

論文 粗骨材の容積比を変えたコンクリートの長さ変化試験における水分の挙動と長さ変化率に関する一考察

安居 裕之^{*1}・中田 善久^{*2}・斉藤 丈士^{*3}・大塚 秀三^{*4}

要旨:粗骨材の容積比が長さ変化率に及ぼす影響を明らかにするために、粗骨材の容積比を変化させたコンクリートの長さ変化率試験における供試体中の水分の変化を調べ、粗骨材の容積比の違いが水分の挙動に及ぼす影響を検討した。また、水分の挙動が長さ変化率に及ぼす影響を検討した。その結果、粗骨材の容積比が大きいかほど供試体からの水分の逸散は抑制され供試体中の自由水量は多くなること、質量減少率および逸散水率と長さ変化率には密接な関係があることがわかった。なお、粗骨材に石灰岩を用いた供試体では、逸散水量が抑制され固定水量が増大することから水とセメントの結合とは異なる水の固定があることを見出した。

キーワード:長さ変化試験, 総水量, 逸散水量, 自由水量, 固定水量, 長さ変化率

1. はじめに

コンクリートの長さ変化試験により測定される収縮は、毛細管空隙やゲル空隙に存在する水が乾燥する際に毛細管壁間におけるメニスカスの曲率半径が小さくなっていき、毛細管壁を接近させようと働く(引張)応力が主な原動力であり、この応力による収縮が粗骨材の拘束により抑制されると考えられる。したがって、粗骨材の容積比が長さ変化率に影響を及ぼす要因であることには疑いがない。これに関して、既往の研究では粗骨材の容積比ならびに種別がコンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす¹⁾ことが指摘されている。また、一般的な調合ではスランプの変化に伴い粗骨材の容積率が異なることから、コンクリートの調合条件としてのスランプの違いが乾燥収縮に影響を及ぼす²⁾との指摘も、粗骨材の容積比の影響を間接的に表現するものと考えられる。ただし、これら既往の研究においては粗骨材の容積比の変化に伴ってセメントと砂の割合すなわちモルタル部分の構成割合を変化させる一般的な調合設計法³⁾を用いているため、結果には粗骨材の種類や容積比以外にモルタル部分の変化による影響が含まれている可能性がある。

また、長さ変化に影響を及ぼすもう一方の主要因である供試体中の水分の状態に関しては、長さ変化試験を終了した供試体を強制的に乾燥し、残存水量を調べて水の挙動を詳細に検討した例⁴⁾や各測定時点における逸散水量をもとにコンクリートの水分逸散量の時間曲線を導き、材齢の経過に伴う水の挙動を示した例⁵⁾が見られるが、これらの検討では、基準となるコンクリート中の水分として単位水量を用いており、一般に湿潤状態で使用される骨材の含水量に関しては考慮されていない。

そこで、本研究は、粗骨材の容積比が供試体中における水分の挙動ならびに長さ変化率に及ぼす影響を明らかにするために、モルタル部分における材料の構成割合を一定として粗骨材の容積比を変化させたコンクリートを対象として実験的検討を行ったものである。ここでは骨材の含水量を考慮し、長さ変化試験の乾燥開始時における供試体中の総水量を調合上の単位水量と骨材の含水量および水中養生中に吸水された水量の和として検討した結果を述べる。

2. 長さ変化試験における供試体中の水分の挙動と本研究の関係

コンクリートの長さ変化試験における供試体中の水分の挙動の概念図を図-1に示す。一般的な長さ変化試験では、初期に水中養生を行うため供試体中における水分量の変化には乾燥開始後における自由水の逸散だけでなく水中養生における吸水もあり、その吸水量は、乾燥開始時の総水量に直結するため乾燥下における水分の挙動に影響を及ぼす可能性が高い。さらに、セメントの水和には時

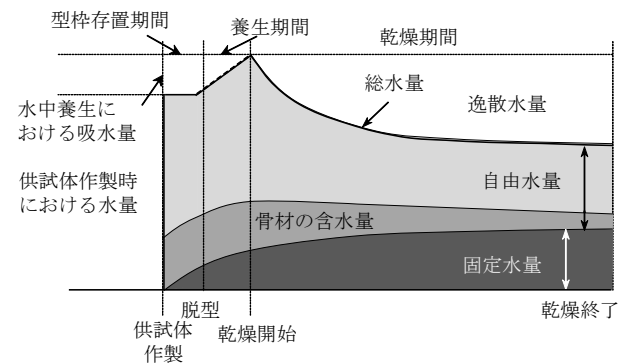


図-1 コンクリートの水分の挙動の概念図

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 生物資源科学部生物環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 ものつくり大学 技能工芸学部建設学科 准教授 博士(工学) (正会員)

