

# コンクリート中の鉄筋腐食の空間的不均一性が 腐食ひび割れ発生限界に及ぼす影響

コンクリート研究室 齋藤 祐樹  
指導教員 下村 匠

## 1. はじめに

腐食ひび割れ発生時の限界腐食量に関しては、実験的・解析的に多くの検討が行われている<sup>1)</sup>。その結果、腐食ひび割れ発生限界腐食量は、かぶりに比例して大きくなるが、鉄筋径が大きくなるほど小さな腐食量でひび割れが発生する。また研究事例はあまりないが、かぶりと鉄筋径が同じである場合は、腐食長さが短いほど限界腐食量は大きくなる結果が示されている<sup>2)</sup>。しかし、いずれの研究結果においても定性的なことは分かっているが、定量的な結論は得られていないのが現状である。また、鉄筋の腐食面に関する検討はほとんど行われていない。

現在、腐食ひび割れの室内実験には電食実験が多く用いられている。この理由として、積算電流量を管理することで程度再現性のある腐食を発生させることができること、鉄筋の通電区間において腐食を均一に発生させること、暴露に比べて短期間で腐食を発生させることが挙げられる。しかし、電食による促進腐食試験はひび割れが発生する位置に腐食が集中するようなことがあり<sup>3)</sup>、鉄筋周方向と軸方向の腐食条件を均一にコントロールすることが難しい。また、実環境におけるコンクリート構造物では、乾湿の繰返しが多い箇所などで鉄筋の一部に局所的な腐食が発生する場合や、鉄筋がかぶり面側だけ大きく腐食するといった状況が考えられる。しかし、電食ではこのような状況を再現すること自体が難しく、そのため上記のような状況を再現した研究事例がほとんどないのが現状である。

本研究では鉄筋の腐食膨張によりかぶりコンクリートにひび割れが発生する時の限界腐食量を把握することを目的としている。ひび割れ発生限界腐食量とはすなわち腐食による鉄筋断面半径の膨張量と考えることができることから、本研究では鉄筋の腐食膨張を膨張変位によってモデル化した実験手法の確立を目指した。また、ひび割れ発生限界腐食量に影響を及ぼす要因として

コンクリートかぶり厚の他に、腐食区間長や腐食面など鉄筋腐食の空間的な不均一性が挙げられる。本研究では腐食区間長と断面内の腐食角度をパラメータとし鉄筋腐食の空間的不均一性が腐食ひび割れ発生限界に及ぼす影響を明らかにすることにした。

## 2. 静的破砕剤を用いた模擬腐食ひび割れ実験

### 2.1 実験概要

静的破砕剤を用いた模擬腐食膨張試験によって膨張区間長と膨張角度およびかぶりをパラメータとした実験を行うことで、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時のビニールパイプの半径増加量を測定する。供試体諸元を表-1に、実験の検討要因と水準を表-2に示す。本研究ではかぶり、膨張区間長  $L_e$  を検討要因としている。かぶりの値はコンクリート標準示方書の規定より、最小かぶりよりも小さい 20mm、一般的な値として 40mm、海岸付近など特に激しい腐食性環境を想定した 80mm の 3 水準を定めた。膨張区間長の検討では、供試体長  $L$  を 600mm とし膨張区間長が変化した場合と、供試体長と膨張区間長

表 - 1 供試体諸元

No.	かぶり c(mm)	膨張区間長 $L_e$ (mm)	供試体長 $L$ (mm)	膨張角度
1	20	400	600	360°
2	40			
3	80			
4	40	100	600	
5		200		
6	20	200	300	
7		800	1200	
8		200	300	
9	40	800	1200	
10		200	300	
11		800	1200	
12	40	400	600	90°
13				180°
14				270°
15				90°
16	80			

の寸法比はそのまま軸方向の長さを 0.5 倍と 2 倍にした場合について実験を行った。膨張角度の検討では供試体長  $L$  と膨張区間長  $L_e$  を一定とし、膨張圧が作用する断面角度を 90 度から 360 度まで変化させた。

### 2.2 コンクリートの配合および供試体

実験に使用したコンクリートの示方配合を表 - 3 に示す。供試体はコンクリート打設後材齢 7 日で脱型し、実験開始まで気中養生とした。実験時のコンクリートの圧縮強度は  $34.5\text{N/mm}^2$ 、弾性係数は  $42.2\text{kN/mm}^2$  であった。静的破砕剤の水粉体質量比は 30% とした。

