

文章编号: 1674—8247(2025)02—0076—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.012

## 隧道洞口偏压高陡边坡 TF 横交锚固桩技术

张湘平<sup>1,2</sup> 张展硕<sup>3</sup> 赵志涛<sup>2</sup> 张 馨<sup>2</sup>

(1. 天津大学, 天津 300072; 2. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222;  
3. 河南理工大学, 河南焦作 454000)

**摘 要:**隧道施工中,因山区地形地貌复杂,岩层破碎、松散等地质条件,导致隧道工程施工困难,其中较为突出的是隧道洞口人字大陡边坡大偏压、大变形的问題。针对某高速铁路隧道出口端因偏压导致的初期支护开裂、拱架变形等问題,提出一种新型的 TF 型横交锚固桩,并基于 TF 型横交锚固桩提出防治隧道边坡大偏压、大变形的一种综合加固技术。通过后期现场监测得出,所有观测桩位移率均低于 5 mm/d,沉降率均低于 5 mm/d,所有观测桩累计位移、沉降值均小于 100 mm,且趋于稳定。TF 型横交锚固桩综合加固技术能有效解决大偏压造成隧道出口的大变形问題,降低隧道施工期及高速铁路运营期的安全风险。TF 型横交锚固桩综合加固技术可为隧道洞口段的施工问題提供新的解决思路。

**关键词:**隧道洞口;浅埋偏压;边坡稳定;TF 型横交锚固桩

中图分类号:U455

文献标志码:A

76

## TF-type Transverse Anchor Pile Technology for High and Steep Slopes with Unsymmetrical Pressure at Tunnel Portals

ZHANG Xiangping<sup>1,2</sup> ZHANG Zhanshuo<sup>3</sup> ZHAO Zhitao<sup>2</sup> ZHANG Xin<sup>2</sup>

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China;  
3. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Tunnel construction often encounters difficulties due to complex topographical and geological conditions in mountainous areas, such as fractured and loose rock formations. Among these challenges, the most prominent issues are the large unsymmetrical pressure and deformation of steep, herringbone slopes at tunnel portals. To address cracking in the initial support and deformation of the form for tunnel lining at the exit end of a high-speed railway tunnel caused by unsymmetrical pressure, a novel TF-type transverse anchor pile was proposed. Furthermore, a comprehensive reinforcement technique based on the TF-type transverse anchor pile was introduced to prevent and control large unsymmetrical pressure and deformation in tunnel slopes. Field monitoring conducted subsequently revealed that the displacement rate of all observation piles was below 5 mm/d, the settlement rate was less than 5 mm/d, and the cumulative displacement and settlement values of all observation piles were less than 100 mm, with a trend towards stability. The comprehensive reinforcement technique using TF-type transverse anchor piles can effectively resolve the large deformation issues at tunnel exits caused by unsymmetrical pressure, thereby reducing safety risks during tunnel

收稿日期:2024-03-18

作者简介:张湘平(1993-),男,工程师。

引文格式:张湘平,张展硕,赵志涛,等.隧道洞口偏压高陡边坡 TF 横交锚固桩技术[J].高速铁路技术,2025,16(2):76-82.

ZHANG Xiangping, ZHANG Zhanshuo, ZHAO Zhitao, et al. TF-type Transverse Anchor Pile Technology for High and Steep Slopes with Unsymmetrical Pressure at Tunnel Portals[J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2):76-82.

construction and high-speed railway operation. This technique provides a new solution for addressing construction problems in tunnel portal sections.

**Key words:** tunnel portal; shallow-buried unsymmetrical pressure; slope stability; TF-type transverse anchor pile

随着我国基建工程的迅速发展,高速铁路建设重心逐渐向西部地区转移,山区隧道工程已成为铁路建设中的关键。隧道洞口明挖段和浅埋段常为高边坡偏压不对称结构,且围岩风化严重,压力分布不均<sup>[1-3]</sup>,开挖易造成明挖段岩质高边坡变形、节理面剪切滑移失稳等现象,造成巨大的经济损失和安全事故。

