

深埋隧道三心拱洞室平面应变模型试验研究

赵 瑜^{1,2} 卢义玉² 陈 浩³

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆, 400045; 2. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制
工程教育部重点实验室, 重庆, 400044; 3. 中国科学院武汉岩土力学所, 武汉 43007)

摘要: 随着隧道的埋深增加, 地应力将进一步增加, 岩体变形的非线性效应进一步显现, 为研究深埋隧道围岩的受力变形特点, 以重庆市共和隧道为工程背景, 进行深埋隧道平面应变模型试验研究。自行研制了满足工程围岩抗压强度、弹性模量、抗拉强度、泊松比、内摩擦角等指标要求的相似材料, 应用内窥摄影技术, 全程跟踪了模型试验破坏的全过程, 采用“过程分析”的方法, 研究高应力条件下隧道关键部位的变形特征、裂纹演化特征。试验结果表明, 高应力条件下, 洞室围岩变形局部化现象严重, 变形发展呈现阶段性、延发性和不对称性; 初始围岩损伤是后期急剧破坏的诱因, 整个破坏过程可以分为: 裂纹局部扩展、裂纹急剧贯通、残余强度三个阶段; 已破坏岩体仍然具有承载能力, 其残余强度对围岩稳定性具有重要意义。

关键词: 深埋隧道; 模型试验; 平面应变; 三心拱

中图分类号: TU45 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X(2010)03-0068-07

A plane strain modeling study of a three-center arch for deep tunnels

Zhao Yu² Lu Yiyu² Chen Hao³

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Education Ministry's Key Lab for the Exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 43007, China)

Abstract: In order to study the geostress state and deformation characteristics of the surrounding rock of deep tunnels, a plane strain model test with the Gonghe tunnel project in Chongqing as the background was conducted. Physical model materials were produced to meet the requirements of model test in terms of uniaxial compressive strength, elasticity modulus, tensile strength, Poisson's ratio and internal friction angle. Observation of the deformation and crack development of key components was carried out by using the full inner spy photograph technology. The test results indicate that under high geostress, obvious deformation localization developed and the deformation evolution was in stages, time delay and asymmetrical. The initial damage was due to rapid lateral failure and the failure processes could be divided into three stages: crack local extension, crack fast coalescence and residual strength. The fractured rock mass still provided bearing capacity which was important to the stability of the surrounding rock.

Keywords: deep-buried tunnel; model test; plane strain; three-center arch

E-mail: zhyu1@126.com

引 言

深埋长隧和地下空间围岩的物理力学性质变动范围较大, 影响因素很多, 利用相似原理进行物理模型试验, 能避开数学和力学上的困难, 真实、全面、直

观、准确地反映隧道围岩变形直至失稳的演化规律, 为建立新的理论和数学模型提供依据^[1-3], 是研究和解决复杂环境下围岩失稳机理的有效工具之一。

许多学者通过模型试验来判断原型(模拟实体)上所发生的力学现象和应力-应变的变化规律, 成功的为岩土工程设计和施工方案的选择提供了依据。如: 蒋树屏等通过对某工程二车道公路隧道在 3 种不同围岩条件下的大型相似模型试验, 研究了二车道公路隧道围岩在隧道施工中的位移发展过程、隧道围岩最终位移及围岩的稳定性, 并对依托隧道工程施工进行了

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(40621463), 国家自然科学基金(50804060)

作者简介: 赵瑜, 博士, 副教授

收稿日期: 2008-11-06

指导^[4]。郭文兵等应用物理模型试验中的光弹性法,对软岩巷道围岩应力分布特点及位移特征进行了模拟研究^[5]。SepiD等运用二维模型试验与数值分析两种手段研究了隧道的稳定性^[6], Barton Nick等对节理岩体中的洞室稳定性作了物理模型试验,研究了支护结构与围岩的相互作用^[7], Brachman R W. 等进行了深埋小直径管道结构的响应试验^[8]。

本次试验以重庆共和隧道为依托工程,在中科院武汉岩土所设计的岩土工程大型真三轴物理模型试验机上展开了深埋长隧围岩体稳定性物理模型试验研究,模拟了深埋隧道的高地应力场,研制了满足依托工程围岩抗压强度、弹性模量、抗拉强度、泊松比和内摩擦角等指标的相似材料,进行了三心拱洞室平面应变模型试验,模拟了高应力条件下洞室开挖、围岩变形演化直至破裂失稳的全过程,研究了隧道关键部位的应力、变形发展特征和关键部位的裂纹演化特征。

