

論文 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

久徳 貢大^{*1}・山口 明伸^{*2}・武若 耕司^{*3}・秋元 新一^{*4}

要旨: ひび割れが生じたコンクリートの塩害環境下における耐久性評価のため、任意のひび割れ幅を導入したモルタル供試体を用いた塩水浸せき試験を実施した。ひび割れを有したモルタル内に浸透した塩化物イオンの濃度分布を2次元的に確認するため、浸せき終了後、供試体をひび割れ面に垂直な断面領域を対象として格子状に分割して塩化物イオン量分布を測定した。全塩化物イオンの2次元濃度分布の実測値を基に、有限要素法による逆解析を行い、ひび割れ部における塩化物イオンの拡散係数を推定した。その結果、ひび割れ幅とひび割れ部から浸透する塩化物イオン量の関係を定量的に評価可能であることが確認された。

キーワード: ひび割れ, 塩害, 見掛けの拡散係数, 表面塩化物イオン濃度, 有限要素法

1. はじめに

塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物は、塩化物イオン（以下、Cl⁻）がコンクリート中に侵入することを想定して設計段階でかぶりを設定し、Cl⁻の見掛けの拡散係数との関係から鉄筋腐食発生時期を予測することで耐久性を確保している。その際、コンクリート部分には初期欠陥が無いことを前提とすることが多いが、実際のコンクリート構造物には、施工不良や乾燥収縮、温度応力等による初期ひび割れが生じていることが少なくない。供用開始前から既にひび割れが生じているコンクリートが塩害環境に曝された場合、コンクリート表面とひび割れ面の2面からCl⁻が侵入するため、健全なコンクリートよりも鉄筋腐食発生時期が早まることが予想される。ひび割れを有するコンクリートのCl⁻浸透特性やひび割れ幅の大小が耐久性に及ぼす影響については、以前から検討が行われている^{例えは1), 2)}が、未だ明らかになっていない部分も多く、定量的な評価手法も確立していない。

コンクリート構造物の長寿命化のためには、新設・既設に拘わらず、ひび割れが生じてしまったコンクリートに対して補修・補強を施して耐久性の回復を図ることが一般的であり、限られた予算の中でひび割れの規模に応じた適切な補修・補強工法を選択するためには、観測されたひび割れ幅の大小が耐久性へ与える影響度を示す定量的な指標が求められる。

そこで本研究では、任意の大きさのひび割れ幅を有するモルタル供試体を用いて、塩害環境を模擬した塩水浸せき試験を実施し、深さ方向に断面2次元的な位置における全Cl⁻量を測定した。この実験から得られた実測値を解として用いた有限要素法による数値解析（以下、FEM

解析）を行い、逆解析によりひび割れ部から侵入するCl⁻の拡散係数を推定した。これにより、ひび割れを有するコンクリートの塩害に対する耐久性を明らかにすることと、そのために、ひび割れの影響度を定量評価することを目的とし、実験のおよび解析的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 使用材料と供試体配合

セメント種類の違いによるCl⁻浸透特性も検討するため、結合材には普通ポルトランドセメント（以下、OPC）、早強ポルトランドセメント（以下、HPC）に加え、混和材のフライアッシュII種（以下、FA）と高炉スラグ微粉末（以下、GGBS）、細骨材には富士川産川砂を使用した。表-1に結合材の物性と化学組成を示す。

表-1 使用結合材の物性と化学組成

結合材	OPC	HPC	FA	GGBS	
密度(g/cm ³)	3.15	3.14	2.25	2.90	
化学組成 (mass%)	SiO ₂	18.0	16.7	65.0	30.7
	Al ₂ O ₃	4.5	4.0	19.2	14.1
	Fe ₂ O ₃	4.3	2.9	5.7	0.4
	CaO	66.9	69.7	5.0	44.1
	MgO	1.6	0.9	1.1	7.4

実験に用いた4種類のモルタル供試体の配合を表-2に示す。単位水量は275kg/m³一定とし、NとHはそれぞれ普通セメントモルタルと早強セメントモルタル、FBはOPC80%とFA20%を混合してフライアッシュセメントB種相当、BBはOPC50%とGGBS50%を混合して高炉セメントB種相当として使用したモルタルである。

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 (学生会員)

*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 教授 博(工) (正会員)

