

高速公路路基工作区深度应用分析

刘盼

广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2024年7月29日; 录用日期: 2024年8月20日; 发布日期: 2024年8月30日

摘要

针对高速公路倒装结构, 文中以某高速公路为依托, 基于弹性层状体系理论, 应用ABAQUS有限元软件, 研究轴载、路基模量对路基力学响应。结果表明, 轴载对路基工作区深度影响显著, 轴载从100 KN增加到200 KN时, 路基工作区深度增幅可达104.7%; 路基模量对路基工作区深度有一定影响, 路基回弹模量由40 MPa增大到70 MPa时, 路基工作区深度增大了12.8%, 工程中, 需要根据实际工况确定高速公路路基工作区深度, 确保路基工作区稳定。

关键词

高速公路, 路基工作区深度, 有限元分析, 路基回弹模量

Analysis of Deep Application of Roadbed Work Area in Expressway

Pan Liu

Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Jul. 29th, 2024; accepted: Aug. 20th, 2024; published: Aug. 30th, 2024

Abstract

Regarding the inverted structure of highways, taking a certain highway as a support, based on the theory of elastic layered systems and ABAQUS finite element software, this article studies the mechanical response of axle load and roadbed modulus to the roadbed. The results show that axle load has a significant impact on the depth of the roadbed working area. When the axle load increases from 100 KN to 200 KN, the depth of the roadbed working area can increase by 104.7%;

文章引用: 刘盼. 高速公路路基工作区深度应用分析[J]. 土木工程, 2024, 13(8): 1633-1639.

DOI: 10.12677/hjce.2024.138176

The roadbed modulus has a certain impact on the depth of the roadbed working area. When the roadbed rebound modulus increases from 40 MPa to 70 MPa, the depth of the roadbed working area increases by 12.8%. In engineering, it is necessary to determine the depth of the highway roadbed working area based on actual working conditions to ensure the stability of the roadbed working area.

Keywords

Expressway, Depth of Roadbed Working Area, Finite Element Analysis, Roadbed Rebound Modulus

Copyright © 2024 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

为了确保路基在交通荷载的反复作用下具有一定的强度和稳定性,《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)对不同路基部位的路基工作区深度及压实度有明确的规定[1]。

唐洪军等[2]分别采用弹性半空间体理论、层状弹性体系理论计算不同工况典型沥青路面结构的路基工作区深度;吕高恒[3]基于 BISAR3.0 程序研究不同路基材料、荷载及土体含水量对路基工作区深度的影响;谢贤举[4]等对考虑路面结构层的砂砾填料低路堤在交通荷载作用下的动应力分布规律进行了研究。

综上所述,现有研究关于高速公路路面的力学行为做了较多研究,但主要集中于半刚性基层路面,对倒装结构研究较少。鉴于此,本文依托某高速公路,利用三维有限元 ABAQUS 软件,首先对比分析布辛尼斯克公式以及基于弹性层状体系理论的路基工作区深度,其次研究不同的轴载、路基回弹模量的路基力学响应,以分析高速公路倒装结构的路基工作区深度规律。

2. 路基工作区深度的计算方法

2.1. 弹性半空间体理论

2.1.1. 路基受力状况

路基土在车轮荷载作用下所引起的垂直应力 σ_z 可以用近似公式(1)计算。计算时,假定车轮荷载为一垂直集中荷载,路基为一弹性均质半空间体[5],则:

$$\sigma_z = K \frac{P}{Z^2} \quad (1)$$

式中: P ——单侧车轮荷载(KN);

K ——系数,一般取 $K = 0.5$;

Z ——垂直集中荷载下应力作用点的深度(m)。

路基土自重路基内深度为 Z 处所引起的垂直压应力 σ_B 按下式计算。

$$\sigma_B = \gamma Z \quad (2)$$

式中： γ ——重度(KN/m)；
 Z ——应力作用点深度(m)。

2.1.2. 路基工作区

在路基某一深度 Z_a 处荷引起的垂直应与路基自重引起的直压应力之比大于 0.1 的范围称为路基工作区。路面结构和车轮荷载对工作区范围内的路基影响较大对工作区范围以外的路基影响较小。

路基工作区深度 Z_a 可以用下式计算。

$$Z_a = \sqrt[3]{\frac{KnP}{\gamma}} \quad (3)$$

式中： Z_a ——路基工作区深度(m)；
 P ——单侧车轮荷载(KN)；
 K ——系数，一般取 $K = 0.5$ ；
 γ ——土的重度(KN/m)；
 系数， $n = 10$ 。

