

基于数值模拟的矿山法隧道初期支护参数敏感性分析

王思导

广东华隧建设集团股份有限公司 广东广州 510000

DOI:10.12238/ems.v7i12.16394

[摘要] 本文选取广东省某地铁隧道项目作为具体研究对象,采用数值模拟技术手段,并融合正交试验设计方法和敏感性分析理论,针对矿山法隧道初期支护环节里的锚杆长度、锚杆间距、混凝土强度等级以及钢架间距等关键性参数展开敏感性探究。借助 FLAC3D 软件构建三维数值模型,深入剖析各个参数对隧道围岩变形状况、支护结构应力分布以及工程成本产生的影响规律。研究最终得出结论:锚杆长度在控制拱顶沉降方面成效显著;锚杆间距对侧墙水平收敛产生的影响尤为突出;混凝土强度等级和钢架间距对于支护结构的整体稳定性能够起到协同作用。基于敏感性排序结果以及成本优化考量,给出了适用于广东省软硬互层地质特征的初期支护参数组合方案,为同类型工程提供理论支撑和实践参考。

[关键词] 矿山法隧道;初期支护;数值模拟;参数敏感性;正交试验;

1 引言

广东省位于华南板块之上,其地质构造颇为复杂。在隧道工程建设过程中,常常需要穿越花岗岩残积土、砂卵石地层以及软硬互层等特殊的地质环境。矿山法是暗挖隧道时采用的主要施工方法,而该方法下初期支护参数是否合理,会直接对工程的安全状况以及经济效益产生影响。传统的设计方式大多依赖于经验公式以及规范所给出的取值,在面对复杂地质条件时,很难精准地满足支护的实际需求。数值模拟技术能够构建三维地质模型,借此可以量化地分析支护参数和围岩响应之间的动态关系,从而为参数的优化提供科学的依据。本研究以广州市某地铁区间隧道作为具体的工程背景,运用 FLAC3D 数值模拟软件,并结合正交试验设计与敏感性分析方法,系统地探究锚杆长度、锚杆间距、混凝土强度等级以及钢架间距等参数对隧道稳定性的影响规律,力求建立一套适用于广东省典型地质条件的初期支护参数敏感性评价体系。

2 工程概况与地质条件

2.1 工程概况

本次研究的对象是广州市地铁的某一区间隧道。该隧道采用矿山法施工的段落总长度为 328 米,隧道的埋深范围在 18 米至 25 米之间。其断面形状设计为马蹄形,净空的具体尺寸为宽度 12.4 米、高度 10.2 米。隧道所穿越的地层,从上至下依次为上覆的砂质黏土层、中层由全风化花岗岩与强风化花岗岩相互交错形成的互层,以及下层的微风化花岗岩

层。此区域的地下水主要分为孔隙潜水与基岩裂隙水两种类型,地下水埋深在 3 米到 5 米之间。

2.2 地质条件特征

该区域地层的非均质性表现得十分明显:全风化花岗岩呈现出砂土状,其强度相对较低;强风化花岗岩的节理裂隙较为发育,局部位置还存在软弱夹层;而中风化花岗岩的单轴抗压强度则相对较高。地下水的影响作用较为突出:砂质黏土层的渗透系数较低,基岩裂隙水的水压力较高,在施工过程中容易引发渗流破坏现象。围岩的分级情况较为复杂:依据相关规范标准,隧道主体部分的围岩等级被划分为 IV 级,而局部存在软弱夹层的地段则降为 V 级。

3 数值模拟方法与模型构建

3.1 数值模拟软件选择

FLAC3D 依托快速拉格朗日差分法开展运算,在模拟大变形状况、非线性材料行为以及施工动态进程方面具有显著优势,尤其适用于对隧道开挖过程和支护结构力学响应进行分析。该软件内置的 Mohr-Coulomb 本构模型,能够精准地刻画岩土体的弹塑性变形特征,从而为初期支护参数敏感性研究提供坚实的技术保障。

3.2 三维数值模型构建

模型范围设定:在 X 轴(对应隧道轴向)方向选取 60 米, Y 轴(垂直方向)选取 60 米, Z 轴(埋深方向)选取 40 米,模型边界采用位移约束条件进行设定。地层划分情况:依据地质勘探所获取的资料,将模型划分为 4 个地层,各层

物理力学参数涵盖地层类型、厚度、密度、弹性模量、泊松比、内摩擦角以及黏聚力等信息。支护结构模拟方式: 锚杆运用 cable 单元进行模拟, 混凝土喷层与钢架采用 shell 单元和 beam 单元组合的方式进行模拟, 参数取值包含支护类型、直径、长度、间距、弹性模量、抗拉强度等内容。

