

基于岩体参数反演的交通工程支护方案优化

董洋

中铁一局集团第二工程有限公司, 河北 唐山 063004

[摘要] 为了实现交通岩土工程建设过程中支护方案的快速、准确的优化设计, 建立了一种基于岩体参数反演的交通工程支护方案优化设计方法。研究过程中, 首先进行了目标工程岩体节理参数的正交设计, 并开展了相关设计因素的极差分析, 得到了各参与正交设计参数的敏感性。在此基础上, 开展了工程岩土体参数的原位反演分析, 根据施工过程中的位移测量数据得到了工程真实的岩体参数, 为数值模拟分析提供了良好的数据基础。基于反演分析获得的岩体参数, 对小导管长度、小导管外插角度、小导管布置间距等隧道工程超前支护参数进行了对比分析, 得到了最优的施工参数。研究结果将为复杂地质条件下交通岩土工程支护方案动态优化设计提供参考。

[关键词] 交通岩土工程; 参数反演; 敏感性分析; 参数优化

DOI: 10.33142/ec.v6i4.8102

中图分类号: TD325

文献标识码: A

Optimization of Support Scheme for Traffic Engineering Based on Rock Mass Parameter Inversion

DONG Yang

China Railway First Group Second Engineering Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063004, China

Abstract: In order to achieve rapid and accurate optimal design of support schemes in traffic geotechnical engineering construction, an optimal design method for traffic engineering support schemes based on rock mass parameter inversion was established. During the research process, the orthogonal design of the rock mass joint parameters of the target project was first carried out, and the range analysis of relevant design factors was carried out to obtain the sensitivity of each participating orthogonal design parameter. On this basis, in-situ inversion analysis of engineering rock and soil parameters was carried out, and real rock mass parameters were obtained from displacement measurement data during construction, providing a good data basis for numerical simulation analysis. Based on the rock mass parameters obtained from the inverse analysis, comparative analysis was conducted on the advanced support parameters of tunnel engineering such as the length of small conduits, the insertion angle of small conduits, and the layout spacing of small conduits, and the optimal construction parameters were obtained. The research results will provide a reference for the dynamic optimization design of traffic geotechnical engineering support schemes under complex geological conditions.

Keywords: traffic geotechnical engineering; parameter inversion; sensitivity analysis; parameter optimization

引言

交通岩土工程建设过程中, 根据开挖揭露的实际地质环境进行支护方案的动态调整设计是十分必要的, 是保证施工安全与施工进度的重要手段。

当前既有研究多是根据经验参数进行施工方案的有效性分析, 并在此基础上进行施工方案的优化选取。这样做的主要原因是岩体具有显著的随机性与不确定性, 取样实验方法获得的岩体参数具有难以代表施工区域内的整体岩土体性质, 且实验周期较长, 难以满足施工过程中的快速优化设计需求。

本文研究在既有研究成果的基础上, 采用正交设计的方式进行了目标工程岩体节理参数的正交设计, 并开展了相关设计因素的极差分析, 得到了各参与正交设计参数的敏感性。在此基础上, 开展了工程岩土体参数的原位反演分析, 根据施工过程中的位移测量数据得到了工程真实的岩体参数, 为数值模拟分析提供了良好的数据基础。基于反演分析获得的岩体参数, 对小导管长度、小导管外插角

度、小导管布置间距等隧道工程超前支护参数进行了对比分析, 得到了最优的施工参数。研究结果将为复杂地质条件下交通岩土工程支护方案动态优化设计提供参考。

1 节理参数正交设计

正交设计是一种研究多因素多水平的实验方它能够筛选出具有代表性的点进行实验设计, 从而减少了大量的试验所带来的困难, 且能方便试验高效地进行。

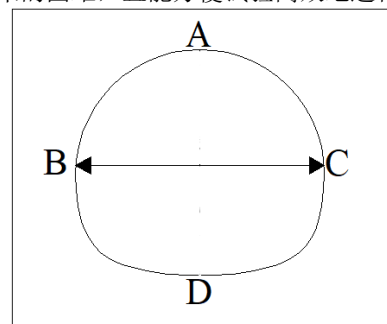


图1 测点分布图

根据某市政地铁工程区间隧道的实际情况,对其典型区段Ⅵ级围岩段节理参数进行正交设计,并确定影响隧道稳定性的较大因素。选取选用 L25 (55) 正交表(如表 1 所示),根据现场调研情况及勘察资料,设计 5 个试验参数在 5 水平下的 25 种组合,参数及取值范围:节理长度 $L=2\sim 4\text{m}$,节理倾角 $0\sim 90^\circ$,节理间距 $1\sim 3\text{m}$,节理岩桥比例 $0.3\sim 0.7$ 。将各方案参数带入有限元中进行正算,

