

論文 フライアッシュの品質変動がコンクリートに及ぼす影響について

江藤 弘之*1・赤塚 剛*2・山本 晃*3

要旨: 本研究は、石炭火力発電所から産出されるフライアッシュを、約 18 ヶ月間にわたり定期的に採取し(100 サンプル) フライアッシュの品質変動がコンクリート特性に与える影響について試験を行った。その結果、フライアッシュの pH がコンクリートの流動性に影響を与えることが確認された。フライアッシュの品質値からコンクリートのフレッシュ性状の想定がある程度可能であることも分かった。一方、今回試験したフライアッシュの品質変動の範囲では、フライアッシュ置換によるコンクリートの硬化性状への影響は認められなかった。

キーワード: フライアッシュ, 分級, 品質変動, 相関, pH

1. はじめに

石炭火力発電所から発生するフライアッシュ(以下:FAと記す)の利用拡大の一方策として、FAを混和材として一般構造用コンクリートに使用することが考えられる。FAをコンクリート混和材に用いることの利点としては流動性の改善、水和熱の低減、アルカリ骨材反応の抑制等の効果があるが、FAの品質変動がコンクリートのフレッシュ性状、硬化性状に与える影響が懸念される。そこで、中部電力(株)碧南火力発電所産のFAを100サンプル[分級後のもの50サンプル(以下:細粉と記す)分級前のもの50サンプル(以下:原粉と記す)]採取し、FAの品質の相違が、コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に与える影響について確認するため試験を行った。

川砂4)のものを、混和剤はFA対応のAE補助剤を使用した。碧南火力で使用する石炭は全て海外炭で、約60種類と多数に及び、多くの場合はそれらを混ぜて燃焼させ、5日程度で使用炭種が変わっている。本研究はできるだけ多くのFAを採取するため、中4日(5日毎)で試料を18ヶ月間採取した。試験対象のサンプルは、基本的に碧南火力発電所の3号機産出のFAとしたが、原粉の一部(50サンプル中19サンプル)については、主にセメントの粘土代替や埋め立てに使用されている1,2号機産出のFAを用いた。

2. 試験概要

2.1 使用材料

使用材料は、表1に示すとおりである。セメントは、三社混合品とし、粗骨材は三重県北勢産砕石、細骨材は三重県東員町混合砂(砕砂6:

表1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント(三社混合)密度3.15g/cm ³
フライアッシュ	碧南火力発電所産
細骨材	(砕砂6:川砂4)密度2.61 g/cm ³
粗骨材	(Gmax20mm)密度2.65 g/cm ³
AE減水剤	オキシカルボン酸塩誘導体
AE補助剤	脂肪酸とポリオキシエチレンアルキルエーテル

*1 東海コンクリート工業(株) 技術開発部(正会員)

*2 中部電力(株) 土木建築部 技術・企画グループ

*3 中部電力(株) 基幹系統建設センター 送電工事課

表2 コンクリートの配合

配合 記号	W/ (C+F) (%)	F/ (C+F) (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE 減水剤量 (C+F) × %	AE 補助剤量 (cc/m ³)
				水 (W)	セメント (C)	フライ アッシュ (FA)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)		
FA20	55.6	20	47	178	256	64	818	936	0.2	160
FA30	55.3	30	47	177	224	96	813	931	0.2	180

表3 フライアッシュの品質 (細粉, 原粉ともに 50 サンプル)

