

曲线梁桥支座脱空成因分析及设计探讨

孟杰^{1,2}, 刘钊², 周明华³

(1. 林同棧国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆市 401121; 2. 东南大学 土木工程学院;
3. 东南大学 混凝土与预应力混凝土教育部重点实验室)

摘要:近年来,曲线梁桥支座移位脱空事故常有发生,该文结合某实桥支座移位和脱空病害,从曲线梁桥受力机理方面阐述了支座移位脱空的原因,并对曲线梁桥设计中的若干问题进行了探讨。

关键词:曲线梁桥; 支座移位和脱空; 成因分析

在公路及城市道路的立体交叉工程中,曲线梁桥是一种不可缺少的重要桥型。对于大曲率半径桥梁往往可以简化地按直桥计算;但对于小曲率半径桥梁,弯扭耦合效应明显,结构受力复杂,若仍按直桥计算误差必然较大。

由于设计和施工对曲线梁桥认识不足,支座移位和脱空事故时有发生。淮南某4跨预应力混凝土箱梁跨线桥(曲率半径为90 m),由于设计上未考虑曲线梁桥的受力特征,在落梁3个月后发现梁体扭转移位,梁端内侧支座脱空,如图1所示。南昌某5跨预应力混凝土箱梁匝道桥预应力张拉结束后发现两端支座反对称移位,但未发现支座脱空。该桥曲率半径较大(曲率半径为2 000 m)可按直线梁桥设计,但支座布置方案除中墩设置固定支座外,其余均采用多向活动支座,梁端无径向约束使得桥梁支座在预应力径向力及温度荷载作用下移位严重,如图2所示。厦门某立交桥匝道成桥不久后梁端内侧支座脱空。该文将对该桥事故成因展开讨论分析,并提出防止曲线梁桥支座移位和脱空的若干设计建议。



(a) 实桥外观



(b) 支座脱空

图1 淮南某预应力混凝土箱梁跨线桥

1 曲线梁桥的结构受力特点

由于曲线梁桥的平面弯曲线形,使得各支承点不在同一直线上,在荷载及预应力作用下曲线梁因弯扭

- *****
- [14] 丁泉顺,陈艾荣,项海帆. 大跨度桥梁多模态耦合颤振的自动分析[J]. 土木工程学报,2002(4).
- [15] 许志豪. 紊流风对大跨度分体双箱梁桥梁的作用[D]. 同济大学博士学位论文,2006.
- [16] 牛华伟. 气动导数识别的三自由度强迫振动法及颤振机理研究[D]. 湖南大学博士学位论文,2007.

- [17] 牛华伟. 桥梁主梁断面18个颤振导数识别的三自由度强迫振动法[J]. 土木工程学报,2014(4).
- [18] Katsuchi H, Jones N P, Scanlan R H. Multimode Coupled Flutter and Buffeting Analysis of the Akashi-Kaikyo Bridge[J]. Journal of Structural Engineering, 1999,125(1): 60-70.

收稿日期:2020-06-20(修改稿)

基金项目:重庆市院士牵头科技创新引导专项(编号:cstc2017zdcy-yszxX0003)

作者简介:孟杰,男,高级工程师. E-mail: mengjie@tylin.com.cn



(a) 实桥外观



(b) 支座移位

图 2 南昌某预应力混凝土箱梁匝道桥

之间相互影响,使得其受力状态极其复杂。研究表明:与曲线梁桥受力有关的主要因素有桥梁跨度、曲率半径、圆心角、桥面宽度以及弯扭刚度比等。圆心角是跨长与半径的比值,能全面地反映梁段的弯曲程度。对于特定跨度桥梁,圆心角越小,曲线梁桥的受力特征越靠近直线梁桥。一般来说,当圆心角小于 22.5° 时可以忽略扭转作用对挠度的影响。加拿大安大略省公路桥梁设计规范中,建议 $L^2/(bR) < 1.0$ 时,曲线梁桥可以按直线桥梁设计,其中 L 为桥梁跨径, b 为桥面半宽, R 为曲率半径。

梁体的弯扭刚度比与结构的受力变形状态有直接的关系。研究表明:在抗弯刚度满足要求的前提下宜尽量增大截面抗扭刚度以减小扭转引起的变形。

所谓弯扭耦合变形,可理解为弯曲和扭转变形的叠加。在计算曲线梁桥的竖向挠度时,由于曲梁外侧弧长比内侧长,因此在恒载作用下即使是对称截面也会对梁体产生向外侧翻转的均布扭矩,使得外侧挠度比内侧大且梁体弯曲程度越大挠度差越大。对于两端的抗扭支座,内侧支座的反力将比外侧支座小,甚至可能出现负反力而脱空。

