

原子力発電所クーリングポンド用コンクリート

主任 研究員

鳥田 専右 飯田 康弘*
星野 一郎* 中西 正俊

(*原子力部)

はじめに

本報告は、茨城県東海村に建設された原子力発電所のクーリングポンドコンクリートに関するものである。

このクーリングポンドでは、水や放射線の漏洩に対して十分な防護がされなければならないので、これをコンクリートで構築する場合、その一般的諸性質とともに、比重、およびき裂の原因となる乾燥収縮や、硬化時の温度応力が特に問題となる。

これらの特性を考慮して、コンクリートの最も適当な材料、調合を見出すために、研究所および原子力部の協同の調査が、昭和37年2月より6月の間に行われた。

以下に、その詳細を記す。

§ 1. 概 要

上記コンクリートについて与えられた基本事項は、	
コンクリート所要強度	210kg/cm ² (設計強度)
標準偏差	25kg/cm ²
コンクリート調合強度	235kg/cm ²
水セメント比	50以下とする
スランプ	10±3cm
セメント量	なるべく少なくする
コンクリート乾燥比重	2.2以上
粗骨材	那珂川産 40mm 以下
細骨材	久慈川産 2.5mm 以下

これによって、5種の調合を計画した。

すなわち、

- | | | |
|------|-----------|-----------|
| No.1 | 普通セメント使用 | プレーン |
| No.2 | 普通セメント使用 | フライアッシュ混入 |
| No.3 | 普通セメント使用 | A E 剤混入 |
| No.4 | 普通セメント使用 | リターダ混入 |
| No.5 | 中庸熱セメント使用 | プレーン |

この5種のコンクリートについて、

- 1) 強度：圧縮・引張・曲げ (材令1, 4, 13W)
- 2) 長さ変化
- 3) 乾燥比重
- 4) 弾性係数
- 5) 水和熱による温度上昇

を比較し、表記コンクリート工事に最も適切なる品種を決定するものである。

なお、試験のうち“水和熱による温度上昇”については、その測定結果を、1937年に発表された Mc Henryの式からの計算値と比較検討した。

§ 2. 材 料

2.1 セメント

使用したセメントは、次のとおりである。

- 1) チチブ普通ポルトランドセメント
 - 2) チチブ中庸熱ポルトランドセメント
- その試験結果を2.1(a)~(c)表に示す。

2.1 (a)表 化学成分 (%)

種 類	Ig. Loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
普通 ポルトランド	0.5	0.5	22.4	5.6	2.7	64.3
	0.5	0.6	22.2	5.3	2.8	64.9
中磨熱 ポルトランド	0.7	0.3	22.9	4.0	3.9	64.0
	0.5	0.3	23.1	4.1	4.0	64.2

MgO	SO ₃	C ₂ S	C ₃ A	Total
1.4	1.8	—	—	99.2
1.5	1.8	—	—	99.6
1.5	1.8	49	4	99.1
1.5	1.6	48	4	99.3

上段：当研究所試験結果

下段：秩父セメント研究部試験結果（以下も同じ）

2.1 (b)表 物理試験（その1）

種 類	比重	粉 末 度		凝 結 試 験		
		比表面積 (cm ² /g)	88μ残分 (%)	水 量 (%)	始 発 時間：分	終 結 時間：分
普通 ポルトランド	3.15	3,050	1.1	28.3	1：47	3：10
	3.15	3,270	—	28.1	2：10	3：15
中磨熱 ポルトランド	3.23	3,080	0.5	25.3	2：15	4：30
	3.19	3,170	—	26.2	2：10	3：45

安定性	異常 凝結性	水 和 熱	
		7日 (cal/g)	28日 (cal/g)
良	ナシ	80.6*	89.9*
良	ナシ	—	—
良	ナシ	62.0*	77.3*
良	ナシ	61.8	77.5

* セメント技術協会の試験結果

2.1 (c)表 物理試験（その2）

種 類	フロー (mm)	曲 げ(kg/cm ²)			圧 縮(kg/cm ²)		
		3日	7日	28日	3日	7日	28日
普通 ポルトランド	225	37.7	60.5	63.0	148	286	402
	258	33.3	47.9	73.0	136	249	397
中磨熱 ポルトランド	228	28.5	37.4	56.2	95	148	304
	264	30.7	40.1	67.6	102	158	352

2.2 骨 材

使用した骨材は、つぎのとおりである。

砂 久慈川産 2.5mm以下

砂利 那珂川産 40mm以下

2.2.1 一般試験：

細骨材の比重および吸水量試験 (JISA 1109による)

粗骨材の比重および吸水量試験 (JISA 1110による)

骨材のふるい分け試験 (JISA 1102による)

骨材の単位容積重量試験 (JISA 1103による)

骨材洗い試験 (JISA 1104による)

砂の有機不純物試験 (JISA 1105による)

