

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発現および収縮特性に及ぼす無水石こうの影響

川村 祐太*1・菅田 紀之*2・小亀 大佑*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 30 %とする配合に対して、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 SO₃ 換算で 0 %, 1.5 %, 3.0 %, 4.5 %の 4 水準の組合せでコンクリートを製造し強度試験および収縮試験を行った。その結果、無水石こうの混合により初期強度が改善されること、高炉スラグ微粉末の混和による自己収縮の増加は抑制されること、高炉スラグ微粉末の混和により低減される乾燥収縮はさらに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

産業副産物の有効利用として高炉スラグに関する研究が行われてきており、その成果が各種指針等として示されている^{1),2)}。また、セメントに関わる二酸化炭素排出量の削減に有効であることから、高炉セメントあるいは高炉スラグを混合したコンクリートに関する研究が継続的に行われてきている。高炉スラグ微粉末についてはコンクリートに混和した場合の効果を生かし、化学物質に対する抵抗性が必要な場面や水和熱発生の抑制が必要な場面において適用されることが多い。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^{3),4)}。

高炉スラグ微粉末をポルトランドセメントに混和することにより、スラグが潜在水硬反応するのみならず、スラグがセメントに含まれる各種鉱物の反応速度に影響を及ぼすことが知られている^{5),6)}。また、高炉スラグ微粉末には無水石こうが混合されることがある。無水石こう混合による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^{7),8)}。しかしながら、圧縮強度が 100 N/mm²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/mm²程度の高強度コンクリートの強度発現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 cm²/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ェームを用いた。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、SO₃ 量は 56 %である。細骨材としては陸砂、粗骨材としては JIS の碎石 2005

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：3,360 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
シリカフェーム (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：2.67 g/cm ³
粗骨材 (G)	JIS A 5005 碎石 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 (cm)	空気量 (%)
					W	C	SF	BS	AH	S	G	SP	AF		
N	30	10	0	0	165	495	55	0	0	851	879	5.86	0.024	69	2.2
B20-00	30	10	20	0	165	385	55	110	0	847	875	4.70	0.019	66	1.8
B20-15	30	10	20	1.5	165	385	55	107.1	2.95	847	875	4.70	0.019	64	1.2
B20-30	30	10	20	3.0	165	385	55	104.1	5.89	847	875	4.70	0.019	65	1.2
B20-45	30	10	20	4.5	165	385	55	101.2	8.84	847	875	4.79	0.019	64	0.8
B40-00	30	10	40	0	165	275	55	220	0	843	871	4.00	0.016	69	0.8
B40-15	30	10	40	1.5	165	275	55	214.1	5.89	843	871	4.00	0.016	68	1.7
B40-30	30	10	40	3.0	165	275	55	208.2	11.8	843	871	4.00	0.016	70	1.5
B40-45	30	10	40	4.5	165	275	55	202.3	17.7	843	871	4.13	0.017	68	0.9

$$B = C + SF + BS + AH, \quad BS' = BS + AH$$

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。

2.2 配合

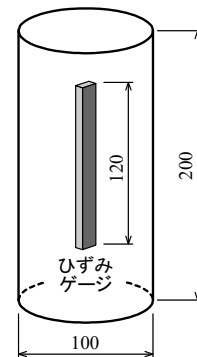
本研究に用いた高強度コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表－２に示す。配合においては、水結合材比 (W/B, $B = C + SF + BS + AH$) を 30%，シリカフェーム置換率 (SF/B) を 10% で一定，高炉スラグ微粉末の置換率 ((BS+AH)/B) を 0%，20% および 40% の 3 水準とした。高炉スラグ微粉末への無水石こうの混合率 (SO₃/(BS+AH)) は SO₃ 量換算で 0%，1.5%，3.0%，4.5% の 4 水準である。高性能 AE 減水剤量については，スランプフローが 65 cm 程度となるように使用量を設定した。配合名については，高炉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 (SO₃ 換算) として示した。なお，スランプフローの実測値は，64～70 cm，空気量の実測値は 0.8～2.2% 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，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 に従って行った。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 日において行った。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



図－１ 収縮試験用供試体

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。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。

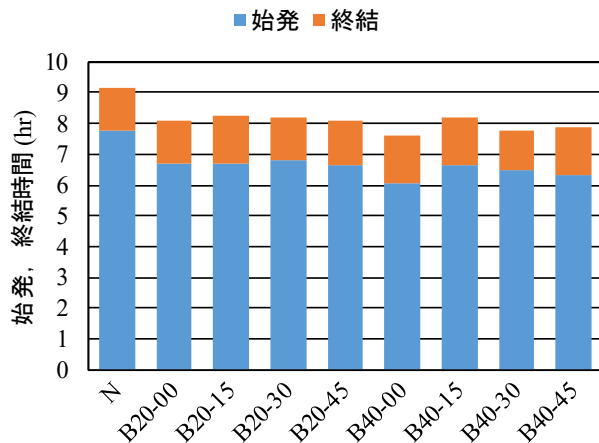
2.5 乾燥収縮試験

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。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。

