

表面吸水試験方法によるコンクリート表層品質の評価

Evaluation of cover concrete quality using the surface water absorption test

伊藤 忠彦*

藤波 亘**

Tadahiko Ito

Takeshi Fujinami

元重 尚也***

飯田 努***

Naoya Motoshige

Tsutomu Iida

要 約

コンクリート構造物の品質向上を明らかにすることを目的に、新たな表面吸水試験方法による品質評価を実際の新設構造物で試みた。対象とした構造物は下水道の水処理施設であり、その一部の鉛直壁面で「うるおい」養生等による追加養生を実験的に実施した。その結果、追加養生を行った壁面は一般部の壁面に比べ、吸水速度が大幅に減少するなど、コンクリート表面が緻密化していることが示された。本試験方法を用いることで、コンクリート品質向上を表層品質の視点から可視化できることがわかった。本研究はコンクリート構造物の長寿命化に関する取り組みとして、横浜国立大学と共同で実施したものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 表面吸水試験方法の概要
- § 3. 実験ケースと追加養生方法
- § 4. 表層品質の評価および考察
- § 5. 他の非破壊検査
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を評価する一手法として、表面吸水試験方法による表層品質評価方法が開発されている¹⁾。本試験方法はコンクリート表面の吸水速度を測定するものであり、吸水速度が小さいほどコンクリート表面が緻密であることを意味する。また、コンクリート表面を傷つけることなく完全非破壊で実施できるので、新設構造物に対しても安心して適用することができる。他の非破壊試験方法としては、表面強度を測定するテストハンマー法²⁾や表面透気性を測定するトレント法³⁾などがある。

今回、コンクリートの品質向上対策の効果を定量的に把握することを目的に、新設構造物における表面吸水試

験方法の適用を試みた。対象とした構造物は建設中の水処理施設であり、一部の鉛直壁面で種々の追加養生を実験的に行った。本文は追加養生の効果を本試験方法で測定し、その表層品質の評価をまとめたものである。

§ 2. 表面吸水試験方法の概要

2-1 表面吸水試験機

本試験方法に用いた吸水試験機を写真-1 および測定状況を写真-2 に示す。試験機はコンクリート面に接して吸水を行う吸水カップ（外径 100 mm、厚さ 30 mm）、水頭を作用させつつ吸水量の変化を読み取るシリンダー

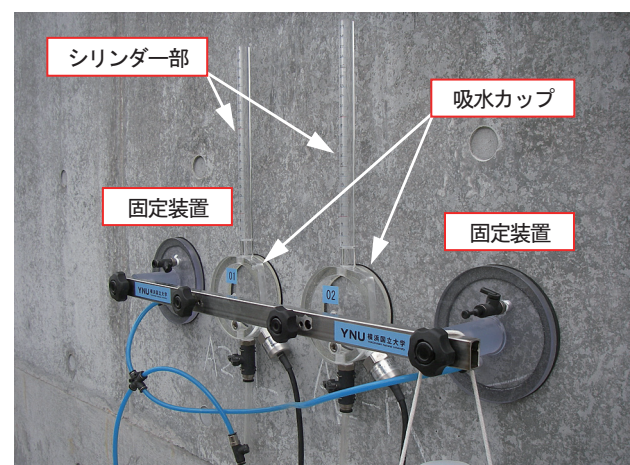


写真-1 表面吸水試験機（吸水カップ2個セット）

* 技術研究所

** 土木設計部リニューアル課

*** 関東土木（支）

部（内径 8 mm，高さ 300 mm），それをコンクリート面に密着させるための固定装置で構成される。固定装置は小型真空ポンプに接続されており，真空ポンプを作動させることでコンクリート面に吸着する仕組みとなっている。本試験機は吸水カップの設置に接着剤や固定用アンカー等を用いずにセットすることができる。

2-2 試験方法

試験手順を図一1に示す。試験機セットは真空ポンプを起動させ，固定装置を用いて空の吸水カップをコンクリート面へ密着させる。次に，吸水カップの水頭 300 mm まで注水を速やかに行う。本試験機では，吸水器具を工夫することで注水を 5 秒程度で完了できる。吸水量の測定は注水開始時刻をゼロとして，その後の 10 分間の水位変化を 1 分毎にシリンダー目盛から読み取って記録する。10 分間のデータ記録後，吸水カップ内の水を排水して終了となる。

