

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

含断层偏压隧道围岩变形机理及支护方案优化

刘晓龙,孙 闯,王 慧,张维明,郑兴炫,王毅婷

Deformation mechanism and optimum supporting structures in fault-bearing biased tunnels

LIU Xiaolong, SUN Chuang, WANG Hui, ZHANG Weiming, ZHENG Xingxuan, and WANG Yiting

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306014

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

隧道洞口浅埋偏压段两种围岩注浆措施的抗震效果分析

Anti-seismic effect analysis of two kinds of surrounding rock grouting measures in the shallow and eccentric pressure section of tunnel portal

崔光耀, 宋博涵, 肖剑, 王道远 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 98-104

基于理想点--可拓云模型的隧道围岩稳定性评价

Stability evaluation of tunnel surrounding rock based on ideal point-extension cloud model 何乐平, 罗舒月, 胡启军, 蔡其杰, 李浴辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 126-134

强震区隧道软弱围岩洞口段桩--筏抗震措施的作用效果分析

Analysis on the effect of pile-raft anti-seismic measures for the tunnel section of weak surrounding rock in strong earthquake area 崔光耀, 李鹏宇, 王庆建 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 106-112

滇中香炉山引水隧洞工程区地应力场特征及断裂影响模糊综合评价

Characteristics of in-situ stress field and fuzzy comprehensive evaluation of the influence of active faults on the water diversion engineering of Xianglushan Tunnel Area in central Yunnan 付平, 张新辉, 刘元坤, 尹健民, 徐春敏 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 123–132

基于DIC分析的含石量对碎石土边坡稳定性影响

Influences of stone content on stability of gravel soil slope based on DIC analysis

陆烨,黄越川 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 49-57

地震与强降雨作用下堆积体滑坡变形破坏机理及防治方案分析

Deformation and failure mechanism and analysis on prevention measures of colluction landslide under earthquake and heavy rainfall 胡爱国, 周伟 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(1): 27–34



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306014

刘晓龙,孙闯, 王慧, 等. 含断层偏压隧道围岩变形机理及支护方案优化[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(1): 108-118. LIU Xiaolong, SUN Chuang, WANG Hui, et al. Deformation mechanism and optimum supporting structures in fault-bearing biased tunnels[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(1): 108-118.

含断层偏压隧道围岩变形机理及支护方案优化

刘晓龙1,孙 闯1,王 慧2,张维明3,郑兴炫3,王毅婷2

(1. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中建七局工程安装有限公司,

河南 郑州 450000; 3. 中铁十六局集团第一工程有限公司, 北京 101300)

摘要:为探明复杂地质条件下隧道围岩变形机理,制定相适应的围岩变形控制技术,以清泉隧道为工程依托,对偏压隧道 洞口段围岩变形进行分析,基于FLAC^{3D}研究有无断层条件下不同支护状态围岩稳定性,明确围岩变形机理并提出控制措 施。研究表明:(1)偏压效应下后行洞开挖扰动使上覆围岩与断层带相交层面张开、层间岩体弯折破裂,围岩应力重分布 且断层破碎带进一步恶化,导致围岩变形严重;(2)软弱围岩自稳能力差,二次应力作用使得小净距隧道顶拱、边墙围岩 产生可持续塑性变形,伴随着时间效应,对支护结构逐渐产生挤压变形,现有支护方案不能提供足够的支护强度和刚度 以抵抗围岩变形;(3)提出的坡面锚索+深埋侧抗滑桩复合控制措施,可有效控制围岩变形,减弱断层破碎带恶化对围岩 稳定性影响,数值计算结果与现场监测结果较为吻合。研究结果可为类似复杂地质条件下隧道围岩变形控制提供参考。 关键词:偏压隧道;断层破碎带;围岩变形机理;数值计算;稳定性控制

中图分类号: U451+.2; P694 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2025)01-0108-11

Deformation mechanism and optimum supporting structures in fault-bearing biased tunnels

LIU Xiaolong¹, SUN Chuang¹, WANG Hui², ZHANG Weiming³, ZHENG Xingxuan³, WANG Yiting² (1. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. Installation Engineering Co. Ltd. of CSCEC.7th Division, Zhengzhou, Henan 450000, China; 3. China Railway 16th Bureau Group First Engineering Co. Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: To explore the deformation mechanisms of tunnel surrounding rock under complex geological conditions and develop appropriate technologies for controlling surrounding rock deformation, this study analyzes the deformation of surrounding rock at the mouth section of a biased tunnel, using the Qingquan Tunnel as a case study. Based on FLAC^{3D}, stability of surrounding rock under different support conditions with and without faults is studied to clarify the deformation mechanism of the surrounding rock and propose effective control measures. The study shows that: (1) Excavation disturbances during backward hole excavation under biased conditions cause tensional interaction between the overlying surrounding rock and fault zones, leading to the interlayer rock body bending, rupturing, and stress redistribution, exacerbating the fragmentation of fault zones and resulting in significant surrounding rock deformation. (2) Weak surrounding rock exhibits limited self-

