



T/CECS G: D31-01-2017

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路桥梁锚下预应力检测技术规程

Technical Standards of Prestress under Anchorage Tests for
Highway Bridge

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction
Standardization

(空白)

征求意见稿

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路桥梁锚下预应力检测技术规程

Technical Standards of Prestress under Anchorage Tests for
Highway Bridge

T/CECS G: D31-01-2017

主编单位：招商局重庆交通科研设计院有限公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

施行日期：2018年XX月XX日

人民交通出版社股份有限公司

2018 北 京

(空白)

征求意见稿

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于〈2016 年第二批工程建设协会标准制修订项目编制工作的通知〉（建标协字〔2016〕026 号）的要求，由招商局重庆交通科研设计院有限公司承担《公路桥梁锚下预应力检测技术规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

编写组在总结近 10 年来在锚下预应力检测技术经验和相关科研成果的基础上，以提升和完善公路桥梁锚下预应力检测技术与标准为目标，完成了本规程的编写工作。

本规程分为 7 章正文以及 4 个附录，主要内容包括总则、术语符号、基本规定、应变法、反拉法、质量评定、安全措施、附录 A 应变法检测设备技术要求、附录 B 应变法检测异常数据剔除、附录 C 反拉法检测过程相关损失计算和附录 D 报告格式。

本规程是基于通用的工程建设理论及原则编制，对不符合本规程的应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由招商局重庆交通科研设计院有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本规程日常管理组：中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或刘涌江（地址：重庆市南岸区学府大道 33 号；邮编：400067；电子邮箱：liuyongjiang@cmhk.com），以便下次修订时参考。

主 编 单 位：招商局重庆交通科研设计院有限公司

参 编 单 位：

贵州路桥集团有限公司

中冶建筑研究总院有限公司

云南省建筑科学研究院

四川升拓检测技术股份有限公司

主 编：刘涌江

主要参编人员：张 朋 黄福伟 刘小飞 刘大洋 徐 莹

徐宏武 郭吉平 吴佳晔 赵 勇 杨建国

主 审：朱新实

参与审查人员：

参 加 人 员：陈 卓 石永燕 杜雁鹏 罗 斌 廖 强

征求意见稿

目 次

1	总则.....	- 1 -
2	术语、符号.....	- 2 -
	2.1 术语.....	- 2 -
	2.2 符号.....	- 5 -
3	基本规定.....	- 6 -
	3.1 一般规定.....	- 6 -
	3.2 检测工作程序.....	- 8 -
	3.3 检测频率.....	- 9 -
	3.4 检测结果.....	- 10 -
4	应变法.....	- 16 -
	4.1 一般规定.....	- 16 -
	4.2 检测设备.....	- 16 -
	4.3 现场检测.....	- 17 -
	4.4 检测数据处理与分析.....	- 19 -
5	反拉法.....	- 21 -
	5.1 一般规定.....	- 21 -
	5.2 检测设备.....	- 22 -
	5.3 现场检测.....	- 22 -
	5.4 检测数据处理与分析.....	- 24 -
6	质量评定.....	- 27 -
	6.1 一般规定.....	- 27 -
	6.2 锚下有效预应力标准值.....	- 27 -
	6.3 锚下有效预应力质量评定.....	- 29 -
7	安全措施.....	- 32 -
	本标准用词说明.....	- 33 -
	附录 A 应变法检测设备技术要求.....	- 34 -
	附录 B 应变法检测异常数据剔除.....	- 35 -
	附录 C 反拉法检测过程相关损失计算.....	- 36 -
	附录 D 报告格式.....	- 41 -

1 总则

1.0.1 为规范公路桥梁锚下预应力检测，提高其检测技术水平，确保锚下预应力符合设计和使用要求，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于公路桥梁的锚下预应力检测。

1.0.3 公路桥梁锚下预应力检测方法应根据检测条件、适用范围、施工工艺等合理选用。

1.0.4 公路桥梁锚下预应力检测除应符合本规程的规定外，尚应符合国家、行业颁布的其它有关标准、规范的规定。

2 术语、符号

2.1 术语

2.1.1 锚下有效预应力 effective prestress under anchorage

预应力筋张拉锚固后，锚口下预应力筋留存的预应力。

2.1.2 锚下有效预应力标准值 standard value of effective prestress under anchorage

标准工况下，预应力筋张拉锚固后，锚口下留存的预应力。该值可通过理论计算、标准试验或数理统计的方式获得。

2.1.3 设计张拉控制力 Tensioning control stress on designed

预应力筋锚固前张拉千斤顶所控制的理论张拉力，由设计提供。

2.1.4 张拉控制力 Tensioning control stress on constructed

预应力筋张拉施工时千斤顶实际控制的最大力，由现场实施。

2.1.5 锚下预应力检测评定 testing of prestress under anchorage

预应力筋张拉锚固后，对锚下有效预应力相关指标进行的检测评定。

2.1.6 锚固损失 anchorage loss

放张锚固后，因预应力筋回缩、锚具和梁体变形等引起的预应力损失。

2.1.7 锚口摩阻损失 friction pressure loss

张拉过程中因锚口摩阻力造成的损失。

2.1.8 补张拉 Compensation tensioning

预应力筋的锚下有效预应力不足且超出偏差范围，再次对其进行张拉，使之符合要求的工艺。

2.1.9 锚下有效预应力同束不均匀度 unevenness of effective prestresses in a tendon

同一束中各单根钢绞线锚下有效预应力最大值和最小值的偏差程度。锚下有效预应力同束不均匀度 (%) = (同一束中单根钢绞线锚下有效预应力最大检测值 - 同一束中单根钢绞线锚下有效预应力最小检测值) / (同一束中单根钢绞线锚下有效预应力最大检测值 + 同一束中单根钢绞线锚下有效预应力最小检测值)。

2.1.10 锚下有效预应力同断面不均匀度 unevenness of effective prestresses on a cross section

同一断面上各束预应力筋锚下有效预应力最大值与最小值的偏差程度。锚下有效预应力同断面不均匀度 (%) = (同一断面中同束预应力筋平均锚下预应力最大检测值 - 同一断面中同束预应力筋平均锚下预应力最小检测值) / (同一断面中同束预应力筋平均锚下预应力最大检测值 + 同一断面中同束预应力筋平均锚下预应力最小检测值)。

