

DOI: 10.11779/CJGE202106008

土砂互层隧道塌方及演变规律的模型试验研究

徐海岩¹, 王志杰^{*1}, 陈昌健¹, 蔡李斌¹, 李振¹, 邓宇航¹, 夏勇²

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

摘要: 塌方作为软弱地层隧道施工建设的一个重大安全风险, 在层状地层隧道建设中尤其值得格外关注。隧道塌方的预防和管控得益于其表现及演变规律的全面掌控。以第四系土砂互层地层隧道为研究对象, 通过相似模型试验并结合数字图像处理技术, 首次研究得出土砂互层地层隧道塌方特征及演变规律。结果表明: ①围岩破坏非瞬间破坏、而呈渐进性破坏, 破坏始于拱脚处围岩裂隙发育并向上扩展、拱脚处围岩产生局部掉块, 接着拱顶上方围岩小范围塌落, 裂隙扩展和失稳塌落循序渐进, 拱顶上方围岩大范围塌落, 最终使得拱顶上方围岩不断离层破坏。②土砂互层地层隧道拱顶上方围岩破坏表现为“层内围岩剪切破坏, 层间围岩离层弯曲破坏”的塌方特征, 互层特性对塌方影响显著, 跨厚比越大、砂土比越大, 塌方破坏越显著。③塌方对拱顶上方围岩沉降主要影响范围为1倍隧道跨度, 隧道施工建设中应加强上述范围内围岩加固。所得结果能够为土砂互层地层隧道施工建设过程中的塌方防控提供借鉴。

关键词: 土砂互层; 隧道塌方; 演变规律; 互层特性; 模型试验; 数字图像处理技术

中图分类号: U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)06-1050-09

作者简介: 徐海岩(1994—), 男, 博士, 主要从事特殊复杂地层隧道围岩稳定及适应性控制技术研究。E-mail: haiyanXU@my.swjtu.edu.cn。

Model tests on characteristics and evolution of tunnel collapse in soil-sand interbedded strata

XU Hai-yan¹, WANG Zhi-jie¹, CHEN Chang-jian¹, CAI Li-bin¹, LI Zhen¹, DENG Yu-hang¹, XIA Yong²

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: As a major safety risk in the construction of tunnels in soft strata, collapse deserves special attention in the construction of tunnels in layered strata. In order to prevent and control tunnel collapse, it is necessary to fully grasp the characteristics and evolution law of collapse. A tunnel in the Quaternary soil-sand interbedded strata is taken as the research object. By using model tests and digital image processing technology, the collapse characteristics and evolution laws of the tunnel in soil-sand interbedded strata are studied for the first time. The results show that: (1) The failure of the surrounding rock is not instantaneous, but gradual. It starts from the cracks in the surrounding rock at the foot of the arch and expands upward, and local falling of the surrounding rock is induced. Then the surrounding rock above the vault of the arch collapses in a small range, the crack expansion and instability occur step by step, and the surrounding rock above the vault of the arch collapses in a large range and eventually breaks away from the stratum continuously. (2) The collapse of the surrounding rock above the vault of the arch of the tunnel in the soil-sand interbedded stratum is characterized by "shear failure of the surrounding rock in the stratum and bending failure of the surrounding rock in the interbedded stratum". The interbedded characteristics have a significant influence on the collapse. The larger the ratio of span to depth and the larger the ratio of sand to soil, the more obvious the collapse failure. (3) The main influence range of the collapse on the settlement of the surrounding rock above the vault of the arch is 1 times the tunnel span, and the reinforcement of the surrounding rock should be strengthened in the above area during tunnel construction. The results may provide reference for the prevention and control of the collapse in the process of the tunnel construction in soil-sand interbedded strata.

Key words: soil-sand interbed; tunnel collapse; evolution law; interbedding property; model test; digital image processing technology

0 引言

塌方是隧道施工建设过程中普遍的、安全风险极

基金项目: 国家自然科学基金委员会高铁联合基金项目(U1934213)

收稿日期: 2020-07-06

*通信作者 (E-mail: E-mail: zhjWang@home.swjtu.edu.cn)

高的围岩破坏表现之一, 对隧道围岩稳定、初期支护的安全服役及施工建设的常态化开展均会产生巨大威胁^[1-3], 尤其于层状地层隧道而言。土砂互层地层作为层状地层中的一类特殊地层, 土层与砂层围岩互为相间呈韵律沉积, 交通隧道工程建设越来越多地穿越该地层, 而该地层隧道围岩稳定的系统性研究较少, 尚未有学者对其塌方特征及演变规律进行研究, 这极不利于掌握该地层隧道围岩的施工动态行为及其稳定性。

隧道掘进过程中会遇到层状岩体, 这类岩体力学特性有较强的方向性, 根据这一特性, 罗彦斌等^[4]提出了一种适用于穿越水平层状地层时隧道的简化计算力学模型。针对隧道穿越层状地层时围岩的稳定性, 国内外学者通过数值模拟、室内试验及现场试验等手段开展研究。在数值模拟和现场试验研究方面, Lisjak等^[5]通过对层状硬质泥岩的开挖过程及变形规律进行了现场监测及数值模拟分析, 发现开挖对围岩影响具有很强的方向性; 陈子全等^[6]通过分析大量穿越层状软岩隧道的变形监测数据, 提出了层状软岩隧道的大变形预测分级指标; 郭小龙等^[7]、沙鹏等^[8]采用数值模拟、现场监测等手段研究了层状地层隧道在高地应力条件下衬砌的挤压变形以及破坏机理。此外, 亦有学者通过室内基本物理力学试验和室内相似模型试验并结合数值模拟分别对层状地层的力学特性和隧道稳定性进行了研究。王志杰等^[9-10]通过室内基本物理力学试验和数值试验, 探究了层厚比和地层倾角对土砂互层地层隧道围岩稳定性的影响规律; 胡善超^[11]通过室内相似材料试验、现场监测并结合数值模拟, 揭示了隧道掘进过程中层状围岩的变形破坏特征和破坏机制; 胡雄玉等^[12]针对盾构隧道穿越层状围岩情况开展了室内相似模型试验以研究围岩与衬砌相互作用机理, 发现其受力变形特征受层理面和层理倾角影响较大。

