

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1300

基于静力推覆试验的山岭隧道衬砌-地层相互作用机制研究

卢钦武, 关振长, 林 林, 吴淑婧, 宋德杰

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘 要: 随着我国交通强国建设向西部丘陵重山地区推进, 地震作用下山岭隧道衬砌与地层的相互作用机制愈发受到关注。以常规二车道公路隧道(V级围岩段)为原型, 开展山岭隧道静力推覆模型试验, 重点分析地层位移、地层应变、围岩压力随推覆距离的变化规律, 探讨了衬砌-地层相互作用机制。试验结果表明: 衬砌-地层相互作用可分为挤密、倾覆、裹挟3个阶段。倾覆阶段地层以起拱线为支点环向绕流, 裹挟阶段地层带动衬砌发生整体位移。起拱附近线地层以径向挤压为主, 形成挤压变形区, 拱肩附近地层则以环向挤压为主, 形成滑移变形区。左右两侧围岩压力的响应规律恰好相反, 即右侧挤压区的围岩压力较左侧大, 而右侧滑移区的围岩压力较左侧小。研究成果可为基于反应位移法的山岭隧道抗震计算提供试验依据与技术支撑。

关 键 词: 山岭隧道; 衬砌-地层相互作用机制; 静力推覆模型试验; 数字图像相关; 围岩压力

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2023)08-2318-09

Lining-stratum interaction mechanism of mountain tunnel based on static pushover model test

LU Qin-wu, GUAN Zhen-chang, LIN Lin, WU Shu-jing, SONG De-jie

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: With the rapid development of traffic infrastructure construction in western mountain area, the lining-stratum interaction mechanism of mountain tunnel under seismic effects has attracted increasing attentions. Based on the prototype of a regular two-lane highway tunnel section with V-grade surrounding rock, a static pushover model test for mountain tunnel was conducted. The variations of stratum displacement, stratum strain and ground pressure with pushover distance were carefully studied, and the lining-stratum interaction mechanism was thoroughly discussed. The test results show that: the lining-stratum interaction can be generally divided into compacting stage, overturning stage, and dragging stage. The stratum tends to circumferentially flow along the lining perimeter from the springing line in the overturning stage, and then drives the lining to shift together in the dragging stage. The stratum near the springing line experiences predominantly radial compression, forming a compression deformation zone, while the stratum near the lining shoulder mainly undergoes circumferential compression, forming a slip deformation zone. The response of the ground pressure on the left and right sides are exactly opposite. Specifically, the ground pressure in the compression deformation zone on the right side is greater than its counterpart on the left side, while the ground pressure in the slip deformation zone on the right side is less than its counterpart on the left side. These researches can provide some experimental basis and technical support for the anti-seismic calculation of mountain tunnels based on response displacement method.

Keywords: mountain tunnel; lining-stratum interaction mechanism; static pushover model test; digital image correlation; ground pressure

1 引 言

我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带之间,

尤其是西部丘陵重山地区, 地形变化显著, 活动断裂密集, 其地震设防烈度普遍在 VIII 度以上^[1]。随着我国交通强国建设向西部地区推进, 地震作用下

收稿日期: 2022-08-22

录用日期: 2022-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52278399); 福建省自然科学基金(No. 2021J01599)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52278399) and the Natural Science Foundation of Fujian Province (2021J01599).

第一作者简介: 卢钦武, 男, 1995 年生, 博士研究生, 主要从事隧道工程方面研究工作。E-mail: lqw5467@163.com

通讯作者: 关振长, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与隧道工程方面的科研和教学工作。E-mail: gaussto@hotmail.com

山岭隧道衬砌与地层的相互作用机制已成为目前学界和业界的研究难点与热点问题^[2-3]。

包括振动台试验、离心机试验和静力推覆试验在内的各类模型试验,是探究山岭隧道衬砌与地层的相互作用机制的有效手段。相较于成本高昂的动力试验,静力推覆试验不仅成本可控,且试验机制上更贴近抗震计算中常用的反应位移法,因此在学界和业界得到广泛应用。景立平等^[4]针对砂土地中单层箱型地下结构开展大型推覆试验,研究土体水平基床系数随加载水平的发展规律。徐琨鹏等^[5]以大开车站为对象开展系列推覆试验,对地层-结构相互作用机制展开定量研究。陈之毅等^[6]针对多层地铁车站开展大型推覆试验,重点关注车站结构的裂缝开展过程及其破坏形态。许成顺等^[7]提出考虑土-结构相互作用的弹簧-地下结构体系静力推覆试验技术,对大开车站模型的结构薄弱位置及破坏形态展开深入研究。刘晶波^[8]、韩润波^[9]等则重点关注模型箱类型以及侧边界位移分布对静力推覆试验结果的影响。