2.1.11 应变法 strains testing

预应力筋张拉施工过程中，在锚下的预应力筋上布置应变传感器，测量应变值，通过应力与应变关系计算锚下有效预应力值。

2.1.12 反拉法 pull-out testing

预应力筋张拉施工后，在梁体外对已张拉的预应力筋再次重新分级施加荷载，测量反拉力值和位移值，通过反拉力与位移关系计算锚下有效预应力值。

条文说明

反拉法又称为复张法、复拉法、拉拔法、再拉法、拉脱法、提离法等。

征求意见稿

2.2 符号

F_c —— 锚下有效预应力；

F_s —— 锚下有效预应力标准值；

σ_p —— 反拉终止应力；

$\Delta\sigma_l$ —— 反拉补偿应力；

σ_{co} —— 设计张拉控制应力；

A_{pk} —— 预应力筋的公称截面面积；

n —— 预应力筋根数；

N —— 测量点数；

δ —— 反拉终止时，实测预应力筋伸长值；

δ_0 —— 反拉终止时，预应力筋反拉段计算伸长值；

L —— 预应力筋反拉影响长度；

l_r —— 锚垫板外预应力筋反拉段长度；

E —— 预应力筋弹性模量；

θ —— 预应力筋张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角之和；

k —— 孔道每米局部偏差对摩擦的影响系数；

μ —— 预应力筋与孔道壁的摩擦系数；

τ —— 单根预应力筋锚下预应力偏差；

g —— 锚下有效预应力同束不均度；

γ —— 锚下有效预应力断面不均度。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 桥梁预应力施工应进行锚下预应力检测。

条文说明

当前，公路桥梁建设普遍采用预应力技术。张拉过程中可能存在多种因素导致实际锚下有效预应力与其标准值偏差过大，影响结构使用安全。为了进一步加强桥梁预应力施工管理，确保桥梁结构的施工质量，应开展桥梁工程的锚下预应力检测工作。

3.1.2 锚下预应力检测宜采用反拉法或应变法。

条文说明

- 1 反拉法原理简单、可靠，现场检测方便，宜优先选用。

3.1.3 锚下预应力检测过程中应关注可能出现的异常现象。

条文说明

通过观察检测过程中预应力筋的异常伸长、锚夹具异响、锚固区结构裂缝变化等异常现象，可以帮助了解结构或构件在试验过程中的表现状况，提前采取应对措施，避免质量和安全事故。

3.1.4 锚下预应力检测应满足以下基本要求：

- 1 预应力张拉施工记录完整，施工工艺、质量控制与施工规范及设计要求一致。

2 预应力筋滑丝断丝、夹片破裂、锚具变形等数量不应超过表 3.1.4 的限制值。

表 3.1.4 预应力筋断丝、夹片破裂、锚具变形等限制值要求

类别	检测项目	控制数
钢丝束 钢绞线束	每束钢丝断丝或滑丝	1 根
	每束钢绞线断丝或滑丝	1 丝
	每个断面断丝和不超过该断面钢丝总数的百分比	1%
螺纹钢筋	断筋或滑移	不允许
夹片	横向、斜向破裂或断裂	不允许
	顶面错位	不超过 2mm
	露出锚具外高度	不超过 4mm
锚具	锚孔过大塑性变形	不允许
锚垫板	中心变形出现明显扰度或破裂	不允许

条文说明

预应力筋出现滑丝、断丝、夹片破裂、锚具变形及锚垫板中心变形或破裂等问题，影响预应力结构的安全性及耐久性。

1 引起滑丝的主要原因有：张拉时锚具锥孔与夹片之间有杂物；钢绞线有油污；锚固效率系数小于规范要求值；钢绞线受力不均匀；夹片、锚具的强度不够。

2 引起断丝的主要原因有：预应力同束张拉不均匀度过大，导致单根绞线（钢丝）应力大于极限强度；钢绞线（钢丝）质量不够标准值；千斤顶多次重复使用，导致张拉力不够均匀；夹片、锚具的强度不够。

