論文　高強度コンクリートの強度発現および収縮特性に及ぼす高炉スラグ微粉末および無水石こうの影響

川村　祐太[*1]・菅田　紀之[*2]・山田　浩貴[*1]

要旨：高強度コンクリートの強度および収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末および無水石こうの影響を検討するために，水結合材比を 25 %とする配合において，高炉スラグ微粉末の置換率を 0 %, 20 %, 40 %の 3 水準，無水石こうの高炉スラグ微粉末への混合率を SO_3 換算で 0 %, 1.5 %, 3.0 %, 4.5 %の 4 水準とした合計 9 ケースのコンクリートを製造し圧縮強度試験および収縮試験を行った。その結果，高炉スラグ微粉末の混和による初期強度の低下および自己収縮の増加は無水石こうの混合により抑制されること，無水石こうの混合により乾燥収縮は低減されることを明らかにした。

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

1. はじめに

近年，地球環境の保全を目的として，高炉スラグやフライアッシュなどの産業副産物のコンクリートに対する有効利用が進められており，高炉スラグに関する成果は指針等として示されている [1), 2)]。また，セメントの二酸化炭素排出量原単位量が 765.5 kg/t であるのに対し，高炉スラグは 26.5 kg/t であり [3)]，セメントの代用としての使用は二酸化炭素排出量の大幅な削減に有効である。高炉スラグは潜在水硬性を有しており，長期強度の増進が期待できる。また，コンクリートの温度上昇の抑制，水密性の向上，化学抵抗性の向上，アルカリシリカ反応の抑制などの効果も期待できるため多くの場面で適用されている。一方で初期強度の低下や高強度コンクリートにおける自己収縮の増大が指摘されている [4), 5)]。この指摘を改善する目的として高炉スラグ微粉末に無水石こうを混合して使用されることがある。無水石こう混合に伴い材齢初期のエトリンガイト生成量の増加などにより，初期強度低下が改善されることや自己収縮が低減されることなどの報告がある [6), 7)]。しかしながら，圧縮強度が 100 N/mm^2 を超えるような高強度コンクリートにおける高炉スラグ微粉末や無水石こうの影響についてはよくわかっていないのが現状である。

本研究では，圧縮強度 100 N/mm^2 を超える高強度コンクリートの強度発現および収縮特性に及ぼす高炉スラグ微粉末および無水石こうの影響を明らかにするために，高炉スラグ微粉末の置換量および無水石こうのスラグへの混合量を変化させ，凝結試験および圧縮強度試験，自己収縮試験，乾燥収縮試験を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

本研究において高強度コンクリートの製造に用いた材料を**表－1**に示す。セメントとしては普通ポルトランドセメントを用い，高炉スラグ微粉末としては JIS の微粉末 4000 の品質を満足する比表面積 4,020 cm^2/g で無水石こう無混合のものを用いた。混和材としては，その他に高強度コンクリートに用いられることが多いシリカフュームを用いた。高炉スラグ微粉末に添加した無水石こうは平均粒径 20 μm 程度のものであり，SO_3 量は 56 %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，エントレインドエアの導入を抑制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
普通ポルトランドセメント (C)	比表面積：3,260 cm^2/g 密度：3.16 g/cm^3
高炉スラグ微粉末 (BS)	比表面積：4,020 cm^2/g SO_3: 0 %　　密度：2.91 g/cm^3
シリカフューム (SF)	比表面積：200,000 cm^2/g 密度：2.2 g/cm^3　　SiO_2：97 %
無水石こう (AH)	平均粒径: 20 μm 程度 SO_3: 56 %　　密度：2.97 g/cm^3
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度：2.70 g/cm^3
粗骨材 (G)	JIS A 5005 砕石 2005 表乾密度：2.68 g/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

