

# 講 演

第 25 卷 第 12 號 昭和 14 年 12 月

## コンクリート堰堤施工中に於ける内部温度の上昇状況と 本邦産セメントの強度水和熱比に就て

(昭和 14 年 10 月 19 日土木學會創立 25 周年記念講演會に於て)

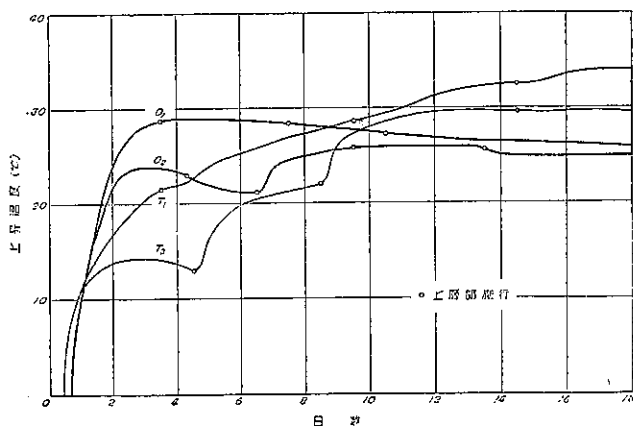
會 員 高 田 昭\*

重力式コンクリート堰堤又は之に類する大塊コンクリートに於て其の施行の途中に龜裂の發生を見るものが屢々ある。其の原因は主としてセメントの水和熱の蓄積によるコンクリート内部温度の上昇に在るもので、之が爲に生ずる温度應力と外部より作用する氣象的影響其の他によつて起る應力との總和がコンクリート塊の抵抗能力よりも大となれば内部至は遂に龜裂となつて現はれるのである。之を防ぐ爲に或は施工法に就き、或はセメントの性質に就て種々の研究も行はれ又一部に於ては實行されてもゐるが、未だ安全なる施工法が確立されるに至つて居ない。殊にセメントの性質は其の種類によつて相違するは勿論であるが、國々により異なり、又同一國內に在つても時局情勢等によつて必ずしも一定であるとは云ひ難いのである。従つてセメントの性質と施工法とは密接不離なる關係の下に於て考慮されねばならぬのである。

### 1. 堰堤内部温度の上昇状況

本邦に於て築造されたコンクリート堰堤に於て施工中温度の上昇状態を實測した結果より代表的であると考へられるものを示せば圖-1 の如くである。從來使用されたセメントの種類は 2 種に止まるから温度上昇の型も 2 種となる。

圖-1. コンクリート内部の温度上昇



O 型は普通セメントと呼ばれてゐるものを使用した場合を示すもので、O<sub>1</sub> では施行後急速に温度が上昇して 3 日目に最高に達し其の後は漸次降下し、其の上にコンクリートを打ち増すも之が爲に影響を受けてゐない。O<sub>2</sub> は施行後 3 日目に最高温度に達し次いで降下し始めた時に其の上に新しくコンクリートが打ち増された爲に再び上昇し、O<sub>1</sub> に近い温度に到達した後次第に低下して居る。

T 型は O 型に比して温度の上昇速度の緩慢なるセメントを使用した場合を示すもので、

T<sub>1</sub> は上層の施工毎に階段状に上昇してゐる状態を明瞭に示してゐる。T<sub>1</sub> は熱の放散の少ない場合に起る上昇曲線であつて上層の打ち増し毎に僅少な影響を受けてゐるが大體としては温度が緩慢ながら継続的に上昇して

\* 内務技師 理學士 内務省土木試験所勤務

る。

一般に堤體コンクリート施行後内部温度が上昇して最高に達する迄に要した日数を見るに孰れも豫想外に短時日である。例へば普通セメントを使用した場合としては小牧堰堤 2~3 日、玉泊堰堤 6~9 日、千頭堰堤 3~8 日、大間堰堤 3~8 日で最高上昇温度 20°~30°C に達してゐる。又主として中耐熱セメントを使用した塚原堰堤では 3~4 日目に最高温度に達した場合と、上層施行毎に階段状或は漸進的に上昇して約 12 日後に最高に達した場合とがあり、其の最高上昇温度は 10°~34°C であつた。