3 引起夹片破裂的主要原因有：预应力同束张拉不均匀度过大，导致夹片破裂；夹片存在质量缺陷。

4 引起锚具变形的主要原因是锚具存在质量缺陷。

5 锚垫板中心变形出现明显扰度或破裂主要原因有：受力不均匀；夹片存在质量缺陷。

3.1.5 反拉法检测前与应变法检测后，检查预应力筋滑丝断丝、夹片破裂、锚夹

具变形等现象。

3.1.6 检测设备应配套齐全、功能完整，主要技术参数应符合本规程要求。

3.1.7 除采取锚下预应力检测外，也须加强张拉施工过程质量控制。

3.2 检测工作程序

3.2.1 检测工作应按图 4.2.1 的流程进行：

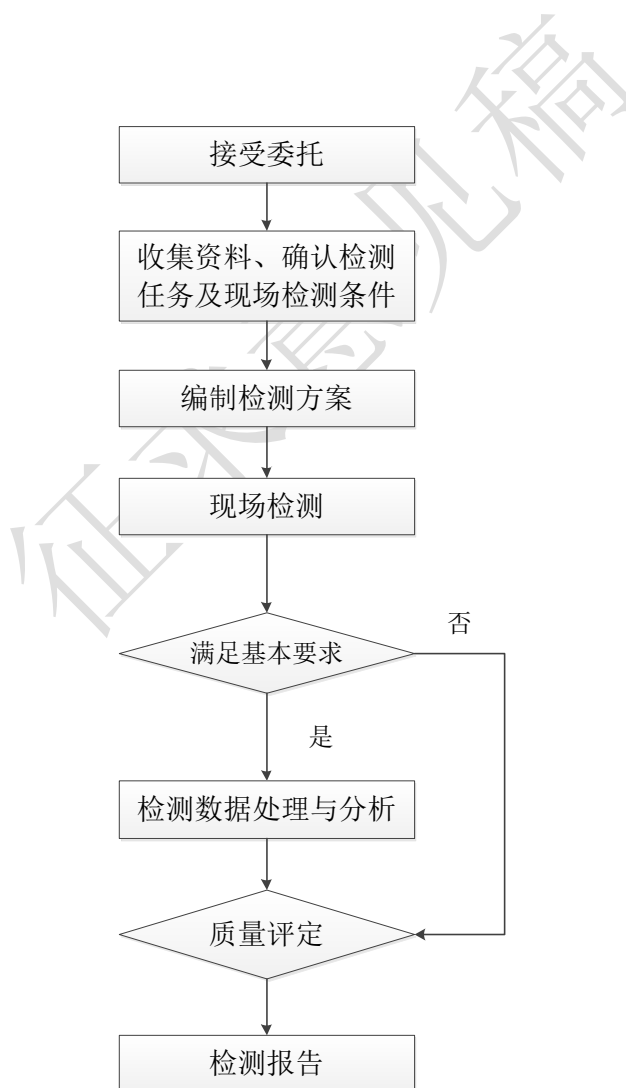


图 3.2.1 检测流程示意图

3.2.2 检测前现场调查与资料收集宜包括检测实施可行性、设计资料、施工工艺、施工异常情况记录等。

3.2.3 应依据检测任务和相关资料制定检测方案。检测方案宜包含工程概况、检测依据、检测内容、检测方法、检测仪器、所需的机械或人工配合等。

3.2.4 现场检测条件应满足以下要求：

- 1 应变法检测时锚具下预应力筋具备应变传感器的布设条件。
- 2 反拉法检测时现场应未压浆，外露端预应力筋长度应满足限位板、反拉加载设备、测力设备等检测设备的安装条件。
- 3 现场检测应满足国家有关安全生产的规定，具备有效的安全措施。

3.2.5 当检测出现异常时，应停止检测，查明原因；在排除异常后，重新检测。

3.3 检测频率

3.3.1 锚下预应力检测以抽样检测为主，检测频率宜满足下列要求：

- 1 抽样数量不少于总孔道数的 10%。
- 2 体外筋、环形筋、无粘结筋、竖向筋、负弯矩段抽样数量不少于总孔道数的 15%。
- 3 边、中跨合龙段等重要部位抽样数量不少于总孔道数的 20%。

3.3.2 如有以下特殊情况的预应力筋，应提高检测频率或全数检测：

- 1 施工质量有疑问的桥梁。
- 2 设计方认为重要的桥梁。
- 3 新工艺施工的桥梁。

4 梁场试生产阶段制作的梁。

3.4 检测结果

3.4.1 锚下预应力检测结果应以检测报告的方式提交。

3.4.2 检测报告宜包含下列内容：

- 1 工程概况及受检对象的基本信息。
- 2 检测依据、内容、设备、方法和过程。
- 3 受检对象的基本要求、检查情况。
- 4 检测数据、计算、分析与结果。
- 5 检测结论。

征求意见稿

4 应变法

4.1 一般规定

4.1.1 应变法适用于先张法施工桥梁结构、体外预应力桥梁结构的锚下预应力检测。

4.1.2 应变法检测过程应自预应力筋张拉施工开始,直至整个张拉锚固过程结束。

4.1.3 检测环境应符合下列要求:

1 检测应在气温较平稳时段进行。气温低于 5℃或高于 35℃时不宜进行应变法检测。

2 存在冲击、振动、强磁场等干扰环境下不宜进行应变法检测。

条文说明

当不满足上述要求时,应根据仪器设备正常工作条件,确定是否进行应变法的检测。

4.1.4 应变法检测结束后应立即采取防护措施,以保证预应力筋的耐久性。

4.2 检测设备

4.2.1 检测设备主要包括应变传感器(应变片,工具式应变计等)、放大调理仪、采集分析与输出设备、以及相应连接导线等。

4.2.2 检测前应对张拉设备进行检查,确保其运行正常,且应具备均匀进油速

率、最大加持荷载、稳压能力等性能。

4.2.3 应变传感器的量程应满足要求，检测精度要求达到 $1\mu\varepsilon$ 。

条文说明

通常，预计实测值处于检测设备量程的 15%~85%。

4.2.4 同一次检测宜选用同种规格的检测设备。

4.3 现场检测

4.3.1 应变测点布置应符合下列规定：

- 1 应变测点布设应充分反映预应力筋锚下预应力分布特点。
- 2 应变测点布设在锚下预应力筋，布设位置宜为预设距离和预应力筋最大计算伸长量之和，预设距离宜取 10cm~20cm。
- 3 每孔道预应力筋应逐根布设测点，单根预应力筋沿轴向布设不少 3 个测点，测点间距宜为 5cm~10cm。

条文说明

- 1 采用粘贴应变片时，每个测点沿预应力筋环向布设不少于 3 个应变片。
- 2 预应力筋最大计算伸长量为预应力筋检测端在最大荷载作用下的计算伸长量。

4.3.2 检测设备安装完成后应进行系统调试和不少于 15min 的稳定观测，确认正常后应立即开展检测工作。

条文说明

- 1 稳定观测时间用于衡量外界条件对测试结果的影响，或用于测点的温度影响修正。
- 2 稳定观测读数频率宜为 1 次/分钟。

4.3.3 张拉过程分级宜不少 2 级，一般为 0→初始应力（持荷 3min）→张拉控制应力（持荷 5min）→0（锚固）；初始应力值的大小宜为 $0.1\sigma_{con}\sim 0.25\sigma_{con}$ ，并根据预应力筋长度进行大小选择。

条文说明

预应力筋长度 30m 以下时，初始应力值宜为 $0.1\sigma_{con}\sim 0.15\sigma_{con}$ ；预应力筋长度 30m~60m 时，初始应力值宜为 $0.15\sigma_{con}\sim 0.2\sigma_{con}$ ；预应力筋长度大于 60m 时，初始应力值宜为 $0.2\sigma_{con}\sim 0.25\sigma_{con}$ 。

4.3.4 数据采集与记录符合下列规定：

- 1 应记录张拉过程中每一级荷载值、测点应变值、环境温度等。
- 2 加卸载过程，应变采样频率宜 1 次/ $0.05\sigma_{con}$ ；持荷期间采样频率 ≥ 1 次/min，且不少于 3 次。
- 3 宜采用自动采集系统记录，采用人工记录应及时、准确。

4.3.5 检测过程发生下列情况时，应停止加载，查明原因，做好记录，采取措施后再确定是否继续：

- 1 实测应变值超过理论计算值；
- 2 实测应变值变化规律异常；
- 3 出现夹片破裂、锚具凹陷、预应力筋断丝或滑移、异常响声等异常现象。

条文说明

加载过程中，应进行实时观测，并与理论计算值对比分析，判断实测应变值变化规律是否异常。

4.4 检测数据处理与分析

4.4.1 数据修正

- 1 温度修正按下式进行计算：

$$\varepsilon_t = \Delta t K_t \quad (4.4.1)$$

式中： ε_t —测点检测过程应变温度修正值；

Δt —检测时段内的温度变化量（℃）；

K_t —空载时温度上升 1℃测点应变变化值。

- 2 电阻值修正

主要考虑应变片或应变计的传输导线电阻引起的应变值修正。

- 3 非线性应变修正

预应力筋不均匀穿束与现场安装等因素引起的非线性应变，宜通过加载过程的荷载-应变曲线线性拟合修正。

条文说明

- 1 荷载-应变曲线线性拟合方式可采用最小二乘法等方法。
- 2 采用工具式传感器直接测度力值时，可直接进行力值数据修正。

4.4.2 预应力筋有效应变计算

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0 - \varepsilon_p - \varepsilon_t - \varepsilon_R \quad (5.4.2)$$