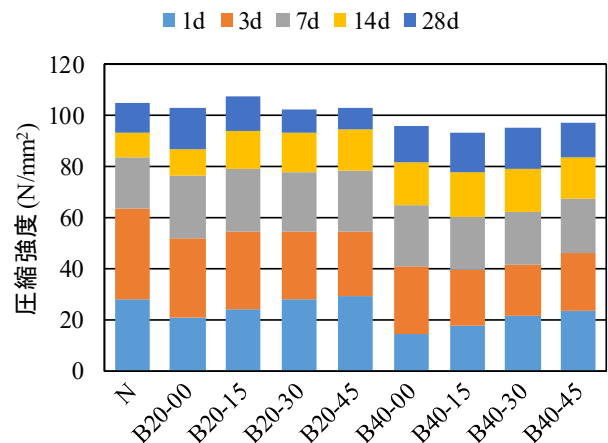
3. 結果および考察

3.1 凝結時間

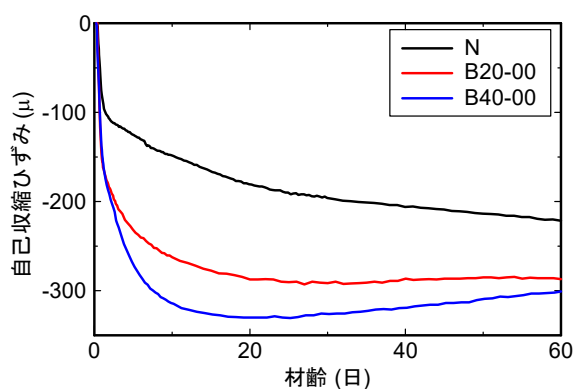
図－２に凝結始発時間および終結時間を示す。図より，高炉スラグ微粉末を混和していない N の始発時間は 7 時間 45 分，終結時間は 9 時間 10 分であるのに対して，高炉スラグ微粉末を混和した B については，始発時間は 6



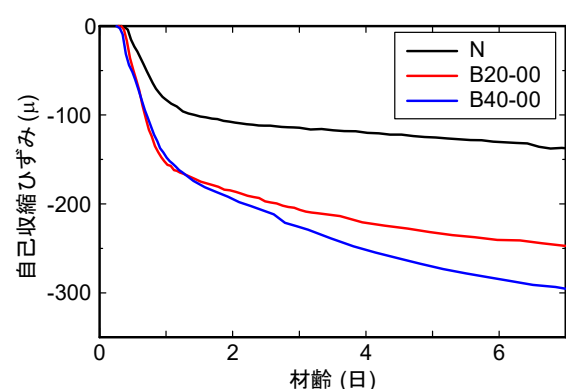
図－2 凝結始発時間および終結時間



図－3 圧縮強度



(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)

時間から 6 時間 50 分、終結時間は 7 時間 40 分から 8 時間 15 分であり、高炉スラグ微粉末を用いた場合に凝結が促進されていることがわかる。高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど凝結が若干早くなっているようであるが、大きな差は無いといえる。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、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

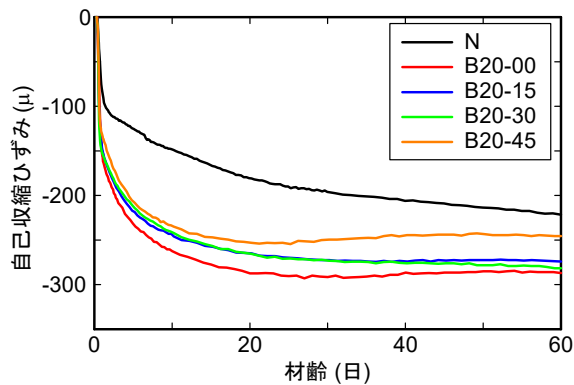
図－3 に圧縮強度を示す。高炉スラグ微粉末を混和していない N の圧縮強度と無水石こうを混合していない高炉スラグ微粉末を用いたケース (B20-00, B40-00) の比較を行うと、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に従い圧縮強度が低下していることがわかる。スラグ 20 % 置換 B20-00 の強度は、材齢 1 日において 24 % 低下しているが、材齢 14 日および 28 日において N とほぼ等しい強度になっている。スラグ 40 % 置換 B40-00 の強度は、材齢 1 日において 49 % 低下しているが、材齢 28 日においては 6 % 低下まで回復しており、材齢初期の低下が大きい。