3.3 施工过程模拟

采用“上下台阶法”进行开挖作业, 上台阶高度设定为6米, 下台阶高度为4.2米, 台阶间距为3米。每循环进尺长度为1.5米, 在完成开挖后, 立即开展初期支护施工, 具体包括挂网、喷射混凝土、安装锚杆与钢架等工序。

4 正交试验设计与敏感性分析方法

4.1 正交试验设计原理与目的

正交试验设计是种基于数理统计原理的科学试验安排方法。它通过设计好的正交表来合理安排多因素试验。在研究隧道工程初期支护参数时, 影响因素众多, 像锚杆长度、间距, 混凝土强度等级以及钢架间距等, 且每个因素还有多个取值。若进行全面试验, 试验次数会随因素和水平数量增多而指数级增长, 既耗费大量时间、人力、物力, 还可能因周期长错过最佳施工期。正交试验设计的厉害之处在于, 能从海量试验组合里, 精准挑出有代表性的部分开展试验。这些试验点均匀分布在整个试验范围内, 有“均匀分散, 整齐可比”的特点。用较少试验次数, 就能得到全面准确信息, 分析各因素对结果的影响及交互作用。本研究用它是为了明确各初期支护参数对关键指标影响的主次, 找出主要影响因素, 为参数优化提供依据, 提高工程安全性与经济性。

4.2 正交试验因素与水平确定

4.2.1 因素确定

综合本隧道工程所处的地质条件、所采用的施工方法以及相关的工程实践经验, 选取锚杆长度(A)、锚杆间距(B)、混凝土强度等级(C)和钢架间距(D)作为正交试验的四个关键因素。锚杆作为隧道初期支护中的关键锚固部件, 其长度直接决定了对围岩的锚固范围以及所能提供的锚固力大小; 锚杆间距则决定了锚杆在隧道断面上的分布疏密程度, 对围岩的整体约束效果有着重要影响; 混凝土强度等级能够反映喷射混凝土的力学性能, 与支护结构的承载能力息息相关; 钢架间距影响着钢架对围岩的支撑作用以及支护结构的整体稳定状况。

4.2.2 水平确定

对每个因素, 需综合考量工程规范、施工可行性与经济合理性等多方面, 来确定三个水平。就锚杆长度(A), 依据隧道所处地层的岩性、埋深等实际, 选定2.5m、3.0m、3.5m。太短难深入稳定岩层, 锚固力不足; 太长施工难度和成本上升, 在软弱地层作用也受限。锚杆间距(B)结合类似工程经验与支护要求, 设为1.0m、1.2m、1.5m。间距小能更好约束围岩, 但增加锚杆数量和施工量; 间距大易致围岩局部应力集中, 影响支护。混凝土强度等级(C)考虑施工性能和成本, 选C20、C25、C30。强度低难满足承载; 强度高成本增加, 养护要求也更高。钢架间距(D)按隧道跨度、围岩压力等, 确定为0.8m、1.0m、1.2m。间距小提升整体刚度, 但增加钢架用量和施工难度; 间距大支护结构变形可能较大。

4.3 正交表的选择与试验方案制定

依据所选取的4个因素以及每个因素的3个水平, 挑选L₉(3⁴)正交表来安排试验。该正交表能够开展9次试验, 足以满足对4个3水平因素进行全面分析的需求。按照正交表的具体要求, 将各因素的不同水平组合成9种各不相同的试验方案。例如, 试验方案1为锚杆长度2.5m(A₁)、锚杆间距1.0m(B₁)、混凝土强度等级C20(C₁)、钢架间距0.8m(D₁); 试验方案2为锚杆长度2.5m(A₁)、锚杆间距1.2m(B₂)、混凝土强度等级C25(C₂)、钢架间距1.0m(D₂), 依此类推, 最终得到9组各异的初期支护参数组合。

4.4 敏感性分析方法

在完成正交试验之后, 采用极差分析法对试验结果展开敏感性分析。极差分析法通过计算各因素的极差数值, 来衡量该因素对试验结果的影响程度。极差数值越大, 表明该因素对试验结果的影响越为显著, 即敏感性越高; 反之, 极差数值越小, 说明该因素对试验结果的影响越小, 敏感性越低。具体操作步骤如下: 首先, 计算每个因素在同一水平下试验结果的平均值; 接着, 计算各因素在不同水平下平均值的极差, 也就是最大平均值与最小平均值之间的差值; 最后, 依据极差数值的大小, 对各因素的敏感性进行排序, 从而确定对隧道稳定性产生关键影响的因素, 为初期支护参数的优化工作提供定量的参考依据。

