論文　製鋼スラグの吸水率が鉄鋼スラグ水和固化体の耐久性に及ぼす影響

藤井　隆史[*1]・藤木　昭宏[*2]・綾野　克紀[*3]・阪田　憲次[*4]

要旨：鉄鋼スラグ水和固化体は，通常のコンクリートと同程度の性能が発現可能な，副産物を利用した建設材料である。しかし，使用するスラグ骨材の品質によっては耐久性が劣る場合がある。鉄鋼スラグ水和固化体の性能を改善することを目的に，吸水率を下げた溶銑予備処理スラグを骨材として使用した。鉄鋼スラグ水和固化体の硬化後の性能に及ぼす影響を実験により確認した。とくに，耐凍害性は，吸水率の低い溶銑予備処理スラグを用いることで，エントレインドエアが連行されやすくなり，著しい改善効果が得られることを確認した。

キーワード：鉄鋼スラグ水和固化体，溶銑予備処理スラグ，吸水率，曲げ強度，耐凍害性

1. はじめに

鉄鋼スラグ水和固化体は，全量，リサイクル材を用いながら，通常のセメントコンクリートと同程度の性能を発現することが可能な建設材料である[1)]。しかし，鉄鋼スラグ水和固化体は，使用するスラグ骨材の品質によっては，耐凍害性が劣ることが知られており，その改良が求められている[2)]。本研究において，鉄鋼スラグ水和固化体の骨材として用いるのは，転炉での精錬前に溶けた銑鉄から珪素，硫黄およびリンを除去する工程で発生する溶銑予備処理スラグである。密度は3.00～3.30 g/cm^{3}程度，多孔質であり，吸水率が4.0~8.0%と高いことに特徴がある。

本研究では，溶銑予備処理スラグの中から吸水率が高い脆弱な粒子を取り除き，吸水率の低い良質な溶銑予備処理スラグを作成した。吸水率の低い溶銑予備処理スラグを用いることで，鉄鋼スラグ水和固化体の圧縮強度，静弾性係数，曲げ強度，乾燥収縮ひずみ，中性化および耐凍害性等の性能を向上させることが可能であることを確かめた。とくに耐凍害性に対しては，吸水率の低い溶銑予備処理スラグを用いることで，エントレインドエアが連行されやすくなることを確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

溶銑予備処理スラグは，エージング処理を行い，JIS A 5015 附属書 2 による水浸膨張比が 1.1% 以下になったものを用いた。溶銑予備処理スラグの吸水率を低くするために，ロサンゼルス試験機に粒径 5mm 以上の溶銑予備処理スラグ 10kg に対して，1 個の質量が 415g の鉄球を 12 個入れ，所定の回数回転させた後，5mm のふるいに留まったものを粗骨材に用いた。細骨材は，ロサンゼルス試験機によって吸水率を下げた粗骨材をジョークラッシャーによって破砕し，5mm のふるいを通過するものを用いた。**表－1** に，本研究で用いた骨材の物性を示す。比較のために，細骨材および粗骨材に，川砂と砕石を用いた水和固化体も作成した。溶銑予備処理スラグは，24 時間吸水させて用いた。高炉スラグ微粉末は，JIS A 6206 に規定されている高炉スラグ微粉末 4000（密度：2.89g/cm^3）を，アルカリ刺激材には，石灰集塵微粉末（密度：3.14g/cm^3，平均粒径：10μm）を用いた。

*1 岡山大学大学院　自然科学研究科地球・環境システム科学専攻　工修　(正会員)
*2 ランデス（株）　研究所　工修　(正会員)
*3 岡山大学大学院　環境学研究科資源循環学専攻助教授　工博　(正会員)
*4 岡山大学大学院　環境学研究科資源循環学専攻教授　工博　(正会員)

表－１　骨材の物性

Type of aggregate	Kind of aggregate	Size (mm)	The number of revolving in the Los Angeles machine	Density in the saturated surface-dry condition (g/cm^3)	Water absorption (%)
PTS0	Hot metal pretreatment slag	0-5	0	3.06	7.67
PTS5			500	3.15	5.96
PTS10			1,000	3.29	3.77
PTG0		5-20	0	3.18	4.50
PTG5			500	3.31	3.19
PTG10			1,000	3.44	2.02
NS	River sand	0-5	0	2.58	1.95
NG	Crushed stone	5-20	0	2.74	0.59

