

実験計画法による富配合軽量コンクリートの研究*

STUDY ON THE RICH MIX LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE USING DESIGN OF EXPERIMENTS

大 浜 文 彦**・富 田 和 政***
By Fumihiko Ohama and Kazumasa Tomita

1. ま え が き

近年急速に利用範囲を広げつつあるところの人工軽量骨材コンクリートをPC構造用として使用すれば、とくに死荷重の小さい構造物を作ることができる。このような高強度の軽量コンクリートは多量の単位セメント量が必要で、単位セメント量が400 kg/m³以上になると、フレッシュ・コンクリートの性質は普通コンクリートの場合と相当異なり、また圧縮強度も軽量コンクリート特有の傾向を示すようである。

本論文は450 kg/m³から600 kg/m³の多量のセメントを使用したフレッシュ軽量コンクリートの性質、圧縮強度の性質、設計上必要な弾性係数の測定、そして富配合の場合特有の性状が予測される乾燥収縮の測定を主な内容としたものである。

本論文のもう一つの目的は、この種の実験における実験計画法の新しい試みとして、分散分析の結果有意差が認められた要因効果（主効果、交互作用）を用いて、実際には測定しなかった組み合わせの実験条件のときの値も含めて工程平均として推定値を求めて、それらをデータとして扱ったことである。

従来、直交配列表を使用する実験は多くなされているが、工程平均として算出した推定値でデータ解析を行なった例はまだみあたらない。工程平均によって信頼度の高い推定値を得るには、特性値に影響を与える主効果、一次交互作用、二次交互作用を知らねばならない。しかし、特性値に微少な影響を与える主効果や交互作用をもれなく検定することはコンクリート実験ではその性質上困難である。したがって、微少な主効果、交互作用を誤差として扱うことになるが、コンクリート実験の特性値はある確率の下における信頼限界という幅をもって評価されるので、このような主効果、交互作用は誤差として扱ってもよいと思われる。

2. 実 験 計 画

コンクリートの材料実験で実験条件の変動による特性

* 第22回年次学術講演会にて一部発表

** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 岐阜大学助手 工学部土木工学科

値のわずかな変化の傾向を解析しようとしても、使用材料のばらつき、経時変化、考慮外の要因の影響、実験中の工程管理の不十分さなどによる特性値の変動、すなわち実験誤差によって、求めようとしている要因の効果が判定できないことがある。このような問題に答える一つの実験方法として、推計学的手法によって最終的な情報判断を得ようとする一連の実験手段が実験計画法であって、広く工業界に用いられている。

直交配列表を使用する実験計画法の詳細は既刊の書物^{1),2),3)}に紹介されているので、その二、三を紹介するにとどめ、本研究では有意差が検定された要因効果を使用して、因子間の種々の水準の組み合わせの推定値を工程平均によって求め、考察した。たとえば、ある特性値 X が主効果 A_i, B_j, C_k, D_l と交互作用 $A_i \times B_j, A_i \times C_k, A_i \times D_l$ の7つの要因効果に分析できると仮定すると、推定値 X はつぎの式で表現できる。

$$X = \bar{x} + A_i + B_j + C_k + D_l + A_i \times B_j + A_i \times C_k + A_i \times D_l$$

(\bar{x} : 全平均)

すなわち、本論文ではすべての有意差をもつ要因効果を上式に代入して、すべての水準の組み合わせの特性値を推定した。上式を使用して信頼度の高い実測値以外の特性値を得るためには、特性値に影響を与える要因効果を見落とさないこと、実験誤差を少なくすることが必要である。

なお、要因効果および工程平均の信頼度95%の信頼区間は、つぎの式より求めた。

$$\text{要因効果の信頼区間} = \pm \sqrt{F(1, \phi_e; 0.05) V_e / n_e}$$

$$\text{工程平均の信頼区間} = \pm \sqrt{F(1, \phi_e; 0.05) V_e / n_e'}$$

ただし、

$F(1, \phi_e; 0.05)$: 信頼度95%のF値

ϕ_e : 誤差の自由度

V_e : 誤差の不偏分散

n_e : 平均を求めようとしている水準でのくり返し数

n_e' : 全実験数/(1+無視しない要因の自由度の和)

本論文の実験は L_{32} 直交配列表と L_{16} 直交配列表を使

用し、実験計画法にもとづいて行なった。フレッシュ・コンクリートの性質、単位容積重量の性質、圧縮強度の性質については L_{32} 直交配列表を使用し、コンクリートの弾性係数と乾燥収縮については L_{16} 直交配列表を用いた実験結果より得た各水準のすべての組み合わせのときの推定値にもとづいて考察を行なった。つぎに実験項目の考察事項を列挙する。

- (1) フレッシュ・コンクリートの性質に関する実験
 - スランブと骨材の種類の関係
 - スランブとセメントの種類の関係
 - スランブと配合の関係
 - 空気量について
- (2) 単位容積重量に関する実験
- (3) 圧縮強度の性質に関する実験
 - 圧縮強度とセメントの種類の関係
 - 圧縮強度と軽量骨材の種類の関係
 - 圧縮強度と配合の関係
 - 圧縮強度と材令の関係
 - 圧縮強度とスランブの関係
- (4) 弾性係数と乾燥収縮に関する実験

3. フレッシュ・コンクリート、単位容積重量、圧縮強度に関する実験

(1) 使用材料

① セメント：実験に使用したセメントはS社の普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントで、これらの試験結果を表-1に示した。

② 水：コンクリートの混和水は $10 \pm 2^\circ\text{C}$ の水道水を使用した。

③ 混和剤：T社のセメント分散剤CPをセメント量の0.05% 使用した。

④ 骨材：つぎの2種類の骨材を使用した。

- i. 人工軽量粗骨材 M_c + 人工軽量細骨材 M_f ……この骨材の組み合わせを M とする。
- ii. 人工軽量粗骨材 J_c + 川砂……この骨材の組み合わせを J とする。

M は膨張頁岩、非造粒型軽量骨材で粗骨材と細骨材の両種がある。 J_c はフライアッシュを原料とした造粒型軽量粗骨材である。表-2、図-1に骨材の試験結果を示した。

(2) 実験条件

コンクリートのワーカビリティ、圧縮強度に影響する

図-1 骨材の物理的試験結果

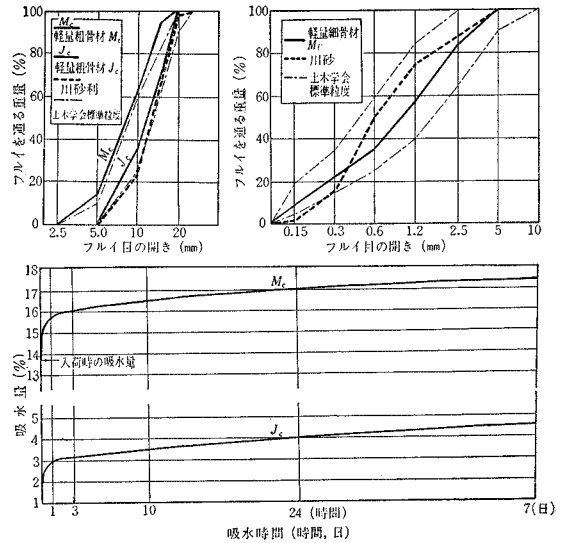


表-2 骨材の物理的試験結果

骨材	性質	比重		吸水量(%)		FM	単位重量 t/m ³	浮粒率 %	備考
		絶乾	表乾	24 hr	7 day				
M (細粗)		1.54	1.82	19.4	19.4	2.93	0.95	—	非造粒型
		1.24	1.50	17.0	17.4	6.25	0.70	7.2	非造粒型
J		1.42	1.49	1.83	2.6	6.65	0.90	0	造粒型
川砂		—	2.57	—	—	2.70	—	0	
川砂利		—	2.58	—	—	7.18	—	0	

要因は数多くあるが、本論文ではつぎの要因を考えた。

① セメントの種類(A)：PC 構造物に広く使用されている早強ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントの2水準とした。

② 骨材の種類(B)：非造粒型の軽量骨材と造粒型の軽量骨材を比較するため、M と J の2水準とした。

③ 単位水量(C)：180 kg/m³, 190 kg/m³, 200 kg/m³, 210 kg/m³ の4水準とした。

④ 単位セメント量(D)：単位セメント量が 450 kg/m³ 以上のコンクリートを富配合軽量コンクリートとして 450 kg/m³, 500 kg/m³, 550 kg/m³, 600 kg/m³ の4水準とした。

⑤ 絶対細骨材率(E)：骨材の最大寸法が 20 mm のとき、標準とされている 42% を中心に $\pm 5\%$ 変化させて 37%, 42%, 47% の3水準とした。

⑥ 交互作用：①～⑤までの要因のほか、これらの

表-1 セメントの物理的試験結果

セメントの種類	比重	粉末度 (cm ² /g)	凝 結			安定性	フロー (mm)	強 さ (kg/cm ²)					
			水量 (%)	始発 (時分)	終結 (時分)			曲 げ		圧 縮			
								3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
普通ポルトランドセメント	3.16	3100	27.5	2:12	3:16	良	235	31.4	47.4	70.4	188	229	410
早強ポルトランドセメント	3.13	4420	31.0	2:00	3:10	良	231	48.0	65.6	75.9	268	378	481

間のつぎのような交互作用も要因と考えた。

セメントの種類と s/a の交互作用 ($A \times E$)

骨材の種類と s/a の交互作用 ($B \times E$)

単位水量と s/a の交互作用 ($C \times E$)

骨材の種類と単位水量の交互作用 ($B \times C$)

以上①～⑥までの要因と水準を表-3に示した。

これら9個の要因を L_{32} 直交配列表に線点図を使用してわりつけた。表-4と表-5は主効果をわりつけた列をぬき出したもので、48回の実験条件を示す。以後表-4の32個の実験条件で行なった実験を実験I、また表-5のバッチ番号1~16と表-4のバッチ番号17~32までの合計32個の実験条件で行なった実験を実験IIと呼ぶことにする。したがって、表-4の17~32までの実験条件は実験Iと実験IIで共通になる。なお、分散分析は一部追加法で行なうことができるが、本実験では一部追加した要因効果の s/a が後述するように分散比が小さく有意差なしと判定されたので、分散分析は実験Iと実験IIとに分けて行ない、同じ実験を2回行なったと考えて解析した。

