

高強度コンクリートに関する研究

久米 国幹・有馬 冬樹・佐伯 貢
(受理 平成6年5月31日)

A study on High-Strength Concrete

Kunimoto KUME, Fuyuki ARIMA and Mitugu SAEKI

On high strength concrete using normal Portland cement and high early strength Portland cement, the influence of the material and mixture factors on the mix design and the mechanical properties were investigated by the orthogonal array experimental plan of $L_{27}(3^{13})$.

The main conclusions are as follows;

- 1) If a high-range AE water reducing agent is used, high strength concrete using the fine and coarse aggregates produced in Kagoshima Prefecture, which have a compressive strength from 600 to 800 kgf/cm² at 4 weeks for material age, can be available under the following conditions at the mix design of concrete;
 - i) The water to cement ratio ranges from 30 to 40%.
 - ii) A slump of fresh concrete is aimed to be 5-18 cm.
 - iii) The water content per unit volume of concrete ranges from 150 to 175 kg/m³
- 2) In the case of high strength concrete, the difference in the characteristics of aggregate included in the concrete exerts a more significant influence upon the compressive strength and the modulus of elasticity, especially the influence of the latter, compared with the case in the ordinary concrete.

1. 序 文

近年、土木並びに建築の鉄筋コンクリート造の分野でコンクリートの高度強化が進み、各機関で高強度コンクリートの研究開発が行なわれている。

現在のところ、鹿児島県内では高強度コンクリートを用いた構造物の施工実績は極めて少ない。しかし、今後はその需要が増えることも十分予測される。そのような事態が生じたとき直ちに対処できるよう、現在県内で使用されている骨材でどの程度の高強度化が可能か検討しておく必要がある。

従って、この実験は土木及び建築用のコンクリートとして圧縮強度が600~800 kgf/cm²の高強度コンクリートを対象に、材料(セメント、細・粗骨材、高性能AE減水剤)及び配合(水セメント比・スランプ)因

子がコンクリートの配合並びに力学的性質(圧縮強度と静弾性係数)に及ぼす影響を検討したものである。

2. 実験の計画と方法

実験の計画は表・1に示す要因と水準を用い、それらの要因の主効果と要因間の交互作用を調べるため、多要因直交配列実験 $L_{27}(3^{13})$ で行なった。

実験に採用した割付表と線点図を表・2と図・1に示す。

実験は現場での施工時期を考慮し、実験・Iは早強ポルトランドセメント(以下、早強セメント)を用いた冬季用コンクリートを1月を対象に、実験・IIは普通ポルトランドセメント(以下、普通セメント)を用いた夏季用コンクリートを対象に6月に実施した。

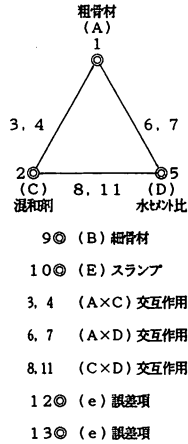
実験・I, IIに使用した材料要因とその水準はセメ

表・1 要因と水準

要因\水準	1	2	3	備考
A) 粗骨材 (産地)	砂 岩 (谷山)	安山岩 (川内)	石灰岩 (津久見)	碎石(2005)
B) 細骨材	海 砂	混合砂*	-	*海砂(7): 砕砂(3)
C) 減水剤	SP	HP	F P	銘柄別
D) 水セメント比	30	35	40	(%)
E) スランプ	8	12	18	(cm)

表・2 割付表

実験番号	割付番号と要因												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	A	C	D							B	E	e	e
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	2	3	3	3	3
4	1	2	2	1	1	1	2	1	2	1	2	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	2	3	1	1	1
6	1	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	2	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	3	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	2	1	2	1	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	1	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	2	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	1	2	3	1
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	1	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	1	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	2	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	2	1	3	2	1
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	1	1	3	2	1
22	3	2	1	3	3	1	3	2	2	1	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	1	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	2	2	2	1	3
25	3	3	2	1	2	1	3	2	1	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	2	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2



図・1 線点図

ント以外は同じで、次のとおりである。

骨材は鹿児島県下で使用されている石質の異なる代表的な3種類の粗骨材(碎石)と、細骨材は海砂及びその海砂に砕砂を混合した砂(以下、混合砂)の2種類を選んだ。混合砂を採用した理由は、そのうち天然砂の供給不足から天然砂に砕砂を一部混合した砂を使用する傾向があるためである。また、高性能AE減水剤(以下、減水剤)は市販されているものの内から代表的なポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体(SP)、水溶性ビニル共重合体(HP)、及び芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物(HP)を主成分とする3種類を用いた。

一方、配合要因とその水準は、材令4週の圧縮強度の目標を600~800 kgf/cm²に置いたため、水セメント比は、40, 35, 30%とし、スランプは土木用と建築用のコンクリートを対象に8, 12, 18cmとした。

