

逆断层错动下基岩上覆土-隧道多尺度响应特征

禹海涛, 李婷婷, 闫 晓

Multi-scale response characteristics of overlying soil-tunnel system under reverse fault dislocation

YU Haitao, LI Tingting, and YAN Xiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41-47

鸿图嶂隧道突涌水预测及防治措施

Prediction and prevention of sudden water gushing in the Hongtuzhang tunnel

罗依珍, 成国文, 尹利君, 邓皇适, 谭宁, 刘真真 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 64-72

圭嘎拉高速公路隧道地应力特征及岩爆预测

In-situ stress characteristics and rock burst prediction of the Guigala Expressway tunnel

邢军, 王建斌, 蒋蕾, 董小波 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 170-178

多级荷载下弱膨胀土的膨胀变形特性试验研究

An experimental study of expansion deformation characteristics of weak expansive soil under multi-stage load

边加敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 125-133

软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响

Influences of double-track shield tunnel construction on settlements of adjacent ground and buildings in a soft soil area

潘涛 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 101-108

隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用

Attribute recognition model of fatalness assessment of rockburst in tunnel construction and its application

何怡帆, 李天斌, 曹海洋 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 102-111



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502016

禹海涛, 李婷婷, 闫晓. 逆断层错动下基岩上覆土-隧道多尺度响应特征 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 202-213.

YU Haitao, LI Tingting, YAN Xiao. Multi-scale response characteristics of overlying soil-tunnel system under reverse fault dislocation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 202-213.

逆断层错动下基岩上覆土-隧道多尺度响应特征

禹海涛^{1,2}, 李婷婷¹, 闫 晓³

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 3. 同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要: 基岩断层错动在上覆土层中的传播破裂过程受多种因素控制, 上覆土中跨断层隧道结构在断层错动下的响应机制尚不清晰。为解决这一问题, 建立了基岩断层上覆土与隧道结构的三维离散-连续耦合模型, 采用离散元模拟上覆土层细观颗粒特性与变形模式, 采用有限差分法计算隧道结构宏观力学响应, 并通过界面耦合实现宏-细观交互传递。基于该方法, 分析了基岩断层错动在上覆土层中的破裂传播过程和上覆土中隧道结构的变形受力响应, 并探究了断层倾角与隧道埋深对隧道响应及失效模式的影响机制。结果表明: 基岩断层错动在上覆土层中以剪切带的形式传播, 隧道结构的存在将增大地层位错变形范围; 隧道结构的受力变形模式为由隧道纵向受弯导致的受弯区上下盘衬砌应力反对称分布, 隧道结构失效最先发生在上盘区段, 体现出显著的上盘效应; 在相同基岩错动量条件下, 断层倾角越小, 隧道结构受力越不利; 隧道埋深越深, 其周围土体变形范围越集中, 隧道结构受力越不利。研究可为基岩断层错动作用下上覆土中隧道结构抗震设计提供科学依据。

关键词: 基岩上覆土隧道; 断层错动; 多尺度模型; 隧道响应特征

中图分类号: TU43; U452.1*1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0202-12

Multi-scale response characteristics of overlying soil-tunnel system under reverse fault dislocation

YU Haitao^{1,2}, LI Tingting¹, YAN Xiao³

(1. Department of Geotechnical Engineering College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The propagation and rupture process of bedrock fault dislocation in the overlying soil layer is controlled by many factors, which makes the response mechanism of the tunnel structure crossing the overlying soil under fault dislocation unclear. To solve this problem, a three-dimensional discrete-continuous coupling model is established, in which the discrete element is used to simulate the microscopic characteristics of the soil particles and deformation mode of the overburden layer, the finite difference method is used to calculate the macroscopic mechanical response of the tunnel structure, and the interface coupling is used to realize the interactive transfer

收稿日期: 2025-02-13; 修订日期: 2025-04-23

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177134; 42477141); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

第一作者: 禹海涛(1983—), 男, 博士, 教授, 从事地下结构防灾减灾方面的研究工作。E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn

通讯作者: 闫晓(1994—), 女, 博士, 助理教授, 从事岩土力学方面的研究工作。E-mail: xiao_yan@tongji.edu.cn

between the above two methods. Based on the multi-scale model, the rupture propagation process of bedrock fault dislocation in the overlying soil layer, as well as the deformation response of the tunnel structure in the overlying soil are investigated. The effects of the fault dip and the depth of tunnel on the tunnel failure mode are also investigated. Results show that the bedrock fault dislocation propagates in the form of shear zone in the overburden, and the existence of tunnel structure will increase the deformation area of the soil. The deformation mode is the anti-symmetric distribution of lining stress in the upper and lower disks of the bending area caused by longitudinal bending of the tunnel, and the structural failure of the tunnel structure occurs firstly in the upper disk section, which shows the significant effect of the upper disk. Suffering the same bedrock dislocation, the tunnel structural is more likely to be damaged with a smaller fault dip. In addition, under a higher depth of tunnel, the deformation zone of the surrounding soil will be concentrated, resulting in the instability of the tunnel. The study can provide a scientific basis for the seismic design of tunnel structures in the overlying soil under the action of bedrock fault dislocation.

Keywords: overburden soil tunnel on bedrock; fault dislocation; multi-scale model; tunnel response characteristics

除岩石裸露的陡峻山坡外, 全球几乎到处被第四纪沉积物覆盖, 地震发生时基岩断层错动作用会经上覆沉积土层向地表传播, 并可能导致地表破裂, 进而威胁近地表结构的安全。随着地下交通网络规模不断扩大, 隧道结构不可避免建设在断裂带周围或穿越断裂带^[1-2], 且通常以两种形式穿越断层带: 隧道埋置于基岩中, 直接穿过断层破碎带; 隧道埋置于基岩断层面上覆沉积土层中。前者主要面临断层核集中位错导致的剪切破坏, 而后者将受到基岩断层错动在上覆土层中传播的破裂变形作用, 该过程受断层性质、上覆土层物理力学性质与几何特征等众多因素的影响^[3-4], 这使得隧道结构受力变形机制更为复杂, 因此亟需开展基岩断层错动下上覆土层与隧道结构相互作用研究。

目前穿断层隧道结构抗震研究较多, 而对于断层错动作用下基岩上覆土层中隧道结构抗震研究相对较少。Burridge 等^[5]设计了受断层错动诱发上覆土与隧道结构相互作用的离心机模型试验, 建立了弹性地基梁简化模型以分析无限长隧道的地震响应, 并研究了隧道沿纵向的内力与变形响应, 研究发现, 有限长度隧道与无限长度隧道工况下的弯曲力矩差异较小; Liu 等^[6]设计了砂箱模型试验研究正断层错动下上覆土体破裂与隧道结构破坏机制, 重点分析了土体剪切带的发展、隧道应变及裂缝形式, 结果表明正断层错动量约为覆土深度的 4.4% 时会形成地表裂缝且呈倒三角破裂形态, 其范围随断层倾角的减小而增大; Cai 等^[7]通过离心机模型试验和数值模拟研究了上覆砂层中隧道结构在正断层错动下的变形破坏机制, 发

现隧道的存在使得正断层错动引起的地表变形减小, 其屏蔽效果随着隧道埋深的减小而增大。可见, 上述研究对上覆土-隧道结构体系在基岩断层错动下的响应研究主要采用基于连续介质力学的有限元方法, 未考虑上覆土层的细观颗粒离散特性及其对隧道结构响应的影响机制, 且主要集中于正断层错动的影响。

