

文章编号: 1007-2993(2024)06-0692-06

# 深埋饱和黄土隧道围岩软化效应及其控制措施

王文卓 胡金鑫 邱成虎 杨治军

(甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃兰州 730000)

**【摘要】** 黄土隧道在地下水作用下围岩会发生不同程度软化, 强度大幅度减弱, 给隧道设计施工带来许多困难。依托陇东某黄土隧道, 设置不同软化程度, 利用有限元数值模拟软件对不同围岩软化程度下隧道围岩变形和衬砌结构的受力变化规律进行计算分析, 同时对围岩软化后现场加固措施以及扩大拱脚的衬砌结构进行对比分析, 结果表明: 深埋黄土隧道强软化后, 拱顶沉降增大了 271%, 拱底隆起增大了 283%, 水平收敛增大了 205%, 初支最大主应力增大了 107%, 其最不利受力位置出现在拱肩处; 采用两种加固措施以及扩大拱脚后, 围岩竖向位移减小 5.10% ~ 77.81%, 初期支护最大主应力减小 17.7% ~ 46.5%, 由加固处治效果可以看出, 锁脚钢管桩加固仅对拱脚围岩变形及衬砌受力有所改善, 但效果不明显; 衬砌结构采用扩大拱脚可以较好地控制衬砌结构的变形及受力, 且施工难度小, 成本低; 帷幕注浆加固对于饱和黄土隧道围岩软化后的变形及支护结构受力改善效果最佳。

**【关键词】** 黄土隧道; 围岩软化; 现场加固; 扩大拱脚

**【中图分类号】** U457+.3

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.008

## Softening Effect and Control Measures of Surrounding Rock in Deep Buried Saturated Loess Tunnel

Wang Wenzhuo Hu Jinxin Qiu Chenghu Yang Zhijun

(Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China)

**【Abstract】** Under the action of groundwater, the surrounding rock of a loess tunnel will undergo varying degrees of softening, greatly weakening its strength, which brings many difficulties to the design and construction of the tunnel. Based on a loess tunnel in Longdong, different degrees of softening were set up, and finite element numerical simulation software was used to calculate and analyze the deformation of the tunnel surrounding rock and the stress changes of lining structure under different degrees of rock softening. At the same time, a comparative analysis was conducted on the on-site reinforcement measures after the softening of the surrounding rock and the lining structure of the enlarged arch foot. The results show that after the strong softening of the deeply buried loess tunnel, the settlement of the arch top increased by 271%, the uplift of the arch bottom increased by 283%, the horizontal convergence increased by 205%, and the maximum principal stress of the initial support increased by 107%. The most unfavorable stress position appeared at the arch shoulder. After adopting two reinforcement measures and expanding the arch foot, the vertical displacement of the surrounding rock decreases by 5.1% to 77.81%, and the maximum principal stress of the initial support decreases by 17.7% to 46.5%. From the reinforcement effect, it can be seen that the locking foot steel pipe pile reinforcement only improves the deformation of the arch foot surrounding rock and the stress on the lining, but the effect is not significant. Using enlarged arch feet in the lining structure can effectively control the deformation and stress of the lining structure, and the construction difficulty is small and the cost is low. The curtain grouting reinforcement has the best effect on improving the deformation and supporting structure stress of saturated loess tunnel surrounding rock after softening.

**【Key words】** loess tunnel; softening of surrounding rock; on site reinforcement; enlarged arch foot

### 0 引言

在黄土隧道工程中, 当黄土处于干燥状态或含水率较低时, 黄土隧道围岩稳定性及支护结构受力状

态相对较好, 但近十几年来, 西北地区黄土隧道的建设数量逐渐增加, 高含水率或饱和黄土围岩越来越多, 造成了大量的施工技术难题和隧道结构病害, 给设计

作者简介: 王文卓, 男, 1996年生, 汉族, 甘肃定西人, 硕士, 助理工程师, 主要从事公路隧道的设计与科研工作。E-mail: 2390034792@qq.com

