

# 城市地下工程中尺度试验装置的 研制及初步试验应用

覃卫民, 任伟中, 周正明

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 针对城市建设中公路隧道、地铁及市政隧道建设带来一系列的环境保护问题, 开展中尺度物理模型试验装置的研制, 该试验装置主要由试验台架系统、测试装置和掘进系统等 3 个独立部分组成。通过对掘进系统的特色设计, 分别实现隧道开挖、地铁盾构开挖和管涵顶推等施工方式对地层环境的影响模拟。通过地层材料配比试验, 得到试验材料选择的试验方法和流程。隧道开挖模型的初步试验表明, 采用 Peck 公式预测的地表沉降值偏小, 且横向沉降槽曲线形状与高斯分布有一定的差距, 因此不宜将 Peck 公式用于该类型土力学试验的地表沉降预测。同时, 就隧道开挖模拟的初步试验发现的一些问题进行分析并给予后续研究展望。

**关键词:** 地下工程; 开挖模拟; 隧道模型; 地表沉降

**中图分类号:** U 91

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2012)增 2-3994-07

## DEVELOPMENT AND PRELIMINARY TEST OF EQUIPMENT OF MESOSCALE TEST IN URBAN UNDERGROUND ENGINEERING

QIN Weimin, REN Weizhong, ZHOU Zhengming

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Aiming at a series of environmental protection problem brought by urban construction including highway tunnel, subway and tunnel construction, the development of mesoscale physical scale model test equipment is carried out. The test equipment mainly consists of bench system, measuring equipment, and tunnelling system, which belongs to separate component. Because of the characteristics design of tunnelling system, influence on surrounding environment by physical simulation of different construction methods are respectively achieved in three aspects including tunnelling, underground excavation and pipe culverts shield pushing. After the materials formation ratio test, the test methods and processes of geologic strata material are selected. The preliminary test of tunnelling model shows that the value of surface subsidence predicted by Peck formulas is too small, and its transverse settlement trough shape has a certain gap by comparing with Gaussian curve, so it is not appropriate for prediction of surface subsidence by Peck formulas in this type of soil mechanics test. According to some of the questions found in preliminary tests of tunnelling simulation, some follow-up research prospects are given by the researchers.

**Key words:** underground engineering; excavation simulation; tunnel model; surface subsidence

**收稿日期:** 2011-07-13; **修回日期:** 2012-01-05

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732101)

**作者简介:** 覃卫民(1973-), 男, 硕士, 1996年毕业于武汉水利电力大学水利水电建筑工程专业, 现任副研究员, 主要从事岩土工程安全监测、技术开发等方面的研究工作。E-mail: qwm1973@sohu.com

## 1 引言

随着国民经济的快速发展，城市地下空间的开发利用也日渐频繁，公路隧道、地铁及各类市政隧道的建设越发普及，同时带来一系列的环境保护问题，时而引发地面沉陷、交通中断、周边建筑物及地下管线受损等事故，从而造成严重的经济损失和不良的社会影响<sup>[1]</sup>。因此，有必要对城市地下工程建设的安全性进行研究。

在地下工程模型试验研究领域，前人做了大量的工作。在公路隧道方面：蒋树屏等<sup>[2]</sup>采用公路隧道及围岩综合试验系统模拟了隧道在多种开挖方法下的施工力学效应；张强勇等<sup>[3]</sup>研制了一种组合式地质力学模型试验系统，进行了分岔隧道的大型模型试验。在水电站地下洞室群方面：李仲奎等<sup>[4]</sup>研制了一种离散化三维多主应力面加载试验系统，针对金沙江上游某水电站进行了大型洞群模型试验；陈安敏等<sup>[5]</sup>研制了 YD-A 型岩土工程多功能模拟试验装置，针对小浪底工程进行了地下洞群模型试验；朱维申等<sup>[6-7]</sup>研制了一种具有超低摩擦力，带滚珠式滑动墙的自平衡式梯级加载的大型真三轴加荷模型试验系统，对深埋、高地应力条件下地下洞群围岩稳定性进行研究。在采矿工程中，姜耀东等<sup>[8]</sup>研制了适合于软岩巷道矿压显现的真三轴巷道平面模型试验系统，并进行复杂条件下巷道稳定性的模型试验。在城市地铁隧道方面：朱合华等<sup>[9]</sup>在人工配制的模型土中进行掘进模拟，探讨盾构机工作参数和地层物理力学特性之间的地层适应性理论；刘纪峰等<sup>[10]</sup>研制了模型盾构掘进试验系统，通过隧道埋深、支护压力和推进速度等 3 个参数的变化，监测隧道周围地层变形及周边土压力的变化，对盾构隧道开挖引起地层变形规律进行研究；叶飞等<sup>[11]</sup>对目前盾构隧道模型试验所涉及到的问题进行了系统总结分析，对每类问题进行了分析阐述，系统归纳了模型试验在盾构隧道相关研究工作中的进展和成果。此外，房倩等<sup>[12]</sup>研制了隧道开挖模拟模型试验平台，分别对黏性材料和砂性材料 2 种典型地质条件下隧道围岩的渐进破坏特点、变形规律进行研究。

