

報告 混和材を大量使用したモルタルの収縮特性に関する研究

清原 千鶴*1・土屋 直子*2・鹿毛 忠継*3・檀 康弘*4

要旨: 本報告では、アジア地域で使用されているセメントおよび混和材(高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ)を用いてモルタル供試体を作製し、収縮特性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、高炉スラグ微粉末を大量使用した場合、環境温度が高いほど長期に渡って乾燥収縮ひずみが増大することや塩基度が大きいほど乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向があることを示唆した。フライアッシュを大量使用した場合、比表面積やSiO₂量に影響を受け、環境温度が高いほど乾燥直後の乾燥収縮ひずみが大きくなることを示した。

キーワード: 混和材大量使用, アジア地域, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 乾燥収縮ひずみ

1. はじめに

現在、アジア地域において、全世界のコンクリートの3/4が生産されており、建設需要は今後さらに増大することが予測される。そのため、セメントクリンカー製造に伴う地球温暖化物質であるCO₂排出量の削減や天然資源消費量の削減が重要な課題の1つである。その一方策として産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材の積極的な有効利用が挙げられ、近年では、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を大量使用した事例も報告され^(例えば 1), 2)であり、国内外に関わらず精力的に研究が進められている。

一般に、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を使用した場合、流動性の改善、長期強度の増進、水和熱の低減、アルカリシリカ反応の抑制などに有効であるとされているが、一方で、初期強度の低下や中性化の促進あるいは早期にひび割れが発生するなどの問題点もあり、混和材を大量使用した場合それらの問題が一層懸念される。このような背景を踏まえて、コンクリートの生産量が増加するアジア各国で産出される産業副産物を大量使用したコンクリートの各種性状に関するデータ

を蓄積していくことは重要であると考えられる。

そこで、本報告では、実際にアジア地域で使用されているセメントおよび混和材(高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ)のサンプルを用いて、モルタル供試体を作製し、使用材料の品質および環境温度の違いがモルタル供試体の収縮特性に及ぼす影響について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料の物理的性質および化学成分

使用した材料の物理的性質と化学成分の一覧を表-1に示す。本実験では、セメントには普通ポルトランドセメント(以下、OPC)を使用し、日本産セメントには3社混合セメントを、海外産セメントには韓国、台湾、ベトナム、インドネシア、タイの5銘柄を用いた。高炉スラグ微粉末(以下、BFS)には、産出国の異なる日本、韓国、台湾の3銘柄を、フライアッシュ(以下、FA)には日本、韓国、台湾、インドネシア、タイの5銘柄を用いた。

OPCの密度はいずれの銘柄もほぼ同程度であったが、比表面積はタイ産(TH)が他国のセメントに比べて小さ

表-1 使用材料の物理的性質および化学成分一覧表

種類	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	塩基度	未燃 カーボン (%)	化学組成(%)																鉱物組成(%)			
						ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	S	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl ⁻	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
OPC	日本 A	JP-A	3.15	3260	-	-	2.19	19.99	5.72	-	2.95	64.3	1.28	0.29	0.08	-	2.44	0.28	0.42	0.10	0.026	56.1	19.5	9.5	8.1
	日本 B	JP-B	3.12	3310	-	-	2.73	20.46	5.19	-	3.14	64.3	0.84	0.29	0.09	-	2.00	0.31	0.34	0.45	0.020	56.4	18.9	12.5	5.8
	日本 C	JP-C	3.14	3280	-	-	2.40	20.33	5.51	-	2.78	65.1	0.92	0.31	0.05	-	1.88	0.25	0.41	0.12	0.007	47.9	25.3	9.8	8.5
	韓国	KR	3.15	3320	-	-	2.22	21.12	4.03	-	3.58	62.4	2.53	0.20	0.07	-	2.21	0.12	0.99	0.10	0.043	64.8	10.5	5.7	10.9
	台湾	TW	3.12	3260	-	-	2.33	20.63	4.29	-	3.11	63.3	2.87	0.29	0.04	-	2.24	0.29	0.57	0.11	0.009	61.1	12.7	6.7	9.9
	ベトナム	VN	3.14	3560	-	-	2.28	19.98	5.20	-	3.30	64.2	1.77	0.28	0.06	-	2.39	0.12	0.52	0.09	0.014	55.5	18.0	6.3	10.9
	インドネシア	ID	3.12	3230	-	-	2.15	20.15	5.32	-	3.35	64.1	1.87	0.32	0.05	-	2.15	0.12	0.52	0.06	0.018	61.7	13.4	6.0	12.1
タイ	TH	3.11	2720	-	-	2.71	21.78	4.83	-	3.31	61.4	2.41	0.25	0.19	-	2.20	0.16	0.77	0.08	0.008	67.1	10.7	5.3	12.0	
BFS	日本	JP-BFS	2.92	3830	1.89	-	0.10	33.83	14.22	0.36	-	43.5	6.01	0.53	0.17	0.72	-	0.25	0.25	0.01	-	-	-	-	-
	韓国	KR-BFS	2.91	4195	1.69	-	0.23	35.36	13.60	0.36	-	42.4	3.66	0.59	0.36	0.41	2.095	0.20	0.46	0.02	-	-	-	-	-
	台湾	TW-BFS	2.90	5085	1.82	-	0.20	34.83	15.11	0.28	-	41.0	7.17	0.58	0.25	0.53	-	0.29	0.32	0.015	-	-	-	-	-
FA	日本	JP-FA	2.31	4110	-	2.25	2.27	54.31	27.38	-	5.16	3.83	1.16	1.46	0.04	-	0.81	0.90	1.07	0.62	-	-	-	-	-
	韓国	KR-FA	2.28	3990	-	4.96	5.00	54.80	19.17	-	7.97	4.93	1.44	0.89	0.04	-	0.68	1.19	1.08	0.43	-	-	-	-	-
	台湾	TW-FA	2.20	2990	-	2.46	2.52	58.79	20.95	-	5.92	3.91	1.61	0.97	0.03	-	0.65	1.41	1.13	0.27	-	-	-	-	-
	インドネシア	ID-FA	2.76	4040	-	0.28	0.33	39.27	13.73	-	13.6	15.3	5.98	0.57	0.06	-	3.60	1.93	1.18	0.22	-	-	-	-	-
	タイ	TH-FA	2.37	2600	-	0.72	0.72	38.15	19.31	-	10.9	18.4	1.99	0.21	0.04	-	5.78	1.03	2.12	0.17	-	-	-	-	-

