

わが國のダム用セメント

浅岡 勝彦

わが國のダム用セメントは 1934 年 (昭和 9 年) に初めて造られ、今日までに 3ヶ所のダムで実際に使用された。その量は合計して 11 萬トンに達している。この量は全體のセメント生産量から考えると、ほんの九牛の一毛にしか當らないが、しかし今後この使用量は相當増加するであろう。

ダム用セメントに要求される最も大切な性質は、凝結、硬化のときに發生する熱すなわち水和熱がなるべく小さいということである。この意味で現在ダム用セメントといわれているものには、主として低發熱型のポルトランドセメントがあり、その水和熱は廣い意味では大體普通セメントの 65~90% 位に相當する。普通セメントの最終水和熱量は、大體、 $MgSO_4 \cdot H_2O$ (硫酸マグネシウム一水鹽) が水に溶解するときの總熱量に等しい。

1. 緒言

コンクリート構造物で、われわれに最も忌みきらわれるものは、何といつても龜裂ということであろう。ダムにおいてもまたそうであるが、その由つてきたところを大別すると、(1) セメント自體によるものと (2) 施工そのものによるものとの 2つに分けることができる。龜裂はダムの内部に蓄積される熱量が大ききときに起るし、又、1941 年以來のアメリカの研究結果では、セメント中にアルカリ分 (酸化ナトリウム、酸化カリウム) が多くて且つそのとき使つた砂、砂利がこのアルカリと反應しやすい形のシリカ (又は珪酸ともいう、 SiO_2) 分を含むときにも起ることがわかつている。であるからダムに龜裂を起さないようにするためには (1) なるべく水和熱 (すいわねつとよむ) の少ないセメントを撰ぶこと (2) 打つたコンクリートを直ちに適當の方法で冷やすこと (3) 或はセメント、砂、砂利、水を事前に冷却して使うこと (4) 強さに差支えない程度で砂、砂利を多く用い、そしてセメントの使用量を減らすこと (5) 急ピッチでコンクリートを打たぬこと (6) 氣温の高い季節又は時間を避けること (7) アルカリ分のなるべく少ないセメントを使うこと (8) 反應性シリカ分の少ない砂、砂利を撰ぶこと、などのもろもろの事柄が常識的に必要條件となつてくる。しかしながらこれらのことを同時に全部満足させることはいろいろの點からみればなほだ難しい。特に (4)、

(5)、(6) は限られた期間でその工事を行い、しかもでき上つたものが或る水準以上の強さであるためには、なかなか實行困難なことであるし、(2)、(3) は經費がかさんでこれ又行いにくい。幸いに (8) の砂、砂利は今までのところでは日本には危険な性質をもっているものはほとんどないらしいので、(7) のアルカリ分はそう問題になくてもよいようである。それに比べると (1) は重大ではあるが、これは施工者の負擔に無關係に、ただ、セメント業者側の製造方法によつて實現できることである。この線に沿つて出現したのがダム用セメントなのであり、従つてその最も大きい使命も低發熱性ということである。以下これについて主として日本の過去と現状について述べてみたい。

2. 沿革

ダム用低發熱性セメントが世界で最初に出現したのはアメリカであり、それは 1932 年すなわち昭和 7 年のところであつた。それまでもダムは幾つとなく構築されたわけであるが、これには普通のセメントを使つたのである。しかしそれで別に異常がなかつたところを見ると、特にダム用セメントでなくてもよいということは一應いえるかも知れない。しかしそれは工事のスピードがおそく、しかも規模の小さいダムだつたからである。たまたま、1930~1932 年になつて高さ 125 m という巨大なオウヘーダムを従來通りの普通セメントで打つこととなつたが、これは不幸にして龜裂を生じたので、その直後に着工された。モリスダム (工事中はバインキャオンダムといわれた) に初めて低熱セメントが使われた。その結果は極めて良好であつたので、次いで彼の有名な世界最高の高さを誇るフーバーダム (別名、ボールダーダム、220 m) にも低熱セメントが用いられたのである。この傾向は少くとも大堰堤をハイスピードで打つときの常識とまでなつた。このニュースは世界各國に傳播し、低熱セメントの製造、使用、試験法、乃至は規格という廣範圍にわたる新しい事柄が、日本、イギリス、スウェーデン、フィンランド、メキシコ等に起つたのである。

