

系杆拱桥吊杆更换桥面铺装无损控制标准及应用

张志国, 王靖彭

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:对系杆拱桥吊杆更换过程中桥面无损控制标准进行了研究,从桥梁设计荷载标准出发,利用位移影响矩阵与转角影响矩阵,建立了桥面铺装最大转角的简化计算公式,提出了便于更换控制桥面铺装不破损条件下最大位移控制标准的优化算法。结合实际拱桥吊杆更换工程,利用本文方法计算,得出吊杆更换时保证桥面不破损的标高控制标准是不超过7.2 mm,并以此作为工程施工控制条件,通过施工验证该控制标准能保证更换过程桥面铺装不破损,达到了预期目标。

关键词:系杆拱桥;吊杆更换;桥面铺装;不破损;控制标准;影响矩阵

中图分类号: TU997 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)01-0001-07

下承式系杆拱桥由拱肋、吊杆、桥面系和系梁等组成,其受力特征为桥面荷载通过吊杆传递给拱肋,产生水平推力并由系梁平衡,故吊杆是重要的传力构件。吊杆拱桥随着营运年限的增加,受车辆荷载、环境腐蚀、吊杆构造缺陷等因素影响经常需要提前更换,以保证桥梁的安全运行^[1]。据文献[2]、文献[3]统计,中国早期修建的拱桥吊杆设计使用年限为20 a,但实际使用年限仅为6~17 a,如太原市漪汾桥1992年成桥,桥梁运营16 a进行吊杆更换;广西邕江大桥1996年成桥,桥梁运营12 a进行吊杆更换;237省道北澄子河大桥运营8 a进行吊杆更换;杭州市叶青兜桥运营10 a更换吊杆等等。

用于直接承受桥面活载的桥面铺装层直接关系到桥梁营运的舒适性及结构耐久性,因此其必须具有足以抵抗活载的抗弯拉强度,以及保证桥梁使用的抗疲劳、抗裂性能^[4]。对于桥面铺装状态良好的吊杆拱桥,更换吊杆时,保证桥面铺装不破损是组织更换施工的重要前提。如何进行施工控制以保证对桥梁状况及营运影响到最小成为研究的关键问题,王欣等^[5]通过有限元法按桥梁设计荷载反算出吊杆更换过程桥面允许转角,得出控制桥面标高变化不超过10 mm可以满足桥面无损条件,但没有给出铺装层转角的显式表达;王石磊^[6]基于影响矩阵法计算吊杆更换时各吊杆理论张拉力,通过构造优化函数减小吊杆更换过程桥面标高变化理论值与施工监测结果之间的误差,并给出桥面标高变化不超过5 mm的控制标准。目前虽有文献结合实际工程对吊杆更换时桥面标高控制标准进行了研究,但是仍缺少一种具有通用性的控制方法。在前期研究基础上,以桥面铺装层转角为限制条件进行吊杆更换施工控制标准的建立,基于位移影响矩阵与转角影响矩阵得出拱桥吊杆更换时桥面铺装层转角的显式表达,并给出便于工程应用的施工控制条件,以期建立一种确保桥面铺装不破损时吊杆更换的控制方法。

1 桥面无损更换吊杆控制标准

1.1 桥面无损转角控制条件

吊杆更换实质上是力的转换,对于钢管混凝土拱桥来说,拱肋刚度远大于桥面系刚度,因此在吊杆更换过程可以忽略拱肋的位移,并认为吊杆力的变化与桥面竖向变形是同步的,吊杆力增大则桥面上挠,相

收稿日期:2022-10-16 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220314

作者简介:张志国(1971—),男,教授,研究方向为桥梁与结构工程。E-mail:zhangzhg@stdu.edu.cn

张志国,王靖彭.系杆拱桥吊杆更换桥面铺装无损控制标准及应用[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(1):1-6,26.