項目	JIS 規格 FA 種	基準 FA	細 粉				原 粉				
			平均	最大	最小	標準 偏差	平均	最大	最小	標準 偏差	
密 度 (g/cm ³)	1.95 以上	2.17	2.28	2.39	2.17	0.05	2.23	2.36	2.08	0.06	
みつかさ比重	-	1.14	1.36	1.47	1.14	0.07	1.26	1.43	0.94	0.11	
ブレン値 (cm ² /g)	2500 以上	3,230	3,530	3,770	3,300	114.0	3,528	4,060	*2,380	415.2	
45 μm 残分 (%)	40.0 以下	21.1	15.9	20.1	11.8	2.09	27.8	*50.6	10.6	7.72	
平均粒径 (μm)	-	14.5	9.8	13.1	5.0	2.0	14.4	25.8	7.1	3.9	
活性度指数 (%)	28 日	80.0 以上	80.2	89.0	98.6	80.2	4.32	87.5	107.0	80.5	5.15
	91 日	90.0 以上	106.3	105.2	116.5	91.3	5.30	98.9	110.9	*89.2	5.23
フロー値比 (%)	95.0 以上	101.6	107.7	112.3	100.7	2.63	101.8	109.4	*89.1	4.46	
強熱減量 (%)	5.0 以下	3.00	1.77	3.40	0.80	0.62	2.30	3.70	0.90	0.65	
MB 吸着量 (mg/g)	-	0.47	0.32	0.52	0.20	0.07	0.47	0.79	0.23	0.15	
pH	-	11.00	10.91	12.26	8.95	0.87	10.90	11.94	3.96	1.66	
SiO ₂ (%)	45.0 以上	58.2	57.6	69.9	49.0	4.93	59.4	75.9	46.8	6.80	
CaO (%)	-	2.8	2.9	4.3	0.8	0.9	3.9	7.7	0.3	1.7	
Al ₂ O ₃ (%)	-	27.6	29.0	36.4	24.6	3.4	25.3	35.3	16.8	5.1	
Fe ₂ O ₃ (%)	-	4.10	4.64	5.59	3.49	0.44	4.61	5.92	3.05	0.75	

*は、JIS FA 種規格値を外れたもの

■ は、1,2号機産出FA

2.2 フライアッシュの品質試験

FAの品質試験は、主な物性試験、化学成分の他に、平均粒径、pH、長瀧氏提案¹⁾によるみつかさ比重について行った。アクリルと金属の円筒容器にFAを入れ、モルタル用のフローテーブルにより2000回衝撃を加えた後のFA質量を、容器の容積で除した値が“みつかさ比重”である。

2.3 コンクリート試験

表2に示すコンクリートの配合は、FA100サンプル採取以前に採取した1サンプルを、基準FAとし、スランプ12cm、空気量4.5%を目標にして決定した。定期的に採取されたFA配合のコンクリートについては、単位水量およびAE補助剤量を変えない場合のフレッシュ性状の測定をした。強度試験用の供試体は、空気量

の影響を軽減するため、4.5±0.3%の範囲となるようにAE補助剤量のみで調整した。なお、コンクリートの練り混ぜはパン形の強制練りミキサを使用し、セメント+FA+骨材を投入して0.5分、その後、水(混和剤含む)を投入して2.5分の計3.0分とした。また、FA20%置換(以下:FA20)は100サンプル全てについて、FA30%置換(以下:FA30)は25サンプルについて試験した。

3. 試験結果・考察

3.1 フライアッシュの品質

本研究で用いたFAの品質試験結果を、表3に示す。細粉は、全てJISのFA種に適合する品質を有している。原粉については、同規格を外れているものが7サンプルあったが、これらは全て1,2号機産出のものであり、1,2号機

分を除けば、JIS F A 種規格を満足する結果であった。

F Aの流動性に関する指標として、モルタルのフロー値比があるが、このフロー値比と各測定項目の相関を、表4に示す。細粉、原粉それぞれについては特に相関は認められないが、図1に示すように、両方を合わせた100サンプルのF Aについては、全体のバラツキが大きくなり、みつかさ比重、45 μ m残分、MB吸着量等との相関が高くなる結果が得られた。これらの物性は、F Aの形状、粒度および粒径に起因し、多孔質で不定形粒子が大部分を占めているとされている未燃カーボンが影響していると考えられる。

なお今回、原粉については、図2に示すpHとフロー値比との関係において、pH値の低いF Aがフロー値比に大きく影響していることが分かる。さらに、図3に示すように、pHがSiO₂およびみつかさ比重とも関係があることが認められた。pHは、CaOとMgO量の減少とともに低下し、このCaOとMgO量は、原炭生成年代と関係しており、地質年代が経るにつれ、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃成分と置換するといわれている²⁾。このことから、表5に示すpHの低い4サンプル(いずれも1,2号機産出のF A)は、CaOとMgO量がそれぞれ0.6%以下と少なく、SiO₂量は70%以上となっている。このことが、pHとSiO₂との相関を高めている。

