

# 巷道围岩卸荷变形特性的影响研究

Study on the influence of roadway surrounding rock deformation characteristics during unloading

李大路, 冯世开, 王 飞(中冀建勘集团有限公司, 河北 石家庄 050200)

**摘要:**随着岩石巷道(隧道)工程面临的地应力量级越来越大,巷道的稳定与维护越来越困难,对围岩卸荷变形特性的认识提出了更高的要求,掌握岩石和围岩在巷道(隧道)开挖卸荷条件下的变形和破坏机制至关重要。针对于此,本文基于三轴试验系统,用有机玻璃模拟天然岩体二次应力状态的弹性阶段,探明巷道围岩在弹性阶段的卸荷对围岩二次应力状态的影响。并利用开挖卸载条件下天然岩体弹性变形理论求解试件的变形,与试验结果对比。研究表明试验过程中有机玻璃试件只发生弹性变形,中间部位变形大于端部位置变形;靠近隧洞壁处的围岩变形越大,试件外侧变形小于内侧变形;理论变形值与试验变形值匹配较好。

**关键词:**天然岩体;三轴试验系统;开挖卸荷;切向应变

**中图分类号:** TD263      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0064-05

**Abstract:** With the increasing geostress level faced by rock roadway (tunnel) engineering, the stability and maintenance of roadway are becoming a bigger challenge, and higher requirements are put forward for the understanding of unloading deformation characteristics of surrounding rock. It is necessary to master the deformation and failure mechanism of rock and surrounding rock under roadway (tunnel) excavation and unloading conditions. In view of this, based on the triaxial test system, polymethyl methacrylate is taken as a specimen to simulate the elastic stage of natural rock mass under secondary stress state, and explore the influence of roadway surrounding rock unloading in the elastic stage on the secondary stress state. The deformation of the specimen is solved by using the elastic deformation theory of natural rock mass under the condition of excavation and unloading, and compared with the test results. The results show that only elastic deformation occurs to the specimen during the test, and the deformation in the middle part is greater than that in the end; the larger the deformation of the surrounding rock near the tunnel wall, the less the deformation of the outer side of the specimen is than that of the inner side; the theoretical deformation value matches well with the experimental deformation value.

**Key words:** natural rock mass; triaxial test system; excavation unloading; tangential strain

## 1 前言

随着地下工程的迅速发展,岩土工程问题变得愈加复杂,交通、隧道等工程灾害频发,尤其是隧道开挖工程。对隧道开挖后围岩的应力分布、变形规律及破坏机理等问题的研究不足是导致工程灾害的主要原因之一。关于隧道围岩开挖问题已成为当前的研究热点之一。

针对围岩开挖卸荷的问题,众多学者开展了一系列的研究。李树忱等<sup>[1]</sup>基于 Hamilton 时域变分原理,采用 Duhamel 积分求解了围岩开挖卸载的解析解,并研究了围岩开挖后的应力应变关系。为研究

隧道开挖时开挖边界上初始应力场动态卸荷效应,严鹏等<sup>[2]</sup>获得了初始地应力动态卸载应力场解析解。张文举等<sup>[3]</sup>通过理论分析研究了深埋隧道开挖卸荷引起的围岩开裂,探讨了深埋隧洞开挖卸荷引起的围岩开裂特征及影响因素。为研究材料尺寸对混凝土试样的强度的影响,A. S. Elkadi 等<sup>[4]</sup>对不同内径比孔道试样进行试验,研究表明材料尺寸对试样有显著的影响,材料强度随试样尺寸的增大而减小。H. Lee 等<sup>[5]</sup>通过一系列厚壁圆筒试验建立了泥岩在主应力空间的屈服面,研究了应力路径对试样的影响。M. I. Alsayed 等<sup>[6]</sup>通过砂岩试样进行单轴、双轴、三轴和多轴压缩试验,结果表明应力路径对岩石的强度有显著的影响。V Labiouse 等<sup>[7-8]</sup>通过对降低厚壁空心圆柱试样来模拟隧道的开挖,结果表明试样相对于层面的方向取决于空心圆柱体的变形。张后全和陈景涛等<sup>[9-11]</sup>通过进行厚壁圆筒多轴应力试验模拟地下隧道开挖,对试样内壁、外壁

[作者简介] 李大路(1988-),男,汉族,吉林省公主岭市人,工程师,从事岩土施工工作。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(71573274)

[引用格式] 李大路,冯世开,王飞. 巷道围岩卸荷变形特性的影响研究[J]. 中国矿山工程,2021,50(6):64-68.

