

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.018

Hardfill 坝在小水电中的应用研究

刘 斌^{1,2}

(1. 水利部农村电气化研究所, 浙江 杭州 310012;
2. 水利部农村水电工程技术研究中心, 浙江 杭州 310012)

摘要: 通过有限元软件从温度控制和坝体应力两个方面对 Hardfill 坝进行了计算分析, 得出了 Hardfill 坝温度场及坝体应力的特点和规律, 并结合 Hardfill 坝的一些材料特性, 得出 Hardfill 坝符合新时代绿色、环保的新要求, 为 Hardfill 坝在绿色小水电中的广泛应用提供一定的理论支撑。

关键词: Hardfill 坝; 仿真分析; 温度场; 坝体应力

中图分类号: TV742

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)02-0097-04

Application of Hardfill Dam in Green Small Hydropower Station

LIU Bin^{1,2}

(1. National Research Institute for Rural Electrification, Hangzhou, Zhejiang 310012, China;

2. Rural Hydropower Engineering Technology Research Center of Ministry of Water Resources, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract: Through the finite element software, the Hardfill dam was modelled, and the temperature and stress were calculated and analyzed. The characteristics and laws of the temperature field and dam stress of the hardfill dam were obtained. By analyzing the material properties of the hardfill dam, we conclude that the dam can meet the new requirements of green and environmental protection in the new era, and provides certain theoretical support for the wide application of Hardfill Dam in green small hydropower.

Keywords: Hardfill dam; simulation analysis; temperature field; dam stress

Hardfill 坝是近年来出现的一种新坝型, 在河床砂砾石和开挖废弃料等在坝址附近容易获得的材料中添加胶凝材料和水, 通过设备的简易拌和从而得到的低强度充填材料, 具有安全、经济和环保等优势, 其热学和力学性质接近贫碾压混凝土^[1]。这种坝具有高安全性、高抗震性和对地基条件要求低的优点。

由于这种材料的胶凝材料用量很少, 水泥水化放出的热量很小, 可以进行连续浇筑, 施工简便、快速, 造价低廉, 对环境的负面影响小, 在中小水电中, 尤其是围堰和拦河堰坝等方面, 得到尝试和应用^[2-3]。

Hardfill 坝剖面示意图如图 1 所示。

1 仿真计算原理

1.1 温度场计算原理

由热量的平衡, 温度升高所吸收的热量必须等

于从外面流入的净热量与内部热之和。一般三维问题, 固体热传导基本方程如下^[4-5]:

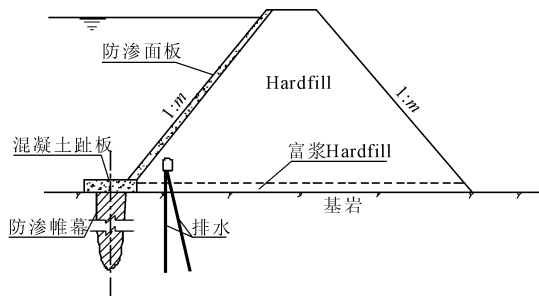


图 1 Hardfill 坝剖面示意图

$$a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数, $\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C})$; c 为比热; a 为导温系数, $a = \lambda/\rho c, \text{m}^2/\text{h}$; ρ 为密度; t 为时间; T 为温度函数。

1.2 徐变应力场计算原理

混凝土作为弹性徐变体,龄期徐变特性对温度应力有较大影响,因此在温度应力计算时必须考虑混凝土徐变效应。温度应力计算中,取混凝土为线弹性徐变体,将计算实体离散为若干单元,则单元内某一点任一时刻的应力-应变关系^[1]为

$$\{\Delta\delta\} = [\mathbf{D}] \times (\{\Delta\zeta\} - \{\Delta\zeta^0\}) \quad (2)$$

式中: $[\mathbf{D}]$ 为弹性矩阵; $\Delta\zeta$ 为应变增量; $\Delta\delta$ 为应力增量; $\{\Delta\zeta^0\}$ 为初应变增量。

