

# 装配式混凝土梁预应力损失试验研究

张建, 王永光\*, 黄义涛, 孔祥韶, 吴卫国

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:**为评估在役预应力混凝土桥梁在可变荷载作用下的结构性能,研究重复荷载对梁体预应力损失及承载力的影响程度,以中国公路常见30 m跨度装配式预应力混凝土T梁为研究对象,基于相似理论设计并制作了两片缩尺比例为1:5试验模型梁。通过静力及疲劳加载试验,得到了预应力筋有效预应力及模型梁承载性能的变化规律。试验结果表明:预应力混凝土梁在重复荷载作用下存在预应力损失;在整个加载过程中预应力累积损失分为3个阶段,疲劳加载前期及后期预应力损失相对较大,加载中期预应力损失较小;200万次循环加载后预应力筋应力损失率在3%~5%范围内。

**关键词:**预应力混凝土梁;静力试验;疲劳试验;重复荷载;有限元方法;预应力损失;剩余承载力

预应力混凝土T梁在中国桥梁工程中已被广泛使用,其有效预应力大小及剩余承载力变化直接关系到桥梁在使用期间的安全性和可靠性。预制T梁在服役期间除了承受永久作用外,还要长期承受可变荷载作用,例如汽车荷载、风荷载等,随着可变荷载作用次数的增加,材料内部将产生累积疲劳损伤及刚度退化,进而引发梁体出现开裂及过度下挠等病害。

由于预应力混凝土梁自身组成材料的复杂性及预测结果的离散性,目前尚不能完全通过已有理论计算模型及数值模拟方法分析预应力混凝土构件的疲劳损伤,对此中国相关学者开展部分试验,但针对反复荷载作用下预应力混凝土梁预应力损失及剩余承载力的研究相对较少。冯秀峰、李进洲等根据疲劳荷载作用下预应力混凝土梁抗裂计算指出,在反复加载过程中受拉区混凝土抗拉强度和预应力筋有效预应力随循环次数增加逐渐降低;周履等根据CEB-FIP 1990模式规范关于重复荷载下混凝土疲劳应变计算公式,对文献[10]算例进行了计算,发现疲劳荷载作用下预应力筋有效预应力损失约为张拉控制应力的5.4%;钟明全等开展了预应力混凝土试验梁的静力及疲劳加载试验,发现当受压区混凝土最大应力接近 $0.4f_c$  ( $f_c$ 为混凝土抗压强度)时,静力强度可能会降低,而当最大应力小于 $0.4f_c$ 时,静力强度反而有所提高;曾丁等通过等

幅疲劳试验发现相对于张拉锚固后有效预应力,预应力累积损失值随循环次数呈指数关系增加;康健强分别对全预应力混凝土梁及A类预应力混凝土梁进行了疲劳试验研究,发现不同预应力度下预应力混凝土梁在疲劳加载过程中均存在预应力损失,两者在前70万次加载过程中预应力损失值差别较小,70万次后存在差异,在200万次循环加载后,A类预应力混凝土梁预应力损失值为全预应力混凝土梁预应力损失值的1.47倍。

在上述研究中,虽对预应力混凝土梁在反复荷载作用下预应力损失进行分析,并未明确预应力混凝土梁在重复荷载作用下预应力损失值。基于此,该文根据九站松花江特大桥引桥和前抚松花江特大桥检测结果,基于相似理论设计并制作两根相同配筋形式的后张有黏结预应力模型梁,通过静力和疲劳加载试验分析预应力混凝土T梁在反复加载过程中有效预应力损失及剩余承载性能,为在役桥梁结构性能评估及加固措施研究提供借鉴。

## 1 试验概况

### 1.1 模型设计及制作

根据中国公路典型桥梁分布,选取高速公路上常

收稿日期:2018-09-01

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:11502180);吉林省交通厅科研项目(编号:2012-1-5)