式中： $\Delta\varepsilon$ —预应力筋有效应变值；

ε ——荷载作用下测量的预应力筋总应变值；

ε_0 ——应变初始值；

ε_p ——荷载作用下预应力筋非线性应变修正值；

ε_t ——应变温度修正值；

ε_R ——导线电阻修正值；

4.4.3 锚下预应力计算

根据测点有效应变，锚下预应力的计算：

$$\Delta\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \Delta\varepsilon_i \quad (4.4.3-1)$$

$$F_e = E \times \Delta\bar{\varepsilon}_i \times \frac{A_{pk}}{1000} \quad (4.4.3-2)$$

式中： F_e —— 单根预应力筋锚下有效预应力，kN；

A_{pk} —— 预应力筋的公称截面面积，mm²；

E —— 预应力筋材料弹性模量，MPa；

$\Delta\varepsilon_i$ —— 第 i 测点的有效应变；

$\Delta\bar{\varepsilon}$ —— 平均有效应变；

N —— 应变测点数量。

条文说明

1 采用粘贴应变片时，有效应变为所有应变片测量应变，剔除异常后，取平均值。

2 先计算单根预应力筋的锚下有效预应力值，再计算整束锚下有效预应力值。

3 应变法检测结果存在应力与应变的换算，其中预应力筋的截面面积和弹性模量为关键因素，宜通过取样实测获取。当无可靠试验数据时，可参考预应力筋质量检验报告。

5 反拉法

5.1 一般规定

5.1.1 反拉法适用于后张法施工桥梁锚下预应力检测。

5.1.2 反拉法检测时间宜在张拉施工完成后 24 小时内，未切割预应力筋，孔道压浆之前进行。

5.1.3 检测方式宜符合下列要求：

- 1 对采用编束穿孔、整束张拉施工工艺的预应力筋，检测时宜采用整束反拉检测。
- 2 对采用非编束穿孔、整束张拉施工工艺或单根张拉施工工艺的预应力筋，检测时宜采用逐根反拉检测。

条文说明

通过大量试验检测发现，采用编束穿孔、整束张拉施工工艺的预应力筋锚下有效预应力同束不均匀度均在允许偏差范围内；因此，对于该工艺施工预应力筋宜采用整束反拉检测方式，提高检测效率。

5.1.4 锚下有效预应力计算时应扣除因预应力筋、锚夹具、预应力孔道、结构混凝土等相互作用产生的反拉力损失。

条文说明

反拉力损失主要包括预应力筋与锚口之间的摩擦损失、预应力筋与管壁之间的孔道摩擦损失，锚具及夹片变形、接缝压缩损失，混凝土的弹性压缩损失

等，宜通过试验确定。

5.2 检测设备

5.2.1 检测设备包含反拉加载设备和测量设备(含测力装置与位移测量装置)。

5.2.2 反拉加载设备应符合下列规定：

- 1 反拉加载设备最大加持荷载应不小于最大加载力值的 1.2 倍。
- 2 反拉加载设备应具备均匀加卸载与稳压补偿能力等性能。

条文说明

- 1 反拉加载设备最大加持荷载宜不超过最大加载力值的 2 倍。
- 2 反拉加载设备运行时加载速率宜不大于 $0.2\sigma_{con}/\text{min}$ 、卸载速率宜不大于 $0.5\sigma_{con}/\text{min}$ 、稳压补偿宜不大于 $\pm 1\%\sigma_{con}$ 等。

5.2.3 测量设备应符合下列规定：

- 1 测力值应在测力装置量程的 15%~85%，示值精度 $\pm 1\%FS$ ，稳定工作温度范围 $-10^{\circ}\text{C}\sim+45^{\circ}\text{C}$ 。
- 2 位移测量装置测量精度应不低于 0.01mm。

5.2.4 反拉加载设备和测量设备宜采用一体化智能检测设备，自动记录和保存测力值、位移量等检测数据。

条文说明

采用一体化智能检测设备记录时，应对控制点的测值进行监控。当采用非一体化智能检测设备时，测读与记录应及时、准确，减小人为误差。

5.3 现场检测

5.3.1 现场检测前，应清理干净待测预应力筋、工具锚、夹片和限位板等部件。

5.3.2 检测设备安装应符合下列规定：

- 1 安装反拉加载设备应使力作用线与预应力筋的轴线重合。
- 2 检测设备安装完成后应进行检查和调试，确认正常后应立即开展检测工作。

5.3.3 加卸载及数据采集应符合下列规定：

- 1 加卸载过程宜为： $0 \rightarrow$ 初应力 \rightarrow 反拉终止应力 $\sigma_p \rightarrow 0$ ，初应力宜为 $0.1\sigma_{con} \sim 0.2\sigma_{con}$ ，反拉终止应力宜为 σ_{con} ，加载速率不宜大于 $0.2\sigma_{con}/\text{min}$ ，卸载速率不宜大于 $0.5\sigma_{con}/\text{min}$ 。
- 2 初应力稳定时间不少于1min，当位移量稳定后，测量并记录初始应力值及初始位移量；否则应停止加载，找出原因并重新试验。
- 3 反拉过程应匀速稳定加载至反拉终止应力 σ_p ，测量并记录反拉终止应力及位移量。
- 4 当反拉终止应力为 σ_{con} 时，宜稳压不少于3min，当预应力筋位移量稳定时，测量并记录反拉应力及位移量，否则继续稳压至位移变化量小于 $0.1\text{mm}/\text{min}$ 。

条文说明

- 1 反拉终止应力也可通过工作夹片退出位移或反拉力（或反拉应力）-位移曲线拐点突变确定，一般小于设计张拉控制应力，但需要通过专项试验验证。
- 2 稳压期内记录位移量不少于3次。
- 3 位移量稳定指观测期内位移变化量不大于1mm。

5.3.4 当检测过程发生下列情况时，应停止加载，查清原因，采取措施后再确

定是否继续:

- 1 预应力筋伸长量 δ 大于理论最大伸长量 δ_{\max} 。
- 2 出现夹片破裂、瞄具凹陷、预应力筋断丝或滑移、混凝土开裂、异常响声等异常现象。

5.4 检测数据处理与分析

5.4.1 锚下有效预应力按下式计算:

$$F_e = (\sigma_p - \Delta\sigma_l - \Delta\sigma_t) \times \frac{A_{pk}}{1000} \times n \quad (5.4.1)$$

式中 F_e —— 锚下有效预应力, kN;

σ_p —— 反拉终止应力 (为反拉终止时检测设备读出的反拉力值与预应力筋的总截面积之比), MPa;

$\Delta\sigma_l$ —— 反拉补偿应力, 预应力筋拉动时至反拉终止时的弹性补偿应力, MPa;

$\Delta\sigma_t$ —— 反拉损失应力, 主要包括反拉检测过程产生的预应力筋与管壁之间的孔道摩擦损失 $\Delta\sigma'_{11}$, 锚具及夹片变形、接缝压缩损失 $\Delta\sigma'_{12}$, 混凝土的弹性压缩损失 $\Delta\sigma'_{14}$, 预应力筋与锚口之间的摩擦损失 $\Delta\sigma'_{17}$ 等, 各项损失可按附录

C 测试, MPa;

A_{pk} —— 预应力筋的公称截面面积, mm^2 ;

n —— 预应力筋根数。

条文说明

1 从式 5.4.1 可知, 准确得出锚下有效预应力值 F_e 与 $\Delta\sigma_l$ 、 $\Delta\sigma_t$ 相关。 $\Delta\sigma_l$ 又与锚下预应力筋拉动时的弹性变形有关, 在反拉过程中利用工作夹片退出位移

或反拉力-位移（或反拉应力-位移）曲线拐点突变确定计算 $\Delta\sigma_l$ 时，反拉过程产生的预应力筋与管壁之间的摩擦损失，锚具及夹片变形、接缝压缩损失、混凝土的弹性压缩损失 $\Delta\sigma_{l4}$ 可忽略不计， $\Delta\sigma'_{l1} = \Delta\sigma'_{l2} = 0$ ，仅需考虑反拉过程中预应力筋与锚口之间的摩擦损失 $\Delta\sigma_{l7}$ 。因此，检测前宜进行专项试验确定 $\Delta\sigma_l$ 、 $\Delta\sigma_i$ ，主要原因是多个因素相互影响导致每个因素造成的预应力损失值理论计算很难确定。

2 根据检测数据绘制反拉力-位移曲线，理想状态下反拉力-位移曲线如图 6.4.3，图中 OA 段为反拉端初应力作用下预应力筋被预紧阶段，AB 段为反拉段预应力筋的弹性变形阶段，BC 段预应力筋拉动后自由段和反拉端预应力筋的共同变形阶段，B 点对应的力值即为锚下有效预应力值。因此，B 点除用式 5.4.1 计算，在一定条件下亦可通过曲线斜率变化率等方式可计算机自动判读，而不用不计算 $\Delta\sigma_l$ 、 $\Delta\sigma_i$ ；但现场实际检测得到的反拉力-位移曲线，由于反拉损失应力影响，拐点的出现并非特别明显，自动判读时宜结合实际并与理论计算综合得出。

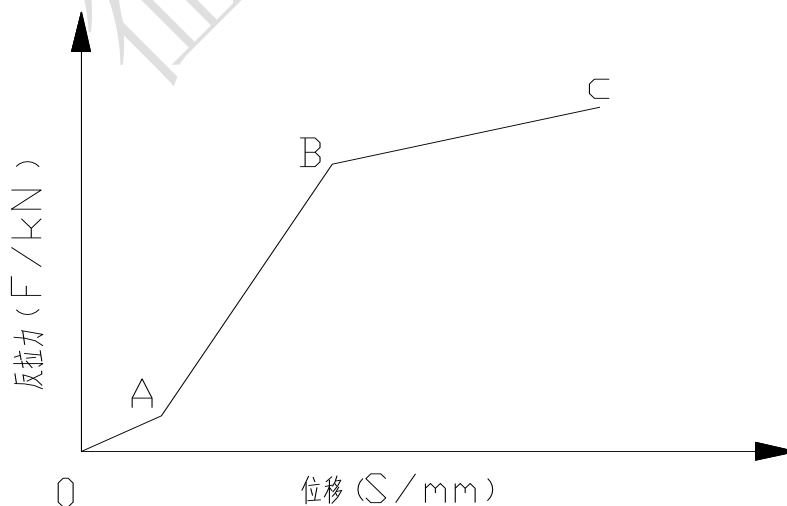


图 6.4.3 理想状态下反拉法检测绘制的反拉力-位移曲线

3 当反拉终止应力为设计张拉控制应力且反拉补偿应力 $\Delta\sigma_l$ 为 0 时（反拉力

-位移曲线未出现拐点 B 点)，锚下有效预应力检测结果宜给出下限值。

5.4.2 反拉补偿应力 $\Delta\sigma_l$ 可按下列式计算：

$$\text{曲线型: } \Delta\sigma_l = \frac{(\delta - \delta_0)E}{L} \left[\frac{kL + \mu\theta}{1 - e^{-(kL + \mu\theta)}} \right] \quad (5.4.2-1)$$

$$\text{直线型: } \Delta\sigma_l = \frac{(\delta - \delta_0)E}{L} \quad (5.4.2-2)$$

式中 δ ——反拉终止时，实测预应力筋伸长量，m

δ_0 ——反拉终止时，预应力筋反拉段理论伸长量，m；

L ——预应力筋反拉影响长度，m；

E ——预应力筋弹性模量，MPa；

θ ——预应力筋张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角之和，

rad；

k ——孔道每米局部偏差对摩擦的影响系数；

μ ——预应力筋与孔道壁的摩擦系数。

5.4.3 预应力筋反拉段理论伸长量

$$\delta_0 = \frac{\sigma_p l_r}{E} \quad (5.4.3)$$

式中 δ_0 ——反拉终止应力时，预应力筋反拉段理论伸长量，m；

l_r ——预应力筋反拉段长度，m；

E ——预应力筋弹性模量，MPa。

6 质量评定

6.1 一般规定

6.1.1 现场检测结束后,应对锚下预应力检测项目的相关指标进行质量评定。

6.1.2 锚下预应力检测项目的质量评定指标包括锚下有效预应力偏差、同束不均匀度、同断面不均匀度。

条文说明

对锚下预应力检测项目评价,应给出锚下有效预应力检测值。单根张拉的预应力构件根据锚下有效预应力检测值计算得出锚下有效预应力偏差、锚下有效预应力同束不均匀度、同断面不均匀度指标,整束张拉的预应力构件根据锚下有效预应力检测值计算得出锚下有效预应力偏差、锚下有效预应力同断面不均匀度,并进行合格判定。

