

装配式预制梁板反拱分析计算及测试方法研究

邢朝阳¹, 周守朋², 陈晓飞³, 张朝文¹, 沈鹏宁³

(1. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 合肥 230031; 2. 沂沭泗水利管理局防汛机动抢险队, 江苏 徐州 221000; 3. 安徽省建筑工程质量监督检测站有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要: 通过介绍预应力梁板反拱形成原理, 针对反拱对结构安全造成的危害, 提出对预制梁板反拱值进行控制的必要性。通过工程实例, 从预制梁板重量、预应力损失、结构自重和预加应力引起的反拱值进行理论分析计算, 得出在预加应力在不同龄期的理论反拱值。采用不同的测试方法对预制梁板反拱值进行跟踪监测研究分析, 从而优选出反拱测试方法, 提高测量精度。同时进一步对反拱测试差异的影响因素进行分析探讨, 提出了减小和避免预应力梁板反拱不利因素, 为预制梁板的施工、反拱及挠度测量提供科学的理论依据和实测经验。

关键词: 装配式预制梁板; 后张法; 反拱; 预应力损失; 测量方法

中图分类号: TV334

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0161-05

Research on Analysis, Calculation and Testing Methods for Reverse Camber of Prefabricated Beams and Slabs

XING Chaoyang¹, ZHOU Shoupeng², CHEN Xiaofei³, ZHANG Chaowen¹, SHEN Pengning³

(1. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei 230031, China; 2. Yishuisi Water Resources Administration Flood Control Mobile Rescue Team, Xuzhou 221000, China; 3. Anhui Province Construction Engineering Quality Supervision Testing Station Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract: By introducing the formation principle of reverse camber of prestressed beams and slabs, aiming at the hazards caused by reverse camber to structural safety, the necessity of controlling the reverse camber value of prefabricated beams and slabs is proposed. Through the engineering examples, the theoretical analysis and calculation are conducted on the reverse camber values induced by the weight of prefabricated beams and slabs, prestressing loss, structural self-weight and prestressing force to derive the theoretical reverse camber values at different ages of prestressing. Different testing methods are adopted to track, monitor, study and analyze the reverse camber value of prefabricated beams and slabs so as to optimize the reverse camber testing method and improve the measurement accuracy. Furthermore, the influencing factors of the differences in the reverse camber test are further analyzed and discussed, and the unfavorable factors for reducing and avoiding the reverse camber of prestressed beams and slabs are proposed, providing a scientific theoretical basis and practical experience for the construction, reverse camber and deflection measurement of prefabricated beams and slabs.

Keywords: prefabricated beam and slab; post-tensioning method; reverse camber; prestress loss; measurement method

0 引言

在工程建设过程中,许多桥梁兼顾防汛和交通功能。为了加快施工进度,往往采用施工周期比较短的装配式预应力混凝土板梁。预应力混凝土板梁可批量生产,安装简便,是公路桥梁的优先之选。预制构件采用预应力主要是用预加压应力来抵消使用荷载作用下对混凝土产生的拉应力^[1]。梁板在施加

预应力后必然会产生反拱,这是预应力混凝土板梁的特点。梁板反拱值是衡量预应力混凝土板梁结构质量的一个重要指标。在桥梁施工过程中,反拱值控制尤为重要。反拱值控制不好,会给施工带来很大的困扰。反拱度参差不齐,装配式预制板梁安装好后,会出现整体结构尺寸不一致现象。板梁反拱值过大,桥面铺装层厚度很难得到保证,造成桥梁整体性能较差,降低桥梁的安全性能和耐久性^[2];桥梁反拱值过小,桥面铺装层厚度就会增大,桥梁自重会增加,成桥后重心上移,造成较大安全隐患^[3]。因此,反拱值控制^[4]在施工过程中是不容忽视的,需要

收稿日期: 2025-12-02

作者简介: 邢朝阳(1978—),男,本科,高级工程师,从事道路桥梁、地基基础、桩基、振动等方面的研究、检测工作。

采取测试手段对构件进行控制,从而避免对桥跨结构安全产生不利影响。

1 工程概况

某一工地交通桥采用后张法预应力混凝土空心板结构,桥面净空:净-9+2×1.5 m,荷载等级为公路 I 级,人群荷载为 3.0 kN/m²,标准跨径 20 m,计算跨径 19.26 m,上部结构为空心板,后张法预应力工艺,总计 180 片板,混凝土强度等级为 C50,弹性模量 $E_c=3.45 \times 10^4$ MPa,截面尺寸为 1.24 m×0.95 m(宽×高); $f_{ck}=32.4$ MPa, $f_c=23.1$ MPa,中板 18 根 ψ 15.2 钢绞线,钢绞线的标准强度 $f_{pk}=1\ 860$ MPa,空心板上顶板厚 120 mm,下底板厚 120 mm,预应力筋的受力中心到板底边距离为 143 mm。

