Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集 11-1 1989

論 文

[1005] 石炭灰軽量骨材の品質とコンクリートの諸性状について

正会員 杉田 英明（九州電力総合研究所）
正会員 ○御手洗泰文（九州電力総合研究所）
正会員 椎葉 大和（福岡大学工学部 ）

1. まえがき

近年，電力事業等においては，石油代替エネルギー源として石炭需要が増大しており，それに伴って大量に発生する石炭灰の有効利用は重要な課題となっている。石炭灰有効利用技術の一つとして，火力発電所より回収される石炭灰を原料として造粒・焼成した人工軽量骨材（以下軽量骨材という，図－１参照）がある。ところが，石炭灰は石炭の炭種や燃焼温度によって，未燃カーボンを多量に含んだものが発生し，それを原料として製造された軽量骨材は，ＪＩＳＡ 5002「構造用軽量コンクリート骨材」に規定されている強熱減量（１％以下）を上回る傾向にある。本報告は，強熱減量（未燃分）の異なる軽量骨材を用いて，ＪＩＳＡ５００２及び建設省住宅局建築指導課長通達第769号（以下住指発769号という）対応の諸試験を踏えて，軽量骨材の強熱減量がコンクリートの諸性能に及ぼす影響を検証し，強熱減量規格値（１％以下）の検討を行ったものである。

2. 試験概要

表－１に試験概要を示す。試験は，次の２シリーズより構成され，主に軽量骨材の品質試験とそれを用いたコンクリートの諸性能試験からなる。シリーズⅠでは，ＪＩＳ Ａ 5002 対応の試験を実施し，軽量骨材の品質とコンクリートの強度性状を検証した。また，シリーズⅡでは，住指発769号対応及び耐久性，耐火性等の試験を実施し，軽量骨材の強熱減量がコンクリートの諸性能に与える影響を検証した。

表－１ 試験概要

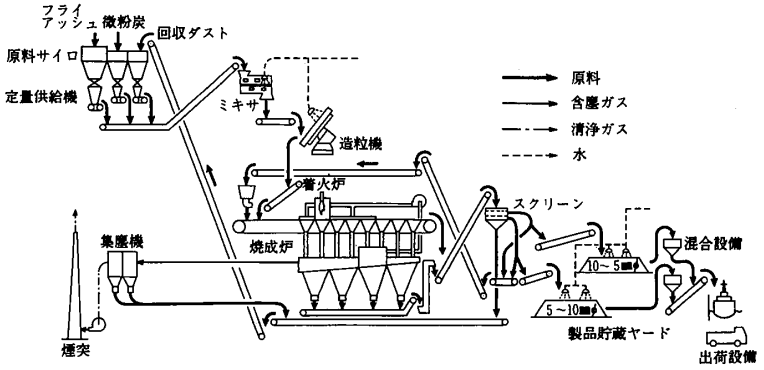
試験シリーズ	試験区分	試験内容
シリーズⅠ	JIS A 5002 対応試験	構造用軽量コンクリート骨材の品質区分を検証
シリーズⅡ	住指発769号 対応試験	人工軽量骨材を用いる軽量コンクリートの使用基準および諸性能を検証

表－２ 試験項目一覧

試験シリーズ	試験項目	試験方法
シリーズⅠ	軽量骨材の物理・化学的品質	JIS A 5002他
	コンクリートの単位容積質量,	JIS A 1116
	圧縮強度	JIS A 1108
シリーズⅡ	ブリージング	JIS A 1123
	コンクリートの単位容積質量	JIS A 1116
	圧縮強度	JIS A 1108
	引張強度	JIS A 1113
	曲げ強度	JIS A 1106
	付着強度	ASTM C 234
	コンクリートの気乾単位容積質量	住指発 769号 6.3
	長さ変化	JIS A, 1129
	クリープ係数（一軸圧縮）	油圧ジャッキ式
	耐久性（気中凍結融解）	ASTM C 291
	中性化深さ	中性化促進試験
	耐火性	JIS A 1304

3. 試験項目と方法

表－２にシリーズごとの試験内容を示す。軽量骨材の品質試験及びコンクリートの強度性状等はＪＩＳによる方法に準拠した。クリープ試験は鋼板シールした供試体（ϕ 15×H30 cm）を用いて 100 kgf/cm^2 の持続荷重を載荷している。コンクリートの中性化試験は，温度 40 ℃，湿度 80 %，CO_2 濃度５％を養生条件として中性化促進試験を実施した。



