

論文 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの強度および収縮特性について

小亀 大佑*1・菅田 紀之*2・川村裕太*1

要旨：高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの強度および収縮特性について検討するために、水結合材比を 25 %および 30 %の 2 水準、シリカフュームの置換率を結合材の 10 %、高炉スラグ微粉末の粉末度を 4000 と 6000 の 2 水準、置換率を 0 %から 40 %に変化させた 10 ケースの高強度コンクリートについて圧縮強度試験および自己収縮試験、乾燥収縮試験を行った。その結果、高炉スラグ微粉末の混和は、初期強度を低下させること、自己収縮を増大させること、乾燥収縮を低減させることなどを明らかにした。

キーワード：高炉スラグ微粉末、高強度コンクリート、自己収縮、乾燥収縮、圧縮強度

1. はじめに

我が国で発生する産業副産物のうち高炉水砕スラグは製鉄過程において大量に副産されている。この高炉水砕スラグは高炉セメントの混合材、コンクリート用混和材、地盤改良材、コンクリート用骨材などに利用されている。この高炉水砕スラグを微粉碎した高炉スラグ微粉末を高炉セメント用混合材あるいはコンクリート用混和材として用いた場合、セメント使用量が減ることによるコンクリート製造に起因する CO₂ 排出量の削減効果が期待できる。さらに水和熱の抑制、耐海水性向上効果などがある。高炉スラグ微粉末あるいはシリカフュームを混和したコンクリートに関する研究は多く行われてきている。しかしながら、高炉スラグ微粉末とシリカフュームを併用した高強度コンクリートに関しては、著者らによる研究¹⁾やいくつかの研究^{2), 3)}が行われているが多くのはない。コンクリートのひび割れは、コンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼす重要な要因である。自己収縮および乾燥収縮は、コンクリート構造物のひび割れの大きな要因とされており、その対策が望まれている。高強度コンクリートでは、その自己収縮が大きくなることが知られており、自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響に関しては、混和量および粉末度が高くなると自己収縮が大きくなるという報告⁴⁾、高炉スラグ微粉末中の石こう量が増えると自己収縮が小さくなるという報告⁵⁾があるが、圧縮強度が 100N/mm²を超える高強度コンクリートについてはよくわかっていない。

本研究では、高炉スラグ微粉末の粉末度および置換率が高強度コンクリートの強度および収縮特性にどのような影響を及ぼすのか明らかにするために、水結合材比を 25 %および 30 %とし、高炉スラグ微粉末の粉末度 4000 と 6000 について結合材に対する置換率を 0 %から 40 %と変化させた高強度コンクリートの圧縮強度試験および自己収縮試験、乾燥収縮試験を行い検討した。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

本研究において高炉スラグ微粉末を使用した高強度コンクリートの製造に用いた材料を表 1 に示す。結合材として普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを用いた。使用した高炉スラグ微粉末は JIS の高炉スラグ微粉末 4000 (以後、B4) および 6000 (以後、B6) の品質を満足するものである。B6 には予め SO₃ が 3 %程度となるように無水石こうが添加されている。シリカフュームはノルウェー産の粉体系のものであり、比表面積は 200,000 cm²/g、平均粒径は約 0.2 μm、密度は 2.2 g/cm³ のものである。細骨材としては陸砂、粗骨材としては JIS の砕石 2005 を用いた。また、流動性を確保するためにポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤、空気量を調整するためにポリエチレングリコール系の消泡剤を用いた。

表 1 使用材料

材料	性質等
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度 : 3.16g/cm ³
高炉スラグ微粉末 粉末度 4000 (B4)	比表面積 : 4,060cm ² /g (W/B= 25%) 4,020cm ² /g (W/B= 30%) 密度 : 2.91g/cm ³ SO ₃ : 0%
高炉スラグ微粉末 粉末度 6000 (B6)	比表面積 : 6,040cm ² /g (W/B= 25%) 6,010cm ² /g (W/B= 30%) 密度 : 2.89g/cm ³ SO ₃ : 2.9%
シリカフューム (SF)	比表面積 : 200,000cm ² /g 密度 : 2.2g/cm ³
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度 : 2.71g/cm ³
粗骨材 (G)	砕石 2005 表乾密度 : 2.67g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系
消泡剤 (AF)	ポリエチレングリコール系