作者简介:张建,男,硕士研究生,E-mail:whutProjz@163.com

\*通信作者:王永光,男,博士研究生,E-mail:jtjz@whut.edu.cn

见的 30 m 装配式预应力混凝土简支 T 梁为原型,按照 1:5 比例缩尺,设计并制作两片模型梁,分别进行静力和疲劳加载试验。静力加载试验用以验证模型梁设计合理性及确定疲劳加载试验中荷载值。疲劳加载试验用以确定反复加载过程中预应力筋受力情况。

混凝土采用浇筑沌口长江大桥 T 梁 C50 商用混凝土。预应力筋采用两根标准强度 1 860 MPa 低松弛高强度钢绞线,按照直线及圆弧线相结合方式进行布置,张拉控制应力为 1 258.70 MPa,采用单孔穿心式千斤顶两端对称张拉,张拉控制应力主要通过千斤顶相连油压表和预埋电阻应变片读数进行监控,同时采用游标卡尺对张拉伸长量进行校核。张拉结束后,采用高压灌浆泵进行压浆封闭,灌浆材料内掺适量的膨胀剂及高效减水剂。受力钢筋为直径 12 mm 的 HRB400 级热轧带肋钢筋及直径 10 mm 的 HPB300 光圆钢筋,箍筋及水平纵向钢筋均为直径 6.5 mm 的 HPB235 钢筋,其中箍筋间距在加载点区段为 150 mm (区间长度为 900 mm),支座附近加密到 70 mm (区间长度为 350 mm),其余区段为 100 mm (区间长度为 1 700 mm),钢筋具体布置形式如图 1 所示。

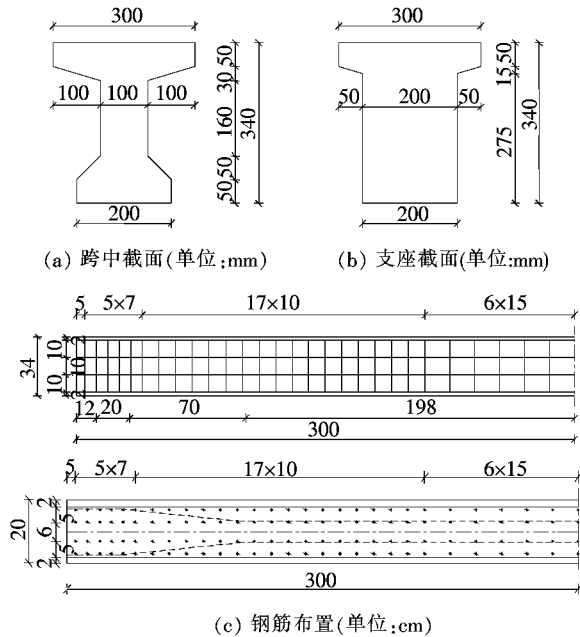


图 1 模型梁示意图

1.2 模型材料性能参数

为了获得更为准确的材料参数用于检验梁体浇筑质量和有限元建模,该文选取与模型梁相同材料开展相关力学性能试验。对于混凝土材料,以 3 个立方体试块为一组,采用与模型梁相同养护条件,参考 GB/T 50010—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,测

得预应力筋张拉时对应立方体强度分别为 73.80、71.24 MPa,满足设计要求。对于预应力筋结构,参考 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》有关规定取值。对于普通钢筋,以 3 根为一组,参考 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》,测得不同类型钢筋对应屈服及极限强度,具体试验值见表 1。

表 1 钢筋实测材料参数

钢筋种类	公称直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	$f_u/f_y$
HPB235	6.5	387	463	1.20
HPB300	10	387	516	1.33
HRB400	12	455	619	1.36

1.3 预应力筋初始应力

对于预应力混凝土结构而言,预应力筋是关键受力部件,其有效预应力大小直接关系到模型梁在静力及疲劳加载过程中梁体受力性能。该文根据预埋应变传感器和规范中关于正式使用阶段预应力损失规定值,对于预加力和试验前两阶段有效预应力进行分析。

