

論文 高流動コンクリートにおける粉体特性が流動性および乾燥収縮性状に及ぼす影響

上野 敦^{*1}・鈴木祥哲^{*2}・国府勝郎^{*3}・宇治公隆^{*4}

要旨: 粉体粒子の特性がコンクリートの性質に顕著に影響すると考えられる粉体系高流動コンクリートを対象として、粉体材料の表面積および材質によるコンクリートの流動性状および硬化後の収縮性状の変化について検討した。著者らがこれまで検討してきたペーストにおける検討結果をもとに、コンクリートの流動性に対する粉体材料の粒度および材質による影響を検討し、硬化後の収縮性状に及ぼすペースト部分の性質について検討した。

キーワード: フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, 石灰石微粉末, 表面積, 流動性, 長さ変化

1. はじめに

コンクリートには、様々な種類の鉱物微粉末が一般的に使用されている。代表的なものは、高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび石灰石微粉末などである。これらの鉱物微粉末は、他の産業からの副産物である場合が多く、資源の有効利用の観点からも効果的かつ積極的な使用が重要となっている。

コンクリートは、固体粒子と液体との混合物であるため、材料の粒子形状、粒度分布および粒子表面の物理化学的性質などによってコンクリートの様々な性質が変化する。特に、粉体材料は、コンクリートの使用材料中で最も大きな表面積を有しており、粉体の性質によってコンクリートの性質は、顕著に影響される。このような粉体の性質によるペースト、モルタルおよびコンクリートの流動性の変化に関する検討としては、高流動コンクリートを対象とした、相対フロー面積比や拘束水膜厚さに着目した粉体の拘束水量に関する検討^{1,2)}が行われている。

本研究は、粉体粒子の表面が有する物理・化学的性質と液相との相互作用が、コンクリートのフレッシュ時の性状および硬化後の組織構造に及ぼす影響を基礎的に検討したものである。粉体系高流動コンクリートは、粉体の物理的性質や表面積

の大きさなどを利用してコンクリートのフレッシュ時の品質を制御しているため、使用粉体の性質によるコンクリートへの影響を検討・評価することが重要であると判断した。また、粉体系高流動コンクリートの場合、自己収縮の影響が考えられるが、本研究では、材齢28日まで標準養生を行ったコンクリートの乾燥収縮性状を検討することとした。著者らがこれまで検討してきたペーストにおける検討結果³⁾をもとに、コンクリートの流動性に対する粉体の粒度および材質による影響を検討し、硬化後の収縮性状に及ぼすペースト部分の性質について検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に示すとおり、セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、混和材として使用する鉱物微粉末は、高炉スラグ微粉末（記号：B）、フラ

表-1 使用粉体材料

種類	記号	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	置換率 (vol. %)
普通ポルトランドセメント	C	3160	3.15	-
高炉スラグ微粉末	B4	4160	2.91	20, 40, 60
	B8	8410	2.91	
フライアッシュ	F4	4000*	2.29	10, 20, 30
	F6	6000*	2.28	
石灰石微粉末	L4	4400*	2.71	10, 20
	L8	7500*	2.71	

*概略値

*1 東京都立大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 (株)フジヤマ 技術部

*3 東京都立大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

*4 東京都立大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

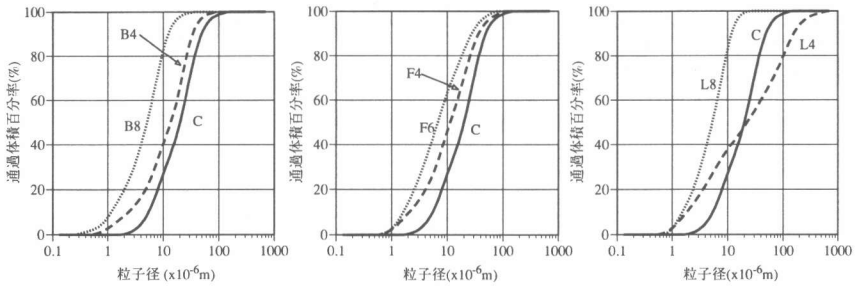


図-1 粉体材料の粒度分布

イアッシュ (記号:F) および石灰石微粉末 (記号:L) の3種類とした。各鉱物微粉末の粉末度は、セメント粒子と同程度 (4000cm²/g程度) およびセメント粒子に比較して粉末度の大きなもの (6000~8000cm²/g) の2水準とした。図-1に示す各粉体の粒度分布は、レーザ回折式粒度分布測定装置を用いて測定した。この体積粒度分布から粒子形状を球と仮定したときの粉体の表面積を計算した。この結果は、表-2に示す配合中

