

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220620003

极高地应力软岩隧道非对称变形机理及支护优化研究*

陈志敏¹, 赵吉万¹, 龚军², 陈宇飞², 李增印², 孙胜旗¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458)

摘要: 针对极大断面公路隧道施工中出现的非对称大变形问题, 考虑高地应力第一主应力与隧道轴线关系、层状软岩夹层与互层状态、掌子面软岩空间不对称、地下水等因素, 基于对工程地质条件、围岩与支护结构失效及破坏特征的分析, 结合岩样物理力学特性室内试验研究及地应力实测情况, 探究了非对称大变形形成机理并提出针对性的支护结果优化方案。结果表明: 高地应力层状软岩隧道围岩非对称变形是在岩层倾角 α 、最大水平主应力与隧道轴线夹角 β 和岩层夹角 γ 、围岩岩性和地下水综合作用下的大变形, 围岩非对称部位由以上几种因素共同决定; 当主应力 σ_1 与隧道轴线既不垂直也不平行时, 会产生挤压性偏压构造水平地应力, 使隧道横断面侧向受力不对称, 发生偏压性非对称大变形; 通过改变锚杆的布设方式、提高超前注浆小导管的长度和刚度、喷射临时封闭、在防水板与喷射砼间增加高密度橡塑海绵板缓冲层等措施, 可以有效的减少变形量, 防止围岩因开挖扰动而松动和坍塌。

关键词: 极高地应力; 软岩隧道; 非对称变形; 支护优化

中图分类号: U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0109-11

Research on Asymmetric Deformation Mechanism and Support Optimization of Extreme High In-situ Stress Soft Rock Tunnel

CHEN Zhimin¹, ZHAO Jiwan¹, GONG Jun², CHEN Yufei², LI Zengyin², SUN Shengqi¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Railway Tunnel Group, Guangzhou 511458, China)

Abstract: Aiming at the problem of asymmetric large deformation in the construction of very large section highway tunnels, considering the relationship between the first principal stress of high in-situ stress and tunnel axis, laminated soft rock interlayer and interlayer state, spatial asymmetry of soft rock at working face, groundwater and other factors, and combined with the physical and mechanical properties of rock samples and ground stress measurements, the mechanism of asymmetric large deformation formation is investigated and the targeted optimization support scheme is proposed based on the analysis of engineering geological conditions, and failure and damage characteristics of surrounding rock and support structure. The results show that the asymmetric large deformation of the surrounding rock in high in-situ stress laminated soft rock tunnel is due to the combined effect of the dip angle α of

* 收稿日期: 2022-06-20; 修回日期: 2022-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(11662007, 12262018), 中央引导地方科技发展资金项目(22ZY1QA005)资助

作者简介: 陈志敏(1979—), 男, 教授, 博士。主要从事岩土与隧道工程方面的研究。E-mail: czm@mail.lzjtu.cn

通讯作者: 赵吉万(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事岩土与隧道工程方面的研究。E-mail: 2427590872@qq.com

rock stratum, the angle β between maximum horizontal principal stress and tunnel axis, the angle γ between maximum horizontal principal stress and rock stratum, surrounding rock lithology and groundwater. The location of the asymmetric deformation in the surrounding rock is determined by the combination of the above factors. When the principal stress σ_1 is neither perpendicular nor parallel to the tunnel axis, compressive bias tectonic horizontal ground stress will form, leading to lateral asymmetric stresses in the tunnel cross-section and resulting in asymmetric deformation. In order to reduce the deformation effectively and prevent the surrounding rock from loosening and collapsing due to excavation disturbance, the measures of altering the layout of anchors, improving the length and stiffness of the advanced grouting small conduits, spraying temporary sealing, and installing a damping layer of high-density rubber sponge board between the flashing and sprayed concrete are helpful.

Keywords: extreme high in-situ stress; soft rock tunnel; asymmetric large deformation; support optimization

0 引言

我国隧道建设越来越向着跨度长、断面大、埋深深的趋势发展。特别是在西部山岭地区,隧道的埋深往往会很大,隧区围岩受山岭地质构造影响显著,通常具有较高的应力水平。尤其遇到复杂软弱围岩时,岩石强度低、自身的稳定性很差,此时,在较高应力作用下,掌子面开挖时隧道的围岩变形表现为一定的流变特性,开挖会导致其严重的压缩、变形,甚至出现塌陷和其他灾难。随着基础建设不断地向中西部地区推进,隧道在线路中的占比越来越重,也面临越来越多的难题。大断面、超大断面隧道越来越多,隧区围岩受构造应力影响,复杂地质条件围岩等等,对施工的工艺和控制技术要求越来越高,复杂地质条件下软岩的大变形问题就更加严重。目前众多软岩隧道大变形的研究,在围岩变形机理、影响因素、施工方法以及支护参数等方面都有学者开展了大量工作,并取得了不错的成就。

周航等^[1]通过室内物理力学试验和对岩石微观结构的分析,认为软岩隧道的大变形往往离不开水的渗入和地层结构的影响。潘文韬等^[2]结合岩石力学试验和数值模拟,研究了层理角度在不同大变形中的影响,在此基础上,统计了不同层理角度下的变形规律。王睿等^[3]研究发现软岩隧道中围岩的松动圈在断面的分布并不均匀,可根据其厚度对锚杆进行优化。胡雄玉等^[4]通过研究层状围岩的衬砌受力特征,发现层理角度对衬砌的受力特性影响显著。孙振宇等^[5]在多个隧道围岩变形的基础上,全面的分析了围岩变形的规律特征和影响因素,为隧道的稳定性评价和支护提供了依据。谭忠盛等^[6]认

