

四国地区におけるコンクリート用骨材の現状と将来 ー 石炭灰（フライアッシュ）の細骨材補充混和材としての利用技術 ー

四国電力(株) 土木建築部 石井光裕

(土木学会四国支部：四国における石炭灰のコンクリートへの適用性に関する調査研究委員会 委員兼幹事)

1. はじめに

石炭灰は、石炭火力発電所等で石炭（微粉炭）を燃焼した後に、残渣として発生するものである。現在、全国的に石炭火力発電所の建設が進めていること等により、石炭灰の発生量は増加する傾向にあり、現時点で8百万トンを超えている状況にある。石炭灰は平成3年に制定された“再生資源の利用の促進に関する法律”において指定副産物とされ、利用の促進が謳われており、また循環型社会形成推進基本法の施行や建設資材リサイクル法の制定など、副産物を資源として有効利用する必要性が一層高まっている。

このような中で、瀬戸内海における海砂採取規制強化と近い将来の全面禁止等による骨材資源の枯渇化対策の一つとして、石炭灰の有効利用が挙げられる。土木学会四国支部では、「四国における石炭灰のコンクリートへの適用性に関する調査研究委員会（委員長：河野清徳島大学名誉教授）」（以下、土木学会四国支部委員会と称す）を設置し、石炭灰（フライアッシュ）をコンクリートの細骨材補充混和材として利用する技術について検討を行い、「フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針(案)」（以下、指針案と称す）を制定している。

ここでは、土木学会四国支部委員会の活動成果である指針案とフライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートに関するフィールド試験の概要を紹介する。

2. フライアッシュとは

フライアッシュは、石炭灰のうち微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスから集じん器で採取されるアッシュであり、粒径数 μm から数百 μm 程度の球形微粉末である。フライアッシュの電子顕微鏡写真を写真-1に示す。石炭灰にはフライアッシュの他に、ボイラ内部で灰分が溶結して落下し、ボイラ底部から回収される塊状のクリンカアッシュがある。クリンカアッシュは外観は砂状であり、微視的には多孔質である。フライアッシュおよびクリンカアッシュの発生フローを図-1に示す。なお、四国電力の石炭火力発電所（西条発電所、橋湾発電所）から発生する石炭灰は、その9割程度がフライアッシュである。

