

文章编号:1673-9469(2024)01-0062-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.01.009

## 浅埋黄土隧道塌方破坏模式及处置技术

张双茁

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉 430063)

**摘要:**以宁夏某浅埋黄土隧道塌方事故为依托,首先讨论分析浅埋黄土隧道的塌方破坏机理及模式,然后根据现场塌方情况,分析案例隧道塌方原因并提出处置方案,最后通过数值模拟和现场监测对其处置效果进行评价。结果表明:黄土自身的易变性、不良地形地势、浅埋隧道施工扰动以及强降雨入渗共同导致隧道上方围岩形成一定范围的黄土软弱湿陷带,原隧道支护结构无法抵抗劣化后的围岩,围岩变形和结构受力均大幅增加,其中拱顶沉降增大了91.8%,拱肩处初支正弯矩增大了60.7%;黄土地层开挖面失稳破坏可分为掌子面到达软弱湿陷带的失稳破坏和穿越整个软弱湿陷带的失稳破坏两种模式;结合有限元模拟和现场监测验证,“临时支护系统+换拱+超前中管棚注浆加固”的综合防塌方处置技术应用效果显著。

**关键词:**浅埋隧道;黄土;塌方;破坏模式;处置技术;数值模拟

中图分类号:U458

文献标识码:A

## Failure Mode and Treatment Technology of Shallow Buried Loess Tunnel Collapse

ZHANG Shuangzhuo

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China)

**Abstract:** Based on the collapse accident of a shallow buried loess tunnel in Ningxia, this paper first discusses and analyzes the collapse failure mechanism and mode of the shallow buried loess tunnel. Then, based on the on-site collapse situation, the causes of the tunnel collapse are analyzed and the disposal plans are proposed. Finally, the disposal effect is evaluated through numerical simulations and on-site monitoring. The results show that the vulnerability of loess itself, adverse terrain, disturbance during shallow tunnel construction, and heavy rainfall infiltration jointly lead to the formation of a certain range of loess soft and collapsible zones in the surrounding rock above the tunnel. The original tunnel support structure cannot resist the degraded surrounding rock, and the deformation and structural stress of the surrounding rock increase significantly. Among them, the settlement of the arch crown increases by 91.8%, and the initial positive bending moment at the arch shoulder increases by 60.7%; The instability and failure of the excavation face in loess strata can be divided into two modes: the instability and failure of the palm face reaching the weak and collapsible zone, and the instability and failure of crossing the entire weak and collapsible zone. Combining the finite element simulation and on-site monitoring verification, the comprehensive anti-collapse treatment technology of “temporary support system plus arch replacement plus advanced pipe shed grouting reinforcement” has shown significant application effects.

**Key words:** shallow tunnel; loess; collapse; failure mode; treatment technology; numerical simulation

收稿日期:2023-04-28

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2014 318 J27 210);陕西省重点研发计划项目(2020SF-428)

作者简介:张双茁(1981-),男,河北武强人,硕士,高级工程师,主要从事隧道与地下工程的勘察设计与研究工作。

伴随我国西部大开发如火如荼地进行,黄土隧道建设数量骤然增多,相应的在黄土隧道建设过程中遇到的问题也越来越多,特别是浅埋黄土隧道的塌方问题<sup>[1]</sup>。黄土自身强度易受到降雨因素的影响<sup>[2-3]</sup>。黄土地层受水湿陷后承载力显著下降,继而对隧道结构产生极大的影响,以至于发生坍塌事故<sup>[4-6]</sup>。

近年来,众多学者针对不同黄土隧道中所发生的塌方事故,详细分析了塌方形态、塌方原因以及处置措施。王伟星等<sup>[7]</sup>通过对浅埋黄土隧道施工过程中围岩变形量与降雨量的相关性进行了分析。结果表明:降雨量对地表变形和围岩变形的发展具有一定的“前瞻性”和“预兆性”。吴宏<sup>[8]</sup>统计了浅埋隧道塌方案例中隧道顶板围岩的塌方形态。通过整理发现,浅埋隧道围岩顶板塌方可大致分为两种,一种是拱部冒顶塌方;另一种则是向临空面侧的滑动塌方。张伟等<sup>[9]</sup>通过现场模型试验方式,对不同地层条件下隧道结构的受力变形进行研究,结果表明隧道上方黄土地层浸水湿陷使衬砌结构发生不均匀沉降,且仰拱中心处的变形最大,从而导致衬砌开裂。杨晓华等<sup>[10]</sup>针对黄土隧道出口塌方冒顶情况,分析隧道发生塌方冒顶的主要原因,提出采用小导管注浆加固围岩、洞内与地表共同治理的综合处置措施。结果证明综合措施对于围岩变形具有较好的控制效果。赖金星等<sup>[1]</sup>以甘肃某浅埋湿陷性黄土隧道塌方事故为依托,提出了采用超前大管棚注浆加固、洞内与洞外共同处置的综合治理措施,并通过数值模拟和现场量测评价了处置效果。罗爱忠等<sup>[11]</sup>采用有限差分数值分析方法分析了黄土隧道穿越软弱地质带隧道可能的破坏形式。根据该破坏形式提出了黄土隧道穿越软弱地质带的超前加固处理措施,并分析了处理后的效果。王强等<sup>[12]</sup>通过统计分析湿陷性黄土隧道施工中,在不同开挖工法和支护参数条件下,处于不同施工阶段时,其对应的变形数据变化情况,从而总结出一些变形发展的规律,针对性地制定相应控制措施,为类似工程施工提供参考。

目前虽已有一些对浅埋黄土隧道塌方的原因分析,但研究多集中在工程本身,并且隧道塌方的处置措施多依赖于施工经验<sup>[13]</sup>,很少从黄土隧道的塌方机理及破坏模式的角度来考虑。基于此,本文以宁夏某浅埋黄土隧道塌方事故为依托,首先讨论分析浅埋黄土隧道的塌方破坏机理及模

式,然后根据现场塌方情况,分析浅埋黄土隧道塌方的原因并提出处置方案,最后通过数值模拟和现场监测对其处理效果进行评价。研究结果可为类似条件下的隧道工程塌方处置提供借鉴。

