

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230353

# 渡槽壁板温度应力的仿真与试验研究

李彬<sup>1</sup>, 张沛琳<sup>1</sup>, 汪泓吉<sup>2</sup>, 何齐宇<sup>1</sup>

(1. 武汉轻工大学机械工程学院, 湖北 武汉 430023; 2. 中南安全环境技术研究院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

**摘要:** 以大型渡槽壁板偶遇气温骤然下降时所受温度载荷为基础, 开展了混凝土板上表面急剧降温时温度自约束应力测试分析, 测定了在不同降温速率时混凝土板上下表面温度差及降温速率为 10 °C/h 时在 1 h 时刻的混凝土板表面温度自约束主应力, 通过对比有限元仿真混凝土瞬态温度应力数值与试验测试数据, 验证了有限元建模的准确性。在此基础上, 分析了降温速率对渡槽瞬态温度场和应力场的影响, 探讨了不同保温材料对渡槽表面温度与应力场的影响。结果表明, 随着环境气温下降速率的增大, 渡槽表面的温度拉应力将以更快的速度增加; 当 U 型渡槽采用 2 mm 厚度聚氨酯、聚苯乙烯板和玻化微珠保温材料后, 与无保温措施渡槽外表面温度应力相比, 渡槽外表面温度拉应力分别减少 83%、80%、68%。综合考虑成本与施工技术, 玻化微珠保温材料较适合作为渡槽外表面的保温隔热材料。

**关键词:** 渡槽; 混凝土; 自约束应力; 降温速率; 数值模拟

**中图分类号:** TV672<sup>+</sup>.3; TV332.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)12-0137-05

## 1 引言

长距离水运广泛使用渡槽凸显了其安全性和耐久性的重要性, 特别是在复杂的地理环境中, 研究渡槽的开裂性能至关重要。EMERSON M<sup>[1]</sup> 研究了混凝土结构的温度场分布, 提出了基于最大温度梯度的温度分布计算方法; PRIESTLEY M J N<sup>[2]</sup> 讨论了混凝土结构的纵向和横向温度应力, 并推导出解析公式; SAETTA A 等<sup>[3]</sup> 研究了温度荷载作用下混凝土结构的变形规律, 利用有限元软件分析了不同类型箱形混凝土结构的温度应力场; ELBADRY M 等<sup>[4]</sup> 建立了二维等截面计算模型, 提出用预应力混凝土控制温度场分布不均匀引起的温度应力。然而, 现有的研究多聚焦于渡槽壁温差的稳态分析, 对大型渡槽在不同冷却条件下的瞬态温度应力研究有所欠缺。本文提出采用瞬态计算方法分析 U 形渡槽的温度场和应力场, 并对比计算结果与试验数据, 验证数值模拟的可靠性, 以期期为开发控制渡槽温度应力的新方法提供参考。

## 2 试验材料及研究方法

### 2.1 试验材料

试验中混凝土平板尺寸为 0.5 m × 0.5 m × 0.05 m (长 × 宽 × 高)。参考南水北调渡槽结构混凝土强度等级<sup>[5]</sup>, 混凝土强度等级选为 C50, 水泥选用细度为 0.67 的华新 P. 042.5 级水泥, 比表面积为 350 m<sup>2</sup>/kg。试验选用细砂, 平均细度模数为 2.35, 堆积密度为 1 400 kg/m<sup>3</sup>。选用 5~20 mm 的碎石, 其堆积密度为 1 450 kg/m<sup>3</sup>。减水剂为自制的高效减水剂, 试验用水为武汉市自来水。C50 混凝土的设计规程参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2011)<sup>[6]</sup>, 其配合比见表 1。

表 1 C50 混凝土配合比

Tab. 1 C50 concrete mix ratio

| 强度等级 | 水胶比  | 水泥 / (kg · m <sup>-3</sup> ) | 石子 / (kg · m <sup>-3</sup> ) | 砂子 / (kg · m <sup>-3</sup> ) | 减水剂 / (kg · m <sup>-3</sup> ) |
|------|------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| C50  | 0.37 | 410                          | 1 200                        | 480                          | 9.9                           |

### 2.2 试件制备

混凝土平板的制作、养护均在实验室内完成, C50 混凝土的拌制采用 60 L 混凝土搅拌机。将

收稿日期: 2023-03-10, 修回日期: 2023-04-11

基金项目: 湖北省自然科学基金青年项目(2021CFB292); 海防技术创新中心创新基金项目(JJ-2020-719-01); 武汉轻工大学校立科研杰出青年项目(2022J04); 武汉市知识创新专项(2022010801020393)

