

# DTS 在三峡工程混凝土温度场监测中的应用

蔡顺德 , 望燕慧 , 蔡德所

( 三峡大学土木水电学院 , 湖北 宜昌 443002 )

摘要 : 以 DTS 实测三峡工程大体积混凝土温度 , 分析了混凝土温度场水化热阶段、二峰阶段、平稳阶段的特点 , 指出水化热是大体积混凝土温度应力产生的重要因素 ; 由于内部集热 , 混凝土浇筑 1 个多月后会出现第二次温度峰值 , 大体积混凝土经过一个季度的温度变化过程后逐渐趋向平稳 , 环境温度对平稳阶段混凝土表层温度有一定的影响 . DTS 测温成果较好地证实了三峡工程大体积混凝土温度场变化的阶段性和规律性 .

关键词 : DTS ; 大体积混凝土 ; 温度场变化 ; 三峡水利枢纽工程

中图分类号 : TV544+ . 91      文献标识码 : B      文章编号 : 1006-7647( 2005 )04-0030-03

Application of DTS to monitoring of concrete temperature field in Three-Gorges Project//CAI Shun-de , WANG Yan-hui , CAI De-su( College of Civil & Hydroelectric Engineering , China Three Gorges University , Yichang 443002 , China )

Abstract : Based on the temperature data of mass concrete in the Three-Gorges Project measured with the Distributed optical fiber Temperature monitoring System( DTS ) , an analysis was made of the characteristics of the three-stage temperature variation of mass concrete during the pouring process , including the hydration heat stage , the second peak stage and the stable stage . Some conclusions were summarized as follows : hydration heat is an important factor leading to concrete stresses ; after a month of concrete pouring , the second temperature peak will occur suddenly due to the inner heat concentration ; the temperature of mass concrete tends to become stable a quarter later , and the environmental temperature is of certain influence on the surface temperature of concrete at the stable stage . The measured data of temperature with DTS confirms the stage variation of temperature field and its regularity of mass concrete in the Three-Gorges Project .

Key words : DTS ; mass concrete ; temperature field variation ; Three-Gorges Project

大体积混凝土结构尺寸大 , 与环境温度变化关系密切 , 内部抗拉能力差 , 因此混凝土结构容易出现裂缝 . 大体积混凝土温度场变化过程的监测分析 , 是指导工程施工 , 控制工程质量 , 保证工程营运的有效方法 .

传统混凝土温度场的监测 , 多采用点式温度计测试 , 它布点有限 , 温度信息量少 . 在大体积混凝土温度场的反映上 , 多采取温度少数代表点的规律性发展和数理计算进行表达 . 另外点式温度计安装工艺复杂 , 对工程施工有一定的干扰 .

分布式光纤测温系统 (distributed optical fiber temperature monitoring system , 简称 DTS ) 在三峡工程大体积混凝土温度场监测中的应用 , 体现出温度信息量大 , 线性连续响应速度快 , 空间定位准确 , 抗干扰性强 , 施工简单 , 能够与工程施工同步进行等优点 .

## 1 DTS 工作原理

DTS 是综合利用光时域反射仪 ( OTDR ) 测距原

理和光纤背向拉曼 ( Roman ) 散射的感温效应 , 使光纤的热膨胀系数对光纤传感信号进行相位调制来反映被测对象温度信号的相应变化 .

### 1.1 DTS 测温原理

光脉冲在光纤中传播时 , 反射光的强度与温度场力  $F$  存在一定的比例关系 :

$$\frac{d\varphi}{dF} = K_0 L \frac{dn}{dF} + K_0 L \frac{dL}{dF} \tag{1}$$

式中 :  $\varphi$  为相位 ;  $L$  为光纤长度 ;  $n$  为光纤折射率 ;  $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  ,  $\lambda$  为真空中光的波长 .

式 ( 1 ) 中 ,  $K_0 L \frac{dn}{dF}$  表示折射率变化引起的光相位变化 ;  $K_0 L \frac{dL}{dF}$  表示光纤几何长度变化引起的光相位变化<sup>[1]</sup> .

