

論文 多量のフライアッシュおよびセメントクリンカー細骨材を利用したコンクリートの耐久性に関する研究

小島 朋也*1・藤原 浩巳*2・丸岡 正知*3・村上遙佳*4

要旨：本研究では多量のフライアッシュとセメントクリンカーを細骨材として用いたコンクリートの凍結融解抵抗性および中性化、乾燥収縮、自己収縮特性の耐久性に関する実験・検討を行った。その結果、凍結融解抵抗性についてはクリンカー細骨材を用いることで性能が向上し、促進中性化抵抗性においてクリンカー細骨材使用による悪影響を及ぼすことはなく、また、乾燥収縮特性においては、細骨材の差異に関わらずフライアッシュ使用による収縮低減効果が認められた。自己収縮特性について、クリンカー細骨材を用いた配合において、材齢7日以降の収縮量が大きくなることを確認した。

キーワード：フライアッシュ、セメントクリンカー細骨材、凍結融解抵抗性、中性化、乾燥収縮、自己収縮

1. はじめに

石炭火力発電所で発生し、産業副産物である石炭灰(飛灰) = フライアッシュの大量資源化は、専用灰処分場の残余量のひっ迫軽減や環境負荷低減の点から望まれている。平成23年に発生した東日本大震災以降、電源構成が変化し、石炭火力発電の稼働率が増加している。それに伴い、フライアッシュも継続して排出されると予想され、専用灰処分場の残余容量がひっ迫状態となっている現状である。

フライアッシュの利用先としてセメント分野が全体の7割を占める。その内セメント原材料がほとんどであり、セメント混合材やコンクリート混和材としての利用割合は非常に低い。今後、フライアッシュの更なる有効利用にはセメント混合材やコンクリート混和材としての利用

を拡大する必要がある。

一方、フライアッシュは、同様に産業副産物であり、コンクリート混和材として利用される高炉スラグ微粉末と比較した際、セメントに対する置換割合が低く定められている。高炉セメントC種において混合割合上限は70%と定めているに対し、フライアッシュセメントC種では30%である。また、フライアッシュ混和コンクリートの主たる用途としては長期強度の増進や水和熱低減などの特性を活かしたマスコンクリートなどであり、高炉セメントと比べて限定的である。また、フライアッシュを内割で多量に使用した場合、初期強度が大幅に低下することが知られている。この問題はフライアッシュのセメント置換率が増加するほど顕著となることが既往の研

表-1 先行研究²⁾および本研究で検討した配合の基本性状(水粉体比: 25%)

配合名	粉体構成 (質量比%)			細骨材構成 (体積比%)		混和剤添加率 (P×質量%)		空気量 (%)	スランブフロー値 (mm)	温度 (°C)	材齢28日圧縮強度 (N/mm ²)
	OPC	HPC	FA	S	NCL	SP	DF				
OPC100	100	0	0	100	0	0.83	0.50	0.2	695	35	116.1
FA30	70	0	30	100	0	0.78		0.7	653	29	113.9
OPC-FA30-NCL50				50	50	0.81		0.3	650	19	119.3
OPC-FA30-NCL100				0	100	0.85		0.2	615	23	132.0
HPC-FA30-NCL50				50	50	0.85		1.0	628	31	135.9
HPC-FA30-NCL100	0	70	0	100	1.07	0.4		675	28	145.4	
FA40	60	0	40	100	0	0.80		0.1	605	30	101.3
OPC-FA40-NCL50				50	50	0.81		0.8	685	21	114.4
OPC-FA40-NCL100				0	100	0.86		0.1	600	19	123.9
HPC-FA40-NCL50				50	50	0.85		1.3	663	28	123.2
HPC-FA40-NCL100	0	60	0	100	1.03	1.0		625	28	132.5	
FA50	50	0	50	100	0	0.76		0.2	648	25	87.1
OPC-FA50-NCL50				50	50	0.79	0.1	655	18	106.0	
OPC-FA50-NCL100				0	100	0.81	0.2	610	22	118.9	
HPC-FA50-NCL50				50	50	0.85	0.6	680	28	116.7	
HPC-FA50-NCL100	0	50	0	100	1.01	1.8	665	26	132.0		