2 后张法预应力空心板计算

预制构件后张法施工是在构件预先设置孔道中插入预应力筋,待混凝土强度达到要求后,通过梁体外千斤顶对预应力筋进行张拉,在梁体端部采用锚具锚固预应力筋,预应力筋的张拉力施加到混凝土上,使构件混凝土产生预压应力^[5]。

2.1 荷载计算

空心板毛截面积 $A=555\ 100$ mm²,惯性矩 6.22×10^{10} mm⁴,重心 469.5 mm,净截面积 $A_n=543\ 100$ mm²,惯性矩 $I_n=6.08 \times 10^{10}$ mm⁴,计算纤维处至净截面重心的距离 $y_n=468.2$ mm; ψ 15.2 公称面积 139 mm²,弹性模量 $E_p=1.95 \times 10^5$ MPa,主筋为 HRB400 型 12 Φ 16 钢筋,弹性模量 $E_s=2.0 \times 10^5$ MPa。桥面二次铺装为 70 mm 厚沥青混凝土+乳化沥青防水层+120~180 mm 厚 C50 桥面现浇层,人行道净宽 1.5 m。

空心板截面如图 1 所示。

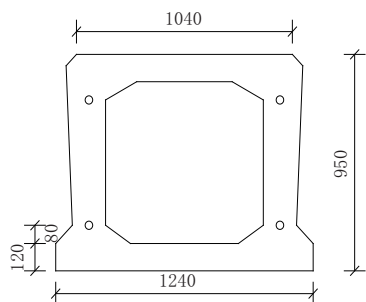


图1 空心板截面

(1)空心板自重 G_1 。空心板、铰缝混凝土比重 $\gamma=25$ kN/m³, $G_1=A\gamma=13.88$ kN/m。其中, A 为空心板毛截面积, m²; γ 为空心板、铰缝混凝土比重, kN/m³。

(2)空心板自重产生的弯矩作用效应。

$$M_g=G_1l/8=643.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

式中: G_1 为空心板自重, kN/m; l 为空心板计算跨径, m。

2.2 空心板预应力损失

空心板锚下控制应力 $\sigma_{con}=0.75f_{pk}=1\ 395$ MPa。

(1)管道壁与预应力筋之间的摩擦产生的预应力损失。

$$\sigma_{l1}=\sigma_{con}[1-e^{-(\mu\theta+kx)}]=97.7 \text{ MPa}$$

式中: σ_{l1} 为管道壁与预应力钢筋之间的摩擦产生的预应力损失, MPa; σ_{con} 为预应力筋锚下的张拉控制应力, MPa; μ 为预应力筋与孔道壁的摩擦系数; θ 为从计算截面到张拉端曲线孔道部分切线夹角之和, rad; k 为孔道每米局部偏差对摩擦的影响系数; x 为从计算截面至张拉端的孔道长度, m。

(2)预应力钢筋锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩引起的预应力损失。

$$\sigma_{l2}=\frac{\sum \Delta l}{l} E_p=15.6 \text{ MPa}$$

式中: σ_{l2} 为预应力钢筋锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩引起的预应力损失, MPa; Δl 为张拉端锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值, mm; l 为张拉端至锚固端之间的距离, mm; E_p 为预应力钢筋弹性模量。

