

预应力混凝土梁下挠开裂后顶升过程 刚度模拟方法研究

吴海军¹, 唐海洵^{1*}, 陈涛², 罗春燕³

(1. 重庆交通大学 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室, 重庆 南岸 400074; 2. 重庆大学, 重庆市 400044;

3. 重庆市酉阳第一中学校, 重庆市 409812)

摘要:主梁下挠是目前普遍存在且较为严重的桥梁病害之一,其常用的加固方案为先顶升,再使用预应力加固等措施。目前顶升过程中主梁刚度通常采用一个常量,采用变刚度来模拟主梁顶升过程的研究较少。但客观地说,主梁在顶升过程的实际刚度是变化的,随着裂缝的不断闭合,其主梁刚度逐渐增加。对于预应力混凝土梁,当主梁下缘出现压应力时,即裂缝完全闭合时,可近似认为其刚度基本恢复到下挠前的刚度值。该文基于 Branson 提出的有效惯性矩计算公式,利用 Midas/Civil 有限元软件,提出混凝土梁顶升过程中刚度变化模拟的简易方法。依托四川省稻城县香格里拉拉桥处治工程,通过对比分析计算值与实测数据,表明该方法简单有效,具有适用性。

关键词:预应力混凝土梁;桥梁加固;主梁下挠;主梁顶升;刚度模拟

中图分类号: U442

文献标志码: A

预应力混凝土梁广泛应用在中国桥梁建设中,不乏出现预应力混凝土梁下挠后,需要顶升加固的案例。由于预应力混凝土开裂后的刚度降低,而且在主梁顶升过程中其裂缝逐渐闭合,刚度不断增大,如何准确模拟顶升过程中的刚度变化是制订顶升方案的关键问题。可以将其简单地视为主梁下挠开裂的逆过程,即顶升前刚度最小,随着顶升力的增加,挠度逐渐变小,裂缝逐渐闭合,刚度不断增加,当主梁下缘受压时,假定此时刚度完全恢复。

目前,对于开裂截面刚度计算的研究较多,主要分为变刚度和统一刚度两种方法。王磊等^[1]通过对开裂后主梁的裂缝特征参数进行统计,将主梁划分为若干个开裂区段,分别求出每个开裂区段的有效刚度,形成阶梯刚度模式,再采用挠度分段积分的方法求出阶梯刚度下的荷载挠度;黄义涛等^[2]通过假定未开裂段和纯弯段之间刚度按直线变化,计算变刚度梁的变形,试验数据证明该变刚度模型具有一定的适用性;杜进生等^[3]基于无黏结部分预应力混凝土梁建立了使用荷载下开裂截面中性轴高度三次方程,得到相应截面的开裂截面惯性矩及有黏结非预应力钢筋的应力,而后利用 JTJ 023—85《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥

涵设计规范》计算无黏结部分预应力混凝土梁的挠度、裂缝宽度;胡志坚等^[4]基于 JTJ D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》,通过引入跨中弯矩修正系数的方法提出了具体的抗弯刚度修正公式。这些方法仅是针对某一裂缝状态下的刚度计算问题,而关于开裂截面梁顶升过程的变刚度计算的研究较少。该文基于有效惯性矩法,建立一种适合预应力混凝土梁顶升过程的刚度变化模型。

1 开裂截面顶升刚度变化模型的建立

1.1 开裂截面刚度退化模型

由于目前关于预应力混凝土梁顶升过程刚度变化的研究较少,鉴于主梁顶升是主梁下挠的逆过程,因此了解开裂截面的刚度退化规律非常必要。开裂截面刚度退化的提出主要是为了准确地计算挠度,尤其是对主梁开裂后的挠度计算。对于均质材料而言,当梁的截面形状、尺寸和材料已知时,梁的截面弯曲刚度是一个常数。而预应力混凝土梁是非均质的非弹性材料,因而在它受弯的全过程中,截面的弯曲刚度是变化的,其不仅随荷载增大而减小,而且还将随荷载作用时间

收稿日期:2022-08-28(修改稿)

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:310821161120)

作者简介:吴海军,男,博士,教授。E-mail:583921237@qq.com

* 通信作者:唐海洵,男,硕士,助理工程师。E-mail:1083759821@qq.com

构,截面形式为单箱双室截面,材料为 C40。采用两片拱肋,设置于人行道内侧,拱肋为钢管混凝土结构,采用等高度哑铃形截面,截面高度为 1.8 m;拱肋计算跨度 $L=70.0\text{ m}$,计算矢高 $f=17.5\text{ m}$,矢跨比 $f/L=1/4$,拱肋采用二次抛物线。两幅拱肋之间共设 5 道横撑,横撑均为“一”字形。“一”字形横撑主钢管截面为 $\phi 500\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,钢管内部不填充混凝土。全桥共设 12 组吊杆,均采用可置换式吊杆,纵桥向间距为 5.0 m。桥梁布置图如图 2 所示。