※OPC：普通ポルトランドセメント，HPC：早強ポルトランドセメント，FA：フライアッシュ，

S：鬼怒川産川砂，NCL：普通ポルトランドセメント用クリンカー，SP：高性能減水剤，DF：消泡剤

*1 宇都宮大学 大学院地域創生科学研究科社会デザイン科学専攻 (学生会員)

*2 宇都宮大学 地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科部長 教授 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学 地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科 准教授 工博 (正会員)

*4 宇都宮大学 大学院地域創生科学研究科社会デザイン科学専攻 (学生会員)

究りより明らかとなっている。さらに、その問題を改善するため、普通ポルトランドセメント用クリンカーを細骨材として利用することで、多量のフライアッシュを用いた場合でも初期強度が増加することが先行研究²⁾によって明らかとなっている。本研究では、この既往の研究により強度改善された試験体の耐久性に関する検討を行った。先行研究および本研究での検討した試験体の基本性状を表-1に示す。なお、練混ぜを行った環境が温度調整器のない実験室であったためことと、実験自体が年間通して実施した関係でコンクリートの練上がり温度が大きくばらついた。供試体作製時には20℃に温度調整した実験室にて作業・養生を行ったため、硬化性状に関してはほぼ影響がないと考えている。

2. 実験概要

2.1 使用材料

フライアッシュは入手が容易な JIS II 種品 (FA, 苫東厚真産, 比表面積: 4,330cm²/g, 密度: 2.28g/cm³), セメントには普通ポルトランドセメント (OPC, 比表面積: 3,340cm²/g, 密度: 3.16g/cm³), および早強ポルトランドセメント (HPC, 比表面積: 5,410cm²/g, 密度: 3.11g/cm³), 練混ぜ水には宇都宮市水道水 (W), 細骨材には鬼怒川産川砂 (S, 表乾密度: 2.59g/cm³, 吸水率: 2.52%, 粗粒率: 2.48), および普通ポルトランドセメント用クリンカー細骨材 (NCL, 絶乾密度: 2.66g/cm³, 吸水率: 1.50%, 粗粒率: 2.91) を使用した。粗骨材には笠間産硬質砂岩砕石 6号 (G, 最大骨材寸法: 15mm, 表乾密度: 2.62g/cm³, 吸水率: 0.71%, 粗粒率: 6.89) を使用した。また、化学混和材としてポリカルボン酸系高性能減水剤 (SP, 密度: 1.08g/cm³), および消泡剤 (DF) を使用した。

2.2 配合条件および粉体構成

配合条件を表-2に、粉体・細骨材構成を表-1, 単位量を表-3に示す。本研究では先行研究にて得られた強

度改善効果が確認された条件および粉体構成、細骨材構成を用いた。セメントに対する FA 置換率は質量比で 30, 40, 50%の3水準とし、セメントとして OPC または HPC のいずれかを組み合わせた。また、NCL は JIS A 1102「骨材のふるい分け試験」に規定される範囲に収まるよう粒度調整し、鬼怒川産川砂 (S) に対して全量を置換した。NCL の粒度分布を図-1に示す。比較用として粉体を全て OPC とした配合 OPC100 を練混ぜた。この配合の細骨材は S のみ用いた。

表-2 配合条件

水粉体比 (%)	細骨材粉体比 (S/P)	単位粗骨材絶対容積 (m ³ /m ³)	スランブフロー値 (mm)	空気量 (%)
25	1.0	0.35	650±50	≤2.0