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科環境創生工学系専攻 (学生会員)

*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科くらし環境系領域准教授 博 (工) (正会員)

表－2 配合およびフレッシュ性状

	W/B (%)	SF/B (%)	BFS/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								スランブ フロー(cm)	空気量 (%)
					W	C	SF	BFS	S	G	SP	AF		
N	25	10	0	49	165	594	66	0	806	827	7.26	0.022	57	1.7
25-B4-20	25	10	20	49	165	462	66	132	801	821	5.81	0.017	62	1.8
25-B4-40	25	10	40	49	165	330	66	264	796	816	4.62	0.014	65	1.8
25-B6-20	25	10	20	49	165	462	66	132	801	822	5.61	0.017	63	2.2
25-B6-40	25	10	40	49	165	330	66	264	797	817	4.62	0.014	66	1.5
N	30	10	0	49	165	495	55	0	855	879	5.86	0.024	69	2.2
30-B4-20	30	10	20	49	165	385	55	110	850	875	4.70	0.019	66	1.8
30-B4-40	30	10	40	49	165	275	55	220	846	871	4.00	0.016	69	0.8
30-B6-20	30	10	20	49	165	385	55	110	850	875	4.79	0.019	66	1.0
30-B6-40	30	10	40	49	165	275	55	220	846	871	4.51	0.018	70	1.2

$$B = C + SF + BFS$$

2.2 配合

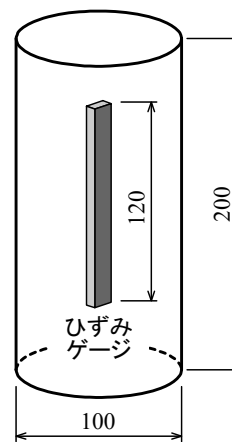
本研究に用いた高強度コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表－2に示す。配合においては、水結合材比(W/B, $B = C + BFS + SF$)を25%および30%の2水準、シリカフューム置換率(SF/B)を10%で一定とした。また、高炉スラグ微粉末置換率(BFS/B)は0%, 20%および40%の3水準の配合とした。目標スランブフローはW/B=25%とW/B=30%ともに65cmである。目標空気量については全ケースにおいて1.0%として配合を決定した。各配合で練混ぜたコンクリートのW/B=25%のスランブフローの実測値は、目標フロー65cmに対して57～66cm、空気量の実測値は1.5～2.2%であった。W/B=30%のスランブフローの実測値は、目標フロー65cmに対して66～70cm、空気量の実測値は、0.8～2.2%であった。

2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験はJIS A 1108に従い行った。試験には直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用い、3本の結果の平均を圧縮強度とした。供試体の養生は材齢1日まで20℃の恒温室における封かん養生、それ以降は20℃の水中養生とした。供試体の打込み面の処理は研磨機による研磨仕上げとした。

2.4 自己収縮試験

自己収縮試験は、図－1に示すような直径100mm、高さ200mmの円柱供試体の中央軸方向に埋込み型ひずみゲージ(ゲージ長120mm、弾性係数2.75GPa)を配置して行った。また、供試体中央に配置した熱電対により温度測定を行った。ひずみの測定は型枠にコンクリートを打込んだ後から封かん状態で行い、凝結始発を起点として以後のひずみ変化を自己収縮ひずみとした。供試体作成に用いた型枠は鋼製缶であり、シート等による型枠面の付着処理の有無が自己収縮ひずみに及ぼす影響は小さかったため、付着処理を行わずに型枠にコンクリートを打込んだ。また、型枠上面はポリエチレンシートおよび



