

論文 コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす骨材の物性について

後藤 貴弘^{*1}・中村 俊彦^{*2}・高尾 昇^{*2}・鳴瀬浩康^{*3}

要旨：10 種類の粗骨材を用いてコンクリートの乾燥収縮および骨材の物性値を調査した。その結果、コンクリートの乾燥収縮は、骨材の種類によって最大で 260×10^{-6} の差が生じた。また、コンクリートの乾燥収縮は、骨材の乾燥収縮、BET 比表面積のほかインクボトル細孔とも相関が強いことが判明した。コンクリートに埋設した骨材の長さ変化率を測定したところ、硬質砂岩骨材は 100×10^{-6} 程度収縮しているのに対し、石灰石骨材はほとんど収縮していないことが確認された。

キーワード：乾燥収縮，石灰石，吸水率，BET 比表面積，細孔容積

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を向上させるには、ひび割れの発生を抑えることが必要である。ひび割れ発生原因の一つであるコンクリートの乾燥収縮の低減には、材料選定や配合を適切に設計することが重要である。従来、コンクリートの乾燥収縮は、主にセメントペーストの毛细管空隙から水分が逸散することにより生じる現象であり、単位水量の影響が大きいと考えられてきたが、近年、骨材の種類で大きく異なり^{1),2)}、石灰石骨材を使用すると小さくなることが報告されている^{3),4)}。骨材自体の収縮や弾性係数が影響していると推察されるが^{5),6)}、コンクリート内部における骨材の挙動との関連性は不明である。

そこで本研究では、岩質および産地が異なる 10 種類の粗骨材を用いて、コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす骨材の物性について調査した。また、ひずみゲージ

を貼り付けた骨材をコンクリート内部に埋設し、骨材自体のひずみ挙動を測定した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を表 - 1 に示す。粗骨材は、石灰石を 4 種類、硬質砂岩を 2 種類、安山岩および流紋岩を各 1 種類、スラグ 2 種類を使用した。コンクリートの配合を表 - 2 に示す。

2.2 試験項目

(1) コンクリートの乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮は、JIS A 1129 のダイヤルゲージ法により長さ変化率を測定した。供試体は、材齢 7 日まで水中養生後、温度 20 ± 2 、湿度 $60 \pm 10\%$ の恒温恒湿室で 26 週間乾燥した。

表 - 1 使用材料

種類		記号	性質
セメント		N	普通ポルトランドセメント，密度 3.16 g/cm^3
混和剤		AD	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤
細骨材	山砂	S	表乾密度 2.62 g/cm^3 ，吸水率 1.41%，粗粒率 2.64
粗骨材	石灰石	A	表乾密度 2.70 g/cm^3 ，吸水率 0.38%，実積率 65.8%
		B	表乾密度 2.71 g/cm^3 ，吸水率 0.38%，実積率 61.5%
		C	表乾密度 2.70 g/cm^3 ，吸水率 0.31%，実積率 63.2%
		D	表乾密度 2.70 g/cm^3 ，吸水率 0.39%，実積率 63.9%
	硬質砂岩	E	表乾密度 2.71 g/cm^3 ，吸水率 0.67%，実積率 61.7%
		F	表乾密度 2.66 g/cm^3 ，吸水率 0.65%，実積率 61.6%
	安山岩	G	表乾密度 2.62 g/cm^3 ，吸水率 2.43%，実積率 60.0%
	流紋岩	H	表乾密度 2.62 g/cm^3 ，吸水率 0.81%，実積率 59.0%
	スラグ	I	電気炉酸化スラグ，表乾密度 3.70 g/cm^3 ，吸水率 1.26%，実積率 54.9%
		J	高炉スラグ，表乾密度 2.46 g/cm^3 ，吸水率 3.57%，実積率 59.5%

*1 三菱マテリアル（株） セメント研究所 コンクリートグループ(正会員)

*2 三菱マテリアル（株） セメント研究所 コンクリートグループ 主任研究員(正会員)

*3 三菱マテリアル（株） セメント研究所 コンクリートグループ グループリーダー(正会員)