表－２　鉄鋼スラグ水和固化体の配合

Type of aggregate		G_{max}	W/P	s/a	Air	Unit content (kg/m^3)					Ad. (kg/m^3)		Δω*5
S	G	(mm)	(%)	(%)	(%)	W	BP*1	LD*2	S	G	SP*3	AE*4	(kg/m^3)
PTS0	PTG0	20	23.4	50.0	4.5	150	562	78	896	931	7.68	0.064	103.9
	PTG5									970			93.9
	PTG10									1008			83.8
PTS5	PTG0								922	931			92.0
	PTG5									970			81.9
	PTG10									1,008			71.9
PTS10	PTG0								963	931			75.1
	PTG5									970			65.0
	PTG10									1,008			55.0
					5.0				954	1,000		0.160	54.4
					8.0				905	948		0.307	51.6
					11.0				856	896		1.544	48.8
NS	NG				4.5				756	802		0.064	19.2

*1 BP: Ground granulate blast furnace slag powder *2 LD: Lime dust *3 SP: Superplaticizer
*4 AE: Air entraining admixture *5 Δω: Water content in aggregate

表－２に本研究で用いた鉄鋼スラグ水和固化体の配合を示す。単位水量，単位高炉スラグ微粉末量，単位石灰集塵微粉末量および細骨材率を一定とする条件で配合を決定した。混和剤は，高性能減水剤および AE 剤を用いた。表中に示される骨材中の水分量Δω(kg/m^3)は，式(1)により求めた。

$$\Delta\omega = \frac{S \cdot Q_S}{100 + Q_S} + \frac{G \cdot Q_G}{100 + Q_G} \qquad (1)$$

ここに，S は単位細骨材量(kg/m^3)，Q_S は細骨材の吸水率(%)，G は単位粗骨材量(kg/m^3)，Q_G は粗骨材の吸水率(%)である。

2.2 耐久性試験

乾燥収縮試験には，14 日間水中養生を行った角柱供試体を用いた。測定は，温度 20℃，相対湿度 60%の恒温恒湿度室内で行った。

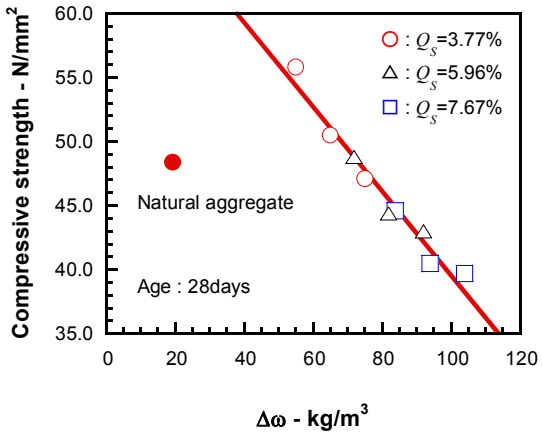
中性化試験には，28 日間の水中養生を行った供試体を用い，温度 30℃，相対湿度 60%，CO_2 濃度 20%の条件で試験を行った。

凍結融解試験には，土木学会コンクリート標準示方書に示される蒸気養生[3)]を行った後，水中養生を材齢 14 日まで行った角柱供試体を用い，JIS A 1178 に規定される水中凍結融解方法（A 法）に従い試験を行った。

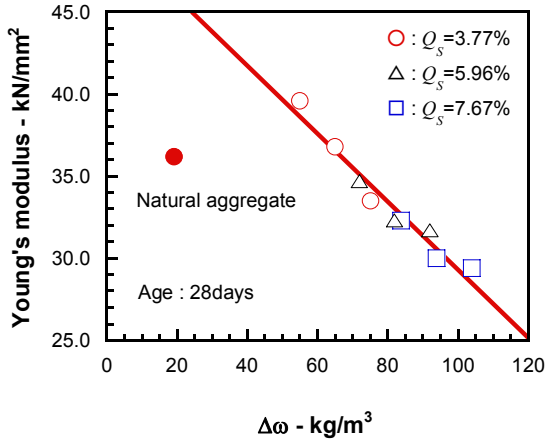
3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度，静弾性係数および曲げ強度

図－１は，式(1)により求めた骨材中の水分量Δωと材齢 28 日における圧縮強度の関係を示したものである。ただし，図中の○は，吸水率が 3.77%の溶銑予備処理スラグ細骨材と，吸水率が 2.02%，3.19%および 4.50%の溶銑予備処理スラグ粗骨材を用いた結果である。また，△は，吸水率が 5.96%の溶銑予備処理スラグ細骨材と，吸水率が 2.02%，3.19%および 4.50%の溶銑予備処



