超高強度コンクリート用微粉末のモルタルによる 活性度指数試験結果の再現性に関する一考察

CONSIDERATION IN REPEATABILITY OF ACTIVITY INDEX TEST RESULTS OF MICRO POWDER FOR ULTRA-HIGH STRENGTH CONCRETE BASED ON MORTAR

陣内 浩^{*1}

Hiroshi JINNAI

This paper describes with experimental study on repeatability of activity index test results of micro powder for ultra-high strength concrete based on mortar. This investigation led to the following conclusions. 1) It is possible to obtain a compressive strength test result of the standard mortar with repeatability by a present test method when used material is same. As a result, the repeatability of a result of the activity index test can also be secured. 2) To change the kind of chemical admixture has a high possibility which influences the repeatability of a result of the activity index test.

Keywords : Activity index, Repeatability, Standard mortar, Flow, Mixing time, Chemical admixture

活性度指数, 再現性, 基準モルタル, フロー, 練混ぜ時間, 化学混和剤

1. はじめに

コンクリート用混和材の活性度指数試験は、セメントに対する各種混和材の代替性能を評価する試験として、JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）、JIS A 6206（コンクリート用高炉スラグ微粉末）、JIS A 6207（コンクリート用シリカフューム）などに規定されている。国内の歴史としては、JIS A 6201が1958年の制定時に定めた圧縮強度比の考え方を改良したものであり、同JISでは1996年の改正時から現行の活性度指数試験方法となっている。

2000年に制定されたJIS A 6207でも、すでに普及していた日本建築学会「シリカフュームを用いたコンクリートの調査設計・施工ガイドライン」²⁾および土木学会「シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針（案）」³⁾の考え方を踏襲し、コンクリート用フライアッシュと同様の活性度指数試験方法が規定された。しかしながら、低水結合材比の領域で使用されることの多いシリカフュームの活性度指数を評価するには、JIS A 6201で規定している水結合材比50%のモルタルは適当ではないという実験結果⁴⁾から、2011年版のJIS A 6207より試験に用いるモルタルの水結合材比が30%に改正された。この改正から10年弱が経過し、改正点に関連する問題はあまり議論されることがなかったが、2020年に制定されたJIS A 6209（コンクリート用火山ガラス微粉末）の原案作成作業中に行ったJIS A 6207の活性度指数試験方法を引用した共通実験で、試験結果の再現性が確保できないケースが指摘された^{5),6)}。そこで、JIS A 6207に規定する活性度指数試験方法の試験結果の再現性に関す

る実験的な検証を行うこととした。

2. 対象とする活性度指数試験方法

本研究が対象とする活性度指数試験方法は、JIS A 6207 附属書C（コンクリート用シリカフュームのモルタルによる活性度指数の試験方法）とした。本試験方法は、普通ポルトランドセメントのみで練り混ぜたモルタル（基準モルタル）の圧縮強度と、普通ポルトランドセメントの10%をシリカフュームに置き換えた結合材で練り混ぜたモルタル（試験モルタル）の圧縮強度を式（1）に代入し、材齢7日および材齢28日での活性度指数を求めることとなっている。一部の規定を変更しているが、本試験はJIS A 6209にも引用されている。使用する普通ポルトランドセメントは3種類のものを同量で混合するように規定されており、使用するセメントの物性値の変動が試験結果に及ぼす影響を抑制するようになっている。また、使用する細骨材は、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）で定められている標準砂を使用することとなっている。基準モルタルおよび試験モルタルの水結合材比は30%と定められており、練り上げたモルタルの空気量は2.0%以下とするように規定されている。

$$As = C_1 / C_2 \times 100 \quad (1)$$

ここに、As：活性度指数（%）

C₁：各材齢における試験モルタルの圧縮強度

C₂：各材齢における基準モルタルの圧縮強度

^{*1} 東京工芸大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University, Ph.D.

3. 基準モルタルの試験結果の再現性

試験結果の再現性を検討するにあたり、まずは活性度指数の評価の基準となる基準モルタルの試験結果の再現性を確認することとした。JIS に示される基準モルタルの調合を Table1 に示す。実務的な観点から、基準モルタルの計量値は、セメント協会が販売しているセメント強さ試験用標準砂の一袋分の細骨材（1350g）を使用することを前提に定められている。また、砂セメント比は、すでに普及していた日本建築学会「高強度コンクリート施工指針(案)」に示される JASS 5T-701-2005（高強度コンクリート用セメントの品質基準(案)）と同じ様の 1.4 としている。この計量値でモルタルを練り混ぜると、概ね 1 リットルのモルタルを練り上げることができるが、圧縮強度試験に用いる $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体を 6 個作製するには不足するため、試験にあたっては 2 バッチのモルタルが必要になる。つまり、1 回の活性度指数試験では、異なるバッチのモルタルを同じ性能のモルタルとして扱うため、試験結果の再現性は極めて重要となる。そこで、ここでは基準モルタルを連続 12 バッチ練り混ぜ、フレッシュモルタルおよび硬化モルタルの試験結果の再現性を確認した。