堰堤コンクリート施工中に於ける堤體內温度の分布状態の一例を示せば 圖-2 の如くである。止水壁は 3 月より施行し始め、全體を各リフト約 1.5 m として順次に打ち上げて 9 月 20 日迄施行し、其の後 10 日餘休止した時即ち 10 月 1 日現在に於ける内部温度の分布状態を示すものである。當日の気温は 9°~21°C、内部温度は最高 40°C である。此の圖に於て注目されることは等温線が或る箇所殊に表面附近に集中して居ること、即ち温度勾配がコンクリート施工後間もない箇所の表面附近に於て極めて急になつて居ることである。

コンクリートの表面附近に於ける温度勾配曲線及其の變化を實測した結果の一例を示せば 圖-3 の如くである。此の例は緩慢發熱性セメントを使用した場合であるから其の最高温度に達する迄には 12~14 日を經過してゐる。即ちコンクリート施工後 3, 7, 14 日と時日の經過と共に内部温度は順次に上昇して 12~14 日には最高に達してゐる。而して或る期間は其の儘の状態を維持し、爾後徐々に低下するが此の圖に示すが如く 5 月下旬の施工にかゝるものは 2 箇月後即ち 7 月下旬になると外気温度の上昇により表面附近の温度も亦上昇するから温度勾配は緩となるが、冬に向ふに従ひ内外共に漸次に低下してゐる。

前述の諸點と 圖-3 に示す状況とより次の傾向を察知することが出来る。

(1) 表面より約 2 m 迄の部分の温度勾配は 3~7 日の間に於て大體定まり、以後は内部温度のみが上昇し表面附近に在つては殆ど變らない。殊に普通セメントを使用した場合には之よりも短時日に最高に達してゐるから此の現象が遙かに顯著であると推測される。内部ではコンクリートの可塑性變形により壓縮應力の幾分は減殺されることは期待し得るが表面附近に於ける温度勾配が施行後短期日内に略々一定し且つ最急になるのであるから、若し此の際コンクリートの引張強が充分に具有されて居なければ龜裂を生ずる危険性が多いと云はねばならぬ。

(2) 表面附近に於ける温度勾配は向暑の季節には緩となり、向寒の季節には急峻となる傾向が多い。即ち夏に向ふ時

圖-2. 堤體內温度分布状態

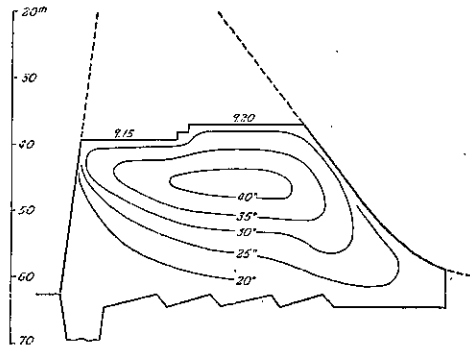
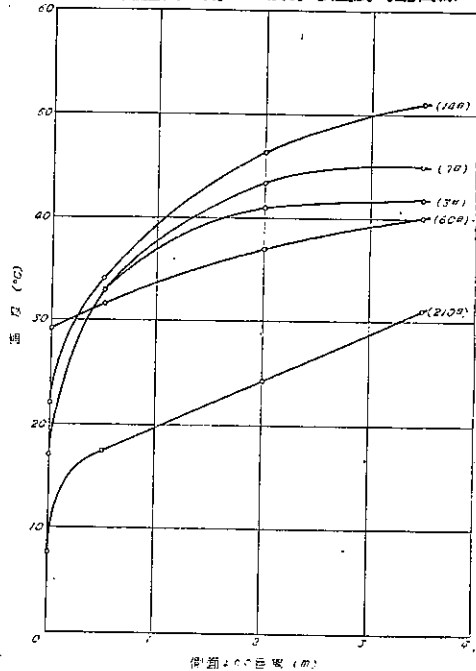