図－１ 軽量骨材の製造工程

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

4. 使用材料

本試験に使用した材料は，セメントが普通ポルトランドセメント，細骨材は球磨川産川砂（F.M=2.79）である。粗骨材は，石炭灰を原料として製造した強熱減量の異なる軽量骨材2種（造粒型）と膨張けつ岩を原料とした市販軽量骨材（非造粒型）の計3種類である。なお，シリーズⅡにおいては，混和剤として天然系のAE剤を使用した。

表－3　軽量粗骨材の品質

（粒度調整後の試料）

試験項目		JIS A 5002規格値 ＼ 骨材の種類	石炭灰利用人工軽量骨材 Fa	石炭灰利用人工軽量骨材 Fb	市販人工軽骨 Sp
強熱減量	(%)	1.0 以下	0.40～0.58	1.39～1.46	0.00
三酸化硫黄	(%)	0.5 以下	0.009	0.12	0.23
塩化物	(%)	0.01以下	0.00	0.00	0.00
粘土塊量	(%)	1.0 以下	0.17	0.17	0.08
浮粒率	(%)	－	0	0	1.4
比重	表乾	－	1.57	1.57	1.41
比重	絶乾	L; 0.0～1.0 M; 1.0～1.5 H; 1.5～2.0	1.37	1.35	1.27
吸水率	*)(%)	－	14.6	16.2	10.5
洗い試験	**)(%)	－	0.3	0.7	0.4
有機不純物		標準色以下	良	良	良
単位容積質量	(kg/ℓ)	－	0.863	0.815	0.802
実積率	(%)	A; 60以上 B; 50以上60未満	63.0	62.3	62.9
圧潰強度	(g/個)	－	83.7	81.1	39.0
10%破砕値	(t)	－	10.8	10.0	9.8
安定性	(%)	－	12.92	9.29	3.96
各ふるいを通過するものの質量百分率	15mm	90～100	100		
	10	40～ 70	50		
	5	0～ 15	0		
粗粒率		－	6.50		

*); 24時間吸水率を示す **); 入荷時の値を示す

5. シリーズⅠ試験結果

5.1　軽量骨材の品質

表－3に各軽量骨材の品質試験結果を示す。Fa骨材は，現在市販されている石炭灰利用人工軽量骨材でJIS規格に適合するものであるが，Fb骨材は強熱減量がJIS規格値（1%以下）を上回る規格外品であり，Fa骨材に比べて三酸化硫黄分及び吸水率等が大きい。Sp骨材は，膨張けつ岩を原料としたものでFa，Fb骨材に比べて強熱減量は0%であるが，三酸化硫黄分が多く，比重，吸水率が小さい，また，硫酸ナトリウムによる安定性が大きい等の違いがある。なお，現在国内炭燃焼灰を原料とした軽量骨材は，強熱減量が最大1.5%程度であるが，海外炭燃焼灰を利用して，同じプロセスで造粒・焼成した場合は，強熱減量が3～4%程度になると予想される。

5.2　コンクリートの性状

表－4に，JIS A 5002対応コンクリートの調合及びその性状を示す。コンクリートの単位水量は，Fa，Fb骨材使用の場合が173 kg/m³，Sp骨材使用が178 kg/m³で，JIS調合のスランプ及び水セメント比の条件を満足した。なお，Sp骨材（非造粒形）はF骨材（造粒形）に比べ粒形が悪いため，単位水量が5 kg/m³増加したものと考えられる。フレッシュコンクリートの単位容積質量は，いずれの骨材も約1.96～1.97 kg/ℓとほぼ同じであった。コンクリートの圧縮強度は，材令7日において，Sp骨材が比較的高い値を示したものの材令28日では，約437～456 kgf/cm²の範囲で近似している。以上より，Fb骨材の強熱減量がコンクリートの調合ならびに強度性状に与える影響は特に認められない。