施工和运营养护造成诸多困难。

目前,许多专家学者对高含水率黄土隧道的开挖及支护措施进行了研究<sup>[1-4]</sup>。王亚琼等<sup>[5]</sup>利用多种检测方法对某黄土公路隧道病害进行了探测,同时针对各类病害提出了治理方案,并利用数值模拟对隧道治理前后围岩稳定性和衬砌结构受力状态进行了分析;丁兆民等<sup>[6]</sup>通过有限元计算分析方法对黄土公路隧道4种不同工况下的加固方案进行分析,发现对拱脚地基采用树根桩和夯扩桩加固的方法可以提高隧道安全通行能力;陈天明等<sup>[7]</sup>通过对现场钻芯进行取样检测,发现在富水软塑黄土隧道中采用钢管桩加固隧基在软塑层中成桩困难,加固、堵水效果差,而采用袖阀管注浆加固隧基,对掘进施工干扰小,堵水和加固软塑土体的效果更佳;来弘鹏等<sup>[8]</sup>依托银西高铁上阁村隧道,通过现场监测得到了典型断面上覆软塑黄土层隧道水分迁移的基本规律;薛晓辉等<sup>[9]</sup>针对乔原隧道穿越富水黄土地层时出现的各种病害,提出了可控注浆加固技术,并通过数值模拟等手段对其加固效果进行全面分析,发现可控注浆加固技术在隧道穿越富水黄土地层处治中取得了良好的效果。

综上,目前针对黄土隧道围岩在不同软化程度下对隧道衬砌结构受力变形影响的研究尚不多见。因此本文以陇东某深埋富水黄土隧道为工程背景,通过数值模拟和现场调研,研究了围岩在不同软化程度下黄土隧道衬砌结构的变形规律,同时对现场加固措施进行计算分析,为类似的黄土隧道工程提供一定的参考和借鉴。

## 1 工程概况

依托工程为陇东某深埋黄土隧道,隧道为左右行分离式双洞长隧道。隧道左右洞净距为21~38 m。隧道最大埋深112 m。根据隧道地质勘察资料,该隧道位于黄土塬地貌,地层岩性主要为第四系上更新统( $Q_3^{eol}$ )马兰黄土、中更新统( $Q_2^{eol}$ )离石黄土。围岩级别为V级。隧址区地下水发育,主要为松散岩类孔隙潜水,地下水水位位于隧道开挖断面以上。黄土深埋段施工开挖采用三台阶分部留核心土法开挖。隧道按照新奥法原理设计施工,支护结构采用复合式衬砌。

隧道K280+265处掌子面渗水较为严重,土体处于软塑或流塑状,洞身处于极强湿陷性深厚富水黄土地质带,经过现场勘察,洞身段黄土含水率达到26%左右,地下水埋深约为54 m,该断面隧道埋深约为96 m,隧道位于地下水范围内,洞身黄土为饱和状态。

## 2 围岩软化数值模拟研究

试验资料统计表明,黄土饱和后抗剪强度大幅

度的降低,其中降低最大的是黏聚力,达到2.3倍,内摩擦角则降低不大,仅是1.2倍。该特点区别于一般土。这也是黄土浸水后强度急剧降低,以致发生湿陷变形和坍塌的主要原因<sup>[10]</sup>。

数值计算方法采用地层结构法,将地层和支护结构视为协同受力,选择K280+265为典型断面,有限元数值模拟计算中主要通过围岩的变形模量 $E$ 、重度 $\gamma$ 、泊松比 $\mu$ 、围岩的黏聚力 $c$ 、内摩擦角 $\varphi$ 等参数来表征地层特性,所以通过改变围岩参数来模拟围岩的软化,分别设置三种不同软化阶段,未软化阶段对应干燥状态黄土,中软化阶段对应中饱和状态黄土,强软化对应实际地质条件下围岩状态,即饱和黄土。

### 2.1 模型建立及参数

数值模拟采用midas GTS NX有限元数值模拟软件,本构模型采用修正莫尔-库仑本构模型,依据圣维南原理,隧道开挖后实际影响范围一般为洞室中心外3~5倍距离,此范围以外的围岩可以认为不受施工的影响,由此确定模型尺寸上下边界为100 m,左右边界为100 m,隧道埋深96 m,上边界为自由边界,数值模拟开挖方法采用三台阶分部留核心土法,数值模型网格划分见图1。

