

論文 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

田中 章梧*1・菅田 紀之*2・岡田 雄樹*1・山田 浩貴*1

要旨：簡易断熱養生ボックスおよび温度制御水槽を用いて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収縮特性に及ぼす水和発熱およびフライアッシュ置換の影響を明らかにするために、圧縮強度試験、乾燥収縮試験、X線回折試験および強熱減量試験を行った。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、養生初期の温度が高いほど7日強度は大きい長期強度は小さくなること、構造部材内部を模擬した簡易断熱養生によって乾燥収縮が小さくなることなどを明らかにした。また、それらについて水和反応の観点から考察した。

キーワード：フライアッシュ、高強度コンクリート、簡易断熱養生、水和発熱、圧縮強度、乾燥収縮

1. はじめに

産業副産物であるフライアッシュは石炭火力発電所より石炭灰の一部として排出されるが、その量は年間約1000万トンを超えている。主にセメントの原材料などとして再利用されているが、残りは埋立て処分が行われており、さらなる有効利用が望まれている。また、地球環境への配慮としてCO₂の削減が求められており、コンクリート分野においても取り組むべき問題となっている。フライアッシュを混和材としてコンクリートの一部に置換することにより、コンクリート政策におけるCO₂排出量を削減させることができ、高強度コンクリートにおいてより削減効果が期待できる。

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やアルカリシリカ反応の抑制、流動性改善が期待できる¹⁾。一方で、初期強度発現の遅延や中性化抵抗性の低下といった作用もあり、適用例が多くないのが現状である。フライアッシュを用いた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²⁾や深川らの研究³⁾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⁴⁾⁵⁾。高強度コンクリートは断面寸法の大きな部材に適用した場合、セメントの水和発熱により内部温度が高温になる。しかしながらフライアッシュを混和した高強度コンクリートの諸特性に及ぼす水和発熱の影響を検討した例は少ない。

本研究では簡易断熱養生ボックスおよび温度制御水槽を用いてフライアッシュを混和した高強度コンクリートによるマスコンクリートの内部を模擬し、強度および収縮特性に及ぼす水和発熱およびフライアッシュ置換の影響を明らかにするために、圧縮強度試験、乾燥収縮試験、X線回折試験および強熱減量試験を行った。

表－1 使用材料

使用材料	特性
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³ 強熱減量：2.28%
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度：2.70g/cm ³
粗骨材 (G)	砕石 2005 表乾密度：2.68g/cm ³
フライアッシュ (FA)	JIS II 種 密度：2.30g/cm ³ 強熱減量：2.0%
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系
消泡剤 (AF)	ポリエチレングリコール系

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種規格を満たす比表面積4020cm²/g、密度2.30g/cm³のものである。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、フライア

*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（工）（正会員）

表-2 配合

配合名	W/B (%)	FA/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							スランプフロー (cm)	空気量 (%)
				W	C	FA	S	G	SP	AF		
FA00	30	0	49	165	550	0	861	890	2.81	0.00843	61	1.3
FA10		10		165	495	55	853	881	2.79	0.00837	60	1.9
FA20		20		165	440	110	844	872	2.77	0.00832	65	1.5
FA30		30		165	385	165	835	863	2.75	0.00825	67	1.6

