DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240317001

第22卷第1期

2025年2月

**引用格式:**张军辉,周书胤,张石平,等. 铰接型装配式锚杆框架梁受力变形特性研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2025, 22(1): 1-14.

**Citation :** ZHANG Junhui, ZHOU Shuyin, ZHANG Shiping, et al. Stress-induced deformation characteristics of a hinged prefabricated anchor frame beam[J].J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2025, 22(1): 1-14.

### 铰接型装配式锚杆框架梁受力变形特性研究

#### 张军辉1,周书胤1,张石平1,黎峰2

(1.长沙理工大学公路工程教育部重点实验室,湖南长沙 410114;2.华东交通大学土木建筑学院,江西南昌 330013)

摘 要:【目的】提出一种铰接型装配式锚杆框架梁的内力计算方法,为铰接型框架梁的设计提供理论基础。【方法】首先,将框架梁的受力模型简化为铰接点连接的多段Winkler弹性地基梁;然后,结合梁的边界 及连续性条件推导求解,得到梁的内力解析解,并依托数值算例分析了铰接型框架梁结构与现有现浇框架 梁结构的受力变形特性,以及在不同锚固力、地基反力系数、截面尺寸、悬臂长度、铰接位置条件下的铰接 型框架梁结构的受力变形特性;最后,将现场实际监测数据与本文理论计算结果进行对比,验证本文计算 结果的准确性。【结果】通过所得解与已有解的退化对比验证了所得内力解析解的合理性;当其他参数相同 时,锚固力越大、悬臂长度越大、铰接位置与锚固点之间的距离越大,则铰接结构的最大弯矩值越大;地基 反力系数和截面尺寸对框架梁结构的梁底位移和转角影响显著,当地基反力系数和截面尺寸增大时,梁底 位移和转角减小,而弯矩和剪力则基本不变。通过分析现场监测数据发现,现场实测结果与本文内力计算 结果的变化趋势吻合。【结论】铰接型框架梁的内力解析解的结果合理,其受力变形特性规律可为铰接型框架梁的设计提供参考。

关键词:铰接型装配式锚杆框架梁;Winkler弹性地基梁;内力计算;受力变形特性;结构设计中图分类号:U417.2;TU416.14 文献标志码:A

# Stress-induced deformation characteristics of a hinged prefabricated anchor frame beam

ZHANG Junhui<sup>1</sup>, ZHOU Shuyin<sup>1</sup>, ZHANG Shiping<sup>1</sup>, LI Feng<sup>2</sup>

 Key Laboratory of Highway Engineering, Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology Changsha 410114, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** [**Purposes**] An internal force calculation method for hinged prefabricated anchor frame beams was proposed, providing a theoretical basis for the design of a hinged frame beam. [**Methods**] Firstly, the stress model of the frame beam was simplified into a multi-stage Winkler elastic foundation beam connected by hinged points. Then, based on the boundary and continuity conditions of the beam, the analytical solution of the internal force of the beam was obtained. The stress and deformation characteristics of the hinged frame beam structure and the existing cast-in-situ frame beam structure were analyzed by numerical examples, as well as the stress-induced

收稿日期:2024-03-17;修回日期:2024-04-11;接受日期:2024-04-12

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(52025085);科技部国家重点研发计划项目(2021YFB2600903);国家自然科 学基金重点项目(52338009)

**通信作者:**张石平(1988—)(ORCID:0000-0002-8057-4914),男,副教授,主要从事土-结构相互作用方面的研究。 E-mail:zhangshipingwy@126.com

deformation characteristics of the hinged frame beam structure under different anchorage forces, foundation reaction coefficient, section size, cantilever length and hinged position. Finally, the accuracy of the calculation results in this paper was verified by comparing the actual monitoring data with the theoretical calculation results in this paper. [Findings] The rationality of the internal force analytical solution is verified by comparing the degradation of the obtained solution with the existing one. When other parameters are the same, a larger anchorage force means a larger cantilever length and larger distance from the hinged position to the anchorage point, resulting in a larger maximum bending moment value of the hinged structure. The foundation reaction coefficient and section size have a significant effect on the bottom displacement and rotation angle of the frame beam structure. As the foundation reaction coefficient and section size increase, the bottom displacement and rotation angle decrease, while the bending moment and shear force are basically unchanged. Through the analysis of field monitoring data, the field measurement results are consistent with the trend of internal force calculation results in this paper. [Conclusions] The analytical results of the internal force of hinged frame beams are reasonable, and the law of stress-induced deformation can provide a reference for the design of hinged frame beams.

**Key words:** hinged prefabricated anchor frame beam; Winkler elastic foundation beam; internal force calculation; stress-induced deformation characteristics; structural design

Foundation items: Project (52025085) supported by the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China; Project (2021YFB2600903) supported by National Key R&D Program of the Ministry of Science and Technology of China; Project (52338009) supported by Key Project of the National Natural Science Foundation of China

**Corresponding author:** ZHANG Shiping (1988—) (ORCID: 0000-0002-8057-4914), male, associate professor, research interest; soil-structure interaction. E-mail: zhangshipingwy@126.com

#### 0 引言

锚杆框架梁在结构上安全可靠,外形上美观, 被广泛应用于边坡支护工程<sup>[15]</sup>。现有传统现浇锚 杆框架梁支护体系已经应用三十多年,然而在实 际应用过程中,该框架梁存在诸多问题,如支护及 时性差、混凝土质量低、变形难协调、工序复杂、施 工风险高等<sup>[6-10]</sup>,这使得其与实际需求之间仍然存 在较大差距。为解决现浇锚杆框架梁结构和在施 工中存在的这些问题,学者们开展了一系列研究。 本研究团队研发了一种由预制十字梁、预制横梁、 预制纵梁组成,相互之间通过高强螺栓连接的铰 接型装配式锚杆框架梁结构的土、锚索/杆、 框架梁之间的作用机理<sup>[12-13]</sup>。该框架梁结构如图 1所示。周剑坤<sup>[14]</sup>结合实际工程验证了铰接型装 配式锚杆框架梁的安全可靠性。ZHANG等<sup>[15]</sup>通 过分析铰接型装配式框架梁在实际工程中的应用 效果,指出该锚杆框架梁在工期、人员和机械、安 全管理、经济成本、碳排放、支护效果等方面均优 于传统现浇框架梁结构。但是,铰接型框架梁作 为一种新型支护结构,其结构设计仍然沿用现浇 框架梁结构设计方法,缺少适用的结构设计方法, 且结构设计需要进行内力计算。因此,研究该结 构的内力计算方法与受力变形特征对铰接型框架 梁的设计具有重要意义。

