

ICS 93.040

P 66

中华人民共和国国家质量监督
检验检疫总局备案号：53867-2017

DB53

云南省地方标准

DB53/T 810—2016

桥梁有效预应力检测技术规程

2016 - 11 - 10 发布

2017 - 02 - 01 实施

云南省质量技术监督局 发布

目 次

| | |
|------------------------|-----|
| 目 次 | I |
| 前 言 | III |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 术语和符号 | 1 |
| 3.1 术语 | 1 |
| 3.2 符号 | 3 |
| 4 基本规定 | 4 |
| 4.1 一般规定 | 4 |
| 4.2 抽样 | 4 |
| 4.3 检测方法选用 | 4 |
| 5 反张法 | 5 |
| 5.1 适用范围与条件 | 5 |
| 5.2 仪器设备 | 5 |
| 5.3 现场检测 | 5 |
| 5.4 数据采集与处理 | 6 |
| 6 自振频率法 | 6 |
| 6.1 适用范围与条件 | 6 |
| 6.2 仪器设备 | 6 |
| 6.3 现场检测 | 7 |
| 6.4 数据采集与处理 | 7 |
| 7 共振频率法 | 7 |
| 7.1 适用范围与条件 | 7 |
| 7.2 仪器设备 | 7 |
| 7.3 现场检测 | 8 |
| 7.4 数据采集与处理 | 8 |
| 8 应力传感器法 | 9 |
| 8.1 适用范围与条件 | 9 |
| 8.2 传感器选择与标定 | 9 |
| 8.3 传感器安置 | 9 |
| 8.4 数据采集与处理 | 9 |
| 9 有效预应力评定 | 10 |
| 9.1 一般规定 | 10 |
| 9.2 质量评定指标 | 10 |
| 9.2.1 锚下有效预应力值 | 10 |
| 9.2.2 有效预应力不均匀度 | 11 |
| 9.3 质量评定标准 | 11 |
| 附录 A 桥梁预应力张拉有效预应力检测记录表 | 13 |
| 附录 B 预应力张拉设备的校验 | 14 |
| B.1 检验条件 | 14 |
| B.2 校验要求 | 14 |

| | |
|----------------------------|----|
| B.3 校验方法..... | 14 |
| B.3.1 用长柱压力试验机校验的基本要求..... | 14 |
| B.3.2 采用压力试验机校验..... | 14 |
| B.3.3 采用标准测力计校验..... | 15 |
| B.3.4 校验结果的回归计算..... | 15 |
| B.3.5 注意事项..... | 16 |
| 附录 C 预应力孔道摩阻测试..... | 17 |
| 附录 D 锚夹具摩阻损失测试 | 18 |
| 附录 E 共振频率法参数标定方法..... | 19 |
| C.1 计算公式..... | 19 |
| C.2 标定方法..... | 20 |

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准由云南省公路开发投资有限责任公司提出。

本标准由云南省交通运输标准化技术委员会(YNTC13)归口。

本标准主要起草单位：云南省公路开发投资有限责任公司、云南航天工程物探检测股份有限公司、云南公投检测有限责任公司。

主要起草人员：温树林、刘浩、柯玉军、李志坚、王运生、冉志红、李文军、刘胜红、许强、陈亮、刘昌、林帆、周丞、张喜波、郭俊、范明外、朱德祥、程路明。

桥梁有效预应力检测技术规程

1 范围

本规程规定了桥梁预应力筋有效预应力检测的基本规定、技术方法和质量评定。
本规程适用于云南省境内桥梁预应力张拉施工有效应力的检测和评定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 50152 混凝土结构试验方法标准
JTG D60 公路桥涵设计通用规范
JTG D62 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
JTG/T F50 公路桥涵施工技术规范
JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准
CJJ 11 城市桥梁设计规范
CJJ 2 城市桥梁工程施工与质量验收规范