6.2 锚下有效预应力标准值

6.2.1 锚下有效预应力标准值获取方式有三种:标准试验检测得出试验值、理论计算得出计算值、基于数理统计得到经验值。

条文说明

锚下有效预应力标准值宜采用标准试验检测得出试验值确定,当无可靠试验数据时,再通过理论计算得出计算值或基于数理统计得到经验值确定。

6.2.2 锚下有效预应力标准值的试验值可采用以下标准试验方法得到:

在测试现场按设计图纸制作标准试验梁,通过在预应力筋锚下安装测力传感器进行标准张拉试验,直接测读出锚下有效预应力值。通过不少于3次试验,

求得锚下有效预应力的算术平均值作为标准试验的锚下预应力标准值。

条文说明

标准试验检测得出最大试验值、最小试验值与算术平均值偏差不大于 1%，否则试验结果无效。

6.2.3 锚下有效预应力标准值的计算值可采用下列公式计算得到：

$$\text{先张法预应力筋: } F_s = [\sigma_{con} - (\sigma_{l2} + \sigma_{l8})] \times \frac{A_{pk}}{1000} \quad (6.2.3-1)$$

$$\text{后张法预应力筋: } F_s = [\sigma_{con} - (\sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l4})] \times \frac{A_{pk}}{1000} \quad (6.2.3-2)$$

式中： F_s ——锚下有效预应力标准值，kN；

σ_{con} ——设计张拉控制应力，MPa；

σ_{l1} ——预应力筋与管道壁之间的摩擦，MPa；

σ_{l2} ——锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩损失（锚固损失），MPa；

σ_{l4} ——混凝土的弹性压缩损失，MPa；

σ_{l8} ——台座的弹性变形，MPa；

A_{pk} ——预应力筋的公称截面面积， mm^2 ；

条文说明

1 各项预应力损失可参见附录 C 相关公式计算。

2 体外预应力桥梁结构锚下有效预应力标准值的计算时，式 6.2.3-2 可忽略预应力筋与管道壁之间的摩擦。

3 对于有锚口摩阻损失的锚具， σ_{con} 应为扣除锚口摩阻损失 σ_{l7} 后的锚下张拉控制应力；锚口摩阻损失 σ_{l7} 宜通过试验确定。

6.2.4 锚下有效预应力标准值的经验值可采用以下数理统计方法得到：

公路预应力桥梁工程中应用最广泛的预应力筋为抗拉强度标准值 $f_{pk}=1860\text{MPa}$ 、公称直径 $A_{pk}=15.2\text{mm}$ 的钢绞线。结合相关技术规程及试验验证情况，给出 20m 及以上预应力梁单根钢绞线张拉锚固后，锚下有效预应力标准值的统计值，见表 6.2.4。

表 6.2.4 锚下有效预应力标准值的数理统计经验值

设计张拉控制应力 σ_{con} (MPa)	锚下有效预应力标准值 F_s (kN)
$0.7f_{pk}$	168
$0.75f_{pk}$	178

条文说明

1 对于 20m 以下的预应力梁，锚下有效预应力标准值应按标准试验测试或理论计算方法获取。

2 本条所述的相关技术规程是指《桥梁预应力及索力张拉施工质量检测验收规程》(CQJTG/T F81-2009)。

6.3 锚下有效预应力质量评定

6.3.1 锚下预应力检测项目评定指标的计算可按以下公式进行：

1 锚下有效预应力偏差

$$\tau = \frac{F_e - F_s}{F_s} \times 100\% \quad (6.2.3-1)$$

式中： τ —— 锚下有效预应力偏差；

F_s —— 锚下有效预应力标准值，kN；

F_e —— 锚下有效预应力，kN。

2 锚下有效预应力同束不均匀度

$$g = \frac{F_{e_{\max}} - F_{e_{\min}}}{F_{e_{\max}} + F_{e_{\min}}} \times 100\% \quad (6.2.3-2)$$

式中： g —— 锚下有效预应力同束不均匀度；

$F_{e_{\max}}$ —— 同一束中单根预应力筋锚下有效预应力最大检测值，kN；

$F_{e_{\min}}$ —— 同一束中单根预应力筋锚下有效预应力最小检测值，kN。

3 锚下有效预应力同断面不均匀度

$$\gamma = \frac{F'_{e_{\max}} - F'_{e_{\min}}}{F'_{e_{\max}} + F'_{e_{\min}}} \times 100\% \quad (6.2.3-3)$$

式中： γ —— 锚下有效预应力同断面不均匀度；

$F'_{e_{\max}}$ —— 同断面中同束预应力筋平均单根锚下预应力最大检测值，kN；

$F'_{e_{\min}}$ —— 同断面中同束预应力筋平均单根锚下预应力最小检测值，kN。

条文说明

同束不均匀度、同断面不均匀度计算，只选取同一束中单根预应力筋锚下有效预应力、同断面中同束预应力筋平均单根锚下预应力的最大值和最小值。

6.3.2 锚下有效预应力偏差 τ 、同束不均匀度 g 及同断面不均匀度 γ 应满足表

6.3.2 的要求：

表 6.3.2 锚下预应力检测项目相关指标判定标准

检测指标	允许偏差 (%)
锚下有效预应力偏差 τ	± 5
锚下有效预应力同束不均匀度 g	5
锚下有效预应力同断面不均匀度 γ	2

条文说明

表 6.3.2 给出的锚下有效预应力偏差 σ 、同束不均匀度 ρ 及同断面不均匀度 γ 的允许偏差，参考自《公路桥涵施工技术规范》（JTG/TF50-2011）中。

6.3.3 锚下有效预应力检测项目的相关指标满足 6.3.2 条时，评定合格，否则评定不合格。

6.3.4 预应力筋滑丝断丝、夹片破裂、锚具变形等数量超过表 3.1.4 的限制值时，评定不合格。

6.3.5 当锚下预应力检测评定不合格时应采用有效措施进行调整，直至满足要求。

条文说明

因张拉控制应力不足造成的锚下有效预应力偏差超出-5%，采用反拉法检测且反拉终止应力为设计张拉控制应力 σ_{con} ，则该孔预应力筋锚下有效预应力得到了补偿，可不进行调整；其他不合格情况，则需对该孔预应力筋先卸锚，重换钢绞线、锚夹具后再张拉，检测合格后方可使用。