作者简介: 李彬(1988-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为热应力数值模拟及结构设计理论等, E-mail: 310875976@qq.com

拌制完成后的混凝土倒入模具,置于振捣台将其振捣密实,然后将模具放置在温度为 21 ℃ 的实验室内静置 24 h。将拆模后的混凝土平板放置于温度为 23 ℃、相对湿度为 95% 的养护室养护 28 d。

### 2.3 测试方法

采用大型环境温度控制箱(WSD-01)、动态信号测试分析系统等试验设备,并在 C50 混凝土平板上布置应变片。为了实现环境温控箱中混凝土板单面环境降温,仅让上表面与环境箱内空气进行热交换,在混凝土板四周边缘及下表面均粘贴三聚氰胺保温泡沫。试验前在应变片的粘贴位置预先用砂纸进行打磨并用丙酮清理,即对混凝土平板进行预处理后,用 AB 胶水将应变片贴在混凝土板上表面。沿混凝土板上表面对角线布置 A、B、C 三个测点(图 1),每个测点在粘贴 0°、45°、90° 三向应变片(图 1(a)中 1-1、1-2、1-3 分别为 A 点的 0°、45°、90° 三个方向的应变片。B、C 点类推)后静置 1 h,并利用塑料薄膜将应变片与混凝土表面进行压实。同时将 pt100 热电阻温度传感器固定于混凝土平板上下面,以便测量上下面的温度变化。为了实现混凝土板单面环境降温试验,在混凝土板四周边缘及下表面均粘贴有三聚氰胺保温泡沫,仅让上表面与环境箱内空气进行热交换。

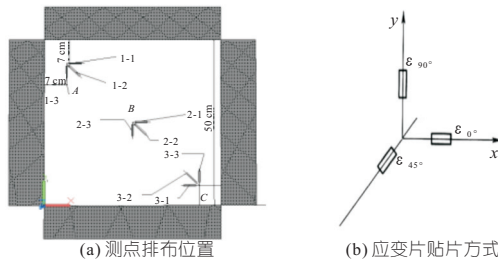


图 1 测点布置位置及贴片方式

Fig. 1 Measurement point arrangement position and patch method

混凝土由于温度自约束应力引起的应变  $\epsilon_{约束}$  为:

$$\epsilon_{约束} = \epsilon_{总} - \epsilon_{自由} \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_{总}$  为混凝土由于内部自约束作用、自由收缩及应变片热输出共同作用下产生的总应变;  $\epsilon_{自由}$  为混凝土由于自由收缩及应变片热输出产生的自由应变。

## 3 有限元模型与数值模拟

### 3.1 有限元模型

混凝土结构热传导方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为混凝土密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c$  为混凝土比热容,

$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$ ;  $\lambda$  为混凝土的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为混凝土温度,  $\text{°C}$ ;  $t$  为热传导过程进行时间,  $\text{s}$ ;  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为混凝土结构三维坐标,  $\text{m}$ 。

式(2)呈现了结构温度场与时间、空间的相互关系。可依据不同实际工况,确定混凝土结构的初始条件和边界条件,得到与之对应的混凝土温度场。在确定混凝土平板试件尺寸后,采用 ANSYS 软件构建其有限元模型并进行网格划分,温度载荷在模型表面以热对流形式施加,为保证混凝土平板能进行自由收缩,边界约束条件只限制其刚体位移,热力耦合单元采用 SOLID70。

### 3.2 边界条件

在实际工程问题中,一般采用冷却定律第三类边界条件计算对流换热  $q_c$ :

$$q_c = h_l (T_s - T_l) \quad (3)$$

式中,  $h_l$  为流体对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_s$  为表面温度,  $\text{°C}$ ;  $T_l$  为流体的温度,  $\text{°C}$ 。

### 3.3 参数选取

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)<sup>[7]</sup>,线膨胀系数  $\alpha_c = 1 \times 10^{-5}/\text{°C}$ 、比热容  $c = 0.96 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$ ;根据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176-2016)<sup>[8]</sup>,混凝土导热系数取  $1.74 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

根据《水工混凝土结构设计规范》<sup>[9]</sup>并结合前期课题研究报告<sup>[10]</sup>,采用经验公式(3)确定了本文有限元计算所采用的热对流系数,混凝土其他材料参数均依据设计规范<sup>[7-9]</sup>选取,见表 2。混凝土平板有限元模型见图 2。

