

文章编号: 1007-2993(2024)05-0584-08

# 粉煤灰地层隧道开挖卸载应力路径 数值模拟与试验

黎林<sup>1</sup> 谢金宏<sup>2</sup> 杨尚川<sup>2</sup>

(1. 四川公路桥梁建设集团有限公司公路三分公司, 四川成都 610200;

2. 西南交通大学交通隧道教育部重点实验室, 四川成都 610031)

**【摘要】** 隧道在动态开挖过程中, 土体的变形与其应力路径密切相关。针对这一问题, 运用FLAC3D有限差分软件构建了隧道动态施工三维模型, 模拟了大断面隧道采用双侧壁导坑法开挖的施工流程, 测得了开挖卸载引起的土体应力状态变化规律。基于数值模拟获得的土体应力状态变化规律简化结果, 对粉煤灰水泥加固土进行不同应力路径下的室内三轴试验, 研究了隧道开挖卸载过程中土体单元受力变形情况, 并对比了未掺入水泥的试件变形情况, 以分析水泥加固对粉煤灰土卸荷变形的影响。数值模拟及室内试验结果表明: 隧道进行三导洞法施工开挖过程中, 围岩监测点的单元土体的应力路径较为复杂且存在明显差异, 但大致可以简化为两类, 即恒围压卸轴压以及恒围压升轴压的加卸载的过程; 在模拟围岩单元土体不同位置的应力路径试验中, 未经掺加水泥的试件存在变形破坏, 而经水泥加固的试件变形量较小, 未发生破坏。

**【关键词】** 隧道开挖; 应力路径; 数值模拟; 室内三轴试验

**【中图分类号】** TU43

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.013

## Numerical Simulation and Laboratory Tests of Unloading Stress Path of Fly Ash Stratum Tunnel Excavation

Li Lin<sup>1</sup> Xie Jinhong<sup>2</sup> Yang Shangchuan<sup>2</sup>

(1. Sichuan Road & Bridge Co., Ltd., Highway Three Branch, Chengdu 610200, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**【Abstract】** The stress path of soil is closely tied to deformation during dynamic tunnel excavation. A three-dimensional model of tunnel construction was created using the FLAC3D finite difference software. The double-side wall guide pit method was used to simulate the excavation process of a large-section tunnel and measure the resulting soil stress state. The changing laws of the stress state were then investigated based on the numerical simulation results. Indoor triaxial tests were conducted on soil reinforced with fly ash cement under different stress paths to replicate the stress and deformation of soil units during tunnel excavation and unloading. Unreinforced soil specimens were used as a control group. The numerical simulations and laboratory test results reveal that the stress paths of the surrounding rock unit soil at monitoring points are complex, and can be roughly divided into two categories: the process of constant confining pressure unloading axial pressure and constant confining pressure rising axial pressure. The cement-reinforced specimens showed less deformation and no signs of failure, while the unreinforced specimens were damaged during the stress path tests of different soil positions within the simulated surrounding rock unit.

**【Key words】** tunnel excavation; stress path; numerical simulation; indoor triaxial test

### 0 引言

粉煤灰地层是隧道开挖中较为少见的一种特殊

软弱地层。在隧道开挖过程中, 注浆加固的粉煤灰围岩原有应力场<sup>[1-2]</sup> 和位移场<sup>[3]</sup> 在重新实现平衡之前将

基金项目: 国家自然科学基金(52278371)

作者简介: 黎林, 男, 1995年生, 汉族, 重庆垫江人, 大学本科, 助理工程师, 主要从事隧道工程设计工作。E-mail: 2250325992@qq.com

通讯作者: 杨尚川, 男, 1987年生, 汉族, 四川乐山人, 博士, 副教授。主要研究领域: 岩土与地下工程。E-mail: shangchuan.yang@foxmail.com

经历一个十分复杂的调整变化过程,并伴随着围岩的变形甚至破坏。根据孙歆硕和乔 兰<sup>[4]</sup>的数值模拟和室内试验结果,隧道开挖过程中周边地层土体单元的应力路径存在明显差异,导致不同位置围岩的变形、破坏形式不一。因此,研究隧道围岩不同应力路径下的变形特征,对于隧道开挖的合理设计和安全施工具有深远意义。

隧道开挖过程中围岩应力状态及变形问题研究较为广泛,既有研究主要从静态分析和动态分析两种方法展开。静态分析关注的是隧道开挖结束时围岩的应力及变形情况,而动态分析强调伴随隧道开挖的不同步骤围岩中应力及变形的动态变化规律。

静态分析方法<sup>[5-7]</sup>常将隧道开挖问题简化为平面应力-应变问题,基于弹塑性力学展开解析或数值求解,研究隧道开挖后围岩的应力状态分析;在此基础上,结合围岩强度理论判别围岩的变形及破坏情况。李政林等<sup>[8]</sup>基于隧道开挖后围岩应力随径向的分布规律,将围岩划分为完全损伤区、非完全损伤区、弹性区和原岩应力区,其中完全损伤区被认定为隧道围岩松动区;黄 锋等<sup>[9]</sup>通过模型试验和数值模拟研究依据围岩切向应力及径向应力大小明确了松动圈范围;刘淑红等<sup>[10]</sup>通过理论解析求解了非圆形隧道开挖的应力分布规律,认为竖向挤压应力和侧压系数将影响围岩塑性区的位置及形状。静态分析可以很好地解决隧道开挖成型之后的围岩应力分布问题,但隧道开挖过程中围岩应力重分布是一个逐渐发展的过程,故静态分析难以分析施工过程中的风险。