圖-3. 堤體側面附近に於ける温度勾配曲線



は外氣温度は次第に昇りつゝあるが、冬に向ふ時は外氣温度がコンクリート施工時よりも次第に——地方によつては急激に——低下するから内外の温度差は益々増大するもので、此の現象は内地よりも大陸性氣温の地に於て著しいと考へられる。従つて斯かる影響が危険であるとすれば之を軽減するには少くとも表部を或る期間保温することも一方法であり、又更に進んで内部温度の人工的低下も考慮されるのである。

以上の如く龜裂發生の危険ある時期は多くの場合施工後約 1 週間位である。従つて之を阻止する爲には少くともコンクリートの引張強が其の間に充分に出ることが必要である。勿論セメントの水和熱の蓄積による温度の上昇もコンクリートの引張強も共に時間的に増進するものであるから、コンクリートの比熱、擴散率、密度等が使用セメントの種類を問はず共通的に一定であるとすれば、此の兩者の間に常に或る一定の關係を保持せしめることが本問題を考察するに當り重要な條件となる。

## 2. 眞空壘法によるセメントの水和熱測定方法

セメントの水和熱の測定方法には間接法と直接法とがある。前者は溶解熱法とも呼ばれるもので所要の材齡の時に硬化セメントに硝酸と弗化水素との混液を作用せしめた時の溶解熱を測定してセメントの水和熱量を算定する方法であるが、連続的測定が出来なく又モルタルとか混合セメントとかに就て測定することの出来ないのが缺點である。直接法とは純セメント、モルタル又はコンクリートの温度上昇を直接に測定する方法で、斷熱法と眞空壘法とがあり同一條件で發熱速度及熱量を連続的に長期に互り測定し得る利點がある。

本測定に用ひた眞空壘法を概説すれば次の如くである。

### (1) 装 置

**恒温槽** 市販の冷蔵庫に似た構造を有する保温函に電動送風扇と其の前方に熱源として 110 V, 16 燭炭素線ランプとを取付け、温度の調節は槽内に設けた水銀調整器により眞空管繼電器を作動せしめ熱源及送風扇を作動又は停止せしめることによつて行はれる。

**温度計** 恒温槽内の温度調節には 0.1°C 分割の水銀變暖計を用ひ、眞空壘内及恒温槽内の温度測定には 6 箇所用電氣抵抗式自記温度計を用ひて記録せしめる。温度計の白金線バルブは直徑約 8 mm を有する硬質硝子管製である。

**眞空壘** 内徑約 7.3 cm, 深さ約 22.5 cm, 容量約 950 cc, 重量 488~530 gr を有する圓筒形のものである。

**眞鍮製容器** 内徑 5~6 cm, 深さ 14 cm を有する截頭圓錐形容器で之に試料を入れ、中央に細いブリキ管を埋設し其の内に温度計バルブを挿入した後、容器に径を施しバルブ挿入孔の間隙にはゴムパッキングを施す他、底及上蓋にも同様にパッキングを施してセメントの發熱に伴ひ發生する水蒸氣の漏出を防止する (圖-4)。

### (2) 眞空壘裝置の熱容量及熱量漏洩恒數

眞空壘裝置の熱容量 ( $C_1$  in Cal/°C) は次式より求められる。

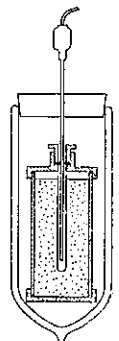
$$C_1 = (2(f+j))/2 + 0.1h + 0.09g + 0.24b$$

但し

{	$f$ : 空虛の眞空壘の重量 (gr)	$j$ : コルク栓の重量 (gr)
{	$h$ : ブリキ管の重量 (gr)	$g$ : 眞鍮容器の重量 (gr)
{	$b$ : 温度計バルブ挿入部分の容量 (cc)	

眞空壘裝置の熱量漏洩恒數は眞鍮容器内へ 65~75°C の温湯 300 cc を入れセメントの試験の場合と同様の裝置として恒温槽に入れ、其の温度の低下速度を 6~7 日間に互つて測定すれば其

