

# 論文 表面吸水試験装置を用いた各種コンクリート構造物の吸水抵抗性の検討

阿部 美里\*1・井林 康\*2・陽田 修\*2

**要旨:** 本研究では、表面吸水試験装置(SWAT)を用いて、各種コンクリート構造物を対象に表層品質を調査した。角柱供試体および大型試験体では、季節ごとに環境を変えて測定した結果、相対湿度が高く、気温、水温、表面温度の温度が低いほど表面吸水速度が小さくなる傾向がみられた。また、実構造物の測定では、過去と現在で表層品質を比較すると、過去よりも現在のほうが良くなっている箇所が多くみられた。また、既存構造物に比べ、新設構造物でも表面吸水速度の値が良くないものがみられた。

**キーワード:** 表面吸水試験, 非破壊試験, 表層品質, かぶりコンクリート

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の表層品質は、塩害や凍害、中性化などコンクリートの耐久性に大きな影響を及ぼすため、表層部の品質を確保することは重要である。

表層品質の非破壊試験手法の代表的なものとして、表面吸水試験装置(SWAT)と表面透気試験(Torrent法)がある。そのうち本検討で用いる表面吸水試験装置は、コンクリートの吸水速度から求めた吸水抵抗性によって表層品質を評価するものであり、水など液体の浸透による劣化が多いと考えられるコンクリートの表層部において、劣化因子の侵入メカニズムに近い形で調査することができる。

本研究では、表面吸水試験装置(SWAT)を用いて、小型の角柱供試体、大型の試験体および実構造物のボックスカルバートの大きく3分類を対象に表層品質評価を行い、それぞれのコンクリートの表層品質の傾向を把握し、将来的にコンクリート構造物の維持管理や新設に役立てることを目的とした。

## 2. 表面吸水試験装置

写真-1に示す表面吸水試験装置(SWAT)<sup>1)</sup>は、吸水カップを通じてコンクリートが吸水する水量を計測するものであり、吸水カップに鉛直に接続されたシリンダーの上縁まで10秒程度で注水することで測定を開始する。計測には水圧センサーを用いてシリンダー内の水の体積変化を水位変化によるセンサーの圧力変化として検知し、0.5秒毎に連続して計測を行う。10分間の計測後、式(1)を用いて数値処理を行うことで、10分経過時点の吸水速度(以下、表面吸水速度)であるWAFが得られる。

$$WAF = at^{-n} \quad (1)$$

式(1)において、 $a$ は初期の吸水速度であり、ごく表層のコンクリートの品質を表すと考えられている。 $n$ は時間とともに吸水が低減する程度を表しており、この値が高



写真-1 表面吸水試験装置(SWAT)

表-1 表面吸水速度の評価指標

吸水抵抗性	表面吸水速度(ml/m <sup>2</sup> /s)
良	<0.250
一般	0.250-0.500
劣	>0.500

いほど奥行方向に緻密であると考えられている。得られた表面吸水速度を吸水抵抗性の指標である、表-1に示す「良」、「一般」、「劣」の値<sup>2)</sup>と比較し、コンクリート表層部の吸水抵抗性を評価する。

