

論文 高強度コンクリートの圧縮強度および収縮特性に及ぼすフライアッシュ混和およびその減水作用の影響

松村 音生*1・菅田 紀之*2・須藤 遥平*1

要旨：高強度コンクリートの圧縮強度および収縮特性に及ぼすフライアッシュの混和およびその減水作用の影響を明らかにするために、圧縮強度試験および収縮試験を実施し、単位水量を一定にしたものと減少させたものとの比較を行った。水結合材比は 30%一定、フライアッシュの置換率は 0%, 10%, 20%, 30%と変化させた。その結果、フライアッシュ置換率が増加するほど圧縮強度および自己収縮は減少、乾燥収縮は増加すること、単位水量を減少させることで、圧縮強度および自己収縮は若干増加、乾燥収縮は減少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、単位水量、圧縮強度、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 CO₂ 排出量などを削減するカーボンニュートラルが重要視されている。特にコンクリートの分野では、コンクリートの製造に欠かせない材料の 1 つであるセメントを 1t 使用する際に約 770 kgの CO₂ を排出することが問題の 1 つとなっている。問題の解決方法として、セメントの一部を産業副産物で置換することで、セメントの使用量を減少させることが考えられている。本研究では、石炭火力発電所から排出される石炭灰の一種であるフライアッシュに着目した。フライアッシュを含む石炭灰の約 6割はセメント原料として利用されているが、CO₂ 削減効果は少ない。CO₂ 削減のための有効利用としては、前述したようにセメントの一部をフライアッシュで置換することであり、コンクリート用混和材としての利用を増加、推進させることが重要であると考えられる。

フライアッシュを混和材として用いた場合、コンクリートの流動性の向上、水和熱の低減などの効果があるが、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¹⁾。その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⁾⁻⁸⁾。これらの研究では、フライアッシュ置換率の増加に伴い圧縮強度は低下、特に初期強度は大きく低下した。加えて、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。しかしながら、これらの研究は単位水量が一定の下で行われたものであり、フライアッシュの流動

表－1 使用材料

材料(記号)	性質
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16 g/cm ³ 比表面積: 3,340 cm ² /g
フライアッシュ(FA)	JIS II種 密度: 2.33g/cm ³ 比表面積: 3,950 cm ² /g
細骨材(S)	陸砂 表乾密度: 2.70 g/cm ³ 粗粒率: 2.70
粗骨材(G)	砕石 2005 表乾密度: 2.66 g/cm ³ 粗粒率: 6.61
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

性向上効果を活かしている研究ではなかった。また、高強度コンクリートの性質に及ぼすフライアッシュの減水作用の影響を検討した研究も少ないのが現状である。

本研究では水結合材比を 30%とし、フライアッシュを混和した高強度コンクリートの強度発現および収縮に及ぼすフライアッシュおよびその減水作用の影響を明らかにすることを目的とし、圧縮強度試験および収縮試験を行い、単位水量を一定にしたものと減少させたものの比較検討を行った。

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。使用したフライアッシュは JIS A 6201 の II 種規格を満たすものである。細

*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 大学院工学研究科もの創造系領域准教授 博士 (工) (正会員)

表-2 配合

配合名	W/B (%)	FA/B (%)	s/a (%)	SP/B (%)	単位量(kg/m ³)							スランプ フロー (cm)	空気量 (%)
					W	C	FA	S	G	SP	AF		
N	30	0	49	0.45	165	550	0	855	876	2.48	0.00743	45	2.3
C10		10		0.41	165	495	55	846	868	2.26	0.00677	45	2.5
C20		20		0.39		440	110	838	859	2.15	0.00644	42	1.9
C30		30		0.37		385	165	830	851	2.04	0.00611	40	2.2
R10		10	0.45	0.45	157	471	52	869	891	2.36	0.00707	45	1.6
R20		20			152	405	101	875	897	2.28	0.00684	42	1.8
R30		30			147	343	147	882	904	2.21	0.00662	41	2.0