表4 F Aの各測定値とフロー値比の相関係数

項目	100サンプル	細粉	原粉
密度	0.454	0.240	0.325
みつかさ比重	0.599	0.393	0.458
ブレン値	0.320	0.100	0.126
45 μ m残分	0.522	0.022	0.146
平均粒径	0.458	0.189	0.118
強熱減量	0.419	0.144	0.292
MB吸着量	0.501	0.201	0.247
pH	0.283	0.227	0.404
SiO ₂	0.340	0.107	0.499

■ は、相関係数0.5以上を示す。

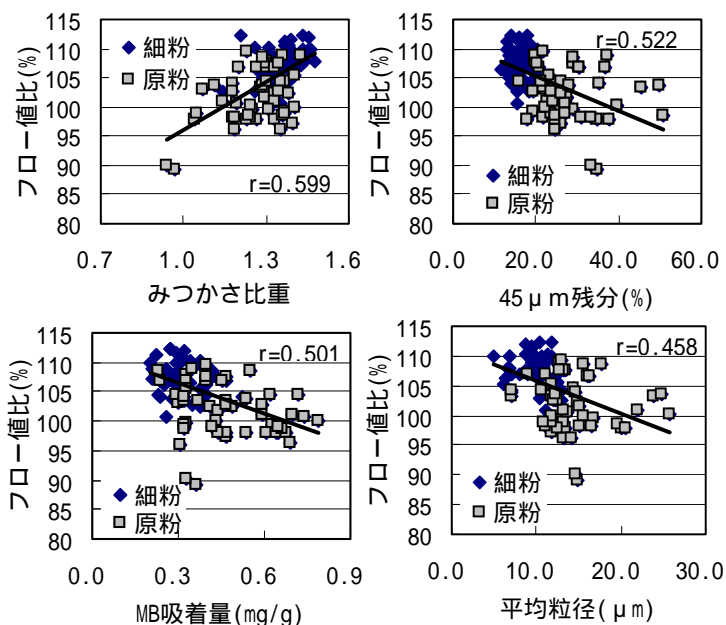


図1 F Aの品質とフロー値比の関係(100サンプル)

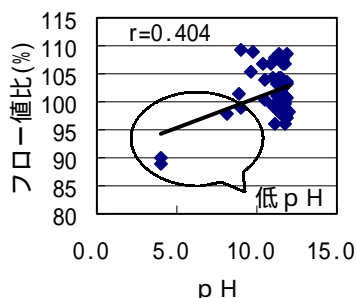


図2 pHとフロー値比の関係(原粉)

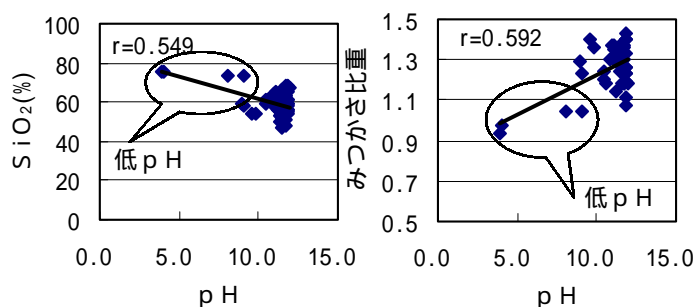


図3 pHとSiO₂およびみつかさ比重の関係(原粉)

表5 F AのpHと物性・化学成分(原粉)

項目	平均	低pH(1,2号機分)				
		9.05	8.11	4.02	3.96	
pH	10.90	9.05	8.11	4.02	3.96	
みつかさ比重	1.260	1.046	1.042	0.971	0.936	
フロー値比 (%)	101.8	99.0	97.9	89.1	90.1	
強熱減量 (%)	2.3	2.2	2.6	2.2	1.9	
MB吸着量 (mg/g)	0.47	0.42	0.44	0.36	0.33	
SiO ₂ (%)	59.4	73.9	73.7	75.9	75.5	
CaO (%)	3.9	0.6	0.4	0.3	0.3	
MgO (%)	1.2	0.5	0.5	0.5	0.5	

3.2 コンクリートの性状

1) フレッシュ性状

AE補助剤による空気量調整後 ($4.5 \pm 0.3\%$) のスランブ試験結果を、表6および図4に示す。細粉の場合、FA20、FA30ともそれぞれ、一部のFAを除き、JIS A 5308の「レディーミクストコンクリート」の許容範囲である $12 \pm 2.5\text{cm}$ に収まる結果が得られており、単位水量を変えずとも安定した性状を示している。原粉の場合は、変動幅が大きく、図4からもわかるように、スランブが極端に小さいものは、低pHのFAであり、フロー値比のときと同様、pHの影響が確認された。FAのpHと流動性の関係については、低pHのFAを使用すると、同一の流動性を得るために減水剤使用量が增大することがあるとの報告³⁾もされており、今回の極端なスランブ低下についても同様なことが考えられる。また、今回の結果からだけでは明らかにできないが、図3に示したpHとみつかさ比重の関係でpHが低いほど、みつかさ比重も小さくなる傾向にあり、pHの低下が流動性を悪化させる要因として、FAの粒子形状も関係していると推測される。

FAの品質とコンクリートの流動性の関係については、図5に示すように、みつかさ比重、 $45\mu\text{m}$ 残分、フロー値比等に相関が認められた。これは、FA品質結果のフロー値比のときと同様な傾向を示しており、今回のコンクリートの流動性における変動は、主に未燃カーボンが影響しているものと考えられる。未燃カーボンの表面は多孔質化した活性炭であり、あらゆる微粒子を吸着することが知られている。このため、未燃カーボン量が多くなると、水や混和剤を吸着し、また、不定形粒子であることからFAのボールベアリング効果も薄れ、流動性の低下となる。したがって、未燃カーボンの多寡が、コンクリートの流動性に影響を与えたものと考えられる。

表6 スランブ試験結果

配合記号		サンプル数	平均 (cm)	範囲 (cm)	標準偏差
細粉	FA20	50	12.1	10.4~13.9	0.76
	FA30	12	13.0	10.6~15.6	1.19
原粉	FA20	50	10.6	6.3~13.6	1.65
	FA30	13	12.4	9.4~14.5	1.52

