## 論文 自己治癒現象に関わるコンクリートのひび割れ初期通水量の急速抑制メカ ニズムの解明

生駒 勇人\*1·岸 利治\*2

要旨:本論文はコンクリートが生来持つ、ひび割れ内の通水を自律的に抑制する自己治癒現象のメカニズムについて、実験 的検討や観察による考察を行ったものである。自己治癒現象のメカニズムとして過去の研究で指摘された要因のうち、未水 和セメントの再水和、セメントマトリクスの吸水・湿潤膨張、微粒子による閉塞について、それぞれが特に初期のひび割れ 内の通水量抑制に与える影響を確認する実験を行った。その結果、検討した要因すべてについて初期の通水量抑制への影響 が小さいことを示唆する結果を得た。その上でひび割れ内の通水性状について内部観察を行うことで、新たな要因として気 泡の出現が通水性に影響を与える可能性を明らかにした。

キーワード:自己治癒、未水和セメント、再水和、湿潤膨張、目詰まり、Hagen-Poiseuille 流れ、気泡

#### 1 はじめに

ひび割れからの漏水が自律的に抑制される自己治癒現 象については古くから報告があり、そのメカニズムを応 用、あるいは新たな要因を付与した自己治癒コンクリー トが近年開発されている<sup>1),2)</sup>。それらの自己治癒メカニ ズムについての研究は、経験的に知られた事実や通水後 時間が経過したコンクリートの観察による考察が主であ り、経時的に変化するひび割れ内の通水性状に対し各要 因の与える影響には不明な点が多い。特に通水初期にあ らわれる急速な通水量抑制は、様々な要因は指摘される ものの<sup>3),4)</sup>、原因の解明には至っていない。自己治癒現 象についてメカニズムを解明し、各種要因が与える影響 を定量的に把握することは、自己治癒コンクリートの長 期的な視点での予測や評価につながり、機能向上に資す ると思われる。

そのために本研究では、自己治癒現象の要因について 整理したうえで、各要因が通水量抑制に与える影響につ いて検討を行う。供試体に人工的なひび割れを導入し、 様々な条件下でひび割れ内部の通水量を測定することで、 通水性状の経時的な変化を調べた。特に通水開始直後の 急激な通水量減少に対し、過去提案されてきた自己治癒 機構それぞれの及ぼす影響について実験的検討を行った。 その上でひび割れ内部の通水性状について直接観察を行 い、空間内の水分移動特性に影響を与えうる新たな要因 を指摘した。

## 2 自己治癒性のメカニズムと評価手法

### 2.1 過去報告された自己治癒の要因

過去に報告されたコンクリートの自己治癒の要因について、特に一般的な環境下で生じえるものを四点にまと めた。

#### (a) 未水和セメントの再水和

コンクリート・セメントは、多くの場合内部に未水和 のセメント分を残し、ひび割れが生じ水分に接すること で未水和セメントが再水和を起こす<sup>5)</sup>。再水和により生 じたセメントペーストによりひび割れ部の充填・癒着が 生じるというものである。

#### (b) カルシウムイオンの炭酸化

ひび割れ水中でコンクリート内の水酸化カルシウムか ら溶出したカルシウムイオンが,水中や気中の二酸化炭 素と反応し,炭酸カルシウムとして析出する。コンクリ ートの自己治癒性の主要な要因と挙げられることも多く <sup>3)</sup>,バクテリアを利用し析出を促進する自己治癒コンク リートも開発されている。

#### (c) セメントマトリクスの吸水・湿潤膨張

セメントマトリクスが水分を吸水し、膨潤することに よりひび割れを閉塞するという現象である。Ahn は湿潤 膨張機能の強化・付与しメカニズムの一部とした自己治 癒コンクリートを開発している<sup>1)</sup>。

#### (d) ひび割れ表面の微粒子の閉塞

ひび割れ表面に存在する微粒子が,ひび割れ内の一部 に目詰まりを起こし,透水性を低下させる現象である。 土質の分野で広く知られた現象であり,コンクリートに ついても論じられている<sup>の</sup>。

以上の要因について,特に自己治癒コンクリートの分 野では(a)(b)の化学的要因が重視され自己治癒の主要因 とされてきた。しかし,これらの要因について,どの時 点で発現するのか,どの程度効力を持つのか等は未だ未 解明な部分が多い。特に通水初期の急速な通水量抑制現 象に対しては,セメント系材料のひび割れ内の結晶の析 出は6カ月以降見られるという報告<sup>70</sup>や,初期には(c)(d) で示した物理的要因が卓越するという意見もあり<sup>4)</sup>,自