国内外学者从不同角度对浅埋偏压隧道进行研究。张军等<sup>[4]</sup>发现浅埋超大跨隧道洞口段施工中导洞核心土的开挖是控制围岩变形的关键工序,洞口段偏压会导致围岩拱脚局部应力集中。钟昌桂等<sup>[5]</sup>考虑隧道洞口仰坡坡度、危岩高度、危岩发育程度、危岩大小、落石冲击力、落石区与铁路工程位置关系等关键因素,采用定性和定量相结合的方法构建初始风险评价体系。张小林等<sup>[6]</sup>针对区域构造条件、现场钻孔天然气测试及室内试验 3 方面结果进行分析,研究表明浅层天然气将给隧道带来较大安全隐患,隧道勘察设计期间有必要开展关于浅层天然气的专项勘察研究。姜冰等<sup>[7]</sup>以贵州玉石高速公路白岩湾隧道进口段施工为例,通过三维数值模拟对超前管棚、偏压挡墙联合支护方案进行模拟分析,结合实际工程监测对比验证了支护方案的可靠性。张惠民<sup>[8]</sup>针对复杂地质条件下的大断面隧道洞口段支护参数进行研究,通过 FLAC3D 软件模拟了不同隧道埋深与不同支护措施加固下隧道洞口与边坡的稳定性,研究结果表明:当隧道埋深超过 25 m 后对边坡的影响不再明显;支护措施强度越大对隧道结构变形控制越显著,但对边坡稳定性的影响有限。卢光兆<sup>[9]</sup>、周玉宏等<sup>[10]</sup>针对破碎岩体浅埋偏压隧道围岩稳定性问题和进洞工法的选取进行研究。刘小军等<sup>[11]</sup>针对围岩失稳、仰坡开裂滑塌和支护变形等问题,对隧道 CRD 法开挖工序进行优化并提出了相应的科学治理措施。目前山岭隧道所处的施工环境均较为复杂,为保证施工安全问题,浅埋偏压隧道进洞施工方案均相对较保守,大多采用围岩超前加固措施。但针对某些特殊工程情况,现有方案和理念不能满足实际需求,需对隧道进洞施工技术进行优化。

以某高速铁路隧道洞口段出现大偏压、初支开裂、拱架变形为工程背景,针对人字高陡边坡失稳、偏压软弱围岩导致垂直桩蠕移等问题,提出一种 TF 型横交锚固桩,并基于 TF 型桩提出防治隧道边坡大偏压、大变形的一种方法。通过布设地表位移监测点对隧道关键点进行变形监测,验证 TF 型横交锚固桩综合加固

技术的有效性,以期同类型偏压隧道施工提供参考。

## 1 工程概况

某高速铁路隧道出口 DK 497 + 554 ~ DK 497 + 658.55 段,长 104.55 m。所在地区属构造侵蚀剥蚀地貌,区内地势总体呈现中间高两侧低的态势,地形较为复杂,如图 1 所示。该段地层岩性主要为页岩,局部夹黑色碳质页岩,灰绿色、黑灰色、泥质薄层状构造。节理裂隙发育密集,风化严重,岩体挤压破碎严重,岩质较软,岩层透水性强,遇水软化呈泥状,易造成隧道开裂变形,掌子面自稳能力较差。地表水主要为河水及沟水,雨季伴有洪水,洪水量受大气降水影响变化较大。施工沿线地下水为第四系孔隙水、基岩裂隙水、构造裂隙水、松散堆积层孔隙水。

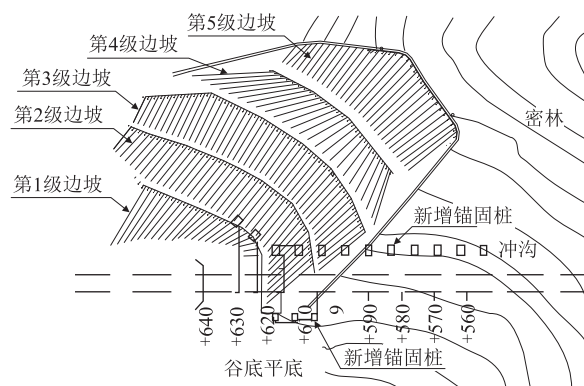


图 1 隧道出口段图

隧道段原设计为 V 级围岩,采用 Vc 型复合式衬砌,三台阶加临时仰拱施工。洞口及明洞段永久边仰坡采用 5 级锚杆框架梁防护,明洞右侧山体段设置 6 根预加固桩,洞口原设计防护,如图 2 所示。

