

# 表面吸水試験による養生方法がコンクリートの表層品質に及ぼす影響度評価

## Impact Assessment Curing Method by Surface Water Absorption Test on the Surface Quality of Concrete

笠井和弘<sup>\*1</sup> 寺澤正人<sup>\*1</sup> 槇島修<sup>\*1</sup> 川里麻莉子<sup>\*1</sup>  
Kazuhiro Kasai Masato Terazawa Osamu Makishima Mariko Kawasato

### 【要旨】

コンクリート表層部品質の評価方法として、従来はリバウンドハンマーによる反発度試験や建研式引張試験が行われていたが、これらの方法は破壊や微破壊を伴うため、同位置での再試験が不可能など、実現場における適用には課題があった。これに対し、近年、現場において完全非破壊でコンクリート表層部の品質を評価する方法として、表面吸水試験が実用化されつつある。この表面吸水試験は、吸水抵抗性を直接評価できる方法であり、水密性が要求される土木構造物においては、より有効な試験方法であると考えられる。本論文では、まず表面吸水試験の概要を述べ、次に、平面寸法 800mm×800mm、高さ 1,200mm のコンクリート供試体 2 体を作製してその側面に各種養生方法を適用し、養生方法がコンクリート表層部の品質にどのような影響を与えるかを、微破壊試験である反発度試験、完全非破壊試験である表層透気試験や表面吸水試験により実験的に評価した結果を述べるものである。

【キーワード】 表面吸水試験 気泡緩衝シート 透水型枠シート 湿潤養生マット 塗布型収縮低減剤

### 1. はじめに

コンクリート表層部、特に鉄筋かぶり部分のコンクリートの品質は、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、コンクリート打込み後の養生方法によって差異があるとされる。このコンクリート表層部品質の評価方法として、従来はリバウンドハンマーによる反発度試験（いわゆるシュミットハンマー）や建研式引張試験が行われていた<sup>1)</sup>が、これらの方法は破壊や微破壊を伴うため、同位置での再試験が不可能など、実現場における適用には課題があった。これに対し、近年、現場において完全非破壊でコンクリート表層部の品質を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開発した表面吸水試験（Surface Water Absorption Test, 以下 SWAT と略す）が実用化されつつある<sup>2)</sup>。この SWAT は、同じく完全非破壊でコンクリート表層部の品質を評価する表層透気試験（トレント法など）が気体の通しやすさを評価する方法であるのに対し、吸水抵抗性を直接評価できる方法であり、水密性が要求される土木構造物においては、より有効な試験方法であると考えられる。

本論文は、この SWAT の試験装置や試験方法を述べ、次に、平面寸法 800mm×800mm、高さ 1,200mm のコンクリート供試体 2 体を作製してその側面に各種養生方法

を適用し、養生方法がコンクリート表層部の品質にどのような影響を与えるかを、微破壊試験である反発度試験、完全非破壊試験である表層透気試験や表面吸水試験により実験的に評価した結果を述べるものである。

### 2. SWAT の概要

SWAT は、現場で容易にセッティングでき、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試験装置である。SWAT 装置を用いて試験している状況を、写真-1 に示す。内径 80mm の吸水カップ設置箇所が SWAT の測定点であり、この吸水カップは真空ポンプによって固定されたスタンドと固定フレームで支持されている。習熟すれば一人でも取扱いが可能であり、セッティングから 10 分間の測定までの 1 サイクルを 15 分程度で完了することができる。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（4mm, 8mm, 12mm）が用意されているが、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。

SWAT の 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、 $\Delta h$ （10 分間の測定

1. 建設事業本部 土木事業統括部 設計グループ

前後の水頭差で、 $\Delta h = h_{610} - h_{10}$ も有用な情報となる。

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

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

$a$ ：1 秒時点での表面吸水速度 ( $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ )

$n$ ：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、ごく表層部の品質を表すとされている。 $a$ が小さいほど吸水抵抗が大きい、品質の優れた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、細田、林の既往の研究では0.3~0.7の範囲を取るとされている<sup>2)</sup>。 $p_{600}$ 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が大きい、品質の優れたコンクリートである。 $\Delta h$ は、水位の低下量を示すもので、小さいほど吸水抵抗が大きい、品質の優れたコンクリートである。