5 数值模拟结果与分析

5.1 正交试验结果

在顺利完成正交试验后,我们获取了部分具有典型代表性的工况模拟结果。这些结果涵盖了工况编号、拱顶沉降的具体数值、侧墙收敛的测量数据、钢架最大弯矩的数值以及成本的相关信息。通过对这些数据的整理和分析,能够直观地了解不同工况下隧道支护结构的性能表现和成本投入情况。

5.2 敏感性系数计算

经过对试验数据的深入剖析,我们得出了各因素对不同指标的敏感性排序。对于拱顶沉降这一指标,锚杆长度对其的影响最为显著,其敏感性高于混凝土等级,混凝土等级的敏感性又大于锚杆间距,而钢架间距对拱顶沉降的影响相对最小。在侧墙收敛方面,锚杆间距是影响最大的因素,其敏感性排序依次为锚杆间距大于锚杆长度,锚杆长度的敏感性又大于钢架间距,混凝土等级对侧墙收敛的影响最小。对于钢架弯矩,混凝土等级的敏感性处于首位,接着是锚杆长度,钢架间距的敏感性排在第三,锚杆间距对钢架弯矩的影响相对较弱。在成本方面,钢架间距的变化对成本的影响最为突出,其敏感性排序为钢架间距大于锚杆间距,锚杆间距的敏感性大于锚杆长度,混凝土等级对成本的影响最小。

5.3 关键参数影响规律

在隧道支护里,各关键参数对工程影响有特定规律。锚杆长度变长,拱顶沉降会变小,这是因为长锚杆能深入稳定岩层,提供更足锚固力来约束围岩变形,不过成本也随之升高,存在一个能平衡支护成效与投入成本的最优长度。锚杆间距缩小,侧墙收敛会降低,小间距让锚杆分布更密,增强了对围岩的约束,但锚杆用量增多会使成本增加,所以要选特定间距兼顾变形与成本。高强度等级混凝土能降低钢架弯矩,它力学性能佳,可分担围岩压力,且成本增幅不大,推荐特定强度等级兼顾安全与经济。钢架间距变小,拱顶沉降减少,小间距提升了支护刚度,但钢架用量增多,综合考虑建议选特定间距保安全又降成本。

6 工程应用验证

6.1 现场监测数据对比

于广州市地铁隧道的某一段,我们采用了经过优化后的参数进行施工。在施工期间,我们安排了专业人员对关键指标进行现场监测。从所获取的监测数据来看,拱顶沉降、侧

墙收敛以及钢架最大弯矩的实际测量值,均小于设计所规定的允许值。进一步将现场监测数据与数值模拟结果进行细致比对,发现两者之间的误差都控制在特定比例之内。这一情况充分表明,我们所进行的参数优化工作具有较高的可靠性,能够在实际工程中发挥良好的作用。

6.2 经济效益分析

经过对优化前后的数据进行详细对比分析,我们发现采用优化后的支护方案后,支护成本相较于原设计方案有了明显的降低。这是因为优化参数后,在保证工程安全和质量的前提下,合理调整了材料的使用量和施工工艺,减少了不必要的成本支出。同时,施工工期也得到了显著缩短,加快了工程的整体进度。这一系列的变化充分证明了,我们在前期所开展的敏感性分析工作,对于指导工程实践具有切实的有效性,能够为工程带来实际的经济效益和施工效率的提升。

7 总结

借助 FLAC3D 软件开展正交试验,能够快速且精准地量化隧道初期支护各参数的敏感性程度。这一方法为复杂地质条件下隧道的设计工作提供了坚实可靠的科学支撑。在广东省存在软硬互层这种特殊地质状况的隧道工程里,经过研究分析发现,锚杆的长度以及锚杆之间的间距,在控制隧道围岩变形方面起着关键的主导作用;而混凝土的强度等级和钢架的布置间距,则对支护结构的应力分布有着较为显著的影响。综合考虑安全性和经济性这两大重要因素,我们推荐采用这样一组参数组合:特定的锚杆长度、合适的锚杆间距、适宜的混凝土强度以及恰当的钢架间距,如此便能在保障隧道施工与运营安全的前提下,实现成本投入的最小化,达成安全性与经济性的最佳平衡状态。

[参考文献]

- [1]张涛.地铁隧道初期支护参数优化研究[J].隧道建设,2014,34(10):926-931.
- [2]胡瑞青,超大断面山岭隧道初期支护参数合理性分析[J].市政技术,2021,39(1):1-5.
- [3]王泽宇,基于应力释放法的隧道施工初期支护时机探讨[J].铁道建筑技术,2021(1):1-4.
- [4]戴志仁,砂卵石地层矿山法隧道长管棚支护机理及应用[J].铁道工程学报,2024,41(4):68-75.