

# 坝体保温层的等效模拟及保温效果分析

汪 强,王进廷,金 峰

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(筹),北京 100084)

**摘要** :针对目前保温层设计施工中工程经验占主导而数值仿真研究相对较少的情况,基于大型商业有限元分析软件 ABAQUS,对某工程保温层进行有限元分析计算。采用参数等效算法,在同一模型上计算不同厚度(1.5 cm、2.5 cm、5.0 cm)保温层防护下的坝体温度场及应力场。分析结果表明:①统计特征点在无保温层时的年内温差较大,铺设保温层后,年内温度变幅显著降低,保温效果随着保温层厚度的增大而逐渐增强,铺设 5.0 cm 厚的聚苯板保温层可将统计特征点的年内最大温差由 15.47℃减小为 6.30℃。②在无保温层保护的情况下,下游坝面出现大面积的拉应力区,最大拉应力值超出混凝土的抗拉强度,增加保温层后,坝体下游面应力状况得到明显改善,拉应力区减小且拉应力值随保温层厚度的增加而逐渐减小,铺设 5.0 cm 厚的聚苯板保温层可将拉应力值由未加保温层时的 2.73 MPa 减小为 1.46 MPa。

**关键词** :混凝土坝;温度应力;保温材料;有限元法;参数等效

中图分类号:TV642;TV315

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2007)02-0058-04

**Equivalent simulation of dam heat insulators and their effect analysis**//WANG Qiang, WANG Jin-ting, JIN Feng (State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** : In consideration of the fact that the current design and construction of heat insulators were mainly dominated by project experiences but rarely depended on numerical simulation, an analysis was performed on the heat insulator of a dam by use of the finite element method based on ABAQUS. Parameter equivalence algorithm was used to calculate the temperature field as well as the stress field of the dam covered by different thickness (1.5 cm, 2.5 cm, and 5.0 cm) of heat insulators. Some conclusions were drawn as follows: the temperature at representative points varied obviously during a year when no insulator was laid, while the range of temperature variation during a year decreased significantly under the protection of a heat insulator; the effect of the heat insulation improved with the increase of the thickness of the heat insulator, and the maximum temperature difference at the representative points during a year decreased from 15.47℃ to 6.30℃ under the protection of 5.0 cm polystyrene insulator; a tensile stress zone of large area appeared on the downstream surface of the dam when no heat insulator was laid, and the maximum tensile stress was larger than the tensile strength of concrete, while the stress zone decreased under the protection of the heat insulator, the tensile stress decreased with increase of the thickness of the heat insulator, and the maximum tensile stress decreased from 2.73 MPa to 1.46 MPa under the protection of 5.0 cm polystyrene insulator.

**Key words** : concrete dam; temperature stress; heat insulation material; finite element method; parameter equivalence

温度应力是造成混凝土结构开裂的重要原因,对寒冷地区的水工结构裸露面铺设保温层是一种常见的保温防裂措施,我国许多水利工程都采用了保温措施,取得了很好的效果。新疆托海水电站坝区多年平均气温 8.4℃,最高气温 37.9℃,最低气温 -40.4℃。年内温差极大,对大坝下游面进行聚氨酯保温层喷涂处理后,没有再出现坝体裂缝<sup>[1]</sup>。新疆石门子水库坝址地区多年平均气温 4.1℃,最高气温 33.2℃,最低气温 -31.5℃。喷涂 3~5 cm 厚

的聚氨酯进行保温,之后在外界气温约 -20℃时保温层下的混凝土表面温度为 6~8℃,保温效果好<sup>[2]</sup>。三峡大坝三期厂房坝段铺设 5 cm 聚苯板作为保温层,试验结果表明聚苯板内部基本保持相对恒温、恒湿,有效减小了坝体表面的非线性温差<sup>[3]</sup>。

对于坝面保温措施,其保温效果的分析和研究非常关键。传统的保温层设计施工方法通常只是根据工程经验进行<sup>[3]</sup>。保温材料的选择主要依赖于之前的工程经验,兼顾保温材料的施工方法和物理特

性参数,此外,保温层铺设厚度的确定也带有明显的经验性。在确定了保温措施后,通常辅以简单的现场试验对保温效果进行检验。传统方法无法确定铺设保温层后坝体的温度场分布和应力状态,其效果评价完全依赖于施工后的现场测量,这种经验方法难以保证保温效果的可靠性,其工程经济性更是无从考虑。因此,在设计施工前对保温层进行精确的数值模拟是工程建设中迫切需要的。