に、セメントと鉱物微粉末の絶対容積1L当たりの全表面積として示されている。

細骨材は、奥多摩産砂岩砕砂 (表乾密度:2.64g/cm³, F.M.:2.90) および富津産山砂 (表乾密度:2.58g/cm³, F.M.:1.51) を質量比で8:2で混合したものを使用し、粗骨材は、奥多摩産砂岩砕石2005 (表乾密度:2.65g/cm³, 実積率:61.6%) を使用した。

2.2 ペーストの配合および流動性試験方法

ペーストの水粉体体積比は、0.75, 0.85および1.00の3水準とした。各水粉体体積比において、ペーストの単位体積から粉体の体積を決定し、この総体積を一定として、セメントを表-1の各鉱物微粉末で体積置換した。置換率は、一般的な粉体系高流動コンクリートでの使用実績を考慮して、高炉スラグ微粉末は粉体総体積の20, 40および60%, フライアッシュは10, 20および30%, 石灰石微粉末は10および20%とした。なお、ペー

表-2 コンクリートの配合

記号	Gmax. (mm)	V _w /V _P	W/B	air (%)	V _G (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)						混合粉体 1Lの表面積 (m ² /L)
						W	C	F	S	G	SP	
B4-20	20	0.9	0.289	4.5	0.310	161	452	104	802	822	7.889	575.7
B4-40	20	0.9	0.294	4.5	0.310	156	329	202	830	822	7.644	681.1
B4-60	20	0.9	0.299	4.5	0.310	148	208	287	874	822	7.252	786.5
B8-20	20	0.9	0.289	4.5	0.310	160	449	104	807	822	7.840	806.1
B8-40	20	0.9	0.294	4.5	0.310	158	333	204	818	822	7.742	1141.8
B8-60	20	0.9	0.299	4.5	0.310	166	233	322	774	822	8.134	1477.6
F4-10	20	0.9	0.293	4.5	0.310	168	531	43	763	822	8.232	528.6
F4-20	20	0.9	0.301	4.5	0.310	158	444	80	818	822	7.742	586.9
F4-30	20	0.9	0.310	4.5	0.310	152	374	116	852	822	7.448	645.1
F6-10	20	0.9	0.293	4.5	0.310	161	509	41	802	822	7.889	565.9
F6-20	20	0.9	0.302	4.5	0.310	160	449	81	807	822	7.840	661.5
F6-30	20	0.9	0.311	4.5	0.310	154	379	117	841	822	7.546	757.0
L4-10	20	0.9	0.316	4.5	0.310	162	512	49	796	822	7.938	523.9
L4-20	20	0.9	0.356	4.5	0.310	156	438	94	830	822	7.644	577.5
L8-10	20	0.9	0.316	4.5	0.310	160	506	48	807	822	7.840	587.2
L8-20	20	0.9	0.356	4.5	0.310	162	455	98	796	822	7.938	704.0
N.C.	20	-	0.5	4.5	-	164	328	-	766	1049	0.82*	470.4

*AE減水剤使用

ストの練混ぜには、空気連行性のないポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を粉体体積に対して4.2%の一定量を添加した。空気連行調整剤を用いなかったのは、使用粉体材料の種類、粒度分布およびこれに起因する表面積の変化が、ペーストの流動性に及ぼす影響を基礎的に評価するため、ペースト内に空気を連行させないためである。ペーストの流動性は、JIS R 5210に規定のフローコーンを用いた打撃なしのフロー試験によって試験した³⁾。

2.3 コンクリートの配合およびフレッシュ時の試験

対象とする粉体系高流動コンクリートは、自己充てん性のランク2のもの⁴⁾とし、表-2に示すとおり、水粉体体積比は0.9の一定で、単位粗骨材容積は0.310m³/m³の一定となっている。そして同等の流動性、材料分離抵抗性および間げき通過性となるように単位水量の調整によって配合を定め

