

論文 施工時の湿潤養生条件がコンクリートの力学・耐久性能に及ぼす影響の屋内曝露試験に基づく評価

齋藤 淳*1・大即 信明*2・西田 孝弘*3・福留 和人*4

要旨: コンクリートが所要の性能を発揮するためには、施工時に適切な湿潤養生を行うことが重要である。本論文では、各種セメントを用いて、円柱および壁状供試体を作製し、実施工を想定して材齢初期に様々な湿潤養生を施した後、屋内にて曝露試験を行った。その結果、型枠を所要期間存置する水分逸散抑制養生では所要の圧縮強度や中性化抵抗性が得られない場合があったが、型枠取外し時期を早めて給水養生を行うことがその対策として有効であることが明らかとなった。また、湿潤養生条件の相違による表層品質の差異は、テストハンマー強度で確認することは困難であったが、表面透気試験によれば相対評価は可能であった。

キーワード: 湿潤養生, 給水養生, 水分逸散抑制養生, 型枠存置, 5年間曝露

1. はじめに

コンクリート構造物の設計段階で設定された特性値（圧縮強度、中性化深さなど）を施工段階において満たすためには、コンクリートの打込み、締固めおよび仕上げ作業を適切に行った上で、コンクリート打込み後の一定期間、適切な湿潤養生を行うことが重要となる。土木学会コンクリート標準示方書施工編¹⁾（以下、示方書施工編と記す）では、セメント種類および日平均気温に応じて、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²⁾では、セメント種類および構造物の供用期間の級に応じて湿潤養生期間の標準値が示されている。この標準の湿潤養生期間が終了した時点ではセメントの水和は不十分であり、当然ながら、コンクリートの性能は特性値を満足していない。したがって、構造物の置かれる環境条件によっては、その後のセメントの水和反応が十分進行せず、特性値に達しない可能性も考えられ、条件によっては、湿潤養生期間の延長も必要といえる。

また、示方書施工編¹⁾および日本建築学会の暑中コンクリートの施工指針・同解説³⁾によれば、湿潤養生は給水養生が原則とされる。コンクリート構造物の鉛直面などの型枠を設置する部位に対する湿潤養生は、従来は型枠存置による水分逸散抑制養生が一般的であったが、近年、広範なコンクリート表面に対して給水が可能な給水養生方法⁴⁾などが開発され、比較的安価に実施可能な給水養生の施工例も増えてきている。しかしながら、湿潤養生方法の相違による効果の違いが明確になっていないことから、特性値の確保に必要な湿潤養生方法や期間などを、適切に選定することができない。

一方、施工時におけるコンクリート構造物の特性値の評価は、これまで主に管理用供試体を用いた破壊試験によって実施されてきたが、今後は実構造物を直接評価することができる非破壊試験の活用が増えると予想される。

以上のような観点から、著者らは、各種セメントを用いたコンクリートの短期的な力学・耐久性能に湿潤養生条件が及ぼす影響を明らかにしてきた⁵⁾。

本論文では、各種セメントを用いたコンクリートで、円柱供試体および実物大の壁状供試体を作製した。そして、実施工を想定して材齢初期に様々な湿潤養生を施し、その後屋内にて曝露する試験を行った。さらに、管理用供試体および実構造物の双方の観点から試験結果を評価し、施工時の湿潤養生条件がコンクリートの長期的な力学・耐久性能に及ぼす影響を明らかにした。

2. 湿潤養生条件が圧縮強度および中性化に対する抵抗性に及ぼす影響の管理用供試体による評価

2.1 供試体の作製方法

レディーミクストコンクリート工場で製造したコンクリートを使用して、φ100mm×高さ 200mm の円柱供試体を作製した。コンクリートの材料を表-1 に示す。セメントは、4 種類のポルトランドセメント（普通セメント：N、早強セメント：H、中庸熱セメント：M および低熱セメント：L）および 2 種類の混合セメント B 種（高炉セメント：BB およびフライアッシュセメント：FB）を使用した。なお、フライアッシュセメントは、コンクリートの練混ぜ時にフライアッシュ II 種を混和材として普通セメントに混合したもので代用し、フライアッシュ II 種の割合は単位結合材量の 18%とした。コンクリート