圖-4. 眞空壘裝置



の結果より次式により算出される。

$$K = C_2(\log T_1 - \log T_2)/(t_2 - t_1)$$

但し

- $K$ : 熱量漏洩恒数 (cal/hr/°C)
- $C_2$ : 真鍮製容器内の水の熱容量と真空罎装置の熱容量 ( $C_1$ ) との合量 (cal/°C)
- $T_1, T_2$ :  $t_1$  及  $t_2$  時間後 ( $t_1 < t_2$ ) に於ける真空罎内の水の温度と恒温槽内の温度との差 (°C)

$K$  は恒温槽の温度により又時間的にも多少變化するから實驗毎に測定した。

(3) 試驗方法

試驗に先だち真空罎, 真鍮容器, 溫度計等装置に要するものは孰れも取りはずし, 又セメント, (砂), 蒸溜水の如き試料も別々に容器に入れ, 之等を全部試驗温度を有する恒温槽内へ入れて約 10 時間放置した。又室内温度は恒温槽内温度より數度低く保つようにした。セメントは 300~400 gr を用ひ, 先づ所要の水を真鍮容器に入れ, 次にセメントを注入して迅速且つ充分に混和した後弱き上下振動を與へて氣泡を排除する。此の操作中真鍮容器に直接手を觸れることは能ふ限り避くべきである。次いでブリキ管を埋込み, 溫度計を挿入して蓋を施した後真空罎内に納めてコルク栓を施す (圖-4 参照)。

(4) 水和熱量

混合後或る時間迄の水和熱量は溫度計記錄より次式によつて求められる。

$$H_x = C_2 \{ (t_0' - t_0) + (t_x - t_0') \} + K \cdot S_{0-x}$$

- 但し
- $H_x$ :  $x$  時迄に發生した熱量 (cal)
  - $t_0'$ : 恒温槽内の温度 (°C)
  - $t_0$ : 恒温槽内に入れる前に於ける試料の温度, 本試驗には  $t_0 = t_0'$
  - $t_x$ :  $x$  時間後に於ける試料の温度
  - $S_{0-x}$ : 溫度曲線圖に於て試料の溫度曲線と恒温槽の溫度線とによりて圍まれた  $0-x$  時間の間面積, 即ち毎時に於ける溫度差の總計

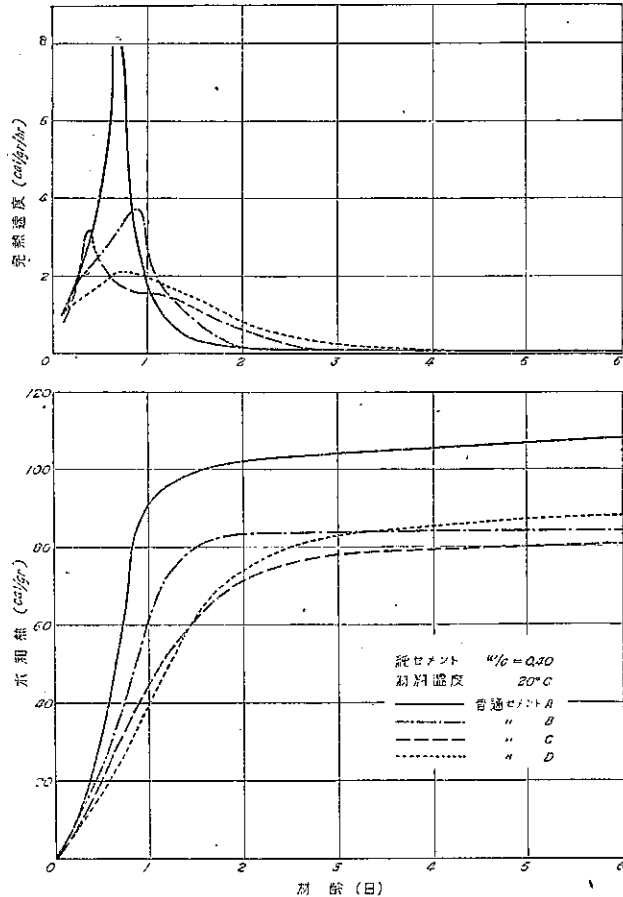
測定の結果はセメント 1 gr に付いての熱量で表はす。

3. セメントの水和熱

本邦産セメント數種に就て其の水和熱及發熱速度を測定した結果は圖-5, 6 に示す如くである。普通セメントは一般に急發熱性であり殊に急硬性のもの程其の傾向が著しい。高爐セメントは一般に考へられてゐるよりも發熱量が大であり, 珪酸セメントも普通セメントと大差なく, 中庸熱セメントは發熱緩慢である。