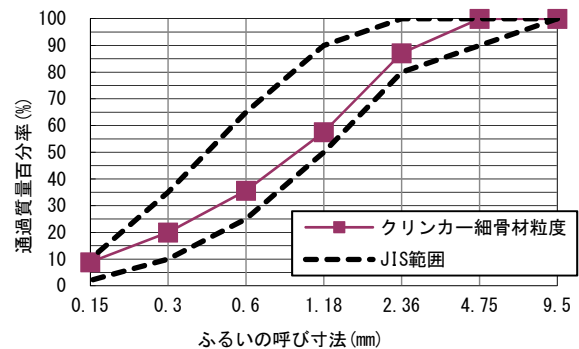


図-1 NCL の粒度分布

2.3 試験項目

(1) 凍結融解抵抗性試験

「JISA 1148 コンクリートの凍結融解試験法」の A 法に準拠した。空気量に関して、FA を多く混和すると従来からエイトレンドエアを導入するための AE 剤の効果が失われることが指摘されているため、AE コンクリートとして 5%程度の空気量を連行することは困難と考え耐

表-3 本研究で検討した配合の計画配合

配合名	単位量 (kg/m ³)							
	W	OPC	HPC	FA	S	NCL	G	
OPC100	178	714	0	0	585	0	910	
FA30	165	461		198	603			
OPC-FA30-NCL50	165	461		198	301			309
OPC-FA30-NCL100	161	385		198	0			624
HPC-FA30-NCL50	164	0	460	197	302	310		
HPC-FA30-NCL100	164		460	197	0	619		
FA40	161	385	0	257	608	0		
OPC-FA40-NCL50	165	461		257	304	312		
OPC-FA40-NCL100	157	314		257	0	624		
HPC-FA40-NCL50	160	0		385	256	304		312
HPC-FA40-NCL100	160		385	256	0	625		
FA50	157	313	0	313	613	0		
OPC-FA50-NCL50	161	314		314	306	315		
OPC-FA50-NCL100	157	314		314	0	629		
HPC-FA50-NCL50	156	0		313	313	307		315
HPC-FA50-NCL100	156		313	313	0	619		

凍害性が悪化することを考慮した上で目標空気量を 2% 以下とした。

(2) 促進中性化試験

「JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠した。

(3) 乾燥収縮

乾燥によるコンクリートの長さ変化試験は「JIS A 1129-3 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法—第3部：ダイヤルゲージ方法」に準拠して行った。

(4) 自己収縮

水和反応に伴う自己収縮によるコンクリートの長さ変化試験は日本コンクリート工学会「自己収縮研究委員会報告」³⁾を参考し、試験を実施した。試験方法を図-2に示す。内寸法 100×100×400mm の型枠を作製し、供試体の自由な変形を阻害しないよう、型枠の底面内側にテフロンシート、型枠と供試体が接触しないよう、型枠内側にポリエステルフィルム、両端部の内側にポリスチレンボードを入れた。また、型枠中心部に埋没型のひずみゲージを設置し、組織内のひずみを測定した。ひずみは打込み後、材齢 24 時間まで 1 時間間隔、材齢 3 日まで 4 時間間隔、以降 1 日 1 回測定を行った。また、計測期間は材齢 28 日までとした。

2.4 試験結果

(1) 凍結融解抵抗性試験

セメントに対する FA 置換率 30, 40, および 50% の凍結融解抵抗性試験結果を図-3, 図-4, 図-5 にそれぞれ示す。また、本試験での各配合の空気量を表-1 に示す。

図-3 より FA 置換率 30% では配合 FA30 において 90 サイクルで相対動弾性係数が低下しはじめ、150 サイクルで 60% を下回った。NCL100% 置換をした配合 OPC-FA30-NCL100 および HPC-FA30-NCL100 の 2 配合では、相対動弾性係数は 80% 以上を示した。また FA 置換率 40 および 50% でも同様の傾向を示した。図-4 より FA 置換率 40% では、配合 FA40 の相対動弾性係数の低下が配合 FA30 より早期に始まり、90 サイクル時点で 60% を下回った。図-5 より FA 置換率 50% では配合 FA50 の相