(3) 実験方法

a) 供試体の作製

容量3切の可傾式ミキサで3分間混合したあと、手練

表-3 実験に採用した要因

要因	水準			
	1	2	3	4
A セメントの種類	A ₁ 普通	A ₂ 早強		
B 骨材の種類	B ₁ M(粗) M(細)	B ₂ J(粗) 川砂(細)		
C 単位水量 (kg/m ³)	C ₁ 180	C ₂ 190	C ₃ 200	C ₄ 210
D 単位セメント量 (kg/m ³)	D ₁ 450	D ₂ 500	D ₃ 550	D ₄ 600
E 細骨材率 (%)	E ₁ 37	E ₂ 42	E ₃ 47	
		実験(I) 実験(II)		
$A \times E$		セメントの種類と s/a の交互作用		
$B \times E$		骨材の種類と s/a の交互作用		
$C \times E$		単位水量と s/a の交互作用		
$B \times C$		骨材の種類と単位水量の交互作用		

りを反復3回行なった。供試体寸法は $\phi 10 \times 20$ mm で1バッチ当り9本作製し材令3日、7日、28日の供試体を作製した。スランプ5cm以下の供試体には約10秒間サーフェース・パイプレンタをかけた。

b) ワーカビリチーの測定

スランプ試験はワーカビリチーの部分的表現であるコンシステンシーを測定するものであり、フロー試験は強制的に材料分離を起こさせて流動性を測定するもので、

表-4 実験条件と測定値(実験I)

バッチ番号	実験条件						測定値						
	セメントの種類	骨材の種類	水セメント比 (%)	絶対細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	空気量 (%)	スランプ (cm)	フロー値 (%)	単位容積重量 (t)	3日圧縮強度 (kg/cm ²)	7日圧縮強度 (kg/cm ²)	28日圧縮強度 (kg/cm ²)
1	普通	M	40.0	37	180 (2.25)	450	2.7	15.0	92.9	1.75	157	281	373
2	早強	M	30.0	37	180 (3.00)	600	2.8	0.0	19.3	1.83	401	516	609
3	普通	J	31.7	37	190 (3.00)	600	2.1	9.1	69.3	1.95	289	390	456
4	早強	J	42.2	37	190 (2.25)	450	3.0	15.1	77.2	1.88	237	395	490
5	普通	J	40.0	37	200 (2.50)	500	2.5	23.1	119.7	1.94	133	300	460
6	早強	J	36.4	37	200 (2.75)	550	2.9	14.7	83.1	1.90	243	453	519
7	普通	M	38.2	37	210 (2.75)	550	2.8	15.6	89.0	1.74	170	322	402
8	早強	M	42.0	37	210 (2.50)	500	2.8	15.3	82.3	1.74	209	372	494
9	普通	J	32.7	37	180 (2.75)	550	2.1	8.1	63.4	1.89	212	367	447
10	早強	J	36.0	37	180 (2.50)	500	2.2	7.1	49.6	1.91	297	470	522
11	普通	M	38.0	37	190 (2.50)	500	2.7	13.3	84.3	1.87	176	318	419
12	早強	M	34.5	37	190 (2.75)	550	2.9	2.7	26.0	1.72	366	477	583
13	普通	M	33.3	37	200 (3.00)	600	1.9	12.2	77.2	1.83	220	394	472
14	早強	M	44.4	37	200 (2.25)	450	3.5	13.9	78.3	1.70	159	302	442
15	普通	J	46.7	37	210 (2.25)	450	1.8	25.0	165.7	1.92	138	273	404
16	早強	J	35.0	37	210 (3.00)	600	2.0	9.9	59.4	1.93	320	456	573
17	普通	J	40.0	42	180 (2.25)	450	3.3	18.1	94.9	1.92	223	289	425
18	早強	J	30.0	42	180 (3.00)	600	2.9	2.4	33.9	1.99	392	539	626
19	普通	M	31.7	42	190 (3.00)	600	2.9	3.6	37.8	1.81	233	414	526
20	早強	M	42.2	42	190 (2.25)	450	3.5	11.4	73.2	1.72	244	382	491
21	普通	M	40.0	42	200 (2.50)	500	3.3	17.8	94.9	1.74	135	290	384
22	早強	M	36.4	42	200 (2.75)	550	3.7	10.0	61.4	1.78	300	411	500
23	普通	J	38.2	42	210 (2.75)	550	2.3	22.7	128.3	1.93	140	348	480
24	早強	J	42.0	42	210 (2.50)	500	2.3	19.6	113.8	1.93	186	338	446
25	普通	M	32.7	42	180 (2.75)	550	2.3	2.9	29.9	1.80	238	422	516
26	早強	M	36.0	42	180 (2.50)	500	2.4	3.4	33.9	1.76	294	464	499
27	普通	J	38.0	42	190 (2.50)	500	3.2	19.9	94.9	1.94	173	320	429
28	早強	J	34.6	42	190 (2.75)	550	3.8	9.3	65.4	1.92	320	493	612
29	普通	J	33.3	42	200 (3.00)	600	2.5	14.8	90.2	1.98	216	411	501
30	早強	J	44.4	42	200 (2.25)	450	2.4	20.5	94.9	1.89	202	365	487
31	普通	M	46.7	42	210 (2.25)	450	2.5	25.2	146.1	1.74	99	235	391
32	早強	M	35.0	42	210 (3.00)	600	2.3	7.9	57.5	1.77	343	477	549

表-5 実験条件と測定値(実験 II)

バッチ号	実験条件						測定値						
	セメントの種類	骨材の種類	水セメント比 (%)	絶対細骨材率 (%)	単位水量 (AE 剤) (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	空気量 (%)	スランプ (cm)	フロー値 (%)	単位容積重 (ton)	3 日 圧縮強度 (kg/cm ²)	7 日 圧縮強度 (kg/cm ²)	28 日 圧縮強度 (kg/cm ²)
1	普通	M	40.0	47	180 (2.25)	450	3.8	16.3	98.0	1.77	151	284	378
2	早強	M	30.0	47	180 (3.00)	600	2.7	1.5	24.0	1.85	411	494	558
3	普通	J	31.7	47	190 (3.00)	600	3.6	8.5	73.2	1.98	242	408	480
4	早強	J	42.2	47	190 (2.25)	450	2.9	17.7	89.0	1.94	232	397	498
5	普通	J	40.0	47	200 (2.50)	500	2.5	22.9	124.0	1.97	151	330	436
6	早強	J	36.4	47	200 (2.75)	550	3.1	8.0	61.4	1.97	285	458	523
7	普通	M	38.2	47	210 (2.75)	550	2.4	22.5	124.4	1.81	164	320	450
8	早強	M	42.0	47	210 (2.50)	500	2.5	17.9	98.8	1.76	231	350	437
9	普通	J	32.7	47	180 (2.75)	550	2.7	5.2	53.5	1.99	263	433	506
10	早強	J	36.0	47	180 (2.50)	500	3.5	3.3	35.8	1.96	314	491	586
11	普通	M	38.0	47	190 (2.50)	500	3.7	22.5	106.7	1.78	154	306	403
12	早強	M	34.5	47	190 (2.75)	550	3.0	3.3	41.7	1.82	363	441	548
13	普通	M	33.3	47	200 (3.00)	600	2.7	12.8	81.1	1.84	232	390	463
14	早強	M	44.4	47	200 (2.25)	450	5.2	15.4	87.0	1.75	184	307	451
15	普通	J	46.7	47	210 (2.25)	450	4.0	23.3	163.8	1.94	165	253	390
16	早強	J	35.0	47	210 (3.00)	600	2.7	9.1	71.3	1.95	327	483	585

いずれも厳密な意味ではワーカビリティの測定に適しているとはいえないが、これら2つを測定しワーカビリティの傾向を観察した。

e) 供試体の養生

供試体の作製後2日間は10±2°Cの室内に置き、以後20±2°Cの水中で養生を行なった。

(4) 実験結果と考察

実験によって得た各特性値を表-4と表-5に示した。また、工程平均によって推定した推定値を表-6に示した。本論文の図はとくに断わらない限り、表-6の値を用いて描いた。

[1] フレッシュ・コンクリートの性質

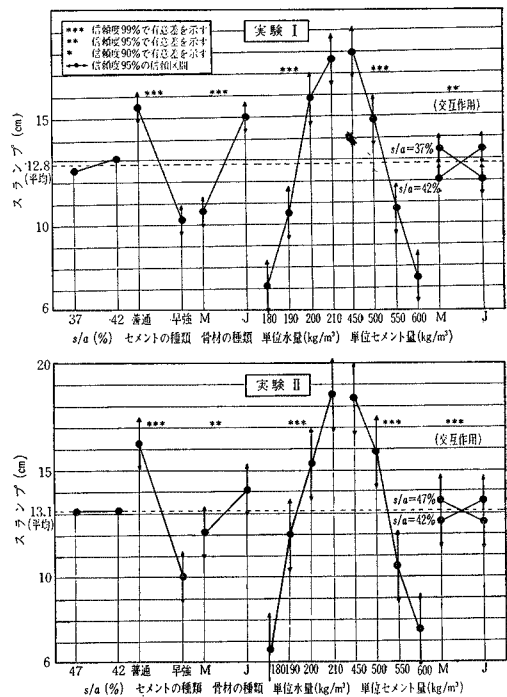
(スランプとセメントの性質)

早強ポルトランドセメントを使用した軽量コンクリートのスランプは、普通ポルトランドセメントを使用したものより小さい。これは粉末度の大きい早強ポルトランドセメントが、コンクリートの流動性を減少させるためと考えられ、富配合の場合特に著しいようである。表-7の分散分析表で分散比をくらべると、セメントの種類分散比が最も大きいことから、セメントの粉末度の影響が大きいことがわかる。すなわち、早強ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントの間には99%以上の信頼度で有意差があり、普通ポルトランドセメントの方が4~6cmスランプが大きいことが認められた。普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートにおいて早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートと、同一のスランプを得るには、単位水量を15kg程度減ずればよいようである。

(スランプと骨材の性質)

骨材の組み合わせMとJとの有意差は実験Iで信頼度99%以上、実験IIでは信頼度95%以上で認められる。図-2の骨材の種類の要因効果図によると、Jを使用したコンクリートのスランプはMを使用したコンク

図-2 スランプに関する要因効果図



リートのスランプより2~4cm大きくなっている。これはMとJとの粒型の差異によるものと思われる。さらに、川砂を含むJと軽量細骨材を含むMとの間の単位容積重量間の差も関係しているものと思われる。

一般に碎石を使用する普通コンクリートでは単位水量を9~15kg/m³増し、さらにs/aを3~5%増すと、川砂利とほぼ同程度のワーカビリティを有するコンクリートになるようである⁵⁾。本実験に使用した最大寸法20mm程度の軽量骨材では、図-3からわかるようにMを使用するコンクリートの単位水量を4~5kg/m³増せば、Jを使用するコンクリートと同じスランプにするこ

