

既有高速公路改扩建中的高边坡绿色智能施工技术

王春冬

中铁大桥局第九工程有限公司，广东 中山

收稿日期：2025年7月26日；录用日期：2025年8月16日；发布日期：2025年8月28日

摘 要

随着我国社会经济快速发展，早期建设的高速公路因通行能力不足等问题亟需改扩建，而既有高速旁高边坡施工存在岩体破碎、落石滑坡等安全隐患。本文以长春至深圳国家高速公路河源热水至惠州平南段改扩建工程T2标段为实例，重点阐述了集智能监控、安全防护、环保施工于一体的高边坡施工技术。该施工技术通过临边防护设计、智能监测系统应用及分层开挖与及时防护相结合的技术，实现了“开挖一级、防护一级”的施工原则，有效保障了边坡稳定与既有高速行车安全。研究表明，该施工技术不仅减少了施工安全隐患和环境影响，还通过优化开挖方式与机械配置，节约机械台班约229个，节省成本约80万元，展现出显著的经济与社会效益，对同类高速改扩建高边坡施工具有重要的推广应用价值。

关键词

高速公路改扩建，高边坡施工，智能监控监测系统，安全隐患

Green-Intelligent Construction of High Slopes in Existing Expressway Reconstruction and Expansion

Chundong Wang

The 9th Engineering Co., Ltd. of MBEC, Zhongshan Guangdong

Received: Jul. 26th, 2025; accepted: Aug. 16th, 2025; published: Aug. 28th, 2025

Abstract

With the rapid social and economic development of our country, the early construction of highways

文章引用：王春冬. 既有高速公路改扩建中的高边坡绿色智能施工技术[J]. 土木工程, 2025, 14(8): 2112-2126.
DOI: 10.12677/hjce.2025.148229

urgently needs to be reconstructed and expanded due to insufficient traffic capacity, and the existing high-speed side slope construction has potential safety hazards such as rock mass fragmentation and rockfall landslides. This paper takes the T2 bid section of the reconstruction and expansion project from Heyuan Shuihui to Huizhou Pingnan section of the Changchun-Shenzhen National Expressway as an example, and focuses on the high slope construction technology integrating intelligent monitoring, safety protection and environmental protection construction. Through the edge protection design, the application of intelligent monitoring system and the combination of layered excavation and timely protection, the construction technology realizes the construction principle of “excavation level 1 and protection level”, and effectively guarantees the stability of the slope and the safety of existing high-speed driving. The research shows that the construction technology not only reduces the construction safety hazards and environmental impact, but also saves about 229 mechanical shifts and saves about 800,000 yuan in costs by optimizing the excavation method and mechanical configuration, showing significant economic and social benefits, and has important promotion and application value for the construction of similar high-speed reconstruction and expansion of high slopes.

Keywords

Highway Reconstruction and Expansion, High Slope Construction, Intelligent Monitoring and Surveillance System, Safety Hazards

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国社会经济高速发展,交通需求激增,早期高速公路出现通行能力饱和、服务品质下滑等问题,亟需改造扩容。高速公路改扩建中,山体开挖易引发落石、滑坡等风险,威胁施工安全与道路通行。

边坡风险评估至关重要,近年来物联网、大数据等技术推动监测预警[1]-[4]向智能化转型,通过多源数据传输与动态模型构建,结合“红橙黄蓝”预警体系,提升了预警及时性与精准度。

在高边坡工程施工质量与稳定性[5]保障方面,全周期质量管控机制发挥着关键作用。前期依托钻探与物探融合的勘察技术,如高密度电法、地震波探测等,可精准剖析岩土层结构与水文地质条件;施工阶段则通过智能设备与先进技术,严格把控锚杆锚索施工精度、注浆质量及混凝土喷射效果,其中预应力锚索技术[6]-[10]凭借主动加固特性成为边坡稳定的重要手段。此外,基于滑坡动力学理论构建的“柔性 + 刚性”双级防护体系[11],实现了对滑坡冲击能量的分级耗散,为边坡风险防控筑牢技术防线。

本文以中铁大桥局第九工程有限公司承建的长春至深圳国家高速公路河源热水至惠州平南段改扩建工程 T2 标段为典型案例,深入探讨高速改扩建中高边坡智能[12]、安全[13][14]、环保[15]施工技术,旨在为同类工程提供可借鉴的实践经验与技术参考,助力我国高速公路改扩建事业高质量发展。

2. 技术原理与体系

2.1. 技术原理

本技术适用于既有高速改扩建中土质挖方边坡 $> 20\text{ m}$ 、岩质 $> 30\text{ m}$ 且处于不良地质地段的高边坡施工,具有安全系数高、智能化程度高、质量标准高等特点,涵盖开挖、排水、防护等安全质量控制工

艺，需兼顾开挖安全与下方既有高速行车安全。

施工关键在于：先设彩钢板与防护网防落石，修截水沟防雨水冲刷；再分级开挖并及时防护、施做排水工程，做到“开挖一级、防护一级”；同时布设监测设备实时预警，通过“防护－开挖－监测”一体化流程，实现安全、质量与效率的统一。

2.2. 技术体系

2.2.1. 临时防护

对于高度大于 3 m 的一级挖方边坡，在坡底高速旁设置彩钢板防护，防止在边坡开挖过程中土块、碎石及其他零散物品滚落行车道。

在旧边坡底部设置彩钢板围挡。对于土质边坡：底部开挖 50 cm × 50 cm × 40 cm 的基础采用 C25 砼浇筑，预埋螺栓；对于岩质边坡：底部直接打入膨胀螺栓，彩钢板颜色统一为蓝色，防护示意图如图 1 所示。