(3)混凝土弹性压缩产生的预应力损失。

后张法简化计算公式为:

$$\sigma_{l4}=\frac{m-1}{2} a_{EP} \Delta \sigma_{pe}$$

式中: σ_{l4} 为混凝土弹性压缩产生的预应力损失, MPa; a_{EP} 为预应力钢筋弹性模量与混凝土弹性模量比值; $\Delta \sigma_{pe}$ 为计算截面预先张拉的钢筋重心处, 各批后张拉钢筋生产的法向应力 (MPa) 取各束的平均值; m 为预应力钢筋束数。

$$\sigma_{pe}=\sigma_{con}-\sigma_1=1\ 281.7 \text{ MPa}$$

$$A_p=2\ 502 \text{ mm}^2, A_s=2\ 411.5 \text{ mm}^2$$

式中: σ_{pe} 为预应力筋相应阶段的有效预应力, MPa; σ_{con} 为预应力筋的张拉控制应力值, MPa; σ_1 为受拉区预应力筋相应阶段的有效预应力, MPa。

$$N_p=\sigma_{pe} A_p-\sigma_{l6} A_s=3\ 206\ 813.4 \text{ N}$$

$$e_{pn}=\frac{\sigma_{pe} A_p y_{pn}-\sigma_{l6} A_s y_{sn}}{N_p}=325.2 \text{ mm}$$

式中: N_p 为后张法预应力筋与普通钢筋合力, N; σ_{l6} 为预应力筋受拉区在合力点因混凝土收缩和徐变产生的预应力损失值, MPa; A_p 为受拉区预应力筋截面积, mm²; A_s 为构件受拉区纵向普通钢筋截面积, mm²; y_{pn} 为预应力筋在受拉区合力处至净截面重心轴距

离, mm; y_{sn} 为普通钢筋在受拉区重心至净截面重心轴距离, mm。

$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A_n} + \frac{N_p e_{pn}}{I_n} y_n = 11.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{l4} = \frac{m-1}{2} \sigma_{ep} \Delta \sigma_{pc} = 194.9 \text{ MPa}$$

式中: I_n 为净截面惯性矩, mm^4 ; y_n 为计算纤维处到净截面重心的距离, mm。

(4) 预应力筋松弛产生的预应力损失值。

$$\sigma_{l5} = \Psi \zeta \left(0.52 \frac{\sigma_{pe}}{f_{pk}} - 0.26 \right) \sigma_{pe}$$

式中: σ_{l5} 为预应力筋松弛引起的预应力损失值, MPa; Ψ 为张拉系数, 一次张拉时, $\Psi=1.0$; ζ 为钢筋松弛系数, 低松弛, $\zeta=0.3$; f_{pk} 为钢绞线的标准强度, MPa。

后张法 $\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{l1} - \sigma_{l2} - \sigma_{l4} = 1086.8 \text{ MPa}$

$$\sigma_{l5} = \Psi \zeta \left(0.52 \frac{\sigma_{pe}}{f_{pk}} - 0.26 \right) \sigma_{pe} = 14.3 \text{ MPa}$$

(5) 由混凝土收缩、徐变引起的预应力钢筋预应力损失。

$$\sigma_{l6} = \frac{0.9 [E_p \varepsilon_{cs}(t, t_0) + a_{ep} \sigma_{pc} \phi(t, t_0)]}{1 + 15 \rho \rho_{ps}}$$

$$\rho = \frac{A_p + A_s}{A_n} = 0.009 \quad \rho_{ps} = 1 + \frac{e_{ps}^2}{i^2}$$

$$i^2 = \frac{I_n}{A_n} = 111950 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{ps} = 1 + \frac{e_{ps}^2}{i^2} = 1.94$$

式中: E_p 为预应力钢筋的弹性模量, Pa; $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ 为传力锚固龄期 t_0 , 计算考虑的龄期 t 时的混凝土收缩应变, $\mu\varepsilon$; $\phi(t, t_0)$ 为加载龄期 t_0 , 计算考虑的龄期 t 时的徐变系数; ρ 为全部纵向钢筋配筋率; A_n 为构件截面面积, mm^2 ; i 为截面回转半径, mm; e_{ps} 为普通钢筋和预应力筋截面在受拉区重心至构件截面重心轴的距离, mm。

空心板自重产生的弯矩作用效应 $M_g = 643.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 考虑自重的影响, 由于收缩徐变持续时间较长^[5], 在全

部钢筋重心处由自重产生的拉应力 $\sigma_l = \frac{M_g}{I_n} y_n = 3.4 \text{ MPa}$,

全部纵向钢筋处压应力 $\sigma_{pc} = 8.1 \text{ MPa}$, 传力锚固加载龄期为 3、7、14、28、60 d, 计算龄期为混凝土终极值 t_0 , 桥梁所处环境大气湿度为 80%。理论厚度 $h = \frac{2A_n}{u}$, 计算构件与大气接触的截面周长 $u = 4288.8 \text{ mm}$,