対動弾性係数の低下がより顕著となり 30 サイクル時点で 60% を下回った。配合 OPC-FA50-NCL100 では、十分な耐凍害性を示したものの 150 サイクル以降、測定毎相対動弾性係数の低下がみられた。これらは、0.15mm 以下の粒度の NCL が結合材として水和反応を示し、0.15mm 以上の NCL は細骨材として作用し、骨材周辺が緻密になることで組織内が密実となり、空隙が減少したと考えられること⁴⁾、それにより強度発現性が改善し、試験開始時の材齢 28 日時点での圧縮強度が 100N/mm² 以上となり、十分な強度が発現したためと考えられる。また、NCL 自体の水和反応により組織内の未水和の水分が減少したこと、NCL 表面の水和反応により組織の引張強度が向上したことが要因と推察される。配合 OPC-FA50-NCL100 の相対動弾性係数の低下の原因は、表-1 に示すように、凍結融解抵抗性試験開始時の圧縮強度が他の配合と比較してやや低く、未水和水が多く残っているためと推察される。

NCL 混和による組織の密実化を確認するため、水銀圧入法による細孔分布を測定した。試験概要を表-4 に示す。全空隙量と材齢 28 日強度の関係を図-6, log 微分細孔容積の分布について図-7, 図-8, 図-9 にそれぞれ示す。図-6 より、FA 置換率 30, 40, 50% の 3 水準において、空隙量の減少に伴って圧縮強度が増加する傾向が確認された。図-7 より配合 FA30 と比較して配合 HPC-FA30-NCL100 の 0.02μm 付近の細孔容積が減少しており、NCL 混和による空隙の減少が確認された。図-8 より配合 HPC-FA40-NCL100 の 0.02μm 以下の細孔容積の減少が確認された。図-9 より配合 HPC-FA50-NCL100 の 0.01μm 以下および 100μm 以上の細孔容積の減少が確認された。このことより NCL 混和により耐凍害性の弱点とされる骨材の遷移帯が密実となり、耐凍害性が向上したと考えられる。

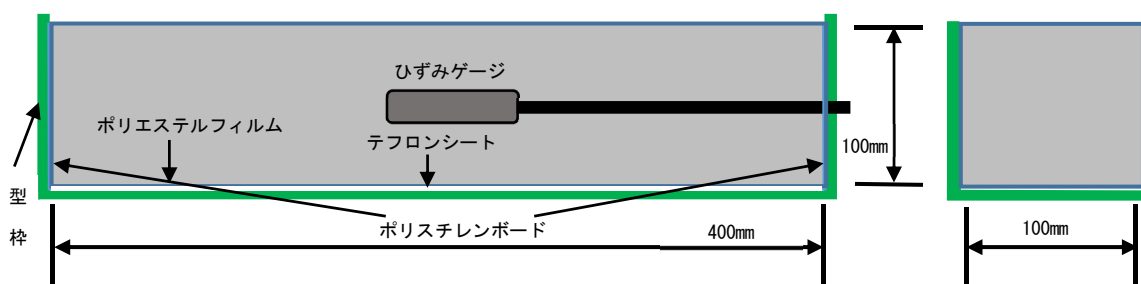


図-2 自己収縮ひずみの測定方法

表-4 水銀圧入法による細孔分布の試験概要

目的	各配合の細孔を測定し、組織内が密実になったか確認する
試験体	凍結融解抵抗性試験で用いた配合条件および粉体構成と同様の試験体（モルタル）を作製
材齢	水中養生 28 日
試験方法	<ol style="list-style-type: none"> ① 供試体における中心部から、5mm×5mm 程度の大きさのモルタルを適量取り出す。 ② 取り出したモルタルを瓶に入れ、24 時間アセトンに浸漬させる。 ③ モルタルをアセトンに浸漬させてから 24 時間経過後、真空デシケータ・コールドトラップ・真空ポンプにより構成される装置を使用し、水和反応停止の処理を行う。 ④ 水和反応停止の処理後、瓶に蓋をし、密閉容器の中で管理を行う。 ⑤ 上記の処理を行った試験体を水銀圧入式ポロシメーターにかけることで細孔を測定する。

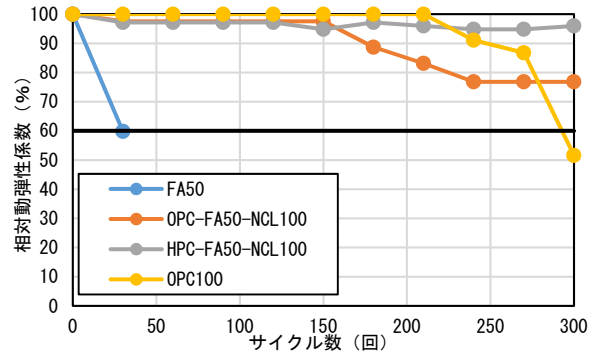


図-5 FA 置換率 50%の相対動弾性係数

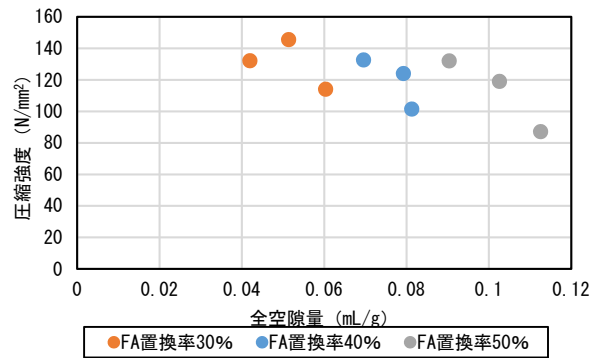


図-6 全空隙量と材齢 28 日強度の関係

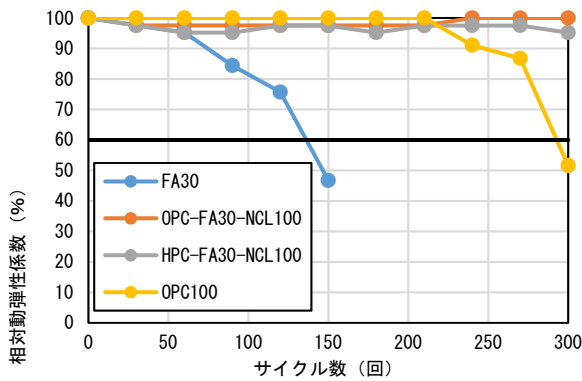


図-3 FA 置換率 30%の相対動弾性係数

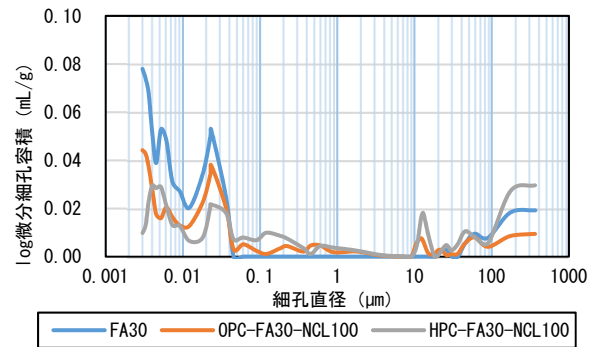


図-7 FA 置換率 30%の細孔分布

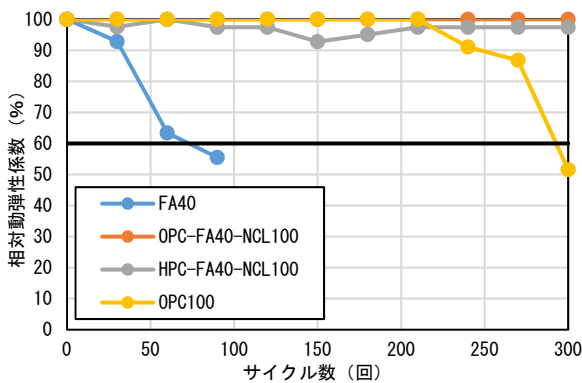


図-4 FA 置換率 40%の相対動弾性係数

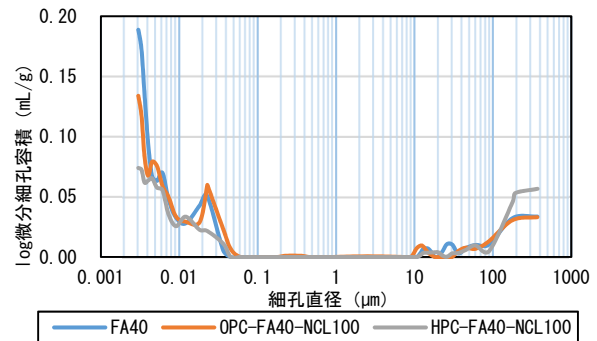


図-8 FA 置換率 40%の細孔分布

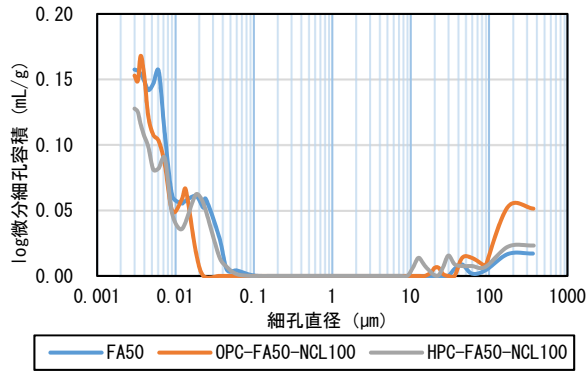


図-9 FA置換率50%の細孔分布

(2) 促進中性化試験

本検討におけるすべての配合において促進中性化開始から26週時点でのフェノールフタレイン溶液の噴霧によって断面全てが変色したため中性化領域を目視で確認されなかった。これはNCL混和の配合においては2.4(1)と同様に、0.15mm以下の粒度のNCLが結合材として、0.15mm以上のNCLが細骨材として作用し、骨材周辺の遷移帯の緻密化に寄与し、全体として組織内が密実となることで、二酸化炭素の侵入を防いだと考えられる。またNCL無混和配合においては、水粉体比が25%としたため、組織内が密実となったためと推察される。コンクリート標準示方書【設計編】⁵⁾より、設計供用年数を100年とした場合の配合FA50の中性化深さの設計値を算出すると $y_d=10.8\text{mm}$ となるが、この計算方法では下記の係数 k を0とし、フライアッシュを無視したものであるため、実際にはさらに小さい値となると推察される。従って、水結合材比が小さい本検討ではほとんど中性化しなかったと考えられる。算出で用いた各式を以下に示す。

$$y_d = \gamma_{cd} \cdot \alpha_d \sqrt{t} \quad (1)$$

$$\alpha_d = \alpha_p \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \quad (2)$$

y_d : 中性化深さの設計値 (mm)

γ_{cd} : 中性化深さの設計値 y_d のばらつきを考慮した安全係数 (1.15)

t : 中性化に対する耐用年数 (年) (100年)

α_p : 中性化深さ速度係数の予測値 = $-3.57 + 9.0 \cdot W/B$ (3)

β_e : 環境作用の程度を表す係数 = 1.0 (試験環境)

γ_c : コンクリートの材料係数 = 1.0

W/B : 有効水結合材比 = $W / (C_p + k \cdot A_d)$ (4)

C_p : 単位体積当たりのポルトランドセメントの質量

A_d : 単位体積当たりの混和材の質量

k : 混和材の種類により定まる定数 (フライアッシュの場合、 $k=0$)