*1 東京理科大学 工学部建築学科嘱託補手 博士(工学) (正会員)

*2 (国研)建築研究所 材料研究グループ研究員 博士(工学) (正会員)

*3 国土技術政策総合研究所 建築研究部建築新技術統括研究官 Ph.D (正会員)

*4 日鉄住金高炉セメント(株) 技術開発センターセンター長 博士(工学) (正会員)

く、ベトナム産(VN)が日本産(JP)と比べて大きい。また、日本産(JP)と比較して、韓国産(KR)、台湾産(TW)およびタイ産(TH)はMgOがやや多くなっており、過剰なペリクレスは、セメントの遅れ膨張を起こすことが指摘³⁾されているため、注意が必要である。

BFSの密度はいずれの銘柄においても同程度であるが比表面積は、台湾産(TW-BFS) > 韓国産(KR-BFS) > 日本産(JP-BFS)の順で小さくなっている。また、韓国産(KR-BFS)は石こう添加によりSO₃が2%程度含まれており、塩基度が他の銘柄に比べて小さい。

FAは産出国によってその物性値や化学成分が大きく異なっている。インドネシア産(ID-FA)は他の銘柄と比較して、密度が大きい。さらにインドネシア産(ID-FA)、タイ産(TH-FA)は、未燃カーボン量が少ないが、SiO₂が少なく、CaOやSO₃が多い。

2.2 実験計画

実験水準を表-2に示す。シリーズAでは、生産国の異なるOPCのみを使用したモルタル供試体の収縮特性を把握し、シリーズBでは、日本産OPCを基準に各銘柄の混和材を混入し混和材の品質の違いが収縮特性に及ぼす影響について検討を行った。シリーズCでは、同一産出国のOPCと混和材を組み合わせて、日本産OPCとの組み合わせとの比較検討を行った。なお、シリーズBにおいて、BFSの乾燥収縮ひずみはSO₃量の違いによって異なることが指摘されていることから、無水石こうを用いて韓国産(KR-BFS)と同様のSO₃量が得られるように調整したものを用いて実験を行った。なお、実験の都合上、石こうを添加した割合については打設時期が異なる。

モルタルの割合は、JIS R 5201に準拠し、結合材：水：標準砂=1:0.5:3(質量比)とした。本実験では混和材を大量使用した場合において収縮特性にどのような影響を及ぼすのかを確認するため、BFSおよびFAは内割置換とし、BFS置換率を70%、FA置換率を30%とした。なお、本実験では化学混和剤は適用していない。

2.3 実験方法

実験項目を表-3に示す。打設は、各割合ともに温度20℃、相対湿度60%および温度35℃、相対湿度40%において実施した。全ての供試体において材齢2日まで封緘養生を行い、脱型後、材齢7日まで温度20℃および35℃において水中養生を行った。その後、材齢7日より、温度20℃、相対湿度60%および温度35℃、相対湿度60%の環境下において乾燥を開始した。