モルタルの練混ぜは $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の実験室で行った。実験開始時の実験室内の湿度は 60% であった。使用材料を Table2 に示す。練混ぜ水も含め、使用する材料はすべて前述の実験室内（ $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ）で保管したものを使用した。使用するセメントは、同じセメント袋のものをビニル袋に小分けして計量したものを使用した。標準砂は、15 箱入りの同じロット No. のものから 12 袋を使用した。化学混和剤にはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用し、消泡剤にはポリアルキレングリコール誘導体系消泡剤を使用した。両混和剤の使用量は、予備試験の結果を参考に 1 バッチ目の使用量を定め、練上がった 1 バッチ目のモルタルのフローおよび空気量が、JIS A 6207 附属書 C に示される $260 \pm 10\text{mm}$ および 2.0% 以下となることを確認して設定した。各混和剤の使用量は、全バッチ共通の量として、高性能 AE 減水剤はセメント質量の 2.0%、消泡剤はセメント質量の 0.3% としている。

3.1 フレッシュモルタルにおける試験結果の再現性

12 バッチのモルタルの練上がり時のフローを Fig.1 に示す。平均値は 253mm、変動係数は 2.5% であった。前述のように条件を揃えて練り混ぜても、ある程度のばらつきのある結果となった。全体像としては、5 バッチ目がやや異なる結果で、それ以外は平均値 $\pm 10\text{mm}$ 内に分布した。平均値がやや低めであるため、1/3 の結果が JIS の規定（ $260 \pm 10\text{mm}$ ）の下限値を下回った。ただし、目視で判断する限り、各モルタルの流動性にはあまり差がなく、フローの値がやや小さいモルタルであっても、供試体の打込みに支障が生じるものではなかった。12 バッチのモルタルの練上がり時の空気量を Fig.2 に示す。平均値は 1.6%、変動係数は 12.5% であった。変動係数で見ると数値が大きく見えるが、各バッチの試験結果は平均値 $\pm 0.4\%$ に分布した比較的安定したものであった。空気量に関しては、全バッチが JIS の規定である 2.0% 以下を満足した。

3.2 硬化モルタルにおける試験結果の再現性

12 バッチのモルタルの供試体の採取方法を Fig.3 に示す。硬化モルタルの圧縮強度の試験では、JIS A 6207 の活性度指数試験に規定される $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体および JIS A 6201 の水結合材比

Table1 Mix proportion of standard mortar

Cement*	Test sample	Standard sand	Total amount of water and admixture
964 $\pm$ 2g	0	1350 $\pm$ 5g	289 $\pm$ 1g

*Mixing equivalent amount of three different Ordinary portland cement

Table2 Materials

Ordinary portland cement A	Density: 3.16g/cm ³ Specific surface area: 3,250cm ² /g
Ordinary portland cement B	Density: 3.16g/cm ³ Specific surface area: 3,350cm ² /g
Ordinary portland cement C	Density: 3.15g/cm ³ Specific surface area: 3,280cm ² /g
Standard sand	Density in saturated surface-dry condition: 2.65g/cm ³ Water absorption: 0.42%
Water	Tap water
Chemical admixture	Air-entraining and high-range water-reducing admixture

