-D13-10	4.46	9.12	40.60
60-D13-20	4.69	7.57	35.42

\* 記号 40-D13-10 : 水セメント比 40%・鉄筋径 13mm・かぶり厚 13mm  
\* 50-D16-30 および 60-D13-30 の結果はなし

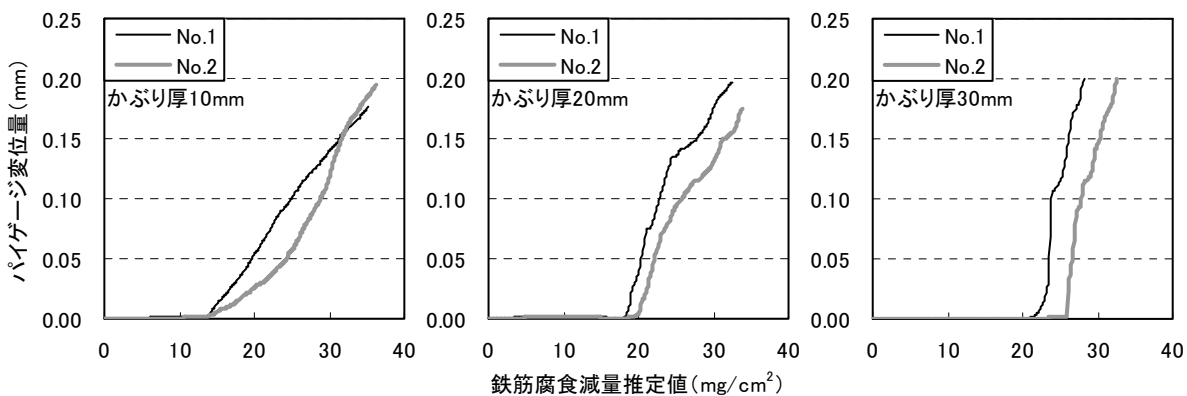


図-3 パイゲージの変位量と腐食減量推定値の関係 (水セメント比 50%・鉄筋 D13)

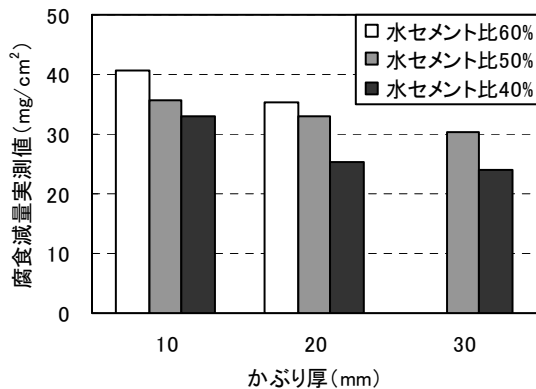


図-4 腐食減量実測値と水セメント比の関係 (鉄筋 D13)

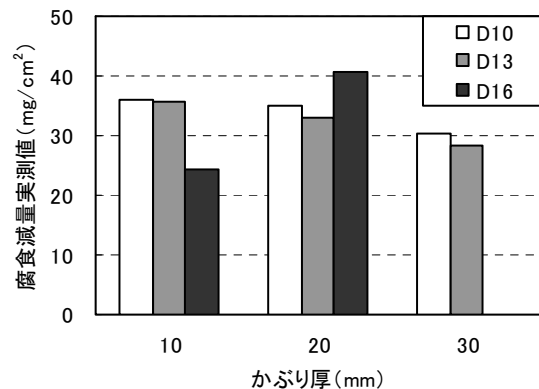


図-5 腐食減量実測値と鉄筋径の関係 (水セメント比 50%)

図-4にD13鉄筋を用いた供試体における表面ひび割れ発生時の、各かぶり厚ごとの腐食減量実測値と水セメント比の関係を示す。かぶり厚が大きくなるに伴い、表面ひび割れ発生時の腐食減量は少なくなっている。また、水セメント比が小さい方の腐食減量が少なくなっている。水セメント比が大きいコンクリートは組織が粗いため、鉄筋が膨張しても周辺のコンクリートが塑性変形することで応力発生を緩和するが、水セメント比が小さい場合は組織が緻密なために脆性的挙動を示すと考えられる。