综上所述,关于矩形断面结构在静力推覆作用下的结构-地层相互作用机制,已取得较为丰硕的成果。但山岭隧道特有的马蹄形断面形式和复杂多变的围岩条件,使得其地震响应与矩形结构差异较大^[10-11]。本文以常规断面山岭隧道为对象开展静力推覆模型试验,探究地层位移、地层应变、围岩压力随推覆位移的变化规律;进而揭示地震作用下山岭隧道衬砌-地层相互作用机制,为基于反应位移法的山岭隧道抗震计算提供试验依据与技术支撑。

2 反应位移法与静力推覆试验机制

2.1 经典反应位移法

经典反应位移法作为地下结构抗震设计计算的规范推荐方法,得到广泛推广与应用^[12-13]。以横断面抗震计算为例,其主要荷载包括地层相对位移、结构惯性力以及周边地层剪力,并引入地基弹簧模拟地层与结构之间的相互作用,如图 1 所示。

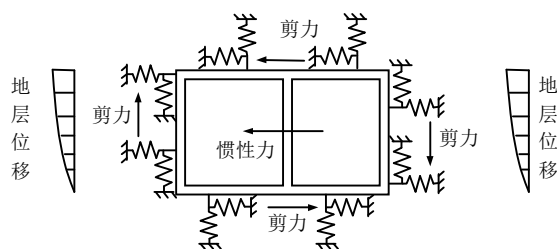


图 1 经典反应位移法示意图

Fig.1 Diagram of classic response displacement method

经典反应位移法具有力学机制清晰、计算相对简便等优点,但难以直接考虑结构-地层相互作用(如地层弹簧刚度不易确定,非规则地下结构存在复杂地层接触力等问题)。因此诸多学者陆续提出整体反应位移法^[14]、边界强制反应位移法^[15]等改进计算方法。

2.2 边界强制反应位移法

杜修力团队^[15]提出的边界强制反应位移法,在模型边界上以强制位移的形式施加地震荷载,从而能直接考虑结构-地层的相互作用,其计算模型如图 2 所示。首先通过自由场推覆得到设计地表峰值位移 U_0 对应的边界位移 U_1 ,进而将其加载至结构-地层体系的侧边界上,可直接且较为准确地计算地震作用下的结构力学响应。

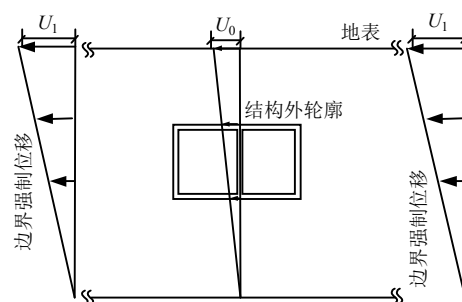


图 2 边界强制反应位移法示意图

Fig.2 Diagram of boundary forced response displacement method

地下结构静力推覆模型试验是上述边界强制反应位移法的试验基础^[4-7],诸多学者通过边界施加倒三角位移的矩形或圆形地下结构推覆试验探讨了结构-地层在地震工况下的相互作用机制。不同于矩形或圆形等规则断面形式,本文以马蹄形断面山岭隧道为研究对象,探究地层位移、地层应变、围岩压力随推覆位移的变化规律。

3 静力推覆模型试验

3.1 相似比设计与相似材料选取

以常规二车道公路隧道(V级围岩段)为原型:内轮廓由拱圈、边墙以及仰拱组成,其中拱圈与仰拱的半径分别为 4.85 m 与 15 m;二衬采用 C30 钢筋混凝土浇筑,厚度为 0.4 m;开挖外轮廓的最大跨度和高度分别为 10.5 m 和 8.4 m。

基于量纲相似原则设计缩尺模型:首先根据试验场地条件,选择长度相似比 $S_L = 1/40$;进而根据地层相似材料的配比经验,选择弹模相似比 $S_E = 1/40$;由于加速度相似比为 S_g 恒定为 1,其余物理

微型土压力盒以观测围岩压力变化,如图 5 所示。其中 T1 位于衬砌拱顶, T3、T5、T7 和 T9 分别位于衬砌右侧拱肩、拱腰、起拱线和边墙, T2、T4、T6 与 T8 则对称布置于衬砌左侧。

