

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温度履歴の影響

岡田 雄樹*1・菅田 紀之*2・川村 祐太*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に温度履歴を与え、強度および収縮特性に及ぼす温度履歴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、乾燥収縮試験および強熱減量試験を行った。水結合材比は 25%、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 日強度は大きいが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、それらについて未水和水およびペースト剛性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, 温度履歴, 圧縮強度, 乾燥収縮

1. はじめに

石炭火力発電所から排出される石炭灰の量は年間約 1,000 万トンであり、そのうち約 90%はフライアッシュである。これら石炭灰の約 70%はセメント・コンクリート分野で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る。今後も石炭火力発電所から排出される石炭灰の量は増加すると予想されており、有効利用が課題となっている。また、フライアッシュは「再生資源の利用促進に関する法律」における指定副産物になっており、さらなる有効活用が望まれている。地球環境問題の対策としてセメントの一部をフライアッシュに置換することにより、コンクリート製造時における CO₂ の削減効果が期待できる。特に高強度コンクリートにおいてその効果は大きいといえる。

フライアッシュを混和材として用いたコンクリートはワーカビリティの向上、アルカリシリカ反応の抑制といった効果があることが確認されている¹⁾。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といった作用もあり、利用が進まないのが現状である。また、そのような問題から高強度コンクリートへの適用例も少ない。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⁾。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特性について明らかにしなければならぬ問題が残されている。高強度コンクリートの水和発熱量が普通コンクリートよりも大きく断面寸法の大きな部材に適用した場合、より高温になることが予想される。しかしながら高温履歴の影響

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温度履歴を与え、強度および収縮特性に及ぼす温度履歴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、乾燥収縮試験および強熱減量試験を行った。

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およびフライアッシュを用いた。使用したフライア

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：2.17%
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度：2.70g/cm ³
粗骨材 (G)	碎石 2005 表乾密度：2.68g/cm ³
フライアッシュ (FA)	JIS II 種 苫東厚真発電所 密度：2.31g/cm ³ 強熱減量：1.90%
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系
消泡剤 (AF)	ポリエチレングレコール系

*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	25	0	49	165	660	0	815	842	4.95	0.0149	49	2.4
FA10		10		165	594	66	805	832	4.88	0.0147	58	2.0
FA20		20		165	528	132	795	821	4.62	0.0139	58	2.1
FA30		30		165	462	198	785	811	4.29	0.0129	56	2.0

