

ひび割れを有するコンクリート中の物質移動の数値シミュレーション

長岡技術科学大学大学院 学生会員 大原 涼平
 長岡技術科学大学 正会員 下村 匠

1. はじめに

コンクリート構造物の塩害や中性化に対する耐久性性能を把握する上で、コンクリートの物質透過抵抗性の正確な評価は重要なことである。そのため、実験的あるいは解析的手法でコンクリートの物質透過抵抗性を評価する研究¹⁾²⁾³⁾が数多く行われている。これらの研究によって、コンクリートの材料特性と物質透過抵抗性の関係が定量的に明らかになりつつある。また、コンクリート中のひび割れが物質透過抵抗性に与える影響についても検討されているが、コンクリート中のひび割れと物質透過抵抗性の関係について定量的に評価した研究は少ない。コンクリート中のひび割れの一例を表-1に示す。本研究では、多様なひび割れをその形状（方向・貫通・連続性）によって、①貫通ひび割れ、②表面ひび割れ、③分散ひび割れの3種類に大別した。これらのひび割れ形状とコンクリートの材料特性の観点からひび割れを有するコンクリートの物質透過抵抗性を整理した研究はほとんど行われていない。

そこで、これらのひび割れの1つである貫通ひび割れを有するコンクリートの物質透過抵抗性の評価手法を構築することを目的とし、貫通ひび割れを有するコンクリート中の拡散透過による2次元水分移動数値シミュレーションを作成した。今回、作成した2次元水分移動数値シミュレーションと過去に行われた西らの研究⁴⁾との比較を行い、2次元水分移動数値シミュレーションの妥当性を検討した結果を報告する。

西らの研究では、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うとともに、平均ひび割れひずみを用いてひび割れ領域を平均化した1次元水分移動数値シミュレーションを用いて物質透過抵抗性の定量化を行っ

た。本研究では、局所的な物質透過を考慮した2次元水分移動数値シミュレーションを用いてひび割れ領域を平均化することなく物質透過抵抗性の定量化を試みている。

2. 物質移動シミュレーションについて

(1) 物質移動シミュレーションの概要

物質移動シミュレーションは、コンクリートの材料特性値とひび割れ形状に関する情報を入力し、境界条件等の計算条件を指定することで水分移動解析を行い、各時間における流出流束を出力するものとした。

(2) 水分移動解析について

今回の水分移動解析では図-1に示すように2次元の格子の配列を行った。ここで、x方向を浸透方向、y方向を浸透直交方向とした。

濃度勾配を駆動力とした非定常状態におけるコンクリート中の水分移動を次のように表す。

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

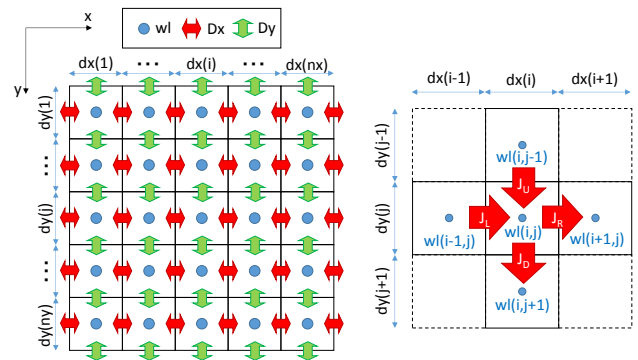


図-1 2次元格子の配列方法

表-1 ひび割れの種類

形状	方向	貫通	連続性	ひび割れの種類
貫通ひび割れ	一方向	あり	あり	温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れ（長期）・コールドジョイント
表面ひび割れ	一方向	なし	あり	曲げひび割れ・乾燥収縮ひび割れ（進展期・初期）・コールドジョイント・腐食ひび割れ
表面ひび割れ	ランダム	なし	あり	骨材膨張（進展期）・ASR（進展期）・凍害（進展期）
分散ひび割れ	ランダム	なし	なし	骨材膨張（初期）・ASR（初期）・凍害（初期）・内部欠陥

$$\begin{cases} J_x = -D_x \frac{\partial wl}{\partial x} \\ J_y = -D_y \frac{\partial wl}{\partial y} \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 wl ：要素の液状水量[kg/m³]、 J_x ：x方向の水分流束[kg/m²・s]、 J_y ：y方向の水分流束[kg/m²・s]、 D_x ：x方向の拡散係数[m²/s]、 D_y ：y方向の拡散係数[m²/s]である。式(1)は質量保存則、式(2)は移動則である。式(1)、(2)を時間に関して後進差分法で離散化した。

(3) 境界条件について

大気と接する流入面・流出面の境界条件は、固体と流体の間の熱伝達境界条件と類似の扱いを適用し、境界面における水分流束を式(3)、(4)のように表した既往のモデル³⁾を用いた。

$$J_B = \alpha_B (w_L - w_{LB}) \quad (3)$$

$$\alpha_B = \frac{D_{(w_L)}}{h} \quad (4)$$

ここで、 J_B ：境界での水分流束[kg/m²・s]、 α_B ：水分伝達係数[m/s]、 w_L ：コンクリート表面での液状水量[kg/m³]、 w_{LB} ：雰囲気相の相対湿度に平衡する液状水量[kg/m³]、 $D_{(w_L)}$ ：水分拡散係数[m²/s]、 h ：境界層[m]である。

大気と接することの無い面（側面）の境界条件は、水分移動が無いものとし、式(5)を用いた。

$$J_B = 0 \quad (5)$$

ひび割れ表面とひび割れ内の空間との境界条件は、大気と接する流入面・流出面の境界条件と同じモデルを用いた。

(4) 拡散係数について

コンクリート中の拡散係数は、健全なコンクリート細孔部分における水蒸気と液状水の移動を考慮した既往の提案モデル³⁾を用いて次のように表した。

$$D_{con} = D_{con,V} + D_{con,L} \quad (6)$$

ここに、 D_{con} ：コンクリート中の水分拡散係数[m²/s]、 $D_{con,V}$ ：コンクリート中の水蒸気拡散係数[m²/s]、 $D_{con,L}$ ：コンクリート中の液状水拡散係数[m²/s]であり、 $D_{con,V}$ と $D_{con,L}$ は健全な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定式化されている。

ひび割れ部分の拡散は、西らが実験結果およびメカニズムの考察に基づいて設けた以下の仮定を採用した。

- 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を考慮する。
- 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、ひび割れ内の空間では自由な空間と同じ分子拡散が生じる。

ひび割れ部分の拡散係数は、これらの仮定に基づいて次のように表した。

$$D_{cr} = D_{cr,V} + D_{cr,L} \quad (7)$$

$$D_{cr,V} = D_{vo} \quad (8)$$

$$D_{cr,L} = 0 \quad (9)$$

ここに、 D_{cr} ：ひび割れ部分の水分拡散係数[m²/s]、 $D_{cr,V}$ ：ひび割れ部分の水蒸気拡散係数[m²/s]、 $D_{cr,L}$ ：ひび割れ部分の液状水拡散係数[m²/s]、 D_{vo} ：自由な空間における水蒸気と乾燥空気の相互拡散係数[m²/s]である。

3. 試験体および実験概要

西らは、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ている。この実験では、ひび割れ形状を表す指標として、ひび割れ幅と平均ひび割れひずみを用いている。

表-2 に実験に用いたコンクリートの示方配合を示す。粗骨材は、供試体寸法が小さいため、最大骨材寸法が10mmのものを用いた。

表-3 に数値計算に用いた実験ケースを示す。図-2 に数値計算の用いた供試体形状を示す。供試体はひび割れの無い供試体 normal、ひび割れ面が凸凹な貫通ひび割れを有する供試体 rw1n3、ひび割れ面が平滑な貫通ひび割れを有する供試体 vw1n3、アルミ供試体 aw1n3 の4種類とした。アルミ供試体 aw1n3 は、アルミ角柱を用いてひび割れ部分のみの水分移動を調べるために作製したものである。

供試体はシリコンを用いてプラスチック板に固定し、一定のひび割れ幅を確保した。その後、500cm³程度の水を入れたプラスチック容器を供試体下方に固定した。供試体を固定した容器を温度20℃、相対湿度60%の恒温室に静置し、定期的に容器を含めた重量を電子天秤（測定精度0.1g）で測定し、重量変化から供試体を透過する水分の流束を求めた。

表-2 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	924	938	C×0.2%

4. 数値シミュレーションと実験結果の比較

(1) 計算条件について

コンクリート中の水分移動モデルに必要な材料パラメータは、西らの実験において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ものをを用いた。境界条件は、温度 20℃、容器内の相対湿度を 96%、供試体乾燥面側を 60% とし、供試体の初期条件は飽水状態とした。

計算に用いた格子の大きさは、寸法依存性の検討を行った結果、コンクリート部分を浸透方向 2mm×浸透直交方向 2mm、ひび割れ部分を浸透方向 2mm×浸透直交方向 1mm とした。

(2) コンクリート部分のみの水分移動

図-3 にひび割れの無いコンクリート供試体 normal を透過する水分流束の経時変化の実験結果と計算結果を示す。実験結果と計算結果を比較すると、実験開始直後の乾燥過程はわずかに差が生じているが、全体的な傾向はよく一致している。このことから、コンクリート中の水分移動は、コンクリート中の拡散係数を表した式(6)を用いて評価できることがわかる。

(3) ひび割れ部分のみの水分移動

図-4 にアルミ供試体 aw1n3 より求めたひび割れ部分のみを透過する水分流束の経時変化の実験結果と計算結果を示す。実験結果と計算結果は全体的に良好に一致している。このことから、ひび割れ中の水分移動は、ひび割れ部分の拡散係数を表した式(7)を用いて評価できることがわかる。

(4) 貫通ひび割れを有するコンクリートの水分移動

図-5 にひび割れ面が凸凹な貫通ひび割れを有する供試体 rw1n3 を透過する水分流束の経時変化の実験結果と計算結果を示す。ひび割れ内の空間とコンクリート間の水分移動を考慮した実験結果と計算結果は定性的な傾向は概ね一致しているが定常状態では差が生じている。この原因として、ひび割れ面の凹凸が水分移動に与える影響とひび割れ内の空間とコンクリート間の水分移動の過大評価が関係していると考えられるため、それぞれについて検討を行った。

(5) ひび割れ面の凹凸の影響

図-6 にひび割れ幅と平均ひび割れひずみを統一したひび割れ面が凸凹な供試体 rw1n3 と平滑な供試体 vw1n3 の実験結果を示す。ひび割れ面が凸凹な供試体 rw1n3 と平滑な供試体 vw1n3 の実験結果はほとんど一致している。このことから、ひび割れ面の凹凸が水分移動に与える影響は小さいと考えられる。

表-3 実験ケース

供試体名	ひび割れの種類	w	n	l_i	$\bar{\epsilon}$
normal	ひび割れ無し	-	-	-	-
rw1n3	貫通ひび割れ(凹凸有)	1	3	60	0.017
vw1n3	貫通ひび割れ(平滑)	1	3	60	0.017
aw1n3	貫通ひび割れ(平滑) アルミ供試体	1	3	60	0.017

w : ひび割れ幅 (mm)
n : ひび割れ本数
 l_i : ひび割れ間隔 (mm)
 $\bar{\epsilon}$: 平均ひび割れひずみ

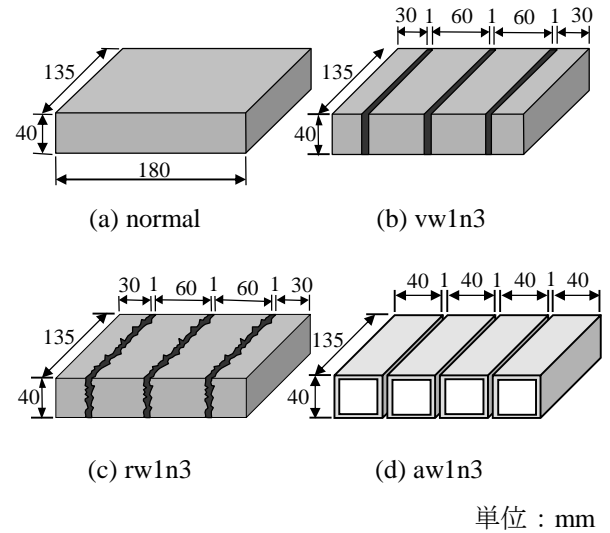


図-2 供試体形状

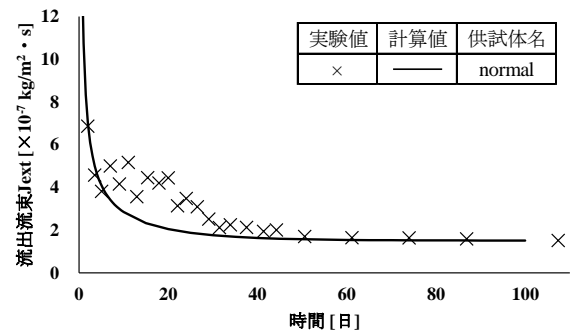


図-3 コンクリート部分のみを透過する水分

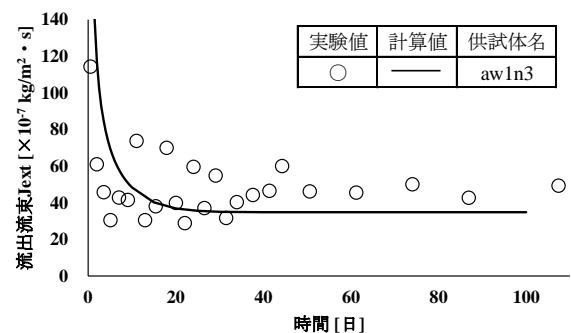


図-4 ひび割れ部分のみを透過する水分

(6) ひび割れ内の空間とコンクリート間の水分移動

図-7 にひび割れ内の空間とコンクリート間の水分移動を0とした場合の貫通ひび割れを有するコンクリートを透過する水分流束の経時変化の計算結果と供試体 rw1n3 の実験結果を示す。計算結果と実験結果は全体的に良好に一致している。このことから、ひび割れ内の空間とコンクリート間の水分移動は無視できるほど小さいことがわかる。

(7) 計算結果の比較

図-7 に2次元水分移動数値シミュレーションと西らの1次元水分移動数値シミュレーションの計算結果を示す。2つの数値シミュレーションは水分移動の評価手法が異なるが、計算結果はほとんど一致している。このことから、どちらの数値シミュレーションも概ね妥当であることがわかる。

これらの比較結果から、貫通ひび割れでは、コンクリート部分を透過する水分流束とひび割れ部分を透過する水分流束を独立して評価することにより、ひび割れを含めた供試体全体を透過するコンクリートの水分流束を評価できることが考えられる。また、今回、限られたひび割れ形状での水分移動シミュレーションの検討を行ったが、様々なひび割れ形状での計算結果と実験結果の比較を行い、ひび割れ形状がコンクリートの物質透過抵抗性に与える影響について検討する必要がある。

5. まとめ

貫通ひび割れを有するコンクリート中の拡散透過による2次元水分移動数値シミュレーションを作成し、既往の研究結果との比較検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) コンクリート中とひび割れ中それぞれにおける水分移動を、一次元拡散移動モデルにより精度よく評価できることを確認した。
- (2) 貫通ひび割れにおいて、ひび割れ内の空間とコンクリート間の水分移動を無視し、ひび割れ中、コンクリート中それぞれにおける水分移動を独立に評価して重ね合わせることで、ひび割れを有するコンクリート中の水分移動を精度よく評価できることを確認した。したがって、ひび割れを有するコンクリート中の水分移動において、ひび割れ内の空間とコンクリート間の水分移動の影響は小さいといえる。
- (3) 貫通ひび割れを有したコンクリートの水分の透過は、平均ひび割れひずみを用いてひび割れ領域を平均化した1次元水分移動数値シミュレーションによっても、

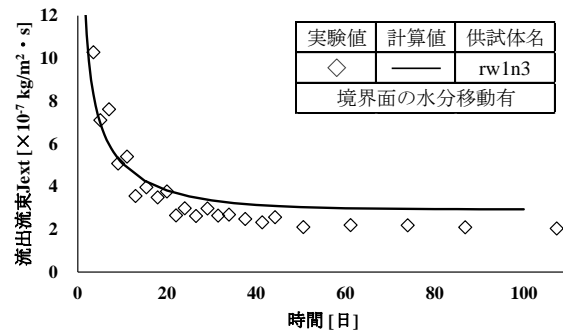


図-5 貫通ひび割れを有するコンクリートを透過する水分

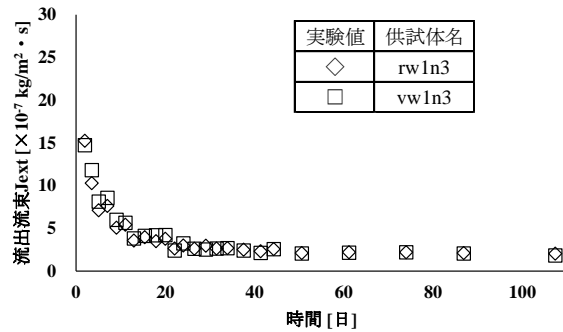


図-6 ひび割れ面の凹凸の影響

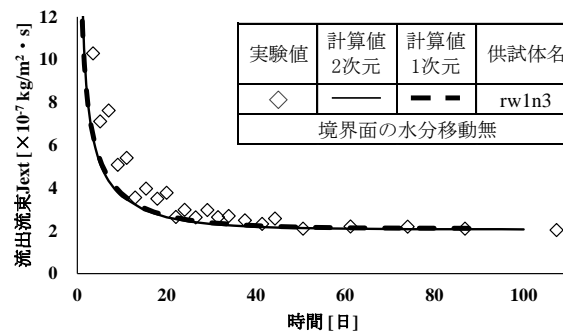


図-7 貫通ひび割れを有するコンクリートを透過する水分

局所的な物質透過を考慮した2次元水分移動数値シミュレーションと同程度の精度で、実験結果を再現できることを確認した。

参考文献

- 1) 氏家勲・長瀧重義：コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究，土木学会論文集，第396号/V-9，pp.79-87，1988.8
- 2) 丸屋剛・SOMNUK T.・松岡康訓：コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究，土木学会論文集，No.442/V-16，pp.81-90，1992.2
- 3) 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/V-28，pp.35-45，1995.8
- 4) 西利明・下村匠・佐藤博之：ひび割れを有するコンクリート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