翻つてわが國の低熱セメントの由來について述べると、その研究はアメリカで低熱セメントが初めて使われた上述の 1932 年に初まり、製品としては 1934 年の 7 月に一應市販化された。すなわち當時のアサノマスコンセメントがそれである。このセメントはその頃、日本で

最高といわれた九州の塚原ダム(つかばるとよむ, 84 m)に 1935 年から年にかけて大量に用いられた。この低熱セメントは當初あまりに發熱が低すぎたために中途から中庸熱セメントに變えられた。1939~1945 年の間は第 2 次大戦のため、ダムの建設は中止されたものが多かつたので、低熱セメントも用いられることなく過ぎ去り、戦後になつて漸く 1949 年あたりから再び徐々に用いられ出してきた。すでに宮崎縣の石河内(いしごうち)ダム(62 m)や京都府の新庄ダム(35 m)にはそれぞれ低熱並に中庸熱セメントが使用された。現在(昭和 27 年 5 月)のところでは、中庸熱又は低熱セメントがダムで使われているということは寡聞にしてこれをきかないが來年から東京都の小河内ダム(149 m)、九州の上椎葉ダム(かみしば, 127 m)、栃木縣の五十里ダム(いかりとよむ, 107 m)、高知縣の物部ダム(ものべ, 75 m)などには中庸熱のダム用セメントが使われ出す公算が大きく、その他電源開發のために計畫されている高堰堤が、奥只見(おくただみ, 155 m)を初め續々と控えているのでその前途は正に洋洋たるものがある。おそらく今後少くとも 10 年間は低熱系セメントにとつての黄金時代がくるであろうことと思われる。

3. 特 性

一般にセメントは數種の礦物の集合體であるが、中でもその本體をなすものは C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF の 4 つである。 C_3S というのは珪酸三石灰のことで $3CaO \cdot SiO_2$ の略記號である。 C_2S は珪酸二石灰のことで $2CaO \cdot SiO_2$ の略記號、以下同様に C_4A はアルミン酸三石灰, $3CaO \cdot Al_2O_3$, C_4AF は鐵アルミン酸四石灰, $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ のことである。この 4 成分のおおの割合は普通セメントであれば大體同じであり C_3S 42~55%, C_2S 20~35%, C_3A 8~12%, C_4AF 9~12%, 平均して 48, 27, 16, 10% 合計 95% 位のところにある。残りは石膏 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 3%, マグネシア MgO 1%, アルカリ($Na_2O + K_2O$) 0.8% その他というところでマグネシアとアルカリは不純物というわけである。ダム用セメントの普通セメントと異なる第 1 のものは實にこの主要 4 成分のいちじるしい相異にあるのであつて、もろもろの特性はすべてここにその源を發する。すなわち次の第 1 表がその成分比較である。

いかなるセメントも $C_3S + C_2S$ の和は 74~76% 位の

第 1 表 ダム用、中庸熱、低熱セメントの成分 (%)

種 類	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	MgO	$Na_2O + 0.65K_2O$
中 庸 熱	32~42	33~43	6~8	12~13	3	1	0.6
中庸代表	37	38	7	12	3	1	0.6
低 熱	20%31	44~55	5~6	12~13	3	1	0.6
低熱代表	26	50	5	13	3	1	0.6

範圍にあり、また $C_3A + C_4AF$ は 18~20% 位のところにある。このことは普通セメントもダム用セメントも變りはない。ただ、その各各の割りふりが根本的に異なるだけである。 $C_3S + C_2S$ はいわゆる、水硬要素でありその中 C_3S は初期ならびに長期の全期間を支配し、 C_2S は 1 ヶ月以後の長期のみを支配する。従つてダム用セメントは $C_3S < C_2S$ のものが多いから、普通セメントに比べて初期特に半ヶ月以内の強さは 20~50% 方、低い。しかし 1 ヶ月位いでたいてい普通セメントの 90% 位の強さとなり 2~3 ヶ月位いでは普通セメントと同じ強さを發揮し、6 ヶ月以降ではかえつてそれを凌駕するのが 1 つの特徴である。 $C_3A + C_4AF$ はセメント焼成の際に必要ないわゆる、媒融劑であり、製品ができてしまつたあとではあまり用をなさない。 C_3A はしかし、 C_4AF に比べると初期の強さ發生に多少補助的な役目をする。

