

論文 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

西利明*1・下村匠*2・佐藤博之*3

要旨: ひび割れ幅とひび割れ間隔を変化させた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ない、ひび割れを有するコンクリート中の水分移動現象の基本的性質を把握した。実験結果より得られた知見およびメカニズムの考察に基づき、ひび割れを有するコンクリート中における水分移動現象をモデル化した。提案したモデルを用いて実験結果のシミュレーションを行ない、その妥当性を検討した。

キーワード: ひび割れ, ひび割れ幅, 平均ひび割れひずみ, 水分移動

1. はじめに

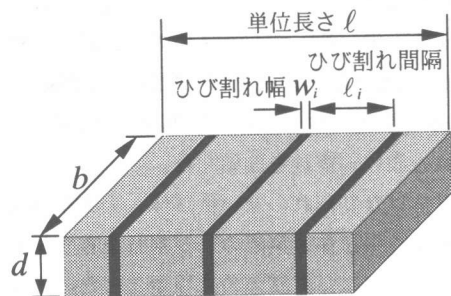
供用中の鉄筋コンクリート構造物には、一般に、曲げひび割れ、乾燥収縮ひび割れなど種々のひび割れが生じる。それらひび割れはコンクリート中の物質移動に影響すると考えられるため、実構造物の劣化過程を予測するには、ひび割れを有するコンクリートの物質移動抵抗性を評価することが重要となる。一方、コンクリート中の物質移動に関するこれまでの研究の多くは、ひび割れや欠陥等を含まない健全なコンクリート中の物質移動の定量化に力が注がれてきた。ひび割れを有するコンクリートのトータルの物質移動抵抗性は、健全な部分の物質移動抵抗性とひび割れ部分のそれとの所産として評価されなければならない。

そこで本研究は、ひび割れを有するコンクリート中の物質移動に関する基礎的な実験を行い、現象の基本的性質を把握するとともに、そのモデル化について検討を行うものである。移動物質として水を取り上げることにした。水分は基本的な物質であるとともに、他の物質の溶媒となることにより劣化過程において重要な役割を果たすためである。また物質移動の形態は、一般的な構造物の劣化過程に頻出する、常圧下における気体の分子拡散移動を考える。

2. ひび割れを有するコンクリート中の水分透過実験

2.1 実験概要

種々の状態のひび割れを有する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、水分を一方向に透過させる実験を行った¹⁾。ひび割れの状態を表す指標として、ひび割れ幅、ひび割れ間隔、および平均ひび割れひずみを考えた。ここに、平均ひび割れひずみとは、単位長さ当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)。



$$\text{平均ひび割れひずみ} \quad \varepsilon = \frac{\sum w_i}{l}$$

図-1 ひび割れを有するコンクリートにおける平均ひび割れひずみ

*1 西松建設株式会社 工修(正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 工博(正会員)

*3 千曲建設工業株式会社

平均ひび割れひずみは、鉄筋コンクリートにおける分散ひび割れ (smeared crack) の概念を応用したものであって、個別のひび割れで起きている現象を問題にするのではなく、ひび割れを含む領域で起きている現象を領域平均化して定量化するのに便利な指標である²⁾。

以下の項目に着目し、ひび割れを有するコンクリートの水分透過に及ぼす影響を検討した。

(1) ひび割れ幅とひび割れ間隔

平均ひび割れひずみを一定とし、ひび割れ幅とひび割れ間隔を変化させる。

(2) 平均ひび割れひずみ

ひび割れ間隔を一定とし、ひび割れ幅を変化させることにより、平均ひび割れひずみを変化させる。

(3) ひび割れ部分を透過する水分

ひび割れを有するコンクリート中の、健全な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個別に評価する。

(4) ひび割れ面の凹凸の影響

ひび割れ部分を通過する水分流束に及ぼすひび割れ面の凹凸の影響について検討する。

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ので、最大骨材寸法を10mmとした。供試体は材齢1日で脱型し、28日間水中養生した。その後、所定のひび割れを設け、実験を開始した。

