

# コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす 骨材の物理・化学的性質

上原 元樹\* 鶴田 孝司\*  
水野 清\* 佐藤 隆恒\*

## Effect of Physicochemical Properties of Aggregates on Dry Shrinkage of Concrete

Motoki UEHARA Koji TSURUTA Kiyoshi MIZUNO Takatsune SATO

The relationship between the physicochemical properties of the aggregates and the dry shrinkage of concrete was investigated. The amount of dry shrinkage depends on Young's modulus of the coarse aggregate, the water absorption rate, and the amount of clay lumps of the fine aggregates. Washing of the aggregates reduced the amount of clay lumps in the aggregates and caused a reduction of about 100  $\mu$  in the dry shrinkage of concrete. The abovementioned reduction in the dry shrinkage was almost equal to that in the case of concrete containing a shrinkage reducing agent.

キーワード：乾燥収縮，ひび割れ，骨材，粘土塊量

### 1. はじめに

近年、建設後間もないコンクリート構造物において、乾燥収縮によると考えられるひび割れが生じ、問題となっている。コンクリートの乾燥収縮に関して有効な対策を実施していくためには、乾燥収縮の要因に関して定量的に把握し、管理することが必要である。乾燥収縮の要因には、セメントや骨材等の使用材料に起因するもの、単位水量等のコンクリート配合に起因するもの、部材形状等の構造に起因するもの、その他養生条件を含めて環境要因に起因するものが考えられる。この中で、管理項目が明確になっておらず、特に地域格差が大きいものとして、骨材の物理・化学的性質に起因した乾燥収縮が挙げられる。

近年、骨材の物理・化学的性質に起因した乾燥収縮が原因と考えられるひび割れの例として、垂井高架橋の事例<sup>1)</sup>を発端として種々の研究が行われてきた。現在までに、石灰石骨材の乾燥収縮量が小さいことがわかっており、骨材の観点からは、乾燥収縮の有効な低減法として石灰石の使用が進められている。しかし、石灰石は地域によって入手しづらくコストが増大することや安定した骨材資源の確保の観点からも、石灰石以外の骨材を有効に利用することも必要である。従来、骨材の物理・化学的性質と乾燥収縮との関係は、乾燥収縮量が極端に

小さくなる石灰石骨材とそれ以外の骨材の対比が行われてきた。その結果、粗骨材のヤング係数や比表面積の相違が乾燥収縮に与える影響が大きいとされている<sup>2) 3)</sup>が、石灰石以外の比較的乾燥収縮が大きくなる骨材において、その各性質と乾燥収縮量との相関は明らかになっていない。

表 1 骨材の分類表

粗骨材	
試料名	主な岩種
GO1	砂岩
GO2	安山岩 (変質), 流紋岩 (変質), 砂岩 (多孔質), 砂岩
GO3	砂岩
GO4	安山岩, 流紋岩砂岩
GT1	片岩, 閃緑岩 (変質)
GT2	安山岩
GT3	安山岩 (変質)
GT4	流紋岩
GH	細粒砂岩
細骨材	
試料名	主な岩種と鉱物粒
SO1	砂岩, 流紋岩, 輝石粒, 石英粒, 長石粒
SO2-1	安山岩, 砂岩, 長石粒, 石英粒
SO2-2	泥岩, 砂岩, チャート, 石英粒, 長石粒
ST1	花崗岩, 石英片岩, 石英粒, 長石粒
ST2	片岩, 角閃岩, ホルンフェルス
ST3	花崗岩, 閃緑岩, 石英粒, 長石粒
ST4	石灰岩, ドロマイト粒
SH	チャート, 流紋岩, 安山岩, 石英粒, 輝石粒

GH, SH は比較用

\* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

## 特集：材料技術

本研究では、実際に乾燥収縮によるひび割れが生じた高架橋構造物で用いられた主に石灰石以外の骨材を対象として、その物理・化学的性質と乾燥収縮ひずみとの相関について検討を行った。また、乾燥収縮ひび割れへの対策として、骨材の性質に着目した手法について検証を行った。