(3) 乾燥収縮

乾燥収縮試験における長さ変化率の推移を図-10、質量変化率の推移を図-11にそれぞれ示す。

長さ変化率・質量変化率ともにNCL無混和の3配合FA30、FA40、FA50と比べてNCL混和の3配合OPC-FA30-NCL100、OPC-FA40-NCL100、OPC-FA50-NCL100の方が、変化率が小さくなった。また、FA置換率が小さくなるに伴い変化率も小さくなった。これは2.4(1)での記述と同様に0.15mm以下の粒度のNCLが結合材として、0.15mm以上のNCLが細骨材として作用し、骨材周辺の遷移帯を密実にしたことにより組織内が密実となったこと、そしてNCLの水和反応により未水和の水分が減少し、乾燥作用により硬化体外部へ逸散し易い硬化体中の水分が減少したためと推察される。

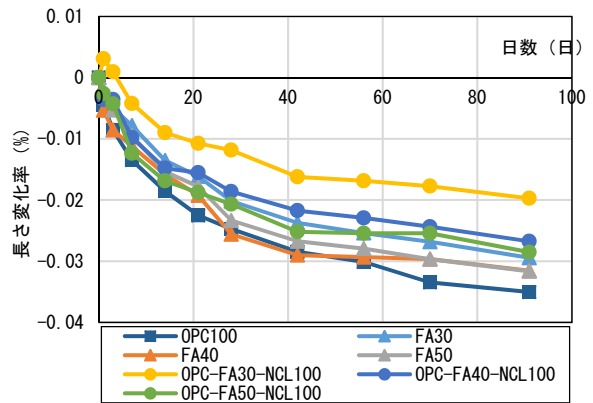


図-10 乾燥による長さ変化率

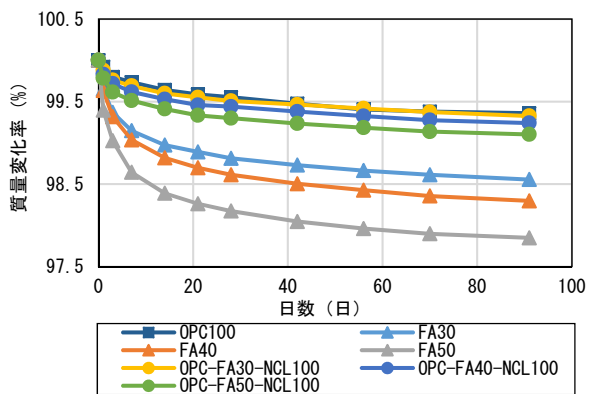


図-11 乾燥による質量変化率

(4) 自己収縮

自己収縮ひずみの変化について、凝結開始から材齢7日までの測定結果を図-12、材齢28日まで結果を図-13にそれぞれ示す。打込み後供試体温度が最大となった時点のひずみを基準としてひずみデータを整理した。図-12より配合OPC100に対して配合FA30は、自己収縮ひずみが大幅に減少した。また、配合OPC-FA30-NCL100、OPC-FA40-NCL100、OPC-FA50-NCL100の3配合のひず

みが配合 OPC100 を比較して、FA 置換率の増加に伴い、減少する傾向がみられた。これらは FA 混和による効果と考えられる。さらに配合 OPC-FA30-NCL100 では FA 置換率が同一である配合 FA30 に対して、材齢 1 日以降の自己収縮ひずみが増加した。要因として NCL 混和により 2.4 (1) と同様に 0.15mm 以下の粒度の NCL が結合材として作用したためと推察される。

図-13 より配合 OPC-FA30-NCL100, OPC-FA40-NCL100, OPC-FA50-NCL100 の材齢 7 日以降の自己収縮ひずみの増加率が、他の NCL 無混和の配合 OPC100, FA30 と比較して大きくなった。要因として、NCL の水和反応によりコンクリート中の水分が失われたためと考えられる。また、NCL を混和した 3 配合 OPC-FA30-NCL100, OPC-FA40-NCL100, OPC-FA50-NCL100 を比較した際、FA 置換率の増加に伴い自己収縮ひずみが減少することが確認できた。一般にフライアッシュの混和によりコンクリートの自己収縮ひずみは減少するとされている。本傾向は、NCL を使用した場合であってもその傾向がみられた。

NCL 混和による初期材齢での自己収縮の低減は確認されたものの材齢 7 日以降のひずみ増加量が大きくなった。そのため、今後ひずみ減少のための検討を行う必要があると考える。

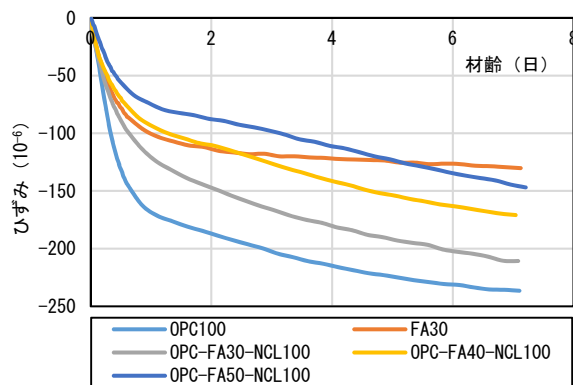


図-12 材齢 7 日までの自己収縮ひずみ

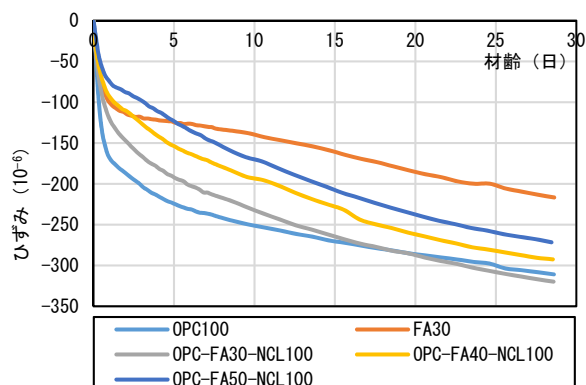


図-13 材齢 28 日までの自己収縮ひずみ

4. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 凍結融解抵抗性は、NCL 混和により FA 置換率 30% 以上であったとしても十分な凍結融解抵抗性を有する。ただし、配合 OPC-FA50-NCL100 においては、他の配合と圧縮強度が比較的低めであったため抵抗性が 20% ほど低下する。
- (2) 促進中性化抵抗性は、圧縮強度が 80N/mm² を超える領域では NCL 混和の有無に関わらず低水粉体比であれば、十分な促進中性化抵抗性を示す。
- (3) 乾燥収縮ひずみについて、NCL 細骨材の混和により組織内が密実となること、NCL の水和反応により未水和水の減少することから、乾燥収縮ひずみが減少する。また FA 置換率の減少に伴い、ひずみの減少割合が大きくなる。
- (4) 自己収縮ひずみは、NCL 混和により材齢 7 日まで減少する。しかし材齢 7 日以降、ひずみ増加率が大きくなる傾向である。ひずみ増加率の増加に関して NCL 混和によるものと考えられ、今後ひずみ低減のため検討が必要である。

謝辞

本研究で使用した各種材料を提供していただいた株式会社鈴木東建、太平洋セメント株式会社および宇都宮大学地域デザイン科学部土木材料研究室に所属し、ともに多くの実験を行った辻拓海氏にここに付記しお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 本田悟・椎葉大和：フライアッシュを大量に使用したコンクリートの諸性状、コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.127-132, 2001
- 2) 村上遥佳ほか：フライアッシュ多量混和モルタル・コンクリートにおける強度発現性遅延改善のための実験的検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1132-1137, 2022
- 3) 田澤栄一ほか：委員会報告「自己収縮研究委員会報告」、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1-10, 1997
- 4) 宮本慎太郎ほか：細骨材として使用したセメントクリンカーがモルタルの物性に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集, Vol.69, No.1, pp.169-175, 2015
- 5) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，pp.153-155