

基于数值仿真的盐渍土路面结构力学响应分析

王树明

(甘肃五环公路工程有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 对以碳酸盐渍土作为路基的路面结构进行力学响应分析,选取沥青路面和水泥混凝土路面两大类路面类型,分别建立路面结构力学响应分析模型,研究采用0~30 cm(工况1)以及30~80 cm(工况2)厚的加入不同石灰掺量改良后的碳酸盐渍土作为路基的路面结构在车辆荷载作用下的力学响应。结果表明:在沥青路面中,随着路基中石灰掺量的增加,2种工况下的竖向变形呈现先减小后增大的趋势;当石灰掺量为5%时,工况1和工况2下的竖向变形分别为1.35 mm和1.51 mm,相较于不掺石灰的情况分别减小了30.13%和17.89%;石灰掺量达到20%厚时,其对2种工况的变形和应力变化的影响基本相等。

关键词: 盐渍土;路基;路面;力学响应;数值仿真

中图分类号: U416.21

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0279-04

Analysis on Mechanical Response of Saline Soil Pavement Structure Based on Numerical Simulation

WANG Shuming

(Gansu Ring V Highway Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: The mechanical response of pavement structure with carbonated soil as subgrade is analyzed. Aiming at two pavement types of asphalt pavement and cement concrete pavement, the mechanical response analysis models of pavement structures are established respectively to study the mechanical response of pavement structure under vehicle load by using the carbonate soil with a thickness of 0~30 cm (working condition 1) and 30~80 cm (working condition 2) with different lime content as the subgrade. The conclusion shows that in asphalt pavement, with the increase of lime content in the subgrade, the vertical deformations of the two working conditions show a trend of first decreasing and then increasing. When the lime content is 5%, the vertical deformations under the working condition 1 and working condition 2 are 1.35 mm and 1.51 mm respectively, which are reduced by 30.13% and 17.89% compared to not adding lime. When the lime content reaches 20% thickness, the impact on the deformation and stress changes of the two working conditions is basically equal.

Keywords: saline soil; subgrade; pavement; mechanical response; numerical simulation

0 引言

随着我国经济和交通状况迅速发展,路网结构越来越完善,相应的建设项目所面临的地质条件也越来越复杂,其中就包括盐渍土地地区中的公路工程^[1]。科学合理地剖析盐渍土路基与不同类型路面结构之间的匹配关系,对于保证建设质量和降低工程造价都具有十分重要的意义。

建设高质量的路基是确保线路安全运营的基础,因此,对盐渍土路基-路面结构在荷载作用下的响应研究是十分必要的。当前已有诸多学者对不同

材料路面结构的力学响应做了理论分析、数值仿真和试验方面的研究工作。董泽蛟等^[2]采用ABAQUS软件建立了沥青路面的三维结构有限元模型,研究了温度场对路面结构的瞬态动力响应的影响。董忠红等^[3]提出了粘弹性层状体系的动力学模型,借此分析了动荷载作用下沥青路面结构的动力响应规律,并分析了车速、轴重对路面结构动力响应的影响。于微等^[4]采用ANSYS软件分析了混凝土路面结构在早期收缩变形阶段的力学响应,同时考虑了不同的层间接触状态,并指出保证层间光滑接触是混凝土路面设计的要点。朱洪洲等^[5]依托足尺环道试验,实测了两种不同类型混凝土路面面层和基层中的温度和应力,发现相较于采用柔性基层的水泥混凝土路面,采用半刚性基层时路面受温度的影响较

收稿日期: 2024-07-18

作者简介: 王树明(1992—),男,硕士,工程师,从事施工管理研究工作。

小。丁义兰等^[6]通过试验模拟了冲击荷载作用,研究了两种不同混凝土路面结构在冲击荷载作用下的面层破坏形式和机理,指出采用水稳碎石层可显著减缓路面的破坏程度。此外,还有一系列非常具有参考价值的相关研究成果^[7-9]。

本文以盐渍土路基作为研究背景,采用 ADINA 软件建立了三维仿真分析模型,对比分析了在车辆荷载作用下,具有盐渍土路基的高速公路在沥青和混凝土两种路面结构下的力学响应规律,以期对相关设计和养护工程提供参考。

1 有限元分析模型

1.1 材料参数

(1)路基结构

本文所研究路面的路基参数如图 1 所示,为采用不同石灰比掺量改良的盐渍土,图中所示参数为两种不同厚度盐渍土(0~30 cm 与 30~80 cm)的材料属性。其中,泊松比取 0.35,密度取为 1 700 kg/m³。

