

# 論文 フライアッシュ置換率が膨張コンクリートの性状に与える影響

澤本 駿汰\*1・横井 克則\*2・近藤 拓也\*2・橋村 茂雄\*3

**要旨:** 近年の地球温暖化等により外気温が高くなる日が増加しており、コンクリート工事においては水和発熱に伴うひび割れが懸念される。そこで本研究では、水和発熱や乾燥収縮に伴うひび割れの低減を目的とし、膨張材と FA を併用したコンクリートの性状について検討した。試験結果より、FA 置換率を増加することで、水和発熱の低減、膨張ひずみの増大及び長期強度増進効果が確認された。また、膨張材と FA の併用により、中性化深さの抑制及び乾燥収縮ひずみが低減する傾向が示され、ひび割れ低減対策として有効な結果が示された。

**キーワード:** 膨張材, フライアッシュ, 断熱温度上昇, 乾燥収縮, 耐久性

## 1. はじめに

近年の地球温暖化やヒートアイランド現象等により、外気温が高くなる日が増加している。コンクリートにおいては、打設時のコンクリート温度が上昇するため、水和熱に伴うひび割れの発生やスランプ及び空気量の経時変化が大きくなること等が懸念される。暑中期におけるコンクリート工事については様々な検証がなされており、フライアッシュ(以下、FA)や高炉スラグを多量使用することにより水和発熱を抑制する方策が検討されている。加えて、産業副産物の有効利用の観点からも多量使用が望ましいが、初期強度の低下や中性化速度の増大等が懸念される<sup>1)</sup>。

膨張材はコンクリートが硬化する過程で膨張することにより、収縮に伴うひび割れを低減し、構造物の水密性や耐久性を向上させることができる。また、膨張材自体は水和熱を発するが、セメント及び膨張材の水和を抑制した水和熱抑制型の膨張材も市販化されており、マスコンクリートや暑中期の施工にも適用可能と考えられる。著者らは膨張材と FA を併用したコンクリートにおいて、膨張材種類や使用量が各種耐久性へ与える影響について検討を行った<sup>2) 3)</sup>。しかし、FA 置換率や初期の水和発熱へ与える影響については確認できていない。

そこで本研究では、膨張材と FA の併用が水和発熱や乾燥収縮に伴うひび割れの低減に効果的であると考え、マスコンクリートや暑中期の施工への適用を目的とし、FA 置換率が膨張コンクリートの各種性状へ与える影響について検討を行った。検討項目として、断熱温度上昇特性、拘束膨張特性、圧縮強度、長さ変化、水中凍結融解及び促進中性化の観点から各種試験を実施した。

## 2. 使用材料及び試験方法

### 2.1 使用材料及び配合

本研究の使用材料一覧を表-1 に、配合表を表-2 に示す。本研究では膨張材はマスコンクリート用として市販されている石灰系膨張材を 20kg/m<sup>3</sup> 使用し、海砂との外割り置換とした。なお、膨張材はセメントや膨張材の水和を抑制する水和熱抑制剤が含まれた水和熱抑制型である。セメントは普通セメントを使用し、FA は FA II 種を内割 10%, 20%, 30%置換に設定した。また、FA 置換率 10%の配合を基準として膨張材無混和 (F10-Non)、高炉セメント B 種 (F10-BB)、膨張材内割り (F10-In) の比較検討用 3 配合を加えた、計 6 配合において検討を行った。配合は実構造物で使用することを想定し、膨張材無

表-1 使用材料一覧

材料名	記号	備考
セメント	N	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm <sup>3</sup>
	BB	高炉セメント 密度3.04g/cm <sup>3</sup>
膨張材	Ex	石灰系膨張材(水和熱抑制型) 密度3.16g/cm <sup>3</sup>
フライアッシュ	FA	FAII種 比表面積3820cm <sup>2</sup> /g 密度2.21g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S①	中土佐町産海砂 表乾密度2.58g/cm <sup>3</sup> , F.M.1.96
	S②	高知市産砕砂 表乾密度2.67g/cm <sup>3</sup> , F.M.2.81
粗骨材	G①	南国市産碎石1505 表乾密度2.69g/cm <sup>3</sup> , F.M.6.33
	G②	南国市産碎石2010 表乾密度2.69g/cm <sup>3</sup> , F.M.6.96
AE減水剤	Ad	リグニンスルホン酸系

