

大跨度连续刚构桥受力影响机理及控制策略研究

宁加伟, 李树鼎, 师新虎

(四川公路工程咨询监理有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:为探究大跨度连续刚构桥挠度及内力影响机理和控制策略问题,首先对主梁下挠成因进行了简要分析,并结合分析结果,给出了用于后续计算分析的计算工况和有限元模型;其次探究了主要影响因素对连续刚构桥挠度和内力的影响机理;最后基于影响机理分析结果,提出了减小主梁下挠和内力的控制策略。研究表明,影响大跨度预应力混凝土连续刚构桥主梁竖向挠度以及结构受力的主要因素有:相对湿度、加载龄期和预应力损失,其中影响程度从大到小的顺序为预应力损失>相对湿度>加载龄期;当预应力损失从5%变化到25%时,主梁竖向挠度最大约增加了18.86%,主梁弯矩约是原来的2倍,可见预应力损失会显著加大主梁的弯矩和主梁竖向挠度;为防治大跨度预应力连续刚构桥在营运过程中出现较大程度的下挠和内力问题,有必要从设计阶段、施工阶段以及营运阶段对预应力损失进行控制。

关键词:大跨度;连续刚构桥;受力影响;影响机理;控制策略

中图分类号: U448.23

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)09-0141-04

0 引言

近年来,我国公路桥梁基础设施^[1-2]的建设得到空前发展。由于连续刚构桥具有刚性美、承载能力强等特点,在高速公路以及国省干线上得到大力应用。然而大跨度连续刚构桥结构自重较大,在环境荷载等作用下,主梁竖向挠度^[3]和线形变形^[4]也较大,对结构安全和行车安全产生严重的影响。

针对大跨度连续刚构桥主梁竖向挠度以及线形问题,学者们进行了大量研究。张阳^[5]、王艳^[6]和陈浩^[7]等研究分析了纵向和竖向预应力损失、结构超重、混凝土加载龄期、跨中下挠等不利因素对大跨PC连续刚构桥工作性能和受力情况的影响,并给出了一定的建议和措施;邹锦华^[8]等在大跨度连续刚构桥常见病害分析的基础上,提出了有利于结构防治下挠的建设性意见;肖金军^[9]等采用荷载零弯矩法对桥梁预应力配束方案进行优化,结合相关材料性能试验,从预应力钢束配筋和混凝土材料性能优化等角度提出了预应力混凝土刚构桥下挠的控制方法;马振栋^[10]、张阳^[11]和朱德祥^[12]等均从不同角度探究了连续刚构桥主梁过度下挠的控制方法。以上研究主要从施工的方法、材料特性等角度对连续刚构桥主梁下挠问题进行了研究,而对成桥营运阶段的

下挠问题研究较少。

基于上述研究,以山岭地区某大跨度高墩双肢薄壁预应力混凝土连续刚构桥为研究对象,探究成桥营运阶段主梁下挠的主要成因、影响机理及对应控制策略问题。

1 工程概况

1.1 桥梁概况

为探究大跨度连续刚构桥主跨下挠成因问题,以山岭地区跨径组成(106 m+200 m+106 m)的大跨度预应力混凝土连续刚构桥为研究对象,该桥采用双肢薄壁墩,其桥型布置情况见图1,桩基为嵌岩桩。

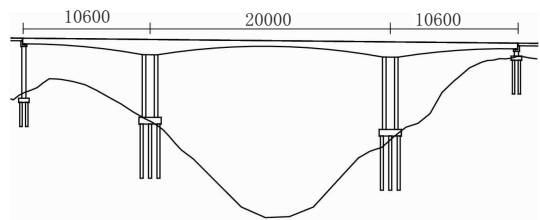


图1 桥型布置图(单位:cm)

