

## 論文 ひび割れを含むコンクリート中の塩分移動に関する実験的検討

岩波 光保<sup>\*1</sup>・横田 弘<sup>\*2</sup>・Nick R. Buenfeld<sup>\*3</sup>

**要旨:** コンクリート中における塩化物イオンの移動現象に及ぼすひび割れの影響については、これまで体系的に検討されていない。本研究では、ひび割れ幅の異なるモルタル供試体を塩化物イオン溶液中に浸せきし、供試体中に浸透した塩化物イオン量を測定することで、ひび割れ幅と塩化物イオン浸透量の関係を調べた。また、実環境下でしばしば観察されるひび割れ閉塞による塩化物イオン浸透抑制効果についても検討を行った。

**キーワード:** コンクリート, ひび割れ, 塩分移動, ひび割れ幅, ひび割れ閉塞

### 1. はじめに

コンクリート構造物において、ひび割れの発生は不可避なものであり、構造物の耐久性を損ねる原因の主要因として考えられている。港湾構造物のように、海洋環境下にあるコンクリート構造物の場合、ひび割れの存在は塩化物イオン、酸素、水などの鉄筋腐食を引き起こす物質がコンクリート中に浸入する「水みち」となる。したがって、ひび割れを有するコンクリート構造物の耐久性について、ひび割れの存在が塩化物イオンの浸透や鉄筋の腐食速度に及ぼす影響の観点から十分に理解しておく必要がある。

しかし現状では、これらについて一部検討された事例はあるものの、十分な知見は得られていない。土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、ひび割れが存在する場合、コンクリートの塩化物イオン拡散係数を割り増すことで、塩化物イオンがコンクリート中に浸透しやすい状況の評価しているが、実際の塩化物イオンの移動メカニズムを考えると、必ずしも妥当な方法であるとは言い難い。

これまでの研究により、ひび割れを有するコンクリート中に塩化物イオンが浸透する場合、ひび割れ幅<sup>2), 3)</sup>やひび割れ内の塩分濃度<sup>4), 5)</sup>の影響が大きいことが指摘されている。また、幅の

小さいひび割れでは、コンクリートの自癒作用等によりひび割れが閉塞することがある<sup>6)</sup>。このことは、実構造物においてもしばしば観察される現象である。このひび割れ閉塞も、塩化物イオンの浸透に大きく影響するとされている<sup>7)</sup>。

そこで本研究では、ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオンの移動現象を明らかにするための基礎的検討として、既往の研究より支配的要因と指摘されているひび割れ幅およびひび割れ閉塞が塩化物イオン浸透量に及ぼす影響を実験的に調べた。

### 2. ひび割れ閉塞

コンクリートのひび割れ閉塞は、ひび割れ面に何らかの物質が析出することで生じることが多い。既往の研究<sup>8), 9)</sup>によれば、海水に曝されるコンクリート表面には、水酸化マグネシウムや炭酸カルシウムが析出し、その程度は海水のpHに大きく依存することがわかっている。また、析出過程としては、海水浸せき直後から水酸化マグネシウム (brucite) 層が形成し、その後炭酸カルシウム (aragoniteおよびcalcite) 層が形成する。したがって、コンクリートのひび割れ閉塞現象を実験で再現する場合には、溶液中におけるマグネシウムイオン ( $Mg^{2+}$ ) の存在と溶液の

\*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 工博 (正会員)

\*2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 工博 (正会員)

\*3 Professor, Imperial College of Science, Technology and Medicine, UK, Ph.D

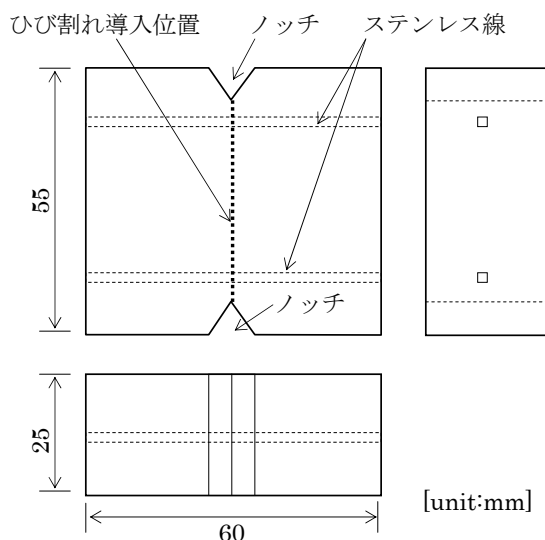


図-1 供試体概要

pH管理が重要であると考えられる。

一般的に実施されている塩化ナトリウム水溶液を用いたコンクリートの浸せき実験では、溶液中に $Mg^{2+}$ は存在せず、溶液のpHも管理されないため、ひび割れ閉塞は起こらないと考えられる。そこで本研究では、ひび割れ閉塞現象を再現するため、これらの点に留意して塩化物イオン溶液の浸せきを行った。

