

# 桥梁设计的几点思考

康星星<sup>1</sup>, 荀浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>河南省中工设计研究院集团股份有限公司交通事业部综合设计院, 河南 郑州

<sup>2</sup>河南省中工设计研究院集团股份有限公司交通事业部交通一院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年7月8日; 录用日期: 2025年7月28日; 发布日期: 2025年8月12日

## 摘要

本文总结了圆曲线上预制桥梁的布梁设计、极限状态下受压区预应力钢筋的应力, 以及上部计算时预应力钢束的调束技巧等内容。

## 关键词

圆曲线桥梁, 布梁, 极限状态下受压区预应力钢筋的应力, 调束

# Key Considerations in Bridge Design

Xingxing Kang<sup>1</sup>, Hao Xun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Comprehensive Design Institute, Transportation Strategy Development Division, Henan Zhonggong Design & Research Group Co., Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>1st Transportation Design Institute, Transportation Strategy Development Division, Henan Zhonggong Design & Research Group Co., Zhengzhou Henan

Received: Jul. 8<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 28<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 12<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This paper summarizes key aspects of precast bridge design on circular curves, including girder arrangement, stress in prestressing steel within the compression zone at the Ultimate Limit State, and tendon adjustment techniques for superstructure computational modeling.

## Keywords

Bridge on Circular Curve, Girder Arrangement, Stress in Prestressing Steel within Compression Zone at Ultimate Limit State, Tendon Profile Adjustment



## 1. 引言

随着国家经济的发展, 我国的桥梁建设有了长足的进步。根据建设材料的不同, 出现了钢箱梁、钢混组合梁等新型桥梁结构形式, 但是预应力混凝土梁桥仍是当前桥梁建设的主要桥型, 在现阶段中小跨径桥梁中占主导地位。本文结合桥梁实际设计工作, 总结了小半径圆曲线上预制桥梁布梁设计、极限状态下受压区预应力筋的应力以及预应力钢束调束等内容。

## 2. 位于圆曲线上预制桥梁的布梁设计

位于圆曲线上的桥梁, 桥梁布孔有径向布置、等角度布置两种方式[1]。墩台径向布置, 即各墩台中心线沿着半径方向设置, 斜桥时, 各墩台中心线与半径方向偏移相同的角度, 一般适用于预制 T 梁和预制箱梁。等角度布置亦即平行布置, 是指各墩台中心线与中心桩号处桥梁中心线偏移相同的角度, 一般适用于预制空心板结构。

位于曲线上的桥梁上部是通过以直代曲的方式设计施工的, 预制梁以直线代替曲线, 必然会存在差值。常规桥梁的布梁方法包括弯桥直做和弯桥折作。弯桥直做包括经线法和平分中矢法; 弯桥折作包括墩台平行布置法和墩台径向布置法[2]。山区特殊地形处桥梁位于 S 形曲线上的桥梁采用了非传统的平行布置法和径向布置法进行总体布梁设计, 保证了相同跨径的 T 梁在孔与孔之间的梁长一致, 从而方便设计及施工[3]。实际的设计施工过程中, 桥梁布梁的调整方式取决于桥梁所处的路线半径。当桥梁所在的路线半径较大时, 可按正常方式进行布梁设计, 即通过偏移基线, 并结合调整梁长和湿接缝宽度的方式实现以直代曲, 基线可选相对于墩中心连线、相对于路线设计中心线和相对于桥台中心连线三种; 当桥梁位于小半径路线时, 可通过先将基线偏移至 1/2 矢高处, 然后再按正常方式进行布梁, 值得注意的是, 将基线偏移 1/2 矢高其实是将桥梁上部整体偏移了 1/2 矢高, 应注意核查上部梁梁底与盖梁挡块的距离, 当上部梁梁底与挡块发生碰撞时, 应将桥梁下部墩台整体偏移 1/2 矢高以满足上部梁架设要求, 下部墩台偏移时, 应注意核查桩位坐标图。本文以采用径向布置的预制箱梁为例, 对小半径圆曲线上的桥梁布梁设计进行说明。

该桥梁桥型图如下图 1~3 所示, 本桥跨径 25 m, 上部结构采用三片预制小箱梁中梁, 湿接缝宽度 68 cm。桥梁 0~3 号墩台平面位于  $R = 500$  m 的圆曲线上, 4 号桥墩位于缓和曲线上。本文采用桥梁大师软件建立布梁模型, 对前三跨位于小半径曲线上的预制梁进行布梁设计对比, 按正常方式和偏移 1/2 矢高两种布梁方法的设计见图 4 和图 5。