对于采用增量法的变应力作用下混凝土徐变应力计算,文献^[1]给出了隐式解法。

有限元基本方程为:

$$[\mathbf{K}]\{\Delta\delta_n\} = \{\Delta P_n\} + \{\Delta P_n^c\} + \{\Delta P_n^T\} + \{\Delta P_n^R\} \quad (3)$$

其中

$$[\bar{\mathbf{D}}_n] = \bar{\mathbf{E}}_n [\mathbf{Q}]^{-1}; \bar{\mathbf{E}}_n = \frac{E(\bar{\tau}_n)}{1 + E(\bar{\tau}_n)C(t_n, \bar{\tau}_n)} \quad (4)$$

式中: $[\mathbf{K}]$ 为整体刚度矩阵; $\{\Delta\sigma_n\}$ 为节点位移, $\{\Delta P_n\}$, $\{\Delta P_n^c\}$, $\{\Delta P_n^T\}$, $\{\Delta P_n^R\}$ 分别为外荷载、徐变、

温度和自生体积变形引起的荷载增量。

徐变度计算:

$$C(t_n, \tau_n) = \sum_j \psi_j(\tau) [1 - e^{-r_j(t-\tau)}]; \{\eta_n\} = \sum_j (1 - e^{-r_j \Delta\tau_n}) \{\omega_{jn}\} \quad (5)$$

逐时段累加后,得到应力如下:

$$\{\sigma_n\} = \{\Delta\sigma_1\} + \{\Delta\sigma_2\} + \dots + \{\Delta\sigma_n\} = \sum_{i=1}^n \{\Delta\sigma_i\} \quad (6)$$

2 三维有限元仿真分析

2.1 仿真概述

在仿真过程中,大坝高度取为 100 m, Hardfill 坝(上下游对称,坝坡 1:0.7),碾压混凝土坝(上游平直,下游坝坡 1:0.7)。以下是仿真过程中用到的三维有限元模型。为了方便对比,两种坝不采用人工温控措施,仅仅采用自然冷却的方法。温度场采用的热学参数如表 1 所示^[2],对于外界温度,采用余弦函数进行模拟。

表 1 碾压混凝土坝仿真计算参数

坝型	导热系数 a /($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	导热系数 λ /($\text{kJ} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	比热 C /($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	热交换系数 β /($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	线膨胀系数 α /(10^{-6}°C)	混凝土绝热温升公式 / °C
碾压混凝土	0.1	216	0.9	1200	9	$18\tau/(2+\tau)$
Hardfill	0.1	220	0.9	1200	9	$9\tau/(2+\tau)$
基岩	0.1	243	0.9	1200	10	—

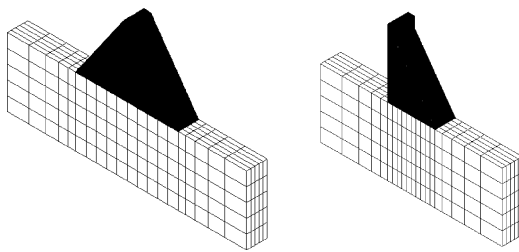


图 2 仿真计算模型

2.2 计算成果分析

2.2.1 特征点温度随时间的变化规律

为反映混凝土温度的变化历程,取坝体中央 5 个特征点(坝基附近,距坝基 30 m、50 m、70 m、85 m),对其温度变化规律进行分析。在计算中只考虑大坝施工期温度场变化规律,Hardfill 坝取为 300 d,碾压混凝土坝计算时间取为 500 d。

碾压混凝土典型高程温度时程线如图 3 所示,温度时程曲线可以看出,混凝土浇筑后温度迅速上升,这主要是由于混凝土水化放热。从图 3 上可以

看出,坝基附近温度上升到最高温度后变化比较小;最高温度出现在坝体距坝基 70 m 的地方;在坝的顶部,由于浇筑结束后外界温度较低,在达到最高温度后,温度逐渐降低。