以上の結果を2.2.1表、および2.2.1図に示す。

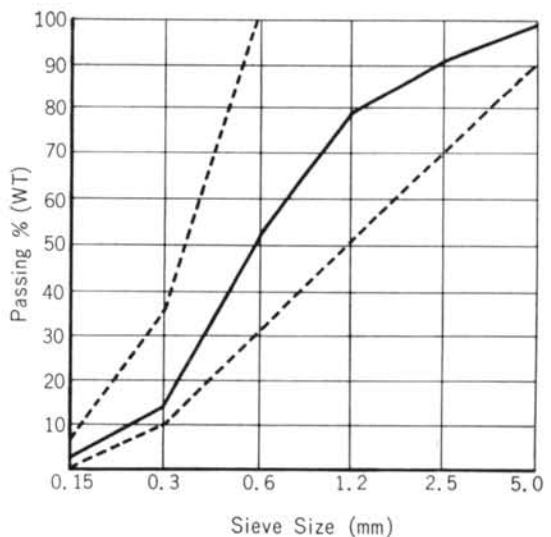
2.2.1(a)表 一般試験

	粒 大	粗粒率	比重	吸水量	単 容 重 量	有機不純物試験	洗い試験	実積率
砂	2.5mm以下	2.63	2.60	1.83%	kg/m ³ 1,747	良	1.0%	66.5%
砂利	40mm以下	7.55	2.61	2.00%	kg/m ³ 1,580	—	0.12%	60.5%

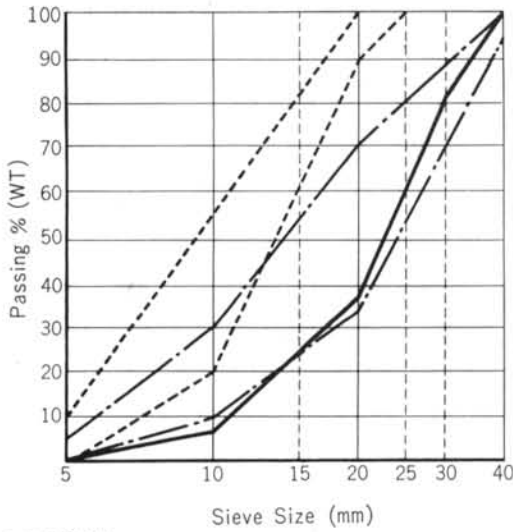
2.2.1(b)表 ふるい分け試験

	40mm	30mm	25mm	20mm	15mm	10mm	7mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
砂								99	91	79	52	14	2
砂利	100	81	60	37	22	7	1						

通過率 (%)



2.2.1(a)図



2.2.1(b)図

2.2.2 軟石試験:

JISA 1126 による。結果を 2.2.2 表に示す。

2.2.2 表 軟石試験 (JISA 1126 による)

ふるいの呼び寸法	各群の重量百分率④	試料		軟石			④×⑤	
		重量	個数	重量	重量百分率⑥	個数		個数百分率
mm		g		g				
10~15	15.1	194	58	9	4.64	1	1.73	70.1
15~20	23.2	607	67	20	3.30	2	2.98	76.6
20~25	21.0	1,447	75	17	1.18	1	1.34	24.8
25~40	18.3	5,193	127	50	0.96	1	0.79	17.6
40~	0.5	—	—	—	0.96	—	—	0.5
計	78.1	7,441	327	96		5		189.6

軟石百分率: $189.6 \times \frac{1}{100} = 1.896\%$

2.2.3 安定性試験:

JISA 1122 による。結果を 2.2.3 表に示す。

2.3 フライアッシュ

常盤共同火力(株) 勿来発電所製のものをを用いた。その試験結果を 2.3 表に示す。

2.4 AE 剤

Vinsol (山宗化学製・市販品) を使用した。

2.5 リターダ

Plastiment-Green (日本シカ製・実験用として、メーカーより取り寄せた) を使用した。

2.2.3 表 安定性試験

とどまるふるい (mm)	通ふるい (mm)	各群の重量百分率 (%)	試験前の各群の重量 (g)	各群の損失重量百分率 (%)	骨材の損失重量百分率 (%)
細骨材					
—	0.15	1.8			
0.15	0.3	12.4			
0.3	0.6	38.2	100	21.7	8.3
0.6	1.2	26.8	100	15.7	4.2
1.2	2.5	11.6	100	4.3	0.5
2.5	5.0	8.0	100	5.4	0.4
5.0	10.0	1.2		5.4	0.6
計		100.0			14.0
粗骨材					
—	5	1.3			
5	10	5.9	300	3.7	0.2
10	15	14.7	500	5.8	0.9
15	20	15.1	750	6.8	1.0
20	25	23.2	1000	8.4	1.9
25	30	21.0	1500	0.3	0.06
30	40	18.3	2008	3.6	0.7
40以上		0.5		3.6	0.02
計		100.0	6058		4.78

溶液 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 750g/l, 比重 1.151~1.174(20°C)

ふるいの呼び寸法 (mm)	試験前の個数	異常がみとめられた個数	破壊状況		
			割れ	崩壊	はげおち
20~25	50	13	7	4	2
25~30	37	2	1		1
30~40	32	1		1	

2.3 表

比重	ブレン (cm ² /g)	含水率 (%)	強熱減量 (%)	シカ (%)	フロー (mm)	曲げ強さ kg/cm ²		圧縮強さ kg/cm ²		使用したセメント
						28日	91日	28日	91日	
2.18	—	0.1	0.2	61.1	220	55.6	66.8	314	414	チチブポルト
2.17	3200	0.08	0.12	60.39	209	59.3	70.2	294	463	イワキポルト

