

# コンクリートの乾燥収縮に及ぼす材齢初期の養生の影響

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○吉田 行  
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 嶋田 久俊  
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 安中新太郎

コンクリートは材齢初期に乾燥の影響を受けると収縮量が大きくなり、ひび割れが発生する確率が高くなる。コンクリートに生じた材齢初期のひび割れは、構造物の耐久性を低下させる要因となるため、ひび割れ防止に向けてコンクリートの収縮挙動を把握することは極めて重要となる。本研究では、材齢初期の湿潤養生期間や養生温度を変えたコンクリートを用いて乾燥収縮試験を行い、乾燥収縮に及ぼす材齢初期の養生の影響について検討した。

キーワード：ひび割れ、乾燥収縮、養生、質量変化

## 1. はじめに

コンクリートは、温度や湿度変化に伴い膨張や収縮挙動を示す。実際の構造物のように種々の拘束を受ける状況下においてコンクリートが収縮挙動を示した場合、コンクリートには引張応力が生じ、ひび割れが発生する可能性がある。特に、材齢初期に乾燥の影響を受けると収縮量が大きくなり、ひび割れが発生する確率が高くなる。コンクリート構造物に生じるひび割れは、構造物の耐久性を低下させる要因となるため、ひび割れ防止に向けてコンクリートの収縮特性を把握することは極めて重要となる。

本研究では、材齢初期の湿潤養生期間や養生温度を変えたコンクリートを用いて乾燥収縮試験を行い、材齢初期の養生条件が乾燥収縮に及ぼす影響について検討した。

## 2. 試験概要

### (1) コンクリートの配合と使用材料

試験で使用したコンクリートの配合を表-1に示す。配合は水セメント比 (W/C) を50%とし、目標スランプと空気量は土木構造物として一般的な8cm±2.5cm、4.5±1.0%とした。セメントは、普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm<sup>3</sup>、比表面積3,340cm<sup>2</sup>/g、以下、普通セメント(N)と記述) と高炉セメントB種 (密度3.05g/cm<sup>3</sup>、比表面積3,760cm<sup>2</sup>/g、以下、高炉セメント(B)と記述) の2種類を用いた。細骨材は、苫小牧樽前産の除塩された海砂 (密度2.67g/cm<sup>3</sup>、吸水率0.87%、粗粒率2.85) を、粗骨材は、小樽見晴産砕石 (密度2.68g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.45%、粗

骨材最大寸法25mm) を用いた。また、スランプと空気量を調整するために、AE減水剤 (リグニンスルホン酸塩系) とAE剤 (樹脂酸塩系) を用いた。

### (2) コンクリートの養生条件と試験材齢

表-2 に養生条件と試験実施または開始材齢の一覧を示す。養生条件として、養生温度は標準の 20°Cと低温養生を想定した 5°Cの 2水準、養生方法は実施工を想定して所定期間湿潤養生を行った後材齢 28 日まで気中養生を行う方法と、供試体の一部において所定期間水中養生を行う方法の 2水準とした。湿潤養生は、不織布製の養生マットを水道水で湿らせて供試体を覆う湿布養生とした。また、湿潤養生後の気中養生については、20°C養生では、温度 20±2°C、相対湿度 60±5%に、5°C養生では、温度 5±2°C、相対湿度 60±5%に制御された実験室内に静置することにより行った。なお、湿潤養生期間については、コンクリート標準示方書施工編に示されている湿潤養生期間の標準<sup>1)</sup>を考慮して、セメントの種類と養生温度の組合せに応じて3、5、7、9、12日から選定した。

### (3) 試験項目と方法

#### a) 圧縮強度および静弾性係数試験

コンクリートの基礎物性として、圧縮強度試験と静弾性係数試験を行った。圧縮強度試験は、JIS A 1108に準

表-1 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	W/C (%)	AE減水剤添加量 (C×%)	s/a (%)	コンクリート単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE剤 (C×%)
					W	C	S	G	
N50	N	50	0.15	44	145	290	843	1077	0.003
B50	B						840	1074	

