

新加坡城市地下空间开发利用现状及启示

李地元,莫秋喆

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

摘要 新加坡地少人多,人口密度已接近10000人/km²,土地资源严重不足。为此,新加坡政府对其城市地下空间的开发给予了高度重视。从20世纪80年代开始,新加坡先后开发建设了一系列适应其发展水平的地下空间工程,如地铁、地下商业街、地下停车场、地下管网系统、地下储存库、大型地下公共空间等。其地下空间工程的开发,无论是在理论知识还是技术实践方面,都取得了令世人瞩目的成绩。本文介绍新加坡一些典型地下空间工程案例,探讨其在工程建设过程中所遇到的主要技术难题和所取得的科技攻关成果,从而汲取其宝贵的工程实践经验。结合中国当前一些大中城市地下空间开发利用的现状,提出几点建设性意见。

关键词 新加坡;城市地下空间;地铁;隧道;地下储库

中图分类号 TU9

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.06.019

The utilization of urban underground space in Singapore and the lesson that could be learned by China

LI Diyuan, MO Qiuzhe

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Singapore is a country of small land but large population. The population density is close to 10000 per square kilometre. With a severe lack of land resource in Singapore, the government pays a great attention to the development and utilization of the urban underground space. From the 80's in the 20th century, a series of underground space projects in its technical and developmental level have been completed in Singapore. For example, the metro, the underground commercial street, the underground parking, the underground pipe network system, the underground storage cavern, the large public underground space. The development of underground space projects in Singapore has made a remarkable progress both in theory and in practice. The paper first reviews some successful underground space projects and then discusses the technical difficulties encountered in the construction process. The purpose of the paper is to highlight some valuable experiences in both theoretical and practical fields in the urban underground projects. Within the context of the current urban underground space development of large cities in China, some suggestions are made.

Keywords Singapore; urban underground space; metro; tunnel; underground storage cavern

近年来,城市地下空间的开发和利用引起了国内外一些学者和城市管理者的高度关注和热烈讨论。一些具有经济实力的国家和城市都在大力发展地下空间并进行相关研究,以寻求更多人类可以使用的空间^[1-3]。如日本学者Nishida等^[4]指出通过有效利用日本的地下空间、重视整合表层和次表层

地下空间的开发过程,可以创建一个完整的地下空间社区,并提供良好的基础设施,从而提高城市安全。荷兰学者Edelenbos等^[2]也对荷兰地下空间的开发利用进行了策略性研究。德国学者Bobylev^[3]利用数据分析研究柏林地下空间的结构、供水、通讯以及污水等一系列问题。有“花园城市”之称

收稿日期:2014-09-15;修回日期:2015-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51474250,11102239);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-0588)

作者简介:李地元,副教授,研究方向为岩石力学和岩石地下工程,电子邮箱:diyuan.li@csu.edu.cn

引用格式:李地元,莫秋喆.新加坡城市地下空间开发利用现状及启示[J].科技导报,2015,33(6):115-119.

的新加坡,也在地下空间开发和利用方面进行了系统的规划和研究,虽然开发时间不长,但发展迅速,现已成为城市地下空间开发和利用领域的佼佼者。而且,它所开展的地下空间工程建设克服了诸多科学和技术难题,为地下空间的发展提供了重要的理论基础和工程实践经验。本文结合笔者在新加坡从事博士后研究工作时所了解的一些地下工程实例,在介绍新加坡主要工程地质条件的基础上,列举一些比较典型的新加坡城市地下空间开发利用实例,根据实践和理论相结合的工程建设和开发思路,给出一些对中国城市地下空间开发利用具有启发性的建议。

1 新加坡工程地质概况

新加坡共和国是位于东南亚马来半岛南端的一个岛国,其北面隔着柔佛海峡与马来西亚紧邻,并以长堤相连于新马两岸之间,南面有新加坡海峡与印尼相望。新加坡的国土除了本岛之外,还包括周围数岛。新加坡位于赤道附近,是典型的热带海洋性气候,降水丰富。新加坡是一个人口稠密的高收入城市,它拥有近540万人口(2013年),但国土面积却只有697 km²。新加坡地势起伏和缓,其西部和中部地区是丘陵地,东部以及沿海地带都是平原,地理最高点为武吉知马,高163 m。图1为新加坡的主要岩土体地质分布。

