

石炭灰を用いた砕砂コンクリートの諸性状

PROPERTIES OF CRUSHED SAND CONCRETE USING COAL ASH

伊藤 秀敏*・藤木 洋一**・及川 隆仁***・林 稔***
by Hidetoshi ITO, Yoiti FUJIKI, Takahito OIKAWA
and Minoru HAYASHI

1. はじめに

第2次オイルショック以降において、石炭は石油に替わるエネルギーの重要な柱として位置づけられてきている。

石炭灰ハンドブック追録（平成4年度版）¹⁾によれば、石炭火力発電による石炭灰の発生量は、毎年約400万tになり、そのうち約4割が有効利用されている。有効利用の主なものは、セメント原料、肥料原料、人工軽量骨材原料、道路路盤材、トンネル裏込材、土壌改良材、アスファルトフィラー材などである。しかし、このまま計画通り石炭火力の開発が進められれば、平成7年度には約679万t、平成12年度には約1,011万tもの石炭灰が発生するものと予想されているとしている。

そこで、産業廃棄物処分用地の確保が次第に困難になりつつある我国においては、石炭灰の有効利用率を高めることは、重要な課題となっている。

一方、広島県では、環境保全の面から、海砂の採取規制が年々強化され、平成10年度には、この採取が全面的に禁止されるとの報道がなされている。このような地域的骨材事情を踏まえ、筆者らは、砕石工場で生産されている砕砂の品質調査を行った。その結果、コンクリート用細骨材としての品質は満足していたが、粒径0.15mm以下の砕石微粉末（以下微粉末という）の含有率は、7～18%の領域に分布し、その製造方法あるいは、岩質によって、差異が認められた。

このような地域的状況より、本研究では、微粉末の含有率を数種変化させた砕砂の一部を、石炭灰で置き換えたコンクリートのフレッシュおよび硬化時における諸性状を実験的に調べ、石炭灰による品質改善効果の有無を検討したものである。

*) 広島工業大学 工学部 土木工学科助教授（〒731-51 広島市佐伯区三宅二丁目1-1）

**) 同上 教授

***) 中国電力（株） 柳井発電所建設所（〒742 山口県柳井市大字宮本塩浜1578番8）

****) 中国電力（株） 技術研究センター（〒732 広島市南区大州4丁目4番32号）

2. 実験の概要

2. 1 使用材料

(1) セメント

セメントは普通ポルトランドセメント（比重3.16、比表面積3,410cm²/g、28日圧縮強さ417Kgf/cm²）を使用した。

(2) 骨材および石炭灰

細骨材は、広島市産乾式砕砂（粘板岩および硬質砂岩、比重2.69、吸水率1.02%、FM3.05）を、粗骨材は、砕砂と同産の碎石（最大寸法20mm、比重2.66、吸水率0.74%、FM6.79）を使用した。石炭灰は、中国電力（株）新小野田発電所産の原粉を使用した。その性状を表1に示す。

表1 石炭灰の性状

比 重		2 . 1 8
平均粒径 (μ)		1 0 . 4
p H		9 . 7
ブレン値 (c m ² / g)		3 8 7 0
I g ・ l o s s (%)		3 . 9
M . B . 吸着量 (m g / g)		0 . 5 0
化 学 成 分 (%)	S i O ₂	6 6 . 3
	A l ₂ O ₃	2 2 . 0
	F e ₂ O ₃	3 . 7 0
	C a O	0 . 9 0
	M g O	0 . 3 0
	S O ₃	0 . 2 0
	N a ₂ O	0 . 1 2
	K ₂ O	1 . 1 5

(3) 混和剤

減水剤はポゾリスN0.70、空気量調整剤はN0.303A（以下、「調整剤」と略す。）を使用した。

2. 2 実験方法

(1) 砕砂微粉末の調整

砕砂は、水洗いしながら0.15mmのフルイでふるい分け、残留分と通過分とに区分し、この通過分を微粉末とした。図1に微粉末の粒度分布を示す。微粉末含有量は、残留分をベースにして体積比で表し、微粉末含有率とした。