表-2 養生条件と試験実施または開始材齢

記号	セメント	W/C	養生温度	養生条件	供試体	試験項目※	
						圧縮強度、 静弾性	乾燥 収縮
N50-20S3	普通 N	50%	20℃	湿布3日+気中25日	φ100×200mm	3.28	
					□100×400mm		3
N50-20S5				湿布5日+気中23日	φ100×200mm	5.28	
					□100×400mm		5
N50-20W				水中養生	φ100×200mm	28	
					□100×400mm		28
N50-5S5			5℃	湿布5日+気中23日	φ100×200mm	5.28	
					□100×400mm		5
N50-5S7				湿布7日+気中21日	φ100×200mm	7.28	
					□100×400mm		7
N50-5S9				湿布9日+気中19日	φ100×200mm	9.28	
					□100×400mm		9
N50-5W	水中28日	φ100×200mm	28				
		□100×400mm		28			
B50-20S5	高炉 B	50%	20℃	湿布5日+気中23日	φ100×200mm	5.28	
					□100×400mm		5
B50-20S7				湿布7日+気中21日	φ100×200mm	7.28	
					□100×400mm		7
N50-20W				水中養生	φ100×200mm	28	
					□100×400mm		28
B50-5S7			5℃	湿布7日+気中21日	φ100×200mm	7.28	
					□100×400mm		7
B50-5S9				湿布9日+気中19日	φ100×200mm	9.28	
					□100×400mm		9
B50-5S12				湿布12日+気中16日	φ100×200mm	12.28	
					□100×400mm		12
N50-5W	水中28日	φ100×200mm	28				
		□100×400mm		28			

※表中の数値：強度・静弾性は試験実施材齢、乾燥収縮は試験開始材齢

扱って実施し、併せて、JIS A 1149に準拠してコンプレッソメータを用いて静弾性係数を測定した。供試体は直径100×200mm円柱供試体を用いた。

b) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、JIS A 1129-3に準拠したダイヤルゲージ法で行った。供試体は、100×100×400mmの角柱供試体を用い、供試体両端面の中央にゲージプラグが配置されるようあらかじめゲージプラグを型枠に設置し、コンクリートを打ち込んで成形した。所定期間の湿潤養生直後に基長を測定し、各温湿度環境に設定した実験室に静置して、乾燥開始後7、28、56、91日にひずみと質量変化を測定した。

3. 試験結果および考察

(1) 圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

図-1 に各養生後の圧縮強度を示す。なお、凡例の「湿潤養生→気中養生後」とは、所定日数湿布養生後に材齢 28 日まで気中養生を行った後、圧縮強度試験を実施したケースである。

セメントの種類で比較すると、いずれの養生条件においても普通セメントの方が高炉セメントよりも圧縮強度は高かった。

養生条件の違いでは、湿潤養生直後（水中養生後含む）の圧縮強度は、いずれも湿潤養生期間（材齢）が長く、養生温度が高いほど強度は増加することが確認できる。

一方、試験材齢 28 日に着目すると、20℃養生では、いずれのセメントでも材齢初期の湿潤養生期間が長くなるにしたがい圧縮強度は概ね微増した。これに対して、5℃養生ではセメントの種類により若干傾向が異なった。普通セメントの 5℃養生では、材齢初期の湿潤養生 5 日から 7 日で強度は大きく増加したものの、湿潤養生 7 日以降は水中養生や 20℃養生とほぼ同程度となった。一方、高炉セメントの 5℃養生では、材齢初期の湿潤養生期間によらず材齢 28 日強度はほぼ同程度となったが、全体的に 20℃養生よりも 5N/mm<sup>2</sup>程度低かった。なお、高炉セメントの 5℃養生で気中養生した材齢 28 日の供試体の強度が水中養生よりも増加しているのは、気中養生期間の乾燥の影響を受けたためであり、供試体の乾燥による見かけの強度の増加<sup>2)</sup>が低温下における強度の増加を上回ったためと考えられる。

以上から、圧縮強度は養生温度や材齢初期の湿潤養生期間により異なり、初期の湿潤養生期間を適切に確保することで水中養生材齢 28 日と同程度の強度を確保することが確認できた。なお、湿潤養生直後の圧縮強度は、普通セメントでは 20℃養生 5 日と 5℃養生 9 日、高炉セメントでは 20℃養生 7 日と 5℃養生 12 日が同程度で、これらの養生日数は北海道開発局道路・河川工事仕様書に示された湿潤養生期間の標準日数（土木学会コンクリート標準示方書施工編と同じ）そのものであり、特に低温下では仕様書に準拠して確実に養生を行う重要性が確

