

論文 コンクリートへの塩分浸透のばらつきに与える要因分析

豊田 亮太*¹・池田 唯順*²・水田 真紀*³・児島 孝之*⁴

要旨: コンクリート中の塩分浸透に影響を及ぼす要因の明確化は、塩害劣化したコンクリート構造物を精度よく診断するために重要である。しかし、その要因の明確化は未だ成されていない。本研究では EPMA を適用したコンクリート構造物の精度よい劣化診断方法を提案するため、様々な要因を考慮したコンクリートを NaCl 溶液に浸漬し、EPMA 分析を実施した。その結果、各種要因がコンクリートへの塩分浸透のばらつきに及ぼす影響を実験的に示すことができ、小径コアによる劣化診断への適用が可能であることを示した。

キーワード: 塩害, EPMA, 小径コア

1. はじめに

塩害環境下におけるコンクリート構造物の劣化診断は、構造物からコア (φ100mm) を採取し、スライス法と呼ばれる方法で塩化物イオン (以下、Cl⁻) の含有量を調査するのが一般的である。しかし近年、RC 構造物では耐震性への要求が厳しく過密配筋となることが多いことから、構造物への負担を最小限にするため、小径コアやドリル粉末を用いた分析が採用されている。ここで後者の方法において問題になるのは、試料が小さく、分析量が少ないため浸透する Cl⁻ が骨材の偏在の影響を受けることである。

2007 年制定コンクリート標準示方書 [規準編] で EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法が示された¹⁾。EPMA 法は高分解能で微小部分の分析が可能なたため、Cl⁻ が主に浸透するセメントペースト部分について測定でき、ドリル粉末を用いた方法等に比べ、精度の高い劣化予測が可能である。また、面分析によりマッピング画像 (2 次元画像データ) を得ることができ、視覚的判断が可能なることも EPMA 法の利点である。しかし、EPMA 法はコンクリートのような不均質な材料への精度の検討が不十分であり、手法の確立には至っていない。そこで、本研究では塩害劣化したコンクリートの EPMA 法による測定結果に統計的手法を取り入れた Cl⁻ 濃度プロファイルを作製する。その Cl⁻ 濃度プロファイルの比較、検討からコンクリートへの塩分浸透程度とばらつきに与える要因分析を行う。

2. 研究計画

2.1 研究概要

図-1 に研究フローを示す。本研究では、検討要因として最大骨材寸法とペースト量、W/C に着目し、最大骨材寸法を 3 水準、単位体積あたりのペースト量を 2 水準、

W/C を 2 水準とした計 6 体の供試体 (400×250×100mm) を作製した。そして、3% の NaCl 溶液に 3 カ月間浸漬後、EPMA 分析を行った。さらに、分析に使用した供試体を引き続き浸漬させ、12 カ月後の分析も行った。

2.2 試料製作方法

供試体寸法及び浸漬状況を図-2 に示す。一面から塩

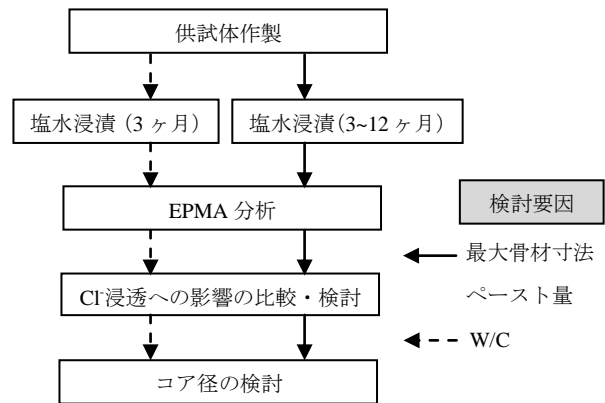


図-1 研究フロー

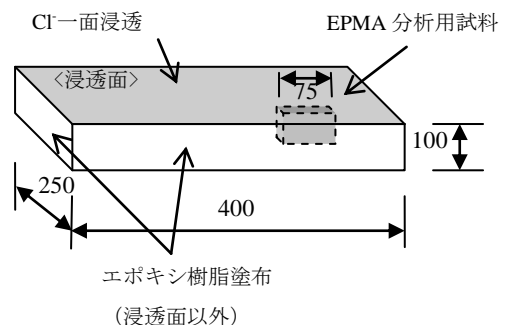


図-2 供試体寸法及び浸漬状況

*1 立命館大学大学院 理工学研究科創造理工学専攻 (正会員)

