

六月田隧道岩溶坍塌地段洞内管棚支护稳定性分析^{*}张军¹, 李洪瑶², 樊斌³

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.上海隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235)

摘要: 六月田隧道施工过程中因漏斗形岩溶发育发生掌子面突泥坍塌的地质灾害, 为此采用洞内管棚支护穿越岩溶坍塌地段。为评价洞内管棚支护的稳定性, 运用 MIDAS/GTS 建立三维数值分析模型, 根据围岩类型、漏斗形溶洞位置和处治方法、管棚支护参数等条件计算洞内管棚支护时拱顶沉降和水平位移, 分析影响洞内管棚支护稳定性的相关因素。

关键词: 隧道; 岩溶坍塌地段; 洞内管棚支护; 稳定性分析

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)01-0142-05

六月田隧道位于湖南湘西自治州, 设计标准为 I 级公路隧道, 双向四车道, 行车速度 80 km/h, 左线长 1 010 m, 右线长 1 015 m。左线施工到 ZK10+803 处时, 在隧道右侧壁出现被大量黏土夹砾石填充的溶洞, 溶洞内的黏土呈软塑状, 很快从掌子面喷涌而出形成突泥, 地表下陷近 30 m, 并呈现长 25 m、宽 20 m 的椭圆形空洞。施工中采用洞内管棚支护穿越岩溶坍塌地段, 方法是在隧道内部掌子面后方开挖管棚工作室, 将隧道洞身拱部开挖断面加大, 在掌子面上安设管棚孔口定位拱架, 拱架上下掌子面喷射砼, 在孔位处钻孔安装带注浆孔的钢管, 再灌注砂浆。洞内管棚工艺复杂, 端部不设套拱, 根据需要可能进行钢管搭接、管棚接长。由于管棚支护与围岩相互作用复杂, 尤其是在岩溶坍塌地段, 围岩压力无法确定, 管棚支护设计目前主要采用经验类比法, 支护稳定性难以评价。该文根据该隧道围岩类型、漏斗形溶洞位置和处治方法、管棚支护参数等条件建立三维数值计算模型, 分析围岩类型、管棚支护参数、溶洞处治及溶洞位置对隧道变形的影响, 揭示影响隧道洞内管棚支护稳定性的因素及规律。

1 工程概况

六月田隧道(见图 1)位于风化溶蚀山地, 山的海拔高、坡度陡峭, 地形起伏大。地面高程为 430~567 m 间有隧道轴线通过, 相对高差约 137 m, 隧道最大埋深 125.30 m。基岩多露于地表, 山坡覆盖层较薄, 植被发育。地层结构分布依次为: 1) 黏土。灰褐色、褐黄、褐红色, 呈可~硬塑状, 含少量砾石,

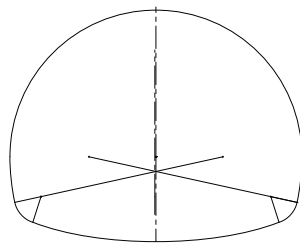


图 1 六月田隧道带仰拱衬砌内轮廓断面示意图

主要分布于隧道进、出口的山坡低洼处。2) 瘤状泥质灰岩。紫红色夹灰绿色, 瘤状构造, 隐晶质结构, 薄~中层状, 节理裂隙部分发育, 与灰岩交界处岩溶较发育, 主要分布于山顶。3) 灰岩。灰、灰白色, 块状构造, 隐晶质结构, 中厚层状, 岩质硬实, 微侵蚀, 节理裂隙局部发育, 局部发育溶蚀裂隙, 岩层较完整, 岩芯多呈柱状, 少量呈半边状, 块状。地质勘察结果表明, 隧道 ZK10+798—830 段发育有天然漏斗形岩溶, 隧道围岩为可塑状的黏土夹砾石, 围岩破碎松散, 自稳能力极差(见图 2)。

为避免溶洞继续坍塌, 使隧道施工顺利进行, 施工方施作管棚工作室, 沿隧道外轮廓线以 5°仰角施作长 24 m、间距 33 cm 的 $\phi 108$ mm 管棚。由于洞身围岩为塌方堆积体, 管棚下方与隧道开挖面形成一个三角形空腔, 开挖后即对该空腔喷射砼作回填处理。