反侧桥面下挠。桥面铺装黏结于桥面板,因此当桥面板出现上挠时,横梁附近的桥面铺装受拉剪共同作用,表现为桥面铺装层出现转角 θ ,当 θ 大于铺装开裂临界转角时,会出现沿横梁方向的裂缝,由此以桥面转角作为吊杆更换的一项控制标准,保证施工过程中 θ 小于铺装开裂临界转角,即可满足吊杆更换中桥面无损控制标准^[7]。

吊杆更换过程一般要经历临时吊杆张拉、原吊杆卸载、新吊杆张拉及临时吊杆卸载 3 个阶段,实现吊杆力的分级转换。满足桥面铺装不开裂,需要对更换过程各阶段分别进行分析,从而得出施工控制条件。

(1)临时吊杆张拉阶段。临时吊杆张拉导致横梁处桥面上挠,与相邻横梁产生相对位移,使得横梁处局部桥面铺装出现转角 θ 。桥面铺装在张拉位置处产生负弯矩而受拉,同时还要承受来自两端的剪力作用,因此在此阶段主要避免桥面铺装出现受弯拉和受剪破坏^[8];该阶段桥面转角大于铺装开裂临界转角时,桥面铺装才会开裂,因此该阶段必须控制转角 θ 满足要求。

(2)原吊杆卸载阶段。在临时吊杆张拉阶段,原吊杆力随之同步卸载,横梁处桥面高程将下降,桥面铺装转角也随之变化。当 $\theta \geq 0$ 时,桥面铺装受力形式不发生改变,且转角比上一阶段小,故不会发生开裂破坏;当 $\theta < 0$ 时,若更换吊杆处桥面下挠过大,铺装层会产生负转角,受压不会产生开裂,但相邻吊杆处桥面铺装产生正转角,若转角超过铺装开裂临界转角,桥面铺装会在相邻吊杆处开裂。转角变化量与原吊杆力卸载大小正相关,综合考虑该阶段一般不控制更换过程限制转角。

(3)新吊杆张拉及临时吊杆卸载阶段。新吊杆张拉与临时体系卸载交替进行,直到临时体系的张拉力全部转移到新吊杆,在此过程中前 2 个阶段累积的位移值与桥面铺装转角会逐渐减小,最终回到初始状态,故本阶段基本不会开裂破坏。

综上所述,控制临时吊杆张拉阶段桥面铺装的转角小于开裂临界转角,便可保证桥面不开裂,能够满足桥面无损更换条件。

1.2 桥面无损最大允许转角的简化计算方法

以桥面铺装开裂临界转角为依据进行更换施工控制,桥面铺装层转角 θ 应小于开裂临界转角,且桥面转角不宜过小,否则将导致施工步距过小进而影响工期。临时吊杆法施工桥面铺装转角 θ 的计算模型如图 1 所示。

图 1 中 x 为控制截面处设计荷载作用时的最大位移, a 、 b 为相邻吊杆处的桥面位移, L 为相邻吊杆间距。

由于转角 θ 较小,因此取 $\theta \approx \tan \theta$,得出桥面铺装转角 θ 计算公式为

$$\theta = \frac{x-a}{L} + \frac{x-b}{L} = \frac{2x-a-b}{L} \quad (1)$$

桥面开裂临界转角的计算是为了确定实际工程中桥面最大允许转角,故将桥面最大允许转角视作桥面开裂转角即可。为获得桥面最大允许转角,首先进行桥梁计算模型建立,再依次向每根吊杆施加 100 kN 的单位力获得位移影响矩阵,根据式(1)将位移影响矩阵转换为转角影响矩阵,并获得全部吊杆位置的纵向转角影响线,向每根吊杆施加设计吊杆力,代入转角影响线,应用影响线进行移动布载,得到各吊杆位置桥面转角,取最大值作为桥面铺装层最大允许转角^[9]。最后依据桥面最大允许转角反算,即可获得施工控制最大位移,以此位移为基准作为吊杆更换过程的控制标准。

