

論文 モルタル・コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす骨材種別の影響

松下文明*1・柴田純夫*2・張文艶*3・濱幸雄*4

要旨：本研究では、細骨材として JIS 標準砂、天然砂、各種砕砂、銅スラグ細骨材、高炉スラグ細骨材、および粗骨材として硬質砂岩砕石、安山岩砕石、石灰石砕石を用いた、モルタル・コンクリートの乾燥収縮特性について比較検討を行った。その結果、モルタルの場合には、細骨材種別によって乾燥収縮量に大きな差が認められた。一方、コンクリートの乾燥収縮量に対する細骨材種類の影響は明らかとならなかったが、粗骨材種類の影響が大きいことが確認され、水分逸散量が増加するほど収縮量が大きくなる傾向が見られた。

キーワード：モルタル、コンクリート、乾燥収縮、粗骨材、細骨材、スラグ系細骨材

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は、元来セメントペーストの収縮に起因するものであり、骨材はそれを拘束するものとして扱われ、国内外において多くの研究例がある。骨材の種類が乾燥収縮に大きな影響があることが指摘されており¹⁾、石灰石砕石を粗骨材として用いた場合に収縮が低減されることが広く認識されている。

また、天然資源骨材の枯渇から、銅スラグ、高炉スラグ等の副産物の有効利用も重要な課題となっている。これらスラグ系材料は細骨材として用いられることが多いが、スラグ系細骨材単独で乾燥収縮に及ぼす影響を検討した資料が十分にあるとは言い難い^{2), 3)}。

そこで本研究では、細骨材として JIS 標準砂、天然砂、各種砕砂、銅スラグ細骨材、高炉スラグ細骨材を、粗骨材として硬質砂岩砕石、安山岩砕石、石灰石砕石を用い、骨材種別がモルタルおよびコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を把握することを目的とした実験を行った。

2. 実験計画および方法

実験は、モルタル実験とコンクリート実験に分けて行った。

モルタル実験では、混合材を含まない普通ポルトランドセメントと表-1 に骨材のうち JIS 標準砂、天然砂、各種砕砂、銅スラグ細骨材 (以下 Cu) および高炉スラグ細骨材 (以下 BFS) の計 14 種類の細骨材を用いた。モルタルの調合は、標準砂を用いた水セメント比 50% の JIS モルタルの調合を基準とし、標準砂以外の場合には細骨材かさ容積が一定となるように定めた。試験体の形状は、4×4×16 cm の角柱に作製した。

コンクリート実験では、市販の普通ポルトランドセメントと表-1 に示す骨材のうち 3 種類の粗骨材および 5

種類の細骨材を用い、表-2 に示す骨材の組み合わせでコンクリートを作製した。コンクリートの調合は、目標スランプを 18cm とした nonAE の安山岩砕石 (A) と陸砂 (s) の組み合わせの調合を基本とし、すべての骨材の組み合わせで同一単位水量としたものを調合 A、全ての組み合わせで同一スランプが得られるように調合を補正した調合 B の 2 つの条件のコンクリートを作製した。コンクリートの調合表と練り上がり性状を表-3 に示す。試験体の形状は、10×10×40 cm の角柱に作製した。

なお、モルタル実験、コンクリート実験のいずれにおいても、材齢 7 日まで 20℃ で水中養生を行った後、20℃・60% RH の恒温恒湿環境下での乾燥収縮量と質量変化率を測定した。長さ変化の測定は、JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法) に準拠した。また、材齢 7 日と 28 日に圧縮強度と静弾性係数の測定を行った。

3. 結果および考察

3.1 モルタル実験

図-1 にモルタルの乾燥収縮試験結果を示す。なお、図-1 の (1) ~ (3) はそれぞれ S, K, F, U (天然砂、各種砕砂系), Cu, Cu2.5, Cu1.2, BFS, CuL (スラグ系), LTA, LTB, LK, LG (石灰石砕砂系) の結果を N (標準砂) と比較して示している。各細骨材を使用したモルタルの圧縮強度及び静弾性係数は表-1 に示した。

