曲げひび割れがコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす影響に関する研究

Study on the effect of bending crack on corrosion of reinforced steel in concrete

北海道大学大学院工学院	○学生員	金子幹 (Motoki Kaneko)
北海道大学大学院工学院	学生員	Idrees Zafar
北海道大学大学院工学研究院	正 員	杉山隆文(Takafumi Sugiyama)

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、構造物の 耐久性や耐荷性能などに影響を与えるものである。ひび 割れが、コンクリート中の鉄筋の腐食に与える影響とし ては、ひび割れを通しての塩化物イオンの侵入、酸素や 炭酸ガスの侵入、水分の浸透が考えられる。

ひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響を調べるためにこれ まで多くの研究が行われてきたが、必ずしも統一的な見 解は得られていない^{1)~2)}。

塩害による鉄筋腐食は鋼材のかぶり位置における塩化 物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの潜伏期、 および鋼材の腐食開始から腐食ひび割れが発生するまで の腐食速度に関係する進展期で評価される。したがって、 鉄筋腐食に及ぼす影響を調べる場合、曲げひび割れがど の段階で影響するかを研究することが必要である。

本研究では、曲げひび割れ導入コンクリートはりの鉄 筋腐食実験とイオン同時輸送モデル(SiTraM)によるシミ ュレーションを行うことで、曲げひび割れがコンクリー ト中の塩化物イオン浸透性状や塩害劣化過程の変遷へ与 える影響を調べた。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

100×100×400mm の角柱の鉄筋コンクリートを作製し た。鉄筋は異形鉄筋(SD345 φ19mm)を使用し、かぶり が 20mm と 25mm の位置に計 2 本配置した。供試体の 打設方向はコンクリートと鉄筋界面のブリーディングな どの影響を避けるため、長さ 400mm 方向に縦打ちとし た。供試体は水中養生日数 91 日(N2CL)を 4 体作製した。 角柱供試体の形状・寸法を図-1 に、使用材料と供試体 の配合を表-1、表-2 に示す。

2.2 ひび割れ発生および塩分浸透方法

鉄筋コンクリートはりを写真-1 のように設置し、ネ ジを締め上げていくことで中央に集中荷重を掛け、曲げ ひび割れを導入・保持させた。曲げひび割れ部を下面と し、幅 48mm の塩分供給容器を設置し、10%NaCl 溶液 を浸透させた(写真-1 を参照)。ひび割れにおいて、水溶 液が毛細管現象を伴い移動し、ひび割れ以外の微細な連 続空隙へも移動すると推察される³⁾ため、塩分供給は下 部から行うこととした。供試体の塩化物イオン供給面と その反対側の面以外の4面を気密アルミテープにより被 覆した。これは、供給面側面からの水の浸透、蒸発を防 ぐためである。

2.3 マイクロスコープでのひび割れの観察

高解像度型(300 万画素)のズーム式デジタル顕微鏡を 用いて曲げひび割れを観察した。ひび割れ位置を確認す るとともにひび割れ幅の計測を行った。

2.4 自然電位および腐食電流密度の計測

2週間おきに2重対極センサー方式の2周波交流イン ピーダンス法を採用した携帯型鉄筋腐食診断器によって 分極抵抗を求め,腐食電流密度と自然電位を計測した。





写真-1 塩分浸透方法

表-1	使用材料
2X-1	C/11/11/11

材料	種類	密度(g/cm ³)	粗粒率(%)			
セメント	普通(OPC)	3.16	_			
陸砂	細骨材	2.61	2.67			
砕石	粗骨材	2.68	6.06			
AE 減水剤	変成リグニンスルホン酸化合物					
AE 助剤	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面					
	活性剤と非イオン界面活性剤の複合体					

表-2 コンクリートの配合と圧縮強度

配合	Gmax	W/C	s/a	単位量(kg/m³)			混和剤(kg/m³)		圧縮強度 (N/mm ²)	
	(mm)	(%)	(%)	W	С	S	G	AE 減水剤	AE 助剤	91 日
N2CL	13	50	43	170	340	772	1012	3.7	0.136	49.6

2.5 塩化物イオン濃度の測定

角柱供試体の塩化物イオン濃度の測定位置は表面から 約 10mmの位置に曲げひび割れ近傍から鉄筋に沿った4 点と曲げひび割れ先端付近における2点もしくは3点を 電動ドリル(φ8 mm)により試料採取を行い、塩化物イオン 濃度を測定した。塩化物イオン濃度の測定方法は JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試 験方法」に従った。また試料採取位置を図-2に示す。



図-2 試料採取位置

3. イオン同時輸送モデル(SiTraM)