試験に用いる水はコンクリート微細孔への目詰まりを防止するため，不純物が混入していない水道水を用いる。水道水は外気温と同程度に調整しておく。なお，吸水量の測定は圧力センサーを用いた自動計測も可能となっている。

§3. 実験ケースと追加養生方法

3-1 実験ケース

追加養生方法をパラメータとした実験ケースを表一1に示す。実験は鉛直のコンクリート壁面で行い，コンクリートの配合は標準配合と冬期配合で若干異なるが，W/C および配合強度は同一である。表一2にコンクリート配合を示す。セメントは高炉B種である。

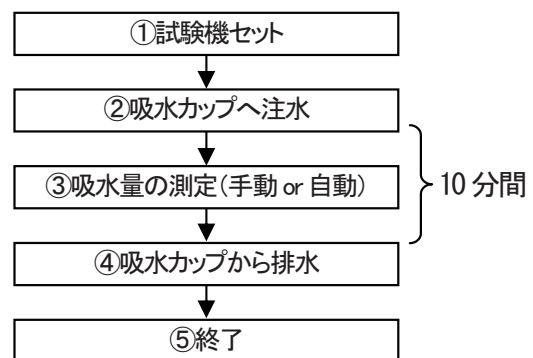
実験ケース 1（以下，標準ケース）は当該現場の標準施工パターンであり，コンクリート打設から型枠の脱型まで 1 週間である。ケース 2 は標準ケースに散水養生を加えたものであり，散水はコンクリート打設の翌日から脱型日まで打設天端から散水ホースで行った。ケース 3~5 は型枠の脱型時期を標準ケースから延長したものであり，打設から脱型までの期間を各々 2 週間，3 週間，4 週間とした。ケース 6~7 は，標準ケースの脱型後に市販の表面養生剤を塗布した。ケース 8~9 は，標準ケースの脱型後に写真一3の養生マットを 1 ヶ月間設置した。養生マットによる養生範囲は高さ 3 m × 幅 4 m である。なお，上記 3~9 の追加養生は壁部材の両面で行い，片面からの乾燥を防止した。壁の厚さはケース 2 のみが 40 cm で，その他は 80 cm である。

3-2 養生期間中の温湿度

コンクリート打設から養生中の挙動を把握するため，外気温，壁中心部のコンクリート温度，コンクリート表面水分等を測定した。ケース 8，9 については，養生マッ



写真一2 測定状況



図一1 吸水試験手順

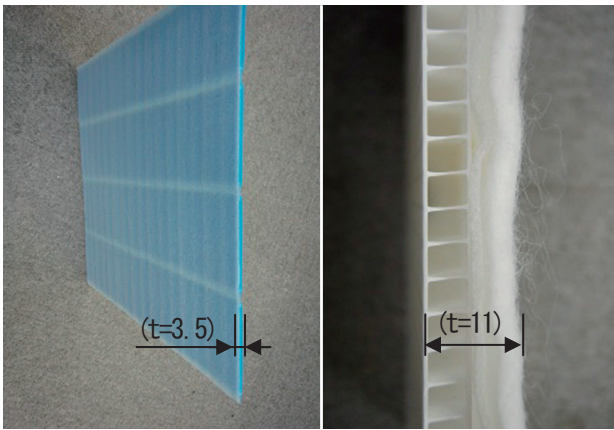
表一1 実験ケース

実験ケース	打設日	追加養生方法	備考	
1	2月9日 (冬期配合)	-	1 W脱型 (標準)	
2		散水	1 W脱型 + 散水	
3		型枠存置		2 W脱型
4				3 W脱型
5				4 W脱型
6	3月15日 (標準配合)	表面養生剤	A 社 CS	
7			B 社 CA	
8		養生マット	積層シート	
9			うるおい	

表一2 コンクリート配合表

(27-12-20-BB)