图 4 为 Hardfill 坝典型高程的温度时程线,将图 4 与图 3 相比较,可以看出,Hardfill 坝达到的最高温度是 22.9 °C ,与此同时,碾压混凝土坝达到的最高温度是 32 °C 。对比两种坝的温度时程线,Hardfill 坝各个高程点除坝基附近与其它高程点温度相差比较大外温度相差不大,变化也较为平缓;碾压混凝土坝的温度时程线变化相对来说较为激烈,不同高程之间温度相差比较大。

2.2.2 坝段中央剖面温度变化规律

图 5 为两种坝温度包络图。在外界条件相同的前提下,通过对比两种坝型温度等值线图可知,碾压混凝土坝达到的最高温度比 Hardfill 坝要高很多,坝体出现的最高温度和最低温度之差,也比 Hardfill 坝大一些。

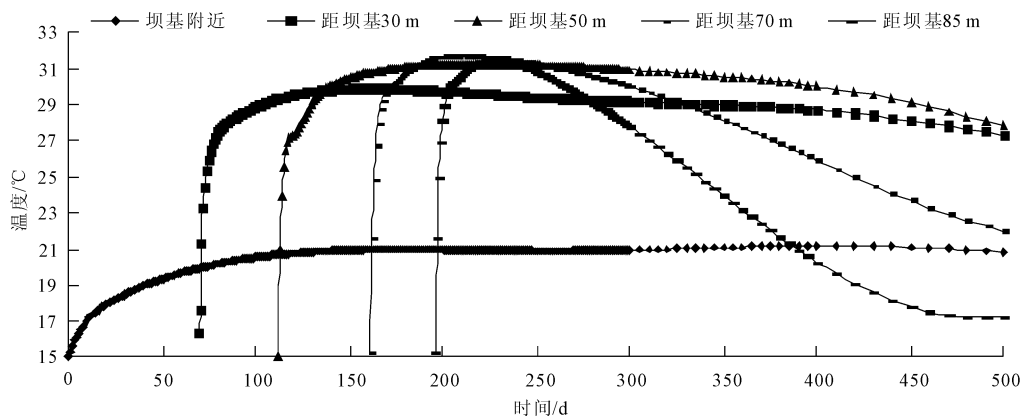


图 3 碾压混凝土坝典型高程温度时程线

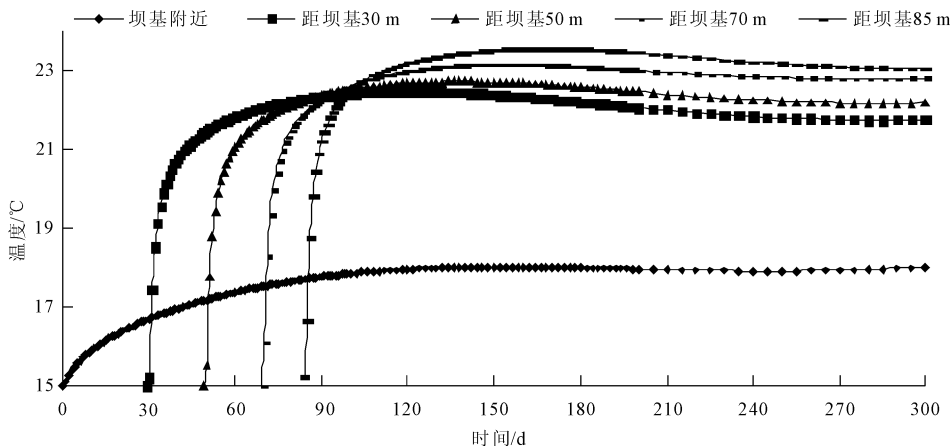


图 4 Hardfill 典型高程温度变化曲线

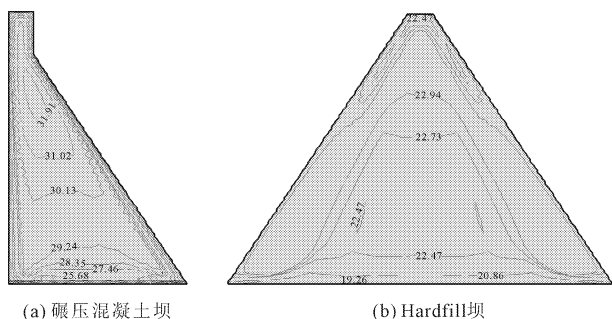


图 5 温度包络图(单位:°C)