### 3. 実験概要

#### 3.1 供試体および実験ケース

実験用に平面寸法800mm×800mm、高さ1,200mmのコンクリート供試体を2体作製し、その側面8面を測定面とした(図-2、写真-2参照)。供試体①シリーズは、主として型枠の脱型時期をパラメータとするもので、材齢2日、7日、14日で脱型するものをそれぞれT02、T07、T14とし、脱型後は特に養生を施さなかった。供試体①シリーズの残り1面TKSには透水型枠シートをあらかじめ型枠に貼り付け、材齢7日で脱型した。供試体②シリーズは、養生方法の違いをパラメータとするもので、いずれの面も材齢7日で脱型した。その後、SYMは湿潤養生マットを、KKSは気泡緩衝シートをそれぞれ敷設し、そのまま材齢28日まで存置した。TSTは、材齢7日で脱型後、その日のうちに塗布型収縮低減剤 ( $115\text{g}/\text{m}^2 \times 2$ 回塗り)を塗布し、材齢28日まで存置したものである。また、KKS+TSTは、材齢7日で脱型後から材齢28日まで気泡緩衝シートに

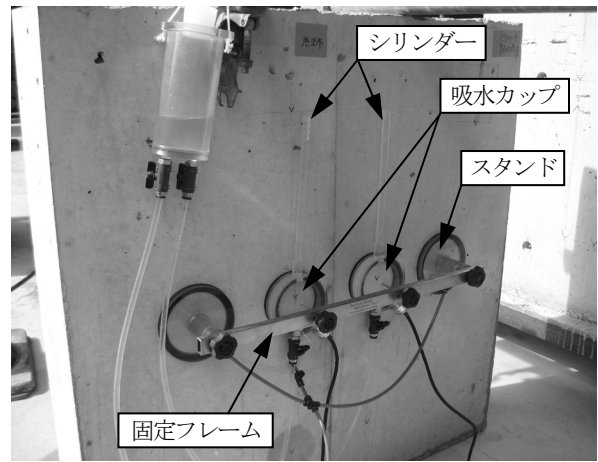


写真-1 SWAT 試験状況

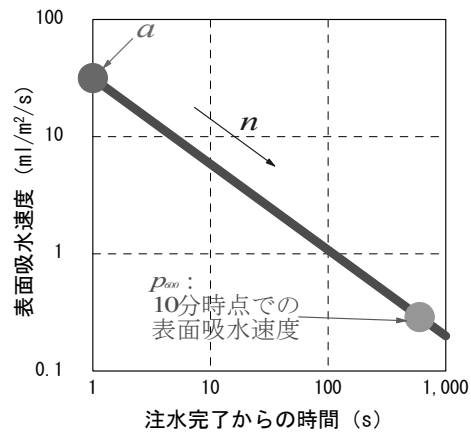


図-1 SWATで得られる評価指標のイメージ図

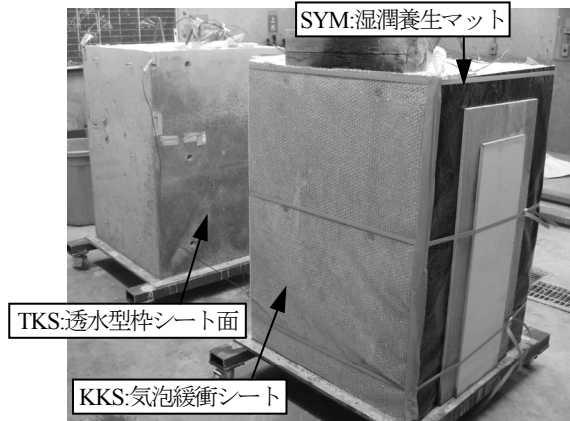


写真-2 供試体の養生状況の一例

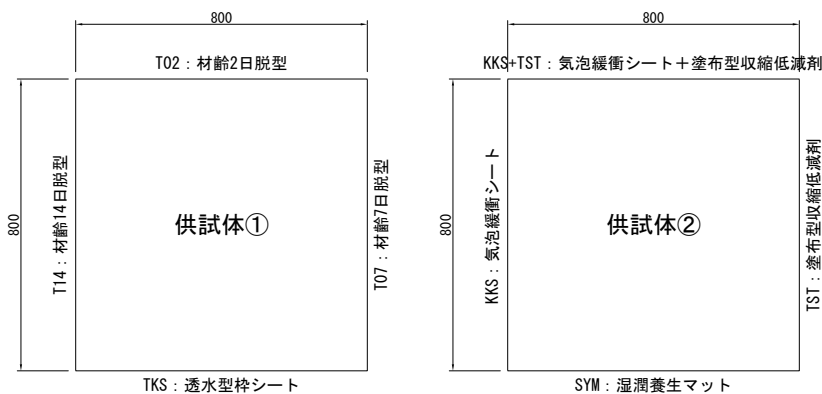


図-2 実験ケース (平面図)

