

节理发育岩体隧道支护的动态设计方法与应用*

徐建平^{1,2},桑运龙³,刘学增⁴,杨志峰⁵

(1. 重庆交通大学,重庆 400074;2. 江西省高速公路投资集团有限责任公司,南昌 330025;3. 上海同岩土木工程科技股份有限公司,上海 200092;4. 同济大学,上海 200092;5.江西交通咨询公司,南昌 330008)

摘 要:动态设计方法对隧道工程的重要性不言而喻。然而,利益分配与协调管理机制的不完善、岩土体的复杂多变特性,致使隧道工程的动态设计仍处于尝试阶段、相关理论亦不成熟。基于理论分析与试点工程总结,针对节理发育地层,将隧道支护动态设计方法划分为预分析、支护参数的初步调整、节理特征的精细化描述、支护参数的优化分析4个步骤,并明确各阶段的实施要点。依托井冈山、桦树塆等隧道,开展试点工程,阐述动态设计方法的实施流程与要点,分析其应用成效。结果表明,基于动态设计方法提出的支护方案与实际围岩情况吻合,经济安全性更为合理,该方法已在江西井睦高速井冈山隧道、内蒙古榕乌高速桦树塆隧道、密沟隧道及贵州独平高速的多条在建公路隧道建设过程中推广应用,获得良好成效。

关键词:公路隧道;动态设计;支护参数;节理特征

中图分类号:TU43 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)02-0416-06

Observational Method and Its Application for Tunnel Supporting in Jointed Rock

Xu Jianping^{1,2}, Sang Yunlong³, Liu Xuezheng⁴, Yang Zhifeng⁵

(1.Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R. China;2. Jiangxi Provincial Expressway Investment Group Co.Ltd., Nanchang 330025, P.R. China;3. Shanghai Tong Yan Civil Engineering Co. Ltd., Shanghai 200092, P.R. China;4. Tongji University, Shanghai 200092,P.R. China;5. Jiangxi Transport Consultation Company, Nanchang 330008, P.R. China)

Abstract: Obviously, observational method is very important for tunnel design. However, we also need to improve related theories greatly and promote more and more pilot projects for imperfections of benefits, management and complexon of rock mass. By summarizing and analyzing engineering applications, the paper puts forward key points of the dynamic design method for tunnel under jointed rock, which including four steps: preanalysis, primary adjustment, description of joints features and optimization based on fine model. Then, we guide the design and construction of Jing Gangshan Tunnel &Hua Shuyan Tunnel according to the above steps. Results show that, economic security can be guaranteed greatly by using observational method to design tunnels through bad geotechnical section. Finally, observational method has got a mass-application in Jing Gangshan Tunnel in Jiangxi Provence, Hua Shuyan Tunnel, Yao Gou Tunnel in Inner Mongolia and under construction tunnels in Guizhou, achieving good results.

Keywords: road tunnel; observational method; support system; joints characteristics

* 收稿日期:2016-09-21(修改稿)
作者简介:徐建平(1975-),男,江西东乡人,硕士,高级工程师,主要从事公路工程建设管理与咨询工作。
E-mail:2816769@qq.com
基金项目:江西省交通运输厅科技项目(2011C0061);内蒙古交通厅科技项目(NJ-2010-14);国家自然科学基金(51278377)

0 引言

对于隧道工程,地质条件是正确设计的基本前提。然而,受岩土体复杂多变性、勘测手段精度不达标以及经济负担过大的影响,难以在隧道开挖前获取足够精细的地质信息,仅凭工程类比的静态设计方法无法保障支护体系适应围岩实际情况,从而造成经济安全性不合理^[1]。针对这一现状,国内外学者将基于初勘资料的工程类比与基于实际开挖地层条件的动态调整结合,提出了隧道等典型地下工程的动态设计与信息化施工方法,在对地质条件进行初判、预设计的基础上,随掌子面推进,动态修正、调整与实际出入较大区段的施工工艺、支护体系,使其与周围地层能够更好地吻合,提高结构安全性^[2-3]。

