

曲げひび割れを有する鉄筋コンクリート中における鉄筋の腐食機構

コンクリート研究室 小山 和雄

指導教官 下村 匠

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材において、かぶりコンクリートが外部より侵入する腐食促進物質から鉄筋を保護する能力は、鋼材腐食に対する部材の耐久性の上で重要な因子となる。

曲げひび割れの発生を許して供用される鉄筋コンクリート部材では、かぶりコンクリートの総合的な物質透過抵抗性は、かぶり厚さ、コンクリートの品質、ひび割れ性状の所産として達成される。2002年制定土木学会コンクリート標準示方書では、ひび割れ部分以外のコンクリートの塩化物イオン拡散係数、曲げひび割れ幅、間隔を複合的に考慮して、かぶりコンクリートの塩化物イオン拡散係数を算定する方法が採用された¹⁾²⁾。構造物の耐久性照査の一項目として、この拡散係数を用いて算定された鋼材位置における塩化物イオン濃度が、限界値に達しないことを照査することになっている。

このように、鋼材腐食に関する照査を物質濃度の照査に置き換えることは、鋼材腐食の程度が物質濃度に対して正の相関関係にあることが前提となっているといえる。

一方、コンクリート中の鉄筋は、条件によって様々な腐食形態をとることが知られている。宮里らは、マクロセル腐食機構により、曲げひび割れ部分の鉄筋が局所的に腐食する場合のあることを指摘している³⁾。マクロセル腐食は、鉄筋軸に沿った物質濃度等の物理化学的状態のコントラストによって誘起されるため、条件が重なると、物質遮蔽性の高い緻密なコンクリートにおいて生じやすい恐れがある。

しかし、通常考えられる条件下において、実際にそのようなことが起こり得るのかどうか検討しておく必要がある。そこで本研究では、ひ

び割れを導入した鉄筋コンクリート供試体の屋外促進暴露試験を行い、鉄筋軸に沿った塩化物濃度、鉄筋の腐食量の分布に及ぼす、コンクリートの品質およびひび割れ幅の影響を実験的に検討する。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は図-1に示す鉄筋コンクリートはりを用いて各2体ずつ、計4体作製した。実験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。供試体1体につき4本の曲げひび割れを意図的に誘導するため、打設時にステンレス板をかぶり部に200mmの等間隔で設置し、断面欠損を生じさせておいた。

供試体は、コンクリート打設後2週間湿布養生をした後、等曲げ区間を600mmとして2点載荷を行い、ひび割れを導入した。ひび割れ幅は、ひび割れ位置の鉄筋が降伏している箇所と降伏していない箇所が、混在することを目標にコントロールした。結局、表-2に示すように、鉄筋が降伏していないひび割れでは約0.2mm、鉄筋が降伏しているひび割れでは約1.0mmのひび割れ幅となった。ひび割れ幅は、ひび割れを跨いで設置したコンタクトチップにより測定した。

外部からの腐食促進物質が暴露面のみから侵入するように、供試体の暴露面以外にはエポキシ樹脂による不透水性被覆を施した。

2.2 暴露試験

腐食促進物質（水分、塩化物イオン、酸素）が十分に供給される腐食に厳しい環境条件を再

表 - 1 実験に使用したコンクリート配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)					
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE助剤
40	150	375	798	986	1.1625	1.1250
60	175	292	799	988	0.9042	0.8750

図-2 各供試体のひび割れ幅

水セメント比 (%)	ひび割れ幅 (mm)	暴露期間 (日)
40	0.29	42
	0.28	
	1.69	
	0.37	
60	0.17	42
	1.02	
	1.04	
	0.35	
40	0.26	97
	0.21	
	1.30	
	0.21	
60	0.19	97
	0.75	
	0.87	
	0.71	