由于坝体结构形状以及变温条件都非常复杂,其温度场和温度应力很难采用解析方法进行分析,因此一般都采用数值方法,其中有限元法是一种方便而有效的工具,得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>。

本文提出在有限元建模中对保温层厚度进行等效放大,直接采用常规实体单元来模拟保温层。这样做主要是考虑到以下两个因素:①高坝有限元计算中,坝体单元特征尺寸为米量级,而保温层实际厚度多为厘米量级。如果按实际厚度模拟,不仅操作存在困难,而且所建单元两个维度尺寸悬殊,单元形态差。②在具体工程问题中,为了优选保温材料及确定保温层厚度,需求解不同厚度保温层作用下坝体的温度场及应力场。基于此,要求采用固定厚度的网格模型模拟不同厚度的保温层,所以必须在建模时将保温层单元定为便于计算的标准厚度,并引入等效算法。本文应用等效算法对某拱坝的保温措施及保温效果进行分析研究,给出了对该拱坝进行保温防护的工程建议。

## 1 等效模型

为了能够采用放大的单元来模拟实际保温层并采用统一网格模拟不同厚度的保温层,需要引入等效算法。保温材料的热力学参数如热导率、比热容等随厚度应做相应等效。

### 1.1 参数等效

混凝土表面通过保温层向周围介质放热的等效放热系数为<sup>[4]</sup>

$$\beta_s = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \sum \left( \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)} \tag{1}$$

式中: $R_s$ 为热阻; $\lambda_i$ 为保温层热导率; $\delta_i$ 为保温层厚度; $\beta$ 为固体表面在空气中的放热系数,它与风速有密切的关系,具体数值可根据表面光滑度及风速查表或采用公式计算得出。

等效前后的保温层欲达到相同的等效放热系数,其热导率需满足如下的关系式:

$$\lambda_2 = \frac{\delta_2}{\delta_1} \lambda_1 \tag{2}$$

式中: $\lambda_1$ 为保温材料的实际热导率; $\delta_1$ 为保温层的实际厚度; $\lambda_2$ 为等效单元的热导率; $\delta_2$ 为等效保温层单元的厚度。

比热容 $c$ 表征单位质量的材料温度升高1 K所需吸收的热量,质量为 $m$ 的材料温度升高 $\Delta T$ 所需吸收的热量 $Q = cm\Delta T$ 。保温材料等效增厚以后,升高相同温度所吸收的热量应与等效前相同,在温度场计算中可令保温材料等效前后的密度不变,即 $\rho_1 = \rho_2$ ,则 $c_1\delta_1 = c_2\delta_2$ ,得到模型中的等效比热容为

$$c_2 = \frac{\delta_1}{\delta_2} c_1 \tag{3}$$

### 1.2 模型验证

经过上述参数的等效后,采用大尺寸实体单元模拟的保温层就能以足够的精度来仿真真实的保温材料。图1所示为建立的一维等效验证模型,模型两端赋以相同的固定温度边界(一类温度边界),分别透过实际保温层和等效保温层向相同的材料块体进行热传导。中间增加1个隔热块体,使得两侧热传导互不干扰。

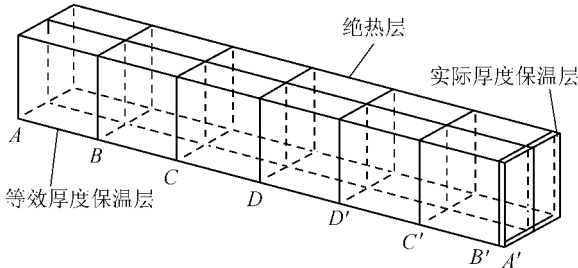


图1 一维等效验证模型

建立有限元网格模型,计算中各部分的材料参数如表1所示。左右两端的6个节点赋以30℃恒定温度边界,采用ABAQUS软件计算其瞬态温度场。

表1 一维等效验证模型计算参数

| 材料部位  | 厚度/cm | 热导率/<br>(W/(m·K) <sup>-1</sup> ) | 比热容/<br>(J/(kg·K) <sup>-1</sup> ) |
|-------|-------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 实际保温层 | 3.38  | 0.045                            | 1000                              |
| 等效保温层 | 100   | 1.331                            | 33.8                              |
| 传 热 层 | 2×100 | 1.395                            | 902.3                             |
| 绝 热 层 | 100   | 0                                | 1000000                           |

