

不良地质隧道围岩稳定性预测模型构建与分析

李和元, 黄卫国, 胡凯

(江西省公路工程监理有限公司, 江西 南昌 330100)

摘要: 基于灰色原理对已知有限集数据进行计算, 建立隧道稳定性预测理论模型, 对未知隧道变形进行预测, 并进行模型残差验算、关联度验算及后验差验算。以某不良地质隧道为依托, 运用灰色预测模型对其围岩稳定性进行预测, 并与监控量测值进行对比, 结果表明预测模型的相对误差较小, 残差最大值为 5.86%, 模型精度符合实际要求; 模型预测值随隧道拱顶沉降监测时间的增加而增大, 拱顶沉降预测值与实测值的相对误差虽在精度范围内, 但误差变化较大。

关键词: 隧道; 围岩稳定性; 变形; 灰色预测; 不良地质

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)06-0158-04

监控量测是隧道施工中实时掌握隧道变形的量测手段, 如何通过监控量测数据有效预测隧道未知变形是当今研究的热门话题。但该方法只能监测隧道变形实际情况, 不能较准确地预测未知的隧道变形规律。灰色模型是隧道施工过程中进行变形预测的有效手段, 通过对监控量测实时数据的分析, 对未知变形规律进行评估预测。宋海萍对矿区地表沉降灰色系统理论预测模型进行研究, 认为将灰色理论应用于矿区地表沉降预测很准确; 兰泽全等进行煤矿特别重大事故灰色预测与分析, 得出灰色预测有利于实时掌握煤矿地表变形情况, 能准确判断未知的变形规律; 牛景太等对施工期高心墙堆石坝沉降变形监控模型进行研究, 发现利用灰色理论进行变形预测比监控量测能更有效地掌握施工场地变形规律; 秦拥军等采用基于灰色关联理论的 Peck 法进行隧道地表移动参数影响研究, 发现灰色模型预测值与实际值的相对误差较小, 且精度符合施工要求; 刘鹏程等采用分数阶算子灰色理论对隧道围岩变形进行了预测。利用灰色理论建立灰色模型对工程地表变形进行预测可行, 且预测精度达到设计与施工要求。该文基于灰色理论建立隧道围岩稳定性预测模型, 以某软岩条件下不良地质隧道为例, 分析该模型预测值与实际值之间的误差, 提出合理的不良地质隧道围岩稳定性预测模型。

1 灰色理论预测模型的构建

1.1 模型构建

隧道变形是以时间线来监测的, 故以时间线为依据建立灰色预测模型。对于所得隧道监测变形成数

据, 不需进行相应规律分析和概率统计, 仅需对已知数据进行相应处理即可得到与时间序列相关的数据。隧道变形沉降监测时间的序列为:

$$T^{(0)} = \{T^{(0)}(1), T^{(0)}(2), T^{(0)}(a-1), T^{(0)}(a)\} \quad (1)$$

式(1)中, 沉降监测时间序列没有规律, 故按式(2)对式(1)中数据作一次累加处理, 将数据序列变为有规律序列。

$$T^{(1)}(t) = \sum_{a=1}^t T^{(0)}(a) \quad (2)$$

通过一次累加处理, 得到隧道变形沉降监测时间的新序列:

$$T^{(1)} = \{T^{(1)}(1), T^{(1)}(2), T^{(1)}(a-1), T^{(1)}(a)\} \quad (3)$$

按照同样的方法, 得到隧道变形沉降监测值的原始数据序列和新序列:

$$\begin{cases} F^{(0)} = \{F^{(0)}(1), F^{(0)}(2), F^{(0)}(a-1), F^{(0)}(a)\} \\ F^{(1)} = \{F^{(1)}(1), F^{(1)}(2), F^{(1)}(a-1), F^{(1)}(a)\} \end{cases} \quad (4)$$

