

## PCCV のコンクリート材料試験

岡 田 克 也\*  
 神 山 行 男\*\*  
 岩 沢 二 郎\*\*\*

### 1. はじめに

原電敦賀2号機の PCCV に用いられるコンクリートは、設計基準強度が  $420 \text{ kg/cm}^2$  と高強度であるが、施工時のコンクリート硬化時の水和熱に起因するひびわれを防止する目的で、フライアッシュを混入した中庸熱セメントを使用した。このような高強度コンクリートにこの種のセメントを使用した例は少なく、これらの諸性質に関するデータはきわめて少ない状況にあった。

そのため、まず、フライアッシュを混入した中庸熱セメントを用いた高強度コンクリートについて、種々の調合について実験し、設計基準強度  $420 \text{ kg/cm}^2$  を満足する基本調合を決定した。次に、この基本調合について、PCCV の設計上必要とされるクリープ特性および熱特性に関する試験を行った。

ここでは、コンクリートに関するこれらの諸試験の結果について述べる。

### 2. 使用材料およびコンクリートの調合に関する試験

#### 2.1 実験概要

PCCV のコンクリートに用いる使用材料およびコンクリートの調合の選定に関する基礎資料を得る目的で、敦賀地方で入手可能なコンクリート材料を組み合わせ、まだ固まらないコンクリートおよび硬化コンクリートの試験を実施した。

#### 2.2 実験方法

##### (1) 実験の要因および組合せ

本実験では、PCCV に用いられるコンクリートの強度レベルが高いこと、対象とする部材が JASS 5 のマスコンクリートの規定に該当する厚肉部材であること、施工地域が敦賀地方であること等を考慮して、表—1 に示す要因と水準を取り上げ、これを組み合わせて表—2 に示す 35 種類のコンクリートについて実験を行った。

表—1 実験の要因および水準

要 因	水 準			
	1	2	3	4
セメントの種類	普 通	中 庸 熱	—	—
粗骨材の種類	川 砂 利	山 砕 石	—	—
細骨材の種類	川 砂 (1)	川 砂 (2)	川砂 (2) +砕砂	—
骨材最大寸法 (mm)	25	40	—	—
混和剤の種類	AE 減水剤	高 性 能 減 水 剤	—	—
フライアッシュ 混入率 (%)	0	15	20	25
水セメント比 (%)	35	40	45	50

##### (2) 使用材料

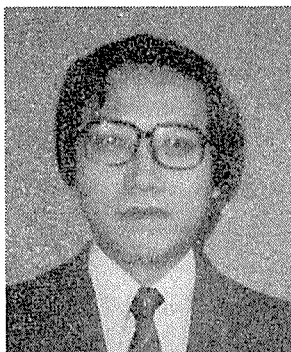
本実験では、セメントは敦賀セメント社製の普通ポルトランドセメント (比重: 3.16) および中庸熱ポルトランドセメント (比重: 3.21) を、フライアッシュは関西電力高砂火力発電所産フライアッシュ (比重: 2.24, 比表面積  $3430 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) を使用した。

粗骨材としては大井川産砂利および葉原産山砕石の 2 種類を、細骨材としては大井川産川砂、安曇川産川砂並びに安曇川産川砂とマキノ産砕砂を 6:4 の割合で混合した混合砂の 3 種類を使用した。各骨材の物理的性質を表—3 に示す。

また、AE 減水剤および高性能減水剤には日曹マスタービルダーズ社製のポゾリス No. 8, NL-4000 をそれぞれ使用した。

##### (3) 試験項目および方法

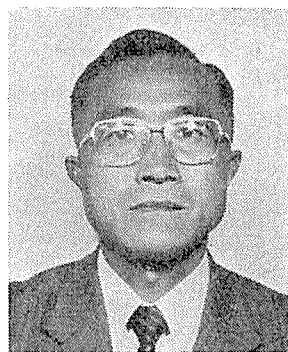
コンクリートの練りまぜは、1 バッチの量を  $45 \text{ l}$  とし、強



