

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2064

# 深埋隧洞力学响应监测与测试设计的思考

张传庆<sup>1,2</sup>, 高 阳<sup>1,2</sup>, 刘 宁<sup>3</sup>, 周 辉<sup>1,2</sup>, 冯夏庭<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:** 深埋隧洞工程越来越多, 但相关工程经验积累不足, 设计和计算方法远未成熟, 深埋隧洞工程设计和施工安全控制需要大量现场监测和测试数据的支撑, 而现有的监测和测试设计方法均针对浅埋工程的特点提出, 在深埋隧洞施工过程中应用时遭遇到极大挑战。为此, 首先依据现场揭露现象和多种先进观测技术获得的成果, 分析了深埋硬岩隧洞施工期围岩的开挖力学响应特征和运行期衬砌的力学响应特征, 剖析了现今主流观测方法存在的问题, 提出了 6 条关于深埋隧洞典型断面监测和测试设计的建议, 为促进此类工程相关设计方法的完善提供参考。

**关 键 词:** 深埋隧洞; 变形监测; 声波测试; 力学响应; 衬砌

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2626-06

## Reflection on the problems in mechanical response monitoring and testing design of deep tunnels

ZHANG Chuan-qing<sup>1,2</sup>, GAO Yang<sup>1,2</sup>, LIU Ning<sup>3</sup>, ZHOU Hui<sup>1,2</sup>, FENG Xia-ting<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. HydroChina, Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

**Abstract:** Nowadays the number of deep tunnels is greatly increased. Since there are lacking successful numerical methods and experiences from relevant engineering construction and design of deep tunnels, massive on-site monitoring and testing should be conducted to support the design and safety control. The present monitoring and testing design methods are proposed according to the characteristics of shallow underground engineering. However, when they are introduced into the deep tunnels, great challenges are encountered. In this study, the failure of surrounding rock mass in the field was presented and then the deformation and failure responses of surrounding rock mass were obtained during excavation by various advanced observation techniques. Based on the acquired information, this study analyzed the mechanical response characteristics of surrounding rock mass during excavation and lining at the operating period. Then we discussed the problems arising from the application of current modern monitoring methods. Six suggestions were put forward relating to the monitoring and testing design of the representative section in the deep tunnel. This study can provide helpful guidance to improve the design methods in similar projects.

**Keywords:** deep tunnel; deformation monitoring; acoustic wave test; mechanical response; lining

## 1 引 言

隧洞施工期和运行期监测和测试是及时掌握围岩及衬砌状态、客观评价工程稳定性、开展反馈分析设计优化及对工程问题进行科学决策的重要支撑技术。因此, 监测和测试信息的丰富程度、代表性和客观性决定了其有效性。

传统的隧洞监测设计中, 变形特别是收敛变形和洞顶沉降监测占据首要地位, 力学参数反演、以新奥法理念为基础的信息化设计和反馈设计优化等均是变形监测成果为基础数据<sup>[1]</sup>。另外, 传统监测设计中还包括应力监测, 即锚杆轴力、锚索应力、接触压力等, 一般仅在关键部位设置测点。

深埋隧洞特别是硬岩隧洞工程实践中揭露出与

收稿日期: 2016-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51279201); 中国科学院科研仪器设备研制项目资助(No. YZ201344)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51279201) and the Funding of Research Instrument and Equipment Development Project of Chinese Academy of Sciences (YZ201344).

第一作者简介: 张传庆, 男, 1977 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事深部工程灾害防护机理与新技术方面的研究工作。

E-mail: cqzhang@whrsm.ac.cn

浅埋隧洞完全不同的力学响应特征, 表面变形微小、内部破裂范围大、破坏时变形突变、时效破裂问题突出等问题均显著区别于浅埋隧洞。围岩内部破裂及其控制是决定深埋隧洞围岩稳定和支护设计的关键问题, 此时, 传统的变形监测方法在应用中遭遇巨大挑战。

另外, 深埋隧洞中衬砌的荷载环境也异常复杂, 多荷载耦合作用与设计采用的计算工况、计算理论及荷载分布模式存在很大差别, 导致实际衬砌力学响应与传统结构设计计算结果完全不同。建立于后者基础上的衬砌监测设计方法常常忽略不同部位的差异, 将不同监测仪器布置在不同断面中, 导致最终获得的监测成果难以为科学分析衬砌力学响应特征、全面评价其安全性提供支撑。