为增大侧墙曲率、增设长锚杆可以有效的降低隧道变形量。邓斌等^[7]结合数值模拟和监控量测结果,认为增强初期支护的强度和刚度可以有效的减少变形量。陈超等^[8]利用映射函数推导出了变形量的计算公式,认为最大主应力对隧道的变形影响显著。孟陆波等^[9]通过收集隧道大变形的数据,给出了非对称大变形的影响规律。王栋等^[10]研究了两种工法下隧道开挖的变形规律,认为锚杆的非对称支护具有良好的作用。唐勇等^[11]认为锚杆的非对称支护应该对塑性变形和位移较大的区域进行强化。邵珠山等^[12]通过有限元模型分析,发现增强衬砌强度可以有效地控制围岩变形。王英帆等^[13]通过研究不同施工阶段的围岩变形,认为采用“先让后抗”的方法更为经济有效。

目前,虽然已有大量学者研究了围岩不对称大变形成因、预测及控制措施,但具体隧道赋存的地质环境千差万别、结构自身又各不相同。本文针对宁缠隧道围岩不对称大变形问题,通过现场的监测和实验,分析了围岩变形的特征和围岩的力学状态,提出了不对称大变形的机理和控制措施,为后续施工及类似工程提供参考。

1 隧道围岩大变形破坏特征

1.1 工程简介

宁缠隧道位于青海省门源县仙米乡,为分离式隧道,净空 10.25×5.0 m。隧道左右洞起讫里程桩号分别为: ZK37+140~ZK43+164、YK37+190~YK43+133,长度分别为 6 024 m、5 943 m,属特长隧道,隧道洞底最大埋深约为 544.00 m,在 ZK40+130~ZK43+164 区间内发生围岩大变形破

坏。该工程区位于构造剥蚀中、高原地貌区,地形起伏大,最大相对高差约662.00 m。大变形段掌子面开挖后揭露地层岩性为石炭系下统钙质粉砂岩与泥碳质粉砂岩互层,夹碳质泥岩和碳质页岩,为较软岩和软岩,岩体结构破碎,节理及裂隙发育,地下水富集。

1.2 围岩变形特征

隧道拱顶下沉及水平收敛量测使用全站仪进行,主要量测竖向三个测点的沉降和横向两处收敛,测点布置如图1所示。选取试验段内3个断面围岩变形量测结果统计,见表1。

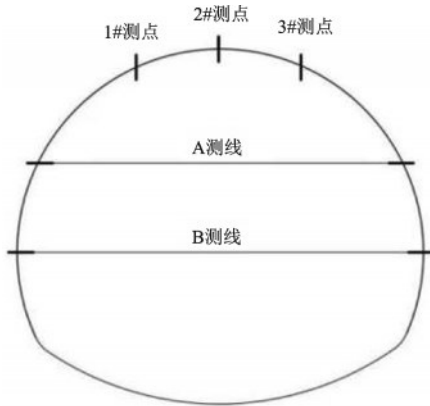


图1 测点布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of measuring point arrangement

表1 测点沉降值统计

Table 1 Statistical table of surrounding rock deformation measurement results

位置	测点沉降/mm			
	1#	2#	3#	均值
ZK41+50	425.1	458.5	407.3	430.3
ZK41+45	435.7	394.8	451.2	427.2
ZK41+40	369.4	387.5	421.3	392.7

以ZK41+40断面为例,分析围岩变形规律,其围岩变形时程曲线和变形速率如图2和图3所示,初护变形如图4和图5所示,分析其变形规律,可以得出隧道围岩变形具有以下特点。

(1) 变形量大

ZK41+040断面三个拱顶沉降点测得拱顶下沉最终值分别为369.4、387.5和421.3 mm,拱顶沉降均值392.7 mm;两处水平收敛变形量稳定值分别为398.3和461.5 mm,均值为429.9 mm,可见围岩在竖向和水平方向都具有较大的变形量。

(2) 初期变形速率快且持续时间长

从图3可以看出围岩在前20 d内具有较大的变形速率,经过初期变形之后,虽然速率有所降低,但变形仍未停止,甚至出现了加速阶段,整个变形持续时间较长,一直到100 d左右才最稳定,围岩在变形过程中展现出了明显的流变特性。