2 三维数值分析模型的建立

2.1 计算模型

以隧道为中心, 模型尺寸为 60 m×60 m×30 m, 隧道建筑限界尺寸为高 5.0 m、宽 10.25 m, 采用

^{*} 基金项目: 湖南省交通科技项目(201435)

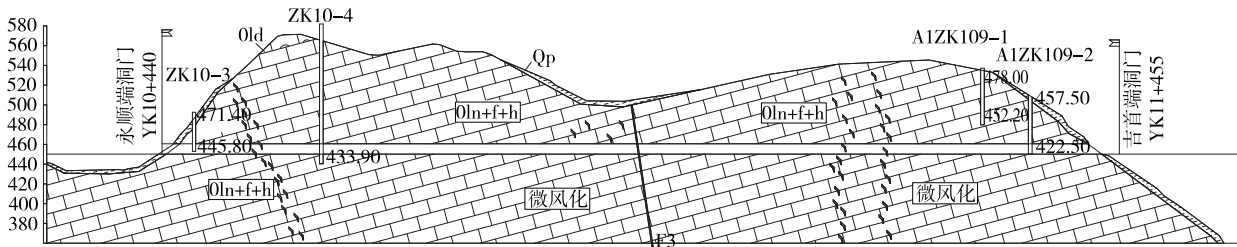


图 2 六月田隧道左线(地质)纵断面(单位:m)

三心圆拱结构,隧道施工采用上下台阶法。以高 10 m、上下半径分别为 5、3 m 的圆锥嵌入围岩模拟漏斗形岩溶发育,溶洞位于沿隧道方向 14~17 m 处,分别距底部、拱腰右侧、拱顶 1 m,溶洞填充材料为 M7.5 号浆砌片石。模型的边界约束条件为上部自

由,侧面水平约束,底部完全约束。假定围岩为均质各向同性弹塑性介质,采用莫尔-库伦准则,将围岩注浆区视为弹性体,定义为实体单元;管棚注浆支护假设为弹性体,定义为壳体单元;锚喷支护也假设为弹性体,定义为平板单元(见图 3)。

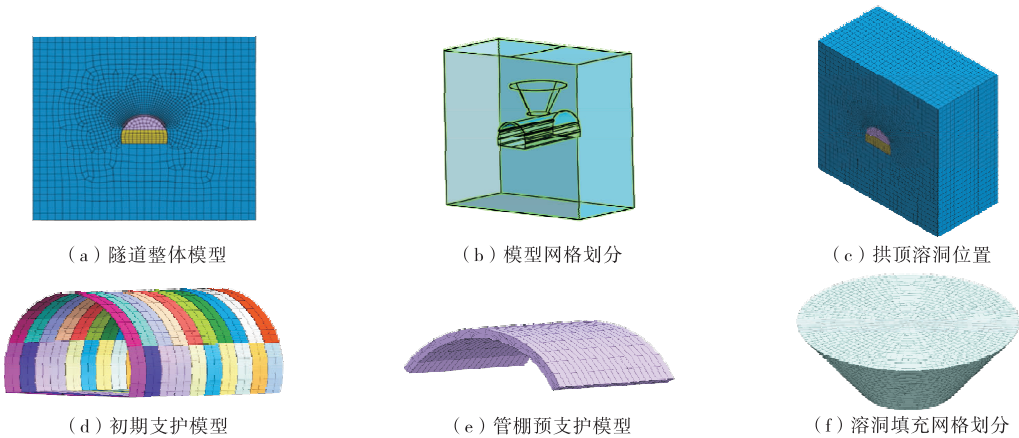


图 3 隧道三维分析模型

2.2 计算参数

根据勘察报告、设计规范中 V 级围岩参数,采用工程类比法确定模型各单元的物理力学参数(见表 1),其中初期支护包括钢拱架、锚杆和砼,管棚支护包括钢管、注浆材料和围岩,计算时分别将初期支护及管棚支护视为一个整体,单元参数按等效原则折算得到。