(2) 骨材の乾燥収縮

骨材の乾燥収縮は、原石から $\phi 25\text{mm} \times 120\text{mm}$ のコアを 3 本採取し、ゲージ長 60mm のひずみゲージによって乾燥期間の経過に伴う岩石の長さ変化率を測定した。コア供試体のゲージ貼り付け部分には、ポリエステル系ブリコーティング剤を塗り、含水によるゲージの剥離を防いだ。ひずみゲージを貼り付けたのち、ブチルゴム系コーティング材により防水加工を施した。コア供試体は、105 で 1 日間乾燥後 20 ± 2 の水中に 28 日間浸漬し、その後、温度 20 ± 2 、湿度 $60 \pm 10\%$ の恒温恒湿室で 28 日間乾燥した。この水中および乾燥のサイクルを 2 回繰り返した。

(3) 骨材の圧縮強度および静弾性係数

骨材の圧縮強度および静弾性係数は、原石から $\phi 25\text{mm} \times 50\text{mm}$ のコアを 3 本採取し、ゲージ長 5mm のひずみゲージを貼り付けて、載荷時におけるひずみを測定した。

(4) 骨材の BET 比表面積および細孔径分布

骨材の BET 比表面積は、骨材の粒度を $0.15 \sim 0.30\text{mm}$ の範囲内に調整し、ガス吸着法により測定した。細孔径分布は、骨材の粒度を $2.5 \sim 5\text{mm}$ に調整し、水銀圧入法により測定した。なお、本研究では、浅賀らの方法⁷⁾に倣い、1 回目の測定後 (200MPa まで加圧後)、 0.2MPa まで減圧し、再度、 200MPa まで加圧した。これにより、1 回目と 2 回目の細孔容積の差から細孔半径 $3750\text{nm} \sim 3.7\text{nm}$ の範囲内におけるインクボトル細孔を求めた。

(5) コンクリート中の骨材の長さ変化率

寸法 20mm 程度の粗骨材にゲージ長 5mm のひずみゲージを貼り付け、(1)に示す乾燥収縮試験と同条件のコンクリート供試体 ($10 \times 10 \times 40\text{cm}$) に埋設してコンクリート中における骨材の長さ変化率を測定した。ひずみゲージの防水加工は、(2)と同様に行った。また、供試体の中央

に $\phi 10\text{mm}$ の空洞を設け、超小型湿度センサでコンクリート内部の湿度を測定した。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの乾燥収縮

乾燥期間 26 週におけるコンクリートの長さ変化率を図 - 1 に示す。コンクリートの乾燥収縮は、流紋岩 H、安山岩 G および硬質砂岩 E が最も大きく、石灰石およびスラグ I は小さかった。骨材の種類により、乾燥収縮は最大で 260×10^{-6} の差が生じた。

3.2 骨材の乾燥収縮

骨材の長さ変化測定結果の一例を図 - 2 に示す。なお、供試体の本数は 3 本とした。いずれの粗骨材も水中に浸漬すると膨張し、乾燥させると収縮する挙動を示したが、

表 - 2 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	粗骨材かさ 容積(m^3/m^3)	スランプ (cm)	空気量 (%)
55.0	0.60	$18 \pm 1.5\text{cm}$	$4.5 \pm 1\%$

表 - 3 骨材の圧縮強度および静弾性係数

試料	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数(kN/mm^2)	
		初期	1/3 割線
石灰石	A	96.7	61.7
	B	47.6	77.0
	C	62.5	43.1
	D	89.7	76.3
硬質砂岩	E	105	70.9
	F	50.9	60.2
安山岩	G	160	85.7
流紋岩	H	184	50.9
スラグ	I	51.0	84.0
	J	37.2	55.3