$h = \frac{2A_n}{u} = 253.3 \text{ mm}$, 由表查得构件的收缩应变和徐变

终极值按直线插入取值及计算 σ_{l6} 如表 1 所示。3、7、14、28、60 d 传力锚固龄期计算 σ_{l6} 值如表 1 所示。

表 1 混凝土收缩应变和徐变终极值及预应力损失

传力锚固龄期/d	混凝土收缩应变终极值 $\varepsilon_{cs}(t_u, t_0)$	混凝土徐变系数终极值 $\Phi(t_u, t_0)$	对应的钢筋预应力损失 σ_{l6}/MPa
3	0.000244	2.45	113.9
7	0.000244	2.10	102.5
14	0.000224	1.84	91.2
28	0.000209	1.61	81.6
60	0.000195	1.39	72.5

(5) 空心板预应力损失总和。

$$\sigma_l = \sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l4} + \sigma_{l5} + \sigma_{l6} = 436.4 \text{ MPa}$$

2.3 空心板变形计算

2.3.1 结构自重挠度计算

在空心板梁未上桥前, 由于结构自重效应, 产生长期挠度值^[6]。该挠度值可抵消一部分因预加应力效应引起的长期反拱值, 其计算如下:

(1) 换算截面的面积。

$$A_0 = A + (a_{ep} - 1) A_p + (a_{es} - 1) A_s$$

$$a_{ep} = \frac{E_p}{E_c} = 5.65$$

$$a_{es} = \frac{E_s}{E_c} = 5.80$$

$$A_0 = 578309.5 \text{ mm}^2$$

(2) 换算截面重心位置。

换算截面对毛截面重心的静矩为: $S_{01} = (a_{ep} - 1) A_p (468.2 - 143) + (a_{es} - 1) A_s (468.2 - 50) = 8624223 \text{ mm}^3$, 换算截面至毛截面重心的距离 $d_{01} = S_{01}/A_0 = 14.9 \text{ mm}$ 向下移, 换算截面重心至空心板下缘及上缘的距离分别为: $y_{01s} = 453.3 \text{ mm}$, $y_{01x} = 483.1 \text{ mm}$ 。换算截面重心至预应力钢筋及普通钢筋合力中心距离分别为: $e_{01p} = 310.2 \text{ mm}$, $e_{01s} = 403.2 \text{ mm}$ 。

(3) 换算截面惯性矩: $I_0 = I + A d_{01}^2 + (a_{ep} - 1) A_p e_{01p}^2 + (a_{es} - 1) A_s e_{01s}^2 = 6.5303 \times 10^{10} \text{ mm}^4$ 。

(4) 结构自重效应产生的挠度计算。在梁板上桥之前, 由于梁板结构自重产生的长期挠度值, 并考虑挠度长期增长系数, 其计算如下: 预应力混凝土构件的刚度采用 $B_0 = 0.95 E_c I_0$, C50 混凝土对应挠度长期增长系数 $\eta_0 = 1.425$, 则 $B_0 = 0.95 E_c I_0 = 2.14 \times 10^{15} \text{ mm}^2$ 。

由结构自重效应产生的跨中挠度 $f_c = f_q = \frac{5 M_{G1} l^2}{48 B_0} = 11.6 \text{ mm}$, 结构自重效应引起的长期挠度值 $f_{ql} = 1.425 f_q = 16.5 \text{ mm}$ 。

2.3.2 预加力引起的反拱度计算

预应力钢绞线张拉时,空心板混凝土强度达到C45,预加力产生的反拱度计算按跨中截面尺寸及配筋计算,反拱长期增长系数 $\eta_0=2.0$,刚度 $B'_0=0.95E'_cI'_c$,因 a_{EP} 和 a_{ES} 发生变化,需重新计算换算截面的惯性矩,C45混凝土 $E'_c=3.35\times 10^4$ MPa。

(1)换算截面的面积: $A'_0=A+(a'_{EP}-1)A_p+(a'_{ES}-1)A_s$, $a'_{EP}=\frac{E_p}{E'_c}=5.82$, $a'_{ES}=\frac{E_s}{E'_c}=5.97$, $A'_0=579\ 144.8\text{ mm}^2$ 。