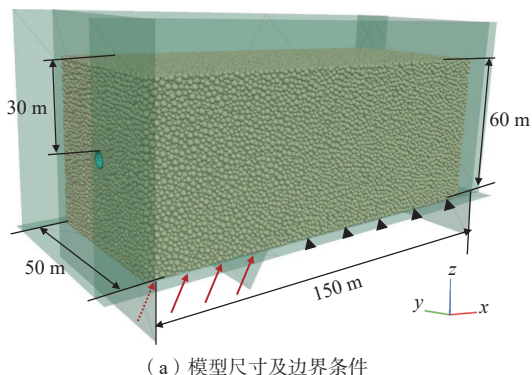
本文假设断层仅在基岩中发育、而上覆土体中无先存断层, 基于离散元方法模拟细观颗粒介质的固有优势, 采用离散元和有限差分方法建立了基岩上覆土与隧道结构相互作用体系的三维离散-连续耦合模型, 其中采用离散元描述上覆土层的细观颗粒变形特性, 采用有限差分方法模拟隧道结构宏观特征, 并通过界面耦合方式实现二者之间的受力变形交互传递。在此基础上, 分析了逆断层基岩错动下上覆土中隧道结构的变形受力响应特征和失效模式, 以及断层错动在上覆土中的破裂传播机制和地层-结构相互作用。最后探究了逆断层错动下不同断层倾角和隧道埋深对上覆土-隧道结构响应的影响机制, 以期为基础断层错动作用下上覆土中隧道结构抗震设计提供指导。

1 模型方法与参数标定

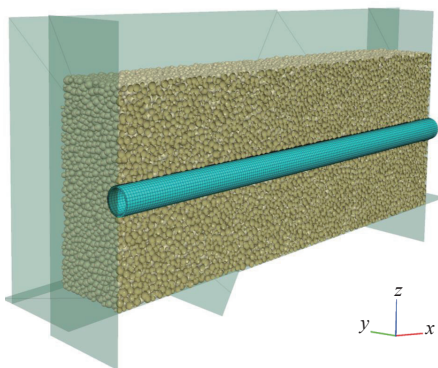
1.1 基岩上覆土-隧道体系多尺度模型

本数值模型采用 PFC-FLAC^{3D} 耦合方法建立, 上覆土层由离散元模拟, 隧道结构由有限差分网格模拟, 二者耦合边界处通过设置与有限差分网格完全重合的墙体来实现界面耦合数据交互, 模型示意图见 [图 1](#)。为正确模拟隧道结构的力学性质, 根据原型尺寸建立三维模型, 鉴于基岩上覆第四纪沉积层厚度主

要分布于十米至数百米之间^[8-9], 定义上覆土厚度为 60 m, 上覆土层模型尺寸为 150 m×50 m×60 m, 隧道结构长度为 150 m, 衬砌内外径分别为 2.65 m 和 3.00 m。



(a) 模型尺寸及边界条件

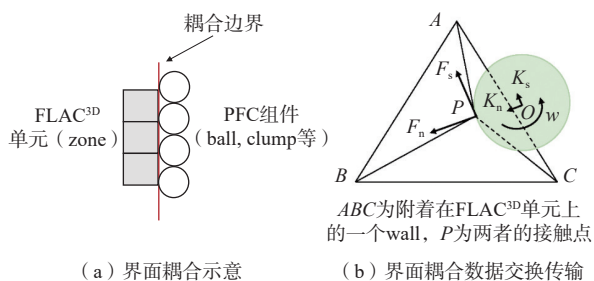


(b) 模型剖面示意图

图1 上覆土中跨断层隧道模型示意图

Fig. 1 Diagram of cross-fault tunnel in overlying

多尺度界面耦合方法的力学原理为取墙体的基本组成面上的接触力和力矩来确定其顶点的等效力系统, 将这些等效力与刚度贡献一起传递到有限差分的网格点上, 界面力在每个计算时间步后再反向从网格传递给球体, 从而实现耦合边界处的信息实时交互, 如图2所示。根据尹小涛等^[10]的研究成果, 颗粒离散元模型长度与试样最小粒径比值 $D/d_{\min} > 10$ 时模



(a) 界面耦合示意

(b) 界面耦合数据交换传输

图2 PFC-FLAC^{3D} 界面耦合原理

Fig. 2 Principle of PFC-FLAC^{3D} interface coupling

注: F_n 为法向应力, F_s 为切向应力, K_n 为法向刚度, K_s 为切向刚度。

型稳定性较好, 因此考虑到数值模型的稳定性及计算成本, 上覆土颗粒数值半径选择 0.5 ~ 1.2 m, 小颗粒范围通过确保大颗粒在计算过程中不会被挤向耦合界面处的试算确定。此外, 为确保土体颗粒将力均匀作用于耦合界面, 隧道结构外围 2 m 范围内土体颗粒均采用相较于网格更小的粒径 (0.3 ~ 0.4 m) 来模拟, 其中小粒径的取值通过对小颗粒与大颗粒集合体进行直剪试验来确定, 具体验证过程将在 2.2 节中详细阐述。

1.2 隧道及上覆土层参数标定

隧道衬砌采用带拉伸截断的 Drucker-Prager 理想弹塑性复合准则。对于拉伸情况, 通过最大拉应力准则判断断裂, 通过设置非相关联流动法则, 定义不同应力状态下的塑性流动状态。其力学参数通过对钢筋混凝土材料等效计算得到^[11], 见表1。

表1 隧道衬砌模型等效参数取值

Table 1 Equivalent parameter of tunnel lining model

参数	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)
隧道衬砌	32	0.2	7.2	45	30

基岩上覆土考虑为非胶结砂土材料, 并选用抗转动线性接触模型来模拟砂土颗粒间接的触行为, 该接触模型示意如图3所示, 接触性质包含线性接触组和抗转动接触组, 即在线性接触模型的基础上结合作用在接触面上的扭矩以抵消滚动运动的接触模型, 可将由于砂土颗粒表面粗糙度对颗粒转动的阻碍作用考虑进来, 以合理捕捉砂土的细观力学特性。

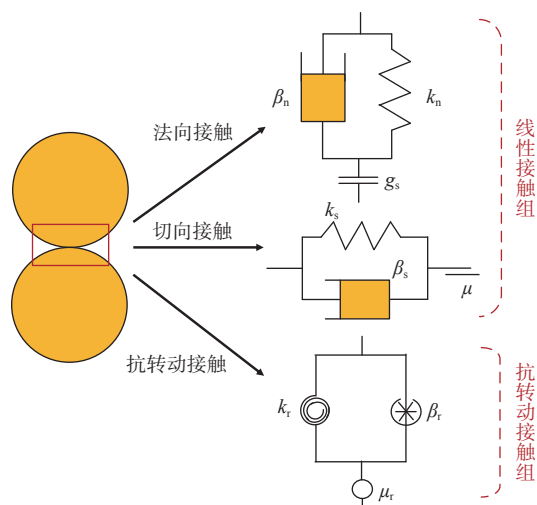


图3 抗转动线性接触模型 (据文献 [11] 重新绘制)

Fig. 3 Rolling resistance linear model (replotted from Ref. [11])

注: β_n 为法向阻尼系数, β_s 为切向阻尼系数, β_r 为扭转阻尼系数, k_n 为法向刚度, k_s 为剪切刚度, k_r 为扭转刚度, μ 为摩擦系数, μ_r 为抗转动系数, g_s 为接触面间距。

对上覆土层材料参数选取试验中的中密砂进行研究,通过开展三维直剪试验对土体模型细观参数进行了标定,其中颗粒粒径为 0.5~1.2 m,三维剪切盒尺寸为 80 m×50 m×80 m,剪切速率为 0.2 m/s,三维颗粒细观参数如表 2 所示。图 4 为三维直剪试验模拟与室内试验^[12]的应力应变曲线对比图,可见二者较吻合,说明当前细观参数取值所表现出的宏观材料剪切力学特性与实验室试样保持一致,可用于后续数值模拟。

表 2 三维试样细观参数标定结果

Table 2 Calibration results of 3D sample microparameters

变量	过程	参数	取值
孔隙率	—	n	0.3
有效模量/GPa	—	E	55
法切向刚度比	—	k_n/k_s	1.0
ball-ball摩擦系数	成样阶段	$fric$	0.02
	剪切阶段	$fric$	0.2
ball-facet摩擦系数	剪切阶段	$fric$	0.0
抗转动组摩擦系数	剪切阶段	$rrfric$	0.15