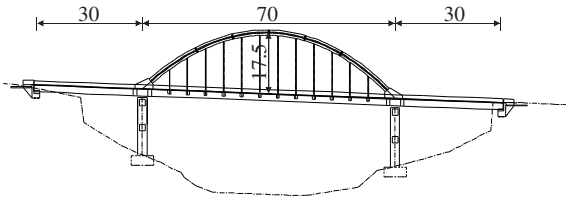


图 2 桥梁布置图(单位:m)

2.2 工程背景

稻城县香格里拉大桥在施工期间由于吊杆安装前拆除了支架,导致主梁下挠,最大下挠值达到 178 mm。顶升方案为:在现有钢管柱上方布置千斤顶,纵向布置 8 个顶位,每个顶位横向布置 6 个千斤顶,共 48 台千斤顶;考虑到主梁下挠现状,前期取 20 mm 为一级,后期逐渐过渡到 10 mm、5 mm 为一级,每顶升一级,需根据现场监测数据判定梁体受力状态是否合理,是否达到主梁设计标高,从而决策是否继续顶升,顶升过程需边顶升边支撑。顶升结束后,再张拉吊杆并增设其他加固措施。

2.3 有限元模型

应用 Midas/Civil 软件对该桥建立有限元计算模型,根据该桥的结构特点和施工工艺要求,在有限元建模中,主梁、主拱肋、肋间横撑均采用空间梁单元模拟,钢管混凝土采用联合截面法模拟,主梁与拱肋采用公共节点连接。结构离散后,全桥共有梁单元 491 个,节点 469 个。

3 实例分析

3.1 主梁下挠模拟及待定系数求取

准确模拟主梁的下挠是能否合理模拟主梁顶升过程的前提,模拟主梁下挠的关键在于 I_e 的取值,而 I_e 依赖于待定系数 m 以及初始跨中弯矩 M_0 的取值,其中 m 可通过试算求得。由于依托工程为连续梁拱组合桥,为超静定结构,跨中区域梁体刚度的改变,导致位移协调方程发生变化,进而影响结构的受力,因此初始跨中弯矩 M_0 也需要通过试算确定。对此该文解决思路为:首先,假设待定系数 m 以及跨中弯矩 M_0 。代入式(1)得到初始 I_e ;其次,通过有限元模型计算得到下挠模拟值 Δ 和跨中弯矩值 M ;最后,对比下挠模拟值 Δ 与实测下挠值以及假定弯矩 M_0 与计算弯矩 M ,判断两者是否接近,从而修正 m 、 M_0 ,如此循环,直到满足条件。经过试算,待定系数 m 取 1.0,试算流程见图 3,各下挠模拟参数值见表 1。其中跨中未开裂截面惯性矩 I_g 以及开裂弯矩 M_{cr} 通过截面构造计算;开裂惯性矩 I_{cr} 根据检测报告中关于跨中裂缝的描述进行估算,跨中区域裂缝最高为 1.0 m。

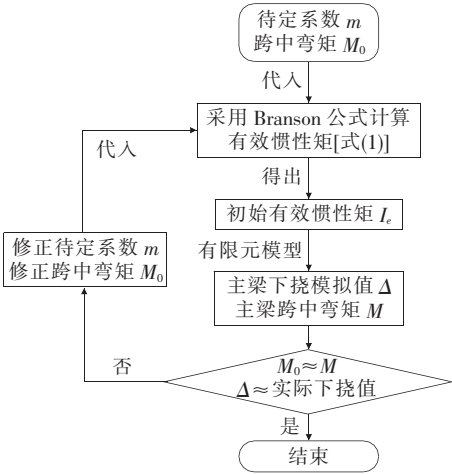


图 3 待定系数 m 、跨中弯矩 M_0 试算流程图

表 1 主梁下挠模拟参数

m	$M/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	$M_{cr}/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	$I_g/$ m^4	$I_{cr}/$ m^4	$I_e/$ m^4	模拟下挠 值/mm	实际下挠 值/mm
1.0	49 503	19 700	4.552 47	0.469 2	2.109	176	178