根据灰色理论, 所得到的新序列服从指数分布, 隧道变形沉降监测值 F 与隧道变形沉降监测时间 T 之间的一阶线性微分方程为:

$$\frac{dF}{dT} + AF = B \quad (5)$$

式中: A 、 B 为灰色参数。

对式(5)进行积分求解, 得:

$$F(T) = C \cdot \exp(A - AT) + BA^{-1} \quad (6)$$

$T=1$ 时, 有 $F(T)=F(1)$, 代入式(6), 得:

$$F(1) = C \cdot \exp(A - A \times 1) + BA^{-1} \quad (7)$$

解得 $C = F(1) - BA^{-1}$ 。

隧道变形沉降监测值 F 与隧道变形沉降监测时间 T 之间的一阶线性微分方程可表达为:

$$F(T) = (F(1) - BA^{-1}) \cdot \exp(A - AT) + BA^{-1} \quad (8)$$

根据函数在导数上面的定义,可知:

$$\frac{dF}{dT} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{F(T + \Delta T) - F(T)}{\Delta T} \quad (9)$$

要使函数能与一次累加的新序列联系上,只需使 $\Delta T \rightarrow 1$ 即可。将 $\Delta T \rightarrow 1$ 代入式(9),得:

$$\frac{dF}{dT} = \lim_{\Delta T \rightarrow 1} F(T + 1) - F(T) \quad (10)$$

由于一阶线性微分函数是连续的, ΔT 较小时,函数值不可能出现较大波动。因此,要得到较合理的隧道变形沉降监测值 F ,只需取 $F(T)$ 和 $F(T + 1)$ 的平均值即可。将该平均值代入式(5),得:

$$F^{(0)}(T + 1) = B - 0.5A[F^{(1)}(T) + F^{(1)}(T + 1)] \quad (11)$$

基于上述推导,当 $T = 1, 2, \dots, a - 1, a$ 时,代入式(11),得:

$$\begin{cases} F^{(0)}(2) = B - 0.5A[F^{(1)}(1) + F^{(1)}(2)] \\ F^{(0)}(3) = B - 0.5A[F^{(1)}(2) + F^{(1)}(3)] \\ \vdots \\ F^{(0)}(a - 1) = B - 0.5A[F^{(1)}(a - 2) + F^{(1)}(a - 1)] \\ F^{(0)}(a) = B - 0.5A[F^{(1)}(a - 1) + F^{(1)}(a)] \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)用矩阵方式表达,并进行简化,得:

$$\begin{bmatrix} F^{(0)}(2) \\ F^{(0)}(3) \\ \vdots \\ F^{(0)}(a - 1) \\ F^{(0)}(a) \end{bmatrix} = B - 0.5A \cdot \begin{bmatrix} [F^{(1)}(1) + F^{(1)}(2)] \\ [F^{(1)}(2) + F^{(1)}(3)] \\ \vdots \\ [F^{(1)}(a - 2) + F^{(1)}(a - 1)] \\ [F^{(1)}(a - 1) + F^{(1)}(a)] \end{bmatrix} \quad (13)$$

令:

$$F = \begin{bmatrix} F^{(0)}(2) \\ F^{(0)}(3) \\ \vdots \\ F^{(0)}(a - 1) \\ F^{(0)}(a) \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} B \\ A \end{bmatrix}$$

$$F^* = \begin{bmatrix} 1 & -0.5[F^{(1)}(1) + F^{(1)}(2)] \\ 1 & -0.5[F^{(1)}(2) + F^{(1)}(3)] \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -0.5[F^{(1)}(a - 2) + F^{(1)}(a - 1)] \\ 1 & -0.5[F^{(1)}(a - 1) + F^{(1)}(a)] \end{bmatrix}$$

式(13)可写为:

$$F = F^* D$$

根据最小二乘法,得:

$$D = [B \ A]^T = (F^{*T} \cdot F^*)^{-1} F^{*T} F \quad (14)$$

式(14)即为灰色参数的计算式。隧道大变形预测的函数表达式为:

$$\hat{F}^{(1)}(i + 1) = [F^{(0)}(1) - BA^{-1}] \cdot \exp\{-A[T^{(1)}(i + 1) - T^{(1)}(1)]\} + BA^{-1} \quad (15)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, a - 1, a$ 。

1.2 灰色理论预测模型验算

隧道变形沉降监测值 F 原始数据的平均值为:

$$\bar{F}^{(0)} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a F^{(0)}(i)$$