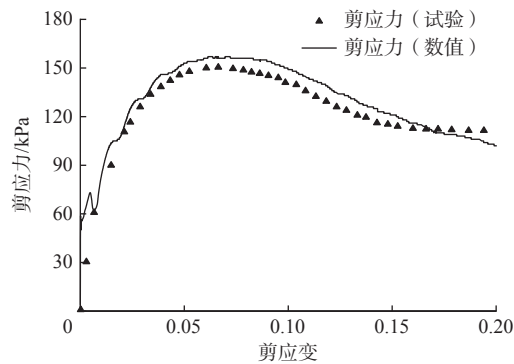


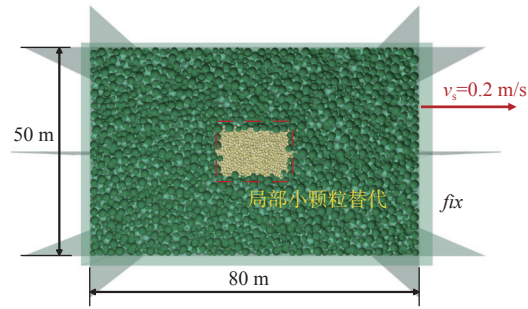
图 4 三维直剪试验模拟结果

Fig. 4 Simulation results of 3D direct shear test

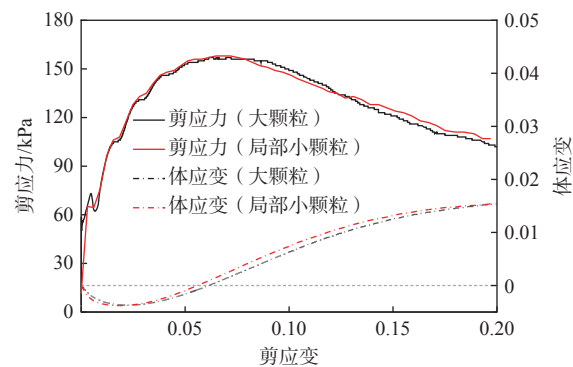
隧道外围的小颗粒细观接触参数也可通过三维直剪试验进行标定,如图 5 所示。控制小颗粒粒径为 0.3~0.4 m,通过对小颗粒与大颗粒集合体进行直剪试验来说明小颗粒局部加密的可行性,结果表明局部加密为小颗粒对试样整体的力学特性影响不大,且整体试样保持变形协调,因此三维模型中局部小颗粒加密方案是合理可行的。

1.3 模拟工况与分析指标

本研究主要探究基岩逆断层错动下上覆土-隧道结构的响应特征以及断层倾角、隧道埋深对其响应的影响机制。由于逆断层倾角分布范围较大,本计算工况考虑三种断层倾角: 30°、45°和 60°,计算工况见表 3。通过固定模型下盘,并对上盘墙体逐级施加归一化基岩位错 h/H (单位为 %, h 为竖向错动量, H 为覆土层厚



(a) 局部小颗粒加密剖面图



(b) 局部小颗粒加密直剪试验结果与原结果对比图

图 5 局部小颗粒加密验证

Fig. 5 Localized small particle cryptographic authentication

度)来模拟逆断层基岩位错过程。已有研究表明,断层黏滑错动速率较慢时,塑性应变带能较为完整地贯穿上覆土层,而非导致上覆土下部的应变集中^[13-14],当断层错动速率持续降低时,覆土塑性变形将不再明显。因此,依据前人研究经验,本文将黏滑断层竖直错动速率设为 0.05 m/s^[13]。历史地震观测事件中,可能会发生数米的地表垂直位移^[15],故本研究将归一化基岩位错施加至 $h/H=10\%$ (即竖向垂直位移为 6 m) 以进行后续的分析研究。

表 3 计算工况表

Table 3 Simulation cases

工况	断层倾角/(°)	隧道埋深/m	分析因素
R60T30	60	30	断层倾角
R45T30	45	30	
R30T30	30	30	
R60T30	60	30	隧道埋深
R60T20	60	20	
R60T10	60	10	

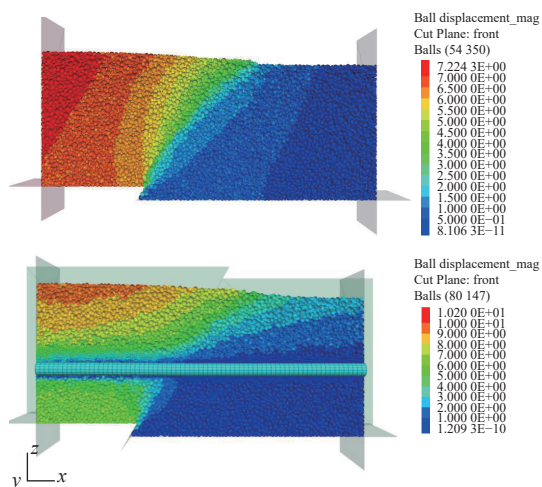
2 结果分析

为研究基岩断层错动在上覆土中的破裂传播过程,并探究上覆土-隧道结构的变形受力响应机制及失效演化特征,本节以表 3 中的标准工况 R60T30 为例

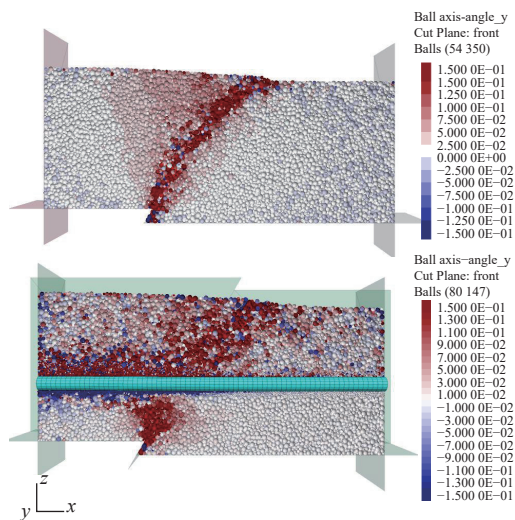
进行说明。

2.1 逆断层错动在上覆土层中的破裂传播过程

与穿基岩断层隧道相比,上覆土隧道周围土体变形更为复杂,逆断层在上覆土层中的破裂传播变形过程是隧道结构响应分析的基础,因此提取了归一化位错 $h/H=10\%$ 下自由场和隧道结构存在时的上覆土颗粒位移和颗粒旋转云图(图 6)进行对比分析,后者可观察断层在上覆土中的剪切破裂带形态与路径。由图 6(a)可看到上覆土变形与隧道结构纵向变形并不连续,二者间相互作用关系可表征为:隧道结构的存在阻碍了其下方土颗粒的位移,且下盘更远位置处土体也发生了位移,说明隧道结构作为土体变形与力链的传播介质,可使地层位错变形传播至下盘更远处。此外,由图 6(b)可知隧道结构的存在会使原本较集中



(a) $h/H=10\%$ 时颗粒位移云图



(b) $h/H=10\%$ 时颗粒旋转分布

图 6 归一化基岩位错 $h/H=10\%$ 时颗粒位移和颗粒旋转

Fig. 6 Cloud image of particle displacement and rotation when normalized bedrock dislocation $h/H=10\%$

的剪切变形破裂带分布于更大的范围,而这与直接穿活动断裂的深埋岩石隧道有所不同。

2.2 逆断层错动下基岩上覆土-隧道结构响应特征

在探究了逆断层错动在上覆土层中的破裂传播过程及其与隧道结构相互作用的基础上,结合宏观手段进一步研究隧道纵向变形特征及隧道结构变形受力响应机理。图 7 为不同基岩归一化竖向位错下隧道拱顶竖向位移曲线。由图可看出,隧道结构纵向变形为 S 形,在 $h/H=8\% \sim 10\%$ 分布范围内上盘隧道结构纵向变形显著增加,且隧道变形模式也发生明显变化,如 $h/H=10\%$ 条件下在 -55.0 m 断面处隧道结构变形最大,表明在此过程中上盘隧道结构响应相比下盘更为不利,且在上盘 $x=-55.0$ m 断面最先发生结构失效,后续分析将进一步证实此现象。