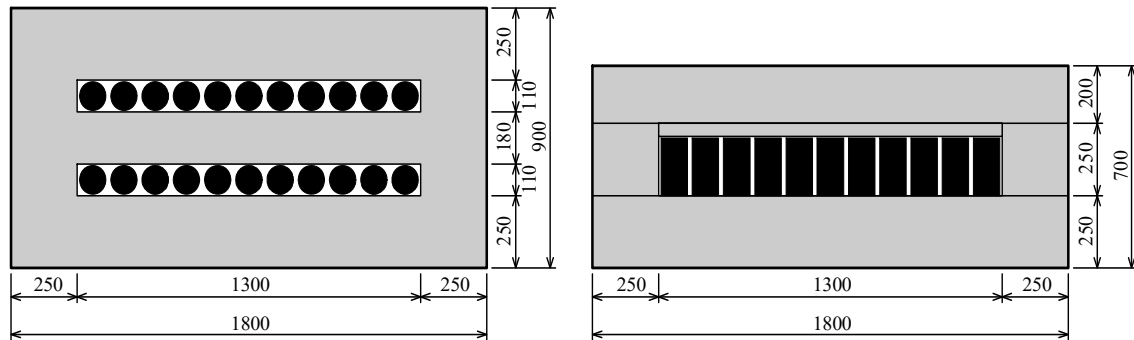


図-1 簡易断熱養生ボックス

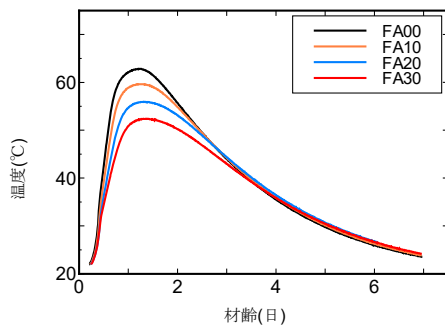


図-2 簡易断熱養生の温度履歴

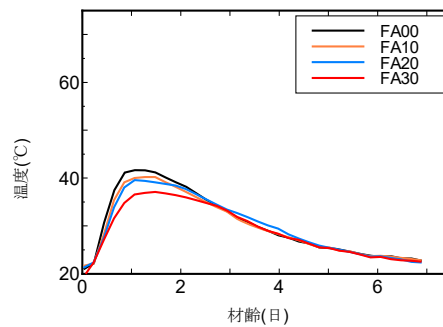


図-3 温度制御養生の温度履歴

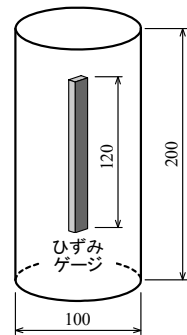


図-4 収縮試験供試体

ッシュ置換率(FA/B)を0%, 10%, 20%および30%の4種類に設定した。全ケースにおいて単位水量を165kg/m³, FA/B=0%において粗骨材絶対容積が0.33m³/m³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65cm, 1.0%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FA00, FA10, FA20, FA30で表す。

2.3 養生方法

養生方法は20℃養生、簡易断熱養生および温度制御養生の3種類で行った。20℃養生は材齢1日まで20℃封かん養生、脱型後温度20℃の水中養生とした。簡易断熱養生は図-1に示すような部材厚1m程度の中心部を模擬できる発泡スチロールボックスを用いて行った。供試体と発泡スチロールの隙間には発泡ビーズを詰め、材齢7日まで養生を行い、脱型後20℃の水中養生とした。簡易断熱養生による温度履歴を図-2に示す。温度はT型熱電対を供試体中央に設置して測定した。温度制御養生は、簡易断熱養生で測定された温度履歴に対して20℃からの

温度上昇量が1/2程度になるように制御した水槽で行った。封かん状態の円柱供試体を材齢7日まで水槽内で養生を行い、脱型後は温度20℃の水中養生とした。温度制御養生を行った円柱供試体中心部の温度履歴を図-3に示す。なお、養生条件は20℃養生を-20、簡易断熱養生を-SA、温度履歴養生を-THと表すことにする。

2.4 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、14日、28日、56日、91日とした。試験は3本の供試体で行い、その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。

2.5 乾燥収縮試験および質量変化試験

乾燥収縮試験は図-4に示すように、直径100mm、高さ200mmの円柱供試体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行った。試験は20℃養生、簡易断熱養生および温度制御養生の3種類の条件で材齢

