

表面吸水試験によるコンクリート表層品質の評価について

飛島建設（株） 正会員 ○笠井 和弘
飛島建設（株） 正会員 寺澤 正人
飛島建設（株） 正会員 川里 麻莉子

1. はじめに

コンクリートの表層品質は、コンクリート構造物の耐久性に大きな影響を及ぼすものであり、現場で打ち込まれたコンクリートの表層品質を的確な方法で測定し、定量的に評価すること、このようなプロセスを踏まえて使用材料や施工技術を改良改善し、表層品質を向上させることが、コンクリート構造物の延命化のために必要不可欠である。このコンクリート表層部分の定量的評価を現場で簡易に行う手法として、従来から行われている方法には、リバウンドハンマー試験、表層透気試験（トレント法やシール法など）、散水試験、電気抵抗率試験などがある¹⁾が、筆者らは、特に鉄筋かぶり部分のち密さを定量的に評価する方法として、横浜国立大学細田暁准教授、香川高等専門学校林和彦准教授が研究開発した表面吸水試験²⁾（**Surface Water Absorption Test**, 以下 SWAT と略す）に着目し、例えば、表面含浸材を塗布した効果を把握する実験などを試みてきた³⁾。その実験の一環として、無塗布供試体で、表層透気試験（以下、トレント法とする）で得られる表層透気係数 kT と SWAT によって得られる評価指標（後述の Δh , a , n , p_{600} ）を約半年間にわたって測定することで、これまであまり明らかにされていなかった両者の試験結果の相関を得ることができた。本論文は、SWAT の概要を述べるとともに、今回行った実験について概説し、打ち込まれたコンクリートの表層品質を判断するためのしきい値についての一考察を示すものである。

2. SWAT の概要

SWAT は、完全非破壊で、10 分間でコンクリート表層部の吸水状態を測定する装置であり、現場で容易にセッティングできる。試験状況を、写真-1に示す。10 分間の測定で得られる評価指標は図-1に示す a , n , p_{600} であり、これらは式（1）の関係で示される。また、この3つの評価指標のほかに、 Δh （10 分間の測定前後の水頭差で、 $\Delta h = h_{610} - h_{10}$ ）も有用な情報となる。なお、写真-1に示すシリンダーは交換式であり、ち密から粗雑なコンクリートまで対応できるように内径を変えたシリンダーが複数個用意されているが、本実験においては、全般的なコンクリートに対応可能とされる内径 8mm のシリンダーを用いた。

$$p = a \times t^{-n} \quad \text{式（1）}$$

ここに、 p ：表面吸水速度（ $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ ）、 $t=600$ 秒のときの表面吸水速度を p_{600} で表す。

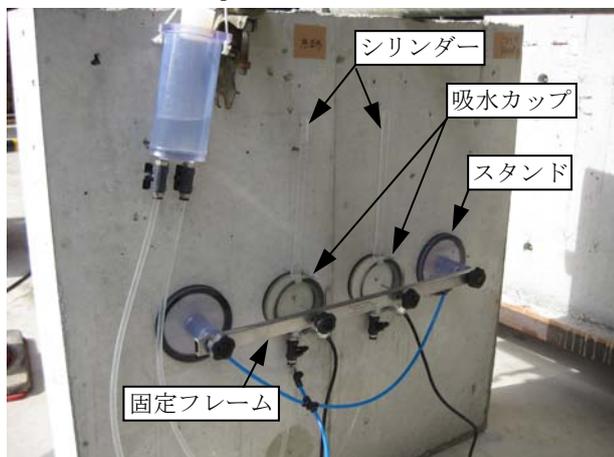


写真-1 SWAT の試験状況

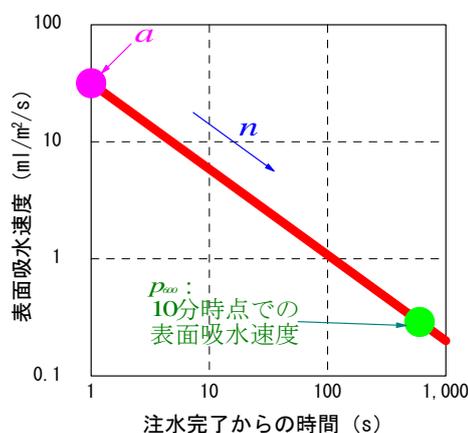


図-1 SWAT で得られる評価指標のイメージ図

キーワード コンクリート表層品質、表面吸水試験、SWAT、表層透気試験（トレント法）

連絡先 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1KSP R&D 棟 2 階 飛島建設 建設事業本部設計グループ TEL044-829-6716

a : 1 秒時点での表面吸水速度 (ml/m²/s)

n : 吸水速度の時間変化を表す係数

t : 注水を完了 (注水を開始してから 10 秒) してからの時間 (s)

