

钢绞线张拉后 48 h 内锚下预应力随时间衰减效应研究

蒋庆¹, 徐嵩基², 李涛¹, 高华睿^{3*}, 周昆¹, 徐传昶⁴

(1. 山东高速建设管理集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东高速湖北发展有限公司;

3. 山东大学 岩土与结构研究中心; 4. 山东高速工程检测有限公司)

摘要:为了揭示后张法 PC 梁张拉后、压浆前 48 h 内预应力损失变化规律,通过现场试验和数值模拟相结合的方法,对张拉施工后 48 h 内 20 m 预应力混凝土梁的锚下有效预应力变化开展研究,建立了时间效应影响下 16 束预应力钢束的预应力损失率数学拟合模型;考虑实际工程中的 6 种随机因素影响,通过采用拉丁超立方抽样的方式,建立了 21 组随机有限元模型;对比分析有限元模型与试验测试拟合值。研究表明:实际测试的预应力损失率呈对数函数形式增长;实际测试中的预应力损失比数值模拟理论计算值大。

关键词:桥梁工程;锚下有效预应力损失;现场试验;时间效应;随机有限元

1 前言

在中国桥梁建设工程中,预应力混凝土梁桥长期存在典型的下挠、开裂病害,其原因主要有:预应力混凝土施工质量不过关,预应力张拉施工质量不过关,预应力波纹管压浆施工质量不过关。其中,预应力张拉施工是最难以控制的一个环节,属于隐蔽工程。早期的预应力钢绞线张拉施工基本是由人工操作电动油泵进行张拉,这种施工方法最大的缺陷是:受施工人为因素影响,很难满足桥梁施工技术规范中张拉速率和稳压时间等各项要求。除有效张拉力不达标的情况外,同时还存在同束预应力钢绞线各根张拉力不均匀的现象,这种情况下容易导致钢绞线出现拉断或者滑丝。此外,外界环境条件以及材料自身特性的共同作用容易导致预应力混凝土梁桥有效预应力不断衰减。设计阶段,主要采用规范中理论公式估算各项预应力损失值,但未对整个施工及运营过程中预应力变化进行准确计算。施工阶段,目前普遍利用张拉控制力与钢绞线延伸量双控张拉施工过程,较之前的张拉工艺相比,其施工质量得以提升,但是其对每根钢绞线能否达到设计值仍无法精确保证。

基于以上情况,需要一种预应力钢绞线有效张拉

力的测试技术来对工程质量进行动态检测,进而达到全面提升预应力张拉施工质量的目的。开展施工期预应力混凝土梁有效预应力检测技术的研究对保障桥梁的安全性、耐久性十分重要,拉脱法检测技术是目前工程应用性较强的一项技术。

通过拉脱法对预应力钢绞线进行反拉,使得钢绞线与夹片脱开,脱开瞬间用高精度仪器采集,从而得到预应力束内的有效预应力。检测过程中,分析张拉力与位移之间的关系(即张拉力-延伸量曲线)如图 1 所示,C 点即对应得到锚下有效预应力值。

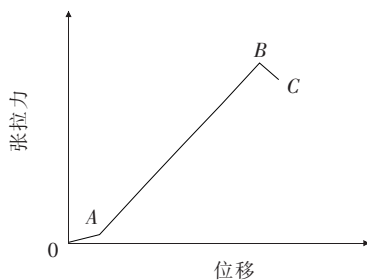


图 1 张拉力-延伸量曲线

但是拉脱法的应用需要考虑以下关键问题:规范中规定张拉钢绞线后 48 h 内需要压浆,检测人员需要在压浆前进行张拉力检测,不能保证“即拉即测”,为准确测试不同时刻的预应力剩余量,保证检测时机的统

收稿日期:2019-10-30(修改稿)

基金项目:山东省交通科技项目(编号:2017B35);山东省高等学校科技计划项目(编号:J15LG02)