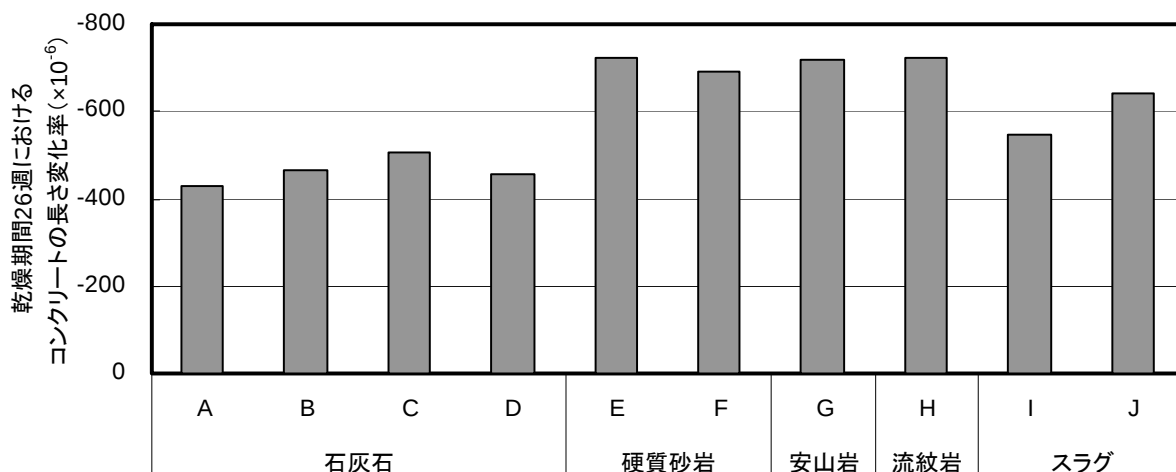


図 - 1 乾燥期間 26 週におけるコンクリートの長さ変化率

石灰石およびスラグ骨材に関しては、他の岩石に比べて変動が小さかった。乾燥期間 28 日における 2 サイクル目の長さ変化率（3 本の平均）を図 - 3 に示す。乾燥収縮は、安山岩 G が最も大きく、次いで硬質砂岩、流紋岩の順となり、石灰石およびスラグ骨材はほぼゼロであった。

3.3 骨材の圧縮強度および静弾性係数

骨材の圧縮強度および静弾性係数を表 - 3 に示す。なお、静弾性係数はコンクリートで一般的に用いられる 1/3 割線弾性係数に加え、ひずみが 200×10^{-6} 程度までの載荷初期における接線弾性係数（以下、初期弾性係数）も求めた。圧縮強度および静弾性係数は、岩種が同じでも産地によって異なり、種類の違いによる明確な傾向は認め

