

小半径 PC 曲线梁桥分析和设计要点

滕小竹

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 结合 PC 曲线梁桥的力学特征,梳理国内规范曲线梁桥的相关条文,从分析方法、支承体系影响、桥墩高度和支座刚度、恒载扭矩、预应力效应、支座横向偏心等方面总结小半径 PC 曲线梁桥的分析要点,从构造设计、钢束设计、钢筋设计、附属设计等方面总结小半径 PC 曲线梁桥的设计要点,相关结论可为设计人员提供参考。

关键词: PC 曲线梁桥;小半径;分析要点;设计要点

中图分类号: U448.42

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)04-0111-07

0 引言

曲线梁桥又称弯梁桥,是立交桥中常见的结构形式,PC 曲线梁桥由于弯扭耦合效应叠加预应力效应,结构受力复杂,设计人员往往很少采用,以 RC 曲线梁桥或钢结构曲线梁桥替代。前者造价不低且桥墩较多,景观效果欠佳;后者造价太高,经济效益不佳,因此有必要进一步研究推广应用小半径 PC 曲线梁桥。

1 小半径 PC 曲线梁力学特征

1.1 小半径曲线梁的定义

曲线梁桥由于曲率的存在,在受力性能上不同于直梁桥,直梁桥可视为曲率无限大的曲线梁桥的一个特例,只有当曲线梁桥足够“曲”时,才有必要进行区别于直梁桥的研究。

加拿大设计规范 OHBDC 中,采用 $L^2/bR < 1$ (b 为桥半宽)作为判别可按直线梁计算的标准^[1]。但根据该标准,桥越宽,越可按直梁桥计算。这与桥越宽,活载偏心越大、扭矩越大的规律相悖,因此有待商榷。NCHRP 的研究成果: $L/R < 0.2$ (对应 $\varphi = 11.5^\circ$) 时,曲梁可按直梁算; $0.2 < L/R < 0.8$ (对应 $\varphi = 45.8^\circ$) 时,按曲梁算,可采用单梁模型(除非桥宽非常宽); $0.8 < L/R$ 时,按曲梁算,采用梁格或者实体模型^[2]。美国 AASHTO(2007)规范:单跨箱梁圆心角 $\varphi \leq 12^\circ$ 时,多跨箱梁总圆心角 $\varphi \leq 34^\circ$ 时(每一跨按直线),可近似采用直线桥进行结构分析;跨径大于梁宽(腹

板外侧面间距)的 2.5 倍时,可采用单梁^[3]。

综上,建议采用圆心角 $\varphi(L/R)$ 作为判定曲线梁及是否小半径曲线梁的指标。当 $L/R \geq 0.2$ ($\varphi \geq 11.5^\circ$) 时,应按曲线梁桥计算。当 $L/R \geq 0.8$ ($\varphi \geq 45.8^\circ$) 时,可认定为小半径曲线梁。

1.2 小半径 PC 曲线梁的力学特征

由于曲率的影响,曲线梁具有弯扭耦合效应和空间几何不对称特性。曲线梁的破坏形态处于三维空间层面,破坏模式属于弯剪扭复合破坏,破坏模式复杂。曲线箱梁的腹板中,弯曲剪应力、扭转剪应力、横向弯曲应力相互叠加,受力状态非常复杂。

曲线梁的曲率越大,曲线梁的弯扭耦合效应越明显,梁内扭矩、扭转变形越大,开裂荷载和极限承载力越小^[4]。小半径 PC 曲线梁桥的受力性能较一般直梁桥有明显区别,相应的分析和设计方法更加复杂,主要体现在以下方面:

(1)小半径 PC 曲线梁桥在结构受力上的空间特性不可忽略,无法简化为平面杆系模型进行分析,必须采用三维空间模型进行分析和设计。

(2)小半径 PC 曲线梁桥主梁内扭转效应明显,主梁内、外侧在支反力、空间变形、应力、徐变等方面具有明显的差异,进而导致支座脱空、超载、主梁爬移、倾覆、侧翻等病害或事故。

(3)小半径 PC 曲线梁桥中的预应力效应(及次效应)、弯扭耦合效应、箱梁框架效应(对于箱梁)、混凝土收缩徐变等相互影响,使其受力性能趋于复杂。

(4)小半径 PC 曲线梁桥中腹板曲线形钢束的径向力可能造成预应力钢束崩出、局部失效的特殊破坏形式。

收稿日期: 2023-05-04

作者简介:滕小竹(1982—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

2 国内规范涉及曲线梁的条文

2.1 《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)