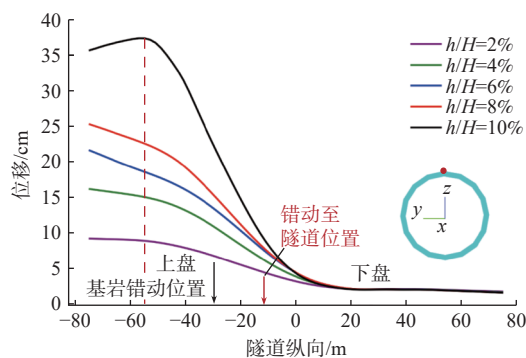


图 7 隧道拱顶纵向位移曲线

Fig. 7 Displacement curve of tunnel arch

决定隧道衬砌破坏的直接原因是隧道沿纵向的相对变形,为此在隧道横断面布置 4 组测点监测了隧道在 1-竖向、2-45°、3-水平向、4-135°四个方向的直径变化率, $h/H=8\%$ 时隧道沿纵向各断面的直径变化率如图 8 所示。由图可知,隧道断面主要发生了竖向拉伸和水平向的收缩变形,并在上盘 $x=-50$ m 断面处达到极值,这与穿基岩断层的隧道结构断面变形形式有所不同,如汶川地震中龙溪隧道震害表明在逆断层错动下隧道结构发生了仰拱开裂和隆起(竖向挤压变形),以及隧道拱顶塌方^[16]。

为深入分析,提取了上盘 $x=-50$ m 断面处地层的细观变形云图以观察隧道周围土体变形,如图 9 所示。由图可知在上盘向上错动过程中,隧道结构下方土体由于受到隧道结构的约束,会被迫挤向隧道结构两侧并向上移动,故力链主要集中在底部和两侧,而隧道两侧对应的地层力链分布将导致隧道断面在水平向受到挤压作用,从而导致隧道衬砌在水平向发生

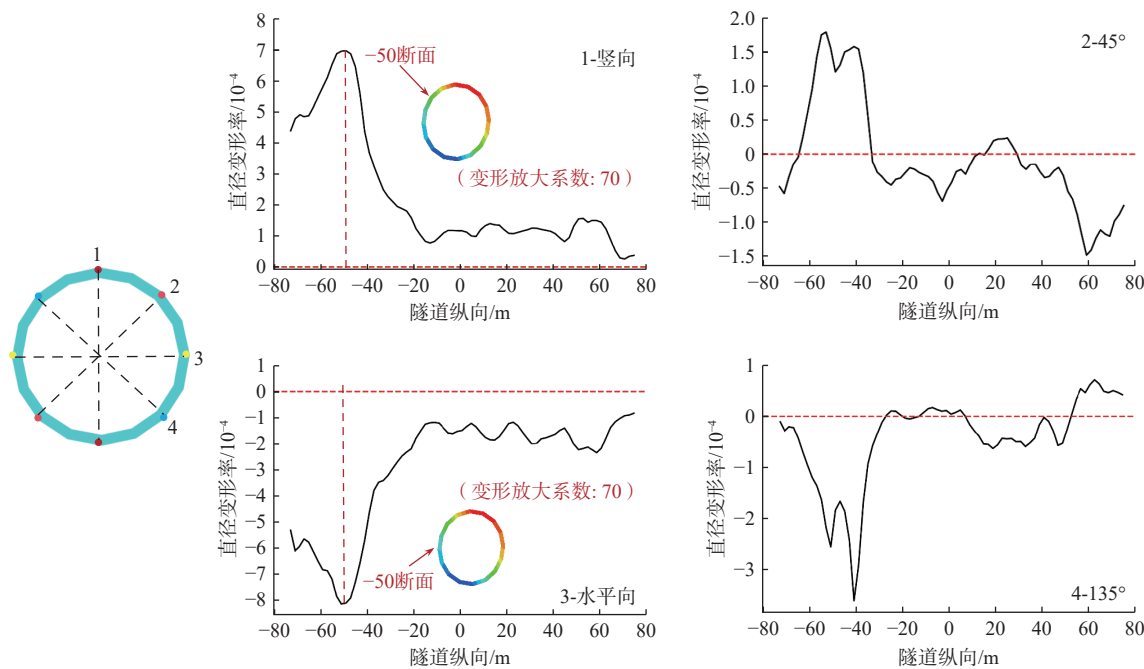


图 8 隧道沿纵向各断面直径变化率曲线
Fig. 8 Curve of the change rate of the diameter of the tunnel along the longitudinal section
注: 直径变形率正值为扩大, 负值为收缩。

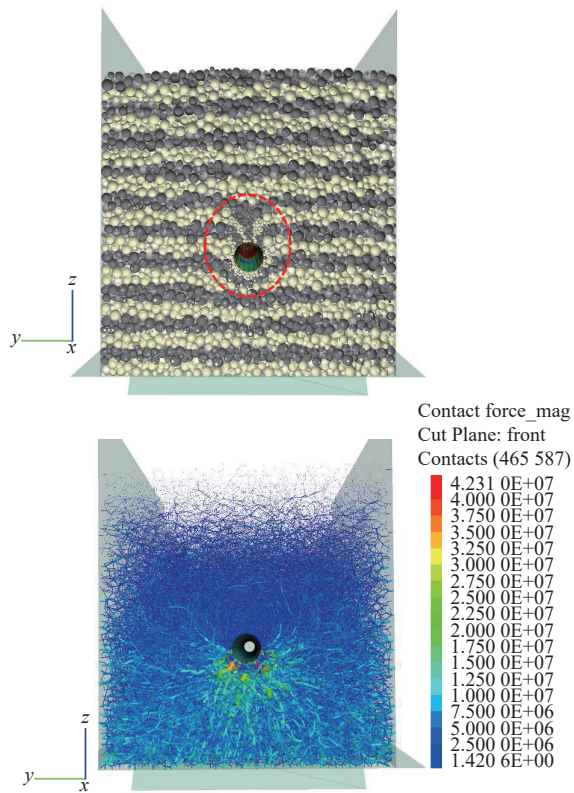


图 9 $h/H=10\%$ 时-50 断面 (上盘) 土体变形图与力链图
Fig. 9 Soil deformation diagram and force chain diagram of -50 section (upper wall) when $h/H=10\%$

压缩变形。值得注意的是, 土体的颗粒运移在连续介质力学如有限元方法中是难以表征的, 进一步体现了

本文多尺度分析模型的优势。

为进一步探究上覆土-隧道结构的受力状态及失效演化模式, 图 10 给出了 $h/H=8\%$ 错动下隧道结构的最大和最小主应力云图。由图可知结构主应力主要分布于断层错动位置两侧上下盘一定范围内, 且呈反对称分布, 其对称中心处的应力较小。对沿隧道纵向各断面的最大主应力和最小主应力进行提取, 见图 11 左侧曲线图, 最大和最小主应力峰值均分布在上盘 $x=-41\text{ m}$ 断面和 $x=0\text{ m}$ 断面; 图 11 右侧为上盘 $x=-41\text{ m}$ 断面和 $x=0\text{ m}$ 断面处的最大和最小应力云图, 可见在 $x=-41\text{ m}$ 断面处隧道结构受力状态为拱顶受拉和拱底受压; 而 $x=0\text{ m}$ 断面则与之相反, 表现为拱顶受压和拱底受拉状态。

上述分析表明上覆土隧道在基岩逆断层错动下的受力模式表现为: 隧道结构应力主要分布于断层错动位置两侧的拱顶和拱底处, 且隧道受弯段结构在拱顶和拱底分别处于受压和受拉状态, 即呈现出一拉一压反对称分布特征。这与穿基岩断层隧道衬砌的受力状态不同, 即基岩中隧道的破坏模式主要来源于断层面附近的剪切破坏^[17]。本质上在于二者周围介质的位移模式不同, 如穿基岩断层隧道结构周围岩体的位移模式为断层面集中位错, 而对于基岩上覆土中的隧道结构, 基岩的集中位错会在向上覆土传播过程中分布于更大的区域内, 尤其在隧道结构存在的情况下