在隧道塌方特征及防控研究方面, 国内外学者亦通过室内试验、数值模拟和现场试验等研究方式开展研究, 并取得了相关有效结论。汪成兵等^[13]、李晓红等^[14]、吴亮等^[15]通过数值模拟分别对隧道塌方全过程、层状围岩的破坏特征及稳定性影响因素进行了探究。Labouisse等^[16]采用室内相似模型试验对层状地层中隧道开挖的影响范围进行了分析。夏彬伟等^[17]针对穿越层状地层深埋隧道的变形破坏特征进行了室内相似模型试验与现场测试, 研究发现围岩受到明显偏压作用而产生失稳破坏。周宗青等^[18]、李术才等^[19]结合衬砌强度、降水量、监控信息等因素, 对隧道开挖风险进行评估并给出有效的隧道塌方防控建议。Wang等^[20]针对山岭隧道穿越软弱地层时产生的塌陷进行了三维变形监测和数值模拟, 亦提出了有效的塌方防

控措施。Tian等^[21]提出了一种可适应大变形的可缩性支架, 应用于隧道工程能够有效减少衬砌结构的拉伸和剪切破坏, 有效预防隧道塌方。Liu等^[22]研究了软弱地层隧道塌方的原因, 通过超前地质预报与加强支护体系相结合的方式有效解决了隧道开挖产生塌方的问题。蒋涛^[23]、曹文贵等^[24]以隧道工程塌方案例为基础, 分析了塌方机理及塌方围岩的变形规律。王迎超等^[25-26]通过数值模拟、理论分析及现场监测调研等方法, 系统研究了山岭隧道的塌方机制, 提出了有效的塌方预测模型。

综上所述, 学者通过不同研究方式对隧道穿越层状地层围岩稳定开展了不少研究、取得了相关研究成果, 同时对隧道塌方的形成机制、预防措施及预测模型进行了相关研究。但是目前关于隧道穿越土砂互层地层稳定性研究极少, 而土砂互层地层围岩稳定性极差^[9-10], 透水砂层和隔水土层交错韵律沉积, 在施工过程中极易产生溜砂、溜塌及塌方等灾害, 目前尚未有专门针对土砂互层地层隧道塌方特征及演变规律的相关研究, 这极不利于对该地层隧道的围岩稳定、地层加固、支护结构设计及安全快速施工。基于此, 本文以浩吉铁路阳城隧道为工程依托, 以隧道穿越第四系土砂互层地层为研究对象, 通过室内基本物理力学试验和隧道开挖相似模型试验并结合数字图像处理技术, 首次研究得出土砂互层地层隧道塌方特征及演变规律, 以及互层特性对其影响规律, 为该地层及类似地层隧道塌方防控提供指导。

1 工程概况

本文以世界最长的重载铁路——浩吉铁路的重点控制性工程之一, 100%由V级和VI级围岩组成的阳城隧道为研究对象(图1), 探究土砂互层地层隧道塌方特征及演变规律。阳城隧道地层主要由白垩系全风化红砂岩及第四系土砂互层地层组成, 其中第四系土砂互层地层在阳城隧道地层中的占比比较大, 在开挖扰动及地下水作用下, 地层围岩极易产生失稳、溜砂及塌方现象, 施工安全风险极高。



图1 浩吉铁路阳城隧道

Fig. 1 Yangcheng Tunnel of Haolebaoji-Ji'an Railway

阳城隧道采用新奥法原理进行施工，施工工法采用3台阶预留核心土法进行施工，上台阶、中台阶、下台阶长度分别为4, 6, 12 m。和以往新奥法隧道施工不同的是，该隧道施工取消了系统锚杆的设置。隧道在施工建设过程中，土砂互层地层段在施工建设过程中多次产生涌水溜砂、失稳和塌方现象，并进一步引起初期支护喷射混凝土开裂和格栅钢架变形扭曲破坏（图2）。受以上因素影响，隧道施工中采取横撑加固、套衬加固和反压回填等措施进行及时加固，隧道亦多次发生设计变更，在原设计的基础上降低围岩级别至VI级，施工亦相应采取加强降水、水平及竖直旋喷桩加固围岩等辅助工法进行施工（图2）。不难得出，对于土砂互层地层隧道，在设计和施工阶段掌握其地层特性及塌方特性，对隧道围岩稳定性及支护参数的合理性显得愈发重要（隧道支护参数见表1）。基于此，本文以土砂互层地层隧道为研究对象，在地质钻孔的基础上（图3），结合室内土工试验（图4），得到砂层和土层围岩的基本物理力学参数，并进一步通过隧道开挖相似模型试验探究无支护条件下隧道塌方特征及演变规律，为互层地层隧道的稳定性研究及设计施工提供有效指导。