主要涉及曲线梁桥离心力的组合和计算,相关条文包括 4.1.5-1-3)、4.3.3 及条文说明。

2.2 《城市桥梁设计规范(2019 版)》(CJJ 11—2011)

主要涉及曲线梁桥的平面布置、支承体系、伸缩装置、固定支座,相关条文包括 6.0.1 及条文说明、8.2.2 及条文说明、9.3.3 条文说明、9.4.3 条文说明、9.4.4 及条文说明。

曲线梁桥上部结构应具有足够的抗扭刚度;连续曲线梁桥不宜采用连续的单点支承形式;对独柱支承曲线梁桥,其变形与曲率半径、墩柱刚度、约束情况及支座的剪切刚度密切相关;应在墩顶设置防止梁体外移、倾覆的限位构造^[5]。

2.3 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)

主要涉及曲线梁桥的计算模型、横隔板构造,相

关条文包括 4.1.7-4 及条文说明、9.3.1-3 及条文说明、附录 A.1.4、附录 A.1.1-(3)条文说明。

半径小于 240 m 的曲线梁桥应设横隔板,对于 RC 箱形截面梁,间距不应大于 10 m;对于 PC 箱形截面梁,应经分析确定。七自由度单梁模型宜用于位于曲线段的混凝土箱梁桥^[6]。

3 PC 曲线梁分析要点

3.1 分析软件和分析方法

目前国内桥梁常用分析软件桥博 4.4、Midas Civil、Wise Plus 等,均能满足 PC 直梁的设计分析要求。PC 曲线梁因为弯扭耦合和空间几何效应的影响,叠加预应力效应,对软件的前后处理要求更加细致。

目前常用结构分析方法主要有 5 种,分别是空间六自由度梁单元、空间七自由度梁单元、梁格(平面梁格、折面梁格)、空间网格和空间实体单元,其区别见表 1。

表 1 常用结构分析方法一览^[7]

分析方法	是否计算纵向弯曲	是否计算自由扭转	是否计算约束扭转翘曲	是否计算畸变	是否计算剪力滞	是否计算横向弯曲
1 空间六自由度单梁	√	无法分离单项结果,采用活载放大系数估算			另行计算	另行计算
2 空间七自由度单梁	√	√	√	—	另行计算	另行计算
3 梁格(平面、折面)	√	无法精确计算,通过纵梁剪力差异定性分析			不完全	另行计算
4 空间网格模型	√	√	√	√	√	√
5 空间实体模型	√	√	√	√	√	√

六自由度梁单元、七自由度梁单元、梁格模型的优点在于程序实现简单、建模方便,所得结果可以直接根据现有规范进行配筋设计;缺点在于部分参数计算结果无法精确计算或分离,剪力滞及横向弯曲效应需另行建模型计算。空间网格模型、空间实体单元的优点在于计算结果包含整体效应和局部效应;缺点在于程序实现复杂,活载、预应力等模拟较难,所得结果无法根据现有规范直接进行配束配筋设计。

城市立交匝道小半径 PC 曲线梁桥,桥宽较窄。图 1 计算结果显示, $L=3 \times 30 \text{ m}$ 、 $B=9 \text{ m}$ 、 $R=90 \text{ m}$ 单梁和实体规律一致,计算误差较小,在活载偏载系数 1.15 范围内,建议小半径曲线梁采用七自由度梁单元为主要分析方法,辅助空间实体单元予以验证。

3.2 PC 曲线梁分析要点

3.2.1 支承体系影响

曲线梁桥由于弯扭耦合力学特性,支承形式直

接影响到全桥的内力分布。曲线梁桥的支承体系设计考虑“两个平衡”:(1)上部与下部之间的平衡。不同的支承形式,整体结构体系没有差别,只是“矛盾”在上、下部之间转移,中支点采用抗扭支座,上部结构扭矩(扭转变形)较小,但是下部结构承受由不均匀反力造成的横向弯矩较大。(2)变形和内力之间的平衡。一般来说,赘余约束越多,变形越小,内力越大;墩梁固结、径向全约束与径向间隔约束相比,扭转变形和径向位移较小,但是梁、墩的内力较大。在不进行支座偏心的情况下,中间支座采用传统点铰支承的布置形式,抗倾覆安全系数不满足规范 2.5 的要求,建议全部支座采用抗扭支承。对于全抗扭支承,相对于与直梁桥一致的水平约束形式(简称 Z1),推荐采用图 2 所示的水平约束形式,以减少温度及预应力效应对桥墩的影响^[8]。