1.3 桥面无损更换转角计算的影响矩阵法

结合桥梁的位移影响矩阵与转角影响矩阵,在式(1)的基础上提出一种桥面转角 θ 的简化计算方法,具体计算过程如下:于 $j^{\#}$ 吊杆处施加 100 kN 的力, $i^{\#}$ 吊杆处的桥面位移为 K_{ij}^d ,则得出全桥一侧吊杆的位移影响矩阵为

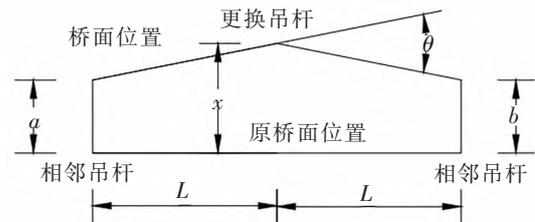


图 1 临时体系施工桥面铺装转角 θ 计算简图

$$\mathbf{K}^d = \begin{bmatrix} K_{11}^d & K_{12}^d & \cdots & K_{1n}^d \\ K_{21}^d & K_{22}^d & \cdots & K_{2n}^d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{(n-1)1}^d & K_{(n-1)2}^d & \cdots & K_{(n-1)n}^d \\ K_{n1}^d & K_{n2}^d & \cdots & K_{nm}^d \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, n 为一侧吊杆数, 位移以向上为正、向下为负。

将上述位移影响矩阵各数值分别代入式(1), 推导得转角影响矩阵 \mathbf{K}^θ , 结果如下

$$\mathbf{K}^\theta = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 2K_{11}^d - K_{21}^d & 2K_{12}^d - K_{22}^d & \cdots & 2K_{1n}^d - K_{2n}^d \\ 2K_{21}^d - K_{11}^d - K_{31}^d & 2K_{22}^d - K_{12}^d - K_{32}^d & \cdots & 2K_{2n}^d - K_{1n}^d - K_{3n}^d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{(n-1)1}^d - K_{(n-2)1}^d - K_{n1}^d & K_{(n-1)2}^d - K_{(n-2)2}^d - K_{n2}^d & \cdots & K_{(n-1)n}^d - K_{(n-2)n}^d + K_{n1}^d \\ 2K_{n1}^d - K_{(n-1)1}^d & 2K_{n2}^d - K_{(n-1)2}^d & \cdots & 2K_{nm}^d - K_{(n-1)n}^d \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, L 为吊杆间距。

由式(3), 经变换有

$$\theta = \mathbf{K}^\theta F \quad (4)$$

式中, F 的分量为施加在各吊杆处的力; θ 的分量为各吊杆位置处的转角。

1.4 桥面无损更换施工控制条件的建立

为满足桥面无损施工要求, 将设计荷载 F 代入式(4), 得到桥面最大允许转角 θ_1 , 以 $\theta < \theta_1$ 作为施工控制条件。但在实际工程中桥面转角的测量难度较大, 增加了施工控制难度, 必须对控制条件进行优化。由式(1)可得更换吊杆处与相邻吊杆处桥面高程变化关系。

$$x = \frac{\theta L}{2} + \frac{a+b}{2} \quad (5)$$

吊杆处桥面标高变化与吊杆长度、拱肋标高变化相关, 吊杆更换过程中相邻吊杆力及高程基本不发生变化, 故更换吊杆力由临时体系承担, 钢管混凝土拱肋具有较强的抗弯刚度, 拱肋标高不会发生明显变化。由式(5)可得, 当忽略相邻吊杆位移变化时, 桥面铺装角的变化限制更为严格也更加安全, 故得出桥面无损更换优化后的标高变化控制条件如下

$$x = \frac{\theta L}{2} \quad (6)$$

2 工程应用

某大桥建于 20 世纪 90 年代, 全长 190.7 m。主桥为双肋纵横梁体系钢管混凝土系杆拱桥, 矢跨比为 1/5.179, 一侧吊杆数为 19。设计荷载为汽车-20, 人群荷载为一类。该桥运营已超过 20 a, 由于受到自然环境的长期侵蚀, 近几年该桥吊杆上锚固端出现明显渗水, 吊杆及横梁连接处的防水罩构件普遍存在渗水及锈蚀; 全桥吊杆下锚头普遍存在渗水、锈蚀、黄油老化失效, 且部分锚头积水严重。故决定采用临时吊杆法对全桥吊杆进行更换。桥型及吊杆编号如图 2 所示。

