

# 混凝土梁桥钢筋工作应力释放法试验研究

郭琦<sup>1,2</sup>, 尹海军<sup>1,2</sup>, 贺拴海<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 长安大学旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为更高精度地获取混凝土梁式桥当前的弯曲应力实际状态, 采用相对匀质的普通构造钢筋进行了应力释放法研究. 综合一维杆与薄圆盘导热方程, 得到圆柱杆有限点上热传导解析解的可视化模型, 重点确定混凝土梁式桥常见的构造钢筋类型、应力释放位置及释放峰值温度等影响因素. 开展切割释放钢筋样本的室内模型构件试验, 基于考虑切割释放温度场环境下温度应力修正模型得到了与各因素的理论变化规律一致的结论, 表明文中建立的普通钢筋释放法的基础标准及释放温度修正模型方法正确、可靠. 文中方法可获得更为客观的截面应力基础状态, 为大跨度混凝土桥梁的延续健康监测奠定了基础.

**关键词:** 桥梁工程; 构造钢筋; 应力释放初始应变; 峰值温度

**中图分类号:** U446.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)04-0517-6

## Study on stress release method of reinforced for concrete girder bridge

GUO Qi<sup>1,2</sup>, YIN Haijun<sup>1,2</sup>, HE Shuanhai<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Key Laboratory of Bridge Detection Reinforcement Technology of Ministry of Communication, Department of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to get the actual bending stress of concrete girder bridge, experimental study of stress release on constructional reinforced bar with relatively homogeneous physical properties were conducted. By combining thermal conduction equation of one-dimensional bar with that of the thin plate, a visual model of thermal conduction solution for cylindrical reinforced bar was got. Factors such as reinforced type, stress release position and the peak releasing temperature etc. were emphasized. Basic standards and amendment on releasing temperature method were studied in detail through indoor test on a large number of releasing samples. It is concluded that the amendment on distribution of releasing temperature worked in accordance with the theoretical one. Thus, the variation principle was verified correctly. It has great significance for the acquisition of on sectional stress state in a more practical way. Furthermore, it laid a foundation for the continuous health monitoring of large-span concrete bridges.

**Key words:** bridge engineering; constructional reinforced bar; stress-free initial strain; peak releasing temperature

大跨径混凝土梁式桥在经年累月的服役状态下发生了诸多病害, 这些病害严重降低了桥梁的实际承载力和使用寿命, 对其安全运营构成了重大威胁<sup>[1-2]</sup>. 由此引发了众多在运营期内对桥梁通过增补测试元件以建立延续健康监测系统的工程应用, 这些均以当前应力水平作为延续监测的基准状态, 而此状态往往是未知的<sup>[3]</sup>.

应用应力释放法来进行工作应力分析最早是在岩体与钢结构中应用和开展的<sup>[4-6]</sup>, 这主要是由于释放材料在组织结构上细密、匀质等特点, 从而使测量结果更加准确可靠. 在预应力混凝土结构中, 也有学者借鉴开展了混凝土释放法分析结构应力的研究<sup>[7-10]</sup>. 然而, 钢筋释放过程中由热能转化的温度应变会干扰所重点关注的释放结构应变量

值的判断, 而相关的研究开展较少.

考虑到储备于梁体普通构造钢筋内的应力是记录桥梁结构时变过程的“刻痕数据”, 基于应力释放(解除)技术获得普通钢筋承载的应变状态信息, 为建立述延续监测基准数据提供了一条可行之路. 文中应用混凝土梁体中普通构造钢筋应力释放原理开展了相关的理论与试验研究, 为获知在役混凝土桥梁健康监测的截面完全应力基准状态, 衔接后续监测数据起到了中介的作用.