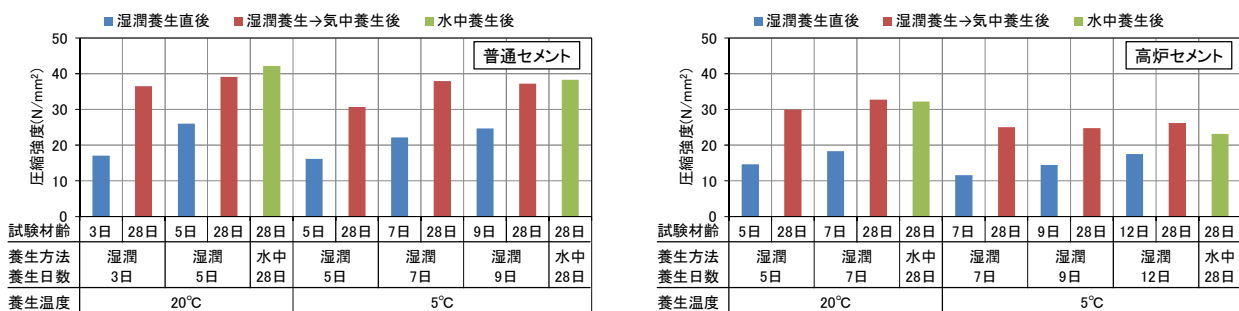


図-1 各養生後の圧縮強度

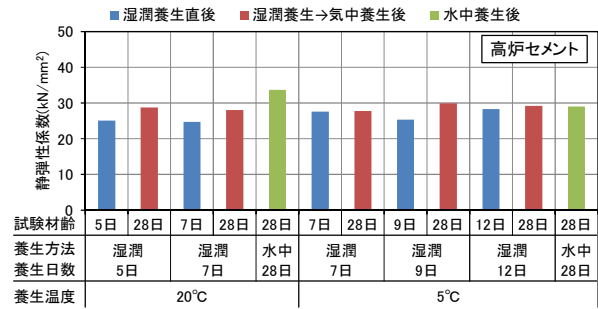
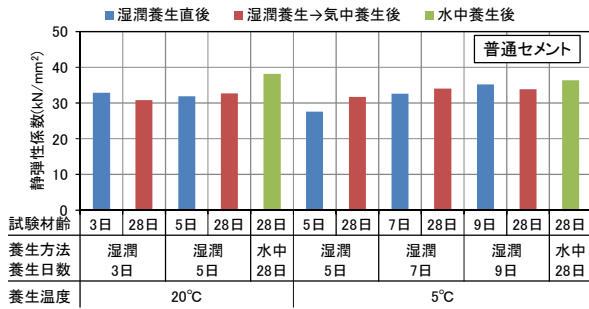


図-2 各養生後の静弾性係数

認できる。

### (2) 静弾性係数に及ぼす養生条件の影響

図-2 に各養生後の静弾性係数をそれぞれ示す。

材齢初期の湿潤養生期間の影響は圧縮強度より顕著ではないものの、普通セメントの 5°C養生で、湿潤養生直後の静弾性係数が湿潤養生期間の増加（材齢の進行）とともに微増した。しかし、全体としては、湿潤養生期間と静弾性係数の関係は明確ではなかった。

なお、図-3 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示すが、圧縮強度の増加に伴い静弾性係数が増加傾向にあり、セメントの種類や養生条件によらず、土木学会のコンクリート標準示方書に示されている圧縮強度から求められる静弾性係数の値<sup>3)</sup>を概ね上回っており、土木学会式により安全側で照査できることを確認した。

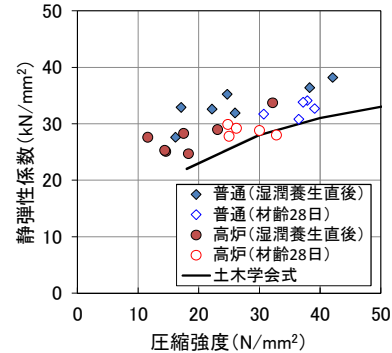


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

### (3) 乾燥収縮に及ぼす養生条件の影響

#### a) 乾燥収縮ひずみ

図-4 に 20°C養生、図-5 に 5°C養生した供試体の乾燥に伴うひずみと乾燥期間の関係をそれぞれ示す。マイナスのひずみは収縮を意味している。なお凡例は湿布あるいは水中養生期間を示しており、各供試体は、所定期間の湿布あるいは水中養生直後から乾燥を開始している。