正交设计及结果如表 1 所示。隧道施工时,先对隧道拱顶 120° 范围内进行小导管超前支护,然后采用 CRD 法施工,初期支护紧跟掌子面。现场观测拱顶 AZ、拱底 DZ 和拱腰 BC 两点间的测点分布如图 1 所示。

根据计算结果作极差分析,得到不同参数的极差值及不同参数组合对不同位移变化的影响次序(见表 1)。将表 1 中 AZ、DZ、BC 测量值极差用柱状图表示,如图 2 所示。

表 1 节理参数正交设计表

因素	节理倾角/ $^\circ$	岩桥比例	节理长度/m	节理间距	A _z 点位移/mm	BC 测线位移/mm	D _z 点位移/mm	屈服单元所占百分比
试验 1	0	0.3	2	1	6	7.2	4.44	24.7
试验 2	0	0.4	2.5	1.5	6.84	7.5	3.96	26.6
试验 3	0	0.5	3	2	7.42	7.82	3.64	29.2
试验 4	0	0.6	3.5	2.5	8.84	8.04	3.12	32.2
试验 5	0	0.7	4	3	9.28	8.37	1.92	30.5
试验 6	20	0.3	2.5	2	4.7	7.22	4.5	32.1
试验 7	20	0.4	3	2.5	6.02	7.7	5.32	30.9
试验 8	20	0.5	3.5	3	6.36	7.89	3.6	31.1
试验 9	20	0.6	4	1	16.8	11	1.2	20.5
试验 10	20	0.7	2	3.5	5.3	8.46	4.5	24.3
试验 11	40	0.3	3	3	4.5	7.14	4.4	34.9
试验 12	40	0.4	3.5	1	9.2	8.55	3	23.7
试验 13	40	0.5	4	1.5	9.4	8.85	3.2	21.4
试验 14	40	0.6	2	2	6	7.74	5.2	24.3
试验 15	40	0.7	2.5	2.5	5.7	8.67	4.6	25.5
试验 16	60	0.3	3.5	1.5	5.5	7.52	4.2	31.5
试验 17	60	0.4	4	2	6.45	9.9	4.65	26.1
试验 18	60	0.5	2	2.5	4.37	7.6	4.66	25.8
试验 19	60	0.6	2.5	3	5.3	7.49	4.5	28.2
试验 20	60	0.7	3	1	18.1	12	2.1	18.4
试验 21	80	0.3	4	2.5	4.8	8.16	4.8	32.9
试验 22	80	0.4	2	3	4.05	7.35	4.59	29.5
试验 23	80	0.5	2.5	1	6	8.25	5.25	17.5
试验 24	80	0.6	3	1.5	7.05	8.84	4.65	23.7
试验 25	80	0.7	3.5	2	6.45	7.66	4.65	25.9
A 极差	2.274	3.866	4.202	5.322				
A 次序	4	3	2	1				
BC 极差	1.116	1.584	1.586	1.752				
BC 次序	4	3	2	1				
D 极差	1.372	0.914	1.524	1.330				
D 次序	2	4	1	3				
E 极差	2.74	6.3	3.16	9.88				
E 次序	4	2	3	1				
极差均值	1.8755	3.166	2.618	4.571				
极差均值次序	4	2	3	1				