間依存性があり、コンクリートの強度は材齢に伴い徐々に発現することから、結合水などとしてコンクリート中に固定される水の量は、時間の経過とともに変化すると考えられる。この固定される水量は、乾燥によって逸散する水分のもととなる自由水の量に影響していると考えられる。一方、供試体中の骨材は練混ぜに用いる状態では含水しており、乾燥条件においてはこの水分も徐々に逸散すると考えられるため、自由水の一部と見なすべきである。

このような考えから、本研究では、モルタル部分の材料の構成割合を一定として粗骨材の容積比を変化させたコンクリートの長さ変化試験における水分量を総水量、逸散水量、自由水量(骨材の含水量を含む)および固定水量の4つに区分し、これらを調合上の単位水量、水中養生における吸水量、各乾燥期間における質量減少量および強制乾燥に伴う質量減少量をもとにして算出し、粗骨材の容積比と水分の挙動の関係について検討している。

3. 実験概要

モルタル部分を一定とし、粗骨材の種類および容積比を変化させた調合のコンクリートを練混ぜ、10×10×40cmの角柱供試体を作製し、標準養生を行った。その後、20℃、60%Rhの環境で乾燥させ、所定の乾燥期間において質量、長さ変化率および105℃で恒量になるまで乾燥させた場合の質量を測定し、質量減少量および105℃の乾燥による質量減少量から水分の挙動を検討した。

3.1 使用材料

セメントに普通ポルトランドセメント、細骨材に陸砂(密度:2.61g/cm³、吸水率:2.20%)、粗骨材に石灰岩、硬質砂岩および砂岩の3種類、混和剤に高性能AE減水剤を使用した。骨材の含水量は、骨材の吸水率から算出した。また、粗骨材の粒度による影響をできる限り除外するため、あらかじめ混合された碎石2005の必要量をすべて各粒群に分類し、JASS 5に示される標準粒度(碎石2005)の範囲の中心値に再度混合することにより、粗骨

材の粒度分布を調整した。

3.2 コンクリートの調合

実施調合の容積比を図-2に、コンクリートの概要を表-1に示す。水セメント比は、50%の一定とした。粗骨材の容積比は、0、0.24、0.35および0.41の4水準とし、セメントと砂の構成割合をC:S=1.0:2.9の一定とした。また、フレッシュコンクリートの性状は、粗骨材の容積比が0.35においてスランプが21±1.5cm、空気量が4.5±1.5%を満足するように高性能AE減水剤の添加量により調整し、粗骨材の容積比が0.24、0.41の場合は、化学混和剤のセメント量に対する添加率をこれと同一とした。また、粗骨材の容積比が0のコンクリートは、粗骨材の容積比が0.35のコンクリートをウェットスクリーニングしたもの(以降、本文ではW.Sモルタル、図中では、0と称す)を使用した。これは、粗骨材に含まれる過小粒や微粒分がコンクリート中におけるモルタル分の一部となり、この影響を加味したものとするために採用した。

3.3 供試体の取扱いと各水量の算出方法

実験概要を図-3に示す。型枠に打込んだコンクリートは、練混ぜから24時間後に脱型をした。脱型後は、材齢7日まで20±2℃の水中で養生し、養生後、寸法および質量を測定した。測定後、供試体は温度20±2℃、湿度60±5%の恒温恒湿室で保管し、所定の材齢においてJIS A 1129-3⁹⁾に準じ測定を行い、コンクリートの長さ変化率および質量減少率を算出した。また、所定の材齢において長