20°C養生の場合、普通セメントでは、湿潤養生期間が最も短い湿布養生 3 日後から乾燥を開始した供試体の収縮ひずみが最大となったが、湿布養生 5 日と水中養生 28 日とでは大きな差はみられず、乾燥期間 91 日で概ね 500 $\mu$  程度となり、初期養生の違いによるひずみ差は最大で 60 $\mu$  程度だった。一方、高炉セメントでは、湿潤養生期間による差は小さいが、水中養生 28 日の供試体は乾燥期間 28 日以降の収縮ひずみが 40 $\mu$  程度低減した。なお、セメントの種類で比較すると、乾燥期間 28 日までは高炉セメントの方が 50 $\mu$  程度収縮ひずみは大きくなったが、それ以降はセメントの種類による差はほとんどなかった。

これに対して、5°C養生の場合、普通セメントでは、湿布養生 7 日後から乾燥を開始した供試体の収縮ひずみが他の養生条件よりも 50 $\mu$  程度小さかったが、その他の供試体では初期養生の違いによるひずみ差はほとんど

確認できなかった。一方、高炉セメントでは、水中養生 28 日の収縮ひずみが最小（約 440 $\mu$ ）となり、湿布養生 7 日と 12 日が同程度（約 500 $\mu$ ）で、湿布養生 9 日が最大（約 550 $\mu$ ）となり、湿潤養生期間の違いによりひずみに差がみられた。

以上から、材齢初期の養生条件が乾燥収縮に及ぼす影響は、20°Cで養生した場合はいずれのセメントでも小さく、5°Cで養生した場合でも普通セメントは比較的小さいが、高炉セメントは低温下で大きいことを確認した。しかし、乾燥収縮ひずみと材齢初期の湿潤養生期間との間に一意的な傾向は確認できなかった。

#### b) 質量変化率

図-6 に 20°C養生、図-7 に 5°C養生した供試体の乾燥に伴う質量変化率をそれぞれ示す。

いずれの養生条件においても、乾燥初期の質量減少が大きいことがわかる。また、セメントの種類や養生温度によらず、材齢初期の湿潤養生期間が短いものほど乾燥に伴う質量減少が大きかった。特に、高炉セメントは普通セメントよりも質量減少が大きく、湿潤養生期間の違いによる差も大きかった。なお、20°C養生よりも 5°C養生の方が質量減少率が小さいのは、温度が低いほど飽和水蒸気量が小さいため、同じ相対湿度環境下では乾燥に伴い逸散する水分の量が少なくなるためである。

以上から、乾燥に伴う供試体の質量変化は、材齢初期の湿潤養生の影響を受け、材齢初期の湿潤養生期間が長いほど乾燥しにくくなることを確認した。

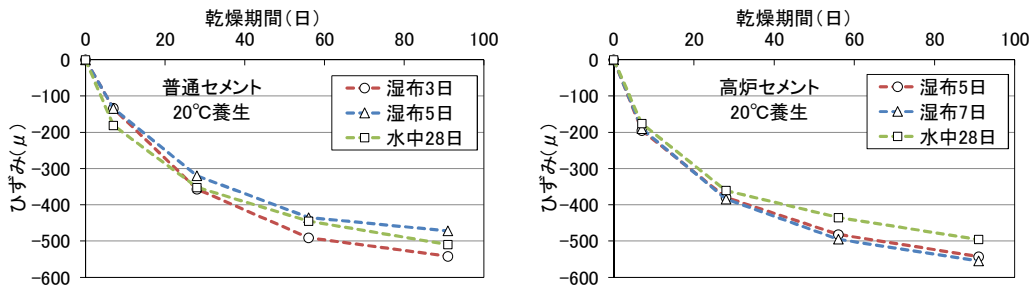


図-4 乾燥に伴うひずみと乾燥期間の関係 (20°C養生)