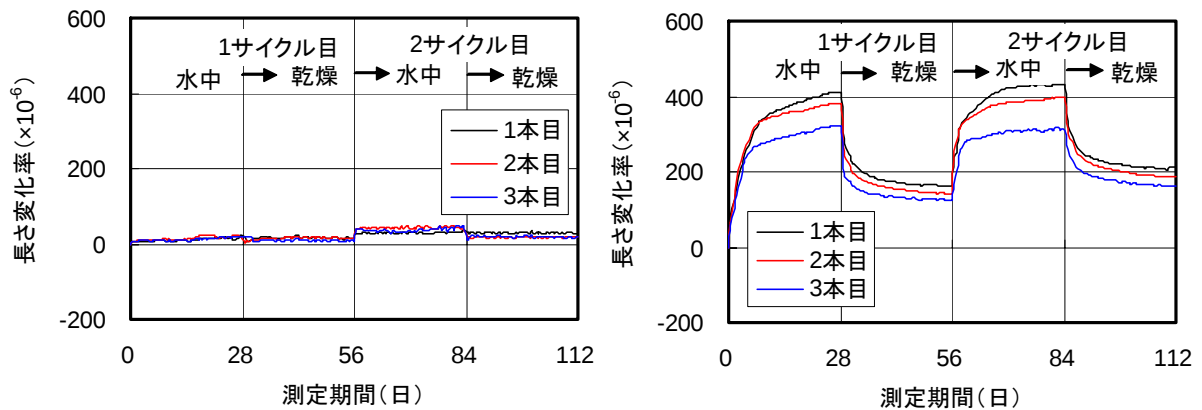


図 - 2 骨材の長さ変化率測定結果の一例（左：石灰石 C，右：硬質砂岩 E）

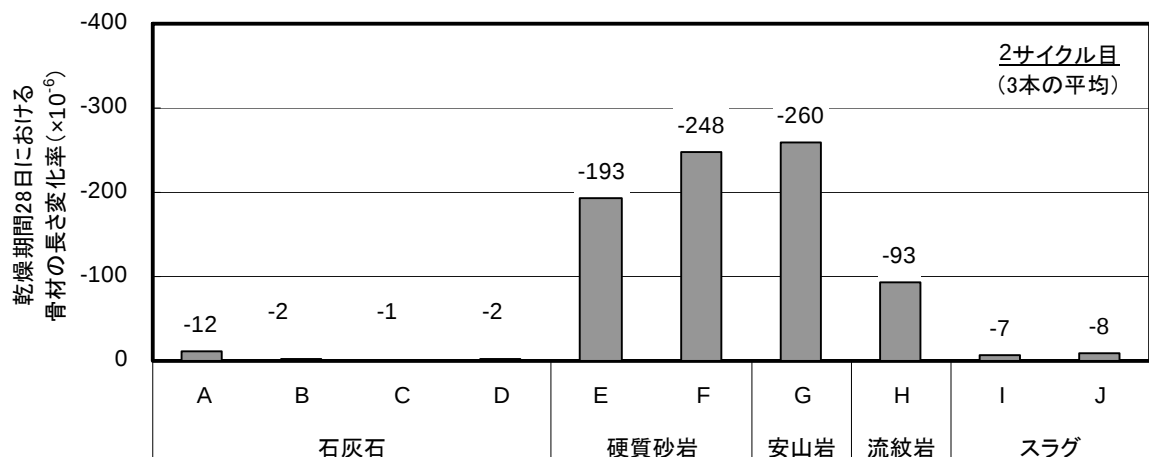


図 - 3 乾燥期間 28 日における骨材の長さ変化率

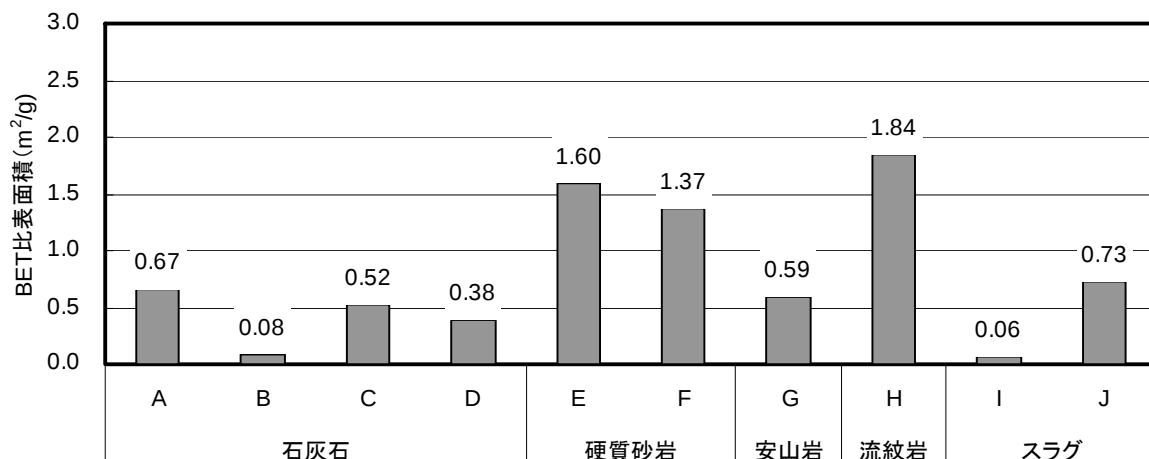


図 - 4 骨材の BET 比表面積

られなかった。

3.4 骨材の BET 比表面積および細孔径分布

骨材の BET 比表面積を図 - 4 に示す。BET 比表面積は、スラグ I および石灰石 B が小さく、流紋岩が最も大きかった。B 以外の石灰石についても、他の骨材に比べて BET 比表面積は小さい傾向を示した。

水銀圧入法により細孔径分布を測定した場合、多孔質材料であるセメントペーストやモルタルは、加圧・減圧のサイクルを繰り返すと水銀圧入の履歴がループ状になることが知られている^{8),9)}。これは、図 - 5 に示す細孔 B のようなインクボトルと呼ばれる細孔が存在し、減圧しても水銀が全て戻らないために起こる現象といわれている。浅賀ら⁷⁾は、この現象を利用して 1 回目と 2 回目の細孔容積の差からセメントペーストのインクボトル細孔を求めている。この方法に倣い、細孔半径 3750nm ~ 3.7nm の範囲内における骨材のインクボトル細孔および非インクボトル細孔を求めた。硬質砂岩 E を用いた場合の水銀圧入法による加圧・減圧サイクルを繰り返した時の細孔半径と累加細孔容積の関係を図 - 6 に示す。岩石の場合も多孔質材料と同様に 1 回目の測定後、水銀が

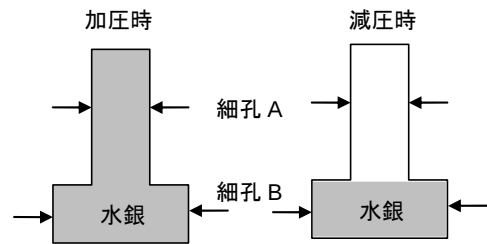


図 - 5 インクボトル細孔の概念図

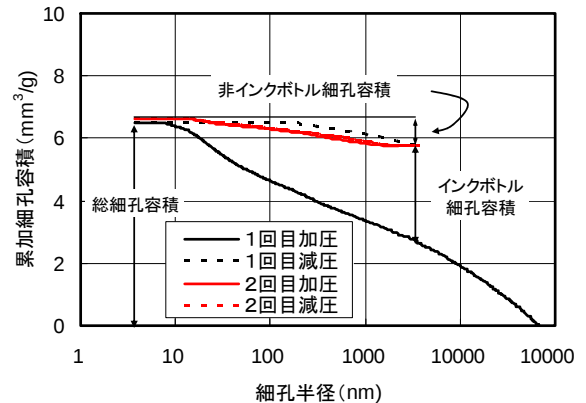


図 - 6 加圧・減圧サイクルを繰り返したときの細孔半径と累加細孔容積の関係（硬質砂岩 E）

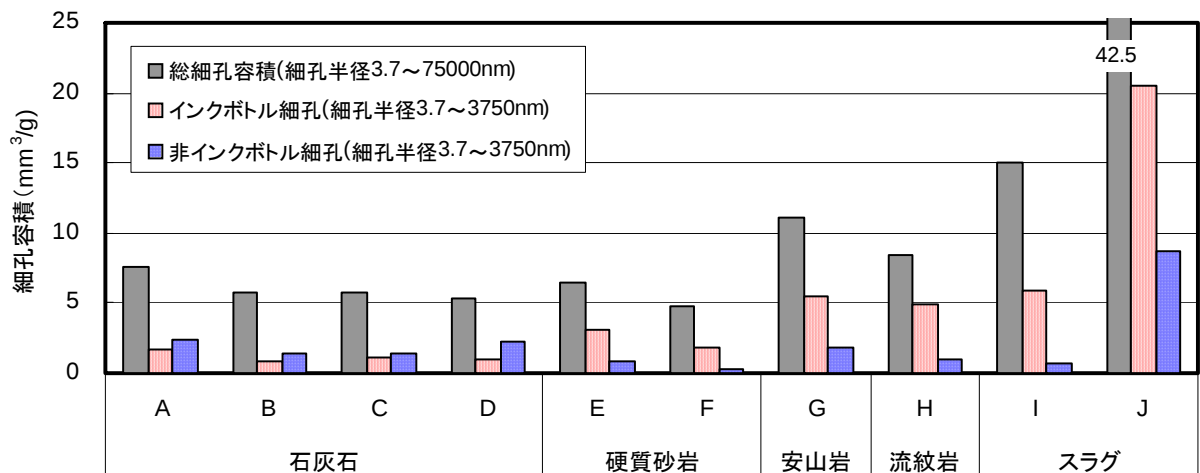


図 - 7 骨材の細孔容積

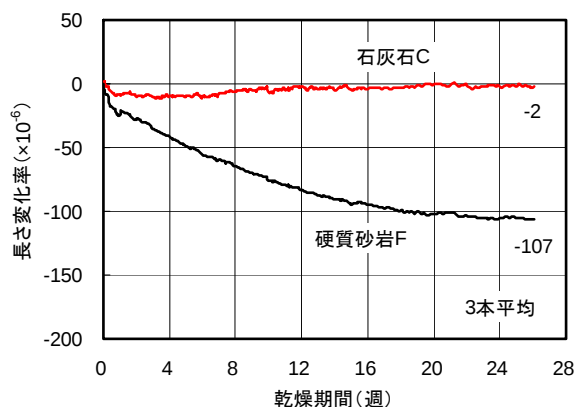


図 - 8 コンクリートに埋設した骨材の長さ変化率

