

フライアッシュを細骨材代替として使用した場合の最適混合率の検討

Study of Optimal Mixing Ratio using Fly Ash as a Fine Aggregate Substitute

北電興業(株) 正員 ○坂本久宣 (Hisanobu Sakamoto)
 北海道電力(株) 正員 山城洋一 (Yoichi Yamashiro)
 北電総合設計(株) 正員 齋藤敏樹 (Toshiki Saito)
 北電総合設計(株) 森大祐 (Daisuke Mori)

1. はじめに

近年、北海道内では細骨材の供給不足が顕在化し、良質な細骨材を入手することが困難であり、今後も改善することは難しい状況が続くものと想定される。フライアッシュ(以下、FAという)は、細骨材補充材として使用することが可能であり、今後、細骨材の代替材として使用される可能性がある。しかし、細骨材は品質によってFAの最適な使用量は異なると考えられる。そこで本検討は、陸砂1種類と砕砂10種類を用いて、モルタル試験およびコンクリート試験を実施し、FAの最適混合率を各物性値により推定する検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および実験ケース

本実験で使用した材料を表-1に、実験ケースを表-2に示す。骨材は陸砂1種類と砕砂10種類を使用した。モルタル試験は骨材品質の結果より砕砂5種類を選定した。コンクリート試験はモルタル試験の結果より砕砂3種類を選定した。

2.2 実験項目および方法

(1) 骨材品質試験:ふるい分け試験はJIS A 1102、微粒分量試験はJIS A 1103、単位容積質量及び実積率試験はJIS A 1104、密度及び吸水試験はJIS A 1109、比表面積試験はJIS A 1218に準拠した。また、骨材の比表面積は透水

表-1 使用材料

種類		諸元	
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.15g/cm ³ 比表面積3.260cm ² /g	
フライアッシュ	F	JIS II種灰, 密度2.30g/cm ³ プレーン比表面積4.330cm ² /g	
細骨材	陸砂	S0	表乾密度2.68g/cm ³ , 吸水率1.53%
		S1	表乾密度2.63g/cm ³ , 吸水率1.96%
		S2	表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率2.85%
		S3	表乾密度2.61g/cm ³ , 吸水率3.49%
		S4	表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率3.09%
	砕砂	S5	表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率3.01%
		S6	表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率3.07%
		S7	表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率3.27%
		S8	表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率2.11%
		S9	表乾密度2.79g/cm ³ , 吸水率2.13%
		S10	表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率3.34%
粗骨材	G	碎石2005, 表乾密度2.63g/cm ³ , 吸水率2.99%, 実積率61.9%	
混和剤	AE減水剤	Ad	リガニスルホン酸塩・キシルホン酸塩・ホリカルホン酸系化合物
	AE剤	AE	樹脂酸系界面活性剤
練混ぜ水	W	上水道水	

試験の結果から算出した1cm³当たりの表面積を骨材の表乾密度で割った値とした。

(2) モルタル試験:モルタルフロー試験の配合条件を表-3に示す。モルタルフロー試験はJIS A 1109に準拠し、記載されているモルタル配合を基準として細骨材容積(s=511cm³)およびペースト容積(w+c=367cm³)を固定させた条件とした。なお、FAは細骨材容積に対して置換した。固相材料実積率は、ステンレス容器(内径76.2mm、内高87.7mm、容積400cm³)に試料を入れ、フローテーブルにて1回/秒の速度で600回落下運動を与え、質量を測定した。試料はモルタル配合を基に固相材料(C+FA+S)の充填率とした。

(3) コンクリート試験:実験ケースを表-4に示す。FA未使用の実験ケースは、FA置換コンクリートとの比較対象とし、FA置換1、FA置換2およびFA置換3はモルタル試験から得られた最適FA置換率の妥当性を評価する試験とした。コンクリートの練混ぜはJIS A 1138に準拠した。スランブはJIS A 1150、空気量はJSCE-F 513に準拠した。T-ポストスランブ試験¹⁾は大成建設が提案している方法とした。固相材料実積率はJIS A 1104に準拠した。

