

論文 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

齋藤 祐樹^{*1}・下村 匠^{*2}

要旨：静的破砕剤を用いた腐食膨張実験を行い、かぶり厚さ、膨張区間長をパラメータとして、鉄筋腐食が空間的に不均一に発生する場合の腐食ひび割れ発生限界について検討した。コンクリートかぶり面にひび割れ発生時の鉄筋の腐食膨張による半径増加量および腐食減量を実験結果より算出した。その結果、ひび割れ発生時の腐食減量はおよそ $8\sim 30\text{mg}/\text{cm}^2$ となり、示方書の値と同程度であった。また、かぶり厚さが大きいほどひび割れ発生限界腐食減量が大きくなること、膨張区間長が 200mm から 800mm の範囲ではひび割れ発生限界腐食減量にほとんど影響がないことが明らかとなった。

キーワード：鉄筋腐食、静的破砕剤、腐食膨張、腐食ひび割れ

1. はじめに

塩害や中性化によるコンクリート中の鉄筋の腐食は、鉄筋コンクリート構造物の耐久性照査において重要な項目である¹⁾。現在、土木学会コンクリート標準示方書では、新設構造物の塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査は、外来塩分によるコンクリート中の鋼材位置における塩化物イオン濃度が、鋼材腐食発生限界濃度に達するかどうかによって行っている。つまり、コンクリート中の鋼材腐食の発生を耐久性の限界状態として設定している。しかし、塩分が飛来する環境下に建設される構造物の場合、コンクリートの水セメント比を低くしてコンクリートの塩化物イオン拡散係数を小さくしたり、かぶりを大きくして塩化物イオンの鉄筋への到達を遅らせるだけでは、この照査に合格することは現実的に難しく、結果として、コンクリートの表面保護工法やエポキシ樹脂塗装鉄筋の使用、電気化学的防食工法の適用などに頼らざるを得ない。

一方、多くの構造物において、コンクリート中の鉄筋の腐食が開始してもただちに不具合が生じるわけではなく、実際に構造物の性能に支障をきたすのはある程度腐食が進行してからであることも経験的に明らかである。そこで、コンクリート構造物中の鋼材腐食開始を限界状態として照査を行う方法だけでなく、鋼材腐食に起因するコンクリートのひび割れ発生を限界状態とした設計を行うことができれば、設計の自由度が広がり、実用上問題のない耐久性を無理なく実現できる可能性が拓けると考えられる。

腐食ひび割れの発生に関する研究は多くの研究者によってかなりの成果が得られている²⁾。

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

である程度再現性のある腐食を発生させることができること、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局所的に腐食が進展することがあり³⁾、均一な腐食を実現することが難しい。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が、電食ではこのような状況を再現した研究は、少数の研究例⁴⁾を除いてあまりない。

荒木ら⁵⁾は、鉄筋の代わりにゴムを用い、コンクリート中での鉄筋の腐食膨張を模倣し、腐食ひび割れに関する系統的な実験を行っている。本研究では、静的破砕剤を用いてコンクリートに模擬的な腐食ひび割れを発生させる実験を行うことで、理想的な膨張が生じたときの内部鋼材の膨張量とひび割れ発生限界およびひび割れ幅の関係について検討した。かぶり厚と膨張区間長をパラメータとした実験を行い、鉄筋腐食が空間的に不均一に発生する場合の腐食ひび割れ発生限界について検討した。

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

実験の検討要因と水準を表-1に示す。かぶり厚さ c 、膨張区間長 Le を検討要因としている。かぶり厚さはコンクリート標準示方書⁶⁾の最小かぶりよりも小さい20mm、標準的な値として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水準とした。膨張区間長の検討では、試験体長 L はそのまま膨張区間長を変化した場合と、供試体長と膨張区間長の寸法比はそのままで軸方向の長さを0.5倍と2倍にした場合について実験を行った。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系准教授 工博 (正会員)

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-2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 34.5N/mm^2 、弾性係数は 42.2kN/mm^2 であった。静的破砕剤は、対象実孔径 $38\sim 50\text{mm}$ 、適用温度 $10\sim 20^\circ\text{C}$ のものを使用した。水粉体質量比 30%で練混ぜた。

