

報告 細骨材の一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの諸物性

鶴田 昌宏^{*1}・小島 明^{*2}・中村 秀三^{*3}

要旨：細骨材の一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートにおいて、石灰石微粉末の含有量が各種物性にどのような影響を与えるかをスランプ 12cm および 18cm の普通コンクリートを対象とし実験的に検討した。その結果、本実験の範囲において微粒分量の増加により、プラスチックティー向上、強度増進、凍結融解抵抗性向上、乾燥収縮低減等コンクリートの性状改善効果が認められた。また、微粒分量の変動が±6%程度あっても、コンクリートの実用上問題を生じるスランプならびに空気量の変動はないものと考えられた。

キーワード：石灰石微粉末, 石灰石砕砂, 外割置換, 微粒分量, 凍結融解抵抗性, 乾燥収縮

1. はじめに

近年、高強度・高流動コンクリートの実用化に伴い、コンクリート用混和材として石灰石微粉末を使用する例が増えている。

石灰石微粉末を混和したコンクリートは、ワーカビリティの改善や初期材齢における強度増進といった効果が期待でき、多くの研究成果が報告されている。

しかし、これらの研究は高強度・高流動コンクリートに関するものが多く、普通コンクリートに関する事例はほとんどないのが現状である。また、石灰石微粉末混和によるコンクリートの性状改善効果は、石灰石微粉末粒子表面の物理的・化学的な性質が流動性の向上に大きく影響している¹⁾とされ、スランプの範囲の普通コンクリートに対しても、石灰石微粉末を混和することで同様の性状改善効果が期待できるものと考えられる。

そこで本研究では、スランプ 12cm および 18cm の普通コンクリートを対象とし、石灰石微粉末混和によるワーカビリティおよび硬化特性の改善効果ならびにその微粒分量の変動がスランプおよび空気量に及ぼす影響について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用した材料の概要を表-1に、混和した石灰石微粉末の粒度分布を図-1に示す。

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、石灰石砕砂を 0.075mm ふるい上で洗浄したものに、砕砂製造時に副産される粒径 0.075mm 以下の石灰石微粉末と市販の石灰石微粉末を所定量添加したものを使用した。粗骨材は、硬質砂岩砕石（最大寸法 20mm）を使用した。混和剤は、リグニンスルホン酸化合物系 AE 減水剤を使用した。

2.2 配合

細骨材中の微粒分量がコンクリートのスラン

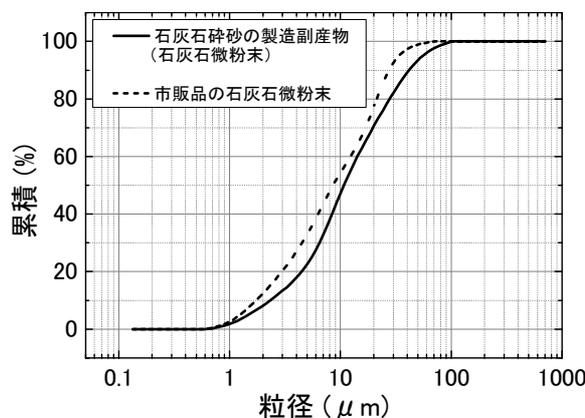


図-1 石灰石微粉末の粒度分布

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 第1研究部 建設技術グループ 工修 (正会員)
 *2 太平洋セメント (株) 中央研究所 第1研究部 建設技術グループ (正会員)
 *3 太平洋セメント (株) 中央研究所 第1研究部 建設技術グループ グループリーダー (正会員)