*1 (株)安藤・間 技術研究所土木研究部 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科国際開発工学専攻教授 工博 (正会員)

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

*4 石川工業高等専門学校 環境都市工学科教授 博(工) (正会員)

の配合は、表-2 に示す 7 種類とした。その内訳は、一般土木構造物を想定した 6 種類のセメントを用いた配合（以下、土木配合と記す）と、トンネル覆工用の配合（以下、トンネル配合と記す）とした。土木配合は、水結合材比、単位粗骨材量および混和剤添加率を一定とし、所要のスランブが得られるようにセメントの種類に応じて単位水量を増減した。なお、トンネル配合のセメント種類は高炉セメント B 種であるが、土木配合と区別するため、本論文では BBT と表記する。

2.2 供試体の養生方法

コンクリート供試体の養生条件を表-3 に示す。示方書施工編¹⁾に示される標準の湿潤養生期間（日平均気温 15℃以上）が経過するまで、型枠を存置するものを示方書養生と称し、普通、早強セメントおよび混合セメント B 種は、それぞれ、5 日、3 日、7 日間、型枠を存置した。中庸熱、低熱セメントについては、示方書施工編¹⁾に標準期間が示されていないため、セメントの圧縮強さが他のセメントと同等となる材齢を考慮し、それぞれ、9 日、

12 日間、型枠を存置するものを示方書養生とした。

短縮養生は、以下のように定めた。一般に、型枠取外しに必要な圧縮強度は、示方書養生よりも短い期間で得

表-1 使用材料

材料	種類		仕様
セメント C	ポルトランドセメント	普通	密度 3.16g/cm ³
		早強	密度 3.14g/cm ³
		中庸熱	密度 3.21g/cm ³
		低熱	密度 3.22g/cm ³
	高炉セメント B 種		密度 3.04g/cm ³
混和材	フライアッシュ F		JIS A 6201 II 種 密度 2.25g/cm ³
細骨材 S	1	陸砂 (70%) 茨城県鹿島産	表乾密度 2.60g/cm ³ 吸水率 1.20%, F.M.2.24
	2	砕砂 (30%) 栃木県佐野産	表乾密度 2.70g/cm ³ , 吸水率 1.18%, F.M.3.07
粗骨材 G	砕石 (Gmax20) 茨城県石岡産		表乾密度 2.67g/cm ³ 吸水率 0.55%, F.M.6.54
混和剤 Ad.	AE 減水剤		リグニンスルホン酸化合物
	AE 剤		界面活性剤

表-2 円柱供試体の配合

配合種別	セメント種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					粗骨材 G	混和剤 (B×%)
						水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S			
									S1	S2		
土木配合	N	8.0±2.0	4.5±1.5	55.0	43.1	157	286	—	561	241	1073	1.0
	H				42.9	159	289	—	556	238		
	M				43.5	156	284	—	569	244		
	L				43.7	154	280	—	575	246		
	BB				43.4	153	279	—	567	243		
	FB				43.5	151	225	50	569	244		
トンネル配合	BBT	15±2.0	4.5±1.5	60.0	46.5	164	274	—	600	257	1001	1.0

表-3 円柱供試体の養生条件

名称	養生条件			
	型枠存置期間	型枠取外し後の養生方法		
水中養生	全ての配合：1日	試験日まで20℃標準水中養生		
示方書養生	N:5日, H:3日, M:9日, L:12日, BB:7日, FB:7日, BBT:該当なし	材齢1年まで恒温恒湿室 (20℃, 相対湿度60%) に保管し, その後, 材齢5年まで屋内曝露 (温湿度管理なし)		
短縮養生	N:3日, H:1.8日, M:5.4日, L:7.2日, BB:4.2日, FB:4.2日, BBT:15時間			
給水養生	1W	土木配合の短縮養生と同様 (N:3日, H:1.8日, M:5.4日, L:7.2日, BB:4.2日, FB:4.2日)	1週間の20℃標準水中養生後	材齢1年まで恒温恒湿室 (20℃, 相対湿度60%) に保管し, その後, 材齢5年まで屋内曝露 (温湿度管理なし)
	2W		2週間の20℃標準水中養生後	
	3W		3週間の20℃標準水中養生後	
	1M	トンネル配合の短縮養生と同様 (BBT:15時間)	1ヶ月の20℃標準水中養生後	
	2M		2ヶ月の20℃標準水中養生後	
	3M		3ヶ月の20℃標準水中養生後	