为研究城市地下工程施工对周边环境产生的影响，在国家重点基础研究发展计划(973)项目的资助下，中尺度物理模型试验装置的研制得以启动。本

文介绍了中尺度物理模型试验装置的初期研制情况，并针对城市地下工程中的公路隧道开挖、地铁盾构开挖和管涵顶推等施工方式对周边环境的影响进行初步试验及研究。

## 2 中尺度试验装置的研制

本课题的试验研究工作涉及小尺度试验、中尺度试验和大尺度试验，小尺度试验是观测土体厘米级和毫米级的土体的变形行为，而中尺度试验是研究分米级的土体的变形行为，大尺度试验则是现场原型试验。三者之间相互独立又存在联系，而中尺度试验在整个试验研究中起到连接纽带的作用。

需要说明的是，中尺度试验装备的研制目标是进行模型试验，但是目前处于初期阶段，配套设备研制和测试手段尚未完善，还不完全具备针对具体工程进行模型试验的条件。目前我们把装置的应用看成真三维土力学试验，旨在通过多次试验获得有效数据，为地层渐进破坏的机制和演化规律提供基础资料。

中尺度试验装置具有结构简单、操作简便的优点，目前的量测方法采用量表法，但量测精度满足试验要求。通过对试验台架和掘进系统的特色设计，可以分别针对公路隧道开挖、地铁盾构开挖和管涵顶推等施工方式对周边环境的影响进行研究，具有适用面广的特点。

中尺度试验装置主要由试验台架系统、测试装置和掘进系统 3 个独立部分组成(见图 1)。



图 1 中尺度物理模型试验装置

Fig.1 Equipment for mesoscale physical model test

### 2.1 试验台架系统

试验台架系统主要由钢板底座、钢立柱、钢板支座、角钢骨架、有机玻璃板 5 个部分组成(见图 2)，各部分之间通过螺栓固定的方式连接固定起来。

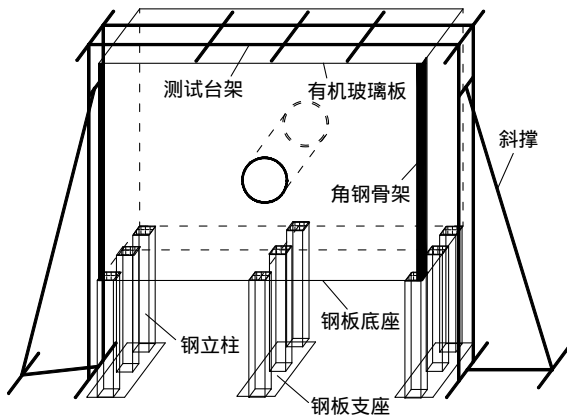


图 2 试验装置示意图

Fig.2 Sketch of test equipment

由于有机玻璃板与钢板底座围成的容器尺寸约为 1 m×1 m×0.7 m，填满土层后的最大质量约为 1 400 kg，因此试验容器的下部采用 20 mm 厚的钢板底座，四周有机玻璃板的厚度为 20 mm，以满足材料强度要求。钢板底座由 4 块钢板采用螺栓固定的方式拼装而成。

在钢板底座、角钢骨架、有机玻璃板上分别钻眼，通过螺栓固定的方式将三者之间分别固定起来。

### 2.2 测试装置

测试装置主要由测试台架和斜撑组成(见图 2)，各部分之间通过螺栓固定的方式连接固定起来。测试台架是用来架设百分表等测试仪表的，为保证测试台架的稳定，在其两侧设置了斜撑。

