

# 論文 フライアッシュと早強ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの強度および収縮特性

齋藤 隆明\*1・菅田 紀之\*2・田中 章梧\*1

**要旨:** 早強ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの強度および収縮特性に及ぼすフライアッシュの影響を明らかにするために、圧縮強度試験、収縮試験、水和反応に関する試験を実施した。また、普通ポルトランドセメントのみを用いたものとの比較も行った。水結合材比は 30%、フライアッシュの置換率は 0% から 30%まで変化させた。その結果、フライアッシュの増加により圧縮強度および自己収縮は減少、乾燥収縮は増加したが、早強ポルトランドセメントを用いることで、フライアッシュ置換率 10%の強度は普通ポルトランドセメントのみを用いたものより大きくなり、自己収縮は増加、乾燥収縮は低減することがわかった。

**キーワード:** 高強度コンクリート, フライアッシュ, 早強ポルトランドセメント, 強度, 自己収縮, 乾燥収縮

## 1. はじめに

近年、環境問題への配慮として CO<sub>2</sub> 排出量を削減するカーボンニュートラルが重要視され、セメントの一部をコンクリート用混和材で置換することで、セメントの使用量を減少させることが求められている。コンクリート用混和材の一つであるフライアッシュは石炭火力発電所から排出される石炭灰の一種であり、産業副産物として様々な用途に使用されている。中でもセメント材料としての使用割合が多く、フライアッシュ使用量の約 7 割を占めている。しかしながら、冒頭で述べたカーボンニュートラルへの対応のためセメント生産量は今後減少していくことが予想され、フライアッシュの使用量もそれに従い減少し、現状のままではフライアッシュ廃棄量が増加していくことも予想される。そのため現在数%の使用割合であるセメント混合材・混和材としての利用を増やすことで、フライアッシュ再利用化を促進することが今後重要となってくると推察される。また、セメントを多く用いる高強度コンクリートにおいては置換による CO<sub>2</sub> 排出量削減およびフライアッシュ再利用効果がより期待できる。

フライアッシュを混和材として用いたコンクリートは、水和発熱の抑制、ワーカビリティの向上、アルカリシリカ反応の抑制などの効果が期待できる。しかしながら、初期強度発現の遅延や中性化抵抗性の低下などを引き起こすことが知られている<sup>1)</sup>。初期強度の改善については、早強ポルトランドセメントを用いることにより材齢 7 日程度までの強度が普通ポルトランドセメントのみを用いた場合よりも同程度以上になるという研究<sup>2),3)</sup>がある。一方で、水結合材比が 30%以下の高強度コンクリートに関する研究としては船本らの研究<sup>4)</sup>や深川らの研究<sup>5)</sup>が行われている程度であった。その後、著者らは水結合材比

表-1 使用材料

材料(記号)	特性
普通ポルトランドセメント(Cn)	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 3,220cm <sup>2</sup> /g 圧縮強さ 7d: 47.6 N/mm <sup>2</sup> 28d: 63.4 N/mm <sup>2</sup>
早強ポルトランドセメント(Ch)	密度: 3.14g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 4,660cm <sup>2</sup> /g 圧縮強さ 7d: 60.4 N/mm <sup>2</sup> 28d: 70.1 N/mm <sup>2</sup>
フライアッシュ(FA)	JIS II 種 密度: 2.29g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 4170cm <sup>2</sup> /g
細骨材(S)	陸砂 表乾密度: 2.67g/cm <sup>3</sup>
粗骨材(G)	碎石 2005 表乾密度: 2.66g/cm <sup>3</sup>
高性能 AE 減水剤(SP)	ポリカルボン酸系
消泡材(AF)	ポリエチレングリコール系

を 30%以下としてフライアッシュを混和した高強度コンクリートに関する検討を行ってきた<sup>6)-8)</sup>。その研究は普通ポルトランドセメントを用いたものであり、フライアッシュ置換率の増加に伴い圧縮強度は低下、自己収縮ひずみは減少、乾燥収縮ひずみは増加することなどが分かった。フライアッシュ混和による初期強度低下は大きく、改善する必要がある。

本研究ではフライアッシュを混入した高強度コンクリートにおける初期強度発現の遅延に対し、早強ポルトランドセメントを用いて改善することを目的とした。検討は、強度発現および収縮に及ぼすフライアッシュの影響について行った。また、水和反応の観点から検討を行う

