

論文 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

家辺 麻里子^{*1}・秋山 仁志^{*2}・岸 利治^{*3}

要旨：かぶりコンクリートの物質移動抵抗性は鉄筋コンクリート構造物の耐久性能に影響するため、非破壊で定量的な評価を行うことが求められる。本研究では配合・養生条件を変化させた中規模柱試験体を作製し、表層透気試験によるかぶりコンクリートの品質把握および、より簡便な評価手法として一定量の水をコンクリート表面に流下させその長さを指標とする「流水試験」の検討を行った。養生の相違は中性化の進行に大きく影響するが、表層透気試験結果への影響は比較的小さいことを確認した。一方、流水試験は流水を繰り返す手法をとることで養生の相違を検知する手法となる可能性を示した。

キーワード：耐久性、表層品質、養生条件、中性化、表層透気試験、流水試験

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において、鉄筋を腐食させる原因となる有害因子はかぶりコンクリートを通して外部より侵入するため、かぶり厚やかぶりコンクリートの品質が鉄筋コンクリートの耐久性能に影響する。一方、コンクリートは現場で個別生産され、その品質は設計だけでなく打込み・締固め・養生等に左右されることから、これらの妥当性を施工後に定量的に検査する必要性が議論されている¹⁾。本研究では、竣工後の耐久性能検査への適用を視野に、海外では実務に導入されつつある²⁾表層透気試験(Torrent 法³⁾)を用い、脱型材齢や養生条件がかぶりコンクリートの透気性に及ぼす影響を把握するとともに、より簡便な検査手法として「流水試験」によるかぶりコンクリートの品質評価手法の開発を試みた。

2. 実験概要

2.1 中規模柱試験体

図-1 に示す中規模柱試験体を作製した。図の右手前側(東側) 10 本を冬季施工(2010 年 3 月 4 日打設)、左奥側(西側) 10 本を夏季施工(同 8 月 5 日打設)とした。各 10 本の柱試験体はそれぞれ配合、養生条件が異なる。



図-1 中規模柱試験体(写真右手前が東)

柱試験体上部はスラブで覆っており、試験体に雨が直接かからないようになっている。柱試験体の高さは 2350mm、断面は 300mm×400mm の矩形である。本研究では、夏季施工の 10 本の試験体を用いた実験結果を対象とする。

2.2 コンクリートの配合および養生条件

柱試験体は表-1 に示す 3 種類の配合で作製し、N24 は施工標準(北・南)、密封・給水および早期脱型の 5 種類の養生条件と 20kg/m³ の現地加水、BB24 と N60 は施工標準と早期脱型の 2 種類の養生条件を設定し、合計 10 種類とした。フレッシュ性状は表-2 の通り、表-3 に示す条件で養生を行った。N24 で施工標準に従った養生を行ったものを基準試験体とし、配合および養生条件が非破壊検査結果に及ぼす影響を確認することとした。基準試験体と同配合、密封養生の試験体は養生期間延長効果、給水養生を行ったものは水分供給効果、早期脱型では養生不足の影響を対比の観点とした。施工標準に従ったものは南北方角の影響を確認するため位置をかえた 2 本を設定し、現地加水は生コン不良を想定したものである。BB24 と N60 で配合の影響を確認し、それぞれ施工標準に従った養生と早期脱型の比較を行った。

2.3 実験の手法

(1) 表層透気試験

Torrent 法はコンクリート表層の透気性を評価する手法のうち表面法に属する。コンクリート表面に減圧したチャンバーを設置し、その内部の気圧変化から透気係数を算出するものであるが、図-2 のように内部チャンバーと外部チャンバーを有することがこの手法の特徴である。透気係数は内部チャンバー内の圧力変化から算出されるが、内部チャンバーと外部チャンバー内の圧力を等しくコントロールすることにより外部から内部チャンバ

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 修士課程 修士(工学) (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 博士課程 修士(工学) (正会員)

