

地铁隧道穿越厚碎裂岩层的支护优化分析

王璐 许霞 李红英

(青岛黄海学院建筑工程学院, 266427, 青岛//第一作者, 讲师)

摘要 青岛地铁3号线汇泉广场站—中山公园站区间穿越厚碎裂岩层地质,其岩体节理裂隙较为发育,导致围岩自稳能力较差,以及施工风险较大。结合现场地质条件和施工环境,提出了4种隧道支护结构加固方案;通过数值模拟分析了各加固方案的地表沉降、初期支护结构主应力及围岩塑性区发展情况;基于灰色关联定量分析了各加固方案对5项评价指标的综合支护效果。结果表明:全断面WSS超前帷幕注浆对地层沉降和围岩塑性区发展控制效果最好,超前小导管支护对抑制围岩塑性区发展较明显;碎裂岩层隧道的综合加固效果为:全断面WSS超前帷幕注浆>超前小导管支护>增大拱顶锚杆长度、增设拱肩及拱脚锚杆>提高初期支护刚度。

关键词 地铁;隧道;厚碎裂岩层;支护优化;数值模拟;灰色关联分析;综合支护效果

中图分类号 U455.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.03.030

Supporting Optimization Analysis of Subway Tunnel Crossing the Thick Cataclastic Stratum

WANG Lu, XU Xia, LI Hongying

Abstract The Huiquan Square-Zhongshan Park tunnel section on Qingdao metro Line 3 crosses the thick cataclastic stratum, the joints and fissures of which are quite developed, easily leading to poor surrounding rock stability and high construction risk. Considering the geological conditions and construction environment, 4 supporting schemes are put forward. The ground surface settlement, principal stress of initial supporting structure, and plastic zone development conditions of the surrounding rock with different reinforced cases are studied by numerical simulation, the comprehensive supporting effects of 5 evaluation indicators are analyzed based on gray correlation theory. The results show that full face WSS (Windows SharePoint Services) curtain grouting has the best control effect on the surface subsidence and plastic zone development, while the small pipe support in advance could obviously refrain the plastic zone development of surrounding rocks. The comprehensive reinforcement effects of cataclastic rock tunnel are evaluated as:

the full face curtain grouting > the small pipe support in advance > increasing crown anchor length, adding arch abutment and arch foot bolt > improving the initial supporting stiffness.

Key words metro; tunnel; thick cataclastic stratum; supporting optimization; numerical simulation; gray correlation analysis; comprehensive supporting effect

Author's address College of Architecture Engineering, Qingdao Huanghai University, 266427, Qingdao, China

随着我国城市轨道交通的快速发展,地铁隧道穿越碎裂岩层段的情况也越发频繁。尤其是青岛地区属于典型的厚碎裂岩层地质条件,全、强风化花岗岩分布广泛,地铁沿线大部分地区厚度达5~25 m,岩体节理裂隙发育,整体性较差,围岩自稳能力弱。施工中支护不及时或支护措施不当,极易造成围岩失稳坍塌,导致地表大范围沉降、地面建筑物倾斜沉陷以及地下管线破裂等工程灾害^[1-2],严重威胁施工安全与周边环境稳定。

目前,关于不良地质条件施工优化及支护设计方面的研究,众多学者已经开展了大量工作。文献[3]研究了青岛台东小净距交叠隧道在多种方案施工时的隧道结构相互影响规律及地表沉降漏斗特征;文献[4]优化了软弱岩层大跨地铁车站的开挖步序和关键工序;文献[5]将有限元强度折减法应用于隧道围岩稳定性分析中,且对改进的CRD法进行了安全评估。

上述研究成果对隧道施工工法优化及围岩稳定性分析具有较高的指导意义,但多数成果集中于施工技术对围岩稳定性的定性分析,而很少涉及碎裂岩层段隧道支护技术优化多指标定量分析。

本文以青岛地铁3号线某典型厚碎裂岩层区的区间隧道为工程依托,对比分析了4种隧道支护加固技术的地表沉降、初支主应力及围岩塑性发展情况,并采用灰色关联理论定量分析了5项评价指标的综合支护效果。研究成果对碎裂岩层地铁隧道的支护优化及稳定性评价具有重要指导作用和借