1.2 下挠成因浅析

超大跨度预应力连续刚构桥由于结构体主要材料为混凝土,自重较大,且混凝土收缩徐变受环境温度湿度影响较大。因此随着时间的推移,大跨度刚构桥主梁竖向位移值会持续性增加,进而导致裂缝的开裂。而裂缝开裂会减小主梁刚度,进一步加大主梁竖向下挠,因此有必要对连续刚构桥下挠成因进行分析,而在设计、施工以及后期养护维修过程中有针对性的

收稿日期: 2022-10-10

作者简介: 宁加伟(1986—),男,学士,工程师,主要从事桥梁抗震与设计工作。

制定相应策略,尽可能减缓大跨度预应力混凝土下挠和梁体开裂等情况的出现。

研究表明,大跨度连续刚构桥下挠的影响因素较多,主要包括汽车荷载、整体升降温、混凝土收缩徐变和预应力损失。而在混凝土收缩徐变中,主要是以相对湿度以及加载龄期为主要影响因素。

各种荷载作用对主梁挠度的定性影响机理见表 1 所示。

表 1 主梁挠度影响性分析

序号	影响参数	影响机理
1	汽车荷载 ^[13]	瞬时性,占比小(≤15%),影响较小
2	整体升降温 ^[14]	随季节性变化,部分可恢复性,影响较小
3	混凝土收缩徐变	长期性,持续性,影响较大
4	预应力损失	永久性,破坏性,影响较大

由表 1 可知,汽车荷载以及整体升降温对主梁竖向挠度影响较小,对主梁竖向挠度影响较大的影响参数为混凝土收缩徐变与预应力损失。因此有必要进一步深入探究混凝土收缩徐变以及预应力损失对大跨度连续刚构桥主梁竖向挠度的影响规律。

2 计算工况及有限元模型

2.1 计算工况

针对上述影响大跨度预应力混凝土连续刚构桥竖向挠度的主要参数,下面结合工程中经常出现的各种情况,按表 2 的计算工况进行详细计算与分析。

表 2 计算工况

工况 编号	相对 湿度 /%	工况 编号	加载 龄期 /d	工况 编号	预应力 损失 /%
1	65	6	3	11	5
2	70	7	7	12	10
3	75	8	15	13	15
4	80	9	20	14	20
5	85	10	28	15	25

预应力损失与混凝土收缩徐变、相对湿度、加载龄期都有一定的影响,具有耦合性、多因素影响等特性。为便于后文分析各个单一因素对结构位移、内力和应力的影响,此处并未考虑多因素耦合性的影响。

2.2 有限元模型

为对上述表 2 的各个计算工况进行计算与分析,有必要对依托桥梁进行建模。基于有限元软件,并结合依托桥梁的结构设计图纸建立该桥的空间有限元模型,其中材料信息见表 3。

全桥采样梁单元模拟,桩基底部固结,桩基与承台之间通过刚臂进行连接,桥墩和主梁进行固结,在

表 3 材料信息

力学性能	混凝土强度等级			
	C55	C50	C40	C30
弹性模量 E/MPa	37 000	32 500	30 000	37 000
轴心抗压标准强度 f_{ck}/MPa	44.5	26.8	20.1	44.5
轴心抗拉标准强度 f_{tk}/MPa	3.0	2.4	2.01	3.0
轴心抗压设计强度 f_{cd}/MPa	30.5	18.4	13.8	30.5
轴心抗拉设计强度 f_{td}/MPa	2.07	1.65	1.39	2.07
热膨胀系数 $/^{\circ}\text{C}$	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}
泊松比 ν	0.2	0.2	0.2	0.2