図－1 自己・乾燥収縮試験用供試体

アルミテープを用いて封かん処理を行った。試験環境は温度20℃である。測定本数は各ケースで2本であり、測定結果の2本の平均を自己収縮ひずみとした。

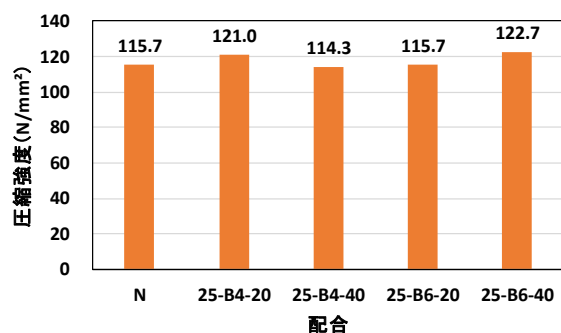
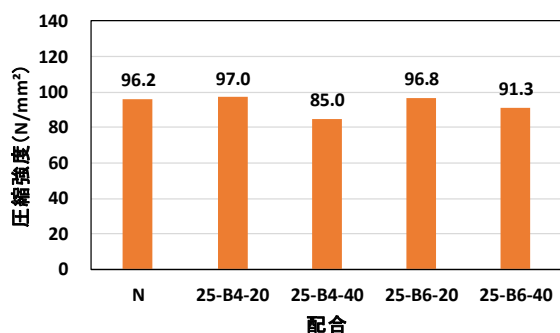
2.5 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験には、自己収縮試験と同様に直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用い、中央に配置したゲージ長120mmの埋め込み型ひずみゲージでひずみの測定を行った。試験は材齢7日まで20℃封かん養生し、脱型後から開始した。脱型後に供試体上下面にアルミテープを貼り付け、乾燥面は供試体側面のみとした。乾燥収縮に影響する体積表面積比は、100×100×400mmの角柱供試体とほぼ同一である。同一バッチで製作した供試体の収縮ひずみはほぼ等しいことが確認できたため、測定本数は各ケース1本とした。試験環境は温度20℃、相対湿度60%とした。測定期間は80日程度である。所定の材齢において質量の測定を行い、質量減少率を算出した。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

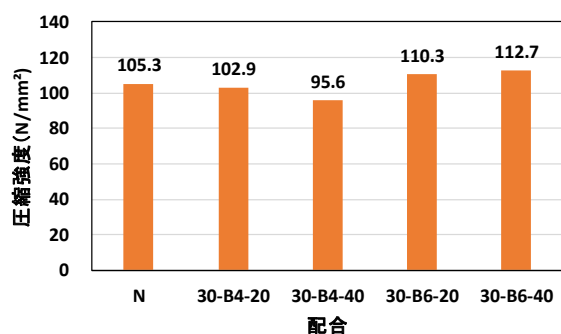
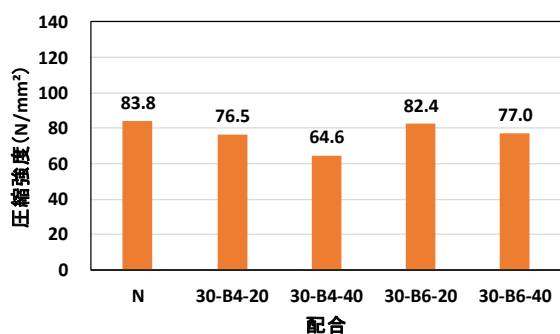
図－2および3は材齢7日と材齢28日におけるW/B=25%および30%の圧縮強度を示している。配合は



(a) 材齢 7 日強度

(b) 材齢 28 日強度

図－2 圧縮強度試験結果 (W/B = 25%)