动态设计理念最早起源于20世纪40年代,并于1969年由Peck教授首次进行详细阐述。经过多年的发展、完善,已逐渐推广应用于基坑、隧道、桥梁等诸多大型岩土工程的设计施工过程中,并形成规范性文件、应用操作系统,如欧洲推出的《Eurocode》规范、AEDCO-RS系统、日本的SIT系统等^[4-7]。20世纪70年代,我国学者开始引入这一理念,并结合国内实情,开展了一系列研究,推动了隧道动态设计理论的发展,如90年代研制的“隧道工程计算机信息化设计、施工管理系统”、“水工

隧道信息化设计施工系统”等;2004年,《公路隧道设计规范》中明确提出了“隧道土建设计应体现动态设计与信息化施工的理念”。

需要注意的是,以往隧道工程设计与施工多由不同单位承担,利益分配与协调管理机制的不完善,致使难以建立统一有效的动态设计与施工体系,严格遵循动态设计理念的工程案例并不多,经验积累亦不丰富^[8]。此外,不同地层条件下,工程设计的关注点有所不同,如硬岩地段,着重于通过地质素描工作及时掌握优势节理的产状、间距、填充物等信息,富水地层则强调通过先进探测技术与理论探明前方水体类型、位置、规模等,以作为确定支护体系的依据。基于这一现状,本文拟针对节理发育这一特殊岩层,阐述隧道支护的动态设计方法与实施要点,并依托井冈山隧道、桦树塢隧道等典型工程,开展示范性应用项目——初期支护参数的优化设计,逐一展示各环节的有效衔接机制,并结合现场监测、数值模拟手段,验证初期支护设计参数的合理性,为今后同类工程动态设计流程的实施提供指导意见。

1 隧道支护的动态设计方法与流程

基于理论分析与试点工程经验总结^[9-12],节理发育岩体隧道支护参数的动态设计划分为4个流程,如图1所示。

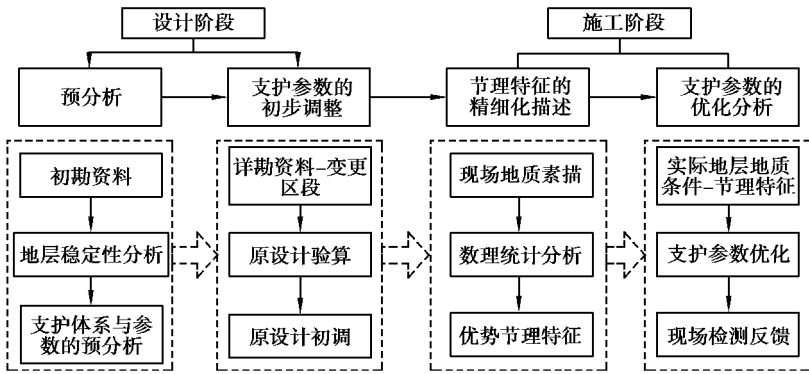


图1 节理发育岩体隧道支护的动态设计流程

Fig.1 Process of dynamic design for tunnel support system under jointed strata

1.1 预分析

初步设计阶段,依初期地勘资料,计入围岩级别、节理裂隙发育特征及其他不良地质对地层稳定性的影响,利用工程经验、理论计算、室内试验及数值模拟等手段,确定地层变形特征,即松动圈分布范围、可能发生坍塌的区域,从而确定支护体系与设计参数。

1.2 支护参数的初步调整

施工图设计阶段,依详勘资料,针对地质条件发生显著变化的区段,利用工程经验、数值模拟等手段,初步修改原设计方案,调整锚杆、喷射混凝土、钢拱架的支护参数,加强变形过大、存在坍塌风险区域的支护强度,并适当削减相对稳定区域的支护强度。

1.3 节理特征的精细化描述

隧道开挖过程中,随掌子面的掘进,及时进行现场地质素描工作,并基于数理统计分析手段,获取优势节理的产状、间距、迹长、整合度、填充物、粘聚力等特征参数。

1.4 支护参数的优化分析与验证

依现场地质素描结果,通过试验、数值分析等手段,分析实际地层条件下的隧道围岩变形特征,优化支护体系与设计参数,并通过现场监测,实时获取、分析支护结构受力变形数据,验证优化设计方案的可行性。

2 工程实例应用

运用上述提出的动态设计方法,指导了江西井睦高速、宁波象山港高速、内蒙古榕乌高速以及贵州独平高速等多条公路隧道的设计施工工作,应用成果显示良好。以桦树塢隧道为例,阐述动态设计方法的实施过程与应用成果。