预加力阶段有效预应力,主要通过布置在预应力筋上的电阻应变片监测并进行相关换算。根据实测应变数据及文献[10]中张拉阶段预应力损失规定,张拉锚固后跨中有效预应力理论值为 969.00 MPa,而两根梁实测有效预应力分别为 962.68、963.86 MPa,理论计算值及实测值误差分别为 0.65% 和 0.53%,满足张拉要求。

试验前有效预应力主要参考 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中关于预应力筋松弛及混凝土收缩、徐变引起的预应力损失规定,将预加力阶段实测的初始应力和存梁阶段预应力损失规定的计算值叠加。根据规范中使用阶段预应力损失规定(由于加载前存梁期均在半年以上,混凝土收缩和徐变引起的预应力损失近似按照混凝土收缩应变和徐变系数终极值计算),加载前两根梁有效预应力分别为 852.38、853.36 MPa。

1.4 加载制度及测试内容

对于静力试验梁,试验包括预加载和逐级加载两部分,采用 100 t 千斤顶加载。在逐级加载阶段,采用重复加载方式简化模拟在役桥梁受车辆荷载反复作用,每级荷载等级下重复 5 次,最终加载到梁体破坏。试验过程中,采用布置在两端台座、L/4、L/2 及 3L/4 位置处的百分表进行挠度测量,并采用 TDS—530 静

态应变仪对混凝土、钢筋和预应力筋应变数据进行监控。

对于疲劳试验梁,试验包括静力加载、疲劳加载和破坏加载三部分,采用 MTS 液压伺服加载系统进行,所有试验参考 GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》有关规定。加载过程分别采用 TDS—530 静态应变仪及 TMR—211 动态应变仪对混凝土、钢筋和预应力筋应变数据进行监控。

## 2 静力试验分析

### 2.1 静力试验结果

静力试验梁最终破坏形式为典型受弯破坏,试件破坏始于受拉钢筋屈服,最终在纯弯段受压边缘形成三角形破坏区域,破坏形式如图 2 所示。梁体对应的开裂荷载为 68 kN,屈服荷载为 120 kN,极限荷载为 160.9 kN。



图 2 静力试验梁破坏形态

对于不同区间内跨中挠度、钢筋和预应力筋对应荷载—应变曲线分别如图 3~5 所示。

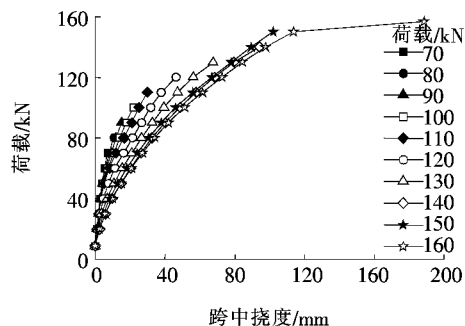


图 3 静力试验梁跨中截面荷载—挠度曲线

从图 3 可知:在不同加载区间内,随着荷载提高,裂缝不断产生和发展,对应抗弯刚度逐渐减小,在相同荷载下跨中挠度不断变大。在达到屈服荷载前,挠度增量不明显,数据重复性较好,表明反复加载对梁体刚度影响较小。到荷载增加到屈服荷载时,裂缝宽度及高度出现较大的增长,梁截面刚度明显减小,对应挠度