天然砂、各種砕砂系は、N と比べてやや収縮量が多い傾向を示している。また、石灰石砕砂系は産地によって収縮量に多少の大小もみられるが、N とほぼ同等の収縮量となっている。一方、スラグ系の収縮量は全体的に小さい傾向にあり、特に高炉スラグ細骨材 BFS の収縮量の小ささが際立っている。

図-2 にモルタルの水分逸散量と長さ変化の関係を示

*1 住友金属鉱山シボレックス (株) 技術部三重分室 博士 (工学) (正会員)

*2 住友金属鉱山シボレックス (株) 専務取締役 工博 (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設環境工学専攻

*4 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 骨材種類及び各種物性値とモルタルの圧縮強度及び静弾性係数

	細骨材種別	記号	表乾密度	絶乾密度	吸水率	粗粒率	微粒分量	7日	28日	7日	28日	
			(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)		(%)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	
細骨材	J I S 標準砂	N	2.65	2.64	0.42	2.66	0.30	38.1	48.2	3.04	3.02	
	天然砂系	陸砂	S	2.69	2.65	1.52	2.60	0.43	36.2	44.0	2.21	2.77
		海砂	U	2.59	2.56	1.23	2.91	3.73	30.2	44.1	2.32	2.56
	スラグ系	銅スラグ系	Cu	3.52	3.50	0.58	3.44	0.32	26.6	41.8	3.19	2.76
			Cu2.5	3.52	3.50	0.58	2.49	1.81	30.0	43.0	2.81	2.71
			cu	3.51	3.49	0.51	2.59	3.50	-	-	-	-
			Cu1.2	3.52	3.50	0.58	2.28	2.82	37.6	58.7	2.78	3.39
		CuL*	3.10	3.09	0.50	2.62	3.27	42.3	54.2	3.23	3.47	
		高炉スラグ	BFS	2.74	2.72	0.74	2.53	1.80	28.9	40.7	2.61	2.99
	砕砂系	石灰石砕砂	b	2.81	2.80	0.53	2.55	3.00	-	-	-	-
			LTA	2.68	2.67	0.41	2.75	4.73	47.0	57.3	3.09	3.20
			l	2.65	2.61	1.38	2.82	6.50	-	-	-	-
			LTB	2.71	2.70	0.39	3.08	12.08	44.6	55.8	2.50	3.30
		LK	2.69	2.68	0.49	2.31	3.80	39.8	48.0	4.01	2.79	
		LG	2.67	2.64	0.87	3.37	8.51	47.4	54.7	2.86	3.47	
		硬質砂岩砕砂	K	2.61	2.58	1.03	3.53	5.77	42.0	53.7	2.82	3.03
k		2.59	2.54	1.65	3.03	4.50	-	-	-	-		
風化花崗岩砕砂	F	2.59	2.57	0.81	2.85	6.10	33.5	48.8	2.25	2.52		
粗骨材	安山岩碎石	A	2.67	2.62	1.83	6.64	-	-	-	-	-	
	石灰石碎石	L	2.70	2.69	0.38	6.66	0.60	-	-	-	-	
	硬質砂岩	H	2.62	2.59	1.18	6.74	-	-	-	-	-	

注) 細骨材の記号で、大文字はモルタル実験で、小文字はコンクリート実験で使用した骨材である。

*) CuL は、Cu2.5 (銅スラグ) と LAT (石灰砕砂) の 1 : 1 混合砂である。

表-2 骨材組み合わせ(コンクリート)

粗骨材	細骨材	記号
安山岩碎石	陸砂	As
石灰石碎石		Ls
硬質砂岩		Hs
安山岩碎石	硬質砂岩+銅スラグ30%	Acuk
	硬質砂岩+高炉スラグ30%	Abk
	石灰石砕砂	Al
	硬質砂岩	Ak