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

*4 日研高圧平和キドウ (株) 管理部 (非会員)

表-2 供試体配合

配合名	水結合材比 (%)	単体量(kg/m ³)						フロー (mm)	空気量 (%)	ひび割れ導入時(材齢14日)の圧縮強度(N/mm ²)
		W	OPC	HPC	FA	GGBS	S			
N	50	275	550	-	-	-	1453	176.8	3.5	41.6
H			-	550	-	-	1452	172.2	2.3	53.3
FB			440	-	110	-	1416	175.2	2.0	35.2
BB			275	-	-	275	1434	171.0	2.9	24.2

※略号 W:水, S:細骨材

表-3 試験開始までの工程フロー

材齢(日)	0	1	1~7	7	7~14	14~19	19~23	23~27	27	28
工程	打設	脱型(合板外し)	水中養生	切断	気中養生	ひび割れ導入幅の調整	エポキシ樹脂塗布	エポキシ樹脂硬化	水浸せき	塩水浸せき開始

(2) 供試体の作製方法

ひび割れを導入するモルタル供試体の型枠は、図-1に断面図を示すように、内径100mm×長さ250mmの塩化ビニル管(以下、塩ビ管)と合板をコーキング材により垂直に接着して作製した。

供試体打設から試験開始までの工程フローを表-3に示す。打設後に湿封養生を1日間施し、その後合板を取り外し、塩ビ管は付けたままで所定の期間(N, FB, BBは7日間, Hは3日間)水中養生を施した。水中養生後は図-1に示した寸法で4分割に切断した。切断された最上層と最下層の部分(高さ25mm)は使用せずに中央層の2つ(高さ100mm)を使用供試体とした。従って、使用供試体の形状は塩ビ管の外径が144mm, モルタル部分がφ100×100mmの円柱供試体となる。このとき、中央部の切断面を上面(試験時の浸せき面)とし、その反対面を底面、塩ビ管に接している面を側面と称する。さらに、切断後は気中養生を施し、材齢が14日を迎えた時点で供試体にひび割れの導入を開始した。

ひび割れの導入方法は、藤井らの示す方法³⁾を参考に、载荷試験機を用いたコンクリートの引張試験の要領で、割裂による貫通ひび割れを導入するものとした。このときに生じたひび割れは塩ビ管によって拘束され、除荷後も形状は維持される。ひび割れが生じた時点で除荷し、接触型のひび割れ測定器にてひび割れ幅の大きさを確認した。この測定器は、専用カメラで測定面を撮影することで測定範囲内(約10mm×10mm)の平均ひび割れ幅が検出可能である。専用カメラにて撮影した写真の一例を写真-1に示す。導入するひび割れ幅の目標値は、0.05mm, 0.10mm, 0.15mm, 0.20mmの4レベルとし、载荷による幅の調整、分類を行った(以下、ひび割れレベル)。表-4に示すようにひび割れ幅の分類は、接触型測定器によるひび割れ中心付近の平均ひび割れ幅と、1cm間隔でのクラックスケール(ルーペ型)による測定の方法2種類の方法で実施した。ただし、接触型測定器では幅0.05mm程度以下のひび割れが適切に検出できなかったため、幅

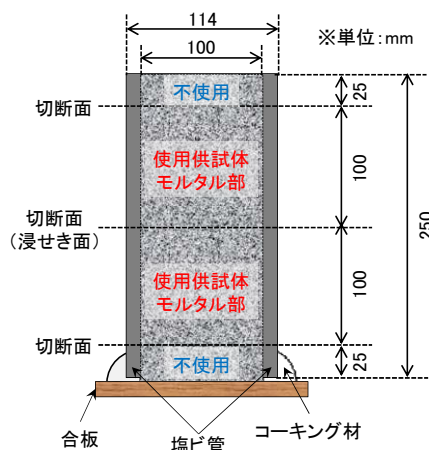


図-1 供試体概要図

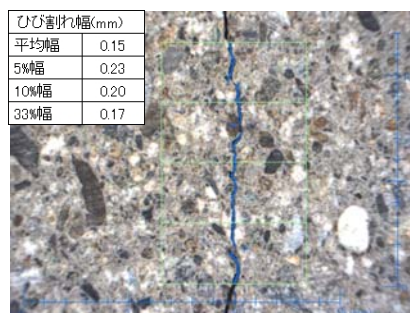


写真-1 検出されたひび割れの例(幅0.15mm)

