

海外炭フライアッシュのコンクリートへの適用(その1)

小 林 仁*
齋 藤 敏 樹**

概要 北海道電力(株)苫東厚真発電所2号機は年間20種類以上の海外炭を燃焼しているため、副産物であるフライアッシュ(以下FAと呼ぶ)も燃焼石炭の違いにより、化学成分や物理性状が一定品質とならないため、FAとしてはその大半がコンクリート用FAⅡ種相当(旧JIS灰)であるにもかかわらず、コンクリート用に使用されていなかった。本稿は5種類のFAを用いて室内試験により、フレッシュコンクリートのスランプと空気量には、FAの密かさ比重とメチレンブルー吸着量が相関関係にあることについて中間報告をする。

キーワード: 海外炭, フライアッシュ, フレッシュコンクリート, 密かさ比重, メチレンブルー吸着量

1. はじめに

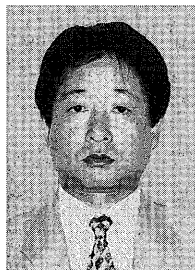
北海道電力(株)では、3箇所の石炭火力発電所を稼働中であり、このうち奈井江、砂川発電所は主に国内炭を燃焼していることからFAの品質も一定であり、コンクリート用FAⅡ種相当として古くからコンクリート混和材として利用されてきた。

海外炭を燃焼している苫東厚真発電所のうち、1号機は当初国内炭を使用して運転をしていたが、途中から海外炭に切り替えたため、FAは相当量の未燃分があること、また3号機はPFBC灰のためそれぞれコンクリート用としては非旧JIS(1996)灰である。しかしながら、2号機はFAの大半がコンクリート用FAⅡ種相当であるにもかかわらず、20種類以上と数多く産出されるFAの品質がフレッシュコンクリートへ与える影響が明確でなかったため、その分野での利用が進んでいなかったのが現状である。

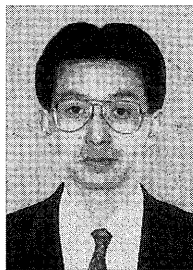
一方、苫東厚真発電所4号機増設工事が平成11年3月着工し、相当量のコンクリートを打設することから、コストダウンとFAの有効利用を目的に、平成9年より2号機のFAを用いて各種室内試験を実施してきており、十分本施工に適用可能である成果が得られたので以下にその内容について中間報告をする。

2. 使用材料

使用材料を表-1に示す。



小林 仁



齋藤 敏樹

表-1 使用材料

種 類	諸 元
普通ポルトランドセメント	比重3.16 比表面積3370cm ² /g
細 骨 材	浜厚真産陸砂 比重2.68 吸水率2.4% FM2.52
粗 骨 材	沙流川産川砂利 25-5mm 比重2.75 吸水率1.0% 40-5mm 比重2.76 吸水率0.9%
A E減水剤	変成リグニンスルホン酸系
A E助剤	アルキルエーテル系

3. FA品質

FAの品質を、表-2に示す。充填率は密かさ比重を比重で除した値であり、密かさ比重は、長瀧らの方法¹⁾に準じて落下回数を1000回と設定したときの値として求めた。

採取したFAのうちメチレンブルー吸着量0.63mg/g、ブレン比表面積2980cm²/g、フロー値比105%の品質のOP灰を本試験における代表的なFAとした。

各FAの品質は、SUのブレン比表面積2310cm²/gが、旧JIS規格(1996)の2400cm²/g以上を満足しなかったほかは、旧JIS規格を満足する品質であった。