表 2 C50 混凝土材料参数

Tab. 2 C50 concrete material parameters

| 导热系数 | 比热容  | 对流换热系数 | 弹性模量   | 密度    | 线膨胀系数     | 泊松比   |
|------|------|--------|--------|-------|-----------|-------|
| 1.74 | 0.96 | 22.2   | 34 500 | 2 450 | $10^{-5}$ | 0.167 |

注:导热系数、比热容、对流换热系数、弹性模量、密度、线膨胀系数单位分别为  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$ 、 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 $\text{MPa}$ 、 $\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1/\text{°C}$ 。

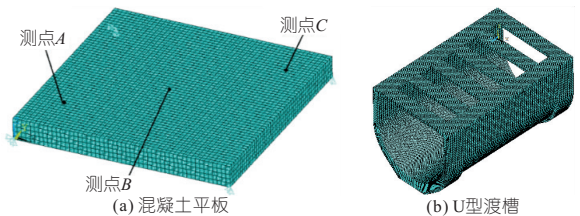


图 2 C50 混凝土平板和 U 型渡槽有限元模型

Fig. 2 Finite element model of C50 concrete slab and U-shaped aqueduct

## 4 结果与讨论

### 4.1 混凝土板数值模拟与试验结果对比分析

图 3 为降温速率为 5、10、15  $\text{°C}/\text{h}$  时的温度

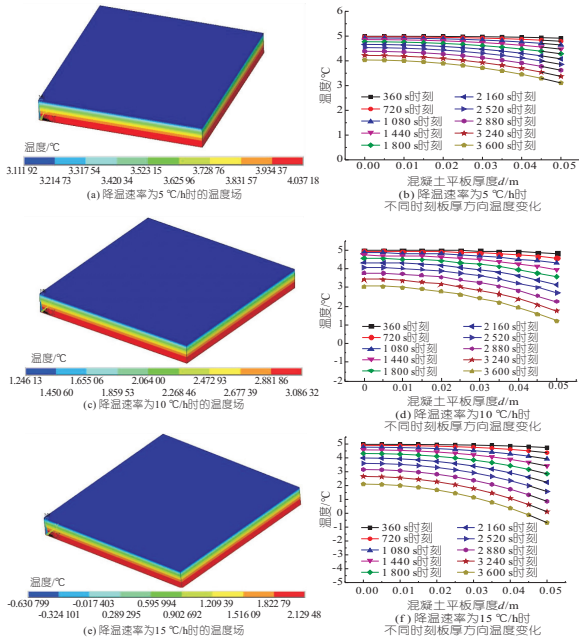


图 3 降温速率为 5、10、15 °C/h 时的温度场及不同时刻板厚方向温度变化

Fig. 3 Temperature fields at cooling rates of 5, 10, 15 °C/h, respectively, and temperature changes in direction of plate thickness at different times

场及不同时刻板厚方向温度变化。由图 3 可知,当混凝土上表面环境温度以某一恒定速率下降时,混凝土温度随之下降,且上表面温度下降比下表面温度快,温度沿厚度方向呈非线性分布,越靠近外表面温度梯度越大,进而产生自约束应力。提取 1 h 时刻的上下表面数值模拟数据,并将其与试验温度对比,发现在不同环境降温速率下,1 h 时刻混凝土板的上下表面温度模拟值与实测值基本吻合,表明数值方法能较好地模拟混凝土板的温度场。

有限元计算在 10 °C/h 降温速率下混凝土板的瞬态温度自约束应力,对比上表面的主应力值与试验值,见表 3。

表 3 上表面各测点温度主应力实测值与模拟值对比(1 h 时刻)

Tab. 3 Comparison between measured value of main stress of each measurement point on the upper surface and simulated value (1 h time)

| 降温速率<br>(/°C · h <sup>-1</sup> ) | 试验值/MPa |      |      | 模拟值/MPa |      |      |
|----------------------------------|---------|------|------|---------|------|------|
|                                  | 测点 A    | 测点 B | 测点 C | 测点 A    | 测点 B | 测点 C |
| 10                               | 0.56    | 0.66 | 0.54 | 0.57    | 0.58 | 0.57 |

