

論文 フェロニッケルスラグ細骨材とフライアッシュを多量に使用したコンクリートのフレッシュ性状と硬化後の性質

佐藤 辰輝*1・黒田 保*2・金氏 裕也*3・野原 秀彰*4

要旨：近年、環境保護の観点で産業副産物であるスラグ骨材の利用が注目されている。フェロニッケルスラグ細骨材(FNS)は、混入率が 50%を超えると、ブリーディング量が増大することで施工性能に問題が発生する。そこで、施工性能の改善を図るために粉体としてフライアッシュ(FA)を混入(セメントに対して外割り)することを考え、FNS と FA を使用したコンクリートのフレッシュ性状と硬化後の性質について検討した。その結果、ブリーディング量は普通コンクリートと同程度まで抑制されるだけでなく、圧縮強度は普通コンクリートより増大し、乾燥収縮の低減や、凍結融解抵抗性と遮塩性が向上することが明らかになった。

キーワード：フェロニッケルスラグ細骨材、フライアッシュ、ブリーディング、圧縮強度、乾燥収縮、遮塩性

1. はじめに

近年、環境保護の観点で天然骨材の使用量低減が望まれており、産業副産物であるスラグ骨材の利用が注目されている。そこで本研究では、フェロニッケルスラグ細骨材(以下、FNS と記す)の使用に注目した。鳥取県においては、岩美町の旧岩美鉱山から 1 日当たり 1500m³ の坑廃水が流出しており、坑廃水内に含まれる有害物質を沈殿処理することで中和処理を行っている。この中和処理を行う過程で、鉄分やカルシウムを多量に含んだ脱水ケーキと呼ばれる汚泥が生成される。鳥取県では、この脱水ケーキを京都府大江山のフェロニッケル精錬工場と売買契約によりフェロニッケルの原料として販売しており、その精錬過程で生成される JIS 製品の FNS1.2 を買い取っている。今後も坑廃水を安定的に処理するためには、フェロニッケルスラグの多量な利用が望まれている。FNS は、普通骨材と比べ密度が大きいので、消波ブロックやケーソン中詰材などの用途に使用されているが、さらなる利用の拡大が望まれる¹⁾。しかし、FNS 混入率が 50%を超えるような、多量に使用する場合において、ブリーディング量の増大に起因する施工性能の問題が生じることが既往の研究により明らかになっている²⁾。

一方で、石炭火力発電所から発生するフライアッシュ(以下、FA と記す)の有効利用も課題となっている。FA をコンクリート用混和材として使用した場合、ワーカビリティの改善、水和熱の低減、長期強度の改善、ポズラン反応による構造の緻密化など、その利点は多岐にわたる。しかし、FA の有効利用において、セメント原材料としての利用が約 7 割を占めているが、コンクリート用混和材としての利用量は約 1%程度であり、セメント需要の低迷や FA の安定利用の観点から、コンクリート用混

和材としての利用拡大が課題となっている³⁾。

そこで本研究では、FNS および FA を用いたコンクリートを、構造用コンクリートへ適用することを目的として、所要のフレッシュ性状を維持できる範囲で、FNS を可能な限り多量に使用するために、FNS を普通細骨材の砕砂に対して容積比で 75%まで置換して使用した。また、粉体として FA を混入することにより、ブリーディングの抑制による施工性能の改善に加え、強度増進、凍結融解抵抗性の改善や乾燥収縮の低減、構造の緻密化による遮塩性の改善などが期待される。そこで、FA の混入による FNS コンクリートの施工性能改善および硬化後の性質に与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料の物理的性質を表-1 に示し、細骨材の粒度分布を図-1 に示す。なお骨材の密度については、表乾密度を記載している。FNS は京都府大江山産の FNS1.2 を使用した。図-1 の FNS+FA は FNS を容積比で 75%使用し、砕砂を 25%使用した場合の粒度分布を示す。また S1+S2 は、砕砂と陸砂を容積比 3:1 で使用した場合の粒度分布を示す。本研究で使用した FNS は、混合砂であっても土木学会標準粒度より細かい砂であることが確認できる。本研究で使用した FA の物理的性質を表-2 に示す。FA は島根県三隅火力発電所から発生したものを使用した。JIS A 6201 において、FA II 種に相当する材料である。