表-2 FA品質

炭 種		OP	DD	SU	MS/BA	BU	旧JIS規格(1996)	
化学成分	強熱減量 (%)	2.3	2.0	0.1	1.0	2.0	5以下	
	二酸化けい素 (%)	49.6	51.9	62.7	54.0	71.1	45以上	
	酸化第二鉄 (%)	3.69	12.56	3.70	6.26	3.23	—	
	酸化アルミニウム (%)	29.87	17.32	15.21	23.64	17.17	—	
	酸化カルシウム (%)	5.72	10.29	9.00	5.72	0.62	—	
物理性状	PH	11.3	13.0	13.1	13.1	8.3	—	
	メチレンブルー吸着量 (mg/g)	0.63	0.94	0.28	0.38	0.57	—	
	水分 (%)	0.04	0.04	0.00	0.01	0.08	1以下	
	比重	2.33	2.47	2.35	2.32	2.18	1.95以上	
	密かさ比重 (g/cm ³)	1.374	1.552	1.642	1.484	1.318	—	
	充填率 (%)	59.0	62.8	69.9	64.0	60.5	—	
	粉末度	ブレン比表面積 (cm ² /g)	2,980	3,360	2,310	2,560	3,430	2400以上
		45μmふるい残分 (%)	10.0	12.0	26.0	23.0	15.0	40以下
	フロー値比 (%)	105	109	108	101	105	92以上	
	活性度指数(材齢28日) (%)	86	90	86	92	86	80以上	
活性度指数(材齢91日) (%)	100	96	97	96	104	90以上		
曲げ強度比(材齢28日) (%)	94	93	91	93	90	—		
曲げ強度比(材齢91日) (%)	98	102	96	99	104	—		

*北海道電力(株) 総合研究所 土木グループ 主幹研究員 会員
**北電興業(株) 土木部 係長 会員

4. 配合ケース

配合ケースおよび配合条件を表-3に示す。

表-3 配合ケースおよび配合条件

配合ケース	粗骨材最大寸法 (mm)	設計基準強度 (MPa)	配合強度 (MPa)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水結合材比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ置換率 F/(C+F) (%)
A	40	24	29	12±2.5	4.5±1.0	55以下	20
B	40	21	25	12±2.5	4.5±1.0	55以下	20
C	40	18	22	12±2.5	4.5±1.0	55以下	20
D	25	24	29	18±2.5	4.5±1.0	55以下	20
E	40	24	29	15±2.5	4.5±1.0	55以下	20
P	40	-	-	12±2.5	4.5±1.0	-	0

P配合は、B配合と細骨材率・単位結合材量を同一とし単位水量を調整した配合

5. 配合試験

(1) FAの品質変動の影響

FAの品質変動がコンクリートに与える影響を把握するため、B配合およびD配合について、FAの種類を変化させた時の同一配合でのスランブおよびAE助剤添加率の変動を確認した。また、時間経過に伴うスランブと空気量の変化と圧縮強度を測定した。

スランブは、FAの品質のうちフロー値比、ブレン比表面積および強熱減量との相関性は低く、密かさ比重との相関性が高く示された。図-1に密かさ比重とスランブの関係を示す。