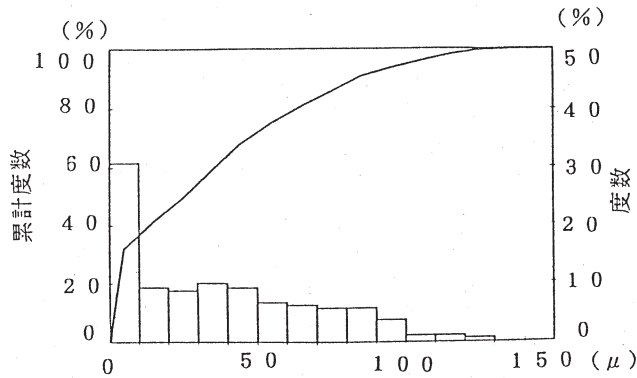


図1 微粉末の粒度分布

(2) コンクリートの配合および練り混ぜ

本試験で用いた配合条件は、単位セメント量は290K g/m³、細骨材率は3.1に示す試験結果より45%とした。スランブは10±2cm、空気量は4±1%、練り上がり温度は20±2℃を目標とした。

なお、石炭灰置換量は、微粉末量を調整した砕砂量に対する体積比で表し、これを石炭灰置換率とした。

コンクリートの練り混ぜは、傾胴式ミキサ（容量100ℓ）で全材料投入後90秒間行った。

本試験で用いた配合の概略を表2に示す。

なお、乾燥収縮試験および凍結融解試験は配合No.1～6について行った。

表2 配合の概略

配合No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
微粉末置換率(%)	0	0	0	10	10	10	20	20	20
石炭灰置換率(%)	0	10	20	0	10	20	0	10	20

(3) 試験項目

本研究で実施した試験項目および方法の概略を表3に示す。なお、断熱温度上昇量測定試験については、JIS化されてないため、建設材料実験²⁾に従うこととした。試験装置は、水循環式の測定装置を用いた。

表3 試験項目および方法

項目	規格	備考
空気量試験	JIS A 1128	
スランブ試験	JIS A 1101	
ブリージング試験	JIS A 1123	整形後4時間
圧縮強度試験	JIS A 1108	7, 28, 91日
乾燥収縮試験	JIS A 1129	7日水中養生
凍結融解試験	ASTM C666	300サイクル
断熱温度上昇量試験	水循環式	7日間

3. フレッシュコンクリートの性状

3.1 最適細骨材率の決定

本試験では、細骨材率の決定に際し、図2に示すように、空気量2%程度にして、単位水量を全配合共に同一としたコンクリートのスランブ試験を行った。その結

果、細骨材率45%でスランブ値は最大となったので、この種の配合では、所用のスランブを得るに要する水量が低減できるものと考え、最適細骨材率は45%に決定した。なお、この試験は配合No.5について実施したものである。

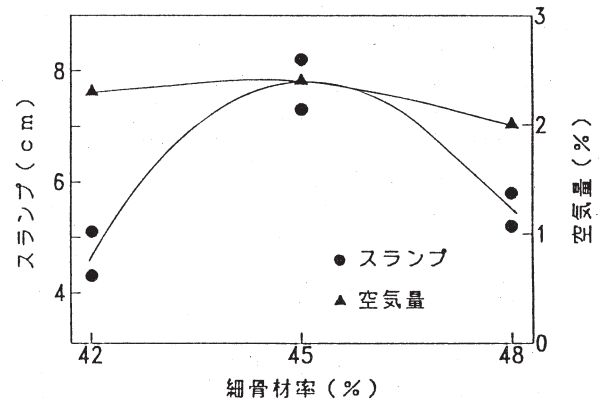


図2 細骨材率とスランブとの関係

3.2 単位水量

同一配合条件下で、石炭灰置換率の相違による単位水量の増減を、微粉末含有率をパラメーターとして示すと、図3のとおりであった。所要のスランブを得るために要する水量は、石炭灰置換率10%で最小となった。石炭灰無置換あるいは20%置換の場合に比べて大略5kg/m³低減することから、石炭灰および微粉末による相対的な減水効果がうかがえた。