在计算锚杆框架梁内力方面:殷跃平<sup>[16]</sup>采用 倒梁法简化格构梁内力计算,并结合实际工程进 行了实例计算;马迎娟等<sup>[17]</sup>提出了一种新的格构 梁计算模型,并将其计算结果与常用的Winkler弹 性地基梁和倒梁法的计算结果进行了对比分析; 吴礼舟等<sup>[18]</sup>认为Winkler弹性地基梁和半无限弹 性体理论可用于计算锚杆框架内力;BORÁK等<sup>[19]</sup> 利用修正Betti定理建立了弹性基础上梁的备选解 析解,并对该方法的使用提供了详细指导;LI等<sup>[20]</sup> 建立了基于Winkler模型的力学模型,提出了预应 力锚杆框架梁的计算方法并将其应用于实际工 程;韩爱民等<sup>[21]</sup>采用数值模拟方法,并结合现场试 验与测试,通过调整设计参数进行数值仿真试验, 深入研究了锚杆框架梁的力学响应特性;徐磊<sup>[22]</sup> 采用数值法对预应力锚索地梁的内力进行了详细 的分析;地方标准《铰接型装配式框架梁锚固技术 规范》(DB43/T 2938—2024)<sup>[23]</sup>中的结构设计推荐 采用倒梁法来简化框架梁的内力计算。

综上所述,框架梁的内力计算方法主要有倒 梁法、Winkler弹性地基梁法、弹性半空间地基梁 法、数值模拟法等。其中,倒梁法最为简单,但因 其假设地基反力为直线分布,所以只有在梁刚度 较大或地基刚度较大的情况下,该方法的计算结 果才比较可靠。数值模拟法的数学模型相对复 杂,不适用于设计。使用最多的是Winkler弹性地 基梁法。该方法适用于软土、非均匀土层、半液态 土、浅基础等地基基础,且不考虑框架梁自重和框 架梁与地基之间的摩擦<sup>[24-25]</sup>。因此,本文将基于 Winkler弹性地基梁法,结合铰接型锚杆框架梁结 构的边界和连续性条件,推导并求解相关方程



(a) 铰接型框架梁施工完成图





组,得到铰接型锚杆框架梁结构的位移、转角、弯 矩、剪力的解析解,在此基础上,进一步通过数值 算例来研究铰接型锚杆框架梁结构与传统现浇锚 杆框架梁结构的受力变形特性,以及在不同锚固 力、地基反力系数、截面尺寸、悬臂长度、铰接位置 条件下,铰接型锚杆框架梁结构的位移、转角、弯 矩、剪力的变化规律。

#### 1 铰接型装配式锚杆框架梁内力变形计算

铰接型装配式锚杆框架梁由装配式梁组成, 十字梁的中心处设有锚杆预留孔,横梁与纵梁两 端预留连接孔,通过高强螺栓与十字梁连接。其 结构示意图如图2所示。



图2 铰接型装配式锚杆框架梁结构示意图 Fig.2 Hinged prefabricated anchor frame beam structure

本文取图2中的2<sup>\*</sup>横梁中的一个格构做力学 分析,通过对这一单元进行深入研究,揭示框架梁 整体受力变形的一些基本规律。假设2<sup>\*</sup>横梁锚固 点分配到的锚固力为P,将十字梁的横梁与纵梁进 行拆分,单独计算横梁与纵梁,并结合Winkler弹 性地基梁理论建立单个格构横梁的力学模型与坐 标系,如图3所示。在图3中,A、B、C、D、E、F点的 坐标分别为(0,0)、(L<sub>1</sub>,0)、(l<sub>2</sub>,0)、(L<sub>3</sub>,0)、 (l<sub>3</sub>,0),点A、F为端点,点B、E为十字梁的中心,受 锚固力作用,点C、D为铰接点,AB、EF段为悬臂长







由于Winkler地基模型假定地基表面任一点的压力T与该点的位移成正比,故有

$$T(x) = kw(x) \tag{1}$$

式中:T(x)为地基对梁的反力;k为地基反力系数; w(x)为梁的位移。

结合式(1)建立梁的挠曲线微分方程,即

$$EI\frac{\mathrm{d}^4w}{\mathrm{d}x^4} = -bky \tag{2}$$

式中:E、I分别为梁的弹性模量和截面惯性矩,其 中 $I=bh^3/12,b$ 为梁宽,h为梁高; $\gamma$ 为梁的挠度。

式(2)的通解为

$$w(x) = e^{\lambda x} \Big[ C_1 \cos(\lambda x) + C_2 \sin(\lambda x) \Big] + e^{-\lambda x} \Big[ C_3 \cos(\lambda x) + C_4 \sin(\lambda x) \Big]$$
(3)

式中: $\lambda = [kb/(4EI)]^{0.25}$ ; $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 均为积分常数, 其值根据框架梁承受的荷载类型以及框架梁的边 界条件来确定。

考虑集中力作用的影响,当*x≥x<sub>p</sub>*(集中力作 用位置)时,由于集中力*P*而增加的位移如式(4) 所示。

$$w(x)_{P} = \frac{P}{4\lambda^{3}EI} \Big[ \operatorname{ch}(\lambda x) \sin(\lambda x) - \operatorname{sh}(\lambda x) \cos(\lambda x) \Big]$$
(4)