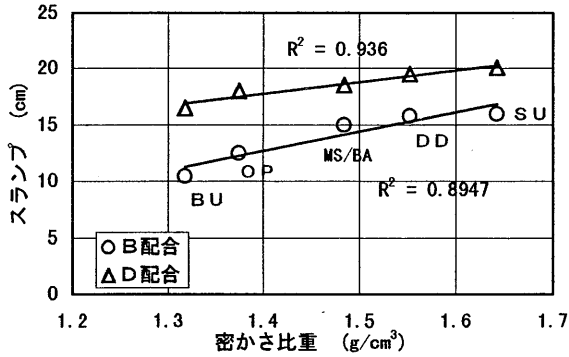


図-1 密かさ比重とスランブの関係

AE助剤添加率は、強熱減量との相関性は低く、メチレンブルー吸着量との相関性が高く示された。図-2にメチレンブルー吸着量とAE助剤添加率の関係を示す。

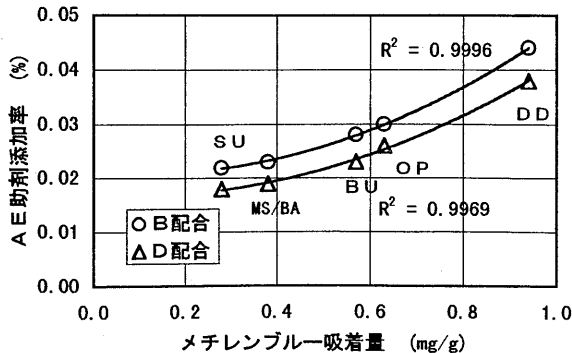


図-2 メチレンブルー吸着量とAE助剤添加率の関係

図-1および図-2より、FAの品質が変動しても密かさ比重およびメチレンブルー吸着量から所定のスランブ・空気量が得られる単位水量およびAE助剤添加率は容易に推定できるものと考えられる。

図-3に密かさ比重と練り上がり90分後のスランブの関係を、図-4にメチレンブルー吸着量と練り上がり90分後の空気量の関係を示す。

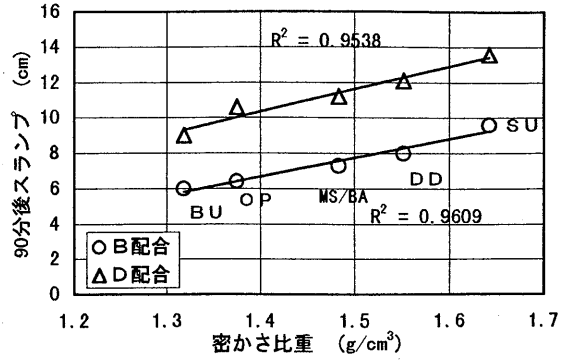


図-3 密かさ比重と90分後スランブの関係

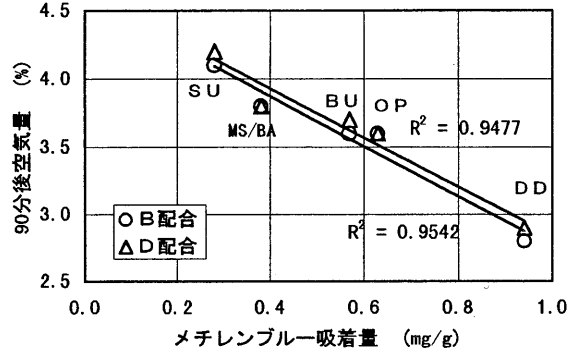


図-4 メチレンブルー吸着量と90分後空気量の関係

練り上がり90分後のスランブは、練り上がり時と同様にFAの密かさ比重との相関性が高く示され、練り上がりのスランブを一定とした場合スランブロスFAの品質に関わりないものと考えられる。練り上がり90分後の空気量は、強熱減量との相関性は低く、メチレンブルー吸着量との相関性が高く示され、メチレンブルー吸着量が0.6mg/g程度までは90分後の空気量ロスが1%程度であった。メチレンブルー吸着量が0.94mg/gのDDは、90分後の空気量が3%以下となり、耐久性が懸念される結果となった。

図-5に圧縮強度を示す。

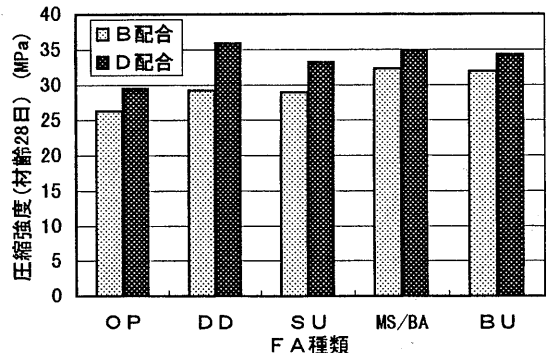


図-5 圧縮強度

圧縮強度は、水結合材比が同一であってもFAの種類により変動する結果となった。FAの品質との関係は、強熱減量、二酸化けい素、酸化アルミニウム、酸化カルシウム、ブレン比表面積および密かさ比重との相関性は示されず、図-6に示されるように活性度指数との関係においても明瞭な相関性は示されなかった。一般に、活性度指数が高いものはコンクリートの圧縮強度は高くなる傾向にあるとされるが、本試験ケースだけでは試料数が少ないことにより明瞭にならなかったものと考えられる。

