

上软下硬地层隧道稳定性因素及影响研究*

吴波^{1,2,3}, 王鸣涛^{1,2}, 邓政³

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福州 350118; 2. 福建省土木工程新技术与信息化
重点实验室, 福州 350118; 3. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004)

摘要: 采用正交试验以及极差分析法比较隧道跨度 W 、埋深 h 、高跨比 λ 、隧道开挖技术以及机械掘进尺寸对施工工程因素作用下上软下硬地层隧道稳定性的影响。当软硬地层组合不同时, 比较 W 、 h 、 λ 和地层隧道的软硬地层分界面中关键的位置参数 β 同地层隧道上部较软的地层参数 D_s 与地层隧道下部较硬的地层参数 D_x 对这三者同隧道地质因素以及隧道工程因素彼此相互作用为上软下硬地层隧道在稳定性方面所产生的一系列影响。研究只有 h 因素变化时对上软下硬地层隧道稳定性的影响, 并分析了隧道的破坏演化规律。研究结果表明: W 和埋深 h 属于隧道工程因素给上软下硬地层隧道自身稳定性造成影响的因素里面最关键的, 影响第二的是高跨比 λ ; 当隧道在开挖后自身稳定时, W 是影响地质因素、工程因素共同作用下隧道稳定性的主要因素, 反之是 D_s ; 软硬分界面改变了上软下硬地层隧道的破坏模式, 当为深埋隧道时, 上部较软地层是最薄弱的地方, 实际工程中要加强支护。

关键词: 上软下硬地层隧道; 敏感性分析; 地质因素; 工程因素; 稳定性

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0589-12

Research on Stability Factors and Effect in Upper Soft and Lower Hard Stratum Tunnel

Wu Bo^{1,2,3}, Wang Mingtao^{1,2}, Deng Zheng³

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P.R. China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory for Advanced Technology and Informatization of Civil Engineering, Fuzhou 350118, P.R. China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, P.R. China)

Abstract: Orthogonal test method and therange analysis were adopted to contrast influence relation of some factors such as tunnel span W , buried depth h , depth-span ratio λ , tunnel excavation method, tunnel excavation method and the size of tunneling on the stability of upper soft and lower hard stratum tunnel in the engineering factors. When the combination of soft and hard stratum wasnot at the same time, the paper contrasted influence relation of some factors such as W , h , λ , soft and hard stratum interface position parameter β and upper soft formation parameter D_s and lower hard formation parameters D_x on the stability of upper soft and lower hard stratum tunnel in the dual role of geological factors and engineering factors. Only when the h factor waschanged, the effect on the stability of upper soft and lower hard stratum tunnel was studied, and the damage evolution law of tunnel was analyzed. The results show that W and h are the two main factors that affect the stability of upper soft and lower hard stratum tunnel in the engineering factors, followed by λ . When the tunnel is stable after excavation, W is the main factor that affects the

* 收稿日期: 2018-08-26(修改稿)

作者简介: 吴波(1971-), 男, 四川阆中人, 博士, 教授, 主要从事隧道工程设计理论、施工技术与安全风险管理工作。E-mail: 813792833@qq.com

通讯作者: 王鸣涛(1989-), 男, 河南滑县人, 硕士生, 主要从事隧道与地下工程技术研究。E-mail: 961953882@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(51478118); 福建省自然科学基金(2014J01170)

tunnel stability in the dual role of geological factors and engineering factors, on the contrary is D_s . Soft and hard interface has changed failure mode of upper soft and lower hard stratum tunnel in deep buried tunnels, and the upper soft stratum is the place where it is the weakest. In the actual project, it is to strengthen the support.

Keywords: upper soft and lower hard stratum tunnel; sensitivity analysis method; geological factors; engineering factors; stability

0 引言

随着城市建设范围的扩大,在城市地下交通以及大部分地下市政隧道的施工现场,正在施工的隧道会出现施工横向断面区域里面穿越不止一种,并且在物理力学方面特征相似度比较小的地层组合,这些实际工程中所出现的地层组合通常称为复合地层^[1]。这些地层中比较常见的是一类上软下硬的复合地层,这种地层在隧道横断面的上方通常表现为第四系的软弱地层,但是在隧道横断面的下部则表现为硬质岩石地层,也有一些隧道横断面的上部属于软岩,隧道横断面的下部属于硬岩。由于中国的城市施工范围逐渐增多,因此隧道施工所工作的地下深度会越来越深,并且上软下硬地层隧道项目数量也同样会逐渐增多。

中国现在的隧道施工还主要根据围岩分级来实施勘探、设计以及隧道施工。其中关键的围岩分级主要是按照岩土体本身的物理、力学等方面的特性,并且在隧道进行施工以后,根据围岩处于没有支护的环境中,由其所表现的稳定性来实施分级。也就是说目前围岩所使用的分级理论以及数据全部来自围岩自身的稳定性。围岩自身稳定性涉及2个方面:(1)周围岩体所具备的物理力学特性。该方面还可以细分为3个主要的特性,首先是周围岩石坚硬的特性,其次是结构面发育的情况,最后是地下水的情况。(2)施工过程给岩体带来的扰动,并且会给围岩本身的稳定程度带来变化。在施工方面还可以细分为4种不同情况,首先是隧道挖凿的形状,其次是隧道开挖的尺寸,再次是隧道挖凿的工法,最后是埋深程度。现在的围岩分级标准主要按照地质因素给隧道围岩稳定性产生的综合影响程度来对实施级别划分,这种标准没有加入工程因素来参考这两种因素共同对围岩实施分级。因此,如果要想实现比较精确的上软下硬地层隧道施工现

场围岩分级标准,首先是要找出给隧道稳定性带来变化的原因,故需要这些原因和所造成的影响实施探讨以及分析。

给上软下硬地层隧道内部带来不稳定的原因主要有2种,第一种原因来自地质方面,第二种原因来自工程方面。这每种原因里面还可以细分为多个不同的因素,这些因素都拥有一定的作用区间,而且这些因素对稳定性影响的权重并不完全一样,一部分因素对稳定性的关联性较强,而另外一部分因素对稳定性的关联性则较差。所以正确的做法是通过不一样的科学方法来获知隧道围岩分级相关联的不同指标因素^[2]。本文通过先进的正交试验设计技术,在软下硬地层隧道稳定性的各种不同因素里面只受工程因素的影响和同时受地质和工程因素影响做了对应的敏感性研究,并计划通过极差分析方法对所得到的分析数据实施详细的研究与比较,从而获得不同的稳定性因素对上软下硬地层隧道围岩形状改变程度和工程施工安全性的敏感性参数。