表－1 使用材料

使用材料	略号	種類	物性値等
水	W	水道水	----
セメント	C	普通ポルトランドセメント	$\rho_C=3.16$ (g/cm ³), 比表面積=3230 (cm ² /g)
細骨材	Ls	副産石灰石微粉末	$\rho_L=2.72$ (g/cm ³), 比表面積=3900 (cm ² /g)
	L	市販石灰石微粉末	$\rho_L=2.72$ (g/cm ³), 比表面積=5500 (cm ² /g)
	S	水洗石灰石砕砂	$\rho_S=2.60$ (g/cm ³), F.M.=3.10
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 (茨城県岩瀬産)	Gmax=20mm, $\rho_G=2.64$ (g/cm ³), 吸水率=0.99%, F.M.=6.70, 実積率=59.5%
混和剤	AE	AE 減水剤	$\rho=1.06$ (g/cm ³), リグニンスルホン酸化合物系

表－2 コンクリートの配合

配合 A : スランプ 12cm, 空気量 4.5%, W/C=55%, W=160kg/m ³ , C=291kg/m ³		配合 B : スランプ 18cm, 空気量 4.5%, W/C=55%, W=170kg/m ³ , C=309kg/m ³		配合 C : スランプ 18cm, 空気量 4.5%, s/a=45%, W=170kg/m ³	
細骨材中 微粒分量(%)	s/a (%)	細骨材中 微粒分量(%)	s/a (%)	細骨材中 微粒分量(%)	W/C (%)
2.6	45	5.6	41, 43, 45, 47, 49	5.6	43, 49, 52
6.1	42, 44, 45, 48, 51	8.6	41, 43, 45, 47, 49	8.6	43, 46, 49, 52
8.8	42, 45, 48, 51	11.9	41, 43, 45, 47, 49	11.9	43, 46, 49, 52
12.2	40, 42, 44, 45, 48	16.0	41, 43, 45, 47, 49	16.0	43, 46, 49, 52
15.9	40, 42, 45, 48	---	---	---	---
21.0	45	---	---	---	---

注) AE 減水剤添加量は全ての配合で C×0.25%

ブ値および空気量に及ぼす影響を検討した実験の配合を表－2に示す。配合は、W/C=55%で単位水量 160kg/m³、目標スランプ 12cm とした配合 A ならびに単位水量 170kg/m³、目標スランプ 18cm とした配合 B および s/a=45%で単位水量 170kg/m³、目標スランプ 18cm とした配合 C の3種を設定した。配合 A および B については、細骨材中の微粒分量 (2.6%～21.0%) と細骨材率 (40%～51%) を組み合わせた各 20 水準と、配合 C では細骨材中の微粒分量 (5.6%～16.0%) と水セメント比を組み合わせた 15 水準の合計 55 水準を設定した。なお、AE 減水剤の添加量は全配合で C×0.25%の一定とし、各水準のスランプおよび空気量による配合補正は行なわなかった。

細骨材中の微粒分量がコンクリートの硬化物性に及ぼす影響を検討した実験では、配合 A の s/a=45%を用いた。さらに、凍結融解抵抗性試験および乾燥収縮試験では、空気量が 4.5±0.5%となるよう AE 調整剤にて調整した。

2.3 試験項目と方法

2.3.1 練混ぜ

コンクリートの混練および供試体の成形は

20℃・80%R.H.の試験室内で行った。混練には、容量 50lit.の強制練りパン型ミキサを使用し、1 バッチあたりの混練量は 25lit.とした。ミキサ内に粗骨材、細骨材およびセメントを一括投入して 15 秒間の空練りの後、水および混和剤を投入し、90 秒間の混練後に排出した。なお、混和剤は事前に水に混入して使用した。

排出した試料は直ちに切返し、それぞれの試験に供した。

2.3.2 スランプおよび空気量試験

スランプ値は JIS A 1101 に、空気量は JIS A 1128 (空気室圧力方法) に、それぞれ準拠して測定を行った。

2.3.3 ブリーディング試験

配合 A の s/a が 45%のものについて細骨材中の微粒分量を 2.6%, 8.8%, 12.2%, 21.0%に変化させてブリーディング率を測定した。測定は JIS A 1123 に準拠して行った。

