

論文 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性におよぼすブリーディングの影響

山崎 舞^{*1}・千歩 修^{*2}・長谷川 拓哉^{*3}

要旨：高炉スラグ細骨材（BFS）を用いたコンクリートは、空気を巻き込みやすく、ブリーディングが大きくなる傾向がある。本研究は、BFS 置換率を変えたコンクリートについて、ブリーディング性状、気泡組織、アジテートによる性状変化を測定し、縦打ち・横打ちの試験体の凍結融解試験による劣化状況について検討したものである。この結果、BFS 置換率の増加にしたがって、ブリーディング速度が増大して耐久性指数が低下したが、耐久性指数の低下は気泡間隔係数で説明できること、ブリーディングが大きい場合には、縦打ち試験体上部のスケーリングが大きくなることなどが明らかになった。

キーワード：高炉スラグ細骨材、置換率、ブリーディング、打込み方法

1. はじめに

高炉スラグ細骨材(以下 BFS と略す)を用いたコンクリートは、BFS が空気を巻き込むために空気量が多くなり、BFS の表面がガラス質のためにブリーディング量も大きくなる傾向がある。コンクリートの空気量を消泡剤を用いて低下させると、気泡径が粗大化し、耐凍害性が低下することが報告されている¹⁾。しかしながら、BFS によって巻き込まれた気泡は粗大であると考えられ、アジテートによって消失することが考えられる。また、ブリーディング量が大きくなると耐凍害性が低下するという報告^{2), 3)}があるが、微粒分を増加させた BFS コンクリートでブリーディング量を低下させても耐凍害性は変化しないという報告⁴⁾もあり、ブリーディングが耐凍害性に及ぼす影響は明確になっているとはいえない。

本研究では、打込み高さが高い場合にブリーディング

の影響が大きくなり上部の耐凍害性が低下するものと考え、長さ 40cm の試験体を縦打ち・横打ち(図-1)で作製し、これらの試験体の凍結融解試験による劣化状況を比較する。さらに、試験体上下、アジテートの有無によって BFS コンクリートの空気量および気泡組織の変化を検討するものである。

2. 実験の概要

表-1 に実験概要を示す。置換率を変えた BFS コンクリートについて横打ち・縦打ちの 2 種類の試験体を使用し、JIS A 1148 A 法に準じて凍結融解試験を行い、相対動弾性係数およびスケーリングの状況を比較検討した。b50・b100 については、アジテートを行い、30 分および 60 分後の性状変化についても検討を行った。

縦打ち試験体では上下方向でのスケーリングの差を

表-1 実験概要

記号	BFS 置換率 (%)	W/C (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	測定項目
n	0	55	18	4.5	・凍結融解試験(横打ち, 縦打ち) (JIS A 1148 A法) 相対動弾性係数, 質量, 長さ 銀紙光沢度法による表面粗さ ^{*3} ・空気量(圧力法・質量法) ・ブリーディング試験 (JIS A 1123) ・気泡組織の測定 (ASTM C 457) ・アジテートによる性状変化(b50, b100のみ)スランブ, 空気量(質量法), 気泡組織
b25	25		(-) ^{*1}	(-) ^{*2}	
b50	50				
b75	75				
b100	100		18		

*1 nとb100のスランブを18cmとなるように試し練りで単位水量を決め、

他の単位水量はBFS置換率に応じて補完して求めた

*2 nと同量のAE減水剤量・AE助剤量とし、目標値を定めなかった

*3 表面粗さの測定は縦打ち試験体でのみ測定した

*1 北海道大学 大学院工学院 (学生会員)

*2 北海道大学 大学院工学研究院 教授 工博 (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究院 准教授 博(工) (正会員)

調べるため、ある程度劣化がすすんだ段階で数サイクルごとに銀紙光沢度法⁵⁾による表面粗さを測定した。なお、銀紙光沢度法は、表面粗さをスケーリングの一つの指標としてとらえ、光沢度計で表面粗さを測定することによりスケーリングによる推定質量減少量を求めるものである。この測定方法は、市販のアルミホイル(試験体1面の大きさに切ったもの)を試験体表面に押し付け、上から柔らかい布で見た目の変化がなくなるまで押さえたのち、測定角 60° の光沢度計を用いて光沢度を測定するものである。測定箇所は、打込み面を上とし、縦打ちの試験体の各面の上・中・下とし、4 側面の平均値を使用した。なお、質量減少量の推定には、次式を使用した⁵⁾。

$$Sm = \exp\left(\frac{9.6 - \ln(X)}{0.74}\right) \quad (1)$$

Sm: 推定質量減少量(g/m²)
X: 光沢度(%)