1 基本理论与假设

1.1 有限元极限分析法

有限元极限分析法,是指利用有限元结合强度折减法或超载法等手段来进行岩土工程模型的极限分析。它可以利用功能强大的岩土专业软件求得岩土体应力、位移与塑性区等有用信息,也可获得岩土体的破坏状态与保持岩土体稳定的最小安全系数。近年来,由于有限元极限分析法的持续进步,特别是其中的有限元强度折减法目前已经在边坡以及地基等项目施工里面获得了大量地使用。郑颖人等^[3]第一次把这种新的分析技术应用在隧道围岩稳定性研究的领域当中,这种新的分析方法一方面能够得到围岩维持本身持续稳定所需要的最小安全系数,另一方面能够获知围岩失去稳定性后最终破坏面的具体出现位置以及所展现的形态,

这些结论以及数据进一步引领了隧道施工中力学方面及隧道设计方面的进步。

该方法主要是使用数值方法,并且折减隧道围岩自身强度,从而获得维持隧道内部持续稳定所需要的最小安全系数。该技术同以往常用的极限分析理论之间存在的差别是不用事先假设隧道围岩的破坏面。因为该方法的计算过程是持续地折减围岩内部的一系列黏聚力 c 和围岩的内摩擦角 $\tan \varphi$,并对围岩的弹塑性数值实施运算直到围岩的极限状态为止^[4]。根据经典的摩尔-库仑理论,物体的强度折减安全系数 F_s 通常能够标准地表述为

$$\tau = (c + \sigma \tan \varphi) / F_s = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (1)$$

$$c' = c / F_s, \tan \varphi' = (\tan \varphi) / F_s \quad (2)$$

式中: F_s 为剪切强度折减系数; c 和 φ 均为原始抗剪强度参数; c' 和 φ' 都是在进行折减之后得到的抗剪强度参数。

当前有限元极限分析法中判断隧道工程整体破坏的判据有3种:①围岩洞周位移判据,即通过观察围岩洞周位移大小以及是否发生突变来判断隧道是否稳定;②围岩塑性区大小判据,即通过观察塑性区大小及抗剪破裂面是否贯通来判断隧道是否稳定;③围岩安全系数判据,即通过分析数值计算结果中安全系数的大小来判断隧道是否稳定。

1.2 正交试验设计与极差分析法

就上软下硬地层隧道稳定性的一系列影响因素实施敏感性研究的过程中,所使用的技术属于正交试验设计法。该技术能够对多因素以及多水平试验进行准确而且高效的分析,它主要是通过个体自身所体现的正交性,从所有的试验里面找到一些重要的少量的试验样本,并且高效地发现大量原因里面给试验研究数据带来明显作用的那部分关键因素,从而能够得到使得正交试验数据处于最优水平的因素。所以这种正交试验设计方法一方面可以大幅度地缩短试验流程,另一方面可以获得最优的因素组合^[5]。

在就正交试验设计方法的实验数据实施统计研究的过程中,通常所使用的技术有2种,第1种是极差分析法,第2种技术是方差分析法。第1种方法中的极差代表的是实验样本所得到的平均效

果里面全部数据的最大值同最小值之间的差,这种方法主要是利用实验样本里面对所有因素之间的极差均值来进行研究。在本文中,正交实验设计法中的统计参数 K_{ij} 可以定义为

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^n Y_{ijk} \quad (3)$$

式中:参数 n 为试验进行的次数;参数 Y_{ijk} 为当前是第 j 因素的情况是在第 i 水平的情况中第 k 次试验所计算获知的最小安全系数 F_s ,而算式中的极差 R_j 具体的计算式为

$$R_j = \max \{ K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j} \} - \min \{ K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j} \} \quad (4)$$

对于式(4)而言,坐标的极差 R_j 代表了这个因素的水平变化同这个试验数据所带来的影响之间成正比的关系,所以可以得到:极差达到最大的因素就为该方法中最关键的因素,而极差相对较小的一部分因素则是重要性相对较低的一部分因素。

1.3 基本假设

本文主要研究上软下硬地层隧道稳定性因素的敏感性问题,通过正交试验理论来设计实验步骤,并且根据有限元数值分析系统来实施数值计算。在计算的环节需要做6个方面的设想:(1)在隧道的地质因素以及施工工程因素两者相互作用的情况下对隧道稳定性进行计算,认为隧道的纵向深度应该足够深,因此能够将其看成是平面应变实验来实施计算,并且基于二维概化模型来进行研究;而针对工程因素的影响,则通过三维概化模型来实施计算。(2)在隧洞横截面区域里面需要包含2种地层成分,其中上部地层所拥有的岩石和上部地层的岩体剪切强度都不能超多下部地层的强度。(3)对强度进行折减的情况下,仅仅是对抗剪强度参数实施计算,不对受拉破坏的情况进行计算。(4)忽视工程进行环节里面爆破所来带的环境参数改变。(5)忽视项目进行环节以及隧道上面地表荷载等因素对隧道参数的改变。(6)忽视隧道内部地下水所带来的影响以及随之而来的流固耦合效应。

2 工程因素作用下隧道稳定性分析

2.1 数值模型与试验方案

本文针对隧道内部上软下硬地层的围岩进

界外面 10 m 的截面位置定义成观察面。如图 2 所示,在观察面洞周取 4 个点,实时追踪这 4 个点的竖向位移、水平位移。在该有限元分析的实验中使用Ⅳ_b~Ⅲ这个组合,将所需要的隧道围岩物理力学具体数据罗列在表 3 中。将根据有限元实验编号所匹配的实验参数所获取的一系列位移值和隧道围岩的最小安全系数罗列在表 4 中,这里只选择前 10 个数据进行展示。

