

実環境下におけるコンクリート部材への塩分侵入に関する実験的研究

コンクリート研究室 鈴木 幸憲
指導教官 下村 匠

1.はじめに

ひび割れが関係する劣化形態として、鋼材腐食促進物質（水分、塩化物イオン、酸素）の侵入による鉄筋腐食メカニズムがある。これは、コンクリート細孔組織、ひび割れ部からの Cl^- の侵入により、コンクリート構造物内の鉄筋表面に形成されている不動態被膜が破壊され、鉄筋腐食が進行する現象のことである。本研究では、鉄筋配置の異なる模擬曲げひび割れコンクリート供試体への長期暴露が及ぼす影響について検証をした。

2.屋外促進暴露実験

2.1 実験供試体

表1に示方配合を、図1に屋外促進暴露実験に用いた鉄筋配置の異なる模擬ひび割れを有するコンクリート供試体を示す。模擬ひび割れとして、 $100 \times 100 \text{mm}$ に加工したろ紙（B5種、厚さ0.2mm、 $\phi 150 \text{mm}$ ）を供試体内2箇所設置した。また、 Cl^- の侵入を暴露方向一面に限定するため、側面及び底面にエポキシ樹脂によるシールを施した。

表1 示方配合

W/C=40%				
G max (mm)	単位量 (kg/m ³)			
	W	C	S	G
20	150	375	798	986
W/C=60%				
G max (mm)	単位量 (kg/m ³)			
	W	C	S	G
20	175	292	799	988

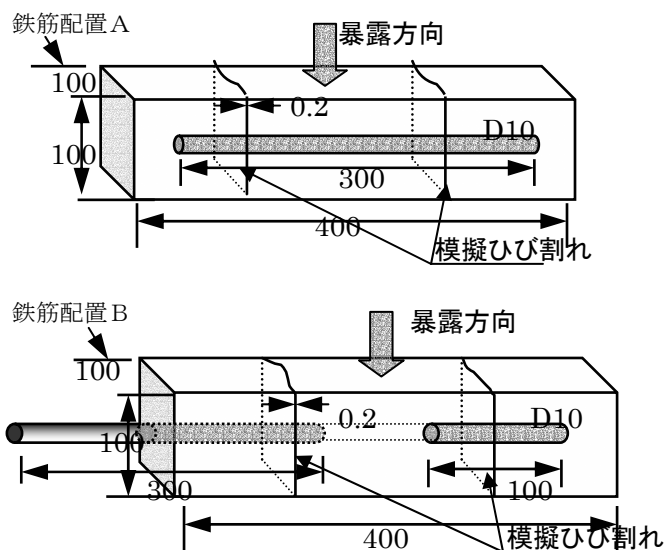


図1 供試体図

2.2 屋外促進暴露実験概要

鉄筋腐食に対する設定環境を、腐食性環境下としコンクリート供試体長期暴露実験を実施した。図2に、暴露実験状況を、表2に暴露実験時の概要を示す。この実験は小山（2002）が、暴露期間の長期化が及ぼす影響を検証する目的で継続して実施していた。