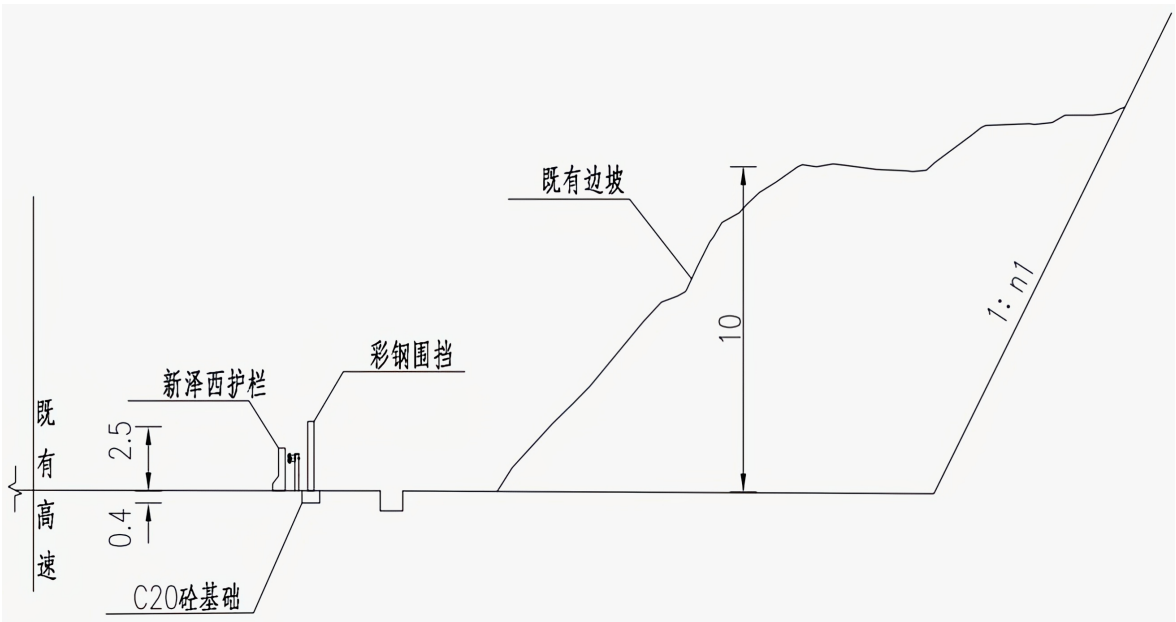


Figure 1. Color-coated steel plate protection schematic diagram

图 1. 彩钢板防护示意图

所用彩钢板尺寸为 2980 × 2500 × 8 mm 蓝色镀锌墙板，立柱为 HM150 × 100 × 2500 烤漆立柱，立柱地板为 250 × 250 × 8 mm，膨胀螺栓为 M18 × 300 mm；彩钢板如图 2 所示。

对于二级及以上的挖方边坡，除在坡底高速旁设置彩钢板外，还需在二级边坡及以上旧边坡平台设置防护网；可有效防止开挖过程块石滚落高速。

在旧边坡上部设置防抛网。钢管柱焊接 4 处钢筋弯钩。钢管柱安装固定后，用铁丝绑扎防抛网与钢管柱焊接弯钩，形成一道防护墙。对于土质边坡：底部开挖 50 cm × 50 cm × 50 cm 的基础采用 C25 砼浇筑。对于岩质边坡：底部先用风钻按间距 400 cm 钻 Φ200 mm、深 50 cm 的孔，然后插进 Φ140 mm 钢管柱，注水泥砂浆进行固结，防护示意图如图 3 所示。

钢丝网采用直径 8 mm 的钢丝绳编织，孔尺寸为 30 cm × 30 cm，每个节点采用卡扣或者十字结连接，铁丝网为镀锌铁丝，采用 2.2 mm 的铁丝，孔尺寸 5 cm，防抛网构造图如图 4 所示。

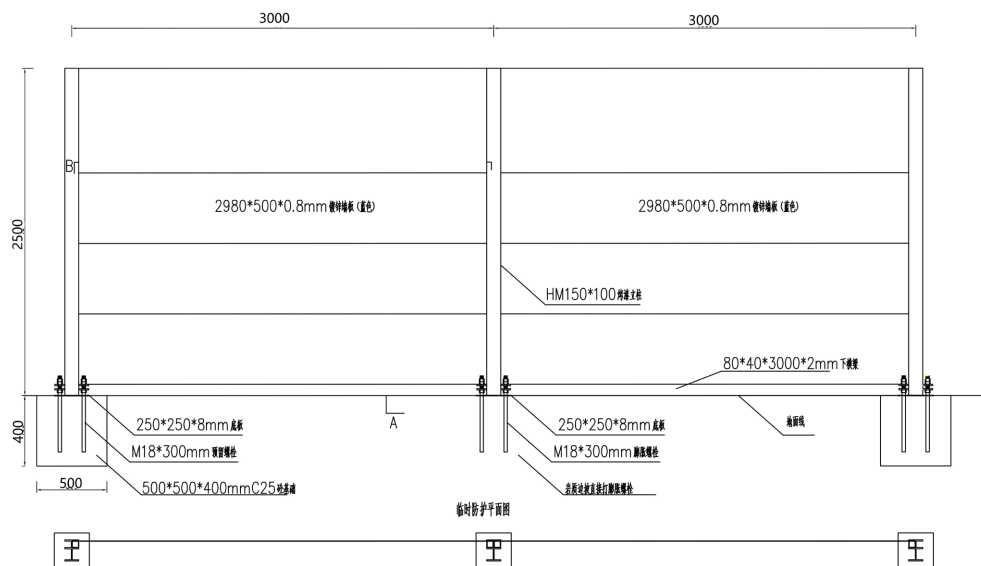


Figure 2. Structural drawing of color steel plate

图 2. 彩钢板构造图

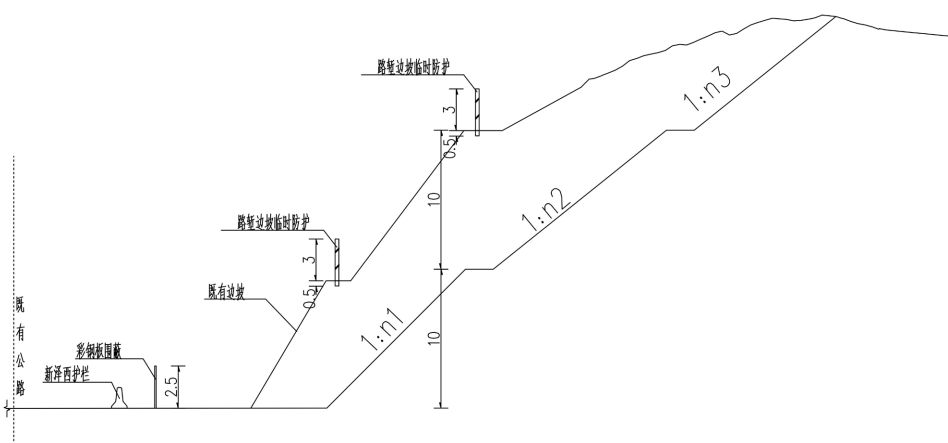


Figure 3. Slope protection schematic diagram

图 3. 边坡防护示意图

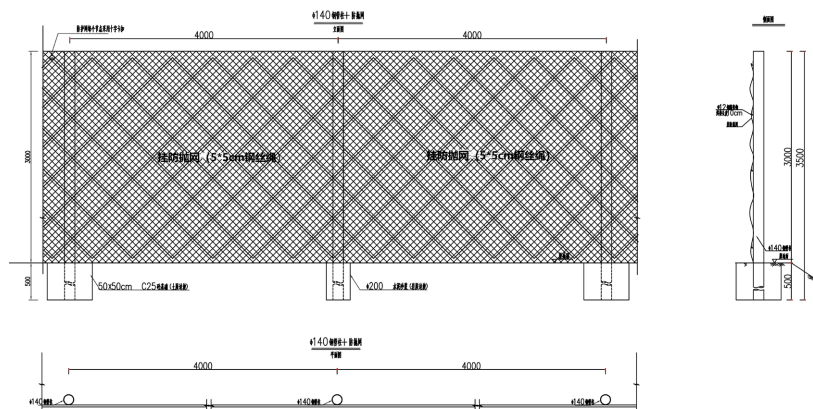


Figure 4. Structure diagram of anti-throwing net

图 4. 防抛网构造图

2.2.2. 永临结合排水

永临结合排水施工中, 坡体汇水经平台截水沟汇入堑顶截水沟, 再引至路基边沟。路堑开挖前先修堑顶截水沟防雨水冲刷, 减少二次开挖; 边坡开挖前两侧设临时排水沟, 与堑顶截水沟连通, 实现永临结合以降本。临时排水沟为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 断面, M7.5 砂浆抹面; 堑顶截水沟为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 矩形, C20 砼预制块砌筑, 设于路基开挖线外(图 5)。