フライアッシュのコンクリート用混和材としての歴史は

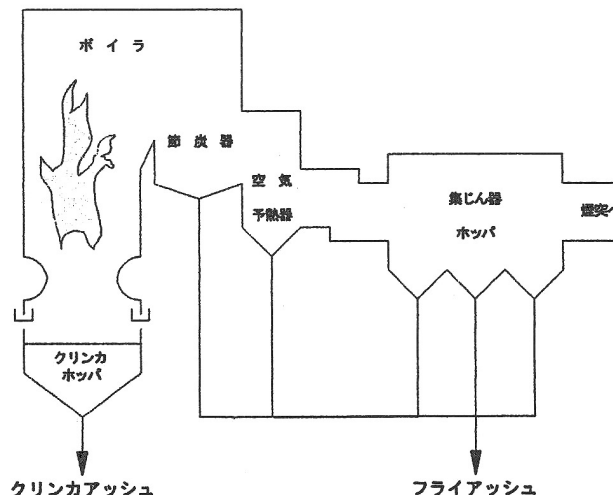


図-1 石炭灰の発生状況フロー

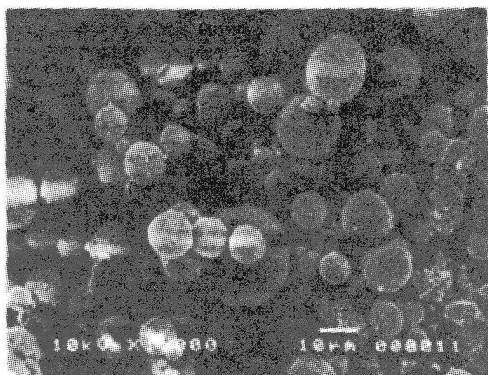


写真-1 フライアッシュの電子顕微鏡写真

表-1 JIS A 6201:1999「コンクリート用フライアッシュ」の種類と品質

項 目	種 類	フライアッシュ I 種	フライアッシュ II 種	フライアッシュ III 種	フライアッシュ IV 種
二酸化けい素 (%)		45.0 以上			
水分 (%)		1.0 以下			
熱収縮率 ¹⁾ (%)		3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
密度 (g/cm ³)		1.95 以上			
粉末度 ²⁾	45 μm 以下の残分 (ふるい分け方法 ³⁾ : %	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	比表面積 (ブレン方法 : cm ² /g)	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 以上
フロー値比 (%)		105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
活性度指数 (%)	材齢 28 日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上
	材齢 91 日	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上

注：1) 熱収縮率に代えて、未燃炭素含有率の測定を JIS M 8819 または JIS R 1605 に規定する方法で行い、その結果に対し熱収縮率の規定値を適用してもよい。

2) 粉末度は、ふるい分け方法またはブレン方法による。

3) 粉末度をふるい分け方法による場合は、ブレン方法による比表面積の試験結果を参考値として併記する。

古く、昭和 34 年に JIS A 6201 として規格化されており、以降 50 年近くに亘りダムコンクリートの混和材を始めとして多く使用されている。現在は、平成 11 年の JIS 改定により主に粉末度と強熱減量により I 種から IV 種に分類され、それらの特徴を活かして多方面で利用されている。JIS A6201:1999「コンクリート用フライアッシュ」によ

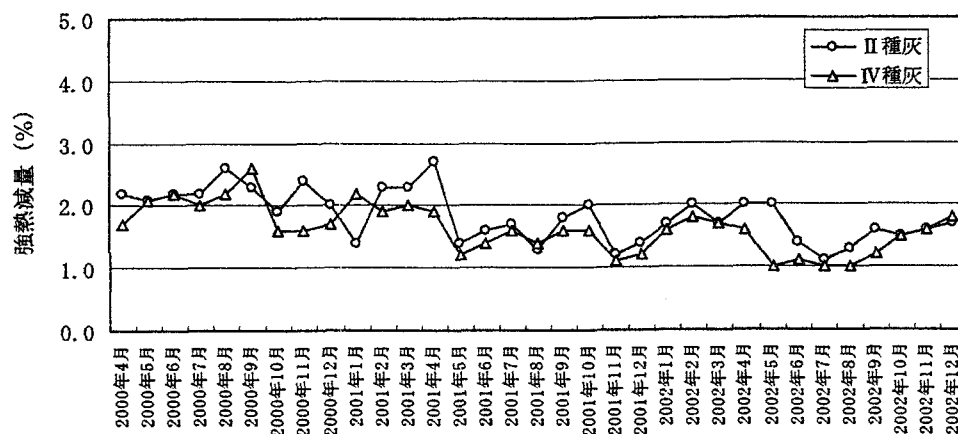


図-2 フライアッシュの強熱減量の変動例（四国電力）

る分類を表-1に示す。ここで紹介する細骨材補充混和材として利用するフライアッシュには、その品質変動やコンクリートの施工性、研究実績等により II 種および IV 種を適用対象とした。参考のため図-2 に四国電力から発生するフライアッシュの強熱減量の変動状況を示す。この図より、フライアッシュ II 種および IV 種の強熱減量の JIS 規格上限値である 5% に対して実績値は 3% 以下と低く、かつその変動も小さいことが明らかである。

3. フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案）の構成

これまでコンクリート用混和材としてのフライアッシュは主にセメントの内割、つまりセメントの一部をフライアッシュで置換する方法で使用されてきた。平成 11 年に土木学会から制定された「フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）」についてもフライアッシュのセメント置換したコンクリートを対象にして書かれている。