図-5に水セメント比50%における表面ひび割れ発生時の、各かぶり厚ごとの腐食減量実測値と鉄筋径の関係を示す。D16鉄筋の結果にばらつきがあるが、鉄筋径が小さくなるに伴い、ひび割れ発生時の腐食減量が多くなると推測される。鉄筋径が小さいほど鉄筋の表面積が小さくなり、膨張圧を生じる面積も小さくなると思われる。

### 3. 鉄筋腐食によるコンクリート表面ひび割れ発生解析

#### 3.1 解析概要

コンクリート中の鉄筋が腐食することで生成される腐食生成物の体積は、もとの鉄筋の約2.5倍とされている。そのため、見かけ上の鉄筋の体積は増加し、鉄筋の周囲に腐食膨張圧が生じる。膨張圧は鉄筋腐食の進行とともに大きくなり、かぶりコンクリートに発生する引張応力がコンクリートの引張強度を上回ると、ひび割れが発生する。この考えをもとにFEM解析により、ひび割れ発生時の鉄筋の腐食量を求めた。

#### 3.2 鉄筋周りのコンクリートのモデル化

図-6にFEM解析モデルの例を示す。本研究では、鉄筋の腐食は一様に進行するものと仮定して、鉄筋の長手方向に対して垂直方向での2次元断面をモデル化して解析を行なった。断面内の要素は節点間隔が約2mmとなるように分割した。コンクリートは均一な材料とし、各要素に材料特性値を設定した。計算用ソフトには汎用有限要素プログラム(TNO DIANA社)を用いた。

#### 3.3 鉄筋腐食による内部発生応力のモデル化

解析対象の鉄筋部分は空洞とした。鉄筋の腐食による応力は空洞の中心から放射状に膨張圧が生じているものと仮定し、コンクリートと鉄筋を模擬した空洞の界面部分に強制変位を与えて、空洞径を拡大させることで再現し、変位は界面部分が放射状に均一に広がるものとした。

鉄筋の腐食量増加による鉄筋を模擬した空洞径の拡大により、かぶりコンクリートに発生する引張応力がコンクリートの引張強度を上回った時点で、ひび割れが発生したと判断する。このときの要素幅(節点間距離)にひずみを乗じたものをひび割れ幅とした。FEM解析においても実験同様に、ひび割れ幅が0.1mmとなった時点での鉄筋部分の膨張圧および変位量を求めた。

### 3.4 コンクリートの引張軟化とひび割れ発生モデル化

本研究では、各要素が引張強度を超えた時点でコンクリートが引張軟化を起こすものと仮定し、ひび割れを介してコンクリートに伝達される応力とひび割れの関係は、図-7に示すリニア型引張軟化モデルを用いた。引張軟化曲線におけるひび割れ発生時の最大引張応力は、コンクリートの圧縮強度をもとに以下の式で求めた<sup>4)</sup>。

$$f_t = 1/10 \times f_c \quad (2)$$

ここで、 $f_t$ : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_c$ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

また、引張応力が伝達しなくなる限界ひび割れひずみ量 $\epsilon$ は、以下の式を用いて算出した。なお、このときの破壊エネルギー $G_f$ は0.1N/mmとした。

$$\epsilon = 2G_f / f_t \times w_r \quad (3)$$

ここで、 $w_r$ : 要素幅 (mm)

### 3.5 腐食減量の計算方法

コンクリート表面のひび割れ発生時(0.1mm)の腐食減量は以下の手順で算定した。

- 1) 断面モデルの空洞に腐食膨張変位を仮定した強制変位を与える。
- 2) 表面に0.1mmのひび割れが発生したときの空洞の変位 $u$ と平均圧力 $P_{av}$ を求める。
- 3) 2次元平面モデルによる弾性解析からひび割れ発生時の腐食減量を算定した。なお、腐食生成物の層は弾性体と仮定した。