さらに、すべての調合で空気量の測定とブリーディング試験を行った。

空気量の測定には、圧力法と質量法を使用した。両者の値に差がみられたため、質量法については圧力法の値に近くなるように補正を行うこととした。また、圧力法の空気量測定時には、BFS を用いた場合、骨材修正係数を求め、置換率に応じて補正した。

ブリーディング試験は JIS A 1123 に準じて試験を行った。また、試験開始から 20 分後までのブリーディング量から初期ブリーディング速度を求めた。

コンクリートの混練には強制攪拌型ミキサーを使用した。また、アジテート時にはコンクリートを傾胴型ミキサーに移し、4 回転/分で回転させ、30 分後および 60 分後に質量法による空気量、硬化後に ASTM C 457 による気泡組織の測定を行った。

コンクリートの調合および基礎性状を表-2 に示す。ここでは、単位粗骨材かさ容積を BFS 置換率に応じて決め、標準量の AE 減水剤を使用し、n のスランブ・空気量が 18±1.5cm、4.5±1.0%となるように試し練りで単位

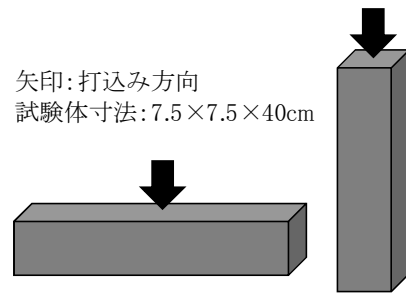


図-1 横打ち(左)縦打ち(右)の打込み方向の違い

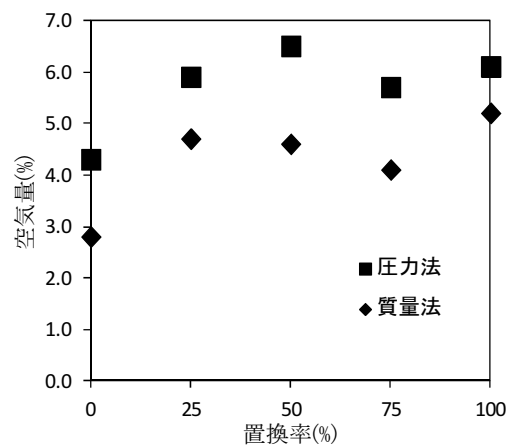


図-2 置換率と空気量(圧力法・質量法)の関係

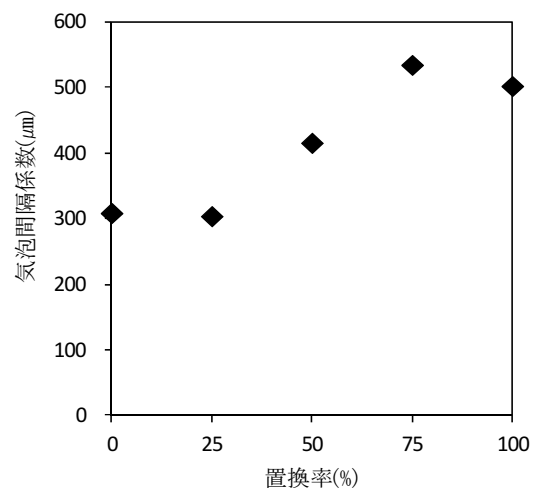


図-3 置換率と気泡間隔係数の関係

表-2 調合と基礎性状

記号	W/C (%)	単位粗骨材かさ容積	単位水量 (kg/m ³)	単位質量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)	空気量*1 (%)	硬化後空気量*2 (%)	スランブ (cm)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	気泡間隔係数 (μm)	圧縮強度*3 (MPa)
				C	S	BFS	G							
n	55	0.580	170	309	940	0	877	減水剤 0.25 AE助剤 0.015	4.3	3.8	16.5	0.219	309	38.3
b25		0.585	180	346	655	225	885		5.9	5.5	21.0	0.336	304	37.2
b50		0.590	190	358	415	427	892		6.5	4.8	21.0	0.953	416	31.4
b75		0.595	200	370	235	566	900		5.7	5.0	16.0	0.749	535	30.9
b100		0.600	210	382	0	763	907		6.1	4.5	20.0	0.698	502	31.1