\*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科環境創生工学系専攻 (学生会員)

\*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科くらし環境系領域准教授 博士 (工) (正会員)

表-2 配合

配合名	W/B (%)	FA/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								スランプフロー (cm)	空気量 (%)
				W	Cn	Ch	FA	S	G	SP	AF		
NFA00	30	0	49	165	550	/	0	852	883	2.75	0.00825	57	2.9
HFA00		0		165	/	550	0	850	882	2.97	0.00891	47	2.4
HFA10		10		165	/	495	55	842	873	2.95	0.00884	52	1.5
HFA20		20		165	/	440	110	833	864	2.88	0.00865	55	1.7
HFA30		30		165	/	385	165	825	855	2.77	0.00832	55	1.9

ため未水和水試験およびX線回折試験を行った。

## 2. 実験の概要

### 2.1 使用材料

本研究において高強度コンクリートの製作に使用した材料を表-1に示す。結合材には普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントおよびフライアッシュを用いた。使用したフライアッシュはJIS A 6201のII種規格を満たすものである。細骨材として陸砂、粗骨材として砕石2005を用いた。また、流動性を確保するためにポリカルボン酸系の高性能AE減水剤、空気量を調整するためにポリエチレングリコール系の消泡剤を用いた。

### 2.2 配合

本研究に用いた高強度コンクリートの配合を表-2に示す。水結合材比(W/B, B=C+FA)を30%とし、普通ポルトランドセメント使用についてはフライアッシュ置換率(FA/B)0%のみ、早強ポルトランドセメント使用に対し置換率を0%, 10%, 20%および30%の4種類、計5ケースに設定した。全ケースにおいて単位水量を165kg/m<sup>3</sup>、FA/B=0%において粗骨材絶対容積が0.33m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>程度になるように細骨材率を49%とし、スランプフローおよび空気量の目安を50cm, 1.5%として配合を決定した。スランプフローおよび空気量の測定結果は表-2に示す。なお、各配合をNFA00, HFA00, HFA10, HFA20, HFA30で表す。

### 2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験はJIS A 1108に従って行った。試験には直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用いた。試験材齢は7日, 28日, 91日とし、養生は脱型まで1日間20°Cの封かん養生とし、脱型後は20°C水中養生とした。試験は3本の供試体で行い、それら結果の平均値を圧縮強度とした。なお供試体の打込み面は研磨機による研磨仕上げとした。

### 2.4 自己収縮試験

自己収縮試験には図-1に示すような、直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用い、中央にゲージベース長120mmの埋込型ひずみゲージを配置して測定を行った。また、供試体中央部に熱電対を配置し温度測定を行った。

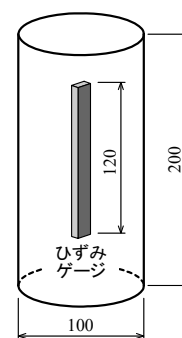


図-1 収縮試験供試体

供試体は練り混ぜ直後に型枠に打ち込み、上面をポリエチレンシートにより密閉し封かん状態とした。ひずみの測定は密閉後から開始し、凝結始発を起点としたひずみ変化を自己収縮ひずみとしている。測定本数は4本とし、測定値の平均を用いた。なお、本研究では型枠に鋼製缶を用い、缶とコンクリートの間に摩擦低減等の処理を行っていないが、JCI-SAS2-2に従った測定結果と大きな差はないことを確認している。

### 2.5 乾燥収縮試験および質量変化試験

乾燥収縮試験には、自己収縮試験と同様に直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用い、中央にゲージベース長120mmの埋込型ひずみゲージを配置して測定を行った。20°Cで材齢7日まで封かん養生したのち供試体を脱型し、供試体の上下面にアルミテープを貼り付け、供試体側面のみを乾燥面として試験を行った。試験環境は温度20°C、相対湿度60%であり、2本の供試体で乾燥収縮ひずみを測定し、その平均値を用いて検討した。測定期間は91日間とした。なお、乾燥収縮に影響を及ぼす体積表面積比は100×100×400mmの角柱供試体と同一であるが、円柱の収縮ひずみのほうが若干大きくなることを確認している。質量変化試験は乾燥収縮試験と同様の条件で行い、乾燥開始0日, 1日, 3日, 7日, 以後7日ごとに質量を測定し、質量減少率を算出した。