## 2. 骨材の物理・化学的性質と乾燥収縮ひずみ量との相関

### 2.1 骨材の各種性質の検討

#### 2.1.1 試験骨材

本試験に使用した骨材は、実際に乾燥収縮によるひび割れを生じた構造物で用いられた骨材として粗骨材 8 種類、細骨材 7 種類および比較用として乾燥収縮が問題となっていない粗骨材 1 種類、細骨材 1 種類の、合計粗骨材 9 種類、細骨材 8 種類である (表 1)。

#### 2.1.2 各種試験方法

各骨材について、偏光顕微鏡および粉末 X 線回折法により構成岩種・鉱物組成を同定し、表乾密度、絶乾密度、吸水率、微粒分量、粘土塊量、比表面積、累加細孔容積を測定した。測定手法は以下の通りである。

各骨材の表乾密度、絶乾密度、吸水率は、粗骨材に関

しては JIS A 1110「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」、細骨材に関しては JIS A 1109「細骨材の密度及び吸水率試験方法」に準じて算出した。比表面積および累加細孔容積は自動比表面積/細孔分布測定装置を用いて窒素吸着による BET 法で測定した。また水蒸気吸着による比表面積を、今井らが提案している比表面積測定試験方法<sup>3)</sup>に基づいて測定した。微粒分量は JIS A 1103「骨材の微粒分量試験方法」に準じて、粘土塊量は JIS A 1137「骨材中に含まれる粘土塊量の試験方法」に準じて行った。構成岩種・鉱物組成の判定は、肉眼観察、粉末 X 線回折および偏光顕微鏡観察により実施した。

#### 2.1.3 試験結果

表 2 および表 3 に粗骨材および細骨材の各物理・化学的性質の測定結果を示す。比較的大きな差が生じた性質として、吸水率、細骨材の微粒分量、細骨材の粘土塊量、細骨材の比表面積および累加細孔容積が挙げられる。このうち吸水率については一部で 3% を超えるものも確認された。また細骨材の粘土塊量については海砂である SO2-2 と ST1、石灰石である ST4 が小さい値を示している。なお、細骨材の微粒分量と比表面積、累加細孔容積については、石灰石である ST4 で特に微粒分量が多く、比表面積および累加細孔容積が小さい値を示している。

表 2 粗骨材の各特性値

記号	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	粘土塊量 (%)	水蒸気 比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	窒素 比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	累加細孔 容積 (cm <sup>3</sup> /g)
GO1	2.63	2.60	1.15	1.50	0.33	3.82	1.16	0.32
GO2	2.65	2.62	1.21	0.40	0.19	12.27	1.38	0.93
GO3	2.63	2.61	0.81	0.80	0.27	—	0.39	0.11
GO4	2.62	2.59	1.40	0.60	0.30	—	1.77	0.80
GT1	2.72	2.67	1.92	1.40	0.26	6.63	2.75	1.67
GT2	2.73	2.67	2.18	0.73	0.18	13.15	0.53	0.12
GT3	2.58	2.50	3.18	1.20	0.14	—	0.72	0.30
GT4	2.59	2.55	1.60	0.50	0.16	5.86	0.91	0.53
GH	2.72	2.71	1.22	0.58	0.65	7.70	1.45	0.96

表 3 細骨材の各特性値

記号	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	粘土塊量 (%)	水蒸気 比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	窒素 比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	累加細孔 容積 (cm <sup>3</sup> /g)
SO1	2.63	2.57	2.36	1.50	1.11	5.62	2.34	1.69
SO2-1	2.54	2.47	2.66	1.70	2.22	—	2.74	1.93
SO2-2	2.64	2.60	1.69	2.00	0.13	12.96	1.78	1.40
ST1	2.59	2.55	1.44	1.00	0.45	1.38	0.62	0.40
ST2	2.70	2.65	1.97	4.20	1.12	6.81	0.53	0.28
ST3	2.54	2.46	3.11	1.50	0.65	7.21	0.60	0.32
ST4	2.66	2.61	1.95	10.40	0.21	—	0.17	0.03
SH	2.64	2.61	1.38	0.58	0.65	9.04	1.45	1.81