供試体の形状と寸法を図 - 1 に示す。供試体は  $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times L$  のコンクリート角柱供試体とし、内部に外径 21mm、内径 19mm のビニールパイプを擬似鉄筋として配置した。ビニールパイプの表面には 100mm 間隔で 3 箇所にはずみゲージを 2 枚左右対称にそれぞれの箇所に貼り付けた。同様に、供試体長さ 1200mm の供試体では 5 箇所、供試体長さ 300mm では中央部 1 箇所にはずみゲージを貼り付けた。例として供試体長さ 600mm でのビニールパイプの状態を図 - 2 に示す。

本実験ではビニールパイプの外周のひずみを測定しており、ビニールパイプの直径変位を直接測定していない。直径の膨張変位は、直径の変化率と外周の変化率が等しいことを利用し、式(1)で表す。

$$dr = \frac{\phi_0 \times \varepsilon}{2} \quad (1)$$

ここで、 $dr$  は半径増加量(mm)、 $\phi_0$  は膨張前の直径で 21mm、 $\varepsilon$  はビニールパイプのひずみである。

### 2.3 実験方法

本研究では静的破砕剤の膨張作用を利用してコンクリートに膨張変位を与える。静的破砕剤をビニールパイプ内に注入することで膨張が周方向に作用し、コンクリートに変位を与えるものである。

コンクリートかぶり面の状況を図 - 3 に示す。

表 - 2 実験の検討要因と水準

検討要因		実験水準	比較供試体
シリーズ	かぶり	20, 40, 80mm	No.1, 2, 3
			No.6, 8, 10
			No.7, 9, 11
	膨張区間長	100, 200, 400mm	No.2, 4, 5
供試体長	300, 600, 1200mm	No.1, 6, 7	
		No.2, 8, 9	
		No.3, 10, 11	
膨張角度	90, 180, 270°	No.2, 12, 13, 14 No.12, 15, 16	

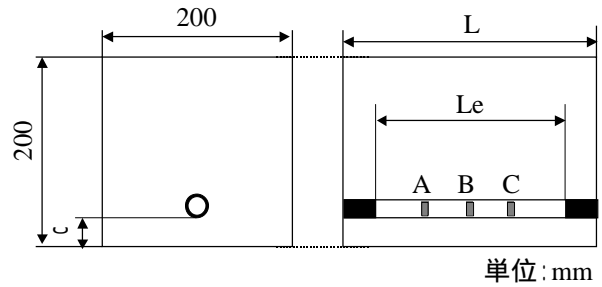


図 - 1 供試体の形状寸法

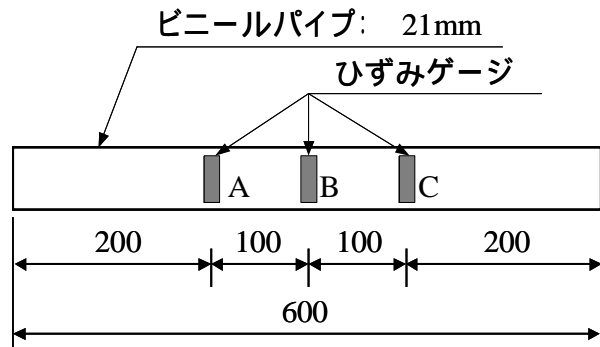


図 - 2 ビニールパイプの状態

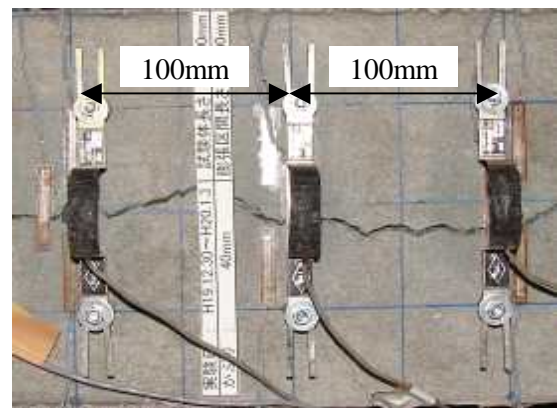


図 - 3 コンクリートかぶり面の状況

表 - 3 コンクリートの示方配合

G max (mm)	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
25	39	36.2	148	379	645	1191	1.137

