

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.03.010

# 快速施工条件下基于变形法的混凝土坝应力分析

强 晟,郑伟忠,王向荣,朱振泱,周兰庭

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**为提高混凝土坝的施工速度,可以采用厚浇筑层和短间歇期的快速施工方法。基于中国西南某大型碾压混凝土重力坝的快速施工过程,根据其施工期和初运行期的实测应变,采用变形法计算了混凝土应力,成果较好地反映了快速施工条件下混凝土坝施工期和初运行期的应力发展过程,对类似工程的施工有一定的参考价值。

**关键词:** 变形法;快速施工;混凝土坝;应变计

中图分类号:TV698.11      文献标志码:A      文章编号:1000-1980(2014)03-0238-05

## Stress analysis of concrete dam under fast construction based on deformation method

QIANG Sheng, ZHENG Weizhong, WANG Xiangrong, ZHU Zhenyang, ZHOU Lanting

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to improve the construction speed of a concrete dam, a method of fast construction using thick pouring layers and short layer intervals was used. Based on the construction process of an RCC gravity dam located in Southwest China, the concrete stress was calculated with the deformation method according to the measured strain during the construction and initial running periods. The results accurately reflect the stress development under the condition of fast construction during the construction and initial running periods, providing valuable references for similar engineering construction projects.

**Key words:** deformation method; fast construction; concrete dam; strain gauge

水工大体积混凝土结构浇筑后,容易在某些关键部位出现较大拉应力,危及大坝的正常运行。为了给大坝安全运行提供依据,需要对这些关键部位进行监测<sup>[1-2]</sup>。由于目前还没有仪器能够直接测量出拉应力,需通过埋设应变计组量测混凝土应变,并采用某种算法将其转化为应力<sup>[3-4]</sup>。为了进行厚浇筑层和短间歇期的现场快速施工方法和运行反馈的试验研究,需布置足够多的应变计和温度跟踪观测仪器<sup>[5-7]</sup>。本文根据快速浇筑条件下某大型碾压混凝土重力坝的施工期实测应变,采用变形法计算了混凝土应力<sup>[8-10]</sup>,并对应力进行了分析,以为大坝安全运行提供量化参考依据。

### 1 变形法的基本原理

结合图1,由单轴应变 $\varepsilon$ 计算混凝土应力:(a)将实测的各向应变数据经过计算转换成单轴应变值。(b)将全部应变过程划分为 $n$ 个不等间距的时段,绘制成单轴应变过程线<sup>[11]</sup>。早期应力增量较大,时段划分较细;后期应力变化不大,时间跨度可以较大<sup>[12]</sup>。(c)将徐变增量进行计算,按每一时段的开始龄期 $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_n$ 绘制成总变形过程线。由于徐变为混凝土在长期荷载作用下,其应变随时间而持续增长的特性,因此某一时刻的实测应变,不仅有该时刻弹性应力增量引起的弹性应变,而且包含在此以前所有应力引起的总变形<sup>[13-14]</sup>,即

收稿日期:2013-03-15  
基金项目:国家自然科学基金(51109071,51209078)  
作者简介:强晟(1977—),男,江苏宜兴人,副教授,主要从事水工结构温控防裂、水工岩体结构稳定分析研究。E-mail:sqiang2118@163.com

$$\varepsilon(\tau_n) = \varepsilon_b + \varepsilon_{e,n} + \varepsilon_{c,n}$$

(1)

其中

$$\varepsilon_b = \int_{\tau_0}^{\tau_{n-1}} \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \left( \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right) d\tau$$

式中: $\varepsilon_b$ ——承前应变,即  $\tau_0 \sim \tau_n$  时间段内应力变化对  $\tau_n$  时总变形的影响值; $\varepsilon_{e,n}$ 、 $\varepsilon_{c,n}$ ——第  $n$  段时间瞬时弹性变形和徐变变形。

实际用式(2)近似计算  $\varepsilon_b$ :

$$\varepsilon_b = \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\sigma_i \left( \frac{1}{E(\tau_i)} + C(\tau_n, \tau_i) \right)$$

(2)

其中

$$\tau_i = \frac{\tau_i + \tau_{i-1}}{2}$$

式中: $\Delta\sigma_i$ ——第  $i$  个时步的应力增量; $\tau_i$ ——时段加荷龄期; $E(\tau_i)$ ——在  $t = \tau_i$  时的瞬时弹性模量; $C(\tau_n, \tau_i)$ ——徐变度,在  $t = \tau_i$  加荷后,单位应力持续作用到  $\tau_n$  所增长的变形。由此,可进一步计算得到第  $n$  个时步的应力增量为

$$\Delta\sigma_n = E_s(\tau_n, \tau_n) [\varepsilon_n(\tau_n) - \varepsilon_b]$$

(3)