2.2 コンクリート供試体の乾燥収縮試験および圧縮強度・静弾性係数試験

2.2.1 各種試験方法

骨材の各種物理・化学的性質とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を検討するために、表1の骨材を使用してコンクリート供試体を作製し、圧縮強度・静弾性係数、および乾燥収縮ひずみを測定した。

コンクリート供試体に使用した骨材の組み合わせは表4に示す通りである。コンクリート供試体の配合条件は、実際に乾燥収縮によるひび割れが生じた高架橋の配合に近いものとし、単位水量を166kg/m<sup>3</sup>、水セメント比を50%と一定にした。乾燥収縮試験には100mm×100mm×400mmの角柱供試体を用い、脱型直後から温度20±2℃、湿度60±5%の環境下に置き、JIS A 1129-1「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法—第1部：コンパレータ方法」に準じて26週までの長さ変化を測定した。圧縮強度・静弾性係数試験には100mmφ×200mmの円柱供試体を用い、それぞれJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」およびJIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて材齢28日時に行った。

2.2.2 試験結果

骨材の各物理・化学的性質およびコンクリートの静弾性係数、圧縮強度と、コンクリートの乾燥収縮ひずみ量との相関を求め、乾燥収縮ひずみに影響を与える骨材およびコンクリートの各性質について検証を行った。なお、コンクリートの乾燥収縮における骨材の寄与は、粗骨材と細骨材で異なると考えられる<sup>4)</sup>ことから、骨材の各性質を粗骨材と細骨材で別々の値として算出し乾燥収縮量との相関を求めている。種々のパラメーターが複合的に

表4 使用骨材の組み合わせ

番号	粗骨材	細骨材
1	GO1,GO2	SO1
2	GO3,GO4	SO1,SO2-1,SO2-2
3	GO2	SO1
4	GH	SO1
5	GO1	SH
6	GH	SH
7	GT4	ST1,★ST4
8	GT1	ST2
9	GT2	ST2
10	GT3	ST1,ST3
11	GT1	ST1,ST2
12	GH	ST2
13	GT2	SH
14	GH	ST3
15	GT3	SH
16	GT1	SO2-1
17	GO1	ST2
18	GT2	SO2-2
19	GT1	SO2-2
20	GT2	SO2-1

※GH, SHはそれぞれ比較用粗骨材および比較用細骨材 ★ST4は石灰石

関連しているため、単独の物理化学量と乾燥収縮量との相関は必ずしも高くなく、単独のパラメーターが乾燥収縮量を決定するような直線的な相関関係は得られなかった(図1)。ただし、粗骨材では乾燥収縮ひずみに対して比表面積(BET)と細孔半径100nm以下の細孔容積に相関の目安として「やや正の相関がある」、吸湿率に