光纤几何长度变化直接受其热膨胀系数的影响 , 若用温度变化  $\Delta T$  和相位变化  $\Delta\varphi$  描述 , 则公式 ( 1 ) 为

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta TL} = K_0 \frac{dn}{dT} + \frac{n}{L} \frac{dL}{dT} \quad (2)$$

例如石英光纤  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta TL} = 107 \text{ rad}/(\text{℃} \cdot \text{m})$ 。

光纤散射特性研究中发现,光纤散射中主要包括瑞利散射和拉曼散射。瑞利散射波长和入射光的波长基本相同,它受温度影响很小。拉曼散射中的非线性散射易受温度变化而改变其反射强度。

拉曼散射包含斯托克斯(stokes)和反斯托克斯(anti-stokes)散射,其中斯托克斯散射与光纤的温度信号变化无关,而反斯托克斯散射的光强却会随光纤的温度信号变化而变化。

## 1.2 DTS 测距原理

光脉冲在光纤中传播时,环境对光纤的微扰(光纤应力变化、微弯、光纤本征的不均匀性等)都会产生光的散射。设其背向反射时间为  $t$ ,光脉冲由散射点返回所走的距离为  $2L$ ,光在光纤中的传播速度  $v = \frac{c}{n}$ ,则

$$L = \frac{1}{2} vt \quad (3)$$

式(3)即是光时域反射仪测定光纤中微扰点距离的原理。

DTS 反映的定位精度可为 0.25 m、0.5 m、1.0 m;温度精度为  $\pm 0.5 \text{℃}$ ,测试范围为 2~4 km。经过几个工程实例,与传统测温仪比较,DTS 所测温度值往往出现高出实际温度  $1 \text{℃}$  左右的现象,这与光纤的金属外套结构有一定的关系。

## 2 分布式测温光纤布设

为便于温度场描述,如图 1 所示(图中“77、88”等为 DTS 测点编号),在三峡工程左厂 14 坝段、高程 140.56 m 处,埋设了 81.1 m SS316 镍铬合金外套测温光纤,它可连续测得 80 多个温度点数值。

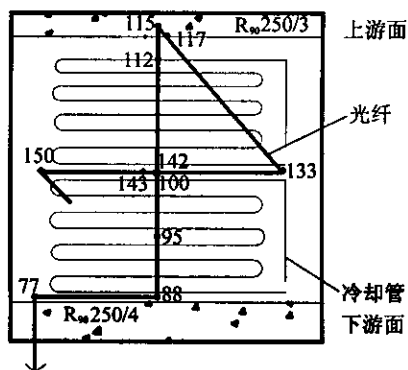


图 1 光纤布设示意图

光纤埋设在冷却管布置平面以上 0.5 m 厚的混凝土层中。在上次混凝土浇筑完后间隔 3 d 进行本次浇筑,仓位两侧为老混凝土柱面。光纤经过 R<sub>90</sub>250/3, R<sub>90</sub>150/4, R<sub>90</sub>250/4 三种不同标号的混凝土层<sup>[2]</sup>。

## 3 温度场变化过程监测分析

2002 年 4 月至 2003 年 2 月 DTS 监测结果表明,所监测的三峡工程大体积混凝土温度场变化具有一定的规律性。本文分析中着重选取 3 个有代表性的温度场变化过程——水化热阶段、二峰阶段、平稳阶段,取值均以变化过程的峰值所在时段为主,采取线性温度场与横向时间点相结合的分析方法。

### 3.1 水化热阶段温度场

水泥加水拌和后,其颗粒表面的熟料矿物立即与水发生水化反应,这个过程是放热反应。硅酸盐水泥的水化热大,放热周期长,50% 以上的热量能在 3 d 左右释放出来。水化热在混凝土内部不断积聚使温度升高,表面与空气接触处温度较低,形成内外温差,使混凝土表面产生拉应力。降温过程中又会使混凝土表面出现压应力。现场观测统计表明,平均气温在 2~4 d 内下降 6~8℃ 以上时,混凝土坝块表面会发生裂缝。因此,大体积混凝土浇筑中,水化热是影响温度应力的重要因素。

DTS 从混凝土浇筑收仓后开始监测,整个混凝土水化热过程中每天测试 3 次。DTS 测温曲线数值的比较分析表明:

a. 从测试情况看,温度最高峰值(34.75℃)发生在第 3 天(2002 年 4 月 4 日),见表 1。

表 1 水化热阶段的混凝土温度峰值与谷值 /℃

| 日 期     | 环境温度 | 混凝土温度 |       |
|---------|------|-------|-------|
|         |      | 峰值    | 谷值    |
| 4 月 2 日 | 25.0 | 30.60 | 18.40 |
| 4 月 3 日 | 28.0 | 32.80 | 21.65 |
| 4 月 4 日 | 20.0 | 34.75 | 24.60 |
| 4 月 5 日 | 19.0 | 33.80 | 23.80 |
| 4 月 6 日 | 25.8 | 33.80 | 24.35 |
| 4 月 7 日 | 15.7 | 32.45 | 23.75 |
| 4 月 8 日 | 13.5 | 32.65 | 23.40 |