2.3 影响因素与施工过程模拟

影响洞内管棚支护稳定性的因素很多,主要因素为管棚支护参数、施工方法、注浆情况及溶洞位置、大小、处治情况。为研究这些因素对洞内管棚支

护作用的影响,建立数值计算模型时将管棚支护状态分别设定为无管棚、无注浆管棚支护、注浆管棚支护,将溶洞状态设定为无溶洞、溶洞未填充、溶洞已填充,溶洞位置分别为拱顶、底部、右侧拱腰处。施工流程为原地层—隧道开挖—初期支护—施作衬砌。V 级围岩采用上下台阶法开挖,先开挖上台阶并及时施作锚杆和喷砼,待围岩稳定后进行下台阶开挖并对下部进行支护。顺着隧道轴线方向,通过数值计算,分别提取沿隧道拱顶、拱腰、底板三轴线上的点,分析拱顶、地表、底部的竖向位移,拱腰的水平向位移、竖向主应力的变化及分布状况。

表 1 模型单元及力学指标

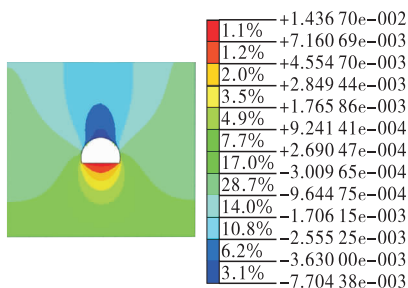
单元类别	变形模量/GPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
V 级围岩	1	0.45	20.0	0.2	27
无注浆管棚支护	62	0.30	27.0	—	—
注浆管棚支护	93	0.30	33.0	—	—
注浆加固区	3	0.26	21.5	0.6	33
初期支护	25	0.30	25.0	—	—
M7.5 浆砌片石	31	0.20	22.0	—	—

3 计算结果分析

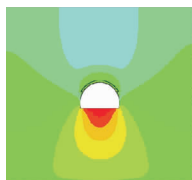
3.1 管棚支护对隧道变形的影响

3.1.1 拱顶沉降

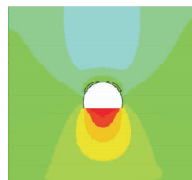
不同支护状态下隧道拱顶竖向位移见图4,拱



(a) 无管棚



(b) 无注浆管棚



(c) 注浆管棚

图4 不同支护状态下隧道竖向位移云图(单位:m)

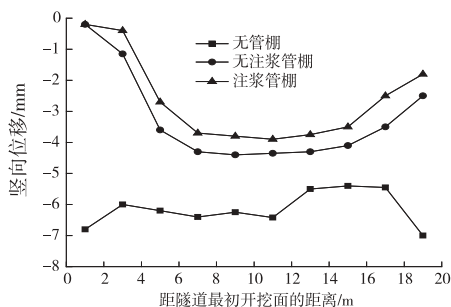


图5 不同支护状态下隧道拱顶沉降比较

比无管棚时减小43.3%,比无注浆时减小16.5%,管棚支护对改善围岩的自承能力效果明显。无注浆围岩与管棚之间的摩阻力使围岩受到的压力减小,故拱顶沉降小于无管棚情况。注浆管棚的钢管、注浆材料与围岩胶结成一个刚度较大的整体,起到承受围岩压力的支护作用。管棚支护始末两端的拱顶沉降比中部小很多,而无管棚情况下隧道拱顶沉降较大且呈均匀分布,说明管棚支护下围岩整体刚度增大,变形减小。

3.1.2 水平位移

如图6、图7所示,隧道两侧向内收缩变形,影响最显著的部位是拱腰,其左侧向位移为正,右侧向位移为负,呈对称分布;无管棚、采用无注浆管棚和注浆管棚时,沿隧道拱腰处周边收敛最大值分别为1.63、1.49、1.46 mm,采用注浆管棚时水平位移比无注浆管棚时减小8.5%,比无管棚时减小10.4%。管棚支护与无管棚相比,隧道开挖后周边位移较小,说明管棚支护对隧道周边收敛有一定控制作用,但与拱顶沉降的控制相比差很多,注浆管棚周边位移与无注浆管棚相差无几。