图2 隧道围岩失稳破坏及相应施工措施

Fig. 2 Instability and failure of surrounding rock and corresponding construction measures

表1 隧道支护参数

Table 1 Supporting parameters of tunnel

围岩级别及 衬砌类型	初期支护			二次衬砌		
	C25 喷射 混凝土	格栅钢架	拱墙 仰拱			
围岩 级别 类型	部位	厚度 /cm	部位	型号/间距	厚度 /cm	厚度 /cm
VI VI	全环	37	全环	H300@0.5 m	60	60

2 试验设计

基于隧道开挖相似模型试验，结合非接触图像测试和数字图像处理技术，对无支护条件下隧道塌方特征及其演化规律进行研究，重点探究围岩破坏过程、隧道塌方特征、隧道塌方引起的拱顶上方围岩沉降及地表沉降规律、隧道塌方演变规律。所得研究成果能

够填补土砂互层地层隧道塌方特征及演变规律研究的空白，为土砂互层地层隧道稳定性研究提供借鉴。

2.1 相似材料设计

对阳城隧道土砂互层地层进行地质钻孔（图3），结合室内土工试验（图4），得到砂层和土层围岩的基本物理力学参数，所得结果作为隧道开挖相似模型试验中围岩原型土的参数，基于相似理论进行模型试验围岩相似材料设计。试验将重度相似比（ $C_y=1$ ）和几何相似比（ $C_f=50$ ）视为基础相似比，基于相似理论得到其他试验参数的相似比（表2）。在围岩试验材料选择的过程中，首先确定了需要满足相似要求的主要围岩力学参数，接着根据表1进行换算并进行多次配比试验，最后采用凡士林：石英砂：重晶石粉=0.7:4.1:12作为配合比用于配制砂层围岩试验材料^[3]（表3），选用水：膨润土：重晶石粉：洗衣粉：黏土：双飞粉=4.9:4.5:4.0:3.5:1.0:1.0作为配合比用于配制土层围岩试验材料^[27]（表4）。



图3 砂层及土层围岩形貌

Fig. 3 Morphology of sand and soil of rock mass



图4 砂层及土层围岩基本物理力学试验

Fig. 4 Basic physical and mechanical tests on rock mass

表2 相似模型试验参数相似比设计

Table 2 Similarity ratio design of model test parameters

参数	几何	重度	应变	内摩	泊松	弹性	黏聚	应力	位移
相似 比	50	1	1	1	50	50	50	50	50

表3 砂层围岩物理力学参数设计

Table 3 Design of physical and mechanical parameters of surrounding rock of sand

砂层围岩	重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$
隧道原型实测值	20.50	20.530	0.25	16.580	28.76
相似理论计算值	20.50	0.411	0.25	0.332	28.76
相似模型试验值	19.68	0.408	0.23	0.301	29.50

表4 土层围岩物理力学参数设计

Table 4 Design of physical and mechanical parameters of surrounding rock of soil

土层围岩	重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$
隧道原型实测值	19.86	46.20	0.30	56.60	23.20
相似理论计算值	19.86	0.924	0.30	1.132	23.20
相似模型试验值	19.23	0.910	0.30	0.990	22.10

2.2 模型试验系统介绍

模型试验系统主要包括试验台架、加载系统和监测系统。试验台架根据模型的几何相似比(1:50)进行设计, 台架尺寸为1200 mm(长)×300 mm(宽)×1600 mm(高), 除试验台架底部的钢板厚度为15 mm外, 其余各处钢板厚度均为6 mm, 台架正面采用1200 mm(长)×1600 mm(宽)×10 mm(厚)的透明钢化玻璃(图5(a)), 便于监测系统准确测得隧道围岩全场位移及应变, 同时清晰直观得到围岩渐进性破坏全过程。

加载系统主要由液压油泵、试验台架顶部的千斤顶和竖向反力梁进行控制, 液压油泵的加载范围为0~30 kN。隧道开挖完成后即进行隧道加载, 控制液压油泵按照1 kPa的增量逐级加载, 加载的同时记录相应加载等级下对应的具体时间, 进一步得到相应时间节点下反相机中的隧道围岩渐进性破坏状态图

片, 对上述图片进行后处理, 以得到不同荷载下隧道塌方过程、拱顶上方围岩沉降规律及地表沉降规律。

监测系统采用基于数字图像处理技术的非接触全场应变测量法(图5(b)), 包括硬件系统和软件系统, 分别完成对围岩变形图像的采集和数字化分析(PhotoInfor软件)。在试验台架正面前方一定距离处固定单反相机进行非接触测量, 在围岩表面设置散斑, 拍摄散斑变形全过程, 进一步通过PhotoInfor软件处理散斑图像, 从而准确得到围岩的全场位移及应变。该方法克服了传统电测法仅仅适用于点对点测量的不足, 能够完整记录围岩破坏全过程。

试验加载完成后, 对后处理得到的不同荷载下拱顶上方围岩沉降及地表沉降云图进行进一步分析, 设置不同监测点得到位移变化规律, 包括不同测点的位移随荷载的变化规律、以及同一荷载下不同测点位移随距隧道距离的变化规律。拱顶上方围岩测点及地表测点的布设示意图分别如图6所示, 其中隧道跨度用D表示, 拱顶上方围岩共布设7个测点, 测点1距隧道拱顶的距离为1/7隧道跨度即1/7D, 测点间距亦为1/7D; 地表测点的布设按如下进行, 以隧道中心竖直向上、对应的地表为中心点, 由中心点向左右两侧按照间距0.10 m布设测点, 探究不同荷载下地表不同测点位移随距隧道中心距离的变化规律。

