

文章编号: 1000-4750(2015)Suppl-0177-07

城市曲线梁桥爬移现象及解决措施研究

焦驰宇^{1,2,4}, 刘陆宇², 龙佩恒^{2,3}, 侯苏伟^{1,2}

(1. 北京建筑大学北京城市交通基础设施建设工程研究中心, 北京 100044;

2. 北京建筑大学首都世界城市顺畅交通协同创新中心, 北京 100044;

3. 北京建筑大学工程结构与新材料北京高等学校工程研究中心, 北京 100044; 4. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 曲线梁桥因其自身特点, 易产生爬移现象, 既影响行车舒适性, 又危害桥梁结构安全。该文首先回顾了影响爬移的重要因素, 然后以北京某曲线桥梁为背景, 建立了数值模型, 探讨了恒载、活载、混凝土收缩徐变、温度、预应力等荷载作用下结构的受力特点, 与实际桥梁检测结果对比, 探讨了桥梁爬移形成的主要原因。此后探讨了缓解曲线桥梁爬移的主要思路, 力图通过合理设计支承形式、合理设置支座预偏心、支座形式优化等方式缓解曲线桥的爬移效果。该文研究表明: 合理设置支座预偏心、支承形式优化适用于车流量小, 半径小的曲线匝道桥。支座形式优化适用于车流量大, 曲率半径大, 抗扭能力更强的曲线梁桥。新建曲线梁桥在适当条件下, 单独或综合使用以上三种技术措施, 可以有效预防爬移病害的发生。

关键词: 爬移; 曲线梁桥; 预偏心; 支承形式; 支座形式

中图分类号: U448.42 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.S033

STUDY ON “CREEPING” PHENOMENON OF CURVED CONTINUOUS GIRDER BRIDGES

JIAO Chi-yu^{1,2,4}, LIU Lu-yu², LONG Pei-heng^{2,3}, HOU Su-wei^{1,2}

(1. BUCEA, Beijing Urban Transportation Infrastructure Engineering Technology Research Center, Beijing 100044, China;

2. BUCEA, Beijing Collaborative Innovation Center for Metropolitan Transportation, Beijing 100044, China;

3. BUCEA, Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Civil Engineering Structure and Renewable Material, Beijing 100044, China;

4. Tongji University, State Key Laboratory of Disaster Prevention in Civil Engineering, Shanghai 200092, China)

Abstract: Because of structural features, creeping diseases can be easily produced in curved bridges. Creeping diseases will reduce driving comfort and endanger structural safety. The existing research showed that the factors of creeping phenomenon had been analyzed. Taking an overpass bridge as an example, the features of radial displacement were analyzed under the effects such as dead loads, live loads, concrete shrinkage and creep, temperature, prestress, and so on. The influences of supporting form, bearing eccentricity, and bearing form on creeping, were also discussed. The study shows that supporting form and bearing eccentricity optimization method can be used when small traffic and curvature radius were applied in curved bridges. The bearing form optimization is applicable when heavy traffic, large curvature radius and torsional stiffnesses are shown in the curved bridges. When doing optimization design for a new curved bridge, the above three method and their mixed

收稿日期: 2014-05-25; 修改日期: 2015-02-05

基金项目: 建设部研究开发项目“多联超长城市高架桥地震反应特点与合理抗震体系研究”(2010-k3-47); 国家青年自然科学基金“基于精细化数值模拟的 FPS 隔震曲线桥抗震性能研究”项目(51308027); 北京市教委科技计划面上项目(2013)“考虑土-桥台-结构相互作用的曲线桥地震破坏机理研究”(KM201310016007); 北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目(2013)(IDHT20130512); 土木工程防灾国家重点实验室开放基金项目(SLDRCE-14-02)

通讯作者: 焦驰宇(1980—), 男, 陕西人, 副教授, 博士, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: jcy@bucea.edu.cn).

作者简介: 刘陆宇(1990—), 男, 北京人, 硕士生, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: 410197804@qq.com);

龙佩恒(1964—), 男, 北京人, 教授, 学士, 副院长, 主要从事桥梁结构理论安全评定及健康监测研究(E-mail: phjz@163.com);

侯苏伟(1984—), 男, 河南人, 讲师, 博士, 主要从事钢桥结构设计与疲劳断裂研究(E-mail: housuwei@bucea.edu.cn).

forms can all be applied for preventing creeping diseases.