结合式(4)和式(3)可得到集中力作用下的梁的位移通解,如式(5)所示:

$$w_{i}(x) = e^{\lambda x} \Big[ C_{4i-3} \cos(\lambda x) + C_{4i-2} \sin(\lambda x) \Big] + e^{-\lambda x} \Big[ C_{4i-1} \cos(\lambda x) + C_{4i} \sin(\lambda x) \Big] + \sum_{0}^{\frac{i+1}{2}} \frac{P_{i}}{4\lambda^{3} EI} \Big\{ \operatorname{ch} \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big) \Big] \sin \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big) \Big] - \operatorname{sh} \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big) \Big] \cos \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big) \Big] \Big\} u \Big( x - x_{P_{i}} \Big) \Big]$$
(5)

式中: $C_{4i-3}$ 、 $C_{4i-2}$ 、 $C_{4i-1}$ 、 $C_{4i}$ 均为积分常数,其值根 据框架梁承受的荷载类型以及框架梁的边界条件 来确定; $P_i$ 为锚固力;i=1、2、3……。为方便编程计 算,假设横纵梁上存在一个数值为零的 $P_i$ ; $u(x-x_P)$ 为Heaviside函数,其取值如式(6)所示。

$$u\left(x-x_{P_{i}}\right) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < x_{P_{i}} \\ 1, & x \geq x_{P_{i}} \end{cases}$$
(6)

$$P_i = \begin{cases} P_i , & i \end{pmatrix} f \oplus \mathfrak{Y} \\ 0 , & i \end{pmatrix} (7)$$

框架梁截面的转角、弯矩、剪力与位移的关系 如式(8)所示。

$$\begin{cases} \theta = \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}x} \\ M = -EI\frac{\mathrm{d}^2 w}{\mathrm{d}x^2} \\ Q = -EI\frac{\mathrm{d}^3 w}{\mathrm{d}x^3} \end{cases}$$
(8)

式中:θ为转角;M为弯矩;Q为剪力。

将式(5)代入式(8)可得到梁的转角、弯矩、剪 力的通解,如式(9)~(11)所示。

为求解铰接型框架梁的位移、转角、弯矩、剪 力的定解,需要根据边界条件建立方程组,以获

$$\theta_{i}(x) = \lambda e^{\lambda x} \begin{bmatrix} C_{4i-3}\cos(\lambda x) + C_{4i-2}\sin(\lambda x) - \\ C_{4i-3}\sin(\lambda x) + C_{4i-2}\cos(\lambda x) \end{bmatrix} + \lambda e^{-\lambda x} \begin{bmatrix} -C_{4i-1}\cos(\lambda x) - C_{4i}\sin(\lambda x) - \\ C_{4i-1}\sin(\lambda x) + C_{4i}\cos(\lambda x) \end{bmatrix} + \\ \sum_{0}^{\frac{i+1}{2}} \frac{P_{i}}{2\lambda^{2}EI} \operatorname{sh} \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big) \Big] \sin \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big) \Big] u \Big( x - x_{P_{i}} \Big) \\ M_{i}(x) = -2\lambda^{2}EIe^{\lambda x} \Big\{ \Big[ -C_{4i-3}\sin(\lambda x) + C_{4i-2}\cos(\lambda x) \Big] + e^{-\lambda x} \Big[ C_{4i-1}\sin(\lambda x) - C_{4i}\cos(\lambda x) \Big] \Big\} - \\ \sum_{0}^{\frac{i+1}{2}} \frac{P_{i}}{2\lambda} \Big\{ \operatorname{ch} \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big] \Big] \sin \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big] \Big] + \operatorname{sh} \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big] \Big] \cos \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big] \Big] u \Big( x - x_{P_{i}} \Big) \\ Q_{i}(x) = -2\lambda^{3}EIe^{\lambda x} \Big\{ \Big[ -C_{4i-3}\sin(\lambda x) + C_{4i-2}\cos(\lambda x) - \\ C_{4i-2}\sin(\lambda x) - C_{4i-2}\sin(\lambda x) - \Big] + e^{-\lambda x} \Big[ -C_{4i-1}\sin(\lambda x) + C_{4i}\cos(\lambda x) + \\ C_{4i-1}\cos(\lambda x) + C_{4i}\sin(\lambda x) - \Big] \Big\} - \\ \sum_{0}^{\frac{i+1}{2}} P_{i} \operatorname{ch} \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big] \Big] \operatorname{cos} \Big[ \lambda \Big( x - x_{P_{i}} \Big] \Big] u \Big( x - x_{P_{i}} \Big) \Big] (10)$$

得积分常数的具体值。由图2可知,梁的自由端弯 矩、剪力为零,铰接位置处的弯矩为零,铰接位置 处的位移、剪力连续。根据全梁的边界条件可得: *A*点的弯矩和剪力为零,即

$$M_{14} = 0$$
 (12)

$$Q_{14} = 0$$
 (13)

将式(10)、式(11)分别代入式(12)、式(13), 并将 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、…、C<sub>4i-1</sub>、C<sub>4i</sub>中非零的系数表示成矩 阵,即

$$\boldsymbol{b}_{0} = \begin{bmatrix} 0 & -2\lambda^{2}EI & 0 & -2\lambda^{2}EI \\ 2\lambda^{3}EI & -2\lambda^{3}EI & -2\lambda^{3}EI & -2\lambda^{3}EI \end{bmatrix} (14)$$
$$\boldsymbol{c}_{0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(15)

$$\boldsymbol{B}_0 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{b}_0 & \boldsymbol{a}_0 \end{bmatrix}$$
(16)