られる。そこで、水結合材比 55%程度の配合で型枠取外しに必要な圧縮強度が得られる養生期間を考慮し、土木配合では型枠存置期間を示方書養生の 60%とした。また、トンネル配合では、トンネル工事における一般的な施工サイクルを考慮し、材齢 15 時間まで型枠を存置した。

そして、給水養生は、短縮養生と同一期間で型枠を取り外した後、標準水中養生を行うものとした。標準水中養生期間は、土木配合は 1 週間、2 週間および 3 週間とし、トンネル配合は 1 ヶ月、2 ヶ月および 3 ヶ月とした。

なお、比較のために、試験日までの全期間標準水中養生を行う条件（以下、水中養生と記す）も採用した。

2.3 試験方法

試験方法を表-4 に示す。力学性能は圧縮強度を評価した。試験材齢は、28 日、91 日、182 日、1 年および 5

年とした。一方、耐久性能は材齢 5 年の中性化深さを測定し、中性化に対する抵抗性を評価した。

2.4 実験結果

(1) 圧縮強度

水中養生の材齢 28 日圧縮強度の試験結果を表-5 に示す。ここでは、この値を配合強度と考える。なお、配合強度をレディーミクストコンクリートの規格（JIS A 5308）により設定した場合、設計段階で設定された圧縮強度の特性値は、配合強度の 8 割程度となる場合が多い。

また、水中養生の材齢 28 日圧縮強度に対する各養生条

表-4 試験方法

評価項目	試験方法
圧縮強度	JIS A 1108, 3本/材齢 材齢28日,91日,182日,1年,5年
中性化抵抗性	JIS A 1152, 1本/配合 材齢5年, 供試体の割裂面にて測定