## 1 工程概况

依托工程设计为双洞分离式隧道,左右线相距约为 50~60 m。隧道中公路设计的等级为双向四车道一级公路,设计行车速度为 80 km/h,设计荷载为公路 I 级,隧道建筑限界为净宽 10.25 m、净高 5 m。隧址区岩土体从上到下依次是杂填土、新黄土、老黄土。其中,新黄土具有湿陷性,湿陷等级为 II 级—III 级。地下水含水层以地表覆盖层为主,且受季节性影响变化大,暴雨季节有洪水泄流,雨后流量突减。

全隧道均采用三步七台阶预留核心土法施工,根据围岩及地质情况,将全线隧道支护措施分为洞口加强段、V 级围岩加强段、紧急停车带段和 V 级围岩段。

## 2 塌方现场概况

### 2.1 塌方现场整体概况

塌方区域属于隧道浅埋段,平均埋深约 17.5 m,地处陡峭山坡下坡处,坡度 1:1.3。塌方当日,曾发生长达 12 h 的降雨,降水量极大。

2014 年 8 月 7 日凌晨 1 时,隧道左线 YK53+895 段附近台阶开挖工程大致完成,并已准备布置钢拱架。但在工程进行过程中,下台阶初喷面(YK53+881)突然出现约 1 cm 宽的裂缝。在中台阶上方的初喷面出现约 2 cm 宽的裂缝,并且出现多条小裂缝,分布于中、上台阶之间。不久之后,临空开挖面上方及前方土体突然向下涌落,导致隧道发生塌方,持续时间大约一小时。待塌方现象基本稳定后,发现中台阶左侧形成一个大小约为 2.25 m×1.5 m×2 m(长×宽×高)的塌腔,其中核心土被掩埋至只有不到 1 m 的深度,而掌子面产生的塌方土体的体积约为 20 m<sup>3</sup>。塌方段隧道纵断示意图如图 1 所示。

### 2.2 塌方对隧道支护结构的破坏情况

隧道塌方后,原先的支护结构遭受了很大的破坏,包括初支开裂、初支侵限和锚杆系统变形失效,具体表现有:

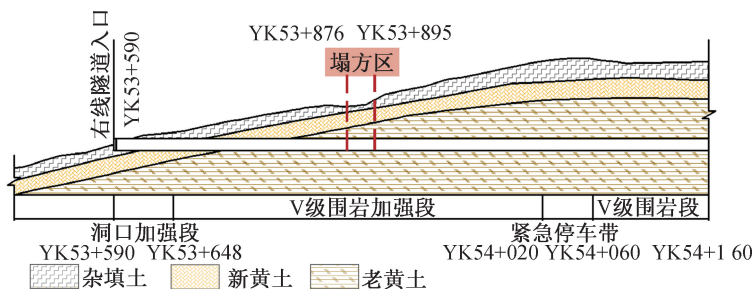


图1 隧道塌方段纵断示意图

Fig. 1 Schematic diagram of longitudinal section of tunnel collapse

### 2.2.1 初支开裂

在原有拱顶位置,初始支护面上产生大量的环形裂纹(图2(a)),裂纹最大宽度达到2 cm;在原边墙位置,初期支护混凝土表面竖向裂缝逐渐发展(图2(b)),并且周边已喷射混凝土表面出现脱落,局部工字钢拱架露出;结果表明,在上、下两个阶段的接触面上,原有的初支护砼表面产生了环形裂纹,裂纹的最大宽度达到0.5 cm。

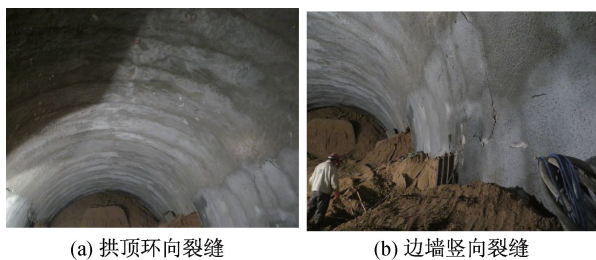


图2 初期支护混凝土的损坏状况

Fig. 2 Damage status of initial support concrete

### 2.2.2 锚杆系统变形失效

隧道塌方之后,初始超前小导管在坍塌土体中基本压塌并倾斜(图3(a)),其平均下移距离大约1 m;原始上台阶锁脚锚管因坍塌的土体而弯曲变形,并且在与拱钢架的焊接处出现开裂情况(图3(b))。

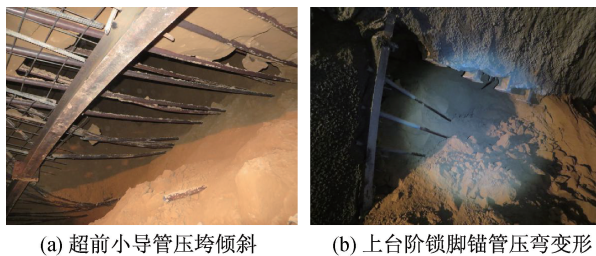


图3 锚杆系统变形失效状况

Fig. 3 The deformation failure condition of bolt system

### 2.2.3 初支侵限

隧道塌方后,初期支护表现为拱部整体下沉,部分初期支护对二衬限界的影响较大。通过对塌方处后方初期支护断面的监测,统计了塌方段不同

桩号拱顶处的侵限值,如表1所示。从表中可见,塌方段拱顶附近出现整体下沉,越靠近塌方处,沉降越大,最大沉降量高达34.2 cm,远超设计预留量18 cm,导致原钢拱架严重侵入二次衬砌限界,致使二次衬砌厚度小于设计厚度50 cm。

表1 塌方段不同桩号拱顶初支侵限值

Tab. 1 Limit values for initial support and invasion of different pile numbers of arches in collapsed sections

里程桩号	拱顶侵限值/cm
YK53+874	2.9
YK53+880	10.7
YK53+886	28.3
YK53+892	34.2

## 3 浅埋黄土隧道塌方机理及破坏模式分析

### 3.1 黄土隧道围岩失稳破坏机理

天然黄土内部颗粒所形成的孔隙结构具有不稳定性,从微观来看,黄土内部颗粒存在临时性约束,这种约束一部分由内部结构间的毛细吸力提供,另一部分由内部颗粒结构的初始排列和联结作用提供<sup>[14]</sup>。图4是黄土湿陷破坏的细观示意机理图<sup>[15]</sup>。从图中可以看出,黄土作为一种典型的非饱和土,其结构表现出明显的多孔隙、弱胶结特征。