Fig.1 Test results of mortar flow

Fig.2 Test results of air content

Fig.3 Sampling method of specimens

Table3 Compressive strength test results of standard mortar

Cylinder($\Phi 50 \times 100\text{mm}$)								Prism($40 \times 40 \times 160\text{mm}$)					
7days				28days				7days			28days		
Batch No.	Specimen No.	Density (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)	Batch No.	Specimen No.	Density (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)	Batch No.	Specimen No.	Compressive Strength (MPa)	Batch No.	Specimen No.	Compressive Strength (MPa)
1	1	2.348	94.6	2	1	2.377	118	3	1	96.9	3	1	98.3
	2	2.347	94.7		2	2.355	113		2	98.5		2	101
	3	2.354	97.1		3	2.363	114		3	98.8		3	109
	4	2.365	97.4		4	2.355	111						
	5	2.360	99.2		5	2.375	118						
	Ave.	2.355	96.6		Ave.	2.365	115		Ave.	98.1		Ave.	103
	V(%)	0.3	2.0		V(%)	0.4	2.7		V(%)	1.0		V(%)	5.4
4	1	2.347	96.1	5	1	2.364	113	6	1	84.8	6	1	103
	2	2.355	96.6		2	2.362	114		2	102		2	107
	3	2.345	94.0		3	2.360	114		3	97.4		3	112
	4	2.361	97.4		4	2.371	116						
	5	2.366	99.9		5	2.371	118						
	Ave.	2.355	96.8		Ave.	2.366	115		Ave.	94.7		Ave.	107
	V(%)	0.4	2.2		V(%)	0.2	1.7		V(%)	9.4		V(%)	4.2
7	1	2.348	95.5	8	1	2.362	114	9	1	93.1	9	1	106
	2	2.343	96.5		2	2.367	116		2	91.9		2	111
	3	2.359	97.1		3	2.357	114		3	91.9		3	108
	4	2.360	95.8		4	2.362	111						
	5	2.360	99.4		5	2.361	115						
	Ave.	2.354	96.9		Ave.	2.362	114		Ave.	92.7		Ave.	108
	V(%)	0.3	1.6		V(%)	0.2	1.6		V(%)	0.7		V(%)	2.32
10	1	2.348	96.5	11	1	2.356	111	12	1	91.9	12	1	105
	2	2.343	96.0		2	2.363	117		2	92.1		2	108
	3	2.362	97.6		3	2.354	113		3	91.5		3	111
	4	2.358	99.8		4	2.355	115						
	5	2.355	98.3		5	2.367	117						
	Ave.	2.353	97.6		Ave.	2.359	115		Ave.	91.8		Ave.	108
	V(%)	0.3	1.5		V(%)	0.2	2.3		V(%)	0.3		V(%)	2.8
Ave. of 20 specimens		2.354	97.0	Ave. of 20 specimens		2.363	115	Ave. of 12 specimens		94.3	Ave. of 12 specimens		107
V of 20 specimens(%)		0.3	1.8	V of 20 specimens(%)		0.3	2.0	V of 12 specimens(%)		4.9	V of 12 specimens(%)		3.9

V : variation coefficient

50%のモルタルを用いた活性度指数試験で使用されている $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体を使用した。それぞれの供試体は、Fig.3 に示すバッチから採取した。より多くの試験結果を得るため、 $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体については、1 バッチから採取可能な 5 個の供試体を採取した。 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体については 1 バッチから採取可能な 3 個の供試体を採取し、試験日当日に各供試体を JIS R 5201「11.2.5 曲げ強度試験機」に示される三点曲げ試験の要領で二分割した 6 個の供試体で圧縮強度試験を行った。また、角柱供試体の圧縮強度試験は JIS R 5201「11.6 測定」、圧縮強度の算定方法は JIS R 5201「11.7 計算」によって行うこととした。なお、角柱供試体の作り方は JIS R 5201「11.5.3 成形」に準じて行っているが、モルタル自体が JIS R 5201 で扱うモルタルよりも流動性が高いこと、また円柱供試体との比較試験であることを考慮し、テーブルバイブレータを用いた詰め方は採用しなかった。この代替案として、今回の実験での角柱供試体は、モルタルを 2 層に別けて詰め、それぞれ JIS R 5201:1992 に規定されていた 35mm 角の突き棒で全面にわたって 5 回ずつ突き、その後、型枠を少し傾け、床に落とすようにして軽く振動を与えて空気を追い出す方法で成形することとした。

材齢 7 日および材齢 28 日に行った圧縮強度試験結果を Table3 に示す。後述するデータ整理の結果などを踏まえ、供試体の密度は測定値から計算した値を小数点以下 3 桁まで示している。 $\Phi 50 \times 100$

Fig.4 Relation between density of specimen and compressive strength of cylinder specimen

mm の円柱供試体を用いた試験では、材齢 7 日、材齢 28 日ともに、バッチ内およびバッチ間での供試体密度や圧縮強度の変動は小さかった。4 バッチの合計 20 個の供試体の圧縮強度の変動係数で見ても、2%以下の安定した試験結果が得られた。この結果から考えれば、現行 JIS に従って実施した基準モルタルの圧縮強度試験では、十分に再現性のある結果が得られるものと考ええる。一方、40×40×160mm の角柱供試体を用いた試験では、前述した円柱供試体を用いた試験結果よりもやや低い圧縮強度となり、バッチ内およびバッチ間での圧縮強度の変動もやや大きくなった。現行 JIS では、圧縮強度 100N/mm² 程度のモルタルの圧縮強度試験では、研磨による載荷面の整形が難しい角柱供試体の使用は不向きという理由などから、上下面を研磨処理した Φ50×100mm の円柱供試体での試験を規定している。今回の試験でも、角柱供試体の使用はあまり推奨できない結果となった。