式 (1) において, a は初期の吸水速度で, ごく表層の品質を表すとされており, a が小さいほど吸水抵抗に優れるコンクリートである. n は, 時間とともに吸水が低減する程度を表すもので, 内部の乾燥の程度や表面から内部への品質の分布の影響を受ける. n は, 既往の研究では 0.3~0.7 の範囲を取るとされている. p_{600} は測定開始後 10 分時点での表面吸水速度であり, p_{600} が小さいほど吸水抵抗に優れるコンクリートである.

3. 実験の概要

筆者らは, 平面寸法 180mm×900mm, 高さ 900mm のコンクリート供試体 4 体に, 供試体の一面右側半分 450mm についてのみ表面含浸材 (シラン系と反応型けい酸塩系) をコンクリート打込み後の材齢 196 日目に塗布し, 表面含浸材がコンクリート表層部の吸水性に及ぼす効果を定量的に把握する実験を行っている³⁾. 打ち込んだコンクリートの配合とフレッシュコンクリートの性状を表-1, 供試体の状況を写真-2に示す. この供試体について, 測点<上> (天端から 150mm), 測点<中> (天端から 450mm), 測点<下> (下端から 150mm) の 3 点でトレント法と SWAT を表-2に示す測定日に定期的に行い (トレント法→SWAT の順), トレント法で得られる表層透気係数 kT と, 前述の Δh , a , n , p_{600} との相関を調べた. この実験は, 表面含浸材の種類や塗布方法を変えた 4 体で実施しているが, 本論文では無塗布側のみの結果を論じる.

表-1 コンクリート配合およびフレッシュコンクリートの性状

配合名称	呼び強度	水セメント比	単位量 (kg/m ³)				フレッシュコンクリート試験結果		
			セメント	水	細骨材	粗骨材	スランプ	空気量	コン温度
27-18-20N	27N/mm ²	55.6%	306	170	888	945	18cm	4.7%	25°C

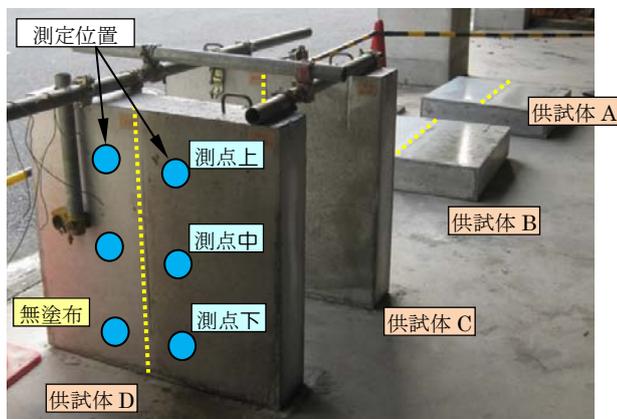


写真-2 供試体の状況

表-2 測定日一覧表

イベント	測定日	コンクリート材齢
コンクリート打込み日	2012.05.17	0 日
表面含浸材塗布日	2012.11.29	196 日
測定①	2012.12.21	218 日
測定②	2013.01.31	259 日
測定③	2013.02.22	281 日
測定④	2013.04.11	329 日
測定⑤	2013.05.17	365 日

4. 実験結果

4. 1 コンクリート表層部の水分測定

トレント法も, SWAT も, コンクリート表層部の水分量の大小が試験結果に影響を及ぼすことは, 容易に想像できる. すなわち, コンクリート表層部に水分を多く含んでいれば, トレント法で得られる表層透気係数 kT や SWAT で得られる Δh , a , p_{600} など小さく測定されるはずである. 本実験においては, 高周波容量式を測定原理とする K 社製コンクリート・モルタル水分計で, トレント法測定前にコンクリート表層部の水