b. 峰值与谷值之间的最大温差为 10.15℃,按理论计算 2~10℃ 温度变化,其体积变形量一般会在  $(20 \sim 100) \times 10^{-6}$  范围内。

c. 温度最高峰值区在上游 R<sub>90</sub>250/3 混凝土浇筑区内,它浇筑时间早,属于强度高、放热量大的混凝土级配。

d. 以测点 100 为中心,在同标号(R<sub>90</sub>150/4)的混凝土中,测点 88~100 区域 DTS 测温曲线呈下降状态,它属后浇的部分,其放热情况比测点 100~112 区域滞后。4 月 2~5 日 DTS 测温曲线均保持这种状态。

e. 以测点 142 为中心,在同标号(R<sub>90</sub>150/4)混凝土中,测点 133~142 区域 DTS 测温曲线显示的温度较高,测点 142~150 区域 DTS 测温曲线显示的温度较低,它反映出浇筑先后时间差所导致的水化热

温度出现的先后。

f. 混凝土内部的成分、水胶比、孔隙率,对浆体与骨料的微观界面结构有较大的影响,使同一标号在一定区域内混凝土的水化热值有一定的区别。

g. 冷却管垂直作用位置与光纤测温降低相对点有一定的漂移.这与冷却管至测温光纤之间 0.5 m 厚混凝土的隔层影响有关。

3.2 二峰阶段温度场

测区温度场经过 1 个月的波动,从 2002 年 5 月上旬开始逐渐形成以测点 95 和 143 为中心的二次峰值现象,其峰值到 7 月 22 日为最高值,8 月以后逐渐下降,后渐平稳.如表 2 所示,从 6 月 3 日开始,二峰值平均高出原峰值点(测点 118)2℃以上。

| 表 2 混凝土中部仓位不同测点二峰值 ℃ |       |        |        |
|----------------------|-------|--------|--------|
| 日 期                  | 测点 95 | 测点 143 | 测点 118 |
| 4 月 29 日             | 26.25 | 25.10  | 27.05  |
| 5 月 5 日              | 26.85 | 26.55  | 26.10  |
| 5 月 13 日             | 27.00 | 25.20  | 25.45  |
| 5 月 19 日             | 27.25 | 26.15  | 25.05  |
| 6 月 3 日              | 27.50 | 25.35  | 23.55  |
| 6 月 23 日             | 28.85 | 27.00  | 26.35  |
| 7 月 7 日              | 28.55 | 27.65  | 26.05  |
| 7 月 22 日             | 29.05 | 27.90  | 27.65  |
| 8 月 2 日              | 27.85 | 27.85  | 26.70  |
| 8 月 26 日             | 27.20 | 25.85  | 24.25  |

二峰现象的分析过程中排除了以下两种情况：

a. 上层新浇筑混凝土水化热对测区下层老混凝土温度的影响不大.4 月 2~4 日峰值呈上升趋势,4 月 4~29 日峰值呈逐渐下降趋势,下降幅度为 0.2~1.3℃,水化热阶段过后,整个温度呈下降趋势.在坝区次高温季节坝体内温度能够稳定下降,表明人工冷却系统充分发挥了作用。

b. 光纤布置的十字区域内(见图 1),由于阳光辐射,坝体下游面温度约高于上游面 2℃.从大坝位置看,下游面东南当阳,上游面西北背阳.坝区 7 月下旬以前半个月多内多为晴好天气,测区气温 27~36℃.当阳下游面受阳光照射量大,背阳上游面受河谷风吹拂,因此,坝体上、下游面温度曲线有一定的差别。

二峰阶段的出现可能主要有两个方面的原因：

a. 测区中间部位混凝土为 R<sub>90</sub>150/4,属中热掺粉煤灰类型,粉煤灰掺量 40%~45%,粉煤灰有比较明显的延迟放热效应.材料研究表明,三峡工程 20℃以下粉煤灰可在 3~4 a 中仍进行水化过程<sup>[1]</sup>。

b. 以测点 142 为中心的测温光纤横向区域,中间部分温度较高,左右两方向温度均呈下降趋势,它表明测区中间部分有集温现象.左右两方向受边墙老混凝土低温的拉动,温度较低,形成肩形状态曲线。