Φ50×100mm 供試体の圧縮強度を、各供試体の密度で整理したものを Fig.4 に示す。使用材料や練混ぜ方法を揃えているとはいえ、各供試体の密度をまったく同じとすることはできない。Fig.4 に示すように、供試体の密度と圧縮強度には明確な相関があり、現行の JIS 通りに試験を行っても、供試体の成形に起因する試験誤差が、活性度指数試験の結果にある程度影響すると考えてよい。この点については、今後の課題と考える。

以上の結果を整理すると、使用材料が同じであれば、現行の JIS の方法で再現性のある基準モルタルの圧縮強度試験結果を得ることができることが確認できた。また、この試験結果には、供試体の密度差によって圧縮強度が変動する影響が含まれることも確認された。さらに、今回の試験では、モルタルのフローの値が現行の JIS の規定の範囲になくても、再現性のある試験結果が得られる可能性を示唆していた。

4. フロー値の変化が活性度指数試験結果の再現性に及ぼす影響

現行の JIS A 6207 の活性度指数試験の規定では、モルタルのフローの値は 260±10mm となっている。しかしながら、前章 3. の結果は、同じ材料で繰り返し試験を行ってもフローの値が規定の範囲に収まらないことがあることを示すとともに、その下限値を下回っても圧縮強度にはあまり影響しないことを示していた。そこで、シリカフュームと火山ガラス微粉末を試験サンプルとして、フローの値の変化が活性度指数試験結果の再現性に及ぼす影響について検討することとした。

使用した超高強度コンクリート用微粉末を Table4 に示す。シリカフュームは、実際に超高強度コンクリートの製造に利用されているシリカフューム A と、比較的強熱減量の値が高く、化学混和剤を吸着しやすいシリカフューム B を使用した。いずれも比表面積や成分は JIS A 6207 の規格品に相当する。火山ガラス微粉末も、比表面積や成分が JIS A 6209 の I 種に相当するものを使用した。微粉末以外の使用材料は、すべて前章 3. と同じときに受け入れたものである。

実験の要因と水準を Table5 に示す。結合材の種類は、基準モルタルとなる普通ポルトランドセメントのみとしたもの 1 種、試験モルタルとなる普通ポルトランドセメントの 10%を Table4 に示した 3 つの超高強度コンクリート用微粉末に置換したもの 3 種とした。化学混和剤は、高性能 AE 減水剤および超高強度コンクリート用の

Table4 Micro powders

	Silica fume A	Silica fume B	Volcanic glass powder
Specific surface area (m ² /g)	19.3	23.2	10.4
Density (g/cm ³)	2.26	2.39	2.37
SiO ₂ (%)	92.7	96.9	72.9
MgO (%)	0.58	0.40	0.31
C ₃ S (%)	0.24	0.28	-
Chloride ion (%)	0.06	0.06	-
Al ₂ O ₃ (%)	-	-	13.0
Fe ₂ O ₃ (%)	-	-	2.22
Na ₂ O (%)	-	-	3.45
K ₂ O (%)	-	-	3.39
Ignition loss (%)	1.90	2.51	2.99
Humidity (%)	0.19	0.80	0.67
Activity index (%)	7days	102	-
	28days	115	-

Table5 Parameters

Binders	Chemical admixtures	Flows
1) O = 100 2) O : SA = 90 : 10 3) O : SB = 90 : 10 4) O : V = 90 : 10	1) SP 2) HSP	1) 260 ± 10mm 2) 230 ± 10mm 3) 200 ± 10mm
O : Ordinary portland cement, SA : Silica fume A SB : Silica fume B, V : Volcanic glass powder SP : Air-entraining and high-range water-reducing admixture HSP : high-range water-reducing admixture (for ultra-high strength concrete)		

高性能減水剤の 2 種とした。目標とするモルタルのフローは、JIS の規定通りである 260±10mm と、それよりも小さな 230±10mm および 200±10mm の 3 種とした。

モルタルの練混ぜは 20±3℃の実験室で行った。実験開始時の実験室内の湿度は 51%であった。試験日の室内の湿度はやや低かったが、1 バッチの試験時間は比較的短いため、試験値への影響はほぼ無視できると判断した。フレッシュモルタルおよび硬化モルタルの試験結果を Table6 に示す。前章と同様に、消泡剤にはポリアルキレングリコール誘導体系消泡剤を使用し、化学混和剤の種類にかかわらず、使用量は全バッチともセメント質量の 0.3%とした。表に示した各モルタルの調査名は、次のルールで定めている。