3.4 试验过程

衬砌模型制作:按照相似比设计定制衬砌模具,按设计水膏比调配石膏浆液并注入模具,待凝固成型后脱模形成衬砌模型,如图 6(a)、6(b)所示。

地层相似材料配置及填筑:按照设计配合比将石英砂、膨润土、石膏和水搅拌均匀并逐层填筑,并按密度要求逐层夯实;将密贴微型土压力盒的衬砌模型放置到 0.7 m 高度处,如图 6(c)所示,后续继续填筑至 1.2 m 高度。

加载过程:放置 2 部固定相机对准观测区域,并设置高亮光源和周边遮光布,如图 6(d)所示;开动千斤顶对右侧墙体以 5 mm 间隔逐步施加倒三角推覆位移,直至最大推覆位移 100 mm。



图 6 静力推覆试验的实施

Fig.6 Implementation of static pushover test

4 地层位移分析

4.1 数字图像相关技术简介

数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术以散斑图像相关性分析为基本原理,通过追踪物体表面的散斑图像,实现变形过程中物体表面坐标的高精度测量。DIC 技术可以得到图像范围内的地层整体位移与应变,为研究结构-地层相互作用提供可能。

采用中国矿业大学开发的 DIC 技术集成程序 PhotoInfor 以及 Postview,前者用于图像分析,后者用于结果再处理^[18]。具体流程如下:将静力推覆过程中连续拍摄的图像导入 PhotoInfor 中,根据图像像素与实际尺寸设定比例为 0.149 mm/像素;建立辅助网格并导入 PhotoInfor,如图 7 所示;将 PhotoInfor 所得数据文件导入 Postview 中,进一步处理得到重点关注区域的地层位移与地层应变云图。

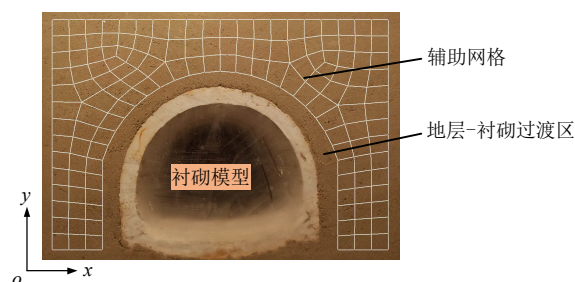


图 7 重点关注区域与辅助网格

Fig.7 Critical focus area and auxiliary grid

需要说明的是,辅助网格并没有密贴衬砌模型,而是与衬砌模型间留有 20 mm 的过渡区。由于衬砌-地层之间的相互挤压作用明显,过渡区内的散斑极易消散,难以对该区域内的地层位移及应变作出准确分析。

试验过程中每间隔 5 mm 推覆位移即拍摄测量一次,并进行相应的 DIC 后处理。限于篇幅,本文重点关注地层位移与地层应变发生突变的推覆位移为 20、60 mm 工况,简称工况 1 和工况 2,以及最大推覆位移为 100 mm 工况,简称工况 3。

4.2 地层水平位移

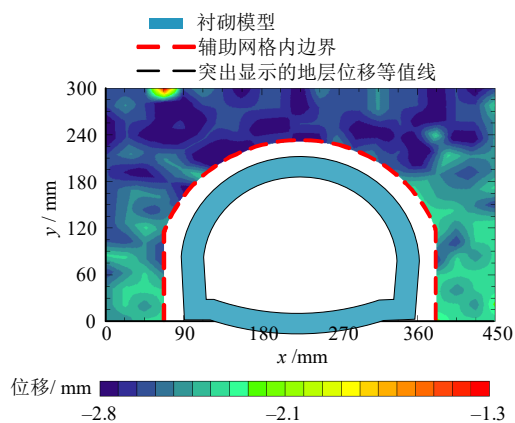
在推覆作用下,衬砌右侧地层作为初始承力区域,将荷载传递至衬砌及左侧地层。通过 DIC 技术观测工况 1、2、3 的地层水平位移如图 8 所示。