### 2.6 未水和水試験

未水和水試験では、表-2の配合から骨材を除いたセメントペーストを用いた。試験用の試料はモルタルミキサーで練り混ぜ、保存袋を用いて20°Cの恒温室に静置、

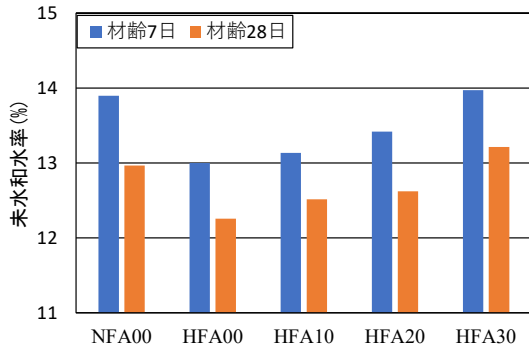


図-2 未水和水率

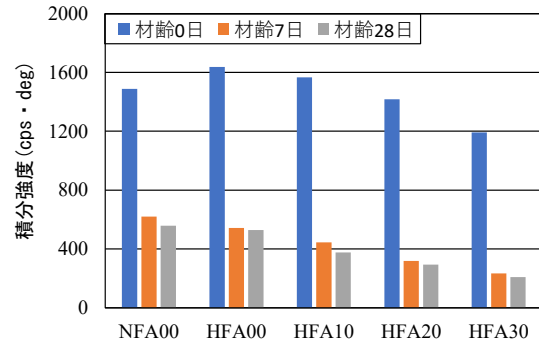


図-3 C<sub>3</sub>S+C<sub>2</sub>Sの積分強度

3時間経過後、練り直しを行い、試験材齢ごとの保存袋に150g程度詰め、厚さ5mm程度の板状に整形した後、封かん状態で20°Cの恒温室で養生を行った。試験は材齢7日および28日において実施し、板状セメントペーストを20g程度に分割したものを105°Cで24時間加熱し、式(1)を用いて乾燥前後の質量減少率を求め未水和水率とした。なお、三枚の試料を用いて試験を行い、それらの平均値を試験結果とした。

$$\text{未水和水率(\%)} = 100 \frac{\Delta M}{M_0} \quad (1)$$

ここで、 $M_0$ ：乾燥前の質量

$\Delta M$ ：乾燥後の質量減少量

## 2.7 X線回折試験

X線回折試験では未水和水試験と同様な方法で作製した板状セメントペーストを用いた。試験は材齢7日および28日において実施し、板状セメントペーストをハンマーにより砕きアセトンにより水和停止したものを試料とし、それを45 $\mu\text{m}$ 以下に粉碎した後、粉末X線回折試験に用いた。測定条件は、使用X線CuK $\alpha$ 、管電圧40kV、管電流30mA、測定速度20deg/min、測定ステップ0.02degとした。得られた結果からセメント化合物の種類を同定し、積分強度を求め、水和反応について検討した。なお、積分強度は三試料の平均とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 水和反応

図-2に未水和水試験の結果を示す。フライアッシュのポズラン反応はほとんど水を消費しない反応であり、未水和水率の変化は主にセメントの水和反応の結果によるものである。材齢0日の未水和水率は、 $W/(W+C+FA)$ で算出されるため、どの配合も23.08%となる。早強ポルトランドセメントを用いたものに注目すると、材齢7日、28日どちらにおいても、フライアッシュ置換率の増加に伴い未水和水率が増加していることがわかる。これは、フライアッシュ置換率の増加によりセメント量が減少し、見かけ上の水セメント比は増加したものの、フライアッ

シュも存在しているためセメント粒子のまわりの水の量の増加は大きくなく、セメント量に応じた水和反応量の大小関係になったと考えられる。また、材齢7日から28日にかけての未水和水率の減少量(反応水量)はフライアッシュ置換率にかかわらずほぼ同値であることにより、この期間におけるセメントの反応量には大きな差がなかったといえる。次に早強ポルトランドセメントを用いたものと普通ポルトランドセメントを用いたものを比較すると、材齢7日、28日どちらにおいてもHFA00、HFA10、HFA20の未水和水率がNFA00よりも小さくなっており、早強ポルトランドセメントの水和反応が普通ポルトランドセメントよりも促進されていることがわかる。また、HFA30についてはセメント量がNFA00の70%であるにもかかわらず、HFA30の未水和水率はNFA00と同程度になっている。なお、材齢7日から28日にかけての反応量はNFA00が最も大きいことがわかる。