## 1 二维圆柱杆导热分析

采用砂轮机割断钢筋的实质是通过外力不间断改变钢筋分子晶相结构间距的过程, 最终实现普通构造钢筋的应力释放. 由于外力做功产生热能,

收稿日期: 2014-11-06 修改稿日期: 2015-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108372); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2015JM5195); 中央高校基本科研业务费基础研究计划科研平台开放基金项目(310821151109); 陕西省重点学科建设专项资金项目(E01004)

作者简介: 郭琦(1976-), 男, 副教授; 研究方向: 混凝土桥梁性能评估; E-mail: gq8558@126.com

热量从温度高的地方向温度低的地方转移,对于待量测应变的钢筋杆件而言,表现为典型的热传导下温度应变分布问题。

### 1.1 简化导热物理模型

钢筋应力释放时,设释放点与测试点间距为  $l_R$ ,则简化导热物理模型示意图如图 1 所示。

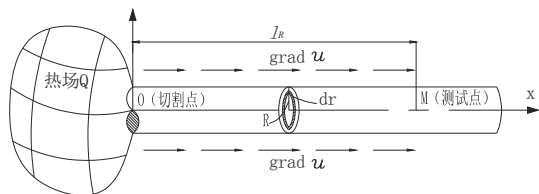


图 1 简化导热物理模型

Fig.1 Simplified thermal conduction model

由于热量的传导过程总是表现为温度随时间和点的位置的变化,因此,该应力释放问题归结为求解释放钢筋内温度的分布,首先建立均匀且各向同性的导热体在传热过程中温度所满足的微分方程。

### 1.2 一维杆导热方程

现在考虑各向同性的均匀细杆,其方向为  $x$  轴正向.设在每一个垂直于  $x$  轴的截面上温度相同,细杆的侧面与周围介质没有热交换,且杆内无热源.这时温度只是坐标  $x$  和时间  $t$  的函数,由热学公式,使细杆温度由  $u(t_1, x)$  变为  $u(t_2, x)$  所需的热量

$$\begin{aligned} Q_1 &= \int_l c\rho [u(t_2, x) - u(t_1, x)] dx \\ &= \int_l c\rho \left\{ \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial u}{\partial t} dt \right\} dx \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $c$  为比热;  $\rho$  为钢筋的密度。

由 Fourier 实验定律可知,物体在无穷小时段  $dt$  内,流过微面积  $dS$  的热量  $dQ$  与  $\vec{n}$  方向温度梯度成正比,即:

$$dQ = -k \text{grad} u \cdot \vec{n} ds dt \quad (2)$$

则从时刻  $t_1$  到时刻  $t_2$ , 通过释放断面  $S$  流入区域的全部热量为

$$Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} \left[ \iint_S k \text{grad} u \cdot \vec{n} dS \right] dt \quad (3)$$

从而,由热平衡建立一维热传导方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, (0 \leq x \leq l_R, t \geq 0) \\ u|_{t=0} = \delta(x) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $k$  为热传导系数,  $a = \sqrt{k/c\rho}$

此为典型线性边界下与周围介质无热交换的 Cauchy 问题,解此二阶微分方程,得到的基本解为

$$u(x, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a^2 t}\right) \quad (5)$$

### 1.3 极坐标系下薄圆盘导热方程

对于半径为  $R$  的薄圆盘的热传导问题,对应于  $t$  时刻由于并未达到稳恒状态,因此此时的瞬时温度分布仍与时间有关,应用 Bessel 方程求解圆域内温度梯度的分布规律.采用极坐标系,任一点极半径为  $r$ ,认为温度梯度沿圆周径向分布,则定解条件与  $\theta$  无关,则控制方程及边界条件以及各参数选择如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = a^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right), 0 < r < R \\ \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \frac{\partial u(t=0)}{\partial t} = l_R \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

得到的解析解为

$$u(r, t) = -\frac{4R}{a} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{a\mu_m^{(1)}}{R} rt\right)}{\left(\mu_m^{(1)}\right)^3 J_0\left(\mu_m^{(1)}\right)} J_0\left(\frac{\mu_m^{(1)}}{R} r\right) \quad (7)$$

其中,  $\mu_m^{(1)}$  为 Bessel 方程  $J_1(x) = 0$  的第  $m$  个正零点. Bessel 方程  $J_0(x)$  与  $J_1(x)$  分别如式 (8) 和式 (9) 所示:

$$J_0(x) = 1 - \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^4(2!)^2} - \cdots + (-1)^k \frac{x^{2k}}{2^{2k}(k!)^2} \quad (8)$$

$$J_1(x) = \frac{x}{2} - \frac{x^3}{2^3(2!)} + \cdots + (-1)^k \frac{x^{2k+1}}{2^{2k+1}k!(k+1)!} \quad (9)$$