それならなぜに上のような一見、不利のように見られる成分上の改變をダム用セメントに施したか。それが今回述べようとする最も重要な事柄なのである。それは何であるかといへば、一にかかつて水和熱を低減するためには他にない。この研究は過去 20 年位いにわたつて内外の多數の人々によつて行われたが、その一致したところによれば、 C_3S は約 110 cal/g, C_2S は 30 cal/g, C_3A は約 200 cal/g, C_4AF は 50 cal/g 位の發熱をするというのである。すなわち C_3A と C_3S とが壓制的に發熱し、これに反して C_2S と C_4AF はほとんど發熱しないのである。中でも C_3A は C_3S の 2 倍も發熱し而も一次的の水硬要素ではないから、低熱セメントという立場からは正に何の役にも立たない代物である。従つて理想的には C_3A は零% としたいところであるが、そうすると非常に燒きにくいばかりでなく、また初期の強さも半分以下に落ちる。 C_3S もまたこれに次いで高發熱であるから、この方も初期の強さを多少犠牲にしてもその含有量を下げるといふことになる。こうして強さと水和熱との適正なバランスでできたものがダム用セメントの第 1 表成分である。もちろん、ダム用セメントには水和熱と強さとの規定がありこれとのかね合ひも重要なことになつてゐる。今、参考のために、英、米、スエーデン、フィンランド、メキシコ、ポルトガルの規格値を次にかかげよう。ただし、強さ關係は砂、水量等を國によつて異なるので彼我の比較はできないからこれを省くこととした。

この表でも明かなようにダム用セメントというからには成分的に見て C_3S 35%, 多くても 40% 以下、 C_3A も 7% 以下を普通とするものようである。このため發熱は普通セメントよりも平均 2 割方少いが、2~3 ヶ月以後の強さはこれを凌駕する。従つてダム用セメントとして最も重要な強度、發熱比が長期にわたつて大である。まだその他に耐水溶

第2表 世界各國のダム用セメント發熱、
成分規格値表

項目	國別	イギリス 低熱 (1947)		アメリカ(1) 中熱 低熱 (1949)		スエーデン 低熱 (1943)	フィンランド 低熱 (1945)	メキシコ 低熱 (1943)	ポルトガル 低熱 (1930)
		低熱	中熱	低熱	低熱	低熱	低熱	低熱	低熱
水和熱 (cal/g)									
3日		—	—	—	<55	<55	—	—	—
7日		<65	<70	<60	<65	<65	—	—	—
28日		<75	<80	<70	—	—	—	—	—
成分(%)		—	—	—	—	—	—	—	—
SiO ₂		—	>21	>22	—	—	—	>21	—
Al ₂ O ₃		—	<6	<6	—	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃		—	<6	<6.5	—	—	—	<6	<6.5
CaS		—	<50	<35	—	—	—	>30	<30
C ₂ S		—	—	—	—	—	—	>40	<40
C ₃ A		—	<8	<7	—	—	—	<7	<7
Na ₂ O+ 0.66 F ₂ O		—	<0.60 ⁽²⁾	<0.60 ⁽²⁾	—	—	—	<0.8	—
MgO		<4.0	<5.0	<5.0	—	—	—	<4.0	<5.0
CaSO ₄ · 2H ₂ O		<5.91	<4.30	<4.30	—	—	—	<4.30	<4.30

註 (1) A.S.T.M 法 (2) 購入者から特に要求のあつた場合だけに適用される。なお、アメリカでは中庸熱型に II 型、低熱型に IV 型という記號を用いている。