取出计算过程中几个典型时刻的节点温度值如表2所示,其中所选时刻 $T_0$ 为 $8.64 \times 10^5$  s(10 d)

表2 对应点温度值计算结果

| 节点 | 10 d  | 50 d  | 100 d | 200 d |
|----|-------|-------|-------|-------|
| A  | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 |
| A' | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 |
| B  | 11.02 | 20.95 | 24.73 | 28.14 |
| B' | 11.03 | 20.95 | 24.73 | 28.14 |
| C  | 3.19  | 13.42 | 20.24 | 26.56 |
| C' | 3.20  | 13.42 | 20.24 | 26.56 |
| D  | 1.10  | 9.41  | 17.68 | 25.65 |
| D' | 1.10  | 9.41  | 17.69 | 25.66 |

5 倍  $T_0(50\text{ d})$  10 倍  $T_0(100\text{ d})$  20 倍  $T_0(200\text{ d})$ 。可以看出,等效放大后的保温层单元和原厚度保温层单元具有相同的热传导特性。在任意时刻,一维等效验证模型左右两侧的温度场分布规律相同,对应节点温度值基本相同。所以,采用等效单元进行保温层保温效果计算分析是可行的。

2 工程实例

2.1 计算模型

某拱坝由于下游坝面存在较大的非线性温差,冬季下游右岸存在较大范围的拉应力区,最大主拉应力约在 2.5 MPa 以上。分析研究表明,过大的非线性温差是下游坝面出现裂缝的重要原因<sup>[5]</sup>。采用有限元对该拱坝保温层进行模拟,计算在不同厚度保温层防护下的坝体温度场和应力场,以确定对该拱坝进行保温防护的优化设计和施工方案。建立该拱坝坝体及保温层有限元网格,该模型连同坝基共有 157 314 个计算单元、169 258 个节点,其中坝体单元 126 428 个,保温层单元 8 062 个。保温层单元厚度为 1 m,与坝体单元大小接近。

选用聚苯板保温材料,计算中选取的计算参数如表 3 所示。

2.2 温度场

文献<sup>[5]</sup>的研究表明 2000 年 1 月上旬该拱坝在自重、水压和温度荷载作用下下游面出现 2.7 MPa 的拉应力。图 2 为该时段不同保温措施下坝体下游

面的温度场等值线。保温层的作用表现为“保温隔热”,即高温区域在保温层作用下温度降低,低温区域在保温层作用下温度升高,整个坝面温度场梯度减小。在 5.0 cm 保温层保护下坝体下游面最高温度由 24 ℃降低为 21 ℃,最低温度由 10 ℃升高为 16.5 ℃。

为了考察保温层的保温效果,从年内温度变幅较大的下游坝面右岸 33 号坝段 1 120 m 高程选出特征点,绘出该点从 1999 年 7 月下旬到 2001 年 3 月下旬的温度时程线(图 3)。图中分别绘出了无保温层保护、全坝面 1.5 cm 保温层保护、全坝面 2.5 cm 保温层保护和全坝面 5.0 cm 保温层保护 4 种工况下的温度时程。