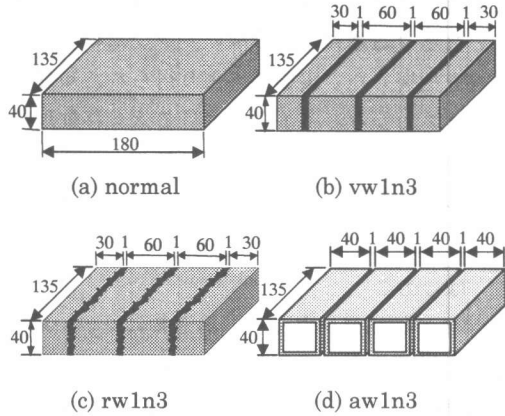
供試体はひび割れのない供試体、人工ひび割れを有する供試体、実際のひび割れを有する供試体、角柱アルミ供試体の4種類とした。主な供試体の形状を図-2に示す。実験ケースを表-2に示す。

人工ひび割れを有する供試体は、別々に打設した所定の大きさを有する4個のコンクリート角柱を一定の間隔を設けて設置したものである。ひび割れ面は、凹凸がなく平滑である。

供試体 rw1n3 では、供試体の上下面に鉄筋を置き、線荷重を加えることにより、割裂ひび割れを導入した。ひび割れ幅 w は、供試体に2

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	924	938	C*0.2%



単位: mm

図-2 供試体形状

表-2 実験ケース

供試体名	ひび割れの種類	w	n	l_i	$\bar{\epsilon}$
normal	ひび割れなし	-	-	-	-
vw1n3	人工ひび割れ	1	3	60	0.017
vw3n1	人工ひび割れ	3	1	180	0.017
vw2n3	人工ひび割れ	2	3	60	0.033
rw1n3	実際のひび割れ	1	3	60	0.017
aw1n3	人工ひび割れ 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

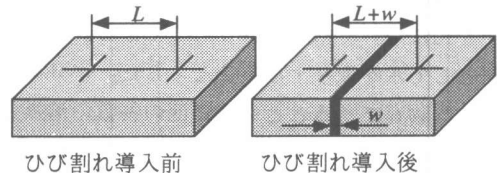


図-3 ひび割れ幅の設定

つの標点間の距離 L を、ひび割れ発生後 $L+w$ にすることにより制御した (図-3)。

アルミ角柱を用いた供試体 aw1n3 は、ひび割れ部分のみの水分透過を調べるために作製し

たものである。

供試体の平均ひび割れひずみは、ひび割れていない健全なコンクリート供試体の幅 180mm を基長として計算した。

一定のひび割れ幅を保つために、供試体はシリコンを用いてプラスチック板に固定した。その後 500 cm³ 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 (図-4)。水分を供試体下面から上面へ一次的に透過させるために、供試体側面をシリコンで防水し、容器と供試体との隙間もシリコンで塞いだ。

供試体を固定した容器を温度 20°C、相対湿度 60% の恒温室に静置し、以後定期的に、容器ごと重量を電子天びん (測定精度 0.1g) で測定した。重量の時間的変化が一定となる定常状態では、測定重量の変化は供試体を透過した水分量に一致することになる。

2.3 ひび割れの状態が供試体を通過する水分流束に及ぼす影響

供試体を透過する水分流束の経時変化を、検討項目別に図-5～図-9に示す。供試体の初期状態は、容器に固定する加工作業中に多少乾燥しており、完全な飽水状態ではない。実験開始後 30 日程度までの測定重量の変化には、供試体自身の乾燥が含まれているため、算出した水分流束はみかけ上大きくなる。実験開始後 30 日頃以降では、測定重量の時間的変化はほぼ一定になり、供試体を透過する水分流束を表していることになる。よって、定常状態において各供試体を透過する水分流束について考える。

(1) ひび割れ幅とひび割れ間隔

図-5は、平均ひび割れひずみが同じで、ひび割れ幅とひび割れ間隔が異なる供試体 vw1n3 と vw3n1 の実験結果を示したものである。両者の結果は、ほぼ一致している。拡散移動によりひび割れを通過する水分流束は、ひび割れ幅とひび割れ間隔によらず、平均ひび割れひずみにより表されることを示唆している。