2.3.4 強度および静弾性係数試験

材齢 1 日で脱型し、以後 20℃水中養生とした φ10×20cm の供試体を用い、材齢 7, 28 および 91 日に圧縮強度および静弾性係数を、JIS A 1108

および JIS A 1149 に準拠して測定した。

2.3.5 凍結融解抵抗性試験

打設後 1 日で脱型し材齢 28 日まで 20°C 水中養生した 10×10×40cm の供試体を用い、凍結融解抵抗性を JIS A 1148 の A 法（水中凍結融解試験方法）に準拠して測定した。

2.3.6 乾燥収縮試験

材齢 1 日で脱型し、材齢 7 日まで 20°C 水中養生した 10×10×40cm の供試体を 20°C・60%R.H. の恒温室に移し、JIS A 1129 に準拠して乾燥収縮量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 微粒分量のスランプおよび空気量への影響

細骨材中の微粒分量がスランプおよび空気量に与える影響を検討した実験結果を図-2 に示す。

(1) 配合 A

微粒分量がスランプに与える影響は、細骨材

率 (s/a) によって大きく異なり、s/a=45% のものは、微粒分量が 2.6% から 21.0% まで変化してもスランプ値の変化が約 3cm と小さかった。同じく、s/a=48% のものも微粒分量が 6.1% から 15.9% に変化してもスランプ値の変化が 1cm 以下と極めて少なかった。一方、s/a=42% のものは微粒分量の変化に対し凸の形状を示し、微粒分量 12.2% で最大のスランプ値を示した。

微粒分量の増加に伴って、細骨材率の変化によるスランプ値の変化は縮小する傾向が見られた。配合 A はペースト分が少ない配合のため、微粒分量の増加はペースト分の増加につながり、それが細骨材率の変化に対するスランプの変化割合を緩和する効果をもたらしたと思われる。