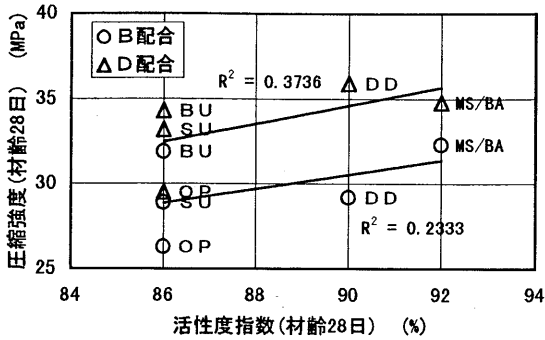


図-6 活性度指数と圧縮強度の関係

(2) W/(C+F)の検討

標準示方配合の水結合材比を求めため、表-3に示すB配合、D配合およびE配合について、使用FAをOPとし、所要のスランブが得られるようにW/(C+F)を変化させ圧縮強度試験を実施した。なお、細骨材率は予備試験により、B配合およびE配合は40%、D配合は46%とした。

圧縮強度は図-7に示されるように、結合材水比((C+F)/W)と相関関係にあり、表-4に示される相関式が求められた。

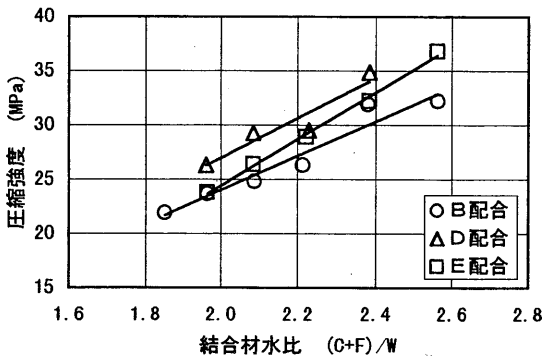


図-7 結合材水比と圧縮強度との関係

表-4 結合材水比と圧縮強度の相関式

配合ケース	回帰式	相関係数
B配合	$\sigma_{28} = 15.761 (C+F)/W - 7.502$	0.969
D配合	$\sigma_{28} = 18.472 (C+F)/W - 9.989$	0.943
E配合	$\sigma_{28} = 21.393 (C+F)/W - 18.367$	0.998

表-4の相関式により、各配合ケースごとに配合強度が得られる水結合材比を求め、表-5に示す配合条件によって標準示方配合を求めるものとした。

表-5 標準示方配合の配合条件

配合ケース	粗骨材最大寸法 (mm)	設計基準強度 (MPa)	配合強度 (MPa)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水結合材比 W/(C+F) (%)	フライッシュ置換率 F/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)
A	40	24	29	12±2.5	4.5±1.0	43.2	20	40
B	40	21	25	12±2.5	4.5±1.0	48.5	20	40
C	40	18	22	12±2.5	4.5±1.0	53.4	20	40
D	25	24	29	18±2.5	4.5±1.0	47.4	20	46
E	40	24	29	15±2.5	4.5±1.0	45.2	20	40
P	40	-	-	12±2.5	4.5±1.0	-	0	40