动态分析强调隧道开挖工序对围岩应力的影响,研究围岩应力随施工工序的变化规律,从而为隧道支护和开挖顺序的优化提供参考。由于隧道施工中围岩的变形与应力路径密切相关,故考虑应力路径是隧道动态分析中的重点<sup>[11]</sup>。目前一些学者采用数值模拟和理论分析的手段,展开了针对隧道开挖引起的围岩应力路径变化及其变形的研究<sup>[12-15]</sup>。路德春等<sup>[16]</sup>采用弹塑性理论应力反馈算法结合数值模拟,研究了隧道开挖过程中围岩的变形、应力重分配以及应力路径等规律,结果表明为围岩土体中的应力路径变化十分复杂,几何位置和开挖进程对其有显著影响;张云军等<sup>[17]</sup>通过数值模拟分析了隧道开挖的动态过程,周围土体的应力路径和隧道的变形及内力变化规律,结果表明隧道上方和下方土体基本处于卸荷状态,而侧面土体处于加荷状态。隧道开挖应力路径在试验方面的研究支撑较为欠缺,阿卜杜拉等<sup>[18]</sup>展开了盾构隧道开挖的模型试验,通过预埋的三维土压力应力

盒,测得开挖引起的土体应力状态的变化,结果显示隧道拱顶、拱肩、拱腰和拱底的应力路径存在显著差异。可见,研究隧道施工过程中围岩应力路径能够更好地分析围岩的变形情况,有效地为开挖及支护方式的调整的提供依据,尤其是对于特殊软弱地层隧道更为重要。

此外,现有的研究主要针对岩石围岩<sup>[18-19]</sup>进行,有关粉煤灰这种特殊软弱地层在注浆加固后的开挖卸荷应力路径及其围岩的变形特征研究较少。针对四川宜宾盐坪坝双联拱粉煤灰地层隧道开挖进行研究,基于数值模拟获得了双侧壁导坑法施工过程中围岩不同部位的应力路径变化规律,并在此基础上,通过三轴试验模拟了隧道开挖过程中围岩单元土体承受的应力路径,分析了各部位围岩的变形情况。所得到的结果可以为在类似特殊地层中的隧道开挖提供参考。

## 1 动态开挖模拟及应力路径监测

### 1.1 模型的建立

为得到盐坪坝双联拱粉煤灰地层隧道在开挖过程中周边围岩的应力路径情况,本文采用 FLAC3D 软件对粉煤灰地层全侵入的区段进行建模,根据实际工程隧道的埋深设为 30 m。计算模型地层的选取范围为:纵向沿隧道轴线方向取 100 m;水平方向长度取 100 m,为洞跨的 3 倍;垂直方向由隧道底部到底部边界取 40 m,约为洞径的 5 倍,以消除模型边界对计算结果的影响;垂直向上方向由隧道顶部到自由面,埋深 30 m 左右。在计算过程中,对隧道动态开挖流程中周边的应力进行监测。

由于该隧道断面为五心圆,断面形状复杂,且隧道分布开挖的步骤较多,因此建模过程简化如下:(1)通过 CAD 建立隧道断面图二维线框模型,如图 1 所示;(2)将 CAD 绘制的二维线框图导入 ANSYS 中,通过拉伸生成隧道三维模型后,进行网格划分;(3)通

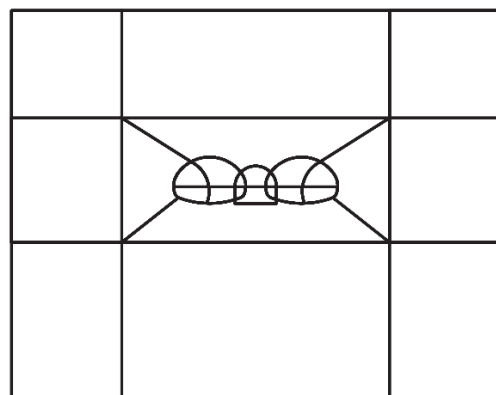


图 1 隧道二维线框图

过分组划分网格使得靠近隧道附近的网格划分较为密集,远离隧道的网格划分较为稀疏,使得模型能在保证计算精度的同时提升计算效率;(4)将划分好网格的模型导入到FLAC3D中进行计算,计算模型如图2所示。在模型前、后、左、右和下部边界均施加法向约束,地表为自由边界。

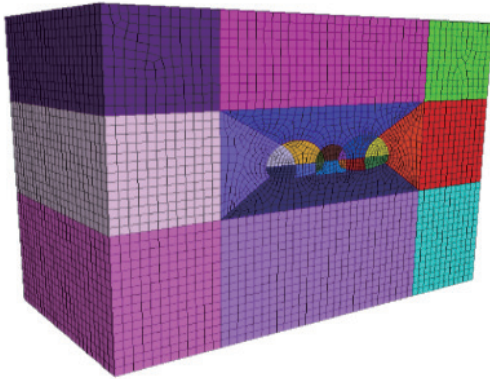


图2 隧道三维模型

1.2 材料参数

在FLAC3D中,岩土体材料采用各向同性Mohr-

coulomb本构模型,初次衬砌采用弹性本构模型。计算过程中,采用不占空间厚度的壳单元(shell)模拟隧道的初期喷锚支护。根据实际工程地质勘察资料以及三轴剪切试验结果,确定材料参数和初期支护的设计参数见表1。