実験ケース	(kg/m ³)					W/C (%)	s/a (%)
	C	W	S	G	AE 剤		
1~5 (冬期)	304	158	773	1083	3.04	52.1	42.5
6~9 (標準)	309	161	760	1083	3.09	52.1	42.1



(左：積層シート，右：うるおい)
写真-3 養生マット

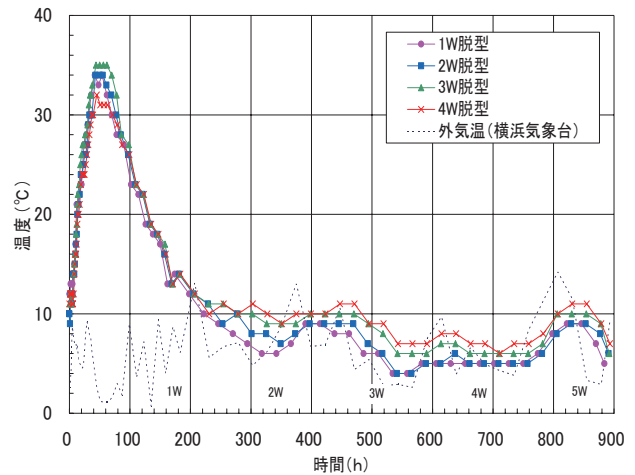


図-2 養生中の温度履歴 (ケース1~5)



写真-4 表面水分の測定

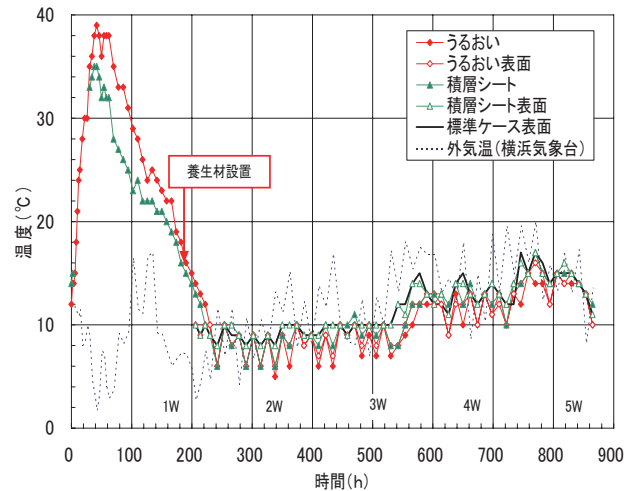


図-3 養生中の温度履歴 (ケース8, 9)

トの設置効果をみるため壁表面部の温度も測定した。また、表面水分の測定は予め養生マットに切れ目を入れておき、測定時のみコンクリート面を露出させて行った(写真-4 参照)。

養生期間中のコンクリート温度履歴を図-2, 3に示す。ケース1~5(図-2)の脱型時期の違いによる影響は、脱型時期が遅いほど脱型後の壁中心部の温度は高くなり、若干ではあるが保温効果が認められた。しかし、その差は1~3℃程度と僅かであった。

ケース8, 9(図-3)の養生マットの違いによる影響は、壁中心部の温度は標準ケース表面のそれと同等または低くなっており、養生マット設置による保温効果は少なかった。それに伴い、壁中心部と壁表面部の温度差も少なかった。

コンクリート表面水分の結果を表-3に示す。表面養生剤と養生マットで追加養生を行なった部位の表面水分は、いずれも標準ケースのそれより大きくなり、種別毎のユニークな保湿効果が認められた。ケース9「うるおい」は、特に高い保湿効果が得られることが確認できた。

表-3 コンクリート表面水分

(%)

材 齢 (d)	ケ ー ス					備 考
	8 積層 シート	9 う る お い	1 標 準	6 CS	7 CA	
0	-	-	-	-	-	コンクリート打設
7	-	-	-	-	-	型枠脱型
8	7.4	9.0	-	-	-	追加養生施工
9	7.0	11.4	6.9	-	-	
12	6.3	9.3	3.0	6.3	6.9	
13	7.1	9.7	5.2	5.9	6.2	
21	5.5	10.4	5.0	5.5	6.0	
27	7.2	10.6	5.2	5.5	5.9	前夜にわか雨
35	6.7	10.0	5.2	5.7	5.5	前日早朝雨
平均	6.7	10.1	5.1	5.8	6.1	