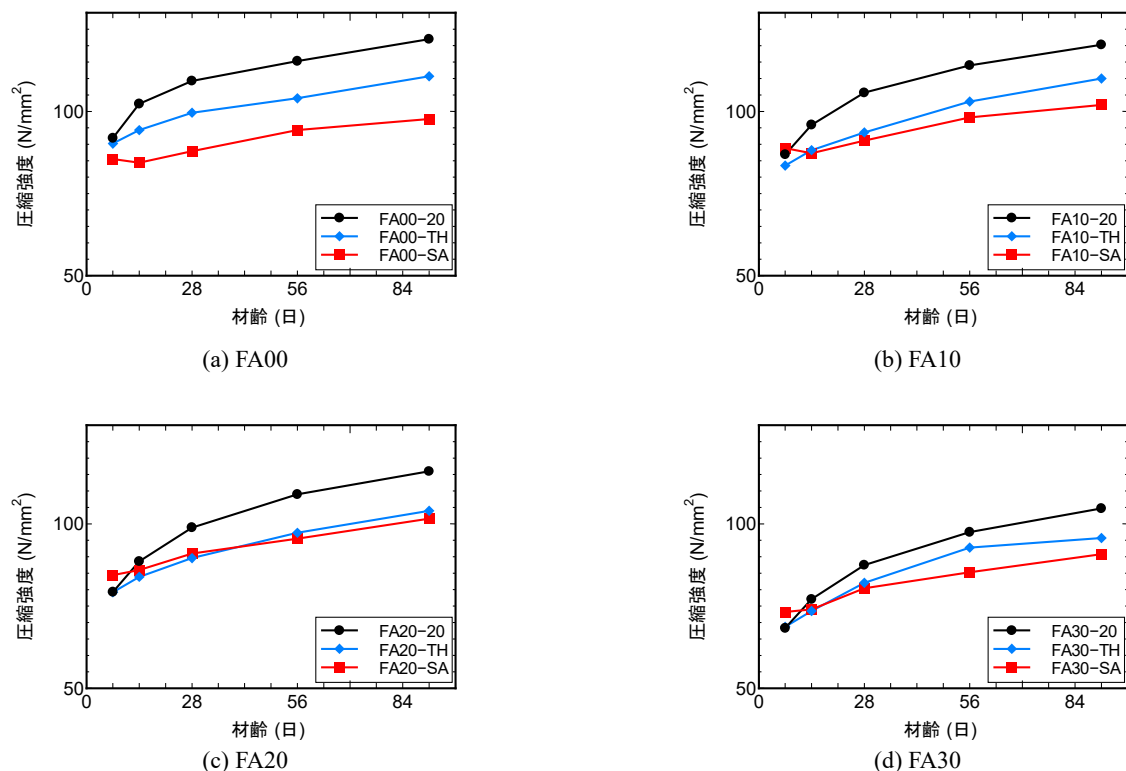


図-5 材齢と圧縮強度の関係

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行った。試験環境は温度 20℃、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。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⁹⁾。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 X 線回折試験

X 線回折試験は表-2 に示した配合において骨材を除いたセメントペーストを作製し、コンクリートの温度履歴と同様の履歴を封かん状態で与え、養生後アセトンで水和停止処理を行ったものを試料とした。セメントペーストを乳鉢と乳棒で、45μm 以下に粉末化したものを試験用試料とした。試験は粉末 X 線回折法により行い、測定条件は、使用 X 線 CuKα、管電圧 40 kV、管電流 30mA、測定速度 2.0deg/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を同定し、積分強度を求めた。試験材齢は 0 日(加水前の結合材)、7 日、28 日とした。

2.7 強熱減量試験

X 線回折試験と同様にセメントペーストを作製、養生したものを試料とした。1 試料の質量は約 2g とした。セ

メントペーストを 2, 3mm 程度以下に粉碎し、水和停止のためアセトンに浸漬を行い、その後 100℃で 60 分加熱しアセトンおよび残存水を蒸発させ、試験用試料とした。加熱温度は 1000℃、加熱時間は 60 分とした。試験材齢は 7 日、28 日とした。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-5 に材齢と圧縮強度の関係を示す。フライアッシュ無混和において、20℃養生、温度制御養生、簡易断熱養生の順で小さくなり、養生初期の温度が高いほど圧縮強度が小さくなっている。ただし、20℃養生と温度制御養生の差は小さい。フライアッシュを混和した場合、材齢 7 日における強度はフライアッシュの置換率に関わらず簡易断熱養生が最も大きく、温度制御養生と 20℃養生は同程度あるいは温度制御養生の方が小さくなっている。材齢 28 日以降の強度は FA20 の材齢 28 日を除き材齢 7 日までの温度が高いほど小さくなっていることがわかる。簡易断熱養生ではフライアッシュの混和による強度低下は FA30 を除き、みられなかった。20℃養生および温度制御養生においてフライアッシュ混和による強度低下がみられる。

