

基于灰色关联分析法的山区隧道围岩稳定性分析

李官群¹, 田庆²

(1.保靖县交通运输局, 湖南 保靖 416000; 2.保靖县农村交通建设技术咨询服务站, 湖南 保靖 416000)

摘要: 运用 ANSYS 模拟隧道开挖过程, 计算不同围岩参数下围岩变形和应力, 将围岩参数和计算结果以矩阵形式表示, 建立正交试验方案; 根据灰色关联分析法, 运用 MATLAB 计算围岩变形和最大压应力对围岩参数的关联度, 确定隧道开挖后影响围岩稳定性的敏感性因素。结果表明, 围岩内摩擦角是影响隧道围岩稳定性的主要因素, 黏聚力和围岩弹性模量是次要因素。

关键词: 隧道; 围岩稳定性; 围岩力学参数; 灰色关联分析法

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)05-0152-04

灰色关联分析法是衡量两个系统发展变化过程中关联程度的一种数值分析方法, 若两个系统的变化趋势相似度高, 则关联度较高, 反之则关联度较低。灰色关联度的取值为 0~1, 越接近 1, 说明两个系统的相关性越好。在灰色系统理论中, 参考数列是一个动态变量, 根据参考数列与比较数列之间发展态势的相似程度分析二者关联度。这一特点弥补了隧道围岩参数难以确定的缺点, 故灰色系统理论在隧道工程中有着广泛应用。刘小俊等采用不同的灰色理论预测围岩变形, 结果表明 GM(1,1) 模型的计算结果不收敛, 只适用于隧道变形的短期预测, 而 Verhulst 模型的计算结果能反映隧道围岩变形的全过程。黎明星以珠江新城隧道为工程背景, 基于灰色 Verhulst 模型对隧道地表沉降进行研究, 结果表明理论变形回归分析曲线与实测值吻合较好, 证明了灰色理论在隧道工程应用中的可靠性。李梓源等综合分析多座隧道, 从主观因素和客观因素出发, 建立由围岩级别、循环进尺、含水量等 9 个指标组成的多因素模型, 利用灰色系统理论计算围岩稳定性对相关参数的关联度, 结果表明隧道循环进尺和开挖面宽度为主控因素。文辉辉等基于离散化的不同围岩参数和相应 ANSYS 仿真结果构建正交型灰色关联分析模型, 分析隧道开挖后围岩稳定性的敏感性因素, 结果表明内摩擦角是围岩稳定性的主要影响因素。倪健等运用灰色系统理论分别建立灰色关联模型和灰色模型, 预测软土地区地铁隧道在运营中的长期沉降, 结果表明灰色关联模型具有更高的精度, 预测结果更接近于实测值。该文运用 ANSYS 有限元软件模拟隧道开挖过程, 把围岩的弹性模量、黏聚力和内摩擦角以向量的形式表示, 作为比较数

列, 将 ANSYS 计算的围岩变形以向量的形式表示, 作为参考数列, 建立正交试验方案, 运用 MATLAB 计算围岩变形对围岩参数的关联度, 确定隧道开挖后围岩稳定性的敏感性因素, 为隧道施工和优化设计提供理论依据。

1 工程概况

屋场坪隧道位于 G209、湖南 S318 保靖龙溪至迁陵公路上, 起讫里程为 K10+655—K11+473, 全长 818 m, 属于直线隧道, 为单洞双向交通二级公路隧道, 隧道净宽为 12 m, 设计速度为 60 m/s。隧道整体采用新奥法施工, 按上下两台阶法开挖。

隧道围岩地质结构复杂, 主要为第四系与寒武系娄山关群中风化白云岩。隧道两端横穿 2 条岩层断裂带, 岩层中夹杂少量粉质土。隧道岩体松散破碎, 节理裂隙发育, 地下水丰富, 且随季节明显变化, 根据地质勘测结果将隧道围岩等级定为 IV 级。

2 灰色关联分析

选取参考数列 $x_0 = \{x_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$, 其中 k 表示时刻。假设有 m 个比较数列, $x_i = \{x_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, 则比较数列 x_i 对参考数列 x_0 在 k 时刻的关联系数为:

$$\zeta_{ij} = \frac{\min_{i=1}^m \min_{j=1}^n |x_{ij} - x_{0j}| + \rho \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |x_{ij} - x_{0j}|}{|x_{ij} - x_{0j}| + \rho \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |x_{ij} - x_{0j}|} \quad (1)$$

