

論文 コンクリート表層品質の簡易判定手法としての繰り返し流水試験の安定性向上に関する検討

菊地 健人*1・岸 利治*2

要旨: かぶりコンクリートの物質移動抵抗性は構造物の耐久性を左右するため、非破壊試験による品質の定量評価が必要となる。既存の品質評価手法よりも簡便な試験法として、一定量の水を流下させ、その長さを指標とする「流水試験」が提案された。本検討ではこの流水試験に改良を加えてデータの安定化を図るとともに、配合、養生の異なる供試体に適用することで中性化深さおよび塩分浸透深さとの相関を確認した。

キーワード: 表層品質, 非破壊検査, 中性化, 塩分浸透深さ, 流水試験

1. はじめに

鉄筋コンクリートにおいては腐食の要因となる有害物質はかぶりコンクリートを通過して鉄筋に到達するため、耐久性を担保するためには、かぶりの十分な厚さおよび品質を確保することが重要である。単品個別生産されるコンクリートの品質は材料のみならず打ち込み、締固め、養生といった施工条件にも左右されるが、特にコンクリートの耐久性に直結する物質移動抵抗性については、強度よりも施工の要因を受けやすいとされ、施工の妥当性を直接的に評価する手法の必要性が議論されている¹⁾。

物質移動抵抗性の評価手法としては表層透気試験や吸水試験といった既存の方法に加え、より簡便な方法として、一定量の水をコンクリート表面に流下させ、流れた距離を指標（以下「流水距離と呼称）」とする「流水試験」が提案されている²⁾。

流水試験では 1 回のみを流下させる試行試験において、水の流れた長さとしゅミットハンマーによる反発度の相関が指摘されている³⁾ほか、一定間隔を空けて複数回流下させる「繰り返し流水試験」とした際の流水距離と、中性化深さおよび塩分浸透深さには高い相関がみられることが報告されている⁴⁾。

しかし、繰り返し流下時にはコンクリート表層の微細な凹凸やひび割れの影響を受け、流水が蛇行分岐する

ことにより、指標とすべき流水距離が正確に測定できない状態になることが少なからず確認された。また、混和材を用いた場合や表層にマイクロクラックが存在する場合は流水の幅が拡大することで流水距離が短くなる傾向も指摘されている²⁾。そこで、流水の方向および幅を制御するガイドを導入することで試験条件を画一化し、取得するデータの安定化を図るとともに、より信頼性の高い品質評価法とすることを目指した。

本論文では中規模柱試験体を対象として、まず中性化深さおよび塩分浸透深さの測定を行い、耐久性指標として用いることとした。次に種々のガイドを用いて繰り返し流水試験を実施し、上記耐久性指標と比較することでガイドの有効性を検討している。

2. 中規模柱試験体の概要

測定には写真-1のような、屋外で作成された中規模の柱試験体（以下、中規模柱試験体とする）を用いた。高さ 2350mm、断面が 300mm×400mm の鉄筋コンクリート柱にスラブを載せ、柱には雨が直接当たらないようになっている。柱は配合、養生が異なる 10 種類で構成されており、配合を表-1、施工方法を表-2 に示す。試験体は夏季、冬季それぞれ 10 本ずつを施工しているが、本研究では常設の水切りが設置されており、降雨の影響が小さいと考えられる夏季施工（2010 年 8 月 5 日打設）の 10 本の柱を対象に検討を行った。

表-1 コンクリートの配合

配合	セメント	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	S	G	AE	SP
N24	N	58.0	168	290	826	1019	2.90	—
BB24	BB	57.5	167	291	818	1019	2.91	—
N60	N	32.0	170	532	768	866	—	8.78

*1 東京大学 工学部社会基盤学科 (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)



写真-1 検討に使用した中規模柱試験体

表-2 施工方法

配合	施工条件	養生方法
N24	施工標準準拠（北側）	型枠 5 日
	施工標準準拠（南側）	型枠 5 日
	給水養生	型枠 1 日→ 散水 27 日
	密封養生	型枠 5 日→ ラップ 23 日
	早期脱型	型枠 1 日
	現地加水 (20kg/m ³ の加水)	型枠 5 日
BB24	施工標準準拠	型枠 7 日
	早期脱型	型枠 1 日
N60	施工標準準拠	型枠 5 日
	早期脱型	型枠 1 日