2.2 実験要因

FNS と FA を使用したコンクリートの実験要因および水準を表-3 に示す。細骨材として FNS を 100%使用し

*1 鳥取大学大学院 持続性社会創生科学研究科 工学専攻 (学生会員)

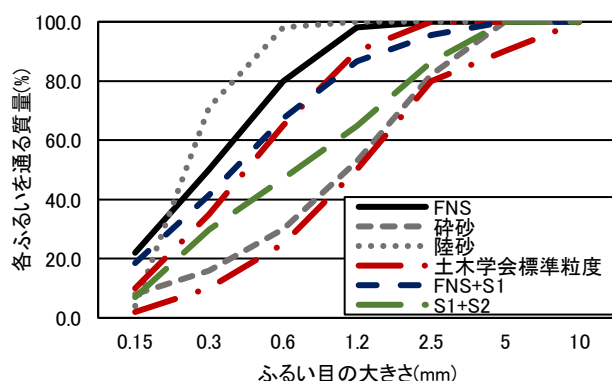
*2 鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

*3 鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*4 中国電力(株) エネルギア総合研究所土木グループ 修士(工学)

表－1 材料物性

各材料	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	F.M.
粉体	普通ポルトランドセメント(C)	3.16		
	フライアッシュⅡ種(FA)	2.18		
細骨材	1.2mm フェロニッケル スラグ細骨材(FNS)	3.09	0.54	1.51
	砕砂(S1)	2.66	1.52	3.14
	陸砂(S2)	2.51	1.42	1.28
粗骨材	普通砕石(G)	2.76	0.64	6.67
混和剤	AE 減水剤高機能タイプ			
	AE 助剤			



図－1 細骨材の粒度分布

表－2 FA の材料物性

	フライアッシュⅡ種(FA)
密度(g/cm ³)	2.18
SiO ₂ 含有量(%)	60.0
湿分(%)	0.1
強熱減量(%)	2.8
粉末度(cm ² /g)	2900
フロー値比(%)	107
28 日活性度指数	80
91 日活性度指数	90

表－3 FNS と FA を使用したコンクリートの実験要因

要因	水準
FNS 置換率(%)	75
単位粉体量(kg/m ³)	350, 400
水セメント比(%)	60, 65, 70

た場合、水セメント比 55%で材料分離を生じることが報告されている⁴⁾。本研究ではこれを考慮し、FNS を砕砂に対して容積比 75%を置換して使用した。また、粉体としてセメントと FA の合計を単位粉体量(以下、P と記す)とし、P は 350 と 400kg/m³ の 2 パターンを設定した。配合条件として、スランブは国土交通省における鉄筋コンクリートのスランブ参考値に準じて⁵⁾ 12cm±1.5cm に設定し、空気量は 4.5%±1.5%とした。

また、細骨材に砕砂と陸砂を容積比で 3:1 の割合で使用し、FA を添加しない普通コンクリート(以下、NC と記す)を作製し、FNS と FA を使用したコンクリートのフレッシュ性状や硬化後の物性について NC と比較した。NC の水セメント比は、試練りの結果 FNS と FA を使用したコンクリートの水セメント比 60%と圧縮強度が同程度であった、水セメント比 55%と 60%の 2 パターンを設定した。混和剤には、リグニンスルホン酸化合物系の AE 減水剤高機能タイプを使用し、AE 減水剤の添加量は P×1.0%を上限とした。また、空気量の調整用に変性ロジン酸化合物系の AE 助剤を使用した。本研究で用いたコンクリートの配合を表－4 に示す。FNS と FA を使用したコンクリートの単位水量は 175kg/m³ と一定とし、普通コンクリートの単位水量は 165kg/m³ とした。コンクリートの細骨材率(以下、s/a)は最適細骨材率(以下、最適 s/a と記す)とし、スランブ試験において、表－5 の○で示す配合で s/a を最適 s/a より 2%大きく設定した。s/a を大きくした理由として、試練りにおいて粉体量が少ない配合(表中の*で示した配合)で材料分離が生じてコンクリートが崩れたことが挙げられる。

以下、配合の表記として”P○○○-○○”と表記する。”P○○○”は単位粉体量を表し、単位粉体量の後ろにつく”○○”は水セメント比を表す。例として、”P350-65”は単位粉体量 350kg/m³、水セメント比 65%の配合を表す。また、前述の通り普通コンクリートは NC と表記する。NC の配合表記については、”NC-○○”と表し、”○○”は水セメント比を示す。例として、”NC-55”は水セメント比 55%の NC の配合であることを示す。

