

報告 花崗岩採石副産物を細骨材として用いたモルタルの流動性および硬化特性

松浦 悟^{*1}・長谷川 雄基^{*1}・田村 樹雄^{*2}・佐藤 周之^{*3}

要旨: 本研究では、花崗岩採石副産物の細骨材としての適用性を評価するために、モルタルの流動性、硬化後の力学的特性、乾燥収縮特性を検討した。試料として用いる花崗岩採石副産物は、表土が付着したままの状態と、表土を水洗により除去した状態の2種類を用意した。結果として、表土の有無にかかわらず、強度発現特性ならびに圧縮・曲げ強さは標準供試体と同程度となった。花崗岩採石副産物の置換により、乾燥収縮ひずみは増加した。しかし、水洗処理を施すことにより、乾燥収縮ひずみを抑制できることが明らかとなった。以上の結果から、本材料は、水洗処理により良質な細骨材代替材として利用できることがわかった。

キーワード: 花崗岩, 採石副産物, 加工砂, モルタル, 流動性, 力学的特性, 乾燥収縮特性

1. はじめに

我が国では、これまでにコンクリート用骨材の多くを海砂に依存してきた。しかし、近年では瀬戸内海一帯をはじめとする全国的な海砂採取の禁止・規制に伴い、砕砂や山陸砂の利用が増加している¹⁾。また、中国地方においては、砕砂や山陸砂といった骨材の利用に関する研究のみならず、地域内に豊富に存在する真砂土をコンクリート用骨材として用いるための研究が数多く行われてきた²⁾。例えば服部らは、川砂の粒度分布に近い真砂土について検討を行い、単位セメント量の増加と混和剤の添加によって細骨材として利用できることを明らかにしている³⁾。井上らは、品質の異なる3種類の真砂土を用いて実験を行い、混和剤の添加量が増えるものの、圧縮強度・乾燥収縮等の特性は普通コンクリートと同等であると報告している⁴⁾。

しかしながら、真砂土の特徴として、採取地点や深さごとの物理・化学的性質が大きく異なることが知られている⁴⁾。真砂土は、花崗岩の風化残積物であり、母岩の鉱物組成や環境条件によって、風化度の進行に差が生じるためである。花崗岩や真砂土を骨材として用いた際に、風化度はコンクリートの強度発現等に直結する指標であるため、既往の研究でも強熱減量をはじめとする物理・化学的な試験が行われている³⁻⁶⁾。しかし、風化度を定量的に評価できる指標はなく、花崗岩および真砂土のコンクリート用骨材としての適用性について十分な検証がなされたとは言い難い。したがって、現場での花崗岩や真砂土の利用は、水洗処理により微粒分や不純物などを除去した後、加工砂として他の骨材と混合されている²⁾。

一方、主に港湾工事用の捨石や被覆石として利用される花崗岩の採掘を行うと、粒径50mm以下の花崗岩砕砂

と表土が混在した土砂材料（以下、花崗岩採石副産物）が大量に発生・蓄積する。この余剰材料は、表土を除去した新鮮な花崗岩の岩盤から同時期に大量生産された後、一定の場所にまとめて保管されている。すなわち、真砂土に見られるような採取地点ごとの品質の差は小さく、風化度の小さい花崗岩砕砂を含有するため、コンクリート用骨材として利用できる可能性が高いと考えられる。

そこで本研究では、花崗岩採石副産物を加工砂あるいはコンクリート用骨材として利用するための基礎的研究として、同材料を細骨材代替材としたモルタルの諸特性を評価した。試料には、表土混じりの花崗岩採石副産物と、それを水洗処理したものの2種類を用意した。試料自体の物理・化学的特性を評価した後、標準砂に対する置換率を変化させたモルタルを作製し、フレッシュ状態における流動性、硬化後の力学的特性を評価した。力学的特性の評価には、花崗岩採石副産物がモルタルの内部構造に及ぼす影響を評価するため、圧縮・曲げ強さ試験という破壊試験に加え、非破壊試験の一つである超音波法を適用し、強度発現特性の把握を試みた。一方、低品質な骨材をコンクリート用骨材として使用する際には、構造物の乾燥収縮に起因するひび割れの発生が問題となる場合がある。そこで、花崗岩採石副産物を細骨材として用いたモルタル供試体の長さ変化試験を実施し、当該材料を使用した場合の乾燥収縮特性を検討した。

