

論文 フライアッシュとシリカフュームを併用した高強度コンクリートの強度・収縮特性に及ぼす養生環境の影響について

長枝 健太*1・菅田 紀之*2

要旨: フライアッシュとシリカフュームを併用した高強度コンクリートの強度特性および収縮特性に及ぼす湿潤養生期間および養生温度の影響について検討するために、初期の湿潤期間および養生温度を変えて圧縮強度試験および乾燥収縮試験を行った。配合は、水結合材比を 25%、シリカフュームの置換率を結合材の 10% とし、フライアッシュの置換率を 0% から 30% まで変化させた。その結果、湿潤期間を材齢 1 日までとした場合、強度低下が顕著であること、湿潤期間が長いほど収縮ひずみが小さいこと、養生温度 40°C および 60°C ではフライアッシュ混和による強度低下は抑制されることなどを明らかとなった。

キーワード: フライアッシュ, シリカフューム, 高強度コンクリート, 圧縮強度, 乾燥収縮, 養生

1. はじめに

主に石炭火力発電所からフライアッシュ等の石炭灰が毎年約 1,000 万トン排出されており、その処分に関する問題を解決する方策としてコンクリート分野では主にセメント原料として利用されてきている。この方策は石炭灰の処分問題を解決するのみならず、セメント原料の枯渇問題の解決方法として効果を上げている。また、近年では地球温暖化対策として、温室効果ガスである 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。CO₂ 削減のためのフライアッシュの有効的な利用方法としては、フライアッシュを混和材として用いる方法が挙げられる。フライアッシュを混和材として用いたコンクリートに関する研究は多く行われてきており、水和発熱の抑制や流動性改善効果が期待できる一方で、コンクリートの強度低下、特に初期における強度の低下や中性化が促進される等の特徴があるため適用例が多くないのが現状である。フライアッシュを混和材として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¹⁾や深川らの研究²⁾が行われている程度であった。その後、著者らはフライアッシュと産業副産物であり空隙充てん効果が高いとされ高強度コンクリートへの適用例が多いシリカフューム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^{3), 4)}。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を実用化するためには明らかにしなければならない問題が多く残されている。

本研究では、フライアッシュとシリカフュームを併用した高強度コンクリートの強度特性および乾燥収縮特性に及ぼす初期の湿潤養生期間、養生温度およびフライアッシュ置換率の影響を明らかにするために、初期の湿潤養生期間を変え、圧縮強度試験および乾燥収縮試験を行

った。また、温度を変化させた湿潤養生を行い、圧縮強度試験を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

本研究においてフライアッシュとシリカフュームを併用した高強度コンクリートの製造に用いた材料を表-1 に示す。結合材には普通ポルトランドセメント、フライアッシュおよびシリカフュームを用いた。使用したフライアッシュは JIS II 種の規格を満足する比表面積 3,830 cm²/g、密度 2.29 g/cm³ および比表面積 3,810 cm²/g、密度 2.24 g/cm³ のものである。採取・分級時期が異なるため、シリーズによってフライアッシュの特性が若干異なっている。シリカフュームはノルウェー産の粉体系のものであり、比表面積は 200,000 cm²/g、平均粒径は約 0.2 μm、密度は 2.2 g/cm³ のものである。細骨材としては陸砂、粗骨材としては JIS 規格 2005 砕石を用いた。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

本研究に用いたフライアッシュとシリカフュームを併用し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+SF) は 25%、シリカフューム置換率 (SF/B) は 10% で一定とし、フライアッシュ置換率 (FA/B) を 0%、10%、20% および 30% の 4 ケースの配合とした。目標スランプフローを 65 cm、目標空気量を 1.0% として、配合を決定した。なお、高性能 AE 減水剤の 70% が水分であり、その量を練混水の一部とした。また、シリーズ 1 は初期の湿潤養生期間の影響を検討するための配合、シリーズ 2 は養生温度の影響を検討するた

*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)

めの配合である。各配合で練混ぜたコンクリートのスランプフローおよび空気量の実測値は、60～70 cm、0.8～1.6%であった。

2.3 養生方法

シリーズ1におけるコンクリートの養生は20℃の一定温度で行った。練混ぜ直後から20℃の恒温室に封かん状態で24時間保管し、脱型後20℃の水中で養生を継続した。初期の湿潤期間を材齢1日までとする場合には、脱型後に温度20℃、相対湿度60%の恒温室にそのまま保管した。また、湿潤期間を材齢3日、5日および7日までとする場合には、所定の材齢経過後、温度20℃、相対湿度60%の恒温室に移動し保管した。