鉴价值。

1 工程概况

青岛地铁3号线汇泉广场站—中山公园站区间(以下简为“汇中区间”)位于市南区香港西路下方,区间范围内文登路、武昌路、荣成路、韶关路与香港西路交汇,路面交通流量较大。区间起讫里程为K2+996.809—K3+584.178,采用钻爆法施工。区间隧道为复合衬砌暗挖结构,采用马蹄形断面,跨度为6.2 m,总高度为6.76 m,隧道间距为13~16 m。

隧道上部覆盖层主要为第四系以及全、强风化花岗岩,拱顶埋深14~18 m。围岩主要为强-微风化花岗岩、花岗斑岩和煌斑岩,级别为Ⅲ~Ⅴ级^[6]。

隧道原支护方案如下:初期支护采用锚喷网支护,其中锚杆采用 ϕ 20 mm、长2.5 m的全长注浆砂浆锚杆,锚杆间距为1.0 m \times 1.0 m,采用梅花形布置,并在拱顶120°范围内垂直布置;喷射混凝土采用C25混凝土,厚度为250 mm;钢筋网采用 ϕ 8 mm@200 mm \times 200 mm。二次衬砌采用自防水C40钢筋混凝土,厚度为300 mm。

在实际施工中,发现区间K3+283.5—K3+342.6段,围岩基本为全、强风化花岗岩,岩层碎裂程度较高,节理裂隙较发育,围岩自稳能力较差,且该施工段地面多为商务楼及住宅别墅,由于建筑物安全等级较高,因此应严格控制地表沉降。若采用原支护方案,极易造成围岩失稳坍塌、地表大范围沉降、周边建筑物倾斜开裂等工程事故,施工风险极大。厚碎裂岩层段地铁隧道原支护方案如图1所示。

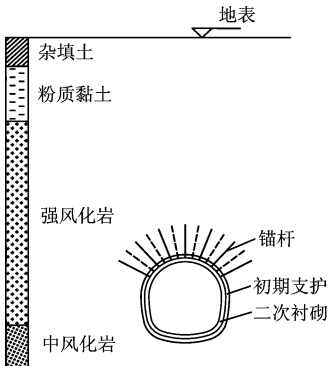


图1 厚碎裂岩层段地铁隧道原支护方案示意图

2 碎裂岩层隧道支护加固技术

针对本区间K3+283.5—K3+342.6段的全、强风化花岗岩碎裂地层,为了确保隧道的施工安全

和周边环境稳定,结合汇中区间隧道的施工环境,提出以下4种支护结构加固方案,如表1所示。

表1 汇中区间支护结构加固方案表

| 方案 | 描述 |
|-------------------------|--|
| 方案1:全断面WSS超前帷幕注浆 | 采用全断面WSS超前帷幕注浆技术,注浆管长度为5 m,外插角为15°,具体布置见图2 |
| 方案2:超前小导管支护 | 在隧道拱顶设置 ϕ 42 mm注浆小导管支护,长度为3.5 m,外插角为15°,环距为0.4 m,排距为1 m,并做好背后补偿注浆 |
| 方案3:提高初期支护刚度 | 初期支护由原先的锚喷网支护调整为锚喷网+格栅拱架支护,格栅采用4根 ϕ 20 mm螺纹钢绑扎而成,每档间距为0.5 m |
| 方案4:增大拱顶锚杆长度,并增设拱肩及拱脚锚杆 | 拱顶锚杆长度由2.5 m增加至3.5 m;在隧道 $\pm 45^\circ$ 拱肩和拱脚处增设锚杆,长度为4 m,并进行注浆加固 |

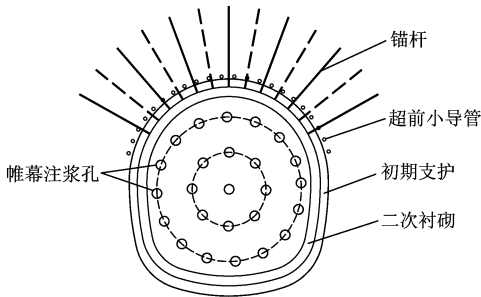


图2 全断面WSS超前帷幕注浆加固示意图

为分析汇中区间支护结构不同加固方案的围岩控制效果,通过数值模拟对各加固方案的地表变形、主应力分布及围岩塑性区发展进行分析,并对综合支护效果进行评价。

3 隧道加固控制模拟分析

3.1 建立计算模型

选取汇中区间隧道碎裂岩层段为建模对象,模型的长度、宽度、高度别为80 m、60 m、60 m。模型边界条件设定为上边界无约束、四周为水平约束、底面为竖向约束。隧道三维数值模型如图3所示。