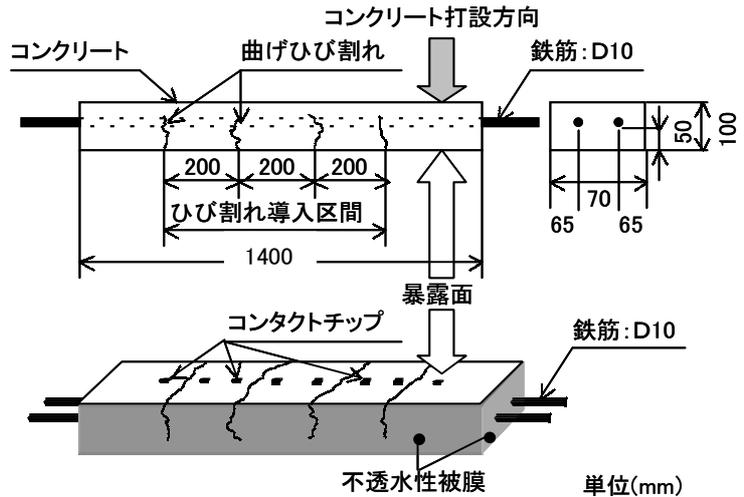


図 - 1 供試体寸法

現するために、屋外にて促進暴露試験を行った。一定時間間隔で自動噴霧する装置を用い、海水と同程度の濃度 3%の食塩水を 3 時間間隔で噴霧した。1 回の噴霧量は供試体表面に塩水が十分行き渡る量として、およそ 1 リットルとした。

暴露は、日中直射日光のあたる屋外で行った。水セメント比 40、60%の各シリーズにおいて 1 体の供試体は 42 日間、残りの 1 体の供試体は 97 日間暴露を行った。42 日間の平均気温は 10.1℃、相対湿度は 72.4%、晴天日は 12 日、97 日間の平均気温は 7.1℃、相対湿度は 74.6%、晴天日は 18 日であった。

2.3 コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定

暴露試験終了後、コンクリートを削岩機で破碎し、鉄筋近傍のコンクリートを鉄筋軸に沿っ

て採取した。各供試体のコンクリート採取位置は図 - 2 に示す。採取した試料を粉碎し、その中に含まれる全塩化物イオン量を測定した。コンクリート工学協会 JCI-SC5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」⁴⁾に準じて、試料の調整を行い、測定方法はイオン電極法による。

2.4 鉄筋の腐食状況の観察と測定

暴露期間 42 日および 97 日の供試体ともに、暴露試験終了後、各供試体から 2 本の鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食の状況を観察した。その後鉄筋をクエン酸アンモニウム溶液に浸し、錆を取り除いて鉄筋直径を測定した。腐食による鉄筋直径の減少量により、鉄筋腐食量を定量化した。