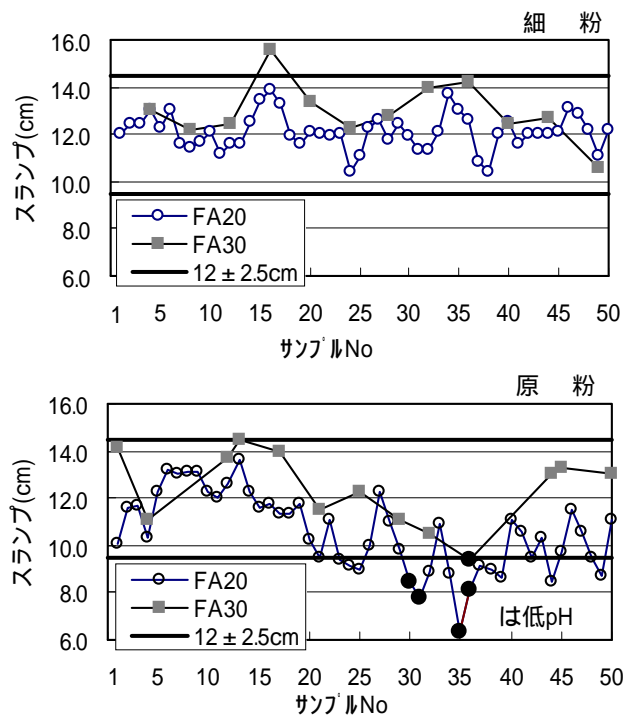


図4 スランブ試験結果

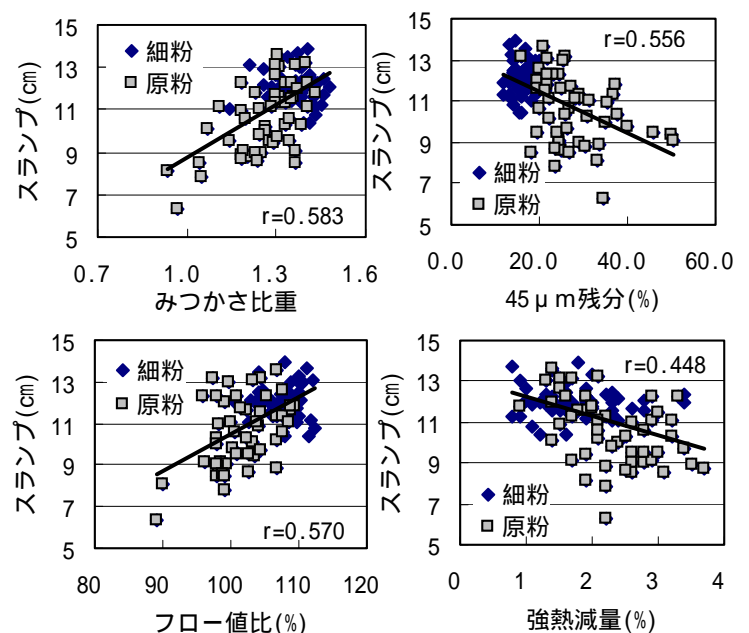


図5 FAの品質とスランブの関係 (FA20 : 100 サンプル)

A E 補助剤量を一定としたときの空気量測定結果を、表7および図6に示す。空気量は、一部のFAを除き、細粉、原粉ともそれぞれ JIS A 5308 の許容範囲である $4.5 \pm 1.5\%$ にあり、ほぼ安定していることが窺えた。なお、図6からもわかるように、スランブの測定結果で見られた pH による影響は、空気量については確認されなかった。

コンクリートの品質と空気量（A E 補助剤量一定）および A E 補助剤量（空気量調整後）の関係では、図7に示すように強熱減量と MB 吸着量に相関が認められた。これは、未燃カーボンが A E 補助剤を吸着するためと考えられる。この、A E 補助剤の吸着活性を示す MB 吸着量は、今回 $0.20 \sim 0.79\text{mg/g}$ の範囲にあり、 0.70mg/g を超えるものが、4 サンプルと変動幅が小さいことが、安定した空気量になったと考えられる。

表7 空気量測定結果

配合記号		サンプル数	平均 (%)	範囲 (%)	標準偏差
細粉	FA20	50	4.5	3.0~6.3	0.65
	FA30	12	3.8	2.4~4.9	0.74
原粉	FA20	50	4.0	2.6~5.8	0.79
	FA30	13	3.3	2.8~5.2	0.83