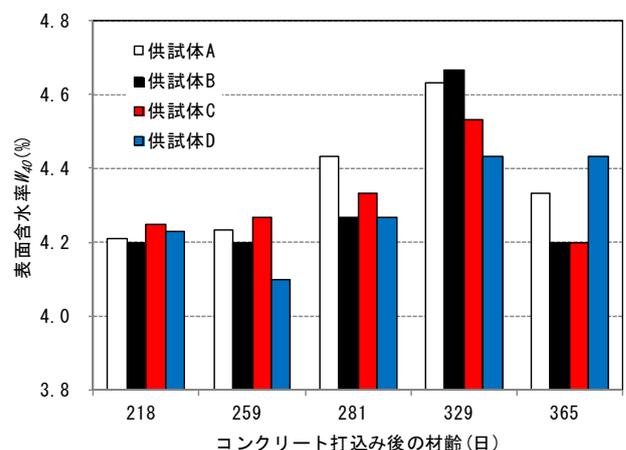


図-2 コンクリート打込み後の材齢と表面水分率

分を測定した. 図-2にコンクリート打込み後の材齢と深さ40mmモードの表面水分率 W_{40} との関係を示すが, 概ね4.2~4.6%の乾燥した状態で測定を実施しており, 本実験におけるトレント法やSWATで得られたデータは, 表面水分率の影響を受けていないものと判断した.

4. 2 コンクリート打込み後の材齢とトレント法, SWATの試験結果の関係

次に, コンクリート打込み後の材齢と, トレント法で得られる表層透気係数 kT , SWATで得られる $\Delta h, a, n, p_{600}$ の関係を整理した.

図-3は, コンクリート打込み後の材齢と表層透気係数 kT の関係を示したものである. 既往の研究では, コンクリート材齢約6ヶ月までの表層透気係数 kT は, 材齢とともに大きくなる傾向がある⁴⁾が, 本実験におけるデータは, コンクリート打込み218日後からちょうど1年目までのものであり, 材齢に関係なく, ほぼ横ばいの傾向を示している. すなわち, コンクリート打込み後, 半年程度が経過すれば, コンクリート表層品質は安定状態に入ること示している. 一方, 測点の高さでデータを見てみると, 測点が下方になるほど kT は小さくなっており(赤→黒→青の順), コンクリート表層品質が良くなっていることがわかる. この傾向は, コンクリート打込み後の材齢に関係なく言えることであり, コンクリート打込み時に, 上方へはブリーディング水が上昇しやすく, 上方と下方では相対的な水セメント比の差異があること, 下方では自重による圧密締固め効果があることなどから起きる現象であると考えられる.

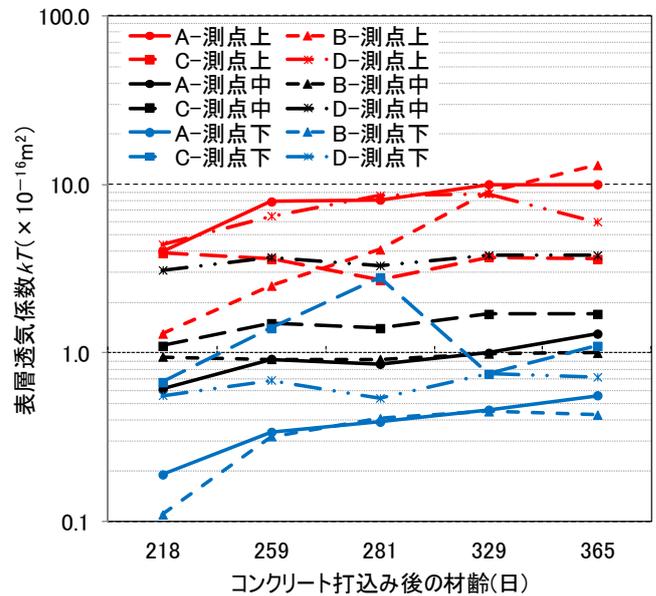


図-3 コンクリート打込み後の材齢と透気係数 kT の関係

図-4~図-7は, コンクリート打込み後の材齢と, SWATで得られる $\Delta h, a, n, p_{600}$ の関係を示したものである. このうち, Δh と a, p_{600} については, 小さくなるほど吸水抵抗に優れることを表すが, ほぼ横ばいの傾向を示しており, 表層透気係数 kT 同様, コンクリート打込み後, 半年程度が経過すれば, コンクリート表層品質は安定状態に入ること示している. また, n は既往の研究の0.3~0.7の範囲内にあり, 測点高さの影響はまったく受けていないが, その他の $\Delta h, a, p_{600}$ は, 表層透気係数 kT と同様, 下方になるほど小さくなっており, 吸水抵抗に優れる表層品質の良いコンクリートになっていることがわかる. その傾向は, 特に図-7で顕著であり, 10分時点での表面吸水速度 p_{600} を主としてコンクリートの表層品質評価に用い, 適宜 a や n を併用して現象を理解するという細田, 林の考え方の妥当性を示唆していると考えられる.