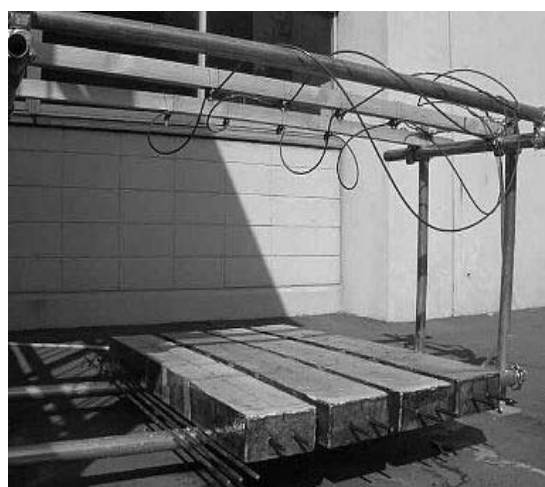


図2 暴露実験状況

表 2 暴露実験概要

設定環境	腐食性環境
噴霧回数	8回／1日
NaCl 濃度	3%
暴露期間	281日
平均気温	15.6℃
平均相対湿度	66.1%

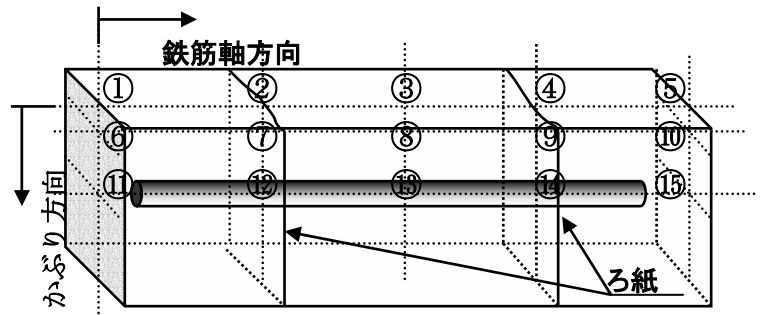


図 3 試料採取位置図

2.3 塩化物イオン濃度測定

暴露実験実施後、鉄筋軸方向に圧縮試験機を用いて割裂を行い、図 3 に示すように、鉄筋軸方向に 5 箇所、かぶり方向に 3 箇所合計 15 箇所の所定位置からコンクリート試料採取をし、粗骨材などを取り除き粉砕した。

塩化物イオン濃度分析では、日本コンクリート工学協会案『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』〔2.1〕を準用して試料の調整を行い、同協会基準案『JCI-SC6 塩化物イオン選択電極法によるフレッシュコンクリート中の塩化物イオン含有量試験方法』を準用して塩化物イオン濃度測定を行った。

2.4 実験結果

①短期暴露実験との比較

本研究室で行われた短期暴露実験（42 日）と長期暴露実験（281 日）の Cl^- 濃度の比較を行った。長期暴露実験と同一の設定環境、水セメント比（40%、60%）で行った短期暴露の Cl^- 濃度の測定を、小山〔2.3〕が行っており、鉄筋近傍における短期暴露と長期暴露実験の Cl^- 濃度分布の比較から、長期暴露が及ぼす影響について検討した。図 4 に、短期暴露と長期暴露の鉄筋近傍における Cl^- 濃度分布を示す。

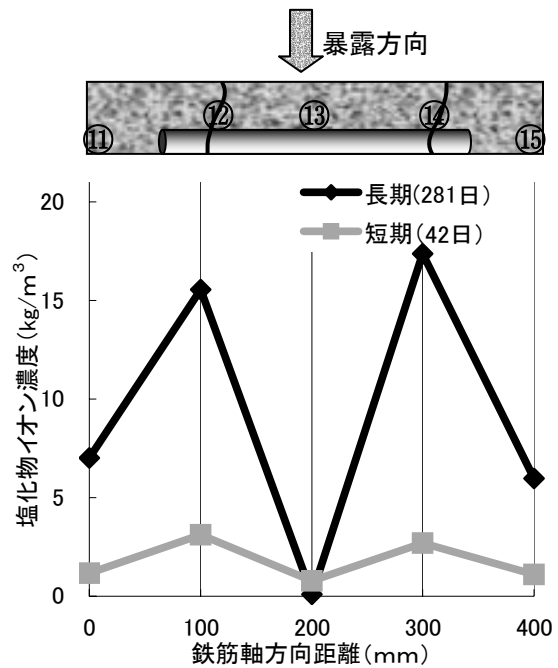


図 4 鉄筋近傍における Cl^- 濃度分布

図 4 より、短期、長期共に鉄筋近傍での Cl^- 濃度分布が同じ傾向を示し、特に長期暴露に置いては、ひび割れ位置において著しい Cl^- の侵入がみられた。 Cl^- 濃度分布より、短期暴露、長期暴露共にひび割れ位置での Cl^- 濃度が高いことが読み取れる。この傾向は、鋼材腐食促進物質（ H_2O 、 Cl^- など）がひび割れを侵入経路として侵入するという既往の研究を検証している。

