

# 論文 ひび割れ部の透水性および透気性に影響を及ぼす要因に関する研究

荻野 和彦\*1・氏家 勲\*2

**要旨:** コンクリートのひび割れ部での透水量や透気量の予測には平行平板内のポアズイユ流れの式に補正係数を乗ずる方法が多く用いられている。本研究はその補正係数に影響を及ぼす要因を検討するためにセメントペーストとコンクリートによるひび割れ部の透気および透水試験を行った。セメントペーストのひび割れに関する補正係数に及ぼす鉄筋の配置の影響は大きい。コンクリートではひび割れ表面のうねりと粗さがひび割れ部の流れに大きく影響を及ぼし、鉄筋の配置が補正係数に及ぼす影響は小さくなる。

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

## 1. はじめに

コンクリート構造物には種々の要因によりひび割れが生じる。ひび割れの発生は力学特性, 耐久性, 美観などコンクリート構造物のほとんどの性能低下の原因となる。使用性能である水密性あるいは気密性においては, ひび割れの存在は直接的にその性能低下に関与する。

これまでコンクリートひび割れ部の漏水量の評価はひび割れを平行平板間とし, ポアズイユ流れを仮定して求めた流量にひび割れの壁面粗度や曲がり等の不確定要素を考慮した補正係数を乗じる方法で行われているが<sup>1)</sup>, この補正係数は実験結果に基づいて与えられている。

ひび割れ部からの漏水量を評価するための補正係数はひび割れ内の空間分布が与えられれば, それにより決定することが可能である。しかし, ひび割れ内の空間分布を求めることは現状では困難であるので, 著者らはひび割れ内の空間分布に関係する指標からこの補正係数を与えようと考えている。そのためには補正係数が影響を受ける要因を知る必要があることから, 本研究では鉄筋の有無をパラメータとし, セメントペーストとコンクリートを用いたひび割れ部の透気・透水試験を行い, ひび割れ部からの透気・透水量に関する補正係数について検討している。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

供試体は $\phi 150 \times 100$ mmの円柱供試体である。用いたセメントペーストおよびコンクリートの水セメント比はそれぞれ50%と40%である。コンクリートの粗骨材最大寸法は20mmである。

セメントペーストおよびコンクリートどちらも供試体は無筋のもと供試体厚さの中央, 直径の位置にD13の異形鉄筋を1本を配置したものの2種類である。供試体は透気透水試験を行う直前まで水中養生を行った。

### 2.2 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載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50mmとした標点を図-1に示すように供試体の $\phi 150$ mmの両面に, 鉄筋位置と直径の1/3の位置に取り付け, ホイットモア型ひずみ計(最小目盛1/1000mm)を使用して計測した。載荷前後における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。無筋供試体では割裂試験中はシャコ万力で拘束し, 試験後は拘束バンドで締め付けた後にひび割れ幅の

\*1 オリエンタル建設(株) 大阪支店 (正会員)

\*2 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 工博(正会員)

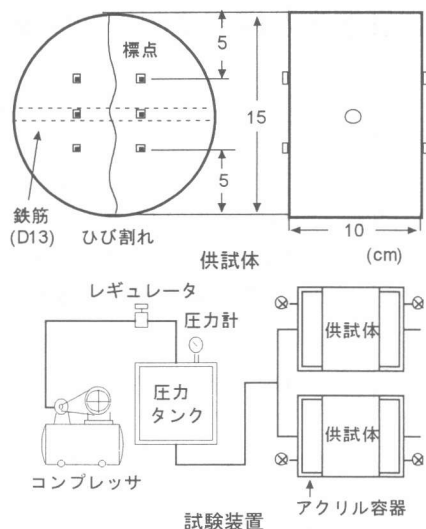


図-1 供試体および透気・透水試験装置

計測を行った。土木学会示方書では軸引張力が作用する場合の水密性に対する許容ひび割れ幅は0.1mmであることから<sup>2)</sup>、0.1mm前後あるいはそれ以下のひび割れ幅を対象とした。試験された供試体に発生したひび割れ幅は約0.03~0.15mmの範囲であった。