図-3にC<sub>3</sub>SとC<sub>2</sub>Sの積分強度の和を示す。積分強度は2 $\theta$ =32.0°~32.7°の間にあるC<sub>3</sub>SとC<sub>2</sub>Sの複数のピークを合計したものである。C<sub>3</sub>SとC<sub>2</sub>Sはこの回折角の範囲において強い回折強度を示す。しかしながら複数の回折ピークが接近しており、分離して積分強度を求めるのが困難であったため、範囲を定めて積分強度を求めた。材齢0日とはセメントとフライアッシュを混合した試料の値で加水していないものである。早強ポルトランドセメントを用いたものに注目すると、材齢0日から7日までの積分強度の減少量(反応量)は、フライアッシュ置換率の増加に伴い少なくなっている。セメント量が減少したことが要因の一つとなり、水和反応量が少なくなったと考えられる。材齢7日から28日までの積分強度の減少量はフライアッシュ置換率による大きな差はない。次に早強ポルトランドセメントを用いたものと普通ポルトランドセメントを用いたものを比較すると、材齢0日から7日までの積分強度の減少量(反応量)はHFA00、HFA10、HFA20においてNFA00より多くなっており、未水和水率の結果で述べたように早強ポルトランドセメントの水和反応が普通ポルトランドセメントよりも促進されている

結果といえ、材齢 0 日から 28 日までの反応量についても同様のことがいえる。また、HFA30 については NFA00 と同程度の減少量である。材齢 7 日から 28 日までの積分強度の減少量は NFA00 が他よりも大きく、この期間の水和反応量は普通ポルトランドセメントの方が早強ポルトランドセメントよりも多くなっているといえる。

これらの結果から早強ポルトランドセメントの効果としては、普通ポルトランドセメントと比較して、材齢 7 日までの反応量は多くなる。材齢 7 日以降の反応量は少ないものの、材齢 28 日までのトータルの反応量は多くなる。またフライアッシュ置換率の増加によって水和反応量は減少するが、HFA30 と NFA00 がほぼ同様の反応量になる。

### 3.2 圧縮強度

図-4 に材齢と圧縮強度の関係、表-3 に HFA00 と他の HFA 配合との圧縮強度差、表-4 に NFA00 と HFA 配合との圧縮強度差を示す。早強ポルトランドセメントを用いたものに着目すると、全ての材齢においてフライアッシュ置換率の増加に伴い圧縮強度が減少していることがわかる。これはセメント量の減少に伴う水和反応量の減少によるものと推察され、水和反応状況と一致する。また、表-3 の HFA00 と他の HFA 配合との圧縮強度差から、材齢 28 日および 91 日において HFA00 と HFA10、HFA20、HFA30 との圧縮強度差が縮まっていることがわかる。特に 91 日の強度差の縮小が顕著であり、材齢 7 日から 28 日にかけての水和反応量はほぼ同様であることから、フライアッシュのポゾラン反応の効果によるものと考えられる。しかしながら、セメントの水和反応と比較するとフライアッシュのポゾラン反応は緩慢であったことにより、HFA00 の強度よりも小さいままであったといえる。次に早強ポルトランドセメントを用いたものと普通ポルトランドセメントを用いたものを比較すると、材齢 7 日強度において HFA10 および HFA20 の強度が NFA00 を超えていること、材齢 28 日強度において HFA10 が NFA00 と同程度であるものの HFA20 は若干小さいことがわかる。水和反応状況から、HFA30 と NFA00 がほぼ同様の水和反応量であることがわかったが、HFA30 の強度は 16.7N/mm<sup>2</sup> 小さくなっている。また材齢 91 日強度において、HFA10、の強度が NFA00 を超え、HFA20 および HFA30 と NFA00 の強度差が縮まっている。これはフライアッシュのポゾラン反応の効果と考えられる。

### 3.3 自己収縮

図-5 に自己収縮ひずみの結果を示す。早強ポルトランドセメントを用いたものに着目すると、フライアッシュ置換率が高いほど自己収縮が低減されていることがわかる。水和反応状況から、フライアッシュ置換率の増加に伴い水和反応量は減少するため、その影響により自己