供試体の形状と寸法を図-1に示す。供試体は $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 600\text{mm}$ のコンクリート角柱供試体の内部に外径 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箇所にはずれゲージを2枚左右対称にそれぞれの箇所にはずれゲージを貼り付けた。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箇所にはずれ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。ビニールパイプの直径方向の膨張変位(半径増加量)は、径の変化率と周の変化率が等しいことを利用し、周方向のひずみの測定値より式(1)で求める。

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

ここで、 dr は半径増加量(mm)、 ϕ_0 は膨張前の直径で 21mm 、 ε 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圧を与える。静的破砕剤をビニールパイプ内に充填し膨張させることで、コンクリートに膨張圧を与える。実験中、膨張区間において均一な膨張が生じていることは、ひずみゲージの測定値により確認する。

コンクリートかぶり面の状況を図-3に示す。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。これら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、実際に膨張させるのは膨張区間 (L_e) だけである。そこで、非膨張区間ではビニールパイプ中に鋼管を挿入し、静的破砕剤がビニールパイプに接触しないようにして、コンクリートに膨張圧が作用しないようにした(図-4)。

表-1 実験の検討要因と水準

供試体 No.	検討要因	かぶり c (mm)	膨張区間長 L_e (mm)	試験体長 L (mm)
C20	かぶり	20	400	600
C40		40		
C80		80		
Le100	膨張区間長	40	100	600
Le200			200	600
L300			200	300
L1200			800	1200

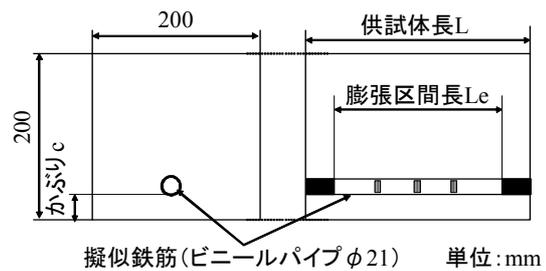


図-1 供試体の形状寸法

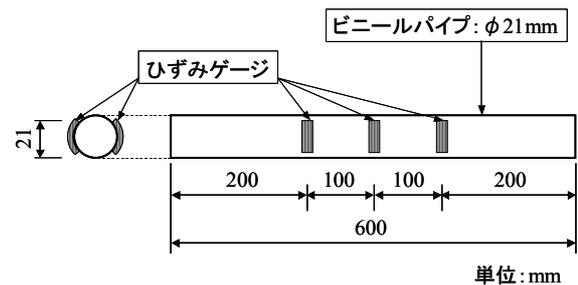


図-2 ビニールパイプの状態(供試体長さ 600mm の例)

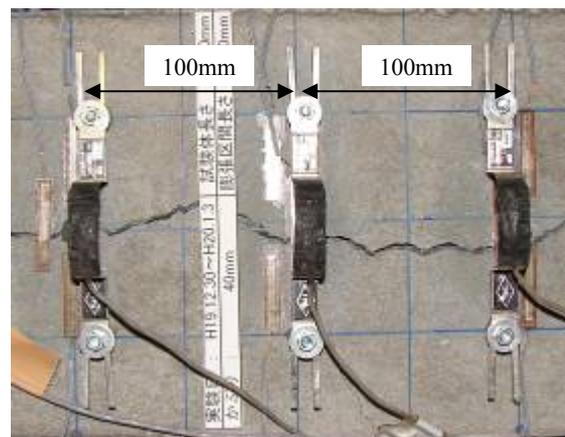


図-3 コンクリートかぶり面の状況

表-2 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^3)				
			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

3. 実験結果および考察

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-5 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。ビニールパイプひずみがおよそ 10000 μ 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、本実験では半径増加量を最大で 0.3mm 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-6 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、ひずみが急に増加している点が認められる。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、ひずみの増加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変した時点に、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 ひび割れ幅