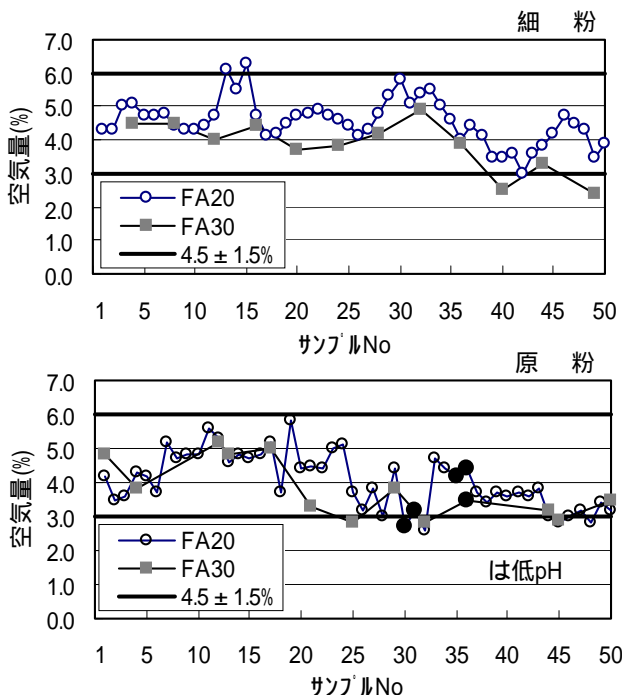
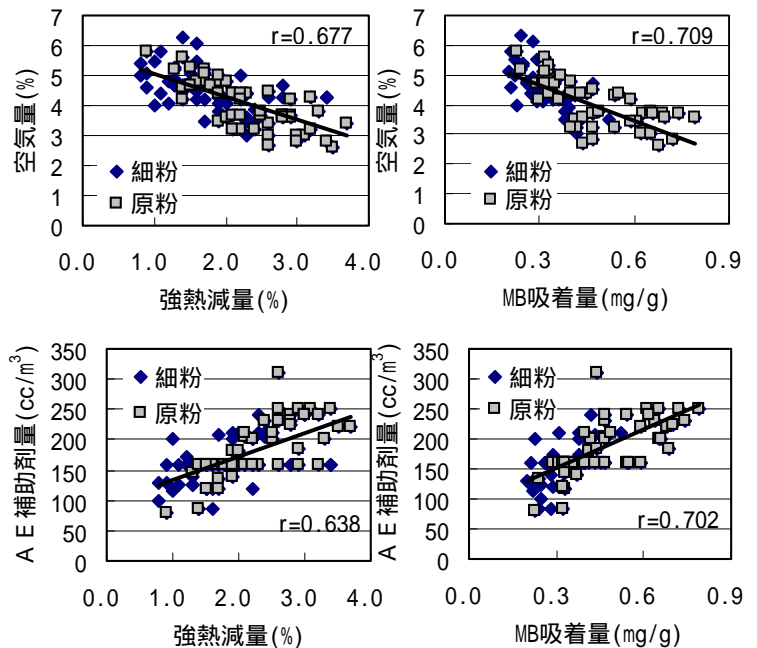


図6 空気量測定結果



(上図：AE 補助剤量一定，下図：空気量調整後)

図7 強熱減量・MB吸着量と空気量・AE 補助剤量の関係(FA20：100 サンプル)

2) 硬化性状

表8および図8に材齢 91 日の圧縮強度試験結果を示す。細粉、原粉とも標準偏差は小さく、変動係数も全てが 4.4%以下と安定した性状であった。また、FAの品質との関係については、細粉、原粉とも全く相関が認められず、今回のFAの品質変動幅では、強度への影響は認められなかった。

表8 圧縮強度試験結果(材齢91日)

配合記号		サンプル数	平均 (N/mm ²)	範囲 (N/mm ²)	標準偏差
細粉	FA20	50	41.9	37.7~45.2	1.71
	FA30	12	35.6	33.5~38.3	1.54
原粉	FA20	50	42.3	39.8~47.4	1.62
	FA30	13	37.5	35.4~41.2	1.62

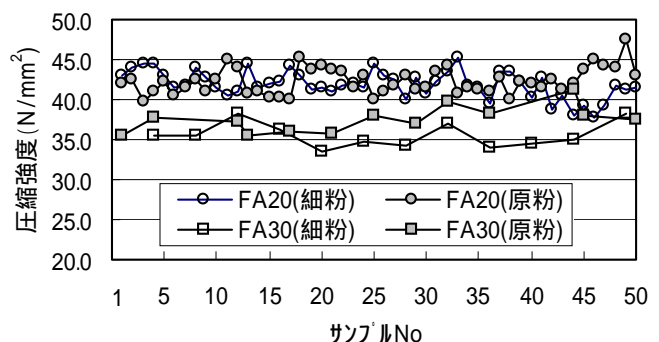


図8 圧縮強度試験結果(材齢91日)

3) 重回帰分析

今回採取した 100 サンプルの F A の品質特性から、F A 20 に対するコンクリートのフレッシュ性状(スランプ、空気量)および硬化性状(圧縮強度)を予測するため、重回帰分析により予測式の検討を行った。なお、説明変数としては測定した F A の品質特性を全て使用し、変数増減法により定式化を行った。