一方、微粉末含有率20%では、石炭灰置換率の変化に対する単位水量の増減は、ほとんど認められなかった。これは、微粉末含有率が多量になると、配合条件を満たすための単位水量が増加し、さらに石炭灰を混入することで、両粉体量が多量になり、従来から言われている、各粉体の分散効果が、充分発揮しうる攪拌性能を、本試験で使用したミキサーでは十分発揮できなかったものと思われる。

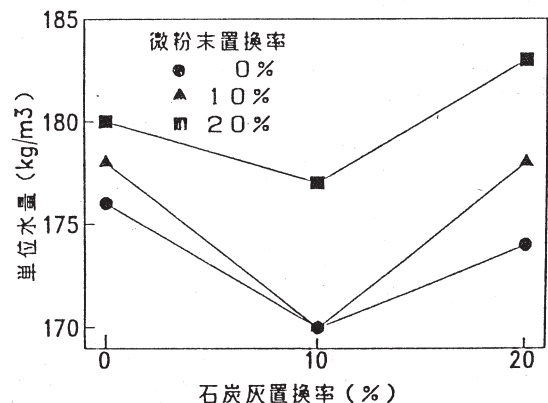


図3 石炭灰置換率と単位水量との関係

3. 3 空気量

通常、石炭灰をコンクリートに混入すると、石炭灰中に含まれる未燃カーボンの影響で、所要の空気量を得るために必要な調整剤量は増加する。図4は、実験データをもとに、石炭灰置換率と1%の空気量を得るために必要な調整剤量の関係を示したものである。この図より、1%の空気量を得るために必要な調整剤量は、石炭灰置換率の増加に伴い、ほぼ直線的に増加する傾向にあった。これは、石炭灰の増加に比例してメチレンブルー吸着量は大きくなるためこのような結果になったためと考えられる。また、微粉末含有率の増加に伴ってもわずかながら増加する傾向にあった。この理由として、化学的には岩質によるメチレンブルー吸着量、物理的には攪拌による調整剤の均等なる分散作用が薄れたためと考えられる。

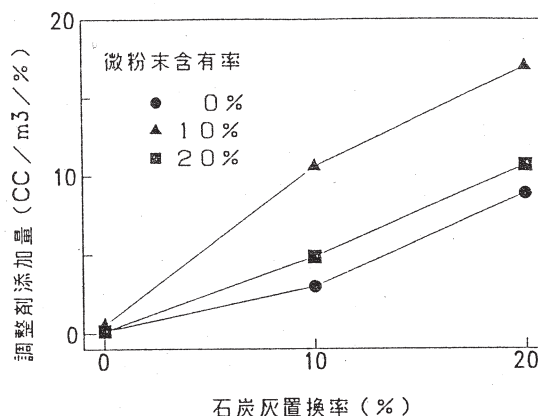


図4 石炭灰置換率と調整剤量との関係

3. 4 ブリージング

石炭灰および鉱物微粉末を含むコンクリートのブリージングは、これらの混入量あるいは粒径等によって著しく変化する。すなわち、微粒子の保水性が大きく関与しているものと考えられる。注水後4時間までのブリージング率を図5に示す。ブリージング率は石炭灰置換率および微粉末含有率を増加させると減少傾向を示した。これは、石炭灰および微粉末の平均粒径はそれぞれ 10.4μ 、 43.6μ であり、両者共に微細な粒径を有しているので、コンクリートの粘性が増加し、保水性が向上したためと考えられる。

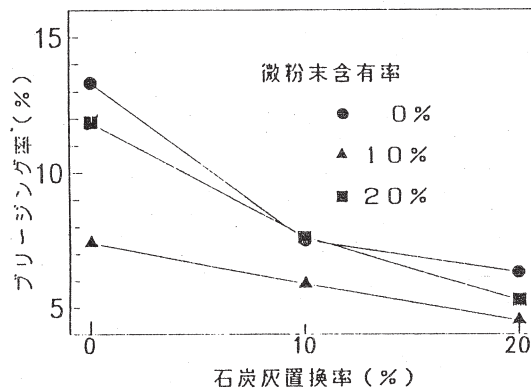


図5 石炭灰置換率とブリージング率との関係

4. 硬化コンクリートの性質

4. 1 圧縮強度発現性

圧縮強度試験材令は、3, 28, 91日とした。その結果を図6に示す。この図より、各材令における強度発現性は、いずれの場合も石炭灰置換率10%の時が最も良好であった。