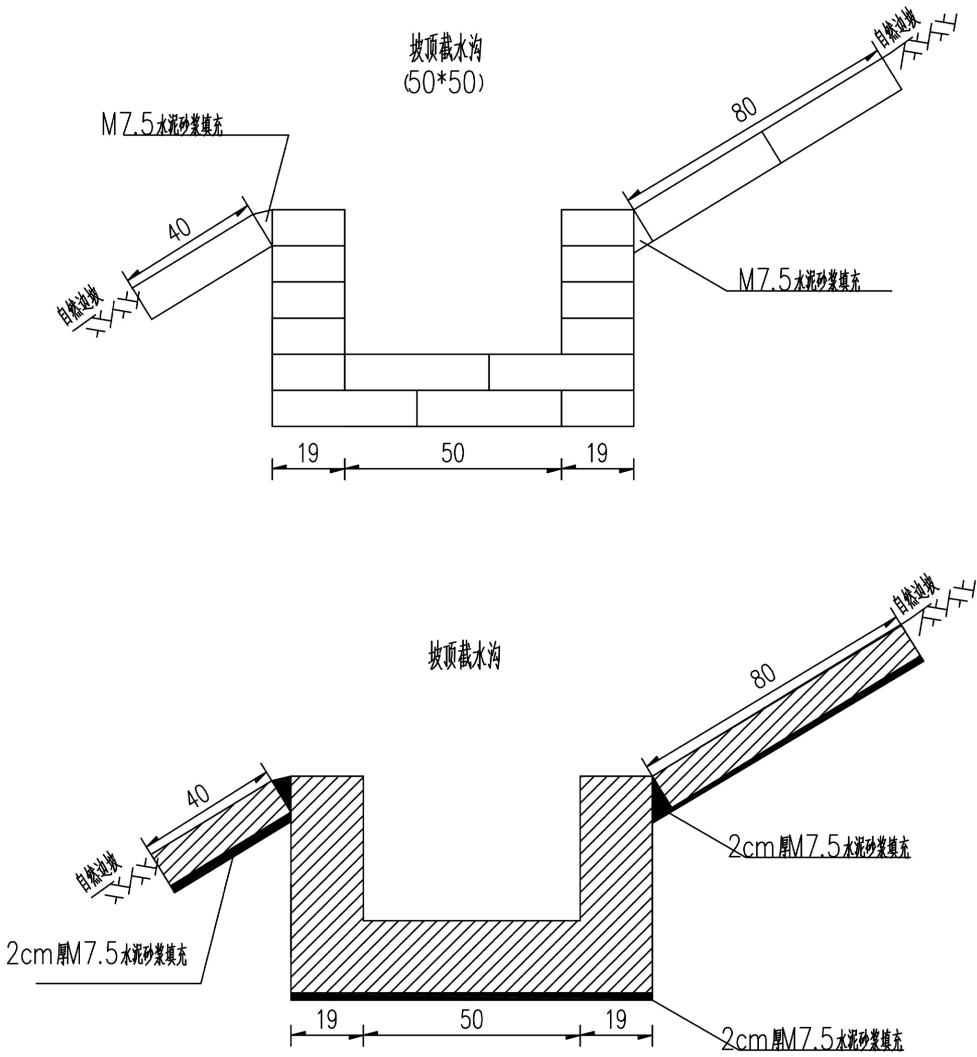
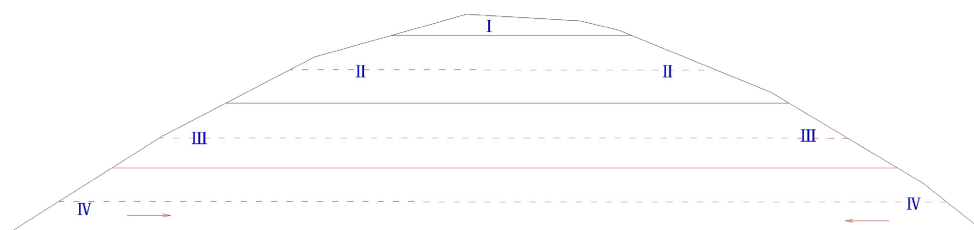


Figure 5. Cross-sectional view of the ditch
图 5. 截水沟断面图

2.2.3. 分级开挖-防护同步

土方路堑或中、强风化砂岩开挖可直接选用挖掘机配自卸车进行施工, 高边坡的土质路堑开挖深度一般在 20 m 以上, 因此选择“横向分层、纵向分段, 阶梯掘进”的混合挖掘法施工。

平缓地形施工时, 因纵向地形平缓且为 U 形路堑, 采用挖掘机配自卸车从高至低分层开挖, 每层控制在 3~5 m (图 6); 陡峭地形则先在边坡中央开挖 6 m 宽便道, 预留 3~5 m 挡渣区, 挖机分层下滑渣料至便道后, 配合运输车外运(图 7、图 8)。



施工说明:

- 1、路堑开挖按照图示从 I 至 IV 顺序进行分台阶开挖，与横向台阶相结合。
- 2、台阶高度为4m，依次由上而下、由外向两侧纵深推进。

Figure 6. Longitudinal sequence schematic diagram of trench excavation

图 6. 路堑开挖纵向顺序示意图

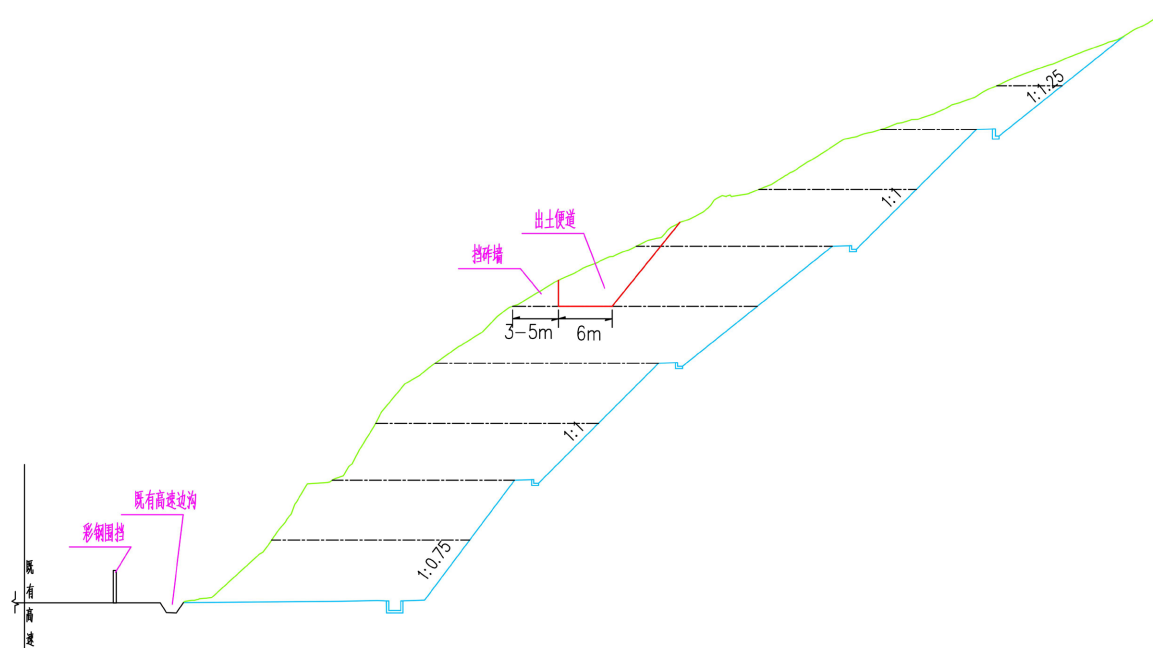


Figure 7. Schematic diagram of steep high-cut slope excavation method

图 7. 陡峭高切坡开挖方法示意图



Figure 8. Construction of a central walkway and a reserved slag retaining wall

图 8. 修筑中央便道及预留挡渣墙

土方边坡开挖采用人工配合 CAT-360 型挖机，按“从上至下、从里到外”逐级开挖，上级锚固完成后再进行下级，逐级加固至防护结束。与常规相比，每万立方米节约 1 个台班(3500 元)，工效提升 20%，开挖分块及顺序如图 9。

(1) 机械凿除

石方边坡开挖方式及顺序同土方。遇坚硬石方用机械凿除，炮头破碎后外运。挖机清理表层土，破碎机破碎岩层后，挖机与运输车配合装运，循环作业。边开挖边外运，雨天需二次转运至安全地带防滑塌。

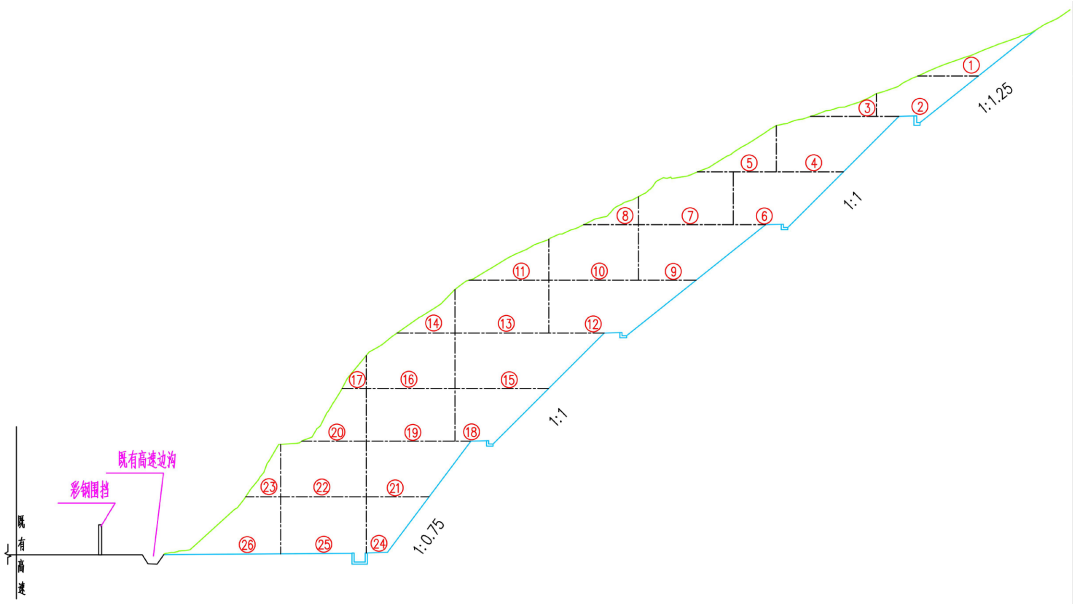


Figure 9. Schematic diagram of earthwork trench excavation sequence
图 9. 土方路堑开挖顺序示意图

挖方边坡分级清刷后，深挖路段分层施工时，防护、排水工程与路堑成型协调实施，严格“开挖一级、防护一级”，严禁滞后防护；与路基平行作业并尽早完成。高边坡防护加固主要采用三维植被网等五种形式，现场施工防护如图 10。



Figure 10. Anchor cable frame beam protection and platform drainage ditch
图 10. 施作锚索框格梁防护及平台排水沟

2.2.4. 智能监测

(1) 地表位移自动化监测

边坡开挖后堑顶附近易出现应力松弛区与张裂缝, 各类破坏模式下最大地表位移均出现在堑顶线外。在坡顶埋设传感器监测地表裂缝位移, 可识别初始变形及全过程, 依累计位移量或速率预警滑塌, 监测量程 2 m、精度 0.1 mm, 相关系统安装示意图如图 11 所示。