式中: $b_0$ 为系数矩阵;等式(15)右边的常数矩阵表示为 $c_0$ ; $a_0$ 为2×8的零矩阵; $B_0$ 为全梁的系数矩阵。

铰接位置*C*、*D*处的弯矩为零,位移连续,剪力 连续,即

$$M_{1c} = 0 \tag{17}$$

$$M_{2c} = 0$$
 (18)

$$w_{1C} - w_{2C} = 0 \tag{19}$$

$$Q_{1c} - Q_{2c} = 0 \tag{20}$$

$$M_{2D} = 0$$
 (21)

$$M_{3D} = 0 \tag{22}$$

$$w_{2D} - w_{3D} = 0 \tag{23}$$

$$Q_{2D} - Q_{3D} = 0 \tag{24}$$

将位移、弯矩、剪力表达式,即式(5)、(10)、 (11)代入上述边界条件及连续性条件式(17)~ (24)中,等式两边的系数用矩阵表示,即

$$\boldsymbol{b}_{i} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{25} & b_{26} & b_{27} & b_{28} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} & b_{37} & b_{38} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} & b_{47} & b_{48} \end{bmatrix} (i = 1, 2)$$

$$(25)$$

$$\begin{bmatrix} c_i - \\ \sum_{i=1}^{i} \frac{P_i}{2\lambda} \begin{cases} \operatorname{ch} \left[ \lambda (l_i - L_i) \right] \sin \left[ \lambda (l_i - L_i) \right] + \\ \operatorname{sh} \left[ \lambda (l_i - L_i) \right] \cos \left[ \lambda (l_i - L_i) \right] \end{cases} \\ \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{i} \frac{P_i}{2\lambda} \begin{cases} \operatorname{ch} \left[ \lambda (l_i - L_i) \right] \sin \left[ \lambda (l_i - L_i) \right] + \\ \operatorname{sh} \left[ \lambda (l_i - L_i) \right] \cos \left[ \lambda (l_i - L_i) \right] \end{cases} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$(26)$$

$$\boldsymbol{B}_1 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{b}_1 & \boldsymbol{a}_1 \end{bmatrix}$$
(27)

 $\boldsymbol{B}_2 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{a}_2 & \boldsymbol{b}_2 \end{bmatrix}$ (28)

式中: $a_1$ 、 $a_2$ 为4阶零矩阵; $b_i$ 为铰接点的系数矩阵; 等式(26)右边的常数矩阵表示为 $c_i$ ; $B_1$ 、 $B_2$ 为全梁 的系数矩阵。其中,

$$b_{11} = b_{25} = 2\lambda^{2} EIe^{\lambda l_{i}} \sin(\lambda l_{i}),$$

$$b_{12} = b_{26} = -2\lambda^{2} EIe^{\lambda l_{i}} \cos(\lambda l_{i}),$$

$$b_{13} = b_{27} = -2\lambda^{2} EIe^{-\lambda l_{i}} \sin(\lambda l_{i}),$$

$$b_{14} = b_{28} = 2\lambda^{2} EIe^{-\lambda l_{i}} \cos(\lambda l_{i}),$$

$$b_{31} = -b_{35} = e^{\lambda l_{i}} \cos(\lambda l_{i}),$$

$$b_{32} = -b_{36} = e^{\lambda l_{i}} \sin(\lambda l_{i}),$$

$$b_{33} = -b_{37} = e^{-\lambda l_{i}} \cos(\lambda l_{i}),$$

$$b_{34} = -b_{38} = e^{-\lambda l_{i}} \sin(\lambda l_{i}),$$

$$b_{41} = -b_{45} = 2\lambda^{3} EIe^{\lambda l_{i}} [\sin(\lambda l_{i}) + \cos(\lambda l_{i})],$$

$$b_{42} = -b_{46} = 2\lambda^{3} EIe^{-\lambda l_{i}} [\sin(\lambda l_{i}) - \cos(\lambda l_{i})],$$

$$b_{43} = -b_{47} = 2\lambda^{3} EIe^{-\lambda l_{i}} [\sin(\lambda l_{i}) - \cos(\lambda l_{i})],$$

$$b_{44} = -b_{48} = -2\lambda^{3} EIe^{-\lambda l_{i}} [\sin(\lambda l_{i}) + \cos(\lambda l_{i})]o$$

$$F \pm \delta n \oplus \pm , \oplus J J J \gg , \oplus$$

$$M_{3F} = 0$$
(29)

$$Q_{3F} = 0 \tag{30}$$

将式(10)、式(11)分别代入式(29)、式(30)。

$$\boldsymbol{b}_{3} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \end{bmatrix}$$
(31)

$$c_{3} = \begin{bmatrix} \left\{ \frac{P_{1}}{2\lambda} \begin{bmatrix} ch\lambda(l_{3} - L_{1}) \sin\lambda(l_{3} - L_{1}) + \\ sh\lambda(l_{3} - L_{1}) \cos\lambda(l_{3} - L_{1}) \end{bmatrix} + \\ \frac{P_{3}}{2\lambda} \begin{bmatrix} ch\lambda(l_{3} - L_{3}) \sin\lambda(l_{3} - L_{3}) + \\ sh\lambda(l_{3} - L_{3}) \cos\lambda(l_{3} - L_{3}) \end{bmatrix} + \\ P_{1}ch\lambda(l_{3} - L_{1}) \cos\lambda(l_{3} - L_{1}) + \\ P_{3}ch\lambda(l_{3} - L_{3}) \cos\lambda(l_{3} - L_{3}) \end{bmatrix} \end{bmatrix} (32)$$

$$B_{3} = \begin{bmatrix} a_{3} & b_{3} \end{bmatrix}$$

式中: $b_3$ 为系数矩阵;等式(32)右边的部分表示为 矩阵 $c_3$ ; $a_3$ 为2×8的零矩阵; $B_3$ 为全梁的系数矩阵。 其中,

$$d_{11} = 2\lambda^{2} EIe^{\lambda l_{3}} \sin(\lambda l_{3}),$$
  

$$d_{12} = -2\lambda^{2} EIe^{\lambda l_{3}} \cos(\lambda l_{3}),$$
  

$$d_{13} = -2\lambda^{2} EIe^{-\lambda l_{3}} \sin(\lambda l_{3}),$$
  

$$d_{14} = 2\lambda^{2} EIe^{-\lambda l_{3}} \cos(\lambda l_{3}),$$
  

$$d_{21} = 2\lambda^{3} EIe^{\lambda l_{3}} \left[\sin(\lambda l_{3}) + \cos(\lambda l_{3})\right],$$