隧道变形沉降监测值 F 原始数据的方差为:

$$S_F^2 = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a [F^{(0)}(i) - \bar{F}^{(0)}]^2$$

1.2.1 残差验算

由于灰色理论的构建是按照相应序列开展的,残差验算也需要先设定相应样本数据的残差序列 $\omega^{(0)}(i)$:

$$\omega^{(0)}(i) = F^{(0)}(i) - \hat{F}^{(0)}(i)$$

残差序列 $\omega^{(0)}(i)$ 的平均值为:

$$\bar{\omega}^{(0)}(i) = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a \omega^{(0)}(i)$$

残差序列 $\omega^{(0)}(i)$ 的方差值为:

$$S_{\omega^{(0)}}^2 = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a [\omega^{(0)}(i) - \bar{\omega}^{(0)}(i)]^2$$

引入方差比 ν 和误差概率 P :

$$\nu = \frac{S_{\omega^{(0)}}}{S_F}$$

$$P = P\{|\omega^{(0)}(i) - \bar{\omega}^{(0)}(i)| < 0.674 \cdot 5S_F\}$$

式中: S_F 和 $S_{\omega^{(0)}}$ 为隧道变形沉降监测值 F 原始数据的方差值和残差序列 $\omega^{(0)}(i)$ 的均方差。

方差比 ν 和误差概率 P 对于灰色理论预测模型精度的评价标准见表 1。

1.2.2 关联度验算

通过计算预测值与实测值之间关联性大小判断灰

表1 残差对灰色理论预测模型精度的分级标准

精确度级别	方差比 ν	误差概率 P
一级(优)	$\nu \leq 0.35$	$P \geq 0.95$
二级(良好)	$0.35 < \nu \leq 0.50$	$0.80 \leq P < 0.95$
三级(中等)	$0.50 < \nu \leq 0.65$	$0.70 \leq P < 0.80$
四级(差)	$\nu > 0.65$	$P < 0.70$

色理论预测模型的精度。假定:

$$\begin{cases} \hat{F}^{(0)}(i) = \{\hat{F}^{(0)}(1), \hat{F}^{(0)}(2), \dots, \hat{F}^{(0)}(a-1), \hat{F}^{(0)}(a)\} \\ F^{(0)}(i) = \{F^{(0)}(1), F^{(0)}(2), \dots, F^{(0)}(a-1), F^{(0)}(a)\} \end{cases}$$

引入关联系数 $\xi(i)$, 其表达式如下:

$$\xi(i) = \begin{cases} \frac{\min |\hat{F}^{(0)}(i) - F^{(0)}(i)| + \chi \max |\hat{F}^{(0)}(i) - F^{(0)}(i)|}{|\hat{F}^{(0)}(i) - F^{(0)}(i)| + \chi \max |\hat{F}^{(0)}(i) - F^{(0)}(i)|}; & i > 0 \\ 1; & i = 0 \end{cases}$$

式中: $\min |\hat{F}^{(0)}(i) - F^{(0)}(i)|$ 为绝对误差最小值; χ 为误差精度系数, 一般取 0.5; $\max |\hat{F}^{(0)}(i) - F^{(0)}(i)|$ 为绝对误差最大值; $|\hat{F}^{(0)}(i) - F^{(0)}(i)|$ 为绝对误差值。

关联度 R 是结合方差比 ν 和误差概率 P 对灰色理论预测模型精度进行的综合评价, 计算公式见式(16), 评价标准见表2。

$$R = a^{-1} \sum_{i=1}^a \xi_i \quad (16)$$

表2 关联度对灰色理论预测模型精度的分级标准

精确度级别	方差比 ν	误差概率 P	关联度 R
一级(优)	$\nu \leq 0.35$	$P \geq 0.95$	$R \geq 0.90$
二级(良好)	$0.35 < \nu \leq 0.50$	$0.80 \leq P < 0.95$	$0.80 \leq R < 0.90$
三级(中等)	$0.50 < \nu \leq 0.65$	$0.70 \leq P < 0.80$	$0.70 \leq R < 0.80$
四级(差)	$\nu > 0.65$	$P < 0.70$	$R < 0.70$