表-5 水中養生の材齢 28 日圧縮強度

セメント種類	N	H	M	L	BB	FB	BBT
強度 N/mm ²	34.6	40.3	32.3	31.1	33.5	29.1	28.0

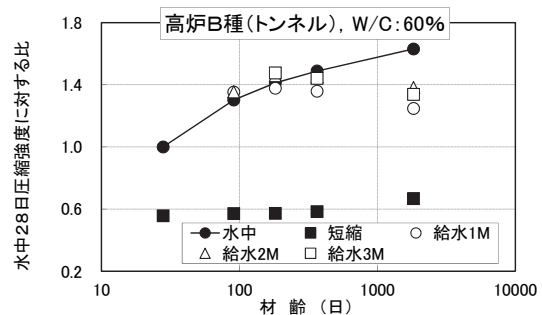
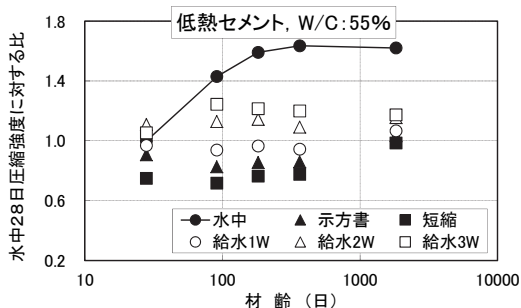
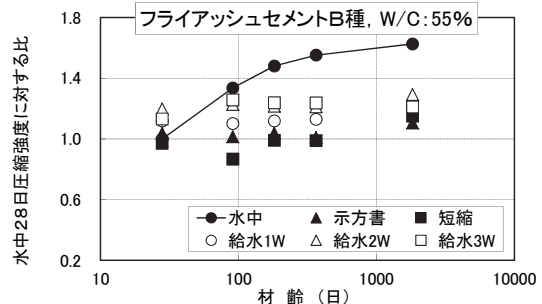
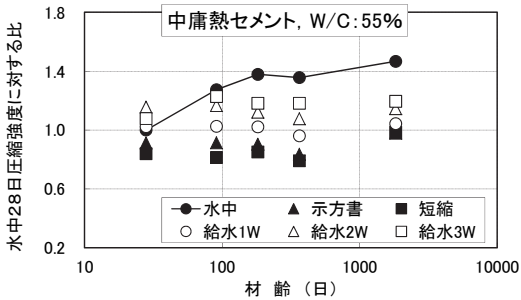
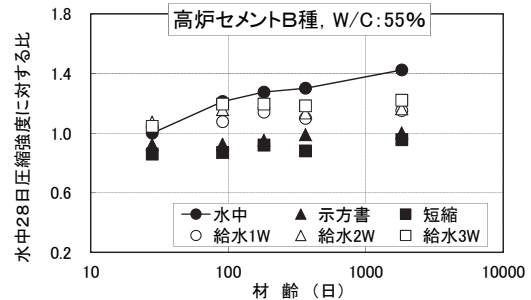
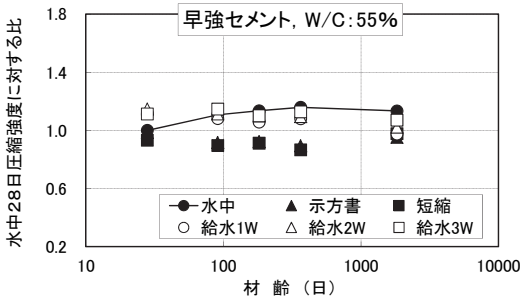
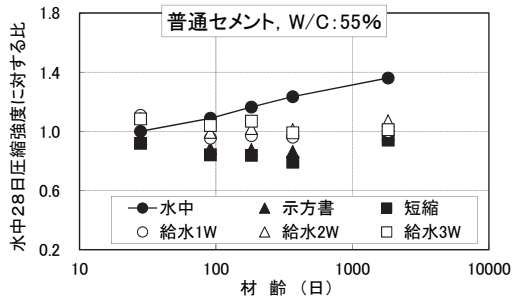


図-1 材齢と水中 28 日圧縮強度比の関係

件における圧縮強度の比と材齢の関係を図-1に示す。湿潤養生期間が長いほど、すなわち、短縮養生、示方書養生、給水養生1W(1M)、給水養生2W(2M)、給水養生3W(3M)の順で、圧縮強度が大きくなると予測されたが、試験結果も概ねその通りであった。水中養生を行った場合は、いずれのセメントでも材齢28日以降も強度増加がみられた。その他の養生では、セメントの種類や給水養生期間によって異なるが、材齢28日～91日頃に強度増加は停止してしまっただけで、本試験では、示方書養生および短縮養生において、材齢1年から5年にかけて強度が増加する結果が得られた。曝露試験を継続しているため、この結果の有意性は今後明らかにしたい。

また、給水養生の場合は、配合強度を概ね確保できているが、示方書養生および短縮養生の場合は、配合強度を下回る場合があることが確認された。なお、本論文では配合強度を材齢28日における水中養生の圧縮強度としたが、この材齢は、レディーミクストコンクリートにおける呼び強度を保証する材齢(以下、管理材齢と記す)と考えることができる。実構造物の施工において、セメント量低減による温度ひび割れ抑制対策などで、管理材齢を56日や91日に延長する場合がある。このようなコンクリートを開削、山岳およびシールドなどの各種トンネル、橋桁の下面や、建屋の屋内などの雨掛りのない構造物に用いる場合には、示方書養生や短縮養生では湿潤養生不足によって圧縮強度が想定した下限値を下回る危険性があること、その対策として給水養生が有効である

ことを、図-1は示している。

(2) 中性化抵抗性

材齢5年における中性化深さの測定結果を表-6に示す。いずれのセメントにおいても、概ね、湿潤養生期間が長くなるほど中性化深さが浅くなる傾向が認められた。すなわち、短縮養生の中性化深さが最も深く、示方書養生、給水養生1W(1M)、給水養生2W(2M)、給水養生3W(3M)の順に浅くなる傾向が確認された。

材齢100年における中性化深さの予測値と設計値を表-7に示す。予測値は、材齢5年の実測値に、この実測値から求めた中性化速度係数を用いて算出した今後95年間の中性化深さを加えたものとした。一方、設計値 y_d は、土木学会コンクリート標準示方書設計編⁶⁾に準拠し、以下の式(1)にて耐用年数 t を100年として算出した。