和轴线方向先施加荷载,再对内壁和外壁进行卸载,研究结果表明试验中试样主要在环向发生破坏。

因此,基于三轴试验系统(LDCTTS)建立围岩开挖卸荷模型试验系统,基于有机玻璃弹塑性好的特点制成小型围岩试件,在弹性阶段对试件进行开挖卸荷过程试验。同时基于开挖卸载条件下天然岩体弹性变形特征理论获得了试件变形的解析解,并与试验结果进行对比,验证了本试验系统和试验方法的可行性。

## 2 试验设备及试样过程

### 2.1 试验设备

本文使用的试验设备为英国GDS公司的三轴试验系统。该三轴试验系统可运行静三轴、动三轴、松弛试验、蠕变试验等岩石力学试验。该三轴试验系统最大轴向加载能力为3500 kN,最大围压为150 MPa,具有位移控制和应力控制两种加载方式。该三轴试验系统核心装置为加卸载腔,可用于模拟围岩试件的开挖卸荷过程。

### 2.2 试样制备及应变片布置

有机玻璃作为一种具有良好重复性的弹塑性材料,在动荷载下的力学行为与天然岩体材料相似<sup>[12]</sup>。因此本文选用有机玻璃来作为试验试件。将有机玻璃加工成高30 cm、内径0.1 m、外径0.2 m的试件以模拟围岩试件。将应变片贴在试件上,随后装载在道围岩试件加、卸载腔内。在试件两侧及内部布置应变片,具体如图1所示。



图1 测试应变片位置

### 2.3 试样加载

本文只在弹性阶段内对有机玻璃围岩试件进行卸载试验。试验中原岩应力设为30 MPa。图2所示为试件加卸载路径,其中 $P_0$ 为外压、 $P_1$ 为内压、 $P_2$ 为轴压。实验具体步骤为:

(1)对有机玻璃试件施加初始地应力,即图中O点到C点路径(此阶段三个方向应力值相等)。试验中设置初始地应力为30 MPa。实验采用应力控制作为加载方式,位移监测作为监测方式。为避免压力锅大导致液压油串腔,首先将 $P_2$ 加卸到2 MPa(图中O点到A点路径)。随后用位移控制将三个方向应力加载到30 MPa, $P_0 = P_1 = P_2 = 30$  MPa,加载过程中保持恒定加载速度为0.05 mm/min(图中B点到C点路径)。

(2)维持 $P_0 = P_1 = P_2 = 30$  MPa的状态5 min。

(3)继续保持 $P_0 = P_2 = 30$  MPa,采用应力控制方式,将内压 $P_1$ 以0.25 MPa/s的速度卸载至0 MPa(图中C点到D点路径)。

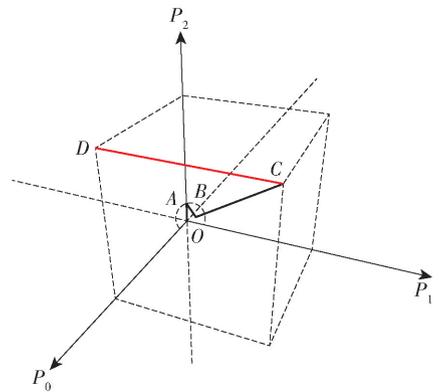


图2 试件加卸载路径

## 3 天然岩体的切向和轴向变形规律

本文选用有机玻璃模拟天然岩体二次应力状态的弹性阶段。图3所示为试件2号测点切向应变的变化曲线,选择2号点的原因是其处于试件中间位置,端面对其几乎无影响,实验所获得的结果更加贴合实际。如图所示,在整个实验过程中,有机玻璃试件切向应变变化过程可划分为1~5阶段。第1阶段(A段)为加载过程,该过程中,测点切向应变缓慢增大。加载到一定值后,即为第2阶段(B段),该阶段压力保持定值,以模拟开挖前岩体的原岩应力阶段。保持一段时间的加载,到卸荷阶段,即第3阶段(C段)。保持一段时间的卸荷状态,即第4阶段(D段)。对有机玻璃试件再次进行加载,即第5阶段(E段)。图中可以看出,第5阶段稳定后的切向应变和第2阶段的切向应变值相等,证明了卸载后的试件会恢复原来的变形。进一步观察整个试验过程中,测点内侧切向应变更大,可见有机玻璃试件在试验过程中是向内扩张的。