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。本実験では透気および透水どちらもひび割れ部での流れが層流と見なせる状態で試験を行うため、作用圧力は0.02N/mm<sup>2</sup>から0.02N/mm<sup>2</sup>間隔で0.1N/mm<sup>2</sup>まで変化させた。透気および透水試験どちらも所定の圧力を与えてから1時間後には流量が安定したことから、透気試験では1時間後に流量計で透気量を、透水試験では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。

また、レーザ変位計(分解能0.5μm、測定範囲

表-1 ひび割れ表面形状の測定結果

項目	コンクリート	セメントペースト
表面積 (cm <sup>2</sup> )	132.6	834.4
表面積比	1.64	1.03
流路長 (cm)	11.42	9.08
流路長比	1.27	1.01
ひび割れ長 (cm)	12.84	9.22
ひび割れ長比	1.43	1.02

測定範囲：9×9cm

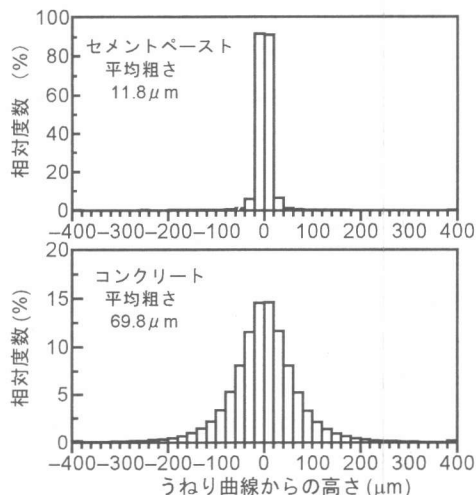


図-2 ひび割れ表面粗さの度数分布

±8mm、最小スポット径45×20μm)、移動ステージ(分解能0.5μm、移動平行度10μm以下)およびコンピュータからなる表面形状測定システムを用いてひび割れ表面の形状を測定した。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、ステージを100μm間隔で移動させた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 セメントペーストのひび割れ表面形状

本研究ではコンクリートのひび割れ部の透気性および透水性を検討するため、ひび割れ面の表面形状の異なるものとしてセメントペーストを用いた。セメントペーストのひび割れの表面形状の測定結果をコンクリートの結果と比較して、表-1に示す。計測した供試体は透気・透水試験と同じもので、表中の値は供試体10体の平均値であり、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、ひび割れ長は直径方向である。供試体には割裂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。その程度はコンクリートの場合に大きいが、これは粗骨材を含んでいるためと考えられる。セメントペーストではそれぞれの比率がほぼ1.0であり、ひび割れ面はほとんど平坦である。また、図-2は移動平均の考え方をを用いて求めた基準面と各位置の差を表面粗さとして、 $20\mu\text{m}$ で分割した度数分布である。セメントペーストでは表面の凹凸も小さく、約90%が $20\mu\text{m}$ 以下の凹凸である。

### 3.2 透気および透水試験結果

図-3および図-4はセメントペーストおよびコンクリートのひび割れ幅と透気速度の関係を示す。作用圧力は $0.02\text{N/mm}^2$ と $0.1\text{N/mm}^2$ の場合である。透気速度は実測された透気量をひび割れ幅とひび割れ長さで除したものである。ひび割れ長さにおいては表-1に示したひび割れのうねりの影響を考慮する必要があるが、後述の補正係数に含めて取り扱うため、図ではどちらも供試体直径の $15\text{cm}$ を用いている。また、図中に示す曲線は平行平板内のポアズイユ流れに基づく次式により求めた計算値である。

$$u_a = c_a \frac{w^2}{12\mu_a} \frac{P_1^2 - P_0^2}{2P_0L} \quad (1)$$

$$u_w = c_w \frac{w^2}{12\mu_w} \frac{P_1 - P_0}{L} \quad (2)$$

ここで、 $u_a$ :透気速度、 $u_w$ :透水速度、 $w$ :ひび割れ幅、 $L$ :流路長、 $P_1$ :作用圧力、 $P_0$ :流出側圧力、 $\mu_a$ 、 $\mu_w$ :空気と水の粘性係数、 $c_a$ 、 $c_w$ :ひび割れの曲がりや壁面粗度等の不確定要因の影響を集約した補正係数である。図-3および図-4では1.0としている。