其中

$$E_s(\tau_n, \tau_n) = \frac{1}{\frac{1}{E_s(\tau_n)} + C(\tau_n, \tau_n)} \quad \tau_n = \frac{\tau_n + \tau_{n-1}}{2}$$

式中: $E_s(\tau_n, \tau_n)$ —— $\tau_n$  时刻有效弹性模量; $\varepsilon_n(\tau_n)$ —— $\tau_n$  时刻的单轴应变值。

在  $\tau_n$  时刻混凝土实际应力为

$$\sigma_n = \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\sigma_i + \Delta\sigma_n = \sum_{i=0}^n \Delta\sigma_i$$

(4)

2 快速浇筑条件下混凝土重力坝应力分析

2.1 基本资料

以中国西南某碾压混凝土重力坝河床溢流坝段为例。该坝坝顶高程 1 334.0 m,最低建基面高程 1 166.0 m,最大坝高 168.0 m,最大坝底宽 153.2 m,坝顶轴线长 516.0 m。大坝混凝土总量 313.28 万 m<sup>3</sup>,其中常态混凝土 30.24 万 m<sup>3</sup>,碾压混凝土(R)271.54 万 m<sup>3</sup>,变态混凝土(Cb)11.5 万 m<sup>3</sup>。坝体上游迎水面为变态混凝土,溢流坝段溢流面、闸墩、基础垫层为常态混凝土,廊道等孔洞周边为变态混凝土,其余均为碾压混凝土。该坝段从 2009 年 11 月开始浇筑,具体混凝土种类及分区标号如图 2 所示。

该混凝土重力坝工程从约束区到非基础约束区都采用了厚浇筑层和短间歇期快速施工方法<sup>[15]</sup>。坝段内部不同高程处理设了多支五向应变计和无应力计,位置如图 2 所示。限于篇幅,本文选取其中具有代表性的 6 个特征点进行计算和分析,这些特征点均埋置于碾压混凝土内,其中,特征点 1、2 位于非基础约束区的 1 275 m 高程,特征点 3、4 位于无约束区的 1 240 m 高程,特征点 5、6 位于强约束区的 1 192 m 高程。特征点的温度历时曲线图(图 3)来源于无应力计。

表 1 为碾压混凝土弹性模量试验资料。

表 1 碾压混凝土劈拉强度和弹性模量试验结果

Table 1 Test results of RCC's splitting tensile strength and elastic modulus

| 分区编号             | 劈拉强度/MPa |      |      | 弹性模量/GPa |      |      |
|------------------|----------|------|------|----------|------|------|
|                  | 7 d      | 28 d | 90 d | 7 d      | 28 d | 90 d |
| R I (特征点 6)      | 1.05     | 1.57 | 2.58 | 26.2     | 33.2 | 39.3 |
| R II (特征点 2、4)   | 0.96     | 1.48 | 2.30 | 23.6     | 28.4 | 36.5 |
| R IV (特征点 1、3、5) | 1.13     | 1.56 | 2.64 | 27.7     | 32.7 | 38.6 |

采用与试验资料符合较好的复指数公式进行拟合,各分区具体拟合公式如下:

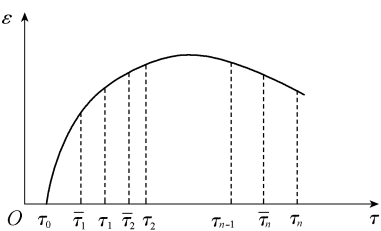


图 1 变形法计算原理  
Fig. 1 Principle of deformation method

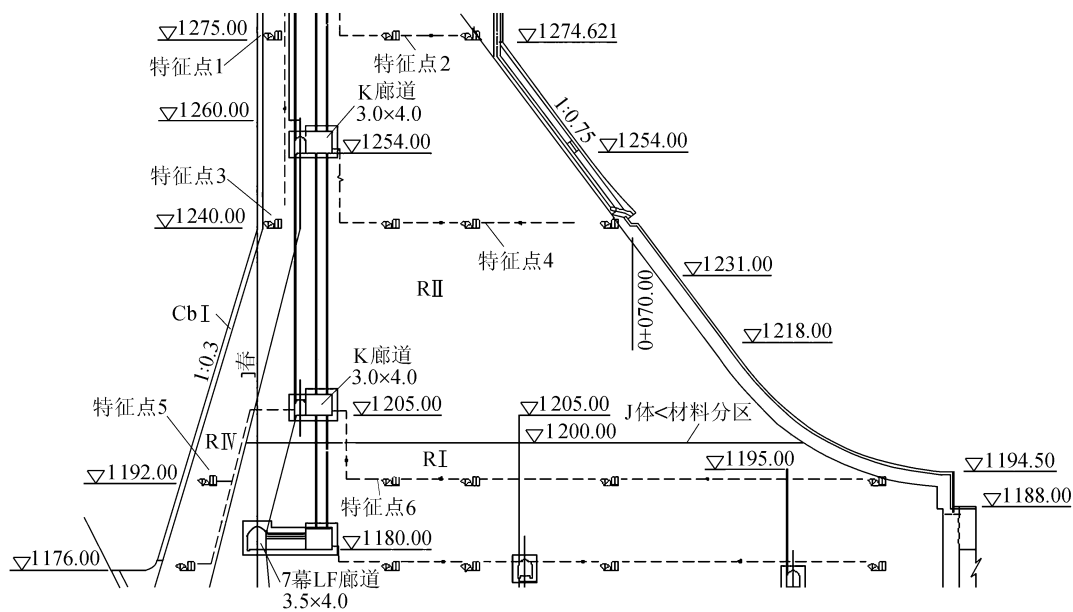


图2 溢流坝坝段截面(单位:m)

Fig. 2 Cross-sectional view of overflow dam(units:m)

$$R\text{ I}:E(\tau)=47.16\times(1-e^{-0.505\tau^{0.28}})\text{ GPa}$$
$$R\text{ II}:E(\tau)=43.8\times(1-e^{-0.335\tau^{0.368}})\text{ GPa}$$
$$R\text{ IV}:E(\tau)=46.32\times(1-e^{-0.345\tau^{0.36}})\text{ GPa}$$

该工程最终施工配合比混凝土未进行徐变试验,故上述混凝土的徐变公式采用文献[5]中的经验公式。

2.2 计算结果及分析

采用变形法原理,对特征点所在位置的五向应变计实测五向应变进行计算,应力数值(拉应力为正)的计算结果如图4所示。

施工期坝体应力的主要产生原因是结构在自重、温度、自生体积变形、徐变、水压力作用下变形受约束<sup>[16]</sup>,因此,应力来源比较复杂,难以从实测应变估算的应力历时曲线中找到其与某种特定施工期荷载非常显著的历时规律。

从基础强约束区的应力变化来看,上游坝踵特征点5的方向1和方向2基本处于拉应力状态,并随无应力计的温度值呈现周期波动的特点;中部特征点6大部分方向处于受压状态。从基础弱约束区的应力变化来看,特征点3、4应力变化平稳,多表现为压应力,没有出现较大拉应力。从基础非约束区的应力变化来看,上游侧特征点1各方向基本处于拉应力状态,初期应力有所上升,后来随温度变化规律周期振荡下降;中部特征点2应力均比较小,多为压应力。

总体来看,该坝的表层混凝土一般出现拉应力,内部混凝土一般为压应力,这是由于表层混凝土受外界环境温度的影响较大,其温度变化的空间梯度和时间梯度都明显大于内部所致。可见,施工期坝体应力与温度荷载的相关性最大。

3 结 论

- a. 根据混凝土预先埋设的五向应变计和无应力计观测到的应变、温度等资料计算混凝土实际应力的过程比较复杂,在资料分析前误差的剔除、仪器设备的埋设都非常重要,否则将产生较大的误差。
- b. 由于计算混凝土的应力需要混凝土的相关物理参数,因此施工前需通过相应的试验获取准确的