フレッシュ性状においては、JIS R 5201に準拠し、モルタルフロー、空気量の測定を行った。圧縮強度試験は材齢7日において実施した。乾燥収縮試験にはφ50×100mmの円柱供試体を用い、埋め込みゲージにて測定を行った。

表-2 実験水準

		OPC					
		JP	KR	TW	VN	ID	TH
OPCのみ (混和材無混入)		●○	○	○	○	△	○
BFS (混入率 70%)	JP	石こう無	●◆	—	—	—	—
		石こう有	●	—	—	—	—
	TW	石こう無	●	—	◆	—	—
		石こう有	●	—	—	—	—
FA (混入率 30%)	JP	●◆	—	—	—	—	
	KR	●	◆	—	—	—	
	TW	●	—	◆	—	—	
	ID	●	—	—	—	◆	
	TH	●	—	—	—	◆	

○:シリーズA, ●:シリーズB, ◆:シリーズC, △:フレッシュ性状のみ

表-3 実験項目

実験項目	供試体寸法	本数	環境条件	養生方法
フレッシュ性状	—	—	20℃, 60%R.H. 35℃, 60%R.H.	材齢2日 脱型後 水中養生 (20℃, 35℃)
圧縮強度	φ50×100mm	3		
乾燥収縮ひずみ	φ50×100mm	2		

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

図-1にフロー値の測定結果を示す。これによると、環境温度が高くなるとモルタルフロー値は低下する傾向にあるが、シリーズAの結果より日本産OPC(JP-OPC)は、20℃に比べて35℃時のフロー値の低下が他国よりも大きいことが分かる。シリーズBおよびCより、BFSを混入したモルタルのフロー値は、BFSの銘柄や混合するセメントの銘柄の違いによらず、混和材無混入のプレーンモルタルのフロー値とほぼ同程度であり、大量使用した場合においても流動性に及ぼす影響は小さいことが確認できた。

一方、FAを混入したモルタルのフロー値は、使用する銘柄によって大きく異なる。日本産FA(JP-FA)、インドネシア産FA(ID-FA)、タイ産FA(TH-FA)は、混和材無混入のプレーンモルタルに対してフロー値が1~2割程度大きくなった。未燃カーボンは、多孔質で水を吸収する性質を持つことや形状が複雑なため流動性に悪影響を及ぼす可能性があることが指摘⁴⁾されているが、本実験においても未燃カーボン量が特に多かった韓国産FA(KR-FA)を使用した場合にフロー値が小さくなっている。

図-2に空気量の測定結果を示す。シリーズAより、日本産OPC(JP-OPC)、インドネシア産OPC(ID-OPC)およびタイ産OPC(TH-OPC)においては、環境温度の影響が見られなかったが、その他の銘柄は環境温度が高くなると1%程度以上空気量が低下している。BFSを混入したモルタルの空気量は、混和材無混入のプレーンモルタルに対して低下しているものが多く、シリーズBでは、環境温度が高い方が空気量の低下が大きく、シリーズCでは、環境温度が低い方が空気量の低下が大きい傾向が

みられ、組み合わせる OPC によって環境温度による影響が異なる結果となった。FA を混入したモルタルにおいて、すべての銘柄において混和材無混入のプレーンモルタルに対して空気量が低下しており、タイ産 (TH-FA) はその低下量が小さく、日本産 (FA-JA) は低下量が大きい結果となった。

なお、BFS の石こう添加の有無が流動性に及ぼす影響は小さいことが報告⁵⁾されているが、石こう添加の有無が、流動性や空気量に及ぼす影響については今後の検討課題としたい。

3.2 圧縮強度

図-3 に材齢 7 日における圧縮強度を示す。シリーズ

A より、いずれのセメントも材齢 7 日の強度発現には環境温度の影響が顕著には現れていない。また、ベトナム産 OPC (VN-OPC) の強度が他のセメントよりも低い結果となった。これは、強度に寄与する C₃S や C₂S が他のセメントよりも少ないことが要因の 1 つであると思われる。

シリーズ B より、BFS の強度発現は環境温度が高いほど早く、BFS を大量使用した場合においても環境温度 35℃ ではその銘柄によらず、混和材無混入のプレーンモルタルとほぼ同等以上の強度発現が得られている。BFS の SO₃ 量の違いについて見てみると、既往の研究⁶⁾と同様に SO₃ 量が 2% 程度の場合は、強度が高くなることが確認できた。また、SO₃ 量が同一時の BFS の塩基度と圧