#### 投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home

$$d_{22} = 2\lambda^{3} EIe^{\lambda l_{3}} [\sin(\lambda l_{3}) - \cos(\lambda l_{3})],$$

$$d_{23} = 2\lambda^{3} EIe^{-\lambda l_{3}} [\sin(\lambda l_{3}) - \cos(\lambda l_{3})],$$

$$d_{24} = -2\lambda^{3} EIe^{-\lambda l_{3}} [\sin(\lambda l_{3}) + \cos(\lambda l_{3})],$$
將全梁的系数矩阵进行合并,得到如下求

将全梁的系数矩阵进行合并,得到如下求解 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、…、C<sub>12</sub>的矩阵,即

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_{0} \\ \boldsymbol{B}_{1} \\ \boldsymbol{B}_{2} \\ \boldsymbol{B}_{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{1} \\ \vdots \\ \boldsymbol{C}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{c}_{0} \\ \boldsymbol{c}_{1} \\ \boldsymbol{c}_{2} \\ \boldsymbol{c}_{3} \end{bmatrix}$$
(34)

求解式(34)可得到*C*<sub>1</sub>、*C*<sub>2</sub>、…、*C*<sub>11</sub>、*C*<sub>12</sub>的数值 解,再将之代入式(5)、(9)、(10)、(11),即可得到 全梁的位移、转角、弯矩、剪力解析解。

#### 2 算例分析

数值算例基于图3所示的力学模型与坐标系统,采用上节推导求解的铰接型装配式锚杆框架梁位移、转角、弯矩、剪力。结构原型为当前工程中最常见的正方形框架梁锚固体系,锚杆间距为3.0m×3.0m,截面尺寸取梁宽为0.3m,梁高为0.4m,地基反力系数参考土质地基取均值4×10<sup>4</sup> kN/m<sup>3</sup>,锚固力P参考文献[11]取值为345 kN,常用C30混凝土弹性模量取值为30 GPa,铰接点与锚固点的距离取最小值0.5m。

#### 2.1 解的验证与比较

为验证本文推导的计算方法的合理性,本研 究将本文结构模型退化为单梁受集中力的结构, 并与文献[20]中的相应解进行比较分析。因铰接 型框架梁由多段地梁组成,故将结构模型退化为 单梁仍然适用于本文的计算方法。为方便与文献 [20]对比,取*L*<sub>1</sub> = 5 m,*l*<sub>1</sub> = 10 m,集中力*P*分别取 400、200 kN两种,其他参数与文献[20]中的保持









文与文献[20]中对应计算结果的内力变化曲线 完全吻合,这验证了本文推导的计算模型的合 理性。

#### 2.2 铰接型装配式锚杆框架梁与传统框架梁受 力变形特性对比

图 5 为传统现浇框架梁结构与铰接型框架梁 结构的示意图。这两种框架梁的锚杆作用位置与 锚固力大小均一致,主要区别在于,铰接型框架梁 是由十字梁和较短的横、纵梁组合而成的铰接型 结构。

图 6 所示为两种框架梁结构在不同锚固力 (0.5P、1.0P)作用下的梁底位移、转角、弯矩、剪力



的变化曲线,其中传统结构采用文献[24]提出的 方法计算,铰接型结构采用本文方法进行计算。

由图6可以看出,传统现浇框架梁结构的梁底 位移、转角、弯矩、剪力的变化趋势与铰接型装配 式框架梁结构的较为相似,不同之处如下:① 铰接 结构的梁底位移最大值比传统现浇结构的大,铰 接结构的梁底位移最小值比传统现浇结构的小, 这是由于铰接结构的连接使每段梁的自由度更 高,且梁底位移受其他梁段的影响较小;② 铰接结 构在2和4m位置处出现了转角不连续、一正一负 的情况,而传统现浇结构是连续的;③以锚固力为 1.0P的弯矩、剪力为例,铰接型框架梁的最大正负 弯矩分别为90、-70 kN·m,最大正负剪力分别为 208、-208 kN, 而传统框架梁的最大正负弯矩分别 为115、-20 kN·m,最大正负剪力分别值为182、 -182 kN,可见铰接型框架梁结构的最大弯矩值比 传统框架梁结构的小,约为传统结构的70%~80% (减少20%以上),而这两种结构剪力基本相当,仅 相差10%左右。因此,铰接型装配式框架梁结构 能够在剪力极值改变不大的情况下,有效减小结 构的最大弯矩,优化结构的受力状态。另外,从图 6还可以看出,计算结果与边界、连续性条件完全 吻合,这亦验证了本文推导的合理性。







Fig. 6 Comparison of bottom displacement, rotation angle, bending moment, and shear force between hinged and traditional frame beams

## 2.3 铰接型装配式锚杆框架梁结构受力变形的 参数化分析

图7为不同段数的铰接型框架梁的梁底位移、 转角、弯矩、剪力的变化曲线,图中m代表格构数。 从图7可以看出,随着格构数的增加,铰接型框架 梁结构的弯矩和剪力的变化趋势基本一致,其中 最大弯矩值出现在锚固点,最小弯矩值出现在每 一个格构的横梁中点位置处。虽然随着格构数的 增加,外侧锚固点处的弯矩值有所减小,剪力有所 增大,但两者的变化幅度均较小,仅为10%左右, 因此将多段梁进行简化计算是合理的。







图 8 为铰接型装配式锚杆框架梁结构在不同 锚固力(0.50P、0.75P、1.00P、1.25P)作用下的梁底 位移、转角、弯矩、剪力的变化曲线图。从图 8 可以 看出,随着锚固力的增大,铰接型框架梁的梁底位 移、转角、弯矩、剪力均增大。梁底位移最大值出 现在2和4m位置处,该处为铰接点所在,这是由 于铰接点的存在使得梁的变形变得更为容易。铰 接点传递的是剪力和轴力,不传递弯矩,即铰接点 的平动自由度是相等的,转动自由度是不相关