図－１　圧縮強度とΔωの関係

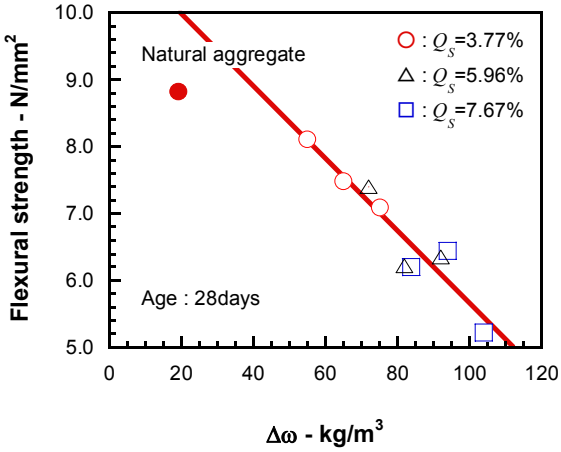


図－２　静弾性係数とΔωの関係

理スラグ粗骨材を用いた結果である。同様に，□は，吸水率が 7.67%の溶銑予備処理スラグ細骨材と種々の吸水率の溶銑予備処理スラグ粗骨材を用いた結果である。●は，川砂と砕石を用いた結果である。これらの水和固化体の空気量は，4.5±0.5%である。この図から，骨材中の水分量Δωと圧縮強度の間には直線関係が成り立つことが分かる。吸水率の低い溶銑予備処理スラグを用いることで川砂と砕石を用いた場合よりも，高い圧縮強度が得られることが分かる。

図－２は，式(1)により求めた骨材中の水分量Δωと材齢 28 日における静弾性係数の関係を示したものである。ただし，図中の○，△および□は，それぞれ，吸水率が 3.77%，5.96%および 7.67%の溶銑予備処理スラグ細骨材と種々の吸水率の溶銑予備処理スラグ粗骨材を用いた結果である。●は，川砂と砕石を用いた結果である。これらの水和固化体の空気量は，4.5±0.5%である。鉄鋼スラグ水和固化体の静弾性係数においても，骨材中の水分量Δωとの間に直線的な関係が成り立つことが分かる。

図－３は，式(1)により求めた骨材中の水分量Δωと材齢 28 日における曲げ強度の関係を示したものである。この図から明らかなように，曲げ強度においても，骨材中の水分量Δωとの間には直線的な関係が成り立ち，低い吸水率の溶銑予備処理スラグを用いれば，配合を変えることなく，高い曲げ強度が得られることが分かる。

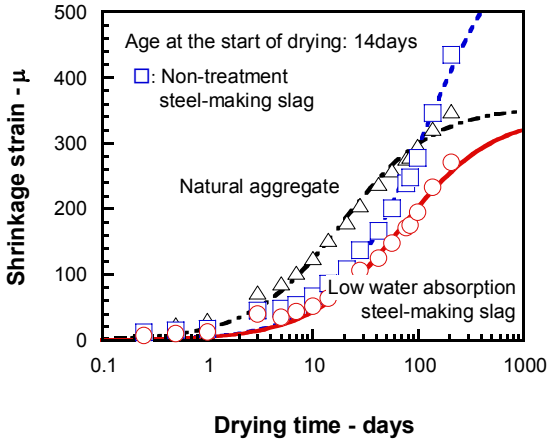


図－３　曲げ強度とΔωの関係

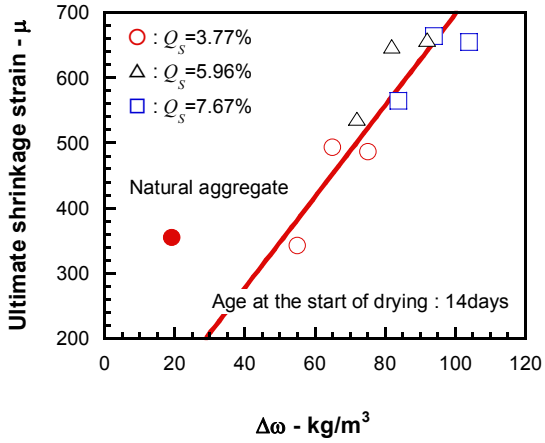
一般のコンクリートの曲げ強度は，圧縮強度の 12.5~20.0%である。川砂と砕石を用いた水和固化体の曲げ強度は，圧縮強度の 18.2%と，一般のコンクリートと比較しても高い値である。一方，一般の吸水率の溶銑予備処理スラグを用いた場合は，13.2%と低い値である。これに対して，最も吸水率の低い溶銑予備処理スラグを用いた場合であっても 14.5%と，曲げ強度を圧縮強度との割合で比較した場合には，吸水率の影響は小さいことがいえる。