表-3 比較に用いた耐久性指標

試験体	中性化深さ(mm)	塩分浸透深さ(mm)
N60 標準	0	6.3
N60 早期	0.4	5.5
BB24 標準	1.4	10.5
BB24 早期	2.3	14.1
N24 密封	3.6	25.4
N24 早期	5.1	27.1
N24 標準北	5.2	25.7
N24 標準南	6.2	27.4
N24 給水	7.7	19.3
N24 加水	8.9	38.9



写真-2 ピペット固定治具

3. 中性化深さおよび塩分浸透深さの測定

流水距離と比較する耐久性指標として、中規模柱試験体での中性化深さおよび塩分浸透深さを測定した。材齢 15 か月時点で各柱の高さ 1400mm 付近から円柱コアの採取を行った際、コア抜き跡付近を 4 か所はつり、フェノールフタレイン溶液を噴霧して変色域を確認した。これら 4 か所の深さを測定し、その平均値を中性化深さとした。塩分浸透深さの測定では、採取したコアを軸方向に 4 分割し、柱の壁面に対応する 1 面のみを残してエポキシ樹脂を塗布した後、10%塩水に浸漬した。浸漬期間 10 日間で供試体を割裂して割裂面に硝酸銀水溶液を噴霧し、目視で変色域を確認している。コア一つあたり 4 か所で変色域の長さを測定し、その平均値を塩分浸透深さとした。測定結果の一覧を表-3 に示すなおコアは柱を貫通して採取したため、各柱で中性化深さおよび塩分浸透深さは南北 2 面で算出されるが、表-3 に掲載した値は 2 面の平均値である。

4. 繰り返し流水試験の安定性に関する検討

4.1 測定概要

繰り返し流水試験では、コンクリート表面に対し、1 回あたり 15 μ l の水をデジタルピペットにより 30 秒間隔で 10 回流下させ、流水距離を測定する。本論文では、ガイドを用いない場合、テグスによるガイドとけがきによるガイドを用いた場合の 3 種類の検討を行った。ここで、水の流下を用いるデジタルピペットとコンクリート面の接触角度によって測定結果に影響が出るため、いずれのケースにおいても写真-2 のような治具を使用し、角度を 15°に固定して測定を行っている。すべての測定は南北 2 面で行い、高さ方向のコンクリート品質の影響を統一するため、高さ 800mm 付近で測定を行った。

(1) ガイドを使用しない測定

ガイドを用いないパターンは、角度固定のための治具を用いているという点を除き、既報⁴⁾と手法、測定位置は同様である。位置をずらした 3 点で測定を実施し、その平均値を流水距離とした。測定時の材齢は約 26 か月であり、気温 20°C 前後、日照は少なかった。

(2)テグスによるガイドを使用した測定

0.6号（直径0.128mm）のテグスを3mm間隔で2本、上下端を粘着テープによって測定面に貼り付けることでガイドとし、その間に水を滴下して繰り返し流水試験を行った。測定は1面あたり2点で行いその平均値を流水距離としている。測定は(1)と同日に実施したが、流水試験の実施による含水状態の変化を受けないよう、測定地点は左右に50mm程度ずらしている。

(3)けがきによるガイドを使用した測定

0.5mm幅、硬度Bの芯を用いたシャープペンシルにより、間隔5mmとなるようにけがきを行いガイドとし、その間に滴下し繰り返し流水試験を行った。測定は(2)と同様に1面あたり2点とし、測定時の材齢は約28か月、気温は10℃前後、日照はほぼなかった。またこのパターンでは、4.2(1)で述べる試験柱表面への硬化成分付着の影響を低減するため、すべての測定面をベルトサンダーで研磨し、圧縮空気ですり粉を除去した直後に繰り返し流水試験を実施している。