かぶり 20mm の供試体におけるコンクリートかぶり面のひび割れ幅測定結果を図-7 に示す。図-6 に示すひび割れ発生と同時にひび割れ幅の増加を確認した。半径増加量とともにひび割れ幅が大きくなっており、両者の間には線形的な関係が認められる。半径増加量とひび割れ幅に線形関係が認められる範囲で近似直線を描き、この直線の傾きを求めた。近似直線の傾きとかぶりの関係を図-8 に示す。近似直線の傾きはかぶり厚さに比例して大きくなる傾向が得られた。また、かぶり厚さ 40mm の供試体の値を比較すると、膨張区間長の違いによって近似直線の傾きが変化しており、膨張区間長がひび割れの拡大に影響を及ぼす可能性が示唆された。Le200 の供試体はビニールパイプ軸方向のひび割れが一様に開口する破壊形態ではなく、コンクリートかぶり面の中央部に十字のひび割れが発生しており、他の供試体とひび割れ形態が異なっていた。軸方向と直交するひび割れが開口することで、軸方向に発生したひび割れ幅の増加が低減されたと考えられる。

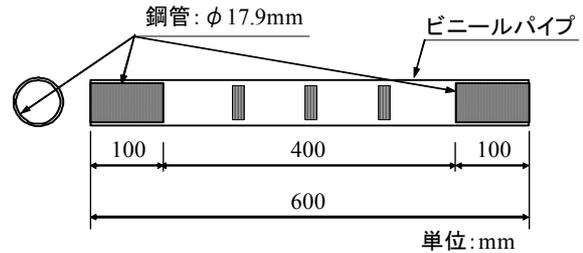


図-4 ビニールパイプの膨張区間の制御方法
(供試体長さ 600mm の例)

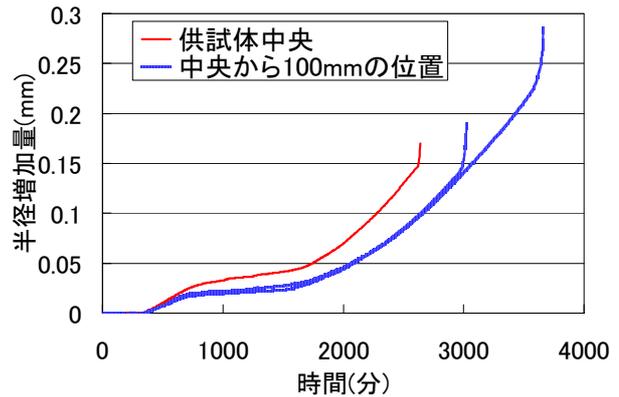


図-5 ビニールパイプ半径増加量の経時変化

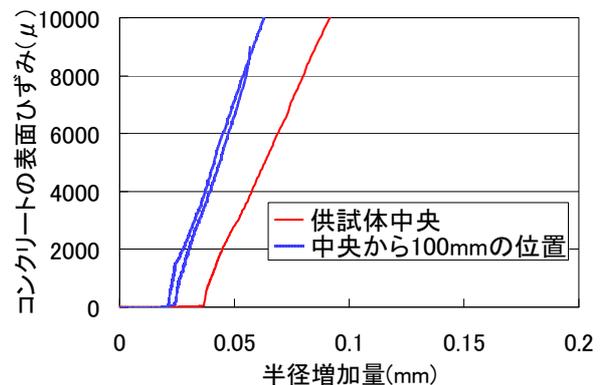


図-6 コンクリートひずみ測定結果

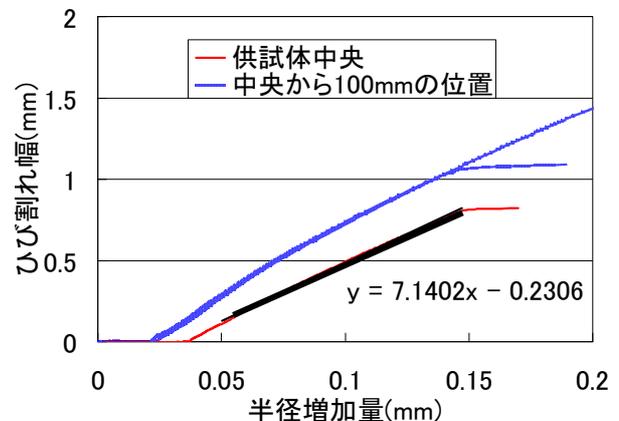


図-7 かぶり面ひび割れ幅の測定結果

3.4 ひび割れ状況

図-9 に供試体のひび割れ図を示す。今回の実験では膨張区間長 100mm の供試体はひび割れが発生しなかった。この供試体で測定されたビニールパイプの半径増加量は 0.2mm を超えていることから、今回の実験におけるひび割れ発生に必要な半径増加量がこれ以上であると推測される。