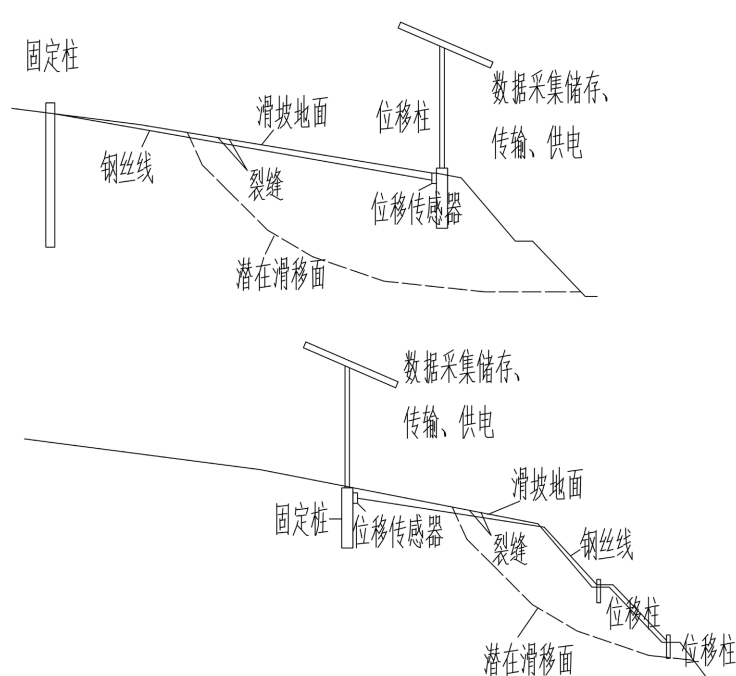
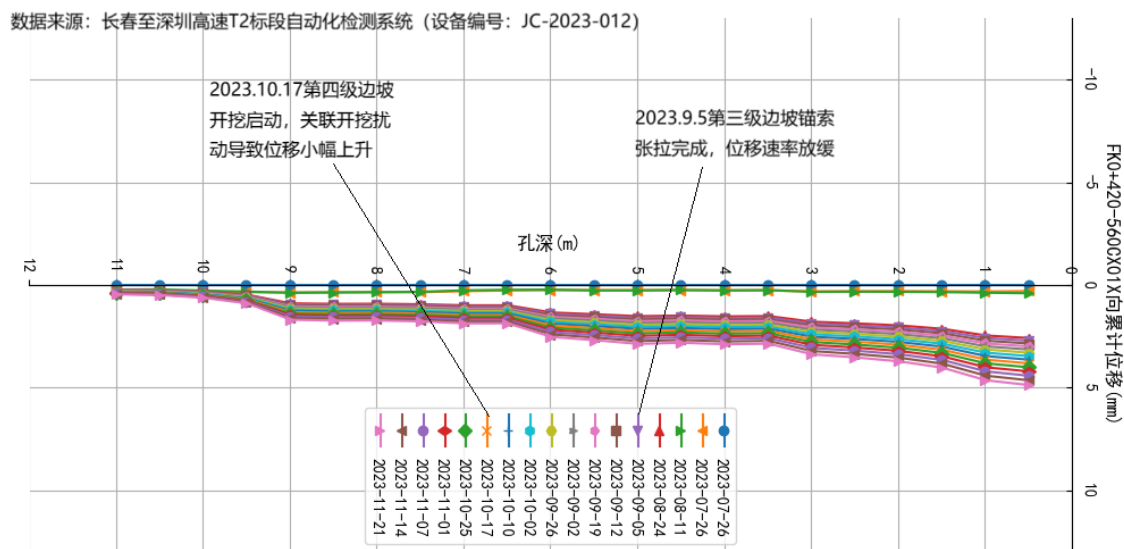


Figure 11. Schematic diagram of the installation of automatic monitoring and early warning system for surface cracks (displacement) at the top of the slope

图 11. 坡顶的地表裂缝(位移)自动化监测及预警系统安装示意图

图 12 为城北互通 FK0 + 420~560 右侧边坡地表位移自动化监测累计位移曲线。



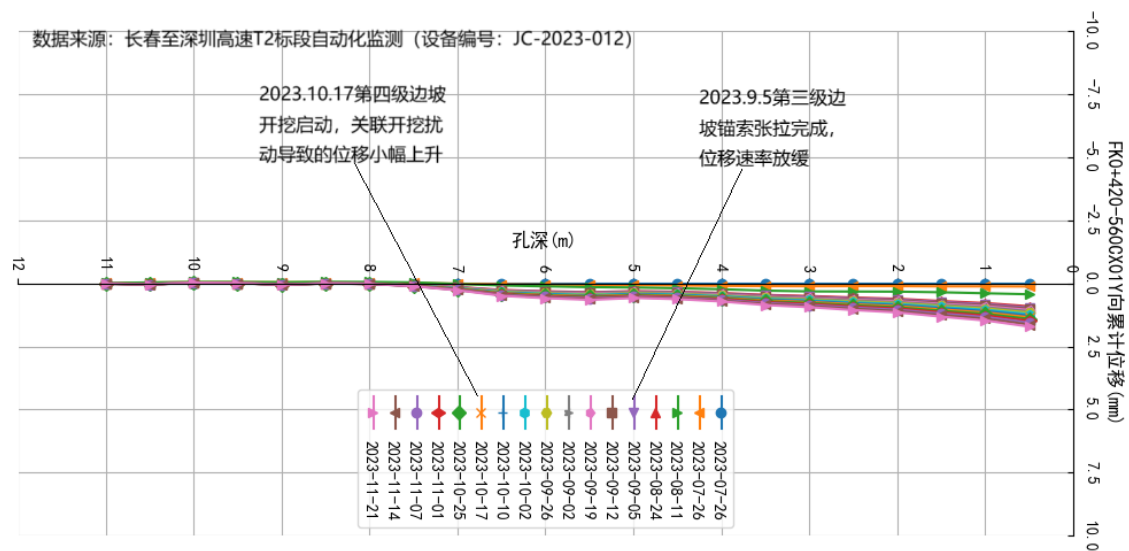


Figure 12. Cumulative displacement curve of monitoring time course
图 12. 监测时程累计位移曲线

2023-09-05 第三级锚索张拉后位移速率从 2.8 mm/d 降至 0.5 mm/d, 验证防护与加固效果良好; 2023-10-17 第四级边坡开挖启动(深度 15~20 m), 开挖扰动导致 X 向位移小幅上升 0.3 mm。

(2) 深层位移监测

深层位移监测通过测斜仪自下而上测量斜侧管变形, 了解高边坡深度方向水平位移。在监测部位埋斜侧管, 内装活动式测斜仪, 自动读数上传, 实时接收数据并绘制曲线, 斜侧管安装位置示意图如图 13 所示。

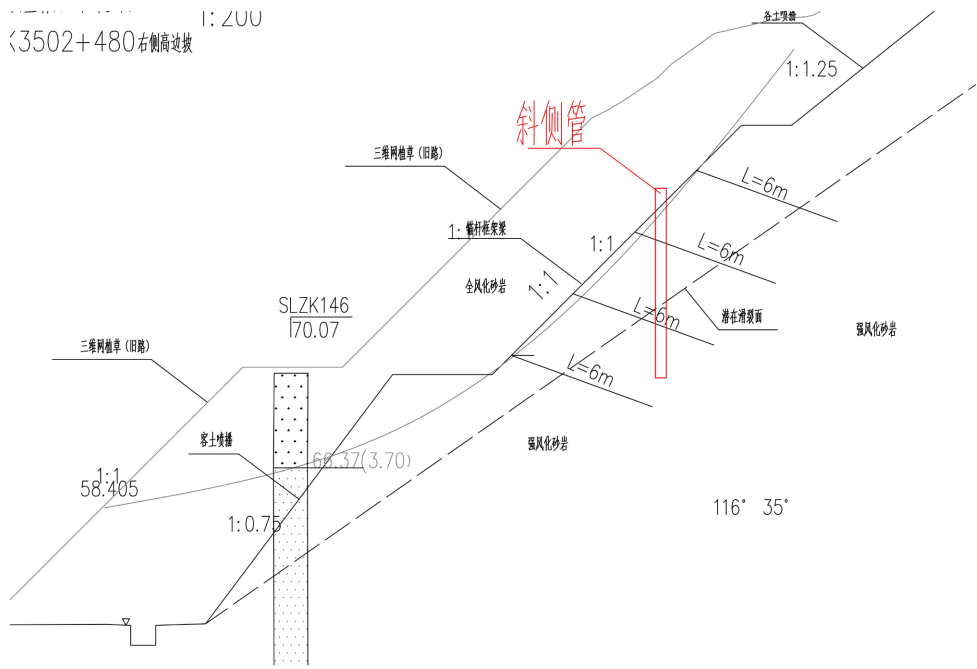


Figure 13. Schematic diagram of the installation position of the inclined side pipe
图 13. 斜侧管安装位置示意图