边跨桥梁梁端约束主梁竖向和横向位移,纵向放开,预应力钢束通过输入钢束坐标进行模拟。全桥共计 1 103 个节点和 868 个单元,其有限元模型见图 2。

由于该桥桩基础为嵌岩桩,故将桩侧的弹性支撑设置为刚性支撑的形式。

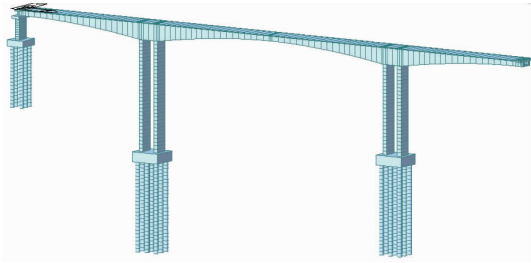


图 2 有限元模型

3 结果分析

3.1 位移

在三种影响因素作用下的主梁位移分别见图 3 至图 5 所示。

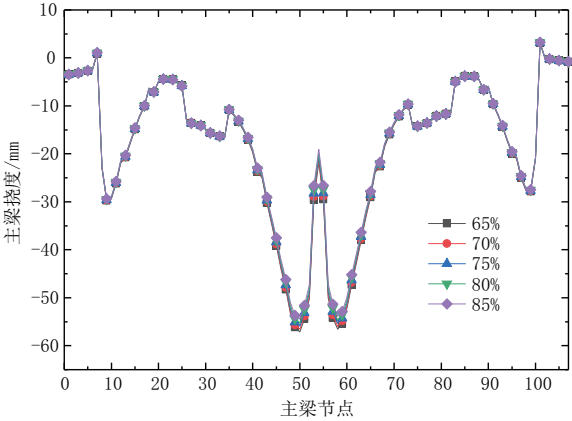


图 3 相对湿度

分析图 3 至图 5 可知:

(1)主梁挠度在相对湿度、加载龄期和预应力损失三个影响因素下的整体变化规律基本保持一致,即在主跨产生最大挠度,在边跨靠近桥墩和桥台处

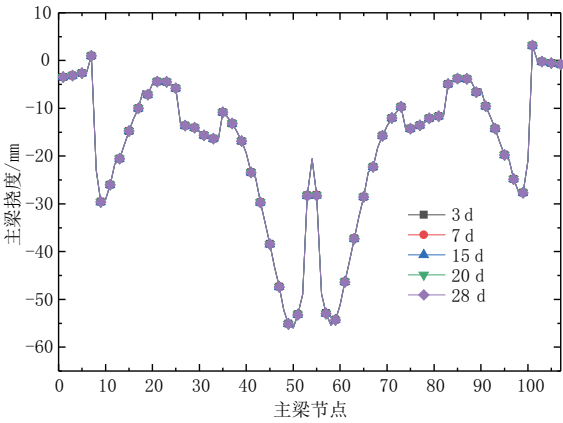


图 4 加载龄期

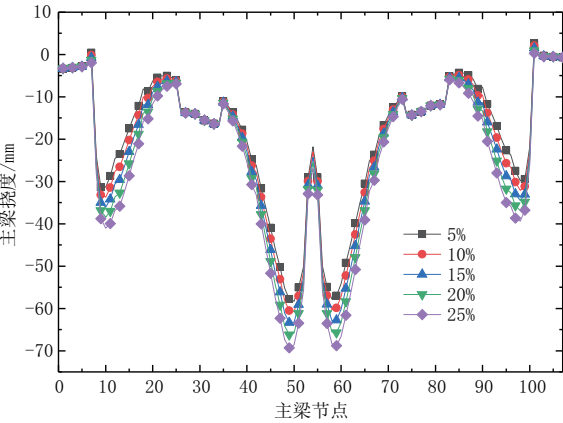


图 5 预应力损失

有轻微向上的变形；

(2) 仔细分析可知,相对湿度、加载龄期和预应力损失对主梁挠度影响程度从大到小的顺序为预应力损失>相对湿度>加载龄期；

(3) 仔细分析图 5 预应力损失可知,当预应力损失从 5%变化到 25%时,主梁最大向下挠度增加约增加了 18.86%,说明主梁向下挠度几乎与预应力损失变化量成正比关系。