顶沉降对比见图5。

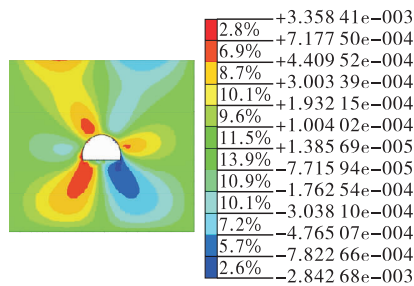
由图4、图5可知:无管棚、采用无注浆管棚和注浆管棚时,隧道轴向各点拱顶沉降最大值分别为7.01、4.49、3.77 mm,注浆管棚的效果最好,无注浆管棚次之,无管棚最差。采用注浆管棚时拱顶沉降

3.2 溶洞处治对隧道变形的影响

为便于比较,假设隧道拱顶的正上方1 m处存在溶洞,溶洞状态分别为无溶洞、溶洞未填充、溶洞已填充,分析溶洞处治对隧道变形的影响。

3.2.1 拱顶沉降

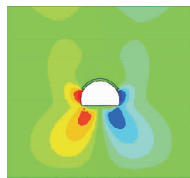
如图8、图9所示,无溶洞时隧道开挖引起的拱



(a) 无管棚



(b) 无注浆管棚



(c) 注浆管棚

图6 不同支护状态下隧道水平位移云图(单位:m)

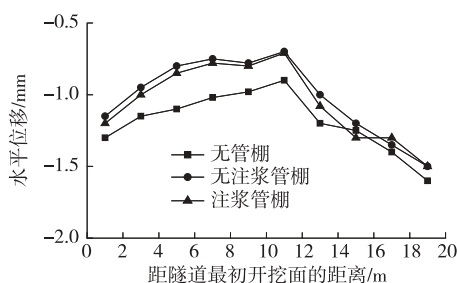


图 7 不同支护状态下隧道水平位移比较

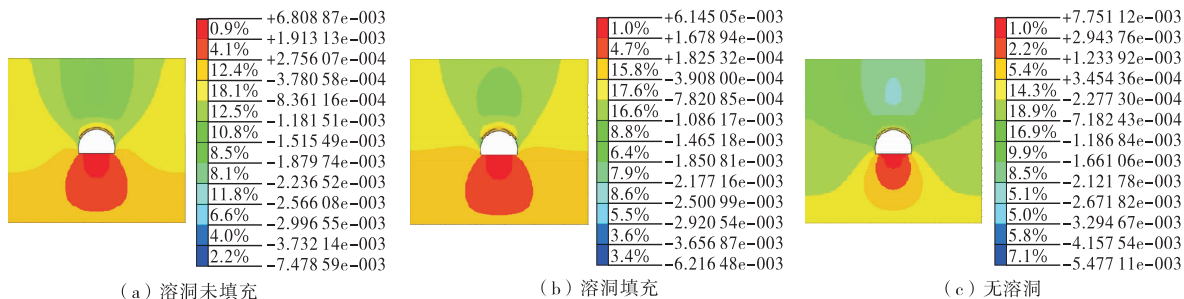


图 8 不同溶洞处治状态下隧道竖向位移云图(单位:m)

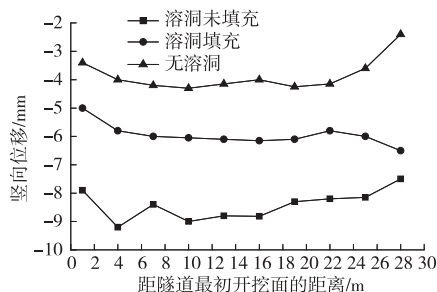


图 9 不同溶洞处治状态下隧道拱顶沉降比较

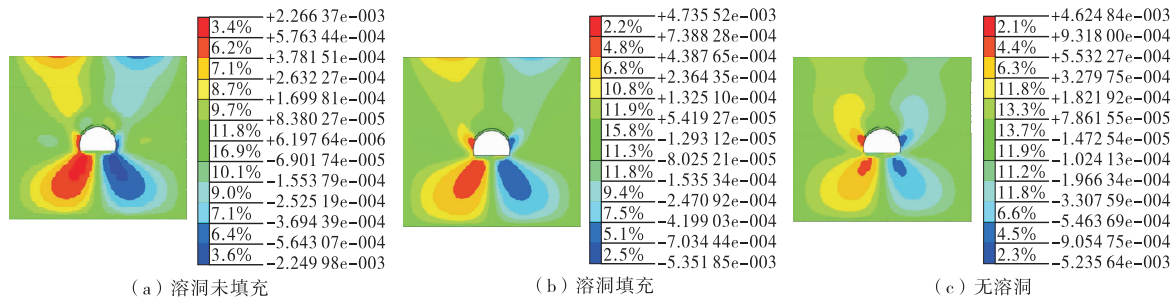


图 10 不同溶洞处治状态下隧道水平位移云图(单位:m)

