

論文 ひび割れを有するコンクリートのひび割れからコンクリートへの塩分浸透に関する実験的検討

齊藤 準平*1・下邊 悟*2

要旨: ひび割れから垂直方向へのコンクリートの塩分浸透特性を明確にすることを目的として、塩分浸せき試験を行った。これは、ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透評価（著者の提案式）を実構造物へ精度よく適用できるようにするための検討の一つである。供試体は実構造物サイズのかぶり部分を模して作製し、ひび割れへの塩分侵入方向は実構造物が複数面のひび割れから塩分侵入を受けること想定し複数方向とした。実験結果から、ひび割れ内のコンクリートへの塩分浸透について検討し、さらに著者の提案式にそれら結果を導入した際の適用の可能性を検討した。

キーワード: ひび割れ, 塩分浸透, 塩化物イオン濃度, 塩分浸せき試験

1. はじめに

長年にわたる交通量の増加や過積載などによって疲労損傷が生じた RC 道路橋は、塩害の影響を同時に受けると著しい鉄筋腐食を生じ、構造的機能を失う恐れがある。それらに対して維持補修を効率的に行うためには、現状の損傷状態における塩分浸透特性を適切に評価し、補修・補強の必要性を的確に見極めることが重要となる。

ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性を拡散係数で評価する方法として、著者はひび割れを有するコンクリートに電気泳動法を適用したモデル実験^{1)~4)}によって、評価できるひび割れ条件、コンクリートの材料条件、部材の種類および外力を受けた状態など、様々な条件に適用できる、ひび割れの影響を考慮した拡散係数 D_{cr} の評価式を提案した（以下、提案式と略称）。式(1)に著者の提案式¹⁾を示す。

$$D_{cr} = \left(\frac{A_{cr}}{A} \right) \times D(x) \quad (1)$$

ここで、 D_{cr} : ひび割れの影響を考慮した拡散係数、 A_{cr}/A : ひび割れ面積比、 A_{cr} : ひび割れ面積 (=ひび割れ幅×ひび割れ長さ×ひび割れ本数)、 A : コンクリート面積、 $D(x)$: ひび割れ深さに関する変数 (= $D_0 \times (x/\text{かぶり } c)$)、 D_0 : ひび割れの影響を表す定数 (200 (cm²/年))、 x : ひび割れ深さ (上限値=かぶり c) である。コンクリートが、外力の影響を受けて損傷している場合は、 D_0 を割り増して計算する。

提案式の実構造物への適用を考える際に、著者が検討すべき課題として特に重要と考えているのが、コンクリート面積 A の設定である。例えば床版部材のような大きな部材面 (A =部材面積と設定) に小さなひび割れがある場合や、棒部材のようなはりにひび割れ間隔がかなり大

きいひび割れがある (A =ひび割れ間隔とはりの幅の積と設定) 場合、コンクリート面積 A がかなり大きくなるため提案式による計算結果はかなり小さくなり、その結果は危険側に評価される。提案式はひび割れに侵入する塩分をコンクリート面積 A で平均化して簡便に評価できるように構成しているが、実構造物に適用するに際し、著者はコンクリート面積 A にそれより小さい領域となるひび割れからの塩分浸透の影響を強く受ける範囲 (塩分浸透影響範囲) を割り当てることによって、コンクリート面積 A の扱いに関する課題を解決することができると考えている。塩分浸透影響範囲の定義は、部材の表面からコンクリート中に浸透した塩分がかぶり c を経て鉄筋に到達する間に、ひび割れ中に侵入した塩分がひび割れ垂直方向に浸透する範囲とする。そしてその範囲はひび割れや部材の既知情報と、開放部に対するひび割れ部の塩分浸透比 α なる係数を用いることによって、 $2 \times (\alpha \times \text{かぶり } c \times \text{ひび割れ長さ})$ として計算することができる。そこで問題となるのが α の設定である。 α はコンクリート中における、ひび割れから片側の垂直方向への塩分浸透量と部材表面から鉄筋方向への塩分浸透量の比であり、ひび割れから片側の垂直方向への塩分浸透特性を明確することが α の適切な設定のために特に重要となる。

そこで本研究は、電気泳動法を適用したモデル実験で検討できなかった、ひび割れ内のコンクリート面 (塩分浸透面) から垂直方向のコンクリート内部への塩分浸透特性を詳細に検討し明確にすることを目的とし、供試体の作製、塩分浸せき試験、塩分濃度分析を行った。実構造物が複数面のひび割れから塩分侵入を受けること想定し、複数方向からひび割れに塩分侵入がある場合の影響も検討した。さらに、それら結果を用いて α を整理し、提案式への適用の可能性を検討した。