骨材として陸砂, 粗骨材として碎石 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, フライアッシュの置換率(FA/B)を 0, 10, 20, 30%の 4 種類に設定した。単位水量一定条件では単位水量を 165 kg/m³とし, 目標スランプフローを 40cm として高性能 AE 減水剤量を決定した。各配合の添加率(SP/B)は 0.45%, 0.41%, 0.39%, 0.37%となった。単位水量減少条件では, 高性能 AE 減水剤添加率(SP/B)をフライアッシュの置換率 0%と同様の 0.45%とし, 単位水量を減少させることにより目標スランプフロー40cm が得られるようにした。各配合の単位水量は表に示すとおり 157 kg/m³, 152 kg/m³, 147 kg/m³となった。配合は合計 7 ケースであり, 全ケースにおいて粗骨材絶対容積が 0.32 m³/m³ 程度になるように細骨材率を 49%とし, 目標空気量は 2.0%に設定した。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。配合名についてはフライアッシュ無混和のものを N, 単位水量一定条件でフライアッシュを混和したものを C10, C20, C30, 単位水量減少条件でフライアッシュを混和したものを R10, R20, R30 と表記する。

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 24 時間 20℃の封かん養生とし, 脱型後は 20℃水中養生とした。試験は 3 本の供試体で行い, それら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。

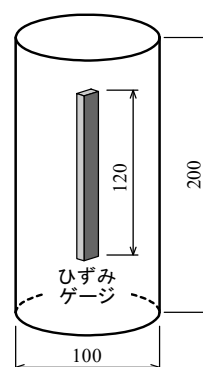


図-1 収縮試験用供試体

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。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。ひずみの測定は温度 20℃ 環境のもとで密閉後から開始し, 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, 型枠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⁹⁾。

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℃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℃, 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。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2に各材齢のフライアッシュ置換率と圧縮強度の関係、表-3に各材齢における単位水量一定条件および単位水量減少条件のフライアッシュ混和配合と無混和配合との圧縮強度比、表-4に各材齢における単位水量一定条件と単位水量減少条件の同置換率での圧縮強度差を示す。

図-2よりフライアッシュ置換率が増加するほど、材齢に関わらず単位水量一定条件、単位水量減少条件ともに圧縮強度は小さくなっ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伴いセメント量が減少し水和反応量が減少したことによるものと推察される。

表-3より、材齢 7 日における強度比は、フライアッシュ置換率 10%において約 90%，フライアッシュ置換率 20%において約 80%，フライアッシュ置換率 30%において約 70%であり、フライアッシュ置換率程度の強度低下が生じていることがわかる。材齢が 28 日、91 日と経過するに従い、強度比は大きくなっており、フライアッシュ置換率 10%では N と同程度の強度が得られている。これはポゾラン反応の効果であると考えられる。また、単位水量一定条件と単位水量減少条件を比較すると、単位水量減少条件の強度比が若干大きくなっていることがわかる。

表-4より、材齢 7 日における強度差は、フライアッシュ置換率 10%、20%で 1.7 N/mm²、強度増加率としては 2.0%、2.3%、置換率 30%で 3.5 N/mm²の強度差、増加率は 5.6%となっている。材齢 28 日では全置換率で 3.0 N/mm²程度の強度差、増加率は 3.0%、2.8%、3.6%となっている。また、材齢 91 日における強度差は、フライアッシュ置換率 10%、20%で 3.0 N/mm²程度、強度増加率としては 2.5%、2.4%、置換率 30%で 2.3 N/mm²の強度差、増加率は 2.2%となっている。前述したように、単位水量減少条件の圧縮強度は、単位水量一定条件に比べ若干大きくなっており、その増加量は 2~3 N/mm²、増加率は 2~6%になることがわかる。単位水量減少条件において圧縮強度が若干増加した要因としては、表-2の配合から分かるように骨材量が多く、練り混ぜ過程において骨材表面に吸着する水が増加し、ペースト中の水量

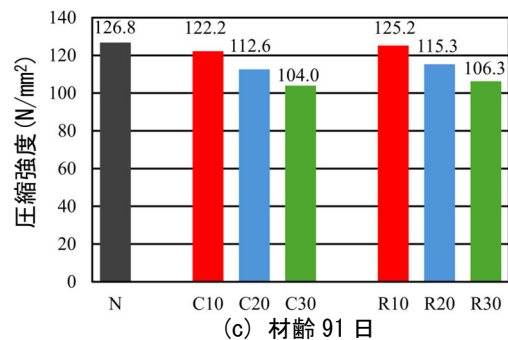
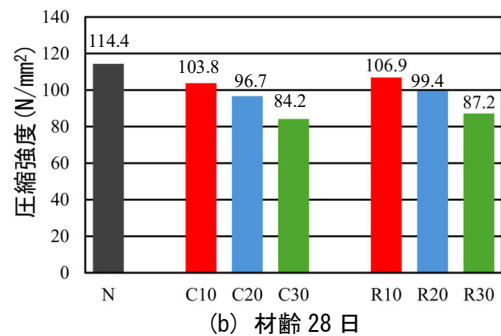
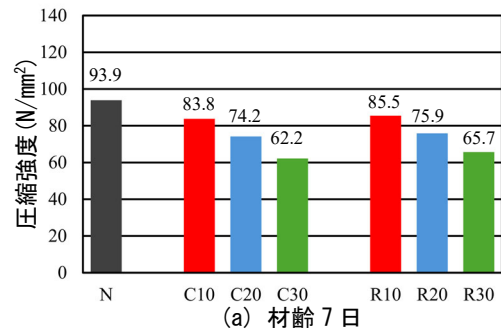


