

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.02.027

# 隧道掌子面预应力锚杆支护作用效果研究

沈向前<sup>1</sup>,陈道云<sup>1</sup>,郑超<sup>2</sup>

(1.福建路桥建设有限公司,福建福州 350002;2.福州大学 土木工程学院,福建福州 350116)

**摘要:**该文针对渭(源)武(都)高速公路木寨岭隧道软岩大变形段掌子面稳定性问题,提出采用预应力锚杆对掌子面进行临时加固的技术方案。通过数值模拟对掌子面预应力锚杆的加固效果以及加固范围进行探讨,并在此基础上进一步分析初始地应力对加固效果的影响。研究表明:在给定的工程条件下,预应力锚杆对掌子面加固的效果要明显优于全长黏结锚杆;采用预应力锚杆加固掌子面时,对掌子面轮廓线附近围岩的加固效果不明显,在实际应用时可以考虑简化;当掌子面预应力锚杆的支护参数确定时,存在临界埋深使得预应力锚杆无法起到限制掌子面最终变形的作用。

**关键词:**隧道工程;软弱围岩;掌子面支护;预应力锚杆;数值模拟

**中图分类号:**U455

**文献标志码:**A

## 0 引言

掌子面稳定是隧道安全施工的前提。对于较好的围岩条件,采用较少甚至不采用支护措施,掌子面便可达到短期或长期稳定的状态。但在软弱围岩隧道中,掌子面较难达到自稳状态,严重威胁隧道施工安全<sup>[1-3]</sup>。因此,如何在软弱围岩隧道中维持掌子面稳定一直是研究的热点问题。

对于掌子面稳定性问题,张光武<sup>[4]</sup>基于筒仓理论,建立了隧道掌子面破坏模型,并提出相应的破坏模型支护力计算方法;杜俊等<sup>[5]</sup>以筒仓理论和太沙基理论为基础,运用椭球体失稳坍塌理论,建立了隧道掌子面失稳的计算模型并推导出相应计算公式;王秀英等<sup>[6]</sup>基于极限平衡理论推导了掌子面极限支护力的计算公式,同时依托宝兰客专洪亮营黄土隧道,对理论计算以及数值模拟结果进行对比,认为理论公式计算结果的1.5倍可作为掌子面最小支护力;胡亚峰等<sup>[7]</sup>借助三维有限元Midas/GTS,结合西久公路拉脊山隧道,研究了CRD法开挖时的掌子面稳定性问题,认为对掌子面进行加固可以有效防止掌子

面失稳;刘大刚等<sup>[8]</sup>以郑万高铁线路为工程依托,对掌子面稳定性级别进行划分,并针对现场的掌子面稳定性问题提出了适用的支护措施。

基于掌子面的稳定性,许多学者对掌子面加固措施进行了相关研究,其中以掌子面锚杆为主。陈炜韬等<sup>[9]</sup>以厦门海底隧道陆域段为依托,通过模型试验研究了正面锚杆等加固措施对掌子面稳定性的影响,结果表明采用正面锚杆对掌子面变形有着比较好的控制效果;王秀英等<sup>[10]</sup>依托兰渝铁路桃树坪隧道,对掌子面锚杆在软岩隧道中的应用效果进行了评价,结果表明掌子面锚杆的支护效果与设计参数密切相关;唐勇三等<sup>[11]</sup>以渭渝高速公路岐山隧道为研究背景,采用数值分析方法,对比了在有无掌子面锚杆加固情况下全断面开挖的变形特性;王克忠等<sup>[12]</sup>结合野猪山隧道的实际工程环境,对采用掌子面锚杆支护的新意法以及传统台阶法进行数值模拟研究,结果表明:新意法可有效控制掌子面变形;关岩鹏等<sup>[13]</sup>通过数值模拟手段得出适合于大断面软岩隧道的新意法隧道加固参数,认为掌子面锚杆加固长度与加固密度需达到一定数值后,才能产生比较好的加固效果。

收稿日期:2020-12-29(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41907251,52179098)