2. 実験概要

2.1 花崗岩採石副産物への物理・化学的試験

本研究で使用した花崗岩採石副産物は、香川県小豆郡小豆島町の採石場で生産された。花崗岩砕砂と表土が混じった状態で集積されていた材料のうち、5mmふるいを

*1 高知大学大学院 総合人間自然科学研究科 農学専攻 (学生会員)

*2 田村石材株式会社 代表取締役 (非会員)

*3 高知大学 農学部農学科 准教授 博士 (農学) (正会員)

表-1 モルタルの配合表

供試体名	配合量[g]				
	セメント	水	標準砂	無洗花崗岩	水洗花崗岩
cont	450	225	1350	0	0
NG-10%	450	225	1215	135	0
NG-30%	450	225	945	405	0
NG-50%	450	225	675	675	0
WG-10%	450	225	1215	0	135
WG-30%	450	225	945	0	405
WG-50%	450	225	675	0	675

通過するものを試料として用意した。採取した材料は、自然乾燥後に再度 5mm ふるいを通過したもののみを試料として利用した。本実験では、5mm ふるいによる処理の花崗岩採石副産物を無洗花崗岩(略号:NG)とし、さらに無洗花崗岩を水道水で洗浄し、表土を除去したものを水洗花崗岩(略号:WG)と区別して表記する。なお、いずれの試料も粒度の調整は行っていない。

試料の物理的特性を把握すること、水洗処理が試料の物理・化学的特性に及ぼす影響を評価することを目的として、2種類の花崗岩採石副産物に対する試験を実施した。評価項目は、絶乾密度、吸水率、粒度(粒度分布と粗粒率)である。さらに、土砂材料の風化度を評価する上で簡便かつ有効な化学的試験となる強熱減量についても測定した。各試験の方法として、絶乾密度と吸水率は細骨材の密度および吸水率試験(JIS A 1109-2006)、粒度は骨材のふるい分け試験(JIS A 1102-2006)、強熱減量は土の強熱減量試験(JIS A 1226-2009)にそれぞれ基づいて実施した。

2.2 モルタル供試体の作製方法

モルタル供試体の作製に使用した材料は、普通ポルトランドセメント(密度:3.14g/cm³)、水道水、JIS規格(JIS R 5201-1997)を満たす標準砂である。モルタル供試体の形状は断面40mm×40mm、長さ160mmの角柱供試体である。本研究では、2種類の花崗岩採石副産物を、標準砂に対する質量比で内割り置換したモルタルを作製した。モルタルの作製方法は、セメントの物理試験方法(JIS R 5201-1997)に準拠した。モルタルの配合を表-1に示す。供試体名に含まれる数字は、花崗岩採石副産物の内割り置換率を示しており、無洗・水洗ともに標準砂1350gを基準として10、30、50%の3条件を設定した。花崗岩採石副産物は、流動性および硬化後の特性を同一の水分条件で相対比較するため、水洗処理の有無にかかわらず、気乾状態で使用した。なお、各材料の気乾含水率は、無洗花崗岩で0.42%、水洗花崗岩で0.12%であった。加えて、基準となるべきモルタルとして、標準砂のみを使用したcontrol(略号:cont)も同時に打設した。モルタル

供試体は、打設後24時間は乾燥を防ぎながら室温20℃の室内に静置し、脱型後に水温20℃一定の恒温水槽内で材齢7日まで標準水中養生を行った。その後、所定の材齢にて、力学的特性ならびに乾燥収縮に関する試験を実施した。

2.3 フレッシュ状態における流動性の評価方法

本研究で行ったモルタルの流動性の評価方法は、セメントの物理試験方法(JIS R 5201-1997)のフロー試験法に従った。フローテーブルの打数は15回とし、所定の練り混ぜ終了後、直交する二軸方向の直径を測定することでフロー値を算出した。

2.4 硬化後の力学的特性の評価方法

力学的特性の評価は、供試体内部の超音波伝播速度を測定する非破壊試験と、圧縮強さおよび曲げ強さを実測する破壊試験の2種類で行った。佐藤らの研究では、異なる養生温度履歴がコンクリートの強度発現に及ぼす影響を超音波伝播速度から評価している⁷⁾。そこで本研究でも、超音波法により、モルタルの強度発現特性を詳細に評価した。