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \beta_e \cdot (-3.57 + 9.0W/B) \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、 γ_{cb} : 安全係数で1.15

β_e : 乾燥しやすい場合の1.6

W/B: 有効水結合材比(高炉スラグは70%、フライアッシュは0%を結合材とみなす)

予測値は、設計値よりも大幅に深くなった。コンクリート中の空隙が水で満たされると、中性化速度は非常に小さくなることが知られている⁷⁾。予測値は屋内曝露試験の結果から求めた値であるが、設計値を算出した式(1)は、普通セメントと中庸熱セメントを用いて作製した供試体を14日間水中養生した後、屋外に曝露した試験から求めた回帰式である⁸⁾。つまり、予測値は降雨の影響を受けない試験結果に基づいているが、設計値は降雨の影響を受ける試験結果に基づいていることが、このような結果となった一因であると考えられる。これは、雨掛りのない構造物においては、湿潤養生期間を延長するなどの対策の検討が必要なことを示している。

また、低熱セメントに対して湿潤養生を特に長くする必要性や、設計値算出におけるフライアッシュの結合材への換算割合を増やせる可能性が見出されたが、これらについては今後の検討課題としたい。

表-6 材齢5年における中性化深さの実測値

養生種別	材齢5年における中性化深さの実測値 (mm)						
	N	H	M	L	BB	FB	BBT
示方書	12.5	10.0	14.1	18.7	16.4	17.1	
短縮	14.0	11.3	16.4	17.7	16.6	17.0	35.6
給水1W	11.3	7.3	11.5	15.4	14.9	13.5	13.7
給水2W	11.3	6.9	10.0	14.4	13.4	12.8	12.9
給水3W	11.3	5.5	8.6	13.0	13.2	12.4	11.7

※BBTでは給水1W,2W,3Wを給水1M,2M,3Mと読みかえる。

表-7 材齢100年における中性化深さの予測値と設計値

養生種別	材齢100年における中性化深さの予測値と設計値 (mm)													
	N		H		M		L		BB		FB		BBT	
	予測値	設計値	予測値	設計値	予測値	設計値	予測値	設計値	予測値	設計値	予測値	設計値	予測値	設計値
示方書	67.0		53.6		75.6		100.2		87.9		91.6			
短縮	75.0		60.6		87.9		94.9		89.0		91.1		190.8	
給水1W	60.6	25.4	39.1	25.4	61.6	25.4	82.5	25.4	79.8	38.6	72.3	45.4	73.4	47.4
給水2W	60.6		37.0		53.6		77.2		71.8		68.6		69.1	
給水3W	60.6		29.5		46.1		69.7		70.7		66.5		62.7	

※BBTでは給水1W,2W,3Wを給水1M,2M,3Mと読みかえる。

3. 湿潤養生条件がテストハンマー強度および表層透気係数に及ぼす影響の実物大供試体による評価

3.1 供試体の作製方法

厚さ 300mm、高さ 900mm、長さ 7200mm の壁状供試体を作製した。コンクリートの配合条件は、水セメント比 55%、スランブ 8cm、空気量 4.5%とし、普通セメント (N) および高炉セメント (BB) を使用した表-8 に示す 2 種類のレディーミクストコンクリートを使用した。

3.2 供試体の養生方法

壁状供試体の片側側面を 1.2m づつに区切り、表-9 に示す養生を行った。その他の面 (側面、上面、端面) は塩ビフィルムをシリコン接着剤で貼り付け、封かん状態を保った。示方書養生は、2 章と同様に示方書施工編¹⁾に示される標準の湿潤養生期間 (日平均気温 15℃以上) が経過するまで、型枠を存置するものとし、普通セメントは 5 日間、高炉セメントは 7 日間、型枠を存置した。