4. 3 トレント法による表層透気係数とSWATの試験結果の関係

ここまで述べてきたように, 今回実施した実験では, コンクリート打込み218日後から定期的にトレント法やSWATの測定を行っているが, コンクリート表層部分の水分率の変化や材齢進行に伴う劣化は受けていないと考え, これらによる補正などを特に考えずにデータを整理しても問題ないと判断した. トレント法で得られる表層透気係数 kT とSWATで得られる評価指標 $\Delta h, a, n, p_{600}$ の関係を整理した結果を, 図-8~図-11に示す. これらの図の横軸は対数軸で, トレント法で得られる表層透気係数 kT であり, 縦軸は, SWATで得られる評価指標 $\Delta h, a, n, p_{600}$ である. トレント法では, 表層透気係数 kT に基づく表層コンクリートの品質評価基準の一例として表-3⁵⁾が提案されており, 図中にはコンクリート表層のグレードをグレード2~グレード5で図示した.

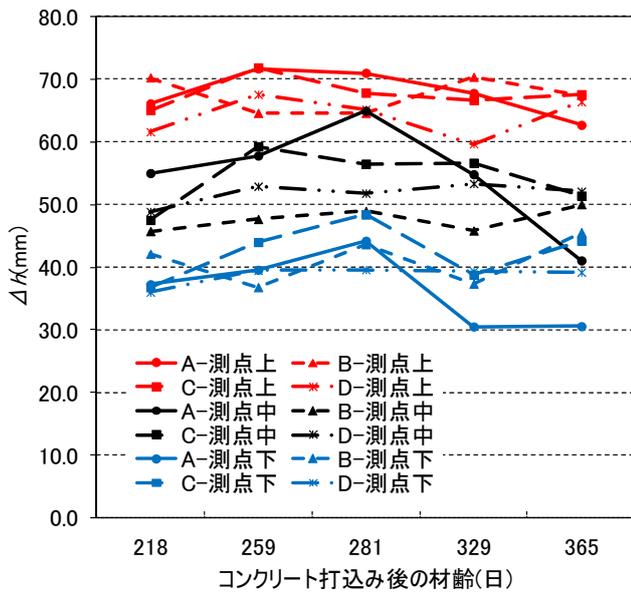


図-4 コンクリート打込み後の材齢と Δh の関係

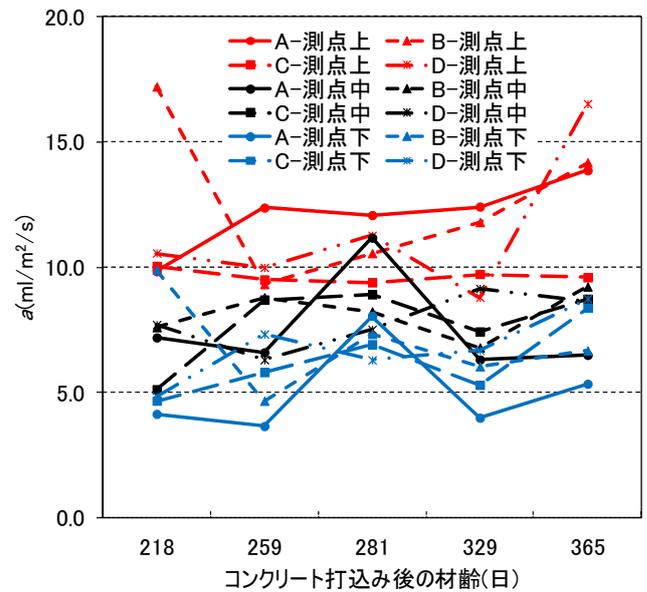


図-5 コンクリート打込み後の材齢と a の関係

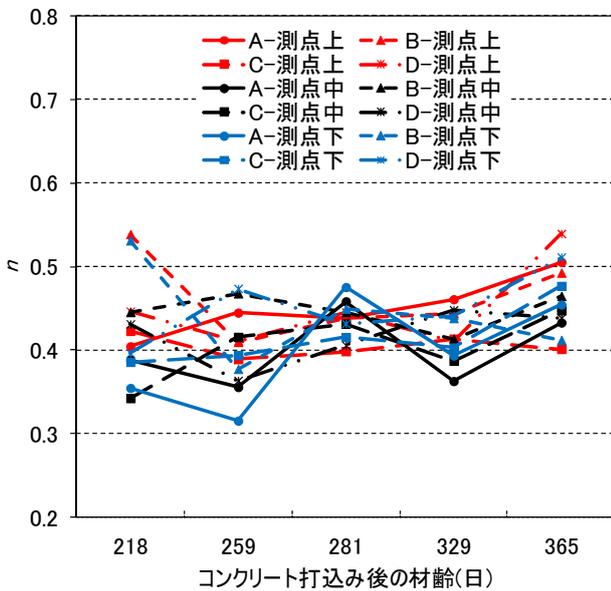


図-6 コンクリート打込み後の材齢と n の関係

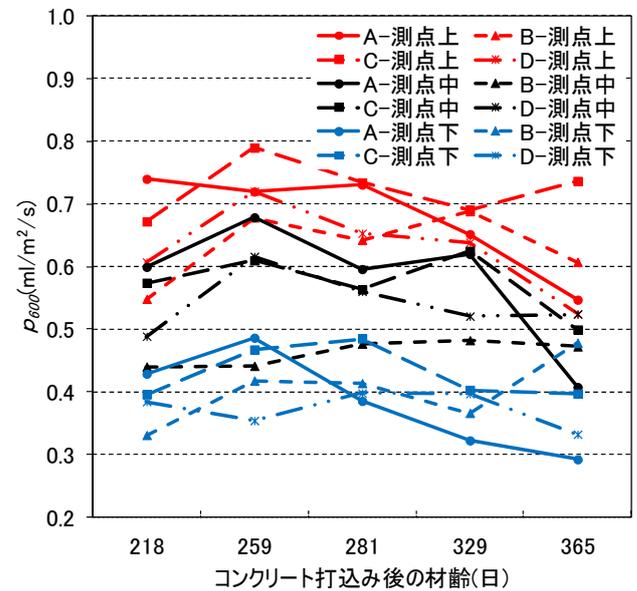


図-7 コンクリート打込み後の材齢と p_{600} の関係

表-3 表層透気係数に基づくコンクリート表層の品質評価基準の例

コンクリート表層のグレード	1	2	3	4	5
品質	Excellent 優	Very Good 良	Fair 標準	Poor 劣	Very Poor 劣悪
表層透気係数 kT ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	< 0.01	$0.01 \sim 0.1$	$0.1 \sim 1.0$	$1.0 \sim 10.0$	$10.0 <$

これらの図から、以下のことがわかった。