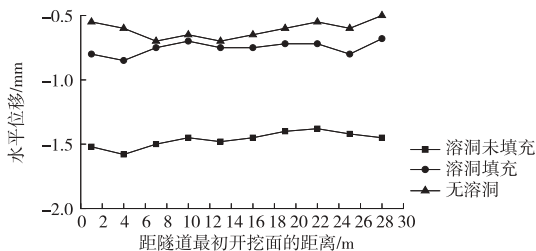


图 11 不同溶洞处治状态下隧道水平位移比较

部溶洞、右侧拱腰处溶洞,位于沿隧道方向 14~17 m 处,分别距拱顶、拱腰右侧、底部 1 m。

顶沉降最小,最大值为 4.60 mm;溶洞未填充时隧道拱顶沉降值最大,最大值为 9.11 mm,溶洞的存在对开挖后隧道拱顶沉降的影响非常明显。对隧道周围的隐伏溶洞作填充处理非常必要,填充后隧道拱顶沉降比未填充时减小 31.7%,隧道围岩强度提高,围岩稳定性增强。

3.2.2 水平位移

如图 10、图 11 所示,隧道开挖后水平位移会因

溶洞的存在而增大,呈现由下而上的发展趋势;溶洞填充后,隧道水平位移得到控制,其发展范围及量值明显减小。溶洞未填充、填充及无溶洞时,隧道最大水平向位移分别为 1.48、0.77、0.43 mm,溶洞填充时隧道水平向位移比未填充时减小 47.9%,隧道周边收敛大幅减小。

3.3 溶洞位置对隧道变形的影响

溶洞位置也考虑 3 种情况,分别为拱顶溶洞、底

3.3.1 拱顶沉降

如图 12、图 13 所示,溶洞位置不同,隧道竖向位移大小有较大差别,竖向位移受拱顶溶洞的影响最大,底部溶洞次之,拱腰右侧溶洞的影响最小;隧道周围隐伏溶洞的位置不同,对开挖后隧道拱顶沉降的影响有较大差别,拱顶、拱腰右侧、底部存在溶洞时,隧道拱顶沉降最大值分别为 6.69、3.53、6.25 mm,拱顶存在溶洞时隧道拱顶沉降比拱腰存在溶洞时增大 47.2%,比底部存在溶洞时增加 6.6%,拱顶和底部存在溶洞对隧道拱顶沉降的影响显著。

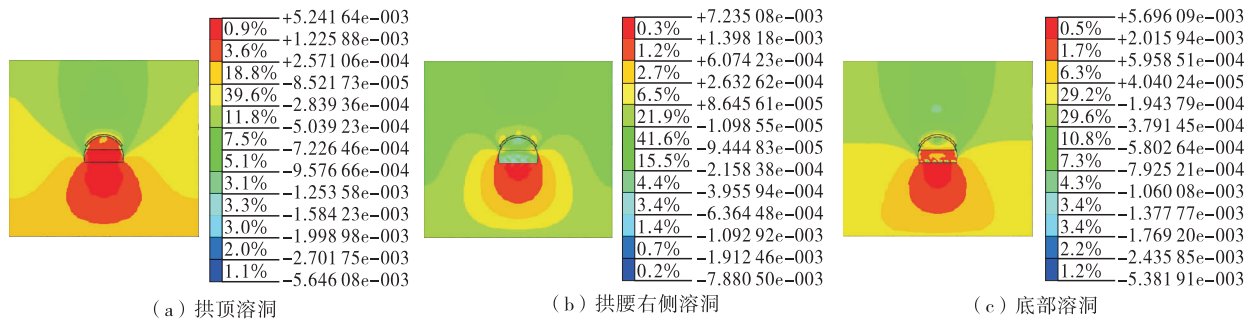


图 12 不同溶洞位置时隧道竖向位移云图(单位:m)