式中: $\min_{i=1}^m \min_{j=1}^n |x_{ij} - x_{0j}|$, $\max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |x_{ij} - x_{0j}|$ 分别

为比较数列与参考数列的两级最小、最大差,对原始数据作标准化处理; ρ 为分辨系数, $\rho \in [0,1]$, ρ 越大则分辨率越大, ρ 越小则分辨率越小。

比较数列 x_i 对参考数列 x_0 在 k 时刻的关联度表示为每一时刻关联系数的平均值:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k) \tag{2}$$

关联度 r_i 取值为 $-1 \sim 1$, $r_i > 0$ 表示正相关, $r_i < 0$ 表示负相关, $r_i = 0$ 表示不相关, r_i 越接近于 1, 表示变量间的关系越密切。

3 构建围岩灰色关联分析模型

3.1 有限元模型

选取屋场坪隧道 K11+125—155 段建立模型,

研究围岩稳定性对围岩物理参数变化的敏感性。根据圣维南原理,选取围岩宽度为隧道开挖宽度的 3~5 倍,隧道开挖深度为 30 m,每天开挖进尺为 2 m。选用 ANSYS 中的 Solid186 单元模拟隧道围岩,选用 Shell63 单元模拟初期支护结构,并使用实常数赋予支护结构相应单元厚度。ANSYS 通过命令流(ET)和(TB,DP \$ TBDATA)定义隧道围岩参数,使用生死单元模拟隧道开挖过程。围岩和支护结构的力学参数见表 1。

模型选用辅助单元 Mesh200,采用映射法进行网格划分,选择合适的单元类型和相应材料属性拉伸成体。尽管围岩与隧道开挖部分物理参数完全相同,但为方便选取,将它们定义为不同的材料编号。隧道模型围岩两侧选择所有节点,只约束水平方向

表 1 围岩和支护结构的力学参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg · m ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
Ⅳ 围岩(白云岩)	18~22	0.3	2 700	0.8~1.2	38~46
初期支护(C25)	28	0.2	2 600	2.0	45

(UX),围岩底部为全约束(UX,UY,UZ),外荷载只考虑重力作用。在第 1 个施工阶段,杀死支护结构以模拟初始地应力;在第 2~16 个施工阶段,杀死隧道开挖部分相应的单元,激活支护结构部分相应的单元,模拟隧道施工过程。模型共 41 757 个节点、41 677 个单元(见图 1)。

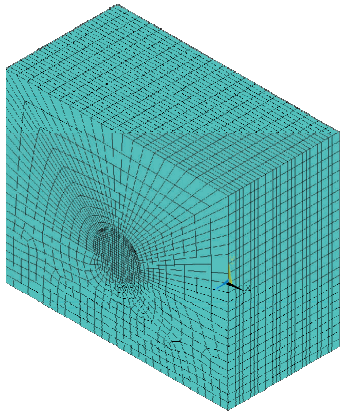


图 1 隧道有限元模型

3.2 围岩关联度正交分析模型

构建正交型关联分析模型的目的是基于有限的数据信息分析不同围岩参数对隧道稳定性的影响程度。构建步骤如下:1) 把围岩参数和仿真结果离散化;2) 选用第一组数据作为初值,作无量纲化处理;3) 计算围岩稳定性对围岩力学参数的关联系数;4) 对关联系数求平均值得关联度;5) 关联度大小排

序,排序越靠前,对围岩稳定性影响越大。

正交模型是一种基于正交原理合理设计试验的最优组合方法。选取不同的围岩参数作为参考数列,提取 ANSYS 中仿真结果作为比较数列,分为 3 个比较数列、3 个参考数列,共 9 组数据,建立离散化的围岩关联分析模型参数表(见表 2)。

3.3 计算关联度

采用 MATLAB 软件对式(1)、式(2)进行编程,求解隧道开挖后围岩稳定性对围岩参数的相关系数和关联度。计算步骤:

%第一步:将围岩力学参数和仿真结果向量化;

$$x_2 = [1.8 \ 1.8 \ 1.8 \ 2.0 \ 2.0 \ 2.0 \ 2.2 \ 2.2 \ 2.2]$$

$$x_3 = [0.8 \ 1.0 \ 1.2 \ 0.8 \ 1.0 \ 1.2 \ 0.8 \ 1.0 \ 1.2]$$

$$x_4 = [38 \ 42 \ 46 \ 42 \ 46 \ 38 \ 46 \ 38 \ 42]$$

$$x_0 = [3.469 \ 3.028 \ 3.077 \ 3.789 \ 2.870 \ 2.941 \\ 2.670 \ 2.909 \ 3.281]$$

$$y_0 = [17.157 \ 15.144 \ 15.533 \ 17.856 \ 20.488 \\ 15.333 \ 13.890 \ 15.335 \ 17.504]$$

$$z_0 = [7.428 \ 7.174 \ 7.636 \ 7.686 \ 7.400 \ 7.223 \\ 7.590 \ 7.274 \ 7.233]$$