C:普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³) S:勇払産陸砂(表乾密度2.67g/cm³ 吸水率1.53% 粗粒率2.43)

G:常盤産碎石(表乾密度2.67g/cm³ 吸水率2.43%) BFS:京浜産高炉スラグ細骨材(表乾密度2.70g/cm³ 吸水率0.47% 粗粒率2.75)

AE減水剤:リグニンスルホン酸系 AE助剤:変性ロジン酸化合物系

*1 骨材修正係数を加味した値(実測値-0.4×置換率/100) *2 ASTM C 457による *3 標準水中養生28日

水量を決め、同じ AE 減水剤量・AE 助剤量で b100 のスランプが 18cm となるように単位水量を決めた。他の BFS を置換した調査では、目標スランプ・空気量は定めず、n の調査と同じ AE 減水剤量・AE 助剤量とし、単位水量は BFS の置換率に応じて n と b100 の値から補間して求めた。今回の実験では消泡剤を用いないこととした。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの基礎性状

図-2 に置換率と圧力法および質量法による空気量の関係を示す。この図をみると、BFS を置換したコンクリートの空気量はすべて n よりも大きくなっており、BFS が空気を巻き込んでいることが考えられる。また、ある程度の量の BFS を含むコンクリートの空気量は置換率が異なっても同等の値を示していると思われ、BFS の量が巻き込む空気量に及ぼす影響は小さいことも考えられる。また、圧力法と質量法で空気量に差が認められ、アジテート時の空気量は次式によって質量法による空気量を圧力法の値に換算することとした。

$$A = 0.63M + 2.89 \quad (2)$$

A : 空気量換算値(%)

M : 質量法による空気量(%)

なおこの換算式は、図-2 および試し練りに使用した BFS コンクリートの質量法および圧力法による空気量のデータの回帰式である。

図-3 に置換率と気泡間隔係数の関係を示す。この図をみると、BFS 置換率が 50%以上のコンクリートの値が大きくなっており、置換率が 25%の場合には BFS が気泡組織を粗大化する程度は小さいことが考えられる。

3.2 ブリーディング試験結果

図-4 にブリーディング試験結果を示す。置換率が 0% と 25%ではブリーディング量に大きな差はないが、置換率が 50%を超えるとブリーディング量が急激に大きくなっている。なお、置換率 75%および 100%のブリーディング量は置換率 50%よりも小さな値となっているが、初期ブリーディング速度が大きいため水みちに微粒分がたまってブリーディング水の上昇が妨げられたためと考えられる。

図-5 に置換率と初期ブリーディング速度の関係を示しているが、置換率が大きくなると、初期ブリーディング速度が大きくなっており、置換率が大きいものほどブリーディングが生じやすいものと考えられる。

