

隧道水平岩层变形破坏机制的模拟研究

刘鹏¹ 吉锋² 温书亿¹

(1 中铁西南科学研究院有限公司,成都 611731;

2 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059)

摘要 在对隧道围岩体的物质组成和结构力学特征分析的基础上,文章定性分析了某隧道围岩体的变形破坏机制;采用底摩擦试验方法,确定了合理的试验参数,并依据现场岩层层面和节理产状建立了室内地质模型。试验结果表明,围岩体变形可分为三个阶段,即弯曲内鼓、拉裂和折断塌落阶段。最后采用 2D 离散元程序对该隧道开挖过程进行了数值模拟,结果与室内模型试验结果基本吻合,可见采用室内模型试验和离散元数值模拟,能够较好地预测隧道在开挖过程中围岩体的变形特性。

关键词 隧道 围岩体变形特征 模型试验 离散元模拟

中图分类号: U451.2 **文献标识码**: A

1 引言

上世纪七十年代, Hoek 最先采用底摩擦试验取代模拟试验的直立模型架^[1]。该方法可通过调整试验参数建立对应的相似模型试验,试验结果可预测或验证已经或可能发生的岩体变形特性及分布规律。由此,该方法因简便、经济、试验周期短等优势而受到广泛的关注和应用。该方法多用于分析岩质边坡的稳定性^[2],本文采用底摩擦试验模拟研究高速公路隧道开挖后主要水平岩层的变形破坏特性^[3]。

2 物理模拟方法介绍

根据底摩擦试验的相似理论^[3],构建室内试验模型与研究对象的特定相似关系,并使室内模型与研究对象在摩擦系数、受力条件和几何条件满足这种特定关系,才能保证模型试验结果与现场原型的相似性。

(1) 受力条件相似系数

$$\alpha_r = \rho_M / \rho_H, \text{ 或 } \alpha_\sigma = \sigma_M / \sigma_H$$

(2) 摩擦相似系数

$$\alpha_f = f_M / f_H$$

(3) 几何相似系数

$$\alpha_L = L_M / L_H$$

式中: ρ 为材料的密度; α 为相似系数; σ 为应力; f 为摩擦系数; L 为几何尺寸; 下标 H, M 分别为原型和模型。

用下列关系式确定上述相似常数的关系:

$$\alpha_\sigma = \alpha_r \cdot \alpha_L; \alpha_f = 1$$

底摩擦试验原理如图 1 所示,该试验摩擦阻力与天然重力场分布相似,通过皮带轮驱动环形橡胶带转动,使模型与环形橡胶带之间产生摩擦阻力,即通过模型底面与橡胶带接触面之间的摩擦阻力来模拟体积力(重力)。图中是将典型竖直横剖面模型水平放倒在橡胶带的平直段上,且剖面的向下(深度)方向为 X 方向,在橡胶带转动方向的一端设置固定框架,通过皮带轮驱动环形橡胶带转动,使橡胶带在 X 方向平直循环运动,不同岩性的岩层可通过在模型表面涂同等厚度的混合料来模拟。由于受到框架的阻力,橡胶带与物理模型的接触面上的摩擦阻力可

修改稿返回日期:2014-01-12

项目基金:国家自然科学基金(编号:51308082)。

作者简介:刘鹏(1981-),男,硕士研究生,工程师,主要从事地质灾害防治、岩土工程和隧道工程专业的科学研究、勘察设计与施工等工作,
E-mail:liup004@163.com.

表达为:

$$dF = \rho_M \cdot t \cdot f \cdot ds$$

式中: dF 为模型所产生的摩擦阻力; ρ_M 为模型的材料密度; t 为试验模型的厚度; f 为试验模型底面与橡胶带之间的摩擦系数。

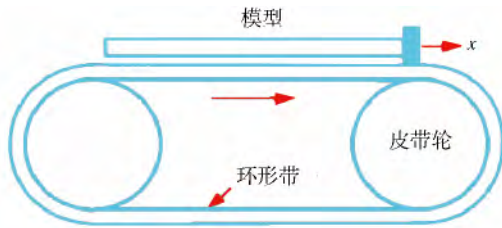


图1 试验原理示意

Fig.1 Schematic diagram of the model experiment

由圣维南原理可知,当模型厚度足够薄时,可认为在整个接触面上的摩擦阻力是均匀分布的,这就相当于研究对象只受重力作用的天然状态。

该方法与其它方法相比,最大的优势在于该试验可根据需要或试验中出现的任何情况随时暂停,以便尽可能地获取试验过程中的每个重要的细节。

3 试验设备

该试验所采用的设备为成都理工大学和四川大学共同设计的一套新型全自动化底摩擦试验设备,该设备是在底摩擦试验原理基础上,通过多年探索共同研发出来的,如图2所示。

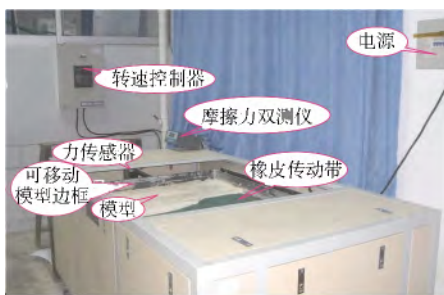


图2 底摩擦试验仪

Fig.2 Experimental instrument for base contact friction

该试验设备的特点是:橡胶带增减速可任意控制,且转速比较均匀,不会出现因转速不稳定而导致摩擦力剧烈变化的现象;摩擦力通过观测仪可即时显示,且可通过橡胶带增减速进行控制调整,以此达到和实际相符合的摩擦力,不必为此进行繁琐的计

算。

4 隧道断面围岩概况

4.1 隧道穿越区的地质情况

某隧道位于巴中市东南方向,距离巴中市4 km左右,全长750 m。隧道区域地层主要为单斜,岩层优势产状为 $201^\circ \angle 4^\circ$,隧道轴线方向与岩层走向成小锐角相交,岩层倾斜角为 4° 左右。图3为隧址区的地质特征,主要为红棕色粉砂质泥岩。

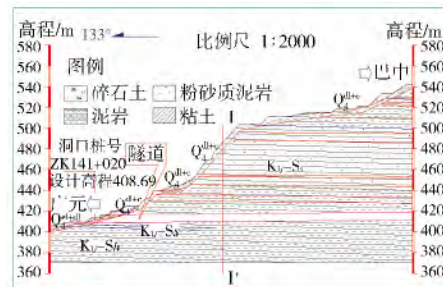


图3 模拟研究实测隧道地质纵断面示意

Fig.3 Geological profile of the studied tunnel

4.2 隧道断面的地质特征

隧道最大开挖宽度和高度分别为6.95 m和10.9 m,呈马蹄状,设有仰拱,最大埋深约138 m,洞口埋深1.8 m(为最小埋深厚度)。开挖断面下部以粉砂质泥岩为主,中上部主要为泥岩,以构造节理为主,且节理裂隙不发育。在施工过程中出现了局部坍塌和掉块现象,岩体完整性较差,围岩主要为以薄层为主的强-中风化的泥岩;在- '剖面附近坍塌和掉块现象严重,该处理深约28 m,洞高6.9 m,宽10.9 m。依据该区域岩体的结构力学特征及围岩组合条件,分析认为,坍塌破坏的主要原因是水平围岩岩体完整性差,洞室开挖后,进一步破坏了岩体的完整性;在天然状态下,破坏首先出现在洞顶洞肩,接着洞底出现轻微隆起,最后隧道顶部变形岩体塌落到隧道底部。

5 模型构建

依据该隧道实际工程情况,对隧道开挖后围岩受重力影响范围部分建立试验模型,按照一定的几何比例进行简化制模,然后进行模拟试验,以模拟隧道开挖围岩变形破坏过程的变形破坏机制^[4,5]。

5.1 相似比与相似材料

模型上的水平岩层采用薄刀片根据地质调查得到的层面切割而成。根据岩体的结构特征、组成性质和隧道开挖后影响范围,并结合试验目的和底摩擦仪的几何尺寸,合理确定室内模型试验的几何相似比 $\alpha_L=1:100$,容重相似比 $\alpha_\gamma=0.8$ 。