鉴于以上原因, 本文基于长期深埋隧洞工程实践经验, 结合对深埋隧洞开挖力学响应特征和衬砌力学响应特征的认识, 对此类工程监测和测试设计中的问题提出了一些思考和见解, 以便为促进深部工程监测和测试设计方法的完善提供参考。

## 2 深埋隧洞开挖力学响应特征

正如何满潮院士所指出的:“深部是指工程岩体出现非线性力学现象的深度及其以下的深度区间”<sup>[2]</sup>。深埋隧洞即属于此类深部工程。高地应力是深部工程的主要环境条件, 而岩质类型及其完整程度则决定了深部工程的物质构成, 深部工程岩体受风化影响较小。

与浅埋隧洞不同, 结构完整或较完整硬岩的岩爆和软岩的挤压变形是深埋隧洞施工期的主要工程难题<sup>[3-4]</sup>。除此之外, 剥落、片帮、鼓胀、应力型塌方、应力结构型和结构应力型塌方等高应力导致的围岩损伤破裂和破坏也是深埋隧洞施工中普遍揭露的工程问题<sup>[5]</sup>。剥落、片帮、鼓胀、应力型塌方和岩爆等脆性破坏是 I、II 和 III 级偏好坚硬围岩在高应力下的主要破坏形式, 而 III、IV 级围岩则以应力结构型和结构应力型塌方破坏为主, IV、V 级围岩则更倾向于遭遇挤压变形问题<sup>[6]</sup>。

围岩变形是隧洞开挖过程中其力学响应的外在表现形式, 被广泛作为围岩稳定评判的基础依据。在深埋条件下, III、IV 和 V 级围岩变形较为明显, 且能够反映围岩在集中应力作用下的破坏发展情况。然而 I、II 级和 III 级偏好硬质围岩(本文称为完整性好的硬岩)的开挖力学响应具有特殊性。

在低应力水平下, 完整性好的硬岩只存在局部块体问题, 变形微小, 不需系统支护也很少开展监

测。而在高应力下, 首先是开挖后即出现表层围岩的片帮、剥落, 但可控性好; 然后是深部围岩破裂的发育, 裂纹萌生、扩展、聚集、贯通, 造成一定深度围岩完整性降低、承载能力下降, 损伤累积到一定程度甚至会导致较严重的塌方问题。图 1 为锦屏二级水电站 3#TBM 掘进过程中声发射监测成果, 由图可见, 在距洞壁 9 m 范围内发生了大量声发射事件, 意味着该范围内围岩发生了损伤破裂。图 2 则更为直观地展现出围岩内部的破裂情况。如图 3 所示的声波测试成果也反映了围岩破裂发育深度和程度。

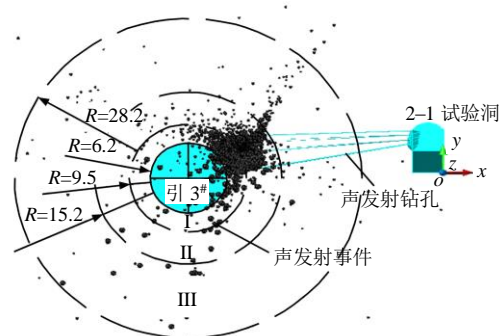


图1 锦屏二级水电站 3#引水隧洞 TBM 掘进过程中围岩声发射监测成果<sup>[7]</sup> (单位: m)

Fig.1 Acoustic emission results in #3 headrace tunnel of Jinping II hydropower station during TBM advancement<sup>[7]</sup> (unit: m)

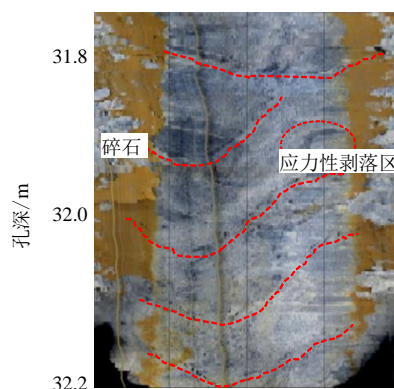


图2 锦屏二级水电站 3#引水隧洞 TBM 掘进过程中围岩破裂的数字钻孔摄像成果<sup>[7]</sup>

Fig.2 Digital borehole camera results in #3 headrace tunnel of Jinping II hydropower station during TBM advancement<sup>[7]</sup>