从边梁悬臂长度层面看, 本工程案例路线半径  $R = 500$  m, 矢高  $h = 0.156$  m, 由图 4、图 5 可知, 按正常方式布梁时, 内外侧边梁中线距悬臂线最大、最小距离分别为 135.6 cm、104.6 cm, 沿路线前进方向路线左侧边梁悬臂超出正常箱梁悬臂线 15.6 cm, 路线右侧边梁悬臂短出正常箱梁悬臂线 15.4 cm; 按偏移 1/2 矢高布梁时, 内外侧箱梁中线距悬臂线最大、最小距离分别为 127.8 cm、112.4 cm, 沿路线前进方向路线左侧边梁悬臂超出正常箱梁悬臂线 7.8 cm, 路线右侧边梁悬臂短出正常箱梁悬臂线 7.6 cm, 较好地缓解了位于小半径曲线上的桥梁内外侧边梁悬臂长度差别较大的问题。但应注意, 本案例中由于桥宽限值, 边梁宽度同中梁宽度, 在边梁悬臂短出正常箱梁悬臂线一侧, 应注意核查边梁悬臂是否切入顶板束齿块中, 若切入齿块中, 应注意调整该侧边梁悬臂长度。

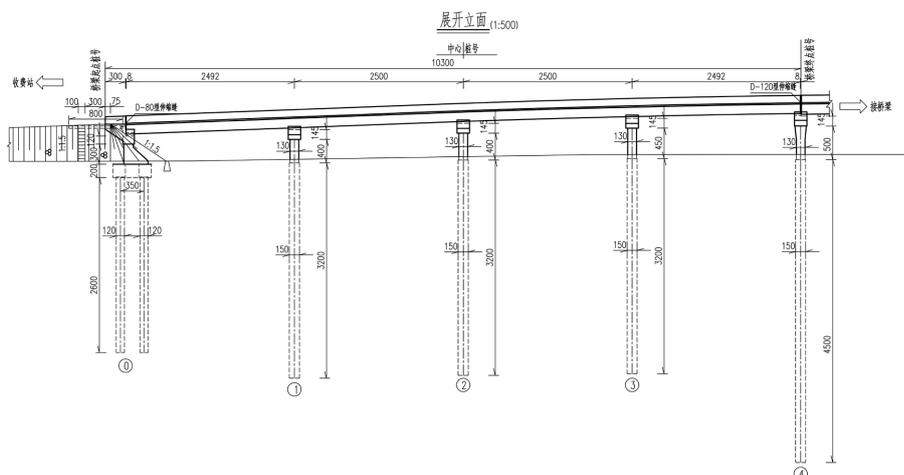


Figure 1. Elevation view of bridge general arrangement drawing  
图 1. 桥型布置图立面

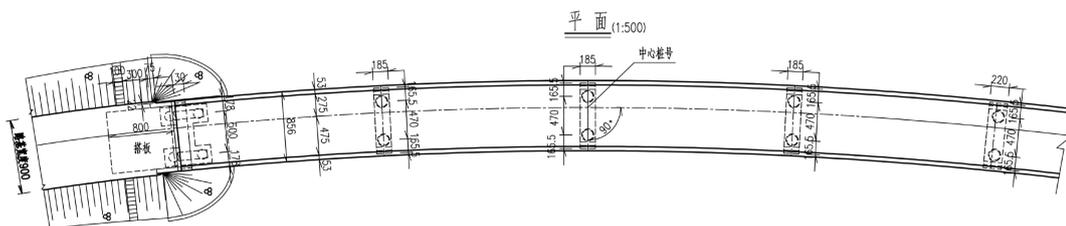


Figure 2. Plan view of bridge general arrangement drawing  
图 2. 桥型布置图平面

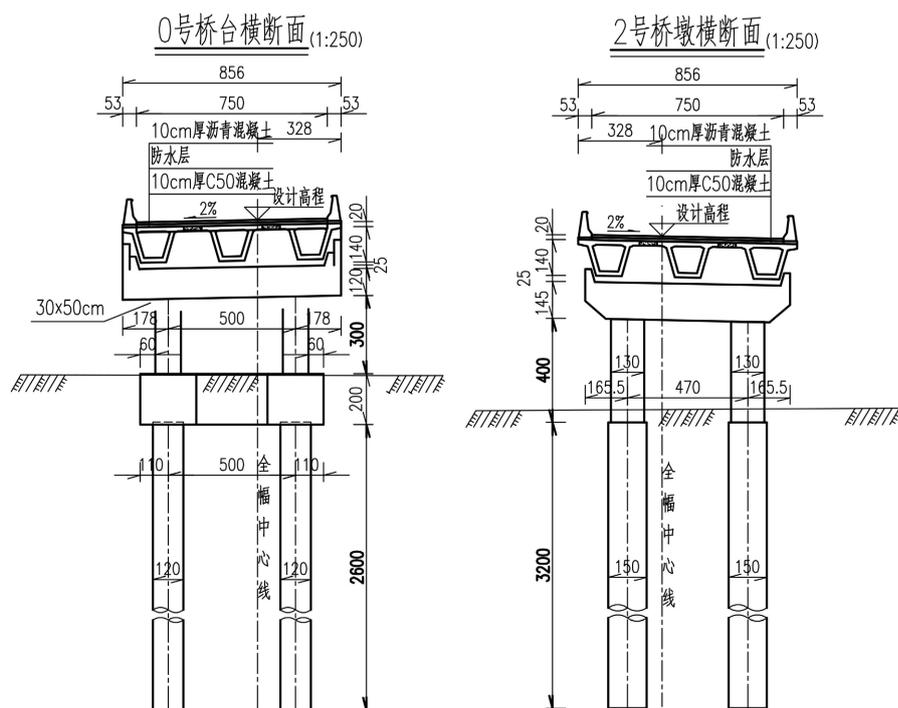
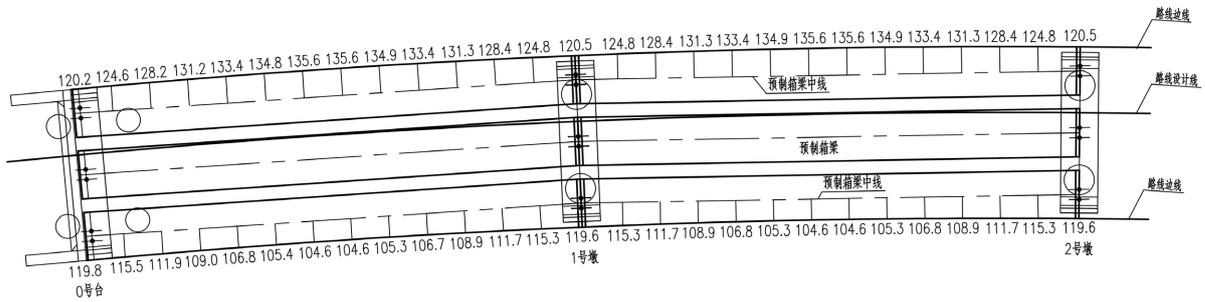
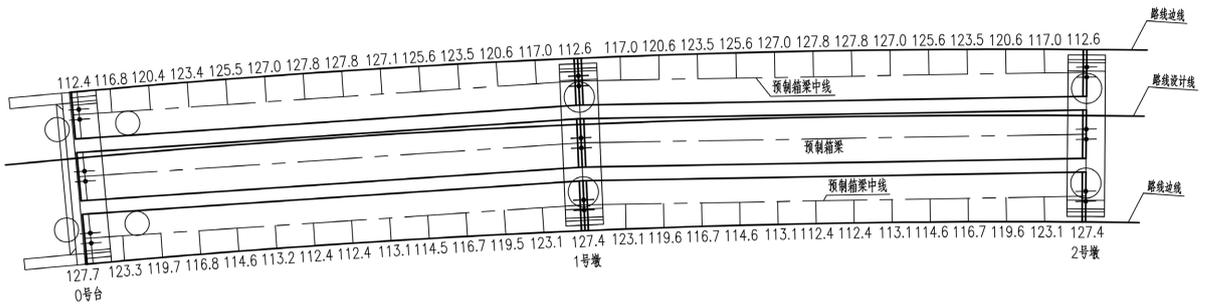