*3 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

表-2 コンクリートのフレッシュ性状

配合	フレッシュ性状		
	スランプ (cm)	空気量(%)	練上温度 (°C)
N24 (加水以外)	13.0	4.5	32.5
N24(加水)	8.0	5.2	34.8
BB24	16.0	5.6	33.5
N60	スランプフ ロー58×57	4.9	35.9

表-3 養生条件

配合	養生良否	養生方法
N24	施工標準(北側)	型枠 5 日
	施工標準(南側)	型枠 5 日
	極優：給水養生	型枠 1 日→ 散水 27 日
	優：密封養生	型枠 5 日→ ラップ 23 日
	極劣：早期脱型	型枠 1 日
	標準・現地加水	型枠 5 日
BB24	施工標準	型枠 7 日
	極劣：早期脱型	型枠 1 日
N60	施工標準	型枠 5 日
	極劣：早期脱型	型枠 1 日

ーへの空気の流入が妨げられる。これにより、コンクリートのごく表層の粗な組織の影響を受けにくいとされている。表層透気試験は材齢約 8 ヶ月で実施した。同一試験体内での測定値のばらつきの検討も行うため、測定は東西南北各面で高さを変えた 8 段の合計 32 点で行った。表層透気試験はコンクリートの含水率の影響を受けるため、同時に四電極法による比抵抗の測定も行ったが、今回の測定で得られたデータは含水率の補正⁴⁾を要さなかった。

(2)流水試験

コンクリート表面に一定量の水を流下させる試行試験で、水の流下長さ(以下、「流水距離」と呼ぶ)がコンクリ

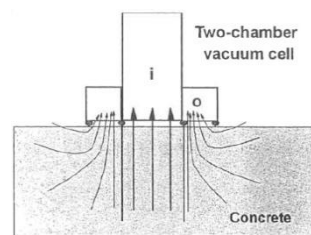
図-2 Torrent 法⁴⁾

図-3 流水試験

ートの劣化事象を把握する指標となる可能性について検討がなされており、シュミットハンマーによる反発度と流水距離との相関性が指摘されている⁵⁾。本検討ではこの報告を参考に、図-3 に示すようにデジタルマイクロピペットを用いて柱試験体のコンクリート表面に一定量の水を流下させ、水の流下長さを測定した。以下、この試行試験を「流水試験」と呼ぶ。流水試験を行う際には、表面の埃や汚れ等を除去するため、あらかじめ乾いた布でコンクリート表面を拭いてから試験を行った。コンクリートの表層品質を把握する新手法の検討として、流下させる水量や流下回数を変化させた 2 種類の試行試験を行った。流水試験は材齢約 16~17 ヶ月で実施した。

3. 表層透気試験

3.1 測定結果

既報⁶⁾で報告した冬季施工の試験体と同様、夏季施工でも表層透気試験により得られた表層透気係数は同一試験体内でも特に高さ方向に 1 オーダー以上ばらつく場合があることを確認した。配合および養生条件による表層透気係数の相違について検討を行うため、32 点の測定値の平均値を求め、試験体同士の比較を行った。図-4 に示すように、N24 においては密封、給水の養生条件において施工標準通りのものよりも透気係数が若干小さくなっていること、早期脱型、加水により透気係数が大きくなっていることが確認できる。また、同一の養生条件でも高強度コンクリートを用いた N60 では N24 より透気係数が小さくなっており、品質が良くなっていることが試験結果に反映されている。養生条件が最も良いものと悪