(3) 变形不对称

从图4和图5可以看出,隧道断面的初支变形不均匀,右侧沉降比左侧多14%左右,右侧收敛比左侧多20%左右,具有明显的非对称特性。

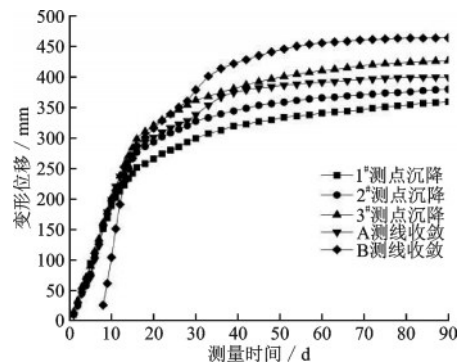


图2 ZK41+040断面变形位移

Fig.2 Deformation displacement curves of section ZK41+040

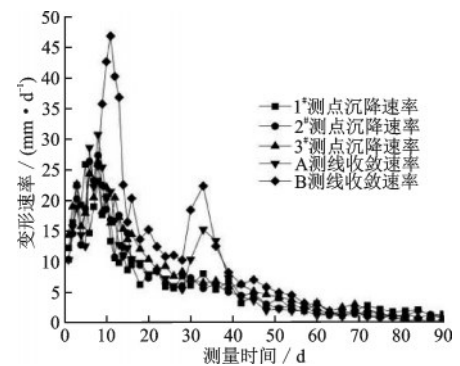


图3 ZK41+040断面变形速率

Fig.3 Deformation rate curves of section ZK41+040

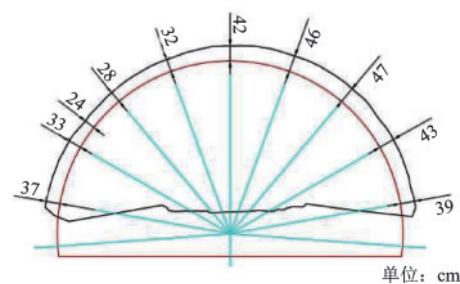


图4 外层初支变形代表断面

Fig.4 Outer layer preliminary support deformation of the representative section

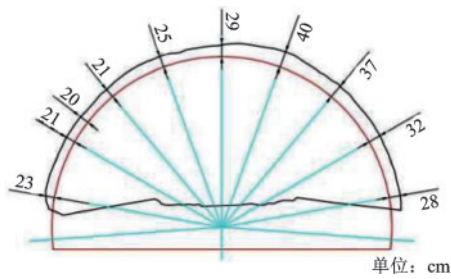


图5 内层初支变形代表断面

Fig.5 Inner layer preliminary support deformation of the representative section

1.3 围岩破坏特征

(1)超前支护失效

超前注浆小导管克服破碎岩石掉落和抗压弯能力不足。一是破碎松散岩块从导管间掉落,形成空腔;二是部分导管压弯,不能有效起到超前支护作用。现场超前支护失效、塌腔情况如图6所示。

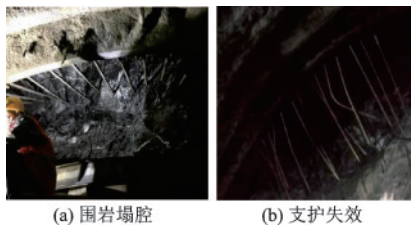


图6 超前支护失效

Fig.6 Failure of the advanced support

(2)掌子面失稳、滑塌

宁缠隧道极高地应力软岩段施工现场掌子面围岩在开挖过程中,上中台阶掌子面开挖完成后,围岩在高地应力释放过程中崩落现象时常出现,尤其是在部分裂隙水发育地段,围岩在遇水的情况下易崩解,围岩失稳、滑塌现象常发生。现场掌子面围岩失稳、溜塌如图7所示。

(3)支护结构变形、失效

在极高地应力作用下,初期支护变形量很大,

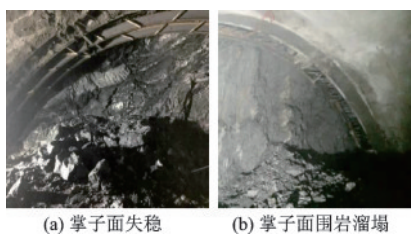


图7 掌子面破坏

Fig.7 Collapse of working face

累计最大达461.5 mm,最大日变形达46.3 mm。初期支护拱架变形、扭曲,喷射混凝土开裂、掉块现象时常发生,试验段施工现场初期支护变形、破坏如图8所示。围岩变形持续时间长,施作二次衬砌时,围岩并未完全收敛,仍有1~3 mm/d沉降、收敛,局部内层支护亦出现拱架变形,喷射混凝土开裂现象如图9所示。

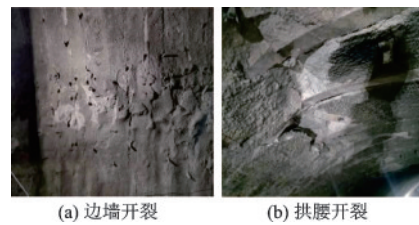


图8 外层初期支护变形开裂

Fig.8 Deformation and cracking of outer layer preliminary support



图9 内层初期支护变形开裂

Fig.9 Deformation and cracking of inner layer preliminary support

2 围岩非对称大变形机理分析

宁缠隧道非对称大变形的机理可归因于多种因素,其中地层岩性和地应力分布被认为是引起隧道围岩不对称大变形的的主要原因。本文通过现场地质勘察和监控量测,并且结合室内试验,系统研究了宁缠隧道围岩不对称大变形的的主要影响因素和变形机理。

2.1 大变形成因分析

2.1.1 岩性条件

选取三组岩样对其进行X射线衍射分析,研究发现其内含有大量的蒙脱石、伊利石和绿泥石等黏土矿物,具有较强的吸水膨胀性。三组岩样矿物成分的衍射分析结果见表2。因此,隧道开挖后,层状软岩由于吸水内部产生膨胀压力,此时软弱层状围岩会在挤压作用下向着临空面流动,如图10所示。

表 2 岩样矿物组成分析结果

Table 2 Rock sample mineral composition analysis results

单位: %

岩样	石英	高岭石	伊利石	蒙脱石	绿泥石	菱铁矿	黄铁矿	石墨
1	32	11	10	12	15	7	6	7
2	31	13	16	13	11	5	6	5
3	35	10	11	15	14	4	4	7

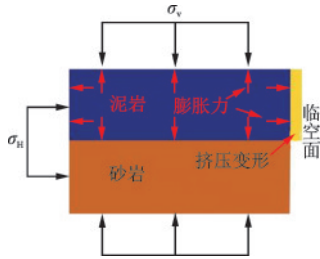


图 10 层状软岩吸水膨胀

Fig.10 Water absorption and swelling of laminated soft rock

取三组岩样对其进行标准室内崩解试验,崩解指数变化曲线和崩解后的级配曲线如图 11 和图 12 所示。

三组试样在经过五次循环之后其崩解指数分别为 9.82%、10.73% 和 11.06%,泥化效应明显,具有较强的崩解性。不同含水状态下侧向约束膨胀率曲线和体积不变条件下岩样天然含水状态膨胀压力变化如图 13 和图 14 所示,综合岩样膨胀性矿物成分含量、饱和吸水率以及侧向约束轴向膨胀率和膨胀压力参数,根据孙小明等^[14]提出的膨胀性软岩分级指标,该岩样属于中等膨胀性软岩。可见隧道的大变形不仅仅是由于软岩的塑性变形和显著的流变性,较强的崩解性和膨胀性也是关键因素。