1.2.3 后验差验算

后验差验算是基于残差验算开展的, 其计算方式及等级评价标准与残差验算一样, 不再赘述。

2 算例分析

十房(十堰—房县)高速公路通省隧道为分离式隧道, 全长 6.887 km, 采用设计速度 80 km/h 双向四车道标准建设。该隧道穿越绢云母片岩地层, 是国内规模最大的变质软岩隧道, 存在软岩大变形、突泥涌水等不良地质。表3为其拱顶沉降监测数据。通过上述灰色理论预测模型预测其拱顶沉降, 并与实测值进行对比分析。

表3 通省隧道拱顶沉降监测数据

监测时间/d	拱顶沉降值/mm	监测时间/d	拱顶沉降值/mm
15	134.5	18	150.0
16	143.0	19	152.3
17	146.4	20	155.1

根据表3, 隧道拱顶沉降监测时间序列如下:

$$\begin{aligned} F^{(0)} &= (F^{(0)}(1), F^{(0)}(2), F^{(0)}(3), F^{(0)}(4), F^{(0)}(5), \\ &F^{(0)}(6)) = (134.5, 143.0, 146.4, 150.0, \\ &152.3, 155.1) \end{aligned}$$

对 $F^{(0)}$ 作一次累加, 得到新的序列:

$$\begin{aligned} F^{(1)} &= (F^{(1)}(1), F^{(1)}(2), F^{(1)}(3), F^{(1)}(4), F^{(1)}(5), \\ &F^{(1)}(6)) = (134.5, 277.5, 423.9, 573.9, \\ &726.2, 881.3) \end{aligned}$$

对序列 $F^{(1)}$ 作紧邻均值生成, 将数据代入式(13), 得:

$$\begin{aligned} f^{(1)}(i) &= (f^{(1)}(2), f^{(1)}(3), f^{(1)}(4), f^{(1)}(5), \\ &f^{(1)}(6)) = (206, 350.7, 498.9, 650.05, \\ &803.75) \end{aligned}$$

则有:

$$F = \begin{bmatrix} F^{(0)}(2) \\ F^{(0)}(3) \\ F^{(0)}(4) \\ F^{(0)}(5) \\ F^{(0)}(6) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 143.0 \\ 146.4 \\ 150.0 \\ 152.3 \\ 155.1 \end{bmatrix}$$

$$F^* = \begin{bmatrix} 1 & -206.0 \\ 1 & -350.7 \\ 1 & -498.9 \\ 1 & -650.05 \\ 1 & -803.75 \end{bmatrix}$$

将 F 和 F^* 代入式(14), 得:

$$D = [B \quad A]^T = \begin{bmatrix} 139.128 \ 07 \\ -0.030 \ 37 \end{bmatrix}$$

将计算得到的 A 和 B 代入式(5), 得:

$$\frac{dF^{(1)}}{dT} - 0.030 \ 37 F^{(1)} = 139.128 \ 07$$

将上述数据代入式(15), 得到隧道变形预测模型如下:

$$\begin{aligned} \hat{F}^{(1)}(i+1) &= 4 \ 715.602 \ 07 \exp[0.030 \ 37 i] - \\ &4 \ 581.102 \ 07 \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)可知:

$$\begin{aligned} \hat{F}^{(1)}(i) &= (F^{(1)}(1), F^{(1)}(2), F^{(1)}(3), F^{(1)}(4), \\ &F^{(1)}(5), F^{(1)}(6)) = (134.5, 279.91, 429.8, \end{aligned}$$

584.32,743.60,907.79)

累减生成新序列:

$$\hat{F}^{(0)}(i) = (134.5, 145.41, 149.89, 154.52, 159.28, 164.19)$$

原本的序列为:

$$F^{(0)}(i) = (134.5, 143.0, 146.4, 150.0, 152.3, 155.1)$$

将上述数据代入公式,得到隧道变形预测结果(见表4),预测结果与实测值的对比见图1。

表4 隧道拱顶沉降监测数据与预测数据对比

监测时间/d	实测值/mm	预测值/mm	绝对残差/mm	预测值与实测值的误差/%
15	134.5	134.50	0.00	0.00
16	143.0	145.41	2.41	1.69
17	146.4	149.89	3.49	2.38
18	150.0	154.52	4.52	3.01
19	152.3	159.28	6.98	4.58
20	155.1	164.19	9.09	5.86

