

轨道曲梁防崩裂关键技术研究

孔凡浩

中交公路规划设计院有限公司

摘要：跨座式单轨交通具有跨越能力强、线路灵活、运营成本低等特殊优势，其配套的轨道梁具有线形复杂、预压应力大、梁截面高宽比大、腹板薄且开孔率高构造特点。当轨道梁为适应线路采用较小的平曲线半径时，在预应力张拉过程中腹板受到较大的预应力径向力作用容易发生崩裂破坏等安全问题。本文针对小半径轨道曲梁腹板在预应力径向力作用下的开裂破坏问题进行了详细的研究，采用数值仿真与理论分析相结合的研究方法，提出了适用于小半径轨道曲梁的腹板开裂计算模型及其结构参数计算方法。

关键词：小半径轨道梁；预应力径向力；腹板结构参数；防崩裂措施

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.08.048

一、引言

单轨交通系统由于具有成本造价低、对复杂起伏的地形适应能力强、转弯半径小、运输量适中等特殊优势，已经成为中小城市、旅游业城市 and 山城的轨道交通首选类型之一。为满足单轨交通部分线路灵活的线形要求，其配套的轨道梁在设计时亦会采用较小的曲线半径，而小半径轨道曲梁的受力和变形相对于直线梁或大半径曲线梁要复杂得多，同时还存在腹板的局部崩裂破坏现象。

（一）轨道曲梁腹板崩裂破坏问题

刚构体系单轨交通配套的轨道梁受限于单轨列车车辆参数，轨道梁往往具有“高而窄”的结构特点，同时在腹板中配置较多的预应力钢束以保证足够的预压应力，使得轨道梁腹板往往处于高应力状态。



图1 预应力张拉时孔道保护层发生破坏

（二）工程概况

本文依托某跨座式单轨交通系统轨道梁工程项目，曲线半径100m轨道梁的跨中腹板厚度为240mm，腹板中共配置10孔7束预应力钢束，轨道曲梁腹板崩裂破坏图和典型横断面如图1、图2所示。

二、轨道曲梁腹板受力性能影响参数分析

通过有限元分析软件Ansys建立曲线半径100m轨道曲梁模型。从腹板结构设计参数、施工误差等方面出发，对腹板受力的影响因素进行了定量对比分析。

（一）腹板厚度影响分析

将腹板作为嵌固在轨道曲梁顶、底板的区域性梁，区域性梁的厚度直接影响其嵌固效果。选定轨道曲梁宽700mm、腹板高度1700mm，取跨中截面腹板厚度240mm、260mm和280mm，对这三种工况进行对比分析。由图4可知，随着腹板厚度的增大，内侧腹板布束区外缘和内缘对应的竖向拉应力最大值均呈减小趋势，即增加腹板厚度可以提高腹板的侧向抗弯刚度，有效地改善腹板在侧向整体受弯作用与腹板布束区局部受弯作用下的受力状态。

（二）孔道净间距影响分析

选定轨道曲梁腹板厚度240mm、孔道直径70mm，根据规范^[1]取实际工程中常见的孔道间竖向净距80mm、70mm和60mm，对这三种工况进行对比分析。由图5可知，孔道竖向净间距对内侧腹板布束区外缘的混凝土竖向应力影响较大，相对于工况一的竖向拉应力峰为1.16MPa，工况二和工况三对应的竖向拉应力最大值的增幅分别为18%和49%。当孔道间距取值过小时，轨道曲梁腹板的竖向拉应力会增大，不利于腹板的结构安全。