2.1.2 地下水条件

遂址区在断层的影响下,基岩受到不同程度的挤压破坏,节理、裂隙发育,与上覆坡积物中的孔隙

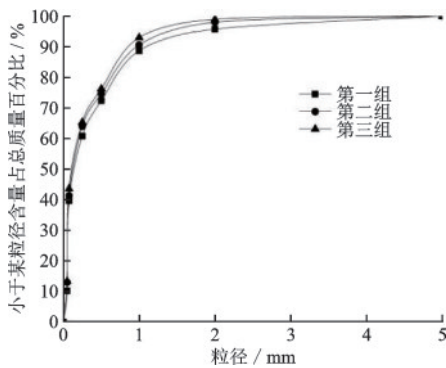


图 11 崩解后颗粒级配曲线

Fig.11 Particle gradation curves after disintegration

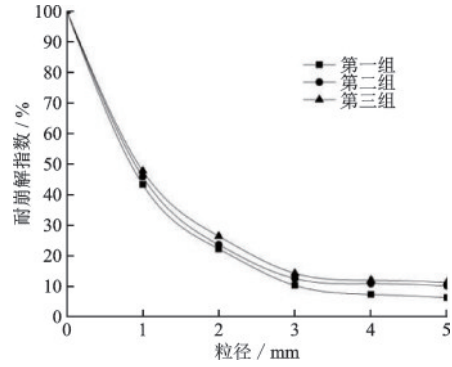


图 12 耐崩解指数变化曲线

Fig.12 Change curves of disintegration resistance index

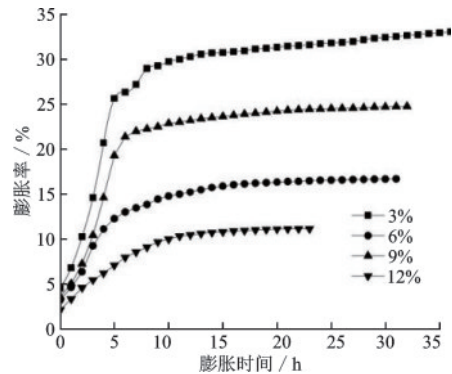


图 13 不同含水状态线膨胀率曲线

Fig.13 Curves of linear expansion rate for different water states

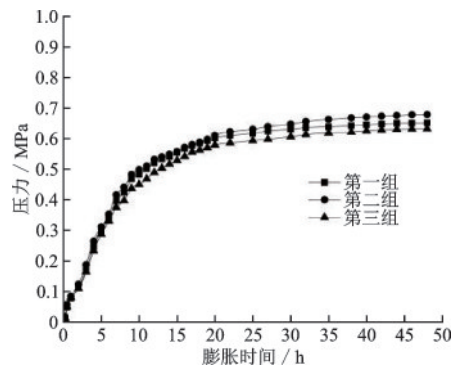


图 14 体积不变条件下膨胀压力

Fig.14 Expansion pressure at constant volume

水一般相互贯通,并且在此构造部位,地下水富集。采用单轴压缩试验对宁缠隧道岩块的模量参数及

抗压强度进行测试,实验结果如图 15 所示。

岩样 S1~S5 为饱和岩样, S6~S10 为干燥岩样, 岩样单轴抗压强度和弹性模量分别降低了 75.98% 和 77.32% 左右, 可见软岩在基岩裂隙水和地下水的影响下其力学性能出现了明显的降低, 为围岩塑性变形和膨胀崩解提供了有利的外部条件。宁缠隧道掌子面在开挖过程中遭遇了大量的大变形, 以 ZK41+40~ZK41+50 为例, 隧道

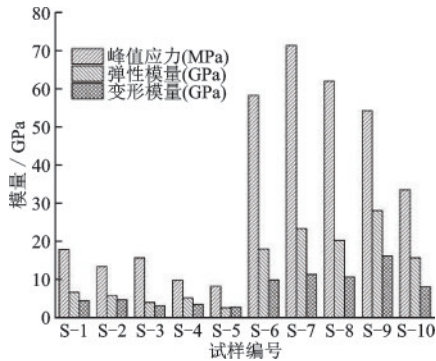


图 15 单轴抗压强度试验结果

Fig.15 Uniaxial compressive strength test results

开挖使得围岩应力重新分布, 结构面开裂, 地下水沿着裂隙入渗, 降低了围岩的力学性能, 促使围岩崩解进一步发生, 这也是掌子面发生大变形的原因所在。

2.1.3 地应力条件

为了更好地评价宁缠隧道地应力特征, 现场采用水压致裂法对 ZK41+40 处进行地应力测试, 测试结果见表 3。在地应力测量深度范围内, 区域最大水平主应力方向为 $N63^{\circ}\sim 65^{\circ}W$, 与隧道轴线方向呈大角度相交, $\beta=79^{\circ}$, 如图 16 所示。钻孔埋深 539.3 m 处的最大水平主应力值为 19.78 MPa, 三向主应力值的关系为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$, 根据国内的实测和统计资料, 工程岩体的初始地应力侧压力系数 λ 在 0.8~3.0, 绝大多数为 $0.8 < \lambda < 1.5$ 。宁缠隧道地应力实测结果表明: 在本次实测范围内, 最大水平主应力为 19.78 MPa, 垂直主应力为 11.85 MPa, 并且在试验范围深度内, 最大水平主应力大于自重应力, 测试段的侧压力系数 $\lambda=1.67$, 说明测点附近应力场以构造应力为主。