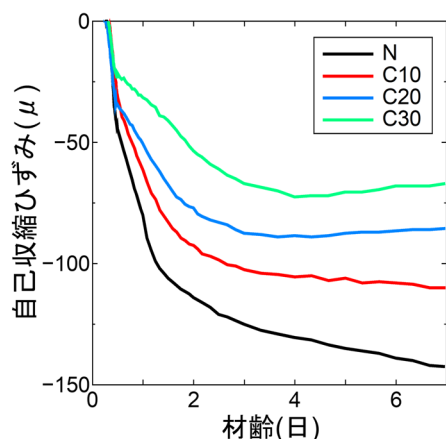
図-2 圧縮強度

表-3 単位水量減少条件(R**), 単位水量一定条件(C**)とフライアッシュ無混和(N)との圧縮強度比(%)

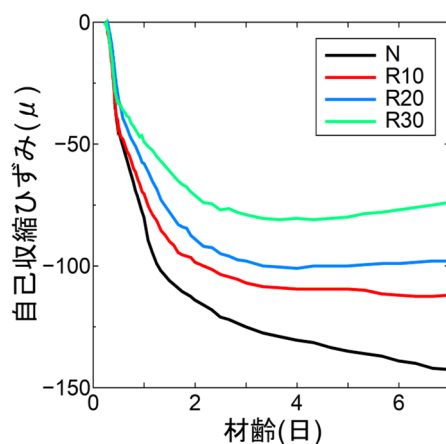
	C10/N	C20/N	C30/N	R10/N	R20/N	R30/N
材齢 7 日	89.2	79.0	66.2	91.1	80.8	70.0
材齢 28 日	90.7	84.5	73.6	93.4	86.9	76.2
材齢 91 日	96.4	88.8	82.0	98.7	90.9	83.8

表-4 単位水量減少条件(R**)と単位水量一定条件(C**)との圧縮強度差(N/mm²)

	R10-C10	R20-C20	R30-C30
材齢 7 日	1.7	1.7	3.5
材齢 28 日	3.1	2.7	3.0
材齢 91 日	3.0	2.7	2.3



(a) 単位水量一定条件



(b) 単位水量減少条件

図-3 自己収縮ひずみ

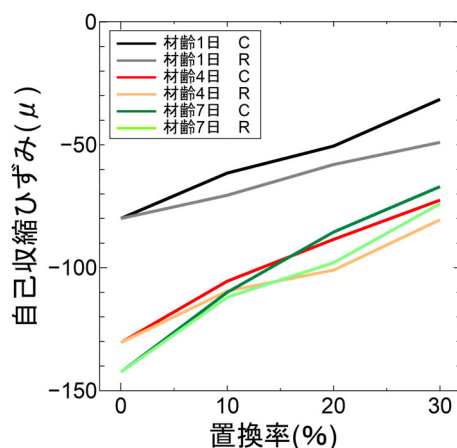


図-4 各材齢の自己収縮

が減り実質的に水結合材比が小さくなったことが考えられる。

3.2 自己収縮

図-3に自己収縮ひずみの結果を示す。フライアッシュ置換率が増加するほど、単位水量一定条件、単位水量減少条件ともに自己収縮ひずみは小さくなっているこ

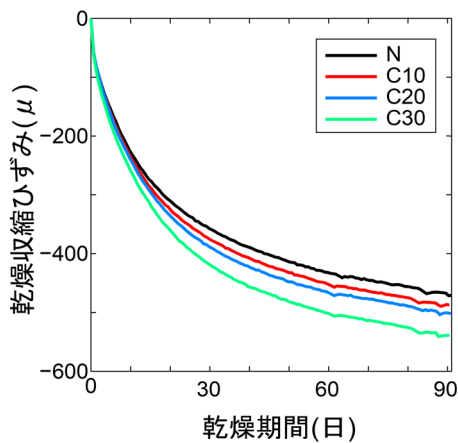
とがわかる。これはフライアッシュ置換率が増加するほど、相対的に単位セメント量が減少するため、水和反応量が減少し、自己乾燥度合いが低減されるとともに細孔構造の緻密化が進まなかったためと考えられる。また、フライアッシュ置換率 20% (C20, R20)および 30% (C30, R30)の自己収縮が材齢 4 日以降減少するという現象が起きていることがわかる。