(a) 材齢 7 日強度

(b) 材齢 28 日強度

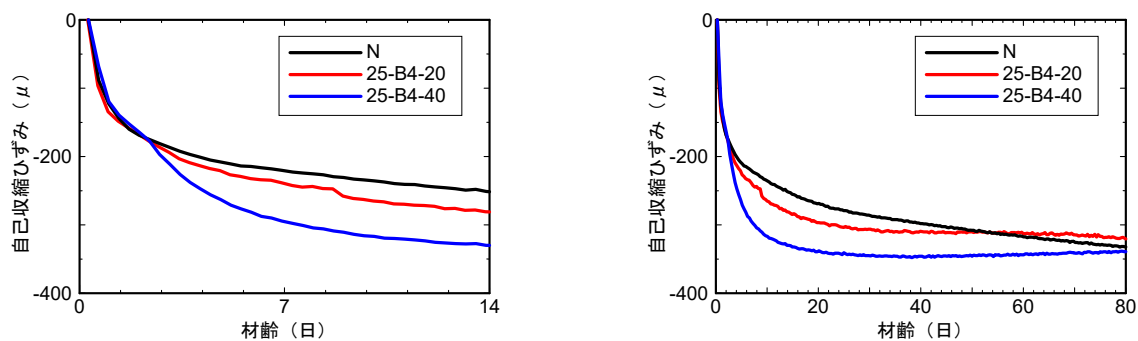
図－3 圧縮強度試験結果 (W/B = 30%)

W/B-粉末度-BFS/B で表示している。材齢 28 日において、水結合材比 25%では 114~123N/mm²の圧縮強度が、水結合材比 30%では 96~113N/mm²の圧縮強度が得られていることがわかる。図－2 の水結合材比 25%の材齢 7 日強度については、スラグ 20%置換において無置換と同程度の強度であり、スラグ 40%置換ではいずれの配合においても小さくなっている。この要因としては、高炉スラグ微粉末の反応が遅いことから、特に、スラグ 40%置換では潜在水硬反応が進んでおらず、強度が伸びなかったと考えられる。材齢 28 日強度では、スラグ 20%置換において無置換と同程度あるいは若干大きな強度になっている。スラグ 40%置換の強度は、B4 においてスラグ 20%置換より依然小さいのに対して、B6 ではスラグ 20%置換よりも大きい。これは粉末度が大きいほど反応が早く、潜在水硬反応が進んだ結果だと考えられる。図－3 の水結合材比 30%の材齢 7 日強度については、いずれの配合においても高炉スラグ微粉末の置換率が増加すると、強度が小さくなっている。材齢 28 日強度では、B4 においてスラグ 20%置換、40%置換ともに無置換よりも小さいのに対して、B6 では強度が大きくなっている。この要因としては水結合材比 25%と同様に粉末度が大きいほど反応が早く、潜在水硬反応が進んだ結果だと考えられる。

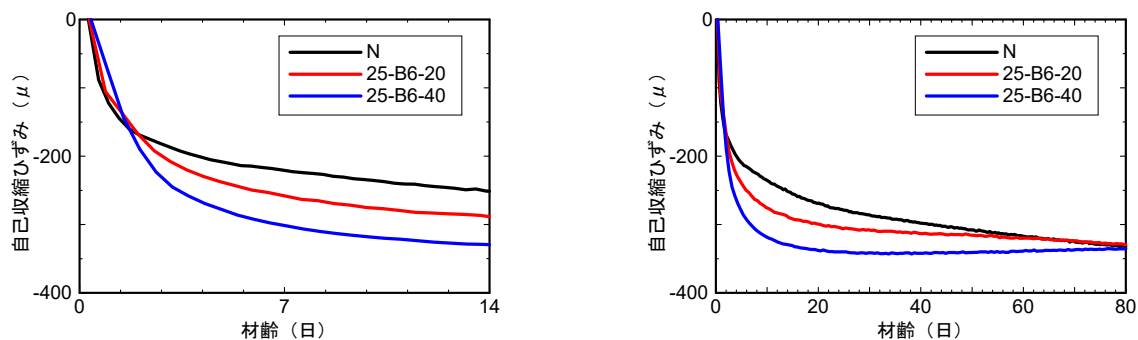
3.2 自己収縮

図－4 に W/B=25%、図－5 に W/B=30%における材齢と自己収縮の関係を示す。両図とも、図(a)は B4、図(b)

