

软岩隧道围岩压力模型试验研究

刁心宏¹, 刘士雨¹, 官伟²

(1. 华东交通大学 道路与铁道工程江西省重点实验室; 2. 中国瑞林工程技术有限公司, 江西 南昌 330013)

摘要: 采用相似材料模型试验方法, 对软岩隧道在以竖直地应力为主和水平地应力为主两种情况下围岩压力分布规律进行了研究. 研究表明, 隧道围岩应力升高区在隧道周围1倍洞径之内, 应力集中系数约为1.2~1.5. 因围岩应力重分布而出现塑性区, 高应力向深部转移. 隧道施作衬砌后, 随着洞周围岩应力进一步释放, 塑性区继续扩张, 应力升高区也进一步向围岩深部发展, 洞周的应力集中现象有所减小. 隧道边墙中部、拱肩、拱顶是比较关键部位, 应加强支护.

关键词: 软岩隧道; 围岩压力; 相似材料模型

中图分类号: U25

文献标识码: A

与硬岩相比, 软岩的力学性质较差, 具有承载能力低、易变形的显著特点. 当在软岩中施工隧道时, 因其抗变形能力差, 软岩向空间产生较大的流动变形, 使作用在衬砌支护结构上的压力较大. 如果衬砌支护结构参数或支护时机不合理时, 常常造成作用在衬砌支护结构上的压力很大, 衬砌结构发生断裂、变形过大等失稳现象, 从而使隧道失去效用. 因为衬砌结构的变形破坏是由于作用其上的围岩压力引起的, 所以, 探究软弱围岩作用在衬砌结构上的压力分布规律, 对于设计衬砌结构参数和确定适当的支护时间无疑是十分重要的. 本研究采用室内相似材料模型试验方法, 对处于较差围岩中的铁路隧道衬砌所受到的围岩压力特征进行研究, 以为软岩隧道设计和施工提供参考.

1 试验总体方案

该试验针对在Ⅳ、Ⅴ级围岩中开挖的曲墙拱形单线铁路隧道进行. 为使所研究问题更具一般性, 研究对象不以某一具体工程为原型, 而是参照隧道设计规范按一般隧道考虑, 原型断面尺寸如图1所示.

鉴于曲墙拱形隧道既适用于竖直压力较大的地压环境, 也适用于水平压力较大的地压环境中, 故在试验中考虑两种情况: 竖直压力为水平压力的2倍和竖直压力为水平压力的1/2.

考虑到隧道埋深一般远大于隧道结构尺寸, 故取隧道周围有限区域的岩体作为研究对象, 忽略体积力的影响. 为了使围岩和支护结构的受力、变形与实际情况更为符合, 试验中采用“先加载, 后开洞”的工艺过程, 即先通过试验装置对模型进行加载, 等加压稳定后再进行隧道的开挖支护工作.

模型材料采用沙、水泥、粘土和石膏通过大量的试验进行选配, 衬砌用石膏包裹细铁丝网模拟.

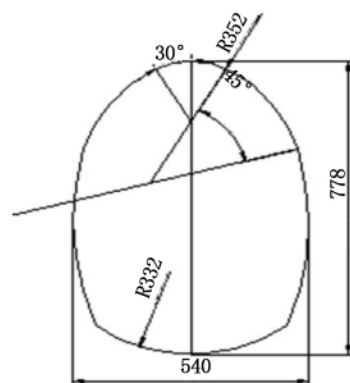


图1 单线铁路隧道内轮廓尺寸(单位: cm)

收稿日期: 2008-06-25

基金项目: 华东交通大学科研基金项目

作者简介: 刁心宏(1961-), 男, 河南邓州人, 教授, 博士, 主要从事岩土工程、道路与铁道工程教学与科学工作.

根据隧道尺寸和进行模型试验的设备技术参数,模型几何比例确定为 1: 30.

2 相似材料模型

2.1 相似比例系数

根据相似理论,模型中应力相似比等于模型几何相似比与模型材料重度比的积. 因本试验中取隧道周围有限区域的岩体作为研究对象而忽略体积力的影响,应力比可以自由选取. 同时,考虑到模型材料的重度与原型岩体的重度相差不大,故在此取应力比为 1: 30.