图 14 为 K3502 + 720~860 右侧边坡深层位移自动化监测累计位移曲线。

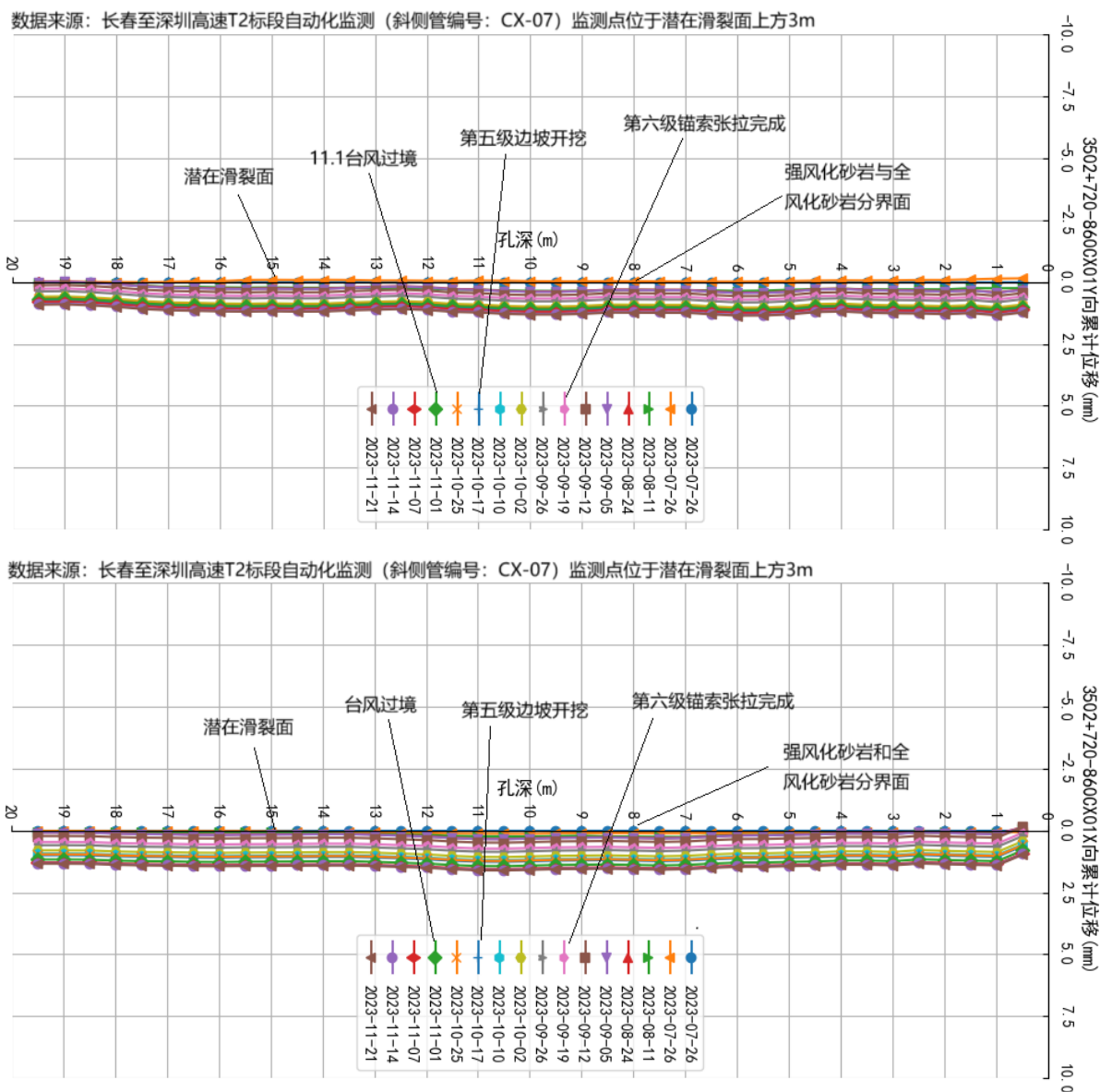


Figure 14. Cumulative displacement curve of monitoring time course

图 14. 监测时程累计位移曲线

2023-09-19 第六级锚索张拉完成(张拉力 350 kN), 张拉后 15 m 深度 X 向位移速率从 3.2 mm/d 降至 0.8 mm/d; 2023-10-17 第五级开挖后, 8 m 深度位移突增 1.1 mm (岩土层分界面扰动); 2023-11-01 台风后各深度位移趋稳, 最大波动 0.3 mm, 排水系统有效。

(3) 预应力锚索锚力监测

为监测锚索拉力变化, 分析受力及预应力损失规律, 项目安装锚索应力计, 如图 15, 图 16 所示。待锚固段与混凝土强度达标, 张拉前将测力计装于锚垫板与工作锚间, 张拉后人工或自动读数, 分析边坡稳定。