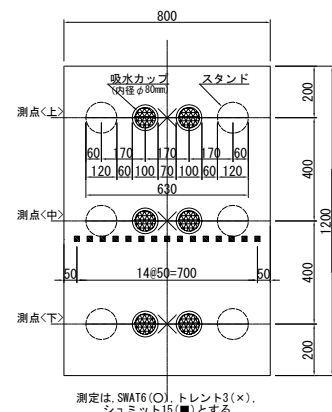


図-3 測定位置図 (側面図)



温度20℃の水中に28日間存置されていたのに対し、実験用供試体が室温10℃の恒温室内に存置されていたという温度や湿潤状態などの養生条件による違いであると考えられる。次に、型枠の存置期間で比較すると、型枠解体までの期間が長いほど反発度による圧縮強度推定値が高くなっており、強度発現のためには2012年制定 コンクリート標準示方書〔施工編：施工標準〕の規準（例えば、表 8.2.1, 解説 表12.6.2）を遵守する必要があることがわかる。また、圧縮強度発現のためには、TKS（透水型枠シート）やSYM（湿潤養生マット）が特に効果的であることがわかる。透水型枠シートは、コンクリート中の余剰水や気泡を型枠外に排出するもので、表面気泡やあばたを防止して美観が向上すると同時に、型枠近傍の水セメント比が相対的に小さくなることから、コンクリート表層部の組織がち密化され、表面強度が増加したものと考えられる。一方の湿潤養生マットは、鉛直面用は水膨潤ウレタンを不織布内に点在させて鉛直面での水分の抜け出しを防止するように工夫されているとともに、保温機能を有しているため、表面強度が増加したものと考えられる。このように、透水型枠シートと湿潤養生マットでは強度増進のメカニズムに違いはあるが、いずれも標準養生供試体に近い強度を発現しており、初期強度増進のためには有効な方法である。

#### 4.2 コンクリート表層部の水分率

各供試体の側面高さ中央で、コンクリート表層部の水分率をHI-520の40mm深さ測定モードで測定した結果を、図-5に示す。第1回目と第2回目を比較すると、いずれの養生方法の場合も第2回目の水分率が小さくなっており、28日間の屋外暴露によりコンクリート表層部の水分率が低下したことがわかる。特に、SYM、KKS、KKS+TSTの第1回目の水分率は、乾燥と湿潤の境界とされる6%を超えていたが、第2回目の測定では6%を下回り、その他の養生方法の水分率に近づいていた。

#### 4.3 トレント法の試験結果

トレント法により、表層透気係数 $kT$ を測定した結果を、測点高さごとに整理して、図-6～図-7に示す。図-6が第1回目、図-7が第2回目の結果である。トレント法では、 $kT$ によってコンクリート表層部の品質を表-4のとおりグレード分けしており<sup>3)</sup>、各図中には数値でこのグレードを示してある。

まず、これらの図から明らかなように、 $kT$ は測点高さの影響を大きく受けている。すなわち、測点高さが低いほど $kT$ は小さくなっており、養生方法や試験材齢に係わらずこの関係が成立する。これは、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