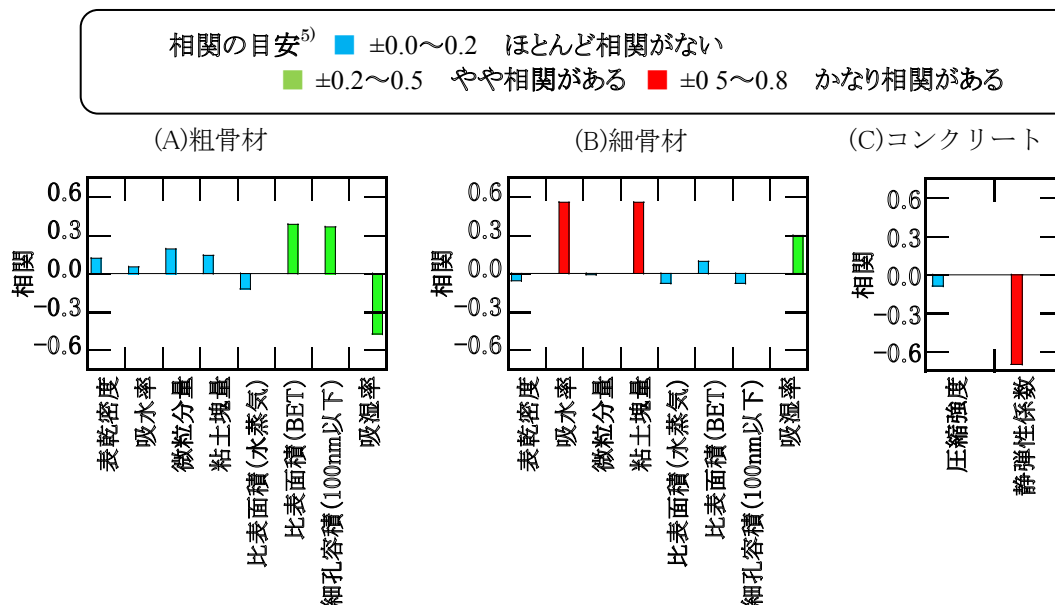


図1 各物理・化学的性質と乾燥収縮ひずみとの相関(26週経過時)

特集：材料技術

「やや負の相関がある」と表される程度の相関が認められた。細骨材では吸水率及び粘土塊量に「かなり正の相関がある」、吸湿率に「やや正の相関がある」とされる程度の相関が認められた。コンクリートの性質では、静弾性係数が乾燥収縮ひずみに対して、「かなり負の相関がある」と表される程度の相関が認められた。なお、今回、コンクリートの静弾性係数と乾燥収縮に相関が認められたが、本試験において使用骨材が異なること以外、配合が同様であること、粗骨材のヤング係数とコンクリートの静弾性係数に相関があることが知られていること<sup>6)</sup>から、使用骨材のヤング係数と乾燥収縮に相関があることが示唆される。

既往の研究において、骨材の比表面積や吸水率とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関が知られている<sup>4)</sup>が、これに対して、骨材の粘土塊量とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関は今まで言及されておらず、測定がされていない場合も多い。したがって、それが乾燥収縮に与える作用のメカニズムも明確になっていないことから、粘土塊を構成する物質を検討した。図2は、JIS A 1137の操作において粘土塊量を測定した際に、洗い流した溶液から採取した粘土塊の粉末 X線回折結果である。粘土塊量が比較的高い細骨材である SO1, SO2-1, ST2, ST3 において、粘土鉱物の一種であるスメクタイトが含まれていることがわかった。スメクタイトは、その構造の層間に水が入り込むことにより、自身の体積の数十倍に膨れあがることもある膨潤性と呼ばれる性質を持つ。このスメクタイトの一種であるモンモリロナイトを含有した骨材で作製したコンクリートは、乾燥収縮が大きくなることが知られている<sup>7)</sup>ことから、粘土塊量が多く構成鉱物にスメクタイトを含む細骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなることが示唆される。このように、乾湿によって体積を変えるとされ

Ch:緑泥石, Sm:スメクタイト, Mi:雲母, Am:角閃石

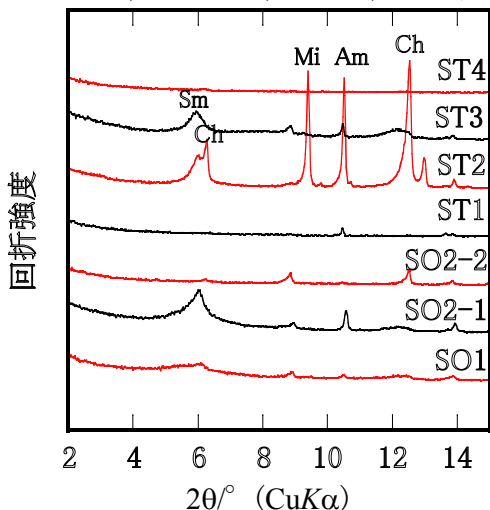


図2 細骨材の粘土塊の粉末 X線回折結果

ているスメクタイトを含む粘土塊<sup>8)</sup>の量と乾燥収縮に相関があることが本試験において判明したことから、乾燥収縮ひずみに影響を及ぼす新たな骨材パラメータとして構造物の施工管理において、粘土塊量に着目する必要があると考えられる。