ひび割れ状況は 1 日 1 回の目視による観察で行っているため、ひび割れが発生する瞬間を観察することができない。また、ひび割れは短時間で急激に進展するため、発生順序や進展方向を把握することができなかった。

図-10 にかぶり厚さ 40mm、膨張区間長 400mm の供試体端部の写真を、図-11 にかぶり厚さ 40mm、膨張区間長 200mm の供試体側面の写真をそれぞれ示す。Le200 を除く全ての供試体においてビニールパイプに沿った軸方向のひび割れが発生している。このひび割れは供試体の端部まで達しており、供試体を 2 次的に割裂するような破壊形態となった。供試体の端部は図-10 のような破壊形態となっていた。一方、試験体長に対して膨張区間長の割合が小さい Le200 の供試体では端部まで軸方向

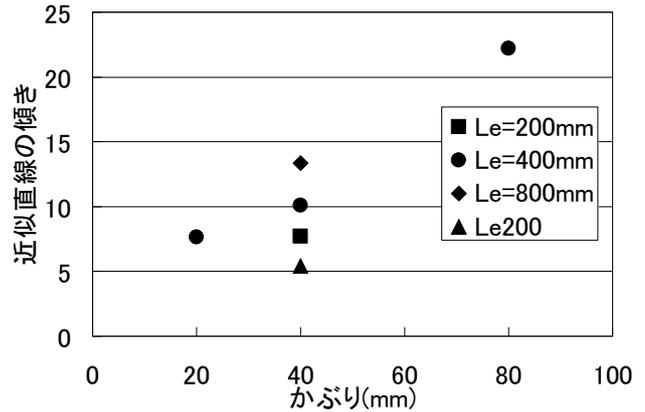


図-8 半径増加量とひび割れ幅の近似直線の傾き

ひび割れが進展せず、中央付近に軸方向ひび割れと交差するひび割れが発生している。この供試体だけに側面にも軸方向ひび割れが発生しており、他の供試体とひび割れ形態が異なった。軸方向ひび割れと交差するひび割れは側面の軸方向ひび割れに到達しており、膨張変位によってかぶりコンクリートを軸方向にも直行方向にも押し上げるような破壊形態となった。