### 1.4 二维圆柱坐标系下温度分布面

对于图 1 所示的释放钢筋热传导模式,此问题应拓展为二维圆柱坐标系下的稳态导热问题.对此问题还未有较精确的描述,这里将二者合成在一个坐标系下,为求解此类复杂问题、掌握其变化规律提供了一条途径。

以直径  $\phi-16$  的 HRB335 普通钢筋为样本,上边界和下边界为绝热,没有内热源,物性为常数,在释放完成时间点  $t=0$ ,取用式 (5) 中  $u(x_0, t)$ ,  $x_0$  分别为 100 mm、150 mm 及 200 mm,如图 2 所示。

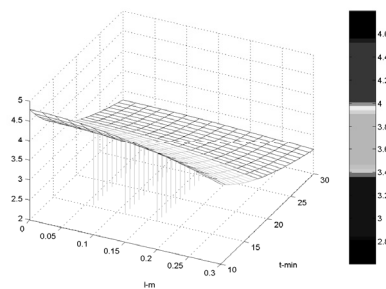


图 2 三测试点位温度分布

Fig.2 Distribution of temperature on 3 testing points

结合式(7)中特定边界条件下的基本解,取左边界为定温  $T_2 = 0$ ,  $x_0 = 200$ , 应用 Matlab 中 `besselj` 函数,取级数求和的前 10 项,得到二维柱坐标系下切割导热过程中的温度时-空变化面,如图 3 所示。

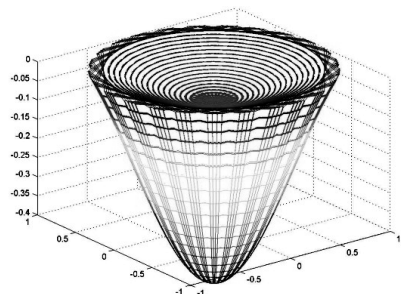


图3 传导温度分布曲面

Fig.3 Distribution plane of conduction temperature

从中可看出,在开始一瞬间集中在点  $x = 0$  传给杆一定热量后,以后任一时刻截面上各点均受到此初始状态的影响,沿直径传导变化的温度为多个同心圆组成的分布曲面,也可通过温度达到平衡过程的历程确定容许误差的测试时间点。

对于释放钢筋样本更关心的是结构应变部分,而释放完成后边界条件变化情况下由于热传导引起的温度自应变分析,依据关于  $r$  和  $x$  的分布面模型可以得到基于该热传导修正模型,在此基础上可以实现释放结构应变与释放温度应变的分解。

## 2 应力释放法的基础试验

### 2.1 试验概况

本项试验研究直接服务于释放应力真实值测试的目的,因而采用了规避复杂的热传导机理分析过程,而直接应用室内模型构件切割释放过程数据反映测试方法的适应性与稳定性的技术路线。

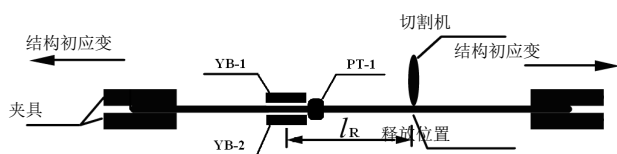


图4 钢筋应力释放装置示意

Fig.4 Releasing device of reinforced bar

钢筋应力释放装置示意图如图 4 所示.沿钢筋直径与切割位置正交方向轴对称布设两组释放应变测试元件,编号分别为 YB-1 和 YB-2,并布置温度传感 PT-1 用于释放温度监测。

### 2.2 试验制度

因在实际桥梁工程应用中采用应力释放法需要凿除部分保护层混凝土,以提供普通钢筋释放工作面。为了减少对梁体的破损,需要对应变仪与切割

处间隔距离  $l$  值的大小进行优化,释放距离  $l_R$  的工程精度可接受取值是试验的重点目标之一。同时,在切割过程中,不可避免要产生传导热和能量转换,热量对释放钢筋应力的影响程度通过监测温度变化过程获得。