\*1 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学専攻 (学生会員)

\*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

\*3 大旺新洋(株) 高知土木本店設計積算部次長 (正会員)

表-2 配合表

配合名	W/B %	s/a %	単位量(kg/m <sup>3</sup> )										フレッシュ性状	
			W	C		FA	Ex	S①	S②	G①	G②	Ad	スランプ (cm)	空気量 (%)
				N	BB									
F10	54.9	45.3	165	271	-	30	20	307	502	508	508	2.26	12.5	4.6
F20	53.5	45.1	162	242	-	61		304	499			2.27	11.0	4.5
F30	52.0	45.0	160	216	-	92		307	502			2.31	11.0	4.3
F10-BB	54.0	45.3	162	-	270	30		415	430			2.25	12.0	4.0
F10-In	54.9	46.0	159	241	-	29		328	510			1.89	13.0	4.8
F10-Non	54.5	45.7	162	267	-	30		-	-			2.23	10.5	4.7

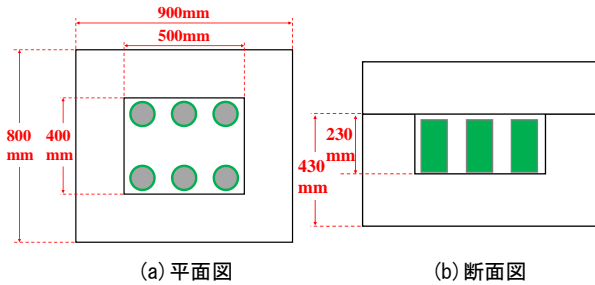


図-1 断熱温度上昇試験概略図

混和配合の 28 日強度の配合強度を 29.1N/mm<sup>2</sup> とし、各配合でこの配合強度を確保するため、予備実験を行う中で W/B や細骨材量は若干異なっている。また、F10-In は他 5 配合で想定配合強度を上回ったため、F10 と同 W/B とし、C+FA=270kg/m<sup>3</sup> を基準に配合設計を行った。骨材はそれぞれ高知県産の骨材を使用し、体積比で細骨材配合比を S①:S②=40:60(F10-In のみ 50:50)、粗骨材配合比を G①:G②=50:50 とした。混和剤はリグニンスルホン酸を主成分とする AE 減水剤を結合材量(C+FA)×0.75%(F10-In のみ 0.70%)の割合で水との内割りにより使用した。また、目標スランプは 12.0±2.5cm、目標空気量は 4.5±1.5%とし、全配合が目標値を満たす結果となった。

## 2.2 簡易断熱温度上昇試験

簡易断熱温度上昇試験の概略図を図-1 に示す。供試体はφ100×200mm のブリキ製の円筒型枠に打設を行い、水分の逸散を防ぐために供試体上面を密閉した。発泡スチロール容器内に供試体を設置し、発泡ビーズを容器に敷き詰め、室内に静置する簡易的な断熱温度上昇試験とした。また、一つの容器内に 2 配合 6 供試体を設置し、供試体同士が温度の影響を受けないよう、可能な限り距離を離して静置した。温度測定は、供試体中心部に熱電対を配置し、一時間毎の測定値を平均した。

## 2.3 拘束膨張試験

拘束膨張試験は JCI-S-009 に準じて実施した。供試体はφ100×200mm のブリキ製の円筒型枠に打設し、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の室内で膨張ひずみの測定を行った。予め型枠表面にひずみゲージを貼付し、供試体