Key words: “creeping” phenomenon; curved bridge; supporting form; bearing eccentricity; bearing form

随着国内桥梁建设事业的飞速发展,在城市立交桥中曲线桥应用越来越广泛。而由于其对各种复杂地形地物有良好的适应性,特别是在城市的立交桥中优美的线条相互交织,不仅能提高路口的通行能力,而且也成为城市中一道优美的风景线。

近年来,各地一些修建较早的曲线桥梁先后出现各种病害,轻则影响美观、降低行车舒适性;重则出现塌桥等严重公共安全事故,对国家造成巨大的经济损失,在社会上也造成了很大负面影响。其中的爬移病害也逐渐引起了广泛的重视^[1-2]。

曲线梁桥因弯扭耦合、支反力不均匀等复杂受力特征,使其受力机制与直线桥有很大差异。而早期的设计者所采用的设计理论并没有考虑这些特征,往往选用同等跨径的直线梁桥进行近似计算,并根据经验予以修正。如在设计中对关键因素把握不当,就会出现爬移现象。近年来,随着计算理论的不完善,对曲线梁桥的计算分析出现了更加精确和高效的方法和手段^[3]。因此,本文拟以一座城市曲线为背景,采用梁格理论对曲线梁桥受力特点及变形特征获得更深的认识,对现况桥梁出现的爬移病害进行分析评估。此后在桥梁设计阶段提出合理的建议并进行数值验证用以预防爬移病害的发生,为后续曲线桥设计提供技术支持。

1 爬移问题影响因素分析

1.1 曲线桥的构造特点

1.1.1 几何偏心效应

与直线桥梁不同,即使是横截面左右完全对称的弯梁桥,其重心也是偏向外侧,并偏离主梁剪力中心的。并且曲线桥梁都会设置横坡,使外侧梁自重大于内侧梁,加大偏心趋势。因而,与直线梁桥相比,在自重作用下,曲线桥会有向外倾覆及爬移的趋势。

1.1.2 曲线桥曲率半径

曲率半径是影响曲线梁桥爬移的主要因素之一。显然,在圆心角不变的前提下,曲率半径越小,曲线桥几何偏心效应越明显,梁端的侧向爬移(径向位移)越大。因此,爬移量与曲率半径成反比。

1.1.3 梁的截面形式

曲线梁的常用截面形式有工字形截面, T 形截

面,箱型截面等,其最大的不同在于抗扭刚度不同。文献[4]的研究表明,抗扭刚度越大,即弯扭刚度比($k=EI/GI_d$)越小,因曲率而导致的扭转变形愈小,在外界荷载作用下侧向位移就愈小;反之则越大。所以曲线桥多采用抗扭刚度大的箱型截面以减小爬移的发生。

1.1.4 支承方式与支座形式

支承方式是影响爬移量的重要因素。曲线梁桥可以采用多种支承形式。文献[5]的研究表明:对于宽桥和大半径的曲线梁桥,由于主梁扭转作用较小,要求主梁增加横向稳定性。中墩宜采用抗扭能力较强的多柱或多支座支承方式,如图 1(a)所示。也可采用墩梁固结的支承形式。对于窄桥和曲线半径较小的曲线梁桥,由于主梁扭转作用较为明显,特别是预应力钢束径向力的作用下,主梁扭转变形很大,常采用独柱墩。但支承形式的选择与墩高有一定关系,较高的中墩采用墩柱与梁固结的形式,较矮的中墩采用较弱抗扭能力的单点支承方式。这几种支承方式都能有效降低曲线桥梁的扭转变形,其对爬移的影响规律将在下一节讨论。



(a) 所有支座均为抗扭支座



(b) 端支座均为抗扭支座,中支座不抗扭

图 1 曲线梁桥的中间支承类型

Fig.1 Supporting Pattern in curved bridge

另外,支座形式对径向位移也有很大的影响,这其中包括不同类型支座的布置和支座预偏心设置等。现普遍采用的支座布置原则为:在曲线桥两端的桥台设置能抵抗外扭矩的抗扭支承,中间支承可以点铰支承,也可采用抗扭支承,或者交替使用两种支承形式,保证伸缩缝正常工作,并限制梁端的扭转变形,此外通过设置预偏心,能有效减少曲线桥几何偏心效应,从而降低曲线桥向外爬移的趋势。