由表 3 可看出,A、B、C 三点(位置见图 1(a))的表面温度应力数值模拟结果与试验结果吻合较好,最大误差为 12.2%。

#### 4.2 降温速率对渡槽瞬态温度场和应力场的影响

选取初始温度为 5 °C 的渡槽与渡槽槽内水体为研究对象,通过拟定渡槽外表面 5 种降温速率,即 15、12.5、10、7.5、5 °C/h 的线性函数变化<sup>[11]</sup>,研究不同降温速率对渡槽温度场及应力场的影响,并以热对流形式施加在渡槽外表面,计算得到降温 1 h(3 600 s 时刻)的渡槽温度场见图 4。由图 4 可知,渡槽结构在不同降温速率的气温影响下,其底板与侧壁表面的温度随时间不断降低,但在初始阶段温度场为非线性函数变化(图 5),5 种工况在降温结束时刻的降温幅度小于气温下降幅度,气温降温速率越快,渡槽结构外表面的降温幅度越大,但降温幅度与降温速率二者之间并非线性关系,随着降温速率的增加,渡槽外表面的降温幅度值明显上升。

图 6 为不同降温速率下渡槽 x、y 方向温度应力最大值变化曲线。由图 6 可知,不同外界气温降温速率为 7.5 °C/h 时,渡槽外表面 x、y 方向温度拉应力最大值分别为 0.57、0.58 MPa;当外界气温降温速率为 10 °C/h 时,渡槽外表面 x、y 方向温度拉应力最大值分别为 0.74、0.76 MPa,相较于气温降温速率为 7.5 °C/h,渡槽外表面 x、y 方向温度应力分别增加 29%、31%;当外界气温降温速率达 12.5 °C/h 时,相较于降温速率为 10 °C/h,渡槽外表面 x、y 方向温度应力分别增加 39%、37%;当降温速率为 15 °C/h 时,与降温速率为 12.5 °C/h 外表面温度应力相比,渡槽外表面 x、y 方向最大温度应力分别增加 51%、49%。可见当降温速率达 10 °C/h 以上,渡槽外表面应力增加显著。

#### 4.3 保温材料对渡槽瞬态温度场与温度应力的影响

以正午 12:00 为计算起点,渡槽和水温初始温度为 5 °C。选取 12 h 降温幅度为 15 °C 的气温曲线,按余弦函数变化。在日降温幅度为 15 °C 的情况下,到午夜 12:00 渡槽内外温差达到最大值。

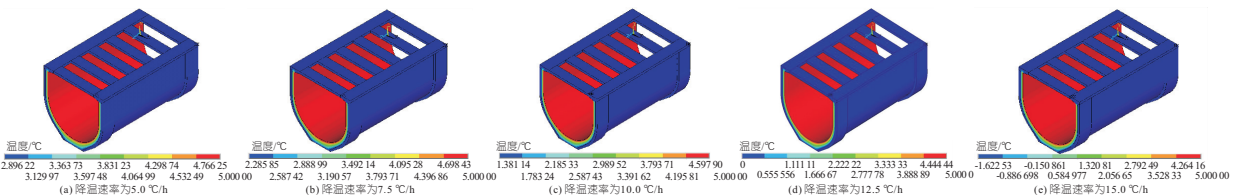


图 4 降温结束时刻 U 型渡槽温度场云图

Fig. 4 Cloud diagram of U-shaped aqueduct temperature field at the end of cooling

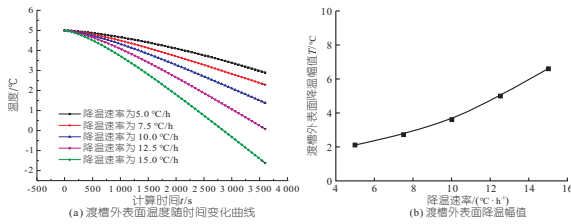


图5 不同降温速率下渡槽外表面温度随时间变化的曲线及渡槽外表面降温幅值

Fig. 5 Temperature curve of outer surface of aqueduct with time at different cooling rates and cooling amplitude of external surface of aqueduct at different cooling rates

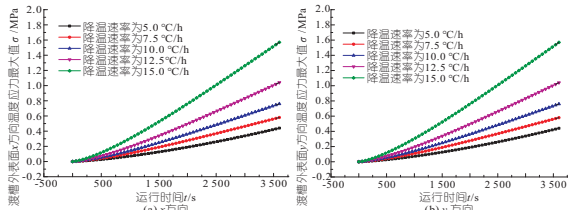


图6 不同降温速率下渡槽 x、y 方向温度应力最大值变化曲线

Fig. 6 Maximum temperature stress variation curves in x and y direction of aqueduct at different cooling rates