3.3 凍結融解試験結果

図-6 に凍結融解試験結果を示す。この図をみると、BFS 置換率によって耐凍害性に大きな差が生じていることがわかる。置換率が大きなものほど早期に相対動弾性

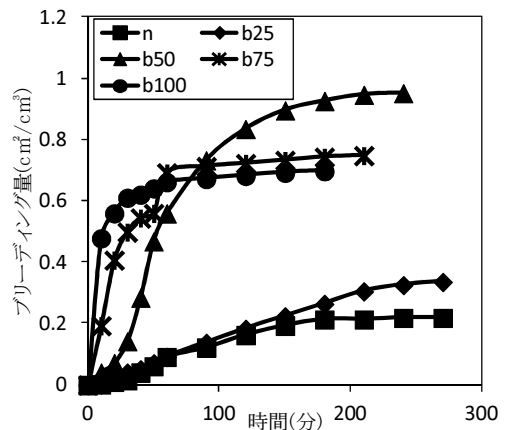


図-4 ブリーディング試験結果

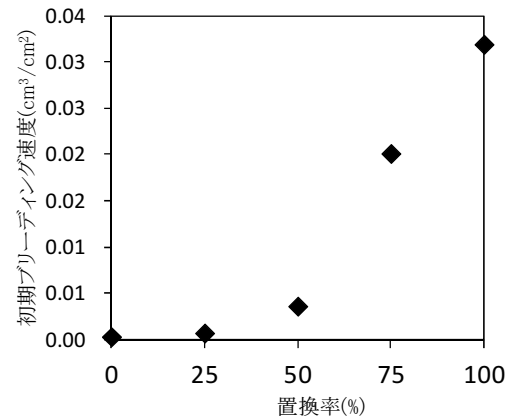


図-5 置換率と初期ブリーディング速度の関係

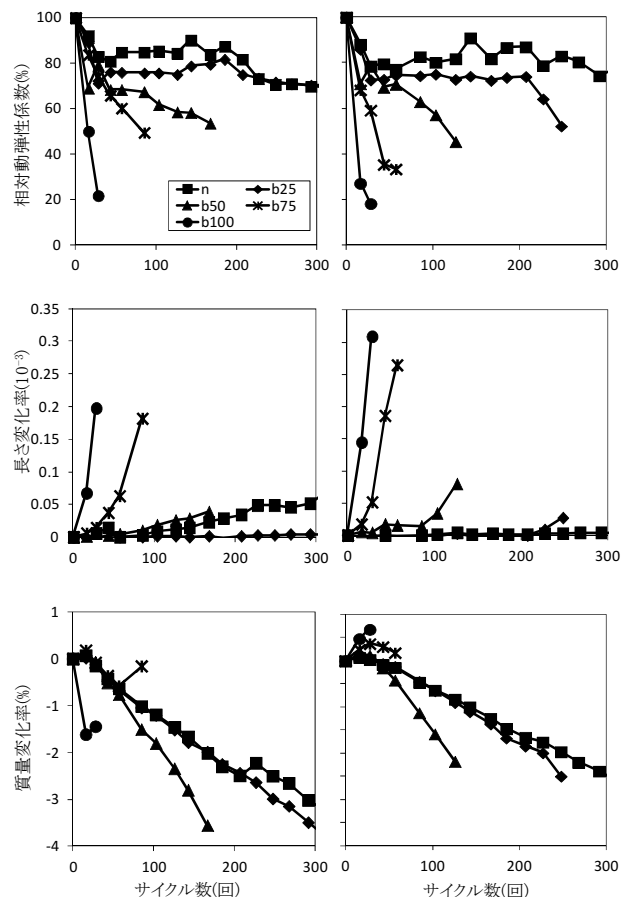


図-6 凍結融解試験結果(左:横打ち 右:縦打ち)

係数・質量変化率が低下しているのがわかる。この傾向は試験体の打込み方法に関わらず同様となっている。

3.4 各種性状が耐凍害性に及ぼす影響

図-7 に空気量と耐久性指数の関係を示す。一般に、ある程度の空気量を確保すると耐凍害性は向上するといわれているが、この図をみると、4%以上の空気量を確保したもので耐凍害性の小さいものもあり、BFS コンクリートについては、空気量だけでは耐凍害性を説明できないといえる。

図-8 に気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。図-9 にブリーディング量と耐久性指数の関係を示す。なお、図-8 には既往のデータ⁴⁾もプロットした。この図をみると、気泡間隔係数の大きいものの耐久性指数が小さくなっており、BFS の使用によって粗大な気泡組織となり、耐凍害性が低下しているものと考えられる。

図-8 と図-9 には横打ちと縦打ちの試験体の値をプロットしている。ブリーディング量が多いものでは縦打ちの試験体のほうが耐久性指数が小さくなるものもあるが、ブリーディング量の小さいnと同程度に縦横の差は小さく、ブリーディングが組織の緩みの劣化に対応する耐久性指数におよぼす影響は小さいと考えられる。

また、図-9 からブリーディング量の大きなものの耐久性指数が小さくなっているように読み取れるが、この理由は気泡間隔係数の増大によるものと考えられる。

これは、一般的な認識と異なるところがあるため、ブリーディング量と気泡間隔係数の測定結果のある既往の凍結融解試験に関する文献^{2), 3), 4), 6)}のデータについて、ブリーディング量と耐久性指数の関係を示したものが図-10 である。なお、この図では左図で空気量4.5%を境として、右図で気泡間隔係数(SF)300 μmを境として記号を区別している。この図をみると、ブリーディング量が多くても耐久性指数の高いものは気泡間隔係数の小さいものと考えられ、微細な気泡の連行は、ブリーディング量の多い場合でも凍結融解による組織の緩みに対する対策となるものと考えられる。

図-11 に銀紙光沢度法による推定質量減少量とブリーディング量の関係を示す。この図から、ブリーディング量の大きいもののスケールリングは上部ほど大きく、サイクル数を重ねていくと、ブリーディング量の大きいものほど上下方向でのスケールリング量の差が大きくなるのがわかる。