### 2.3 掘进系统

掘进系统主要由钻头、转轴、摇轮、支架、底座及调节螺丝等组成(见图 3)。

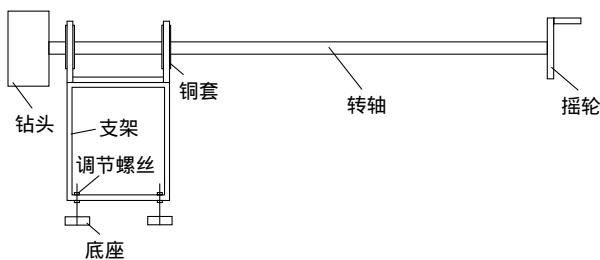


图 3 掘进系统侧面示意图

Fig.3 Sketch of side view of tunneling system

掘进系统是中尺度试验装置研制的亮点：(1)

模型试验中的掘进方式对应于城市地下工程中不同的施工项目，如手工掘进对应于常规隧道开挖，而采用钻头掘进对应于盾构开挖和管涵顶推等。(2) 钻头参数的变化对应于不同的试验工况，如钻头的大小对应于不同的覆跨比(见图 4)，而采用方形钻头则对应于箱涵顶推工程。



图 4 掘进钻头

Fig.4 Boring bit

在支架和底座间设置调节螺丝，通过在调节螺丝可以保证掘进系统在掘进过程中保持纵向和横向上的水平状态。

## 3 地层材料配比试验

在中尺度试验设计中，地层材料用黏土和粒径小于 2 mm 的细砂配制而成。

由于中尺度试验台架容积约为 0.7 m<sup>3</sup>，将砂土拌合均匀并装入模型台架压实的工作量不小，通常需要 3~4 d 时间才能就位。因此，有必要对试验中砂土的配比进行研究，以防止在开挖隧道过程中出现无明显变形的现象，从而失去研究变形规律的试验意义。

### 3.1 试验流程和小模型试验

砂土配比试验的流程见图 5。对试验砂土的选择初定一定的比例范围，分别在边长为 150 mm 的立方体模具里制作试块。然后在试块上安装测试装置，采用百分表对隧道开挖过程中试块顶部的竖向位移进行测试(见图 6)。

根据尺度的相似比关系，在试验中约定：在覆跨比为 0.5 的条件下，以开挖过程中最大累计位移大于 0.1 mm 为标准，采用该配比制作的小尺度模型试验连续 3 次达到该标准为可选用配比。