此时的围岩变形主要为岩体破裂产生的变形, 因此, 岩体内部不同深度处的变形大小可反映岩体破裂发展的程度, 通过多点位移计、滑动测微计或光纤等方法可获得这类变形数据。通过开挖前预设滑动测微计, 监测得到埋深 2 340 m 左右深部地下实验室试验支洞 F (尺寸为 7.5 m×8.0 m) 的总变形

量,最大变形为 2.5 mm<sup>[7]</sup>,洞壁变形量非常小,因此,通过传统的收敛变形监测分析围岩开挖力学响应、评价其稳定性进行施工期支护设计优化几乎不可能。锦屏二级水电站引水隧洞深埋大理岩洞段施工过程中逐步放弃了原来设计的收敛变形观测方案,改为在典型洞段设置多点位移计监测断面。

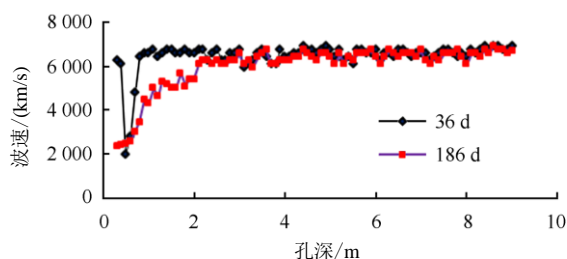
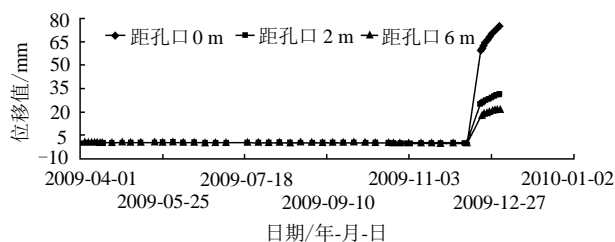


图3 锦屏二级水电站 2#引水隧洞 K13+085 断面 6#孔开挖后不同时期声波测试结果

Fig.3 Acoustic testing results at #6 borehole at section K13+085 in #2 headrace tunnel of Jinping II hydropower station

上述可知,硬质围岩开挖过程中呈现脆性破裂、破坏前变形微小的特点。在围岩破坏前,多点位移计变形极小,而破坏时变形才出现剧烈突变,如图 4 所示。此时洞壁围岩在短时间内即发生了明显鼓胀破裂,部分岩体已经塌落,如图 5 所示。由声波测试可知该部分低波速区深度已经达到 5.2 m,远超该部位刚开挖完后 3 m 左右的深度。



注: 多点位移计埋设位置为洞左边,横坐标起始点为监测起始时间。

图4 锦屏二级水电站 4#引水隧洞 K13+800 断面多点位移计监测结果

Fig.4 Monitoring results using multipoint extensometers at the section K13+800 in #4 tunnel of Jinping II hydropower station



(a) 围岩鼓胀破裂

(b) 围岩节理张开

图5 锦屏二级水电站 4#引水隧洞 K13+800 断面围岩破坏情况

Fig.5 Failure of surrounding rockmass at the section K13+800 in #4 tunnel of Jinping II hydropower station

高应力条件下完整性好的硬岩另一个重要特点是时效破裂问题,即刚开挖揭露围岩的完整性较好,低波速区很浅,但是经过几个月后,就会出现大量表层围岩鼓胀或剥落破坏,如图 6 所示。围岩内部的损伤程度和深度也出现明显增大,如图 3 所示。



图6 锦屏二级水电站 2#引水隧洞埋深 1 800 m 洞段北侧边墙片帮

Fig.6 Splitting at the north side wall at the section buried under 1,800 m depth in #2 tunnel of Jinping II hydropower station

综上可见,控制变形、根据变形进行支护优化的传统监测设计理念已经不适用于深埋硬岩隧洞了。围岩脆性破坏、内部损伤破裂、时效破裂等导致的不稳定问题决定这类隧洞施工期支护优化设计的依据应该以波速测试为主,以围岩深部变形监测为辅。

### 3 深埋隧洞衬砌力学响应特征

深埋隧洞中高地应力引起的硬岩时效破裂效应和软岩挤压变形问题都可能对衬砌产生变形压力,地应力的各向异性导致变形压力分布的各向异性;大埋深同时伴随着高外水压力,高外水压力的作用虽然是各向同性的,但由于各部位围岩破裂程度的不同引起了外水压力分布的不均匀性,这也是影响衬砌受力特征的重要因素;另外,衬砌形状具不规则性,也影响衬砌应力分布。因此,多种荷载因素的耦合作用使得衬砌工作环境非常恶劣,衬砌力学响应也变得复杂。