*2 立命館大学大学院 理工学研究科創造理工学専攻 (正会員)

*3 立命館大学 理工学部都市システム工学科 助教 (正会員)

*4 立命館大学 理工学部 特命教授 (正会員)

分が浸透するように供試体の浸透面以外の面にエポキシ樹脂を塗布し、3%のNaCl溶液に浸漬させた。そして、所定日数が経過した後、エポキシ樹脂塗布面から数10mm離れた部分を浸漬面に対して直角方向に切断し、幅75mmの部分をEPMA分析用に切り出した。ここで、最終的なEPMA分析用試料の大きさは、EPMA装置に適應するように切り揃えたため、幅75×深さ75×厚さ10mm程度である。また、12カ月後にEPMA分析を実施した供試体については、切断面に再度、エポキシ樹脂を塗布し、所定の日数まで浸漬を続け、同様に分析試料を採取した。

2.3 分析要因

分析に用いた試料の分析要因一覧を表-1に示す。また、各試料のコンクリート配合を表-2に示す。試料名には分析要因を反映させ、最大骨材寸法が15mm、20mm、25mmのものをそれぞれG15、G20、G25、W/Cが40%、65%のものをそれぞれW/C40、W/C65とした。また、試料G20については、ペースト量の異なる2種類を作製し、ペースト量の少ない方をA、多い方をBとした。さらに、NaCl溶液浸漬期間の違いは、3カ月のものをN3、12カ月のものをN12と表すことにした。

2.4 EPMA 分析方法

試料(75×40mm)を樹脂で補強した後、測定面を研磨し、伝導性を持たせる目的で炭素を蒸着したものを測定用試料とした。そして、Cl、Ca、Si、およびSについて表-3の条件で面分析を行った。

2.5 評価方法

Clは主にコンクリート中のペースト部分を浸透することが明らかになっており、骨材部を除去したプロファイルは骨材を含めたプロファイルよりもCl濃度のばら

つきが小さくなるとの報告がある²⁾。そこで、本研究においても骨材部を除去したCl濃度プロファイルを検討に用いることにした。ペースト部と骨材部の識別は、ペーストと骨材の主な化学成分の違いを利用し、CaO、SiO₂、SO₃濃度の範囲から判断することができる。既往の研究³⁾で、骨材とみなす範囲がCl濃度に与える影響は小さいとの報告があることから、表-4に示す範囲を骨材とみなし、以後の検討を行った。

また今回、各試料のCl濃度プロファイルと変動係数の比較を行った。ここで、Cl濃度プロファイルには各深さでの全Cl濃度データの平均値を用いた。そして、その平均値に対する各深さのCl濃度データのばらつきを表す指標には、変動係数を用いることにした。

表-1 分析要因一覧

試料名	Gmax (mm)	セメント量 (kg/m ²)	W/C (%)	期間 (月)
G15-N3	15	320	50	3
G20-A-N3	20			
G25-N3	25			
G20-B-N3	20	350	40	
W/C40-N3		400		
W/C65-N3		267		
G15-N12	15	320	50	12
G20-A-N12	20			
G25-N12	25			
G20-B-N12	20			

表-2 コンクリート配合

試料名	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						フレッシュ性状	
		W	C	S	G			SL. (cm)	Air (%)
					5-13 mm	13-20mm	20-25mm		
G15	50	160	320	846	1011	0	0	4.5	4.7
G20-A					506	506	0	4.5	5
G25					405	405	202	7.5	6
G20-B					175	350	816	488	488
W/C40	40	160	400	812	485	485	0	6.4	6
W/C65	65	175	269	844	505	505	0	7.3	6

表-3 EPMA 分析

測定条件	加速電圧：15kV，資料電流：1×10 ⁻⁷ A，プローブ径：50μm
分光結晶	Cl,Ca,S(PET),Si(TAP),計数時間：40msec，ピクセルサイズ：100μm
標準試料	Cl(Halite,Cl=60.66%), Si,Ca(Wollastonite,SiO ₂ =50.94%,Ca=48%)S(Anhydrite,SO ₃ =58.81%)
方法	ステージスキャン法

