

# 論文 不飽和状態のコンクリートのひび割れ中における急速な水分移動に関する研究

土屋 直子<sup>\*1</sup>・兼松 学<sup>\*2</sup>・野口 貴文<sup>\*3</sup>

**要旨:** 不飽和状態のコンクリートのひび割れにおける水分挙動のより正確な評価に向けて、特にひび割れ中の水分移動の初期数分の急速な挙動について評価を行うことを目的とし、移動距離に影響を及ぼす要因の検討を行った。また、ひび割れからコンクリート部への吸水現象及び水蒸気圧の影響を含む見かけの毛管張力及び粘性係数の取得を行うことで、2枚の平行平板間における Washburn 式の適用を検討した。その結果、重力及び水蒸気圧の影響が大きいこと、ペースト細孔の毛管張力と重力エネルギーの効力のバランスから、ひび割れ幅が減少するほどひび割れ方向に対する抵抗力が大きく働くことが確認された。

**キーワード:** コンクリート, ひび割れ, 毛管吸収, 初期水分移動, 不飽和状態

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象の原因には、ひび割れの存在や、様々な劣化因子をコンクリート中へ運ぶ水分の供給が挙げられる。すなわち、鉄筋コンクリート構造物の維持保全・耐久性の向上のためにはその水分の挙動を明らかにすることが重要である。

これまで、コンクリートのひび割れ中の水分移動に関する研究では、飽和状態の定常流におけるひび割れ幅及び粗さによる摩擦抵抗の定量化<sup>1)2)</sup>や、不飽和状態においては水分分布の実験的検討<sup>3)4)5)6)7)8)</sup>、及び水分移動のモデル化<sup>8)9)10)</sup>などが行われている。特に近年では、非破壊イメージング装置によりコンクリート中における水分挙動の可視化に関する研究が行われており、その中でも装置の特徴を生かしてこれまで研究が困難であった不飽和状態のコンクリートのひび割れ部における水分挙動について実験的な研究が進みつつある<sup>5)6)7)</sup>。

図-1<sup>5)</sup>に兼松らによる、ひび割れ中における水分の到達距離の挙動について研究された結果を示す。結果から、水分が一気にある場所まで移動し、その後徐々に浸透す

るという実験結果が読み取れる。P. Zhang らの鉄筋コンクリートのひび割れ中を移動する水分に関する研究からも同様の傾向が示されている<sup>6)</sup>。しかし、明確な機構の解明にはまだ至っていない。

このような不飽和状態のコンクリート中の水分移動の現象は、これまではコンクリート中の水分移動が定常流となるまでに時間を要する、という事実のみで特に言及されることも少なかった現象でもあるが、不飽和状態のコンクリート内部でどのような含水状態にあるかについてより正確に評価することは、鉄筋コンクリートの耐久性を評価する上で重要であると考えられる。すなわち、ひび割れを通じて供給されたコンクリート内部の水分分布は、鉄筋近傍の中性化並びに腐食速度に関与するため、耐久性評価において重要であることが予測される。

特に、図-1に見られる初期数分段階の急速な移動は、その後のコンクリート内部の水分分布に大きく影響を与えるものと考えられる。すなわち、初期数分段階の急速な移動を正確に評価することにより、内部の含水状態をより正確に評価可能であると考えられる。

そこで本研究では、不飽和状態のコンクリートのひび割れにおける水分挙動の解明を目的とし、ひび割れ中の水分移動の初期急速な挙動を対象として、特に移動距離に影響を及ぼすとされる要因について検討を行った。また、ひび割れ中における水分移動予測として Washburn 式の適用を試みた。