1.2 曲线桥的外部作用

1.2.1 车辆荷载作用

文献[6]的研究表明,车辆行驶在曲线梁桥上,车辆荷载对桥梁有竖向力(车辆重力、冲击力)、切向力(制动力)和径向力(离心力)三种力的作用。对于竖向力,车辆的偏心行驶会使得梁体产生扭转。对于径向力,其是在间隔时间很短中不断施加的,而且梁体发生横桥向位移后,由于支座的摩擦力等因素的影响,在外荷载或引起其变化的因素消失后,侧向位移并不能全部恢复,长年累月后会产生横桥向残余位移的累积,即产生曲线梁桥的爬移现象。

1.2.2 温度作用

温度效应,包括年平均温差(整体升、降温)和日照骤变温差(内外温差和竖向梯度)。由于曲线桥内外弧长不同,易造成桥梁整体升温或降温过程中内外弧变形量不同,使曲线梁桥产生缓慢爬移现象[7]。

1.2.3 混凝土收缩徐变

文献[8]的研究表明:对于曲线梁桥而言,由于混凝土收缩、徐变的影响,外弧的变形量大于内弧变形量,随着时间的推移导致侧向位移不断加大。总体而言,其工作原理与整体降温作用基本一致。

1.2.4 预应力影响

一般而言,曲线梁桥中,预应力钢束正弯矩区段的长度要远大于负弯矩区段的长度,相应的预应力钢束重心位于主梁底部的长度远大于位于主梁顶部的长度。这使得预应力径向力产生的向外侧扭矩 $M_{T下}$ 大于向内侧扭矩 $M_{T上}$,所以预应力产生的总扭矩会使曲线梁向外侧扭转,进而产生爬移现象。

2 典型工程实例

2.1 实例建模

2.1.1 设计资料

本文以某城市立交桥第二联北桥作为工程背景,如图2所示。该桥为8跨预应力钢筋混凝土连续箱梁桥,总跨径为217.098 m,桥宽7 m,曲率半径 $R=220$ m。

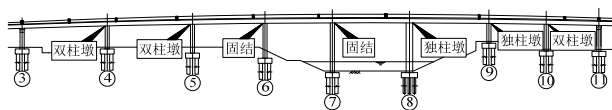


图2 某立交桥第二联北桥总体布置图

Fig.2 The drawing of the bridge

该桥建于1991年,至今已运营22年。近年来,

对其进行检测表明:该桥主梁最大爬移量达到70 mm,造成部分支座使用性能无法满足规范要求,承载力下降,桥梁结构安全受到严重威胁。2011年,对该桥结构做定期检测表明:梁体存在偏移,支座周边抗震锚栓已与桥墩紧贴、锚栓已倾斜,给桥墩带来水平附加力,影响桥墩结构安全;多个独柱墩顶部球型支座径向位移量超过支座允许限值。2013年,对该桥的支座特殊检测中,对支座位置处桥梁的位移进行了更加细致的检测,其具体位移方向及大小如图3所示。

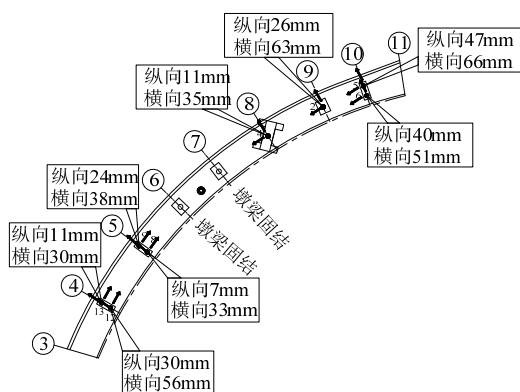


图3 桥面位移图

Fig.3 The displacement of the bridge

2.1.2 梁格法建模

为准确探讨曲线高架桥发生爬移的主要原因,本文采用MIDAS/CIVIL软件,选用梁格法[9]进行建模。按照桥梁的施工过程,依据《桥梁设计通用规范》(JTJ D60-2004),《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ D62-2004)等规范要求,对模型施加了自重、二期、温度、活载、离心力等荷载,并对其进行组合。建立的最终模型如图4所示。