7 安全措施

7.0.1 桥梁锚下预应力检测前应做好各种危险源辨识、评估及其安全应对措施，防止意外事故的发生。

7.0.2 检测区域内应设置明显的防护、警示及引导标志。进入检测区域必须佩戴安全防护用品，**预应力筋两端的正面严禁站人和穿越。**

7.0.3 对检测作业使用的张拉机械、仪器设备及辅助工具，应符合其安装、维护、使用等相关规定，并定期检查、检验，使其保持良好的工作状态。

7.0.4 高空、水上检测作业应对相关人员进行安全技术交底，并设置必要的安全防护措施；在强风、浓雾、暴雨、雷电和暴风雪等恶劣天气情况下，不得开展现场检测作业。

7.0.5 应核实验算结构和支架的安全性；在分级加、卸载试验过程中，应通过观察异常反应、测试数据等进行分析判断。

7.0.6 检测设备应轻拿轻放、安置稳固；运输过程中应按设备要求包装防护。

本标准用词说明

1 本标准执行严格程度的用词采用下列写法：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”“或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本标准的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。

2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准或行业标准时，应表述为“应符合《××××××》（×××）的有关规定”。

3) 当引用本标准中的其他规定时，应表述为“应符合本标准第×章的有关规定”、“应符合本标准第×.×节的有关规定”、“应符合本标准第×.×.×条的有关规定”或“应符合按本标准第×.×.×条的有关规定执行”。

附录 A 应变法检测设备技术要求

应变（或应力）测试设备应满足表 A.0.1 的要求。

表 A.0.1 应变（或应力）测试技术要求

量测内容	仪表名称	最小分化值 ($\mu\epsilon$)	常用量测范围 ($\mu\epsilon$)	数据采集分析系统	
				仪器名称	技术参数
应变	电阻应变仪	1	± 20000	应变测试分析系统	①测量范围： $\pm 20000\mu\epsilon$ ； ②分辨率： $1\mu\epsilon$
	振弦式应变计	1	± 3000	振弦式传感器、频率测量仪或综合测试仪	①测量范围：振弦频率 400-6000Hz； ②频率测量精度： 0.05Hz

注：1.宜采用标距不大于 6mm 小标距应变计。

2.或根据实际检测情况采用符合技术要求的其他设备。

附录 B 应变法检测异常数据剔除

B.0.1 检测过程因粘贴表面的应变片或应变计不牢固，粘贴部位或附近出现异常造成有效应变值发生明显偏大或偏小，应予以剔除。

B.0.2 应变异常值计算

1 计算所有测点应变平均值及标准差。

$$\Delta\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\varepsilon_i \quad (B.0.3-1)$$

$$S = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta\varepsilon_i - \Delta\bar{\varepsilon})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (B.0.3-2)$$

式中： $\Delta\bar{\varepsilon}$ — 应变平均值；

S — 应变标准方差。

2 某测点应变值与平均值之差的绝对值大于标准偏差与肖维勒系数之积，则该测点应变值异常，应予以剔除。

$$|\Delta\varepsilon_i - \Delta\bar{\varepsilon}| > \kappa S \quad (B.0.3-3)$$

κ —肖维勒系数，见表 B.0.2。

表 B.0.2 肖维勒系数表

N	3	4	5	6	7	8	9
κ	1.38	1.53	1.65	1.73	1.80	1.86	1.92
N	10	11	12	13	14	15	20
κ	1.96	2.00	2.03	2.07	2.10	2.13	2.24

附录 C 反拉法检测过程相关损失计算

C.1 反拉法检测过程的孔道摩阻损失 $\Delta\sigma'_n$

C.1.1 本条给出反拉法检测锚下有效预应力时，预应力筋与管壁之间的摩阻损失 $\Delta\sigma'_n$ 的理论计算方法。

C.1.2 反拉法检测锚下有效预应力时，预应力筋与管壁之间摩擦引起的预应力损失 $\Delta\sigma'_n$ ，可按式(1)进行计算：

$$\sigma'_n = \sigma_{con} [1 - e^{-(kx + \mu\theta)}] \quad (C.1.2)$$

式中： $\Delta\sigma'_n$ — 反拉检测预应力筋与管壁之间的孔道摩擦损失，MPa；

σ_{co} — 设计张拉控制应力，MPa；

x — 预应力筋反拉端至计算截面的孔道长度，m；

θ — 预应力筋反拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角之和，

rad；

k — 孔道每米局部偏差对摩擦的影响系数；

μ — 预应力筋与孔道壁的摩擦系数。

C.2 反拉法检测过程的锚具及夹片变形、接缝压缩损失 $\Delta\sigma'_{i2}$

C.2.1 本条给出反拉法检测锚下有效预应力时，锚具及夹片变形、接缝压缩损失 $\Delta\sigma'_{i2}$ 的理论计算方法。

C.2.2 反拉过程引起的锚具变形、钢筋回缩、接缝压缩损失 $\Delta\sigma'_{i2}$ 的计算，应考虑反拉过程中反摩擦的影响。

C.2.3 反拉过程引起的锚具及夹片变形、接缝压缩损失 $\Delta\sigma'_{i2}$ 的计算方法

1 反摩擦影响长度 l_f （见图 C.2.3）可按下列公式计算：

$$l_f = \sqrt{\frac{\sum \Delta l \cdot E_p}{\Delta\sigma_d}} \quad (\text{C.2.3-1})$$

式中， $\Delta\sigma_d$ 为单位长度由管道摩擦引起的预应力损失，按下列公式计算：

$$\Delta\sigma_d = \frac{\sigma_0 - \sigma_l}{l} \quad (\text{C.2.3-2})$$

式中： σ_0 ——反拉端锚下控制应力，反拉检测时为 σ_{con} ；

σ_l ——预应力筋扣除沿途孔道摩擦损失后锚固端应力；

l ——反拉端至锚固端的距离；

2 当 $l_f \leq l$ 时，预应力筋离反拉端 x 处考虑反摩擦后的预应力损失 $\Delta\sigma'_x(\sigma'_{i2})$ ，可按下列公式计算：

$$\Delta\sigma'_x(\sigma'_{i2}) = \Delta\sigma \frac{l_f - x}{l_f} \quad (\text{C.2.3-3})$$

$$\Delta\sigma = 2\Delta\sigma_d l_f \quad (C.2.3-4)$$

式中， $\Delta\sigma$ 为当 $l_f \leq 1$ 时在 l_f 影响范围内，预应力筋考虑反摩擦后在反拉端锚下的预应力损失值。如 $x \geq l_f$ ，表示 x 处预应力筋不受反摩擦的影响。