3.2 乾燥収縮および質量変化

図-6 に乾燥収縮試験の結果を示す。置換率によらず簡易断熱養生、温度制御養生、20℃養生の順となり、養

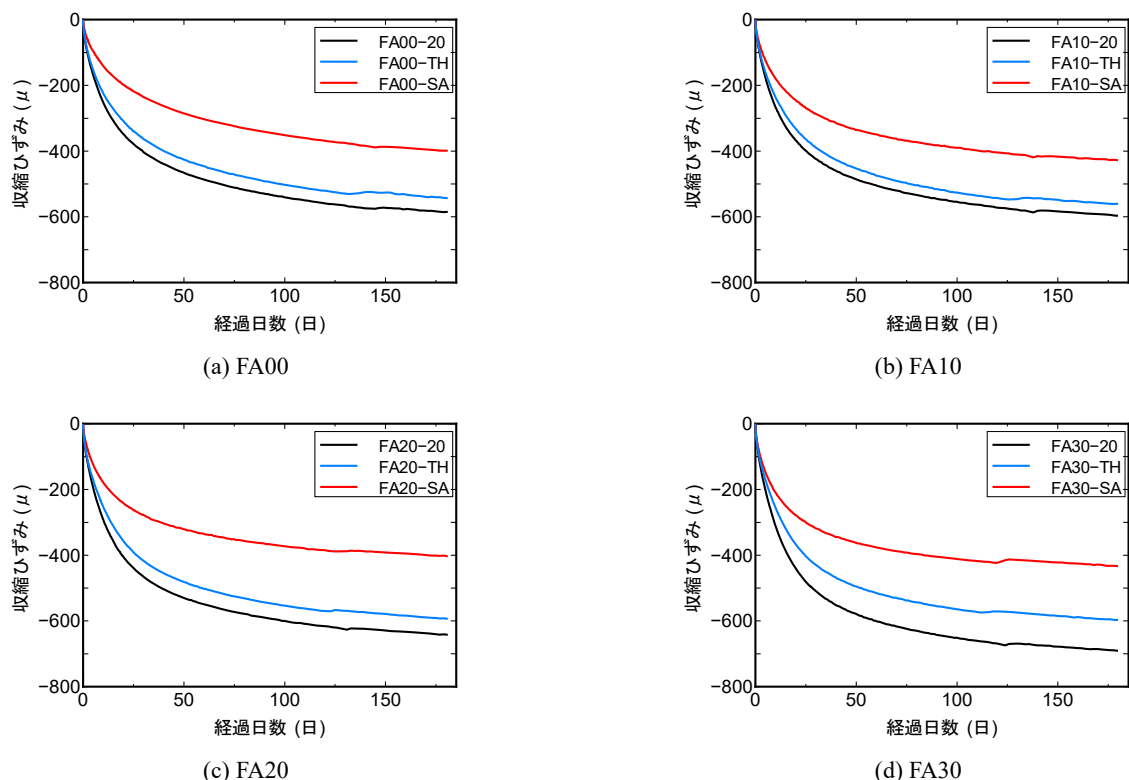


図-6 乾燥収縮ひずみ

生初期の温度が高いほど、乾燥収縮ひずみが小さいことがわかる。乾燥収縮を毛細管張力説に基づいて考えると、乾燥収縮量には環境条件の他、空隙構造、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考えられる。各配合において簡易断熱養生における乾燥収縮の低減は、ペーストの剛性の増加および空隙の粗大化によるところが大きいと考えられる。温度制御養生による乾燥収縮ひずみについては、圧縮強度の結果からペーストの剛性は20℃養生と同程度と推定できるが、空隙の粗大化で20℃養生より低減したと推定できる。ここで、空隙の粗大化とは空隙量が等しくても空隙径分布において大径側の量が多くなっていることを意味している。

