

中規模重力式ダムにおける熱応力軽減対策とレアー工法の採用

中部電力(株) 土木建築部 ○安藤兼治
岐阜支店 正会員 野池悦雄

1 はじめに

一般に、中規模重力式ダムでは低発熱型の中庸熱ポルトランドセメントを用い、堤体を縦横断面方向に分割(15m×20m程度の区画)して施工するブロック工法が採用されている。しかし、この場合は、縦継ぎ目をジョイントグラウトによって充填し、堤体を上下流方向に一体化させる必要がある。

そこで、ダム用セメントのワーカビリティ改善と発熱抑制をねらってフライアッシュを混入し、堤体を上下流方向に一体化するレアー工法を検討して、当社赤石ダム(堤高58.0m、

堤体積102,000m³)で採用しコストの低減を図ることができたので報告する(表-1)。

2 熱応力軽減対策とそのコンクリートの性質

最近いくつかのダムで超低発熱型の中庸熱フライアッシュセメントを用いた事例が見られるが、これらは貧配合化を行ったうえ、レアー工法を採用している。

フライアッシュは品質バラツキがあり、管理が難しい等の問題があるが、既地点での実績、現場配合試験の結果から特に支障がないことを確認した。また、内部コンクリートについて、その施工性を検討するため、中庸熱ポルトランドセメントおよび中庸熱フライアッシュセメントを用い、単位セメント量140、160kg/m³とした骨材最大寸法 150mmのコンクリートの試験練りを行った。このコンクリートのセグリゲーションの観察、締固め所要時間を測定した結果から、中庸熱フライアッシュ(30%混入)セメントを用いて単位セメント量を140kg/m³とする貧配合化が可能となり、表-2の配合を選定した。このコンクリートの強度は表-3のとおりであり、当ダムの設計基準強度を十分満足している。なお、合わせて行った熱特性試験の結果は表-4のとおりである。

3 熱応力解析

レアー工法のコンクリートの特性値、赤石ダムの形状、

表-1 赤石ダムの使用セメント等

項目	実 績
使用セメント	中庸熱フライアッシュセメント (フライアッシュ30%)
単位セメント量	内部 140kg/m ³ 外部 200kg/m ³
打設工法	レアー工法
リフト高	EL1060~1090m...1.0 m EL1090~1118m...2.0 m

表-2 コンクリートの示方配合

項目	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (mm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 w/c (%)	細骨材率 s/a	単位重量 W+C+S+G (kg/m ³)
配合						
内 部	150	4 ± 1	3 ± 1	68.6	26.0	2,454.0
外 部	150	4 ± 1	3 ± 1	48.0	24.5	2,458.7

項目	水 W	セメント C	細 骨 材 S	粗 骨 材 G					骨 材 合 計	混 和 剤 A E 剤(cc/c=1kg)
				150mm~80	80mm~40	40mm~20	20mm~5	粗骨材計		
配合										
内 部	96	140	566.5	496.6	463.5	362.8	328.6	1,651.5	2,218.0	1.70
外 部	96	200	520.4	493.8	460.9	360.8	326.8	1,642.3	2,162.7	2.25

表-3 コンクリートの強度 (単位 kg/cm²)

強度	単位セメント量	1日	3日	5日	7日	14日	28日	91日
圧縮	140kg/m ³	9	33	45	51	67	110	238
	200 "	22	89	113	130	179	252	433
引張	140 "	1.2	4.4	5.6	7.3	8.4	15.2	25.4
	200 "	2.9	9.8	12.1	13.1	19.7	28.3	43.2

表-4 コンクリートの熱特性試験結果

項 目	コン ク リ ート	
	内 部	外 部
熱伝導率 K (Kcal/mh℃)	2.98	2.99
比 熱 C (Kcal/kg℃)	0.320	0.309
熱膨張係数 α (×10 ⁻⁶ /℃)	9.17	9.18
断熱温度上昇式	$T = 15.56 \times \{1 - e^{-0.594(t-0.167)^{0.538}}\}$	$T = 20.61 \times \{1 - e^{-0.707(t-0.2)^{0.608}}\}$

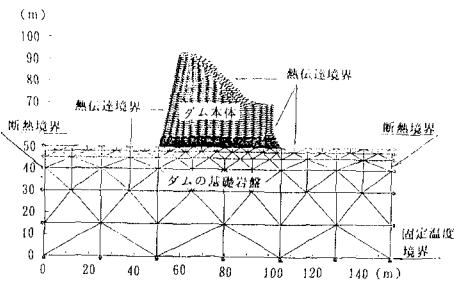


図-1 ダムの熱伝導、熱応力解析と境界条件のための要素分割

外気温等を考慮して、次式を用い2次元FEMによる非定常熱伝導・熱応力解析を行い、温度ひび割れに対する安全性の検討を行った。

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial \theta}{\partial y}) + Q(t) = \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