收稿日期: 2023-06-10; 修订日期: 2023-12-05 投稿网址: https://v

投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

第一作者:刘晓龙(2001—),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事隧道工程数值计算方面的研究工作。 E-mail: lxl321433714@163.com

通讯作者: 孙 闯(1983—), 男, 辽宁阜新人, 教授, 主要从事隧道及地下工程稳定性控制方面的研究工作。 E-mail: sunchuang88@163.com stabilization capacity; secondary stress induces sustainable plastic deformation in small clear span tunnel roofs and sidewalls, gradually causing squeezing deformation in support structures over time. Existing support schemes fail to provide sufficient strength and stiffness to resist surrounding rock deformation. (3) Proposed composite control measures of slope surface anchors and deep-buried lateral anti-sliping piles effectively control surrounding rock deformation, mitigate the adverse impact of fractured fault zones on rock stability, and numerical calculation results align closely with on-site monitoring results. The findings provide valuable insights for deformation control of tunnel surrounding rock under similar complex geological conditions.

Keywords: offset tunnel; faulted fracture zone; deformation mechanism of surrounding rock; numerical calculation; stability control

0 引言

我国中西部地区地形复杂,隧道工程建设常遇荷载 不对称等复杂地质条件,导致隧道结构出现偏压现象。 相比于无偏压隧道,偏压隧道受力更为复杂,施工风险 更高,若支护设计或施工方案不合理,极易引起安全事 故,尤其是在坡体较陡或存在断层破碎带的区域^[1-4]。 因此,开展含断层破碎带偏压隧道围岩变形机理研究具 有重要的科学价值和工程意义。

针对含断层破碎带偏压隧道的围岩变形机理研究, 国内外学者开展了大量工作并取得了丰硕的成果。学 者们主要从围岩岩性、物理力学特性及水文地质条件 等方面出发研究围岩压力变化规律[5-8],采用极限平衡 法求解隧道深、浅埋侧滑动阻力及水平侧压力系数,进 而建立围岩压力计算公式[9-10]; 邵江等[11]研究了不同滑 带角度滑坡对隧道衬砌结构受力的影响;董建华等[12] 将简化计算方法应用于洞口段浅埋偏压隧道防护结构 措施的方案参考;Li 等[13]针对围岩变形过程中将产生的 一系列岩石裂隙,分析了围岩变形微震 b 值及其时间变 化特征,为围岩变形预警提供了重要参考;Ma^[14]利用 FLAC^{3D}模拟了隧道施工过程中,各围岩体参数对地表 沉降的影响,给出了隧道施工不均匀沉降的经验公式; 孔超等[15]通过数值模拟分别计算了偏压隧道拱顶及边 墙处的围岩特征曲线,并建立了隧道支护变形失稳模 型,研究了支护承载及失稳机理。

目前有关围岩变形机理的研究多集中于单一或多 层岩性地质条件如文献[15-16],针对含断层破碎带偏 压小净距隧道围岩变形机理及控制研究较少。本文以 清泉含断层带偏压小净距公路隧道为工程依托,采用现 场调研和变形监测数据统计分析方法,对现场隧道围岩 破坏机理进行研究;利用 FLAC^{3D}模拟有无断层及不同 支护状态下隧道围岩变形破坏规律;在此基础上提出洞 口段坡面锚索+深埋侧抗滑桩的复合支护形式,分析该 支护系统对隧道围岩稳定性的影响,通过与现场监测数 据进行对比分析,验证该支护方案的可行性。

1 含断层偏压隧道工程地质特征

1.1 工程地质概况

清泉隧道位于甘肃省天水市境内,小净距双洞短隧 道净宽为14m,净高为5m,最大埋深约90m。现场调 查及钻孔揭示地层情况如图1所示,坡体上部以黄土为 主,垂直节理发育;中部为破碎的片麻岩,节理裂隙发 育;坡体内存在易沿倾向塌落、抗风化及自稳能力极差 的条带状片麻岩捕虏体;下部为花岗岩,裂隙发育。隧 道进口处表层为强风化花岗岩及石英片岩,大部分基岩 裸露,节理裂隙发育,地形条件差。



Fig. 1 Geological cross-section profile

1.2 隧道围岩破坏特征

施工期间,隧道进口处仰坡坡面上部平台出现多条 裂缝,并有增大趋势,如图 2(a)所示;边坡防护工程及 便道处也发生多次小范围溜塌,如图 2(b)所示;后行洞 (以下简称左洞)出口处原状山体在未施工扰动的情况 下出现连续的坍塌,后期出洞存在较大的坍塌风险,且 有继续向上扩展的趋势,如图 2(c)所示。