SiTraM⁴⁾はコンクリート中のイオン移動に影響を与え る主な要因となる、セメントの空隙構造、細孔溶液中の 各イオンの相互作用、セメント水和物とイオンとの相互 作用の3つのモデルから構成され、Fickの拡散方程式 を有限体積法により離散化させることでコンクリート中 のイオン移動を予測するモデルである。図-3にSiTraM の概要図を示す。空隙構造係数は空隙率と空隙構造を円 筒形でモデル化した際の円筒の屈曲度により定義される。 空隙構造係数の導入により空隙構造による拡散への影響 を考慮している。細孔溶液中の電気化学平衡では、細孔 溶液および接触溶液の各イオンの相互作用は相互拡散係 数を用いることで考慮し、イオンと水和物の相互作用で は、CIの固定化、Ca²⁺の溶出や選択的イオン移動の影響 を考慮している。



図-3 SiTraM 概要図

4. 実験結果および考察

4.1 曲げひび割れ幅の変位

図-4 にマイクロスコープによる曲げひび割れ幅の変 化の結果を示す。いずれの供試体においても曲げひび割 れ幅は増大する結果となった。本実験では濃度の高い 10%NaCl 溶液を用いた。後記する自然電位並びに腐食 電流密度の結果より腐食開始時期は塩分浸透開始からお よそ2週から4週の間であると同時に腐食速度は非常速 いことが考えられる。このことより曲げひび割れ幅増大 の主たる要因は腐食生成物による膨張圧に起因するもの と思われる。



4.2 自然電位の測定結果

図-5 にひび割れありの供試体(N2CL)の自然電位の計 測結果、図-6 に過去に行ったひび割れなしの供試体(N2) の自然電位の計測結果を示す。なおひび割れなしの供試 体(N2)は水中養生日数が 28 日である。またここでは飽 和塩化銀照合電極で測定した自然電位を飽和硫酸銅電極 (CSE)へ換算した値を使って表している。UP はかぶり 20mm の鉄筋を、ASTM は腐食判定基準の1つであり、 ASTM-C876 における 90%以上の確率で腐食していると される基準値-350mv を表している。N2CL の結果から は、N2CL(3)を除く 3 体が塩分浸透開始から 14 日後ま でに腐食が発生し、N2CL(3)は塩分浸透開始から 28 日 後までに腐食が発生したと思われる。一方 N2 の結果か ら、値に多少のばらつきがあるが、N2(3)と N2(4)が塩 分浸透開始から 15 日後までに腐食が発生し、残りの 2 体は塩分浸透開始から 30 日後までに腐食が発生したと 思われる。これらの結果を比較すると僅かに曲げひび割 れの影響による潜伏期の短縮の可能性が示唆されたが、 断定するためには自然電位の計測スパンを短くし、確認 することが必要である。







図-6 ひび割れなし供試体の自然電位測定結果

4.3 腐食電流密度の測定結果

図-7 にひび割れありの供試体(N2CL)の腐食電流密度 の計測結果、図-8 に過去に行ったひび割れなしの供試 体(N2)の腐食電流密度の計測結果を示す。なお、図中の CEB とはヨーロッパコンクリート委員会(現 fib:国際コ ンクリート連合)の評価基準(0.2 µ A/cm²以下で腐食なし) を表している。CEB の基準で腐食発生の有無を評価す ると N2CL では N2CL(1)は塩分浸透開始から 2 週間で腐 食したと考えられ、その他の供試体では塩分浸透開始後 4週間から6週間以内に腐食が発生したと考えられる。 N2 では N2(2)、N2(3)、N2(4)が 4 週間から 10 週以内に 腐食が発生し、N2(1)は 10 週後に腐食が発生したと思わ れる。これらを比較すると N2 において 4 週から 10 週 間のどの段階で 3 体の供試体が 0.2 μ A/cm² を上回った のかが判断できないが、N2(1)においては 10 週間以降に 腐食したことを考えると、曲げひび割れの影響による潜 伏期の短縮の可能性があると言える。また CEB の評価 基準では腐食電流密度が 1μA/cm² よりも大きい場合、 激しい/高い腐食速度であるとされているが、N2CLの 106 日後の値は N2CL(1): 2.25 µ A/cm², N2CL(2): 1.67 µ A/cm², N2CL(3) : 2.38 μ A/cm², N2CL(4) : 3.95 μ A/cm² \geq

なり、腐食速度が非常に加速していることがわかった。 この結果は N2 の結果と比較しても顕著であり、曲げひ び割れを介して酸素の供給が容易になったためであると 思われる。



5. SiTraM による解析結果と考察

5.1 境界条件

側面からひび割れ状況を確認したところ、全ての供試 体において鉄筋表面まで垂直に曲げひび割れが発生して いた。そこで SiTraM ではひび割れを鉄筋表面まで垂直 に再現した。溶液と接触している引張縁において、曲げ ひび割れを中心に塩分供給容器の幅 48mm と鉄筋方向 である鉛直方向において、曲げひび割れ内の深さ 10mm まで溶液が吸水されたと仮定し、10%NaCl 溶液を境界 条件とした。