作者简介:沈向前,男,硕士,高级工程师.E-mail:385670696@qq.com

掌子面锚杆按照单次布设长度可分为5 m以下的短锚杆以及5 m以上的长锚杆。短锚杆主要起到防止掌子面围岩松动掉块、促进掌子面稳定的作用。而长锚杆在控制掌子面变形的同时,主要起到控制掌子面前方围岩变形的作用<sup>[14]</sup>。目前中国对于掌子面锚杆支护措施的研究,主要集中于10 m以上长锚杆,分析在长锚杆等措施加固掌子面的前提下,实现大断面开挖隧道的可行性,而对于短锚杆支护效果的研究较少。

掌子面长锚杆的施工以及隧道大断面开挖的实现,均需要配套的大型机械设备,短期内难以在中国隧道实现推广。相较于长锚杆,5 m以下短锚杆的施工方便、快捷,不需要专门的钻孔设备以及大量的施工空间,更容易在中国隧道中实施。虽然无法通过布设短锚杆实现隧道的大断面开挖或施工工法优化,但在作为促进掌子面稳定的辅助支护措施时,可以解决掌子面喷射混凝土支护力不足、预留核心土占用施工作业空间的问题。因此对于掌子面短锚杆支护效果的研究具有现实意义。

本文以渭(源)武(都)高速公路木寨岭隧道为工程背景,针对现场掌子面存在的松动掉块以及局部滑塌问题,提出采用长度与单次开挖进尺相同的预应力锚杆对掌子面进行临时补强。采用有限差分软件FLAC<sup>3D</sup>建立符合现场实际的数值模型,对掌子面预应力锚杆的支护作用效果以及适用条件进行系统性分析评价。

## 1 工程概况

渭武高速公路木寨岭隧道采用分离式双向四车道设计,左线全长15 226 m,右线全长15 168 m,设计高程2 419.12~2 641.25 m,最大埋深约629.1 m,隧道建筑限界净宽10.25 m,设计速度80 km/h。全线均为V级围岩,岩性以软质炭质板岩为主。隧址区小微构造极为发育,岩体破碎,裂隙密集,常伴有渗水,围岩稳定性差。隧址融合了构造交会部位地应力高度集中,褶皱带活动强烈,近东西走向断层发育,地质构造极为复杂,类型多样,对隧道存在较大影响的有3个背斜和3个向斜构造,6处褶皱和12条断层。根据设计图中给出的实测地应力结果,测段位置最大主应力值为12.14~18.76 MPa,最小主应力

值为7.34~11.61 MPa,最大主应力方向为NE39.6°。隧址区范围内的岩石抗压强度 $R_c$ 值范围为20~30 MPa,岩石强度应力比 $R_c/\sigma_{max}$ 值均小于4,属于极高应力区。隧址区地层岩性较软,岩体较破碎,在极高应力状态下,围岩极易受施工扰动影响,发生大变形。

现场调研时发现,隧道掌子面时常处于不稳定状态,以局部围岩滑塌为主(图1),严重时发生失稳,并进一步诱发拱顶坍塌(图2)。



图1 掌子面局部滑塌



图2 掌子面失稳导致拱顶坍塌

针对掌子面围岩松动掉块以及局部滑塌问题,现场主要采用喷射混凝土进行临时补强,然而在高应力以及围岩本身软弱破碎的叠加作用下,喷射混凝土产生的支护效果十分有限。为解决该问题,在综合考虑现场施工条件后,本隧道计划采用2 m长锚杆对掌子面围岩局部掉块以及滑塌区域进行临时补强。由于设定的锚杆支护长度与隧道单次开挖进尺相同,因此在隧道推进过程中不涉及锚杆的切割问题,锚杆材质采用传统的钢材便能满足施工要求。

掌子面锚杆通常采用全长黏结锚杆,此类锚杆虽然施工工艺简单,但需要围岩产生一定的变形后才能提供支护抗力,发挥支护效果慢,属于被动支护<sup>[15-16]</sup>。而本支护方案主要解决掌子面不稳定问题,