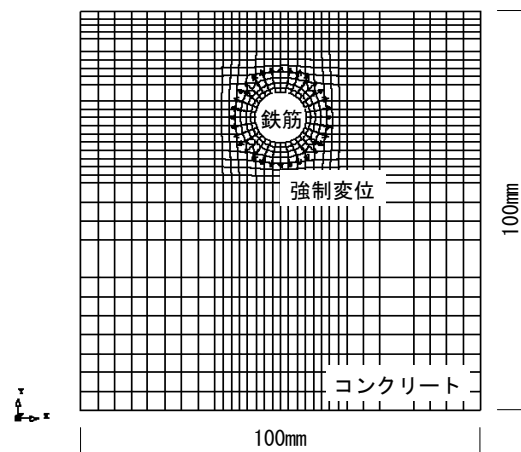


図-6 FEM解析モデルの例



図-7 リニア型引張軟化モデル

図-8 にひび割れ発生時の腐食量算定概念を示す。腐食前の鉄筋半径を  $r$  とし、無拘束状態で腐食すると、腐食により膨張した鉄筋半径は  $l$  となるが、健全部の鉄筋半径は  $r$  から  $t$  減少した  $d$  となる。しかし、実際の鉄筋はコンクリート中に埋め込まれているため、拘束を受けた状態で腐食する。そのため、拘束を受けた分だけ腐食生成物に応力が生じることとなる。無拘束状態と同様の腐食が発生した場合、腐食による膨張量は拘束によって生じる応力分だけ無拘束状態と比較して低減される。応力による膨張低減量を  $\delta$  とすると、以下の式が成り立つ。

$$l - \delta - t - d = u \quad (4)$$

式(4)を用いて腐食減量  $t$  (mm) は以下の式で表せる。

$$t = \frac{-u \cdot E_r}{n \cdot P_{av} - (n-1)E_r} \quad (5)$$

ここで、 $E_r$ : 腐食生成物のヤング係数<sup>3)</sup>=250 (N/mm<sup>2</sup>)

$n$ : 腐食による鉄筋の体積膨張率

$u$ : FEM 解析で与えた変位 (mm)

したがって、鉄筋の単位表面積あたりの腐食減量  $W$  (mg/cm<sup>2</sup>) は以下の式により求められる。

$$W = t \times \rho \times 100 \quad (6)$$

ここで、 $\rho$ : 鉄筋の密度=7.86 (g/cm<sup>3</sup>)

### 3.6 解析条件

以上の仮定のもとに、FEM 解析によりひび割れ発生時のコンクリート中の鉄筋腐食量の検討を、実験と同じ供試体の条件について行った。コンクリートの材料特性は表-6 に示すとおり実験値および実験値から算出した値を用いた。鉄筋の体積膨張率は一般に 2.5 前後といわれているが、水セメント比の高いコンクリートほど鉄筋周りのコンクリートの塑性変形が大きくなること、その部分への錆の浸透が多くなることから、本解析では体積膨張率  $n$  を水セメント比 40% で 2.2, 50% で 2.1, 60% で 2.0, 80% で 1.8 とした。

### 3.7 解析結果および実験結果との比較

図-9 に実験結果と解析結果の比較を示す。D16 鉄筋を用いた場合が異なっているものの、本解析結果と実験結果とはほぼ一致している。実験結果と同様、かぶり厚が大きくなるに伴い、表面ひび割れ発生時の腐食減量は少なくなるが、この理由は、同一鉄筋膨張量の場合、かぶり厚が大きいほど表面に生じる引張強度が大きくなるためである<sup>2)</sup>。

表-6 解析に用いたコンクリートの材料特性

W/C (%)	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
40	33.0	7.0	0.2
50	30.0	5.0	0.2
60	23.0	3.5	0.2
80	18.0	1.8	0.2