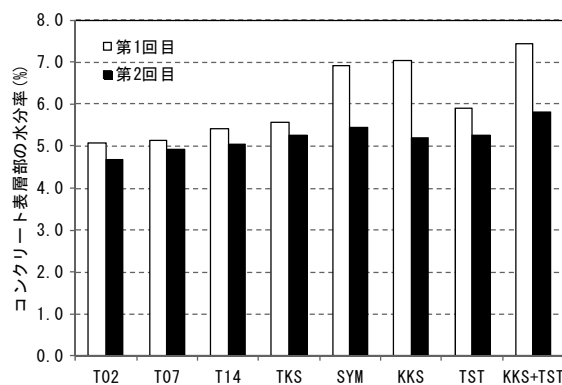


図-5 コンクリート表層部の水分率

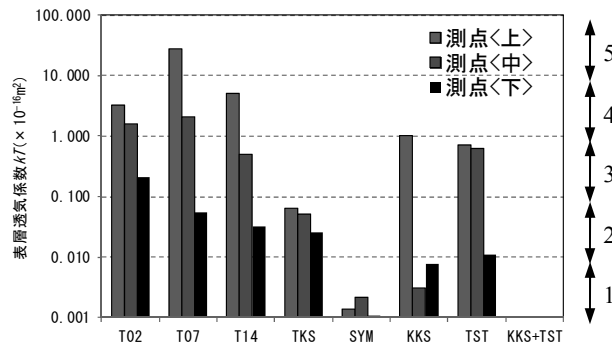


図-6 第1回目の表層透気係数  $kT$

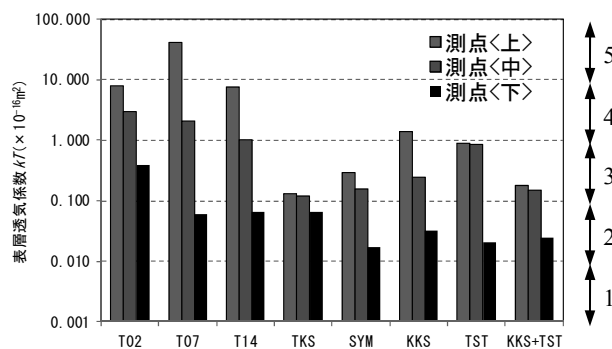


図-7 第2回目の表層透気係数  $kT$

表-4 表層透気係数に基づくコンクリート表層部の品質評価基準の例

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

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る現象であると考えられるが、同じ供試体でも測点高さによってコンクリート品質が変わってしまうことを示しており、このような試験を実施する場合には、測点高さの考え方を統一しておくことが極めて重要であることを示唆している。

次に、図-6により第1回目の試験結果を考察すると、T07の測点<上>が他に比べて $kT$ は高いものの、型枠存置期間が長いほど透気抵抗性が向上していることがわかる。

また、TKSは他の養生方法と比較して、 $kT$ のばらつきが小さいことも特徴的である。供試体②シリーズは、TKSと比較すると $kT$ のばらつきは大きいものの、測点高さが低くなるほど $kT$ も小さくなり、相対的には供試体①シリーズよりも透気抵抗性が向上していることがわかる。これは、図-5に示すとおり、第1回目の試験時に、供試体②シリーズの方が供試体①シリーズよりもコンクリート表層部分の水分率が高かったためであると考えられる。

図-7は第2回目の結果だが、型枠存置期間が長いほど $kT$ が小さいこと、TKSの $kT$ のばらつきが小さいこと、供試体①シリーズよりも供試体②シリーズの方が相対的に $kT$ が小さいことなどは、図-6と同様の結果である。ただ、図-6と図-7を比較した場合、供試体①シリーズは第1回目と第2回目の結果に大差がないのに比べて、供試体②シリーズは、第2回目の方が $kT$ が大きくなっている。これも、図-5に示すコンクリート表層部分の水分率の影響であると考えられる。表-5は、コンクリート表層部分の品質が安定していると思われる測点<下>の $kT$ について、どの養生方法が優れているかの順位を一覧表にまとめたものであるが、供試体②シリーズの方が順位が高く、脱型後に何らかの養生を施すことで、コンクリート表層部の透気抵抗性が向上することがわかる。

#### 4.4 SWATの試験結果

SWATにより、 $\Delta h$ ,  $a$ ,  $n$ ,  $p_{600}$ を測定した結果を、測点高さごとに整理して、図-8~図-9に示す。図-8が第1回目、図-9が第2回目の結果である。

これらの図から明らかのように、トレント法同様、 $\Delta h$ ,  $a$ ,  $p_{600}$ は測点高さの影響を大きく受けている。すなわち、測点高さが低いほど $\Delta h$ ,  $a$ ,  $p_{600}$ は小さく、吸水抵抗性に優れており、養生方法や試験材齢に係わらずこの関係が成立する。この理由については、4.3で考察したとおりであるが、SWATにおいても測点高さの考え方を統一しておくことが極めて重要である。

一方、 $n$ については、第1回目、第2回目とも、細田、林の既往の研究0.3~0.7の範囲にあり、大きく逸脱していない。細田、林は、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部品質評価に用い、適宜  $a$  や  $n$  を併用して現象を理解するという考え方を示しており<sup>2)</sup>、本論文においても、以降は  $p_{600}$  を主として評価の対象とする。

図-8 (4) により第1回目の $p_{600}$ の試験結果を考察すると、トレント法同様、型枠存置期間が長いほどコンクリート表層部の吸水抵抗性が向上していることがわかる。特に T02 の試験結果は T07 と比較して悪くなっており、型枠の早期脱型は強度だけでなく、コンクリートの吸水抵抗性にも大きな影響を及ぼすと考えられる。また、TKS (透水型枠シート) は、吸水抵抗性という点では非常に優れていることがわかる。供試体②シリーズも、いずれも好結果が得られており、KKS (気泡緩衝シート) のような比較的安価な養生方法でも、TKS (透水型枠シート) やSYM (湿潤養生マット) に匹敵する吸水抵抗性が得られていることがわかる。