また、短期と長期の比較から、鋼材腐食促進物質である Cl^- の侵入は、暴露期間（時間）の長さに依存すると考えられる。

②鉄筋配置A, Bの比較

鉄筋配置の違いが及ぼす影響を検討するため、鉄筋配置A, Bの鉄筋近傍での Cl^- 濃度分布を比較した。

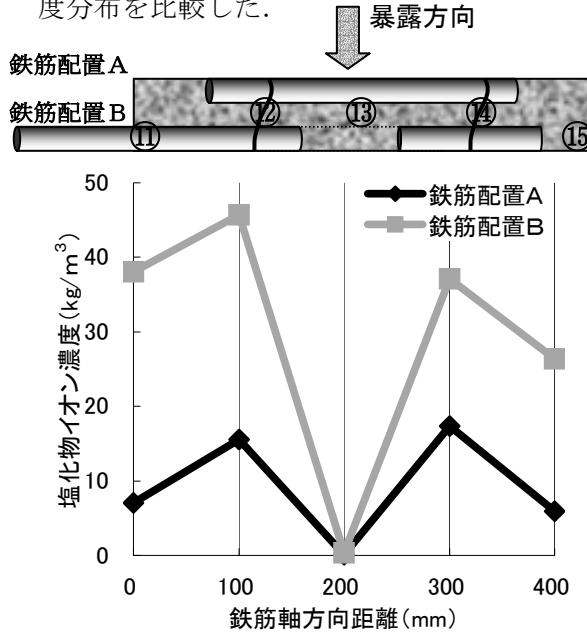


図5 鉄筋配置が違う Cl^- 濃度分布 (W/C40%)

鉄筋配置の違いが及ぼす影響について本実験で確認することができた。鉄筋配置Aは、暴露面一方向からの Cl^- の侵入が考えられ、鉄筋配置Bでは、Aに比べ供試体端部（鉄筋軸方向 0mm位置）での Cl^- 濃度が著しく高いことから、暴露方向からの Cl^- の侵入、外に突出した鉄筋に沿った Cl^- の侵入が考えられる。一方、供試体中央（鉄筋配置B鉄筋軸方向 200mm位置）では、ひび割れや鉄筋に沿った Cl^- の侵入が無いために、 Cl^- 濃度が低くなっていることが読み取れる。

この結果より、藤田 (2002) の研究で示唆された鉄筋に沿った Cl^- の移動を、暴露実験によって確認することができたといえる。

3.RC 中の物質移動に関する数値解析

3.1 はじめに

本研究室において、小林 [2.5] によって開発された数値解析プログラムで、長期暴露

実験の環境条件、供試体条件を用いた数値解析シミュレーションを行った。また、短期暴露 (42日) についても数値解析を行った。

表3 解析条件

		W/C40%	W/C60%
水 W	(kg/m ³)	150	175
セメント C	(kg/m ³)	375	292
かぶり厚 d	(mm)	50	
pH		12.5	
ひび割れ幅	(mm)	0.20	
平均気温	(°C)	15.6	
平均湿度	(%)	66.1	
大気中 O ₂ 濃度	(kg/m ³)	0.286	
Cl ⁻ 濃度	(kg/m ³)	18.2	
解析期間	(day)	281	