空気量は、細骨材率にかかわらず微粒分量が増加すると減少した。

(2) 配合 B, C

微粒分量の増加に伴って、細骨材率、水セメント比にかかわらずスランプ値が減少し、空気

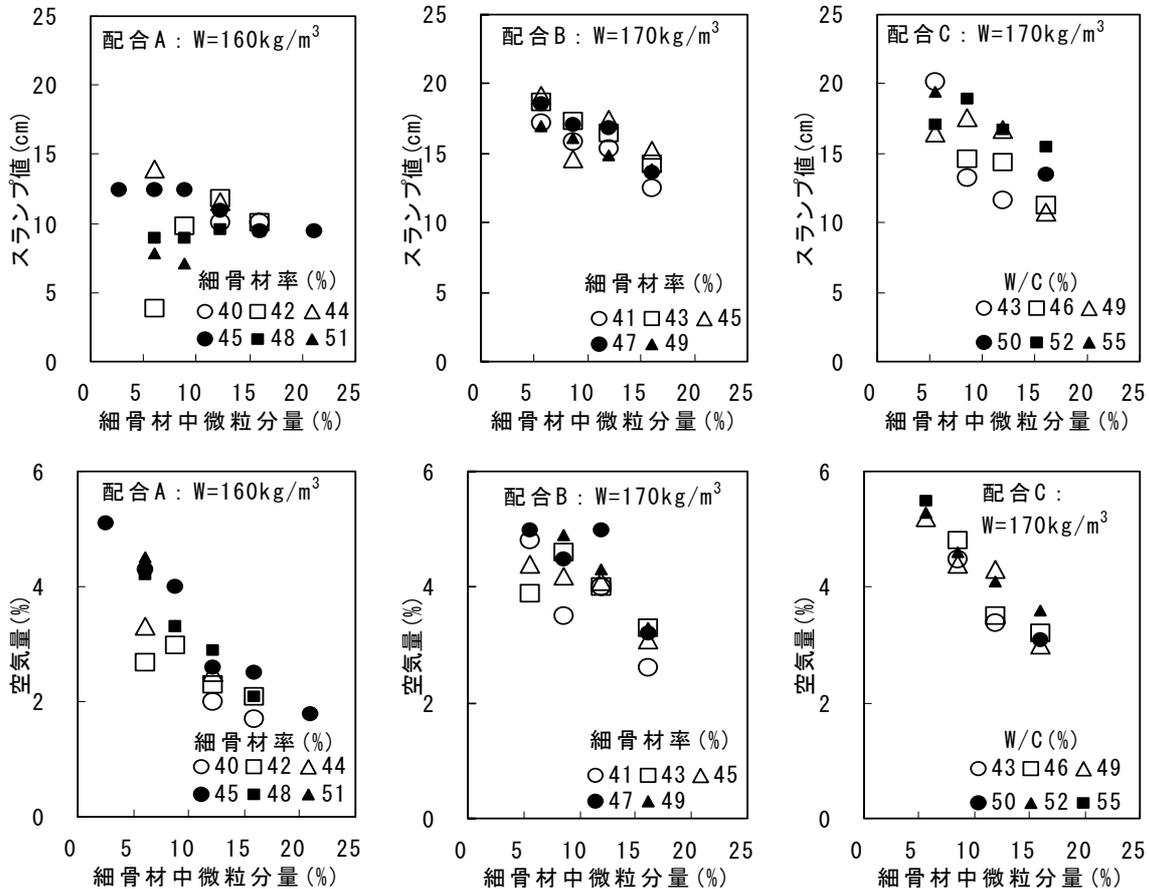


図-2 細骨材中の微粒分量がコンクリートのスランプおよび空気量に及ぼす影響

量も減少した。また、微粒分量の少ないものはプラスティシティーに劣りスランプが崩れる傾向にあったが、10%程度の微粒分が含まれたものは良好なワーカビリティを示しており、目視によってもフレッシュ性状の向上が確認できた。

(3) 微粒分量が空気量に及ぼす影響

前述したように、どの配合においても微粒分量の増加に伴って空気量が減少した。これは、単位セメント量に対して所定量添加された AE 剤が、増加した微粒分に吸着されることにより、その効果が減殺されたものと考えられる。そこで、添加した石灰石微粉末量 (L+Ls:kg/m³) に対し単位セメント量 (C:kg/m³) で除した微粒分率と空気量の関係に整理しなおしたものを図-3 に示す。

配合によらず微粒分率が 1%増加すると空気量が 0.0688%減少する結果が得られた。単位セメント量 300kg/m³、細骨材量 800kg/m³ の標準的な配合を考えると細骨材中の微粒分量の変動が±3%以内であれば空気量の変動が±0.5%以内に収まると計算される。

(4) 微粒分量がスランプに与える影響

微粒分量の変化がスランプに与える影響については、空気量の減少がスランプを減少させるため、空気量変化の影響を差し引いて考える必要がある。そこで、図-2の配合 B, C の結果を、空気量とスランプ値の関係に整理しなおしたものを図-4 に示す。図より、空気量 1%の増加によってスランプ 2.1cm の増加が認められる。この関係を用いて図-2のスランプ値を空気量が 4.5%の場合に補正した結果の一部を図-5 に、配合ごとに補正スランプ値と微粒分量の関係を直線回帰して求めた、微粒分によるスランプの変化割合を表-3 に示す。最も変化幅が大きな配合においても微粒分量の変動が±3%以内であればスランプの変動は明らかに±1cm 程度に収まる。また、平均的にみると、微粒分量が 0%~20%まで変化しても、スランプ値の減少は約 3cm 程度と少ない。微粒分量の増加によるスランプの変動は、微粒分量の増加が空気量を変動させ