由于路基路面不是均质体，路面的刚度和重度较路基土大，路基工作区的实际深度随路面刚度和厚度的增加而减小。因此，如果采用应力简化公式(3)，需要将路面折算为与路基同一性质的整体，沥青路面的当量厚度 h_e 可采用下式计算。

$$h_e = \sum h_i \sqrt[2.5]{\frac{E_i}{E_0}} \quad (4)$$

式中： h_i ——沥青路面结构层的厚度(cm)；
 E_i ——沥青路面结构层模量(MPa)；
 E_0 ——路基顶面的综合模量(MPa)。

2.2. 弹性层体系理论

将各层路面材料视作多个线形弹性体，路基视作弹性半空间体。基于以下基本假定的前提下，运用弹性力学方法求解得出荷载作用下的任意点的附加应力。

- 1) 路面各结构层为连续均质、各向同性材料，力学特性用弹性模量和泊松比表示。
- 2) 路面各结构层在垂直方向完全连续，会出现脱空现象，沥青面层、基层和底基层连续接触条件，而底基层与路基之间为光滑件。
- 3) 按平面应变问题进行分析。

3. 模型建立

3.1. ABAQUS 有限元模型

通过 ABAQUS 软件建立二维模型，垂直行车方向长度为 6 m，路基深度为 3 m。有限元模型边界条件采用底面固定，两侧面进行法向约束，路面结构层自由，层间完全接触。

3.2. 计算参数

路面结构型式选取沿海城市某高速公路典型的沥青路面倒装结构，各结构层材料参数如表 1 所示。

Table 1. Typical material parameters of pavement structure layers
表 1. 典型路面结构层材料参数

层位	材料名称	路面厚度	弹性模量	泊松比	重度
		(cm)	(MPa)		(KN/m ³)
上面层(AC-16C)	细粒式改性沥青混凝土	4.5	1400	0.25	23
下面层(AC-20C)	中粒式改性沥青混凝土	5.5	1200	0.25	23
上基层(ATB-25)	密级配沥青稳定碎石	16	1100	0.25	23
下基层	级配碎石	16	400	0.35	21
底基层	3%水泥稳定碎石	30	1500	0.25	22
路基	—	—	50	0.4	18

4. 计算结果及讨论

4.1. 布辛尼斯克公式法

轴载大小会影响路基工作区深度,《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017) [6]规定了标准轴载 BZZ100 作为设计轴载,轴载参数见表 2。

Table 2. Tire grounding parameters under different axle loads
表 2. 不同轴载下的轮胎接地参数

工况	单轴双轮/KN	单轮重 P/KN	轮胎接地压强 F/MPa	当量圆半径 δ /cm
一	100	25	0.70	10.65
二	130	32.5	0.76	11.64
三	160	40	0.82	12.47
四	200	50	0.88	13.43

Table 3. Cumulative equivalent thickness results of road surface structures
表 3. 路面各结构累计当量厚度结果值

层位	材料名称	路面厚度	弹性模量	当量厚度	累计当量厚度
		(cm)	(Mpa)	(cm)	(cm)
上面层(AC-16C)	细粒式改性沥青混凝土	4.5	1400	17.1	17.1
下面层(AC-20C)	中粒式改性沥青混凝土	5.5	1200	19.6	36.7
上基层(ATB-25)	密级配沥青稳定碎石	16	1100	55.1	91.8
下基层	级配碎石	16	400	36.8	128.5
底基层	3%水泥稳定碎石	30	1500	116.9	245.5
路基	—	—	40/50/60/70		