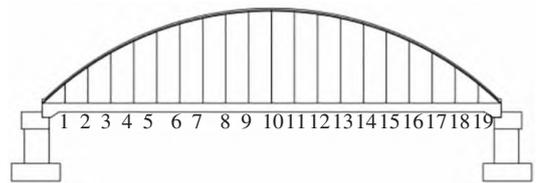


图 2 桥型及吊杆编号

2.1 桥面无损吊杆更换过程仿真分析

2.1.1 仿真分析模型建立

采用有限元软件 Midas Civil 进行计算, 计算模型如图 3 所示。全桥模型计算节点数 329 个, 单元数 504 个, 系梁、横梁、拱肋和横撑采用梁单元, 吊杆采用桁架

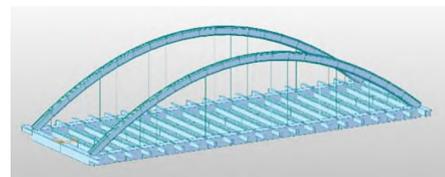


图 3 Midas Civil 模型

单元,不考虑普通钢筋参与结构受力。

2.1.2 更换施工过程控制方法

通过模拟计算得到位移影响矩阵 \mathbf{K}^d 和转角影响矩阵 \mathbf{K}^θ ,其中位移影响矩阵数值单位为 mm,转角影响矩阵数值单位为 rad,考虑到矩阵的对称性($\mathbf{K}_{ij}^d = \mathbf{K}_{(n+1-i)(n+1-j)}^d$, $\mathbf{K}_{ij}^\theta = \mathbf{K}_{(n+1-i)(n+1-j)}^\theta$),文中仅列出 2 个矩阵的前 10 列,具体表达式如下

$$\mathbf{K}^d = \begin{bmatrix} -0.024 & -0.021 & -0.016 & -0.015 & -0.016 & -0.018 & -0.020 & -0.022 & -0.022 & -0.023 \\ -0.021 & -0.054 & -0.049 & -0.042 & -0.042 & -0.046 & -0.052 & -0.057 & -0.006 & -0.061 \\ -0.017 & -0.048 & -0.086 & -0.080 & -0.079 & -0.072 & -0.078 & -0.084 & -0.090 & -0.092 \\ -0.017 & -0.041 & -0.079 & -0.119 & -0.113 & -0.103 & -0.101 & -0.105 & -0.111 & -0.114 \\ -0.019 & -0.040 & -0.069 & -0.111 & -0.153 & -0.145 & -0.132 & -0.126 & -0.127 & -0.130 \\ -0.021 & -0.043 & -0.067 & -0.099 & -0.143 & -0.184 & -0.173 & -0.155 & -0.146 & -0.143 \\ -0.024 & -0.047 & -0.039 & -0.094 & -0.127 & -0.717 & -0.210 & -0.195 & -0.173 & -0.159 \\ -0.025 & -0.050 & -0.073 & -0.095 & -0.119 & -0.152 & -0.194 & -0.230 & -0.211 & -0.184 \\ -0.026 & -0.052 & -0.077 & -0.098 & -0.118 & -0.141 & -0.171 & -0.210 & -0.243 & -0.219 \\ -0.026 & -0.053 & -0.078 & -0.101 & -0.119 & -0.137 & -0.156 & -0.183 & -0.219 & -0.247 \\ -0.026 & -0.053 & -0.078 & -0.101 & -0.120 & -0.135 & -0.149 & -0.165 & -0.188 & -0.219 \\ -0.026 & -0.052 & -0.076 & -0.099 & -0.118 & -0.133 & -0.145 & -0.154 & -0.166 & -0.184 \\ -0.024 & -0.049 & -0.073 & -0.095 & -0.114 & -0.129 & -0.140 & -0.147 & -0.152 & -0.159 \\ -0.023 & -0.046 & -0.068 & -0.089 & -0.107 & -0.121 & -0.132 & -0.139 & -0.142 & -0.143 \\ -0.021 & -0.042 & -0.062 & -0.080 & -0.097 & -0.110 & -0.121 & -0.127 & -0.130 & -0.130 \\ -0.018 & -0.036 & -0.054 & -0.070 & -0.084 & -0.096 & -0.105 & -0.111 & -0.114 & -0.114 \\ -0.014 & -0.029 & -0.043 & -0.055 & -0.067 & -0.076 & -0.084 & -0.089 & -0.092 & -0.092 \\ -0.009 & -0.019 & -0.028 & -0.036 & -0.044 & -0.050 & -0.055 & -0.058 & -0.061 & -0.061 \\ -0.003 & -0.007 & -0.010 & -0.013 & -0.016 & -0.018 & -0.020 & -0.021 & -0.022 & -0.023 \end{bmatrix}$$