图 7 为锦屏二级水电站绿泥石片岩挤压变形洞段衬砌钢筋应力监测结果,沿隧洞断面共设置了 8 个点。由图可见,在同一个断面,钢筋应力变异性很大,除了混凝土温度应力作用外,不均匀的变形压力是导致衬砌钢筋应力分布不均匀的重要原因,这同时也说明了混凝土应力分布的不均匀性。如图 8 所示的衬砌混凝土应力分布计算结果进一步说明了这一点。





图 7 锦屏二级水电站绿泥片岩洞段衬砌钢筋应力监测结果 (单位: MPa, 拉正、压负)

Fig.7 Monitoring results of rebar stress in lining at the chlorite schist section in Jinping II hydropower station (unit: MPa, tension is positive and compression is negative)

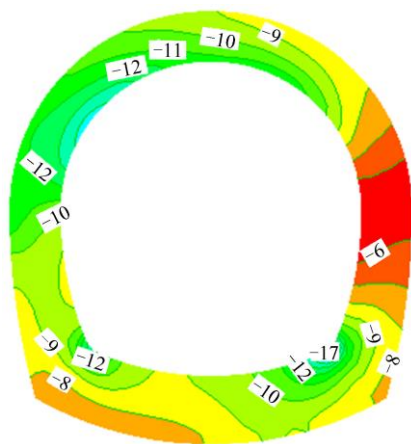


图 8 衬砌混凝土应力分布 (单位: MPa, 拉正、压负)

Fig.8 Stress distribution in lining concrete (unit: MPa, tension is positive and compression is negative)

## 4 监测与测试设计的思考

### 4.1 施工期围岩监测与测试

对于变形响应明显的 III、IV 和 V 级围岩, 采用传统的变形监测思路是可行的, 且变形监测技术非常成熟, 此处不再赘述。然而对于完整性好的硬岩, 由深埋隧洞围岩力学响应特征可知, 其变形微小, 变形监测将难以反映岩体内部实际损伤破裂状态及发展情况, 无法为施工期支护反馈设计优化提供客观信息和数据支撑。因此, 应该更加关注围岩内部破裂的范围、程度和发展演化规律。

在深埋硬岩隧洞施工过程中, 围岩变形是内部破裂的外在表现, 但表面变形太小, 其数据缺乏分析意义。而多点位移计可反映出围岩内部变形的分区特征, 从而间接反映不同深度处围岩的破裂情况, 同时, 此类变形监测可实现开挖过程中的实时监测,

可很好地与开挖过程中的时空效应结合起来。相对于多点位移计变形监测来讲, 声波测试则可更为直接地反映围岩破裂情况, 但无法在开挖过程中开展实时测试。因此, 声波测试和多点位移计监测结合更加适合深埋硬岩隧洞的力学响应特征。

由于工程专业分工的问题, 变形监测布置一般由监测设计专业负责, 而声波测试孔的布置则一般为地质勘察专业负责, 因此, 变形监测断面和声波测试断面常常交错布置。当多点位移计监测到变形突然变化, 而由于洞壁支护系统遮挡无法判断表层围岩情况时, 只能临时在此处布置声波测试钻孔, 以进一步揭示岩体内部破裂发育情况。因此, 只有将多点位移计监测和声波测试两种手段同时布置在同一断面, 才能达到全面掌握和评价围岩实际状态的目的<sup>[8]</sup>。

在浅部工程的实践中, 监测和测试与施工活动的对应问题未得到足够重视, 大部分监测和测试曲线仅反映了监测变量数值与时间的对应关系, 各开挖台阶掌子面的空间状态和支护情况等信息缺乏, 在相关工程经验积累非常丰富的前提下, 这些问题并未对工程设计与施工造成明显影响。而深埋隧洞工程实践经验缺乏, 人们对围岩响应及其与支护相互作用问题的认识尚不深刻和成熟, 在深埋隧洞工程缺乏设计规范指导的背景下, 这些信息对于揭示其特殊力学响应机制、总结其变化规律、建立科学的设计计算方法至关重要。围岩力学响应由开挖活动直接导致, 且受支护作用的影响。因此, 开挖过程中各台阶掌子面位置随时间的变化、各支护措施实施的时机及位置的变化等信息都需要详细记录, 以便与位移监测曲线和声波测试结果相对应, 分析围岩变形和损伤破裂状态的时空响应规律。需要注意的是, 由于声波测试无法实时测试, 不能像变形监测那样获得足够连续的时序数据, 故只能在开挖过程中不同的代表阶段开展声波测试, 以获得围岩损伤破裂范围和程度的时空演化规律。