た影響が大きいものと考えられる。

以上のことを統合すると、プラスティシティー改善等の目的で細骨材の一部を微粉末で置換する場合、置換量に合わせて配合設計をすれば

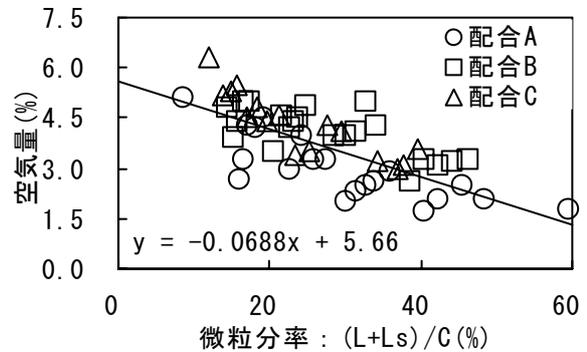


図-3 空気量と微粒分率の関係

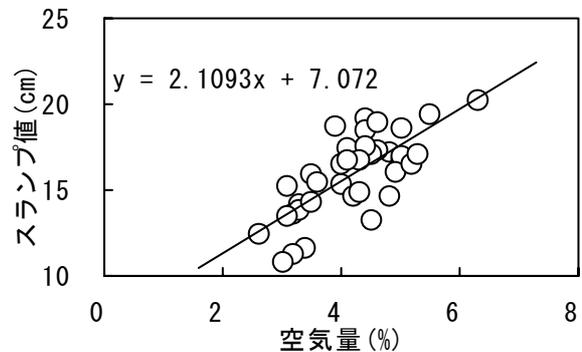


図-4 スランプ値と空気量の関係

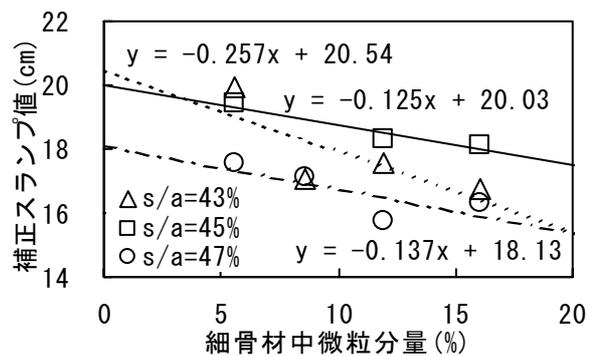


図-5 補正スランプ値と微粒分量の関係

表-3 微粒分によるスランプの変化割合

配合 B		配合 C	
s/a	変化割合	W/C	変化割合
41	-0.058	43	-0.386
43	-0.257	46	-0.016
45	-0.125	49	-0.140
47	-0.137	52	0.122
49	0.042	---	---

注) 変化割合は回帰式の傾きであり、微粒分量が 1%増加した場合のスランプ値の変化量を示している

微粒分量の変動が±3%以内であればスランプ値や空気量に影響が表れないものと考えられる。また、±6%程度変動しても生コンで許容される変動幅には収まるものと考えられる。

3.2 ブリーディング

含有微粒分量別のブリーディング率の経時変化を図-6に示す。微粒分量の増加に伴いブリーディング率は低下する傾向となった。高流動コンクリートに石灰石微粉末を外割置換することでブリーディングの低減が確認されており²⁾、普通コンクリートにおいても同様の結果となった。この原因には、粒子径の小さな石灰石微粉末が混和されたことで、ブリーディング水の移動流路が長くなることと、セメントと比較して密度が小さい石灰石微粉末が混和されることで粉体の沈降速度が遅くなり、ブリーディングの発生速度が遅くなること³⁾が考えられる。

3.3 強度特性

細骨材中の微粒分量が圧縮強度に及ぼす影響を図-7に、静弾性係数に及ぼす影響を図-8に示す。圧縮強度では、材齢28日以内において微粒分量の増加に伴って明らかな強度増加が認められ、微粒分2.6%と21.0%を比較した場合、材齢7日で31%程度、材齢28日では19%程度の強度増進となった。材齢91日では強度の増加は小さくなるものの、同様の比較では6%程度増進しており、依然として増加の傾向が認められた。一方、静弾性係数については、圧縮強度の結果とは異なり、微粒分量の増減に伴った特性変化は認められなかった。