(7)

$$\mathbf{K}^\theta = \begin{bmatrix} -0.027 & 0.012 & 0.017 & 0.012 & 0.010 & 0.010 & 0.012 & 0.013 & -0.038 & 0.015 \\ -0.001 & -0.039 & 0.004 & 0.011 & 0.011 & -0.002 & -0.006 & -0.008 & 0.100 & -0.007 \\ 0.004 & -0.001 & -0.044 & 0.001 & -0.003 & 0.005 & -0.003 & -0.006 & -0.063 & -0.009 \\ 0.002 & 0.006 & 0.003 & -0.047 & 0.006 & 0.011 & 0.008 & 0.000 & -0.005 & -0.006 \\ 0.000 & 0.004 & 0.008 & -0.004 & -0.050 & -0.003 & 0.010 & 0.008 & 0.003 & -0.003 \\ 0.001 & 0.001 & -0.026 & 0.007 & -0.006 & -0.052 & -0.004 & 0.011 & 0.548 & 0.003 \\ -0.002 & -0.001 & 0.062 & 0.006 & 0.008 & -0.006 & -0.053 & -0.005 & -1.059 & 0.009 \\ 0.000 & -0.001 & -0.030 & 0.002 & 0.007 & 0.008 & -0.007 & -0.055 & 0.514 & 0.010 \\ -0.001 & -0.001 & -0.003 & 0.000 & 0.002 & 0.007 & 0.008 & -0.007 & -0.046 & -0.007 \\ 0.000 & -0.001 & -0.001 & -0.003 & 0.000 & 0.002 & 0.008 & 0.009 & -0.007 & -0.056 \\ 0.000 & -0.001 & -0.002 & -0.002 & -0.003 & 0.000 & 0.003 & 0.007 & 0.009 & -0.007 \\ -0.002 & -0.002 & -0.001 & -0.002 & -0.002 & -0.002 & -0.001 & 0.004 & 0.008 & 0.010 \\ 0.001 & 0.000 & -0.002 & -0.002 & -0.003 & -0.004 & -0.003 & -0.001 & 0.004 & 0.009 \\ -0.001 & -0.001 & -0.001 & -0.003 & -0.003 & -0.003 & -0.003 & -0.004 & -0.002 & 0.003 \\ -0.001 & -0.002 & -0.002 & -0.001 & -0.003 & -0.003 & -0.005 & -0.004 & -0.004 & -0.003 \\ -0.001 & -0.001 & -0.003 & -0.005 & -0.004 & -0.006 & -0.005 & -0.006 & -0.006 & -0.006 \\ -0.001 & -0.003 & -0.004 & -0.004 & -0.006 & -0.006 & -0.008 & -0.009 & -0.009 & -0.009 \\ -0.001 & -0.002 & -0.003 & -0.004 & -0.005 & -0.006 & -0.006 & -0.006 & -0.008 & -0.007 \\ 0.003 & 0.005 & 0.008 & 0.010 & 0.012 & 0.014 & 0.015 & 0.016 & 0.017 & 0.015 \end{bmatrix}$$

