

黑 龙 江 省 地 方 标 准

DB 23/T XXXX—2025

寒区曲线梁桥设计规范

（送审稿）

联系单位：黑龙江省交通规划设计研究院集团有限公司

联系人：徐兰钰

联系电话：18946056080

2025 - XX - XX 发布

2025 - XX - XX 实施

目 次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和符号 1

4 基本规定 3

 4.1 基本要求 3

 4.2 作用 3

5 总体布置 5

 5.1 平面和纵、横断面布置 5

 5.2 桥跨布置 5

 5.3 主梁横截面 5

 5.4 墩台形式及设计原则 6

6 结构体系与支承布置 6

 6.1 结构体系的分类及选择 6

 6.2 竖向支承布置 6

 6.3 水平面内变形及约束布置 7

7 结构计算 7

 7.1 有限元方法的分类和选择 7

 7.2 上部结构静力计算 8

 7.3 下部结构静力计算 9

 7.4 抗倾覆验算 9

 7.5 抗震设计计算 9

8 结构构件设计 10

 8.1 主梁设计 10

 8.2 墩柱设计 11

 8.3 跨间横隔板设计 11

 8.4 支座设计 12

 8.5 附属设施设计 12

9 预应力钢束设计 12

 9.1 预应力筋布置基本要求 12

 9.2 预应力筋布置 12

 9.3 侧向防崩钢筋设计 13

10 施工要求 13

 10.1 基本要求 13

 10.2 施工技术要求 14

参考文献 15

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由黑龙江省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：黑龙江省交通规划设计研究院集团有限公司、大连理工大学、黑龙江省龙建路桥第五工程有限公司、黑龙江农垦建工路桥有限公司、黑龙江省龙建路桥第二工程有限公司、大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司、大连大学。

本文件主要起草人：陈柯、姜涛、郑华、王海峰、齐琳、李亚军、刘长刚、刘召辉、潘旭、刘大伟、张思远、邢明明、朱巍志、张哲、徐兰钰、李巍、蒋东冰、姜晓岩、武铁雷、韩娟、赵德鹏、王新山、邱文亮、孙丽丽、杨玉光、王会利、李文博、罗婷婷。

寒区曲线梁桥设计规范

1 范围

本文件确定了寒区曲线梁桥设计基本规定、总体布置、结构体系、结构计算、结构构件设计、预应力钢束设计和施工的要求。

本文件适用于寒区公路和城市道路新建的曲线梁桥的设计和施工，包括钢筋混凝土、预应力钢筋混凝土、钢结构及钢混组合曲线梁桥。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG B02 公路工程抗震规范
- CJJ 166 城市桥梁抗震设计规范
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范

3 术语和符号

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 术语

3.1.1

曲线梁桥

主梁设计轴线在水平面上投影为曲线的桥梁。

3.1.2

圆心角

曲线梁一跨或一联梁端支承线中点与圆心连线的夹角。

3.1.3

弧线跨径

沿曲线梁桥中心线的水平跨径。

3.1.4

超高

用于平衡曲线梁桥上由车辆产生的离心力而在桥面水平方向设置的斜坡。

3.1.5

预拱度

为抵消桥梁在使用过程中由于荷载产生的变形影响结构的美观和功能，在施工或制造时预设的与荷载变形方向相反的校正量。

3.1.6

离心力

由于车辆行驶方向改变而产生的横桥向力。

3.1.7

畸变

结构几何形状的改变。

3.1.8

径向

曲线梁桥水平面内曲线上各点与对应弧线圆心的连线方向。

3.1.9

切向

曲线梁桥水平面内曲线上各点的对应圆弧切线方向。

3.1.10

剪力流

平行于板边缘的单位宽度剪力。

3.1.11

剪力滞

由于剪切变形引起的构件正应力的非线性分布。

3.1.12

单梁模型

一种将桥梁上部结构用一系列沿桥梁中心线的直弦梁表示的分析方法。

3.1.13

梁格法

一种将上部结构全部或部分离散为反映结构特征的正交异性构件的分析方法。

3.1.14

角位移

以特定方式围绕指定轴旋转的角度。

3.1.15

销轴

一种允许支点在水平面内转动，限制其线位移的约束形式。

3.1.16

切向销轴

一种允许支点在水平面内转动，允许切向位移且限制其径向位移的约束形式。

3.1.17

径向销轴

一种允许支点在水平面内转动，允许径向位移且限制其切向位移的约束形式。

3.1.18

单点支承

在桥墩横桥向只有一个支承点的约束方式。

3.1.19

抗扭跨径

邻近的两个抗扭支撑间的跨度距离。

3.1.20

抗扭支座

在桥墩横桥向布置的具有一定间距的两个或两个以上支座的支承形式。

3.1.21

爬移

曲线梁桥运营过程，受到外力、环境等诸多因素的作用导致桥梁主梁发生平面移位，相关因素消失后，其平面移位不能完全恢复，而产生部分残余位移。长期反复的作用使这种残余位移逐渐累积，最终导致曲线梁桥的平面移位。

3.2 符号

几何参数：

$B(b)$ ——桥宽；

$D(d)$ ——直径；

$R(r)$ ——半径；

$L(l)$ ——跨度；

L_0 ——计算跨径；

P_k ——车道荷载集中荷载；

D_i ——间距；

ϕ_T ——扭转角；

4 基本规定

4.1 基本要求

4.1.1 根据桥梁建设条件的特点和难点，有针对性地深入开展相应的建设及使用条件专题工作，如有必要可进行相关试验研究工作，保证设计基础资料真实、可靠、实用。

4.1.2 曲线梁桥按本文件进行设计、施工及运行维护时，除应符合本文件外，尚应遵循国家现行有关规范和标准的规定。

4.1.3 曲线梁桥应进行以下两类极限状态设计：

- a) 承载能力极限状态：对应于桥梁及其构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形或变位的状态。
- b) 正常使用极限状态：对应于桥梁及其构件达到正常使用或耐久性的某项限值的状态。