境界条件

固定温度境界

$$\theta(x, y) = \theta_0(x, y)$$

対流境界

$$K_x \frac{\partial \theta}{\partial x} L_x + K_y \frac{\partial \theta}{\partial y} L_y + q + \alpha(\theta - \theta_0) = 0$$

ここに、 θ ；温度 K_x, K_y ；x, y方向の熱伝導率 Q ；発熱率 ρ ；密度 C ；比熱 α ；熱伝達率 θ_0 ；外気温 q ；熱流束 L_x, L_y ；x, y方向の方向余弦

3-1 解析断面

解析は次の2つの断面を対象とし、コンクリート打設のリフトスケジュールに基づいて行った。

①レアー長が最大(55.3m)となり、温度応力が大きくなる越流部の断面(図-1)

②コンクリートの打設開始時期が初夏となるため、岩盤拘束により発生する引張応力が他のブロックより大きくなると思われる非越流部の断面。

3-2 解析結果

内部コンクリートでは、堤体の温度降下に伴い引張応力が増加し、ダム完成後10年経過した時点でほぼ一定値に収束する。また、堤体中央真夏打設部が熱応力的に過酷な条件となることが分かった。次に、着岩部の堤体中央部については、発生する引張応力の絶対値が小さく、ひび割れの発生する危険性が他の箇所比べて非常に小さいことが分かった。ここで、解析結果のうち越流部について、大きな引張応力の生ずる上下流面隅各部および堤体中央真夏打設部における温度、応力履歴図を図-2に示す。なお、内部コンクリートの最終安定温度到達時の引張応力の推定については、各経過年毎の温度降下量当たりに発生する引張応力の関係から推定した。

この結果から得られた越流部の各箇所の最大引張応力を表-5に示す。これはひび割れを防止したい場合の温度ひび割れ指数1.5を上回っており問題ない。

なお、レアー工法施工後の着岩部および真夏打設部の温度測定結果を図-3に示す。

4 おわりに

以上のような検討の結果、中庸熱フライアッシュセメントを用いたレアー工法を採用し、主にセメント量の減、縦ジョイントの省略等により、工事費を削減することができた。

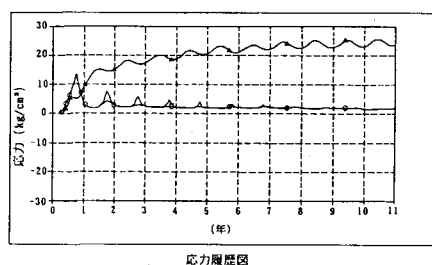
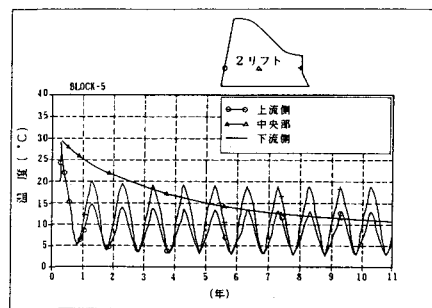


図-2 越流部真夏打設部 温度、応力履歴図

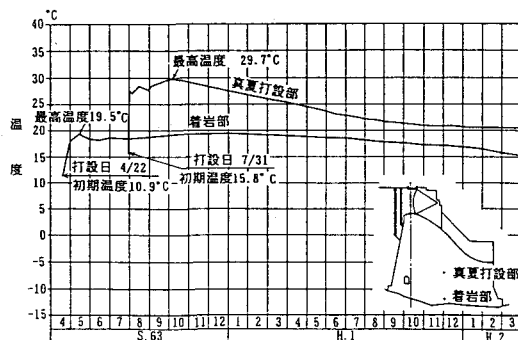


図-3 越流部における堤体温度の実測結果

表-5 堤体内部に生じる最終引張り応力と温度ひび割れ指数

堤体内部の位置	非越流部		越流部	
	引張り応力 (kg/cm²)	温度ひび割れ 指数	引張り応力 (kg/cm²)	温度ひび割れ 指数
上流面隅角部	19.7	2.62	18.2	2.48
真夏打設部	13.0	2.98	18.3	2.11
下流面隅角部	21.2	2.44	20.0	2.59

(注) 温度ひび割れ指数 ≥ 1.5 のとき、ひび割れに対し安全である。