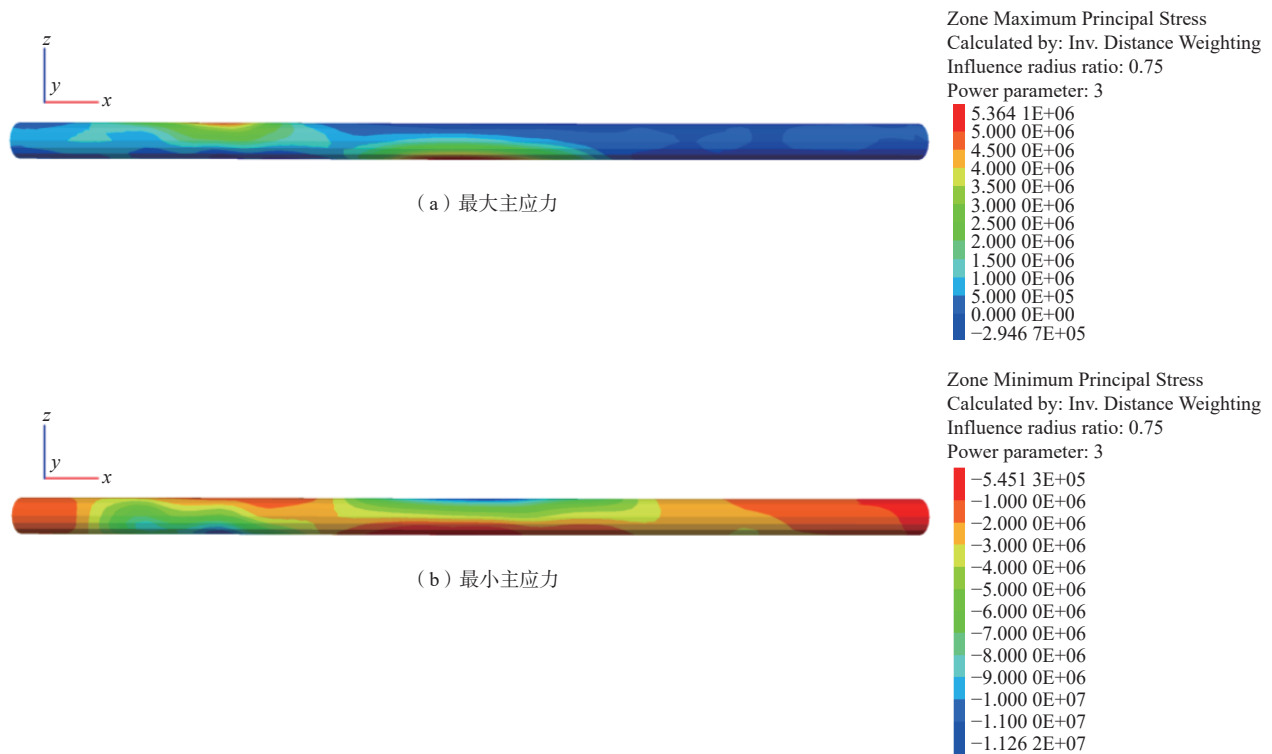


图 10 隧道主应力云图

Fig. 10 Principal stress cloud diagram of the tunnel

注: 压应力为负值, 拉应力为正值。

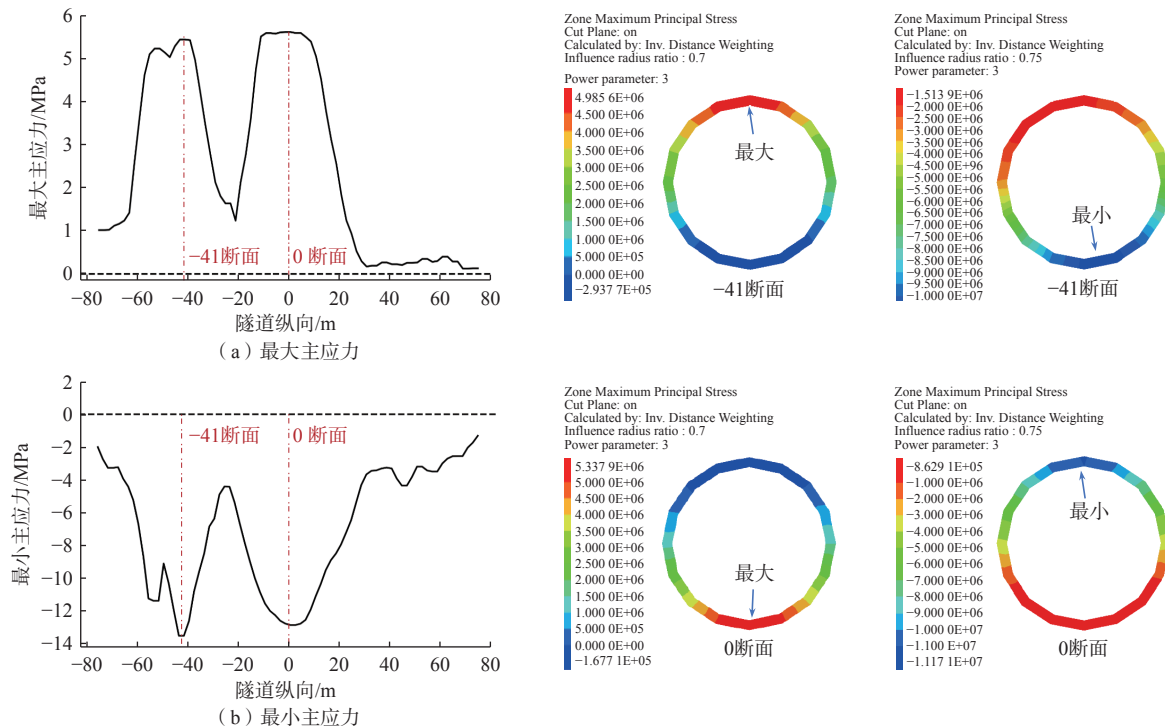


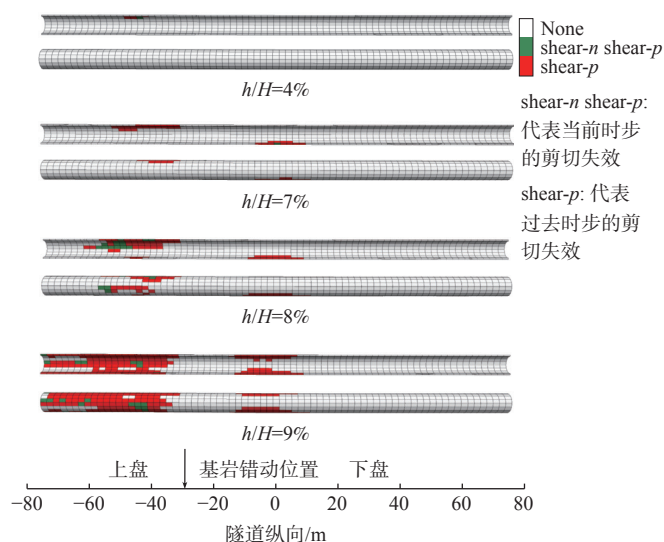
图 11 隧道主应力分析

Fig. 11 Tunnel principal stress analysis

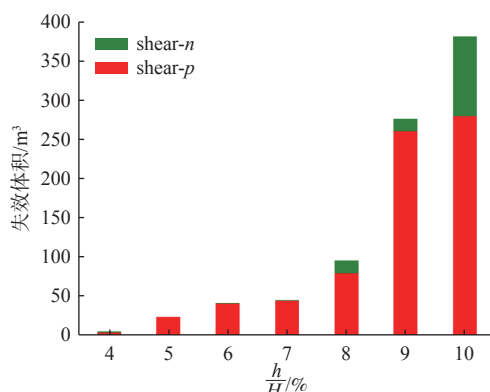
(图 6), 可见上覆土-隧道结构是受地层变形控制, 且在较大范围内发生弯曲变形。