使用材料の性状を表・3に示す。

なお、セメントは早強セメント及び普通セメントとも銘柄の異なる3種類を重量比で等量混合したものを

表・3 使用材料の性状

骨材種類	粗粒率	見掛け比重		吸水率 (%)	実積率 (%)	単位容積重 (kg/m ³)	40t 破砕値 (%)
		絶乾	表乾				
細	海砂混合砂	2.56 2.76	2.45 2.48	2.52 2.54	2.98 2.39	- -	- -
粗	砂岩 安山岩 石灰岩	6.61 6.75 6.72	2.64 2.67 2.69	2.65 2.71 2.70	0.38 1.39 0.25	58.7 58.5 61.8	1556 1564 1664
							13 14 20

表・4 セメントの強度 (kgf/cm²)

材令	3日		1週		4週		8週		備考
	曲げ	圧縮	曲げ	圧縮	曲げ	圧縮	曲げ	圧縮	
早強	60.6	291	65.8	414	83.1	549	92.9	688	3銘柄等量混合 材令8週は 4週後気中養生
普通	-	-	54.0	265	73.1	433	85.8	539	

使用した。セメントの強度試験結果を表・4に示す。

コンクリートの配合は、それぞれ試し練りを行い、同一スランプでは単位水量を一定とし、所要のスランプ(許容幅±0.5cm)が得られるよう細骨材率と高性能減水剤の使用量で調整した。また、空気量は全て3.5±0.5%内に納まるよう高性能減水剤に空気量調整剤を併用して調整した。

供試体はφ10×20cm(キャップレス鋼製型枠)を3個ずつ採取し、試験材令は3日(早強ポルトランドセメント使用コンクリートのみ)、1週、4週及び8週で圧縮強度と弾塑性係数(最大強度の1/3)を測定した。供試体の養生は材令4週まで標準養生(20±1℃の水中養生)、材令8週の供試体は4週後水中から揚げ恒温恒湿室(20±1℃・RH:70~90%)で気中養生した。

3. 実験結果とその考察

以下、各特性値の解析は分散分析法を用いてF検定により有意要因を求め、更に有意要因についてはt検定で水準間の有意判定を行なう。F検定並びにt検定に於ける有意判定には危険率として5%(文中では有意または表の中ではS記号で表わす)及び1%(高度に有意またはHS)を用いる。

3.1 コンクリートの配合

実験・I(早強セメント使用)とII(普通セメント使用)の結果を表・5(a)及び(b)に示す。

コンクリートの配合設計では、実験・Iと実験・IIではセメントの種類及びコンクリート混練り時の気温が異なるため、セメント以外は同じ材料を使用したにもかかわらず、実験・IIでは実験・Iと同じ配合で所

表・5 (a) コンクリートの配合と実測値
(実験・I：早強セメント)

表・5 (b) コンクリートの配合と実測値
(実験・II：普通セメント)

実験 番号	重量配合 (kg/m ³)						実 測 値					
	s/a (%)	単位 水量	単位 セメント 量	砂		砕石	減水剤	スラン プ (cm)	空気量 (%)	単位容積 量 (kg/m ³)	温度 (°C)	
				海砂	砕砂						コンクリート	気 温
1	37.6	150	500	618	-	1076	5.000	8.0	3.0	2368	16.0	13.0
2	40.5	160	458	668	-	1031	4.122	11.5	3.6	2326	16.0	13.0
3	46.6	175	438	536	229	914	3.154	18.0	3.2	2310	15.0	11.0
4	38.1	160	534	605	-	1034	4.005	12.0	3.5	2345	16.5	12.0
5	42.7	175	500	475	203	951	2.750	18.5	3.2	2323	14.0	11.0
6	43.8	150	375	764	-	1028	2.250	8.0	3.6	2326	15.5	13.0
7	38.9	175	584	414	178	970	9.110	18.5	3.7	2328	15.5	11.0
8	41.6	150	429	706	-	1041	6.260	7.5	3.4	2340	14.0	11.0
9	44.7	160	400	759	-	986	5.720	11.5	3.3	2321	13.2	10.0
10	39.1	175	584	590	-	989	5.020	18.5	3.7	2345	15.0	10.0
11	45.9	150	429	550	235	986	3.690	8.0	3.3	2367	13.0	9.5
12	46.0	160	400	781	-	984	3.280	11.0	3.4	2339	13.0	9.0
13	42.9	150	500	496	213	1008	3.750	8.1	3.3	2384	15.5	13.5
14	43.6	160	458	718	-	1000	2.980	11.3	3.4	2350	15.0	12.0
15	45.8	175	438	746	-	949	2.630	18.0	3.4	2322	14.5	11.0
16	40.3	160	534	640	-	1019	8.540	12.0	3.5	2365	16.5	13.0
17	42.9	175	500	678	-	967	7.250	18.2	3.5	2332	16.0	14.0
18	47.5	150	375	583	250	984	5.250	8.3	3.7	2349	16.0	13.5
19	38.6	160	534	432	185	1045	3.952	12.1	3.1	2377	16.0	12.5
20	39.4	175	500	622	-	1023	3.500	18.8	3.8	2325	16.0	12.0
21	42.6	150	375	741	-	1072	2.738	8.0	3.5	2350	15.0	11.0
22	35.4	175	584	534	-	1045	3.620	13.3	3.4	2352	15.0	11.5
23	40.3	150	429	683	-	1085	2.145	7.9	3.3	2364	15.5	13.0
24	44.7	160	400	536	229	1004	1.800	12.5	3.9	2331	15.0	13.0
25	37.2	150	500	610	-	1104	7.500	7.5	3.3	2381	16.0	13.5
26	42.8	160	458	498	213	1010	5.496	11.5	3.1	2360	15.5	13.0
27	42.4	175	438	690	-	1004	5.475	18.0	3.1	2327	16.0	13.0