図-4に横軸に置換率を取り材齢ごとの自己収縮ひずみを示す。凡例中の C は単位水量一定条件、R は単位水量減少条件を意味している。単位水量一定条件と単位水量減少条件を比較すると、材齢 7 日において単位水量減少条件の R10 の自己収縮ひずみは単位水量一定条件の C10 と同程度であるが、フライアッシュ置換率 20%および 30%では単位水量減少条件の自己収縮ひずみが単位水量一定条件のものより大きくなっていることがわかる。以上のように、単位水量一定条件に比べ単位水量減少条件の方が、自己収縮は若干大きくなるといえる。この要因としては、3.1 で述べたように実質的に水結合材比が小さくなったことにより、水和進行による自己乾燥度合いが大きくなったこと、細孔構造の緻密化が進んだことが考えられる。

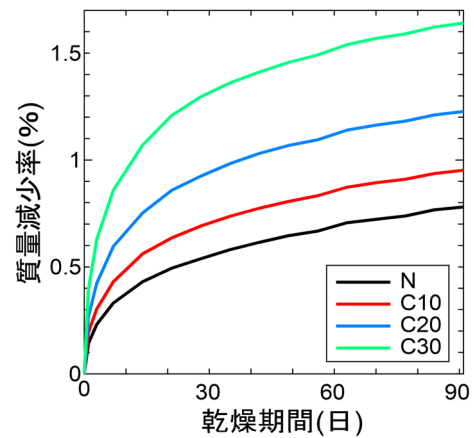
3.3 乾燥収縮

図-5に乾燥収縮ひずみの結果を示す。フライアッシュ置換率の増加に伴い、単位水量一定条件では乾燥収縮ひずみが大きくなっていることがわかる。これはフライアッシュ置換率が高いほど水和反応量が減少し、乾燥開始時にコンクリート内に蒸発可能な未反応水が多く残っていたことが影響していると考えられる。しかしながら、単位水量減少条件では、R10 の乾燥収縮ひずみが N と同程度となっている。また R30 は N より大きいものの R20 よりも小さく R20 の乾燥収縮ひずみが最も大きくなった。これは R10 および R30 の供試体ごとの収縮ひずみのばらつきは小さかったのに対して、R20 の収縮ひずみのばらつきが大きかったことが影響し、このような結果になったものと考えられる。

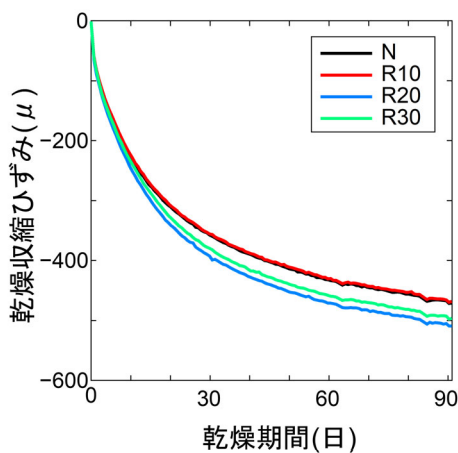
図-6に横軸にフライアッシュ置換率を取り材齢ごとの乾燥収縮ひずみを示す。全材齢において置換率 20%を除くと、単位水量減少条件の乾燥収縮ひずみは、単位水量一定条件に比べ小さくなっていることがわかる。また、置換率 30%での、材齢 91 日における単位水量減少条件の乾燥収縮ひずみが、材齢 56 日における単位水量一定条件のものと同程度まで小さくなっていることがわかる。これは単位水量が減少していることにより、乾燥開始時点での未水和水量が少なくなり、乾燥による蒸発水が減少したこと、収縮の駆動力となるセメントペースト量が減少したことが要因として考えられる。