3 术语和符号

下列术语和符号适用于本文件。

3.1 术语

3.1.1

预应力筋 prestressed tendon

用于混凝土结构构件中施加预应力的钢绞线、钢筋、钢丝和精轧螺纹钢等的总称，预应力筋又分为有粘结和无粘结两种。

3.1.2

预应力管道 prestressed pipe

后张法预应力结构中预留穿入预应力筋的管状通道。

3.1.3

张拉应力 tensioning stress

张拉预应力筋时在张拉端所施加的应力，其值为张拉设备所施加的总张拉力除以预应力筋截面面积。

3.1.4

张拉控制应力 **tensioning control stress**

张拉预应力筋时在张拉端所施加的设计控制应力。

3.1.5

锚固应力损失 **anchorage stress loss**

放张锚固后，因锚具形变、梁体形变、预应力筋回缩等因素所引起的预应力损失。

3.1.6

张拉伸长率 **tensioning elongation**

筋预应力筋张拉后的伸长比例，其值为预应力筋张拉后长度与原始长的差除以其原始长度的百分比。

3.1.7

锚下有效预应力 **effective prestress under anchorage**

预应力筋张拉锚固后，实际张拉控制应力扣除锚固损失、弹性压缩损失，锚下留存的预应力筋张拉应力。

3.1.8

锚下有效预应力检测 **detection of effective prestress under anchorage**

构件预应力筋张拉锚固后，对锚下有效预应力进行的检测和评定。

3.1.9

反张法 **reverse tension method**

采用在锚头外露预应力筋上施加反向张拉力以检测、验证有效预应力的方法，包括整数反张拉法和逐根反张拉法。

3.1.10

自振频率法 **self-vibration frequency method**

对于先张法预应力构件，对预应力筋施加一个瞬时激振后，通过测试其自由振动频率，并计算确定其预应力值的方法。

3.1.11

共振频率法 **resonance frequency method**

对未注浆或注浆初凝的后张法预应力体系，采用专门的激振装置在其锚头激发应力波，通过粘贴在锚头上的拾振器拾取锚头的振动响应获取预应力体系共振频率，从而检测出预应力构件锚下有效预应力值的方法。

3.1.12

应力传感器法 **Preset stress sensor method**

在预应力张拉前将应力传感器预先安置在预应力筋上以监测预应力筋应力变化的方法。

3.1.13

同束不均匀度 same beam nonuniformity

同束预应力筋在不同位置有效预应力的差异程度。

3.1.14

同断面不均匀度 same section nonuniformity

同断面、不同束预应力筋有效预应力的差异程度。

3.2 符号

α 、 β 、 γ ——共振频率法的待定系数，由标定试验确定；

δ 、 δ_b 、 δ_s 、——有效预应力不均匀度、同束不均匀度、同断面不均匀度；

ε ——应变值、光纤光栅轴线总应变值；

σ ——应力值、光纤光栅轴线总应力值；

σ_{con} ——张拉控制应力值；

σ_{ten} ——张拉应力值；

σ_y ——有效预应力的设计值；

σ'_y ——有效预应力的实测值；

σ_{12} ——预应力筋与锚圈口间摩擦、锚具变形、钢筋回缩、接缝压缩引起的预应力损失；

σ_{14} ——混凝土弹性压缩引起的预应力损失；

σ'_{15} ——预应力筋松弛引起的预应力损失值；

σ'_{16} ——混凝土收缩徐变引起的预应力损失值；

$\bar{\sigma}$ ——检测有效预应力实测样本的算术平均值；

λ 、 λ^* ——波长、波长初始值；

ξ^* ——修正的光热常数；

$\Delta\lambda$ ——波长变化值；

ΔT ——温度变化值；

$\Delta\sigma$ ——检测有效预应力实测样本中最大值与最小值的差值；

EI ——钢束的抗弯刚度；

F ——张拉（压）力；

f ——共振频率；

f_n —— n 阶频率；

f_σ ——传感器应力灵敏度系数；

f_ε ——传感器应变灵敏度系数；

- f_{pk} ——预应力筋抗拉强度标准值；
- g ——重力加速度， m/s^2 ；
- K_l ——预应力筋的抗拉刚度；
- L ——预应力筋锚固点之间净距；
- M ——单位长度预应力筋的质量；
- M ——锚具的质量；
- n ——频率阶次；
- R ——等效接触半径， m ；
- T ——千斤顶的作用力值；
- P ——油缸（油压表）的油压值。

4 基本规定

4.1 一般规定

- 4.1.1 从事桥梁预应力混凝土构件有效预应力检测机构应拥有相应检测资质，检测参数应通过检验检测机构资质认定，承担检测人员应经过专门培训合格并持证上岗。
- 4.1.2 检测仪器设备应经检定或校准并合格。
- 4.1.3 应以“过程控制、及时检测、评验分离”为原则，客观公正地对预应力张拉有效预应力进行检测。
- 4.1.4 检测情况和结果应及时记录，记录格式参照附录A。

4.2 抽样

- 4.2.1 应根据预桥梁应力钢筋（预应力筋）、桥梁预应力混凝土构件的工作形式，按表1所列被检预应力筋总束数的最低百分比进行有效预应力抽样检测。抽样采取随机抽样原则。

表1 有效预应力检测抽样频率表

| 结构类别 | 抽样频率 | | |
|----------------|---------|-----------|----------|
| | 有效预应力检测 | 同断面不均匀度检测 | 同束不均匀度检测 |
| 先张法构件 | ≥6% | ≥3% | ≥1% |
| 先简支后连续的负弯矩预应力筋 | ≥10% | ≥5% | ≥3% |
| 预制梁、板中的预应力筋 | ≥15% | ≥8% | ≥4% |
| 现浇连续梁桥中的预应力筋 | ≥15% | ≥8% | ≥4% |
| 连续刚构桥的纵向预应力筋 | ≥20% | ≥10% | ≥5% |
| 斜拉桥主梁纵向预应力筋 | ≥20% | ≥10% | ≥5% |
| 桥梁横向、竖向、环向预应力筋 | ≥5% | - | - |

- 4.2.2 对安全等级高的桥梁预应力结构，可适当加大抽样频率。
- 4.2.3 被抽检的单个预应力构件中的所有预应力筋均应进行有效预应力检测。
- 4.2.4 若预应力构件中按本规程检测评定存在实测有效预应力与设计有效应力的差值超过本规程规定，应加大抽检比例，直至全检。