図-7 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。ここに示していないが、同一材齢で比較すると質量減少率はフライアッシュ無混和の場合、20℃養生において一番小さく、温度制御養生、簡易断熱養生の順に大きくなっていった。フライアッシュを混和した場合、簡易断熱養生において一番小さく、20℃養生、温度制御養生の順に大きくなっていった。また、置換率の増加に伴い質量減少率が増加していた。図より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。温度制御養生における収縮ひずみは20℃養生より小さく、空隙の粗大化が推定できる。FA00 では20℃養生における7日強度が温

度制御養生より大きく、温度制御養生による空隙の粗大化の影響が大きいと考えられる。フライアッシュを混和した場合における温度制御養生の強度と20℃養生の強度は同程度であり、空隙の粗大化による毛細管張力の低下が乾燥収縮の低減要因と考えられる。簡易断熱養生における収縮ひずみはFA30を除き20℃養生より小さい。強度試験結果と合わせて考えると、FA00では簡易断熱養生により20℃養生よりも空隙が粗大化、FA10およびFA20では簡易断熱養生により20℃養生よりもペーストの剛性が増加することによる影響が表れたと推定できる。FA30では簡易断熱養生により20℃養生よりも水が蒸発しにくくなっていることが、収縮低減の要因として推定できる。ここでは言及しなかったが、未水和水に量の影響について次節において水和反応の面から検討する。

3.3 水和反応

図-8 にX線回折試験で得た、 C_3S 、 C_2S および C_3A の $2\theta=32.0^{\circ}\sim33.3^{\circ}$ における回折ピークの積分強度の和で示す。FA00 および FA10 の場合、養生時の温度が高いほど材齢7日の積分強度が20℃養生より小さくなっており、セメントの水和が促進していることがわかる。材齢7日から材齢28日で20℃養生ではセメントの水和反応が進行している。しかしながら、高温になる養生、特に簡易断熱養生では20℃養生より進行速度が低下している。FA20 および FA30 の場合、材齢7日において温度制御養生および簡易断熱養生でセメントの水和はあまり促進さ