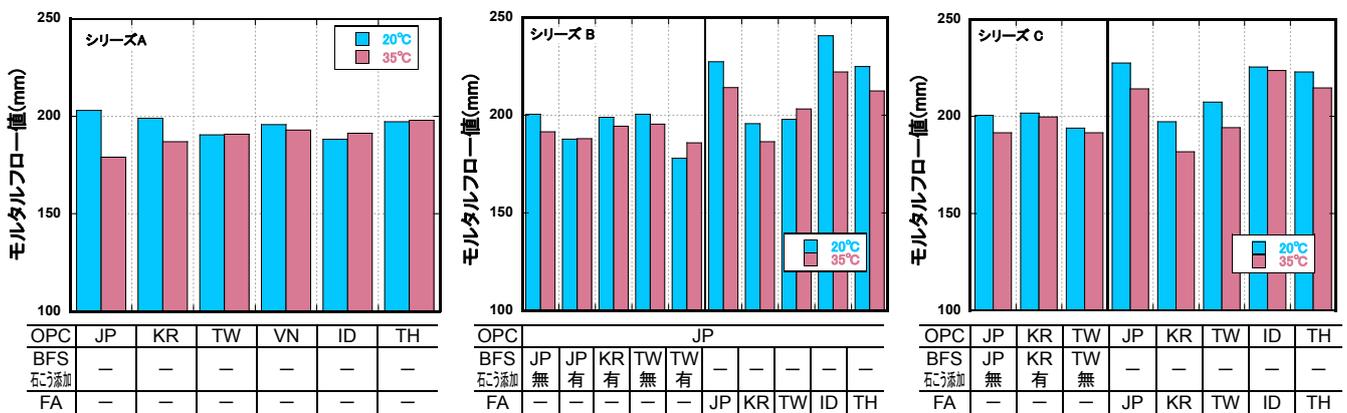


図-1 モルタルフロー測定結果

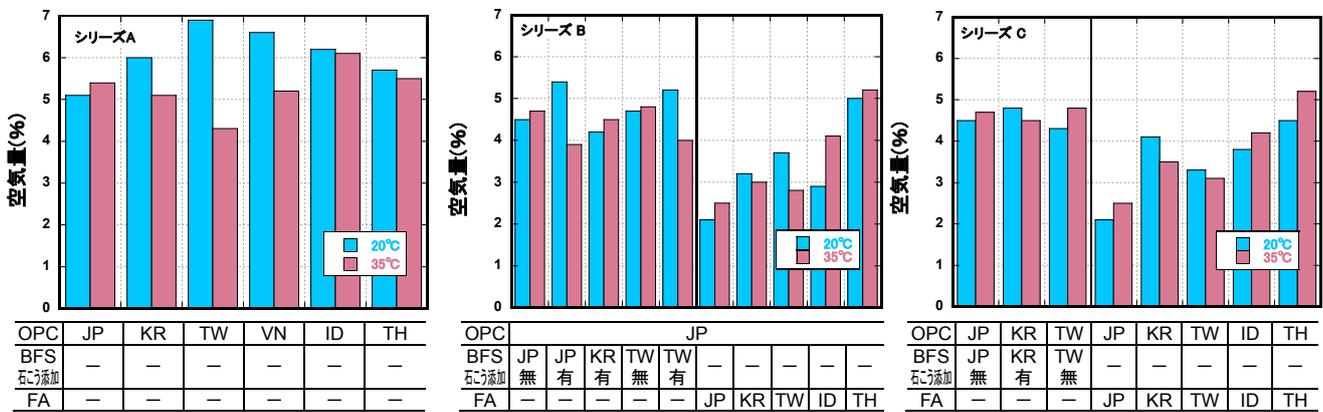


図-2 空気量測定結果

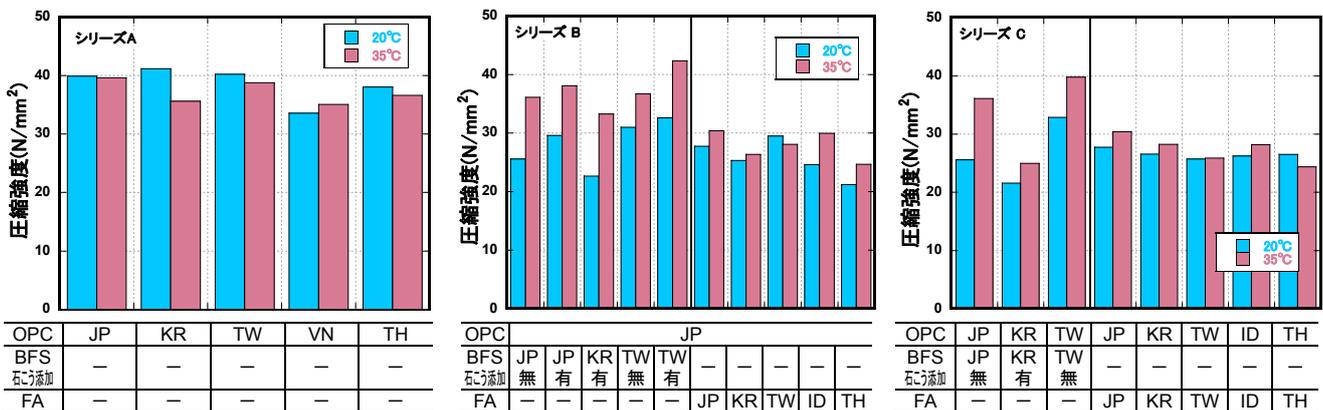


図-3 材齢 7 日圧縮強度

縮強度の関係(図-4)によると、本実験の範囲内においては、塩基度が大きいほど強度が高くなっており、既往の研究⁷⁾と同様に塩基度が高い方が、BFSの反応が進行し緻密になるためと思われる。

FAにおいてもBFSと同様に、概ね環境温度が高くなるほど強度が高い結果が得られた。FAの品質と強度発現の影響については、比表面積が小さくSiO₂量が少ないタイ産FA(TH-FA)の圧縮強度が低いことから、既往の研究⁸⁾を参考にして、FAの比表面積×SiO₂量と圧縮強度の関係(図-5)を求めた。これによると比表面積が大きいほど、SiO₂量が多いほど圧縮強度が高い傾向が確認できた。

シリーズCより、韓国産OPC(KR-OPC)と韓国産BFS(KR-BFS)の組み合わせにおいては、シリーズBの日本産OPC(JP-OPC)と韓国産BFS(KR-BFS)の組み合わせと比較して環境温度の影響が明確には現われなかった。

3.3 乾燥収縮ひずみ