図-9 (4) は第2回目の $p_{600}$ の結果だが、型枠存置期間が長いほど $p_{600}$ が小さいこと、供試体①シリーズよりも供試体②シリーズの方が相対的に $p_{600}$ が小さいことなどは、図-8 (4) と同様の結果である。また、図-8 (4) と図-9 (4) を比較した場合、供試体①、供試体②の両シリーズとも、わずかずつではあるが、 $p_{600}$ が大きくなっている。ここまで述べているとおり、第2回目の試験時には第1回目と比較してコンクリート表層部の水分率は低下しており、コンクリート表層部の吸水特性を測定するSWATでは、トレント法よりも敏感にこの影響を検知しているものと考えられる。したがって、SWATを実施する際には、測定高さに加えて、コンクリート表層部の水分率の上限値、あるいは脱型後の放置期間の統一などの考え方を統一しておく必要がある。表-6は、コンクリート表層部分の品質が安定していると思われる測点

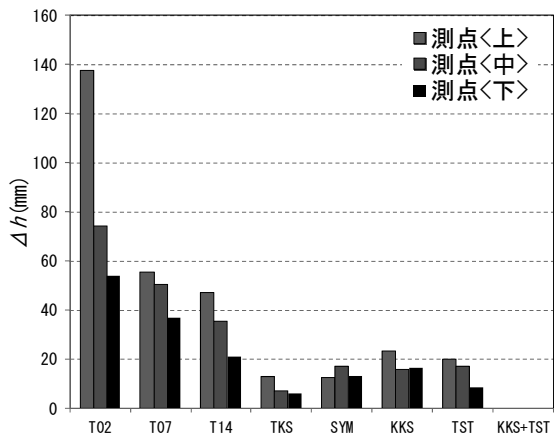
表-5 養生方法の違いによる測点<下>の $kT$ とその順位

		供試体①シリーズ				供試体②シリーズ			
		T02	T07	T14	TKS	SYM	KKS	TST	KKS+TST
第1回目	$kT$	0.2100	0.0540	0.0320	0.0260	0.0011	0.0076	0.0110	—
	順位	7 (3.89)	6 (1.00)	5 (0.59)	4 (0.48)	1 (0.02)	2 (0.14)	3 (0.20)	—
第2回目	$kT$	0.3900	0.0590	0.0660	0.0670	0.0170	0.0320	0.0210	0.0250
	順位	8 (6.61)	5 (1.00)	6 (1.12)	7 (1.14)	1 (0.29)	4 (0.54)	2 (0.36)	3 (0.42)

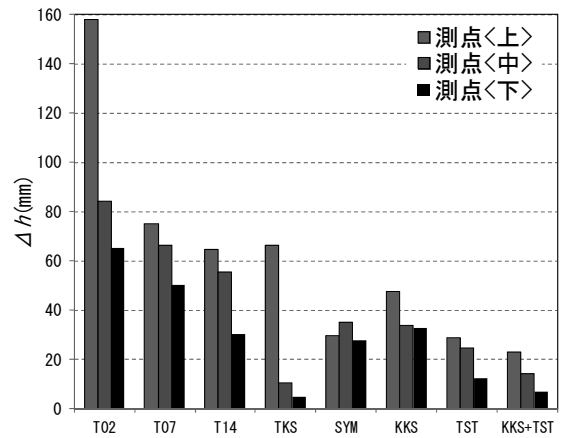
表-6 養生方法の違いによる測点<下>の $p_{600}$ とその順位

		供試体①シリーズ				供試体②シリーズ			
		T02	T07	T14	TKS	SYM	KKS	TST	KKS+TST
第1回目	$p_{600}$	0.537	0.390	0.201	0.028	0.112	0.148	0.080	—
	順位	7 (1.38)	6 (1.00)	5 (0.51)	1 (0.07)	3 (0.29)	4 (0.38)	2 (0.20)	—
第2回目	$p_{600}$	0.718	0.461	0.306	0.034	0.279	0.280	0.106	0.043
	順位	8 (1.56)	7 (1.00)	6 (0.66)	1 (0.07)	4 (0.60)	5 (0.61)	3 (0.23)	2 (0.09)

