# 論文 フェロクロムスラグ粗骨材を用いたコンクリートの耐久性評価

宮里 心一\*1・土屋 慶悟\*2・片山 太貴\*3・花岡 大伸\*4

要旨:フェロクロムスラグ骨材を用いたコンクリートの性能に関しては不明な点が多い。特に,吸水率が高く,耐凍害性や物質透過抵抗性に劣る懸念がある。本研究では,フェロクロムスラグ粗骨材を用いたコンクリートの,凍結融解抵抗性,遮水性,遮塩性および中性化抵抗性を評価した。すなわち,フェロクロムスラグ 粗骨材あるいは陸砂利を100%用いた場合と各50%ずつを混合使用した3水準に対して,普通ポルトランド セメントと高炉セメントB種を用いた,全6ケースの耐久性について比較した。その結果,フェロクロムス ラグ粗骨材を用いたコンクリートの耐久性は,普通コンクリートと同等であることを確認できた。 キーワード:フェロクロムスラグ粗骨材,セメント種類,凍結融解,透水,塩分浸透,中性化

#### 1. はじめに

フェロクロムは、国内では JIS G 2303 に、国際的には ISO 5448 に規格化される。この内、低炭素フェロクロム は、世界的に生産量は少ないが、ステンレス精錬の最終 工程で使用されるなどの重要な材料である。その製造過 程で副産されるフェロクロムスラグ(以下 FCS と略す) のコンクリート用骨材への適用研究は、低炭素 FCS に限 らず高炭素 FCS を含めても、フレッシュ性状や圧縮強度 に関する研究<sup>1)~4</sup>が僅かにあるものの、耐久性に関する 研究は皆無である。特に、**写真-1** に示すとおり、FCS 骨 材の表面には多くの空洞が存在し、吸水率も高い。その ため、人工軽量骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵 抗性が低い<sup>3</sup>ことを鑑みると、FCS 骨材を用いたコンク リートの耐凍害性や物質透過抵抗性は低いことが懸念さ れる。

以上の背景を踏まえて本研究では、FCS 粗骨材を用い たコンクリートの耐久性を評価した。すなわち、FCS 粗 骨材のみを用いたコンクリート、陸砂利のみを用いたコ ンクリート、および FCS 粗骨材と陸砂利を半量ずつ混合 したコンクリートの耐久性指数を比較し、凍結融解抵抗 性を評価した。また、コンクリートの透水量、塩化物イ オン浸透深さ、実効拡散係数および中性化深さを比較し、



写真-1 FCS 骨材の外観

遮水性, 遮塩性および中性化抵抗性を評価した。なお, 普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種の 2 種を用いた,全6ケースを実験ケースとして設けた。

# 2. 実験手順

## 2.1 使用材料と配合

使用材料を表-1に示す。粗骨材としては FCS 骨材と 陸砂利の2種類を、セメントとしては普通ポルトランド セメントと高炉セメントB種の2種類を用いた。ここで、 比較対象として使用した陸砂利は、富山県西部地区の生 コン工場で一般的に使用されている粗骨材である。また、 両骨材の粒度分布は、概ね同様であった。

実験ケースは,粗骨材の全量を FCS 粗骨材あるいは陸

種類			物性値	
セメ ント	普通 ポルトランド	Co	密度 3.16g/cm <sup>3</sup>	
	高炉 B 種	Св	密度 3.04g/cm <sup>3</sup>	
細骨材	陸砂 (庄川産)	S	表乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.26% F.M.2.86	
粗骨材	陸砂利 (庄川産)	G <sub>N</sub>	表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> 吸水率 1.19% F.M.6.87 実積率 63.0%	
	FCS 骨材	GF	表乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup> 吸水率 3.71% F.M.6.68 実積率 56.0%	

表一1 使用材料

\*1 金沢工業大学 工学部環境土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

\*2 金沢工業大学 工学部環境土木工学科

\*3 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻修士課程 (学生会員)