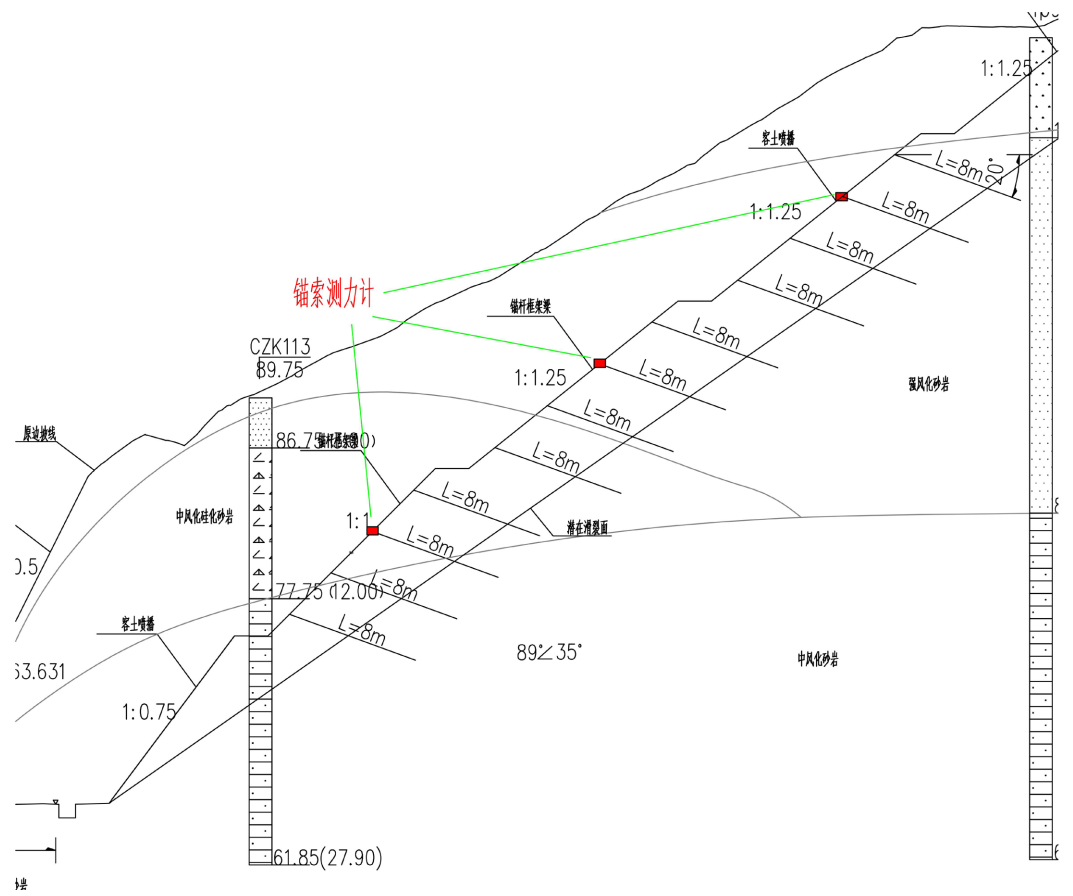


Figure 15. Schematic diagram of the installation position of the anchor cable dynamometer
图 15. 锚索测力计安装位置示意图

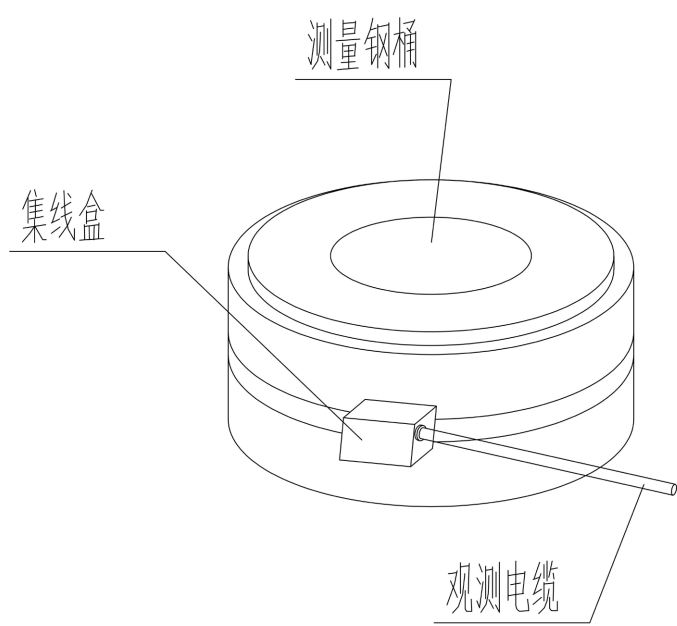


Figure 16. Schematic diagram of the structure of the anchor cable dynamometer
图 16. 锚索测力计结构示意图

(4) 智慧监控、监测系统

在边坡安装监控摄像头 24 小时监测，内容包括防护网、施工机械、人员及排水系统等情况，如图 17 所示，影像实时上传智慧监测系统，发现险情及时预警并通知处理。位移及锚索应力实施自动化监测，数据实时上传云端，由计算机系统储存、计算、管理并在云平台展示，如图 18 所示。监测组定期整理分析数据，预测坡体变形动态。



Figure 17. Slope surveillance camera

图 17. 边坡监控摄像头



Figure 18. Video surveillance and slope monitoring data are uploaded to the owner's integrated platform from time to time

图 18. 视频监控及边坡监测数据时时上传至业主单位的一体化平台

(5) 检测标准

边坡监测以稳定控制为主，达到预警的目的。因此须设定评判标准，一旦出现超过允许范围值，立即采取措施。边坡稳定性评价主要根据以下几点进行综合判断：

(a) 位移监测：土质边坡位移速率 $\geq 5 \text{ mm/d}$ ，累积位移值 $\geq 5 \text{ cm}$ ；石质边坡位移速率 $\geq 2 \text{ mm/d}$ ，累积位移值 $\geq 2 \text{ cm}$ ，深层位移监测：位移速率 $\geq 3 \text{ mm/d}$ ，累积位移值 $\geq 3 \text{ cm}$ ；

(b) 边坡开挖停止后位移速率呈收敛趋势；

(c) 坡面、坡顶有无开裂，裂缝的变化趋势情况；

(d) 预应力锚索锁定后力值稳定。

运用上述技术与常规技术其经济效益对比如表 1 所示：

Table 1. Comparison of economic benefits
表 1. 经济效益对比

项目	本技术	常规技术	节约效果
监测人力	0.2 人/边坡	2 人/边坡	↓90%
机械台班	229 个	458 个	↓50%
工期	18 个月	26 个月	↓30%
安全事故	0 起	3 起	100%避免