## 2. 実験

### 2.1 試験水準

ひび割れ中の水分挙動に影響を及ぼす要因は、既往の研究<sup>1)-10)</sup>からは、ひび割れ幅, 水分移動の方向, 含水率,

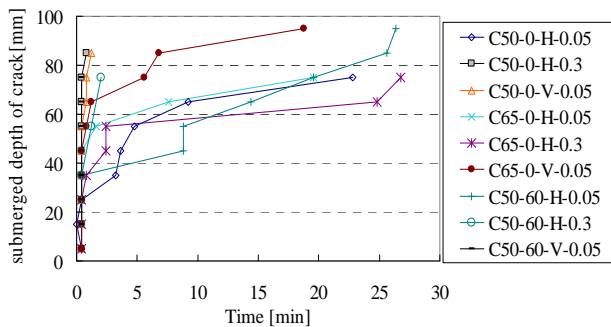


図-1 ひび割れ中における水分の到達距離の挙動<sup>1)</sup>

\*1 (独) 建築研究所 材料研究グループ 博士 (工学) (正会員)

\*2 東京理科大学 理工学部建築学科 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京大学 工学系研究科建築学専攻 博士 (工学) (正会員)

屈曲率，貫通しているかどうか，が挙げられる。そこで，本研究ではこれらを試験水準とした。さらに本研究が対象とする初期の吸水挙動と比較するための比較的長期的な試験を行った。また，後述する

## 2.2 試験方法

図-2 の様に，ひび割れが水平面と垂直になるよう試験体を設置したときの吸上げ方向及び重力方向の移動，またひび割れ面が水平面と平行になるようにしたときの水平方向の移動の3方向について，ひび割れ部へのインク吸水試験を行った。表-1 に実験項目及び実験水準の概要を示す。ここでの相対含水率とは，飽和水分質量に対する水分質量の比率である。ひび割れ中を移動する水分および試験終了後水分の吸水長さをより明確に可視化するために，本試験では黄色の蛍光塗料を水に溶かし使用した。全て20℃RH60%室内で測定を行い，シーリングを剥がした後，インク水の入ったひび割れ部の長さを計測した。長さの測定方法は，吸水直後の試験体を撮影し，その画像を実物大に合わせてCADソフトウェアに取り込み，吸水部分のひび割れ形状に沿って線を引き，その線分の長さを吸水長さとした。なお，予め同試験体を用いたインクなしの水及びインク水による吸水試験を目視により比較し，本研究で扱う数分においては差がほぼ無いことを確認している。

表-2 に試験体調合を示す。試験体は100×100×400mmのコンクリートを打設後28日水中養生し，コンクリートカッターを用いて100×100×20mmのコンクリートを切り出し，それを曲げ載荷にて割裂或いはコンクリートカッターにてカットして2つに分け，ひび割れ幅をクラックスケールで制御しながら再度突き合わせることでひび割れ試験体を作成した。相対含水率は，105℃乾燥機に入れて重量法により調整した。なお，105℃乾燥による組織変

表-1 試験水準

| ひび割れ形態        | W/C        | ひび割れ幅                     | 相対含水率              | 移動方向            |
|---------------|------------|---------------------------|--------------------|-----------------|
| -             | (%)        | (mm)                      | (%)                | -               |
| 割裂・カット，貫通・非貫通 | 30, 50, 65 | 0.01, 0.05, 0.3, 0.6, 1.0 | 0, 30, 60, 80, 100 | 吸上げ<br>重力<br>水平 |

表-2 試験体調合

| W/C | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     | 混和剤   |
|-----|-------------------------|-----|-----|-----|-------|
| (%) | W                       | C   | S   | G   | C*(%) |
| 30  | 175                     | 583 | 665 | 911 | 0.5   |
| 50  | 175                     | 350 | 856 | 911 | 0.7   |
| 65  | 185                     | 285 | 870 | 925 | 2.5   |

普通ポルトランドセメント，大井川水系陸砂，青海産硬質砂岩砕石 使用

化等の影響については検討していない。相対含水率とひび割れ幅調整後，側面からの吸湿・蒸発を避けるため，またひび割れ部でのインク水の移動を可視化するため，試験体とテープに空気が入らないよう接着型の透明テープでシーリングした。インク水を水槽に入れて試験を開始し，吸水開始後90秒で試験体を取り出し，長さを計測した。長期的な吸水試験では，開始後90秒，7日，14日の3時点で吸水長さの計測を行った。