以上の結果から、相関の大きな骨材およびコンクリートの性質として、細骨材の粘土塊量、吸水率、コンクリートの静弾性係数が挙げられた。そこで、コンクリートの乾燥収縮ひずみ量を推定する例として、これら相関が認められた値を説明変数、コンクリートの乾燥収縮ひずみを目的変数として重回帰分析を行った結果を図3に示す。本研究におけるコンクリート配合においては、細骨材の評価として粘土塊量と吸水率、粗骨材ヤング係数の評価としてコンクリートの静弾性係数を測定することにより、およそ標準誤差  $50 \times 10^{-6}$  で収縮ひずみ量を推定することが可能であることがわかった。

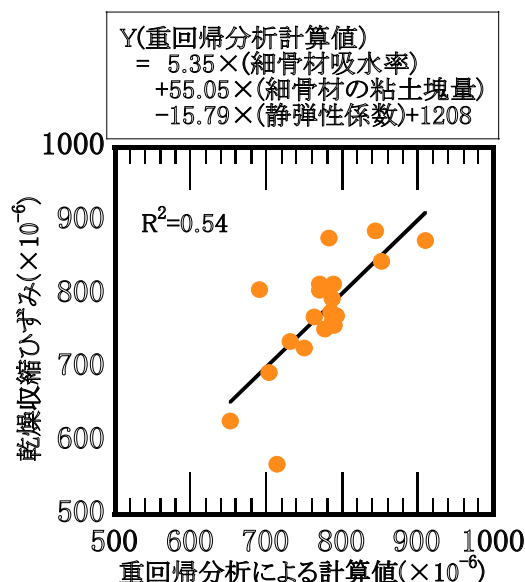


図3 細骨材の粘土塊量、吸水率とコンクリートの静弾性係数による乾燥収縮ひずみの推定

### 3. 骨材の物理・化学的性質に着目した乾燥収縮抑制対策

前章の結果から、乾燥収縮を低減する骨材の管理項目として、骨材の粘土塊量を低減させることにより、コンクリートの乾燥収縮が抑制されることが推察される。このことから、本章では骨材の水洗による粘土塊量の低減を試み、それによるコンクリートの乾燥収縮量の低減効果を検討した。

#### 3.1 骨材の水洗による粘土塊量の低減

骨材を水洗することにより粘土塊量の低減を試みた。使用骨材は、そのままの状態で使用した骨材（以下、未

洗浄) および、JIS A 1103「骨材の微粒分量試験方法」における水洗方法に準じて水洗を行い、粘土塊分を洗い流した骨材(以下、洗浄)を作製した。未洗浄骨材および洗浄骨材の粘土塊量測定結果を表5に示す。水洗を行うことにより、粗骨材で4割程度、細骨材で6割程度の粘土塊量を低減することができた。

表5 洗浄および未洗浄骨材の粘土塊量(%)

	粗骨材	細骨材
洗浄	1.79	0.39
未洗浄	2.83	0.97

表6 骨材の組み合わせ

	粗骨材	細骨材
①	未洗浄	未洗浄
②	洗浄	未洗浄
③	洗浄	洗浄

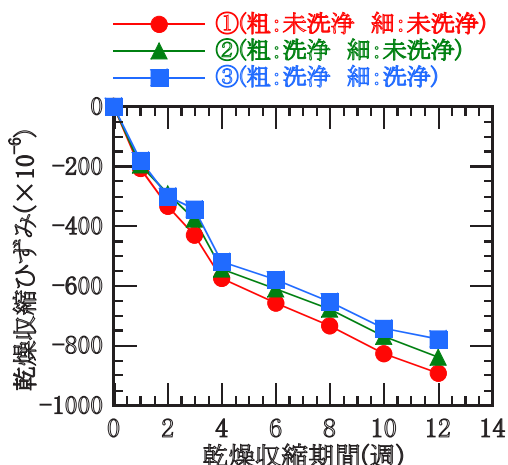


図4 骨材の水洗の有無によるコンクリートの乾燥収縮試験結果

### 3.2 水洗した骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮試験

前節で作製した骨材を表6に示す3通りに組み合わせ、2.2節と同じ配合にて100mm×100mm×400mmの角柱供試体を作製し、脱型直後から温度20±2℃、湿度60±5%の環境下に置き、JIS A 1129-1「モルタル及び