高流動コンクリートでは、石灰石微粉末を外割置換とした場合、微粒分量の増加に伴って若材齢時の圧縮強度増加が認められ、長期材齢ではその効果がほとんどなくなることで、微粒分量を増加させても静弾性係数に変化はないことが報告されており⁴⁾、本実験の普通コンクリートにおいても同様の結果となった。

3.4 凍結融解抵抗性

含有微粒分量別の凍結融解抵抗性の経時変化を図-9に示す。サイクル数100以下までは、

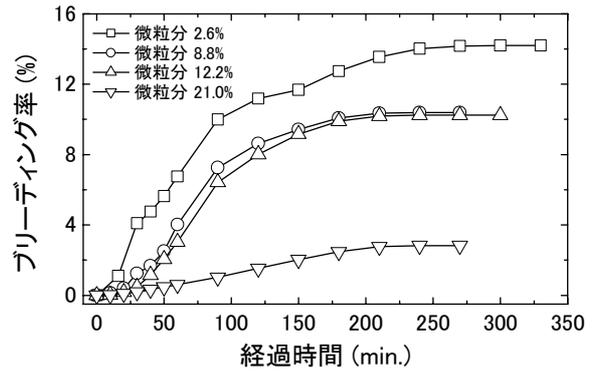


図-6 ブリーディング率の経時変化

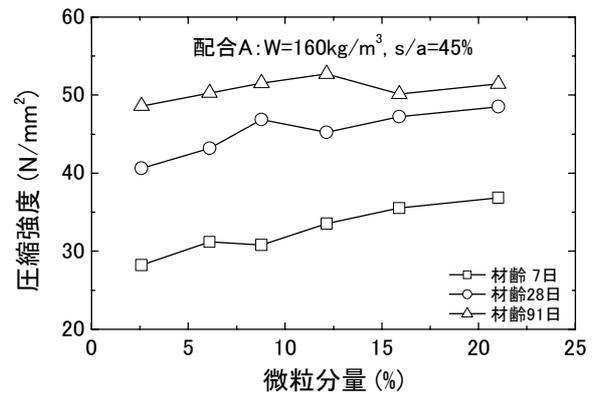


図-7 圧縮強度と微粒分量の関係

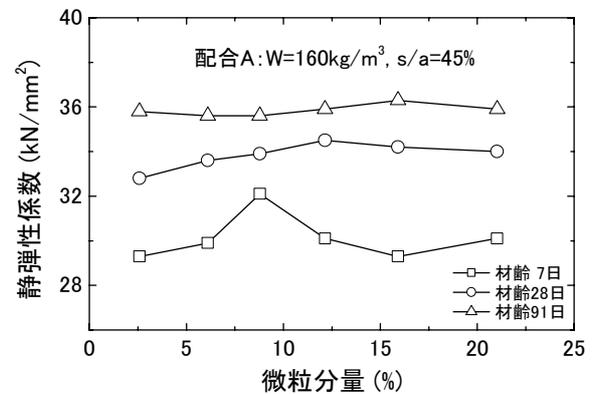


図-8 静弾性係数と微粒分量の関係

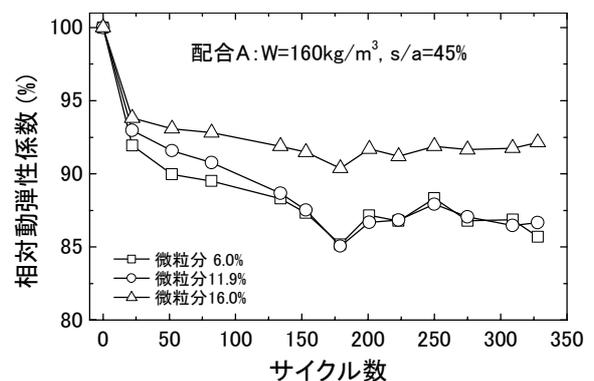


図-9 凍結融解抵抗性の経時変化

微粒分が多いものほど相対動弾性係数の値も高くなった。100 サイクル以降では微粒分 6.0%および 11.9%の間に差がなくなったが、微粒分 16.0%についてはそれらと比較して依然として高い凍結融解抵抗性を示した。