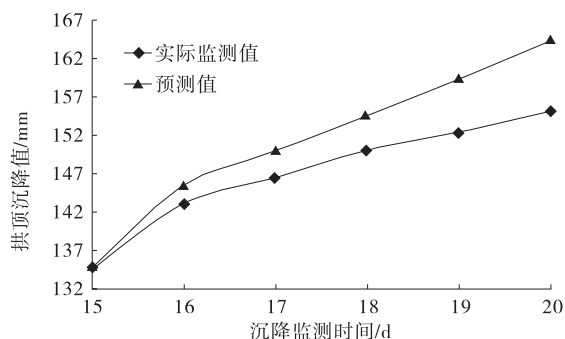


图1 隧道变形预测结果与实测值对比

由表4和图1可知:对15~20 d隧道拱顶变形实测值和预测值的最大误差为5.86%,最小误差为零,模型精度符合要求;随着拱顶沉降监测时间的增加,拱顶沉降预测数据与实测数据间的相对误差虽然在可接受范围内,但误差越来越大。

3 结论

(1) 隧道拱顶变形随着时间的增加而增大。灰色预测模型的最大误差为5.86%,最小误差几乎为零,模型精度满足要求。

(2) 利用灰色理论构建预测模型,随着隧道拱顶沉降监测时间的增加,拱顶变形预测数据与实测数据的相对误差虽在允许范围内,但误差越来越大。

参考文献:

- [1] 宋海萍.矿区地表沉降灰色系统理论预测模型对比研究[J].华北自然资源,2020(4):26-28.
- [2] 兰泽全,傅本福,田冬梅,等.煤矿特别重大事故灰色预测与分析[J].煤炭技术,2020,39(7):81-83.
- [3] 牛景太,梁彬彬,邓志平,等.施工期高心墙堆石坝沉降变形监控模型构建研究[J].南昌工程学院学报,2020,39(3):15-19.
- [4] 秦拥军,孟建宇,谢良甫,等.基于灰色关联理论的Peck法隧道地表移动参数影响研究[J].城市轨道交通研究,2020,23(6):28-31.
- [5] 刘鹏程,包太,蔡科,等.基于分数阶算子灰色理论隧道围岩变形预测[J].中国水运(下半月),2019,19(4):84-86.
- [6] 杨洋.隧道紧急停车带施工工法计算机模拟分析及变形预测研究[D].西安:西安科技大学,2015.
- [7] 何伟.灰色系统理论在隧洞工程中的应用研究[D].西安:西安理工大学,2010.
- [8] 刘能铸.基于灰色理论的隧道围岩稳定性预测分析[D].重庆:重庆大学,2007.
- [9] 姜帆.灰色理论在建筑工程质量综合评价中的应用研究[J].安徽建筑,2015,22(1):169-170.
- [10] 黄凤娇,张跃刚,郑明君.基于灰色原理的最优测量方案选择[J].化学工程与装备,2011(10):34-36.

收稿日期:2021-03-18

(上接第157页)

(1):83-90.

- [15] 王海龙,李庆斌.孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响[J].工程力学,2006,23(10):141-145.
- [16] 邓华锋,李建林,刘杰,等.考虑裂隙水压力的岩体压剪裂纹扩展规律研究[J].岩土力学,2011,32(增刊1):297-302.
- [17] 李夕兵,贺显群,陈红江.渗透水压作用下类岩石材料张开型裂纹启裂特性研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1317-1324.

- [18] 汤连生,张鹏程,王洋.岩体复合型裂纹的扩展规律I:无水作用条件下[J].中山大学学报(自然科学版),2002,41(6):84-87.
- [19] 汤连生,张鹏程,王洋.岩体复合型裂纹的扩展规律II:有水作用条件下[J].中山大学学报(自然科学版),2003,42(1):90-94.
- [20] 汤连生,张鹏程,王洋.水作用下岩体断裂强度探讨[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3337-3341.

收稿日期:2021-01-17