シリカフューム A および火山ガラス微粉末を用いたモルタルは問題なく練り混ぜることができた。一方、強熱減量の多いシリカフューム B を用いたモルタルは化学混和剤の使用量が明らかに多く、高性能 AE 減水剤を使用したケースでは、化学混和剤の使用量を結合材の質量の 4.0%としても、フロー200mm 程度のモルタルを練り上げることしかできなかった。引き続き、結合材の質量の 5.0%および 6.0%の高性能 AE 減水剤を使用したバッチも練り混ぜたが、フローの値はそれぞれ 211×209mm, 212×209mm にしかならなかったため、目標フロー260±10mm および 230±10mm のモルタルの作製は諦めた。今回の試験で使用しているシリカフューム B の強

Table6 Activity index test results

	Dosage of chemical Admixture (%)	Flow (mm)	Temperature (°C)	Air content (%)	Density of flesh mortar (g/cm ³)	7days		28days	
						Compressive Strength (MPa)	Activity Index (%)	Compressive Strength (MPa)	Activity Index (%)
O-SP-260	B×1.9	251×250	23.1	2.0	2.31	93.2		116	
O-SP-230	B×1.7	225×224	22.0	1.3	2.33	93.9		113	
O-SP-200	B×1.6	206×206	22.8	1.7	2.32	91.6		112	
O-HSP-260	B×0.9	252×249	21.9	1.5	2.32	98.6		117	
O-HSP-230	B×0.8	234×233	20.9	1.5	2.32	103		122	
O-HSP-200	B×0.73	197×195	21.6	1.7	2.32	99.0		120	
OSA-SP-260	B×3.2	254×250	22.3	1.7	2.29	95.7	103	127	109
OSA-SP-230	B×2.4	228×227	21.8	1.1	2.31	93.6	100	125	111
OSA-SP-200	B×2.2	210×209	19.9	1.1	2.31	96.8	106	129	115
OSA-HSP-260	B×1.4	260×257	20.9	0.7	2.32	98.9	100	134	115
OSA-HSP-230	B×1.25	235×234	21.3	1.2	2.30	102	99	133	109
OSA-HSP-200	B×1.05	207×204	21.3	1.3	2.30	96.6	98	130	108
OSB-SP-200	B×4.0	199×197	22.3	1.8	2.30	90.3	99	119	106
OSB-HSP-260	B×2.0	252×255	22.2	1.6	2.30	96.2	98	129	110
OSB-HSP-230	B×1.8	222×222	22.1	1.6	2.30	95.7	93	127	104
OSB-HSP-200	B×1.6	202×200	22.0	1.8	2.30	92.3	93	128	107
OV-SP-260	B×1.7	252×248	23.1	1.0	2.31	97.3	104	122	105
OV-SP-230	B×1.5	241×239	22.5	1.4	2.30	96.1	102	121	107
OV-SP-200	B×1.3	210×206	21.6	1.5	2.30	95.5	104	120	107
OV-HSP-260	B×0.85	259×258	20.8	1.5	2.30	97.8	99	127	109
OV-HSP-230	B×0.78	236×235	20.8	1.3	2.31	101	98	128	105
OV-HSP-200	B×0.65	194×188	20.8	1.6	2.30	101	102	125	104

Fig.5 Relation between density of specimen and compressive strength

熱減量の値は高めではあるが、JIS の品質規格である 4.0%には収まっている。したがって、今回の結果は、JIS の規定通りの活性度指数試験方法で規格に適合するシリカフェームを用いて試験を行っても、規定通りの試験モルタルが練り上がらないケースがあることを示したことになる。

圧縮強度試験結果に関しては、いずれのフロー値とした場合も、ほぼ同様の結果となった。ただし、全体像としては、高性能減水剤を用いたモルタルの圧縮強度が、高性能 AE 減水剤を使用したモルタルの圧縮強度よりも高くなる傾向にあった。その傾向は、特に基準モルタルで顕著であるように見える。

活性度指数試験の結果としては、前述した圧縮強度試験のばらつきが、活性度指数の値に反映しているようにみえる。特に、高性能減水剤を用いた基準モルタルの圧縮強度が高くなったことは、高性能減水剤を用いた場合の活性度指数の値を相対的に小さくする結果となっており、化学混和剤の選定が試験結果に影響を与える可能性を示唆していた。