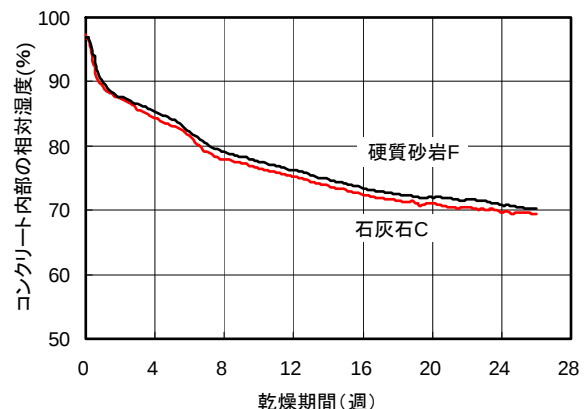


図 - 9 コンクリート内部の相対湿度

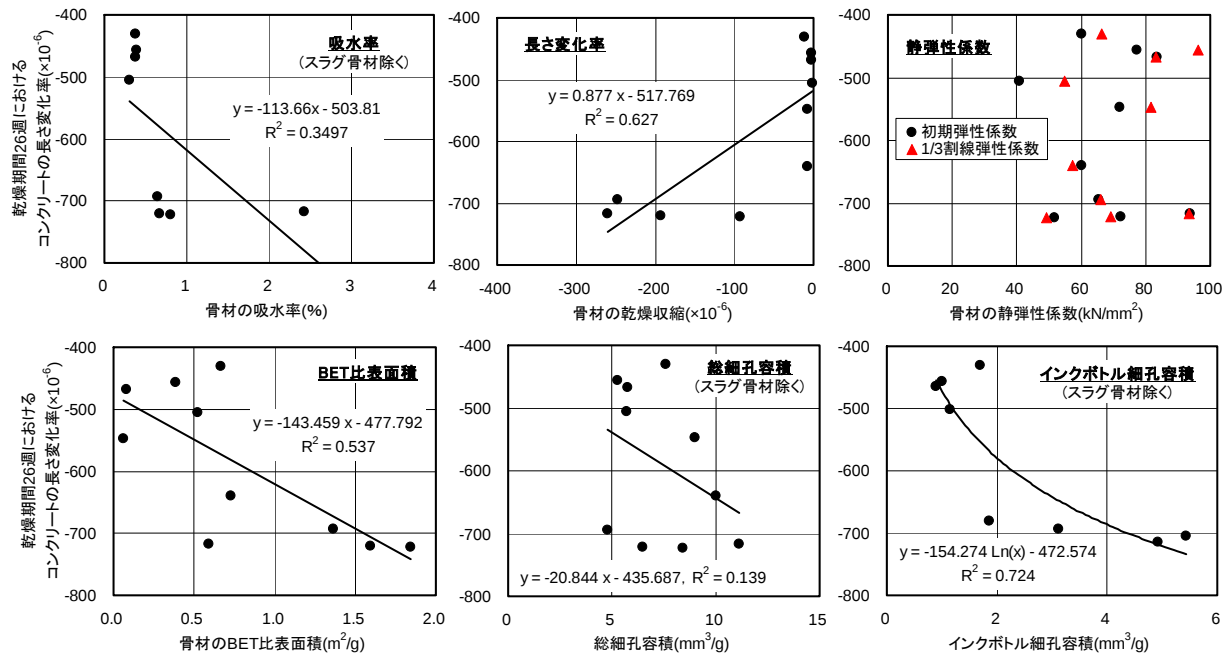


図 - 10 コンクリートの乾燥収縮と骨材の各種物性値との関係

試料内部に残存し、履歴がループ状になることが確認された。骨材の細孔容積を図 - 7 に示す。石灰石骨材の総細孔容積は、他の骨材に比べて少なかった。また、石灰石骨材以外は、非インクボトル細孔よりインクボトル細孔の方が多い特徴を示すが、石灰石骨材に関しては逆の傾向が見られた。