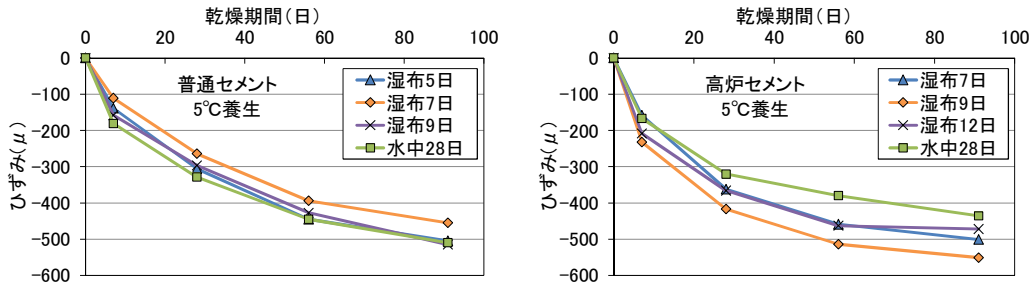


図-5 乾燥に伴うひずみと乾燥期間の関係 (5°C養生)

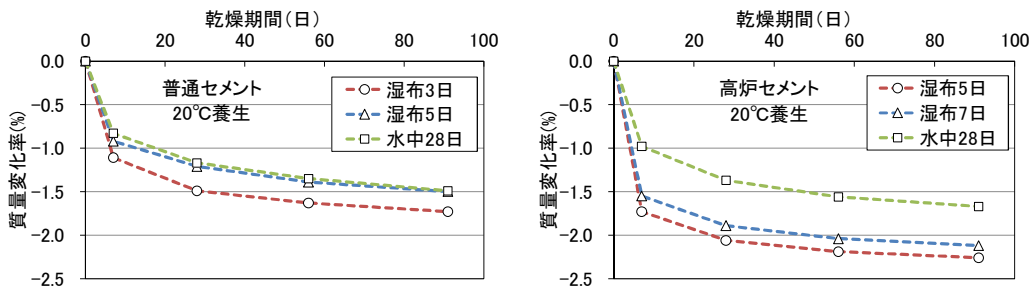


図-6 乾燥に伴う質量変化率 (20°C養生)

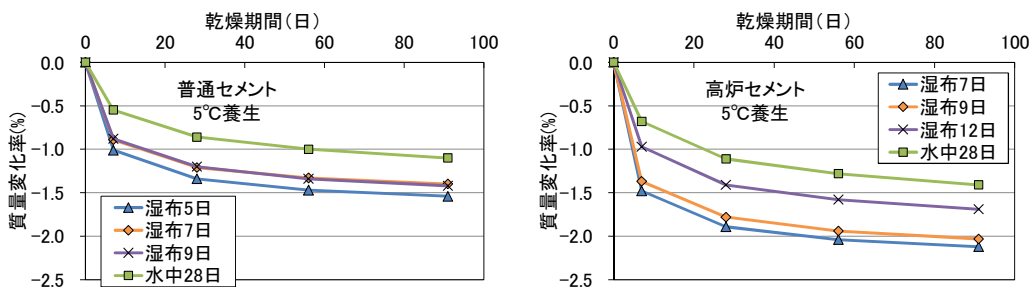


図-7 乾燥に伴う質量変化率 (5°C養生)

### c) 乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係

図-8 に 20°C養生、図-9 に 5°C養生した供試体の乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係をそれぞれ示す。

いずれも質量の減少に伴い、収縮ひずみは増大している。20°C養生では、セメントの種類によらず、材齢初期の湿潤養生期間が長いほど質量変化が抑制され、水中養生 28 日は最も質量変化が小さいが、同時に、質量変化率が同じ場合、湿潤養生期間が長いほどひずみが大きくなる傾向が確認され、既往の研究<sup>4)</sup>でも同様の傾向が報告されている。

これについて、乾燥収縮のメカニズムとして比較的よく用いられている毛細管張力説<sup>5)</sup>によると、コンクリート細孔内の水分が逸散する際に毛細管張力は、細孔径が小さいほど大きくなる。材齢初期の湿潤養生期間が長いコンクリートは細孔が緻密になり、質量変化率が同じ場合、より多くの緻密な細孔から水分が逸散することになるため、毛細管張力が大きくなり、結果として収縮ひずみは大きくなると考えられる。一方、細孔が緻密なコンクリートほど細孔内の水分は逸散しにくくなるため、結果として収縮ひずみが小さくなる効果もある。このよう