3.2 刚度变化模拟

为减少工作量,有限元模型计算时,主梁顶升共分为 8 个阶段,前 7 阶段每阶段顶升 20 mm,第 8 阶段顶

升 18 mm。其中每级的有效惯性矩 I_e 和每级所需顶升力见图 4。顶升 x 高度的值代表从上一阶段顶升到 x 高度有限元模型采用的参数。

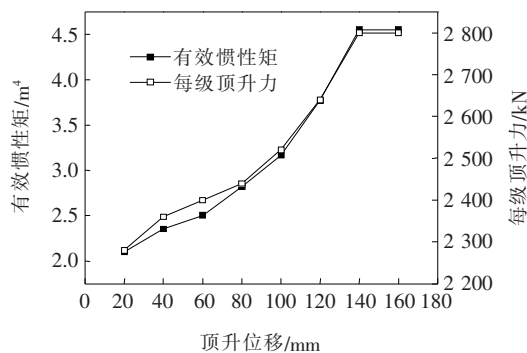


图4 各阶段顶升过程参数

由图4可以看出:随着顶升的进行,有效惯性矩呈非线性增长,前期有效惯性矩增长较慢,中期增长较快,主梁顶升到120 mm时,主梁刚度完全恢复。同时,单级顶升力同刚度变化情况符合较好,在前期每级顶升力偏大,但是中后期单级顶升力和刚度变化基本一致。这也从侧面验证了顶升力与有效惯性矩基本呈线性关系。

提取各阶段跨中弯矩值见图5。

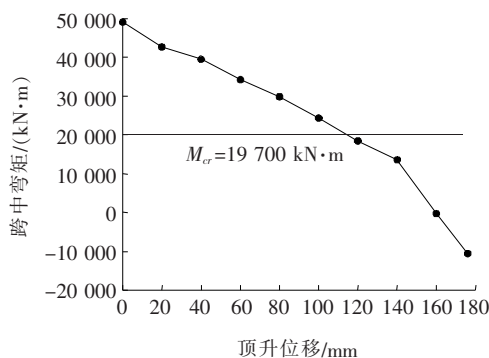


图5 各阶段跨中弯矩

由图5可得:①随着顶升位移的增加,跨中弯矩逐渐减小,直接原因是顶升力的增加抵消了部分自重的影响;②当顶升位移为115 mm时,跨中弯矩 M 小于开裂弯矩 M_{cr} ,此时近似认为主梁裂缝完全闭合,刚度完全恢复。当顶升位移超过140 mm时,由于主梁刚度在该阶段近似完全恢复,其弯矩下降幅度明显增加。

在实际顶升过程中,最终顶升位移为160 mm,所用顶升力为18 865 kN,对应计算顶升力为20 240 kN,较实际值偏大,偏差率为7%。实际顶升力、计算顶升力与最大顶升位移的关系见图6。从总体来看,顶升力与顶升位移关系的实际值和计算值符合情况较好。其中前期计算顶升力与实际顶升力差距较大,这是由于前期千斤顶的启动力对结果的影响较大,导致实际值偏大。后期计算顶升力与实际顶升力基本接

近,且计算值普遍大于实际值,这可能是因为计算假设主梁裂缝闭合后主梁刚度完全恢复,但实际主梁刚度小于该值。

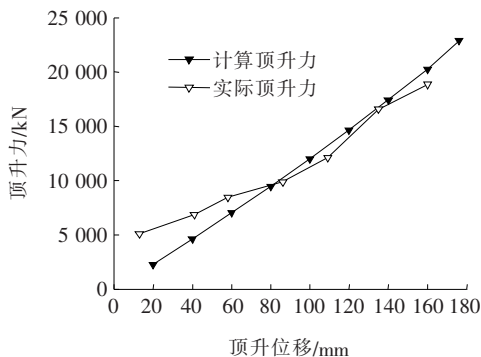


图6 顶升力与最大顶升位移关系

同时从图6可以明显看出顶升位移110 mm左右实际顶升力存在一个拐点,拐点前较为平缓,刚度较小,拐点后较陡,刚度较大。这与理论计算中通过跨中弯矩与开裂弯矩相对大小的判断结果基本相同。

选取跨中处5 m范围内宽度最大的两条横向裂缝进行监测,结果见表2。

表2 主梁跨中裂缝宽度变化

顶升力/kN	裂缝宽度/m	
	跨中裂缝1	跨中裂缝2
0	0.23	0.21
5 220	0.18	0.15
8 620	0.16	0.14
10 070	0.13	0.11
12 370	0.09	0.07
16 920	0.09	0.07
19 250	0.09	0.07

从表2可得:跨中横向裂缝闭合(裂缝宽度值不再变化)时,实际千斤顶力为12 370 kN,与之对应的实际顶升位移为110 mm,与通过刚度恢复判断准则预测的115 mm相差不大,进一步验证了该准则的有效性。

4 结论

(1)基于Branson提出的有效惯性矩计算公式,提出了利用Midas/Civil软件模拟预应力混凝土梁下挠后顶升过程主梁刚度变化的方法。通过对比顶升力与顶升位移关系曲线的计算值与实际值,表明该方法可以较好地模拟混凝土梁顶升过程,且具有适用性。