上段: 当研究所試験結果

下段: 常盤共同火力(株) 勿来発電所試験結果

§ 3. 調 合

3.1 調 合 計 画

3.1 表に示すように、5種の調合を計画した。

3.1 表

調合略号	普通ポルトセメント	中熱ポルトセメント	AE剤	リターダ	フライアッシュ
O	○				
F	○				○
A	○		○		
R	○			○	
L		○			

3.2 調合決定

有効水量については、現場における従来の経験と試し練りにより、プレーンコンクリートにおいて160l/m³とし、その他のコンクリートの場合は3.2(a)表に示すように補正した。

またW/cは、50%ならどの場合でも十分満足されるものと考え、W/cまたはW/c+Fは総て50%とした。S/Aは当初34%としたが、試し練りの結果、36%とした。

決定した調合は3.2(b)表に示す。

3.2(a)表

調合略号	有効水 (l/m ³)	air (%)	混和剤	目標F28 (kg/cm ²)
O	160	1		300
F	160-10=150	1	W/C+F=50%, F/C+F=0.2	240
A	160×0.92=147	4	Vinsol:セメント量の0.04~0.05%	250
R	160×0.90=144	1	Plastiment // 0.3%	300
L	160	1		280

3.2(b)表 調合表(1m³あたり)

調合略号	調合略号No.	調合略称	有効水	セメント	砂	砂利	混和剤
O	1	普通セメント	160	320	682	1217	—
F	2	フライアッシュ	150	240	689	1228	フライアッシュ 60kg
A	3	A E 剤	147	294	674	1200	ヴィンゾール118~147cc
R	4	リターダ	144	288	705	1260	プラスチックメント 864cc
L	5	中熱セメント	160	320	683	1220	—

§4. 強度試験

4.1 試験体の製作

3.2で定めた調合で製作した。

場 所: 研究所地下実験室

室温 20±3°C, 湿度 60±5%

ミキサー: 2切傾胴式, 回転速度27回/分

混練時間: 3分

養生: 標準養生

生コンクリートの性質を4.1表に示す。

4.1 表

調合番号	略号	スランプ (cm)	コンクリートの温度 (°C)	空気量 (%)	W.D.
1	O	9 ~10	17	1.8	2.41
2	F	10.5~12	17	1.9	2.38
3	A	12 ~12.5	17	5.1	2.31
4	R	6 ~14.5	17	3.8	2.38
5	L	8 ~14	15	2.0	2.41

4.2 試験結果

- 1) コンクリートの圧縮強度試験 (JISA 1108による) 結果を4.2(a)表および4.2.1図に示す。
- 2) コンクリートの曲げ強度試験 (JISA 1106による) 結果を4.2(c)表および4.2.2図に示す。
- 3) はりの折辺による圧縮強度試験 (JISA 1114による) 結果を4.2(c)表および4.2.3図に示す。
- 4) コンクリートの引張強さ係数試験 (JISA 1113による) 結果を4.2(b)表および4.2.4図に示す。

4.2(a)表 圧縮強度
kg/cm²(15φ×30)

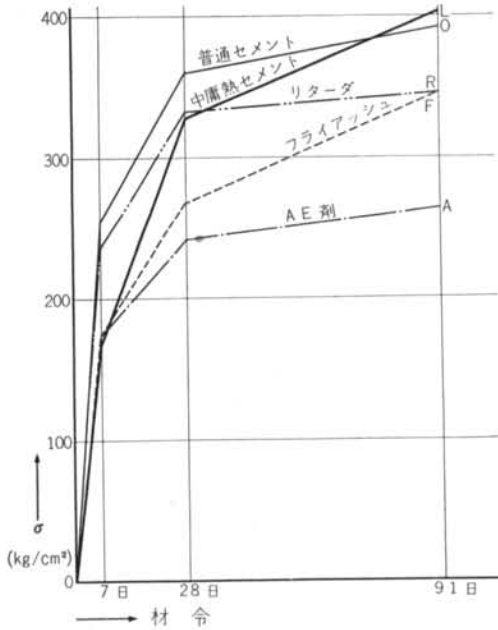
略号	7日	28日	91日
O	254	360	392
F	175	268	347
A	175	241	265
R	235	332	348
L	168	328	403

4.2(b)表 引張強度
kg/cm²(係数法による)