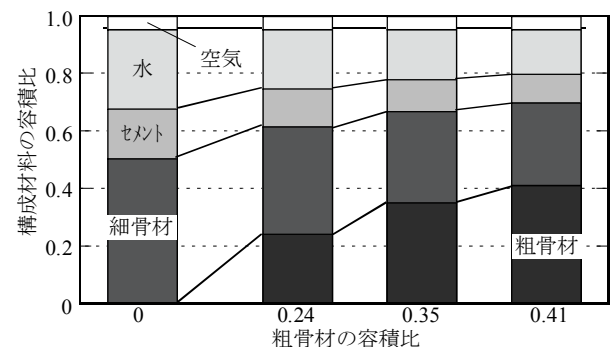


図-2 構成材料の容積比

表-1 コンクリートの概要

粗骨材の種類	粗骨材の品質および性状	粗骨材の容積比	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				SL (cm)	空気量 (%)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)
				W	C	S	G			
石灰岩	表乾密度:2.70g/cm ³ 吸水率:0.86% 粗粒率:6.60	0.41	50	157	314	749	1112	24.0	3.9	0.19
		0.35		175	350	830	948	22.0	4.9	0.11
		0.24		207	414	979	653	16.0	4.0	0.06
		0 ^{*1}		—	—	—	—	—	—	—
硬質砂岩	表乾密度:2.68g/cm ³ 吸水率:0.78% 粗粒率:6.60	0.41	50	157	314	749	1104	23.5	3.5	0.16
		0.35		175	350	830	941	21.0	4.2	0.08
		0.24		207	414	979	649	19.5	4.0	0.06
		0 ^{*1}		—	—	—	—	—	—	—
砂岩	表乾密度:2.58g/cm ³ 吸水率:2.79% 粗粒率:6.60	0.41	50	157	314	749	1063	25.0	3.3	0.21
		0.35		175	350	830	906	21.0	4.7	0.12
		0.24		207	414	979	624	17.0	4.3	0.08
		0 ^{*1}		—	—	—	—	—	—	—

*粗骨材の容積比が0.35のコンクリートをウェットスクリーニングしたものを使用した

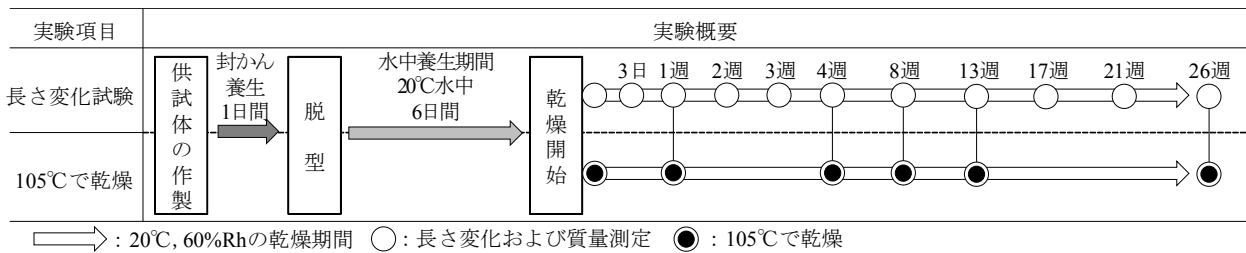


図-3 実験概要

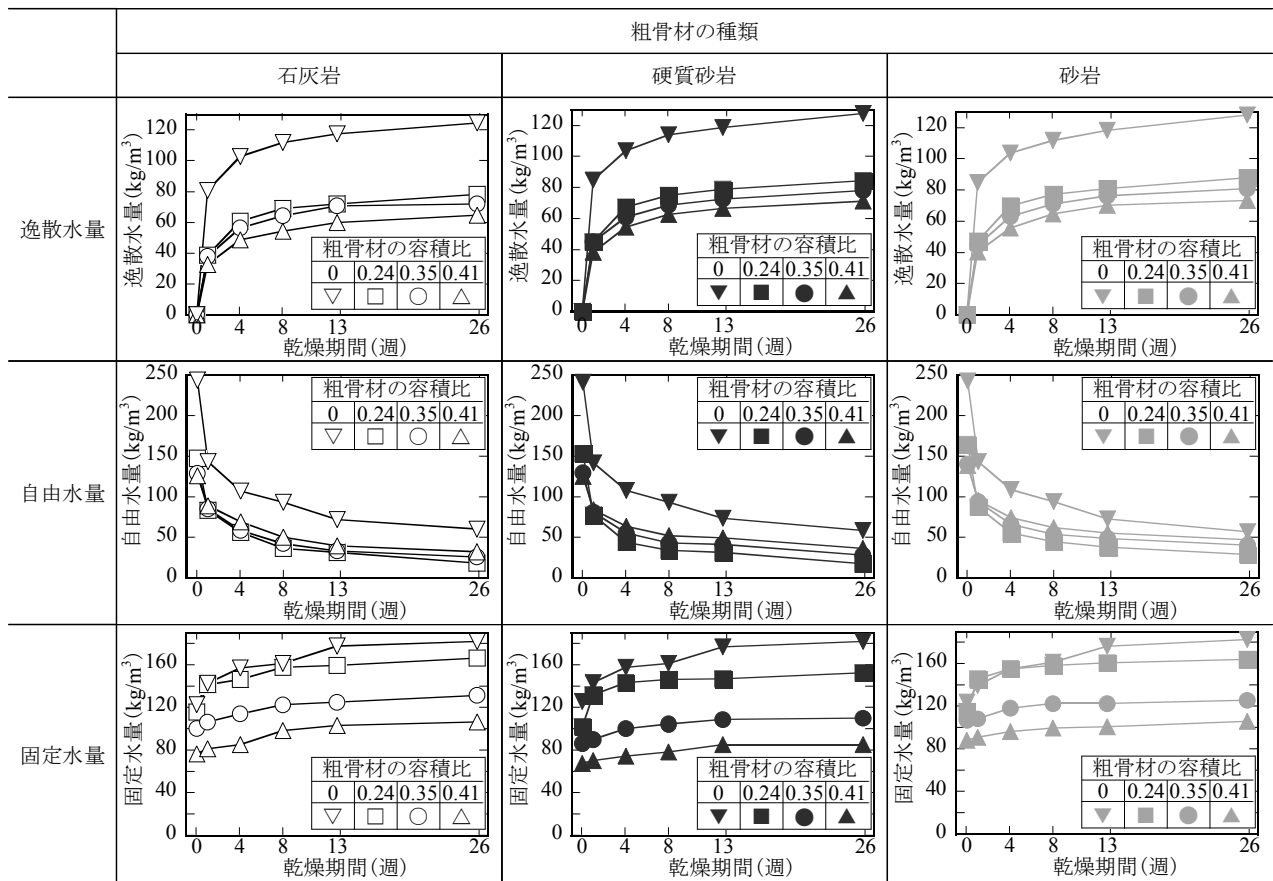


図-4 乾燥期間と各水量の関係

長さ変化率を測定した供試体と同条件の供試体を $105 \pm 5^\circ\text{C}$ の乾燥炉で恒量になるまで乾燥させ、乾燥前後の質量から自由水量を算出した。

逸散水量、総水量、自由水量および固定水量の算定式を式(1)、式(2)、式(3)、式(4)および式(5)に示す。

$$W_C = (m_w - m_0) / m_0 \times M \quad \dots (1)$$

$$W_L = (m_w - m_x) / m_0 \times M \quad \dots (2)$$

$$W_T = W_0 + W_A + W_C - W_L \quad \dots (3)$$

$$W_F = (m_x - m_0) / m_0 \times M \quad \dots (4)$$

$$W_B = W_T - W_F \quad \dots (5)$$

ここに、 W_C :水中養生における吸水量(kg/m^3)

W_L :各乾燥期間における逸散水量(kg/m^3)

W_T :各時点における総水量(kg/m^3)

W_0 :調合上の単位水量(kg/m^3)

W_A :骨材の含水量(吸水量)(kg/m^3)

W_F :各乾燥期間における自由水量(kg/m^3)

W_B :各材齢の固定水量(kg/m^3)

m_w :水中養生後(乾燥開始時)の質量(g)

m_0 :脱型時の質量(g)

M :調合上の単位容積質量(kg/m^3)

m_x :各乾燥期間における質量(g)

m_D : 105°C で乾燥した後の質量(g)