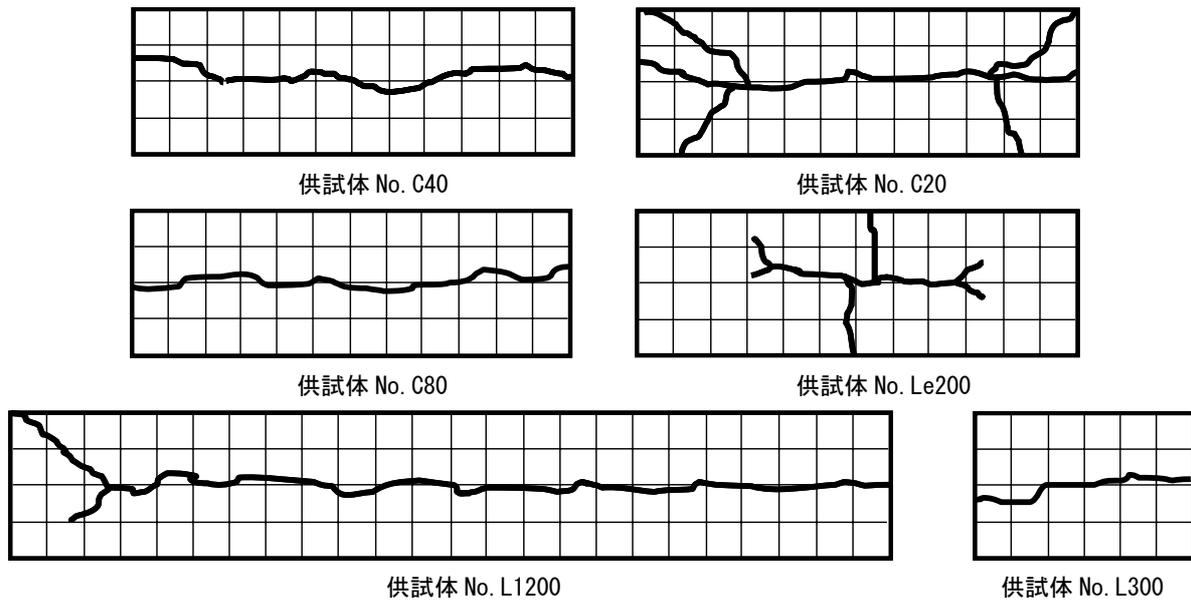


図-9 ひび割れ図



図-10 供試体端部の割裂状況

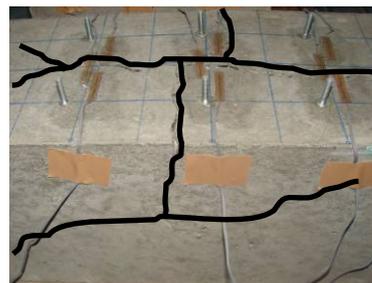


図-11 供試体側面の軸方向ひび割れ

このように、膨張区間長 Le が試験体長 L に比べて小さいとき、(本実験では $Le/L=1/3$) 膨張によるひび割れ形態が変化することが示唆された。膨張区間が 100mm の供試体が破壊しなかったのは、上記のような理由によって破壊メカニズムが変化したため、ひび割れ発生に必要な半径増加量が増加した可能性が考えられる。

3.5 かぶり厚さの影響

ひび割れ発生時の半径増加量とかぶり厚さの関係を図-12 に示す。ひび割れ発生時の半径増加量はかぶり厚さが大きくなるにつれて大きくなっており、かぶりの増加によってコンクリートの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いえる。しかし、実験データ数が少ないためひび割れ発生時の半径増加量に関する定量的な評価を行うことは難しい。

既往の研究⁷⁾において、かぶり厚さが大きいほどひび割れ発生時の腐食量は大きくなる結果が示されている。本研究の実験におけるビニールパイプの膨張が、鉄筋コンクリート中における鉄筋の腐食による膨張の再現に成功していたとした場合、ビニールパイプの半径増加量は鉄筋の膨張量に相当する。ここで、鉄筋の膨張量が腐食量に比例すると仮定すると、本実験結果により、既往の研究と同様の傾向が間接的に得られたことになる。

3.6 膨張区間長の影響

ひび割れ発生時の半径増加量と膨張区間長の関係を図-13 に示す。本実験では膨張区間長 200mm から 800mm まで変化させているが、この範囲の膨張区間長ではひび割れ発生時の半径増加量におよぼす影響はほとんどないように見られる。

荒木らの研究結果⁸⁾では、膨張区間長が 50mm~200mm の条件において実験を行っている。その結果、膨張区間長が短いほどひび割れ発生時の半径変化量が大きくなり、膨張区間が長くなるにつれて、ある一定値に収束するような傾向が見られる。本実験では荒木らが対象とした膨張区間長をさらに長くした条件で行っており、この範囲ではもはやひび割れ発生時の半径増加量に対する膨張区間長の影響が鈍感になっている可能性がある。このため、図-13 に明確な傾向が認められなかったものと考えている。

3.7 腐食減量への換算

実験結果から得られた半径増加量を、より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]⁹⁾では腐食評価指標に腐食減量を用いていることから、ここでも半径増加量を腐食減量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 Δr (mm) への換算式を示す。式(3)によって鉄筋断面半径減少量を腐食減量 W_{loss} (mg/cm²) へ換算する。