(2)换算截面重心位置。

换算截面对毛截面重心的静矩为: $S'_{01}=(a'_{ES}-1)A_p(468.2-143)+(a'_{EP}-1)A_s(468.2-50)=8\ 933\ 986.7\text{ mm}^3$,换算截面至毛截面重心的距离: $d'_{01}=S'_{01}/A'_0=15.4\text{ mm}$ 向下移。

换算截面重心至空心板下缘及上缘的距离分别为: $y'_{01s}=452.8\text{ mm}$; $y'_{01x}=483.6\text{ mm}$ 。

换算截面重心至预应力钢筋及普通钢筋合力中心距离分别为: $e'_{01P}=309.8\text{ mm}$; $e'_{01S}=402.8\text{ mm}$ 。

(3)换算截面惯性矩: $I'_0=I+Ad'^2_{01}+(a'_{EP}-1)A_p e'^2_{01P}+(a'_{ES}-1)A_s e'^2_{01S}=6.543\ 4\times 10^{10}\text{ mm}^4$ 。

(4)跨中反拱度计算。扣除全部预应力损失后的预加力为:

$$\begin{aligned}\sigma_{p0}&=\sigma_{con}-\sigma_1+a_{EP}\sigma_{pc}=1\ 153.5\text{ MPa},\\N_{p01}&=\sigma_{p0}A_p-\sigma_{l6}A_s=2\ 611\ 387.2\text{ N};\\e_{p01}&=\frac{\sigma_{p0}A_p e'_{01P}-\sigma_{l6}A_s e'_{01S}}{N_{p01}}=280.2\text{ mm};\end{aligned}$$

由预加力产生的弯矩 $M_{p0}=N_{p01}e_{p01}=731\ 710\ 693.4\text{ N}\cdot\text{mm}$ 。

考虑反拱长期增长系数 $\eta_0=2.0$,由预加力产生的跨中反拱值计算如下:

$$f_p=\eta_0\frac{5M_{p0}l^2}{48B'_0}=25.8\text{ mm}$$

依据以上计算方式,计算出的3、7、14、28、60 d的跨中反拱值分别为:25.8、26.2、26.5、26.8、27.1 mm。

在梁板上桥前不同龄期阶段,由预加应力长期反拱值 f_p 去除结构自重效应引起的长期挠度值,对应的3、7、14、28、60 d的由预加应力引起的梁板反拱值分别为:9.3、9.7、10.0、10.3、10.6 mm。为避免反拱值过大,在梁板上桥前不同龄期阶段,需控制因预加应力效应引起的反拱值。

3 预应力空心板反拱值测试

本工程共计有140片中板,因此对本工程同龄期

的10片空心板在不同龄期阶段采用不同测试方法进行了反拱值跟踪测试^[7]。

3.1 反拱测试方法选择

在传统的测量反拱值方法中^[8],尤为常见的测量工机具为钢弦、塞尺、百分表、水准仪等^[9]。本次测试除选用百分表、精密水准仪两种测试方法外,还引用一种新型研发测试装置,即装配式预制构件反拱装置。该装置采用监测装置安装于被监测的预制梁实体上,通过信号传送完成测试,减少了设立基准点、场地限制的影响,克服了移梁期间的间断测试。

3.2 反拱测试结果

自梁板预制完成至上桥60 d时间段内,分别采用百分表、精密水准仪和测量装配式预制构件反拱装置对10片中板进行跟踪测试,结果和理论计算值如表2所示,反拱值与理论计算值随时间变化关系曲线图如图2所示。

表2 中板跨中底部反拱理论计算值及三种测试方法
实测跨中反拱平均值

存梁时间/d	理论计算值/mm	百分表测量	水准仪测量	装配式预制构件反拱装置
		10片板跨中反拱值平均值/mm		
3	9.3	8.33	8.29	8.364
7	9.7	8.86	8.75	8.987
14	10.0	9.29	9.16	9.445
28	10.3	9.65	9.45	9.798
60	10.6	10.02	9.82	10.246