表-2 実験ケース

実験ケース	試験項目
骨材品質試験	ふるい分け試験
	微粒分量試験
	単位容積質量及び実積率試験
	密度及び吸水率試験
	比表面積試験
モルタル試験	モルタルフロー試験
	固相材料実積率
コンクリート試験	スランブ試験
	空気量試験
	T-ポストスランブ試験
	固相材料実積率

表-3 モルタル配合条件

実験ケース	水セメント比 W/C (mass%)	FA置換率 f/(f+s) (vol%)	細骨材代替比 s(w+s) (vol%)	ペースト容積 w+c (cm ³)	細骨材容積 s (cm ³)	骨材種類	
						種類	数量
モルタル試験	5水準*1 40	5水準	1.39	367	511	陸砂	1水準
	45	0					
	50	2.5					
	55	5.0					
	60	7.5					
65	10.0	砕砂	5水準				

*1: 陸砂は水セメント比40%~60%、砕砂は水セメント比45%~65%とする

表-4 コンクリート試験の実験ケース

コンクリート試験 実験ケース	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	FA置換率 f/(f+s) (vol%)	細骨材率 s/a (%)	骨材種類	
						種類	数量
FA未使用	18±1.5	4.5±1.0	2水準 45 65	0	4水準	陸砂	1水準
FA置換1				最適	4水準	陸砂	1水準
						砕砂	3水準
FA置換2				3水準	最適	陸砂	1水準
FA置換3	最適	最適	陸砂	1水準			
			砕砂	3水準			

表-5 骨材の品質試験結果

試験項目	試験結果										
	陸砂	砕砂									
	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
ふるい分け(粗粒率)	2.57	3.02	2.96	2.85	3.10	2.89	2.79	3.34	2.72	2.97	3.07
微粒分量 (%)	0.7	10.4	2.2	3.8	5.1	4.3	5.6	7.1	3.2	2.0	6.2
単位容積質量 (kg/L)	1.81	1.79	1.65	1.66	1.59	1.66	1.41	1.64	1.63	1.72	1.69
実積率 (%)	68.6	69.4	65.3	65.8	62.5	64.8	55.0	63.7	63.5	63.0	66.7
密かさ比重 (g/cm³)	1.930	1.977	—	1.898	—	—	—	1.928	1.875	2.053	—
充填率 (%)	73.1	76.6	—	75.3	—	—	—	74.7	73.0	75.2	—
密度(表乾) (g/cm³)	2.68	2.63	2.60	2.61	2.64	2.64	2.64	2.66	2.62	2.79	2.62
密度(絶乾) (g/cm³)	2.64	2.58	2.53	2.52	2.56	2.56	2.56	2.58	2.57	2.73	2.54
吸水率 (%)	1.53	1.96	2.85	3.49	3.09	3.01	3.07	3.27	2.11	2.13	3.34
供試体乾燥密度 (g/cm³)	1.813	1.964	1.718	1.747	1.839	1.819	1.737	1.835	1.711	1.894	1.824
透水係数 ×10 ⁻⁶ (m/s)	80.0	11.6	21.7	12.3	8.70	25.9	13.2	21.4	12.2	16.3	20.2
1cm ³ 当たりの表面積 (cm ² /cm ³)	427.7	677.5	915.4	1102.0	1091.2	677.4	1176.4	733.9	1335.3	954.0	716.0
比表面積 (cm ² /g)	159.6	257.6	352.1	422.2	413.3	256.6	445.6	275.9	509.7	341.9	273.3