§ 4. 表層品質の評価および考察

4-1 表面吸水試験結果の評価方法

本試験方法で得られるデータは単位面積あたりの時々刻々の吸水速度であり、一般に式(1)で整理することができる¹⁾。式(1)は、測定開始時を最大として時間と共に徐々に減少する吸水挙動を精度よく近似できる。

$$y = a \cdot t^{-n} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、y：各時刻における吸水速度 (ml/m²/s)
 a, n：定数
 t：時間 (s)

吸水速度はコンクリートの表層状態によっては、試験時間の10分経過以前にゼロになることもある。また、コンクリート表面が極めて緻密で、かつ、ある程度の湿潤状態が保たれている場合は、今回の実験では全く吸水しない場合もあった。ここでは、10分時点での吸水速度を用いてコンクリートの表層品質を評価する。

定数 a は試験開始直後(1秒時、データの外挿により求める)の吸水速度であり、測定データを整理することで計算される。a はコンクリート表面の緻密性を表す指標と考えている。a が大きいと相対的に表層が粗またはマイクロクラックが多く、小さいと表層が緻密であることを意味している。

定数 n は吸水の時間変化を表す指標と考えている。n が小さいと、いつまでも水を吸い続けることを意味し、n が大きいと直ぐに水を吸わなくなることを意味する。ここに、n は 0~1 の範囲となりうる。

したがって、式(1)は3つの指標(10分時点での吸水速度、a、n)からコンクリート表層品質を多面的に評価できる可能性がある。

以上のことから、今回の実験では10分時点での吸水速度が小さいほどコンクリートが緻密であると判断し、構造物としてのバリア機能が高いと評価する。また、吸水速度と定数 a および n の関係を整理し、コンクリート表層品質の状態を多面的に考察する。

4-2 実験結果および考察

(1) 測定位置の選定

実験箇所の壁は、コンクリート打設リフト高さが3mであり、途中の約1.5mで打ち重ねている。打ち重ね部の近傍はパイプレタ締め固め度合い等の影響で、測定値にバラツキが生じる恐れがある。今回の測定箇所は打ち重ね上部1.5mの中央付近である0.75mを測定位置と定めた(図-4参照)。これにより、測定値からブリーディング等の影響を避けることができると考えている。