(8)

结合以上数据使用影响线移动布载计算汽车荷载作用下桥面的最大转角,由转角影响矩阵的定义可知 K^{θ} 的第 i 行便是第 i 根吊杆处桥面转角的纵向影响线,因此各吊杆处桥面转角的影响线可得。列举 1[#]、5[#]、10[#] 吊杆处桥面转角的影响线,如图 4 所示,横坐标 0、20 点表示桥梁的端横梁位置,可以看出在 1、5、10 点处 1[#]、5[#]、10[#] 吊杆的影响线数值最大。

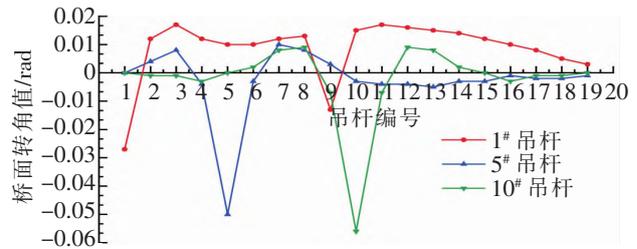


图 4 1[#]、5[#]、10[#] 吊杆转角影响线

将上述数据导入 Midas 模型,并施加相应荷载,使用软件布载功能得到吊杆处桥面的最大转角值,考虑汽车荷载的冲击系数 $\mu=0.05$,得到该桥桥面最大允许转角结果如表 1 所示。

表 1 设计荷载作用下各吊杆位置处桥面最大转角

吊杆 编号	桥面铺装最大转角 θ/rad		吊杆 编号	桥面铺装最大转角 θ/rad	
	汽车-20+人群	城 B+人群		汽车-20+人群	城 B+人群
1	0.022 5	0.062 5	6	0.080 0	0.190 0
2	0.237 5	0.182 5	7	0.145 0	0.130 0
3	0.180 0	0.230 0	8	0.052 5	0.007 5
4	0.257 5	0.262 5	9	-0.125 0	-0.212 5
5	0.180 0	0.262 5	10	-0.450 0	-0.380 0

由表 1 的计算结果得出设计荷载作用下桥面允许最大转角为 $\theta=4.5 \times 10^{-3}$ rad,取 0.8 的安全系数,并将 θ 代入式(6),可得 $x=7.2$ mm。以 10[#] 吊杆为例计算最大施工步距,根据吊杆更换设计图纸,10[#] 吊杆设计吊杆力为 902 kN,吊杆理论伸长量为 37.2 mm,10[#] 吊杆处桥面最大高程变化为 7.2 mm,故 10[#] 吊杆最大施工步距为 20%,即 174 kN,其余吊杆可酌情适当增大施工步距。

综上所述,在吊杆更换过程中,仅需控制更换吊杆桥面高程变化值 $x \leq 7.2$ mm,施工步距设为 20%,即可保证桥面铺装层不开裂。

2.2 更换施工效果评价

以本文所得出的结果作为该桥吊杆更换工程的施工控制条件,7[#]~13[#] 吊杆施工步距设为 20%,其余吊杆施工步距为 30%,各吊杆处桥面累计高程变化不超过 7.2 mm。以北侧 10[#] 吊杆为例,其施工控制结果如表 2 所示,所有阶段累计位移都未超过 7.2 mm。

表 2 8[#]~12[#] 吊杆处桥面累计位移

施工控制	8 [#] 吊杆	9 [#] 吊杆	10 [#] 吊杆	11 [#] 吊杆	12 [#] 吊杆
原桥	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 [#] 临时吊杆张拉 20%	-2.98	-3.77	-4.21	-3.77	-2.98
10 [#] 原吊杆卸除 20%	0.97	-0.01	-0.99	-0.01	0.97
10 [#] 临时吊杆张拉 40%	-1.36	-3.09	-4.49	-3.09	-1.36
10 [#] 原吊杆卸除 40%	1.46	0.48	-0.48	0.48	1.46
10 [#] 临时吊杆张拉 60%	0.01	-1.65	-3.02	-1.65	0.01
10 [#] 原吊杆卸除 60%	1.84	0.86	-0.09	0.86	1.84
10 [#] 临时吊杆张拉 80%	1.24	-0.07	-1.22	-0.07	1.24
10 [#] 原吊杆卸除 80%	2.30	1.47	0.63	1.47	2.31
10 [#] 临时吊杆张拉 100%	5.01	4.36	3.57	4.36	5.01
10 [#] 原吊杆卸除	1.76	1.91	2.02	1.91	1.76

按该要求完成吊杆更换后,对桥面标高及吊杆力进行测量,以北侧吊杆为例,北侧桥面标高测量结果如图 5 所示,桥面标高基本恢复原设计水平,北侧吊杆力测量结果如图 6 所示,实测吊杆力与设计吊杆力符合。结果表明,本次吊杆更换过程及更换完成后的吊杆力测试结果满足设计及规范要求。

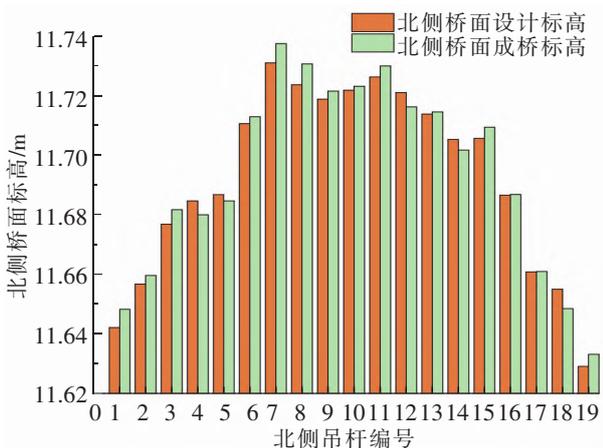


图 5 施工前后北侧桥面标高对比

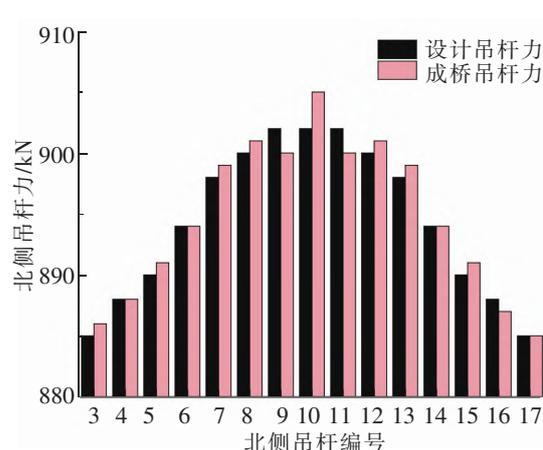


图 6 设计吊杆力与成桥吊杆力对比

3 结语

针对吊杆更换过程桥面无损控制标准进行了研究,首先采用设计荷载通过仿真计算得到桥面吊杆处的转角控制标准,然后再反算出吊杆位移控制标准,以方便现场更换控制,通过简化分析、模拟计算和工程应用,主要工作及结论如下:

(1) 对吊杆更换过程桥面不破损控制工况及转角条件进行了分析,得到了转角控制的临界值。

(2) 基于位移影响矩阵与转角影响矩阵计算,得到了吊杆处桥面转角计算方法的显式表达,并建立了桥面允许转角计算的有限元模拟计算方法。

(3) 由于桥面转角在更换过程测量困难,为方便施工对控制条件进行了优化,将桥面转角控制转换为更换吊杆处的桥面高程控制,建立了基于临界转角的挠度控制标准。

(4) 采用本文方法对工程实例桥梁更换吊杆过程控制条件进行了计算,并将理论计算结果作为吊杆更换时的控制依据,通过更换施工表明,按本文方法得到的标准进行过程控制,能保证桥面不出现破损。

以影响矩阵法为基础的桥面转角计算方法及优化控制公式,为今后的吊杆更换设计与施工提供了一种可行的控制方法。

参 考 文 献

- [1]周岚,赵岩荆. 大跨径钢箱梁悬索桥铺装层裂缝病害高发区域机理分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(12): 192-195.
- [2]唐三元. 南宁邕江大桥检测与病害分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2007, 32(S1): 292-295.
- [3]苗家武,袁保星,季文刚,等. 太原市漪汾桥改造工程设计与施工[C]//第十九届全国桥梁学术会议论文集(上册). 北京:人民交通出版社, 2010: 330-337.
- [4]李存,孔凯歌,石忠利. 混凝土桥面铺装裂缝成因分析[J]. 西部交通科技, 2022, 17(5): 136-137.
- [5]王欣,虞根森,俞峰. 不损伤桥面更换拱桥吊杆的方法研究[J]. 中国建材科技, 2011, 20(4): 91-93.
- [6]王石磊. 拱桥吊杆更换施工监控方法研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(2): 11-15.
- [7]王欣,虞根森,俞峰. 不损伤桥面更换拱桥吊杆的方法研究[J]. 中国建材科技, 2011, 20(4): 91-93.
- [8]张志国,聂磊. 拱桥吊杆病害及桥面铺装无损更换标准研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2010, 23(2): 94-97.
- [9]陈双聪. 拱桥吊杆更换若干关键问题研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.

(下转第 26 页)

[15]刘世忠. 双层公路钢桁梁桥车桥耦合振动研究[D]. 西安:长安大学, 2015.

Vehicle-Bridge Coupling Vibration Response Analysis of Long-Span Continuous Girder Bridge with Elastic Support

Bai Qi¹, Deng Nianchun^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to investigate the vehicle-bridge coupling vibration response of the beam bridge with elastic support, a spring-damping element was used to simulate the bearing, a nine-degree-of-freedom three-axis space vehicle model was adopted, and a three-span continuous box girder bridge was taken as the research object. The vehicle-bridge coupling equation was established, and the secondary development language of ANSYS software APDL was used for simulation analysis. The influences of support stiffness, road roughness, speed and distance on vehicle-bridge coupling dynamic response of long-span continuous girder bridges under elastic support were studied and analyzed. The results show that when the bearing stiffness is small, the dynamic response of the bridge is greater, but when the bearing stiffness is large, the dynamic response of the bridge is smaller. The lower the pavement level is, the more the vibration frequency of the bridge tends to be low frequency. When it is close to the natural frequency of the bridge, the dynamic response is particularly intense. Vehicle speed and distance have little influence on mid-span deflection, but have great influence on impact coefficient and acceleration amplitude. Controlling running speed and maintaining good distance can effectively reduce vehicle-bridge coupling vibration response.

Key words: elastic support; finite element method; vehicle-bridge coupling vibration; dynamic response

(上接第 6 页)

Nondestructive Control Standard and Application of Deck Pavement for Suspender Replacement of Tied Arch Bridge

Zhang Zhiguo, Wang Jingpeng

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The non-destructive control standard of bridge deck in the process of suspender replacement of tied arch bridge was studied. Based on the bridge design load standard, a simplified calculation formula of the maximum rotation angle of bridge deck pavement was established by using the displacement influence matrix and the rotation angle influence matrix. An optimization algorithm was proposed to control the maximum displacement control standard under the condition that the bridge deck pavement was not damaged. Combined with the actual arch bridge suspender replacement project, using the method of this paper, it was concluded that the elevation control standard to ensure that the bridge deck was not damaged during the suspender replacement was not more than 7.2 mm, and this was used as the construction control condition. Through the construction verification, the control standard could ensure that the bridge deck pavement was not damaged during the replacement process, and the expected goal was achieved.

Key words: tied arch bridge; suspender replacement; bridge deck pavement; non-destructive; control standard; influence matrix