

应用研究·非煤矿山·

开挖卸荷条件下巷道围岩卸载变形特性的模拟试验研究

Simulation and Experimental Study on Distortion Property of Wall Rocks Around Roadway Under Excavation Unloading Condition

史旭波, 王 飞, 孙娜科(中冀建勘集团有限公司, 河北 石家庄 050200)

摘要:隧道开挖过程中,围岩变形是影响隧道结构稳定性和施工使用安全的重要影响因素。基本此工程背景,通过三轴压缩试验与FLAC^{3D}建立数值分析模型分析天然砂岩在不同内径条件下和不同卸载状态时围岩结构的应变和破坏特征,对比分析两种试验方法的试件的变形特征,得到以下结论:在相同的试验条件下,试件的尺寸越大,试件的切向应变逐渐增大;瞬态卸载相较于缓慢卸载的应变值较大,缓慢卸载的卸载作用更加充分,数值模拟得到的切向应变值较三轴压缩试验较小,但两种试验条件下应变值的变化趋势基本相同。

关键词:数值模拟;三轴压缩;内径大小;切向应变;破坏特征

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2021)05-0018-05

Abstract: Distortion of wall rocks during tunnel excavation is a key factor influencing the stability of tunnel structure and the safety in tunnel construction and use. Against this background, a triaxial compression test and FLAC3D-based numerical modeling are carried out to analyze the strain and failure characteristics of natural sandstones under different inner diameters and different unloading states. By comparison of the distortion properties of the specimens in the two tests, the following conclusions are drawn: under the same test condition, the tangential strain of the specimens increases with their size; the strain value under transient unloading condition is larger than that under slow unloading condition; the unloading effect under slow unloading condition is more sufficient; the tangential strain value obtained in the numerical modeling is smaller than that from the triaxial compression test, but the variation trend of the strain value in the two tests is basically the same.

Key words: numerical modeling; triaxial compression; inner diameter; tangential strain; failure characteristics

1 前言

隧道结构开挖过程中,围岩结构的稳定性是目前工程中较为重要的研究对象,隧道(巷道)围岩结构的稳定性受到多重因素的影响,主要包括围岩结构的强度、地下水、隧洞大小、支护形式以及开挖方式等因素。目前已经有大量的学者对围岩结构卸载稳定性做了相关的研究。

对于围岩结构稳定性的研究主要是通过理论分析、缩尺试验、数值模拟等研究方法。张强勇等^[1]以淮南煤矿巷道为研究对象,对巷道开挖引起周围

围岩变形破坏机制进行了分析,分析洞形和洞室尺寸对围岩结构稳定性的影响;洛锋等^[2]利用数值模拟与缩尺试验相结合的方法分析了围岩结构的变形破坏特征;马天辉^[3]通过岩心取样的试验方法分析了围岩的变形破坏特征;严鹏等^[4]分析了钻爆法和TBM开挖对周围围岩结构损伤影响以及围岩结构应力释放特性进行了分析;谢理想等^[5]对深部岩体的开挖变形破坏机制以及演化特征进行了分析;戴峰^[6]以某水电站地下隧洞工程为研究对象,对隧洞开挖过程中结构的损伤特征进行了模拟研究;张树光等^[7]通过温度变化机制,分析了深部高温围岩条件下,围岩结构开挖对于高温围岩的影响机理;何满潮等^[8]通过室内试验分析了隧洞结构开挖围岩结构的脆性变形破坏特征,按照释放的能量特征对脆性破坏阶段进行划分。

[作者简介] 史旭波(1988-),男,汉族,河北省石家庄市元氏县,本科,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] 史旭波,王飞,孙娜科. 开挖卸荷条件下巷道围岩卸载变形特性的模拟试验研究[J]. 中国矿山工程,2021,50(5):18-22.

基于前人研究的基础,本研究以三轴压缩试验与运用 FLAC3D 建立数值分析模型,进行缩尺试验,分析不同内径条件下和不同卸载状态时围岩结构的应变和破坏特征。

本研究基于某巷道开挖工程,研究该巷道在不同开挖内径条件下,巷道周围围岩的受力和变形破坏特征,通过对比分析不同内径围岩的试样实验结果和数值模拟结果,分析得出巷道开挖的围岩卸载变形特性。

2 三轴试验研究

2.1 试验设备及试样制备

本试验所使用的试验设备为 GDS 三轴试验系统。该三轴试验系统主要是应用于土木工程领域,进行土工材料材料力学性能测试的仪器,在日常实验中,可以进行岩石材料的动、静三轴、蠕变试验以及松弛试验等试验研究。对于动三轴试验的试验研究,该试验系统主要通过加卸载腔的加载系统进行加载,可以模拟基岩结构内部的隧道、巷道工程的开挖,该试验研究系统对于岩石加载的最大围压为 150 MPa,加载的最大轴向压力为 3 500 kN,对于一般的工程项目研究具有很好的效果。

试样选取于巷道工程现场的岩体结构,岩体为强度较好的天然砂岩,将砂岩试样加工成直径 5 cm,高 10 cm 的圆柱体试样,通过对该标准试样进行加载破坏试验得到该岩样的强度指标分别为:单轴抗压强度为 48.0 MPa,内摩擦角为 29.0°,黏聚力为 12.0 MPa。得到岩样的强度指标值后,将砂岩试样加工成直径 20 cm,高 30 cm 的圆柱体试样,为了模拟巷道开挖内径对围岩结构的影响,将试样分成三组,分别将三组试样加工成内径为 15 cm、12.5 cm 以及 10 cm,共计制作 30 个试样,每个试验组 10 个试样,分别进行表 1 中的 6 种工况试验,每种工况试验采用 5 个试样并分别进行试验。对于每种工况 5 个相同的试验结果选取试验结果最为合理的进行分析,试样的应变片布置情况如图 1 所示。

2.2 试验方案设计

本研究的研究对象为不同开挖内径和不同卸载状态对试样的影响,为了研究以上影响因素的作用,采用 15 cm、12.5 cm 以及 10 cm 三种不同内径的试样分别进行瞬态卸载和缓慢卸载试验研究,试验方案见表 1,设原围岩结构的压力值为 20.0 MPa。

图 2 所示为试验试样初始应力状态下的受力

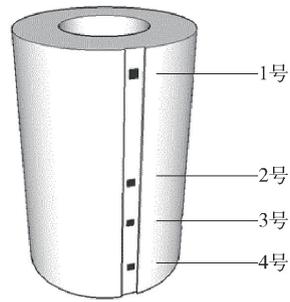


图 1 应变片布置图

图,在初始状态下,受到三个方向的作用力,分别为外向压力 P_0 、内部压力 P_1 、轴向压力 P_2 。

表 1 试验方案设计

试样编号	试验围压/MPa	试样内径	卸载速率/MPa·s ⁻¹
A-10	20.0	10.0	0.025
A-12.5	20.0	12.5	0.025
A-15	20.0	15.0	0.025
B-10	20.0	10.0	瞬态卸载
B-12.5	20.0	12.5	瞬态卸载
B-15	20.0	15.0	瞬态卸载

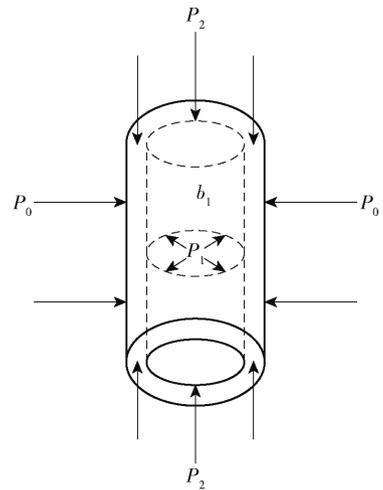


图 2 应力状态下的受力图

试验操作步骤如下:

(1) 设置初始压力为围岩初始状态下的压力,三个方向的压力值均为 20 MPa,即 $P_0 = P_1 = P_2 = 20$ MPa,使得试样受力为围岩结构的初始受力状态。

(2) 使得围岩初始状态下,即 $P_0 = P_1 = P_2 = 20$ MPa 时保持 10 min。

(3) 使得 $P_0 = P_2 = 20$ MPa 保持不变,释放 P_1 值的大小,模拟巷道开挖的应力释放,进行瞬态卸载和缓慢卸载试验研究。

(4) 在卸载试验完成后,使得试验后的状态继续保持 10 min,进而记录该状态下的应变值。

2.3 试验结果分析

对于试验试样的四个测点,2号测点位于试样的中部,对比1、2、4号测点可以有效减小边界效应的干扰,因而选取2号测点的实测数据进行研究。图3所示为不同内径条件下,各试样在瞬态卸载试验时2号测点内外两侧的切向应变随时间变化图。由试验结果分析可得,在瞬态卸载试验条件下,当开挖开始时,内外两侧的切向应变值出现骤然增加,呈直线状,但开挖完成后,切向应变值逐渐趋于稳定,对比图中的数据可得,试样开挖完成后,内侧的切向应变值均大于外侧的切向应变值,对于不同内径的试样,内径越大,试样的切向应变值越大。开挖内径为10 cm的条件下,在开挖初期,内测切向应力小于外侧,内测切向应变在开挖完成后逐渐增大,呈现出反弹的变化趋势,由此可以判断,内径为10 cm时,试样的变形为弹性变形。对于2号测点内侧切向应变,是随着内径增大而逐渐增大,这说明巷道内径越大,卸载时,周围围岩变形越大。因而,对于大内径的巷道需要进行相应的支护防止出现结构破坏。

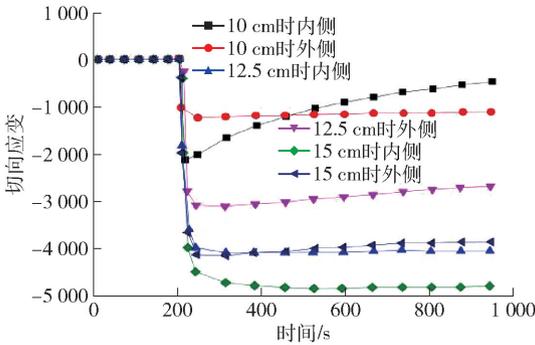


图3 瞬态卸载试验时2号测点切向应变值

图4所示为不同内径条件下,各试样在缓慢卸载试验时2号测点内外两侧的切向应变随时间变化图。与瞬态卸载试验对比,缓慢卸载试验切向应变值变化较为缓慢,且切向应变值相较于开挖卸载有

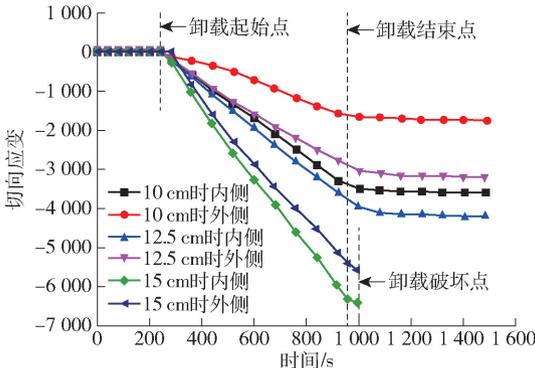


图4 缓慢卸载试验时2号测点切向应变值

滞后的效应,在缓慢卸载状态下,随着内径的逐渐增大,切向应变值逐渐增大,且2号测点外侧应变值大于内测,由于缓慢卸载实验条件下,试样应力得到充分释放,因而,卸载完成后2号测点切向应变值趋于稳定,由图中分析可得,当试件内径为15 cm时,在卸载完成后的60 s左右,监测仪器测得的应变值不显示,说明该状态下,试件发生破坏,而内径为10 cm、12.5 cm的试件均为发生破坏且瞬态卸载试验时内径为15 cm的试件也未发生破坏。对比分析可得较小内径时,缓慢卸载相较于瞬态卸载具有优势,但内径较大时,可以考虑瞬态卸载。

3 数值模拟研究

3.1 建立数值分析模型

对上面的试样建立数值分析模型如图5所示,建立的数值分析模型与上面的时间尺寸相同,均为外径20 cm,长30 cm,以及三种不同内径的模型结构,分别为10 cm、12.5 cm、15 cm,数值分析过程的试验方案与三轴压缩试验的实验方案相同,图6所示为初始状态下的加载受力图。模型采用摩尔-库伦强度理论,模型中的材料力学性能见表1。

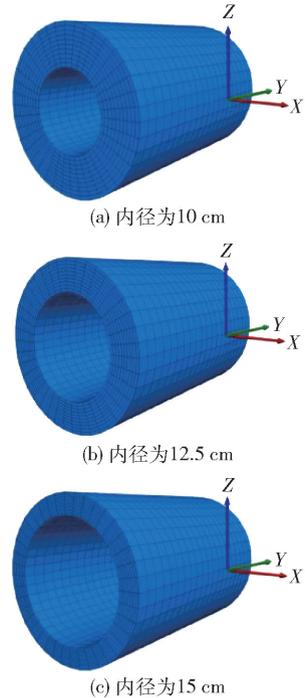


图5 模型示意图

表1 材料物理力学参数

参数名称	密度/ kg·m ⁻³	弹性模 型/GPa	抗拉强 度/MPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ MPa	泊松 比
参数值	2 300	3. 10	2. 60	30	12. 5	0. 26

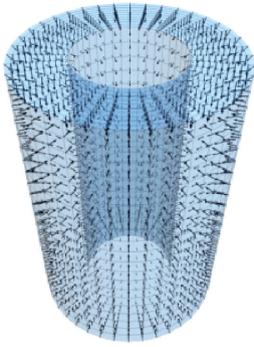
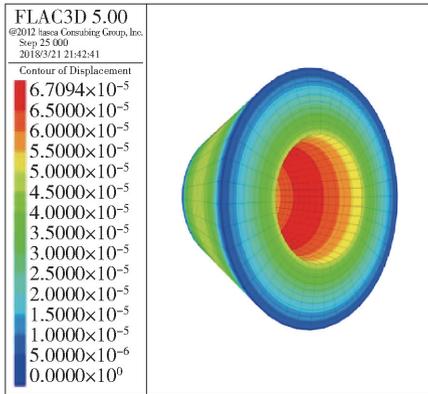


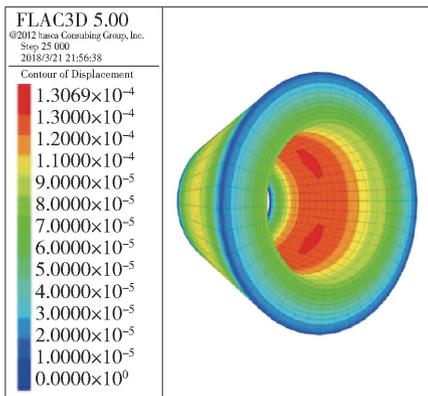
图6 初始应力加载示意图

3.2 数值模拟结果分析

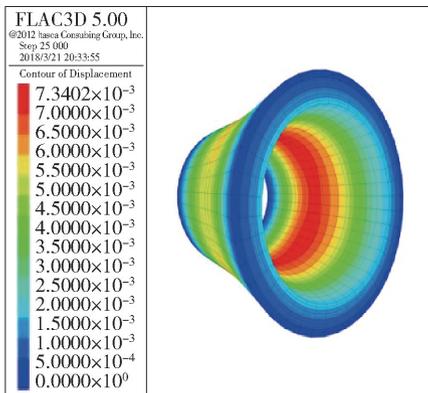
图7所示为瞬态卸载模拟试验时三种内径工况



(a) 内径10 cm



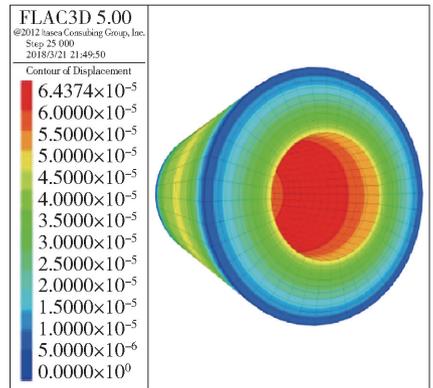
(b) 内径12.5 cm



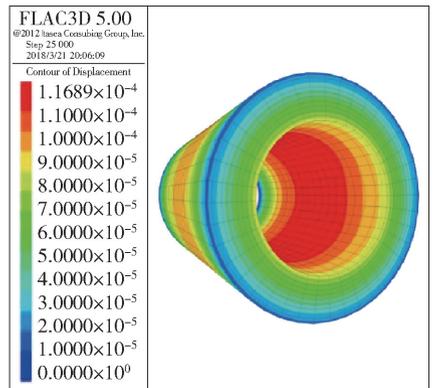
(c) 内径15 cm

图7 瞬态卸载下模型的位移云图

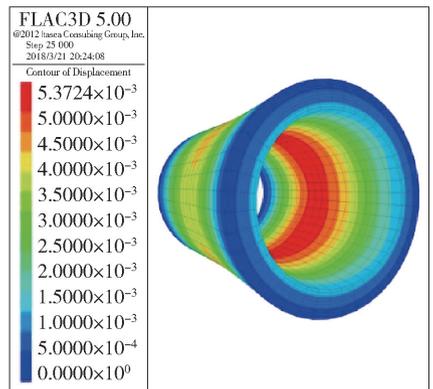
下的模型位移图,图8所示为缓慢卸载试验时三种内径工况下的模型位移图。所有工况条件下,最大位移发生在模型的中间位置,由中间向两端呈现出逐渐减小的变化趋势,在瞬态卸载和缓慢卸载两种条件下,模型的位移量随着内径的增幅大而逐渐增大,对比分析两种卸载状态,相同内径条件下瞬态卸载比缓慢卸载的位移大,而当模型的内径为15 cm时,两种卸载状态下的试件均被破坏。



(a) 内径10 cm



(b) 内径12.5 cm



(c) 内径15 cm

图8 缓慢卸载下模型的位移云图

图9所示为瞬态卸载模拟时中点切向应变值,由图形分析可得,对于监测点的切向应变,模型的内径越大,监测点的切向应变值越大,对比分析模拟结

果与试验结果,试验结果普遍大于模拟结果,这主要是由于模拟状况下由于有限元模拟的影响,很多条件都是为理想假定状态下的。但模拟结果与试验结果的切向应变值的变化规律均相同。

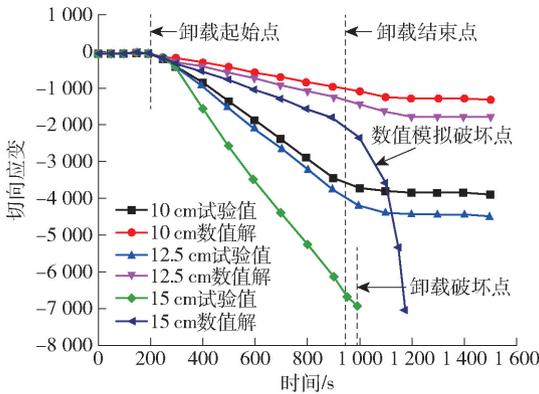


图9 缓慢卸载模拟时中点切向应变值

图10所示为缓慢卸载模拟时中点切向应变值,由图形分析可得,对于监测点的切向应变,与实验结果对比,模拟试样的应变变化与试验结果变化趋势基本相同,但存在微小差异,当内径为15 cm时模型出现破坏,这主要是由于数值模拟建立的模型与实际试件存在差别,试件试验受到切向应变后可以产生膨胀,而数值模拟在较大切向应变作用下只能产生破坏。

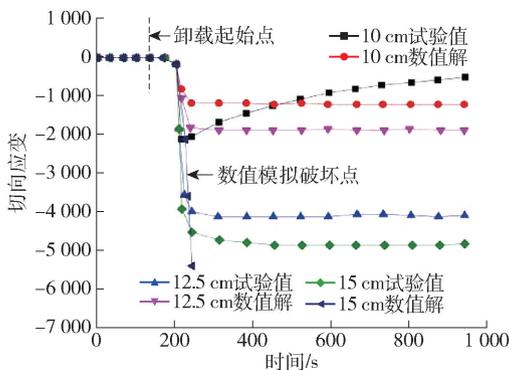


图10 瞬态卸载模拟时中点切向应变值

4 结论

本研究基于三轴压缩试验与FLAC3D建立数值

分析模型,分析了天然砂岩在不同内径条件下和不同卸载状态时围岩结构的应变和破坏特征,两种试验均采用相同的试样尺寸、试验方案,对比两种试验条件下的试验结果,主要得到以下结论:

(1)对于相同的试验条件下,两种卸载方式条件下的试件随着内径尺寸的变化规律基本相同,均是随着内径的增大,试件的切向应变逐渐增大

(2)对于不同种卸载条件,瞬态卸载相较于缓慢卸载,缓慢卸载的卸载作用更加充分。

(3)试验结果相较于模拟结果较大,但两种试验的变化趋势基本相同。

[参考文献]

- [1] 张强勇,张绪涛,向文,等.不同洞形与加载方式对深部岩体分区破裂影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(8):1564-1571.
- [2] 洛锋,杨本生,孙利辉,等.高垂直应力状态下巷道围岩分区破坏特征试验研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(4):497-504.
- [3] 马天辉,王龙,徐涛,等.岩芯饼化机制及应力分析[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(10):1491-1495.
- [4] 严鹏,谢良涛,范勇,等.不同开挖方式下深部岩体应变能的释放机制[J].煤炭学报,2015,40(S1):60-68.
- [5] 谢理想,卢文波,姜清辉,等.深部岩体在掏槽爆破过程中的损伤演化机制[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(5):1252-1260.
- [6] 戴峰,李彪,徐奴文,等.猴子岩水电站深埋地下厂房开挖损伤区特征分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):735-746.
- [7] 张树光,张传.深部岩体传热机理的研究现状与进展[J].世界科技研究与发展,2011,33(4):563-565.
- [8] 何满潮,郭平业.深部岩体热力学效应及温控对策[J].岩石力学与工程学报,2013,32(12):2377-2393.