该试验目的主要为模拟水平岩层开挖后的变形

破坏机制,物理模型材料主要是由重晶石粉、液体石蜡和石英砂三种材料混合而成,首先根据不同配合比进行物理力学指标试验,确定配料配比,结果如表 1 所示。根据摩擦相似比和量纲分析,粉砂质泥岩和泥岩的模型材料配比分别对应为试样 3 和试样 5 的配比。

5.2 模型的设计与制作

表 1 相似材料配比及强度

Table 1 Mix ratios and strengths of similar materials

试样编号	材料配合比 石蜡油 : 石英砂 : 重晶石粉	单轴抗压强度 $\times 10^5/\text{MPa}$	抗拉强度 $\times 10^5/\text{MPa}$	容重 $\gamma/(\text{g}/\text{cm}^3)$	内聚力 c/KPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
1	10 : 26 : 64	3.5	0.26	2.30	11.9	31.6
2	9 : 29 : 62	4.1	0.22	2.45	6.1	31
3	10 : 31 : 59	3.2	0.25	2.09	9.1	30.4
4	10 : 30 : 60	2.8	0.31	2.33	3.9	31.2
5	11 : 32 : 57	0.5	0.09	1.89	16.2	32.0

按照相似比原理,模型设计宽为 800 mm,长 340~400 mm,模型边界条件简化为与实际情况类似。为减小在模型制作过程中出现裂隙完全闭拢而失真的现象,采用两层锡箔纸夹约 0.1 mm 的极薄层滑石粉在裂隙间隔开。

根据 - ' 剖面岩层的主要分布特征,通过薄刀片切割,将其分成 11 个近似水平的岩层,层厚最大为 18 mm,最小为 10 mm,平均层厚为 14 mm。 C_2 层以下为泥岩, C_3 层以上为粉砂质泥岩(图 4)。

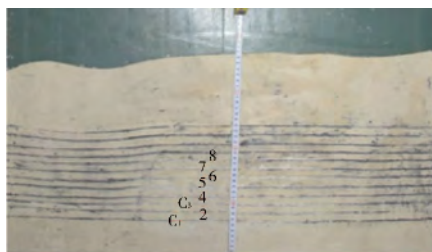


图 4 模型的设计和制作

Fig.4 Design and fabrication of the model

6 试验过程、现象及其分析

试验过程为:为使围岩内部形成初始应力,首先开动橡胶带轮,并保持每秒 0.4 转(圈)左右的速度匀速转动约 5 min 后,待围岩局部出现挤压变形时,

停止转动;接着抹平模型表面产生的裂缝,随后继续转动约 2 min,停止后可模拟洞室的开挖。图 5 为以 (405,100) 为中心的隧道开挖。

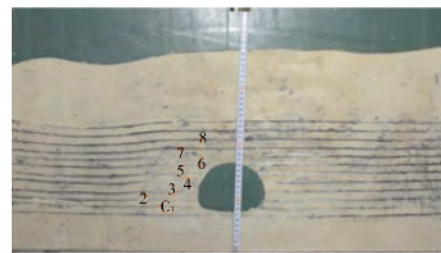


图 5 开挖后的隧道模型

Fig.5 Tunnel model after excavation

根据隧道开挖区围岩结构力学特征和组合条件,初步分析隧道开挖后围岩体的破坏机制为弯折-内鼓型,可分为三个阶段:轻微变形阶段、明显变形阶段和整体塌落阶段。

(1) 第一阶段(轻微变形)

图 6 为第一阶段的试验结果,其试验过程为橡胶带轮的转速保持为 0.4 r/s 左右,约 5 min 后,模型拱顶首先出现微小裂缝,随着裂缝的发展,洞底会出现一些鼓起情况。

(2) 第二阶段(明显变形)

随着试验过程的持续,第一阶段拱顶出现的微

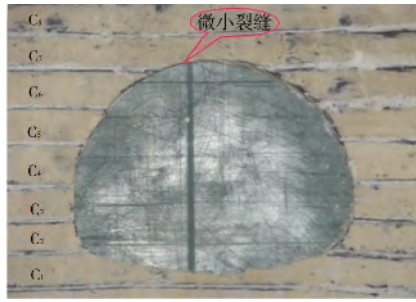


图6 模型开挖后第一阶段微小变形特征

Fig.6 Micro-deformation characteristics at the first stage after excavation shown by the model