超音波伝播速度は、超音波パルス法による固体の音速の測定方法(JIS Z 2353-2003)のデジタル超音波探傷器を用いたパルス透過法の直接法を適用した。超音波伝播時間の測定には、時間測定基準10kHz、振動子周波数50kHzの超音波非破壊試験機を用いた。本試験の材齢は7、14、28、56、91日であり、材齢7日時点で供試体を3本選定し、最終材齢日までこれら同じ3本の伝播時間を測定した。圧縮強さおよび曲げ強さは、セメントの物理試験方法(JIS R 5201-1997)に基づいて測定し、コンクリート圧縮試験機を用いて行った。破壊試験は材齢7、28、91日に行い、各材齢あたり曲げ試験用に3本の供試体を破壊し、曲げ試験後の供試体片を用いて圧縮試験を行った。なお、これら力学的特性の評価に用いたモルタル供試体は全て、材齢7日以降も継続して標準水中養生を継続した。

2.5 硬化後の乾燥収縮特性の評価方法

乾燥収縮特性の評価は、モルタルの乾燥収縮ひずみと

質量減少率を測定して行った。測定方法は、モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法—第2部：コンタクトゲージ方法 (JIS A 1129-2-2010) に準拠して実施した。乾燥収縮試験用のモルタルは、水温 20±2℃一定の恒温水槽内で7日間水中養生した後、水中から取り出して温度 20±2℃、相対湿度 50±5%の乾燥状態で保存した。乾燥を開始した材齢7日を乾燥材齢0日とし、乾燥材齢7, 14, 28, 56, 91日に全供試体の収縮ひずみと質量を測定した。乾燥収縮ひずみの測定機器は、最小表示量が0.001mmのダイヤルゲージを用い、測定機器の特性からゲージプラグの基長を100mmに設定した。

3. 結果と考察

3.1 花崗岩採石副産物の物理的特性

2種類の花崗岩採石副産物に対する材料試験の結果を表-2に、粒度分布を図-1にそれぞれ示す。なお、表-2中の真砂土Hと真砂土Lは、井上らの研究で高品質とされた真砂土と低品質とされた真砂土の各物性値をそれぞれ示している⁴⁾。表-2から、無洗花崗岩の絶対乾密度と吸水率は、コンクリート用砕石及び砕砂 (JIS A 5005-2009) で定められた細骨材の物理的性質の規定 (絶対乾密度: 2.50g/cm³以上, 吸水率: 3.0%以下) には適合しない材料であった⁸⁾。一方、水洗花崗岩の絶対乾密度および吸水率の値はJIS規格の値を満たしたことから、水洗処理による品質の改善効果が確認できた。各試料の粒度に着目すると、水洗花崗岩の粗粒率は無洗花崗岩のものより大きくなった。加えて、図-1の粒度分布から、無洗花崗岩に約3%含まれていた粒径0.075mm以下の微粒子が、水洗後には無くなっていた。一方、強熱減量は、無洗花崗岩で約1.2%、水洗花崗岩で約0.8%となり、水洗処理による不純物含有量の減少が確認できた。

真砂土と花崗岩採石副産物の物理・化学的特性値を比較すると、無洗花崗岩は真砂土Hと同程度の値であることがわかる。高倉らの研究によると、真砂土の強熱減量が1.7%以下であれば、海砂を用いた場合と同等の品質のコンクリート供試体を作製できることが報告されている⁹⁾。したがって、本研究で用いた花崗岩採石副産物は、無洗の場合であっても、風化度の低い良質な真砂土と同等の材料と判断できる。この無洗花崗岩の強熱減量が低い理由としては、花崗岩採石副産物の生産過程に一因があると考えられた。すなわち、無洗花崗岩は、表土除去後の新鮮な花崗岩の岩盤から同時期にかつ大量に採取されるものであるため、本来の材そのものの風化度が小さかったことに加え、その後の風化度の進行が抑えられたことが要因と考えられた。