2.1 试点工程隧址区地质条件

以 ZK42+280~ZK42+240 洞口浅埋段为试验区段,其中+280~+260 采取基于工程类比的原设计支护方案,ZK42+260~ZK42+240 采取基于动态设计的优化支护方案。

初期地勘资料表明,该区段以强风化灰岩为主,节理裂隙发育,岩体破碎,属 V 级围岩,自稳能力差,[BQ]=237.5,无支护时可能产生较大坍塌,侧壁可能失稳。集中降雨时洞室可能呈淋雨状或股状出水,如图 2 所示。

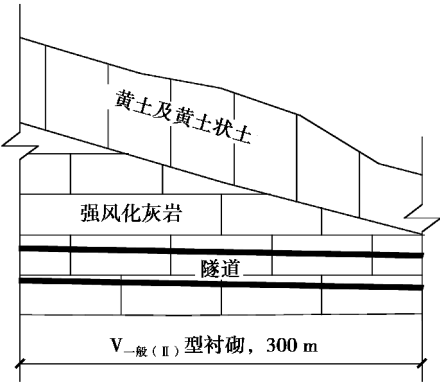


图 2 试验段地质纵断面图

Fig.2 Longitudinal section for testing

2.2 设计阶段预分析

依据初期地勘资料,结合《公路隧道设计规范》推荐支护形式、工程类比法,采取锚喷+钢拱架支护体系,衬砌横断面几何尺寸如图 3。

(1)系统锚杆:环向布置范围 216°,拱部为 $\phi 25$

的中空注浆锚杆,长度为 3.5 m,间距为 80 cm×100 cm;中岩墙位置采用 $\phi 32$ 涨壳式锚杆,长度为 6 m,间距为 80 cm×100 cm。

(2)钢拱架: I18 的工字钢,纵向间距为 80 cm。

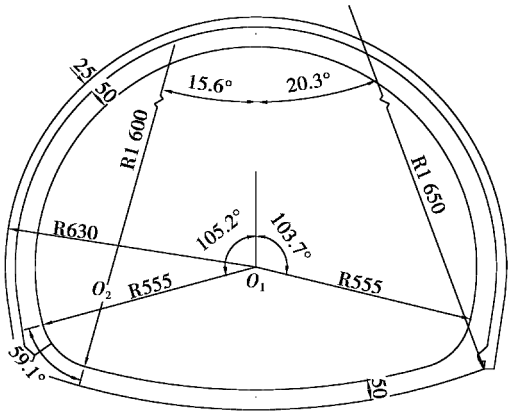


图 3 衬砌横断面示意图(单位:cm)

Fig.3 Cross section of lining (unit: cm)

对于该试验区段,初期地勘资料与详勘资料差异不大,施工方法亦未变更,无需进行“支护参数的初步调整”这一环节。

2.3 掌子面地质素描

隧道开挖过程中,及时开展掌子面地质素描工作,绘制 CAD 重构图(如图 4),获取掌子面、洞周节理发育产状,并利用极点与等密度分布工具,统计、分析优势节理产状、间距、迹长、体密度等信息。试验区段内共采集 26 个断面地质信息,图 5 为节理极点图与等密度图。