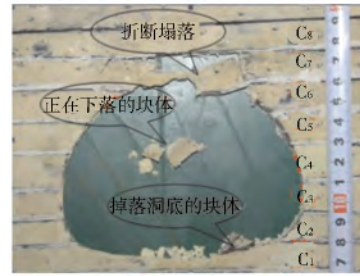


图9 模型开挖后第三阶段折断塌落变形特征

Fig.9 Breaking and collapsing characteristics at the third stage after excavation shown by the model

小裂缝逐渐发展成裂缝 f_1 、裂缝 f_2 ，洞底隆起明显，最大隆起点位置为(395,75)；拱顶出现明显裂缝(0.1 mm)，洞顶上方右侧出现贯穿 C_5, C_6, C_7 的裂缝，宽约0.3 mm，洞顶上方左侧在 C_5 内也出现裂缝，宽约0.1 mm(图7、图8)。

(3) 第三阶段(整体塌落)

图9给出了该阶段的变形现象，即顶拱发生掉

块塌落,发生破裂—破碎,最大裂缝宽1.8 mm,裂缝 f ,最大发展宽度为5 mm左右, C_8 岩层出现内鼓迹象,但没发生掉块现象,且洞底与洞壁部分变化不明显。

整个试验结果表明:在隧道开挖后,随着时间的推移,开挖影响范围内的围岩受到应力集中作用影响,先后发生向隧道内部轻微鼓起、变形累积发生明显隆起裂缝、最后变形岩体脱离整体围岩形成坍塌挤入洞内的变形破坏现象,与现场开挖过程中的变形破坏现象基本一致。该隧道围岩的变形破坏机制可归纳为典型的弯曲内鼓—拉裂—折断塌落模式^[3]。

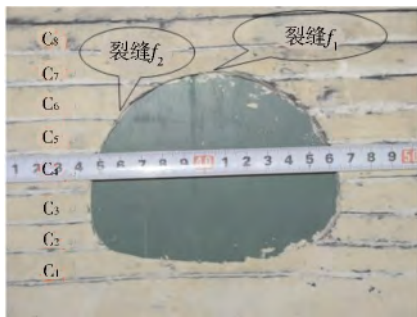


图7 模型开挖后第二阶段初期变形特征

Fig.7 Initial deformation characteristics at the second stage after excavation shown by the model

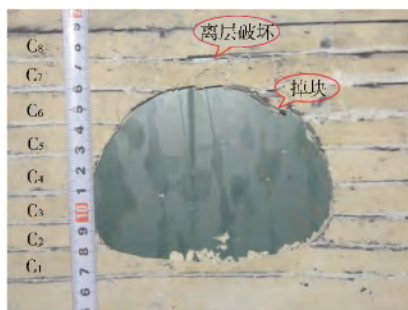


图8 模型开挖后第二阶段弯曲拉裂变形特征

Fig.8 Bending and cracking characteristics at the second stage after excavation shown by the model

7 模拟结果可靠性分析

为了验证以上底摩擦试验研究结果的可靠性,采用2D-Block二维离散元分析软件对水平岩层隧道开挖后出现变形破坏的过程进行了模拟分析。结果显示:隧道水平层状围岩在开挖后的变形破坏^[6-8]过程也大致可分为三个阶段,基本与物理模拟结果一致,而且与现场实际情况大致吻合。

在离散元模拟过程中,通过简化岩土层面、确定边界条件和确定参数建立模型,如图10所示。

模拟结果显示,隧道水平围岩的变形破坏过程可以分为三个阶段:

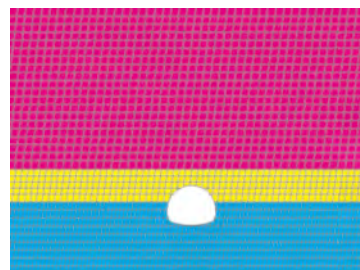


图10 隧道离散元模型

Fig.10 UDEC model of the tunnel

(1) 变形与不稳定块体形成阶段(第一阶段)