4.1.4 曲线梁桥应考虑以下四种设计状况及其相应的极限状态设计：

- a) 持久设计状况：桥梁建成后承受自重、活荷载等持续时间很长的状况。对该状况应做承载能力极限状态和正常使用极限状态设计，并进行倾覆和滑移及构件应力验算。
- b) 短暂设计状况：桥梁施工过程中承受临时性作用的状况。对该状况应做承载能力极限状态设计和构件的应力验算。
- c) 偶然设计状况：在桥梁使用过程中偶然出现的状况。对该状况仅做承载能力极限状态设计。
- d) 地震设计状况：对该状况仅做承载能力极限状态设计。

4.1.5 桥梁结构的设计和施工质量应分阶段实行严格管理和控制，桥梁的使用应符合给定的使用条件，应采取相应措施禁止超载、超限车辆通行，使用过程中必须进行定期检查和维护。对重载占比较大的桥梁，应采用相应的特殊车辆荷载进行结构整体和局部验算。

4.1.6 根据桥梁建设条件的特点和难点，有针对性地深入开展相应的建设及使用条件专题工作，如有必要可进行相关试验研究工作，保证设计基础资料真实、可靠、实用。

4.2 作用

4.2.1 除特殊说明外，参照《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）中的相关规定。以下作用须特殊考虑。

4.2.2 抗倾覆验算汽车荷载

汽车荷载的计算要充分考虑其偏载效应，尽可能将活载的最不利布载形式包络到结果中，计算时应考虑多种车道布载组合形式，验算时取其最不利包络结果。在分析桥梁抗倾覆稳定性时应采用车道荷载和车辆荷载分别进行计算，取最不利工况计算结果来衡量桥梁抗倾覆性能，其中车道荷载采用公路-I级车道荷载的1.3倍，抗倾覆验算车道荷载如图1所示，其中集中荷载 P_k 的取值见表1。车辆荷载采用55吨间距10m的密排重车，荷载系数取1.2倍。抗倾覆验算车辆荷载及纵向布置如图2所示，横向布置如图3所示。车道横向和纵向折减系数参照《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）中的相关规定。

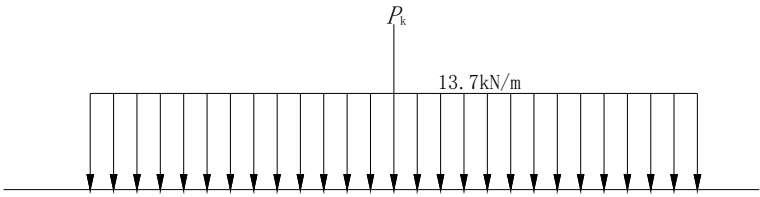


图1 抗倾覆验算车道荷载

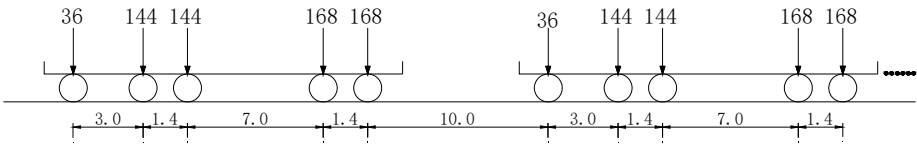


图2 抗倾覆验算车辆荷载及纵向布置（图中尺寸单位为 m，荷载单位为 kN）

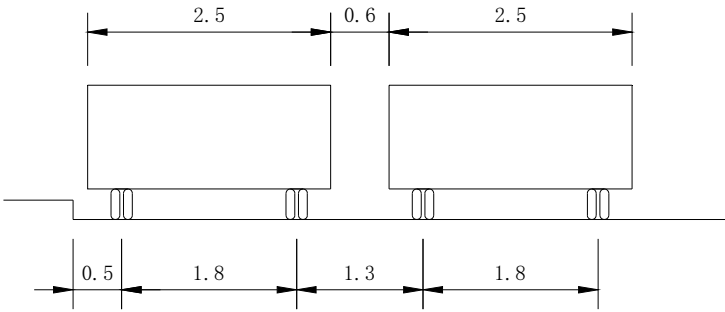


图3 抗倾覆验算车辆荷载横向布置（图中尺寸单位为 m）

表1 集中荷载 P_k 取值

计算跨径 L_0 (m)	$L_0 \leq 5$	$5 < L_0 < 50$	$L_0 \geq 50$
P_k (kN)	351	$2.6 (L_0 + 130)$	468

4.2.3 系统温度

对于水平面内有多余约束的曲线梁桥来说,系统温度会产生反力和结构内力,计算时该作用应考虑。

4.2.4 梁截面横向温差

在进行寒区曲线梁桥设计时,除根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)考虑梁截面竖向温差外,尚应考虑梁截面横向温差,具体取值可采用实际测量结果,若无相关数据,取值可参考《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)之相关规定。

4.2.5 离心力

离心力的作用点位置取桥面上1.8m处,不做简化处理。

4.2.6 冲击力

弯矩冲击系数和扭矩冲击系数差别较大,所以应该分别给出,弯矩剪力的冲击系数可以参照通用规范,而扭矩的冲击系数要普遍大于这个参考值,具体可参考以下公式:

$$I_{mp}=0.622-0.670(L/R)+0.254(L/R)^2 \quad (0.22<I_{mp}<0.6) \quad (\text{式1})$$

4.2.7 自重

在在用单梁有限元模型计算曲率半径较小的曲线梁桥时,梁体外弧长度大于内弧长度产生的自重偏心影响不能忽略,计算时应对梁单元施加相应的外翻扭矩,对于圆心角小于30度的曲线梁桥,这一影响一般可忽略不计。