表1 计算模型参数表

材料类别	弹性模量 E/GPa	泊松比 $\mu$	重度 $\gamma(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
围岩	2	0.35	20	150	37
初期支护	25	0.2	24		
中隔墙	35	0.2	25		

1.3 双侧壁导坑法施工过程模拟

本研究隧道采用三导洞的方法进行开挖,施做初期支护,浇筑中隔墙,之后依次开挖左右侧壁导洞,最后采用上下台阶法开挖左右主洞。研究对依托工程采用“三导洞法”施工可行性进行三维数值模拟分析,根据数值模拟计算对依托工程实际施工作了必要的简化(见表2)。

表2 三导洞法简化模拟施工工序

工序编号	施工工序	工序编号	施工工序
工序1 (Step 0—Step 3100) <sup>a</sup>	初始地应力计算	工序2 (Step 3100—Step 4725)	中导洞开挖及支护
工序3 (Step 4725—Step 5700)	中隔墙浇筑及墙顶回填	工序4 (Step 5700—Step 6660)	左洞导洞上台阶开挖及支护
工序5 (Step 6660—Step 7426)	左洞导洞下台阶开挖及支护	工序6 (Step 7426—Step 7915)	右洞上台阶开挖及支护
工序7 (Step 7915—Step 8664)	右洞导洞下台阶开挖及支护	工序8 (Step 8664—Step 9130)	左侧正洞上台阶开挖及支护
工序9 (Step 9130—Step 10390)	左侧正洞下台阶开挖及支护	工序10 (Step 10390—Step 11080)	右洞正洞上台阶开挖及支护
工序11 (Step 11080—Step 13497)	右洞正洞下台阶开挖及支护		

注:上标a表示图4中横轴Step计算步骤。

在模拟隧道三导洞开挖过程中,选取沿着隧道轴线方向 $y=4\text{ m}$ 的断面进行监测,分别选取隧道主洞以及中导洞的关键点处水平应力以及垂直应力进行分析。具体的断面观测点示意图见图3。