存在一定的突发性。因此要求采取的支持措施能够尽快提供较大的支持抗力。若采用传统的全长黏结锚杆,由于高应力软岩在开挖初期即会迅速产生较大变形,很可能导致其产生的支持效果有限。相比之下,预应力锚杆虽然施工工艺较为繁琐,但其具有可提供主动支持抗力以及发挥支持作用效果快的特点<sup>[17]</sup>,可在隧道掌子面开挖初期快速提供较大的支持抗力,有望起到临时补强掌子面的作用。因此,为比选出最佳的掌子面锚杆类型用以临时补强掌子面,采用数值模拟的方式对全长黏结锚杆以及预应力锚杆对掌子面的支持效果进行对比分析。

## 2 数值模型及计算参数

### 2.1 基本数值模型的建立

选取木寨岭隧道软岩大变形段为研究对象,采用有限差分软件FLAC<sup>3D</sup>进行数值建模分析。研究段平均埋深约300 m。为简化计算,建模时取隧道埋深为40 m,其余埋深影响通过在上部边界施加自重应力进行等效考虑。模型边界尺寸的确定依照圣维南原理取3~5倍的开挖跨径。隧道模型尺寸为116 m×50 m×90 m,模型网格划分如图3所示。为使计算结果更加精确地反映掌子面的变形情况,对掌子面部位网格进行加密处理。模型的四周采用位移边界条件进行约束。

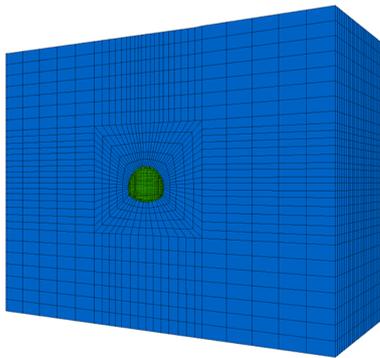


图3 隧道模型网格划分

隧道围岩等级为V级,模拟时的相关参数按照《公路隧道设计规范:第一册 土建工程》(JTG 33701—2018)进行选用,如表1所示。模型采用全断面法开挖,每开挖循环进尺为2 m。为充分消除边界效应的影响,当模型循环开挖至中部时,再安设掌子面锚杆,

研究其支持作用效果。假定围岩服从Mohr-Coulomb屈服准则。

表1 围岩(V级)参数

重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
18	1	0.4	0.1	25

### 2.2 支护结构的模拟及相关参数

隧道初期支护结构中的混凝土喷层采用Shell单元模拟。钢筋网及钢拱架的作用,采用刚度折算的方式,通过等效提高混凝土喷层的弹性模量予以考虑。初支具体参数如表2所示。不考虑二次衬砌的作用。

表2 初支参数

重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/cm
25	50	0.2	28

全长黏结锚杆与预应力锚杆均采用Cable单元进行模拟。Cable单元包含锚杆构件以及水泥浆。全长黏结锚杆赋予的具体参数如表3所示。预应力锚杆为端锚式锚杆,自由段通过调整水泥砂浆的参数至极小值(单位长度水泥浆黏聚力及刚度均取1 Pa)进行模拟<sup>[18]</sup>,其余参数均与全长黏结锚杆相同。锚杆托盘通过固结Cable单元端头节点与实体单元节点实现模拟。初始预紧力的施加,通过Pretension命令实现。

表3 掌子面锚杆参数

弹性模量/GPa	锚杆直径/mm	横截面积/m <sup>2</sup>	单位长度水泥浆黏聚力/Pa	单位长度水泥浆刚度/(N·m <sup>-2</sup> )	抗拉强度/kN
210	25	0.000 491	$2 \times 10^5$	$1.75 \times 10^7$	$2 \times 10^5$

掌子面支护长度与隧道单次开挖进尺相同均为2 m。由于掌子面锚杆布设长度短,布设数量少,因此不考虑布设的时间问题。假定掌子面开挖完成后,即可完成掌子面锚杆施作。预应力锚杆的内锚固段长0.4 m,自由段长1.6 m,初始预紧力60 kN。

掌子面锚杆采用2.5 m×2.5 m全断面梅花形布设。隧道开挖面最大跨度约为13 m,最大高度约为11 m,开挖面积约为115 m<sup>2</sup>。总计布设33根锚杆,平均布设密度约为0.29根/m<sup>2</sup>。图4为掌子面锚杆平面布置图。