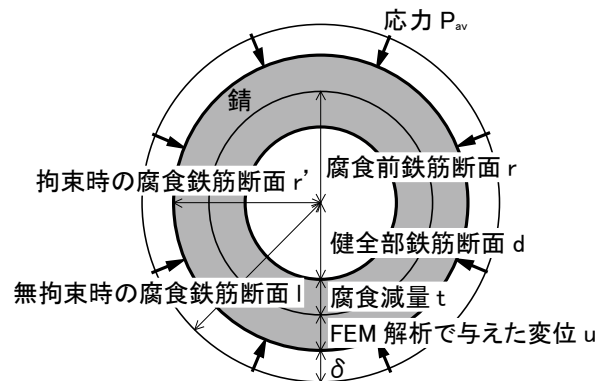


図-8 ひび割れ発生時の腐食量算定概念

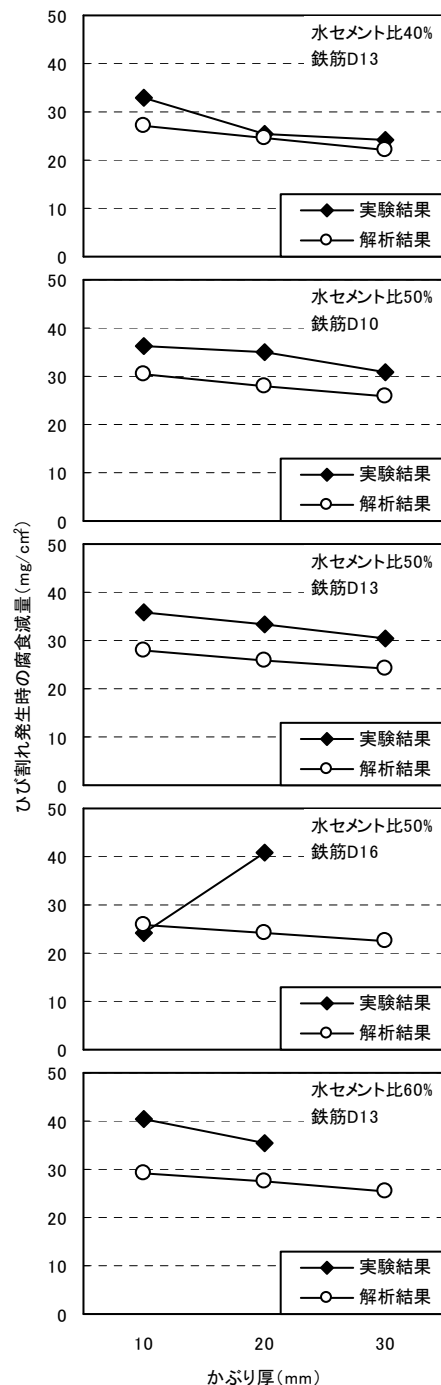


図-9 ひび割れ発生時の腐食量の  
実験結果と解析結果の比較

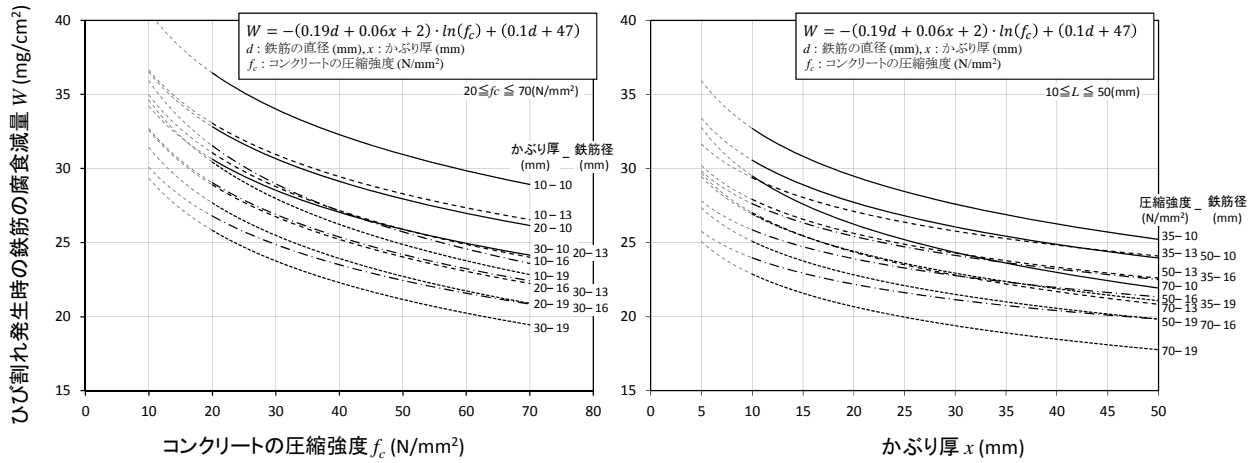


図-10 表面ひび割れ発生時 (0.1mm) の鉄筋腐食減量と鉄筋径, かぶり厚, コンクリート強度の関係に関する評価図

表-7 鉄筋腐食減量と圧縮強度の関係に関する係数

鉄筋の呼び名	かぶり厚 (mm)	$\alpha_1$	$\beta_1$
D10	10	-6.00	54.43
	20	-5.32	48.75
	30	-5.17	46.10
D13	10	-5.19	48.59
	20	-5.62	47.91
	30	-5.31	44.81
D16	10	-6.34	50.52
	20	-5.28	44.85
	30	-4.76	40.99
D19	10	-6.06	48.58
	20	-5.41	43.87
	30	-5.08	41.04

表-8 鉄筋腐食減量とかぶり厚の関係に関する係数

鉄筋の呼び名	圧縮強度 (N/mm²)	$\alpha_2$	$\beta_2$
D10	35	-4.65	43.41
	50	-4.10	40.00
	70	-4.70	40.32
D13	35	-3.28	36.93
	50	-3.30	35.51
	70	-3.84	35.86
D16	35	-3.18	34.95
	50	-2.81	32.33
	70	-2.57	29.89
D19	35	-3.63	35.28
	50	-3.26	32.59
	70	-3.17	30.17

#### 4. 解析によるコンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量の推定

図-10 に本解析に基づいた各条件での表面ひび割れ発生時 (0.1mm) の鉄筋腐食減量と鉄筋径, かぶり厚, コンクリート強度の関係に関する評価図, 表-7, 表-8 に評価式の係数を示す。なお, 評価図は以下の式(7),(8)のように表せる。

$$W = \alpha_1 \ln(f_c) + \beta_1 \quad (7)$$

$$W = \alpha_2 \ln(L) + \beta_2 \quad (8)$$

ここで,  $W$ : 鉄筋腐食減量 (mg/cm<sup>2</sup>)