材齢7日から乾燥を開始した乾燥収縮ひずみの経時変化を図-6に示す。また、乾燥材齢7日および90日における乾燥収縮ひずみを図-7に示している。

これらによると、シリーズAでは、乾燥初期においては環境温度が高いほど乾燥収縮ひずみが大きくなっている。また、環境温度20℃の場合、タイ産OPC(TH-OPC)の乾燥収縮ひずみは若干小さくなっているが、その他のセメントにおいては銘柄によらず、ほぼ同一の値を示している。一方、環境温度35℃では、OPCの銘柄によって乾燥収縮ひずみの値が異なっている。OPCの品質が及ぼす影響について、図-8に示すMgO量と乾燥収縮ひずみ

の関係について検討を行った。これによると、MgO量が多いほど乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向が見られた。

シリーズBより、BFSのSO₃量に着目してみると、既往の研究⁷⁾と同様に、SO₃を含有しているBFSを使用したモルタルの方が乾燥収縮ひずみは小さくなっている。また、SO₃量を同一とした場合におけるBFSの塩基度と乾燥収縮ひずみの関係によると(図-9)、本実験の範囲

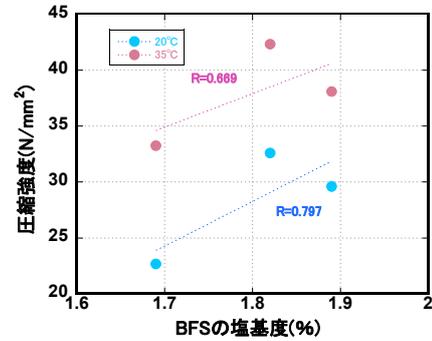


図-4 BFSの塩基度と圧縮強度の関係(シリーズB)

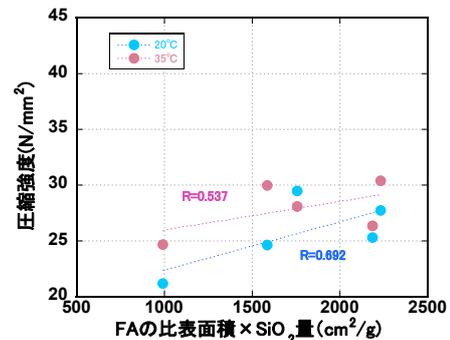


図-5 FAの比表面積×SiO₂量と圧縮強度の関係(シリーズB)