作者简介:蒋庆,男,大学本科。E-mail:421334170@qq.com

* 通信作者:高华睿,男,硕士研究生。E-mail:gaohuarui0330@163.com

一性,因此需要建立起 48 h 内钢绞线随时间衰减变化模型,准确评估时间衰减后锚下有效预应力的剩余量,以指导合理的检测时机。

2 测试方案

该研究依托现场试验得到 20 m 预应力混凝土箱梁钢绞线 48 h 内锚下有效预应力的变化测试值,通过有限元模拟出施工阶段预应力混凝土梁有效预应力损失变化的规律,通过对比分析确认实测数据和理论计算值的有效性,进行锚下预应力时间效应分析。

2.1 测试梁简介

选取山东省某在建高速公路改扩建工程预制梁场中 20 m 预制箱梁 4 片,截面尺寸相同,其中箱梁的预应力束形式有两种类型:A 类和 B 类。主要材料:预制主梁混凝土采用 C50 混凝土,钢绞线采用 ϕ^s 15.2 mm,抗拉强度标准值 $f_{pk}=1\ 860$ MPa,张拉控制应力 $\sigma=0.75f_{pk}$ 。预制混凝土梁抗压强度达到设计混凝土强度等级的 90%后张拉预应力钢束。箱梁张拉顺序为 N1→N2→N3,具体梁体规格参见表 1 及图 2。

表 1 梁体规格

梁体 编号	梁体长 度/m	预应力筋 数量/束	张拉控制 应力/MPa	测试位置
1	20	8	1 395	N1~N4(单侧)

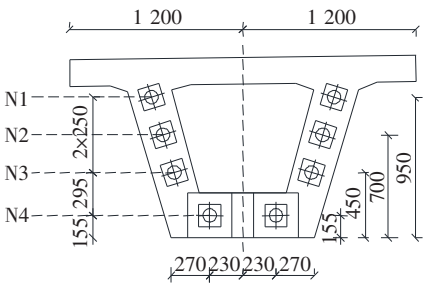


图 2 试验梁截面形式(单位:mm)

2.2 试验设备及测试流程

自动化综合测试系统由穿心式压力传感器、温度传感器及相关配件组成。并将实时采集的压力值及温度数据上传至电脑内储存。

在梁体混凝土浇筑并养生 7~8 d 后,进入预应力钢束的张拉施工阶段,在预应力筋穿束张拉前,将压力传感器安装至锚具与梁端之间(仅在梁体单侧放置),即进入张拉阶段;在张拉过程中,保持 1 次/min 采集锚下预应力数值和环境温度数值,实时监控锚下预应力变化过程。待张拉结束 3 h 后,将设备调成自动采集模式,采样频率为 1 次/(10 min)。

3 测试结果及讨论

3.1 测试结果

2 880 min(48 h)内各束钢绞线预应力剩余率随时间及温度变化曲线如图 3 所示。

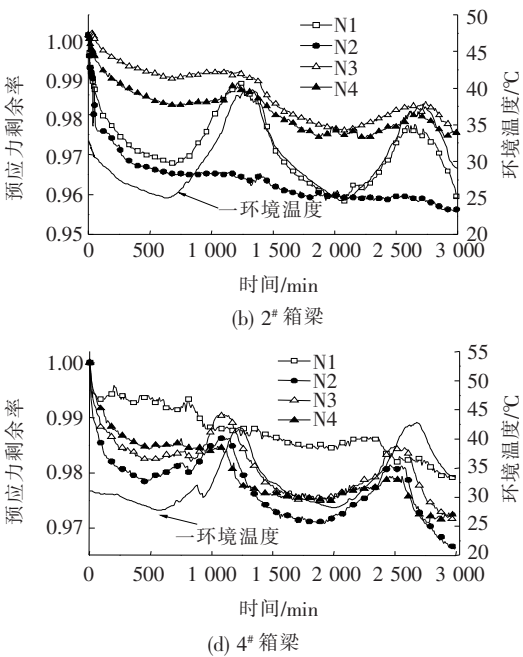
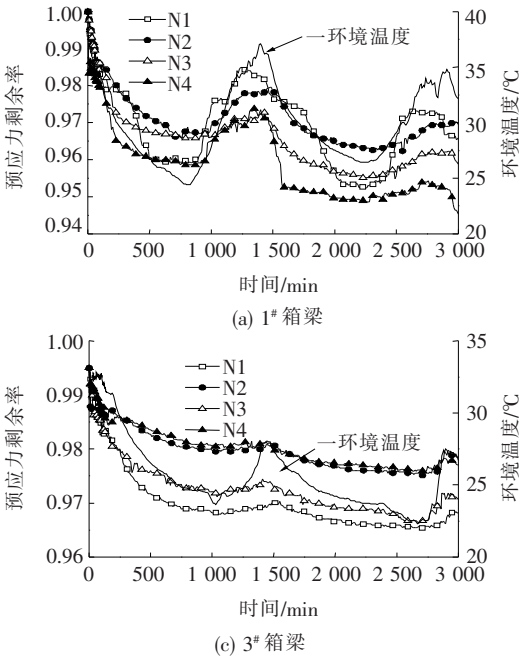