投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home

的,转角可以不相等。因此,在2和4m位置处出 现了转角不连续、一正一负的情况。以锚固力为 1.25P的弯矩、剪力为例:沿梁长度方向,0~1.5 m 位置的弯矩从0 kN·m 增加到 110 kN·m, 接着 1.5~ 3.0 m位置的弯矩从110 kN·m减小至0 kN·m再到 -90 kN·m,梁底位移与弯矩的变化曲线在计算模 型的中点处成中心对称分布,在0、2、4、6m处的弯 矩为零,对应铰接点和自由端处弯矩为零的边界 条件;剪力在0~1.5 m位置从0 kN增加到170 kN, 在1.5m位置由于锚固力的作用发生突变,从170kN 变化到-260 kN,其绝对值之和为作用在该处的 锚固力,然后在1.5~3.0m位置从-260kN又增加 至0 kN, 3.0 m 位置处的右侧剪力、转角变化与左 侧的成轴对称分布,在0、6m处的剪力为零,对应 自由端处剪力为零的边界条件,在2、4m处的剪力 连续,这符合铰接点传递剪力这一条件。

图9为铰接型装配式锚杆框架梁结构在不同 地基反力系数条件下的梁底位移、转角、弯矩、剪 力的变化曲线图。在图9中,不同地基反力*K*<sub>1</sub>、*K*<sub>2</sub>、 *K*<sub>3</sub>、*K*<sub>4</sub>、*K*<sub>5</sub>的取值分别为1×10<sup>5</sup>、2×10<sup>5</sup>、3×10<sup>5</sup>、4×10<sup>5</sup>、 5×10<sup>5</sup> kN/m<sup>3</sup>。地基反力系数越大,土体在外力的 作用下越不容易变形。从图9可以看出:地基反力 系数对框架梁的梁底位移和转角影响显著,地基 反力系数越大,梁底位移和转角越小;而地基反力 系数对弯矩和剪力的影响很小,最大弯矩值变化 幅度仅为1%。







Fig. 9 Comparison of bottom displacement, rotation angle, bending moment, and shear force between hinged frame beams under different foundation reaction coefficients

图 10为铰接型装配式锚杆框架梁结构在不同 截面尺寸条件下的梁底位移、转角、弯矩、剪力的 变化曲线图。在图 10 中,截面尺寸 $(b \times h)S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、  $S_6$ 的取值分别为 0.3 m×0.3 m、0.4 m×0.4 m、0.5 m× 0.5 m、0.6 m×0.6 m。从图 10 可以看出,截面尺寸



投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home



图10 不同截面尺寸下铰接型框架梁的梁底位移、转角、 弯矩、剪力对比图

Fig. 10 Comparison of bottom displacement, rotation angle, bending moment, and shear force between hinged frame beams under different section sizes

对框架梁的弯矩、剪力影响极小,而对框架梁的梁 底位移和转角影响较大。当只改变截面尺寸时, 其值越大,梁底位移和转角越小。当受外力作用 时,梁的截面尺寸越小,其越容易变形,但由于外 力大小是不变的,因此梁的剪力和弯矩变化很小。

图 11 为铰接型装配式锚杆框架梁结构在不同 悬臂长度(AB、EF的长度)条件下的梁底位移、转 角、弯矩、剪力的变化曲线图。在图11中,悬臂长 度X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>、X<sub>4</sub>、X<sub>5</sub>的取值分别为0.50、0.75、1.00、 1.25、1.50 m。从图 11 可以看出,悬臂长度对梁底 位移、转角、弯矩、剪力的影响均较为明显。随着 悬臂长度的增大,悬臂端部的梁底位移急剧减小, 从40 mm减小到5 mm,而两个铰接点之间的梁底 位移却增大,从5 mm增加到12 mm,增幅远小于 端部的。转角的变化与梁底位移的相似,铰接点 两侧的转角绝对值随悬臂长度的增大而减小,铰 接点之间的梁的转角值变化较小。正弯矩随悬臂 长度的增大而增大,负弯矩随悬臂长度的增大而 减小,不同悬臂长度下梁的最大弯矩值相差约 40%。在锚固点两侧,剪力最大绝对值随悬臂长 度的增大而减小,而在锚固点之间则恰好相反,即 随悬臂长度的增大而增大。这是由于悬臂长度减 小之后,梁的受力面积减小,而土的刚度却不变。 因此,梁两端的梁底位移更大,受到锚固力的影响 增大,锚固力作用点之间的部分受到的影响减小, 故中间梁的梁底位移、转角、弯矩、剪力更小。因 此,在进行铰接型框架梁结构设计时,应尽可能减





Fig. 11 Comparison of bottom displacement, rotation angle, bending moment, and shear force between hinged frame beams under different cantilever lengths 小端部锚固点与端部的距离,从而有效减小铰接 型框架梁端部锚固点附近的弯矩。

图12为铰接型装配式锚杆框架梁结构在不同 铰接位置(BC、DE的长度)条件下的梁底位移、转 角、弯矩、剪力的变化曲线图。在图12中,铰接位 置 Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub>、Y<sub>3</sub>、Y<sub>4</sub>、Y<sub>5</sub>的取值分别为 0.5、0.6、0.7、0.8、 0.9 m。从图 12 可以看出:随着铰接点与锚固点之 间距离的增大,梁底位移变化趋于平缓,位移最大 值减小,端部的位移增大;随着铰接点与锚固点之 间距离的增大,转角的绝对值减小;正弯矩随铰接 点与锚固点之间距离的增大而增大,负弯矩随铰 接点与锚固点之间距离的增大而减小,因此,存在 一个铰接点位置,此时的最大正弯矩与最小负弯 矩的绝对值相等,且由图12可以看出,改变铰接位 置可使最大弯矩值降低约25%,而铰接点与锚固 点之间的距离对剪力的影响较小。增大铰接点与 锚固点之间的距离,相当于使得锚固力作用位置 处的受力结构更趋于传统现浇结构,具体表现为







Fig. 12 Comparison of bottom displacement, rotation angle, bending moment, and shear force between hinged frame beams under different hinged positions

梁底位移曲线更为平缓,转角的突变在铰接点变 小,锚固力作用点的正弯矩和负弯矩增大。因此, 在进行铰接型框架梁结构设计时,可以通过调节铰 接点与相邻锚固点之间的距离来有效均衡铰接型 框架梁锚固点两侧的弯矩,从而减小最大弯矩值。