4.3 检测方法选用

- 4.3.1 本规程所涵盖的预应力构件有效预应力检测方法有反张法、自振频率法、共振频率法、应力传感器法。

4.3.2 有效预应力检测方法应按下列规定选择：

- a) 先张法张拉施工预应力构件宜采用自振频率法、反张法、应力传感器法；
- b) 后张法张拉施工预应力构件宜采用反张法、应力传感器法，可采用共振频率法。

4.3.3 可抽取一定数量的预应力筋采用反张法和应力传感器法对比验证检测。

5 反张法

5.1 适用范围与条件

5.1.1 反张法检测适用于后张法施工桥梁预应力混凝土构件未注浆时锚下有效应力的检测评定。先张法施工预应力桥梁结构构件有效应力的检测评定可参照使用。

5.1.2 反张法检测后张法施工桥梁预应力混凝土构件的锚下有效预应力应在预应力体系已张拉、未注浆状态下进行；反张法检测应在张拉后 24h 之内检测；检测前不应截断外露预应力筋。

5.1.3 宜采用对整束预应力筋共同加力的反张法检测；当需要检测同断面不均匀度时，可采用逐根预应力筋反向张拉检测。

5.1.4 正式开展有效预应力检测前，应按照附录 B 对仪器设备进行校验，宜针对不同预应力构件型式参照附录 C 和附录 D 分别进行孔道摩阻力测试、锚夹具摩阻损失测试。

5.2 仪器设备

检测仪器设备应包括反向张拉系统和数据采集分析系统：

- a) 整束反向张拉系统，应包括空心千斤顶、高压油泵、油管、锚夹具、锚垫板和限位板等；逐根反向张拉系统，应包括手提式单孔千斤顶、手压油泵、接长器等；
- b) 压力表或应力传感器精度级别应为 1.0 级或以上，最大量程宜不小于设备额定张拉力的 1.3 倍；位移传感器的精度应不低于 1/100mm；
- c) 数据采集分析系统主要是对数据的采集、记录、分析，包括应力传感器、位移传感器、数据采集仪、计算机及辅助磁性吸附底座等。

5.3 现场检测

5.3.1 受检预应力构件和检测现场应符合下列规定：

- a) 收集相关设计和施工资料；
- b) 检查待检预应力构件是否满足检测要求；
- c) 检查工作区内是否存在安全隐患，确保人员安全；
- d) 反向张拉过程应注意油压与压力传感器之间的对应关系，严禁张拉应力超过设计规定的张拉控制应力值。

5.3.2 检测工作可参照图 1 所示安置仪器设备，具体步骤如下：

- a) 在工作锚上安装限位板；
- b) 安装力传感器、限位板；
- c) 安置千斤顶；千斤顶应先将活塞空顶 5cm 左右，以备检测结束后能顺利卸下锚夹具、取下千斤顶；
- d) 在千斤顶上安装工作锚；

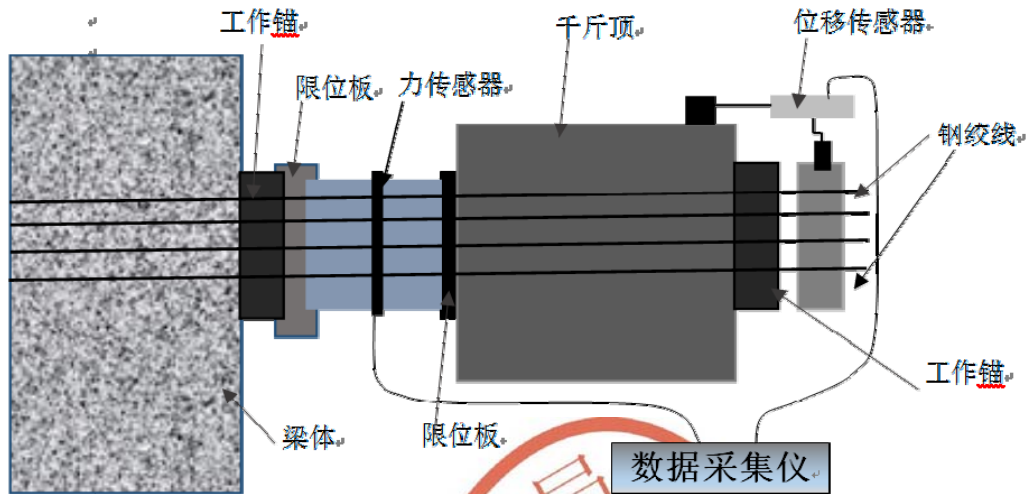


图 1 反张法检测工作布置示意图

- e) 安装位移传感器；
- f) 将传感器与数据采集仪正确连接，千斤顶与油压泵可靠连接；
- g) 安装完毕后应检查仪器设备安置情况，保证力传感器与千斤顶接触良好，数显百分表量杆与千斤顶活塞垂直，线路连接正确，仪器显示清晰、稳定；
- h) 检测结束后按上述步骤逆序卸下检测用仪器设备。