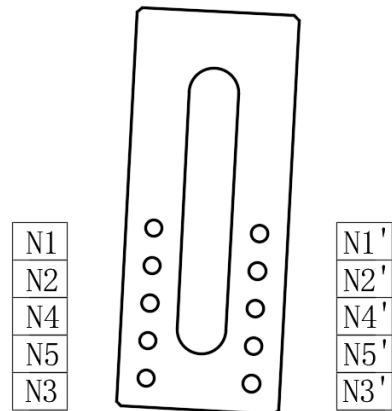


图2 轨道曲梁结构参数

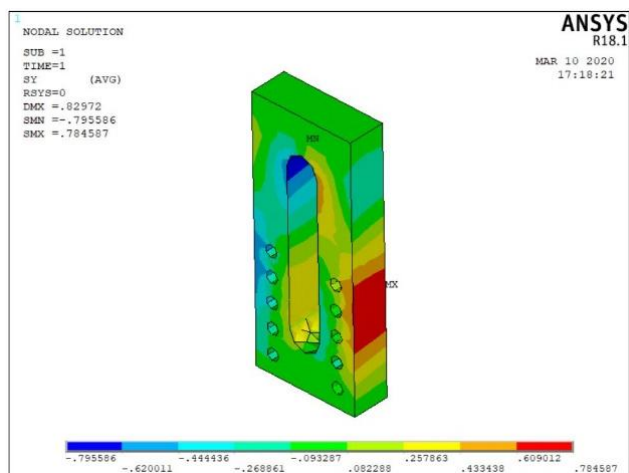


图3 轨道曲梁有限元模型

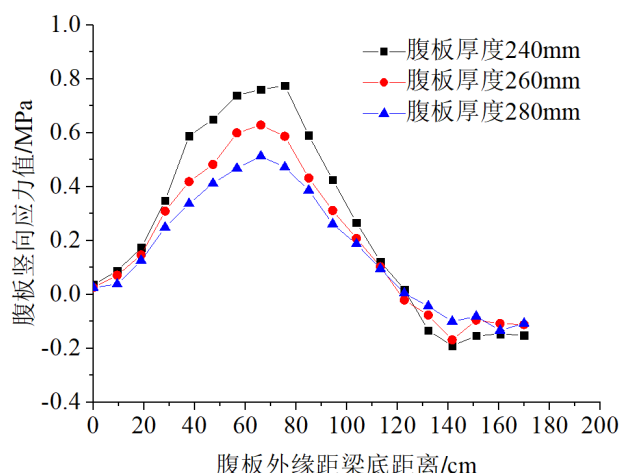


图4 不同腹板厚度的跨中节段应力

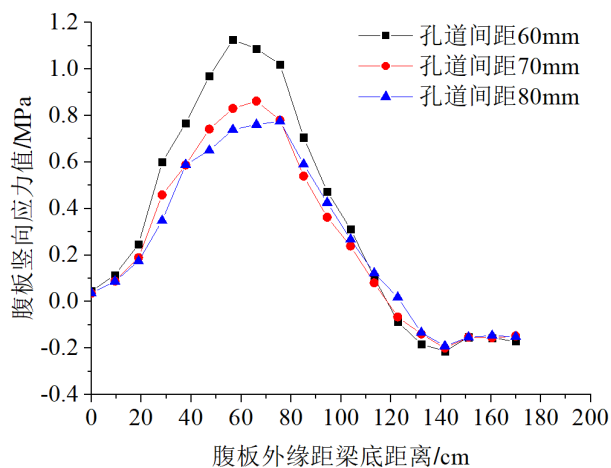


图5 不同孔道间距的跨中节段应力

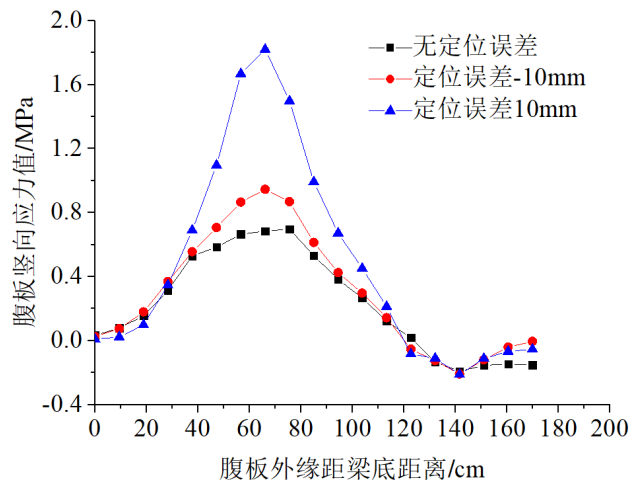


图6 不同定位误差的跨中节段应力

(三) 孔道定位误差影响分析

结合规范^[1]和实际施工情况，以定位网片向曲线外侧偏移为正，取工况一预应力孔道无定位误差、工况二N2'孔道在跨中截面的定位误差-10mm、工况三N2'孔道在跨中截面的定位误差10mm，对这三种工况进行对比分析。由图6分析可知，当定位网片向曲线外侧偏移10mm时，内侧腹板外缘的竖向拉应力峰值增幅142%；当定位网片向曲线内侧偏移10mm时，内侧腹板外缘的竖向拉应力由峰值增幅26%。定位网片向曲线外侧偏移会使得预应力钢束平曲线半径变小，导致其产生的水平径向力大幅增加，出现沿预应力孔道的纵向裂缝。

三、轨道曲梁腹板防崩裂合理设计

预应力径向力是导致轨道曲梁腹板崩裂破坏的直接原因，本文将在有限元仿真的基础上，归纳轨道曲梁腹板在预应力径向力作用下常见的破坏形态及其对应的开裂机理，给出相应的轨道曲梁腹板防崩裂设计方法。

(一) 轨道曲梁腹板的开裂破坏形式

1. 预应力径向力作用下轨道曲梁腹板纵向开裂

从仅考虑预应力径向力作用的角度出发，轨道曲梁腹板可以视为边支点弹性固结的单向板结构，腹板布束区受到预应力钢束张拉产生的垂直于腹板平面的径向力作用，引起腹板布束区出现横向正弯矩，而靠近顶底板的倒角位置则承受负弯矩作用，即腹板布束区外缘和顶底板的倒角位置处的混凝土出现竖向拉应力。