の水分蒸発を防ぐため、上面をプラスチックフィルムで密閉し、封緘状態とした。測定は同一配合に対して 3 供試体を使用し、1 時間毎の測定値を平均した。なお、この試験の適用範囲は「打ち込み直後から封かん養生された膨張コンクリートの膨張試験方法」であるため、膨張材混和配合にて試験を実施した。

## 2.4 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じて実施した。φ100×200mm の円柱供試体を打設後 1 日で脱型し、その後 20±2℃の水中養生槽で所定材齢まで養生を行った。材齢 7、28 及び 91 日で測定を行い、3 供試体の測定値を平均した。

## 2.5 長さ変化試験

長さ変化試験は JIS A 1192-2 (コンタクトゲージ法) に準じて行った。100×100×400mm の角柱供試体を打設後 1 日で脱型し、その後 20±2℃の水中養生槽で材齢 7 日まで養生を行った。打設面を側面とした裏表にゲージプラグを貼付し、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の室内で静置した。基長測定後、経過日数 7、14、28、56、91、126 及び 182 日で測定を行った。

## 2.6 促進中性化試験

促進中性化試験は JIS A 1171 に準じて実施した。100×100×400mm の角柱供試体を打設後 1 日で脱型し、その後 20±2℃の水中養生槽で材齢 28 日まで養生を行い、材齢 56 日まで温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の室内で静置した。角柱供試体の打設面及びその裏面並びに 100×100mm の正方形面 2 面の計 4 面をアルミニウム箔テープでシールし、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%、二酸化炭素濃度 5±0.2%の促進中性化試験槽に静置した。促進期間 7、28、56、91、126、154 及び 182 日で供試体を切断後、フェノールフタレイン液を用いて、中性化深さの測定を行った。

## 2.7 水中凍結融解試験

凍結融解試験は JIS A 1148(A 法)に準じて実施した。100×100×400mm の角柱供試体を打設後 1 日で脱型し、その後 20±2℃の水中養生槽で材齢 28 日まで養生を行った。30 サイクル毎にたわみ振動の一次共鳴周波数及び質量

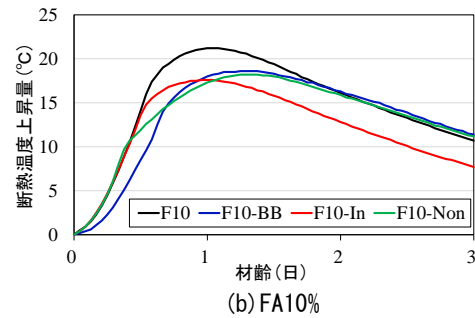
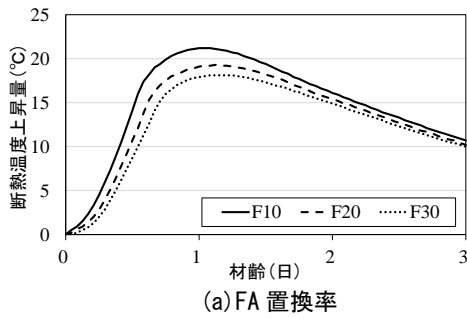


図-2 打設温度に対する断熱温度上昇量

の測定を行い、300 サイクルまで実施した。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 簡易断熱温度上昇

打設温度に対する断熱温度上昇量を図-2 に示す。FA 置換率で比較した場合、FA 置換率の増加に伴い発熱開始時間は遅延し、最高温度は低下している。FA 置換率増加に伴うセメント量の低減により、水和熱の抑制効果が確認された。同一 FA 置換率で比較した場合、F10 が最も高い上昇温度を示している。これは、膨張材無混和の場合、膨張材の水和発熱が生じないため水和発熱が小さく、膨張材内割りの場合、セメント量低減による水和発熱の低下が考えられる。

セメント種類で比較すると、高炉セメント配合の発熱開始時間は遅延し、断熱温度が小さく推移しているが、高炉セメントを使用した配合では、近年の高炉スラグの微粉末化やスラグ混合量の低下に伴い、従来の高炉セメントと比べて水和発熱が大きくなるといった報告<sup>4)</sup>もあるため、製品によって異なる傾向が得られる可能性がある。また、F10-In は発熱の開始時間及び最高温度までの発熱時間は最も早い、最高温度は最も低く推移した。