3.2 解析条件

表3に数値解析に用いた長期暴露実験の環境条件、供試体条件を示す。

3.3 解析結果

① 数値解析による短期、長期の比較

図6に、数値解析による短期暴露と長期暴露の比較を示す。

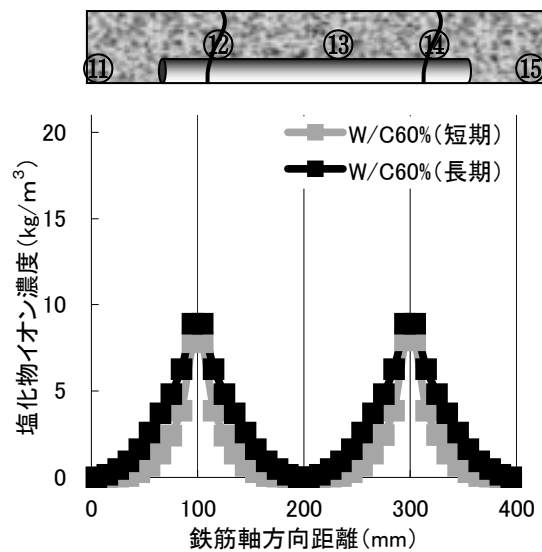


図6 短期暴露と長期暴露の比較 (W/C60%)

図6に示すように、長期暴露と数値解析のCl⁻濃度の分布は同じような傾向を示した。ひび割れ位置でのCl⁻濃度が高く、供試体端部、中央部では、コンクリートの物質透過抵抗性によりCl⁻濃度が抑止されている。しかし、数値解析ではひび割れ位置での累計的なCl⁻濃度の差は、あまり見られなくひび割れ位置周辺のCl⁻増加が確認される程度に止まった。この傾向は、W/C40%にも同様にひび割れ位置での累計的なCl⁻濃度はみられなかった。この原因としては、数値解析プログラムの環境条件の部分で、暴露実験の環境作用のモデル化が実環境と異なるためと考えられる。

②長期暴露結果と数値解析（長期）の比較

図7に、長期暴露の実験結果、数値解析結果の比較を示す。

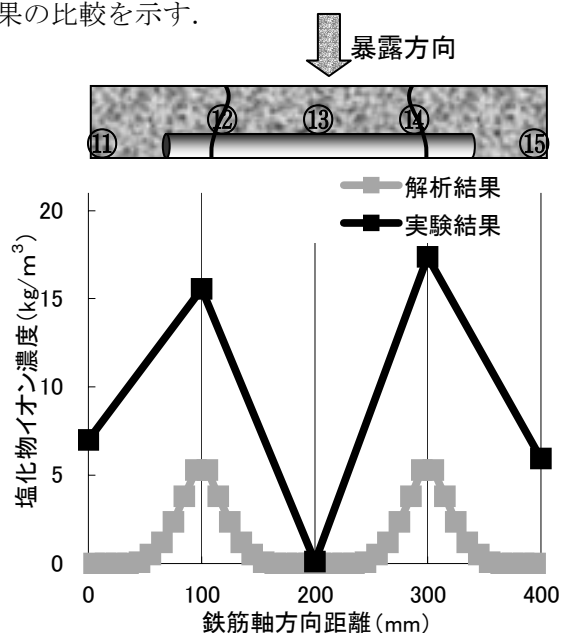


図7 実験値と解析値との比較 (W/C40%)

実験結果と解析結果共に、ひび割れ位置での著しいCl⁻の侵入がみられるCl⁻濃度分布の傾向を示した。

しかし、数値解析では、暴露実験のような環境作用による累計的なCl⁻の侵入による増

加が表現されなかったために、実験結果と解析結果の2つの結果に大きなCl⁻の差が生じてしまったと考えられる。このことは、W/C60%の暴露結果と数値解析結果の比較にも同様なことがいえた。

4.コンクリート細孔組織中の液状水移動と水蒸気移動に関する実験

4.1 はじめに

水分移動解析手法に用いられるコンクリート中の水分移動は、理論的に2つの水分移動（液状水移動、水蒸気移動）共に生じるとして仮定され、定式化されている。しかし、全てがコンクリート中の水分移動について、実験により検証されているわけではない。そこで、コンクリート中の水分移動と考えられている液状水移動と水蒸気移動について実験的検証を目的に実験を行った。