配合名	W/B	SF/B	BS'/B	SO_3/BS'	単位量 (kg/m^3)									フロー	空気量
	(%)	(%)	(%)	(%)	W	C	SF	BS	AH	S	G	SP	AF	(cm)	(%)
N	25	10	0	0	165	594	66	0	0	803	830	7.59	0.023	64	1.2
B20-00	25	10	20	0	165	462	66	132	0	798	825	6.40	0.019	65	2.0
B20-15	25	10	20	1.5	165	462	66	128.5	3.54	798	825	6.40	0.019	63	2.4
B20-30	25	10	20	3.0	165	462	66	124.9	7.07	798	825	6.40	0.019	65	1.9
B20-45	25	10	20	4.5	165	462	66	121.4	10.6	798	825	6.40	0.019	66	1.6
B40-00	25	10	40	0	165	330	66	264	0	793	820	5.61	0.017	69	1.9
B40-15	25	10	40	1.5	165	330	66	256.9	7.07	793	820	5.61	0.017	69	1.3
B40-30	25	10	40	3.0	165	330	66	249.9	14.1	793	820	5.61	0.017	64	1.8
B40-45	25	10	40	4.5	165	330	66	242.8	21.2	793	820	5.61	0.017	69	2.0

B = C + SF + BS + AH,　BS' = BS + AH

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, 実験パラメーターを**表－３**示す。配合としては，水結合材比 (W/B, B= C+SF+BS+AH) を 25 %，シリカフューム置換率 (SF/B) を 10 %で一定，高炉スラグ微粉末の置換率 ((BS+AH) /B) を 0 %, 20 %および 40 %の 3 水準とした。高炉スラグ微粉末への無水石こうの混合率 (SO_3/ (BS+AH)) は SO_3 量換算で 0 %, 1.5 %, 3.0 %, 4.5 %の 4 水準である。高性能 AE 減水剤量については，スランプフローが 65 cm 程度となるように使用量を設定した。配合名については，高炉スラグ微粉末を混和していない配合は N，混和している配合は B で示し，B に続き高炉スラグ微粉末の置換率，無水石こうの混合率（SO_3 換算）として示した。なお，スランプフローの実測値は，63～69 cm，空気量の実測値は 1.2～2.4 %であった。

2.3 凝結試験および圧縮強度試験

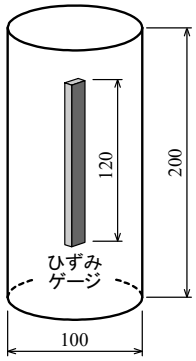
凝結試験は JIS A 1147 に従い行った。フレッシュコンクリートを 5mm ふるいで粗骨材を取り除いたモルタルを使用し，凝結始発および終結時間を求めた。圧縮強度試験は JIS A 1108 に従い行った。試験に用いた供試体は直径 100 mm，高さ 200 mm の円柱供試体であり，材齢 1 日まで 20 ℃で封緘養生，その後 20 ℃の水中養生を継続したものである。強度試験は材齢 1, 3, 7, 14, 28 日において行い，3 本の平均を圧縮強度とした。供試体の打込み面の処理は研磨機による研磨仕上げである。

2.4 自己収縮試験

自己収縮試験は**図－１**に示すように直径 100 mm，高さ 200 mm の円柱供試体の中央軸方向にゲージ長 120 mm の埋込型ひずみゲージを設置して行った。また，供試体中央に熱電対を設置し温度測定を行った。ひずみの測定は型枠にコンクリートを打込み，封緘状態としたのちに開始し，凝結始発を起点として以後のひずみ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，上面をポリエチレンシートおよびアルミテープを用いて密封し封緘とした。なお、本試験では鋼製缶とコンクリートの間には摩擦低減処理を行っていないが, JCI-SAS2-2 の試験方法による結果と大きな差がないことを確認している。試験環境は 20 ℃に制御された恒温室内で，試験期間は材齢 60 日までである。