先行洞(以下简称右洞)贯通后施加支护结构, 左洞



图 2 洞口段坡面破坏 Fig. 2 Slope damage at the tunnel cave section

施工进尺 89 m, 右洞二衬及仰拱出现不同程度裂纹, 如 图 2(d)所示; 洞口仰拱出现裂缝后, 裂缝持续发展, 且 新增裂缝数量较多; 洞内伞状临时支撑发生变形, 深埋 侧临时支撑竖梁弯曲变形严重, 如图 2(e)所示。左洞 进口边仰坡出现裂缝后, 仰坡临时防护出现了多条不同 程度的贯通裂缝, 进洞口套拱出现斜向开裂, 深埋侧边 墙拱脚位置出现多处边墙混凝土脱落, 部分拱脚钢筋受 挤压外露。

2 含断层偏压隧道围岩变形破坏演化机理

2.1 数值模型

根据现场实际情况,利用 FLAC^{3D} 数值软件建立含 断层偏压隧道精细化模型(图 3),模拟小净距隧道开挖 对隧道荷载分布的影响,分析含断层隧道开挖情况下围 岩变形演化规律。模型边界设置为弹性边界,隧道左右 土层尺寸取开挖宽度的 4 倍,下部土层尺寸取隧道高度 的 3 倍,上部土层延伸到地表。X 方向垂直于隧道掘进 方向,Y 方向为隧道掘进方向,Z 方向为竖直方向。为真 实反映偏压隧道支护结构变形破坏特征,选用可破裂式 衬砌结构单元^[17]。

2.2 模型参数的选取

基于本文工程背景及复杂地质条件下应用 GSI 围 岩评级系统在小净距隧道数值模拟中能够有效模拟现 场破坏情况^[18],结合上述现场勘查及掌子面观测,针对 TRT 勘测结果,采取隧道围岩量化评级方法,估算该区



Fig. 3 Schematic diagram of the 3D model

段围岩峰值 GSI 指标在 39~45 之间,峰后残余 GSI 指标在 27~33 之间。现场对隧道围岩进行取样,加工岩体试件为圆柱形,根据规范试件高度与直径比 H/R=2~2.5,取试件尺寸为半径 r=25 mm,高 H=100 mm,试件及试验设备如图 4 所示。通过室内单轴压缩试验,获得围岩单轴压缩试验结果后依据等效节理岩体应变软化模型参数处理如式(1)—(12),计算模型力学参数结果如表1 所示。

基于 H-B 屈服准则[19], 即:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{\rm ci} \left(m_{\rm b} \frac{\sigma_3}{\sigma_{\rm ci}} + s \right)^a \tag{1}$$



图 4 试件及试验装置 Fig. 4 Test specimens and experimental setup

 Table 1
 Mechanical parameters of the computational model

材料	E/GPa	υ	$m_{\rm b}^{\rm p}$	$s^{p}/(10^{-3})$	$m_{\rm b}^{\rm r}$	<i>s</i> ^r /(10 ⁻³)	η^*
黄土	3.02	0.25	0.83	0.4	0.69	0.2	0.012
片麻岩	4.89	0.25	1.17	1.3	0.73	0.3	0.003 8
花岗岩	8.66	0.25	1.68	3.9	0.82	0.4	0.002

式中:
$$\sigma_1$$
、 σ_3 ——掩体破坏时最大、最小主应力

 σ_{ci}——岩块单轴抗压强度;
 m_b、s、a——均为常数,其中m_b为m_i折算值,反映 岩体破坏程度,取值范围在0~1之间。

$$m_{b} = m_{i} \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right)$$
(2)

若假设 H-B 常数中的 m_b、s 随 η 值线性衰减, 通过 最大主塑性应变和最小主塑性应变的差值获得的软化 参数 η 定义为塑性剪切应变, 则可得到 H-B 应变软化模 型, 其关系式为:

$$\omega(\eta) = \begin{cases} \omega^{\mathrm{p}} - \frac{\omega^{\mathrm{p}} - \omega^{\mathrm{r}}}{\eta^{*}} \eta, \ 0 < \eta < \eta^{*} \\ \omega^{\mathrm{r}}, \quad \eta \ge \eta^{*} \end{cases}$$
(3)

$$\gamma^{\rm p} = \eta = \varepsilon_1^{\rm p} - \varepsilon_3^{\rm p} \tag{4}$$

式中: ω^p——峰值参数;