*1 日本大学 理工学部交通システム工学科助教 博 (工) (正会員)

*2 日本大学 理工学部交通システム工学科教授 工博 (非会員)

2. 塩分浸せき試験方法

2.1 試験概要

想定するひび割れとその片側の部材の周辺領域について、実構造物サイズのかぶり部分をモデル化した供試体を用いて、JSCE G 572⁵⁾に準じて、図-1のように塩分浸せき試験を行う。供試体は、模擬ひび割れ（以下、ひび割れと略称）部分に塩化ナトリウム水溶液が侵入し、ひび割れ内部のひび割れ垂直方向の塩分浸透面からコンクリート内部に塩分が浸透するひび割れモデル（I）と、比較のための開放面から塩分浸透する開放面モデル（II）である。各モデル供試体から、ひび割れならびに開放面からの塩分浸透特性を別々に検討することができる。

塩分浸せき試験では、供試体の作製、設定したひび割れ幅と塩分侵入方向の加工を行い、塩分浸せき試験後は供試体の塩分浸透面内および塩分浸透断面方向の各箇所での塩化物イオン（以下、Cl⁻）濃度分析を行う。

2.2 配合と使用材料

供試体の材料にはモルタルを用いた。モルタルの配合と力学的性質を表-1に示す。水セメント比は55%、細骨材とセメントの容積比は400vol%とした。セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には山砂（表乾密度2.65g/cm³、最大寸法2.5mm）を、水には蒸留水を用いた。圧縮強度試験は材齢28日で実施した。打設後は28日間封緘養生し、その後人工的にひび割れを設けた。

2.3 ひび割れ条件およびその加工方法

図-2に供試体の概要を示す。ひび割れ幅は0.2mmとした。ひび割れへの塩分侵入方向は1~4方向とした。塩分侵入は塩分浸透面において、Y方向における片側（single）のみからの侵入および両側（double）からの侵入と、X方向における両側からの侵入の有無の組み合わせとした。ひび割れ幅を0.2mmとした理由は、実構造物における一般的な補修・補強の目安とするひび割れ幅を想定したこと、ひび割れ幅と塩分侵入方向の各条件下におけるCl⁻濃度を概略的に検討した著者の既往研究⁶⁾から、様々な大きさのひび割れ幅に複数方向から塩分が侵入した場合の侵入方向数を合わせて示した一つの指標である、塩分侵入方向1方向のひび割れ幅に換算したひび割れ幅 w_{cr}^* が0.8mm（ひび割れ幅0.2mm×塩分侵入方向4方向）以上では、コンクリート中のCl⁻濃度にひび割れ幅や塩分侵入方向の違いが顕著に現れない傾向にあったことによる。塩分侵入方向を1~4方向とした理由は、提案式の基となった著者の電気泳動実験による既往研究^{1)~4)}は、塩分侵入方向を1方向のみで行われているが、実構造物においては塩分侵入が複数方向となる部材が少なくないことから、それらへの提案式の適用が必要と考えたためである。床版のような板状部材にひび割れが貫通しない場合を1方向、ひび割れが貫通した場合を2方向、はりの

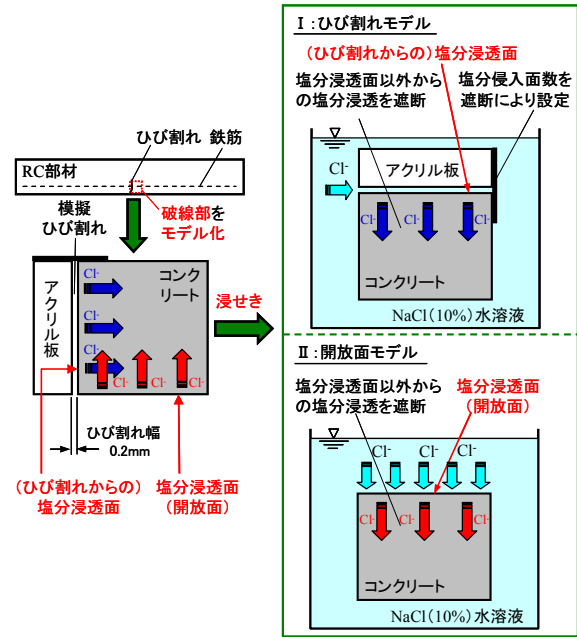


図-1 塩分浸せき試験概要

表-1 モルタルの配合と力学的性質

W/C (%)	S/C (vol%)	単位量 (kg/m ³)			単位容積質量 (t/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)
		W	C	S		
55	400	257.9	469.0	1576	2.200	37.3