性であり且つ低收縮性である。

4. 試験法

ダム用セメントの試験項目として重要なものは、もちろん水和熱であるがその他強さ、化学分析等もまた不可欠である。しかしながらここでは主として水和熱について述べる。わが國ではこの測定法はまだ JIS として規格化されていない。しかしいずれはこれを設けるべき機運にある。今までに規格になつてゐる國は第2表のように4ヶ國であるが、端的にいつて英、米の測定法はいわゆる、溶解熱法といわれるものであり、スエーデン、フィンランドのものは斷熱法と呼ばれてゐるものである。溶解熱法は一名、間接法ともいわれ、水和熱をセメントの酸に對する溶解熱から間接的に求める方法である。これに反して斷熱法というの是一名、直接法ともいわれ、セメントの發熱を直接に温度上昇から算出するのである。兩者には一長一短があつて、にわかにいずれがいいとは斷じ難い。溶解熱法の長所はいかに1年、2年という長期でもその全期間に發生した熱量の總和を知ることができ、短所として連続的に時々刻々の發熱を知ることができない。斷熱法はその反對で、特に0~3日というような初期の發熱速度を知ることができるが、7日以後は熱漏洩による誤差も大きく事實上測定は繼續は難しい。従つて溶解熱法は普通の場合7日、28日の水和熱値を試験の對象とするに反し、斷熱法では3日、7日を對象とする。日本の水和熱規格がその何れの方法によるべきかは、はなはだ研究を要する問題であるが、國際性ともならみ合わせれば、米英式に準ずるであろう見透しは大きい。従つてここでは溶解熱法について今少し詳しく述べてみよう。熱化学ではいわゆる、ヘスの法則というの

があり、熱化学についての吸熱又は發熱の化學式がいくつかあるとき、それを差引き又は加え合せても差支えないことになつてゐる。溶解熱法はこの理論に基づいて行われるもので、今、水和しないすなわちもとのセメントが或る酸に完全に溶解して X₀ cal/g を出したとき、その同じセメントの假に 28 日経過した水和物を同様にその酸で溶解して X₂₈ cal/g を出したとすれば、X₀-X₂₈ cal/g はその 28 日の全期間に發熱した總熱量であるはずである。この際酸としては硝酸だけではセメントを完全に溶かし切らないから、これに少量の弗化水素酸を混合し常に一定濃度のものを一定量用いるのである。このようにして求められる溶解熱や水和熱の値は次の第3表のようなものである。

第3表 各種セメントの溶解熱と水和熱

種 題	酸液に對する溶解熱 (cal/g)			水和熱(cal/g)	
	原セメント X ₀	水和物		7日 X ₀ -X ₇	28日 X ₀ -X ₂₈
		7日, X ₇	28日, X ₂₈		
普通セメント	610	536	520	74	90
早強セメント	620	538	521	82	99
ダム用セメント(中庸熱)	600	534	523	66	77
ダム用セメント(低熱)	590	535	523	55	67

セメントの水和熱は初めの 28 日で全體の約 80% を放出してしまうものであるが、その大きさは上の第3表のように高々 100 cal/g 止りである。それはちやうど Mg SO₄·H₂O が水に溶解するときの溶解熱 96 cal/g に大體等しい。そして普通セメントを 1.00 とすれば、上の例では發熱量の割合は、早強セメントが約 1.10、中庸研セメント 0.85、低熱セメント 0.75 というところである。ダム内の温度上昇も、もしセメント使用量、水量その他の條件が全く等しい場合にはこのセメントの發熱量に正比例すると見てよい。すなわち盛夏時に普通セメントならばダム内の温度は最高 55°C には達するが、その場合低發熱系セメントで置換すれば、それ相當の低温度上昇で済むのである。

5. 實 績

それでは次に過去において、わが國でダム用セメントの實績がいくつあるかということになる。これについて少し述べると、わが國で過去 25 年位の間には造られた、しかも高さ少くとも 25 m 以上の主なダムは優に 50 以上に達するが、この中、ダム用の中庸熱又は低熱セメントが用いられたのは僅かに3つである。あとはすべて普通セメントか又は極くまれに高爐セメントかである。そして今までに別に大きな龜裂事件もなく今日にいたつて

(21 頁へ續く)