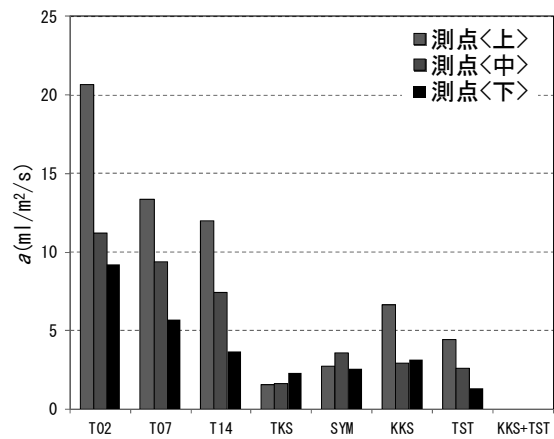
表-5、表-6の( )内は、T07に対する比率



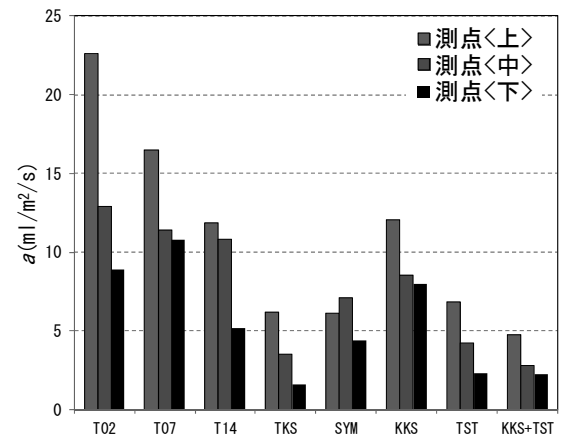
(1)  $\Delta h$



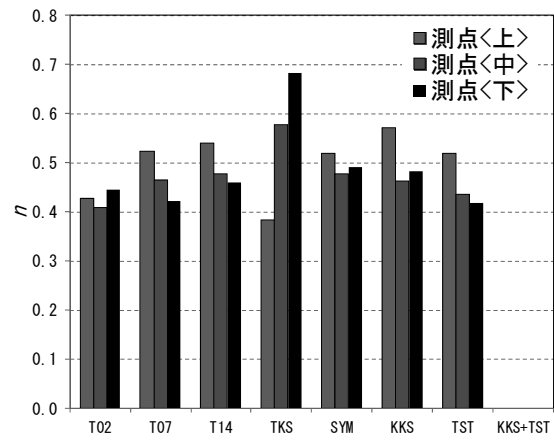
(1)  $\Delta h$



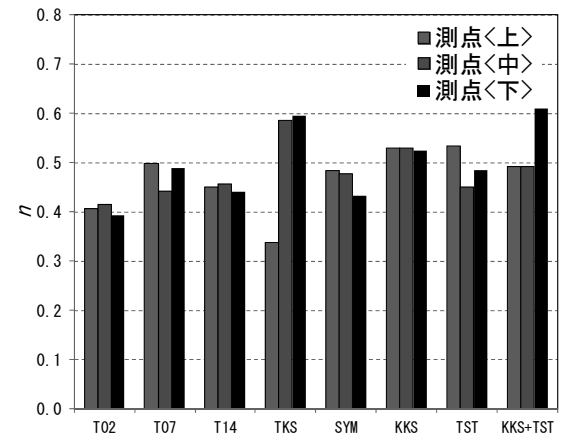
(2)  $a$  (ml/m<sup>2</sup>/s)



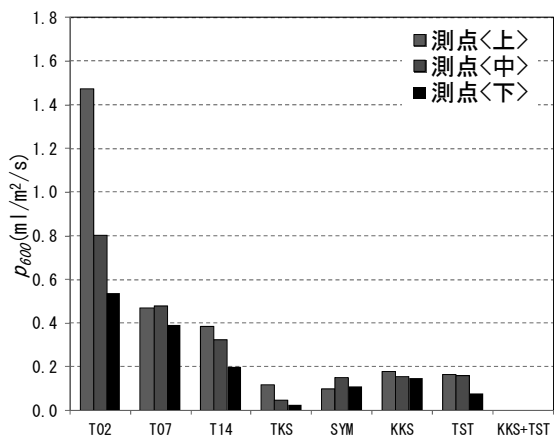
(2)  $a$  (ml/m<sup>2</sup>/s)



(3)  $n$

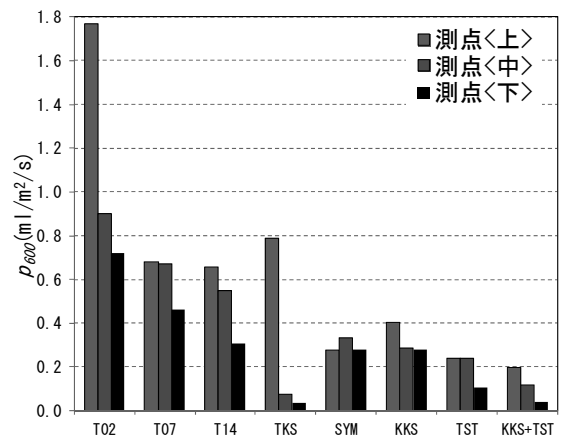


(3)  $n$



(4)  $p_{600}$  (ml/m<sup>2</sup>/s)