スランプの場合、説明変数としては、みつかさ比重、45 μm 残分、強熱減量の組み合わせで、重相関係数が 0.73 と高い値を示した。また、予測値と観測値の残差分析を行ったところ(図 9)、観測値に対して全てが ±2.5cm 以内で、95%が 2

に収まる結果が得られた。推定式(1)を示す。

$$Y = 6.21 + 5.72 X_1 - 0.06 X_2 - 0.54 X_3 \quad (1)$$

Y : スランプ(cm)

X₁ : みつかさ比重

X₂ : 45 μm 残分 (%)

X₃ : 強熱減量 (%)

空気量の場合、説明変数としては、MB 吸着量で単相関係数が 0.71 であった。また、予測値と観測値の残差分析を行ったところ(図 10)、観測値に対して全てが ±1.5%以内で、95%が 2

に収まる結果が得られた。推定式(2)を示す。

$$Y = 5.87 - 3.99 X_1 \quad (2)$$

Y : 空気量(%)

X₁ : MB 吸着量 (mg/g)

硬化性状の圧縮強度については、重相関の高い組み合わせは存在しなかった。これは目的変数である強度自体の変動が、非常に小さく安定していたためと考えられる。

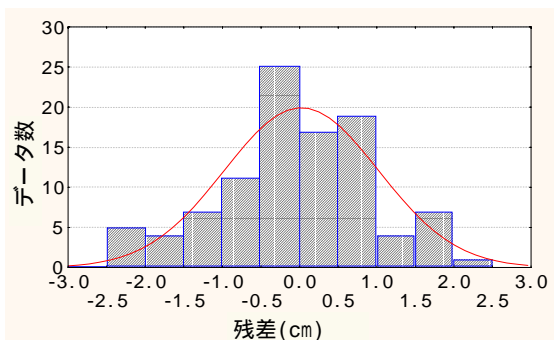


図 9 スランプの予測値と観測値の残差 (FA20 : 100 サンプル)

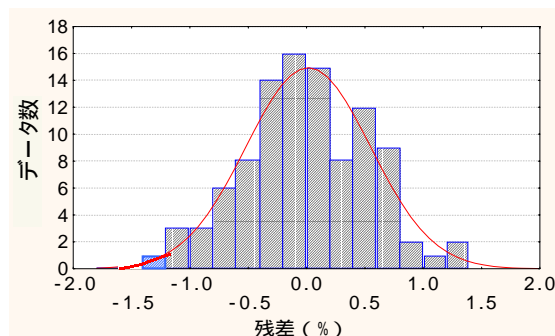


図 10 空気量の予測値と観測値の残差 (FA20 : 100 サンプル)

4. まとめ

今回の結果は、以下のとおりであった。

- 1) F A の pH が低いと、コンクリートの流動性は大きく低下するが、空気量への影響は認められなかった。
- 2) 今回のコンクリートの流動性は、主に未燃カーボン量の変動に起因していると考えられる。
- 3) コンクリートの空気量も流動性同様、主に未燃カーボン量の変動に起因していると考えられる。
- 4) 今回採取した F A 100 サンプルについては、重回帰分析を行うことで、コンクリートのフレッシュ性状の想定がある程度可能であった。
- 5) 今回の F A の品質変動幅では、材齢 91 日までについて、細粉も原粉も圧縮強度への影響は認められなかった。

参考文献

- 1) 長瀧重義, 大賀宏行, 増田和機, 谷直樹: フライアッシュコンクリートの品質管理手法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.223-228, 1987
- 2) 田野崎隆雄, 野崎賢二, 谷川公一, 芦谷原和, 真鍋賢治: 近年の石炭灰の性状について, 秩父小野田研究報告, Vol.49, No.129, pp.101-125, 1995
- 3) 田野崎隆雄, 野崎賢二, 白坂優, 曾根徳明: コンクリート混和用石炭灰の品質について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.333-338, 1996