表一7 スランプに関する分散分析表

要因	実験 I					実験 II				
	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率(%)	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率(%)
E (s/a)	1	2.8	2.8	0.99	—	1	0	0	0	—
A (セメントの種類)	1	216.3	216.3	77.62***	14	1	302.0	302.0	43.93***	17
B (骨材の種類)	1	149.6	149.6	53.70***	10	1	29.8	29.8	4.54**	1
C (単位水量)	3	561.9	187.3	67.22***	36	3	616.5	205.5	31.27***	34
D (単位セメント量)	3	514.5	171.5	61.52***	33	3	594.3	198.1	30.13***	32
E×A	1	0.2	0.2	0.05	—	1	9.4	9.4	1.42	—
E×B	1	13.8	13.8	4.95**	1	1	109.9	109.9	16.72***	6
E×C	3	12.3	4.1	1.47	—	3	10.5	3.5	0.53	—
B×C	3	6.9	2.3	0.82	—	3	12.9	4.3	0.66	—
e (誤差)	14	39.2	2.8		6	14	92.0	6.6		10

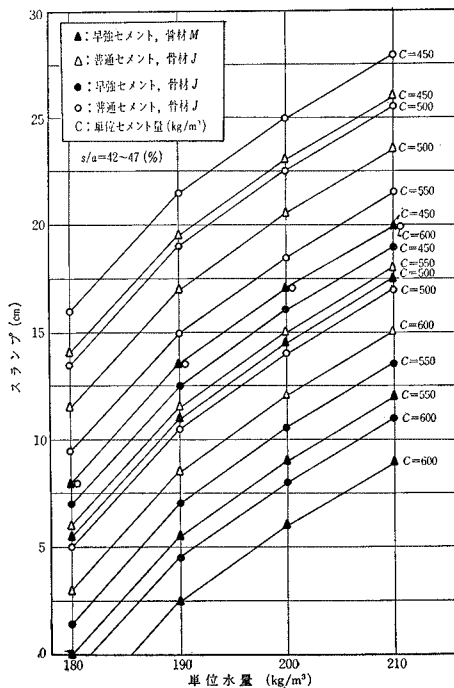
とができるようである。なお、後述するように、富配合の場合 s/a の多少の変化はスランプを左右する要因にならないので、s/a の補正はあまり必要でないと思われる。

人工軽量骨材コンクリート設計施工指針(案)ではスランプの最大値を 12 cm 以下にするよう規定しているが、富配合軽量コンクリートはセメントペーストが多いため、非常にプラスチックで 12 cm 以上のスランプであってもワーカブルなコンクリートになる。しかし、スランプが 15 cm 以上になると J を使用したコンクリートは骨材の分離が目立ち、著しくワーカビリチーの悪いコンクリートになった。

(スランプと単位水量)

単位水量によるスランプの変動はセメントの種類による変動について大きく、単位水量がスランプの大きな要因であることを示している。

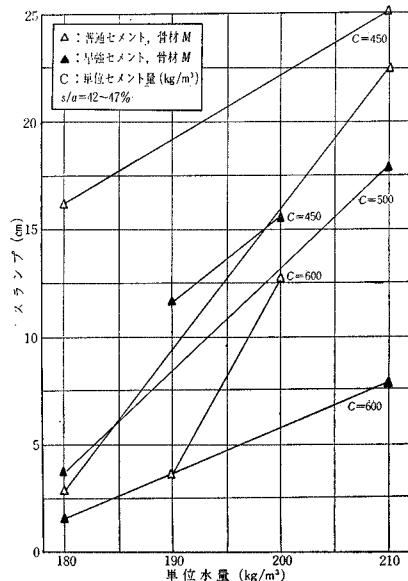
図一3 単位水量とスランプの関係



図一3 のスランプに対する単位水量の要因効果図を見ると、曲線は 95% の信頼限界内で横軸に対して若干凸になってはいるが、富配合軽量コンクリートのスランプを 1cm 増減させるには、単位水量を大体 2~3 kg/m³ 増減させればよい。すなわち、単位水量を 1~1.5% 増減させればスランプ 1cm の調整が可能である。これは要因効果の信頼区間 ±1~1.5 cm の範囲で平均的にいえることであり、単位セメント量によって、この値には若干の増減が認められた。そこでつぎに単位セメント量別に考えた。

図一3 はスランプと単位水量の関係を単位セメント量別に図示したものである。要因の決定にさいして、単位水量と単位セメント量の交互作用を直交配列表にわりつけなかったため、すべての曲線が平行となり、各単位セメント量での関係を明らかにできなかった。そこで実測特性値を使用して、スランプと単位水量の関係を図示したものが図一4である。1つの曲線は2個の特性値だけで図示してあるため正確さを欠くが、各単位セメント量でのスランプと単位水量の関係を概略的に知ることが

図一4 単位水量とスランプの関係



できる。これによると早強ポルトランドセメントを使用した場合、単位セメント量が 450~550 kg/m³ のときは単位水量を 1.2%，単位セメント量が 600 kg/m³ のときは単位水量を 2% それぞれ増減させれば、スランブを 1 cm 増減できる。一方普通ポルトランドセメントを使用した場合、単位セメント量を 450~600 kg/m³ と変えても、スランブと単位水量はほぼ同じ比率で変化しスランブを 1 cm 増減させるには単位水量を 1% 程度増減させればよい。いずれにしても単位水量を 1~2% 変化させれば、スランブ 1 cm の調整が可能である。

単位セメント量が少ない場合、骨材の種類によるスランブの差が大きくなる。これはセメントペーストが少ないため骨材の流動が起りやすくなり、スランブに差が生じたためと思われる。

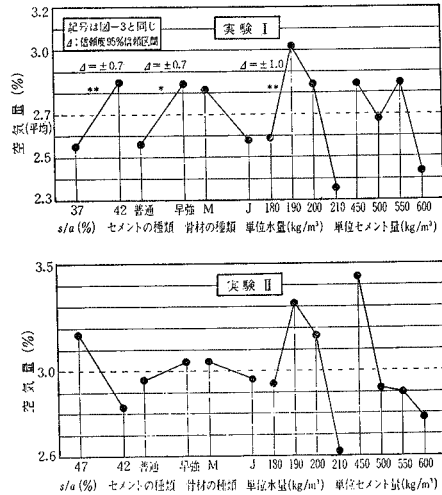
(スランブと *s/a*)

一般のコンクリートでは、*s/a* の 1% 増減に対して単位水量を 1 kg/m³ 増減させれば、同一のスランブになるようであるが富配合の場合、実験 I と実験 II の分散分析表 (表一7) に示すように、*s/a* によるスランブの変動はとくに小さく、実験 II では 0 とみなせるほど小さい。これは富配合コンクリート特有の性状で、多量のセメントペーストが細骨材を十分おおってしまい、*s/a* 増減の影響を消去してしまうためと思われる。*s/a* と骨材の種類の交互作用が信頼度 95% と 99% の有意差で認められている。これは川砂を含む J と軽量細骨材を含む M との単位容積重量の差によるものであろう。

(空気量)

T社の分散剤 CP はセメント重量の 0.05% 使用すると、4~5% の空気をコンクリートに連行するようである。本論文ではメーカー指定の使用量ですべての供試体を作製し、空気量についての要因分析を行なった。表一8 で空気量を特性値とする分散分析表を見ると *s/a*、セメントの種類、単位水量が信頼度 95% 以上で有意となり、連行空気量の変動に影響を与えていることが認められた。要因効果図は図一5 のようであるが、これによると空気量を多くするには、早強ポルトランドセメントを使用し、単位セメント量を多く用い、*s/a* を増し、骨

図一5 空気量に関する実験



材は M を使用しそして単位水量は 190~200 kg/m³ の範囲にした方がよいようである。

単位セメント量が多いため、全般に所要の空気量は連行されず、フレッシュ・コンクリートは非常にプラスチックではあるが、べとべととしていて空気が逃げにくいいため気泡ができやすかった。

[2] 単位容積重量

軽量コンクリートは所要の強度、耐久性そしてワーカビリティばかりでなく、ほかに、所要の単位容積重量をもつことが必要である。一般に単位容積重量は骨材の種類、配合によって異なる。そこで十分吸水した供試体の重量 (気乾状態の単位容積重量との差はそれほど大きくなく約 0.05 t/m³ であった) を特性値として分散分析を行なった。

表一9 の分散分析表によると、*s/a* の分散比は実験 I と実験 II とで非常に異なっており、*s/a* が単位容積重量に与える影響は *s/a* の範囲によって異なることが認められる。すなわち、*s/a* を 37~42% で変化させても、単位容積重量はほとんど影響を受けないが、*s/a* を 42~47% で変化させると、信頼度 99% で有意差が認められるほど単位容積重量に影響を与える。本実験では、*s/a* 5%

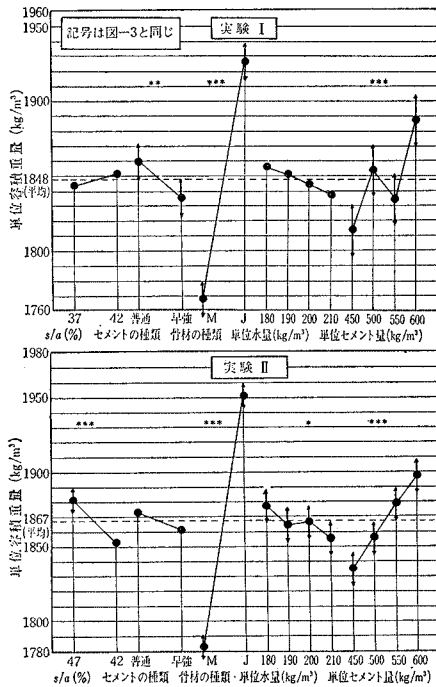
表一8 空気量に関する分散分析表

要因	実験 I					実験 II				
	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率 (%)	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率 (%)
E (<i>s/a</i>)	1	7.5	7.5	4.80**	6	1	9.1	9.1	2.58	—
A (セメントの種類)	1	6.3	6.3	4.05*	5	1	0.5	0.5	0.13	—
B (骨材の種類)	1	4.3	4.3	2.74	—	1	0.5	0.5	0.13	—
C (単位水量)	3	20.1	6.7	4.29**	16	3	22.2	7.4	2.10	—
D (単位セメント量)	3	9.3	3.1	2.01	—	3	20.7	6.9	1.96	—
E×A	1	2.0	2.0	1.25	—	1	0.2	0.2	0.06	—
E×B	1	3.4	3.4	2.18	—	1	0.2	0.2	0.06	—
E×C	3	4.8	1.6	0.99	—	3	4.2	1.4	0.40	—
B×C	3	6.3	2.1	1.36	—	3	29.1	9.7	2.73	—
e (誤差)	14	22.4	1.6	—	73	14	49.0	3.5	—	—