4. 結果および考察

4.1 各水量の変化

(1) 乾燥期間の経過に伴う各水量の変化

乾燥期間と各水量の関係を図-4に示す。逸散水量は、乾燥期間4週まで顕著に増大し、4週以降は緩やかに増大する傾向を示した。

自由水量は、乾燥期間4週まで顕著に減少する傾向を示

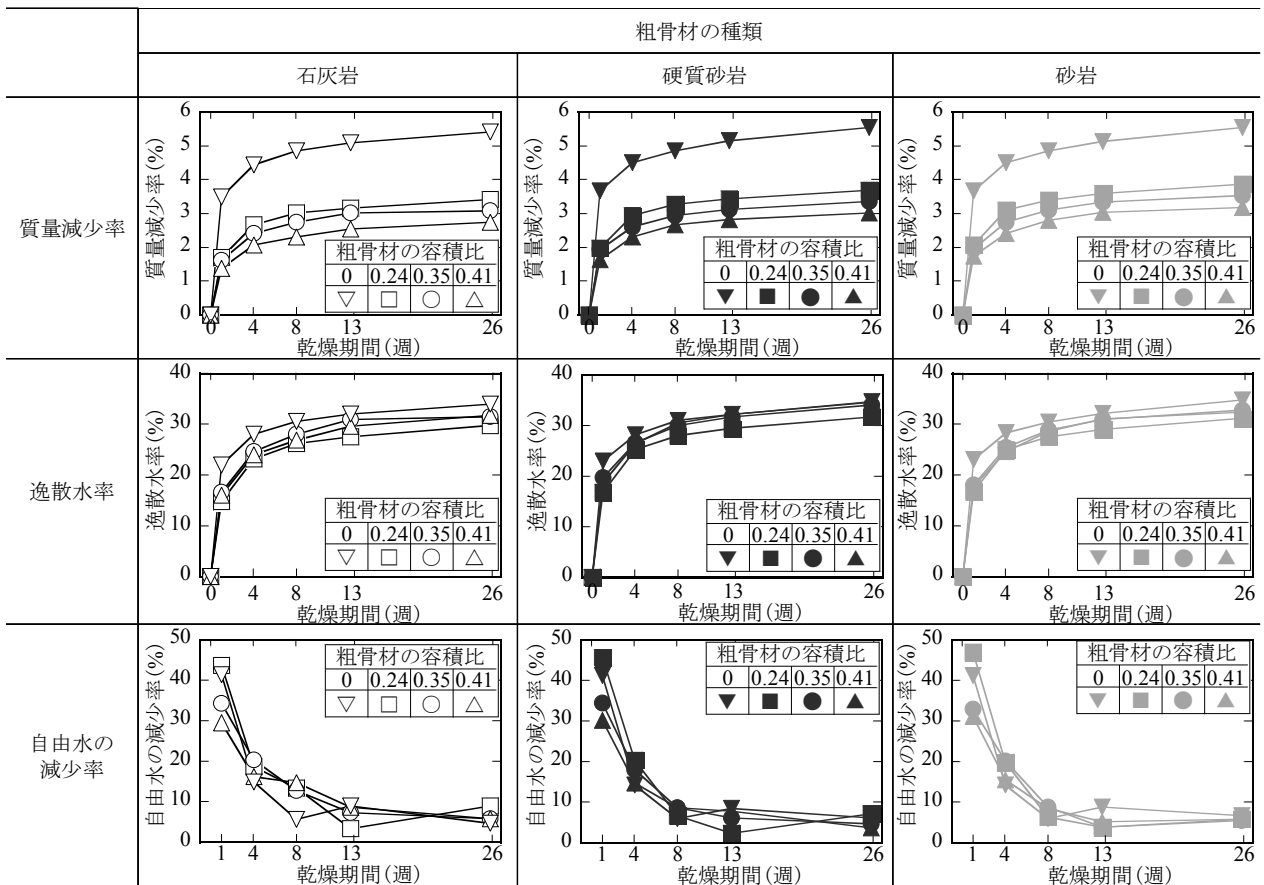


図-5 乾燥期間と各水量における変化率の関係

し、4週以降は緩やかに減少する傾向を示した。

一方、固定水量は、粗骨材の種類および容積比にかかわらず乾燥期間の経過に伴い増加する傾向を示し、W.Sモルタルおよび粗骨材の容積比0.24の場合、粗骨材の種類にかかわらず乾燥開始から乾燥期間1週にかけて顕著に増加する傾向を示した。これは、セメントの水和反応が初期材齢に活発である⁹⁾ことが、単位セメント量の多い調合において顕著に表れたものと考えられる。

(2) 乾燥期間の経過に伴う水分の変化率

乾燥期間と各水量における変化率の関係を図-5に示す。逸散水率は、各乾燥期間における逸散水量を乾燥開始時の総水量で除したものとし、自由水の減少率は、各乾燥期間における自由水の減少量を乾燥開始時の自由水量で除したものとした。

質量減少率は、全体に乾燥期間4週程度まで顕著に増大し、その後は緩やかに増大する傾向にあり、粗骨材の容積比による傾向は図-4に示す逸散水量と概ね同様であった。また、逸散水率は、同様に乾燥期間4週程度まで顕著に増大し、その後は緩やかに増大する傾向にあったが、図-4に示す逸散水量と比べると粗骨材の容積比による違いは顕著に小さくなった。これより、供試体表面から逸散する水量には、乾燥開始時における総水量が大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