以上の結果から、本研究で用いた花崗岩採石副産物は、無洗状態の時に風化度の低い真砂土と同程度の物理的特

表-2 試料の物理・化学的特性

	絶対乾密度 [g/cm ³]	吸水率 [%]	粗粒率	強熱減量 [%]
無洗花崗岩	2.42	3.32	2.72	1.22
水洗花崗岩	2.58	0.75	3.22	0.81
標準砂	2.64	0.42	2.41	0.07
真砂土H*	2.45	3.07	3.99	1.20
真砂土L*	2.44	2.26	3.15	3.21

*井上らの研究より引用⁴⁾

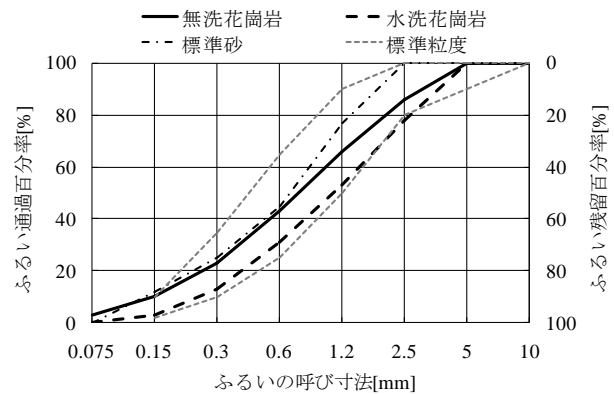


図-1 各花崗岩採石副産物の粒度分布

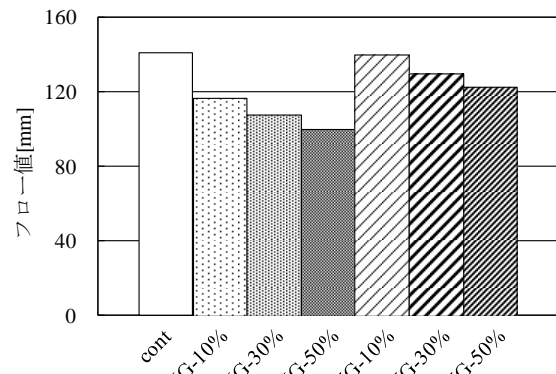


図-2 置換率とモルタルのフロー値

性を有することが示された。また、同材料を水洗処理することによって、物理・化学的な特性が改善されることが確認できた。

3.2 フレッシュ状態の流動性の評価

モルタルのフロー試験の結果を図-2に示す。図-2より、無洗・水洗を問わず花崗岩の置換率が増加するほど、フロー値は減少していくことがわかる。これは花崗岩採石副産物の表面形状による影響と考えられた。一般的に、砕砂は表面形状の粗さからフレッシュ状態時の流動性を阻害しやすいことが知られている。本研究で用いた花崗岩採石副産物は、採石の際に岩盤を粉砕することにより生産されるため、砕砂特有の粗い表面形状を有する材料であると考えられた。

一方、材料の水洗処理の有無に着目すると、フロー値

の低下傾向に明確な違いが見られた。水洗処理を施したWG-10%はcontと同等のフロー値を示し、骨材の半分を水洗花崗岩で置換したWG-50%では、contと比較して約20mm程度の低下に過ぎず、NG-10%のものよりも大きいフロー値を示した。しかし、水洗処理を施していないNG-50%では、同一置換率にもかかわらずフロー値がcontと比較して約40mm小さくなり、水洗花崗岩の2倍近い低下量を示している。モルタルの流動性が無洗花崗岩と水洗花崗岩とで大きく異なった原因は、試料中に含まれる微粒分量の影響によるものと考えられた。すなわち、無洗花崗岩中に約3%含まれていた微粒分によって練り混ぜ水が吸水された結果、同一置換率でもフロー値の低下量に差が生じたものと推察された。したがって、本材料を無洗状態で使用する際には、減水剤などの混和剤の添加が必要であると考えられた。