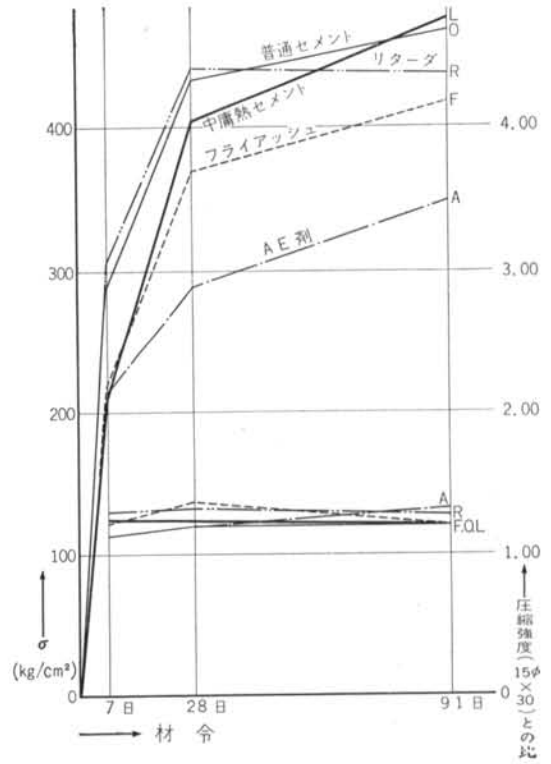
略号	7日	28日	91日
O	26.3	34.2	32.0
F	12.7	26.0	28.0
A	15.8	22.4	25.8
R	19.2	29.2	30.4
L	18.4	32.2	33.7

4.2(c)表 曲げ強度および圧縮強度(15×15)

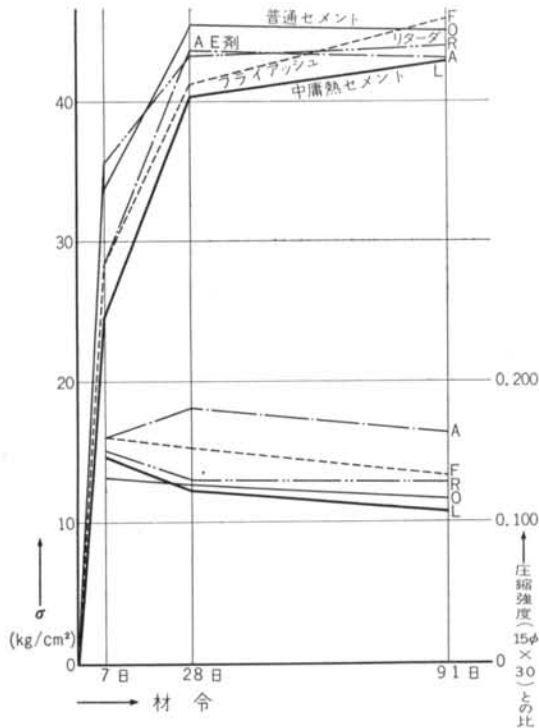
略号	曲げ強度 kg/cm ²			圧縮強度 kg/cm ²		
	7日	28日	91日	7日	28日	91日
O	33.5	45.6	45.6	286	433	470
F	28.2	41.1	46.3	219	369	419
A	28.0	43.6	43.6	213	288	349
R	35.5	43.1	44.4	303	442	441
L	24.5	40.4	43.1	208	404	478



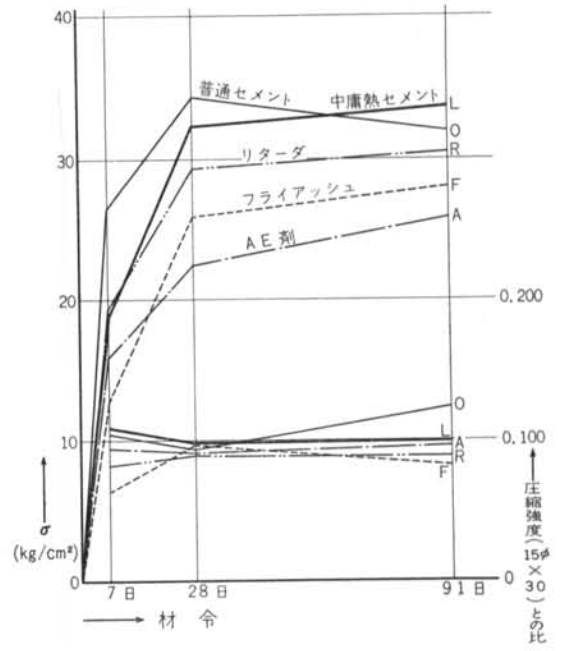
4.2.1図 圧縮強度(15φ × 30)



4.2.3図 圧縮強度(15cm立方体)



4.2.2図 曲げ強度



4.2.4図 引張強度(係数法)

