

大坝混凝土温控防裂措施优化研究

周迅伟

江西省水投建设集团有限公司, 江西 南昌 330038

[摘要] 在进行水利建设如大坝的过程中, 混凝土往往是首选的建筑材料。然而, 混凝土的材料特性使其在温度波动下的抗拉强度容易降低, 有可能产生裂痕。因此, 防止和减少混凝土裂痕的出现在水利工程中尤为重要。文中通过研究一个具体的混凝土大坝, 利用 ANSYS 有限元分析软件来研究储存温度和表面保温如何影响混凝土内部的温度和应力。研究结果表明, 如果储存温度和环境温度的差异低于 5°C , 混凝土内部主应力的最大值增长较慢。反之, 如果温度差超过 5°C , 主应力的峰值增长将会加速。因此, 建议在实际操作过程中将温度差保持在 5°C 以下, 以减少混凝土裂痕的风险。使用 2 厘米厚的聚乙烯泡沫板对混凝土表面进行保温, 可以有效地保证混凝土表面拉应力低于混凝土的最大抗拉强度, 从而减小因温度变化导致的混凝土拉裂痕的可能性。

[关键词] 大坝混凝土; 温控防裂; 优化措施

DOI: 10.33142/hst.v6i11.10770

中图分类号: TV332

文献标识码: A

Optimization of Temperature Control and Crack Prevention Measures for Dam Concrete

ZHOU Xunwei

Jiangxi Water Investment Construction Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330038, China

Abstract: In the process of water conservancy construction such as dams, concrete is often the preferred building material. However, the material characteristics of concrete make its tensile strength easily reduced under temperature fluctuations, which may cause cracks. Therefore, preventing and reducing concrete cracks is particularly important in water conservancy engineering. The article studies a specific concrete dam and uses ANSYS finite element analysis software to investigate how storage temperature and surface insulation affect the temperature and stress inside the concrete. The research results indicate that if the difference between storage temperature and ambient temperature is less than 5°C , the maximum value of internal principal stress in concrete increases slowly. On the contrary, if the temperature difference exceeds 5°C , the peak growth of principal stress will accelerate. Therefore, it is recommended to keep the temperature difference below 5°C in actual operation to reduce the risk of concrete cracking. The use of 2cm thick polyethylene foam board to insulate the concrete surface can effectively ensure that the tensile stress on the concrete surface is lower than the maximum tensile strength of the concrete, thus reducing the possibility of concrete tensile cracks caused by temperature changes.

Keywords: dam concrete; temperature control and crack prevention; optimization measures

引言

随着我国水利水电事业的快速发展, 大型水利水电工程的建设日益增多, 其中大坝混凝土温控防裂问题成为了一个亟待解决的关键问题。大坝混凝土在施工过程中, 由于原材料、施工工艺、操作技术、外界条件等因素, 很容易出现各种裂缝, 不仅影响了大坝的外观质量, 还可能引发安全隐患。因此, 针对大坝混凝土温控防裂问题进行深入研究, 对于提高大坝混凝土的耐久性、安全性和稳定性具有重要意义。大坝混凝土温控防裂措施主要包括原材料选择、配合比设计、施工工艺优化、温度监测和控制等方面。然而, 在实际工程中, 由于各种原因, 这些措施的实施效果并不理想, 导致大坝混凝土裂缝问题仍然较为严重。因此, 有必要对大坝混凝土温控防裂措施进行优化研究, 以期提高温控防裂效果, 确保大坝的安全稳定运行。本文以大坝混凝土温控防裂措施为研究对象, 通过理论分析、实验研究和工程实践相结合的方法, 对大坝混凝土温控防