### 3. 実験概要

#### 3.1 供試体概要

##### (1) 寸法・形状, 配合・使用材料

本研究では、図-1に示すモルタル供試体を用いて実験を行った。供試体の寸法は55mm×25mm×60mmであり、後述する方法でひび割れを導入するため、幅が10mmで、深さが7mmのノッチを2ヶ所に設けた。また、ひび割れ導入時に供試体が完全に割れてしまわないように、内部に直径1.5mmのステンレス線を2本配置した。

モルタルの配合は、水セメント比を0.50、砂セメント比を2.5とした。セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には川砂を用いた。細骨材の最大寸法は5 mmとし、練混ぜに混和剤は用いなかった。

製作した供試体数量は8個である。実験ケースを表-1に示す。

表-1 実験ケース

目標ひび割れ幅	溶液種類	
	$Mg^{2+}$ なし	$Mg^{2+}$ あり
0mm	CASE 1A	CASE 2A
0.15mm	CASE 1B	CASE 2B
	0.128mm	0.123mm
0.20mm	CASE 1C	CASE 2C
	0.173mm	0.172mm
0.25mm	CASE 1D	CASE 2D
	0.241mm	0.236mm

上段：供試体名

下段：ひび割れ幅の実測値



写真-1 ひび割れ導入方法

#### (2) ひび割れ導入方法

打設後1日で脱型した供試体は、20℃の実験室内にて、水和生成物の溶出を避けるため、飽和水酸化カルシウム水溶液中で28日間養生した後、写真-1に示す方法で、ひび割れを導入した。すなわち、ノッチ部に丸鋼を設置し、ネジ式の載荷装置を用いて圧縮することで供試体を割裂した。ひび割れ発生後、表-1に示した目標ひび割れ幅となるまで荷重を与え続けた。なお、ひび割れ幅は、8mm間隔で設けた測線とひび割れが交差した位置で画像解析により計測した。計測箇所数は、供試体の両面で10点である。表-1には、実測ひび割れ幅の平均値も示してある。これ以降は、実測ひび割れ幅の平均値を用いて検討を進める。

#### 3.2 塩化物イオン溶液への浸せき

塩化物イオン溶液への浸せきに先立って、エポキシ樹脂による表面被覆を行った。ひび割れ

表-2 溶液の組成

溶液種類	組成 (g/l)			イオン濃度 (g/l)		
	NaCl	MgCl <sub>2</sub>	NaOH	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>
Mg <sup>2+</sup> なし	27.8	0	2.3	12.2	0	16.9
Mg <sup>2+</sup> あり	22.4	4.4	6.0	12.2	1.1	16.9
北海				12.2	1.1	16.9

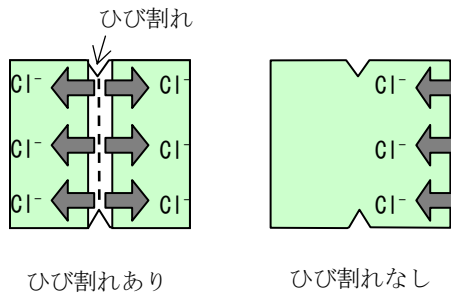


図-2 塩化物イオンの浸透方向

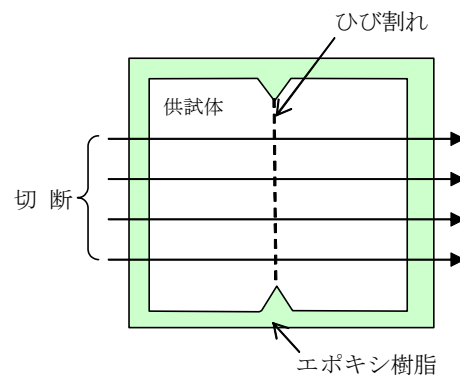


図-3 供試体の切断方法

を含む供試体については、ひび割れ部(幅:5 mm)以外のすべての表面を被覆した。一方、ひび割れのない供試体については、1側面以外の表面を同様に被覆した。これにより、図-2に示すように、塩化物イオンの供試体中への浸透を特定の方向のみに制御した。