供試体の密度と圧縮強度の関係を整理したものを Fig.5 に示す。基準モルタルでは、フローの値にかかわらず、供試体の密度と圧縮強度の間には相関関係がある。また、供試体の密度が同等であっても、黒塗りでプロットした高性能減水剤を用いた場合の圧縮強度は、白抜きでプロットした高性能 AE 減水剤を用いた場合の圧縮強度よりも高くなる傾向にある。シリカフューム A および B を用いた試験モルタルでは、全体的に左下から右上にプロットが並んでいるように見えるものもあるが、基準モルタルに比べると、供試体の密度と圧縮強度の間の相関性などはあまり認められない。その傾向は火山ガラス微粉末を用いた試験モルタルでも同様である。

以上の結果を整理すると、今回の試験で比較したフローの範囲であれば、再現性のあるモルタルの圧縮強度試験結果を得ることが可能であり、結果として活性度指数試験の結果の再現性も確保できると考えられた。市場にはシリカフューム B のような様々なシリカフュームが存在するため、目標とするフローの許容差はもう少し幅があってもよいと考える。一方、化学混和剤の種類を変更することは、活性度指数試験の結果の再現性に影響する可能性が高いことも確認できた。現状では、継続的に同じ超高強度コンクリート用微粉末の活性度指数を評価し続ける場合などでは、一連の試験で使用する化学混和剤の種類を揃えるような対応が必要であると考ええる。

5. 練混ぜ時間が活性度指数試験結果の再現性に及ぼす影響

現行の JIS A 6207 の活性度指数試験方法では、モルタルの練混ぜ量だけでなく、モルタルの練混ぜ時間も規定されている。仮に、前章 4. で明確となった基準モルタルの圧縮強度における化学混和剤の種類の影響がモルタルの練混ぜ時間の不足に起因するものであるとすれば、練混ぜ時間の延長によって問題は解消する。そこで、実験の要因に練混ぜ時間を加えた試験を行うこととした。

使用材料は前章までの材料を踏襲するものとした。超高強度コンクリート用微粉末に関しては、前章 4. で使用したのと同じロットのシリカフューム A と火山ガラス微粉末を使用した。標準砂は前章までの試験で使用したのと同じときに受け入れたものとした。普通ポルトランドセメントおよび化学混和剤は、前章までで使用したのと同じ銘柄のロット違いのものを使用した。

実験の要因と水準を Table7 に示す。結合材の種類は、基準モルタルとなる普通ポルトランドセメントのみとしたもの 1 種、試験モルタルとなる普通ポルトランドセメントの 10% を Table4 に示したシリカフューム A および火山ガラス微粉末に置換したもの 2 種とした。化学混和剤は、高性能 AE 減水剤および超高強度コンクリート用の高性能減水剤の 2 種とした。練混ぜ時間は、表中の 1) で示した JIS の規定通りの時間と、2) で示した JIS の規定時間よりも延長した時間の 2 種とした。なお、化学混和剤の使用量が実験結果に影響することを避けるため、この実験では、JIS の規定通りの時間で練り混ぜた基準モルタルのフローが $260 \pm 10 \text{ mm}$ となる使用量を、同じ化学混和剤を使用するすべての調合に適用した。前章と同様に、消泡剤にはポリアルキレングリコール誘導体系消泡剤を使用し、化

Table7 Parameters

Binders	Chemical admixtures	Mixing time			
1) O = 100 2) O : SA = 90:10 3) O : V = 90:10	1) SP 2) HSP	1)N	①	Cement & sand & (test sample)	30s
			②	+Water & Chemical admixture	120s
			③	Stop	20s
			④	Re-start	160s
		2)L	①	Cement & sand & (test sample)	30s
			②	+Water & Chemical admixture	240s
			③	Stop	20s
			④	Re-start	300s

O : Ordinary portland cement, SA : Silica fume A
SB : Silica fume B, V : Volcanic glass powder
SP : Air-entraining and high-range water-reducing admixture
HSP : high-range water-reducing admixture (for ultra-high strength concrete)