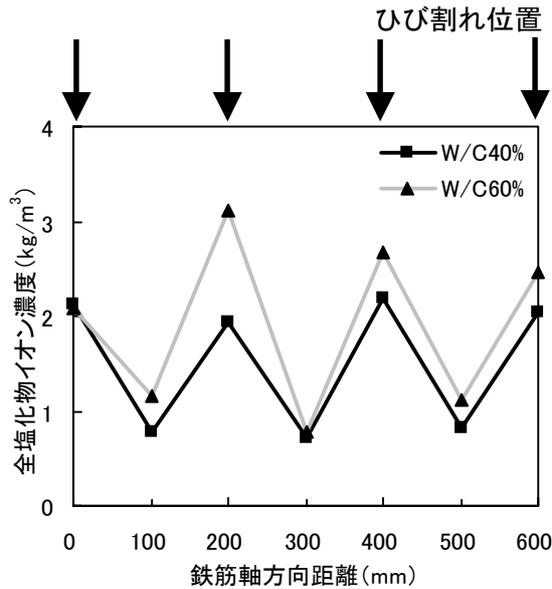


図 - 3 暴露 42 日供試体全塩化物イオン濃度分布

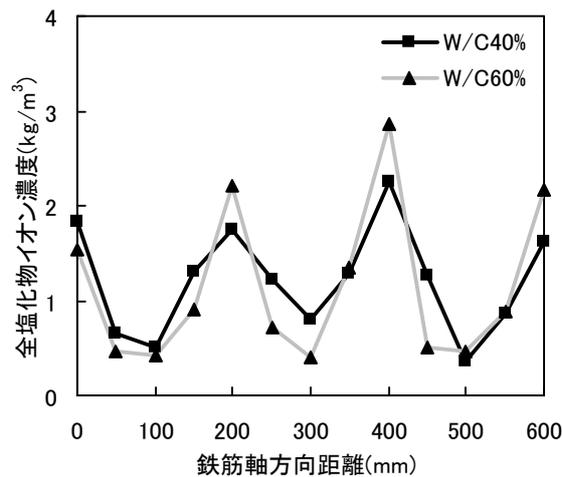


図 - 4 暴露 42 日供試体全塩化物イオン濃度分布

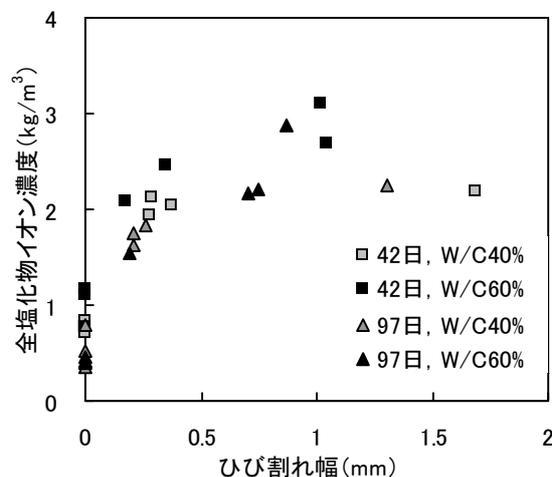


図 - 5 全塩化物イオン濃度とひび割れ幅

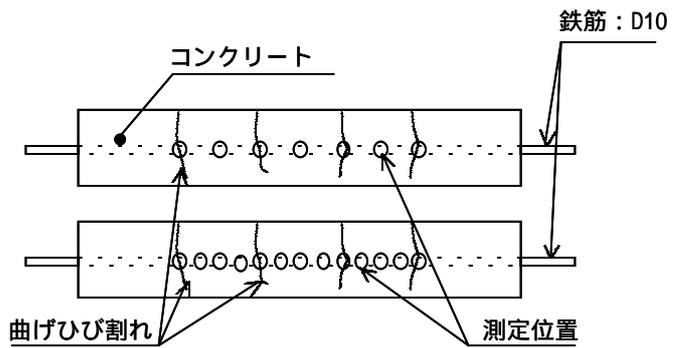


図 - 2 全塩化物イオン濃度測定位置

3. 実験結果

3.1 塩化物イオン量の分布

供試体中から採取したコンクリート粉末から測定されたコンクリート中の全塩化物イオン量を図 - 3, 4, 5 に示す。

図 - 3, 4 は、ひび割れ区間における鉄筋軸方向の全塩化物イオン濃度の分布を表している。鉄筋軸方向距離 0, 200, 400, 600mm 位置は供試体のひび割れ位置を示している。図 - 3 から、ひび割れ位置で塩化物イオンが高く、ひび割れ間中央位置で低いことがわかる。また、水セメント比 40% の供試体の方が 60% に比べ、平均的に全塩化物イオン濃度が低いことがわかる。ひび割れ間中央部では、ほぼ同程度の値となった。図 - 4 においても図 - 3 と同様に、ひび割れ位置で塩化物イオン濃度が高く、ひび割れ間中央位置では低い傾向が示された。

図 - 5 は、ひび割れ幅がひび割れ位置の全塩化物イオン濃度に与える影響を検討したものである。暴露期間 42 日および 97 日における、水セメント比 60% の供試体では、ひび割れ幅の影響が比較的明確に現れている。ひび割れ幅が大きくなるにつれて、そのひび割れ位置における全塩化物イオン濃度が増加する傾向が認められる。