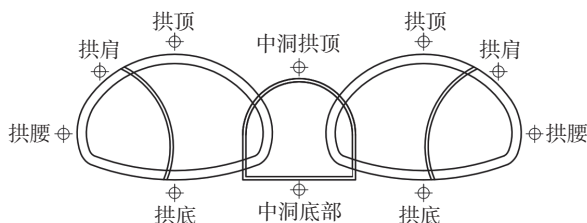


图3 隧道围岩应力监测点示意图

2 围岩应力监测结果及应力路径简化

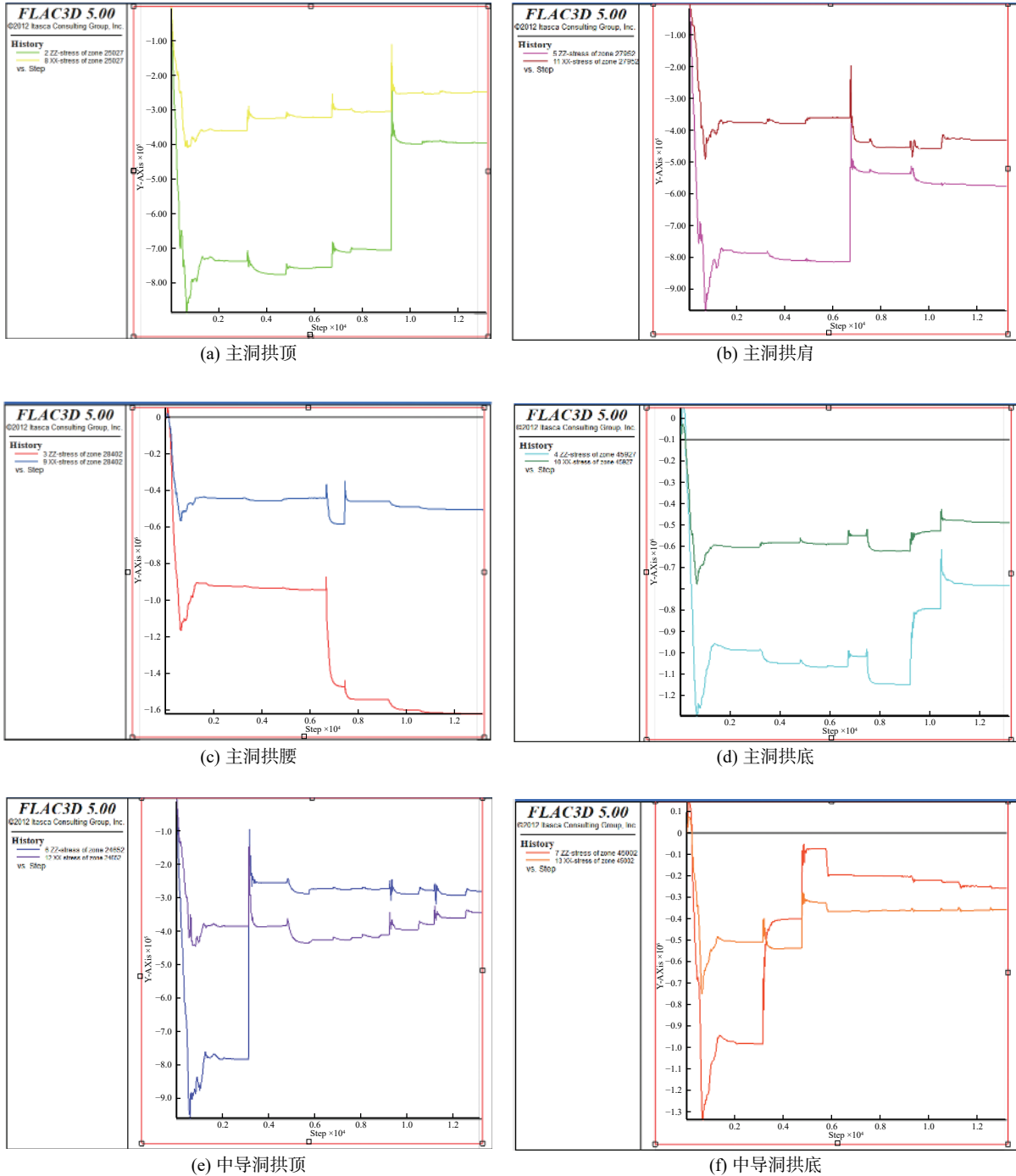
2.1 围岩应力监测结果与分析

根据FLAC3D的应力监测数据,得到三导洞施工隧道开挖过程中隧道拱顶、拱肩、拱腰和拱底的水平以及竖向应力状态。选取左线隧道主洞和中导洞的关键点应力变化规律进行分析,监测结果见图4。

如图4所示,隧道在分布开挖及支护过程中,围岩中不同部位应力路径存在差异。其中隧道主洞拱顶、拱肩、拱底处水平应力和竖向应力总体处于卸荷状态,且围岩竖直方向的卸荷量远大于水平方向。例如施工结束时主洞拱顶处水平应力由 $-357\text{ kPa}$ (受压)

降低至-248 kPa, 卸荷量为 109 kPa, 但此时对应的竖向应力卸荷量达到 336 kPa, 而隧道主洞拱腰处水平应力基本保持不变, 竖向应力呈加载趋势。值得注意的是, 中导洞拱顶、拱底土体单元在开挖过程中出现

主应力偏转。另外, 施工工序对不同部位应力路径变化的影响程度有所不同, 例如, 隧道主洞拱顶处应力路径对主洞上台阶开挖及支护工序最为敏感, 应力大小变化最强烈, 而拱腰处受侧导洞上台阶开挖影响最大。



注: ZZ-stress 为监测点竖向应力, XX-stress 为监测点水平应力

图 4 水平、竖向应力监测图

### 2.2 应力路径简化

由于数值模拟监测到的隧道周边关键点的应力变化规律过于繁杂, 一方面会造成后续的三轴应力路径试验研究操作困难的问题, 另一方面并不是每个开

挖支护步骤都会给监测点的应力造成显著的变化, 离监测点较远的土体开挖步骤往往对应力的影响偏小。因此, 考虑到三轴应力路径试验的可行性以及试验的合理性, 有必要对实际监测的应力变化规律进行相应

的简化。以下对各个监测点的水平应力以及竖向应力,基于监测到的显著变化进行简化之后,提取出了在  $p$ - $q$  平面上的应力应变结果,为后续的试验提供了依据。 $p$ - $q$  平面中,广义剪应力  $p = \sigma_1 - \sigma_3$ , 平均应力  $q = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 。

图5中  $OA$  和  $AB$  段为数值模拟计算中,隧道未开挖之前的原始地应力状态的水平应力及竖向应力

施加过程,  $AB$  段之后为隧道开挖及支护过程中应力变化的简化路径。前人的研究显示,主应力轴的偏转对围岩的变形有着一定影响<sup>[20-21]</sup>。但鉴于本研究中开挖卸荷为隧道围岩变形的主要因素,以及试验中三轴试验设备功能的限制,本研究中对应力偏转后的应力路径进行了相应简化,即应力偏转后出现拉应力后即结束加载。