#### 3.2 拘束膨張

膨張ひずみの経時変化を図-3 に示す。FA 置換率で比較した場合、FA 置換率の増加に伴い、膨張ひずみが大きくなる傾向が示された。また、FA 置換率の増加に伴い、膨張の開始時間は遅延している。既往の研究より、FA を置換することで膨張ひずみが大きくなる傾向や凝結遅延により膨張ひずみが大きくなる傾向が示されている<sup>5)</sup>。FA 置換率の増加に伴い、凝結時間が遅延し、膨張ひずみが大きくなったことが考えられる。また、コンクリート標準示方書では収縮補償用の膨張材の膨張ひずみは材齢 7 日で 150~250 $\mu$  と示されているが、3 配合は材齢 1 日時点で 250 $\mu$  を超え、FA20%及び FA30%は材齢 7 日で 300 $\mu$  を超える膨張ひずみが計測されている。膨張材と FA を併用することにより、規定の膨張ひずみを超える値が計測されたと考えられる。加えて、FA 置換率の増加により、セメント量に対する膨張材の割合は増加している

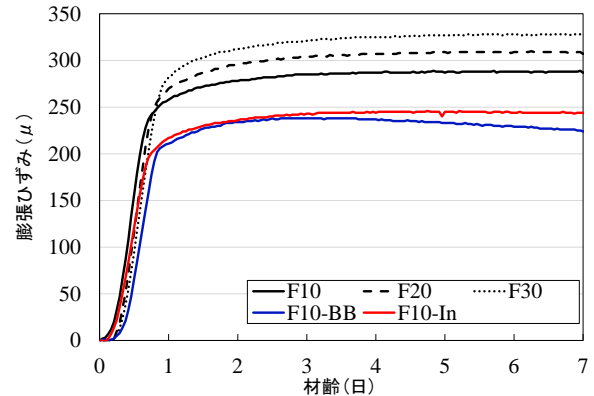


図-3 膨張ひずみの経時変化

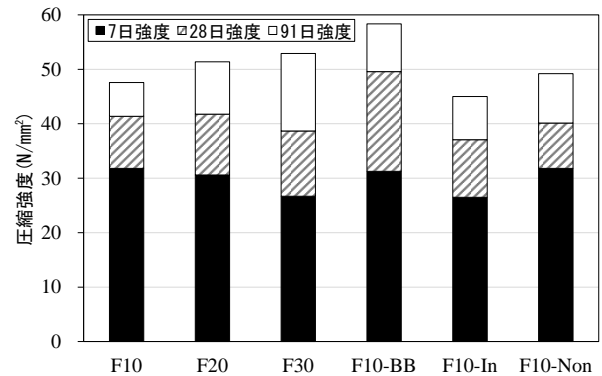


図-4 圧縮強度試験結果

ことから膨張ひずみが大きくなったことが考えられる。一方で、F10-In ではセメント量が低減したにも関わらず膨張ひずみが小さくなっていることや既往の研究では、セメント量が増加した場合に膨張ひずみが大きくなったケースもある<sup>3)</sup>。

また、高炉セメント配合では膨張ひずみが小さくなる傾向が示された。これは膨張材の  $\text{Ca(OH)}_2$  生成に必要な生石灰を高炉スラグが消費し、膨張ひずみが小さくなったと考えられる<sup>6)</sup>。また、他配合は材齢 7 日で膨張ひずみの最大値を示しているのに対して、高炉セメント配合では材齢 3 日程度で膨張ひずみの最大値を示し、材齢 7 日ではひずみが収縮側に推移している。加えて、簡易断熱温度上昇試験における発熱の開始時間と膨張の開始時間には相関があり、発熱が遅いほど膨張ひずみの開始時