B=C+FA

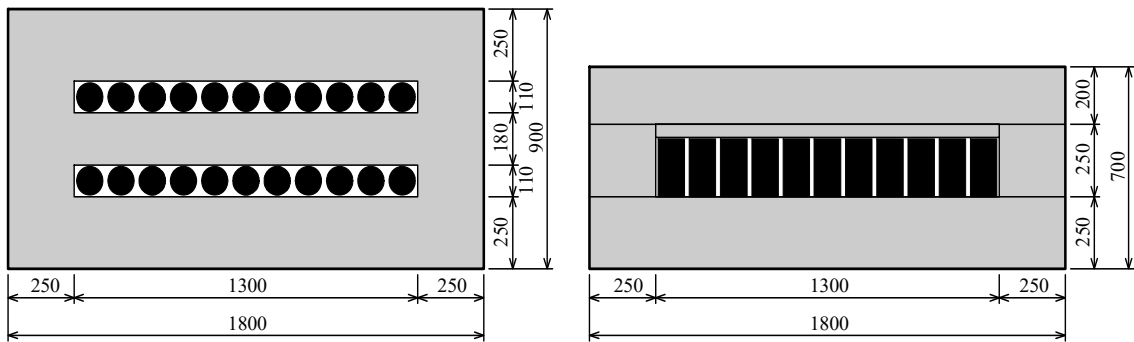


図-1 簡易断熱養生ボックス

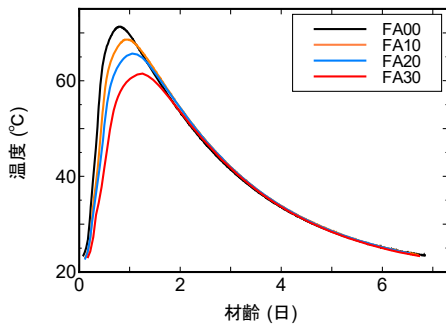


図-2 簡易断熱養生の温度履歴

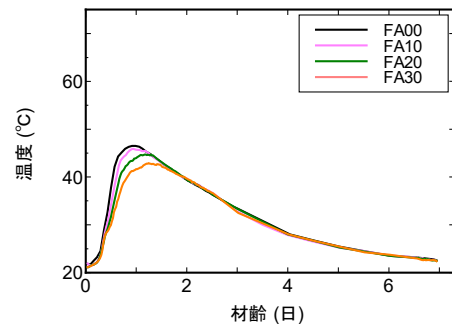


図-3 温度制御養生の温度履歴

ッシュは JIS A 6201 の II 種規格を満たす比表面積 4190cm²/g、密度 2.31g/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25%とし、フライアッシュ置換率(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 0.3m³/m³ 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 55cm, 2.0%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 に示すとおりである。各配合を FA00, FA10, FA20, FA30 で表す。

2.3 養生方法

養生は 20°C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°C養生は材齢 1 日まで 20°C封かん, 以後 20°C水中における養生である。簡易断熱養生は図-1 に示すような部材厚 1m 程度の部材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 日までボックス内で養生し, 脱型後温度 20°Cの水中養生とした。簡易断熱養生による円柱供試体中心部の温度履歴を図-2 に示す。温度は T 型熱電対を設置して測定した。温度制御養生は簡易断熱養生で測定された温度履歴において 20°Cからの温度上昇量 1/2 の温度で制御を行った水槽を用いて行った。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, 脱型後温度 20°Cの水中養生とした。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°C養生を-20, 簡易断熱養生を-SA, 温度

制御養生を-THで表すこととする。

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日である。測定は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である。

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7日まで封かん養生したのち供試体を脱型し、供試体の

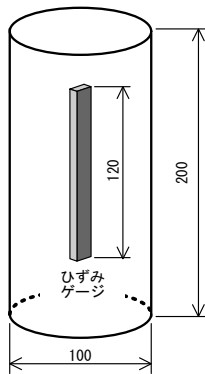


図-4 乾燥収縮試験供試体

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、材齢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。

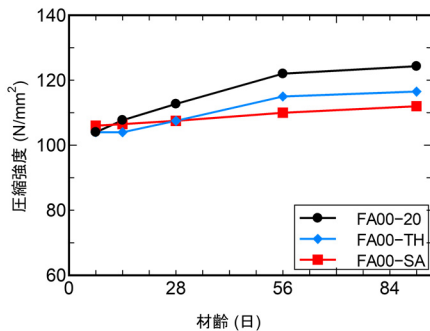
2.6 強熱減量試験

強熱減量試験は表-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20℃養生、簡易断熱養生および温度制御養生を封かん状態で行ったものを試料とした。1試料の質量は約2gである。セメントペーストを2、3mm程度以下に粉砕し、水和停止のためアセトンに浸漬1時間を2回行い、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、強熱減量試験用試料とした。加熱温度は1000℃、加熱時間は60分とした。試験材齢は7日である。

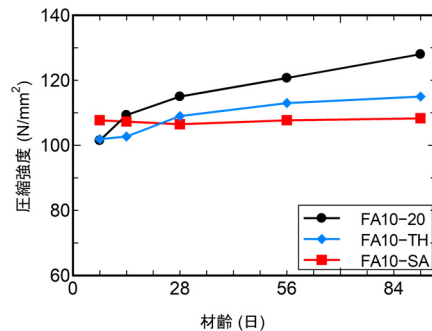
3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度試験結果