5 总体布置

5.1 平面和纵、横断面布置

5.1.1 桥梁平面设计的技术指标应符合路线布设的规定,按规范和相关技术标准设置超高和加宽,对小半径曲线应采用对梁体有利的技术指标。

5.1.2 曲线梁桥设计时应根据计算确定内外侧梁是否需要设置不同的预拱度。

5.1.3 曲线梁桥的设计和施工中对桥梁标高的控制应考虑桥梁平纵曲线、纵横坡、桥面超高设置、预拱度等因素影响。

5.1.4 曲线梁桥纵断面设计时应设置较小的纵坡。

5.2 桥跨布置

5.2.1 在条件允许的情况下应降低曲线梁桥的抗扭跨度,减小曲线梁桥抗扭跨度所对应的圆心角。

5.2.2 偏心荷载效应较大的曲线梁桥抗扭跨径不宜过大。

5.3 主梁横截面

5.3.1 曲线梁桥的主梁截面形式主要包括:板式截面、肋板式截面、肋式截面(T型或I型)、多箱式截面及整体箱式截面。

5.3.2 半径较大($R>300\text{m}$)的小跨径曲线梁桥可以采用板式截面、肋板式截面、肋式截面(T型或I型)或多箱式截面。

5.3.3 当曲线梁桥半径较小而跨度较大时,为抵抗截面中较大的弯矩和扭矩,宜采用抗扭性能较好的闭口整体箱式截面。

5.3.4 箱梁的悬臂不宜超过2.5m,特别是多跨连续曲线梁桥。

5.3.5 曲线梁桥的横截面尺寸参数可以参考直梁桥的相关参数拟定，但应根据圆心角的大小适当加强局部构造的尺寸。

5.3.6 为简化曲线梁桥的结构构造和施工工艺，宜选择等高截面，避免选择变高截面梁。

5.3.7 曲线梁桥内外侧梁高设置应结合桥梁曲线半径、超高设置等条件综合确定。

5.3.8 当曲率半径 $R < 300\text{m}$ 时，首选采用箱梁截面型式，其中：当 $100\text{m} < R < 300\text{m}$ 时，不宜采用肋式截面作为预应力曲线梁桥截面；当 $R < 100\text{m}$ 时，禁止采用预应力曲线肋式截面型式。

5.4 墩台形式及设计原则

5.4.1 曲线梁桥的桥台可以采用和直梁桥相同的形式，但应合理布置抗扭约束的墩台，当连续曲线梁桥在中支点采用了单点支承形式时，必须要在桥台或交接墩设置抗扭约束。

5.4.2 曲线梁桥的桥墩可以采用独柱墩、T 型墩、Y 型墩或双柱墩等形式，对于独柱墩宜采用横向双支座提高抗扭性能。

5.4.3 独柱墩占地范围小，当曲线梁桥的桥宽较窄且曲率半径较小时，可采用这种形式，且应进行专项研究及论证；当桥宽较宽，且桥下有行车要求时，宜采用 T 型墩、Y 型墩或双柱墩。

5.4.4 当采用墩梁固结设计时，应进行上、下部及基础整体计算分析。在主梁的扭转变形较大同时墩柱弯矩也很大的情况下，宜采用矩形截面墩柱。

5.4.5 由于曲线梁桥内、外侧梁的受力不均，故在墩台计算和构造设计时应注意墩台在横向的受力不均问题，计入这一墩（台）顶弯矩。

5.4.6 曲线梁桥桥面上的离心力和横向力矩较大，应对横向刚度较小的独柱墩横向荷载组合工况进行验算。

5.4.7 纵坡较大的曲线梁桥纵向固定墩应具备较大的抗弯刚度，以减小主梁的纵向爬移量。

5.4.8 如果采用顶推法或者悬臂法施工连续曲线梁桥时，其墩台设计都应考虑施工过程中的抗扭约束，应分析曲线梁桥由恒荷载及施工荷载产生的弯矩影响，以确保施工期间墩台的安全性。

6 结构体系与支承布置

6.1 结构体系的分类及选择

6.1.1 简支曲线梁桥受力和计算均较为简单，但设计中应注意梁端较大的扭矩易引起支座脱空和疲劳问题，一般应用于中小跨径的曲线梁桥设计，应在施工和运营中设置防倾覆构造装置。

6.1.2 连续曲线梁桥可通过支座预偏心来调整主梁的扭矩分布。在没有特殊要求的情况下除小半径的窄桥外应采用抗扭支承，避免采用单点支承。桥下有空间限制需要采用独柱墩时，可选用独柱墩上设帽梁的抗扭支承结构。

6.1.3 当进行柔性高墩曲线梁桥设计时，可以将连续曲线梁桥的部分支点变为墩梁固结的形式，在采用该结构体系时首先要进行墩梁的刚度比选择和桥墩的承载力计算。

6.2 竖向支承布置

6.2.1 曲线梁桥的支承方式应根据曲率半径的大小及上、下部结构的总体布置图式而定。

6.2.2 如图 4 所示给出了简支曲线梁桥竖向支承的两种支座布置方式，一种属于竖向的静定结构，一种属于竖向的超静定结构，如无特殊情况，简支曲线梁桥应采取两端均设置抗扭支承的竖向超静定结构，避免出现竖向静定结构。