(2) 吸水速度による比較

実験ケース毎の10分時点での吸水速度の平均値および最大最小の範囲を図-5に示す。測定日は7月29日

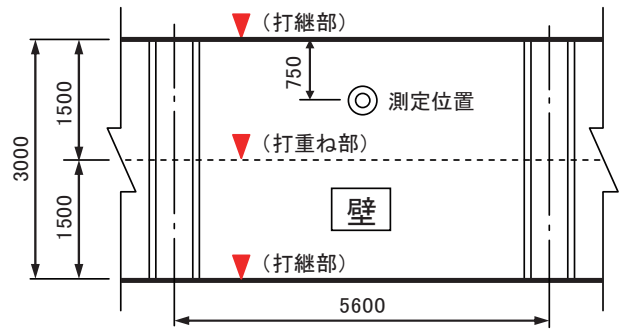


図-4 測定位置

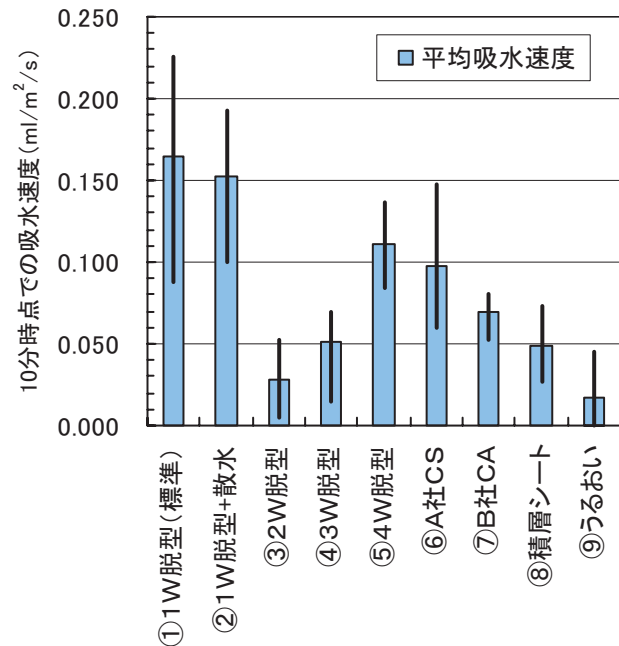


図-5 吸水速度の測定結果

あり、測定時のコンクリート材齢は171日(ケース1~5)および136日(ケース6~9)である。今回、測定は追加養生終了から十分に時間経過した状態で行った。すなわち、全ての測定箇所は同一の周辺環境下で100日以上経過しており、その間の日射による乾燥や降雨による湿潤を繰り返し受けている。測定は原則として3点(n=6)行なった。

追加養生を行った壁の平均吸水速度は、行わなかった壁(標準ケース)に比べて、全てのケースで低減しており、コンクリートの表層品質が各々のケースで向上していると判断できる。単純に平均吸水速度が小さい順(言い換えれば表層品質が高い順)に並べると、うるおい<2W脱型<積層シート≒3W脱型<養生剤CS<養生剤CA<4W脱型<1W脱型+散水<1W脱型であった。ただし、British Standard 1881-5に規定されている類似の吸水テスト(水頭200mm)による評価¹⁾では、吸水速度

がLow : <0.25, Average : 0.25~0.5, High : >0.5 と規定されており, 当該構造物の吸水速度は標準ケースでも相当低いレベルであることを付記しておく。

型枠存置の効果は, 自然降雨の影響を受ける今回の現場条件の範囲内では, 2 W脱型で一番効果が高くなった。3 W脱型と4 W脱型の平均吸水速度は, 2 W脱型よりも若干ではあるが大きく, 品質向上という観点からは2 W脱型よりも劣る結果となった。このことは, 品質向上対策としての型枠存置には, 最適な存置期間があることを示唆していると思われる。ただし, 当該現場は半地下構造物であり, 日射と降雨の影響は受けるが風の影響は殆ど受けず, 結果として地上部よりも湿度が若干高い等の条件下であることに注意を要する。

散水養生の効果は期待に反して少ないものとなったが, これは1 W脱型まではコンクリート表面が十分に湿っているため, 散水の効果が少なかった影響と思われる。同じ1週間の散水を行うのであれば, 散水は1 W脱型後か3 W脱型後に行うのが良い可能性が示され, 散水開始のタイミングが重要であることが示された。

表面養生剤の効果は, 3 W脱型と4 W脱型の中間同程度の向上が認められた。今回の実験では, ケース6よりもケース7の方が向上効果が高くなった。なお, 養生剤の違いによる表層改質の特徴が指標aおよびnから考察できるので, この点については後述することにする。

養生マットの効果は, 今回の実験の中で一番顕著であり, 型枠存置方式で効果が高かった2 W脱型および3 W脱型と同等の品質向上が認められた。特にうるおいは, 全ての実験ケース中で最も平均吸水速度が小さくなった。うるおいの平均吸水速度は標準ケースの約1/10となり, 大幅なコンクリート表層品質の向上が図られていることが明らかとなった。その値は今回の実験の範囲内では, 表面養生剤を上回るものだった。

(3) 定数 a による考察

図-6 に吸水速度と定数 a の関係を示す。両者は概ね正の相関関係があることがわかる。吸水速度が小さいものは定数 a も小さくなっている。

養生マット (ケース 8, 9) は相対的に a が小さく, 保湿の効果が現れたものと思われる。したがって, 材齢初期の適切な保湿はコンクリート表層のマイクロクラックの発生を防止するか, あるいはマイクロクラックの自然治癒作用を促すものと思われる。