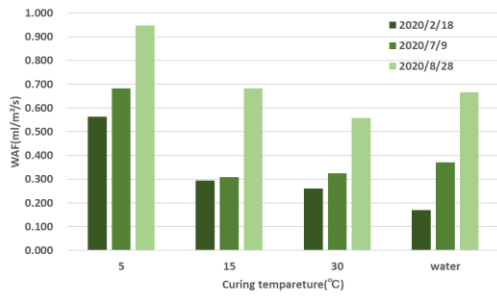
## 3. 角柱供試体の調査

### 3.1 角柱供試体概要

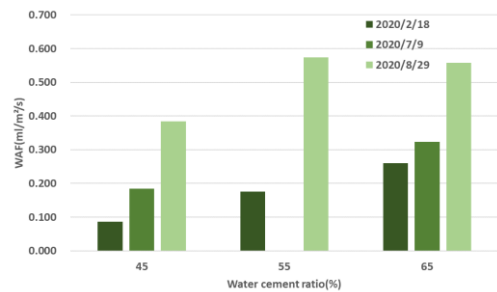
まずは角柱供試体の調査を行った。供試体寸法は150mm(W)×150mm(H)×100mm(D)の角柱供試体であり、水セメント比(W/C)を45%、55%、65%の3種、また養生は5℃、15℃、30℃の気中養生および湿潤養生の4種として1週間の養生を行い、計12種を3体ずつ作成した。測定箇所としては、供試体の中央を一か所測定し、結果は3体の平均を採った。コンクリートの表層品質は養生方法に影響することが知られており、本実験では季節の因子に加え、養生温度およびW/Cを実験パラメータとした。なお、材齢に関しては、作成してから1年程度が経過しており、今回は特に考慮しないこととした。

\*1 長岡工業高等専門学校専攻科 環境都市工学専攻 (学生会員)

\*2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科教授 博士(工学) (正会員)



(a) 養生温度別の表面吸水速度(W/C 65%)



(b) W/C 別の表面吸水速度(養生温度 30°C)

図-1 季節ごとの表面吸水速度の測定結果

### 3.2 表面吸水速度の季節依存性に関する検討

ここでは季節による表面吸水速度の変化の検討を行った。測定は実際の気候に合わせ、7/9、8/28、2/18の3つの時季に測定を行った。測定日ごとの環境条件を表-2に示す。測定環境は実験室ではなく、屋根と通風性のある囲いを持つ屋外の小屋に設置し、雨と風が当たらず、気温と湿度が屋外とほぼ同様となる環境で測定を行った。

測定結果を図-1に示す。なお、(b)のW/C55%の7/9は測定できなかったため値がない。(a)のW/Cが65%の場合のコンクリートの養生温度別、(b)のW/C別ともに、すべての供試体において、2/18の測定が最も表面吸水速度が小さくなり、8/28に最も表面吸水速度が大きくなっていた。養生温度別にみると5°Cが最も表面吸水速度が大きくなっており、7/9から8/28にかけ、どの養生温度でも表面吸水速度が0.300ml/m<sup>2</sup>/sほど大きくなっていった。

表-2、表-3に示すように2月と7月の環境条件では、湿度と表面含水率が同程度であったが、表面吸水速度に差が生じていた。これは湿度と表面含水率以外の環境条件が表面吸水速度に影響している可能性が考えられる。逆に、8月については気温、水温、表面温度が最も高く、湿度と表面含水率が最も低い状況となっており、気温、水温、表面温度が表面吸水速度に影響している可能性が考えられる。

### 3.3 表面吸水速度と各種測定値との関係性調査

先行研究により、環境条件が違う測定でも、表面温度と表面吸水速度に高い相関性が見られ表面吸水速度の補正を行うことができると報告されている<sup>3)</sup>。本研究で対象とした角柱供試体においても同様の相関性がみられる

表-2 測定日ごとの環境条件

	気温(°C)	湿度(%)	水温(°C)	表面温度(°C)
2020/2/18	5.6	72.8	5.7	4.5
2020/7/9	26.4	75.4	25.1	23.7
2020/8/28	37.0	43.9	36.8	36.8

表-3 W/C ごとの測定日の表面含水率

測定時期	W/C 45%	W/C 55%	W/C 65%
2020/2/18	4.4%	4.3%	4.2%
2020/7/9	4.4%	4.1%	4.1%
2020/8/28	3.9%	3.7%	3.8%

表-4 角柱供試体の名称

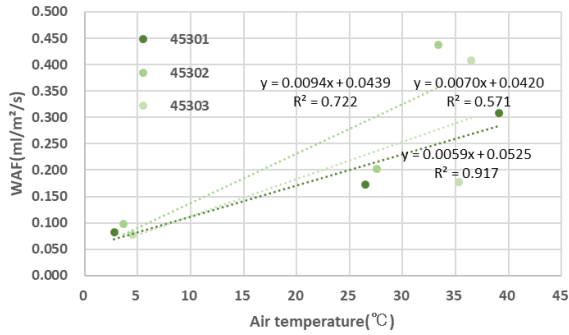
試験体番号	W/C 45(%)	W/C 65(%)
	養生温度30°C	
1	45301	65307
2	45302	65308
3	45303	65309