### 2.3 预应力锚杆与全长黏结锚杆支护作用效果对比

为研究两种不同类型锚杆对于掌子面变形的影响程度,在隧道模型中部 $y=26\text{ m}$ 断面处掌子面位置,沿隧道中轴线方向布置一系列挤出变形监测点(挤出变形即掌子面向已成洞室内的水平变形),得到图5所示的掌子面挤出变形图。

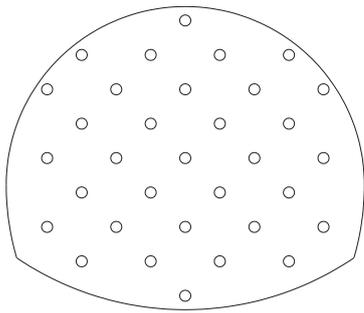


图4 掌子面锚杆布置平面图

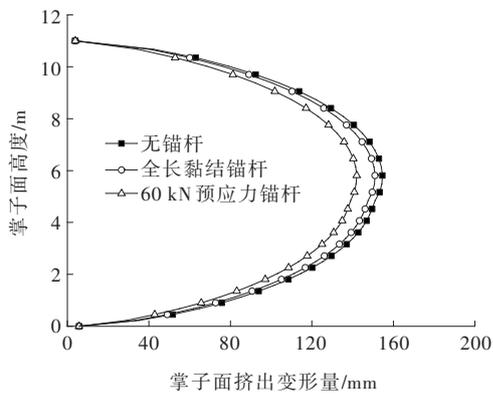


图5 不同类型掌子面锚杆支护下掌子面挤出变形

由图5可知:①采用不同类型的掌子面锚杆全断面支护掌子面时,对于掌子面变形的限制规律相同,即距离开挖轮廓线位置越远的掌子面围岩受到的变形限制程度越大;②采用全长黏结锚杆支护掌子面时,由于临时支护长度较短,锚杆端部未能锚入掌子面前方未受扰动的岩体中,且支护作用效果的产生需要牺牲一部分的掌子面变形,因此对于掌子面的加固效果并不明显,仅将掌子面最大挤出变形量由 $154.6\text{ mm}$ 减小至 $150.97\text{ mm}$ ,产生的支护作用效果约为2%;③采用预应力锚杆作为临时支护措施时,虽然支护长度与全长黏结锚杆相同,但是由于能在掌子面变形初期迅速提供较大的支护抗力,因此支护作用效果较全长黏结锚杆有了较大的提升,将全断面开挖时的最大挤出变形量由 $154.6\text{ mm}$ 减小至 $142\text{ mm}$ ,产生的支护作用效果约为8%,为采用全长黏结锚杆支

护时的4倍。由上述分析可知,现场选用预应力锚杆临时补强掌子面可以获得较好的支护效果。

### 3 预应力锚杆布置范围优化

在确定了采用预应力锚杆作为掌子面的临时补强措施后,考虑到越靠近开挖轮廓线位置掌子面挤出变形越小<sup>[19-20]</sup>,布置预应力锚杆对这部分围岩的变形限制程度较小,因此可以进一步对预应力锚杆的布置范围进行优化。本节为了确定可优化范围,首先对掌子面挤出变形量随预应力锚杆密度的变化规律进行研究,而后确定出掌子面挤出变形随锚杆布置密度变化不大的范围作为可优化范围。

#### 3.1 可优化范围确定

本节共设置3种工况,将锚杆布置间距由 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 分别缩小至 $2.0\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 以及 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ ,对应的锚杆布置密度分别为 $0.29\text{ 根}/\text{m}^2$ 、 $0.46\text{ 根}/\text{m}^2$ 、 $0.88\text{ 根}/\text{m}^2$ 。在掌子面上沿中轴线方向以及水平方向布置一系列挤出变形监测点,得到掌子面挤出变形图如图6、7所示。