\* Katsuya OKADA  
 ㈱竹中工務店技術  
 研究所



\*\* Yukio KAMIYAMA  
 ㈱竹中工務店技術  
 研究所



\*\*\* Jiro IWASAWA  
 ㈱竹中工務店原子力本  
 部

表—2 まだ固まらないコンクリートの試験結果

No.	セメントの種類	骨材の種類		骨材最大寸法 (mm)	フライアッシュ混入率 (%)	混和材の種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)			
		粗骨材	細骨材						セメント	フライアッシュ	水	細骨材	粗骨材	混 和 剤						
														ポゾリス No. 8				NL-400 AE 剤 (cc/m <sup>3</sup> )		
1	普通	川砂利	川砂	25	—	ポゾリス No. 8	35	34	466	—	163	614	1205	1.165	—	16.3	8.5	4.5	20.5	
2							40	36	380		152	686	1234	0.950		9.5	10.5	4.7	20.0	
3							45	37	333		150	722	1243	0.833		6.6	9.5	4.9	21.0	
4	普通	山砕石	砕砂 + 川砂*	25	—	ポゾリス No. 8	35	39	523	—	183	661	1001	1.318	—	26.2	9.0	4.4	21.0	
5							40	40	443		177	710	1031	1.118		17.7	11.0	4.0	20.0	
6							45	41	369		166	770	1075	0.923		14.4	9.5	3.5	20.5	
7	中庸熱	川砂利	川砂	25	—	ポゾリス No. 8	35	35	437	—	153	651	1224	1.093	—	21.9	12.0	5.0	19.5	
8							40	36	368		147	696	1252	0.920		12.9	10.5	4.6	17.0	
9							45	37	327		147	725	1254	0.818		11.4	9.5	4.5	19.0	
10	中庸熱	山砕石	川砂*	25	—	ポゾリス No. 8	35	36	526	—	184	610	1051	1.315	—	26.3	9.0	4.0	20.5	
11							40	37	440		176	661	1093	1.100		22.0	10.0	4.3	21.0	
12							45	38	391		176	694	1101	0.978		19.6	11.0	4.7	20.0	
13	中庸熱	山砕石	砕砂 + 川砂*	25	—	ポゾリス No. 8	35	38	515	—	180	650	1033	1.283	—	30.9	9.0	4.4	20.0	
14							40	39	430		172	705	1070	1.075		25.8	10.0	4.8	20.0	
15							45	40	382		172	740	1075	0.995		19.1	10.0	4.3	18.5	
16	普通	川砂利	川砂	25	—	NL-4000	45	38	311	—	140	738	1271	—	9.33	24.9	9.0	4.5	20.0	
17	中庸熱						37	304	137		744	1282	—	9.12	27.4	9.5	4.1	18.5		
18	普通						40	39.5	380		152	751	1115	—	11.40	38.0	10.0	3.7	19.0	
19	普通	山砕石	砕砂 + 川砂*	25	—	NL-4000	45	40.5	338	—	152	784	1117	—	10.14	33.8	10.0	3.4	19.0	
20							50	41.5	304		152	816	1114	—	9.12	30.4	10.0	4.8	18.5	
21							40	39.5	403		161	735	1091	—	14.79	59.2	9.5	5.2	20.5	
22	中庸熱	山砕石	砕砂 + 川砂*	25	—	NL-4000	45	40.5	345	—	155	781	1121	—	10.35	38.0	9.0	3.5	20.5	
23							50	41.5	316		158	805	1104	—	9.48	28.4	9.0	3.5	20.0	
24							普通	36	319		56	150	682	1226	0.938	—	37.5	11.0	4.8	20.0
25	普通	川砂利	川砂	25	—	ポゾリス No. 8	40	36	294	—	74	147	685	1232	0.320	—	25.8	10.3	4.0	20.0
26							36	276	92		147	683	1227	0.920	—	44.2	9.0	3.8	20.0	
27							36	318	57		150	684	1229	0.938	—	45.0	10.7	4.9	17.0	
28	中庸熱	川砂利	川砂	25	—	ポゾリス No. 8	40	36	294	—	74	147	686	1234	0.920	—	47.6	11.5	4.7	20.0
29							36	272	91		145	687	1236	0.908	—	50.8	9.7	4.0	20.0	
30							山砕石	砕砂 + 川砂*	15		40	370	65	174	741	1083	1.088	—	69.6	12.0
31	中庸熱	山砕石	砕砂 + 川砂*	40	—	ポゾリス No. 8	35	35.5	495	—	173	620	1096	1.238	—	29.7	9.5	4.7	19.5	
32							40	36.5	413		165	672	1133	1.033		—	22.7	10.5	4.5	20.0
33							45	37.5	367		165	705	1141	0.918		—	19.3	10.5	3.9	19.5
34							50	38.5	326		163	740	1146	0.815		—	17.1	11.5	3.5	19.5
35							55	39.5	291		160	773	1149	0.728		—	17.5	11.5	4.0	19.0

(備考) 川砂\*: 滋賀県安曇川産

表—3 骨材の物理的性質

種別	種類	岩石の種類	比重	吸水率 (%)	単重 (kg/cm <sup>3</sup> )	粗粒率
細骨材	静岡県大井川産川砂	粘板岩	2.62	0.92	1776	2.70
	滋賀県安曇川産川砂	粘板岩, 珪岩, チャート	2.58	2.21	1735	2.61
	滋賀県マキノ産砕砂	粘板岩	2.92	1.55	1763	3.16
	安曇川産川砂 6+マキノ産砕砂 4 混合砂	—	2.72	1.95	1752	2.83
粗骨材	静岡県大井川産砂利	硬質頁岩, 砂岩, 珪岩	2.65	0.78	1768	7.03
	福井県葉原産山砕石	砂岩	2.65	1.01	1589	7.00
			2.64	1.08	1593	7.35

制練りミキサ (容量 55 l) を用いて全材料投入後 2 分間練り混ぜた。

練り上がったコンクリートは、直ちにスランプおよび空気量を測定した後、φ15×30 cm 圧縮試験用供試体を 1 調合当り 6 本ないし 9 本成形した。

供試体は 20°C の水中で養生し、材令 7 日、28 日および 91 日において圧縮強度試験に供した。

### 3.3 実験結果および考察

#### (1) まだ固まらないコンクリートの試験結果

まだ固まらないコンクリートの試験結果は表—2 に示すようになって、得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- ① 中庸熱セメントを用いたコンクリートは、普通セメントを用いたコンクリートに比べて、同一スランプを得るための単位水量は若干減少した。
- ② 単位セメント量の 15~25% をフライアッシュに置き換えることにより、同一スランプを得るための単位水量は、普通セメントを用いた場合には置換え率が大きいほど減少したが、中庸熱セメントを用いた場合にはその傾向は認められなかった。
- ③ 使用材料の種類によりコンクリートの性状は著しく相違し、普通セメント、中庸熱セメントいずれを用いた場合にも、山砕石を用い

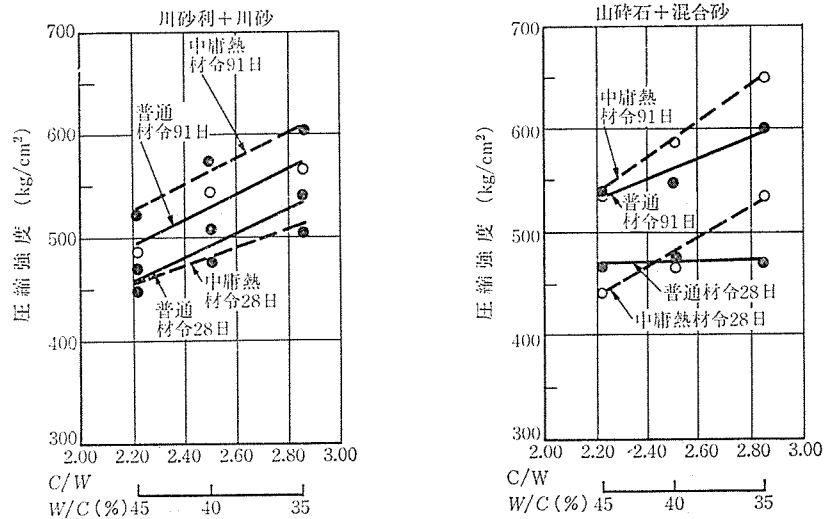
たコンクリートの単位水量は川砂利を用いた場合に比べて約 25 kg/m<sup>3</sup> 増加した。

- ④ 骨材最大寸法 25 mm と 40 mm の山砕石コンクリートを比較すると、一般に認められているように最大寸法 40 mm のコンクリートの方が単位水量は約 8 kg/m<sup>3</sup> 減少した。
- ⑤ 高性能減水剤を用いたコンクリートは、AE 減水剤を用いたコンクリートに比べて著しく単位水量を低減でき、川砂利を用いた場合で 10~12 kg/m<sup>3</sup>、山砕石を用いた場合で 11~25 kg/m<sup>3</sup> 減少した。