図-8 第1回目のSWAT結果



(4)  $p_{600}$  (ml/m<sup>2</sup>/s)

図-9 第2回目のSWAT結果

<下>の  $p_{600}$  について、どの養生方法が優れているかの順位を一覧表にまとめたものであるが、 $kT$  とは違って TKS の成績が最もよく、続いて供試体②シリーズの順位が高いことがわかる。なお、細田、林、あるいは筆者らの既往の研究<sup>2), 4)</sup>では、SWAT による吸水抵抗性のしきい値を表一七のとおり提案しており、標準以上の吸水抵抗性を確保するためには、型枠を7日間以上存置すること、さらに良好な吸水抵抗性を要求するならば、透水型枠シート、湿潤養生マット、気泡緩衝シート、塗布型収縮低減剤など、脱型後に何らかの養生が必要となる。

表一七 SWAT の評価指標に基づくコンクリート表層部の吸水抵抗性評価基準の例

コンクリート吸水抵抗性		良好	標準	不良
細田、林の研究 <sup>2)</sup>	$p_{600}$ (ml/m <sup>2</sup> /s)	<0.25	0.25~0.5	0.5<
	$\Delta h$ (mm)	?	<40	40<
筆者らの研究 <sup>4)</sup>	$a$ (ml/m <sup>2</sup> /s)	?	<10	10<
	$p_{600}$ (ml/m <sup>2</sup> /s)	?	<0.5	0.5<

#### 4.5 $kT$ と $p_{600}$ の関係

図一10に、 $kT$  と  $p_{600}$  の関係を示す。本実験は、養生方法を変えているために、直線近似をすることは難しいが、この図からも、第1回目と第2回目では、第2回目の方が  $kT$  や  $p_{600}$  が大きくなる傾向にあること、測点が<上>になるほどデータのばらつきが大きく、<下>になるほどデータのばらつきが小さくなり、かつ  $kT$  や  $p_{600}$  も小さくなって透気抵抗性や吸水抵抗性などの品質が向上していることがわかる。

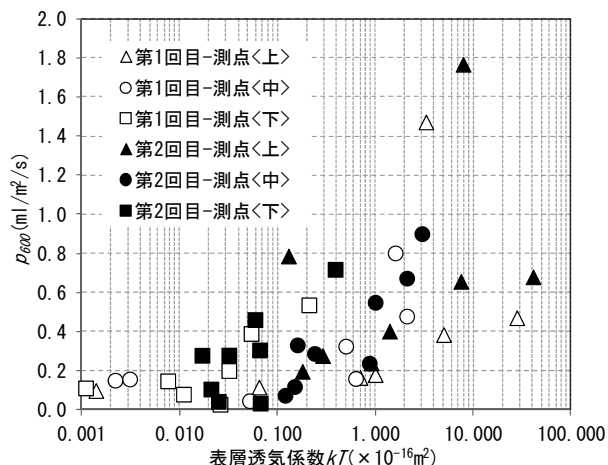
#### 4.6 表層部水分率と $kT$ , $p_{600}$ の関係

図一11~図一12に、コンクリート表層部の水分率と  $kT$ ,  $p_{600}$  の関係を示す。これらの図は、水分率を測定した測点<中>の  $kT$  と  $p_{600}$  をプロットしたものだが、水分率が6%を超えていた第1回目のSYM, KKSのデータを棄却してデータを整理した。これらによれば、表層部が乾燥状態にあるとされる水分率6%以下の範囲では、水分率と  $kT$  や  $p_{600}$  が比較的高い相関関係を示すことがわかる。

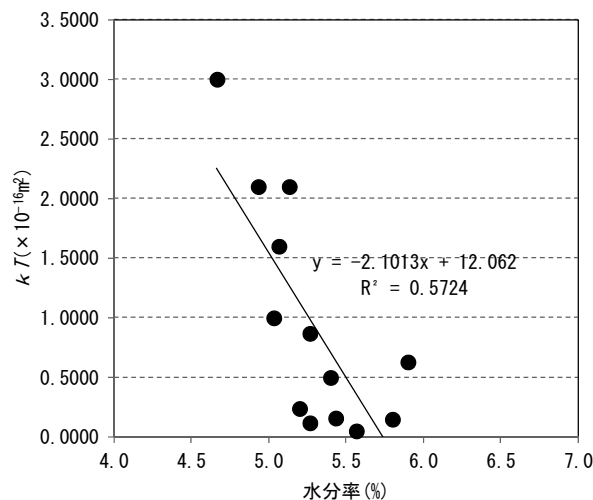
### 5. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

