報告 コンクリートのひび割れ幅の制御方法と漏水速度低減効果の評価 方法についての考察

小日山 喬*1·細田 暁*2·栗田淑乃*3

要旨:筆者らは過去の研究でひび割れ間を通水する状態でのコンクリートの自己治癒性能を,通水速度 により評価してきたが,ひび割れ間の通水に関する試験方法は確立されていない。本研究では供試体の 作成方法,通水速度に影響を与える因子の検討を行った。その結果,供試体ごとのひび割れ幅のばらつ きを従来よりも制御することができた。モルタル試験体においては,ひび割れ幅を考慮した初期通水速 度とその後の通水速度の低減の程度を制御することができた。供試体の表面ひび割れ幅の測定方法と通 水試験結果の評価への活用には十分な配慮が必要であることを指摘した。

キーワード:ひび割れ導入方法、表面ひび割れ幅、内部ひび割れ幅、通水試験、初期通水速度

1.はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは,地下構造 物や水密性の要求される構造物,建築物などで漏水を引 き起こす原因となる。例えば漏水が塩分を含む場合は, 構造物の深刻な劣化を引き起こす懸念があり,漏水を抑 制するニーズは多い。そのため,漏水防止をターゲット とした自己治癒コンクリートの開発や,実構造物で発生 した漏水を抑止する補修方法の開発が活発に行われてい る¹⁾。

これまでの筆者らの研究においては、実際の構造物で 発生するひび割れ部からの漏水のような、ひび割れ間を 通水する状態での自己治癒コンクリートの性能評価の検 討や、通水する水の性質が漏水低減効果に及ぼす影響の 検討などをおこなってきた²⁾。しかし、供試体にひび割 れを導入する方法や通水試験方法は確立されているとは 言えず、供試体ごとに初期通水速度の供試体ごとの個体 差が大きく、自己治癒性能の評価方法の信頼性が確保さ れていない状況にある。

本研究では通水試験時に生じる初期通水速度のばらつきを抑えることを目標に、ひび割れ幅の制御方法を入念

に検討する。

ひび割れの内部形状を測定し,それが初期通水速度の ばらつきに与える影響について,コンクリートとモルタ ルの供試体の比較を通して検討する。

これらの結果を踏まえて,漏水低減効果の評価方法の あるべき姿について考察を行う。

2. 供試体の作成方法

2.1 使用材料

本研究で使用した材料を**表-1**に示す。セメントには 普通ポルドランドセメントを用いた。粗骨材の最大寸法 は 20mm である。

2.2 コンクリート, モルタルの配合

コンクリート,モルタルの配合を表-2 に示す。モル タルはコンクリートの水,セメント,細骨材の質量比を 変更させないように配合設計を行った。配合の名前はコ ンクリートを C,モルタルの名前を M とした。

2.3 ひび割れ幅の制御方法と計測方法

本研究が対象としているひび割れは、日本コンクリー ト工学協会で補修が必要と規定されている 0.2mm を勘

セメント	N:普通ポルトランドセメント(密度=3.16) (比表面積=3300cm ² /g)
細骨材	S:千葉県君津市法木産陸砂(密度=2.30)
粗骨材	G:明星セメント(株)田海鉱山 石灰石砕石(密度=2.68)
混和剤	A:高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)

表-1 使用材料

表-2 コンクリート、モルタルの配合

配合名	セメント種類	空気量	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤 (g/m ³)	
C M	N	45(+15)	50	167	334	913	1020	320	
	IN	4.5(±1.5)	50	270	540	1475	0	502	

*1 横浜国立大学 大学院環境情学府 環境システム学専攻(正会員)

*2 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 准教授 博(工)(正会員)

*3 東日本旅客鉄道株式会社 横浜土木技術センター 修(工)