か、また気温や湿度などの他の環境条件でも表面吸水速度との相関性がみられるか評価を行った。着目した環境条件は(a)気温、(b)表面温度、(c)湿度、(d)水温の4つである。なお、(d)水温については、測定時に使用した水の水温を測定前に測ったものを使用した。供試体名は表-4のように分類し、これらと3つの測定日における表面吸水速度の関係性を調査した。

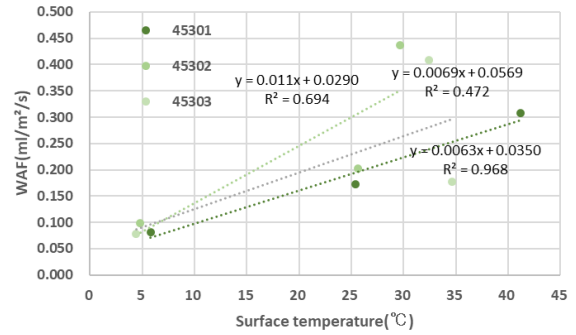
W/C45%、養生温度30°Cの供試体の結果を図-2に示す。なお、図中のそれぞれのプロットは(a)~(d)のいずれも、左側から2月、7月、8月を示している。2月の測定では、(a)、(b)、(d)の各環境条件で各供試体の表面吸水速度の値が近い箇所にあった。しかし、8月の測定では表面吸水速度の値が(a)気温と(b)表面温度にて0.200ml/m<sup>2</sup>/sほど、それぞれ差が生じていた。決定係数を確認するとR<sup>2</sup>値は今までの測定から4項目すべて約0.4~0.6の間に入っていたが、全体としては表面温度との相関が最も高かった。

また、ここには載せていないが、W/C65%の結果についてもW/C45%の結果とほぼ同様の結果となった。よって、3つの供試体で全体的に相関がみられたのは表面温度であった。

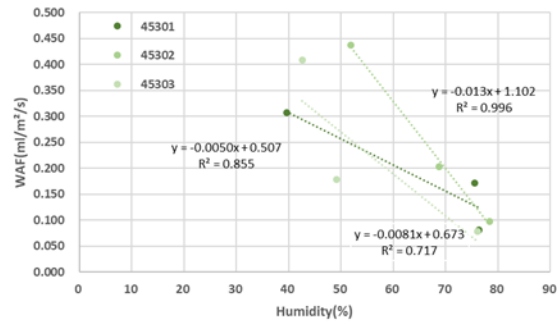
結果として、本検討において、気温や表面温度とのある程度の相関について確認することができた。しかし、他の環境条件の影響については、あまり明確な結果は得られなかった。相関があった要因が、測定の際のばらつきか、供試体の傾向か、環境条件の影響であるかは、明確には解明ができなかった。また、ばらつきの原因として、小屋に設置している期間の日光の当たり具合や、測定の際の日射の具合などの影響も考えられる。