工况 1 中,周边地层处于初始挤密状态,连续拍摄的照片中散斑位移变化不明显,水平位移云图呈现不规律变化。

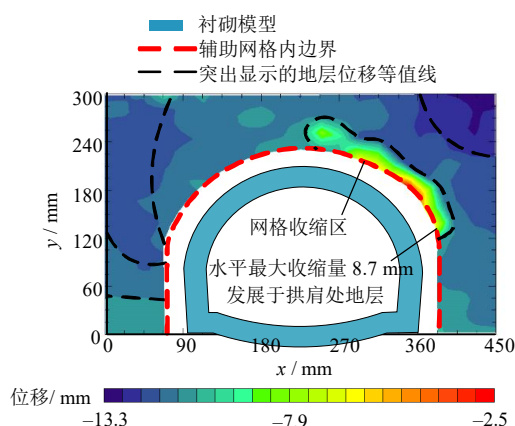
工况 2 中,地层水平位移迅速增大且出现明显分层,位移等值线自右向左呈现倾倒趋势,表明地层进入倾覆阶段;最大水平位移约为 13.3 mm,出现于右上方角点。进一步观察可知:衬砌右拱肩附近地层出现位移抵抗现象,即局部网格发生不均匀收缩,与初始网格相比,其水平最大收缩量为 8.7 mm。

工况 3 中,地层水平位移持续增大且分层现象愈发明显;局部网格不均匀收缩现象加剧,范围扩大至起拱线处附近,其水平最大收缩量为 20.2 mm。同时衬砌模型也发生显著的水平位移(22.6 mm),

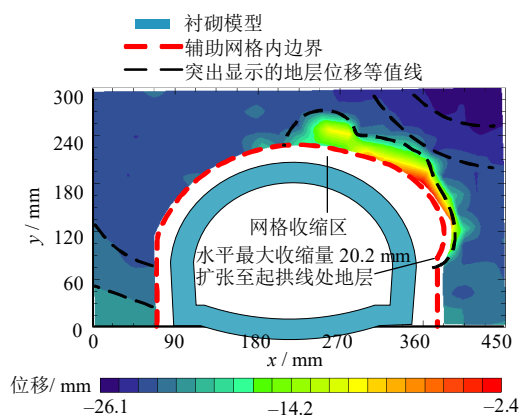
其位移量与周边地层相近,表明地层进入裹挟阶段(即地层带动衬砌发生共同位移)。



(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3

图 8 地层水平位移云图

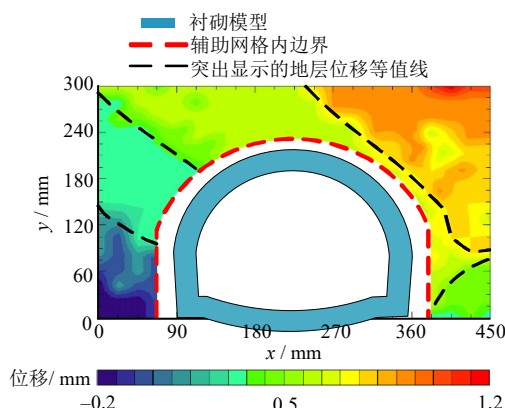
Fig.8 Horizontal displacement contour of stratum

4.3 地层竖向位移

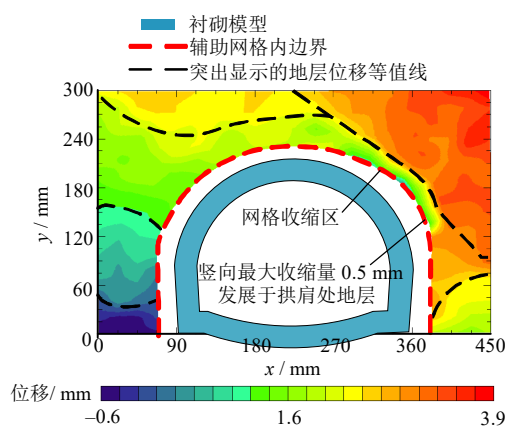
类似地,关注工况 1、2、3 的地层竖向位移,如图 9 所示。

工况 1 中,周边地层处于初始挤密状态,在推覆位移作用下,地层整体发生隆起且分层现象明显,其最大竖向位移约为 1.2 mm,出现于右上方角点。

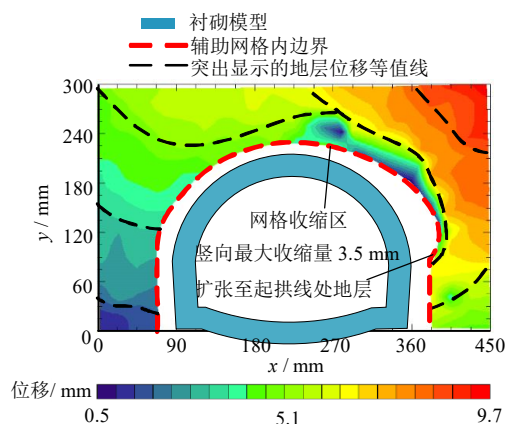
工况 2 中,地层竖向位移持续增长且分层现象愈加明显,最大隆起量达到 3.9 mm。进一步观察可知:右侧起拱线附近地层竖向位移等值线方向相异,表明地层以起拱线为分岔产生环向绕流现象;同时水平推覆作用沿环向传递至拱肩附近,使局部网格发生不均匀收缩,与初始网格相比,其竖向最大收缩量为 0.5 mm。