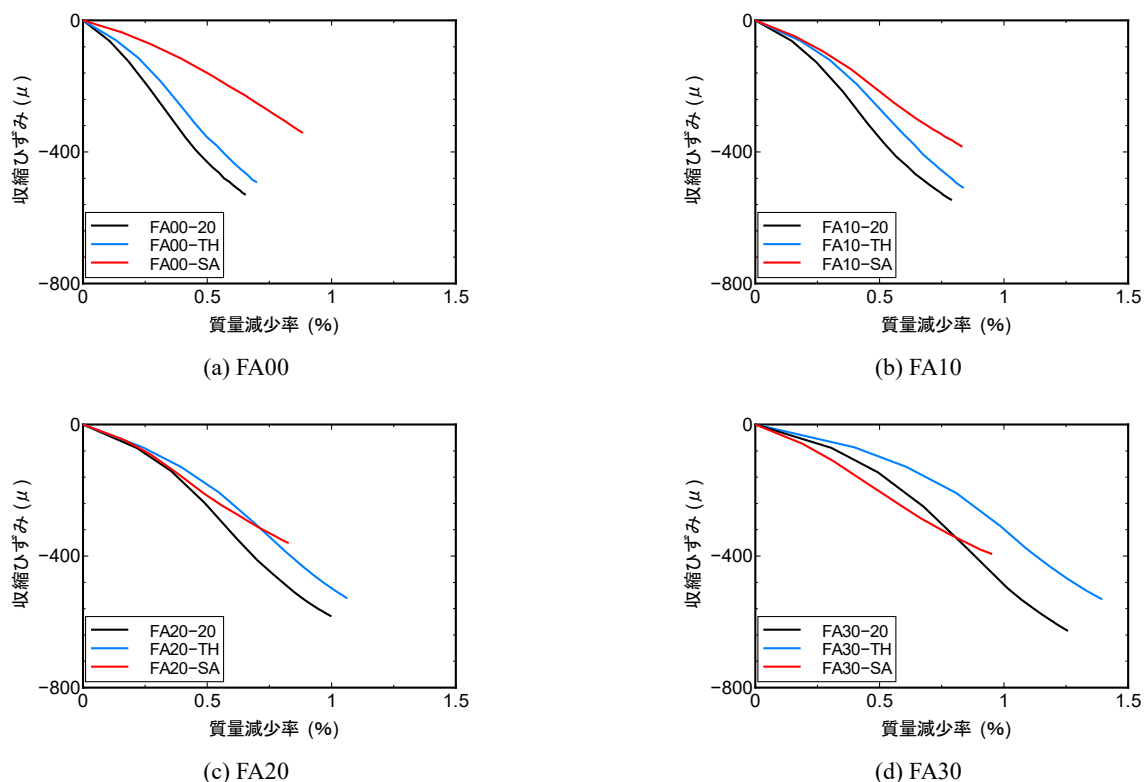


図-7 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

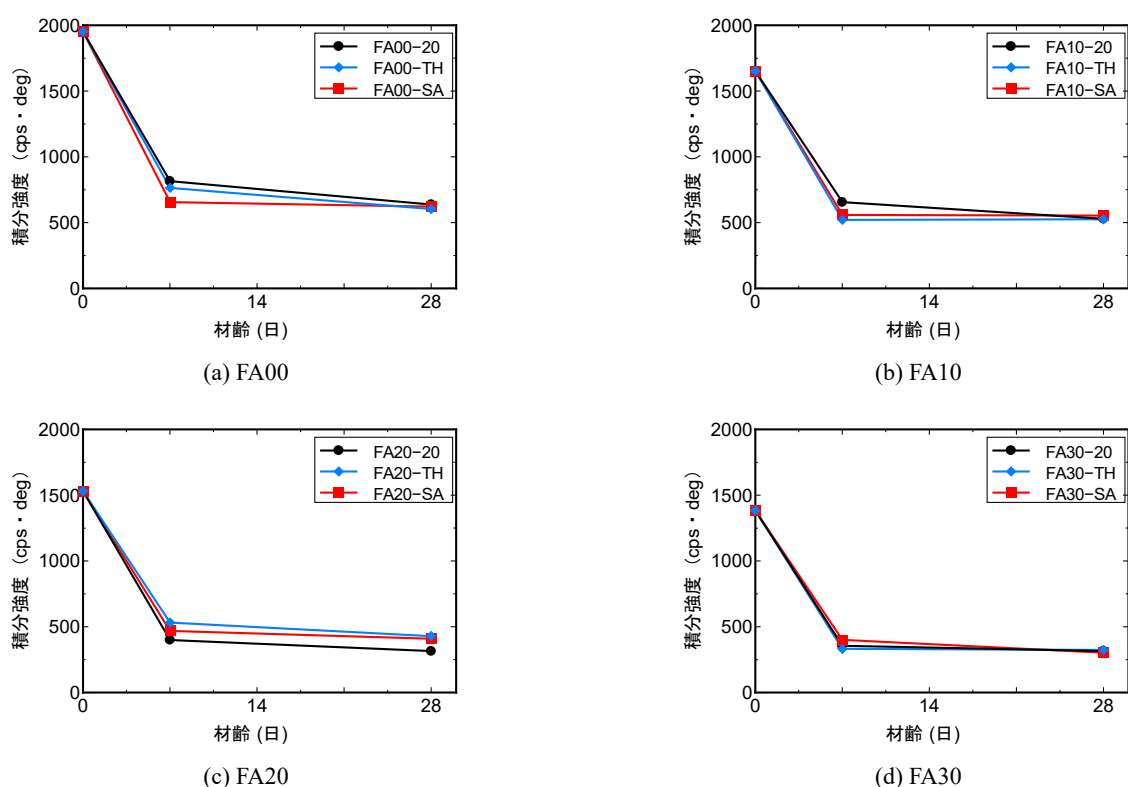
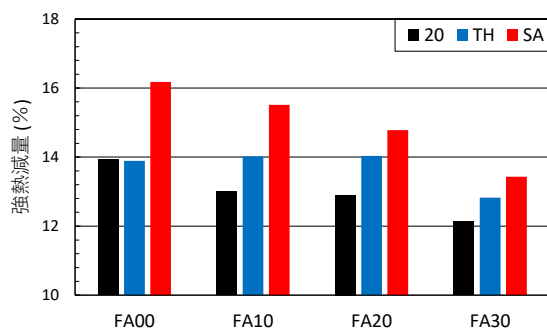


