

深埋大断面黄土隧道围岩失稳试验研究

梁小勇¹, 扈世民^{2, 3*}, 张春会¹

(1. 河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄 050018; 2. 北京城建设计研究总院有限责任公司, 北京 100037;
3. 北京交通大学隧道及地下工程实验研究中心, 北京 100044)

摘要: 以兰渝铁路黄土隧道工程为依托, 采用室内模型试验研究深埋大断面黄土隧道失稳机理, 结论表明: ①首先边墙部位沿最小主应力方向形成楔形滑移体, 然后围岩破坏向拱顶、拱底蔓延, 较弱抗拉强度引发黄土拱部围岩松动塌落; ②黄土隧道围岩失稳过程: 局部裂隙产生→局部裂隙扩展→裂隙急剧贯通→残余强度四个阶段, 拱顶围岩松动塌落是边墙剪切滑移破坏基础上出现的; ③随着荷载的增大, 拱部松动区径向应力先增大后减小, 其他测点的径向应力随荷载的施加而增大; 边墙处切向应力均随荷载增加而增大, 距洞周越近切向应力值增长的幅度越大; ④围岩深部存在切向应力升高区, 此部分围岩承担着自重与外部土体荷载形成显著压力拱效应, 自洞壁向围岩深部依次可分为: 松动区→压力拱区→原岩应力区。

关键词: 黄土隧道; 深埋; 大断面; 失稳模式; 相似材料; 模型试验; 压力拱

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-0559-05

作者简介: 梁小勇(1980-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事岩土工程模型试验研究。E-mail: lixiaoyong_2001@163.com。

Failure modes of surrounding rock of deep-buried large-section loess tunnel

LIANG Xiao-yong¹, HU Shi-min^{2, 3}, ZHANG Chun-hui¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Beijing Urban Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037, China; 3. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the loess tunnel of Lanzhou-Chongqing Railway, mode tests on the instability mechanism of the surrounding rock of large-section loess tunnel are performed. The results show that: (1) The wedge slip is formed on the side-wall parts along the direction of the minimum principal stress firstly and then spread to the vault and arch bottom. The weak tensile strength leads to the loosening collapse on the vault. (2) The instability process is as follows: initiation of local fracture→extension of local fracture→rapid coalescence of fracture→residual strength. The loosening collapse on the vault is on the basis of shear slip on the wall. (3) The radial stress increases as the load applied firstly and then decreases on the vault. The shear stress on the wall increases with the consecutive loading, and the growth rate of tangential stress is greater far away from the hole. (4) The tangential stress-increasing area exists in the deep rock, which bears the self-weight and external soil load and a significant pressure-arch effect is formed. The rock from the wall to the deep part can be divided into three zones: loose zone, pressure-arch zone and initial stress area.

Key words: loess tunnel; deep bury; large section; failure mode; similar material; model test; pressure arch

0 引 言

确定合理支护参数是隧道设计面临核心问题, 而支护参数的确定取决于隧道围岩失稳破坏模式, 可见围岩失稳模式对于隧道支护结构设计具有重要意义^[1-4]。

近年来, 模型试验成为解决复杂工程课题的重要手段, 在隧道工程研究中得到广泛重视和应用。汪成兵对软弱围岩塌方机制及影响因素进行分析, 通过模型试验得出动态压力拱发展过程^[5]; 陈浩采用室内相似模拟实验与数值模拟相结合的手段, 对不同工

况下围岩体失稳演化过程、应力变化规律和锚杆轴力变化规律进行研究^[6]。

以兰渝铁路典型隧道工程为依托, 对大断面黄土隧道失稳机理进行研究; 采用室内相似模型试验对隧道开挖后围岩失稳机理进行研究, 分析围岩变形失稳

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274079); 河北省自然科学基金项目(E2013208148)

收稿日期: 2013-07-17

*通讯作者

过程中应力与位移场特征，同时探索围岩失稳过程中压力拱的变化规律，从而为支护参数的选择提供依据。

1 试验设计

1.1 试验装置

隧道开挖模型试验台架是由北京交通大学隧道与地下工程研究中心自主研发和设计，该系统可以较好的实现大断面黄土隧道围岩失稳模式研究，对超载实验过程中围岩的应力特征及变形发展规律进行动态监测。隧道开挖模型台架设计为 300 cm×30 cm×162 cm（长×宽×高），台架结构体系承压强度大于 0.3 MPa，其受力后局部变形小于 3 mm，满足模型试验精度要求^[7-8]。