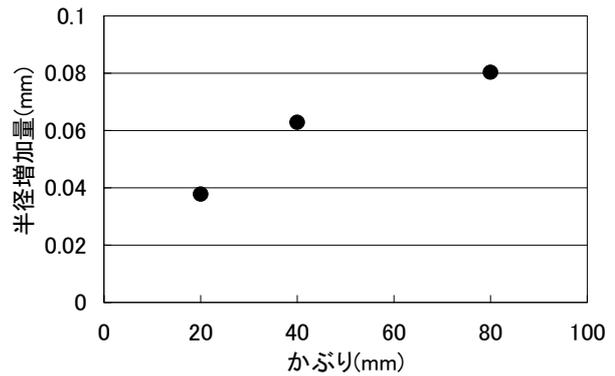


図-12 ひび割れ発生時の半径増加量とかぶり厚さ

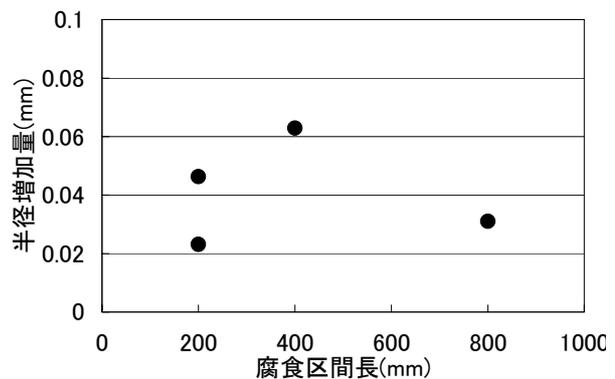


図-13 ひび割れ発生時の半径増加量と膨張区間長の関係

表-3 各水準における腐食減量

供試体 No.	かぶり c (mm)	膨張区間長 Le (mm)	試験体長 L (mm)	換算腐食減量 (mg/cm ²)
C20	20	400	600	14.2
C40	40			23.6
C80	80			30.1
Le100	40	100	600	17.3
Le200		200		
L300		200		
L1200	40	800	1200	11.6

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の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、 γ は鍍の体積膨張率、 ρ_s (g/cm³) は鉄筋の単位体積質量である。鍍の体積膨張率 γ は須田らの論文¹⁰⁾より 3.1 倍とし、鉄筋の単位体積質量 ρ_s を 7.85 (g/cm³) として換算を行った。換算結果の一

覧を表-3 に示す。コンクリート標準示方書では電食実験の結果をもとにひび割れ発生時の腐食減量として $10\text{mg}/\text{cm}^2$ が示されている。本実験から算出された腐食減量はおよそ $8\sim 30\text{mg}/\text{cm}^2$ であり、示方書の値と同程度の結果であるといえる。しかし、既往の研究結果³⁾¹⁰⁾¹¹⁾と比べると、供試体諸元が異なるため一概に比較することができない。かぶり厚さや鉄筋径、膨張区間長がひび割れ発生限界におよぼす影響を定量的に評価するためには実験条件を変化させた検討が必要であると考えられる。

4. 結論

本研究では、静的破砕剤を用いた腐食膨張実験を行って、鉄筋腐食が部分的に発生する場合の腐食ひび割れ発生限界を検討した。結果、以下の知見が得られた。

- (1) 静的破砕剤を用いた腐食膨張実験より、コンクリートかぶり面のひび割れ発生時の半径増加量を算出することができた。
- (2) ひび割れ幅の拡大はかぶり厚さと膨張区間長の影響を受けることが確認された。
- (3) 供試体長に対する膨張区間長の割合が小さくなると、軸方向と直交方向にひび割れが発生することがある。その場合、半径増加量とひび割れ幅の関係は軸方向ひび割れが卓越する場合とは異なる。
- (4) 膨張区間長が $200\text{mm}\sim 800\text{mm}$ では、膨張区間長がひび割れ発生時の半径増加量に及ぼす明確な影響は認められなかった。
- (5) 本研究の実験結果から算出されたひび割れ発生時の腐食減量はおよそ $8\sim 30\text{mg}/\text{cm}^2$ となり、示方書に示された $10\text{mg}/\text{cm}^2$ と同程度であった。

謝辞

本研究の実施に当たり、太平洋セメント株式会社から静的破砕剤の提供を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'06[基礎編]，日本コンクリート工学協会，2006
- 2) 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
- 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) Andrés A. Torres-Acosta and Alberto A. Sagüés：Concrete Cracking by Localized Steel Corrosion-Geometric Effects, ACI Materials Journal, V.101, No.6, pp.501-507, Nov-Dec.2004
- 5) 荒木弘祐，高谷哲，服部篤史，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋腐食膨張圧モデル化と実験・解析手法，第4巻コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，日本材料学会，pp.25-32，2004.10
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，土木学会，2002
- 7) 田村清美，丸山久一，小田川昌史，橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.505-510，1988
- 8) 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
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，土木学会，2001
- 10) 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
- 11) 武若耕司，松本進：コンクリート中の鉄筋腐食がRC部材の力学的性状におよぼす影響，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.6，pp.177-180，1984