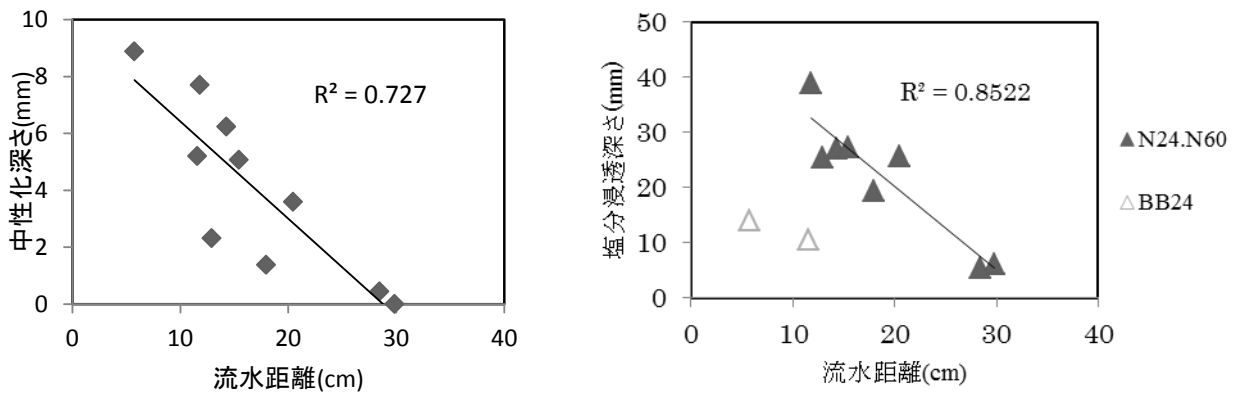


図-1 ガイド無しでの結果

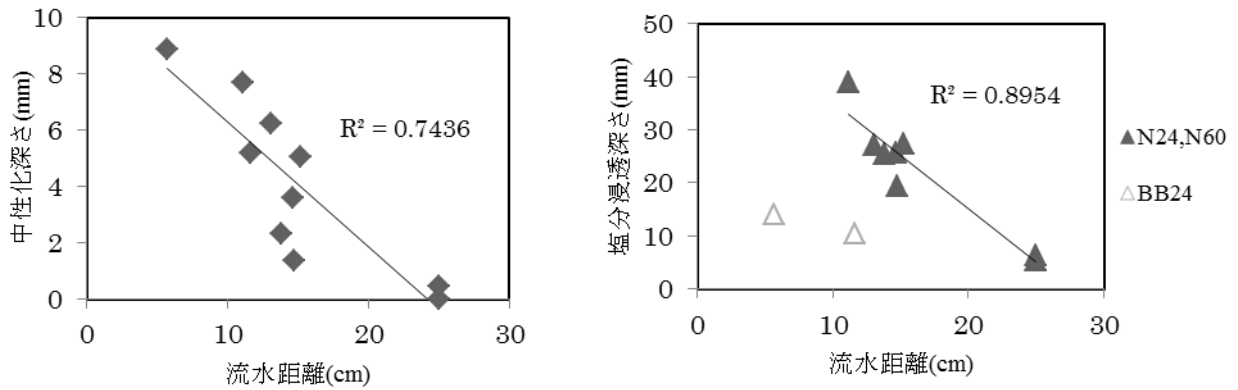


図-2 テグスを用いたガイドでの結果

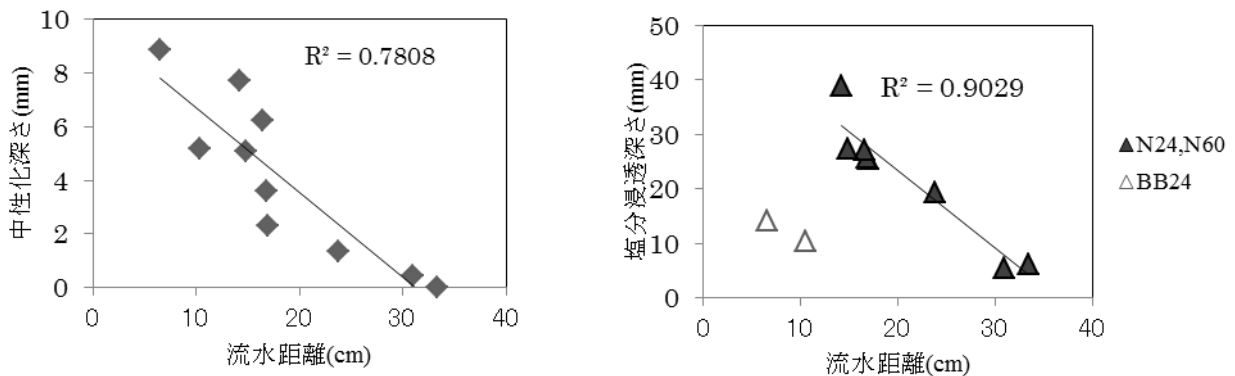


図-3 けがきを用いたガイドでの結果



写真-3 ガイドを用いない場合



写真-4 テグスを用いたガイド

4.2 測定結果とガイドによる安定化に関する検討

前節の各手法により測定された流水距離を各試験体毎に示したのが表-4であり、3章で測定した中性化深さおよび塩分浸透深さとの関係をプロットしたのが図-1、図-2、図-3、である。流水距離については耐久性指標と同様、南北での測定結果の平均値をプロットに用いている。ガイドによる流水挙動の違いや、耐久性指標との相関に関して以下で検討する。

