

論文 養生水の種類がコンクリート構造物の力学性能および耐久性能に及ぼす影響に関する実験

齋藤 淳^{*1}・中島 史暁^{*2}・西田 孝弘^{*3}・大即 信明^{*4}

要旨: 湿潤養生は、打ち込んだコンクリートが性能を発揮するための極めて重要な作業である。本論文では、実構造物の鉛直面に対する湿潤養生を模擬した実験を行い、湿潤養生方法や、養生水の種類がコンクリート構造物の性能に及ぼす影響を評価した。実験結果から、型枠取外し後の給水養生は型枠存置による水分逸散抑制養生より耐久性能を向上できる湿潤養生方法であること、養生水に①海水を用いると中性化と塩害、②炭酸ナトリウムを用いると塩害、③納豆菌を用いると中性化に対する耐久性能を向上できることがわかった。

キーワード: 給水養生、水分逸散抑制養生、型枠存置、海水、納豆菌

1. はじめに

湿潤養生は、打ち込んだコンクリートが性能を発揮するための極めて重要な作業である。建設工事においては、仕様書等に従って施工を行うが、土木学会コンクリート標準示方書施工編（示方書）¹⁾や、日本建築学会建築工事仕様書・同解説（JASS5）²⁾には、透水性の極めて低いせき板（型枠）の存置は、給水養生に近いあるいは同等の湿潤養生と考えられるとする旨の記載がある。そのため、鉛直面等の湿潤養生は、一般的に型枠存置で実施されてきた。一方、筆者らは、橋脚や壁などの鉛直面やトンネル覆工のアーチ面に対する給水養生工法を開発し、型枠取外し後の給水養生の実施に取り組んでいる³⁾。

ここで、給水養生の養生水には水道水を用いることが多いが、養生水に用いる水溶液に関する規定は特に見当たらない。しかしながら、海水については、示方書において、十分に硬化して所要の強度および水密性が得られるまで、直接海水にあてることを避ける必要があり、この期間は普通ポルトランドセメントを用いた場合は5日間が標準であるとされている¹⁾。また、油、酸、塩類などコンクリートの表面を侵す物質の有害量を含んでいる水溶液を養生に用いてはならないとしている文献⁴⁾もあるものの、養生水の種類がコンクリートの性能に及ぼす影響を検討した事例は非常に少ない。

また、バクテリアは一般的にはコンクリートに悪影響を及ぼすとされているが⁵⁾、既往の文献⁶⁾では、コンクリートの改質や補修へのバクテリアの利用が先駆的な研

究事例として紹介されている。これらを踏まえ、海水やバクテリアの一種である納豆菌等の6種類の養生水を既成概念にとらわれずに選定し、検討することとした。

以上のことから、本論文では、実構造物の鉛直面に対する湿潤養生（型枠存置、型枠取外し後の給水養生）を模擬した実験を行い、湿潤養生方法や、給水養生に用いる養生水の種類が、コンクリート構造物の力学性能および耐久性能に及ぼす影響を実験結果に基づき評価した。

2. 実験概要

2.1 供試体

実構造物の鉛直面を逆T型供試体の壁部（高さ90cm、長さ90cm、厚さ10cm）で模擬した。また、φ10×20cmの円柱供試体、10×10×40cmの角柱供試体を作製した。供試体作製には、普通ポルトランドセメント（普通：N）を使用したレディーミクストコンクリートを用いた。コ

表-1 使用材料

材料	種 類	仕 様
セメント C	普通ポルトランド N	密度 3.15g/cm ³
細骨材 S	1 陸砂（70%） 茨城県行方産	密度 2.58g/cm ³ 吸水率 1.63%, F.M.2.50
	2 砕砂（30%） 栃木県佐野産	密度 2.69g/cm ³ 吸水率 1.44%, F.M.3.10
粗骨材 G	砕石 茨城県つくば産	Gmax20mm, 密度 2.69g/cm ³ 吸水率 1.19%, 実績率 60.0
混和剤 Ad.	AE 減水剤	リグニンスルホン酸塩と ポリカルボン酸塩の混合物

表-2 コンクリートの配合

セメント 種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S S1 S2	粗骨材 G	混和剤 Ad.
N	12.0±2.5	4.5±1.5	55.0	44.0	169	307	547 245	1038	3.28

*1 (株) 安藤・間 技術研究所土木研究部 博(工) (正会員)