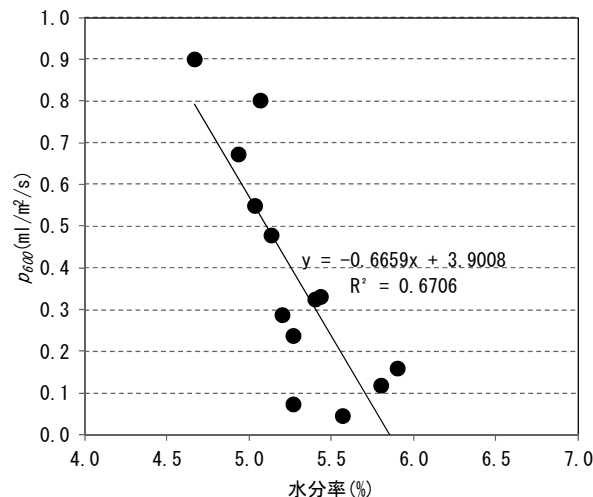
- ①コンクリートの養生方法は、コンクリート表層部分の品質（強度、透気抵抗性、吸水抵抗性）に大きな影響を及ぼし、特に早期に型枠を脱型すると、コンクリート表層部の品質は悪くなる。
- ②型枠として透水型枠シートを用いること、型枠脱型後に、湿潤養生マットや気泡緩衝シート、あるいは塗布型



図一10  $kT$  と  $p_{600}$  の関係



図一11 表層部水分率と  $kT$  の関係



図一12 表層部水分率と  $p_{600}$  の関係

収縮低減剤を塗布することは、コンクリート表層部分の品質向上に寄与する。このうち、特に吸水抵抗性を高めるのは透水型枠シートだが、比較的安価な気泡緩衝シートでも、湿潤養生マットや塗布型収縮低減剤と同等の養生効果を得ることができる。

## 6. おわりに

トレント法と SWAT という完全非破壊の試験方法をコンクリート表層部で実施することにより、型枠存置期間が長いほど強度や透気抵抗性、吸水抵抗性などに関するコンクリート表層部の品質が向上すること、脱型後の養生方法は種々提案されているが、気泡緩衝シートのような比較的安価な養生方法でも、湿潤養生マットや塗布型収縮低減剤のような高価な養生方法に匹敵する透気抵抗性や吸水抵抗性が得られることがわかった。一方、これら試験方法が、コンクリート表層部の水分率や測定高さの影響を大きく受けることも明らかとなった。トレント法も SWAT も現場で簡単に、かつ同じ位置で何度でも測定を行える利点があるが、今後は試験方法の規格統一について検討する必要がある。また、この供試体2体は2013年7月現在、当社技術研究所に保管されており、2ヶ月以降のデータ取得や、例えば表面含浸材の塗布効果の確認、コア採取による中性化促進試験なども可能な状態にある。本研究で得られた成果をもとに課題を整理し、実験を継続していく所存である。

**謝辞：** SWAT のデータ取得、評価方法などについては、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に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) 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.
- 4) 笠井和弘，寺澤正人，川里麻莉子：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，2013土木建設技術発表会投稿済み，2013.11.

**Summary** As a means of evaluating the quality of concrete surface, hardness testing using a rebound hammer or tensile tests specified by Building Research Institute has conventionally been conducted. Applying these methods in the field was, however, difficult for various reasons. For example, re-testing at the same position was impossible because of the destructive or semi-destructive nature. In recent years, surface water absorption tests have been put to practical use as a nondestructive means of testing concrete surface quality in the field. The test method enables direct evaluation of resistance to water absorption and is more effective in civil engineering structures that require water-tightness. This paper first outlines surface water absorption tests and describes the results of experimental evaluation of the effects of curing methods on concrete surface quality. For experimental evaluation, two specimens 800 mm square and 1200 mm in height were manufactured and various curing methods were applied on the side of the specimen. Concrete surface quality was evaluated by conducting rebound testing, a semi-destructive test method, and surface air permeability tests and surface water absorption tests, both of which are nondestructive testing methods.

**Key Words :** *Surface Water Absorption Test, Bubble Wrap Sheet, Permeability formwork sheet, Wet curing mat, Coating type drying shrinkage reducing agent*