無筋のセメントペーストの場合、透気速度は式(1)の補正係数を1.0とした計算結果とほぼ一致している。これはセメントペーストでは表-1に示すようにひび割れ面は平らであり、表面に凹凸がなく、ひび割れ内部の空間が式(1)における平行平板内の条件を満足しているためである。さらにセメントペーストに鉄筋を配置すると透

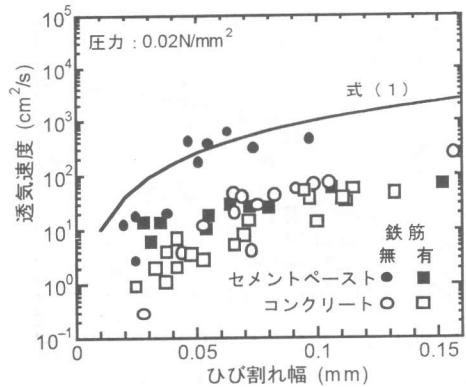


図-3 ひび割れ幅と透気速度の関係

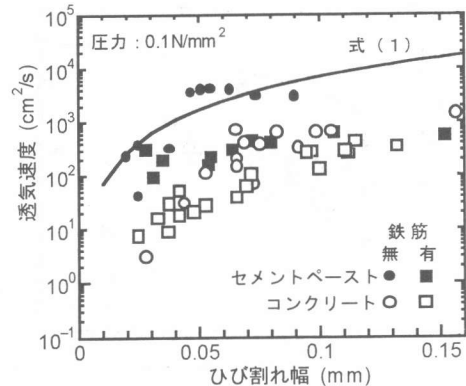


図-4 ひび割れ幅と透気速度の関係

気速度は無筋のものより小さくなっているが、ひび割れ幅が約 $0.05\text{mm}$ 以下ではその低下の程度が小さくなっている。

一方、無筋のコンクリートの場合にはこれまで報告されている結果と同様に補正係数を1.0とした式(1)の結果より透気速度は小さくなっている。また、コンクリートに鉄筋を配置した場合には無筋コンクリートに比べて透気量は小さくなるが、鉄筋を配置したことによる透気量の減少の程度はセメントペーストの場合に比べて小さくなっている。

図-5および図-6はセメントペーストおよびコンクリートのひび割れ幅と透水速度の関係を示す。作用圧力は $0.02\text{N/mm}^2$ と $0.1\text{N/mm}^2$ の場合であり、透水速度の算出方法は透気速度と同じである。図中の曲線は補正係数を1.0とした式(2)による計算値である。透水速度とひび割れ幅の関係はおおむね透気速度の場合と同じ傾向を示