2.2 相似材料选择与配比设计

选择用于试验的相似材料时主要考虑了以下因素:

- (1) 试验过程中材料的力学性能稳定,不易受到外界影响;
- (2) 改变材料配比方便,可调整材料的某些性质以适应外界条件的需要;
- (3) 制作方便,凝固时间短;
- (4) 成本低廉,来源丰富.

根据以上原则,选择砂子、水泥、石膏、粘土作为制作相似材料的主要成份. 进行配比试验时,以相似材料的密度、弹性模量、粘聚力、抗压强度与围岩的对应参数尽量满足相似关系为目标进行筛选配制.

经过大量的配比试验,最终确定 3541 号配比(即胶结物中粘土、石膏、水泥的比例为 5: 4: 1,砂子与胶结物的比为 3: 1) 为制作相似材料模型的配比.

表 1 3541 号配比的试块物理力学参数

抗压强度 σ_c (MPa)	弹性模量 E (MPa)	泊松比 μ	内聚力 C (MPa)	内摩擦角 φ (°)	容重 γ (kN/m ³)
0.58	64.0	0.32	0.03	32	20.7

2.3 模型试验装置与模型填筑

试验使用华东交通大学结构与岩土工程实验中心的“岩土工程地质力学模型试验装置”进行(如图 2 所示). 该装置可以进行平面应力和平面应变试验,模型尺寸为 160 cm × 160 cm × 40 cm,最大加荷为 5 MPa,模型顶面和两侧面可加均布荷载或线性荷载,手动液压控制.

根据模拟的隧道尺寸和几何相似比例,模型中隧道尺寸为 18 cm × 26 cm. 考虑到模型填筑方便和加载需要,模型高度取 137 cm. 隧道处于模型中心部位,模型左右两侧边界距离隧道中心 80 cm(见图 3),上下受荷面距离隧道中心 68 cm,分别为隧道 1/2 跨度和 1/2 高度的 8.8 倍和 5.3 倍,即隧道在边界显著影响范围之外,满足模型试验要求.

模型厚度(即隧道长度)为 40 cm,相当于取 12 m 长的一段隧道进行模拟试验.

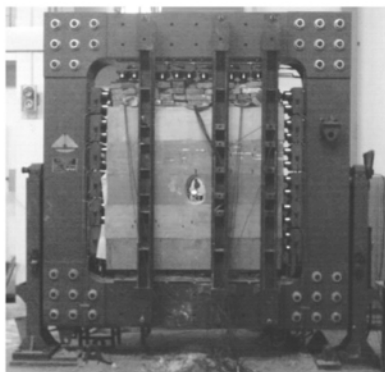


图 2 填筑完成的相似材料模型

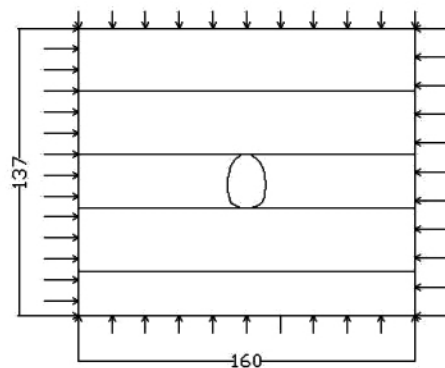


图 3 力学模型示意图
(尺寸单位: cm)

衬砌材料采用石膏、滑石粉按 1: 1.2 配置. 衬砌中加入直径 0.5 mm, 网格间距 8 mm × 8 mm 的钢

丝网用来模拟钢筋网.衬砌厚度 1.3 cm,相当于 40 cm 厚的衬砌.

填筑模型时,首先按比例拌和好材料,然后安装前后表面和左右侧面挡板,分层压实材料.模型分五大层,每层分 4~6 小层压实.每层材料的重量事先计算好以控制材料的密实度,使整个模型的密实度均匀.在材料的装填过程中,于相应的位置埋放压力盒.