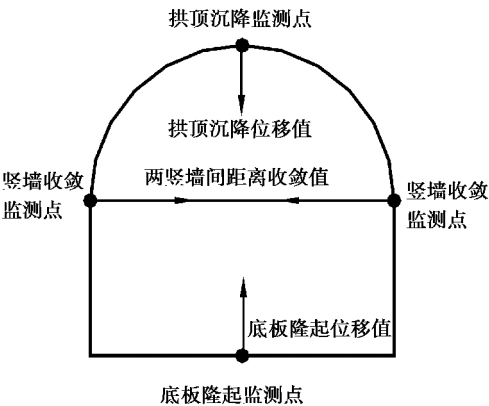


图 2 监测截面洞周位移监测点示意图
Fig. 2 The sketch of observation points of displacement on the cross section of tunnel portal

表 2 影响因素的取值范围

Table 2 Range and level of the factors

影响因素水平	h/m	W/m	λ	开挖方法	掘进尺寸/ m
1	10	5	0.5	全断面法	1
2	22.5	10.5	0.75	台阶法	2
3	35	16	1	CD 法	3
4	47.5	21.5	12.5	预留核心土法	4
5	60	27	1.5	双侧壁导坑法	5

表 3 围岩物理力学参数表

Table 3 Physico-mechanical parameters of the rock

材料	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
Ⅲ	24.5	47.25	1.3	16.5	0.262 5
Ⅳ _b	20	27	0.2	1.3	0.35

表 4 地层围岩级别为Ⅳ_b~Ⅲ组合的模型试验方案及计算结果

Table 4 The calculation results and sample schemes of the orthogonal test design for Ⅳ_b~Ⅲ

模型号	h/m	W/m	λ	开挖方法	掘进尺寸	拱顶下沉值/ mm	底板隆起值/ mm	竖墙顶部间距收敛值/ mm	安全系数
1	10	5	0.5	全断面法	1	0.680	0.076	0.103	4.400
2	10	10.5	0.75	台阶法	2	1.831	0.273	0.982	3.209
3	10	16	1	CD 法	3	3.672	0.639	2.344	2.334
4	10	21.5	1.25	预留核心土法	4	6.118	1.232	4.354	1.939
5	10	27	1.5	双侧壁导坑法	5	10.233	2.132	6.985	1.641
6	22.5	5	0.75	CD 法	4	1.574	0.136	0.847	2.543
7	22.5	10.5	1	预留核心土法	5	3.583	0.422	3.151	2.500
8	22.5	16	1.25	双侧壁导坑法	1	6.312	0.890	6.759	2.005
9	22.5	21.5	1.5	全断面法	2	10.291	1.610	12.786	1.702
10	22.5	27	0.5	台阶法	3	11.605	1.508	1.588	1.626

2.2 因素敏感性分析结果

根据式(4)将表 4 里面的全部因素实施了详细的极差计算以及敏感性计算,并将计算获取的数

据罗列在表 5 所示中。为直观起见,依次绘出表 5 中 5 个影响因素 h 、 W 、 λ 、开挖方法、掘进尺寸的五水平趋势图(如图 3)。

表5 工程因素敏感性分析
Table 5 Sensitivity analysis of engineering factors

类 别	h/m	W/m	λ	开挖方法	掘进尺寸/m	敏感性
拱顶下沉值	15.555	17.973	3.060	4.248	4.095	$W>h>$ 开挖方法 $>$ 掘进尺寸 $>\lambda$
底板隆起值	0.659	2.098	0.296	0.222	0.307	$W>h>$ 掘进尺寸 $>\lambda>$ 开挖方法
竖墙收敛值	43.577	38.868	29.133	21.218	20.087	$h>W>\lambda>$ 开挖方法 $>$ 掘进尺寸
安全系数	1.133	1.158	0.491	0.467	0.457	$W>h>\lambda>$ 开挖方法 $>$ 掘进尺寸