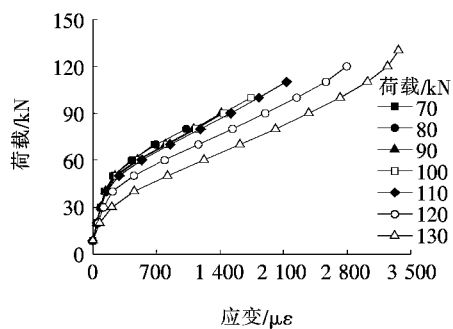


图 4 静力试验梁钢筋荷载—应变曲线

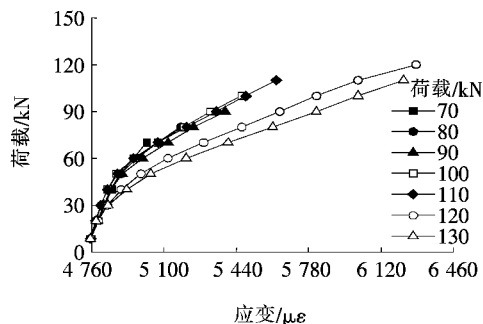


图 5 静力试验梁预应力筋荷载—应变曲线

变化较大。荷载继续增加到极限荷载过程中,主要裂缝(纯弯段竖向裂缝和剪弯段斜裂缝)基本出现,裂缝发展相对缓慢,挠度增量相对较小。达到极限荷载时,维持荷载不变挠度急剧增加,梁体失去承载能力。

由图 4、5 可知:普通钢筋和预应力筋荷载—应变趋势较为接近,由于钢筋屈服后,截面应力发生重分布,钢筋和预应力筋应变增量较大,造成测点位置处的应变片损坏,该文重点对屈服荷载前的受力情况进行分析。根据图 4,不同加载区间内相同荷载对应的受拉钢筋应变逐渐增大,在屈服荷载前应变增量不明显,屈服荷载附近应变增量明显。根据图 5,由于预应力筋在整个加载过程中处于弹性范围内,预应力筋上测点的应变在不同阶段基本呈线性变化。屈服荷载前,预应力筋应变变化不大,屈服荷载后,由于刚度损失导致预应力筋应变明显增加。

根据上述分析结果,梁体在整个加载过程中表现出适筋梁的受力特性,验证了模型设计的合理性。根据预应力筋应变情况,发现反复加载对预应力筋受力存在影响,因此需要进一步开展疲劳试验明确预应力筋的性能。

### 2.2 静力有限元结果

为了进一步验证静力试验结果的有效性,该文借助有限元程序 Ansys,采用分离式模型完成建模,其中混凝土采用实体 Solid65 单元模拟,普通钢筋和预应

力筋均采用 Link8 单元模拟,混凝土、钢筋和预应力筋采用节点耦合方式连接形成整体,采用初始应变法施加预应力。

混凝土单元选用多线性等向强化模型(MISO),参考 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》给出混凝土单轴本构关系;钢筋和预应力筋选用双线性随动强化模型(BKIN),其中钢筋采用理想弹塑性本构关系,预应力筋采用 Romberg—Osgood 本构关系,相关材料参数按照 1.2 节实测值,考虑到结构及加载方式对称性特点,该文只建立一半模型。开裂荷载和极限荷载对应实测值及有限元计算特征荷载值如表 2 所示。

表 2 试验梁开裂荷载及极限荷载

特征荷载	试验值/ kN	有限元计算值/ kN	相对差值/ %
开裂荷载	68.0	81.6	16.67
极限荷载	160.9	170.0	5.35

由表 2 可知:开裂荷载计算值为 81.6 kN,试验值为 68 kN,计算值偏大,是因为在建模过程中采用初始应变法施加预应力,忽略了由于预应力筋与管道摩擦等引起的预应力损失,使得跨中截面有效预应力相对较大,造成开裂荷载值偏高。对于极限荷载,根据极限承载力计算公式,其数值只与钢筋、混凝土材料参数及受压区高度有关,数值计算结果较为准确,计算值约为试验值的 1.06 倍,表明重复加载对梁体承载力存在一定影响。