P配合は、B配合と細骨材率・単位結合材量を同一とし単位水量を調整した配合

6. 標準示方配合の検討

表-5に示された標準示方配合の配合条件を満足する配合を求め、経時変化試験、ブリーディング試験、圧縮強度試験および耐久性試験により諸性状の確認を行った。

表-6に配合および練り上がり性状を示す。

表-6 配合および練り上がり性状

配合ケース	水結合材比 W/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)							練り上がり性状		
			水	セメント	フライッシュ	細骨材	粗骨材	混和剤 (g/m³)	スランブ	空気量	温度	
A配合	43.1	40	141	262	65	755	1,167	3,270 (1.0%)	101.4 (0.031%)	12.2	4.4	20.0
B配合	48.4	40	137	226	57	775	1,198	2,830 (1.0%)	82.1 (0.029%)	12.0	4.5	20.0
C配合	53.4	40	135	202	51	788	1,218	2,530 (1.0%)	70.8 (0.028%)	12.4	4.5	20.0
D配合	47.3	46	156	264	66	848	1,021	3,300 (1.0%)	82.5 (0.025%)	18.5	4.6	20.0
E配合	45.1	40	144	255	64	755	1,166	3,190 (1.0%)	41.5 (0.030%)	14.9	4.6	19.5
P配合	49.8	40	141	283	0	778	1,202	2,830 (1.0%)	36.8 (0.013%)	12.1	4.6	19.5

P配合は、単位セメント量をB配合の単位結合材量(C+F)と同一とし、所定のスランブおよび空気量が得られるように単位水量およびAE助剤量を調整した配合で、B配合より単位水量は4kg増加し、AE助剤量は45.3g(0.016%)減少した。すなわち、FAを20%置換することによりAE助剤量は増加するもののコンクリートのワーカビリティの改善効果が示されたものである。

B配合およびP配合のスランブの経時変化試験結果を図-8に、空気量の経時変化試験結果を図-9に示す。

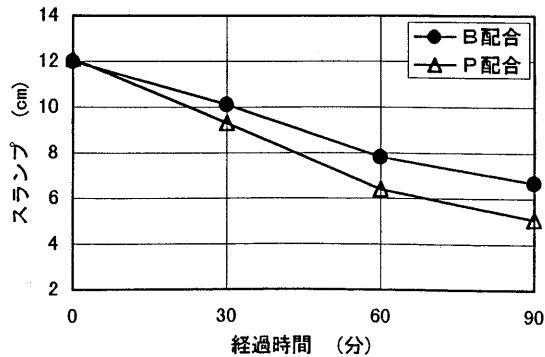


図-8 スランブの経時変化

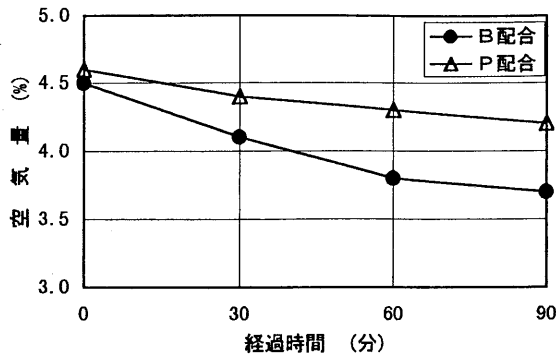


図-9 空気量の経時変化

F Aを置換したB配合とF Aを置換しないP配合を比較すると、P配合の方が1.5cm程度スランプロスが大きくなり、F Aを置換することにより経時変化が若干ではあるが改善される傾向が示された。空気量は、P配合が90分経過後においても4%程度確保されているのに対し、B配合では3.7%となりF Aにより空気量ロスが大きくなる傾向が示された。これはF A中の活性炭素分がA E剤を吸着し、さらに発生したエントレインドエアも吸着・消失させたためではないかと考えられる。

図-10にブリーディング試験結果を示す。

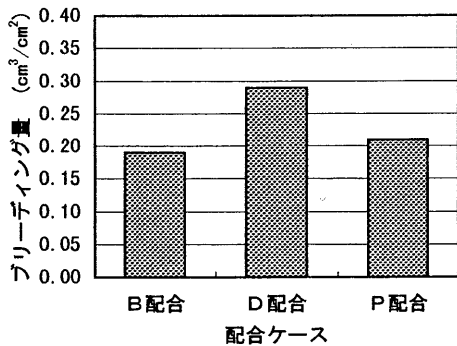


図-10 ブリーディング試験結果

F Aを置換したB配合とF Aを置換しないP配合は、同程度のブリーディング量であった。単位水量が最も大きいD配合(スランプ18cm)は、B配合より大きい結果であったが、JASS 5の「凍結融解作用を受けるコンクリート」における規格値0.3cm³/cm²を満足するものであった。