极差的次序表示各参数对于测线或测点的影响主次关系。

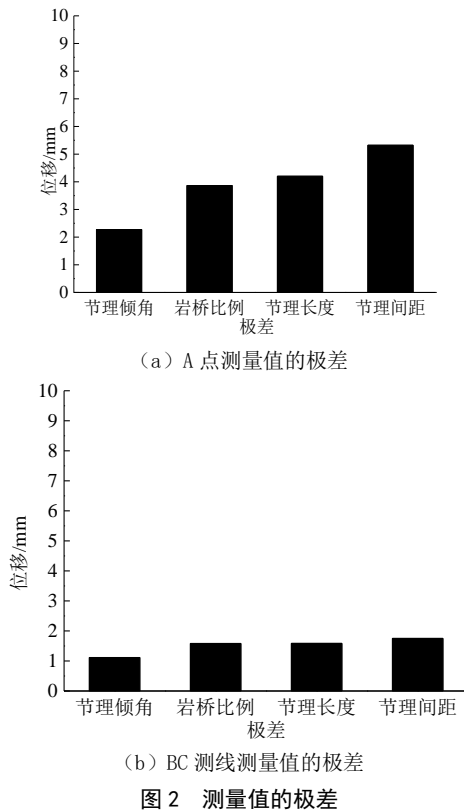


图2 测量值的极差

表2中, AZ为拱顶处沉降位移值, BC为拱腰处测线位移值, DZ点为拱底隆起位移值, AZ、BC、DZ的极差、次序、极差均值表示各点或测线位移值极差、各参数对其影响主次关系和极差平均值。

由极差结果可知,对隧道位移影响的敏感性因素排序依次是节理间距、岩桥比例、节理长度和节理倾角。其中节理间距的影响最为显著,其次岩桥比例和节理长度影响也很大。因此,本文选取影响较大的前三个参数进行反分析。

2 节理参数反演分析

利用 Matlab 实现的 GP-DE 算法对节理参数进行反分析,设定相关参数,种群规模 NP 为 100,变异因子 F 为 0.4,交叉因子 CR 为 0.9,最大进化代数 Itermax 为 100,核函数选用平方指数协方差函数(SE),核函数中所含超参数由 GP-DE 算法进行优化选择。将按石劳区间隧道设计的 25 种方案参数有限元正算的结果 AZ、BC、DZ 的位移作为训练样本,通过 GP-DE 算法进行学习寻求最优的非线性映射关系的模型。将石劳区间隧道工程实际监测所得的数据作为控制值进行反分析,其中 AZ=-7.75mm, BC=-5.66mm, DZ=-4.56mm, 搜索得到是适应值函数取最小值时的最佳力学参数组为:岩桥比例为 0.3,节理长度为 2.3m,节理间距为 1.5m,将反演的参数输入石葵路车站的数值模型中进行计算,可得到各点或测线的位移值,并与实际位移值进行对比,其结果见表2。反演参数计算值与实际测量值

相对误差最大值为 6.9%,满足工程需要,证明方法可用于后续数值分析。

表2 反演值与实测值对比

测量值	反演值	监测值	相对误差 (%)
A _z	-7.49	-7.75	3.4
BC	-5.27	-5.66	6.9
D _z	-4.44	-4.56	2.6

3 支护结构参数优化分析

3.1 超前小导管参数分析

超前小导管作用是固定隧道上方岩体,能够显著提高围岩的整体性和稳定性,进而使隧道能够安全有效的进行开挖。小导管能够将小导管长度之内的薄层岩石通过小导管的作用组合成岩石组合梁,起到提高围岩承载能力的作用。因此小导管超前支护作为支护结构来说也是必不可少的一部分,此节针对超前小导管的长度、外插角度和布置范围进行分析,确定小导管最优选取值,以优化施工。

3.2 超前小导管长度对隧道稳定性的影响

超前小导管作用是固定隧道上方岩体,能够显著提高围岩的整体性和稳定性,进而使隧道能够安全有效的进行开挖。为了研究小导管长度对隧道稳定性的影响,选取小导管布置范围 120°,小导管外插角度 16°,对小导管长度 2m、2.5m、3m、3.5m、4m 进行分析。为了更加直观地比较小导管长度变化对隧道的影响,绘制了隧道拱顶沉降曲线图如图 3 所示。