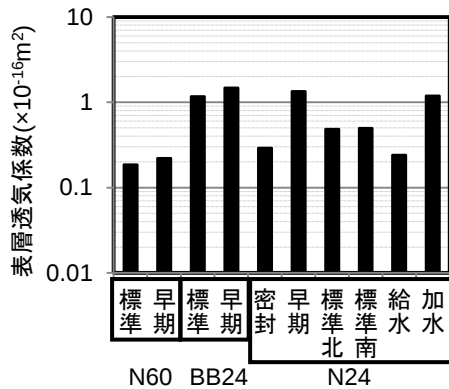


図-4 表層透気係数の平均値比較

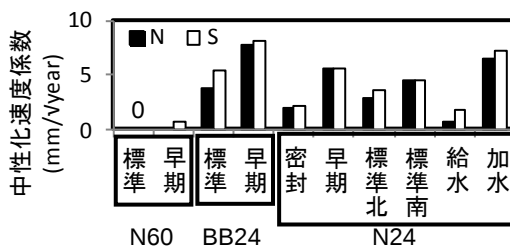


図-5 中性化速度係数

いものを比較すると、表層透気係数の差は1オーダー以内と余り大きくなく、同一試験体内でも試験体の上下で透気係数が1オーダー程度ばらついていることと比べても、養生条件が表層透気係数に及ぼす影響は比較的限定的であるということが言える。

3.2 中性化深さとの関係

図-5に材齢約13ヶ月で測定した中性化深さから算出した各試験体の中性化速度係数を示す。中性化深さの測定は試験体の南北面、中段(下から約1400mm)で行い、各面8点の測定値の平均を用いた。グラフより、N24においては密封や給水養生により中性化速度係数が2分の1程度まで抑えられ、早期脱型や加水で2倍程度促進されていることが確認された。表層透気係数の比較では養生条件による相違がほとんど見られなかったBB24およびN60においても、早期脱型の試験体で中性化の進行が早くなっていることが確認できる。このことから、中性化速度係数が、配合だけでなく養生条件の良否を明確に示しているということが言える。また、全ての試験体において南面は北面よりも中性化速度係数が大きくなっており、また同一配合(N24)、同一養生条件(施工標準)でも南側の試験体は北面よりやや中性化速度係数が大きくなっていることも確認でき、乾燥により南面で中性化の進行が早くなるという知見と一致する結果が得られた。図-6に表層透気係数と中性化速度係数の関係を示す。試験体全体としての傾向を見るため、中性化速度係数は南北面の平均、表層透気係数は中性化深さの測定を行った高

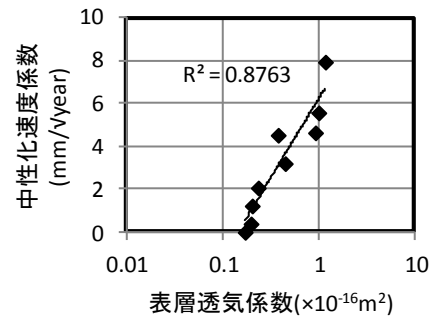


図-6 表層透気係数と中性化速度係数の関係

さに近い中段2段、東西南北4面の計8点の平均値を用いた。グラフより、決定係数は0.8763と相関が高い結果となっているが、先に述べたように表層透気係数の範囲が1オーダー程度と非常に狭いのに対し、中性化速度係数は0~8(mm/√year)程度と広い範囲に分布している。表層透気係数の相違は1オーダーの半分以上と大きくはなくても、中性化速度係数が2倍以上になる場合もあることが確認された。

4. 流水試験

4.1 試行の流水試験手法およびその位置づけ

(1) 回流水

2.3で述べたように、所定量の水(50μl)をデジタルピペットでコンクリート表面に流し、「流水距離」を測定した。局所的なひび割れやあばた等の影響による試験のばらつきを考慮し、位置を少しずらした5点で試験を行い、5点の平均値および最大値・最小値を除いた3点の平均値を求めた。測定は、東西南北4面、中段(下から約1400mm)と下段(下から約800mm)で行った。試験日は晴天で試験中はつねに日照があった。