5.3.3 锚下有效预应力检测的现场加载和数据采集步骤如下：

- a) 正式采集数据前，应先进行试采集，确保仪器工作正常、参数设置合理；
- b) 按设计张拉预应力值分级加载与锚下有效预应力方向相反的拉力，加载分级按照 JTG/T F50 《公路桥涵施工技术规范》要求执行；
- c) 每级持荷时间不少于 5min，待仪器显示的数据稳定后读数；
- d) 建立伸长量—张拉力曲线，分析曲线斜率变化过程；如果斜率稳定，继续施加拉力；如果斜率突然变小，曲线上突变点对应的拉力数值即为锚下有效预应力数值。
- e) 检查数据是否齐全、准确，记录质量是否达到标准要求；如发现数据记录不正常时，应重新采集。

5.4 数据采集与处理

- a) 对预应力筋的外露段施加与锚下有效预应力方向相反的张拉力，采集并记录伸长量和张拉力值，建立伸长量—张拉力曲线；
- b) 计算伸长量—张拉力曲线的斜率；
- c) 判断斜率变化情况，如果斜率稳定，继续施加拉力，如果斜率突然变小，曲线上突变点对应的拉力数值即为锚下有效预应力数值；
- d) 对软件判定结果存在疑问时，应进行复核。

6 自振频率法

6.1 适用范围与条件

- 6.1.1 自振频率法适用于先张法预应力混凝土构件的有效预应力检测。
- 6.1.2 自振频率法应在台座上张拉预应力完成后、浇筑混凝土前实施。

6.2 仪器设备

6.2.1 信号激发和接收装置应满足以下要求:

- a) 激振设备可采用冲击锤,也可采用可调频幅的专用激振器;激发信号的频率范围应为 100Hz~25kHz;
- b) 接收传感器频响范围宜在 10Hz~100kHz,宜采用加速度型传感器。

6.2.2 信号采集仪器设备应满足以下要求:

- a) 频响范围, 10 Hz~500 kHz;
- b) 采样精度, 24 bit;
- c) 采用间隔, 2 us;
- d) 工作温度, -10℃~50℃。

6.2.3 数据处理软件应具有带通滤波、频谱分析、相关分析等功能。

6.3 现场检测

6.3.1 检测工作应按以下规定布置:

- a) 测点宜布置在预应力筋中间点,也可选择在预应力筋 1/4~1/2 位置;
- b) 激发点位置选择在接收传感器附近;
- c) 激发方向应与接收传感器接收方向相同。

6.3.2 对每个测点,应采取统一激振方法重复采集,记录信号不少于 3 次数据,且保证波形频谱基本一致。

6.4 数据采集与处理

6.4.1 测试数据中的异常值,应该舍去。

6.4.2 预应力筋张拉力计算公式:

$$F = \frac{4mL^2 f_n^2}{n^2} - \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \dots\dots\dots (6.4.2-1)$$

式中:

- F ——张拉力, kN;
- m ——单位长度的预应力筋质量, kg/m;
- L ——预应力筋锚固点之间净距, m;
- n ——频率阶次;
- f_n —— n 阶频率, Hz;
- EI ——钢束的抗弯刚度, MPa·m⁴。

7 共振频率法

7.1 适用范围与条件

7.1.1 共振频率法适用于后张法预应力混凝土构件注浆前和注浆后的锚下有效预应力检测。

7.1.2 采用共振频率法检测前,应依照附录 E 对计算参数进行标定。

7.1.3 对已张拉、已注浆并初凝的预应力混凝土构件,检测时的初凝时间应与仪器校验时的初凝时间一致。对已张拉、未注浆的预应力构件,宜在张拉后 12h 内完成检测。

7.2 仪器设备

7.2.1 信号激发和接收装置应满足以下要求:

- a) 应使用信号稳定、重复性好的激发振源,可选用线性调频脉冲震源或超磁致伸缩声波震源;激发信号的频率范围应为 100Hz~25kHz;

b) 接收传感器频率响应范围宜在 10Hz~50kHz，宜使用加速度型传感器，可采取强力磁座或其它方式耦合；加速度传感器电压灵敏度宜为 100mV/g~1000 mV/g；

c) 传感器灵敏度和激振能量应与采集器信号输入范围相匹配。

7.2.2 信号采集仪器设备应满足以下要求：

- a) 频响范围，10 Hz~500 kHz；
- b) 采样精度，24 bit；
- c) 采用间隔，2 us；
- d) 工作温度，-10℃~50℃。

7.2.3 资料处理软件应具有带通滤波、频谱分析、积分处理、相关分析等功能。

7.3 现场检测

7.3.1 检测工作应按图 2 和以下规定布置：

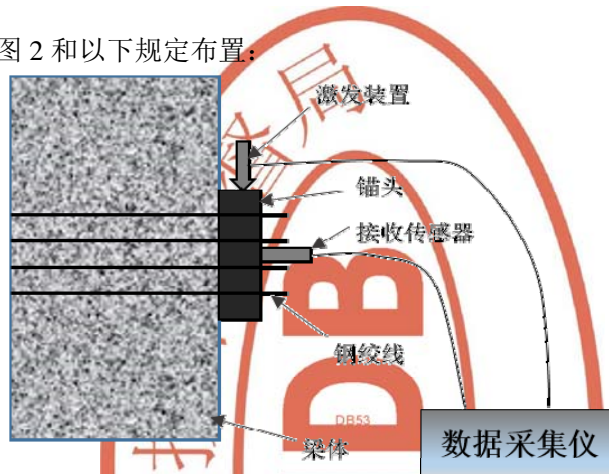


图 2 共振频率法检测工作布置示意图

- a) 检测点应布置在预应力构件两端锚具上；
- b) 拾振器宜通过其配备的强力磁座，安装在锚头中心位置；
- c) 激发点位置应选择锚头四周；
- d) 激发方向应与锚头平面垂直，且不能敲击到锚头的棱上。