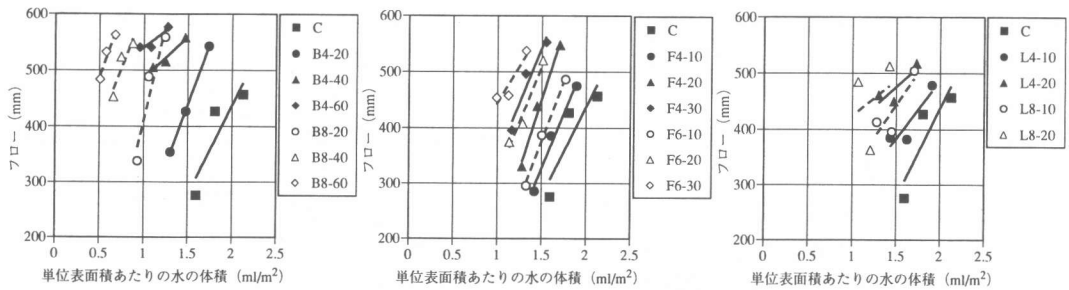


図-2 単位表面積当たりの水の体積とペーストのフローの関係³⁾

た。鉱物微粉末は、前述のペーストに関する検討と同一の置換率で使用した。また、高性能AE減水剤はペースト試験で用いたものと同じで、その使用量は粉体体積に対して4.2%一定とし、空気連行助剤を目標空気量となるように配合ごとに調整して試験した。これは、粉体質量に対して1.4～1.6%であり、一般的な使用量となっている。なお、W/C50%、空気量4.5%、スランプ8cmの一般的なコンクリートについても比較用として試験を行った。

コンクリートの流動性および材料分離抵抗性は、土木学会標準JSCE-F-503⁵⁾に規定のスランプフローおよび500mmフロー到達時間によって試験し、間げき通過性は、JSCE-F511⁶⁾に規定のU形充てん装置（障害R2）によって試験した。各コンクリートは、スランプフロー650±50mm、500mmフロー到達時間3～15秒、U形充てん高さ300mm以上を満足する配合とした。

2.4 硬化コンクリートの乾燥収縮試験

硬化コンクリートの乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129によって試験した。供試体は、100×100×400mmの角柱供試体とし、供試体端部中央にゲージプラグを設置した。乾燥収縮性状にはペースト部の細孔構造が顕著に影響すると考えられるため、暴露時にある程度ペーストの組織構造が完成している必要があると考え、フライアッシュの水和を考慮して、脱型後28日間の20℃水中養生を行った後、基長を設定し、20℃、60%R.H.の恒温恒室室内に暴露した。供試体数は、1配合につき3本とし、供試体の軸方向の自由収縮は、1/1000mmダイヤルゲージを用いて測定した。測定期間は暴露開始から1年間とし、各測定時には、供試体の質量も測定した。

3. 結果および考察

3.1 ペーストの流動性に及ぼす鉱物微粉末の影響

ペーストにおいて、セメントと各種の鉱物微粉末とを混合して用いれば、鉱物微粉末の粉末度と置換率によって、粉体全体の表面積が変化する。また、鉱物微粉末の種類によって、水による濡れの性状が変化する。セメントを各種の鉱物微粉末で置換することにより、ペーストの流動性は顕著に変化するが、この影響の程度は、粒度よりも表面積に着目した方が合理的であると考えた。したがって、ペーストの流動性は、使用する鉱物微粉末の材質（種類）と表面積の大きさによって変化すると考え、各鉱物微粉末の種類ごとに、表面積の変化がペーストの流動性に及ぼす影響を定量化することとした。各ペーストの配合における粉体材料の粒度分布から求めた総表面積と水量から、図-2に示すとおり、粉体の単位表面積当たりの水の体積とペーストのフローの関係を整理した。この結果、本実験の範囲では、いずれの鉱物微粉末を用いた場合にも、置換率の増加に伴って、同一フローとなるために必要な単位表面積当たりの水量が減少した。このことは、それぞれの鉱物微粉末の表面の濡れの性状が、セメント粒子と異なっており、かつ鉱物微粉末の種類ごとに特有のものであることがわかる。また、鉱物微粉末の粉末度が大きいほど、この傾向は顕著となり、流動性に影響を及ぼす表面の分散が影響しているものと推察される。このような鉱物微粉末の種類および粉末度がペーストの流動性に及ぼす影響を定量的に評価するため、図-2中のセメントのみを使用した場合の関係を最小自乗法で直線近似し、式(1)に示すとおり、鉱物微粉末の表面積に係数 β を導入し、同一のフローにおいて、セメントのみ