裂措施进行优化研究。

2 工程概况

铜鼓县备用水源工程葛藤坳水库坝址位于铜鼓县城西大汾山林场附近, 距铜鼓县城约 16km, 坝址以上控制流域面积 8km^2 , 主河道长 7.1km, 属于武宁支流大感桥水流域。坝址地理位置为东经 $114^{\circ} 14' 59''$, 北纬 $28^{\circ} 29' 15''$, 拟建坝顶 $\nabla 371.74\text{m}$, 最大坝高 37.44m; 水库正常高 $\nabla 367.00\text{m}$, 总库容为 97.3万 m^3 , $P=1\%$ 的校核洪水位为 $\nabla 370.24\text{m}$, 水库 $P=5\%$ 的设计洪水位为 369.51m。葛藤坳水库是一座以供水为主, 兼防洪功能的小 (2) 型水库, 主要建筑物包括: 混凝土重力坝和输水涵管。枢纽工程等级为 V 级, 永久性主要建筑物为 V 级, 永久性次要建筑物为 5 级, 设计洪水标准采用 20 年一遇, 校核洪水标准采用 100 年一遇。水库供水规模 ($45\text{万 m}^3/\text{月}$), 常规供水规模 $0.8\text{万 m}^3/\text{d}$, 年供水量 292万 m^3 。水库坝顶高程 371.74m, 最大坝高 37.74m, 坝长 95.73m; 溢流坝段采用

开敞式实用堰型式，堰顶高程 367.0m，消能方式采用挑流消能。

3 数值有限元模型

3.1 模型建立

选用了一套大型常用的有限元软件，用以模型的构建。这套软件在全球的有限元数字模拟中有着广泛应用，商业影响力颇为突出。它具有丰富的功能，如三维设计、扩展建模、流体动力学和动态反应仿真分析等。在该软件中，只需完成建模，并为各类材料设置参数，即可进行各种工况的数字计算，应用范围极其广泛。在本篇文章中，首先，大坝建设是典型的分段浇筑，因此假定每个坝段都是各自独立的。为了降低计算量，只对典型的 1#坝段进行建模和计算。所生成的模型的长、宽均为 19m，高为 2.5m。模型包括两部分，上部为 1.5m 厚的混凝土，下部为 1.0m 厚的混凝土，且两层混凝土的强度等级同为 C30。为了保证计算准确，我们适当地拓展了模型，也就是向下增加了 10m。模型的 X 轴指向右岸，Y 轴朝向水流的方向，而 Z 轴则朝上。

根据当前的研究，该文采用了经典的邓肯模型进行了计算，同时预设了材料的应力与应变呈线性弹性关系。这个模型是由 24925 个网格和 26568 个节点构建的。有关材料属性和热力学参数的具体信息，可参阅表 1。

表 1 材料属性和热力学参数

弹性模量/GPa				导温系数 /m ² ·h ⁻¹	导热系数 /kJ·(m·h·°C) ⁻¹	比热 /kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	绝热温升 /°C	线膨胀系数/10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹
7d	28d	90d	180d					
15.1	20.4	30.9	27.9	0.003	5.6	0.65	26.5	8.9

3.2 边界条件和计算参数

在数字化模拟阶段，施加了法向位移的限制在地基的两侧，而底部则限制了三个方向的移动。另外，当计算温度边界时，混凝土表面的温度会增加 2°C，同时混凝土注入库的温度同样升高 2°C。大坝主体部分选用的混凝土强度级别为 C30。基于先前专家对不同冷却阶段混凝土的研究，我们为数字化模拟计算中混凝土的不同保养阶段提供了相关的材料参数，详细信息可以参考上述表 1。

3.3 计算工况

一项研究报告指出，当进行大规模混凝土浇筑时，混凝土内部达到的最高温度等于存储温度与增温的累计。这阐明了，如果混凝土的存储温度过高，很可能使得混凝土内部温度迅速攀升，并可能产生温度应力，从而增加混凝土裂开的可能性^[9-11]。进一步的研究显示，实施低温储存的方法可以有效预防混凝土开裂。然而，若对混凝土的储存温度盲目降低，可能导致顶部混凝土的温度远低于底部混凝土，在储存期间，顶部混凝土可能对底部混凝土产生

冷冲击，从而引发混凝土裂开。鉴于这些研究结果，本文选取了不同的环境温度和储存温度进行数值模拟研究，相关计算结果见表 2。

表 2 不同的环境温度和储存温度进行数值

工况	外界温度	入仓温度
A1	15	0
A2	15	5
A3	15	10
A4	15	15
A5	20	0
A6	20	5
A7	20	10
A8	20	15
A9	25	0
A10	25	5
A11	25	10
A12	25	15