土木学会四国支部委員会では、四国の骨材事情を勘案して天然の細骨材使用量の低減を一つの目標とした、フライアッシュを細骨材補充混和材としての使用方法、つまりセメントと置換する方法を採らず、従来のセメントの外割的な使用方法についての調査研究を行った。この委員会活動や既往の研究成果から、当コンクリートは、フライアッシュをセメントと置換したコンクリートやフライアッシュを用いない通常のコンクリートとは多少異なった特性を有することから、その施工における標準となるよう指針案を制定した。指針案の構成を図-3 に示すとともに、概要を以下に紹介する。

1 章では指針案の適用の範囲と、使用する用語および記号の解説を行っている。この中で、指針案は土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕（平成 8 年制定）と土木学会「フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）」を基本として、フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工により、使用目的にあった所要の品質を持つ構造物ができるように、仕様規定型としてとりまとめたものであることを説明している。

2 章から 8 章ではコンクリートの一般的な使用に

フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案）	
1章 総則	コンクリートの一般的な使用に関する品質や、製造から施工までの標準的な取扱い等について記載
2章 フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの品質	
3章 材料	
4章 配合	
5章 コンクリートの製造、打込みおよび表面仕上げ	
6章 養生	
7章 レディーミクストコンクリート	
8章 品質管理および検査	
9章 マスコンクリート	
10章 寒中コンクリート	
11章 暑中コンクリート	
12章 海洋コンクリート	
13章 舗装コンクリート	
14章 高強度コンクリート	
15章 水密コンクリート	
16章 水中コンクリート	
17章 工場製品	
18章 その他の特殊な用途	
付録	
付録1	コンクリートの配合設計方法
付録2	コンクリートの配合の表し方
資料編 I 各種実験	
○	フィールド試験
○	クリープ試験
○	蒸気養生試験
資料編 II 単位水量および細骨材率の概略値ならびに配合補正表の根拠	
○	単位水量および細骨材率の概略値ならびに配合補正表の根拠
資料編 III 既往の研究	
1.	フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたフレッシュコンクリートの性質
2.	フライアッシュを細骨材補充混和材として用いた硬化コンクリートの性質
3.	四国における石炭灰の現状

図-3 「フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案）」の構成

関する品質や、製造から施工までの標準的な取扱い等について示している。フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの品質としては、フライアッシュによるボールベアリング効果と粘性の増加がフレッシュ性状に影響すること、ブリーディング、強度発現、耐久性、水密性、鋼材を保護する性能、収縮・クリープ等はフライアッシュを用いない通常のコンクリートと同等か、品質が向上する傾向にあること、AE 剤量、終局断熱温度上昇量はフライアッシュを用いない通常のコンクリートに比べて若干増加する傾向にあること等の特性を有し、これらを考慮したコンクリートの施工の標準をここで示している。

9章から18章では、特殊な配慮を要するコンクリートに適用する場合の注意すべき事項について示している。当コンクリートの、海洋コンクリート、水密コンクリートおよび水中コンクリートとしての使用では、細孔構造の緻密化や材料分離抵抗性の向上等により有効となる一方で、マスコンクリートや暑中コンクリートでは発熱に対する配慮が必要であると考えられる。いずれにしても、これらの特殊なコンクリートに関する実績が少ないため、フライアッシュの容積置換率は、所要の品質が得られることを試験等により確認することを基本としている。

4. フィールド試験状況

土木学会四国支部委員会では、フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの基礎物性と施工性を把握することを目的として、フライアッシュの種類および容積置換率を変化させたコンクリートをレディーミクストコンクリート工場の実プラントで製造し、ポンプ圧送、大型ブロックへの打込み、および海岸部飛沫帯への暴露を行い各種試験を実施した。その概要について以下に紹介する。

(1) 試験概要

使用材料は、試験を実施するレディーミクストコンクリート工場で日常より用いられているものを基本とし、表-2に示す材料を使用した。フライアッシュにはJISのⅡ種およびⅣ種に適合するフライアッシュを使用した。

試験は鉄筋コンクリート造の土木構造物への適用を想定し、粗骨材

最大寸法を25mm、水セメント比を55%、荷卸し時のスランブを $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ として、セメントの種類（普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種）、フライアッシュの種類（Ⅱ種、Ⅳ種）およびフライアッシュの容積置換率（0, 10, 20, 30%）を組み合わせた7種類の配合で実施した。