養生剤 CS (ケース 6) は相対的に a が小さくなっている。したがって, 本製品は表層のマイクロクラックを塞ぐ特徴を持っていることがわかる。逆にケース 2 の a は, 標準ケースよりも大きくなっている。壁厚が標準ケースの半分と薄いため, 乾燥が進みやすい等の影響が表層状態に現れたものと思われる。

(4) 定数 n による考察

図-7 に吸水速度と定数 n の関係を示す。両者は概ね反比例関係にあることがわかる。表層品質が高いことが

示されたうるおい (ケース 9) や 2 W脱型 (ケース 3) での n は, 1.0 に近い値を示すことがあった。これらのケースは表層のマイクロクラックの緻密化だけでなく, 内部の緻密性も向上したことを意味すると思われる。

前述の養生剤 CS (ケース 6) に着目すると, n の値は標準ケースのそれと同等であることがわかる。これは, コンクリート表層は確かに塞がれて緻密化した, 内部の緻密性は標準ケースと変わらないことを示していると思われる。

積層シート (ケース 8) は, n のバラツキが大きくなっている。これは, コンクリート内部の緻密性が一律に向上したわけではないことを示していると思われる。

以上のように, コンクリート表層品質は式(1)で得られる3つの指標のうち, 10分時点での吸水速度をもって評価することができた。また, 同時に得られる指標 a および n によって, コンクリート表層の状態を多面的に考察することが可能であった。

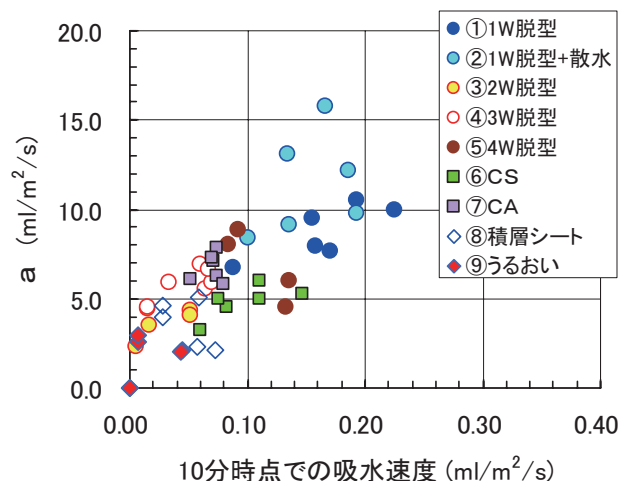


図-6 吸水速度と a の関係

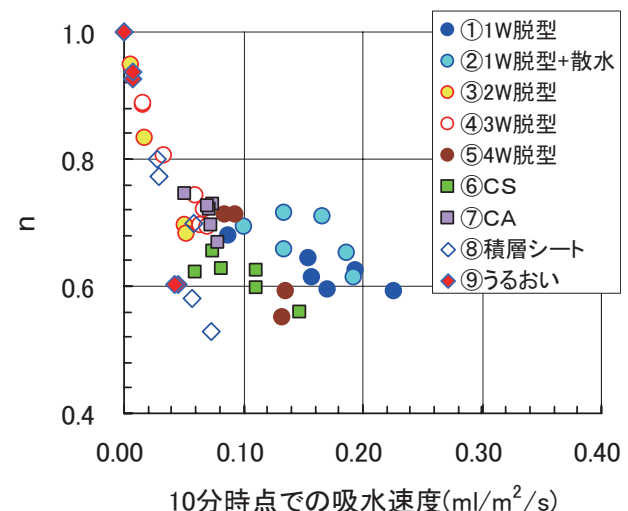


図-7 吸水速度と n の関係

§ 5. 他の非破壊検査

従来のテストハンマー法による測定結果を表-4に示す。測定（1点あたり20回）は吸水試験を行った近傍で実施している。実験ケース毎に実施した点数に差はあるものの、全体的に反発度Rのバラツキは小さかった。今回の実験では、追加養生を行なった壁で反発度Rが必ずしも大きくなることはなかった。

テストハンマー法と吸水速度の関係を図-8に示す。吸水速度と反発度Rに明確な相関はみられず、今回のような追加養生効果をテストハンマー法で評価することは困難であるように思われる。