各材令における強度発現性を微粉末含有率と石炭灰置換率について等強度線によって示すと図7～図9のごとくとなった。図7より、材令3日の強度発現性の良い範囲は、微粉末置換率10～15%、石炭灰置換率10%付近であった。これは、石炭灰混入による減水効果と微粉末効果³⁾によるものと考えられる。この微粉末効果により、結合材の分散効果と、結合材料間に介入する微粉末界面の水和量の増加等が考えられる。材令28日の強度発現性の良い範囲は図8より、微粉末含有率5～15%、石炭灰置換率10%付近であった。これは、石炭灰によるポゾラン効果のため微粉末含有率が低い範囲でも強度発現性は良好になったと考えられる。一方、材令91日の強度発現性の良い範囲は、微粉末含有率0～8%、

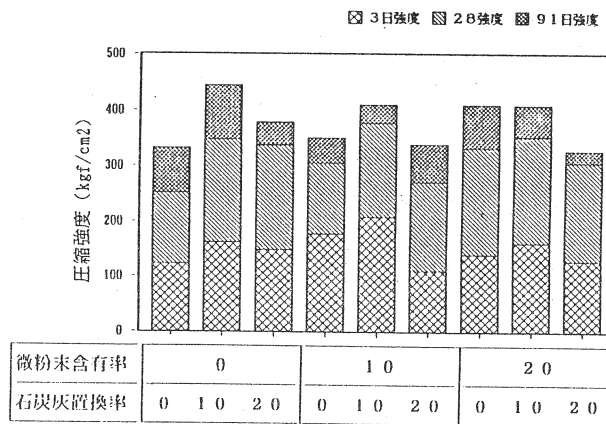
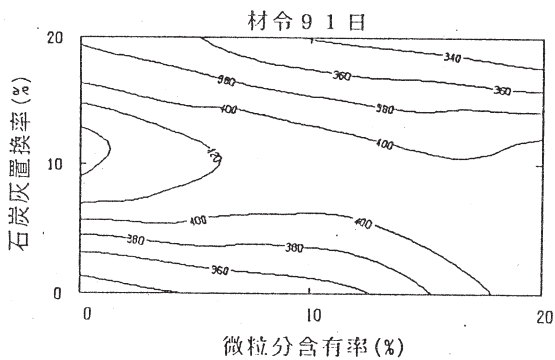
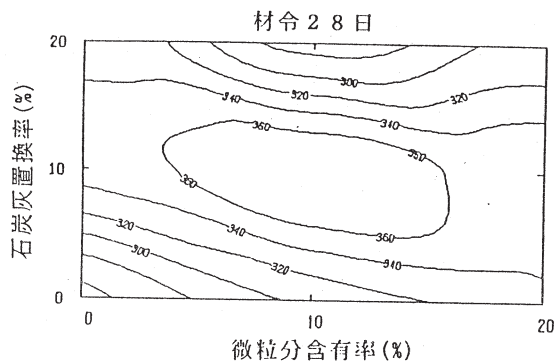
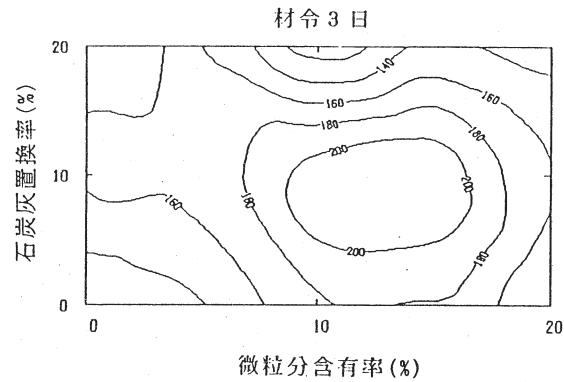


