

論文 コンクリート中のひび割れの内部構造が透水性に与える影響

岡崎 慎一郎^{*1}・平田 直矢^{*2}・氏家 勲^{*3}

要旨：本論文は、凹凸を有するひび割れの透水の場合、亀裂を平行平板と近似する場合と比較して流れの様相が異なるという実験事実から、その特性を主として解析的に検討するものである。凹凸のある亀裂面を有した供試体に対して透水試験では、既往の知見と同じく圧力勾配と流量の関係に非ダルシー性が確認された。ひび割れ中の流動を詳細に把握するため、レーザー変位計により計測された亀裂の内部構造をもとにバーチャル狭小空間を計算空間上に再現し、圧力勾配を与える仮想透水試験により液状水を透過させた。亀裂部の凹凸により流量が減少すること、および流れが層流であっても非ダルシー性が現れることが明らかとなった。
キーワード：ひび割れ、透水性、バーチャル狭小空間、非ダルシー性、層流

1. はじめに

地震動による損傷、セメントの水和発熱による温度ひび割れ、収縮に起因する応力によるひび割れなど、コンクリート構造物にとってひび割れは避けることのできない事象である。ひび割れの発生により構造物は美観を損ない、本来有する構造性能を失うのみならず、コンクリート部材の劣化因子の移動を容易にさせることで劣化が加速度的に進行する。そのため、コンクリートの寿命予測および耐久性能の検証には、健全部のみならずひび割れ部における物質異動特性を考慮する必要がある。ひび割れを有するコンクリートの耐久性能の検証には、ひび割れの発生予測技術、ひび割れの検査診断技術、および、ひび割れを考慮した物質移動評価技術が必要である。ひび割れ発生の予測においては、収縮解析、温度応力解析などによって精度の高い技術が確立されている。また、ひび割れ検査診断技術は、超音波などによる非破壊検査によって、ひび割れ幅、ひび割れ長さのみならずひび割れ深さや形状の把握が可能となっている。しかしながら、ひび割れを考慮した物質移動評価技術においては、ひび割れ内部に

おける劣化因子の移流及び拡散を支配する液状水の水理物質移行現象に未だ踏破すべき課題が残されている。

ひび割れ部における透水モデルは、先達により様々なものが提案されている。流れを層流と仮定するものは、どのモデルにおいても、ひび割れの内部構造を平行平板間に近似した場合の解である Hagen-Poiseuille 流れに、定数を乗じたもの(式(1))を礎としている。

$$q_w = c_0 \frac{bw^3}{12\eta_w} \frac{P_1 - P_0}{L} \quad (1)$$

ここに、 q_w ：単位時間あたりの透水量、 c_0 ：補正係数、 b ：ひび割れ長さ、 w ：亀裂幅、 L ：流路長、 η_w ：液状水の粘性係数である。伊藤洋等¹⁾は、補正係数 c_0 の代わりに、亀裂幅 w に応じた係数 $c(w)$ を式(1)に乗じることを提案している。また伊藤忠彦等²⁾は、亀裂幅が小さい場合に透水が確認されないこと、および(1)の理論値は常に実験値を過大評価するという事実から、限界ひび割れ幅 w_0 を提案し、亀裂幅 w の代わりに $(w-w_0)$ を用いることで、算出される流量を減ずることを提案している。なお、限界ひび割れ幅 w_0 は圧力に依存する関



図-1 バーチャル狭小空間

*1 愛媛大学大学院 理工学研究科 生産環境工学専攻 環境建設工学コース 助教 博(工) (正会員)

*2 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

*3 愛媛大学大学院 理工学研究科 生産環境工学専攻 環境建設工学コース 教授 博(工) (正会員)

数となっている。いずれのモデルも実験条件による適用範囲の違いから単純に比較することはできないが、特に亀裂幅が 0.2mm 以下の場合、評価モデルによって透水性に大きな差が生じる³⁾。モデルに用いられる流路幅に、ひび割れ幅をそのまま用いるのは適切ではないことは上述の研究により明らかとなったが、モデルによって算出される透水量に差異が生じることは、平行平板による近似の限界を示していると思われる。