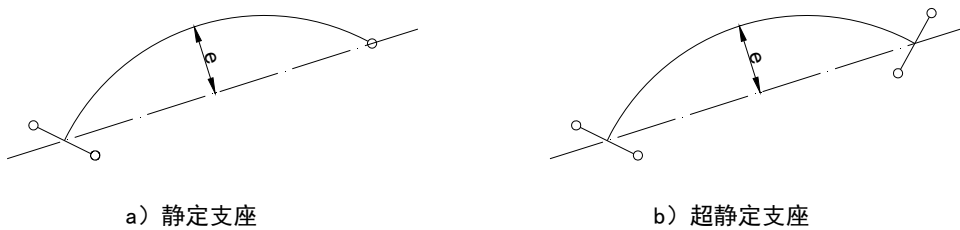


图4 简支曲线梁桥竖向支承布置

6.2.3 连续曲线梁桥的竖向支承形式包括：

- a) 全部采用抗扭支承；
- b) 两端抗扭支承，中间单点铰支承；
- c) 两端抗扭支承，中间既有单点铰支承又有抗扭支承。

应根据实际需要和桥梁结构特点选择合适的竖向支承形式。一般在曲率半径较大或桥宽较宽时采用全部抗扭支承的形式，而不选用单点铰支承。当连续曲线梁曲率半径较小，桥宽较窄，上部结构采用具有较大抗扭刚度的箱梁结构时，如有需要，可将中间墩布置成独柱墩、铰支承的构造，对采用单点铰支承的连续曲线梁桥，单点铰支承处的支座可预设偏心，以减小偏心荷载作用下梁体的扭矩，另外，为增大全桥抗倾覆的稳定性，应将点铰支承交替布置在桥轴线两侧。

6.2.4 非单点支承的桥梁同一支承处应设置为双支座并尽可能加大支座的横桥向间距，不要设置两个以上的支座，条件允许的情况下可以在较大半径曲线梁桥的中墩处采用墩梁固结的形式来提高桥梁的抗倾覆性能。

6.3 水平面内变形及约束布置

6.3.1 温度变化和混凝土收缩会让曲线梁产生弧段膨胀或收缩性质的变形，涉及到弧段的半径变化而圆心角不变。在进行曲线梁桥水平面内约束设计的时候要充分考虑这些作用对结构水平面内受力的影响。

6.3.2 曲线梁桥宜采用适应其曲率变化的平面约束形式，尽量减少平面内转动约束的超静定次数。仍应设置正常使用状态下不作为约束的挡块等防落梁措施，且需与抗震和温度力计算以及伸缩缝设计相协调。

6.3.3 径向约束不足的曲线梁桥会在系统温度变化及汽车制动力、离心力等荷载的反复作用下产生横向爬移，在放松约束的方向应设置限位挡块，并可在挡块与梁体之间设置弹性垫块，以防止梁体产生过大的水平位移甚至落梁，限位挡块的预留空隙根据计算结果确定，限位挡块要有足够大的刚度和承载能力。对于复杂的曲线桥增加挡块间隙及状态的运营期监控。

7 结构计算

7.1 有限元方法的分类和选择

7.1.1 曲线梁桥的计算理论有很多，占据主导地位的主要有单纯扭转理论、翘曲扭转理论、梁格系理论、折板理论、正交异性板理论、多角形曲线桥理论和横向分布理论等。

7.1.2 对曲线梁桥进行有限元计算分析时应根据结构具体形式，结构特点及其所要解决问题的不同而选择恰当的单元类型，以期获得恰当的分析精度和效率。

7.1.3 当曲线梁桥的跨度大于边肋或边腹板间距离的 3 到 4 倍时，计算可以采用六自由度空间梁单元模型。

7.1.4 当曲线梁桥所采用的箱壁比较纤薄，同时桥跨上部箱梁跨间横隔梁较少或没有时，计算应采用空间薄壁箱梁单元模型。

7.1.5 当曲线梁桥的跨度小于边肋或边腹板间距离的 3 倍，或变宽、斜交的曲线梁，计算应采用空间梁格模型。

7.1.6 曲线梁桥的局部结构分析宜采用板壳单元模型或实体单元模型。

7.2 上部结构静力计算

7.2.1 针对跨度和曲率半径不同的曲线梁桥，根据分析精度的需要应选择相应的方法进行计算，当圆心角小于 30 度，且梁长宽比大于 2 时，可以采用单梁模型进行整体受力分析。

7.2.2 有限元计算模型的边界条件应严格按照拟定的支承约束条件输入。

7.2.3 曲线梁桥内外侧腹板的实际跨度与理论跨度不同，从而造成了内外侧腹板受力的差异，对于小半径曲线梁桥来说这一差异尤其显著，且当桥梁宽跨比较大时，作用使桥梁上部结构除沿其纵向产生弯曲和整体扭转外，还会产生截面的横向变形，此类桥梁须采用梁格分析模型进行分析验算。

7.2.4 对于圆心角较大、宽跨比较大、变宽、斜交以及在单个支点处布置超过两个支座的曲线梁桥一般应该进行梁格法的分析来考虑结构在横向受力不均匀性以及支座反力的分配问题；对于特殊情况的异形曲线梁桥根据需要可进行板壳单元或者实体单元的整体分析，但要注意使用梁格法模型计算的曲线梁结构应同时建立空间单梁模型或者其他能够正确反映结构水平面内变形及受力的模型进行计算作为补充和校核。

7.2.5 仅在特殊情况下，例如异形变宽曲线梁桥的设计时要进行整体的板单元或者实体单元分析，通常实体、板壳元模型多用于局部结构分析。

7.2.6 对于下部结构刚度较大的结构，为提高效率，在进行上部结构的初步计算时可以选择采用不考虑下部结构直接在支座下方进行约束的有限元模型计算，但如果下部结构刚度相对较小，应在计算时考虑下部结构的影响建立全桥模型进行设计计算，否则可能会造成上部结构设计及支座脱空验算的结果有误。

7.2.7 使用直线梁单元模拟曲线梁时要保证有足够数量的节点，以满足计算精度。在使用单梁模型计算时，内外侧弧长不同产生的恒载扭矩可以通过计算内外侧重量差以均布扭矩的形式施加到有限元模型上。