は B6 で、左図が材齢 14 日、右図が材齢 80 日までの自己収縮を示している。材齢 60 日程度まででは、高炉スラグ微粉末の混和により自己収縮が大きくなっている。水結合材比 25%では、材齢 1 日程度までは無置換とスラグ置換の自己収縮は同程度であるが、その後スラグ置換の方が大きくなる。材齢 20 日を超えた期間では、無置換では収縮が続いているのに対して、スラグ置換では収縮が停滞している。材齢 20 日程度までの挙動としてはスラグ置換で継続的に起こっている潜在水硬反応による細孔構造の緻密化、あるいは自己乾燥の進行の影響で収縮が大きくなったと考えられる。水結合材比 30%では、材齢 1 日程度までの自己収縮ひずみの増加量はスラグ置換で非常に大きく、材齢 20 日を超えた期間では、水結合材比 25%と同様に無置換では収縮が続いているのに対して、スラグ置換では収縮が停滞あるいは膨張傾向に転じている。膨張傾向に転ずる要因としては、潜在水硬反応を含む水和反応の進行による細孔構造の変化や相対湿度の変化などが考えられるが、詳細については良くわかっていないのが現状である。スラグ 20%置換と 40%置換を比較すると、極初期材齢において 20%置換の自己収縮が大きい、ほぼ全期間において 40%置換の方が大きい。これについては、スラグ反応率の進行に応じて自己収縮量が大きくなるという報告⁷⁾があり、スラグ置換が多い 40%置換の反応が進んだため収縮が大きくなったと考えられる。水結合材比 25%と 30%を比較すると、同程度か若干

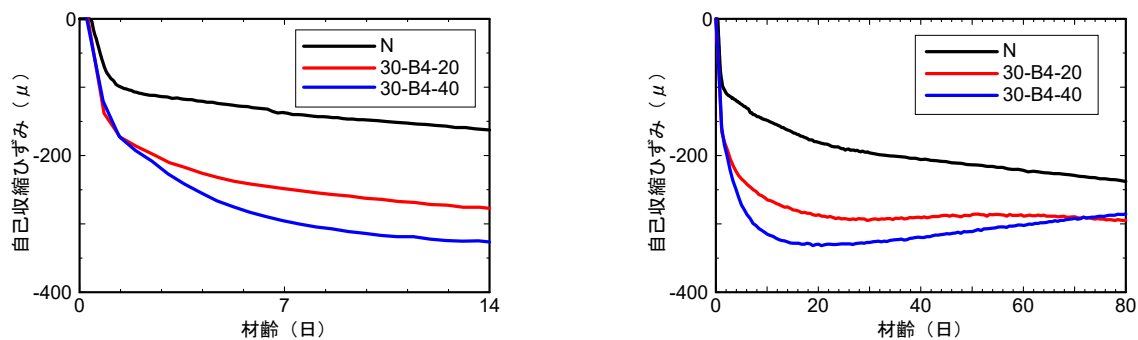


(a) 粉末度 4000

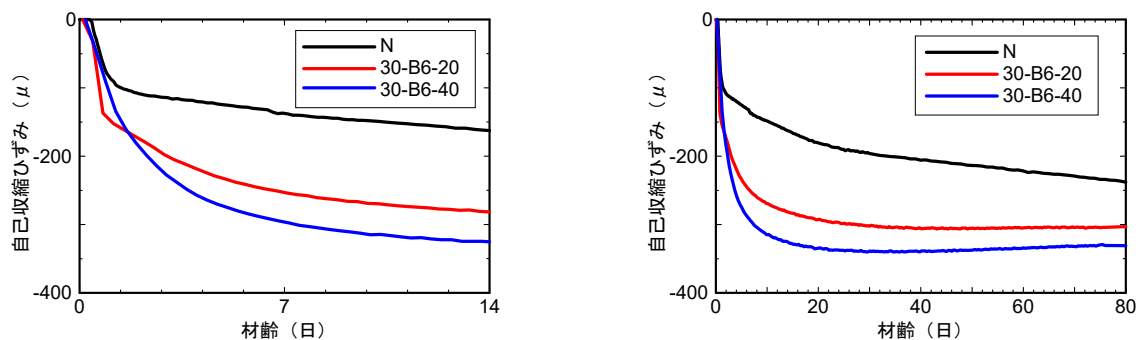


(b) 粉末度 6000

図-4 自己収縮ひずみ (W/B = 25 %)