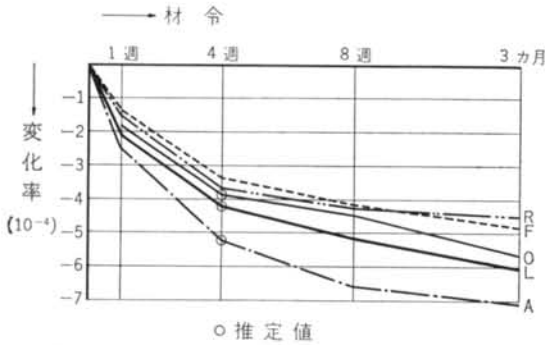
§ 5. 長さ変化

5.1 試験体の製作

4.1 と同時に行った。

5.2 試験結果

JISA 1125 (コンパレータ方法) による結果を 5.2 図に示す。



5.2図

§ 6. 比重

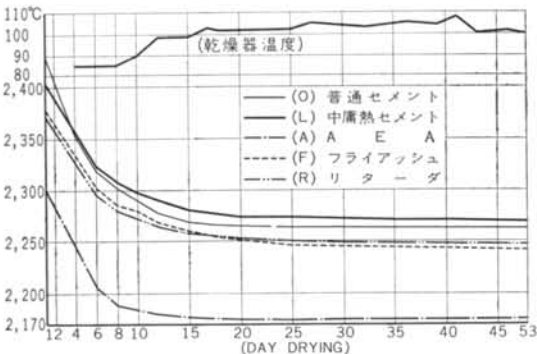
6.1 試験体の製作

4.1 と同時に行った。大きさは 15cm 立方体である。

6.2 試験結果

Wet Density は 4.1 表に示すとおりである。

Dry Density は、研究所地下実験室で 4 週間 20°C で水中養生した後、東海村作業所内コンクリート試験室へ移し、測定した。結果は 6.2 図のとおりである。



6.2図

§ 7. 弾性係数

動弾性係数 E_D は共鳴振動 (JISA 1127) によった。その結果を 7 表に示す。

静弾性係数 E_s は、コンタクトストレインゲージ (ドイツ・フリッツステーゲル社製、測定最小目盛 0.001mm) を使用し、 E_s は破壊荷重の $\frac{1}{4}$ における σ/ϵ とした。その結果を 7 表に示す。

7 表

No.	略号	$E_D(\text{kg/cm}^2)$	$E_s(\text{kg/cm}^2)$	E_D/E_s
1	O	4.05×10^5	—	—
2	F	4.06×10^5	—	—
3	A	3.62×10^5	2.98×10^5	1.22
4	R	4.02×10^5	3.19×10^5	1.26
5	L	4.21×10^5	3.45×10^5	1.22

§ 8. 水和熱による温度上昇

<その 1・実験>

8.1 実験の概要

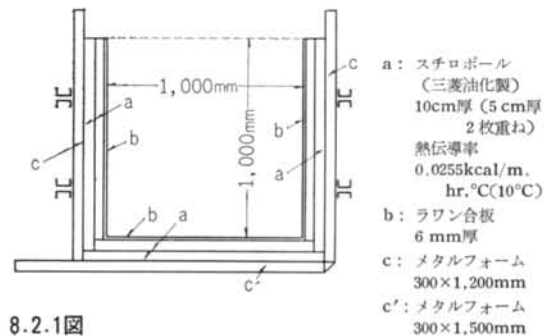
前記 5 種のコンクリートを、1 面開放、5 面断熱の 1 m^3 の型枠に打ち込み、その内部温度を 1 週間連続測定した。なお、この実験は、東海村作業所内で行った。

8.2 実験方法

8.2.1 型枠:

試験体となるコンクリートは、1,000mm \times 1,000mm \times 1,000mm とし、上面以外は断熱になるような型枠を用いた。

詳細を 8.2.1 図および写真に示す。



8.2.1図

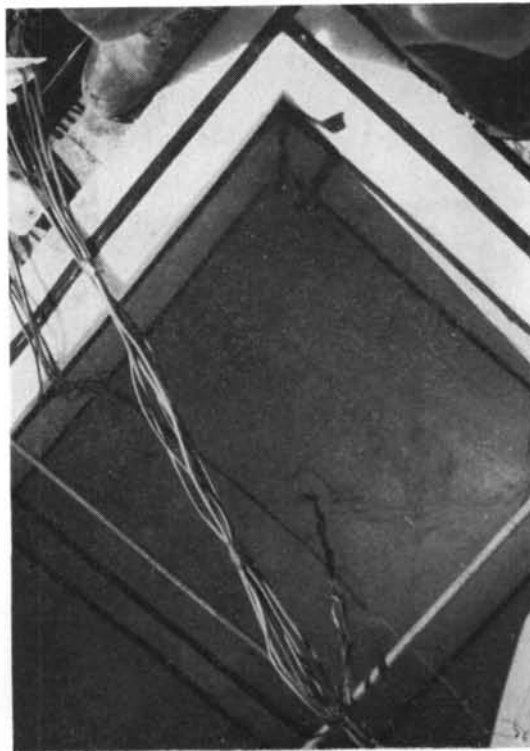


写真 型枠

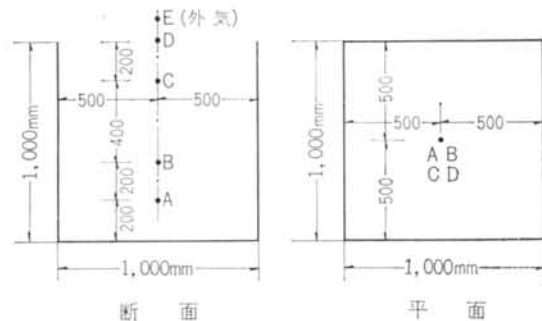
8.2.2 温度測定方法:

温度変化の記録は電子管式自動平衡電位差記録計(横河製ER-12-20)を使用した。

測定感熱部は、銅-コンスタンタン熱電対を使用し、冷接点補償法(標準冷接点: 0°C)で測定した。なお、一部に測温抵抗体を使用した。この他に、アルコール温度計も併用した。

8.2.3 測定点の決定:

予備実験を行って温度分布状態をみたところ、型枠の断熱性は良好であることがわかった。この結果、測定点をつぎのように決定した。8.2.3図、8.2.3表に示す。



8.2.3図

8.2.3 表 (上下分布)

測点	コンクリート 下底より	コンクリート 上面より	測定方法
A	20cm	80cm	銅-コンスタンタン熱電対
B	40	60	銅-コンスタンタン熱電対
C	80	20	アルコール温度計
D	100	0	計
E	外	気	測温抵抗体

8.3 コンクリート

8.3.1 材料および調査:

使用材料および調査は§2および§3に示したものと同様である。ただし、セメントの水和熱について再試験の結果、8.3.1表のようであった。

試料はコンクリート打設当日プラントより採取し、試験はセメント技術協会へ依頼した。

8.3.1 表

セメント種類	水和熱 cal/g	
	7日	28日
普通ポルトランド	80.4	89.5
中庸熱ポルトランド	65.5	79.2

8.3.2 製造設備:

東海作業所内のプラントを使用した。すなわち、ミキサーは、21S定置式(石川島コーリング)、パッチャは、SK式である。これは骨材のみを計量し、セメントは別に貯蔵ビン附属の計量器で計量された。

8.3.3 打設時の状態、その他:

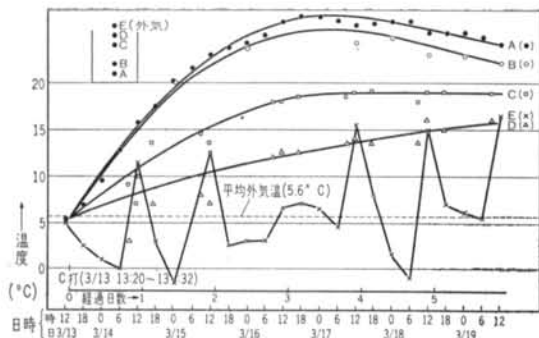
8.3.3表に示す。

8.3.3 表

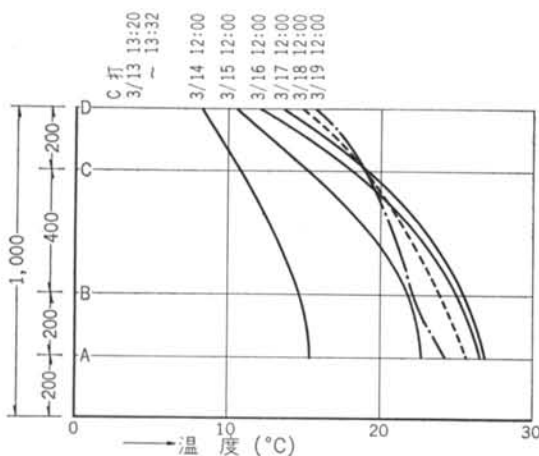
調査No.	略 称	スラップ (cm)	空気量 %	コンクリート 温度 °C	W.D.	打込時刻 (630313)	打込所要時間
1	普通セメント	10	1.8	7.5	2.414	10:20~10:35	15分
2	フライアッシュ	12	1.8	6.5	2.399	10:49~11:04	15分
3	A E 剤	12.5	4.5	7.0	2.349	11:10~11:22	12分
4	リターダ	6	2.8	7.5	2.419	13:20~13:32	12分
5	中庸熱セメント	12	2.0	7.0	2.419	14:03~14:15	12分

8.4 結果

結果は平均温度を計算した上で計算値と対比して9.4図に示したが、各点における測定結果は、調査No.4(プラスチック混入)を参考までに8.4図に示す。



8.4図 (その1)



8.4図 (その2)

§ 9. 水和熱による温度上昇 ＜その2・計算式との対比＞

マスコンクリートの温度上昇を9.1, 9.2, 9.3, の順序で考える。

9.1 セメントの水和熱

セメントの水和熱による発熱量は、一般に次式で表わされる。

$$Q_t = Q_0(1 - e^{-rt}) \quad \dots\dots(1)$$

ここに、

Q_t : 水和反応開始 t 日後における発熱量 kcal/kg

Q_0 : 終極の総発熱量 kcal/kg (9.1表参照)

r : 実験常数 (")

9.1表

	Q_0	r
普通セメント	89.9	0.324
中庸熱セメント	79.2	0.251

9.2 コンクリートの断熱温度上昇

断熱状態で養生されるとすると、コンクリートの温度上昇は、次式で表わされる。

$$\theta_t = \frac{W_c Q_0}{\rho c} (1 - e^{-rt}) \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 $t \leq 28$ days

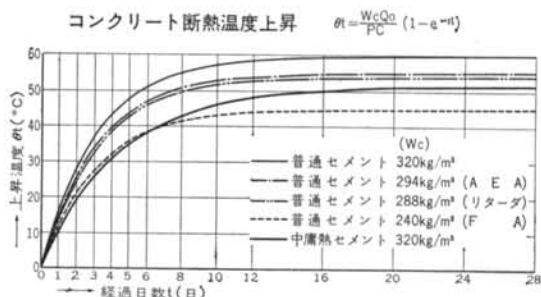
ここに、

ρ : コンクリートの密度 kg/m³

c : コンクリートの比熱 kcal/kg, °C

W_c : セメント量 kg/m³

5種のコンクリートについて、(2)式で表わされる曲線を9.2図に示す。ただし、 $\rho = 2400$ kg/m³, $c = 0.2$ kcal/kg, °C とした。