$L=3 \times 30 \text{ m}$ 、 $B=9 \text{ m}$ 、 $R=90 \text{ m}$ 计算结果显示,小

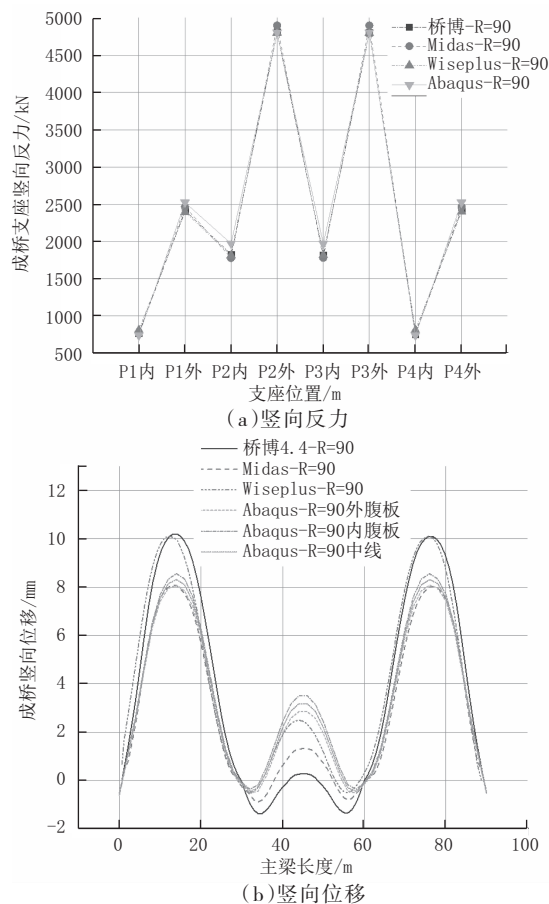


图1 成桥支座竖向反力、位移



图2 PC 曲线梁推荐支座布置形式(简称 Z2)

半径 PC 曲线梁桥采用 Z1, 横向约束导致主梁横向剪力、弯矩较大, 因而横向反力较大, 进而影响下部结构桥墩的横桥向剪力和弯矩, 这种趋势随半径增大而变小。采用 Z2 由于释放了中间桥墩的横向约束, 矛盾向中间墩纵向约束转移, 中间墩纵向制动支座产生方向相反的纵向力水平反力(见图 3), 进而在下部结构桥墩产生扭矩。

3.2.2 桥墩高度及支座刚度影响

Z1 和 Z2 两种支座水平约束布置形式的横向制动墩墩底水平剪力和纵向制动墩墩底扭矩均随桥墩高度变大而变小, Z1 桥墩墩底的横向剪力、弯矩远大于 Z2, 纵向制动墩墩底扭矩远小于 Z2, Z2 纵向制动墩墩底扭矩对桥墩刚度变化极为敏感(见图 4)。PC 曲线梁桥分析计算时, 应考虑桥墩刚度影响, 按照实际桥墩截面样式及高度, 建立上下部一体化模型, 分析上下部力学性能。