案して 0.2±0.1mm のひび割れ幅を作製することを目標 とした。

供試体の寸法は図-1に示すように100×100×400mmと し、中央部にD16の鉄筋が貫通している。鉄筋が貫通す ることで、ひび割れのせん断方向のずれを防いでいる。 供試体長さ方向の中央部には図-2(a)に示すようなステ ンレス製の台形のノッチを設置し、ひび割れの発生箇所 を特定した。図-1に示すように、供試体中央部のひび 割れ発生箇所の鉄筋 10mm の区間は、鉄筋の直径が ϕ 11mm になるように切削し、さらにグリスを塗布した。 既報³⁾では鉄筋の切削領域の端部にはテーパーをもたせ ていたが、本研究では写真-1に示すように直角に切削 した。鉄筋の切削を行う目的は以下の3点である。

1)鉄筋近傍の付着を切り,ひび割れ幅が鉄筋により絞られるのを防ぐ。

2)付着除去区間の鉄筋が先に降伏するので、付着除去区 間以外の鉄筋周囲の損傷が抑制される。

3)漏水試験の際にひび割れ間に存在する鉄筋の影響をな るべく小さくする。

次に,ひび割れ導入方法,ひび割れ幅の制御方法について説明する。既報³⁾では,鉄筋に引張力を加えることによってひび割れを導入し,その後除荷して残留ひび割れ幅が目標のひび割れ幅となる様に制御を試みていた。

本研究ではひび割れ幅をさらに精度よく制御するため, 写真-2 に示すように打設時に供試体に設置したノッチ をひび割れ発生後に除去して,その代わりに,図-2(b) に示すより大きなステンレス製ノッチを挟み込むことで 除荷後のひび割れ幅が一様になる工夫をした。さらに引 張載荷時に生じる2次曲げに対処することを目的に,秋 田らの研究⁴⁾を参考にして作製したステンレス製の型枠 を供試体にセットし,ナットを締め付けることで2次曲 げを軽減した。ステンレス鋼棒の直径はM10で,4本の 鋼棒を使用しての拘束治具となっている。引張載荷時の ひび割れ幅は, π 型変位計によって測定した。通水試験 時に供試体のひび割れ以外の箇所からの漏水を防ぐこと を目的に,供試体の側面には接着材を用い,防水処理を 施した。

2.4 ひび割れ幅の計測方法

本研究におけるひび割れ幅の計測方法について説明す る。本研究では表面ひび割れ幅と,内部ひび割れ幅を計 測した。

表面ひび割れ幅は、通水試験の評価に用いた。通水試 験開始前に表面ひび割れ幅を、水頭がかかる面と反対側 の水が流れ出る面のそれぞれ3箇所ずつ,計6箇所を100 倍のマイクロスコープで計測し、その平均値を各供試体 の表面ひび割れ幅とした。計測点を、**写真-3**に示した。

内部ひび割れ幅の計測方法を説明する。ひび割れ導入

後にひび割れ内部に赤に着色したエポキシ系の樹脂を注 入し、供試体をひび割れから垂直方向に図-3 に示す箇 所で切断した。各断面において水頭がかかる面から 1cm ごとに 100 倍のマイクロスコープで撮影し、ひび割れ幅 を計測した。

2.5 養生方法

20±1℃,相対湿度は概ね 60%の恒温恒湿室で養生を 行った。各供試体は打設後に緘封状態にして型枠中で養 生し,水分の出入りがないようにした。材齢3日で脱型 し,その後材齢7日まで湿布養生をした。7日目にひび 割れを導入し,2.3 で述べたようにひび割れ幅をコント ロールした後,供試体と通水試験機をエポキシ系接着剤 で固定するために1日静置した。





(b)ひび割れ幅保持材 図-2 台形ノッチとひび割れ幅保持材の寸法



写真-1 鉄筋の切削状況



写真-2 ひび割れ幅の固定方法



図-3 供試体の切断の状況と内部ひび割れ幅の計測位置



写真-3 表面ひび割れ幅の測定箇所

3. 通水試験の概要

3.1 通水試験方法と通水速度

ひび割れ幅を固定した後,温度管理されていない実験 室内で,20℃の水道水がひび割れ間を常に通水している 状態に供試体を置いた。ひび割れ部を通過した水は循環 させずに廃棄した。なお通水している水の水頭は10kPa とし,温度調整のために電熱ヒーターと温度調整器を用 いた。通水試験の概要を図-4に示す。