3. 工艺流程

高边坡施工具体工艺步骤如图 19 所示。

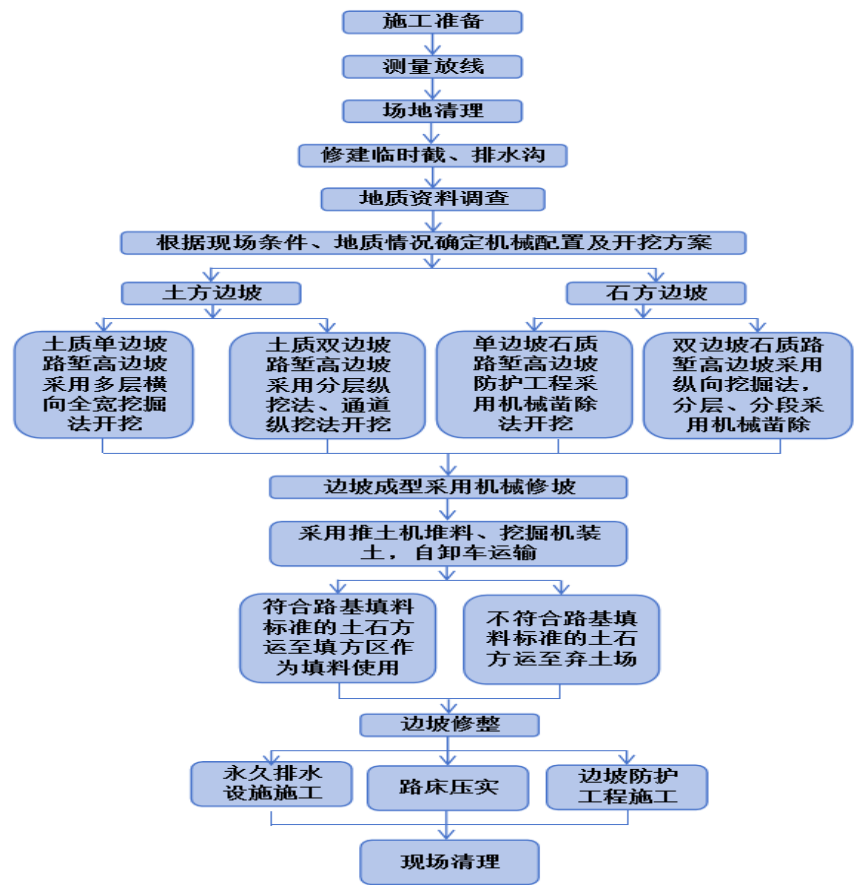


Figure 19. Overall construction flow chart of slope excavation
图 19. 边坡开挖总体施工流程图

4. 材料与设备

4.1. 材料

高边坡施工主要材料具体如表 2 所示。

Table 2. List of construction materials
表 2. 施工材料一览表

序号	材料名称	规格型号	用途
1	彩钢板围挡		高速旁防护
2	防护网		边坡平台防护
3	混凝土	C30	框格梁
4	C20 混凝土砌块	39 cm × 19 cm × 9 cm 19 cm × 19 cm × 9 cm	排水沟
5	水泥砂浆	M7.5、M30	排水沟、锚孔注浆
6	钢绞线	f _{pk} = 1860 MPa、Φ15.2 mm	锚索
7	锚具	OVM15-4 低回缩锚具	锚索
8	锚杆	HRB400、Φ32 mm	锚杆
9	钢筋	HRB400、HPB300	框格梁
10	客土草籽		边坡植草防护
11	绿网		边坡覆盖
12	模板	1.5 cm 厚竹胶板	框格梁模板
13	土工布	白色、0.6~0.9 mm 厚	混凝土养护

4.2. 机械设备

高边坡施工所需机械设备如表 3 所示：

Table 3. List of machinery and equipment
表 3. 机械设备一览表

序号	机械或设备名称	型号	用途
1	挖掘机	CAT-360	土方边坡开挖
2	风镐		清理石质边坡
3	破碎机	CAT-360	石方边坡开挖
4	泵车	37 米	浇筑混凝土
5	罐车	7 m ³	运输混凝土
6	运输车	15 m ³	运土
7	洒水车	9.7 m ³	洒水降尘
8	喷播机	WD-35 型	边坡植草防护
9	注浆机	ZKSY90	锚杆锚索孔注浆
10	锚固钻机	ZYMG2200	锚杆锚索钻孔
11	张拉千斤顶	YCW60B	锚杆锚索张拉
12	张拉油泵	ZB4-500	锚杆锚索张拉

5. 结论

本施工技术针对既有高速公路改扩建高边坡施工难题，融合智能监测、安全防护与环保技术，形成

系统性解决方案。

(1) 施工中通过彩钢板防护、防抛网设置及截水沟施工, 确保既有高速行车安全; 采用“开挖一级、防护一级”工艺, 结合 CAT-360 机械分级开挖, 保障边坡稳定与施工效率。

(2) 智能监测系统实现地表位移、深层位移及锚索应力 24 小时自动化监测, 预警精度达 0.1 mm, 相较传统人工监测节省 80% 人力。

(3) 工程应用中, 228.96 万 m³ 挖方节约机械台班 229 个, 降本 80 万元, 且边坡平顺度误差≤15 cm, 植被复绿率超 90%。

(4) 该技术在长深高速 T2 标段 10 处高边坡施工中验证了安全性与经济性, 为同类工程提供可复制的智能、安全、环保施工范式。

基金项目

中铁大桥局集团有限公司资助项目: 高速公路改扩建的绿色智能建造关键技术及应用(2025184)。

参考文献

- [1] 罗纳卿, 蒋铨隆. 高速公路高边坡自动化监测系统工程应用[J]. 土木工程, 2024, 13(4): 358-365.
- [2] 林伟. 工程监测技术在公路高边坡稳定性监测中的应用[J]. 工程建设与设计, 2025(11): 183-185.
- [3] 何枫, 高乐星. 山区高速公路高边坡全过程动态监测应用与分析[J]. 建筑安全, 2025, 40(3): 21-27.
- [4] 梁慧, 葛玉伟. 山区公路高边坡施工监测技术应用研究[J]. 市政技术, 2023, 41(12): 168-173+187.
- [5] 刘洋. 边坡稳定分析方法以及防治措施研究现状与应用综述[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 727-738.
- [6] 杨明瑞, 杨宝强, 马立秋. 基于极限平衡理论和有限元强度折减法的预应力锚索加固边坡稳定性分析研究[J]. 土木工程, 2017, 6(5): 515-524.
- [7] Sassa, K., Guzzetti, F. and Yamagishi, H., *et al.* (2018) Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57774-6>
- [8] 李小红. 公路施工中高边坡预应力锚索施工技术[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(7): 122-124.
- [9] 李鑫. 高速公路高边坡工程中预应力锚索施工技术的应用研究[J]. 运输经理世界, 2025(8): 37-39.
- [10] 但靖. 公路高边坡预应力锚索抗滑桩施工技术的应用[J]. 低碳世界, 2024, 14(10): 133-135.
- [11] Yadav, D.K., Karthik, G., Jayanthu, S. and Das, S.K. (2019) Design of Real-Time Slope Monitoring System Using Time-Domain Reflectometry with Wireless Sensor Network. *IEEE Sensors Letters*, 3, 1-4. <https://doi.org/10.1109/lens.2019.2892435>
- [12] Dou, Y., Yan, X., Li, T., Wang, M., Zheng, R. and Yuan, Y. (2025) Quality and Safety Management Framework for Intelligent Construction: Cases Study in China. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 29, Article 100068. <https://doi.org/10.1016/j.kscj.2024.100068>
- [13] 杨茂英. 公路高边坡安全施工探究[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(6): 125-127.
- [14] 崔凯, 葛玉宁, 王军. 施工期水库岸边坡安全监测自动化控制系统研究[J]. 土木工程, 2021, 10(11): 1123-1128.
- [15] 顾小华, 丁国栋, 刘胜, 赵方莹. 一种新型的高速公路边坡生态防护技术[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 106-107+180.