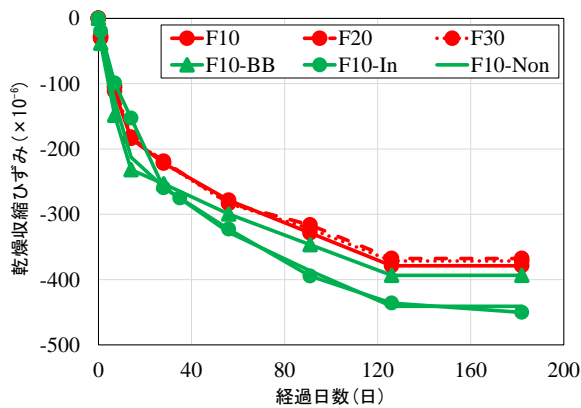


図-5 乾燥収縮ひずみ

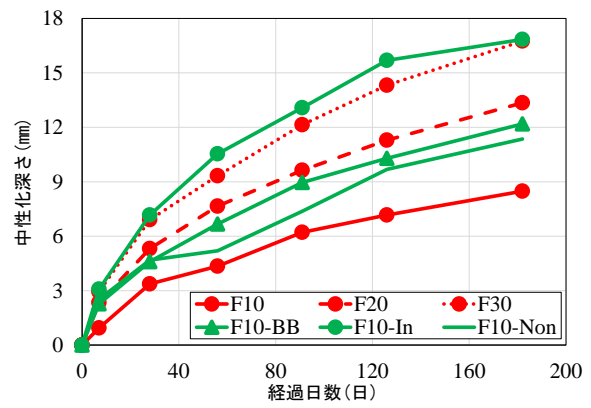


図-6 促進中性化深さ

間は遅延する傾向が示された。

### 3.3 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-4に示す。FA置換率で比較した場合、FA置換率10%と20%は7日、28日強度において同程度であるが、おおよそFA置換率の増加に伴い初期強度は低下し、長期強度は増加した。これはセメント量の低減並びにFAのポズラン反応が影響したと考えられる。同一FA置換率で比較した場合、F10-Inは結合材量が最も少なく、初期強度、長期強度が小さくなる傾向を示した。膨張材の有無で比較した場合、初期強度及び長期強度は同程度であり、膨張材の混和が圧縮強度へ及ぼす影響は少ない。

一方で、高炉セメント配合は、各材齢において最も強度が高い傾向を示し、特に28日強度の増進率が大きい傾向を示した。既往の報告では、膨張材は高炉スラグ及び高炉スラグを混合したセメント中のベースセメントの水和反応を促進し、エトリンサイト系の膨張材の内、特に遊離石灰を多く含有した系で水和反応が促進したことを示している<sup>7)</sup>。本研究でも同様に、膨張材が高炉セメントの刺激材として作用し、強度増加に寄与したと考える。また、図-3に示す膨張ひずみが高炉セメント配合では小さくなっていることから、材齢初期で膨張材と高炉セメントが反応し、材齢28日までの間に潜在水硬性によるC-S-Hゲルが生成され、強度増加に繋がったと考えられる。また、初期強度はF10と同程度であるが、発熱開始時間は遅延し、断熱温度は小さく推移しているため、初期強度を低下させることなく初期の水和発熱を抑制できる可能性があると考えられる。

### 3.4 長さ変化

乾燥収縮ひずみの推移を図-5に示す。FA置換率で比較した場合、乾燥収縮ひずみは同程度である。FA置換率の増加に伴い、乾燥収縮ひずみが低減することが考えられるが、本研究ではそのような傾向は確認できない。その要因として、水中養生期間が材齢7日までと短く、ポズラン反応による組織の緻密化が十分に得られず、FA置

換率が増加した場合でも同程度の乾燥収縮ひずみとなったと考えられる。しかし、図-4に示す圧縮強度試験結果では、FA置換率の増加に伴いポズラン反応による長期強度の増進が確認されており、水中養生を長期間行うことでFA置換率の増加に伴う乾燥収縮の低減は得られると推察する。