表－３　実験パラメーター

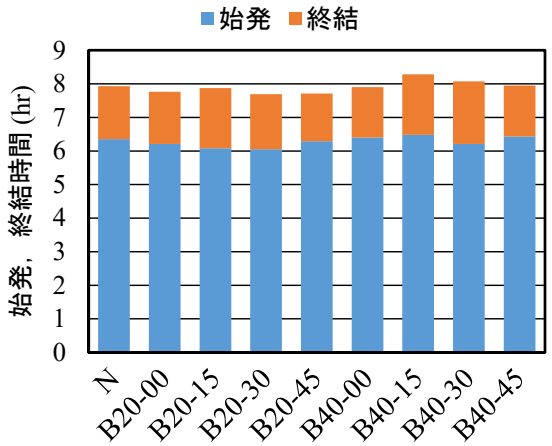
結合材 B	置換率 BS'/B (%)	SO_3 (%)
C+SF	0	
C+ BS'+SF	20，40	0，1.5，3.0，4.5



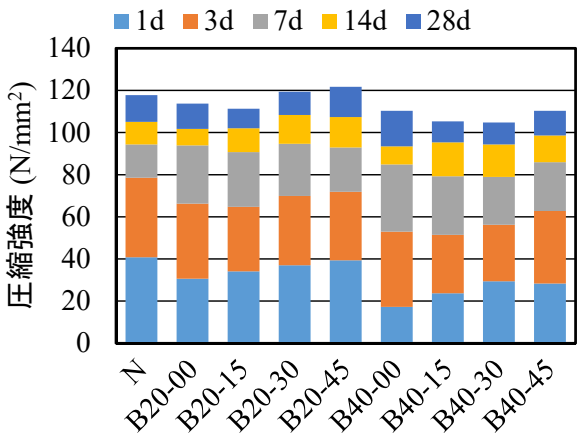
図－１　収縮試験用供試体

2.5 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は自己収縮試験と同様に直径 100 mm，高さ 200 mm の円柱供試体の中央軸方向にゲージ長 120 mm の埋込型ひずみゲージを設置して行った。本方法と同様な試験法による乾燥収縮ひずみの値は, JIS A 1129 の長さ変化試験より若干大きくなるという報告 [8] があるが，本研究内における相対比較には問題ないと考えられる。試験は材齢 7 日まで 20 ℃封緘状態で養生されたものを用い，脱型後に供試体の上下面にアルミテープを貼付け，供試体側面のみを乾燥面とした。試験環境は温度 20 ℃，相対湿度 60 %で，試験期間は材齢 60 日までであ



図－２　凝結始発時間および終結時間



図－３　圧縮強度

る。乾燥収縮試験においては，同様の処理を行った供試体の質量測定も行い，質量減少率を算出した。

3. 結果および考察

3.1 凝結時間

図－２に凝結始発時間および終結時間を示す。図より，高炉スラグ微粉末を混和していないNの始発時間は6時間20分，終結時間は7時間55分であるのに対して，高炉スラグ微粉末を混和したBについては，20%置換で始発時間は6時間5分から6時間15分，終結時間は7時間40分から7時間50分であり，40%置換で始発時間は6時間15分から6時間30分，終結時間は7時間55分から8時間15分であることから，40 %置換において凝結が若干遅延しているといえる。また，無水石こうの混合率が増加しても凝結始発時間および凝結終結時間に大きな変化は無く，高炉スラグおよび無水石こうの凝結に及ぼす影響についてはほぼ無いといえる。