以初始结构应变  $\varepsilon_0 = 200\mu\varepsilon$  为基准值,模拟正常使用状况恒载及预加力作用下的普通构造钢筋应力水平,对不同类型钢筋构件进行切割释放,过程中记录测点峰值温度,监测切割温度随时间的变化及相应的应变变化,以  $\Delta t = 0.5^\circ\text{C}$  为级差记录数据。

同步观测单次释放试验释放应变与初始应变间的闭合性及多次试验结果的复现性,判断量测的可行性及测试的有效性,进而确定出应变受切割温度影响最小的时刻及最佳量测时机。应变释放过程试验照片如图 5 所示。

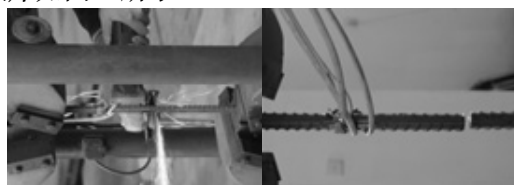


图5 试验过程照片

Fig.5 Test process

## 3 试验参数与试验结果

### 3.1 主要试验参数

(1) 对大、中跨径预应力桥梁普遍应用的  $\phi-12$  与  $\phi-16$  两类 HRB335 普通钢筋参数进行释放过程试验,分别确定出应变受切割温度影响最小的时刻;

(2) 根据标准化要求,分别调整释放距离为 100、150 及 200mm,通过正交试验分析,得到初应力范围、获得优化后的裸露钢筋应力释放位置与数据量测时机。

### 3.2 试验工况说明

按照主要试验参数中钢筋类型即直径 16 mm 与直径 12 mm 将释放钢筋构件分别划分为 I 与 II 两主工况;根据释放距离  $l_R$  的差异,子工况 1 至子工况 3 依次代表 100 mm、150 mm 与 200 mm 三种释放形式。

每个子工况均对应完成三组应力释放构件,通过剔除异值点后加权平均绘制释放应变与释放温度趋势分布变化曲线。

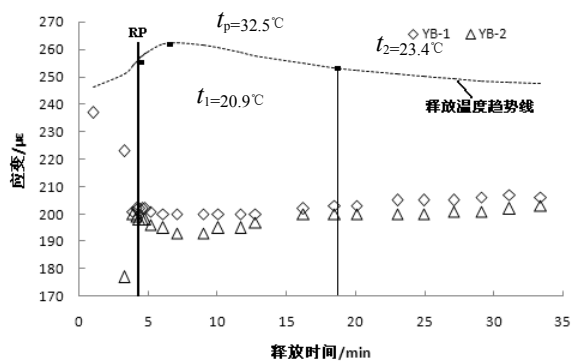
### 3.3 试验结果

释放试验结果曲线如图 6 所示。图中 RP (Released Point) 线代表钢筋构件切割分离瞬间,

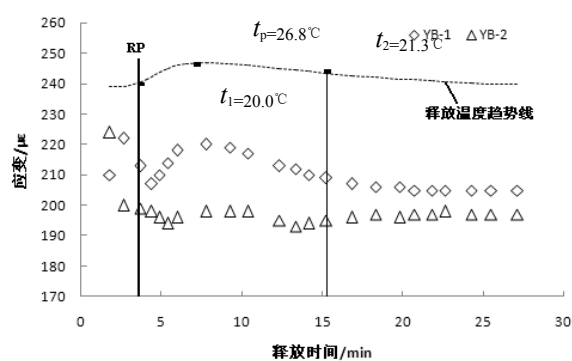
应力释放完成对应的时刻线,  $t_1$  为与之对应的释放温度;  $t_p$  为测试过程中释放温度峰值;  $t_2$  为释放应变变化平缓, 趋于收敛点的释放温度。

从各工况图中总体看出, 应变数据在切割释放初期, 沿切割位置正交方向轴对称布设两组释放应变 YB-1 及 YB-2 测试结果离散较大, 而在试验中、后期随着应变的重新分布而趋于一致。经反复核查, 主要是由于本次试验两方面因素导致的: (一)、