图 3 钢绞线预应力剩余率随时间、温度变化曲线

从图3可以看出:2 880 min(48 h)内,环境温度对锚下预应力值有明显影响,预应力混凝土结构受环境温度循环的作用会发生明显的波动,因此每束钢绞线内有效预应力值呈周期性正弦波形曲线衰减。

3.2 张拉结束后48 h内时间衰减效应

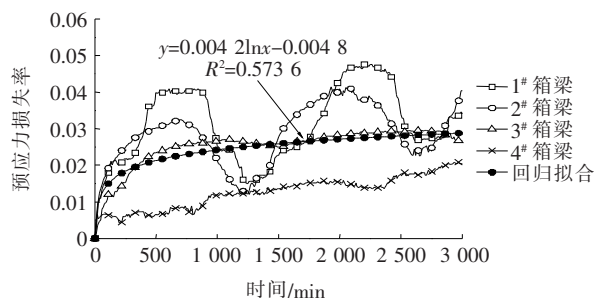
分析实测数据,得到48 h内16束钢绞线预应力

损失率曲线。分别提取N1、N2、N3及N4钢绞线损失率进行分析,建立各束钢绞线预应力损失变化数学回归模型,如图4所示。

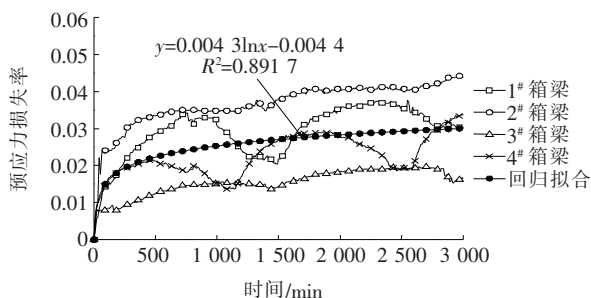
拟合得到的各束损失率数学模型表达式为:

N1:

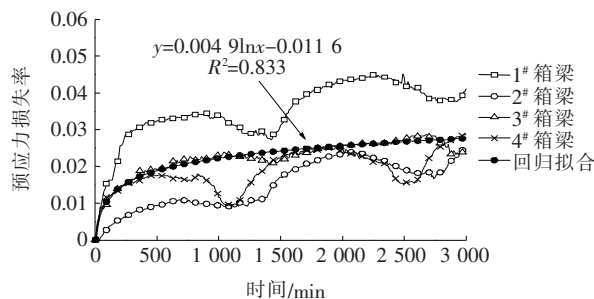
$$y=0.004\ 2\ln t-0.004\ 8 \quad (1)$$



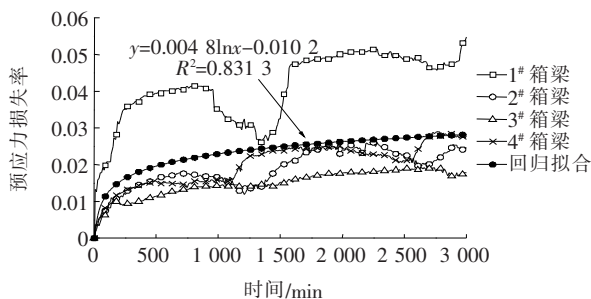
(a) N1 钢绞线损失率变化



(b) N2 钢绞线损失率变化



(c) N3 钢绞线损失率变化



(d) N4 钢绞线损失率变化

图4 钢绞线损失率变化及线性拟合结果

N2:

$$y=0.004\ 3\ln t-0.004\ 4 \quad (2)$$

N3:

$$y=0.004\ 9\ln t-0.011\ 6 \quad (3)$$

N4:

$$y=0.004\ 8\ln t-0.010\ 2 \quad (4)$$

式中: y 为钢绞线预应力损失率; t 为张拉后经过的时间($t>1$)(min)。

4 预应力损失变化随机有限元模拟

由于实际施工过程中,梁体施工受多重因素的影响,包括混凝土立方体抗压强度 X_1 、张拉控制应力 X_2 、环境年平均湿度 X_3 、混凝土弹性模量 X_4 、混凝土实际重量系数 X_5 、钢绞线回缩量 X_6 、实际加载龄期 X_7 等。该7种影响因素对梁体结构的预应力体系性能影响较为敏感,施工过程中很难避免由于操作误差导致的影响因素取值的变化,故针对7种影响因素的

不确定性展开随机有限元模型分析,采用拉丁超立方抽样的方法抽取随机影响参数,避免了重复抽样,能以较小的样本量反映总体的变异规律,抽样的次数可大大减少。

研究建立了考虑施工过程的预应力混凝土梁桥实体有限元单元模型,采用拉丁超立方抽样方法开展了随机有限元分析。

根据已有研究基础,对各个影响参数取值为:① GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》认为C50混凝土立方体抗压强度 X_1 的变异系数为0.149;②有效预应力的对长期变形有直接的影响,取决于张拉控制应力的值和预应力损失。规范规定考虑超拉后张拉控制应力 X_2 最大为 $0.8f_{ptk}$ (1 488 MPa),张拉控制应力取用截尾正态分布,均值为1 395 MPa,截断上限取1 488 MPa;③根据中国气象官方网站的天气预报信息,得到该研究所计算桥梁的桥址处年平均相对湿度 $X_3=80\%$,同时认为年平均相对湿度服从 $x<100\%$ 、变异系数为0.039的截尾正态分布;④混凝土

土弹性模量 X_4 服从变异系数 0.04 的正态分布;⑤ 桥梁施工期由于施工原因导致的实际重量 X_5 分布服从正态分布,实际重量为设计重量的 1.05 倍,变异系数为 0.1;⑥ 钢绞线张拉施工结束后产生的瞬时损失是

由于夹片回缩导致的,该钢绞线回缩量 X_6 服从均值为 5.279 的正态分布;⑦ 混凝土龄期 X_7 服从 $\mu=7$ d 的正态分布。影响因素参数如表 2 所示,采用拉丁超立方抽样方法,得到 21 组随机数,如表 3 所示。

表 2 影响因素参数

项目	$X_1/\text{MPa}(>40)$	$X_2/\text{MPa}(<1\ 488)$	$X_3/\%(<100\%)$	X_4/GPa	X_5	X_6/mm	X_7/d
均值	50.00	1 395.0	80.00	34.500	1.050	5.279	5~9
标准方差	7.45	139.5	3.12	1.094	0.105	1.365	