图 12 为不同位错量条件下隧道结构失效区演化及失效体积(发生失效的网格单元的总体的积)的演化

统计。由图 12(a) 可以看到 $h/H=7\%$ 时上盘隧道拱顶首先发生失效, 而后下盘隧道拱底也发生失效, 当 $h/H=8\%$ 时上盘隧道部分区段发生全断面失效, 而在 $h/H=9\%$ 时上盘隧道几乎都已经失效; 图 12(b) 可明显看出 h/H 从 8% 到 9% 过程中隧道衬砌的失效体积显著增



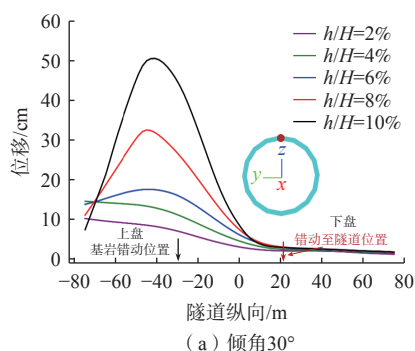
(a) 隧道失效位置



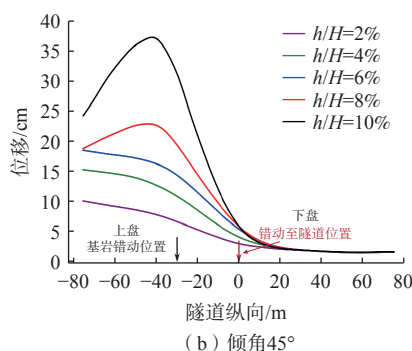
(b) 隧道失效体积演化

图 12 隧道结构失效演化过程

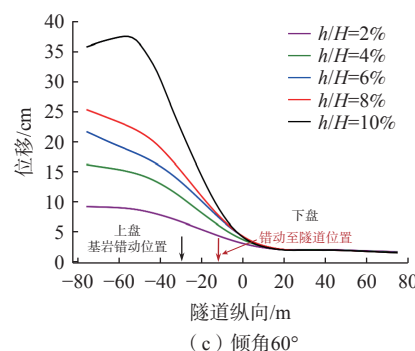
Fig. 12 Tunnel failure evolutionary process



(a) 倾角30°



(b) 倾角45°



(c) 倾角60°

图 13 不同断层倾角下隧道纵向拱顶位移

Fig. 13 Tunnel vault displacement under different fault dip

加, 而下盘隧道失效范围相对较小, 主要发生在拱顶底且向全断面失效发展。因此, 上覆土-隧道结构在基岩逆断层错动下会在上盘区段发生较严重全断面失效, 而下盘区段会在拱顶底位置发生结构失效, 工程结构应重点考虑这些不利位置处的抗震设计。

3 参数敏感性分析

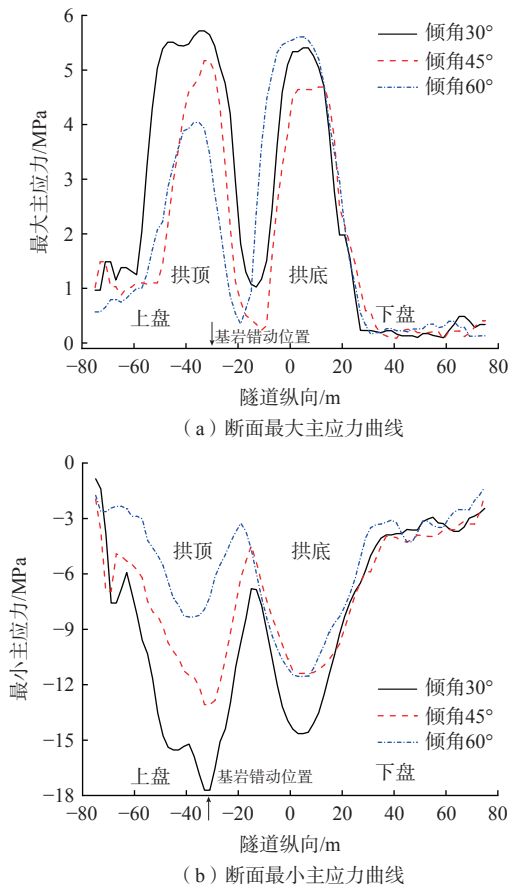
3.1 断层倾角对隧道响应的影响

图 13 为不同基岩错动量下断层倾角为 30°、45°、60°三种工况(对应表 3 工况)下隧道结构纵向变形曲线。由图可知, 断层倾角越小, 隧道纵向变形特征发生变化更快, 如断层倾角为 30°时, 隧道纵向变形曲线在 $h/H=2\% \sim 6\%$ 范围内上盘区 $x=-40$ m 断面处变形分布发生显著变化, 且在后续的错动中, 断层倾角越小, 隧道纵向变形值也越大。

图 14 给出了 $h/H=6\%$ 时隧道沿纵向断面的最大和最小主应力分布, 可以看到在相同基岩错动量下, 断层倾角越小, 隧道结构主应力值越大。

相应地, 图 15 描述的结构失效体积演化曲线也表明断层倾角为 30°时隧道衬砌最先发生失效, 且在 $h/H=6\%$ 时失效体积增幅发生突变, 表明此时失效区域突然扩大, 并发生了隧道的全断面失效; 而断层倾角为 45°和 60°时衬砌失效体积突然增加所需的错动量会更大。值得注意的是, 不同于穿断层岩石隧道, 断层倾角越小, 穿断层处隧道结构的易损性越小^[18-19]。本研究发现, 断层倾角越小, 上覆土-隧道结构受力越不利, 结构失效演化更快且失效区范围也越大。

在岩石隧道中, 随着断层倾角的增加, 断层与隧道衬砌相交范围减小, 隧道衬砌段遭受的断层位错更为集中, 损伤也更加严重。而在本研究中, 由图 14 已知产生最大主应力的位置是隧道变形位置两侧的隧道拱顶和拱底, 其中产生较大差异且更危险更需要关

图 14 $h/H=6\%$ 时隧道沿纵向断面主应力曲线Fig. 14 Principal stress curve of the tunnel along the longitudinal section when $h/H=6\%$

注的是上盘的隧道区段。上盘中隧道发生弯折的原因是上盘中隧道部分区段发生了全断面失效, 因此导致位移将会集中于此位置, 也即位移的最大值处。由于隧道与上覆土层变形不同步, 断层破裂路径和形态受到土体性质与断层倾角的共同影响。断层错动角度与竖向最大应力的夹角不同将导致土体的剪胀效应不同, 断层倾角越小, 其与竖向应力夹角越大, 剪胀

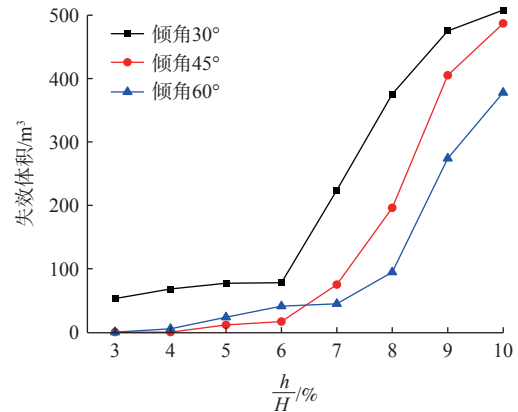


图 15 不同倾角下隧道失效体积演化

Fig. 15 Evolution of tunnel failure volume under different inclination angles

越明显, 因此断层倾角越小, 地表位错量值也越大。此外, 倾角越小越先发生上盘隧道位移的弯折。

3.2 隧道埋深对结构响应的影响

图 16 为不同基岩错动量下隧道埋深分别为 10 m、20 m、30 m 三种工况(距离基岩距离分别为 50 m、40 m 和 30 m)(表 3)下隧道纵向变形曲线。由图可知隧道埋深越小, 断层错动作用下的隧道纵向变形也越小。