無水石こう混合による影響については、スラグ 20 % 置

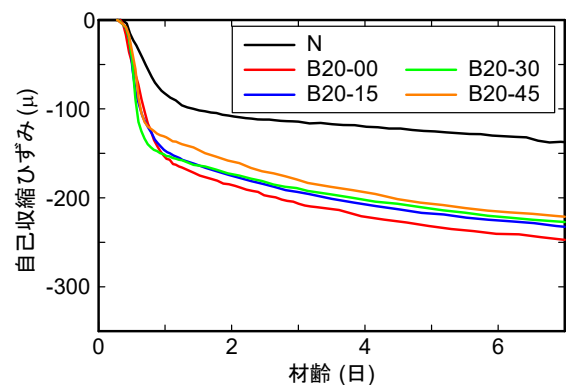
換において材齢 1 日から 14 日で無水石こうの増加により圧縮強度が増加していることがわかる。材齢 1 日における強度増加が特に大きく、B20-00 の強度は N より 24 % 低下しているのに対して、B20-30 の強度は N と同程度、B20-45 の強度は N より 6 % 増加している。スラグ 40 % 置換においては、材齢 1 日および 3 日で無水石こうの増加とともに強度が大きくなっている。材齢 1 日における効果としては、B40-00 の強度は N より 49 % 低下しているのに対して、B20-45 の強度低下は 15 % にとどまっている。無水石こうを混合すると初期にエトリンガイトの生成が増大すると報告されており⁷⁾、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。

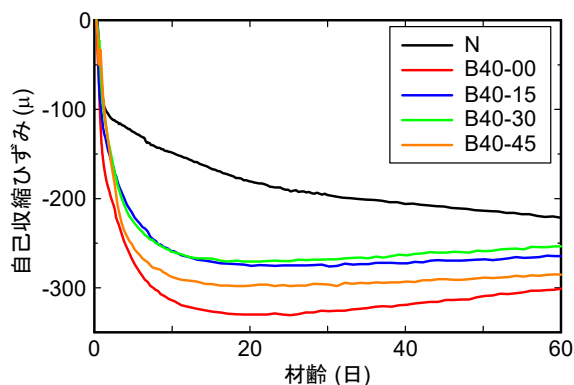


(a) 材齢 60 日までの自己収縮ひずみ

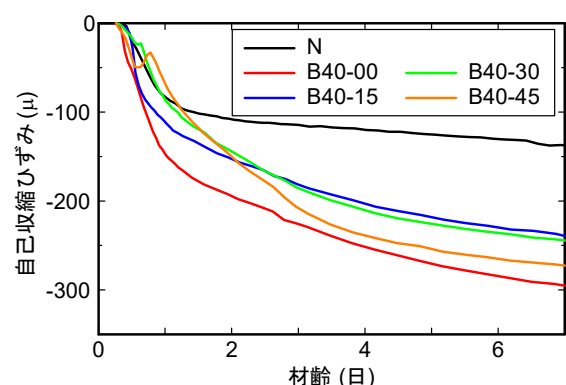


(b) 材齢 7 日までの自己収縮ひずみ

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

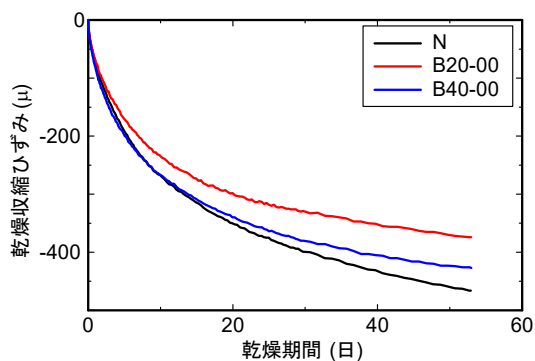
図－6 自己収縮ひずみの経時変化 (N, B40-00, B40-15, B40-30, B40-45)

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、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がわかる。N に対して B20-00 および B40-00 の材齢 1 日程度までの自己収縮の増大量が特に大きいことがわかる。N においては材齢 60 日まで収縮量が増大しているが、B20-00 では材齢 30 日程度から、B40-00 では 20 日程度から収縮量が減少傾向に転じている。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 の材齢 1 日程度までの自己収縮の増大量が N よりも大きいという現象は、無水石こうの混合によっても大きく変わることはないことがわかる。それ以降の自己収縮量については、無水石こうを混合することにより若干低減されている。材齢 60 日において、B20-00 の収縮ひずみ -287μ に対して B20-45 のひずみは -246μ 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、B40-00 の材齢 1 日程度まで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、無水石こう量が多いほど収縮増加率が低減傾向にある。B40-45 における自己収縮低減効果は小さい結果となってい