(2) 平均ひび割れひずみ

図-6は、平均ひび割れひずみが異なる供

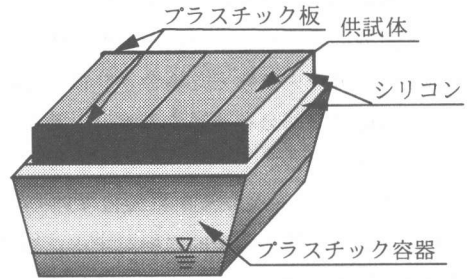


図-4 供試体の設置

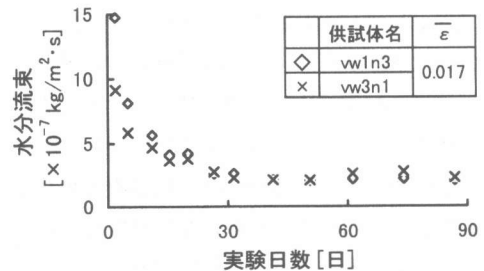


図-5 ひび割れ幅とひび割れ本数の影響

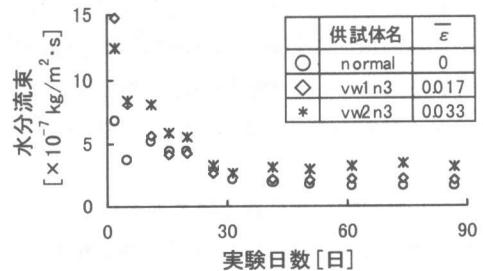


図-6 平均ひび割れひずみの影響

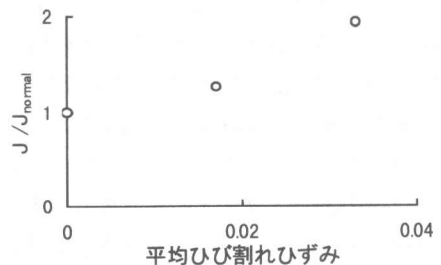


図-7 平均ひび割れひずみと水分流束の関係

試体 normal, vw1n3, vw2n3 の実験結果を示したものである。定常状態において供試体を透過する水分流束は、平均ひび割れひずみが大きい供試体ほど大きい。しかし、たとえばひび割れない供試体 normal と平均ひび割れひずみが

0.017 の供試体 vw1n3 の結果を比較すると、その差は意外に小さい。すなわち、供試体全体を透過する水分流束を考えた場合、ひび割れ部分に比べて健全な部分を透過する水分の割合が大きいことがわかる。

供試体を透過する水分流束に及ぼす平均ひび割れひずみの影響を定量的に検討するために、各供試体の平均ひび割れひずみと定常状態における透過水分流束の関係をプロットしたのが図-7である。水分流束は、ひび割れのない供試体 normal の水分流束 J_{normal} を用いて正規化してある。ひび割れ部分における水分の移動が自由な空間における分子拡散移動と同じで（すなわち壁面への分子の衝突の影響が無視でき）、かつひび割れ面の凹凸や経路の屈曲の影響が無視できるなら、ひび割れの寄与は空間容積のみとなるため、水分流束は平均ひび割れひずみと線形関係にあることになる。図-7によると、ひび割れ部分を透過する水分流束は平均ひび割れひずみの増加にともない単調増加する傾向は見られるものの、その関係が線形かどうかは、実験ケースが少なく、この結果のみでは明らかでない。

(3) ひび割れ部分を通過する水分

図-8はひび割れのない供試体 normal と人工ひび割れを有するアルミ供試体 aw1n3 の実験結果、および両者の和を示し、同じ平均ひび割れひずみのコンクリート供試体 vw1n3 の結果と比較したものである。定常状態では、normal と aw1n3 の和が vw1n3 の結果に良好に一致している。このことより、健全なコンクリート細孔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の間の相互作用は無視してよく、それぞれを独立に評価して加えることにより、コンクリート供試体を透過するトータルの水分流束を評価できることがわかる。

(4) ひび割れ面の凹凸の影響

図-9は、人工ひび割れを有する供試体 vw1n3 と、同じひび割れ幅、平均ひび割れひずみの実際のひび割れを有する供試体 rw1n3

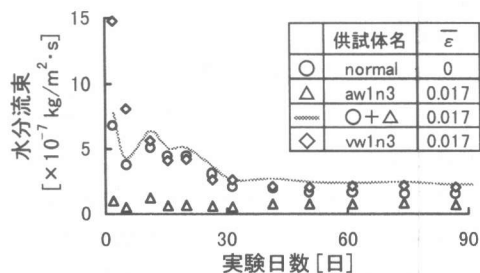


図-8 ひび割れ部分を通過する水分

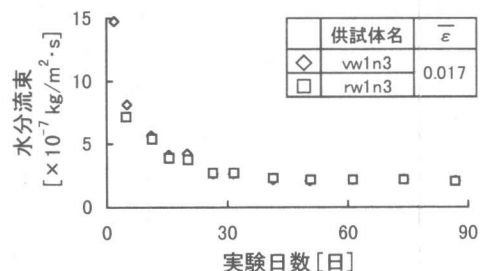


図-9 ひび割れ面の凹凸の影響

の実験結果を示したものである。両者の実験値はきわめてよく一致している。ひび割れ部分を透過する水分流束に及ぼす、ひび割れ面の凹凸の影響および経路の屈曲の影響は小さく、実際のひび割れを、幅が等価で平坦かつまっすぐな空間に置き換えてモデル化できることを示唆している。

この結果は以下の考察からも推論できる。すなわち、水蒸気分子の分子運動の平均自由行程 ($0.05\mu\text{m}$) に比べると、ひび割れ面の凹凸、屈曲の大きさのレベルは数オーダー大きいので、それらが分子運動に起因した拡散移動に及ぼす影響は無視できると考えられるのである。

3. ひび割れを有するコンクリート中の水分移動モデル

3.1 定式化

実験により得られた知見をもとに、ひび割れを有するコンクリート中の水分移動をモデル化する。ひび割れは、鉄筋コンクリートの曲げひび割れ、乾燥収縮ひび割れのように、幅のオーダーが 0.1mm 程度以上、間隔のオーダーが cm レベル、類似のひび割れが均一に存在している

状態を対象とする。水分移動現象は、実験と同じく、常圧下においてコンクリートが水蒸気を含んだ空気に接する場合に生じる移動とする。また、ひび割れ平行方向の水分移動を考える。

コンクリート要素の大きさは内部にひび割れが複数本存在する大きさとする(図-10)。まず、一般に以下が成り立つ³⁾。

$$J = J^c + J^{cr} \quad (1)$$

ここに、 J ：ひび割れを有するコンクリート要素を透過する水分流束[$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]、 J^c ：健全なコンクリート細孔部分を透過する水分流束[$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]、 J^{cr} ：ひび割れ部分を透過する水分流束[$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]である。

2.3(3)の結果より、健全なコンクリート細孔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に評価して重ねあわせてよいと仮定する。

健全なコンクリート細孔部分における水分移動は、水蒸気移動と液状水移動を考慮した著者らの既往の提案モデル⁴⁾を用いて評価する。

$$J^c = J_v^c + J_L^c \quad (2)$$

ここに、 J_v^c 、 J_L^c はそれぞれ、均質なコンクリート細孔組織中を透過する水蒸気流束、液状水流束であり、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。

ひび割れ部分を通過する水分流束に関して、実験で得た知見およびメカニズムの考察に基づき、以下の仮定を設ける。

- 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、ひび割れ内の空間では自由な空間と同じ分子拡散が生じる。

なお、図-7に明確な線形関係が認められなかったため、上記の仮定④は今回の実験のみから導き出されるものではないが、考察に基づき設けたものである。

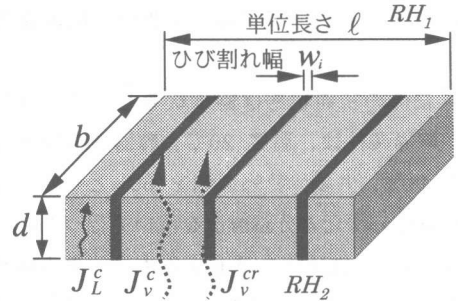


図-10 ひび割れを有するコンクリート要素

以上の仮定に基づいて、ひび割れ部分を通過する水蒸気の流束を次のように表す。

$$J^{cr} = -\bar{\epsilon} D_{vo} \text{grad} \rho_v \quad (3)$$

ここに、 $\bar{\epsilon}$ ：平均ひび割れひずみ、 D_{vo} ：自由な空間における水蒸気と乾燥空気との相互拡散係数[m^2/s]、 ρ_v ：水蒸気の密度[kg/m^3]である。式(3)は、著者らが既報⁵⁾において仮定した式に一致する。本研究では実験事実に基づき、従来の仮説を再構築したことになる。

これまで述べた仮定に基づけば、ひび割れ部分における水蒸気密度は、同一コンクリート要素内の細孔部分における水蒸気密度と独立であることが許される。しかし、計算を簡便化するために、それらが同一であるとの仮定を置く。すなわち、ひび割れ部分と細孔部分とで、水分が常に平衡状態にあるとする。この仮定により、ひび割れ部分と細孔部分の水分状態が統一的に表されるため、変数を減らすことができ計算が簡便となる。なお、厳密に計算しても、この仮定のもとに計算しても、計算結果はほぼ等しくなることを、数値実験により別途確認してある。

3.2 提案モデルによる実験結果の解析

提案モデルを用いて、実験結果の数値シミュレーションを行い、その妥当性を確認する。ここでは、平均ひび割れひずみが異なるシリーズの計算結果について示す。

コンクリート細孔部分における水分移動モデルに必要な材料パラメータは、同一条件下で測定したコンクリート角柱供試体(40×40×

160mm) の逸散水量の経時変化と炉乾燥後の重量より同定した⁴⁾。

供試体の初期状態は飽水状態として計算した。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%とした。数値計算は一次元差分陰解法を用いて行った。

図-11 に供試体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。実験開始直後の乾燥過程を含めて、全体的な傾向は、いずれの供試体においても、計算結果は実験結果とよく一致している。水分移動に及ぼすひび割れの影響を、どの程度妥当に表現し得ているかを検討するために、各供試体の平均ひび割れひずみと定常状態において供試体を透過する水分流束の関係を示したのが図-12 である。図-12 に示される精度で、ひび割れのない供試体、ひび割れを有する供試体の水分透過を統一的に評価できたことにより、手法が概ね妥当であったと判断している。ただし、平均ひび割れひずみの増加に対する水分流束の増加割合は、実験値の方が計算値よりも大きくなっており、平均ひび割れひずみ大きいケースほど両者の差が大きい。これは先述した仮定④に起因するものであると考えられる。

提案手法は供試体の厚さに関して理論的に一般化されているものの、本研究ではその適用性を検証するに至らなかった。今後の検討課題である。また、本研究ではひび割れを有するコンクリートの平均的な物質透過抵抗性を定量化の対象としたが、今後はひび割れ近傍の局所的な物質透過もあわせて評価できるようにしたい。

4. まとめ

ひび割れを有するコンクリート中の水分移動に関する実験およびそのモデル化を行い検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 分子拡散によりひび割れを透過する水分流束は、ひび割れ幅とひび割れ間隔に関わらず平均ひび割れひずみにより表わされる。

(2) 平均ひび割れひずみが増加すると供試体

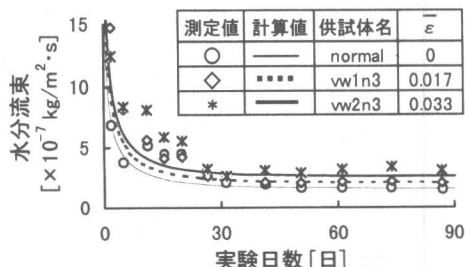


図-11 計算値と実験値との比較

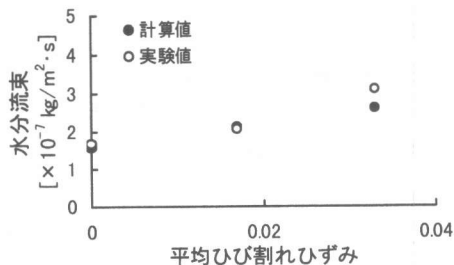


図-12 平均ひび割れひずみと水分流束の関係

を透過する水分流束は単調に増加する。

(3) ひび割れを有するコンクリートを透過する水分流束は、コンクリート細孔部分を透過する水分流束とひび割れ部分を通過する水分流束を独立に評価して加えることにより評価できる。

(4) ひび割れ部分を通過する水分流束に及ぼすひび割れ面の凹凸の影響は小さく、実際のひび割れを、幅が等価で平坦かつつますぐな空間に置き換えてモデル化できる。

参考文献

- 1) 伊藤洋・前村辰二・坂口雄彦：水蒸気拡散法によるコンクリートの透水性評価試験について、コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.733-738, 1992.6
- 2) 岡村甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991
- 3) Shimomura, T. : Modelling of Initial Defect of Concrete Due to Drying Shrinkage, Concrete Under Severe Conditions 2, Vol.3, pp.2074-2083, Jun.1998
- 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/V-28, pp.35-45, 1995.8
- 5) 佐藤博之・下村匠・青山敏幸：ひび割れを有するコンクリートの気体透過抵抗性，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，pp.744-745, 1997.9