为了减小挡板与模型材料之间的摩擦,挡板与模型材料之间加铺两层特制塑料膜,同时使挡板内倾 2~3 度,以避免夹制作用.

2.4 压力与变形观测方法及测点布置

根据试验研究目的,本试验对围岩压力、衬砌受力和隧道变形进行观测.围岩压力和衬砌受力采用压力盒进行观测,主要观测隧道顶部竖平面上、底板、隧道腰线水平面上和墙拱结合部压力,以及衬砌受到的径向压力.压力盒在填筑相似材料时按照设计位置埋置(见图 4).

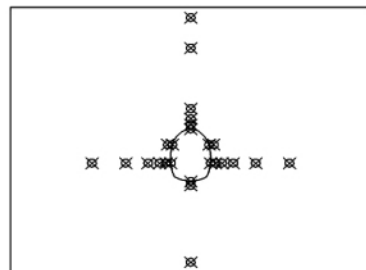


图4 压力盒布置示意图

3 模型开挖及试验

模型填装完成后,在自然状态下养护 3 天.

试验时先加载后开挖隧道.当竖直方向初始应力为水平应力 2 倍时,竖向加载 0.4 MPa,水平方向加载 0.2 MPa,相当于原型应力为 12 MPa 和 6 MPa;当竖直方向初始应力为水平应力 1/2 时,竖向加载 0.2 MPa,水平方向加载 0.4 MPa.等待压力变化趋于稳定后,读取各个压力盒初始读数,然后开挖隧道.

本研究共进行两个相似材料模型试验,分别对应两种初始应力状态.

4 试验结果及分析

4.1 试验结果

(1) 初始应力场 $\sigma_v = 2\sigma_h$ 时的情况

开挖隧道后拱顶、边墙围岩中的水平和竖直应力如图 5~8 所示.

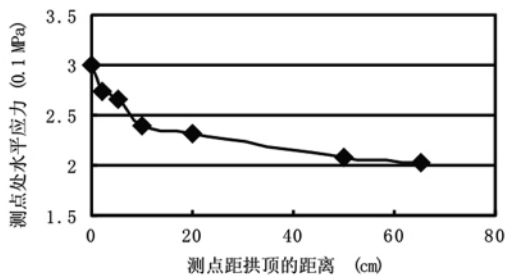


图5 开挖后拱顶竖平面上水平应力

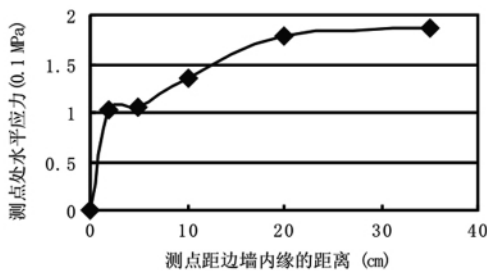


图6 开挖后边墙腰线水平面上水平应力

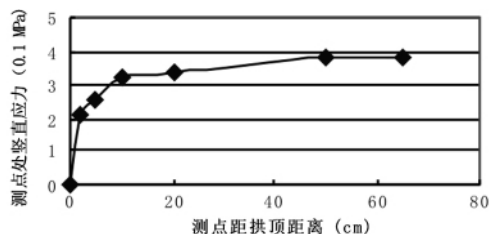


图7 开挖后拱顶竖平面上铅锤应力

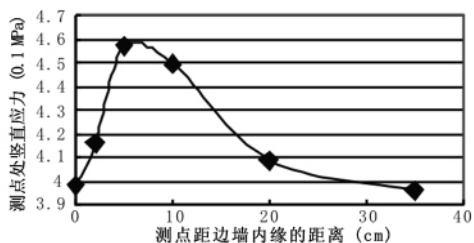


图8 开挖后边墙腰线水平面上铅锤应力

衬砌施作后隧道拱顶、边墙围岩中的水平和竖直应力如图 9~12 所示.