エポキシ樹脂の硬化後、塩化物イオン溶液への浸せきを行った。溶液は、Mg<sup>2+</sup>を含むものと含まないものの2種類用意した。溶液量は、供試体体積に対して16倍とした。溶液の組成は、表-2に示すように、北海の実海水のイオン濃度と等しくなるように調整した。

前述のように、溶液のpH管理が重要であるため、溶液のpHをほぼ毎日計測し、必要に応じて硝酸を加えることで、実海水の一般的なpH範囲内(7.8~8.3)となるように調整した。また、常に同様な溶液環境下に供試体が曝されるように、1週間に1度溶液を全量交換した。

供試体の塩化物イオン溶液への浸せき期間は28日とした。

### 3.3 塩分量測定およびEPMA分析

ひび割れ内部の状態を保存するため、塩化物イオン溶液への浸せき終了後、供試体全体をエポキシ樹脂で固めた。ひび割れ内部にも確実に

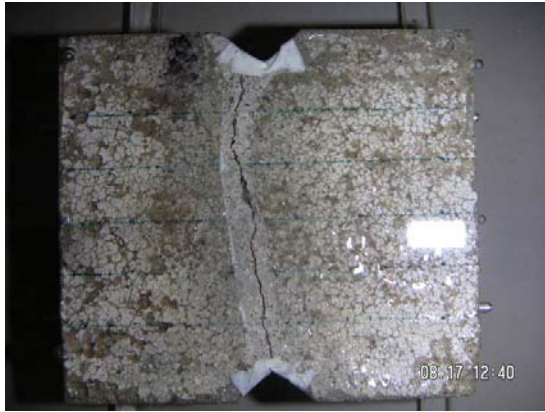
エポキシ樹脂が注入されるよう真空処理を施した。エポキシ樹脂の硬化後、図-3に示すように、供試体を精密カッターで切断し、供試体中央部分から3つの薄片(厚さ:8 mm)を採取した。

ひび割れを有する供試体については、薄片をひび割れ位置で分割し、合計6個の塩化物イオン含有量測定用試料とした。一方、ひび割れのない供試体については、薄片を長手方向に半分に切断し、浸せき面側の3個を塩化物イオン含有量測定用試料とした。その後、供試体周囲のエポキシ樹脂を取り除き、モルタル試料中に含まれる塩化物イオン量を、JCI-SC4に示された方法に準拠して測定した。

### 3.4 断面観察およびEPMA分析

切断後の供試体の残りの部分を用いて、断面観察およびEPMAによる元素の面分析を行った。断面観察は、供試体の切断面を十分に研磨し、マイクロ스코プにて300~500倍の倍率で行った。

EPMA分析は、切断面のうち、ひび割れを含む30mm×30mmの面を対象として、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、Mg<sup>2+</sup>およびS<sup>2-</sup>の各イオンの含有量を同定した。なお、



(a)  $Mg^{2+}$ なし (CASE 1D)



(b)  $Mg^{2+}$ あり (CASE 2D)

写真-2 ひび割れの閉塞状況の例

ひび割れのない供試体については、塩化物イオンの浸透を許容した側面を含む面を分析した。

#### 4. 実験結果と考察

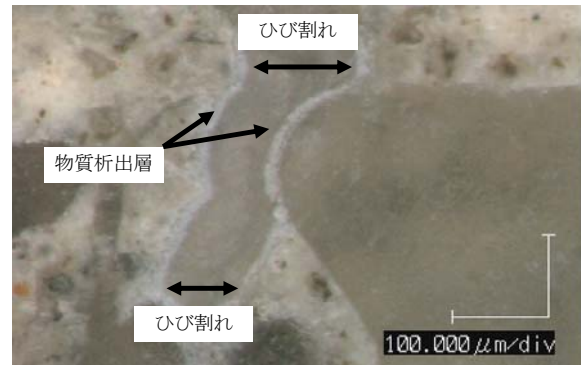
##### 4.1 ひび割れ閉塞の状況

写真-2に、塩化物イオン溶液への浸せきによって生じたひび割れの閉塞状況を示す。これらの供試体は、いずれも目標ひび割れ幅0.25 mmのものであり、浸せき開始後3日で撮影した。

これによれば、 $Mg^{2+}$ を含まない場合、初期ひび割れに沿った物質析出は認められない。28日間の浸せき終了時点でも、物質の析出は確認できなかった。むしろ、ひび割れ幅が浸せき開始前よりも広がっていた。これは、ひび割れ面から供試体中のカルシウム分が溶出したためと推察される。一方、 $Mg^{2+}$ を含む溶液に浸せきした供試体では、ひび割れの全長にわたって白色の物質が供試体表面に析出していた。なお、他の