1 工程背景

重庆共和隧道为双洞分修特长公路隧道,左洞全长 4779m,右洞全长 4745m,两洞轴线相距 20~23m,最大埋深 1000m,洞室断面为三心拱断面(图 1),最大埋深处为 II 类围岩段,隧道穿越地层为志留系上统罗惹坪组砂质页岩、页岩,局部夹粉砂岩。选取最大埋深段进行物理模拟,最大水平应力 29.86MPa,垂直应力为 27.0MPa。围岩主要力学参数为:弹性模量 27.3GPa,单轴抗拉强度 6.1MPa,泊松比 0.31,内聚力 9.56MPa,内摩擦角 33.7°;容重 27.5kN/m³。

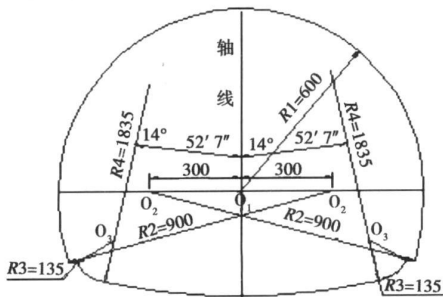


图 1 共和隧道 III 级围岩开挖断面 (mm)

Fig. 1 III grade rock excavation section of Gonghe tunnel

2 相似材料的研制

根据相似三定理^[1],相似材料在模型试验过程中所包含的各物理量或主要物理量应与原型相似,实践证明,正确选择模型材料往往是模型试验成功的关键问题^[6]。综合考虑试验的精度、制作模型的工作量和经济指标,寻找材料的难易程度、实验室现有的模型试验设

备、测试技术、试验技术和模拟范围等几个方面,经过对多个模型比例尺方案的综合分析比较,首先确定几何相似比为 55,然后确定应力相似比为 40。同时由于本次试验是在岩土工程大型真三轴模型试验机上进行深埋隧道的工程模拟,模型自身的重力与边界荷载相比小很多,也就是说,在进行物理模拟时,模型材料的自身容重的影响可以不予考虑,取容重相似比为 1。最后依据相似定理确定弹性模量相似比、强度相似比为 40。

到目前为止,国内外成功的配比为多种岩石的模拟材料,较好地模拟了岩石的物理力学特性,从而研究了围岩的变形状态、稳定条件及其与支护结构的相互作用^[9-11]。但由于岩体的复杂性,不同隧道工程围岩的力学性质差别较大,各研究单位的试验条件也不尽相同,在现有的条件下,不可能每一个要进行的相似模拟试验都能在现有的相似材料基础上找到自己所需要的配方,如果需要的相似材料与现有的相似材料有较大差距时,还需根据实际情况,进行相似材料的研制。因此本次试验在现有配比材料的基础上,改进了配方,采用白乳胶、环氧树脂、粉砂、铁粉、机油和石膏等配制了新的相似材料,对相似材料试件进行单轴压缩试验、抗拉强度试验和剪切试验测试。

采用 $\phi 50 \times 100$ mm 的圆柱体试件在土工单轴压缩仪上做抗压试验(图 2)时,把应变片粘贴在试件的两侧,量测试件的横向应变和轴向应变,利用 DF3818 应变测试数据自动采集系统采集数据。采集的数据经处理后生成试件应力应变曲线,从而求出试件的弹性模量、泊松比等物理力学指标。

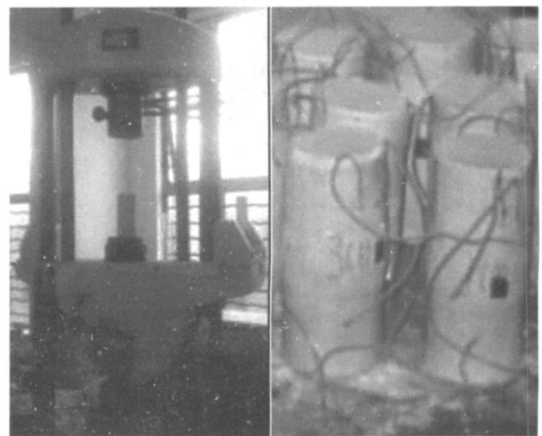


图 2 单轴压缩试验

Fig. 2 Compression test

经过 8 大组 96 小组的配比试验,得到了与示范工程岩石力学性质相一致的相似材料配比,所做的配比材料的物理力学指标,如:抗压强度、弹性模量、抗拉强度、泊松比和内摩擦角等,都很好的满足相似关系,