表-4 骨材範囲

元素	ペースト部の濃度範囲 (%)
CaO	7.5 - 46
SiO ₂	6 - 28
SO ₃	0.4< -

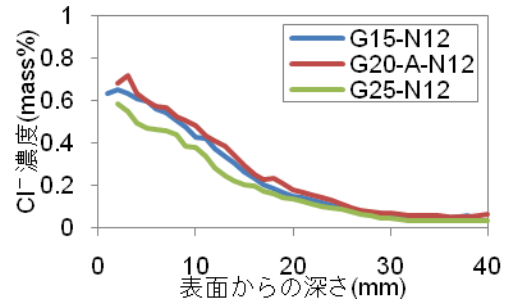


図-3 最大骨材寸法における比較 1

3. 各種要因が塩分浸透に与える影響

3.1 最大骨材寸法の影響

図-3は、最大骨材寸法を15、20、25mmに変化させた場合のCl⁻濃度プロファイルである。図-3より、試料G15-N12と試料G20-A-N12においては同一浸透深さにおけるCl⁻量に差は見られなかった。しかし、試料G25-N12においては、他の2体の試料に比べ、同一浸透深さにおけるCl⁻量が少なかった。

図-4は、図-3と同試料において変動係数の比較を行ったものである。ここではCl⁻量が0.05(mass%)より高い数値を示す部分(表面からおよそ27mmまで)を浸透面と見なし、その部分において比較を行った。図-4より、試料G15-N12と試料G20-A-N12の違いは微小である。しかし、試料G25-N12においては、他の2体の試料に比べ、変動係数がわずかに大きい。

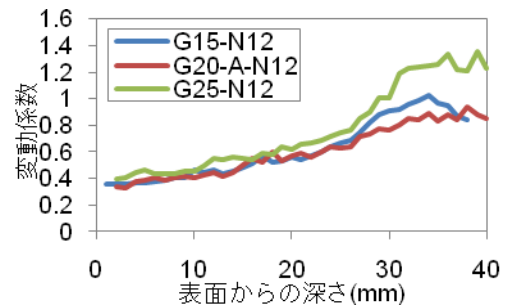


図-4 最大骨材寸法における比較 2

以上の結果より、最大骨材寸法が大きいほど同一浸透深さにおけるCl⁻量は少なく、ばらつきが大きくなる可能性があるということを示した。

3.2 ペースト量の影響

図-5はペースト量を変化させた場合のCl⁻濃度プロファイルであり、ペースト量の少ない方がA、多い方がBである。図-5より、この2体の試料の比較では同一浸透深さにおけるCl⁻量に差は見られなかった。

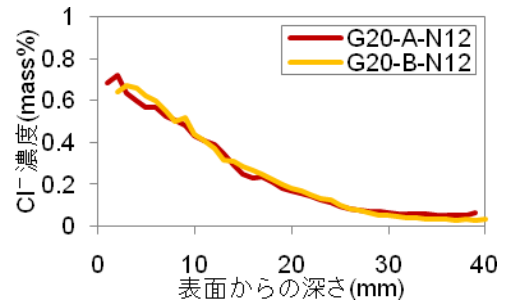


図-5 ペースト量における比較 1

図-6は図-5と同試料において変動係数の比較を行ったものである。図-6においても、Cl⁻量が0.05(mass%)より高い数値を示す部分(表面からおよそ27mmまで)を浸透面と見なし、その部分において比較を行った。これより、試料G20-A-N12と試料G20-B-N12の違いは微小であった。

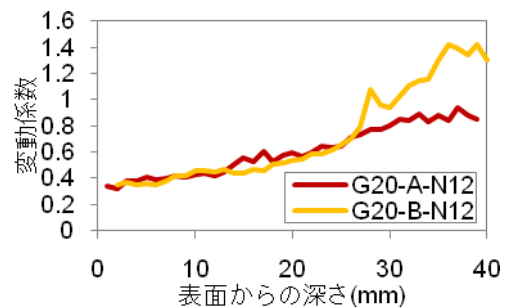


図-6 ペースト量における比較 2

以上の結果より、同一浸透深さにおけるCl⁻量に違いが見られなかったのと同様、変動係数においても違いが見られなかった。このことから、ペースト量の違いがCl⁻の浸透深さおよびばらつき具合に与える影響は微小であると考えられる。