3 当 $l_f > 1$ ，预应力筋离反拉端 x' 处考虑反摩擦后的预应力损失 $\Delta\sigma'_x(\sigma'_{l2})$ ，可按下列公式计算：

$$\Delta\sigma'_x(\sigma'_{l2}) = \Delta\sigma'_0 - 2x'\Delta\sigma_d \quad (C.2.3-5)$$

式中 $\Delta\sigma'_0$ 为当 $l_f > 1$ 时在 l 范围内，预应力筋考虑反摩擦后在张拉端锚下的预应力损失值，可按以下方式求得：令图中“ $ca'bd$ ”等腰梯形面积： $A = \sum \Delta l \cdot E_p$ 式算得到 cd ，则 $\Delta\sigma' = cd$ 。

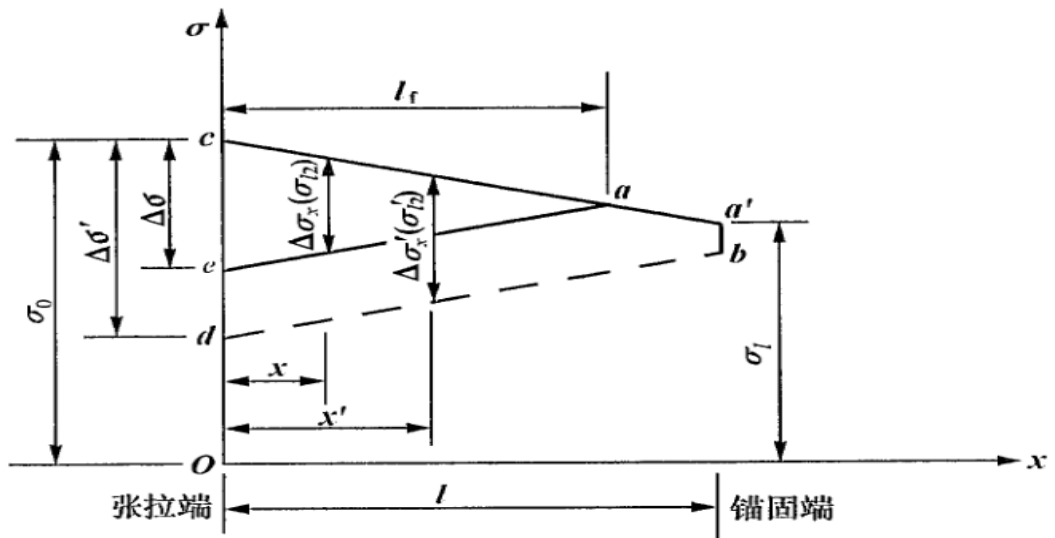


图 C.2.3 考虑反摩擦后预应力损失计算简图

图中： caa' 表示预应力筋扣除管道正摩擦损失后的应力分布线。

eab 表示 $l_f \leq l$ 时，预应力筋扣除管道正摩擦和回缩（考虑反摩擦）损失后的应力分布线。

bd 表示 $l_f > l$ 时，预应力筋扣除管道正摩擦和回缩（考虑反摩擦）损失后的应力分布线。

caa' 为等腰三角形； $ca'bd$ 为等腰梯形。

C.3 反拉法检测过程的混凝土弹性压缩损失 $\Delta\sigma'_{l4}$

C.3.1 本条给出反拉法检测锚下有效预应力时，混凝土弹性压缩损失 $\Delta\sigma'_{l4}$ 的理论计算方法。

C.3.2 后张法预应力混凝土构件，当同一截面的预应力筋逐束反拉时，由混凝土弹性压缩引起的预应力损失，可按下列简化公式计算：

$$\sigma'_{l4} = \frac{m-1}{2} \alpha_E \Delta\sigma_{pe} \quad (\text{C.3.2-1})$$

式中： l ——预应力筋的束数；

$\Delta\sigma_{pe}$ ——在计算截面的全部钢筋重心处，由张拉一束预应力筋产生的混凝土法向压应力（MPa），取各束的平均值。

C.4 反拉法检测过程的预应力筋与锚口之间的摩擦损失 $\Delta\sigma'_{\text{f}}$

C.4.1 在有条件的情况下，锚口摩阻 $\Delta\sigma'_{\text{f}}$ 宜通过现场试验进行测试获得，测试方法参见《公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器》（JTT 329-2010）中 7.6.2 章节。

C.4.2 预应力筋与锚口之间的摩擦损失 $\Delta\sigma'_{\text{f}}$ 一般由锚具生产厂商通过产品体系试验获得并明示。一般情况，锚具生产厂商测得的锚口摩擦损失率不大于 3%。

征求意见稿

附录 D 报告格式

D.1 报告封面格式

No. (报告编号)

检测报告

工程名称: _____

检测项目: 公路桥梁锚下预应力

委托单位: _____

发送日期: _____

检测单位 (盖章)

D.2 报告扉格式

No. (报告编号)

检测报告

承担单位：

资质等级：

获证日期：

证书编号：

发证机构：

项目负责：（签字）

报告审批：（签字）

批 准：（签字）

主要参加人员：

D.3 报告页

检测报告

第×页，共×页

检测单位：

报告编号：

委托单位		委托编号					
工程名称		工程部位					
检测依据		检测时间					
主要仪器设备 及编号							
项目概况							
检测结果	(1) ×××基本要求检测结果						
	序号	预应力 筋编号	基本要求检测结果				
			结构混凝土强度、龄期、外观、尺寸、工艺及预应力筋滑丝断丝、夹片破裂、锚具变形等基本要求检测结果				
检测结果	(2) ×××锚下有效预应力检测结果						
	序号	预应力 筋编号	设计张拉 控制力 (kN)	锚下有效 预应力标 准值 (kN)	锚下有效 预应力检 测值 (kN)	锚下有效 预应力偏 差 (%)	同束 不均匀度 (%)
检测结论	(1) ×××检测结论						
	序号	预应力筋编号	检测结论	序号	预应力筋编号	检测结论	
			合格/不合格			合格/不合格	
备注							

检测：

审核：

签发日期： 年 月 日 (专用章)