成功地模拟了依托工程围岩的物理力学性质。由模型材料制作的圆柱体小试件,在液压伺服控制试验机上测试得到的应力-应变关系曲线如图3所示。

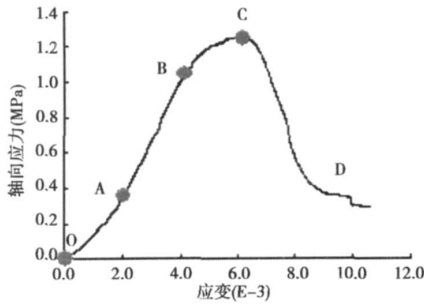


图3 模型试件轴向应力-应变关系曲线
Fig. 3 Stress-strain curve of specimen

A点对应的轴向应力为 0.38MPa, B点对应的轴向应力为 1.06MPa, C点对应的轴向应力为 1.29MPa。该曲线可分为四个阶段: OA段(曲线向上凹曲,为裂隙压密阶段), AB段(曲线接近于直线,为线弹性阶段), BC段(曲线向下弯曲,为应变硬化阶段), CD段(下降曲线,为应变软化阶段)。

3 平面应变模型试验

3.1 三心拱洞室的制作

根据三心拱断面原型的具体尺寸按几何相似比换算成在物理模型中的具体模拟尺寸,加工一个内空为物理模型模拟尺寸的三心拱木制模具(图4)。

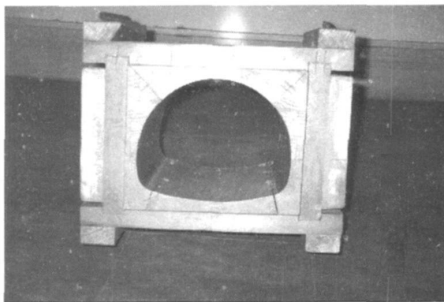
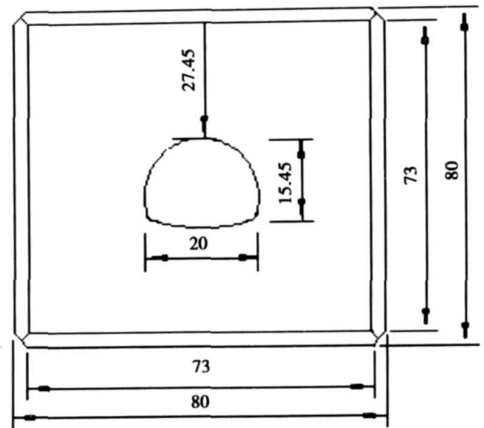


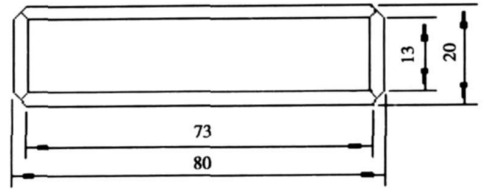
图4 物理模型三心拱模具
Fig. 4 Three-center arch physical model

把物理模型材料装入三心拱模具中预制成底面为三心拱形的柱体,待模具内材料充分胶结后拆开模具,在三心拱形柱体表面包裹一层涂有机油的纸张或塑料,将该柱体放在平躺的平面应变模型试验铁模框的中间位置,并加以固定,然后把搅拌好的物理模型材料迅速送入模框中浇注物理模型。