首先完成模型试验框架的安装工作, 并在其上面布置反力梁。在模型试验箱内部均匀涂抹润滑剂以减小模型箱与试验材料间的摩擦力。对于试验相似材料设计, 根据前述所得相似材料配合比计算各种材料所需重量, 分别将试验相似材料加入搅拌机进行均匀搅拌以制备砂层及土层围岩。分别将搅拌均匀后的试验材料三等分, 分别加入红色、黄色和蓝色3种染色剂对试验材料进行染色(图7(a))并进行均匀搅拌以配制散斑。将试验材料填埋到模型试验箱里, 填埋时由上到下分层摊铺, 每摊铺一层即压实一层, 严格

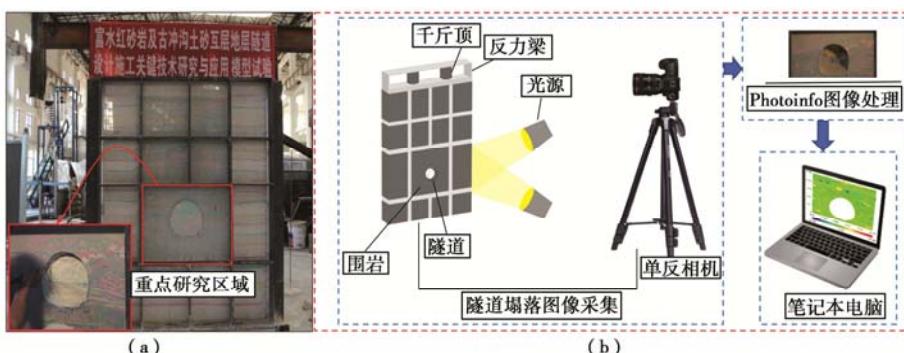


图5 模型试验系统设计图

Fig. 5 Design of model test system

控制材料的密度以满足模型试验要求。隧道开挖采用钢尺进行开挖(图7(b)), 开挖贯通后在隧道上方进行逐级加载, 待隧道发生多次塌方后最终稳定(图7(c))不再进行加载。

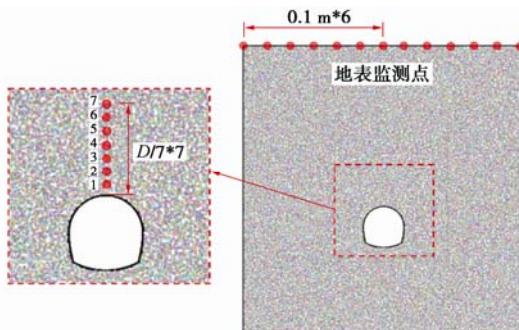


图 6 隧道围岩位移测点布设示意图

Fig. 6 Layout of measuring points for displacement of rock mass



图 7 隧道开挖相似模型试验关键流程图(部分)

Fig. 7 Part of key flow chart of similarity model tests on excavation of tunnel

2.3 模型试验工况设计

研究土砂互层地层隧道塌方特征及演变规律, 同时考虑互层特性, 探究跨厚比和层厚比对隧道塌方的影响(表5和图8所示为试验工况设计)。探究跨厚比的影响时, 控制层厚比不变(保持土层和砂层厚度相

同, 即砂/土=1:1), 保持隧道跨度不变, 改变地层厚度, 分别设置地层厚度为1倍隧道跨度、1/2隧道跨度和1/3隧道跨度。探究层厚比的影响时, 保持隧道跨度不变, 设置砂层与土层的厚度比即砂/土为1:1, 1:1.5和1:2。隧道围岩试验材料填充时, 均保持隧道拱顶上方地层为土层, 其上为砂层, 相继按照跨厚比和层厚比的要求依次叠加。

表 5 相似模型试验工况设计

Table 5 Cases of similarity model tests

工况 编号	砂层 厚度	土层 厚度	跨厚比	砂/土	探究 因素	加载范 围/kN
1	1D	1D	1:1	1:1	跨厚比	0~30
2	1/2D	1/2D	2:1	1:1	跨厚比/ 层厚比	0~30
3	1/3D	1/3D	3:1	1:1	跨厚比	0~30
4	2/7D	3/7D	—	1:1.5	层厚比	0~30
5	1/4D	1/2D	—	1:2	层厚比	0~30