%第二步:数据初值化、标准化;

$$x_1 = x_0$$

%计算拱顶沉降的关联度时,使 $x_1 = y_0$; 计算最大压应力的关联度时,使 $x_1 = z_0$;

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4];$$

表2 围岩关联度正交分析模型参数表

编号	围岩力学参数			仿真结果		
	弹性模量 E/GPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\theta/(\circ)$	拱顶沉降/mm	水平收敛/mm	最大压应力/ MPa
1	1.8	0.8	38	17.157	3.469	7.428
2	1.8	1.0	42	15.144	3.028	7.174
3	1.8	1.2	46	15.533	3.077	7.636
4	2.0	0.8	42	17.856	3.789	7.686
5	2.0	1.0	46	20.488	2.870	7.400
6	2.0	1.2	38	15.333	2.941	7.223
7	2.2	0.8	46	13.890	2.670	7.590
8	2.2	1.0	38	15.335	2.909	7.274
9	2.2	1.2	42	17.504	3.281	7.233

```

for i=1:4
    x(i,:)=x(i,:)/x(i,1);
end
data=x;
%标准化之后的数据;
n=size(data,2);
%将  $x_0$  作为参考数列,将  $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  作为比较
数列;
ck=data(1,:);
bj=data(2:end,:);
m2=size(bj,1);
t=zeros(size(bj));
for j=1:m2
    t(j,:)=bj(j,:)-ck;
end
%第三步:求解关联系数
mn=min(min(abs(t')));%求最小差

```

```

mx=max(max(abs(t')));%求最大差
rho=0.5;%分辨系数
r=(mn+rho*mx)./(abs(t)+rho*mx);%
求关联系数
%第四步:求解关联度
R=sum(ri,2)/n;
%第五步:关联度排序;
[rs,rind]=sort(R,'descend')%对关联度进行
排序;%rs 代表关联度从大到小排序,rind 代表对
应的 x 的序号

```

运用 MATLAB 运行以上源程序,即可得到围岩稳定性对不同围岩参数的关联系数和关联度。提取程序中 r 的各个元素,即可得到不同围岩参数对围岩稳定性的关联系数,结果见表 3;提取程序中 R 的各个元素,即可得到不同围岩参数对围岩稳定性的关联度,结果见表 4。

由表 4 可知:弹性模量、黏聚力和内摩擦角对围

表3 围岩稳定性关联系数计算结果

编号	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{31}	r_{32}	r_{33}
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.779	0.543	0.659	0.785	0.539	0.658	0.910	0.549	0.713
3	0.799	0.423	0.581	0.819	0.419	0.584	0.925	0.423	0.655
4	0.650	0.829	0.972	0.594	0.913	0.869	0.537	0.909	0.831
5	0.470	0.515	0.539	0.755	0.885	0.963	0.507	0.577	0.618
6	0.480	0.408	0.747	0.494	0.414	0.801	0.490	0.396	0.926
7	0.333	0.661	0.504	0.333	0.692	0.517	0.350	0.941	0.647
8	0.351	0.522	0.735	0.357	0.546	0.801	0.335	0.561	0.944
9	0.384	0.447	0.738	0.399	0.472	0.834	0.333	0.397	0.725

表4 围岩稳定性关联度计算结果

变量	各参考变量的关联度		
	弹性模量	黏聚力	内摩擦角
拱顶沉降	0.583	0.594	0.719
水平收敛	0.615	0.653	0.781
最大压应力	0.599	0.639	0.784

岩稳定性的关联度均大于 0.5,表明围岩稳定性与这 3 个围岩力学参数密切相关;隧道开挖后,3 个围岩力学参数对围岩稳定性(拱顶沉降、水平收敛、最大压应力)的影响大小排序一致。对围岩稳定性影响的大小排序为内摩擦角>黏聚力>弹性模量。

