

# Numerical Analysis of Mechanical Response of Red Mud Subgrade Based on PLAXIS

Junhua Zhang<sup>1</sup>, Zhengchao Zhang<sup>2</sup>, Yuxin Li<sup>1</sup>, Zhaoyun Sun<sup>2</sup>, Shihua Pang<sup>1</sup>, Xia Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shandong Hi-Speed Company Limited, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

Email: 1044053629@qq.com

Received: Mar. 12<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2020; published: Apr. 9<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

In this paper, numerical analysis is performed on the road structure of a red mud-filled subgrade in a reconstruction and expansion project of a high-speed highway in Shandong. The road surface deflection of the red mud-filled subgrade and conventional soil subgrade pavement structure, the bottom strain of the asphalt layer, and the top pressure strain of the soil are studied on the change law of mechanical response index. The results show that the bearing capacity and anti-fatigue cracking ability of the pavement structure filled with red mud are better, and the larger the thickness range of the red mud filled roadbed is, the stronger the overall performance of the pavement structure is. Design parameters and quality control are selected for reference.

## Keywords

Modified Red Mud, Subgrade, Mechanical Response, Finite Element Simulation, Performance

# 基于PLAXIS的赤泥路基力学响应数值分析

张军华<sup>1</sup>, 张正超<sup>2</sup>, 李玉鑫<sup>1</sup>, 孙兆云<sup>2</sup>, 庞世华<sup>1</sup>, 李夏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东高速股份有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东省交通科学研究院, 山东 济南

Email: 1044053629@qq.com

收稿日期: 2020年3月12日; 录用日期: 2020年4月2日; 发布日期: 2020年4月9日

## 摘要

本文对山东某高速改扩建工程采用赤泥填筑路基道路结构进行数值分析, 研究赤泥填筑路基及常规土路

基路面结构的路表弯沉、沥青层底拉应变及土基顶压应变等力学响应指标的变化规律。结果表明：采用赤泥填筑路基的路面结构的承载能力和抗疲劳开裂能力更好，且采用赤泥填筑路基厚度范围越大，路面结构整体性能越强，可为赤泥填筑路基的设计参数和质量控制选定提供参考。

## 关键词

改性赤泥，路基，力学响应，有限元分析，性能

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国经济高速发展和工业化进程，工业固体废弃物赤泥的大量堆存不仅侵占了宝贵的土地资源，而且对周边土壤、水体带来一定环境安全隐患[1][2]。赤泥是一种铝厂在以铝土矿为原材料进行氧化铝生产时所产生的一种固体废弃物，赤泥颗粒极细且呈现出强碱性[3][4]。相关数据表明：每生产1吨氧化铝，大约产生赤泥0.8~1.5吨。我国作为氧化铝生产大国，现存赤泥的堆储量极高，且每年仍大量、持续增加[5][6]。赤泥具有密度小、收缩性低、活性高等特点，经改性后应用于道路半刚性基层，不仅可以大量替代传统筑路材料，而且能够改善传统半刚性基层材料的路用性能，具有较高的资源化利用价值[7][8]。

本文采用有限元软件 PLAXIS 分析比较采用赤泥填筑路基与传统路基的道路结构性能及力学响应情况，可为选择合理的结构设计方案提供参考。

## 2. 工程概况

### 2.1. 工程简介

该工程位于山东省济南市，老路已服役超二十年，既有设计标准为双向四车道，改扩建完成后道路变为双向八车道，设计速度将达到120公里/小时。该改扩建工程投资大、里程长，而且为边通车边施工项目，对于组织管理、路基强度和施工便宜性以及整体路面结构性能有着较高要求。沿线土地资源紧张，旧路废弃材料多，沿线赤泥、铁尾矿粉等大量大宗工业废弃料突出，节能减排与环保压力大，绿色节能技术、旧路材料与工业废弃料循环利用需求迫切。