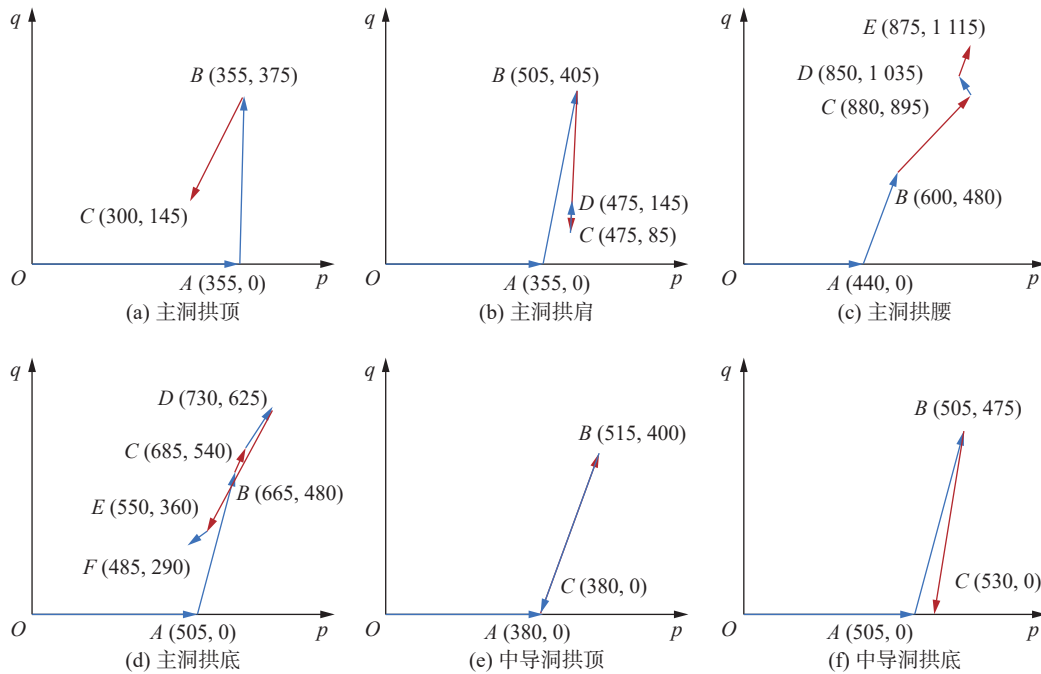


图5 应力路径简化图

### 3 围岩单元体不同应力路径三轴试验研究

应力路径不同可能导致围岩在施工过程变形和应力的分布及其性质和特性(如张拉和压缩)的改变。因此,本节采用上一节中获得的隧道开挖后的围岩应力路径,对粉煤灰围岩单元体进行了三轴试验,分析了不同应力路径下粉煤灰围岩的变形特征。

#### 3.1 试验材料及试样制备

本研究试验所用土样来自四川省宜宾市盐坪坝连拱隧道工程现场。盐坪坝连拱隧道穿越粉煤灰地层,隧址区中粉煤灰在堆填碾压和上覆堆填灰层压力的共同作用下,完成了自然状态下的固结沉降。该粉煤灰地层自稳能力差,受力即破碎成散颗粒,物理力学性质离散性,具体物理指标见表3。试验使用的水泥为普通的425#的硅酸盐水泥。为模拟注浆加固后的粉煤灰地层,本研究采用水泥掺量为12%,养护龄期为7天,设计水灰质量比为1.0的粉煤灰水泥土,进行模拟隧道各部位在开挖过程中的应力和变形特性,并以未参加水泥的土体作为对照组。根据表3中粉煤灰地层物理力学指标重塑粉煤灰土,在此基础

上,根据试验方案中的水泥掺入比和水灰质量比等要求称取适量的水泥、水,参照《水泥土配合比设计规程》JGJ/T(233—2011)<sup>[22]</sup>规定:将重塑土样和水泥搅拌均匀,洒水并继续搅拌20 min,制备成粉煤灰水泥土。随后将水泥土分三次插捣、振实、刮平制成高为100 mm,直径为50 mm的标准试件,并在模具中成型24 h后,标号后放入恒温( $20 \pm 2$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,恒湿(湿度 $\geq 95\%$ )的养护箱中,养护到相应龄期进行试验。参考盐坪坝隧道的实际埋深,取得典型围压为400 kPa,基于常规三轴试验得到了试验土体关键物理力学参数,见表4。

表3 粉煤灰地层原状土基本物理性质指标

天然含水率 $w/\%$	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 $e$	饱和度 $S_r/\%$	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$
59.1	1.49	2.07	88.3	76.1	52.6

#### 3.2 试验方案

试验所用的仪器为西安康拓力仪器设备有限公司生产的KTL动三轴,可实现同步地改变轴向应力和径向应力。试验采取应力控制方式,应力加载速率

为 10 kPa/min, 三轴应力路径试验方法为不固结不排水试验。具体试验方案见表 5。

表 4 试验土样关键物理力学参数

土样类别	峰值强度 /MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\circ)$	割线模量 $E_{50}/\text{MPa}$
粉煤灰地层原状土	0.81	172.5	12.7	18.5
粉煤灰地层重塑土	0.65	137.6	14.2	15.2
粉煤灰水泥土	1.74	275.9	34.2	48.2

### 4 试验结果及分析

#### 4.1 粉煤灰水泥土的应力-应变关系

为了模拟三导洞法施工过程中隧道围岩不同位置处土体的不同应力路径, 本试验研究采用常规三轴试验, 以静水压力状态下的应力、应变为坐标轴的起点, 首先对未加固的粉煤灰土和粉煤灰加固土施加围压以及轴压至原始的地层应力状态(第一加载阶段), 然后根据前文获得的开挖卸荷应力路径进行卸荷(第二加载阶段), 并绘制整个过程的应力-应变曲线, 如图 6(隧道主洞围岩)和图 7(隧道中导洞围岩)所示。