表-9 単位容積重量に関する分散分析表

要因	実験 I					実験 II				
	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率(%)	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率(%)
E (s/a)	1	4.5	4.5	0.48	—	1	66.1	66.1	19.39***	2
A (セメントの種類)	1	45.1	45.1	4.78**	2	1	10.1	10.1	2.97	—
B (骨材の種類)	1	1985.0	1985.0	210.08***	80	1	2278.0	2278.0	667.93***	87
C (単位水量)	3	15.9	5.3	0.56	—	3	28.2	9.4	2.75*	1
D (単位セメント量)	3	220.2	73.4	7.77***	8	3	176.7	58.9	17.26***	6
E×A	1	10.1	10.1	1.07	—	1	0.1	0.1	0.04	—
E×B	1	18.0	18.0	1.91	—	1	1.1	1.1	0.33	—
E×C	3	9.3	3.1	0.33	—	3	2.1	0.7	0.21	—
B×C	3	20.4	6.8	0.71	—	3	1.5	0.5	0.16	—
e (誤差)	14	131.6	9.4	—	10	14	47.6	3.4	—	4

図-6 単位容積重量に関する要因効果図



の増減に伴い単位容積重量は 30 kg/m³ 増減した。またセメントの種類による差は早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートの方が約 20 kg/m³ 重くなった。図-6 に示すように単位セメント量と単位水量は、単位容積重量との間に、それぞれ直線関係が認められた。以上のように、コンクリートの配合は単位容積重量を左右するが、その程度はわずかである。しかし、骨材の種類は表-9 に示すように寄与率が 80% と 87% で非常に大きく、単位容積重量は、ほとんど骨材の種類によって決まることを示している。

一般に普通配合では、コンクリートの単位容積重量は軽量骨材のみを使用した場合 1.5~1.7 t/m³、細骨材として川砂を使用した場合 1.7~2.0 t/m³ である⁷⁾。一方図-7 に示すように富配合では前者の場合 1.75 t/m³~1.85 t/m³、後者の場合 1.9~2.0 t/m³ となり、約 0.1~0.2 t/m³ 増加した。

図-7 単位容積重量と 28 日圧縮強度の関係

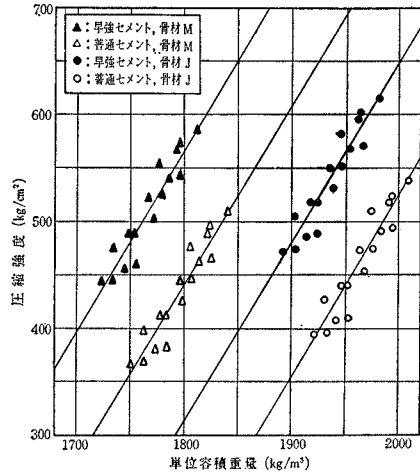
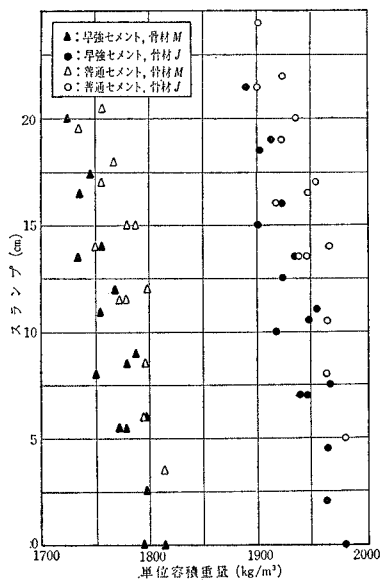


図-8 単位容積重量とスラブの関係



また、図-7 より材令 28 日の圧縮強度と単位容積重量の関係を見ると、両者の相関係数は 0.94 で直線関係を示し、重いコンクリートほど強いことを示している。

図-8 は単位容積重量とスラブの関係を示したものの

である。一般に、重いコンクリートほどスランプが大きいと考えられがちであるが、この関係はまったく逆の興味ある傾向を示している。富配合軽量コンクリートのモルタルは粘着性に富むため、スランプしようとするコンクリートの自重の影響を減少させ、図のような傾向を示したものと思われる。

〔3〕 圧縮強度

(圧縮強度とセメントの種類)

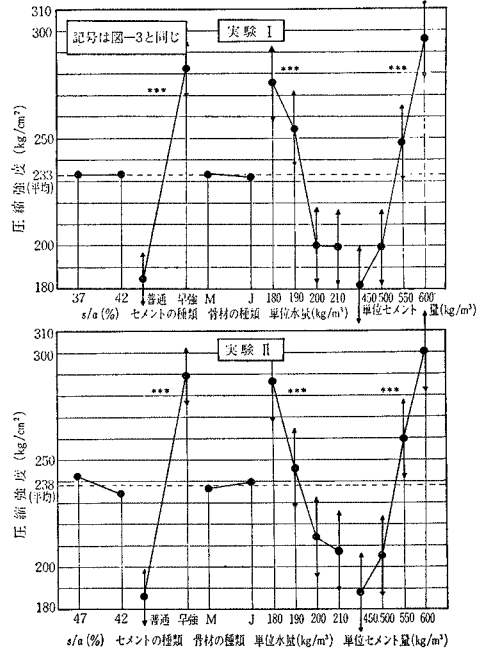
表-10、表-11、表-12の分散分析表によると、セメントの種類による圧縮強度の変動が最も大きい。図-9、図-10、図-11に示すように、早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートと普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの圧縮強度差はつぎのようになった。

- 材令 3 日で約 100 kg/cm²
- 材令 7 日で約 80~85 kg/cm²
- 材令 28 日で約 75~85 kg/cm²

このように早強ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントの圧縮強度の差は材令 3 日で 100 kg/cm² 程度であって最も大きく、材令経過とともにやや減少するが、それでも材令 28 日で 80 kg/cm² 程度であった。

一般に早強ポルトランドセメントを用いた場合、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの 28 日圧縮強度を 7 日で得ることができるが、図-10 と 図-11 とに明らかなように富配合の場合も同様の傾向が

図-9 3 日圧縮強度に関する要因効果図



認められ、早強ポルトランドセメントを使用すれば材令が若くても高強度のコンクリートを得ることができる。

(圧縮強度と骨材の種類)

普通コンクリートでは、川砂利と川砂の強度はコンクリート中のモルタル分の強度より強いのが普通で、とく

表-10 3 日圧縮強度に関する分散分析表

要因	実験 I					実験 II				
	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率 (%)	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率 (%)
E (s/a)	1	3.8	3.8	0.01	—	1	536.3	536.3	0.62	—
A (セメントの種類)	1	76 150.0	76 150.0	95.87***	39	1	84 975.0	84 975.0	98.54***	43
B (骨材の種類)	1	16.5	16.5	0.02	—	1	94.5	94.5	0.11	—
C (単位水量)	3	35 670.0	11 890.0	14.97***	17	3	31 350.0	10 450.0	12.12***	15
D (単位セメント量)	3	68 790.0	22 930.0	28.86***	34	3	63 060.0	21 020.0	24.38***	31
E×A	1	236.5	236.5	0.30	—	1	0	0	0	—
E×B	1	63.3	63.3	0.08	—	1	472.8	472.8	0.55	—
E×C	3	3 792.0	1 264.0	1.59	—	3	1 297.2	432.4	0.50	—
B×C	3	349.2	116.4	0.15	—	3	1 243.2	414.4	0.48	—
e (誤差)	14	11 130.2	794.3		10	14	12 073.6	862.4		11

表-11 7 日圧縮強度に関する分散分析表

要因	実験 I					実験 II				
	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率 (%)	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率 (%)
E (s/a)	1	392.0	392.0	0.61	—	1	87.8	87.8	0.19	—
A (セメントの種類)	1	73 730.0	73 730.0	114.50***	38	1	64 530.0	64 530.0	140.45***	33
B (骨材の種類)	1	528.1	528.1	0.82	—	1	4 255.0	4 255.0	9.26***	2
C (単位水量)	3	21 771.0	7 257.0	11.27***	11	3	26 178.0	8 726.0	18.99***	13
D (単位セメント量)	3	83 370.0	27 790.0	43.16***	43	3	88 350.0	29 450.0	64.10***	45
E×A	1	98.0	98.0	0.15	—	1	57.8	57.8	0.13	—
E×B	1	406.1	406.1	0.63	—	1	3 894.0	3 894.0	8.48**	2
E×C	3	689.1	229.7	0.36	—	3	352.2	117.4	0.26	—
B×C	3	1 706.7	568.9	0.88	—	3	1 060.5	353.5	0.77	—
e (誤差)	14	9 014.6	643.9		8	14	6 433.0	459.5		5

表-12 28日圧縮強度に関する分散分析表

要因	実験 I					実験 II				
	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率(%)	自由度	変動	不偏分散	分散比	寄与率(%)
E (s/a)	1	1212.8	1212.8	1.19	—	1	903.1	903.1	1.20	—
A (セメントの種類)	1	57545.0	57545.0	56.22***	40	1	47895.0	47895.0	63.49***	34
B (骨材の種類)	1	1610.0	1610.0	1.57	—	1	6786.0	6786.0	9.00***	4
C (単位水量)	3	8466.0	2822.0	2.76*	4	3	12285.0	4095.0	5.43**	7
D (単位セメント量)	3	51540.0	17180.0	16.78***	35	3	54360.0	18120.0	24.02***	38
E×A	1	1815.0	1815.0	1.77	—	1	465.1	465.1	0.62	—
E×B	1	166.5	166.5	0.16	—	1	861.1	861.1	1.14	—
E×C	3	2014.2	671.4	0.66	—	3	1359.6	453.2	0.60	—
B×C	3	2715.0	905.0	0.88	—	3	1606.5	535.5	0.71	—
e (誤差)	14	14336.0	1024.0		21	14	10561.6	754.4		17