表 3 地应力测试结果

Table 3 Ground stress test results

埋深/m	最大水平主应力 σ_H /MPa	最小水平主应力 σ_h /MPa	垂直主应力 σ_v /MPa	最大水平主应力方向
429.3	16.65	8.95	11.63	—
431.3	18.03	10.13	11.69	—
433.3	18.81	10.25	11.74	NW63°
435.3	18.95	10.53	11.80	—
437.3	18.96	11.23	11.85	NW65°
439.3	19.78	10.69	11.91	—

由测试结果可知隧区所在处的地应力为极高地应力, 加之围岩强度较低, 同时隧道埋置深度很大, 最深处可达 500 多米, 因此开挖后隧洞周围岩体塑性区会不断扩大, 进而导致塑性区产生剪胀作用, 当初期支护难以抵挡塑性区域内作用于其上的围岩压力时, 洞周将产生很大的位移, 是围岩发生大变形的的主要原因之一。

2.2 非对称机理分析

围岩不对称变形的广义定义是隧道局部变形特征明显, 狭义定义是隧道中线两侧的变形不均匀。常见的不对称大变形有以下三种形式, 如图 17 (a~c) 所示分别为边墙、拱顶、隧底不对称变形。

通过对 ZK41+40 断面围岩进行拱顶下沉和水

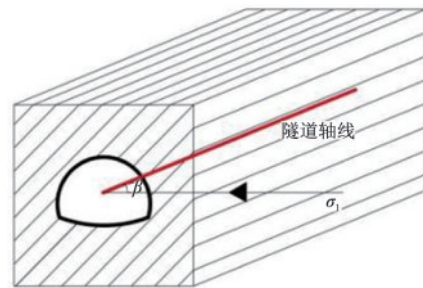


图 16 最大主应力与隧道轴线夹角

Fig.16 The angle between the maximum principal stress and the tunnel axis

平收敛的连续性监测, 结果显示隧道拱顶的沉降小于水平收敛, 右侧拱顶的沉降为 421.3 mm, 左侧拱顶的沉降值是 369.4 mm, 并且左右边墙的收敛值也有较大的差异, 隧道围岩的非对称变形显著。图 18

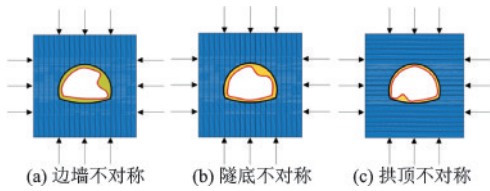


图17 不对称变形形式

Fig.17 Asymmetric deformation forms

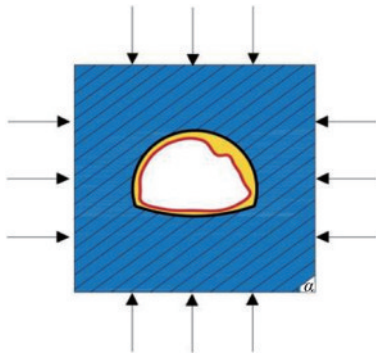


图18 非对称变形

Fig.18 Asymmetric deformation diagram

所示为隧道拱顶和边墙非对称变形图。

2.2.1 岩层产状

岩层产状和隧道围岩的变形息息相关。岩层倾角接近垂直时,在重力作用下,隧道边墙会由于岩层发生弯曲而产生变形,如图19(a)所示;隧道围岩为水平层状岩体时,拱顶和仰拱处容易产生弯曲变形破坏,如图19(b)所示;岩层倾斜不仅会使该围岩发生背离临空面的顺层滑移,而且会导致洞壁发生切向应力集中,引起岩体挤压,造成围岩朝向临空面的弯曲内鼓,如图19(c)所示。

宁缠隧道大变形段围岩的岩层产状以NWN和NEN为主,角度富于变化,如图20和图21所示,岩层倾角 α 和主应力与岩层夹角 γ 随着岩层产状的改变而处于不断的变化之中,层状围岩受到的切应力 σ_i 和挤压力 σ_f 也会随之变化。

对宁缠隧道大变形的多个断面进行统计分析,发现其变形具有以下特征:当 $\gamma < 30^\circ$ 时,主应力对层

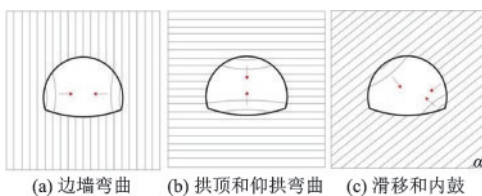


图19 围岩变形

Fig.19 Deformation of surrounding rock

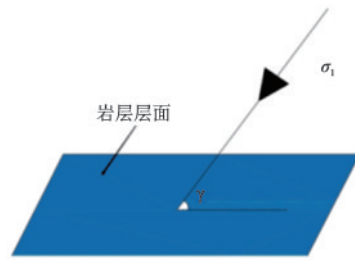


图20 主应力和岩层夹角

Fig.20 The angle between principal stress and rock formation

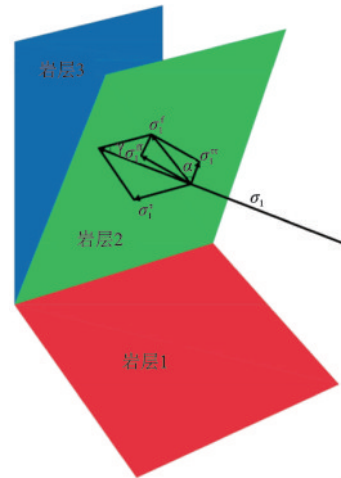


图21 岩层倾角和主应力夹角变化

Fig.21 Variation of the angle between rock bed dip angle and principal stress

状围岩产生较大的切向应力,沿着层面的法向挤压力次之,此时围岩的破坏主要由沿着层面的滑移导致;当 $\gamma > 60^\circ$ 时,围岩主要受到层面法向的挤压力,切应力次之,此时围岩的破坏主要由软岩的流变效应引起;当 $60^\circ > \gamma > 30^\circ$ 时,层状围岩受到的切应力和挤压力都比较大,此时围岩发生更为严重的破坏。