膨張材の有無で比較した場合、膨張材を使用した配合で乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向が示された。既往の報告でも同様の傾向が示されており<sup>3), 8)</sup>、膨張材は膨張ひずみに伴う収縮低減効果に加え、膨張後の乾燥収縮低減にも寄与していると考えられる。一方で、膨張材内割配合では、膨張材無混和と同程度の乾燥収縮ひずみが示された。全配合の中でも最も結合材量が少ないことが起因し、組織の緻密化が乏しかったことで水分の逸散が大きくなったと考えられる。加えて、セメント種類で比較した場合、F10とF10-BBでは同程度の乾燥収縮ひずみが示されている。一方で、高炉セメントでは材齢28日以降の圧縮強度が増進していることから、FA置換率と同様に長期間の水中養生を行うことで、高炉セメントの潜在水硬性に伴う組織の緻密化により乾燥収縮の低減効果が得られると考えられる。

### 3.5 促進中性化

中性化深さの推移を図-6に示す。FA置換率で比較した場合、FA置換率の増加に伴い、中性化深さが大きくなる傾向が示された。FA置換率の増加によりセメント量が減少し、pHが低下したためと考えられる。一方で、同一FA置換率で比較するとF10が最も中性化深さが小さく推移している。既往の研究では、膨張材がCa(OH)<sub>2</sub>を生成することで、同一FA置換率では膨張材混和配合で中性化深さが小さくなる可能性が示された<sup>3)</sup>。本研究でも同様に、F10はF10-Nonの中性化深さを下回っており、膨張材がpHの維持に寄与していると考えられる。