\*4 金沢工業大学 工学部環境土木工学科准教授 博士(工学) (正会員)

砂利としたものと,各骨材を 50%で混合した計3水準の 粗骨材に対して,2種類のセメントを用いた,全6ケー スとした。コンクリートの配合を表-2に示す。本研究 では,基礎的性状を把握するため,水セメント比は 50% および単位水量は 157kg/m<sup>3</sup>に統一し,骨材の占める体積 を一定として,フレッシュ性状を見ながら細骨材率を調 整して配合を設計した。また,凍結融解抵抗性に及ぼす 影響の大きい空気量の目標値を 5.0%±1.5%とした。一方, スランプに関しては,陸砂利のみを用いた N0 と B0 のケ ースにおける目標値を 12±2.5cm とし,それ以外のケー スに関しては目標値を定めなかった。コンクリートのフ レッシュ性状および材齢 28 日の硬化性状を表-3 に示 す。なお,作製した供試体に豆板や材料分離などの不具 合はなかった。

# 2.2 測定方法

測定項目を表-4に示す。

粗骨材の安定性および耐凍害性を評価するために,JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」

記品	W/C	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
口与	(%)	(%)	W	Co	CB	S	GN	GF
N0	45 48 50 50 44 47 50	45.0	-	314	0	811	1003	0
N50		48.0				866	502	439
N100		51.1				921	0	878
B0		44.7	157	0	314	802	1003	0
B50		47.8				857	502	439
B100		50.9				912	0	878

表-2 コンクリートの配合

記是	スランプ	空気量	圧縮強度	静弹性係数
市力	(cm)	(%)	$(N/mm^2)$	$(kN/mm^2)$
N0	12.0	4.9	37.3	37.4
N50	8.0	5.3	36.4	36.7
N100	3.5	5.5	40.0	36.8
B0	13.0	4.5	35.7	37.6
B50	8.0	5.3	38.1	36.7
B100	5.5	5.4	38.7	37.8

表-3 コンクリートの基本性状

表-4	測定項目

測定対象	評価する耐久性	測定方法
粗骨材	安定性	JIS A 1122
	耐凍害性	片平法 6),7)
コンク リート	凍結融解抵抗性	JIS A 1148 A 法
	遮水性	JSCE K 571
	<b>油</b> 指 杜	JSCE G 571
	巡塭注	浸漬法
	中性化抵抗性	JIS A 1153

と片平らにより提案された方法<sup>6,7)</sup>を実測した。なお前 者に関しては、本研究では粗骨材に注目しているため、 5mm 以上の骨材を用いて実験した。また後者に関しては、 水に浸漬した粗骨材を入れたプラスチック製の容器を、 1日1サイクルで冷蔵庫(-20℃)と水槽(20℃)へ交 互に入れ替え、5サイクル後の粗骨材の損失質量分率を 測定した。

コンクリートに対する測定には、材齢 28 日まで初期 養生した,各3体ずつの供試体を用いた。凍結融解抵抗 性を評価するため、JISA1148「コンクリートの凍結融解 試験方法」の A 法「水中凍結融解試験方法」を実測した。 次に遮水性を評価するため、JSCE K571「表面含浸材の試 験方法(案)」の「③透水量試験」に準拠し、実測した。 また遮塩性を評価するため, JSCE G 571「電気泳動によ るコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方 法(案)」および浸漬法を実測した。後者に関しては、φ 10×20cmの円柱供試体の中央部から高さ 5cmの試験体 を切断し、側面と底面をエポキシ樹脂により被覆後、8週 間に亘り 3.0wt%の NaCl 水溶液に 20℃環境下で浸漬し た。その後,試験体を割裂し,文献 8を参考に 0.1N の硝 酸銀水溶液を噴霧し,銀白色に呈色した深さを測定した。 さらに中性化抵抗性を評価するために、JISA1153「コン クリートの促進中性化試験方法」を参考に実測した。た だし、試験体の準備方法は上記の浸漬法と同様としてお り、暴露期間は8週間とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 凍結融解抵抗性