表-3 コンクリートの調査及び練り上がり性状と圧縮強度及び静弾性係数

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)				Sl(cm)	Air(%)	7日 圧縮強度 (N/mm ²)	28日 圧縮強度 (N/mm ²)	7日 静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	28日 静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	
			W	C	S	G							
As-A	50	46.0	185	370	850	993	17.5	3.0	32.9	38.6	4.5	4.9	
Ls-A					850	1005	18.0	2.9	34.8	35.5	3.9	5.2	
Hs-A					850	978	19.0	2.3	38.2	38.1	4.7	4.4	
Acuk-A					k573	cu334	993	3.5	3.2	37.6	48.5	5.8	3.1
Abk-A					k573	b267	993	3.5	3.3	37.3	47.6	2.8	3.1
Al-A					838	993	3.0	4.4	41.4	49.3	4.5	4.2	
Ak-A					819	993	3.5	2.8	39.3	46.5	4.6	6.2	
Acuk-B					k456	cu263	993	19.0	1.6	36.9	48.4	2.7	2.8
Abk-B					k456	b211	993	18.0	1.8	34.8	46.0	1.2	2.9
Al-B	665	993	19.5	2.3	38.3	45.6	2.6	3.0					
Ak-B	650	993	17.5	1.5	37.4	48.7	3.8	3.9					

す。(1)の天然砂、砕砂系で、NとS、およびK、F、Uがそれぞれほぼ同じ挙動を示しているものの、水分逸散量と長さ変化の関係は一樣ではない。(2)のスラグ系と(3)の石灰石砕砂においても、水分逸散量と長さ変化の関係は一樣ではない。

3.2 コンクリート実験

図-3にコンクリートの乾燥収縮試験結果を、表-3に圧縮強度及び静弾性係数を示した。図-3(1)は、粗骨材を安山岩碎石(A)共通として、細骨材の組み合わせを変化させ、骨材の組み合わせによらず単位水量を一

定とした場合(A調査)の結果であり、細骨材種別の影響を示すものである。石灰石砕砂を用いたAl-Aの収縮量がやや小さいが、その他の収縮挙動はほぼ同一である。

図-3(2)は、細骨材を陸砂(s)共通として、粗骨材の組み合わせを変化させ、骨材の組み合わせによらず単位水量を一定とした場合(A調査)の結果であり、粗骨材種別の影響を示すものである。粗骨材種別による収縮量の差は大きく、乾燥収縮量の大小に与える影響が大きいといえる。