(2) 繰り返し流水

既往の研究⁵⁾で表面の劣化検出への適用が検討されているように、流水試験はコンクリートのごく表層の影響を強く受けると考えられる。そこで、ごく表層の影響をできる限り除去し、かぶりコンクリートの物質移動抵抗性を評価する指標となるデータを得るため、さらに少量の水を同じ箇所から一定間隔で繰り返し流下させる試行試験を行った。同じ箇所から繰り返し流下を行うことにより、流した水は徐々にコンクリート表面から内部にしみ込んでいくと考えられる。1回の流下で15μlを流下させ、繰り返し間隔は30、60、120秒の3種類、繰り返し回数は15回とした。試験のばらつきを考慮し、位置を少しずらした3点で試験を行い、平均値を求めた。試験は、南北面の下段(下から約800mm)で実施した。試験日は曇天で試験中に日照はなかった。

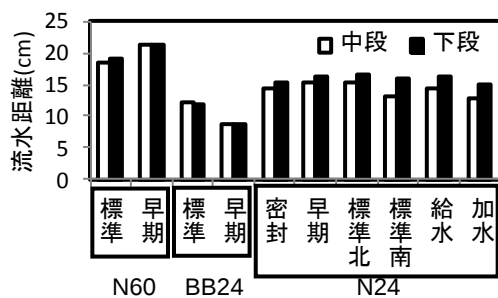


図-7 流水試験結果(5点平均)

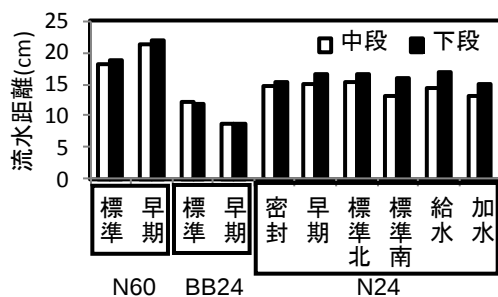


図-8 流水試験結果(3点平均)

表-4 流水試験結果の変動係数

試験体	変動係数(%)	
	中段	下段
N60 標準	26.7	18.7
N60 早期	17.7	19.7
BB24 標準	8.5	11.3
BB24 早期	9.4	9.2
N24 密封	13.0	12.3
N24 早期	8.5	10.8
N24 標準北	15.9	11.6
N24 標準南	19.4	11.3
N24 給水	19.0	16.9
N24 加水	13.4	13.0

4.2 測定結果

(1) 1回流水

5点および3点での流水距離の平均値は図-7および図-8のようになった。高強度で表層の品質も良いと考えられるN60の流水距離は普通強度のN24、BB24と比べ流水距離が5~10cm長くなっており、流水試験結果がこれらの品質の違いを検出していると思われる。一方、N24では養生条件等を細かく設定しているにもかかわらず、6試験体とも流水距離の差は最大でも数cmであり、例えば早期脱型の流水距離が密封より長くなるなど、養生条件から想定される品質との逆転が生じている場合も多く見られた。N60でも、中段・下段ともに早期脱型の方が施工標準より流水距離は長くなっている。BB24は