表－4 計画配合

	W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							単位粉体量×(%)		スランブ (cm)	空気量 (%)
				W	C	FA	FNS	S1	S2	G	AE 減水剤 (%)	AE 助剤 (%)		
P350-60	60	50	40	175	292	58	611	175	0	1095	0.7	2.5	10.5	3.8
P400-60	60	44	35	175	292	108	516	148	0	1145	0.8	6.0	13.0	4.9
P350-65	65	50	39	175	269	81	593	170	0	1107	0.8	3.0	11.0	5.5
P400-65	65	44	37	175	269	131	543	156	0	1104	0.8	6.0	11.5	5.7
P350-70	70	50	39	175	250	100	589	169	0	1101	0.7	2.0	11.0	3.1
P400-70	70	44	35	175	250	150	511	147	0	1134	0.8	6.5	12.0	5.7
NC-55	55	—	44	165	300	0	0	648	162	1039	0.6	0.8	11.0	4.6
NC-60	60	—	47	165	275	0	0	660	218	1026	0.6	0.8	10.5	4.8

表一5 細骨材率を最適 s/a から 2%大きく設定した配合

W/C (%)	P350	P400	NC
55			
60	○*		○
65	○*	○	
70	○*		

2.3 実験方法

(1) コンクリートの練混ぜおよびフレッシュ性状

コンクリートの練混ぜは、容量 50L の水平二軸強制攪拌型ミキサーを使用した。まず、ミキサー内部に粗骨材、セメントと FA、細骨材の順番で投入して 30 秒間練り混ぜ、その後、練混ぜ水を投入して 60 秒間練り混ぜた。練混ぜが完了したコンクリートは、直ちにミキサーから練板に排出し、スコップで数回練返し、均一な状態になったことを確認して、まず、スランブ試験(JIS A 1101)および空気量試験(JIS A 1128)を行った。その後、ブリーディング試験(JIS A 1123)および凝結時間試験(JIS A 1147)を実施した。

(2) 硬化後のコンクリートの性質

圧縮強度試験は JIS A 1108 に従って材齢 3, 7, 28, 91 日に行い、また、静弾性係数試験を JIS A 1149 に従って材齢 28 日, 91 日に行った。

乾燥収縮試験は、JIS A 1129-2 に従って行った。100×100×400mm の角柱供試体を、各配合で 3 本ずつ作製した。打設後は材齢 1 日で脱型し、直ちにひずみ測定用プラグを供試体に貼り付けた。プラグの貼り付け位置は供試体の長手方向の両側面に 250mm 間隔とした。プラグの貼り付け後に水温 20℃の水槽に材齢 7 日まで水中養生を行い、材齢 7 日以降は室温 20±3℃、相対湿度 60±5% の室内に保管した。

凍結融解試験は、JIS A 1148 の A 法に従って行った。供試体寸法は 100×100×400mm の角柱供試体とし、各配合で 3 本ずつ作製した。凍結融解の 1 サイクルは 5℃から-18℃に下降し、再び 5℃に上昇するものとし、30 サイクルごとに、たわみ振動の一次共鳴振動数および質量の測定を行った。凍結融解試験はサイクル数の合計が 300 サイクルとなったときに終了とするが、それまでに相対動弾性係数が 60%以下となったものはそのサイクルで終了することとした。

(3) 塩化物イオンの実効拡散係数試験

塩化物イオンの実効拡散係数試験は、JSCE-G571-2003「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」に基づいて試験を行った。供試体の作製については、φ100×200mm の円柱供試体を打設し、材齢 28 日まで標準水中養生を行った後、コンクリートカッターでφ100×50mm になるように円盤供試体を切り出した。この供試体を試験に供した。

3. 実験結果および考察

3.1 FA の混入がフレッシュ性状に与える影響

図一2 にブリーディング試験の結果を示す。FA 混入量の増加に伴って、FNS を用いたコンクリートのブリーディング量は抑制される傾向がみられた。特に同一の水セメント比では、P350 と比較して単位粉体量の多い P400 の配合でブリーディング量の抑制が確認された。その中で P400-60 の配合では NC と同等のブリーディング量まで抑制された。これは、FA を混入することにより、粉体量が増加し、粉体に吸着される水量が増加したことと、ペーストの粘性が増大し骨材の沈降が抑制されたため、ブリーディング量が低減されたと考えられる。

表一6 に凝結時間試験の結果を示す。同一水セメント比で FA を混和した場合、NC と比較して凝結時間が 1~2 時間ほどの遅延であり、FNS と FA を使用したコンクリートの凝結特性は、NC と同程度であることを確認した。凝結時間が変化した要因として、FA の反応速度が普通セメントと比較して緩慢であることに起因すると考えられる。また、高性能 AE 減水剤の添加率が 0.2%増加するに伴って、凝結時間が 2~3 時間程度長くなる傾向が報告されており⁹⁾、AE 減水剤添加量の増加も凝結時間に影響を及ぼしたと考えられる。

3.2 FA の混入が圧縮強度に与える影響

圧縮強度試験の結果を図一3、図一4、図一5 に示す。図一3 から、いずれの材齢においても、同一の水セメント比では FNS と FA を使用したコンクリートの方が NC よりも高い強度が得られた。これは、一般的に FNS を使用したコンクリートは普通骨材を使用したコンクリートと比較して圧縮強度が同等以上となり、FNS 混入率の増大に伴って圧縮強度が増加する傾向にあるためである⁷⁾。また図一4、図一5 より、水セメント比が 65%、70%の FNS と FA を使用したコンクリートは、水セメント比 60%の NC よりも高い強度が得られた。さらに図一6、図一7 より、水セメント比の増大に従って、材齢 28 日以降の強度増進が大きくなる傾向がみられた。これらの要因として、FA を添加したことにより、微粉末としての充填効果とポゾラン反応による内部構造の緻密化が進んだことによって、強度が増大したと考えられる。特に FNS と FA を使用したコンクリートは、水セメント比が大きくなると FA 混入率(P に対する FA の割合)が増加することから、水セメント比の増大に従って前述した 2 つの影響が大きくなると考えられる。

3.3 FA の混入が乾燥収縮ひずみに与える影響

乾燥収縮試験の結果を図一8、図一9、図一10 に示す。一般的に単位水量が多いほど、また W/C が大きくなるにしたがって乾燥収縮ひずみは増大する傾向にある⁸⁾。しかし、NC と比較して FNS と FA を使用したコンクリートは、

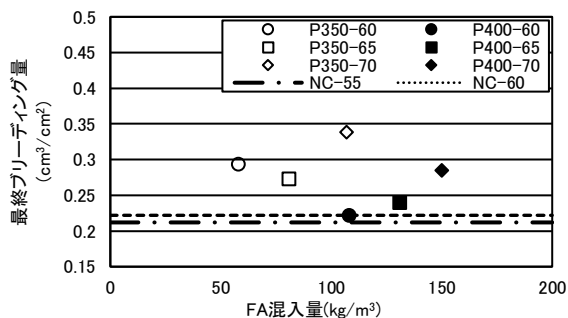


図-2 ブリーディング試験の結果

表-6 凝結時間試験の結果

配合名	FA 添加量 (kg/m³)	始発時間 (時間-分)	終結時間 (時間-分)
P350-60	58	7-20	9-30
P400-60	108	8-40	11-10
P350-65	81	8-15	10-40
P400-65	131	8-55	11-30
P350-70	107	8-55	11-30
P400-70	150	11-55	14-35
NC-55		5-50	8-05
NC-60		6-25	9-00

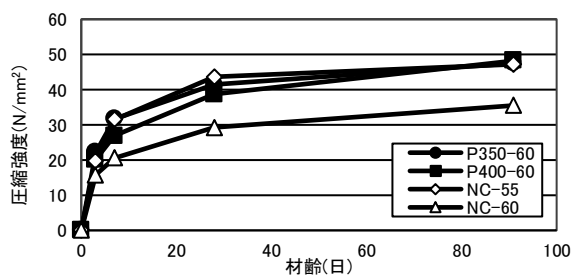


図-3 W/C=60%の圧縮強度試験の結果

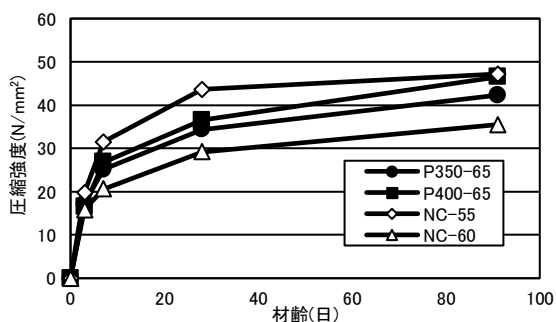


図-4 W/C=65%の圧縮強度試験の結果

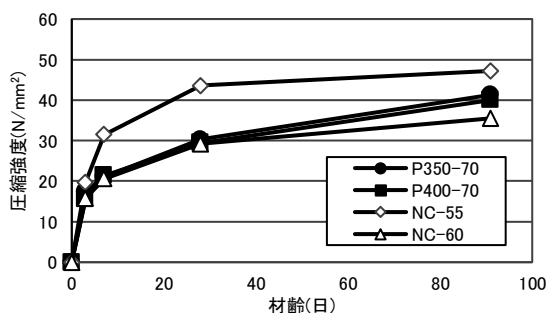


図-5 W/C=70%の圧縮強度試験の結果

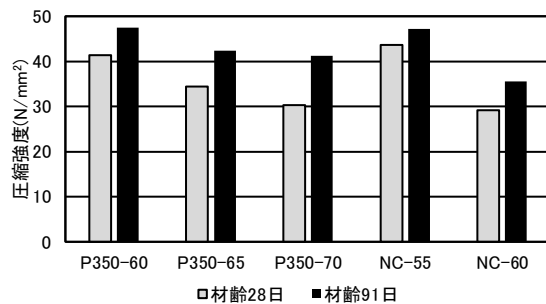


図-6 材齢 28 日・91 日圧縮強度試験の結果(P350)

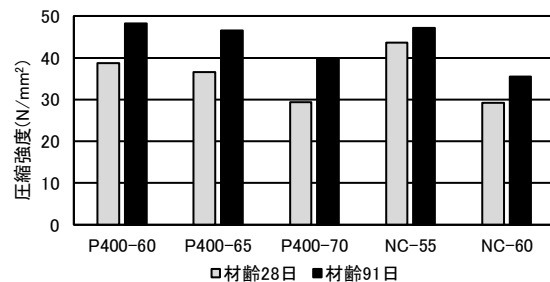


図-7 材齢 28 日・91 日圧縮強度試験の結果(P400)

単位水量が多く水セメント比も大きいですが、乾燥収縮ひずみは NC を含めた全ての配合において、水セメント比によらず同程度となった。これは、細骨材に FNS を用いたコンクリートは砕砂を使用したコンクリートと比較して乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向が示されていることから⁹⁾、本研究においても同様な傾向が確認できる。乾燥収縮ひずみが同程度となった要因として、FNS の吸水率が砕砂より小さいことから、骨材からの水分の逸散量が減少したことが考えられる。また、粉体量の増加により、NC より細骨材率が低下し粗骨材量が増加したことで、粗骨材がセメントペーストの収縮を拘束したことが、FNS と FA を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみが低減した一因として考えられる。

本研究における乾燥収縮ひずみの低減効果について、単位水量が一定で FNS 置換率が同一である条件下から、FA の混入による粉体量の増加が、ペースト部分の粘性の増大につながり、それによって粗骨材量が増えたことで乾燥収縮に対する抵抗性が増加した大きな要因であると考えられる。

3.4 FA の混入が凍結融解抵抗性に与える影響

凍結融解試験の結果を図-11 に示す。図中の 3 つの配合について実験を行った結果、水セメント比の大小に関わらず、いずれの配合も 300 サイクル終了時まで相対動弾性係数は 90%以上を維持した。FNS を 50%以上使用したコンクリートは、ブリーディング量の増大によって凍結融解抵抗性が低下することが報告されている¹⁰⁾。

本研究では FA を混入したことにより、粉体量が増加して保水性が向上し、ブリーディング量が $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以

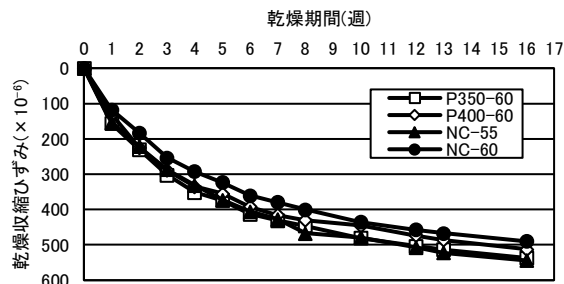


図-8 W/C=60%の乾燥収縮試験の結果

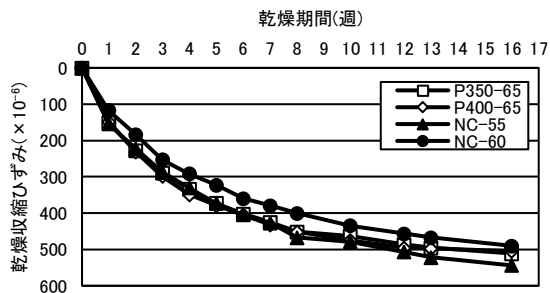


図-9 W/C=65%の乾燥収縮試験の結果

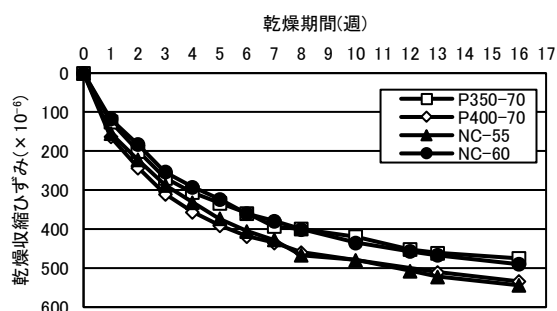


図-10 W/C=70%の乾燥収縮試験の結果

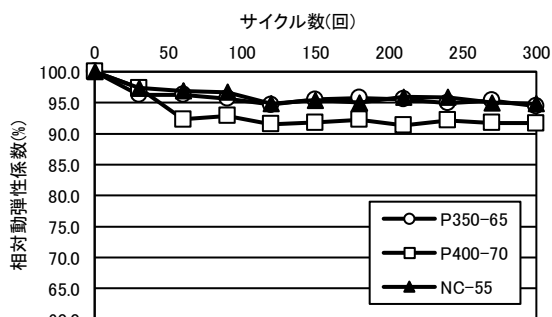


図-11 凍結融解試験の結果

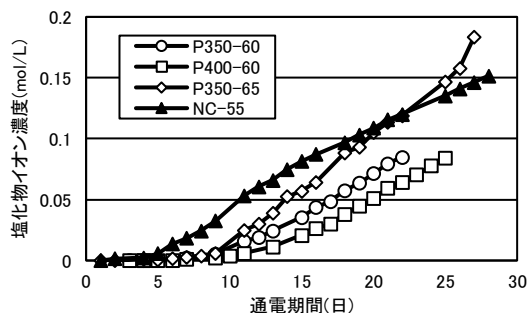


図-12 通电期間中の陽極側塩化物イオンの経時変化

下まで減少したことで凍結融解抵抗性が改善され、普通コンクリートと同等の凍結融解抵抗性が得られたと考えられる。

3.5 FAの混入が塩化物イオンの拡散に与える影響

図-12に、図中の4つの配合について塩化物イオンの実効拡散係数試験を行った際に得られた、通电期間中の陽極側塩化物イオン濃度の経時変化を示す。また、図-13に図中の配合における塩化物イオンの実効拡散係数を示し、図-14に塩化物イオンの見掛けの拡散係数を示す。見掛けの拡散係数への換算については、土木学会の「2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】」を参考に算出した¹¹⁾。FNSとFAを使用したコンクリートについては、大半の配合でFA置換率が20%を超えるが、本研究においては、NCを除く配合はフライアッシュセメントB種相当を使用する場合として換算を行った。

図-13および図-14より、同一の水セメント比においては、FA混入量の増加に伴って塩化物イオンの実効拡散係数および見掛けの拡散係数が減少したことを確認した。また、FNSとFAを使用したコンクリートは、NCと比較して水セメント比が大きい、塩化物イオンの拡散係数が小さい傾向がみられた。また、いずれの材齢においても圧縮強度がほぼ同等である、FNSとFAを使用した水セメント比60%のコンクリートと、水セメント比55%のNCを比較すると、塩化物イオンの拡散係数はFNSとFAを使用したコンクリートの方が小さいことから、遮塩性はNCより向上していると考えられる。また、FNSとFAを使用したコンクリートの遮塩性の向上は、FAのポゾラン反応によるコンクリートの組織の緻密化が要因であると考えられる。