シリーズ2における養生は20℃、40℃および60℃の3種類の温度で行った。温度20℃の養生では、コンクリートを20℃の恒温室に練混ぜ直後から封かん状態で24時間保管し、脱型後20℃の水中で養生を継続した。温度40℃および60℃の養生では、図-1に示す発泡スチロール製の簡易断熱養生ボックスを用いた。また、供試体と発泡スチロールとの隙間には発泡ビーズを詰めた。練混ぜ後、鋼製モールドにコンクリートを打込み封かん状態で簡易断熱養生を行い、設定温度に達したのち40℃あるいは60℃の水中に移し、練混ぜから24時間経過時に脱型し水中養生を継続した。図-2に各配合における温度

履歴を示す。40℃養生では全ケースで設定温度に達したが、60℃養生では、FA2-20およびFA2-30のケースで設定温度まで温度が上昇しなかったため、最大温度に達したと判断した時点で設定温度における養生を開始した。また、60℃養生では練上がり温度が40℃養生よりも低いことが影響してか、温度が上昇する材齢が遅くなっていることがわかる。

表-1 使用材料

材料	性質等
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g/cm ³
フライアッシュ (FA：シリーズ1)	比表面積：3,830 cm ² /g 密度：2.29 g/cm ³
フライアッシュ (FA：シリーズ2)	比表面積：3,810 cm ² /g 密度：2.24 g/cm ³
シリカフェューム (SF)	比表面積：200,000 cm ² /g 平均粒径：0.2 μm 密度：2.2 g/cm ³
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度：2.69 g/cm ³ , 2.70 g/cm ³
粗骨材 (G)	JIS 2005 碎石 表乾密度：2.66 g/cm ³ , 2.67 g/cm ³
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

表-2 配合

シリーズ	記号	W/B (%)	SF/B (%)	FA/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
						W	C	SF	FA	S	G	SP	AF
シリーズ1	FA1-00	25	10	0	49	166	598	66.4	0	809	820	6.6	0.013
	FA1-10	25	10	10	49	166	531	66.4	66.4	798	810	5.6	0.011
	FA1-20	25	10	20	49	166	465	66.4	132.8	788	799	5.3	0.011
	FA1-30	25	10	30	49	166	398	66.4	199.2	777	788	5.0	0.010
シリーズ2	FA2-00	25	10	0	49	166	598	66.4	0	800	823	6.0	0.012
	FA2-10	25	10	10	49	166	531	66.4	66.4	790	813	5.6	0.011
	FA2-20	25	10	20	49	166	465	66.4	132.8	779	802	5.3	0.011
	FA2-30	25	10	30	49	166	398	66.4	199.2	769	791	5.0	0.010