コンクリートの相対動弾性係数と質量減少率の測定結 果を図-1と図-2に示す。これらを整理し、コンクリー トの耐久性指数を図-3にて比較する。その結果、普通 ポルトランドセメントを用いた場合、FCS 骨材のみを用 いた N100と、陸砂利のみを用いた N0、および両骨材を 混合使用した N50の耐久性指数は同等であることを確認 できる。同様に高炉セメントを用いた場合も、B100、B0 および B50の耐久性指数は同等である。したがって、FCS 骨材コンクリートと陸砂利コンクリートの耐凍結融解抵 抗性は、混合使用した場合も含めて、同等であると判断 できる。

次に,粗骨材の損失質量分率を図-4と図-5に示す。 これらによれば、測定方法によらず、FCS 骨材の損失質 量分率は、陸砂利よりも少ないことが認められる。ここ で、JIS A 1122 の測定後の粗骨材の状態を写真-2 に示 す。これによれば、両骨材において、一部では粉末化し たものを確認できる。また、欠片化したものに関して、 陸砂利では割れが多く、FCS 骨材では表面が剥げ落ちた ものが多いことを確認できる。これは、骨材中マトリッ



クス部の細孔径分布の相違が影響している可能性が示唆 される <sup>9</sup>。いずれにしても、凍結融解作用により、陸砂 利では骨材全体が、FCS 骨材では表面のみが劣化し、損 失質量分率は FCS 骨材より陸砂利で多かったと考える。 また、図-6 に、既往の研究<sup>6</sup>で示された砂利に対する損 失質量分率とそれを用いたコンクリート(W/C=55%、W =165 kg/m<sup>3</sup>)の耐久指数の関係に加えて、本研究で得ら れた結果(片平法)もプロットした。この図から、FCS 骨 材および陸砂利の損失質量分率は相対的に少なく、また FCS 骨材コンクリートである N100 および陸砂利コンク リートである N0 の耐久性指数は相対的に高いことが読



(1) 普通ポルトランドセメント



(2) 高炉セメント

図-2 コンクリートの質量減少率



図-4 粗骨材の損失質量分率(JIS A 1122)



み取れる。したがって、FCS 骨材では陸砂利と同等に、 コンクリート用粗骨材としての十分な耐凍害性を有する と判断できる。

なお、リニアトラバース法により測定されたコンクリートの気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図-7 に示す。 これによれば、両者に明瞭な傾向は認められない。ここで Pigion らによれば、気泡間隔係数が 500 μ m 以下の場合、高い凍結融解抵抗を有することが示されている<sup>10</sup>。 したがって、最も気泡間隔係数が大きい B100 の FCS コンクリートにおいても 350 μ m であることから、全ての 実験ケースのマトリックス部分が耐凍結融解抵抗性を有 していたと考える。また、FCS 骨材とセメントペースト



(1) 陸砂利



(2) FCS 骨材 写真-2 JIS A 1122 試験後の粗骨材の状態



の界面は強固である<sup>2)</sup>ことから,遷移帯が凍結融解抵抗 性の弱点にならなかったと推察する。以上のことから, 吸水率の比較的高い低品質骨材を用いたコンクリートで も,必ずしも凍結融解抵抗性が劣るとは限らない結果が 示された既往の実験結果<sup>11),12)</sup>と同様に,FCS 骨材コン クリートの凍結融解抵抗性も低くないことが明らかにな った。

#### 3.2 物質透過性

コンクリートの透水量の測定結果を図-8 に示す。こ の図では、縦軸に示す水頭の低下量が少ないほど、遮水 性は高いことを意味する。これによれば、普通ポルトラ ンドセメントを用いた場合、FCS 骨材のみを用いた N100 と、陸砂利のみを用いた N0,および両骨材を混合使用し た N50 の水頭の低下量は同等であることを確認できる。 同様に高炉セメントを用いた場合も、B100, B0 および B50 の水頭の低下量は同等である。ここで、骨材の吸水 率が 5%を超えると、吸水率が高いほど、コンクリートの 透水係数は増加するが、4%以下では透水係数は増加しな いことが指摘されている<sup>13)</sup>。したがって、FCS 骨材の吸 水率は 3.71%であることから、コンクリートの透水性を 増加させなかったと考えられる。以上のことから、FCS 骨材コンクリートと陸砂利コンクリートの遮水性は、混 合使用した場合も含めて、同等であると判断できる。