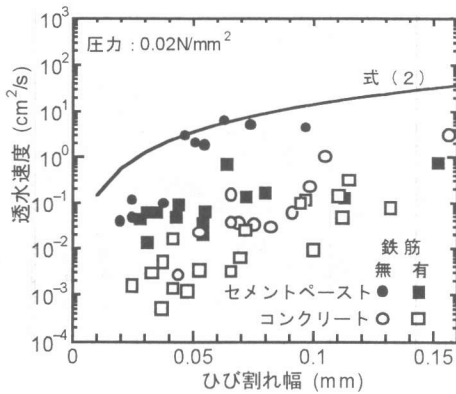


図-5 ひび割れ幅と透水速度の関係

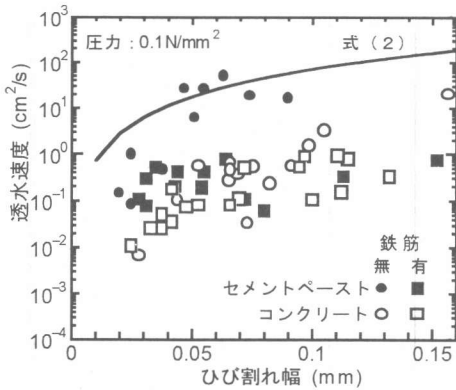


図-6 ひび割れ幅と透水速度の関係

しているが、無筋のセメントペーストの場合を除いて、透水速度の計算値に対する実測値の差が透気速度に比べて大きく、作用圧力が $0.02\text{N/mm}^2$ の場合のひび割れ幅が小さい範囲で顕著である。これはひび割れ内で空気は流れても水は流れない部分があるためであり、圧力の低い場合にその影響が大きくなったと考えられる。従って、ひび割れ幅の増加による透気速度の実測値の増加はセメントペーストあるいはコンクリートにおいても、式(1)による曲線と同じようであるのに対し、透水速度の場合には片対数グラフ上であるが、ひび割れ幅の増加に対して直線的に増加する傾向がある。

### 3.3 補正係数に関する検討

無筋のセメントペースト以外の場合にはひび割れでの透気速度あるいは透水速度は式(1)あるいは式(2)より得られた計算値より小さくなっていった。そこで、実測値と式(1)あるいは式(2)に

よる計算値と一致するための補正係数 $c_a$ 、 $c_w$ がセメントペーストとコンクリートあるいは鉄筋の有無によりどのような値となるかを検討する。

ここでは実測値と一致するための補正係数を知るために、摩擦損失係数とレイノルズ数の関係を用いる。摩擦損失係数は連続の式、運動量式、ひび割れ面でのせん断応力と摩擦損失係数との関係から、次式のように圧力損失から摩擦損失係数 $f$ を求めることができる。

$$\frac{f}{w} \rho_a u_a^2 = \frac{P_1^2 - P_0^2}{2P_0 L} \quad (3)$$

$$\frac{f}{w} \rho_w u_w^2 = \frac{P_1 - P_0}{L} \quad (4)$$

ここで $\rho_a$ は $P_0$ での空気の密度、 $\rho_w$ は水の密度である。一方、レイノルズ数 $Re$ は流速 $u$ 、ひび割れ幅 $w$ 、粘性係数 $\mu$ および密度 $\rho$ を用いて、レイノルズ数 $Re = uw/(\mu/\rho)$ と表せ、 $f = 12/Re$ との関係が成り立てば、式(3)と式(4)は補正係数を1.0とした式(1)と式(2)と一致する。

そこで式(1)あるいは式(2)と比較的良好く一致していた無筋のセメントペーストの場合の摩擦損失係数とレイノルズ数の関係を図-7に示す。図からわかるように、 $f = 12/Re$ との関係が成り立っているのはレイノルズ数が約1より大きい範囲で、レイノルズ数が小さい範囲、言い換えればひび割れ幅が小さく、透気速度あるいは透水速度が遅い場合に一致していない。実測値は全体的に見ると直線関係にあり、摩擦損失係数と良い相関関係にあり、これらの結果を回帰する

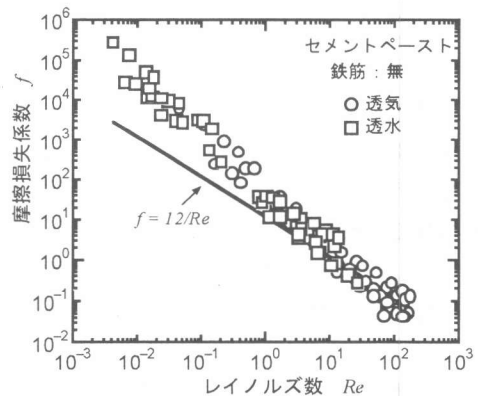


図-7 レイノルズ数と摩擦損失係数の関係

と、透気の場合、その傾きは約 $-1.36$ 、透水の場合、 $-1.46$ となる。このような摩擦損失係数とレイノルズ数の関係の傾きが $-1$ より大きい結果は著者らの既往の研究においても得られている<sup>3)</sup>。しかしながら、ポアズイユ流れを仮定していることから、摩擦損失係数とレイノルズ数の関係の傾きは $-1$ でなければならず、図-7の結果はレイノルズ数が小さくなるにつれて係数の12が徐々に大きくなったためと考えられる。