3.2 内力

在三种影响因素作用下的关键位置内力分别见图 6 至图 8 所示。

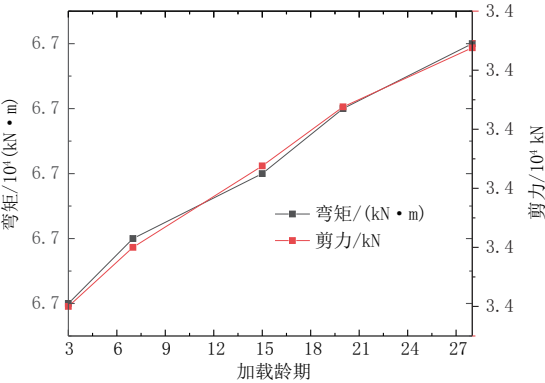


图 6 加载龄期

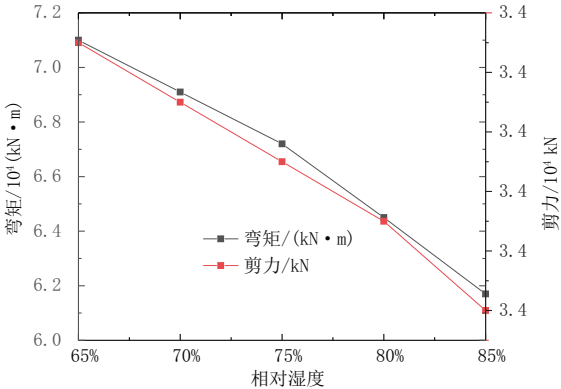


图 7 相对湿度

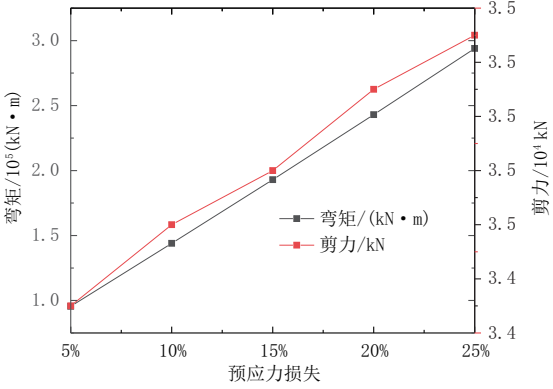


图 8 预应力损失

由有限元模型计算结果可知,加载龄期和相对湿度作用下的弯矩均发生在桥墩墩底,而预应力损失作用下的弯矩发生在桥墩顶对应主梁截面处,这是因为仅在主梁布设了预应力束。而剪力主要发生在桥墩顶对应主梁截面处,这与连续刚构受力特点相符合。

分析图 6 至图 8 和表 4 可知:

(1) 由图 6 至图 8 可知,结构弯矩和内力随加载龄期和预应力损失增加而增加,随相对湿度增加而减小；

(2) 由表 4 可知,相对湿度、加载龄期和预应力损失对结构弯矩和剪影响程度从大到小的顺序为预应力损失>相对湿度>加载龄期,这与上述主梁挠度影响顺序相同；

(3) 当预应力损失从 5%变化到 25%时,弯矩是原来的 2 倍左右,可见预应力损失会显著加大主梁的弯矩。

4 策略研究

由上述分析可知,影响大跨度预应力混凝土连续刚构桥主梁竖向挠度以及结构受力的主要因素有:相对湿度、加载龄期和预应力损失。其中影响程度从大到小的顺序为预应力损失>相对湿度>加载

表 4 各计算参数下的内力计算值

龄期 /d	弯矩 /(kN·m)	剪力 /kN	相对湿度	弯矩 /(kN·m)	剪力 /kN	预应力损失	弯矩 /(kN·m)	剪力 /kN
3	66 900	34 050	65%	71 000	34 090	5%	95 500	34 300
7	67 000	34 060	70%	69 100	34 070	10%	14 400	34 600
15	67 100	34 070	75%	67 200	34 050	15%	19 300	34 800
20	67 200	34 080	80%	64 500	34 030	20%	24 300	35 100
28	67 300	34 090	85%	61 700	34 000	25%	29 400	35 300
最大变化率	-0.60%	-0.13%	最大变化率	13.10%	0.26%	最大变化率	207.85%	2.92%