7.2.8 进行车道荷载计算时应针对外侧偏载和内侧偏载考虑多种车道布载组合形式，验算时取其最不利包络结果。

7.2.9 寒区温度对于曲线梁桥产生的作用需引起重视，温度作用分析时应分别计算系统升、降温，主梁上、下缘日照温差以及主梁侧向日照温差，并进行多种组合取其包络。

7.2.10 采用直梁单元进行单梁模型计算时，预应力钢束及混凝土徐变所引起的平面内反力和平面内次内力都是与实际不符的，对于预应力钢束沿主梁轴线对称布置的曲线梁桥，在进行支座水平承载力验算时，可将钢束及混凝土徐变的结果剔除掉不进行组合。如果预应力钢束沿主梁轴线非对称布置，则不能仅进行单梁模型计算，应结合梁格或者实体单元模型等其他有限元计算结果进行设计验算。

7.2.11 有单点支承约束的曲线梁桥，不可采用以直代曲简化成直线梁桥的有限元模型进行设计验算。

7.2.12 优先选择成熟的、有数座同等规模类型桥梁使用且校核过的有限元计算软件。在进行设计验算时应采用按照我国现行标准规范编制的软件。

7.2.13 在寒区低温环境下板式橡胶支座的抗压弹性模量和剪切模量都会随温度的变化而产生较大变化，对于采用板式橡胶支座的曲线梁桥，由于支座刚度会影响结构的受力，计算时需要对板式橡胶支座的刚度进行修正，分别考虑高温和低温下的结果，取最不利包络进行设计。

7.2.14 寒区有冻融发生的区域须考虑基础在冻融下的约束条件，对于曲线梁桥，该约束的变化对桥梁上部和下部结构的受力均有影响，需分别考虑有冻融和无冻融情况下的约束条件对结构进行计算并取

其包络结果进行设计。

7.2.15 主要计算内容

- a) 优化结构体系，确定边中跨比及支承体系等相关内容，验算支反力。
- b) 为确定支座、伸缩缝装置规格提供反力及位移结果。
- c) 为构件设计分析提供各工况及组合下的位移、内力与应力结果。

7.3 下部结构静力计算

7.3.1 利用包括上部结构和下部结构的整体模型进行计算，提取下部结构的内力结果进行设计验算。对于支座形式为板式橡胶支座等弹性约束支座的结构，应在模型中利用考虑剪切变形的梁单元来模拟支座的特性，用以验算支座的局部脱空等问题，其中板式橡胶支座的高度应取橡胶层的总厚度。对于存在固结体系的单点支承体系要特别注意固结墩的受力及稳定性验算。

7.3.2 墩柱的刚度对曲线梁桥内力影响较大，计算时应考虑墩柱的实际刚度，对于存在可能会造成墩高变化的冲刷等问题时，应分别建立模型进行计算，取其包络结果。

7.3.3 进行独柱墩的设计验算时，若支座没有径向约束，除按相关规范计算外，还应将最大支座反力的 6% 作为水平力施加到墩顶进行计算，作用方向为曲线梁在该处的径向。

7.4 抗倾覆验算

7.4.1 梁桥倾覆过程是在汽车或其它荷载的倾覆作用下，单向受压支座依次脱空，边界条件失效而失去平衡的过程。

7.4.2 抗倾覆验算时应分别采用 4.2.2 条中车道荷载和车辆荷载进行计算，取其最不利结果。

7.4.3 相同的结构和支承布置形式下，单跨简支梁的梁体抗倾覆能力弱于连续梁，一般随着连续梁的跨数增多，梁体抗倾覆能力会增强，对简支或跨数较少的连续梁尤其要重视抗倾覆验算。

7.4.4 相同的结构和支承布置形式下，曲线连续梁桥的抗倾覆稳定系数随着曲线半径的增大先是减小，当半径增加到倾覆轴线发生变化时，稳定系数又会有所增大，即微弯曲线连续梁的抗倾覆能力弱于直线连续梁桥和小半径的曲线连续梁桥，对于曲率半径较大的曲线连续梁桥尤其要重视抗倾覆验算。

7.4.5 钢梁和钢混组合曲线梁桥比钢筋混凝土梁桥自重更小，并且在钢梁部分的加工、运输及吊装过程中产生的变形会导致非受力支座脱空，在进行抗倾覆验算时需要引起重视，可采用较高的安全系数。

7.4.6 有单点支承的曲线梁桥抗倾覆验算中应包括梁体扭转角的验算，限制梁体支点处的最大扭转角 $\phi_T < 0.02\text{rad}$ 。

7.4.7 立交匝道桥梁受条件限制必须采取独柱支承形式时，应充分重视其横向受力性能，必须验算其在正常使用阶段及主要施工阶段的倾覆稳定性。

7.4.8 独柱支承梁式桥需选择合理跨径，控制扭矩峰值和支承反力。常规情况下，连续梁的边中跨径比不宜小于 0.7，每联长度不宜超过 120 米。

7.4.9 独柱支承梁式桥设计时考虑抗倾覆稳定性应严格限制桥宽与边支承间距的比值，一般情况下不应大于 2。

7.4.10 独柱支承梁式桥应在边墩处设置抗倾覆装置，以提高结构的倾覆稳定性能。

7.4.11 抗倾覆验算要求在短暂及持久状况下，桥梁不应发生结构体系改变，并应同时满足下列规定：

- a) 在作用基本组合下，单向受压支座始终保持受压状态。
- b) 考虑抗倾覆措施作用后，在考虑 2.5 倍汽车荷载的基本组合下，结构受力体系不发生改变。
- c) 结构整体抗倾覆承载能力大于强度破坏承载力。