実験 番号	重量配合 (kg/m ³)						実 測 値					
	s/a (%)	単位 水量	単位 セメント 量	砂		砕石	減水剤	スラン プ (cm)	空気量 (%)	単位容積 量 (kg/m ³)	温度 (°C)	
				海砂	砕砂						コンクリート	気 温
1	38.6	150	500	633	-	1060	4.750	9.0	3.6	2352	25.5	25.5
2	41.5	160	458	683	-	1015	3.570	11.5	4.0	2316	26.0	25.5
3	46.6	175	438	536	229	914	3.150	17.5	3.6	2301	26.0	25.5
4	38.1	160	534	605	-	1034	4.810	12.9	3.2	2352	24.0	25.0
5	42.7	175	500	475	203	951	3.500	18.5	3.1	2325	24.0	25.0
6	43.8	150	375	764	-	1028	3.380	7.0	3.0	2340	25.5	23.5
7	38.9	175	584	414	178	970	9.230	17.0	3.0	2344	25.5	23.5
8	41.6	150	429	706	-	1041	7.940	7.5	4.0	2326	25.5	23.5
9	44.7	160	400	759	-	986	6.000	11.0	3.2	2324	24.5	25.0
10	39.1	175	584	590	-	989	5.430	18.0	4.0	2338	26.0	28.0
11	45.9	150	429	550	235	986	4.420	7.5	3.8	2355	26.0	27.0
12	46.0	160	400	781	-	984	4.200	13.5	3.9	2327	26.0	27.0
13	42.9	150	500	496	213	1008	4.750	7.0	3.0	2391	27.0	27.0
14	43.6	160	458	718	-	1000	3.890	12.0	3.0	2360	27.0	27.0
15	45.8	175	438	746	-	949	3.200	17.0	3.9	2310	26.0	28.0
16	40.3	160	534	640	-	1019	6.880	12.0	3.6	2362	26.5	28.5
17	42.9	175	500	678	-	967	6.850	18.0	3.5	2332	27.0	29.0
18	45.0	150	375	553	237	1030	6.640	8.0	3.3	2362	27.0	28.0
19	38.6	160	534	432	185	1045	4.540	12.5	3.1	2377	22.0	25.5
20	39.4	175	500	622	-	1023	3.750	18.0	3.5	2332	22.0	25.5
21	42.6	150	375	741	-	1072	3.380	7.0	3.4	2352	22.5	25.0
22	35.4	175	584	534	-	1045	3.910	19.2	3.2	2357	22.5	20.5
23	40.3	150	429	683	-	1085	2.570	7.5	3.7	2354	24.0	24.5
24	44.7	160	400	536	229	1004	2.200	12.0	3.9	2331	24.0	24.5
25	37.2	150	500	610	-	1104	8.000	8.0	3.1	2385	25.5	28.0
26	42.8	160	458	498	213	1010	5.500	13.0	4.0	2339	26.0	28.5
27	42.4	175	438	690	-	1004	4.950	19.0	3.3	2323	25.5	29.0

要のスランプ及び空気量が得られなかったため、減水剤の使用量で調整した。それでもなお2～3の配合で細・粗骨材の量を多少修正せざるを得なかったものもある。

しかし、配合設計の条件を同一スランプでは単位水量を一定としたため、水セメント比（以下、水比）が同じ配合では単位水量と同様、結果的には単位セメント量も変わらないことになる。

これらの結果をもとに配合に及ぼす各要因の影響を調べるため、細骨材率（以下、s/a）を特性値とし、分散分析法を用いて解析し検討する。

ただし、スランプ調整のため実験・IIの配合の一部を細・粗骨材量で修正したため、実験・Iと実験・IIのs/aの値に一部で多少の違いはあるが、解析結果に影響ないと判断し、実験・Iのs/aの値を用いて解析した。

s/aの要因別水準平均値と有意要因の水準間検定の結果を表・6に示す。（分散分析表は省略）

有意要因は粗骨材、細骨材と水比で、各要因とも水準間に高度な有意差が認められる。即ち、粗骨材（砕石）の種類によるs/aの水準平均値は津久見産石灰岩（A3）の40.4%、谷山産砂岩（A1）の41.6%、川内産安山岩（A2）の43.8%の順に大きくなっている。

津久見産石灰岩は粒形、粗粒率、実績率ともに他の砕石より優れていることがs/aを小さくした原因と思われる。

細骨材の種類によるs/aは、混合砂（B2）が海砂（B1）より大きく、水比もその値の大きい方が大きくなっている。

これはコンクリートの配合設計で用いる使用材料（砕砂を使用した場合）またはコンクリートの品質（水セメント比）の相違によるs/aの補正值と一致している。

表・6 要因別s/aの水準平均値と有意要因の水準間検定

要因\水準	1	2	3	水準間検定	危険率とt値
A) 粗骨材	41.6	43.8	40.4	A2>A1>A3 (HS)	5%:0.60 1x:0.82
B) 細骨材	41.2	43.4	-	B2>B1 (HS)	5%:0.52 1x:0.71
C) 減水剤	41.8	41.9	42.0		5%:0.60 1x:0.82
D) 水 比	38.7	42.2	44.9	D3>D2>D1 (HS)	5%:0.60 1x:0.82
E) スラン	42.2	42.1	41.5		5%:0.60 1x:0.82