図-10 7日圧縮強度に関する要因効果図

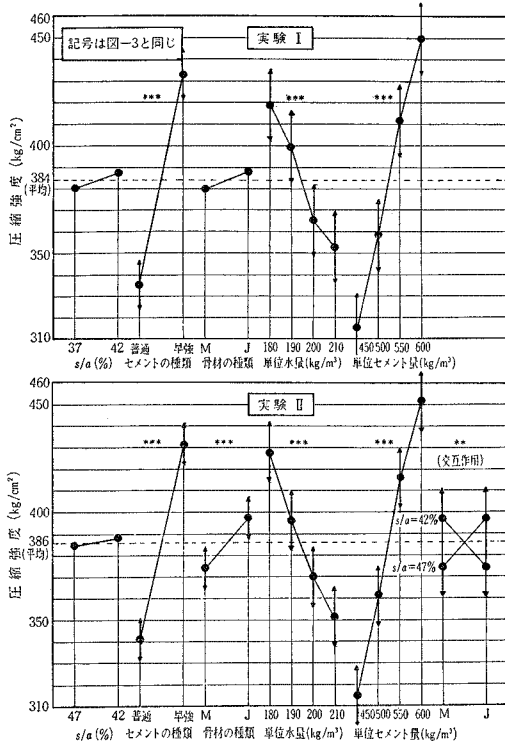
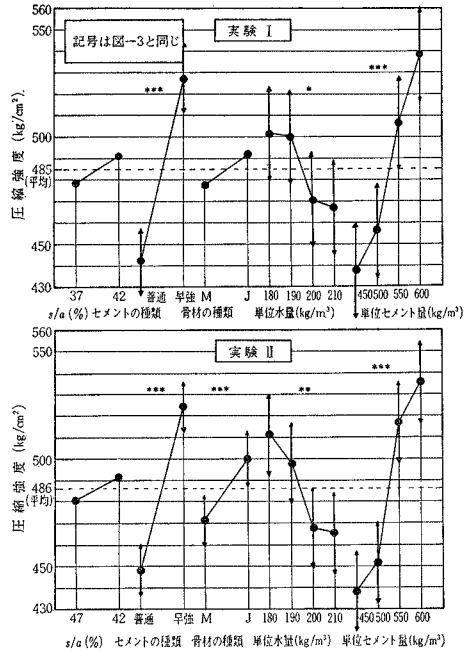


図-11 28日圧縮強度に関する要因効果図



材令 7日 で 25 kg/cm²

材令 28日 で 30 kg/cm²

に弱い骨材を含まない限り、骨材の強度はコンクリートの強度に影響を与えない。これに対して、軽量骨材の強度はモルタル強度より常に強いとはいえないようである。また製品によって粒型が異なり、さらに吸水量の変動も大きいので軽量骨材の種類がコンクリートの強度にある程度影響を与えるようである。

表-10, 表-11, 表-12 の分散分析表に示すように、実験 I で骨材の種類による圧縮強度の差は各材令で認められなかったが、実験 II では材令 7日 と 28日 で認められた。すなわち、実験 II では図-10 と 図-11 に示すように、骨材の組み合わせ J を用いたコンクリートと M を用いたコンクリートとの圧縮強度の差はつぎのようになり、99% 以上の信頼度で J を用いたコンクリートの方が強かった。

実験 I の分散分析結果にしたがうと圧縮強度は骨材の種類によって変化しないことになるがつぎの理由により、実験 I の場合も実験 II と同じく、7日圧縮強度と 28日圧縮強度は影響を受けると考えた。

(1) 実験 I と実験 II の分散分析結果において、誤差を比較すると、実験 I の誤差は大きく、実験精度が実験 II より悪かったと考えられる。そのため骨材の種類の有意差が検定できなかった。

(2) 多くの場合 M を使用した供試体の破壊面では骨材そのものの破断面が認められ、J を使用した供試体の破壊は大部分骨材とモルタルとの附着面に起こることが認められた。すなわち、これら供試体破壊面の違いから骨材の種類の違いは圧縮強度に影響すると考えられる。

(3) J を使用したコンクリート中のモルタルは細骨

材として川砂を使用しているので、軽量細骨材を含む M を使用したコンクリートのモルタルより強いと考えられるが、その差は実験誤差の範囲内にあるものと考えた。

以上の理由で、骨材の差は材令 7 日以後のコンクリートの圧縮強度に影響を与えると考えられる。しかしながら実験Ⅱの分散分析表に示す寄与率は各材令で、

材令 7 日で 2% 材令 28 日で 4%

となり、材令経過とともに増加しているが、全体に占める割合はわずかである。したがって骨材間の差が圧縮強度に与える影響も、きわめてわずかであろうと思われる。

供試体破壊面での状態の概略的な傾向を各材令ごとに列記するとつぎのようになる。

材令 3 日：骨材の破壊は認められず、モルタル部または骨材との付着面で破壊

材令 7 日：M は一部骨材部分破壊、J は付着面またはモルタル部破壊

材令 28 日：M は骨材自身の破壊、J もほとんど破壊し一部付着面またはモルタル部破壊

以上により骨材強度とモルタル強度の関係をつぎのようにまとめることができる。

(1) 材令 3 日では、骨材の方がコンクリート中のモルタルより強い。したがって、骨材はコンクリートの圧縮強度にあまり影響しない。

(2) 材令 7 日では、一部のモルタルは M より強くなり、J はモルタルより強いようである。

(3) 材令 28 日では、モルタルは M および J より強くなる。

(圧縮強度と配合)

本研究では最大寸法 20 mm の骨材では s/a を 42% 前後にして、コンクリートの配合設計を行なったが、表-10、表-11、表-12 に示すように富配合では s/a による圧縮強度の変動は各材令ともに小さく有意差はいずれも認められなかった。また富配合コンクリートを練り混ぜた直後に観察すると、コンクリート中のモルタル分はセメントペーストに近い外観を示していた。すなわち、多量のセメントペーストはコンクリートの細骨材をつみこんで、モルタルの性質をセメントペーストに近い性質に変えてしまうようである。富配合コンクリートでは s/a を 37%、42%、47% と変えても圧縮強度はほとんど影響を受けないように思われた。

表-10、表-11、表-12 に示すように単位水量の変化による圧縮強度の変動は各材令でいずれも大きく、つぎに示すように材令経過に伴って減少し、とくに材令 28 日での減少が著しい。

材令 3 日で 35 670

材令 7 日で 21 771

材令 28 日で 1 610

また、図-9、図-10、図-11 の単位水量の要因効果図に示すように、最高強度と最低強度の差は材令経過とともにつぎのように減少している。

材令 3 日で 75~80 kg/cm²

材令 7 日で 70~75 kg/cm²

材令 28 日で 32~45 kg/cm²

さらに、単位水量の要因効果図で、各材令共通して、圧縮強度減少割合が単位水量 200~210 kg/m³ の間で少ないことが認められる。しかし、図-3 に示すように単位水量 200 kg/m³ の場合単位セメント量が少ない配合ではスランプが非常に大きくなり、プラスチックなコンクリートを得ることができない。したがって、富配合の場合単位水量を 200 kg/m³ 以上にすることは望ましくないと思われる。

表-10、表-11、表-12 に示すように、各骨材において圧縮強度に対する単位セメント量の寄与率は大きく、富配合では単位セメント量はセメントの種類と並んで圧縮強度に影響する重要な要因となっていることを示している。寄与率を材令別に列記するとつぎのようになる。

材令 3 日で 34%

材令 7 日で 43%

材令 28 日で 35%

これによると、材令 3 日と 28 日で同じ程度の値を示し、材令 7 日で大きくなっている。また図-9、図-10、図-11 に示すように、各材令で単位セメント量 10 kg/m³ の増加に対する圧縮強度の増加は概略的にいってつぎのようになる。

材令 3 日で 7.5 kg/m³

材令 7 日で 9.0 kg/m³

材令 28 日で 6.5 kg/m³

すなわち、硬化がすすむにつれて単位セメント量の圧縮強度におよぼす影響はやや大きくなるが、材令 28 日になると、前述のように骨材の強さの影響が現われて、単位セメント量の圧縮強度に対する影響は相対的に少なくなってくるようである。

図-11 に示すように単位セメント量が 550 kg/m³ 以上になると圧縮強度増加の割合がやや減少しているが、さらに単位セメント量を増加して 600 kg/m³ 以上にすれば、より高い強度を示すコンクリートを得ることができるようである。

図-12 と図-13 に示すようにプレストレスト導入時に問題となる 3 日圧縮強度はつぎのとおりである。

普通ポルトランドセメントを用いたとき

単位セメント量 600 kg/m³ のとき 220~300 kg/cm²

単位セメント量 450 kg/m³ のとき 110~180 kg/cm²

早強ポルトランドセメントを用いたとき

単位セメント量 600 kg/m³ のとき 320~400 kg/cm²

単位セメント量 450 kg/m³ のとき 210~280 kg/cm²

図-12 単位セメント量と圧縮強度の関係
(普通セメント)

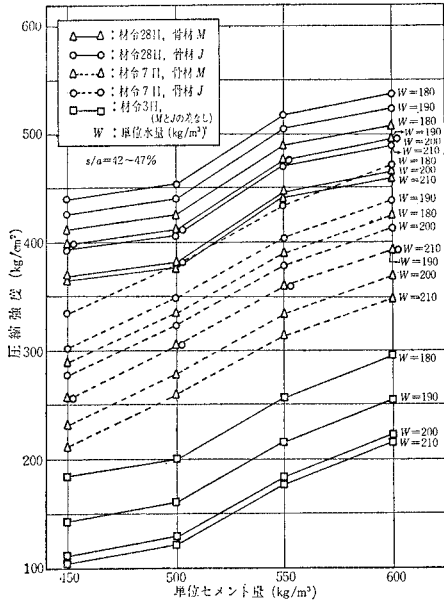
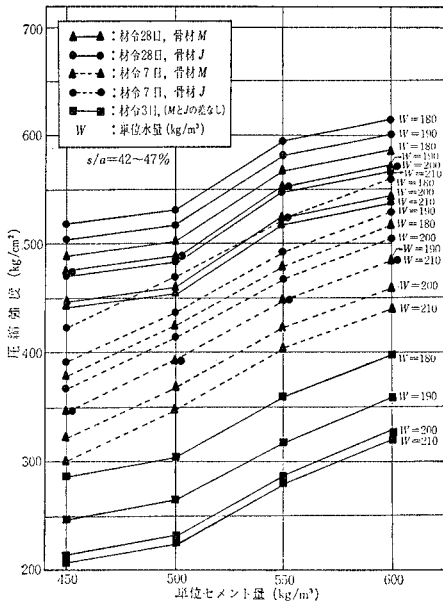


図-13 単位セメント量と圧縮強度との関係
(早強セメント)