一般にセメントの水和熱量は W/C によつて

圖-5.



異なり、水量が増せば發熱速度は低下するが或る期間を経過した後の發熱總量は却つて増加する。又混合時の材料の温度によつても可成りの影響を受けるもので、其の高い程初期の發熱量は多く、又其の低い場合には之と反對に其の初期の發熱量は少ないが或る期間を経過した後の總量は却つて増加する。故にセメントの水和熱量の測定は  $W/C$  と材料温度とに一定の條件を設けて行はねばならぬ。

#### 4. セメントの強度水和熱比

堰堤コンクリートに於て温度上昇による龜裂の發生を防止する爲に要求される性質は其の發熱の少量であると同時に引張強の大なることである。即ち或る時期に於ける等量の發熱に對する引張強の大なるコンクリート程龜裂發生に對する耐抗性が大である。之をセメントに就て考へれば其の引張強水和熱比の大なるもの程此の目的に副ふものであると云へる。

表-1 は日本標準規格に據る硬練モルタル試験と工學會提案の軟練モルタル試験とを行つた結果を示し、之等の結果と  $W/C=0.40$ 、材料温度  $20^{\circ}\text{C}$  で測定した當該セメントの水和熱との

比を求めれば表-2 に示す如くである。セメント中で初期急速發熱性のものと緩慢發熱性のものとの壓縮強水和

圖-6.