5.2 塩化物イオン濃度の実験値と解析値の比較・検討

図-9 に曲げひび割れ近傍から鉄筋に沿い、表面から 約 10mm の位置の 4 点における全塩化物イオン濃度の 実験値および SiTraM による解析値を示す。SiTraM によ る解析値と全ての供試体の塩分浸透結果を比較すると高 い相関性があり、解析値は妥当であると言える。また図 -10, 11, 12, 13 は SiTraM による全塩化物イオン濃度 の等高線図であり、図上にひび割れ先端にて採取した試 料の塩分濃度とマイクロスコープによるひび割れ幅の結 果も記した。N2CL(1)、N2CL(2)、N2CL(3)の実験値と SiTraM の解析値はよく一致した。解析による結果では N2CL(4)の採取位置における塩分量は0となった。しか し実験値は、11.14kg/m³、9.05 kg/m³ であった。このこ とから N2CL(4)では曲げひび割れへの吸水深さは 10mm ではなくさらに深くにまで 10%NaCl 溶液が浸透してい ったと思われる。吸水深さの違いはひび割れ幅に寄与す ると考えると、150µmは 60~110µm より毛細管現象 による吸水能力が高いと考えられる。





0 25 50 75 100 125 150 175 図-11 SiTraMによる塩分等高線と N2CL(2)実験値



5.3 鉄筋表面における CI^{-/}OH⁻

コンクリート中の鋼材に対して、空隙水中の水酸化物 イオンは不動態被膜を形成する防食に寄与し、空隙中の 塩化物イオンは不動態被膜を破壊する腐食に寄与してい る。このため、コンクリート中の鋼材の腐食開始に影響 を及ぼす化学的な側面として塩化物イオンと水酸化物イ オンのモル数比率、すなわち CI/OH に支配されている 5)。しかし鉄筋表面における空隙水中の塩化物イオンと 水酸化物イオンを測定することは非常に困難である。そ こで SiTraM を用いて CL/OH を検討した。図-14 は SiTraM による曲げひび割れ直上における表面から 20mm での Cl-/OH である。鋼材腐食の閾値となる Cl-/OH⁻は Hausman による 0.6⁶⁾や Diamond による 0.3⁷⁾とい った値がよく知られている。これらの値を閾値と考える と、7~8日もしくは11~12日に掛けて腐食が発生したと 考えられる。実験から推定した潜伏期よりも少し安全側 の評価になっており、今後はひび割れや境界条件の入力 値をさらに精査する必要がある。





6.結論

本研究では、曲げひび割れを導入した鉄筋コンクリー

トにおける塩分浸透による鉄筋腐食実験とイオン同時輸送モデル SiTraM による解析の2つの手法を用いて曲げひび割れが塩分浸透と鉄筋腐食に与える影響に関して研究を行った。本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 自然電位および腐食電流密度の測定結果より曲げ ひび割れの影響による潜伏期の短縮の可能性が示唆 された。
- (2) 塩化物イオンの実験値と SiTraM による解析値を比較することで吸水によると思われる差異が生じていた。また、ひび割れ幅に寄与すると考えると、150 μmは60~110μmより毛細管現象による吸水能力が高いと考えられる。
- (3) SiTraM を用いることで実験によって得るのが困難 な Cl/OH を検討することが可能である。

参考文献

 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割 れ調査,補修・補強指針 -2003-,2003
 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひ び割れ制御設計・施工指針(案)・同解説,pp.223-233,2006

3) 吉川昴純, 杉山隆文, Ivan Sandi Darma: X線CTによ る曲げひび割れ及び炭酸セシウム水溶液の移動の可視化, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1810-1815, 2012

4) T. Sugiyama, W. Ritthichauy, Y. Tsuji: Experimental investigation and numerical modeling of chloride penetration and calcium dissolution in saturated concrete, Cement and Concrete Research, Volume 38, Issue 1, pp.49-67, January 2008.

5) 土木学会:コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防 食技術研究小委員会(338委員会)委員会報告書,コンクリ ート技術シリーズ86,2009.1

6) Hausman, D.A.: Steel Corosion in Concrete: How Does It Occur?, Materials Protection, 6-11, pp.19-23, 1967.
7) Daimond, S.: Chloride Concentration in Concrete Pore Solutions Resulting from Calcium and Sodium Chloride Admixtures, Cement Concrete and Aggregates, 8-2, pp.97-102, 1986.

8) G. M. Sadiqul-Islam and T. Sugiyama: Corrosion initiation state of rebars in concrete subjected to chloride penetration, Concrete under severe conditions, CRC Press, Vol.1, pp.453-460, 2010.

9) 藤秀学,杉山隆文:コンクリート中の鉄筋腐食発生 限界塩化物イオン濃度の測定に関する考察,土木学会第 65 回年次学術講演会概要集第 V 部, pp.421-422, 2010.9

10) 古村惇朗, 杉山隆文:フライアッシュコンクリート 中の腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1012-1017, 2012