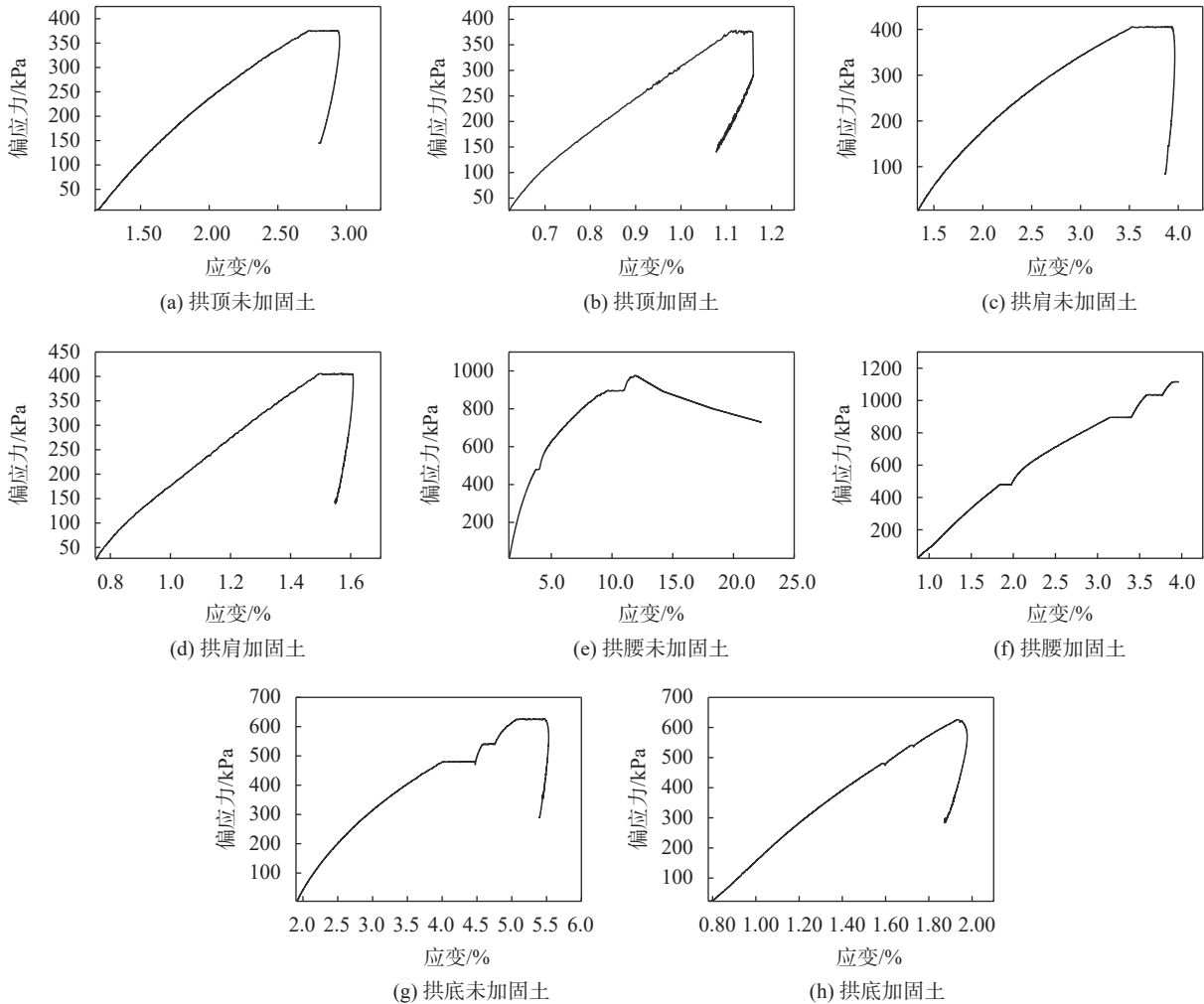


图 6 隧道主洞应力路径下的应力-应变关系图

表 5 试验方案表

试验路径	编号	隧道围岩所处位置	应力路径简化	控制方式
应力路径1	J-1 W-1	隧道主洞拱顶	主洞拱顶处的应力变化情况, 见图5(a)	均采用应力控制
应力路径2	J-2 W-2	隧道主洞拱肩	主洞拱肩处的应力变化情况, 见图5(b)	
应力路径3	J-3 W-3	隧道主洞拱腰	主洞拱腰处的应力变化情况, 见图5(c)	
应力路径4	J-4 W-4	隧道主洞拱底	主洞拱底处的应力变化情况, 见图5(d)	
应力路径5	J-5 W-5	隧道中导洞拱顶	中导洞拱顶处的应力变化情况, 见图5(e)	
应力路径6	J-6 W-6	隧道中导洞拱底	中导洞拱底处的应力变化情况, 见图5(f)	