○S0 ●S1 ▲S2 ×S3 △S4 ◆S5 ■S6 ◆S7 ■S8 ▲S9 □S10

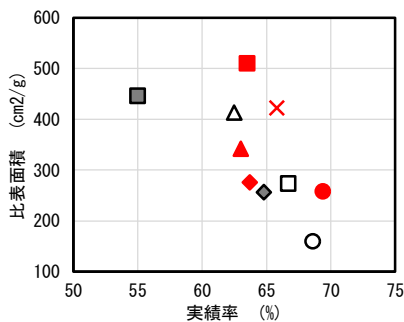


図-1 実積率と比表面積の関係

○W/C=40% ◆W/C=45% ■W/C=50% ▲W/C=55% ●W/C=60% ■W/C=65%

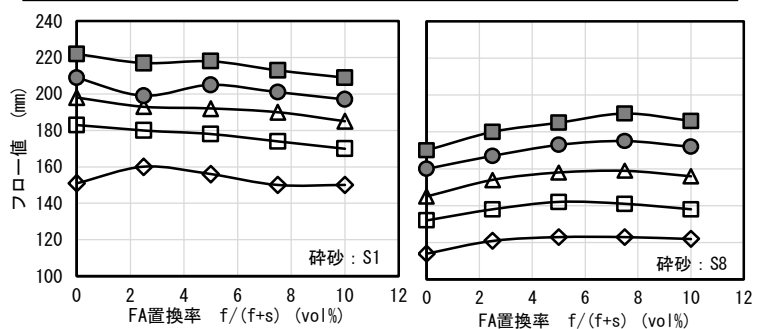


図-2 モルタルフロー試験

3. 実験結果

3.1 骨材品質試験

骨材の品質結果を表-5に、比表面積と実積率の関係を図-1に示す。陸砂S0の物性値は一般的な値であった。他方、砕砂は産地により物性値の変動が大きい結果であった。特に砕砂S1の微粒分量は10.4%と高く、実積率も高かった。砕砂S6の実積率は他の砕砂と比べて5%程度小さい値であった。以上の結果より、10 試料の砕砂のうち、比表面積、実積率および密度に着目し、比表面積が適度にばらつくように、S1、S3、S7、S8およびS9の計5試料の砕砂についてモルタル試験を実施した。

3.2 モルタル試験

(1) モルタルフロー試験

モルタルフロー試験結果の一部を図-2に示す。砕砂S1は、水セメント比45%の場合FA置換率2.5%で最大のフロー値を示し、水セメント比が50%、55%、60%および65%の場合は、FA置換率が大きくなるほどフロー値は小さく

なる傾向であった。砕砂S8は、FA置換率とフロー値の関係は上に凸の傾向を示し、水セメント比45%および50%では、FA置換率5%程度においてフロー値が最大値となり、水セメント比55%の場合はFA置換率6%程度、水セメント比60%および65%の場合はFA置換率7.5%程度であった。

(2) 固相材料実積率

固相材料実積率試験結果の一部を図-3に示す。砕砂S8は、水セメント比45%、50%、55%および60%の場合FA置換率2.5%~5%において固相材料実積率が最大となる上に凸の傾向を示し、水セメント比65%の場合FA置換率7.5%程度において固相材料実積率が最大となる上に凸の傾向であった。モルタル試験の結果から、FA置換率とフロー値の関係は、砕砂の種類により異なることがわかった。以上の結果より、FA置換率、固相材料実積率およびフロー値の関係などから代表的な砕砂の選定をする予定であったが、全ての砕砂で同様な傾向となった。したがって、流動性の指標として使用出来ると考えられる充填率と比

表面積に着目し、コンクリート試験に用いる砕砂をS1、S8、S9とした。

3.3 FA置換率および細骨材率の推定

最適FA置換率および最適細骨材率の推定値を表-6に示す。前項の図-3に示す各骨材におけるFA置換率と固相材料実積率の関係から、固相材料実積率が最大となる値を最適FA置換率とした。また、最適細骨材率の推定は推定FA置換率を用いて、単位水量170kg/m³の条件における推定コンクリート配合による固相材料実積率試験から最適細骨材率とした。

3.4 コンクリート試験

モルタル試験結果より推定したFA置換率および細骨材率の妥当性評価試験として表-4に示す実験ケースにおけるコンクリート試験を行った。

(1) 細骨材率の確認試験

実験ケースのFA未使用とFA置換1における細骨材率と単位水量の関係を図-4に、細骨材率と固相材料実積率の関係を図-5に示す。なお、図-5の赤印はT-ポストスランプ試験において適正と判断されたものである。図-4より、FA未使用における細骨材率と単位水量の関係は、細骨材率が大きくなるほど単位水量は多くなる傾向が示された。FA置換した場合、水セメント比45%では同一細骨材率の単位水量は同程度か若干多くなる傾向を示した。しかし、水セメント比65%では同一細骨材率の単位水量はFA未使用より少なくなる傾向であった。水セメント比45%の場合、単位セメント量が380kg/m³以上あるため絶対容積が多く、FA置換したことでさらに粉体の容積が多くなり、ペーストの粘性が増加することでコンクリートの流動性が低下して単位水量が多く必要になったと考えられる。他方、水セメント比65%の場合、単位セメント量は300kg/m³程度以下のためFA置換して粉体の容積が多くなりペーストの粘性が増加してもFAの球形粒子によるボールベアリング効果により流動性が向上し、単位水量は減少したと考えられる。