一方、自由水の減少率は全体に乾燥期間の経過に伴い小さくなり、乾燥期間1週の場合にはW.Sモルタルの場合を除き粗骨材の容積比が大きいほど小さく、乾燥期間4週以降では粗骨材の容積比の違いによる差は小さくなる傾向を示した。この結果は、粗骨材の容積比が小さいほど、逸散水量に影響する乾燥開始時の総水量、ならびに固定水量に影響する単位セメント量のいずれも多いことが影響し、また、この影響は乾燥初期において顕著であることを示唆するものと考えられる。

(3) 粗骨材の容積比と各水量の関係

粗骨材の容積比と乾燥期間26週における各水量の関係を図-6に示す。乾燥期間26週における逸散水量は、粗骨材の種類にかかわらず粗骨材の容積比の増加に伴って概ね直線的に減少する傾向を示した。これは、モルタル部分の調合を一定としたことにより粗骨材の容積比が大きいほど単位水量が直線的に少なくなったためと考えられる。また、粗骨材の種類の影響はW.Sモルタルの場合にはほとんどみられないが、それ以外の場合は粗骨材の容積比にかかわらず石灰石を用いた場合に最も小さくなった。これより、石灰岩は硬質砂岩や砂岩よりも供試体中の水分の逸散を抑制するものと考えられる。また、図-5に示す逸散水率のW.Sモルタルとそれ以外の差において石灰岩の傾向が乾燥期間4週以降に硬質砂岩や砂岩と異なって

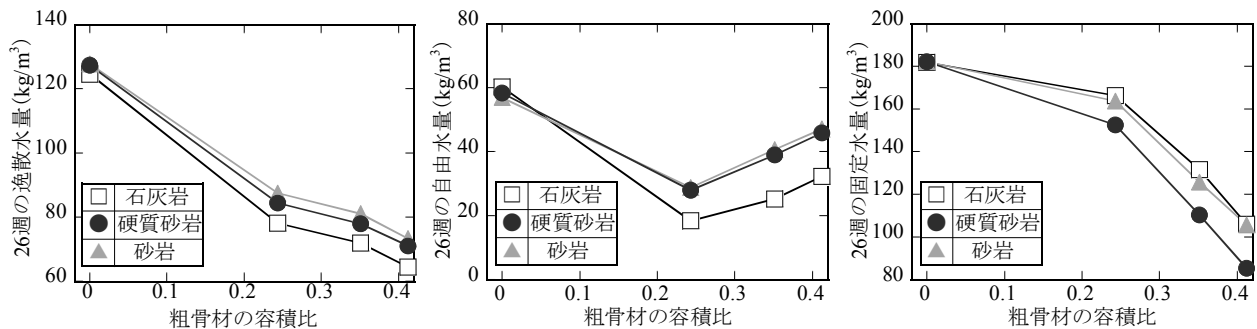


図-6 粗骨材の容積比と乾燥期間26週における各水量の関係

いるように見えることから、石灰岩が水分の逸散を抑制する傾向は乾燥期間4週以降において現れるものと考えられる。なお、乾燥期間26週における逸散水量は硬質砂岩を用いた場合に砂岩を用いた場合よりもわずかに小さくなる傾向を示した。これは、砂岩において粗骨材の吸水率が高く乾燥開始時における総水量が多かったことが若干の影響を及ぼしたものと考えられる。

乾燥期間26週における自由水量は、W.Sモルタルで最も多く、それ以外は粗骨材の容積比が大きいほど増加する傾向を示した。これは、図-5に示すように自由水の減少率が乾燥初期において粗骨材容積比が大きいほど小さいが、その後は粗骨材容積比による明確な傾向が見られないことから、乾燥初期における水分の挙動が乾燥期間26週まで影響しているものと考えられる。また、W.Sモルタルで乾燥期間26週における自由水量が多いことは、乾燥開始時における自由水量が著しく多いためと考えられる。なお、乾燥期間26週における自由水量は、W.Sモルタルにおいて粗骨材の違いによる差は小さかったが、それ以外では石灰岩の場合に少なかった。