Table8 Activity index test results

	Dosage of chemical Admixture (%)	Flow (mm)	Temperature (°C)	Air content (%)	Density of flesh mortar (g/cm ³)	7days		28days	
						Compressive Strength (MPa)	Activity Index (%)	Compressive Strength (MPa)	Activity Index (%)
O-SP-N	B×3.2	265×263	22.8	1.2	2.33	89.8		107	
O-SP-L	B×3.2	259×258	23.3	1.3	2.33	93.4		109	
O-HSP-N	B×0.9	265×263	22.5	1.3	2.33	98.4		114	
O-HSP-L	B×0.9	260×259	21.5	2.2	2.31	99.7		120	
OSA-SP-N	B×3.2	211×208	21.8	1.3	2.30	92.4	103	127	119
OSA-SP-L	B×3.2	229×226	20.7	1.4	2.30	94.4	101	128	117
OSA-HSP-N	B×0.9	216×214	21.0	2.0	2.29	92.5	94	129	113
OSA-HSP-L	B×0.9	226×224	20.5	1.9	2.29	97.4	98	131	109
OV-SP-N	B×3.2	283×282	21.5	0.9	2.32	94.7	105	120	112
OV-SP-L	B×3.2	307×306	20.9	1.0	2.31	97.2	104	124	114
OV-HSP-N	B×0.9	308×302	21.3	2.1	2.29	96.8	98	126	111
OV-HSP-L	B×0.9	307×304	20.8	1.5	2.30	103	103	130	108

Fig.6 Relation between density of specimen and compressive strength

学混和剤の種類にかかわらず、使用量は全バッチともセメント質量の0.3%とした。

モルタルの練混ぜは $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の実験室で行った。実験開始時の実験室内の湿度は70%であった。フレッシュモルタルおよび硬化モルタルの試験結果を Table8 に示す。表に示した各モルタルの調合名は、次のルールで定めている。

OSA-SP-N
 ↑
 練混ぜ時間 (NはTable7 Mixing Time 1), LはTable7 Mixing Time 2)
 ↑
 使用した化学混和剤の記号
 ↑
 使用した結合材の記号

化学混和剤を同じ種類とした場合、基準モルタルのフローの値は練混ぜ時間を延長してもほとんど変わらなかった。空気量に関しては、同等かやや増加する傾向であった。一方、化学混和剤を同じ種類とした場合、試験モルタルのフローの値はやや増加する傾向にあった。空気量に関しては、同等かやや減少する傾向であった。当初、練混ぜ時間を延長することでモルタルのフローが増加し、モルタル中の空気が抜けやすくなることを期待したが、そこまでの結果は得ることができなかった。

圧縮強度は、一部を除き、ほぼ練混ぜ時間を延長したことで向上した。当初、基準モルタルでの高性能減水剤を用いたモルタルと高性能AE減水剤を用いたモルタルの圧縮強度差が小さくなることを期待していたが、練混ぜ時間の延長は高性能減水剤を用いたモルタルでも強度増加に有効であったため、想定した結果とはならなかった。そのため、活性度指数試験の結果についても、練混ぜ時間を延長することで、使用する化学混和剤の影響を抑制できるという結果とはならなかった。

供試体の密度と圧縮強度の関係を整理したものを Fig.6 に示す。前章までの結果と同様に、普通ポルトランドセメントのみを用いた基準モルタルでは、練混ぜ時間にかかわらず、黒塗りでプロットした高性能減水剤を用いたモルタルの圧縮強度が相対的に高くなる傾向にあった。フレッシュモルタルでの結果と同様に、練混ぜ時間を延長することで、供試体の密度が増加する（モルタル中の空気量が減る）ような傾向は見られず、Table8 で得られた印象と変わらなかった。シリカフュームや火山ガラス微粉末を用いた試験モルタルでも、練混ぜ時間の延長が強度増加以外のことに影響している傾向は見られなかった。

以上の結果を整理すると、練混ぜ時間の延長は、各モルタルの圧縮強度を向上させることには有効であったが、化学混和剤の種類の違いが活性度指数試験の結果に及ぼす影響を抑制するような結果にはならなかった。前述したように、繰り返し同じ超高強度コンクリート用微粉末の活性度指数を評価し続ける場合などでは、使用する化学混和剤の種類を揃えるような対応が必要であると考えられる。

6. まとめ

JIS A 6207 に規定される活性度指数試験方法の試験結果の再現性に関する実験的な検証を行った。この結果、以下の知見を得た。

- 1) 使用材料が同じであれば、現行の試験方法によって再現性のある基準モルタルの圧縮強度試験結果を得ることができる。
- 2) 今回の試験で比較したフローの範囲(260, 230mm および 200mm)であれば、再現性のあるモルタルの圧縮強度試験結果を得ることが可能であり、このようなフローの範囲であれば、活性度指

数試験結果の再現性も確保できると考えられた。

- 3) 化学混和剤の種類の変更は、活性度指数試験の結果の再現性に影響する可能性が高かった。
- 4) 練混ぜ時間の延長は、基準モルタルと試験モルタルの圧縮強度を向上させる結果になった。しかし、この結果によって 3) の問題を抑制できるわけではなかった。