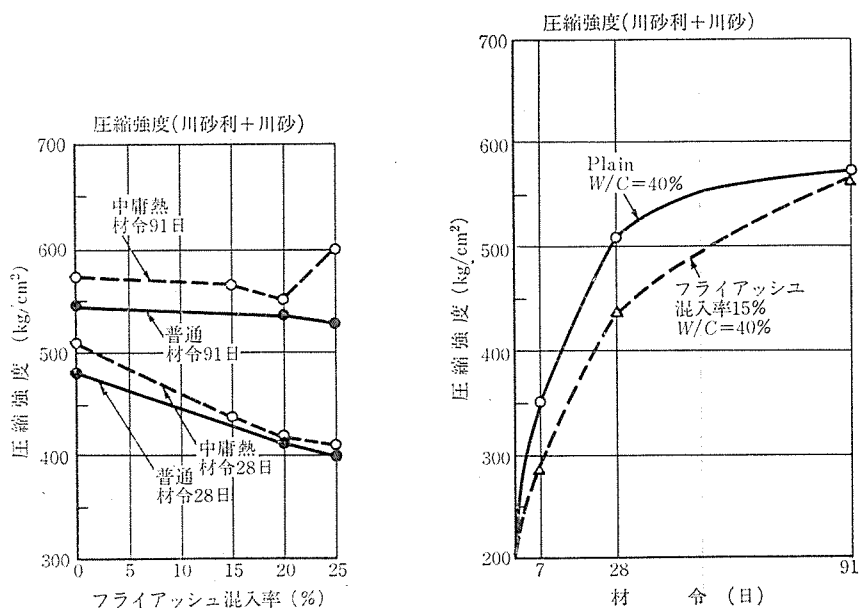
#### (2) 硬化コンクリートの試験結果

各種硬化コンクリートの圧縮強度試験結果から得られる結論を要約すると以下のとおりである。

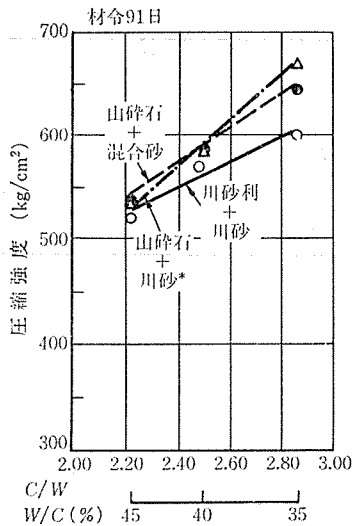
- ① 図—1 に示すように、同一水セメント比における



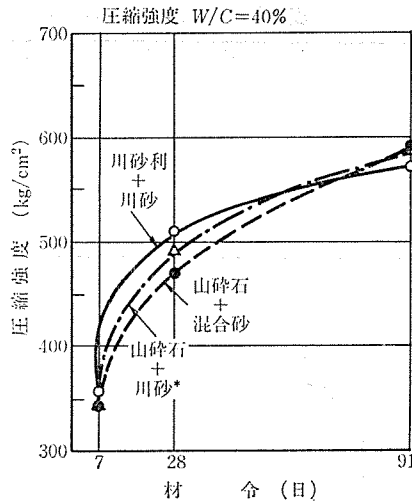
図—1 セメントの種類がコンクリート強度に及ぼす影響



図—2 フライアッシュの混入がコンクリート強度に及ぼす影響



図—3 骨材の種類がコンクリート強度に及ぼす影響



② 図—2 に示すように、単位セメント量の 15~25% をフライアッシュに置き換

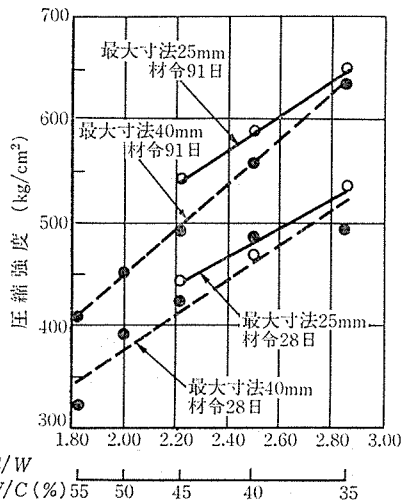
えても、材令 91 日における圧縮強度はいずれの置換え率においても同等の値を示し、ワーカビリティの改善ならびにセメントの水和熱の低減効果を考慮すると単位セメント量の 20% 程度をフライアッシュで置き換える方が得策と考えられる。

③ 3 種類の細粗骨材を組み合わせたコンクリートの圧縮強度試験結果は図—3 に示すように、いずれの骨材を組み合わせたコンクリート強度にも大きな差異は認められず、骨材の選定に当たっては、強度発現の問題は特に考慮する必要がないことが明らかとなった。

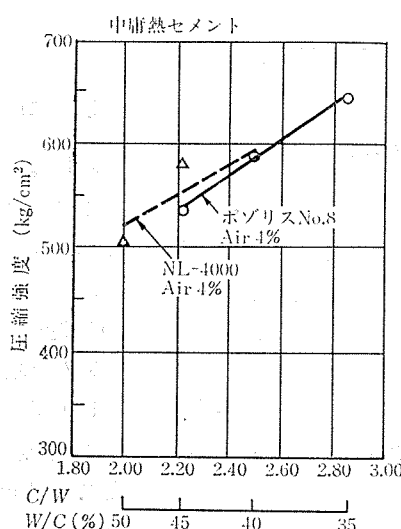
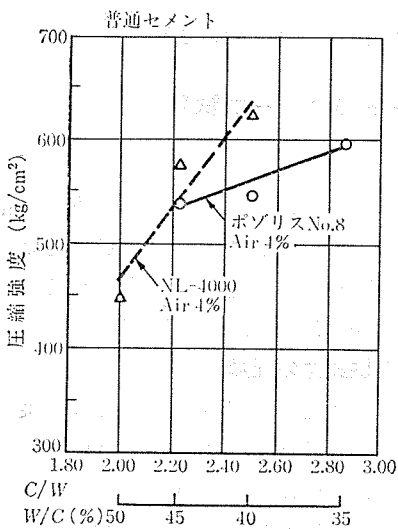
④ 骨材の最大寸法 25 mm と 40 mm のコンクリートを比較してみると、図—4 に示すように、最大寸法 40 mm のコンクリートは単位水量を減ずることができたが圧縮強度は逆に低下した。したがって、