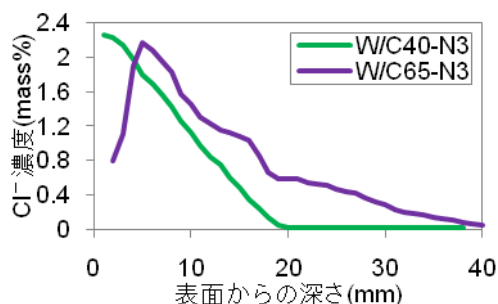


図-7 W/C における比較 1

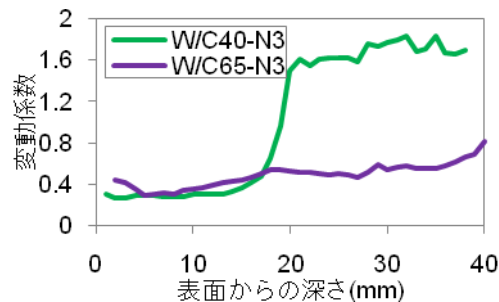


図-8 W/C における比較 2

3.3 W/C の影響

図-7 は W/C を 40, 65% に変化させたコンクリートの Cl⁻ 濃度プロファイルである。図-7 より、試料 W/C65-N3 は試料 W/C40-N3 よりも同一浸透深さにおける Cl⁻ 量が多く、より内部まで Cl⁻ が浸透した。

図-8 は図-7 と同試料の変動係数の比較を行ったものである。図-8 においても、Cl⁻ 量が 0.05(mass%) より高い数値を示す部分（表面からおよそ 18mm まで）を浸透面と見なし、その部分において比較を行った。試料 W/C40-N3 と試料 W/C65-N3 の違いは微小であった。

以上の結果より、W/C が大きくなるにつれて、Cl⁻ がより内部まで浸透することを示した。

3.4 浸漬期間における比較

図-9 は最大骨材寸法 25mm の試料について、NaCl 溶液の浸漬期間 3 カ月と 12 ヶ月における比較を行ったものである。今回、この試料を比較に用いたのは、分析を行った試料の中で最大 Cl⁻ 浸透深さにおける変動係数が最も高い数値を示したからである。図-9 より、浸漬期間が長くなるにしたがい、同一深さの Cl⁻ 量が増え、より内部にまで浸透した。

表-5 は各試料における Cl⁻ 浸透深さを示したものである。ここで、各試料において、Cl⁻ の深さ単位での平均値において 0.05(mass%) 以下を非浸透面と見なし算出した。表-5 より、浸漬期間における比較のできる 4 体の試料はそれぞれほぼ同様の割合で浸透が進行していた。

図-10 は図-9 と同試料において変動係数の比較を行ったものである。図-10 より、表-5 で示す最大 Cl⁻ 浸透深さでの変動係数の違いは微小であった。

以上の結果より、Cl⁻ は浸漬期間が増加してもばらつきのおおきさは一定であると考えられる。

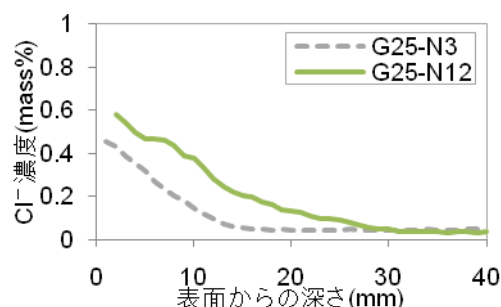


図-9 浸漬期間における比較 1

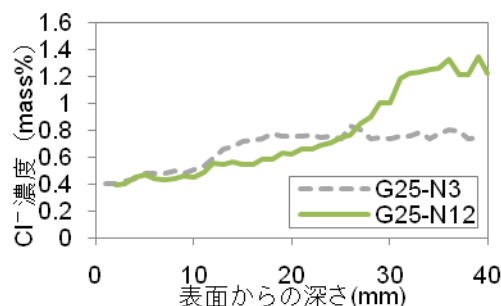


図-10 浸透期間における比較 2

表-5 各試料における Cl⁻ 浸透深さ

試料名	Cl ⁻ 浸透深さ (mm)	
	3 カ月 (-N3)	12 カ月 (-N12)
G15	20	28
G20-A	20	30
G25	15	27.5
G20-B	18	27
W/C40	18	未測定
W/C65	38.5	未測定