かぶりコンクリート面にはひび割れの発生を感知するためにひずみゲージを貼り付けた。コンクリートかぶり面のひび割れ幅はパイゲージを用いて測定した。ひび割れの測定はビニールパイプのひずみゲージの直上の位置で行った。

#### 2.4 膨張区間および膨張角度の制御

本研究では供試体の全長にビニールパイプを配置しているが、実際に膨張変位を与えるのは膨張区間  $L_e$  だけである。膨張区間を制御するために、非膨張区間ではビニールパイプ中に鋼管を挿入することで静的破砕剤による膨張圧がビニールパイプに作用しないようにした(図-4)。

膨張角度を制御するために、本実験ではビニールパイプ内に鋼管の一部を削り取ったものを挿入することで、静的破砕剤による膨張圧作用面を限定することにした。膨張角度を制御したビニールパイプ断面のモデルを図-5に示す。実験には外径 17.3mm の鋼管を使用した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 コンクリート中における擬似鉄筋の膨張

静的破砕剤によるビニールパイプ半径増加量の経時変化の一例として、かぶり 20mm の供試体の測定結果を図-6に示す。図中において、半径増加量はビニールパイプひずみの測定結果を式(1)によって換算したものである。時間の経過に伴い、各測定点における半径増加量が同様の傾向を示しながら増加していることから、膨張区間全域において均一な膨張変位が作用していると考えられる。本実験ではビニールパイプひずみがおおよそ 10000  $\mu$  を超えるとひずみゲージによるひずみの測定が行えなくなる場合があり、半径増加量を 0.2mm 程度までしか測定できなかった。

#### 3.2 ひび割れ発生

かぶりコンクリート表面ひずみの測定結果の一例として、かぶり 20mm の供試体の測定結果を図-7に示す。かぶりコンクリート表面ひずみの測定結果において、ひずみが著しく上昇している点が存在しており、かぶりコンクリートの表面にひび割れが発生した可能性が考えられる。パイゲージによって測定したひび割れ幅の計測結果においても、ひずみの上昇と同じ時点からひび割れ幅が増加していることから、本研究ではひずみが急