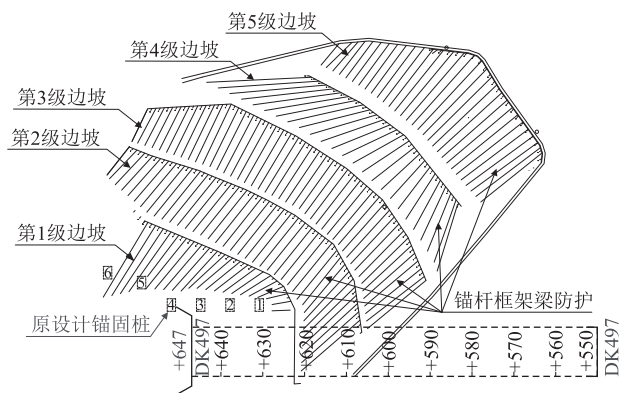


图 2 洞口原设计防护图

隧道从出口按原设计方案开挖、初期支护 63 m 后发现线路右侧变形严重,伴随 50 ~ 180 mm 的左向位移,初期支护开裂,拱架变形。为防止变形、位移继续发展,掌子面开挖停止,施工二次衬砌进行掌子面回填反压,二次衬砌施工到 31 m 时,停止出口端施工。在隧道施工的同时,历时 4 个月完成了出口段右侧山坡的锚杆框架梁施工,原设计施工后隧道洞口。经半年观测发现,山坡上出现多处 5 ~ 30 mm 的裂缝,同时有 10 多处框架梁断裂。

框架梁为现浇钢筋混凝土框架梁,坡率 1:1.5,正方形布置,节点处设置锚杆,框架梁内采用土工网垫客土植生绿化,节点间距  $D = 3.0$  m,截面宽 0.4 m,高 0.35 m,嵌土深 0.2 m,锚杆采用 HRB400 $\phi$ 32 mm 钢筋制作,长 8 m,锚杆体与水平面夹角  $15^\circ \sim 25^\circ$ ,配合框架梁使用,锚头采用弯钩与框架梁主筋焊接或绑扎牢固,锚杆锚孔为 90 ~ 110 mm,注浆材料采用 M30 水泥砂浆。

## 2 隧道洞口偏压高陡边坡综合防治施工技术

针对隧道施工过程中初期支护开裂、拱架变形、框架梁断裂等问题,提出以下解决思路:在隧道上部山体表面找一合适位置开斜井,从斜井向隧道正线出口方向施工,可在向出口方向软弱围岩偏压段进行施工的基础上,解决工期紧张问题。重新对“人”字大陡边坡的防护进行设计,隧道两边增加抗滑桩,解决出口段软弱围岩大偏压问题,通过增加边坡长锚索,解决边坡稳定问题。为防止预加固桩在人工挖孔时边坡失稳,影响施工安全,应需先进行边坡的锚杆(索)框架梁施工<sup>[12]</sup>,再施工预加固桩。具体施工流程如图 3 所示。

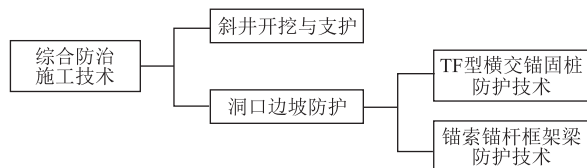


图3 施工流程图

### 2.1 斜井

在出口段线路右侧增设 1 座长 275 m 的斜井,斜井处于里程 DK 497 + 000 与正洞相交  $53^\circ$ ,纵坡 10%,净空断面 5.6 m  $\times$  6.0 m,如图 4 所示。

斜井向大里程方向施工时,从里程 DK 497 + 530 处开始,线路右边设立拱架,每榀拱架增加两组(每组 2 根)长 20 m 的锚索互抱拱架,设于隧道线路右侧即大偏压的一侧,如图 5 所示。注浆后,施加 3 ~ 5 t 预应