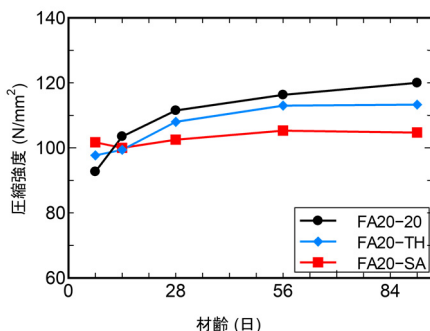
図-5に材齢と圧縮強度の関係を示す。すべてのフライアッシュ置換率において材齢7日の強度は20℃養生、温度制御養生、簡易断熱養生の順に大きくなり最高温度



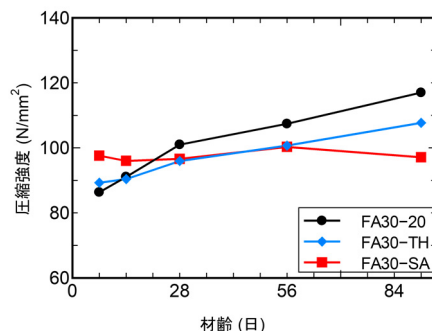
(a) FA00



(b) FA10



(c) FA20



(d) FA30

図-5 材齢と圧縮強度の関係

が高いほど強度が大きくなっている。ただし、20℃養生と温度制御養生の差は大きくない。材齢 28 日以降の強度は簡易断熱養生，温度制御養生，20℃養生の順になり最高温度が高いほど強度が小さくなっていることがわかる。また，簡易断熱養生では材齢 7 日以降の強度増加は非常に小さいことがわかる。初期に高温で養生したことによりセメント粒子のまわりに緻密な水和物が生成され，未水とセメントと水との接触が阻害されたことが，20℃養生，温度制御養生より長期強度が増加しなかった要因として考えられる。また，簡易断熱養生の 7 日強度についてはフライアッシュ混和による強度低下は小さくなっていることがわかる。20℃養生に注目すると，フライアッシュ置換率 30%の材齢 28 日において，明らかに強度発現の遅延による強度低下が確認できるが，材齢 91 日においてはフライアッシュ無混入の強度近くまで回復している。

3.2 乾燥収縮試験結果

図-6 に乾燥収縮試験の結果を示す。すべてのフライアッシュ置換率において簡易断熱養生，20℃養生，温度制御養生の順で乾燥収縮量が小さくなっていることがわかる。乾燥収縮には環境条件の他，コンクリート内部の未水と水，空隙構造，ペーストの剛性などが影響すると考えられる。簡易断熱養生における乾燥収縮の低減は，水和反応の促進による未水と水の減少およびペーストの

剛性の増加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の若干の増加は，強度の結果からわかるように材齢 7 日までの水和反応が 20℃養生より若干促進され，未水と水の減少およびペースト剛性の増加による収縮低減と空隙構造の微細化による収縮増大作用などが小さく，相殺されたことによるものと考えられる。20℃養生に注目すると，フライアッシュ置換率が大きくなるほど乾燥収縮が大きくなっていることがわかる。これは水和反応の遅延による未水と水の増加およびペースト剛性の低下による影響が大きいと考えられる。

図-7 に乾燥による質量減少率の結果を示す。図よりフライアッシュを混和しない場合，養生方法によって質量減少率に大きな差はないが，フライアッシュを混和した場合において最高温度が高いほど質量減少率が小さいことがわかる。また，20℃養生および温度制御養生ではフライアッシュの置換率の増加に伴い質量減少率が大きくなっており，特にフライアッシュ置換率 30%においてはフライアッシュ無混入の質量減少率の約 2 倍となっている。これはフライアッシュ置換率を大きくするほど水和反応が緩慢になり，未水と水がより多く残っており，乾燥時の蒸発水量が多くなったためであると考えられる。しかしながら，簡易断熱養生ではフライアッシュの置換率に関わらず質量減少率はほぼ同等の結果となった。圧縮強度の結果からわかるように水和反応が同程度であっ

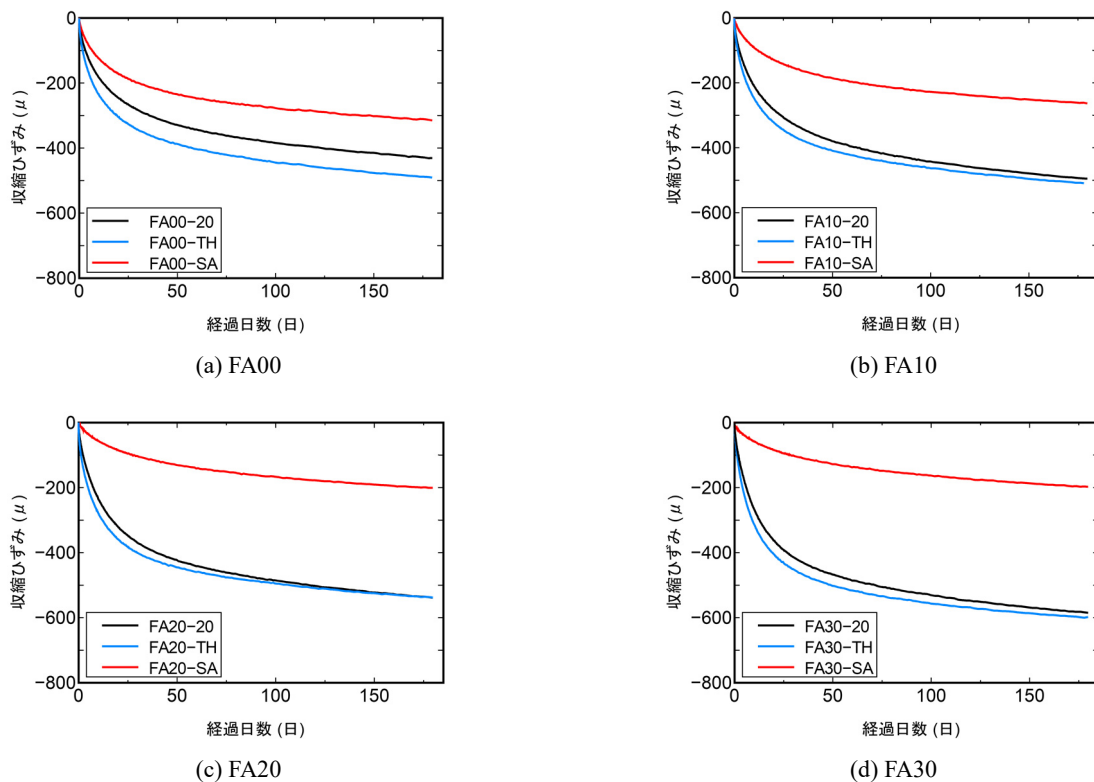


図-6 乾燥収縮ひずみ

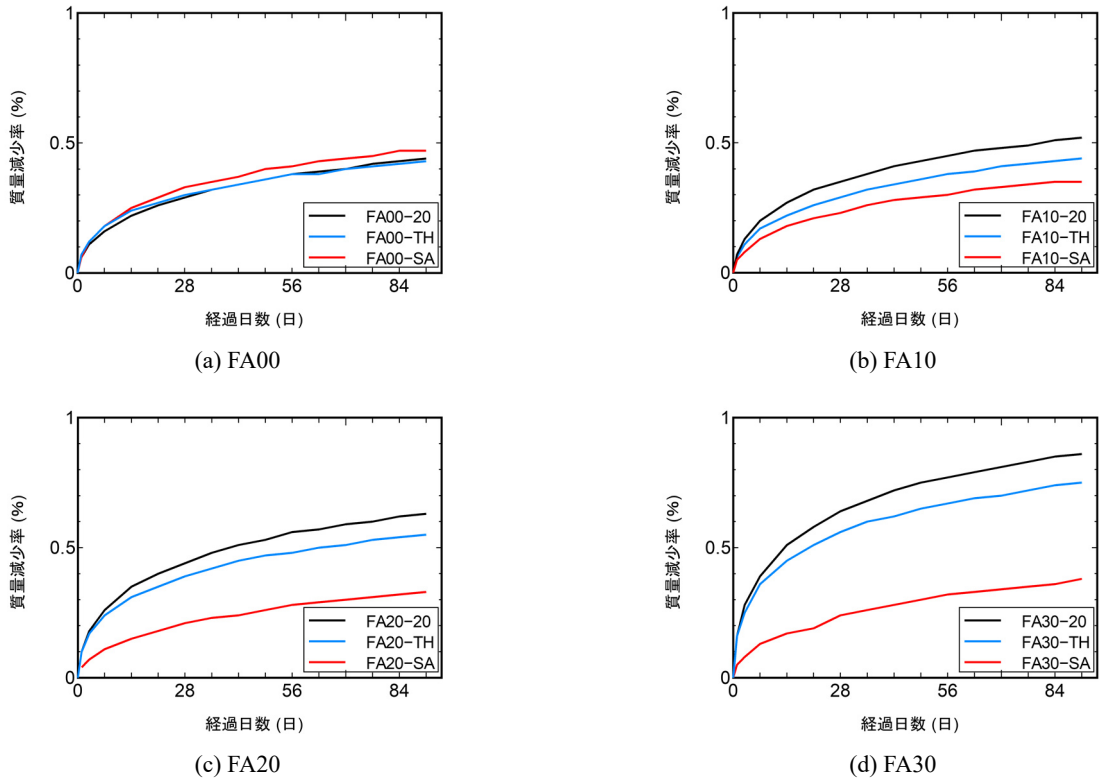


図-7 質量減少率

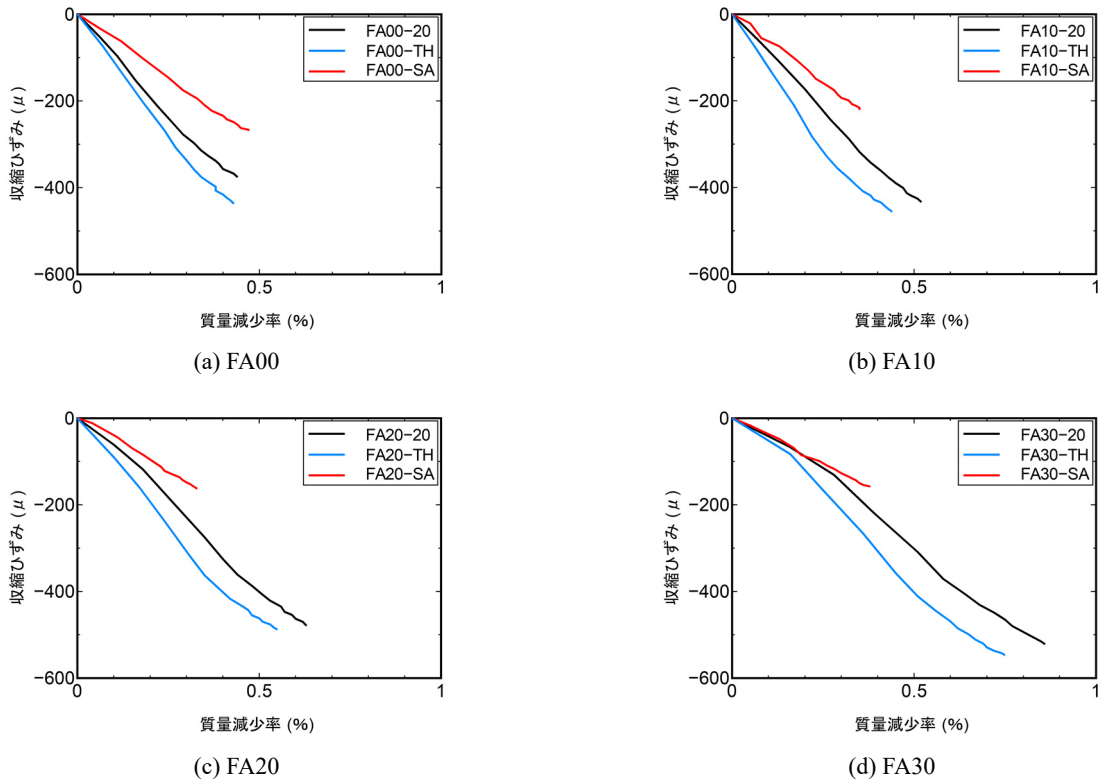


図-8 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

たことによるものと考えられる。

図-7 では乾燥収縮と影響要因の関係について推察しにくいため、図-8 に質量減少率と乾燥収縮ひずみの関

係を示し、影響因子について考察する。図より同一の質量減少率における比較において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て考

察する。簡易断熱養生における収縮ひずみは 20℃養生よりも小さく、空隙構造の粗大化あるいはペースト剛性の増大が推定できるが、7 日強度が促進されていることを合わせて考えるとすでに述べたようにペースト剛性の増加が乾燥収縮の低減要因といえる。温度制御養生における収縮ひずみは 20℃養生よりも大きく空隙構造の微細化あるいはペースト剛性の低下が推定できるが、7 日強度が若干大きいことからペースト剛性の低下は想定できず空隙構造の微細化の影響が表れたと考えられる。