\*1 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 (学生会員) \*2 東京大学 生産技術研究所 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリート配合

スラ	水セメ	空気	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
ンプ	ント比	量	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
(cm)	(%)	(%)	W	С	S	G	Α
12	49	4.5	171	349	802	953	1.40

- 21	セメント	普通セメント(密度:3.15g/cm3)
川川	細骨材	富士川産川砂(密度:2.62g/cm 3,吸水率 2.1%)
10	粗骨材	秩父両神産砕石(密度:2.72g/cm 3,吸水率 0.5%,最大寸法 20mm)
	混和剤	AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系,密度 1.04~1.11g/cm 3)

表-2 使用材料の諸元

実験条件	検討する自己治癒の要因	実験を行った時点の材齢
連続通水条件	未水和セメントの再水和	
割裂によるひび割れ		14日,1カ月,3カ月,6カ月
切断による平滑ひび割れ		14日,1カ月,6カ月
低圧飽和条件	セメントマトリクスの吸水・湿潤膨張	3 カ月
再通水条件		2 カ月(1 カ月養生→28 日通水)
通エタノール条件	微粒子による閉塞	1 カ月

#### 表-3 実験条件の概要

# ひび割れ導入後 ひび割れ導入後 (供試体) 一定時間での 流下量の測定 写真-1 通水量測定の様子

一定の水頭差

己治癒性の評価手法の確立上問題となっている。本研究ではこれらの4条件の内、比較的早期に作用すると思われる(a)(c)(d)やその他の要因について検討を行う。

#### 2.2 自己治癒性評価手法としての通水試験

コンクリートの自己治癒現象は様々な点から論じられ ているが、本研究ではひび割れの治癒によるひび割れの 漏水抑制を対象としている。以下に説明するひび割れ通 水試験を様々な条件下で行い、通水量の経時的な変化を 自己治癒性の指標とすることでメカニズムを検証した。

本研究の供試体として、水セメント比を49%とした¢ 100mm×200mmの円柱供試体を打設した。コンクリート 配合は表-1、使用材料の諸元は表-2にまとめている。 養生方法は封緘養生を用い,養生期間は14日から6か月 までの計4種類とした。

所定の養生期間が経過した供試体に対し,模擬的なひ び割れを導入し,一定の水頭差でのひび割れ内流量を測 定する通水試験を行った。ひび割れの導入には圧縮試験 機を用い,一定の方向に割裂面が出来るようアングルを 設けた供試体に対し割裂を行った。割裂した供試体の断 面に高圧空気を吹き掛けて微粒分を除去した。ひび割れ 幅 w を制御するために,割裂面に厚さ 0.2mm×幅 3mm ×長さ 35mm の樹脂フィルムを断面 8 カ所に挟んだ後, 表面でのひび割れ幅 w が概ね 0.2~0.3mm になるよう鋼 性ホースクランプで固定した。一部供試体については平 滑なひび割れ面を持つ模擬ひび割れを導入するために, コンクリートカッターを用いて供試体を切断し,紙やす りを用いて表面を研磨したうえで,同様に樹脂フィルム

を挟み込みクランプで固定した。平滑ひび割れの場合, 0.2mm と 0.1mm の 2 種類の厚さのフィルムを使用するこ とで w=0.2mm, 0.1mm のひび割れを形成した。

供試体上面に溜水用の φ 85mm×長さ 80mm の塩ビ管 を取り付け,水頭を約 80mm(水圧=約 0.8kPa)とした 2.1 で挙げた自己治癒現象による通水量抑制の要因 について検討するため、模擬ひび割れ導入・最初の通水 量測定の後、ひび割れ内の流れについて様々な条件を設 定した上で経時的な通水量の変化を測定した。今回実施 したすべての実験条件と検討した要因について表-3 に まとめた。供試体数については原則として N=3 としてい る。平滑ひび割れを用いた供試体では N=2, アクリル・ ガラス板を用いた模擬ひび割れの内部観察では N=1 と した。