4. 小径コアにおける適用

小径コアを用いた塩害調査への適用を考え、コア径を25mmとした評価を行う。図-11に示すように、試料G20-B-N12を3分割し、径25mmのコアに見立てることにした。ここで、それぞれの試料をG20-B-N12-1、G20-B-N12-2、G20-B-N12-3とする。図-12より、分析幅25mmにおいて、同一浸透深さにおけるCl⁻量に差は見られたものの、Cl⁻浸透深さに及ぼす影響は微小であった。

また、表-6は第4章で比較を行った各種要因それぞれで変動係数の高かったものを25mm×3体に分割し、それぞれのCl⁻浸透深さを示したものである。表-6より、各供試体において、浸透深さはほぼ同じであり、分析幅の減少が与えた影響は微小であった。今回の比較で、浸透深さに最も違いを示したのは試料G25-N12であった。これは、分析幅が最大骨材寸法と同サイズであるため、分析幅の大半を骨材が占めるような箇所が存在し、ばらつきが生じたと考えられる。

以上の結果より、採取するコア径が最大骨材寸法よりも大きい場合、小径コアを用いた塩害調査への適用は可能であると考えられるが、採取するコア径が最大骨材寸法より小さい、もしくは最大骨材寸法が不明確な場合、採取本数を増やし検討する必要があると考えられる。

また、今回の検討は25mmのコアが75mmの領域での現象を代表しているにすぎない。そのため今後は、構造物や部材においても25mmコアでの塩害調査が可能か更なる検討が必要である。

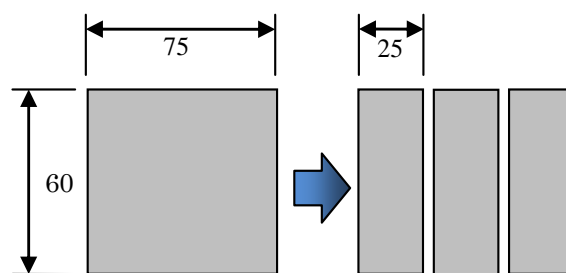


図-11 試料分割方法

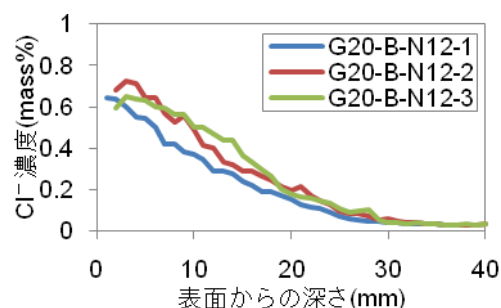


図-12 25mmにおける比較

5. 結論

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) 最大骨材寸法が大きくなるほど同一浸透深さにおけるCl⁻量は少なくなり、W/Cが大きくなるほど同一浸透深さにおけるCl⁻量は大きく、より内部まで浸透する。また、最大骨材寸法が大きくなるほどばらつき可能性がある。ペースト量の違いがコンクリート中を浸透するCl⁻に与える影響は微小である。

(2) コンクリート中を浸透するCl⁻のばらつきに浸漬期間は影響を与えない。

(3) コンクリートの劣化診断において、採取するコア径が最大骨材寸法以下であれば、小径コアへの適用は可能である。

(4) EPMAを用いた面分析により多くのデータを得たことから、浸透に影響を与える要因を明確に示すことができた。今後、劣化診断の更なる精度の向上や手法の確立に取り組む上で、EPMAは強力なツールになるだろう。

表-6 25mm 試料のCl⁻浸透深さ

試料名		Cl ⁻ 浸透深さ (mm)
G20-B-N12	1	26
	2	27
	3	27
G25-N12	1	29
	2	26
	3	26
W/C40-N3	1	19
	2	18
	3	18

参考文献

- 1) 土木学会：EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案) (JSCE-G 574-2005)，コンクリート標準示方書，規準編，pp297-307，2007
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.69「硬化コンクリートのミクロの世界を拓く新しい土木学会基準の制定－EPMA 法による面分析方法と微量成分溶出試験方法について－」，No57，pp293-300，2003
- 3) 池田唯順，水田真紀，岡本享久，小川彰一，森寛晃：EPMA による塩化物イオン濃度の推定方法の統計的手法を用いた評価，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，第 9 巻，pp.125-130,2009.