整个物理模型尺寸为 80mm×80mm×20mm,如图5所示。



(a) 正视图



(b) 侧视图

图5 平面应变模型试件尺寸标注(cm)
Fig. 5 Plane-strain model scale

3.2 应变测试

采用 BQ120-4BA应变片(标距 3.8mm)来测试应变,首先在模型表面的一侧沿洞室周边径向预先布置3条粘贴槽。粘贴槽宽 3mm,槽深 1.5mm,槽的底面初凝后要用抹光设备抹平并保证一定的光滑度,以便粘贴应变片。模型达初凝强度送恒温室烘干后,在各粘贴槽的底面画测试线,各测试线分别位于拱顶、拱腰和拱底。在每一条测试线上布设测试点,距离洞室边缘近的区域测试点布设比较密集,稍远区域测试点布设相对稀疏。各测试点粘贴应变片分别测试洞室围岩的径向应变与切向应变,应变片的布设见图6。

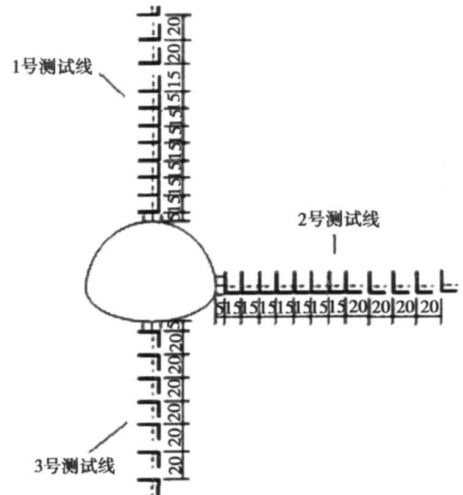


图6 平面应变模型试件应变片布置尺寸标注(mm)
Fig. 6 Plane-strain model strain rosette placement

3.3 荷载施加步骤

基于新的配比材料,进行平面应变模型试验(图 7),模型试件边界荷载在中科院武汉岩土所大型物理模型试验机上施加。X 方向为水平加载方向,对向加载;Y 方向下部固定,上部施加垂直荷载;Z 方向前后向均固定,通过与其紧贴的两块高强混凝土传力块对模型试件施加前后方向约束。从物理模型试件边界荷载条件与几何尺寸来看,基本符合平面应变条件。然而平面应变模型约束了洞室两端面 Z 向的变形,约束了端面的应力释放,但同时加剧了侧面、顶面和底面临空面的变形和应力释放,将使这些临空面更易进入塑性,相应地,三维模型在临空面不易进入塑性^[12],因此平面应变模型试验与洞室实际三维受力状态有一定的差异,关于平面应变和三维方法差异的进一步分析请见参考文献[12]。

物理模型边界水平荷载与垂直荷载同步施加,施加水平荷载与垂直荷载的速度分别为 20 kN/m^2 和 18.33 kN/m^2 由物理模型试验机的液压伺服控制。

当水平荷载施加到 120 kN 后,保持荷载不变开始进行三心拱洞室开挖,此时,对模型施加的荷载值等

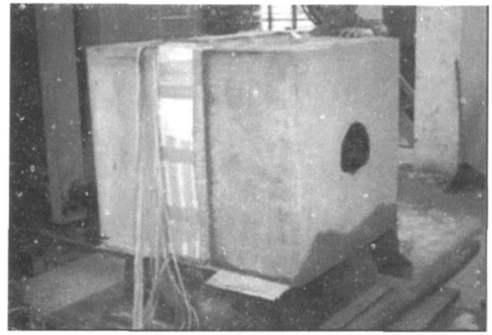


图 7 平面应变试件与传力板
Fig. 7 Plane strain model and dowe

于原岩应力模拟值。采用工程钻机先开挖圆形洞室,然后在模型内人工开挖出三心拱形状的洞室,由于在预制三心拱柱体表面包裹了涂有机油的纸张,钻完圆形洞室后可以很方便的在模型内人工开挖出三心拱形状的洞室。这种“先加载后开洞”的开挖方式同开挖隧道的实际情况相符。

开挖完成后,在物理模型试件的水平与垂直方向同步提高荷载。荷载施加步骤如表 1 所示。

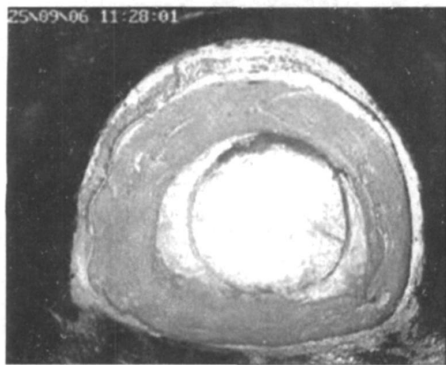
表 1 荷载施加步骤
Table 1 Loading scheme

步骤	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X 方向水平加载 P_X (kN)	60	90	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
Y 方向垂直加载 P_Y (kN)	55	82.5	110	119	129	138	146.7	153.8	165	174.2	183.3	192.5