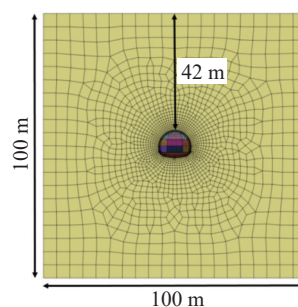


图1 数值模型网格划分

参照现场地勘资料和《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)<sup>[11]</sup>,得到数值模型的计算参数,具体黄土和支护结构计算参数分别见表1、表2。

表1 隧道围岩参数表

结构名称	变形模量 $E_0/\text{MPa}$	含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
未软化黄土	180	15	16	0.32	50	28
中软化黄土	100	20	18	0.36	35	27
强软化黄土	20	26	20	0.4	20	26

### 2.2 结果分析

#### (1) 位移分析

在洞周均匀选择14个特征点,提取围岩未软化、

中软化、强软化三个阶段的围岩竖向位移,得到不同软化阶段下洞周围岩竖向位移变化曲线见图2。

表2 隧道支护结构参数表

结构名称	变形模量 $E_0$ /MPa	重度 $\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比 $\mu$
初支	28	23	0.2
二衬	30	23.5	0.2
钢拱架	$2.1\times 10^5$	78.5	0.2

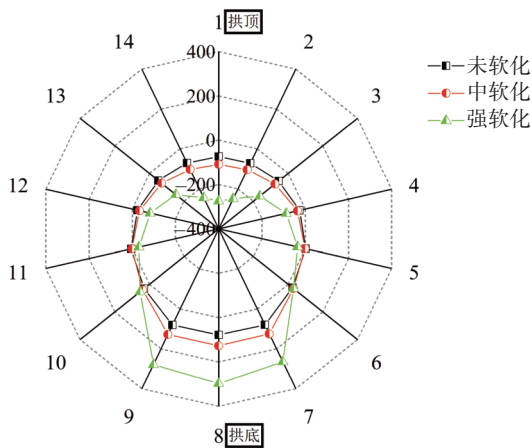


图2 不同软化程度下洞周围岩竖向位移变化曲线

强软化工况对应实际围岩饱和状态,数值计算结果拱顶沉降与水平收敛分别为274.6 mm、110.9 mm,现场实测累计拱顶沉降为308 mm、水平收敛为127.7 mm,与数值计算结果相比,误差分别为10.8%、13.2%,误差在可接受范围内,说明数值模拟计算结果与现场实测比较相符。

由图2可知,不同软化阶段围岩竖向位移沿着隧道中线基本呈对称分布,各阶段竖向位移均表现为拱顶沉降变形,拱底为隆起变形;随着围岩软化程度不断加强,洞周围岩竖向位移均发生不同程度增大;拱顶沉降、拱底隆起、水平收敛在围岩软化过程中的发展趋势见图3,三个位置的位移变化基本呈线性增长,较围岩未软化状态,拱顶沉降增大了271%,拱底隆起增大了283%,水平收敛增大了205%,可以看出,拱底隆起增大趋势最为明显,其次为拱顶沉降与水平收敛。如图4所示,黄土发生软化后,其强度大大降低,导致围岩变形增大,现场施工时,拱顶钢拱架发生了较大变形,与数值模拟结果比较相符。

## (2) 应力分析

如图5所示,施工完成后,随着围岩软化程度的增大,初支的最大主应力不断增大,其最不利受力位置均出现在拱肩处,表现为受拉,且在强软化阶段,拱肩的最大主应力极值范围有所扩大。