多点位移计和声波测试的成本相对较高, 很难实施整条隧洞系统布置全断面监测与测试断面。一般隧洞洞线较长, 沿线可根据地质条件相似性分为若干单元, 每个单元内地质条件相同、埋深接近, 开挖过程中围岩的力学响应也较为接近。因此, 在监测和测试设计时可在每个单元设置典型断面进行重点观测, 该单元内其他断面可仅针对关键部位(如洞顶或拱肩)布设测点。

全断面监测和测试可全面掌握该断面各个部位围岩的变形和损伤情况, 特别是通过揭示其非均匀

性可为分析最大主应力方向、优势结构面产状、确定支护重点部位、优化锚杆长度提供依据。

图9为全断面声波测试得到的低波速区范围。由图可见,洞周不同部位围岩低波速区深度并不相同,拱肩和边墙部位低波速区深度较大,顶拱和两侧底角则相对较小。若根据经验仅在顶拱设置一个测孔,如此得到的结果将大大高估围岩的稳定程度,据此进行锚杆长度设计将增大工程安全风险。而根据围岩破裂损伤发育部位、范围和深度在北侧拱肩布置测孔,将单测孔测试结果与典型全断面测试结果结合将会更加全面、合理地掌握该洞段围岩的损伤范围和程度。

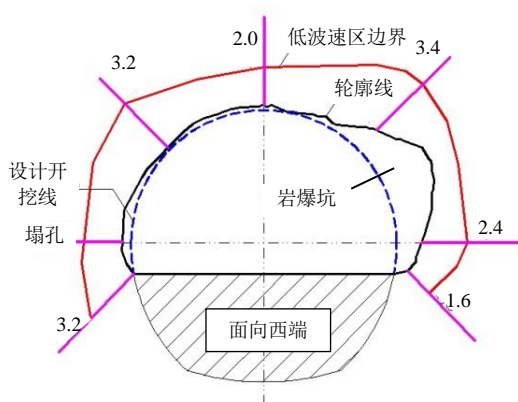


图9 锦屏二级水电站白山组洞段围岩声波测试结果(单位:m)

Fig.9 Acoustic testing results at the Baishan group section of Jinping II hydropower station (unit: m)

高应力条件下硬岩的时效破裂是深埋隧洞工程施工期和运行期面临的重要问题,需要在施工期支护设计时充分考虑,才能有效抑制问题的发展。多点位移计监测本身具有长期监测功能,而声波测试则需要针对典型断面在不同时间段进行重复测试,获得长期测试数据,如图3所示。

综上所述,声波测试和多点位移计监测相结合、监测和测试与开挖支护活动相对应、典型断面全断面观测、典型断面长期观测这4个要求与深埋隧洞围岩力学响应特征相对应,对于深埋隧洞围岩稳定性控制和支护设计有着重要意义。

#### 4.2 运行期衬砌监测

由于深埋条件下衬砌运行环境复杂,各部位变形和应力分布变异性大。因此,监测设计中每个断面仅设置几个点可能无法掌握整个衬砌的状态。同时,与围岩类似,不同洞段环境条件存在较大差别,即使在同一洞段不同断面的力学响应也并非理论上的完全相同。故将混凝土应变、钢筋应力、渗压和

接触压力等监测分别布置在不同断面将很难共同解释或理解衬砌的运行情况,应该尽可能将不同类型的监测仪器布置在同一个断面。

## 5 结 论

本文以典型深埋隧洞现场现象、监测与测试结果为依据,分析了此类工程围岩及衬砌的力学响应特征,认为表面变形微小、围岩以内部破裂为主、时效破裂、不同部位围岩或衬砌力学状态变异性大是此类工程的显著特点,在深部工程经验不足、设计和计算方法尚不成熟的情况下,传统的表面变形监测方法、不同类型监测仪器分散布置的方法不适用现实情况。为此,本文提出了以下几个建议:

- (1) 根据地质条件和埋深大小设置典型断面,区分典型断面和一般断面进行监测和测试布置。
- (2) 对于同一典型断面须同时开展多点位移计监测和声波测试,以便相互印证。
- (3) 应详细记录开挖掌子面和支护实施情况的时空信息,以便将其与监测和测试结果对应起来。
- (4) 典型断面应进行全断面测点布置,以掌握不同部位围岩破裂程度和深度的差异,全面评价围岩稳定性。
- (5) 应该开展长期声波测试,掌握围岩时效破裂的发展规律,评估支护控制效果。
- (6) 对于衬砌,应将接触压力、渗透压力、钢筋应力、混凝土应变等监测仪器布置的同一断面,进行全断面监测。

**致谢:** 本研究得到中国科学院青年创新促进会的资助,在此表示感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 徐干成,郑颖人,乔春生,等. 地下工程支护结构与支护设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.  
XU Gan-cheng, ZHENG Ying-ren, QIAO Chun-sheng, et al. Design of underground engineering support structure[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [2] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2854—2858.  
HE Mao-chao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2854—2858.
- [3] 张传庆,俞缙,陈珺,等. 地下工程围岩潜在岩爆问题评估方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 341—349.  
ZHANG Chuan-qing, YU Jin, CHEN Jun, et al.

- Evaluation method for potential rockburst in underground engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37 (Supp.1): 341—349.
- [4] 张传庆, 周辉, 朱勇, 等. 基于潜在挤压比的地下工程软岩挤压程度评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 939—947.
- ZHANG Chuan-qing, ZHOU Hui, ZHU Yong, et al. An evaluation method of squeezing degree based on potential squeezing ratio[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(5): 939—947.
- [5] 向天兵, 冯夏庭, 江权, 等. 大型洞室群围岩破坏模式的动态识别与调控[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 871—883.
- XIANG Tian-bing, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Failure mode dynamic recognition and control for surrounding rock of large-scale cavern group[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(5): 871—883.
- [6] 中华人民共和国水利部. GB/T50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T50218—2014 Standard for engineering classification of rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [7] 冯夏庭, 张传庆, 李邵军, 等. 深埋硬岩隧洞动态设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, LI Shao-jun, et al. Dynamic design method for deep tunnels in hard rock[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [8] 汪天翼, 沈育民, 汪志明, 等. 隧洞施工中的位移与声波监测[J]. 水力发电, 1990, (8): 33—36.
- WANG Tian-yi, SHEN Yu-min, WANG Zhi-ming, et al. Displacement and acoustic wave monitor in construction of tunnel[J]. **Water Power**, 1990, (8): 33—36.
- 
- 上接第 2625 页
- [8] LU N, GODT J W. Hillslope hydrology and stability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [9] 简文彬, 许旭堂, 郑敏洲, 等. 土坡失稳的有效降雨量研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 247—251.
- JIAN Wen-bin, XU Xu-tang, ZHENG Min-zhou, et al. On effective rainfall of slope instability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp. 2): 247—251.
- [10] 王维早, 许强, 郑光, 等. 强降雨诱发缓倾堆积层边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 87—95.
- WANG Wei-zao, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Centrifugal model tests on sliding failure of gentle debris slope under rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 87—95.
- [11] 詹良通, 李鹤, 陈云敏, 等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 872—880, 886.
- ZHAN Liang-tong, LI He, CHEN Yun-min, et al. Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rainfall-induced landslides in residual soil slope in Southeastern coastal areas of China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 872—880, 886.
- [12] BOGENA H R, HUISMAN J A, OBERDÖRSTER C, et al. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications[J]. **Journal of Hydrology**, 2007, 344(1): 32—42.
- [13] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 44—47.
- CHEN Hong-song, SHAO Min-gan, WANG Ke-lin. Effects of initial content on hillslope rainfall infiltration and soil water redistribution[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2006, 22(1): 44—47.
- [14] GENUCHTEN M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44: 892—898.
- [15] 田东方, 郑宏, 刘德富, 等. 考虑径流影响的滑坡降雨入渗二维有限元模拟及应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1179—1186.
- TIAN Dong-fang, ZHENG Hong, LIU De-fu, et al. 2D FEM numerical simulation of rainfall infiltration for landslide with considering runoff effect and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(4): 1179—1186.
- [16] KIM J, JEONG S, PARK S, et al. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils[J]. **Engineering Geology**, 2004, 75(3): 251—262.