 $ω^{r}$ ——残余参数; ω 可以代替 H-B 模型中的 m_{b} 、s 常数; γ^{p} ——塑性剪切应变; $ε_{1}^{p}$ 、 $ε_{3}^{r}$ ——最大、最小塑性应变。 岩体最大主塑性应变可表示为:

$$\varepsilon_{1}^{p} = \varepsilon_{1}^{peak,e} + \varepsilon_{1}^{drop} - \varepsilon_{1}^{e}$$
(5)
式中: $\varepsilon_{1}^{peak,e}$ ——峰前弹性最大主应变;
 ε_{1}^{drop} ——峰后软化应变;
 ε_{1}^{e} ——弹性最大主应变。
其中,
 $\varepsilon_{1}^{peak,e} = \frac{\sigma_{1}^{p}(\sigma_{3})}{E}$

$$\varepsilon_{1}^{\text{drop}} = \frac{\sigma_{1}^{\text{p}}(\sigma_{3}) - \sigma_{1}^{r}(\sigma_{3})}{-M}$$

$$\varepsilon_{1}^{\text{e}} = \frac{\sigma_{1}^{\text{r}}(\sigma_{3})}{E}$$

$$(6)$$

式中: σ^p₁ — 峰值主应力; σ^r₁ — 残余主应力; *E* — 节理岩体弹性模量。 在考虑剪胀角ψ时, ε^o₃可表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{3}^{\mathrm{p}} = -\frac{1}{2}\boldsymbol{k}_{\psi} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{1}^{\mathrm{p}} \tag{7}$$

其中,

$$K_{\psi} = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi} \tag{8}$$

当ψ=0时,式(7)可变为:

$$\varepsilon_3^{\rm p} = -\frac{1}{2}\varepsilon_1^{\rm p} \tag{9}$$

软化曲线斜率 *M* 是控制节理岩体软化过程的关键,本文采用 Alejano 等^[20]提出的考虑围压变化及岩体质量等级的公式,即:

$$M = -\xi \cdot E \tag{10}$$

其中,当
$$\frac{\sigma_{3}}{\sqrt{s^{p}}\sigma_{ci}} \leq 0.1$$
时;
 $\xi = \left[0.004 \, 6e^{0.076 \, 8GSP}\right] \left(\frac{\sigma_{3}}{\sqrt{S^{p}}\sigma_{ci}}\right)^{-1}$ (11)

$$\stackrel{\text{tr}}{=} \frac{\sigma_3}{\sqrt{s^p} \sigma_{ci}} \ge 0.1_{\text{BT}};$$

$$\xi = \left[0.004 \, 6e^{0.076 \, 8GS \, P}\right] \left(\frac{\sigma_3}{2 \, \sqrt{S^p} \sigma_{ci}} + 0.05\right)^{-1} \qquad (12)$$

2.3 围岩稳定性计算与分析

 σ

采用上述模型参数开展小净距隧道台阶法开挖数 值计算,对有无断层及不施加支护结构和现有支护结构 等方案计算结果进行对比,计算结果如图 5 所示。由数 值计算结果可得,隧道开挖后围岩沿坡面倾向产生位移 变形趋势;无支护状态下含断层情况对围岩变形影响明 显大于无断层情况,最终变形量稳定在 120~155 mm。 含断层现有支护条件下,右洞中线至浅埋侧产生较大的



Fig. 5 Displacement contour map of simulation results

变形, 左洞偏压变形较缓, 拱顶位置竖向沉降量大于右 洞, 且施加现有支护方案后, 围岩变形抑制效果未达到 要求。

有无断层及不同支护方案下洞口断面拱顶围岩变 形降监测如图 6 所示,监测点拱顶沉降随计算时间增加 先逐渐增大后趋于稳定。无支护方案下有无断层的计 算结果如图 6(a)所示,无断层情况下左洞洞口断面拱 顶沉降速率大于右洞,拱顶最大沉降量为 129.79 mm, 右洞初期应力平衡后拱顶最大沉降量为 49.32 mm, 在左洞开挖扰动下围岩再次发生变形,最终沉降量为 101.17 mm。含断层情况下左洞洞口断面拱顶最大沉降 量为 154.85mm,右洞初期应力平衡后拱顶最大沉降量 为 60.24 mm, 在左洞开挖扰动下围岩再次发生变形, 最 终沉降量为 123.38 mm。洞口断面围岩内含断层带地 质条件下现有支护方案计算结果如图 6(b)所示, 左洞 未开挖时右洞拱顶沉降缓慢增加且最后趋于稳定, 拱顶 最大沉降量为 51.87 mm; 左洞施工后, 右洞围岩进一步 发生变形, 最后沉降量稳定在 111.17 mm; 左洞沉降速 率大于右洞, 并在右洞沉降变形稳定后趋于稳定, 最大 沉降量为 119.77 mm。不同支护条件下数值计算结果 如图 6(c)所示, 采用现有支护方案后, 右洞单独开挖拱 顶最大沉降量差值为 8.37 mm; 左洞采用现有支护方案 后拱顶最大沉降量降低了 35.08 mm, 右洞采用现有支 护方案后最终拱顶沉降量降低了 12.21 mm。