また、膨張材無混和のF10-Nonは高炉セメント配合及びFA置換率20%配合と同程度の中性化深さを示した。既往の研究では、高炉セメントにCaO含有量を高めた膨

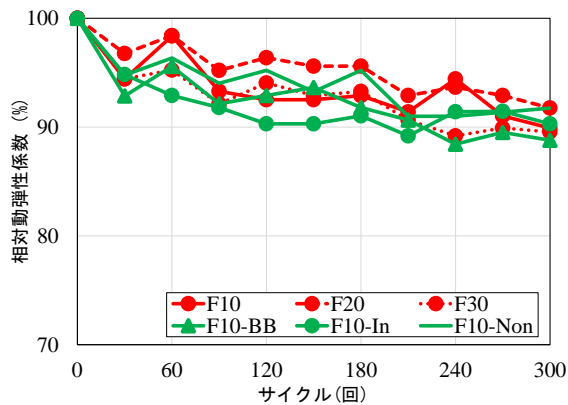


図-7 凍結融解試験における相対動弾性係数

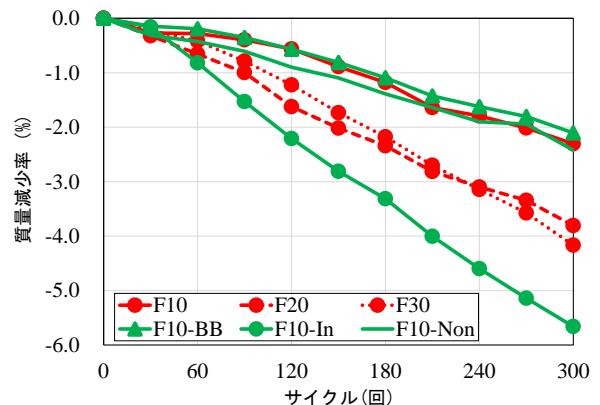


図-8 凍結融解試験における質量減少率

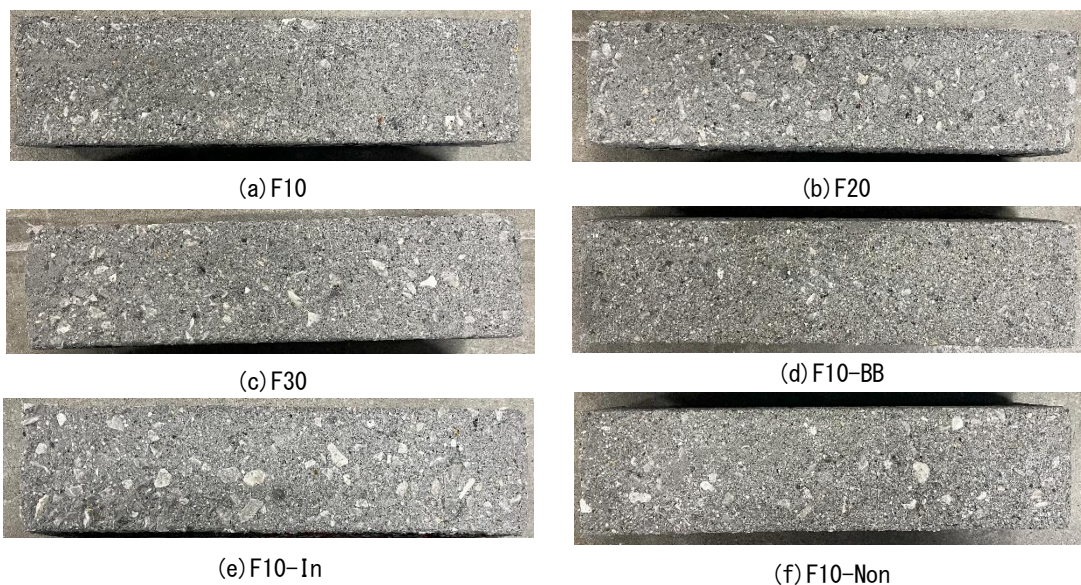


写真-1 300 サイクル終了後の供試体外観

張材を混和することで中性化が抑制される傾向が示されている<sup>9)</sup>。その一方で、高炉セメントは普通セメントと比較して、ポルトランドセメント量の減少に伴う  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  生成量の減少や高炉スラグの水和反応に伴う  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の消費により中性化深さが大きくなることが考えられる。そのため、セメント種類で比較した場合は高炉セメント配合の中性化深さが大きい、膨張材を混和することで、F10-Non と同程度の中性化深さに保たれたと考える。一方で、高炉セメントが膨張材の  $\text{CaO}$  を消費し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の生成を阻害したために膨張ひずみが小さく推移したと考えれば、高炉セメントは普通セメントと比較して膨張材混和による中性化深さの改善効果は小さいと推察する。

また、F10-In が最も中性化深さが大きく、FA 置換率 30%配合と同程度の中性化深さを示した。この要因として、F10-In は結合材量が最も少なく、強度も最も小さいため、セメント量低減に伴う pH の低下に加え、コンクリート内の組織の緻密化が最も乏しく、 $\text{CO}_2$  の侵入阻止

性が低下したためと考えられる。

### 3.6 耐凍害性

凍結融解試験の相対動弾性係数の推移を図-7 に示す。本試験の結果より、全配合が相対動弾性係数 90%前後で推移している。FA を使用することで AE 剤のエントレインドエアが吸着され、空気量の減少及び気泡間隔係数の増加により耐凍害性が悪化することが懸念されるが、本研究の範囲では全配合が耐凍害性を有していると考えられる。

凍結融解試験の質量減少率の推移を図-8 に示す。FA 置換率で比較した場合、FA20%及び FA30%の質量減少率が大きい傾向にある。また、F10-In は質量減少率が最も大きい傾向が示された。この要因として、強度が最も小さく、コンクリート表面のスケーリングが増加したためと考える。加えて、セメント種類や膨張材の有無で比較した場合、同程度の質量減少率であり、フレッシュ時の空気量が 4.0~4.5%程度の範囲であれば膨張材混和や高炉セメントが耐凍害性に与える影響は少ないと考えられ

る。

写真-1に300サイクル終了時の供試体の外観を示す。相対動弾性係数は全配合が90%前後で推移しており、外観上は供試体が大きく劣化したことは確認できない。しかし、図-8に示す質量減少率が大きい配合では、粗骨材が剥き出しとなっている部分が多く、コンクリート表面のスケーリングが進行していることが確認できる。