3.2 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数

実験・I（冬季用：早強セメント使用）と実験・II

表・7 圧縮強度 (kgf/cm²) と 静弾性係数 (×10⁵ kgf/cm²)

実験番号	実験・I (早強セメント)												実験・II (普通セメント)											
	圧縮強度				静弾性係数(x10 ⁵)				圧縮強度				静弾性係数(x10 ⁵)											
	3日	1週	4週	8週	3日	1週	4週	8週	1週	4週	8週	1週	4週	8週										
1	648	687	821	895	3.30	3.44	3.84	675	801	867	3.79	4.28	4.53											
2	592	631	677	817	3.13	3.52	3.71	621	743	807	3.82	4.16	4.34											
3	484	541	642	780	3.12	3.47	3.83	524	662	768	3.55	3.55	4.03											
4	624	732	820	842	3.29	3.50	4.26	706	777	900	3.64	4.32	4.47											
5	551	673	717	815	3.59	3.80	3.95	612	720	812	3.37	3.93	4.23											
6	432	550	615	720	3.24	3.64	3.81	534	649	731	3.47	4.05	4.19											
7	686	748	833	979	3.15	3.98	4.11	706	808	911	3.58	3.78	4.24											
8	549	608	687	833	3.70	3.77	3.84	576	715	773	3.52	3.97	4.37											
9	439	535	587	691	3.03	3.27	3.97	488	609	690	3.39	3.58	4.34											
10	662	725	841	921	3.71	4.14	4.31	710	788	905	3.69	4.31	4.42											
11	589	630	757	888	3.44	3.66	4.12	636	773	894	3.81	4.07	4.35											
12	435	536	633	727	3.61	3.60	3.70	527	667	747	3.83	4.12	4.33											
13	650	696	805	1023	3.77	4.06	4.33	735	869	1016	4.05	4.51	4.48											
14	514	551	732	820	3.91	4.26	4.45	636	754	874	3.90	4.68	4.49											
15	411	496	628	724	3.59	4.10	4.28	490	614	702	3.42	3.84	4.01											
16	598	683	812	866	4.47	4.65	4.83	659	763	896	3.84	4.24	4.51											
17	538	640	730	850	3.81	4.07	4.38	582	703	786	3.58	4.00	4.33											
18	426	555	634	757	3.30	3.62	3.89	519	667	729	3.66	4.33	4.32											
19	604	721	734	779	4.60	5.12	5.60	627	728	765	4.79	5.32	5.57											
20	506	553	641	676	4.16	5.04	5.37	558	646	710	4.48	4.75	4.85											
21	451	512	554	608	4.58	4.82	5.32	519	639	702	4.84	4.46	4.97											
22	580	624	704	763	4.13	4.84	5.04	605	675	720	4.64	4.84	5.38											
23	500	529	570	684	4.54	4.61	4.69	527	620	682	4.59	4.69	4.92											
24	471	507	545	635	3.96	4.23	4.43	504	563	634	4.47	4.52	4.89											
25	628	650	672	807	4.82	5.14	5.14	592	645	729	4.98	5.07	5.16											
26	546	590	643	738	4.51	4.92	5.09	539	595	689	4.80	5.13	5.09											
27	447	483	515	590	4.37	4.59	4.75	455	490	581	4.40	4.57	4.69											

(夏季用：普通セメント使用)のコンクリートの各材令における圧縮強度と静弾性係数の結果を表・7に示す。(3個の平均値)

これらの資料をもとに、圧縮強度と静弾性係数について、s/aと同様に分散分析法(繰返し数：1)を用いて解析し、有意要因並びに要因間の寄与率、更に、有意要因については水準間の有意判定を行なった。

3. 2. 1 圧縮強度

圧縮強度の解析結果を、表・8及び図・2(a)と(b)に示す。

有意要因は実験・IとIIで多少異なるが、粗骨材、細骨材(ただし、普通セメントを用いた実験・IIでは細骨材要因は有意要因ではない。これは実験・IとIIの実験誤差の相違が関係しているものと思われる。)と水比である。

有意要因の水準間検定によれば、水比と粗骨材要因の水準間に高度な差がある。

水比要因は各材令とも水準間(水比にして5%)に約100kgf/cm²の開きがあり、当然のことながら水比の小さい方が強度は高い。

粗骨材要因は砂岩(A1)と安山岩(A2)の両碎石間には有意な差は認められないが、これらと石灰岩碎石(A3)の間に高度な差が生じ、前者の二碎石と

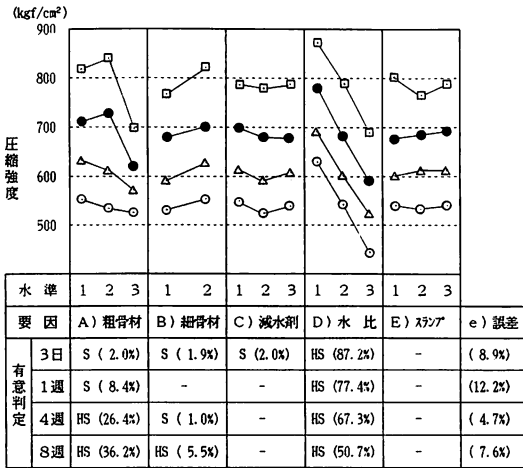
表・8 要因別圧縮強度の水準平均値と有意要因の水準間検定 (kgf/cm²)