Z1 和 Z2 两种支座布置形式的制动支座横向水平反力和纵向水平反力均随制动支座刚度变大而变

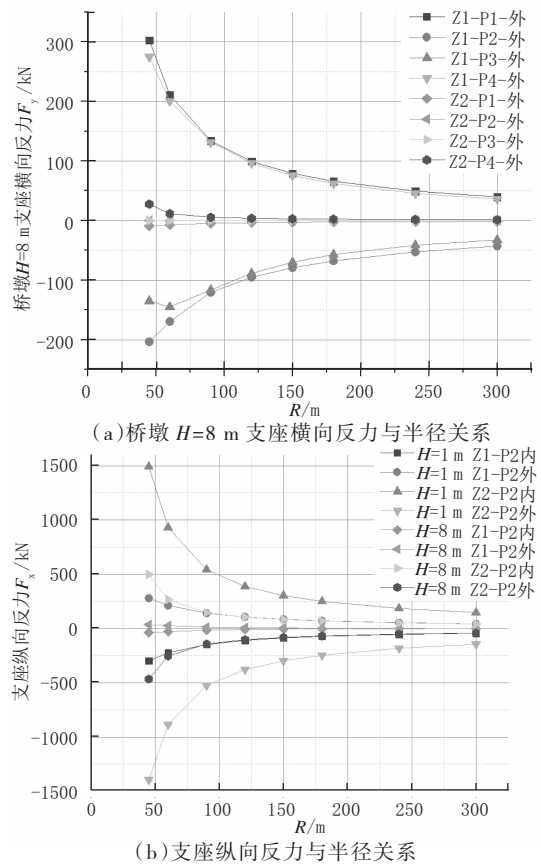


图3 成桥支座水平力与半径关系

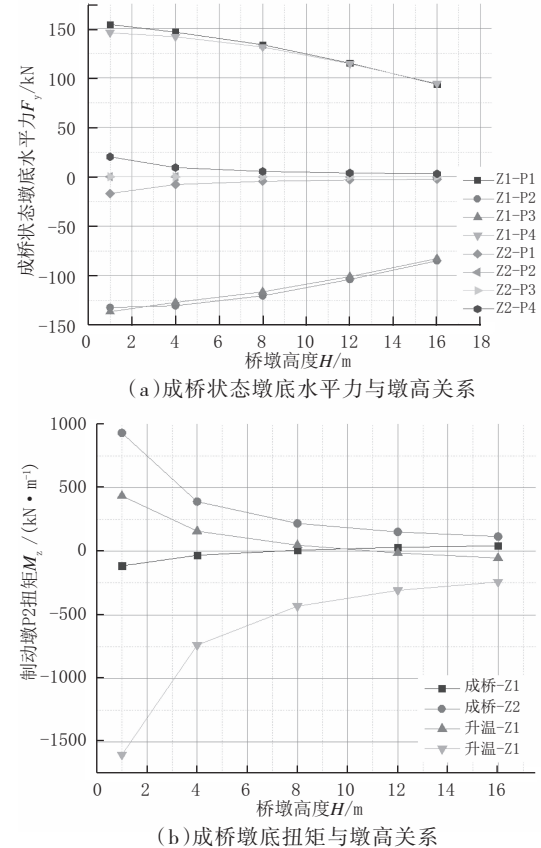


图4 成桥墩底水平力、扭矩与墩高关系

大。Z1 产生主梁横向水平反力远大于 Z2, 纵向水平反力远小于 Z2; Z2 对刚度增大更加敏感(见图 5)。

故 PC 曲线梁桥分析计算时,支座应考虑其约束方向实际刚度,使桥梁上下部受力分析结果与实际尽可能一致。

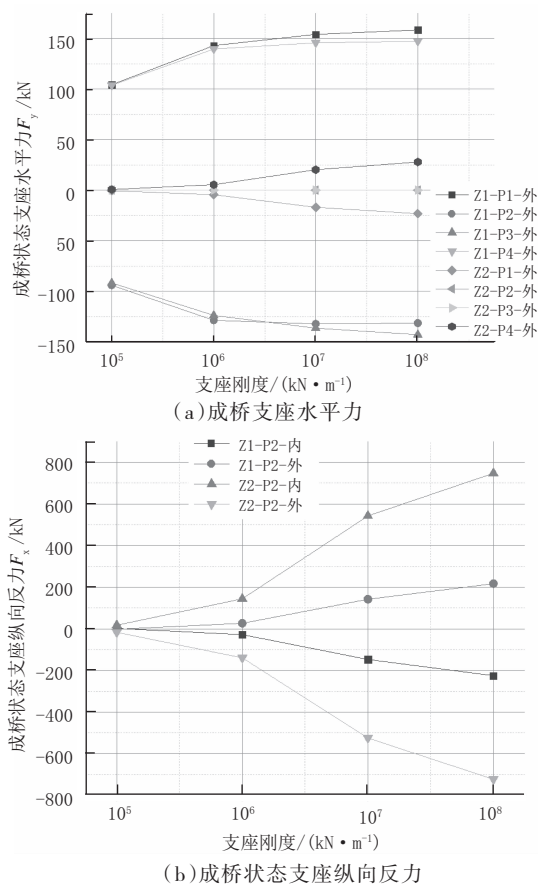


图 5 成桥支座水平力与支座刚度关系

3.2.3 恒载扭矩

曲线梁桥由于内外弧长差异,外侧恒载比内侧大,即使是对称截面,一期恒载内外腹板、顶板底板,二期恒载内外侧防撞护栏、桥面铺装等均会产生向曲线外侧翻转的力矩。扭矩根据荷载分布形式不同,计算方法不同;桥面均布荷载(如铺装)产生的扭矩参照式(1)计算,分布在桥梁两侧荷载(如防撞护栏、人行道)产生的扭矩参照式(2)计算^[9],箱型截面一期恒载扭矩可参照式(3)计算。

$$mt_1 = -qb^3/(12R) \quad (1)$$

$$mt_2 = -p[(2a+b)^3-b^3]/(12R) \quad (2)$$

$$mt = -\rho I_y/R \quad (3)$$

式中: q 为分布全桥面的均布面荷载; p 为分布桥梁两侧的均布面荷载; R 为桥梁中线半径; a 为桥梁两侧均布荷载分布宽度; b 为全桥面均布荷载的分布宽度; ρ 为重力密度,对混凝土取 25 kN/m^3 。