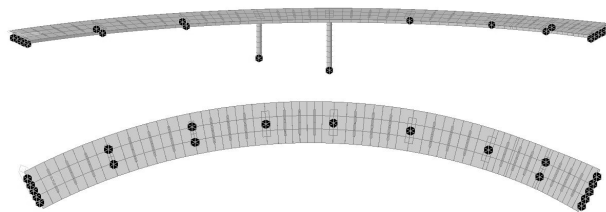


图4 桥梁模型

Fig.4 The model of the bridge

2.2 模型计算结果分析

经过计算,得到各支座处桥梁径向位移情况如表1所示。

分析计算可以看出:通过比较模型计算得到的位移与实际桥梁发生的位移,发现其趋势基本一

致，证明此模型能够较为真实的模拟实桥位移情况，进而证明此模型可以被用于爬移问题的相关研究。通过分析：离心力是引起该桥爬移的主要原因(约占爬移总量的 60%); 其次为混凝土收缩徐变及温度作用(约占爬移总量的 32%); 恒载+预应力作用(约占爬移总量的 8%)。具体分析过程详文献[10]。

表 1 六种荷载作用下桥梁径向位移 /mm
Table 1 Model calculation results on radial displacement

支座位置	恒载	预应力	徐变 收缩 整体降温			离心力	合计	实测值
			20a	20a	25°			
3#轴公用墩	-2	-1	-3	-5	-4	-3	-19	—
4#轴 12 号	-1	1	-2	-2	-2	3	-2	53
4#轴 13 号	-1	2	-1	-1	-1	3	2	30
5#轴 8 号	0	2	-1	-3	-3	10	5	33
5#轴 9 号	0	2	-1	-2	-2	10	8	38
6#轴(固结)	0	3	0	-2	-2	14	14	—
7#轴(固结)	1	3	1	-1	-1	21	24	—
8#轴 4 号	1	2	2	1	1	30	37	35
9#轴 2 号	1	3	3	4	3	37	50	63
10#轴 5 号	1	3	4	5	5	39	56	51
10#轴 6 号	1	4	5	7	6	39	62	66
11#轴公用墩	1	2	0	0	0	37	39	—

2.3 爬移问题解决方法研究

本节拟讨论新设计桥梁在曲率半径，截面形式等条件受限制且无法进行调整的情况下，通过合理设计支承形式，支座预偏心等措施如何有效减小爬移；其次针对已出现爬移病害的既有桥梁提出采用的更换支座形式等方法防止爬移的进一步发展。

2.3.1 支承形式优化设计

已有研究表明^[11]，平面曲线梁桥当去除支座而直接墩梁固结或中墩单柱改双柱时，主梁的扭矩及位移可得到大大改善。本文所研究的曲线桥，因受场地条件限制，桥梁 8#轴, 9#轴均采用独柱墩支承，这对控制桥梁爬移是不利的。故笔者假设该桥下部结构形式不受空间限制，在原桥模型基础上，改变了 8#轴, 9#轴处的支承形式。以期获得此桥理论上最有利于控制桥梁径向位移的支承形式。

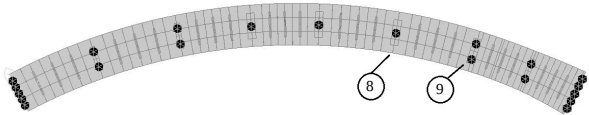
为简化分析，以下各节对全桥扭矩，扭转变形及支座反力分析时仅考虑主梁恒载+预应力荷载组合。另外在径向位移对比中加入温度，收缩徐变，离心力作用等，以便对比原桥模型径向总位移值。具体的支承形式改变方式如表 2、图 5 所示，计算结果如图 6 所示。

表 2 支承形式优化设计表格

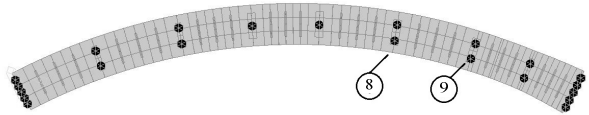
Table 2 The change mode of supporting form

支承形式名称	支承形式改变
支承形式 1	9#轴改为双柱支承
支承形式 2	8#轴, 9#轴均改为双柱支承

计算结果表明在支承形式改变后，全桥扭矩，扭转变形均得到有效控制，其中以支承形式 2 控制效果最好。不难分析出，双柱墩能强行限制桥梁横向的扭转，结果导致原桥最大扭矩明显降低。



(a) 支承形式 1 顶视图



(b) 支承形式 2 顶视图

图 5 支承形式示意图

Fig.5 View of supporting form

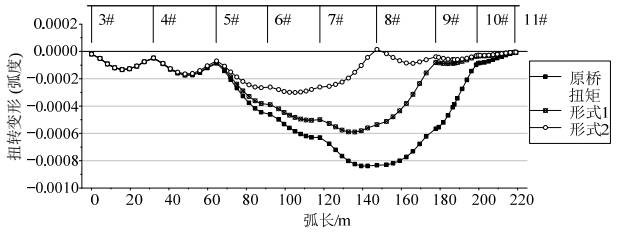
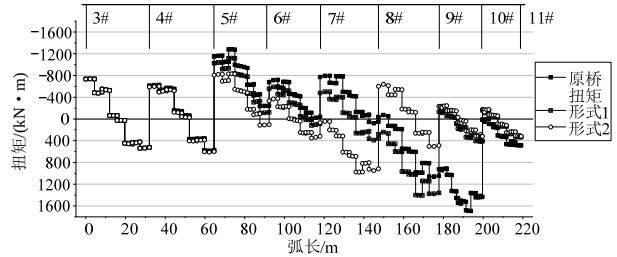


图 6 全桥扭矩、扭转变形变化

Fig.6 Trends of bridge Torque and torsional deformation

图 7 显示了不同支承形式下桥梁径向位移变化。虽然支承形式的改变并没有使全桥径向位移有明显的降低，但仅考虑恒载+预应力作用时，改变支承形式对改善曲线桥径向向外侧平动位移十分有效。其主要原因是曲线桥梁的扭转变形被限制后，由恒载偏心所造成的桥梁径向位移即得到有效控制。而对离心力作用，由于其力的作用方向是径向，故改变支承形式并不能降低其向桥梁外侧力的

作用。最后确定对本桥而言,采用支承形式2是较为合理的。

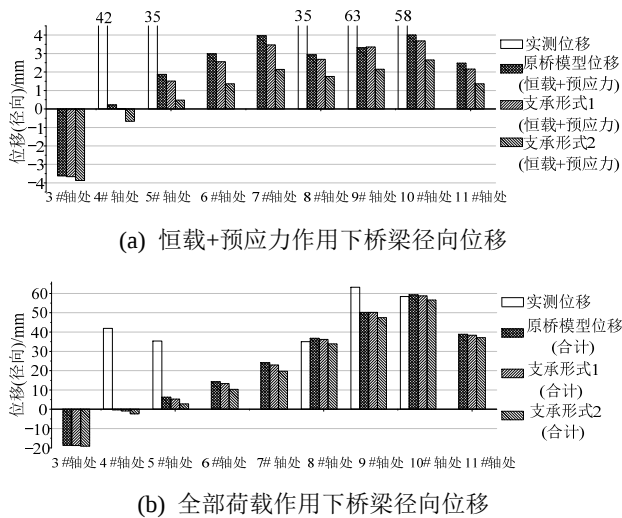


图7 径向位移变化

Fig.7 Trends of bridge radial displacement

2.3.2 支座预偏心优化设计

因该桥建设时间较早,受限于当年的计算水平,原桥独柱墩的支座均未设置预偏心。故本文假设设计中,对6#轴~9#轴独柱墩设置预偏心值如表3所示。计算结果如图8、图9所示,可以看出:设置预偏心后桥梁在5#轴和10#轴处扭矩值明显降低,全桥扭矩分布更加均匀,扭转变形也随之明显减少。

表3 预偏心设计表格

Table 3 Design for bearing eccentricity

预偏心位置	预偏心距离
6#、7#、8#、9#轴独柱墩	外偏 10 cm
6#、7#、8#、9#轴独柱墩	外偏 20 cm

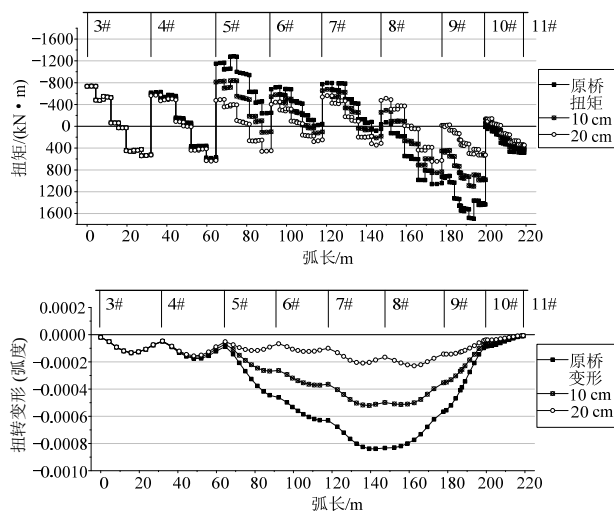


图8 全桥扭矩,扭转变形变化

Fig.8 Trends of bridge torque and torsional deformation

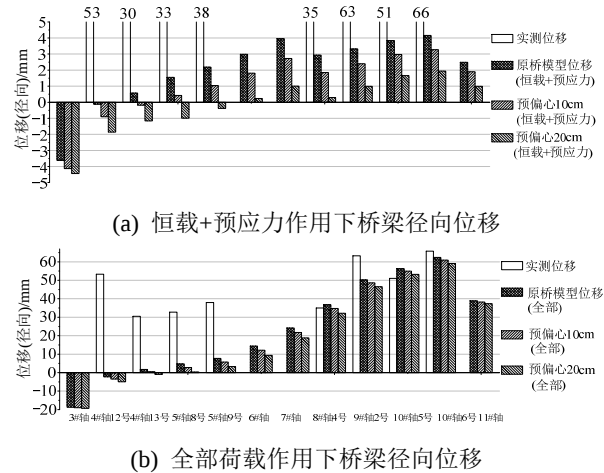


图9 径向位移变化

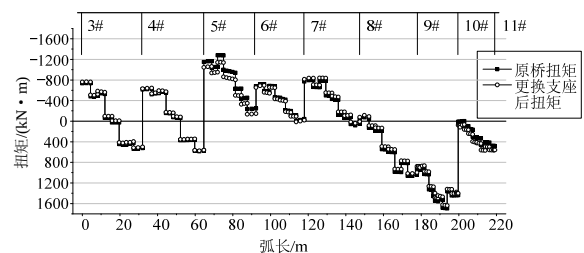
Fig.9 Trends of bridge radial displacement

图9显示了该桥中墩设置不同预偏心值后径向位移的变化规律,可以看到全部荷载作用下全桥位移几乎没有降低,而仅考虑恒载+预应力作用时,设置预偏心对改善曲线桥径向爬移是十分有效的。其主要原因在于设置预偏心后曲线桥梁的扭转效应明显降低,固恒载偏心所造成的桥梁径向位移亦明显降低。而对因离心力产生爬移,由于其力的作用方向是径向,故设置预偏心并不能阻止其使曲线桥向外侧爬移。最后确定对本桥而言,设置20 cm的预偏心值是较为合理的。

2.3.3 支座布置形式优化设计

桥梁支座的主要作用,是将桥梁上部结构结构横载与活载传递到桥梁的墩台上去,同时保证上部结构能在一定范围内位移与转动。对于本实例而言,4#、5#、10#轴处盆式支座均为多向滑动支座,对桥梁径向位移没有限制。由此造成现在其中许多支座发生了径向位移超限的情况。为更好限制桥梁的横向位移,本节中笔者将该桥4#、5#、10#轴内侧三个支座模拟为单向活动盆式支座,并对更换支座后桥梁内力变形变化进行分析。

根据《梁桥》书中关于弯桥支座布置实例,假定将6#、8#、12#支座更换为:《中华人民共和国交通行业标准》(JT 391-1999)中GPZ10DX单向滑动盆式支座,支座布置方向不变。



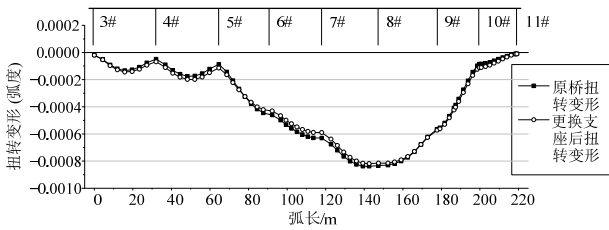
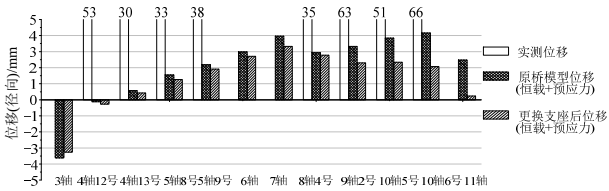


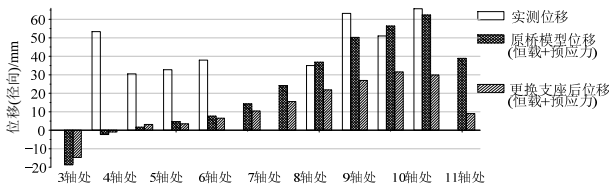
图 10 全桥扭矩, 扭转变形变化

Fig.10 Trends of bridge Torque and torsional deformation

图 10 显示了恒载+预应力所用下桥梁扭矩及扭转变形变化。可以看到支座类型改变后, 全桥扭矩, 扭转变形均变化很小。可见改变支座形式并不能降低桥梁的扭转效应。结果造成桥梁上部结构依然会存在爬移趋势。



(a) 恒载+预应力作用下桥梁径向位移



(b) 全部荷载作用下桥梁径向位移

图 11 径向位移变化

Fig.11 Trends of bridge radial displacement

图 11 显示了更换支座后桥梁径向位移变化。更换单向活动支座后桥梁在恒载+预应力作用下位移并没有明显降低, 但更换支座对全部荷载作用下曲线梁爬移的限制要明显好于前两种方法。故综合比较以上三种方法, 限制离心力作用下的爬移最有效的方法是设置单向支座。故对本桥而言, 此方法能有效限制桥梁的径向位移。

在更换单向活动支座后, 曲线桥单向活动支座处一般都会产生径向力, 故在更换支座设计中必须要考虑径向力对支座的作用。根据《盆式支座规范》, 普通盆式固定支座的水平抗剪能力为设计竖向承载力的 10%。故取更换后支座的水平抗剪能力 $10000 \text{ kN} \times 10\% = 1000 \text{ kN}$, 最终得到全部作用下各支座径向水平力如下表所示。

表 4 支座径向力表格

Table 4 Trends of bridge radial displacement

支座	径向水平力/kN	支座水平抗剪能力/kN
12 # 支座	17.2	1000
8# 支座	123.96	1000
6# 支座	542.54	1000

经验算, 虽支座径向水平力验算均符合要求, 但个别支座径向水平力较大。如 6# 支座径向水平力已达到了支座抗剪能力的 55%, 故曲线桥原有双向活动支座更改为单向活动支座后, 应进行支座径向水平力验算, 以保证更换后的支座能满足结构承载力要求。

3 结论

本文以北京某桥梁为例, 对曲线桥梁爬移机理及其解决措施进行了研究, 得到以下结论。

(1) 研究表明: 车辆荷载, 温度, 混凝土收缩徐变, 预应力作用均会使曲线桥产生爬移现象。其中离心力是引起曲线桥爬移的主要原因。

(2) 支座预偏心, 支承形式优化能有效限制曲线桥恒载+预应力作用下的爬移, 并能有效降低全桥扭矩及扭转变形, 但不能限制离心力作用下曲线桥的爬移。故对车流量小, 曲率半径小的匝道桥, 应优先考虑跨中设置双柱墩的方法, 若场地条件不允许时, 也可采用独柱墩设置支座预偏心的优化方法。

(3) 支座形式优化能有效限制曲线桥中离心力引起的爬移, 但不能有效降低全桥扭矩及扭转变形。故对车流量大, 曲率半径大, 抗扭能力更强的曲线梁桥, 应优先考虑设置单向活动支座的方法。但支座更换前应进行径向剪力验算, 并验算下部结构刚度, 确保桥梁结构安全

(4) 新建曲线梁桥, 应在满足现场条件的前提下, 综合使用以上三种优化设计方法, 以有效预防爬移病害的发生。

参考文献:

[1] 徐文平, 钟金周. 某独柱支承连续曲梁桥侧向滑移事故处理[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 79—81.
Xu Wenping, Zhong Jinzhou. Treatment of lateral slipping of continuous curved box girder bridge with single support [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(3): 79—81. (in Chinese)

- [2] 霍志芳. 独柱支承曲线连续梁桥预偏心距设计[J]. 公路, 2007, 24(7): 24—30.
Huo Zhifang, Pre-eccentric distances design of curved continuous girder bridges with single-column supports [J]. Highway, 2007, 24(7): 24—30. (in Chinese)
- [3] 王荣辉, 刘光栋, 邱波. 薄壁曲线箱梁空间计算的曲板梁单元法[J]. 中国公路学报, 2000, 13(1): 73—76.
Wang Ronghui, Liu Guangdong, Qiu Bo. A curved plate beam element method of spatical computation for thin-walled curved box girder [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1): 73—76. (in Chinese)
- [4] 邵容光, 夏淦. 混凝土弯梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994: 20.
Shao Rongguang, Xia Gan. Hunningtu Wanliangqiao [M]. Beijing: China Communications Press, 1994: 20. (in Chinese)
- [5] 周若来, 陈卫东. 曲线梁桥常见病害与设计要点[J]. 中外公路, 2008, 28(6): 149—151.
Zhou Ruolai, Chen Weidong. The common diseases and design points of curve beam bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(6): 149—151. (in Chinese)
- [6] 王新定, 丁汉山, 吉林, 戴航, 刘华. 混凝土连续弯梁桥侧向位移分析及对策研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(11): 64—67.
Wang Xinding, Ding Hanshan, Ji Lin, Dai Hang, Liu Hua. Study on lateral displacement of continuous curved girder concrete bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(11): 64—67. (in Chinese)
- [7] 张继尧, 杨耀柱, 刘效尧, 徐岳. 梁桥 [M]. 第 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2011: 578—581.
Zhang Jiyao, Yang Yaoshuan, Liu Xiaoyao, Xu Yue. Beam bridge [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2011: 578—581. (in Chinese)
- [8] 刘柱国. 曲线梁桥平面位移机理分析[J]. 交通科技, 2007(3): 20—22.
Liu Zhuguo. Plane displacement mechanism analysis of curve beam bridge [J]. Transportation Science & Technology, 2007(3): 20—22. (in Chinese)
- [9] 汉勃利 E C. 桥梁上部结构性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982: 76—79.
Hambly E C. Bridge deck behaviour [M]. Beijing: China Communications Press, 1982: 76—79. (in Chinese)
- [10] Bai Y, Du X, Lin P S, et al. Challenges and advances in sustainable transportation systems [C]. ASCE, 2014: 639—646.
- [11] 贾文杰. 连续弯梁桥支座平面合理布置和构造措施[J]. 山西交通科技, 2010(4): 84—86.
Jia Wenjie, The rational arrangement and structural measures of continuous curved beam bridge bearing plane [J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2010(4): 84—86. (in Chinese)

(上接第 176 页)

- [7] 高志强. 现浇混凝土空心楼盖分析与设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
Gao Zhiqiang. Study on the analysis and design method of cast-in-site hollow concrete floor system [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [8] 孙会郎. 现浇混凝土空心楼盖受力性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
Sun Huilang. Study on properties of cast-in-situ reinforce concrete hollow slab floor system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [9] Miao Z W, Lu X Z, Jiang J J, Ye L P. Nonlinear fe model for rc shear walls based on multi-layer shell element and microplane constitutive model [C]. Computational Methods in Engineering and Science Epmesc X, August 21-23, Sanya, Hainan, China; Tsinghua University Press, 2006, CD-ROM.
- [10] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 163—169.
Lu Xinzheng, Ye Lieping, Miao Zhiwei. Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009: 163—169. (in Chinese)
- [11] 叶列平, 陆新征, 马千里, 等. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[J]. 工程力学, 2006, 23(增刊 2): 173—183.
Ye Lieping, Lu Xinzheng, Ma Qianli, et al. Nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures subject to earthquake loading [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(Suppl 2): 173—183. (in Chinese)
- [12] 门俊, 陆新征, 宋二祥, 等. 分层壳单元在剪力墙结构计算中的应用[J]. 防护工程, 2006, 28(3): 9—13.
Men Jun, Lu Xinzheng, Song Erxiang, et al. Application of layered model in analysis of shear wall structures [J]. Protective Engineering, 2006, 28(3): 9—13. (in Chinese)
- [13] 林旭川, 陆新征, 缪志伟, 等. 基于分层壳单元的 RC 核心筒结构有限元分析和工程应用[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 51—56.
Lin Xuchuan, Lu Xinzheng, Miao Zhiwei. Finite element analysis and engineering application of RC core-tube structures based on the multi-layer shell elements [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 51—56. (in Chinese)
- [14] 汪训流, 陆新征, 叶列平. 往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 76—81.
Wang Xunliu, Lu Xinzheng, Ye Lieping. Numerical simulation for the hysteresis behavior of rc columns under cyclic loads [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 76—81. (in Chinese)
- [15] 卢啸, 陆新征, 张万开, 叶列平. 特大地震下超高层建筑的倒塌模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(11): 1405—1416.
Lu Xiao, Lu Xinzheng, Zhang Wankai, Ye Lieping. Collapse simulation of a super high-rise building subjected to extremely strong earthquakes [J]. Science China Technology Science, 2011, 41(11): 1405—1416. (in Chinese)