## 3. 実験結果

吸水方向と吸水長さの関係の結果を図-3 に示す。給水方向について見ると，重力方向の吸水試験では，3試験体すべてでインク水は非常に速い速度で浸入し，吸水開始後早い段階でひび割れ最下部に達した。水平方向からの給水試験では，インク水は1試験体のみで末端部に達し，他の2試験体でも大きい値が得られ，水分移動の速さに関しては，重力方向からの給水に比べると遅かった。最後に，吸上げ方向の給水試験では，インク水が最上部に達した試験体はなく，吸水長さの値も小さい値となった。水分移動の速さに関しては，他の試験に比べて最も遅かった。

図-4 に，試験開始から14日まで吸水させた試験の結果を示す。結果より，本試験において使用したすべての試験体において吸水速度は極めて遅くなるものの長時間になるにつれて上昇した。また，割裂試験体はカット試験体よりも値の上昇が大きかった。割裂によるひび割れは面が荒く，カットによるひび割れよりも表面積が広いため，ひび割れ表面の相対含水率の変化の影響を受けやすい。またひび割れ幅が大きいほどコンクリート内部への水分供給量が大きくなった結果，14日後においては0.3mmの吸水長さが大きく変化したと考えられる。また，

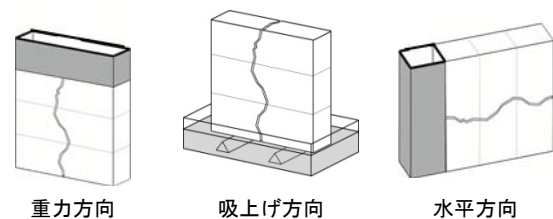
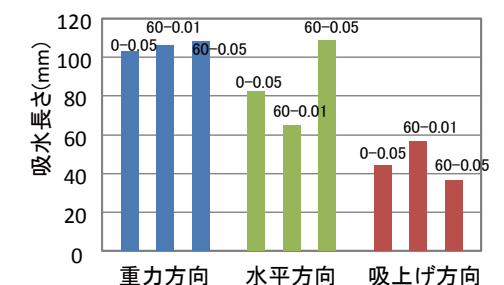


図-2 試験方法



(何れもW/C50%、数字は相対含水率(%)・ひび割れ幅(mm)を示す)

図-3 吸水方向と吸水長さ

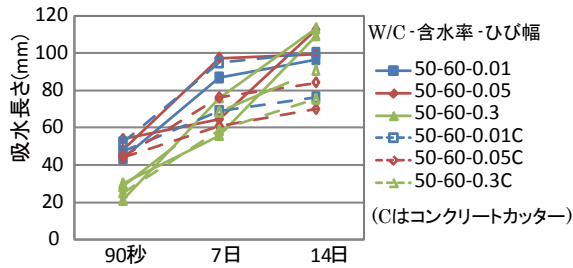


図-4 90秒, 7日, 14日における吸水長さ

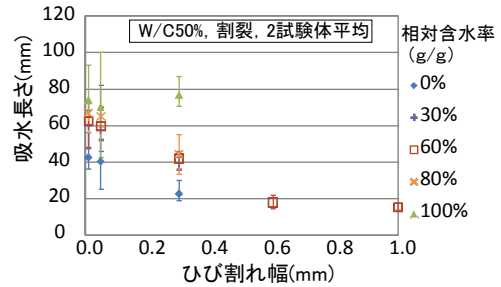


図-5 相対含水率・ひび割れ幅と吸水長さ

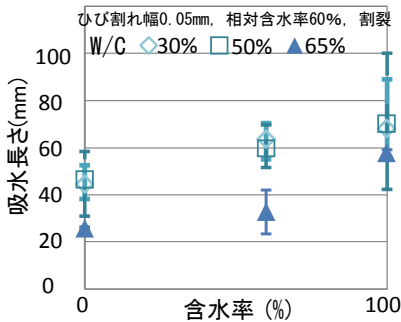


図-6 水セメント比と吸水長さ

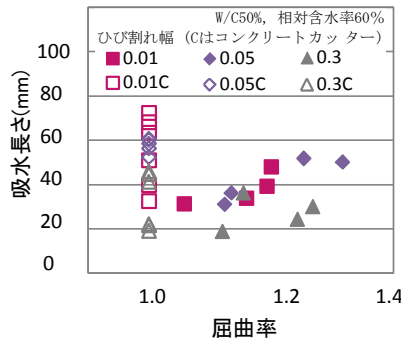


図-7 屈曲率と吸水長さ

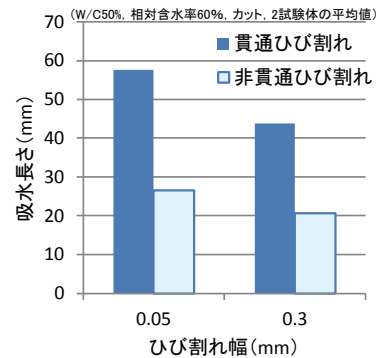


図-8 貫通・非貫通と吸水長さ

この結果から、1週間を超えて常時、水が供給される場合と1週間未満では吸水の長さおよびひび割れの幅の関係が逆転することから、耐久性評価の際には同様に扱わないよう注意が必要となる。

次に、ひび割れ幅・相対含水率と吸水長さの関係を図-5に、水セメント比と吸水長さの関係を図-6に示す。図-5からひび割れ幅が増加するほど、100%を除いた各相対含水率において吸水長さの平均は減少することがわかる。また、初期の相対含水率が高くなるほど吸水長さも増加するという傾向が見られた。藤岡らの研究<sup>3)</sup>からも乾燥状態より湿潤状態のモルタルのひび割れ中の方が水分移動距離が大きいという結果が報告されている。相対含水率100%においては、0.3mmの吸水長さは相対含水率80%以下のそれから著しく上昇し、他2つのひび割れ幅の吸水長さとは比べて最も大きな値をとっている。これは、相対含水率が高いほどひび割れ壁面の表面が水で満たされたため、液水の表面エネルギーをより小さくする方向に働いた結果、表面が濡れやすくなったためと考えられる。一方で相対含水率0%及び60%試験体ではその傾向が見られない結果も一部あった。これは相対含水率が0%から60%の含水状態では水で満たされている細孔の径はより小さい径の細孔であり、水で満たされていない細孔径の毛管張力によるひび割れと垂直方向への吸水量に大きな違いが無かったことなどが推測される。一方、図-6からは水セメント比65%のとき吸水長さが減少するという結果が得られ、コンクリート部への吸水が影響したことが考えられる。そのため、実験で用いた0.05mm幅のひび割れにおいて、ある一定以上の細孔径

から毛管張力の影響が見られやすくなると考えられる。

次に屈曲率と吸水長さの関係を図-7に示す。なおここでの屈曲率とは吸水長さを吸上げ高さで除した値とした。つまり、屈曲率が1はカットの試験体の結果であり凹凸がない。結果から屈曲率が1のときはそれ以外に比べて全体的に吸水長さが大きくなっており、ひび割れ内表面の濡れやすさの影響も含んだ屈曲による影響があると示唆される。Dianeらは吸水6秒までの水分挙動について実験を行い、屈曲による吸水の妨げと考えられる結果や水セメント比及び相対含水率の影響は小さいことを示唆しており<sup>8)</sup>、本実験結果と一部異なる傾向を示している。

次に貫通・非貫通の試験体の吸水長さの結果を図-8示す。貫通・非貫通の比較には全てカットした試験体を用いた。非貫通のひび割れ試験体の吸水長さが貫通それよりも半分程度の大きさとなった。また、Bradらはひび割れの長さおよび吸水高さの相関関係があることを示唆している<sup>7)</sup>。これらから、気体の抜け道による制限から水蒸気の流れが大きく影響していることが推測される。本研究では10cm長さのひび割れであるが、長さや幅の異なるひび割れの場合については今後検討すべきと考えられる。また、ひび割れ幅の大きさによる差は依然として存在した。

#### 4. コンクリートのひび割れ中の水分移動の理論背景

##### 4.1 Washburn 式

コンクリートのひび割れ部における水分移動はしばしば2枚の平行平板間の液体の移動として捉えられ、ポア

ズイユ式や Washburn 式により示される<sup>7) 9)</sup>。式(1)に 2 枚の平行平板間の Washburn 式を記す。なお、Washburn 式は流量の関係式であるポアズイユ式から得られる<sup>11)</sup>。

$$l^2 = \frac{d^2}{6\eta} \Delta p \cdot t \quad (1)$$

$l$  : 移動距離 [m]

$d$  : ひび割れ間の幅 [m]

$\eta$  : 粘性係数 [m<sup>2</sup>/sec]

$\Delta p$  : 駆動力 [N/m<sup>2</sup>]

駆動力は間管内の圧力差及び重力エネルギーである。圧力差は界面張力のエネルギー差から生じ、毛管張力として表現される。

#### 4.2 界面張力

濡れた表面と乾いた表面のエネルギーの差 $\Delta E$  は液体と固体と気体の間のそれぞれの界面張力により式(2)で示される<sup>12)</sup>。

$$\Delta E = \gamma_{so} - \gamma_{sl} - \gamma \cos \alpha \quad (2)$$

$\gamma$  : 液体-気体界面の界面張力 (表面張力) [N/m<sup>2</sup>]

$\alpha$  : 接触角 [°]

$\gamma_{so}$  : 固体・空気相間の界面エネルギー [N/m<sup>2</sup>]

$\gamma_{sl}$  : 固体・液体相間の界面エネルギー [N/m<sup>2</sup>]

$\gamma_{so} > \gamma_{sl}$  のとき、固体界面のエネルギーを下げようとして濡れる。なお、平衡状態となっているとき左辺は 0 となるため、 $\gamma \cos \alpha = \gamma_{so} - \gamma_{sl}$  となる。

#### 4.3 毛管張力

コンクリート中の毛管張力は式(2)において左辺が 0 のとき、2 壁の界面張力及び重力との釣り合いから式(3)のようにして算出される<sup>12)</sup>。

$$\rho g h = 2\gamma \cos \alpha \quad (3)$$

$\rho$  : 液体の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$h$  : 毛管吸収による吸水高さ [m]

$g$  : 重力加速度 [m/sec<sup>2</sup>]

#### 4.4 粘性

固体と液体間に相対的に速度があるとき、界面からの距離  $r$  [m] において速度  $u$  [m/sec] は粘性  $\eta$  による摩擦と力により示される。

#### 4.5 コンクリートのひび割れ中の水分移動適用への見解

コンクリートのひび割れ中の水分移動を Washburn 式に適用する際には 2 枚の平行平板間の流れとして仮定している。しかし、実際には固体部には細孔空隙が存在するため、ひび割れの向きと垂直方向への吸水現象が厳密には生じている。さらにひび割れの屈曲により、固体界面が重力方向と角度を有す。従って、ひび割れに沿う方向と直交するコンクリート細孔の毛管張力は、厳密には式 (2) における重力方向の力に加算されることとなる。

また、重力は現象の長さの尺度が毛管長を超えないと重要にならない<sup>12)</sup>。この値は水の場合 2.7mm 程度であ

り、この値以上では重力が支配的となる。そのため、コンクリートのような nm オーダーから数百  $\mu$ m といった細孔が複雑につながり分布しているような細孔構造の中に存在する水分は、毛管張力が支配的になると考えられる。このような空隙構造を持つ多孔質材料中の液水の流れにおいては、しばしばマクロな透水係数を用いて不飽和ダルシー流として表される。一方、コンクリートのひび割れの場合には、ひび割れの形状も多岐に渡るため一概には言えないが、毛管張力以外に重力の影響は一概には無視できないものと考えられる。

また、粘性係数に関して、コンクリートのひび割れのような多孔質材料の平行平板間においては多孔質固体への吸水、すなわち板間から板方向と垂直方向への吸水もあるため、一般的な水の粘性を用いて考えることは不相当であると考えられる。また、速度を決定する粘性摩擦力及び毛管張力は屈曲を有すひび割れにおいて常に微妙に変化する。

また、一方で気体の抜け道の存在が無視できないが、一般的に行われている気体の移動は拡散流束であり、この現象論は本研究で対象としている初期段階の急速な液水の移動により押し込まれる場合には適さないと考えられる。

上記から、コンクリートのひび割れを平行平板として式(1)をコンクリートのひび割れ中の水分移動の予測式として適用する際には、粘性係数及び毛管張力が特有のパラメータとなる。そこで、次にこれらの特有なパラメータの取得を行い、Washburn 式の適用による予測を試みた。

### 5. Washburn 式による予測

#### 5.1 見かけの毛管張力の取得

前掲した実験の結果を式(3)に適用し、コンクリートのひび割れにおける毛管張力を取得した。ただし、ひび割れ壁面からコンクリート細孔中へ吸水されるため、これらを含む見かけの毛管張力とする。

図-9 及び図-10 に屈曲無し、屈曲有り試験体の順で見かけの毛管張力の結果を示す。値は 3 試験体の平均値を用いた。屈曲が無いひび割れの場合、相対含水率に依存し、ひび割れ幅の増加に従い見かけの毛管張力は減少する傾向が見られた。また、相対含水率が 100% では見かけの毛管張力が大きくなり、0% 及び 60% 試験体では同じ程度であった。両方の結果からひび割れ幅と見かけの毛管張力の線形式を得た。

一方、屈曲がある場合には屈曲無しに比べて、特にひび割れ幅が 0.01mm のときに見かけの毛管張力は小さい値となり、屈曲が無い試験体で見られたようなひび割れ幅と見かけの毛管張力の相関の傾向は見られなかった。

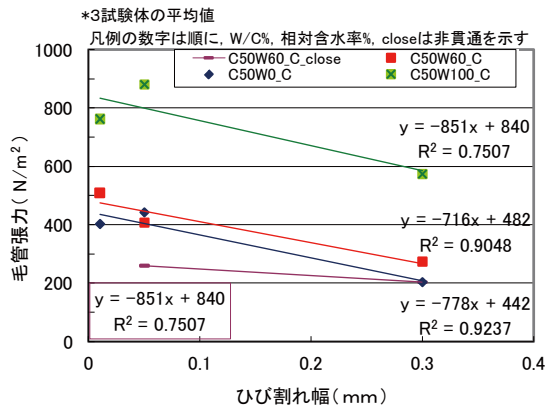


図-9 見かけの毛管張力 (屈曲無し)

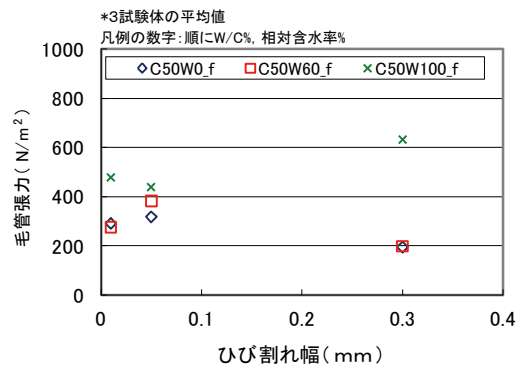


図-10 見かけの毛管張力 (屈曲有り)

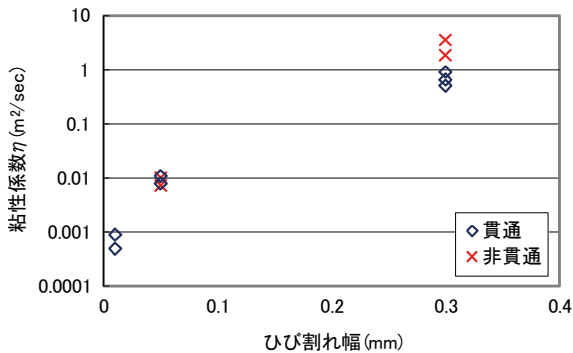


図-11 見かけの粘性係数

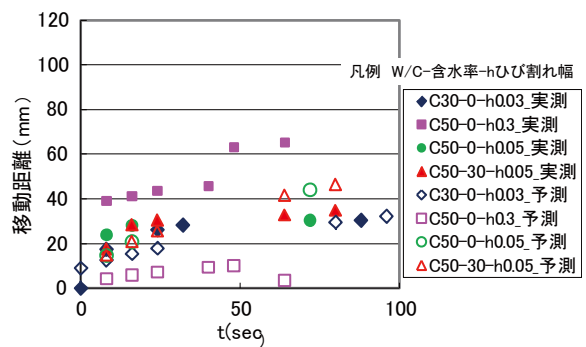


図-12 Washburnによる予測と実測の比較 (水平方向)

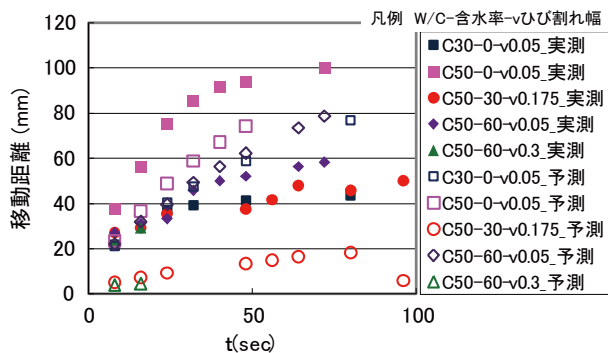


図-13 Washburnによる予測と実測の比較 (重力方向)

これは、ひび割れの屈曲によりひび割れに沿う方向に対して重力エネルギーが減少し、ひび割れ幅が減少するほど重力に対するペースト細孔の毛管張力の影響が増加するためと考えられる。

0.05mm 及び 0.3mm 幅においては屈曲の有無で大きな差異は見られなかったことから、0.01mm 幅における毛管張力は見かけ上、屈曲の影響を受けて 0.05mm 幅におけるそれより減少する場合があることが確認された。

## 5.2 見かけの粘性係数の取得

粘性摩擦は液体固有の値であるが、コンクリートのひび割れ中においてはひび割れ壁面からコンクリート中へ吸水されるために、ひび割れ中の水分移動ではコンクリート界面から受ける抵抗力が異なると考えられる。そこで、流れに対して摩擦抵抗力の係数である粘性係数を取

得する。各時刻の移動距離及び実験結果から得た毛管張力を用いてひび割れ中の吸い上げ方向の水分移動におけるみかけの粘性係数を得た。毛管張力は図-9 の屈曲無し試験体の結果のものを用い、各時刻の移動距離は吸い上げ試験 (屈曲無しの試験体) によるものとした。

図-11 に粘性係数の結果を示す。ひび割れ幅が小さいほど粘性係数が小さくなっており、またひび割れ幅が 0.3mm の非貫通では見かけの粘性係数は 1 以上となっている。この結果はすなわち、吸い上げ方向に対して、ひび割れ幅が減少するほど摩擦抵抗力が大きく働いていることを意味し、また 0.3mm 幅の非貫通ひび割れでは、見かけの毛管張力に含まれる水蒸気圧といった他の要素による影響が摩擦抵抗力以上に大きいことが考えられる。

## 5.3 Washburn 式による予測

本研究とは別で行われたひび割れ中の水分移動実験における結果<sup>5)</sup>と、上記の各パラメータを用いた Washburn 式による予測値を比較した。なお、以前の試験体のひび割れは、幅が 0.05mm 以上で非貫通であった。また毛管張力は屈曲の無い試験体の結果を用いた。

図-12 及び図-13 に水分移動の向きが水平方向及び重力方向の結果についてそれぞれ示す。

方向によらず 0.05mm についてはよく合致しているが、0.3mm では大きく異なった。0.3mm 幅の非貫通のひび割れでは、上記 5.2 の見かけの粘性係数の取得時に考察したように、水蒸気圧などの見かけの毛管張力の取得方法