3 种埋深条件下的自由场地层位移分布见图 17, 可知不同埋深处地层总位错量基本一致, 但分布模式有所不同, 具体表现为: 30 m 埋深处土层位移分布于较窄范围内, 而 10 m 深度处土层位移分布于更宽范围, 故不同埋深隧道周围土体位移模式不同, 且埋深较大时土体位移分布更为集中, 从而导致隧道结构变形与受力响应更为不利。

图 18 为 $h/H=6\%$ 时隧道沿纵向断面的最大和最小主应力分布曲线, 可知相同错动量下, 埋深 30 m 隧道结构的主应力值最大, 而埋深 10 m 则最小。相应地, 3 种埋深隧道的失效演化分布如图 19 所示, 可见

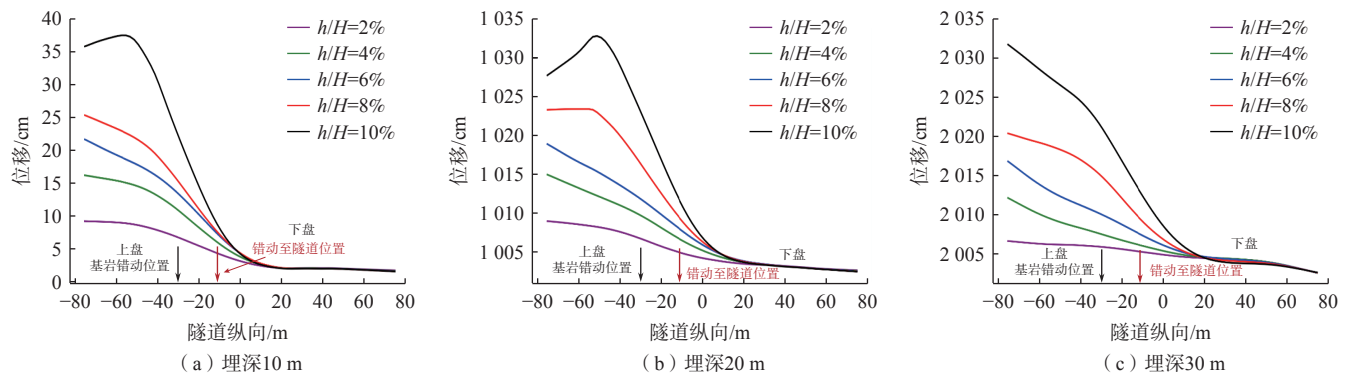


图 16 不同埋深隧道拱顶纵向位移曲线

Fig. 16 Displacement curve of tunnel vault with different buried depths

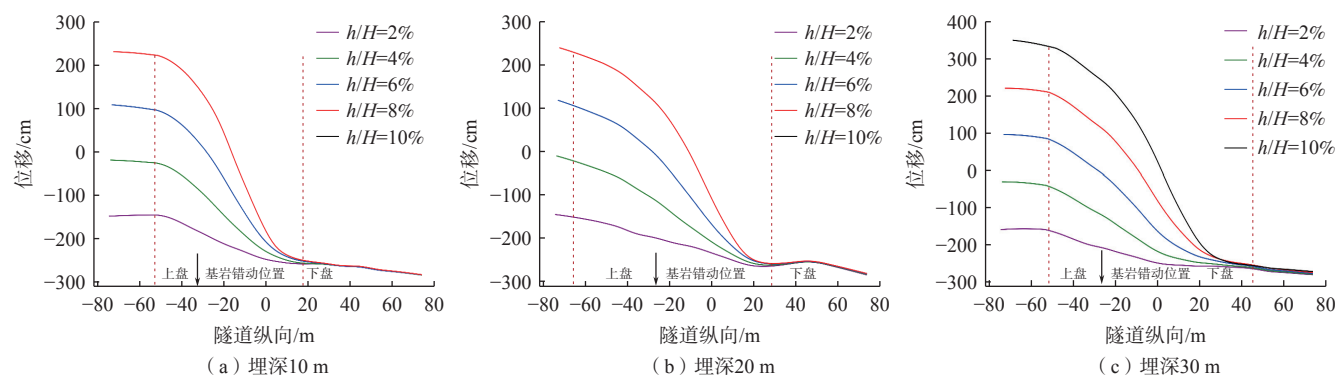
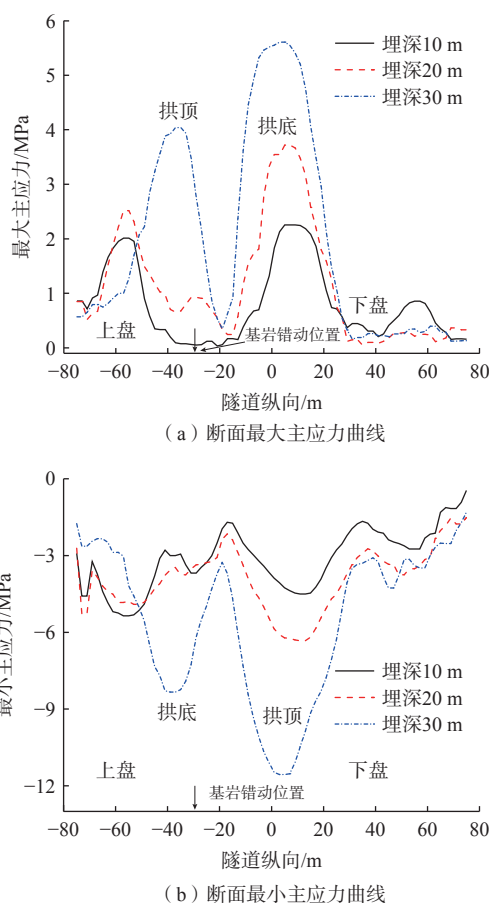


图 17 不同土层深度处土层位移曲线

Fig. 17 Soil displacement curves at different soil depth

图 18 不同埋深隧道 $h/H=6\%$ 时隧道沿纵向断面主应力曲线Fig. 18 Principal stress curve of the tunnel along the longitudinal section at $h/H=6\%$ with different buried depths

埋深 30 m 隧道首先在 $h/H=4\%$ 时发生失效, 随后是埋深 20 m 隧道在 $h/H=7\%$ 时发生失效, 最后是埋深 10 m 隧道, 且埋深 30 m 隧道结构失效最为严重。结合前述分析可知, 相同倾角和错动量下, 不同埋深处土体位移变形范围不同, 且埋深越深, 土体变形越集中, 导致隧道结构受力越大, 因此结构越先发生失效且更严重。

4 结论

本文聚焦基岩断层位错在上覆沉积土层中的破裂传播机制及其对埋置结构受力变形响应的影响规律, 基于离散元和有限差分方法建立了基岩上覆土中隧道-地层三维离散-连续耦合模型, 可同时反映上覆土层的细观颗粒特性与变形模式, 以及隧道结构的宏观力学响应特征。基于该模型从宏细观角度揭示了基岩断层错动在上覆土层中破裂传播过程及其与上覆土-隧道结构的相互作用机制, 得出以下结论:

(1) 上覆土-隧道结构在基岩逆断层错动作用下的变形模式表现为沿隧道纵向的受弯变形, 导致受弯区段衬砌拱顶底应力在上下盘内呈反对称拉压分布, 隧道衬砌失效最先且主要集中在上盘区段, 其横断面变形表现为竖向拉伸和水平挤压, 主要归因于隧道下方土体变形受到结构约束而被迫挤向隧道两侧所致, 下盘隧道断面相比上盘位置变形较小。且隧道结构的存在可作为强力链的传播介质, 将断层上覆土体位移传递至下盘更远范围。

(2) 断层倾角和隧道埋深变化均会显著影响隧道结构的受力和变形响应, 具体表现为: 相同基岩错动量下, 断层倾角越小, 隧道纵向变形和衬砌主应力峰值越大, 越先发生隧道结构失效, 并快速发展为隧道上盘全断面失效; 不同埋深隧道周围的地层位移分布模式不同, 埋深越深, 地层受基岩断层位错产生的剪切变形越集中, 导致隧道结构受力更为不利, 从而越先发生结构失效且失效范围更广。