黄土受水侵蚀后,土体单元内的胶结物质会被破坏,黄土抗剪强度逐渐下降。当原外部荷载超过劣化土体抗剪强度时,原始黄土松散的结合结构会快速地被破坏和压缩,黄土单元呈现整体下沉,宏观表现为隧道上覆黄土围岩局部形成了软弱湿陷带。相较于未侵蚀区,黄土软弱湿陷带内的围岩表现为变形的增加和强度的降低,在支护结构形式及参数不合理、支护不及时或者不到位的情况下,黄土围岩的应力释放和变形不断加剧,进入塑性破坏阶段以后围岩发生强度破坏,并且破坏范围持续扩大,在未及时处理的情况下,则会引发隧道塌方或者表覆层滑塌等不同程度的灾害。

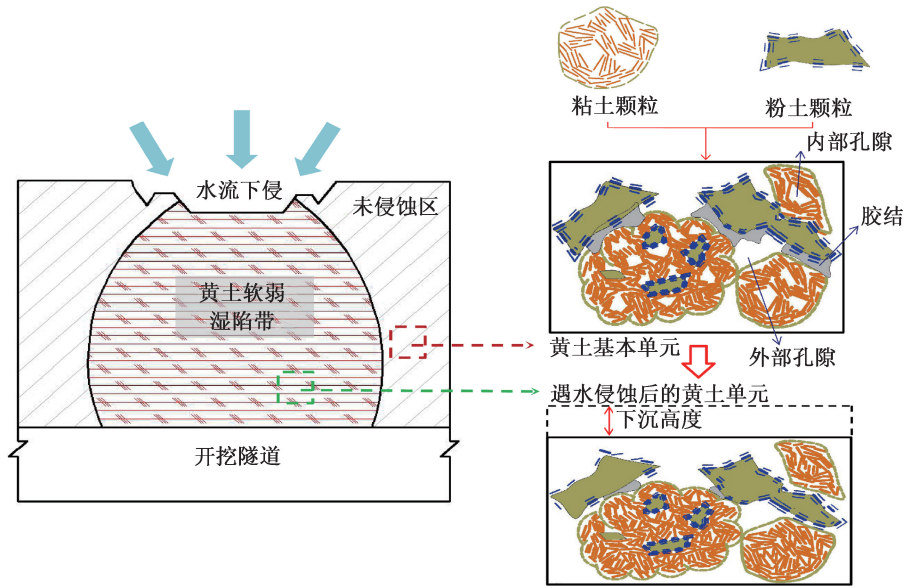


图 4 黄土湿陷破坏的细观示意机理图

Fig. 4 Microscopic schematic mechanism diagram of loess collapsibility failure

### 3.2 黄土隧道失稳破坏模式

隧道围岩的失稳破坏模式一般是根据实际监测工程或者室内模型试验得到定性的概念<sup>[16]</sup>。根据调查,常见的黄土隧道塌方有两种形态:滑动塌方和拱部冒顶塌方<sup>[17-18]</sup>,但之前的研究多集中在隧道塌方形态本身,并未深入分析造成两种不同塌方模式的原因。本文根据隧道穿越黄土软弱湿陷带的位置,将两种黄土隧道塌方模式进一步归纳总结。

#### 3.2.1 掌子面到达软弱湿陷带的失稳破坏

当掌子面已经处于软弱湿陷带时,由于隧道的超前支护无法抵抗塑形破坏的围岩使得掌子面前方出现了严重的超前变形,围岩松动范围的持续扩大造成开挖面附近塑性区的迅速联通,此时隧道掌子面产生了滑动塌方,塌方滑动方向为掌子面内侧向临空面侧移动,如图 5 所示。该破坏模式下,由于围岩的超前垮落无法实施正常的隧道开挖和及时有效的支护,使隧道施工陷入恶性循环状态。因此,对这类破坏事故处置的重点是首先防止破裂带继续扩展,以确保围岩破裂范围的可靠控制,然后及时修复破坏的支护结构,最后优化、改善超前支护形式以及范围,杜绝发生连续破坏而造成严重的安全事故。

#### 3.2.2 穿越整个软弱湿陷带的隧道失稳破坏

当隧道全部穿越软弱湿陷带时,在施工扰动以及初支背后空洞松弛影响下,围岩松动范围的持续扩大使得初期支护结构受力突然增大,由于隧道初期支护受力不均无法抵抗塑形破坏的围岩而造成初期支护结构失效,此时在掌子面后方一

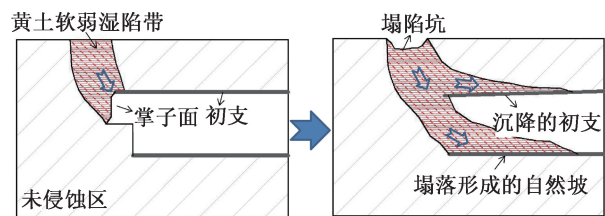


图 5 破坏模式 1:掌子面到达软弱带的失稳破坏发展

Fig. 5 Failure Mode 1: The unstable and destructive development of the palm face reaching the weak zone

定范围尚未施作二次衬砌结构的地段发生局部的冒顶和塌方,如图 6 所示。这类破坏对安全性的影响一方面表现为塌方对初期支护结构的破坏效应,另一方面则是围岩的松动范围扩大使得地层的预加固作用减弱。因此,对这类破坏事故处置的重点是首先对塌方周边围岩进行注浆加固,使围岩的破坏范围得到可靠的控制,然后优化、改善塌方段的支护结构形式,并及时施做。此外,由于该破坏模式发生的隐蔽性较强,不易预测。为杜绝此类事故的发生,在隧道施工中应格外注重初

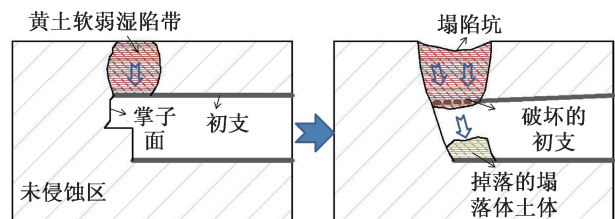


图 6 破坏模式 2:穿越整个软弱带的隧道失稳破坏发展

Fig. 6 Failure Mode 2: Development of instability and failure of tunnels crossing the entire weak zone