5.3　JIS A 5002による品質区分

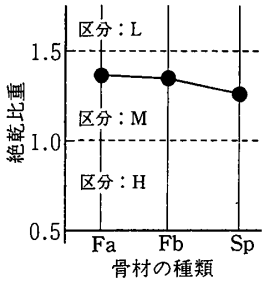
図－2～5に，JIS A 5002の品質による区分と試験結果を示す。

①絶乾比重　軽量骨材の絶乾比重は，表－3よりFa，Fb骨材がそれぞれ1.37及び1.35，Sp骨材が1.27であり，JIS A 5002における絶乾比重による区分はすべてM区分（1.0以上，1.5未満）に該当している。

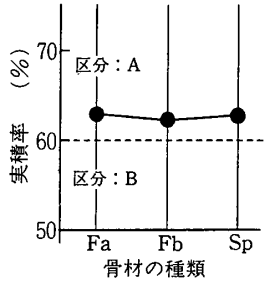
表－4　JIS 調合及びコンクリートの性状

骨材の種類	調合番号	調合条件 スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³) 水	セメント	細骨材	粗骨材	コンクリートの性状 スランプ (%)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	圧縮強度 (kgf/cm²) 7日	28日	91日
Fa	J-Fa	8±1	40	40.0	173	433	689	688	9.0	2.5	1.972	358	437	523
Fb	J-Fb							672	8.5	2.2	1.963	333	448	498
Sp	J-Sp				178	445	680	632	7.5	1.6	1.973	408	456	520

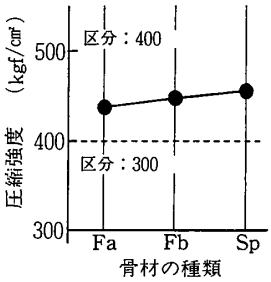
NII-Electronic Library Service



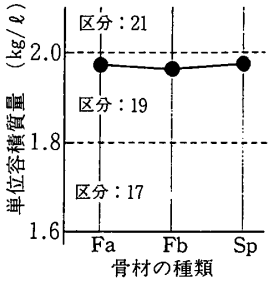
図－2 骨材の絶乾比重による区分



図－3 骨材の実積率による区分



図－4 コンクリートの圧縮強度による区分



図－5 コンクリートの単位容積質量による区分

②実積率　　骨材の実積率は，表－3よりFa，Fb，Sp骨材がそれぞれ63.0，62.3，62.9％であり，いずれもJIS A 5002による実積率の区分ではA区分（60％以上）に該当している。

③コンクリートの圧縮強度　　材令28日におけるコンクリートの圧縮強度は，いずれの骨材を用いた場合も400 kgf/cm²を上回っており，JIS A 5002に定めてあるコンクリートとしての圧縮強度による区分は400（400 kgf/cm²以上）に該当している。

④コンクリートの単位容積質量　　フレッシュコンクリートの単位容積質量は，いずれもJIS A 5002の品質で19の区分（1.8 kg/ℓ以上，2.0 kg/ℓ未満）に該当している。

以上シリーズⅠより，3種類の軽量骨材はいずれもJISによる呼び方で「MA－419」となり，強熱減量が規格値（1％以下）を0.5％程度上回るFb骨材においても，JIS A 5002適合品と比べて，コンクリートの性状に大きく影響しないことが確認された。

6. シリーズⅡ試験結果

6.1 コンクリートの調合及び性状

表－5に住指発769号にもとづいたコンクリートの調合及びその性状を示す。

住指発769号の4調合（A，B，C，D調合）において，Fa，Fb骨材を用いたコンクリートはいずれも同量の単位水量で調合条件を満足した。また，AE剤の使用量も骨材の強熱減