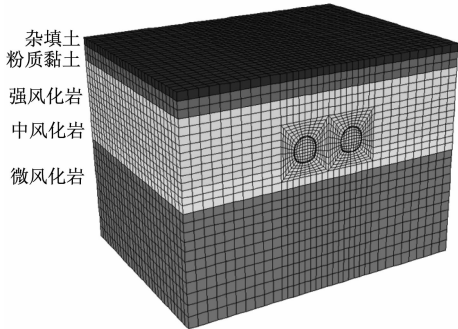


图3 汇中区间隧道三维数值模型

隧道围岩选用莫尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 弹塑性模型。超前帷幕注浆与超前小导管支护通过提高加固圈围岩力学参数实现,锚杆采用 cable 单元,

初期支护结构采用 shell 单元,二次衬砌结构采用实体弹性单元。模型中地层及支护结构物理力学参数如表 2 所示。

表 2 模型中地层及支护结构物理力学参数表

| 名称 | 厚度/m | 容重/ (kN/m ³) | 弹性模量/ MPa | 泊松比 | 内摩擦角/ (°) | 黏聚力/ kPa | 抗拉强度/ kPa |
|----------|-------|-----------------------------|--------------|------|--------------|-------------|--------------|
| 杂填土 | 2.30 | 18.0 | 8.5 | 0.38 | 16 | 8 | 12 |
| 粉质黏土 | 4.10 | 19.2 | 24.0 | 0.30 | 22 | 20 | 45 |
| 全、强风化花岗岩 | 16.00 | 22.4 | 70.0 | 0.28 | 25 | 60 | 65 |
| 中风化花岗岩 | 8.20 | 23.5 | 800.0 | 0.25 | 32 | 240 | 190 |
| 超前帷幕注浆 | 5.00 | 23.0 | 600.0 | 0.23 | 27 | 200 | 160 |
| 超前小导管支护 | 0.92 | 23.6 | 2 000.0 | 0.25 | 32 | 500 | 400 |

3.2 计算结果分析

对上述 4 种方案下的隧道地表沉降、支护结构主应力分布及围岩塑性区发展情况进行对比分析。

3.2.1 地表沉降分析

图 4 为各支护结构加固方案下的横断面地表沉降曲线。由图 4 可知:

(1) 各方案地表沉降趋势相似,方案 1 的沉降值最小,仅为 9.52 mm,比原方案减小了 30.7%。这说明采用全断面 WSS 超前帷幕注浆对掌子面前方碎裂岩体进行预加固,显著改善了不良地质段围岩的力学特性,该方案对地层沉降的控制效果较好。

(2) 方案 2、3 的沉降控制效果基本一致,说明通过超前小导管支护提高拱顶围岩强度,以及提过提高初期支护刚度来抵抗地层变形,其原理都是为了增强围岩及支护结构的弹性抗力。

(3) 方案 4 的支护效果较其它方案略差,说明增大拱顶锚杆长度和增设拱肩及拱脚锚杆需要与其它支护结构有机结合,才能发挥出更好的加固效果。

3.2.2 结构主应力分析

图 5 为右线隧道初期支护结构最大主应力分布情况。由图 5 可知:

(1) 不同加固方案下,初期支护结构主应力分布趋势类似;隧道轴线(180°)两侧主应力呈不对称分布,左帮明显大于右帮,这是由于左线隧道开挖对右线围岩起到扰动叠加作用;拱肩处压应力最大,表现为拱肩初期支护结构压应力集中。因此,针对厚碎裂岩层隧道,应重点加强拱顶与拱肩的支护强度。

(2) 方案 1 中拱顶及拱肩处的主应力明显较小,说明全断面 WSS 超前帷幕注浆能够有效提高隧道开挖范围内碎裂岩体的自稳性,从而减小围岩扰

动及减压压应力集中。

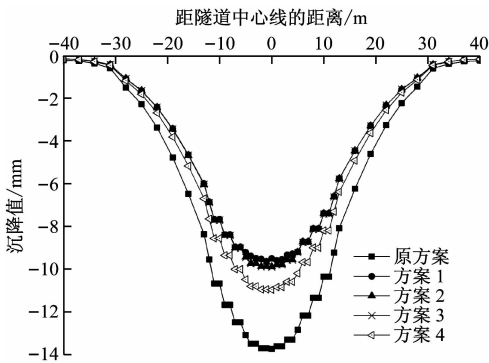


图 4 各支护结构加固方案下隧道横断面地表沉降曲线

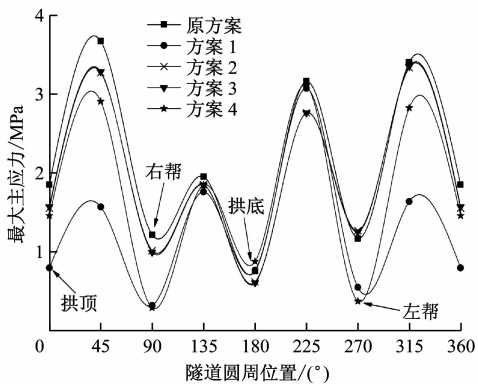


图 5 各支护结构加固方案下隧道结构最大主应力曲线

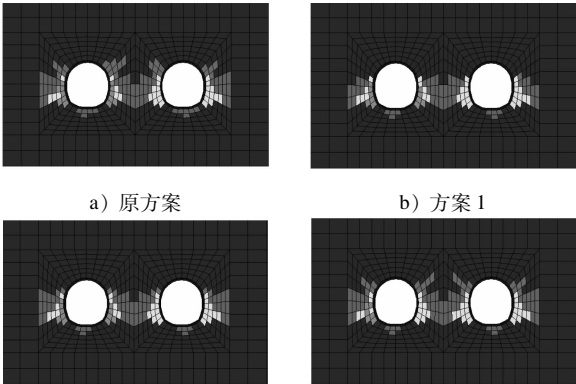
3.2.3 围岩塑性区分析

图 6 为各支护结构方案的围岩塑性区分布情况。由图 6 可知:

(1) 方案 1:采用全断面 WSS 超前帷幕注浆加固后,隧道拱顶围岩塑性区明显减小,相较于原方案,塑性区仅出现在拱肩以下,这说明通过超前注浆加固能够显著改善开挖范围内碎裂岩体的力学性质;且通过该措施碎裂岩体可胶结融合为整体,使其抗剪强度明显增强,加固效果良好。

(2) 方案2:超前小导管支护能够提高拱顶围岩的强度和稳定性,从而减小拱顶围岩的塑性发展,对抑制隧道两帮变形具有重要作用。

(3) 方案3:提高初期支护刚度后,原方案的塑性区略小,加固效果并不显著,这说明仅提高初期支护刚度对抑制围岩塑性发展效果并不明显。



注: ■——弹性; ■——拉剪破坏; ■——剪切破坏; ■——拉伸破坏

图6 各支护结构加固方案下的围岩塑性区分布图

4 基于灰色关联的支护优化分析

4.1 多指标灰色关联分析

灰色关联分析是研究系统中各影响因素关联程度的定量性评价方法^[7]。对于隧道施工中的支护优化问题,通过对各支护结构加固方案进行多指标关联度分析,得到综合支护效果最佳的加固方案。

基于灰色关联的多指标综合支护效果具体计算过程如下:首先确定支护效果评价参考序列 A_0 ,记 $A_0 = \{x_0(k) \mid k=1,2,\cdots,n\}$,其中 n 为每个支护方案的评价指标个数;然后确定比较数列 A_i ,记 $A_i = \{x_i(k) \mid k=1,2,\cdots,n\}$ ($i=1,2,\cdots,m$),其中 m 为支护方案个数。

则 $A_i(k)$ 对 $A_0(k)$ 的关联系数 $\xi_{0,i}(k)$ 为:

$$\xi_{0,i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \beta\Delta_{\max}}{\Delta_{0,i}(k) + \beta\Delta_{\max}} \quad (1)$$

其中: $\Delta_{\min} = i_{\min} \cdot k_{\min} \mid A_0(k) - A_i(k) \mid$; $\Delta_{\max} = i_{\max} \cdot k_{\max} \mid A_0(k) - A_i(k) \mid$; β 为分辨系数,一般取0.5; $\Delta_{0,i}(k) = \mid A_0(k) - A_i(k) \mid$ 。

考虑不同评价指标对支护效果的重要程度具有较大差异,因此,通过各评价指标的权重乘以其关联系数得到各支护结构方案的关联度,即:

$$\gamma_{0,i} = \sum_{k=1}^n w_k \cdot \xi_{0,i}(k) \quad (2)$$

式中:

$$w_k \text{——各评价指标的权重, } \sum_{k=1}^n w_k = 1。$$

4.2 各支护结构加固方案支护效果综合评价

结合本区间工程的施工条件及周边环境特点进行风险敏感性分析^[8-9],确定地表沉降量、拱顶沉降值、拱顶初期支护结构最大主应力、隧道两帮水平收敛位移、围岩塑性区发展水平等5项指标,并将其作为支护效果评价指标。其中,围岩塑性区发展水平为隧道开挖后围岩塑性区面积与开挖断面面积之比,用来描述隧道围岩塑性区随开挖面的发展趋势^[12]。结合国内外研究成果^[10-11]和专家调查法确定各评价指标权重,如表3所示。各支护结构加固方案对5项指标的支护效应评价如表4所示。

表3 各评价指标权重

| 评价指标 | 地表沉降 | 拱顶沉降 | 拱顶初期支护最大主应力 | 隧道两帮水平收敛位移 | 围岩塑性区发展水平 |
|------|------|------|-------------|------------|-----------|
| 权重 | 0.32 | 0.16 | 0.14 | 0.10 | 0.28 |

表4 支护结构加固各方案下评价指标的支护效应

| 项目 | 地表沉降/mm | 拱顶沉降/mm | 拱顶初期支护最大主应力/MPa | 隧道两帮水平收敛位移/mm | 围岩塑性区发展水平 | 支护效果水平 |
|-----|---------|---------|-----------------|---------------|-----------|--------|
| 原方案 | 13.74 | 18.14 | 1.854 | 4.82 | 1.26 | 1.000 |
| 方案1 | 9.50 | 11.12 | 0.795 | 3.83 | 0.88 | 2.165 |
| 方案2 | 9.88 | 11.95 | 1.554 | 4.11 | 1.08 | 1.661 |
| 方案3 | 9.90 | 12.27 | 1.573 | 3.48 | 1.20 | 1.497 |
| 方案4 | 10.96 | 13.15 | 1.457 | 3.78 | 1.04 | 1.658 |

对于隧道的支护优化问题,选取原方案各指标量为参考序列,即 $A_0 = [13.74, 18.14, 1.854, 4.82, 1.26]$,则支护影响效应矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 13.74 & 18.14 & 1.854 & 4.82 & 1.26 \\ 9.50 & 11.12 & 0.795 & 3.83 & 0.88 \\ 9.88 & 11.95 & 1.554 & 4.11 & 1.08 \\ 9.90 & 12.27 & 1.573 & 3.48 & 1.20 \\ 10.96 & 13.15 & 1.457 & 3.78 & 1.04 \end{bmatrix} \quad (3)$$

为了消除各评价指标数值范围和量纲的差异,对支护影响效应矩阵 A 进行归一化处理,得到无量纲规范矩阵 B 。

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.691 & 0.613 & 0.429 & 0.795 & 0.698 \\ 0.719 & 0.659 & 0.838 & 0.853 & 0.857 \\ 0.721 & 0.676 & 0.848 & 0.722 & 0.952 \\ 0.798 & 0.725 & 0.786 & 0.784 & 0.825 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(1)、(4)计算得到关联系数矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \xi_{0,1} \\ \xi_{0,2} \\ \xi_{0,3} \\ \xi_{0,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.481 & 0.416 & 0.316 & 0.605 & 0.488 \\ 0.509 & 0.452 & 0.680 & 0.709 & 0.718 \\ 0.511 & 0.467 & 0.700 & 0.512 & 1.002 \\ 0.610 & 0.515 & 0.592 & 0.590 & 0.656 \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据式(2)和表3计算得到比较序列关联度为:

$$[\gamma_{0,i}]^T = [0.462 \quad 0.602 \quad 0.668 \quad 0.603] \quad (6)$$

由于该关联度求解过程中选取的原支护方案为参考序列,致使其关联性与综合支护效果呈负相关,因此定义支护效果水平 $s_{0,i}$ 为:

$$s_{0,i} = \frac{1}{\gamma_{0,i}} \quad (7)$$

将式(7)带入式(6)计算得到:

$$[s_{0,i}]^T = [2.165 \quad 1.661 \quad 1.497 \quad 1.658] \quad (8)$$

由式(8)可知,加固方案1的综合支护效果水平比原方案提高了116.5%,比方案2、3、4分别提高了66.1%、49.7%、65.8%,这说明方案1的综合加固效果最好,方案2、4的加固效果相近,方案3的加固效果略差。

综上所述,各支护结构加固方案的支护效果为方案1>方案2>方案4>方案3。

结合经济性、施工便捷性和工期风险等因素,对4种加固方案进行比较可知:全断面WSS超前帷幕注浆施工速度较慢、造价较高、对施工队伍水平要求亦较高,而其他3种加固方案则施工速度较快、经济性较好、地层适应性较强、施工更为便捷。因此,现场施工中需结合具体地质条件合理选择加固方案,在岩层碎裂、岩体风化程度较高或地表密布建筑物地段采用全断面WSS超前帷幕注浆支护;在地质条件较好地段,可采用超前小导管支护或增大拱顶锚杆长度或增设拱肩及拱脚锚杆等措施。

5 结论

(1) 结合汇中区间厚碎裂岩层的地质情况,提出了全断面WSS超前帷幕注浆、超前小导管支护、提高初期支护刚度、增大拱顶锚杆长度并增设拱肩及拱脚锚杆4种加固措施。

(2) 全断面WSS超前帷幕注浆对碎裂岩层的地层沉降和塑性发展控制效果最好;超前小导管支护与提高初期支护刚度的沉降控制效果基本相同,但超前小导管支护对抑制围岩塑性区发展效果较明显;增大拱顶锚杆长度、增设拱肩及拱脚锚杆对控制拱顶沉降效果不理想,而对抑制隧道两帮变形具有重要作用。

(3) 应用灰色关联理论对各加固方案进行多指标综合支护效果定量评价,方案1、2、3、4的支护效果水平比原方案分别提高了116.5%、66.1%、49.7%、65.8%,即综合支护效果总结为:全断面WSS超前帷幕注浆>超前小导管支护>增大拱顶锚杆长度、增设拱肩及拱脚锚杆>提高初期支护刚度。

参考文献

- [1] 王梦恕,张成平. 城市地下工程建设的事故分析及控制对策[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(2):1.
- [2] 曹成勇,施成华,彭立敏,等. 浅埋大跨下穿高速公路隧道施工风险评估及控制措施研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(7):1439.
- [3] 王渭明,路林海. 台东交叠隧道施工过程数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2009(6):1181.
- [4] 漆泰岳,刘强,琚国全. 软弱岩层大跨度地铁车站施工优化与地表沉降控制[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(4):804.
- [5] 张丛峰,宋林,罗承平. 改进CRD方案施工过程围岩稳定性分析[J]. 铁道标准设计,2013(12):87.
- [6] 孙捷城,吕显州,秦志斌,等. 浅埋碎裂岩层地铁车站拱盖一桩锚组合施工工法[J]. 铁道建筑,2015(7):72.
- [7] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002:137-150.
- [8] 王辉,陈卫忠. 嘎隆拉隧道围岩力学参数对变形的敏感性分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(8):1548.
- [9] 黄书岭,冯夏庭,张传庆. 岩体力学参数的敏感性综合评价分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1):2624.
- [10] 姜禹,郝伟. 基于赋权关联度法的桥梁加固方案优选研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(7):1317.
- [11] 邱道宏,张乐天,李术才,等. 基于优化理论的权重反分析方法研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(2):259.
- [12] 王渭明,孙捷城,王丹,等. 浅埋强风化岩车站拱盖——桩锚组合施工技术研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(1):143.

(收稿日期:2017-06-15)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704