7.5 抗震设计计算

7.5.1 对混凝土曲线梁桥进行抗震设计时，荷载应按国家标准《公路工程抗震规范》或《城市桥梁抗震设计规范》取用，并满足其中对梁桥的相关规定。

7.5.2 在 E1 和 E2 地震作用下，一般情况应首先建立桥梁结构的动力计算模型，通常可以采用单梁模型，计算模型应反映实际桥梁结构的动力特性。

7.5.3 桥梁结构动力计算模型应能正确反映桥梁上部结构、下部结构、支座和基础的刚度、质量分布及阻尼特性，从而保证在地震作用下引起的惯性力和主要振型能得到反映。一般情况下动力计算模型应满足下列要求：

- a) 计算模型中的梁体和墩柱可采用空间梁单元模拟，单元质量可以采用一致质量或者集中质量代表；墩柱和梁体的单元划分应能准确反映结构的实际动力特性。
- b) 支座单元应能准确反映支座的力学特性，如果有减隔震支座或阻尼器等设施应采用边界非线性单元正确模拟其受力特性。
- c) 计算模型应考虑相邻结构和边界条件的影响。

7.5.4 在曲线梁桥中，不存在纯粹沿单独某方向的振动形态，但振型一般有一个主振动方向；会存在纵横向的耦合效应，因此进行曲线梁地震反应分析时，应分别沿各桥墩连线方向和垂直于连线水平方向进行多方向地震输入，以包络最不利地震水平输入方向。

7.5.5 采用减隔震支座或阻尼器等装置时，应对结构进行非线性时程分析。

7.5.6 在地震高烈度地区应避免采用一个固定墩的约束形式，尽量在水平方向采用弹性约束，提高结构的自振周期，并使各墩共同参与受力。

7.5.7 在不同强度等级的地震动作用下，支座的破坏一般会早于墩台的破坏。因此，对于混凝土曲线梁桥来说，地震作用下的支座设计验算和类型选择需要引起重视。

7.5.8 应考虑地震作用下的最不利组合对曲线梁桥进行抗倾覆验算，抗倾覆验算时采用水平地震作用+竖向地震作用+公路-I 级车道荷载计算倾覆力矩。

7.5.9 对结构进行地震时程分析，求出桥梁的倾覆力矩时程，得到桥梁的最小倾覆力矩，计算得到地震作用下的抗倾覆稳定系数。

8 结构构件设计

8.1 主梁设计

8.1.1 对混凝土主梁进行正截面抗弯承载力及抗扭承载力验算、斜截面抗剪承载力验算；对锚下等受力复杂部位进行局部受压区截面尺寸、局部抗压承载力验算及端部锚固区段内的局部应力分析。

8.1.2 持对主梁进行正截面和斜截面抗裂验算，计算正截面拉应力和斜截面主拉应力；对主梁进行挠度验算，验算时不考虑汽车荷载冲击系数。

8.1.3 除了验算主梁承载能力极限状态外，还要验算弹性阶段的构件应力。应力计算实质上仍是构件的强度计算，是对构件承载能力极限状态计算的补充。验算时应考虑汽车荷载冲击系数。计算主梁使用阶段正截面混凝土的法向压应力；受拉区预应力钢筋的拉应力；斜截面混凝土的主压应力；结构及受力复杂区域如外侧腹板的防崩局部应力分析。

8.1.4 根据主梁施工过程验算各施工阶段由自重、施工荷载等引起的正截面和斜截面的应力，尤其对最大双悬臂、边跨合龙、中跨合龙、合龙后施工二期恒载等主要控制阶段进行分析。

8.1.5 在进行主梁的构造配筋设计时应充分估算温差变形、混凝土收缩等作用引起的应力，合理布置抵抗温差应力的普通钢筋，适当地增加分布构造钢筋等措施。构造钢筋优选小直径小间距布置的形式，或采用相应的焊接钢筋网等措施使可能出现的裂缝分散分布。

8.1.6 主梁的配筋应充分考虑弯扭耦合造成的影响，曲线梁桥相对直梁来说，由于扭矩较大的原因，

一般顶底板的纵横向受力钢筋、腹板箍筋等都会相应加强，相应的配筋率需在《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)第 9.3.13 条的配筋率要求基础上有所提高。

8.1.7 曲线梁钢筋布置要求使截面具有较强的抗扭能力。箱梁底板、顶板上下层横向钢筋及腹板箍筋要相互搭接，从而构成一个封闭的抗扭矩形。

8.1.8 曲线梁纵向的配筋原则是根据主梁腹板及板的形状配筋，不得已配置成折线形时，在转折点应留有足够的保护层，若保护层不够时，在桥梁横向应配置加固钢筋。

8.1.9 曲线梁横向配筋如果沿半径方向配置，其间距在横截面上应有相应的变化。即曲线内外侧钢筋的间距不同。而且在设计计算时也应考虑这种影响。

8.1.10 在锚固区附近，不得已必须改变预应力钢筋配置方向的区段，应有足够的保护层，由于配筋方向改变，导致局部侧向压力较大时，须配置加固钢筋。

8.1.11 曲线梁中横梁的功能除具有与直线桥相同的功能外，还担负着全桥稳定性的作用，应设置较为强大的横梁。

8.1.12 在进行各支点处支座布置形式不同的曲线梁桥，特别是变宽度异型曲线梁桥的横梁设计时，需要在梁格模型中进行验算，不能仅采用单独的横梁模型进行设计验算。

8.1.13 采用独柱支承结构时，支点横梁宜采用预应力钢筋混凝土结构。

8.2 墩柱设计

8.2.1 墩身为偏心受压构件，应按现行规范的要求计入偏心距增大系数 η 。除应验算弯矩作用平面抗压承载力外，尚应按轴心受压构件验算垂直于弯矩作用平面的抗压承载，此时不考虑弯矩的作用，但应考虑稳定系数 ϕ 的影响。对于可能产生主梁横向爬移的曲线梁桥，在桥墩进行验算时应考虑主梁爬移可能产生的反力作用点偏移引起的弯矩增大效应，防止桥墩在梁弧线内侧面的裂缝等相关病害的产生。建议采用支座偏移 0.1m 计入该作用产生的弯矩增大影响。