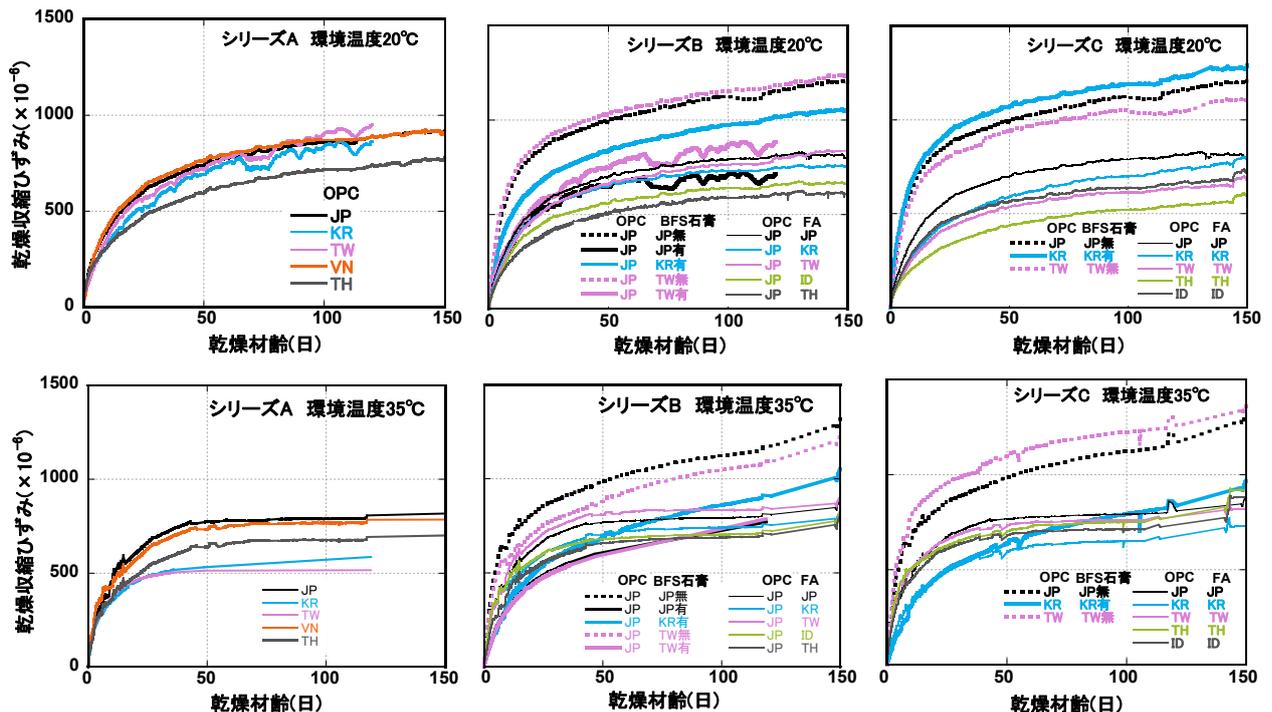
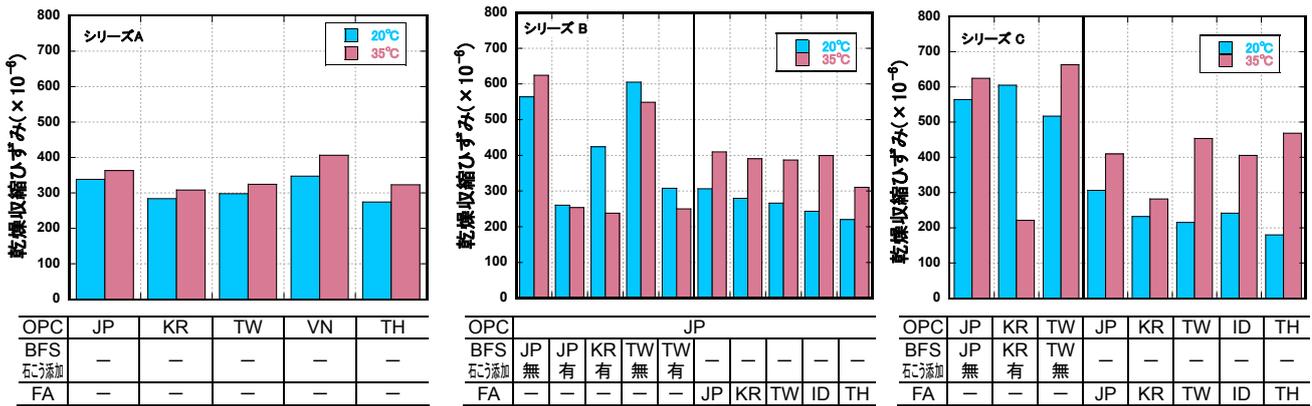