图 6 的计算结果显示,相同桥宽箱梁一期恒载的扭矩随半径增大显著减小,相同半径箱梁一期恒载的扭矩随桥宽增大显著增大。

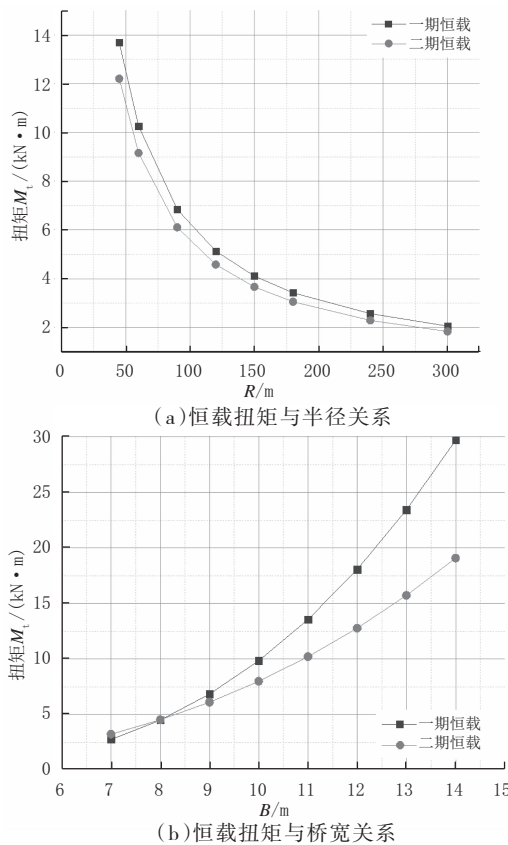


图 6 恒载扭矩与半径、桥宽关系

3.2.4 优化预应力效应

对 PC 曲线梁桥,预应力钢束不仅对截面有偏心距,在弯扭耦合作用下还会产生扭矩。与 PC 直梁桥一致,PC 曲线梁桥一般也有腹板束、顶板束和底板束三大类钢束形式,PC 曲线梁设计配束应根据各类钢束特点进行优化配束。

(1)PC 曲线梁桥中的腹板钢束对于主梁截面既有竖向偏心距又有径向偏心距,其竖向分力和径向分力会对梁体产生扭矩作用。计算表明,腹板钢束对主梁的扭矩以外翻扭矩为主。腹板束对同一桥墩外侧支座具有加载效应,对内侧支座具有卸载效应,从而加剧内外侧支座的不平衡性^[10]。腹板束可采用不对称布置,不对称布置腹板束主要指左右腹板竖弯不一致,外腹板束竖弯小,内腹板束竖弯大(见图 7)。不对称布置腹板束主梁竖向弯矩由于外侧腹板束束偏心距变小稍有变化,对内外支座的加载和卸载效应会减弱(见图 8)。



图 7 不对称布置腹板束

(2)PC 曲线梁桥中的顶板钢束包含中跨顶板束、边跨顶板束和中墩顶板束。计算表明,顶板束对主梁的扭矩以内翻扭矩为主。内翻扭矩能抵抗其他恒活载产生的外翻扭矩,对同一桥墩外侧支座具有

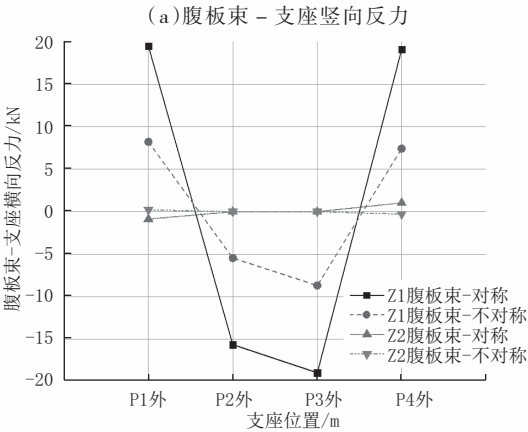
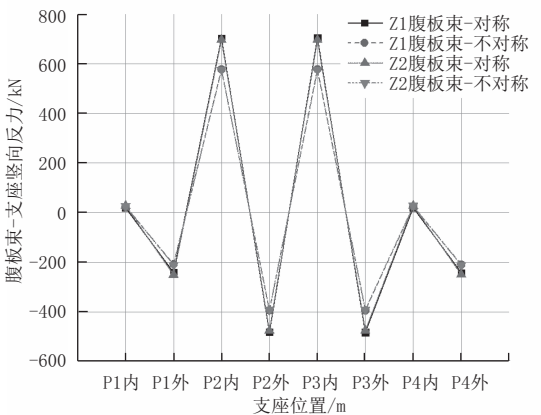