3.2 乾燥収縮ひずみ

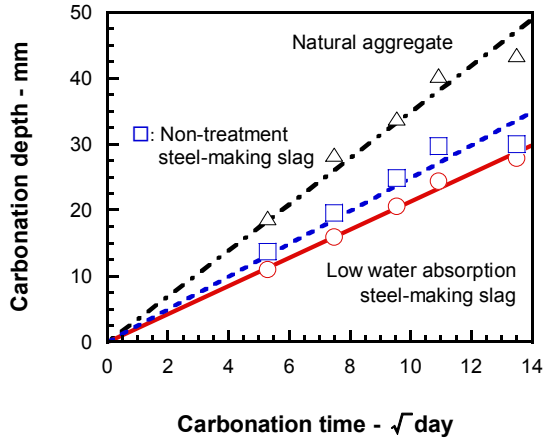
図－４は，鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみ試験結果を示したものである。図中の○，□および△は，それぞれ，細骨材および粗骨材に，吸水率を下げた溶銑予備処理スラグ（Q_S：3.77%，Q_G：2.02%）を用いた場合の結果，一般の溶銑予備処理スラグ（Q_S：7.67%，Q_G：4.50%）



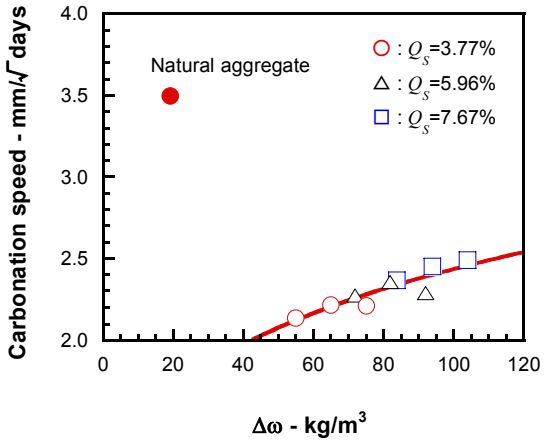
図－４　乾燥収縮試験の結果



図－５　乾燥収縮ひずみ最終値とΔωの関係



図－６　中性化試験の結果



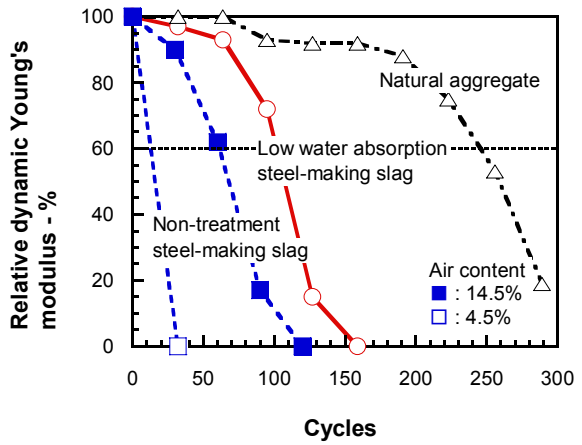
図－７　中性化速度とΔωの関係

を吸水率を下げずに用いた場合の結果および川砂と砕石を用いた場合の結果である。乾燥初期においては，川砂と砕石を用いたものよりも，溶銑予備処理スラグを用いた場合の方が，乾燥収縮ひずみは小さい。しかし，乾燥期間が経つにつれ，一般の吸水率の溶銑予備処理スラグを用いたものは，川砂と砕石を用いた水和固化体よりも乾燥収縮ひずみが大きくなる。しかし，吸水率を下げた溶銑予備処理スラグを用いた場合には，乾燥期間 100 日を越えても，川砂と砕石を用いたものよりも，乾燥収縮ひずみは小さいことが分かる。