统计分析表明,试验区段发育两组不利结构面:近水平层理,间距为 0.40 m;近竖向节理,间距为 1.05 m,如表 1 所示。

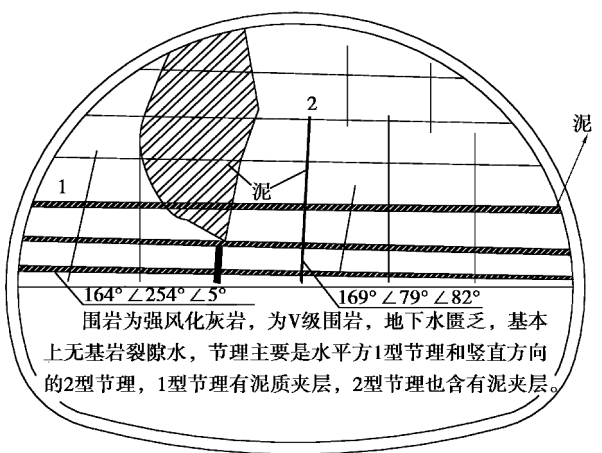


图 4 ZK42+249 断面 CAD 重构图

Fig.4 CAD sketch for the section ZK42+249

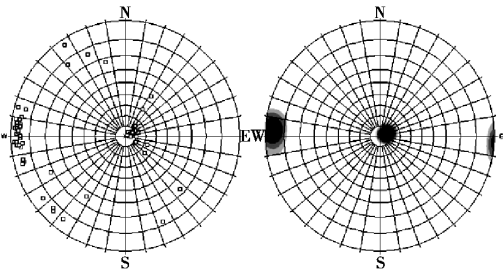


图 5 节理分组极点图和等密度图(26 个断面)
Fig.5 Pole and isodensity maps for the counted sections(26 groups of section)

表 1 优势节理特征
Table 1 Features of developed joints

节理类型	倾向	倾角	迹长 /m	间距 /m	体密度 /(m ⁻³)
	/(°)				
水平层理	272	4	5.75	0.40	0.003 1
竖向节理	70	83	1.41	1.05	0.021 9

2.4 基于节理特征的初支参数优化

2.4.1 原支护方案经济安全性分析

(1)数值计算:依据地质素描获取的节理特征,将节理简化为贯通的水平层理与竖向节理,利用 UDEC 软件,建立二维计算模型(如表 2-计算模型),模拟全断面开挖工况,分析原设计支护参数下地层变形、围岩压力、净空收敛、锚杆轴力数据。模型边界条件与相关力学参数详见文献[10],这里仅列出计算结果,详见表 2。

表 2 优化前后对比分析数据

Table 2 Contrast of data before and after optimization

	基于工程类比的原支护方案	基于动态设计的优化支护方案
计算模型		
位移云图		
	最大沉降:7.71 mm	最大沉降:7.79 mm

(2) 现场变形监测:在里程 ZK42 + 279、ZK42+269 处安装监测仪器,统计变形数据,并绘制变形-时间曲线(如表 2)。

分析计算与监测结果,原支护方案下,拱顶沉降最大值为 7.71 mm(数值模拟:7.71 mm,现场监测:4.75 mm),锚杆轴力最大处(12.46 kN)位于拱腰位置,远小于极限承载力,边墙部位锚杆轴力近似为 0 或处于受压状态。

综上可知,运用工程类比方法时,对围岩条件估计过差,致使原支护强度富余,安全性过于保守,经济上存在一定浪费。动态设计时,应结合节理发育特征等地质信息,对支护方案进行优化。

2.4.2 优化方案

基于同济大学“节理发育岩体隧道稳定性与支护关键技术研究”课题组提出的一系列研究成果^[13],确定该类地层条件下的合理支护参数:

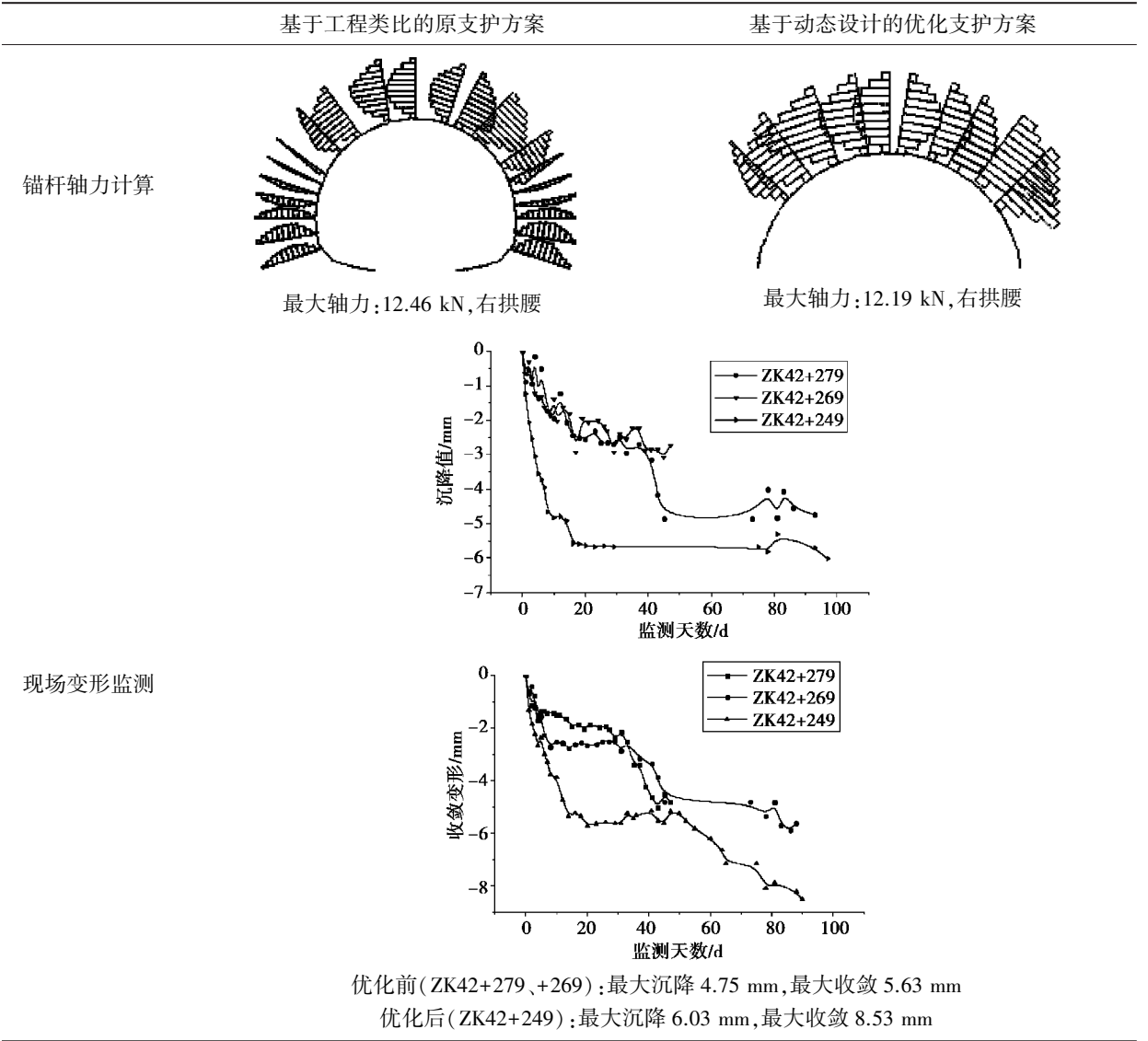
(1)系统锚杆:保留拱部 120°范围(拱顶两侧各 60°)内锚杆,φ25 的中空注浆锚杆,长度为 3.5 m,间距调整为 100 cm×100 cm;取消中岩墙处涨壳式锚杆。

(2)钢拱架:钢拱架工字钢型号不变,间距调整为 100 cm。

2.4.3 优化方案经济安全性分析

(1)数值计算:依据优化参数,建立二维离散元计算模型(如表 2-计算模型),模拟全断面开挖,分析地层变形、围岩压力、净空收敛、锚杆轴力数据。

续表2



(2)现场变形监测:在里程 ZK42+249 处安装监测仪器,分析变形数据,如表 2-现场变形监测。

分析计算与监测结果表明,优化支护方案下,地层变形、锚杆轴力与原支护工况基本一致,变形数据略有增加(拱顶沉降由 4.75 mm 增加到 6.03 mm,边墙收敛由 5.63 mm 增加到 8.53 mm),在工程接受范围内。同时,未出现坍塌、衬砌表面裂损等病害,可以认为,优化前后结构安全性等级一致。基于试验段数据反馈,后期应用时进一步修正了中岩墙处的支护方案,增设短疏构造锚杆(长度 1 m,间距 200 cm×100 cm,环向布置 200°),以固定钢拱架为主,约束水平收敛。

采取修正后的优化支护方案,锚杆成本比原设计减小了 53%,钢拱架成本比原设计减小了 20%,不仅降低了材料成本,还加快了施工进度,可见优

化方案的经济安全性更为合理。

2.4.4 工程推广应用

鉴于上述分析成果,后续建设及同类工程建设过程中,在业主单位、设计单位的协同下,动态设计方法得到进一步推广,内蒙古榕乌高速桦树塬隧道、窑沟隧道应用里程达 1.91 km,基本覆盖了 V 级围岩节理发育地层,直接经济效益达千万余元。江西井睦高速井冈山特长隧道、贵州独平高速漂里与大钟等隧道亦尝试采用动态设计方法进行土建设计,应用效果正处于验证分析过程。