要因-実験-材令\水準	1	2	3	水準間検定	危険率とt値		
					5%	1%	
A) 粗骨材	実験 I	3日	556	536	526	A1>A3(S), A1, A2(NS), A2, A3(NS)	5%:23 1%:32
		1週	634	612	574	A1>A3(HS), A2>A3(S), A1, A2(NS)	5%:38 1%:60
		4週	711	730	620	A1, A2>A3(HS), A1, A2(NS)	5%:22 1%:28
	実験 II	3日	819	842	698	A1, A2>A3(HS), A1, A2(NS)	5%:29 1%:39
		1週	605	610	547	A1, A2>A3(HS), A1, A2(NS)	5%:28 1%:45
		4週	720	733	622	A1, A2>A3(HS), A1, A2(NS)	5%:45 1%:71
B) 細骨材	実験 I	3日	531	556	-	B2>B1(S)	5%:20 1%:28
		1週	596	629	-	B2>B1(S)	5%:35 1%:42
		4週	680	701	-	B2>B1(S)	5%:18 1%:24
	実験 II	3日	769	822	-	B2>B1(HS)	5%:25 1%:34
		1週	581	600	-	B1, B2(NS)	5%:26 1%:42
		4週	683	709	-	B1, B2(NS)	5%:41 1%:65
C) 減水剤	実験 I	3日	552	526	540	C1>C2(S), C1, C3(NS), C2, C3(NS)	5%:23 1%:32
		1週	615	595	610	C1, C2, C3(NS)	5%:38 1%:60
		4週	700	682	679	C1, C2, C3(NS)	5%:22 1%:28
	実験 II	3日	788	781	790	C1, C2, C3(NS)	5%:29 1%:39
		1週	599	594	568	C1, C2, C3(NS)	5%:28 1%:45
		4週	716	693	666	C1, C2, C3(NS)	5%:45 1%:71
D) 水比	実験 I	3日	631	543	444	D1>D2>D3(HS)	5%:23 1%:32
		1週	696	601	524	D1>D2>D3(HS)	5%:38 1%:60
		4週	782	684	595	D1>D2>D3(HS)	5%:22 1%:28
	実験 II	3日	875	791	692	D1>D2>D3(HS)	5%:29 1%:39
		1週	668	587	507	D1>D2>D3(HS)	5%:28 1%:45
		4週	762	697	618	D1>D2>D3(HS)	5%:45 1%:71
E) スパ	実験 I	3日	541	536	541	E1, E2, E3(NS)	5%:23 1%:32
		1週	602	610	609	E1, E2, E3(NS)	5%:38 1%:60
		4週	679	687	695	E1, E2, E3(NS)	5%:22 1%:28
	実験 II	3日	802	768	789	E1, E2, E3(NS)	5%:29 1%:39
		1週	590	590	582	E1, E2, E3(NS)	5%:28 1%:45
		4週	709	689	678	E1, E2, E3(NS)	5%:45 1%:71
8週	791	778	766	E1, E2, E3(NS)	5%:33 1%:51		

比べて石灰岩碎石コンクリートの強度は同じ水比で約100kgf/cm²も低い。

その原因は、三碎石の見掛比重並びに粗粒率がほぼ同じにも拘らず、強度試験後のコンクリートの破断面を見ても砂岩と安山岩碎石はモルタルとの付着は良好で、その殆どが碎石で破断しているのに対し、石灰岩碎石は一部に碎石での破断が見られるものの、その大半が碎石表面で鱗状に石目に沿って削り取った感じで滑り破壊をしている。表・3で示したBS規格による碎石の40t破砕値は砂岩が13%、安山岩が14%に対し、石灰岩碎石は20%と大きく、この値からも石灰岩碎石は高圧に脆いと考えられるが、それ以上に碎石の表面状態の違いが大きく影響したものと推察される。

国府・飛坂ら²⁾によれば、「粗骨材の40t破砕値と圧縮強度との間には、破砕値の小さい骨材ほどコンクリートの圧縮強度が大きくなる傾向が顕著に認められ、粗骨材の比重及び吸水率に比べ、破砕値のほうが良い相関関係が認められる」とした報告もある。



()内は寄与率 材令3日 ○-1週 △-4週 ●-8週 □-

図・2 (a) 圧縮強度の水準平均値及び有意判定とその寄与率 (実験・I：早強セメント)