为了模拟隧道开挖卸载过程,试验中只需分析

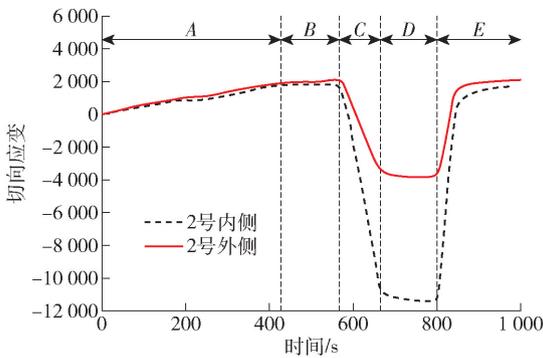


图3 2号测点切向应变的变化曲线图

卸载过程的天然岩体变形,即图3中所对应的第2、3、4阶段。将第2和3阶段切向应变减去第2阶段切向应变,即得到了天然岩体因开挖卸载导致的切向应变(第2阶段切向应变为初始应变)。

图4所示为试件卸载过程中所有4个测点内侧切向应变随内压外压差值的变化曲线。从图中可以看出,试件4个测点内侧切向应变随着内外压差值呈线性增大。可见,试件在卸载过程中只发生了弹性变形。2号3号测点的变形值基本相等,约为1号测点变形值的1.3倍,约为4号测点变形值的2倍。可见,中间两测点的应变远大于端部两测点的应变,这是因为端部位置处的岩体被限制了变形,中间位置的岩体变形规律更贴合实际情况。

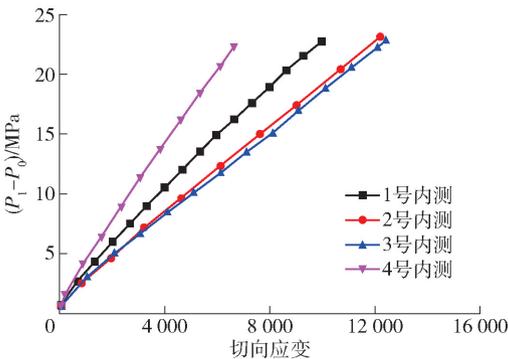


图4 所有测点内侧切向应变随内压外压差值的变化曲线

图5所示为1、2、3号测点轴线应变的变化曲线。从图中看出,卸载过程中,1号测点外侧和3号测点内侧轴向应变相比其他测点均很小。3号测点内侧轴向应变是唯一受拉状态,且自卸载起始点起呈线性增大至卸载结束点,随后趋于稳定。1号内测、2号外侧、3号外侧轴线应变均呈受压状态,在卸载过程中呈线性增大,轴线应变值在卸载结束后呈稳定状态。4号测点因测试中处于异常状态,本次研究中并未采用。

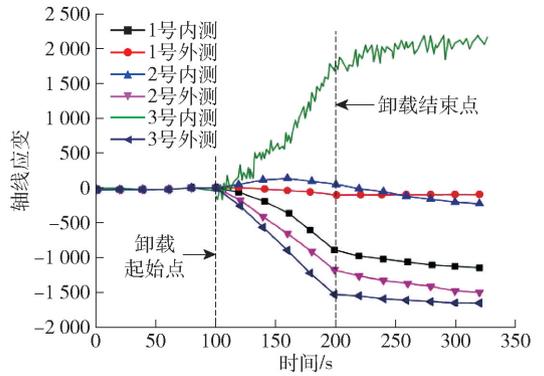


图5 1~3号测点两侧轴向应变变化曲线

1~4号测点两侧切向应变在卸载过程中的变化曲线如图6所示。从图中可以看出,卸载过程中,所以测点的两侧切向应变均为负值(呈受压状态),且自卸载起始点其线性增大至卸载结束点,随着卸载过程结束处于稳定状态。所有测点的外侧应变值均小于其对应的内侧应变值。这是因为试件在卸载时,其产生径向变形,且变形随着距离洞壁越近而增大。图6观察到了与图3同样的现象:端部测点的变形均大于内部测点的变形。