を使用した場合と同一の関係となるための各鉱物微粉末の表面積のセメントの表面積への換算係数 β を計算した³⁾。

$$fl = a \cdot \frac{V_w}{S_c + \beta \cdot S_p} + b \quad (1)$$

ここに、 fl : フロー (mm)、 a : 図-2におけるセメント100%のときの直線の傾き、 V_w : 水の体積 (ml)、 S_c : セメントの表面積 (m²)、 β : 鉱物微粉末の表面積のセメント換算係数、 S_p : 鉱物微粉末の表面積 (m²)、 b : 図-2におけるセメント100%のときの y 切片

係数 β の計算結果を表-3に示す。本実験で使用する鉱物微粉末の表面積は、セメント換算すると実際の値の約10～30%程度に計算される。すなわち、セメント粒子と比較して単位表面積当たり少ない水量で流動できる粉体であることが定量的に示されている。

3.2 コンクリートの流動性に及ぼす鉱物微粉末の影響

所定のスランプフロー (650 ± 50mm) を得るためのコンクリートの単位水量を、スランプフローで除して、コンクリートを100mm流動させるために必要な水量を算出した。各鉱物微粉末の置換率とフロー100mm当たりの必要水量の関係を図-3に示す。本実験の範囲では、高炉スラグ微粉末 (B8) を用いた場合以外では、置換率の増大にともなって、フロー100mm当たりの必要水量が減少した。高炉スラグ微粉末 (B8) を使用した場合は置換率が60%となるとフロー100mm当たりの必要水量が増加した。したがって、使用粉体によっては、流動に必要な水量を最小とする置換率が存在する可能性も示された。表-2に示すとおり、セメント(記号:N.C.)および各混合粉体の絶対容積1L当たりの表面積の計算値は、各鉱物微粉末の置換率の増大に伴って増加している。一般的には、表面積の増大は、流動に必要な水量を増加させる要因となるが、粒子表面の物理化学的な性質による必要水量低減効果との複合的な影響によって流動性が変化していることが示されている。したがって、コンクリートの流動性を考える際には、粒子の表面が有する物理化学的な性質と表面積の大きさの両方を考える必要があると思わ

れる。

ペーストの流動性に関する検討により算出された表面積換算係数 β を用いて、コンクリート1m³中

の鉱物微粉末およびセメントの換算粉体総表面積とコンクリートの流動に必要な水量の関係で整理すると図-4のようになる。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの一部にばらつきがあるものの、ほぼ全

ての配合について、換算粉体総表面積の増加にともなってコンクリートのフロー100mm当たりの必要水量が増加していることがわかる。すなわち、粉体の表面特性を反映した表面積換算係数 β を導入することにより、粉体系高流動コンクリートの流動性を、粉体の換算表面積によって整理できることが示された。

3.3 硬化コンクリートの質量変化および乾燥収縮性状

(1) 鉱物微粉末の粉末度および置換率による質量および長さ変化率の変化

図-5に各配合の質量変化率および長さ変化率を示す。粉体系高流動コンクリートの質量変化率および長さ変化率は、通常のコンクリート (N.C.) よりもいずれの鉱物微粉末を用いた場合でも小さいことがわかる。この質量変化率および

表-3 表面積換算係数 β

種類	β
B4	0.27
B8	0.12
F4	0.33
F6	0.23
L4	0.20
L8	0.09

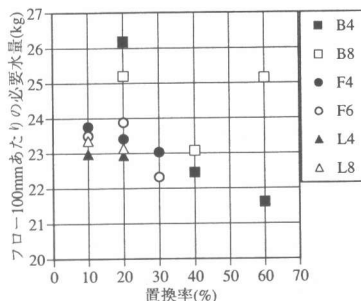


図-3 置換率とフロー100mm 当たりの必要水量

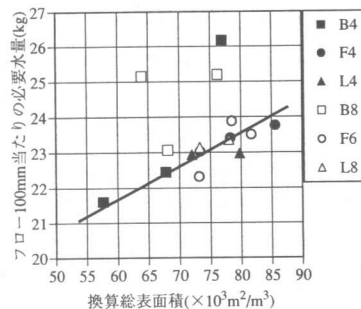


図-4 換算総表面積とフロー100mm 当たりの必要水量

長さ変化率の減少傾向は、粉末度4000cm²/gの鉱物微粉末を使用した場合と比較して、粉末度6000～8000cm²/gの鉱物微粉末を使用した場合が顕著となり、特に8000cm²/gの高炉スラグ微粉末を使用した場合には、質量変化率および長さ変化率が最も小さいことがわかる。本研究では、水粉体体積比を一定として、同等のフレッシュ性状となるように配合を調整したため、ペーストの体積濃度は同じであるが、ペーストの体積は、配合ごとに異なっている。したがって、図-5の質量および長さ変化性状には、ペースト体積および使用鉱物微粉末の違いによる組織構造の変化の影響が含まれている。使用鉱物微粉末の違いによる組織構造への影響について検討するため、図-6に示すとおり、単位ペースト体積当たりの質量変化率および長さ変化率を整理した。実験に用いた各配合間のペースト体積の差が小さいため、図-6においても図-5と同様の傾向となった。