3.2 ハーゲン・ポアズイユ式

ひび割れからの通水量は,ハーゲン・ポアズイユ式により,ひび割れ面の凹凸を考慮した補正係数を乗じた式(1) で求めることが提案されている^{5),6)}。

$$q_{leak} = C_w \cdot b \cdot \Delta P \cdot w^3 / 12 \cdot \mu \cdot L \tag{1}$$

ここに q_{leak}: ひび割れからの通水量(mm³/s) C_w: ひび割れの凹凸を考慮した補正係数 b: ひび割れの長さ(m) AP: 水圧差(N/m²) µ: 水の粘性係数(Ns/m²) L: 水路長(m) w: ひび割れ幅(mm)

通水試験で測定される通水量から,式(1)を用いること で,補正係数 C_w が求められる。 C_w は,ひび割れ面の凹 凸を考慮した補正係数である。既往の報告 ^{5),6)}に示され



図-4 通水試験の概要

4. 実験結果

4.1 内部ひび割れ幅のばらつき

q: 通水速度 P: 水圧 μ: 水の粘性

w: ひび割れ幅

b,L: 供試体の寸法

表面ひび割れ幅の測定結果を表-3,内部ひび割れの 測定結果を図-5,6に示す。表-4には、内部ひび割れ 幅の標準偏差,変動係数を示す。本研究で提案したひび 割れ導入方法で、内部ひび割れ幅を計測するための供試 体を配合Cについて2体,Mについて1体作製した。既 報³⁾によるひび割れ制御方法では、配合Cについて2体 作製している。

本研究で提案した方法は著者らの既報³⁾と比較して, 内部ひび割れ幅の標準偏差,変動係数が共に大きく減少 しており,供試体全体のひび割れ幅が制御できていると 言える。

3.1 で説明した方法で計測された表面ひび割れ幅と内 部ひび割れ幅は大きく異なっている場合があり,非破壊 で計測できる表面ひび割れ幅が,種々の評価に用いられ ることが多いため,表面ひび割れ幅の取扱いには十分な 配慮が必要である。

4.2 初期通水速度のばらつき

通水試験開始時の通水量をひび割れの面積で除した, 初期通水速度を求めた。初期通水速度とは,通水試験を 開始してから5分以内に計測した通水速度である。配合 C,Mの供試体に対して行った通水試験の初期通水速度 とひび割れ幅の関係を図-7に示す。表-5には,通水 試験を行った供試体のデータの詳細を示した。

方法	本研究で	ご提案する	方法(I)	既報で提案 ³⁾ された方法(Ⅱ)			
供試体名	I -C-1	I -C-2	I -M-1	II -C-1	I -C-2		
配合	С	С	М	С	С		
表面ひび割れ幅,上下面平均(µm)	178.0	181.0	193.5	293.3	212.5		
上面 (µm)	181.0	178.0	211.0	196.6	136.9		
下面 (µm)	175.0	184.0	176.0	390.0	288.1		

表-3 各ひび割れ導入法で生じた表面ひび割れ幅の値







<u>I</u>-С-2

123.7

45.6



図-6 内部ひび割れ幅の計測結果 (既報³⁾で提案された方法)

モルタル供試体はコンクリート供試体に比べ,ひび割 れ幅と初期通水速度の関係にばらつきが少ない。コンク リート供試体はモルタル供試体と比べて,粗骨材の影響 でひび割れの壁面に屈曲が多く,実際の水路長が変化し ていることや,狭隘部が多く存在することによると考え られる。また,表面のひび割れにおいても同様で,コン クリートの場合は局所的にひび割れ幅が大きく変化する 箇所が見られ,本研究の表面ひび割れ幅算定方法が必ず しも供試体の実際のひび割れ幅を適切に表現できていな い可能性も考えられる。既報³⁾の試験結果と比較して, 本研究の初期通水速度の値が小さくなる傾向が見られる。