図-8 コンクリートの透水量

コンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数の測定結 果を図-9に示す。これによれば、普通ポルトランドセ メントを用いた場合, FCS 骨材のみを用いた N100 と, 陸砂利のみを用いた N0,および両骨材を混合使用した N50の実効拡散係数は同等であることを確認できる。同 様に高炉セメントを用いた場合も, B100, B0 および B50 の実効拡散係数は同等である。ここで、骨材の吸水率が 10%を超えると、吸水率が高いほど、コンクリートの塩 化物イオン拡散係数は増加するが、5%以下では拡散係数 は増加しないことが指摘されている<sup>13)</sup>。したがって, FCS 骨材の吸水率は 3.71%であることから、コンクリートの 実効拡散係数に影響しなかったと考えられる。以上のこ とから、FCS 骨材コンクリートと陸砂利コンクリートの 遮塩性は, 混合使用した場合も含めて, 同等であると判 断できる。

コンクリートの塩化物イオン浸透深さの測定結果を 図-10に示す。これによれば、普通ポルトランドセメン トを用いた場合, FCS 骨材のみを用いた N100 と、陸砂 利のみを用いた N0, および両骨材を混合使用した N50 の塩化物イオン浸透深さは同等であることを確認できる。 同様に高炉セメントを用いた場合も, B100, B0 および B50の塩化物イオン浸透深さは同等である。ここで, FCS 骨材コンクリートの塩分浸透状況を写真-3 に示す。こ れによれば、粗骨材内部や粗骨材周囲の界面において、







特に銀白色の呈色が目立たないことを確認できる。した がって、FCS 骨材の内部やセメントペーストとの界面を 塩化物イオンが浸透しやすいことは認められなかった。 また、図-9 に対する考察にて前述のとおり、骨材の吸 水率が10%を超えると、コンクリートの塩化物イオンの 拡散係数は大きいことが指摘されている13)。したがって、 FCS 骨材の吸水率は 3.71%であることから、コンクリー トの塩化物イオン浸透深さに影響しなかったと考えられ る。以上のことから、FCS 骨材コンクリートと陸砂利コ ンクリートの遮塩性は,混合使用した場合も含めて,同 等であると判断できる。

コンクリートの中性化深さの測定結果を図-11 に示 す。これによれば、普通ポルトランドセメントを用いた 場合, FCS 骨材のみを用いた N100 と, 陸砂利のみを用 いた N0,および両骨材を混合使用した N50 の中性化深 さは同等であることを確認できる。同様に高炉セメント を用いた場合も, B100, B0 および B50 の中性化深さは 同等である。ここで、FCS 骨材コンクリートの中性化進 行状況を写真-4 に示す。これによれば、粗骨材内部や 粗骨材周囲の界面において、特に非呈色部分が目立たな いことを確認できる。したがって、FCS 骨材の内部やセ メントペーストとの界面を二酸化炭素が浸透しやすいこ とは認められなかった。ここで、水セメント比が 50%以 下では、骨材の吸水率に拘わらず、コンクリートの中性 化速度係数は小さいことが指摘されている<sup>12)</sup>。したがっ



写真-3 Cl<sup>-</sup>の浸透経路(N100の例)





写真-4 CO2の侵入経路(B100の例)

て、本研究で用いたコンクリートの水セメント比は 50% であることから、FCS 骨材コンクリートと陸砂利コンク リートの中性化深さは同等になったと考えられる。以上 のことから、FCS 骨材コンクリートと陸砂利コンクリー トの中性化抵抗性は、混合使用した場合も含めて、同等 であると判断できる。