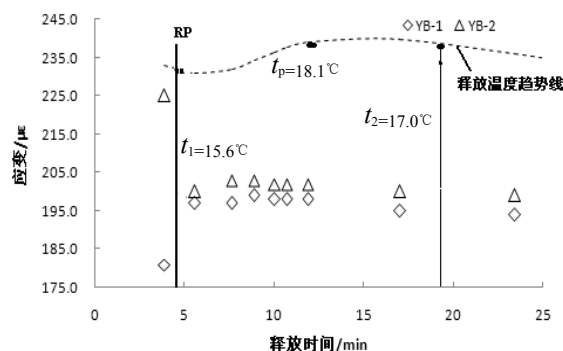
在施加结构初应变时, 由于因张拉机夹具在同一轴线上存在偏差, 使得钢筋构件两侧具有不对称的结构初始应变; (二)、释放机具在接触钢筋试件并释放的过程中, 对钢筋试件有一横向作用力, 钢筋试件 YB-1 与 YB-2 两侧会产生弯曲拉、压应变。而在 RP 线之后, 钢筋试件一端处于自由状态, 初始不对称应变以及弯曲应变逐渐消失, 这时释放应变主要受释放温度的影响。



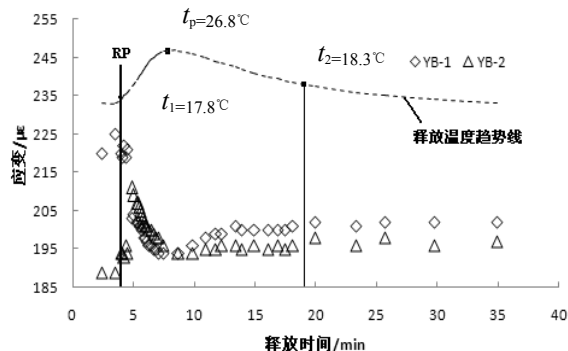
a) 工况 I-1



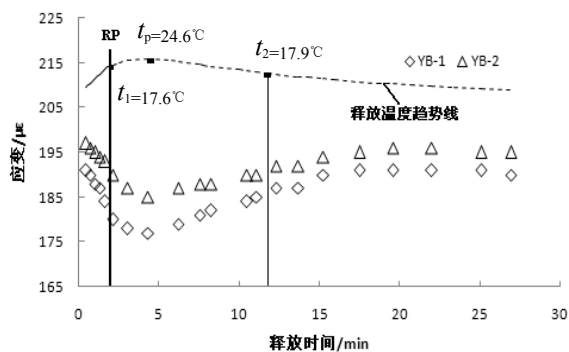
b) 工况 I-2



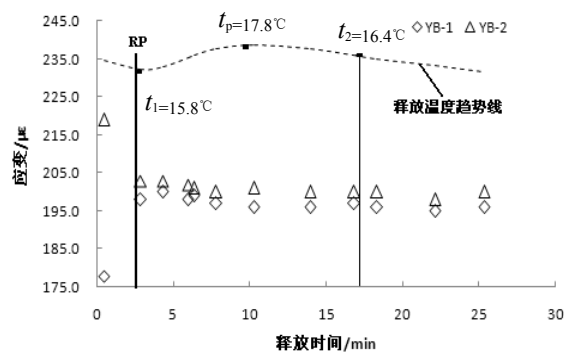
c) 工况 I-3



d) 工况 II-1



e) 工况 II-2



f) 工况 II-3

图 6 试验构件释放应变曲线图

Fig.6 Curve diagram for strain releasing

## 4 试验现象分析

### 4.1 不同直径钢筋试验现象分析

对于主工况而言, 释放应变与释放温度变化曲

线总体趋势及走向一致, 表明了试验方法的适用性。但在量值上存在的典型差异现象表现为:

(1) 公称直径 16mm 的钢筋样本无论在 RP 线、达到时刻  $t_1$  还是峰值温度出现时刻  $t_p$  均滞后于公称

直径 12mm 的钢筋样本,滞后程度在 30%~50%之间.从释放应变收敛点的温度  $t_2$  之后,随着应变的重新分布而趋于一致且释放应变达到  $t_2$  的测试时间增加量一致;

(2)公称直径 16mm 的钢筋样本的在不同释放距离下绝对峰值温度 18~33℃,且温度变化率达到 35.7%;而公称直径 12 mm 的钢筋样本的在不同释放距离下,峰值温度为 18~27℃,温度变化率为 33.6%.表明公称直径 16 mm 在释放试验中、后期由于温度绝对值与温度波动值均较大,对释放应变的影响程度也较大,需要更长的观测时间,以弥补结构应变测试精度的损失.