从地质构造学看,新加坡的地质大体上可分为4类^[4]:

- 1) 由火成岩组成的甘柏苏长岩(Gombak Norite)以及武吉知马花岗岩(Bukit Timah granite),分布在北部和中心北部。
- 2) 由沉积岩组成的裕廊组(Jurong Formation)地层,分布在西部和西南部。
- 3) 由第四纪沉积土组成的老冲积层(Old Alluvium),分布在东部。
- 4) 由加冷组(Kallang Formation)沉积组成的冲击层、过渡土层和海洋黏土,遍及整个岛国。

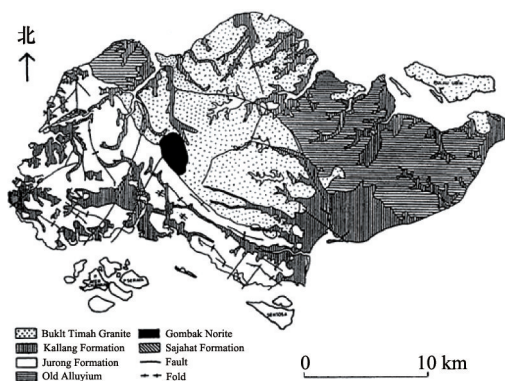


图1 新加坡主要地质分布

Fig. 1 Simplified geological map of Singapore

按新加坡政府在2002年时提出的“在地下再建立一个新加坡”的模式计算,考虑必要的地下原岩支撑面积,则新加坡

的地下空间总面积可约等同于其国土面积的1/3~1/2,即约为200~300 km²,人均地下空间面积可达30~50 m²。新加坡在对城市地下空间进行开发利用时,特别注重与工程地质的结合,其地下空间的开发充分考虑了工程岩土体本身的力学特性。以下对新加坡的一些典型地下空间开发利用实例进行介绍。

2 新加坡地下空间利用典型案例

2.1 地铁

新加坡作为举世闻名的国际航空和航运中心,其陆路公共交通也极其发达。以地铁为例,新加坡地铁,又叫大众捷运系统(mass rapid transport, MRT),始建于1987年,现已成为当今世界上最为便捷、高效、明亮、整洁的公共交通系统之一。图2是新加坡当前的捷运系统路线图。新加坡地铁系统分为4条主干线路:东西线(绿线①②③);从巴西立(或从樟宜国际机场)前往西部群岛;南北线(红线④⑤):从滨海湾通往裕廊东;东北线(紫线⑥⑦):连接港湾至东北部的榜鹅;环线(橘黄线⑧⑨⑩):从港湾通往多美哥和滨海湾;其中南北线和东西线,总长83 km,纵横穿越新加坡岛全境,是地铁网络中最主要的干线。



图2 新加坡捷运系统路线

Fig. 2 MRT lines in Singapore

新加坡地铁隧道大多是采用隧道掘进机(TBM)或新奥法(NATM)进行施工,有些地区的隧道则采用明挖法技术施工。由于新加坡很多地铁车站都位于城市中心商务区,因此对隧道施工引起的沉降变形有严格的控制,根据新加坡MRT公司实践和轨道保护规程规定,由隧道施工引起的隧道周边建筑物变形不允许超过15 mm^[5]。如此严格的规定,使得新加坡在修建地铁隧道工程时,对隧道施工、变形监测和管理以及数值模拟分析方面都提出了更高的要求。根据新奥法的原理,隧道施工应特别强调变形观测的重要性,以新加坡地铁南北线建设的C710合同段为例,他们对隧道建设过程中的一些关键截面进行了大量的变形监测,主要包括3部分:地表变形监测、开挖引起的衬砌变形监测和初次衬砌中的钢拱架等主要部件的应力、应变监测^[6]。新加坡因其特殊的地质

构造情况和广泛分布的高层建筑及建筑群,其地铁工程的建设为解决一些同类型的复杂施工条件下的地铁车站及隧道建设提供了良好的案例^[5-9]。此外,新加坡地铁车站的综合集成开发模式也值得国内外城市借鉴^[10]。