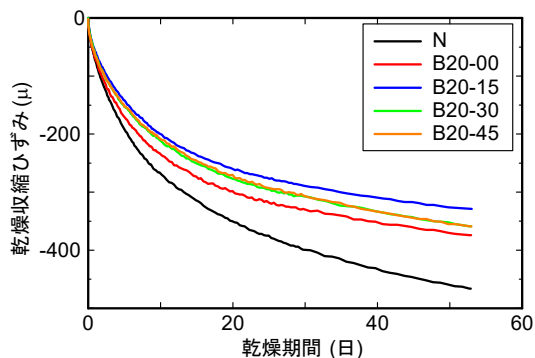
るが、材齢 60 日において、B40-00 の収縮ひずみ -301μ に対して B40-15, B40-30 のひずみは -265μ および -254μ である。これまで報告されているように⁷⁾、無水石こうの混合により初期のエトリンガイト生成量が増大し、自己収縮量が低減されたのではないかと考えられる。また、無水石こう混合による自己収縮低減効果は、スラグ 40 % 置換の方が 20 % 置換よりも大きいといえる。

3.4 乾燥収縮

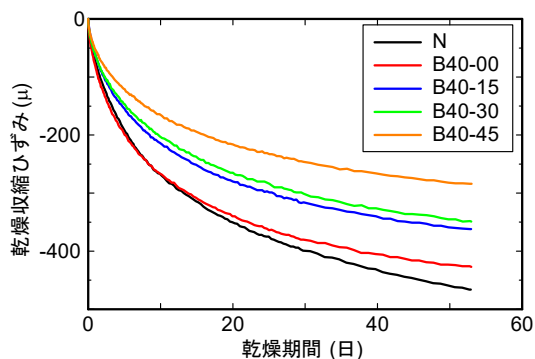
図－7 に温度 20 °C、相対湿度 60 % の環境における材齢 7 日からの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。図 (a) において無水石こうを混合していない N, B20-00, B40-00 で比較すると、高炉スラグ微粉末を混和している B20-00 および B40-00 の乾燥収縮ひずみは混和していない N よりも低減していることがわかる。収縮低減量はスラグ 20 % 置換 B20-00 の方が 40 % 置換 B40-00 よりも大きくなっている。乾燥収縮には、コンクリート内部の相対湿度や細孔構造、セメントペースト部の剛性などが関係しているものと考えられる。高炉スラグ微粉末を混和した場合、圧縮強度試験の結果から材齢 7 日程度では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



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

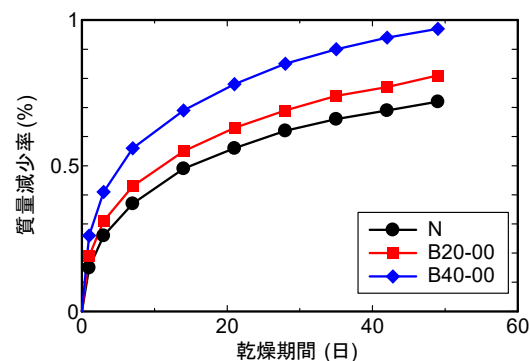


(b) N, B20-00, B20-15, B20-30, B20-45

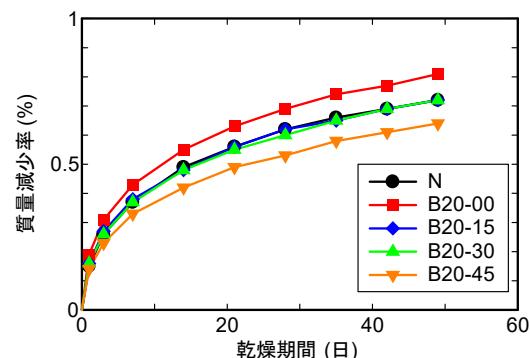


(c) N, B40-00, B40-15, B40-30, B40-45

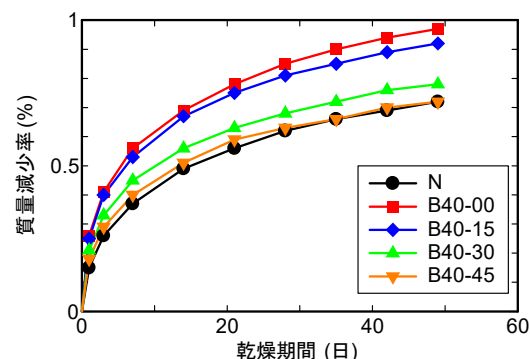
図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化