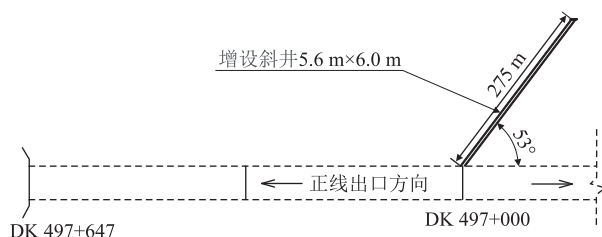


图4 增设斜井示意图

力,两边各用 3 个卡子锁住,以此增加第一锚索与拱架之间的稳定性,如图 6 所示。为确保安全,初期支护应及时成环,二次衬砌距离掌子面不超过 30 m。

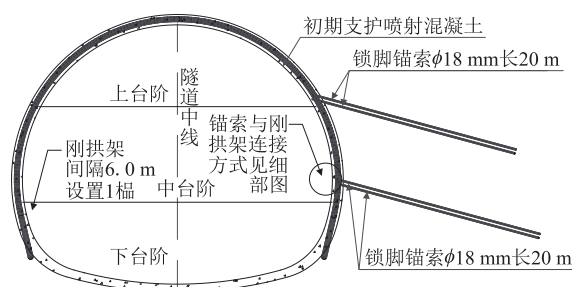


图5 钢架锚索图

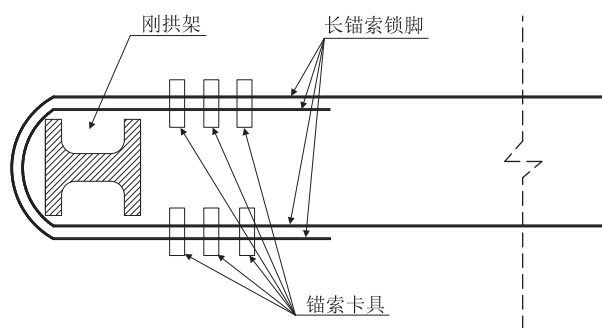


图6 连接细部图

通过设置拱架,对隧道内部进行支撑,增强隧道掌子面的稳定性;由于大偏压作用,位于大偏压一侧的隧道受到的压力大,每个拱架设置两组第一锚索,第一锚索设于隧道大偏压的一侧,通过施加与大偏压产生压力相反的拉力,防止隧道在大偏压下蠕移,解决大偏压造成隧道出口的大变形问题。洞内初期支护时,大偏压一侧采用第一锚索与拱架反锁,提高了支撑能力,保证初期支护和二次衬砌结构安全。

### 2.2 边坡防护

#### (1) TF 型横交锚固桩

设计一种 TF 型桩,包括 1 个竖桩编号 13、2 个第一横桩编号 14 和 1 个第二横桩编号 15,任一第一横桩一端固定于竖桩同侧,2 个第一横桩平行设置,第一横桩垂直于竖桩;第二横桩垂直设于靠近竖桩底部的

一个第一横桩,第二横桩设于第一横桩远离竖桩的一端,第二横桩轴向与竖桩轴向垂直。TF 型桩结构示意图如图 7 所示。

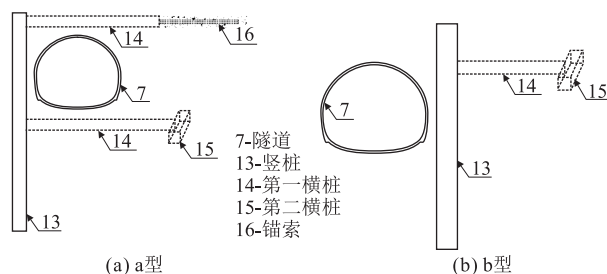


图 7 TF 型桩示意图

TF 桩的竖桩安装在隧道侧面,起抗滑桩作用,防止隧道两侧软弱围岩滑落。2 个第一横桩,设于隧道上方,第二横桩设于隧道下方,通过将隧道上下进行支撑,增强隧道支撑能力。TF 横交锚固桩布置如图 8 所示。

沿隧道左右线两侧边坡增加 15 根 TF 横交锚固桩,隧道大偏压一侧的 TF 型桩数量大于另一侧隧道。

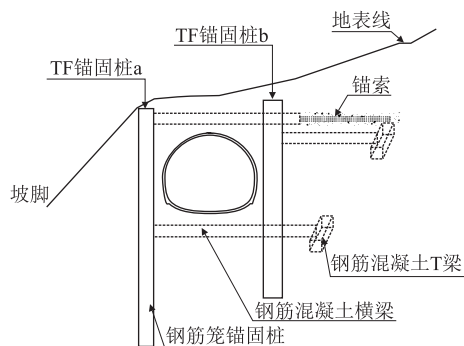


图 8 TF 横交锚固桩布置图

DK 497 + 605.45 ~ DK 497 + 618.95 段,长 13.5 m,线路左侧设置 3 根 TF 锚固桩 a,桩间距为(中~中) 6.0 m,桩长 20~22 m,桩截面均为 2.25 m × 1.50 m,桩靠线路侧边缘距左线线路中心距离均为 6.375 m。DK 497 + 554 ~ DK 497 + 631.7 段,长 77.7 m,为隧道大偏压一侧。线路右侧设置 12 根锚固桩,桩间距(中~中) 7.0 m,桩长 28~30 m,桩截面均为 3 m × 2 m,桩靠线路侧边缘距左线线路中心距离均为 11.00 ~ 19.89 m。TF 横交锚固桩纵断面如图 9 所示。