2 某曲线梁桥支座脱空成因分析

2.1 工程概况

厦门某立交桥 C 匝道第 2 联,跨径为 3×36 m,上部结构设计为预应力连续箱梁,全桥共 15 束纵向预应力钢绞线,基本沿全桥通长布置,如图 3(a)所示。

从 C3 墩起约 46 m 梁体位于 180 m 的圆曲线,剩余梁段位于 $A=120$ m 的缓和曲线。支座均采用盆式橡胶支座,C3、C6 两端端横梁支承均为双支座,支座布置间距为 1.8 m,中间 C4、C5 两个墩柱为单个固定支座,设计预偏心为 20 cm,如图 3(b)所示。

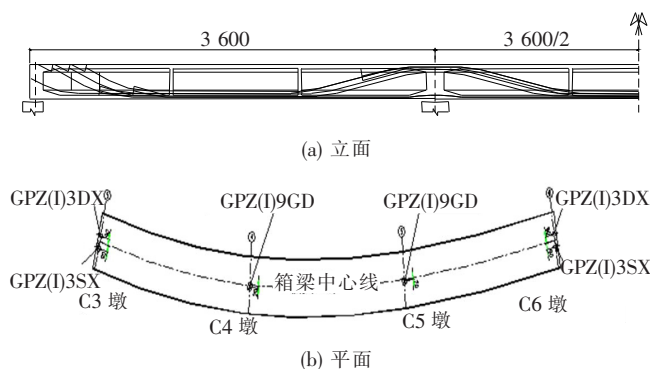


图 3 桥梁布置图(单位:cm)

主梁截面采用斜腹板单箱单室截面,顶板宽 8 m,底板宽 3 m,梁高 2 m,如图 4 所示。

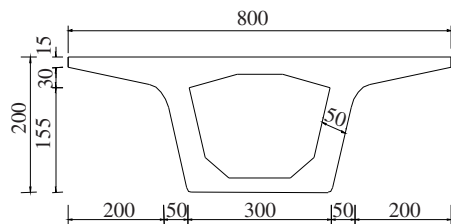


图 4 标准横断面图(单位:cm)

该桥曲线梁段的主要要素列于表 1。由表 1 可知:综合影响系数 $L^2/(bR)$ 远大于 1,因此该桥曲线梁桥特征明显,弯扭耦合效应不能忽略。

表 1 曲线梁要素

圆心角/ ($^\circ$)	曲率半 径/m	弧长/ m	桥面宽/ m	EI / ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)	GJ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)	$L^2/(bR)$	EI/GJ
34.4	约 180	108	8	7.83×10^7	6.5×10^7	16.2	1.2

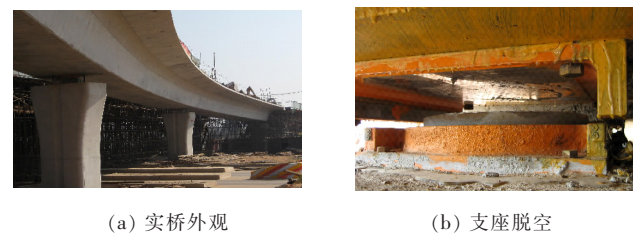
注: G 为剪变模量; J 为抗扭惯性矩; GJ 用于描述截面的抗扭能力; EI/GJ 为弯扭刚度比。

2.2 支座脱空情况

该桥采用满堂支架施工,成桥后梁体向曲线外侧

扭转严重,梁体曲线外侧上翘 125 mm,内侧下沉 125 mm,伸缩缝处联间梁端错台明显,C3 及 C6 墩外侧支

座压缩变形大,内侧支座脱空,如图 5 所示。



(a) 实桥外观 (b) 支座脱空

图 5 厦门某预应力混凝土箱梁桥

2.3 成因分析

2.3.1 模型建立

建立空间有限元模型,如图 6 所示。梁体采用 Timoshenko 梁单元,梁体与支座刚臂连接。支座处按局部坐标系考虑,局部坐标 X 轴沿梁体曲线切向, Y 轴沿曲线径向。