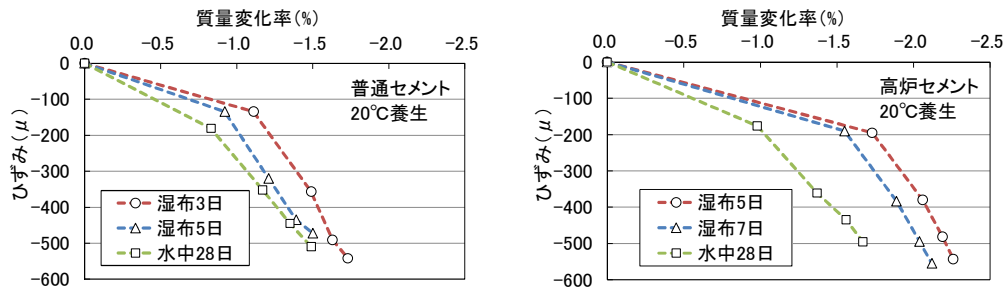


図-8 乾燥収縮ひずみ質量変化率の関係 (20°C養生)

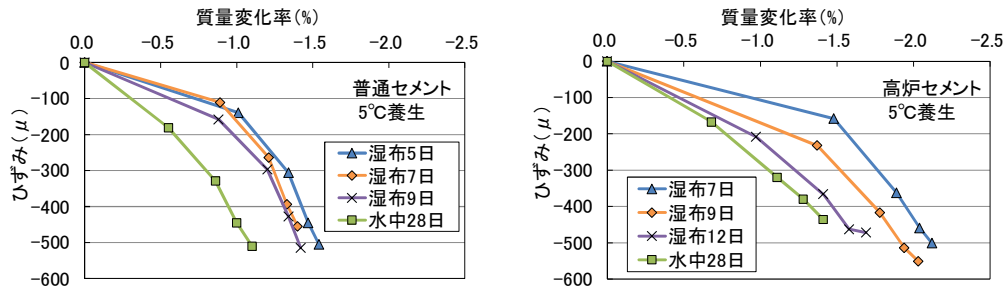


図-9 乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係 (5°C養生)

に、収縮ひずみは、水分が逸散する細孔の大きさと、逸散する水分の量の両方を考慮する必要がある。

本試験結果は、前述のように、材齢初期の湿潤養生期間が長いほど質量減少が抑制されていることから、細孔は緻密になっていると考えられる。また、湿潤養生期間が長いほど質量変化率あたりの乾燥収縮ひずみは増大しており、細孔が緻密になっていることを考慮すると、この現象は毛細管張力説により説明することができる。

一方、乾燥収縮ひずみと材齢初期の湿潤養生期間との間に一意的な傾向はみられなかったが、これは湿潤養生による細孔の緻密化に伴い水分が逸散しにくくなるプラスの効果と、緻密化に伴い水分が逸散する際に生じる毛細管張力の増大により収縮が大きくなるマイナスの影響が相互に作用し、より影響の大きい方に結果がシフトしたためと考えられる。

以上から、材齢初期の湿潤養生期間が長いほどコンクリートの水分逸散は抑制され、強度発現や乾燥を抑制する観点からは湿潤養生期間の延長は有効であるが、実際の乾燥収縮量は、水分が逸散する細孔の大きさも考慮する必要があることを確認した。

#### 4. まとめ

本研究では、コンクリートのひび割れ防止に向けてコンクリートの収縮特性を把握することを目的として、材齢初期の養生がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響について検討を行った。

その結果、材齢初期の湿潤養生はコンクリートの水分逸散の抑制に寄与するため、圧縮強度の確保や乾燥を抑制する観点から大変重要であるが、実際に生じる乾燥収縮量は細孔の緻密化に伴う毛細管張力の影響を受けることから、コンクリートの収縮特性を評価するにはさらに詳細な検討が必要である。

なお、実構造物においては、実際にひび割れが生じるか否かが重要であり、コンクリートに生じる収縮ひび割れについては、コンクリートの収縮特性だけでなく強度や弾性係数、鉄筋による拘束等を含めて検討する必要がある。今後は、収縮特性に加え、拘束条件下における収縮ひび割れ挙動や、ひび割れを抑制するための具体的な対策について検討を行う。

#### 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：施工標準〕、pp.121-123、2013.3
- 2) 福留和人、古川幸則、庄野昭：コンクリートの強度発現に及ぼす湿潤養生条件の影響評価手法に関する研究、土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)、Vol.67、No.1、pp.18-27、2011
- 3) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕、p.39、2013.3
- 4) 郭度連、國府勝郎、宇治公隆、上野敦：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす水セメント比および養生条件の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、2003
- 5) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書、pp.51-54、1996.11