また、ひび割れ中の流れを乱流と仮定したものに松岡等⁴⁾の研究がある。ひび割れ中の透水に関する幾つかの実験結果⁵⁾⁶⁾⁷⁾によると、同一の亀裂幅を有するコンクリートにおいて、液状水の加圧力の増加に伴い透水量が非線形に増加する非ダルシー性が認められており、狭小空間中の流れ場が乱流と仮定すれば、ひび割れ中の液状水に非ダルシー性を再現することが可能となる。しかし、ひび割れ中の平均流速から算出されるレイノルズ数(Re)は、ひび割れ中の流れの場合、管路や開水路において層流から乱流に遷移する $Re=2000$ よりも 3 から 4 オーダー小さい。ひび割れのような狭小空間中は管路や開水路とはスケールが異なるとはいえ、乱流であると断定するには論拠が不十分である。

以上の議論から、より汎用性の高いモデルの構築には、平行平板ではない凹凸のある狭小空間での流動メカニズムの解明が不可欠である。

本研究では、コンクリート部材におけるひび割れの亀裂面に代表されるような、屈曲を有する狭小空間中の液状水が、ひび割れ内部でどのような挙動を示すかに眼目を置いた。亀裂を有するコンクリートを対象とした透水試験を行うとともに、レーザー変位計により計測された上下不連続面の表面形状情報から構築されたバーチャル狭小空間(図-1)に水圧を作用させる仮想透水試験により、ひび割れの内部構造が液状水の挙動に与える影響に関する検討を行った。

2. 加圧透水試験の実験概要

2.1 使用材料および供試体の亀裂形状

供試体は、 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ のセメントペースト供試体および、コンクリート供試体である。セメントには普通ポルトランドセメントを用い、細骨材および粗骨材には砕砂を用いた。養生は各供試体 2 週間の水中養生を施した。亀裂部の内部構造が流動に与える影響を明確にするために、亀裂形状は、平滑面と割裂面の 2 種類とした。亀裂を平滑にした供試体(以下、平滑面供試体)の作製には、材料分離の影響を排除するために、 $W/C=30\%$ のセメントペーストを用いている。供試体打設前に鋼製モールドの円柱軸方向に $50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の平面プレートを設置し、亀裂面が平滑になるように再

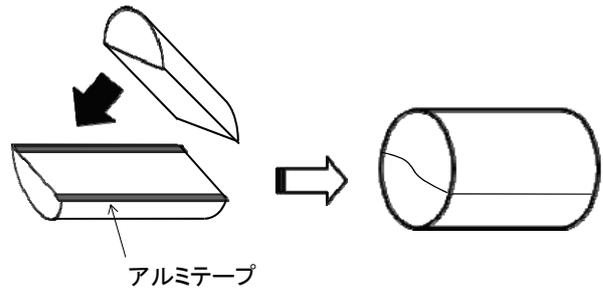


図-2 亀裂幅の制御法

現した。打設後 1 日経過後、モールドの脱型を行い、プレートが付着した状態のまま水中養生を施した。養生終了後、プレートを外し、透水を行った。割裂面を有する供試体(以下、割裂面供試体)の作製には $W/C=65\%$ のコンクリートを用いた。割裂面は、側面から一軸圧縮を加えて供試体を割裂することにより再現した。なお、 W/C の低い場合、セメントマトリックスの強度が高く、骨材に沿わない亀裂が発生し、亀裂面が比較的平滑になることが知られている。平滑面の供試体と W/C が異なるものを用いた理由としては、平滑面の透水との差異をより明確にするためである。

2.2 亀裂幅の制御法と透水試験方法

透水試験は各供試体の亀裂幅および加圧力をパラメータとして行っている。亀裂幅は、図-2に示すように、対となる供試体的一方である半円柱状の供試体の、端面から 2mm までの位置において、任意厚さに調整したアルミテープを設置したのちにもう一方の供試体を張合わせ、アルミテープの厚みを利用して亀裂を再現した。供試体底面および上面それぞれ 4 箇所計 8 箇所測定し、8 箇所の平均値を平均亀裂幅と定義し、理論値の算定に用いる。試験は、平滑面供試体の平均亀裂幅は、0.028mm, 0.080mm, 割裂面供試体の亀裂幅は、0.116mm となった場合を対象に行っている。亀裂幅を制御したのち、供試体を内径 $\phi 50\text{mm}$ 外径 $\phi 100\text{mm}$ 高さ 50mm のゴム環にはめ込んだものを透水セル内に設置する。コンプレッサーによって任意の加圧力に調整された液状水をセル内に透過させ、0.01g の精度で透過量を測定した。試験は 0.01MPa 毎に増加させ、透水量を測定した。なお、数十日にわたる透水試験においては、微粒子の目詰まりによる透水量の減少が確認されている¹⁾。本試験においては、1 ケースの測定につき数分の計測時間であったことから、微粒子による目詰まりの影響はほとんど無視できると考えている。

2.3 実験結果

図-3, 4に透水試験結果を示す。なお、横軸には加圧注水面の作用圧力 P_1 と大気圧 P_0 の差(P_1-P_0)を供試体厚で除した圧力勾配をとり、縦軸には透過量の測定

値である質量を、体積に換算したものを透水時間で除した単位時間あたりの透水量を示している。なお、グラフの実線は、以下の式で表現される平行平板間の流量に関する理論式を示している。

$$q_w = \frac{bw^3}{12\eta_w} \frac{P_1 - P_0}{L} \quad (2)$$

亀裂部が平滑面の場合、圧力差と流量はおよそ線形関係にあり、ダルシー則が成立していることが確認される。また、理論値を示す直線と実験値に相違がほとんど見られない。一方、割裂供試体の場合、圧力差と流量の関係は上に凸の曲線の関係が確認されることから、流れは非ダルシー則に従っているといえ、加えて理論値と比較して流量が少ないことが確認された。これは、流路の屈曲における流路長の増加と、圧力損失の影響によるものと考えられる。いずれの供試体の場合においても、亀裂内部の平均流速から算出されるレイノルズ数はすべての圧力勾配下において $Re=1$ を下回っており、層流と乱流の遷移値とされる限界レイノルズ数とされる 2000 より小さいため、層流と判断してよいと考えられる。層流であるにも関わらず、実験値は式(1)で表現される Hagen-Poiseuille 流れに従わないという事実より、平行平板によるひび割れのモデル化は適切ではなく、モデルに流路の屈曲など内部構造が流動に与える影響を考慮に入れる必要があることを示唆している。

3. パーチャル狭小空間における仮想透水試験

3.1 パーチャル狭小空間

割裂した円柱供試体の一方を対象に、亀裂面のラフネス形状をレーザー変位計により $50 \mu\text{m}$ ピッチで計測し、計測結果をもとに離散化ラフネスデータを作成した。なお、計測領域の端点周辺でノイズが確認され、この影響を排除するため、ラフネスデータの計測領域は $48\text{mm} \times 48\text{mm}$ とした。流体に関する基礎方程式につ

いては次節において詳細を述べるが、流体挙動を記述する基礎方程式は強い非線形性を有しており、境界面

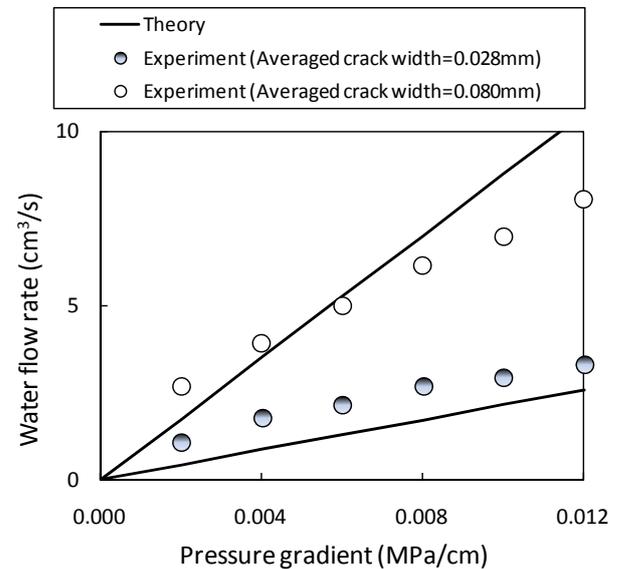


図-3 平滑面供試体の透水試験結果

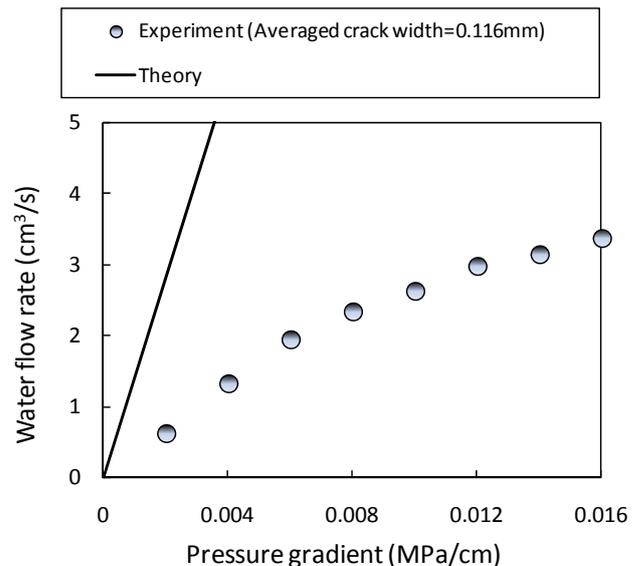


図-4 割裂供試体の透水試験結果

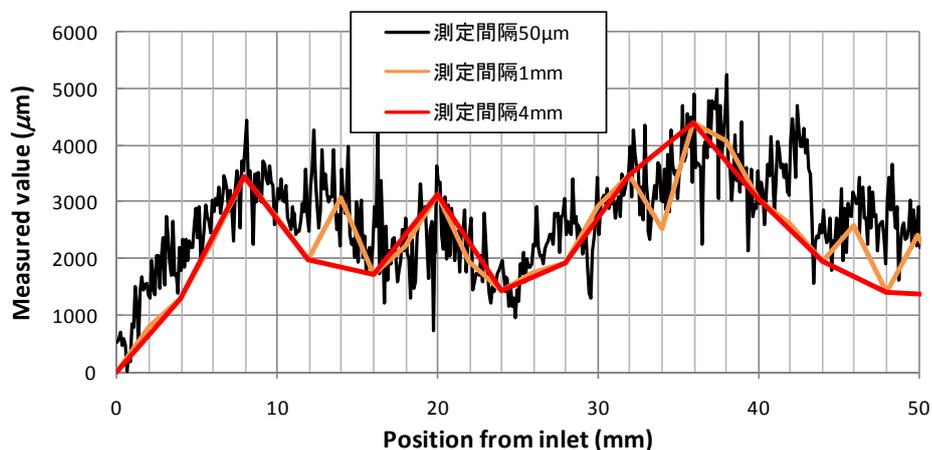


図-5 レーザー変位計による測定間隔と測定値

に幾つもの凹凸を有するような計算空間内での数値演算には莫大な計算時間を要することが事前の感度解析により確認された。そこで本研究では演算効率を考慮し、ラフネスデータのマッピング間隔を大きくすることを検討した。図-5に流入部から流下方向への距離と表面凹凸の測定値の関係の一部を示す。レーザー変位計による測定間隔は $50\mu\text{m}$ であったが、マッピング間隔を 4mm まで増加させても $1000\mu\text{m}$ 程度の起伏はおよそ再現されたため、 4mm ピッチの測定結果を用いてバーチャル空間の要素分割を行った。次に、ラフネスデータの平均平面を算定し、平均平面が地平面に平行となるように、ラフネスデータに補正を施した。図-6にその結果を示す。なお、標高における負の値は、平均平面よりも下部に位置することを示している。このラフネスデータによって再現されたひび割れ面と同一なものを2枚用意し、任意の間隔を保ちつつ平行に配置する。その2枚の面によってつくられる領域をバーチャル狭小空間と定義する(図-1)。

3.2 解析手法

バーチャル狭小空間を透過する液状水を支配する方程式として、以下に表現される Navier-Stokes 式を採用した。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (3)$$

ここに、 \mathbf{u} : 速度ベクトル, ρ : 密度, p : 圧力, ν : 動粘性係数, \mathbf{f} : 単位体積あたりの流体に作用する外力ベクトルである。液状水は非圧縮性とし、計算空間には液状水で満たされているものと仮定した。解法には有限要素スキームを採用し、計算には乱流モデルを用いず、壁面における境界層を直接解くといった層流計算の枠組みを用いた。計算空間の要素分割には4面体要素を使用した。要素分割後の計算空間と境界条件を図-7に示す。流入口, 流出口には圧力境界を設定することとし, 流入口の面全体一様に所定の圧力($P_1 - P_0$)を加え, 流出口における圧力は0とした。流入口, 流出口以外の境界面はすべりのない壁境界とした。流れが定常に至り, 解が所定の誤差に収束するまで反復計算を行った。

3.3 解析結果

図-8に、亀裂幅を 0.116mm , 流入側に 0.08MPa 作用させた場合における速度ベクトルの一例を示す。速度ベクトルは一様に流下方向に向いており、流下方向直角への流れはほとんど見られないものの、局所的に流速が変化しており、亀裂中の流れの複雑さが確認できる。図-9に圧力と透水量の関係を示す。なお、図中の白抜き四角点に解析結果、黒の丸点に実験結果を

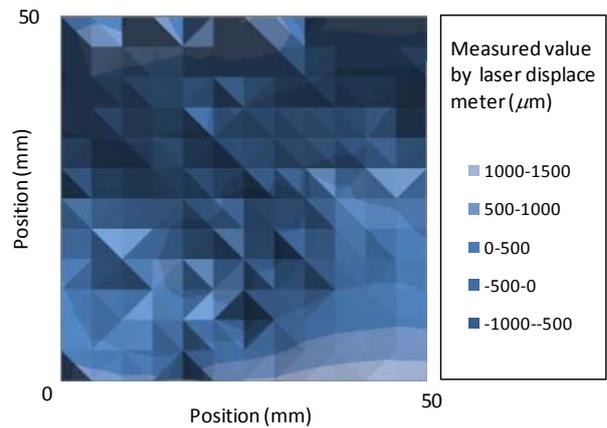


図-6 平均平面による補正後の亀裂面の起伏

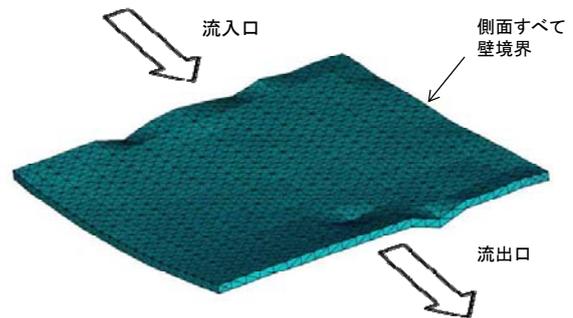


図-7 要素形状と境界条件

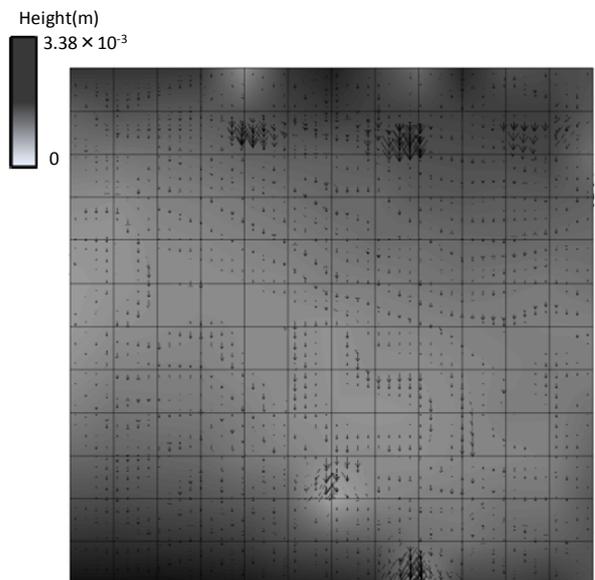


図-8 計算された速度ベクトル

示している。また、直線は式(2)で算出される理論値であり、図-4に示した直線と同一のものである。解析結果は、式(2)による理論式と比較して流量が小さく、より実験値に近づいている。これは、凹凸の再現による流路長の増加により、空間内の液状水が亀裂面に接する領域が平行平板と比較して大きくなることで、壁面摩擦における圧力損失が増加したことに起因する。

また、低圧力勾配域において実験値のおよその再現には至っているが、解析値は圧力勾配の増加に対して流量はほぼ直線的に増加し、非ダルシー性を呈していないため、圧力勾配の増加に伴い実験値との乖離が大きくなっている。非ダルシー性の再現に至らなかったのは、流路の幅が、設定した起伏のスケールに対して相対的に小さく、起伏の変化も緩慢であり、流れが屈曲沿ったものしか存在できなかったことに起因すると思われる。運動エネルギーの逸散が壁面摩擦のみに起因する場合、圧力勾配と流量の関係は線形となる。流れにおいて渦および流れの剥離⁸⁾が発生する場合、壁面摩擦以外の原因で運動エネルギーが損失する。その損失が圧力勾配の増加に対して非線形に変化するため、非ダルシー性が現れると考えている。この仮説を検証するためには、渦および流れの剥離が確認されるまで、マッピング間隔を小さくとり、起伏のスケールおよび起伏の変化を敏感にすべきではあるが、計算時間の都合から、今回は流路幅を10倍の1.16mmとし、流路幅を大きくすることで起伏のスケールと流路幅のスケールをほぼ同等にした場合の解析を実施した。

図-10に解析結果を示す。この場合、非ダルシー性の再現に至ることが確認された。設定した流路の幅が増加し、定常的な渦の形成や流れの剥離が起り、これらが圧力勾配の値によって異なる挙動を呈することに起因すると思われる。この結果により、非ダルシー性は、層流の枠組みにおいても説明が可能であり、流路の屈曲、渦や剥離の形成による運動エネルギーの損失が主とした要因であるといえる。なお、流路幅が0.116mmである場合においては、バーチャル狭小空間に用いるマッピング間隔をより小さくすることにより、凹凸の起伏のスケールが流路幅とほぼ同じになり、流路幅が1.16mmの場合における流れ場の再現および非ダルシー性が再現できると考えられる。

最後に、凹凸による局所的な流況の詳細な把握のため、48mm×48mmの流路において、ラフネスデータを100点に減じ、その代わりにバーチャル狭小空間のメッシュを増加させて解析を行った。各点のラフネスには平均値0mm上限値48mmとする分布に従うランダムデータを用いた。流入側、流出側の圧力をそれぞれ0.08MPa、0MPaとし、流路幅を10mmとした。図-11に渦度分布と速度分布の解析結果を示す。なお、各値の分布は、流下方向に垂直な平面で切ったときの断面のみを示している。渦度の分布において、5つの断面の中央に位置する断面の、中央下部の屈曲部において渦度の値が大きくなっており、回転の速度が大きい渦がこの部位に存在すると考えられる。渦の存在により、運動エネルギーが逸散される⁸⁾。圧力勾配の増加に伴

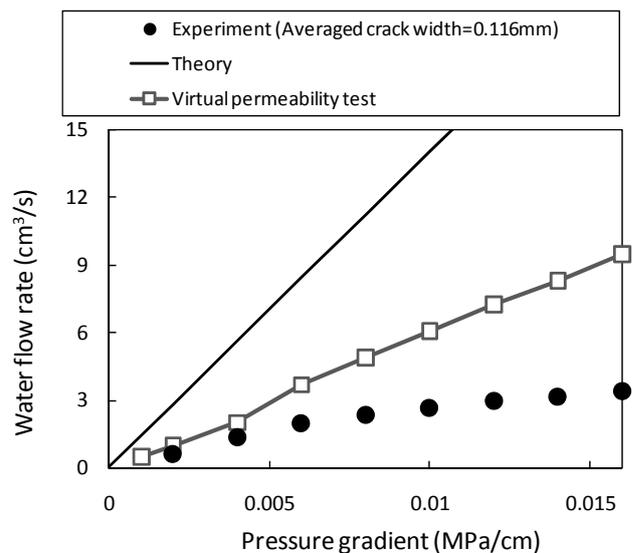


図-9 解析結果(平均亀裂幅 0.116mm)

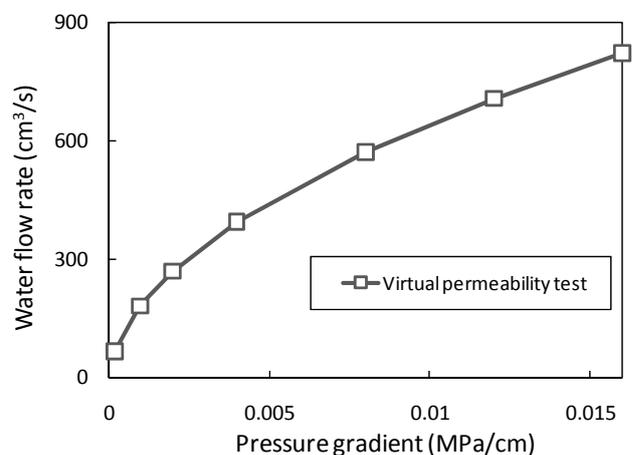


図-10 解析結果(平均亀裂幅 1.16mm)

い、逸散するエネルギーならびに流速が、非線形に変化するために、圧力勾配と流量の関係に非ダルシー性が現れると考えられる。また、速度の分布において、中央の断面に着目すると、流れは流路に沿ってはならず、流れは流下方向に向かって直線的な挙動を示している。この事実により、ひび割れ部における流れは、常にひび割れの屈曲に沿うものであるとは限らず、ひび割れ内部構造によっては図-11で示している実質の流路幅と称すべき領域が形成される場合も存在するということが明らかとなった。これは、流量の算出において、亀裂幅を常に用いるのは必ずしも適切ではなく、流れ場のスケールと亀裂面の凹凸のスケールによっては実質の流路幅を用いるのがよいことを示唆している。これは、第1章で述べたように、流量の算出に用いる亀裂幅には、実際の亀裂幅よりも小さい($w-w_0$)を用いている伊藤等²⁾のモデルの妥当性を裏付けるものである。なお、本研究におけるバーチャル狭

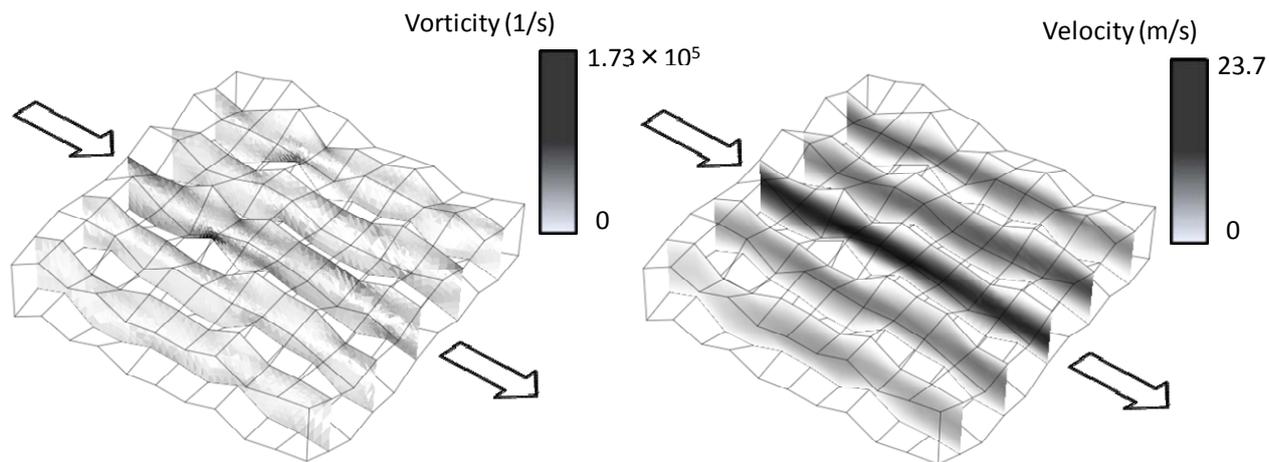


図-11 渦度分布と速度分布(解析値)

小空間は、コンクリートの割裂供試体の一方のデータを平行に2つ重ね合わせることで再現しているが、実際には割裂供試体の一方のひび割れ形状ともう一方とは厳密には同じではなく、割裂時やひび割れ発生時には断面の欠損が生じるため、ひび割れ内部の流路幅は一定ではない。Mohamed⁹⁾は単一のひび割れ内部の亀裂幅分布を、関数を用いて再現するという試みを行っている。流量計算モデルには亀裂部の流動メカニズムの解明のみならず、このような工学的扱いが容易となるモデルへの組み込みが必要である。

また、屈曲による部分的な流速の変化により、流路において層流のみならず局所的には乱流となる場合もあり、流体の構成則に乱流モデルを組み入れた場合の検討も重要である。これらは今後の課題とする。

4. 結論

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 単一のひび割れを有するコンクリートの透水試験を行った。亀裂面が平滑である場合はダルシー則に従い、亀裂面が凹凸である場合はダルシー則に従わず、圧力勾配と流量に非線形性が現れることが明らかとなった。
- (2) レーザー変位計による測定結果をもとに、ひび割れの内部構造を表現するバーチャル狭小空間を計算空間上に再現した。圧力境界を与えることにより、ひび割れ内部の透水の再現に至った。
- (3) 流路の屈曲による渦および流れの剥離の発生により、運動エネルギーが逸散し、平行平板で計算される理論値よりも流量が減少することが確認された。また、圧力勾配を変化させることにより、実験的に検証された非ダルシー性が確認された。
- (4) 亀裂に凹凸がある場合、流下方向への流れは必

ずしも流路に沿ったものにはならず、亀裂幅よりも狭い領域を通過する流路が形成される。透水モデルの構築にはこの影響を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 伊藤 洋ほか：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.217-220，1987.12
- 2) 伊藤忠彦ほか：ひび割れを有するコンクリートの高水圧下における漏水量について，土木学会第44回年次学術講演会講演集，第5部，pp.412-413，1989.10
- 3) 土木学会：コンクリート構造の時間依存性変形・ひび割れ評価-現状と今後の課題-，コンクリート技術シリーズ38，pp.118-120，土木学会，2000
- 4) 松岡 茂ほか：コンクリートひび割れからの漏水メカニズムと漏水量予測，土木学会論文集，No.523/III-32，pp.83-90，1995.9
- 5) 與田敏昭ほか：高動水勾配下における微小間隙の透水特性の実験的検討，土木学会第56回年次学術講演会講演集，III-A239，pp.478-479，2001.10
- 6) 氏家 勲ほか：ひび割れ表面粗さとひび割れ部の透気・透水性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.841-846，1999.7
- 7) 狩野裕之：コンクリートのひび割れ内の透水性に関する一考察，土木学会第55回年次学術講演会講演集，V-327，2000.9
- 8) 椿東一郎：水理学I，基礎土木工学全書6，森北出版株式会社，p.112，1973
- 9) Mohamed, Boulfiza et al. : Prediction of chloride ions ingress in uncracked and cracked concrete, ACI Material Journal, January-February, pp.38-48, 2003