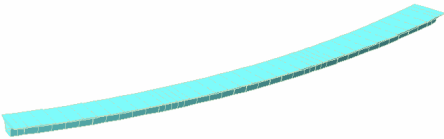


图 6 桥梁有限元模型

模型考虑恒载,预应力以及日照截面升温等工况,截面升温取桥规温度模式。

2.3.2 支座脱空成因分析

首先通过数值计算,可将 C3 及 C4 墩在各工况下支反力列于表 2。

表 2 各工况下支座反力

荷载工况	支座反力/kN		
	C3 墩内侧支座	C3 墩外侧支座	C4 墩中支座
恒载	1 326.8	621.5	5 315.9
预应力	-1 630.2	2 059.3	-429.0
日照升温	-491.7	623.5	-131.7
恒载+预应力	-303.4	2 680.8	4 886.9
恒载+预应力 +日照升温	-795.1	3 304.3	4 755.2

注:支座受压反力取为正值,反之为负。

由表 2 可见:中支座设计有 20 cm 的预偏心,可以调节梁体扭矩在全桥的分布,因此结构在恒载作用下,C3 墩内侧支反力大于外侧支座。但注意到,结构在预应力作用下,C3 墩内侧支反力为-1 630.2 kN,而恒载作用下为 1 326.8 kN,由计算可以看出在恒载和预应力共同作用下,主梁端部内侧支座脱空,而日照作用下,支反力为-491.7 kN,加大了梁体向外的扭转程度。

在计算的基础上,结合现场勘查情况可从如下几

个方面对桥梁支座脱空成因展开探讨。

(1) 预应力布置

曲线梁桥由于平面曲线的存在,预应力束将产生平面内的径向力,如图 7 所示。沿轴线水平径向力与截面剪心不重合,将对梁体产生沿程扭矩。

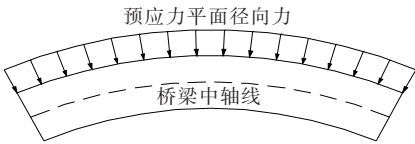


图 7 预应力钢束平面径向力

纵向预应力钢绞线基本沿桥跨通长布置,钢束特征如表 3 所示。

表 3 预应力钢束特征

钢束编号	钢束规格	数量/束	张拉控制力/kN	线形布置特征
N1	$\phi^{15.2-19}$	2	3 536.8	腹板通长曲线束
N2	$\phi^{15.2-19}$	2	3 536.8	腹板通长曲线束
N3	$\phi^{15.2-19}$	2	3 536.8	腹板通长曲线束
N4	$\phi^{15.2-19}$	2	2 908.6	腹板通长曲线束
N5	$\phi^{15.2-19}$	2	2 908.6	腹板通长曲线束
N6	$\phi^{15.2-19}$	3	2 326.9	底板通长直线束
N7	$\phi^{15.2-19}$	2	2 326.9	底板通长直线束

由图 3(a)可以看出:预应力钢绞线多布置于底板,仅 N1~N5 腹板束在墩顶附近上弯至顶板,即钢束大部分沿底板布置,因此预应力对梁体的总体效应是向外侧翻转效应。

该桥两中墩均设置固定支座,如图 3(b)所示,这直接导致中跨段预应力次内力较大,成桥后梁体上、下缘正应力如图 8 所示,主梁底缘最大压应力高达 15 MPa。可以推测设计上为了确保中跨段有必要的压应力储备,配置了过量的预应力钢束。这直接导致梁体在预应力作用下过分地向曲线外侧扭转,致使梁端内侧支座脱空。

(2) 箱梁截面构造

该桥采用单室斜腹板箱梁(图 4),顶板宽 8 m,底板宽 3 m,翼板伸出腹板净间距为 2 m。翼板悬臂距离过长而底板宽度过窄,这一构造特点直接限制了梁端双支座的布置(设计双支座间距仅为 1.8 m)。抗扭双支座间距偏小,使得梁端抗扭力臂小,在外荷载作用下内外侧支座受力不均匀,易导致内侧支座脱空。

(3) 日照升温影响

由于两中墩均设置成固定支座,可以想象在太阳

照射下,中跨梁段升温膨胀受两端固定支座约束而向曲线外侧变形,如图 9 所示。这又进一步加大了梁体向曲线外侧扭转的趋势。

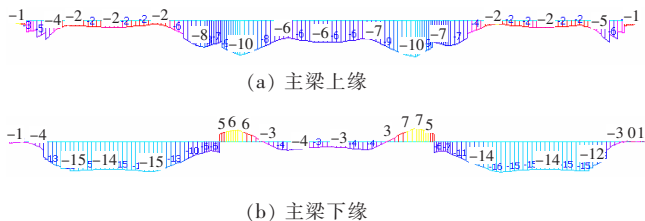


图 8 成桥后主梁应力图(正值代表拉应力,负值为压应力,单位:MPa)