7.4 数据采集与处理

7.4.1 测试数据中的异常值，特别是异常大值，应予舍去。

7.4.2 对每个锚具测点，应采取统一激振方法重复采集，记录不少于 3 次数据，且保证波形、频率特征基本一致。

对于注浆之前的构件，在两端得到的检测结果应该一致；对于注浆之后的构件，如果应力分布不均，在两端得到的检测结果可有一定差异。

7.4.3 通过检测获得的共振频率，可按下式计算获得预应力构件的有效预应力：

$$F = \alpha \left[(\beta R + g) \frac{K_1 - 4\pi^2 f^2 M_1}{4\pi^2 f^2 - \beta} \right] \dots\dots\dots (7.4.3-1)$$

式中：

- f ——共振频率，Hz；
- K_1 ——预应力筋的抗拉刚度，N/m；
- M_1 ——锚具的质量，kg；
- F ——共振体抗拉（压）力，kN；
- R ——等效接触半径，m；
- g ——重力加速度，m/s²；

α 、 β 、 γ ——待定系数，由标定试验确定。

8 应力传感器法

8.1 适用范围与条件

8.1.1 应力传感器法检测适用于先张法、后张法预应力施工预应力混凝土结构构件的有效预应力的检测、监测与评定。

8.2 传感器选择与标定

8.2.1 预置应力传感器可选用机械式传感器、钢弦式传感器进行有效预应力检测；预置应力传感器选用光纤光栅传感器（FBG）时，可进行预应力筋应力应变检测和监测。

8.2.2 传感器参数应满足下列要求：

- a) 机械式、钢弦式力传感器量程宜为 1kN~2000kN，测量精度不小于 1 μ s。
- b) 光纤光栅传感器的波长量程范围为 20nm，测量误差不大于 0.02nm；

8.2.3 应力传感器在选用、安置前应进行参数标定。

8.3 传感器安置

8.3.1 应力传感器宜安置在预应力筋的单根预应力筋上，安置方向为沿预应力筋螺旋方向。

8.3.2 应采用粘结方式在预应力筋上安置应力传感器，不应采用焊接方式在预应力筋上安置应力传感器。

8.3.3 预置传感器及引线应妥善保管，光纤光栅传感器应采取保护性封装，避免因张拉施工、注浆施工而造成破坏。

8.4 数据采集与处理

8.4.1 机械式应力传感器的被测应力，由输出的应变除以灵敏系数获得，即：

$$\sigma = f_{\sigma} \varepsilon \dots \dots \dots (8.4.1-1)$$

式中：

σ ——被测应力值；

ε ——应变初始值；

错误！未找到引用源。——传感器应力灵敏度系数。

8.4.2 钢弦式传感器的张拉力由式（8.4.2-1）确定：

$$F = \frac{4mL^2 f_n^2}{n^2} \dots \dots \dots (8.4.2-1)$$

式中：

F ——张拉力，kN；

m ——单位长度的预应力筋质量，kg/m；

L ——预应力筋锚固点之间净距，m；

n ——频率阶次；

f_n —— n 阶频率，Hz。

8.4.3 光纤光栅传感器进行应力监测时，可利用 FBG 波长与荷载成线性关系，根据粘贴于单根预应力筋上的 FBG 所测得的应力值，表征该局部位置同截面预应力筋的应力。

$$\sigma = f_{\sigma} \Delta \lambda / \lambda^* \dots \dots \dots (8.4.3-1)$$

式中:

σ ——光纤光栅轴线总应力值;

λ^* ——波长初始值;

$\Delta\lambda$ ——波长变化值;

错误! 未找到引用源。——传感器应力灵敏度系数。

8.4.4 光纤光栅传感器进行应力监测时,总应变按下式计算:

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right) / f_\varepsilon \dots\dots\dots (8.4.4-1)$$

如果构件温度有变化,总应按下式进行温度补偿、计算出总应变值:

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} - \xi^* \Delta T \right) / f_\varepsilon \dots\dots\dots (8.4.4-2)$$

式中:

ε ——光纤光栅轴线总应变值;

λ **错误! 未找到引用源。**——波长初始值;

$\Delta\lambda$ ——波长变化值;

ξ^* ——修正的光热常数;

ΔT ——温度变化值;

f_ε ——传感器应变灵敏度系数。

9 有效预应力评定

9.1 一般规定

9.1.1 应采用扣除各种预应力损失的预应力混凝土构件有效预应力设计值,与有效预应力实测值进行对比。

9.1.2 对连续梁桥、连续刚构桥等重要桥梁,有效预应力的检测结果宜当日形成报告,并对预应力张拉施工质量进行综合分析。

9.1.3 张拉施工质量检测验收除应符合本规程规定外,还应符合现行《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T F50)等相关规范的要求。