### 3 疲劳试验分析

#### 3.1 疲劳试验结果

为了明确反复加载下预应力筋受力情况,进行模型梁疲劳加载试验。根据静力试验结果,疲劳加载试验荷载上限值为 40 kN,荷载下限值为 8 kN,按照正弦波形式施加,加载频率控制在 3 Hz。加载过程中每隔  $15 \times 10^4$  次停机进行一次静力加载,并在循环加载中每隔  $1 \times 10^4$  次进行一次动态应变数据采集。 $200 \times 10^4$  次循环加载结束后,梁体未观察到裂缝,加载过程中受拉区混凝土应变不断增长而预应力筋应变不断减小。

由于梁体未开裂,预应力混凝土梁各组成材料协调工作,梁体刚度基本保持不变,梁体处于弹性工作阶段,因此不同循环次数后静力加载过程中曲线基本重合并呈线性关系,不同循环次数后静力加载过程中钢筋和预应力筋荷载—应变曲线如图 6、7 所示。混凝土

和钢筋应变随循环次数增加无明显增长趋势,应变幅值波动较小,对应应变幅值变化曲线如图 8 所示。

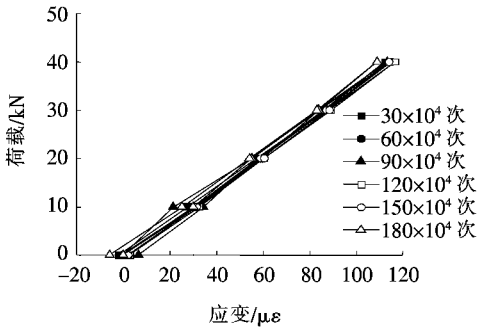


图 6 疲劳试验梁钢筋荷载—应变曲线

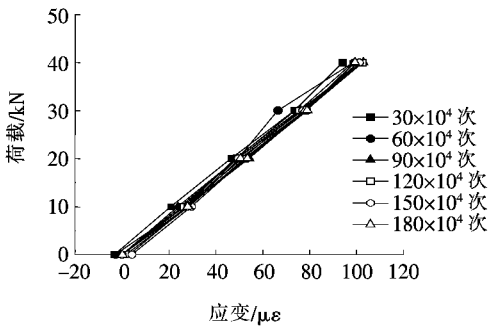


图 7 疲劳试验梁预应力筋荷载—应变曲线

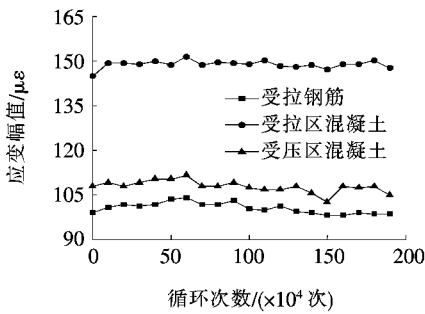


图 8 疲劳试验梁应变幅值变化曲线

$200 \times 10^4$  次循环加载过程中预应力累积损失曲线如图 9 所示。

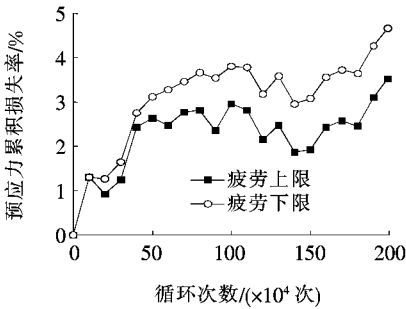


图 9 疲劳试验梁预应力累积损失

由图 9 可知:预应力筋有效预应力随循环次数的增加存在累积损失,在  $200 \times 10^4$  次循环加载过程中预应力损失大体可以分为 3 个阶段:前  $40 \times 10^4$  次循环加载过程中,预应力损失幅度较大; $40 \times 10^4 \sim 180 \times 10^4$  次循环加载过程中,预应力基本保持不变;后  $20 \times 10^4$  次循环加载过程中,预应力损失幅度加快,但下降速率小于第一阶段。