乾燥期間26週における固定水量は、粗骨材の容積比が大きいほど減少する傾向を示した。これは、単位セメント量が多いほどセメントと水和し固定される水量が多いためと考えられる。また、乾燥期間26週における固定水量はW.Sモルタルにおいて粗骨材の違いによる差は小さかったが、それ以外では石灰岩および砂岩を用いた場合に硬質砂岩を用いた場合よりも多くなった。これは、石灰岩では逸散水量が抑制されるにもかかわらず自由水量が少ないことから、骨材に何らかの水を固定する作用があるためと考えられる。一方、砂岩では粗骨材の吸水率が高く乾燥開始時における総水量が多いことや乾燥中に骨材から徐々に放出される水分がモルタル部分に供給されたことでセメントの水和が進んだ可能性がある。

4.2 各水量が長さ変化率に及ぼす影響

(1) 乾燥期間の経過に伴う長さ変化率の変化

乾燥期間と長さ変化率の関係を図-7に示す。長さ変化率は、水中養生期間に減少(膨張)するが、粗骨材の種類および容積比にかかわらず乾燥期間の経過に伴い増加する

傾向を示した。また、全体に乾燥期間4週まで顕著に増加する傾向を示し、それ以降は緩やかに増加する傾向となった。さらに、長さ変化率は、乾燥期間にかかわらず、石灰岩を用いた場合に硬質砂岩および砂岩を用いた場合よりも小さくなる傾向を示した。

(2) 粗骨材の容積比と長さ変化率の関係

粗骨材の容積比と乾燥期間26週における長さ変化率の関係を図-8に示す。乾燥期間26週における長さ変化率は、粗骨材の種類にかかわらず粗骨材の容積比が大きいほど小さくなる傾向を示した。なお、全体に石灰岩を用いた場合に長さ変化率は硬質砂岩および砂岩を用いた場合よりも小さくなる傾向にあることは前述の通りであるが、この場合の差はW.Sモルタルの場合には極めて小さく、粗骨材の容積比が大きくなるほど大きくなっていった。この結果より、粗骨材の容積比が大きいほど石灰岩を用いた場合に長さ変化率が小さくなる効果は高くなるものと考えられる。

(3) 供試体の水分と長さ変化率の関係

質量減少率、逸散水率、固定水の増加率および自由水の減少率と長さ変化率の関係を図-9に示す。固定水の増加率は、各乾燥期間における固定水の増加量を乾燥開始時の固定水量で除したものとした。

長さ変化率は、質量減少率および逸散水率に伴い増加する傾向を示し、粗骨材の種類にかかわらず概ね直線的な関係を示していた。これは、既往の研究⁹⁾と同様の傾向である。しかし、質量減少率と長さ変化率の関係においては、粗骨材の容積比による違いがあまり明確でないが、逸散水率と長さ変化率の関係においては、ばらつきはあるものの粗骨材の容積比の違いによる差が比較的明確であった。これは、いずれも逸散水量を分子とするものの基準(分母)となる供試体質量と乾燥開始時における総水量の大きさが著しく異なるためと考えられるが、この結果からは、骨材にあらかじめ含まれる水を考慮した場合の逸散水率が質量減少率よりも粗骨材の容積比の影響に関して詳細に検討できる可能性があると思われる。