コンクリートの練混ぜは、実プラントの二軸強制練りミキサ（容量2,000l）を使用し、セメント、フライアッシュ、細骨材、水、混和剤、粗骨材

を順次投入した後、90秒間の練混ぜを実施した。

製造したコンクリートは、工場から現場までの運搬時間を考慮してトラックアジテータで60分間の攪拌を行い、その後コンクリートポンプ（ピストン式）により約50mの配管（呼び寸法100A）内を圧送して大型試験用ブロッ

表-2 フィールド試験の使用材料

材料種別	使用材料	仕 様
セメント	高炉セメントB種	密度 3.04g/cm^3 、ブレン値 $3700\text{ cm}^2/\text{g}$
	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm^3 、ブレン値 $3340\text{ cm}^2/\text{g}$
細骨材	玉石砕砂	那賀川（阿南市下大野町）密度 2.62g/cm^3 、FM2.98
粗骨材	玉碎石	那賀川（阿南市下大野町）密度 2.63g/cm^3 、FM6.85
フライアッシュ	JISⅡ種	密度 2.27g/cm^3 、ブレン値 $3040\text{ cm}^2/\text{g}$ 、強熱減量1.4%、 SiO_2 50.1%
	JISⅣ種	密度 2.20g/cm^3 、ブレン値 $1930\text{ cm}^2/\text{g}$ 、強熱減量1.2%、 SiO_2 50.5%
混和剤	AE剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤、 変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体

表-3 試験項目および準拠基準等

実施項目	試験および調査項目	準拠規格等
配合試験	配合試験	JIS A 1101-1998
	圧縮強度試験	JIS A 1108-1999
フレッシュコンクリートの経時変化 (攪拌60分間の経時変化)	スランブ試験	JIS A 1101
	空気量試験	JIS A 1128-1999
	温度測定	棒状アルコール温度計による。
施工性の把握	圧送負荷測定	動ひずみ計による配管内圧力測定
	スランブ試験(圧送前後)	JIS A 1101
	空気量試験(圧送前後)	JIS A 1128-1999
	型枠側圧測定	土圧計による。
	打設状況評価	目視観察による。
	こて仕上げ性評価	左官職人による。
硬化コンクリートの性状把握	表面状況の追跡調査	目視観察、スケッチ、写真撮影
	圧縮強度試験(コア、標準養生)	JIS A 1108-1999
	中性化試験(コア、はり供試体)	フェノールフタレイン法
	塩分浸透深さの測定(コア)	フルオレセインナトリウム変色法

ク（直方体、1.5m×1.0m×0.5m）の型枠に打設した。

フィールド試験で実施したフレッシュコンクリート性状、施工性および硬化コンクリート性状に関する各種試験項目とその準拠規格等を表一3に、ポンプ圧送から試験用ブロック打設までの試験設備配置図を図一4に示す。

(2) 試験結果

1) 配合

コンクリートの配合は、所要の練上り性状が得られるよう事前に室内で配合試験を行い、表一4に示す配合を選定した。なお、選定配合は、練混ぜてから60分間の攪拌後の荷卸し時に、スランプ8.0±2.5cm、空気量4.5±1.5%となるようロスを考慮し、練上がり時のスランプを10+2.5cm、空気量を5.0+1.5%とした。選定配合は以下の特徴を示している。

- ・ 単位水量はフライアッシュIV種を容積置換率10%としたコンクリートはフライアッシュを用いないプレーンコンクリートと同等であり、さらにフライアッシュが増加した場合には単位水量も増加した。
- ・ 空気量の調整に使用したAE剤量は、フライアッシュ容積置換率の増加とともに増加した。
- ・ 細骨材率はフライアッシュ容積置換率が高いほど小さくなった。