3.3 平稳阶段温度场

从 2002 年 8 月上旬以后的测值分析,混凝土温度场 7 月下旬在二峰值波动了一段时间后,温度曲线由起伏较大到逐渐平稳,峰谷值差从 5.15℃降到 2.55℃,见表 3。

| 表 3 8 月后混凝土温度峰谷值及差值比较 ℃ |       |       |      |
|-------------------------|-------|-------|------|
| 日 期                     | 峰值    | 谷值    | 差值   |
| 8 月 2 日                 | 28.55 | 23.40 | 5.15 |
| 8 月 26 日                | 27.85 | 23.15 | 4.70 |
| 9 月 9 日                 | 27.40 | 23.15 | 4.25 |
| 9 月 21 日                | 26.95 | 22.55 | 4.40 |
| 10 月 2 日                | 25.75 | 21.70 | 4.05 |
| 10 月 15 日               | 24.00 | 20.35 | 3.65 |
| 10 月 25 日               | 23.85 | 20.85 | 3.00 |
| 11 月 3 日                | 23.15 | 20.60 | 2.55 |

表 3 的平稳降温成效体现出：

a. 当年中期冷却水(9 月开始通水)对削减坝体内集热峰值起到了积极的作用。

b. 坝体内降温均衡,起伏度不大.从 9 月 9 日至 10 月 25 日温度峰值降幅为 0.5℃左右,谷值波动在 0.8~0.2℃之间。

温度的平稳阶段,其边界易受到环境温度的一定影响.测点 115 是距上游外墙面最近的测温点(1.5 m),测点 114 和 113 是垂直后向点,测点 116 和 117 是斜边后向点(参见图 1).测区温度场平稳后,由 2003 年 1 月和 2 月 4 次相邻测时的温度状态(表 4)及环境温度(表 5),可分析出测点 115 受环境气温影响的情况。

| 表 4 2003 年 1 月和 2 月 4 次测温情况 ℃ |          |          |       |       |       |       |
|-------------------------------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 日 期                           | 环境<br>温度 | 不同测点温度峰值 |       |       |       |       |
|                               |          | 测点113    | 测点114 | 测点115 | 测点116 | 测点117 |
| 1 月 21 日                      | 8.0      | 16.65    | 15.05 | 13.75 | 12.35 | 14.55 |
| 1 月 23 日                      | 14.0     | 15.65    | 14.55 | 13.00 | 11.90 | 14.50 |
| 2 月 9 日                       | 11.5     | 15.90    | 14.90 | 11.95 | 12.00 | 12.25 |
| 2 月 10 日                      | 11.0     | 16.35    | 13.95 | 12.50 | 13.40 | 14.00 |

| 表 5 2003 年 1 月和 2 月环境温度 ℃ |      |          |      |
|---------------------------|------|----------|------|
| 日 期                       | 环境温度 | 日 期      | 环境温度 |
| 1 月 18 日                  | 11.7 | 2 月 5 日  | 12.8 |
| 1 月 19 日                  | 14.0 | 2 月 6 日  | 12.3 |
| 1 月 20 日                  | 16.0 | 2 月 7 日  | 11.8 |
| 1 月 21 日                  | 8.0  | 2 月 8 日  | 15.0 |
| 1 月 22 日                  | 11.8 | 2 月 9 日  | 11.5 |
| 1 月 23 日                  | 14.0 | 2 月 10 日 | 11.0 |

从表 5 可见,1 月环境温度从 18 日起逐渐升高到 20 日,21 日低温跳动后又呈上升趋势.21 日和 23 日两天测点 115 混凝土内温度峰值从 13.75℃降到 13.00℃,差值为 0.75℃,可以认为 21 日环境温度的跳动对 23 日的降温有一定的影响.观测数据证实,日气温变化可以影响到混凝土表面下 0.6 m 的地方<sup>[4]</sup>。

(下转第 35 页)

工程实施后,改善了大庆街—高公街上弯道的平面形状,增大了曲率半径,主流线大幅度右移,缓解了水流顶冲龙王庙险段压力。②近岸流速发生变化。工程施工前,上弯道进口段流速分布较均匀,而进入下弯道顶冲点垃圾码头—汉江口门段,流速变幅加大,在龙王庙险段更为突出。工程完工后在左岸宝庆码头—汉江口门 50 m 内流速减小 1.8 ~ 1.1 m/s;右岸大庆街—高公街 20 m 处流速增加 0.8 ~ 2.0 m/s。③河床局部冲刷坑发生变化。工程施工前施放 1983 年型流量后,出现 4 个大冲刷坑,坑底高程为 -5.0 ~ -20.0 m,长 110 m 不等,表明工程施工前汉江主要是高程 -5.0 m 冲刷坑,汉江口门—长江段主要是高程 -15.0 m 和 -20.0 mm 冲刷坑。工程完工后,冲刷坑位置及范围有了变化,即右岸国棉一厂—品字街一带冲刷坑右移并延长,而龙王庙上段冲刷坑缩短,并向右偏移,长江冲刷坑缩小下移。另外集家嘴、水运码头及南岸嘴回流区均出现一定回淤,都对堤防安全有利。