3.2 圧縮強度

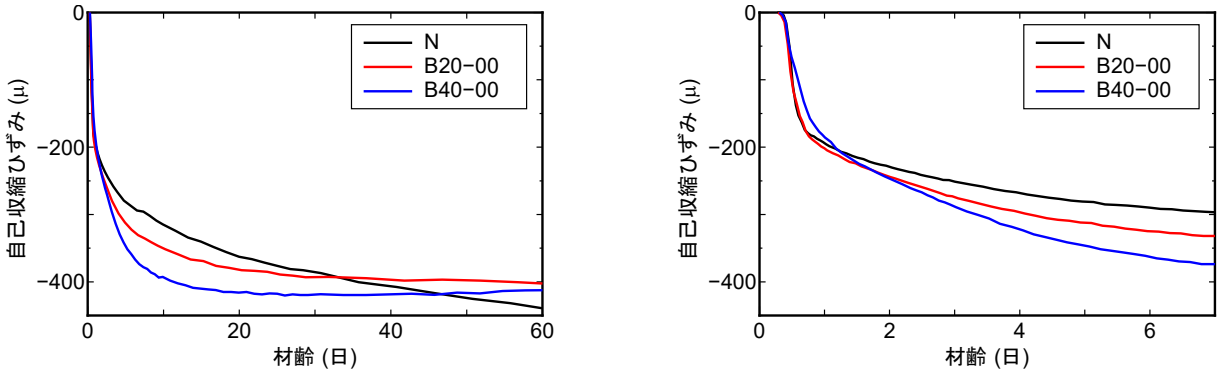
図－３に圧縮強度を示す。高炉スラグ微粉末を混和していないNの圧縮強度と無水石こうを混合していない高炉スラグ微粉末を用いたケース (B20-00, B40-00) の比較を行うと，高炉スラグ微粉末の置換率の増加に従い圧縮強度が低下していることがわかる。スラグ 20 %置換 B20-00 の強度は，材齢 1 日において 25 %低下しているが，材齢7日以降においてはNとほぼ等しい強度になっている。スラグ40 %置換 B40-00 の強度は，材齢 1 日において 58 %低下しているが，材齢7日および材齢14日においては10 %，材齢28日においては6 %低下まで回復しており，材齢初期の低下が大きい。

無水石こう混合による影響については，スラグ20%置換において材齢 1 日から材齢 28 日で無水石こうの増加により圧縮強度が増加していることがわかる。材齢1日における強度増加が特に大きく，B20-00 の強度は N より 25 %低下しているのに対して，B20-30 および B20-45 の強度は N と同程度である。スラグ 40 %置換においては，材齢1日および3日で無水石こうの増加とともに強度が大きくなっている。材齢1日における効果としては，B40-00 の強度は N より 58 %低下しているのに対して，B40-30 の強度低下は 28 %にとどまっている。無水石こうを混合すると初期にエトリンガイトの生成が増大すると報告されており [6), 9)]，その効果で強度が増加したものと考えられる。

3.3 自己収縮

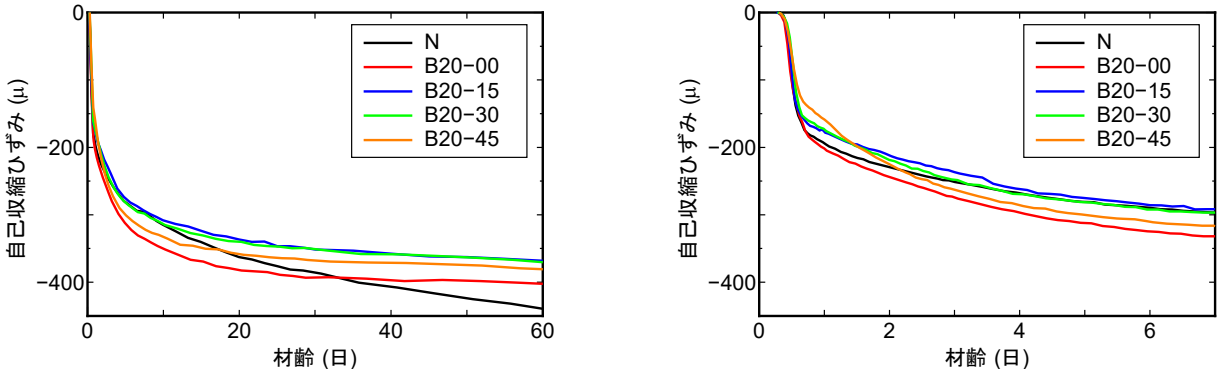
図－４～６に自己収縮ひずみの経時変化を示す。**図－４**は無水石こうを混合していない配合での高炉スラグ置換による比較，**図－５**はスラグ20%置換の無水石こう混合率による比較，**図－６**はスラグ40%置換の無水石こう混合率による比較である。また，**図** (a) には材齢 60 日までの自己収縮ひずみ，**図** (b) には材齢7日までの比較的初期の自己収縮ひずみを示している。