9.2図

9.3 コンクリートの熱放散に関する理論

(D. Mc Henry の方法)

コンクリートを打込む場合、自然熱放散は上面のみからと考え、側面に対する熱流は起らないものと仮定すれば、熱伝導の基本方程式は、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = h^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{c} \frac{dQ_t}{dt} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、

x : 熱流の方向 m

θ : コンクリートの温度 °C

h^2 : コンクリートの温度拡散率 m²/day

$$= \frac{k}{\rho c}$$

k : コンクリートの熱伝導率 kcal/m, day, °C

Q_t : $Q_0(1 - e^{-rt})$ kcal/kg

t : 時間 day

いま、コンクリートの厚さを d (m)、上面外気温度を 0°C 、下面是断熱として解いた結果は、つぎのとおりである。

$$\theta_x = \alpha \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \frac{e^{-rt} - e^{-\beta t}}{n(\beta - r)} \cdot \sin \frac{n\pi}{2d} x \quad \dots\dots(4)$$

$$\theta_m = \frac{1}{d} \int_0^d \theta_x dx = \frac{2\alpha}{\pi} \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \frac{e^{-r^2 t} - e^{-\beta^2 t}}{n^2(\beta - r)} \dots (5)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{4rQ_0Wc}{\pi c \rho}, \quad \beta = \frac{h^2 n^2 \pi^2}{4d^2}$$

ここに、

θ_x : 厚さ d なるコンクリートの深さ x なる位置における温度上昇 $^{\circ}\text{C}$

θ_m : 厚さ d なるコンクリートの平均温度上昇 $^{\circ}\text{C}$

(5)式による計算結果を 9.3 図 (その 1, その 2) に示す。ただし、

Q_0, r : 9.1 表に示した数値

Wc : 3.2 (b) 表調査表参照

c : 0.2kcal/kg, $^{\circ}\text{C}$

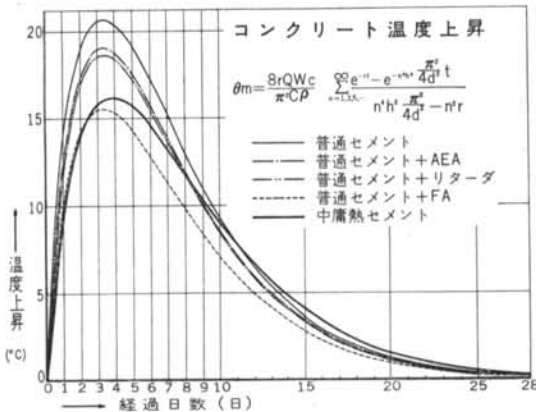
ρ : 2400kg/m³

h^2 : 0.1m²/day

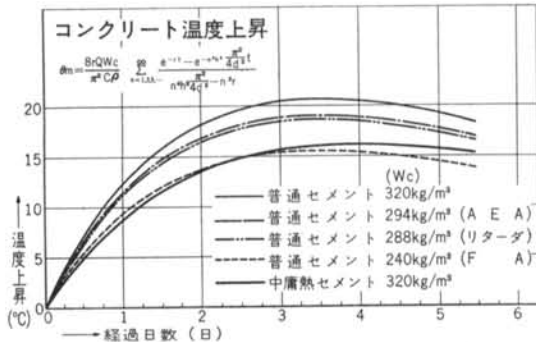
なお、計算は通常の手段によるほか、当社設計部の電子計算機により行った。

機名: LGP-30, Royal Mc Bee Corporation 製

計算方法: 純 2 進, 浮動小数点方式



9.3図 (その 1)



9.3図 (その 2)

9.4 計算値と実験値との比較検討

実験値から平均温度を図上計算し、それと計算値を対比したものを 9.4 図 (その 1~その 5) に示す。

また、9.4 表で数値を比較した。

これらによると、両者はかなり忠実に一致している。

すなわち、

1) 計算の上では、発熱の原因としてセメントのみを考え、他の混和物の影響は無視しているのであるが、それが大勢において誤っていない。

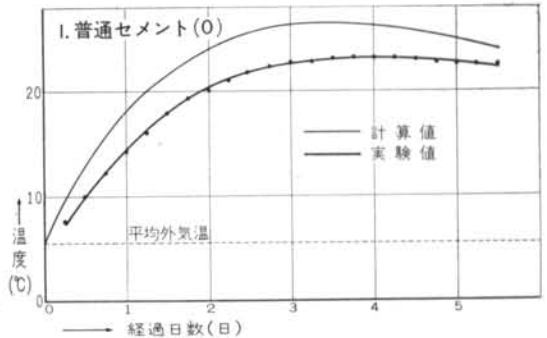
2) しかし、リターダの影響は初期において発熱の遅れとして現れているということがいえる。