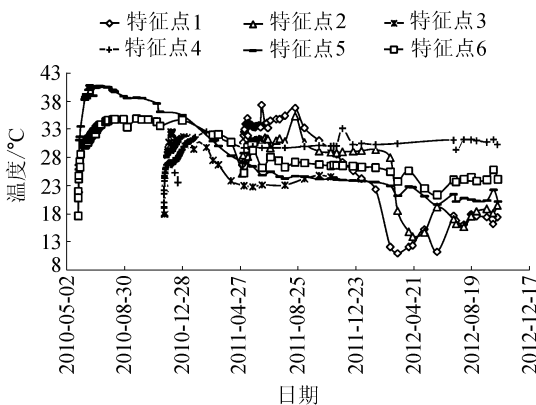


图3 特征点的温度历时曲线

Fig. 3 Temperature duration curves of feature points

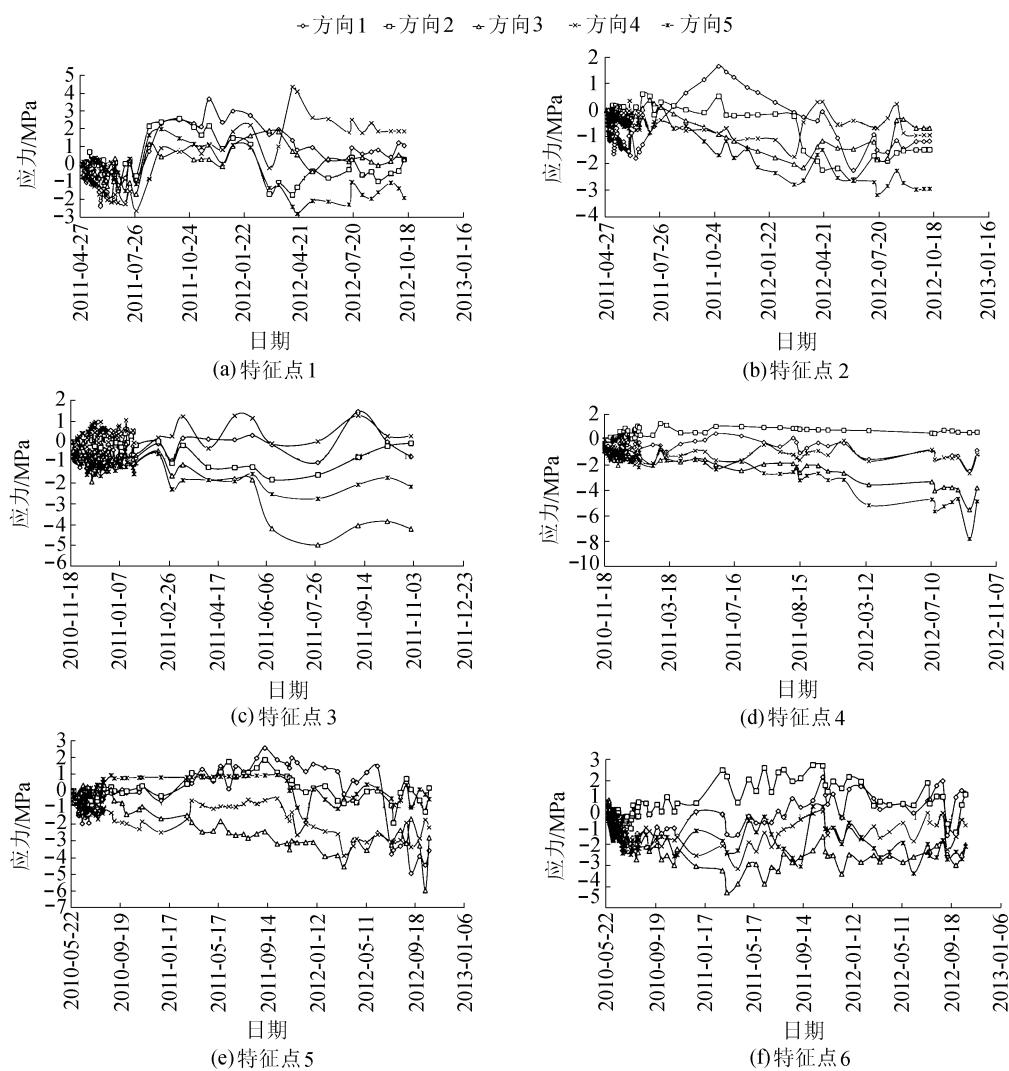


图 4 五向应力图  
Fig. 4 Five-directional stress

参数。

c. 从实测转换的应力结果来看,在厚浇筑层快速施工条件下,碾压混凝土重力坝在上游侧基本表现为拉应力,但绝大部分拉应力值不超过混凝土的抗拉强度,坝体内部基本表现为压应力,这个和仿真结果相似,符合施工期和运行期的应力变化规律,可以为施工和运行提供量化依据。

d. 与常规施工方法相比,采用类似快速施工方法的其他工程应加强上游侧混凝土的施工期温控力度,尽量减小上游面的拉应力,避免蓄水后出现劈头缝。

参考文献:

[ 1 ] 彭虹. 大坝应力、应变监测的几个问题[J]. 水电自动化与大坝监测,2010,34(4):42-47. ( PENG Hong. Several questions of stress strain monitoring on concrete dam[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2010, 34 ( 4 ) : 42-47. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 储海宁. 关于高混凝土坝应力应变监测的几个问题;兼评安全监测规范的有关规定[J]. 大坝与安全,2009(2):29-37. ( CHU Haining. Several issues on stress and strain monitoring of high concrete dams;discussion on some specifications in safety monitoring norm[J]. Dam and Safety, 2009(2):29-37. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 管志成. 混凝土坝应变计测值的应力计算[J]. 水利学报,1980(3):72-76. ( GUAN Zhicheng. The stress calculation of measured values to strain gauge buried in concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980(3):72-76. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 邵乃辰. 关于应变计若干问题的讨论[J]. 水电站设计,2004,20(3):73-75. ( SHAO Naichen. Several issues on the discussion of strain gauge[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2004, 20(3):73-75. ( in Chinese ) )

- [5] 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,1999:156-199.
- [6] 徐兆全. 大体积混凝土早期应变监测研究[C]//第21届全国结构工程学术会议论文集第Ⅱ册. 沈阳:中国力学学会工程力学编辑部,2012:130-135.
- [7] 顾冲时,吴中如,吴相豪. 碾压混凝土坝安全监测理论与方法[J]. 水利学报,2002(9):112-116. (GU Chongshi, WU Zhongru, WU Xianghao. A review on development of theory and method for safety monitoring of roller compacted concrete dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9):112-116. (in Chinese))
- [8] 彭海波,卢文富,梁波. 混凝土应力应变观测的探讨[J]. 水利水文自动化,2005(1):36-38. (PENG Haibo, LU Wenfu, LIANG Bo. The discussion of stress and strain observation in concrete[J]. Automation in Water Resources and Hydrology, 2005(1):36-38. (in Chinese))
- [9] 门远,林坚,张日勇,等. 五向应变计的松弛法应力计算[J]. 水利水电技术,2004,35(3):27-28. (MENG Yuan, LIN Jian, ZHANG Riyong, et al. The stress calculation of 5-D strain gauge by relaxation method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(3):27-28. (in Chinese))
- [10] 魏德荣,王玉洁,傅春江. 基于变形法的粘弹性体实测应力计算[J]. 大坝与安全,2004(1):52-56. (WEI Derong, WANG Yujie, FU Chunjiang. Observational stress calculation of viscoelastic body based on deformation method[J]. Dam and Safety, 2004(1):52-56. (in Chinese))
- [11] 刘志敏,赵坚,周澄. 关于应变计的应力数值转换[J]. 大坝与安全,2005(1):52-54. (LIU Zhimin, ZHAO Jian, ZHOU Cheng. On conversion stress numerical value of strain gauge[J]. Dam and Safety, 2005(1):52-54. (in Chinese))
- [12] 冯波,张志诚,董霞. 混凝土应力计算的变形法误差分析及方法改进[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(2):217-219. (FENG Bo, ZHANG Zhicheng, DONG Xia. Error analysis of deformation method for stress calculation of concrete and its improvement[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(2):217-219. (in Chinese))
- [13] 张雄,陈胜宏,傅少君,等. 变形法计算混凝土应力的改进[J]. 水力发电学报,2010,29(6):187-192. (ZHANG Xiong, CHEN Shenghong, FU Shaojun, et al. Modification to deformation method of stress computation of concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6):187-192. (in Chinese))
- [14] 张子明, GARGA V K. 碾压混凝土坝的温度应力[J]. 河海大学学报:自然科学版,1995,23(3):8-14. (ZHANG Ziming, GARGA V K. Temperature-induced stresses in RCC dam[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1995, 23(3):8-14. (in Chinese))
- [15] 强晟,朱岳明,钟谷良,等. 混凝土坝厚层短歇的快速浇筑方法及应用[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2010,32(4):38-41. (QIANG Sheng, ZHU Yueming, ZHONG Guliang, et al. Fast pouring method with thick layer and short interval for concrete dam and its application [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2010, 32(4):38-41. (in Chinese))
- [16] GUO Lixia, BAI Xiaohong, ZHONG Ling, et al. Temperature control and cracking prevention in coastal thin-wall concrete structures[J]. Water Science and Engineering, 2011, 4(4):455-462.