Figure 3. Cross-section view of abutments and piers  
图 3. 桥台及桥墩横断面图



**Figure 4.** Precast beam layout design drawing (standard arrangement)  
**图 4.** 预制梁按正常方式布梁设计图



**Figure 5.** Precast beam layout: Half-Camber offset arrangement  
**图 5.** 预制梁按偏移 1/2 矢高方式布梁设计图

从悬臂根部应力层面分析, 25 m 跨径预制箱梁边梁断面见图 6, 边梁悬臂按悬臂梁计算效应。由图可知正常情况下边梁悬臂长度 37.6 cm, 布梁设计时边梁悬臂长度增加  $l$ 。成桥后, 箱梁悬臂承担自重和二期荷载作用, 沿桥梁纵向取单位长度进行计算, 悬臂梁断面为 100 cm × 25 cm, 则成桥后箱梁悬臂根部效应为:

$$\text{永久荷载标准值 } q_{g1} = 0.5 \times 0.25 \times 1 \times 26 = 3.25 \text{ kN/m}$$

$$\text{二期铺装荷载标准值 } q_{g2} = 0.1 \times 1 \times 26 + 0.1 \times 1 \times 24 = 5 \text{ kN/m}$$

$$\text{二期护栏荷载标准值 } q_{g3} = 0.43 \times 26 / 0.5 = 22.36 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} M &= -0.5 \times 3.25 \times (0.376 + l)^2 - 0.5 \times 5 \times (0.376 + l)^2 - 0.5 \times 22.36 \times (0.376 + l - 0.25) \\ &= -2.875 \times (0.376 + l)^2 - 11.18 \times (0.126 + l) \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

$$V = 3.25 \times (0.376 + l) + 5 \times (0.376 + l) + 22.36 \times 0.5 = 8.25 \times (0.376 + l) + 11.18 \text{ (kN)}$$

上式中, 边梁悬臂根部荷载效应值与悬臂长度呈正比例关系。由材料力学, 边梁悬臂根部正应力  $\sigma = My/I$ , 剪应力  $\tau = VS/bt_w$ , 在截面一定的情况下, 悬臂长度越大, 荷载效应值越大, 悬臂根部应力越大, 对结构受力越不利, 因此布梁时应注意控制悬臂长度, 以免悬臂长度过大影响结构安全。

### 3. 极限状态下受压区预应力筋的应力

预应力混凝土构件截面受力状态在不同的阶段其受力状态不一致, 主要分为施工阶段、使用阶段和破坏阶段等。

在构件制作、运输、安装等施工阶段, 预应力混凝土受弯构件截面处于弹性工作阶段, 计算时应注意构件混凝土强度和截面特征的选用, 根据规范[4], 预应力混凝土受弯构件弹性阶段应力计算时, 先张法构件, 其截面性质采用换算截面; 后张法构件, 体内束管道压浆前其截面性质采用净截面, 压浆后采

用换算截面。在预加应力阶段, 构件承受预压偏心力  $N_p$  作用, 在此作用下, 构件产生向上的反拱, 截面上边缘受拉, 下边缘受压。预加应力阶段应注意预压偏心力  $N_p$  施加后, 控制截面上下缘混凝土的最大拉压应力不应超过规范容许值。

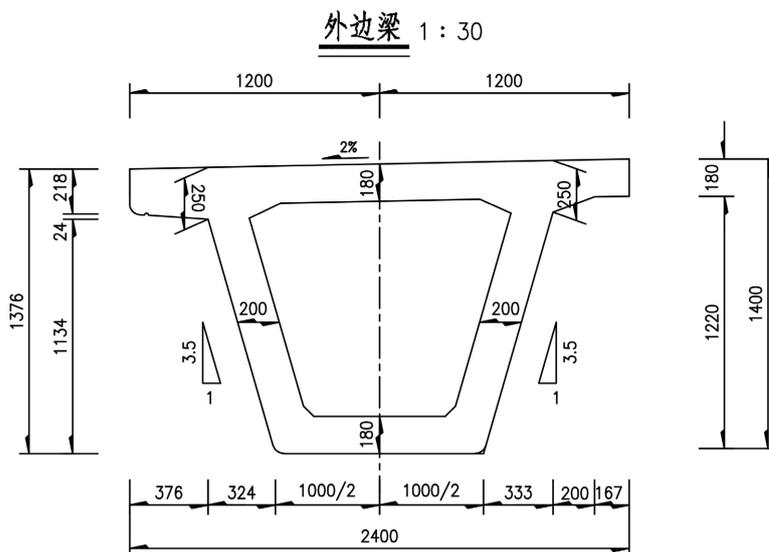


Figure 6. Cross-sectional drawing of exterior beam for 25 m span precast box girder  
图 6. 25 m 跨径预制箱梁边梁断面图