細孔中の水の凍結温度と凍結水量の関係から細孔径 $10^{-8}\text{m}\sim 10^{-6}\text{m}$ 程度の細孔の多少がコンクリートの凍結融解抵抗性に関する挙動と関連深いことが既往の研究で指摘されている⁵⁾。石灰石微粉末を外割置換した場合には、全細孔量は変化しないが、物理的な充填効果が発揮され、細孔径の分布が小さい側にシフトする⁶⁾ことから、微粒分量が多いものほど細孔径が小さくなり、高い凍結融解抵抗性を示したと考えられる。

3.5 乾燥収縮

含有微粒分量別の乾燥収縮の経時変化を図-10に示す。材齢の増加とともに、微粒分量が多いものほど乾燥収縮が低減された。材齢 28 日では、微粒分 6.0%のひずみに対して 11.9%および 16.0%のひずみでは、それぞれ 14%および 20%程度低減された。また、材齢 91 日でのひずみ低減率は、それぞれ 8%および 13%程度であった。

石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートにおいては、微粉末を外割置換した場合には乾燥収縮はほとんど変化しないか、若干低減されるとの報告がある⁴⁾。本実験の普通コンクリートに関しては、高流動コンクリートと比較した場合に水セメント比が大きいため、乾燥可能な自由水量が多く、低減効果が大きく表れたと考えられる。

4 まとめ

細骨材の一部を石灰石微粉末で置換し、その微粒分量がコンクリートの各種物性に与える影響を実験的に検討し、以下の結論を得た。

- (1) 微粒分量の増加により、プラスティシティー向上、ブリーディング低下、強度増進、凍結融解抵抗性の向上が認められた。
- (2) 目視およびハンドリング性の結果では、微粒分量 10%程度のものが最もワーカビリティ

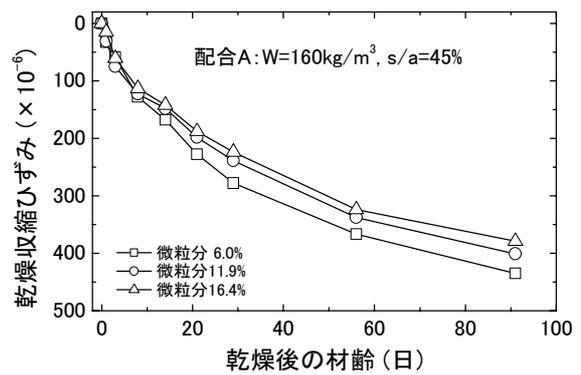


図-10 乾燥収縮の経時変化

ーが良かった。

- (3) 微粒分量約±3%の変動は空気量を約±0.5%変動させ、その結果としてスランプ約±1cmを変動させた。生コンの許容変動を考えると微粒分の許容変動は±6%程度と想定された。

参考文献

- 1) 星野清一ほか: 石灰石粉末添加によるセメントペーストのレオロジー特性変化の解析, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.414-419, 1995.12
- 2) 浜田二郎ほか: 石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートの品質に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.135-138, 1995.6
- 3) 平田隆祥ほか: 石灰石粉末の多量添加がコンクリートの強度特性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.204-209, 1995.12
- 4) 日本コンクリート工学協会, 石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム 委員会報告書・論文集, pp.3-90, 1998.5
- 5) 鎌田英治: セメント効果体の微細構造とコンクリートの凍害, コンクリート工学, Vol.19, No.11, pp.36-42, 1981.11
- 6) 中辻健ほか: 微粒子混和材を使用したモルタルの強度に及ぼす粉体時の空隙率の影響, セメント・コンクリート論文集, No.48, pp.316-321, 1994.12