再者，研究课题主要关注混凝土表面产生的温度裂纹，并且这些裂纹常常在混凝土初始浇筑的阶段出现。在未有进一步扩展的情况下，这些裂纹普遍不会导致大坝的质量问题。然而，在外部承载之压下，这些裂纹可能会进一步裂纹扩大，甚至形成渗透性的深部裂纹，因此需要采取相应措施进行控制。经过深入研究，控管温度被证明为最有效的手段。因此，在执行温度控制时，需要对使用的各类材料和各式保温措施进行计算。详见表 3。

表 3 不同材料的厚度情况

工况	材料	厚度 / mm
B1	无保温	-
B2	竹胶	2
B3	竹胶	5
B4	竹胶	10
B5	聚乙烯	2
B6	聚乙烯	5
B7	聚乙烯	10

4 计算结果与分析

4.1 入仓温度计算结果

模拟不同入仓温度对混凝土内部的第一和第三主应力影响，并提取最大值，见表 4 和图 1。从表 4 我们可以看出，在 A1 至 A4 的工况中，环境温度都是 15°C，而进仓温度依次为 0°C、5°C、10°C 与 15°C。在这些工况下，第一主应力的值从 0.05 变化至 1.36 MPa，显示出随着进仓温度的提升，第一主应力也有所增加。而第三主应力的值从 -3.13 变化至 -1.21 MPa，反映出随着进仓温度的增加，第三主应力呈现减小的趋势。通过同样的方法，我们也可以发现其他工况下也有类似的变化规律。

表 4 不同入仓温度对混凝土内部的第一和第三主应力影响数值

工况	温度/°C	应力/MPa	
		第一主应力	第三主应力
A1	38.9	0.05	-3.13
A2	35.1	0.08	-2.05
A3	31.2	0.72	-1.62
A4	27.7	1.36	-1.21
A5	40.0	0.03	-2.63
A6	36.3	0.06	-2.19
A7	32.6	0.71	-1.77
A8	29.1	1.34	-1.35
A9	41.3	0.01	-2.77
A10	37.5	0.04	-2.33
A11	34.1	0.69	-1.94
A12	30.1	1.32	-3.39

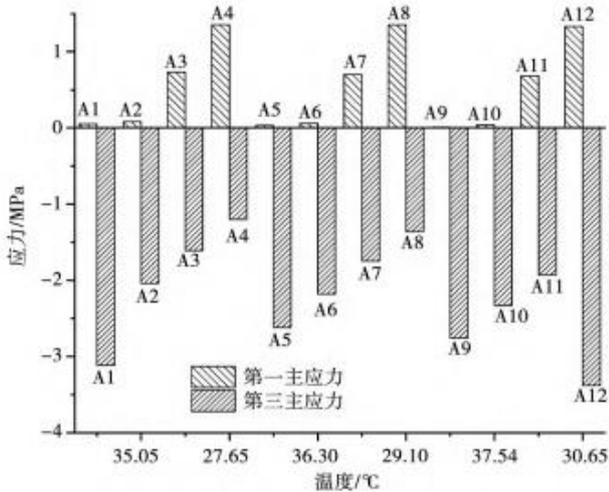


图 1 不同入仓温度对混凝土内部的第一和第三主应力影响变化柱状图

根据前述细节分析,第一主应力会随着混凝土入仓温度和环境温度差的升高而增加,相应的,第三主应力逐渐降低。在温差低于 5°C 的情况下,第一主应力的增幅相对小一些。相反,温差超过 5°C,第一主应力的增幅就变得显而易见。主要的裂缝是由混凝土中的主拉应力引起的,因此在实际操作过程中,一定要关注环境温度变化对混凝土开裂产生的影响,并尽可能将混凝土入仓温度和环境温度差限制在 5°C 以内,以便更好地管理混凝土老化阶段的温度上升,同时也能有效地控制浇筑过程中上一层混凝土对下一层产生的冷冲击效应。

4.2 表面保温措施的计算结果

对各种表面温度调控方案下的混凝土内部的首要应力与次要应力进行了量化,并从中筛选出最大值,具体数据请见第 5 个表格和第 2 个图表。

表 5 混凝土内部的第一主应力与第三主应力量化数值

工况	温度/°C	应力/MPa	
		第一主应力	第三主应力
B1	41.51	1.50	-2.54
B2	71.77	1.32	-2.51
B3	42.26	1.0	-2.46
B4	42.72	0.74	-2.42
B5	43.28	0.8	-2.35
B6	43.69	0.9	-2.34
B7	43.92	0.98	-2.32