综上所述,岩层倾角的变化使得掌子面软岩空间不对称,隧道一侧的边墙会受到一定的偏压作用,不利于隧道支护结构受力,易引发不对称变形;主应力和层状围岩夹角的变化使隧道断面各个部位的受力方式也不相同,是非对称变形的主要原因之一。

2.2.2 地应力分布

在构造应力为主的层状软岩隧道中,最大主应力 $\sigma_1 = \sigma_{H1}$,其与隧道轴线的夹角对围岩变形影响较大。如图22所示, β 为最大主应力和轴线夹角,以X轴正方向逆时针旋转,在旋转的过程中, σ_1 在X和Y

方向上的分力也会不断变化。假设Y方向为隧道轴线方向,将最大主应力分解在X和Y方向上,如图23所示, σ_1^x 为主应力在X方向上的分力, σ_1^y 为主应力在Y方向上的分力。这些分力的存在,使洞壁受到不同程度的挤压效应,并且隧道开挖后,掌子面上的层状软岩除了受到挤压产生的流变效应外,还有一个指向临空的分力,使得掌子面产生更为严重的滑塌失稳。

综上所述,最大水平主应力方向是隧道围岩发生不对称变形的重要原因之一。当最大水平主应力与隧道轴线既不垂直也不平行的话,隧道横断面一侧会受挤压性偏压构造水平地应力的影响而发生不对称大变形。

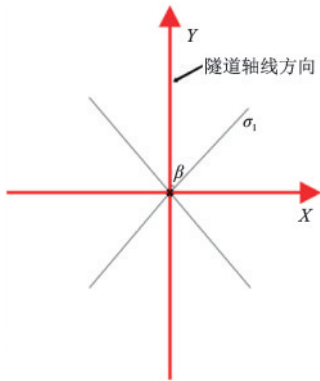


图22 最大主应力和轴线夹角变化

Fig.22 Variation of the angle between the maximum principal stress and tunnel axis

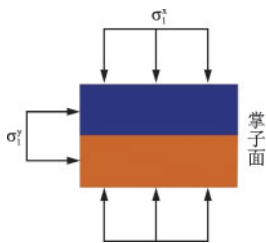


图23 主应力分力示意

Fig.23 Schematic diagram of main stress components

2.2.3 泥岩膨胀崩解

室内试验表明砂岩泥岩互层中的泥岩具有较高的膨胀崩解性,由于地下水的存在,泥岩易发生软化崩解,从而降低了围岩整体的黏聚力和内摩擦角,使层状围岩的稳定性降低。

泥岩崩解不仅会使砂岩倾覆坍塌,还会使砂岩滑动崩塌^[15]。泥岩崩解会使上层的部分砂岩处于悬空位置,砂岩在自重应力下会产生张拉裂隙,节

理不断发育,最终导致砂岩的坍塌,如图24所示, G_1 为砂岩非悬空部分自重, G_2 为砂岩悬空部分自重。

另外,在泥岩崩解的情况下,砂岩会因倾角而滑动失稳,并且其稳定系数会随着泥岩崩解深度的增加而减小,如图25所示, G 为砂岩自重, τ 为砂岩泥岩接触面的抗剪强度。

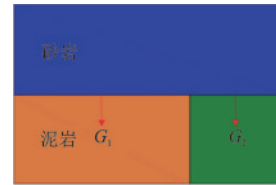


图24 砂岩坍塌

Fig.24 Sandstone collapse

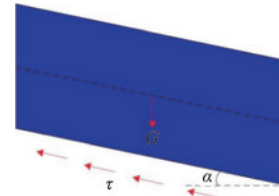


图25 砂岩滑动

Fig.25 Sandstone sliding

故在层状软岩隧道中,互层围岩的膨胀崩解是诱发不对称变形的重要因素。

3 支护优化措施

3.1 强化超前支护

针对超前支护塌腔失效可以采用提高超前注浆小导管的长度和刚度,来增加初支和围岩的协同变形能力。同时,可采取预应力锚索或锚杆作为工程预案,在采取到相关围岩深层变形数据后,用在位移压力较大的时候,保证施加的锚索或锚杆可迅速使得岩体处于三向受力状态,最大限度地发挥锚索或锚杆的支护效果。超前支护可调整为长度6m的 $\varphi 42 \times 4$ 双层注浆小导管,环、纵向间距不变,外插角采用外层大角度内层小角度相结合的方式,上下层交错布置。外层超前注浆小导管采用大角度,一般为 $30^\circ \sim 60^\circ$,内层超前注浆小导管采用小角度,一般为 $8^\circ \sim 15^\circ$,外层可以扩大注浆加固范围,起到类似锚杆的加固效果,内层形成类似简支梁加强对掌子面围岩支撑作用,防止围岩因开挖扰动而松动和坍塌。