$B = C + SF + FA$

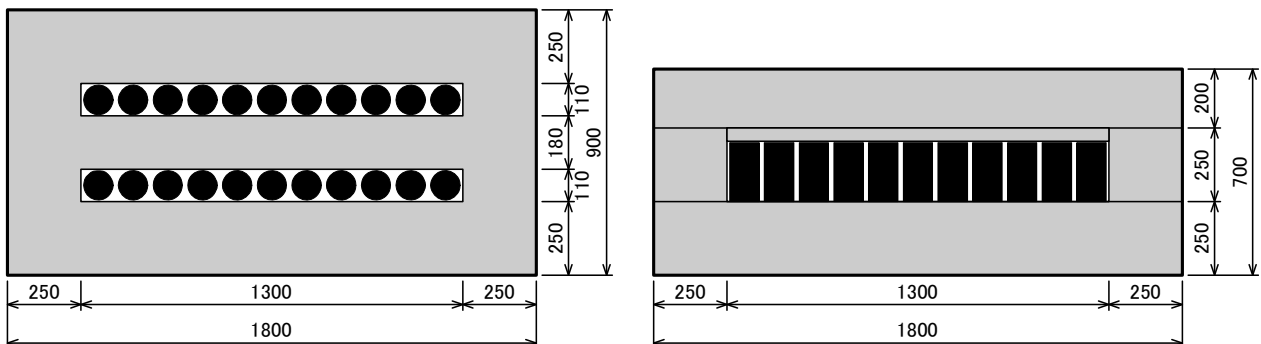


図-1 簡易断熱養生ボックス

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 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体を用いた。試験材齢は 1 日、3 日、7 日、14 日、28 日、56 日（シリーズ 2 のみ）および 91 日である。供試体の端面処理は研磨機による研磨仕上げである。40℃養生の場合、試験 1 時間前に 20℃水槽へ移し試験直前に研磨、60℃養生の場合、試験 2 時間前に 40℃水槽へ、1 時間前に 20℃水槽へ移し、試験直前に研磨を行った。圧縮強度試験では、コンプレッションメーターを供試体に取り付けひずみの測定を行い、静弾性係数を JIS A 1149 に従って算出した。なお、圧縮強度は供試体 3 本の結果の平均を用いた。

2.5 乾燥収縮試験

シリーズ 1 における乾燥収縮試験は、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体にゲージ長 120mm の埋込み型ひずみゲージを配置して行った。試験は湿潤養生後の材齢 1 日、3 日、5 日および 7 日に開始し、試験環境は温度 20℃、相対湿度 60%とした。供試体の上下面にはアルミテープを貼付け、供試体側面のみを乾燥面とした。ひずみの計測は 340~350 日間行った。なお、乾燥収縮に影響する体積表面積比は 100×100×400mm の角柱供試体と同一である。同一バッチで製作した供試体の収縮ひずみはほぼ等しいことを確認し、測定本数を各 1 本とした。

3. シリーズ 1 の結果および考察

3.1 圧縮強度

図-3 に材齢と圧縮強度(f_c)の関係を配合別に示す。

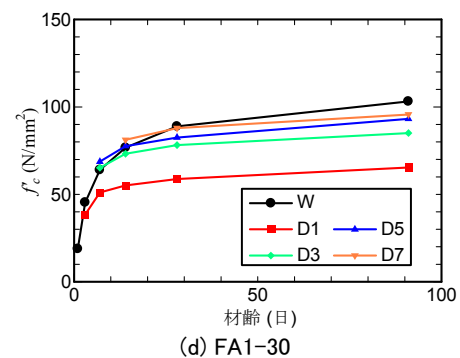
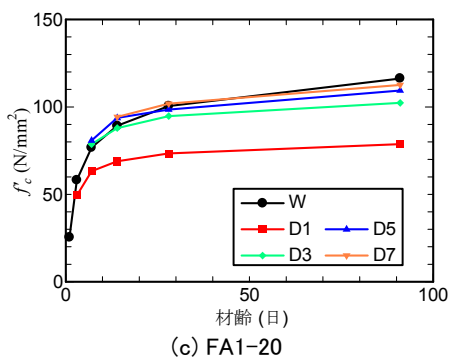
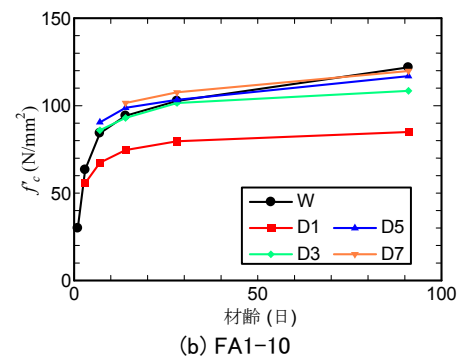
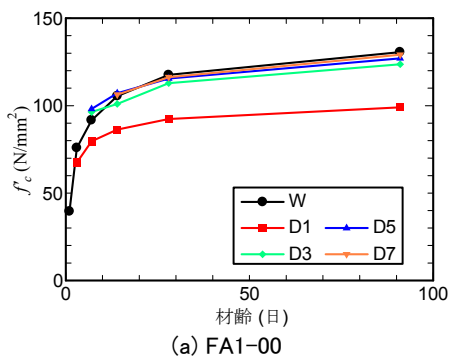


図-3 圧縮強度

凡例の W は水中養生、D は湿潤養生期間を示す。いずれの配合においても、D1 の強度が著しく低下していることがわかる。D3 および D5 の 7 日強度が W の強度を上回っている。また、D5 の 14 日強度も W の強度より大きくなっていることがわかる。これはコンクリートの乾燥により表面エネルギーが増加したことによる強度増加のためであると考えられる。FA1-00 では、D3 の強度が W の