# 3 未水和セメントの再水和の要因についての検証3.1 材齢の異なる供試体での連続通水条件

2.1(a)で述べた未水和セメント量の要因検証のため, 材齢が異なる供試体に対し連続通水条件による通水量の 経時的変化を測定し比較を行った。連続通水条件とは上 部の塩ビ管に連続的に水を供給し,一定の水頭差で通水 をし続ける条件である。この流水状態を保つ条件は,自 己治癒性の指標としていくつかの報告で用いられている <sup>3),4)</sup>。実験上 28 日間通水を行っているが,本論文では通 水開始後から 24 時間までの通水量の変化を対象とする。

割裂によるひび割れでの連続通水条件下での通水試 験の結果の比較を材齢14日、1カ月、3カ月、6カ月の 供試体で行ったほか、更なる比較のために材齢3カ月以 外の供試体については、ひび割れの内部性状が統一され た平滑ひび割れ面を用いた通水試験の比較を行った。

#### 3.2 結果・考察

割裂によりひび割れを導入した供試体での通水試験結 果を図-1に示す。

材齢14日から6か月の供試体全てにおいて,通水開始 から1~3時間以内に通水量が急激に抑制されている。特 に材齢3カ月を除いた供試体では,材齢にかかわらず同 様の通水量抑制が生じている。 図-1 では供試体数 N=3 を平均した値を用いているが, 個々の供試体毎に初期の通水量や通水量抑制の過程に大 きなばらつきがあった。供試体固有のひび割れ内部の凹 凸やひび割れ幅のばらつきや,それに起因する初期通水 量のばらつきは自己治癒性の発現に影響を与える。その ため図-1 の結果では通水量の経時的変化の比較を行う ことが難しく,材齢の違いによる未水和セメント量が自 己治癒性発現に与える影響を論じることは困難である。

そこで、ひび割れ内部性状を統一した平滑ひび割れ面 の供試体を用いて、材齢の異なる供試体における通水量 の経時的変化の測定を行った。結果を図-2に示す。実 線と点線は、それぞれひび割れ幅 w=0.2mm、0.1mm の供 試体の結果を示している。図−2の結果からは、割裂に より導入したひび割れでの通水試験と比較すると、ひび 割れ形状を平滑に統一したことで初期の通水量のばらつ きが押さえられていることが分かる。通水量の経時的変 化をみると、異なる材齢の供試体においても、通水量の 経時的変化の過程は非常に近しいことを示している。ひ び割れ幅に応じて更なる比較を行うため, N=2の値を平 均したうえで、各時点の値を初期通水量の値で除して比 をとり無次元化した結果を図-3 に示した。同一のひび 割れ幅の場合,材齢が14日から6カ月まで変化した場合 においても、ほぼ同一の通水量変化の過程をとることが 分かる。すなわち通水開始後24時間での通水量変化の過 程はひび割れ幅にのみ依存しており、材齢は大きな影響 を与えないことを示している。

この結果は、初期の通水量の抑制が示す自己治癒性は、 未水和セメントに起因することでないものを示唆する。 コンクリートは材齢14日から材齢6か月の間に水和が進 行し、未水和セメント量は大きく減少する。それにもか かわらず通水量がひび割れ幅のみによって決まるという ことは、通水量抑制が未水和セメント量にかかわらず生 じる現象であることを示す。すなわち、本実験のように 開始後1日までに生じる通水量抑制においては、未水和 セメントによる再水和による自己治癒要因の影響は大き くないといえる。

#### 4 吸水・湿潤膨張による要因の検討

#### 4.1 低圧飽和条件·再通水条件

2.1(c)で示した吸水・湿潤膨張の要因を検討するため, 飽和条件と再通水条件の下での通水試験を行った。

飽和条件は、通水試験における最初の通水量を測定す る前に、アスピレータによる飽和処理を行う条件である。 この実験における飽和処理は以下の手順で行った。アス ピレータにより減圧(25mmHg 程度)した状態で1時間, 供試体の飽和処理を行った。その後、大気圧に戻してさ らに24時間水中に浸漬した。その後、供試体上部の塩ビ



管の水位を保って連続通水状態とした場合の通水量を測 定した。

再通水条件では、連続通水条件で用いた供試体につい て、28日間の通水後に105℃の乾燥炉により絶乾状態に した上で、再度連続通水状態におくことでひび割れ内の 通水量の経時変化を測定した。供試体の重量を測定し、1 日ごとの重量変化量が供試体全重量の1%より小さくな った時点を絶乾状態としている。