図－４に示す無水石こうを混合していない N, B20-00, B40-00 で比較すると，材齢33日，あるいは46日までにおいて高炉スラグ微粉末を混和することにより自己収縮が大きくなっていること，置換率の増加により自己収縮が大きくなっていることがわかる。また，Nに対してB20-00およびB40-00の材齢1日から10日程度までの自己収縮の増大量が大きいことがわかる。N では材齢 60 日においても収縮量が増大しているが，B20-00 および B40-00においては材齢30日程度から収縮量がわずかな増加，あるいはわずかな減少をしており，B20-00は材齢33日，B40-00は材齢46日以降でNより小さい値を示している。**図－５**に示すスラグ 20 %置換の B20-00, B20-15, B20-30, B20-45 で比較すると，B20-00 の自己収縮量が大きいという現象は無水石こうの混合で緩和され，材齢 60 日において B20-00 の収縮ひずみ-405 μ に対して B20-15, B20-30 のひずみは-369 μ である。**図－６**に示すスラグ 40 %置換の B40-00, B40-15, B40-30, B40-45 で比較すると，



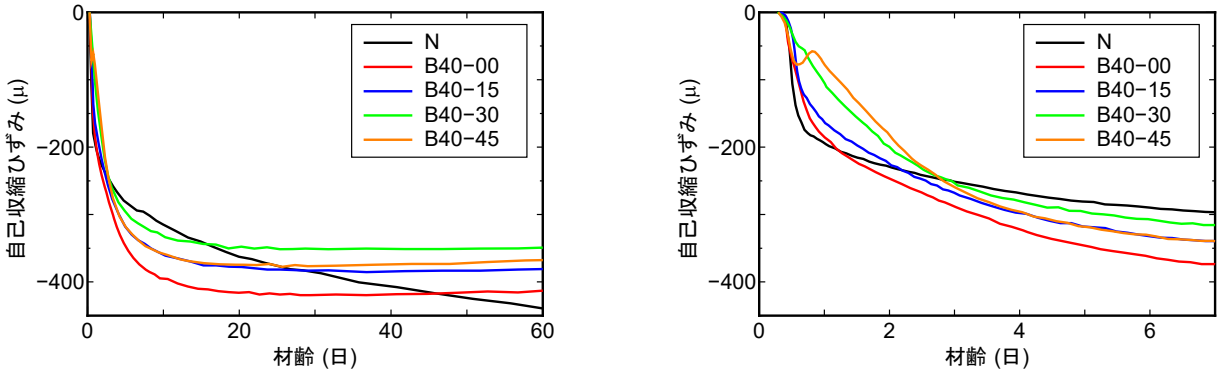
(a) 材齢 60 日までの自己収縮ひずみ　(b) 材齢 7 日までの自己収縮ひずみ