最大寸法 40 mm のコンクリートをすべてにわたって採用するよりも、部位や配筋によって使い分ける方が得策と考えられる。

⑤ AE 減水剤と高性能減水剤を用いたコンクリートの試験結果を図—5 に示す。図—5 において、高性能減水剤の使用効果は若干認められるが、AE 減水剤を用いたコンクリートとの圧縮強度の差は小さく、設計基準強度 420 kg/cm<sup>2</sup> 強度のコンクリートでは特に大きな効果は期待できないこ



図—4 骨材寸法がコンクリート強度に及ぼす影響

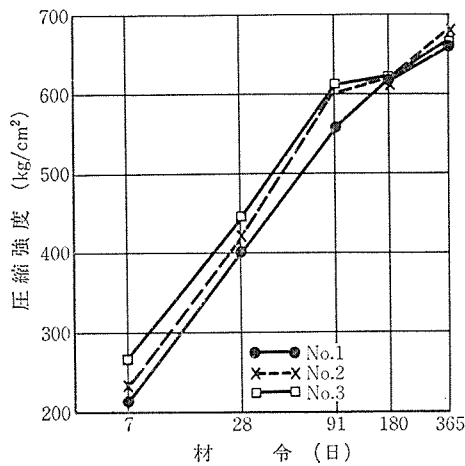


図—5 混和剤の種類がコンクリート強度に及ぼす影響

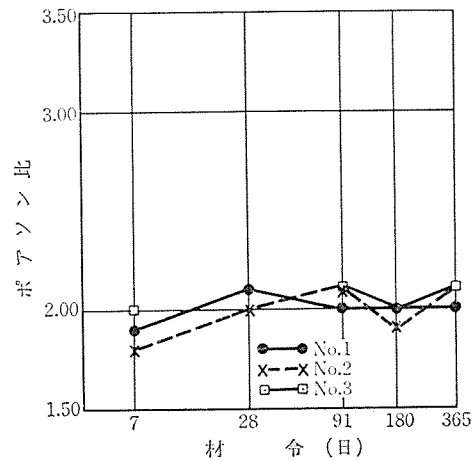
表—4 コンクリートの調合

No.	セメントの種類	骨材の種類		骨材最大寸法 (mm)	フライアッシュ混入率 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		粗骨材	細骨材							セメント	フライアッシュ	水	細骨材	粗骨材	混和剤*
1	中庸熟	山碎石	山砂+砕砂	25	20	8	4	45.0	43.0	290	72	163	745	1014	0.905
2				25	20	12	4	46.5	43.0	293	73	170	735	1001	0.915
3				40	20	8	4	43.5	40.5	294	74	160	702	1060	0.920

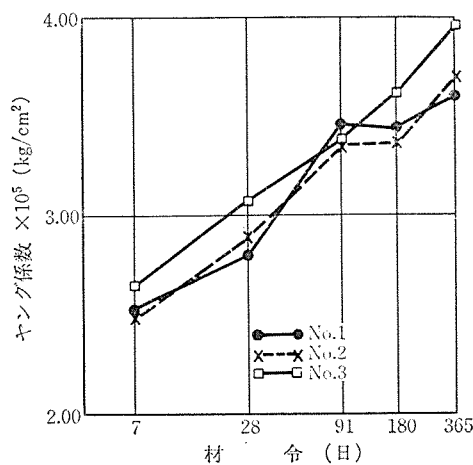
\* 混和剤の種類：AE 減水剤



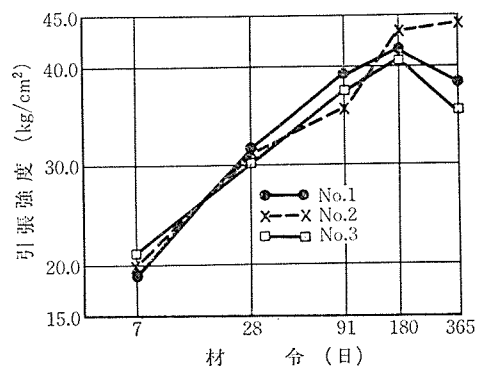
図—6 材令と圧縮強度の関係



図—8 材令とポアソン比の関係



図—7 材令とヤング係数の関係



図—9 材令と引張強度の関係

とが明らかとなった。

以上の実験結果並びにコンクリート材料の生産、供給状況調査、海外の施工例調査等に基づいて使用材料およびコンクリートの調合は表—4 に示すものを基本とした。

なお、参考のため、表—4 の調合を用いて行った標準養生供試体の材令 365 日までの力学的性質試験結果を図—6 から図—9 に示す。

### 3. コンクリートのクリープ試験

#### 3.1 試験概要

本試験は 2. で選定された調合のコンクリートの一軸圧縮クリープ試験を行って、そのクリープ特性を確認し、設計に用いたクリープ係数の妥当性を評価するための基礎的資料を得る目的で行ったものである。

#### 3.2 試験の要因と供試体の種類

PCCV では、原子炉の運転時に壁体の年平均温度は 30°C 程度であって、その壁厚は円筒部で 1.3 m、ドーム部で 1.1 m と、一般の建築構造物に比べてマッシブである。また、プレストレスの導入時期は、部位によって異なり、コンクリート打設後 3 か月から 2 年ほどにな

表—5 供試体の種類および本数

調 合 No.		載 荷 供 試 体					無 載 荷 供 試 体		
		1	2	3	1	2	3		
粗骨材最大寸法 (mm)		25			40	25			40
ス ラ ン プ (cm)		8		12	8	8	12	8	
載 荷 材 令 (日)		18	180	365	180	180	—	—	—
温 度	20°C	シ ー ル	2	2	2	2	2	2	2
		ア ン シ ー ル	—	2	—	—	—	2	—
	40°C	シ ー ル	2	2	2	2	2	2	2
		ア ン シ ー ル	—	2	—	—	—	2	—

る。

したがって、クリープ試験は、これらの条件を考慮して、以下の要因を選定した。

- 調合の種別（骨材の最大寸法，スランプ）
- 養生温度
- 載荷の有無および載荷時材令
- 試験体シールの有無

これらの組合せにより表—5に示す供試体の種類と本数とした。なお、試験計画は載荷材令180日でシールした状態のクリープ（ベーシッククリープ）の測定を中心としたものとなっている。また載荷時にはクリープ供試体と同一条件で養生した圧縮供試体の強度，ヤング係数を測定した。