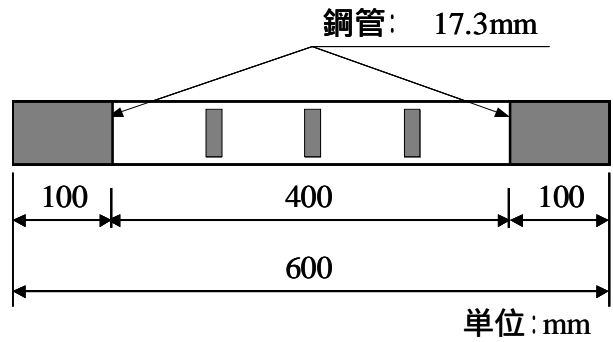


図-4 膨張区間長の制御方法

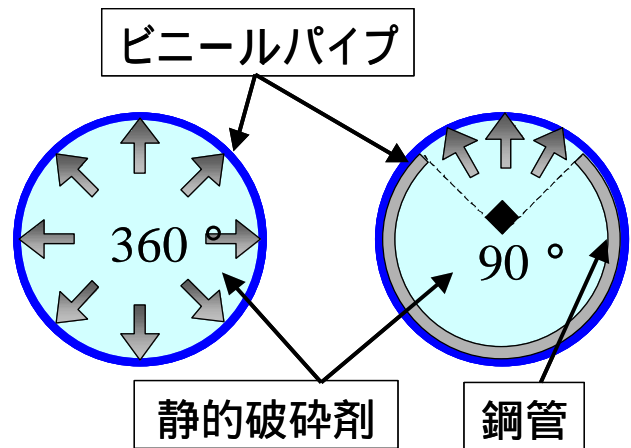


図-5 膨張角度の制御方法

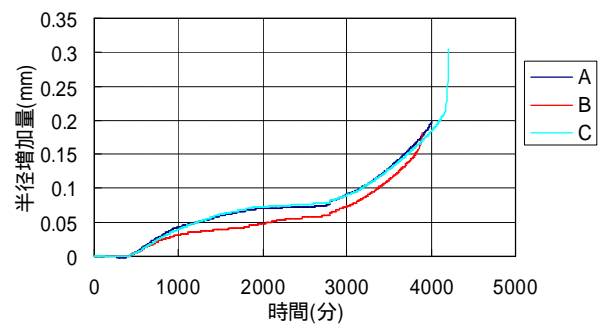


図-6 ビニールパイプ半径増加量の経時変化

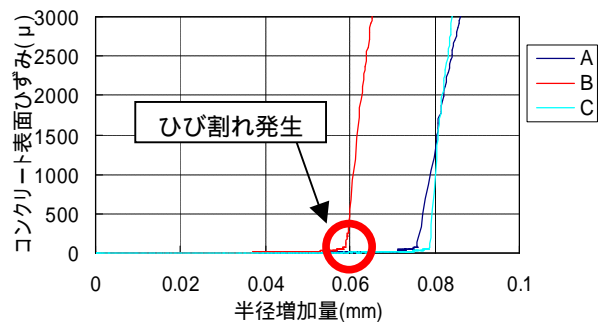


図-7 コンクリートひずみ測定結果

上昇したときに、かぶりコンクリートの表面にひび割れが発生したと判断した。また、ひび割れ発生時の供試体中央におけるビニールパイプの半径増加量をひび割れ発生時の半径増加量とした。

### 3.3 ひび割れ状況

本実験ではかぶり、膨張区間長や膨張角度をパラメータとしているため、多様なひび割れが確認された。各供試体を破壊形態によって分類すると、大きく分けて3種類の破壊形態があったと考えられる。

- (1) かぶり面にビニールパイプに沿った軸方向ひび割れが発生し、ひび割れの進展によって背面まで貫通し、供試体を2分割する割裂破壊。
- (2) かぶり面に軸方向ひび割れ発生後、供試体の側面にも軸方向ひび割れが発生し、かぶり面のコンクリート塊を押出して破壊する押出し破壊
- (3) かぶり面に軸方向ひび割れ発生後、かぶり面に剥離ひび割れが発生する剥離破壊

それぞれの破壊形態をした供試体の代表的な例を図 - 8 から図 - 10 に示す。全供試体の破壊形態の分類を表 - 4 に示す。多くの供試体は割裂破壊しているが、かぶりが小さく、膨張区間長が短くなると押出し破壊や剥離破壊する供試体が多くなるように見られる。



図 - 8 割裂破壊の例 (No.3)



図 - 9 押出し破壊の例 (No.1)



図 - 10 剥離破壊の例 (No.6)

表 - 4 破壊形態と換算腐食減量の一覧

供試体 No.	かぶり c(mm)	膨張区間長 Le(mm)	供試体長 L(mm)	膨張角度	ひび割れパターン	換算腐食減量 Wloss(mg/cm <sup>2</sup> )
1	20	400	600	360°	ひび割れなし	
2	40				押出し	14.2
3	80				割裂+押出し	23.6
4	40	100	600		ひび割れなし	
5		200	600		ひび割れなし	
6	20	200	300		ひび割れなし	
7		800	1200		ひび割れなし	
8		200	300		ひび割れなし	
9	40	800	1200		割裂	8.7
10		200	300		割裂	11.6
11		800	1200		割裂	34.4
12	80	400	600	90°	割裂	15.8
13				180°	割裂	
14				270°	割裂	
15				90°	剥離	
16				90°	ひび割れなし	
						ビニールパイプひずみ測定失敗

### 3.4 腐食減量への換算

実験結果から得られた半径増加量を，一般性のある腐食評価指標に換算する。コンクリート標準示方書の維持管理編ではひび割れ発生予測を腐食減量によって行っていることから，本研究では半径増加量を腐食減量  $W_{loss}(mg/cm^2)$  に換算することにした。式(2)に半径増加量  $dr(mm)$  から鉄筋断面半径減少量  $r(mm)$  への換算式を示す。そして，式(3)によって鉄筋断面半径減少量を腐食減量へ換算する。換算式では鉄筋が剛体膨張すると仮定しており，鉄筋とコンクリート弾性変形を考慮していない。また，腐食生成物は全て半径増加量に換算され，鉄筋周囲のひび割れに浸入しないと仮定した。

$$\Delta r = r_0 - \sqrt{\frac{\gamma \cdot r_0^2 - (r_0 + dr)^2}{\gamma - 1}} \quad (2)$$

$$W_{loss} = \frac{50\rho_s}{r_0} (2r_0 \cdot \Delta r - \Delta r^2) \quad (3)$$

ここで， $r_0 (mm)$  は鉄筋の初期半径， $\gamma$  は錆の体積膨張率， $\rho_s (g/cm^3)$  は鉄筋の単位体積質量である。錆の体積膨張率  $\gamma$  は既往の文献<sup>4)</sup>より 3.1 倍とし，鉄筋の単位体積質量  $\rho_s$  を  $7.85 (g/cm^3)$  とし換算を行った。換算結果の一覧を表 - 4 に示す。