产生明显位移增量。

在有无支护情况下,收敛变形量差值为 3.18 mm。右洞

径向变形在左洞开挖后增加,各监测点均随左洞的开挖

无支护与现有支护方案两种工况数值计算结果收 敛变形趋势一致,由图 7(a)结果显示,左洞在有无断层 情况下,收敛变形量差值为 4.81 mm;在有无支护情况 下,收敛变形量差值为 0.99 mm。由图 7(b)结果显示,



图 7 收敛监测曲线 Fig. 7 Convergence monitoring curve

2.4 围岩失稳破坏演化机理

由上述围岩变形特征可知,右洞支护结构前期受力 以围岩自重为主,初期支护能够提供足够的约束反力以 抵抗围岩变形;左洞施工后,偏压效应导致洞口断面再 次变形,并且最终变形量超过预留变形量,表现为围岩 失稳。含断层偏压小净距隧道围岩变形机理可总结为:

(1)据现场原位测试以及数值计算结果分析可知, 现场断层破碎带呈东南倾向 25°~45°倾斜,存在围岩 软、硬互层及完整、破碎交错的情况,由于断层破碎带 内节理裂隙发育、围岩性状及自稳能力差的特点,开挖 卸荷进一步使断层带围岩破碎化,导致顶拱、边墙围岩 显著变形等现象。

(2)偏压效应下左洞开挖扰动使上覆围岩与断层破碎带相交层面张开、层间岩体弯折破裂,隧道断面产生不可逆的挤压变形。左洞开挖后导致隧洞围岩应力重分布,引起不可逆的围岩变形,与断层破碎带交叉影响作用于顶拱、边墙等位置,进一步加剧变形。

(3)偏压效应使得围岩在左洞开挖扰动下出现应力 集中,并产生可持续塑性变形。隧道上覆围岩自稳能力 差,受偏压作用和开挖卸荷影响,产生了围岩松动变形, 随着时间增长,对支护结构产生挤压,导致拱顶支护整 体沉降,出现严重的扭曲变形,拱腰处出现二次衬砌开 裂,仰拱处发生回填隆起。

(4)由于现有支护方案未能提供足够的支护强度和

刚度,在上覆围岩发生持续变形时,施加U型钢后浇筑 混凝土支护无法较好地控制围岩变形,导致隧道在围岩 压力作用下产生支护结构变形侵限、失效。

总结现有支护破坏特征及隧道开挖数值计算结果, 原隧道支护设计方案无法提供足够的约束反力来抵抗 围岩变形,对含断层偏压隧道适用性较差,应对洞口段 围岩变形采取相应的控制措施,并调整后行洞开挖 参数。

3 含断层偏压隧道围岩变形支护方案优化

基于含断层偏压小净距隧道围岩变形的诱发因素 及变形特征,针对现阶段左洞开挖引起的围岩不稳定变 形加剧现象,提出相应的治理方案,以控制围岩变形。

3.1 支护方案设计与优化

根据隧道左右洞口段支护破坏情况及数值计算结 果,预设计围岩变形控制方案,设计材料参数及数值计 算结果如表 2、3 及图 8 所示,采用坡面锚索控制岩体 的位移,防止断层导致的滑坡;埋设抗滑桩以支挡滑动 力及偏压效应下应力分布不均匀情况,并采用数值计算 验证其可行性。

不同控制方案下数值计算位移云图如图 8 所示,围 岩变形规律基本一致,偏压现象明显,右洞浅埋侧拱脚 围岩变形范围比深埋侧大,围岩变形集中在左洞拱顶位 置及右洞与断层带接触位置。对比分析不同控制方案

Table 2 various control schemes and numerical carculation models					
模拟工况	支护参数	支护模型图			
支护方案A	现行隧道支护方案+坡面锚索				
支护方案B	现行隧道支护方案+深埋侧抗滑桩(间距8 m)				
支护方案C	现行隧道支护方案+坡面锚索(倾角15°)+深埋侧抗滑桩(间距8m)				

表 2 各控制方案及数值计算模型

Table 2 Various control schemes and numerical calculation models

表 3 材料参数表 Table 3 Table of material parameters

材料	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	E/MPa	v	c/kPa	φ/(°)
抗滑桩	25.0	32 500	0.2	_	_
锚索	22.0	1 800	0.35	30	25

数值计算结果可知:

(1)单独采用抗滑桩或锚索控制时效果如图 8(a)、 (b)所示,围岩变形集中于左洞拱顶位置及右洞上覆断 层位置,且向深部扩展明显。在未施加控制措施时,上 覆围岩内含断层带整体稳定性较差,在卸荷回弹应力重 分布的影响下,即使施加二衬仰拱等支护结构,洞口段 围岩也会沿竖向发生明显变形,围岩稳定性较差。

(2)复合控制效果如图 8(c)所示,围岩变形范围逐 渐减小且变形区域更加均匀,上覆围岩由拱顶沉降的集 中变形发展至隧道周边的围岩分散变形,其原因可归纳 为复合控制方案显著增强了断层带施加给围岩的挤压 应力,使围岩的整体强度得到有效发挥。值得注意的 是,虽然复合控制方案能显著改善上覆断层带引发的局 部失稳,但整体围岩变形的不均匀性依旧明显,主要表 现为拱顶沉降显著大于两帮变形。



由图 9(a)可知: 在隧道洞口段施加抗滑桩、锚索以 及复合控制措施后, 前期围岩变形趋势一致, 坡面锚索 控制下左洞拱顶沉降量差值为 85.87 mm, 右洞拱顶沉 降量差值为 59.58 mm; 施加抗滑桩后左洞拱顶沉降量 差值为 95.47 mm, 右洞拱顶沉降量差值为 59.62 mm; 复 合控制方案施作后左洞拱顶沉降量差值为 103.47 mm, 右洞拱顶沉降量差值为 68.89 mm;复合控制方案下围 岩变形控制效果最好。围岩变形随断层分布呈偏压式 分布,表明在层状复合围岩条件下,含断层破碎带隧道 围岩产生的大变形更加明显。断层破碎带影响应力分 布,通过改善支护结构受力条件,施加抗滑桩+锚索复合 控制措施,有效减小围岩的不均匀变形。



Fig. 9 Settlement amount at the arch crown under different surrounding rock deformation control schemes

进一步优化上述复合控制措施参数,通过改变锚固 角度、长度、预应力等,与抗滑桩共同作用,选取最优材 料参数应用于工程,支护参数及围岩变形结果如表4所 示。抗滑桩长为25m时,拱顶沉降量达到预定控制效 果,改变抗滑桩参数后变形控制效果不明显,故选用 4号支护参数。

	wi	th different control parameters		
Table 4	Comparison of vault settlement at the arch crow			
	表 4	不同支护参数拱顶沉降量对比表		

_				-			
	支护 参数	抗滑桩 桩长/m	锚索 倾角/(°)	锚固段 长度/m	锚索预 应力/kN	后行洞拱顶 沉降/mm	
	1	10	15	6	50	68.3	
	2	15	20	9	100	65.7	
	3	20	25	12	150	59.4	
	4	25	30	15	200	53.5	
	5	30	35	18	250	51.3	

基于所选取的参数,沿隧道进线坡面走向设立锚 索+深埋侧抗滑桩如图 10 所示,抗滑桩设于后行洞据中 线深埋侧 11.5 m 位置处。抗滑桩截面尺寸均为 2.5× 3.0 m, 桩长为 25 m, 相邻桩中线间距为 5 m, 共设计 4 根锚固桩, 桩身采用 C35 钢筋混凝土。锚索长选为 45 m, 倾角 30°, 以断层带为界, 根据断层倾向设置台阶式分布 设计, 上部锚固段长为 20 m, 自由段长度为 20 m, 加设 预应力大小为 200 kN。针对断层位置, 通过改变锚固 段长度达到锚固断层破碎带的目的, 设计锚固段长度





为 15 m, 自由段长度为 30 m, 加设 300 kN 的预应力。 **3.2** 优化支护方案稳定性计算结果分析

由如图 5(d)与图 11 的数值计算结果对比可知,未 施加复合控制方案时,围岩变形集中于左洞拱顶位置、 右洞上覆断层位置,隧道偏压现象明显;施加复合控制 措施后,偏压范围大幅度减小,围岩最大变形逐渐减小, 且断层破碎带对应力重分布影响减弱,隧道拱顶沉降逐 渐趋于稳定,且在现行支护结构预留变形量范围内。



国 11 他加载优压两万米冶固有文/7江两众术

Fig. 11 Effect of the surrounding rock deformation control after implementing the optimal control scheme

施加坡面锚索+深埋侧抗滑桩后,有效增加了滑动 区域摩擦力,使互层结构岩面更加结合紧密;在深埋侧 设立抗滑桩有效支挡了滑体的滑动力;高地应力偏压+ 断层破碎带导致隧道开挖过程中围岩破坏严重,施加复 合控制结构后对穿透破碎带围岩稳定影响显著。中下 部预应力锚索与深埋侧抗滑桩对围岩变形起关键作用, 较好地控制隧道偏压区,限制了隧道开挖过程中由断层 破碎带及高应力卸荷扰动造成的变形破坏。