注:表 4 中龄期一列中最大变化率是加载龄期从 3 d 变化到 28 d 的变化率,相对湿度一列中最大变化率是相对湿度从 65%变化到 85%的变化率,预应力损失一列中最大变化率是预应力损失从 5%变化到 2%的变化率。

龄期。

可见为防治大跨度预应力连续刚构桥在营运过程中出现较大程度的下挠和内力问题,有必要对预应力和相对湿度进行控制,具体控制措施如下:

(1)设计阶段

合理设计预应力束线形,尽可能加大预应力束曲率半径,减小管道摩阻损失;

合理设计预应力束张拉工艺,主要包括预应力束的张拉顺序以及张拉时间,需等到梁体混凝土达到一定强度后方可张拉,减少预应力束弹性回缩引起的预应力损失;

合理选用预应力束锚固系统,减少锚具变形引起的预应力损失;

严格控制主梁箱梁混凝土结构的设计配合比、水灰比、减水剂用量,进而通过控制配合比达到对相对湿度的控制。

(2)施工阶段

要严格按照设计图纸放样预应力束,并在放样后及时校核尺寸偏差;

严格按照预应力束张拉顺序、张拉要求和锚具安装工艺进行预应力束的规范施工;

在张拉预应力束时,张拉力必须在张拉控制力容许范围内,不能过多张拉或过少张拉;

在现场施工时,要严格结合设计文件中对配合比、水灰比、减水剂用量和相关施工规范,控制主梁箱梁混凝土结构的湿度;

工地试验室、监理单位等不定期对主梁箱梁混凝土强度、碳化情况等方面进行抽检。

(3)营运使用阶段

时刻关注和检查预应力管道是否存在破损、开裂,进而导致的预应力束锈蚀引起的预应力损失;

对预应力损失过大的预应力束,在有条件的情况下,及时进行更换。

定期对主梁箱梁内部湿度进行监测,一旦出现湿度较大或积水等情况,要及时进行除湿等措施,确保箱梁内部的干燥。

5 结 语

主要结论如下:

(1)相对湿度、加载龄期和预应力损失对主梁挠度影响程度从大到小的顺序为预应力损失>相对湿度>加载龄期,其中当预应力损失从 5%变化到 25%时,主梁最大向下挠度增加约增加了 18.86%;

(2)相对湿度、加载龄期和预应力损失对结构弯矩和剪影响程度从大到小的顺序为预应力损失>相对湿度>加载龄期,这与上述主梁挠度影响顺序相同;当预应力损失从 5%变化到 25%时,弯矩是原来的 2 倍左右,可见预应力损失会显著加大主梁的弯矩。

(3)为防治大跨度预应力连续刚构桥在营运过程中出现较大程度的下挠和内力问题,有必要从设计阶段、施工阶段以及营运阶段对预应力损失进行控制。

参考文献:

[1] 贺拴海,赵祥模,马建,等.公路桥梁检测及评价技术综述[J].中国公路学报,2017,30(11):63-80.

[2] 任远,王晓春,黄侨,等.中美欧公路桥梁设计规范的综合评价方法[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(9):7-13.

[3] 曹自俊,赵军,张效军.大跨 PC 连续刚构桥病害分析与加固技术研究[J].公路,2021,66(8):206-211.

[4] 曾俊铤,刘志权.大跨连续刚构桥长期下挠的设计成因参数化分析[J].公路,2019,64(11):88-93.

[5] 张阳,姚学昌,张楠,等.大跨 PC 连续刚构桥结构性能参数影响分析[J].公路工程,2013,38(4):50-53,83.

[6] 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,2014,34(4):215-219.