9.2 质量评定指标

9.2.1 有效预应力值

a) 预应力损失值可采取计算或实测方法获得。

b) 采用本规程检测得出的锚下有效预应力实测值,其中锚下有效预应力的设计值应按以下公式计算:

$$\sigma_y = \sigma_{con} - \sigma_{l2} - \sigma_{l4} - \sigma'_{l5} - \sigma'_{l6} \dots\dots\dots (9.2.1-1)$$

式中:

σ_y ——有效预应力的设计值;

σ'_y ——有效预应力的实测值;

σ_{con} ——设计张拉控制应力值;

- σ_{l2} —预应力筋与锚圈口间摩擦、锚具变形、钢筋回缩、接缝压缩引起的预应力损失值；
 σ_{l4} —混凝土弹性压缩引起的预应力损失值；
 σ'_{l5} —预应力筋松弛引起的预应力损失值；
 σ'_{l6} —混凝土收缩、徐变引起的预应力损失值。

按本规程要求时段及时进行有效预应力检测时，预应力筋松弛引起的预应力损失值 σ'_{l5} 和混凝土收缩徐变引起的预应力损失值 σ'_{l6} 可忽略不计，混凝土弹性压缩引起的预应力损失 σ_{l4} 影响较小，亦可忽略不计。

c) 在进行锚下有效应力检测前，可实测或计算锚圈口摩擦阻等预应力损失 σ_{l2} 。

注：经过对云南省几家检测单位的实际测试结果进行统计分析，本规范对预制构件，对 $f_{pk}=1860\text{MPa}$ 、公称直径为 15.20mm 的单根预应力筋，张拉锚固后锚下有效预应力理论值可参考下表取用。

有效预应力实测值参考表

| 预制梁长 (m) | 设计张拉控制应力 (MPa) | 控制应力对应的张拉力 (kN) | 统计的平均损失 | 有效预应力对应的张拉力 (kN) |
|---------------------|----------------|-----------------|---------|------------------|
| $30 \leq L \leq 40$ | $0.7 f_{pk}$ | 182 | -3.4% | 176 |
| | $0.75 f_{pk}$ | 195 | | 188 |
| $20 \leq L < 30$ | $0.7 f_{pk}$ | 182 | -4.7% | 173 |
| | $0.75 f_{pk}$ | 195 | | 185 |

d) 实测值与设计值的偏差按下式计算：

$$\delta = \frac{\sigma'_y - \sigma_y}{\sigma_y} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (9.2.1-2)$$

9.2.2 有效预应力不均匀度

a) 逐根预应力筋检测有效预应力时，应计算有效预应力同断面不均匀度 δ_s ，在同束预应力筋不同位置检测有效预应力时，应计算有效预应力同束不均匀度 δ_b ；

b) 不均匀度按式 (9.2.2-1) 计算：

$$\delta = \frac{\Delta\sigma}{\bar{\sigma}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (9.2.2-1)$$

式中：

- δ ——有效预应力不均匀度；
 $\Delta\sigma$ ——有效预应力实测样本中最大值与最小值的差值；
 $\bar{\sigma}$ ——有效预应力实测样本的算术平均值。

9.3 质量评定标准

桥梁预应力张拉施工有效预应力质量控制要求和允许偏差列于表 2。

表 2 有效预应力检测质量评定标准

| 项 目 | | 允许偏差 (%) |
|------|---------------|-------------|
| 大小 | 单根预应力筋有效预应力大小 | -3~+7 |
| | 整束平均有效预应力大小 | -2~+6 |
| 不均匀度 | 有效预应力同束不均匀度 | ±5 |
| | 有效预应力同断面不均匀度 | ±2 |



附录 A

(规范性附录)

桥梁预应力张拉有效预应力检测记录表 (反张法) 第 页 共 页

QJ0206a

检测机构:

记录编号:

| 工程名称 | | | | 委托/任务编号 | | | | |
|---------------|------------------------|----------------|----------|--------------|---|-------|-------------|-----------------|
| 桥梁名称 | | | | 构件名称 | | | | |
| 检测依据 | | | | 设计强度等级 | | | | |
| 浇注日期 | | | | 张拉日期 | | | | |
| 主要设备/编号 | | | | | | | | |
| 千斤顶 标定方程 | | | | | | 有效期限 | | |
| 预应力筋 规格、性能 | | 直径: | | 截面积: | | 公称强度: | | 设计控制应力 (MPa) |
| 加载 分级 | 加载 荷载 (kN) | 油压表读数 (MPa) | | 实测位移 (mm) | | | | 情况 说明 |
| | | 计算 读数 | 实际 读数 | 1 | 2 | 3 | 平均值 (mm) | |
| | | | | | | | | 初应力 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 备注 | 见证单位: _____ 见证人: _____ | | | | | | | |

检测:

复核:

日期: 年 月 日

附录 B

(规范性附录)

预应力张拉设备的校验

B.1 检验条件

预应力张拉设备，包括千斤顶、油压表、油泵及油管，在下列情形下应配套校验：

- a) 新千斤顶初次使用前；
- b) 油压表指针不能退回零点时；
- c) 千斤顶、油压表和油管进行过更换或维修后；
- d) 当千斤顶使用超过 6 个月或张拉超过 200 次以上；
- e) 在使用过程中出现其他不正常现象。