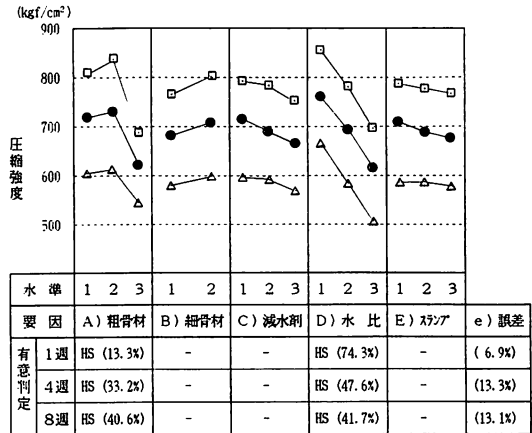
細骨材要因は2水準間に有意性は認められるものの、高度な差はない、即ち、材令によって多少異なるが、海砂 (B1) より砕砂混合砂 (B2) 使用コンクリートの方が圧縮強度は高い。その差は20~45kgf/cm²程度で、材令が進むにつれその差は開く傾向にある。

減水剤とスランプ要因の主効果及び、粗骨材と減水剤、粗骨材と水比及び減水剤と水比要因の交互作用には有意性は確認されなかった。従って、これらの要因は圧縮強度に影響しないとみなしてよい。

寄与率は水比要因が各材令を通じ最も大きく、粗骨材要因がそれに次ぐ。しかし、その値は水比要因が材令1週の75%前後から8週では40~50%に低下するのに対し、粗骨材要因は1週では10%前後に過ぎないが、8週では強度の増進に連れ約40%と逆に大きくなる。この現象は通常のコンクリート (圧縮強度200~300kgf/cm²) では余り明確でないのに対し、600~800kgf/cm²の高強度領域では粗骨材の種類 (石質) によってはコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響が極めて大きいことを示している。従って、高強度コンクリートでは特に粗骨材の選択が重要である。

細骨材要因の寄与率は1~6%程度で、粗骨材要因に比べるとコンクリート強度への影響は極めて小さい。

有意要因である粗骨材要因の水準間検定の結果をもとに、砂岩砕石と安山岩砕石コンクリートを強度的に



()内は寄与率 材令1週 △-4週 ●-8週 □-

図・2 (b) 圧縮強度の水準平均値及び有意判定とその寄与率 (実験・II：普通セメント)

は同じグループに属するとみなし、それらと石灰岩砕石コンクリートの材令4週 (28日) における圧縮強度とセメント水比の関係を最小自乗法により一次式で表わすと、下式で示される。

$$F_{28} = 240X + 23 \dots\dots\dots (砂岩, 安山岩)$$

$$F_{28} = 199X + 40 \dots\dots\dots (石灰岩)$$

但し、 F_{28} ：材令4週の圧縮強度 (kgf/cm²)

X：セメント水比

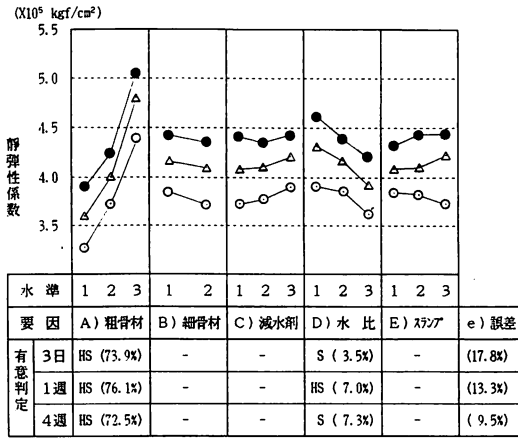
3. 2. 2 静弾性係数

静弾性係数の解析結果を、表・9及び図・3 (a), (b) に示す。

実験・I (材令3日・1週・4週)、実験・II (1週・4週・8週) とともに粗骨材と水比要因が全ての材令で有意要因となっている。特に粗骨材は高度な有意要因である。

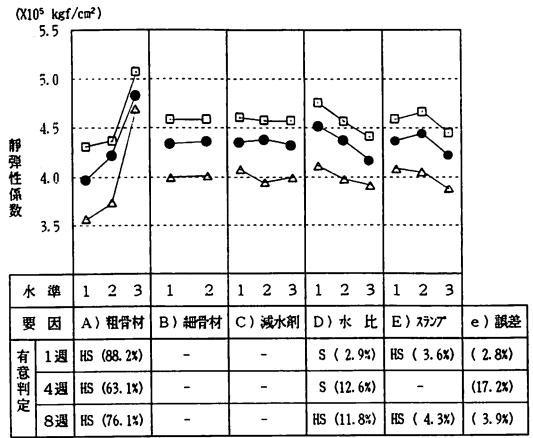
その他の要因は、実験・IIの材令1週と8週のスランプ要因を除いて、有意性は認められない。スランプ要因が有意となった原因は、上記材令の実験誤差が他の材令の実験誤差と比較して小さかったことによる。また、有意判定となったものの、その寄与率は4%前後に過ぎない。(図・3 (b) 参照)

有意要因の水準間検定によれば、粗骨材要因は実験・Iの各材令と実験・IIの材令1週では全ての水準間に高度な差が生じている。また、実験・IIの材令4週と



()内は寄与率 材令3日 ○-1週 △-4週 ●-

図・3 (a) 静弾性係数の水準平均値及び有意判定とその寄与率 (実験・I : 早強セメント)