- ①測点<上>, 測点<中>, 測点<下>の3点を比較すると, 下方になるほどコンクリート表層品質は向上している. 逆に言えば, 測定する高さによっては, 同じコンクリートでもコンクリート表層品質が Fair にも Poor にもなる場合があり, トレント法や SWAT を行う場合には, 測定高さの考え方を明確にしておく必要がある.
- ②表層透気係数 kT と SWAT で得られる評価指標 Δh , a , p_{600} には, 相関がある.
- ③コンクリート表層部分のグレードが Fair とされる表層透気係数 kT は $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下であるが, このようなしきい値は SWAT による評価指標にも存在しており, 表-3に併記する形でまとめると, 概ね表-4のよう

な数字となる。

④このうち、 $a \leq 10.0 \text{ ml/m}^2/\text{s}$ だけの判断では Poor を見落としてしまう可能性がある。目視で確認可能な Δh を良く観察し、測定終了後に計算ソフトで算出される p_{600} から、総合的に判断する必要がある。

⑤SWAT で得られる評価指標 n は、既往の研究の 0.3~0.7 の範囲にあるが、今回の実験の範囲内では、この数値だけでコンクリート表層部の品質の良否を分類することは難しい。

表-4 表層透気試験に基づくコンクリート表層の品質評価基準に対する SWAT のしきい値

コンクリート表層のグレード	1	2	3	4	5
品質	Excellent 優	Very Good 良	Fair 標準	Poor 劣	Very Poor 劣悪
表層透気係数 kT ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)	< 0.01	$0.01 \sim 0.1$	$0.1 \sim 1.0$	$1.0 \sim 10.0$	$10.0 <$
$\Delta h(\text{mm})^{*1)}$? ^{**2)}	? ^{**2)}	< 40	$40 \sim 70$	$70 <$
$a(\text{ml/m}^2/\text{s})$? ^{**2)}	? ^{**2)}	< 10	$10 <$	
$p_{600}(\text{ml/m}^2/\text{s})$? ^{**2)}	? ^{**2)}	< 0.5	$0.5 <$	