No. 1 (普通セメント) のみが、傾向は一致しているが、数値に差がある。この原因としては、計量誤差が考えられる。

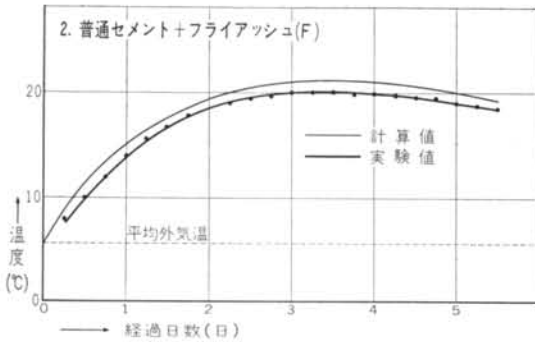
また、生コンクリートの温度、外気温、風速等によっても結果は違うはずであるから、このような試験の結果が常に一致することは期待できないが、極端に低温、または高温の条件下でない場合は、この計算式で推定し得るものと考えられる。

9.4 表

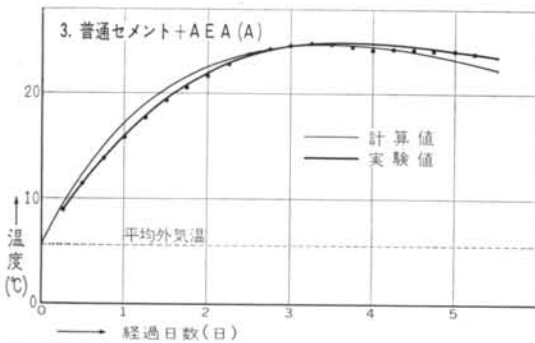
調査 No.	略称	測定された温度の最大値 ($^{\circ}\text{C}$)	計算値 Umean の最大値 + 平均外気温	それに達するまでの時間 (分)	
				実験値	計算値
1	O	23.3	26.28	240	208
2	F	19.9	21.11	210	208
3	A	24.8	24.56	220	208
4	R	23.4	24.21	230	208
5	L	22.3	21.73	210	237



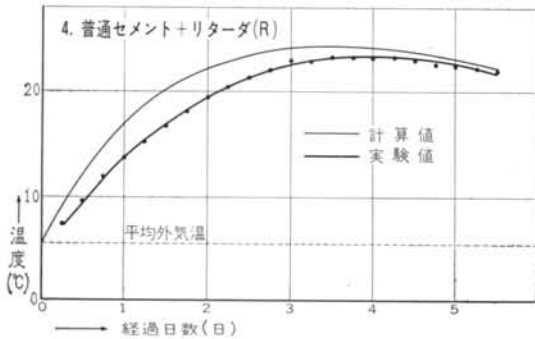
9.4図 (その 1)



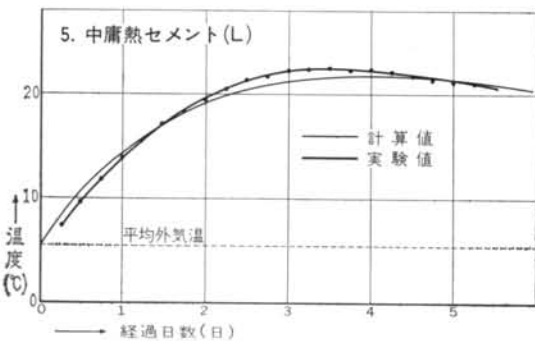
9.4図 (その2)



9.4図 (その3)



9.4図 (その4)



9.4図 (その5)

9.5 現場コンクリートとの関係

今回の試験では、境界条件が厳密に規定されており、一面に開放性をもつ無限に大きいコンクリートに相当する。ところが、現場のコンクリートは、

- 1) 境界条件が複雑である
- 2) 打込み時のコンクリートの温度、外気温、風速等は前述のように、セメントの水和速度と放熱速度に影響を与える

等の原因で、この実験値と必ずしも一致することはないが、その温度の順位や経過の傾向等は同じであると考えられるから、現場に使用するコンクリートの品質決定の資料となる。

§ 10. 結 論

A. 実験の目的に対する結論

- 1) 強度：すべて調査強度を上廻った。ただ、AEコンクリートのみが目標を下廻った。
- 2) 乾燥収縮量：AEコンクリートが最も大きく、リターダ混入コンクリートが最も小さい。
- 3) 乾燥比重：AEコンクリート以外は、条件を満足する。
- 4) 水和熱によるコンクリート温度：フライアッシュ混入コンクリートが最も低かったが、いずれも最大温度差は 20°C 以内で、この程度ならば、温度応力によるきれつ発生の可能性は少ない。

以上の結論より、実験の対象となった調査のなかの No. 4 のリターダ混入普通セメントコンクリートを採用した。

- ### B. 水和熱によるコンクリート温度に関して、理論式 (Mc Henry 式) からの計算値が、実験値とよく一致することを確かめた。

謝 辞：

この実験のうち“水和熱による温度上昇”に関して、理論式についてご指導をいただいた、建設省土木研究所コンクリート研究室の伊東室長、柳田技官に対して、また、理論式の数値計算に関してご協力をいただいた、当社設計部電子計算課の宮崎課長、三雲主任、小嶋氏に対し、厚く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) Measured and Computed Temperatures of Concrete at Norris Dam : D. Mc Henry : A.C.I. ,1937
- 2) 小河内ダム：東京都水道局編