期支护结构的施做质量,并且要做到初期支护结构背后的回填注浆。

## 4 浅埋黄土隧道塌方因素分析及验证

### 4.1 塌方因素分析

黄土隧道失稳是一个复杂的动态过程,其背后的原因是各个因素之间相互作用耦合发生的结果。按照作用效果的不同,影响整个体系的失稳因素可以分为内部、外部和触发因素三类。

其中内部因素包括黄土自身的易灾性和不良的地形地貌,它们为形成黄土软弱湿陷带埋下了安全隐患,是致使黄土隧道失稳的诱因;外部因素包括隧道施工扰动以及不当的灾害处置,它们加剧了黄土围岩的大范围塑形变形,是致使隧道塌方失稳的次因;触发因素包括强降雨作用以及不当的超前支护形式,它们驱动了黄土围岩的大范围塑形变形,是致使本次隧道塌方失稳的主因。

#### 4.1.1 内部因素

内部因素包括黄土自身的易灾性和不良的地形地势。在本案例中,隧道塌方段埋深浅,地形陡峭,其上部围岩以湿陷性黄土为主,具有大孔隙及垂直节理发育等特点。此外,塌方段位于山坡下坡处且受到冲沟偏压的影响,因此,此处水体汇集现象严重并且容易形成滑坡体。

#### 4.1.2 外部因素

外部因素主要是浅埋隧道施工扰动以及不当的灾害处置。浅埋隧道开挖的施工扰动对围岩已经造成一定的破坏,产生了大范围的松动破裂区,并且在地表形成了裂缝,形成优势降雨入渗通道,对隧道施工造成安全隐患。此外,在降雨发生时围岩的变形明显增加,但是现场的工程师并没有考虑采取有效的降排水和围岩预加固措施来及时阻止围岩的进一步变形。

#### 4.1.3 触发因素

触发因素主要为强降雨作用以及不当的超前支护形式。此处地表在强降雨作用下,雨水顺着上覆土层节理及孔隙进入到下部地层,隧道拱顶及掌子面土层的含水量会迅速增加,在隧道掌子面前方围岩中形成黄土软弱湿陷带。由于隧道的超前支护无法抵抗塑形破坏的围岩使得掌子面前方出现了严重的超前变形,隧道开挖后围岩的自稳能力差,从而因局部失稳产生连锁反应,即围岩的松动范围的持续扩大造成开挖面附近塑性区的迅速联通,在不良地形的影响下,已成型上台阶初

期支护和由于掌子面受前方滑动围岩的影响,因此造成此次隧道的坍塌。

塌方当日发生长时间降雨,导致原本超前支护无法抵抗劣化后的围岩变形。在本案例中,黄土隧道塌方的原因是以触发因素为主,内在因素以及外在因素之间相互作用耦合发生的结果。根据塌方现场概况可知初支裂缝出现及塌方发生的顺序是由后向前的,这表明拱顶上方围岩向前发生了滑动,此外严重的超前支护破坏也表明掌子面前方出现了大范围的塑形破坏。基于此,结合上节所提出的两种黄土地层开挖面失稳破坏特点,综合判定本次塌方属于掌子面到达软弱带的失稳破坏(破坏模式1)。

### 4.2 模型验证

为验证案例原隧道支护结构在围岩劣化前后的支护效果,本节利用 MIDAS 有限元软件,分别建立隧道在黄土软弱湿陷带形成前后的开挖模型(图7)。模型计算物理参数如表2所示。

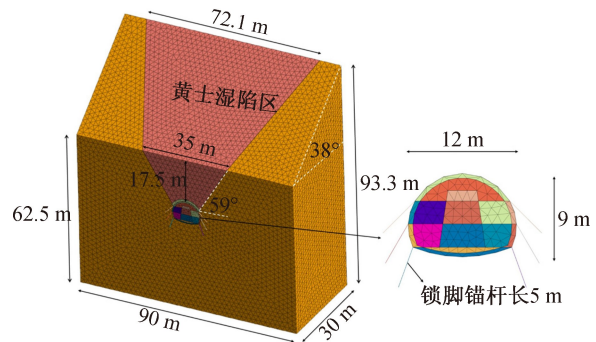


图7 模型尺寸示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the model

模型尺寸根据实际情况建立,假定模型底部有水平和垂直位移约束,两侧有水平位移约束,顶面是自由表面。隧道模型左右边界设置  $X$  方向位移约束,前后方向设置  $Y$  方向位移约束,下边界设置  $Z$  方向位移约束,上边界自由。在模拟中假定软弱湿陷带的范围为隧道上部土体与破裂面所组成的区域。其中破裂面的角度按照库伦屈服准则,选择土体破裂角( $45^\circ + \varphi/2$ )进行计算。其中正常黄土参数按照黄土硬塑状态取值,软弱湿陷带的黄土按照黄土流塑状态取值<sup>[19]</sup>。

#### 4.2.1 竖向位移分析

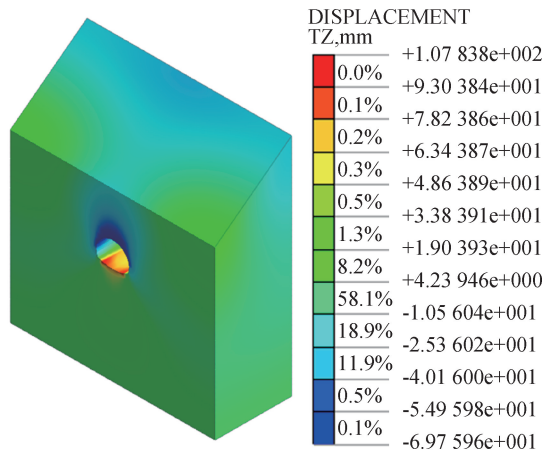
两种工况下模型竖向整体位移如图8所示。由于假设黄土软弱湿陷带的范围为隧道顶部至地表,所以两种工况下,隧道仰拱初支隆起值相差不大,均为10 cm左右。主要是隧道拱顶沉降与周围黄土变形差别较大。黄土在未产生软弱湿陷带