3.3 现场监测分析

将上述控制方案应用于现场施工,如图 12 所示,现 场实时监测后行洞已成型洞口、新开挖断面及其相邻 位置的围岩变形情况,验证预应力锚索+抗滑桩结构作 用于含断层破碎带小净距隧道开挖的施工效应。



图 12 现场施工效果 Fig. 12 On-site construction effect

施加围岩变形复合控制系统后,对后行洞新开挖 断面及相邻断面继续监测其累计沉降变形量,如图 13 所示。监测结果与数值计算结果较为吻合,各监测点位 置沉降量逐渐减小,左洞洞口断面拱顶位置沉降量最 大差值为 87.91 mm,右洞洞口断面拱顶位置沉降量最 大差值为 52.37 mm,新开挖断面及相邻断面随着支护 结构施工完成,沉降量趋于稳定。峰值沉降量稳定在 80.00 mm 以内,符合规范要求。

对比分析数值计算结果及现场监测结果可知,浇筑 抗滑桩和施加预应力锚索法在控制围岩变形方面具有 可行性,通过抗滑桩的设置有效减弱小净距隧道高应力 卸荷扰动造成应力分布不均匀带来的影响;施加预应力







锚索用于控制断层破碎带,避免了开挖卸荷及围岩破碎 引发的岩体失稳破坏,保证了施工安全,减少了高地应 力偏压及断层破碎带对隧道衬砌结构的破坏,更加有效 地控制了隧道围岩的稳定性。

4 结论

通过对清泉含断层偏压小净距隧道变形量测数据 统计分析,针对围岩变形机理研究总结并提出控制措 施,得出结论如下:

(1)偏压效应下左洞开挖扰动使上覆围岩与断层破 碎带相交层面张开、层间岩体弯折破裂,且围岩应力产 生重分布;开挖卸荷使断层破碎带进一步恶化,二次应 力作用使得软弱围岩在后行洞开挖扰动下产生可持续 塑性变形;对比分析现场支护破坏及数值计算结果可 知,含断层情况下,左、右洞拱顶的沉降量相比于无断 层情况下增大15~25 mm,隧道洞口段深埋侧边坡在高 应力偏压卸荷扰动下产生坍塌、滑坡等现象,加速支护 结构变形。

(2)通过数值计算分析隧道现场支护方案下围岩变 形规律,小净距隧道沉降和收敛随时间发展的趋势基本 一致,沉降变形大于收敛变形,稳定时间也相对较短。 上部围岩自重与断层破碎带周围岩体的层间相对滑动 对隧道变形影响增大,在断层破碎带及高地应力偏压效 应下,围岩自重对洞口断面产生挤压,使得支护结构所 承受的约束力大于极限承载力,造成隧道洞口断面失稳 变形。

(3)选取 25 m 长抗滑桩+倾角 30°、预应力 200 kN 锚索复合支护控制围岩变形,控制前后左洞拱顶沉

降量差值为 87.91 mm, 右洞新开挖断面最大沉降量为 52.37 mm, 处于安全控制范围, 坡面锚索的施加使得断 层破碎带得到了有效控制, 深埋侧抗滑桩有效支挡了隧 道洞口边坡的滑动力, 支护效果显著, 满足安全生产要 求, 可为类似含断层带隧道围岩变形控制提供参考。

参考文献(References):

- [1] 付君宜,陈发达,沈志平,等.岩溶山区城市地下隧道工程地质灾害风险分析[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(3):100-108. [FU Junyi, CHEN Fada, SHEN Zhiping, et al. Risk analysis of the geological hazards during urban tunnel construction in mountainous Karst areas [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3):100-108. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 咎文博,赖金星,曹校勇,等.漂卵石隧道围岩力学响应与 失稳破坏机制[J].岩石力学与工程学报,2021,40(8): 1643 - 1653. [ZAN Wenbo, LAI Jinxing, CAO Xiaoyong, et al. Mechanical responses and instability failure mechanisms of surrounding rock of tunnels in boulder-cobble mixed stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1643 - 1653. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 岳中琦.梅大高速公路路基边坡失稳条件与滑坡机理初探[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(4):1-12.
 [YUE Zhongqi. Study on the instability condition and landslide mechanism of subgrade slope in Mei-Da Expressway [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4):1-12. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 胡炜,谭信荣,蒋尧,等.深埋顺层偏压隧道围岩破坏机 理及规律研究——以郑万线某隧道为例[J].水文地 质工程地质,2020,47(3):60-68. [HU Wei, TAN Xinrong, JIANG Yao, et al. A study of the mechanism and regularity of failures in the surrounding rock of a deep buried bias tunnel embedded in geologically bedding strata: Taking one tunnel of the Zhengwan line as an example [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 60 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 杜建明,房倩.考虑黏聚力与內摩擦角的变坡面浅埋偏 压隧道围岩压力计算方法[J].湖南大学学报(自然科 学版), 2022, 49(1): 165 - 173. [DU Jianming, FANG Qian. Calculation method of surrounding rock pressure of shallowburied and asymmetrical pressure tunnel under variable slopes considering cohesion and internal friction angle [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(1): 165 - 173. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 康永水, 耿志, 刘泉声, 等. 我国软岩大变形灾害控制技术与方法研究进展[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2035-

rock with large deformation hazards in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2035 – 2059. (in Chinese with English abstract)]