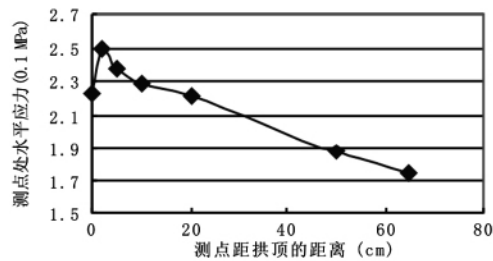


图9 衬砌后拱顶竖直平面上水平应力

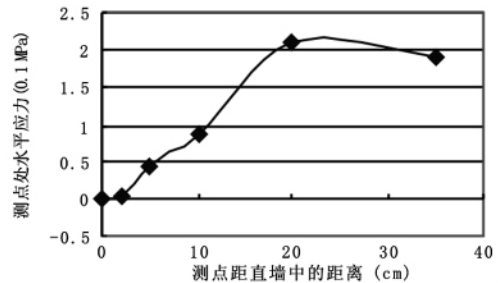


图10 衬砌后边墙腰线水平面上水平应力

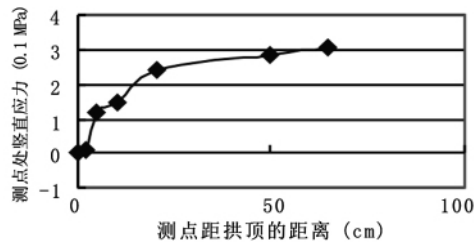


图11 衬砌后拱顶竖直平面上铅锤应力

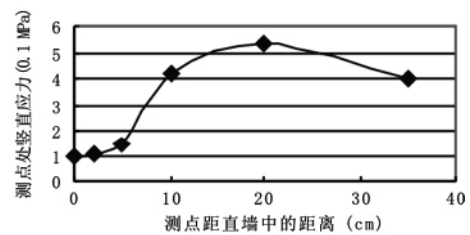


图12 衬砌后边墙腰线水平面上铅锤应力

表2 隧道衬砌前后洞周附近测点应力 (0.1 MPa)

			拱顶	底板	边墙腰线	拱肩
衬砌前	0 cm 处	σ_x	3.13	1.35	0.01	0.03
		σ_y	0.01	0.01	3.98	4.76
	2 cm 处	σ_x	2.75	1.79	1.03	1.58
		σ_y	2.10	1.19	4.16	4.57
衬砌后	0 cm 处	σ_x	2.23	0.76	0.01	0.57
		σ_y	0.90	0.00	0.97	1.76
	2 cm 处	σ_x	2.50	0.89	0.02	0.65
		σ_y	1.21	0.03	1.02	1.50

(2) 初始应力场 $\sigma_h = 2\sigma_v$ 时的情况

开挖隧道后拱顶、边墙围岩中的水平和垂直应力如图13~16所示。

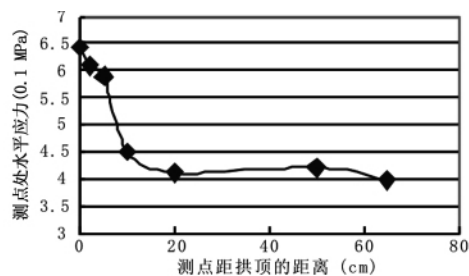


图13 开挖后拱顶竖直平面上水平应力

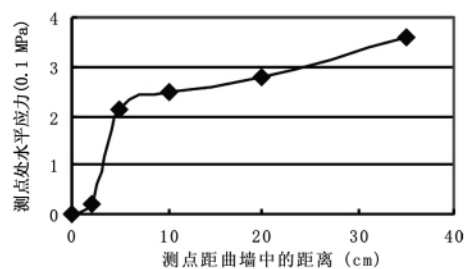


图14 开挖后边墙腰线水平面上水平应力

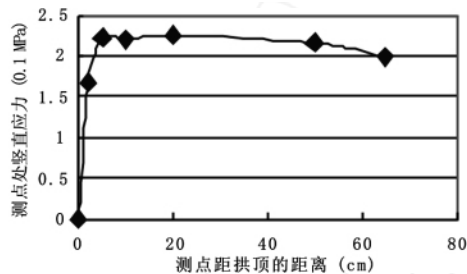


图15 开挖后拱顶竖直平面上铅锤应力

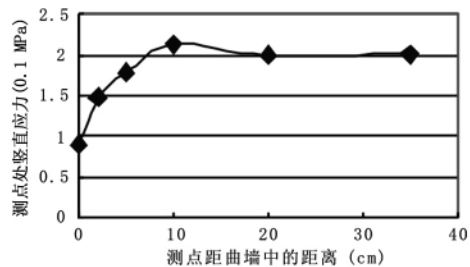


图16 开挖后边墙腰线水平面上铅锤应力

衬砌施作后隧道拱顶、边墙围岩中的水平和竖直应力如图 17~20 所示。

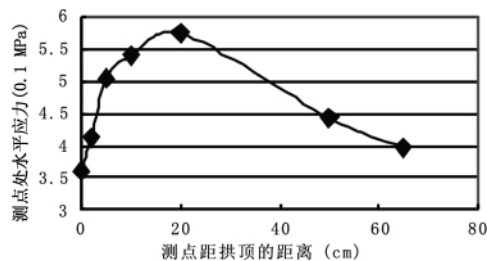


图 17 衬砌后拱顶竖直平面上水平应力

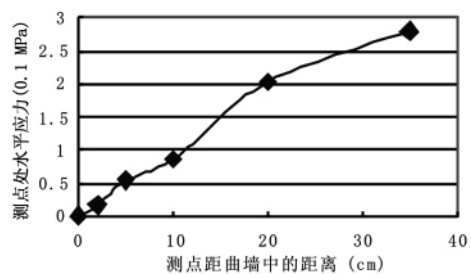


图 18 衬砌后边墙腰线水平面上水平应力

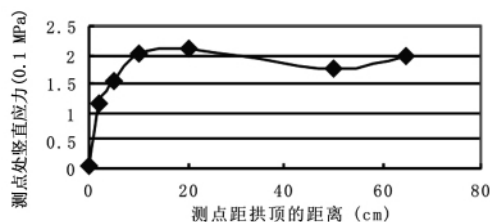


图 19 衬砌后拱顶竖直平面上铅锤应力

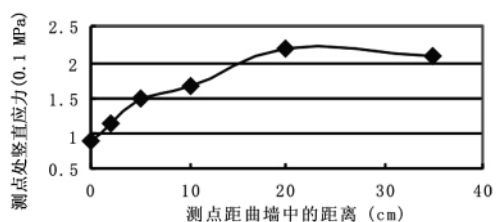


图 20 衬砌后边墙腰线水平面上铅锤应力

表 3 隧道衬砌前后洞周附近测点应力 (0.1 MPa)

			拱顶	底板	边墙腰线	拱肩
衬砌前	0 cm 处	σ_x	6.42	5.17	0.01	0.09
		σ_y	0.00	0.00	0.90	1.55
	2 cm 处	σ_x	6.09	5.54	0.20	2.23
		σ_y	1.67	1.42	1.47	1.79
衬砌后	0 cm 处	σ_x	3.61	1.11	0.01	0.00
		σ_y	0.02	0.01	0.01	0.02
	2 cm 处	σ_x	4.13	3.49	0.18	0.40
		σ_y	1.18	1.14	1.14	1.02

4.2 围岩应力分布规律

由图 5~12 和图 13~20 知: 当铅锤初始应力为水平初始应力的 2 倍时, 开挖后拱顶方向水平应力升至 0.3 MPa, 且在距离隧道内缘 3 倍洞径左右降至原岩应力 0.2 MPa, 而在隧道腰线水平面内的水平应力上升, 到 3 倍洞径以外应力已经很接近 0.2 MPa(水平原岩应力)。铅锤方向的应力, 拱顶依然是由 0 增长到 0.4 MPa(竖直原岩应力), 而边墙腰线平面内的铅锤向应力却由约 0.4 MPa 在一倍洞径处迅速增加至 0.46 MPa 左右, 然后又缓慢地降至 0.4 MPa。衬砌施作前所测的最大铅锤应力出现在拱肩处, 达到 0.476 MPa, 最大水平应力达到 0.286 MPa。

衬砌施作后, 应力分布有较大的变化。拱顶竖直平面内水平应力由 0.223 MPa 迅速增长到 0.249 MPa, 然后直线下降, 直到距隧道内缘 4 倍洞径处仍然没有减缓的趋势。边墙腰线水平面内的铅锤应力先由 0.967 MPa 逐渐增长, 在距隧道内缘 1~2 倍洞径左右上升到最大值, 随后逐渐趋向 0.4 MPa。

当铅锤初始应力为水平初始应力的 1/2 时, 开挖后拱顶竖直平面内水平应力由 0.642 MPa 逐渐降低, 在 3 倍洞径处就降至 0.4 MPa, 即达原岩应力。边墙腰线水平面内的水平应力逐渐上升到 0.4 MPa。在拱顶铅锤应力先由 0 急剧上升到 0.2 MPa 以上, 然后在 3 倍洞径以后缓慢降至原岩应力; 边墙腰线水平面内铅锤应力则在距隧道内缘 3 倍洞径左右处上升到原岩应力。

衬砌施作后, 围岩应力同样有比较大的变化。拱顶竖直平面内水平应力由 0.361 MPa 在一倍洞径的深度内上升到 0.575 MPa, 然后在距离隧道内缘 4 倍洞径左右又恢复到原岩应力。边墙腰线水平面内的水平应力由很小直线上升至原岩应力。拱顶、边墙围岩中的铅锤应力都是由较小值上升到接近原岩应力。

由以上观测结果可知,隧道在衬砌施作前应力升高区都分布在隧道周围 1 倍洞径之内,最大应力都高于原岩应力,其中尤以拱顶处的应力集中系数最大,达到 1.5,边墙腰线水平面上铅锤应力集中系数约为 1.2 左右. 由于软岩的岩性较差,在地应力较高的情况下很容易进入塑性,导致围岩应力重分布,使塑性区扩大、应力升高区深部转移,故难以出现很高的应力集中现象,最大应力值始终不会太高. 在隧道 3 倍洞径外由于开挖而造成的影响不明显,基本处于原岩应力状态.

隧道衬砌施作后,随着时间的发展,开挖后洞周应力进一步释放,衬砌也逐渐发挥出作用. 在隧道稳定后应力升高区又进一步向围岩深部发展,洞周的应力也进一步降低,应力升高区都分布在 1.5~2 倍洞径之间,应力集中系数仍以拱顶最大,达到 1.6. 但是,由于高应力区向深部发展,以竖直初始地应力为主的隧道拱顶的水平、铅锤应力在距隧道表面 3 倍洞径处仍与原岩应力有较大差距,这表明由于软岩体的弹性模量较小,隧道开挖后引起的径向压力松弛区范围较大,由于应力松弛导致的应力重分布使开挖隧道的影响深度大于较好岩体中开挖的隧道.

4.3 隧道衬砌破坏特征及关键部位分析

为了研究隧道围岩压力很大时的破坏特征,以便确定加固隧道围岩和设计衬砌的关键部位,在每个模型的试验最后阶段,对模型逐渐增大加压荷载(即增大初始应力),直至模型发生破坏.

当铅锤初始应力为水平应力的 2 倍时,衬砌开始破坏的位置发生在隧道边墙腰线附近,随着超载的增大,在拱肩至边墙底部范围内有两条贯穿的剪切破裂线相交成明显的楔形体,如图 21 所示,破坏形态属于典型的剪切破坏.

当铅锤初始应力为水平应力的 $1/2$ 时,衬砌剥落首先发生在拱肩到拱附近,并逐渐向拱肩和边墙发展,有片帮现象出现,如图 22 所示.

由以上分析可见,边墙腰线附近、拱肩、拱顶是比较关键的部位. 当铅锤初始应力为水平应力的 2 倍时,衬砌首先在直墙中点附近出现破坏,这是因为边墙中部的位移过大却得不到有效控制造成的. 如果在该部位通过打入锚杆等方式而使变形得到有效控制,那么边墙腰线部位围岩的松动区将会大大的减小,围岩的强度也不会严重降低,这样拱肩部位的剪应力也会相应减小,可见此时边墙中间部位是隧道的关键部位. 当铅锤初始应力为水平应力的 $1/2$ 时,衬砌破坏首先出现在拱肩到拱顶之间. 这是由拱顶方向上有较大的应力集中,且距离拱顶很近(不到一倍洞径)造成的. 因此拱顶到拱肩是隧道的关键部位. 此外隧道的边墙底部、拱肩处在开挖后应力就较大,易出现很大的应力集中现象,所以也须重视.



图 21 隧道剪切破坏状态

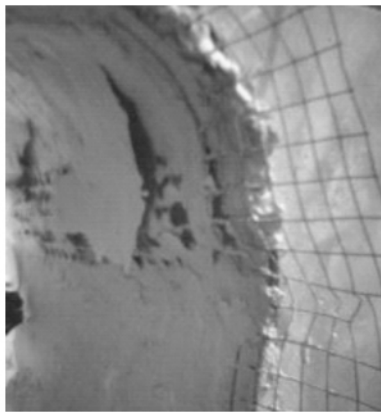


图 22 隧道拱肩部位片帮破坏情况

5 结论

(1) 采用相似材料模型试验研究隧道围岩压力是一种行之有效的研究方法,特别是对于宏观破坏现象的研究,结果更为直观、可信.

(2) 软岩隧道衬砌施作前,应力升高区在隧道周围 1 倍洞径之内,最大应力都要高于原岩应力. 因围岩

应力重分布而出现塑性区,高应力向深部转移,故难以出现很高的应力集中现象,最大应力值始终不会太高,应力集中系数约为 1.2 ~ 1.5. 在隧道 3 倍洞径外开挖造成的影响不再明显,应力基本恢复到原岩应力状态. 隧道施作衬砌后,随着洞周围岩应力进一步释放,塑性区继续扩张,应力升高区也进一步向围岩深部发展,洞周的应力集中现象有所减小. 应力升高区都分布在 1.5 ~ 2 倍洞径之间.

(3) 受非静水应力场作用的隧道,当地应力水平足够高,而围岩性质较软弱时,最大位移方向将会与最大主应力方向正交,而不是与它平行.

(4) 在软岩隧道中,边墙中部、拱肩、拱顶是比较关键部位,应加强支护.

参考文献:

- [1] 王成平. 破碎围岩隧道的模拟试验研究 [J]. 杭州: 浙江大学, 2004. 1.
- [2] 何满潮. 软岩工程力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 5.
- [3] 张生华. 关键部位预加强支护控制技术应用 [J]. 包头钢铁学院学报, 2003, 22(4): 104 - 107.
- [4] 程 桦, 孙 钧, 吕 渊. 软弱围岩复合式隧道衬砌模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 162 - 170.
- [5] M. Vafarian. Analysis of soil behavior during excavation of shallow tunnel [J]. Geotechnical Engineering, 1991, 20(2): 257 - 262.
- [6] 李志业, 等. 大跨度公路隧道结构模型试验研究 [J]. 铁道学报, 1999, 18(3): 114 - 116.

Research on Model Test of Wall Rock Stress of Tunnel in Soft Rock

DIAO Xin - hong¹, LIU Shi - yu¹, GUAN Wei²

(1. East China Jiaotong University Key Laboratory of Road and Railway Engineering of Jiangxi Province;
2. China Nerin Engineering Co., Ltd. Nanchang 330013, China)

Abstract: Wall rock stress distribution of tunnel in soft rock is researched by means of similar material model test in this paper. The result indicates that the rising interval of the wall rock stress is in the area of one time span of the tunnel and the stress concentration factor is about 1.2 ~ 1.5. As plastic zone appear resulting from the wall rock stress re - distribution, the raising interval of stress move toward the deep - part of wall rock. After lining, along with the stress around the tunnel release, the plastic zone extends continuously. Rising interval of the stress also develops toward the deep - part of the wall rock and stress concentration is weakening around the tunnel. The side wall central section, the arch foots and the vault are key parts of the tunnel where should be strengthened to support.

Key words: tunnel in soft rock; wall rock stress; similar material model

(责任编辑: 王全金)