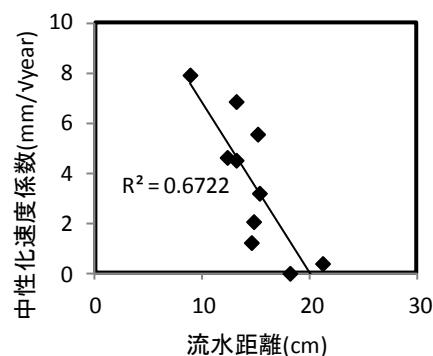


図-9 流水距離と中性化速度係数の関係

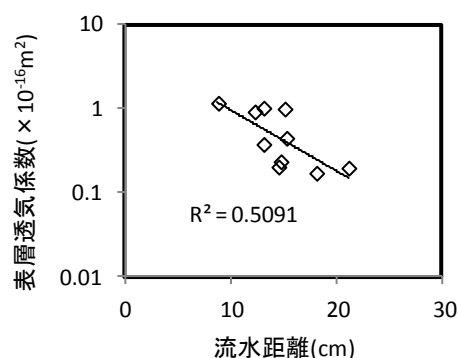


図-10 流水距離と表層透気係数の関係

施工標準でもN24より流水距離がやや短く、早期脱型ではさらに短くなっており、ここでは養生条件の相違による表層品質の差異を検出できていると考えられる。50μlの水をコンクリート表面に流す流水試験により、高強度と普通強度での表層品質の相違および、BB24における養生条件の影響を検出することができた。しかし、N24での流水試験結果に見られるように、養生条件の違いにより生じると考えられる表層品質の違いはこの手法では確認できなかったと言える。コンクリート表面の微細な凹凸などで水滴が停止し、流水距離が伸びなくなってしまう場合もたびたびあり、このことが試験のばらつきを大きくし、養生条件の良否と流水試験結果の逆転につながっている可能性もある。試験結果の変動係数は表-4に示すようにほとんどの試験体で10%を超え、特に流水距離の長いN60の試験体でばらつきが大きくなった。流水距離と中性化速度係数および表層透気係数の関係は図-9および図-10のようになる。

(2) 繰り返し流水

流水繰り返し試験結果は各試行時の流水距離および累積の流水距離を用いて整理した。N24、BB24、N60の施工標準(N24は南側の試験体：標準南)と早期脱型のデータを比較したものをそれぞれ図-11、図-12、図-13に示す。試験体全体としての傾向を把握するため、流水距離は南北面の平均値を用いた。流水の繰り返し間隔は

30, 60 および 120 秒で試験を行っているが, 特徴的な 30 秒と 120 秒の結果のみを示し, 60 秒は省略した。図-12 より, BB24 の早期脱型の影響は流水繰り返し試験によっても明確に差異が検出されていることがわかる。繰り返し間隔 30 秒, 120 秒ともに 15 回の繰り返しで施工標

準の流水距離は早期脱型の 2 倍程度になる。また, その差が 5 回程度の繰り返しではっきりとあらわれていることもわかる。図-11 の N24 については, 1 回の流水では (1) で検討した結果と同様施工標準と早期脱型の差が見られないが, 10 回程度以上繰り返した後は早期の方がや

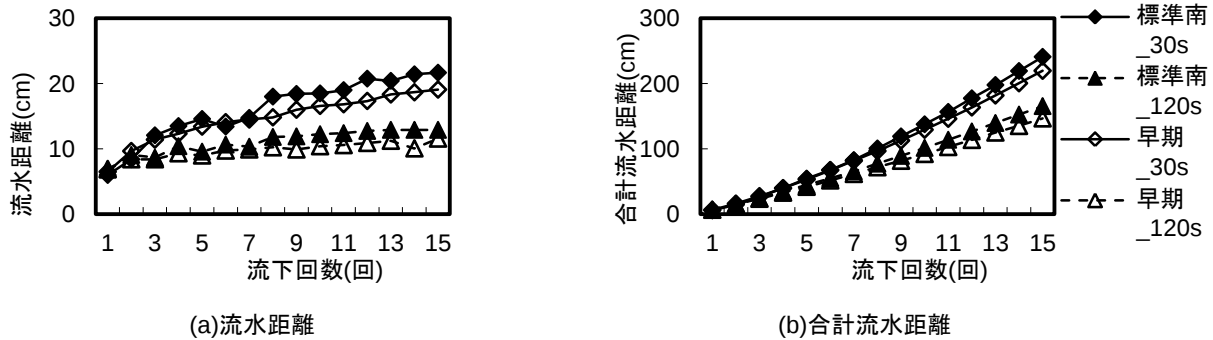


図-11 流水繰り返し試験結果(N24)