表 3 随机参数

编号	X_1/MPa	X_2/MPa	$X_3/\%$	X_4/GPa	X_5	X_6/mm	X_7/d
1	41.78	1 320.00	80.11	35.81	1.13	4.88	5.83
2	44.83	1 140.00	79.78	35.26	1.21	5.36	8.36
3	48.95	1 257.00	78.46	31.13	0.93	3.76	7.03
4	53.00	1 475.00	78.70	34.09	0.98	6.88	6.40
5	45.52	1 304.00	77.45	36.65	0.99	5.38	7.48
6	68.79	1 457.00	76.54	34.31	1.16	3.99	7.94
7	55.24	1 244.00	77.79	32.94	1.08	2.94	8.61
8	58.83	1 469.00	79.24	35.48	1.02	5.06	5.07
9	51.65	1 357.00	74.06	34.20	1.08	4.82	7.26
10	50.69	1 400.00	77.19	33.68	1.12	5.85	8.78
11	46.57	1 338.00	75.42	33.49	1.03	4.56	7.67
12	55.86	1 299.00	81.41	36.08	1.03	7.12	6.57
13	60.71	1 201.00	81.93	34.54	1.10	4.29	6.75
14	47.78	1 278.00	80.24	33.91	0.95	4.35	6.27
15	48.34	1 381.00	83.75	35.38	0.96	6.51	7.29
16	41.44	1 169.00	83.23	35.09	0.85	6.04	6.04
17	57.27	1 353.00	82.49	34.83	1.07	6.23	5.58
18	50.28	1 420.00	80.58	34.68	1.05	5.66	8.21
19	53.87	1 390.00	80.95	33.78	1.25	8.72	5.41
20	43.99	1 443.00	85.61	34.94	1.17	6.42	8.90
21	52.55	1 410.00	84.79	33.16	0.90	3.23	5.30

将 48 h 分为 10 个施工阶段,每个施工阶段时长为 0.2 d,采用无黏结式预应力钢绞线模拟无压浆状态下的钢绞线,梁体单元采用平面杆系单元,计算模型参见图 5。

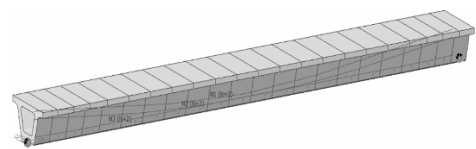


图 5 有限元模型

有限元计算结果和试验测试拟合结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出:

(1) 预应力损失率的实测拟合值比有限元数值分析结果偏大。

(2) 前 500 min,实际测试拟合的预应力损失率变化增长明显,500 min 后损失率逐渐趋于平缓;有限元计算结果显示预应力损失率也会随时间趋于平缓,但是在前期发展过程中没有实测值变化明显。