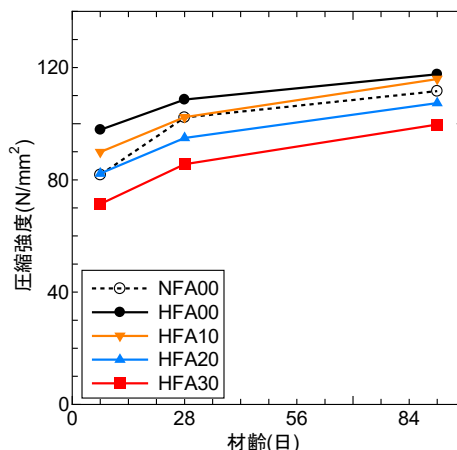


図-4 圧縮強度試験結果

表-3 HFA00 と HFA\*\*との圧縮強度差 (N/mm<sup>2</sup>)

	HFA10 -HFA00	HFA20 -HFA00	HFA30 -HFA00
材齢 7 日	-8.0	-15.6	-26.5
材齢 28 日	-6.3	-13.7	-23.1
材齢 91 日	-1.7	-10.3	-17.9

表-4 NFA00 と HFA\*\*との圧縮強度差 (N/mm<sup>2</sup>)

	HFA00 -NFA00	HFA10 -NFA00	HFA20 -NFA00	HFA30 -NFA00
材齢 7 日	16.1	8.1	0.4	-10.5
材齢 28 日	6.4	0.1	-7.3	-16.7
材齢 91 日	6.0	4.3	-4.2	-11.9

収縮ひずみは低減したと考えられる。次に早強ポルトランドセメントを用いたものと普通ポルトランドセメントを用いたものを比較すると、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみが、すべての配合において NFA00 より大きくなっていることがわかる。水和反応状況から、早強ポルトランドセメントにより水和反応量が増加しているため、HFA00 の自己収縮ひずみより大きな値を示したと考えられる。また HFA30 は NFA00 より大きいものの近い値であるといえ、水和反応状況も同様であった結果によるものと推察される。

### 3.4 乾燥収縮

図-6 に乾燥収縮試験の結果を示す。本研究では乾燥収縮を毛細管張力説に基づき、乾燥環境条件の他、空隙構造の粗密、コンクリート内部の未水和水の量、セメントペーストの剛性などが影響するとして考察する。早強ポルトランドセメントを用いたものに着目すると、フライアッシュ置換率が高いほど乾燥収縮が増加しているのがわかる。水和反応状況からフライアッシュ置換率が高いほど材齢 7 日までの水和反応が減少していたため、乾燥開始時にコンクリート内の未水和水が多く残ったことが影響していると考えられる。また、材齢 7 日の強度が減