# 4. まとめ

FCS 骨材コンクリートの耐久性評価に関する基礎的研究の結果,次のことが明らかになった。

- (1) コンクリートの凍結融解抵抗性, 遮水性, 遮塩性およ び中性化抵抗性は, FCS 骨材を用いた場合, 陸砂利を 用いた場合, および両骨材を混合使用した場合で, 同 等であった。
- (2) FCS 骨材の耐凍害性は、富山県で汎用されている陸 砂利と同程度であった。
- (3) FCS 骨材の内部や,周囲のセメントペーストとの界 面は,コンクリート中への物質透過の弱点ではなか った。

# 謝辞

FCS 骨材は, JFE マテリアル(株)から提供された。また コンクリート供試体は, 富山西部生コン(株)で製造した。 加えてコンクリートの凍結融解試験は, (株)八洋コンサ ルタントで実施した。さらに研究を推進するにあたり, 東京工業大学の長瀧重義名誉教授に御指導を, 富山県立 大学の伊藤始教授ならびに日本コンクリート技術㈱の篠 田佳男氏に協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す る。

## 参考文献

 
 ・枷場重正,川村満紀,本多宗高,助田佐右エ門:コン クリート用骨材としての高炭素フェロクロムおよ び高炭素フェロニッケルスラグの利用に関する研
 究, セメントコンクリート, No.348, pp.30-38, 1976.2

- 五十嵐心一,荒野憲之,川村満紀,川口外秋:高炭 素フェロクロムスラグモルタルの力学的性質と微 視的破壊特性,コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.319-324, 1997.6
- 3) 吉田匠吾,可計皓規,田中義人,吉田晴信:藻場再 生を目的にしたフライアッシュ高含有ポーラスコ ンクリートの諸性質,第 68 回土木学会年次学術講 演会概要集,V,pp.639-640, 2013.9
- Susheel S. M., ほか: Development of normal strength concrete using ferrochrome slag aggregate as replacement to coarse aggregate, Int'l journal of innovative science, engineering & technology, Vol.3, No.6, pp.250-253, 2016.6
- 5) 小林一輔:人工軽量骨材コンクリートについて-現状 と問題点-,生産研究, Vol.19, No.5, pp.134-139, 1967.5
- 伊佐見和大,片平博,渡辺博志:コンクリート用骨 材の簡易な耐凍害性評価手法,土木技術資料, Vol.52, No.2, pp.22-25, 2010.5
- 7) 片平博,渡辺博志,山田宏:粗骨材の耐凍害性評価 指標の検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.35, No.1, pp.1072-1077, 2014.7
- Otsuki N., Nagataki S. and Nakashita K.: Evaluation of the AgNO<sub>3</sub> solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials, Construction and building materials, Vol.7, No.4, pp.195-201, 1993.12
- 9) 阿波稔, 庄谷征美, 月永洋一:細孔構造特性に着目した粗骨材の品質とコンクリートの凍結融解抵抗性, コンクリート技術シリーズ No.46, コンクリートの耐久性データベースフォーマットに関するシンポジウム論文集, pp.41-46, 2002.12
- 10) Pigion M., Pleau R. and Aitcin P. C.: Freeze-thaw durability of concrete with and without silica fume in ASTM C 666 (Procedure A) test method: Internal cracking versus scaling, Cement, concrete and aggregate, Vol.8, No.2, pp.76-85, 1986.1
- 11) 阿波稔, 庄谷征美, 月永洋一, 杉田修一: 低品質粗 骨材を用いたコンクリートの耐凍害性, コンクリー ト工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.85-90, 2000.7
- 12) 袴田豊,藤原忠司,小山田哲也,藤原裕介:低品質 骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす配 合の影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.29, No.1, pp.1143-1148, 2007.7
- 13) 日本コンクリート工学協会:骨材の品質と有効利用 に関する研究委員会報告書, pp.141-148, 2007.7