表-4 ひび割れ幅のレベルの分類

ひび割れレベル		0.05mm	0.10mm	0.15mm	0.20mm	
接触型測定器の検出値(mm)		検出不能	0.10	0.15	0.20	
クラックスケール	5点平均値(mm)	0.052	0.081	0.157	0.223	
	範囲(mm)	最小値	0.032	0.058	0.112	0.172
		最大値	0.062	0.122	0.230	0.290

0.05mmについてはクラックスケールによる測定のみで評価し、分類した。このとき、接触型測定器の検出値に対するクラックスケールの測定値(平均値)の差を比較すると、ひび割れ幅が大きいほど差が大きくなることが確認された。なお、クラックスケールの測定値は各々の供試体での測定点5点×供試体数48体の平均値である。

所定のひび割れ幅まで導入後、Cl⁻浸透面以外からのCl⁻浸透を防ぐために、供試体の上面における塩ビ管とモルタル部の隙間、および底面をエポキシ樹脂により被覆した。また、乾燥状態からの吸水作用によるCl⁻侵入の影響（濃度勾配による拡散以外の要因）を取り除くため、あらかじめ供試体を24時間水中に浸せきし、湿潤状態とした後、塩水浸せきを開始した。

2.2 試験方法

塩水浸せき試験は、塩水（10%濃度 NaClaq）中に供試体を所定の期間（3、6ヶ月）浸せきするものとし、Nのみは12ヶ月まで浸せきを実施し、期間を3水準とした。

図-2にひび割れ面に垂直な中央位置の断面図（右半分）を示す。浸せき終了後の供試体は、深さ方向（上面に対して垂直方向）に5段階、水平方向（ひび割れ面に対して垂直方向）に4段階の短冊状の20分割とした。なお、奥行方向は試験片の端部約1cmを除いた長さとし、左右対称の試験片は、混合粉砕して試料を平均化した。全Cl⁻量の測定は、JIS A-1154に準拠して実施し、上面とひび割れ面の2面からCl⁻が浸透した場合の2次元濃度分布を求めた。

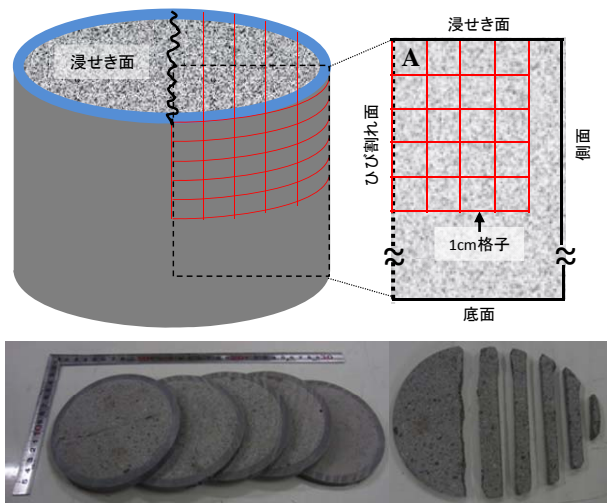


図-2 供試体分割時の格子20点と分割後の試験片（ひび割れ面に垂直な中央位置での半断面図）

3. 実験結果

3.1 拡散係数と表面Cl⁻濃度（ひび割れ無し供試体）

ひび割れを導入しなかったモルタル供試体の上面から深さ方向への全Cl⁻の1次元濃度分布をFickの拡散方程式の解にフィッティングさせて算出した見掛けの拡散係数と表面Cl⁻濃度を表-5に示す。浸せき期間3ヶ月における見掛けのCl⁻拡散係数は、NとFBがほぼ同程度の値であったが、浸せき期間6ヶ月になるとNの拡散係数の差が殆ど変化しなかったのに対し、FBの拡散係数は大きく低下している。これは浸せき期間中にポズラン反応が進行してモルタル内部の細孔構造が緻密になったことが