すなわち、材令3日でプレレスト導入可能なコンクリートを得ることができると考えられる。

図-14 はセメント水比と28日圧縮強度および3日圧縮強度の関係を、また 図-15 はセメント水比と7日圧縮強度の関係を図示したものである。これらを見ると、セメント水比と圧縮強度の関係は28日、7日、3日の順に相関係数が0.96、1.00、0.97となり、本研究に用いた富配合の場合もほぼ直線関係になった。表-13に

図-14 セメント水比と圧縮強度(28日, 3日)の関係

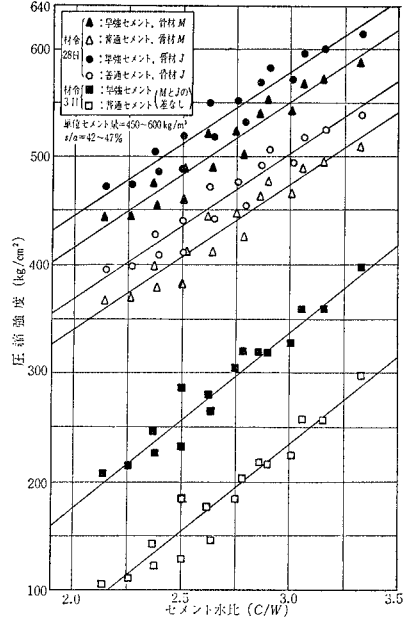


図-15 セメント水比と圧縮強度(7日)の関係

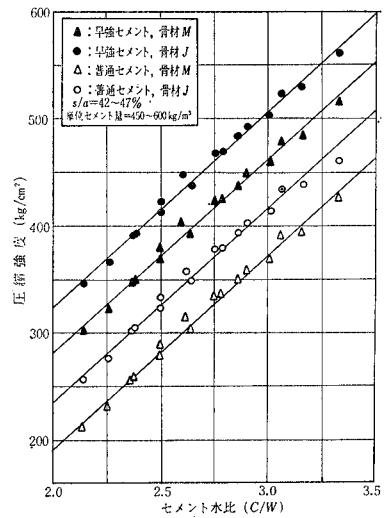


表-13 圧縮強度推定式

材令(日)	セメントの種類	骨材の種類	強度推定式 (kg/cm²)
3	早強	—	$\sigma_3 = 161 c/\omega - 146$
3	普通	—	$\sigma_3 = 161 c/\omega - 249$
7	早強	J	$\sigma_7 = 182 c/\omega - 39$
7	早強	M	$\sigma_7 = 182 c/\omega - 84$
7	普通	J	$\sigma_7 = 182 c/\omega - 129$
7	普通	M	$\sigma_7 = 182 c/\omega - 174$
28	早強	J	$\sigma_{28} = 134 c/\omega + 177$
28	早強	M	$\sigma_{28} = 134 c/\omega + 148$
28	普通	J	$\sigma_{28} = 134 c/\omega + 100$
28	普通	M	$\sigma_{28} = 134 c/\omega + 70$

各材令での圧縮強度推定式を示す。各式のこう配を比較するとつぎのようになる。

材令 3 日で 161
 材令 7 日で 182
 材令 28 日で 134

とくに、このよう配は材令 28 日では若材令時より小さくなっているが、これは前述のように軽量コンクリートの強度が軽量骨材の種類の影響を受けるためと思われる。

(圧縮強度と材令)

図-16 は材令を対数目盛とし圧縮強度を普通目盛としたものである。一般に骨材が天然骨材の場合、両者は直線関係を示すが⁴⁾、前述したように人工軽量骨材コンクリートでは長期材令の圧縮強度が軽量骨材の影響を受け直線関係にはならなかった。

図-16 材令と圧縮強度の関係

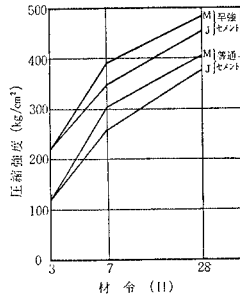


図-17 30日圧縮強度と28日圧縮強度の関係

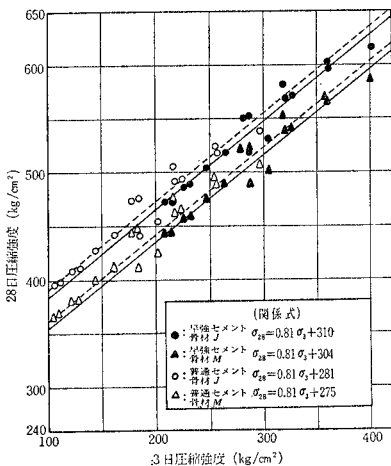
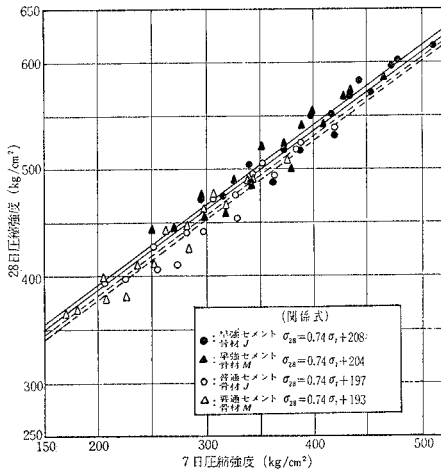


図-18 7日圧縮強度と28日圧縮強度の関係



材令間の圧縮強度の関係を 図-17 と 図-18 から求めると 図中に示す関係式が得られる。さらに 28 日圧縮強度を 100 とした場合の 3 日圧縮強度と 7 日圧縮強度を求めると、つぎようになる。

$$\sigma_{28}=600 \text{ kg/cm}^2 \text{ のとき } \sigma_{28} : \sigma_7 : \sigma_3 = 100 : 90 : 80$$

$$\sigma_{28}=500 \text{ kg/cm}^2 \text{ のとき } \sigma_{28} : \sigma_7 : \sigma_3 = 100 : 80 : 50$$

$$\sigma_{28}=400 \text{ kg/cm}^2 \text{ のとき } \sigma_{28} : \sigma_7 : \sigma_3 = 100 : 62.5 : 32.5$$

すなわち、28 日圧縮強度が大きいほど初期の圧縮強度増加の割合は大きい、以後圧縮強度の伸びは減少した。逆に、28 日圧縮強度が小さいと、初期における急激な圧縮強度増加は認められなかったが、長期強度の伸びが著しかった。

(圧縮強度とスランプ)

P C 設計施工指針で要求している 28 日圧縮強度はプレテンション方式とポストテンション方式とで、それぞれ 350 kg/cm², 300 kg/cm² 以上となっている。また、人工軽量骨材コンクリート設計施工指針では最大スランプを 12 cm としている。図-21 を見ると、スランプ 12 cm 以下で早強ポルトランドセメントを使用した軽量コンクリートの 28 日圧縮強度は 500~600 kg/cm²、また普通ポルトランドセメントの場合、450~550 kg/cm² となり、ワカブルな範囲で容易に高強度軽量コンクリートを得ることができる。

工期の短縮をはかるため、普通早強ポルトランドセメントを用いた場合材令 3~5 日くらいで、また、普通ポルトランドセメントを用いた場合 10~14 日くらいまでにプレストレスの導入がなされているようであるが、

図-19 3日圧縮強度とスランプの関係

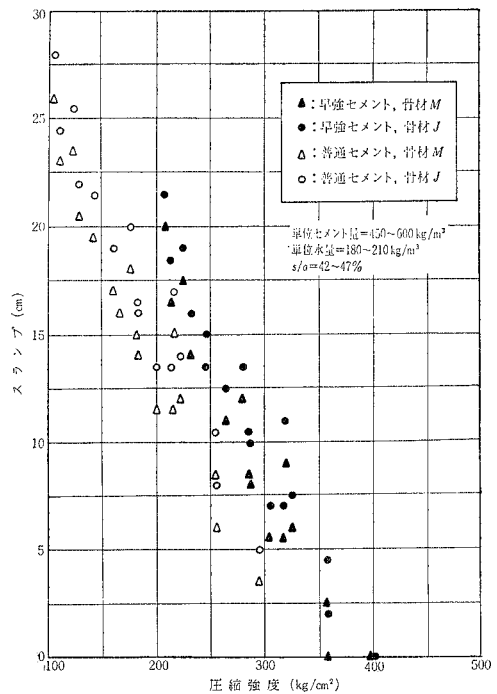


図-20 7日圧縮強度とスランプの関係

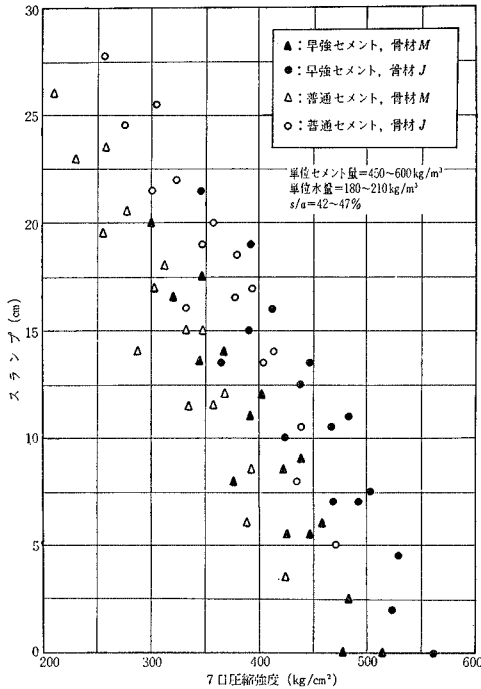


図-21 28日圧縮強度とスランプの関係

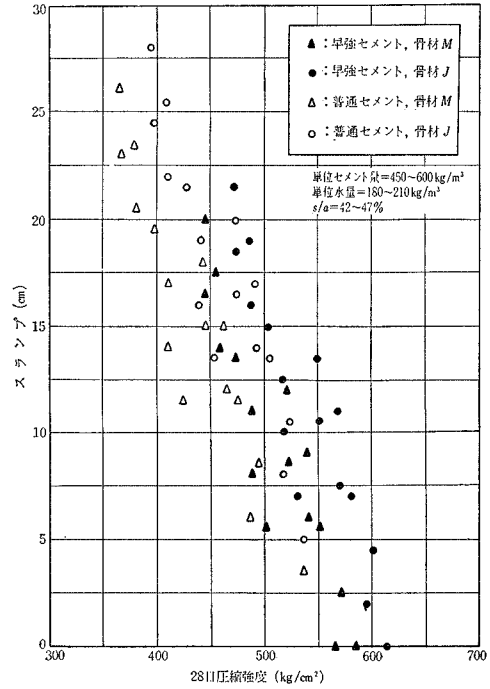


図-19と図-20に示すように骨材Jを用いればそれらの材令で所要の圧縮強度をもつコンクリートを得ることが可能である。

4. 弾性係数と乾燥収縮に関する実験

(1) 使用材料

セメント、水、混和剤は前章の実験3と同じである。骨材はつぎの2種類の骨材の組み合わせを使用した。

- i. 人工軽量粗骨材 M_c+川砂
- ii. 川砂利+川砂

なお、骨材の物理的試験結果は表-2と図-1に示した。

(2) 実験条件

表-14に示す要因と水準で実験を行なった。

表-14 実験に採用した要因

要因	水準	
	1	2
A セメントの種類	A ₁ 早強	A ₂ 普通
B 骨材の種類	B ₁ 川砂利	B ₂ M
C 水セメント比 (%)	C ₁ 33	C ₂ 43
D 単位セメント量 (kg/m ³)	D ₁ 500	D ₂ 600
A×B	セメントの種類と骨材の種類の交互作用	
A×C	セメントの種類と水セメント比の交互作用	
A×D	セメントの種類と単位セメント量の交互作用	
B×C	骨材の種類と水セメント比の交互作用	
B×D	骨材の種類と単位セメント量の交互作用	
C×D	水セメント比と単位セメント量の交互作用	