()内は寄与率 材令1週 △-4週 ●-8週 □-

図・3 (b) 静弾性係数の水準平均値及び有意判定とその寄与率 (実験・II : 普通セメント)

表・9 要因別静弾性係数の水準平均値と有意要因の水準間検定 (x10^5 kgf/cm^2)

要因-実験-材令\水準	1	2	3	水準間検定	危険率とt値		
A) 粗骨材	実験 I	3日	3.28	3.73	4.41	A3>A2>A1 (HS).	5%: 23 1%: 31
		1週	3.60	4.01	4.81	A3>A2>A1 (HS).	5%: 21 1%: 29
		4週	3.92	4.25	5.05	A3>A1, A2 (HS), A2>A1 (S).	5%: 26 1%: 42
	実験 II	1週	3.57	3.75	4.69	A3>A2>A1 (HS).	5%: 12 1%: 19
		4週	3.98	4.23	4.85	A3>A1, A2 (HS), A1, A2 (NS).	5%: 26 1%: 41
		8週	4.30	4.36	5.06	A3>A1, A2 (HS), A1, A2 (NS).	5%: 10 1%: 16
B) 細骨材	実験 I	3日	3.86	3.72	-	B1, B2 (NS).	5%: 18 1%: 25
		1週	4.17	4.10	-	B1, B2 (NS).	5%: 15 1%: 22
		4週	4.43	4.37	-	B1, B2 (NS).	5%: 20 1%: 28
	実験 II	1週	4.00	4.01	-	B1, B2 (NS).	5%: 08 1%: 15
		4週	4.34	4.37	-	B1, B2 (NS).	5%: 19 1%: 23
		8週	4.57	4.58	-	B1, B2 (NS).	5%: 07 1%: 13
C) 減水剤	実験 I	3日	3.74	3.78	3.91	C1, C2, C3 (NS).	5%: 23 1%: 31
		1週	4.09	4.12	4.22	C1, C2, C3 (NS).	5%: 21 1%: 29
		4週	4.42	4.36	4.44	C1, C2, C3 (NS).	5%: 26 1%: 42
	実験 II	1週	4.07	3.95	4.00	C1, C2, C3 (NS).	5%: 12 1%: 19
		4週	4.36	4.38	4.33	C1, C2, C3 (NS).	5%: 26 1%: 41
		8週	4.60	4.56	4.56	C1, C2, C3 (NS).	5%: 10 1%: 16
D) 水比	実験 I	3日	3.92	3.87	3.64	D1, D2>D3 (S), D1, D2 (NS).	5%: 23 1%: 31
		1週	4.32	4.18	3.93	D1>D3 (HS), D2>D3 (S), D1, D2 (NS).	5%: 21 1%: 29
		4週	4.61	4.40	4.22	D1>D3 (S), D1, D2, D3 (NS).	5%: 26 1%: 42
	実験 II	1週	4.11	3.99	3.92	D1>D2, D3 (S), D2, D3 (NS).	5%: 12 1%: 19
		4週	4.51	4.38	4.17	D1>D3 (S), D1, D2 (NS), D2, D3 (NS).	5%: 26 1%: 41
		8週	4.75	4.56	4.42	D1>D2, D3 (HS), D2>D3 (S).	5%: 10 1%: 16
E) スコア	実験 I	3日	3.85	3.83	3.74	E1, E2, E3 (NS).	5%: 23 1%: 31
		1週	4.08	4.12	4.23	E1, E2, E3 (NS).	5%: 21 1%: 29
		4週	4.33	4.45	4.45	E1, E2, E3 (NS).	5%: 26 1%: 42
	実験 II	1週	4.08	4.05	3.88	E1, E2>E3 (HS), E1, E2 (NS).	5%: 12 1%: 19
		4週	4.38	4.45	4.23	E1, E2, E3 (NS).	5%: 26 1%: 41
		8週	4.59	4.67	4.46	E2>E3 (HS), E1>E3 (S), E1, E2 (NS).	5%: 10 1%: 16

8週で砂岩碎石 (A1) と安山岩碎石 (A2) の間に有意な差は認められないが、砂岩碎石並びに安山岩碎石

と、石灰岩碎石 (A3) との間には、圧縮強度と同様に高度な差 (1.10~1.24x10^5 kgf/cm^2) がある。

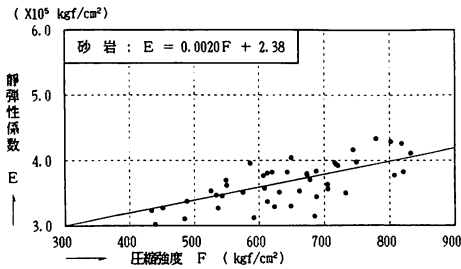
しかし、静弾性係数は、圧縮強度の高い砂岩及び安山岩碎石コンクリートより圧縮強度の低い石灰岩碎石コンクリートの方が大きい。

有意要因の寄与率は材令によって多少異なるが、水比要因の3~7%に対し、粗骨材要因は60~80%を占め、静弾性係数に及ぼす粗骨材の影響が圧縮強度以上に大きいことを示している。