図6 石炭灰置換率および微粉末含有率と圧縮強度との関係

～8%, 石炭灰置換率10%の付近であり, 微粉末効果による強度寄与は薄れ, 石炭灰によるポゾラン効果がさらに優位になったためと思われる。



4. 2 断熱温度上昇量測定試験

断熱温度上昇量測定試験は, 水循環式の装置で行い, 実験によって得られた断熱温度上昇量の測定値は, 鈴木ら⁴⁾が推奨する次式に近似した。

$$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-r t^s)\}$$

ここに,

$Q(t)$: 時刻 t における断熱温度上昇量

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量

t : 経過日数

r, s : 実験定数

また, この時の実験定数を表 4 に示す。

表 4 実験定数

微粒分 (%)	石炭灰 (%)	実 験 定 数		
		Q_{∞}	r	s
0	0	45.0	0.692	1.108
	10	52.3	0.408	1.250
	20	56.5	0.357	1.322
10	0	48.5	0.537	1.165
	10	54.8	0.494	1.142
	20	57.0	0.488	1.173
20	0	50.2	0.715	0.911
	10	52.8	0.341	0.325
	20	54.5	0.340	1.362

断熱温度上昇量の測定値とその近似曲線とを対比した場合の一例を図10に示す。なお, この図は, 微粉末含有率が10%で石炭灰置換率を0, 10, 20%と変化させたものである。近似式は, コンクリート打ち込み後10時間までは, 測定値よりやや大きくなっているが, 全般にわたり良く一致しており, 測定値との差は最大でも4%程度であり, 上式で高精度に近似できることが確認できた。

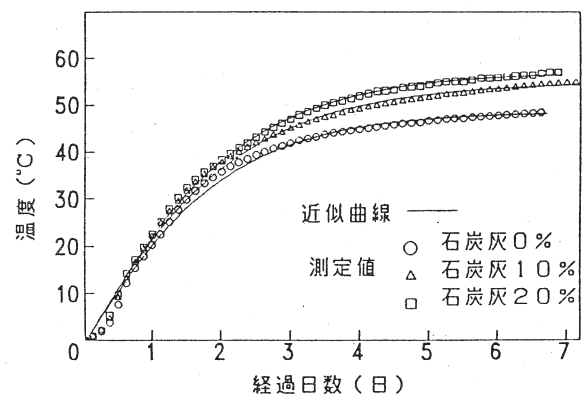


図11は、石炭灰置換率と終局温度との関係を示したものである。この図より、微粉末含有率の差異に関わらず、石炭灰置換率を大きくすると、終局温度は高くなる傾向を示した。また、微粉末含有率が大きいほど終局温度は高くなっている。したがって、石炭灰および微粉末含有率をそれぞれ大きくすると、温度上昇に起因する温度応力発生量が大きくなるものと考えられる。よって、石炭灰を混入することは、この点で不利と考えられるが、温度応力に基づくひび割れの発生は、強度発現性とのバランスによって定まるので、強度と終局温度について整理することにした。

コンクリートの28日強度（標準養生）を終局温度上昇量で除した値を強度温度比とした。したがって、この値が高いほど温度応力発生を制御する効果があるものと考えられる。強度温度比をもとに微粉末含有率および石炭灰置換率の関係について示したものが図12である。この図より、石炭灰置換率10%におけるこの値は、ほぼ同等であり、終局断熱上昇量の増分に見合うコンクリートの強度増加が見込めるものと考えられる。この点においても、石炭灰による改善効果がうかがえた。