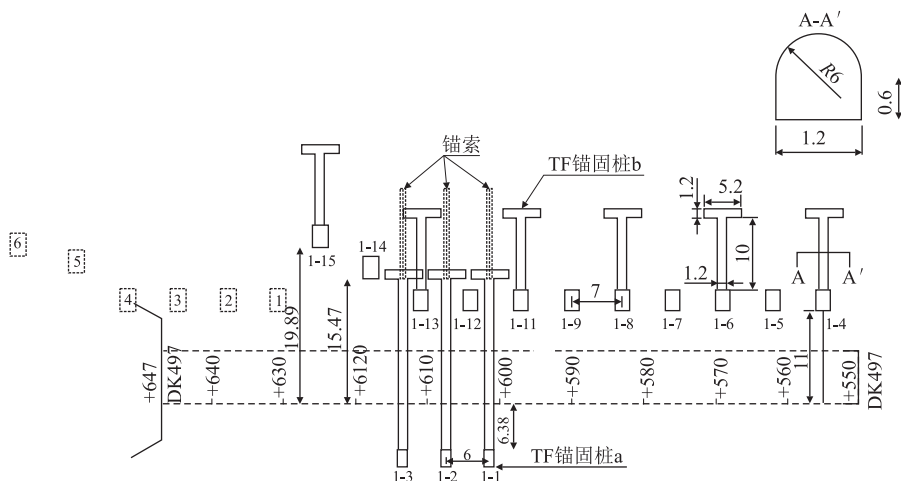


图 9 TF 横交锚固桩纵断面示意图 (m)

锚固桩桩井施工时,对土层及岩层设置锁口、护壁。锁口、护壁采用 C20 钢筋混凝土浇筑,桩身采用 C35 钢筋混凝土灌注。桩身须间隔两根桩开挖。锚固桩在一定深度设置横交桩,横交桩净空 1.2 m × 1.8 m,配置钢筋。通过设置锁口和护壁,对所挖桩井墙壁施压,将其固定,保证桩井的形状不变,增加桩井的稳定性,防止桩井坍塌。

## (2) 锚杆、索框架

将隧道出口上方边坡从上到下依次划分为第 5 级边坡、第 4 级边坡、第 3 级边坡、第 2 级边坡、第 1 级边坡,每一级边坡在原有框架梁中部增加锚杆、锚索框架梁加固。总体示意如图 10 所示。

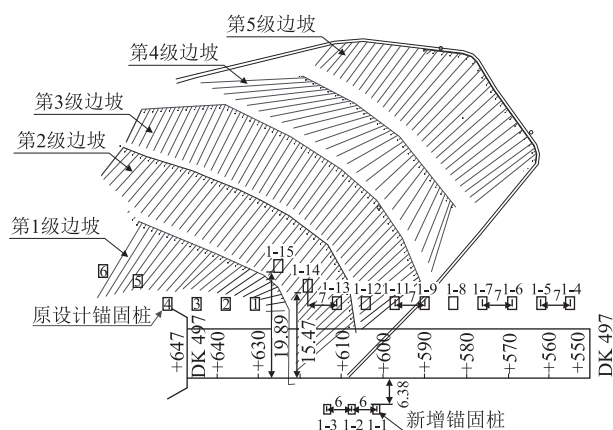
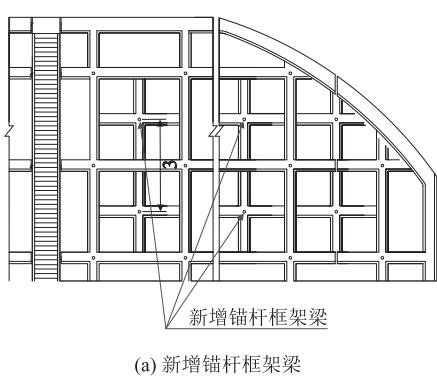


图 10 边坡防护示意图 (m)



DK 497 + 598.5 ~ DK 497 + 658.55,线路右侧,长 60.55 m,对已施工的第 4 级~第 5 级边坡锚杆框架梁中部增加锚杆框架梁加固。框架梁采用人工挖槽嵌入坡面内,框架梁节点上设置锚杆,锚杆采用两根  $\phi 32$ HRB400 螺纹钢筋制作,长 12 m,锚杆钢筋表面刷环氧树脂涂料封闭。锚孔与水平方向下倾角夹角  $20^{\circ}$ ,锚孔  $\phi 130$  mm,采用干钻,孔内灌注 M35 水泥砂浆,注浆压力不小于 0.4 MPa。新增锚杆框架梁坡面示意如图 11(a)所示。



DK 497 + 598.5 ~ DK 497 + 658.55,线路右侧,长 60.55 m,在已施工的第 3 级边坡框架梁中部增加锚索框架梁加固。框架梁采用 C35 钢筋混凝土浇筑。框架梁节点处设置锚索,共布置锚索 165 孔,锚索均采用 4 束高强度,低松弛  $\phi 15.2$  mm 钢绞线制作,锚索孔  $\phi 115$  mm,锚孔与水平方向下倾角夹角  $18^{\circ}$ ,锚索长度由锚固段、自由段和张拉段组成,锚固段长 10 m,张拉段长 1.5 m,锚索注浆材料选用 M35 水泥砂浆,注浆压力不小于 0.6 ~ 0.8 MPa,如图 11(b)所示。