受汉江出口段整体河势的限制,南岸嘴拓宽工程并不能彻底改变汉江出口段的平面态势,汛期龙王庙险段流速仍相对较大,该险工段仍需适当加固。主流线右移后,国棉一厂—品字街近岸流速增加较大,河床冲刷加剧,此处岸线应加强守护。在汉江流量为 4670 m<sup>3</sup>/s、长江流量为 41 400 m<sup>3</sup>/s 的条件下,左岸流通码头近岸 50 m 流速减小 1.1 m/s 左右,集家嘴—汉江口门段近岸 50 m 内流速减小 0.1 ~ 1.2 m/s,右岸大庆街—高公街 20 m 处流速增加 0.4 ~ 2.0 m/s。

(上接第 32 页)

2 月环境温度从 5 日起较平稳地上升到 8 日,9 日和 10 日温度下降(表 5)。9 日和 10 日测点 115 温升的状态,应该还是反映 8 日前的温度效应。

可见,测点 115 能够反映前 3 d 环境温度对混凝土一定部位的影响。测点 114 和 113、116 和 117 显示的混凝土温度变化,从纵斜两个方向说明,随混凝土深度的纵向深入,混凝土内的温度有一定幅度的爬高现象。

### 4 结 论

a. DTS 在三峡工程大体积混凝土温度场监测中的应用表明,DTS 理论完善,信息量大,线性连续,响应速度快,空间定位准确,抗干扰性强,施工简单,反映了现代科技成果。

b. 2002 年 4 月至 2003 年 2 月对三峡工程大体积混凝土温度场的监测成果表明,大体积混凝土温度场的变化具有阶段性和规律性。

c. 大体积混凝土水化热最高温度峰值发生在

综上所述,南岸嘴人工拓宽各方案实施后,汉口龙王庙险段的河势都有不同程度的改善,流速分布趋于均匀,主流线右移,局部冲刷坑缩小,险工段河床冲刷强度减弱,可为龙王庙岸线及河床稳定提供有利条件。同时可改善汉江河口段的平面形态,增大汉江出口段的泄洪能力。汉江出口段的航道无累积淤积,对航运基本无影响。特别是整治工程的推荐方案更能满足预期的设计效果,作用最为显著,为龙王庙险段综合整治工程采用。

### 3 结 语

龙王庙险段综合整治工程按推荐方案实施完工后(1999 年汛前全部竣工,验收合格),已经过几年大小洪水考验,特别是 1999 年汛期,武汉关水位达到 28.89 m,仅次于 1954 年和 1998 年的水位,居历史第 3 位。经过综合整治后的龙王庙江堤经受住了这次特大洪水的严峻考验,达到设计要求,由原来险象环生、岌岌可危的“险点”,变成环境优美、赏心悦目的“景点”和休闲胜地,取得了良好的环境和社会效益。这项模型试验研究工作为武汉市防洪保安和环境治理做出了重大贡献,荣获市政府的嘉奖。

### 参考文献:

[1] 武汉市文史编辑委员会.武汉市建制沿革[M].武汉:湖北人民出版社,1956.  
[2] 长江水利委员会长江科学院.长江志:中下游河道整治[M].北京:中国大百科全书出版社,2000.

(收稿日期 2004-06-16 编辑 熊水斌)

第 3 天。

d. 一期和二期冷却水对削减水化热峰值和降低二峰阶段的集温有重要作用。

e. 大体积混凝土二峰值的出现,与浇筑材料逐渐水化放热的集温相关。

f. 大体积混凝土的表层易受到环境气温变化的影响,如测点 115 能够反映 3 d 左右环境气温的一定影响。

### 参考文献:

[1] 孙圣和.光纤测量与传感技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.109—110.  
[2] 蔡顺德.分布式光纤监测大块体混凝土水化热过程分析[J].三峡大学学报,2002,24(6):481—485.  
[3] 储传英.三峡工程混凝土原材料研究[M].北京:中国水利水电出版社,1999.32—33.  
[4] 三峡水利枢纽混凝土工程温控研究编委会.三峡水利枢纽混凝土工程温控研究[M].北京:中国水利水电出版社,2001.

(收稿日期 2004-12-25 编辑 熊水斌)