#### 4. まとめ

本研究では、FA置換率及びFA置換率10%で配合条件を変化させたコンクリート供試体を作製し、断熱温度、膨張特性、強度特性及び各種耐久性に関する抵抗性について検討を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 簡易断熱温度上昇試験結果より、FA置換率の増加に伴い、発熱開始時間は遅延し、断熱温度上昇量は低下した。また、同一FA置換率では膨張材内割り及び高炉セメントの使用により、断熱温度上昇量は低下した。
- (2) 拘束膨張試験結果より、FA置換率の増加に伴い膨張ひずみは増大した。また、膨張材の内割使用及び高炉セメントの使用により膨張ひずみは小さく推移した。
- (3) 圧縮強度試験結果より、FA置換率の増加に伴い初期強度は低下し、長期強度は増進した。また、高炉セメントでは各材齢で最も高い強度を示し、特に28日強度で著しく強度が増加した。
- (4) 長さ変化試験結果より、膨張材を外割りで混和した場合、無混和と比べて乾燥収縮ひずみは低減した。また、FA置換率が増加した場合、乾燥収縮ひずみは同程度であった。
- (5) 促進中性化試験結果より、FA置換率の増加に伴い中性化深さが増大した。また、膨張材を混和することで中性化深さは小さく推移した。
- (6) 水中凍結融解試験結果より、相対動弾性係数はFA置換率及び膨張材の有無に関わらず同程度の傾向を示した。一方で、質量減少率は膨張材の内割使用及びFA置換率の増加により大きくなった。

以上、本研究ではFAの使用により、水和発熱の低下、膨張ひずみの増大及び長期強度の増進並びに膨張材混和による乾燥収縮の低減及び中性化の抑制効果が確認され、

ひび割れ低減対策として有効な結果が示された。一方で、FA30%及び膨張材内割配合では強度及び耐久性が損なわれる傾向が示されたため、これらを今後の検討課題とする。

#### 参考文献

- 1) 和田真平, 阿部道彦, 柳啓, 藤田克己: フライアッシュコンクリートの中性化, 水密性および遮塩性に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.121-126, 1998.7
- 2) 澤本駿汰, 門田基博, 横井克則, 近藤拓也, 下村昭司, 橋村茂雄: 膨張材の種類や使用量がフライアッシュコンクリートに与える影響, 土木学会第78回年次学術講演会, V-582, 2023.9
- 3) 澤本駿汰, 横井克則, 近藤拓也, 橋村茂雄, 下村昭司: 膨張材の種類がフライアッシュコンクリートの耐久性に与える影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.24, No.1, pp.197-202, 2024.10
- 4) 二戸信和, 廣島明男, 大友健, 宮澤伸吾: スラグ粒度と化学成分を調整した低発熱高炉セメントコンクリートおよび膨張コンクリートの発熱・強度・体積変化, 第60回セメント技術大会講演要旨集, pp.236-237, 2006.5
- 5) 竹下永造, 長塩靖祐: フライアッシュと膨張材を併用したコンクリートの拘束膨張特性, 土木学会第70回年次学術講演会, V-492, pp.983-984, 2015.9
- 6) 細田暁: 膨張コンクリートの技術の現状と今後の展望, コンクリート工学, Vol.49, No.5, pp.65-69, 2011.5
- 7) 安達丈, 新大軌, 森泰一郎: 高炉スラグ微粉末および高炉セメントの水和反応に及ぼす刺激材としての各種膨張材の効果, セメント・コンクリート論文集, Vol.74, No.1, pp.51-58, 2020.3
- 8) 佐川孝広, 名和豊春: 膨張材を混和した高炉セメントの水和反応, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.181-186, 2009.7
- 9) 盛岡実, 二階堂泰之, 久保田賢, 浅賀喜与志: 各種刺激剤を混和した高炉スラグセメント硬化体の中性化, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.11, pp.741-746, 1996.7