模型试验台架采用加载系统为气囊伺服加载，气囊伺服加载可方便有效的实现竖直方向与水平方向的加载。使用气囊加载具有加载稳定、均匀、拆装方便等优点，尤其是可实现伺服控制，如图 1 所示。

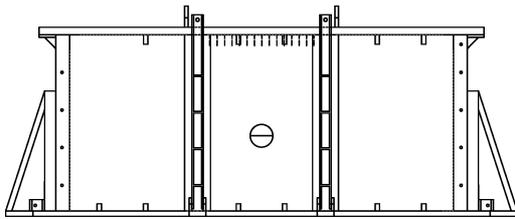


图 1 气囊加载原理图

Fig. 1 Loading mode of airbag

采用 TM-BW2000 箔式微型压力盒监测隧道围压应力场变化规律，Datataker 公司设计的 DT80G 型高智能可编程数据采集器获取试验数据。

1.2 相似常数的确定

试验中需设计的变量包括结构几何尺寸 l ，应力 σ ，弹模 E ，重度 γ 与应变 ε ，设各物理量满足函数：

$$f(\sigma, E, \gamma, l, \mu, \varepsilon) = 0 \quad (1)$$

根据式 (1) 推导，可得隧道开挖初始应力场与卸载作用下各物理量相似常数计算公式，如表 1 所示。

表 1 各物理量相似常数计算公式

Table 1 Formula of various physical quantities similar constants

物理量	符号	量纲	相似常数确定公式
几何尺寸	l	L	α_l
重度	γ	$ML^{-2}T^{-2}$	α_γ
弹模	E	$ML^{-1}T^{-2}$	$\alpha_E = \alpha_\gamma \alpha_l$
应力	σ	$ML^{-1}T^{-2}$	$\alpha_\sigma = \alpha_\gamma \alpha_l$
应变	ε	—	1
泊松比	μ	—	1

通过多次反复室内试验，确定以重晶石为骨料、

石英砂，凡士林作为胶结剂按照一定的配比拌合，再将其按照 12 : 4.2 : 0.7 比例压实。选取的几何相似常数： $\alpha_l=80$ ，则隧道模型跨度 17.8 cm；重度相似常数 $\alpha_\gamma=1$ 。以大断面黄土隧道 V 级围岩力学参数为背景，相关参数如表 2 所示。

表 2 大断面黄土隧道 V 级围岩模型力学指标

Table 2 Mechanical indexes of large-section loess tunnel V class surrounding rock model

类型	重度 $\gamma / (kN \cdot m^{-3})$	弹模 E / MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 c / kPa
原型	19	240	0.3~0.35	27~39	30~40
模型	19	3.2	0.32	30	0.35

2 试验方案选择

将黄土围岩从力学上概化为均匀连续介质，利用平面应变试验台架，采用“先开挖后加载”的方式，通过气囊施加初始荷载为 0.04 MPa，随后每级荷载增加 0.02 MPa，直至围岩失稳为止，加载时待压力盒数据稳定方可进行下一级加载^[9]。

隧道左右两侧分别布置 5 个测点、洞室上方布置 4 个测点，洞室右侧 A1~A5 监测边墙部位切向应力，洞室左侧 A6~A10 监测边墙部位径向应力，B1~B4 监测拱部围岩径向应力，B5~B8 监测拱部围岩切向应力，模型试验压力盒布设如图 2 所示。

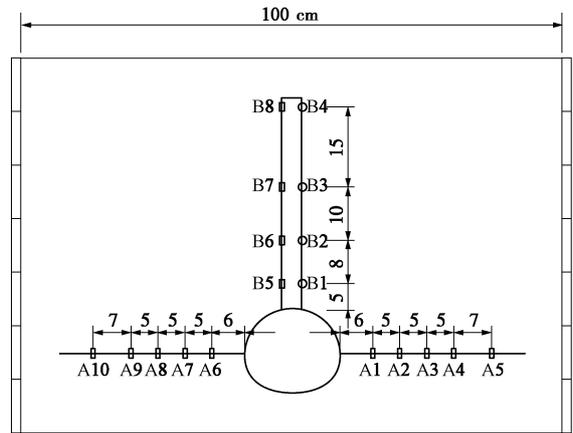


图 2 试验测点布置

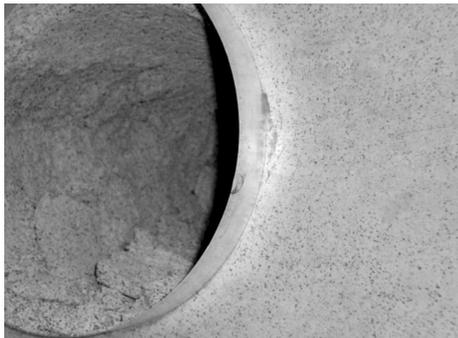
Fig. 2 Distribution of measurement points