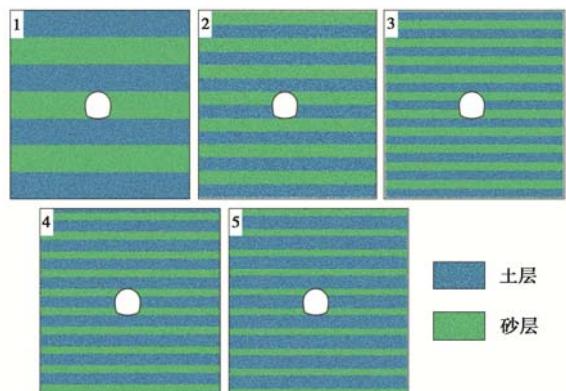


图 8 相似模型试验工况设计

Fig. 8 Cases of similarity model tests

3 隧道塌方特征及演变规律研究

3.1 隧道塌方过程分析

图9给出了不同荷载作用(由液压油泵控制, 用P表示)下隧道围岩渐进性破坏过程(以试验工况2为例)。隧道开挖相似模型试验表明:①随着隧道上覆荷载的逐渐增大($P=1\text{ kN}$), 隧道拱顶处围岩首先产生显著变形, 局部发生剥落现象。②在上覆荷载的作用下($P=6\text{ kN}$), 右拱脚处围岩首先产生裂隙并引起围岩掉块, 裂隙进一步向上扩展, 拱顶上方土层产生失稳塌落。③拱顶上方围岩进一步产生裂隙, 左拱脚处产生裂隙并向右扩展, 拱顶上方围岩进一步塌落, 拱脚上方的隧道洞周区域均产生塌方区域($P=12\text{ kN}$)。④随着上覆荷载的持续增大, 发轫于左右拱脚处的裂隙继续向上向外扩展, 右拱腰处围岩进一步产生塌落($P=18\text{ kN}$), 拱顶上方土层围岩塌落范围进一步扩大至完全塌落, 塌落区域由土层向砂层围岩延伸($P=24\text{ kN}$)。

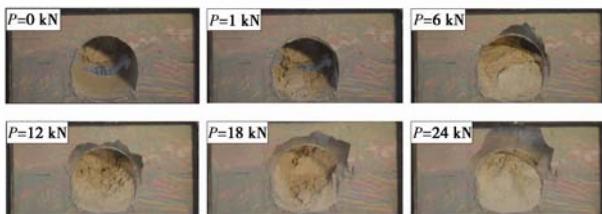


图 9 隧道围岩渐进性破坏过程 (以试验工况 2 为例)

Fig. 9 Progressive failure process of surrounding rock of tunnel
(Case 2)

基于塌方的渐进性过程, 进一步探究互层特性对隧道塌落特征的影响, 对比分析加载全过程中跨厚比和层厚比(砂土比)对围岩破坏的影响, 图 10 给出了不同跨厚比(图 10(a))和层厚比(图 10(b))下隧道塌方的最终稳定状态。得到跨厚比越小、砂土比越小时, 拱顶上方围岩塌落高度和塌落范围越小, 围岩失稳破坏速率越小, 围岩稳定性越好。

3.2 隧道拱顶上方围岩沉降规律分析

隧道塌方对拱顶上方围岩稳定产生极为显著的不良影响。为准确得出这一不良影响, 结合数字图像处理技术, 采用 Photoinfor 软件得到隧道围岩全场位移及应变, 着重对拱顶上方围岩沉降规律进行分析, 包括围岩竖向位移随上覆荷载的变化规律、位移随距拱顶距离的变化规律, 并进一步得出互层特性对变化规律的影响。

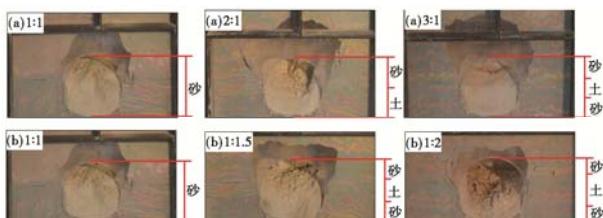


图 10 不同互层特性下隧道塌落的最终稳定状态

Fig. 10 Final stable state of tunnel collapse under different
interbedding characteristics

图 11 为不同上覆荷载下隧道围岩在竖直方向上的全场位移云图。在加载初始阶段($P=1\text{ kN}$), 拱顶上方围岩即表现出较大的竖向位移分布。随着上覆荷载的增大($P=6\text{ kN}$), 拱顶正上方及左右拱腰处围岩竖向位移较大值产生集中分布, 围岩产生裂隙并在竖直方向上向上扩展, 拱顶正上方围岩产生失稳塌落。随着上覆荷载的进一步增大($P=12\text{ kN}$ 和 $P=18\text{ kN}$), 拱顶上方围岩竖向位移进一步显著增大, 围岩裂隙进一步向上向外扩展, 围岩继续失稳塌落。当荷载增大到 24 kN 时, 拱顶上方围岩塌落基本完成, 隧道达到基本稳定状态。

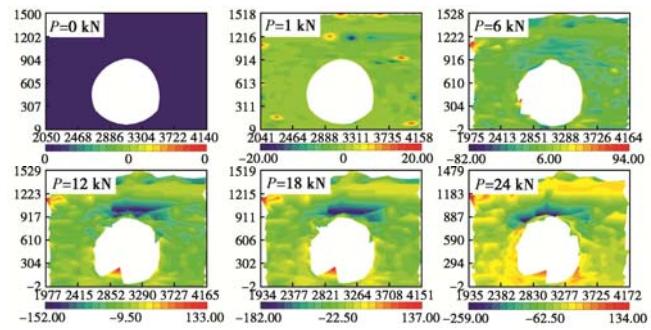
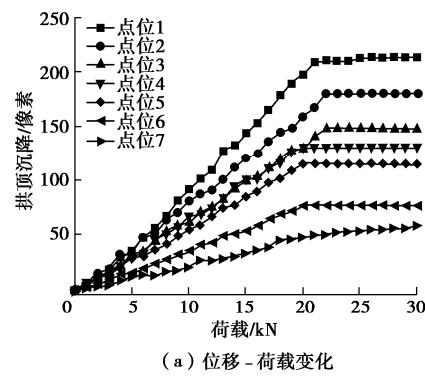