圧縮強度試験結果を表-7に示す。

表-7 圧縮強度試験結果

配合ケース	配合強度 (材齢28日) (MPa)	水結合材比 W/(C+F) (%)	圧縮強度 (MPa)			
			材 齢 (日)			
			3	7	28	91
A配合	29	43.2	13.7	20.9	30.6	37.5
B配合	25	48.5	12.0	18.0	27.0	32.8
C配合	22	53.4	9.38	14.9	23.8	27.9
D配合	29	47.4	12.8	19.9	30.1	38.0
E配合	29	45.2	13.8	20.5	30.1	36.2
P配合	29	49.8	16.0	23.1	33.9	35.7

圧縮強度を配合強度で除し百分率で表したものを強度発現率として、図-11に示す。

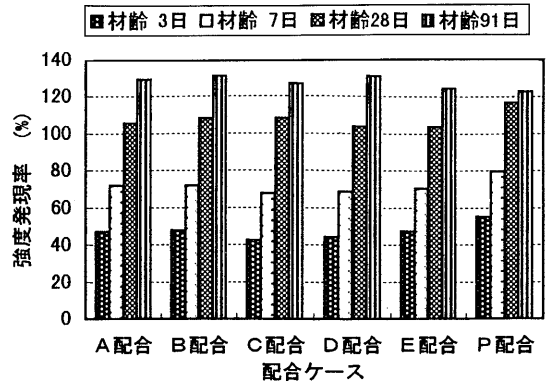


図-11 強度発現率

F Aを置換したA, B, C, DおよびE配合の強度発現率は、材齢3日で42~48%、材齢7日で68~72%、材齢28日で104~108%、材齢91日で125~131%となり、材齢7日で配合強度の約70%の圧縮強度が発現した。また、材齢28日から材齢91日までの強度増進は、F Aを置換した配合は材齢28日の117~126%であるが、F Aを置換しないP配合は105%程度となり、F Aのボゾラン効果を示されたものと考えられる。

凍結融解試験は、B配合、D配合およびP配合について実施し、代表的な灰としたO Pのほかに空気量ロスが大きい結果となったD Dについても耐久性の確認を行った。結果を図-12に示す。なおB配合およびP配合は25mmふるいでウェットスクリーニングをして供試体を作製した。

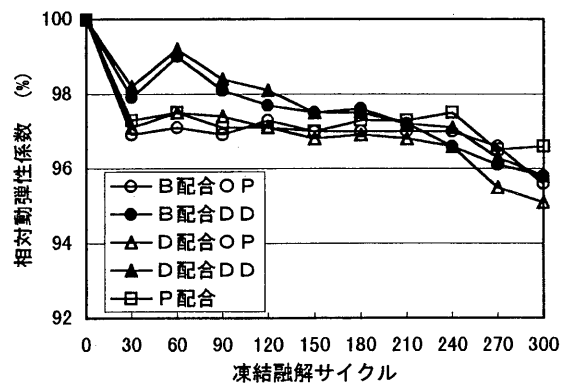


図-12 凍結融解試験結果

凍結融解300サイクル終了時の相対動弾性係数は、全配合とも規格値の60%以上を大きく上回る90%以上となり、優れた耐凍害性を示した。F Aを置換したB配合と置換しないP配合とは顕著な相違は示されず、同程度の耐凍害性を示した。練り上がり90分後の空気量が3%以下となったD Dを用いた配合においても、相対動弾性係数はO Pと同程度を示し、F Aの品質の変動による耐久性の影響は少ないものと考えられる。コンクリートの耐凍害性は、コンクリート中の気泡分布と密接な関係にあり、F Aの品質により硬化コンクリート中の気泡組織にどのような影響を与えるか検討する必要があると考えている。