隧道作为地下线性工程结构, 其抗震性能受地质构造、地震动特性及结构形式等多因素影响, 现有震害研究表明, 断层的大尺度位错作用是决定隧道震害模式及破坏程度的关键因素, 因此本研究主要关注断层错动产生的位移对上覆土-隧道体系多尺度响应的

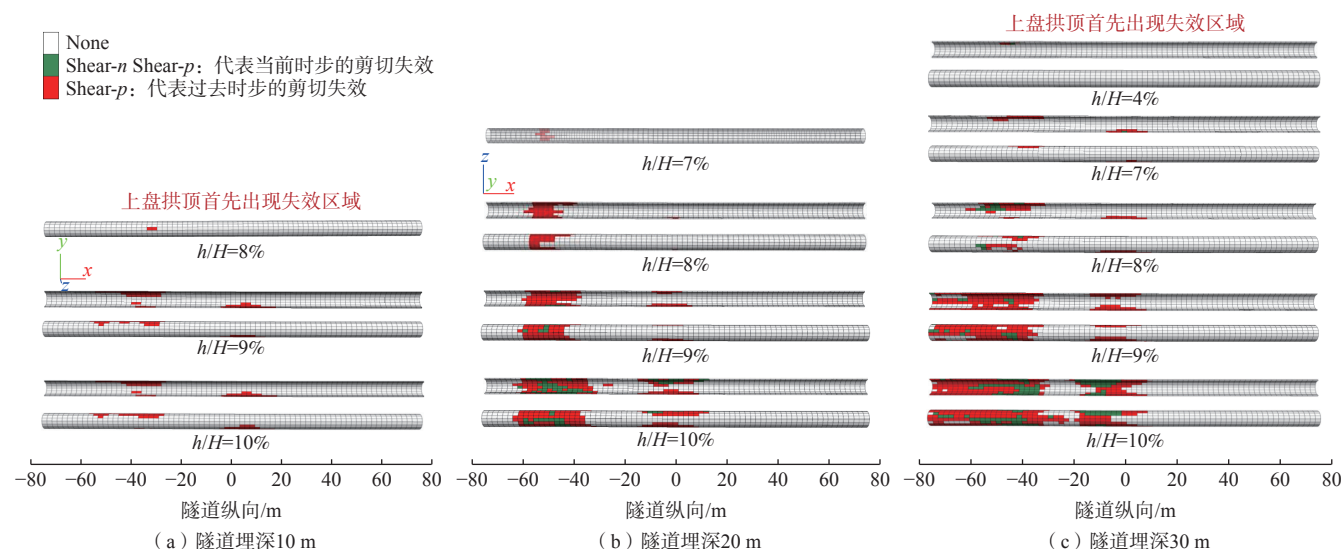


图 19 不同埋深隧道的失效演化图

Fig. 19 Failure evolution diagram of tunnels with different buried depths

影响,本文建立的离散-连续多尺度分析模型采用准静态方法近似解决动力学问题,能在一定程度上反映荷载的动力特性并有充足理论依据。然而,地震发生时通常会伴有断层错动产生的波动和位移两种作用,因此,作者下一步将进一步建立地震动-断层错动耦合作用下的多尺度耦合模型,重构系统各子域动力控制方程,建立了与宏-细观网格密度相匹配的混合积分时步算法。

参考文献 (References) :

- [1] 王志民, 罗刚, 王媛, 等. 切割斜坡断层的几何形态对斜坡地震响应影响研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 147 - 157. [WANG Zhimin, LUO Gang, WANG Yuan, et al. A study of the influence of the crossing-slope fault geometry on the slope seismic response[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 147 - 157. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李远远, 李春鹏, 和大钊, 等. 基于流固耦合作用的富水断层区隧道初期支护优化分析 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 144 - 152. [LI Yuanyuan, LI Chunpeng, HE Dazhao, et al. Optimization analysis of initial support for tunnels in water-rich fault zone based on fluid-solid interaction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 144 - 152. (in Chinese with English abstract)]
- [3] BRAY J D, SEED R B, CLUFF L S, et al. Earthquake fault rupture propagation through soil[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(3): 543 - 561.
- [4] 张永双, 任三绍, 郭长宝, 等. 活动断裂带工程地质研究 [J]. 地质学报, 2019, 93(4): 763 - 775. [ZHANG Yongshuang, REN Sanshao, GUO Changbao, et al. Research on engineering geology related with active fault zone[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(4): 763 - 775. (in Chinese with English abstract)]
- [5] BURRIDGE P B, SCOTT R F, HALL J F. Centrifuge study of faulting effects on tunnel[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(7): 949 - 967
- [6] LIU Xuezheng, LI Xuefeng, SANG Yunlong, et al. Experimental study on normal fault rupture propagation in loose strata and its impact on mountain tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 49: 417 - 425.
- [7] CAI Q P, PENG J M, NG C W W, et al. Centrifuge and numerical modelling of tunnel intersected by normal fault rupture in sand[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 111: 137 - 146.
- [8] 史秋艾. 珠江三角洲西北部晚第四纪沉积演化研究 [J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(7): 25 - 28. [SHI Qiui. Study on late Quaternary sedimentary evolution in northwest the Pearl River Delta[J]. *Coal Geology of China*, 2024, 36(7): 25 - 28. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 鲁战乾. 新乡市第四纪沉积物粒度分析及其沉积相特征 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. [LU Zhanqian. Grain size analysis and sedimentary facies characteristics of Quaternary sediments in Xinxiang city[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013. (in Chinese with English abstract)]

- [10] 尹小涛,郑亚娜,马双科. 基于颗粒流数值试验的岩土材料内尺度比研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(4): 1211 – 1215. [YIN Xiaotao, ZHENG Yana, MA Shuangke. Study of inner scale ratio of rock and soil material based on numerical tests of particle flow code[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(4): 1211 – 1215. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘凯,孔超,唐浚哲,等. 高地应力断层破碎带衬砌力学特性对比与分析 [J]. *铁道标准设计*, 2014, 58(12): 99 – 103. [LIU Kai, KONG Chao, TANG Junzhe, et al. Comparison and analysis of mechanical properties of lining in fault fracture zone with high geostress[J]. *Railway Standard Design*, 2014, 58(12): 99 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王一伟,刘润,孙若晗,等. 基于抗转模型的颗粒材料宏-细观关系研究 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(4): 945 – 956. [WANG Yiwei, LIU Run, SUN Ruohan, et al. Macroscopic and mesoscopic correlation of granular materials based on rolling resistance linear contact model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(4): 945 – 956. (in Chinese with English abstract)]
- [13] ANASTASOPOULOS I, GAZETAS G, BRANSBY M F, et al. Fault rupture propagation through sand: Finite-element analysis and validation through centrifuge experiments[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(8): 943 – 958.
- [14] 张炳焜. 断层错动数值模拟中的几个关键影响因素 [J]. *四川建筑*, 2014, 34(2): 124 – 125. [ZHANG Bingkun. Several key influencing factors in numerical simulation of fault dislocation[J]. *Sichuan Architecture*, 2014, 34(2): 124 – 125. (in Chinese)]
- [15] LIN Minglang, CHUNG C F, JENG F S. Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip[J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(1/2): 70 – 89.
- [16] 张培震,徐锡伟,闻学泽,等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(4): 1066 – 1073. [ZHANG Peizhen, XU Xiwei, WEN Xueze, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1066 – 1073. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析 [J]. *工程地质学报*, 2008, 16(6): 742 – 750. [LI Tianbin. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(6): 742 – 750. (in Chinese with English abstract)]
- [18] MA Y, SHENG Qian, ZHANG Guimin, et al. A 3D discrete-continuum coupling approach for investigating the deformation and failure mechanism of tunnels across an active fault: A case study of Xianglushan tunnel[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2318.
- [19] 禹海涛,许桦霖,卫一博. 穿活动断裂带隧道抗错动易损性分析方法 [J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(10): 2060 – 2068. [YU Haitao, XU Hualin, WEI Yibo. Seismic fragility analysis method for evaluation of dislocation resistance of tunnels crossing active fault zones[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(10): 2060 – 2068. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华