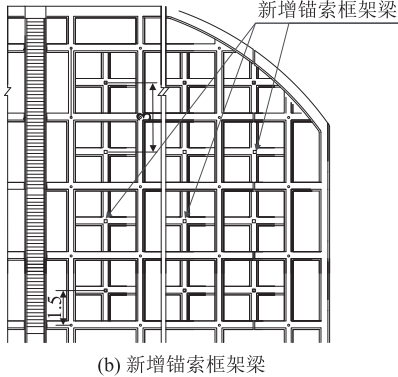


图 11 新增框架梁坡面示意图 (m)

3 现场监测

隧道出口 DK 497 + 554 ~ DK 497 + 658.55 段在第 1 级~第 5 级边坡位置,布设 13 个地表位移监测点,在图 11 中选取桩编号为 1 号、3 号、5 号、1-4 号、1-8 号、1-12 号、1-14 号的桩顶设置位移检测,桩顶位移监测仪器选用全站仪精度指标 ( $1''$ ,  $\pm (1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ )或双频 CPS 接收机实施监测,其水平和垂

直位移精度达到  $\pm 5 \text{ mm} \sim \pm 10 \text{ mm}$ 。施工过程中监测 1 次/周,汛期监测 2 次/周,出现重大情况时加密监测、巡视检查频率。竣工后,监测 1 次/月,监测期 1 a。竣工后位移观测数据如表 1 所示,沉降观测数据如表 2 所示。

根据竣工后检测仪器的监测数据绘制位移、沉降速率曲线,如图 12 所示。累计位移、沉降曲线如图 13 所示。

表 1 竣工后位移观测数据表

编号	测桩位置	位移/mm									
		4-1	5-1	6-1	7-1	8-1	9-1	10-1	11-1	12-1	累计
1	1 号桩顶	0.9	3.0	1.2	-0.4	5.7	-1.9	-0.2	2.7	-2.7	8.2
2	3 号桩顶	0.3	5.2	4.2	-1.1	4.7	-1.6	2.3	-1.1	5.2	18.3
3	5 号桩顶	-2.6	-0.6	-1.5	0.2	3.4	3.0	0.8	1.7	4.5	8.7
4	1-4 号桩顶	-1.8	5.6	-0.1	5.3	2.8	-1.9	3.2	-1.2	1.3	13.1
5	1-8 号桩顶	-1.4	-0.2	1.0	1.0	-0.2	-1.9	2.2	-1.8	-1.3	-2.7
6	1-12 号桩顶	3.7	-0.3	-3.2	-0.7	1.7	5.4	4.6	4.5	3.2	18.7
7	1-14 号桩顶	-1.4	-1.5	3.2	3.9	4.4	5.8	3.5	-2.1	-1.8	14.0
8	第 1 级边坡	-3.2	7.3	-3.3	7.1	0.4	3.3	4.9	-0.6	6.0	21.9
9	第 2 级边坡	6.5	3.2	4.2	6.4	2.5	3.6	3.6	1.7	-0.2	31.6
10	第 3 级边坡	2.0	-2.9	5.2	7.1	3.0	5.2	-0.4	1.9	1.1	22.1
11	第 4 级边坡	1.1	7.2	-3.3	-2.6	7.0	6.6	3.0	-1.6	-2.4	15.0
12	第 5 级边坡	6.1	5.6	5.5	2.6	6.1	-2.1	5.0	6.9	-1.2	34.3

表2 竣工后沉降观测数据表

编号	测桩位置	沉降/mm									
		4-1	5-1	6-1	7-1	8-1	9-1	10-1	11-1	12-1	累计
1	1号桩顶	1.9	3.0	1.7	2.1	2.2	0.5	0.0	2.2	2.3	15.8
2	3号桩顶	4.0	3.3	0.4	-0.6	3.9	1.2	2.9	0.0	0.5	15.6
3	5号桩顶	2.5	-0.8	3.0	-0.3	3.7	2.1	3.0	1.5	2.8	17.5
4	1-4号桩顶	3.0	-0.7	3.2	3.3	3.0	0.8	2.5	0.6	2.2	17.8
5	1-8号桩顶	1.9	1.4	3.0	3.3	3.0	0.0	-0.9	3.0	1.1	16.0
6	1-12号桩顶	2.1	3.1	0.8	2.7	1.7	3.6	2.1	3.1	-1.0	18.2
7	1-14号桩顶	0.1	3.5	1.4	1.4	1.1	4.0	1.4	-0.3	-0.1	12.4
8	第1级边坡	2.9	5.6	5.1	0.8	1.7	2.3	3.3	2.1	3.8	27.8
9	第2级边坡	3.9	3.9	4.2	3.5	0.4	3.2	3.2	1.3	5.6	29.1
10	第3级边坡	4.6	1.5	2.6	2.9	3.4	-1.0	2.3	3.9	5.0	25.0
11	第4级边坡	0.8	2.7	-0.5	2.4	4.2	0.1	2.2	3.3	2.9	18.0
12	第5级边坡	2.6	-0.7	2.0	3.2	3.6	1.5	5.0	2.7	3.1	23.0