一因と考えられる。一方でBBの拡散係数は、いずれの浸せき期間においても他の配合よりも低い値を示しており、優れた遮塩性を有していることが確認された。一方で、Hは比較的高い拡散係数となっていた。表面Cl⁻濃度については、BBの表面Cl⁻濃度が他の配合よりも高く算出された。この現象はBBの拡散係数とも関連しており、表面Cl⁻濃度が、環境条件のみならず、対象とする材料の特性によっても影響を受けることを示唆している。

なお、これらのひび割れ無し供試体のパラメータは、後述するFEM解析を行う際に入力値として使用した。

表-5 ひび割れ無し供試体の拡散係数と表面Cl⁻濃度

	浸せき期間	N	H	FB	BB
拡散係数 (cm ² /year)	3ヶ月	2.61	3.03	2.55	0.72
	6ヶ月	2.29	2.90	1.28	0.36
表面Cl ⁻ 濃度 (kg/m ³)	3ヶ月	20.79	21.86	18.71	30.17
	6ヶ月	19.92	21.39	22.38	40.24

3.2 全Cl⁻の2次元濃度分布（ひび割れ有り供試体）

全Cl⁻の2次元濃度分布図の例として、N（ひび割れレベルが0.05mm、0.10mm、0.15mm、0.20mm）の塩水浸せき6ヶ月後における測定結果を図-3、図-4、図-5、図-6にそれぞれ示す。（図中の括弧内の数値はクラックスケールで測定されたひび割れ幅）上面からの深さ方向だけでなくひび割れ面に垂直な方向に対しても濃度勾配が生じており、ひび割れ幅の大きい順に内部のCl⁻量が多くなっていることが確認できる。特に、ひび割れ面近傍である5mm位置にてCl⁻量の顕著な違いが表れている。

次に、H、FB、BB（ひび割れレベルが全て0.20mm）の塩水浸せきを6ヶ月後における測定結果を図-7、図-8、図-9にそれぞれ示す。同じひび割れレベル0.20mmで材料の違いによる塩分浸状況の違いをみると、FBやBBの場合は拡散係数が低いため、ひび割れが存在する場合でもある程度Cl⁻浸透を抑制していることが確認できる。逆に、Nよりも拡散係数の高いHはひび割れ面からのCl⁻浸透に対しても遮塩性が低くなっている。