4 结论

以屋场坪隧道 K11+125—155 段为研究背景,运用 ANSYS 对隧道开挖过程进行仿真分析,基于不同围岩参数和仿真结果建立正交型灰色关联分析模型,运用 MATLAB 编辑程序求解围岩稳定性对围岩参数的关联系数和关联度。从关联度计算结果来看,围岩力学参数对屋场坪隧道开挖后稳定性的影响大小排序为内摩擦角>黏聚力>弹性模量,内摩擦角对围岩稳定性的影响较大,选取不同的参数值对仿真结果影响较大,需给予足够重视。基于灰色关联分析理论和 ANSYS 软件仿真分析结果建立正交型灰色关联分析模型,运用 MATLAB 软件的编程功能可以确定不同围岩参数对围岩稳定性的敏感程度,为隧道施工和优化设计提供理论依据。鉴于隧道施工是一个动态过程,对于不同的地质情况,需重新构建样本数据和分析模型,从而得到可靠的分析结果。

参考文献:

- [1] 董明余.灰色建模方法及其在预测中的应用研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [2] 张英,万文,程宏超.基于灰色 Verhulst 模型的隧道拱顶沉降预测[J].西部交通科技,2010(1):55—59.
- [3] 刘小俊,蒋雅君,陶双江,等.灰色模型在预测隧道围岩

变形中的应用[C]//中国土木工程学会.2016 中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十九届年会论文集.北京:中国土木工程学会,2016:243—248.

- [4] 黎明星.基于灰色 Verhulst 模型的珠江新城隧道变形监测数据分析[J].科技资讯,2017,15(17):84—86.
- [5] 李梓源,王海亮.基于灰色关联度分析法的浅埋隧道围岩稳定性研究[J].安全与环境学报,2017,17(6):2079—2083.
- [6] 文辉辉,秦强,彭海华.基于 ANSYS 的灰色关联分析模型的围岩稳定性分析[J].水力发电,2018,44(12):27—30.
- [7] 倪健,陈甦,王彬,等.地铁盾构隧道长期沉降的灰色关联分析[J].森林工程,2018,34(1):71—74.
- [8] 刘思峰,党耀国.灰色系统理论及其应用[M].8 版.北京:科学出版社,2017.
- [9] 郝静,贾仰文.应用正交试验法分析地下水流模型参数灵敏度[J].人民黄河,2015,37(9):66—68.
- [10] 田庆,李官群.基于施工监测数据及数值回归的山岭隧道围岩稳定性分析[J].公路与汽运,2021(2):123—125.
- [11] 周凯,胡敏.隧道穿越溶洞群对围岩及支护结构稳定性的影响[J].公路与汽运,2020(6):149—155.
- [12] 罗跃锋.大华山隧道围岩稳定性及结构可靠度研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.

收稿日期:2020—08—04

(上接第 120 页)

- 科学技术创新,2021(5):138—139.
- [2] 孙恒.现浇箱梁门洞支架受力分析[J].公路交通科技(应用技术版),2020(9):267—269.
- [3] 王欢.跨国道现浇箱梁支架施工技术研究[J].工程建设与设计,2020(11):250—251+254.
- [4] 李杨.跨公路连续梁支架设计与计算分析[J].交通世

界,2020(11):121—122+125.

- [5] 赵建民.大跨度大面积贝雷梁门洞支架体系设计与应用[J].施工技术,2017,46(增刊 1):394—399.
- [6] 王宁.桥梁大跨径门洞支架的设计及施工[J].铁道勘察,2019,45(3):104—108.

收稿日期:2021—06—08

(上接第 151 页)

- [4] 蒋颖.溶洞分布部位对隧道稳定性影响的数值分析[J].铁道标准设计,2009,38(6):67—70.
- [5] 吴梦军,许锡宾,赵明阶,等.岩溶地区公路隧道施工力学响应研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1525—1529.
- [6] 王高波.岩溶隧道围岩稳定性及施工力学行为分析[D].重庆:重庆大学,2011.
- [7] 郭而东.溶洞位置对隧道围岩稳定性的影响及治理方案研究[D].西安:长安大学,2014.

- [8] 赵明阶,刘绪华,敖建华,等.隧道顶部岩溶对围岩稳定性影响的数值分析[J].岩土力学,2003,24(3):445—449.

- [9] 宋战平.隐伏溶洞对隧道围岩一支护结构稳定性的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2006,31(5):1296.
- [10] 宋战平,杨腾添,张丹锋,等.溶洞对隧道(洞)稳定性影响的数值试验及现场监测分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(4):484—491.

收稿日期:2020—07—13