### 3.3 使用材料と調合

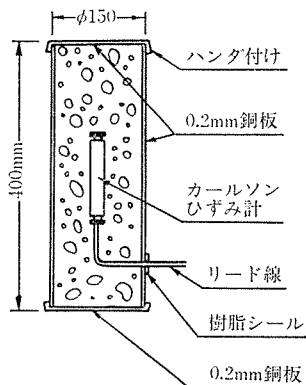
使用材料と調合は2.の表—4に示すとおりである。

### 3.4 供試体の寸法形状および養生条件

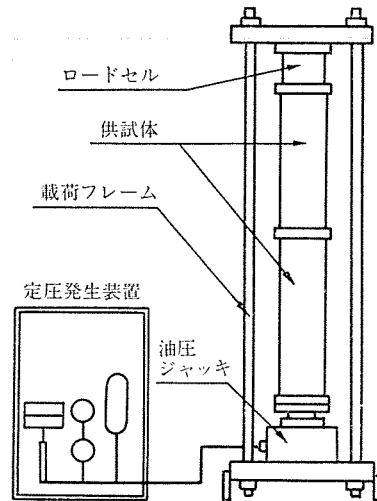
クリープ供試体は図—10に示すようにφ15×40cmの円柱で、シールは厚さ0.2mmの銅板を用いている養生は20°C，60%RHの恒温恒湿室にて行った。なお、40°Cでの試験は供試体を、載荷の3日前に40°C，60%RHの恒温恒湿室に入れてから載荷した。

### 3.5 載荷および測定方法

供試体への載荷は、図—11のような定油圧発生装置に連動した油圧ジャッキを用いた。作用応力度は100



図—10 供 試 体



図—11 載 荷 装 置

kg/cm<sup>2</sup> で一定とした。供試体のひずみ測定には検長15cmのカールソン型ひずみ計を、載荷重荷の測定にはロードセルを用いた。

### 3.6 試験結果および考察

圧縮強度とヤング係数の測定結果を表—6に、クリープ試験結果の一覧を表—7に示す。また、載荷時間とクリープひずみの関係を図—12, 13に、無載荷供試体の自己収縮ひずみ測定結果を図—14に示す。自己収縮ひずみ材令は50日まで徐々に増加し、最終的には20°Cで100×10<sup>-6</sup>程度の値を示している。載荷直前に20°Cより40°Cの養生室に入れた供試体は、図—14に示すように温度膨張ののち再び自己ひずみの増加を示している。試験要因である載荷時材令，調合，養生温度シール条件と1年間載荷に対するクリープ係数φ<sub>365日</sub>の関係を図—15に示す。載荷時の材令が大きくなるほどφ<sub>365日</sub>の値は小さくなる。試験した3種類の調合時間のφ<sub>365日</sub>の相違はほとんど認められなかった。

表—6 コンクリートの圧縮強度およびヤング係数

No.	養 生 条 件		圧 縮 強 度 (kg/cm <sup>2</sup> )			ヤング係数×10 <sup>5</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )		
			28日	180日	365日	28日	180日	365日
1	20°C	水 中	402	621	656	2.80	3.44	3.60
		シ ー ル	338	483	564	2.87	3.26	3.21
		ア ン シ ー ル	—	351	—	—	2.14	—
	40°C	シ ー ル	354	507	552	2.89	3.35	3.23
ア ン シ ー ル		—	326	—	—	2.28	—	
2	20°C	水 中	423	623	679	2.89	3.37	3.70
		シ ー ル	—	523	—	—	3.33	—
3	40°C	シ ー ル	—	516	—	—	3.39	—
		水 中	445	625	660	3.07	3.61	3.96
	20°C	シ ー ル	—	509	—	—	3.48	—
3	40°C	水 中	445	625	660	3.07	3.61	3.96
		ア ン シ ー ル	—	502	—	—	3.39	—

表-7 クリープ試験結果一覧

調査 No.	載荷時材令 (日)	環境温度 (°C)	シールの種別	供試体 No.	載荷応力の強度比率	弾性ひずみ $\epsilon \times 10^{-6}$	載荷後 365 日		クリープひずみ推定のための回帰式 ( $\times 10^{-6}$ )	回帰式の寄与率 (%)	
							クリープひずみ $\epsilon_{365} \times 10^{-6}$	クリープ係数 $\phi_{365}$			
1	28	20	シール	1	0.30	410	328	0.92	123.6 log(t+1) + 12.1	99.2	
				2	0.30	395	351	0.88			
		40	シール	1	0.28	445	504	1.41	187.0 log(t+1) + 40.2	98.6	
				2	0.28	421	520	1.46			
	180	20	シール	1	0.21	357	215	0.60	102.9 log(t+1) - 63.1	96.6	
				2	0.21	323	287	0.80			
			40	シール	1	0.20	370	342	0.96	188.2 log(t+1) - 105.1	97.8
					2	0.20	377	400	1.12		
		20	アンシール	1	0.28	538	464	1.30	243.9 log(t+1) - 148.5	—	
				2	0.28	541	477	1.34			
		40	アンシール	1	0.31	562	538	1.51	288.6 log(t+1) - 92.9	—	
				2	0.31	576	618	1.73			
365	20	シール	1	0.18	325	125	0.35	75.3 log(t+1) - 68.5	92.7		
			2	0.18	350	141	0.39				
	40	シール	1	0.18	322	304	0.85	180.9 log(t+1) - 153.1	96.8		
			2	0.18	373	340	0.95				
2	180	20	シール	1	0.19	339	198	0.57	113.0 log(t+1) - 90.2	97.2	
				2	0.19	356	205	0.59			
		40	シール	1	0.19	374	401	1.16	214.6 log(t+1) - 140.3	98.6	
				2	0.19	380	424	1.23			
3	180	20	シール	1	0.20	328	159	0.49	102.9 log(t+1) - 84.1	98.4	
				2	0.20	341	209	0.64			
		40	シール	1	0.20	372	367	1.13	210.6 log(t+1) - 162.9	97.8	
				2	0.20	358	384	1.18			

20°C と 40°C におけるシール供試体の  $\phi_{365}$  を比べると 40°C では 20°C の 1.4~1.9 倍程度であった。

### 3.7 PCCV のクリープ係数の推定

PCCV の設計寿命は 40 年といったような長期間であって、この間のクリープを推定する場合、推定式をどのようなものとするか問題となる。PCCV のようにマッシュな部材で、プレストレス導入時材令も大きく、環境条件等を評価できる推定式としては、CEB—FIP ('78)<sup>3)</sup> のものがある。ここでは、供試体のクリープひずみの測定結果とこの推定式による値を検討し、その適用性について検討したのち、PCCV のクリープ係数について検討した。