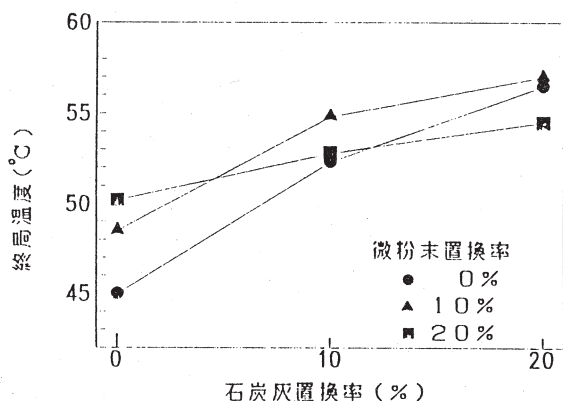


図11 石炭灰置換率と終局温度との関係

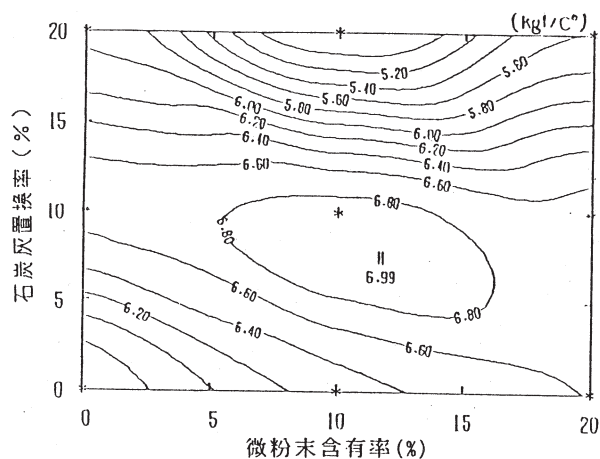


図12 強度温度比の分布

4. 3 乾燥収縮試験

圧縮強度試験、断熱温度上昇試験^{9) 10)}の結果より、石炭灰置換率10%が最も効果的だと確認されていたので本試験では、石炭灰置換率0%, 10%の場合について試験を行った。

図13は乾燥収縮の経時変化を、図14は微粉末含有率と乾燥収縮との関係を示したものである。

図13より、石炭灰を10%置換することによって、若干ではあるが、乾燥収縮率は小さくなっていることが確認された。

図14より、石炭灰無置換の場合、微粉末含有率の増加に伴って乾燥収縮は、ほぼ直線的に増加する傾向を示したが、石炭灰で置換すると、この傾向は薄れ、各微粉末含有率においてほぼ同等な値を示した。これは、石炭灰で10%置換することにより単位水量が微粉末含有率の相違にかかわらず約5%低減したこと等によるものと考えられる。

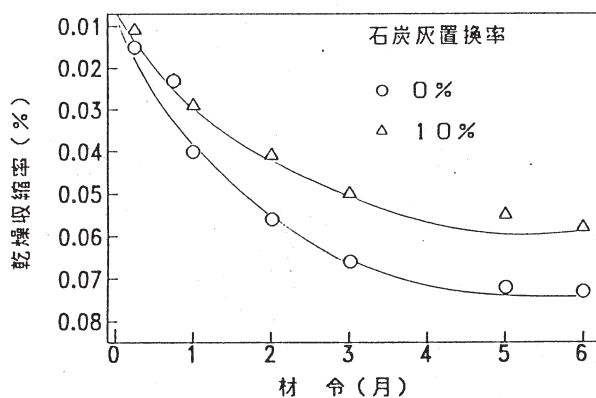


図13 材令と乾燥収縮率との関係

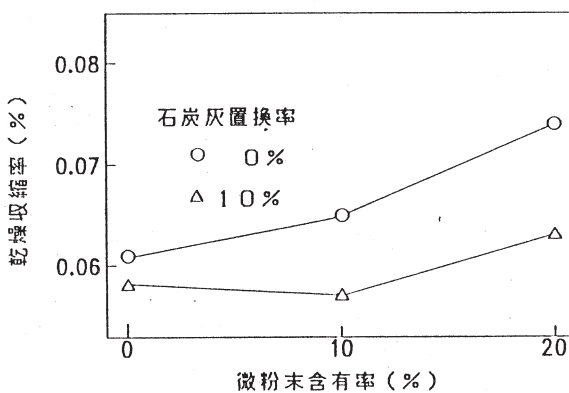


図14 乾燥収縮率

4. 5 凍結融解抵抗試験

凍結融解抵抗試験の結果を図15～17に示す。この図より相対動弾性係数はいずれも80%以上であり、微粉末含有率あるいは石炭灰置換率の相違による顕著な差は認められなかった。したがって、石炭灰の置換による凍結融解作用に対して、空気量の管理を綿密に行えば、気泡間隔係数はほぼ均等になり、凍結融解作用による耐久性は向上するものと考えられる。

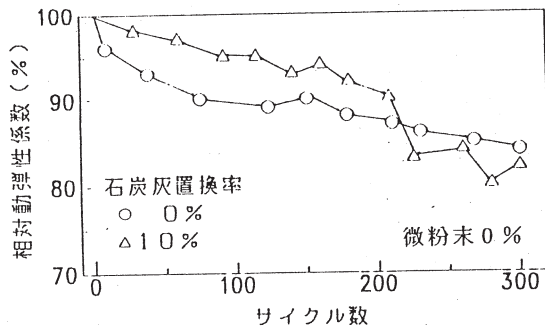


図15 相対動弾性係数

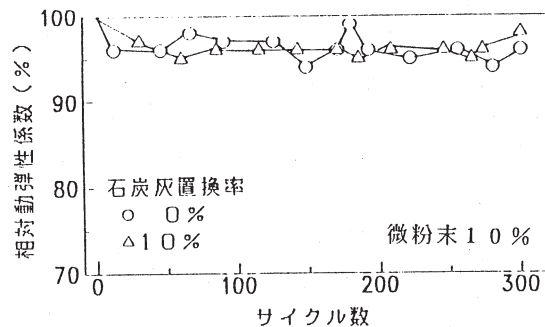


図16 相対動弾性係数

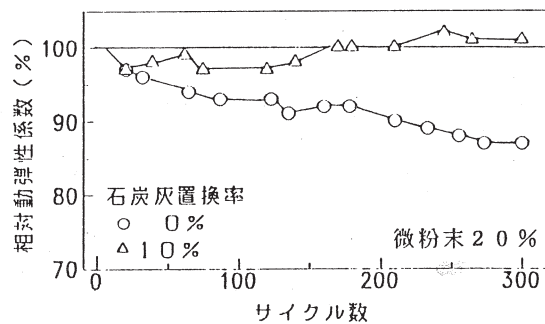


図17 相対動弾性係数

5. まとめ

本研究では、微粉末の含有量を数種に変化させた砕砂の一部を、石炭灰で置き換えたコンクリートのフレッシュおよび硬化時における諸性状を実験的に調べ、石炭灰による品質改善効果の有無を検討した結果、次のような事が判明した。

- 1) 単位水量は、石炭灰を10%置換することにより大略5%の減水効果が認められた。
- 2) 石炭灰で置換することにより、所要の空気量を得るための調整剤量は増加した。
- 3) ブリージングは、石炭灰および微粉末で置換すると大幅に低減した。
- 4) 圧縮強度は、材令3日では微粉末含有率10～15%付近に良好な範囲があったが、材令28、91日では石炭灰置換率10%付近で良好であった。
- 5) 終局温度は石炭灰で置換すると高くなったが、強度温度比によると石炭灰置換率10%程度ならば改善効果が認められた。
- 6) 乾燥収縮は、石炭灰を10%置換することにより低減できることが確認された。
- 7) 相対動弾性係数では、空気量の管理を綿密に行えば、石炭灰で置換することによる耐久性の低下は認められなかった。

以上より、この種のコンクリートに石炭灰を10%程度混入することにより、フレッシュおよび硬化性状を改善できることが判明した。

[謝 辞]

本研究を行うに当たり、終始御指導いただいた、中国電力(株)技術研究センター佐々木氏、谷本氏ならびに、御協力いただいた広島工業大学の卒研生の皆様に感謝する次第です。

[参考文献]

- 1) 環境技術協会、日本フライアッシュ協会；石炭灰ハンドブック追録平成4年度版、pp7～17
- 2) 社団法人日本材料学会；建設材料実験、pp200～204, 1988.4
- 3) 川崎；鉱物質微粉末がコンクリートの強度に及ぼす効果に関する基礎研究、コンクリートライブラリーNo.8, pp25～53
- 4) 鈴木、原田、前川、辻；新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇の定量化、土木学会論文集、第396号、Vol.9, pp109～117, 1988
- 5) 塩道、伊藤、藤木；石炭灰と砕砂を用いたコンクリートの諸性質について、セメント・コンクリート論文集44, pp152～157, 1990
- 6) 伊藤、藤木、塩道、吉岡；砕砂の一部を石炭灰で置換したコンクリートの基礎性状、セメント・コンクリート論文集45, pp316～321, 1991
- 7) 及川、伊藤、藤木；砕砂の一部を石炭灰で置換したコンクリートの強度発現性と断熱温度上昇、セメント・コンクリート論文集46, 204～209, 1992