根据预应力筋实测数据, $200 \times 10^4$  次循环加载结束后,40 kN 对应预应力损失为  $175 \mu\epsilon$ ,约为张拉锚固后跨中截面有效预应力的 3.52%,8 kN 对应预应力损失为  $232 \mu\epsilon$ ,约为张拉锚固后跨中截面有效预应力的 4.67%。

### 3.2 疲劳加载后静力破坏

为了验证疲劳加载对梁体承载力的影响,循环加载后进行静力破坏试验。根据试验结果,疲劳试验梁破坏现象与静力加载梁的情况相同。构件的破坏始于底缘混凝土开裂,随后受拉钢筋屈服,最终纯弯段受压边缘混凝土压碎,破坏时受拉钢筋和预应力筋均未出现断裂现象。

根据 2.2 节,静力加载梁极限承载力的试验值和计算值分别为 160.9 kN 和 170.0 kN,疲劳加载后静力破坏得到试验梁的极限荷载为 167 kN。从对比结果可知:梁体在未疲劳开裂前,反复加载对梁体承载力影响不大,极限承载力基本保持不变。

根据文献[10]中关于 T 形截面受弯构件正截面承载力计算公式,材料参数按照规范规定取值,得到模型梁规范计算值为 122.18 kN,两片梁极限荷载试验值分别为规范计算值的 1.32 倍及 1.37 倍,相比于现行规范均具有一定安全储备。

## 4 结 论

该文对模型梁静力和疲劳试验过程进行详细阐述,并根据试验结果对预应力混凝土梁的受力性能及预应力损失进行了分析,结合现行规范及有限元计算结果,讨论了梁体承载性能变化,得到如下结论:

(1) 梁体未开裂前,重复荷载对梁体剩余承载力影响不大,相比于现行混凝土设计规范仍有一定的安

全储备。

(2) 预应力混凝土梁在反复荷载作用下存在预应力损失,预应力筋预应力损失随循环次数增加呈现 3 阶段变化规律,在  $200 \times 10^4$  次循环加载过程中,加载前期和后期预应力损失相对较大,在中期预应力基本保持不变。

(3) 不同荷载下预应力筋有效预应力损失存在差别,疲劳上限对应预应力损失约为锚固后张拉控制应力的 3.52%,疲劳下限对应预应力损失约为锚固后张拉控制应力的 4.67%。

(4) 该文仅通过单片梁的重复加载试验,对预应力混凝土梁的预应力损失及承载性能变化进行初步讨论,下一步还需开展不同荷载限值的疲劳试验,讨论不同荷载条件下重复加载对预应力损失及承载性能的影响程度。

### 参考文献:

- [1] 韩基刚,宋玉普,常继峰.疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁裂缝宽度计算模型[J].中南大学学报:自然科学版,2014(11).
- [2] 肖赞,雷俊卿,张坤,等.多级变幅疲劳荷载下预应力混凝土梁刚度退化[J].吉林大学学报:工学版,2013(3).
- [3] 余志武,李进洲,宋力.重载铁路桥梁疲劳试验研究[J].土木工程学报,2012(12).
- [4] 雷俊卿,肖赞,张坤,等.预应力混凝土梁变幅疲劳性能试验研究[J].振动与冲击,2013(18).
- [5] 冯秀峰,宋玉普.预应力混凝土构件正截面疲劳抗裂分析[J].哈尔滨工业大学学报,2006(3).
- [6] 李进洲,余志武.大轴重列车对既有线 32m 预应力混凝土简支 T 梁的疲劳影响研究[J].铁道标准设计,2014(10).
- [7] 车惠民,邵厚坤,李霄萍.部分预应力混凝土:理论·设计·工程实践[M].成都:西南交通大学出版社,1992.
- [8] 曾丁,王国亮,谢峻,等.预应力混凝土梁疲劳预应力损失探索性试验[J].公路交通科技,2012(12).
- [9] 康建强.预应力混凝土 T 梁承载力试验研究[D].长安大学硕士学位论文,2010.
- [10] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].