#### 4.2 結果・考察

飽和条件での通水試験の結果を図-4 に示す。飽和条件では、通水開始前に飽和処理を行い、供試体を十分吸水させたうえで通水量の変化を測定している。すべてのデータは同配合・同材齢で同じ飽和処理を行っている。 図-4の結果からは N=3のうち2つの供試体において、 飽和を行った後で最初の通水量と比較し飽和試験後において通水量が増加したことが分かる。残りの供試体についても飽和処理後の通水量は連続通水状態と比較して減少量は小さかった。また連続通水状態においた後、通水 量の減少量は小さくなったものの、通水直後の急速な抑制をわずかながら確認できる。

飽和処理により供試体内部に水分が十分浸透し湿潤状 態になったといえるので,飽和処理の後では湿潤膨張の 影響がすでに生じているはずである。それにもかかわら ず低圧飽和処理後に通水量が増加する,あるいは連続通 水状態に置いたのちに通水量が減少するということは吸 水・湿潤膨張の影響は通水量の抑制に対し決定的ではな いことを示す。すなわち吸水・湿潤膨張の影響に対し否 定的な結果であるといえる。

さらなる検討として,再通水条件で通水試験を行った 結果を図-5 に示した。図-5 では通水量は一時的な減 少はありつつも,経時的には増加している。少なくとも 他の供試体で見られる実験初期の急激な通水量の減少は 生じなかった。すなわち,十分な期間通水を行った供試 体の場合,乾燥状態から湿潤状態に移る過程が,必ずし も通水量抑制につながらず,むしろ増加させる場合があ



ることを示している。

再通水条件の場合,供試体には事前に28日間の通水を 行っており,通水終了時点では既に通水量は定常状態に あった。そのため2.1 で挙げた要因のうち(a)(b)の化学的 反応による要因や,(d)の微粒子の閉塞の要因はすでに喪 失していると思われる。しかし吸水・湿潤膨張の要因で あれば,28日間の通水後でもセメントマトリクスが乾燥 状態から湿潤状態に移ることで,要因として発現しうる と思われる。しかしながら,再通水条件の結果では,乾 燥状態から通水した場合でも通水量は抑制されず,むし ろ増加している傾向にあった。この点から見て,吸水・ 湿潤膨張の要因について,影響の低さを裏付ける結果と なったといえる。

以上の結果から,吸水・湿潤膨張の要因は,通水開始 直後の通水量抑制に対し大きな影響を持たないといえる。

#### 5 ひび割れ表面の微粒子の閉塞による要因の検討

#### 5.1 通エタノール条件

2.1(d)で示した微粒子閉塞の影響の確認のため,エタ ノールを用いた通エタノール条件での流量測定を行った。

微粒子閉塞の影響は以前から指摘されており,過去の 研究でもひび割れ部に対し高圧空気により微粒子を除去 していたものの<sup>2)</sup>,実際に生じる微粒子の閉塞が通水量 抑制に及ぼす影響は不明であった。そこで本研究では, 水の代替としてエタノールをひび割れ内部に流下させ, 化学的反応が影響しない状況での流量の経時的な変化を 測定する通エタノール条件での測定を実施した。測定方 法は連続通水条件と基本的に同じであるが,実験上の制約により,供試体内を通過したのちのエタノールをろ過後再利用している点,測定時間が9時間に限定されている点が異なる。エタノール流下後,更なる検討のため測定期間経過後に1日間気中乾燥したのち,供試体を連続通水状態におき1日での通水量の変化の測定を行った。

#### 5.2 結果・考察

通エタノール条件による流量測定と、その後の通水条件での結果をそれぞれ図-6、図-7に示した。

図-6 が示すように、エタノールを流下した場合、試験開始直後の急激な流量の抑制はほぼ見られず、流量は 定常あるいは微増であった。また実験上の都合により、 実験開始から3時間から5時間の間でエタノールの供給 がストップしてしまい、ひび割れ面が乾いた状態になっ ていた期間があった。その前後で通水量の減少が見られ たが、多くはエタノールを流下させることで元の流量ま で増加した。