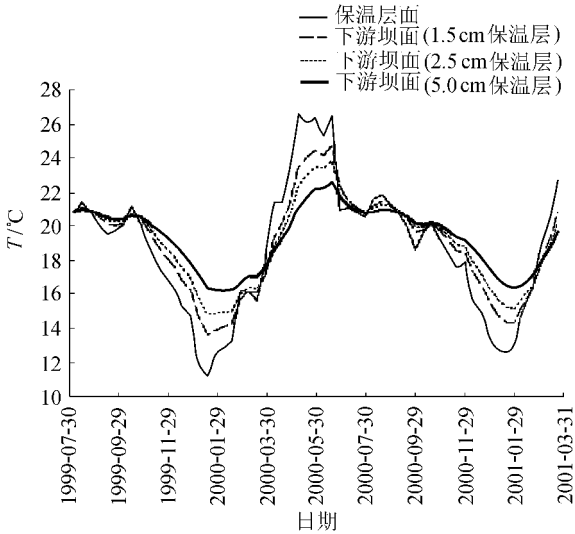


图 3 1 120 m 高程特征点温度时程

表 3 三维坝体模型计算参数

| 保温层厚度/cm |      | 热导率/(W·(m·K) <sup>-1</sup> ) |       |       |       | 比热容/(J·(kg·K) <sup>-1</sup> ) |       |       |       | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) |       |      |     |
|----------|------|------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|------|-----|
| 实际厚度     | 等效厚度 | 实际保温层                        | 等效保温层 | 坝体    | 地基    | 实际保温层                         | 等效保温层 | 坝体    | 地基    | 实际保温层                    | 等效保温层 | 坝体   | 地基* |
| 1.5      | 100  | 0.034                        | 2.667 | 1.395 | 1.914 | 1350                          | 20.25 | 902.3 | 766.0 | 50                       | 50    | 2400 | 0   |
| 2.5      | 100  | 0.034                        | 1.333 | 1.395 | 1.914 | 1350                          | 34.43 | 902.3 | 766.0 | 50                       | 50    | 2400 | 0   |
| 5.0      | 100  | 0.034                        | 0.680 | 1.395 | 1.914 | 1350                          | 67.50 | 902.3 | 766.0 | 50                       | 50    | 2400 | 0   |

\* 计算中采用无质量地基。

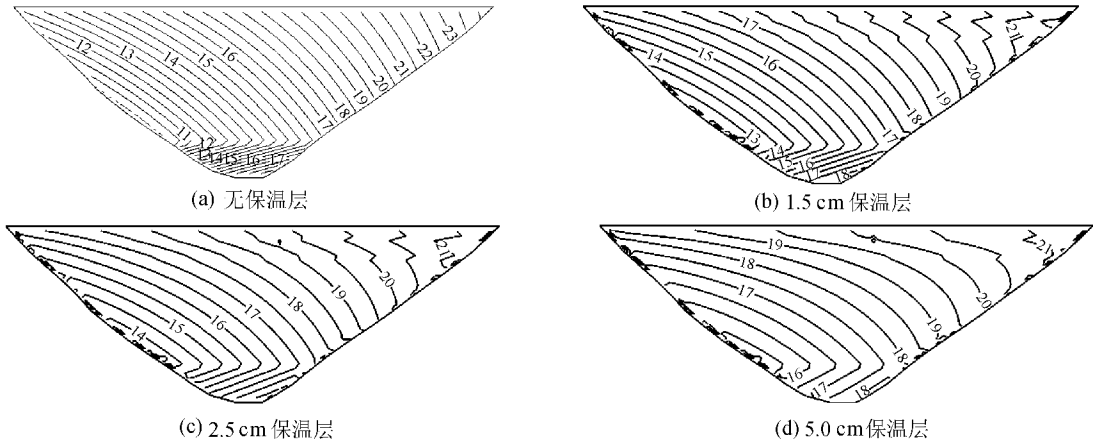


图 2 不同厚度保温层作用下的坝体下游面温度场等值线(单位:℃)

统计特征点在不同保温措施下的年内最大温差如表 4 所示,可以看出:1120 m 高程特征点年内最大温差较大。无保温层时,最大温差达 15.47℃;铺设保温层后,统计特征点在年内的温度变幅显著降低;随着保温层厚度的增大保温效果逐渐增强,当坝体下游面铺设 5.0 cm 厚聚苯板保温层后,该点年内最大温差减小为 6.30℃,保温层的作用使得年内温度变幅减小了 9.17℃。

表 4 特征点年内温差及保温作用统计  $^{\circ}\text{C}$ 

| 保温情况       | 年内最大温差 | 保温作用减小的温差 |
|------------|--------|-----------|
| 无保温层       | 15.47  | 0         |
| 1.5 cm 保温层 | 11.00  | 4.47      |
| 2.5 cm 保温层 | 8.90   | 6.57      |
| 5.0 cm 保温层 | 6.30   | 9.17      |

### 2.3 应力场

坝体下游面全坝面分别铺设 1.5 cm、2.5 cm、5.0 cm 厚的聚苯板保温材料后,坝体温度场有了明显的改善。为了进一步分析保温层的防护效果,对坝体应力场进行仿真计算。计算中考虑自重、上下游水压及温度荷载,其中温度荷载为每旬的瞬态温度场与封拱温度场的差值。