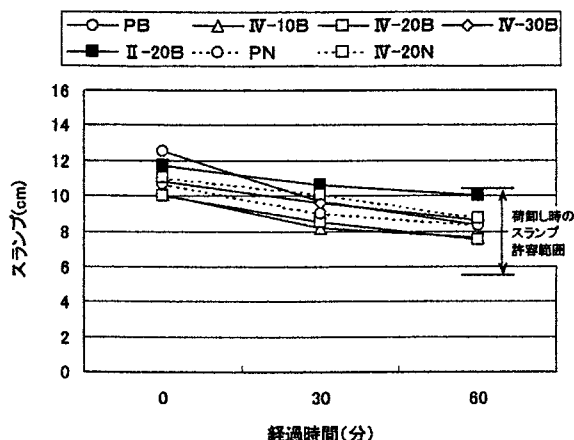
表一4 コンクリート配合

配合 種別	水結合材比 W/(C+Ad) (%)	容積置換率 f/(s+f) (vol.%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)										スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	性状
				水 W	セメント C	細骨材 S	フライアッシュ F	粗骨材G		混和剤(cc/m ³)							
								2510	1005	AE減水剤	AE剤(1)	AE剤(2)					
PB	55	0	45	147	268	849	-	729	312	712	8	-	-	12.2	6	22.5	良好
IV-10B		10	42	147	268	713	66	769	330	712	47	-	-	11.7	5.6	22.5	良好
IV-20B		20	37	158	288	545	114	813	349	765	-	86	10	6.1	21.5	良好	
IV-30B		30	32	169	308	401	145	858	368	819	-	231	10.4	5.6	21.5	良好	
II-20B		20	37	155	282	550	118	819	351	749	-	85	10.5	5.8	21.5	良好	
PN		0	45	147	268	852	-	733	314	712	4	-	-	10.5	5.7	23	良好
IV-20N		20	37	181	293	542	114	813	349	779	-	70	12.2	6.2	23	良好	

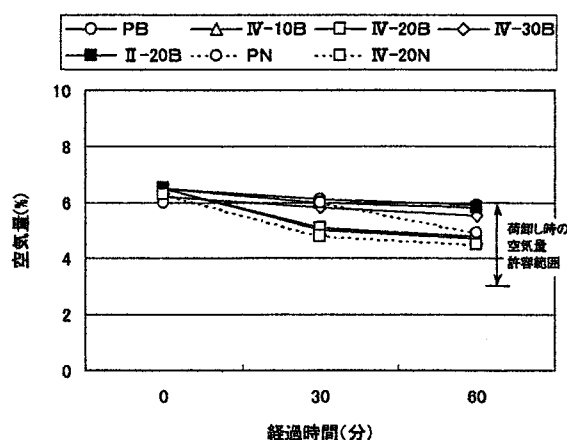
※ AE剤(1): 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, AE剤(2): 変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤

2) フレッシュコンクリート性状

コンクリートを練混ぜた後のフレッシュ性状（スランプ、空気量）の経時変化を図一5、図一6に示す。スランプ、空気量のいずれも、気温が25℃を超える条件下であったにもかかわらず、フライアッシュの使用による顕著な低下は認められず、60分間攪拌した後の荷卸し時の値は許容範囲内に入っている。