注: J 开头的试件为掺加水泥进行加固的试件, W 开头的试件则为未经水泥加固的试件。

据图 6、图 7, 试验在第一加载阶段中粉煤灰水泥加固土试件的应力-应变图近似呈直线, 而未掺水

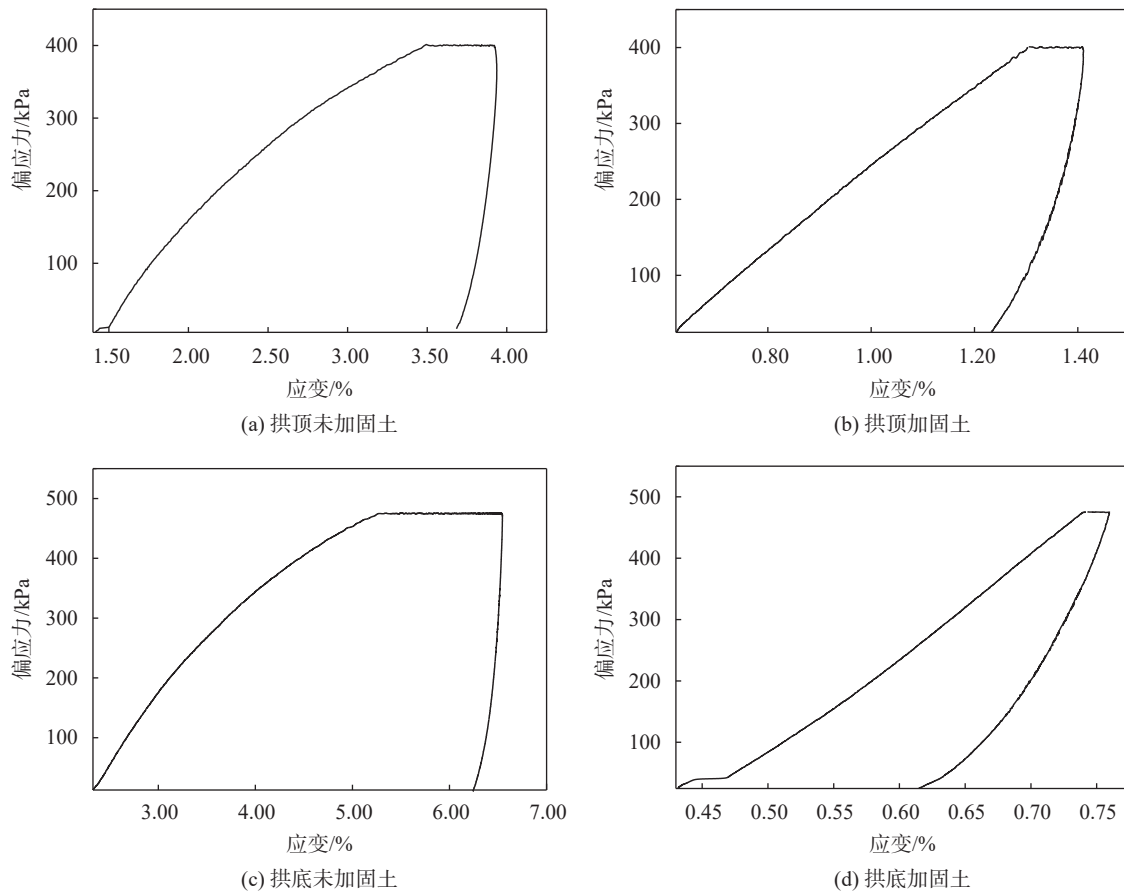


图7 隧道中导洞应力路径下的应力-应变关系图

泥加固的试件在第一加载阶段中均表现出一定的曲线形态,并与其所处位置有关。例如,图6(e)显示隧道主洞拱腰位置试件在第一加载阶段出现呈现明显的曲线形态,表明该处围岩在原始状态下已有一定的塑性变形发生,在第一阶段加载完成时应变变量已达到10%左右。

在隧道开挖过程中,隧道主洞拱顶、拱肩、拱底以及中导洞拱顶、拱底均存在一个卸荷阶段。图6和图7显示未加固土和粉煤灰水泥加固土的应力-应变曲线(第二加载阶段)都发生了不同程度的卸荷回弹现象,且加固土的回弹量更为明显。在整个加卸荷过程结束时未加固土试件的应变变量显著大于加固土试件。例如,图6(c)和图6(d)显示,隧道主洞拱肩处在其对应的卸荷应力路径加载结束时,未加固土的应变量为3.9%,而加固土的应变变量仅为1.5%。

#### 4.2 试件的变形与破坏特征分析

试件在三轴应力路径试验过程中的变形特征、破坏形式与加卸荷应力路径有关,不同的应力路径下试件的变形特征有所不同。由表6可知经水泥加固的试件变形量大幅小于未加固试件,即对围岩变形控制起到了积极的作用;隧道拱腰处应力路径下试件的

变形最为严重,且未加固试件发生了破坏,水泥加固试件的变形量达到了近4%,隧道中导洞开挖应力路径下的试件隧道主洞拱底应力路径下的试件也发生了较大的变形量,这两处位置在施工过程中应予以重点关注。

表6 试件变形特征表

试验类型	编号	隧道围岩所处位置	最终(峰值)应变变量/%	是否破坏
应力路径1	J-1	隧道主洞拱顶	1.08	否
	W-1		2.8	否
应力路径2	J-2	隧道主洞拱肩	1.54	否
	W-2		3.86	否
应力路径3	J-3	隧道主洞拱腰	3.96	否
	W-3		11.86	是
应力路径4	J-4	隧道主洞拱底	1.87	否
	W-4		5.39	否
应力路径5	J-5	隧道中导洞拱顶	1.21	否
	W-5		3.86	否
应力路径6	J-6	隧道中导洞拱底	0.59	否
	W-6		6.24	否