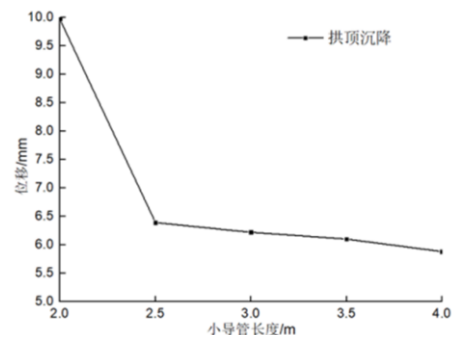


图3 隧道拱顶沉降曲线图

由上图可以看出,随着小导管长度的增加,隧道拱顶沉降位移先减小后增大,当小导管长度超过 2.5m 时,拱顶沉降位移增加,小导管长度在 2.5m 处位移达到最小值,所以当小导管长度为 2.5m 时,最经济。

3.3 超前小导管外插角度对隧道稳定性的影响

超前小导管作用是固定隧道上方岩体,能够显著提高围岩的整体性和稳定性,进而使隧道能够安全有效的进行开挖。为了研究小导管长度对隧道稳定性的影响,选取小导管布置范围 120°,小导管长度 2.5m,小导管外插角度 10°、13°、16°、19° 进行分析。为了更加直观地比较

小导管外插角度变化对隧道的影响,绘制了隧道拱顶沉降曲线图,如图4所示。

由图4可见,小导管外插角度增长时,隧道拱顶沉降逐渐减小,在19°左右时,位移达到最小值,但整体看,小导管外插角度对隧道的拱顶沉降位移影响并不大。

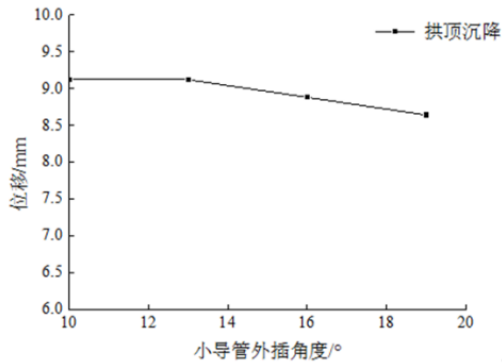


图4 隧道拱顶沉降曲线图

4 施工方案选取

根据分析,并结合石劳区间勘测资料,选取小导管长度为2.5m,小导管外插角度为16°,小导管布置间距为120°的施工方案并建立有限元模型进行分析,模型中小导管采用等效模拟法,等效模拟为隧道上方一定范围内岩体的参数的增强。并把反分析所得节理参数带入模型中,模拟施工中的开挖支护。

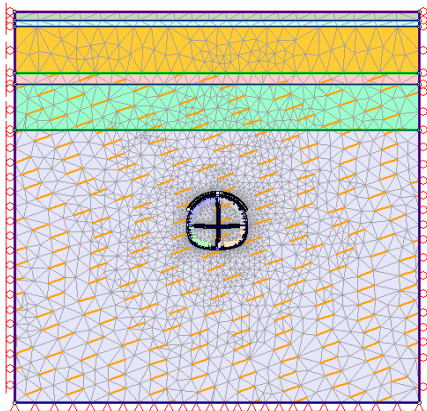


图5 数值计算模型图

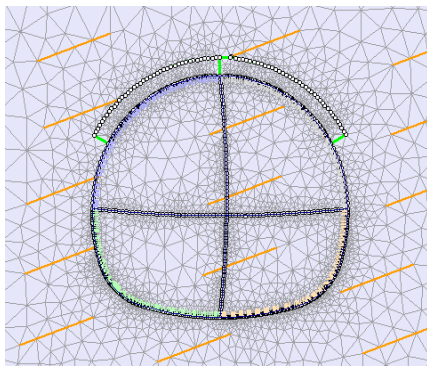


图6 隧道计算模型局部放大图

4.1 位移分析

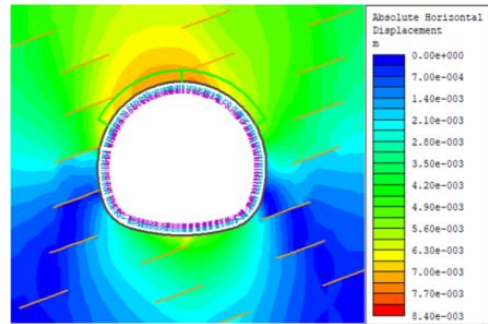


图7 竖向位移云图

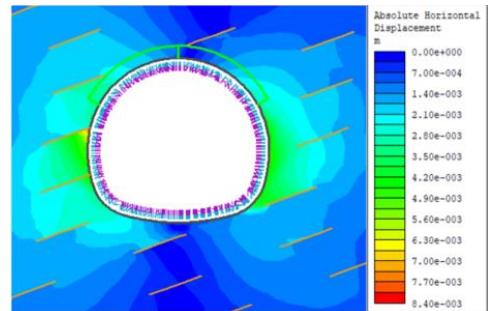


图8 水平位移云图

从图7、图8可以看出,采用小导管长度为2.5m,小导管外插角度为16°,小导管布置间距为120°的施工方案进行模拟施工后,拱顶沉降位移为7.35mm,拱底隆起为5.95mm,拱腰收敛位移为4.45mm,满足施工要求。

4.2 塑性区分析

塑性区计算结果如图9、图10所示,可见,采用小导管长度为3.5m,小导管外插角度为16°,小导管布置间距为120°的施工方案进行模拟施工后,隧道上方120°范围内的超前加固区的塑性区基本无屈服,这是因为塑性区小导管与注浆加固区一起形成的拱形支护体,承受了上部岩体的压力,抑制了围岩变形,从塑性区变形图可以看出,节理的存在加剧了隧道的不稳定性,塑性区沿节理破坏明显,隧道岩体被节理切断,呈现转移现象,隧道围岩出现不规则变形。

综上,采用小导管长度为2.5m,小导管外插角度为16°,小导管布置间距为120°的施工方案既能够节省建筑材料,又能够使隧道稳定性影响最小。

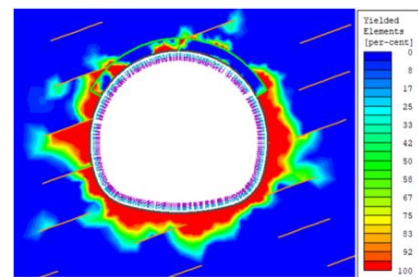


图9 塑性区图

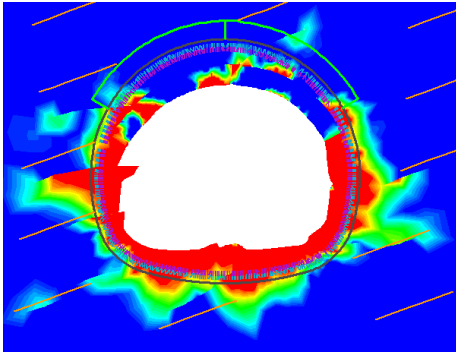


图 10 塑性区变形图

5 结论

本文研究进行了目标工程岩体节理参数的正交设计,并开展了相关设计因素的极差分析,得到了各参与正交设计参数的敏感性。在此基础上,开展了工程岩土体参数的原位反演分析,根据施工过程中的位移测量数据得到了工程真实的岩体参数,为数值模拟分析提供了良好的数据基础。基于反演分析获得的岩体参数,对小导管长度、小导管外插角度、小导管布置间距等隧道工程超前支护参数进行了对比分析,得到了最优的施工参数。研究结果将为复

杂地质条件下交通岩土工程支护方案动态优化设计提供参考。

[参考文献]

- [1]赵俊峰. 基于 TSP 超前地质预报与监控量测信息的隧道围岩亚级分级方法及应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
 - [2]周宗青, 李术才, 李利平, 等. 围岩超前优化分级的属性识别模型及其工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1611-1619.
 - [3]耿耘. 地下工程围岩变形的支持向量机预测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
 - [4]赵洪波. 支持向量机在隧道围岩变形预测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 24(4): 649-652.
 - [5]赵洪波. 基于进化支持向量机的滑动面参数识别[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 541-544.
 - [6]赵洪波. 基于 GA 与 SVM 的最危险滑动面识别[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2011-2014.
- 作者简介: 董洋(1991.12-), 男, 总工程师, 主要从事交通岩土稳定性研究。