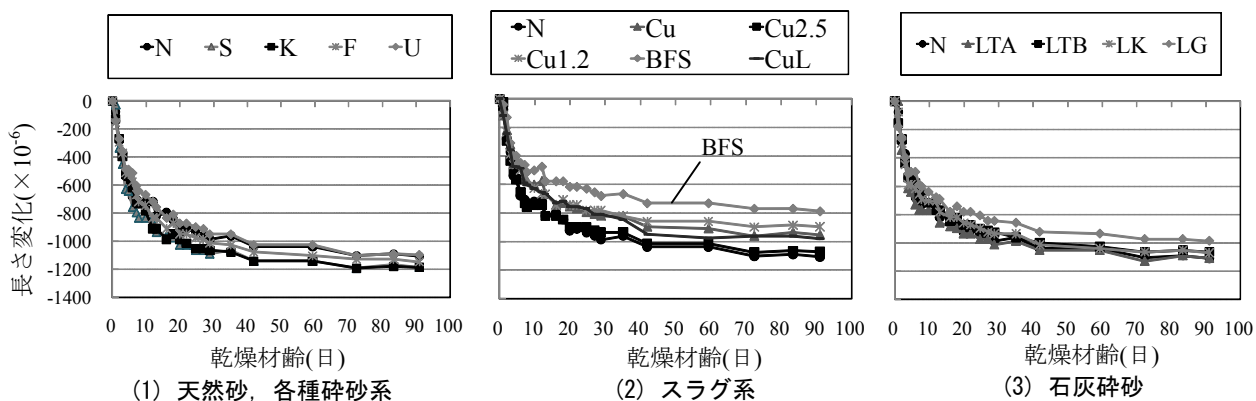


図-1 モルタルの乾燥収縮試験結果

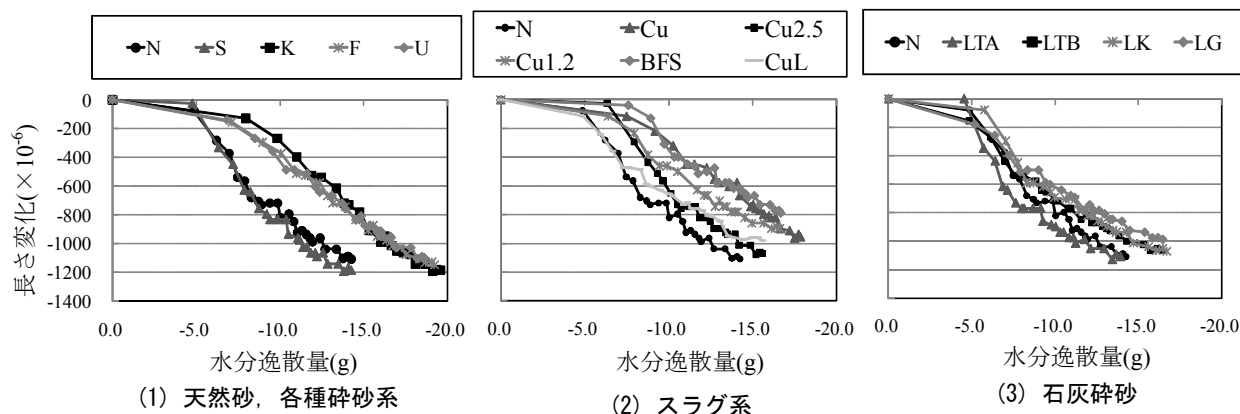


図-2 モルタルの水分逸散量と長さ変化の関係

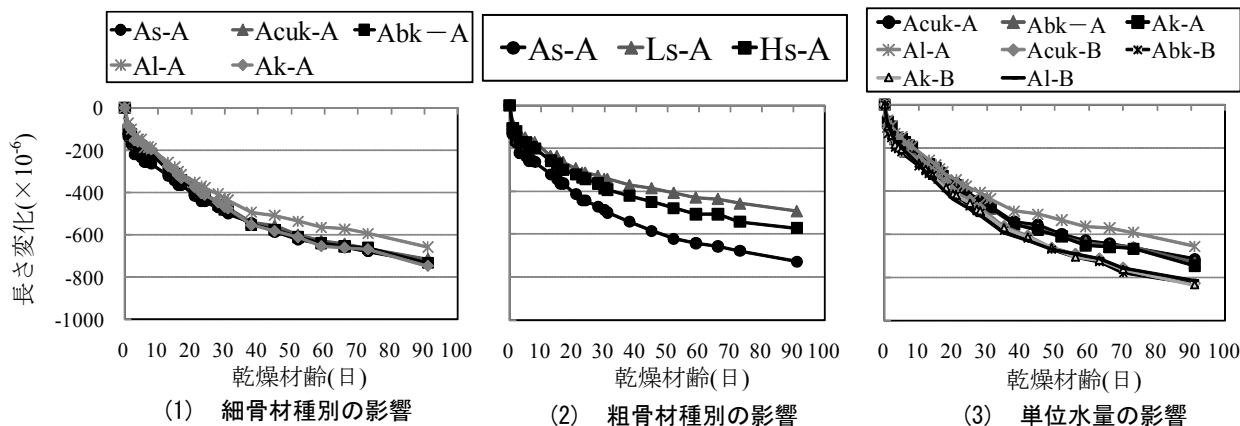


図-3 コンクリートの乾燥収縮試験結果

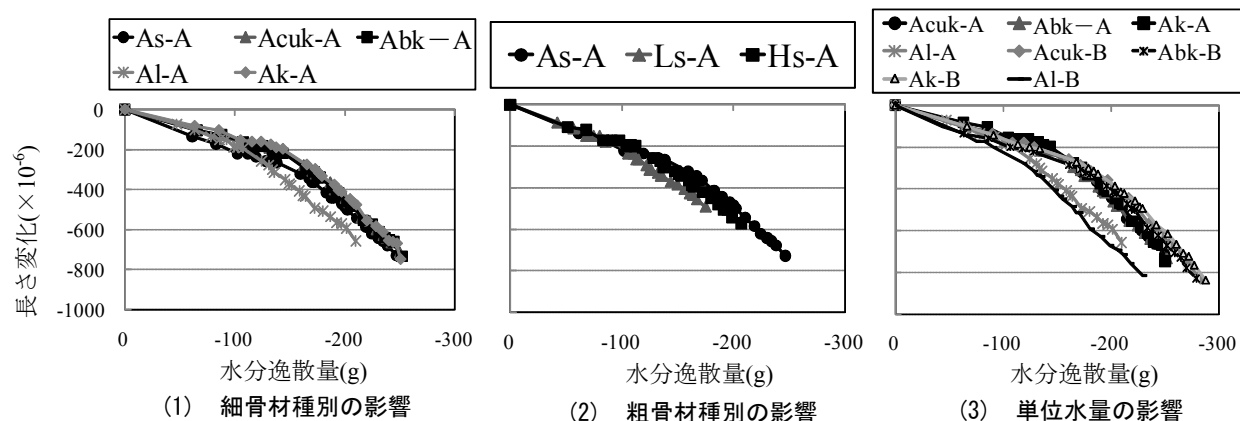


図-4 コンクリートの水分逸散量と長さ変化の関係

銅スラグ、高炉スラグ、石灰石砕砂、硬質砂岩砕砂を細骨材に用いたコンクリートでは、単位水量 185kg/m³ のA調合でのスランプは3cm程度であり、スランプ18cmに調整したB調合では単位水量が225 kg/m³と40 kg/m³も増加した。図-3 (3) は、これらのコンクリートのA

調合とB調合の結果を比較したもので、単位水量の影響を示すものである。骨材の組み合わせによらず、単位水量の大きなB調合の方がA調合よりも収縮量が大きくなっている。特に、石灰石砕砂 (1) の場合の差が大きい。