本実験で得られた換算腐食減量は  $8.7 \sim 34.4 mg/cm^2$  であり，ある程度の範囲を持った値であることが確認された。しかし，コンクリート標準示方書の維持管理編では，電食実験の結果からひび割れ発生時の腐食減量を  $10mg/cm^2$  としている。かぶりや腐食区間長の違いによってひび割れ発生時の換算腐食減量は大きく変化することから，これを一義的に定めるのではなく，構造条件や腐食条件によって定量的に評価できる指標の確立が必要であるといえる。

### 3.5 かぶりの影響

ひび割れ発生時の換算腐食減量とかぶりの関係を図 - 11 に示す。これより，ひび割れ発生時の換算腐食減量はかぶり厚に比例して大きくなる傾向を示しており，かぶりの増加によってコンクリート表面にひび割れが発生することに対する抵抗性が高くなっていると考えられる。既往の研究<sup>2)</sup>において，かぶりが増加するほどひび割れ発生時の腐食量は大きくなるという結果が示され

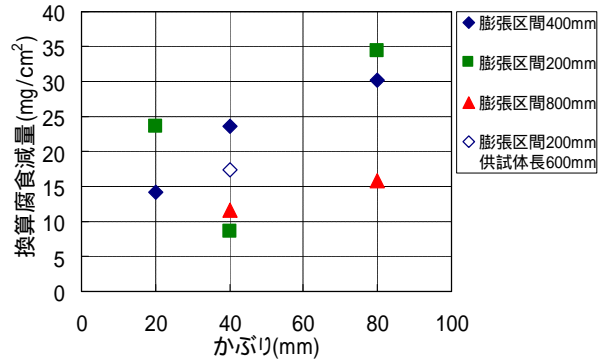


図 - 11 かぶりと腐食減量の関係

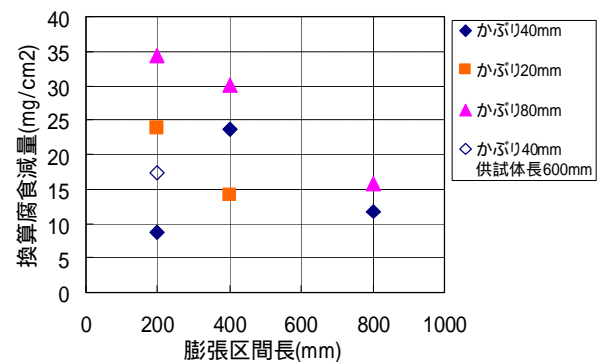


図 - 12 膨張区間長と腐食減量の関係

ており，本研究でも同様の傾向が得られた。また，かぶりが同じ場合でもひび割れ発生時の換算腐食減量が異なっていることから，膨張区間長が影響を与えているものと推測される。つまり，腐食区間長が異なる場合，腐食ひび割れ発生時の腐食減量はかぶりだけで評価できず，腐食区間の影響を考慮する必要があることが示唆された。

### 3.6 膨張区間長の影響

図 - 11 をひび割れ発生時の換算腐食減量と膨張区間長の関係として整理することで膨張区間長が腐食ひび割れ発生限界に及ぼす影響を明らかにする。図 - 12 に膨張区間長と換算腐食減量の関係を示す。本実験では膨張区間長 200mm から 800mm まで変化させているが，膨張区間長が短くなるほどひび割れ発生時の換算腐食減量が大きくなる傾向が示された。供試体長が 600mm で膨張区間長が 200mm の供試体は供試体長 300mm のものと比べて，ひび割れ発生時の換算腐食減量が小さくなっている。これは両者の破壊形態が異なることが影響したものと考えられる。図より膨張

区間長が短いほどひび割れ発生時の換算腐食減量が大きくなる傾向が見られる。膨張区間長が800mmの場合にはひび割れ発生時の換算腐食減量に大きな違いが見られないが、膨張区間長が200mmの場合にはかぶりの大小によってひび割れ発生時の換算腐食減量にばらつきが見られる。

### 3.7 かぶりと膨張区間長の影響

かぶりと膨張区間長を底面とし、鉛直方向にひび割れ発生時の換算腐食減量を軸として、3者の関係をプロットすると図-13に示すような面として表すことができる。これより、かぶりと膨張区間長によってひび割れ発生時の換算腐食減量を平面上に表すことは可能であるが、一部は平面に合致しない結果となった。これは図-5.7に示される供試体の破壊形態の違いが影響したものと推測される。かぶりが小さく、膨張区間長が短い供試体は剥離破壊や押し出し破壊しやすくなり、破壊形態の変化はひび割れ発生時の換算腐食減量にも影響を与えらる。

### 3.8 膨張角度の影響

膨張角度を制御した供試体では、ビニールパイプの膨張ひずみを測定できなかったため、一般的な腐食の指標によって評価することができない。本実験ではコンクリートかぶり面にひび割れが発生するまでの実験経過時間を測定しており、これを用いて定性的な評価を行えらる。図-14にNo.1~No.3, No.12~No.16供試体のひび割れ発生までの実験経過時間を示す。

膨張角度を制御した供試体は、いずれも基準となる供試体よりもひび割れ発生までの実験経過時間が長くなり、ひび割れ発生に必要な膨張圧が大きくなると推測される。

## 4. 結論

- (1) 本実験から得られたひび割れ発生時の換算腐食減量はかぶりと膨張区間長によって変化し、その値は8.7~34.4mg/cm<sup>2</sup>の範囲であった。
- (2) かぶりと膨張区間長とひび割れ発生時の換算腐食減量から3軸グラフを描くことで、これらの関係を平面で表せる可能性が示された。しかし、破壊形態の変化によってひび割れ発生時の換算腐食減量に影響を与えるため、平面に一致しない場合がある可能性が示された。

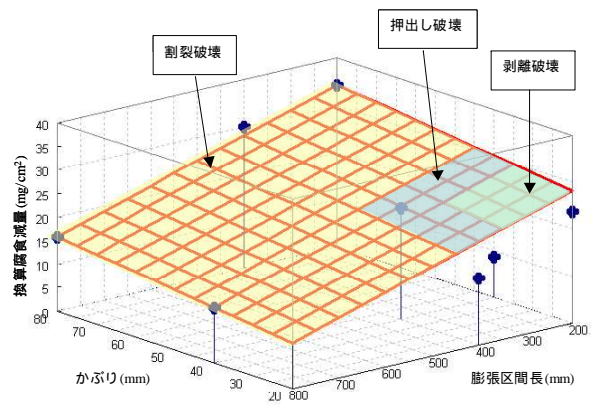


図-13 膨張区間長と腐食減量の関係

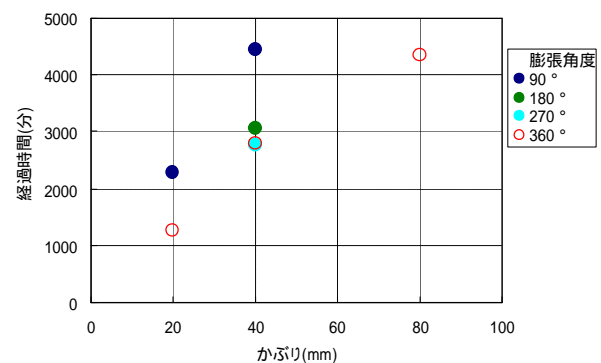


図-14 膨張区間長と腐食減量の関係

- (3) 膨張角度を制御した供試体は、いずれも基準となる供試体よりもひび割れ発生までの実験経過時間が長くなり、ひび割れ発生に必要な膨張圧が大きくなると推測される。

## 参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム，日本コンクリート工学協会，2004.10
- [2] 荒木弘祐，服部篤史，宮川豊章：鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥離現象とその予測，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.209-222，2005.11
- [3] 松島学，横田優，関博：鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1669-1674，2004
- [4] 須田久美子，MISRA Sudhir，本橋賢一：腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.751-756，1992