PCCV のプレストレス導入時のコンクリート材令は 3 か月~2 年程度である。またその壁厚は 1.1~1.3 m というマッシュな部材でありコンクリートの内部の乾燥には長期間を要する。そのため乾燥条件から見れば、シール供試体に近い。したがって、まず調査 1 のコンクリートで供試体と同一寸法の部材が湿度 90% におかれると

きのクリープ係数とひずみを CEB—FIP 式 (1) により推定する。このとき (1) 式において、仮想厚さ  $h_0 = 40$  cm,  $\phi_f$ ,  $H_f$  の値は同式に付随する図、表よりそれぞれ 1.4, 870 とする。表-8 に  $t_0$  を 28, 180, 365 日とし、載荷 365 日でのクリープ係数を求めた結果を、調査 1 の実験値と比較して示す。これらの結果からみて、計算値と実験値は良い対応を示しており、CEB—FIP のクリープ係数推定法をこのような調査の PCCV に適用することは妥当であると考えられる。

$$\phi_{28}(t, t_0) = \beta_a(t_0) + \phi_b \beta_d(t - t_0) + \phi_f \{ \beta_f(t) - \beta_f(t_0) \} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

$t$ : コンクリートの材令 (日)

$t_0$ : 載荷時の材令 (日)

$\beta_a$ : 初期流動の経時変化を示す関数

$$\beta_a(t_0) = 0.8 \left\{ 1 - \frac{1}{1.276} \left( \frac{t_0}{4.2 + 0.85 t_0} \right)^{3/2} \right\}$$

$\phi_d$ : 遅れ弾性に関する係数で 0.4 とする

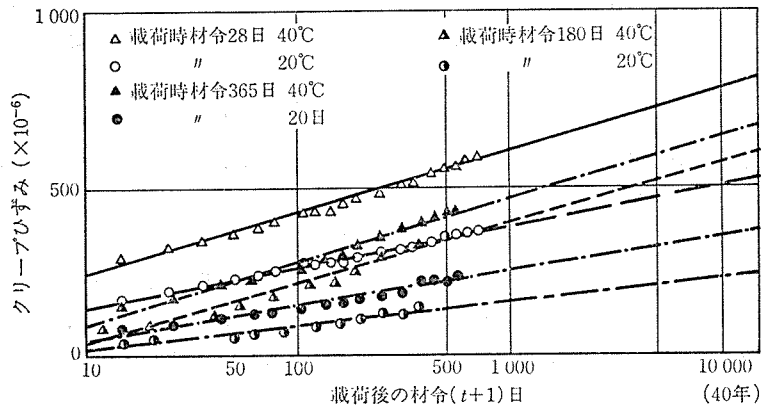


図-12 載荷後のクリープひずみ (調合 1, シール)

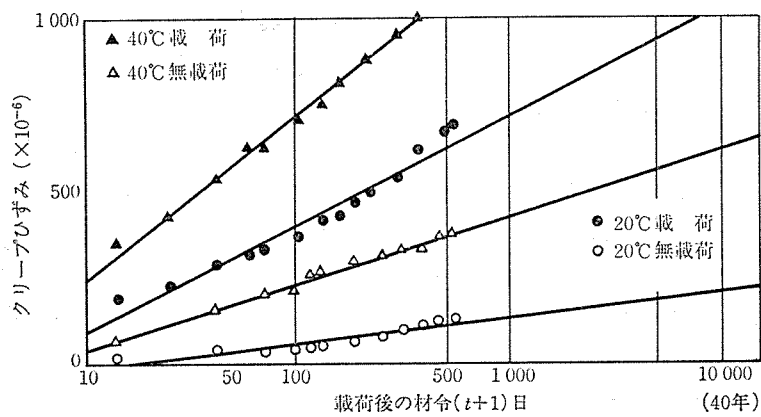


図-13 載荷後のクリープひずみ (調合 1, アンシール, 載荷時材令 180 日)

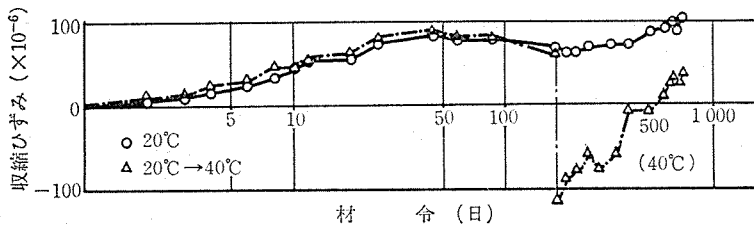


図-14 無載荷供試体のひずみ測定結果 (調合 1, シール)

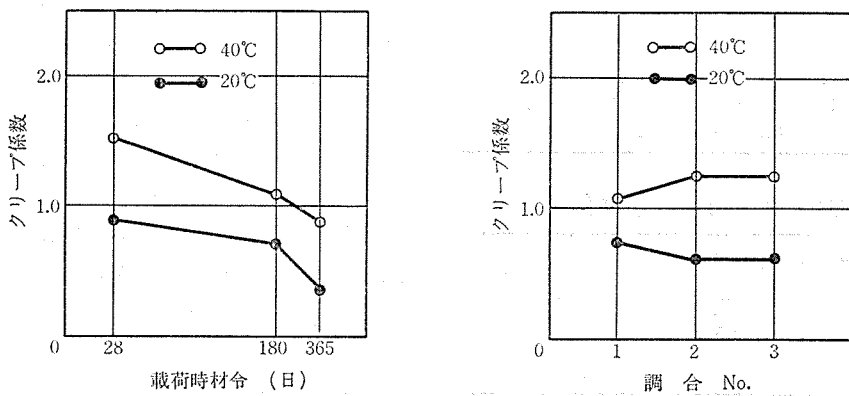


図-15 試験要因と  $\phi_{365}$  (シール供試体) の関係



$\beta_d$  : 遅れ弾性変形の経時変化を示す関数

$$\phi_d \beta_d(t-t_0) = 0.4 \{0.73(1 - e^{-0.01(t-t_0)}) + 0.27\}$$

$$\phi_f = \phi_{f1} \cdot \phi_{f2}$$

$\phi_{f1}$  : 環境条件に関する係数

$\phi_{f2}$  : 部材の仮想厚さ  $h_0$  に関する関数

$\beta_f$  : 遅れ流動の仮想厚さ  $h_0$  に対する経時変化を示す関数

$$\phi_f \{ \beta_f(t) - \beta_f(t_0) \} = \phi_f \left\{ \left( \frac{t}{t+H_f} \right)^{1/3} - \left( \frac{t_0}{t_0+H_f} \right)^{1/3} \right\}$$