一方、水セメント比 40% の供試体では、ひび割れ位置での全塩化物イオン濃度はひび割れ間の中央よりも高くなる傾向は認められたが、ひ

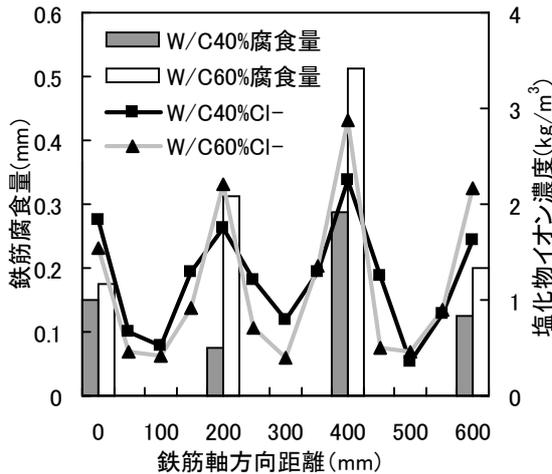


図 - 6 暴露 97 日鉄筋腐食量と全塩化物イオン濃度分布

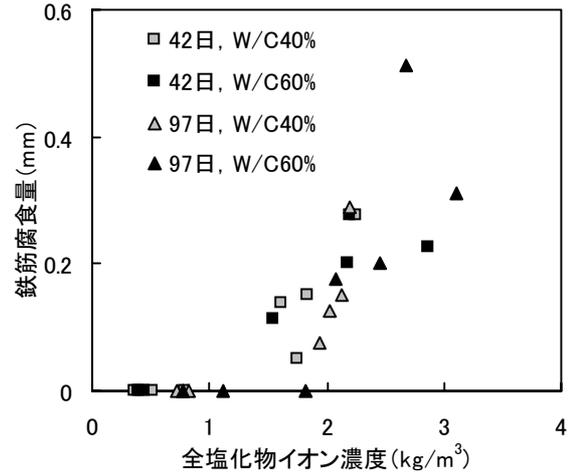


図 - 7 暴露 97 日鉄筋腐食量と全塩化物イオン濃度

び割れ幅の影響は明確ではない。すなわち、ひび割れ幅が大きな位置でも全塩化物イオン濃度の極端な増加は認められなかった。

本実験の範囲では、コンクリート中への塩化物イオンの侵入に及ぼす、コンクリートの品質、ひび割れ幅の影響は、順当であり、直感に違わぬ結果であったといえる。

3.2 鉄筋腐食

暴露終了後の供試体より取り出した鉄筋は、全てのひび割れ位置に発錆が認められた。鉄筋直径の減少量で表した腐食量と、塩化物イオン濃度の関係を図 - 6, 7 に示す。データは暴露期間 42 日および 97 日の供試体すべてに関するものであり、各点はひとつのひび割れ位置の 2 本の鉄筋のデータを平均した値である。

図 - 6 では、水セメント比 40%の方が 60%に比べ、全てのひび割れ位置で腐食量が少ないことが伺える。また、ひび割れ位置において、塩化物イオン濃度の上昇に伴い、鉄筋腐食量が増加する傾向が認められる。

図 - 7 では、ひび割れ位置における全塩化物イオン濃度と鉄筋腐食量の関係を示している。大略的には、各水セメント比とも塩化物イオン濃度の増加に伴い、鉄筋腐食量も増加する傾向にあることがわかる。すなわち、全塩化物イオン濃度と鉄筋腐食量の間には正の相関関係がある

と言える。

3.3 腐食メカニズムに関する考察

図 - 7 によると、各水セメント比と全塩化物イオン濃度の増加に伴った腐食量の増加傾向が示されたことから、全塩化物イオン濃度と鉄筋腐食量の間には正の相関関係が示された。しかし、図 - 5 で確認したように、水セメント比 40%の供試体では、ひび割れ幅が大きくなっても塩化物イオン濃度の極端な増加が認められないので、腐食が進行しない。