図－４　自己収縮ひずみの経時変化（N, B20-00, B40-00）



(a) 材齢 60 日までの自己収縮ひずみ　(b) 材齢 7 日までの自己収縮ひずみ

図－５　自己収縮ひずみの経時変化（N, B20-00, B20-15, B20-30, B20-45）



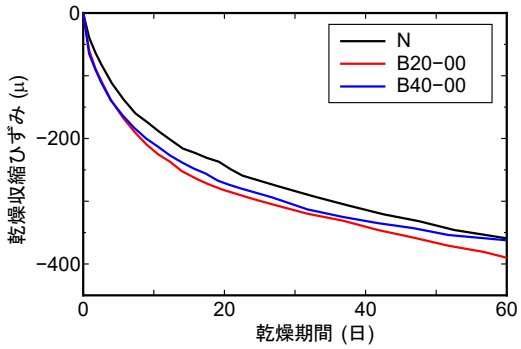
(a) 材齢 60 日までの自己収縮ひずみ　(b) 材齢 7 日までの自己収縮ひずみ

図－６　自己収縮ひずみの経時変化（N, B40-00, B40-15, B40-30, B40-45）

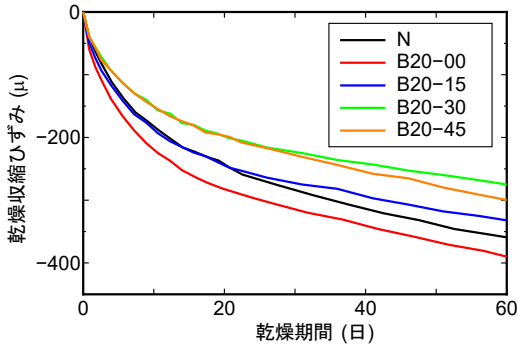
40 %置換においても自己収縮量が大きいという現象は無水石こうの混合で緩和されている。ただし，低減効果が大きいことが期待された B40-45 については，B45-15 と同程度の低減効果であった。この要因についてはよくわかっていない。B40-45 のひずみが材齢 0.6 日から 0.9 日において膨張側に転じているのは，エトリンガイトの生成による膨張が勝ったためと考えられる。材齢 60 日において, B40-00 の収縮ひずみ -412 μに対して B40-30, B40-45 のひずみは -348 μおよび -366 μである。これまで報告されているように [6]，無水石こうの混合により初期のエトリンガイト生成量が増大し，自己収縮量が低減されたのではないかと考えられる。また，無水石こう混合率の増加による収縮量の低減率が 40 %置換の方が大きいことから，自己収縮低減効果は 20 %置換よりも大きいといえる。

3.4 乾燥収縮

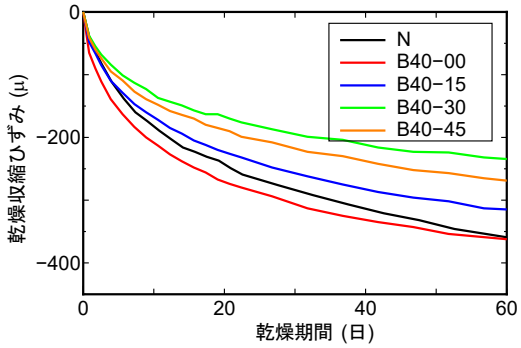
図－７に温度 20 ℃，相対湿度 60 %の環境における材齢 7 日からの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。**図 (a)** において無水石こうを混合していない N, B20-00, B40-00 で比較すると，高炉スラグ微粉末を混和している B20-00