2. 预应力径向力作用下轨道曲梁腹板局部冲切破坏

当预应力径向力作用于轨道曲梁腹板时，可把孔道曲线内侧的混凝土保护层视为混凝土板结构，该板结构受到预应力径向力的局部作用。当出现孔道曲线内侧的混凝土保护层厚度取值过小、孔道局部折弯现象严重、孔道定位误差过大、普通钢筋配置不合理或浇筑的混凝土存在质量缺陷等问题时，孔道曲线内侧保护层混凝土容易发生上述冲切破坏。

3. 预应力径向力作用下孔道间混凝土竖向开裂

由有限元仿真分析可知,当设计或施工不当引起预应力径向力过大、孔道间距过小等问题时,孔肋混凝土相对薄弱,难以将腹板内、外侧联系为一整体来共同抵抗预应力径向力,使孔道周围特别是孔肋位置容易出现应力集中现象,进而出现竖向裂缝。孔道间混凝土的竖向裂缝属于局部破坏。

(二) 轨道曲梁防崩裂设计

1. 轨道曲梁腹板厚度设计

轨道曲梁腹板的纵向开裂计算可以采用两端由顶板弹性嵌固支撑的单向薄板的计算模式。将腹板中的竖向箍筋视为嵌固板受弯情况下的受力主筋,与孔道曲线内侧混凝土保护层共同承担预应力径向力产生的弯矩。

每米腹板径向力计算公式为:

$$M'_{max} = 250Q_n H \quad (1)$$

式中: Q_n ——预应力径向力;

H ——轨道曲梁腹板净高度。

由嵌固板的跨中截面弯矩公式:

$$M_{max} = 0.8M'_{max} = 200Q_n H \quad (2)$$

式中: 0.8——嵌固板的跨中弯矩修正系数。

根据钢筋混凝土结构受弯构件的计算原则,将预应力径向力作用下的腹板开裂问题转化为普通钢筋混凝土开裂问题,则有:

$$M_{cr} = 0.292(1 + 4\alpha_E \rho + 0.4\alpha_E \rho') f_{tk} b d^2 \quad (3)$$

式中: M_{cr} ——钢筋混凝土构件的开裂弯矩;