$H_f$  :  $h_0$  の関数

$$h_0 = \lambda \frac{2Ac}{u} \quad (\text{仮想厚})$$

$A$  : 部材の断面積

$u$  : 外気に接する周長

$\lambda$  : 外気湿度の係数

よって、実機の場合についても CEB—FIP によってクリープ係数を 40 年後の値として推定する。

この場合、湿度 70% として内側をライナによりシールされた 1.3 m の壁の仮想厚、40 年後のクリープ係数  $\phi$  (14 600,  $t_0$ ) を算定する。このとき  $\phi_f, H_f$  の値は、CEB—FIP の図表より  $\phi_f = \phi_{f1} \cdot \phi_{f2} = 2 \times 1.12 = 2.24$ ,  $H_f = 2500$  とする。

表—9 に  $\phi$  (14 600,  $t_0$ ) の計算値を、 $t_0$  を 60~730 日としたときについて示した。

原子炉運転時の PCCV の温度は年平均で 30°C 程度であり、またコンクリートのクリープは 20°C~60°C 程度の範囲では、温度上昇に伴い、ほぼ直線的に増加することが知られている。20°C と 40°C の供試体の 365 日でのクリープ係数の平均値を 30°C におけるクリープ係数とすると、30°C の値は 20°C の約 1.3 倍程度となる (表—9 参照)。したがって、表—9 において 20°C におけるクリープ係数を 1.3 倍した値を 30°C におけるクリープ係数として示した。

表—8 クリープひずみ計算値と実験値との比較

載荷時(日)	$\phi(t, t_0)$ の値	クリープひずみ $\times 10^3$	
		計算値	実験値*
28	$\phi(393, 28) = 1.03$	36.1	34.0
180	$\phi(545, 180) = 0.645$	22.5	25.1
365	$\phi(730, 365) = 0.534$	18.5	13.3

\* 2 体の平均値

表—9 40 年後のクリープ係数  $\phi$  の値

プレストレス導入時材令 ( $t_0$ )	60	180	365	730
$\phi$ (20°C における値)	1.98	1.65	1.42	1.16
温度 30°C における $\phi$ *	2.57	2.15	1.85	1.51
鉄筋拘束を考慮した $\phi$ **	2.16	1.78	1.53	1.25

\*  $\phi$  (20°C) の 1.3 倍

\*\*  $\phi$  (30°C) の 0.83 倍

PCCV では内側ライナと壁体中に補強筋が配置されており、これがクリープ変形を拘束する。これらの影響により壁体のクリープではそれだけ小さくなる (たとえば鉄筋比 1.6% とすると見掛けのクリープ係数は 17% 減少することが予想されるが、この算定については紙数が限られているので省略する)。したがって、PCCV のクリープ係数はプレストレス導入時材令  $t_0$  に応じて表—9 のように推定される。

実機のプレストレス導入のコンクリートの平均材令は 1 か年程度であるとする、設計に採用されたクリープ係数 1.8 は適切な値であったと考えられる。

## 4. 熱的特性試験

### 4.1 実験概要

温度変化が生ずるコンクリート構造物の設計、施工を合理的に行うためには、使用するコンクリートの正確な熱的特性を知ることはきわめて重要である。しかし、コンクリートの熱特性に関する既往の研究は、ダムコンクリートのような比較的貧調合のコンクリートを対象としたものが多く、PCCV コンクリートのような富調合のコンクリートを対象としたこの種の研究成果はあまり報告されていない。

そこで、PCCV コンクリートの材料試験の一環として、主要な熱的特性について検討した。

### 4.2 実験方法

#### (1) 使用材料およびコンクリートの調査

本実験に使用したコンクリート材料および調査は 3. の実験結果に基づいて、クリープ試験と同様とした。

#### (2) 実験項目および方法

熱伝導率試験には、材令 28 日まで標準水中養生した  $\phi 15 \times 30$  cm 円柱形供試体の中央に  $\phi 8$  mm の穴を設けた中空円筒試験体を 1 調査当り 2 本ずつ、計 6 体用いた。

測定に当たっては、まず、供試体の内径、外径および高さを測定したのち、供試体の上下端面を断熱材 (厚さ 5 cm のコルク) でシールし熱流出を断ち、攪拌機をセットした水槽に入れる。供試体内部へは円管状ヒーター、攪拌機、水および熱電対を入れセットする。このヒーターに既知熱量を与え、内部温度と外部温度が定常状態となるまで温度差を測定した。

熱拡散率試験には、 $\phi 15 \times 30$  cm 円柱形供試体の高さ 1/2 の水平断面中心部に径 0.32 mm の銅コンスタンタン熱電対を埋設したものを 1 調査当り 3 本ずつ計 9 本用いた。

測定は材令 28 日まで標準水中養生を行った供試体を用いて Glover の水中冷却による直接法により行った。

熱膨張試験には、φ15×30 cm 円柱形供試体の供試体中央に測長 15 cm のカールソン型ひずみ計を埋設し、供試体表面を 2 mm の銅板で覆ったものを 1 調合 3 本ずつ計 9 本使用した。

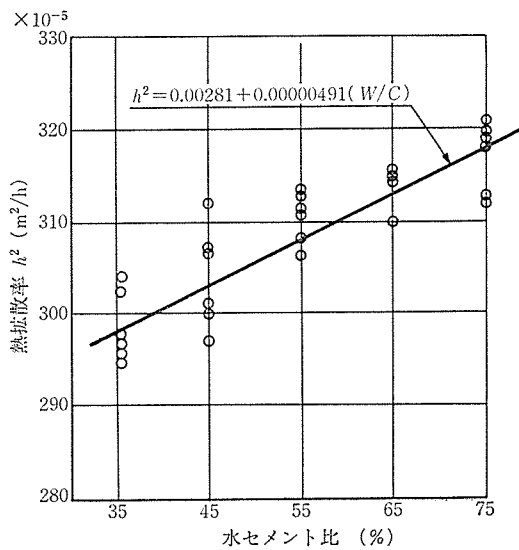
測定は、供試体を温度 20°C、湿度 90% の室内で養生して置き、材令 28 日、180 日および 365 日に供試体に埋設したカールソン型ひずみ計で内部温度をチェックしながら 5~50°C の温度範囲で昇温、降温を繰り返し、温度変化量と長さ変化量から熱膨張係数を算出した。