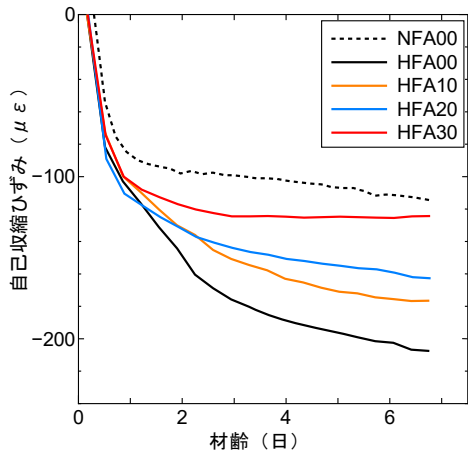


図-5 自己収縮ひずみ

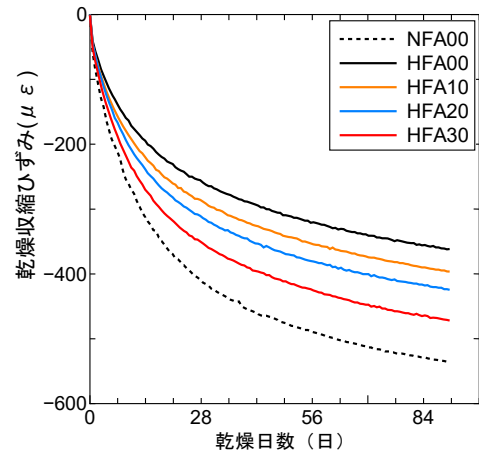


図-6 乾燥収縮ひずみ

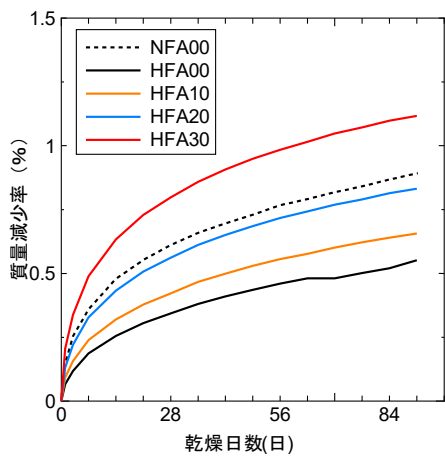


図-7 質量減少率

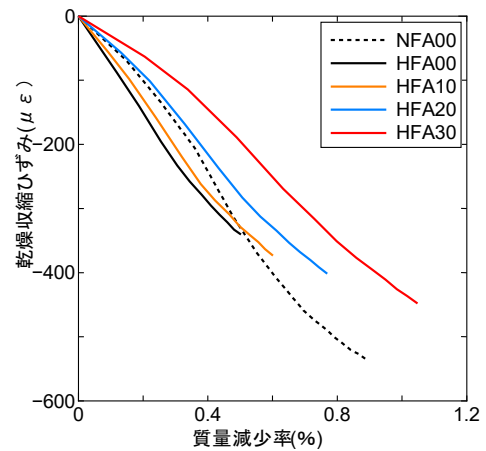


図-8 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

少していることにより、一般的な強度と弾性係数の関係から弾性係数も減少していると考えられ、セメントペースト部分の剛性(弾性係数)の低下も乾燥収縮の増加に影響していると考えられる。次に早強ポルトランドセメントを用いたものと普通ポルトランドセメントを用いたものと比較すると、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートは、すべての配合においてNFA00より乾燥収縮ひずみが小さくなっているのがわかる。フライアッシュを用いることにより乾燥収縮は増加するものの、早強ポルトランドセメントによる乾燥収縮を低減する効果により、HFA30においてもNFA00よりも小さくなっていることがわかる。早強ポルトランドセメントを用いた場合、HFA30を除いて材齢7日までの水和反応量が普通ポルトランドセメントよりも増加しており、コンクリート内の未水和水が減少したこと、また7日強度が大きくなっており、セメントペーストの剛性が大きくなっていることが要因と考えられる。未水和水率がほぼ同じであるHFA30とNFA00において、7日強度が小さいHFA00の乾燥収縮が小さな値となっている。毛細管張力説に基づく、HFA30の空隙構造がNFA00よりも粗大になっており毛細管張力が小さかったことが要因として推察される。

### 3.5 質量減少率

図-7に乾燥による質量減少率の結果を示す。早強ポルトランドセメントを用いたものに注目すると、フライアッシュ置換率が高いほど質量減少率が増大していることがわかる。水和反応状況から、フライアッシュ置換率が高いほど未水和水率が大きいため、蒸発水量も多くなったこと、もしくは空隙が粗大化しているため水が蒸発しやすい状態になっていることが考えられる。次に早強ポルトランドセメントを用いたものと普通ポルトランドセメントを用いたものを比較すると、HFA00、HFA10、HFA20はNFA00より質量減少率が小さく、HFA30の質量減少率はNFA00よりも大きいことがわかる。HFA00、HFA10、HFA20については、水和反応状況から、早強ポルトランドセメントの効果によって材齢7日までに水和反応量が増加し、コンクリート内の未水和水が減少したためと考えられる。HFA30については、未水和水率がNFA00とほぼ同じであるにもかかわらず蒸発水量が多いことより、蒸発しやすい空隙構造、すなわちNFA00より空隙構造が粗大であることが推察される。