3.5 コンクリート中の骨材の長さ変化率

石灰石 C と硬質砂岩 F について、乾燥収縮試験時におけるコンクリート中のひずみ挙動を測定した。コンクリートに埋設した骨材の長さ変化率を図 - 8 に示す。硬質砂岩 F の長さ変化率は、保存開始から材齢の経過とともに大きくなっており、材齢 26 週で -107×10^{-6} となった。一方、石灰石 C の長さ変化率は、保存直後からほとんど変化無く、硬質砂岩 F に比べて約 100×10^{-6} 程度の差が生じた。コンクリート内部の相対湿度を図 - 9 に示す。コンクリート内部の相対湿度は、乾燥開始直後より緩やかに低下しており、材齢 26 週で石灰石 C および硬質砂岩 F とともに約 70% 程度となり、骨材種類の違いは認められなかった。図 - 2 より、原石コアを温度 20℃、湿度 60% の環境下で保存した場合の骨材の長さ変化率は、石灰石 C が -1×10^{-6} 、硬質砂岩 F で -248×10^{-6} であった。コンクリート中の相対湿度は、保存期間 26 週で 70% 程度であることを考慮すると、本結果に現れた骨材のひずみは、コンクリート中の相対湿度が影響していると推察された。

3.6 コンクリートの乾燥収縮と骨材の各物性との関係

乾燥期間 26 週におけるコンクリートの長さ変化率と骨材の各種物性との関係を図 - 10 に示す。コンクリートの乾燥収縮は、既往の文献と同様^{10),11)}に、骨材の乾燥収

縮および BET 比表面積と比較的相関が強かった。また、インクボトル細孔に関しては、スラグ骨材を除くと、強い相関関係が得られ、インクボトル細孔の増加により乾燥収縮が大きくなる傾向を示した。この理由については今のところ不明であり、今後、更なる検討が必要である。なお、本研究で使用した 2 種類のスラグ骨材は、多孔質であるため吸水率が高い。多孔質な骨材は、コンクリート中で内部養生効果をもたらすことも考えられるため^{12),13)}、他の骨材と傾向が異なると推察された。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートの乾燥収縮は、骨材の種類によって異なり、最大で 260×10^{-6} 程度の差が生じた。
- (2) 骨材の乾燥収縮は、安山岩が最も大きく、次いで硬質砂岩、流紋岩の順となり、石灰石およびスラグ骨材はほぼゼロであった。
- (3) 骨材の圧縮強度および静弾性係数は、種類が同じでも産地によって異なり、種類の違いによる明確な傾向は得られなかった。
- (4) 石灰石の BET 比表面積および水銀圧入法による細孔容積は、他の骨材に比べて小さかった。
- (5) コンクリートに埋設した骨材の長さ変化率は、硬質砂岩骨材が 100×10^{-6} 程度収縮したのに対し、石灰石骨材はほとんど収縮しなかった。
- (6) コンクリートの乾燥収縮は、骨材の長さ変化率、BET 比表面積のほかインクボトル細孔とも相関が強いことが判明した。

参考文献

- 1) 岩清水隆, 米澤敏男, 井上和政, 松本竹史: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材品質の影響に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.1079-1080, 1998.9
- 2) 日本コンクリート工学協会: コンクリート収縮問題とその対応-委員会中間報告およびパネルディスカッション-, 2009.7
- 3) 石灰石鉱業協会: 石灰石骨材とコンクリート, 2005
- 4) 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
- 5) 後藤幸正, 藤原忠司: 乾湿に伴う骨材の体積変化, 土木学会論文報告集, 第 247 号, pp.97-108, 1976.3
- 6) 兵頭彦次, 谷村充, 藤田仁, 番地成朋: 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, pp.867-868, 2009.9
- 7) 浅賀喜与志, 青木幸二, 加藤一樹, 菊間勲: 粒径をそろえた各種ポルトランドセメントの水和反応と硬化体組織, セメント・コンクリート論文集 No.54, pp.8-14, 2000
- 8) S.LOWELL: Continuous Scan Mercury Porosimetry and the Pore Potential as Factor in Porosimetry Hysteresis, Powder Technology, Vol.25, pp.151-165, 1981
- 9) 吉田亮, 岸利治: 水セメント比および養生が異なるセメントペーストにおける水銀圧入過程の相違に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, pp.729-734, 2007
- 10) 今本啓一, 石井寿美江, 荒井正直: 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
- 11) 今本啓一, 案浦隆通, 遠山俊一: 骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する研究(その 6.粗骨材品質の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.649-650, 2000
- 12) 五十嵐心一, 川村満紀, 神崎暁史: 軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, pp.399 - 404 (2002)
- 13) 温品達也, 清木祥平, 中川信矢, 佐藤良一: 廃瓦粗骨材によるフライアッシュ混入コンクリートの内部養生効果, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.465 - 466 (2008)