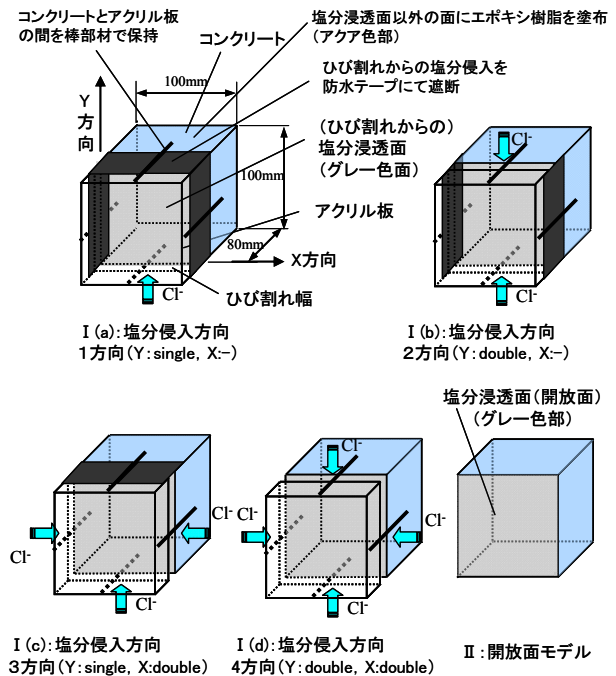


図-2 供試体概要

ような棒部材に底面と側面にひび割れが発生した場合を3方向、特異なものとして柱部材の周囲にひび割れが発生した場合を4方向と想定した。

ひび割れの加工は、供試体とアクリル板の間に設定したひび割れ幅となるようにPP製シートを挟み保持した

状態でプラスチック製の棒部材を供試体とアクリル板に接着剤でバイパスし、接着剤の硬化後に PP 製シートを抜き取る方法とした。棒部材によるひび割れ幅の保持は、塩分浸透面に隣り合う4面に各1本ずつ設置し行った。ひび割れへの塩分侵入方向の違いは、塩分侵入方向以外のひび割れに対し、ひび割れ開口部を塞ぐように供試体とアクリル板をゴム製防水粘着テープにて貼り付ける方法によって設けた。ひび割れモデルおよび開放面モデルは共に、塩分浸透面は1面(図-2 グレー色面)であり、それ以外の5面にはエポキシ樹脂を塗布し、塩分浸透を遮断した。

2.4 塩分浸せき試験

塩分浸せき試験は、図-1に示すように JSCCE G 572⁵⁾ に準じて、濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液中に供試体を浸せきした。浸せき期間は3ヶ月とし、その間は塩化ナトリウム水溶液の水温および Cl⁻ 濃度を計測し、規準内に収まるようにした。

2.5 Cl⁻ 濃度分析

図-3に供試体切断位置を示し、塩分浸透断面と浸透方向の位置関係を示す。図-4に塩分浸透断面の Cl⁻ 濃度の分析箇所(白色部)の概要図を示す。Cl⁻ 濃度の分析は、JIS A 1154⁷⁾ に準じた。図-3に示す塩分浸透方向(Z方向)にて、供試体を塩分浸透面から20mm間隔に3箇所を切断した後、図-4に示すようにY方向およびX方向を各3等分し、各断面を9等分に切断した。それら分析箇所の区分は、I(a)塩分侵入方向1方向の場合の区分と他の侵入方向の場合の区分を同一とし、断面内のY方向についてはひび割れ開口部に近い箇所(near(以下、nと略称))と開口部から最も離れた深い箇所(far(以下、fと略称))およびその中間箇所(middle(以下、mと略称))に区分し、X方向については中央部(center(以下、(c)と略称))と端部(side(以下、(s)と略称))に区分した。各切断片を微粉碎した後、全 Cl⁻ を硝酸にて煮沸抽出し、ろ過後、自動電位差滴定装置による電位差滴定法にて全 Cl⁻ 濃度の分析を行った。なお、分析は抽出したろ液を2等分して2回行い、その平均値を分析結果とした。

ひび割れモデルの分析において、分析を効率的に行うため、各塩分侵入方向の供試体で位置条件が重複した箇所は、同じ条件の1箇所を分析箇所(図-4(白色部))とした。なお、分析箇所は、中心を通るY軸を対象の軸として線対称な塩分浸透方向1方向と3方向、中心を通るY軸およびX軸のいずれに対しても対象の軸として線対称な塩分浸透方向2方向と4方向のそれぞれで異なる。4断面の分析検体数は、塩分侵入方向が1, 3方向のケースでそれぞれ24検体、2方向のケースで16検体、4方向のケースで12検体で、計76検体である。

開放面モデルはひび割れの影響を受けないため同一断

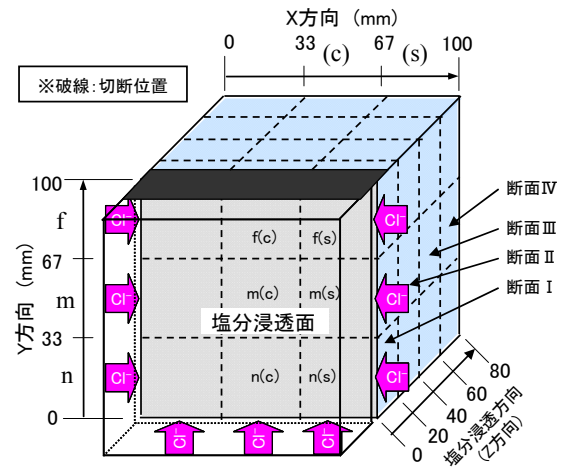
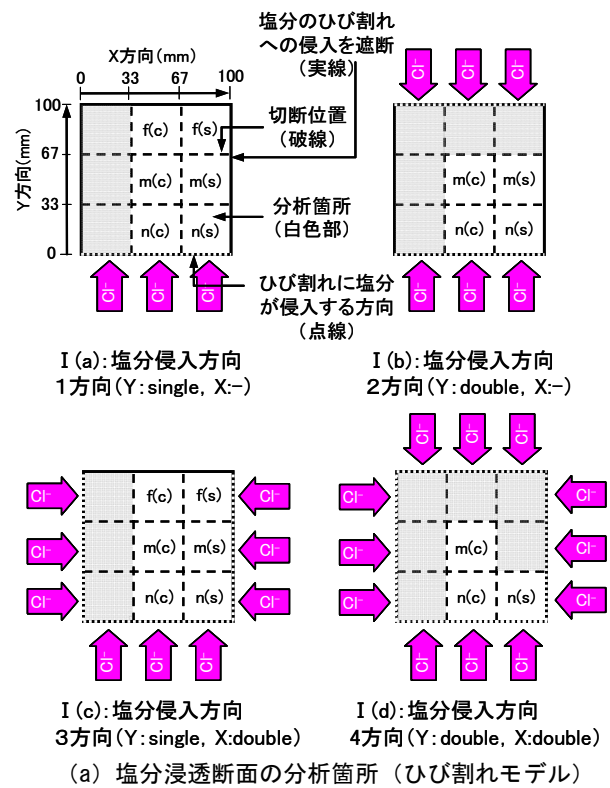
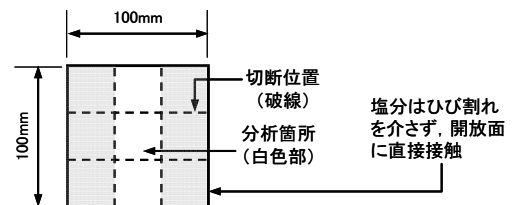


図-3 供試体切断位置の概要 (塩分侵入方向: 3方向の場合)



(a) 塩分浸透断面の分析箇所(ひび割れモデル)



(b) 塩分浸透断面の分析箇所(開放面モデル)

図-4 Cl⁻ 濃度の分析箇所の概要図

面で塩分浸透の条件は同じとなるが、ひび割れモデルとの比較データとして重要なため、計3箇所を分析箇所とした。検体数は12検体である。なお、各分析箇所が概ね同程度の分析値となるため、平均値を開放面モデルの結果とした。

3. 実験結果および考察

3.1 塩分浸透面から垂直方向へのCl⁻濃度

図-5に塩分浸透面から垂直方向へのCl⁻濃度分布を示す。データはひび割れモデルの各分析箇所n(c)のCl⁻濃度と開放面モデル(平均値)である。なお参考までに、フィックの第2法則に基づいた拡散方程式の解を用いて回帰分析し、塩分浸透面の表面のCl⁻濃度C₀ならびに見掛けの拡散係数D_cの算出結果を併記する。

図より、すべての供試体において、塩分浸透方向に濃度勾配が生じていることが認められた。また、塩分浸透の影響を大きく受けるI断面(塩分浸透面からの距離0~20mm)のCl⁻濃度を検討し、以下の所見を得た。ひび割れモデルは開放面モデルよりCl⁻濃度が小さいことが確認できた。塩分侵入方向の違いを分析箇所が同じ1方向、3方向で比較すると、塩分侵入方向が1方向では塩分浸透面におけるCl⁻濃度分布の値の最大値と最小値の差が大きく、3方向ではその差は小さくなるのがわかる。侵入方向が多くなると、ひび割れ内部への塩水の拡散がされやすく、ひび割れ内部での塩分の供給が均等になりやすいためであると考えられる。また、塩分浸透方向が2方向から、3、4方向にその方向数が増えるに従い、Cl⁻濃度が開放面モデルの値に近づくことが確認できる。

3.2 各分析箇所のCl⁻濃度

図-6に各分析箇所のCl⁻濃度を示す。図-7にひび割れ開口部からの距離(Y方向)とCl⁻濃度の関係を示す。

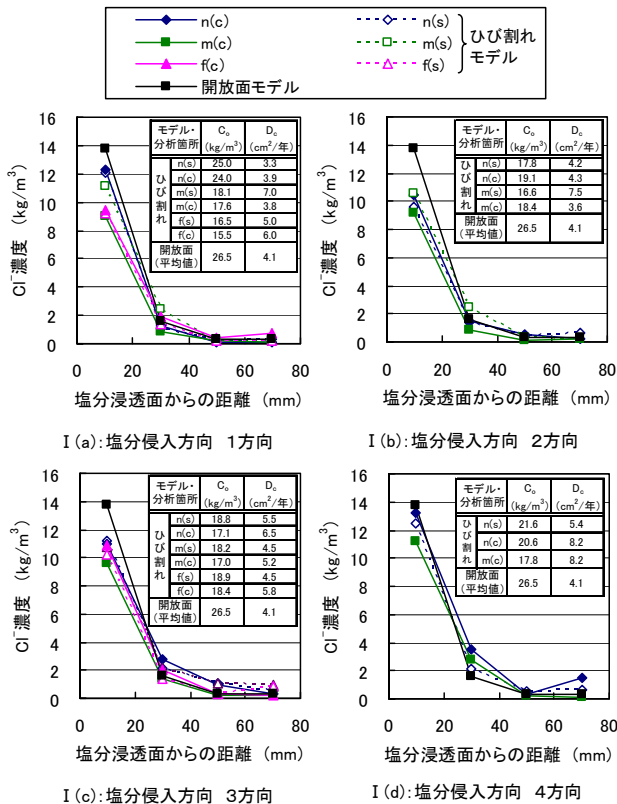


図-5 塩分浸透面から垂直方向へのCl⁻濃度分布

ここで、ひび割れ開口部とはY=0の位置と定義する。それぞれの図には、表面付近のCl⁻濃度の特徴を捉えた(a)塩分断面Iデータと、I~IV断面のCl⁻濃度の特徴を捉えた(b)全断面合計データを示した。また図-7には、その傾向の検討を容易にするために、ひび割れ開口部からの各距離のCl⁻濃度の平均値を併記した。平均値は、(((c)部のCl⁻濃度) + ((s)部のCl⁻濃度) × 2)の和を3で除して求めた。また、塩分侵入方向4方向のm部の平均値の計算のみ、塩分侵入条件が同じn(c)値をm部の(s)部のCl⁻濃度に用いた。

図-6より、各分析箇所のCl⁻濃度を見ると、いずれの供試体も開口部付近の分析箇所nが最大値となる傾向が

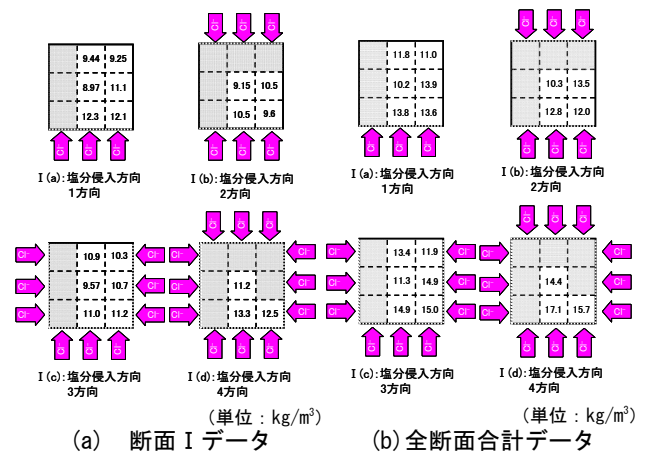


図-6 塩分浸透断面の各分析箇所のCl⁻濃度

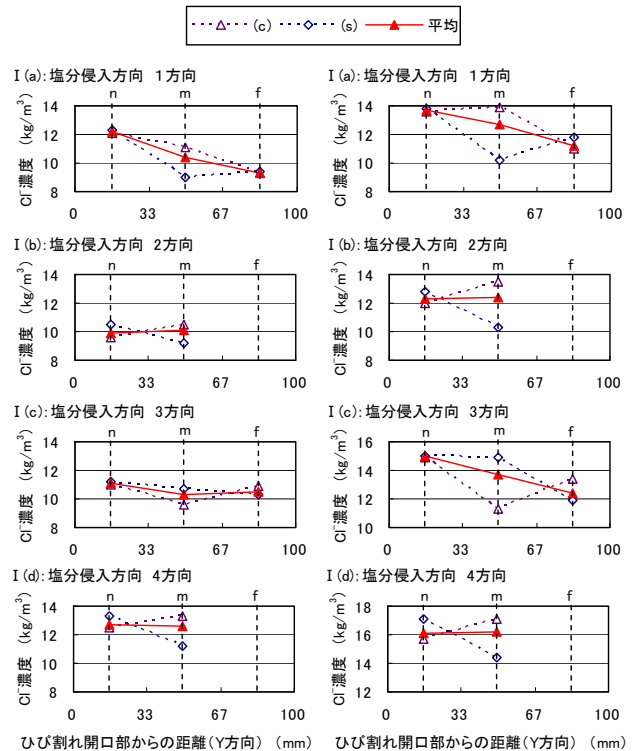


図-7 ひび割れ開口部からの距離(Y方向)とCl⁻濃度の関係

あることがわかる。また、ひび割れ開口部付近とひび割れ深部の Cl 濃度を総合的に見ると、一部の開口部付近の Cl 濃度に高い箇所があるものの、概略的には塩分侵入方向が増加するに伴い Cl 濃度が増加する傾向が確認できる。これは、ひび割れへの塩分侵入方向が単数、複数に関わらず塩分浸透面は 1 面であることから、ひび割れを介してひび割れ内部への供給される塩化物イオン量の差が塩分侵入方向の違いに伴う全体的な濃度の差になったものと考えられる。一方で、塩分侵入方向が 3、4 方向で X、Y 方向から塩分供給がありその影響を最も受けると推測される隅角部 n(s) の位置の Cl 濃度は、同じ塩分侵入条件の n(c) とほとんど変わらず、その影響は少ないことがわかる。

図-7より、ひび割れ開口部からの距離 (Y 方向) と Cl 濃度の関係は、塩分侵入方向が 1 方向と 3 方向の場合では、ひび割れ開口部からの距離 (Y 方向) が大きくなると、Cl 濃度が低下する傾向がみられる。一方、2 方向と 4 方向の場合では、その関係には開口部からの距離の増加に伴う Cl 濃度の変化はほとんどみられないことがわかる。これは、片側 (single) からと両側 (double) からのひび割れ内部への塩分の侵入形態に起因すると考えられ、片側からはひび割れ内部へのひび割れを介した塩分の侵入の容易さが影響していると考えられ、両側からは塩分侵入方向が両側になることによるひび割れ内部への塩化ナトリウム水溶液の拡散の容易さに伴うひび割れ内部での Cl 濃度の平均化に起因したと考えられる。

3.3 塩分浸透影響範囲の検討

α の算出は、ひび割れから片側の垂直方向への塩分浸透量 (ひび割れモデル) $C_{(H)}$ と部材表面から鉄筋方向への塩分浸透量 (開放面モデル) $C_{(V)}$ を同一期間の浸せきによって浸透した塩分量 (全断面合計の Cl 濃度) から求め、 $\alpha = C_{(H)}/C_{(V)}$ と正規化した。 α の物理的意味として、 α が 1.0 に近づくことは、開放面から浸透する塩分量にひび割れから浸透する塩分量が近づくことになり、開放面と同等の塩分のひび割れ内部への供給を意味し、一方、 α が 0 に近づくことは、ひび割れの存在が塩分浸透に及ぼす影響が低くなることを意味する。さらに、開放部とひび割れ部とは塩分の浸透面が異なるだけで浸透される材料は同一材料であることから、提案式の α に関する実構造物への実用性として材料の違いの影響を受けず標準的な特性を持つコンクリートに概ね適用できると推測される。

図-8に、ひび割れ開口部からの距離 (Y 方向) と α の関係を示す。図-9に、塩分侵入方向と α の関係を示す。なお、右軸 α と同じ関係となる Cl 濃度目盛りを左軸に併記する。

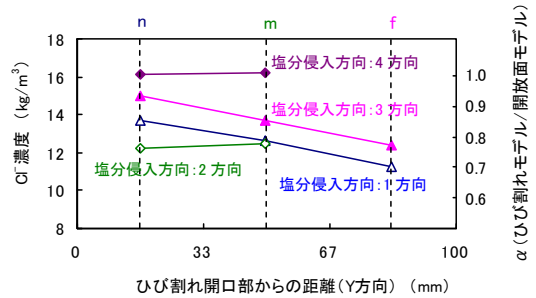


図-8 ひび割れ開口部からの距離 (Y 方向) と α の関係

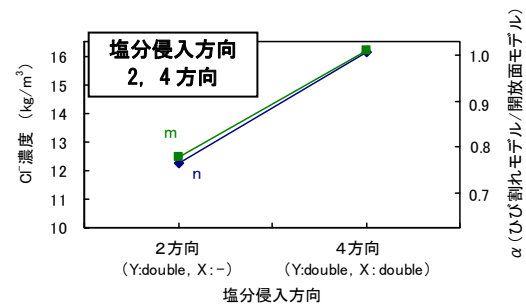
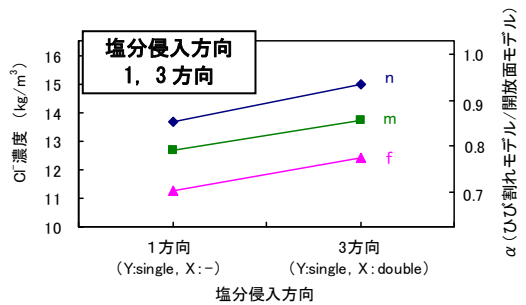


図-9 塩分侵入方向と α の関係

図-8より、 α の値は塩分侵入方向が 4 方向の場合が最も大きくひび割れ開口部からの距離 (Y 方向) の違いに関わらず開放面と同程度 (α 約 1.0) となった。一方で、塩分侵入方向が 1 方向の場合がひび割れ開口部からの距離 (Y 方向) が最も深い位置で最も小さく、 α 約 0.7 となった。ひび割れ開口部からの距離 (Y 方向) と α の関係には、先述の通り塩分侵入方向によって異なり、 α が低下するものが塩分侵入方向が 1、3 方向、低下しないものが 2、4 方向であることが確認できる。塩分侵入方向が 1、3 方向において、その低下量は塩分侵入方向の数の違いに関わらず、ほぼ同程度であることがわかる。その低下量は、n 部から m 部まで $\alpha=0.062\sim 0.078$ 、m 部から f 部まで $\alpha=0.080\sim 0.088$ となった。また、それらひび割れの各深さ位置への低下の傾向は、n 部から m 部への低下、m 部から f 部への低下がほぼ同じ割合であることがわかる。図-9より、塩分侵入方向の数が多くなると、 α は増加することが確認できる。それらは、ひび割れ開口部からの距離 (Y 方向) の違いに関わらず、同程度であることがわかる。それら増加量は、1 方向から 3 方向へは $\alpha=0.065\sim 0.081$ 、2 方向から 4 方向へは $\alpha=0.234\sim$

0.243 となった。

提案式への α の適用の可能性を検討する。図-10 にひび割れの各深さ位置における塩分侵入方向 1 方向のひび割れ幅に換算したひび割れ幅 w_{cr}^* と α の関係を示す。 w_{cr}^* の計算方法は、ひび割れ幅 (0.2mm) とひび割れ長さの合計 (塩分侵入方向 1 方向の場合 100mm, 4 方向の場合 400mm) の積を、塩分侵入方向 1 方向の場合のひび割れ長さ 100mm で除した。図の m 部のデータは、著者の既往研究⁶⁾のデータに本研究の m 部のデータを合わせて w_{cr}^* ごとに平均化した。n 部, m 部データについては、べき乗近似した。