2.2 地下管网系统

中国城市地下管网系统建设由于涉及到多个不同单位不同部门之间的协调,致使其规划和建设都相对滞后,如近年来中国一些大中型城市都先后因地下排水系统能力不足而导致城市内涝现象,就是一个典型的例证。而新加坡在城市地下排水系统方面的规划做得相当好,虽然该地区经常遭受暴雨的袭击,但却很少出现城市内涝现象。以下为新加坡城市地下管网系统建设的3个典型例子。

1) 综合管路隧道(common services tunnel)。新加坡市区重建局在滨海湾区修建了1条综合管路隧道,把该区间的主要供水管道、通信电缆、电力电缆等全部集中到这个隧道中,该隧道的截面尺寸为12 m×12 m,其中,管道通道为12 m×8 m,电缆通道为4 m×8 m^[11]。整个工程历时十几年,综合管路隧道的第一阶段长度约1.4 km,已于2004年完工;隧道第二阶段长度约1.6 km,已于2010年完工。

2) 深隧排污系统(deep tunnel sewerage system)。新加坡公用设施局投资兴建了一个深埋隧道排污系统,这个系统的第一阶段包括一条长约48 km的排水深隧道和一座污水处理厂(樟宜污水处理厂),排水隧道直径最大6 m,隧道埋深20~40 m不等,污水处理厂的设计排水量为80 Mm³/d(最高极限能力可增至240 Mm³/d)。考虑到新加坡将来可能出现的缺水状况,该污水处理厂设计时预留了将处理过的污水净化为工业用水的接口^[11-13]。

3) 电缆隧道(electric cable tunnel),新加坡地底最深的电缆隧道工程已于2012年9月动工。这条电缆隧道深入地下60 m,相当于20层楼高,比一般的地铁隧道还要深一倍。该电缆隧道可装置电压高达400 kV的电缆,以应对130万个家庭、商业和工业用户日益增加的电量需求。与地铁线类似,该隧道工程分为南北线和东西线,主要是为了连接北端和西端的3大发电厂。隧道直径6 m,计划采用盾构法施工,两条隧道长约35 km,预计耗资20亿元。

2.3 地下储存库

新加坡一般被认为是一个没有自然资源的国家,但在新加坡的一次学术报告会议上,新加坡岩石力学与工程地质学会主席周应兴先生指出,新加坡有丰富的地下空间资源和水资源,岩石地下储存空间可以为新加坡储存大量的天然淡水(降雨)资源。事实确实如此,过去十几年,通过大量的工程地质调查和岩石力学试验,发现新加坡中部地区的武吉知马花岗岩和中西部地区的沉积岩层特别适合修建大型地下洞室作为地下储库^[14-18]。早在1995年,新加坡就提出了利用武吉知马花岗岩层修建地下储库和安全庇护洞室的计划^[14]。

20世纪90年代新加坡就在南洋理工大学专门成立了“地下空间和岩石力学”(underground space and rock mechanics,

USRM)研究小组,现改名为“防护技术研究中心”(protective technology research centre, PTRC)。该研究小组的主要研究方向包括^[19]:岩石材料在动态和瞬态载荷作用下的力学特性,动载荷作用下岩石节理的响应特性,冲击波在岩石节理和岩体中的传播,岩体和岩石结构的离散元模拟等,并取得了颇为领先的岩石动力学研究成果,目前这些研究方向仍是岩石动力学研究领域的热门方向。

上述基础研究的工程背景是新加坡计划利用花岗岩优越的抗爆性能,在万礼花岗岩地层中建设地下军火弹药储存库。万礼地区的花岗岩地层属于三叠纪地质期,有2亿年历史,其硬度是水泥的6倍,还有天然冷却作用。万礼军火库由多个储藏仓库组成,每个仓库长100 m,宽26 m,高13 m,由双车道宽的隧道连接。两隧道间至少间隔20 m,满足“当其中一隧道爆炸时,不会对另一隧道产生破坏性影响”的要求。同时每个仓库门口都设置电动钢铸防爆闸,以防爆炸碎片、火势和气浪冲入。此外,每个仓库门口对面都凿有存留爆炸碎片用的空间——留碎室,可存留90%向外冲出的爆炸碎片,也能减缓爆炸火势。万礼军火库还是一个省地、省电、省水、省力的高效军火库。该库建造在地下数十米,与地面军火库相比,所需安全地区面积可以减少90%,相当于400个足球场。同时,由于花岗岩的隔热作用,电力消耗只有地面军火库的一半;雨水收集和地面排水系统每年省水约60000 m³。2008年3月7日,新加坡的万礼地下军火库正式启用。

近年来,新加坡为了应对可能遭遇的石油危机,开始着手修建地下石油储存库。根据新加坡地质条件特点和经济战略布局的要求,以裕廊组(Jurong Formation)沉积岩为主的裕廊岛成为地下储油库的最佳选择地点。裕廊岛位于新加坡西部,是由7个小岛填海造陆而成的人工岛,这里是新加坡的石化产业基地,也是全球第三大石油贸易中心和炼油中心。图3为新加坡海底地下石油储存库的布局示意图。

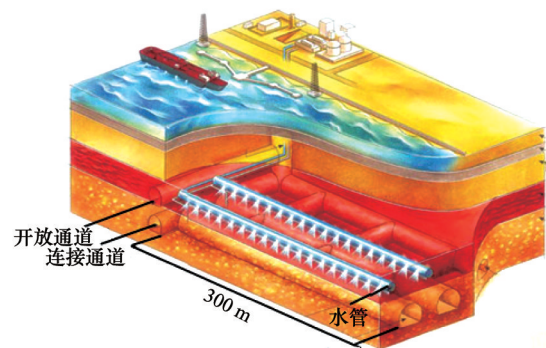


图3 新加坡海底地下石油储存库示意

Fig. 3 Sketch map of subsea underground oil storage cavern in Singapore

由于该地下石油储存库建于海平面以下,在地下洞室开挖建设过程中,海水入侵和地下水渗漏成为需要首先考虑的问题,如水对岩石强度弱化特性的影响分析、地下水渗流场

分析、洞室开挖围岩在流固耦合作用下的稳定性分析等。为此,地下石油储存库项目建设方裕廊集团(Jurong town corporation, JTC)委托新加坡南洋理工大学对洞室建设的全过程进行了大量的室内试验、现场监测和数值模拟研究,并随着工程建设的进度已经取得了一些极具工程实践和技术指导意义的研究成果^[20-23]。目前,该地下储油库第1阶段工程已经完成,最初的两座岩洞已于2013年完工,采用水封油库的方式储油。此外,新加坡政府还计划2014年在海床下100 m深处挖掘5个地下储油库。5座岩洞共有9座储油长廊,每座长廊有9层楼高,可以容纳相当于64座奥运会标准游泳池的液体量。全部完工后的总储油量接近400 Mm³,储油总量可供新加坡全国人民使用1个月。

2.4 大型地下公共空间

为了创造空间容纳新增人口,新加坡有意在地下打造更为广阔的地下公共空间,如新加坡计划在肯特岗(Kent Ridge)公园附近打造一座相当于30层楼的地下科学城。肯特岗公园的表层由砂岩、砾岩和石灰岩3种不同的岩石组成,并含有丰富的断裂和褶皱带,但在50~60 m以下的地下岩层,却具备相当好的工程地质条件,围岩稳定性好,可以建造多功能地下设施。

图4为新加坡地下科学城的概念示意图,从图中可以看到2个明显的竖井。由于新加坡地势平坦,其地下空间的开发依托深大竖井的建设,大型机械设备和人员都通过竖井进入地下空间。该类地下空间开发的竖井直径一般在30 m以上,最高可达60 m,开挖深度在80~100 m。如此巨大的竖井工程建造也存在一系列和岩土工程有关的科学和技术难题,如竖井开挖方法、竖井稳定性、竖井通风排水等。随着工程技术的进步,新加坡也越来越倾向于应用这种深大竖井来开发和建设大型地下空间工程,如地下科学城、地下医院、地下物流等。



图4 新加坡地下科学城概念

Fig. 4 Concept map of underground science city in Singapore

3 对中国城市地下空间利用的启示

新加坡人多地狭,但其城市交通并不拥堵,居民出行方便,生活环境轻松,这与当地政府重视并积极有效地利用地下空间的行为是紧密相连的。可以借鉴新加坡城市地下空间的成功案例来指导中国一些经济发达的大中城市的地下空间开发和利用。建议政府主管部门从以下方面加强对城市地下空间的规划、开发、利用和管理。

1) 健全地下空间资源开发法律法规,强化制度管理。加速中国城市地下空间建设相关法律法规的制定,尽快建立起完整的城市地下空间开发体系。关于地下空间的使用权、所有权等,中国目前还没有统一的成文规定。而这种现状对于中国城市地下空间开发利用的蓬勃发展将产生不利的影 响。国际上一些发达国家已经相继建立了地下空间资源开发的法律法规,新加坡的国土部门、市政部门都对地下空间的合理开发和利用进行了一些制度化的管理。因此,建议中国政府部门加快落实地下空间法律法规的制定,争取城市地下空间的快速有序可持续发展。

2) 坚持规划先行,制定城市地下空间总规划。中国城市地下空间的发展速度日益加快,越来越多的地下工程涌现。然而,因为地下空间划分不合理产生的问题也越来越多。这就需要根据城市未来的发展计划,提早对地下空间进行功能用地划分,避免造成矛盾。同时,在政府进行城市总体规划的过程中,应考虑将地下空间的开发利用与人防建设等功能相结合,争取为城市创造更大的效益。以新加坡的城市地铁建设、地下管网系统建设、深隧排污系统建设和电缆隧道建设为例,因为一些地下隧道线路开发具有并行的特点,地下空间开发时大多都遵循从浅入深、预留连接通道和连接站点的方式进行总体开发。

3) 开展工程地质勘察,总结完善城市地质资料。城市地下空间的开发利用存在高风险性、不可逆性以及难适应性等特点,所以,一个好的工程选址对建筑物的建造来说显得尤为重要。工程选址前的地质基础资料的勘察是关键性因素,如新加坡的万礼地下军火库和裕廊岛的海底地下石油储存库的建设,都是基于其完善的地质勘察资料。虽然,目前展开全国范围内地质情况的勘察工作有较大困难,但可以从一些大中城市开始,逐渐完善中国主要城市工程地质资料库,通过已有的和大量将要勘探的地质钻孔数据,建立所谓的“透明城市”或“三维可视化”城市地下空间模型。

4) 理论联系实际,因地制宜建造地下工程。只有牢牢把握理论联系实际的原则,才能因地制宜地建造出优秀的城市地下工程。例如,新加坡在进行地下工程施工时,总是要将实地考察所得的地质情况和工程设计、施工相结合,尽可能根据实际的工程地质条件建造功能相适应的地下建筑物,并广泛开展与工程建设相关的基础理论研究,如本文提到的裕廊岛海底地下石油储存库。只有这样,所建造的工程才能从根本上达到预期功能。因此,理论联系实际,并将理论应用

于工程实际,提高地下工程建设的能力,也是广大地下空间研究者应注重的方式。

5) 广泛推广并科学普及地下空间知识,寻求更大突破。对中国大多数人来说,城市地下空间概念还相当模糊,甚至很多人说到地下空间,想到的就是地铁或人防这些基本概念。殊不知,全球范围内的“城市地下空间工程”早已包罗万千。就新加坡而言,它的地下工程就涵盖了更为广阔的内容,如地下综合体(地下科学城)、地下仓储设施(地下石油储存)、地下管网系统(城市共同沟)、地下物流系统等。新加坡在地下空间工程方面的成就值得借鉴和参考。因此,中国需要对城市地下空间工程的概念进行广泛的科普,促进人们对地下空间的认识,推动城市地下空间工程学科的进步,从而寻求人类对空间资源需求更为广阔的突破。

4 结论

他山之石,可以攻玉。新加坡因其稀缺的土地资源,而在城市地下空间工程开发建设方面取得了长足的进步。中国以地大物博而闻名,却导致在很长一段时期内忽略了对城市地下空间的规划、开发和利用。目前,随着中国经济的持续发展,大量人口向城市转移,不少大中型城市已出现堵车、内涝、雾霾等环境恶化现象,这与城市地表空间的过度开发和城市摊大饼发展模式不无关系。因此,希望通过汲取新加坡的城市地下空间发展特点和城市地下空间利用的优势,推动中国城市地下空间的规划、管理、开发和利用。这不但可以有效提高中国城市土地的利用率,还可以有效缓解目前中国城市发展建设中所出现的一系列弊病,为中国建设“资源节约型、环境友好型”的两型城市贡献一份力量。

参考文献(References)

- [1] Nishida Y, Uchiyama N. Japan's use of underground space in urban development and redevelopment[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1993, 8(1): 41-45.
- [2] Edelenbos J, Monnikhof R, Haasnoot J, et al. Strategic study on the utilization of underground space in the Netherlands[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998, 13(2): 159-165.
- [3] Bobylev N. Underground space in the Alexanderplatz area, Berlin: Research into the quantification of urban underground space use[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(5): 495-507.
- [4] Sharma J S, Chu J, Zhao J. Geological and geotechnical features of Singapore: An overview[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(4): 419-431.
- [5] Sharma J S, Hefny A M, Zhao J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(2): 93-98.
- [6] Williams I, Osborne N, Thai A E. Recent large-diameter tunnel construction in Singapore using sprayed concrete linings[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(4): 527-538.
- [7] Reilly B J. EPBMs for the North East line project[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(4): 491-508.
- [8] Hulme T W, Burchell A J. Tunnelling projects in Singapore: An overview [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(4): 409-418.
- [9] Zhao J, Gong Q M, Eisensten Z. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 22(4): 388-400.
- [10] 张琦. 新加坡地铁站体的综合开发[J]. *城市轨道交通研究*, 2008, 11(2): 65-67.
Zhang Qi. The integrated development of metro stations in Singapore[J]. *Urban Mass Transit*, 2008, 11(2): 65-67.
- [11] 王鹏. 新加坡工程建设的发展特点[J]. *中国勘察设计*, 2004(1): 24-26.
Wang Peng. The characteristics of engineering construction development in Singapore[J]. *Investigation & Design*, 2004(1): 24-26.
- [12] Marshall R H, Flanagan R F. Singapore's deep tunnel sewerage system: Experiences and challenges[C]//*Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*. Englewood, CO: Society of Mining, Metallurgy & Exploration, 2007.
- [13] Luan I O B. Singapore water management policies and practices[J]. *Water Resources Development*, 2010, 26(1): 65-80.
- [14] Wallace J C, Ho C E, Bergh-Christensen J, et al. A proposed warehouse-shelter cavern scheme in Singapore granite[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1995, 10(2): 163-167.
- [15] Zhao J. Construction and utilization of rock caverns in Singapore part A: The Bukit Timah granite bedrock resource[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(1): 65-72.
- [16] Choa V, Zhao J, Lee K W. Construction and utilisation of rock caverns in the Bukit Timah granite of Singapore[M]. Nanyang: Nanyang Technological University Press, 1995.
- [17] Wong I H. An underground pumped storage scheme in the Bukit Timah granite of Singapore[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(4): 485-489.
- [18] Zhao J, Liu Q, Lee K W, et al. Underground cavern development in the Jurong sedimentary rock formation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(4): 449-459.
- [19] Zhao J, Zhou Y X, Hefny A M, et al. Rock dynamics research related to cavern development for ammunition storage[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(4): 513-526.
- [20] Sun J, Zhao Z. Effects of anisotropic permeability of fractured rock masses on underground oil storage caverns[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(5): 629-637.
- [21] Li D, Wong L N Y, Liu G, et al. Influence of water content and anisotropy on the strength and deformability of low porosity meta-sedimentary rocks under triaxial compression[J]. *Engineering Geology*, 2012, 126: 46-66.
- [22] Wong L N Y, Li D, Liu G. Experimental studies on permeability of intact and singly jointed meta-sedimentary rocks under confining pressure[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(1): 107-121.
- [23] Chen H, Zhao Z, Sun J. Coupled hydro-mechanical model for fractured rock masses using the discontinuous deformation analysis[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 506-516.

(责任编辑 王媛媛)