(2) 鉱物微粉末の種類による質量および長さ変化率の変化

使用した鉱物微粉末の種類による影響をより明確に検討するため、全ての鉱物微粉末を同一の置換率20%で使用した場合の単位ペースト体積当たりの質量変化率および長さ変化率を図-7に示す。高炉スラグ微粉末を使用した場合の質量変化率は、他の鉱物微粉末を使用した場合と比較して、著しく小さいことがわかる。高炉スラグ微粉末を使用した場合の長さ変化率も、他の鉱物微粉末を使用した場合に比較して小さいが、質量変化率の低減程度と比較して長さ変化率が大きいことがわかる。また、F6およびL8の質量変化率および長さ変化率が同等となっており、水中養生28日では、フライアッシュのポズラン反応が不十分であることも推察される。

一般的に、粉体材料の水和進行に伴う組織の緻

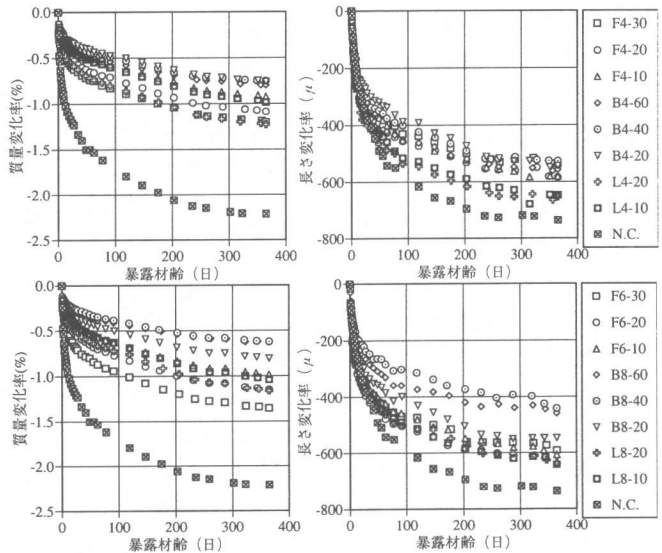


図-5 コンクリートの質量変化率および長さ変化率

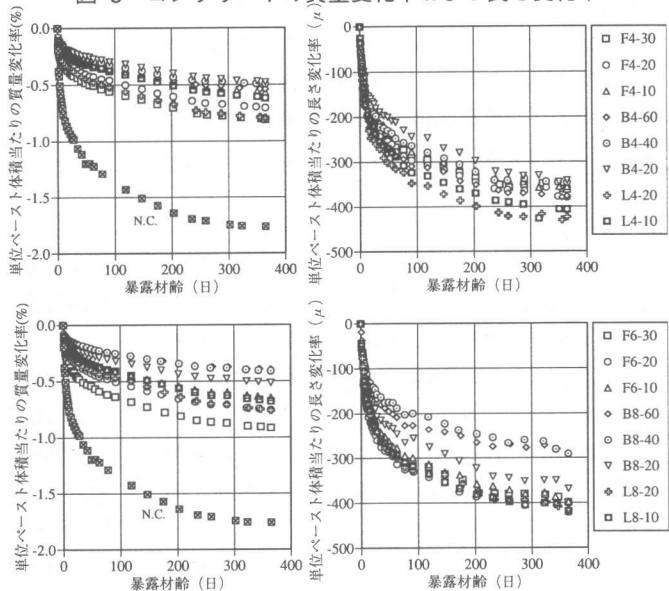


図-6 コンクリートの単位ペースト体積当たりの質量変化率および長さ変化率

密化は、ペースト部分からの水分の蒸発を減少させ、コンクリートの乾燥収縮を抑制するが、同時に細孔の小径化により、強力な乾燥を受けた場合は、より大きな収縮を生じる要因となる。本研究において、前述の高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの質量変化率および長さ変化率の関係を考えると、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートでは、細孔構造の緻密化による水分の蒸発の低減効果が支配的となって供試体の乾燥収縮ひ