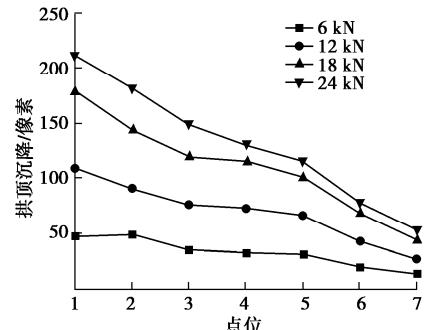
图 11 隧道围岩竖直方向全场位移云图

Fig. 11 Cloud chart of vertical displacement of surrounding rock
of tunnel

随着上覆荷载的增大, 竖向位移较大值始终在拱顶上方围岩集中分布, 拱顶上方不同位置处围岩竖向位移产生不同的增大趋势, 围岩随着距拱顶距离的增大亦产生不同的分布规律。基于所得位移云图, 根据图 6 所示监测点, 以试验工况 2 为例, 对拱顶上方围岩竖向位移随荷载的变化规律(图 12(a))及随距隧道距离的变化规律(图 12(b))进行分析。随上覆荷载的增大, 拱顶上方围岩所有测点均表现为“先缓慢增大, 后迅速增大, 最后趋于稳定”的变化趋势, 测点在上覆荷载为 24 kN 时位移达到稳定状态, 距离拱顶越近、位移增大速率越大且位移最终稳定值越大, 距离拱顶越远、位移增大速率越小且位移最终稳定值越小, 如测点 1 和测点 7 位移最终稳定值分别为 213 像素和 56 像素, 前者为后者的 3.80 倍。



(a) 位移 - 荷载变化



(b) 位移 - 距隧道距离变化

图 12 拱顶上方围岩沉降变化规律 (试验工况 2)

Fig. 12 Change of settlement of surrounding rock above vault of
arch (Case 2)

同一上覆荷载下, 随着距拱顶距离的增大, 拱顶上方围岩竖向位移逐渐减小。当上覆荷载较小时($P=6\text{ kN}$), 随距拱顶距离的增大, 位移减小幅度和速率均很小; 当上覆荷载较大时($P=18\text{ kN}$ 和 $P=24\text{ kN}$), 随距拱顶距离的增大, 位移减小幅度和速率均很大。相对而言, 测点7处的位移及变化规律均较小, 认为上覆荷载作用下隧道塌方对该处之外的影响很小, 即隧道塌方对拱顶上方围岩沉降的影响规律为拱顶上方1倍隧道跨度范围内。

进一步探究跨厚比(图13)和层厚比(图14)对土砂互层地层隧道拱顶上方围岩沉降规律的影响。随着荷载的增加拱顶沉降逐渐增大, 增大到一定值时发生破坏, 往后随着荷载的增加拱顶沉降基本保持不变。跨厚比越大($3:1$), 拱顶沉降最终稳定值会相对偏大, 拱顶沉降随荷载增大的增长速率越快, 越先发生破坏。随着跨厚比的增大($1:1 \rightarrow 2:1 \rightarrow 3:1$), 地层围岩最终破坏荷载 P 的变化为 $24\text{ kN} \rightarrow 20\text{ kN} \rightarrow 14\text{ kN}$, 地层围岩稳定性降低。同样地, 得到随着砂土比的增大

($1:2 \rightarrow 1:1.5 \rightarrow 1:1$), 围岩沉降最终稳定值变化为145像素 \rightarrow 168像素 \rightarrow 213像素, 后二者相对前者的增大幅度分别为15.9%和46.9%, 地层围岩最终沉降值随砂土比的增大而增大, 砂土比越小、拱顶上方围岩越稳定。

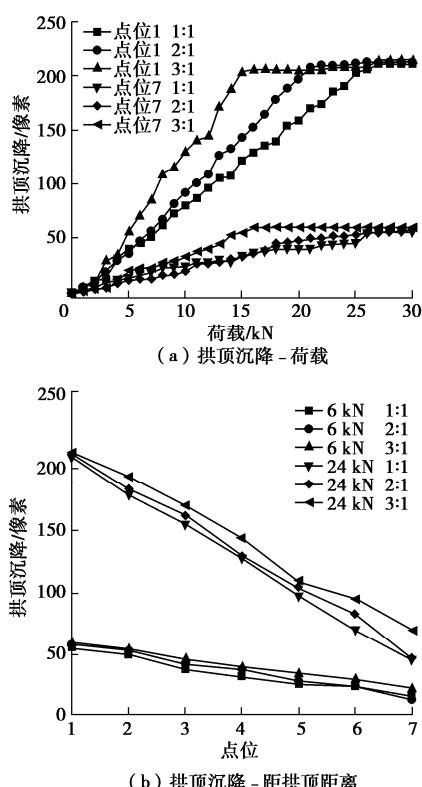
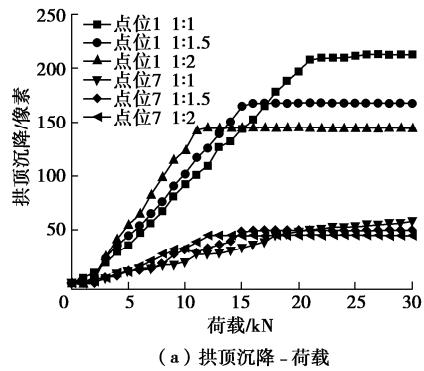
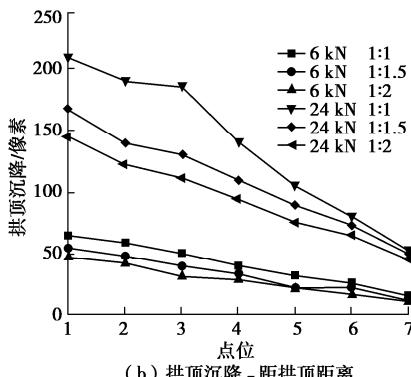