(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3

图 9 地层竖向位移云图

Fig.9 Vertical displacement contour of stratum

工况 3 中,随着推覆位移增大,绕流现象更加

显著,同时网格收缩区范围进一步扩大至起拱线附近,其竖向最大收缩量为 3.5 mm。

5 地层应变分析

5.1 地层压应变

仅分析地层绝对位移,无法体现衬砌-地层的相互作用。压应变是反映衬砌-地层相互作用机制的重要指标,绘制其云图如图 10 所示。

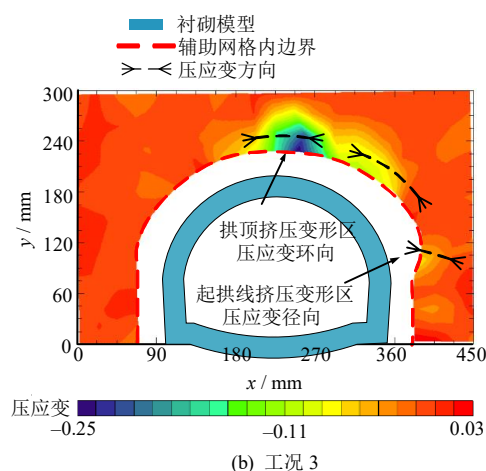
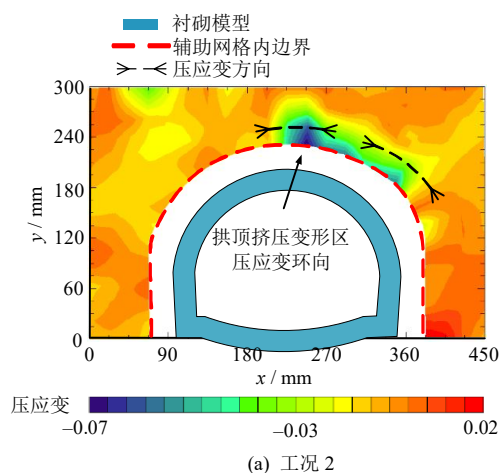


图 10 地层压应变云图及其方向
Fig.10 Stratum compressive strain contour and its direction

工况 2 中,拱顶与拱肩附近地层首先出现环向压应变,形成挤压变形区。工况 3 中,随着推覆位移进一步增大,拱顶与拱肩附近地层环向压应变值显著增加,同时起拱线附近地层也出现径向压应变,形成新的挤压变形区。上述挤压变形区的发展过程,进一步佐证了地层以起拱线为分岔、将水平推覆作用沿环向传递至拱肩/拱顶附近的结论。

5.2 地层拉应变

类似地,绘制地层拉应变云图如图 11 所示。

工况 2 中,拱肩附近地层环向受压从而产生径向拉应变,形成滑移变形区。工况 3 中,随着推覆位移进一步增大,拱肩与拱腰附近地层径向拉应变值显著增加,滑移变形区扩张至起拱线附近,其方向由径向转为环向,进一步佐证了地层环向绕流的结论。

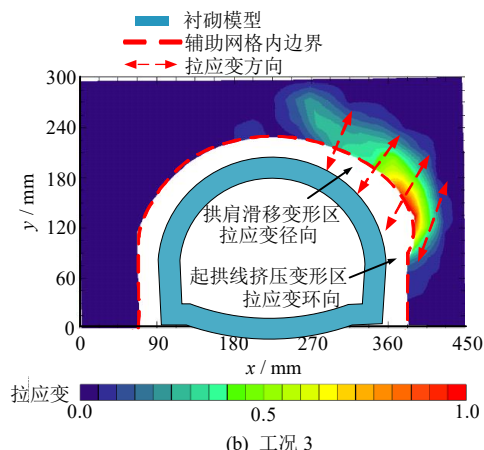
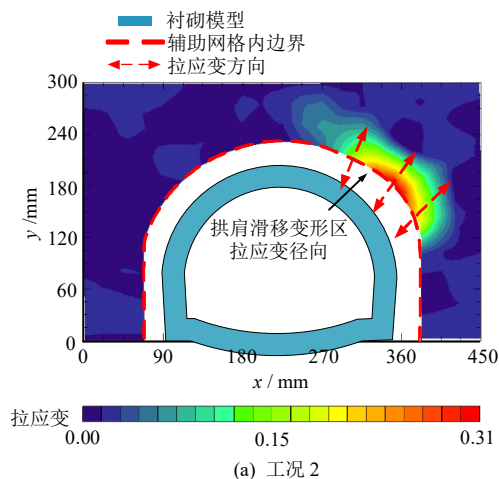