ずみに影響していると考えることができ。蒸発量が収縮に及ぼす影響を検討するために、図-8に、各鉱物微粉末を20%置換した場合の質量変化率と長さ変化率の関係を整理した。各粉体系高流動コンクリートは、一般的なコンクリート（N.C.）と比較して、同一質量変化率における長さ変化が非常に大きいことがわかる。また、高炉スラグ

微粉末を使用したコンクリートの場合、フライアッシュおよび石灰石微粉末を使用したコンクリートに比較して、同一質量変化率における長さ変化が大きいことがわかる。これは、高炉スラグ微粉末の水和によって、ペースト部の細孔構造が緻密化していることに起因するものと推察できる。今後、各コンクリートの細孔構造と供試体の質量変化および乾燥収縮性状との関連性について検討する必要があると思われる。

4. まとめ

粉体材料の粒度（表面積）および種類（粒子材質）が粉体系高流動コンクリートの流動性および硬化後の乾燥収縮性状に及ぼす影響について検討した結果、本実験の範囲で、以下のことが明らかとなった。

- (1) 各種の鉱物微粉末を使用した、粉体系高流動コンクリートの流動性は、使用する鉱物微粉末の種類および表面積に顕著に影響される。
- (2) 各種の鉱物微粉末を使用した、粉体系高流動コンクリートの流動性は、ペーストの流動性に関する検討で得られた、鉱物微粉末の表面積のセメント表面積への換算係数を用いて整理すると、論理的に評価できる。
- (3) 粉体系高流動コンクリートの質量変化率および長さ変化率は、鉱物微粉末の種類および置換率に関わらず、一般的なコンクリートと比較して小さい。
- (4) 同一質量変化率における長さ変化は、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの場合、フライアッシュおよび石灰石微粉末を使用したコンクリートに比較して大きい。

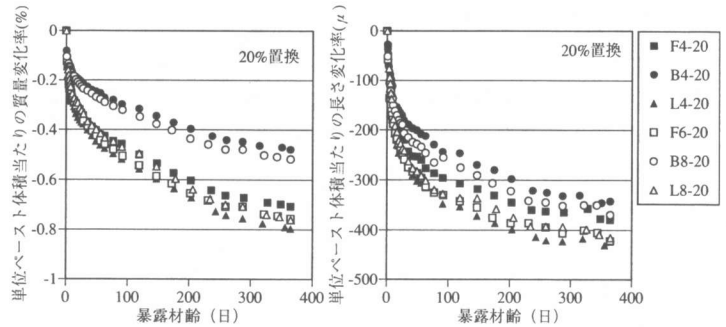


図-7 各微粉末20%置換における単位ペースト体積当たりの質量変化率および長さ変化率

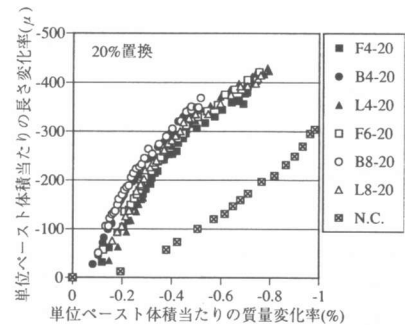


図-8 質量変化率と長さ変化率の関係

参考文献

- 1) 枝松良展, 下川浩児, 岡村 甫: 粉体の特性とペーストのフロー値との関係, 土木学会論文集, No.544, V-32, pp.65-75, 1996.8
- 2) 緑川猛彦, 丸山久一, 下村 匠, 桃井清至: 粉体特性の定量化手法に基づくペーストの流動性評価方法, 土木学会論文集, No.578, V-37, pp.99-110, 1997.11
- 3) 丸山未来, 上野 敦, 国府勝郎: ペーストの流動性および粘性に対する粉体粒子特性の影響評価, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 第V部, V-252, 2000.9
- 4) 土木学会: 高流動コンクリート施工指針, コンクリートライブラリー, No.93, 1998.7
- 5) 土木学会: コンクリートのスランプフロー試験方法, 平成11年制定コンクリート標準示方書規準編, pp.339-340, 1999.11
- 6) 土木学会: 高流動コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過性試験方法(案), 平成11年制定コンクリート標準示方書規準編, pp.352-354, 1999.11