謝辞

本研究の一部は、工業標準化推進事業委託費戦略的国際標準化加速事業：産業基盤分野に係る国際標準開発活動新市場創造型 JIS の開発「コンクリート用火山ガラス微粉末の開発」の一環として行ったものです。試験にあたっては、長瀧重義東京工業大学名誉教授、故友澤史紀東京大学名誉教授、坂井悦郎東京工業大学名誉教授、野口貴文東京大学教授、佐伯竜彦新潟大学教授、友寄篤東京大学助教にご助言を頂きました。使用材料の提供に関しては、太平洋セメント、宇部三菱セメント、住友大阪セメント、巴工業、鹿児島県工業技術センター、プリンシプル、BASF ジャパンの協力を得ました。実験に関しては、平成 30 年度および令和元年度東京工芸大学建築材料研究室卒研生の協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1)Ishikawa, Y. : A basic study on activity index in Japanese industrial standard of fly ash for use in concrete, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.18, No.40, pp.819-822, 2012.10 (in Japanese)

- 石川嘉崇：コンクリート用フライアッシュの JIS における活性度指数に関する一考察，日本建築学会技術報告集，Vol.18, No.40, pp.819-822, 2012.10
- 2)Architectural Institute of Japan : Guideline for mix proportion and construction of concrete using silica fume,1996.1 (in Japanese)
日本建築学会：シリカフュームを用いたコンクリートの調合設計・施工ガイドライン,1996.1
- 3)Japan Society of Civil Engineers : (Guideline for design and construction of concrete using silica fume), 1995.10 (in Japanese)
土木学会：シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案),1995.10
- 4)Watanabe, S., Hori, A., Naruse, H. and Nagataki, S. : Study on influences of quality of silica fume on quality of high strength concrete, Cement science and concrete technology,No.62,pp.419-426, 2008(in Japanese)
渡邊悟士，保利彰宏，鳴瀬浩康，長瀧重義：シリカフュームが高強度コンクリートの物性に及ぼす影響の評価に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.62,pp.419-426, 2008
- 5)JIS A 6209 (Volcanic glass powder for use in concrete), pp.7-8, 2020.3(in Japanese)
JIS A 6209 (コンクリート用火山ガラス微粉末), pp.7-8, 2020.3
- 6)Jinnai, H., Tomoyose, A. and Noguchi, T. : (Fundamental study on test method for activity index of volcanic glass powder based on mortar), Proceedings of the 46th JUCC Congress on cement and concrete, 35-38,2019.11(in Japanese)
陣内 浩，友寄 篤，野口貴文：火山ガラス微粉末の活性度指数試験に関する基礎的研究，第 46 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，35-38,2019.11
- 7)Architectural Institute of Japan : Recommendation for practice of high-strength concrete, p.212, 2005.1
日本建築学会：高強度コンクリート施工指針(案),p.212, 2005.1

CONSIDERATION IN REPEATABILITY OF ACTIVITY INDEX TEST RESULTS OF MICRO POWDER FOR ULTRA-HIGH STRENGTH CONCRETE BASED ON MORTAR

Hiroshi JINNAI^{*1}

^{*1} Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University, Ph.D.

An activity index test of mineral admixture for concrete is the test of estimates the substitution performance of the mineral admixture to cement. This test is prescribed by JIS A 6201 (Fly ash for use in concrete), JIS A 6206 (Ground granulated blast-furnace slag for use in concrete) and JIS A 6207 (Silica fume for use in concrete).

Mortar with water binder ratio of 50% prescribed in JIS A 6201 isn't suitable to estimate the activity index of the silica fume. This is because silica fume is used by ultra-high strength concrete with low water binder ratio. The water binder ratio of the mortar used for a test after JIS A 6207(2011) was changed to 30% from this reason. About 10 years had passed from this change, but a problem related to a revised point wasn't reported. However, a problem about the repeatability of the activity index test results was pointed out by an experiment related to establishment of JIS A 6209 (Volcanic glass powder for use in concrete). Then, repeatability of activity index test results of micro-powder for ultra-high strength concrete based on mortar was investigated. This investigation led to the following conclusions.

1) It is possible to obtain a compressive strength test result of the standard mortar with repeatability by a present test method when used material is same.

2) In the range of a mortar flow of this test (200mm-260mm), it is possible to obtain a compressive strength test result of the standard mortar with repeatability. As a result, the repeatability of a result of the activity index test can also be secured.

3) To change the kind of chemical admixture has a high possibility which influences the repeatability of a result of the activity index test.

4) Extension of mixing time contributed to increase compressive strength of standard mortar and test mortar. However, a problem of 3) could not be solved by extending mixing time of mortar.

(2020年4月1日原稿受理, 2020年5月26日採用決定)