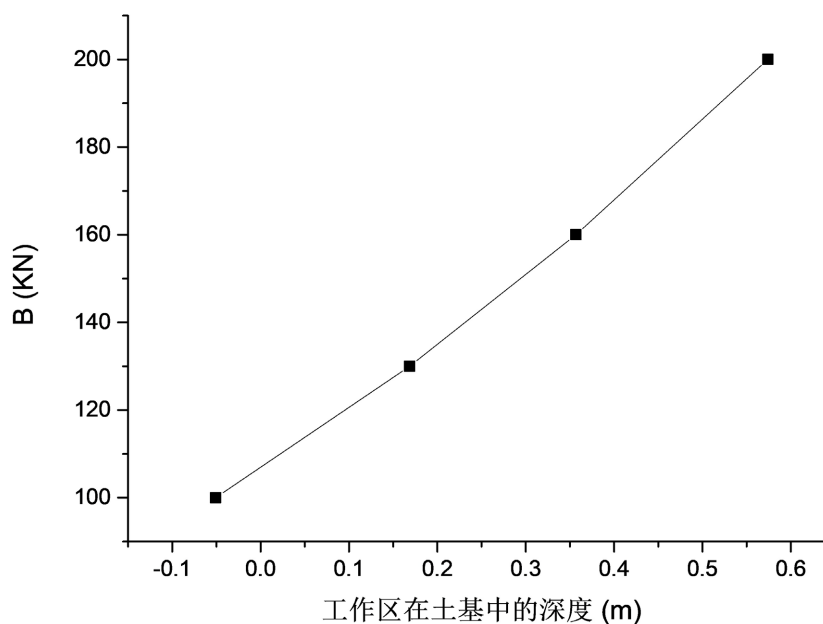


Figure 1. Depth of roadbed working area under different axle loads based on Boussinisk
图 1. 基于布辛尼斯克的不同轴载下的路基工作区深度

根据式(4),以路基回弹模量 50 MPa 为例,路面各结构累计当量厚度结果值见表 3,根据式(3)~式(4),路基工作区深度见图 1。

根据图 1,工作区深度近似线性增加。表明轴载越大,车轴的影响深度越深。因此,伴随交通荷载的逐步增加,路基工作区深度不是固定的,与规范的 80 cm 路床深度不符,说明布辛尼斯克公式的解法偏小。

4.2. 有限元法

基于弹性层状体系,建立 ABAQUS 有限元计算模型,典型工况应力云图如图 2 所示,分析不同轴载作用对高速公路倒装结构的路基工作区深度影响,不同回弹模量作用下的路基工作区深度如图 3 所示,在四种轴载作用下,附加应力与自重应力的比值在不同路基深度的结果如图 4 所示。

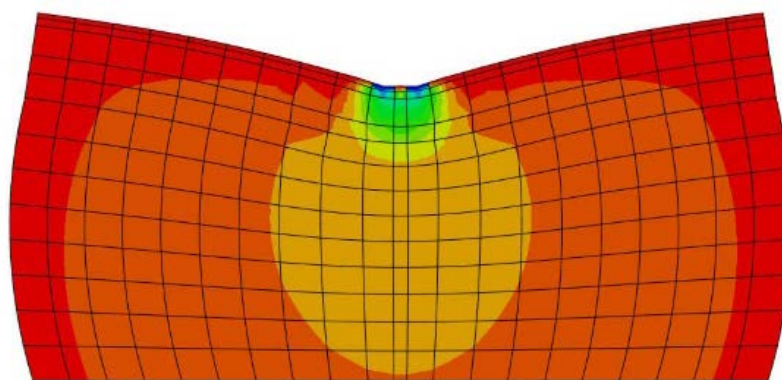


Figure 2. Typical working condition stress cloud map
图 2. 典型工况应力云图

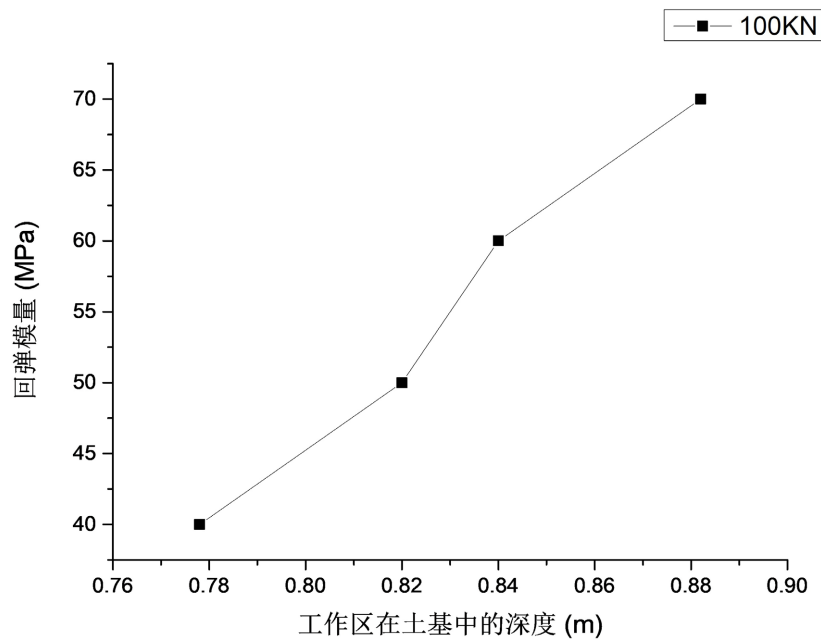


Figure 3. Depth of roadbed working area under different rebound moduli
 图 3. 不同回弹模量作用下的路基工作区深度