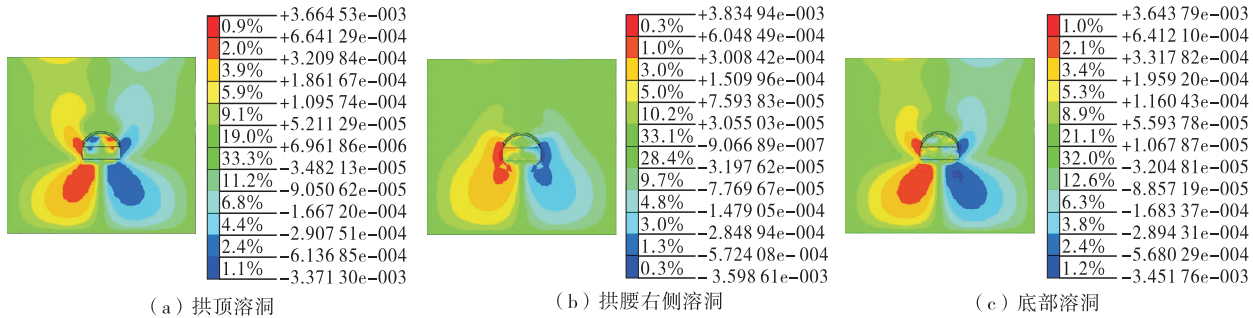
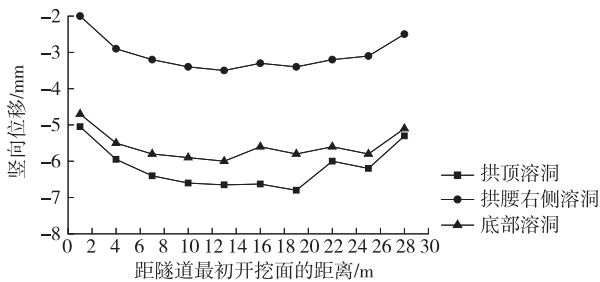
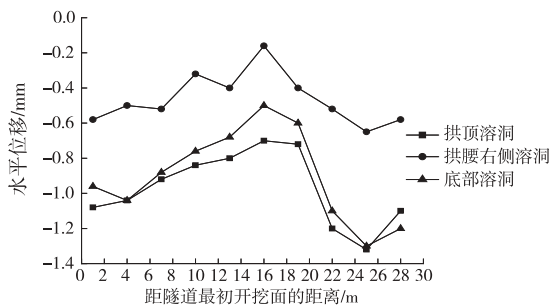


图 14 不同溶洞位置时隧道水平位移云图(单位:m)



4 结论

(1) 岩溶坍塌地段采用洞内管棚超前支护是一种有效的技术手段,可增强隧道开挖围岩的稳定性,其中注浆管棚的效果最好,无注浆管棚的效果次之。

(2) 隧道周围有隐伏溶洞时,采取溶洞填充措施可减小隧道竖向和水平位移。

(3) 溶洞位置不同,对管棚支护效果的影响不

3.3.2 水平位移

如图 13、图 14 所示,拱顶存在溶洞时,与其他两种位置溶洞相比,隧道掌子面处水平位移增大,上台阶和上下台阶分界处都表现出对称发展的较大水平位移,说明隧道掌子面的稳定性受拱顶溶洞较大的负面影响;拱顶、拱腰右侧、底部存在溶洞时,隧道水平位移最大值分别为 1.34、0.61、1.33 mm,拱顶和底部存在溶洞对隧道水平位移的影响较明显。

同,其中拱顶溶洞的影响最大,底部溶洞次之,拱腰右侧溶洞的影响最小。

(4) 与无注浆管棚相比,注浆管棚对隧道竖向位移的控制效果比对水平位移的控制效果更好。

(5) 拱顶溶洞对掌子面的稳定性影响最大,开挖至靠近溶洞时掌子面上会出现较大水平位移,施工时需考虑对掌子面进行支护和加固。

参考文献:

- [1] 苟德明.高速公路隧道充填块石土大型岩溶坍塌处治[J].中国科技信息,2018(19):56—58.
- [2] 李天铭,崔宝林.隧道洞内岩溶段长大管棚施工技术[J].铁路标准设计,2007(增刊2):102—104.
- [3] 黎荐.高速公路隧道浅埋段特大塌方的综合处治技术[J].地下空间与工程学报,2008,4(3):102—104.
- [4] 宋战平,田小旭,周冠南,等.隧道洞内管棚超前预支护

(下转第 154 页)

构建,使用时只需改变环境因子即可进行计算。

文献[6]通过修正传统 GM(1,1)中的发展灰度与内生成控制灰度参数,提出无偏 GM(1,1)模型;通过消除原始数据中异常值的影响,提出滑动 GM(1,1)模型;通过遗传算法(GA)优化后的 BP 神经网络对传统、无偏与滑动 GM(1,1)模型进行组合,得到了兼顾灰色理论、遗传算法和 BP 神经网络优点的 GA—灰色神经网络组合预测模型。应用实例表明,该组合模型的预测精度较高,误差较小。但目前的研究基本集中于模型优化、算法组合及数据参数更正,对使用性能和影响因素的发展变化关系的预测模型较鲜见。可利用该 GA—灰色神经网络组合预测模型建立荷载、温度、水分等单因素预测模型,然后通过不同因素场的耦合构建总的预测模型,在某地区进行沥青路面性能预测时,只要改变环境因子,修改到预测时间段即可得到预测值。

通过影响因素分析更易了解沥青路面的变化,对沥青路面出现的破坏状况与使用性能变化建立有效联系,对养护方案制订、养护技术应用、病害处理的指导性更强。

3 结语

沥青路面使用性能的影响因素较多,在路面服

务期限产生的各种病害均会对路面使用性能造成影响,因而使用性能评价指标繁多。而且实际中多种病害都是联系在一起的,性能评价中不能完全地脱离开进行单一评价,各评价方法也不能完全反映路面的使用性能情况。

参考文献:

- [1] 易辉.高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究[D].西安:长安大学,2014.
- [2] 谢峰.基于 BP 神经网络的高速公路路面性能预测[J].公路交通科技,2015,11(9):73—75.
- [3] 潘怀兵.基于主成分分析法的沥青路面使用性能评价[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2010,29(6):888—890.
- [4] 胡霞光,王秉纲.两种基于遗传算法的路面性能综合评价方法[J].长安大学学报(自然科学版),2002,22(2):6—9.
- [5] 汤晴,吴大鸿.沥青路面使用性能及其预测研究[J].公路工程,2015,40(5):217—219+249.
- [6] 陈仕周,李山,熊峰,等.基于 GA—灰色神经网络的沥青路面使用性能预测[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(2):44—50.

收稿日期:2021—05—16

(上接第 141 页)

学版),2020,47(3):89—96.

- [10] 朱志辉,王力东,龚威,等.多种垂向轮轨关系的对比及改进的车—线—桥系统迭代模型的建立[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(6):1585—1593.

- [11] 李岩,吴志文,蔡明,等.一种随机车流与桥梁耦合振动的分析方法[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(3):46—52.

收稿日期:2021—04—21

(上接第 146 页)

力学行为的理论分析[J].中国公路学报,2020,33(4):89—98.

- [5] 武松,汤华,罗红星,等.浅埋软岩公路隧道超前管棚支护机制与工程应用研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊 1):3080—3091.
- [6] 何雄刚,毕冉.全风化花岗岩隧道连续超前中管棚支护力学性能数值分析[J].公路工程,2019,44(3):216—221+252.
- [7] 朱涵,赵春安,赵博.基于变基床系数的管棚变形机制研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(5):617—624.
- [8] 董敏,董明星,阳军生.下穿既有高速公路下隧道施工双层管棚对土层加固作用有限元数值分析[J].公路工

程,2014,39(3):284—289.

- [9] 李力.粉细砂地层大跨浅埋隧道注浆管棚数值分析[J].隧道建设,2008,28(6):656—659.
- [10] 阳军生,张戈.浅埋暗挖隧道管棚变形监测及受力机制分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1258—1264.
- [11] 伍振志,傅志锋,王静,等.浅埋松软地层开挖中管棚注浆法的加固机理及效果分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(6):1026—1029.
- [12] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设置:JTG D70/2—2014[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.

收稿日期:2020—11—24