不同保温材料的参数见表4。根据数值模拟结果,对比分析不同保温材料的保温效果,见图7。由图7可知,当环境温度从5℃降至-10℃时,无保温措施的混凝土外表面温度约为-4.8℃,温度变幅为9.8℃。当采取了保温材料后,渡槽侧壁外表面的温度降幅减小,有2cm厚的聚氨酯保温板时渡槽外表面温度约为3.13℃,温度降幅为1.87℃;有2cm厚的聚苯乙烯保温板时渡槽外表面温度约为2.9℃,温度降幅为2.1℃;有2cm厚的玻化微珠涂层时渡槽外表面温度约为1.5℃,温度降幅为3.5℃。可见采用3种保温材料后均能使外表面温度下降明显减缓。

表4 不同保温材料的主要理化性能

Tab. 4 Main physical and chemical properties of different thermal insulation materials

| 材料                   | 导热系数<br>/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 密度<br>/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 压缩强<br>度/10 <sup>3</sup> Pa | 尺寸稳<br>定性/% |
|----------------------|--|------------------------------|-----------------------------|-------------|
| 聚氨酯 <sup>[12]</sup>  | ≤0.02±0.002                                    | >20                          | ≥1.70                       | ≤2          |
| 聚苯乙烯 <sup>[13]</sup> | 0.034  | >20                          | ≥1.28                       | ≤5          |
| 玻化微珠 <sup>[14]</sup> | 0.053  | 110~120                      | 2.28                        | ≤0.3        |

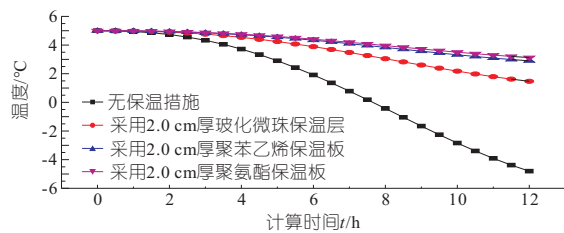


图7 渡槽外表面温度随时间变化曲线

Fig. 7 Temperature curves of outer surface of aqueduct with time

表5为有不同保温材料时降温结束时刻渡槽外表面温度应力值。由表5可知,当采用2cm聚氨酯、聚苯乙烯板和玻化微珠保温材料后,U型渡槽外表面的最大温度拉应力分别为0.43、0.50、0.79MPa。与无保温层相比,渡槽外表面温度拉应力分别减少83%、80%、68%,相同厚度下3种保温材料均能有效降低渡槽外表面温度应力,但保温材料的导热系数越高,其制作成本越高,施工工艺越复杂,综合保温材料成本及施工技术的合理性,玻化微珠保温涂料在三者中,制作成本相对较低,同时施工技术简单,特别是对于带有弧度的不规则构件更易涂覆,故大型水工建筑均可采用玻化微珠保温材料作为渡槽外表面的保温隔热材料。

表5 有不同保温材料时降温结束时刻渡槽外表面温度应力值

Tab. 5 Temperature stress value of outer surface of aqueduct at the end of cooling with different insulation materials

|        |               | MPa           |         |               |               |
|--------|---------------|---------------|---------|---------------|---------------|
| 保温材料种类 | 混凝土底板外表面(x方向) | 混凝土侧壁外表面(y方向) | 保温材料种类  | 混凝土底板外表面(x方向) | 混凝土侧壁外表面(y方向) |
| 无保温措施  | 2.49          | 2.50          | 聚苯乙烯保温板 | 0.49          | 0.50          |
| 聚氨酯保温板 | 0.42          | 0.43          | 玻化微珠保温层 | 0.78          | 0.79          |

## 5 结论

随着环境气温下降速率的增大,渡槽表面的温度拉应力将以更快的速度增加。当U型渡槽采用2mm厚度聚氨酯、聚苯乙烯板和玻化微珠保温材料后,与无保温措施渡槽外表面温度应力相比,渡槽外表面温度拉应力分别减少83%、80%、68%。综合考虑成本与施工技术,玻化微珠保温材料较适合作为渡槽外表面的保温隔热材料。

## 参考文献:

[1] EMERSON M. Thermal movements of concrete bridges: field measurements and methods of prediction [J]. Special publication, 1981, 70: 77-102.

[2] PRIESTLEY M J N. Design thermal gradients for concrete bridge [J]. New Zealand engineering, 1976, 31(9): 213-219.