(3) 実験方法

供試体の作製方法は実験3と同じである。

a) 弾性係数の測定

ひずみはペーパー ストレイン ゲージを用いて測定した。なお、測定にさいして、破壊荷重の約1/2を3回供試体に加えその後測定を行なった。なお、圧縮強度の1/3における secant modulus を弾性係数とした。

b) 乾燥収縮

精度1/1000mmのホイットモア・ストレイン ゲージで測定した。供試体は打込み直後から恒温室(20±1°C, RH=65%)に入れ、翌日約20cmの基点を設けた。な

表-15 実験条件と測定値

バッチ番号	実験条件		測定値				
	セメントの種類	骨材の種類	水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	弾性係数 (10 ⁶ kg/cm ²)	乾燥収縮 (10 ⁻⁵) 30日	乾燥収縮 (10 ⁻⁵) 1年
1	早強	天然	33	500	3.37	38	222
2	早強	天然	43	600	3.31	45	235
3	早強	天然	33	500	3.04	44	244
4	早強	天然	43	600	2.72	50	247
5	早強	M	33	500	1.85	15	219
6	早強	M	43	600	1.94	14	211
7	早強	M	33	500	1.66	25	234
8	早強	M	43	600	1.69	31	238
9	普通	天然	33	500	3.37	37	236
10	普通	天然	43	600	3.63	43	240
11	普通	天然	33	500	3.29	43	246
12	普通	天然	43	600	3.11	48	246
13	普通	M	33	500	1.91	11	210
14	普通	M	43	600	1.83	11	213
15	普通	M	33	500	1.65	5	247
16	普通	M	43	600	1.77	16	221

お、供試体の寸法は 480×160×75 mm である。

(4) 実験結果と考察

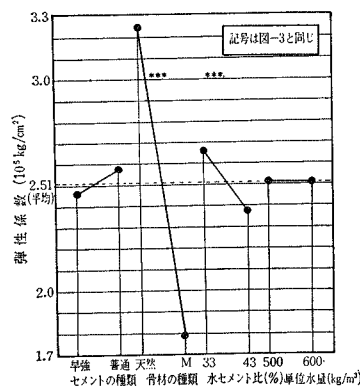
実験によって得た各特性値を表-15 に示した。

[1] 弾性係数

軽量コンクリートの弾性係数は使用する軽量骨材の種類、配合、コンクリートの乾燥程度などに左右され、とくにコンクリートの圧縮強度、単位容積重量とかなり密接な関係にあるとされている。

表-16 の分散分析表によると、骨材の種類による弾性係数の変動は非常に大きく、普通コンクリートと軽量コンクリートとの間に弾性係数の差があることを示している。図-22 の骨材の種類の要因効果図に示すように、

図-22 弾性係数に関する要因効果図



弾性係数は普通コンクリートで $3.25 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、軽量コンクリートで $1.8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ となり、軽量コンクリートの弾性係数は普通コンクリートの弾性係数の 50~55% の値を示した。このように軽量コンクリートを富配合にして

も、弾性係数の増加を期待することはできなかった。

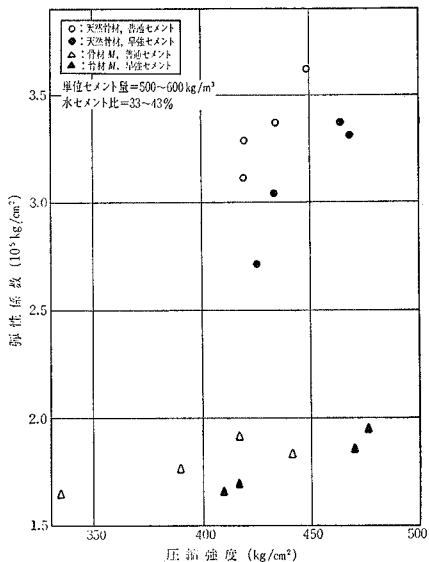
単位セメント量による弾性係数の変動は表-16 に示すようにほぼ 0 で、単位セメント量 500 kg/m^3 以上で、単位セメント量を 100 kg/m^3 増加してもなら弾性係数は変化しなかった。一方水セメント比による弾性係数の変動を見ると、分散比も大きく、図-22 に示すように水セメント比を 10% 変えると $0.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ほど変化し、水セメント比すなわち単位水量の変化が弾性係数の重要な要因になっていることを示している。

セメントの種類による弾性係数の変動は普通コンクリートでは、早強ポルトランドセメントを使用した場合と普通ポルトランドセメントを使用した場合とで、か

表-16 弾性係数に関する分散分析表

要因	材令 28 日			
	自由度	変動	不偏分散	分散比
A (セメントの種類)	1	0.060	0.060	3.86
B (骨材の種類)	1	8.323	8.323	535.43***
C (水セメント比)	1	0.325	0.325	20.90***
D (単位セメント量)	1	0.001	0.001	0.08
A×B	1	0.055	0.055	3.56
A×C	1	0.012	0.012	0.76
A×D	1	0.009	0.009	0.58
B×C	1	0.046	0.046	2.32
B×D	1	0.013	0.013	0.83
C×D	1	0.020	0.020	1.27
e (誤差)	5	0.078	0.016	

図-23 弾性係数と圧縮強度の関係



なり差が生ずるが、軽量コンクリートの場合にはほとんど差が生じないようである。

図-23 は圧縮強度と弾性係数の関係を図示したもので、これによれば、普通コンクリートの弾性係数が圧縮強度とともに変化する傾向をよく示しているが、軽量コンクリートの弾性係数は圧縮強度との関係をはっきり示していない。すなわち、軽量コンクリートの弾性係数は軽量骨材の影響を受けるため、圧縮強度が 400 kg/cm^2 以上になると、弾性係数の増加は頭打ちになるようである。

[2] 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮はコンクリートのクリープとともに重要な要因である。一般に 20×10^{-5} を軽量コンクリートの乾燥収縮とし、設計計算に使用しているが、軽量コンクリートを富配合とした場合、その値は異なってくるようである。これによると、乾燥収縮は材令初期において多くの要因の影響を受けるが、材令がすすむにつれて次第に影響を受けることが少なくなってゆくようである。

骨材の種類による乾燥収縮の変動は他の要因の変動に比較して非常に大きく、とくに材令 30 日において大きい。図-24 の骨材の種類の要因効果図に示すように、各材令での乾燥収縮はつぎのようになった。

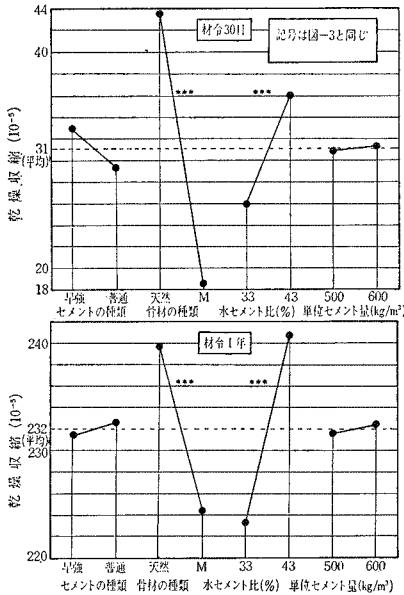
普通コンクリートでは
 43.5×10^{-5} (材令 30 日), 239.5×10^{-5} (材令 1 年)
 軽量コンクリートでは
 18.5×10^{-5} (材令 30 日), 224.0×10^{-5} (材令 1 年)

上記のように、両コンクリートの乾燥収縮はわずかに接近するようであるが、1年間の測定期間では普通コンクリートの方が軽量コンクリートより 15×10^{-5} 程度大きい乾燥収縮を示した。

表-17 乾燥収縮に関する分散分析表

要 因	材 令 30 日				材 令 1 年			
	自由度	変 動	不偏分散	分 散 比	自由度	変 動	不偏分散	分 散 比
A (セメントの種類)	1	0.45	0.45	3.46	1	0.05	0.05	0.08
B (骨材の種類)	1	24.74	24.74	180.00***	1	9.45	9.45	15.75***
C (水セメント比)	1	4.10	4.10	31.60	1	11.74	11.74	19.60***
D (単位セメント量)	1	0.03	0.03	0.54	1	0.30	0.30	0.50
A×B	1	0.16	0.16	1.23	1	0.61	0.61	1.02
A×C	1	0.02	0.02	0.15	1	0.14	0.14	0.23
A×D	1	0.53	0.53	4.07*	1	0.33	0.33	0.55
B×C	1	0.87	0.87	6.68*	1	0.86	0.86	1.43
B×D	1	1.06	1.06	8.16*	1	1.12	1.12	1.87
C×D	1	0.02	0.02	0.15*	1	0.33	0.33	0.55
e (誤差)	5	0.73	0.13		5	2.98	0.60	

図-24 乾燥収縮に関する要因効果図



単位セメント量による乾燥収縮の変動は、弾性係数の場合と同じく小さい。すなわち、富配合コンクリートで単位セメント量を 100 kg/m³ 程度変えてもあまり乾燥収縮は変化しないようである。しかし、水セメント比による乾燥収縮の変動は両材令で大きく、水セメント比が長期にわたって乾燥収縮に影響を与えていることがわかる。