*2 (株) 計測企画

*3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤専攻特定准教授 博(工) (正会員)

*4 東京工業大学 名誉教授 工博 (正会員)

表－3 養生条件

No.	名称	型枠取外し	型枠取外し後の養生方法
1	養生無し	材齢 1 日	気中養生
2	型枠存置	材齢 8 日	気中養生
3	水道水	材齢 1 日	材齢 8 日まで水道水で養生を行った後、気中養生
4	海水		材齢 8 日まで人工海水（表－4）で養生を行った後、気中養生
5	にがり		材齢 8 日までにがり（表－5）で養生を行った後、気中養生
6	酢酸 Mg		材齢 8 日まで 0.1mol/l 酢酸マグネシウム水溶液で養生を行った後、気中養生
7	炭酸 Na		材齢 8 日まで 1.0mol/l 炭酸ナトリウム水溶液で養生を行った後、気中養生
8	納豆菌		材齢 8 日まで納豆菌で養生を行った後、気中養生

ンクリートの使用材料を表－1 に、配合を表－2 に示す。

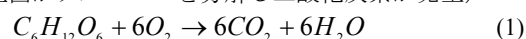
2.2 養生条件

供試体の養生条件は表－3 に示す 8 種類とした。給水養生を行う No.3～No.8 では、円柱供試体および角柱供試体は、各養生水に浸漬した。逆 T 型供試体は、壁部の一方の側面に給水養生装置を用いて各養生水を給水する養生を実施し、反対側面の型枠は存置しておき封かん状態を保った。養生状況を写真－1 に示す。

また、電着物を析出させる電着工法⁷⁾や炭酸化反応⁸⁾による耐久性向上効果が明らかにされていることから、これらと類似した反応を得る狙いで、以下の養生水を選定した。海水、にがりおよび酢酸マグネシウムは、マグネシウム化合物を析出させることを狙いとした。一方、炭酸化させる狙いに対しては、炭酸ナトリウムと納豆菌

を選んだ。なお、納豆菌は増殖に栄養素と酸素が必要であるため、最小培地である E9 培地を参考にした表－6 に示す栄養素を水溶液に混入し、エアレーションを行った。納豆菌に期待する炭酸化反応を式(1)～(3)に示す。

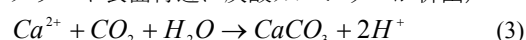
（納豆菌がグルコースを分解し二酸化炭素が発生）



（コンクリート表面付近にカルシウムイオンが生じる）



（コンクリート表面付近に炭酸カルシウムが析出）

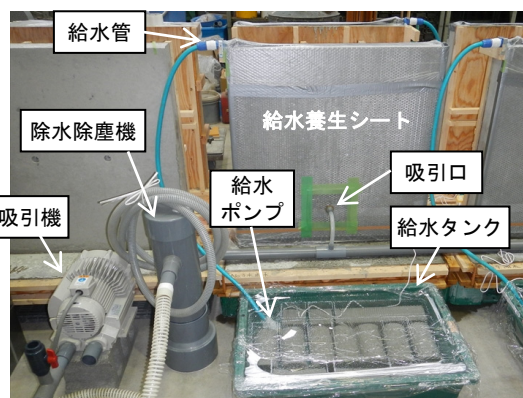


2.3 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表－7 に示す。湿潤養生方法と、養生水の種類に着目して評価するため、両者に共通する水道水を評価基準とした。なお、コア供試体とは、試験項目毎に逆 T 型供試体壁部の同じ高さから採取したコアのことである。

また、促進中性化試験および塩水噴霧試験における測定面は、角柱供試体では底面とした。コア供試体では各種養生を実施した端面を測定面とし、その他の面はエポキシ樹脂で被覆した。なお、塩水噴霧試験は、環境温度 50℃で、NaCl 濃度 3%の塩水を継続して噴霧した。

さらに、逆 T 型供試体に対して 2 種類の非破壊試験を実施した。まず、図－1 に示すダブルチャンバーを有する表面透気試験機（トレント法）を用いて、表層透気係数（KT 値）の測定を行った⁹⁾。測定にあたり、非破壊式



写真－1 供試体の養生状況

表－4 人工海水の組成

試薬名	単位量 (g/l)
塩化ナトリウム	24.54
塩化マグネシウム	11.10
硫酸ナトリウム	4.09
塩化カルシウム	1.16
塩化カリウム	0.69
炭酸水素ナトリウム	0.20