### 2.2. 赤泥填筑路基施工方案

该工程为国内第一次将赤泥大规模应用于高速公路建设，填筑赤泥路床5.3公里，分别在路床顶部20cm及80cm范围内采用改性赤泥材料进行填筑，现场实测弯沉值及压实度均达到设计要求。路基之上基层及面层结构为：18cm低剂量水泥稳定碎石底基层+18cm水泥稳定碎石下基层+18cm水泥稳定碎石基层+10cmATB-25沥青稳定碎石上基层+8cmAC-25粗粒式沥青混凝土+6cmAC-20中粒式改性沥青混凝土+4cmSMA-13改性沥青玛蹄脂碎石。具体路面结构形式见表1；图1为赤泥现场应用情况展示。

## 3. 有限元模型建立

路面结构沿宽度方向几何对称，建立平面应变有限元模型，土路基、赤泥路基、水泥稳定碎石基层、沥青面层均采用15节点三角形平面单元；赤泥路基模型采用硬化土模型(Hardening-soil模型)；以弹性层

状理论分析路面结构整体受力响应情况，故不考虑界面强度折减因子  $R_{inter}$  对不同结构层之间层间粘结的影响情况。模型边界的约束条件设置为左侧及右侧设置水平向约束只允许其上下活动，模型的底部水平向及垂直向约束均施加不允许其产生活动；计算过程中不考虑地下水位。

**Table 1.** Pavement structure

**表 1.** 路面结构形式

结构一	结构二	结构三
4 cm SMA-13 改性沥青玛蹄脂碎石	4 cm SMA-13 改性沥青玛蹄脂碎石	4 cm SMA-13 改性沥青玛蹄脂碎石
6 cm AC-20 中粒式改性沥青混凝土	6 cm AC-20 中粒式改性沥青混凝土	6 cm AC-20 中粒式改性沥青混凝土
8 cm AC-25 粗粒式沥青混凝土	8 cm AC-25 粗粒式沥青混凝土	8 cm AC-25 粗粒式沥青混凝土
10 cm ATB-25 沥青稳定碎石上基层	10 cm ATB-25 沥青稳定碎石上基层	10 cm ATB-25 沥青稳定碎石上基层
18 cm 水泥稳定碎石基层	18 cm 水泥稳定碎石基层	18 cm 水泥稳定碎石基层
18 cm 水泥稳定碎石下基层	18 cm 水泥稳定碎石下基层	18 cm 水泥稳定碎石下基层
18 cm 低剂量水泥稳定碎石底基层	18 cm 低剂量水泥稳定碎石底基层	18 cm 低剂量水泥稳定碎石底基层
土路基	20 cm 改性赤泥路基	80 cm 改性赤泥路基



**Figure 1.** Red mud scale road

**图 1.** 赤泥规模化路用

### 3.1. 模型尺寸

考虑到边界效应对计算结果的影响，本模型路基宽度取 15 m，高度为 2.8 m，各结构层厚度按表 1 中进行取值。荷载按照公路沥青路面设计规范(JTG D50-2017)要求进行设置，采用轴重为 100 KN 的单轴 - 双轮组轴载一侧作为荷载施加条件，轮胎与路面的接触形状设置为矩形；与规范中要求的单轮接地当量圆直径 213.0 mm，两轮中心距 319.5 mm 相对应地加载面宽度设置为 213 mm，两加载面间距为 319.5 mm；轮胎接地压强为 0.7 Mpa。

### 3.2. 参数取值

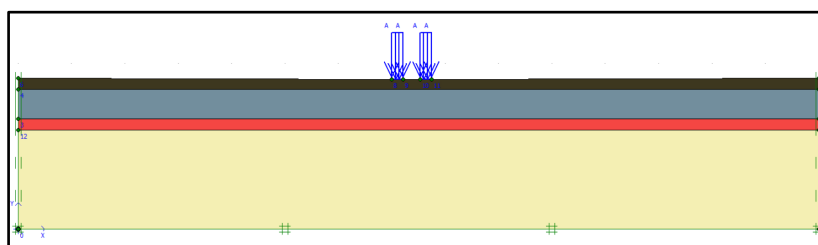
模型计算中所用主要物理力学参数根据室内试验数据进行取值，如下表 2 所示。

### 3.3. 模型建立

本文采用 PLAXIS 有限元数值分析软件进行模拟计算，根据前文所述路面结构一、路面结构二级路面结构三分别建立三个数值分析模型，以路面结构三为例，模型建立如下图 2 所示。

