

論文 貫通・非貫通ひび割れを有するコンクリート中における水分の移動

大原 涼平*1・下村 匠*2

要旨：ひび割れ形状とひび割れ表面の水分伝達特性がコンクリート中の水分移動現象に及ぼす影響を把握することを目的とし、ひび割れ間隔を一定としてひび割れ幅とひび割れ深さを変化させた貫通・非貫通ひび割れを有するコンクリート供試体を用いた水分透過実験を行った。また、2次元水分移動解析による実験結果のシミュレーションを行った結果、ひび割れ深さの大きさにかかわらずひび割れ幅が水分移動に影響を及ぼすこと、貫通・非貫通ひび割れではひび割れ面での水分伝達特性が大気に接する面と異なることの2つのことが示唆された。

キーワード：貫通ひび割れ, 非貫通ひび割れ, 水分移動, 水蒸気拡散

1. はじめに

コンクリートのひび割れは、コンクリートの物質透過抵抗性を損なうことにより、構造物の耐久性に影響を及ぼす。近年、コンクリート中の物質透過現象を精度よく設計に反映するために数値解析を用いた定量化手法に関する研究が行われている¹⁾。西らは、水蒸気の拡散移動の場合、ひび割れ形状が水分流束に及ぼす影響はひび割れひずみにより表されることを明らかにし、1次元水分移動数値シミュレーションにより貫通ひび割れを有するコンクリートの物質透過抵抗性を評価している²⁾。ここに、ひび割れひずみとは、単位長さあたりに含まれるひび割れ幅の総和を単位長さで除した量である(図-1)。西らは、今後の課題として、ひび割れひずみと水分流束が線形関係であることの幅広い検証、ひび割れ表面における水分伝達特性の解明の2点を挙げている。

小林らは、貫通ひび割れを対象として、水分伝達特性がひび割れ幅とコンクリート表面からの距離に依存するとしたモデルを提案している³⁾が、実験による精緻な検証は行われていない。

これらの課題は、貫通ひび割れだけでなく非貫通ひび

割れをも対象としたコンクリートの物質透過抵抗性の定量化手法を構築するために解決すべき点である。

本研究では、水蒸気移動を対象としてひび割れ形状がひび割れ内の物質移動に及ぼす影響とひび割れ表面における物質伝達特性の評価を目的とし、貫通・非貫通ひび割れを有するコンクリートの水分透過実験を行い、2次元水分移動数値シミュレーションと比較することで、西ら小林らにより提案された仮定の妥当性を検討した。

2. 貫通・非貫通ひび割れを有するコンクリートの水分透過実験

2.1 実験概要

西らの実験方法²⁾に準じ、貫通・非貫通ひび割れを模擬したコンクリート供試体を2つの異なる相対湿度の空気に接する状態にし、水分を一方に透過させる実験を行った。ひび割れの様態は、ひび割れ幅、ひび割れ間隔およびひび割れ深さを変化させた。ひび割れ深さは、透過方向のコンクリートの厚さをひび割れ深さで除した貫通率を指標として整理する場合もある(図-1)。

以下に示す項目に着目し、ひび割れの様態がコンクリート中の水分移動に及ぼす影響を検討した。

(1) ひび割れ幅

ひび割れ間隔とひび割れ深さを一定とし、ひび割れ幅を変化させる。

(2) ひび割れ深さ

ひび割れ幅とひび割れ間隔を一定とし、ひび割れ深さを変化させる。

(3) ひび割れ部分のみを透過する水分

ひび割れ幅を変化させ、ひび割れを有するコンクリート中のコンクリート部分とひび割れ部分を透過する水分を個別に評価する。

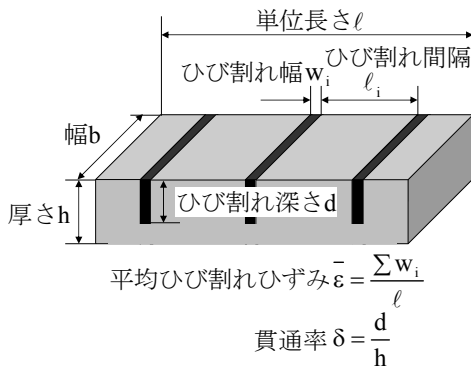


図-1 ひび割れ形状の概要

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 教授 (正会員)

表-1 示方配合

Gmax (mm)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	AE 減水剤
10	50	175	350	941	948	C×0.2%

(4) ひび割れ表面とひび割れ内空間との間の水分伝達
ひび割れ幅とひび割れ深さを変化させ、数値シミュレーションによりひび割れ表面における水分伝達の有無が供試体全体の水分移動に及ぼす影響を評価する。

2.2 実験方法

実験に用いたコンクリートの示方配合を表-1 に示す。供試体寸法が小さいため、粗骨材は最大骨材寸法が10mm のものを用いた。供試体は材齢1日 で脱型し、28日間水中養生した。その後、供試体と試験容器との固定を行い、水分透過実験を開始した。

供試体は、ひび割れの無い供試体(normal), 貫通ひび割れを有する供試体(tc_series), 中空の角柱アルミを用いた供試体(al_series), 非貫通ひび割れを有する供試体(sc_series)の4種類とした。主な供試体の形状を図-2 に示す。貫通・非貫通ひび割れ幅 w は、1.0, 0.5, 0.25, 0.1mm の4種類とし、非貫通ひび割れではひび割れ深さ d を30, 20, 10mm の3種類とした。ひび割れ間隔 ℓ_i は、すべて60mm で統一した。実験ケースを表-2 に示す。

貫通ひび割れを有する供試体は、同時期に打設した4個のコンクリート角柱にひび割れ幅に相当する厚さのアルミ板(板厚 1.0, 0.5mm) または PEN フィルム(板厚 0.25, 0.10mm) を挟み込み、コンクリート角柱をアルミ製L型アングルと固定することで模擬的な貫通ひび割れを導入した。挟み込んだアルミ板とPEN フィルムは、水分透過実験開始前にひび割れから取り除いた。

非貫通ひび割れを有する供試体は、打設時にひび割れ幅に相当する厚さのアルミ板(板厚 1.0, 0.5mm) またはPEN フィルム(板厚 0.25, 0.10mm) を所定の深さまでコンクリートに挿入し、脱型時に硬化したコンクリートから板を引き抜くことで模擬的な非貫通ひび割れを導入した。

角柱アルミを用いた供試体は、ひび割れ部分のみの水分透過を調べるために作製した。貫通ひび割れを有する供試体と同様の方法で4個の角柱アルミをひび割れ幅に相当する間隔において固定することで模擬的な貫通ひび割れを導入した。

供試体の設置状況を図-3 に示す。供試体側面をエポキシ樹脂を用いて防水加工すると同時にひび割れ幅を維持するためにアルミ製L型アングルで固定した。エポキシ樹脂硬化後、シリコンを用いてアルミ製L型アングルを600cm³程度の水を入れたプラスチック容器に固定し、

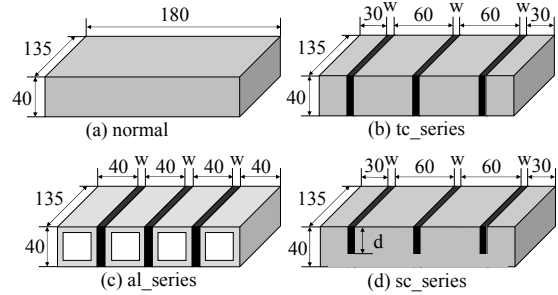


図-2 主な供試体の形状

表-2 実験ケース

供試体名	ひび割れの種類	w	d	ℓ_i	$\bar{\varepsilon}$	δ
normal	ひび割れ無し	-	-	-	-	-
tcw1.0	貫通ひび割れ (凹凸無)	1.0	40	60	0.017	100
tcw0.5		0.5	40		0.008	100
tcw0.25		0.25	40		0.004	100
tcw0.1		0.1	40		0.002	100
alw1.0	貫通ひび割れ (角柱アルミ)	1.0	40	60	0.017	100
alw0.5		0.5	40		0.008	100
alw0.25		0.25	40		0.004	100
alw0.1		0.1	40		0.002	100
scw1.0d10	非貫通ひび割れ (凹凸無)	1.0	10	60	0.017	25
scw1.0d20			20		0.017	50
scw1.0d30			30		0.017	75
scw0.5d10		0.5	10	60	0.008	25
scw0.5d20			20		0.008	50
scw0.5d30			30		0.008	75
scw0.25d10		0.25	10	60	0.004	25
scw0.25d20			20		0.004	50
scw0.1d10		0.1	10	60	0.002	25
scw0.1d20			20		0.002	50

w : ひび割れ幅 [mm]
d : ひび割れ深さ [mm]
 ℓ_i : ひび割れ間隔 [mm]
 $\bar{\varepsilon}$: 平均ひび割れひずみ
 δ : 貫通率 [%]

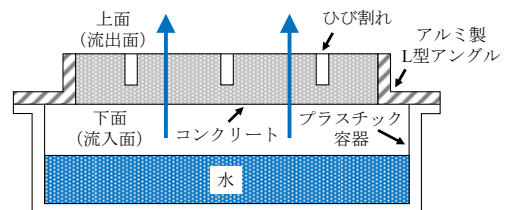


図-3 供試体の設置状況

水分を供試体下面（流入面）から上面（流出面）へ1次元的に透過させた。なお、非貫通ひび割れを有する供試体では、ひび割れが存在する面を上面とし、ひび割れの無い面を下面とした。

供試体を固定した容器を温度 20℃、相対湿度 50%の恒温室に静置し、定期的に容器ごと質量を電子天秤（測定精度 0.01g）で測定した。測定質量の変化から供試体を透過した水分量と供試体の乾燥量の合計である流出量を求めた。容器中の相対湿度は、静電容量式の温湿度計を用いて、下面から約 5mm の位置を定期的に測定した。

2.3 貫通ひび割れが供試体の水分透過性状に及ぼす影響

貫通ひび割れを有するコンクリート供試体 (tc_series) と角柱アルミ供試体 (al_series) の流出量の経時変化を図-4 に示す。コンクリート供試体は、実験開始から 20 日までは曲線の傾きが徐々に減少し、20 日以降の傾きの減少量は非常に小さいことが確認できる。一方、角柱アルミ供試体は、実験開始から曲線の傾きは一定で定常な流れであることが確認できる。この曲線の傾きの減少は、供試体の乾燥による質量減少の影響が大きいと考えられる。以下では、ひび割れが及ぼす影響のみを検討するため、供試体の乾燥の影響が小さく、水分移動が定常な状態に落ち着く実験開始から 20 日以降の測定結果を用いることとする。

貫通ひび割れを有する供試体を透過する水分流束におけるひび割れの寄与分を図-5 に示す。水分流束は、測定質量の単位時間当たりの変化量を上面面積で除した値とし、実験開始後 20 日から 33 日までに計測された水分流束の平均値を用いている。また、ひび割れの影響のみを抽出するために、水分流束はひび割れが無い供試体の水分流束を差し引いて表している。図-5 より、供試体を透過する水分流束は、貫通ひび割れが存在することにより増加するが、本実験の範囲ではコンクリート供試体にひび割れ幅の影響は認められなかった。一方、角柱アルミ供試体では供試体を透過する水分流束は、ひび割れ幅が大きくなるほど線形的に増加する傾向が得られている。また、コンクリート供試体の水分流束は角柱アルミ供試体より大きいことから、ひび割れ表面からひび割れ内空間への水分透過による水分流束の増加を示唆している。

2.4 非貫通ひび割れが供試体の水分透過性状に及ぼす影響

ひび割れ幅 0.5mm の非貫通ひび割れを有する供試体の流出量の経時変化を図-6 に示す。貫通ひび割れの結果と同様に実験開始から 20 日以降は、供試体の乾燥の影響が小さく、水分移動が定常な状態に近づく傾向が確認できた。

ひび割れ幅と供試体の水分流束の関係を図-7 に示す。

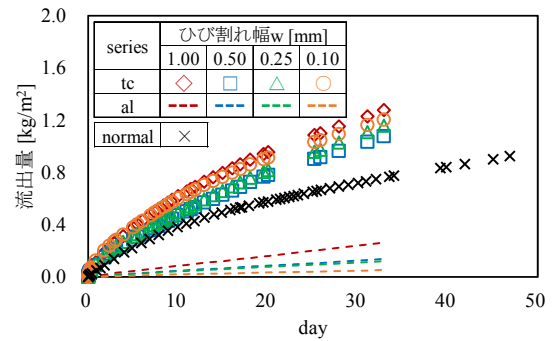


図-4 貫通ひび割れを有する供試体の流出量の経時変化

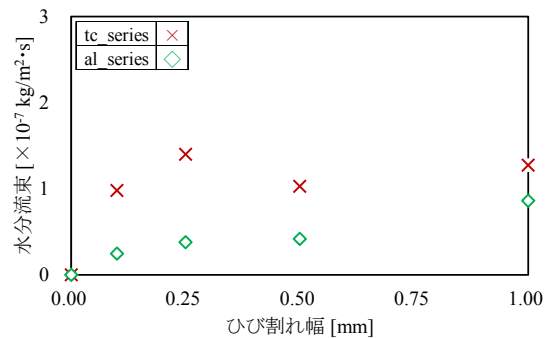


図-5 貫通ひび割れを有する供試体を透過する水分流束におけるひび割れの寄与分

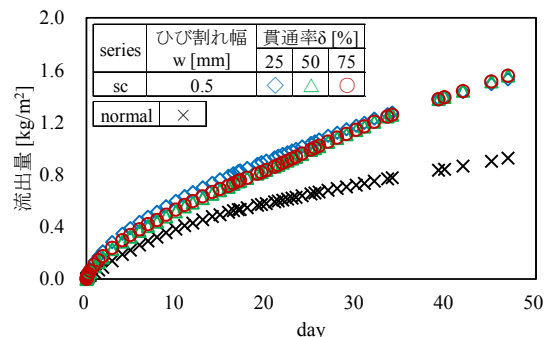


図-6 非貫通ひび割れを有する供試体の水蒸気透過量の経時変化（ひび割れ幅 0.5mm）

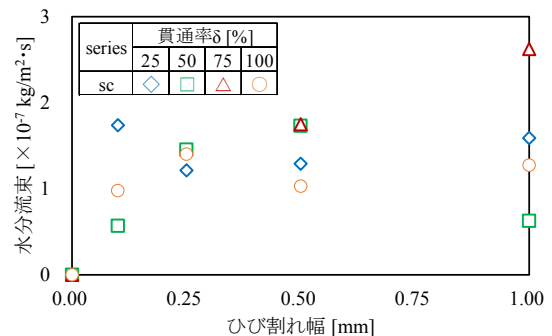


図-7 非貫通を有する供試体を透過する水分流束におけるひび割れの寄与分

ここに、貫通率 δ が 100[%] の供試体は貫通ひび割れを有する供試体の測定結果である。非貫通ひび割れが存在することにより水分流束は増加するが、水分流束に及ぼすひび割れ幅の影響は明確ではない。また、ひび割れ幅が同じで貫通率が異なる供試体の流束に着目しても、透過流束に及ぼす貫通率の関係は明確ではない。この原因として、一部の供試体において供試体と容器間の防水加工が完全でなく、わずかな隙間が生じたことで水分流束が過大に計測されたことが考えられる。

3. 貫通・非貫通ひび割れを有するコンクリート中の水分移動数値シミュレーション

3.1 数値解析モデルの概要

コンクリートの材料特性とひび割れ形状に関する情報を入力し、供試体中の水分移動解析を 2 次元で行い、各時間における水分分布や流出面の水分流束を評価した。

コンクリート中の水分の質量保存則を式(1)で表す。コンクリート細孔組織中の水分移動流束とひび割れ内の水分移動流束を式(2)により表した。これらの式を後進差分法により離散化した。なお今回の解析では、 x 方向を浸透方向、 y 方向を浸透直交方向とした。

$$\frac{\partial w_l}{\partial t} = -\frac{\partial J_x}{\partial x} - \frac{\partial J_y}{\partial y} \quad (1)$$

$$\begin{cases} J_{con} = J_{con_V} + J_{con_L} \\ J_{cr} = J_{cr_V} \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 w_l : 液状水量[kg/m³]、 $J_x \cdot J_y$: 各方向の水分移動流束[kg/m²・s]、 J_{con} : コンクリート細孔組織中の水分移動流束[kg/m²・s]、 J_{con_V} : コンクリート細孔組織中の水蒸気の移動流束[kg/m²・s]、 J_{con_L} : コンクリート細孔組織中の液状水の移動流束[kg/m²・s]、 J_{cr} : ひび割れ内の水分移動流束[kg/m²・s]、 J_{cr_V} : ひび割れ内の水蒸気の移動流束[kg/m²・s]である。

3.2 水分移動則

ひび割れを有する供試体中の水分移動解析の概要を図-8に示す。

(1)コンクリート細孔組織中の移動

コンクリート細孔組織中の水分移動は、コンクリートの細孔組織構造と水分の微視的挙動に基づき水蒸気と液状水の移動を考慮した下村らのモデル⁴⁾を用いることとし、水分移動流束は式(3)、式(4)により表した。

$$J_{con_V} = -K_V V_G D_{VO} \text{grad} \rho_V \quad (3)$$

$$J_{con_L} = \int_0^{r_s} \left[\rho_L \frac{dV(r)}{dr} \left\{ -K_L \frac{r^2}{8\mu} \text{grad} \left(-\frac{2\gamma}{r_s} \right) \right\} \right] dr \quad (4)$$

ここに、 K_V : 水蒸気移動に関する材料係数、 V_G : 単位

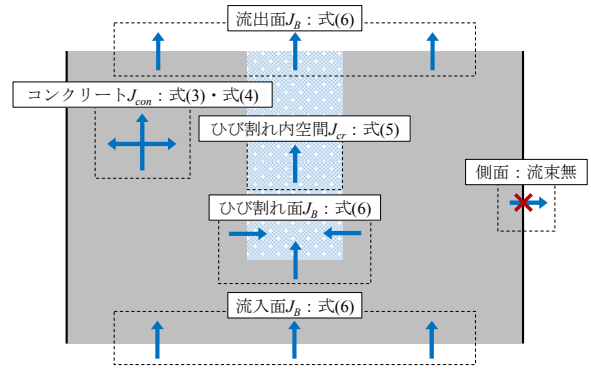


図-8 ひび割れを有する供試体中の水分移動解析の概要

体積中の気相の体積[m³/m³]、 D_{VO} : 水蒸気と乾燥空気の相互拡散係数[m²/s]、 ρ_V : 水蒸気の密度[kg/m³]、 r_s : 液状水が存在する最大細孔半径、 ρ_L : 液状水の密度[kg/m³]、 $dV(r)/dr$: 細孔容積密度分布関数[m³/m³・m]、 K_L : 液状水移動に関する材料係数、 r : 細孔半径[m]、 μ : 液状水の粘性係数[Pa・s]、 γ : 液状水の表面張力[N/m]である。

(2)ひび割れ内の移動

ひび割れ部分の水分移動は、西らが実験およびメカニズムの考察に基づいて設けた以下の仮定に基づき評価した²⁾。

- (1) ひび割れ部分における水分の移動成分として、水蒸気の形態での移動のみ考慮する。
- (2) 水蒸気の移動メカニズムは分子拡散とする。
- (3) ひび割れは、壁面が平坦で、幅が等価なまっすぐな空間に置き換えて考えることができる。
- (4) ひび割れの壁面への水蒸気分子の衝突が拡散速度に及ぼす影響は無視し、ひび割れ内では広い空間と同じ拡散現象が生じる。

以上の仮定に基づき、ひび割れ内の水分移動流束は式(5)により表した。

$$J_{cr_V} = D_{VO} \text{grad} \rho_V \quad (5)$$

(3)境界条件

コンクリートが大気と接する面における流出入の水分移動流束は、固体と流体間の熱伝達境界条件と類似の扱いを適用した下村らのモデル⁴⁾を用いて式(6)、式(7)により表した。

$$J_B = \alpha_B (w_L - w_{LB}) \quad (6)$$

$$\alpha_B = \frac{D(w_L)}{h} \quad (7)$$

ここに、 J_B : 境界面での水分移動流束[kg/m²・s]、 α_B : 水分伝達係数[m/s]、 w_L : 表面近傍のコンクリートの液状水量[kg/m³]、 w_{LB} : 雰囲気相の相対湿度に平衡するコンクリートの液状水量[kg/m³]、 $D(w_L)$: 水分拡散係数[m²/s]、 h : 境界層[m]である。境界層の厚さは表面近傍の大気との対流

の状況に依存する量であり、その標準値は 0.75mm とした⁵⁾。

供試体側面はシールされているので表面における流出量は無いものとした。

ひび割れ表面を通じたコンクリート部分とひび割れ内空間の間の水分伝達は、その特性を検討するために、以下に示す 2 種類の仮定を用いて計算を行った。

- (1) ひび割れ表面における流入を大気に接する表面と同じ式(6)、式(7)を用いる。ひび割れ表面での境界層の厚さも流入・流出面と同一の 0.75mm とした。これを「解析 1」とする。
- (2) コンクリート部分とひび割れ内空間との間の水分伝達を無視し、水分伝達係数を 0 とする。これを「解析 2」とする。

3.3 実験結果のシミュレーション

2 次元水分移動解析により、実験結果のシミュレーションを行い、妥当性を確認する。

コンクリート細孔組織中の水分移動解析に用いた材料パラメータは、同一条件下で測定したコンクリート角柱供試体の逸散水量の経時変化と炉乾燥後の重量より同定した。境界条件は、実験における測定結果から、温度 20℃、容器内の相対湿度を 96%、供試体乾燥面側の相対湿度を 50% とした。供試体の初期条件は、直接測定することが困難なため、同定された材料パラメータを用いた再現解析結果から飽和度 96% とした。

計算に用いた格子の大きさは、コンクリート部：浸透方向 2mm×浸透直交方向 2mm、ひび割れ部分：浸透方向 2mm×浸透直交方向 1mm～0.1mm (計算対象のひび割れ幅) とした。

(1) 貫通ひび割れを有する供試体

貫通ひび割れを有する供試体の流出量の経時変化の計算結果と実験結果の比較を図-9 に示す。ひび割れ表面における水分伝達を考慮した解析 1 による計算結果は実験結果より流出量を大きく評価する傾向を示した。ひび割れ表面における水分伝達を無視した解析 2 による計算結果はひび割れ幅の大きさによって実験結果との差が異なるが、傾向を再現できていることが確認できる。

貫通ひび割れを有する供試体の水分流束におけるひび割れの寄与分の計算結果と実験結果の比較を図-10 に示す。ここに、水分流束の計算結果は実験開始から 20 日～50 日間の各時間ステップの水分流束の平均値を用いた。図-10 より、ひび割れ表面における水分伝達を考慮した解析 1 による計算結果は、これを無視した解析 2 と比較して透過流束の傾きが大きくなる傾向を示した。また、実験結果では見られなかったが、ひび割れ幅が大きいほど水分流束が大きくなる傾向を示した。一方、ひび割れ表面における水分伝達を無視した解析 2 による計

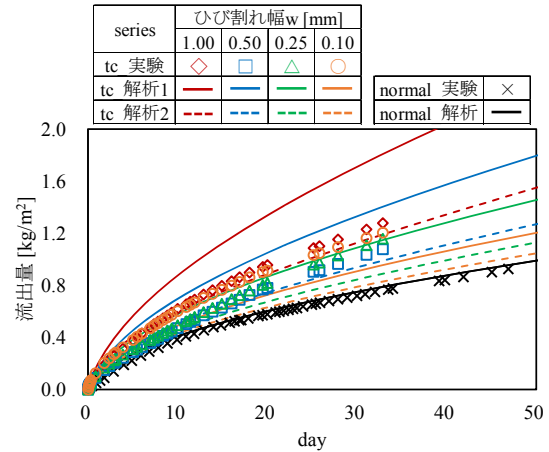


図-9 貫通ひび割れを有する供試体の流出量の経時変化

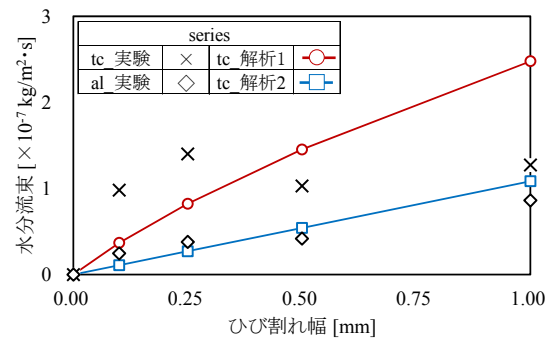


図-10 貫通ひび割れを有する供試体を透過する水分流束におけるひび割れの寄与分

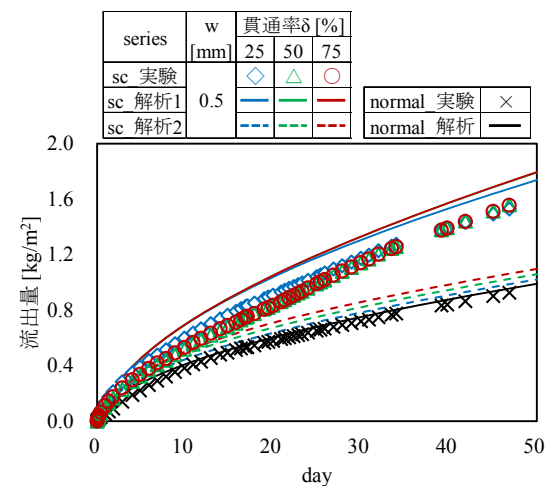


図-11 非貫通ひび割れを有する供試体の流出量の経時変化 (ひび割れ幅 0.5mm)

算結果から、ひび割れの寄与分のみを抽出した結果は、角柱アルミ供試体の実験結果と良好に一致することが明らかとなった。このことより、貫通ひび割れ幅が 1mm～0.1mm の範囲でのひび割れ表面における水分伝達を無視

したひび割れの寄与は、西らの仮定を用いて表現することができると判断できる。また、コンクリート供試体の実験値は解析1と解析2の間にあることから、ひび割れ表面における水分伝達を大気に接する表面と異なる形で考慮する必要があると判断でき、今後の検討課題である。

(2) 非貫通ひび割れを有する供試体

非貫通ひび割れを有する供試体の流出量の経時変化の計算結果と実験結果の比較を図-11に示す。ひび割れ表面における水分伝達を考慮した解析1による計算結果では、実験結果と比較して値は異なるが傾向を再現できていることが確認できる。

非貫通ひび割れを有する供試体の水分流束におけるひび割れの寄与分の計算結果と実験結果の比較を図-12に示す。ひび割れ表面における水分伝達を考慮した解析1による計算結果は、ひび割れ幅が増加するほど水分流束は増加する傾向が得られている。また、ひび割れ幅が同じで貫通率が異なる供試体の水分流束に着目した場合、解析1による計算結果ではひび割れが存在することによりある程度増加するが、貫通率が増加しても水分流束の変化は小さい傾向が確認できる。

本研究では、コンクリート中の物質移動現象として水蒸気の拡散透過を対象とした。しかし、実際に供用されるコンクリート構造物では、乾燥・吸湿だけでなく降雨などによる吸水も考慮する必要がある。吸水時のひび割れの影響の評価は今後の検討課題のひとつである。

4. まとめ

貫通・非貫通ひび割れを有するコンクリート中の水蒸気の拡散透過に関する実験および2次元水分移動解析による実験結果のシミュレーションを行い、ひび割れが水分流束に及ぼす影響とひび割れ表面における水分伝達特性を検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 貫通・非貫通ひび割れにおいて、貫通率の大小にかかわらずひび割れ幅が増加すると、供試体を透過する水分流束は増加する傾向を示す。
- (2) 非貫通ひび割れにおいて、貫通率の大きさが供試体を透過する水分流束の増減に及ぼす影響は小さい。
- (3) 貫通・非貫通ひび割れを有するコンクリート中における水蒸気の拡散移動は、ひび割れ表面での水分伝達を考慮した解析により実験結果の傾向を再現可能である。

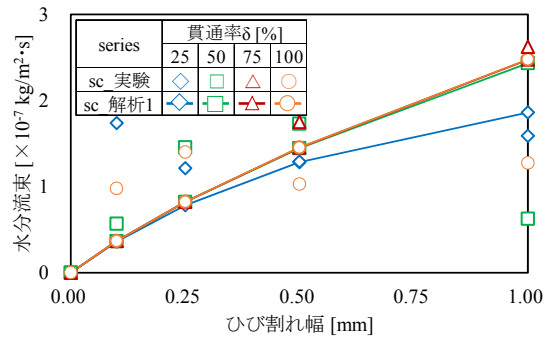


図-12 非貫通を有する供試体を透過する水分流束におけるひび割れの寄与分

- (4) ひび割れ表面での水分伝達は、大気に接する表面での水分伝達と異なる形で考慮する必要がある。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)「コンクリート構造物の高精度な長期供用性予測に資する環境作用評価システムの開発」(研究代表者:下村 匠, 課題番号:25289131)を受けて行った。

参考文献

- 1) Tetsuya Ishida, Prince O'Neill Iqbal and Ho Thi Lan Anh : Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete, Cement and Concrete Research, Vol.39, pp.913-923, 2009
- 2) 西 利明, 下村 匠, 佐藤博之: ひび割れを有するコンクリート中における水蒸気の拡散移動のモデル化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.859-864, 1999
- 3) 小林悟志, 下村 匠: コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.24, No.1, 2002
- 4) 下村 匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No.520, pp.35-45, 1995.2
- 5) Bazant,Z.P. and Najjar,L.J. : Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, Materials and Structures, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972