表 2 模型计算参数

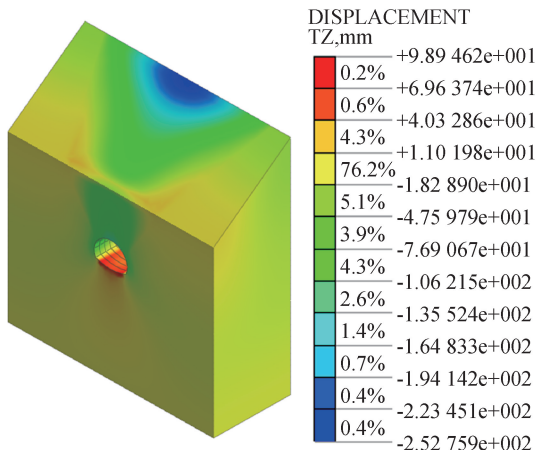
Tab. 2 Calculation parameters of model

材料类别	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
正常黄土	100	0.35	18	30	28
软弱湿陷带	10	0.3	15.6	16	15
初支	30 000	0.23	23.8	—	—
二衬	31 500	0.3	25	—	—
锚杆/钢管	210 000	0.3	78.5	—	—
加固圈	1 000	0.3	20	50	28

前,隧道拱顶沉降最大值为 69.8 mm;黄土产生软弱湿陷带后,隧道拱顶沉降最大值为 133.9 mm,拱顶沉降增大了 91.8%。此外,软弱湿陷带的存在使得隧道开挖过程中会在坡面形成明显的滑坡区域,坡面上部土体沉降最大可达到 252.8 mm。



(a) 无软弱湿陷带



(b) 有软弱湿陷带

图 8 黄土软弱湿陷带形成前后的整体竖向变形

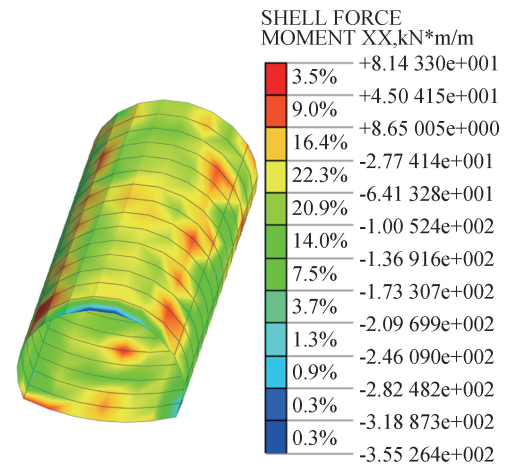
Fig. 8 Overall vertical deformation before and after the formation of weak and collapsible loess zones

4. 2. 2 隧道结构受力分析

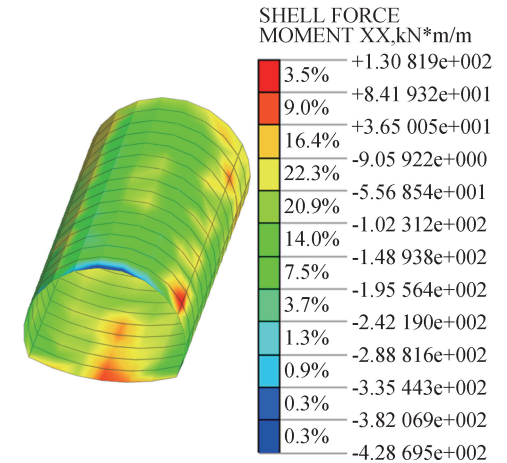
两种工况下隧道初支单位长度弯矩分布如图 9 所示。所受弯矩分布状况为拱肩以及仰拱部位承受正弯矩为主,黄土在未产生软弱湿陷带前,初支单位

长度正弯矩最大值为 81.4 kN·m;黄土产生软弱湿陷带后,初支单位长度正弯矩最大值为 130.8 kN·m,初支单位长度正弯矩增大了 60.7%。部分拱脚及主体结构承受负弯矩,其中以开挖面拱顶部位所受负弯矩最大,初支单位长度负弯矩最大值在黄土软弱湿陷带形成前后分别为 355.3 kN·m 和 428.7 kN·m,初支单位长度负弯矩增大了 20.7%。

综上所述表明,在未形成黄土软弱湿陷带时,



(a) 无软弱湿陷带



(b) 有软弱湿陷带

图 9 黄土软弱湿陷带形成前后的隧道初支弯矩分布

Fig. 9 Distribution of initial support bending moment of tunnels before and after the formation of weak and collapsible loess zones

原隧道支护结构可以有效起到支护作用,围岩变形和结构受力等各项指标均在可控范围内。但是黄土软弱湿陷带形成后,原隧道支护结构无法抵抗劣化后的围岩,围岩变形和结构受力均大幅增加。虽然在有限元模拟中初支变形量在设计预留变形量 18 cm 内,但考虑施工现场实际情况复杂,在黄土产生软弱变形带后,对于隧道竖向位移和坡面土体稳定性的影响较大,必须采取支护刚度更大的超前支护形式以控制围岩变形。

## 5 浅埋湿陷性黄土隧道塌方处置技术

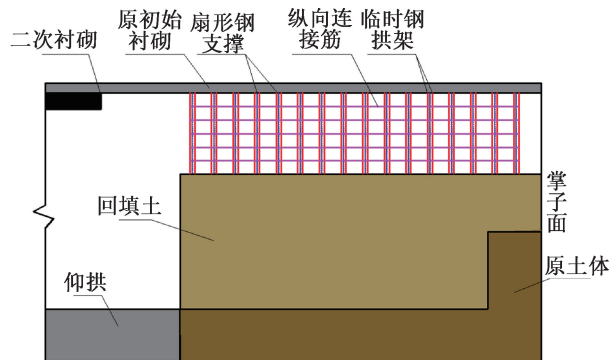
通过上述的分析可知,本文依托工程中发生的塌方事故属于掌子面到达软弱带的失稳破坏(破坏模式 1),鉴于该模式下的破坏特征是塌方体具有滑动性,因此本文综合提出了“临时支护系统+换拱+超前中管棚注浆加固”的塌方处置技术。该塌方处置技术中,首先对塌落土体进行临时支撑应急处理来阻断滑动塌方体对隧道结构的再生破坏,然后对破坏和侵限的初支进行了换拱处理来修复之前所造成的破坏影响,最后采用超前中管棚注浆加固技术优化了对塌方段的超前支护。该组合措施层层递进,从应急处置再到修复处置,最后进行加固处置,可有效控制滑动塌方。各详细处置技术分述如下。