(a) 供試体側面



(b) 供試体内部のひび割れ面

写真-3 断面観察結果の例

ひび割れ幅のケースでも、 $Mg^{2+}$ を含む溶液に浸せきした供試体では、同様のひび割れ閉塞現象が認められた。

本実験は、既往の実験<sup>8)</sup>を再現して行ったので、析出した物質は、既往の実験で同定された物質と同一の水酸化マグネシウムと炭酸カルシウムであると考えられる。EPMA分析の結果でも、ひび割れ近傍において、 $Mg^{2+}$ の析出を確認することができた。

写真-3に、断面観察より得られた析出物質の拡大写真を示す。(a)は、ひび割れのない供試体(CASE 2A)で塩化物イオン溶液に曝されていた側面で撮影されたものである。析出物質の厚さは10~50 $\mu$ mであった。この厚さは既往の実験結果<sup>7)</sup>とほぼ同様の値である。観察した側面のほとんどで、これと同様な析出層が認められた。

(b)は、供試体(CASE 2D)内部のひび割れ面における物質析出状況である。向かい合う1対のひび割れ面の双方で、厚さが約10 $\mu$ mの析出物質層が確認された。供試体内部のひび割れ面では、

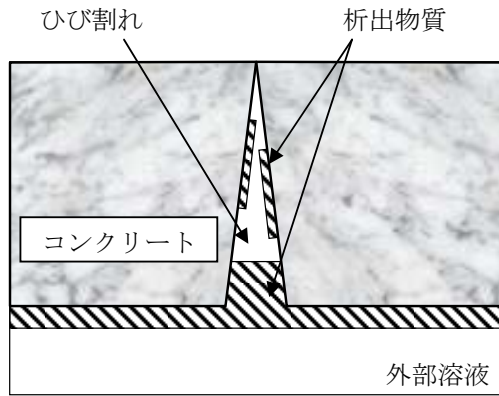


図-4 ひび割れ閉塞のモデル化

必ずしもすべての面が析出物質で覆われていたわけではないが、塩化物イオン溶液と直接接する供試体表面のひび割れは、析出物質で完全に閉塞していた。

これらを模式的に表すと、図-4のようになる。このような析出物質によるひび割れ閉塞によって、外部からひび割れ内部への塩化物イオンの供給が抑制されるだけでなく、ひび割れ面から供試体中への浸透も抑制されることが期待される。本実験における $Mg^{2+}$ を含まない溶液、すなわち、従来の同種の浸せき実験で用いられてきた塩化ナトリウム水溶液では、この塩分浸透抑制効果が現れないため、 $Mg^{2+}$ が存在する実海洋環境下における場合よりも塩化物イオンの浸透量を大きく見積もってしまう可能性がある。

#### 4.2 ひび割れ幅が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響

図-5に、供試体中に含まれる塩化物イオン量の測定結果を示す。ここでの塩化物イオン含有量は、同一条件における全測定結果の平均値である。これより、 $Mg^{2+}$ を含まない溶液に浸せきした場合、ひび割れ幅が0.2mmより小さいと、ひび割れがない場合と比較して塩化物イオン含有量は少なかった。これは、既往の研究<sup>5)</sup>でも指摘されているように、ひび割れ内部の溶液中においてもひび割れ深さ方向に塩化物イオンの拡散による移動現象が生じ、ひび割れ内部の溶液組成が外部と異なり不均一となっていたためと考えられる。一方、ひび割れ幅がある程度以上

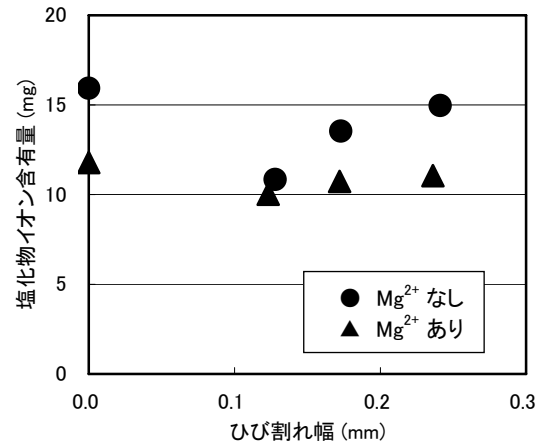


図-5 塩化物イオン含有量の測定結果

大きくなると、ひび割れ内部の溶液組成は、急速な塩化物イオンの拡散により、外部溶液と等しくなる。したがって、ひび割れ幅が大きい場合の塩化物イオン含有量は、ひび割れがない場合のそれに近づく。本実験の結果でも、この傾向が確認できた。すなわち、供試体内部のひび割れ面からの塩化物イオンの浸透現象は、外部溶液と直接接する供試体表面からの浸透と同一に取り扱えるものと考えられる。