表－5 にがりの組成

試薬名	濃度
塩化マグネシウム	12.7%
硫酸塩	3.0%
臭化物	2.5%以下
亜鉛	70μg/g
カルシウム	0.1%以下
ナトリウム	2.6%以下
カリウム	1.0%以下
重金属	5μg/g 以下
砒素	1.0μg/g 以下

表－6 納豆菌の栄養素

試薬名	単位量 (g/l)
グルコース	20.0
塩化アンモニウム	7.0
リン酸水素二カリウム	0.5
硫酸マグネシウム	0.5
塩化鉄	0.031
塩化カルシウム	0.15
硫酸マンガン	0.1
ビオチン	0.0005

コンクリート水分計にて、コンクリート面の含水率が5.5%以下であることを確認した。表層透気係数の測定直後に、同じ位置で表面吸水速度の測定を行った。表面吸水速度は、表面が濡れた状態でなければ材齢28日程度以降において表層品質の違いを検知できるとされる指標であり、図-2に示す表面吸水試験機を用いて測定した¹⁰⁾。

2.4 実験結果および考察

(1) 外観観察

養生終了後の円柱供試体の表面色の相違を、色差計を用いてRGBで評価した。ここで、RGBとは、赤(Red)、緑(Green)、青(Blue)の3つの原色を混ぜて幅広い色を再現する方法である。RGBはそれぞれ0から255の値を取り、数値が大きい方が明るい色となる傾向がある。

標準板を基準にした測定結果を表-8に示す。水道水と型枠存置は非常に近い色調であり、海水は養生無しと近い色調で水道水より若干暗い色であることが定量的に確認できた。また、にがりの測定値は二桁であり最も暗い色であった。一方、納豆菌、炭酸ナトリウム、酢酸マグネシウムは明るい色調であった。

(2) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を図-3に示す。円柱供試体では、養生無しおよびにがりの強度が、基準とした水道水よりも15%以上低下していた。一方、コア供試体では、強度が15%以上低下したものはなかった。これは、円柱供試体は供試体の露出面全体で養生の影響を受けるが、逆T型供試体から採取したコア供試体は、端面しか養生の影響

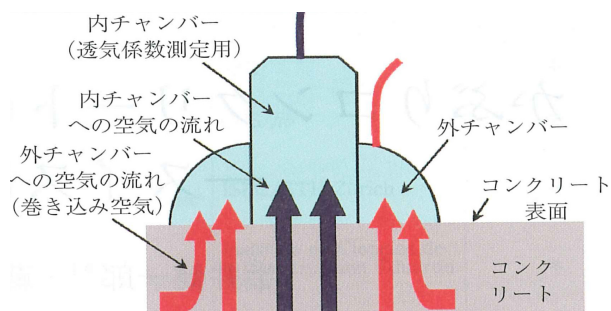


図-1 表面透気試験機の概要⁹⁾

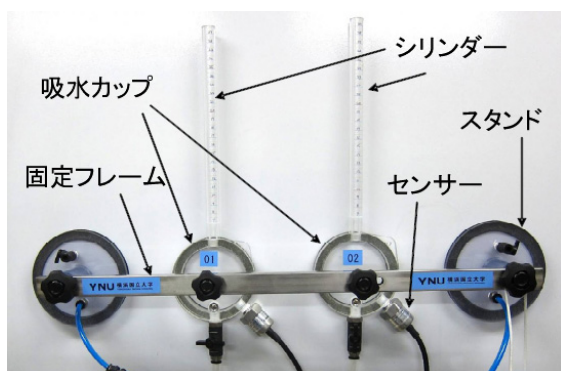


図-2 表面吸水試験機の外観¹⁰⁾

響を受けていないことから、養生の影響が小さくなったと考えられた。

(3) 促進中性化

促進中性化深さから $\sqrt{t}$ 則を用いて算出した中性化速度係数を図-4に示す。促進中性化試験は材齢28日に開始しており、図-4中の促進0日は、促進中性化試験開始前（材齢28日）の測定値を示している。また、図-4に示す中性化速度係数 A_{atm} は、既往の研究¹¹⁾に示されている式(4)を用いて促進中性化環境における中性化速度係数 A_{acc} を一般大気中での値に換算したものである。

$$A_{atm} = \frac{A_{acc}}{(0.742 - 0.224 \cdot \log(C_{acc})) \cdot \sqrt{C_{acc}/C_{atm}}} \quad (4)$$