一方、給水養生は、以下のように定めた。第一大戸川橋梁の事例⁹⁾などから、できるだけ早く型枠を取り外して給水養生を行うことが、コンクリートの性能向上につながる可能性があるが、水和熱上昇時に給水養生を行うと内部拘束型の温度ひび割れ発生の危険性が高まる場合もあると考え、型枠存置期間を 2 日、3 日および 4 日とし、その後、著者らが開発した鉛直壁面に対する給水養生方法⁴⁾で 1 週間の給水養生を行った。なお、本給水養生方法は、同一期間かつ同一温度の水中養生と同等の効果があることを、既往の研究¹⁰⁾で確認している。

3.3 試験方法

実構造物の表層コンクリートの性能評価を想定して、以下の 2 種類の非破壊試験を行った。力学性能はテストハンマー強度 (JSCE-G 504) で評価し、試験材齢は、28 日、91 日および 4 年とした。

一方、耐久性能は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、材齢 4 ヶ月および 4 年の表層透気係数で評価した。測定は、各養生方法に対し 2 箇所実施し、材齢 4 ヶ月および 4 年で同一箇所とした。また、測定箇所の高さは全て同じ高さとした。なお、測定前に、コンクリート用水分計 CMEX 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。

3.4 実験結果

(1) テストハンマー強度

テストハンマー強度の測定結果を図-2 に示す。どちらのセメントでも、材齢の経過とともにテストハンマー強度は増大した。しかし、湿潤養生条件の相違によって、テストハンマー強度に差異は認められなかった。

(2) 表層コンクリートの透気性

表層透気係数の測定結果を 5 段階の評価区分¹¹⁾とともに図-3 に示す。測定結果は 2 箇所の測定値の相乗平均

表-8 壁状供試体の配合

セメント種類	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (×C%)
	水 W	セメント C	細骨材 S		粗骨材 G	
			S1	S2		
N	159	289	555	247	1068	1.0
BB	155	282	560	250	1069	

表-9 壁状供試体の養生条件

名称		養生条件	
		型枠存置期間	型枠取外し後の養生方法
示方書養生		N:5日 BB:7日	材齢4年まで屋内曝露 (温湿度管理なし)
給水養生	R2	N, BB:2日	1週間の給水養生後、材齢4年まで屋内曝露 (温湿度管理なし)
	R3	N, BB:3日	
	R4	N, BB:4日	

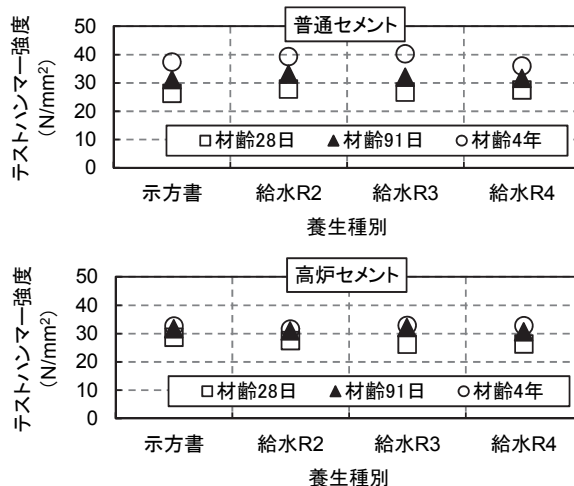


図-2 テストハンマー強度

で示した。普通セメントでは、給水養生を行うと、示方書養生より表層透気係数が小さくなった。しかし、型枠の取外し時期の相違による差異は認められなかった。

一方、高炉セメントでも、給水養生により表層透気係数が小さくなったが、その効果は普通セメントの場合より小さかった。なお、給水養生 R3 は、その他の測定結果と明らかに傾向が異なるため除外して考えた。

また、材齢 4 ヶ月と 4 年の測定結果を比較すると、どちらのセメントの場合も、材齢 4 年の測定結果の方が 5 ~ 10 倍程度大きい値となっており、評価区分に差異が生じる場合が確認された。これは、同一の表層品質を有するコンクリートでも、乾燥期間の増加に伴い表層透気係数が増大することを示していると考えられた。このことは、材齢 28 日まで標準水中養生を行った供試体に対する既往の研究¹²⁾でも言及されており、表面透気試験によって表層品質を評価する場合には、乾燥期間による補正を