#### 2.4 铰接型装配式锚杆框架梁现场实测结果

图 13 为贵黄高速公路 K87 边坡的框架梁横梁 内力监测值<sup>[26]</sup>与理论值的对比图。为方便将监测 值与理论值进行对比,将两种数据归一化。从图 13 可以看出,横梁弯矩的监测值与理论值的变化 趋势基本一致,在格构两端的锚固点处的正弯矩 值最大,格构中心位置的负弯矩值最大,铰接点附 近的弯矩为零。在图 13 中,铰接点处的监测值之 所以不为零,一方面是因为测量存在一定的不可 避免的误差,另一方面是因为格构横梁只布设了 5 个监测点,铰接位置处没有监测数据,只能通过拟 合曲线进行预估。



图13 贵黄高速公路K87边坡的框架梁横梁内力监测值 与理论值对比图

Fig. 13 Comparison between monitoring and theoretical internal force values of cross arm of frame beam of K87 slope along Guiyang-Huangping Expressway

#### 3 讨论

在以往的框架梁结构内力计算过程中,对象 多为传统现浇框架梁结构,而对于新型框架梁结 构的内力计算研究相对较少。因此,本文研究了 一种针对新型边坡支护结构——铰接型装配式锚 杆框架梁结构的内力计算方法。格构梁的内力计 算方法主要有倒梁法、Winkler弹性地基梁法、弹 性半空间地基梁法、数值模拟法。其中,倒梁法假 设地基反力为直线分布,故只有在梁刚度较大或 地基刚度较大的情况下,其计算结果才比较可靠, 而弹性半空间地基梁法的数学模型相对复杂<sup>[25]</sup>, 求解困难。因此,本文采用 Winkler 弹性地基梁法 对铰接型框架梁进行内力计算。

本研究结合铰接型框架梁的边界条件,求解 得到了铰接型框架梁的梁底位移、转角、弯矩、剪 力表达式,并通过具体数值算例的分析,验证了本 文的计算方法正确可靠。与传统现浇框架梁结构 的内力对比,本研究发现,铰接型结构的受力更为 合理,最大弯矩值可降低20%以上。这是因为铰 接点的存在使得框架梁的变形更为容易,有利于 释放弯矩,故最大弯矩值减小。同时,本文探究了 锚固力、悬臂长度、铰接位置、地基反力系数和截 面尺寸对铰接型框架梁的影响。本文研究成果为 框架结构的设计提供了理论基础,有助于铰接型 框架梁的应用与推广。

目前,本研究仅使用了单一的Winkler弹性地 基梁法对铰接型框架梁的内力进行了计算,缺乏 多种方法的共同验证。本课题组下一步拟采用多 种方法对铰接型装配式锚杆框架梁的内力进行计 算,以期得到更好、更方便、更适用于设计的框架 梁内力计算方法,以指导实际工程中的铰接型装 配式框架梁的设计与施工。

#### 4 结论

1) 基于Winkler 弹性地基梁法,利用铰接结构 的边界条件,推导求解得到了铰接型装配式锚杆 框架梁结构的内力表达式,形成了铰接型框架梁 的内力计算方法。 2)通过数值算例,对传统现浇锚杆框架梁结构和铰接型装配式锚杆框架梁结构进行受力分析。与现浇锚杆框架梁结构对比,铰接型装配式锚杆框架梁结构的梁底位移更大,整体柔性更强,从而其与坡面变形更为协调;两种框架梁结构的 剪力分布基本相当,而铰接型装配式锚杆框架梁的弯矩分布更为合理,其最大弯矩值可降低20%以上。

3)通过对框架梁的内力进行参数分析发现: 锚固力越大,铰接结构的弯矩值越大;在不影响框架梁构造要求时,改变铰接结构的铰接点位置,可以使最大弯矩值减小约25%,减小悬臂长度,可以使最大弯矩值减小约40%;地基反力系数和截面尺寸对框架梁结构的影响主要体现在梁底位移和转角上,地基反力系数和截面尺寸增大,弯矩和剪力的变化仅在1%左右。

4)通过对现场实测数据与本文内力计算结果进行对比发现,弯矩的监测值与理论值的变化趋势基本一致,边界条件基本吻合,这证明了本文的内力计算方法合理可靠。

5)根据参数化分析结果发现,在进行铰接型 框架梁结构设计时,应该减小悬臂长度,铰接点尽 可能地靠近相邻锚固点。

#### [参考文献]

- DANZIGER F A B, DANZIGER B R, PACHECO M P. The simultaneous use of piles and prestressed anchors in foundation design [J]. Engineering Geology, 2006, 87 (3/4) : 163-177. DOI: 10.1016/j. enggeo. 2006. 06.003.
- [2] YAN M J, XIA Y Y, LIU T T, et al. Limit analysis under seismic conditions of a slope reinforced with prestressed anchor cables [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 108: 226-233. DOI: 10.1016/j. compgeo.2018.12.027.
- [3] SHI K Y, WU X P, LIU Z, et al. Coupled calculation model for anchoring force loss in a slope reinforced by a frame beam and anchor cables [J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105245. DOI: 10.1016/j.enggeo. 2019.105245.
- [4] 周宏元,曾智勇.预应力锚杆框架梁边坡加固结构的应用分析[J].铁道工程学报,2013,30(3):16-18,85.DOI:10.3969/j.issn.1006-2106.2013.03.004.
  ZHOU Hongyuan, ZENG Zhiyong. Applied analysis of slope structure reinforced with prestressed anchored frame beam [J]. Journal of Railway Engineering

Society, 2013, 30(3): 16-18, 85. DOI: 10.3969/j. issn.1006-2106.2013.03.004.

 [5] 李毅,程宝平,何学春,等.涔天河渠道土质边坡失 稳分析与对策研究[J].长沙理工大学学报(自然科 学版),2022,19(1):53-63.DOI:10.19951/j. cnki.1672-9331.2022.01.007.