ここで、 C_{acc} :促進中性化環境での CO_2 ガス濃度(=10%)、 C_{atm} :大気環境での CO_2 ガス濃度(=0.0351%)である。

角柱供試体およびコア供試体ともに以下の傾向を示していた。促進期間91日における中性化速度係数が、水道水よりも大きいものは、養生無しと型枠存置であった。一方、どの水溶液を用いた場合も、水道水と比較すると中性化速度係数が小さくなっており、特に海水、納豆菌

表-7 試験項目および試験方法

試験項目	供試体種類	試験方法
外観観察	円柱 φ10×20cm	色差計 材齢91日
圧縮強度	コア φ7.5×10cm	JIS A 1107 材齢28日
	円柱 φ10×20cm	JIS A 1108 材齢28, 56, 91日
促進中性化	コア φ10×10cm	CO_2 濃度10% 促進期間28, 91日
	角柱 10×10×40cm	CO_2 濃度10% 促進期間7, 28, 91日
塩水噴霧	コア φ10×10cm	NaCl濃度3% 噴霧期間28日
細孔径分布	円柱 φ10×20cm	水銀圧入式ポロソメータ 材齢91日
表層透気係数	逆T型供試体	トレント法 材齢91日
表面吸水速度	同じ位置	表面吸水試験機 材齢91日

表-8 色差計による測定結果

養生種類	色調	R	G	B
養生無し		126	125	111
型枠存置		134	132	115
水道水		135	134	119
海水		123	122	109
にがり		87	86	75
酢酸Mg		157	158	144
炭酸Na		163	158	133
納豆菌		144	142	124
(標準板)		245	245	244