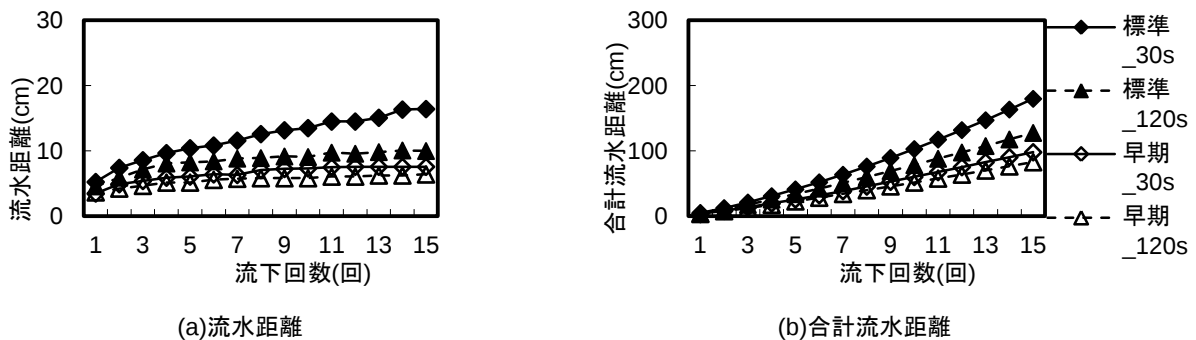


図-12 流水繰り返し試験結果(BB24)

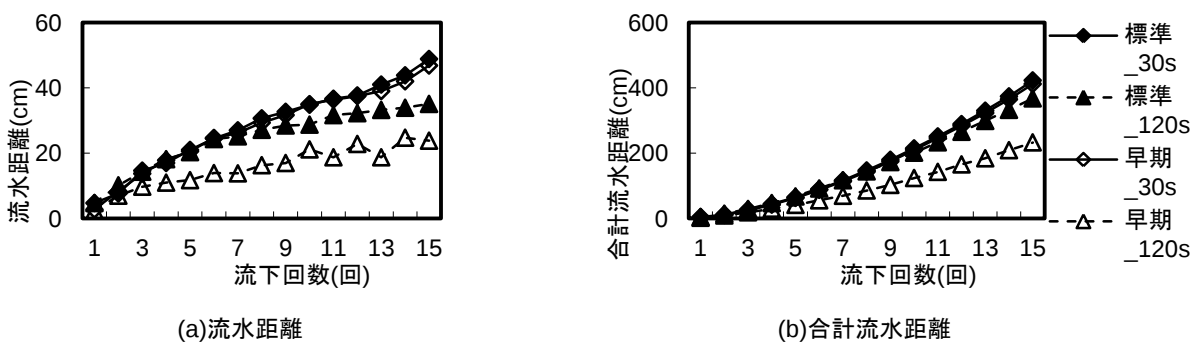


図-13 流水繰り返し試験結果(N60)