表－5　住指発769号及びコンクリートの性状

骨材の種類	調合の種類	調合番号	調合条件			単位量 (kg/m³)					フレッシュコンクリートの性状			
			単位セメント量 (kg/m³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	単位AE剤量 (cc/m³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	ブリージング量 (cm³/cm²)	単位容積量 (ton/m³)
Fa	A	Fa-A	400	15±2	5±1.5	163	400	676	668	800	15.5	4.9	0.185	1.906
	B	Fa-B	350			160	350	740	658	700	14.5	5.0	0.194	1.909
	C	Fa-C	400	21±1		178	400	720	614	800	20.5	5.0	0.202	1.925
	D	Fa-D	350			175	350	784	604	700	21.0	5.3	0.228	1.918
Fb	A	Fb-A	400	15±2		163	400	704	648	800	15.5	5.1	0.175	1.913
	B	Fb-B	350			160	350	753	648	700	14.5	5.2	0.243	1.911
	C	Fb-C	400	21±1		178	400	730	606	800	21.0	5.3	0.253	1.906
	D	Fb-D	350			175	350	794	596	700	20.5	5.3	0.296	1.896
Sp	A	Sp-A	400	15±2		171	400	673	656	800	15.0	4.6	0.157	1.899
	B	Sp-B	350			168	350	738	646	700	14.0	5.0	0.189	1.911
	C	Sp-C	400	21±1		186	400	714	604	800	20.5	4.9	0.248	1.907
	D	Sp-D	350			183	350	781	592	700	20.5	5.0	0.323	1.906

表－6　コンクリートの諸性能試験結果

骨材の種類	調合の種類	強度特性 (kg/cm²) 圧縮 7日	28日	91日	引張 28日	曲げ 28日	1)付着(28日) 上段	下段	気乾単位容積質量 (ton/m³) 91日	長さ変化率 2) (×10⁻⁴)	クリープ係数 3) (×10⁻⁶)	相対動弾性係数 4) (%)	中性化深さ (mm) 1ヵ月	2ヵ月	3ヵ月	4ヵ月	耐火性 圧縮強度(kgf/cm²) 試験前	15分	30分
Fa	A	280	383	412	32.1	54.3	62.2	75.7	1.797	6.64	0.65	−	0	6.1	7.8	12.9	405	305	197
	B	246	350	379	30.5	52.5	58.3	81.6	1.787	7.16	0.76	−	0	10.7	13.3	20.0	347	258	167
	C	266	375	400	32.7	52.5	52.5	108.6	1.812	7.33	0.74	89	0	3.6	6.6	14.3	385	261	184
	D	211	317	360	29.0	46.8	60.7	74.3	1.804	7.58	0.77	89	2.7	13.1	15.7	21.8	358	250	167
Fb	A	291	387	435	29.8	56.0	50.8	111.3	1.800	6.53	0.74	−	0	1.4	6.1	10.4	421	303	197
	B	241	352	380	28.8	50.8	49.4	70.9	1.776	6.94	0.72	−	0	5.4	8.6	17.0	359	265	171
	C	262	368	392	31.5	53.5	61.3	79.9	1.782	7.78	0.74	88	0	2.3	8.5	13.6	399	253	176
	D	199	311	348	30.2	48.5	46.0	96.5	1.747	8.57	0.78	85	0.5	9.6	12.1	15.1	346	234	148
Sp	A	292	400	411	32.6	53.3	68.3	101.5	1.775	4.60	0.71	−	0	5.4	8.9	11.5	447	287	183
	B	255	345	381	32.8	48.8	54.0	69.9	1.742	6.24	0.77	−	0	8.7	12.3	13.3	360	245	162
	C	260	355	396	30.3	47.3	64.6	88.6	1.754	6.88	0.79	40	0	6.4	11.4	15.0	398	262	178
	D	218	332	355	30.0	47.8	50.8	65.0	1.735	7.07	0.85	33	0	9.6	13.2	18.5	364	232	154

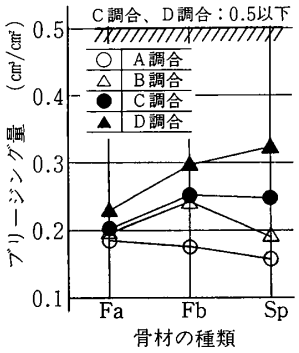
注)．1)すべり量0.2時の付着強度．　2)材令91日の長さ変化率．　3)材令150日のクリープ係数．4)凍結融解試験40サイクル時

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

量の違いによる影響は認められなかった。

フレッシュコンクリートのブリージングは，図－6に示すようにFa骨材を用いたコンクリートで全調合とも約0.2cm^3/cm^2近傍に集中しているのに比べ，Fb，Sp骨材のコンクリートは，スランプが15cmのA，B調合とスランプが21cmのC，D調合の差異が顕著である。しかし，軽量骨材の強熱減量の違いによる影響はさほど見られない。また，住指発769号では，C，D調合についてブリージング量（0.5cm^3/cm^2以下）が規定されているが，いずれの骨材を使用した場合も規格値を大きく下回っている。