またエタノール流下後に供試体を乾燥させたのち行った通水試験の結果を図-7 に示した。図-7 では,通常の通水試験に見られる急激な通水量の顕著な抑制が見られた。

エタノールの流下の場合に通水量が減少しないこと について,エタノールの物性により表面の微粒子の閉塞 がそもそも生じなかったことが考えられた。そこでエタ ノールと水がひび割れ内の微粒子に及ぼす物理的影響に ついて,ストークスの抵抗則により検討した。ひび割れ 内の流体を渦が生じない層流と仮定すれば,流体中の半 径 a の物体に与える力は式(1)で表せる。

 $F = 6\pi\eta av$ 

(1)

Fは層流内の粒子に与える力(N),ηは液体の粘度(Pa・s), υ(m/s)は流体の速度である。本実験の場合,エタノール の流量は通水試験の場合と比較して同程度であることか ら流体の速度の差異は無視できる。温度 25℃の場合の粘 度は,水がηw=0.890,エタノールは濃度 100% (実験は濃 度 95%のものを用いている)の場合でη<sub>ethanol</sub>=1.084<sup>8)</sup>と, 同程度の値である。そのため流れにより微粒子が受ける 力はエタノールと水で同程度であり,エタノールの場合 でも微粒子の閉塞について水と同様に検討することがで きると思われる。

このときエタノールが流下した場合に流量が低下しな かったこと、一方で水を流下すると通水量の急激な抑制 が生じたことは、通水量の抑制に対するひび割れ表面の 微粒子の影響を否定することになる。同時にコンクリー トの自己治癒現象による通水量の抑制は、現状の結果か らは流体の中でも水に特有の現象ということになる。

以上の結果から,ひび割れ表面の微粒子による閉塞の 要因が通水量減少に与える影響は非常に少ないと考えら れる。

#### 6 コンクリートの通水性状の内部観察

ここまでの自己治癒現象の要因について実験的検討に 加え、エポキシ樹脂およびガラス板を用いて片側を半透 明の板とした模擬ひび割れを作製し、ひび割れ内の通水 性状を観察することで、さらなる理解を試みた。

模擬ひび割れについては、供試体割裂もしくは切断後、 片側に透明性を有するエポキシ樹脂もしくはガラス板を 用いて模擬ひび割れを作製した。割裂により凹凸な断面 をもつ供試体については、ひび割れ面を鋳型として高透 明エポキシ樹脂により凹凸を再現した模擬ひび割れ面を 作製した。切断により平滑な断面をもつ供試体について は、ガラス板とコンクリートの接合により模擬ひび割れ 面を作製した。接合時には0.2mmの厚さの樹脂フィルム を挟み込むことで内部のひび割れ幅の制御を行ったが、 エポキシ樹脂を用いた場合、割裂面の再現性が低いため、 表面で0.5mm 程度という過大なひび割れ幅になった。

通水を行う際には、連続通水条件と同様に水頭差を一 定にしたうえで供試体を固定し、照明とカメラによりエ ポキシ樹脂・ガラス板を通して内部を撮影した。特に通 水開始から 0,1,3,6,12,24 時間経過後に、流下させる水を 染色し、内部の流域箇所を確認した。染色剤には実験上 の都合から、開始6時間までは赤色 102 号、6時間以降 は青色1号を用いた。

観察結果を**写真-2, 写真-3**に示す。**写真-2**の供試 体を横切る白線部は固定用のバンド,**写真-2**,**写真-3** 



開始時 6 時間 12 時間 24 時間 写真-2 ひび割れ内部の通水性状(エポキシ樹脂)





# 12時間経過時点の拡大図 写真-3 ひび割れ内部の通水性状(ガラス板)

中の白い小片は樹脂フィルムである。エポキシ樹脂を用いた供試体の場合,24時間後では内部を流れる流域が小 さくなっている。通水開始直後はひび割れ内部の多くの 領域を流れていたのが,時間が経過するごとに流路は細 くなり,網目状に分布し始めることが分かる。

この傾向はガラス板を用いた平滑ひび割れ面の場合より顕著である。開始した時点ではひび割れ内部のほぼ全域が流路となっているのに対し,12時間,24時間後では気泡の影響により流域が大きく制限されているとわかる。

