

DOI: 10.11779/CJGE201606003

深部多裂隙岩体开挖变形破坏规律模型试验研究

李树忱¹, 马腾飞¹, 蒋宇静², 李术才¹, 张露晨¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 长崎大学, 日本 长崎)

摘要: 深部资源开发中地下洞室围岩稳定控制必须面对峰后碎裂岩体的变形和破坏问题, 目前深部多裂隙岩体开挖强卸荷引起的围岩变形破坏规律尚不清楚, 常导致大体积塌方、大变形等重大工程事故。采用大尺度三维模型相似试验系统, 分析具有一定倾角的多组裂隙的岩体在高地应力下开挖变形破坏规律。试验结果表明: 隧道上下侧围岩主要呈现大变形现象, 左右侧围岩呈现分层破裂现象, 破裂区随时间增长由内向外逐渐增多, 在拱顶、底板大变形的诱导下发生边墙大体积坍塌; 隧道围岩由内向外位移值和应力值呈现波动状分布; 裂隙倾角与破坏区分布形态有一定相关性。为保障深部工程的安全兴建与运营提供了试验基础。

关键词: 高地应力; 多组裂隙; 分层破裂; 模型试验

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)06-0987-09

作者简介: 李树忱(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程等方面的教学和科研。E-mail: shuchenli@sdu.edu.cn。

Model tests on deformation and failure laws in excavation of deep rock mass with multiple fracture sets

LI Shu-chen¹, MA Teng-fei¹, JIANG Yu-jing², LI Shu-cai¹, ZHANG Lu-chen¹

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Nagasaki University, Nagasaki, Japan)

Abstract: The stability of surrounding rock of underground caverns in development of deep resources must face deformation and failure problems of post-peak fractured rock. At present, the deformation and failure laws of the surrounding rock of deep fractured rock mass in strong unloading excavation are unclear, often leading to large volume collapse, large deformation and other major engineering accidents. Using a large scale three-dimensional similar model test system, the deformation and failure laws in excavation of deep rock mass with multiple fracture sets and certain tilt angle under high ground stress are analyzed. The results show that the surrounding rock at the upper and lower sides mainly presents large deformation phenomenon, the rock at the left and right sides exhibits layered fracture phenomenon, and the fracture area increases from the inside to the outside with time. Large volume of side wall collapse is induced by the large deformation of vault and floor. The displacements and stresses of the surrounding rock from the inside to the outside are fluctuant. There is a great correlation between the fracture angle and the distribution of failure zone. The results may provide more experimental data for ensuring the safety of construction and operation of deep under-ground engineering.

Key words: high ground stress; multiple fracture set; layered fracture; model test

0 引言

随着矿山开采深度增加和条件趋于复杂, 以及越来越多的水利水电、交通、国防和基础物理试验等工程在深部和中国强烈构造活动区兴建, 高强度岩爆、持续大变形和大体积塌方等深部工程灾害造成的经济损失触目惊心。深部工程的重大灾害事故难以遏制的关键问题在于目前对这些灾害的发生机理缺乏深入研究, 尚无有效指导这些灾害预测和防治的系统理论和方法。

任利等^[1]基于修正的压剪判据推导了裂隙岩体试

件的抗压强度求解公式, 讨论了摩擦系数、节理裂隙倾角、裂隙长度、黏聚力以及围压对裂隙岩体试件抗压强度的影响机理; 王明洋等^[2]提出了深部岩体变形破坏全过程动态本构模型; 魏进兵等^[3]分析了高地应力条件下大型地下厂房围岩松动区的分布及变化特

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2010CB732002); 国家自然科学基金项目(51179098、51379113); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120131110031); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-2009); 山东省自然科学基金杰出青年基金项目(JQ201313); 山东大学基本科研业务费项目(2014YQ005)
收稿日期: 2015-05-26

表 1 原型材料和模型材料物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of prototype and model materials

介质	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	泊松比 ν	抗压强度 σ /MPa	黏聚力 c /MPa	弹性模量 E /GPa
围岩原型	24.5	37	0.25	102.49	0.9	15
围岩模型	26.5	39	0.28	1.95	0.02	0.33
相似比	1	1	1	50	50	50

征；罗超文等^[4]分析了煤矿深部岩体开挖后围岩应力特征及塑性区变化规律；周小平等^[5]、Guzev 等^[6]根据非欧几何模型和 Mohr–Coulomb 准则获得了静水压力和非静水压力情况下深部圆形洞室损伤围岩的应力场和破裂区与非破裂区的分布规律。在裂隙扩展和贯通方面，有些学者通过模型试验和数值计算对二维情况下某些分布的裂纹扩展问题做过较多研究，揭示了裂纹扩展的一些规律^[7–8]。上述研究成果表明，需要建立新的强度准则和计算方法，以精确预测岩体不同碎裂状态下的强度，并能描述节理裂隙岩体碎裂演化过程；在裂隙扩展、地应力演化方面取得了许多成果，但没有涉及到多尺度峰后岩体的变形破坏问题，且已有的模型需要过多的参数，不便于工程直接应用。

有学者采用单轴、三轴、真三轴、剪切试验机等试验手段和数值方法研究了岩石变形破坏过程宏观力学行为和机理，对于解释浅部裂隙岩体的变形破坏及力学行为具有不同程度的理论指导作用，但无法回答深部岩体特殊的变形破坏问题，如即使坚硬的裂隙岩体也表现出可持续大变形、深部裂隙软岩也可突然发生岩爆、深部巷道出现分区破裂化等现象^[9–13]。也有学者开展了大尺度相似模型试验，研究了在高地应力作用下岩体的开挖破坏规律，但均采用均匀的相似材料，未考虑岩体裂隙的作用^[14–15]。传统的岩石力学更多地关注唯象学和宏观的描述，对多组裂隙系统的演化与宏观力学特性的关联性、宏细观破坏机理研究较少，已经无法圆满解释上述特殊变形破坏发生的原因。