使用阶段预应力混凝土梁承受荷载工况较多, 依据结构设计原理[5], 预应力混凝土受弯构件在运营阶段要承受铺装等二期恒载作用和车辆等活载作用, 预应力混凝土受弯构件在整个使用阶段其截面基本处于弹性。扣除全部预应力损失后预应力筋内所存余的预应力  $\sigma_{pe}$  为有效预应力亦即永存预应力。构件施加预应力时, 预应力筋产生预拉力, 对混凝土产生预压力, 预应力施加完成后, 对构件进行加载, 当梁截面下缘混凝土的预压应力  $\sigma_{pc}$  被抵消时, 此时构件截面上的应力状态即为消压状态。值得注意的是, 消压状态并不意味着构件整个控制截面上的应力都为零, 而是只有控制界面下边缘纤维混凝土的应力为零。当预应力混凝土受弯构件达到消压状态后, 随着外荷载的增加, 构件下边缘混凝土拉应力逐渐增大, 当拉应力达到混凝土抗拉极限强度  $f_{tk}$  时, 构件出现裂缝。由此可以看出, 预应力混凝土受弯构件达到消压状态后, 其受力状态与普通钢筋混凝土受弯构件一样。适筋梁构件受弯破坏的标志为受压区全部钢筋, 包含预应力钢筋和非预应力钢筋达到屈服, 受压区混凝土被压碎。

一般认为, 预应力混凝土适筋梁构件受弯破坏时, 受压区配置预应力钢筋和非预应力钢筋的构件, 其抗弯承载力计算公式如下:

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{sd}' A_s' (h_0 - a_s') + (f_{pd}' - \sigma_{p0}') A_p' (h_0 - a_p')$$

由上式可知, 受拉区预应力钢筋和非预应力钢筋分别达到抗拉强度设计值  $f_{pd}'$  和  $f_{sd}'$ , 受压区混凝土压应力采用等效矩形应力图表示, 其抗压强度设计值为  $f_{cd}$ , 受压区非预应力钢筋抗压强度设计值取为  $f_{sd}'$ , 受压区预应力钢筋的应力拉压情况不可确定, 其值一般达不到受压区预应力钢筋抗压强度设计值, 因而将其称为计算应力, 数值大小为  $(f_{pd}' - \sigma_{p0}')$ 。

对于极限状态下受压区预应力钢筋计算应力  $(f_{pd}' - \sigma_{p0}')$  的来源, 规范并未给出详细解释。规范 5.2.2 条文说明指出, 受弯构件承载能力极限状态下, 受压区区内预应力钢筋的应力取为各自的抗压强度设计

值  $f'_{sd}$  和  $f'_{pd}$ 。此说法与规范正文有冲突, 认为规范条文说明说法不合适, 按规范正文执行。关于极限状态下受压区预应力钢筋计算应力  $(f'_{pd} - \sigma'_{p0})$  的来源, 叶见署教授认为, 构件施加预应力后承受外荷载之前, 受压区预应力钢筋的应力为有效预拉应力  $\sigma'_p$ , 预应力钢筋重心处混凝土的有效预压应力为  $\sigma'_c$ , 当构件破坏时, 受压区混凝土应力达到混凝土轴心抗压强度设计值  $f_{cd}$ , 应变为  $\varepsilon_c$ , 因此构件破坏状态时, 受压区混凝土压应变增加量等于受压区预应力钢筋压应变增量为  $(\varepsilon_c - \sigma'_c/E_c)$ , 则受压区预应力钢筋应力为  $E'_p(\varepsilon_c - \sigma'_c/E_c) - \sigma'_p$ , 此式可简化为  $(f'_{pd} - \alpha'_{EP}\sigma'_c - \sigma'_p)$ , 式中  $(\alpha'_{EP}\sigma'_c + \sigma'_p)$  项为受压区预应力钢筋重心处混凝土应力为零时的有效预应力  $\sigma'_{p0}$ 。因此, 极限状态下预应力混凝土受弯构件受压区预应力钢筋的计算应力为  $(f'_{pd} - \sigma'_{p0})$ 。