(a) 粉末度 4000



(b) 粉末度 6000

図-5 自己収縮ひずみ (W/B = 30%)

25%の方が大きい。B4 と B6 を比較すると、材齢 1 日までにおいて B4 の自己収縮が若干大きくなっている。全体としてみると大きな差はない。これは SO_3 を高含有したもののほど初期の膨張量が大きくなるという報告⁸⁾があり、本来ならば B6 の自己収縮が B4 よりも大きい、B6 は SO_3 を含むため初期の自己収縮量が小さくなり、結果

的に B6 と B4 の自己収縮が同程度になったものと考えられる。

3.3 乾燥収縮

図-6 に W/B=25%、図-7 に W/B=30%における材齢と乾燥収縮の関係を示す。両図とも、図(a)は B4、図(b)は B6 を示している。高炉スラグ微粉末の混和により、

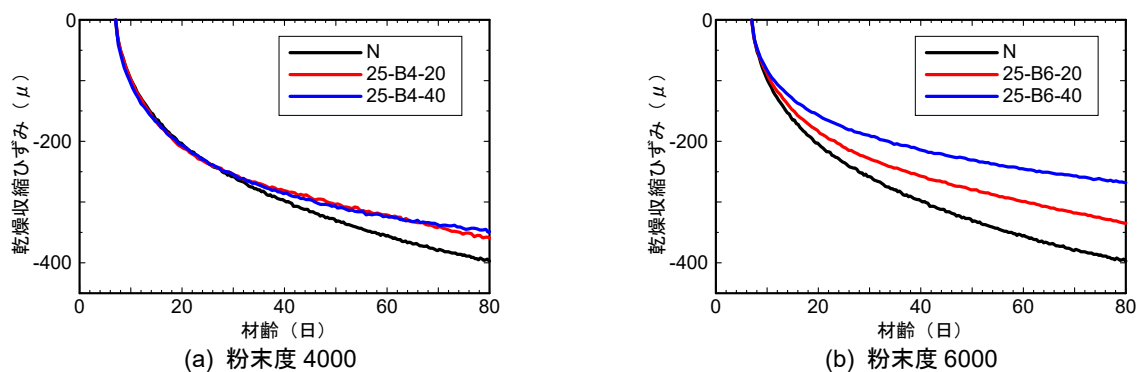


図-6 乾燥収縮ひずみ (W/B = 25%)

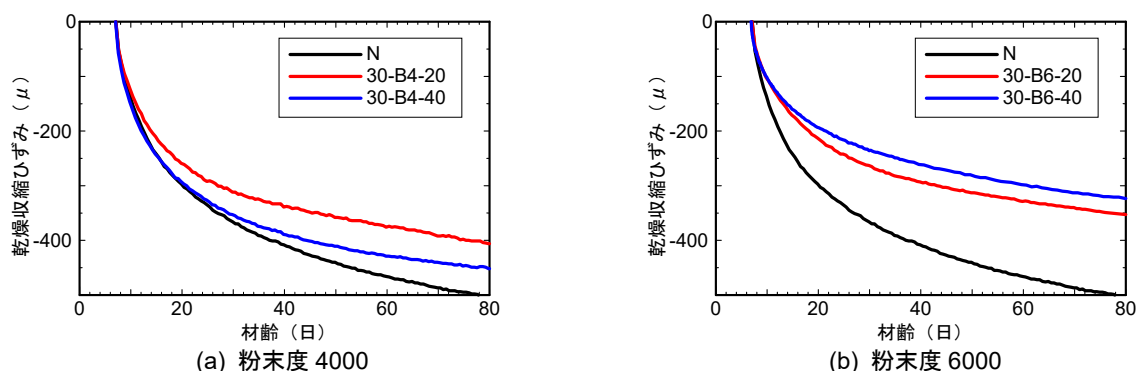


図-7 乾燥収縮ひずみ (W/B = 30%)