7. まとめ

標準示方配合は表-8のようになった。

表-8 標準示方配合

配合 ケース	設計 基準 強度 (MPa)	配合 強度 (MPa)	粗骨材 最大 寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	フライアッシュ 置換率 F/(C+F) (%)	水 結合材比 W/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
									水 W	セメント C	フ ラ イ ア ッ シ ュ F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (g/m ³)	
														AE減水剤	AE助剤
A配合	24	29	40	12±2.5	4.5±1	20	43.1	40	141	262	65	755	1,167	3,270 (1.0%)	101.4 (0.031%)
B配合	21	25	40	12±2.5	4.5±1	20	48.4	40	137	226	57	775	1,198	2,830 (1.0%)	82.1 (0.029%)
C配合	18	22	40	12±2.5	4.5±1	20	53.4	40	135	202	51	788	1,218	2,530 (1.0%)	70.8 (0.028%)
D配合	24	29	25	18±2.5	4.5±1	20	47.3	46	156	264	66	848	1,021	3,300 (1.0%)	82.5 (0.025%)
E配合	24	29	40	15±2.5	4.5±1	20	45.1	40	144	255	64	755	1,166	3,190 (1.0%)	41.5 (0.030%)
P配合	—	—	40	12±2.5	4.5±1	0	49.8	40	141	283	0	778	1,202	2,830 (1.0%)	36.8 (0.013%)

F Aの品質変動がコンクリートに与える影響は次のようであった。

- (1) メチレンブルー吸着量が大きくなるとA E助剤添加率は多くなる相関性が示され、所定の空気量が得られるA E助剤添加率はメチレンブルー吸着量から推定が可能と考えられた。
- (2) メチレンブルー吸着量が大きくなるにしたがい、練り上がり90分経過後の空気量は小さくなる傾向が示された。
- (3) 密かさ比重が大きくなるとスランブは大きくなる相関性が示され、密かさ比重からスランブの変動を推定し、単位水量の補正が可能と考えられた。
- (4) 圧縮強度は、F Aの品質と明瞭な関係は示されなかった。しかし、本試験で使用したO Pは使用したF Aの中では最も低い強度であったことから、ほかのF Aを使用しても配合強度を下回る可能性は低いと考えられた。
- (5) 凍結融解抵抗性は、メチレンブルー吸着量が0.94mg/gのD Dを使用した場合であっても優れた耐凍害性を示し、練り上がり空気量が4.5%程度であればF Aの品質変動による凍結融解抵抗性に与える影響は少ないと考えられた。

本成果をもとに建設工事におけるF Aコンクリートの品質管理のうちF Aの品質試験として、J I S規格の試験項目のほかにメチレンブルー吸着量および密かさ比重試験を実施していくこととし、さらにデータの蓄積を行い、スランブ、空気量および圧縮強度とF Aの品質との関連の研究・検証を行う予定である。

またそれらの成果を踏まえて、今後F Aコンクリートの配合設計を構築し、20種類以上と数多く産出されるF Aのコンクリート分野での有効利用を実施していきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 長瀧重義；坂井悦郎；宮沢伸吾；竹内 徹. セメント技術年報, 36, 1982, p.57-60.

電力土木誌の別冊代早見表

(単位：円)

ページ数	1～25部	26～50部	51～100部	101～200部	201～500部	1,000部
2	11,000	13,000	15,000	16,000	18,000	30,000
4	13,000	15,000	16,000	18,000	21,000	33,000
6	14,000	16,000	18,000	21,000	24,000	36,000
8	16,000	18,000	21,000	24,000	28,000	42,000
10	19,000	21,000	24,000	28,000	32,000	48,000
12	22,000	24,000	27,000	32,000	35,000	55,000

- 注：① 上記金額は概算額です。発送手数料は別に請求させていただきます。
 ② 消費税5%が別に加算されます。
 ③ 1997年7月号よりの価格です。