セメントの種類による乾燥収縮の変動は材令初期において相当認められるが、材令が経過するとそれが認められなくなってくる。

以上の要因のほか、乾燥収縮を左右する要因として交互作用が材令 30 日で認められるが、材令経過とともにそれらによる影響は減少し、最終乾燥収縮の要因にはならないように思われる。

本実験で得た表-15の測定値は従来の研究報告の値に比較して非常に大きく、測定値の平均は材令 30 日で 31×10⁻⁵、材令 1 年で 232×10⁻⁵ となった。しかも、材令が 1 年経過しても、わずかではあるが、乾燥収縮は進

行している。このように、測定値が大きくなったのは供試体の寸法、基線長、養生条件などに起因すると考えられ、今後検討を試みたいと考えている。いずれにしても、富配合コンクリートの乾燥収縮は普通程度の配合の場合より大きく、構造物の設計にさいして十分考慮する必要がある。

5. あとがき

本論文の実験的研究結果から、普通配合の人工軽量骨材コンクリートに対する富配合の場合の特異性について総括を行なうとつぎのようになる。

(フレッシュ・コンクリート)

(1) 富配合の場合、スランプは使用するセメントの種類によって変化する。普通ポルトランドセメントを使用した富配合軽量コンクリートは早強ポルトランドセメントを使用した富配合軽量コンクリートのスランプより 4~5 cm 大きくなり、同一のスランプにするには単位水量を 15 kg/m³ 程度変えればよい。

(2) 非造粒型軽量骨材を使用した富配合軽量コンクリートのスランプは、造粒型軽量粗骨材と川砂を使用した富配合軽量コンクリートのスランプより 2~4 cm 小さく、同一のスランプにするには単位水量を 4~5 kg/m³ 増加しなければならない。

(3) 富配合軽量コンクリートのスランプは、15 cm 程度であってもワーカブルなコンクリートになる。

(4) 単位水量を 1~2% 変化させれば、スランプ 1 cm の調整が可能である。

(5) 富配合軽量コンクリートでは s/a を 37% から 47% の範囲で変えても、スランプはあまり変化しない。したがって、s/a を 37% より大きくする必要はない。

(6) 富配合軽量コンクリートに所要の空気を普通配合の場合のメーカー指定の使用量で連行することは困難であるがつぎの場合比較的空気は連行されやすい。

- a) 単位セメント量が少なき
- b) 単位水量が 190~200 kg/m³ の範囲のとき
- c) s/a が大きいとき
- d) 骨材の種類は細骨材として川砂を含むものを用

いるとき

(単位容積重量)

(7) 一般に富配合軽量コンクリートの単位容積重量は普通配合の場合より若干重くなり、上記の単位容積重量より $0.1 \sim 0.2 \text{ t/m}^3$ 増加する。

(8) 単位容積重量の大きい富配合軽量コンクリートほど圧縮強度は大きい。

(圧縮強度)

(9) 早強ポルトランドセメントを使用した富配合軽量コンクリートと普通ポルトランドセメントを使用した富配合軽量コンクリートとの圧縮強度差は材令3日で 100 kg/cm^2 、材令7日で 80 kg/cm^2 、材令28日で 80 kg/cm^2 で、材令経過とともに減少する。

(10) 早強ポルトランドセメントを使用すれば、普通ポルトランドセメントを使用した富配合軽量コンクリートの28日圧縮強度を材令7日で十分得ることができる。

(11) 造粒型軽量骨材を使用した富配合軽量コンクリートの圧縮強度は、非造粒型軽量骨材を使用した富配合軽量コンクリートの圧縮強度より 30 kg/cm^2 程度大きい。

(12) 富配合軽量コンクリートの28日圧縮強度は軽量骨材の影響を受け、単位セメント量に対する圧縮強度増進の割合は減少する。

(13) s/a を $37 \sim 47\%$ の範囲で変えても、富配合では軽量コンクリートの圧縮強度は影響を受けない。

(14) 富配合の場合軽量コンクリートの圧縮強度は単位水量の影響を材令初期において大きく受け、材令経過とともに減少する。

(15) 圧縮強度は単位水量が 200 kg/m^3 以上になるとあまり変化しない。また、その場合スランプは大きくなるが、非常に作業しにくいコンクリートとなる。したがって、単位水量を 200 kg/m^3 以上にすることは望ましくない。

(16) 富配合コンクリートではセメント量の増加とともに圧縮強度は強くなる。本研究の範囲では28日圧縮強度は単位セメント量 10 kg/m^3 の増加で約 65 kg/cm^2 増加した。

単位セメント量が 550 kg/m^3 以上になると、28日圧縮強度の増加割合はさらに減少する。そして単位セメント量を増加すれば 600 kg/cm^2 以上の圧縮強度をもつコンクリートを得ることができる。

(17) セメントを 600 kg/m^3 使用すれば、セメントの種類によりつぎの圧縮強度をもつコンクリートを得ることができる。

早強ポルトランドセメントを使用した場合

材令3日で $320 \sim 400 \text{ kg/cm}^2$

材令7日で $440 \sim 560 \text{ kg/cm}^2$

材令28日で $540 \sim 60 \text{ kg/cm}^2$

普通ポルトランドセメントを使用した場合

材令3日で $220 \sim 300 \text{ kg/cm}^2$

材令7日で $350 \sim 440 \text{ kg/cm}^2$

材令28日で $460 \sim 540 \text{ kg/cm}^2$

以上のように、プレストレス導入可能な富配合軽量コンクリートをワーカブルな範囲で得ることができる。

(18) セメント水比と各材令の圧縮強度の関係は直線関係でリースの説を適用できる。

(19) 富配合人工軽量コンクリートでは圧縮強度が大きい配合ほど初期の圧縮強度増加の割合が大きい。

(弾性係数と乾燥収縮)

(20) 富配合軽量コンクリートの弾性係数は富配合普通コンクリートの弾性係数の $50 \sim 55\%$ の値を示す。このように軽量コンクリートを富配合にしても弾性係数の増加を期待することはできない。

(21) 富配合軽量コンクリートの弾性係数は単位セメント量を変えても変化しないが、単位水量を変えると変化する。

(22) 富配合軽量コンクリートの弾性係数と圧縮強度との相関性は、富配合普通コンクリートの場合より小さい。

(23) 富配合軽量コンクリートの圧縮強度が 400 kg/cm^2 以上になると弾性係数の増加は頭打ちになるようである。

(24) 富配合では普通コンクリートの乾燥収縮は軽量コンクリートの乾燥収縮より大きい。

(25) 富配合軽量コンクリートの乾燥収縮は単位セメント量を変えてもほとんど変化しないが、単位水量を増加すれば、増加する。

(26) 富配合コンクリートの乾燥収縮は大きいので設計にさいして十分注意する必要がある。

(実験計画法)

上記の総括はすべて実験計画法にしたがって行なったところの分散分析結果と推定値にもとづいたものである。この方法を適用するにあたって生じた問題点はつぎの諸点である。

(1) 3章の実験ではスランプ、空気量、単位容積重量、圧縮強度を特性値として実験を行なった。各特性値の主な要因は特性値ごとに若干異なるので、すべての特性値の要因分析を同時に可能にする直交配列表へのわりつけを行なうことは困難であった。たとえば、スランプに影響を与える交互作用と、圧縮強度に影響を与える交互作用とは異なっており、本実験では単位水量と単位セメント量の交互作用は分析できなかった。このような場合、交互作用のわりつけ可能な実験を別途に行なうべきであった。

(2) 多くの交互作用は実験前に変動の程度がわから

ないので、予備実験で有意差の有無を確かめて回数が少ない実験にせねばならない。変動のわずかな交互作用を直交配列表にわりつけても、それを検定できるほどの精度をもつ実験を行なわなければ交互作用をわりつけた意味がなくなる。

このように変動の少ない交互作用は直交配列表にわりつけずに、もっと実験回数の少ない実験を行なった方が有利である。また、特性値の変動に大きな影響を与える交互作用を見落とすと工程平均による推定値に大きな誤差が生じ、特性値の傾向を見誤るおそれがある。したがって、交互作用のわりつけにさいしては、交互作用の変動の程度を十分考慮して要因として採用するかしないかを決めねばならない。たとえば、交互作用 $E \times C$ は3章の実験で、すべての特性値に対して1以下であった。はじめに $E \times C$ の変動の小さいことがわかっていたら、当然わりつけから除かれ、より実験回数の少ない実験がなされるべきであった。

(3) 空気量の分散分析で、誤差による特性値の変動が大きくなった。これは特性値の変動区間が狭いことと測定精度が悪いためである。このように特性値の変動区間が狭い場合、より精度の高い実験を行なわなければ工程平均により推定した推定値は誤差の大きいものになるであろう。

(4) 本実験では要因効果の有意差検定を信頼度 99%、95% のほか 90% でも行なった。従来、検定は信頼度 99% か 95% で行なわれているようであるが、コンクリート実験のように特性値のある程度のばらつきが予想される場合、信頼度 90% で有意差検定を行なうことは実状に即していると考えられる。

(5) 3章の実験の分散分析は、48回の実験より求めた特性値で行なった。これを多元配置法で行なうと実験回数は192回となる。この2つの方法による分散分析の精度はあまり差がないとされている。また、多元配置法で実際に実験を行なっても、実験の長期化に伴う制御できない因子の変動による特性値の変動で信頼における特性値を得ることが困難である。このように、直交配列表による実験計画法で実験を行なえば実験回数は非常に減少する。また、分散分析結果にしたがうと客観的に考察ができるであろう。

なお、本研究は昭和41年度、文部省科学研究(各個研究)の一部として行なった。

また、本論文作成にあたり実験その他で協力を得た、当時学生の市川政保君(現在五洋建設)、花畑英昭君(現在森本組)、梁川龍雄君(現在自営)に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 田口玄一: 実験計画法, 上, 丸善(昭和40年)
- 2) 磯部邦夫: 実験計画法入門, 日刊工業新聞(昭和40年)
- 3) 中野 一: 実験計画法入門, 実業図書(昭和40年)
- 4) 近藤泰夫・坂 静雄編: コンクリート工学ハンドブック(7章, 8章, 9章, 13章), 朝倉書店(昭和40年)
- 5) セメント協会編: 第24回コンクリート講習会テキスト(昭和41年)
- 6) 日本材料学会編: 人工軽量骨材コンクリート(昭和40年)
- 7) 村田二郎: 人工軽量骨材コンクリート, セメント協会(昭和42年)
- 8) 宮崎昭二・菅原 操・村田二郎: 高強度 軽量骨材 コンクリート, 山海堂(昭和41年)

(1968. 2. 5・受付)