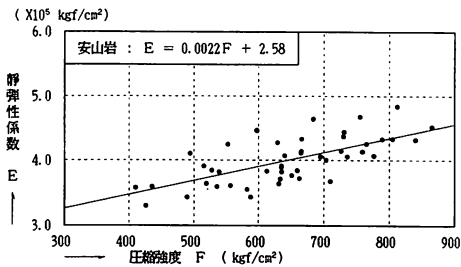
この結果は、国府・飛坂らの研究³⁾でも、「高強度コンクリートの静弾性係数に及ぼす骨材の影響がコンクリートの比重や圧縮強度に比べて非常に大きく、粗骨材の種類によっては、圧縮強度の低いコンクリートの方が静弾性係数が大きいものもある」とする実験結果の報告と一致している。

静弾性係数を日本建築学会⁴⁾ではコンクリートの比重及び圧縮強度で表わしている。この式ではコンクリートの比重及び圧縮強度が大きいほど静弾性係数も大きくなる。この実験で使用した粗骨材 (碎石) では、前述したとおり、粗骨材の種類によっては圧縮強度が高いコンクリートの方が逆に静弾性係数は小さいものもある。従って、使用骨材別に取り扱った方が適切と判断し、下記の要領で静弾性係数と圧縮強度の関係性を求めた。

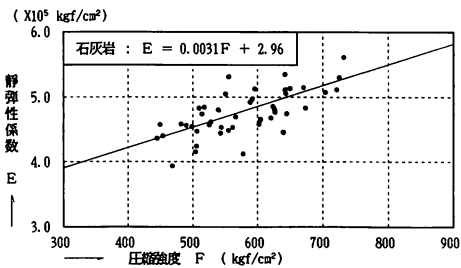
即ち、セメントの種類が異なる実験・IとIIで、同



図・4 (a) 静弾性係数の圧縮強度の関係
(砂岩砕石コンクリート)



図・4 (b) 静弾性係数の圧縮強度の関係
(安山岩砕石コンクリート)



図・4 (c) 静弾性係数の圧縮強度の関係
(石灰岩砕石コンクリート)

じ材令における同じ粗骨材(砕石)を使用したコンクリートの静弾性係数は、t検定の結果、統計的に有意な差が認められないことから、実験・IとIIの結果をまとめ、粗骨材別に標準養生を施した(実験・I:材令3日・1週・4週, 実験・II:材令1週・4週)砂

岩・安山岩・石灰岩砕石コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係をそれぞれ図・4 (a), (b), (c)に示すように別々に求めた。

これらを最小自乗法により一次式で表わすと、下式のようなになる。

$$E = 0.0020 F + 2.38 \quad \dots\dots\dots (\text{砂岩砕石})$$

$$E = 0.0022 F + 2.58 \quad \dots\dots\dots (\text{安山岩砕石})$$

$$E = 0.0031 F + 2.96 \quad \dots\dots\dots (\text{石灰岩砕石})$$

ただし、E: 静弾性係数 ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)

F: 圧縮強度 (kgf/cm^2)

4. 結 論

早強セメント(冬季用)と普通セメント(夏季用)を用いた高強度コンクリートについて、細・粗骨材(主に鹿児島県産)、高性能減水剤、水セメント比並びにスランブを要因とした $L_{27}(3^{13})$ 多要因直交配列実験を行い、その範囲内で下記の結論を得た。

【配合】

- ① 高性能減水剤を用いることにより、単位水量が 175 kg/m^3 以下、水セメント比30~40%、スランブ5~18cmの配合設計は可能である。
- ② セメントの種類(早強:冬季用と普通:夏季用)による配合設計は、一部を除き、高性能減水剤の使用量を変えるだけでよい。
- ③ 細骨材率(s/a)の値は、細・粗骨材の種類によって異なる。即ち、細骨材は海砂(単身)より混合砂(海砂に砕砂を30%混合)の方が大きい。一方、粗骨材(砕石)は津久見産石灰岩が最も小さく、谷山産砂岩、川内産安山岩の順に大きくなる。また、水セメント比はその比が大きくなるほど細骨材率も大きくなる。

【圧縮強度と静弾性係数】

- ① 高性能減水剤を使用することにより、県産骨材で圧縮強度 800 kgf/cm^2 の高強度コンクリートの製造は十分可能である。
- ② 圧縮強度に及ぼす粗骨材の影響は、通常のコンクリートに比べ、高強度コンクリートは大きい。
- ③ 粗骨材の40t破砕値(BS規格)とコンクリートの圧縮強度の相関性は高い。
- ④ 粗骨材の静弾性係数に及ぼす影響は、圧縮強度より大きい。
- ⑤ 粗骨材の種類によっては、圧縮強度の高いコンクリートが静弾性係数も大きいとは限らない。

- ⑥ 早強と普通セメントが圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす各要因への影響は同程度である。

謝 辞

実験の実施に当り、鹿児島県生コンクリート工業組合試験小委員会の皆様にご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事
- 2) 国分勝郎ほか：高強度コンクリートと骨材，コンクリート工学，Vol. 28, No. 2, Feb, 1990, pp. 14-22.
- 3) 飛坂基夫：高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす骨材の影響，セメント・コンクリート，No. 384, Dec. 1979, pp. 30-33.
- 4) 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説