(a) N, B20-00, B40-00

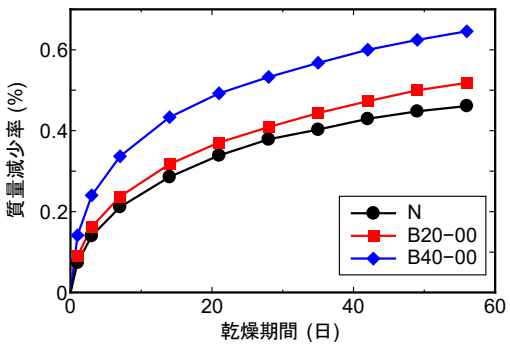


(b) N, B20-00, B20-15, B20-30, B20-45

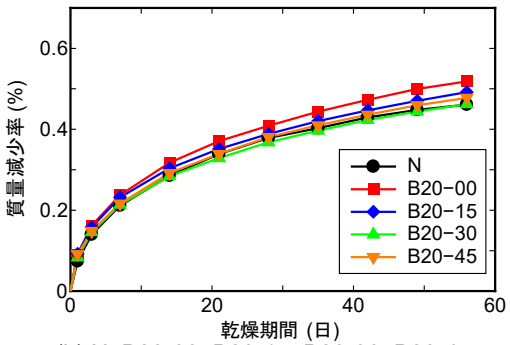


(c) N, B40-00, B40-15, B40-30, B40-45

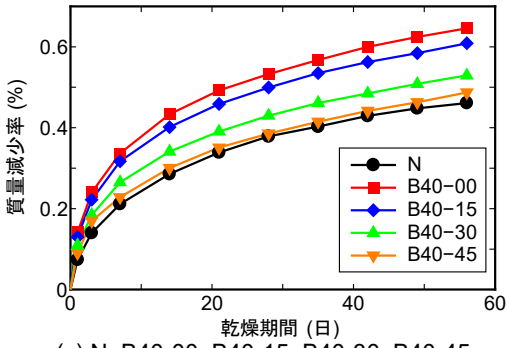
図－７　乾燥収縮ひずみの経時変化



(a) N, B20-00, B40-00



(b) N, B20-00, B20-15, B20-30, B20-45



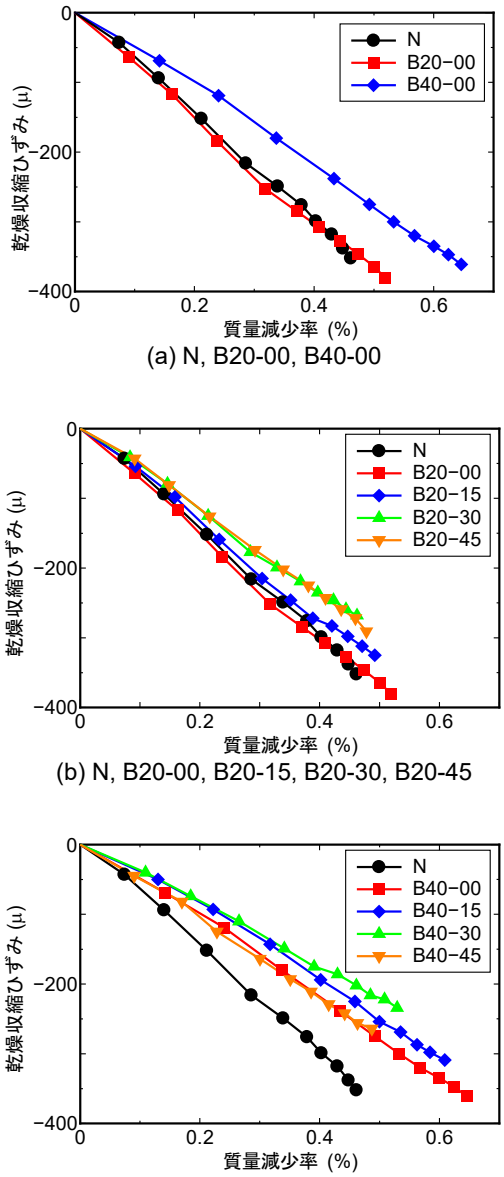
(c) N, B40-00, B40-15, B40-30, B40-45

図－８　質量減少率の経時変化

および B40-00 の乾燥収縮ひずみは混和していない N よりも若干増大していることがわかる。しかしながら，材齢 60 日（材齢 67 日）において N の収縮ひずみ-358 μ に対して B40-00 のひずみは-365 μ でありほぼ同等の値を示している。