B.2 校验要求

- a) 校验（检定/校准）应在由计量法规允许的合法机构进行；
- b) 校验时，应将千斤顶、油泵及油压表一起配套进行；
- c) 校验用的标准仪器可选用材料试验机，或压力（拉力）传感器；该标准仪器的精度不得低于±2%，压力表的精度不宜低于 1.5 级，最大量程不宜小于设备额定张拉力的 1.3 倍；
- d) 校验时，千斤顶活塞的运行方向与实际张拉工作状态一致。

B.3 校验方法

B.3.1 用长柱压力试验机校验的基本要求

校验时，应采取被动校验法，即在校验时用千斤顶顶压力试验机，这样活塞运行方向、摩阻力的方向与实际工作时相同，校验比较准确。

在进行被动校验时，压力试验机本身也有摩阻力，且与正常使用时相反，故试验机表盘读数反映的也不是千斤顶的实际作用力。因此，用被动法校验千斤顶时，应事先用具有足够吨位的标准测力计对试验机进行被动标定，以确定试验机的表盘读数值。标定后在校验千斤顶时，就可以从试验机表盘上直接读出千斤顶的实际作用力以及相应的油压表的准确读数。

B.3.2 采用压力试验机校验

采用压力试验机校验的步骤如下。

a) 千斤顶就位

当校验穿心式千斤顶时，将千斤顶放在试验机台面上，千斤顶活塞面或撑套与试验机压板紧密接触，并使千斤顶与试验机的受力中心线重合。

当校验拉杆式千斤顶时，先把千斤顶的活塞杆推出，取下封尾板，在缸体内放入一根厚壁无缝钢管，然后将千斤顶两脚向下立于试验机的中心线部位。放好后，调整试验机，使钢管的上端与试验机上压板接紧，下端与缸体内活塞面接紧，并对准缸体中心线。

b) 校验千斤顶

开动油泵，千斤顶进油，使活塞杆上升，顶试验机上压板，在千斤顶顶试验机且使荷载平缓增加的过程中（此时不得用试验机压千斤顶），自零位到最大吨位，将试验机被动标定的结果逐点标记到千斤顶的油压表上。标定点应均匀地分布在整个测量范围内，且不应少于 5 点。当采用最小二乘法回归分析千斤顶的标定经验公式时需 10~20 点。各标定点重复标定 3 次，取平均值，并且只测读进程，不

得读回程。

对千斤顶校验数值采用表 B.1 记录，并可根据校验结果绘制千斤顶校验曲线供预应力筋钢材张拉时使用；亦可采用最小二乘法求出千斤顶校验的经验公式，供预应力筋张拉时使用。

表 B.1 张拉设备校验记录表

| | | | | | | |
|------------------|-------|---------|------|------|-----|------|
| 张 拉 设 备 | 油压千斤顶 | 名称 | 型号规格 | 精度等级 | 制造厂 | 出厂编号 |
| | 高压油泵 | | | | | |
| | 油压表 | | | | | |
| 检定吨位 (kN) | | 油压表校验读数 | | | | |
| | | (一) | (二) | (三) | 平均 | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| 试 验 机 | 型号规格 | | | | | |
| | 精度等级 | | | | | |
| | 制造厂 | | | | | |
| | 出厂编号 | | | | | |
| 备注 | | | | | | |

校验地点：

校验日期：

环境温度：

有效期至：

校验单位（盖章）：

B.3.3 采用标准测力计校验

采用水银压力计、测力环、弹簧拉力计等标准测力校验千斤顶，是一种简单可靠的方法。校验穿心式千斤顶时的装置，校验拉杆式千斤顶的附加装置与压力试验机校验时相同。

校验时，开动油泵，千斤顶进油，活塞杆推出，顶压测力计。当测力计达到一定吨位 T_1 时，立即读出千斤顶油压表相应读数 P_1 ，同样方法可得 T_2 、 P_2 、 T_3 、 P_3 ……。此时 T_1 、 T_2 、 T_3 ……即为相应于油压表读数为 P_1 、 P_2 、 P_3 ……时的实际作用力。将测得的各值绘成曲线。实际使用时，即可由此曲线找出要求的 T 值和相应的 P 值。

B.3.4 校验结果的回归计算

千斤顶的作用力 T 和油缸的油压 P 的关系是线性关系。考虑活塞和油缸之间的摩阻力后，它们的关系可以表示为：

$$T=aP+b \quad \dots\dots\dots (B. 3. 3-1)$$

可以利用千斤顶检验测得的作用力和油压 $(T_1、P_1)、(T_2、P_2)、(T_3、P_3)、\dots\dots、(T_n、P_n)$ ，对式 (B. 3. 3-1) 进行线性回归，利用最小二乘原理求回归值。