固定水の増加率と長さ変化率の関係に明確な傾向は見られなかった。これは、単位セメント量およびモルタル量が

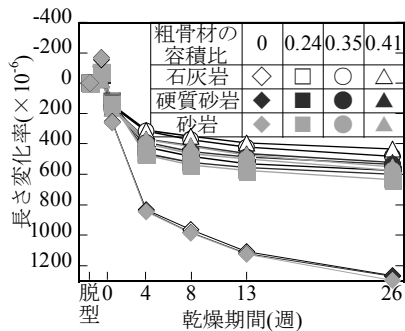


図-7 乾燥期間と長さ変化率の関係

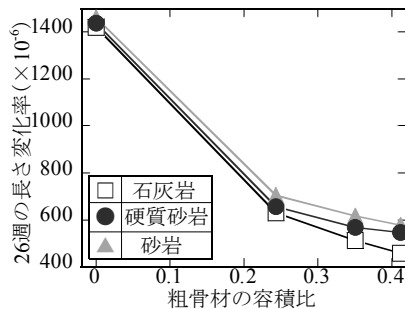


図-8 粗骨材の容積比と26週における長さ変化率の関係

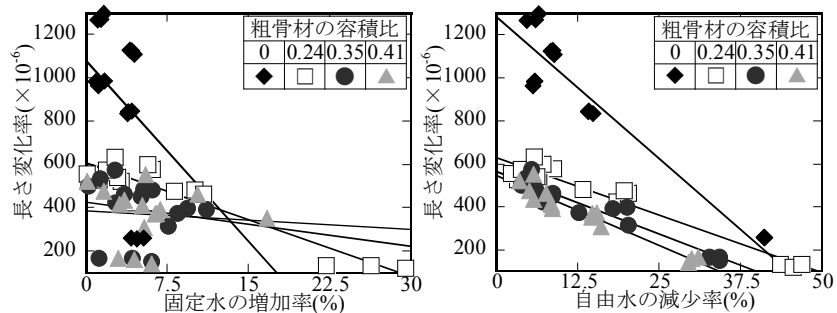
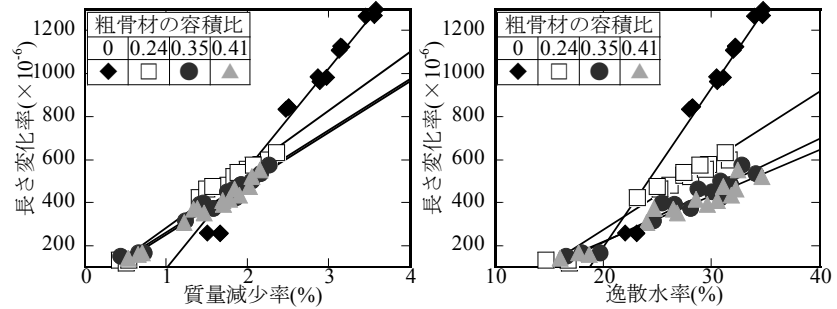


図-9 質量減少率、逸散水率、固定水の増加率および自由水の減少率と長さ変化率の関係

参考文献

多い場合に初期の固定水の変動が大きいことならびに粗骨材の容積比ごとに固定水量が大きく異なるためである。

自由水の減少率と長さ変化率の関係は、粗骨材の容積比による差が見られていたが、自由水の減少率が大きいほど長さ変化率は小さくなり、自由水の減少が収縮の原動力であると考えられる一般的な概念とは異なる傾向を示した。これは、水分の挙動および長さ変化率の双方に粗骨材の容積比の変化またはそれに伴う単位セメント量の変化の影響が及んでいるためであり、さらにこの影響は、水の挙動による長さ変化率への影響よりも大きいことを表していると考えられる。

5. まとめ

本報告では、粗骨材の容積比を変化させたコンクリートの長さ変化試験における各水分の挙動および長さ変化率について検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 乾燥期間26週における逸散水量は、粗骨材の容積比の増加に伴って減少する傾向を示した。一方、W.Sモルタルを除く場合乾燥期間26週における自由水量は、粗骨材の容積比の増加に伴い増大する傾向を示した。
- (2) 乾燥期間26週における長さ変化率は、粗骨材の容積比が大きいほど小さくなる傾向を示した。
- (3) 長さ変化率は、質量減少率および逸散水率の増加に伴い増大する傾向を示した。
- (4) 骨材にあらかじめ含まれる水を考慮した場合の逸散水率は、長さ変化試験における粗骨材の容積比の影響に関して質量減少率よりも詳細に検討できる可能性がある。

- 1) 長瀧重義ほか: コンクリートの乾燥収縮およびクリープの機構に関する考察, コンクリート工学, Vol.20, No.12, pp.85-95, 1982.12
- 2) 藤本貴, 千歩修, 足立裕介: 粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 分冊 pp.97-98, 2003.7
- 3) 石橋敏, 坂本昭夫, 嵩英雄: コンクリートの乾燥収縮と調合に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.65-66, 1980.9
- 4) 日本建築学会: コンクリートの調合設計指針・同解説, 1999
- 5) 郭度連, 國府勝郎, 宇治公隆: コンクリートの乾燥下における水分の存在状態および経時変化, コンクリート工学論文集, pp.1-10, 2005.9
- 6) 寺西浩司: コンクリートの乾燥に伴う水分逸散の機構に関する一考察 その1 水分逸散量に対する骨材量の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1分冊, pp.559-560, 2002.8
- 7) 日本規格協会: JIS A 1129 「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」, 2001
- 8) 井上豪, 五十嵐心一: 2, 3 の手法により求めたセメントの水和度の比較, コンクリート工学論文集, pp.541-546, 2005
- 9) 例えば, 清水五郎, 松井嘉孝: 含有水の減少とコンクリートの収縮との相関性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 分冊, pp.93-94, 1979.9