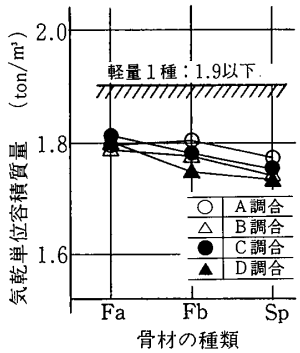
図－6 骨材の種類別によるブリージング量

6.2 コンクリートの諸性能

コンクリートの諸性能試験結果を表－6及び図7～図－15に示す。

①気乾単位容積質量

図－7に材令91日におけるコンクリートの単位容積質量を示す。気乾単位容積質量は，Fa，Fb骨材コンクリートで約1.75～1.81 ton/m^3，Sp骨材で約1.74～1.78 ton/m^3の範囲にある。Fb骨材を用いたものが調合により若干差異が見られるものの，軽量骨材の強熱減量による影響は特に認められない。また，住指発769号における気乾単位容積質量の上限値（1.90 ton/m^3；川砂使用）を，いずれの骨材を使用した場合も下回っている。

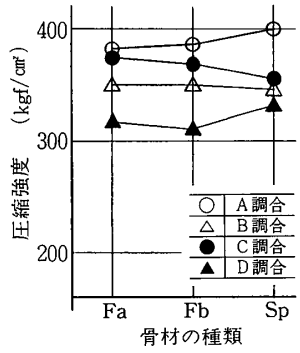


図－7 骨材の種類別による気乾単位容積質量（材令91日）

②圧縮強度

図－8に材令28日における圧縮強度を示す。

圧縮強度は，全調合をとおして約311～400 kgf/cm^2の範囲にあり，単位セメント量が多くスランプが小さいものほど大きくなると言う一般的な傾向を呈している。また，軽量骨材の強熱減量の違いによる圧縮強度への影響は認められず，骨材の種類にかかわらず同調合のものはほぼ近似した値である。

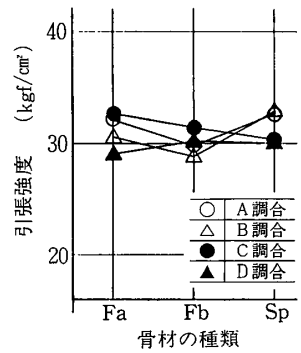


図－8 骨材の種類別による圧縮強度（材令28日）

③引張強度

図－9に材令28日における引張強度を示す。

引張強度は，調合及び骨材の種類による明確な傾向は，認められないものの，すべて約29～33 kgf/cm^2 の範囲にある。



図－9 骨材の種類別による引張強度（材令28日）

④圧縮強度と引張強度，曲げ，付着強度との関係

図－10に圧縮強度と引張強度，曲げ，付着強度との関係を示す。引張強度は，全体的に圧縮強度の約8～10%の範囲に散在している。住指発769号には，A，D調合について引張強度の下限値（20 kgf/cm^2以上かつ0.06F以上）が定められているが，すべての調合ともこれを上回っている。曲げ強度は，圧縮強度に対して約13～16%の範囲にあり，軽量コンクリートの一般的なもの（10～17%程度）と比較しても大差ない。鉄筋とコンクリートの付着強度は，調合や骨材の種類には関係なく，上段筋で約46～68 kgf/cm^2，下段筋で約65～111 kgf/cm^2の範囲にある。これらは，住指発769号に定められている下限値をすべて上回っている。

⑤長さ変化率

図－11に材令91日におけるコンクリート長さ変化率を示す。長さ変化率は，Fb骨材のD調合で最大8.57 × 10^{-4}，Sp骨材のA調

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

合で最小 4.60×10^{-4} の範囲にある。これらは，水セメント比またはスランプが大きいものほど増加する傾向にある。住指発 769 号には，B，C調合についてそれぞれ上限値が定められているが，すべてその規格値を下回っている。

⑥クリープ係数

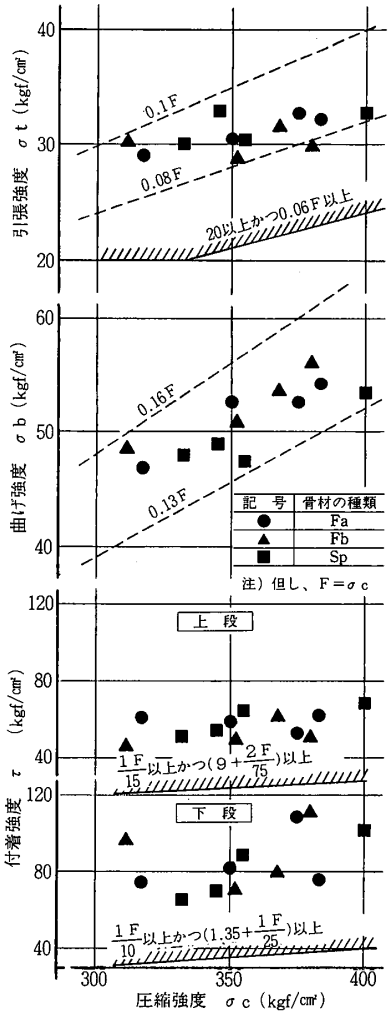
図－12に材令 150 日におけるコンクリートのクリープ係数を示す。材令 150 日のクリープ係数は，Fa骨材を用いたもので，約 0.65～0.77，Fa骨材で約 0.72～0.78，またSp骨材で約 0.71～0.85 程度であり，今後とも試験材令の経過に伴って増加する傾向にある。なお，現在のクリープ係数においては，軽量骨材の強熱減量の違いによる影響は認められない。

⑦耐久性

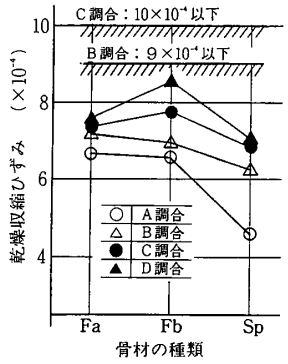
図－13にコンクリートの凍結融解試験結果を示す。試験方法は，気中凍結，気中融解を養生条件として行い，C，D調合について実施した。Fa，Fb骨材を用いたコンクリートは，凍結融解の繰り返しサイクルに伴ってほぼ同程度の相対動弾性係数の低下がみられ，D調合の低下率が若干大きくなっている。同様に，Sp骨材のものは，D調合が先行して相対動弾性係数が低下しているが，15～20サイクルにおいて 60％を下回っている。これより，石炭灰利用軽量骨材の耐久性性能は，市販の膨張けつ岩製のものより良好な結果が認められる。

⑧中性化

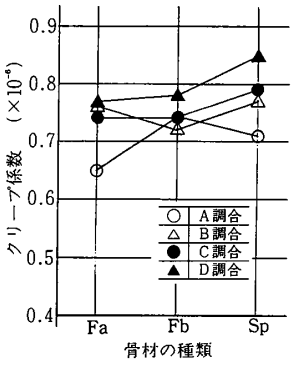
図－14にコンクリートの中性化促進試験結果を示す。軽量骨材を用いたコンクリートの中性化深さは，中性化試験材令とともに進行している。中性化材令 1 か月においては，C，D調合のみコンクリートの中性化が見られるが，2か月以降はスランプの大きいC，D調合が先行しながら，



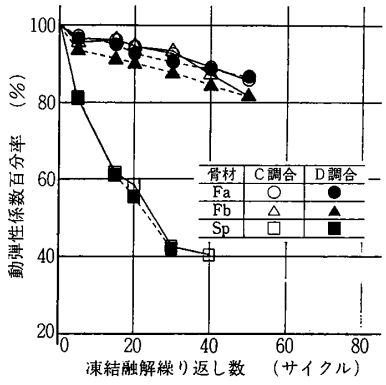
図－10 圧縮強度と曲げ・引張・付着強度と関係



図－11 骨材の種類別による乾燥収縮ひずみ（材令91日）



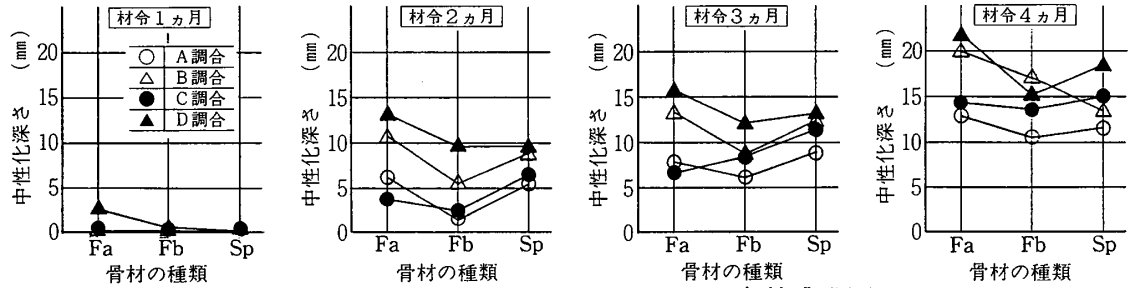
図－12 骨材の種類別によるクリープ係数（材令150日）



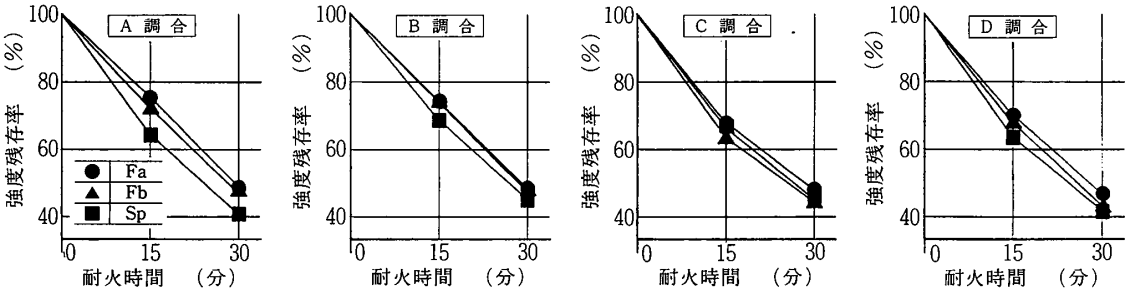
図－13 骨材の種類別による凍結融解試験結果

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute



図－14　骨材の種類別による中性化深さ



図－15　骨材の種類別による耐火性能

すべての調合について中性化が進んでいる。Fa骨材とFb骨材を用いたコンクリートの中性化深さを比較すると，若干Fa骨材が大きい傾向を示しているが，全体的にはコンクリートの中性化進度に骨材の影響は特に認められない。

⑨耐火性

図－15にコンクリートの耐火性能試験結果を示す。試験方法は，JIS A 1304の加熱標準曲線に準拠して，15分耐火（756℃）と30分耐火（857℃）を実施した。耐火試験後のコンクリート強度の残存率は，軽量骨材及び調合の違いによる大きな差異はなく，15分耐火で約65～75%，30分耐火で約40～50%となっている。これより，石炭灰利用軽量骨材の未燃カーボンの含有量（強熱減量）がコンクリートの耐火性能に与える影響は少ないものと思われる。

7.　まとめ

強熱減量の異なる軽量骨材を用いて，JIS A 5002及び住指発769号対応の品質，性能試験を行った。その結果を要約すると以下のとおりである。

(1)石炭灰利用人工軽量骨材の規格外品は，強熱減量がJIS A 5002の上限値（1%以下）を上回るものの，その他の品質はJISに適合し，「MA−419」という軽量骨材の区分に該当した。

(2)軽量骨材の規格外品を用いたコンクリートは，住指発769号に定められているコンクリートの使用基準にすべて適合し，市販の軽量骨材と比較しても実用上に支障のない性能を示した。

石炭灰を産業資源として活用する上で，軽量骨材への利用は極めて有効である。しかし，海外炭燃焼灰を原料とした人工軽量骨材化を推進するうえで，未燃カーボンの分級・除却等による強熱減量の低減対策が重要な課題である。また，石炭灰利用人工軽量骨材を対象としたJIS規格値の見直しも必要であろうかと考えられる。

<謝辞>

本研究の実施に際して御指導，御協力を頂いた電力中央研究所　大沼博志氏，岡澤孝雄氏，廣永道彦氏，石田博彰氏に感謝の意を表します。

<参考文献>

1) 日本建築学会；軽量コンクリート調合設計．施工指針案．同解説　1986

2) 軽量骨材コンクリートハンドブック編集委員会編；軽量骨材コンクリートハンドブック

NII-Electronic Library Service