图 11 地层拉应变云图及其方向
Fig.11 Stratum tensile strain contour and its direction

6 围岩压力分布

围岩压力是衬砌-地层间相互作用的直观体现,本文重点关注推覆过程中围岩压力的变化值(即试验前对采集仪通道清零)。

6.1 下部围岩压力分布

绘制下部围岩压力(T6~T9 测点)随推覆位移的发展变化,如图 12 所示。由图可知:各测点围岩压力均随推覆位移呈整体增大趋势。对比相同高程位置,右下部围岩压力(红线)显然大于左下部(蓝线),这与右下部地层处于挤压变形区的结果是一致的。对比相同侧面位置,边墙围岩压力显著大于起拱线,这与地层起拱线绕流、水平推覆作用沿环

向传递的结论是一致的。

进一步分析可知：下部围岩压力的变化曲线清晰体现了衬砌-地层相互作用的三阶段。初始挤密阶段，地层与衬砌相互挤压，各测点围岩压力迅速上升；进入倾覆阶段后，围岩压力持续平稳增长；裹挟阶段中，网格收缩区扩张至起拱线处，导致该处围岩压力略有下降，其他各测点围岩压力则再次快速增长。推覆位移 100 mm 时，右边墙围岩压力最大值高达 15.2 kPa。

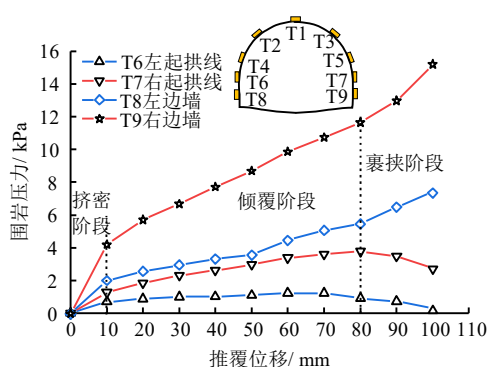


图 12 下部围岩压力随推覆位移的变化

Fig.12 Variation of lower ground pressure with pushover distance

6.2 上部围岩压力分布

绘制上部围岩压力 (T2~T5 测点) 随推覆位移的发展变化, 如图 13 所示。由图可知: 各测点围岩压力均随推覆位移呈整体增大趋势。从地层应变角度分析, 认为右上部地层处于滑移变形区, 以环向挤压和径向脱离为主; 因此对比相同高程位置, 右上部围岩压力 (红线) 显然小于左上部 (蓝线)。从地层位移角度分析, 越接近拱顶位置, 衬砌-地层间相互作用以滑移为主 (而非以挤压为主); 因此对比相同侧面位置, 拱腰围岩压力显著大于拱肩。