[3] SAETTA A, SCOTTA R, VITALIANI R. Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads [J]. Journal of structural engineering, 1995, 121(3): 446-457.

[4] ELBADRY M, GHALI A. Control of thermal cracking of concrete structures [J]. Aci structural journal, 1995, 92(4): 435-450.

[5] 李有发, 杨西梅, 何鹏飞. 浅谈南水北调 SG9 标曹骂沟渡槽槽身 C50 预应力泵送混凝土施工质量控制[J]. 四川水力发电, 2014, 33(1):81-84.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范:GB 50010-2010(2015 年版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范:GB 50176-2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[9] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范:

SL191-2008[S]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[10] 曹为民, 王长德, 夏富洲, 等. 南水北调工程若干关键技术研究与工程应用(2006BAB04A05): 大流量预应力渡槽设计和施工技术研究[R]. 武汉大学, 河海大学, 南水北调中线干线工程建设管理局, 2010.

[11] 宁交贤, 何思龙. 高温应变电测技术研究的现状和发展[J]. 力学与实践, 1982(3): 24-27.

[12] 黄远智, 邢毅. 聚氨酯硬泡体防水保温材料在工程上的应用[J]. 建筑技术, 2009, 40(7): 607-608.

[13] 杜聘, 杨军. 聚苯乙烯泡沫(EPS)的特性及应用分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 138-142.

[14] 李文超. 渡槽保温材料的制备与性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009.

### Simulation and Experimental Study of Temperature Stress of Aqueduct Wall Plate

LI Bin<sup>1</sup>, ZHANG Pei-lin<sup>1</sup>, WANG Hong-ji<sup>2</sup>, HE Qi-yu<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Central-southern Safety and Environment Technology Institute Co., LTD., Wuhan 430051, China)

**Abstract:** Based on the temperature load on the wall slab of a large aqueduct when the temperature suddenly drops, the temperature self-confinement stress of the upper surface of the concrete slab was tested and analyzed. The temperature difference between upper and lower surfaces of concrete slabs at different cooling rates and the self-constrained principal stress of concrete slab surface temperature at 1 h at a cooling rate of 10 °C/h were measured. The accuracy of finite element modeling was verified by comparing the numerical value of concrete transient temperature stress simulated by finite element method with the experimental test data. On this basis, the influence of cooling rate on transient temperature and stress field of aqueduct was analyzed. The impact of different insulation materials on surface temperature and stress field of aqueduct was discussed. The results show that the temperature tensile stress on the aqueduct surface will increase at a faster rate with the increase of the ambient temperature decreasing rate. Compared with the external surface temperature stress of the aqueduct without insulation measures, the tensile stress of the external surface temperature of the U-shaped aqueduct was reduced by 83%, 80% and 68%, respectively, when the polyurethane, polystyrene board and vitrified microbeads with 2mm thickness were adopted. Considering the cost and construction technology, vitrified microbead insulation materials are more suitable as thermal insulation materials on the outer surface of aqueducts.

**Key words:** aqueduct; concrete; self-confining stress; cooling rate; numerical simulation



(上接第 128 页)

[3] 李林林, 夏军强, 周美蓉, 等. 基于起动概率的清水冲刷后河床粗化覆盖层级配的计算方法[J]. 应用

基础与工程科学学报, 2020, 28(6): 1281-1293.

[4] 何文社. 非均匀沙运动特性研究[D]. 成都:四川大学, 2002.

### Research on Coarsening Effect of Local Scour Pit Bottom on Bridge Piers Under Clear Water Conditions

WU Yu-lun, WU Long-hua, YANG Xiao-li, FANG Chen-zhuo

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

**Abstract:** On the non-uniform sand river bed, the armor layer at the bottom of the bridge pier local scour pit will affect the maximum local scour depth of the bridge pier. Through a flume model experiment, the sediment gradation, relative coarseness, and non-uniformity of the armor layer at the bottom of the local scour pit on the bridge pier were studied. The results indicate that the median particle size of the sediment in the armor layer at the bottom of the local scour pit on the bridge pier increases with the increase of the local scour depth on the bridge pier, and its relative coarsening degree increases with the increase of the Froude number, while the degree of non-uniformity decreases with the increase of the Froude number. A formula for calculating sediment particle grading in the armor layer at the bottom of the local scour pit on the bridge pier has been proposed. The applicability and reliability of the proposed formula is verified by the measured data.

**Key words:** bridge pier; maximum local scour depth; armor layer; sediment particle grading; relative coarseness; non-uniformity