3.3 硬化後の力学的特性の検討

(1) 超音波法による評価

モルタル供試体の超音波伝播速度の経時変化を図-3に示す。全体として、置換率が大きくなるほど、超音波伝播速度は小さくなった。これは、置換した花崗岩の密度の影響を受けたためと考えられた。一方、全条件で材齢の経過に伴い、伝播速度の値も大きくなることが確認された。材齢7日を基準値1とした場合の材齢91日の伝播速度の増加比は、contで約1.05となるのに対し、花崗岩採石副産物を混入した条件では、水洗処理の有無にかかわらず、約1.05~1.07の範囲内であった。このことから、花崗岩採石副産物を混入した場合であっても、置換率が50%までならば、標準供試体と同程度の強度発現性を有することがわかった。また、後述する圧縮強さと超音波伝播速度との相関分析を行ったところ、無洗状態で使用した場合の相関係数 R_{ng} が0.850、水洗状態で使用した場合の相関係数 R_{wg} が0.982となった。佐藤らは、超音波伝播速度の増加比と圧縮強度の強度発現との間に高い相関性があることを明らかにしている⁷⁾。したがって、水洗処理の有無ならびに置換率を問わず、花崗岩採石副産物を細骨材置換した場合、モルタルの強度発現に及ぼす影響は極めて小さいと推察された。

兵頭らは、有機質土壌を細骨材として用いたモルタルの超音波伝播速度は置換率の増加に伴って著しく低くなり、同時に強度発現の遅延が生じることを報告している⁹⁾。本結果からは、花崗岩砕砂および試料中の表土には、上記の有機不純物のような強度発現を大きく低下させる物質が多く含まれていないことが示唆された。

(2) 圧縮強さおよび曲げ強さ試験による評価

モルタル供試体の圧縮および曲げ強さの経時変化を図-4に示す。水洗の有無を問わず、すべての置換率において材齢の進行に伴い、圧縮・曲げ強さの両者とも増

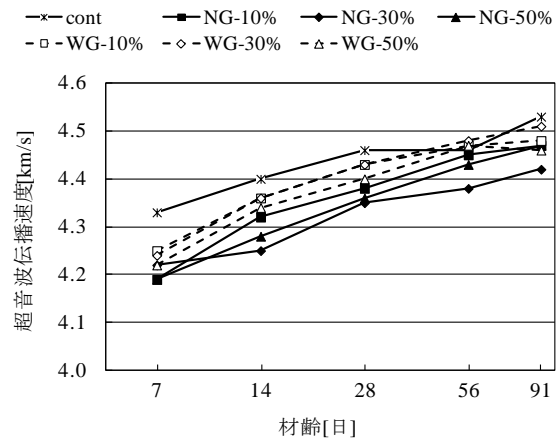


図-3 超音波伝播速度の経時変化

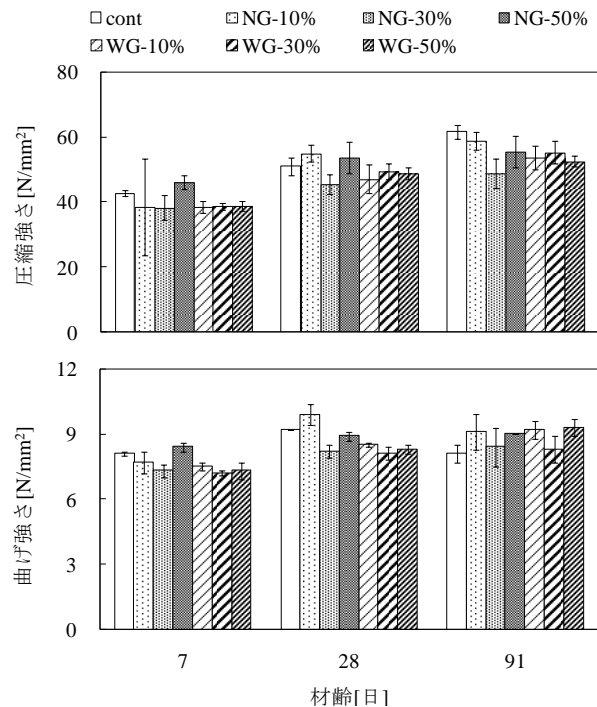


図-4 圧縮強さおよび曲げ強さの経時変化

加していることが確認できる。塚らは、試験製造された花崗岩系砕砂を用いたコンクリートの強度や耐久性が、海砂を用いたコンクリートと同等程度もしくはそれ以上の性能を確保できることを報告している¹⁰⁾。したがって、花崗岩採石副産物を細骨材として使用した場合では、置換率50%以下であれば水洗の有無を問わず十分な強度を確保できている。