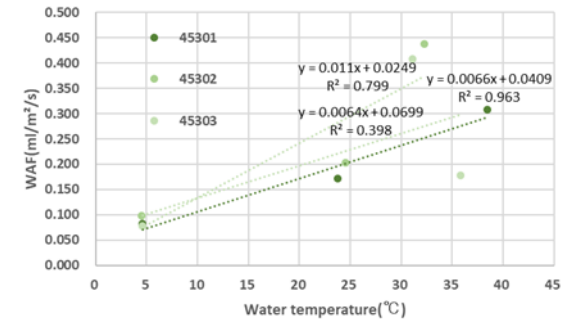
(a) 気温との関係



(b) 表面温度との関係



(c) 湿度との関係



(d) 水温との関係

図-2 表面吸水速度と環境条件の関係（角柱供試体）

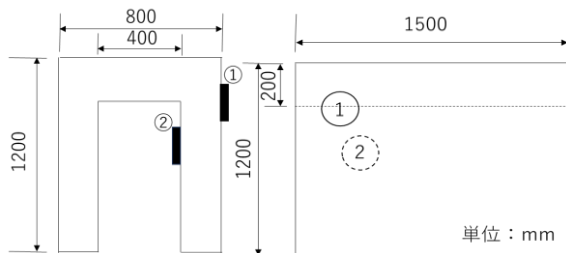


図-3 大型試験体の寸法と測定箇所

#### 4. 大型試験体の調査

##### 4.1 試験体概要

長岡高専内の屋外に設置された、ボックスカルバートを模した大型試験体の表層品質調査を行った。2022年の10月に打設されたものであり、配合は24-12-25BBである。試験体の外側の測定点1、試験体の内側の測定点2の計2か所について、2023年5月から12月にかけて1か月に1~2回程度、様々な環境条件のもとで計9回の測定を行った。図-3に試験体の外形寸法および測定位置を示す。また、表-5に大型供試体の近傍で実測した環境条件を各季節ごとに平均した値を示す。

##### 4.2 表面吸水速度の季節依存性に関する検討

大型試験体を対象に、環境条件としては前節と同様に(a)気温、(b)表面温度、(c)湿度、(d)水温の4つについて

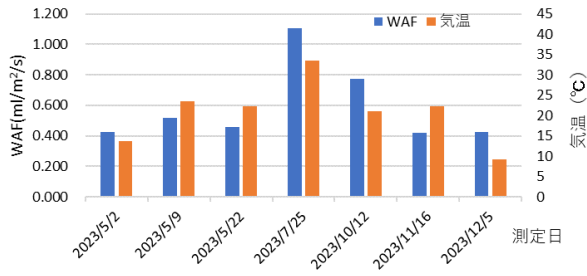
表-5 長岡高専の環境条件

	梅雨 (5月下旬~6月)	夏 (7月~9月)	冬 (11月~12月)
平均気温(°C)	25.0	33.0	6.0
平均湿度(%)	84.0	58.0	92.0

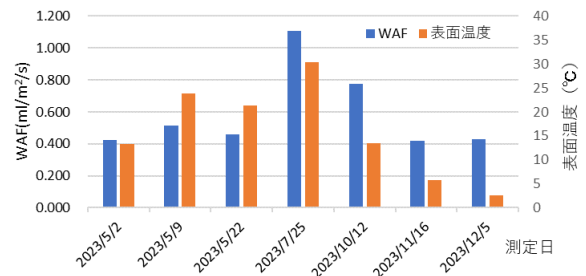
検討した。それぞれの結果を図-4に示す。

また、大型試験体の測定時期ごとの表面含水率を平均した結果を表-6に示す。前節の結果と同様に、夏がもっとも表面吸水速度が大きい結果となった。夏は気温、水温、表面温度が最も高く、湿度と含水率が最も低くなるため、表面吸水速度に影響を及ぼしていると考えられる。環境要因のそれぞれに着目してみると、気温は低い値のときほど表面吸水速度が小さくなっていたが、例えば、最も低い気温の時に最も小さい表面吸水速度が測定されるわけではなく、全体的に低い気温を観測すると表面吸水速度が小さくなる傾向であった。しかし、表面温度に関しては、最も表面温度が低い値の時に表面吸水速度も最も小さくなる傾向が見られた。

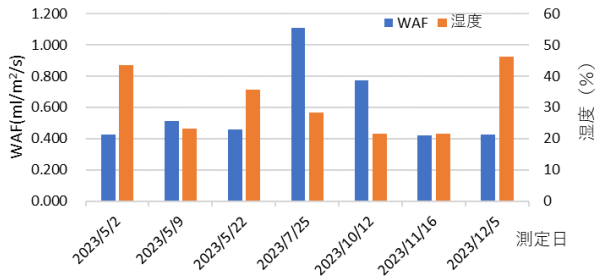
結果として、(a)から(d)の環境条件の中で最も相関があると考えられるのは表面温度であり、前節の結果も踏まえると、表面吸水速度は気温や湿度、水温、表面温度により変動し、特に表面温度が、表面吸水速度に最も影響を及ぼしていると考えられる。