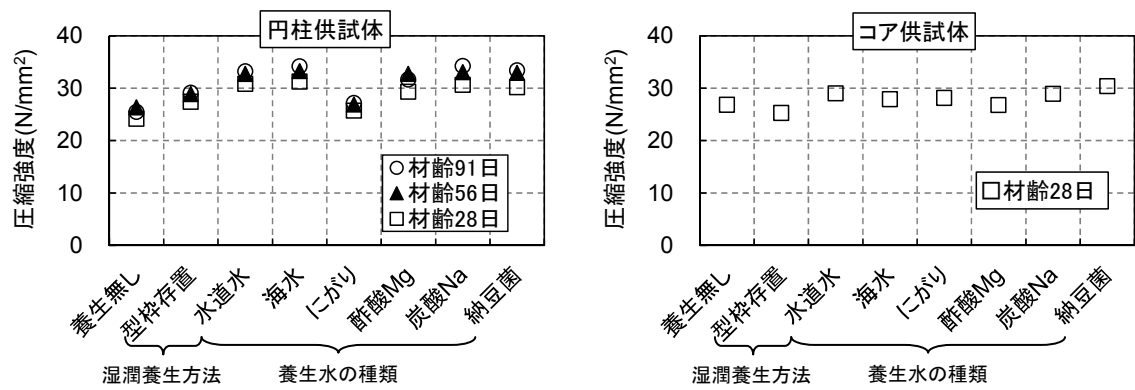


図-3 圧縮強度試験結果

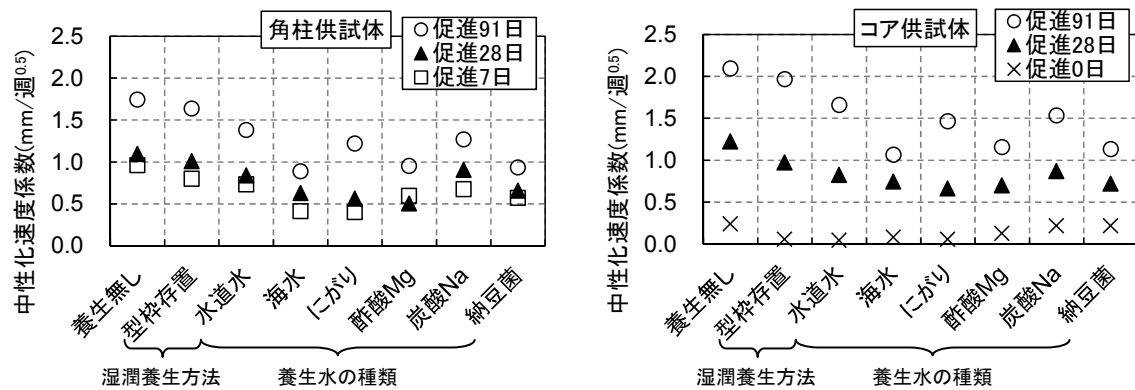


図-4 中性化速度係数（一般大気中の値に換算）

および酢酸マグネシウムが高い効果を示していた。なお、促進期間 28 日時点では、にがりの中性化速度係数が最小であったが、促進期間 28 日から 91 日にかけて大幅に大きくなっていた。

(4) 塩水噴霧

塩水噴霧の実施前および噴霧期間 28 日における塩化物イオンの浸透深さを、硝酸銀噴霧法¹²⁾にて測定した結果を図-5 に示す。供試体の切断面に 0.1mol/l の硝酸銀水溶液を吹き付けて自然乾燥させた後に、褐色から白色に変色した境界を塩化物イオンの浸透深さとした。この変色境界に対応する塩化物イオン量は、可溶性塩化物イオン量であり、その量は単位セメント量のおよそ 0.15% であるとされている。すなわち、本実験の供試体の単位セメント量は、307kg/m³であることから、およそ 0.5kg/m³以上の塩化物イオン量である深さを測定したこととなる。

水道水より浸透深さが浅いものは炭酸ナトリウムであった。一方、型枠存置および養生無しは、水道水より深くまで浸透していた。また、初期の塩分量を考慮すると、海水およびにがりは水道水より拡散が遅くっており、納豆菌は水道水と同程度であった。

(5) 細孔径分布

材齢 91 日に円柱供試体の高さ方向中央部を厚さ 2cm で輪切りに切り出し、側面から 1cm の区間を 2.5~5mm 程度に粉砕した後、ランダムに抽出した試料を測定に用

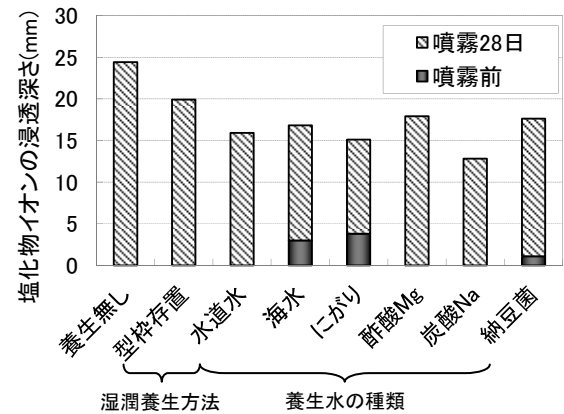


図-5 塩化物イオンの浸透深さ（コア供試体）

いた。試料は、粉砕後、直ちにアセトン浸漬および D-dry 乾燥によって水和を停止させた。

評価にあたっては、乾燥収縮、圧縮強度と関連が高いことが知られている細孔直径 50nm 未満、細孔直径 50nm 以上の細孔容積に着目した¹³⁾。なお、キャピラリー空隙を細孔直径 3nm~2000nm (2μm) と仮定し、これを総細孔容積とした。

養生種類と細孔容積の関係を図-6 に示す。このように区分すると、水道水と型枠存置が非常に類似した容積量を示していた。炭酸ナトリウムと酢酸マグネシウムは 50nm 未満の細孔が減少したことによって、総細孔量も減少していることがわかった。また、にがりは細孔が大