图13 跨厚比对拱顶上方围岩沉降的影响规律

Fig. 13 Influences of ratio of span to depth on settlement of surrounding rock above vault of arch crown



(a) 拱顶沉降 - 荷载



(b) 拱顶沉降 - 距拱顶距离

图14 层厚比对拱顶上方围岩沉降的影响规律

Fig. 14 Influences of layer thickness ratio on settlement of surrounding rock above vault of arch

4 结 论

本文以第四系土砂互层地层隧道为研究对象, 通过隧道开挖相似模型试验和数值图像处理技术, 首次研究得出土砂互层地层隧道塌方特征及演变规律, 同时给出塌方影响下的拱顶上方围岩沉降规律, 为隧道塌方防控提供相应建议。得到4点结论。

(1) 围岩破坏为渐进性破坏, 裂隙产生到向上扩展引起围岩局部掉块需要一定的时间, 拱顶上方围岩局部塌落到拱部全范围塌落, 再到离层破坏完成亦需要一定的时间。隧道施工建设中应充分利用好围岩渐进性破坏过程的宝贵时间, 及时采取相应加固措施进行围岩加固, 对隧道塌方进行有效防控。

(2) 隧道开挖相似模型试验揭示, 土砂互层地层隧道破坏表现为“层内围岩剪切破坏, 层间围岩离层破坏”的破坏特征, 离层破坏逐渐在土层和砂层间延伸破坏, 隧道塌方区域逐渐扩大且逐渐加速。因此在实际隧道施工中, 当隧道产生小范围塌落时, 应及时采取加固措施进行加固, 将隧道塌落范围控制在层内围岩的小范围塌落, 避免进一步引起层间围岩离层破坏而引发大范围塌方。

(3) 数字图像处理结果表明, 隧道塌方对拱顶上方围岩沉降位移的影响高度主要在1倍隧道跨度范围

内, 隧道施工中应加强上述范围内的围岩加固。

(4)互层特性对土砂互层地层隧道围岩稳定性影响显著, 跨厚比越大, 砂土比越大, 隧道塌方破坏越显著, 拱顶上方围岩沉降值越大且变化速率越快, 地层围岩稳定性越差。隧道施工建设过程中, 根据地层围岩厚度及厚度变化、层厚比及其变化, 及时对围岩稳定性进行初步评估, 相应采取加固措施及时进行加固, 如拱顶上方围岩在竖直方向上的锚杆加固及管棚加固能够作为弹性支座, 一定程度上起到减小跨度的作用, 提高围岩破坏的临界应力, 增强拱顶上方围岩的稳定性。

参考文献:

- [1] MANDAL S K, SINGH M M. Evaluating extent and causes of overbreak in tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, **24**(1): 22 – 36.
- [2] 汪成兵, 朱合华. 埋深对软弱隧道围岩破坏影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(12): 2442 – 2448. (WANG Cheng-bing, ZHU He-hua. Experimental study of influence mechanism of buried depth on surrounding rock failure of tunnel constructed in soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(12): 2442 – 2448. (in Chinese))
- [3] 张成平, 韩凯航, 张顶立, 等. 城市软弱围岩隧道塌方特征及演化规律试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(12): 2433 – 2442. (ZHANG Cheng-ping, HAN Kai-hang, ZHANG Ding-li, et al. Test study of collapse characteristics of tunnels in soft ground in urban areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(12): 2433 – 2442. (in Chinese))
- [4] 罗彦斌, 陈建勋, 王利宝, 等. 考虑层间黏聚力的水平层状围岩隧道顶板力学模型计算 [J]. 中国公路学报, 2018, **31**(10): 230 – 237, 265. (LUO Yan-bin, CHEN Jian-xun, WANG Li-bao, et al. Mechanical model calculations of tunnel roof with horizontal stratified rock mass tunneling considering the interlayer cohesion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(10): 230 – 237, 265. (in Chinese))
- [5] LISJAK A, GARITTE B, GRASSELLI G, et al. The excavation of a circular tunnel in a bedded argillaceous rock (opaline clay): short-term rock mass response and FDEM numerical analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **45**: 227 – 248.
- [6] 陈子全, 何川, 吴迪, 等. 高地应力层状软岩隧道大变形预测分级研究 [J]. 西南交通大学学报, 2018, **53**(6): 1237 – 1244. (CHEN Zi-quan, HE Chuan, WU Di, et al. Study of large deformation classification criterion for layered soft rock tunnels under high geostress[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, **53**(6): 1237 – 1244. (in Chinese))
- [7] 郭小龙, 谭忠盛, 李磊, 等. 高地应力陡倾层状软岩隧道变形破坏机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(增刊2): 38 – 44. (GUO Xiao-long, TAN Zhong-sheng, LI Lei, et al. Deformation and failure mechanism of layered soft rock tunnel under high stress[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(S2): 38 – 44. (in Chinese))
- [8] 沙鹏, 伍法权, 李响, 等. 高地应力条件下层状地层隧道围岩挤压变形与支护受力特征 [J]. 岩土力学, 2015, **36**(5): 1407 – 1414. (SHI Peng, WU Fa-quan, LI Xiang, et al. Squeezing deformation in layered surrounding rock and force characteristics of support system of a tunnel under high in-situ stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(5): 1407 – 1414. (in Chinese))
- [9] 王志杰, 徐海岩, 唐力, 等. 层厚比对互层地层隧道围岩稳定性的影响探究[J]. 铁道工程学报, 2019, **36**(3): 50 – 55. (WANG Zhi-jie, XU Hai-yan, TANG Li, et al. Research on the influence of thickness ratio on surrounding rock stability of tunnel in interbedded strata[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, **36**(3): 50 – 55. (in Chinese))
- [10] 王志杰, 李振, 徐海岩, 等. 倾角对土砂互层地层围岩稳定性的影响探究[J]. 铁道工程学报, 2019, **36**(9): 54 – 59, 84. (WANG Zhi-jie, LI Zhen, XU Hai-yan, et al. Research on the influence of dip angle on stability of surrounding rock in sand and soil interbedded strata[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, **36**(9): 54 – 59, 84. (in Chinese))
- [11] 胡善超. 深井巷道层状围岩变形破坏特征及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(11): 2376. (HU Shan-chao. Characteristics and mechanism of deformation and failure of layered surrounding rock mass in deep roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(11): 2376. (in Chinese))
- [12] 胡雄玉, 杨清浩, 何川, 等. 层状围岩中管片衬砌受力特征的模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(10): 1773 – 1781. (HU Xiong-yu, YANG Qing-hao, HE Chuan, et al. Experimental study on behaviors of segment linings in an anisotropically jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(10): 1773 – 1781. (in Chinese))
- [13] 汪成兵, 朱合华. 隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟[J].