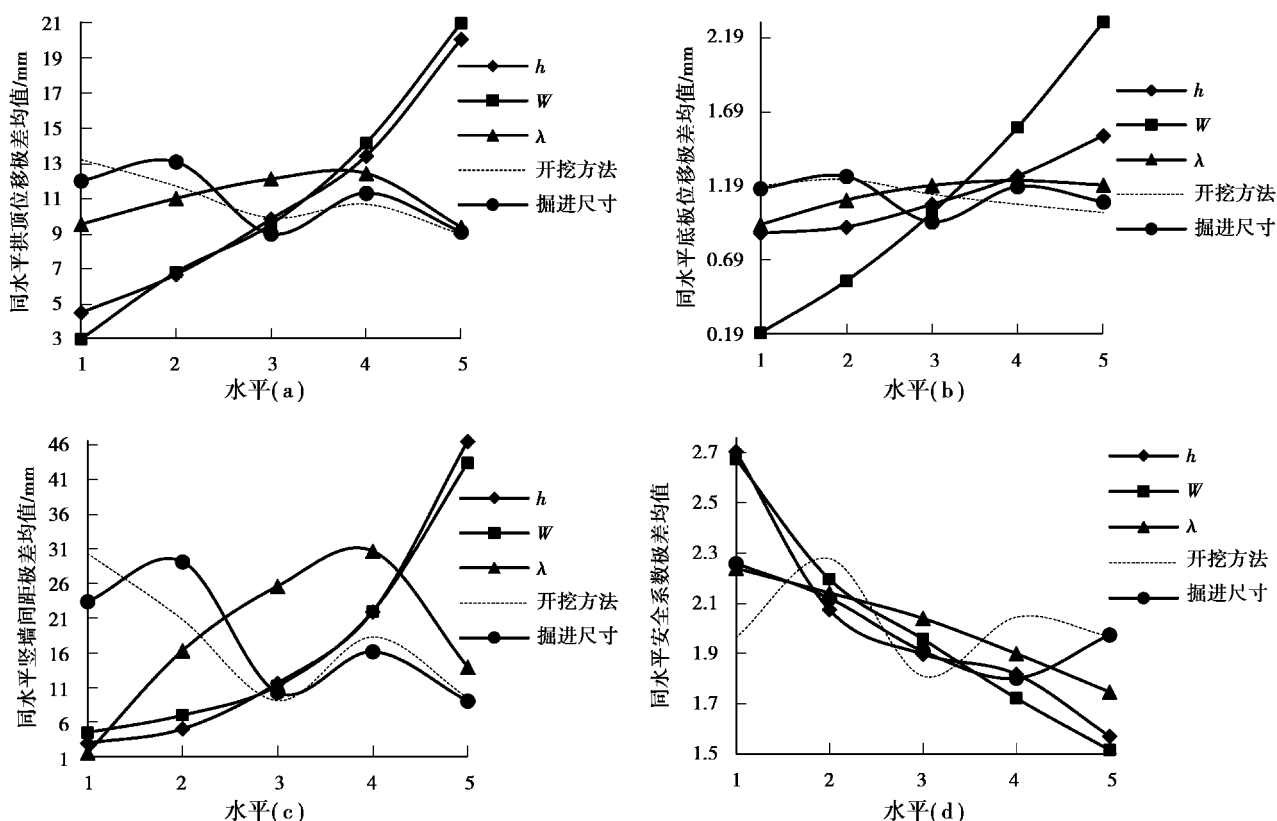


图3 工程因素水平趋势图

Fig. 3 Trend of engineering factor level

由表5可知:①在隧道拱顶围岩变形分析中, W 因素所体现出的极差值最高,第二高的是隧道埋深 h ,而对于隧道高跨比 λ 因素而言,该参数的极差值最小。从而可知,隧道跨度 W 给隧道拱顶带来的变形作用是最大的,隧道高跨比 λ 对隧道的作用是最小的。②如果因素敏感性分析过程中所使用的参数不同,不同工程因素对隧道围岩敏感性的影响存在一定的差异,隧道跨度 W 以及隧道埋深 h 对上软下硬地层隧道内部稳定性带来的作用最大,而在各个因素里面,掘进尺寸以及开挖方法对隧道内部稳定性的作用并不重要。③在敏感

性分析所计算的参数是竖墙相对位移的情况下,隧道埋深 h 的对产生的敏感性是最为明显的,接下来是隧道跨度 W 以及隧道高跨比 λ 。从而可知,如果隧道埋深 h 增加,会导致边墙的稳定性的出现减弱,该结论同郑颖人等^[3]所得到的结论是比较符合的,也就是说隧道如果浅埋转化隧道深埋模式的时候,主要的破坏情况会从隧道拱顶破坏模式变成隧道边墙破坏模式。④当分析过程中使用多个指标的时候,隧道高跨比 λ 的敏感性波动频率最高,针对隧道拱顶位移进行计算的过程中发现 λ 所展现的感性最弱,如果分析是使用的指标是竖墙相对

位移与安全系数时,隧道高跨比 λ 所展现的敏感性只比隧道跨度 W 以及隧道埋深 h 低,从而可知,如果只使用位移收敛数据来计算隧道内部围岩的稳定性,该结论还无法满足标准要求,而且其中还存在一定的经验性结论。

根据上述 4 个方面的讲解,根据安全系数判据的结论去计算上软下硬地层隧道内部的稳定性符合科学性以及合理性,并且在计算判断过程中完全按照力学理论进行试验,因此,该试验所得到的位移收敛判据能够同安全系数判据相结合共同用于判断隧道内部围岩的稳定性,作为辅助方法以及验证方法。在隧道属于深埋隧道类型的情况下,通常调整隧道高跨比 λ ,以此来增加隧道边墙的稳定性的作用最大体现了岩体完整性的关键程度,因此使用隧道跨度 W 来代表隧道内部围岩的稳定性是能够满足理论要求的。

根据图 3(a) 可以直观地发现,影响因素 W 、 h 变化时,拱顶位移的数值变化幅度最大,说明该分析指标(拱顶位移)对这两个因素变化非常敏感。相反地, λ 、开挖方法和掘进尺寸变化时,拱顶位移变化幅度很小,从图中可以看出其只在很狭窄的范围内上下波动,说明这些影响因素不敏感或次要。同理可以分析图 3(b)、(c)、(d)。由图 3(b) 可以看出,因素 W 比较敏感,而因素 h 、 λ 、开挖方法和掘进尺寸变化时,底板位移只在很狭窄的范围内上下波动;图 3(c) 显示 h 和 W 相对比较敏感;而图 3(d) 可以清晰显示因素 W 、 h 非常敏感,其次是因素 λ 、开挖方法和掘进尺寸。

3 地质因素、工程因素共同作用下隧道稳定性分析

3.1 数值模型与试验方案

由上一节的描述能够得到在各种工程因素里面给上软下硬地层隧道内部围岩稳定性带来作用最大的是隧道跨度 W 以及隧道埋深 h ,影响次之的为隧道高跨比 λ ,而对于隧道的开挖方法以及隧道的掘进尺寸而言,这两者所造成的影响最弱。因此本节就地质因素以及工程因素两者相互作用下详细地对上软下硬地层隧道稳定性进行研究,在该过程中并不会涉及隧道的掘进尺寸以及隧道的开挖方法这两种工程因素,此实验中所使用的有限元分析模型属于标准的二维平面应变模型,并且将开挖方法假设成全断面法。

上软下硬地层隧道根据地质因素以及工程因

素相互作用下对隧道稳定性相关的因素总共有 6 种,第 1 种是隧道埋深 h ,第 2 种因素是隧道跨度 W ,第 3 种因素是隧道高跨比 λ ,第 4 种因素是隧道软硬分界面位置参数 β ,第 5 种因素是隧道上部较软地层物理力学参数 D_s ,第 6 种因素是隧道下部较硬地层物理力学参数 D_x 。这 6 个因素全部取五水平,并且通过 $L_{25}(5^6)$ 正交实验表来实施进一步地正交试验,共 6 种实验地层组,并且需要实现 150 个不同的数值模型。图 4 所展示的是上软下硬地层隧道的标准二维平面概化模型。

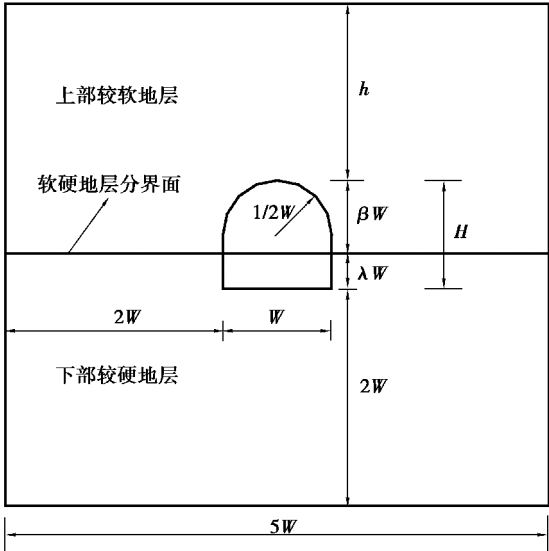


图 4 上软下硬地层隧道平面概化模型

Fig. 4 The two-dimensional concept models of upper soft and lower hard stratum tunnel

这 6 个因素以及对应水平的值罗列在表 6 中,所使用的材料指标按照表 1 里面对应的围岩级别参数区间使用均匀递增的五种因素水平。针对组合为 $IV_b \sim III$ 来分析,根据实验编号得到实验参数来获得对应的位移值和隧道的最小安全系数,如表 7,该表中以前 10 组数据为例。

表 6 影响因素的取值范围

Table 6 Range and level of the factors

影响因 素水平	h/m	W/m	λ	β	D_s	D_x
1	10	5	0.5	0.167	D_{s1}	D_{x1}
2	22.5	10.5	0.75	0.333	D_{s2}	D_{x2}
3	35	16	1	0.5	D_{s3}	D_{x3}
4	47.5	21.5	1.25	0.667	D_{s4}	D_{x4}
5	60	27	1.5	0.833	D_{s5}	D_{x5}

表 7 地层围岩级别为 $IV_b \sim III$ 组合的模型试验方案及结果数值Table 7 The calculation results and sample schemes of the orthogonal test design for $IV_b \sim III$

模型号	h/m	W/m	λ	β	D_s	D_x	拱顶下沉值/mm	底板隆起值/mm	竖墙顶部间距收敛值/mm	安全系数
1	10	5	0.5	0.167	D_{s1}	D_{x1}	0.579	0.207	0.148	6.488
2	10	10.5	0.75	0.333	D_{s2}	D_{x2}	1.388	0.470	0.410	4.225
3	10	16	1	0.5	D_{s3}	D_{x3}	2.567	0.807	1.744	3.400
4	10	21.5	1.25	0.667	D_{s4}	D_{x4}	3.989	1.228	3.464	2.775
5	10	27	1.5	0.833	D_{s5}	D_{x5}	5.475	1.731	5.952	2.247
6	22.5	5	0.75	0.5	D_{s4}	D_{x5}	0.953	0.120	0.540	5.200
7	22.5	10.5	1	0.667	D_{s5}	D_{x1}	2.179	1.171	2.000	3.772
8	22.5	16	1.25	0.833	D_{s1}	D_{x2}	7.797	1.473	9.670	1.713
9	22.5	21.5	1.5	0.167	D_{s2}	D_{x3}	5.945	2.159	1.812	2.267
10	22.5	27	0.5	0.333	D_{s3}	D_{x4}	6.664	1.548	0.804	2.213

3.2 因素敏感性分析结果

应用极差分析的前提是实验数据种类的均一性,即在多因素数据输入的条件下,使用正交实验来让得到的数据类别一致,并根据该性质来计算所有输入因素对应的极差值以及得到对应的均方差从而实施进一步研究。不过,本文在进行正交计算的环节里,出现了在隧道上部软弱地层围岩为 V 级,并且隧道下部硬质地层里面的围岩属于 II 级、III 级以及 IV_a 级情况下,计算使用的地层组合模型里面的 8 号模型、15 号模型、17 号模型、24 号模型以及 25 号都会由于变形超过一定范围而出现发散性,也就是实验计算获取的隧道安全系数不超过 1。这种情况下得到的位移量主要属于原模型在进行强度折减后所计算出的数据,因此上述的 5 个地层组合模型同其他模型所计算得到的位移值无法实施比较分析。假设通过极差分析法来考察,必然要将实验数据进行分类。分 2 类来进行统计研究,第 1 类是稳定模型,第 2 类是不稳定模型。进行分类之后会带来 2 种影响,第 1 种是全部的输入因素给实验分析的输出因素所带来的影响次数无法维持在一样的水平,因此无法展现出正交实验关键的“均匀分散,齐整可比”特性;第 2 种影响是在就实验数据实施分类并研究后,使得各个种类实验结果所需的样本范围缩窄,并会使得实

验数据对计算的精确度更为依赖,造成实验数据变化幅度较大,无法进行连续性地增加^[11]。因此,对于 $V \sim II$ 、 $V \sim III$ 以及 $V \sim IV_a$ 组合的输出位移而言,不需要对其实施极差分析工作。不过隧道安全系数对应的类别都相同,因此,该参数能够实施极差分析,且用安全系数来表示隧道的稳定性有严格的力学依据。综上,本文在地层为 $IV_b \sim II$ 、 $IV_b \sim III$ 与 $IV_b \sim IV_a$ 的情况下实施各个组合彼此之间就位移对应的因素敏感性实施研究,并且就前面 6 种地层组合就安全系数方面对应的因素敏感性实施研究。

3.2.1 针对位移的因素敏感性分析

利用针对隧道稳定性的极差分析法对隧道内部地层组合进行研究,使用了 3 种组合的实验数据,第 1 组是 $IV_b \sim III$,第 2 组是 $IV_b \sim IV_a$ 。实验获取的数据见表 8。

由表 8 可知,当分析指标为拱顶位移时,有 4 种情况:第 1 种情况时隧道跨度 W 对应的敏感性为最大的,第 2 敏感的是隧道埋深 h ,第 3 敏感的是隧道软硬分界面位置参数 β ,最不敏感的是隧道高跨比 λ ,并且上述 4 个工程因素所具备的敏感性同隧道内部地层组合无关;第 2 种情况是在隧道内部地层组合是 $IV_b \sim III$ 以及 $IV_b \sim II$ 组合的情况下,

表 8 不同地层组合针对位移的因素敏感性分析
Table 8 Factors sensitivity analysis of displacement of different strata combination

类 别	敏感性		
	拱顶位移	底板位移	竖墙相对位移
$IV_b \sim IV_a$	$W > h > D_s > D_x > \beta > \lambda$	$W > h > D_x > \lambda > \beta > D_s$	$W > h > D_x > D_s > \beta > \lambda$
$IV_b \sim III$	$W > h > D_s > \beta > D_x > \lambda$	$W > D_x > h > \lambda > \beta > D_s$	$W > \beta > h > D_x > D_s > \lambda$
$IV_b \sim II$	$W > h > D_s > \beta > D_x > \lambda$	$W > h > D_x > \lambda > \beta > D_s$	$W > \beta > h > D_s > D_x > \lambda$

影响因素本身的敏感性强弱次序相同;第 3 种情况是如果隧道内部地层组合相互间的软硬差距持续变大的情况下,软硬分界面位置参数 β 的敏感性也会变大,从而可以得知隧道内部软硬分界面的位置的关键作用以及其同隧道地层软硬程度保持有一定的关系,还可以知道如果地层组合的软硬差距变大,则它的关键性越大;第 4 种是如果隧道内部围岩处于隧道全断面开挖不支护的状态时,可以维持一定的稳定,此时隧道跨度 W 的所体现出的重要程度最强,必须予以关注,并且隧道跨度 W 本身的敏感性最显著,也完全体现出隧道围岩的不完整性非常关键。由于实际施工中上软下硬地层隧道大部分是浅埋隧道,因此在这种施工环境中拱顶大变形就属于出现频率最高的破坏模式,所以根据前面的研究结论可以得到实际施工中上软下硬地层隧道的一系列必须要考虑的工程因素,主要是隧道跨

度 W 以及隧道埋深 h 。

当研究指标是底板位移的时候,有 2 种情况。第 1 种情况是此时隧道跨度 W 的体现出的敏感性最强时,并且上部较软地层物理力学参数 D_s 最小时,可知此时的较软地层针对隧道底板位移所带来的影响是最弱的;第 2 种情况是在上述 3 种地层组合里面各个影响因素敏感性的强弱次序大体上相同,只有当地层组合是 $IV_b \sim III$ 的时候隧道埋深 h 同下部较硬地层物理力学参数 D_x 交换了彼此的位置,不过这 2 个因素之间的距离依旧比较近,并且没有给所有的影响因素敏感性带来变化。

当研究指标是隧道竖墙相对位移的时候,有 2 种情况。第 1 种情况是此时隧道跨度 W 的敏感性为最强,而此时隧道高跨比 λ 为最小,有实验可以知道 W 以及 λ 因素本身的敏感性会保持稳定,没有由于地层组合的不同而不同;第 2 种情况是如果地层组合彼此之间的软硬差距比较悬殊,并且此时隧道埋深 h 的敏感性减弱,此时软硬分界面位置参数 β 的敏感性出现突变,从第 5 突变至第 2,因此可以得出结论,软硬分界面的位置对隧道内部竖墙的稳定性的影响较为显著,此时软硬差距越大,它的影响就会越明显。

3.2.2 针对安全系数的因素敏感性分析

对不同的 6 种组合所产生的总共 150 个二维模型实施研究并获得实验的安全系数,通过使用极差分析法来获取隧道的安全系数,并利用这些数据来做敏感性研究,所得到的数据见表 9。从表 9 中不难看出,各种影响因素的敏感性随着地层组合的改变的变化趋势。

表 9 不同地层组合针对安全系数的因素敏感性分析
Table 9 Factors sensitivity analysis of FOS of different strata combination

类 别	h/m	W/m	λ	β	D_s	D_x	敏感性
$IV_b \sim IV_a$	1.624	1.660	1.159	1.085	0.541	0.865	$W > h > \lambda > \beta > D_x > D_s$
$IV_b \sim III$	1.788	1.850	1.100	1.394	0.526	0.804	$W > h > \beta > \lambda > D_x > D_s$
$IV_b \sim II$	1.902	2.036	1.173	1.617	0.676	1.060	$W > h > \beta > \lambda > D_x > D_s$
$V \sim IV_a$	0.496	0.823	0.429	0.500	0.799	0.275	$W > D_s > \beta > h > \lambda > D_x$
$V \sim III$	0.477	0.861	0.437	0.537	0.884	0.276	$D_s > W > \beta > h > \lambda > D_x$
$V \sim II$	0.480	0.857	0.443	0.539	0.892	0.278	$D_s > W > \beta > h > \lambda > D_x$

由表9能够获得结论:

(1)隧道内部的围岩在进行开挖施工之后可以维持一定的稳定,在于以下3个方面。第1个方面在于隧道跨度 W 因素的敏感程度最显著,其次是隧道埋深 h ,而此时敏感程度最弱的为上部较软地层物理力学参数 D_s ,不仅如此,这3个因素不会因为地层的不同而不同。第2个方面是如果隧道内部地层组合所具备的软硬差距变得明显的时候,软硬分界面位置参数 β 的敏感性也会更加明显。因此可知,软硬分界面的位置非常关键,并且它还同隧道地层软硬程度保持着紧密联系,所以隧道地层的软硬差距越大,则该因素的关键作用越大。第3个方面是在各种工程因素里面隧道跨度 W 的作用是最关键的,需要予以重视,因为隧道跨度 W 的敏感性最为关键,使得隧道内部围岩的不完整性也需要予以关注。

(2)围岩在隧道进行施工开挖完成之后,无法维持一定的稳定时,会存在以下3种情况。第1种情况是隧道跨度 W 的敏感性会由于隧道地层组合之间的软硬差距变大出现一定的减弱,此时上部较软地层物理力学参数 D_s 的敏感性将达到最大值,从而可以看到各个地质因素的关键性,即便这样,各个工程因素还需要进行关注,因为工程因素的敏感性程度只比地质因素小。第2种情况是在地层组合是 $IV_b \sim III$ 以及 $IV_b \sim II$ 组合的情况下,对敏感

性的影响程度次序相同,从而可以得知,如果下部地层围岩的级别位于III级或者大于III级的时候,不会对各地质因素本身的敏感性排序带来变化。第3个情况是软硬分界面位置参数 β 的敏感性排在上部较软地层物理力学参数 D_s 以及隧道跨度 W 因素后面,不过排在隧道埋深 h 的前面,因此可以知道软硬地层分界面位置给隧道内部围岩稳定性的作用是比较大的。

3.3 上软下硬地层隧道破坏演化规律

由上节分析可知,上软下硬地层隧道稳定性影响因素中 W 起着举足轻重的作用,其次是 h 。 W 的大小决定了隧道开挖后的稳定时间,而隧道埋深 h 则会影响到隧道施工的破坏方式。本节将就上软下硬地层的隧道在隧道跨度 W 和隧道内部地质状态相同的条件下,分析上软下硬地层隧道渐进破坏过程根据隧道埋深 h 的不同而出现的不同状态,并研究上软下硬地层隧道的破坏演化规律。

针对上节所建模型,当地层组合为 $V \sim III$, $W=20\text{ m}$, $\lambda=0.75$, $\beta=0.5$, $h=0.125W, 0.25W, 0.5W, 1W, 1.5W, 2W, 2.5W, 3W$ 时,对上软下硬地层隧道实施严格地实验,从而找到隧道根据埋深的不同做呈现出的破坏演化规律。在图5里面罗列各种有限元强度折减法在进行一系列数值计算之后所获取的上软下硬地层隧道对应的剪应变增量云图。

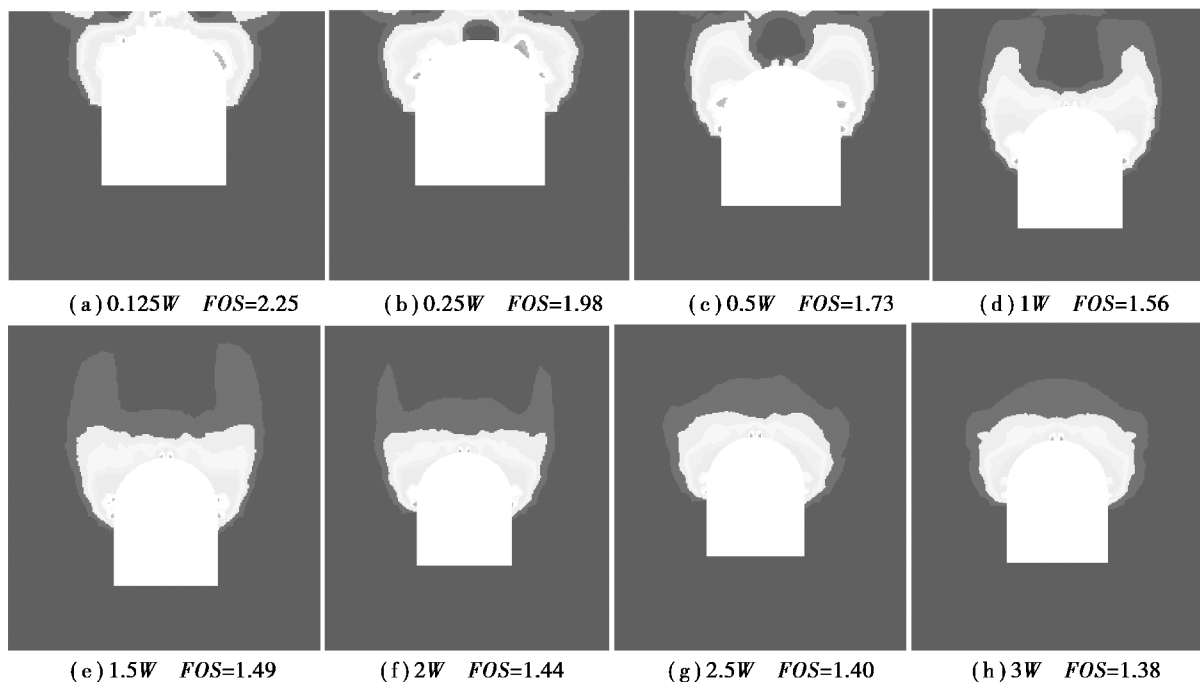


图5 埋深变化时上软下硬地层隧道的剪应变增量云图及安全系数

Fig. 5 Shear strain's increment and FOS of upper soft and lower hard stratum tunnel in different depth

由图5可知:随着 h 的增大,上软下硬地层隧道的安全系数 FOS 逐渐减小,但减小幅度越来越平缓。当 h 为 $0.125W$ 时,隧道内部对应的最大剪应变增量会主要出现在施工隧道拱顶正上方的地表上面,而且该情况下围岩压力几乎同重力相等。如果隧道埋深取 $0.25W$,则隧道内部拱肩以及隧道拱顶正上方对应的地面剪应变增量会进一步达到最大值,这种情况下的破坏会主要出现在拱肩以及拱顶位置,并且位于拱顶的破坏会朝向隧道拱肩破坏的模式进行变化,根据云图能够获知此时出现了浅埋压力拱。如果将隧道埋深 h 的值提高至 $1W$ 的时候,这种情况下隧道内部的破坏模式会从拱顶破坏模式转移至拱肩破坏模式,而且此时浅埋压力拱会失效。如果将隧道埋深 h 值提升到 $1.5W$,隧道内的浅埋拱会消失,隧道会转变为深埋隧道。从上述分析能够得知,就上软下硬隧道而言,如果隧道地质组合是V~Ⅲ,则隧道深浅埋的界限位于隧道埋深 h 值在 $1W\sim 1.5W$ 的时候。如果隧道埋深 h 再进行扩大,隧道内部软硬分界面对应的剪应变同样会变大,不过由于下部地层对应的抗剪切强度还很明显,因此即便隧道埋深 h 已经非常大,而速调内部的剪应变增量也仅仅出现在隧道的上部地层,该特性是同均质地层隧道之间出现的最大区别。因此,隧道内部的破坏模式同隧道的埋深保持着紧密联系, h 越大,安全系数越低,但并不是越浅就越安全,因为浅埋隧道受外界环境影响很大,如降雨会使隧道的稳定性急剧降低。

从前面的描述能够得到上软下硬地层隧道会由于隧道埋深 h 的不同而呈现出一定的破坏演化规律。该规律有以下3种:第1种规律是隧道拱顶坍塌破坏,拱顶和拱肩都呈现出明显的剪应变,从而变成浅埋压力拱;第2种规律是拱肩部位有明显的剪应变,此时浅埋压力拱会逐渐转变为深埋隧道;第3种规律是拱肩以及软硬地层分界面对应的剪应变较明显时,隧道上部较软地层洞周塑性区将出现贯穿现象,导致隧道整体进入不稳定状态。

5 结论

在本文计算所用极差法分析正交试验结果条件下,可以得到以下结论:

(1)在围岩分级过程中,分级指标的得出是最

为关键的,也就是对找到隧道围岩稳定性影响因素最为关键。本文通过把正交试验法以及极差法相结合运用在上软下硬地层隧道施工项目里面,体现出这两种技术的优势,从而更加准确地展现了各个地质因素以及隧道工程因素给上软下硬地层隧道对应的所有分析指标带来的敏感性影响。

(2)通过结合地质因素、工程因素与隧道围岩分级情况,建立了多组复合地层的三维概化模型,再通过极差分析技术研究了6种工程因素给上软下硬地层隧道围岩位移情况以及安全系数的敏感性所带来的影响,从而发现有3种因素对隧道的稳定程度影响较为显著:第1种因素是隧道跨度 W ,第2种因素是隧道埋深 h 、第3种因素是高跨比。在各个因素中,影响最小的是隧道开挖方法以及隧道掘进尺寸。

(3)极差分析法过程中对隧道地质因素以及隧道工程因素进行了研究,并深入分析了两者相互作用的情况下给上软下硬地层隧道围岩位移情况以及安全系数的敏感性所造成的影响,从而得到了3个结论。第1个结论是如果隧道围岩在施工工程开挖不支护的环境中,围岩可以维持稳定状态的情况下,隧道跨度 W 对应的敏感性最为显著,因此隧道围岩本身的不完整性不可忽视,所以能够通过 W 来计算隧道自身的稳定程度,也就是能够通过将隧道跨度实施分级来代替隧道围岩稳定的分级。第2个结论是如果在隧道围岩无法继续维持稳定的情况下,上部较软地层物理力学参数 D_0 就属于各个因素中敏感性最显著的一个,在各个因素中地质因素影响最为显著,而隧道跨度 W 的影响仅次于地址因素。第3个结论是如果在地层组合内部的软硬差距变大的情况下,软硬地层分界面位置参数 β 所对应的敏感性也会同步增加,因此可得出软硬分界面对应位置的关键性同隧道内部地层软硬程度存在紧密联系,所以软硬差距越大,代表其越关键。

(4)得出上软下硬地层隧道随埋深 h 变化的破坏演化规律。与均质地层不同的是,当隧道为深埋隧道时,隧道的拱肩、拱顶以及软硬地层分界面都会呈现出明显的破裂面,而隧道上部较软地层洞周塑性区也会出现贯穿现象,进而导致隧道整体失稳。

(5)在实际施工过程中,由于外界环境(地震、降水等)的影响,原地质工况会发生强度折减,对围岩的稳定性造成不同程度的影响;而且地下水能够引起上部土质围岩软化劣化、强度降低,容易引发围岩和掌子面滑移失稳,此时即使围岩自身能够保持稳定,也是暂时性的。因此,地质因素的作用依然是最大的。因素的敏感性分析为完善上软下硬地层隧道围岩分级指明了方向。

参考文献(References)

- [1] 刘栋. 复合地层中土压盾构隧道开挖面稳定性研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2009. (Liu Dong. Study on stability of tunnel excavation face for ebp shield machine in composite ground[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009. (in Chinese))
- [2] 韩秀, 崔春义. 基于正交试验法的隧道系统锚杆参数敏感性分析[A]//第八届全国青年岩土力学与工程会议暨青年岩土工程论坛论文集[C]. 2013: 141-146. (Han Xiu, Cui Chunyi. Analysis of parameter sensitivity for systematic bolts of the tunnel based on orthogonal experimental method[A]//The 8th Chinese Youth & World Forum of Chinese Youth Conference on Geotechnical Engineering [C]. 2013: 141-146. (in Chinese))
- [3] 郑颖人, 朱合华, 方正昌, 等. 地下工程围岩稳定分析与设计理论[M]. 北京:人民交通大学出版社, 2012. (Zheng Yingren, Zhu Hehua, Fang Zhengchang, et al. The stability analysis and design theory of surrounding rock of underground engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))
- [4] 郑颖人, 丛宇. 隧道稳定性分析与设计方法讲座之二:隧道围岩稳定性分析及其判据[J]. 隧道建设, 2013, 33(7): 531-536. (Zheng Yingren, Cong Yu. Analysis on and criteria of stability of surrounding rock of tunnel[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(7): 531-536. (in Chinese))
- [5] 韩秀. 基于数值模拟的抚顺隧道稳定性评价及因素敏感性分析[D]. 大连:大连海事大学, 2015. (Han Xiu. Analysis of stability evaluation and sensitivity of factors of the Fusong Tunnel based on numerical simulation [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese))
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准(CB 50218—2014)[S]. 北京:中国计划出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass (CB 50218—2014) [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道设计规范(TB 10003—2005)[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005. (Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for design on tunnel of railway (TB 10003—2005) [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范(JTG D70—2004)[S]. 北京:人民交通出版社, 2004. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Code for design of road tunnel (JTG D70—2004) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [9] 王明年, 刘大刚, 刘彪, 等. 公路隧道岩质围岩亚级分级方法研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1590-1594. (Wang Mingnian, Liu Dagang, Liu Biao, et al. Methods for surrounding rock sub-classification of road tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1590-1594. (in Chinese))
- [10] 刘大刚. 公路隧道施工阶段岩体围岩亚级分级研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007. (Liu Dagang. Study on rock mass sub-classification in construction stage for road tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [11] 王志伟. 上软下硬节理岩体中地下洞室围岩松动特性与松动压力计算方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015. (Wang Zhiwei. Characteristics of surrounding rock and calculation method of relaxation pressures of underground excavations in up-soft/low-hard jointed rock stratum[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese))