

論文 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

氏家 勲^{*1}・浅井 文貴^{*2}・佐藤 良一^{*3}

要旨: 本研究はコンクリートのひび割れ部での透気性および透水性を検討するために、ひび割れ表面の凹凸をレーザ変位計で測定し、移動平均を用いて流路長さおよび表面粗さを調べた。また、ひび割れ幅を変化させたコンクリートおよびモルタル供試体を用いて透気および透水試験を実施し、透気量および透水量とひび割れ幅の関係について検討した。ひび割れ面の粗さはコンクリートのほうがモルタルより大きかったが、透気・透水量に殆ど差はなく、また、割れ部の透気量と透水量は比較的良い相関関係があった。ひび割れの摩擦損失係数はレイノルズ数と直線関係となったが反比例とはならなかった。

キーワード: ひび割れ, 表面粗さ, 透気性, 透水性, 摩擦損失係数, レイノルズ数

1. はじめに

水密性あるいは気密性を要求されるコンクリート構造物において、ひび割れはその機能性を低下させる重要な要因である。コンクリート標準示方書では水密性を確保するためのひび割れ発生制御および許容ひび割れ幅が示されている¹⁾。今後、設計法が性能照査型設計法に移行することが予定されており、使用性能である水密性および気密性を照査するためにはひび割れを考慮した漏水量あるいは透気量の予測技術を確立することが必要とされている²⁾。既往の研究においてはひび割れからの漏水量は平行平板内の粘性流体の式を用いて評価されており、その評価式にはひび割れの壁面粗度や曲がりの等の不確定要素を考慮した補正係数を取り入れたものとなっている^{3,4)}。しかしながら、実験条件の相違などにより補正係数は異なっており、また、ひび割れ表面の粗さのデータがなく、補正係数と表面粗さとの関係については検討されていない。

そこで本研究はひび割れ表面の凹凸をレーザ変位計で測定し、ひび割

れの幾何学的表面形状について検討を行った。また、1本のひび割れを対象として、割裂によりひび割れを発生させた円柱供試体を用いて、ひび割れ幅と作用圧力を変化させて透気および透水試験を行い、得られた透気量あるいは透水量とひび割れ幅の関係について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体はφ15×10cmの円柱供試体である。用いたコンクリートおよびモルタルの配合を表1に示す。ひび割れ面の表面形状を測定する供試体は無筋としたが、透気・透水試験を行う供試体にはひび割れ幅を制御するために供試体厚さの中央、直径の1/3の位置の2カ所にD13の異形鉄筋を配置した。供試体は打設後所定の期間まで水中養生を行った。

2.2 表面形状の測定

表面形状の測定には14日間の水中養生終了後

表-1 コンクリートおよびモルタルの配合

種類	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤	AE助剤
コンクリート	20	50	46	170	340	806	972	1.70	1.02
モルタル	---	50	---	270	540	1333	---	---	---

*1 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 工博 (正会員)

*2 愛媛大学 工学部環境建設工学科

*3 広島大学教授 工学部第四類 (建設系) 工博 (正会員)

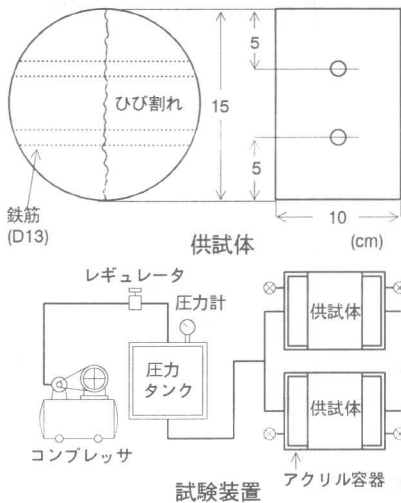


図-1 供試体および透気・透水試験装置

に割裂試験により2分割した供試体の一方を使用した。表面形状測定システムはレーザ変位計(分解能 $0.5\mu\text{m}$, 測定範囲 $\pm 8\text{mm}$, 最小スポット径 $45\times 20\mu\text{m}$), 移動ステージ(分解能 $0.5\mu\text{m}$, 移動平行度 $10\mu\text{m}$ 以下)およびコンピュータからなる。移動ステージに上方から放射されているレーザに対してひび割れ面が垂直となるよう取り付け、 $100\mu\text{m}$ 間隔でステージを移動させた。測定範囲は $9\times 9\text{cm}$ とした。コンクリートおよびモルタルとも10体の供試体について測定を行った。

2.3 透気および透水試験

供試体には割裂試験によりひび割れを発生させた。割裂試験前日に水中から取り出した供試体の上下面にひび割れ幅測定用の標点と载荷中に偏心していないことを確認するためのひずみゲージ(ゲージ長 60mm)を取り付けた。ひび割れ幅は標点間隔 5cm とした標点を供試体上下面で鉄筋と直径位置に取り付け、ホイットモア型ひずみ計(最小目盛 $1/1000\text{mm}$)を使用して計測した。载荷前後における6カ所の標点の変位量の差の平均値を各供試体のひび割れ幅とした。試験を行ったひび割れ幅は約 $0.04\sim 0.15\text{mm}$ である。

割裂試験終了後直ちに供試体上下面以外をエポキシ樹脂系接着剤でシールし、上下面にはアクリル容器を取り付けた。透気および透水試験は割裂試験の翌日から開始した。透気および透

水試験は図-1に示す装置で行い、透気試験に用いた供試体を透水試験に転用している。即ち、最初に透気試験を実施し、終了後直ちにアクリル容器内を水で満たし、翌日圧力タンク内にも水を注水して透水試験を行った。透気および透水試験どちらも作用圧力は $0.02\text{N}/\text{mm}^2$ から $0.02\text{N}/\text{mm}^2$ 間隔で $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ まで与えた。透気試験では所定の圧力を与えて1時間後に流量計で透気量を測定した。透水試験では所定の圧力を与えて1時間後から3時間後までに出てくる水をメスシリンダで計測し透水量を求めた。

測定した供試体数はコンクリート24体、モルタル10体である。供試体は一度に作製したが、上述の一連の試験は2体ずつ実施したため、水中養生期間はコンクリートで $14\sim 40$ 日、モルタルでは $14\sim 24$ 日となり、ひび割れ発生応力はコンクリートで $3.57\sim 4.90\text{N}/\text{mm}^2$, モルタルで $4.65\sim 5.02\text{N}/\text{mm}^2$ であった。既往の研究で曲げ载荷ではあるがコンクリート破断面の表面積に及ぼす材齢の影響が報告されているが³⁾, これを参考にすれば本実験での材齢の差がひび割れ表面形状に及ぼす影響は少ないと考えられる。また、試験中の装置近くの温度は $10\sim 20^\circ\text{C}$ であったため、後述の中では 15°C での粘性係数を用いている。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ表面の粗さ

図-2は供試体の破断面の表面積を測定間隔を変化させて測定した結果の一例を示す。表面積は3次元で測定された点を三角形で結び、三

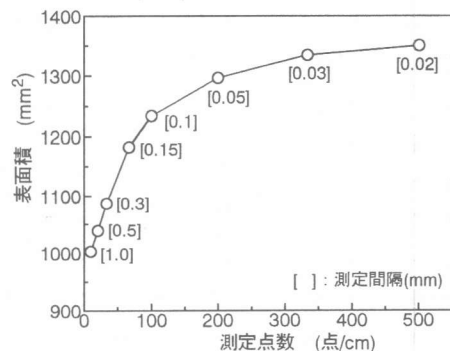


図-2 表面積に及ぼす測定間隔の影響

表-2 ひび割れ表面形状の測定結果

種類	表面積 (cm ²)	表面積比	流路長 (cm)	流路長比	ひび割れ長 (cm)	ひび割れ長比
コンクリート	132.59 [12.01]	1.64	11.42 [0.53]	1.27	12.84 [1.00]	1.43
モルタル	114.21 [6.52]	1.41	10.54 [0.33]	1.17	11.40 [0.49]	1.27

[] : 標準偏差

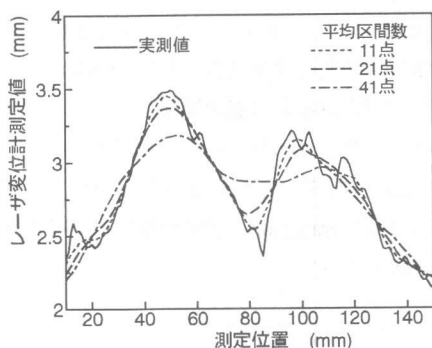


図-3 表面形状実測値とうねり曲線

角形の面積を合計して算出している。表面積は測定間隔を小さくすることにより大きくなっているが、測定間隔0.1mmあたりから表面積の増加の程度が小さくなっている。本研究ではこのことと測定効率を考慮して測定間隔を0.1mmとした。

表-2 はひび割れ表面形状の測定結果を示す。表中の値は10体の平均値である。流路長は供試体厚さ方向、即ち透気および透水試験で流体が流れる方向であり、ひび割れ長は直径方向である。本研究では割製でひび割れを発生しているため、ひび割れ長のほうが流路長より長くなっている。また、コンクリートのほうがモルタルよりそれぞれの値とも大きくなっている。

ひび割れ表面の粗さを求めるためには基準となる位置が必要である。本研究では移動平均値を基準点とし、それらを結んだ線をうねり曲線と呼ぶ。図-3 は移動平均を取る範囲を変化させた時のうねり曲線の一例を示している。移動平均の区間数が多くなると、うねり曲線は滑らかとなる。測定値が増加あるいは減少傾向にある場合にはうねり曲線に大きな差はみられないが、増加から減少あるいはその反対の場合には区間数の違いによる影響が大きくなる。本研究ではうねり曲線と実測値との比較および得られた粗さの大きさから判断して、移動平均の区間数を求めようとする点とその両側5点の11点とした。

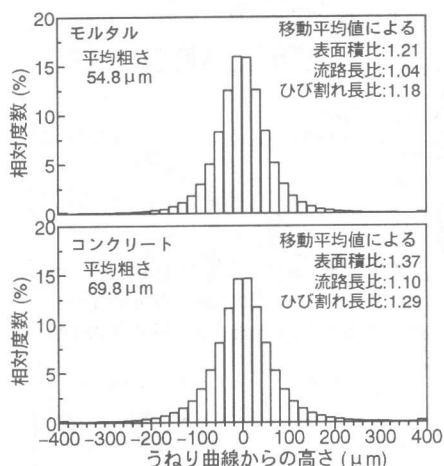


図-4 ひび割れ表面粗さの度数分布

図-4 は実測値とうねり曲線との差を粗さとして、20 μmで分割した粗さの度数分布を示している。各範囲に相対度数は10供試体の度数から求めている。図の粗さが正の値は凸の、負の値は凹の形状であることを意味し、図中の平均粗さはそれらの絶対値の算術平均である。コンクリートおよびモルタルとも粗さが±40 μmまでで相対度数の合計が50%以上となっているが、平均粗さからコンクリートのほうが粗さが高いひび割れ表面であるといえる。また、うねりの程度もコンクリートのほうがモルタルより少し小さくなっているが、本実験のひび割れではどちらも流路長比が1に近くほぼ真っ直ぐに流れていると考えられる。

3.2 透気および透水試験結果

図-5 は試験で得られた特徴的な透気量および透水量と圧力勾配の関係を示したものである。透気と透水で同じ作用圧力に対応する圧力勾配に差があるが、これはひび割れ内の流れ方向の圧力分布が透水では直線であるのに対し、透気では放物線となるためである。図では透気の場合、ひび割れ出口での圧力勾配を用いている。図中のひび割れ幅が上下で同じものは供試体と同じであることを意味する。ひび割れ内の流れ

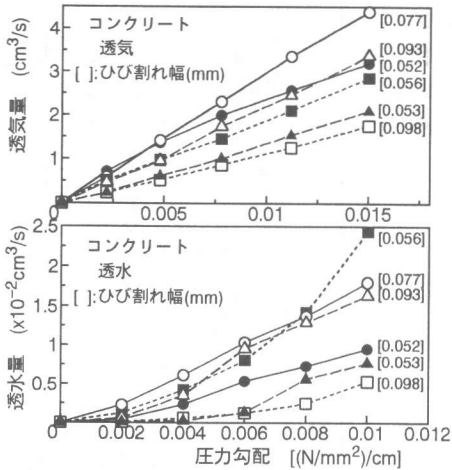


図-5 圧力勾配と透水量・透気量の関係

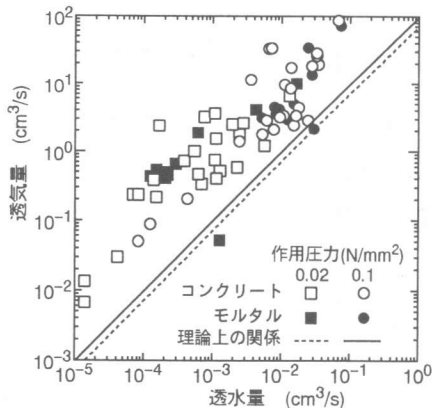


図-6 ひび割れからの透水量と透気量の関係

がPoiseuille流れであるならば、流量は圧力勾配に比例する。透気では、殆どの供試体において透気量は圧力勾配に比例していた。しかし、透水では比例関係にあるもの、最大作用圧力まで直線の傾きが圧力勾配の増加とともに増加するものおよび途中で傾きが一定になるものに大別された。これは圧力が低い場合にひび割れ内にある空気により流れていなかった部分を圧力が高くなった場合に流れるようになったためと考えられる。なお、これらの違いに関してはひび割れ幅の大きさによる傾向はみられなかった。

図-6 はひび割れからの透水量と透気量の関係を示したものである。透気量と透水量はパラツキはあるもののよい相関関係にある。しかしながら、作用圧力が 0.1N/mm^2 では水と空気の粘性係数の違いと圧力勾配の差により理論上は透

気量は透水量の約100倍となるが、実験値ではそれ以上の差となっている。これは水は空気に比べて粘性係数が大きいことからひび割れ内に空気は流れても水は流れない部分があるためと考えられる。作用圧力が 0.02N/mm^2 では図-5で述べた影響もあり、透水量に対する透気量の割合が 0.1N/mm^2 の場合より大きい傾向にある。

3.3 ひび割れ幅と流量の関係

既往の研究ではひび割れからの透水量 q_w および透気量 q_a はひび割れを平行平板とみなし、ひび割れ内の流れにPoiseuilleの法則を適用して得られる次式で求められている^{3),6)}。

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

$$q_a = c_a \frac{bw^3}{12\mu_a} \frac{P_1^2 - P_0^2}{2P_0L} \quad (2)$$

ここで、 b ：ひび割れ長、 w ：ひび割れ幅、 L ：流路長、 P_1 ：作用圧力、 P_0 ：流出側圧力、 μ_w 、 μ_a ：水および空気の粘性係数、 c_w 、 c_a ：ひび割れの曲がりや壁面粗度等の不確定要因を集約した補正係数である。

図-7 はひび割れ幅と透水量の関係を示したものである。図中の実線は式(1)の補正係数を1としたもの(以下、理論式と呼ぶ)である。それぞれの破線は参考文献3)および4)で式(1)に基づいて提案されている計算式に本実験の条件を与えて計算したものである。本実験結果も既往の研究と同様に理論式に比べり小さくなっている。ま

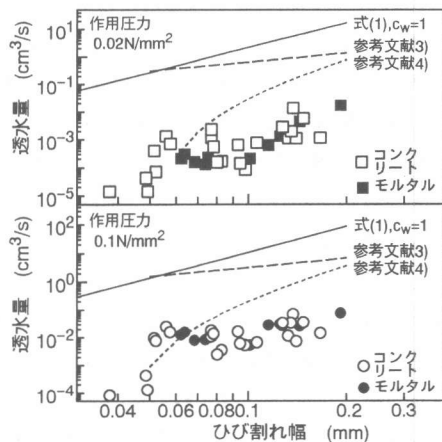


図-7 ひび割れ幅と透水量の関係

た、既往の提案式に比べても小さくなっている。この理由の一つとして既往の提案式の元となっている実験でどちらも無筋コンクリートを用いているのに対して、本研究では鉄筋を使用していることが考えられる。

参考文献3)では0.05~0.6mmのひび割れに対して、補正係数の値をひび割れ幅の関数として与えており、ひび割れ幅が大きくなるにつれて補正係数の値が1より小さくなる。参考文献4)では補正係数は作用圧力により異なるがひび割れ幅によらず一定とし、さらに漏水を生じないひび割れ幅を仮定し、その値を差し引いたひび割れ幅を用いている。その結果、図にも示されているように、ひび割れ幅0.2mmで両者の結果はほぼ近い値であったが、ひび割れ幅が小さくなるにつれて文献3)では理論値に近づくが、文献4)では理論値との差が大きくなっており、理論式に対する評価式の挙動が異なっている。また、補正係数は文献3), 4)や他の既往の研究でも^{7),8)}、ひび割れの曲がりや壁面粗度の影響を考慮したものとなっている。しかしながら、一般に層流の場合の摩擦損失は壁面の粗さに関係せず、乱流において壁面の相対粗さが関係するようになるといわれている。従って、層流を仮定した式(1)に壁面粗度による影響を考慮する係数を用いることは矛盾することとなる。また、ひび割れの曲がりについてであるが、図-4のところで述べたように流路長は供試体厚さと殆ど変わらず、表-2に示した値を用いても理論式と実測値との差は改善されない。

そこで、ひび割れ表面での摩擦損失係数について検討する。断面積 $A(=bw)$ のひび割れ内に一次元の定常流れを考える。微小区間 dx に関して次の運動量の式が得られる⁹⁾。

$$\rho u A[(u+du)-u] = PA - (P+dP)A - \tau S dx \quad (3)$$

ここで、 ρ : 流体の密度、 u : 平均流速、 P : 圧力、 τ : ひび割れ面におけるせん断応力、 S : 周長 $(=2(b+w))$ である。式(3)に連続の式 $(\rho u = \text{const.})$ およびせん断応力と摩擦損失係数 f との関係 $(\tau = (1/2)f\rho u^2)$ 代入すると次式が得られる。

$$\rho u du = -dp - (f/w)\rho u^2 dx \quad (4)$$

式(4)では $b \gg w$ としている。式(4)を流路長を L 、作用圧力を P_1 、流出側圧力を P_0 とし、透水の場合は密度が一定、透気の場合は $\rho = (\rho_0/P_0)P$ とて解けば次式が得られる。ただし、 ρ_0 は流出側での密度である。

$$\frac{f}{w} \rho u_w^2 = \frac{P_1 - P_0}{L} \quad (5)$$

$$\frac{f}{w} \rho u_a^2 = \frac{P_1^2 - P_0^2}{2P_0 L} \quad (6)$$

ここで、 u_w 、 u_a は透水量、透気量をひび割れの断面積 (bw) で除した平均流速である。式(5)および式(6)において摩擦損失係数 f とレイノルズ数 R_e と $(=uw/v, v = \mu/\rho)$ 間に $f = 12/R_e$ との関係が成り立てば式(5)と式(6)は補正係数を1とした式(1)と式(2)と一致する。

そこで、透水に関して式(5)を用いて摩擦損失係数を求め、レイノルズ数との関係を示したのが図-8である。図には本実験で得られたコンクリートおよびモルタルの全ての結果について示しているが、摩擦損失係数はレイノルズ数とよい相関関係にある。さらに図には参考文献4)において得られている結果の一部(ひび割れ幅に対してその時の作用圧力と透水量がわかるもの)も併せて示している。参考文献4)の場合も摩擦損失係数はレイノルズ数とよい相関関係にあり、本実験結果の関係とも殆ど差がない。従って、ひび割れ内の流れは層流として取り扱って良いと思われる。しかしながら、図中の直線は全ての結果に関して回帰したものであるが、直線の傾きは-1.52が得られ、-1とはなっていない。

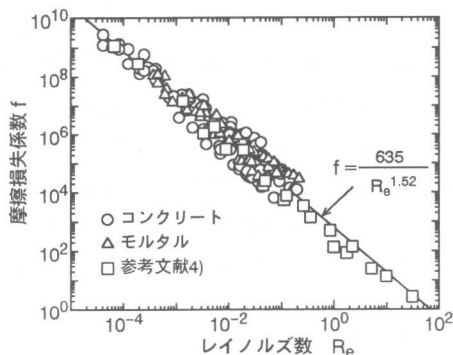


図-8 ひび割れの摩擦損失係数とレイノルズ数の関係

式(5)を用いて摩擦損失係数を計算する際には流路長およびひび割れ長は供試体の厚さと直径を用いているが、表面形状の測定結果を考慮しても直線は平行移動して傾きには影響しない。従って、傾きが-1とならなかった要因としてひび割れ幅が考えられる。試みに透水量は同じでひび割れ幅の値を小さくすると、実験結果の傾きは-1に近づいた。用いているひび割れ幅は供試体表面で測定されたものであって実際に水が流れている部分の幅ではないと考えられる。コンクリート表面を平滑に仕上げた微小な隙間を設けた漏水実験では式(1)が成り立つことが報告されているおり¹⁰⁾、ひび割れ表面の微細な粗さにより流れる部分を狭くしていると考えられ、粗さが流れる部分に及ぼす影響はひび割れ幅の大きさにも関係するものと考えられる。また、図-6のところでも述べたように、ひび割れ内で水が流れていない部分もあると考えられ、このことも影響していると思われる。

4. まとめ

本研究はひび割れ表面の粗さとひび割れ部の透気・透水性について検討したものである。本研究の範囲で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) レーザ変位計によるひび割れ表面の測定結果に対して移動平均を用いてひび割れの曲がりやと表面粗さを求めた。コンクリートおよびモルタルの平均粗さはそれぞれ約70 μ mと55 μ mであった。
- 2) ひび割れからの透水量と透気量の間には比較的良好な相関関係がみられた。しかしながら、粘性係数と圧力勾配の違いを考慮した透水量と透気量の間には一致せず、透気量に対して透水量のほうが少なくなっていた。
- 3) 本研究で得られたひび割れからの透水量は平行平板内の粘性流体の式で得られる透水量より非常に小さく、ひび割れ表面形状の測定で得られたひび割れの曲がりやを考慮しても評価式との差は殆ど改善されなかった。
- 4) 実測されたひび割れ幅と透水量を用いて得ら

れた表面摩擦係数はレイノルズ数と直線関係となったが、表面摩擦係数はレイノルズ数に反比例する関係とはならなかった。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金（基盤研究(A)(1)，課題番号0930531，研究代表者：名古屋大学教授 田辺忠顕）の一部として実施されたことを付記いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，平成8年制定，pp.86-89，1996.3
- 2) 下村匠ほか：性能照査型設計システムにおけるコンクリート構造物の使用性能照査，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，第CS部門，pp.246-247，1998.10
- 3) 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，セメント技術年俵，41，pp.217-220，1987.12
- 4) 伊藤忠彦ほか：ひび割れを有するコンクリートの高圧水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概要集，第V部門，pp.412-413，1989.10
- 5) 国枝稔ほか：コンクリートの破断面の表面積とフラクタル次元，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，第V部門，pp.154-155，1998.10
- 6) 鈴木敏郎ほか：ひび割れの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する実験研究，日本建築学会構造系論文報告集，第384号，1988.2
- 7) 渡部直人：発電所廃棄物陸地貯蔵・処分用コンクリートに関する研究，電力中央研究所報告，1987.9
- 8) 石川廣三：モルタル・コンクリート壁体の亀裂からの漏水について(第2報)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.277-278，1977.10
- 9) 生井武文，松尾一泰：圧縮性流体の力学，理工学社，pp.54-57，1983
- 10) 下岡謙司，阿部美紀也：平行間隙を有するコンクリートの漏水性状，日本原子力研究所，JRERI-M，88-185，1988.10