一般的に、骨材の水洗処理は、骨材表面に存在する粘土やシルトなどの微粒物質を除去することで、強度や耐久性の低下を防ぐことを目的としている¹¹⁾。一方、本研究の結果からは、水洗の有無はモルタルの力学的特性に大きな影響を及ぼしていない。この理由としては、無洗状態の花崗岩採石副産物に含まれる微粒分の影響の程度

の違いが考えられた。具体的には、試料中の微粒分が供試体打設時のブリーディング水を捕捉したこと、石灰石微粉末などと同様にフィラーとして空隙充填効果を発揮したことにより、モルタル内部の微細部や脆弱部の構造が改善された可能性がある。今後、水和生成物の観察などにより、詳細な検討を進める必要がある。

3.4 硬化後の乾燥収縮特性の評価

モルタル供試体の質量減少率の経時変化を図-5に、乾燥収縮ひずみの経時変化を図-6にそれぞれ示す。全ての供試体でほぼ同様の質量減少の傾向が見られ、置換率および水洗処理の有無による質量減少率の違いは確認できなかった。

一方、乾燥収縮ひずみは、全ての供試体で材齢の経過に伴い増加しており、花崗岩採石副産物の置換率が大きくなるほど乾燥収縮ひずみは大きくなっている。したがって、実使用にあたり、乾燥収縮ひずみによるひび割れの抑制が求められる場合は、収縮低減剤や膨張材などの混和材料の適切な利用を検討する必要がある。

また、水洗処理の有無に着目すると、全ての置換率で水洗花崗岩を使用した場合のひずみ量が、無洗花崗岩のものよりも小さくなった。石森らは、石灰石砕砂を用いて水洗の有無と乾燥収縮量の関係を検討した結果、水洗によりモルタルの乾燥収縮を低減できることを報告しており¹²⁾、本結果においても、水洗による同様の効果を得た。

以上のことから、花崗岩採石副産物を細骨材として混入したモルタルの乾燥収縮は、標準砂のみを使用したものよりも大きくなるが、水洗処理を施すことで乾燥収縮を大きく抑制できることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、余剰材料の1つである花崗岩採石副産物を細骨材として用いた際のモルタルの流動性、硬化後の力学的特性と乾燥収縮特性について検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 無洗状態の花崗岩採石副産物は、風化度の低い真砂土と同程度の物理的特性を有する材料であった。一方、花崗岩採石副産物に水洗処理を施すことで、JIS規格で定められたコンクリート用砕砂の絶乾密度および吸水率を満足する材料となった。
- (2) 無洗状態では、花崗岩採石副産物の置換率が増加するほど、モルタルの流動性は低下した。一方、水洗状態では、置換率に関わらず標準砂を使用したモルタルの流動性と同程度となった。
- (3) 花崗岩採石副産物を混入したモルタルは、水洗処理の有無に関わらず、圧縮・曲げ強さともに十分な強度を示した。