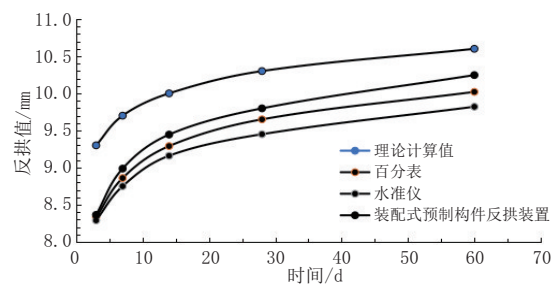


图2 实测反拱均值、理论计算值随时间变化关系

表2为采用三种不同的仪器测试的10片梁板自预应张拉后至起吊移梁至梁板堆放场地,延续至梁板上桥前60 d内反拱平均值。从三种不同的测试仪器实测数据可以看出,3 d的反拱实测值与理论计算值相对误差分别为10.4%、10.8%、10.1%,三种仪器测试反拱平均值与理论计算值误差基本接近。从7 d到28 d的相对误差变化较大,60 d的相对误差分别为5.5%、7.4%、3.3%。从测试数据可以看出,采用装配式预制构件反拱装置实测数据与理论计算值的相对误差较小,说明在外部因素影响下,装配式预制构件反拱装置实测数据与理论值更接近。

从实测数据及反拱平均值与理论计算值随时间变化关系曲线图可以看出:

(1)三种测量方法的线型基本一致,检测结果均呈一定规律增加,与理论计算值增长规律保持一致。

(2)随着时间增长,反拱变化趋势逐渐平稳,但后期受移梁、外界环境温度、混凝土徐变^[10]等内外因素影响,反拱随时间增长也在不断增加^[11]。可见,采用的测试方法不同,其精度受外界环境影响较大。

(3)百分表、精密水准仪两种仪器测试需架设支架,安置基准点。基准点距梁底座距离较近,混凝土梁台座的变形、吊装移梁、人工读数会影响测试精度。装配式预制构件反拱装置不需要在外部设置基准点,受外界环境影响很小,可长期观测,测量精度大幅度提高。

4 影响反拱值差异分析探讨

(1)外部环境影响。在预制梁场大批量预制混凝土构件,需要较多的预制台座。台座的刚性需达到一定要求,以便保证测试的精度。因此,需对台座基础进行加固处理。张拉时,混凝土龄期、外界温度变化、养护条件等因素也会对测量精度产生影响。

(2)测量仪器设备及方法选择、测量基准点的选择、基准梁的架设、人工读数等产生的误差,会对测量精度产生影响。

(3)大批量生产梁场,为了达到缩短工期、提高生产效率的目的,考虑到混凝土梁台座循环利用,会在混凝土达到起吊强度后吊至梁场堆放。常规的监测手段会出现监测间断期,测量基准点也要随场地变化而重新布置,从而降低测量精度。

5 结 语

通过对后张法预制梁板计算及现场选用不同的设备跟踪测试梁板的反拱值,为装配式预制混凝土构件反拱度控制提供理论及实际施工控制参考依据。反拱度是影响桥梁结构安全和美观的重要因素,因此在工程应用中,根据现场施工实际情况,综合考虑外界环境影响等各种因素,选用适合的仪器和观测方法测试装配式预制混凝土构件在张拉后的实际反拱值,分析采用不同方法出现差异的原因,采取有效措施,对反拱过大的梁板进行有限控制,从而大大降低工程风险。

参考文献:

- [1] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [2] 陈杰.先张法预应力空心板反拱度的计算及影响反拱度变化的因素分析[J].黑龙江交通科技,2008(167):74-76.
- [3] 沈毓凡.浅谈后张预应力混凝土空心板反拱度偏大的原因与防治[J].建筑与工程,2007(23):456-457.
- [4] 潘明明,雷洋.先张法空心板反拱值计算及预拱度过程控制[J].砖瓦,2020(11):150-151.
- [5] 肖德宝,王谦,吴铭.核电站安全壳后张预应力系统张拉施工中断丝的处理[C].第十六届全国混凝土及预应力混凝土学术会议暨第十二届预应力学术交流会,2013:388-391.
- [6] 吴桐.预制预应力混凝土梁反拱度研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
- [7] 王镇锐.预制箱梁存放时长对反拱及静载试验结果的影响分析[J].广东公路交通,2024(6):18-24.
- [8] 徐学文,管树国.几种桥梁挠度测量方法的比较[J].林业科技情报,2005(2):85.
- [9] 耿波.预应力混凝土梁的起拱度控制方法及试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2004.
- [10] 侯炜.预应力混凝土梁桥长期挠度主要影响因素分析[D].西安:长安大学,2009.
- [11] 徐金生.预应力梁的长期变形[J].土木工程学报,1998,21(3):59-70.