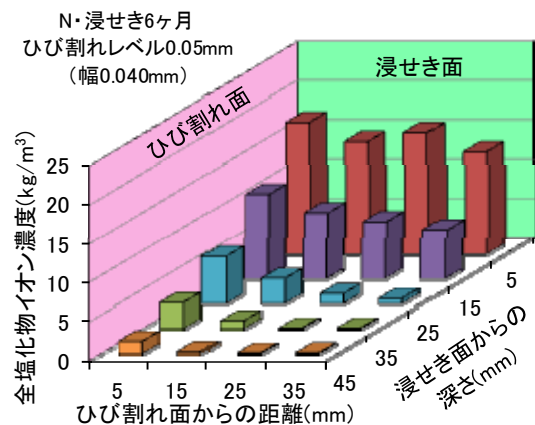


図-3 塩化物イオン濃度分布図
N・ひび割れレベル 0.05mm

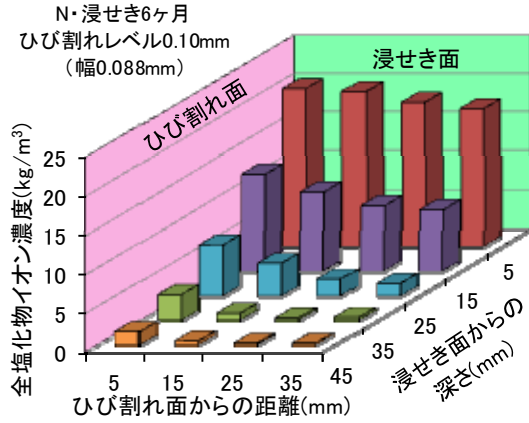


図-4 塩化物イオン濃度分布図
N・ひび割れレベル 0.10mm

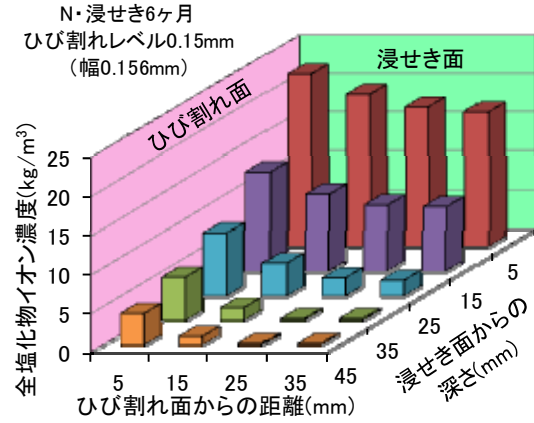


図-5 塩化物イオン濃度分布図
N・ひび割れレベル 0.15mm

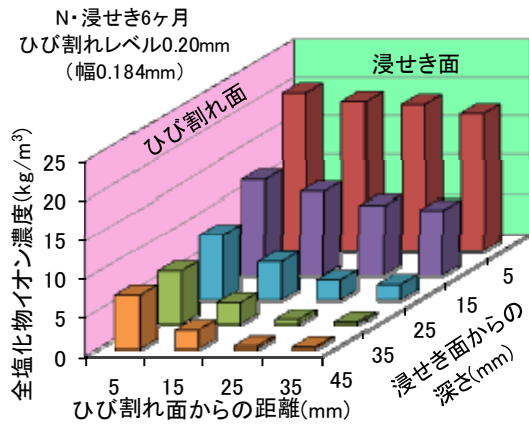


図-6 塩化物イオン濃度分布図
N・ひび割れレベル 0.20mm

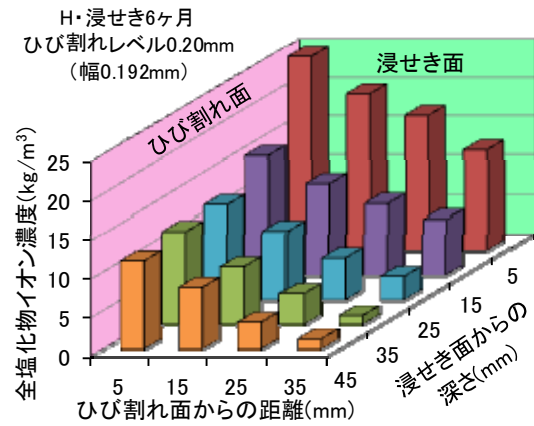


図-7 塩化物イオン濃度分布図
H・ひび割れレベル 0.20mm

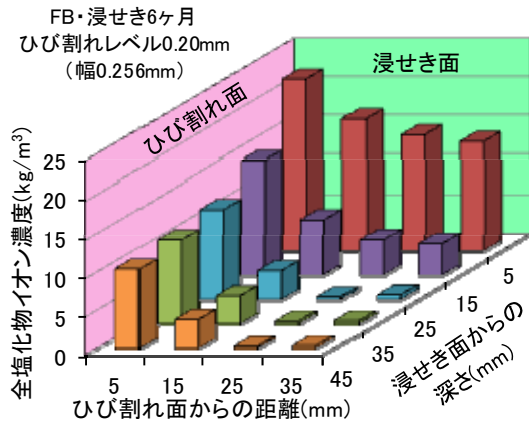


図-8 塩化物イオン濃度分布図
FB・ひび割れレベル 0.20mm

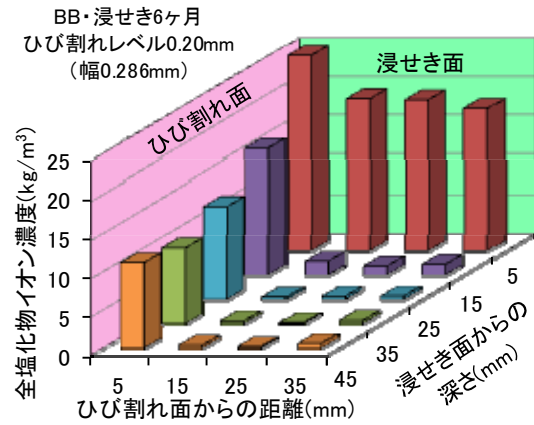


図-9 塩化物イオン濃度分布図
BB・ひび割れレベル 0.20mm

ただし、ひび割れ面近傍では、深さ方向に濃度分布が生じており、ひび割れ面近傍における Cl^- 濃度は、表面 Cl^- 濃度同様に N や H よりも大きい状態となることが確認された。

また、ひび割れ面と浸せき面から 5mm の測定点 (図-2 中の A 点) で最高濃度となる結果になっている。 Cl^- 浸透面が浸せき面とひび割れ面の 2 面となっていることから当然であるが、同一条件下での測定結果が他の箇所と比較して大きくばらつく結果となった。これは、浸せ

き中にひび割れ開口部に固形として付着した塩分も含んで測定されたことが原因と考えられる。通常、表面に付着した固形塩分は、測定前にエタノール等を用いて除去されるが、A 点のひび割れ面側 (ひび割れ端部) に付着した塩分は十分に除去することが困難であったことによる。従って、 Cl^- 浸透量の評価ならびに後述の逆解析の際には A 点を除く 19 測定点によって評価した。

19 測定点の合計 Cl^- 量とひび割れレベルの関係を図-10 に示す (ひび割れレベル 0mm はひび割れ無し供試体の

値)。表-3 に示したように各々の配合の拡散係数に応じて遮塩性の違いも現れているが、いずれの配合においてもひび割れ幅の増大に伴って、ほぼ同様の傾向でCI浸透量が増加していることが確認できる。これは、既往の文献²⁾でも指摘されているように、ひび割れ幅に応じてひび割れ部分の拡散係数が異なるためと考えられる。

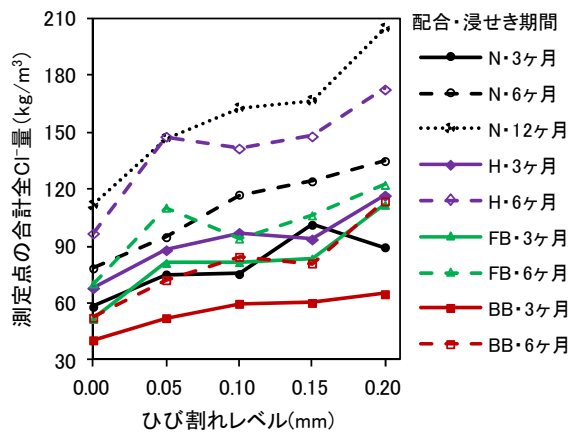


図-10 ひび割れレベルと合計全 Cl 量の関係

4. FEM 解析

4.1 解析の概要

(1) ひび割れを有する供試体のモデル化

上記の実験で用いたひび割れを有する供試体をモデル化し、3次元FEMによる解析を行った。図-11に解析モデルの概要を示す。解析モデルはひび割れ面に垂直な中央位置の半断面を対象とした。CIが浸せき面から深さ方向へ拡散する現象とひび割れ面から水平方向へ拡散する現象を再現する必要があるため、ひび割れ部とモルタル部（健全部）の隣接する2部材から成るモデルとして解析を行った。モルタル部の寸法はひび割れを有する供試体と同値とし、モルタル部の拡散係数を D_0 、ひび割れ部の拡散係数を D_{cr} として設定した。

(2) 解析方法

解析方法は逆解析とし、そのフローチャートを図-12に示す。 D_0 と表面CI濃度は、表-5で示したひび割れ無し供試体における実測値を入力値として用いた。一方で D_{cr} はひび割れ面からのCI浸透の影響度を示す指標であり、ひび割れ幅の大きさに依存する未知数となる。図-3～図-9で示したように、塩水浸せき試験から得られた実測値を正解値として扱い、解析値と実測値と比較して差が一定の判定値に収まるまで入力し、 D_{cr} を段階的に変化させた。入力値のときの D_{cr} を入力 D_{cr} 、入力 D_{cr} の中で判定値を満たし、実測値に最も近い値を出力したときの D_{cr} を推定 D_{cr} として算出を行った。

境界条件は図-11に示したように、ひび割れ部とモルタル部の上面を濃度伝達境界（浸せき面）および濃度固定境界（表面CI濃度）とし、それ以外の面は非濃度伝達

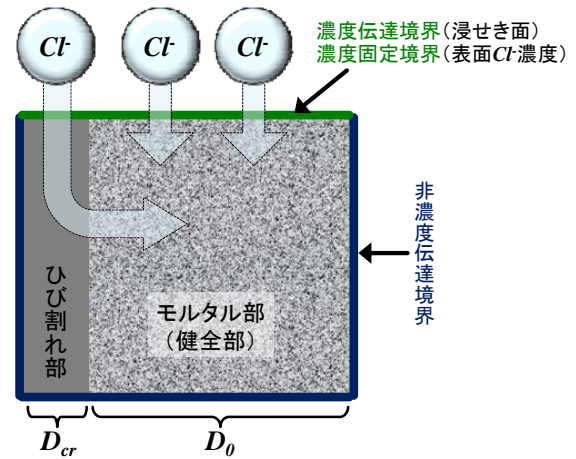


図-11 解析モデルの概要

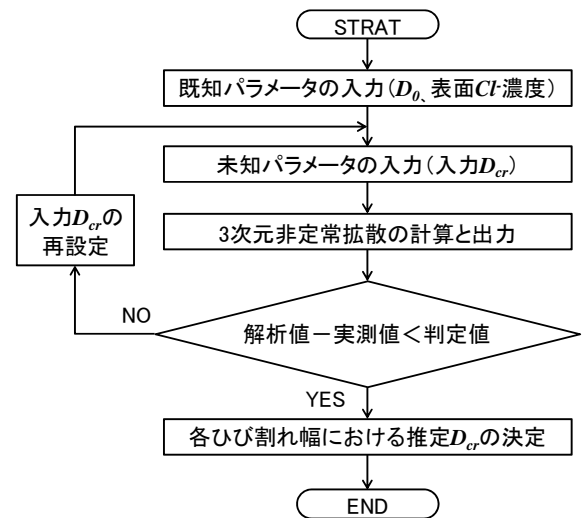


図-12 逆解析のフローチャート

境界として設定した。

4.2 解析結果

推定 D_{cr} の求め方の一例として、浸せきを6ヶ月行ったNの各ひび割れレベルにおける入力 D_{cr} と実測値から解析値を差し引いた値の関係を図-13示す。横軸は段階的に変化させた入力 D_{cr} 、縦軸はCI量の実測値（19測定点）の合計した全CI量から解析値（実測値の座標に合わせた19点）の合計した全CI量を差し引いた値の絶対値となっている。各ひび割れ幅のときに差が判定値（ 1.0kg/m^3 ）以下に収まるまで入力 D_{cr} を変化させた。なお、3次元解析をするにあたって、解析値は奥行方向で平均化した値を用いて実測値と比較した。ひび割れ幅が小さい順に入力 D_{cr} が最小差となり、ひび割れ幅が大きいほどひび割れ面からのCIの拡散の影響度が大きくなる傾向を表現できていることが確認された。

推定 D_{cr} が得られたときの各点における実測値と解析値の全CI量の関係を図-14に示す。プロット点の数は配合4種、浸せき期間2種、ひび割れ幅4種および20測定点（解析点）の合計640点である。実測値と解析値の合計差が最小のときの各点の差を示しており、各点での差