4.3 実験結果および考察

(1) 熱伝導率試験結果

熱伝導率の試験結果は表—10 に示すようであって、1.83~1.90 kcal/m·hr·°C、平均約 1.86 kcal/m·hr·°C となり調合による差異は認められなかった。

また、この値は通常の温度変化の範囲での 1°C 当りの熱伝導係数 1.4~2.6 kcal/m·hr·°C と一致しており、PCCV に用いられるような富調合コンクリートにおいても設計常数としては従来どおり 2.0 と仮定しても差しつかえないことが示された。



図—16 コンクリートの水セメント比と熱伝導率の関係

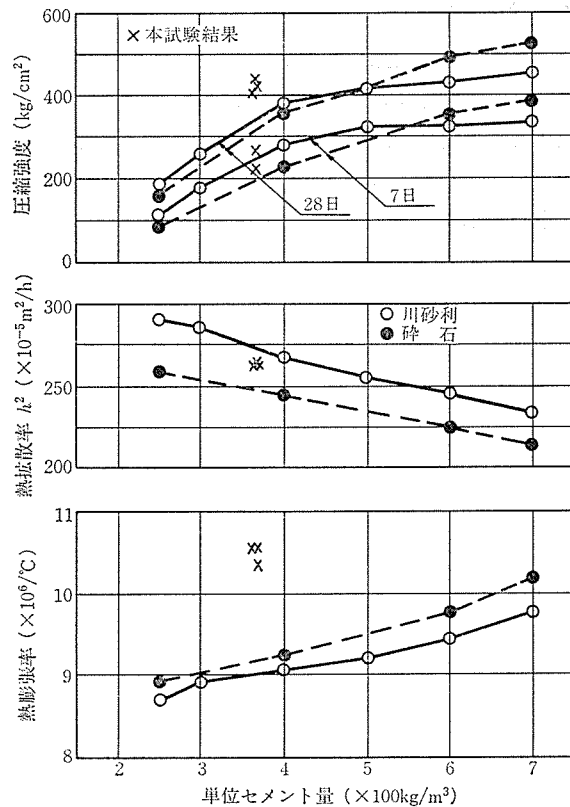
(2) 熱拡散率試験結果

熱拡散率の試験結果は同じく表—10 に示すように、いずれの調合のコンクリートの熱拡散率の測定値も平均 262~263×10⁻⁵ m²/hr の値を示し、調合による差異は認められなかった。

この値を既往の研究結果と比較してみると、本試験に用いたコンクリートは富調合であるため図—16 に示す一般的なコンクリートの熱拡散係数に比べやや小さな値を示した。しかし、図—17 に示す徳田氏が行った富調合コンクリートの値を比べると若干大きな値を示している。これは単位セメント量の 20% をフライアッシュに置き換えたことに起因しているものと考えられる。

(3) 熱膨張率試験結果

熱膨張率の試験結果を同じく表—10 に示す。表—10



図—17 富配合コンクリートの熱的性質<sup>2)</sup>

表—10 コンクリートの熱的特性試験結果

No.	セメントの種類	骨材最大寸法 (mm)	フライアッシュ混入率 (%)	目標準スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	熱伝導率 (kcal/m·hr·°C)	熱拡散係数 (m²/hr)	熱膨張係数 (×10⁻⁶/°C)	比熱 (kcal/kg·°C)
1	中層熟	25	20	8	4	45.0	43.0	1.96	0.00265	10.56	0.301
								1.85	0.00257	10.49	0.306
								1.91	0.00263	10.12	0.292
2	中層熟	25	20	12	4	46.5	43.0	1.85	0.00263	10.13	0.288
								1.83	0.00259	10.54	0.295
								1.81	0.00264	10.35	0.289
3	中層熟	40	20	8	4	43.5	40.5	1.91	0.00264	10.70	0.302
								1.93	0.00260	10.27	0.309
								1.92	—	10.66	—

において、熱膨張係数は調合、温度レベルおよび材令とは無関係に  $10.34 \sim 10.54 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、平均  $10.47 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  となり、通常の温度領域における  $1^{\circ}\text{C}$  当りの熱膨張係数  $7 \sim 13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  と良く一致し、設計常数としては  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  と仮定して差しつかえないと判断された。

#### (4) 比熱の算定

比熱と熱伝導率、熱拡散率との間には下記のような密接な相関関係が認められる。

$$\text{比熱} = \frac{\text{熱伝導率}}{\text{熱拡散率} \times \text{コンクリートの容量}} \dots (2)$$

熱伝導率および熱拡散率の試験結果を用いて(2)式により算出した比熱の値は表—10に示すように、一般にいわれている値  $0.20 \sim 0.24 \text{ kcal/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$  より若干大きな値を示した。

## 5. む す び

フライアッシュを混入した中庸熱セメントを用いたコンクリートの調合について種々検討し、これらに基づいて決定した基本調合について、諸強度、ヤング係数、クリープ、熱特性について実験した。その結果、圧縮強度は材令 91 日では普通セメントを用いたコンクリートよ

りも大となり、PCCV のようにプレストレスの導入とその後のプラント運転までに期間のある構造で、かつマスコンクリートとなる構造では、本調合のコンクリートが有利となることがわかった。

また、これらの調合のコンクリートのクリープおよび熱的特性は、普通セメントを用いたコンクリートと大きな差はなく、従来より設計に用いている特性値を用いてもよいことが明らかとなった。特に、クリープ試験結果は、CEB—FIP のクリープ曲線にほぼ一致していることから、40 年後のクリープ係数を CEB—FIP の式に基づき計算し、PCCV の設計に用いたクリープ係数  $\phi_{40}$  が妥当であることを示した。

なお、本報告のクリープ試験結果の検討については、日本構造橋梁(株)の猪股博士に御指導をいただいた。誌面を借りて感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 近藤泰夫, 坂静雄監修: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 1968 年
- 2) 徳田弘ほか: 富配合コンクリートの熱特性値の測定と二, 三の考察, 材料, 第 26 卷, 第 283 号
- 3) Comité Européen du Béton (CEB—FIP), 1978