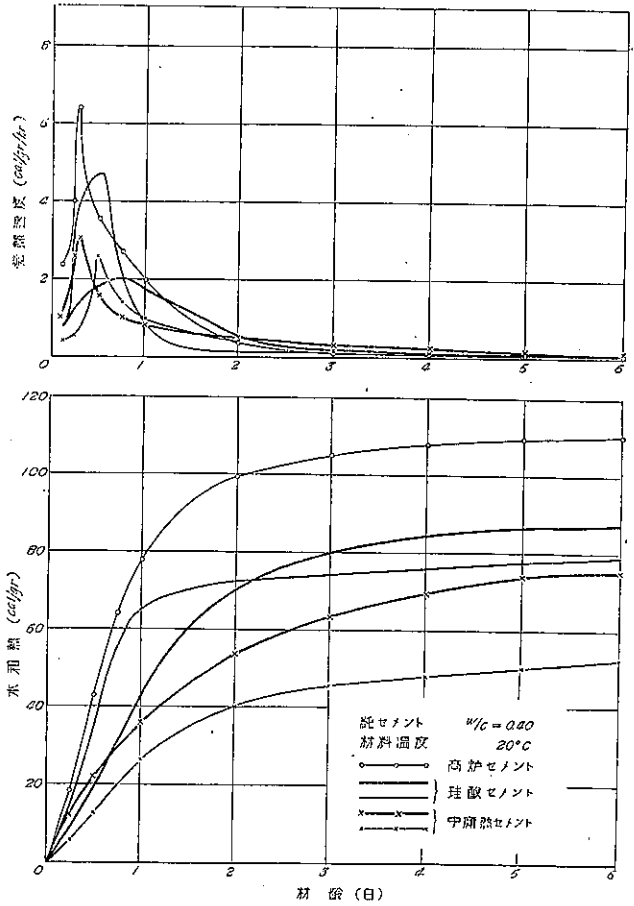


表-1. モルタル強度試験結果

セメントの種類	硬練 (1:3) モルタル						軟練 (1:1) モルタル				軟練 (1:2) モルタル						
	引張強			壓縮強			$W/C$	曲げ強		壓縮強		$W/C$	曲げ強		壓縮強		
	$W/C$	3日	7日	$W/C$	3日	7日		3日	7日	3日	7日		3日	7日	3日	7日	
普通セメント	A	0.271	37.7	41.5	0.280	426	523	0.45	66.0	92.2	363	536	0.65	41.3	58.2	181	324
	B	0.287	33.7	34.9	0.276	326	413	"	43.2	73.8	240	377	"	23.9	40.4	95.7	185
	C	0.271	31.1	37.1	0.280	249	395	"	49.1	88.5	216	428	"	24.2	41.4	88	183
	D	"	33.4	34.7	"	332	386	"	55.4	71.9	265	363	"	25.3	39.1	104	173
高熱セメント	E	0.280	33.0	35.9	0.288	337	456	"	39.8	70.6	224	348	"	29.0	46.8	111	189
珪酸セメント	F	0.300	31.5	33.6	0.308	282	431	"	38.5	72.7	201	345	"	25.4	40.8	87.8	143
中庸熱セメント	H	0.267	26.8	29.1	0.276	199	287	"	31.1	53.1	114	219	"	15.2	23.3	44.6	78.1
	I	"	22.7	29.3	"	180	253	"	26.6	40.4	84.1	168	"	14.7	26.1	41.9	79.4

表-2. セメントの強度水和熱比

セメントの 種類	硬練 (1:3) モルタル				軟練 (1:1) モルタル				軟練 (1:2) モルタル				
	引張強/水和熱		壓縮強/水和熱		曲げ強/水和熱		壓縮強/水和熱		曲げ強/水和熱		壓縮強/水和熱		
	3日	7日	3日	7日	3日	7日	3日	7日	3日	7日	3日	7日	
普通セメント	A	0.359	0.381	4.06	4.80	0.629	0.846	3.46	4.92	0.392	0.534	1.72	2.97
	B	0.404	0.412	3.91	4.37	0.515	0.871	2.86	4.45	0.285	0.482	1.14	2.21
	C	0.398	0.455	3.19	5.84	0.629	1.025	2.76	5.25	0.310	0.508	1.13	2.25
	D	0.401	0.446	3.99	4.34	0.676	0.808	4.36	4.13	0.304	0.439	1.25	1.94
高爐セメント	E	0.315	0.322	3.22	4.09	0.380	0.633	2.14	3.12	0.277	0.420	1.06	1.69
珪酸セメント	F	0.389	0.379	3.50	4.87	0.476	0.821	2.48	3.90	0.314	0.451	1.08	1.62
中庸熱セメント	H	0.426	0.381	3.17	3.77	0.495	0.699	1.81	2.88	0.242	0.307	0.71	1.03
	I	0.499	0.548	3.96	4.73	0.585	0.755	1.86	3.14	0.323	0.488	0.92	1.48

熱比を比較するに軟練モルタルの場合に於ては相當に顯著なる差異があり、後者は前者に比すれば發熱量の割合に硬化緩慢なることが窺はれるが、硬練モルタルの場合に在つては兩者共に殆ど等しい値を示してゐる。珪酸セメント及高爐セメントに就ても亦之と大體似た傾向が認められる。之に反して軟練モルタルの曲げ強水和熱比に在つては各セメントは孰れも大差なき値を示し、壓縮強水和熱比に於けるが如き著しい差を示すものがない。又硬練モルタルの引張強水和熱比に於ても之と同様であり、寧ろ中庸熱セメントの中に稍、大なる値を示すものすらある。

日本標準規格に據る硬練モルタル強度試験の結果とコンクリートの強度との間には殆ど關聯性が認められないのであるから、強度水和熱比も亦軟練モルタルの強度に就て求める方が至當であらう。前述の試験結果は其の數に於て充分ではないが軟練モルタルの曲げ強と水和熱との比が堰堤コンクリートの發熱による龜裂發生に關し重要な一條件であるとするれば、前述のセメントは其の種類如何を問はず本問題に關する限りに於ては概ね同等の條件を有して居ると云ひ得るのである。