隧道爆破开挖导致围岩应力重分布,围岩局部发生应力集中现象,且在卸荷作用下,位于拱顶和拱肩部位的两组节理面组合切割的岩块向爆破开挖导致的临空面发生变形(图 11)。

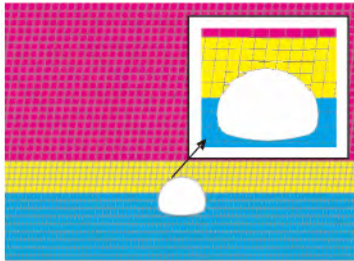


图 11 不稳定块体形成阶段
Fig.11 Formation stage of unstable blocks

(2) 不稳定块体失稳阶段(第二阶段)

随着节理裂隙的发展,拱肩部位不稳定块体逐渐与周围岩体分离,由于周围岩体对其摩阻力减小,最终导致不稳定块体开始向下运动。图 12 给出了拱肩处岩体的塌落和拱顶围岩出现的离层变形现象。

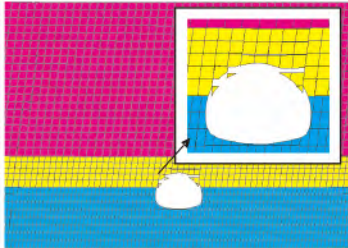


图 12 不稳定块体失稳阶段
Fig.12 Failure stage of unstable blocks

(3) 局部破坏与不稳定块体掉落阶段(第三阶段)

图 13 给出了不稳定块体掉落阶段的变形破坏过程。不稳定块体完全掉落,与母岩分离;随着拱顶处围岩层面间距的逐步变大,产生离层破坏,最终掉

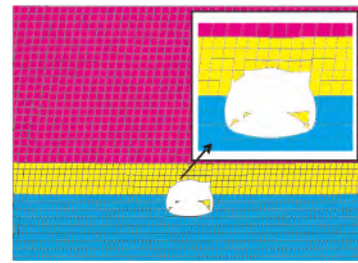


图 13 不稳定块体掉落阶段
Fig.13 Collapse stage of unstable blocks

落底部。

从离散元模拟过程及结果来看,在开挖后隧道水平围岩应力重新分布,导致应力集中,先后经历了拱顶拱肩发生微小变形、变形加剧围岩发生离层、最终掉落隧道底部的全过程,基本完整地再现了水平围岩隧道在施工开挖后的变形破坏过程及特征,与物理模拟实验结果一致^[9]。

8 结 论

本文在对隧道围岩体的物质组成和结构力学特征分析的基础上,定性分析该隧道围岩体的变形破坏机制,通过物理模拟^[10]室内底摩擦试验和离散元数值模拟基本再现了该隧道在开挖过程中的变形破坏特征^[11],其结果表明:

- (1) 室内底摩擦试验很好地验证了现场调查分析得出的隧道开挖后隧道围岩体初期变形破坏机制;
- (2) 该隧道开挖后由于应力回弹作用,围岩体先后会发生拉裂、折断、塌落和内鼓现象,围岩变形破坏机制可归纳为弯曲-拉裂-折断塌落模式;
- (3) 离散元数值分析和室内底摩擦试验两者的模拟结果基本吻合,具有一定的相互验证作用;
- (4) 采用室内底摩擦模型试验和离散元数值模拟,能够较好地预测隧道在开挖过程中围岩体的变形特性,对隧道施工可提供一定的技术支撑,在隧道开挖后应及时对围岩体采取支护措施,以加强围岩自身承载能力,以此满足工程需要。

参考文献

References

- [1] 石豫川,冯文凯,冯学纲,等. 国道 108 线某段缓倾角顺层边坡变形破坏机制物理模拟研究[J].成都理工大学学报(自然科学版), 2003,30(4):350-355
Shi Yuchuan, Feng Wenkai, Feng Xuegang, et al. Study on Mechanism of Deformation Failure of a Low-Angle Dip Bedding Slope of National Highway NO.108 by Physical Simulation Method [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science & Technology Edition), 2003, 30(4):350-355
- [2] 徐进. 斜坡变形破坏几种基本地质力学模式的物理模拟研究[D].成都:成都理工大学, 1987

- Xu Jin. Physical Simulation Study on Several Basic Geomechanics Modes of Slope Deformation Failures [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1987
- [3] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 1994
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Analysis Theory of Engineering Geology (2nd Edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994
- [4] 徐昌茂, 吴立, 吴双兰, 张良刚, 江帆. 超大断面高速铁路隧道围岩变形预测分析[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(6): 80-84
Xu Changmao, Wu Li, Wu Shuanglan, Zhang Lianggang, Jiang Fan. Rock Deformation Prediction and Analysis in High-Speed Railway Tunnels with Larger Sections [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(6): 80-84
- [5] 张桂民, 李银平, 杨长来, 刘伟, 施锡林, 杨春和. 软硬互层盐岩变形破坏物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1813-1820
Zhang Guimin, Li Yinping, et al. Physical Simulation of Deformation and Failure Mechanism of Soft and Hard Interbedded Salt Rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1813-1820
- [6] 宁寅, 冯伟, 马永其, 朱斌. 泥水盾构下穿已有隧道施工过程数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5): 63-69
Ning Yin, Feng Wei, Ma Yongqi, Zhu Bin. Numerical Simulation of the Construction Process of A Slurry Balance Shield Traversing Under an Existing Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(5): 63-69
- [7] 赵瑜, 李晓红, 顾义磊, 陈陆望, 李丹, 陈浩. 高应力区隧道围岩变形破坏的数值模拟及物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 393-397
Zhao Yu, Li Xiaohong, Gu Yilei, Chen Luwang, Li Dan, Chen Hao. Numerical Simulation on Deformation and Failure of Surrounding Rock in High In-situ Stress and Its Verification in Physical Model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S): 393-397
- [8] 刘海, 沈军辉, 等. 穿越古滑坡川主寺隧道围岩破坏特征及稳定性研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(1): 53-59
Liu Hai, Shen Junhui, et al. A Study of the Failure Features and Stability of Surrounding Rock of the Chuanzhusi Tunnel Passing through the Ancient Landslide [J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(1): 53-59
- [9] 郑邦宝, 蒋树屏, 王晓雯, 文栋良. 公路隧道减震模型试验及数值模拟[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(4): 59-64
Zheng Shengbao, Jiang Shuping, Wang Xiaowen, Wen Dongliang. Model Test and Numerical Simulation of Vibration Attenuation for Highway Tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(5): 59-64
- [10] 漆泰岳, 谭代明, 吴占瑞. 隧道全空间瞬变电磁响应的物理模拟[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(1): 53-59
Qi Taiyue, Tan Daiming, Wu Zhanrui. Physical Simulation of the Transient Electromagnetic Response Throughout a Whole Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(1): 53-59
- [11] 刘建友, 赵勇, 李鹏飞. 隧道围岩变形机制及其本构关系研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(6): 54-61
Liu Jianyou, Zhaoyong, Li Pengfei. A Study of the Deformation Mechanisms and Constitutive Relations of a Tunnel's Surrounding Rock [J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(6): 54-61

Simulation Study on the Deformation and Failure Mechanism of Level Rock in Tunnels

Liu Peng¹ Ji Feng² Wen Shuyi¹

(1 China Southwest Research Institute Co. Ltd., Chengdu 611731; 2 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract Based on an analysis of the material composition and structural mechanical characteristics of tunnel surrounding rock, the deformation and failure mechanism of the surrounding rock in a certain tunnel was qualitatively analyzed, the rational test parameters for the base contact friction experiment were determined and an indoor geological model was established according to in-situ stratum bedding and joint occurrences, with the results indicating that deformation of the surrounding rock can be divided into three phases, i.e., bending and inward heaving, tensile cracking, and breaking and collapsing. This was verified for the tunnelling process using a 2D-UDEC numerical simulation, with the results being basically consistent with that of the laboratory model experiment. Thus it is clear that prediction of the deformation behavior of surrounding rock during tunnelling is possible by adopting this indoor model experiment and UDEC numerical simulation.

Keywords Tunnel; Deformation behavior of surrounding rock; Model experiment; UDEC simulation