#### 4.2 不同释放位置试验现象分析

对于各子工况而言,但随着  $l_R$  的不同,释放应变的测试结果也体现出不同的特性:

(1)  $l_R$  值越大,释放温度的波动率越小,释放应变收敛稳定的时间越短,  $l_R = 200$  mm 的收敛时间相对于  $l_R = 100$  mm 而言缩短了 25%以上;

(2) 随着  $l_R$  值的增大,RP 线达到时刻  $t_1$  与峰值温度出现时刻  $t_p$  间的时间间隔逐渐变大,也与释放应变最大波动时间点差距变大.因此,采用尽可能大的释放距离能保证快速而准确的测试释放应变.

#### 4.3 释放法标准及温度修正

根据基于普通钢筋应力释放法的基础试验数据分析,初步得到了量测时机、释放位置及释放温度的影响规律,应力释放法的建议标准如下:

##### (1) RP 线控制

进行应力释放试验时,释放过程不能停顿,须受力均匀、连续不间断,达到 RP 线时间要尽量短,  $t_1$  不宜超过 4min;

##### (2) 量测时机

通过拐点  $t_2$  位置的选择可部分消除其他应变干扰因素的影响,释放应变测值宜在  $t_2$  对应时刻选择确定,这一指标对不同种类样本均具有普适性;

##### (3) 释放位置

以距离  $l_R$  来界定释放位置,  $l_R$  宜在 150 mm~200 mm 之间,接近下限时宜延长量测时机;

##### (4) 释放温度影响修正

若实际工程应用中对于推荐量测时刻测试有困难,则需要根据测试时刻温度  $t$  与峰值温度  $t_p$  的比值作为权重在残余波动应变的主要变化范围内进行微调,以得到更为准确的释放结构应变,如式(10)所示:

$$\varepsilon_S = -(\varepsilon_R + \varepsilon_a) \quad (10)$$

式中:  $\varepsilon_S$  为结构应变;  $\varepsilon_R$  为测试得到的释放应变,对应测试时刻温度为  $t$ ;  $\varepsilon_a = 0.23 \exp(3.81t/t_p)$  为释放温度的影响修正项,根据试验数据回归值按图 7 确定.

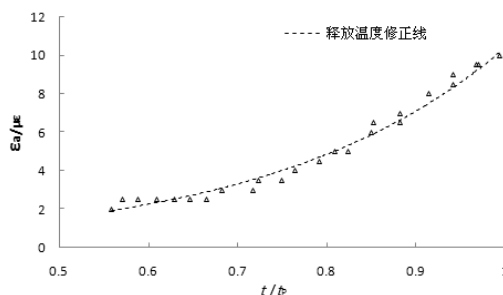


图7 释放应变修正曲线图

Fig.7 Amendment curve for strain releasing

## 6 结论

(1) 释放温度是钢筋释放应变测值的主要影响因素,对应释放位置与量测时机的优化是试验的关键,而直径与类别对释放应变影响权重较小;

(2) 从普通构造钢筋大样本切割释放平缓段的整体过程来看,释放距离  $l_R = 200$  mm 时,释放温度曲线与理论变化规律最相符,且应变测值均能较好的回复初始状态,具有复现性;

(3) 普通钢筋应力释放技术受外界干扰程度小,通过修正释放温度对释放应变的影响,可反映出钢筋结构应力状况的变化规律,但受限于温度测试环境和影响因素,绝对量值的精度还有待进一步提高.