行うなどの工夫が必要であると考えられた。ただし、乾燥期間の長短に関わらず、同一配合かつ同一材齢における表層品質の相対比較は可能であると考えられた。

4. おわりに

本論文では、施工時の湿潤養生条件がコンクリートの長期的な力学・耐久性能に及ぼす影響を評価するために、各種セメントを用いたコンクリートで、円柱供試体および実物大の壁状供試体を作製し、屋内曝露試験を行った。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 示方書養生（型枠を示方書施工編¹⁾の湿潤養生の標準期間存置）では、圧縮強度の特性値を確保できない危険性がある。給水養生（型枠取外し時期を示方書養生より早めてその後給水養生）を行うことで、工程への影響を最小限に留めて強度を増進できる。また、その効果は、給水養生期間が長いほど大きい。
- (2) 管理材齢 56 日や 91 日のコンクリートを用いる場合など、示方書養生では湿潤養生不足によって圧縮強度が想定した下限値を下回る恐れがある場合にも、給水養生が有効な対策となる。
- (3) 中性化に対する抵抗性は、給水養生を行うことで示方書養生よりも向上できる。また、その効果は、給水養生期間が長いほど大きい。
- (4) 示方書養生および給水養生によるテストハンマー強度の差異は認められなかった。よって、テストハンマー強度では、同一配合かつ同一材齢における表層品質の相違の評価は困難であると考えられる。
- (5) 給水養生を行うことで、示方書養生よりも表層透気係数が小さくなったが、型枠取外し時期の相違による差異は認められなかった。また、乾燥期間の増加に伴って、表層透気係数は増大してしまうことがわかった。しかしながら、表面透気試験は、同一配合かつ同一材齢における表層品質の相対評価は可能であると考えられる。

謝辞

表層透気係数の評価にあたり、(一財)電力中央研究所蔵重勲氏にご指導戴きました。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.121-125，2013.3
- 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，pp.270-277，2009.2
- 3) 日本建築学会：暑中コンクリートの施工指針・同解説，pp.106-116，2000.9

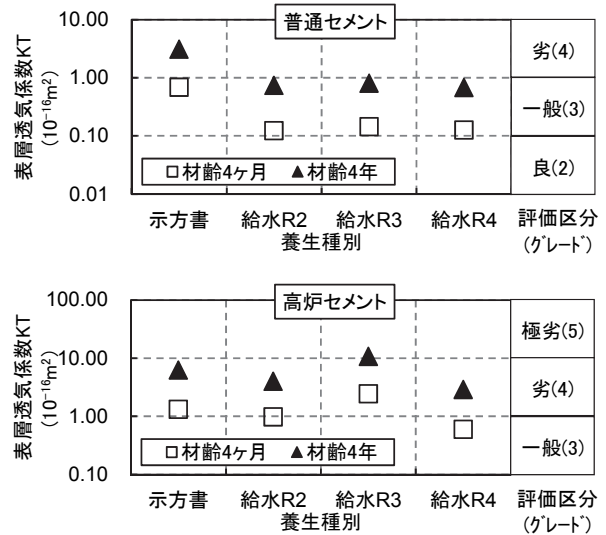


図-3 表層透気係数

- 4) 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—鉛直壁面やトンネル覆工での給水養生—，土木学会建設技術発表会 2011，pp.17-24，2011.11
- 5) 福留和人，古川幸則，庄野昭：各種セメントを用いたコンクリートの強度発現特性に及ぼす養生の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1307-1312，2010.7
- 6) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書【設計編】，pp.145-148，2013.3
- 7) 佐伯竜彦，大賀宏行，長滝重義：コンクリートの中性化の機構，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.563-568，1989.6
- 8) 土木学会：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究(最終報告)，コンクリートライブラリー64，pp.3-51，1988.3
- 9) 土木学会：構造物表面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（335委員会）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 80，pp.10-245，2008.4
- 10) 齋藤淳，庄野昭：水中・封かん・浸水養生したコンクリート円柱供試体圧縮強度の比較，土木学会第66会年次学術講演会，V-288，pp.575-576，2011.9
- 11) 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.
- 12) 早川健司，水上翔太，加藤佳孝：表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.68，No.4，pp.385-398，2012.12