### 3.2 材料配比选择

经过数十次小模型开挖试验(见图 7)发现：在达到上述累计位移标准的试验中，砂与土的比例大小

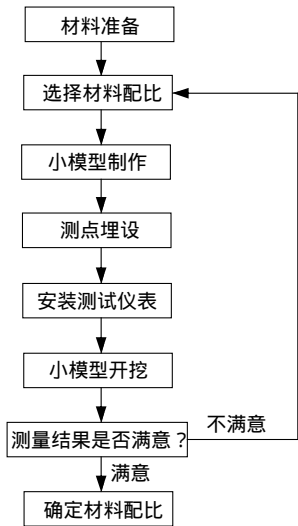


图 5 试验材料配比试验流程

Fig.5 Process of material ratio test

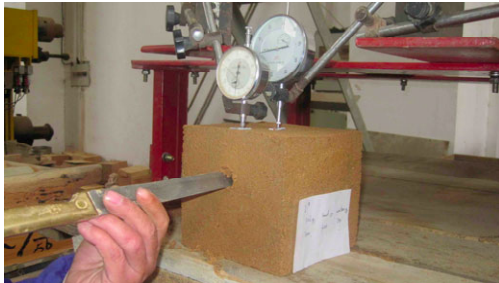


图 6 小模型开挖试验

Fig.6 Excavation test of small-scale model



图 7 开挖试验后小尺度隧道模型

Fig.7 Small-scale model after excavation test

的几乎都大于 1.2。为给试验留有余地，应适当增大砂的比例，最终确定中尺度试验采用的首次材料配比为：砂 土 水=9 6 2。

## 4 中尺度试验装置的应用

为方便研究，使得研究成果更具有普适性，中尺度试验的隧道断面选取圆形。

### 4.1 测试方法

在中尺度试验的初步试验中，以获得隧道上方

土体表面沉降数据为目的。原计划采用摄影测量方法对隧道上方表面沉降进行量测，但实际操作中，由于拍照角度不理想影响测试精度而放弃，改用百分表结合千分表的量测方法。

测点选用十字螺钉剪掉螺杆制成，共设置 5 排测点，测点间的排距为 10 cm，同排的测点间距为 10 cm，以隧道中轴线对称布置(见图 8)。



图 8 沉降量测装置

Fig.8 Device for settlement measurement

待每一次开挖进尺完成，间隔 5 min 后进行读数，读数完成后即可进行开挖下一个进尺。

### 4.2 隧道开挖试验

采用手工掘进的方式模拟隧道开挖(见图 9)，隧道开挖直径为 20 cm，实测隧道覆盖层厚 5.5 cm。在隧道开挖期间，位于隧道中央正上方的 2#，5#，8#测点的沉降曲线见图 10。



图 9 隧道开挖模拟试验

Fig.9 Tunneling simulation test

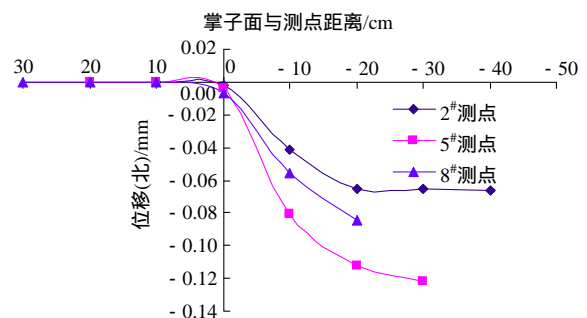


图 10 隧道开挖引起的地表沉降曲线

Fig.10 Surface subsidence curves caused by tunneling

从图 10 可以看出,随着掌子面的推进,掌子面距离测点 10 cm 时,测点还没出现下沉;掌子面到达测点时,测点出现少许下沉,下沉值为 0.002 ~ 0.007 mm;掌子面穿过测点后,测点的下沉处于加速状态;当距跨比(掌子面到测点距离与洞径之比)为 0.5(测点在掌子面后 10 cm)时,阶段性下沉值(掘进距离为 10 cm 期间的下沉值)为 0.039 ~ 0.077 mm;当距跨比为 1.0 时,测点的下沉减缓,阶段性下沉值为 0.024 ~ 0.038 mm;随着距跨比的增大,测点的阶段性下沉值逐渐减小至稳定状态。

### 4.3 顶管施工试验

采用手工掘进的方式模拟顶管施工(见图 11),隧道开挖直径为 20 cm,实测隧道覆盖层厚 7.5 cm。在隧道开挖期间,位于隧道中央正上方的 2#, 5#, 8#测点的沉降测试曲线见图 12。

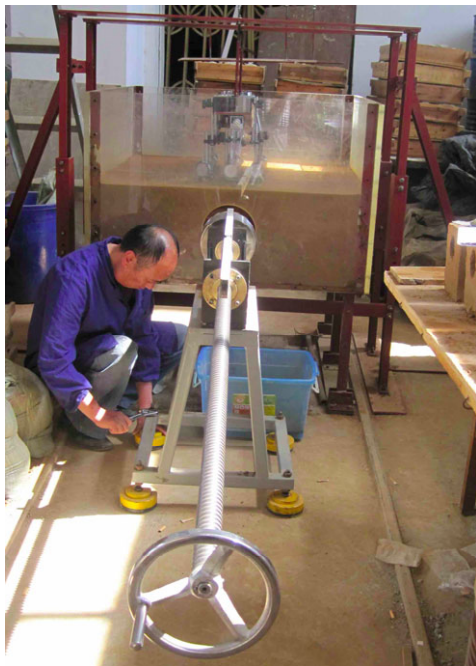


图 11 顶管施工模拟试验  
Fig.11 Pipe jacking simulation test

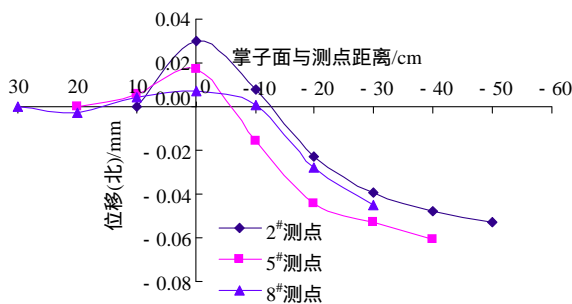


图 12 顶管施工引起的地表沉降曲线  
Fig.12 Surface subsidence curves caused by pipe jacking

从图 12 可以看出,随着掌子面的推进,前方测点呈现上抬现象,掌子面距离测点 10 cm 时,最大上抬值为 0.006 mm;掌子面到达测点时,测点呈现上抬加速的现象,上抬值为 0.007 ~ 0.030 mm;掌子面穿过测点后,测点开始呈现下沉现象;当距跨比为 0.5 时,阶段性沉降值(掘进距离为 10 cm 期间的沉降值)为 0.006 ~ 0.033 mm;当距跨比为 1 时,测点的沉降减缓,阶段性沉降值为 0.028 ~ 0.031 mm;当距跨比为 1.5 时,测点的沉降减缓,阶段性沉降值为 0.009 ~ 0.017 mm;随着距跨比的增大,测点的阶段性下沉值逐渐减小至稳定状态。

## 5 分析与探讨

### 5.1 地面沉降最大值

根据 Peck 公式,对圆形隧道,隧道中心线正上方的最大沉降值  $S_{max}$  由以下公式<sup>[13-14]</sup>给出:

$$S_{max} = \frac{0.313VD^2}{i} \tag{1}$$

$$i = \frac{Z}{2.5 \tan(45^\circ - 0.5\varphi)} \tag{2}$$

式中:  $D$  为隧道开挖直径,  $V$  为地层损失率,  $Z$  为隧道埋深,  $\varphi$  为土体内摩擦角。

在试验后取样进行地层的物理力学参数试验,取  $\varphi = 32^\circ$ ,  $D = 0.2$  m,  $Z = 0.055$  m,  $V = 3 \times 10^{-4}$ , 将其代入式(1), (2), 可以得出隧道中心线正上方的最大沉降值  $S_{max} = 0.024$  mm, 远小于实测的最大值 0.124 mm。

由此可见,在本类型土力学试验中,不宜将 Peck 公式用于地表沉降预测。

### 5.2 地面横向沉降槽

图 13 为隧道开挖引起的地面沉降曲线,从图中可以看出,沉降槽曲线形状与高斯分布有一定的差距,隧道边缘及以外的区域在隧道开挖期间大都处于上抬状态。

分析认为,采用人工压实地层可能会造成各区域地层存在一些不均匀性,另外地层中砂粒颗粒大小分布的差异也会影响沉降槽曲线形状。

根据一些隧道工程监测资料,在隧道边缘及以外的区域,地表测点往往都处于下沉状态。而在十多次本类型的物理模型试验中,相同区域的地表测

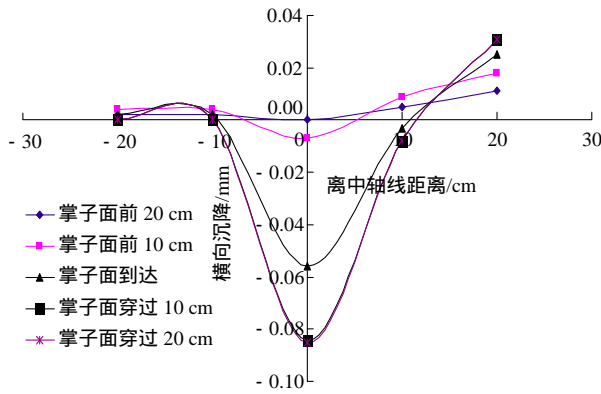


图 13 隧道开挖引起的地表横向沉降曲线

Fig.13 Surface transverse settlement curves caused by tunneling

点大都处于上抬状态。分析认为，试验中的隧道开挖引起地层应力重分布出现上抬现象，由于试验时间不长地层失水非常小，由失水造成的地层固结沉降基本可以忽略不计。

### 5.3 展望

由于本阶段只是进行了一些中尺度土力学试验的初步试验，在试验过程中发现一些问题，需要在下一阶段做进一步研究，主要表现在：

- (1) 扩大地层材料的配比范围，继续研究和验证 Peck 公式的适用范围。
- (2) 加大测试手段的自动化程度，使测试数据的采集同步，有利于测试数据的分析。
- (3) 对试验台架进行适当改造，增加地下水渗流模拟，研究水土耦合条件下隧道开挖对地层环境的损伤机制。
- (4) 扩大覆跨比、距跨比等试验工况范围，揭示地层渐进破坏的机制和演化规律和地层渐进破坏的尺度效应。
- (5) 进一步开发掘进系统，力争在下一步试验工作中考虑支护因素。

## 6 结论

采用自行研制的中尺度试验装置，可以分别针对公路隧道开挖、地铁盾构开挖和管涵顶推等施工方式对周边环境的影响进行研究，具有适用面广的特点和优点。

(1) 通过对掘进系统的特色设计，分别实现隧道开挖、地铁盾构开挖和管涵顶推等施工方式对地层环境的影响模拟。

(2) 通过砂土配比试验，给出了试验材料选择的试验方法和流程。

(3) 隧道开挖模拟的初步试验表明，采用 Peck 公式预测的地表沉降值偏小，且横向沉降槽曲线形状与高斯分布有一定的差距，因此不宜将 Peck 公式用于本类型土力学试验的地表沉降预测。

### 参考文献(References)：

- [1] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥：安徽教育出版社，2004：220-251.(WANG Mengshu. Technology of shallow tunnel excavation[M]. Hefei：Anhui Education Press，2004：220-251.(in Chinese))
- [2] 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 of construction mechanics behavior of road tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 662-666.(in Chinese))
- [3] 张强勇，李术才，尤春安，等. 新型组合式三维地质力学模型试验台架装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(1)：143-148.(ZHANG Qiangyong, LI Shucai, YOU Chun'an, et al. Development and application of new type combination 3D geomechanical model test rack apparatus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 143-148.(in Chinese))
- [4] 李仲奎，卢达溶，中山元，等. 三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(9)：1430-1436.(LI Zhongkui, LU Darong, NAKAYAMA H, et al. Development and application of new technology for 3D geomechanical model test of large underground powerhouses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1430-1436.(in Chinese))
- [5] 陈安敏，顾金才，沈俊，等. 地质力学模型试验技术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(22)：3785-3789.(CHEN Anmin, GU Jincai, SHEN Jun, et al. Application study of geomechanical model experiment techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3785-3789.(in Chinese))
- [6] 朱维申，李勇，张磊，等. 高地应力条件下洞群稳定性的地质

- 力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 308 – 1 314.(ZHU Weishen, LI Yong, ZHANG Lei, et al. Geomechanical model test on stability of cavern group under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 308 – 1 314.(in Chinese))
- [7] 朱维申, 张乾兵, 李 勇, 等. 真三轴荷载条件下大型地质力学模型试验系统的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 1 – 7.(ZHU Weishen, ZHANG Qianbing, LI Yong, et al. Development of large-scale geomechanical model test system under true triaxial loading and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 1 – 7.(in Chinese))
- [8] 姜耀东, 刘文岗, 赵毅鑫. 一种新型真三轴巷道模型试验台的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 727 – 3 731.(JIANG Yaodong, LIU Wengang, ZHAO Yixin. Design and development of a new type of triaxial system for roadway model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 727 – 3 731.(in Chinese))
- [9] 朱合华, 徐前卫, 傅德明, 等. 地层适应性盾构模型试验设计方法初探[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1 437 – 1 441.(ZHU Hehua, XU Qianwei, FU Deming, et al. Study on design principle of shield machine applicable to different strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1 437 – 1 441.(in Chinese))
- [10] 刘纪峰, 刘 波, 张会芝. 盾构隧道致地层沉降的物理模型试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(3): 91 – 98.(LIU Jifeng, LIU Bo, ZHANG Huizhi. Experimental study on the shield tunnelling-induced surface settlement[J]. Industrial Construction, 2011, 41(3): 91 – 98.(in Chinese))
- [11] 叶 飞, 何 川, 王士民. 浅析盾构隧道模型试验的现状与发展[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 66 – 74.(YE Fei, HE Chuan, WANG Shimin. Discussion on present situation and development of model test of shield tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(1): 66 – 74.(in Chinese))
- [12] 房 倩, 张顶立, 王毅远, 等. 圆形洞室围岩破坏模式模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 564 – 571.(FANG Qian, ZHANG Dingli, WONG Louis Ngai Yuen, et al. Model test study of failure modes of surrounding rock for circular caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 564 – 571.(in Chinese))
- [13] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S.l.]: [s.n.], 1969: 225 – 290.
- [14] 韩 焯, 李 宁, STANDING J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 23 – 29.(HAN Xuan, LI Ning, STANDING J R. An adaptability study of Peck equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 23 – 29.(in Chinese))