8.2.2 墩身为钢筋混凝土构件，持久状况正常使用极限状态主要验算墩身裂缝宽度和墩顶变形。墩身裂缝宽度验算按照现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)有关规定执行。

8.2.3 对于较大跨径悬浇施工的预应力钢筋混凝土连续曲线梁桥，还应进行施工阶段风险校验，即大悬臂及不利作用组合工况下对墩身及基础带来的风险分析。

验算荷载包括：

- a) 施工荷载：挂篮等施工机具及施工人员。
- b) 不平衡施工荷载：计算主梁半个节段的重力。
- c) 主梁的不均匀性：一侧按理论重量的 1.025 倍，另一侧按理论重力的 0.975 倍计算。
- d) 施工阶段风荷载：施工阶段风荷载的设计重现期系数，可根据施工时间长短，按照《公路桥涵抗风设计规范》(JTG/T 3360-01)的有关条款取用。

8.2.4 曲线梁桥的圆形墩柱按径向和切向合力的最不利组合进行配筋，矩形墩柱除按两个方向分别配筋外，还应进行合力的配筋验算。

8.2.5 进行墩柱的盖梁设计时应考虑主梁扭矩最大时产生的反力不均匀影响。

8.3 跨间横隔板设计

8.3.1 混凝土曲线梁桥中设置横隔板可减小截面畸变变形，并有利于减少预应力径向力产生的腹板和翼缘板之间的拉应力。

8.3.2 设置跨间横隔板可使曲线梁桥各阶固有频率降低，在一定程度上减小跨中竖向位移的冲击系数和扭转角，同时能有效降低边跨跨中应力。

8.3.3 混凝土箱梁横隔板的最大间距可参考表 2。

表2 横隔板最大间距

曲率半径 R (m)	$R \leq 120$	$120 < R < 240$	$R \geq 240$
横隔板间距 D_i (m)	13	25	可不设

8.3.4 对于大曲率、小跨径且腹板较厚的曲线箱梁桥可不设跨间横隔板。

8.4 支座设计

- 8.4.1 对于混凝土曲线梁桥，在支座设计时应充分考虑主梁爬移的影响，并采取相应的措施来避免或减小主梁爬移。
- 8.4.2 当曲线梁桥需要设置拉压支座时，应采取相应措施保证拉压支座不得产生水平面内附加的约束。
- 8.4.3 对于曲线梁桥，支反力不大的情况下一般选择采用板式橡胶支座，避免在曲线梁桥中使用辊轴支座。
- 8.4.4 采用板式橡胶支座的曲线梁桥须设置较强的横向挡块，防止爬移产生的径向位移过大。
- 8.4.5 正常运营状态下支座应具有一定的压力储备，防止支座偏移脱空。大跨度小半径曲线梁桥或者比较重要的曲线梁桥，建议选择采用测力支座，对其进行健康监测，实时监测支座的反力及水平位移状态，以便于对出现脱空和水平变位较大的病害进行及时发现和处理。

8.5 附属设施设计

- 8.5.1 温度变化和混凝土收缩将引起各支点处的弦向位移，故在桥梁活动端将引起径向位移分量，会使伸缩缝位置产生一个平面扭转，因此在进行伸缩缝设计时应考虑这一影响，根据计算结果对梳齿板伸缩缝转角提出要求，安装伸缩缝时也要根据当时的气温决定转角的预留量。
- 8.5.2 有纵坡的曲线梁桥更容易产生爬移，在设置伸缩缝时应考虑这一影响预留冗余。
- 8.5.3 支座垫石尺寸和位置的偏差会造成支座脱空以及结构爬移，在设计时应确保其准确性，并在设计中强调垫石施工避免出现偏差。
- 8.5.4 对于设置超高的单向横坡曲线梁桥，桥面排水孔道的布置也须作相应配合。
- 8.5.5 曲线梁桥的外弧比内弧长，因而在布置栏杆和其他诸如灯柱、路缘石、泄水孔等的附属构造时要充分注意到这一差异产生的影响。
- 8.5.6 应尽量将梁体的附属结构，如水管路、电线路等设置在曲线内弧侧。
- 8.5.7 在抗倾覆性能较差的曲线梁桥上应设置警示牌，禁止重车在桥上集中排队靠一侧行驶或停靠。

9 预应力钢束设计

9.1 预应力筋布置基本要求

- 9.1.1 曲线梁桥的预应力筋设计不同于直线梁桥，设计时应综合分析预应力作用下结构弯矩、剪力、轴力、扭矩及支反力效应，合理布置预应力筋
- 9.1.2 曲线梁预应力筋布置应有利于施工稳定性控制。
- 9.1.3 为防止预应力钢束产生的径向力过大，在设计中宜避免使用大吨位的预应力钢束。
- 9.1.4 曲线梁平面内、外管道的保护层厚度应满足抗崩要求。

9.2 预应力筋布置

- 9.2.1 曲线梁桥纵向预应力钢筋的配置应尽可能使预应力筋的水平合力作用点连线与梁的轴线相吻合。

如有必要，在进行纵向预应力钢束配置时，也可以通过预应力钢束来调整扭矩分布，例如在弧线内外侧腹板布置形状或大小不一样的钢束等，但应注意这一偏心产生的桥梁横向弯矩及由此产生的水平面内的次反力，设计时应尽量降低钢束这一作用对结构受力的影响。