### 5.1 塌落土体进行临时支撑应急处理

首先对整个塌方段采用回填的方式进行反压和封闭,为避免开挖面土体的不稳定而引起二次垮塌。回填时,用挖掘机将土运到核心土与上台阶拱架之间,并用挖掘机进行碾压,碾压的高度与核心土的高度相同,在回填完毕后,立即进行 5 cm 厚度的喷射混凝土喷灌,将掌子面封闭。在此基础上,利用环向临时钢拱架+扇形钢撑+纵向连接钢筋的组合体系,对该区域进行了临时支护。其中,环状钢拱使用原钢拱的 I18 工字钢作为内衬,间隔 0.75 m,底面用 20 cm×20 cm 方木垫固定。每榀拱架设置扇形钢支撑,在底部节点处使用方木垫片,并使用  $\Phi 22$  纵向连接钢筋,将拱架纵向连接为一个整体(图 10)。临时支护系统与原初支紧密接触,共同形成支护作用来控制围岩变形,阻断滑动塌方体对隧道结构的再生破坏。

### 5.2 对侵限钢拱架进行换拱

根据上述隧道侵限情况,塌落段二衬厚度局部不足,必须采取换拱措施。换拱架时按照从小



(a) 纵断面示意



(b) 现场实施

图 10 临时支护系统

Fig. 10 Temporary support system

到大的桩号顺序施工,详述步骤如下:①拆除一榀既有侵限钢拱架及临时支座;②按照自上而下顺序,更换一榀 I20b 工字钢拱架;③在仰拱施工之前,挖除反压回填土,并及时采用锚杆进行坡面加固、封闭;④连续 3 榀换拱后,立即进行仰拱施工;反复换拱 6 榀,随后进行二次衬砌施工;⑤施工至 YK53+895 处,按原施工程序进行换拱。换拱段支护参数如表 3 所示。

表 3 换拱段支护参数

Tab. 3 Support parameters of arch replacement section

名称	布置方式	备注
锁脚锚管	双排	采用 $\Phi 42$ 无缝钢管,壁厚 4.5 mm,长 5 m
钢拱架	拱架间距为 50 cm	采用 I20b 工字钢

### 5.3 优化超前支护方式

随着掌子面坍塌,已有的单层超前小导管方法已不能满足工程的要求,为了确保隧道在湿陷性黄土地区的安全施工,必须采用更为高效的超前支护方法,对掌子面进行预先加固。在众多隧道掌子面超前支护加固的方法中,超前管棚注浆加固相较于其他方法更适用于含水的砂土质地层以及浅埋隧道段等<sup>[19]</sup>。其优势主要包括:管棚施

作后,由于其在围岩中所起的“梁效”作用,能够有效地避免上覆岩层的大面积崩塌。通过注浆施工,可在隧洞顶部形成一个圆形拱壳,拱壳可以有效地承受上部湿陷土体的自重,确保隧洞施工的安全性。同时在管棚支护作用下,可对围岩产生加强和阻隔效果,从而减少水流冲刷影响,提高围岩强度。

依据现场实际情况,最终对塌方段采用超前中管棚注浆加固的支护方案。超前中管棚注浆加固的横断面示意图如图 11 所示。

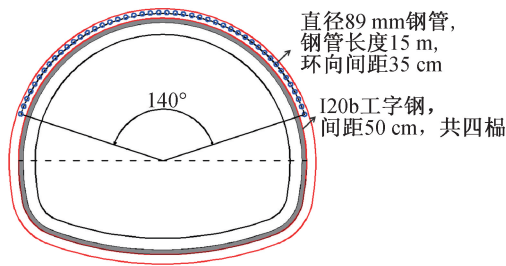


图 11 超前中管棚注浆加固的横断面示意图

Fig. 11 Cross section schematic diagram of grouting reinforcement for advanced pipe shed

具体布置方案如下:在拱顶  $140^\circ$  范围内布置超前管棚,使用长度为 15 m 的  $\Phi 89$  钢管,管棚仰角  $25^\circ$ ,共计 41 根,小导管配合管棚进行施工。在 YK53+876 节段施工中,为保证管棚尾翼的稳定,施工中使用 4 榀 I120b 工字钢拱架作为临时钢拱架支撑,每节间隔 50 cm。在每侧钢拱架底部,浇筑纵向支撑梁 ( $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 200\text{ cm}$ ),来支撑并连接钢拱架。拱与拱之间采用  $\Phi 22$  钢筋,环向间隔 50 cm。管棚于坍塌空洞处打梅花形钻孔 ( $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ ),注水泥浆增强刚性及完整性。

## 6 处置效果分析

与超前小管支护相比,超前中管棚支护由于管顶区域的梁拱效应和加固作用,可以更有效地控制从隧道拱顶到拱肩区域的变形。同时,延伸的管棚可以完全覆盖隧道前方的扰动土体,相较于超前小导管支护,更适合作为浅埋软弱地层隧道的超前支护方法。

为验证上述理论分析,通过模拟不同超前支护的方式,对比分析超前管棚支护在保证隧道安全施工方面的优势。通过监测实际施工中优化超前支护方式后的隧道沉降变形情况,与模拟情况进行对比,进一步验证模拟结果的可靠性。

## 6.1 超前支护优化验证

针对黄土发生湿陷后隧道拱顶沉降及塌方问题,隧道需采用超前支护措施以控制变形问题。本节主要分析隧道在采用超前小导管和超前中管棚支护下变形控制效果对比,超前支护模型如图 12 所示。测点布置于隧道拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和仰拱等关键位置。其中隧道拱顶、拱肩和拱腰主要为沉降变形,变形情况较稳定;而拱脚和仰拱变形较为特殊,故将测点按上述情况进行分组后分析。