## 5 结论

本文针对盐坪坝隧道煤灰特殊地层开挖卸荷应力路径及其围岩变形特征进行了研究,采用FLAC3D数值模拟软件获得了隧道在三导洞法开挖施工过程中围岩关键部位的应力路径。基于获得的应力路径,采用三轴试验分析了隧道围岩土体单元在不同应力路径下的变形特征,得出了以下结论:

(1)隧道在分布开挖及支护施工过程中,围岩各部位的单元土体均经历了较为复杂的应力变化过程且应力路径差异显著,其中拱腰处土体的加卸荷最为强烈。复杂的应力路径大致可以简化并分类,其中隧道主洞拱顶、拱底、拱肩以及中导洞拱顶、拱底处的应力路径可视为恒围压卸轴压的过程,而隧道主洞拱腰的应力路径可视为恒围压升轴压的过程。

(2)不同的卸荷应力路径下,粉煤灰水泥加固的试件最终变形量均远小于未加固试件,即通过旋喷注浆的方式对地层进行预加固,对隧道开挖过程中围岩变形的控制具有积极作用。隧道主洞拱腰处的应力路径下试件的变量最为严重,若不对地层进行预加固,该处土体将在隧道开挖过程中发生变形破坏。

(3)隧道开挖之后周边围岩承受到的应力情况各不相同,因此产生的应变以及破坏特征也有所差异,故可针对不同位置采取不同强度的支护,其中隧道主洞拱腰处为重点关注的区域。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 张 梅,何志军,张民庆,等.高地应力软岩隧道变形控制设计与施工技术[J].现代隧道技术,2012,49(6):13-22,69.
- [ 2 ] 薛 勇,屈卫鹏,孟哲玮,等.高地应力软岩隧道开挖施工技术及受力变形分析[J].现代隧道技术,2018,55(S2):349-354.
- [ 3 ] 苑绍东,杨 林,黄 舰.并行隧道工程中后行隧道分步开挖对先行隧道横纵向地表沉降的影响研究[J].现代隧道技术,2018,55(6):80-86,100.
- [ 4 ] 孙歆硕,乔 兰.不同应力路径下地下隧道强度及开挖效应研究[J].金属矿山,2008(12):42-45,50.
- [ 5 ] 马 茹.点锚固锚固浅埋隧道解析解[J].隧道与地下空间技术,2020,100:103402.
- [ 6 ] 郑可跃,施成华,赵前进,等.考虑围压效应和中主应力的深埋软岩隧道弹塑性解[J].岩石力学与工程学报,2023.
- [ 7 ] 蒋望涛,马勤国,姜海强,等.寒区隧道应力和位移弹塑性统一解及对比分析[J].铁道学报,2023,45(7):161-168.
- [ 8 ] 李政林,吴瑞祥,李龙剑,等.基于损伤理论的隧道围岩松动圈确定方法[J].地下空间与工程学报,2011,7(6):1060-1064,1090.
- [ 9 ] 黄 锋,朱合华,徐前卫.含软弱夹层隧道围岩松动破坏模型试验与分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(A1):2915-2924.
- [ 10 ] 刘淑红,范金录,朱永全.非圆形隧道毛洞围岩的应力和塑性区[J].中国铁道科学,2022,43(3):78-85.
- [ 11 ] 乔亚飞,肖颖鸣,丁文其,等.跨断层隧道施工应力路径识别与扰动分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(1):50-59.
- [ 12 ] CAI M. Influence of stress path on tunnel excavation response numerical tool selection and modeling strategy[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(6): 618-628.
- [ 13 ] 蒋明镜,王富周,朱合华.考虑尾隙的盾构隧道土压力离散元数值分析[J].地下空间与工程学报,2010,6(1):28-32.
- [ 14 ] 张春生,侯 靖,朱永生,等.深埋隧洞围岩应力分布与破坏机理[J].现代隧道技术,2011,48(3):7-13.
- [ 15 ] 黎春林,缪林昌.盾构隧道施工土体塑性区解析法研究[J].中国矿业大学学报,2014,43(3):402-408.
- [ 16 ] 路德春,曹胜涛,张 波,等.隧道开挖围岩土压力拱效应分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(6):1421-1430,1436.
- [ 17 ] 张云军,宰金珉,王旭东.隧道开挖对周围土体的影响分析[J].建筑结构,2006,36(S1):833-835.
- [ 18 ] 阿卜杜拉,杜修力,田 雨,等.盾构隧道开挖过程中土的应力路径试验研究[J].现代隧道技术,2020,57(S1):772-779.
- [ 19 ] 张宏博,宋修广,黄茂松,等.不同卸荷应力路径下岩体破坏特征试验研究[J].山东大学学报:工学版,2007,37(6):83-86.
- [ 20 ] 王 兴,孔 亮,李学丰.砂土非共轴本构模型及其在地基承载力方面的应用[J].岩土工程学报,2020,42(5):892-899.
- [ 21 ] 赵龙涛.盾构隧道开挖过程中土体主应力轴旋转影响研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [ 22 ] JGJ/T 233—2011 水泥土配合比设计规程[S].

收稿日期:2023-06-06