3.2 及时封闭掌子面

为防止台阶法开挖过程中上台阶、中台阶掌子面围岩失稳、溜塌,可以在每循环开挖后立即对掌子面使用C30钢纤维混凝土临时封闭,厚度15 cm,此举可以使围岩保持一定的应力水平,限制围岩的膨胀变形,使掌子面围岩具有较好的稳定性。

3.3 强化二次衬砌

由于高地应力软岩流变特性,二次衬砌施作时围岩并未完全收敛,二衬施工后一段时间内(未达到设计强度之前)围岩仍缓慢产生变形,为减少二衬结构破坏,在防水板与喷射砼间增加高密度橡塑海绵板缓冲层。同时为增加二衬结构抗压能力,减少二衬开裂、渗漏水 and 冻损风险,可将二次衬砌混凝土调整为高标号或者使用早强混凝土等特殊性能混凝土,如P10、F200C40防水抗冻混凝土。

3.4 优化锚注支护

锚注支护可以改善围岩物理力学性能,提高围岩的整体性能,对围岩的塑性变形有很好的抑制作用。在实践中,锚杆采用 $\varphi 42$ 中空注浆锚杆, $L=4.5\sim 6$ m,环向间距120 cm,纵向间距60 cm,由原先的监测数据可知采用对称支护的方式效果并不理想,因此,采用不对称的支护方式,着重强化围岩塑性区和位移较大的区域,平面布设如图26所示。如果内层支护施工时围岩已出现较大松动圈,可在内层增加 $L=6.0$ m预应力树脂锚杆,锚杆纵环间距 60×120 cm。

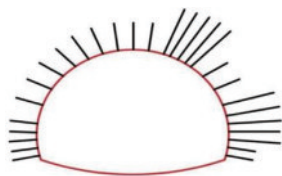


图26 锚杆布设示意

Fig.26 Anchor layout diagram

3.5 效果分析

在ZK41+40断面支护的基础上,ZK40+970断面采用优化后的支护参数和支护形式,并设置同样位置的测点进行监控量测,监测数据见表4。ZK40+970断面沉降收敛曲线如图27所示。

根据监测结果可以看出,ZK40+970断面的支

表4 围岩变形量测结果统计

Table 4 Statistical table of surrounding rock deformation measurement results

位置	拱顶下沉/mm			水平收敛/mm	
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	A	B
ZK40+970	261.6	305.8	298.1	278.1	316.7
ZK40+965	277.3	304.2	293.8	339.4	365.5
ZK40+960	293.5	322.8	316.4	314.5	338.6

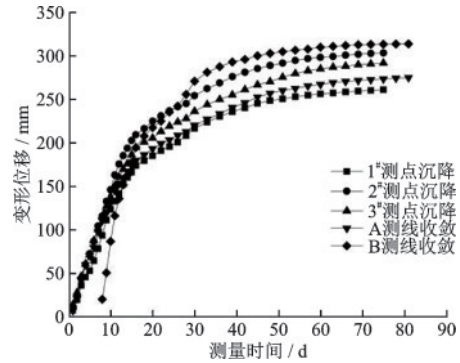


图27 ZK40+970断面收敛沉降时程曲线

Fig.27 Settlement convergence time-history of cross-section ZK40+970

护结构经过优化后,拱顶沉降和水平收敛分别减少了26.5%和30.8%,说明优化后的支护结构在层状软岩不对称大变形中具有更好的支护效果。

4 结论与建议

目前,有关软岩大变形的研究较多,但是关于高地应力条件下层状软岩隧道的非对称变形机制尚不完善。依托宁缠隧道,通过量测数据和室内试验,对其变形机制和规律进行系统分析,得出如下结论:

(1) 宁缠隧道的围岩强度应力比: $Rc/\sigma_{max}=0.71$,属于极高地应力层状软岩隧道,,相较于普通软岩隧道,宁缠隧道成岩性更差、围岩强度更低、地应力更高。并且岩层倾角 α 富于变化,最大水平主应力 $\sigma_1(\sigma_{H1})$ 与隧道轴线夹角 $\beta=79^\circ$,与隧道轴线既不垂直也不平行,因此产生挤压性偏压构造水平地应力,使隧道横断面侧向受力不对称,右侧沉降比左侧多14%左右,右侧收敛比左侧多20%左右,具有明显的非对称特性。

(2) 在极高地应力层状软岩隧道中,互层围岩的吸水膨胀崩解是诱发不对称变形的主要因素。围岩为砂岩泥岩互层时,泥岩崩解会使上层的部分砂

岩处于悬空位置,导致砂岩在重力作用下发生坍塌,同时砂岩也会因岩层倾角的存在产生滑动失稳。

(3)岩层产状与隧道非对称变形密切相关。最大水平主应力 $\sigma_1(\sigma_H)$ 与岩层夹角 γ 随着岩层产状的改变而改变,在构造应力为主的层状软岩隧道中,当 $\gamma < 30^\circ$ 时,主应力对层状围岩产生较大的切向应力,不对称部位主要出现在拱顶和仰拱;当 $\gamma > 60^\circ$ 时,围岩主要受到层面法向的挤压力,不对称部位主要出现在边墙;当 $60^\circ > \gamma > 30^\circ$ 时,层状围岩受到的切应力和挤压力都比较大,不对称部位主要出现在拱肩。

(4)在高地应力层状软岩隧道中,最大水平主应力 $\sigma_1(\sigma_H)$ 与隧道轴线的夹角 β 对围岩变形影响显著。在笛卡尔坐标系中,假设横轴为X轴,Y轴为隧道掘进方向,当主应力 σ_1 与隧道轴线既不垂直也不平行时,会产生挤压性偏压构造水平地应力,使隧道横断面侧向受力不对称,发生偏压性非对称大变形。