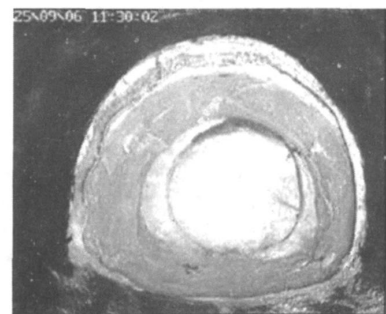
4 试验结果分析

4.1 高应力条件下三心拱洞室破坏演化过程研究

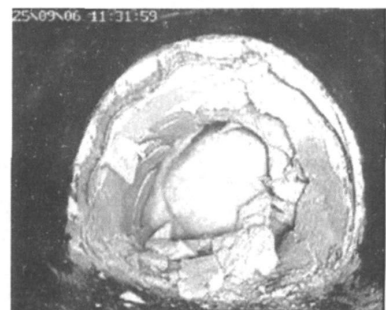
通过内窥摄影技术(洞室开挖后,在传力块孔内放置针孔摄影机进行实时内窥摄影,具体内容请见参考文献[13])观察洞室渐进破坏的发展情况,如图 8 所示。



(a) $P_X = 130 \text{ kN}$; $P_Y = 119 \text{ kN}$



(b) $P_X = 170 \text{ kN}$; $P_Y = 153.8 \text{ kN}$



(c) $P_X = 210 \text{ kN}$; $P_Y = 192.5 \text{ kN}$

图 8 洞室破坏演化过程

Fig. 8 Model failure process

洞室开挖后,保持水平与垂直加荷速率不变持续加载,水平荷载在 130 ~170 kN区间,如图 8(a), (b)所示,洞室在相对较长的时间内出现稳定,只有水平荷载施加到 160 kN时,左拱肩部开始有碎屑飞出,右拱脚部位局部屈服变形,出现长度很短、没有贯通的裂缝,其余大范围围岩仍保持整体稳定,微裂纹开始扩展,而后围岩又进入一个短暂稳定期,洞室以内空收敛为主,断面形状变化明显,裂缝局部范围扩展。

水平荷载在 170 ~210 kN区间,如图 8(b), (c)所示,破坏裂纹快速扩展到整个洞室内壁轮廓,并伴随岩层剥离现象,洞周岩体以条带状层层挤压剥落,不时有较大的碎屑、碎块脱落或弹出,内敛进一步发生。

当水平荷载施加到 210 kN洞室已完全破坏,试验机已无法给试件加力,并且出现荷载下滑现象,模型承受外界荷载的能力下降。

模型试验的水平加载面积与垂直加载面积均为 0.16m²,通过换算可得到模型材料圆柱体小试件单轴压缩试验应力-应变关系曲线上 A、B、C三点(图 3)在所对应的模型试验荷载水平分别为 60.8 kN、169.6 kN、206.4 kN。对比模型试件单轴试验应力-应变关系曲线与模型试验的三个具有明显区别的加载区间,发现平面应变模型试验 130 ~170 kN加载区间在模型试件单轴试验应力-应变曲线的 AB段内,170 ~210 kN区间与单轴试验应力-应变曲线的 BC段对应,水平荷载达到 210 kN后的区间近似对应于曲线的 CD段。

根据这种现象,初步将洞室的破坏过程大致分三个阶段:水平荷载(130 ~170 kN)为第一阶段(裂纹局部扩展);水平荷载(170 ~210 kN)为第二阶段(裂纹急剧贯通);第三阶段为试验机荷载从水平荷载 210 kN垂直荷载 192.5 kN开始下滑阶段(残余强度)。

一个很有意义的发现:模型试验完成后,去掉洞周的条带状残留物后,洞室周围 5 cm范围内(0.5倍洞径),全部呈现条带状剪切破坏,各剪切带之间有明显擦痕(图 9)。