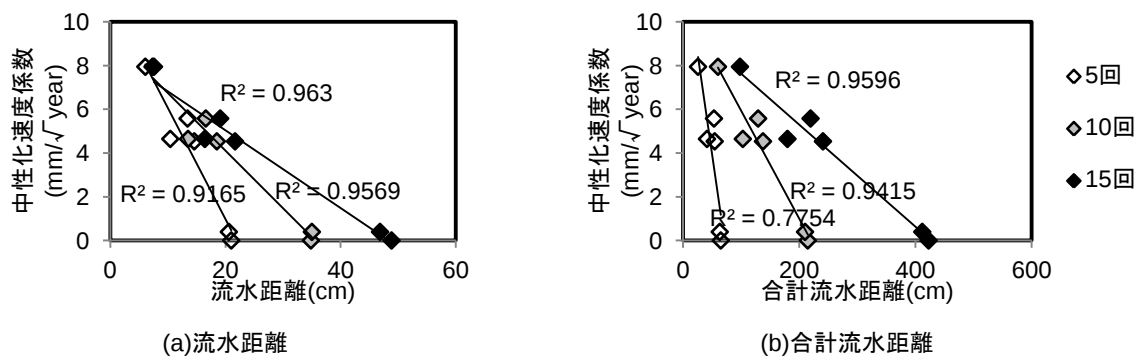


図-14 流水繰り返し試験と中性化速度係数の関係

や短くなっており、1回の流水試験で把握することができない養生条件の影響を流水繰り返し試験により検出できる可能性がある。図-13のN60は、30秒の繰り返し間隔では施工標準、早期脱型ともにN24の2倍程度の流水距離となっており、表層品質が良いことを表していると考えられる。一方、繰り返し間隔を120秒にすると早期脱型において流水距離が短くなる。このことについては、繰り返し間隔が長くなることで次の試行までにコンクリート表面から水が浸透する時間が生じ、施工標準より表層品質が劣ると考えられる早期脱型では流水距離が伸びなくなった可能性がある。流水繰り返し試験結果と中性化速度係数の関係は図-14のようになった。流水距離は、繰り返し間隔30秒で、5回目、10回目、15回目の試行での流水距離およびそれまでの合計流水距離を用いた。流水距離と中性化速度係数には相関関係があり、繰り返し回数が多くなるほど相関が高くなる。流水1回の試験結果と比べても相関は高く、今回の検討の範囲では、15回の流水繰り返し試験結果と中性化速度係数が概ね対応する結果となった。

5. まとめ

本検討では、配合・養生条件を変化させた中規模柱試験体を作製し、非破壊試験による表層品質の把握、新手法の開発を試みた。

(1)表層透気試験により、多数の測定値の平均は配合および養生条件の相違による表層品質の優劣を反映することを確認した。中性化深さの測定を行い、養生の良否が中性化の進行に大きく影響することも確認できた。一方、養生条件による表層透気係数の差はそれほど大きくはなく、表層透気試験の結果のみにより中性化の進行を予測することが難しい場合がある。

(2)表層品質の簡便な試験手法として、試行的に2種類の「流水試験」を行った。1回の水の流下で、高強度のコンクリートでは普通強度より流水距離が長くなっており、強度の違いによる表層品質の相違を検出していると考えられる。BB24の配合においては早期脱型で流水距離が短くなったが、その他の配合では養生の良否と流水距離の逆転が起きている場合もあり、ばらつきの影響をできる限り排除することが課題となると考えられる。流水繰り返し試験では、1回の流下で得られる情報に加え、10回程度以上の繰り返し試行でN24でも早期脱型の流水距離や合計流水距離が施工標準よりやや短くなることを確認した。高強度コンクリートのN60では養生条件に関わらず流水距離が長くなるが、流下間隔を120秒とること

により、施工標準と早期脱型の差が検出される可能性を示した。さらに、今回の検討の範囲では、流水繰り返し試験により得られた流水距離は中性化速度係数と高い相関にあることが確認された。流水距離にはコンクリート表面の温度や含水率も影響すると考えられることから、試験時の気温や天候を考慮する必要がある。今回は気象条件をある程度統一して試験を行ったが、試験時のコンクリート表面温度や含水率と流水距離との関係を明らかにし、気象条件の影響を定量的に評価することは今後の検討課題である。

謝辞

模擬RC柱の製作におきまして、東日本旅客鉄道(株)松田芳範氏、小林薫氏、住友大阪セメント(株)小田部裕一氏、小出貴夫氏 他の関係各位の御協力を頂きました。ここに記しまして深甚の謝意を表します。また、本論文は、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構「平成21年度運輸分野における基礎的研究推進制度」により実施した研究の成果であることを付記致します。

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、2008
- 2) 半井健一郎、蔵重勲、岸利治：かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査—スイスにおける指針—、コンクリート工学、Vol.49, No.3, pp.3-6, 2011.3
- 3) R.J. Torrent, “A two — chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site”, Materials and Structures, Voi.25, No.6, pp.358—365, 1992.
- 4) R.J. Torrent, G. Frenzer, A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”, Proceedings of the International Symposium Non — Destructive Testing in Civil Engineering(NDT—CE), pp.985—992, 1995
- 5) 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
- 6) 家辺麻里子、秋山仁志、蔵重勲、岸利治：表層透気試験による養生条件を変化させた中規模柱試験体の表層品質詳細把握、コンクリート工学年次論文集、Vol.33, No.1, pp.659-664, 2011.6