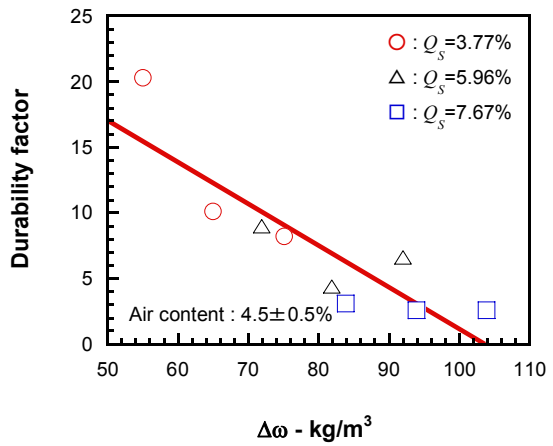
図－５は，式(1)により求められる骨材中の水分量Δωと乾燥収縮ひずみ最終値との関係を示したものである。ただし，実験データを双曲線（$bt/(a+t)$，t：乾燥期間）により回帰し，未定係数 a，b を求め，b を乾燥収縮ひずみ最終値とした。図中の○は，細骨材に吸水率が 3.77%の溶銑予備処理スラグ細骨材を，粗骨材に吸水率が 2.02%，3.19%および 4.50%の溶銑予備処理スラグ粗骨材を用いた結果を示している。また，△および□は，細骨材に用いた溶銑予備処理スラグの吸水率が 5.96%および 7.67%の場合の結果である。●は，川砂と砕石を用いた結果である。この図から，溶銑予備処理スラグの吸水率を下げることで，川砂と砕石を用いた水和固化体よりも鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみを小さくすることが可能であることが分かる。

3.3 中性化

図－６は，鉄鋼スラグ水和固化体の中性化試験結果を示した図である。図中の○，□および△は，それぞれ，細骨材および粗骨材に最も吸水率を下げた溶銑予備処理スラグを用いた場合の結果，一般の溶銑予備処理スラグを吸水率を



図－８　凍結融解試験の結果



図－９　耐久性指数とΔωの関係

下げずに用いた場合の結果および川砂と砕石を用いた場合の結果である。骨材に溶銑予備処理スラグを用いたものは，川砂と砕石を用いた水和固化体よりも，中性化速度が小さいことが分かる。これは，溶銑予備処理スラグから溶出する水酸化カルシウムの影響であることが知られている[4)]。また，吸水率の低い溶銑予備処理スラグを用いた場合には，中性化速度がさらに小さくなることが分かる。

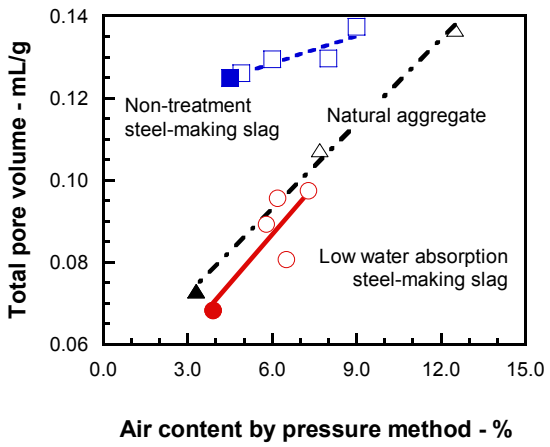
図－７は，式(1)により求められる骨材中の水分量Δωと鉄鋼スラグ水和固化体の中性化速度の関係を示した図である。中性化速度は，**図－６**に示される直線の傾きである。図中の○，△および□は，それぞれ，細骨材に用いた溶銑予備処理スラグの吸水率が 3.77％，5.96%および7.67%の結果である。●は，川砂と砕石を用いた結果である。この図から，骨材に溶銑予備処理スラグを用いた場合は，川砂と砕石を用いた場合に比べて中性化速度が小さく，吸水率のより低い溶銑予備処理スラグを用いることにより，中性化速度がさらに小さくなることが分かる。