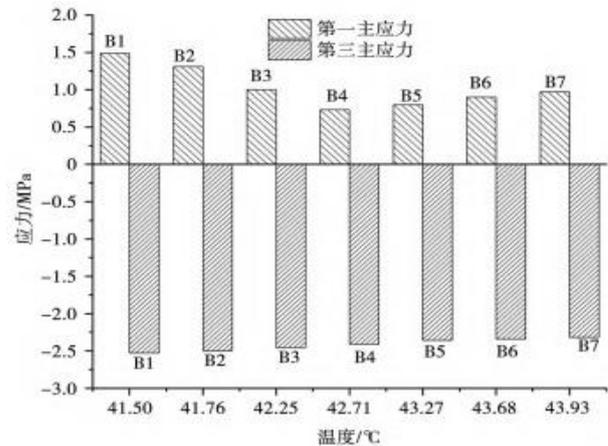


图 2 混凝土内部的第一主应力与第三主应力量化数值对比柱状图

数据的解析显示,没有任何温度控制措施在 B1 条件下,主应力之一和三都达到了极大值,这暗示着如果不进行保温处理,混凝土的开裂可能性极大。当使用不同厚度的竹胶进行温度管理时,其表现远胜在 B1 条件下,其中第一和第三主应力的值分别为 1.32, 1.0, 0.74 MPa 以及 -2.51, -2.46, -2.42 MPa。而使用聚乙烯泡沫进行保温调控的效果最为显著。另外,数值模拟结果揭示,随着保温手段的增加,混凝土内部达到的最高温度也逐渐升高。这主要是因为保温控制对混凝土的散热产生了反效果。通过第三主应力的结果可知,其最大值为 2.5 MPa,这个值远低于混凝土的极限承载力。在 B1、B2 和 B3 这三种条件下,主应力之一的最大值超过了混凝土的极限抗拉强度,这表明混凝土产生了拉伸裂痕。然而,在 B4、B6 和 B7 的情况下,主应力之一的最大值已经接近混凝土的极限抗拉强度。

从上述的评估结果来看, B5 的保温手段是最优秀的方法,以规避混凝土产生裂痕。因此,在具体的建筑实施过程中,利用聚乙烯泡沫进行表面的隔热处理是最为高效的,同时其厚度建议控制在 2 厘米左右。这个方法能保障混凝土表层的拉张应力小于其耐拉强度,而且施工过程简洁,有效节省成本。

5 大坝混凝土温控防裂的具体措施分析

5.1 原材料选择

原材料的选择对于混凝土的性能和裂缝控制至关重要。应选用优质的骨料、水泥和掺合料，降低水泥用量，使用低热水泥或掺有矿物掺合料的水泥，以降低混凝土的热产生。同时，选用适当比例的粉煤灰、矿渣粉等掺合料，可以提高混凝土的抗裂性能。对于骨料，应选择级配合理、质地坚硬、抗冻性好的骨料，以降低混凝土的收缩和膨胀。此外，对于掺合料，如矿物掺合料和化学掺合料，也需要合理选择和控制其掺量，以改善混凝土的性能。

5.2 配合比设计

配合比设计是混凝土工程中至关重要的一环，因为它直接决定了混凝土的性能和裂缝控制效果。在配合比设计中，需要充分考虑混凝土的收缩、膨胀、徐变等性能，以降低混凝土的内部应力，防止裂缝的产生。如果水泥用量过多，会导致混凝土的收缩和膨胀较大，从而容易产生裂缝，因此在设计中应合理调整水泥用量，以保证混凝土的收缩和膨胀性能在合理范围内。掺合料可以改善混凝土的性能，提高其抗裂性能，例如掺入矿物掺合料可以提高混凝土的抗渗性、抗冻性等性能，设计中应根据具体需求，合理选择和控制掺合料掺量。此外，水灰比是影响混凝土强度和抗裂性能的关键参数。水灰比过大会导致混凝土的强度降低，容易产生裂缝；水灰比过小则会使混凝土的抗渗性、抗冻性等性能降低。因此，在设计中应充分考虑水灰比的影响，确保混凝土具有合适的强度和抗裂性能。