### 3.6 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

図-8に乾燥による質量減少率と乾燥収縮ひずみの関

係を示す。同一質量減少率における乾燥収縮の大小は空隙構造およびペーストの剛性の影響を受けた結果と考え考察する。例えば、同一質量減少率において乾燥収縮ひずみが大きい場合、毛細管張力説に基づくと、空隙構造が緻密で毛細管張力が大きい、あるいはセメントペーストの剛性が小さく変形しやすいと推察できる。逆に乾燥収縮ひずみが小さい場合、空隙構造が粗大で毛細管張力が小さい、あるいはセメントペーストの剛性が大きく変形しにくいと推察できる。早強ポルトランドセメントを用いたものに着目すると、フライアッシュ置換率が高いほど同一質量減少率における乾燥収縮が小さいことがわかる。水和反応状況から、材齢 7 日において、フライアッシュ置換率の増加による未水和水の増加による空隙の粗大化の影響を反映した結果といえる。次に早強ポルトランドセメントを用いたものと普通ポルトランドセメントを用いたものを比較すると、質量減少率 0.5%程度までにおいて、HFA00 と HFA10 の乾燥収縮ひずみは NFA00 より大きく、NFA00 に対して HFA00 と HFA10 の空隙構造が緻密化している、あるいはセメントペーストの剛性が小さくなっているといえるが、7 日強度は大きいためセメントペーストの剛性は大きいと判断でき、HFA00 と HFA10 の空隙構造が緻密化していると推察される。HFA20 と HFA30 の乾燥収縮ひずみは NFA00 よりも小さくなっており、NFA00 に対して HFA20 と HFA30 の空隙構造が粗大化している、あるいはセメントペーストの剛性が大きくなっているといえるが、7 日強度が同程度以下であるためセメントペーストの剛性が同程度以下であると判断でき、HFA20 と HFA30 の空隙構造が粗大化していると推察される。

#### 4. まとめ

本研究では水結合材比を 30%に設定し、早強ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現および収縮特性に及ぼすフライアッシュの影響を明らかにするために、圧縮強度試験、収縮試験および水和反応にかかわる試験を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) フライアッシュ置換率の増加により水和反応量が減少するため、圧縮強度は低下する。
- 2) 早強ポルトランドセメントを用いることで水和反応量は増加し、フライアッシュ置換率 10%の材齢 7~91 日強度およびフライアッシュ置換率 20%の材齢 7 日強度が、普通ポルトランドセメントのみを用いたものより大きくなる。
- 3) フライアッシュ置換率の増加により水和反応量が

減少するため、自己収縮は低減される。

- 4) 早強ポルトランドセメントを用いることで水和反応量は増加し、自己収縮ひずみが普通ポルトランドセメントを用いたものより大きくなる。
- 5) フライアッシュ置換率の増加により蒸発水量が増加するため、乾燥収縮ひずみは大きくなる。
- 6) 早強ポルトランドセメントを用いることで蒸発水量は減少し、乾燥収縮ひずみが普通ポルトランドセメントを用いたものより小さくなる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）1999.4
- 2) 盛岡実，樋口隆行，坂井悦郎，大門正機：早強セメントとフライアッシュから調製したフライアッシュセメントの物性とエコロジカル評価，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.2，pp33-39，2002.5
- 3) 今岡知武，石川嘉崇，鷲尾朝昭，中村英佑：早強セメントをベースセメントとした養生条件が異なるフライアッシュコンクリートの物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp151-156，2015.6
- 4) 船本憲治，村上英治，黒羽健嗣，並木哲：フライアッシュが高強度コンクリートの流動性におよび強度発現に及ぼす影響，コンクリート工学年次論報告集，Vol.18，No.1，pp357-362，1996.6
- 5) 深川正浩，中村成春，榊田佳寛，阿部道彦：分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの力学的特性及び耐久性，コンクリート工学年次論報告集，Vol.19，No.1，pp205-210，1997.6
- 6) 菅田紀之，相澤義徳：フライアッシュを用いた高強度コンクリートの強度および収縮特性，コンクリート工学年次論報告集，Vol.28，No.1，pp.1205-1250，2006.6
- 7) 渡辺新一，菅田紀之：フライアッシュ混入高強度コンクリートの強度および収縮に及ぼす養生温度の影響，コンクリート工学年次論報告集，Vol.29，No.1，pp285-290，2007.6
- 8) 田中章梧，菅田紀之：フライアッシュを混和した高強度コンクリートの強度および乾燥収縮特性に及ぼす水和発熱の影響，コンクリート工学年次論報告集，Vol.43，No.1，pp.125-130，2021.6
- 9) 菅田紀之，川村祐太：コンクリートの収縮試験におけるひずみ測定法および供試体寸法の影響，土木学会北海道支部論文報告書，No.76，E-14，2020.1