深部岩体开挖过程中，岩体处于高地应力和开挖扰动等条件作用下，表现的是其峰后强度特性，会出现有别于浅埋工程的特殊非线性力学行为，而目前对于深部多裂隙岩体开挖强卸荷引起的围岩变形破坏规律尚不清楚，为了充分了解深部多裂隙岩体在开挖强卸荷作用下的变形破坏行为，本文采用大尺度三维模型相似试验系统分析了有一定倾角裂隙的岩体在高地应力下开挖变形破坏规律，为保障深部工程的安全修建与运营提供了试验基础。

1 模型试验原理及方案

1.1 试验原理

试验依托实际工程六盘山隧道，选取埋深 1000

m，节理裂隙较发育，含有多组节理裂隙的Ⅲ级围岩公路隧道断面，岩石为弱风化粉砂质泥岩，间夹泥质粉砂岩薄层，裂隙倾角为 $13.9^{\circ} \sim 25.7^{\circ}$ ，依据相似理论模拟深部岩体及裂隙的物理力学参数，通过加载、开挖卸荷、超载等步骤，实现对深部多裂隙岩体在开挖强卸荷作用下变形破坏行为的模拟，为简化模拟难度，普通岩体模型按照Ⅲ级围岩强度配置相似材料，裂隙模型按照Ⅵ级围岩强度配置相似材料，围岩强度参数见表 1，图 1 为模型试验示意图。

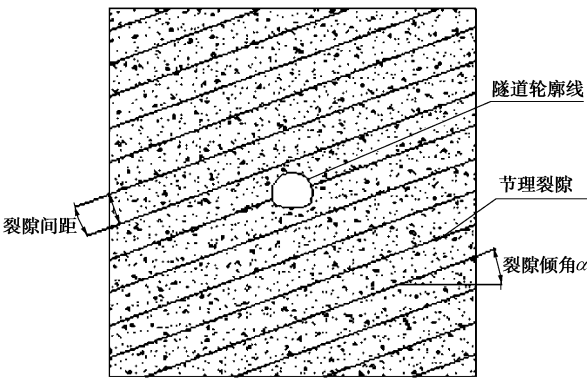


图 1 模型试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model tests

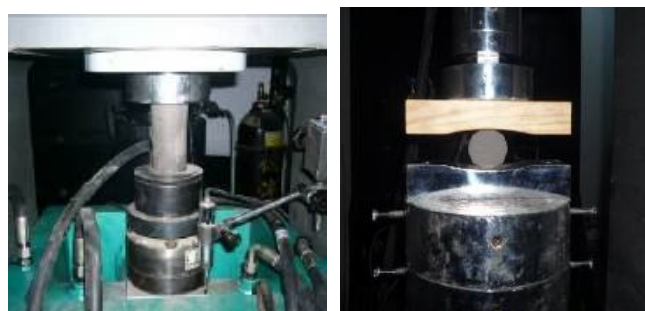
1.2 相似判据及相似材料

试验以几何相似比 $1:50$ ，重度相似比 $1:1$ ，进行试验模型的制作和材料的配比，根据相似理论三定理，得应变、摩擦系数、内摩擦角、泊松比相似比为 $C_\epsilon = C_f = C_\varphi = C_\mu = 1$ ，应力、黏聚力、弹性模量相似比为 $C_\sigma = C_c = C_E = 50$ 。

选择铁粉、石英砂的拌合料做为骨料，重晶石粉做为调节剂、松香的酒精溶液做为黏结剂，来研制适合于深部岩体及裂隙的相似材料。将相似材料按照不同比例制成大量标准试件，应用岩石刚性压力试验机进行弹性模量 E 、泊松比 ν 、抗压强度 σ_c 和抗拉强度 σ_t 的测试；在常规三轴压力机和直剪仪上进行内摩擦角 φ 、黏聚力 c 的测试，见图 2。

通过试验测试，最终确定了按照质量比为 $I:B:S=1:1:0.26$ ， $\beta=15.38\%$ ， $RA\%=6.98\%$ ，来配制岩石相似材料，按照质量比为 $I:B:S=1:0.8:0.38$ ， $\beta=11.54\%$ ， $RA\%=6.76\%$ ，来配制裂隙相似

材料,可满足对原型材料的相似模拟。其中, I 为铁精粉, B 为重晶石粉, S 为石英砂, β 为松香酒精溶液浓度, RA%表示松香酒精溶液占总重的百分比。原型材料和模型材料物理力学参数见表 1, 模型材料的实际值比理论值略大, 可降低因模型材料的填筑夯实不足所引起的误差, 从而保证制作的相似材料具有设定的强度特征。



(a) 压缩试验

(b) 劈裂试验



(c) 三轴试验

(d) 直剪试验

图 2 相似材料物理力学参数测试

Fig. 2 Tests on mechanical parameters of similar materials

1.3 测量系统

制作应变块和多点位移计, 见图 3, 4, 在隧道模型正向上下左右 4 个部位布置测点, 在模型纵向上, 分别布置应变块和多点位移计, 见图 5, 6, 采用 XL2101G 高速静态电阻应变仪以及光栅尺多点位移计测试系统对试验数据进行采集。



图 3 应变块

Fig. 3 Strain block

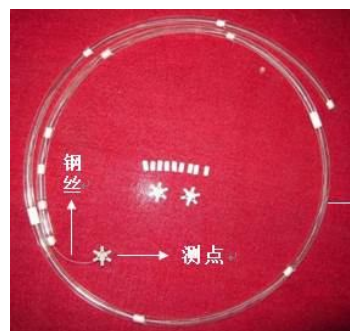
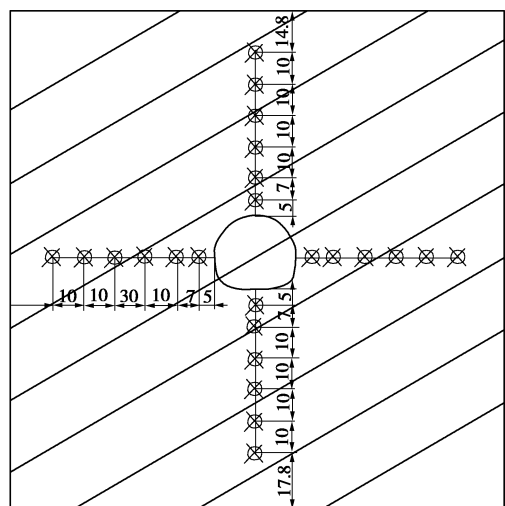


图 4 多点位移计

Fig. 4 Multi-point displacement meter



尺寸单位: mm

图 5 测点布置正面图

Fig. 5 Front view of arrangement of measuring points

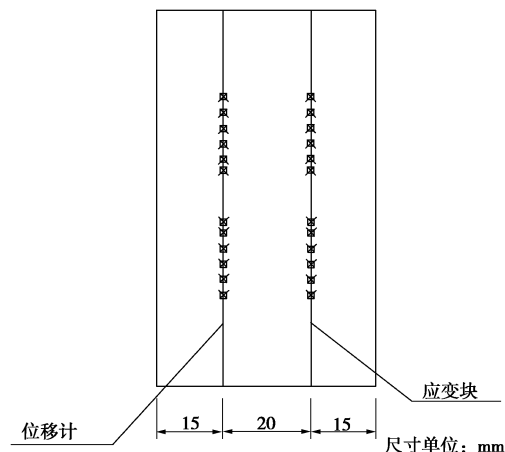


图 6 测点布置侧面图

Fig. 6 Side view of arrangement of measuring points

1.4 试验系统及加载条件

采用山东大学研制的高地应力三维模型试验装置,见图7,该装置具备以下性能:①先加载后开洞,模拟地应力条件下隧道、洞室的开挖和锚固等施工动态过程力学效应;②拼装方便,可完成三维和平面条件两类模型试验;③具有压力高、稳步加载、长时保压等优点,自动液压控制系统可实现同步均匀梯度加载;④配备高速静态应变测试系统测试模型位移和应

变；⑤可通过高强度钢化玻璃透视窗口观察洞的变形和围岩的破裂规律及相关现象；⑥可对模型进行超载破坏试验，模型可升降移入移出，方便内部变形破坏剖视。



图 7 三维模型试验装置
Fig. 7 3D model test device

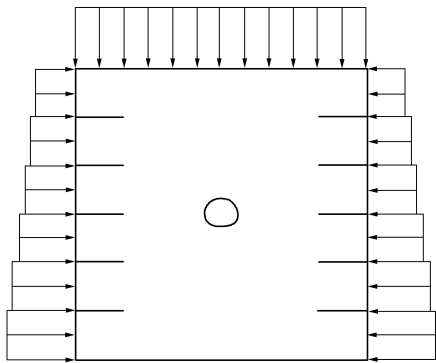


图 8 加载示意图
Fig. 8 Schematic diagram of loading

模型尺寸为宽×高×厚=240 cm×240 cm×50 cm，隧道模型断面尺寸为 26.4 cm×23.4 cm。如图 1，将配置好的相似材料按照 15° 角采用分层压实的方式堆填，具体流程为：按材料规定配比大规模称量配制材料—用搅拌机均匀搅拌材料—在试验台架内倾斜摊铺材料—人工逐层密度夯实材料—按设计标高在洞周部位分层埋设量测元件—洞周埋设仪器部位以外仍用人工或机械逐层遍布地夯实材料，直至模型顶部。

试验过程中先加载后开挖，垂直方向应力按照 γh 计算，水平方向应力按照 $0.34 \gamma h$ 计算，将应力换算成模型加载系统油路中油压值后，通过模型控制系统控制加载。按照 1000 m 埋深设计要求，换算成垂直方向的每个推力器油压值为 0.53 MPa，水平方向的推力器从上至下分别为 0.182, 0.186, 0.190, 0.194, 0.197, 0.201 MPa，加载示意图见图 8。试验过程中通过液压控制系统控制模型边界加载，模型边界加载以 100 m 埋深换算成推力器油压值作为加荷载梯度，逐级按比例增加，每加载一级静置 10 min，直至荷载达到设计值。

当荷载施加完成后，保持施加荷载不变，稳定 30 min，然后按照全断面方式进行洞室开挖。开挖进尺

为 5 cm，每开挖一个进尺用时约为 5 min，开挖完一个进尺等待 10 min，测量仪器的读数稳定后，记录试验数据，接着进行下一个进尺的开挖，如此循环直至开挖完毕。开挖完成后，待监测数据完全稳定，开展超载破坏试验，逐级增大荷载，直至隧道破坏，记录并观察破坏规律，见图 9~12。



图 9 加载
Fig. 9 Loading



图 10 人工开挖
Fig. 10 Manual excavation

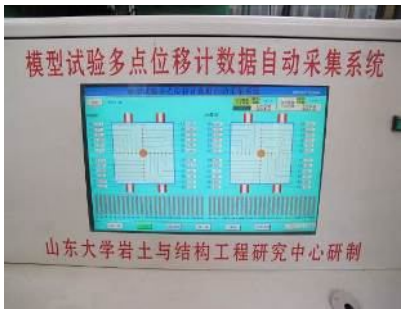


图 11 数据采集
Fig. 11 Data collection



图 12 破坏观察
Fig. 12 Failure observation

2 洞周围岩破坏规律分析

开挖完成后, 保持原加载压力不变, 等待监测数据稳定, 观察洞周围岩的变化。由图 13 可见, 洞周上半部发生朝向洞室内侧的变形, 拱顶位置沉降变形较为明显, 监测数据完全稳定时, 拱顶最大沉降量约 2 mm, 而仰拱、边墙的变形不明显, 预制裂隙处也没有发生明显的变形和破坏。

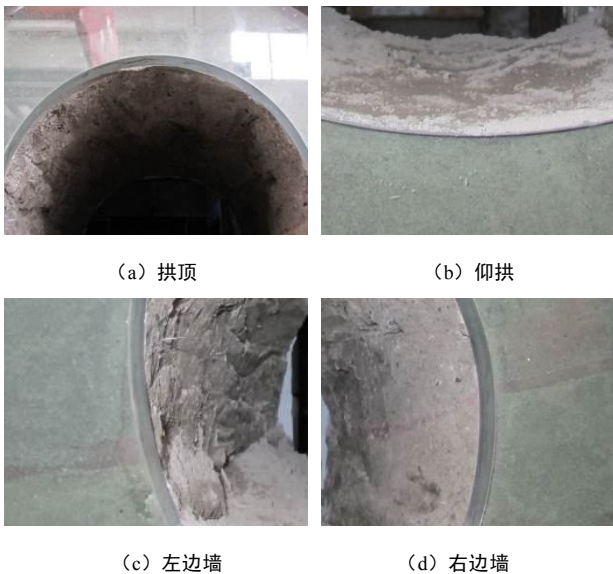


图 13 开挖完后围岩自稳图

Fig. 13 Photos of self-stability of surrounding rock after excavation

之后开展超载破坏试验, 以 50 m 埋深换算成推力器油压值作为加载梯度, 逐级按比例增大加载, 超载每提高一级静置 10 min。图 14 为超载过程中拱顶沉降变化情况, 拱顶沉降随着超载等级的增大而增大, 当超载等级为 12 (对应于增大的埋深为 600 m) 时, 拱顶沉降达到最大 2 cm, 继续增大一级, 沉降未发生明显变化, 此时停止超载。

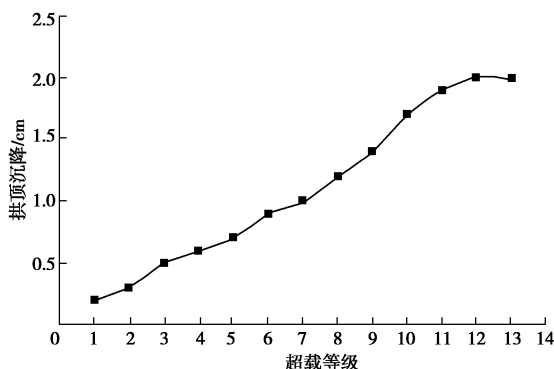


图 14 超载过程中拱顶沉降与超载等级关系曲线

Fig. 14 The relation curve between vault settlement and overload levels during the overloading process

由图 15 可见, 在超载等级为 3 时, 洞周上半部朝

向洞室内侧的变形持续增大, 拱顶沉降增大约 0.5 cm, 仰拱变形仍不明显; 洞室内壁左右边墙预制裂隙附近以及墙脚附近最先出现裂缝, 洞室内壁裂缝主要分布于墙脚和预制裂隙之间, 并相互贯通。

从钢化玻璃观察边墙, 右边墙预制裂隙面上部距离洞壁约 1.5 cm 处出现与洞周平行的弧形裂缝, 弧形裂缝下缘向左下方发展, 与洞室内壁的裂缝相互贯通, 弧形裂缝上缘向左上方发展, 逐渐到达洞壁; 左边墙的裂缝出现在预制裂隙上部距离洞壁约 1 cm 处, 裂缝下缘向右下方发展到达预制裂隙, 裂缝上缘竖直向上发展到达洞腰。

由此可见, 破坏最先发生于强度最薄弱的预制裂隙处, 然后在应力较集中的墙脚和边墙内侧出现裂缝, 由于裂隙具有一定倾角, 左边墙的裂缝位置低于右边墙的裂缝位置, 几处的裂缝逐渐贯通, 形成不稳定的破坏区域。

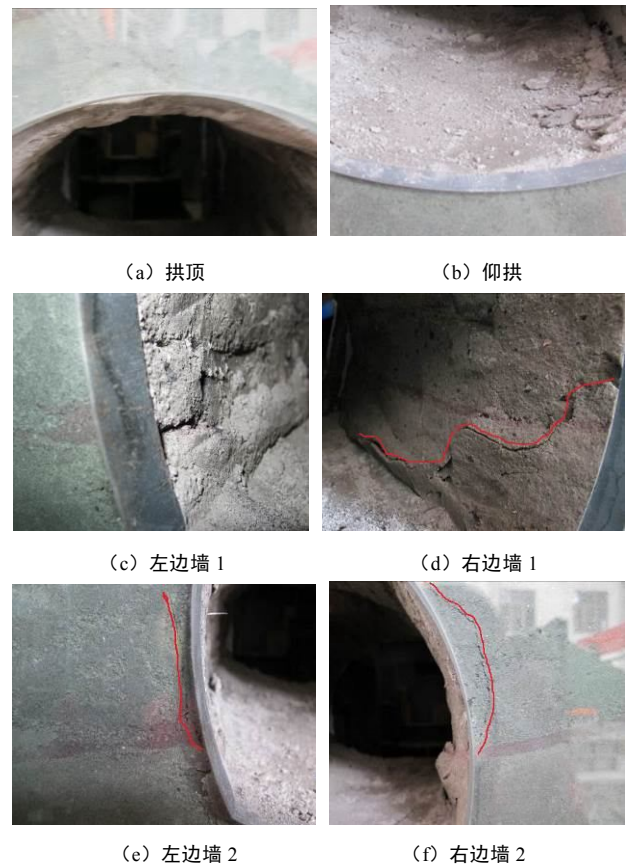


图 15 超载前期围岩变形破坏图

Fig. 15 Photos of deformation and failure of surrounding rock masses at the prophase of overload

在超载等级为 7 时, 由图 16 可见, 拱顶沉降增大至 1 cm。右边墙的裂缝完全贯通, 且宽度逐渐增大, 破坏区域呈残月状; 左侧洞壁有少量岩体呈片状剥落, 左边墙内侧裂缝宽度增大。

随着加载增大, 变形逐渐增大, 右侧洞壁的残月状破坏区域整体坍塌, 破坏面右侧预制裂隙面上下侧

又产生新的平行于破坏面的裂缝；左侧洞壁原裂缝右侧区域整体滑塌，破坏面左侧预制裂隙上部产生新的平行于洞周的弧形裂缝。

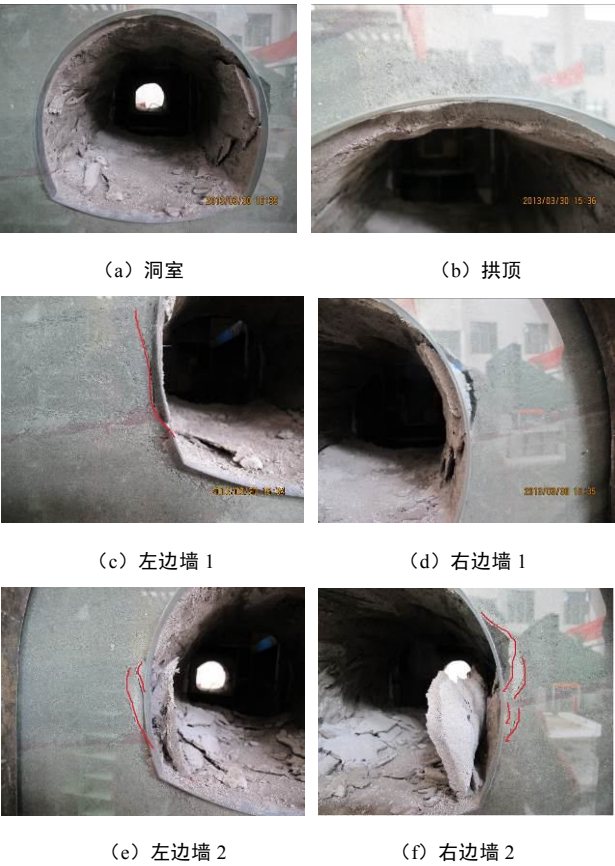
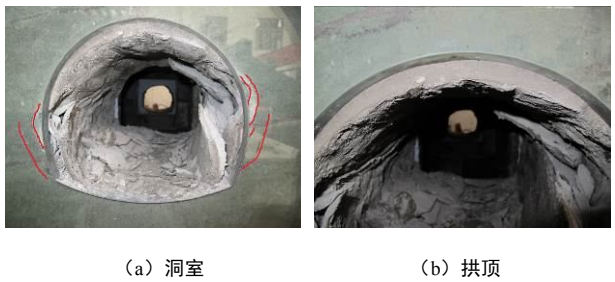


图 16 超载中期变形破坏图

Fig. 16 Photos of deformation and failure of surrounding rock masses at metaphase of overload

在超载等级为 12 时，由图 17 可见，拱顶沉降最大至 2 cm，洞室没有继续发生大体积的坍塌，洞壁有大量岩体呈片状剥落，洞壁表面变得残缺不平，围岩内部裂缝主要分布在左右边墙的预制裂隙处，而拱顶及仰拱等其余位置的围岩内并无明显裂缝产生。

超载等级继续增大，拱顶沉降没有明显变化，左右边墙的裂缝呈现明显的分层破裂状，形成 3 层破裂区，从洞壁向围岩内部弧形裂缝和岩体完整区间隔排列，且完整区厚度逐渐递增。最深裂缝下缘到达墙脚，上缘弯向洞壁，其所包络的破坏区域分布于边墙预制裂隙附近，在洞周呈“耳朵状”分布。



(a) 洞室 (b) 拱顶

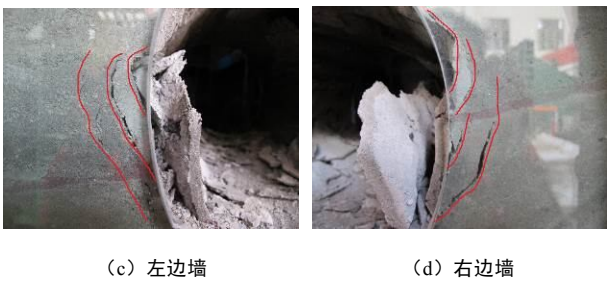


图 17 超载后期变形破坏图

Fig. 17 Photos of deformation and failure of surrounding rock masses at anaphase of overload

由试验破坏现象可见，含有一定倾角裂隙的深部岩体的破坏模式不同于无裂隙深部岩体。后者破坏区域多呈现环绕洞周的分区破裂形态，变形破坏区在围岩中分布较为均匀，存在传统意义上的围岩松动圈。

而含有一定倾角裂隙的深部岩体，在高地应力作用下，拱顶处最先发生沉降变形，裂隙附近以及墙脚处出现裂缝，随着沉降变形增大，裂隙面上侧接近洞壁的围岩内部出现裂缝，各处裂缝逐渐扩展并相互贯通形成“残月状”破坏区域，在应力重分布过程中，从破坏面向围岩内部逐渐产生平行于破坏面的弧形裂缝，形成相互间隔的多层破裂区，在洞周沿裂隙倾角呈“耳朵状”分布，在围岩大变形诱导下发生大体积坍塌。

陈旭光等^[16]在深部巷道边墙打设了直径 32 mm、深度 10 m 的钻孔，采用钻孔电视成像仪在钻孔内观察巷道围岩的破裂情况，随着深度的增加，钻孔内出现明显的破坏区交替出现的现象，见表 2，图 18。观测到的破坏情况与本试验表露出的多层破裂区相似。

表 2 钻孔内破坏观察记录表				
Table 2 Failure observation records in boreholes				
深度/m	0.35~1.2	1.45	1.6	2.1
破坏情况	大，严重 破裂	中，裂隙	细小，裂 隙	大，粗
深度/m	2.65	4.4	5.7	7.8
破坏情况	小，裂隙	较大	小，裂隙	较大



图 18 钻孔中破坏情况

Fig. 18 Failure situations in boreholes

3 洞周围岩变形规律分析

3.1 监测结果分析

试验过程中对隧道模型洞周上下左右 4 个方向进行了位移和应变监测, 监测点具体布置情况见 1.3 节, 表 3 为开挖后模型围岩位移值, 图 19 为模型洞周测点位移变化示意图。

表 3 开挖后模型围岩位移值

Table 3 Displacements of surrounding rock after excavation

测点 编号	1	2	3	4	5	6	编号顺序
上侧	1.49	0.98	0.93	0.88	0.70	0.68	从下到上
下侧	0.81	0.55	0.56	0.41	0.40	0.28	从上到下
左侧	0.72	0.83	0.61	1.09	0.11	0.08	从右到左
右侧	0.93	0.84	0.30	0.41	0.22	0.20	从左到右

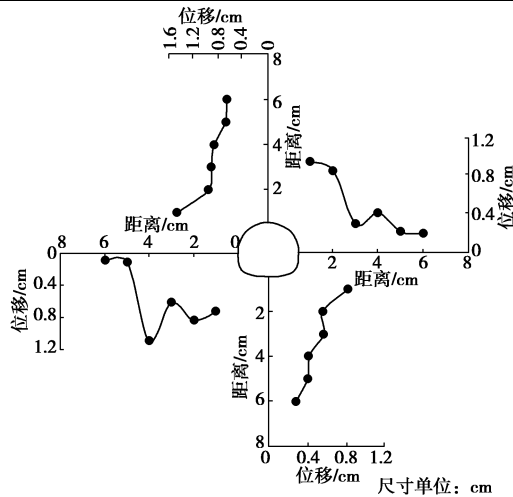


图 19 模型洞周测点位移变化示意图

Fig. 19 Schematic diagram of displacement change at measuring points around model tunnel

由图可见, 开挖后洞周测试线上各测点的位移呈现波峰与波谷间隔排列的波浪形分布, 这种变化规律不同于传统围岩位移随洞壁距离的增大而逐渐减小的单调变化规律, 深部多组裂隙隧道模型开挖后围岩内部存在分区破裂现象, 位移量较大的波峰部位为围岩“破裂区”, 位移量较小的波谷部位为围岩“非破裂区”。隧道模型上下两侧的测点由内向外位移逐渐减小, 波动情况弱于隧道模型左右两侧, 这与试验中洞室上下侧围岩位移主要呈现大变形、左右侧位移呈现分层破裂情况相符。

通过对高速静态电阻应变仪测得的应变数据进行计算, 得到开挖后模型洞周测点应力变化示意图, 见图 20。

由图 19 可见, 隧道模型周围应力也呈现波峰波谷间隔的波浪形变化, 这种变化规律与浅埋洞室洞周应力随洞壁距离的增大而逐渐减小的规律也不相同。

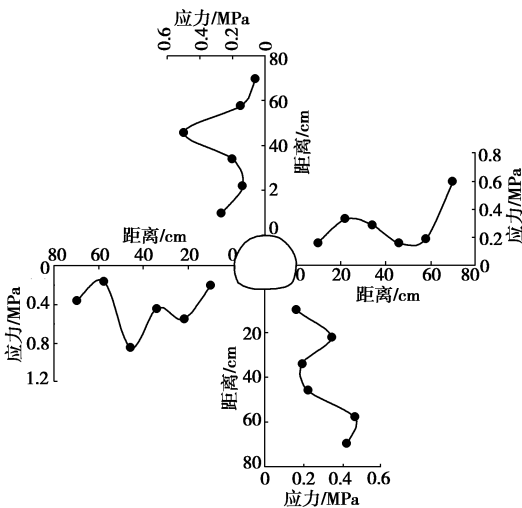


图 20 模型洞周测点应力变化示意图

Fig. 20 Schematic diagram of stress variation at measuring points around model tunnel

3.2 数值模拟分析

根据试验模拟的裂隙分组情况, 建立高、宽为 120 m, 厚度为 10 m 有限元数值模型, 隧道断面尺寸为 13.2 m×11.7 m, 采用原型围岩和裂隙的物理力学参数, 模拟在深部多组裂隙岩体条件下隧道开挖围岩变形破坏规律。

图 21 为洞周竖向位移分布云图, 由图 21 可见, 隧道上下部两层裂隙之间的区域竖向位移最大, 在裂隙位置发生突变, 裂隙外侧竖向位移显著降低; 穿过隧道的倾斜裂隙附近竖向位移相对较小, 仅在洞壁附近分布较为集中; 竖向位移分布方向基本与裂隙倾斜方向垂直。图 22 为洞周水平位移分布云图, 由图 22 可见, 在穿过隧道的裂隙位置, 洞室左右两侧水平位移最大, 且形成明显的分层三角形, 呈“耳朵状”沿倾斜裂隙分布于洞周两侧。裂隙两侧的水平位移在裂隙位置不连续, 隧道拱腰和墙角延伸出去在上下部裂隙相交的位置, 水平位移较大。

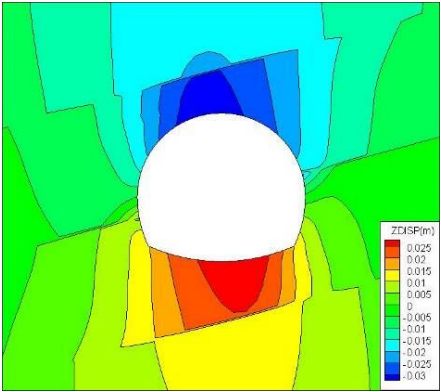


图 21 洞周竖向位移分布云图

Fig. 21 Cloud chart of distribution of vertical displacement around tunnel

图 23 为洞周最大主应力分布云图, 由图 23 可见, 最大主应力的最大值沿裂隙倾斜方向分布于隧道左右

两侧, 呈负值; 隧道拱顶和底板位置的最大主应力略大, 呈正值, 但远小于隧道左右两侧的最大主应力; 隧道左右两侧沿着倾斜裂隙方向最大主应力呈现波动状分布, 在裂隙上的最大主应力相对于裂隙两侧较小; 隧道左侧墙角和右侧拱腰向外延伸至上下两层裂隙, 该区域最大主应力较大, 形成的区域与裂隙倾斜方向的夹角约为裂隙倾角的 2 倍。

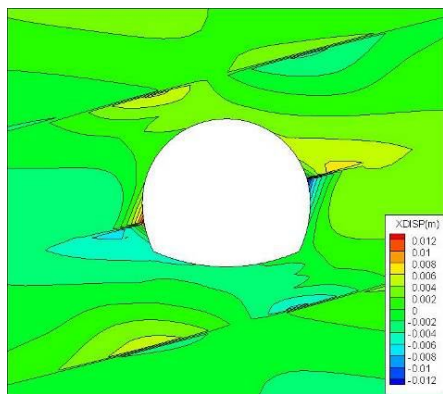


图 22 洞周水平位移分布云图

Fig. 22 Cloud chart of distribution of horizontal displacement around tunnel

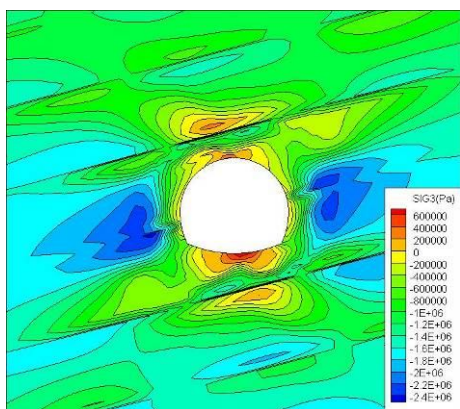
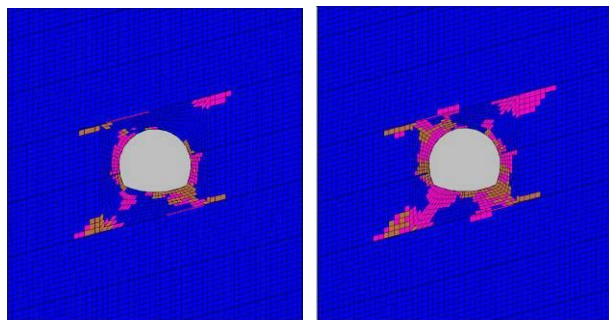


图 23 洞周最大主应力分布云图

Fig. 23 Cloud chart of distribution of maximum principal stress around tunnel

图 24 为洞周塑性区分布云图, 由图 24 (a) 可见, 塑性区主要分布于洞周左右两侧, 和隧道拱腰和墙角延伸出去在上下层裂隙相交的位置, 破坏最先发生在这些区域, 由图 24 (b) 可见, 当荷载增大过程中,



(a) 1 倍竖向荷载

(b) 2 倍竖向荷载

图 24 洞周塑性区布图

Fig. 24 Distribution of plastic zones around tunnel

原塑性区相互贯通, 隧道左侧拱腰和上侧裂隙之间及右侧墙角和下侧裂隙之间的距离最短, 塑性区最先贯通。可见深部多组裂隙岩体洞周破坏区分布与裂隙倾角有很大相关性。

4 结 论

本文通过大尺度三维模型相似试验和数值模拟研究了深部带有一定倾角的多组裂隙岩体在开挖强卸荷作用下围岩变形破坏规律, 主要得到以下 4 点结论。

(1) 通过大尺度三维模型相似试验, 得到了多裂隙岩体在高地应力作用下隧道开挖过程中围岩变形破坏规律, 隧道上下侧围岩主要呈现大变形, 左右侧围岩呈现分层破裂现象, 沿裂隙方向在隧道两侧呈“耳朵状”分布, 破裂区层数随时间增大由内向外逐渐增多, 在拱顶、底板大变形的诱导下发生边墙大体积坍塌。

(2) 隧道围岩由内向外位移值呈现波动状分布, 隧道上下侧较大竖向位移分布趋势与裂隙方向垂直, 隧道左右两侧水平位移呈层状三角形分布, 位移分布在裂隙位置不连续。

(3) 隧道围岩由内向外应力值呈波动状分布, 隧道拱顶和底板以及边墙内部有应力集中现象, 边墙围岩最大主应力大于拱顶和底板最大主应力, 裂隙位置应力急剧增大, 由近到远应力逐渐减小, 隧道左侧墙角和右侧拱腰向外延伸到两层裂隙的区域最大主应力较大, 与裂隙面的夹角约为裂隙倾角的 2 倍。

(4) 塑性区最先分布于洞周左右两侧, 和隧道拱腰和墙角延伸出去在上下层裂隙相交的位置, 随着应力重分布, 由于隧道左侧拱腰和上侧裂隙之间及右侧墙角和下侧裂隙之间的距离最短, 塑性区最先贯通, 深部多组裂隙岩体洞周破坏区分布与裂隙倾角有很大相关性。

因此在深部多裂隙岩体工程中, 应注意顶部局部围岩和边墙围岩的加固, 采用注浆、锚固等手段维持围岩松动范围的稳定, 避免大变形及塌方灾害的发生。研究为保障深部工程的安全修建提供了试验基础。

参考文献:

- [1] 任 利, 谢和平, 谢凌志, 等. 基于断裂力学的裂隙岩体强度分析初探[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 156 - 162. (REN Li, XIE He-ping, XIE Ling-zhi, et al. Preliminary study on strength of cracked rock specimen based on fracture mechanics[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 156 - 162. (in Chinese))
- [2] 王明洋, 解东升, 李 杰, 等. 深部岩体变形破坏动态本构

- 模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(6): 1112 - 1120. (WANG Ming-yang, XIE Dong-sheng, LI Jie, et al. Dynamic constitutive model for deformation and fracture of deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(6): 1112 - 1120. (in Chinese))
- [3] 魏进兵, 邓建辉. 高地应力条件下大型地下厂房松动区变化规律及参数反演[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 1): 330 - 336. (WEI Jin-bing, DENG Jian-hui. Variation of excavation damaged zone and back analysis of large scale underground powerhouse with high geostress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 330 - 336. (in Chinese))
- [4] 罗超文, 李海波, 刘亚群. 煤矿深部岩体地应力特征及开挖扰动后围岩塑性区变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(8): 1613 - 1618. (LUO Chao-wen, LI Hai-bo, LIU Ya-qun. Characteristics of in-situ stress and variation law of plastic zone of surrounding rocks around deep tunnels in a coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(8): 1613 - 1618. (in Chinese))
- [5] 周小平, 周敏, 钱七虎. 深部岩体损伤对分区破裂化效应的影响[J]. 固体力学学报, 2012, **33**(3): 242 - 250. (ZHOU Xiao-ping, ZHOU Min, QIAN Qi-hu. Influence of rock damage on zonal disintegration around deep circle tunnels[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2012, **33**(3): 242 - 250. (in Chinese))
- [6] GUZEV M A, PAROSHIN A A. Non-euclidean model of the zonal disintegration of rocks around an underground working[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2001, **42**(1): 131 - 139.
- [7] 赵小平, 左建平, 裴建良. 锦屏层状大理岩断裂机制的细观试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(3): 534 - 542. (ZHAO Xiao-ping, ZUO Jian-ping, PEI Jian-liang. Meso-experimental study of fracture mechanism of bedded marble in Jinping[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(3): 534 - 542. (in Chinese))
- [8] 黄达, 黄润秋. 卸荷条件下裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化的物理模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 502 - 512. (HUANG Da, HUANG Run-qiu. Physical model test on deformation failure and crack propagation evolvement of fissured rocks under unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 502 - 512. (in Chinese))
- [9] 戚承志, 钱七虎, 王明洋, 等. 深隧道围岩分区破裂的数学模拟[J]. 岩土力学, 2012, **33**(11): 3439 - 3446. (QI Cheng-zhi, QIAN Qi-hu, WANG Ming-yang, et al. Mathematical modeling of zonal disintegration of surrounding rock near deep tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(11): 3439 - 3446. (in Chinese))
- [10] MALAN D F. Simulation of the time-dependent behavior of excavations in hard rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, **35**(4): 225 - 254.
- [11] SELLERS E J, KLERCK P. Modeling of the effect of discontinuities on the extent of the fracture zone surrounding deep tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, **15**(4): 463 - 469.
- [12] ZHOU X P, QIAN Q H, ZHANG B H. Zonal disintegration mechanism of deep crack-weakened rock masses under dynamic unloading[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2009, **22**(3): 240 - 250.
- [13] WU H, GUO Z K, FANG Q, et al. Mechanism of zonal disintegration phenomenon in enclosing mass around deep tunnels[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, **16**: 0303 - 0311.
- [14] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 433 - 438. (GU Jin-cai, GU Lei-yu, CHEN An-min, et al. Model test study on mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 433 - 438. (in Chinese))
- [15] 左宇军, 马春德, 朱万成, 等. 动力扰动下深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(10): 2929 - 2936. (ZUO Yu-jun, MA Chun-de, ZHU Wan-cheng, et al. Model test study of mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum tunnelling under dynamic disturbance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(10): 2929 - 2936. (in Chinese))
- [16] 陈旭光. 高地应力条件下深部巷道围岩分区破裂形成机制和锚固特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2011. (CHEN Xu-guang. Study on forming mechanism and anchorage character of zonal disintegration in rock mass of deep tunnel under high geostress[D]. Jinan: Shandong University, 2011. (in Chinese))