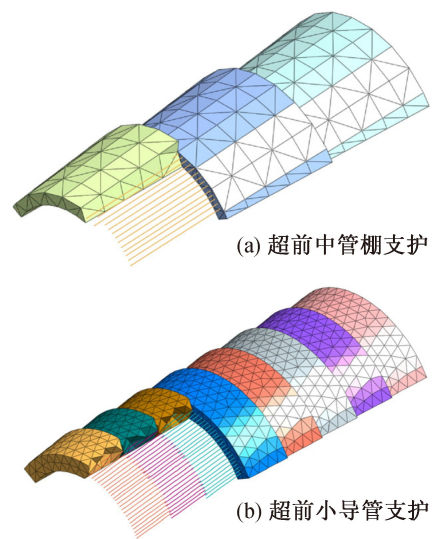


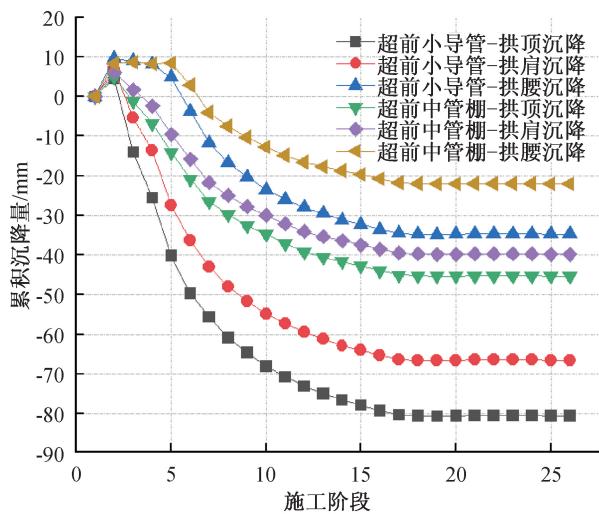
图 12 不同超前支护措施模型

Fig. 12 Models of different advanced support measures

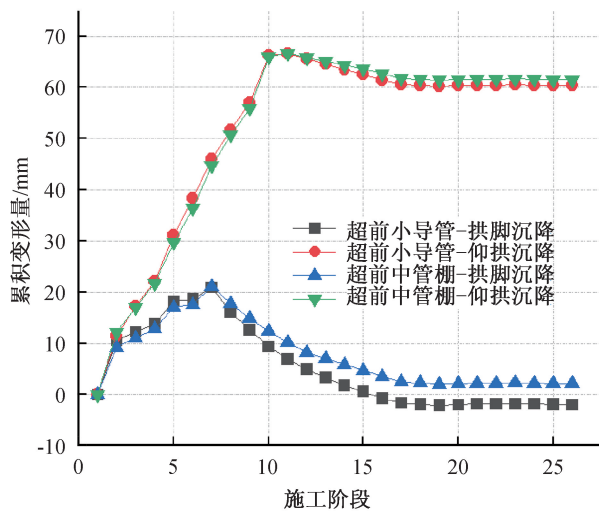
图 13(a)展示了两种超前支护方式下的隧道拱顶、拱肩和拱脚的累积沉降量变化。在超前小导管和超前中管棚情况下,拱顶沉降均变形最大。采用超前小导管支护,前 10 阶段拱顶与拱肩发生急剧沉降,拱腰先发生向上变形后产生急剧沉降,10 到 15 阶段沉降速率减缓,第 15 阶段后累积沉降量基本不变;采用超前中管棚支护,前 5 阶段各位置均发生微小向上变形,5 到 15 阶段发生沉降,变形速率逐渐减小,第 15 阶段后累积沉降量基本不变。相较于超前小导管,在隧道采用超前中管棚支护下,拱顶沉降减小 43.7%;拱肩沉降减小 40.2%;拱腰沉降减小 36.5%。

图 13(b)为两种超前支护方式下的隧道拱脚和仰拱累积沉降量变化。拱脚在超前小导管与超前中管棚支护下变形规律相似,但最终变形情况不同。第 7 阶段前发生隆起变形,后变形减小至趋于稳定。拱脚在超前小导管支护下最终累积沉降量为 2.0 mm;拱脚在超前中管棚支护下最终隆起变形量为 2.1 mm。仰拱位置以隆起变形为主,第

10 阶段前仰拱隆起变形速率较快,后隆起变形量趋于稳定。隧道在超前中管棚支护下,拱脚与仰拱变形相差较小,对于控制隧道变形效果较为显著。



(a) 拱顶、拱肩和拱腰



(b) 拱脚和仰拱

图 13 不同超前支护下隧道各部位累积变形量  
Fig. 13 Accumulated deformation of various parts of the tunnel under different advanced supports

### 6.2 现场监测

为检验处置方案对围岩稳定性的实际效果,在对塌方段加固后,对塌方段 2 个的典型断面(888 断面和 895 断面)的围岩变形特征进行了现场监测。主要监测内容有:拱顶沉降和周边收敛。2 个塌方段断面的隧道拱顶沉降和周边收敛时程曲线如图 14 和图 15 所示。

两处断面的沉降发展趋势大致相同,即在塌方处置后累计沉降均呈现先增大后稳定的变化趋势,888 断面和 895 断面的最终累积沉降分别为 67 mm 和 54 mm。两处断面的水平收敛发展趋势

同样大致相同,即在塌方处置后水平收敛均呈现先增大后稳定的变化趋势。888 断面的累积收敛值为 17 mm,收敛稳定阶段的速率为 1 mm/d;靠近塌方源头的 YK53 + 895 断面受影响较大,累积收敛值为 21 mm,收敛稳定阶段的速率为 1 mm/d。总的来说,两处断面的最终稳定的沉降速率、收敛速率均在规范规定的范围之内,说明本次对塌方段采用的处置措施具有较好的效果。

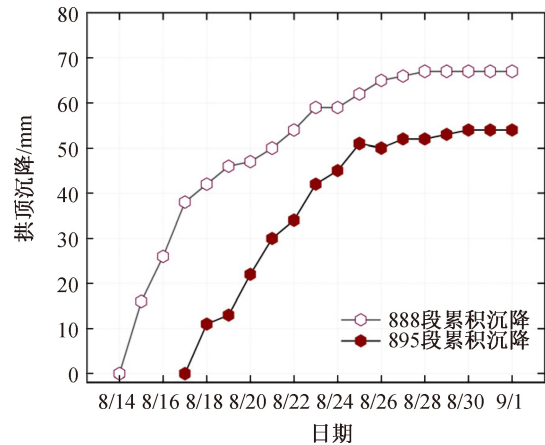


图 14 处置后塌方段拱顶沉降发展曲线

Fig. 14 Development curve of arch crown settlement in the collapsed section after disposal