9.2.2 在布置腹板钢筋时宜偏向腹板的曲线外侧布置，增大腹板内侧砼的抵抗厚度。

9.2.3 应力筋竖弯或平弯相邻预应力管道间的最小净距应大于弯曲平面内最小混凝土保护层厚度且不小于管道直径的 0.6 倍

9.2.4 管道内径的截面面积不宜小于 2 倍预应力钢筋截面面积。

9.2.5 预应力钢筋的张拉顺序应保持沿梁轴线对称张拉，宜减小张拉过程中在水平面内产生的次反力和次内力。

9.2.6 计算曲线梁桥预应力钢筋损失时，除需要考虑规范规定的预应力损失项目外，还应计入平面内主梁弯曲变形造成的预加力变化。

9.3 侧向防崩钢筋设计

9.3.1 预应力曲线梁桥，由于预应力引起的径向力作用，腹板箍筋应予加强，同时须增设防崩钢筋。

9.3.2 防崩钢筋的内侧要与预应力筋束相密贴，用铁丝扎牢，不能松动。

9.3.3 防崩钢筋的锚固端必需有充足的锚固长度，并设成弯钩与构造钢筋骨架绑扎牢固、或与腹板钢筋焊接（图 9.3.3-1）。

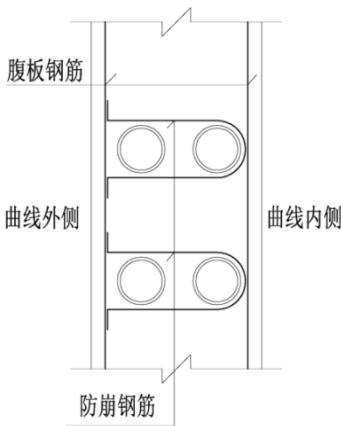


图5 防崩钢筋固定示意图

9.3.4 管道应按设计规定的坐标位置进行安装，并通过定位钢筋固定，定位钢筋间距不应大于 0.5m。

10 施工要求

10.1 基本要求

10.1.1 曲线梁桥施工应根据不同的施工步骤进行施工验算分析，在对结构进行上部静力分析时，应根据施工过程形成各阶段的计算图式，详细分析结构各阶段的应力和位移变化情况，并考虑施工阶段的风险工况。

10.1.2 施工过程中应合理设置抗扭约束，确保施工期结构的稳定安全，特别是采用顶推法或者悬臂法施工连续曲线梁桥时，应充分考虑施工过程中的抗扭约束，如有必要可增加临时约束，以确保施工期间主梁及墩台的安全性。

10.1.3 施工支架在施工荷载作用下须具有足够刚度和抗扭能力。

10.1.4 在曲线梁桥的二期恒载施工过程中,应采用合理的施工顺序及施工方法,同时车辆在停靠时应该避免停靠在引起过大倾覆效果的位置。在设计计算时应充分考虑施工过程中的最不利布载对结构进行抗倾覆验算,确保施工过程中结构的安全性。抗倾覆验算方法参考 7.4 部分内容。

10.2 施工技术要求

10.2.1 设计说明中应对曲线梁桥的施工措施提出相关规定和要求。

10.2.2 施工支架应进行预压,消除支架地基的不均匀沉降和支架的非弹性变形并获取弹性变形参数,确保支架的安全性。预压荷载宜为支架需承受全部荷载的 1.2 倍,预压荷载的分布应模拟需承受的结构荷载及施工荷载,应考虑曲梁施工过程中产生的扭转效导致的支架反力变化。

10.2.3 施工过程中禁止重车在曲线梁桥外侧通过。

10.2.4 曲线钢梁桥在进行热拌沥青铺装施工时,要避免横向分幅施工,以免桥面升温 and 横向温差叠加造成水平面内过大次内力,造成支座横向约束的破坏。如果不可避免使用分幅施工,需要采取相应的钢梁降温措施,避免产生过大温差。

10.2.5 采用销轴式限位约束措施的曲线梁桥,要确保梁端桥墩帽梁上的销槽安装精度,同时应尽量控制在气温与设计基准温度相近的时间内进行销轴与销槽的安装定位。

10.2.6 设计文件中应明确以下内容:在预应力钢筋混凝土曲线梁桥施工过程中,预应力钢束的张拉顺序应使腹板钢束中间与两侧交叉张拉,顶底板钢束上下交叉张拉,尽量保持沿梁轴线对称张拉,以尽可能减小张拉过程中在水平面内产生的次反力和次内力。

10.2.7 施工过程的支架验算应考虑曲梁施工过程中产生的扭转效应导致的反力变化。

10.2.8 预应力钢筋宜在浇筑混凝土之前穿入孔道,预应力安装完成后,应对预应力管道进行全面检查;浇筑混凝土凝固前,宜将预应力钢筋在管道内前后拖动,避免局部漏浆对预应力张拉产生的不利影响。

10.2.9 预应力张拉之前,应对不同类型的孔道进行至少一个孔道的摩阻测试,通过测试所确定的 u 值和 k 值修正设计张拉控制应力,对长度大于 60m 的孔道宜适当增加摩阻测试的数量。

10.2.10 曲线预应力筋宜采用两端张拉。

参考文献

- [1] JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范
- [2] JTG B02-2013 公路工程抗震规范
- [3] CJJ 166-2011 城市桥梁抗震设计规范
- [4] JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- [5] JTG/T 3360-01-2018 公路桥梁抗风设计规范
- [6] JTG D64-2015 公路钢结构桥梁设计规范
- [7] JTG B01-2014 公路工程技术标准
- [8] JTG 3363-2019 公路桥涵地基与基础设计规范
- [9] CJJ 11-2011 城市桥梁设计规范
- [10] JTG/T 3650-2020 公路桥涵施工技术规范
- [11] CJJ 2-2008 城市桥梁工程施工与质量验收规范
- [12] JTG F80-1-2017 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程