表-5 通水試験に用いた供試体の詳細

供試体名	I - C - a	I - C - b	I - C - c	I - C - d	I - C - e	I - C - f	I - C - g	I - C - h	I - C - i
上面の表面ひび割れ幅 (µm)	170.1	207.0	211.5	212.9	212.1	231.3	225.4	226.1	314.1
下面の表面ひび割れ幅 (µm)	168.4	182.3	179.9	228.6	229.7	238.6	295.8	314.3	361.8
表面ひび割れ幅平均値 (µm):w	169.3	194.7	195.7	220.7	220.9	235.0	260.6	270.2	337.9
初期通水速度 (mm/s):q	77.85	35.32	76.79	33.01	40.18	37.77	50.99	137.95	107.03
$q/w^3(1/s/mm^2)$	1.605E+04	4.787E+03	1.025E+04	3.070E+03	3.728E+03	2.912E+03	2.881E+03	6.991E+03	2.773E+03

(a) I - C の供試体

(b) I - M の供試体

0 0 11 = + 11

供試体名	I - M - a	I - M - b	I - M - c	I - M - d	I - M - e	I - M - f	I - M - g	I - M - h
上面の表面ひび割れ幅 (μm)	202.9	211.9	193.7	221.0	289.4	241.8	258.0	284.1
下面の表面ひび割れ幅 (μm)	165.4	176.3	230.1	255.2	214.3	316.2	286.2	297.3
表面ひび割れ幅平均値 (µm):w	184.2	194.1	211.9	238.1	251.9	279.0	272.1	290.7
初期通水速度 (mm/s):q	26.74	33.29	57.39	48.40	85.355	103.943	120.815	112.65(*)
$q/w^3(1/s/mm^2)$	4.280E+03	4.552E+03	6.029E+03	3.585E+03	5.341E+03	4.786E+03	5.996E+03	4.585E+03

(*) 参考 -M-fの試験体寸法の場合 100mm/s**=約**3g/s

		(C)	Ш-СО,	の供試体
供試体名	ІІ - С - а	II - C - b	II - C - c	
上面の表面ひび割れ幅 (µm)	157.1	477.6	107.1	
下面の表面ひび割れ幅 (µm)	284.7	232.7	189.3	
表面ひび割れ幅平均値 (µm):w	220.9	355.2	148.2	
初期通水速度 (mm/s):q	92.1	250.0	79.1	(*)参考 ***********************************
q/w ³ (1/s/mm ²)	8.537E+03	5.579E+03	2.432E+04	yyam海迪小述度の値







図-8 補正係数とひび割れ幅の関係

図-6 で示した通り, 既報の供試体は同一供試体におい て上下面ひび割れ幅, 断面ごとの内部ひび割れ幅の差が 大きいことから, 通水速度の計算に用いられているひび 割れ幅が供試体のひび割れ幅の実態を正確に表していないことや、局所的に大きくなった水の通り道の影響が大きく出た可能性が考えられる。

4.3 ひび割れ幅と補正係数の関係

配合 C, M の供試体に対して行った通水試験の補正係 数 C_wとひび割れ幅の関係を図-8 に示す。C_wは,初期 通水速度から算出した。初期通水速度と同様に,モルタ ル供試体の方がコンクリート供試体に比べてひび割れ幅 と補正係数の関係にばらつきが少ない。コンクリート供 試体に生じる供試体のばらつきの要因としては 4.2 と同 様に,粗骨材の影響が考えられる。

モルタル供試体において,ひび割れ幅の増加ともに補 正係数 *C_w*が増加していく傾向がみられた。ひび割れ幅 が大きくなることにより,岡崎ら⁹⁾が報告している骨材 の存在がひび割れ内部の水路を屈曲させて水の流れを滞 留させることの影響が小さくなるためと考えている。

伊藤ら⁹によって提案された *C*_wの算定式では, ひび割 れ幅の増加と共に *C*_w は低下していくという,本研究と は異なる見解が示されている。伊藤らは割裂によってひ び割れを導入しているため,供試体上下面の表面ひび割 れ幅に差ができ,見かけ上の供試体の表面ひび割れ幅が 大きくなっても内部が閉塞していたり,狭隘部が多く存 在していたりすることが考えられる。供試体の寸法によ り,水路長の増加量が異なることも原因の一つとして考 えられる。伊藤らの供試体は高さが 15~17cm であり, 本試験と近い値を示した仕入⁸らの供試体は本研究と同 じく 10cm である。