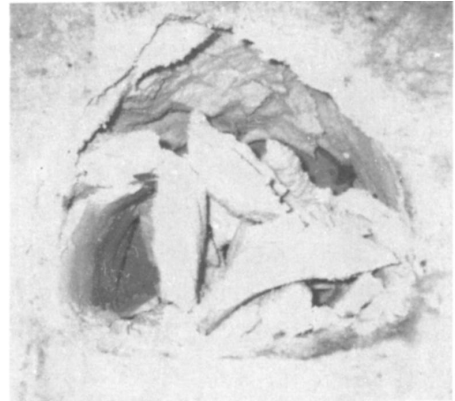


图 9 条带状剪切破坏图

Fig. 9 Band shear failure of surrounding rock

图 9所示的破坏一方面说明洞室破坏以剪切破坏为主;另一方面,表明在无支护情况下,这些条带状岩体的相互摩擦所决定的岩体残余强度就成了维持洞室稳定性的一个重要因素,它们由峰后岩体单元在模型中聚集而成,促使岩块产生了新的力学边界,使之接近松散块状介质的性质并决定了岩体的岩石压力及其残余强度的大小。因此,残余强度的存在不仅是保证深埋隧道在岩石压力很高条件下稳定性的重要原因,且与深部岩体工程响应密切相关。

4.2 高应力条件下三心拱洞室应力场演化过程研究

通过 BQ120-4BA应变片测得洞室开挖前后及超载试验条件下模型内三条测线各点应力场的演化如图 10 ~图 12所示。

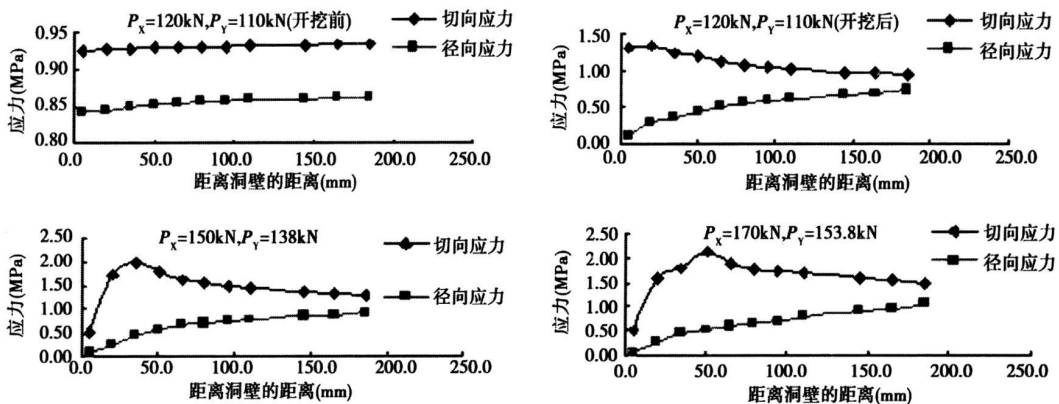


图 10 平面应变模型 1号测试线各点切向应力、径向应力与洞壁距离的关系

Fig. 10 Shear stress and radial stress vs. wall distance of 1# model

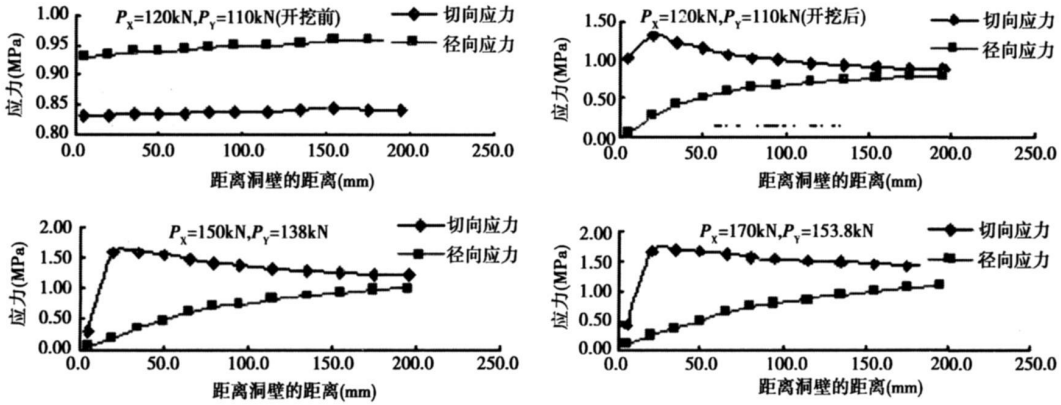


图 11 平面应变模型 2 号测试线各点切向应力、径向应力与洞壁距离的关系

Fig. 11 Shear stress and radial stress vs. wall distance of 2# model

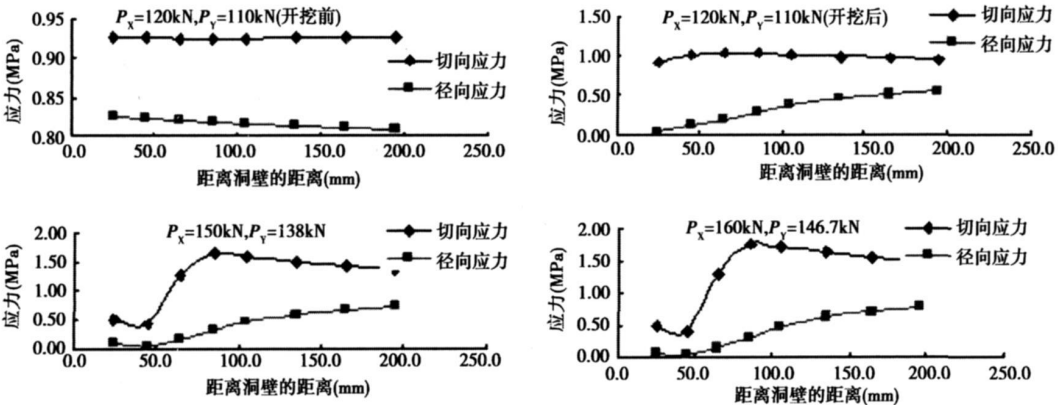


图 12 平面应变模型 3 号测试线各点切向应力、径向应力与洞壁距离的关系

Fig. 12 Shear stress and radial stress vs. wall distance of 3# model

洞室开挖前, 1、2、3号测试线各测点的切向应力与径向应力大致相等(3号测试线距离洞壁最近的一个测点在安装试件时损坏)。洞室开挖后, 各测试线所有测点的切向应力普遍大于径向应力(图 10、11、12), 1、3号测试线在加载初期表现出轻微应力集中(图 10、12), 而 2号测试线在加载初期就表现出较大程度的应力集中(图 11)。

各测试线切向应力距离洞壁越远, 其值越小, 大约距离洞壁约 200mm处, 切向应力趋于稳定; 相反, 径向应力距离洞壁越远, 其值越大, 也是距离洞壁 200mm处径向应力趋于稳定。继续施加荷载, 水平荷载到 150 kN时, 1号测试线和 2号测试线靠近洞壁的测试点切向应力开始下滑, 应力峰值后移, 表明该测试点围岩开始由弹性状态进入塑性软化状态。当荷载步施加到水平荷载 160 kN时, 3号测试线靠近洞壁的测试点切向应力也开始下滑, 此处围岩亦进入塑性软化状态。当荷载步施加到水平荷载 170 kN时, 3号测试线部分应变片读数溢出, 当荷载步施加到水平荷载 180 kN时, 1号测试线部分应变片读数溢出。

加载过程中, 拱顶、拱底的应力集中峰值后移速

度、最终后移幅度明显高于拱腰测点, 拱底切向应力峰值最终后移 80mm(图 12), 拱顶切向应力峰值最终后移 50mm(图 10), 拱腰应力峰值后移不到 25mm(图 11), 洞室的塑性区主要分布在拱顶和拱底部位。当荷载加至水平荷载 190 kN时, 2号测试线大部分应变片读数溢出, 洞室已发生较彻底的大变形破坏。

5 结论

通过以上分析, 可以得出以下几点结论:

(1) 高应力条件下, 地下洞室围岩变形具有阶段性、延发性特征, 初始围岩损伤是后期急剧破坏的诱因, 整个破坏过程可以分为: 裂纹局部扩展、裂纹急剧贯通、残余强度三个阶段。

(2) 深埋隧道围岩变形局部化现象严重, 不同空间和位置表现出不同的变形特征。本次模型试验中, 变形的起点在左拱肩和右拱脚部位, 然后扩展至整个洞室, 洞室变形发展表现出不对称性。顶部、底部变形充分发展, 顶部变形影响范围约为 5.0 m, 底部变形影响范围约为 6.5 m, 两邦变形影响范围约为 1.5 m。

整体变形影响范围约为 0.5 倍洞径左右。

(3)高地应力三心拱洞室开挖后,洞壁附近切向应力集中,距离洞壁越远,其值越小,径向应力距离洞壁越远,其值越大,距离洞室轴线 2 倍洞径距离处,切向应力与径向应力均趋于稳定;当水平荷载大于垂直荷载时,拱顶、拱底的应力集中峰值后移速度和最终后移明显高于拱腰测点,根据峰值后移的范围可大概判断洞室的塑性区主要分布在拱顶和拱底部位。

(4)在浅埋隧道开挖中,围岩破坏以脆性为主,通常没有或仅有少量的永久变形或塑性变形,破坏岩体不具备承载能力。而在深埋条件下,围岩多处于峰后状态,围岩在破坏时已发生了较大的剪切变形。本次试验中洞壁呈条带状剥落,但破坏的岩体仍然具有承载能力,各个条带之间相互摩擦就决定了残余强度的大小,残余强度的存在是保证深埋隧道在高应力条件下稳定性的重要原因。

感谢:物理模型试验得到中科院武汉岩土力学所白世伟研究员、杨春和研究员的指导!

参 考 文 献

[1] 李晓红,卢义玉,康勇,等.岩石力学实验模拟技术[M].北京:科学出版社,2007:3-72

[2] 林韵梅.实验岩石力学[M].北京:煤炭工业出版社,1984:3-94

[3] 李鸿昌.矿山压力的相似模拟试验[M].徐州:中国矿业大学出版社,1993:3-53

[4] 蒋树屏,黄伦海,宋从军.利用相似模拟方法研究公路隧道施工力学形态[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):662-666(Jiang Shuping, Huang Lunhai, Song Congjun. Physical simulation analysis on construction mechanics behavior of road tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 662-666 (in Chinese))

[5] 郭文兵,李楠,王有凯.软岩巷道围岩应力分布规律光弹性模拟实验研究[J].煤炭学报,2002,27(6):596-600

(Guo Wenbing, Li Nan, Wang Youkai. The photoelastic experiment simulating study on the law of stress distribution of the surrounding rock of soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(6): 596-600 (in Chinese))

[6] Stepić, Cividini A. A Physical and numerical investigation on the stability of shallow tunnels in strain softening media[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 37(4): 277-298

[7] Baron N. Effects of rock mass deformation on tunnel performance in seismic regions[J]. Publikasjon Norges Geotekniske Institutt 1986 (162): 1-11

[8] Bradman R W, J Moore II, Rowe R K. The performance of a laboratory facility for evaluating the structural response of small diameter buried pipes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(2): 260-275

[9] 左保成,陈从新,刘才华,等.相似材料试验研究[J].岩土力学,2004,25(11):1805-1808(Zuo Baocheng, Chen Congxin, Liu Caihua, et al. Research on similar material of slope simulation experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1805-1808 (in Chinese))

[10] 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 Hanpeng, Li Shucai, Zhang Qiangyong, et al. Development of a new geomechanical similmaterial[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1842-1847 (in Chinese))

[11] Kim SH, Burd H J, Milligan W E. Model testing of closely spaced tunnels in clay[J]. Geotechnique, 1998, 48(3): 375-388

[12] 周颖,张小玉.平面应变和三维方法分析洞室开挖问题的探讨[J].广州大学学报,2001,15(8):7-10(Zhou Ying, Zhang Xiaoyu. Excavation analysis and research to underground caves[J]. Journal of Guangzhou University, 2001, 15(8): 7-10 (in Chinese))

[13] 赵瑜.深埋隧道围岩系统稳定性及非线性动力学特性研究[D].重庆:重庆大学,2007:31-43

赵瑜(1978—)男,博士,副教授。主要从事地下工程研究。

卢义玉(1972—)男,博士,教授。主要从事高压水射流理论及应用、隧道灾害控制等研究。

陈浩(1981—)男,博士,助理研究员。主要从事岩土工程研究。