※1) シリンダー内径 8mm に対する値

※2) 今回の実験では、しきい値を特定できない

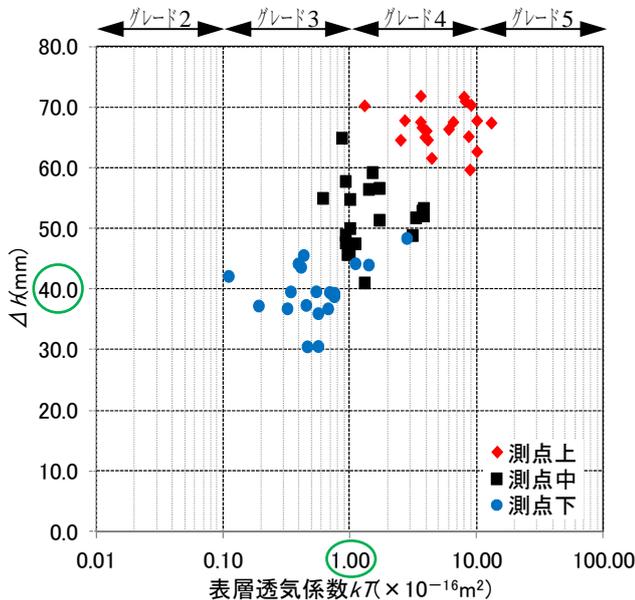


図-8 kT と Δh の関係

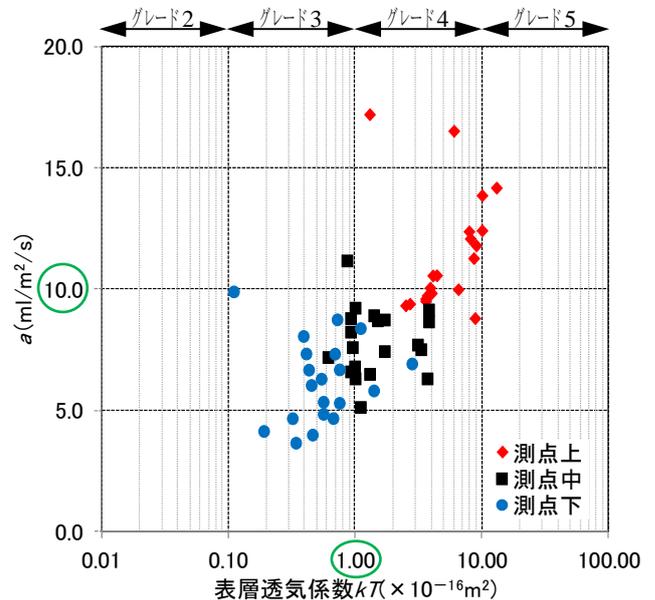


図-9 kT と a の関係

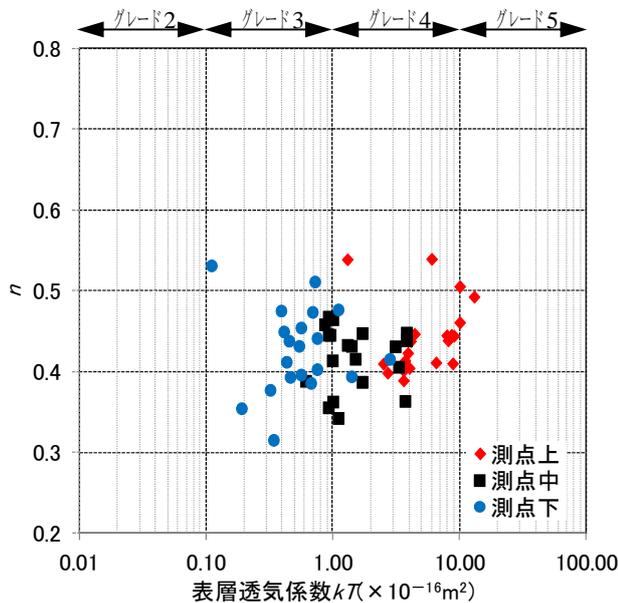


図-10 kT と n の関係

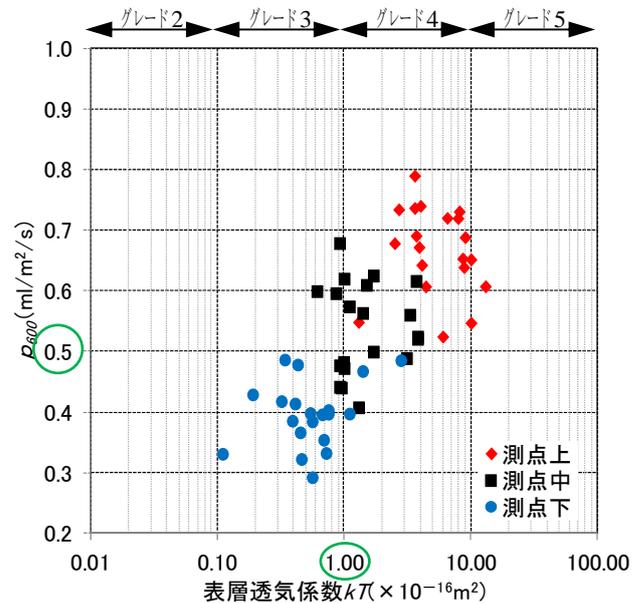


図-11 kT と p_{600} の関係

5. まとめ

コンクリート打込み後の材齢が 196 日目となる供試体に表面含浸材を塗布し、その効果を確認する実験の一環として、無塗布部分のトレント法、SWAT による測定データを整理したところ、以下の知見を得た。

- ①コンクリート表層品質は、コンクリート打込み後半年程度が経過すれば安定状態に入り、少なくとも 1 年程度の範囲では材齢進行による大きな劣化は生じない。
- ②コンクリート表層部分の品質は、1 回の打込み高さの中でも、下方になるほど向上する。特に、上方から 500mm 程度までのコンクリートは、同じような施工方法で打ち込んでも、下方よりも表層品質が劣っている可能性がある。
- ③トレント法で得られる表層透気係数 kT と SWAT で得られる評価指標 $\Delta h, a, p_{600}$ には相関があり、 $\Delta h \leq 40\text{mm}$ (シリンダー内径 8mm)、 $a \leq 10.0\text{ml/m}^2/\text{s}$ 、 $p_{600} \leq 0.5\text{ml/m}^2/\text{s}$ の 3 条件を満足すれば、標準的な表層品質を有するコンクリートであると言える。