図-6 乾燥収縮ひずみ

a) 乾燥材齢 7 日



b) 乾燥材齢 90 日

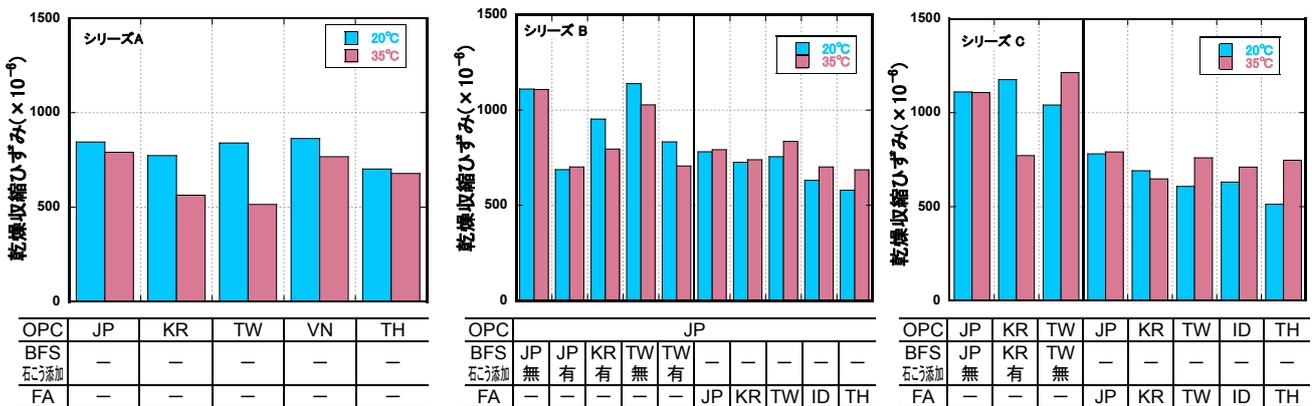


図-7 乾燥材齢 7 日および 90 日における収縮ひずみ

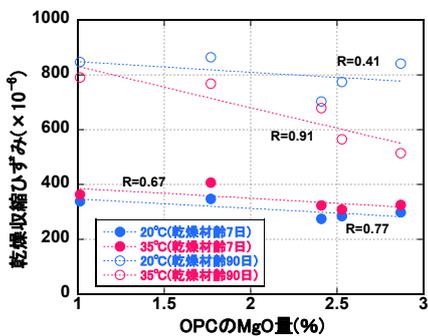


図-8 OPC の MgO 量と乾燥収縮ひずみの関係 (シリーズ A)

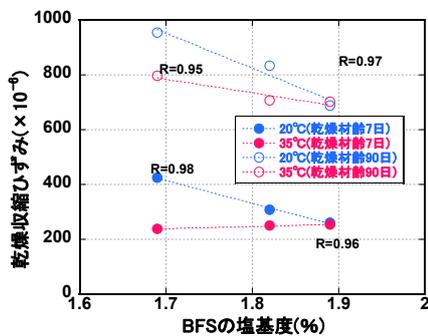


図-9 BFS の塩基度と乾燥収縮ひずみの関係 (シリーズ B)

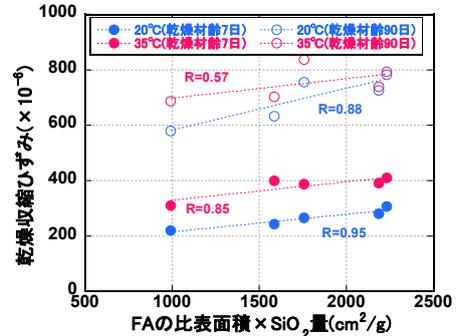


図-10 FA の比表面積 \times SiO₂量と乾燥収縮ひずみの関係 (シリーズ B)

内においては BFS の塩基度が大きいほど乾燥収縮ひずみが低下しており、その傾向は環境温度 20°Cの方が顕著に現れている。圧縮強度と同様に BFS の塩基度は乾燥収縮ひずみにおいても影響を及ぼす可能性があると思われる。なお、本実験では、比表面積と乾燥収縮ひずみには相関性が見られなかった。

FA を大量使用した乾燥収縮ひずみは、乾燥初期において環境温度が高いほど大きくなっている。また、比表面積が小さく、SiO₂量が少ないタイ産(TH-FA)およびインドネシア産(ID-FA)の乾燥収縮ひずみが他の FA に比べて小さい。そこで、FA の比表面積 \times SiO₂量と乾燥収縮ひずみの関係を図-10 に示す。これによると比表面積が大

きくおよび SiO₂量が多いほど、FA を大量使用した場合、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向が見られた。

シリーズ C とシリーズ B を比較すると、BFS を大量使用した場合は、OPC と BFS の組み合わせにより、乾燥収縮ひずみの値が異なっており、FA を大量使用した場合、同一産出国の材料を用いた方が値が小さくなっている。

乾燥開始材齢時の強度発現性が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について検討するため、材齢 7 日の圧縮強度と乾燥材齢 90 日における乾燥収縮ひずみの影響について検討を行った(図-11)。その結果、ばらつきは大きいですが、BFS を大量使用した場合、圧縮強度が高くなるほど乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向が見られた。一方、OPC の