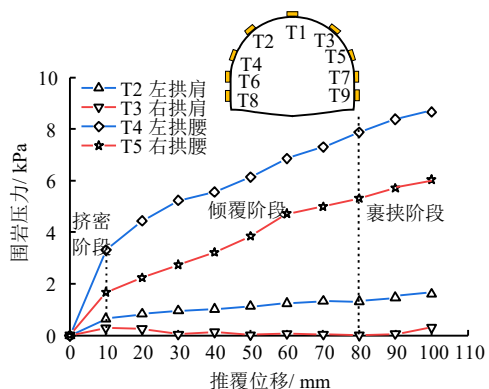


图 13 上部围岩压力随推覆位移的变化

Fig.13 Variation of upper ground pressure with pushover distance

类似地, 上部围岩压力的变化曲线, 也清晰体现了衬砌-地层相互作用的挤密、倾覆、裹挟三阶段, 不再赘述。

7 山岭隧道衬砌-地层相互作用机制

综合前述地层位移、地层应变及围岩压力的分析, 得到静力推覆作用下山岭隧道衬砌-地层相互作用机制如图 14 所示。

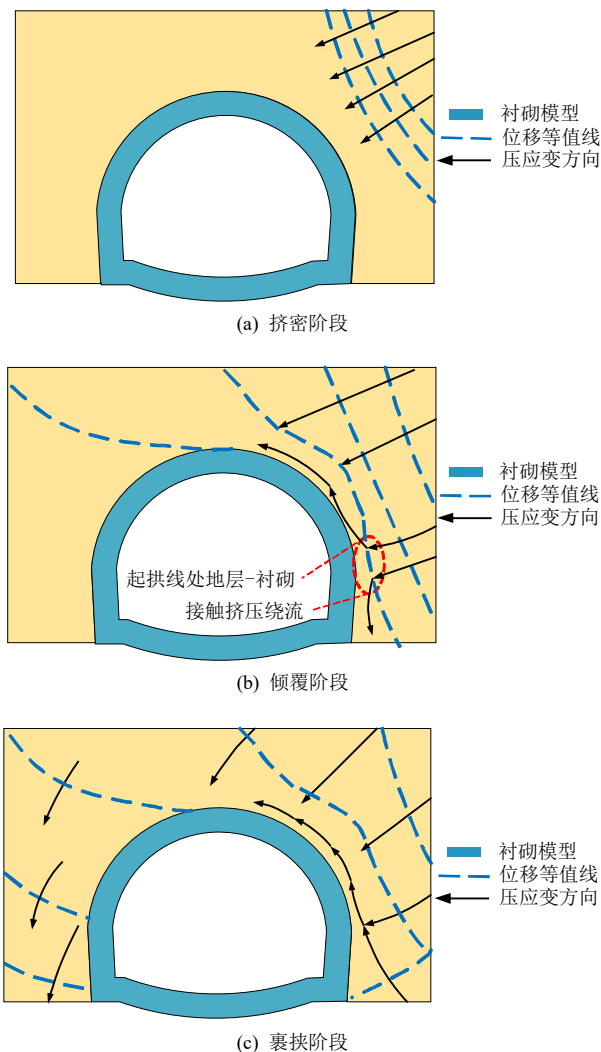


图 14 静力推覆作用下山岭隧道-地层相互作用机制

Fig.14 Mountain tunnel-stratum interaction mechanism under static pushover action

(1) 挤密阶段: 地层开始挤密并发生规律性倾斜, 与倒三角形加载机制近似, 地层位移等值线以一定斜率沿高程线性分布, 如图 14(a)所示; 该阶段各测点围岩压力快速增长。

(2) 倾覆阶段: 随推覆位移增大, 起拱线附近地层产生绕流现象, 拱顶以上地层位移等值线覆过衬砌呈现大角度倾斜, 如图 14(b)所示。倾覆过程中, 分别在拱肩与拱顶形成滑移变形区与挤压变形区,

该阶段各测点围岩压力持续平稳增长。

(3) 裹挟阶段: 随推覆位移进一步增大, 地层带动衬砌发生共同位移, 位移等值线进一步倾斜至衬砌左侧, 如图 14(c)所示。滑移变形区扩张至起拱线附近, 使其围岩压力略有下降, 其他测点围岩压力则继续保持增长。

进一步探讨极限工况下(进一步推覆直至衬砌结构破坏)衬砌结构的破坏模式。以右起拱线为界, 下部挤压区衬砌阻挡地层位移, 上部滑移区衬砌受地层绕流作用, 使得起拱线处衬砌首先受剪破坏, 形成贯通裂缝①。闭合拱结构破坏后, 随着挤压作用进一步增加, 衬砌产生裂缝②、③、④, 如图 15 所示。



图 15 极限工况下的衬砌裂缝

Fig.15 Lining cracks under ultimate condition

8 结 论

以常规二车道公路隧道(V级围岩段)为原型, 开展静力推覆模型试验, 重点分析地层位移、地层应变、围岩压力随推覆距离的变化规律, 探讨山岭隧道衬砌与周边地层相互作用机制, 得到主要结论如下:

(1) 水平推覆作用下, 衬砌-地层相互作用模式可分为挤密、倾覆、裹挟 3 个阶段。倾覆阶段中, 地层以衬砌起拱线为支点环向绕流; 裹挟阶段中, 地层带动衬砌整体位移。

(2) 倾覆及裹挟阶段中, 拱肩附近地层以环向挤压为主, 径向扩张为辅, 形成滑移变形区; 同时拱顶及起拱附近线地层受推覆作用产生水平压缩, 形成挤压变形区。

(3) 左右两侧围岩压力的响应规律恰好相反: 右侧挤压区的压应变径向使得地层推覆作用依次传递, 其围岩压力较左侧大; 右侧滑移区的压应变环向而拉应变径向, 使得地层脱离衬砌, 其围岩压力较左侧小。