コンクリートの長さ変化測定方法—第1部：コンパレータ方法」に準じて12週までの長さ変化を測定した。

乾燥収縮試験の測定結果を図4に示す。①の粗骨材、細骨材ともに未洗浄の供試体に比べて、③の粗骨材、細骨材ともに洗浄の供試体は12週での乾燥収縮ひずみ量が $112 \times 10^{-6}$ 小さいことがわかった。この値は、既存の乾燥収縮対策に用いられる収縮低減剤による乾燥収縮ひずみ量の低減量(図5)と同程度であった。また、①に比べて②の粗骨材のみを洗浄した供試体で乾燥収縮ひずみが小さいことから、粘土塊量が極端に多い場合は、粗骨材のみの洗浄でも乾燥収縮ひずみを低減することがわかった。このことから、粘土塊量が多い骨材の場合には、骨材の水洗により粘土塊の低減が可能であり、それがコンクリートの乾燥収縮低減に有効であると考えられる。

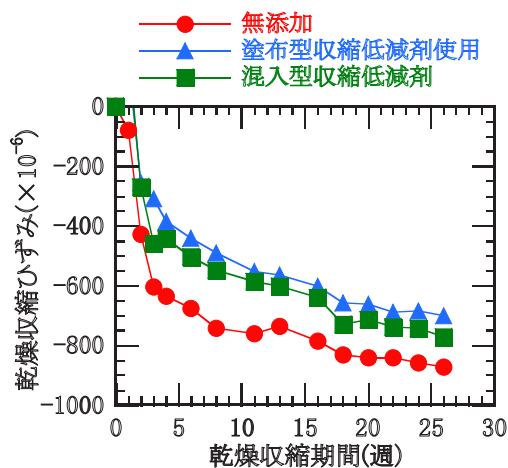


図5 収縮低減剤を使用したコンクリートの乾燥収縮試験結果

### 3.3 ひび割れ抵抗性に対する骨材水洗の効果

前節までで検討を行った乾燥収縮ひずみの値と、コンクリートに生じる乾燥収縮によるひび割れの発生との関係を検討するために、ひび割れ抵抗性試験を実施した。

#### 3.3.1 試験体および試験概要

本試験に用いたコンクリートは、乾燥収縮ひずみ量が大きい供試体で使用されていた骨材と粘土塊量の高い骨材を組み合わせたもの(表4番号16)、乾燥収縮ひずみ量が小さい供試体で使用されていた骨材と粘土塊量の低

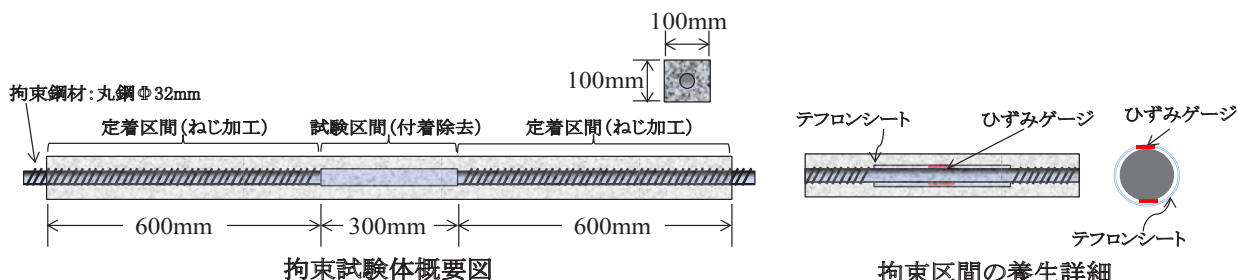


図6 ひび割れ抵抗性試験用コンクリート供試体の概要

表7 ひび割れ抵抗性試験結果

番号	粗骨材	細骨材	ひび割れ 発生日数 (日)	ひび割れ発生時の 引張応力 (N/mm <sup>2</sup> )	乾燥収縮ひずみ (16週：×10 <sup>-6</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) 28日水中養生
表4, 番号16	GT1	SO2-1	20	2.82	786	3.18
表4, 番号18	GT2	SO2-2	26	2.80	682	3.85
表6①	未洗浄	未洗浄	17	2.82	920	4.02
表6②	洗浄	未洗浄	21	2.82	880	3.93
表6③	洗浄	洗浄	20	2.82	837	4.27