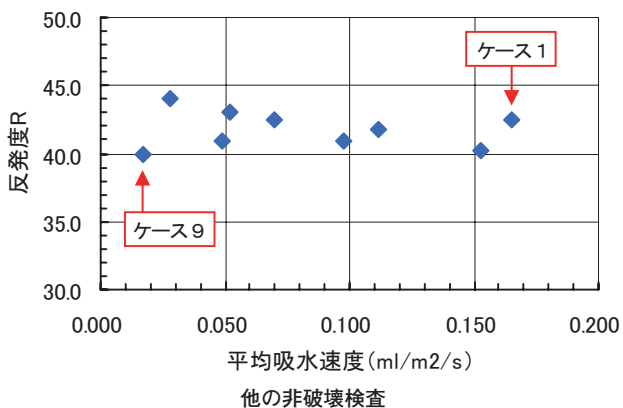
岡崎ら⁴⁾は養生条件がコンクリートの強度と物質移動抵抗性に与える影響を評価している。これによると、圧縮強度は水率率に依存するのに対し、養生条件の相違による空隙の連続性等の相違には、殆ど影響を受けないことを確認している。すなわち、今回の実験のような追加養生の効果は、圧縮強度に及ぼす影響よりも、耐久性に関する物質移動抵抗性に及ぼす影響が相当に大きいことが予想される。

以上のことから表面吸水試験方法は、コンクリート表層における物質移動抵抗性の変化を精度良く測定および評価できるシステムと思われる。

表-4 テストハンマー

実験ケース	反発度 R (点数)	f'28*) (N/mm ²)	備考
1	42.5 (10)	34.0 32.7	1 W脱型 (標準)
2	40.2 (3)		1 W脱型 + 散水
3	44.1 (6)		2 W脱型
4	43.0 (6)		3 W脱型
5	41.8 (6)		4 W脱型
6	40.9 (4)	33.3 34.0	A社 CS
7	42.5 (2)		B社 CA
8	40.9 (6)		積層シート
9	40.0 (5)		うるおい

*) 標準養生供試体



§ 6. まとめ

コンクリート構造物の品質向上を定量的に把握することを目的に、新たな表面吸水試験方法による評価を実際の新設構造物で試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①コンクリートの表層品質は、表面吸水試験方法で定量的に測定可能であった。
- ②養生を工夫することで、実構造物のコンクリート表層品質を向上させることができた。
- ③型枠の脱型時期を遅らせる養生方法は、現場条件によって最適な存置期間があることが示された。
- ④散水養生は散水開始のタイミングが重要であることが示唆された。
- ⑤脱型後の表面養生剤の塗布や養生マットの設置は、その効果を表面吸水試験方法で定量的に測定可能であり、かつ表層緻密化の特徴を把握できた。
- ⑥今回の実験の範囲内では「うるおい」養生が最も平均吸水速度が小さくなった。
- ⑦「うるおい」養生の壁の平均吸水速度は、標準施工のその約1/10であり、大幅な品質向上が図られることがわかった。
- ⑧表面吸水試験方法から得られる3つの指標を用いて、コンクリートの表層状態を多面的に把握できることが示された。
- ⑨表面吸水試験方法は吸水速度が小さいレベルでも、コンクリート耐久性に関する物質移動抵抗性を精度良く測定できる可能性が実証された。

謝辞：今回の実験に用いた表面吸水試験方法および表面吸水試験機は、細田暁・横浜国立大学大学院准教授および林和彦・同大学院特別研究教員が開発したものである。また、現場測定では研究室所属の多くの学生の皆様に大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 林 和彦, 細田 暁：コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1769-1774, 2011.
- 2) 硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法(案), 土木学会コンクリート標準示方書【規準編】.
- 3) 井上 翔, 秋山仁志, 岸 利治, 魚本健人：現場簡易透気試験による実構造物コンクリート表層の透気性評価とその相互比較, 第35回土木学会関東支部技術研究発表会 (V-057), 2008.
- 4) 岡崎慎一郎, 八木 翼, 岸 利治, 矢島哲司：養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究, セメントコンクリート論文集, No. 60, pp. 227-234, 2006.