B. 3. 5 注意事项

a) 施加预应力所用的张拉设备用仪表应由专人使用和管理，并应定期维护和校验，以提高施加预应力时张拉为的控制精度。

b) 千斤顶与压为表应配套校验，配套使用。即在使用时严格按照标定报告上注明的油泵号、油表号和千斤顶号配套安装成张拉系统使用。



附录 C

（规范性附录）

预应力孔道摩阻测试

桥梁预应力孔道摩阻的测试步骤如下：

- a) 在梁体的两端装千斤顶后，连通全自动反拉测试装置同时加压 4MPa 并保持约 5min；
- b) 甲端封闭，乙端张拉；张拉时分级加压，直至张拉控制应力；如此反复 3 次，取两端压力差的平均值；
- c) 乙端封闭，甲端张拉，取两端 3 次压力差的平均值；
- d) 将上述两次压力差的平均值再次平均，即为孔道摩阻力的测定值。

附录 D

(规范性附录)

锚夹具摩阻损失测试

锚夹具摩阻损失的测试步骤如下：

- a) 采用油压千斤测试，在张拉台上或用一根直孔道钢筋混凝土柱进行，两端均用锥形夹具固定；
- b) 两端同时充油，油压均保持 4MPa；
- c) 将甲端封闭作为被动端，乙端作为主动端，张拉至控制荷载，读取两端读数的差值；如此反复进行 3 次，取其差值的平均值，即为甲端锚夹具摩阻力；
- d) 把乙端封闭，甲端为主动端张拉，重复上述试验 3 次，取差值的平均值，即为乙端锚夹具摩阻力。



附录 E

(规范性附录)

共振频率法参数标定方法

E.1 计算公式

E.1.1 相对于长时间的锚固预应力体系，在激振作用力非常小、时间非常短的情形下，预应力锚固体系可看作是一个弹性体系，其共振频率由下式确定：

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \dots\dots\dots (E.1-1)$$

式中，

$$K = K_1 + K_2, \quad K_1 = EA/L, \quad M = M_1 + M_2$$

K_1 为预应力钢筋的抗拉刚度、 K_2 为锚具与混凝土的接触刚度； M_1 为锚具质量、 M_2 为参与振动的混凝土质量。其中 K 和 M 为不变量。

式 (E.1-1)，如果 M 为一常值，那么根据测试的共振频率 f 即可较容易地测出有效应力。然而，理论与实验表明，不同工况条件下其诱发的振动体系并非固定不变，而是会随着其应力的变化而变化。应力越大，参与共振的范围也就越大，共振频率就越低。

按共振频率法的受力特点，预应力张力越大，所参与振动的质量 M_2 越大，锚具与混凝土的接触刚度 K_2 也越大，其共振频率 f 就越小。有关研究表明，预应力张拉力与 M_2 和 K_2 有如下关系：

$$F = \alpha(K_2 R + M_2 g)^\gamma$$

$$K_2 = \beta M_2$$

式中， α 、 β 、 γ 为待定系数，由标定试验确定； g 为重力加速度。 R 为等效接触半径，圆形接触面为接触圆的半径，其它形式接触面回转半径 i 为：

$$i = \sqrt{I/A},$$

式中， I 为惯性矩，

A 为截面面积。

由于：

$$4\pi^2 f^2 = \frac{K_1 + \beta M_2}{M_1 + M_2}$$

可解得：

$$M_2 = \frac{K_1 - 4\pi^2 f^2 M_1}{4\pi^2 f^2 - \beta}$$

代入预应力张拉力公式中可得：

$$F = \alpha \left(\beta \frac{K_1 - 4\pi^2 f^2 M_1}{4\pi^2 f^2 - \beta} R + \frac{K_1 - 4\pi^2 f^2 M_1}{4\pi^2 f^2 - \beta} g \right)^\gamma$$

$$= \alpha \left[(\beta R + g) \frac{K_1 - 4\pi^2 f^2 M_1}{4\pi^2 f^2 - \beta} \right]^\gamma$$

E.1.2 对不同工况条件下共振频率法检测，可在试验构件或工程构件上采用张拉法进行标定，计算公式如下：

$$F = \alpha \left[(\beta R + g) \frac{K_1 - 4\pi^2 f^2 M_1}{4\pi^2 f^2 - \beta} \right]^\gamma \dots\dots\dots (E. 1. 2-1)$$

E.1.3 如果条件允许，应分别每个现场各型号锚具进行常规参数标定，每种工况标定数不少于 3 个。若条件所限，可采用简易标定法、每种工况标定数为 1 个；或采用已验证过的数据库法。

E. 2 标定方法

- E.2.1 一端张拉、一端标定时，要注意沿管壁预应力的损失。
- E.2.2 在标定的一端锚具、预应力筋上，要求没有千斤顶等附加设备。
- E.2.3 在低应力条件下，由于参与振动的质量较小，容易激发出高频信号。因此，提高频谱分析读取精度是非常重要的。
- E.2.4 在标定时，由于张拉的需要，其预应力筋往往露出较长，其影响不容忽视。
- E.2.5 即使同类型构件，其不同位置孔道标定得出的数值可能不同，因此需对不同位置孔道进行标定。
- E.2.6 绘出共振频 f 与 α 、 β 、 γ 的经验曲线或建立相关数据库，之后在使用“共振频率法”过程中，根据工况条件和实测频率 f ，将对应的 α 、 β 、 γ 值代入公式 (E. 1. 2-1)，即可计算获得锚下有效预应力。

