

装配式预应力锚杆框架梁在路基边坡防护中的受力与施工技术研究

谭 搏 何林书

中建交通建设集团有限公司 北京 110000

摘 要：基于我国交通基础设施快速发展的背景，路基边坡防护工程亟需平衡结构可靠性与施工效率的双重需求。传统现浇锚杆框架梁存在施工周期长、质量可控性不足等局限，难以满足现代工程绿色建造要求。装配式预应力锚杆框架梁通过构件工厂化预制与现场装配化施工，展现出提升工程效能与质量稳定性的显著潜力，但其技术体系尚未形成标准化规范。本研究针对该技术空白，开展结构受力特性与施工工艺研究。

关键词：路基边坡；装配式锚杆框架梁；施工工艺；边坡支护

1 引言

在交通基建持续推进下，路基边坡防护面临效率与效果的双重挑战。传统现浇框架预应力锚杆支护存在施工周期长、质量波动等缺点，难以满足快速施工与绿色建造需求。装配式预应力锚杆框架梁凭借构件工厂化预制和现场装配优势，在提升效率、保证质量方面潜力显著，成为新兴边坡防护技术。深入研究其受力特性与施工技术，对完善边坡防护理论和推动工程创新意义重大。然而，当前装配式锚杆框架梁施工技术体系尚不完善，国内外缺乏专项技术标准及权威规范，对其工艺参数、质量控制等核心内容界定不清。为此，本研究基于既有边坡工程研究成果，结合工程实践需求，旨在开展装配式锚杆框架梁边坡施工标准化理论研究。

2 装配式预应力锚杆框架梁受力分析

2.1 受力分析

针对装配式支护结构的内力计算问题，本文基于Winkler弹性地基梁理论建立力学模型。将十字形框架梁简化为弹性地基上的连续梁，锚固力等效为作用于梁上的集中荷载。该理论假定地基表面任一点的竖向沉降与该点所受压力成正比，即：

$$p = ky \quad (1)$$

式中：为地基的基床系数。

在进行装配式十字梁结构设计时，通常将十字梁拆分成两个一字梁分别进行内力计算和结构设计^[1]。在弹性地基上，有一长度为、宽度为、弹性模量为、截面惯性矩为的梁，其上部受到荷载作用，产生的变形量为，根据Winkler假设和该微分段受力平衡，可以得到梁的挠曲线微分方程为：

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + kby = q(x) \quad (2)$$

在实际边坡加固工程中，由于无限长梁、半无限长梁很难找到，而框架预应力锚杆支护结构一般支护8-15m高度挖方边坡^[2]。赵明华^[3]认为荷载作用点与梁两端的距离都小于，且梁的长度大于时为有限长梁，显而易见，适用于支护8-15m高度挖方边坡的框架预应力锚杆支护结构，其地基梁属于有限长梁。Hetenyi在其1946的著作中给出了有限长地基梁内力的解析解，距离梁端处的弯矩、剪力和沉降变形量的计算公式如下：

$$\begin{cases} M = A_1 \frac{p}{2\lambda\phi} \\ V = A_2 \frac{p}{\phi} \\ y = A_3 \frac{p\lambda}{kb\phi} \end{cases} \quad (3)$$

式中：φ为沉降系数， A_1 、 A_2 、 A_3 分别为弯矩计算系数、剪力计算系数、沉降变形系数，可通过相应的数学表达式计算。

2.2 结构设计

装配式预制锚杆框架梁的结构设计以弹性地基梁内力解析为基础，通过规范荷载组合确定设计弯矩 M_d 与剪力 M_d ，据此配置梁体钢筋：

纵向主筋按下式计算：

$$A_s \geq \frac{M_d}{0.9f_y h_0} \quad (4)$$

式中： f_y 为钢筋屈服强度（MPa）；

h_0 为截面有效高度（mm）。

通过该式计算截面面积并满足最小配筋率。

抗剪箍筋间距按下式计算：

$$s = \frac{A_{sv} f_{yv} h_0}{V_d - 0.7f_t b h_0} \quad (5)$$

式中： A_{sv} 为箍筋截面面积（）；

f_{yv} 为箍筋强度 (MPa) ;

V_d 为设计剪力 (KN) ;

f_t 为混凝土抗拉强度 (MPa) 。

锚杆系统按《建筑边坡工程基数规范》(GB50330-2013)设计, 锚杆轴向拉力标准值计算公式如下:

$$N_{ak} = \frac{H_{tk}}{\cos \alpha} \quad (6)$$

式中: H_{tk} 为水平拉力标准值 (KN) ;

α 为锚杆倾角 ($^{\circ}$) 。

钢筋截面面积满足下式:

$$A_s \geq \frac{K_b N_{ak}}{f_{py}} \quad (7)$$

式中: K_b 为锚杆杆体抗拉安全系数;

N_{ak} 为锚杆轴向拉力标准值 (KN) ;

f_{py} 为预应力钢筋抗拉强度设计值 (MPa) 。

锚固段长度满足下式:

$$l_a = \frac{K N_{ak}}{\pi D f_{rbk}} \quad (8)$$

式中: K 为抗拔安全系数;

f_{rbk} 为岩土极限粘结强度 (kPa) 。

根据《建筑施工起重吊装工程安全技术规范》(JGJ276-2012) 吊装系统按下列公式设计预埋吊钩:

$$F_h \geq 1.1 \times 1.5 G_k \quad (9)$$

式中: F_h 为吊钩的设计抗拔承载力 (KN) ;