(1)ガイドを使用しない場合

試験時の流水の様子を写真-3に示すが、蛇行や幅の不均一が生じていることが確認できる。図-1に示すように、中性化深さとの対応を1次近似した場合の決定係数は0.7程度であり、手法としては同様であった既報⁴⁾における0.9程度を大きく下回る結果となった。この原因としては、全体の傾向として流水距離が短縮されていることから、試験体の材齢が増したことにより内部の乾燥が進行し、流下した際の吸水量が配合や養生の違いを検出できるレベルよりも大きくなってしまったことや、試験体の表面温度が比較的高かったために測定実施中の蒸発量が大きくなってしまったことが考えられる。また、測定地点より上部にあるコアサンプル採取跡はモルタルで補修されているが、モルタルの一部が溶出して下部のコンクリート表面に付着、硬化していたことから、材質の違いや表面の凹凸といった表層部の極端な不均一が、流水距離に影響を及ぼしている可能性がある。塩分浸透深さとの関係については既報⁴⁾と同様に、流下に伴う拡幅により流水距離が極端に短くなる傾向のBB24を除くことにより、良好な決定係数が得られることを確認した。この条件では計60点の測定を行ったが、大幅な蛇行や停滞、繰り返し時の分岐により流水距離が測定できなかったものが8点生じ、これらについては位置をずらして再度試験を行う必要があった。

(2)テグスによるガイドを用いた場合

試験時の流水の様子を写真-4に示す。テグスは試験



写真-5 けがきを用いたガイド

体表面の微細な凹凸には追従しないため、しみによる幅の拡大は抑制しきれていないものの、蛇行については制御できていることが確認できる。蛇行の抑制により流水距離は増加すると予想されたが、(1)と比較してほぼ同等、もしくは若干短くなる結果となった。原因として、テグスとコンクリート表層とのわずかな隙間から生じる粘性抵抗が流水距離の短縮に影響した可能性が考えられる。なお、流水距離の最大値が25cmに留まっているのは、繰り返し8~10回目時点で流水が用意したテグスの端に到達し、それ以上の測定ができなくなったためである。

図-2に示す耐久性指標との関係を見ると、ガイドなしの結果(図-1)と比較して、中性化深さとの相関についてはわずかながら決定係数が向上する結果が得られた。一方、塩分浸透深さとの相関については依然としてBB24の流水距離が短く、N24、N60の試験体とは区別して扱わなければ、高い相関は得られなかった。計

40 点の測定を行った結果、テグスと表面の隙間から水が漏れて蛇行し、流水距離が測定できなかったものは2点に留まった。蛇行の解消と合わせて、データの安定した取得という観点から、テグスによるガイドは一定の効果が得られていると言える。ただし、2本のテグスを平行に貼り付けるには現場で1分から数分程度の作業時間を要するため、1回あたりの測定時間が増大するという欠点がある。

(3)けがきによるガイドを用いた場合

流水の様子を写真-5に示すが、わずかな滲みは見られるものの、蛇行および拡幅はほぼ完全に抑制されることが確認できる。テグスを用いた場合のような粘性抵抗も生じないため、ガイドを用いない場合と比較しても流水距離が増大する傾向が見られた。テグスを用いたガイドは測定までの準備時間の増加が欠点であったが、けがきにかかる時間は数十秒から1分程度であり、作業時間は大幅に短縮されている。

繰り返し流水試験の結果と耐久性指標との関係を図-3に示す。他のケースと比較して、最も高い決定係数が得られる結果となった。しかしながら、これまで流下に伴い流水幅の増大が生じていたBB24においても、幅の増大を抑制することができたものの、流水距離としてはガイド無しのケースやテグスを用いた場合とほぼ同様であった。そのため、これまでと同様に、図-3の塩分浸透深さとの決定係数は、BB24の測定点を除いて算出されている。けがきによるガイドを用いた測定は南北面に加え、データは示していないものの、ベルトサンダーで研磨していない東西面においても測定を実施し、計80点のデータを取得している。その内、流水距離の測定に支障をきたすほどの分岐や停滞が生じて再試験が必要となったのは、2点のみであった。極めて単純な方法ながら、蛇行や分岐の排除といった点ではテグスを用