に関わる他の要素が大きく影響したためと考えられ、これらについては今後の課題である。

また重力方向の結果は全体的に実測より移動速度が遅い傾向となった。見かけの粘性係数はひび割れからコンクリートへの吸い込みを含むものであり、本研究では吸い上げ時における速度において粘性係数を得た。ひび割れを吸い上がる速度においてひび割れからコンクリート部へ吸い込まれる影響と、重力方向においてひび割れ中を移動する水分の速度ではコンクリートへの吸い込む量が異なったことは一因として考えられる。つまり、ひび割れ中の移動速度によってコンクリートへの吸い込み方が異なったと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、不飽和状態のコンクリートのひび割れにおける水分挙動のより正確な評価に向けて、特にひび割れ中の水分移動の初期数分の急速な挙動について評価を行うことを目的とし、移動距離に影響を及ぼす要因の検討を行った。また、ひび割れからコンクリート部への吸水現象及び水蒸気の流れの影響を含む見かけの毛管張力及び粘性係数の取得を行うことで、2枚の平行平板間における Washburn 式の適用を検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ひび割れ中の水分移動の駆動力として、0.01mm 以下のひび割れでは見かけの毛管張力に対する重力の影響は小さくなり、0.05mm 以上のひび割れ幅においては見かけの毛管張力に対して重力の影響は無視できない。
- (2) 不飽和状態において、ひび割れ中への吸水長さ及びひび割れ中の見かけの毛管張力の水セメント比及び相対含水率の違いによる差は比較的小さいことが確認された。
- (3) 吸水長さはひび割れの屈曲の影響により屈曲がない時より若干減少する。また、ひび割れ幅が減少するほどひび割れ方向に対する摩擦抵抗力が大きく働いていることが確認された。これは、空気の抜け道の減少に加え、ひび割れの屈曲によりひび割れに沿う方向に対して重力エネルギーが減少し、ひび割れ幅が減少するほど重力に対するペースト細孔の毛管張力の効力が増加するためと考えられる。
- (4) 0.3mm 幅、10cm 長さの非貫通ひび割れでは、ひび割れの屈曲やコンクリートへの吸水に伴うひび割れ方向の摩擦抵抗力以上に水蒸気圧による影響が大きいことが考えられる。ひび割れ中の水蒸気圧が及ぼす影響についてはより詳細な検討が必要であり、今後の課題であると考えられる。

謝辞：本研究は東京理科大学の正道照奈氏、藤田朋也氏に多大な協力を得た。記してここに謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 伊藤洋, 坂口雄彦, 西山勝栄, 清水昭男: コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究, セメント技術年報, vol.41, pp.217-220, 1987
- 2) 早野博幸, 野口貴文, 榎木隆: ひび割れ面の粗さがコンクリートの水密性に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, No.615, pp.23-30, 2007/05
- 3) 藤岡正見, 鈴木計夫: 耐久性劣化要因としてひび割れ内雨水に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集 No.50, pp. 434-439, 1996
- 4) 矢田一也, Hussein Nour-Allah, 田中和幸, 佐藤良一: 電気抵抗法に基づく鉄筋コンクリートひび割れ部での水分移動の評価について, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.701-706, 2003
- 5) 兼松学, 丸山一平, 野口貴文, 飯倉寛: 中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ部における自由水挙動に関する研究, セメントコンクリート論文集, Vol.61, pp.160-167, 2008
- 6) P. Zhang, F. H. Wittmann, T. Zhao, E.H. Lehmann: Neutron imaging of water penetration into cracked steel reinforced concrete, Physica B: Condensed Matter, Volume 405, Issue 7, 1 April, pp. 1866-1871, 2010
- 7) Brad Pease, Jon Couch, Mette Geiker, Henrik Stang, and Jason Weiss: Assessing the portion of the crack length contributing to water sorption in concrete using X-ray absorption, proceedings of the 2nd international RILEM Workshop, pp.63-70, 2009
- 8) Diane Gardner, Anthony Jefferson, Andrea Hoffman: Investigation of capillary flow in discrete cracks in cementitious materials, Vol.42, 2012, pp.972-981
- 9) Mohamed Boulfiza, Koji Sakai, Nemkumar Banthia, and Hidenori Yoshida: Prediction of chloride ions ingress in uncracked and cracked concrete, ACI Material journal, pp.38-48, January-February 2003
- 10) B.Gerard, H. W. REINHARDT, D. Breysee: Measured transport in cracked concrete, penetration and permeability of concrete, H.W.Reinhardt, ed., RILEM Report 16, 1997, pp.265-324
- 11) 小石眞純: ナノテクノロジー時代の含侵技術の基礎と応用, テクノシステム, 2007
- 12) ドジェンヌ, ブロシャール-ヴィアール, ケレ: 表面張力の物理学, 吉岡書店, 2003