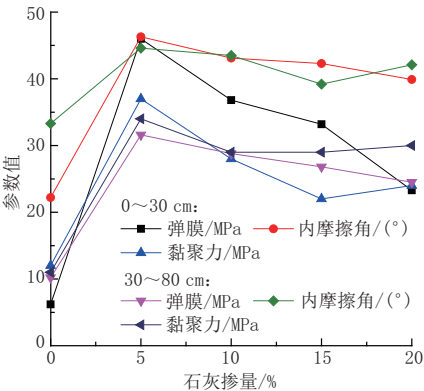


图 1 路基材料属性

(2)路面结构

本文分别研究采用两种不同材料的路面结构的应力响应规律,所用沥青路面材料和普通混凝土路面材料的属性分别如表 1、表 2 所列。

表 1 沥青路面材料属性

结构层	厚度/ m	弹模/ MPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)
SMA-13	0.04	1 400	0.25	2 450
AC-20	0.06	1 200		2 430
AC-25	0.08	1 000		2 400
水泥稳定碎石基层	0.36	1 600	0.35	1 750
级配碎石垫层	0.20	250		2 200

1.2 数值模型

本文采用 ADINA 软件建立的数值模型的长(X 向)、宽(Y 向)分别为 4.6、1.8 m,高则根据表 1 与表 2 所列不同路面结构取值。路面结构均采用 8 节点的

表 2 普通混凝土路面材料属性

结构层	厚度/ m	弹模/ MPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)
水泥混凝土面层	0.30	25 000	0.15	2 400
水泥稳定碎石基层	0.18	1 600	0.25	1 750
级配碎石垫层	0.15	250	0.35	2 200

实体单元模拟,并采用不均匀的网格划分方式。为模拟实际行车荷载作用下的动力响应,路面结构层采用弹性材料模型,土基采用莫尔库伦模型,在模型底部施加全约束,在模型侧面约束两个水平方向的位移。此外,根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[10]中的双圆载荷(轴重为 100 kN,荷载半径为 0.106 5 m)的规定,当荷载半径 R=0.15 m 时,行驶速度按 100 km/h 考虑,则荷载作用时间为 T=0.06 s。最终建立的有限元模型如图 2 所示。

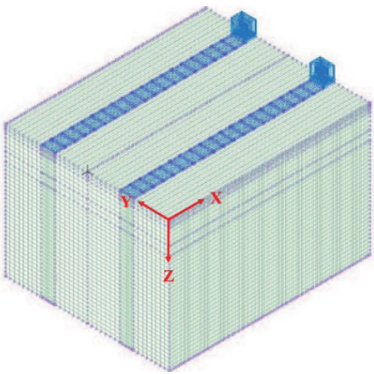


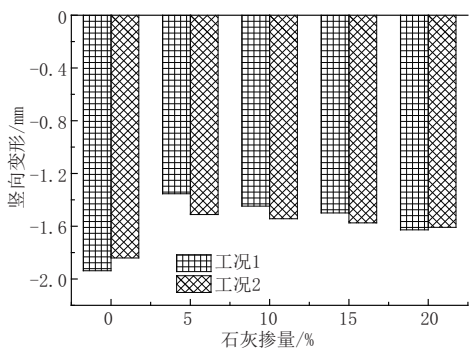
图 2 有限元模型图示

2 路面结构应力响应分析

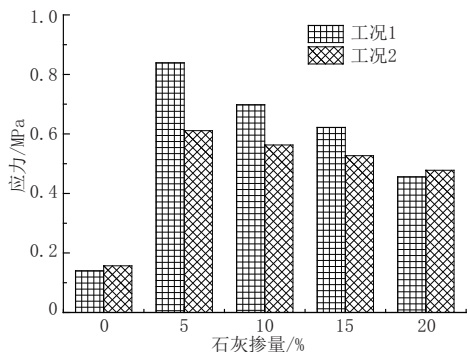
2.1 沥青路面

分析采用沥青材料时路面结构的变形及应力极值与路基状态之间的关系,如图 3 所示。其中,工况 1 对应的路基土为土层深度为 0~30 cm 的碳酸盐渍土,工况 2 对应的路基土为深度为 30~80 cm 的碳酸盐渍土。