3 坝体应力水平

坝体应力水平是对筑坝材料强度要求的直接依据,研究 Hardfill 坝可采用低强度筑坝材料的理论原理。Hardfill 坝的基本坝体剖面是对称的梯形,相对以直角三角形作为基本剖面的传统重力坝,其坝体应力水平有较大幅度的降低。采用有限元数值模拟方法^[7]计算 100 m 高的 Hardfill 坝的应力分布,没有拉应力,最大压应力为约 1.8 MPa。

Hardfill 坝的基本坝体剖面是对称的梯形,相对

以直角三角形作为基本剖面的传统重力坝,其坝体应力水平有较大幅度的降低。Londe^[8]对 100 m 高 Hardfill 坝的计算结果是,其坝体最大压应力不超过 1.5 MPa。坝体应力水平是对筑坝材料强度要求的直接依据。重力坝为直角三角形剖面,而 Hardfill 坝采用对称梯形剖面,坝体应力降低由于坝体断面的增大而降低,应力分布也较为均匀,而且由于断面宽大,坝基面面积增大,坝基内的应力包括坝基面上的应力较重力坝大幅度减小^[9]。大坝的整体稳定性和安全性提高。而在强震区,Hardfill 坝地震动应力集中程度较重力坝大为缓解,大坝抗震安全性得到显著改善。故地震活动区建坝,这种新坝型具有显著优势。实验证明,这种新坝型在软基上相比重力坝也有显著优势^[10]。

图 6 和图 7 分别给出了重力坝和 Hardfill 坝的坝体在满库时第一主应力、第三应力的分布情况,其中正值表示拉应力,负值表示压应力。

从图 6 可以看到,重力坝和 Hardfill 坝在坝踵都有局部的拉应力集中,但 Hardfill 坝的坝体内应力明显比重力坝应力分布均匀,特别是在靠近坝基面附

近的位置,重力坝应力沿顺河向变化较大,而 Hardfill 坝几乎没有变化,等值线近似水平,应力分布十分均匀^[11]。从图 7 的第三主应力分布中也可以看到 Hardfill 坝坝体内应力等值线呈近似水平分布,在坝趾处没有重力坝所显示的应力集中。

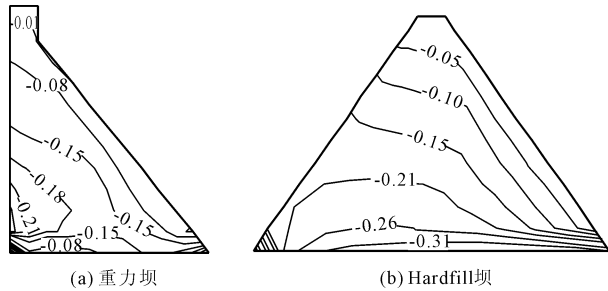


图 6 第一主应力 σ_1 分布(单位:MPa)

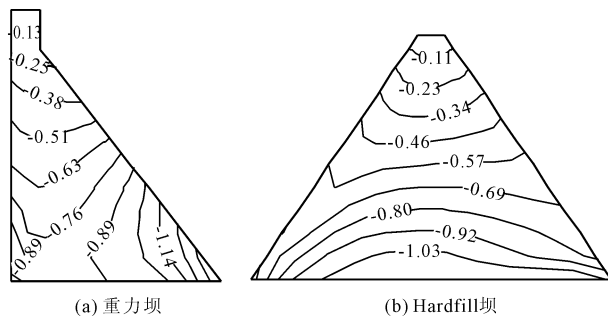


图 7 第三主应力 σ_3 分布(单位:MPa)