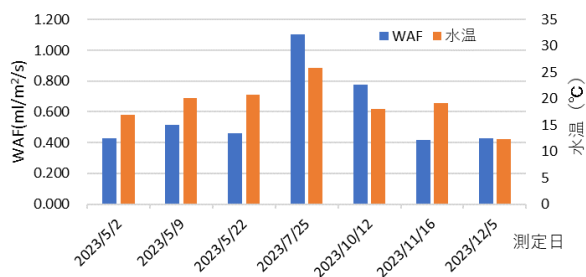
(a) 気温との関係



(b) 表面温度との関係



(c) 湿度との関係



(d) 水温との関係

図-4 測定点2の表面吸水速度と環境条件比較(大型試験体)

表-6 測定時期ごとの平均表面含水率(大型試験体)

測定点	1	2
梅雨(5月下旬~6月)	4.8%	4.4%
夏(7月~9月)	4.5%	4.1%
冬(11月~12月)	4.9%	4.2%

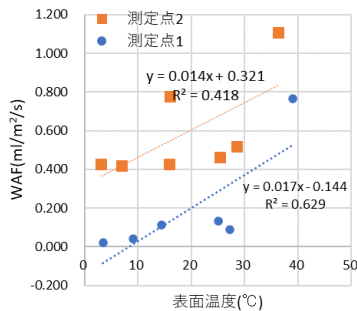


図-5 表面温度と表面吸水速度の相関図

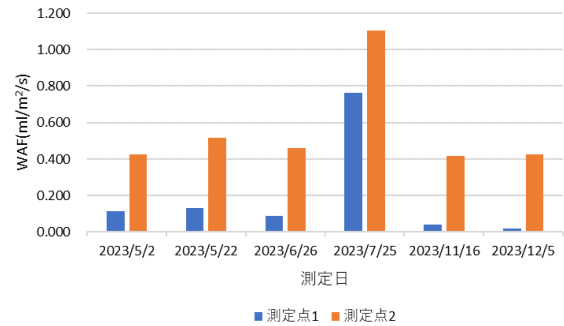


図-6 2つの測定点の表面吸水速度の計時変化

表面温度は表面吸水速度とある程度相関があると考えられる結果となった。前節と今節の検討結果である図-2と図-5では類似の傾向があったが、いずれも測定する試験体および測定時のばらつきはある程度存在すると考えられる。

### 4.3 表面吸水速度の表面温度依存の検討

前節において、角柱供試体における表面吸水速度と表面温度の関連について検討しているが、同様に大型試験体についても検討を行った。図-4より、気温と表面温度との相関が最も高いことから、表面温度と気温について検討を行った。

図-5に表面温度と表面吸水速度についての比較結果を示す。これより、値が若干ばらついているものの、角柱供試体の図-2と類似の傾向を示していることが確認できた。また、ここには示していないが、温度についても同様の傾向であった。この大型試験体による検討でも、

### 4.4 試験体の内側と外側の表面品質の比較

屋外に置かれた大型試験体について、風雨にさらされる外側の測定点1と、内側の測定点2の経時的変化の結果をそれぞれ図-6に示す。測定時の材齢は7~14か月程度であったが、表面吸水速度の値は2か所で大きく異なる結果であり、内側の測定点2の方が、表面吸水速度の値が大きい結果となった。このような結果の要因として、外面は雨がかりがあるのに対し、内面は外部からの水の供給が乏しく、外面に比べて乾燥しやすいことが原因として考えられる。

表-7 Nボックスにおける平均表面含水率

測定日	B8	B10	B11
2015/10/12	4.3%	4.3%	/
2021/11/17	4.3%	4.4%	

## 5. 既存構造物の調査

### 5.1 既存構造物の概要

著者らは、過去に新潟県N市内の主要道路にある、ボックスカルバート(以下、Nボックス)12基、橋脚17基、橋台9基のうち、河川内になく接近できるものを対象に調査を行っている<sup>4)</sup>。2015年の調査で、橋台・橋脚は全体的に表層品質が良く、逆にNボックスは12基あるうちの9基で吸水抵抗性が劣を示す結果となり、この要因として雨がかりが大きく影響している可能性が報告されている。