図一5 スランプの経時変化



図一6 空気量の経時変化

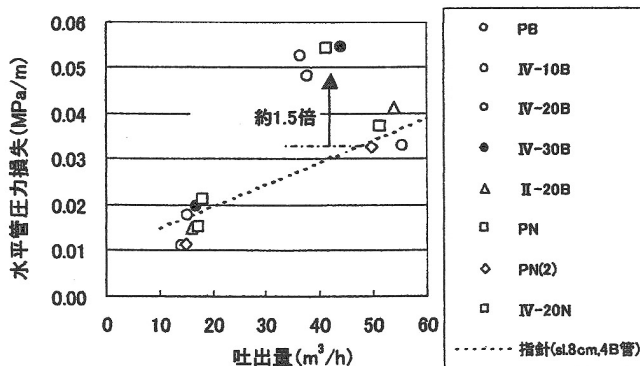


図-7 コンクリートの吐出量と管内圧力損失の関係

— 水平管 —

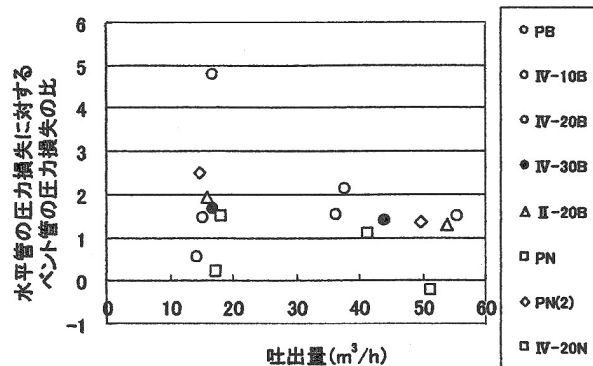


図-8 水平管の圧力損失に対するベント管の圧力損失の比

3) 施工性

施工性試験として、ポンプ圧送時の管内圧力損失の測定、コンクリート打込み時に型枠へ作用する側圧の測定および試験用ブロックの打設・表面仕上げ等の作業性についての定性評価を行い、以下のとおりフライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工上の特徴を確認した。

- ・ ポンプ圧送における管内圧力損失は、水平管 1m 当たりの圧力損失がフライアッシュを使用しないコンクリートの 1.5 倍程度に増加した (図-7)。したがって、施工計画時にポンプの機種や吐出量の選定に工夫をするのがよい。
- ・ ベント管の圧力損失は水平管の圧力損失に対して最大でも 5 倍程度であった (図-8)。この傾向は、フライアッシュを使用しない通常のコンクリートと同様であることから、従来の施工に対する特別な考慮は必要ない。
- ・ 圧送時の脈動の変動係数はフライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートは、フライアッシュを使用しないコンクリートよりも小さい傾向にあり、安定した圧送が可能となる。
- ・ 型枠へ作用する側圧は、いずれの配合も液圧を下回り、フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートはフライアッシュを使用しない通常のコンクリートよりも側圧は小さい傾向が認められる (図-9)。
- ・ 型枠への打設状況は、フライアッシュを容積置換率 30% 使用した場合に粘性が強く流動性が低下する傾向があるが、それ以外に顕著な差は認められなかった。また、フライアッシュの容積置換率が高い場合に粘性によりこて仕上げ作業において“こて離れが悪い”との評価があったが、逆に表面の肌理は細かく、仕上がり具合は良好であった。

4) 硬化コンクリートの品質

硬化コンクリートの中長期的な品質を評価するため、試験用ブロッ

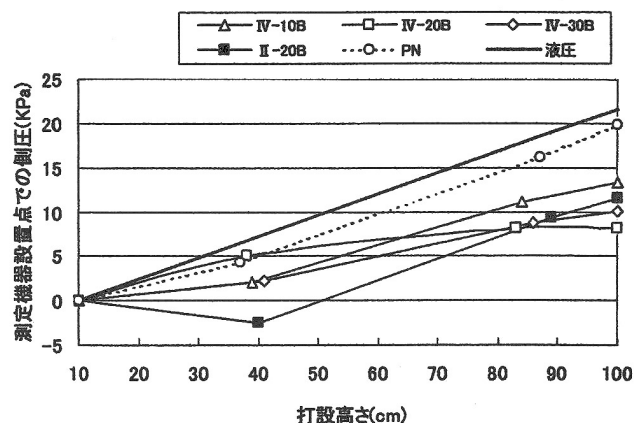


図-9 打込み高さで側圧の関係

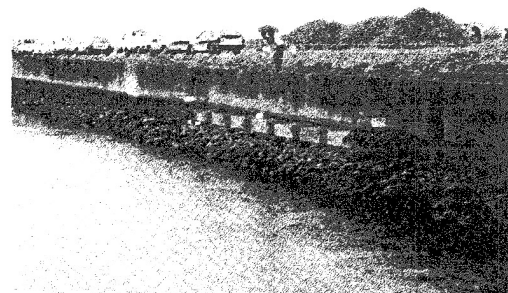


写真-2 試験用ブロック暴露状況

(平成 14 年 7 月 10 日 11 時)