3.3 強熱減量試験結果

図-9 に材齢 7 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。すべての配合において養生における最高温度が高いほど強熱減量が大きく水和反応が進んでいることがわかる。材齢 7 日における圧縮強度が最高温度が高いほど大きいのは、水和反応が促進された結果であることがこのことからわかる。強熱減量が多いということは未水和水が少ないということでもあり、この結果はフライアッシュ無混和を除き、乾燥に伴う質量変化試験結果と符合する。また、程度は異なるが、フライアッシュ混和により強熱減量が小さくなっており、フライアッシュによる水和反応の遅延作用および未水和水の増加が示されている。すでに述べているが、このことが圧縮強度の低下、乾燥収縮および質量減少の増加に影響していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、構造部材内部を模擬した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温度履歴を与え、強度および収縮特性に及ぼす温度履歴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、乾燥収縮試験および強熱減量試験を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) 養生における最高温度が高いほど材齢 7 日までの水和反応は促進され、7 日強度は大きくなるが、長期強度は小さい。
- 2) 簡易断熱養生において材齢 7 日以降の強度増加は非常に小さい。
- 3) フライアッシュ混和により水和反応は遅延し強度

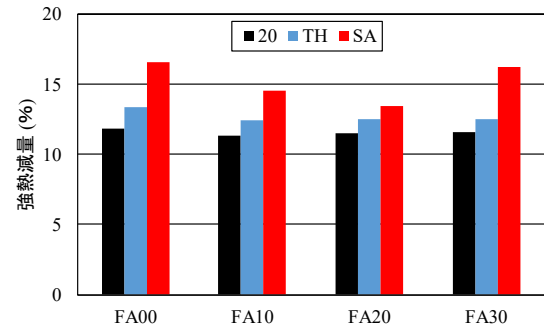


図-9 強熱減量

低下は起きるが、簡易断熱養生における強度低下は小さい。

- 4) 簡易断熱養生において未水和水の減少およびペースト剛性の増大により乾燥収縮が小さくなる。
- 5) フライアッシュ混和により未水和水が増加し乾燥収縮は大きくなるが、簡易断熱養生においては乾燥収縮は増大しない。

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，榎田佳寛，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