また、Nボックスのうち、B8と呼んでいるものに加え、他と比べて面的な砂すじやひびわれが多いB11と称したものについて、詳細に20箇所の測定を行った。B8においては、2015年に14箇所を測定した記録があり、材齢は2021年の測定においていずれも約10年が経過している状況にある。また、各測定点の表面含水率を平均した値を表-7に示し、図-7にて各測定点の簡易図および写真を示す。ここでは主にB8の新旧の測定結果の比較と、B11の測定箇所による違いの検討を行った。

### 5.2 B8の測定結果

今回比較を行うB8の測定箇所は、2015年における測定箇所の写真からほぼ同一の箇所を調べ、2021年に8箇所の測定を行った。2015年の測定結果と、2021年の測定したB8の測定結果を比較したものを図-8に示す。図より、2021年の測定では、2015年よりも表面吸水速度は同程度であるか、表層品質が良くなっている箇所が多いことが判明した。2015年と2021年では、測定時の気温は14℃と18℃と差があったが、表面含水率は平均するとほとんど一緒だった。また、B8では両端と路面近くの下部分は表面吸水速度が0.100 ml/m<sup>2</sup>/s程度と、その他の部分が0.200 ml/m<sup>2</sup>/sを超えるのに対して小さい傾向にあった。要因として、2015年から2021年に至るまで、雨がかりや結露、車が通る際の跳ね水等でコンクリートの水和反応が進み、測定時の含水率が高くなった為、見かけの吸水速度が小さくなった影響で表面吸水速度が小さくなった可能性が考えられる。

### 5.3 B11の測定結果

B11の特徴として、全体的にひび割れや砂すじが多く、全体的に表層品質にムラがありそうなことが挙げられる。全20箇所の測定結果を図-9に示す。20箇所中16箇所で吸水抵抗性が劣を示し、4箇所は吸水抵抗性が一般と良の値であった。比較的よい値であった箇所は路面近く



図-7 B8およびB11の各測定点の簡易図と写真

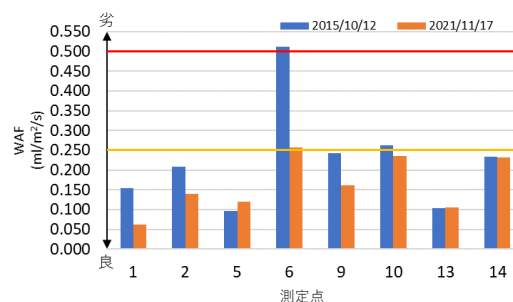


図-8 B8による前回と今回の測定結果

の低い位置にあることが多いことから、前述のB8と同様に車が通る際の跳ね水や結露などの影響もあるが、コンクリートの品質のばらつきによりその部位の緻密性が高く、たまたま良い品質であった可能性も考えられる。

## 6. 新設構造物の調査

### 6.1 新設構造物の概要

対象としたのは、新潟県S市内に設置されたボックスカルバート(以下、Sボックス)、およびT市内に設置されたボックスカルバート(以下、Tボックス)である。材齢は、測定時でSボックスが約60日、Tボックスが約40日である。

### 6.2 新設構造物と既設構造物の測定結果の比較

前節の既設構造物であるNボックスのB11と、比較対象として同時期に測定したB10、そして新設構造物のSボックス、Tボックスの測定結果を図-10に示す。これより、Tボックス、Nボックス、Sボックスの順で表面吸水速度が小さいことが判明した。新設であるSボックスの表層品質が最も悪かった要因として、Sボックスは平均表面含水率が4.7%程度と比較的高い状態にも関わらず、図-11に示すnの値が最も小さいことから、表面吸水速度が大きくなったと考えられる。また、Tボックスは平均表面含水率が5~6%程度と非常に高い状態であったため、見かけ上、小さ目に測定された可能性がある。結果として、新設の構造物でも、測定時の気候や施工方法によっては、既設の構造物よりも、表層品質が良くないものがある可能性が判明した。