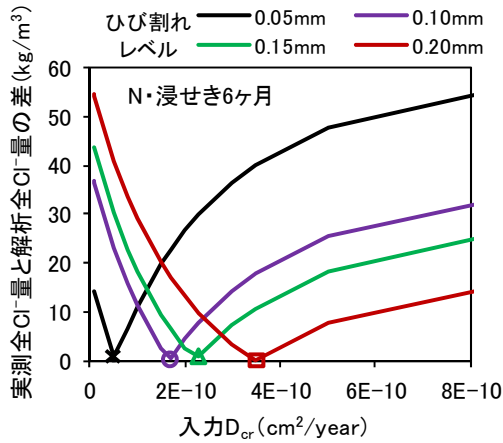


図-13 推定 D_{cr} の求め方の一例

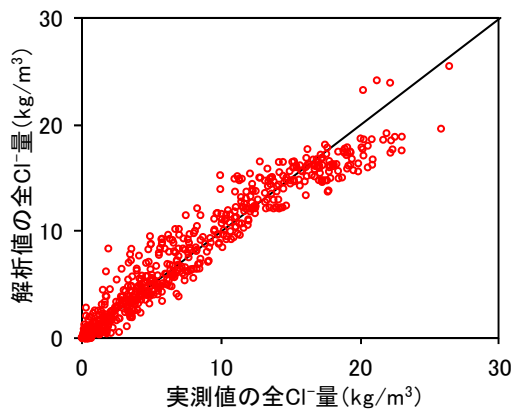


図-14 推定 D_{cr} のときの実測値と解析値の関係

でもみても概ね実測値と解析値が一致していることが確認された。浸せき面あるいはひび割れ面のように Cl 濃度が高い点にて、実測値と解析値の差が大きくなったが、これは解析の際の表面 Cl 濃度にひび割れ無し供試体の結果を用いていることが主因であると考えられる。なお、実測値と解析値の最大差は、ひび割れ面近傍で $+6.5\text{kg/m}^3$ 、平均値は $\pm 1.0\text{kg/m}^3$ の範囲内であった。

図-15 に各配合、浸せき期間のときの推定 D_{cr} とひび割れレベル（ひび割れレベル 0mm は D_0 の値）の関係を示す。図-10 で示した Cl 浸透量の結果と同様に、ひび割れ幅の増大に伴い、推定 D_{cr} が増加する傾向が認められた。しかしながら、配合の種類や浸せき期間に拘わらず各ひび割れレベルで推定 D_{cr} は同程度であり、加えて、ひび割れ無しからひび割れレベルが 0.05mm になると急激に推定 D_{cr} が増加していることから、遮塩性の優れる高炉セメントを用いたコンクリートであってもひび割れが生じた場合には、影響度を十分に考慮しなければならないことが予想された。また、今回の検討範囲内において、推定 D_{cr} は、ひび割れレベル 0.05~0.15mm 程度の範囲内ではほぼ同様であり、それよりも幅が大きくなると急激に推定 D_{cr} が増加することが確認された。これは、ひび

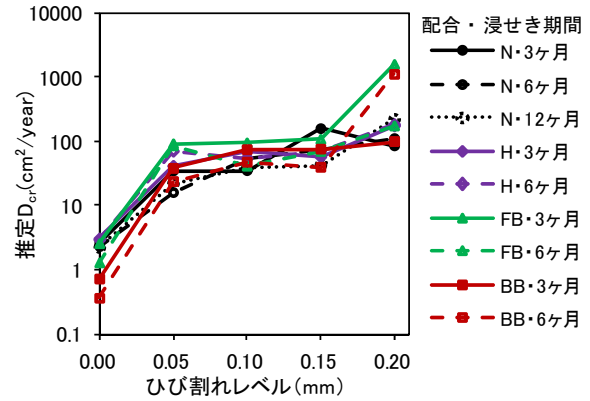


図-15 ひび割れレベルと推定 D_{cr} の関係

割れ幅に応じて、内部でのひび割れの連続性が異なることが原因と考えられ、ひび割れ幅が 0.15mm よりも大きくなると断面内におけるひび割れの連続性が急激に増加することが原因と考えられる。

5. まとめ

本研究では、ひび割れ部における Cl 浸透特性の定量評価を目的とした検討を行い、以下の結論が得られた。

- (1) ひび割れ内部の拡散係数は、モルタルの拡散係数に拘わらず、ひび割れ幅によって評価できることが確認できた。
- (2) ひび割れは、その幅が 0.05mm 程度であってもモルタルの遮塩性に影響を与える。ただし、モデル化したひび割れ部の拡散係数を逆解析した結果、ひび割れ部の拡散係数は、幅 0.05~0.15mm の範囲ではほぼ同一であり、それよりも幅が大きくなると急激に増加することが確認できた。

実現象の場合には、濃度拡散だけでなく、水分移動に伴う Cl 浸透が生じているため、今後さらに、ひび割れ部分からの水分移動が Cl 浸透に及ぼす影響についても検討し、耐久性を評価する必要がある。

参考文献

- 1) 前田 聡, 武若 耕司, 山口 明伸, 北畠 祐之: ひび割れを有するコンクリート中への塩化物イオン拡散に関する基礎的研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会, V-672, pp1343-1344, 2002.9
- 2) 塚原 絵馬, 加藤 佳孝, 魚本 健人: 塩化物イオンの移動評価におけるひび割れのモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, pp573-578, No.1, 2002
- 3) 藤井 隆史, 山本 昌宏, 谷村 成, 安藤 尚, 綾野 克紀: 微細なひび割れを持つコンクリート試験体の作製方法と試験方法, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-451, pp901-902, 2012, 9