5.3 施工工艺优化

施工工艺对于混凝土的质量和裂缝控制具有至关重要的影响。首先，在浇筑过程中，应采用适当的浇筑方式，以降低混凝土的温度应力和收缩应力。例如，采用分层浇筑的方法，可以有效地减轻混凝土的内部应力，防止裂缝的产生。此外，预冷技术也是一种有效的措施，通过在混凝土浇筑前对其进行冷却处理，可以降低混凝土的温度，从而减少温度应力和收缩应力。同时，在浇筑过程中，还应注重后期维护，如及时进行湿润养护，以保证混凝土的质量和抗裂性能。其次，严格控制浇筑速度和振捣质量也是提高混凝土抗裂性能的关键。在浇筑过程中，应根据混凝土的性能和浇筑条件，合理控制浇筑速度，避免过快浇筑导致混凝土密实度不足，从而影响其抗裂性能。同时，振捣质量也是影响混凝土质量的重要因素。在振捣过程中，应确保混凝土充分密实，以提高其抗裂性能。此外，在施工过程中，还应注重湿度和温度的控制，避免混凝土受到过高的温度和湿度变化，导致裂缝的产生。湿度过高或过低都可能对混凝土的性能产生不良影响，因此在施工过程中，应保持适宜的湿度条件。

5.4 温度监测与控制

在大坝施工过程中，对混凝土的温度进行实时监测是保证混凝土质量和防止裂缝的关键环节。因为混凝土的温度与其收缩、膨胀、徐变等性能密切相关，这些性能又会影响到混凝土的内部应力，从而导致裂缝的产生。因此，实时监测混凝土温度，并根据监测数据及时调整混凝土的浇筑速度、养护措施等，是确保混凝土温度在合理范围内的重要措施。对于温度过高的情况，可以采取喷水冷却、覆盖保温等方法进行调控。例如，当混凝土温度过高时，可以采取喷水冷却的方法，降低混凝土的温度，以减轻温度应力和收缩应力，防止裂缝的产生。同时，覆盖保温也是降低混凝土温度应力的有效方法。通过在混凝土表面覆盖保温材料，可以阻止外部热量进入混凝土，降低混凝土的温度，从而减少裂缝的产生。此外，在施工过程中，还应密切关注混凝土的收缩、膨胀等性能，及时发现和处理潜在的问题。

6 结语

综上所述，通过数值仿真技术，研究了大体积混凝土的初始温度和保温手段如何影响混凝土内部的裂纹形成能力，然而，混凝土内部的主要应力的最大值增长范围在仓库温度和环境温度差小于 5°C 的情况下相对受限。但是，当温度差超过 5°C ，主要应力的最大值的增长速度显著加速。为此，在实际的应用中，我们建议将温度差维持在 5°C 以内，以降低混凝土开裂的风险。经过数学运算，我们发现采用2厘米厚的聚乙烯泡沫板作为混凝土表层的保温材料，可以帮助保持混凝土表层的拉伸应力在混凝土最高抗拉强度以内，进而降低温度影响下混凝土拉伸开裂的可能性。

[参考文献]

- [1]郭冬, 欧阳磊明, 张进文, 等. 干冷河谷大坝碾压混凝土温控防裂措施[J]. 水电与新能源, 2022, 36(12): 23-27.
 - [2]孙培培, 王作强. 大坝碾压混凝土的温控与防裂关键技术[J]. 科学技术创新, 2022, 11(19): 156-159.
 - [3]聂军洲. 大坝混凝土温控防裂措施优化研究[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(6): 109-112.
 - [4]于敬铎. 大坝混凝土温控防裂措施优化研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(1): 25-27.
 - [5]李金涛. 大坝混凝土快速施工与温控防裂措施[J]. 科学技术创新, 2020, 11(32): 147-148.
 - [6]张忠东. 碾压混凝土大坝温控防裂与施工质量控制研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 5(1): 26-27.
- 作者简介: 周迅伟(1994.11—), 毕业院校: 西南大学, 所学专业: 土木工程, 当前就职单位: 江西省水投建设集团有限公司。