#### 4.3 ひび割れ閉塞が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響

図-5に、 $Mg^{2+}$ を含む溶液に浸せきした供試体中に含まれる塩化物イオン量の測定結果についてもあわせて示す。 $Mg^{2+}$ を含まない溶液に浸せきした場合と比較すると、ひび割れのない供試体では、 $Mg^{2+}$ を含む溶液に浸せきした供試体の塩化物イオン量は約25%低減した。これは、供試体表面に析出した物質層が供試体中への塩化物イオンの浸透を抑制したためと考えられる。

ひび割れを有する供試体における測定結果と比較すると、いずれのひび割れ幅のケースでも、 $Mg^{2+}$ を含む溶液に浸せきしひび割れ閉塞が生じた場合の方が塩化物イオン含有量は10~25%少なかった。これは、図-4に示したひび割れ閉塞により、ひび割れ内部に対する塩化物イオンの供給が少なくなるだけでなく、ひび割れ面から供試体内部に浸透する塩化物イオン量も減少

するためと考えられる。

さらに、 $Mg^{2+}$ を含まないシリーズで見られたような、ひび割れ幅の増加にともなう塩化物イオン含有量の増加傾向は認められなかった。これは、供試体内部のひび割れが閉塞することで、見かけ上ひび割れ幅が小さくなり、 $Mg^{2+}$ を含まない溶液に浸せきしたひび割れ幅の小さい供試体で見られたひび割れ内部における塩化物イオンの拡散現象が、より幅の広いひび割れ内部でも生じたためと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオンの移動現象を明らかにするための基礎的検討として、ひび割れ幅およびひび割れ閉塞がコンクリート中に浸透する塩化物イオン量に及ぼす影響を実験的に調べた。その結果、得られた結論を以下に示す。

- (1) ひび割れ閉塞がない場合、ひび割れ幅が0.2mmより小さいと、供試体中に浸透する塩化物イオン量はひび割れのない供試体よりも少なくなった。しかし、ひび割れ幅がある程度大きくなるとひび割れのない場合の浸透量に近づいた。
- (2) 水酸化マグネシウムや炭酸カルシウムが析出してひび割れが閉塞した供試体では、塩化物イオン含有量は、閉塞しない場合よりも10～25%小さくなった。

実際の海洋環境に曝されるコンクリート構造物では、海水中に含まれる $Mg^{2+}$ 等の存在により、本実験と同様なひび割れ閉塞現象が多少なりとも起きていることが推察される。今後、実構造物からひび割れ閉塞を生じたコアサンプルを採取して塩化物イオンの移動現象に及ぼす影響を検討するとともに、本実験結果をどのような形で海洋環境下にあるコンクリート構造物の耐久性能照査に反映していくかについても検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造的能照査編]，2002
- 2) Aldea, C. M., S. P. Shah and Karr, A.: Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.11, No.3, pp.181-187, 1999
- 3) Rodriguez, O. G. and Hooton, R. D.: Influence of cracks on chloride ingress into concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.100, No.2, pp.120-126, 2003
- 4) Win, P. P., Watanabe, M. and Machida, A.: Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No.7, pp.1073-1079, 2004
- 5) 塚原絵万, 加藤佳孝, 魚本健人：ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオン移動評価手法の提案, 土木学会論文集, No.732 /V-59, pp.109-120, 2003
- 6) Mohammed, T. U., Hamada, H. and Yokota, H.: Autogenous healing; Ingress of chloride and sulfate through cracks in concrete under marine environment, *Proceedings of Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, ACI SP 222, pp. 135-154, 2004
- 7) Ismail, M., A. Toumi, R. François and Gagné, R.: Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in inert materials, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No.4, pp.711-716, 2004
- 8) Buenfeld, N. R. and Newman, J. B.: The permeability of concrete in a marine environment, *Magazine of Concrete Research*, Vol.36, No.127, pp.67-80, 1984
- 9) Buenfeld, N. R. and Newman, J. B.: The development and stability of surface layers on concrete exposed to sea-water, *Cement and Concrete Research*, Vol.16, No.5, pp.721-732, 1986