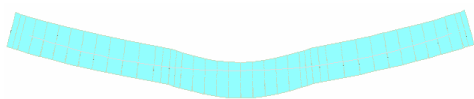


图 9 日照升温下主梁变形图

3 设计探讨

简单来说,防止曲线梁桥支座移位和脱空,就相当于控制梁体的扭转变形,因此通过设计使梁体扭转变形趋于合理,可以避免支座脱空发生。以下将从曲线梁桥设计的角度,探讨如何避免支座移位和脱空。

(1) 合理选择主梁截面。由于曲线梁桥弯扭耦合变形的特点,在箱梁结构抗弯刚度一定的情况下,尽量采用大抗扭刚度的截面,如采用扁平箱式截面,以利于抑制结构的扭转变形。

就上述实例情况,若把梁体截面底板宽度加大或采用直腹板截面,将带来两个好处:① 加大箱式中心线所围面积,使得截面获得更大的抗扭刚度;② 增加了抗扭支座间距,使内外侧支座反力受力均匀,避免一侧支座受力过小甚至脱空。

(2) 支承布置方式的选择。曲线梁桥有多种支承布置方式,通常来说梁端设置抗扭支承,而中间支承可以采用抗扭支承,或单点铰支承,或墩梁固结的形式。在荷载作用下,支承布置方式的不同对梁体弯矩、剪力影响基本可以忽略,仅对扭矩有较大影响。

研究表明:曲率半径越小,传递到端支承的扭矩越小。因此对于曲率半径小,截面宽度小的曲线桥,中墩单点支承方式常因工程造价低、桥下视野好而多被采用。而对于曲率半径大,截面宽度大的曲线桥,考虑到

桥梁横向稳定性及若用单点支承,荷载(活载、预应力或日照升温等)作用下梁端势必要承担较大扭矩,有支座脱空危险,这时中墩采用抗扭支承受力更加合理。为了适应梁体正常使用阶段的位移需求,一般在两端桥台设置可切向活动的抗扭支座,而仅在一个中墩设置固定支座,但需注意,为防止梁体移位,一般限制端部支座径向活动,因此支座在温度作用下需要抵抗径向力,有必要验算其受力情况。设计上有时会设置抗拉支座来防止桥梁内侧支座脱空,但抗拉支座的存在对桥墩混凝土抗裂不利,建议尽量不予采用。

(3) 单点支承曲线梁桥与预偏心的设置。将中墩单点支承沿曲线径向往曲线外侧移动一段距离,为桥梁提供预偏心,调整外扭矩沿桥跨的分布,可以降低梁端扭矩,即预偏心的合理设置可减小支座脱空的可能性。通常确定支座预偏心的方法为:调整支座预偏心值,使得梁体在自重及预应力作用下,跨中和支点截面扭矩大小接近相等,以充分利用截面抗扭能力。

(4) 预应力对曲线梁内力的影响。从连续梁的设计包络图看,正弯矩区远大于负弯矩区,预应力重心大部分布置在梁底部,因此,曲线梁桥预应力钢束由于平面线形产生的径向力将对结构有向曲线外侧翻转的效应,认识这一规律,可以避免设计上盲目过量配束,致梁体翻转过度而产生支座脱空。

参考文献:

- [1] 周明华,等. 预应力连续箱梁弯桥事故的整体同步顶升纠扭及加固[C]. 2007 年全国桥梁学术会议论文集, 2007.
- [2] 范立础. 桥梁工程[M]. 上册. 北京:人民交通出版社, 2001.
- [3] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- [4] 孙广华. 曲线梁桥计算[M]. 北京:人民交通出版社, 1997.
- [5] 邵容光,夏淦. 混凝土弯梁桥[M]. 北京:人民交通出版社, 1996.
- [6] 庞振宇,等. 城市混凝土曲线梁桥温度场及温度效应分析[J]. 中外公路, 2016(3).
- [7] 张贵明,等. 多跨连续曲线宽箱梁桥支座反力与平面内变形分析[J]. 中外公路, 2016(4).
- [8] 刘三会,等. 基于温度效应的小半径曲线箱梁支座布置[J]. 中外公路, 2016(4).
- [9] 段平,等. 曲线连续梁桥抗震支座减震效果分析[J]. 中外公路, 2016(4).