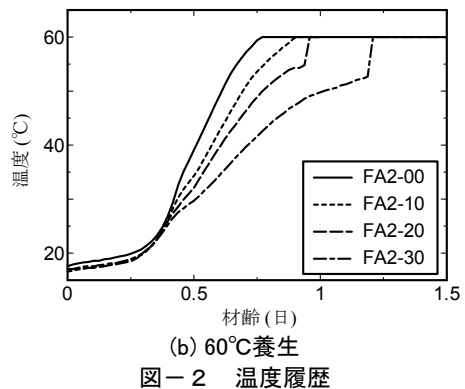
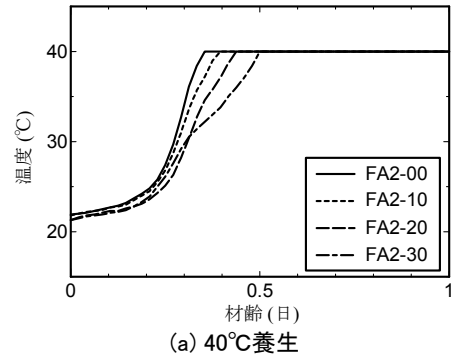


図-2 温度履歴

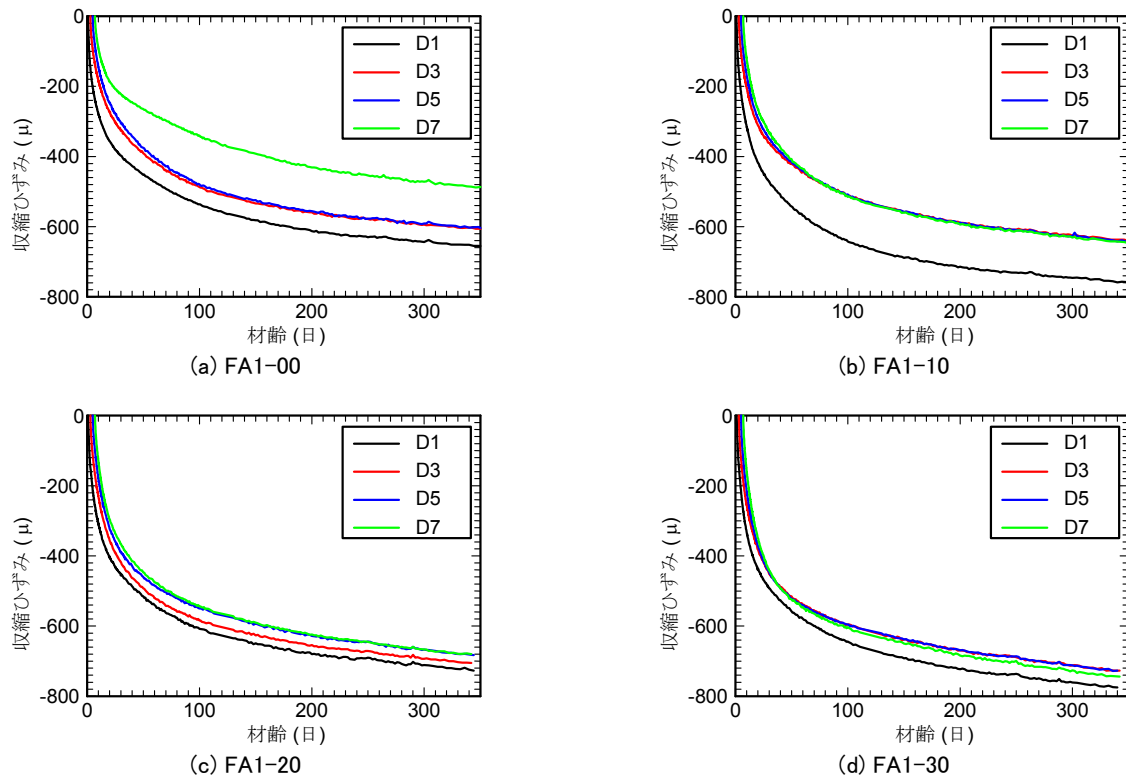


図-4 乾燥開始後収縮ひずみ

強度より若干小さくなっているが、D5 および D7 の強度は W と同程度になっていることがわかる。FA1-10 では、D3 の 91 日強度が W より小さくなっているが、D5 および D7 の強度は W と同程度以上になっている。FA1-20 では、D3 の 28 日および 91 日強度、D5 の 91 日強度が W より小さくなっている。FA1-30 では、D3、D5、D7 の湿潤養生終了直後の強度は W より大きくなっているが、その後の強度は小さくなっている。このように、フライアッシュ置換率が大きくなるに従い、初期の湿潤養生期間を短くすることによる強度低下が大きくなることわかる。