以上の実験結果より、水セメント比の小さいコンクリートの方が、コンクリート中の平均的な全塩化物イオン濃度を低く抑えられること、ひび割れ幅が小さい方が、ひび割れ近傍における全塩化物イオン濃度を低く抑えられることを確認することができた。また、図 - 7 よりコンクリート中の各位置における、全塩化物イオン濃度と鉄筋腐食量の間には正の相関が認められた。以上より、本実験ではコンクリート構造物の曲げひび割れ部で懸念されたマクロセル腐食は、確認されなかった。

表 - 3 解析に入力した条件

暴露期間(日)	42				97			
水セメント比	40		60		40		60	
ひび割れ幅(mm)	0.29	0.28	0.17	1.02	0.26	0.21	0.19	0.75
	1.69	0.37	1.04	0.35	1.30	0.21	0.87	0.81
単位水量(kg/m ³)	150		175		150		175	
単位セメント量(kg/m ³)	375		292		375		292	
ひび割れ間隔(m)	0.2							
供試体養生日数(日)	14							
かぶり厚さ(mm)	50							
pH	12.5							
乾燥時間(分)	132							
湿潤時間(分)	48							
平均気温(°C)	10.1				7.1			
平均湿度(%)	72.4				74.6			
塩化物イオン濃度(kg/m ³)	18.2							
食塩水濃度(%)	3							

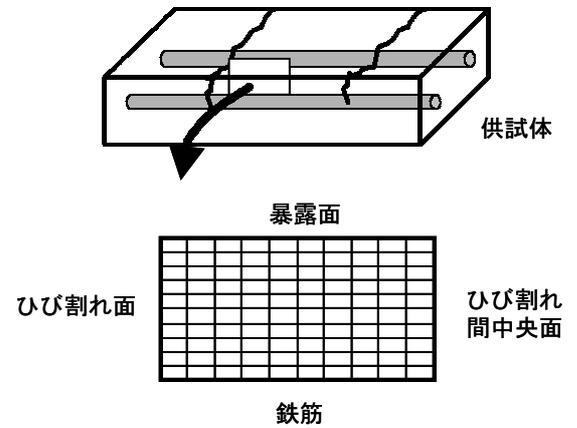


図 - 7 計算対象領域

4. 数値解析

4.1 解析方法の概要

本研究室が開発し、改良を続けている、コンクリート中の腐食促進物質移動とコンクリート中の鋼材腐食に関する数値解析手法⁵⁾により、本実験結果がどの程度説明可能なのか、数値シミュレーションを行った。

本法では、鉄筋の腐食速度は、その位置の塩化物イオン濃度、酸素供給量をもとに、ミクロセル腐食を仮定した電気化学モデルにより算定している。物質移動解析法における特徴は以下である。

- (1) コンクリートの品質の違いは、細孔組織構造の緻密さの違いとして考慮される。
- (2) コンクリート中の水分と塩化物イオンの移動を計算する。腐食速度の算定では酸素の移動も考慮する。
- (3) 大気中における乾燥、境界が液状水に接したときの吸水が考慮可能であり、これらの組み合わせにより乾湿繰返し条件下における水分移動を表現することができる。
- (4) コンクリート中の二次元物質解析を行うことにより、曲げひび割れの影響を考慮して、

鉄筋軸に沿った物質の分布を計算することができる。

実験を行った供試体の実際の諸数値を用いて、コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食量を計算した。入力した条件を表 - 3 に示す。解析対象領域を図 - 7 に示す。

4.2 解析結果

暴露 42 日目における、コンクリート中の鉄筋軸に沿った全塩化物イオン濃度の計算結果を図 - 8 にしめす。ひび割れ位置において全塩化物イオン濃度が高く、ひび割れ間中央部では、低い傾向を示した。水セメント比が高いコンクリートの方が、全塩化物イオン濃度が高くなった。これは、実験結果の傾向と一致している。全塩化物イオン濃度に与えるひび割れ幅の影響の定性的傾向も、表現できている。