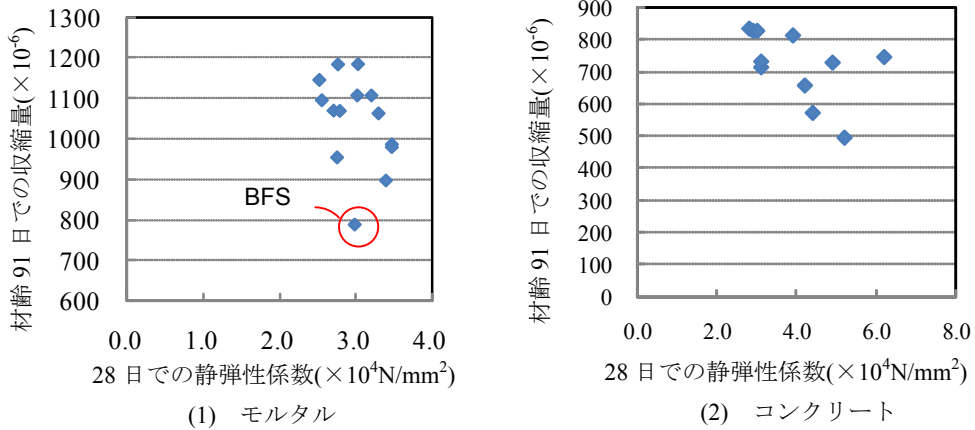


図-5 静弾性係数(材齢28日)と収縮量(材齢91日)の関係

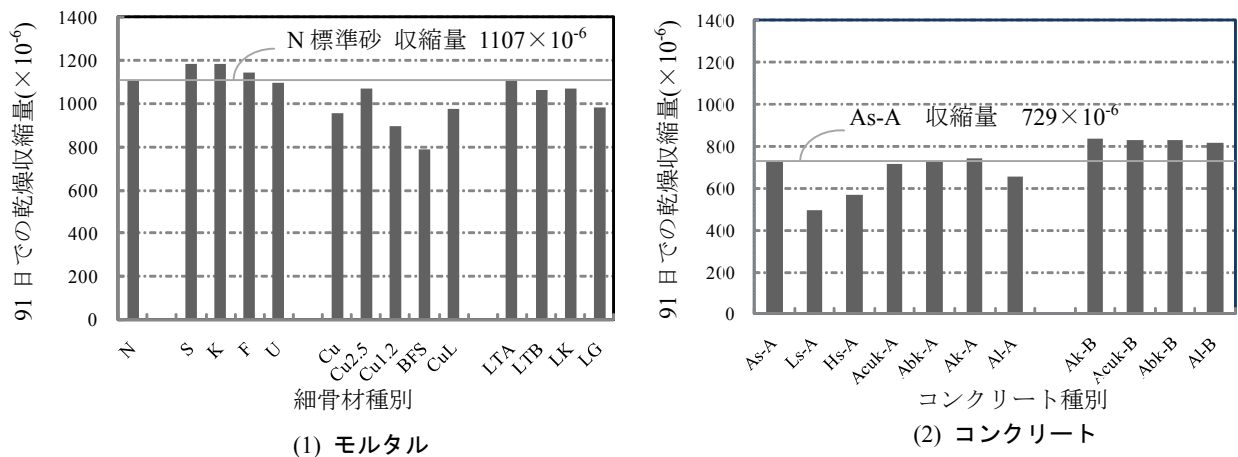


図-6 乾燥材齢91日での乾燥収縮量

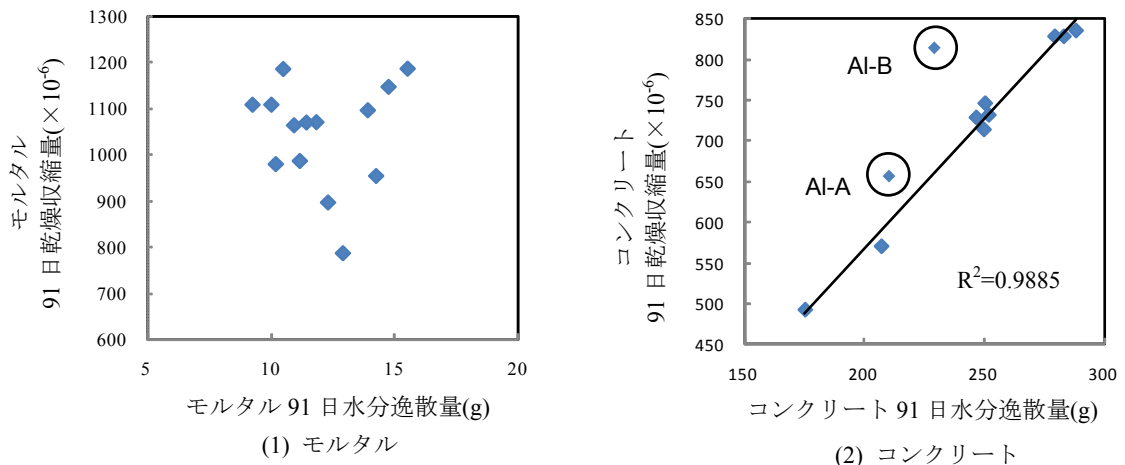


図-7 水分逸散量と乾燥収縮量 (91日) の関係

図-4 にコンクリートの水分逸散量と長さ変化の関係を示す。石灰石砕砂を用いた AI-A および AI-B を除いて、細骨材や粗骨材の種類によらず、コンクリートの水分逸散量と長さ変化の関係はほぼ同じ挙動である。石灰石砕砂では他の細骨材の組合せに比べて、同じ水分逸散量において収縮率が大きい傾向が見られた。

3.3 静弾性係数と乾燥収縮量の関係

図-5 (1) にモルタルの、図-5 (2) にコンクリートの 28 日での静弾性係数と 91 日における乾燥収縮量の関係を示す。両者ともにばらつきは大きいものの、静弾性係数が大きくなるほど、乾燥収縮量が小さくなる傾向が見られた。しかし、モルタル実験において最も収縮量が小さい BFS において、静弾性係数は今回の細骨材種の中では中位である。BFS の収縮量が小さい理由として他の細骨材とは異なる要因が影響している可能性が考えられる。具体的には、骨材によるセメントペーストの収縮の拘束ではなく、BFS 自体の微粒分の粒度及び頻度や、表面性状による影響が考えられる。

3.4 モルタルとコンクリートの比較

図-6 にモルタルとコンクリートの乾燥材齢 91 日での収縮量をそれぞれ示す。細骨材種類以外の条件を同一としたモルタルの乾燥収縮量の違いは、骨材物性の相違によるものと考えることができ、骨材の種類によってモルタルの収縮量は乾燥開始材齢 91 日において約 $800 \sim 1200 \times 10^{-6}$ の範囲で大きく異なっている。一方、コンクリートの場合には、モルタルで見られたほどの細骨材による収縮量の違いは認められなかった。これは、本実験で用いた細骨材が、モルタル実験の結果で収縮量にあまり大きな差が無かった陸砂 S、硬質砂岩砕砂 K、石灰石砕砂 LTA および銅スラグ Cu2.5 を使用していることと、モルタル実験で収縮量が際立って小さかった高炉スラグ細骨材 (BFS) を用いた場合でも、実際の施工での使用を考慮して、その使用量を全細骨材量の 30% としたため、細骨材の影響度が元々小さい条件となっていたものと考えられる。