乾燥収縮ひずみが低減されている。乾燥収縮には、コンクリート内部の相対湿度や細孔構造、セメントペースト部の剛性などが関係しているものと考えられる。高炉スラグ微粉末を混和した場合、材齢7日程度では圧縮強度試験の結果から細孔量の増加および細孔径の増大が推定される。そのため、水分逸散時における毛細管張力が弱くなり、乾燥収縮が低減したのではないかと考えられる。B4においては、水結合材比25%での低減量は同程度、水結合材比30%ではスラグ40%置換の低減量が20%置換より小さくなっている。後述するが、40%置換において水分逸散量（質量減少率）が多かったことが、収縮低減量が小さくなった要因の1つとして考えられる。B6においては、スラグ置換率が大きいほど収縮低減量が多くなっている。B4とB6を比較すると、B6の収縮低減量が大きい。この要因としては、粉末度が大きいことによって、反応が進みやすく、水を多く消費し蒸発水量が少なくなったためと考えられる。

3.4 質量減少率

乾燥期間と質量減少率の関係を図-8に示す。図(a)のW/B=25%の結果から、乾燥開始初期において大きな質量減少がみられる。B4、B6の質量減少率はともにスラグ20%置換において無置換と大きな差は無いが、40%置換において質量減少率が大きくなっている。また、B4の減少率の方が大きい。図(b)のW/B=30%の結果においても、W/B=25%の結果と同様に乾燥開始初期において大きな質量減少がみられる。B4においては無置換よりも質量減

少率が大きく、スラグ置換率が大きいほど質量減少率も大きくなっている。これに対してB6においては無置換よりも質量減少率が小さくなっている。また、W/B=25%と30%の比較では、W/B=30%の質量減少率が大きいことがわかる。

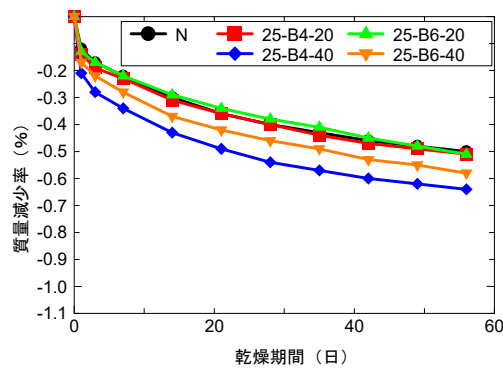
3.5 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係を図-9に示す。図(a)のW/B=25%において同一の質量減少率で比較を行うと、B4、B6ともにスラグ20%置換において無置換と同程度の乾燥収縮ひずみに、スラグ40%置換において無置換よりも小さな乾燥収縮ひずみになっている。図(b)のW/B=30%において同一の質量減少率で比較を行うと、スラグ置換率において質量減少率が無置換よりも小さくなっていること、置換率が大きいほど小さくなっていることがわかる。

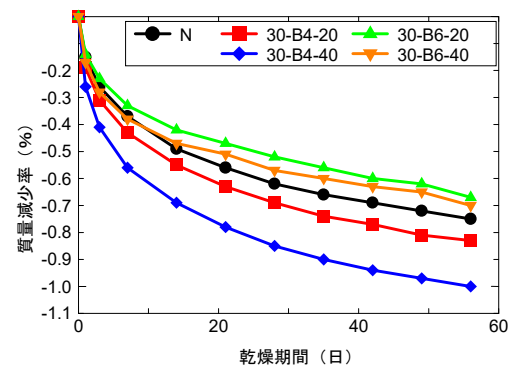
4. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末の混和量およびスラグ粉末度が高強度コンクリートの強度、収縮特性にどのような影響を与えるのかを検討するために、水結合材比を25%および30%とし、高炉スラグ微粉末の粉末度を4000および6000、結合材に対する置換率を0%から40%と変化した高強度コンクリートの圧縮強度試験および自己収縮試験、乾燥収縮試験を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) 高炉スラグ微粉末の混和は、高炉スラグ微粉末の初期