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



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



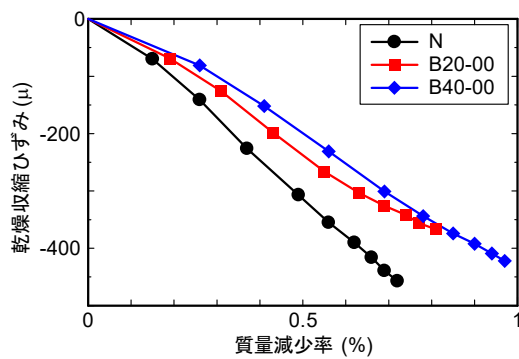
(c) N, B40-00, B40-15, B40-30, B40-45

図-8 質量減少率の経時変化

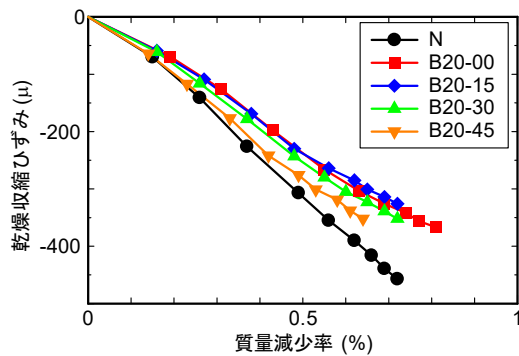
したのではないかと考えられる。図 (b) においてスラグ 20 %置換の B20-00, B20-15, B20-30, B20-45 で比較すると、スラグ 20 %置換の乾燥収縮ひずみはすべてのケースで N よりも小さくなっていることがわかる。また、無水石こうを混合している B20-15, B20-30, B20-45 の乾燥収縮ひずみは B20-00 よりも小さくなっており、無水石こうの混合は乾燥収縮ひずみの低減に有効であることがわかる。図 (c) においてスラグ 40 %置換の B40-00, B40-15, B40-30, B40-45 で比較すると、スラグ 40 %置換の乾燥収縮ひずみは、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。また、無水石こうの混合率の増加に従い乾燥収縮ひずみは減少している。乾燥期間 53 日 (材齢 60 日) において、B40-00 の収縮ひずみ -427μ に対して B40-45 のひずみは -284μ で、33 %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、圧縮強度が増加している結果から、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。

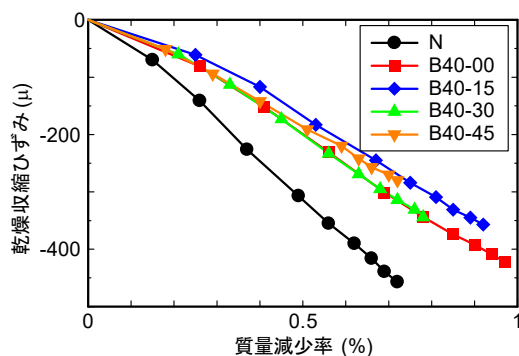
図-8 に温度 20 °C、相対湿度 60 % の環境における材齢 7 日からの水分逸散に伴う質量減少率の経時変化を示す。図 (a) において無水石こうを混合していない N, B20-00, B40-00 で比較を行うと、スラグ置換率の増加に従い質量減少率も増加していることがわかる。高炉スラグ微粉末混和による水和反応の遅延により未水和水が多く残っていること、および空隙径の増大が要因として考えられる。図 (b) および図 (c) において無水石こうの影響について検討すると、スラグ 20 %置換、40 %置換の両ケースにおいて、無水石こうの混合率が増加するに従い



(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

図ー9 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

質量減少率が低下していることがわかる。20 %置換の B20-25, B20-30 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。無水石こうを混合することにより、細孔量あるいは細孔径の減少が起こり、水分が逸散しにくくなったのではないかと考えられる。

図ー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、スラグ置換率の増加に従い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増加するケースと減少するケースがあり、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 程度の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 63 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（案），土木学会，1988
- 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) 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
- 4) 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集，Vol.38, No.1, pp.183-188, 2016
- 5) 佐川孝広，名和豊春：リートベルト法による高炉セメントの水和反応解析，コンクリート工学論文集，Vol.17, No.3, pp.1-11, 2006
- 6) 高松伸之，丸山一平，五十嵐豪，寺本篤史：高炉スラグ微粉末を用いたセメント硬化体の若材齢体積変化と水和反応に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.187-192, 2009
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 佐川孝広，濱幸雄，塚本康登：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