図 (b) においてスラグ 20 %置換の B20-00, B20-15, B20-30, B20-45 で比較すると，B20-00 の乾燥収縮量が増大する現象は緩和され，無水石こうを混和したすべてのケースで N よりも小さくなっていることがわかる。最も低減効果が大きいのは B20-30 である。図 (c) においてスラグ 40 %置換の B40-00, B40-15, B40-30, B40-45 で比較すると，スラグ 40 %置換の乾燥収縮ひずみは，20 %置換と同様に無水石こうを混和したすべてのケースで N よりも小さくなっている。乾燥期間 60 日（材齢 67 日）において，B40-00 の収縮ひずみ -365 μに対して B40-30 のひずみは -237 μで，35 %低減されており，無水石こうによる乾燥収縮ひずみの低減効果は大きい。無水石こうを添加した場合，初期強度が増加している傾向から，細孔量の減少あるいは細孔径の減少などが考えられる。それらで生ずる水分逸散による収縮駆動力の変化に対してペースト部剛性の増加が勝り，収縮低減につながったのではないかと推定される。

図－８に温度 20 ℃，相対湿度 60 %の環境における材齢 7 日からの水分逸散に伴う質量減少率の経時変化を示す。図 (a) において無水石こうを混合していない N, B20-00, B40-00 で比較を行うと，スラグ置換率の増加に従い質量減少率も増加していることがわかる。高炉スラグ微粉末混和による水和反応の遅延により未水和水が多く残っていること，および緻密化が進んでいないことが要因として考えられる。図 (b) および図 (c) において無



(a) N, B20-00, B40-00

(b) N, B20-00, B20-15, B20-30, B20-45

(c) N, B40-00, B40-15, B40-30, B40-45

図－９　質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

水石こうの影響について検討すると，スラグ 20 %置換，40 %置換の両ケースにおいて，無水石こうの混合率が増加するに従い質量減少率が低下していることがわかる。20 %置換の B20-30，B20-45 および 40 %置換の B40-45 でスラグ無混和 N と同程度になっている。また，低下の程度は 40 %置換の方が大きくなっている。無水石こうの混合により初期強度が増加していることから細孔量や細孔径の減少が推察され，そのことより水分が逸散しにくくなったのではないかと考えられる。

図－９は質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係である。**図** (a) において無水石こうを混合していない N, B20-00, B40-00 で比較を行うと，同一の質量減少率に対する乾燥収縮ひずみは，40 %置換において減少していることがわかる。**図** (b) および**図** (c) において無水石こうの影響について検討する。同一の質量減少率で比較すると，無水石こうを混合することにより乾燥収縮ひずみが若干減少しているが，一定の傾向を示していない。しかしながら，高炉スラグ微粉末を混和していない N よりも乾燥収縮ひずみは小さくなっていることがわかる。

4. まとめ

高炉スラグ微粉末を混和した圧縮強度が 100 N/mm^2 を超える高強度コンクリートの強度発現および収縮特性について，無水石こうの影響を検討した。その結果，無水石こうの混合は，初期強度の改善に有効であること，自己収縮および乾燥収縮の低減に有効であることを明らかにした。

参考文献

1) 土木学会:コンクリートライブラリー 第 151 号　高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針，土木学会, 2018
2) 土木学会:コンクリートライブラリー　第 76 号　高炉スラグ骨材コンクリートの施工指針，土木学会, 1993
3) 土木学会：コンクリートライブラリー　第 125 号 コンクリート構造物の環境性能照査指針，土木学会, 2005
4) 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
5) 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ュ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集, Vol.38, No,1, pp.183-188, 2016
6) 井上和久，田中敏嗣，下山善秀：高炉スラグ系混合セメントの初期水和に及ぼす石こうの影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.46, pp.74-79, 1992
7) 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
8) 百瀬晴基，閑田徹志，今本啓一，三橋博三：乾燥収縮迅速評価システムの開発，コンクリート工学, Vol.47, No.10, pp.22-29, 2009
9) 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.239-245, 2014