4.2 細骨材による基礎実験

4.2.1 実験供試体

参考とした土壌分野での実験 [2.6] の概要を把握するために、細骨材による予備実験を実施した。表4に、示方配合を示す。

表4 示方配合

単位量 (kg/m ³)		
W	S	NaCl
0.97	4000	0.03

液状水の移動について検証するため、呼び寸法0.25mmのふるいで細骨材をふるい、海水と同程度の3%NaCl溶液とをモルタルミキサーで攪拌し、湿潤状態の試料を有底円柱(φ100×200mm)内に3層25回で突き固めを行い、供試体合計2本を作製した。

4.2.2 基礎実験概要

供試体作製後、供試体Aを乾燥炉(設定温度100℃)内へ、供試体Bを比較検証のために気中乾燥として、24時間の液状水移動実

験を行なった。24 時間後、供試体内での水分移動分布を知るため、供試体より垂直方向に6箇所(0, 10, 30, 50, 100, 200mm位置)の試料を採取し、Cl⁻濃度測定をした。

4.2. 実験結果

図8に、基礎実験で行った水分移動によるCl⁻濃度分布を示す。

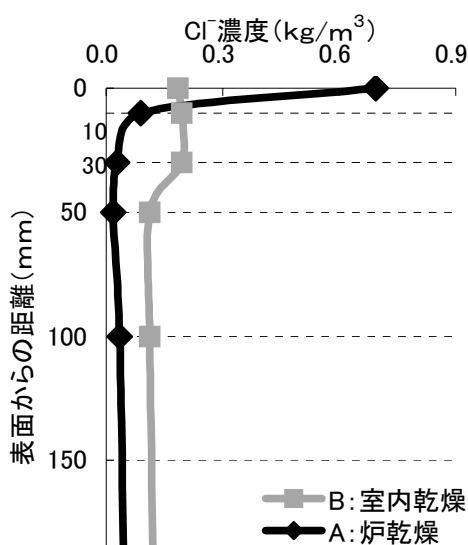


図8 水分移動によるCl⁻濃度分布

図8は、細骨材試料による24時間経過後のCl⁻濃度分布を示したものである。炉に入れて乾燥を促進することで、短時間で水分移動の大略の傾向を把握することができる。液状水中に存在するCl⁻は、供試体内で液状水移動があるとこれに伴って移動をする。また、Cl⁻は液状水移動でしか移動することが無いため、蒸発(気化)により水蒸気移動に移行した位置では、Cl⁻がとり残される。図8によると、乾燥面である上面近傍では、Cl⁻濃度が高くなっており、その高さ位置まで供試体内では、液状水移動が行われていたといえる。また、上面近傍以外の位置で測定されたCl⁻は、水蒸気移動によって拡散分布していると考えられる。

4.3 モルタル供試体による水分移動実験

4.3.1 実験供試体

コンクリート中の水分移動についてモルタル供試体を用いて実験を行った。表5に、示方配合を示す。

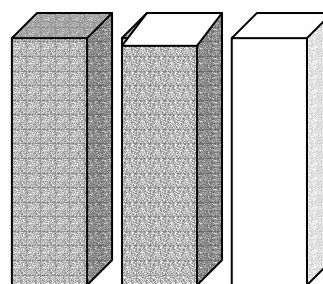
表5 示方配合

単位量 (kg/m ³)				
W	C	S	Sp	NaCl
320	1000	950	10	6.06

モルタル供試体には、初期含有Cl⁻濃度1%となるように、NaClを6.06(kg/m³)を与えモルタルミキサーで攪拌し、モルタル供試体成型型枠(40×40×160mm)で合計6本のモルタル供試体を作製した。