また、モルタル、コンクリートのいずれにおいても、石灰石砕砂または石灰石砕石を用いた場合の乾燥収縮量は、同一調合の他の試験体と比べて小さい結果となった。しかし、所定のスランプを得るために単位水量を増加させた B 調合のコンクリートでは、石灰石砕石は他の粗骨材と同等の収縮量となった。

図-7 にモルタルとコンクリートの水分逸散量と乾燥材齢 91 日の収縮量の関係を示す。モルタルの場合には、両者の関係は大きくばらついており、相関は見られない。一方、コンクリートの場合には、水分逸散量が多くなるほど収縮量が大きくなる傾向が認められた。ただし、石灰石砕砂を用いた AI-A と AI-B がこの傾向から外

れており、同じ水分逸散量での収縮量が大きくなっている。同一水セメント比で、セメントペースト部分の組織が同等と考えられる条件であることから、骨材界面の遷移帯の状態による水分移動の変化が水分逸散量に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

図-8 にモルタルとコンクリートの乾燥材齢 91 日における乾燥収縮量の関係を示す。なお、コンクリートで使用した細骨材が 2 種類の場合のモルタルの収縮量には、各細骨材種でのモルタルの乾燥収縮量を、調合時の重量比で比例配分して算出した数値を用いた。今回の実験条件では、細骨材による収縮量に大きな差はなく、粗骨材種類が収縮量に大きく影響していることが分かる。ただし、図-1 及び図-3 から分かるように、今回の試験ではモルタルは 91 日で乾燥収縮がほぼ一定になっているのに対し、コンクリートでは乾燥収縮が依然として進行中である。この相違については、粗骨材の存在によって、水分逸散の速度やモルタル部の微細構造が異なる可能性が考えられる。従って、今回示した材齢 91 日での評価が確定的なものではなく、今後詳細な考察を進めていくべきと考えている。

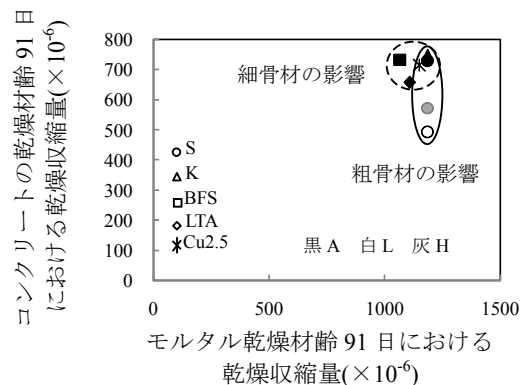


図-8 モルタルとコンクリートの乾燥収縮量の関係

4. まとめ

本研究では、各種骨材を用いたモルタルとコンクリートの乾燥収縮特性について、以下のことが明らかになった。

- (1) モルタルの乾燥収縮量は、細骨材種類によって大きく異なり、特に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの収縮量が小さかった。
- (2) コンクリートの乾燥収縮量に対する細骨材種類の影響は明らかとならなかったが、粗骨材種類の影響が大きいことがわかった。
- (3) 水分逸散量と乾燥収縮量の関係は、モルタルでは相関は見られなかったが、コンクリートでは水分逸散

量が増加するほど収縮量が大きくなる傾向が見られた。

謝辞

本研究の遂行に関しまして、室蘭工業大学大学院修了生渡邊詩穂子氏(現:北海道電力株式会社)、室蘭工業大学卒業生平野利彰氏(現:大成建設株式会社)にご助力頂きました。ここに感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 田中博一ほか: 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
- 2) 権寧世ほか: 銅スラグのコンクリート用細骨材への利用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.443-444, 1996.9
- 3) 今本啓一ほか: 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.