水セメント比 60%において、実験結果ではひび割れ位置で、3kg/m³ 弱の塩化物イオン濃度であったのに対し、計算結果では、約 5kg/m³であった。

暴露 97 日目における、鉄筋腐食量の計算結果を図 - 9 に示す。計算結果において、ひび割れ幅が小さい方が、鉄筋腐食量が小さいことが表

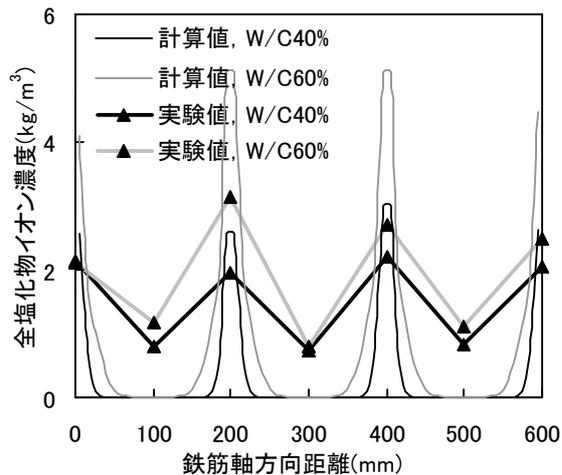


図 - 8 全塩化物イオン濃度の計算結果

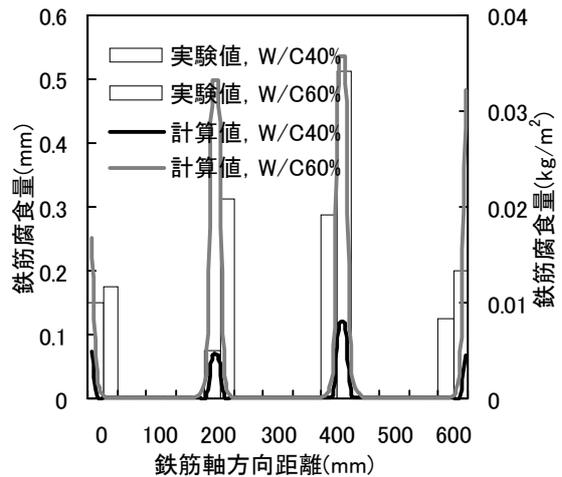


図 - 9 鉄筋腐食量の計算結果

現されている。また、水セメント比が低い方が、鉄筋腐食量が小さく、これらは、実験結果と同様の結果を示している。

5. まとめ

本研究の内容をまとめると以下ようになる。

- (1) 鉄筋コンクリート供試体の暴露試験を行い、コンクリート中の塩化物イオン濃度と鉄筋腐食の分布に及ぼす、曲げひび割れ幅およびコンクリートの品質の影響を定量化することができた。
- (2) 水セメント比 40%のコンクリートは 60%のコンクリートよりも、ひび割れ位置およびひび割れ以外の位置においても、塩化物イオンの侵入を抑制することが確認できた。
- (3) コンクリート中のひび割れ位置における塩化物イオン濃度は、ひび割れ以外の位置よりも高くなることが実験的に確かめられた。ただし、ひび割れ幅が大きいひび割れ位置ほど塩化物イオン濃度が高くなる傾向は、水セメント比 60%のコンクリートでは認められたが、40%のコンクリートでは認められなかった。
- (4) コンクリート中の鉄筋位置における塩化物イオン濃度とその位置の鉄筋の腐食量との間に明確な相関関係が認められた。このこ

とより、本実験ケースにおいてマクロセル腐食の影響は現れなかったことが認められた。

- (5) コンクリート中の二次元物質移動と、ミクロセル腐食を考慮した解析手法で、本研究で行った実験結果がシミュレーションできた。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002.3
- 2) 土木学会：2002年版コンクリート標準示方書 改訂資料，コンクリートライブラリー 108，pp.32-39，2002.3
- 3) 宮里心一，大即信明，木村勇人，水流徹：モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度，土木学会論文集，No.690/V-53，83-93，2001.11
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準（案），1987.4
- 5) 小林悟志，下村 匠：コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.831-836，2002.6