**Table 2.** Parameter value table  
**表 2.** 参数取值表

类型	参数	计算值
沥青面层	弹性模量(Mpa)	6000
	厚度(cm)	28
	泊松比	0.35
水泥稳定碎石基层	弹性模量(Mpa)	12000
	厚度(cm)	54
	泊松比	0.2
赤泥路基	弹性模量(Mpa)	500
	厚度(cm)	20/80
	泊松比	0.42
土路基	弹性模量(Mpa)	700
	厚度(cm)	/
	泊松比	0.4



**Figure 2.** PLAXIS calculation model for pavement structure option 3  
**图 2.** 路面结构方案三的 PLAXIS 计算模型

## 4. 计算结果及分析

### 4.1. 路表弯沉

通常意义上的弯沉指的是路基或者路面在规定荷载下产生垂直向的变形，且当荷载归零后可以恢复的那一部分变形。回弹弯沉量在一定程度上表征了在当前使用状态下整体路基路面结构的刚度和强度。一般认为回弹弯沉越大，路面结构在一定荷载下产生的塑性变形也就越大，抗疲劳能力越差，相对应地此时的路面结构就不适于承受重载交通或者说当承受重载交通时路面结构会产生较大的疲劳累计，进而发生结构性破坏。

图 3 为路面结构方案三竖向变形箭头图，图 4 为各路面结构路表弯沉对比图。

如图 3 及图 4 所示，计算结果表明：在轮胎荷载作用下轮胎周边路面结构产生竖向变形，在轮隙中心处竖向变形达到最大，且左右两侧竖向变形以轮隙中心为参照点左右对称，其影响范围可达轮隙中心单侧约 2 m 范围。路面结构一轮隙中心点弯沉值为 4.3，路面结构二轮隙中心点弯沉值为 7.3，路面结构三轮隙中心点弯沉值 9.8，与只采用土路基形式的路面结构相比，当路床顶部 20 cm 范围内采用改性赤泥填筑时其弯沉值降低 25.5%，当路床顶部 80 cm 范围内采用改性赤泥填筑时其弯沉值降低 56.1%。

由计算结果可知，采用改性赤泥部分填筑路基时，路面结构整体承载能力高于只采用路基土填筑的路面结构；路床顶部 80 cm 范围内采用改性赤泥填筑路基的路面结构整体承载能力高于路床顶部 20 cm 范围内采用改性赤泥填筑路基的路面结构。