これらのことから、適切な気泡組織を確保しているBFS コンクリートの場合、ブリーディングは凍結融解によるコンクリートの組織の緩みにおよぼす影響は小さいと考えられるが、ブリーディング水の上昇によって上部のコンクリートの水セメント比が増加し、上部のスケールリングが大きくなるものと考えられる。

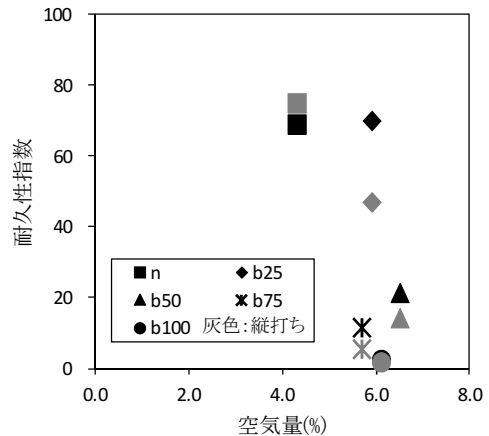


図-7 空気量と耐久性指数の関係

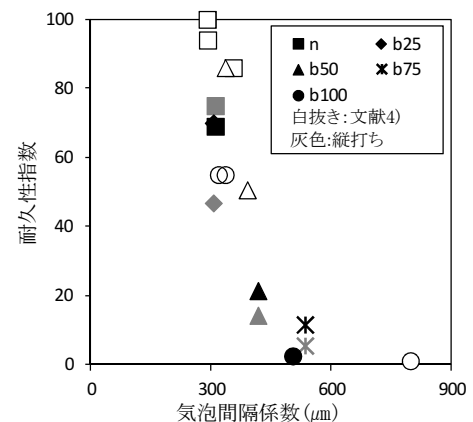


図-8 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

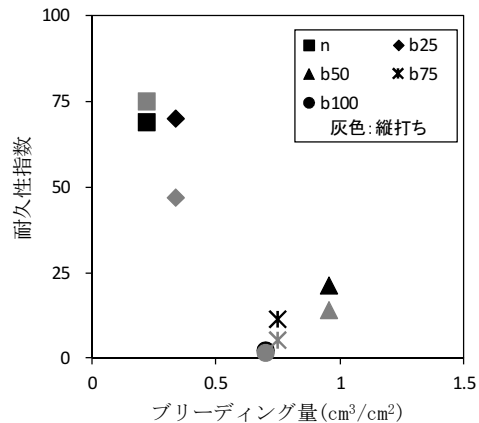


図-9 ブリーディング量と耐久性指数の関係

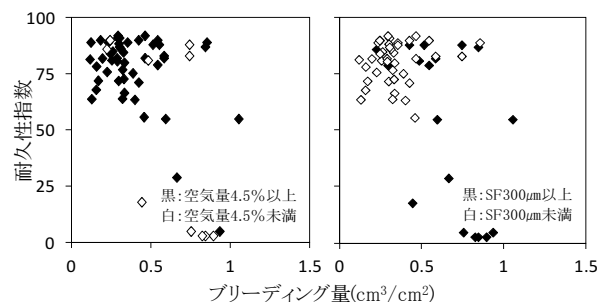


図-10 ブリーディング量と耐久性指数の関係(文献調査)

3.5 BFS コンクリートの経時変化

図-12 に BFS コンクリートの質量法による空気量とスランプの経時変化を示す。なお、ここでの空気量の値は式(2)を用いて換算した値である。b50・b100 とともにアジテートにより、60 分後の空気量は 3~4%低下し、スランプは 5cm 程度低下し、BFS 置換率による差は小さい。

図-13 に硬化後の空気量と気泡間隔係数の経時変化を示す。硬化後の空気量は混練直後に比べ、30 分後に 2%程度低下したのち、60 分後には 1~2%増加している。これはアジテートの途中でコンクリート採取時に粗骨材を多く採取したためモルタル分の多いコンクリートが残されたこと、あるいはアジテート時に気泡が連行したことによるものと思われる。また、気泡間隔係数は、b50 では増加、b100 では増加ののち低下の傾向を示しているが、その変化は小さく、アジテートによって粗大径の気泡が消失したと思われる。