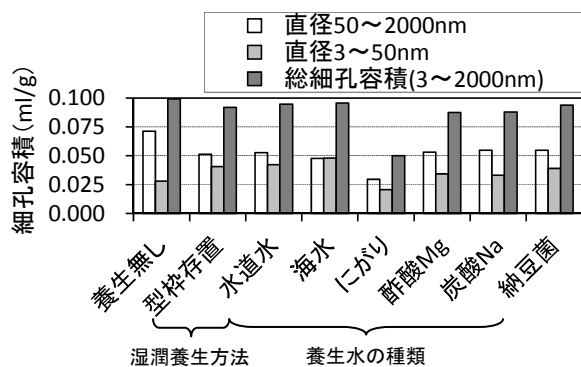


図-6 養生種類と細孔容積の関係

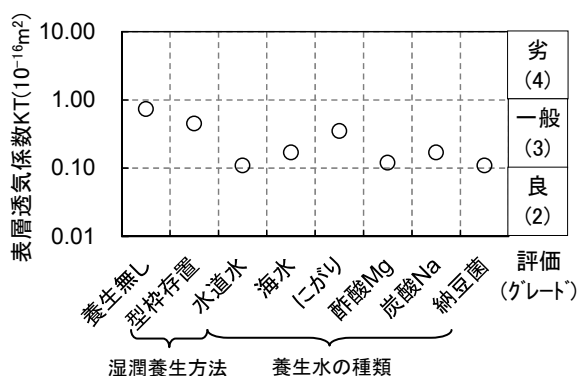


図-8 表層透気係数

表-9 10分時点の表面吸水速度による区分 (ISAT)

クラス	Low	Average	High
表面吸水速度 (ml/m ² /s)	<0.25	0.25-0.50	0.50<

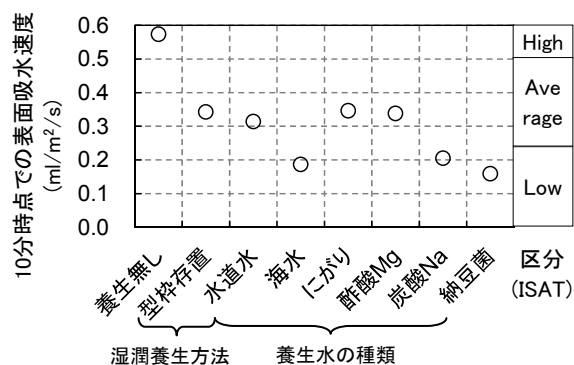


図-9 10分時点での表面吸水速度

幅に減少していた。にがり中の硫酸塩濃度は表-6に示したように3.0%であり、既往の研究¹⁴⁾において、2.5%硫酸マグネシウム中に浸漬した結果と同様の傾向であることから、硫酸塩による劣化作用によって細孔が減少した可能性があると考えられた。

また、細孔容積と圧縮強度の関係を図-7に示す。いずれの区分の細孔容積でも圧縮強度との相関が低く、直径50nm以上の細孔容積における決定係数 R^2 は0であった。したがって、細孔容積の差異は、水和反応の進展によるコンクリートの組織構造の緻密化ではなく、析出物

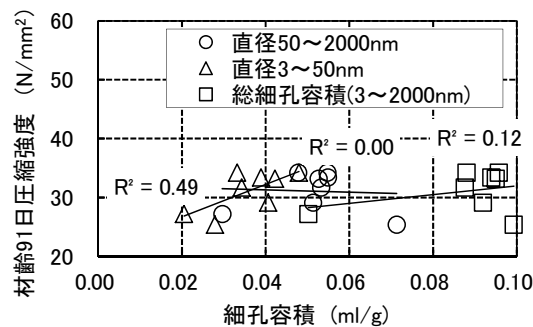


図-7 細孔容積と圧縮強度の関係

や炭酸化の作用によるものと考えられた。

(6) 表層透気係数

材齢91日における表層透気係数(KT値)の測定結果を5段階の評価区分¹⁵⁾とともに図-8に示す。養生無し、型枠存置およびにがりのKT値が、他の養生より大きいものの、いずれの養生も同じ評価グレードであった。

(7) 表面吸水速度

表層透気係数の測定後に、同じ場所の表面吸水速度を測定した。既往の研究¹⁶⁾において、本試験装置でされた10分時点での表面吸水速度は、表-9に示すBS 1881に規定されるInitial Surface Absorption Test(以下、ISAT)に対する品質評価基準¹⁷⁾と相互比較ができるとされている。そのため、10分時点での表面吸水速度の測定結果を図-9に示す。海水、納豆菌、炭酸ナトリウムが水道水より速度が遅くなっており、ISATによる品質評価基準における最も高品質なクラスであるLowに分類された。また、型枠存置、にがりおよび酢酸マグネシウムは水道水と同程度の速度でありAverageに分類され、養生無しはHighに分類された。

4. おわりに

本論文では、実構造物の鉛直面に対する湿潤養生を模擬した実験を行い、湿潤養生方法や、給水養生に用いる養生水の種類が、コンクリート構造物の力学性能および耐久性能に及ぼす影響を実験結果に基づき評価した。