3.2 乾燥収縮

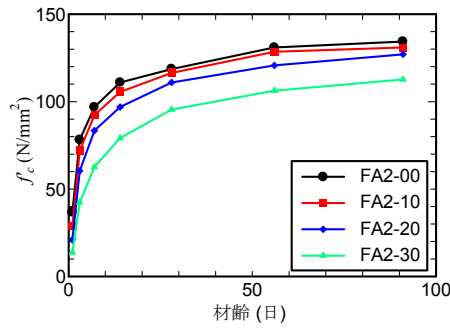
乾燥収縮試験において測定される収縮ひずみには、自己収縮も含まれる。特に乾燥開始材齢 1 日および 3 日では多くの自己収縮ひずみ成分が含まれると予想されることより、測定された収縮ひずみを乾燥開始後収縮ひずみと表することとする。図-4 に材齢と乾燥開始後収縮ひずみの関係を示す。図はそれぞれ、フライアッシュ置換率 0%、10%、20% および 30% における図である。いずれの配合において、湿潤期間が長いほど収縮ひずみが小さくなっていることがわかる。乾燥開始から 1 ヶ月程度までの収縮ひずみの増加量は、湿潤期間が短いほど小さくなっているが、2 ヶ月以後の収縮ひずみの増加量は湿潤期間によらずほぼ一定であり、ひずみ差に変化がないことがわかる。またフライアッシュ置換率が高いほど収縮ひずみも大きくなっていることがわかる。FA1-00 では、D3 および D5 の収縮ひずみは D7 より 120 μ 程度、D1 の

ひずみは 180 μ 程度大きい。FA1-10 では、D3、D5 および D7 の収縮ひずみは同程度であり、D1 の収縮ひずみは他より 130 μ 程度大きい。FA1-20 および FA1-30 では、湿潤期間による差は小さく 50 μ 程度である。これは湿潤養生期間が短いほどコンクリートの水和反応が進んでおらず、未水和水が多く残っており蒸発水量が増加したこと、弾性係数が小さいこと、また自己収縮の成分が多いことにより収縮量が増加したと考えられる。フライアッシュ置換率が高いほど収縮ひずみが大きくなる要因は、自己収縮以外について同様であると考えられる。

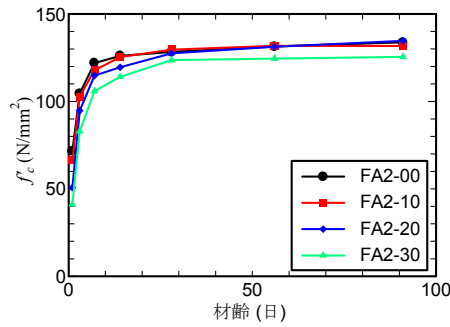
4. シリーズ 2 の結果および考察

4.1 材齢と圧縮強度の関係

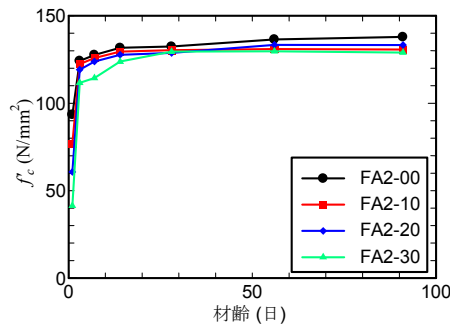
図-5 に材齢と圧縮強度(f'_c)の関係を養生温度別に示す。20℃養生では、材齢 91 日までの範囲において、フライアッシュ置換率が大きくなるに従い圧縮強度が低下していることがわかる。材齢 28 日における FA2-30 の FA2-00 に対する強度低下率は 19.5%、材齢 91 日では 16.1% であり、材齢 91 日においても強度低下が比較的大きいままである。40℃養生では材齢 28 日以降、60℃養生では材齢 14 日以降のフライアッシュ置換による強度低下は小さくなっており、材齢 28 日における FA2-30 の 40℃養生および 60℃養生の強度低下率は、それぞれ 3.7% および 2.2%、材齢 91 日における強度低下率は、それぞれ 6.2% および 6.5% である。このように、40℃以上の温度で養生が継続された場合、ポズラン反応が活性化された