LI Yi, CHENG Baoping, HE Xuechun, et al. Instability analysis and countermeasure research of soil slope in Centianhe canal [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19 (1): 53-63. DOI: 10.19951/j. cnki. 1672-9331.2022.01.007.

- [6] ABDALLA L B, GHAFOR K, MOHAMMED A. Testing and modeling the young age compressive strength for high workability concrete modified with PCE polymers [J]. Results in Materials, 2019, 1: 100004. DOI: 10.1016/j.rinma.2019.100004.
- [7] ZAWAM M, SOUDKI K, WEST J S. Factors affecting the time-dependent behaviour of GFRP prestressed concrete beams [J]. Journal of Building Engineering, 2019, 24: 100715. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.02.007.
- [8] TANG W, MOHSENI E, WANG Z Y. Development of vegetation concrete technology for slope protection and greening [J]. Construction and Building Materials, 2018, 179: 605-613. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2018.05.207.
- [9] OZCAN-DENIZ G, ZHU Y M, CERON V. Time, cost, and environmental impact analysis on construction operation optimization using genetic algorithms [J]. Journal of Management in Engineering, 2012, 28(3): 265-272. DOI: 10.1061/(ASCE) ME. 1943-5479. 0000098.
- [10] LI Z H, HUANG H W, NADIM F, et al. Quantitative risk assessment of cut-slope projects under construction
  [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136 (12) : 1644-1654. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000381.
- [11] 张军辉, 黎峰, 郑健龙, 等. 防水保湿全预制式格构 梁锚索支护系统、支护及修复方法: CN110241833B [P]. 2021-01-01.

ZHANG Junhui, LI Feng, ZHENG Jianlong, et al. Waterproofing and moisturizing fully prefabricated lattice beam anchor cable support system, support and repair method: CN110241833B[P]. 2021-01-01.

[12] ZHANG J, LI F, et al. Research on application of multi-channel selector in centrifugal model test of anchoring slope by frame beam [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 757724. DOI: 10.3389/feart.2021. 757724.

- [13] ZHANG J H, LI F, ZHANG S P, et al. Research on application of multi-channel selector in centrifugal model test of anchoring slope by frame beam [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 757724. DOI: 10.3389/feart.2021.757724.
- [14] 周剑坤.贵黄高速公路铰接型装配式框架梁支护边 坡的变形监测及数值模拟[D].长沙:长沙理工大 学,2020.

ZHOU Jiankun. Deformation monitoring and numerical simulation of slope supported by fabricated articulated frame beams on Gui-Huang Expressway [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.

- [15] ZHANG J H, ZHOU Q W, LI F, et al. Case study of field application of prefabricated anchoring frame beam structure in slope supporting projects [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2022, 148 (9) : 05022008. DOI: 10.1061/(ASCE) CO. 1943-7862.0002363.
- [16] 殷跃平. 滑坡钢筋砼格构防治"倒梁法"内力计算研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(6): 52-56.
  DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2005.06.013.
  YIN Yueping. Internal force analysis on steel concrete lattice by reverse beam method for landslide control[J].
  Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(6): 52-56. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2005.06.013.
- [17] 马迎娟,彭社琴,周斌.滑坡治理中预应力锚索格构梁内力计算方法对比分析[J].地质力学学报,2004,10(4):366-371.DOI:10.3969/j.issn.1006-6616.2004.04.010.
  MA Yingjuan, PENG Sheqin, ZHOU Bin. Comparative

analysis of the methods of internal force calculation of the prestressed cable lattice beam for landslide control [J]. Journal of Geomechanics, 2004, 10(4): 366-371. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6616.2004.04.010.

- [18] 吴礼舟,黄润秋.加固膨胀土路堑边坡中框架梁的内力计算[J]. 岩土力学,2005,26(7):1113-1117. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2005.07.022.
  WU Lizhou, HUANG Runqiu. Calculation of internal forces of frame beam for strengthening expansive soil roadcut slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (7): 1113-1117. DOI: 10.3969/j.issn. 1000-7598. 2005.07.022.
- [19] BORÁK L, MARCIÁN P. Beams on elastic foundation using modified Betti's theorem [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 88: 17-24. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.06.014.
- [20] LI J B, ZHU Y P, YE S H, et al. Internal force analysis and field test of lattice beam based on winkler

theory for elastic foundation beam [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019(1): 1-13. DOI: 10.1155/2019/5130654.

[21] 韩爱民,李建国,肖军华,等.预应力锚杆框架梁的 支护力学行为研究[J]. 岩土力学,2010,31(9);
2894-2900. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-7598.2010.
09.034.

HAN Aimin, LI Jianguo, XIAO Junhua, et al. Mechanical behaviors of frame beam supporting structure with prestressed anchors [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2894-2900. DOI: 10.3969/j. issn.1000-7598.2010.09.034.

[22] 徐磊. 预应力锚索地梁设计及其内力影响分析[D]. 成都: 四川大学, 2006.

XU Lei. The design and analysis of influence factors for internal force of beam with pre-stressed anchor [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.

[23] 长沙理工大学. 铰接型装配式框架梁锚固技术规 范: DB43/T 2938—2024[S]. 长沙: [出版者不详], 2024. Changsha University of Science & Technology. Technical specification for the anchoring of hinged assembled frame beam structure: DB43/T 2938—2024 [S]. Changsha; [Publisher unknown], 2024.

- [24] 黄义,何芳社.弹性地基上的梁、板、壳[M].北京:
   科学出版社,2005.
   HUANG Yi, HE Fangshe. Beams, plates and shells on
- elastic foundation[M]. Beijing: Science Press, 2005. [25] 乐璇.贵州江玉高速红黏土边坡稳定性分析及装配 式框架梁支护[D].长沙:长沙理工大学, 2019. YUE Xuan. Stability analysis of red clay slope of Jiangyu Expressway in Guizhou Province and support of fabricated frame beam [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [26]周勤伟. 铰接型装配式框锚结构节点受力特性及抗 剪性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
  ZHOU Qinwei. Study on node mechanical properties and shear behavior of hinged prefabricated anchoring frame beam structure [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022.

(责任编辑:刘平;校对:赵冰)