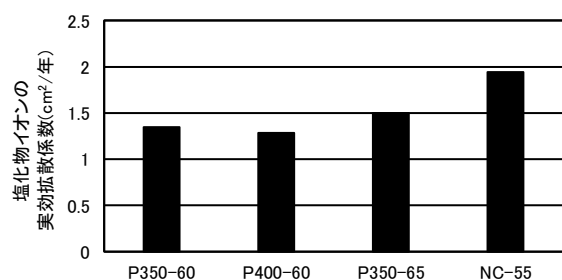


図-13 塩化物イオンの実効拡散係数

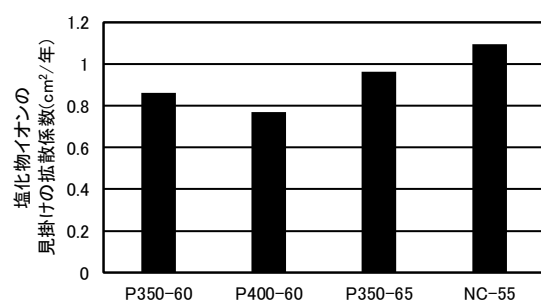


図-14 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

4. まとめ

本研究では、FNS をできるだけ多量に使用する観点から FNS 置換率を 75% とし、FA 混入量と水セメント比を変化させたコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の性質について検討を行った。本研究で得られた知見を以下に挙げる。

- (1) FNS と FA を使用したコンクリートでは、FA の混入によって粉体量が増加することで、ブリーディング量の抑制効果が確認された。
- (2) FNS と FA を使用したコンクリートは、同一の水セメント比において NC よりも高い圧縮強度を得られた。また、材齢 28 日以降では水セメント比の増大に従って、FA 混入量が増加することで強度増進が大きくなった。
- (3) FNS と FA を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは、それよりも単位水量が少なく、水セメント比の小さい NC と同程度であった。FNS の吸水率が小さいことと、FA の混入によって細骨材率が低下し、粗骨材量が多くなったためであると考えられる。
- (4) FNS と FA を使用したコンクリートの凍結融解試験の結果、300 サイクル終了時の相対動弾性係数は 90% 以上を維持した。FA の混入によって、ブリーディングが抑制され凍結融解抵抗性が改善されたと考えられる。
- (5) FNS と FA を使用したコンクリートは、NC よりも塩化物イオンの実効拡散係数が小さくなる傾向が確認された。FA のポゾラン反応で構造の緻密化が進み、遮塩性が向上したと考えられる。

参考文献

- 1) 宇治公隆, 佐伯竜彦, 綾野克紀, 吳承寧: 土木学会「フェロニッケルスラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針」および「銅スラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針」の概要, コンクリート工学, Vol.55, No.3, pp.217-221, 2017
- 2) 土木学会コンクリート委員会非鉄スラグ骨材コンクリート研究小委員会: フェロニッケルスラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針, 社団法人土木学会, pp.98-101, 2016
- 3) 一般財団法人石炭エネルギーセンター: 石炭灰全国実態調査報告書(平成 30 年度実績), 2020.3
- 4) 滝田真哉, 井上正一, 松井信作, 黒田保, 長谷川明生: フェロニッケルスラグ細骨材のコンクリート二次製品への適用, 第 63 回土木学会中国支部研究発表会, V-6, 2011
- 5) 国土交通省: スランプ規定の見直し, <http://www.mlit.go.jp/common/001176464.pdf> (閲覧日: 2020 年 12 月 7 日)
- 6) 吉野公, 井上正一, 黒田保, 村山真一: フライアッシュによる高炉スラグ骨材コンクリートの品質改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.147-152, 2007
- 7) 岡友貴, 山田悠二, 橋本親典, 渡邊健: 非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能および強度に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1033-1038, 2015
- 8) 桜井邦昭, 近松竜一, 中里剛: 単位水量や水セメント比がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-466, pp.929-930, 2009
- 9) 中島和俊, 渡辺健, 橋本親典, 石丸啓輔: 拘束条件の有無による非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.469-474, 2015
- 10) 戸川一夫, 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, 材料, Vol.45, No.1, pp.101-109, 1996
- 11) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書【設計篇】, pp.162-163, 2017