(a) 20°C養生

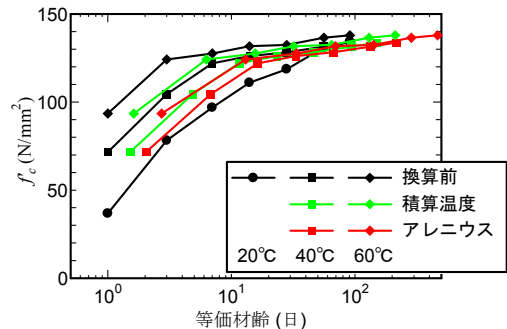


(b) 40°C養生

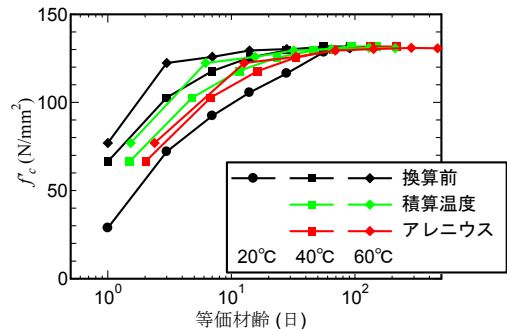


(c) 60°C養生

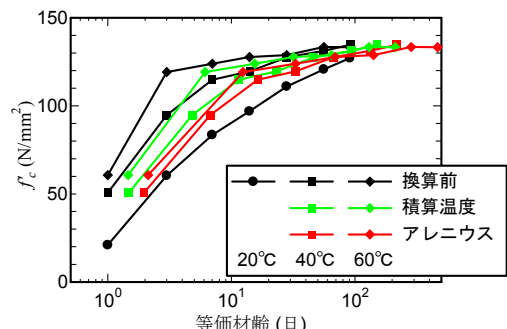
図-5 材齢と圧縮強度の関係



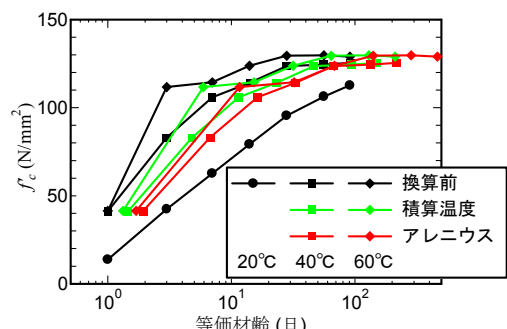
(a) FA2-00



(b) FA2-10



(c) FA2-20



(d) FA2-30

図-6 等価材齢と圧縮強度の関係

ためフライアッシュ置換による強度低下が抑制されたものと考えられる。また、60°C養生では材齢3日強度が材齢28日強度の9割前後になっており、初期強度の増加が非常に大きいことがわかる。

4.2 等価材齢と圧縮強度の関係

コンクリートの強度に及ぼす養生温度の影響を考慮する方法として等価材齢を用いる方法がある。本研究では積算温度およびアレニウス式に基づき求めた等価材齢と圧縮強度の関係について検討する。積算温度に基づく等価材齢は式(1)を用いて、アレニウス式^{5),6)}に基づく等価材齢は式(2)を用いて求めた。

$$t_e = \frac{\sum (T - T_0) \Delta t}{20 - T_0} \quad (1)$$

$$t_e = \sum \exp \left(13.65 - \frac{4000}{273 + T} \right) \Delta t \quad (2)$$

ここで、 T_0 :基準温度
 T :養生温度
 Δt :養生温度 T の期間

T_0 は一般的に採用されている -10°C 、 Δt は10分、アレニウス式における活性化エネルギーは 33.5 kJ/mol としている。図-6に等価材齢と圧縮強度(f_c)の関係を示す。