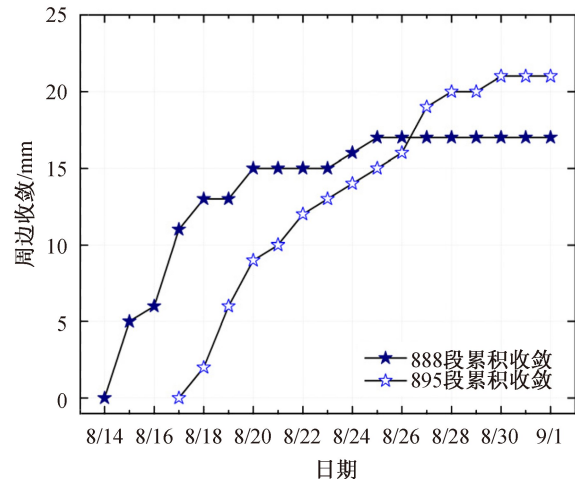


图 15 处置后塌方段周边收敛发展曲线

Fig. 15 Convergence development curve around the collapsed section after disposal

### 7 结论

1) 浅埋湿陷性黄土围岩失稳破坏的机理是上部水流的入浸使得原始黄土松散的组合结构造成了破坏压缩,形成了一定范围的黄土软弱湿陷带。黄土地层开挖面失稳破坏可分为掌子面到达软弱湿陷带的失稳破坏和穿越整个软弱湿陷带的失稳

破坏两种模式。前者的破坏特征为隧道掌子面产生了滑动塌方,后者的破坏特征为隧道拱顶发生了塌方破坏。

2)本案例隧道塌方是黄土自身的易灾性、不良地形地势、浅埋隧道施工扰动、强降雨作用以及不当的超前支护形式等因素共同耦合导致的掌子面滑动塌方,属于掌子面到达软弱湿陷带的失稳破坏型。塌方后原先的支护结构遭受了很大的破坏,具体表现为:初支开裂、初支侵限和锚杆系统变形失效。

3)在未形成黄土软弱湿陷带时,原隧道支护结构可以有效起到支护作用,围岩变形和结构受力等各项指标均在可控范围内。但是黄土软弱湿陷带形成后,原隧道支护结构无法抵抗劣化后的围岩,围岩变形和结构受力均大幅增加,其中拱顶沉降增大了91.8%,拱肩处初支正弯矩增大了60.7%。因此必须采取支护刚度更大的超前支护形式以控制前方塑性破坏的围岩。

4)提出了“临时支护系统+换拱+优化超前支护方式”的综合塌方处置技术。首先对塌落土体进行临时支撑来阻断滑动塌方体对隧道结构的再生破坏;然后对侵限初支进行换拱来修复塌方所造成的破坏;最后将塌落段的超前支护方式优化为超前中管棚注浆加固,加强隧道掌子面前方的支护效果。结合有限元模拟及处置后的现场测试验证,该塌方处置技术应用效果显著,可为类似条件下的隧道工程塌方处置提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 赖金星,邱军领,牛方园,等. 浅埋偏压黄土隧道塌方处治及效果分析[J]. 现代隧道技术,2017,54(2): 194-201.
- [2] YU D, HUANG Q, KANG X, et al. The unsaturated seepage process and mechanism of internal interfaces in loess-filled slopes during intermittent rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129317.
- [3] XIE Q, HUANG Q, LIU Y, et al. Strength behaviors of undisturbed malan loess under rainfall leaching in Yan'an area, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82: 53.
- [4] 朱才辉,贺豪楠,兰开江,等. 黄土层含水率增大对大跨度隧道围岩压力影响[J]. 岩土工程学报,2021, 43(S1):93-98.
- [5] 张乾翼,冯文强,赖国泉. 某黄土隧道浅埋段地表变形研究及治理方案[J]. 铁道勘察,2019,45(6):55-58.
- [6] 杨凯,戚铁. 新建黄土隧道开挖及支护对既有隧道影响的数值模拟分析[J]. 铁道勘察,2019,45(2): 56-61.
- [7] 王伟星,盛斌,韩侃,等. 降雨对浅埋黄土隧道围岩沉降变形影响研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(04):1132-1136.
- [8] 吴宏. 浅埋松散围岩隧道破坏模式研究及其工程应用[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [9] 张伟,骆维斌,雒建奎,等. 黄土层条件下隧道衬砌结构受力变形分析[J]. 公路,2022,67(08):421-425.
- [10] 杨晓华,肖靖,辛延甫,等. 黄土隧道洞口浅埋段塌方冒顶处治及效果分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2021,38(05):118-126.
- [11] 罗爱忠,邵生俊,陈昌录,等. 黄土隧道穿越软弱地质带失稳破坏和超前支护效果分析[J]. 公路交通科技,2014,31(3):101-105.
- [12] 王强,汪镇,高飞,等. 湿陷性黄土隧道施工中的变形控制[J]. 公路,2021,66(06):395-403.
- [13] WANG X L, LAI J X, QIU J L, et al. Geohazards, reflection and challenges in mountain tunnel construction of China; A data collection from 2002 to 2018[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 766-784.
- [14] 谢婉丽,王延寿,马中豪,等. 黄土湿陷机理研究现状及发展趋势[J]. 现代地质,2015,29(2):397-407.
- [15] QIU J L, WANG X L, LAI J X, et al. Response characteristics and preventions for seismic subsidence of loess in northwest China[J]. Natural Hazards, 2018, 92(3): 1909-1935.
- [16] 张顶立,台启民,房倩. 复杂隧道围岩安全性及其评价方法[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(2): 270-296.
- [17] 张顶立,方黄城,陈立平,等. 隧道支护结构体系的刚度设计理论[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(4): 649-662.
- [18] CUI G Y, MA J F, WANG D Y, A large 3D laboratory test on the deformation characteristic of shallow loess tunnel under different plastic states[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 7577-7590.
- [19] 赵文财,范飞飞,李子琦,等. 基于大管棚支护的大断面黄土隧道穿越冲沟地貌控制效果分析[J]. 公路, 2020,65(8):380-385.

(责任编辑 王利君)