(5)传统的对称支护结构在层状软岩隧道中效果不佳,可以根据围岩的受力分析,加强塑性变形和位移较大的区域。在此基础上,提高超前注浆小导管的长度和刚度、改变锚杆的布设方式、喷射临时封闭、在防水板与喷射间增加高密度混凝土、橡塑海绵板缓冲层等措施,可以有效的减少变形量,防止围岩因开挖扰动而松动和坍塌。

参考文献:

- [1] 周航,陈仕阔,刘彤,等.复杂山区深埋隧道软岩大变形机理研究——以杨家坪隧道为例[J].工程地质学报,2022,30(3):852-862.
Zhou H, Chen S K, Liu T, et al. Study on the mechanism of large deformation of soft rocks in deep buried tunnels in complex mountainous areas-taking Yangjiaping tunnel as an example[J].Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 852-862. (in Chinese)
- [2] 潘文韬,何川,吴枋胤,等.不同大变形等级下层理角度对层状软岩隧道的影响[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(5):94-105.
Pan W T, He C, Wu F Y, et al. Effect of laminar angle on laminated soft rock tunnels unde different large deformation levels[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (in English and Chinese), 2023, 45(5): 94-105. (in Chinese)
- [3] 王睿,张煜,黄晓东,等.基于松动圈理论的软岩大变形隧道锚杆支护优化研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(4):74-82.
Wang R, Zhang Y, Huang X D, et al. Optimization study of anchor support in soft rock large deformation tunnel based on loosening circle theory [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (in English and Chinese), 2023, 45(4): 74-82. (in Chinese)
- [4] 胡雄玉,杨清浩,何川,等.层状围岩中管片衬砌受力特征的模型试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(10):1773-1781.
Hu X Y, Yang Q H, He C, et al. Model experimental study of force characteristics of pipe lining in laminated surrounding rock[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1773-1781. (in Chinese)
- [5] 孙振宇,张顶立,侯艳娟,等.基于现场实测数据统计的隧道围岩全过程变形规律及稳定性判据确定[J].岩土工程学报,2021,43(7):1261-1270.
Sun Z Y, Zhang D L, Hou Y J, et al. Determination of deformation law and stability criterion of tunnel surrounding rock based on field measurement statistics[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(7): 1261-1270. (in Chinese)
- [6] 谭忠盛,杨旸,陈伟,等.中老铁路高地应力软岩隧道大变形控制技术研究[J].铁道学报,2020,42(12):171-178.
Tan Z S, Yang Y, Chen W, et al. Research on large deformation control technology of high ground stress soft rock tunnel of China-Laos Railway [J]. Journal of Railway, 2020, 42(12): 171-178. (in Chinese)
- [7] 邓斌,饶和根,廖卫平,等.软岩隧道支护结构优化研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(10):2203-2213.
Deng B, Rao H G, Liao W P, et al. Research on optimization of soft rock tunnel support structure [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(10): 2203-2213. (in Chinese)
- [8] 陈超,李天斌,陈国庆,等.公路隧道挤压型非对称变形解析解研究[J].现代隧道技术,2015,52(5):54-60.
Chen C, Li T B, Chen G Q, et al. Studyon the analytical solution of extrusion-type asymmetric deformation in highway tunnel [J]. Modern Tunnel Technology, 2015, 52(5): 54-60. (in Chinese)
- [9] 孟陆波,黄意霖,李天斌,等.高地应力层状软岩隧道非对称挤压大变形分级修正方法研究[J].岩石力学与

- 工程学报, 2022, 41(1): 147-156. (in Chinese)
- Meng L B, Huang Y L, Li T B, et al. Study on the graded correction method for asymmetric extrusion large deformation in high ground stress laminated soft rock tunnel[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 147-156. (in Chinese)
- [10] 王栋, 彭雪辉, 黄戡, 等. 层状岩体隧道变形特征及非对称支护研究[J]. 公路与汽运, 2021, 1(2): 132-136.
Wang D, Peng X H, Huang Z, et al. Study on deformation characteristics and asymmetric support of stratified rock tunnel[J]. Highways and Motor Transport, 2021, 1(2): 132-136. (in Chinese)
- [11] 唐勇, 孙智慧. 层状软岩隧道开挖稳定性及锚杆非对称支护方式研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 52-60.
Tang Y, Sun Z H. Research on the stability of excavation and asymmetric support method of anchor rod in stratified soft rock tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2020, 39(4): 52-60. (in Chinese)
- [12] 邵珠山, 李希, 赵南南, 等. 高地应力软岩隧道初期支护优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(5): 99-105.
Shao Z S, Li X, Zhao N N, et al. Optimization of initial support in high ground stress soft rock tunnel[J]. China Science and Technology of Safety Production, 2021, 17(5): 99-105. (in Chinese)
- [13] 王英帆, 刘钦, 胡永志, 等. 高地应力软岩隧道大变形监测及支护优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(30): 317-323.
Wang Y F, Liu Q, Hu Y Z, et al. Large deformation monitoring and support optimization in high ground stress soft rock tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(30): 317-323. (in Chinese)
- [14] 孙小明, 武雄, 何满潮, 等. 强膨胀性软岩的判别与分级标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 12(1): 128-132.
Sun X M, Wu X, He M C, et al. Discrimination and grading standard of strong expansive soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 12(1): 128-132. (in Chinese)
- [15] 陈志敏. 膨胀性顺(互)层边坡崩塌机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 3785-3793.
Chen Z M. Study on the collapse mechanism of expansive cis(inter)layer slopes[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup2): 3785-3793. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)