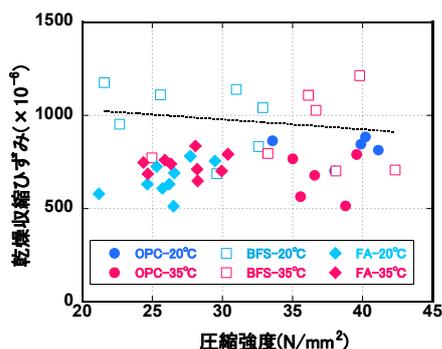


図-11 材齢 7 日圧縮強度と乾燥材齢 90 日における乾燥収縮ひずみの関係

みおよび FA を大量使用した場合においては傾向が見られなかった。

出雲らの研究¹⁰⁾によれば、混和材がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響については、水和反応や毛細管張力の他に細孔内の水の吸着および脱着が要因として考えられることや FA の置換率が上がると細孔内の自由水が増えることにより、水の消費や逸散に対する化学ポテンシャルの変化が少なくなることが指摘されている。また、今本らの研究¹¹⁾によれば、混合セメントコンクリートは環境温度が高くなることによって比表面積と乾燥収縮ともに大きくなることなどが示されている。これらのことから、今後は、混和材を大量使用したモルタルの収縮特性についても水分逸散量や供試体内部の含水率および比表面積などについてもデータを蓄積し検討していく予定である。

4. まとめ

本報告では、混和材を大量使用したモルタルの乾燥収縮ひずみ特性について実験的に検討を行った。なお、本報告で使用した材料は産出国の一例である。本実験の範囲内においては以下のような知見が得られた。

[BFS を大量使用した場合]

- (1) 流動性は OPC のみのものとほぼ同程度である。
- (2) 圧縮強度は塩基度が大きいほど高くなる傾向がある。
- (3) 乾燥収縮ひずみは、環境温度が高くなると長期に渡って収縮ひずみが進行し、SO₃ を含有しているほうが小さくなり、SO₃ 量が同一の場合、塩基度が大きいほど小さくなる傾向が見られた。

[FA を大量使用した場合]

- (1) フレッシュ性状は、未燃カーボン量などの FA の品質に大きく影響を受ける。
- (2) 圧縮強度は比表面積が大きいほど、SiO₂ 量が多いほど高くなる。
- (3) 乾燥収縮ひずみは、環境温度が高くなると乾燥直後の収縮ひずみが大きくなり、比表面積が大きいほど、SiO₂ 量が多いほど大きくなる。

謝辞

本実験は、日本コンクリート工学会 JCI-TC132A:「混和材を大量使用したコンクリートのアジア地域における有効利用に関する研究委員会(委員長:野口貴文東京大学教授)」の一貫として、材料を入手し実施したものです。材料を提供いただいた各国の方々に感謝いたします。実験の遂行には東京理科大学工学部建築学科今本研究室の卒研生および修論生の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林利充, 溝渕麻子, 近松竜一, 一瀬賢一: 混和材を高含有したコンクリートの強度発現および促進中性化に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, vol.32, No.1, pp.118-123, 2012.7
- 2) 辻大二郎ほか: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性(その 1 からその 3), 日本建築学会学術講演梗概集 2011 年度大会(関東)A-1 材料施工, pp.205-210, 2011.8
- 3) 宗田義明, 水上国男, 白坂優: MgO によるセメントの長期強さ低下について, セメント技術年報, Vol.22, pp.63-67, 1968
- 4) 川上晃, 李昇憲, 坂井悦郎, 大門正機: 未燃カーボンを多量に含んだフライアッシュと高性能 AE 減水剤の作用, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.127-132, 1999.7
- 5) 尾関規史, 出光隆, 山崎竹博, 石松宗一郎: 高微粉砕した高炉スラグ微粉末の配合と物理的諸性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.121-126, 2000.7
- 6) 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼす SO₃ 量の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.33, No.1, pp.203-208 2011.7
- 7) 小野吉雄, 河村繁雄, 伊藤隆夫: 高炉スラグのガラス化率, 塩基度と高炉セメントの強さとの関係, セメント技術年報 37, pp.73-76, 1983.12
- 8) 本田悟, 椎葉大和: 各種フライアッシュがコンクリートの諸特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.351-356, 1996.7
- 9) 二戸信和, 大澤友宏, 鯉淵清, 宮澤伸吾: 高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度と SO₃ の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008.7
- 10) 出雲健司, 名和豊春: 二つの異なる温度環境下でのフライアッシュを使用したモルタルの収縮ひずみ挙動, 土木学会論文集 739/5-60 号, pp.221-236, 2003.8
- 11) 今本啓一, 栗原司: 混合セメントコンクリートにおける乾燥収縮ひび割れ特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.376-381, 2012.7