今回得られた知見は、表-1に示すコンクリート供試体で得られた実験室レベルの成果であり、使用材料や水セメント比などの配合、初期養生方法や暴露されている環境条件などが変われば、同じ結果が得られない場合も想定される。また、トレント法、SWAT とも測定高さの感度が鋭敏であり、どの高さで測定を行うかについて、統一を図る必要がある。いずれにしても、トレント法や SWAT によって得られる評価指標の信頼性を高めるためには、より多くの条件、より多くの構造物でのデータの蓄積が必要不可欠であり、今回示したしきい値の数字だけが独り歩きしないよう、注意が必要である。また、この供試体 4 体によるトレント法と SWAT の測定は現在も継続しており、無塗布側のデータ採取によるしきい値の考え方の整理だけでなく、シラン系、反応型けい酸塩系表面含浸材の効果の持続性についても検討しているところである。今後も、有用なデータが得られれば、発表していく所存である。

なお、SWAT のデータ取得やその評価方法については、横浜国立大学の細田暁准教授、香川高専の林和彦准教授から手厚いご指導をいただいた。紙面を借りて謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会（JSCE335 委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ，No.97，2012.07
- 2) 林和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.69，No.1，pp.82～97，2013
- 3) 笠井和弘，寺澤正人：表面吸水試験による表面含浸工法の効果の確認，土木学会第 68 回年次学術講演会，V-150，2013.09
- 4) 槇島修，寺澤正人，川里麻莉子，鈴木基行：乾燥収縮ひび割れの発生程度把握への透気試験法の適用性に関する検討，土木学会第 68 回年次学術講演会，V-381，2013.09
- 5) R.Torrent et al. : Non-Destructive Test Methods to Measure Gas-permeability, Non-Destructive evaluation of the penetrability and thickness of the concrete cover, RILEM report 40, pp.35～70,2007