3.4 耐凍害性

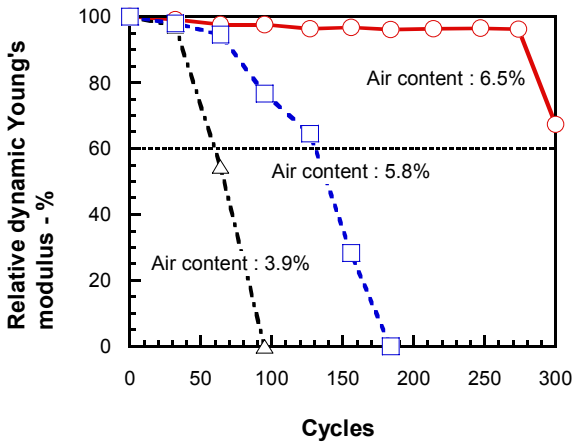
図－８は，鉄鋼スラグ水和固化体の耐凍害性に及ぼす溶銑予備処理スラグの吸水率の影響を示した図である。図中の○，□および△は，それぞれ，細骨材および粗骨材に吸水率を下げた溶銑予備処理スラグを用いた場合の結果，一般の溶銑予備処理スラグを吸水率を下げずに用いた場合の結果および川砂と砕石を用いた場合の結果である。これらの水和固化体の空気量は，4.5±0.5%である。一方，図中の■は，一般の吸水率の溶銑予備処理スラグを用い，空気量を14.5%とした場合の結果である。この図から，一般の吸水率の溶銑予備処理スラグを用いた場合には，多量の空気を連行しても要求される耐凍害性が得られないことが分かる。一方，吸水率の低い溶銑予備処理スラグを用いた場合は，一般の吸水率の溶銑予備処理スラグを用いた場合よりも高い耐凍害性が得られていることが分かる。しかし，その溶銑予備処理スラグは，川砂と砕石を用いたものに比べても，十分なものとはいえない。

図－９は，式(1)により求められる骨材中の水分量Δωと耐久性指数の関係を示した図である。図中の○，△および□は，それぞれ，吸水率が3.77%，5.96%および 7.67%の溶銑予備処理スラグ細骨材と種々の吸水率の溶銑予備処理スラグ粗骨材を用いた結果である。この図から明らかなように，溶銑予備処理スラグの吸水率の低いほど，耐久性指数は高くなることが分かる。しかし，最も低い吸水率の溶銑予備処理スラグを用いた場合であっても，耐久性指数は20程度と低い値であった。

図－10 は，AE 剤を添加したときの鉄鋼スラグ水和固化体のフレッシュ時の空気量と総細孔容積の関係を示した図である。フレッシュ時の



図－10　フレッシュ時の空気量と硬化後の総細孔容積の関係



図－11　低い吸水率の溶銑予備処理スラグを用いた場合の凍結融解試験の結果

空気量は，JIS A 1128 に従い測定した。ただし，骨材修正係数は考慮していない。総細孔容積は，水銀圧入法により，3.0nm から 140,000nm の範囲の細孔を測定した。図中の○，□および△は，それぞれ，細骨材および粗骨材に吸水率を下げた溶銑予備処理スラグを用いた場合の結果，一般の溶銑予備処理スラグを吸水率を下げずに用いた場合の結果および川砂と砕石を用いた場合の結果である。また，●，■および▲は，AE 剤無添加の場合の結果を示している。一般の吸水率の溶銑予備処理スラグを用いた場合と，川砂と砕石を用いた場合では，直線の傾きが異なることが分かる。すなわち，一般の吸水率の溶銑予備処理スラグを用いた場合には，川砂と砕石を用いた場合に比べて，AE 剤添加によるフレッシュ時の空気量の増加に対して，硬化後の空気量の増加が小さいことが分かる。

図－11 は，吸水率が 3.77%および 2.02%の溶銑予備処理スラグ細骨材および粗骨材を用いて，空気量が鉄鋼スラグ水和固化体の耐凍害性に及ぼす影響を示した図である。図中の○，□および△は，それぞれ，フレッシュ時の空気量が，6.5%，5.8%および 3.9%のものの結果を示している。この図から，吸水率を下げた溶銑予備処理スラグを用いた場合は，一般のコンクリートよりも 2.0%程度多い空気を連行することで，耐凍害性が著しく改善されていることが分かる。

4. まとめ

鉄鋼スラグ水和固化体に用いられる溶銑予備処理スラグの吸水率を下げることにより，圧縮強度，静弾性係数，曲げ強度は高くなり，乾燥収縮および中性化は小さくなることが分かった。また，耐凍害性では，吸水率を下げた溶銑予備処理スラグを用いることで，有効なエントレインドエアが連行されやすくなり，要求される耐凍害性が得られることが分かった。

参考文献

1) 松永久宏，小菊史男，高木正人，谷敷多穂：鉄鋼スラグを利用した環境に優しい固化体の開発，コンクリート工学，Vol.41，No.4，pp.47-54，2003.4
2) (財)沿岸開発技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル　－溶銑予備処理スラグの有効利用技術－，沿岸開発技術ライブラリー，No.16，2003.3
3) 土木学会コンクリート委員会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書「施工編」，土木学会，pp.344~345，1996.3
4) 藤井隆史，田中秀和，綾野克紀，阪田憲次：鉄鋼スラグ水和固化体の pH が強度および耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1653-1658，2004.7