$f_c$ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$L$ : かぶり厚さ (mm)

$\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ : 実験係数

これらの結果に基づき, 鉄筋の呼び名に示された径  $d$  (mm), かぶり厚さ  $x$  (mm), コンクリート強度  $f_c$  (N/mm<sup>2</sup>) を変数とし, ひび割れ発生時の鉄筋腐食減量  $W$  (mg/cm<sup>2</sup>) を求める回帰分析を行い式(9)の回帰式を得た。なお, 解析値と回帰式の値の相関係数は 0.97 と高い相関関係にある。

$$W_u = -(0.19d + 0.06x + 2) \times \ln(f_c) + (0.1d + 47) \quad (9)$$

この式により鉄筋径, かぶり厚, コンクリート強度別の, コンクリート表面ひび割れ発生時の鉄筋腐食減量のおおよその値を推定できる。

#### 5. まとめ

本研究の範囲内で以下のことが明らかとなった。

- (1) 促進腐食劣化試験を実施し, ひび割れ発生時の腐食減量と鉄筋径, かぶり厚, 水セメント比との関係を実験的に把握した。
- (2) FEM 解析により, ひび割れ発生時の腐食減量を求め, 実験結果との比較を行ない, 両者には比較的良い対応関係が得られた。
- (3) 鉄筋径, かぶり厚, コンクリート強度から, コンクリート表面ひび割れ発生時の鉄筋腐食減量を推定する評価式を提案した。

#### 謝辞

解析にご助言頂いた東京工業大学の篠原保二准教授に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書「維持管理編」, pp.95, 2008
- 2) 中村則清, 橘高義典: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.93-97, 1997
- 3) 山田義智, 大城武: 破壊力学に基づく FEM による縦ひび割れ発生腐食量の解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.733-738, 1994
- 4) 伊澤純平, 松島学, 横田優: 腐食ひび割れ発生限界腐食減量に関する一考察, 土木学会第 59 回年次学術講演梗概集, pp.515-516, 2005