图8 腹板束布置反力对比

卸载效应,对内侧支座具有加载效应,从而改善内外侧支座的不均衡性。因此,适量的顶板钢束不仅对抵抗主梁墩顶负弯矩有利,对抵抗扭矩也有很大作用^[10]。以中墩顶板束为例,若采用向曲线内弧平弯的不对称布置,对内外支座的加载和卸载效应在边墩会加强、中墩会减弱(见图9)。

(3)PC 曲线梁桥中的底板钢束包含中跨底板束、边跨底板束和边跨过墩底板束。计算表明,底板束对主梁的扭矩以外翻扭矩为主,对同一桥墩外侧支座具有加载效应,对内侧支座具有卸载效应,从而加剧内外侧支座的不平衡性^[10]。以中跨底板束为例,若采用向曲线内弧平弯的不对称布置,主梁竖向弯矩由于外侧腹板钢束偏心距稍有变化,对内外支座的加载和卸载效应在中墩会加强、边墩会减弱(见图10)。

3.2.5 设置支座横向偏心

曲线梁桥内外支座存在反力差,同一桥墩外侧支座反力大于内侧支座,故曲线梁桥在配束完成后,应进行支座横向预偏心计算,以保证下部结构受力均衡和上部结构在标准组合下不致出现负反力(支座脱空)。支座预偏心一般不调整内外支座间距,以保证下部结构设计统一性。分析时主要考虑两个方

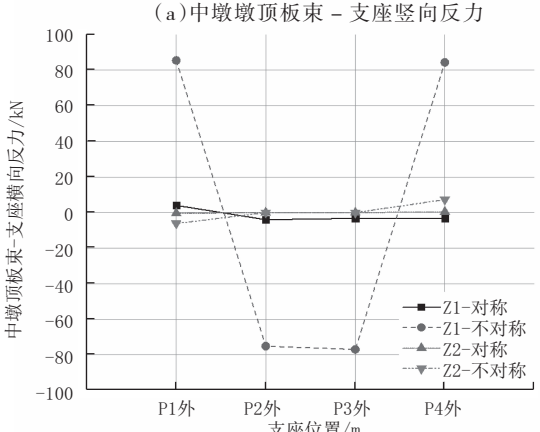
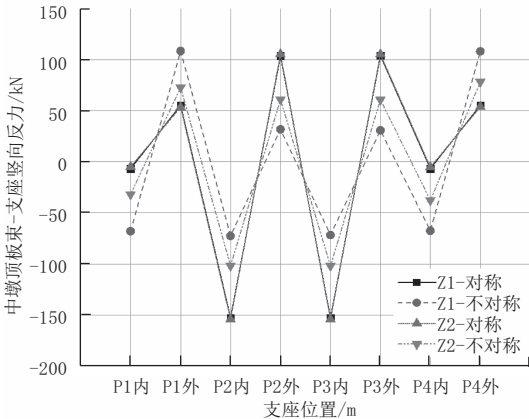


图9 顶板束布置反力对比

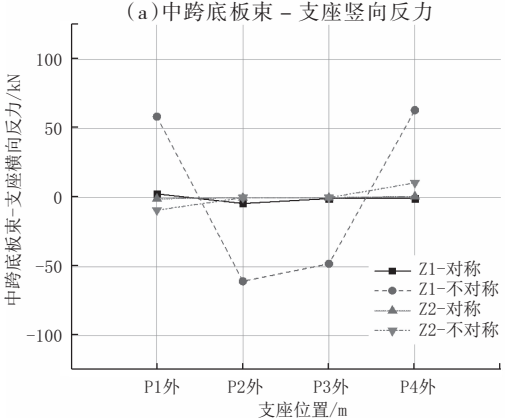
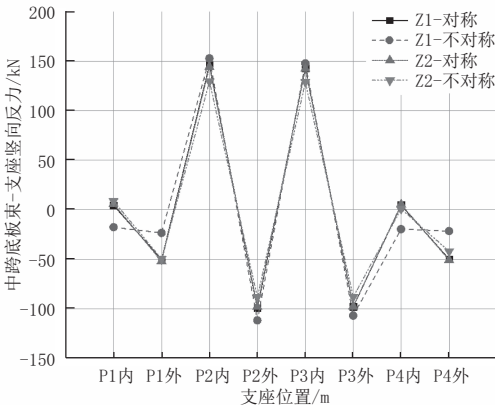