- 岩土工程学报, 2008, **30**(3): 450 - 456. (WANG Cheng-bing, ZHU He-hua. Tunnel collapse mechanism and numerical analysis of its influencing factors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(3): 450 - 456. (in Chinese))
- [14] 李晓红, 夏彬伟, 李丹, 等. 深埋隧道层状围岩变形特征分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1163 - 1167. (LI Xiao-hong, XIA Bin-wei, LI Dan, et al. Deformation characteristics analysis of layered rockmass in deep buried tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1163 - 1167. (in Chinese))
- [15] 吴亮, 李凤, 卢文波, 等. 爆破扰动下邻近层状围岩隧道的稳定性与振速阈值[J]. 爆炸与冲击, 2017, **37**(2): 208 - 214. (WU Liang, LI Feng, LU Wen-bo, et al. Vibration velocity threshold of a tunnel adjacent to surrounding layered rocks under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, **37**(2): 208 - 214. (in Chinese))
- [16] LABIOUSE V, VIETOR T. Laboratory and in situ simulation tests of the excavation damaged zone around galleries in opalinus clay[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**(1): 57 - 70.
- [17] 夏彬伟, 胡科, 卢义玉, 等. 深埋隧道层状岩体破坏过程特征模型试验[J]. 中国公路学报, 2012, **25**(1): 107 - 114. (XIA Bin-wei, HU Ke, LU Yi-yu, et al. Model test for characteristics of failure process of layered rock mass in deep buried tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, **25**(1): 107 - 114. (in Chinese))
- [18] 周宗青, 李术才, 李利平, 等. 浅埋隧道塌方地质灾害成因及风险控制[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1375 - 1382. (ZHOU Zong-qing, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Causes of geological hazards and risk control of collapse in shallow tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1375 - 1382. (in Chinese))
- [19] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(5): 1041 - 1069. (LI Shu-cai, XU Zhen-hao, HUANG Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(5): 1041 - 1069. (in Chinese))
- [20] WANG H, JIA Y, CAO L. Cause analysis and prevention of road tunnel collapse in complex soft strata[J]. Energy Procedia, 2012, **16**: 259 - 264.
- [21] TIAN H, CHEN W, YANG D, et al. Numerical analysis on the interaction of shotcrete liner with rock for yielding supports[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **54**: 20 - 28.
- [22] LIU Y N, LU J F. The solution on problem of soft soil layer's collapse in xin kailing tunnel and evaluations on its effect[J]. Applied Mechanics and Materials. 2011(90/92/93): 2401 - 2407.
- [23] 蒋涛. 隧道塌方特征分析和预报预警监测系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016. (JIANG Tao. Analysis of the Characteristics of Tunnel Collapse and Research on Forecasting and Earlying Warning-Monitoring System[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [24] 曹文贵, 翟友成, 王江营, 等. 山岭隧道塌方风险的集对分析方法[J]. 中国公路学报, 2012, **25**(2): 90 - 99. (CAO Wen-gui, ZHAI You-cheng, WANG Jiang-ying, et al. Method of set pair analysis for collapse risk during construction of mountain tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, **25**(2): 90 - 99. (in Chinese))
- [25] 王迎超. 山岭隧道塌方机制及防灾方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(11): 2376. (WANG Ying-chao. Collapse mechanism and preventive measures of mountain tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(11): 2376. (in Chinese))
- [26] 王迎超, 尚岳全, 靖洪文, 等. 隧道塌方段施工方案优化及效果评价[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 514 - 520. (WANG Ying-chao, SHANG Yue-quan, JING Hong-wen, et al. Optimization of construction scheme of tunnel collapse and treatment effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 514 - 520. (in Chinese))
- [27] 谢雄耀, 牛俊涛, 杨国伟, 等. 重叠隧道盾构施工对先建隧道影响模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(10): 2061 - 2069. (XIE Xiong-yao, NIU Jun-tao, YANG Guo-wei, et al. Model test for effects of construction of shield tunnelling in overlapping tunnels on existing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(10): 2061 - 2069. (in Chinese))