3 结论

基于一系列课题研究成果,提出了节理发育岩体隧道支护的动态设计方法,并结合工程实例,阐述了实际应用过程中的实施要点与应用成果。主

要研究结论如下:

(1)节理发育岩体隧道支护的动态设计方法包含预分析、支护参数初步调整、节理特征精细化描述及支护参数的优化分析4个步骤。其中,预分析与初步调整以设计阶段的地勘资料为依据,节理特征描述与优化分析则以实际开挖过程揭示的地质信息为依据。基于动态设计方法进行隧道土建设计,可以及时依据实际开挖地层条件,动态调整支护体系,确保结构的经济安全性。

(2)针对竖向节理、水平层理发育的试点隧道工程,应用动态设计方法优化支护参数,成功指导了依托隧道工程的设计施工工作,并将这一理念在其他工程中推广应用。应用结果表明,试点工程原设计支护强度富余,基于节理特征进行优化分析后,在确保地层稳定的同时可节约成本千万余元。

(3)在本研究过程中并未考虑施工爆破震动对节理裂隙扩展及围岩松动圈变化的影响,与实际情况存在一定差异。后续研究及推广应用时,应增加动力相应分析,并结合长期监测数据,对支护方案进行验证、修正。

参考文献(References)

[1] 龚伦. 山岭隧道信息化施工技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004. (Gong Lun. Technical study of observational method applied to mountain tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese))

[2] 杨会军, 胡春林, 谌文武, 等. 断层及其破碎带隧道信息化施工[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 3917-3922. (Yang Huijun, Hu Chunlin, Chen Wenwu, et al. Information construction of the tunnel in a fault [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 3917-3922. (in Chinese))

[3] 吴江敏, 王建宇. 关于新建隧道动态设计方法的探讨[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(4): 35-37. (Wu Jiangmin, Wang Jianyu. On observational design of the newly built tunnels[J]. Modern Tunneling Technology, 2003, 40(4): 35-37. (in Chinese))

[4] Peck R B. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics [J]. Geotechnique, 1969, 19(2): 171-187.

[5] Nicholson D, Tse C, Penny C. The observational method in ground engineering-principles and applications

[R]. London: CIRIA, 1999.

[6] Asanoa K, Ishiharab M, Kiyotab Y, et al. An observational excavation control method for adjacent mountain [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(2-3): 291-301.

[7] Powderham A J. An overview of the observational method: development in cut and cover and bored tunneling projects [J]. Geotechnique, 1994, 44(4): 619-636.

[8] 徐加民. 浅谈隧道工程的动态设计与信息化施工[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(5): 1-4. (Xu Jiamin. Discussion of dynamic design and observational construction of tunneling [J]. Modern Tunneling Technology, 2013, 50(5): 1-4. (in Chinese))

[9] 郑颖人, 王永甫, 王成, 等. 节理岩体隧道的稳定分析与破坏规律探讨——隧道稳定性分析讲座之一[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 649-656. (Zheng Yingren, Wang Yongfu, Wang Cheng, et al. Stability analysis and exploration of failure law of jointed rock tunnel——seminor on tunnel stability analysis [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 649-656. (in Chinese))

[10] 张玉敏, 朱付广. 地下厂房围岩块体稳定分析及支护优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(1): 150-155. (Zhang Yumin, Zhu Fuguang. Rock block stability and support optimization of underground powerhouse [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(1): 150-155. (in Chinese))

[11] 段群苗, 刘学增. 隧道破碎围岩施工安全因素控制与预警体系研究[R]. 上海: 同济大学, 2012. (Duan Qunmiao, Liu Xuezeng. Research on construction control and pre-warning system for tunnels in broken rock [R]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese))

[12] 周可哥, 刘学增. 竖向节理发育地层隧道围岩稳定与支护关键技术研究报告[R]. 上海: 同济大学, 2014. (Zhou Kege, Liu Xuezeng. Research on strata stability & tunnel support key techniques with developed vertical joints [R]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese))

[13] 索超峰. 节理发育岩体隧道变形特征及失稳模式研究[D]. 上海: 同济大学, 2013. (Suo Chaofeng. Study on the tunnel deformation feature and disability mode of the joint developed rock mass [D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese))