論文　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

齊藤　準平[*1]・下邊　悟[*2]

要旨：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実験結果を検討し，ひび割れ条件から求めたひび割れ面積比（ひび割れ面積/コンクリート面積）を用いて，多様化するひび割れを持つ様々な部材の塩分浸透特性が簡便に評価できる式を構築した。しかし，実構造物に適用すると，ひび割れ面積比を構成するコンクリート面積が大きくなり，危険側の評価になるという課題を残した。本研究は，コンクリート面積を塩分浸透影響範囲として設定するために必要なひび割れから垂直方向への塩分浸透について，塩分侵入ひび割れ面数の影響も含め，塩分浸せき試験により検討した。

キーワード：ひび割れ，塩分浸透特性，塩化物イオン濃度，塩分浸せき試験

1. はじめに

多くの鉄筋コンクリート構造物は，長年の荷重による疲労損傷と，多くの劣化・損傷コンクリートの原因とされる塩害とが複合的に作用し合い，著しい鉄筋腐食によって構造的な機能を失う危機を迎えている。鉄筋コンクリート構造物への維持補修計画の効率的な遂行のためには，特にひび割れを有する場合はひび割れが塩分の浸透を助長する恐れがあることや，ひび割れは増加進展する可能性があることを踏まえると，現状のひび割れにおける補修・補強の必要性を見極めること，すなわちその状態での塩分浸透特性を適切に評価する必要がある。

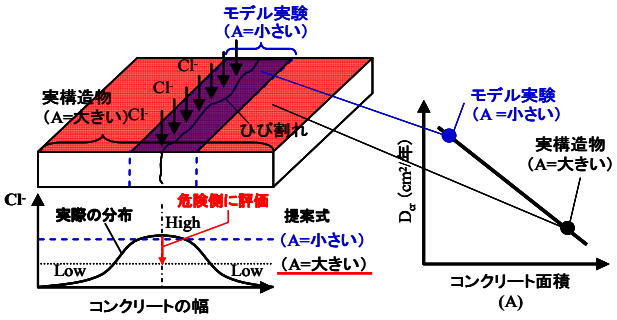
著者は，多様化するひび割れを持つ様々な部材への塩分浸透特性評価を簡便にするために，ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性を拡散係数で評価する方法として，土木学会コンクリート標準示方書［設計編］で提示されている，塩害に対する照査における鋼材位置における塩化物イオン濃度の算出方法[1)]（以下，JSCE 算出方法と略称）を，ひび割れを有するコンクリートに電気泳動法を適用したモデル実験によって検討し，ひび割れ面積比を用いること，ひび割れ深さの影響を考慮するためにひび割れの影響を表す定数D_0にひび割れ深さに応じた係数を乗ずること，外力による損傷の影響を考慮するために D_0 を割り増すことなどによって，評価できるひび割れ条件やコンクリートの材料条件および部材の適用範囲の制限を拡張してきた[2)~6)]。この式（式(1)）（以下，提案式と略称）によって，JSCE 算出方法が対象とするはり部材に発生した曲げひび割れだけでなく，床版のような広い面に対し，不規則な複数のひび割れが散在する場合や，ひび割れが鉄筋まで達していない場合の塩分浸透特性が評価できる可能性を得た。

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

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×（x/かぶり）），D_0：ひび割れの影響を表す定数（200（cm^2/年）），x：ひび割れ深さ（上限値=かぶり）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。

しかし，実構造物のコンクリート面積はモデル実験に用いた供試体と比べて極端に大きい。そのため，実構造物では，**図－１**に示すように，ひび割れから垂直方向への塩分濃度分布はひび割れ付近とひび割れから離れた位置とでかなりの差を生じると考えられる。提案式はコンクリート面積の濃度分布を平均化しているので，実構造物を対象とするとコンクリート面積が大きく塩分浸透特性はひび割れ付近の実際に塩分濃度が高い範囲でも低く計算され，危険側に評価されるという課題を持っている。

著者は，提案式を実構造物へ適用できるようにするために，提案式におけるコンクリート面積 A の設定方法について，**図－２**のように，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 A_1）を定め，その範囲内外に応じて，コンクリート面積の値を変化させて適切に設定する方法を提案する。塩分浸透影響範囲内



図－1　コンクリート面積と平均濃度の関係

*1 日本大学　理工学部交通システム工学科助教　博士（工学）（正会員）
*2 日本大学　理工学部交通システム工学科教授　工学博士（非会員）

では，塩分浸透影響範囲 A_1（=ひび割れ長さ×塩分浸透影響長さ L_{Cl}×2（ひび割れの両側分）（**図－３**平面図参照））とし，範囲外では A_2（=部材面積）とするため，面積の大きい部材に少ない短いひび割れがある場合でも，ひび割れに近い塩分浸透影響範囲に限定して，維持補修等の対応が効率的に行えると考えられる。

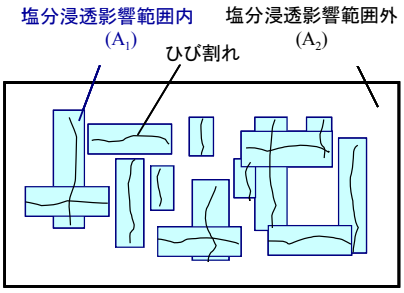
ここで重要となるのが塩分浸透影響長さ L_{Cl} の設定であるが，著者は，**図－３**の断面図のように，コンクリート表面から侵入した塩化物イオン（Cl^-）がコンクリート中の鋼材に到達するまでの間に，ひび割れから片側の垂直方向に塩化物イオンが浸透する距離と定義して，式(2)のように，塩分浸透影響長さ L_{Cl} を，かぶり c（表面から鉄筋までの距離）と，ひび割れから片側の垂直方向への浸透塩分量 $C_{(V)}$と表面から鉄筋方向への浸透塩分量 $C_{(H)}$ の比 α（$= C_{(V)}/C_{(H)}$）の積で計算して求められることを考えた。α が 1.0 に近づくことは，開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，ひび割れの存在による開放面と同等の塩分のひび割れ内部への浸透を意味する。一方，α が 0 に近づくことは，ひび割れの存在に伴う塩分浸透の影響をひび割れ周辺のコンクリートに与えないことを意味する。なお，$C_{(V)}$，$C_{(H)}$は同一期間の浸せきによって浸透した同一領域の塩分量で，その単位は領域当たりの塩分量として kg/m^3 と表す。同一領域とは，塩分浸透面の中心部分における浸透方向の同一の深さまでの領域と定義し，例えば本研究では**図－５**の分析箇所に示すような領域である。

$$L_{Cl} = c \times \alpha \qquad (2)$$

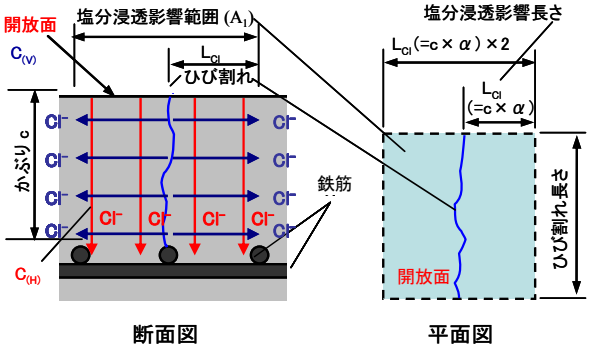
そこで本研究は，ひび割れ周辺の実構造物サイズの供試体を用いた塩分浸せき試験（JSCE G 572）[7]によって，ひび割れから垂直方向への塩分浸透特性を明らかにし，コンクリート面積の適切な設定値を決定するために必要な α の値について，検討することを目的とする。

さらに，提案式が実構造物のひび割れからの様々な塩分侵入形態に対応できるように，著者の研究で検討していない新たな条件として，塩分侵入ひび割れ面数の α への影響についても併せて検討することにした。これは，**図－４**に示すように，ひび割れを有するコンクリート面からひび割れを介して塩分がコンクリート中に浸透するケースを考えた場合，実構造物においては，現実的に鉄筋に対して 1 面からだけではなく複数のひび割れ面からの塩分侵入が至極当然だからである。それはすなわち，外部からコンクリート内部への塩分の供給量が増加することによる，ひび割れから垂直方向への浸透塩分量の増加を意味するものであり，当然その影響も α に考慮する必要があると考えられる。

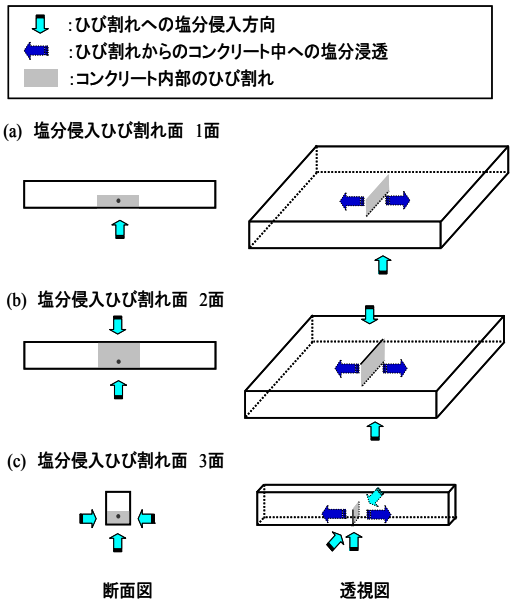
なお，塩分浸せき試験に先んじて，α の値の大きさや



図－2　塩分浸透影響範囲の範囲内と範囲外



図－3　塩分浸透影響範囲の設定



図－4　実構造物の塩分侵入ひび割れ面数

表－１　逆解析のひび割れ深さに関する変数 D(x)

ひび割れの種類	ひび割れ深さ	コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数（cm^2/年）（土木学会コンクリート標準示方書[設計編]）	
		2007年制定	2012年制定 塩化物イオンの水中の拡散係数（化学便覧）
貫通ひび割れ	かぶり	200（$=D_0$）	400（$=D_0$）
非貫通ひび割れ	かぶり ×3/4	150（$=D_0 \times 3/4$）	300（$=D_0 \times 3/4$）
	かぶり ×1/2	100（$=D_0 \times 1/2$）	200（$=D_0 \times 1/2$）
	かぶり ×1/4	50（$=D_0 \times 1/4$）	100（$=D_0 \times 1/4$）

αとひび割れ条件との関係などに予め目処をつけるため，著者の電気泳動実験結果について逆解析を行った。電気泳動実験と浸せき試験の浸透現象の駆動力の違いの影響は，同じ駆動力で得られた浸透塩分量を $C_{(v)}/C_{(H)}$のように正規化することで解消でき，目処をつける概略的な計算を目的とするのであれば，問題はないと考えられる。

2. 逆解析および塩分浸せき試験の概要

2.1 逆解析

逆解析には，著者のひび割れを有する供試体の電気泳動実験 [2)~6)]で得られた値を用い，実験結果 D_{cr} とひび割れ条件（ひび割れ面積比に換算）ならびに D(x)から，提案式を変換した式(3)を用いた逆解析によって適切なコンクリート面積として塩分浸透影響範囲 A_1 を求める。ただし，D(x)を構成するひび割れの影響を表す定数 D_0 は，JSCE 算出方法（2007 年制定）で扱われる 200（cm^2/年）と，水中の塩化物イオンの拡散係数 [8)]で，かつ JSCE 算出方法（2012 年制定）で扱われる 400（cm^2/年）[9)]の 2 種類とする。非貫通ひび割れの場合は，ひび割れ深さに応じて D_0 を考慮し用いる（**表－１**）。

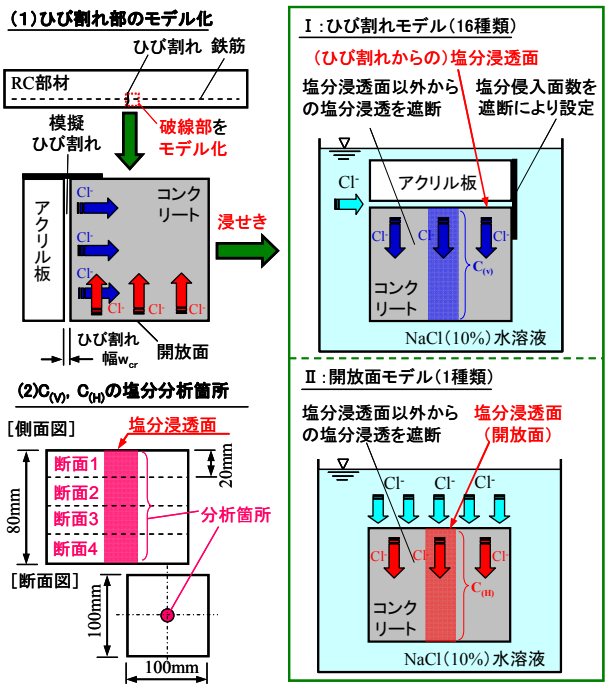
提案式とひび割れから供給される塩分量の関係から，適切なコンクリート面積Aの大きさについて理論的に考察すると，ひび割れに供給される塩分量は，ひび割れ幅とひび割れ長さの積であるひび割れ面積 A_{cr}の大きさと，ひび割れ深さに応じて当該係数が決定されるひび割れ深さに関する変数 D(x)の積（$=A_{cr}\cdot D(x)$）に相関する。一方，ひび割れに供給された塩分量は，ひび割れからコンクリート中に浸透し，提案式のようにひび割れの影響を考慮した拡散係数 D_{cr} とコンクリート面積 A との積（$=D_{cr}\cdot A$）にも相関する。したがって，A_{cr} が大きくなれば D_{cr} が大きくなるという関係が一定であれば，D(x)がひび割れ深さに応じて当該係数が決定されるため，D_{cr} を用いて式(3)より A_1 を算出すると，ひび割れ条件（長さや幅等）が異なる供試体でも A_1 は理論上同一面積に計算されると考えられる。

$$A_1 = \frac{D(x)\times A_{cr}}{D_{cr}} \qquad (3)$$

2.2 塩分浸せき試験

(1) 実験概要

想定するひび割れとひび割れの片側の部材の周辺の領域について，実構造物サイズのモデル化した供試体を**図－５**のように作製し，塩分浸せき試験を行う。モデル化した供試体は，ひび割れ部分に塩分が侵入しその後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加工を施したひび割れモデル(Ⅰ)と，開放面から塩分浸透する開放面モデル(Ⅱ)である。



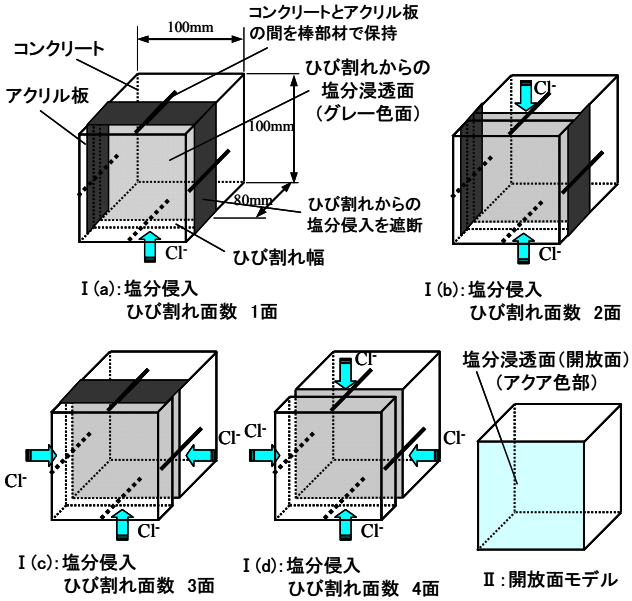
図－５　供試体のモデル化

表－２　配合と材料の性質

W/C (%)	S/C (vol%)	単位量(kg/m³) W	C	S	単位容積質量 (kg/m³)	圧縮強度 (N/mm²)
55	400	257.9	469.0	1576	2200	37.3

表－３　条件項目と設定値

条件項目	設定値
ひび割れ幅	0.1, 0.2, 0.4, 0.8 (mm)
塩分侵入ひび割れ面数	1, 2, 3, 4 (面)



図－６　モデル化供試体の概要

これら供試体から，ひび割れからと開放面からの塩分浸透を別々に検討することができ，$C_{(V)}$はひび割れ条件ごとの値が，$C_{(H)}$は一定値が得られる。

塩分浸せき試験に際し，供試体の作製，設定したひび割れ幅と塩分侵入ひび割れ面数の加工処置，塩分浸せき試験後の供試体の塩化物イオン濃度分析を行う。

(2) 供試体の作製

材料はモルタル（水セメント比＝55%，細骨材とセメントの容積比＝400vol%）を用いる。配合条件を**表－２**に示す。供試体の形状は，塩分浸透面が 100mm×100mm，浸透方向が 80mm となる直方体とする。

(3) ひび割れ幅と塩分侵入ひび割れ面数の加工処理

ひび割れ条件の項目と設定値を**表－３**に示す。**図－６**にモデル化供試体の概要を示す。ひび割れ幅は，0.1，0.2，0.4，0.8mm の 4 種類で，塩分侵入ひび割れ面数は 1～4 面とする。打設後封緘養生 28 日後，アクリル板と供試体との間に棒部材で設定値通りのひび割れ幅を保持する処理を施した後，ゴム製防水粘着テープにて特定のひび割れからの塩分侵入を遮断し，塩分侵入ひび割れ面数の違いを設ける。供試体には塩分浸透面以外の面にエポキシ樹脂を塗布し，塩分浸透を遮断する。

(4) 塩分浸せき試験と塩化物イオン濃度の分析

塩分浸せき試験は，JSCE G 572[7]に準じて，一定塩分濃度（NaCl（10%））水溶液中に供試体を浸せきする。浸せき期間は 3 ヶ月とする。塩化物イオン濃度の分析は，JIS A 1154[10]に準じて，供試体を塩分浸透面から 20mm 間隔に切断した後，切断した各コンクリート断面の中心部分の試料を採取および粉砕と，全塩化物イオンを抽出の後，すみやかに電位差滴定法によって行う。

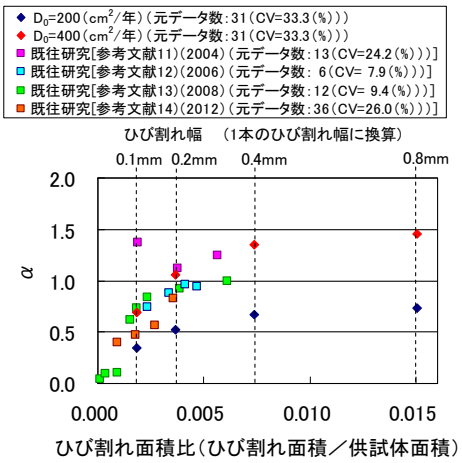
3. 逆解析結果および実験結果

3.1 逆解析結果

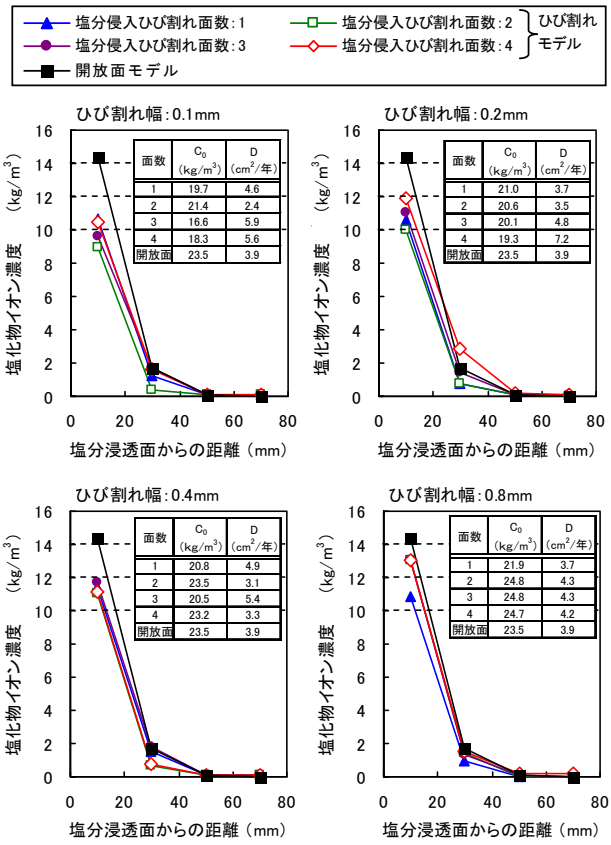
α について，ひび割れ面積比で整理し，**図－７**に示す。使用データは，著者の研究 [2)~6)]の逆解析結果と，比較のための既往研究結果 [11)~14)]である。

α は，著者の研究結果からは，式(3)にて算出した塩分浸透影響範囲 A_1 をひび割れ長さで除し，その半分の長さを塩分浸透影響長さ L_{Cl} として求め（**図－３**平面図参照），かぶり c で除して算出した（式(2)参照）。既往研究結果からは，本研究の浸せき試験と原則的に同様の方法で，ひび割れから塩分浸透させた供試体と，開放面から塩分浸透させた供試体の，各供試体の同一領域の塩化物イオン濃度をそれぞれ $C_{(V)}$，$C_{(H)}$とし，$C_{(V)}/C_{(H)}$で求めた。既往研究結果のひび割れ面積比は，ひび割れ幅に著者の供試体のひび割れ長さを乗じ，供試体面積で除して換算した。ただし，凡例に示すように使用データ数がかなり多く，変動係数（CV）の値からばらつきが小さくないと判断できるため，α とひび割れ面積比との関係の傾向の理解を容易にするために，各逆解析結果ならびに各既往研究結果をそれぞれ同一ひび割れ面積比ごとに平均化した。

図より，α はひび割れ面積比の増加に伴い増加する傾向がみられた。逆解析や一部の既往研究の結果では，最終的に収束する傾向がみられた。その収束値は，逆解析では D_0 が 200（cm^2/年）の場合では約 0.75 に，D_0 が 400（cm^2/年）の場合は約 1.5 になった。既往研究結果では約 1.0 になった。ただし，著者の実験の逆解析結果と比較し，既往研究結果はすべて外力によってひび割れが作製されているため，その加力の影響を受けたコンクリートの $C_{(V)}$は加力の影響を受けないひび割れがないコンクリートの $C_{(H)}$より大きくなることが推測でき，α は本来より大きく計算されていることが推測される。



図－７　逆解析結果



図－８　塩分浸透面からの距離ごとの塩化物イオン濃度

ここで求めたαは，既往研究における加力によるひび割れ作製の過程に伴う算出精度への影響，著者の電気泳動実験結果からの逆解析という間接的な計算過程に伴う算出精度への影響など，精度に影響をおよぼす因子の存在とばらつきが小さくないという事実がある。しかし，その上で，式(3)より A_1 として求められる A_{cr} の増大に伴う D_{cr} の増加の関係について，それは式(2)より実質的にαと考えてもよいためαからひび割れ条件との関係性を定性的に検討すると，提案式とひび割れからの供給塩分量の関係から考察したような一定値に計算されるという理論的な推測とは異なり，α の全データからは，ひび割れ面積が小さい場合は一定ではなく，大きくなるにつれて一定値に収束する傾向があることがわかった。

3.2 実験結果

(1) 塩分浸透面からの距離ごとの塩化物イオン濃度

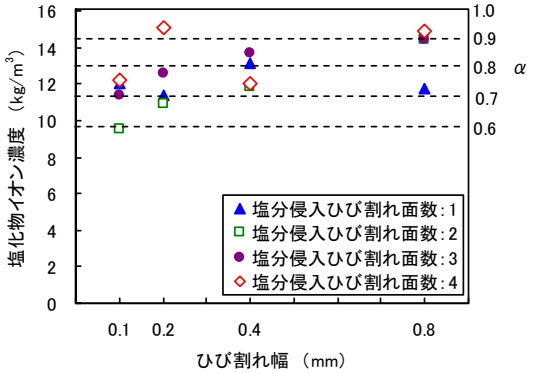
図－８に塩分浸透面からの距離ごとの塩化物イオン濃度を示す。各データの塩分浸透面からの距離の値は，各分析区間の平均値である。また，フィックの第２法則に基づいた拡散方程式の解を用いて回帰分析し，浸せき試験によるコンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 ならびに見掛けの拡散係数 D の算出結果を併記する。

図より，塩分浸透面からの距離が大きくなるにつれて，濃度が低くなることがわかる。特に，0～20mm の濃度から 20～40mm の濃度への低下は顕著にみられ，40～60mm，60～80mm は，0～20mm の濃度よりかなり低いことが確認できる。また，開放面モデルより，ひび割れモデルの方が，全体的に濃度が低い傾向がみられること，ひび割れモデルの場合，ひび割れ幅の拡大や塩分侵入ひび割れ面数の増加の影響を受けて，全体的に濃度が高くなる傾向がみられることがわかる。

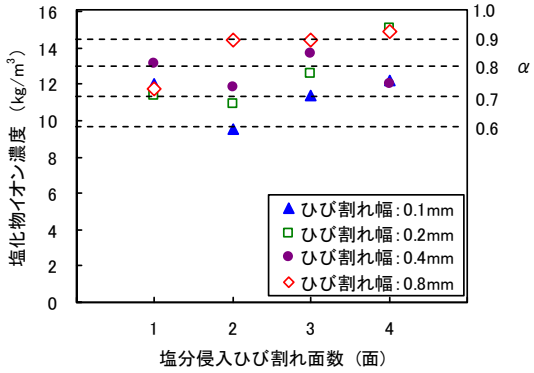
見掛けの拡散係数 D においては，一部かけ離れるものの，ひび割れ幅や塩分侵入ひび割れ面数の違いとの関係に規則性はあまりみられず，開放面モデルとひび割れモデルの値は平均的にほぼ同じ程度である。一方，コンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 は，開放面モデルの場合，あるいはひび割れモデルのひび割れ幅が大きく，塩分侵入ひび割れ面数が多い場合において，大きくなることが確認できる。この C_0 の計算結果から，浸透塩分量は塩分浸透面のコンクリートと NaCl 水溶液の境界面の濃度勾配に伴う塩分供給量に影響されるものと考えられ，それはすなわち塩分浸透面へのひび割れを介した塩分の侵入の容易さ，つまりひび割れ幅や塩分侵入ひび割れ面数の違いに起因すると考えられる。

(2) 塩分侵入ひび割れ面数と塩化物イオン濃度の関係

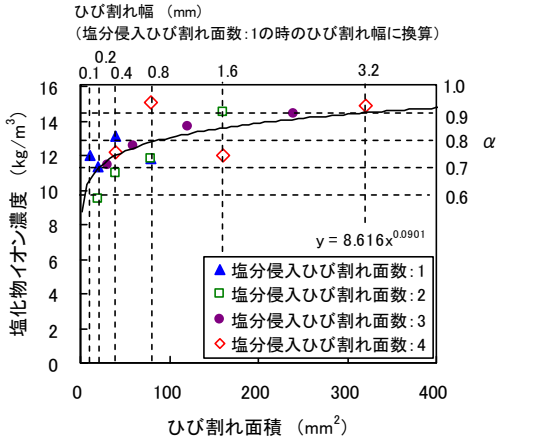
図－９にひび割れ幅と塩化物イオン濃度の関係を示す。**図－１０**に塩分侵入ひび割れ面数と塩化物イオン濃度の関係を示す。ここでの塩化物イオン濃度は，**図－５**に示す分析箇所（断面 1～4 の塩化物イオン濃度）の合計である。なお，開放面モデルの濃度とひび割れモデルの各濃度を比較するための指標として，α の目盛線を併記した（1.0 で開放面モデルの濃度と同値であることを意味する）。



図－９　ひび割れ幅と塩化物イオン濃度の関係



図－１０　塩分侵入ひび割れ面数と塩化物イオン濃度の関係



図－１１　ひび割れ面積と塩化物イオン濃度の関係

図より，ひび割れ幅の拡大や塩分侵入ひび割れ面数の増加に伴い濃度やαが増加する定性的傾向が確認できる。

(3) ひび割れ面積と塩化物イオン濃度の関係

図－１１にひび割れ面積と塩化物イオン濃度の関係を示す。塩化物イオン濃度は，**図－９，１０**と同様である。

ひび割れ幅や塩分侵入ひび割れ面数と塩化物イオン濃度の定量的な関係の検討には，ひび割れ幅とひび割れ長さと塩分侵入ひび割れ面数を乗じたひび割れ面積で整理すると，傾向がより容易に理解できる。**図－１１**より，

全体的な傾向として，塩化物イオン濃度は，ひび割れ面積の増加に伴い最小値（α=0.59）から換算したひび割れ幅で 0.8mm のひび割れ面積まで増加（α=0.93（最大値））し，その後はひび割れ面積が増加しても横ばいになる頭打ち現象の傾向があることがわかる。その傾向を，ひび割れの透水量の計算式[15]において，ひび割れ幅が透水量の素因になることからそのべき乗などで構成されていることを参考に，同じくひび割れ面積比による α の計算式においても，本実験において塩分浸透面へのひび割れを介した塩分の侵入の容易さ，すなわちひび割れ面積比が α の素因になることに基づき，**図－１１**において透水量の計算式と同様にべき乗近似し検討すると，α は，塩分侵入ひび割れ面が 1 面のときに換算したひび割れ幅が 0.05mm で 0.62，0.1mm で 0.66，0.2mm で 0.70，0.4mm で 0.75，0.8mm で 0.79 になることが確認され，最終的にひび割れ幅が 10mm で 1.0 に収束，すなわちひび割れ幅（ひび割れ面積）の大きさの違いの影響を受けないことが推測された。その傾向は**図－７**と定性的に一致した。

以上より，本実験，逆解析および既往研究結果を踏まえると，提案式の塩分浸透影響範囲を考慮したコンクリート面積 A の設定に関しては，式(2)による L_{Cl} 算出のための α はひび割れ面積に応じて変化するため，それに対応した値を設定し用いるのが適切と考えられる。しかし，一方で簡便な評価のために用いることを考えるならば，少なくとも α の最大値としては 1.0 を上限値とするのが妥当と考えられる。

4. まとめ

提案式のコンクリート面積の適切な設定値を決定するために必要な，ひび割れから片側の垂直方向と表面から鉄筋方向への浸透塩分量の比 α の値について検討することを目的とした本研究の範囲内で，以下のことが明らかになった。

(1) 塩分侵入ひび割れ面数の増加に伴い塩化物イオン濃度が増加する傾向がみられた。

(2) 塩分侵入ひび割れ面数をひび割れ幅を含めてコンクリート面積として整理すると，塩化物イオン濃度および α との関係にべき乗近似できる。

(3) 提案式のコンクリート面積の設定に関しては，α はひび割れ面積に応じて変化するため，それに対応した値を用いるのが適切と考えられる。しかし，簡便な評価のためには，少なくとも α の最大値として 1.0 を上限値とするのが妥当と考えられる。

謝辞

本研究の一部は，科研費（若手(B) No.23760430）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) 土木学会:コンクリート標準示方書［設計編］（2007 年制定），pp.119-121，2007

2) 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

3) 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

4) 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，pp.790-795，2012. 7

5) 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

6) 齊藤 準平，柳沼 善明:コンクリートの塩分浸透特性におよぼすひび割れ深さの影響に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，pp.815-820，2011. 7

7) 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]（2010 年版），pp.319-323，2010

8) 日本化学会:化学便覧 基礎編Ⅱ，pp.62-67，2004

9) 土木学会:コンクリート標準示方書［設計編］（2012 年制定），pp.148-154，2012

10) 土木学会:コンクリート標準示方書[規準編 JIS 規格集］（2010 年制定），pp.527-536，2010

11) Win, P. P., Watanabe, M. and Machida, A.: Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete，Cement and Concrete Research，Vol.34，pp.1073-1079，2004

12) 岩波光保，横田弘，Nick R. B.: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，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.917-922，2006.7

13) Ismall，M.，Toumi，A.，Francois，R. and Gagne，R.:Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples，Cement and Concrete Research，Vol.38，pp.1106-1111，2008

14) 久徳貢大，山口明伸，武若耕司，秋元新一:ひび割れを有するモルタルの塩化物イオン浸透特性とひび割れ部における拡散係数の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.853-858，2013.7

15) 土木学会:コンクリート標準示方書[施工編］（2002 年版），pp.32-33，2002