そこで、摩擦損失係数とレイノルズ数の積により補正係数が得られるとして求めたセメントペーストの透気速度に関する補正係数とひび割れ幅の関係を図-8に示す。図中の破線は $f=12/R$ の関係が成り立つ、すなわち補正係数の値が $1.0$ を表している。無筋のセメントペーストの場合、ひび割れ幅が $0.03\text{mm}$ あたりで、補正係数が $0.1$ 以下のものもあるが、それを除けば補正係数は $1.0$ 前後の値となっている。一方、鉄筋を配置した場合にはひび割れ幅が増加するにつれて、補正係数の値は小さくなる傾向がある。その低下の程度はひび割れ幅が約 $0.05\text{mm}$ までで、約1オーダー小さくなっているが、それ以上のひび割れ幅ではひび割れ幅の増加による補正係数の低下はそれまでの低下割合より小さくなっている。鉄筋を配置した場合にひび割れ幅が増加するにつれて補正係数が小さくなっているのは、ここで用いているひび割れ幅が供試体表面で計測された値であり、セメントペーストでは鉄筋がある場合にはひび割れ内部で拘束され、内部のひび割れ幅が狭くなったためと考えられる。

図-9はコンクリートにおける透気速度に関するひび割れ幅と補正係数の関係を示す。無筋のコンクリートではひび割れ幅が増加するにつれて補正係数の値はほぼ同じか若干大きくなる傾向にある。また、鉄筋を配筋することにより同じひび割れ幅であっても無筋の場合より補正係数は小さくなっているが、その程度はセメントペーストの場合より小さい。また、図-8と比較すると、ひび割れ幅が $0.05\text{mm}$ 以上において、無筋のセメントペーストの補正係数は $0.5\sim 3$ の

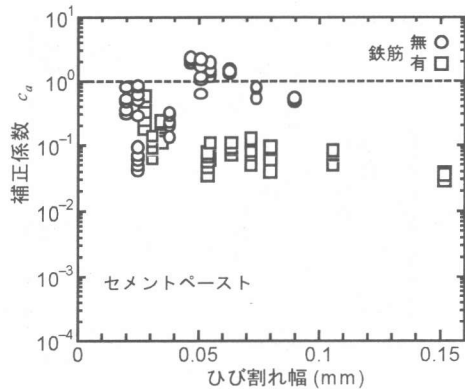


図-8 ひび割れ幅と補正係数の関係(透気)

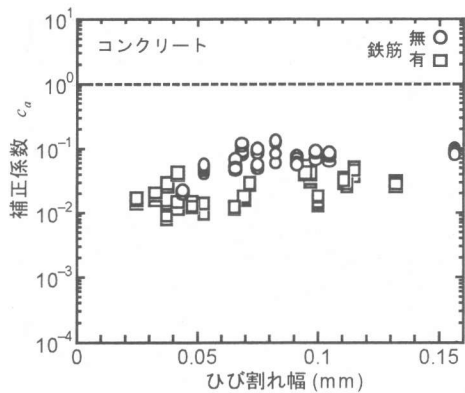


図-9 ひび割れ幅と補正係数の関係(透気)

範囲であるのに対し、無筋のコンクリートでは $0.04\sim 0.1$ の範囲であり、 $1/10$ 以上小さくなっている。表-1に示したコンクリートのひび割れ長さや流路長の増加を用いて補正係数で表すと約 $0.4$ となり、図-9に示す値より大きい。従って、コンクリートのひび割れ部の流れではひび割れのうねりに加えて、ひび割れ面の粗さが大きく影響していると考えられる。また、鉄筋を配置した場合、ひび割れ幅が $0.05\text{mm}$ 以上においてコンクリートの補正係数はセメントペーストの補正係数の $1/2\sim 1/3$ であり、無筋の場合より補正係数の差が小さくなっている。しかし、 $0.05\text{mm}$ 以下においてはセメントペーストではひび割れ幅が狭くなるにつれて補正係数は大きくなるのに対して、コンクリートではひび割れ幅が狭くなると補正係数も小さくなっている。このひび割れ幅の狭い範囲での違いはコンクリー