図より、 α は開放面からの距離に関わらず、 w_{cr}^* の増加に伴い増加することがわかる。全体的な α の傾向をデータ数の多い m 部から検討すると、 $w_{cr}^*=0.8\text{mm}$ まで増加 ($\alpha=0.85$) し、その後は w_{cr}^* が増加してもほぼ横ばいになる頭打ち現象の傾向があることがわかる。近似線から α を検討すると、 $w_{cr}^*=0.05\text{mm}$ では n 部で $\alpha=0.67$, m 部で $\alpha=0.61$, $w_{cr}^*=0.2\text{mm}$ では n 部で $\alpha=0.80$, m 部で $\alpha=0.71$, $w_{cr}^*=0.8\text{mm}$ では n 部で $\alpha=0.95$, m 部で $\alpha=0.81$ になり、 α が 1.0 となるのは、n 部では $w_{cr}^*=1.2\text{mm}$, m 部では $w_{cr}^*=7\text{mm}$ と計算できる。以上より、任意のひび割れ幅で複数方向からひび割れに塩分が侵入するコンクリートの塩分浸透特性の評価のために、 w_{cr}^* の値から α を求め提案式に適用することが可能になると思われる。さらに、これまでの提案式では、ひび割れ開口部からひび割れ内部への距離の違いに関わらず α の値を一定としていたが、本研究結果から得られたひび割れ開口部からの距離 (Y 方向) に応じて α の値が変化することを提案式に適用することによって、任意のかぶりにおける α の値が設定できるようになり、精度の高い評価ができるものと考えられる。ただし、ひび割れに両側から塩分が侵入する際の n 部と m 部の α がほぼ同じであったように、ひび割れからのコンクリートへの塩分浸透特性は未だ不明な点が多いのも事実であり、すべてのひび割れ条件に w_{cr}^* から α を求め提案式に適用するには、さらに検討の余地がある。

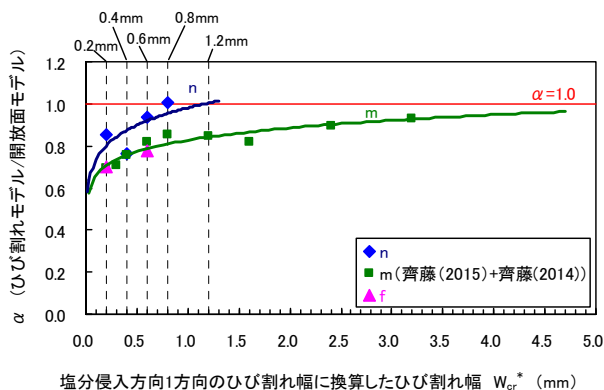


図-10 塩分侵入方向 1 方向のひび割れ幅に換算したひび割れ幅 w_{cr}^* と α の関係

4. まとめ

本研究の範囲内で、以下のことが明らかになった。

- (1) ひび割れ開口部からの距離とコンクリート中の Cl⁻ 濃度の関係は、塩分侵入方向に片側のみの侵入がある場合は、ひび割れ開口部からの深さに応じて Cl⁻ 濃度は低下する傾向がある。
- (2) 塩分侵入方向の数とコンクリート中の Cl⁻ 濃度の関係は、塩分侵入方向の数の増加に伴い Cl⁻ 濃度が増加する傾向がある。
- (3) 著者の提案式に関係する、開放部に対するひび割れ部の塩分浸透比 α と塩分侵入方向 1 方向のひび割れ幅に換算したひび割れ幅 w_{cr}^* の関係から、任意のかぶり位置や複数方向からのひび割れへの塩分侵入に対応した α の値を設定でき、その α を用いた提案式から精度の高い評価ができるものと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、科研費 (若手 (B) No.26820186) の助成を受けたものである。ここに付記し、謝意を表します。

引用・参考文献

- 1) Saito, J. and Shimobe, S.: Evaluation Equation of Diffusion Coefficient of Chloride Ion for Cracked Concrete, Third International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, GEOMATE 2013, Paper No.3156, pp.327-332, Nov. 2013
- 2) 齊藤 準平, 下辺 悟: 外力による損傷を受けたコンクリートの塩分浸透特性に関する電気泳動法を用いた実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.823-828, 2013.7
- 3) 齊藤 準平: モルタル供試体を用いた板状部材における複数ひび割れの塩分浸透特性評価に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, pp.790-795, 2012.7
- 4) 齊藤 準平: ひび割れを有する板状コンクリート部材の塩分浸透特性に関する実験的検討, 日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル, No.127, pp.1-10, 2012.2
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編 土木学会規準および関連規準] (2013 年版), pp.372-376, 2013
- 6) 齊藤 準平, 下辺 悟: ひび割れを有するコンクリートのひび割れ垂直方向への塩分浸透に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp.940-945, 2014.7
- 7) 日本工業規格 JIS A 1154 : 2012 「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」, 2012