図-5より、FA未使用の砕砂の場合は、上に凸の傾向を示し、固相材料実積率が最大となる細骨材率は、T-ポストスランプ試験において適正と判定された細骨材率とほぼ同一であった。他方、FA置換の場合、細骨材率と固相材料実積率の関係は、不明瞭ではあるが概ね上に凸の傾向が示し、固相材料実積率が最大となる細骨材率は、T-ポストスランプ試験において適正と判定された細骨材率と若干異なる結果であった。これは、FA置換によりコンクリートの粘性が増加し、材料分離抵抗性が向上することで少ない細骨材率でもコンクリートの分離が生じないためと考えられる。以上の結果から、実験ケースFA置換2における最適細骨材率はT-ポストスランプ試験において適正と判断されたものを使用することとした。結果を表-7に示す。

(2) FA置換率の確認試験

前項の結果より得られた細骨材率を用いてFA置換率を3水準として配合試験を行った。FA置換率と単位水量の関係を図-6に示す。図-6より、砕砂S1の場合、水セメント比45%および65%の両ケースにおいて、FA置換率2.5%が最も単位水量が少ない下に凸の傾向を示した。砕砂S8

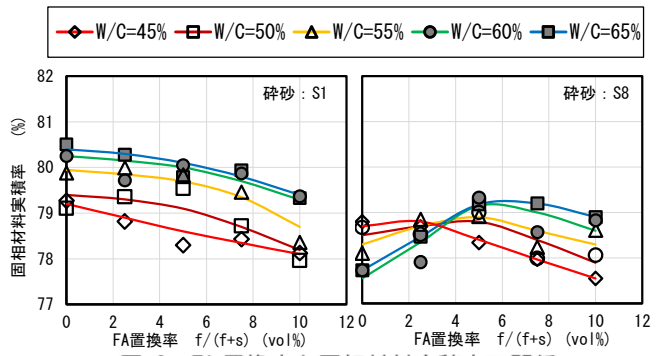


図-3 FA置換率と固相材料実積率の関係

表-6 各骨材の最適FA置換率 (W/C=45%、W/C=65%)

細骨材種類	水セメント比 W/C (mass%)	FA置換率 f/(s+f) (vol%)	単位水量 W (kg/m ³)	細骨材率 (s+f)/a (vol%)	固相材料実積率		
					単位容積質量 (kg/L)	実積率 (%)	
砕砂 S1	45	0	170	46	2.269	85.5	
		2.5		46	2.264	85.3	
	65	0		58	2.261	86.0	
		2.5		54	2.267	86.2	
	砕砂 S8	45		0	52	2.252	85.0
				2.5	44	2.257	85.3
0			48	2.227	84.9		
砕砂 S9	45	0	54	2.247	85.9		
		5.0	54	2.347	86.2		
	65	0	46	2.317	85.7		
		0	58	2.312	85.4		
		7.5	58	2.332	86.7		