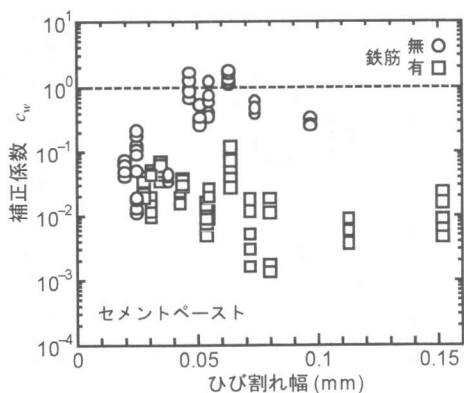


図-10 ひび割れ幅と補正係数の関係 (透水)

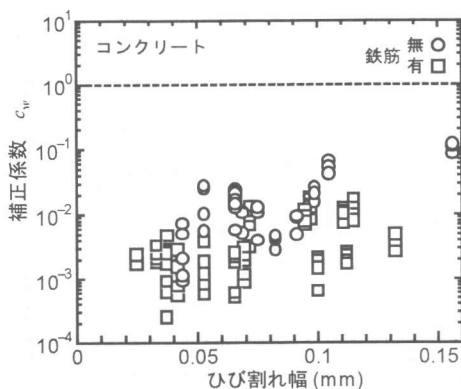


図-11 ひび割れ幅と補正係数の関係 (透水)

トのひび割れ表面の粗さがひび割れが狭いことで大きく影響したことがあるいはひび割れ幅が0.03mm程度と狭いことからひび割れ内部で完全に開口していない部分がコンクリートの場合には存在していることが考えられる。

図-10はセメントペーストの透水速度に関するひび割れ幅と補正係数の関係を示す。鉄筋がある場合、ひび割れ幅の増加による補正係数の変化の傾向は透気とほぼ同じである。ただし、透水の補正係数は透気の場合より、さらに約1/10程度小さな値となっている。

図-11はコンクリートの透水速度に関するひび割れ幅と補正係数の関係を示す。透水の場合には補正係数のバラツキが大きくなっているが、圧力の大きさにより同じひび割れ幅でもひび割れ内で透水しない部分が生じるためと思われる。また、鉄筋を配置したものでは透気の場合と同様に、セメントペーストの透水の補正係数はひび割れ幅の増加により小さくなったが、コンクリートの場合には大きくなっている。このように、ひび割れ幅の増加に伴う補正係数の変化は鉄筋の拘束とひび割れ表面の粗さの大きさの関係により異なる傾向を示すことが明らかとなった。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) セメントペーストのひび割れ表面はほとんど平坦であるため、約0.05mm以上のひび割れからの透気量および透水量は平行平板内のポアズイユ流れの式で得られ結果とほぼ同じとなる。
- 2) 表面ひび割れ幅が同じであっても、鉄筋を配置した場合の流量は無筋の場合より少なくなり、配筋による流量の減少はセメントペーストのほうがコンクリートより大きい。
- 3) 鉄筋を配置した場合、セメントペーストではひび割れ幅が増加するにつれてポアズイユの式に乗じる補正係数の値は小さくなるが、コンクリートでは補正係数の値は大きくなる。
- 4) ひび割れ内の流れに及ぼすひび割れ表面の粗さの影響の程度はひび割れ幅の大きさによって異なると考えられ、今後はひび割れ幅の大小による流れ方の違いやひび割れ内の空間分布に関係するコンクリート強度や粗骨材寸法が補正係数に及ぼす影響を検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 例えば、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，41，pp.217-220，1987.12
- 2) 土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書，設計編，pp.87-89，1996.3
- 3) 氏家勲，浅井文貴，佐藤良一：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，Vo.21，pp.841-846，1999.6