图 4 所示为 2000 年 1 月上旬坝体下游面最大主

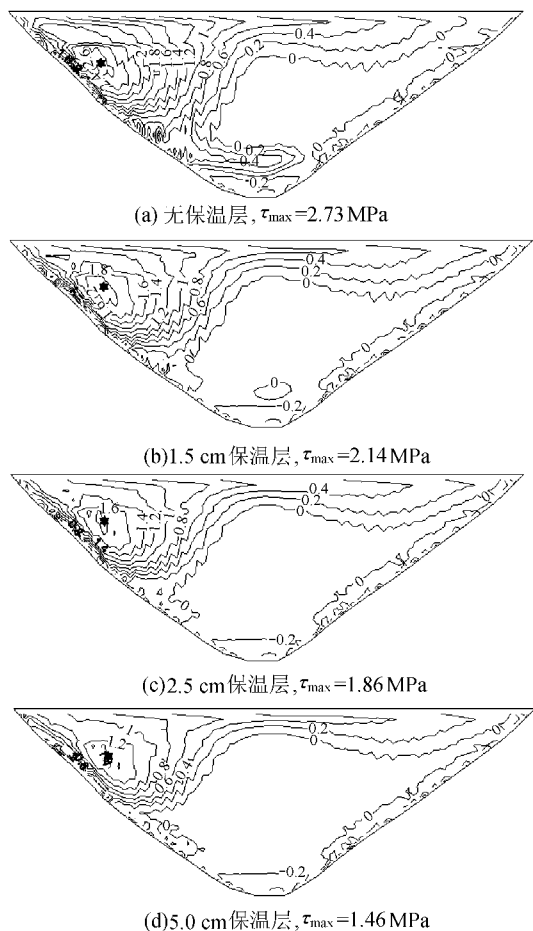


图4 下游坝面最大主应力等值线(单位:MPa)

应力等值线。在无保温层保护的情况下下游坝面出现大面积的拉应力区,最大拉应力达 2.73 MPa,超出混凝土抗拉强度,坝体表面可能出现温度裂缝。增加保温层后,下游坝面虽然仍存在较大范围的拉应力区,但是最大拉应力值显著降低。铺设 1.5 cm、2.5 cm、5.0 cm 保温层时,相应的最大拉应力分别减小为 2.14 MPa、1.86 MPa 和 1.46 MPa;拉应力区范围也逐渐减小。

### 3 结 论

经过热力学参数的等效换算,实现了采用常规有限元网格尺寸精确模拟保温层的保温效果,并验证了该方法的可行性和有效性。利用这一方法,分别计算了某拱坝下游面在厚度为 1.5 cm、2.5 cm、5.0 cm 的保温层保护作用下的温度场和应力场。经过对比分析可知,对该拱坝铺设 5.0 cm 厚的聚苯板保温层,可将年内最大温差由 15.47 °C 减小为 6.30 °C。坝体下游面应力状况也有明显改善,拉应力区减小且最大拉应力由 2.73 MPa 减小为 1.46 MPa,具有明显的“保温隔热”效果,可以有效防止坝面裂缝的产生。

## 参考文献：

- [1] 陈亚新, 胡光瑞. 托海水电站大坝坝面保温措施及效果[J]. 大坝与安全, 2001(4): 55-56.
- [2] 李鹏辉, 杜彬, 刘光廷, 等. 石门子碾压混凝土拱坝采用聚氨酯硬质泡沫保温保湿的效果分析[J]. 水利水电技术, 2002, 33(6): 37-38.
- [3] 詹剑霞, 曾明. 聚苯板保温材料在三峡工程中的应用[J]. 中国三峡建设, 2004(4): 23-25.
- [4] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 306-331.
- [5] 杨剑. 基于原型观测资料的二滩拱坝下游面裂缝成因分析[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [6] 厉易生, 朱伯芳, 林乐佳. 寒冷地区拱坝苯板保温层的效果及计算方法[J]. 水利学报, 1995(7): 54-58.
- [7] 马跃峰, 朱岳明. 表面保温对施工期间墩混凝土温度和应力的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 276-279.

(收稿日期:2006-06-24 编辑:高建群)