由图 3 可看出,随着路基中石灰掺量的增加,两种不同工况的路面结构的竖向变形呈现出先减小后增大的变化趋势,而应力则呈现出先增大后减小的变化趋势。其中,当石灰掺量为 5% 时,竖向变形达到最小值,工况 1 和工况 2 下的变形分别为 1.35 mm 和 1.51 mm,相较于不掺石灰时分别减小了 30.13% 和 17.89%;当石灰掺量为 5% 时,应力达到最大值,工况 1 和工况 2 下的应力分别为 0.84 MPa 和 0.61 MPa,相较于不掺石灰时分别增大了 0.70 MPa 和 0.45 MPa。

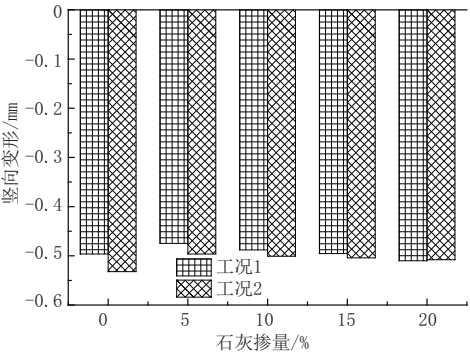


(a)变形

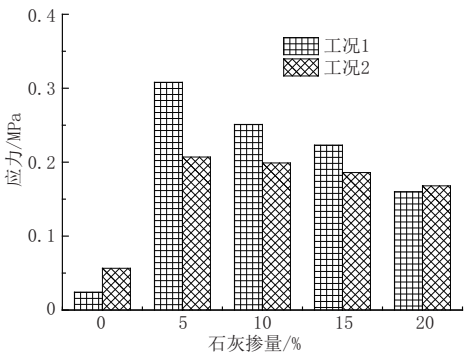


(b)应力

图3 路基状态与沥青路面结构的应力响应关系



(a)变形



(b)应力

图4 路基状态与混凝土路面结构的应力响应关系

2.2 混凝土路面

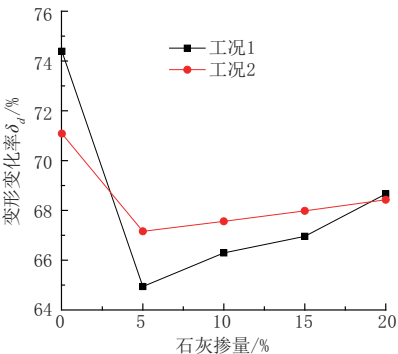
分析采用混凝土材料时路面结构的变形及应力极值与路基状态之间的关系,如图4所示。其中,工况1对应的路基土为土层深度为0~30 cm的碳酸盐渍土,工况2对应的路基土为深度为30~80 cm的碳酸盐渍土。

由图4可看出,随着路基中石灰掺量的增加,两种不同工况下的路面结构的竖向变形呈现出先减小后增大的变化趋势,而应力则呈现出先增大后减小的变化趋势。其中,当石灰掺量为5%时,竖向变形达到最小值,工况1和工况2下的变形分别为0.47 mm和0.50 mm,相较于不掺石灰时分别减小了4.35%和6.75%;当石灰掺量为5%时,应力达到最大值,工况1和工况2下的应力分别为0.31 MPa和0.21 MPa,相较于不掺石灰时分别增大了0.29 MPa和0.15 MPa。

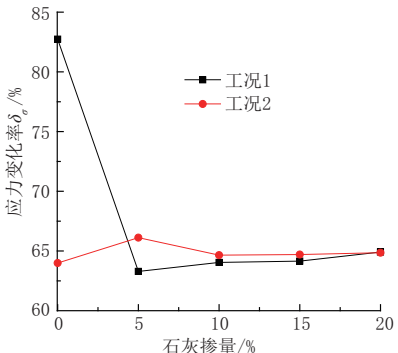
2.3 对比分析

为了对比分析当石灰掺量相同时,采用沥青与混凝土两种路面材料的路面结构的竖向变形和应力情况,定义了如式(1)、式(2)所示的变形和应力对比关系式,并绘制出相应的变化曲线图,如图5所示。

$$\delta_d = \frac{d_{\text{沥青}} - d_{\text{混凝土}}}{d_{\text{沥青}}} \times 100\% \quad (1)$$



(a)变形



(b)应力

图5 对比分析

$$\delta_\sigma = \frac{\sigma_{\text{沥青}} - \sigma_{\text{混凝土}}}{\sigma_{\text{沥青}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $d_{\text{沥青}}$ 和 $d_{\text{混凝土}}$ 分别代表采用沥青和混凝土路面材料的路面结构竖向变形值,mm; $\sigma_{\text{沥青}}$ 和 $\sigma_{\text{混凝土}}$ 分别代表

采用沥青和混凝土路面材料的路面结构应力值,MPa。

由图5可以看出,随着石灰掺量增加,路基工况对于路面结构材料的响应敏感性逐渐减弱,即工况1与工况2的两条曲线越来越接近;当石灰掺量达到20%时,根据式(1)和(2)得到的两种工况下的变形变化率和应力变化率基本相等。

3 结 语

本文通过数值仿真分析,研究了采用0~30 cm(工况1)以及30~80 cm(工况2)厚的加入了不同石灰掺量改良后的碳酸盐渍土作为路基的路面结构在车辆荷载作用下的力学响应,得出结论如下。

(1)随着路基中石灰掺量的增加,两种不同工况下的路面结构的应力均呈现出先增大后减小的变化趋势;其中,当石灰掺量为5%时,应力达到最大值,工况1和工况2下的路面结构应力分别为0.84 MPa和0.61 MPa,相较于不掺石灰时分别增大了0.70 MPa和0.45 MPa。

(2)随着路基中石灰掺量的增加,两种不同工况下的路面结构的竖向变形则呈现出先减小后增大的变化趋势;当石灰掺量为5%时,竖向变形达到最小值,工况1和工况2下的路面结构变形分别为

0.47 mm和0.50 mm,相较于不掺石灰时分别减小了4.35%和6.75%。

(3)当石灰掺量达到20%时,两种工况下的变形变化率和应力变化率基本相等。

参考文献:

- [1] 孙健.戈壁滩盐渍土地区路基施工质量控制[J].工程机械与维修,2024(2):144-146.
- [2] 董泽蛟,潘小康,邵显智,等.温度场及非均布移动荷载作用下沥青路面力学响应分析[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(5):740-746,793.
- [3] 董忠红,吕彭民.移动荷载下倒装结构沥青路面动力响应[J].长安大学学报(自然科学版),2008(5):111-115.
- [4] 于微,陈良.不同层间接触状态下的水泥混凝土路面力学响应分析[J].广州建筑,2021,49(6):38-43.
- [5] 朱洪洲,张瑞,吴小军,等.不同基层类型水泥混凝土路面温度应力的差异[J].公路交通科技,2023,40(3):8-16.
- [6] 丁义兰,张震东,任杰.冲击荷载下典型沥青混凝土路面动态响应试验研究[J].农业装备与车辆工程,2023,61(12):60-65.
- [7] 刘志华,尹聪,刘明茜,等.高速公路沥青路面不同结构层应力分析[J].黑龙江交通科技,2024,47(2):50-54.
- [8] 陈祥,朱洪洲,范世平,等.荷载-温度-水共同作用下脱空水泥混凝土路面板力学响应分析[J].公路交通科技,2022,39(2):11-19.
- [9] 于涛.沥青混合料的动荷载响应特征及沥青路面黏弹性力学研究[J].浙江水利水电学院学报,2024,36(1):70-74.
- [10] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].

(上接第278)

- [11] 李翔宇,邢国华,张蓬瑶,等.7075高强铝合金管约束混凝土柱轴压承载力计算[J].工业建筑,2020,50(11):162-167.
- [12] 曾翔,吴晚博,霍静思,等.圆铝合金管混凝土短柱轴心受压承载力研究[J].工程力学,2021,38(2):52-60.
- [13] 王炜.铝管混凝土中长柱受压力学性能研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
- [14] Bin R, Song Z, Yichun Z, et al. Study on the Ultimate Bearing Capacity of 7A04-T6 CFAT Columns Under Eccentric Compression

- [J]. Journal of Building Engineering, 2022(46):103654.
- [15] Mazzolani F M. Aluminum Alloy Structures[M]. London: Chapman & Hall, 1995.
- [16] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
- [17] 李进军,丁永君,王衬心,等.7A04-T6铝合金圆管的材性试验和本构模型研究[J].钢结构(中英文),2019,34(12):35-39.
- [18] CECS 159—2004,矩形钢管混凝土结构技术规程[S].
- [19] ANSI/AISC360-10, Specification for Structural Steel Buildings[S].