い骨材を組み合わせたもの(表4番号18)、および表6に示す3種類の合計5種類である。ひび割れ抵抗性試験は、「混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会 報告書」に記載の「コンクリートの収縮ひび割れ評価試験方法(試案)」に準拠して実施した。供試体の概要を図6に示す。コンクリートの引張応力は、拘束鋼材の試験区間に貼付けたひずみゲージによる鉄筋ひずみ量から換算した。試験は打設した直後から温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の条件下にて開始し、ひび割れが発生するまで継続した。

### 3.3.2 試験結果

ひび割れ抵抗性試験におけるひび割れ発生日数、ひび割れ発生時のコンクリートの引張応力を表7に示す。ひび割れ発生時の引張応力は、およそ $2.8\text{N/mm}^2$ と水中養生28日時の引張強度と比較して小さかった。これは、本試験の養生条件が、気中養生となるため、ひび割れ発生時の引張強度が水中養生の供試体に比べて小さくなるためと考えられる。なお、このひび割れ発生時の引張応力は、全ての供試体でほぼ同じ値を示すことから、ひび割れ発生時の引張強度は骨材の性質、水洗による粘土塊量の相違等の影響を受けていないものと考えられる。しかし、ひび割れ発生日数については、乾燥収縮ひずみ量が大きいほど早い日数で発生し、骨材の水洗による粘土塊量の低減で、乾燥収縮量が低減することによりひび割れ抵抗性が増すことがわかった。

## 4. まとめ

- (1) 本試験において、細骨材の吸水率と粘土塊量がコンクリートの乾燥収縮量との相関が高いことがわかった。特に粘土塊量は、乾燥収縮対策として、今まで重要視されておらず、測定が行われていない事例も見受けられたことから、乾燥収縮に影響する新たなパラメータとして、構造物の施工管理において粘土塊量に着目することが望ましい。
- (2) 骨材の性質に着目したひび割れ発生対策法として、

粘土塊量が多い骨材の場合には、骨材を水洗することによりコンクリートの乾燥収縮を抑制できることがわかった。

- (3) ひび割れ発生時の引張応力は骨材の性質、水洗による粘土塊量の相違等の影響を受けておらず、これらがひび割れ発生に対する抵抗性に直接影響するものではないと考えられる。しかし、ひび割れ発生日数の延伸は、早期の乾燥収縮の低減を示し、その間より水合が進み引張強度の増進が期待されることから、骨材の水洗によるひび割れ発生の低減効果が期待される。

## 文献

- 1) 垂井高架橋損傷対策特別委員会 中間報告書：土木学会 2005
- 2) 田中博一, 橋田 浩：骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.553-558, 2009
- 3) 今村啓一他, 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第606号, pp.9-14, 2006
- 4) 濱 幸雄他：各種骨材を用いたモルタル・コンクリートの乾燥収縮特性, 日本コンクリート工学協会「コンクリートの収縮特性評価およびひび割れの影響」に関するシンポジウム論文集 pp.25-28, 2010
- 5) 大村 平：実験と評価のはなし, pp.50, 日科技連, 2000
- 6) 兵頭彦次他：物性の異なる粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性, 土木学会第64回年次学術講演会, V-435, pp.867-868, 2009
- 7) 脇坂安彦他：モンモリロナイト含有骨材を使用したコンクリートの物理的性質, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.733-738, 1990
- 8) 岡田 清, 六車 照 編：コンクリート工学ハンドブック, pp.1386, 朝倉書店, 1981