3 试验结果分析^[9-11]

3.1 围岩失稳直观分析

图 3 为无支护条件下大断面黄土隧道渐进性破坏过程，隧道开挖后具有较好的自稳能力；分级加载初期，围岩无明显变化，相似材料存在一个压密的过程；加载至 0.12 MPa 时，隧道右侧边墙出现裂缝，随着荷

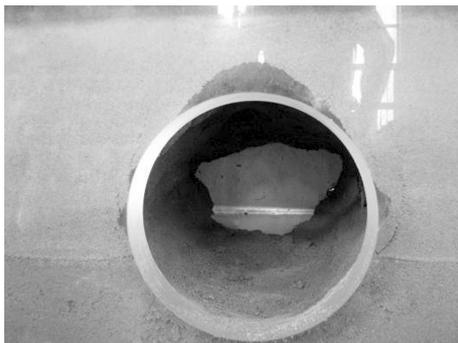
载的增大剪切裂隙逐渐贯通, 当加载至 0.18 MPa 时, 边墙部位剪切裂隙贯通, 出现掉块现象 (图 3 (a)); 随着进一步加载, 边墙剪切裂隙向拱顶和拱底蔓延, 应力调整向围岩深部转移加剧裂隙范围扩大, 拱部围岩因边墙临空而显著下沉(图 3(b)); 当荷载增至 0.28 MPa, 拱顶部位形成塌落拱结构 (图 3 (c))。深埋黄土隧道围岩破坏首先沿小主应力方向形成剪切破坏, 进一步蔓延至拱部, 拱顶松动塌落是在边墙剪切滑移破坏的基础上形成的。



(a) 0.18 MPa



(b) 0.24 MPa



(c) 加载完毕

图 3 大断面黄土隧道渐进性破坏过程

Fig. 3 Failure progress of large-section loess tunnel

3.2 围岩应力时程分析

通过预埋土压力盒对大断面黄土隧道超载失稳过程中围岩应力场特征进行实时监测, 见下图。

图 4, 5 为模型试验加载过程中边墙处应力变化的时程曲线, 在分级加载过程中, 整体上压力盒数值随着荷载增大而增大, 切向应力增长幅度 (84.49 kPa)

明显大于径向应力 (29.57 kPa)。径向应力测点 A1、A2 随荷载增大表现为先增大后减小, 因为随着围岩塑性区向深部转移, 测点 A1、A2 位于松动区范围内, 故其它测点的径向应力随荷载施加而递增; 边墙切向应力测点 A6~A10 均随荷载增加而增大, 距洞周越近切向应力值增长的幅度越大。

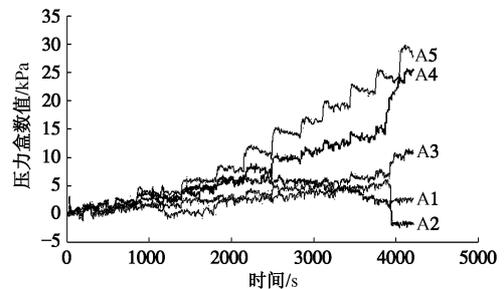


图 4 边墙径向应力时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of radial stress on side wall

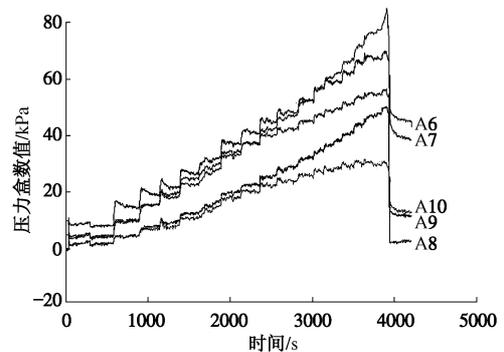


图 5 边墙切向应力时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of annular stress on side wall