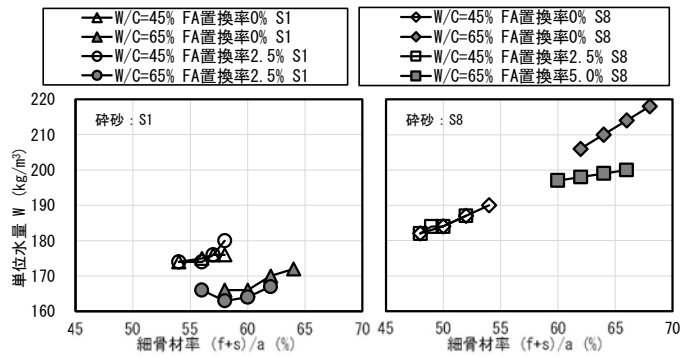


図-4 細骨材率と単位水量の関係

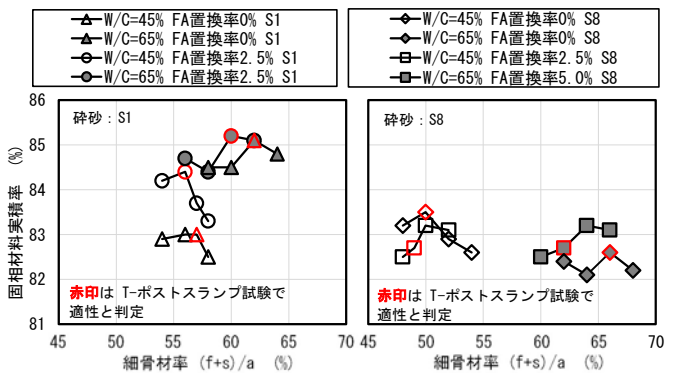


図-5 細骨材率と固相材料実積率の関係

表-7 実験ケース2における細骨材率

実験ケース	細骨材種類	水セメント比 W/C (%)	水粉体比 W/(C+F) (%)	細骨材率 (f+s)/a (%)	FA置換率 f/(f+s) (vol%)	単位水量 W (kg/m ³)
65.0	59.2	60.0	2.5	164		
砕砂 S8	45.0	43.1	49.0	2.5	184	
	65.0	56.1	62.0	5.0	198	
砕砂 S9	45.0	41.7	46.0	5.0	190	
	65.0	52.5	54.0	7.5	178	

の場合、水セメント比45%ではFA置換率が多くなるほど単位水量は多くなる傾向を示したが、水セメント比65%ではFA置換率が多くなるほど単位水量は少なくなる傾向を示した。他方、単位水量は細骨材種類および水セメント比により相違する結果であり、水セメント比45%の方が65%より少ない結果であった。一般に、水セメント比が小さい場合ペーストの粘性が高いためコンクリートの流動性を確保するために単位水量は多くなる傾向になる。

FA置換率が多くなるほど、粉体の体積が増加しペーストの粘性が高くなる。したがって、水セメント比が小さい45%の方がさらにペーストの粘性が高くなり、流動性を確保するための単位水量が増加したと考えられる。水セメント比65%の場合、FA未使用ではペーストの粘性が低いため単位水量を多くしてペーストの絶対容積を確保し、モルタルの粘性を高くする必要がある。しかし、FA置換率が多くなるほどペーストの粘性が高くなり、ペーストの絶対容積を少なくすることができるため単位水量は少なくなる傾向になったと考えられる。

図-7より、FA置換率とT-ポストスランブ試験判定の関係は、FA置換率が多くなるほどコンクリートの粘性が増加し、判定が過剰になる妥当な傾向が示された。

(3) FA最適コンクリートとFA未使用コンクリートの比較

前項(1)(2)にて得られた結果より、FA最適配合コンクリートとFA未使用コンクリートのFA置換率および細骨材率の関係を図-8に示す。図-8より単位水量の関係は砕砂を使用した場合、FA未使用よりFA置換した方が少なくなる結果であった。特に水セメント比65%では単位水量の減少量が多かった。しかし、本配合条件だけではJASS標準の185kg/m³以下を満足できない砕砂があり、AE減水剤添加率の増加や種類の変更などが必要と考えられる。

細骨材率の関係は、FA未使用よりFA置換した方が小さくなった。これは、FA置換することでコンクリートのワーカビリティが改善され、材料分離抵抗性が向上したため、細骨材率が少なくなったと考えられる。

モルタル試験結果より推定したFA置換率および細骨材率とコンクリート試験で得られた結果との関係を図-9に示す。図-9より、最適FA置換率は、砕砂S9の水セメント比65%以外はモルタル試験の推定値と同じであった。しかし、最適細骨材率は砕砂S9の水セメント比45%は推定値と同じであったが、他のケースは0~10%相違し、FA未使用より1~4%小さくなった。