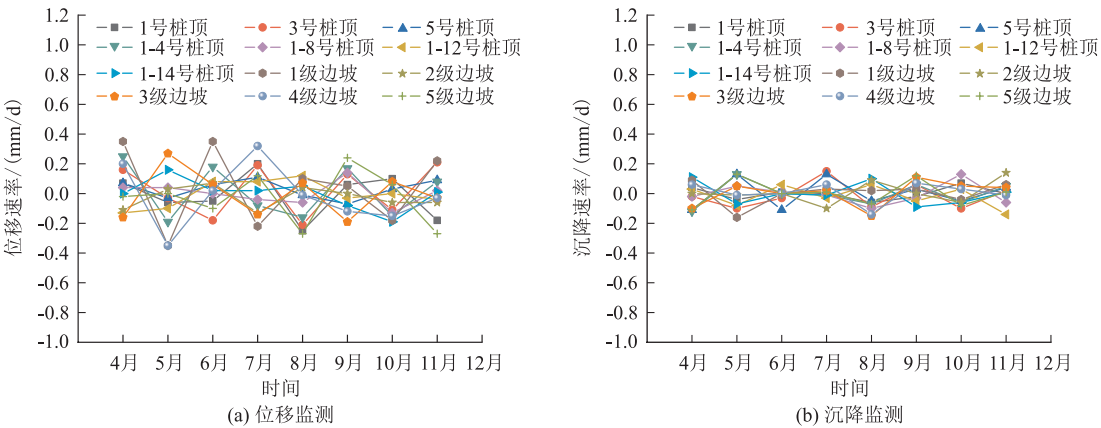


图12 速率监测曲线图

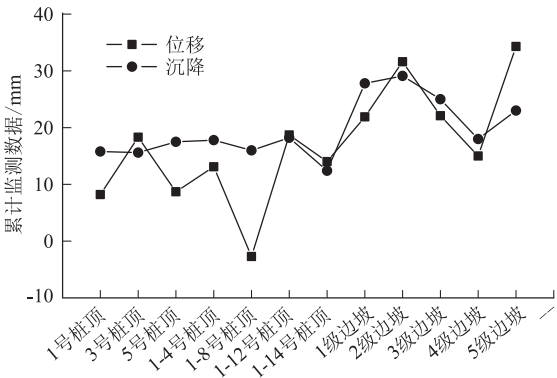


图13 累计监测曲线图

通过竣工后9期数据计算得出日位移、沉降速率。分析可知,第1级边坡处观测桩位移速率最大为0.04 mm/d,平均位移速率为0.017 mm/d,所有观测桩位移率均低于5 mm/d,满足设计要求;1-12号桩顶处观测桩沉降速率最大为-0.015 mm/d,平均沉降速

率为0.05 mm/d,所有观测桩沉降率均低于5 mm/d,满足设计要求。第5级边坡处观测桩累计位移值最大为34.3 mm,第2级边坡处观测桩累计沉降值最大为29.1 mm,所有观测桩累计位移、沉降值均小于100 mm,且趋于稳定,满足设计要求。

4 结论

本文以某高速铁路隧道出口端因偏压导致的初期支护开裂、拱架变形为背景,通过研究分析提出了一种新型的TF型横交锚固桩,基于TF型横交锚固桩提出防治隧道边坡大偏压、大变形的一种综合加固技术,解决了隧道洞口偏压变形问题。得到主要结论如下:

(1)通过设置斜井继续向隧道内施工,同时对隧道出口方向的软弱围岩偏压段施工,解决工期紧张问题,减少隧道出口段边坡整治对工期的影响,节约了人工、机械窝工等综合成本。

(2) 针对隧道洞口“人”字大陡边坡大偏压、大变形的问題,提出一种新型的 TF 型桩,在边坡设置 TF 型桩,将隧道设于 2 个第一横桩之间,增强了传统采用单纯垂直桩的受力特性,提高了抗滑能力,防止了隧道在大偏压下蠕移,解决了大偏压造成隧道出口的大变形问题。