4.3.2 水分移動実験概要

養生後、モルタル供試体2本ごとに、食品包装用ラップフィルムで3種類の異なるシールを施した。シール後、モルタル供試体を垂直方向に設置し、乾燥炉(設定温度40°C)内で水分移動実験を行った。図9に、モルタル供試体に施した3種のシール状況を示す。



全面シール / 一面乾燥 / 全面乾燥

図9 シール状況

実験終了後、供試体より垂直方向に5箇所(0, 10, 20, 80, 160mm位置)、試料採取を行い、2.3に示した同様の方法でCl⁻濃度測定を行った。

4.3. 実験結果

図10に、モルタルによる水分移動実験で行った、水分移動によるCl⁻濃度分布を示す。

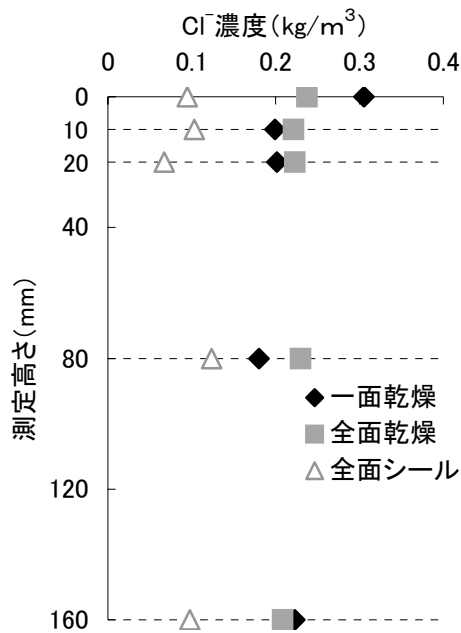


図 10 水分移動による Cl^- 濃度分布

全面乾燥供試体の Cl^- 濃度分布は、全体的にほぼ平坦となった。供試体内からの水分の逸散が等方的に生じるからである。一面乾燥も同様に、「乾燥」による水分移動現象が生じたと考えられるが、モルタル供試体の内部と外部の結ぶ面が一面に限定されているため、内部の液状水は予備実験で見られたように乾燥面に向かって生じ、乾燥面近くで水蒸気に気化するため、その付近に Cl^- が取り残された。全面シールは、液状水の移動がないので直線的分布を予想していたが、今回の実験ではあまり想定していた傾向とはいえない結果となった。

5.まとめ

以下に、本研究の結果を示す。

- ・ 暴露実験における Cl^- 濃度分布を確認した。暴露期間の継続によりひび割れ位置での累計的な Cl^- の侵入増加が確認できた。
- ・ 鉄筋に沿った Cl^- の侵入移動を暴露実験

で確認した。藤田 (2002) により示唆された鉄筋に沿った Cl^- の移動を、今回暴露で確認することができた。

- ・ 数値解析において Cl^- の侵入を定性的に表現することができた。しかし、解析より定量的に表現するために環境作用のモデル化の検討が必要と考えられる。
- ・ コンクリート中の水分移動をモルタル供試体による水分移動実験で検証することができた。今後は、コンクリート供試体による水分移動実験による検証が必要といえる。

参考文献

- [2.1] 日本コンクリート工学協会基準案：『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』
- [2.2] 日本コンクリート工学協会基準案：『JCI-SC6 塩化物イオン選択電極法によるフレッシュコンクリート中の塩化物イオン含有量試験方法』
- [2.3] 小山和雄：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，長岡技術科学大学修士論文，2002.2
- [2.4] 藤田徹：かぶりコンクリートの初期欠陥が鋼材腐食促進物質の侵入に及ぼす影響，長岡技術科学大学卒業論文，2002.3
- [2.5] 小林悟史：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，長岡技術科学大学修士論文，2002.2
- [2.6] 八幡敏雄：土壌の物理，東京大学出版会，1975