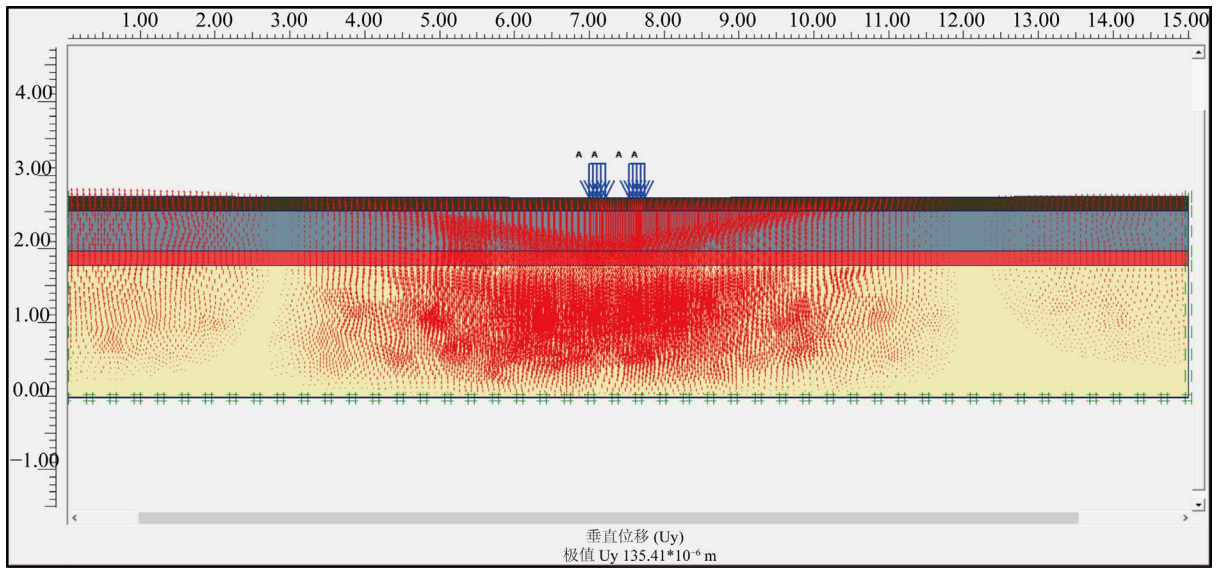


Figure 3. Vertical deformation arrow illustration of working condition 3

图 3. 路面结构三竖向变形箭头图

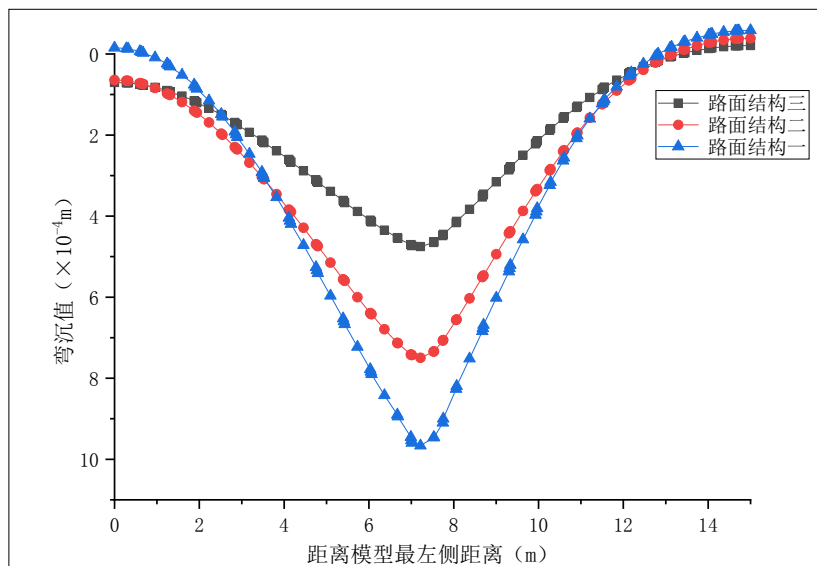


Figure 4. Deflection value comparison chart

图 4. 弯沉值对比图

#### 4.2. 沥青层底拉应变

沥青层底拉应变是现行沥青路面设计规范中要求的设计指标之一，受限于当前的技术手段，尚未建立有效的实际测量手段。虽然通过埋设沥青应变计等传感器的方式虽然可以测得沥青层底拉应变，但其与计算值或真实值间仍有较大差距，实测沥青层底拉应变的数据可信性仍需要继续深入研究。因此，有限元数值分析仍是当前进行路面结构沥青层底拉应变计算分析的方便有效的技术手段。沥青路面结构中累计疲劳损伤的产生通常是由于在荷载作用下沥青层底或者沥青层底附近产生水平向的拉应变，随着路面结构服役时间的增长，沥青层底的拉应变通常不断增大，当沥青层底的拉应变大于沥青混合料结构的极限拉应变时，就会产生疲劳开裂的现象。

如图 5 及图 6 所示, 在轮胎荷载作用下路面结构产生变形, 沥青层底拉应变最大值在轮隙中心处, 随着距离轮隙中心距离的增大沥青层底拉应变逐渐减小为零, 随着距离的进一步增大拉应变转变为压应变, 且其值逐渐增大。路面结构三沥青层底拉应变最大值为  $115.1 \times 10^{-6}$ 、路面结构二沥青层底拉应变最大值为  $317.4 \times 10^{-6}$ 、路面结构一沥青层底拉应变最大值为  $385.3 \times 10^{-6}$ 。相同位置处, 路面结构三的层底拉应变最小, 这说明本文三种路面结构形式中, 路面结构三的结构整体承载力好、抗疲劳开裂的能力强。与采用普通土路基的路面结构相比, 路床顶部分别在 20 cm 及 80 cm 范围内采用改性赤泥填筑路基的路面结构的最大层底拉应变分别降低了 17.6% 和 70.1%。

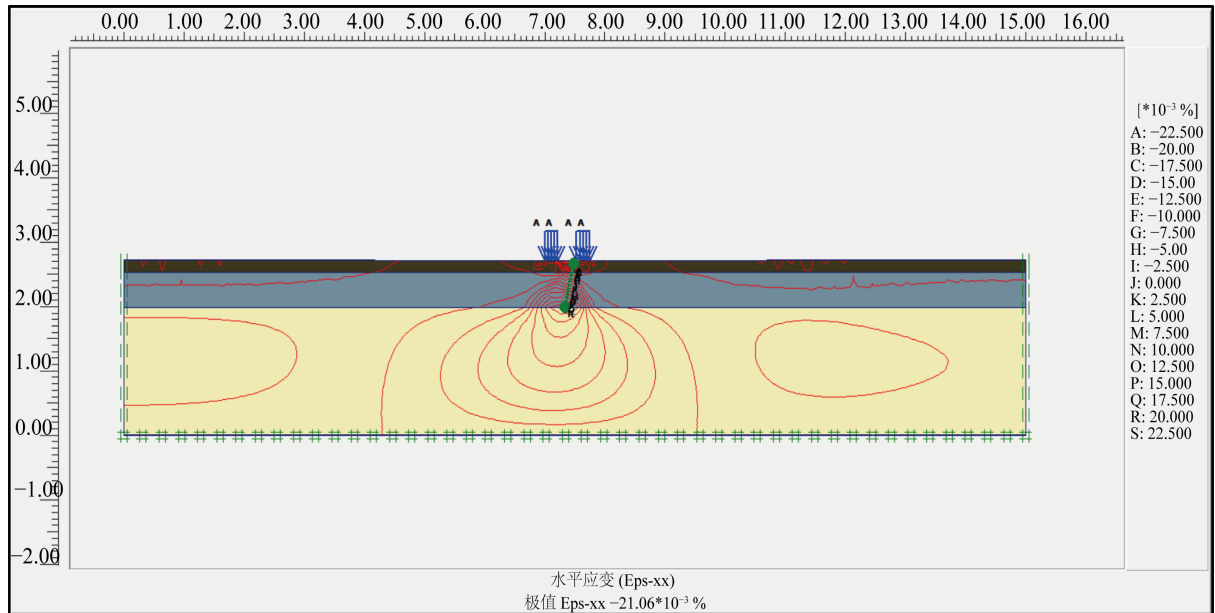


Figure 5. Horizontal strain contour map of working condition 1

图 5. 路面结构一水平应变等值线图

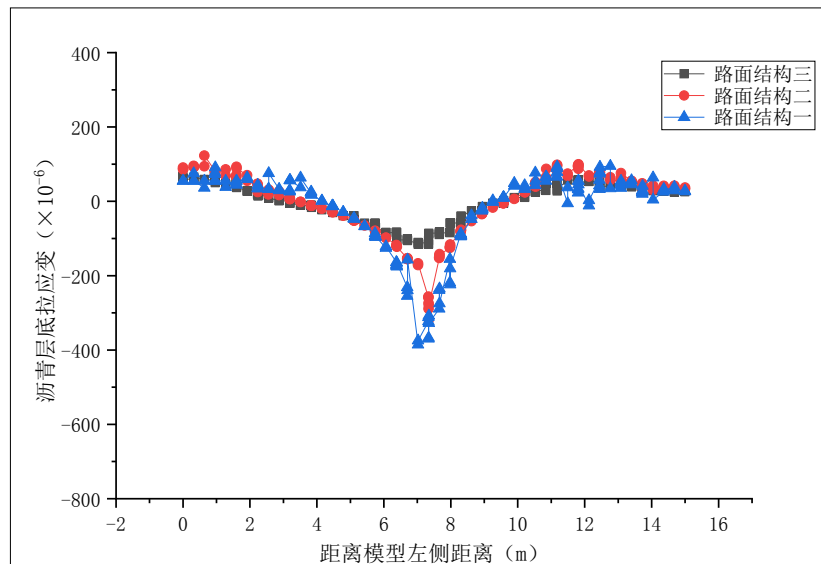


Figure 6. Comparison chart of bottom strain of asphalt layer

图 6. 沥青层底拉应变对比图

### 4.3. 路床顶压应变

在车辆荷载作用下，土基的顶部及内部产生竖向压应变，而土基顶的压应变在整体上反映了土基的综合承载能力。相关研究表明，路面结构在受到相同的荷载作用时，当土基顶压应变值较小时表明土基综合性能好、抵抗变形和损坏的能力更强。

如图 7 所示，由轮隙中心引垂线至路基顶，此处土基顶压应变为最大值，且压应变以该中心向土基扩散并逐渐衰减。图 8 中计算结果表明：轮隙中心处路面结构一、二、三的土基顶压应变分别为  $49.8 \times 10^{-6}$ 、 $22.3 \times 10^{-6}$ 、 $11.2 \times 10^{-6}$ 。与采用普通土路基的路面结构相比，路床顶部分别在 20 cm 及 80 cm 范围内采用改性赤泥填筑路基的路面结构的轮隙中心处土基顶压应变分别降低了 55.2% 和 77.5%。因此，当路床顶部一定范围内采用改性赤泥填筑路基时可以明显提高路基的承载能力、改善路面结构的整体性能，且随着填筑赤泥深度的不断增大，效果越好。

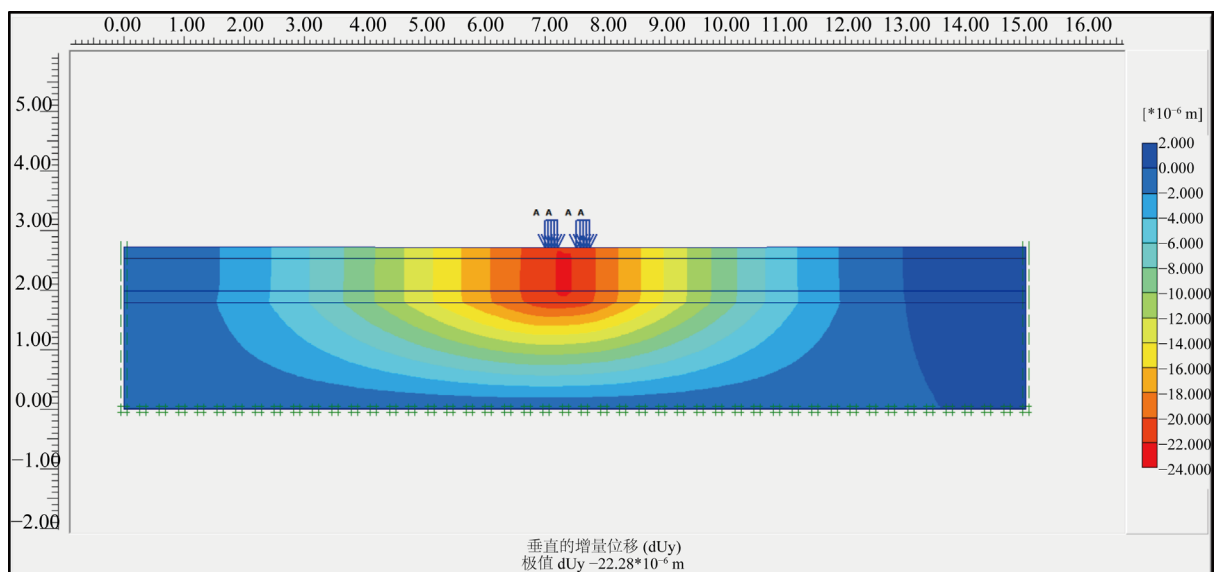


Figure 7. Vertical strain cloud map of working condition 2

图 7. 路面结构二竖向应变云图

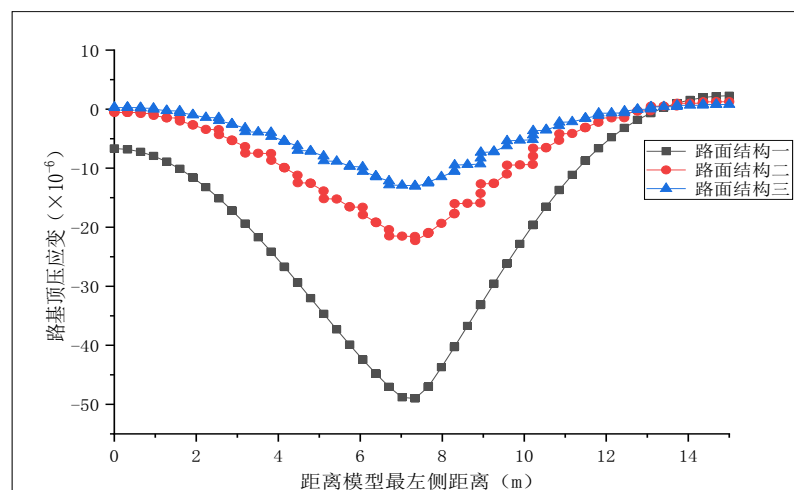


Figure 8. Subgrade compressive strain comparison chart

图 8. 路基压应变对比图

## 5. 结语

本文所述工程采用改性赤泥填筑路基为固体工业废弃物的资源化应用提供了一种新的尝试,不仅可以节约因赤泥等大宗工业固体废弃物堆放所占用的土地资源,还可以节省大量的筑路材料、降低工程造价,具有较高的经济效益和社会效益。依托实际改扩建工程中的路面结构形式及采用改性赤泥填筑路基的施工方案,本文采用有限元分析软件 PLAXIS 对该工程的三种路面结构进行了力学响应计算,可以得出以下结论:

1) 采用规范中标准轮胎加载方式进行路面结构力学响应计算表明,三种路面结构所对应的路表弯沉值、沥青层底拉应变值及土基顶压应变值存在一定差异,表明所对应路面结构性能存在优劣之分。三种计算值均表现为:以轮隙中心左右对称,路表弯沉值的最大值、沥青层底拉应变的最大值、路基顶压应变的最大值均出现在轮隙中心处,且向两侧不断消减。

2) 与传统土路基相比,当路床顶部一定范围内采用改性赤泥填筑路基时,路表弯沉、沥青层底拉应变及土基顶压应变等指标均更优秀。采用改性赤泥填筑路基的厚度越大,路面整体性能越好。赤泥路基可以对传统土路基起到加强和改善的作用。

3) 采用赤泥填筑路基可以实现赤泥的规模化路用,其路面结构的整体性能可以满足相关要求。

## 参考文献

- [1] 张云,陈伟,陈潇.赤泥基应用于路基半刚性基层材料性能实验研究[J].山西建筑,2018,44(35):111-112.
- [2] 刘恹,郭群.改性赤泥在市政道路工程中的应用[J].中国市政工程,2019(1):24-26+103-104.
- [3] 梁乃兴,张登良,颜祖兴.水泥赤泥混凝土路用性能研究[J].中国公路学报,1996(2):6-11.
- [4] 李阳,梁乃兴,曾晟,周崇辉.水泥赤泥混凝土路缘石力学性能的研究[J].中外公路,2017,37(6):296-298.
- [5] 程钰,李辰,孙兆云.水泥基固化剂固化赤泥的路用特性研究[J].轻金属,2017(9):15-18.
- [6] 崔宏环,裴国陆.含赤泥土壤固化剂改良粉质黏土的路用性能研究[J].中外公路,2018,38(3):301-306.
- [7] 王亮,牟顺,赵艳.二灰稳定赤泥底基层路用性能研究[J].路基工程,2011(6):91-94.
- [8] 杨伟刚,孙兆云,李玉鑫,马士杰,庞世华.改良赤泥固化材料的路用力学特性分析[J].交通科技与经济,2020,22(1):65-68+74.