图10 底板束布置反力对比

面:一是恒载最小支座反力(一般是内侧)不至于过小,预留足够的压力储备;二是标准组合下最大支

座反力不至于过大,使同一桥墩内外侧支座吨位尽量一致。 $L=3 \times 30 \text{ m}$, $B=9 \text{ m}$, 支座偏心与半径关系见图 11。

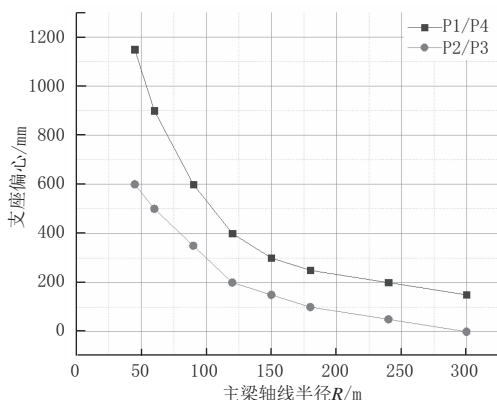


图 11 支座偏心与半径关系

3.2.6 进行弯剪扭构件验算

小半径 PC 曲线梁属于弯剪扭构件,分析计算应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)进行弯剪扭构件验算。

4 PC 曲线梁设计要点

4.1 结构设计

4.1.1 抗扭构造设计

小半径 PC 曲线梁桥一般采用抗扭刚度大的箱形截面箱梁,并设置跨间横隔板。小半径 PC 曲线整体式箱梁受弯、扭作用,畸变翘曲和剪力滞效应叠加,导致断面应力分布不均匀。平面弯曲半径越小,扭转应力的占比越大,结构受力偏离初等梁理论的计算值越大。增加横隔板对改善箱梁受力,特别是减小箱梁畸变作用较明显。横隔板的厚度一般采用 300 ~ 400 mm,横隔板的间距规范要求通过分析确定,对 30 m 左右常规跨径 PC 曲线梁,一般建议在跨中设置即可。

4.1.2 预应力设计

(1)预应力保护层厚度及防崩。曲线形管道,如直梁竖曲线钢束、弯梁钢束的管道,其曲线平面内侧受曲线预应力钢筋的挤压,混凝土保护层厚度在曲线平面内和平面外均受剪,所以曲线内侧保护层需加厚或设置防崩拉筋。

对于小半径 PC 曲线梁桥,腹板束会对腹板产生向内的径向崩裂力,应通过计算配置防崩钢筋,防止腹板向曲线内侧崩裂。防崩钢筋可以采用半封闭弧形(见图 12),兜住钢束管道圆弧内侧,弯钩与构造骨架筋绑扎牢固,锚固端必须有足够的长度。防崩钢筋间距根据曲线梁半径和钢束张拉力大小确定,一般

采用 200 ~ 400 mm。

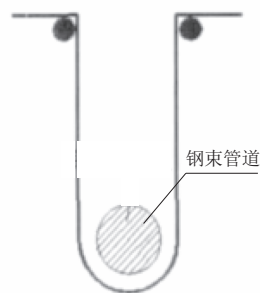


图 12 防崩钢筋示意

(2)内外弧钢束长度及引伸量的差异。PC 曲线梁桥布置在箱梁截面两侧的钢束由于曲线内外弧长的差异,钢束长度不一致,以 $L=3 \times 30 \text{ m}$, $R=90 \text{ m}$ 的连续梁而言,通长腹板束内外腹板长度差值接近 4 m,设计需同时给出内外腹板钢束长度,避免施工放样错误,导致外腹板钢束长度不够、内腹板钢束过长。同时,内外腹板钢束曲线半径的差异、长度的差异也会导致内外腹板钢束引伸量的差异。

(3)减小预应力钢束的张拉力。为了防止 PC 曲线梁腹板束产生过大的径向力,腹板束尽量避免采用过大型号,建议控制在 $\phi 15.2$ ~21 以内,按张拉控制应力 0.75 计算,张拉力控制在 4 100 kN 以内。顶底板厚度较小的曲线梁,为避免顶、底板束产生过大的面外力,也应避免采用过大型号钢束。

(4)合理布置腹板钢束的锚固位置。PC 曲线梁桥的腹板束应尽量布置于腹板外侧,或增加腹板内侧钢束的保护层厚度,以增加腹板内侧混凝土的抵抗厚度,锚固时平弯至腹板中心锚固。此外,也可采用单片腹板对应单排钢束的布置形式,即每道腹板同一水平位置布置单根钢束,腹板宽度可适当减小,如 40 cm。