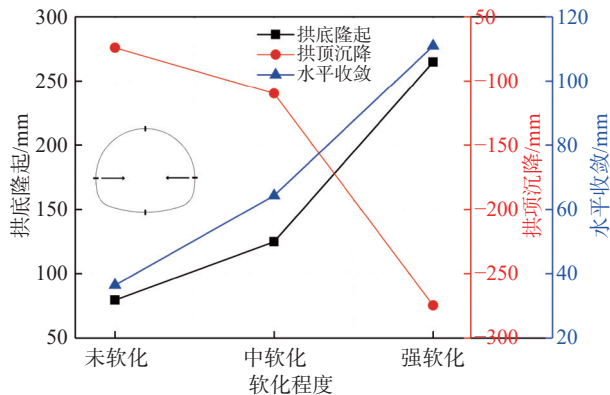


图3 不同软化程度下围岩位移变化曲线



图4 初期支护拱顶下沉

如图6所示,不同软化程度下初支最大、最小主应力最大值的发展关系,可以看出,最大、最小主应力最大值随着软化程度的变化规律一致,均表现为先快速增长,之后缓慢增长,强软化阶段最大主应力最大值达到2.15 MPa,较未软化状态增大了107%,超过C25混凝土抗拉强度极限值,已经发生破坏。黄土中的地下水丰富,同时排泄条件不畅时,地下水会与黄土发生长期的物理和化学作用,溶解黄土中的可溶性成分,降低物理力学性质,破坏黄土原有的结构,使黄土软化,承载力急剧下降,同时,由于地下水的渗入,使得黄土自身的重度增大,导致初期支护易发生侵限,甚至发生坍塌。

## 3 围岩加固措施分析

### 3.1 现场加固措施概述

含水的黄土地层,隧道的成洞条件、承载力和稳定性较差,易于发生初期支护侵限、大变形、地表开裂等隧道病害,给施工带来了极大的困难。

由于地下水比较丰富,掌子面开挖后,地下水不断渗出,汇聚到仰拱部位,使得仰拱部位围岩软化严重,承载力不足,部分段落拱脚出现下沉,导致已施工初支整体下沉,增大了施工风险,针对拱脚下沉,现场采取拱脚加强措施,如图7所示,在每榀钢拱架拱脚部位设置两对 $\phi 108\times 6$  mm 钢管桩,钢管桩每根长为6 m,纵向间距与钢拱架间距一致,同时配置钢筋笼,

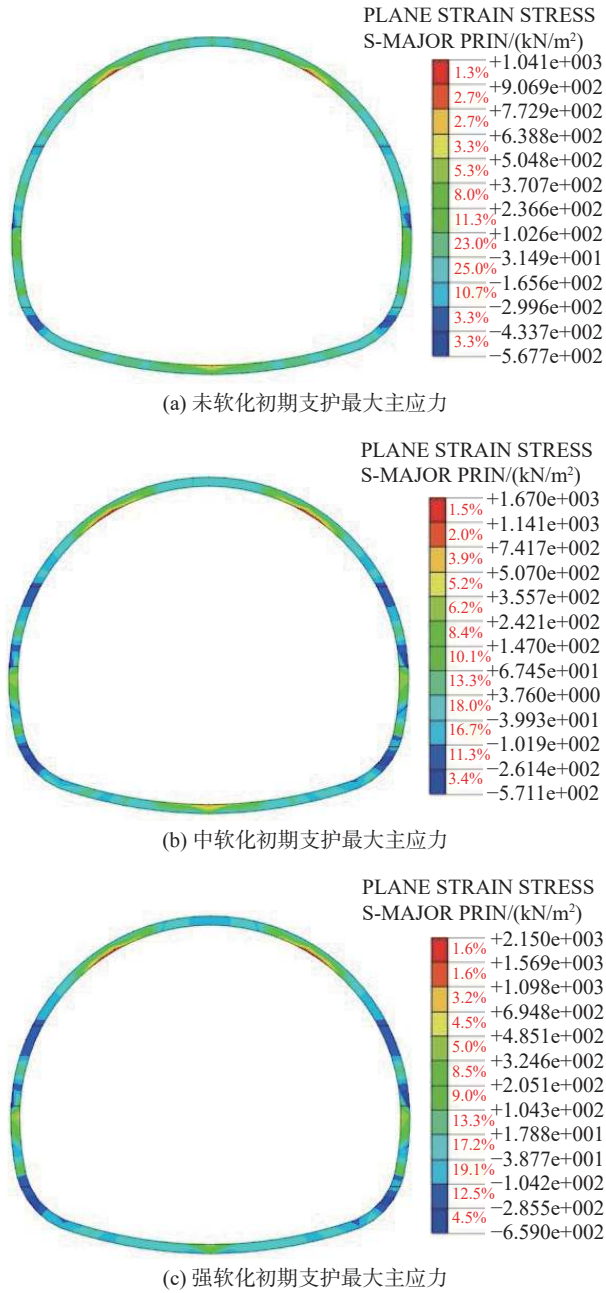


图 5 初期支护最大主应力云图

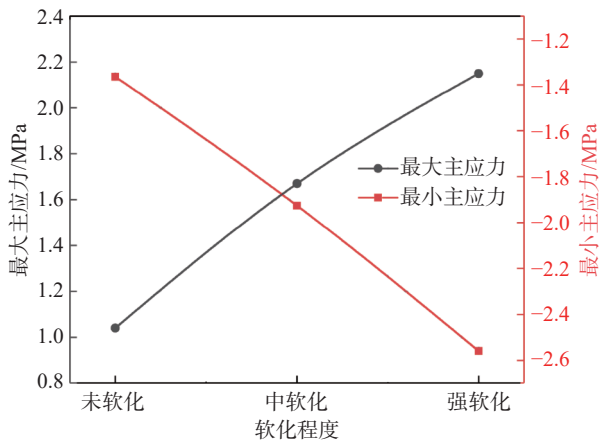


图 6 不同软化程度下初期支护应力变化曲线



图 7 现场锁脚钢管桩加固

预留注浆口,进行高压注浆加固。

施工中,部分段落掌子面由渗水变为涌水,涌水量较大,掌子面黄土变为流塑状,易导致大变形或坍塌,对施工安全造成威胁,也无法进行正常施工,现场对涌水进行改排后,对掌子面进行喷射混凝土+钢筋网临时支护,之后对未开挖段落进行帷幕注浆加固,图 8 为加固后所形成的浆脉。注浆材料以普通水泥-水玻璃双浆液为主,普通水泥单浆液为辅,注浆时先进行前进式分段注浆施工,同时结合发散一约束型注浆原则进行,先以内圈孔注浆为主,之后按由外向内、由下到上、间隔跳孔注浆施工作业,通过注浆加固冒顶段围岩;之后采用钻杆后退式分段注浆对松散地层进行加固,并采用集束袖阀管分段注浆工艺,进行后退式分段注浆。



图 8 现场帷幕注浆加固效果

### 3.2 加固措施对比分析

设计中,仰拱部位钢拱架与边墙钢拱架直接连接,这种连接方式拱脚部位受力面积较小,在围岩软化后,承载力不足时,不能起到很好的支撑作用,如图 9 所示,扩大拱脚的支护技术是在拱脚处向围岩方向外扩挖一定尺寸,向外焊接斜向的型钢以及水平型钢,然后喷射混凝土与初支结构形成一个整体,扩大的拱脚有利于减小上导开挖过程拱脚土体浸泡软化支护整体下沉,另一方面,有利于上导坑先行施作的大拱脚在中台阶开挖的时候具有支撑拱部结构的重要作用。

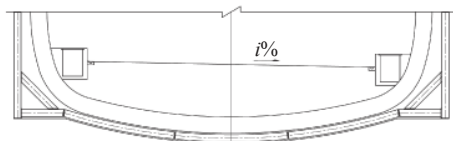


图9 扩大拱脚结构图

通过数值模拟,以强软化后数值模型为基础,对现场加固措施进行数值模拟计算,对现场加固的处治效果以及扩大拱脚计算结果进行对比分析。锁脚钢管桩采用植入式桁架单元进行模拟;帷幕注浆加固模拟时通过提高洞周3 m范围内土体参数,形成注浆加固圈<sup>[12]</sup>,计算参数见表3。

表3 加固结构参数表

结构名称	变形模量 $E_0/\text{MPa}$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
帷幕注浆加固	1000	22	0.22	120	32
锁脚钢管桩	$2.1\times 10^5$	18	0.30		

### 3.3 位移变化分析

现场加固以及使用扩大的拱脚结构后洞周围岩竖向位移变化见图10,在基底设置锁脚钢管桩后,围岩拱顶沉降为260.12 mm,减小了14.52 mm,拱底隆起为248.69 mm,减小了49.19 mm,水平收敛为101.4 mm,减小了9.5 mm;衬砌结构设置扩大拱脚后,围岩拱顶沉降为211.18 mm,减小了63.46 mm,拱底隆起为210.32 mm,减小了87.56 mm,水平收敛为81.24 mm,减小了29.66 mm;帷幕注浆加固后,围岩拱顶沉降为90.48 mm,减小了184.16 mm,拱底隆起为98.71 mm,减小了199.17 mm,水平收敛为30.4 mm,减小了80.5 mm。

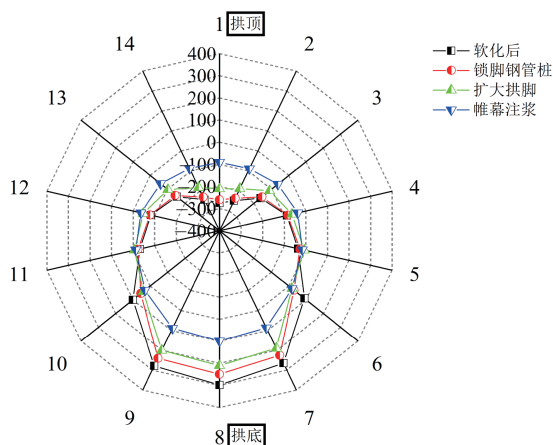


图10 洞周围岩竖向位移变化曲线

选取隧道拱顶、拱肩、拱脚、拱底四个位置围岩竖向位移以及水平收敛,与围岩软化后进行对比,得到各位置位移变化率,如表4所示,结合图10可以

看出,设置锁脚钢管桩后,拱脚和拱底的位移分别减小了28.08%,16.26%,较其他位置减小比较明显,说明锁脚钢管桩对仰拱及拱脚位移有一定改善,但对其他位置变形抑制效果一般;衬砌形式增加扩大拱脚后,由于衬砌结构拱脚部位受力面积增大,围岩软化后,支护结构整体下沉得到有效控制,进一步改善了围岩整体变形,从位移的变化率可以看出,洞周围岩位移都有一定程度减小,其中拱脚位移减小了62.95%,减小程度最大,相较于锁脚钢管桩加固,对围岩变形抑制效果更佳;帷幕注浆加固后,各位置围岩位移减小程度在61.19%~77.81%,洞周围岩位移都得到了较大程度的减小,相较于其他处治措施,加固效果最为明显,帷幕注浆加固提高了围岩参数,同时可以起到堵水的作用,从计算结果以及现场加固效果来看,其对围岩变形的抑制效果十分显著。

表4 位移变化率

加固措施	位移变化率/%				
	拱顶	拱肩	拱脚	拱底	水平收敛
锁脚钢管桩	5.10	10.07	28.08	16.26	8.41
扩大拱脚	29.64	20.25	62.95	19.08	26.27
帷幕注浆	66.82	61.19	77.81	66.65	71.31

### 3.4 初期支护应力

围岩软化后,通过现场加固以及使用扩大拱脚后,初期支护最大主应力得到了不同程度减小,其最不利受力位置均出现在拱肩处,表现为受拉,提取三种措施下初期支护最大、最小主应力,得到不同处治措施下初期支护应力极值柱状图(见图11),可以看出,初支最大、最小主应力变化规律一致,都按照锁脚钢管桩→扩大拱脚→帷幕注浆的顺序逐渐减小,最大主应力分别减小了17.7%,29.1%,46.5%,帷幕注浆加固效果最为显著,加固完成后最大主应力极值为1.15 MPa,帷幕注浆加固通过高压注浆改善洞周

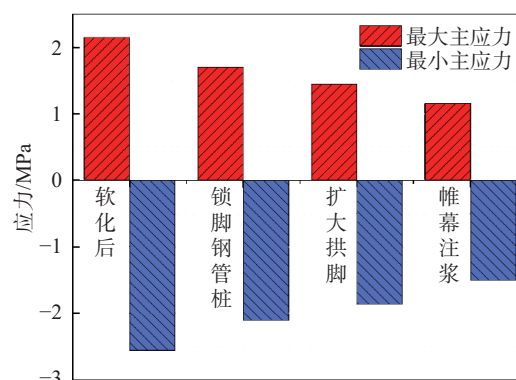


图11 初期支护应力变化柱状图

围岩物理力学性质, 大幅提升土体黏聚力, 在一定程度上可以认为帷幕注浆加固圈为开挖前期主要承载结构, 保证施工安全, 改善衬砌结构受力。

#### 4 结论

(1) 黄土隧道围岩软化后, 洞周各位置围岩位移发生不同程度增大, 其中拱底隆起增大趋势最为明显, 其次为拱顶沉降, 最后为水平收敛; 初支最大主应力同样也在增大, 其中拱肩处增大趋势最为明显, 在设计施工中, 此类地质条件下的隧道初支在拱肩处的受力需要得到重视。

(2) 相较洞周其他位置, 采用锁脚钢管桩加固后仅对拱脚围岩变形有所改善, 但效果不明显, 所以该种加固方式适合在软化程度较小或围岩承载力不足的段落使用。

(3) 衬砌结构形式对围岩变形及支护结构受力有较大影响, 增设扩大拱脚后, 隧道洞周各位置围岩位移及支护结构受力状态都有所改善, 对于拱脚部位的围岩位移的控制效果最为显著, 且扩大拱脚具有结构简单、施工难度小、成本相对较低等优点, 建议在饱和黄土隧道衬砌结构形式中增设扩大拱脚。

(4) 采用帷幕注浆加固后, 洞周各位置围岩位移及支护结构受力均明显减小, 对于饱和黄土隧道, 超前帷幕注浆加固技术可有效控制隧道围岩变形, 改善支护结构受力状态, 保证后续施工安全及支护结构的稳定性。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘保成, 谢经臣, 高志军, 等. 浅埋大断面富水软弱黄土隧道变形控制技术 & 措施 [J]. *现代矿业*, 2017, 33(8): 203-207.
- [2] 陈鹤, 乔春生. 富水黄土隧道初期支护监控及分析 [J]. *西部探矿工程*, 2003(1): 105-106.
- [3] 赵中华. 浅埋富水黄土隧道开挖支护及塌方预防施工技术 [J]. *铁道建筑技术*, 2012(3): 24-29.
- [4] 王新东. 高含水率黄土大断面隧道变形特性及施工方法 [J]. *铁道建筑*, 2018, 58(5): 59-61.
- [5] 王亚琼, 谢永利, 晏长根. 黄土公路隧道病害治理实例研究 [J]. *工程地质学报*, 2008(4): 557-562.
- [6] 丁兆民, 杨晓华. 某黄土隧道病害原因分析及处治措施 [J]. *工程地质学报*, 2009, 17(1): 138-144.
- [7] 陈天明, 董志堦. 富水黄土隧道地表降水开挖与隧底软基加固技术研究—以银西高铁驿马一号隧道为例 [J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(6): 1015-1023.
- [8] 来弘鹏, 谭智鹏, 孙玉坤, 等. 富水黄土隧道施工过程围岩水分迁移规律研究 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36(1): 150-161.
- [9] 薛晓辉, 张军. 公路隧道富水黄土地层可控注浆加固技术研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(6): 180-187.
- [10] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.
- [11] JTG 3370.1—2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [12] 刘晓杰. 富水黄土隧道围岩变形特征与控制技术研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.

[1] 刘保成, 谢经臣, 高志军, 等. 浅埋大断面富水软弱黄土

收稿日期: 2023-09-07