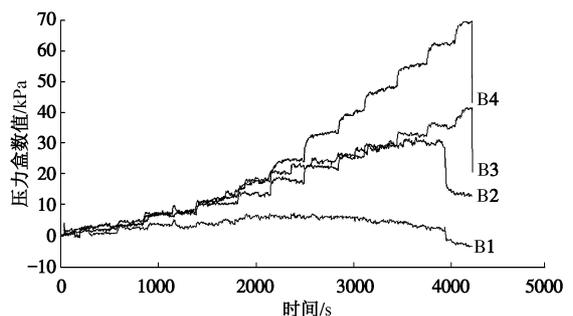


图 6 拱顶径向应力时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of radial stress on vault

图 6, 7 为模型试验加载过程中拱部围岩应力时程曲线, 拱部围岩应力变化规律与边墙基本一致, 但应力变化影响区域显著增大。加载初期测点 B6 应力值较大, 随着加载进行测点 B8 切向应力达到最大, 表明围岩应力升高区即压力拱逐渐向深部转移; 相应的松动区也向洞周外部蔓延, 表现为剪切滑移破坏到达 B1、B2 位置, 对应的应力值显著减小。

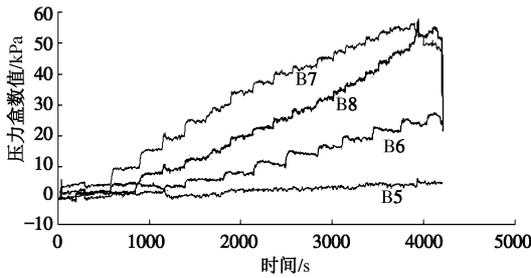


图7 拱顶切向应力时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of annular stress on side wall

3.2 围岩压力拱动态分析

压力拱的形成是围岩自我调整的结果，拱内土体将外部围岩压力顺滑传递到拱脚及更远的原岩应力区，故围岩切向应力升高区为主要承载区，从而形成压力拱效应。

图8为分级加载作用下边墙测点A6~A10切向应力变化规律，边墙处切向应力随上覆荷载的增加而增大，距洞壁较近A6、A7应力变化幅度较大，而A10、A9增长幅度相对较小恢复到原岩应力状态。可见，在围岩深部存在切向应力升高区，这部分围岩承担着自重与外部土体荷载，形成显著的压力拱效应。自洞壁向围岩深部依次可分为：松动区→压力拱→原岩应力区。

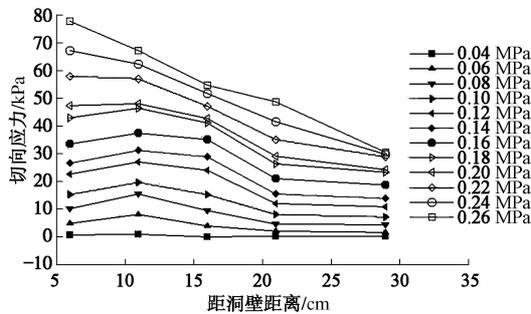


图8 分级加载边墙切向应力变化

Fig. 8 Change of radial stress on wall under step loading

图10为分级加载作用下拱部测点不同深度径向应力与切向应力变化规律。拱顶径向应力测点B1径向压力随着荷载的增长而减小，因为B1距洞壁较近，隧道临空面的存在，拱部洞周围岩在重力作用下产生变形，该部位围岩物理力学性质严重劣化，位于松动区范围；随着上覆荷载的增大，B2、B3测点的径向应力与切向应力均增大，但B2测点应力增幅切向大于径向应力，而B3测点应力增幅径向大于切向应力，故在两测点之间存在径向应力与切向应力的交点即荷载传递路线发生转移。黄土围岩显著的结构性使得压力拱效应更加明显。B4测点距洞周较远，该处围岩恢复为原岩应力状态。