本実験の範囲内ではあるが、各種養生がコンクリート構造物の力学性能および耐久性能に及ぼす影響を、水道水による給水養生と比較して表-10に示すとともに、得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 水道水に比較して、型枠存置の中性化速度係数および塩化物イオン浸透深さは劣っていた。すなわち、型枠取外し後の水道水を用いた給水養生は、型枠存置による水分逸散抑制養生より、コンクリート構造物の耐久性能を向上できる湿潤養生であることが確認された。これは、1章で述べた、建設工事において型枠存置を給水養生に近いあるいは同等の湿潤養

表－10 水道水による給水養生を基準とした各種養生がコンクリート構造物の性能に及ぼす影響評価

項目		養生無し	型枠存置	海水	にがり	酢酸 Mg	炭酸 Na	納豆菌
圧縮強度	円柱	△	—	—	△	—	—	—
	コア	—	—	—	—	—	—	—
中性化速度係数		△	△	○	—	○	—	○
塩化物イオン浸透深さ		△	△	○	○	△	○	—

【凡例】○：品質向上，△：品質低下，—：同等品質

生として扱っていることと異なる知見である。

- (2) 水道水に比較して，①海水は中性化速度係数および塩化物イオン浸透深さの両者，②炭酸ナトリウムは塩化物イオン浸透深さ，③納豆菌は中性化速度係数が優れており，コンクリートの耐久性能向上に資する養生水であると考えられた。この知見の発展を目指し，今後，さらなる実験を実施していく所存である。
- (3) 圧縮強度は，円柱供試体では養生無しおよびにがりでより 15%以上の強度低下が見られたが，コア供試体ではいずれの養生でも水道水と同程度の強度が得られていた。したがって，圧縮強度は構造物の耐荷力に直結する重要な指標であることから，コア供試体より安全側の評価となる円柱供試体を用いて，養生が及ぼす影響を慎重に評価する必要があると考えられた。

謝辞

納豆菌の評価にあたり，茨城県工業技術センター久保雄司氏にご指導をいただきました。また，本実験は，元東京工業大学学部生石原和輝氏のご協力により実施したものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，pp.121-272，2013.3
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015，pp.282-292，2015.7
- 3) 古川幸則，庄野昭，齋藤淳：型枠取りはずし後のコンクリート浸水養生工法（アクアカーテン）の開発ー鉛直壁面やトンネル覆工での給水養生ー，土木学会建設技術発表会 2011，pp.17-24，2011.11
- 4) 土木学会：土木施工なんでも相談室〔コンクリート工編〕2006 年改訂版，pp.266，2006.12
- 5) 中本至：下水道施設におけるコンクリート構造物の化学的劣化，土木学会論文集，No.472/V-20，pp.1-11，1993.8
- 6) 西脇智哉：バクテリアを利用したコンクリート，コンクリート工学，Vol.45，No.12，pp.52-56，2007.12
- 7) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリーNo.107，pp.177，2001.11
- 8) 坂井悦郎ほか：低熱ポルトランドセメント硬化体の炭酸化反応，Journal of the Ceramic Society of Japan，Vol.107，pp.561-566，1999.6
- 9) 今本啓一，下澤和幸，山崎順二，二村誠二：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.44，No.2，pp.31-38，2006.2
- 10) 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.82-97，2013.3
- 11) 西田孝弘，大即信明，小原弘毅：練混ぜ水として海水を用いたコンクリートの物質移動抵抗性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.685-690，2013.6
- 12) Otsuki, N., Nagataki, S., Nakashita, K.: Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials, ACI Material Journal / November-December, Title no.89-M64, pp.587-592, 1992.
- 13) Mehta, P. K., Monteiro, J. M.: Concrete; Microstructure, Properties, and Materials, Mc Graw Hill Education, pp.30-32, 2005.9
- 14) 小林和一，岡林茂生，片岡信裕：各種セメントの耐硫酸塩性に関する研究，セメント技術年報，XXVIII，pp.116-120，1974.
- 15) Torrent, R. J., Frenzer, G.: 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.
- 16) 土木学会：構造物表層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（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，pp.152-162，2012.7
- 17) Levitt, M.: Non-destructive Testing of Concrete by the initial surface absorption method, Proceedings of a Symposium on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber, London, pp.23-26, 1969.6