α_E ——竖向箍筋与混凝土的弹性模量之比,即 $\alpha_E = E_s / E_c$;

f_{tk} ——轨道曲梁腹板混凝土标准抗拉强度;

b ——轨道曲梁腹板长度,取 $b=1000\text{mm}$;

d ——轨道曲梁腹板厚度;

ρ ——每米轨道曲梁腹板受拉钢筋配筋率;

ρ' ——每米轨道曲梁腹板受压钢筋配筋率。

轨道梁腹板径向受拉、受压箍筋配筋率为:

$$\rho = \frac{A_s}{bd}, \rho' = \frac{A_s'}{bd} \quad (4)$$

式中: A_s ——每米轨道曲梁腹板受拉区箍筋面积;

A_s' ——每米轨道曲梁腹板受压区箍筋面积。

由轨道曲梁腹板的普通钢筋构造可知 $\rho = \rho'$,若要保证腹板不发生侧向挠曲开裂,则需使预应力径向力引起的弯矩满足 M_{max} 不大于 M_{cr} ,即腹板厚度须满足:

$$d \geq \sqrt{4.84 \left(\frac{\alpha_E A_s}{b} \right)^2 + 685 \frac{Q_n H}{f_{tk} b} - 2.2 \frac{\alpha_E A_s}{b}} \quad (5)$$

2. 轨道曲梁腹板预应力孔道间距设计

当孔道布置较为密集时,孔肋混凝土相对薄弱,难以将腹板内、外侧混凝土联系为一整体来共同抵抗预应

力径向力,使孔道周围特别是孔肋位置容易出现应力集中现象。

针对孔道间混凝土的竖向开裂这一形式,可假设其裂缝面平行于腹板,则破坏时预应力径向力为:

$$Q_n = f_{td}(s - d') \quad (6)$$

式中: f_{td} ——混凝土抗拉强度设计值;

s ——轨道曲梁腹板预应力孔道的竖向净间距;

d' ——预应力孔道直径。

则有预应力孔道竖向净间距取值应满足:

$$s \geq \frac{Q_n}{f_{td}} + d' \quad (7)$$

为保证不出现贯穿孔肋的竖向裂缝,轨道曲梁在设计阶段应采取如下控制措施:对于曲线半径 $\geq 500\text{m}$ 的轨道梁,其预应力孔道最小竖向净间距不宜小于孔道直径;对于曲线半径在 $100 \sim 500\text{m}$ 范围内的轨道梁,其预应力孔道最小竖向净间距不宜小于 1.4 倍的孔道直径;预应力孔道定位误差和定位网片间距应按照施工规范严格控制,严禁出现波纹管大幅度下挠变形现象。

四、结语

本文以小半径曲线轨道梁腹板的崩裂破坏问题为研究对象,探讨了轨道曲梁腹板在预应力径向力作用下的空间受力特性,提出了腹板结构参数的合理计算方法。梁体张拉过程中腹板布束区混凝土出现拉应力,而腹板厚度、孔道间距、孔道定位误差等参数取值不合理是腹板受力开裂的关键因素。腹板的开裂破坏形态可以归纳为腹板布束区混凝土纵向开裂、孔道曲线内侧混凝土保护层局部冲切破坏和孔道间混凝土竖向开裂。轨道曲梁腹板参数取值应从结构抗力的角度出发,严格把控施工质量,防止腹板在预应力径向力作用下发生崩裂破坏。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家标准. 跨座式单轨交通设计规范[S]. GB 50458-2008. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[2] 冯祁. 大跨径PC箱梁桥底板崩裂机理[D]. 长安大学, 2018.

[3] 中华人民共和国国家标准. 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S]. TB 10092-2017. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

[4] 李进. 大跨PC箱梁底板崩裂机理[J]. 公路与水路运输, 2018.

[5] 张长林. 径向力作用下预应力混凝土箱梁底板抗裂设计方法及应用[J]. 公路与水路运输, 2020.

[6] 温会芳. 大跨径连续刚构桥底板崩裂机理及其影响研究[D]. 昆明理工大学, 2017