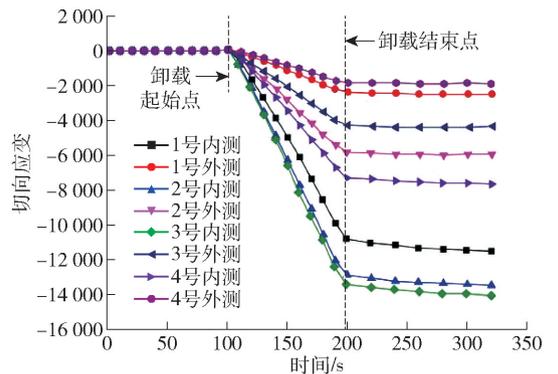


图6 1~4号测点两侧切向应变变化曲线

## 4 开挖卸载条件下天然岩体弹性变形特征的理论计算

### 4.1 理论公式推导

徐秉业等<sup>[13]</sup>人给出了弹性状态下均压厚壁圆筒解析解,应变可由式(1)得出:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \left[ (1 + \nu) \frac{a^2 b^2 (P_2 - P_1)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + (1 - \nu) \frac{a^2 P_1 - b^2 P_2}{b^2 - a^2} \right]$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \left[ (1 + \nu) \frac{a^2 b^2 (P_2 - P_1)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + (1 - \nu) \right]$$

$$\frac{a^2 P_1 - b^2 P_2}{b^2 - a^2} \quad (1)$$

依据本文的试验条件,由于初始应力的存在,卸载试验开始前保持  $P_1 = P_2$ , 带入到式(1)可得:

$$\varepsilon_{r,0} = \varepsilon_{\theta,0} = \frac{1}{E} \left[ (1 - \nu) \frac{a^2 P_1 - b^2 P_2}{b^2 - a^2} \right] \quad (2)$$

将式(1)减去式(2),可得均压厚壁圆筒开挖后应变为

$$\Delta \varepsilon_r = \varepsilon_r - \varepsilon_{r,0} = \frac{1}{E} \left[ (1 + \nu) \frac{a^2 b^2 (P_2 - P_1)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} \right]$$

$$\Delta \varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta} - \varepsilon_{\theta,0} = \frac{1}{E} \left[ - (1 + \nu) \frac{a^2 b^2 (P_2 - P_1)}{b^2 - a^2} \right]$$

$$\frac{1}{r^2} \quad (3)$$

- 式中: $a$ ——内径;
- $b$ ——外径;
- $E$ ——弹性模量;
- $\nu$ ——泊松比;
- $r$ ——同样为外径;
- $P_0$ ——外压;
- $P_1$ ——内压;
- $P_2$ ——轴压。

由上述推导可知,隧道围岩因开挖引起的径向应变为拉应变,切向应变为压应变,其互为相反数。说明隧道围岩在弹性状态下当侧压力系数为1时,隧道围岩体积保持不变。

由第2节可知,试件在卸载试验过程中,其切向应变处于受压状态,由公式(3)可知,试验过程中试件径向应变处于受拉状态,而切向应变绝对值与其相等,可知理论与试验结果一致。本节验证围岩开挖过程中试件切向应变试验值是否与理论值相符。试验中所选试件参数见表1(其中试件外压  $P_0 = 30$  MPa 即为式(3)中  $P_2$ , 内压  $P_1$  从 30 MPa 开始卸除)。将  $a = 0.1$  m,  $r = b = 0.2$  m,  $E = 2\,712$  MPa,  $\nu = 0.36$  带入式(3)可得卸载过程中不同时刻试件两侧切向应变值。

### 4.2 试验值与理论值对比

因2号测点位于试件中部不受端部影响,本节选用2号测点结果进行对比分析。表1给出了2号测点两侧切向应变的试验值和理论值。

图7所示为2号测点切向应变随内外压差值的变化曲线,分别给出了理论结果和试验结果。图中可以看出,2号测点两侧切向应变均随着内压值的

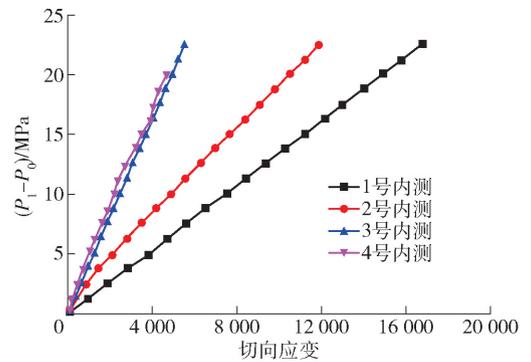


图7 2号测点两侧切向应变试验值和理论值对比曲线

表1 2号测点切向应变理论与试验值

外压 $P_0$ / MPa	内压 $P_1$ / MPa	内测切向 应变 理论值	内测切向 应变 试验值	外测切向 应变 理论值	外测切向 应变 试验值
30	30	0	0	0	0
30	29	-747	-199	-246	-72
30	28	-1 495	597	-492	-422
30	27	-2 242	-1 068	-737	-528
30	26	-2 989	-1 578	-983	-806
30	25	-3 736	-2 111	-1 229	-1 036
30	24	-4 484	-2 656	-1 475	-1 275
30	23	-5 231	-3 207	-1 721	-1 360
30	22	-5 978	-3 752	-1 967	-1 688
30	21	-6 726	-4 298	-2 212	-1 983
30	20	-7 473	-4 855	-2 458	-2 230
30	19	-8 220	-5 418	-2 704	-2 259
30	18	-8 968	-5 970	-2 950	-2 692
30	17	-9 715	-6 532	-3 196	-2 957
30	16	-10 462	-7 100	-3 441	-3 205
30	15	-11 209	-7 668	-3 687	-3 599
30	14	-11 957	-8 221	-3 933	-3 585
30	13	-12 704	-8 788	-4 179	-4 153
30	12	-13 451	-9 363	-4 425	-4 215
30	11	-14 199	-9 931	-4 671	-4 611
30	10	-14 946	-10 492	-4 916	-4 742
30	9	-15 693	-11 062	-5 162	-4 897
30	8	-16 441	-11 630	-5 408	-5 184
30	7	-17 188	-12 202	-5 654	-5 505
30	6	-17 940	-12 732	-5 899	-5 744
30	5	-18 682	-13 263	-6 145	-5 983
30	4	-19 429	-13 793	-6 391	-6 223
30	3	-20 177	-14 324	-6 637	-6 462
30	2	-20 924	-14 854	-6 883	-6 701
30	1	-21 671	-15 385	-7 128	-6 941

增大而线性增大,且均处于受压状态。两种方法得到的内侧切向应变也均大于外侧切向应变。测点外侧切向应变理论值比外侧切向应变试验值大约3%,理论结果均大于试验结果。上述结果很好的证明试验方法的正确性。

## 5 结论

本文基于三轴试验系统,用有机玻璃模拟天然岩体二次应力状态的弹性阶段。同时基于开挖卸载条件下天然岩体弹性变形特征理论求解有机玻璃试件卸载的变形,并与试验结果进行对比。得到以下结论:

(1) 试验过程中,有机玻璃试件切向应变随内外压差呈线性增大,说明试件只发生了弹性变形。试件中间部位变形大于端部位置变形。

(2) 试验过程中,试件内侧切向应变大于外侧切向应变,试件变形随着距洞壁距离变小而增大。

(3) 基于弹性状态下均压厚壁圆筒解析解,求出隧道围岩因开挖引起的变形。

### [参考文献]

- [1] 李树忱,钱七虎,张敦福,等. 深埋隧道开挖过程动态及破裂形态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10):2104-2112.
- [2] 严鹏,卢文波,陈明,等. 隧洞开挖过程初始地应力动态卸载效应研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12):1888-1894.
- [3] 张文举,卢文波,杨建华. 深埋隧洞开挖卸荷引起的围岩开裂特征及影响因素[J]. 岩土力学, 2013, 34(9):2690-2698.
- [4] ELILADI A S, VANMIER J G M. Experimental investigation of size effect in concrete fracture under multiaxial compression [J]. International Journal of

Fracture, 2006, 140(1/4):55-71.

- [5] LEE D H, JUANG C H, LIN H M, et al. Mechanical behavior of Tien-Liao mudstone in hollow cylinder tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3):744-756.
- [6] ALSAYED M I. Utilising the Hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 2002, 39(3):355-366.
- [7] 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.
- [8] LABIOUSE V, SAUTHIER C, YOU S. Hollow cylinder simulation experiments of galleries in boom clay formation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(1):53-55.
- [9] 张后全,刘红岗,贺水年,等. 岩石厚壁圆筒三向压缩下的卸荷试验与岩石强度破坏[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(7):800-805.
- [10] 张后全. 岩石厚壁圆筒高压卸载环状劈裂及其相关力学行为研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2010.
- [11] 陈景涛,冯夏庭. 高地应力下岩石的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8):1537-1543.
- [12] ROSSMAMTH H P, DAEHNKE A, KNASMILLNER R E K, et al. Fracture mechanics applications to drilling and blasting[J]. Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures, 1997, 20(11):1617-1636.
- [13] 徐秉业,刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京:清华大学出版社,1995.