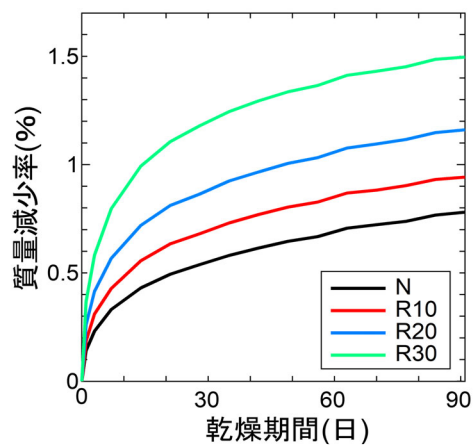
(a) 単位水量一定条件



(a) 単位水量一定条件



(b) 単位水量減少条件



(b) 単位水量減少条件

図-5 乾燥収縮ひずみ

図-7 質量減少率

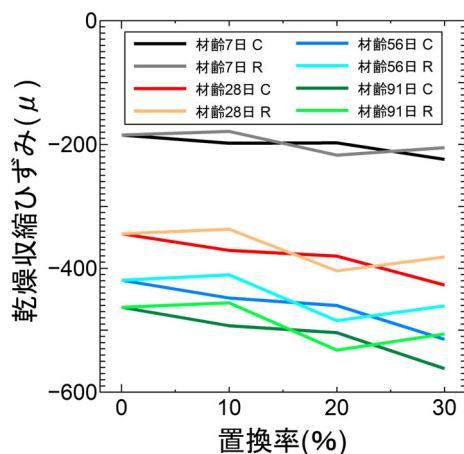


図-6 各材齢の乾燥収縮

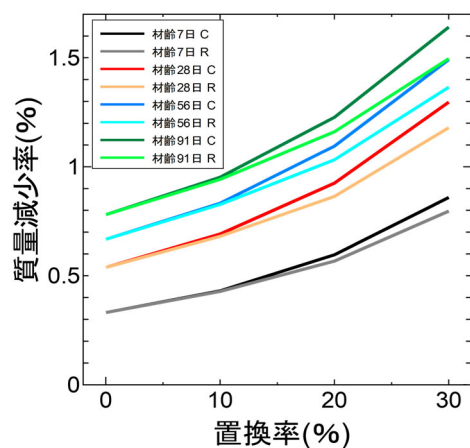


図-8 各材齢の質量減少率

3.4 質量減少率

図-7に乾燥による質量減少率の結果を示す。フライアッシュ置換率の増加に伴い、単位水量一定条件、単位水量減少条件ともに質量減少率が大きくなっていることがわかる。これはフライアッシュ置換率が增大するほど水和反応によって消費される水が少なく、蒸発可能

な水量が多くなること、空隙構造が粗であり水が蒸発しやすい状態になっていることが要因として考えられる。また単位水量一定条件、単位水量減少条件ともに乾燥初期では急激に質量減少率は増大するが、それ以降の期間では、質量減少率の増加量が緩やかになっていることがわかる。

図-8に横軸にフライアッシュ置換率を取り材齢ごとの質量減少率を示す。全材齢において単位水量減少条件の質量減少率が、単位水量一定条件に比べ小さくなっていることがわかる。また、材齢の経過にともない差が大きくなっていることもわかる。この質量減少率は蒸発水の量を示しており、単位水量減少条件の乾燥収縮ひずみが小さくなる要因の1つといえる。

4. まとめ

本研究では水結合材比を30%とし、高強度コンクリートの圧縮強度および収縮特性に及ぼすフライアッシュの混和および減水作用の影響について明らかにするため、単位水量一定条件および単位水量減少条件で圧縮強度試験および収縮試験を行い検討した。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圧縮強度は小さくなる。
- 2) 単位水量減少条件の圧縮強度は、フライアッシュ置換率に関わらず単位水量一定条件に比べ若干大きくなる可能性がある。
- 3) フライアッシュ置換率の増加により自己収縮ひずみは小さくなる。
- 4) 単位水量減少条件の自己収縮ひずみは、フライアッシュ置換率に関わらず単位水量一定条件より若干大きくなる。
- 5) フライアッシュ置換率の増加により乾燥収縮ひずみは大きくなる。
- 6) 単位水量減少条件の乾燥収縮ひずみは、フライアッシュ置換率に関わらず単位水量一定条件より小さくなる。
- 7) フライアッシュ置換率の増加により質量減少率は大きくなる。
- 8) 単位水量減少条件の質量減少率は、フライアッシュ置換率に関わらず単位水量一定条件より小さくなる。

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），土木学会，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，榊田佳寛，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.
- 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) 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
- 7) 齋藤隆明，菅田紀之，田中章梧：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，コンクリート工学年次論報告集，Vol.45，No.1，pp.125-130，2023.6
- 8) 須藤遥平，菅田紀之，齋藤隆明，松村音生：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.46，No.1，pp.175-180，2024.6
- 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