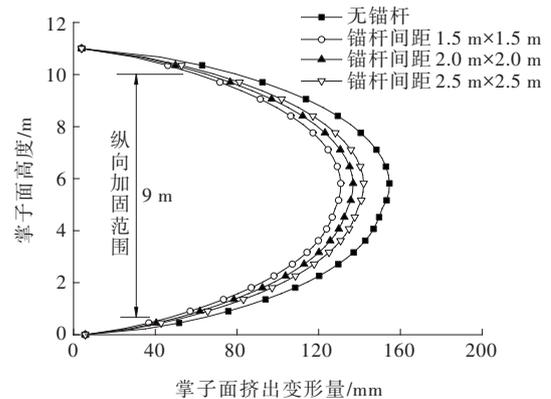


图6 掌子面挤出变形图(纵向)

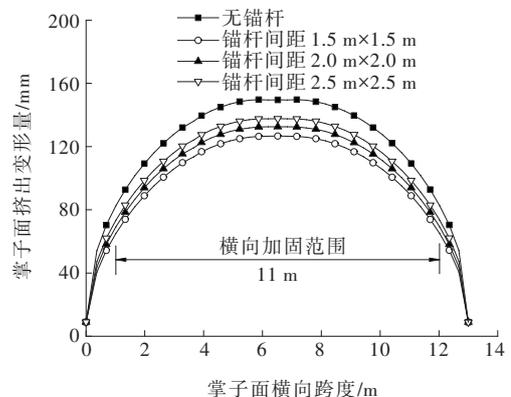


图7 掌子面挤出变形图(横向)

由图6、7可知:随着锚杆布置密度的增大,掌子面挤出变形在全断面范围内减小。掌子面中心的减小程度最大,越靠近开挖轮廓线位置减小程度越小。例如,在锚杆布置间距为2.0 m×2.0 m时,掌子面中心的挤出变形量较无锚杆时由154.6 mm降低至136.8 mm,而掌子面边缘位置挤出变形变化很小甚至没有发生变化;当锚杆布置间距缩小至1.5 m×1.5 m时,掌子面挤出变形的最大值进一步由136.8 mm降低至130 mm,但掌子面边缘位置挤出变形的变化仍旧不明显。

将掌子面边缘随锚杆布置密度增大,挤出变形变化不大的部分确定为可优化范围,对原布置范围进行缩减优化。纵、横向上的缩减距离根据图6、7确定,得到优化后的掌子面锚杆布置范围如图8所示。优化后,掌子面纵向加固范围为9 m,横向加固范围为11 m。相较于原布置范围分别在纵、横向上缩减了2 m的加固范围。

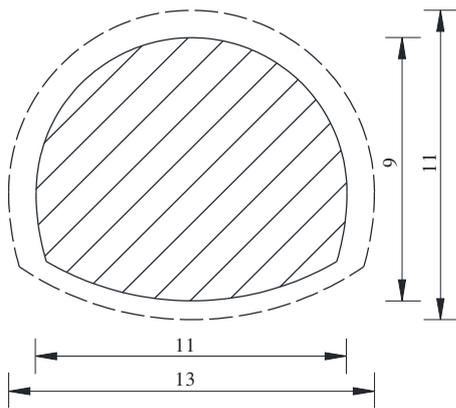


图8 掌子面锚杆布置范围优化后示意图(单位:m)

### 3.2 局部加固作用效果

按照优化后的掌子面锚杆布置范围,对上述3种不同密度下的全断面掌子面锚杆加固工况进行优化。以锚杆布置间距1.5 m×1.5 m为例,得到布置范围优化前后的掌子面挤出变形对比曲线,如图9、10所示。

由图9、10可知:在全断面范围内布置锚杆与在优化范围内布置锚杆产生的支护作用效果几乎相同。掌子面最大挤出变形量仅由130.8 mm增大至132.34 mm,挤出变形量增大约1%,而锚杆的用量却能够从101根减少至74根,节省约26.7%。对其余两种工况进行范围优化后也得到了类似的结果。将2.0 m×2.0 m全断面锚杆加固方案进行简化后,掌子

面最大挤出变形增大约1%,锚杆用量节省约20%;2.5 m×2.5 m全断面锚杆加固方案进行简化后,掌子面最大挤出变形增大约1%,锚杆用量节省约18%。可以看出减少掌子面轮廓线周围锚杆的布置,对于掌子面预应力锚杆所产生的支护效果影响并不大,但可以显著减少锚杆用量,降低施工成本,加快施工进度。

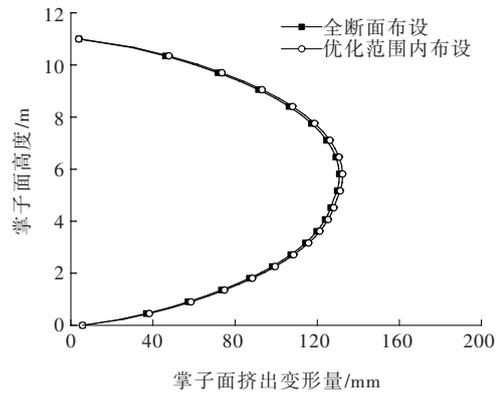


图9 优化前后掌子面挤出变形量对比(纵向)

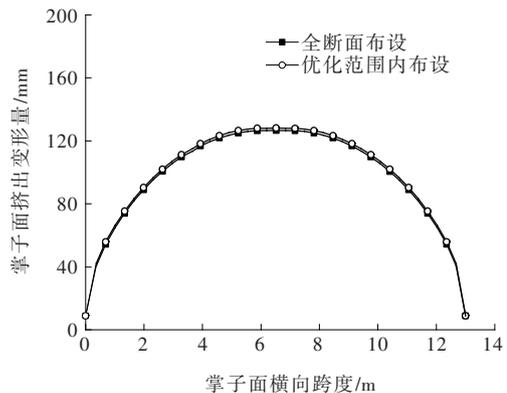


图10 优化前后掌子面挤出变形量对比(横向)

## 4 预应力锚杆支护效果影响因素分析

由前述分析可知,在给定的工程条件下,预应力锚杆对掌子面的支护效果要明显优于常规采用的全长黏结锚杆。为进一步探讨掌子面预应力锚杆的适用范围,以前述数值模型为基础,通过单一改变隧道模型的埋深以及侧压力系数,分析初始地应力对掌子面预应力锚杆支护作用效果的影响规律。为量化评价掌子面预应力锚杆的支护作用效果,定义掌子面挤出变形约束量 $\delta$ :

$$\delta = \frac{\delta_0 - \delta_s}{\delta_0}$$

式中: $\delta_0$ 为无锚杆支护条件下掌子面挤出变形最大值(mm); $\delta_s$ 为锚杆支护条件下掌子面挤出变形最大值(mm)。

#### 4.1 不同埋深影响

本小节研究不同埋深条件下,掌子面预应力锚杆支护效果的变化规律。仅改变基础模型的埋深条件,设置埋深为300 m、350 m、400 m、450 m、500 m、550 m共6种工况。各埋深条件的模拟,通过在模型上部边界施加对应的自重应力实现。同时在每种工况下将锚杆的初始预应力增大,由30 kN增加至120 kN,得到不同埋深影响下掌子面预应力锚杆支护效果变化规律如图11所示。

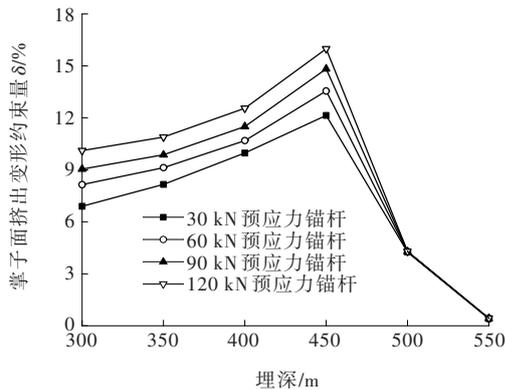


图11 埋深对掌子面预应力锚杆支护效果的影响

由图11可知:预应力锚杆对于掌子面的支护作用效果随埋深的变化存在“拐点”。当埋深小于450 m时,预应力锚杆对掌子面的支护作用效果随着埋深的增大而增大,此时增大初始预应力可以有效提高支护作用效果。例如,初始预应力为30 kN时,预应力锚杆对于掌子面变形约束量为6%~12%;当初始预应力提升至120 kN时,该量值增大至10%~16%,相较30 kN时增大4%。当埋深大于450 m时,预应力锚杆对于掌子面的支护作用效果开始随着埋深的增大而降低,至550 m时几乎不产生支护作用效果,同时初始预应力的大小不再产生影响。

为探讨“拐点”产生的原因,首先对预应力锚杆应用于掌子面支护时,产生的支护作用作简单分析。掌子面预应力锚杆的支护作用主要包括两部分:一部分是在掌子面挤出压力释放初期所提供的主动支护抗力,主要体现为对掌子面初期挤出变形的影响;另一部分是随着掌子面挤出压力的释放,初始预应力被抵消后,与掌子面共同变形产生的被动支护抗

力,主要体现为对掌子面后期变形发展的约束作用。

随着埋深的增大,掌子面挤出压力随之增大。由图11曲线出现的“拐点”推测,预应力锚杆提供的支护抗力与掌子面挤出压力的比值可能存在某一临界值。当该比值大于临界值时,预应力锚杆的两部分支护作用均能体现在对掌子面最终变形量的控制上;当比值小于临界值时,预应力锚杆的支护作用仅能体现在掌子面挤出压力释放初期所提供的主动支护抗力上,对于最终变形的约束几乎不起任何作用。由于在数值计算中未考虑时间效应,计算结果仅能反映出预应力锚杆对掌子面最终变形量的影响,这就使预应力锚杆支护效果随着埋深的增加出现“拐点”。

由上述分析可知:在掌子面预应力锚杆支护参数确定的情况下,存在临界埋深使得预应力锚杆无法起到限制掌子面最终变形的作用。因此在评估掌子面预应力锚杆的支护作用效果时,埋深的影响不容忽视。

#### 4.2 不同侧压力系数影响

本小节研究不同侧压力系数条件下,掌子面预应力锚杆支护效果的变化规律。取轴向及横向侧压力系数相同。保持埋深条件不变(300 m),仅改变基础模型的侧压力系数,侧压力系数为0.85、0.90、0.95、1.00、1.05、1.10、1.15、1.20、1.25共9种工况。同时在每种工况下将锚杆的初始预应力增大,由30 kN增加至120 kN,得到不同侧压力系数条件下掌子面预应力锚杆支护效果变化规律如图12所示。

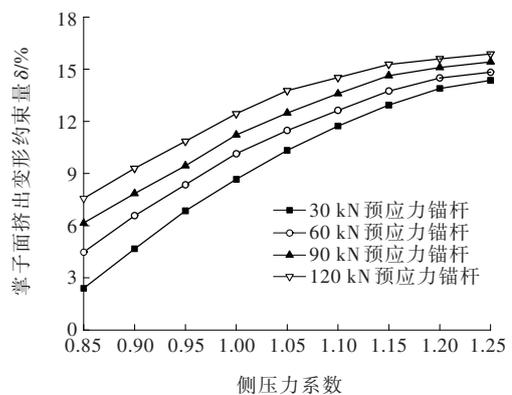


图12 侧压力系数对掌子面预应力锚杆支护效果的影响

由图12可知:不同初始预应力条件下,预应力锚杆对掌子面的支护作用效果随着侧压力系数的变化趋势相同。具体为,随着侧压力系数的增大,预应力

锚杆对掌子面的支护作用效果逐渐增大,而提高初始预应力对支护作用效果的提高程度则越来越低。例如,侧压力系数为 0.85 时,将初始预应力由 30 kN 提升至 120 kN,掌子面挤出变形约束量可提高 3.4%,侧压力系数增大为 1.25 时,同样将初始预应力由 30 kN 提升至 120 kN,掌子面挤出变形的约束量仅提高 1%。

同时,随着初始应力的增大,侧压力系数的变化对于预应力锚杆支护作用效果的影响有所降低。例如,当初始预应力为 30 kN 时,侧压力系数由 0.85 增大至 1.25,掌子面挤出变形约束量的变化范围为 7.6%~15.5%;当初始预应力为 120 kN 时,掌子面挤出变形约束量的变化范围为 11%~16.5%,变化范围缩小。

由上述分析可知:侧压力系数对于掌子面预应力锚杆支护效果的影响曲线并未出现“拐点”。因此,在考虑初始地应力对掌子面预应力锚杆支护作用效果时,主要考虑埋深对其影响。

## 5 结 论

针对渭武高速公路木寨岭隧道施工过程中的掌子面稳定性问题,提出采用预应力锚杆对掌子面进行临时补强。通过数值模拟对比了预应力锚杆与全长黏结锚杆的支护效果,并进一步确定现场应用时的可优化范围。在此基础上对影响预应力锚杆支护效果的因素进行分析,得到如下结论:

(1) 在所给定的工程条件下,预应力锚杆对掌子面变形的控制效果为全长黏结锚杆的 4 倍。

(2) 采用预应力锚杆加固掌子面时,对开挖轮廓线附近的围岩加固效果不明显,在实际应用时可以考虑简化。

(3) 当掌子面预应力锚杆的布设参数确定时,存在临界埋深,使得预应力锚杆无法起到限制掌子面最终变形的作用。受限于篇幅,本文仅得到这一定性结论,后续将对临界埋深作系统性的量化研究。

### 参考文献:

[1] 朱正国,李文江,刘志春,等. 软弱围岩隧道掌子面挤出变形特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(3):

711-716, 736.

- [2] 叶飞,宋京,唐勇三,等. 软弱围岩隧道掌子面及超前核心土挤出位移特征研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(S1): 323-330.
- [3] 侯艳娟,张顶立,李奥. 隧道施工塌方事故分析与控制[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 45-52.
- [4] 张光武. 基于筒仓理论的近接断层掌子面稳定分析模型[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S2): 663-668.
- [5] 杜俊,梅志荣,陈永照. 基于椭球体失稳坍塌理论的隧道掌子面失稳计算研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(9): 1497-1504.
- [6] 王秀英,李凯,王丽娟,等. 软弱围岩隧道掌子面极限支护压力研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(9): 110-117.
- [7] 胡亚峰,董新平,马晓良,等. 浅埋软弱地层隧道施工中掌子面稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(6): 1368-1372, 1385.
- [8] 刘大刚,姚萌,张霄. 郑万高铁大断面岩质隧道掌子面稳定性评价及控制措施[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(8): 1311-1315.
- [9] 陈炜韬,王明年,张磊,等. 预加固措施对隧道开挖稳定性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1640-1645.
- [10] 王秀英,郑维翰,张建国,等. 软岩隧道玻纤锚杆预加固掌子面的稳定性分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S1): 53-58.
- [11] 唐勇三,林剑飞,叶飞,等. 基于新意法原理的隧道全断面预加固效果研究[J]. 公路, 2017, 62(11): 296-301.
- [12] 王克忠,朱海斌,孔令民,等. 新意法在野猪山隧道施工中的应用研究[J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(3): 237-242.
- [13] 关岩鹏,黄明利,彭峰. 大断面软岩隧道新意法加固参数研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(3): 105-110.
- [14] 关宝树. 软弱围岩隧道变形及其控制技术[J]. 隧道建设, 2011, 31(1): 1-17.
- [15] 程良奎,张培文,王帆. 岩土锚固工程的若干力学概念问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 668-682.
- [16] 汪波,郭新新,何川,等. 当前我国高地应力隧道支护技术特点及发展趋势浅析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 1-10.
- [17] 牛建春,高家平,张胜军,等. 深部软岩巷道围岩稳定性综合分析及支护实践[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(2): 68-71.
- [18] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC<sup>3D</sup> 基础与工程实例[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [19] 崔柔柔,杨其新,蒋雅君. 软岩隧道掌子面玻璃纤维锚杆加固参数研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(11): 79-83.
- [20] 李斌,漆泰岳,吴占瑞,等. 隧道掌子面锚杆加固参数确定方法[J]. 铁道学报, 2012, 34(10): 115-121.