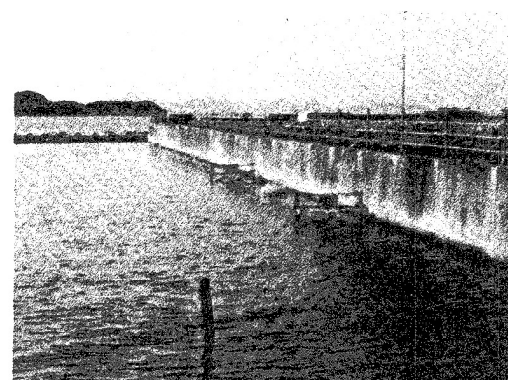


写真-3 試験用ブロック暴露状況

(平成 14 年 8 月 22 日 17 時)

クを打設地点で1ヶ月間気中暴露した後、徳島県小松島市の海岸部の飛沫帯に暴露して追跡調査を実施した。暴露状況は写真-2、写真-3のとおりである。その結果、フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの硬化後の品質を以下のとおり確認した。

- ・ 暴露期間が長くなるにつれて表面の色むらは変化し、半年後には海水や生物等による色むらや付着物が表面に広く分布したが、フライアッシュの有無等による明確な違いは認められなかった(写真-4)。
- ・ コアの圧縮強度は、図-10に示すとおりフライアッシュを細骨材補充混和材として使用することにより強度増加が明らかに認められた。ただし容積置換率による強度発現の差は顕著ではなかった。
- ・ コアの中性化深さは、図-11に示すとおりフライアッシュを細骨材補充混和材として使用することにより小さくなる傾向が認められ、容積置換率20%で最も小さくなった。なお、図中には試験用ブロックの暴露状態の上面および下面のそれぞれを示しており、乾燥の進む上面の方が中性化深さは大きい傾向が認められた。
- ・ コンクリートの塩分浸透深さは、図-12に示すとおりフライアッシュを細骨材補充混和材として使用することにより小さくなる傾向が認められた。ただし、フライアッシュの種類や容積置換率の影響は小さい結果であった。

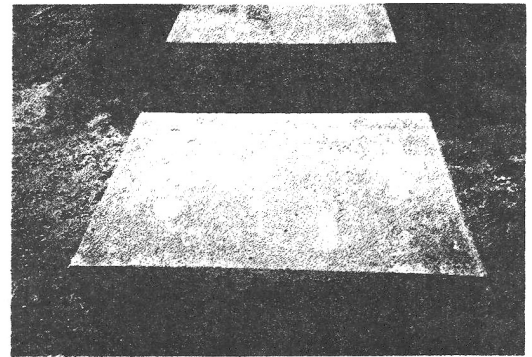


写真-4 試験用ブロック表面状況
(半年後, IV-20B, 上面)

5. おわりに

近畿以西の地域では、これまでコンクリート用細骨材として海砂が多く使用され、特に四国ではレディーミクストコンクリート用細骨材のおよそ半分を海砂が占めていた。しかし、自然環境の保全や漁業資源保護の観点から瀬戸内海での海砂の採取が強化され、近い将来全面採取禁止されることになっている。

土木学会四国支部委員会では、この四国における骨材事情を勘案し、天然の細骨材使用量の低減を目指した、フライアッシュを細骨材補充混和材として利用する技術に関する調査研究を実施した。その活動成果を取り纏め、今般、「フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針(案)」を制定する運びとなった。

当技術のように、細骨材の不足を補う材料として石炭灰等の産業副産物を利用することは、細骨材の安定供給の確保とともに、資源リサイクルにつながるものであり、当技術がその一助となるよう、多方面で活用されることを期待する。

最後に、土木学会四国支部委員会の活動に多大なご協力をいただいた委員長、委員各位および関係者の方々に深く感謝いたします。

図-10 コアの圧縮強度