(5)预应力分段张拉。如果 PC 曲线连续梁采用悬臂浇筑施工,在施工过程中,自重作用下均为负弯矩,一般张拉中墩顶板束,对主梁的扭矩以内翻扭矩为主。合龙阶段,一般张拉跨中底板束,对主梁的扭矩以外翻扭矩为主,平衡中墩顶板束的内翻扭矩。对于采用满堂支架现浇的等高梁,可采用分跨、分段浇筑张拉的施工顺序,减小预应力钢束产生的面外力。

4.1.3 钢筋设计

PC 曲线梁属于弯剪扭构件,其纵向钢筋最小配筋率不应小于受弯构件最小配筋率与剪扭构件最小配筋率之和^[6],箍筋最小配筋率需满足规范要求,设计人员需注意验算抗扭钢筋的最小配筋率。

4.2 附属设计

4.2.1 支座和限位设施

曲线梁支座内、外侧压缩量不同,易造成梁体下滑,宜进行侧向限位。设计可结合抗震挡块,设置限位设施。支撑外侧支座采用切向滑动+径向固定,内侧支座为双向滑动。为了使梁体在切向能够自由滑动,支座的侧向挡板应特殊加工,使它能够在径向卡紧的情况下,切向可滑动。曲线梁的扭转变形较大,应采用设计转角参数较大的支座。

曲线梁在温度作用下可能发生径向和切向变形(爬移现象),在设计中要结合桥墩布置及刚度情况,统一考虑“释放”或“抵抗”策略,考虑支座的设置。设计可结合抗震体系,如采用减隔震支座,需结合减隔震支座形式确定水平支座约束形式和限位设施。

4.2.2 伸缩装置设计

曲线梁桥和直梁桥一样,梁体端部在恒载及活载作用下会出现纵向变形、横向变形、竖向转角变形和平面转动变形。直梁桥的横向变形、扭转变形较小,一般可忽略。曲线梁桥由于横向变形、扭转变形较大,如果忽略可能导致伸缩缝卡位、断裂等病害。

曲线梁伸缩装置设计,一方面伸缩装置的刚度应尽量小,降低曲线梁面外的“拱”受力效应;另一方面,曲线梁桥的伸缩装置应同时具备纵向、横向及转动的变形能力。设计可采用具有多向变位能力的伸缩缝装置,以适应曲线梁多向变形要求。

5 结 语

(1)一般采用圆心角 $\varphi(L/R)$ 作为判定曲线梁及是否小半径曲线梁的指标。当 $L/R \geq 0.2 (\varphi \geq 11.5^\circ)$ 时,应按曲线梁桥计算。当 $L/R \geq 0.8 (\varphi \geq 45.8^\circ)$ 时,

可认定为小半径曲线梁。

(2)小半径 PC 曲线梁采用七自由度梁单元为主要分析方法,辅助空间实体单元予以验证。分析时,边界条件需考虑支承体系的影响,按照实际桥墩布置和支座刚度建模。采用单梁模型时,需考虑内外曲线长度差异导致的恒载扭矩,按照钢束特点优化预应力配束,设置支座预偏心,进行弯剪扭构件承载能力验算和最小配筋率验算。

(3)小半径 PC 曲线梁一般采用整体箱梁断面,并设置横隔板,预应力钢束验算保护层厚度并进行防崩设计,钢束长度及引伸量考虑内外弧长差异。附属设计需系统考虑支座横向约束,设置横向挡块,采用多向变位伸缩装置。

参考文献:

[1] OHBDC. Ontario Highway Bridge Design Code[S]. third edition. Ontario, Canada: Ministry of Transportation, 1992.

[2] NCHRP. NCHRP Report 575 [R]. Legal Truck Loads and AASHTO Legal Loads for Posting. 2007.

[3] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S]. 4th ed. Washington, D. C. : AASHTO, 2007.

[4] 邵容光,夏淦.混凝土弯梁桥[M].北京:人民交通出版社,1994.

[5] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范(2019 年版)[S].

[6] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[7] 徐栋,赵瑜,刘超.混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计[M].北京:人民交通出版社,2013.

[8] 滕小竹.PC 曲线梁桥水平约束布置及其力学性能[J].城市道桥与防洪,2022(9):53-58,63.

[9] 张罗溪.连续弯桥的实用计算方法及其扭转性能分析[J].石家庄铁道学院学报,1991(2):15-23.

[10] 滕小竹.小半径 PC 曲线梁桥预应力效应研究[J].上海公路,2023(1):49-58.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com