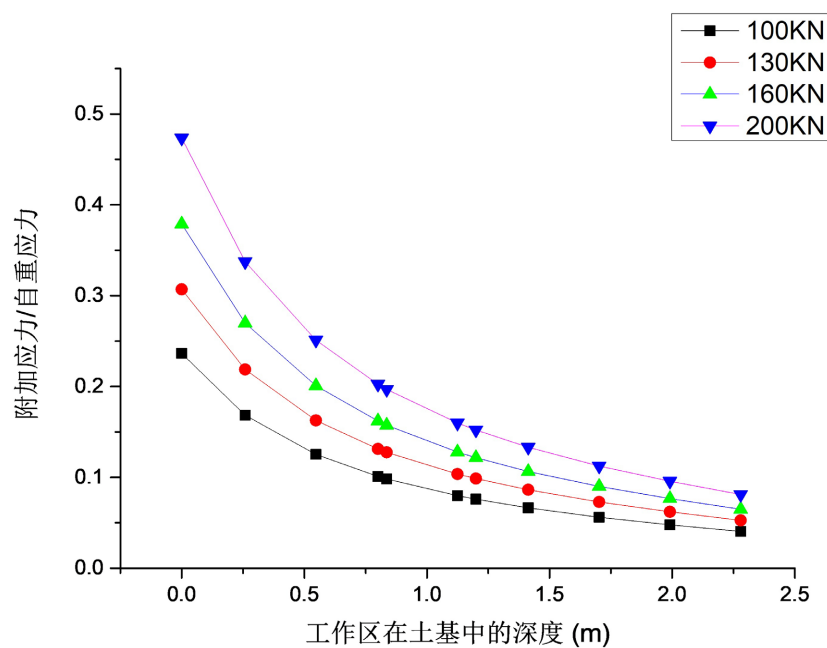


Figure 4. Depth of roadbed working area under different axle loads
 图 4. 不同轴载作用下的路基工作区深度

由图 3 可见, 在相同轴重作用下, 路基工作区深度与路基模量呈现正向增长, 以标准轴载 BZZ100 为例, 当路基模量由 40 MPa 增大到 70 MPa 时, 路基工作区深度增大了 12.8%, 其增大幅度比较平缓。这是因为车辆轴载一定时, 路基模量越大, 其应力扩散能力越强, 传递得越远。

由图 4 可见, 以路基回弹模量 50 MPa 为例, 当路基回弹模量相同时, 与标准轴载作用相比, 超载时

的路基工作区深度具有较大幅度的增加,轴载从 100 KN 逐渐增加到 200 KN 时,两者差值在 0.31~0.89 m 的范围内,增幅为 36.4%~104.7%。这是因为路基回弹模量一定时,荷载越大,附加应力越大,影响深度越远。

以上分析说明,轴载和路基模量对路基工作区深度均具有较大的影响,尤其是轴载的影响更为显著,在公路路基设计,尤其是高速公路倒装结构的路基工作区深度时,要考虑公路所要承受的交通荷载,根据其轴载合理确定路基工作区深度,确保路基工作区稳定。

结合某高速公路检测数据,对于超载路段,出现明显裂缝、沉陷等病害,并且随着荷载的增大,病害越发严重,说明荷载的影响深度逐渐加大,未经处理的路基强度不足,从而导致路基产生累计塑性变形,破坏道路稳定性,进而反射到路面产生病害。

5. 结论

1) 对于标准轴载,现行规范给出的路基工作区深度范围是合理的。但对于重载交通,过大的轴载会使得路基工作区深度显著增大,现行规范给出的范围已经不能适应高速公路倒装结构的要求。

2) 轴载和路基模量对路基工作区深度均具有较大的影响。在同一轴重作用下,路基工作区深度随路基模量的增长而增大;当路基模量相同时,超载时的路基工作区深度具有极大幅度的增长。

3) 在不同轴载作用下,路基工作区深度随着轴载增加而显著增加,轴载从 100 KN 增长到 200 KN 时,路基工作区深度变化幅度达 0.31~0.89 m,增幅为 36.4%~104.7%。

参考文献

- [1] 中交第二公路勘察设计研究院. 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] 唐洪军, 宋伟. 典型沥青路面结构路基工作区深度分析[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(1): 115-118.
- [3] 吕高恒. 路基换填工作区影响深度计算方法研究[J]. 交通世界, 2023(30): 91-94.
- [4] 谢贤举, 刘德功, 尹利华. 考虑路面结构影响的低路堤动应力响应分析[J]. 公路工程, 2024, 49(3): 49-57.
- [5] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 40-41.
- [6] 中华人民共和国交通部. JTG D50-2017. 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.