既往の研究においてひび割れ内の通水性状に対し,ひ び割れ内部を水が飽和しており,流量の変化は Hagen-Poiseulle流れに基づくことが前提とされていた<sup>6</sup>。 その上で自己治癒現象においては,水和物などの析出等 の要因によりひび割れ幅が狭まり,その結果通水量が減 少するという解釈がなされてきた<sup>2)</sup>。しかし本実験での 観察からは、通水開始直後の急速な通水量の減少は、ひ び割れ幅の減少によるものではなく流域が制約されるこ とによるものであることが示唆された。またガラス板で 観察したところ、染色されていない部分の形が円形を保 っていたこと、および、円の一部が千切れて流れに従い 移動する現象を観察により確認した。この2つの事実か ら、染色された水が流れていない円形の流域は、気泡が ひび割れ内部に出現し、ひび割れ内の通水を抑制した領 域であると推測される。

以上の観察結果から,不飽和のコンクリート中のひび 割れへの初期通水量の急激な減少は,コンクリート中に 水が浸潤したことにより空隙から追い出された気泡が毛 管張力によってひび割れ中に留まることによるものと考 えられる。このような事実は従来指摘されておらず,自 己治癒現象,特に初期透水量抑制機構の解釈に修正を迫 るものであるといえる。

#### 7 結論

本研究では、通水量を減少させる自己治癒現象の要因 について4点にまとめたうえで、そのうち3点の要因に ついて通水直後の急激な通水量抑制への影響を検討する ため、様々な条件の下で通水試験を行った。さらにひび 割れ内部の通水性状の観察を行った。その結果、初期の 通水量抑制は従来指摘されていない新たな通水量抑制の 機構が主要因であるという結論を得た。

本研究では 2.1(b)で挙げた炭酸塩の析出の要因につい ては十分な検討を行えていない。しかし, 3.2 で実施し た通水試験では,既に初期透水量の急速な減少が生じた 試験開始後1日の時点で,ひび割れ表面での析出物はみ られないことを確認した。また,炭酸イオンをほとんど 含まない水道水の供給により炭酸塩の生成反応が材齢1 日以内に急速に進行するとは考えにくいことから,初期 透水量の減少に及ぼす炭酸塩析出の影響も極めて限定的 と考えられる。

得られた知見を以下にまとめた。

- (1) ひび割れの内部性状を同一にした場合,供試体の材齢にかかわらず,通水開始から1日目までのひび割れ内の通水量の経時的変化はほぼ同一であった。このことにより,未水和セメントの再水和による影響は小さいことを示した。
- (2) 湿潤膨張や吸水の影響を検証する実験を行い、その影響限定的であることを確認した。
- (3) エタノールをひび割れ内に流下させた場合

の流量の経時的変化を測定し、水を用いた場 合の測定結果と比較することで、初期透過量 の急速な減少は水の流下時特有の現象であ り、微粒子の閉塞の影響は非常に限定的であ ることを示した。

(4) 供試体内部の流水状況の観察から、初期通水 量の急速な抑制がひび割れ内部の流域の減 少により生じていることを示し、コンクリー ト内部から生じる気泡の成長が流量抑制の 主要因であると指摘した。

謝辞:本研究の遂行には酒井 雄也博士(東京大学生産 技術研究所助教),後藤 誠史博士(山口大学名誉教授), 浅賀 喜与志博士(帝京科学大学名誉教授)との議論が 大変参考になりました。ここに深謝いたします。

#### 参考文献

- T.H. Ahn and T. Kishi: Crack Self-healing-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures, Journal of Advanced Concrete Technology, 8(2), pp. 171-186, 2010
- 森田卓,小出貴夫,安台浩,岸利治: 無機系ひび割 れ自己治癒組成物を造粒混和したコンクリートの 漏水抑制効果に関する基礎的検討,日本コンクリ ート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp1457-1462, 2011
- Edvardsen, C.: Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 4, pp. 448-454, 1999
- 4) 日本コンクリート工学会 セメント系材料の自己 治癒技術の体系化研究専門委員会 編:セメント 系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会報 告書,日本コンクリート工学会,pp.8-15,2011
- Neville, A.M. : Properties of Concrete fifth edition, Person Education Limited, pp.328, 2011
- 6) 伊藤洋,坂口雄彦,西山勝栄,清水昭雄: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, pp217-220, 1987
- 福田大祐ほか: マイクロフォーカス X 線 CT を用 いた水中環境下における高強度高緻密コンクリー トのき裂閉塞挙動の評価, Jounal of MMIJ, Vol.128, pp471-478, 2012
- 文部科学省 国立天文台 編: 理科年表, 丸善株式 会社, pp394, 2002