4. まとめ

今回の実験の範囲では、以下の結果を得た。

- (1) BFS を置換すると空気量が大きくなるが、置換率による空気量の差は小さかった。
- (2) BFS を置換すると気泡間隔係数が大きくなる傾向を示したが、置換率 25%程度の場合、BFS を用いないものと同様の気泡間隔係数を示した。
- (3) BFS の置換率が大きくなると、初期ブリーディング速度が大きくなる。
- (4) BFS の置換によって耐凍害性が低下したが、これは気泡間隔係数が大きくなったことによる。
- (5) 同じコンクリートの場合、縦打ち試験体と横打ち試験体の耐久性指数の差は小さい。
- (6) 縦打ち試験体の場合、ブリーディング量が多いものほど、上部のスケーリングが多くなる。
- (7) BFS コンクリートは、アジテートによって空気量が低下するが、粗大径の気泡の消失が多いものと思われる。

参考文献

- 1) 太田宏平, 三高信吾, 平野彰彦, 田畑雅幸, 浜幸雄: コンクリートの耐凍害性および気泡組織制御に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 78, pp.9-12, 2005.7
- 2) 上本 洋, 阿部道彦, 鹿毛忠継, 浅野研一: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解に関する実験, 第 10 回日韓建築材料・施工 Joint Symposium 論文集, pp.237-241, 2011.9
- 3) 戸川雄太, 庄谷征美, 国府勝郎: フェロニッケルスラグ細骨材コンクリートのブリーディングの低減と耐凍害性および水密性に関する研究, 材

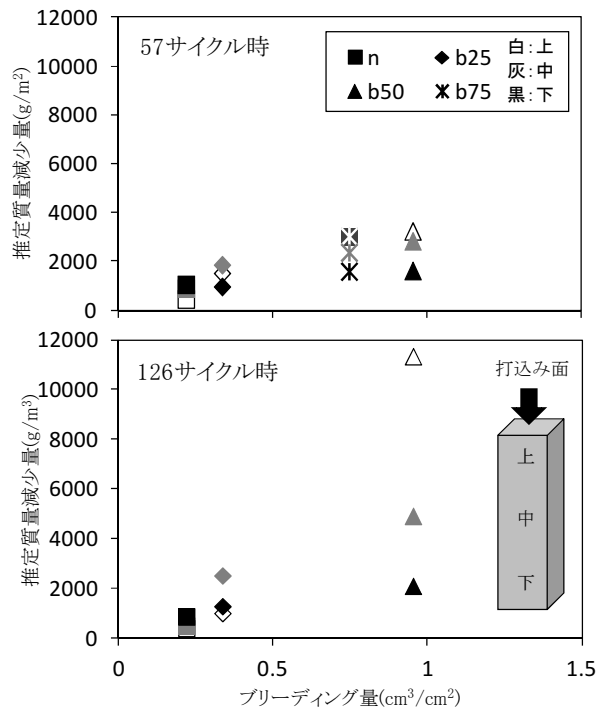


図-11 ブリーディング量と推定質量減少量の関係

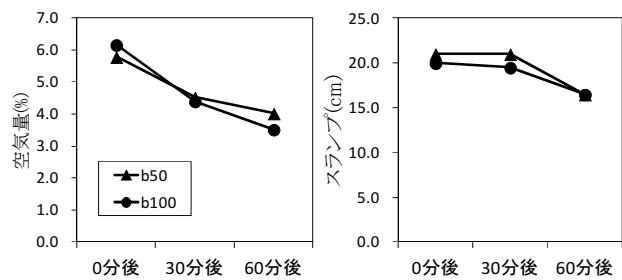


図-12 空気量とスランプの経時変化

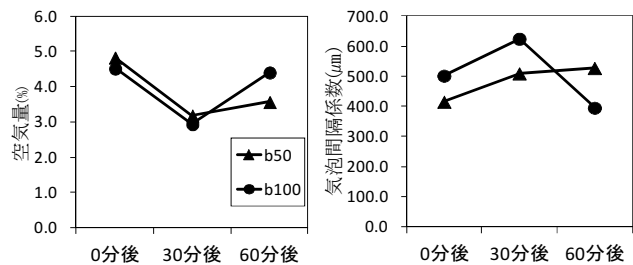


図-13 硬化後空気量と気泡間隔係数の経時変化

料, Vol.45, No.1, pp.101-109, 1996.1

- 4) 山崎 舞, 千歩 修, 長谷川拓哉: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.595-560, 2011.8
- 5) 長谷川拓哉, 谷口 円, 桂 修, 千歩 修: 光沢度計によるスケーリング測定手法の検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.82, pp.2-4, 2009.7
- 6) 社団法人日本建築学会, 高炉スラグを用いるコンクリート施工についての調査研究(その 2)報告書, pp.111-116, 2011.3