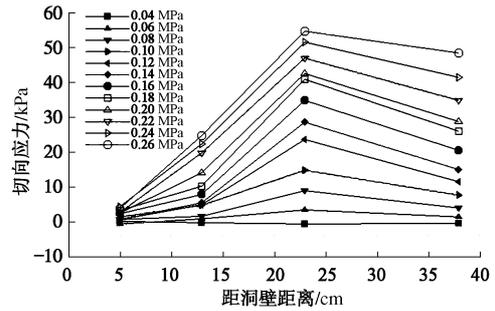


图9 分级加载拱部切向应力变化

Fig. 9 Change of annular stress on vault under step loading

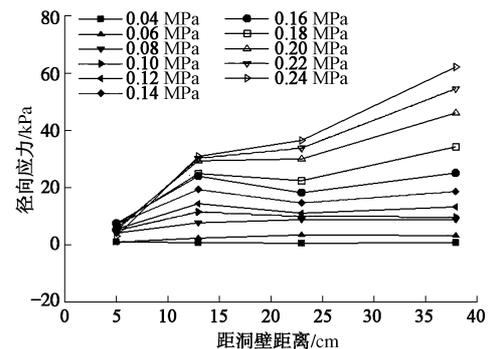


图10 分级加载拱部径向应力变化

Fig. 10 Change of radial stress on vault under step loading

4 结论

以兰渝铁路大断面黄土隧道为工程背景，采用模型试验方法对大断面黄土隧道失稳机理进行研究，分析围岩变形失稳过程中应力场变化特征，探索围岩失稳过程中压力拱变化规律，可以结论：

(1)模型试验失稳模式与兰渝铁路黄土隧道失稳调研结果基本吻合。

(2)黄土围岩失稳首先在边墙部位沿最小主应力方向形成楔形滑移体，然后破坏向拱顶、拱底部位围岩蔓延，较弱抗拉强度引发黄土拱部松动塌落。

(3)无支护条件下黄土围岩渐进性破坏过程表现为：局部裂隙产生→局部裂隙扩展→裂隙急剧贯通→残余强度四个阶段，拱顶松动塌落是在边墙剪切滑移破坏基础上发展的。

(4)随着荷载增大拱部松动区范围内径向应力测点先增大后减小，其他测点的径向应力增大；边墙切向应力测点均随荷载增加而增大，距洞周越近切向应力值增长的幅度越大。

(5)围岩深部存在切向应力升高区，此部分围岩承担着自重与外部土体荷载形成显著的压力拱效应，自洞壁向围岩深部依次可分为：松动区→压力拱→原岩应力区。

参考文献:

- [1] 张顶立, 王梦恕, 高 军, 等. 复杂围岩条件下大跨隧道修建技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(2): 290 - 296. (ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu, GAO Jun, et al. Construction technique of large-spanned tunnel under condition of complicated surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(2): 290 - 296. (in Chinese))
- [2] 扈世民, 张顶立, 王梦恕. 大断面黄土隧道开挖引起的围岩的力学响应[J]. 中国铁道科学, 2011, **32**(5): 51 - 55. (HU Shi-min, ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu. The mechanics response on surrounding rock of large section tunnel in loess[J]. Chinese Railway Science, 2011, **32**(5): 51 - 55. (in Chinese))
- [3] 关宝树. 隧道设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 189 - 202. (GUAN Bao-shu. The main points of tunnel design[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 189 - 202. (in Chinese))
- [4] 房 倩, 张顶立, 王毅远, 等. 圆形洞室围岩破坏模式模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(3): 564 - 571. (FANG Qian, ZHANG Ding-li, WANG Yi-yuan, et al. Model test study of failure modes of surrounding rock for circular caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(3): 564 - 571. (in Chinese))
- [5] 汪成兵, 朱合华. 隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 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 Rock Mechanics and Engineering, 2008, **30**(3): 450 - 456. (in Chinese))
- [6] 陈 浩. 地下工程围岩与支护体相互作用的模型试验研究与理论分析[D]. 武汉: 中国科学院, 2008. (CHEN Hao. Model test and theoretical analysis of the interaction of the surrounding rock and supporting system of underground engineering[D]. Wuhan: Chinese Academy of Science, 2008. (in Chinese))
- [7] 韩伯鲤, 张文昌, 杨存奋. 新型地质力学模型材料(MIB) [J]. 武汉水利电力学院学报, 1983(1): 11 - 17. (HAN Bo-li, ZHANG Wen-chang, YANG Cun-fen. A new model material of geomechanics (MIB)[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1983(1): 11 - 17. (in Chinese))
- [8] SHAHANI A R. Some problems in the antiplane shear deformation of bi-material wedges[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, **42**(11/12): 3093 - 3113.
- [9] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(9): 1842 - 1847. (WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHANG Qiang-yong, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(9): 1842 - 1847. (in Chinese))
- [10] LEE C J, WU B R, CHEN H T, et al. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, **21**(2): 119 - 132.
- [11] WANG C. Rock fracture around a highly stressed tunnel and the impact of a thin tunnel liner for ground control[J]. Internal Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, **41**(3): 1 - 8.

(本文责编 黄贤沙)