G_k 为预制构件自重标准值 (KN) 。

3 装配式预应力锚杆框架梁施工工艺

3.1 施工工艺流程

装配单元预制→边坡处理→测量放线→锚杆施工→预制框架装配单元安装→非预制段现浇及养护。

3.2 装配单元预制

预制框架梁装配单元的生产过程需严格遵循标准化流程, 具体包括: 模具安装→钢筋笼加工及安装→混凝土浇筑→预制件脱模及养护^[4]。首先按照预制单元尺寸制作模具 (十字形梁、T形梁、一字梁), 然后在模具内按设计要求进行钢筋笼安装, 在此过程中, 必须预埋吊钩。吊钩的设置应遵循对称布置, 吊装时重心稳定避免倾斜和旋转的原则。同时, 借鉴《混凝土结构设计规范》(GB50010) 的要求吊钩应焊接或绑扎在主筋上, 埋入混凝土深度大于30d, d为吊钩钢筋直径。

安装好后选用符合设计强度等级的混凝土进行浇筑, 混凝土浇筑前, 对模板进行打磨除锈处理并涂刷脱模剂。浇筑时预埋锚杆孔洞模具, 确保孔位定位偏差不得超过±5mm。

浇筑完成后立即进行养护, 待混凝土强度达到设计

值的80%以上方可脱模。脱模后执行质检, 质检合格的构件标注安装方向与唯一编号, 最后分类存放于经压实的平整场地。

3.3 边坡处理

路基边坡开挖至设计坡面后, 进行表面整平与压实处理, 清除浮土与松动岩体, 确保坡面平整度误差不超过±10cm。

3.4 测量放线

按设计间距测量放线, 确定锚杆孔位, 借鉴《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012) 确保钻孔孔位偏差应为±50mm, 同时复核边坡坡度, 确保与框架梁安装角度匹配。

3.5 锚杆施工

借鉴《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2013) 锚孔定位偏差不宜大于20.0mm; 锚孔偏斜度不应大于2%; 钻孔深度超过锚杆设计长度不应小于0.5m。在锚固体强度大于20Mpa并达到设计强度的80%后方可进行锚杆张拉, 锚杆张拉控制应力不宜超过0.65倍钢筋强度标准值, 锚杆张拉完成后锁定锚筋, 用机械割除余露锚筋, 用C30商品混凝土进行封锚^[5]。

3.6 预制框架装配单元安装

装配单元在预制场经质量验收合格后, 采用平板运输车运抵施工现场, 抵达现场后, 根据预制单元类型核查预埋吊钩位置进行试吊试验, 验证重心稳定性, 确保无误后, 人工配合起重机开展起吊安装作业。

安装顺序采用“顺作法”施工, 即施工时可从坡脚到坡顶依次吊装, 该施工方式可抑制边坡滑塌^[6]。安装时应遵循“先十字段、后直杆段”的顺序: 十字段单元安装时, 需将其预留孔精准套入已施工完成的锚杆, 确保锚杆前端铁管深入十字段内部10cm~20cm; 十字段外部的锚杆需向边坡外侧弯折, 以增强固定效果。待十字段安装就位后, 再按照预先放样的位置安装直杆段。预制件与沟槽间两侧缝隙采用M15砂浆填充^[4]。

3.7 非预制段现浇及养护

在完成十字形梁及直杆段预制单元的安装定位后, 随即开展现浇区段的钢筋混凝土施工。预制构件端部已通过拉毛处理形成粗糙面, 确保新旧混凝土界面具备足够的抗剪强度, 同时在预制阶段预埋的接长钢筋与现浇段主筋通过双面搭接焊连接, 焊缝长度不小于22cm。待整体骨架验收合格后安装现浇段模板, 随后浇筑混凝土。针对直杆段现浇体, 严格遵循“三格一缝”原则, 即每浇筑3个框架格单元后预留20mm宽伸缩缝。浇筑完毕后立即覆盖透水土工布保湿养护, 养护周期持续14天

以上^[7]。

总结

相较于现浇工艺，其标准化预制从根本上提升了构件质量均质性和尺寸精度，有效规避现场浇筑的质量缺陷；通过工厂预制与现场吊装的作业转换，大幅降低高空支模的安全风险；锚杆施工与构件生产的并行推进，显著缩短了整体工期。基于以上研究，装配式预应力锚杆框架梁以其可控的质量体系、本质化的安全特性和集约化的工期优势，正逐步成为路基边坡防护工程的核心技术，其推广价值不仅体现在工程效率提升，更将为交通基础设施建设的工业化转型提供关键技术支撑。

参考文献

[1] 沈振义.装配式十字梁结构设计及其与锚索加固边坡动力响应研究[D].天津大学,2022.

[2] 朱彦鹏,罗晓辉,周勇.支挡结构设计[M].北京;高等教育出版社,2008

[3] 赵明华,陈昌富,邹新军等.基础工程[M].北京,高等教育出版社,2017.

[4] 李栋.路基边坡装配式锚杆框架梁防护技术研究[J].山西建筑,2024,50(01):124-127+142.

[5] 左志辉.路基高边坡预应力锚杆框架梁施工工法[J].四川建材,2012,38(06):210-211+214.

[6] 张世诚.刚接装配式框架预应力锚杆支护结构的变形及内力研究[D].兰州理工大学,2024.

[7] 中华人民共和国工业和信息化部.现浇混凝土养护技术规范:JC/T60018-2023[S].北京:中国建材工业出版社,2023.