参 考 文 献

- [1] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377-2389.
PENG Jian-bing, CUI Peng, ZHUANG Jian-qi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2377-2389.
- [2] ZHANG X P, JIANG Y J, KAZUHIKO M. Mountain tunnel under earthquake force: a review of possible causes of damages and restoration methods[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(2): 414-426.
- [3] WANG T T, KWOK O L, JENG F S. Seismic response of tunnels revealed in two decades following the 1999 Chi-Chi earthquake (Mw 7.6) in Taiwan: a review[J]. *Engineering Geology*, 2021(2): 106090.
- [4] 景立平, 徐琨鹏, 程新俊, 等. 水平推覆作用下土-地下结构反应特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1567-1576.
JING Li-ping, XU Kun-peng, CHENG Xin-jun, et al. Study on response characteristics of soil-underground structure under horizontal pushover[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(9): 1567-1576.
- [5] 徐琨鹏, 景立平, 程新俊, 等. 基于边界位移法的地下结构推覆试验可行性研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 127-138.
XU Kun-peng, JING Li-ping, CHENG Xin-jun, et al. Feasibility study of pushover test of underground structure based on boundary displacement method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 127-138.
- [6] 陈之毅, 刘文博, 陈炜. 多层地铁车站结构性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 811-820.
CHEN Zhi-yi, LIU Wen-bo, CHEN Wei. Performance experiment of a multistory subway station[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(6): 811-820.
- [7] 许成顺, 韩润波, 杜修力, 等. 考虑土-结构相互作用的弹簧-地下结构体系静力推覆试验技术及其试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(1): 248-258.
XU Cheng-shun, HAN Run-bo, DU Xiu-li, et al. Static pushover test technology of spring-underground structure system considering soil-structure interaction and its experimental study[J]. *Journal of Building Structures*,

- 2023, 44(1): 248-258.
- [8] 刘晶波, 安志尧, 宝鑫. 地下结构抗震性能土工模型箱拟静力试验中土体尺寸的影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(3): 11-21.
- LIU Jing-bo, AN Zhi-yao, BAO Xin. Study on the influence of soil size in pseudo-static test of soil model box for seismic performance of underground structure[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Dynamics**, 2021, 41(3): 11-21.
- [9] 韩润波, 许成顺, 杜修力, 等. 土-地下结构体系拟静力推覆试验模型箱类型的优选[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 462-470.
- HAN Run-bo, XU Cheng-sun, DU Xiu-li, et al. Optimization of model box type in quasi-static pushover test of soil-underground structure system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(2): 462-470.
- [10] WANG X, PAN C. Review of seismic damage characteristics and influence factors of mountain tunnels[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2022, 15(6): 1-16.
- [11] 关振长, 龚振峰, 罗志彬, 等. 特大断面隧道地震动力特性的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2553-2560.
- GUAN Zhen-chang, GONG Zhen-feng, LUO Zhi-bin, et al. Seismic property of a large section tunnel based on shaking table model tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2553-2560.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T 2232-01—2019 公路隧道抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T 2232-01—2019 Specification for seismic design of highway tunnels[S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [14] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 地下结构抗震分析的积分式反应位移法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1618-1624.
- LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, et al. Integral response deformation method for seismic analysis of underground structure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1618-1624.
- [15] 韩润波, 许成顺, 许紫刚, 等. 对称地下结构抗震分析的边界强制反应位移法[J]. 工程力学, 2021, 38(5): 50-60.
- HAN Run-bo, XU Cheng-sun, XU Zi-gang, et al. A boundary forced response displacement method for seismic analysis of symmetrical underground structures[J]. **Engineering Mechanics**, 2021, 38(5): 50-60.
- [16] 关振长, 罗志彬, 徐道, 等. 基于振动台模型试验的特大断面隧道地震动态响应研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 648-656.
- GUAN Zhen-chang, LUO Zhi-bin, XU Qiu, et al. Seismic responses of large section tunnel based on shaking table model test[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2017, 25(3): 648-656.
- [17] 王戌平. 破碎围岩隧道的模拟试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- WANG Shu-ping. Model test study on tunnel within cracked surrounding rock[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [18] 李元海, 刘德柱, 杨硕, 等. 深部复合地层 TBM 隧道围岩应力与变形规律模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1783-1793.
- LI Yuan-hai, LIU De-zhu, YANG Shuo, et al. Experimental investigation on surrounding rock stress and deformation rule of TBM tunneling in deep mixed strata[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(7): 1783-1793.