図-8 セメント化合物の積分強度

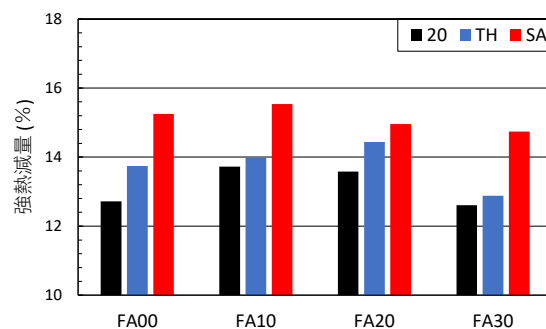
れない。材齢 7 日から材齢 28 日で、いずれもセメントの水和の進行は同程度であった。

図-9 に材齢 7 日および材齢 28 日における水和セメントペーストの強熱減量試験の結果について示す。セメン

トとフライアッシュの強熱減量は 2%程度でほぼ等しいことより、それによる補正等はせずにセメントペーストの強熱減量により水和の程度について考察する。養生時の温度が高いほど、強熱減量が大きく、セメントの水和



(a) 材齢 7 日



(b) 材齢 28 日

図-9 強熱減量

反応およびフライアッシュのポゾラン反応が促進したといえる。材齢 7 日から材齢 28 日の変化について検討する。反応が進行した場合、強熱減量は一般的に増加する。FA00 では減少している。FA00 は材料分離の傾向が大きく均質な試料を作製できなかったことが、その要因として考えられる。よって材齢 28 日における FA00 を除外して検討を進める。材齢 7 日から材齢 28 日の反応については、温度制御養生および簡易断熱養生よりも 20℃養生のほうが進んでいるといえる。また、簡易断熱養生では反応の進行が遅い。以上より、FA00 および FA10 では養生時に高温になったことにより材齢 7 日までのセメント水和反応が促進されるのに対して、FA20 および FA30 ではセメントの水和反応の促進が小さく、フライアッシュのポゾラン反応が促進される。20℃養生、温度制御養生においては材齢 7 日から材齢 28 日にセメントの水和反応およびフライアッシュのポゾラン反応が進行するのに対して、簡易断熱養生における反応の進行は小さい。その結果として材齢 7 日における圧縮強度はフライアッシュを混和した場合、20℃養生および温度制御養生より簡易断熱養生のほうが大きくなった。材齢 28 日では 20℃養生、温度制御養生、簡易断熱養生の順、すなわち養生初期の温度が高いほど圧縮強度が小さくなった。乾燥収縮については、養生初期の温度が高いほど反応が促進されることによる未水和水の減少が、乾燥収縮の低減に影響していると考えられる。さらに、簡易断熱養生および温度制御養生におけるペーストの剛性の増加も影響しているといえる。

4. まとめ

本研究では、簡易断熱養生ボックスおよび温度制御水槽を用いて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収縮特性に及ぼす水和発熱およびフライアッシュ置換の影響を明らかにするために、圧縮強度試験、乾燥収縮試験、強熱減量試験および X 線回折試験を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

1) 簡易断熱養生では材齢 7 日までの反応が促進し、20℃養生および温度制御養生より圧縮強度が大きくなる。

2) 養生時の温度が高いほど材齢 7 日以後の水和の進行が小さく、長期強度は小さくなる。

3) フライアッシュを混和した場合、簡易断熱養生および温度制御養生において反応の促進によるペーストの剛性の増加および未水和水の減少により 20℃養生より乾燥収縮が低減する。

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) 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
- 3) 深川正浩，中村成春，梶田佳寛，阿部道彦：紛糾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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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