#### 参考文献 References

- [1] 张方, 钱永久, 唐继舜. 基于结构性能的 PC 连续刚构桥损伤分析[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 817-822.  
ZHANG Fang, QIAN Yongjiu, TANG Jishun Performance-based damage analysis for pc continuous rigid frame bridges[J]. Journal of Southeast Jiaotong University, 2009, 44(6): 817-822.
- [2] SANTIAGO R. Design of long span concrete box girder bridge challenges and solutions[C]//Proceedings of the Structures Congress-Building on the Past: Securing the Future. Nashville: SCE, 2004.
- [3] 谢峻, 江见鲸, 王国亮, 等. 大跨度预应力混凝土箱梁桥的健康监测系统[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(12): 1957-1960.  
XIE Jun, JIANG Jianjing, WANG Guoliang, et al. Health monitoring system for long span prestressed concrete box-girder bridges[J]. Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2006, 46(12): 1957-1960.

- [4] 王秋成, 柯映林, 邢鸿燕. 板类构件内部残余应力测试技术研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2005, 39(3): 67-70.  
WANG Qiucheng, KE Yinglin, XING Hongyan. Study on measurement method of interior stress distributions in engineering rolled-plates[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(3): 67-70.
- [5] 陈渠, 吴德政, 许江, 等. 应变仪埋入式应力解除法的测量值与初期应力场的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 2912-2919.  
CHEN Qu, WU Dezheng, XU Jiang, et al. Relationship of measured values of stress relief method of embedded strain gauge and initial stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2912-2919.
- [6] JEFERREY J K, CATHERINE E F. Release Methodology of Prestressing Strands[R]. Minnesota department of transportation office of research and strategic services. 1998.5.
- [7] 杨勇, 王灿, 朱新实. 既有桥梁结构混凝土现存应力测量与分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版. 1999, 27(2): 73-77.
- YANG Yong, WANG Can, ZHU Xinshi. Measurement and analysis of existing stress in concrete bridge structures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 1999, 27(2): 73-77.
- [8] HALE W M, RUSSELL B W. Effect of allowable compressive stress at release on prestress losses and on the performance of precast, prestressed concrete bridge girders[J]. PCI Journal, 2006, 51(2): 14-25.
- [9] 贾巧燕. 基于应力释放法的在役混凝土结构现存预应力确定[D]. 武汉: 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2008.  
JIA Qiaoyan. Study on the extant pre-stressed force of the concrete structure in service based on the stress release method[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [10] Karim Hariri, Alex Holst, Wichmann Hans-Joachim, et al. Assessment of the state of condition of prestressed concrete structures with innovative measurement techniques[J]. Structure Health Monitoring, 2003, 2(2): 179-18.
- (编辑 沈波)

(上接第 510 页)

- [11] 陈国栋, 郭彦林, 范珍, 等. 钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2):19-26.  
CHEN Guodong, Guo Yanlin, Fan Zhen, et al. Cyclic test of steel plate shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2):19-26.
- [12] ERFAN A, Fariborz N. Experimental study of diagonally stiffened steel plate shear walls. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(11):1795-2048.
- [13] 李峰, 李慧, 李振敏, 等. 交叉加劲肋钢板剪力墙低周反复荷载试验研究. 西安建筑科技大学学报:自然科学版[J]. 2009, 41(1):57-62.  
LI Feng, LI Hui, LI Zhenmin, et al. Cyclic test of diagonally stiffened steel plate shear wall [J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(1):57-62.
- [14] 荣柏生, 李盛勇, 陈洪涛, 等. 中国高层建筑中钢管混凝土柱的应用与展望[J]. 建筑结构, 2009, 39(9):33-38.  
RONG Baisheng, LI Shengyong, CHEN Hongtao, et al. Application and future perspective of concrete fill steel tube column in tall buildings [J]. Building Structure, 2009, 39(9):33-38.
- [15] 王先铁, 马尤苏夫, 郝际平, 等. 钢板剪力墙边缘构件的计算方法研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8):175-182.  
WANG Xiantie, MA Yousufu, et al. Calculation methods for boundary elements in steel plate shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8):175-182.
- [16] JGJ101-96. 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.  
JGJ101-96. Specifying of testing methods for earthquake resistant building[S]. China Architecture & Building Press, 1997.
- [17] GB50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [18] 熊仲明, 王社良. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.  
XIONG Zhongming, WANG Sheliang. Testing for civil engineering structure[M]. China Architecture & Building Press, 2006.
- (编辑 吴海西)