等価材齢が最大で 466 日になること、および初期材齢における比較が容易になるように等価材齢を対数表示とした。また、ゴンペルツ曲線式を用いて求めた強度の収束値に及ぼす温度の影響として、40℃および 60℃養生で強度の収束値が低下していたが、その低下率は 2~7%であり、大きくなかった。このことに基づき考察を行う。いずれの配合においても、等価材齢を用いることにより 40℃および 60℃養生の材齢と圧縮強度の関係が 20℃養生のそれに近くなっていること、60℃養生よりも 40℃養生の材齢と圧縮強度の関係の方が 20℃養生に近くなっていることがわかる。さらに積算温度よりもアレニウス式に基づく等価材齢を用いる方が同一の関係に近づくことがわかる。40℃および 60℃養生の等価材齢を用いることによる 20℃養生への近似の程度は、FA2-00、FA2-10、FA2-20 では同程度であり、FA2-30 では劣っている。FA2-30 では、高温養生による水和反応およびボゾラン反応の促進効果が他の配合より高かったことが要因であると考えられる。積算温度による結果は、基準温度を一般的に採用されている -10℃としたものであり、基準温度を変えることにより近似度を高めることは可能であると考えられる。同様にアレニウス式による結果も、活性化エネルギーを変えることによりさらに近似度を良くすることが可能であると考えられる。

4.3 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-7 に圧縮強度と静弾性係数(E_c)の関係を示す。養生温度 40℃および 60℃の圧縮強度が材齢 7 日あるいは 3 日において 100 N/mm² をこえていたことにより、圧縮強度 100 N/mm² 以上におけるデータが多くなっている。図より圧縮強度と静弾性係数の関係は、フライアッシュ置換率の影響を受けていないことがわかる。また、養生温度が異なることの影響も受けていないといえる。圧縮強度の増加に対する静弾性係数の増加率は、圧縮強度 120 N/mm² までの範囲において強度増加に伴い減少を示しているが、強度 120 N/mm² を境として静弾性係数の増加率が大きくなっているようである。

5. まとめ

本研究では、フライアッシュとシリカフェームを併用した高強度コンクリートの強度特性および乾燥収縮特性に及ぼす養生環境の影響を検討するために、湿潤養生期間、養生温度およびフライアッシュ置換率を変えて、圧縮強度試験および乾燥収縮試験を行った。養生温度の等価材齢への換算において、積算温度については基準温度を一般的に採用されている -10℃とし、アレニウス式については活性化エネルギーを 33.5 kJ/mol とした。その結

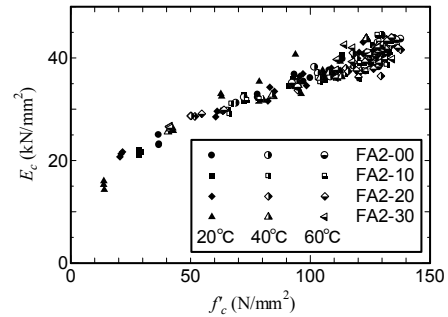


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

果、次のようなことが明らかになった。

- 1) 湿潤養生期間を 1 日にした場合、著しい強度低下を起こす。
- 2) フライアッシュ置換率が大きくなるに従い、湿潤養生期間を短くすることによる強度低下が大きい。
- 3) 湿潤養生期間が長いほど、乾燥開始後の収縮量は小さくなる。
- 4) フライアッシュの混和による圧縮強度の低下は養生温度が 40℃および 60℃において抑制される。
- 5) 圧縮強度に及ぼす養生温度の影響を考慮する等価材齢は、アレニウス式に基づくものがよい。
- 6) 圧縮強度と静弾性係数の関係に、フライアッシュ置換率と養生温度は影響しない。

参考文献

- 1) 船本憲治ほか：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文報告集，Vol.18，No.1，pp.357-362，1996
- 2) 深川正浩ほか：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特性及び耐久性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.205-210，1997
- 3) 菅田紀之，三好友也，井田翔：フライアッシュとシリカフェーム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ついて，セメント・コンクリート論文集，No.63，pp.486-492，2010
- 4) 小山央，菅田紀之：フライアッシュとシリカフェームを併用した高強度コンクリートの自己収縮低減，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.413-418，2011
- 5) CEB：CEB-FIP Model Code 1990，Thomas Telford，pp.61-62，1993
- 6) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，土木学会，pp.105-108，2013