#### 4. 调束要点

以预应力混凝土等高现浇箱梁为例, 构件的计算应首先查看抗弯承载能力和抗剪承载能力是否满足。从最不利截面看, 抗弯承载能力重点看跨中截面抗弯承载能力是否满足, 若无法满足, 则可通过加大梁截面尺寸和预应力钢筋束数两种方法进而增大梁抗弯承载力。抗剪承载能力着重看支座附近和承受集中荷载附近截面, 根据规范, 预应力筋施加预应力后对构件产生预压力, 预压力可阻碍斜裂缝的开展, 增加抗剪截面混凝土剪压区高度, 从而提高构件混凝土部分的抗剪能力; 预应力混凝土梁与钢筋混凝土梁相比延性更好, 其斜裂缝长度比钢筋混凝土梁更长; 但根据规范预应力混凝土受弯构件抗剪承载力验算公式可知, 预应力钢筋对斜截面抗剪承载力的贡献只考虑钢筋弯起部分, 抗剪承载力验算公式如下:

$$\gamma_0 V_d = V_{cs} + V_{sb} + V_{pb} + V_{pb,ex} \quad (1)$$

式中,  $V_{pb}$  为与斜截面相交的体内预应力弯起钢筋抗剪承载力设计值;  $V_{pb,ex}$  为与斜截面相交的体外预应力弯起钢筋抗剪承载力设计值。结合公式以及工程实践, 截面抗剪承载力通过构件截面尺寸和设置足够箍筋肢即可满足, 预应力筋对于抗剪承载力的贡献更多的是作为承载力储备。

其次, 应重点查看构件正截面的应力情况, 尤其是拉应力情况。构件正截面的应力验算包括抗裂验算和持久状况、短暂状况下构件层面的应力验算。如果支座截面顶缘拉应力超标, 可通过将钢束位置上移缓解拉应力情况, 若拉应力超过容许值过多, 则可通过增加顶板束束数来控制拉应力情况。反之, 若支座截面底缘拉应力超标, 可通过将钢束位置下移进行控制。主拉应力的验算关键在于把钢束弯起过渡段设置的平缓一些, 通过减小截面处的剪应力进而减小主拉应力数值。

钢束应力过大, 会造成钢束断丝进而造成钢束失效, 故构件计算时应关注钢束应力情况, 若钢束应力过大, 则可通过减小张拉控制应力并结合其他调束措施进行控制。实际设计中, 钢束张拉控制应力一般取为  $0.75f_{pk}$ , 若钢束应力过大, 张拉控制应力可调整为  $0.72f_{pk}$ 。

#### 5. 结语

本文结合实际的桥梁设计工作, 总结了桥梁设计工作中的几个要点:

(1) 位于圆曲线上的预制桥梁, 其布梁设计与路线半径  $R$  有关,  $R$  较大时, 可通过预制梁长和湿接缝宽度调整布梁;  $R$  较小时, 可通过将路线设计线偏置  $1/2$  矢高, 同时将桥梁上部 and 下部同时偏移  $1/2$  矢高的方法解决预制桥梁小半径布梁产生的边梁悬臂过大或过小的问题。

(2) 预应力混凝土受弯构件极限状态下受压区预应力钢筋的抗压强度设计值为  $(f'_{pd} - \sigma'_{p0})$ 。规范 5.2.2 条文说明指出, 受弯构件承载能力极限状态下, 受压区体内预应力钢筋的应力取为各自的抗压强度设计值  $f'_{sd}$  和  $f'_{pd}$ , 此说法与规范正文冲突, 实际的设计工作中按正文设计。

(3) 从承载力层面和应力层面总结了预应力钢束的调束要点。

## 参考文献

- [1] 刘红卫, 冯海江. 装配式桥梁设计[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 91-92.
- [2] 陈晨, 刘洋亿. 曲线桥梁的自动布梁方案设计研究[C]//中国公路学会计算机应用分会. 中国公路学会计算机应用分会 2010 年学术年会论文集. 2010: 66-68.
- [3] 何俊, 牛小平, 王泽军, 等. 处于 S 形曲线桥梁布梁方案研究[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会. 第二十一届全国桥梁学术会议论文集(上册). 2014: 257-260.
- [4] 中交公路规划设计院有限公司. JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [5] 叶见署. 结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2020: 249.