- [7] 严涛,李坤杰,牟智恒,等.变坡条件下浅埋偏压隧道围岩压力解析法[J].西南交通大学学报,2020,55(3):531-536.[YAN Tao, LI Kunjie, MOU Zhiheng, et al. Analytical method for calculation of surrounding rock pressure of shallow-buried and unsymmetrically loaded tunnel adjacent to variable slope[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3):531-536.(in Chinese with English abstract)]
- [8] 池建军,刘登学,丁秀丽,等.第三系泥岩隧洞围岩大变 形成因及应对措施[J].长江科学院院报,2022,39(10): 88 - 96. [CHI Jianjun, LIU Dengxue, DING Xiuli, et al. Causes and countermeasures of large deformation in a tunnel with tertiary mudstone [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(10): 88 - 96. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张广泽,邓建辉,王栋,等.隧道围岩构造软岩大变形发 生机理及分级方法[J].工程科学与技术,2021,53(1): 1-12. [ZHANG Guangze, DENG Jianhui, WANG Dong, et al. Mechanism and classification of tectonic-induced large deformation of soft rock tunnels [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 1 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 杜建明,房倩,海路,等.地表变坡下浅埋偏压隧道围岩压力计算方法[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):4088-4098. [DU Jianming, FANG Qian, HAI Lu, et al. Calculation method for surrounding rock pressure of shallow tunnel with asymmetrical pressure of variable slopes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11):4088-4098. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 邵江,朱宝龙,李涛.不同滑带角度滑坡作用下隧道衬砌结构受力特征[J].西南交通大学学报,2021,56(6):
 1214 1221. [SHAO Jiang, ZHU Baolong, LI Tao. Stress characteristics of tunnel lining structures under landslides with different angles of sliding zone [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1214 1221. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 董建华, 颉永斌, 李建军, 等. 洞口段浅埋偏压隧道新型防护结构及其简化计算方法[J].中国公路学报, 2018, 31(10): 339 349. [DONG Jianhua, XIE Yongbin, LI Jianjun, et al. New protective structure for shallow-buried bias tunnel at portal section and its simplified calculation

method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 339 – 349. (in Chinese with English abstract)]

- [13] LI Biao, DING Quanfu, XU Nuwen, et al. Characteristics of microseismic b-value associated with rock mass large deformation in underground powerhouse Caverns at different stress levels [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(2): 693 – 711.
- [14] MA Lin. Analysis of shallow bias tunnel influence factors in mountain area[J]. International Congress of Mathematicans, 2015.
- [15] 孔超,张俊儒,王海彦,等.深埋软岩大变形隧道支护变形特征及承载机理研究[J].中国铁道科学,2021,42(6):103-111.
 [KONG Chao, ZHANG Junru, WANG Haiyan, et al. Study on deformation characteristics and bearing mechanism of support in large deformation tunnel with deep buried soft rock [J]. China Railway Science, 2021, 42(6): 103 111.
 (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈秋雨,黄璐,潘虎,等. 径向让压系统对软岩隧道围岩力学特性影响研究[J].水文地质工程地质, 2024, 51(4): 146-156. [CHEN Qiuyu, HUANG Lu, PAN Hu, et al. Enhancing mechanical characteristics of soft rock tunnel surrounding rock through radial yield pressure system [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2024, 51(4): 146-156. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈东旭.新奥法隧道支护结构约束效应及破裂失效模型研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.[CHEN Dongxu. Study on constraint effect and rupture failure model of new Austrian method tunnel support structure [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 孙闯, 敖云鹤, 张家鸣. 弱节理小净距隧道合理净距及 围岩稳定性研究[J].公路交通科技, 2020, 37(5): 108-115.
 [SUN Chuang, AO Yunhe, ZHANG Jiaming. Study on reasonable clear distance and surrounding rock stability of weak jointed small clear distance tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(5): 108-115. (in Chinese with English abstract)]
- [19] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8): 1165 – 1186.
- [20] ALEJANO L R, RODRIGUEZ-DONO A, ALONSO E, et al. Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behaviour
 [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(6): 689 - 705.