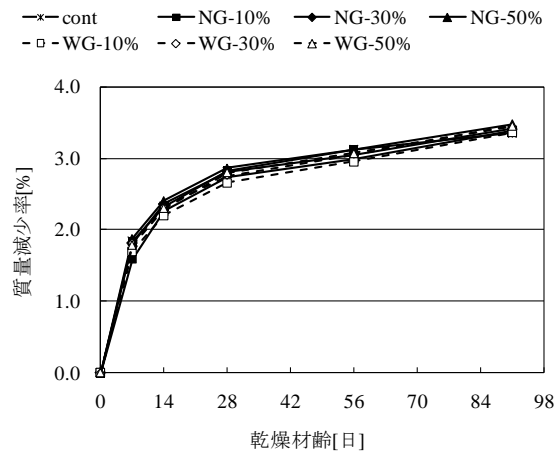


図-5 質量減少率の経時変化

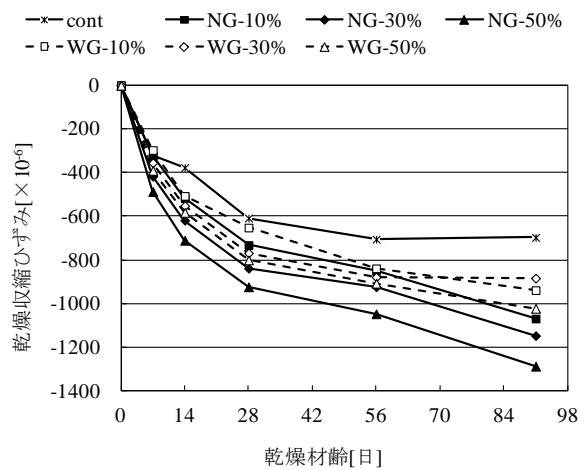


図-6 乾燥収縮ひずみの経時変化

- (4) 花崗岩採石副産物を細骨材として用いた場合、置換率が大きくなるほど乾燥収縮ひずみが増加した。しかし、水洗処理を施すことで、乾燥収縮ひずみが大きく低減した。

5. 今後の展望

本研究では、花崗岩採石副産物の細骨材としての適用性を評価した。モルタルの力学的特性の評価結果から、水洗処理の有無を問わず十分な強度を発現することが確認できた。一方、本材料の置換率により乾燥収縮ひずみが増加することが明らかとなった。

従来の考え方、すなわち骨材の品質を規定することでコンクリートの品質を確保する考え方と比べるとすれば、本材料は率先してコンクリートに利用するのが難しいものと考えられがちである。しかしながら、我が国は現在、設計思想の大幅な転換を進めているところでもある。例えば性能設計の導入など、従来の仕様規定とは全く異なる思想が設計全般に導入されてきている。このことは、これまで低品質という理由から使用が避けられてきた材

料であっても、適材適所の観点から、各々の特性を利用した活用方法の確立を目指すものである。限られた資源の有効利用は、資源循環型社会の構築に必須である。また、既に良質な天然骨材の枯渇が問題となって久しい我が国は、将来的に材料の性能設計を主導的かつ積極的に進める必要があると考える。例えば本研究で用いた花崗岩採石副産物のように、現在もコンクリートへの積極的利用が進んでいない材料については、その特性を評価した上で、適切な利用方法を検討・確立する必要がある。今後、コンクリートの細骨材・粗骨材としての利用性について、作業性や安定性、各種耐久性についてさらに検討を進める予定である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 24580356 ならびに四国建設弘済会の助成を受けて実施されたものです。また、本研究の遂行にあたり、高知大学大学院総合人間自然科学研究科農学専攻の内田美夏氏、流域水工学研究室の青木杏奈氏、香川晴彦氏、金岡弘記氏には多くのご協力を頂きました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 古井博：中国地方における骨材事情について、コンクリート工学, Vol.48, No.1, pp.102-104, 2010.1
- 2) 佐藤良一, 井上正一, 斎藤直, 安達久仁彦：中国地方のコンクリート技術の現状と特色, コンクリート工学, Vol.48, No.1, pp.34-36, 2010.1
- 3) 服部九二雄, 柘植巳一：マサ土を細骨材として利用したコンクリートの特徴—低品質骨材の有効利用に関する研究 (I) 一, 農業土木学会論文集, No.144, pp.25-32, 1989.12
- 4) 井上正一, 黒田保, 松井信作, 吉野公：まさ土を細骨材として用いたコンクリートの物性, 材料, Vol.53, No.10, pp.1077-1082, 2004.10
- 5) 古河幸雄ほか：コンクリート用細骨材としてのまさ土の利用に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.750, pp.159-170, 2003.12
- 6) 高倉寅喜, 吉野好明：マサ土コンクリートの開発, 建設マネジメント技術, pp.72-78, 1998.10
- 7) 佐藤周之, 服部九二雄, 緒方英彦, 高田龍一：初期養生温度が普通コンクリートの強度発現特性および圧縮強度に及ぼす影響, 農業土木学会論文集, No.220, pp.69-76, 2002.8
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 2010 年制定, 規準編, pp.100-107, 2010
- 9) 兵頭正浩, 横井克則, 藤川智紀, 佐藤周之：有機質含有量の高い土壌を細骨材に用いたモルタルの力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1852-1857, 2012
- 10) 堺孝司ほか：花崗岩砕砂を用いたコンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.129-134, 2004.5
- 11) 田澤栄一編著：エースコンクリート工学, 朝倉書店, pp.32-35, 2002
- 12) 石森正俊, 名和豊春, 胡桃澤清文：石灰石砕砂を用いたモルタルの強度発現と乾燥収縮に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.109-114, 2009