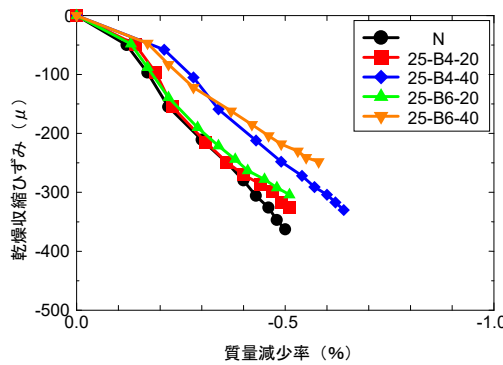


(a) W/B=25%

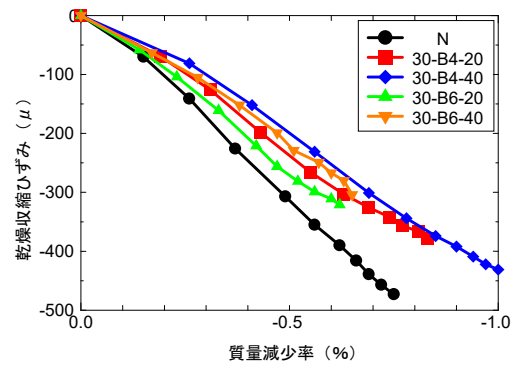


(b) W/B=30%

図－8 質量減少率



(a) W/B=25%



(b) W/B=30%

図－9 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

における潜在水硬反応速度が遅いため、初期強度を低下させる。粉末度 6000 では材齢 7 日以後の反応が早いため材齢 28 日における強度低下はない。

- 2) 高炉スラグ微粉末の混和は、潜在水硬反応による細孔構造の緻密化や自己乾燥の進行などの影響により、自己収縮を増大させる。
- 3) 高炉スラグ微粉末の混和は、材齢初期における潜在水硬反応が遅いことによる細孔量の増加および細孔径の増大の影響で乾燥収縮を低減させる。その効果は粉末度 6000 で高い。

参考文献

- 1) 小亀大佑, 菅田紀之, 横川慶介: 高炉スラグ微粉末とシリカフェームを用いた高強度コンクリートの自己収縮について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 38, No.1, pp.183-188, 2016
- 2) 渡部嗣道, 岡村一臣, 横須賀誠一, 穂山文男: シリカフェーム・高炉スラグ微粉末を使用した高強度コンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No.1, pp.99-104, 1990
- 3) 閻学謙: 高炉スラグとシリカフェームを併用した高強度コンクリートの強度及び耐凍害性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol. 49, pp.198-203, 1995

- 4) 横室隆, 宮澤祐介: 超高強度コンクリートの基礎的性状について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No.1, pp.1235-1240, 2010
- 5) 三浦智哉, 田澤榮一, 宮澤伸吾, 保利彰宏: コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No.1, pp.359-364, 1995
- 6) 原田克己, 松下博通, 後藤貴弘, 三小田典史: 高炉セメント使用コンクリートの高温化における歪み特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No.2, pp.901-906, 2001
- 7) 伊代田岳史, 兼安真司, 檀康弘: 高炉セメント中のスラグ粉末度と石こう量が水和発熱と自己収縮特性に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 29, No.1, pp.99-104, 2007
- 8) 佐川孝広, 濱幸雄, 塚本康誉: 高炉セメント A 種の強度発現と水和反応に及ぼす無水石こうと石灰石微粉末の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol. 68, pp.239-244, 2014
- 9) 加藤弘義, 宮川豊章, 中村明則, 土井宏行: 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリートの自己収縮に与えるセッコウ及び石灰石微粉末の影響, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.111-124, 2002