以上より、モルタル試験と固相材料実績率よりFA置換率はある程度推定することが可能であるが、細骨材率は今回の試験項目だけでは十分な推定はできなかった。

4. まとめ

本実験結果より、得られたことを以下にまとめる。

- (1) モルタル試験においてFA置換率とフロー値の関係は、砕砂の種類により異なる傾向となった。
- (2) モルタル試験において固相材料実績率は、砕砂の種類により水セメント比およびFA置換率との関係が異なる傾向となった。
- (3) コンクリート試験においてFA未使用よりFA置換した方が、コンクリートの材料分離抵抗性が向上

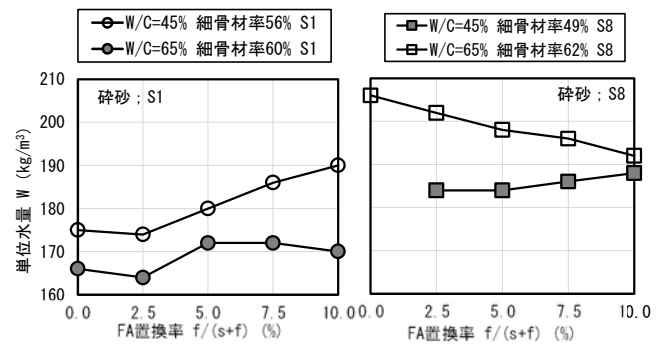


図-6 FA置換率と単位水量の関係

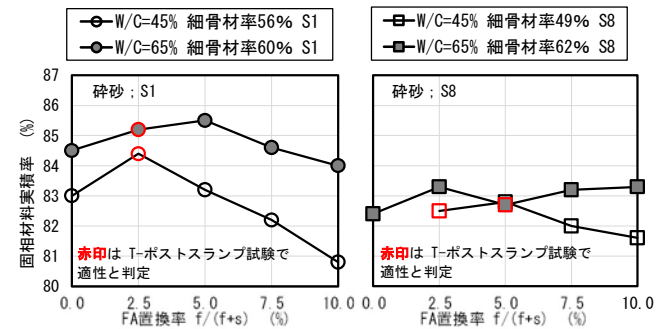


図-7 FA置換率と固相材料実績率の関係

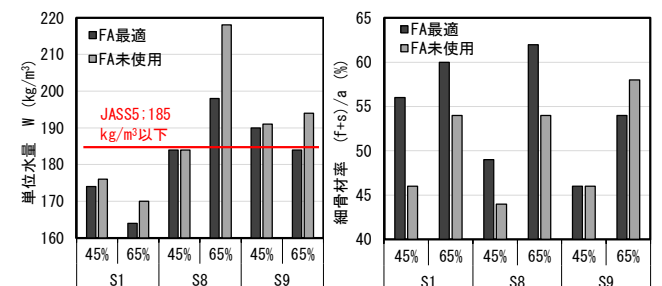


図-8 FA最適コンとFA未使用コンの比較

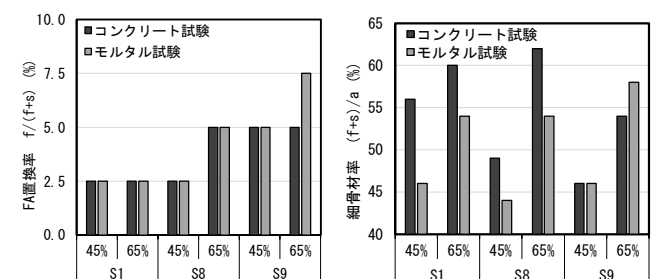


図-9 モルタル試験とコンクリート試験の比較

した。また、単位水量は同等または減少傾向となった。

- (4) コンクリート試験においてFA置換率は、モルタル試験より得られた最適FA置換率とほぼ同じ傾向となった。したがって、FA置換率は固相材料実績率より推定可能であることが示唆された。また、細骨材率は、固相材料実績率試験より推定した最適細骨材率と0~10%異なり、FA未使用より1~4%小さくなった。

参考文献

- 1) 梁俊、丸屋剛、坂本淳：コンクリートの分離抵抗性の簡易な定量評価方法の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.34, No.1, 2012