[7] 陈浩,毛焕雄,曲道来.大跨度连续刚构桥长期下挠成因分析与建议

法并不适用于小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁结构,本文采用 ANSYS 软件准确模拟了组合梁的扭转与畸变效应,引入了应力放大系数的概念准确计算了偏载系数,采用此方法可提高一定的安全储备。

(2)小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁桥在偏心车道荷载作用下,正应力放大系数近似接近于 1.3~1.4 之间,其曲线半径外侧的偏载效应较内侧明显;对于剪应力放大系数而言,其数值近似接近于 1.5~1.6 之间,正应力放大系数在中支点附近处较为明显,剪应力放大系数在中跨四分之一截面附近处较为明显。

(3)与直线梁桥相比,小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁桥在偏心车道荷载下的应力放大系数较大,对该类结构而言,由活载引起的偏载效应不容忽视。

参考文献:

- [1] THEVENDRAN V, CHEN S, SHANMUGAM N E, et al. Nonlinear analysis of steel-concrete composite girders curved in plan [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1999, 32(3): 125-139.
- [2] THEVENDRAN V, SHANMUGAM N E, CHEN S, et al. Experimental study on steel-concrete composite girders curved in plan [J]. Engineering Structures, 2000, 22(8): 877-889.
- [3] 聂建国, 熊辉, 胡少伟. 开口截面钢-混凝土组合梁弯扭性能的理论分析与试验研究 [J]. 土木工程学报, 2004(11): 6-10, 66.
- [4] 聂建国, 唐亮, 胡少伟, 等. 钢-混凝土组合箱梁的抗扭强度 [J]. 土木工程学报, 2008(1): 1-11.
- [5] TAN E L, UY B. Experimental study on straight composite girders subjected to combined flexure and torsion [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(4): 784-793.
- [6] TAN E L, UY B. Experimental study on curved composite girders subjected to combined flexure and torsion [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8/9): 1855-1863.
- [7] 林诗枫, 黄侨, 任远, 等. 钢-混凝土组合简支箱梁桥活载效应计算方法 [J]. 公路交通科技, 2012, 29(6): 75-80.
- [8] 张彦玲, 孙瞳, 侯忠明, 等. 隔板式钢-混凝土曲线组合梁弯扭性能 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1107-1114.
- [9] 袁晓静, 奚兵, 赵伟, 等. 双箱钢-混凝土连续曲线组合梁受力性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2020, 50(8): 154-159.
- [10] 袁晓静, 刘凡, 赵伟, 等. 连续曲线双箱钢-混凝土组合梁弯扭性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52(3): 124-129.
- [11] 郭金琼, 房贞政, 郑振. 箱形梁设计理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [12] 沈阳工业大学学报, 2013, 35(5): 594-600.
- [13] 朱德祥, 李睿, 杨晶晶, 等. 基于病害检测的连续刚构桥震害预测方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(34): 9420-9424.
- [14] 吴冲. 汽车荷载作用下三跨度变截面连续梁桥的挠度响应及冲击系数 [C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第九届年会论文集. [出版者不详], 1990: 727-731.
- [15] 刘晓梅. 温度变化对连续刚构桥线形与受力的影响分析 [J]. 科技风, 2015(5): 199-201.
- [8] 邹锦华, 姜海波, 欧阳仕武. 大跨连续刚构桥跨中下挠成因及加固效果分析 [J]. 公路, 2010(7): 72-74.
- [9] 肖金军, 何伟能, 李纯, 等. 基于配束和材料优化的连续刚构桥下挠控制技术 [J]. 桥梁建设, 2021, 51(6): 31-38.
- [10] 马振栋, 刘安双. 控制大跨连续刚构桥梁过度下挠的技术措施 [J]. 桥梁建设, 2015, 45(2): 71-76.
- [11] 张阳, 张楠, 姚学昌. 预防大跨 PC 连续刚构桥开裂和下挠技术 [J]. 公路工程, 2012, 37(2): 45-49.

(上接第 144 页)