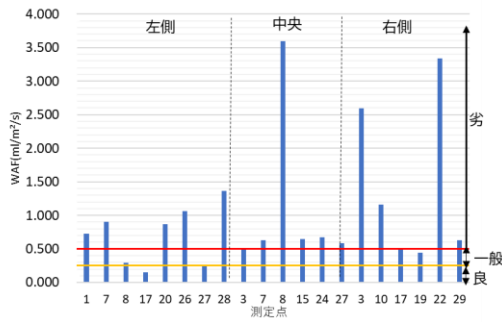


図-9 B11の表面吸水速度

次に、各構造物の表面吸水速度の分布図を作成し、値の分布形状を比較した結果を図-10に示す。既設構造物であるNボックスのB11の分布範囲が特に大きく、その次にSボックスの分布範囲が大きいという結果となった。NボックスのB11の分布範囲が大きくなった要因として、日射や雨掛かり、車の跳ね水を受けやすい場所などの偏った場所に外部から水が供給されたりすることが考えられる。また、NボックスのB10は既設構造物であるが、NボックスのB11と比べると分布範囲が小さい。なお、NボックスのB10は他の構造物に比べて測定位置が少なく、分布範囲がやや小さめに出ていた可能性も考えられ、B10に関しては、壁面全体の測定を行い、改めて比較を行う必要があると考える。

また、Sボックスは2番目に分布範囲が大きい、新設にも関わらず、構造物内で相対的に大きな差が生じており、呼び強度や水セメント比によらず、場所により表面吸水速度に大きく差があることが判明した。

## 7. まとめ

本研究は、角柱供試体、大型試験体、および実構造物の3つを対象とし、表面吸水試験装置を用いて、表層品質の評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1)角柱供試体および大型試験体において、季節ごとに測定した結果、測定時の気温、表面温度、湿度、水温などの環境要因が影響を及ぼしていた。特にコンクリートの表面温度が最も表面吸水速度に影響を及ぼしていた。また、相対湿度が高く、気温、水温、表面温度の温度条件が低いほど表面吸水速度が小さくなる傾向がみられた。
- (2)大型試験体の内面と外面では、内面のほうが表面吸水速度が大きく、表面品質は低い傾向にあった。雨がかりがなく、乾燥しているためであると考えられる。
- (3)実構造物の表面吸水速度について、2015年の測定結果と比較したところ、全体として2015年と同程度か、小さい傾向にあった。理由としては、雨がかりの有無、

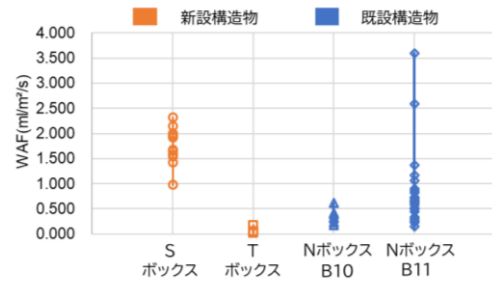


図-10 各構造物の表面吸水速度の分布形状の比較

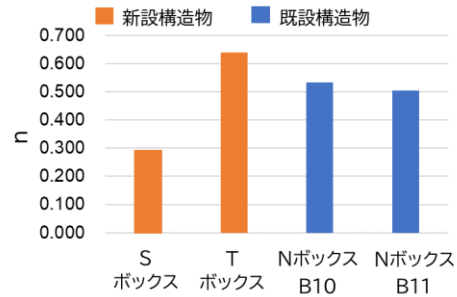


図-11 n値の比較

車の跳ね水が考えられる。逆に、前回測定時に既に十分な雨がかりがあったと思われる箇所については、あまり変化がなかった。

- (4)面的に砂すじやひびわれがありそうな実構造物について、20箇所ほど測定を行ったところ、場所により表面吸水速度に大きな差が生じていた。

## 謝辞

本論文は、同研究室の卒業生である長部拓海氏、笠井倫氏、桐生倭斗氏の多大なるご協力を頂いて作成された。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 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, Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013
- 2) 国土交通省東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)(橋脚、橋台、函渠、擁壁編)，2022.7
- 3) 中川 直人，村上 祐貴，上村 健二，井林 康：吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化に基づく表層品質評価，コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1695-1700, 2018.7
- 4) 井林 康，陽田 修，品川 彰：各種既存コンクリート構造物を対象とした表面吸水試験および目視評価法による表層品質の評価，コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1333-1338, 2018.7