4.4 通水試験初期時の通水速度の時間変化

配合 C, M の供試体に対して行った通水試験の通水速 度を表面ひび割れ幅(mm)の3乗で除した値 q/w^3 の時間変 化を図-9, 10 に示す。 q/w^3 は, C_w の関数となる。 q/w^3 の試験開始時の値は、コンクリート供試体の値はばらつ くが、モルタル供試体の値はばらつきが少ない。

コンクリート供試体では、I-C-e など試験開始後 24 時 間で顕著な q/w³の低下が見られた供試体と,見られなか った供試体があった。q/w³の低減が見られた供試体につ いては,試験開始後 24 時間程度では CaCO₃ などの結晶 の析出によるひび割れの閉塞が見られない²⁾という既往 の研究結果や,q/w³の低減が一度落ち着くことから,こ の期間は微粒子の目詰まりやセメント分の膨潤による物 理的なひび割れの閉塞が内部で起こっていることが原因 と考えている。q/w³の低減が見られなかった供試体につ いては,目詰まりが起こらず,ペースト部を中心とする 吸水による膨張もさほど起こらなかったと考えている。

モルタル供試体では、全ての供試体で q/w³の低減が見 られた。モルタル供試体はコンクリート供試体と比べて ひび割れの内の水路に屈曲が少ないため、目詰まりの程 度は小さいと推測されるが、コンクリート供試体に比べ てペースト部の体積が大きいため、吸水膨張による q/w³ の低減が見られたと考えている。目詰まり、膨潤の影響 は、今後も分析を続ける予定である。





図-9 配合 C の q/w³の経時変化

図-10 配合 Mの q/w³の経時変化

5.まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ひび割れ幅のばらつきを抑えるひび割れ導入方法を 提案し、内部ひび割れ幅、上下面の表面ひび割れ幅 のばらつきを従来よりも小さくすることが可能となった。
- (2)供試体の表面ひび割れ幅と内部のひび割れ幅には大 きく異なっている場合があり、表面ひび割れ幅の計 測方法と活用には十分な配慮が必要である。
- (3) モルタル供試体はコンクリート供試体と比較して, 表面ひび割れ幅と初期通水速度の関係,表面ひび割 れ幅と漏水量算定のポアズイユ式の補正係数 C_wの 関係のばらつきがともに小さかった。
- (4) 通水速試験におけるひび割れ幅を考慮した初期通水 速度と、その後の通水速度の低減の程度は、モルタ ル供試体でばらつきが小さくなった。

参考文献

- 日本コンクリート工学協会:セメント系材料の自己修 復性の評価とその利用法研究専門委員会,報告書, 2009.3
- 2) 小松 怜史,細田 暁,安 台浩,池野 誠司: ひび割 れ間で通水する自己治癒コンクリートの治癒性状,コ ンクリート工学年次論文報告集, Vo.30, No.1, pp.117-128, 2008
- 3) 栗田 淑乃,細田 暁,小日山 喬:自己治癒コンクリ ートの漏水防止性能の評価方法に対する一考察,第 64 回セメント技術大会講演要旨,pp.160-161,2010
- 4) 秋田 宏,小出 英夫,外門 正直:コンクリートの直接引張試験における実験的方法,コンクリート工学 年次論文報告集,Vol.21, No.2, pp.643-648, 1999
- 5) 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 41, pp.217-220, 1987.12
- 6) 壱岐 直之,清宮 理,山田 昌郎,高野 誠紀:沈埋ト ンネル側壁のひび割れからの漏水と自治効果の確認実 験,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.737-742, 1995
- 岡崎 慎一郎,平田 直矢,氏家 勲:コンクリート工 学年次論文報告集, Vo.31, No.1, pp.925-930, 2009
- 8) 仕入 豊和:キレツによるコンクリートの水密性低下の防止に関する二三の実験的検討,日本建築学会論文報告集,第69号,pp.217-220,1961.10