(3) 基于 TF 型桩防治隧道边坡大偏压、大变形方法,将边坡划分为第 1 级~第 5 级,对第 5 级边坡和第 4 级边坡的框架梁设置锚杆框架梁加固,对第 3 级边坡的框架梁设置锚索框架梁加固。

(4) 通过布设地表位移监测点对现场进行监测,监测结果表明,TF 型横交锚固桩综合加固技术能够解决隧道边坡大偏压、大变形问题,有效降低了隧道施工期及高速铁路运营期的安全风险。

## 参考文献:

- [1] 张富有,黄守辉,于野.公路隧道浅埋、偏压段施工技术应用[J].公路,2018,63(10):149-157.  
ZHANG Fuyou, HUANG Shouhui, YU Ye. Application of Construction Techniques in Shallow-buried and Biased Sections of Highway Tunnel[J]. Highway, 2018, 63(10): 149-157.
- [2] 许王亮.大断面隧道浅埋偏压洞口段施工关键技术及应用[J].工程建设与设计,2022(21):159-161.  
XU Wangliang. Analysis on Key Construction Technology and Application of Shallow Buried Bias Tunnel Entrance Section of Large Section Tunnel [J]. Construction & Design for Engineering, 2022(21): 159-161.
- [3] 张杨,邵鹏哲,刘明昌.某水电站公路隧道浅埋偏压段施工技术研究[J].水电站设计,2022,38(3):42-45.  
ZHANG Yang, SHAO Pengzhe, LIU Mingchang. Research on Construction Technology of Shallow-buried Biased Section of Highway Tunnel at One Hydropower Station[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2022, 38(3): 42-45.
- [4] 张军,麻建飞,刘夏冰,等.浅埋超大跨隧道洞口段围岩稳定性研究[J].高速铁路技术,2023,14(6):7-12,18.  
ZHANG Jun, MA Jianfei, LIU Xiabing, et al. A Study on Rock Stability in Portal Section of Shallow Extra-large-span Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 7-12, 18.
- [5] 钟昌桂,张磊,周良.高速铁路隧道洞口危岩落石灾害评价方法及工程对策研究[J].高速铁路技术,2022,13(6):84-91.  
ZHONG Changgui, ZHANG Lei, ZHOU Liang. A Study on Evaluation Method and Engineering Countermeasures of Dangerous Rockfall Disaster at Tunnel Portal of High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 84-91.
- [6] 张小林,应黎,冯君.浅层天然气对浅埋隧道安全性的影响研究[J].高速铁路技术,2019,10(5):73-76.  
ZHANG Xiaolin, YING Li, FENG Jun. Study on Influence of Shallow Natural Gas on Safety of Shallow-buried Tunnels [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(5): 73-76.
- [7] 姜冰,常树芳,王方立,等.浅埋偏压隧道洞口联合支护变形监测及模拟[J].交通科学与工程,2021,37(4):78-84,107.  
JIANG Bing, CHANG Shufang, WANG Fangli, et al. Deformation Monitoring and Numerical Simulation of Combined Support at Portal of Shallow Buried Bias Tunnel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4): 78-84, 107.
- [8] 张惠民.复杂地质条件下大断面隧道洞口段支护参数研究[J].公路,2020,65(3):344-348.  
ZHANG Huimin. Study on Support Parameters of Large Section Tunnel Entrance Section under Complex Geological Conditions [J]. Highway, 2020, 65(3): 344-348.
- [9] 卢光兆,周博,徐锋,等.浅埋偏压隧道进洞施工围岩稳定分析[J].山东大学学报(工学版),2021,51(4):61-70.  
LU Guangzhao, ZHOU Bo, XU Feng, et al. Stability Analysis and Construction Mechanics of Shallow Buried Bias Tunnel Openings [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(4): 61-70.
- [10] 周玉宏,赵燕明,程崇国.偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):679-683.  
ZHOU Yuhong, ZHAO Yanming, CHENG Chongguo. Optimum Analysis on the Construction Process for Joint Arch Tunnels in Partial Pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 679-683.
- [11] 刘小军,张永兴,高世军,等.软弱围岩隧道洞口段失稳机制分析与处置技术[J].岩土力学,2012,33(7):2229-2234.  
LIU Xiaojun, ZHANG Yongxing, GAO Shijun, et al. Mechanism Analysis and Treatment Technique of Surrounding Rock Instability for Tunnel Portal Section in Weak Surrounding Rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2229-2234.
- [12] 吕兴彬.锚索框架梁在山区公路高边坡防护中的应用[J].交通世界,2016(10):94-95.  
LV Xingbin. Application of Anchor Cable Frame Beam in High Slope Protection of Mountain Highway [J]. Transport World, 2016(10): 94-95.