线弹性有限元计算成果表明:在空库和满库两种情况下常规重力坝的坝趾、坝踵都有明显的应力集中:坝趾为压剪应力集中;坝踵为拉剪应力集中。

在空库和满库两种情况下 Hardfill 坝的坝趾、坝踵均出现应力集中:坝趾为压剪应力集中;坝踵为拉剪应力集中。空库下坝体基本不出现拉应力,坝体最大第一主应力出现在坝踵附近(为压应力)。随着地基弹模减小,坝底中部将出现拉应力。地基弹模越小,拉应力值越大,在拉应力出现前,坝体第一主应力随着地基弹模的减小而增大。可见地基较软时,坝体工作条件较差。满库时,坝踵处出现拉应力。随着坝基弹模增大,坝踵处最大第一主拉应力值增大。

4 讨论分析

Hardfill 坝作为一种新坝型,具有一些独特的优势,并且已经得到了一定的应用与发展。

(1) 从温度控制上来看,Hardfill 坝与传统重力坝具有较大不同。由于 Hardfill 材料胶凝材料用量较小,达到的最高温度大大小于碾压混凝土,相比碾压混凝土 Hardfill 材料在这方面具有比较大的优势。

Hardfill 坝高温区不仅仅集中在坝体中央,在坝体两侧也出现较高的温度,而碾压混凝土坝高温区集中在坝体的中央;Hardfill 坝产生的温度应力约为碾压混凝土重力坝的 1/15—1/20,甚至更小,用 Hardfill 材料建坝可以像土石坝一样全断面快速碾压施工,少设或不设伸缩缝,施工效率将大大提高。

(2) 从坝体应力来看,Hardfill 坝也具有自己独特的特点。Hardfill 坝的基本坝体剖面是对称的梯形,相对以直角三角形作为基本剖面的传统重力坝,其坝体应力水平有较大幅度的降低;重力坝和 Hardfill 坝在坝踵都有局部的拉应力集中,但 Hardfill 坝的坝体内应力明显比重力坝应力分布均匀。

5 结 语

目前,绿色小水电的创建工作正在有序的进行,过去小水电工程大多以发电为主,现在越来越多的小水电不仅要发电、灌溉、供水,还要满足生态用水和景观用水需求。Hardfill 材料,生态、绿色、环保,就地取材,价格低廉,施工方便,必将在小水电绿色之路上发挥自己的优势,迎来较大的发展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘 斌,何蕴龙,彭云枫. Hardfill 坝温度场仿真分析[J]. 人民长江,2008,39(14):92-95.
- [3] 许美娟,刘 斌,曹学兴. 七里塘碾压混凝土拱坝温度应力仿真分析[J]. 人民长江,2009,40(7):75-78.
- [4] 刘 斌,赵玉宇,乔海娟. 格八拱坝温度应力有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(1):112-115.
- [5] 刘 斌,何蕴龙,万 彪. 七里塘碾压混凝土拱坝温度场仿真分析[J]. 水利与建筑工程学报,2008,6(3):55-57.
- [6] 何蕴龙,彭云枫,熊 莹. Hardfill 筑坝材料工程特性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2007,5(4):1-6.
- [7] ADINA Theory and Modeling Guide Volume II: ADINA Heat Transfer[Z]. USA: ADINA R&D,2012.
- [8] Londe P, Lino M. The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC[J]. International Water Power & Dam Construction, 1992,44(2):19-24.
- [9] Raphael J M. The optimum gravity dam[C]//Proceedings Roller Compacted Concrete III, San Diego: ASCE, 1992:5-19.
- [10] Hansen K D, Melean F G. Reinhardt, Roller Compacted Concrete III [C]//Roller Compacted Concrete III. New York: ASCE, 1992.
- [11] Stevens M A, Linard J. The safest dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, February, 2002,128(2):139-142.