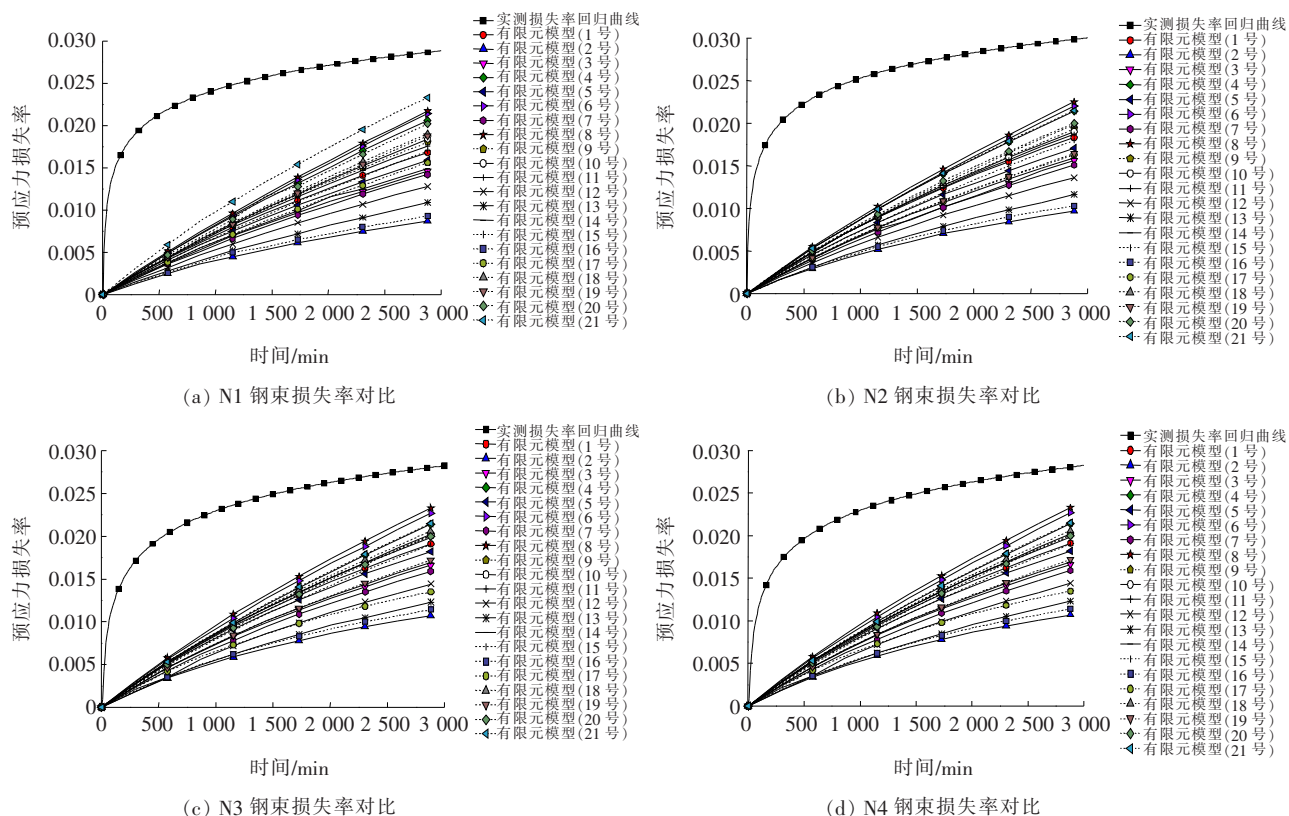


图6 实测值与有限元计算值对比

(3) 由统计数据可知在目前预应力张拉施工过程中,规范中规定的理论损失值计算偏小,设计时需注意。

5 结论

(1) 基于现场测试结果,通过拟合回归得到3种类型钢绞线预应力损失率数学模型表达式,该损失率模型呈对数函数形式变化。

(2) 前500 min测试中,实测值拟合的预应力损失率变化增长明显,500 min后损失率逐渐趋于平缓;有限元计算结果显示预应力损失率亦随时间趋于平缓,但在前期发展过程中没有实测值变化明显。

参考文献:

- [1] 吕志涛,潘钻峰.大跨径预应力混凝土箱梁桥设计中的几个问题[J].土木工程学报,2010(1).
- [2] 王艳,陈淮,李杰.大跨径PC连续刚构桥长期下挠影响因素分析[J].中外公路,2014(4).
- [3] 黄侨,吴红林,王宗林.基于时效分析理论的预应力混凝土结构分析[J].同济大学学报(自然科学版),2003(7).
- [4] 黄海东,向中富.基于预应力损失识别的连续刚构桥内力计算方法[J].公路交通科技,2008(6).
- [5] GUO Tong, SAUCE R, DAN MF, et al. Time-Depend-

ent Reliability of PSC Box-Girder Bridge Considering Creep, Shrinkage, and Corrosion[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(1): 29-43.

- [6] 郭琦,贺拴海.大跨度PC桥梁有效预应力衰变行为监测与评估模型研究[J].公路交通科技,2011(5).
- [7] 劳晓春,汤立群,任鹏,等.桥梁内部预应力钢绞线应变的长久监测与分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2003(11).
- [8] 张小鹏,王象良,邢怀念,等.预应力钢绞线力学性能试验研究[J].金属制品,2016(3).
- [9] 杨国强,徐向锋,姚晨,等.拉脱法在检测锚下有效张拉力的应用[J].公路,2016(10).
- [10] 詹桂超,刘冠之.基于拉脱法的预应力钢绞线张拉力测试分析[J].公路与汽运,2016(3).
- [11] 张峰,高磊,徐向锋,等.施工期钢绞线锚下有效预应力测试技术[J].东北大学学报(自然科学版),2017(8).
- [12] 张峰,高磊,韩福州.预应力钢绞线夹片式锚具咬合力试验[J].应用基础与工程科学学报,2017(6).
- [13] 姜天华,龚杰.预应力混凝土桥梁挠度的敏感性分析[J].中外公路,2015(5).
- [14] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S].
- [15] 张运涛,孟少平.基于响应面法的大跨连续刚构桥长期变形预测[J].土木工程学报,2001(8).
- [16] JTG D62-2012 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].