いたガイドよりも高い効果が得られているといえる。

4.3 ガイドによる変動係数の変化

ガイドの有用性を検討するため、表-5に示すように、各測定手法における結果の変動係数を算出した。標本は測定面1面につき、ガイド無しの場合は位置をずらした3点、テグスおよびけがきによるガイドの場合は2点を用いている。テグスを用いた場合は前述のように、N60での流水距離が測定できる最大値であった25cmに達したことにより、変動係数が0となり比較ができないが、BB24、N24に限ってみてもガイドを用いない場合は変動係数が10を超えるものが16点中10点あったのに対し、テグスを用いた場合は3点、けがきを用いた場合は4点まで減少している。変動係数の減少には蛇行や拡幅による誤差の排除に加え、あらかじめ流水させる範囲を限定できることで誤差の要因となる凹凸やクラックを回避するというガイドの効果が要因として考えられる。

5. まとめ

本検討では繰り返し流水試験の安定性向上を目的としてガイドの有効性を検討した。養生を変化させた中規模柱試験体を対象として、流水距離と各種耐久性指標との比較を行うことでその適用性を検討した。

テグスを用いたガイドでは、滲みによる拡幅は抑制できなかったが蛇行についてはほぼ完全に排除できた。全体として流水距離は短くなる傾向があったものの、ガイドを用いない場合と比較すると、中性化深さ、塩分浸透深さとの関係は決定係数向上する結果となった。さらに、現場での作業性向上や拡幅の抑制を目的としたけがきガイドでは流水距離が増大する傾向が確認され、テグスを用いたガイドと比較してもより高い決定係数が得られた。測定結果の変動係数を比較した場合においても、ガイドを用いない場合に比較して流水距離のばらつきは大きく減少していることが確認できた。

今回の測定では既報と比較して、測定全体の傾向は大きく変わらないものの、特に中性化深さとの相関が劣る結果となった。ベルトサンダーによる表層状態の統一を行っても顕著な相関の向上は見られなかったことから、

試験体の材齢による乾燥から吸水性状が変化している影響を受けている可能性があり、その影響を定量化する必要がある。また、塩分浸透深さとの相関については依然として高炉セメントを用いた試験体のデータは除かなければならず、混和材を用いたコンクリートへの繰り返し流水試験の適用可能性については今後の検討課題である。

表-4 各試験体での流水距離

試験体	流水距離(cm)		
	ガイド無し	テグス	けがき
N60 標準	29.9	25.0	33.4
N60 早期	28.5	25.0	31.0
BB24 標準	11.6	11.6	10.4
BB24 早期	5.8	5.7	6.6
N24 密封	12.9	13.8	16.9
N24 早期	14.3	13.1	16.5
N24 標準北	20.5	14.6	16.9
N24 標準南	15.5	15.2	14.9
N24 給水	18.0	14.7	23.8
N24 加水	11.8	11.1	14.2

表-5 変動係数の比較

試験体	変動係数 (%)					
	無し		テグス		けがき	
	北	南	北	南	北	南
N60 標準	14.9	8.0	0	0	3.6	12.4
N60 早期	2.0	25.5	0	0	0.3	15.0
BB24 標準	10.4	11.2	1.1	13.9	8.4	6.3
BB24 早期	4.1	3.2	4.4	2.7	0.8	13.9
N24 密封	1.5	33.5	4.5	8.3	1.6	3.0
N24 早期	2.8	26.1	2.4	1.5	5.8	1.5
N24 標準北	13.6	7.8	18.8	7.8	10.0	20.3
N24 標準南	17.6	55.3	15.8	0.8	14.7	2.7
N24 給水	1.5	24.6	1.8	9.8	5.5	5.3
N24 加水	26.7	11.0	9.0	4.7	7.4	1.0

謝辞

本検討は韓国道路公社からの受託研究の一環として行いました。関係各位には、ここに記しまして深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会(335 委員会)成果報告書,コンクリート技術シリーズ 80, 土木学会, 2012
- 2) 家辺麻里子, 秋山仁志, 岸利治: 水の流下試験によるコンクリート表層の品質評価に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.34, No.1, pp.670-675, 2012.6

- 3) 地濃茂雄, 佐藤茂治: 打放しコンクリート外壁面における雨水の吸水・流下に関する検討, 第 65 回セメント技術大会講演要旨, pp.156-157, 2011.5
- 4) 家辺麻里子, 岸利治, 西尾壮平, 上田洋: 水の流下試験によるコンクリート構造物の表層品質評価に関する研究, 第 66 回セメント技術大会講演要旨, pp.94-95, 2012.5