

# 行车荷载作用下软弱黄土路基的竖向应力特征

谢经保<sup>1</sup>, 凌建明<sup>2</sup>, 马德文<sup>3</sup>, 李 宏<sup>3</sup>

(1. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 山西省祁临高速公路有限责任公司, 山西省 030904)

**摘要:**采用线弹性体系理论和 BISAR 程序, 计算分析了行车荷载下软弱黄土路基顶面和路基土中的竖向应力的变化规律, 揭示了其分布特征, 为软弱黄土地基公路工程的路基、路面设计提供了理论支持和决策依据。

**关键词:**行车荷载; 软弱黄土; 路基; 竖向应力; 分布特征

**中图分类号:** U416.169 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2006)03-0087-04

## 0 前言

山西省祁临高速公路工程全线有 40 多公里的路段分布有软弱黄土, 厚度从几米到二十几米不等, 部分路段为挖方路基, 地下水距路表仅 0.5m, 天然地基土含水量高, 呈现饱和或近饱和状态, 属于典型的饱和黄土。饱和黄土虽然湿陷性已经退化, 但在欠压实密时, 孔隙比大, 含水量高, 往往处于软塑到流塑状态, 地基承载力低, 压缩变形大, 具有显著的触变性和压缩性, 是一种典型的软弱地基。

行车荷载作用下湿软路基的残余累积变形是低路堤路段的主要工程病害, 而路基土的竖向附加应力是引起路基残余变形的一个主要原因<sup>[1]</sup>, 因此, 研究行车荷载作用下软弱黄土路基的竖向应力分布特征, 对于解决软弱黄土地基公路低路堤工程的工程病害具有重要的理论意义和实用价值。

## 1 基本参数与假定

祁临高速公路较长路段穿过广胜寺泉水、汾河水、七一渠水以及龙洞泉水等灌溉区形成的软弱黄土地基, 属冲积或洪积平原, 表层以 Q<sub>3</sub>、Q<sub>4</sub> 层黄土为主, 厚度从几米到二十几米不等, 地下水埋藏较浅, 仅为 0.5~3.5m, 处于软塑或流塑状态。祁临高速公路地基土的物理参数与标准路基路面结构如表 1、表 2 所示。

表 1 软弱黄土物理力学指标

层号	土层名称	含水量 W (%)	重度 γ (kN/m <sup>3</sup> )	孔隙比 e	液限 w <sub>L</sub> (%)	塑限 w <sub>P</sub> (%)	塑性指数 I <sub>p</sub>	液性指数 I <sub>L</sub>	内摩擦角 φ (°)	粘聚力 c (kPa)	压缩系数 α <sub>1-2</sub>	压缩模量 E <sub>s-2</sub> (MPa)	承载力 E <sub>s-2</sub> (kPa)
Q <sub>3</sub>	黄土状粘土	≤4	26.6	18.1	0.90	26.1	16.8	9.3	1.05	0.38	4.9	85	
Q <sub>4</sub>	流塑亚粘土	14~30	25.2	18.7	0.81	25.8	16.2	10.5	1.21	23	14.2	0.39	4.3 80~170

表 2 祁临高速公路标准路基、路面结构设计参数

项目	结 构 层				路基
	沥青混凝土面层	水泥稳定级配碎石基层	水泥石灰稳定土基层	路基	
E(MPa)	1200	1600	600	30	
泊松比 μ	0.3	0.3	0.3	0.35	
密度 γ (g/cm <sup>3</sup> )	2.0	2.0	2.0	1.8	
厚度 (cm)	15	32	28		

路基、路面结构是一种多层体系, 本文采用双圆均布垂直荷载作用下的多层弹性体系理论和壳牌公司编制的 BISAR 3.0 程序, 计算分析行车荷载作用下路基顶面及路基土中的

竖向应力; 轮载作用模式取文献[3]所规定的“标准轴载计算参数”; 层间结合条件视为完全结合(层间结合条件影响分析时除外)。分析模型如图 1 所示, 其基本假定如下:

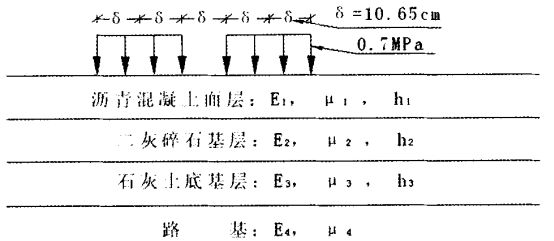


图 1 竖向应力分析模型

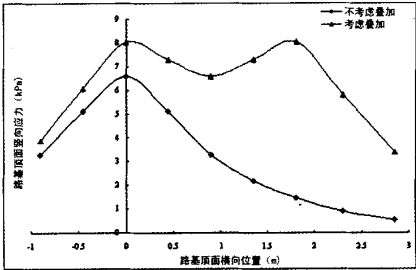
- (1) 各层都是由匀质、各向同性的线弹性材料组成, 其弹性模量和泊松比为 E 和 μ, 材料的力学性能服从虎克定律;
- (2) 假定路基在水平方向和向下的竖直深度方向均为无限, 其上的路面各层厚度均为有限, 但水平方向仍为无限;
- (3) 假定作用在路面上层表面的行车荷载为轴对称垂直荷载, 荷载与路面表面接触面形状呈圆形, 接触面上的压力呈均匀分布, 同时在路基无限深处及水平无限远处应力和应变都是零;
- (4) 每一层之间的接触面假定为完全连续的(具有充分的摩阻力)、部分连续或完全光滑(没有摩阻力)的。

## 2 行车荷载作用下路基顶面的竖向应力特征

路基顶面的竖向应力决定了行车荷载作用下软弱黄土路基竖向应力的极值, 研究其分布特征及其敏感因子具有重要的意义, 可以为工程决策提供重要的理论依据。

### 2.1 路基顶面竖向应力的横向分布特征

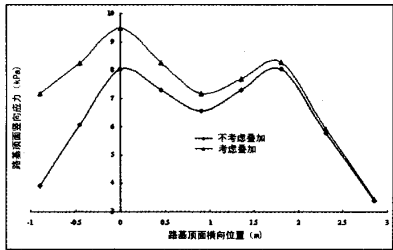
以祁临高速公路的标准路基、路面结构为基准, 通过计算分析不同轮载数量、轴载大小、层间结合条件、路基模量以及路面各结构层的厚度与模量等参数条件下的路基顶面竖向应力(图 2~7), 可以掌握其横向分布规律, 揭示行车荷载作用下的软弱黄土路基的应力分布特征。



a). 相同车道

收稿日期: 2006-04-07

作者简介: 谢经保 (1975-), 男, 山东菏泽人, 工学硕士, 助理工程师, 从事路基、路面工程设计工作。



b).相邻车道

图 2 轮载数量对路基顶面竖向应力的影响

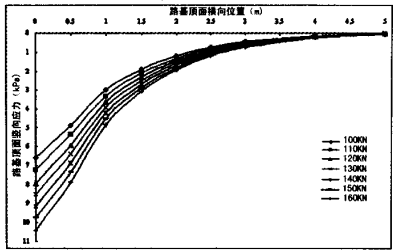


图 3 轴载大小对路基顶面竖向应力的影响

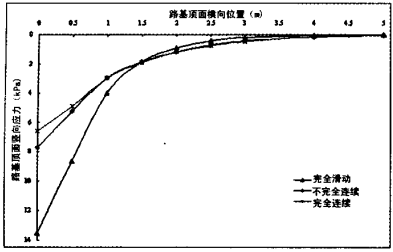
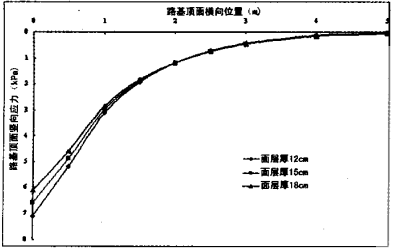
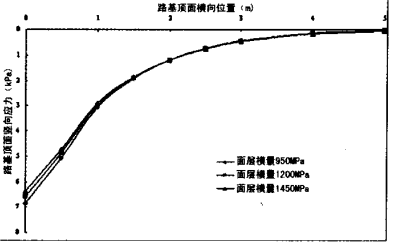


图 4 层间结合条件对路基顶面竖向应力的影响

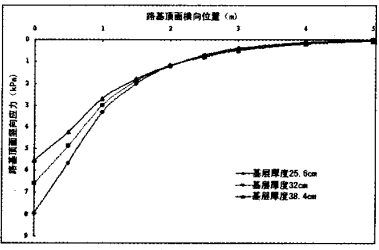


a.面层厚度

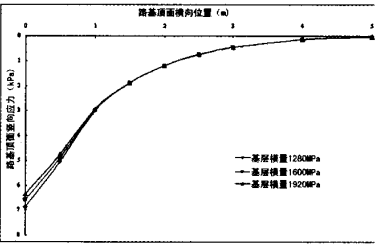


b.面层模量

图 5 路面面层对路基顶面竖向应力的影响



a.基层厚度



b.基层模量

图 6 路面基层对路基顶面竖向应力的影响

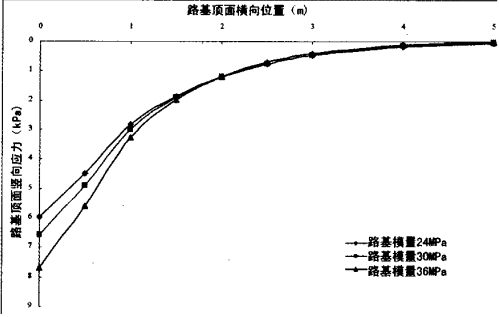


图 7 路基回弹模量对路基顶面竖向应力的影响

注：1.图中所示附加应力为单轮组行车荷载的计算结果(计算轮载数量影响时除外)；  
2.坐标原点位于轮组作用中心处(计算轮载数量影响时，取距车边缘道 0.9m 处<sup>[3]</sup>)。

分析图 2~7 所示的路基顶面竖向应力的横向分布特征，可以得到以下结论：

(1)相同车道轮载的叠加，对路基顶面竖向附加应力的横向分布影响较大，使 0~2m 的横向范围内路基顶面竖向附加应力的分布趋于均匀；相邻车道轮载的叠加，对离它较近的位置影响较大，对离它较远的位置影响较小。

(2)6 种重车(轴载分别为 110~160kN，计算参数如表 3 所示)作用下的路基顶面竖向应力计算结果表明：路基顶面竖向附加应力与轴载密切相关，轴载越大，路基顶面竖向附加应力也越大，而且竖向附加应力最大值与轴载大致呈线性关系，轴载 160kN 的轮载的路基顶面竖向应力是轴载 100kN 的 1.58 倍。

表 3 重车轴载计算参数

轴载(kN)	110	120	130	140	150	160
压力(MPa)	0.74	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85
作用圆半径(cm)	10.88	11.17	11.45	11.73	11.99	12.26

(3)取完全连续、不完全连续(摩擦系数为 0.5)和完全滑动(竖向应力和竖向位移连续，剪切应力和径向位移不连续)3 种层间结合状况条件，路基顶面竖向应力具有较大的差异，表现在：层间完

全滑动和完全连续状况下路基顶面竖向附加应力最大值相差很大,前者达到 13.5kPa,为后者的 2 倍多;层间不完全连续与层间完全连续两种条件下路基顶面竖向附加应力相差不大。

(4)随着面层厚度和回弹模量的增加,标准轴载作用下路基顶面竖向附加应力随之减小;在距轴载中心径向距离 0~4m 的范围内,竖向附加应力迅速减小,超过 4m 时竖向附加应力的影响主要集中在距轴载中心径向距离 0~1.8m 的范围内,超出这一范围影响很小。

(5)随着基层厚度和模量的增加,标准轴载作用下路基顶面竖向附加应力显著减小,基层厚度由 25.6cm 增加到 38.4cm,路基顶面竖向附加应力最大值减小 30.4%;与面层相似,其影响也主要集中在距轴载中心径向距离 0~1.8m 的范围内。

(6)随着路基回弹模量的增加,标准轴载作用下路基顶面竖向附加应力随之增加。

(7)对于不同路基、路面结构和轴载大小,行车荷载作用下路基顶面竖向附加应力的空间变化趋势大致相同。

2.2 路基顶面竖向应力的敏感因子分析

分析、掌握路基顶面竖向应力对参数条件改变的敏感性和变化规律,是控制行车荷载作用下路基顶面竖向应力的必要基础工作,并可为工程决策提供理论依据和技术指导。

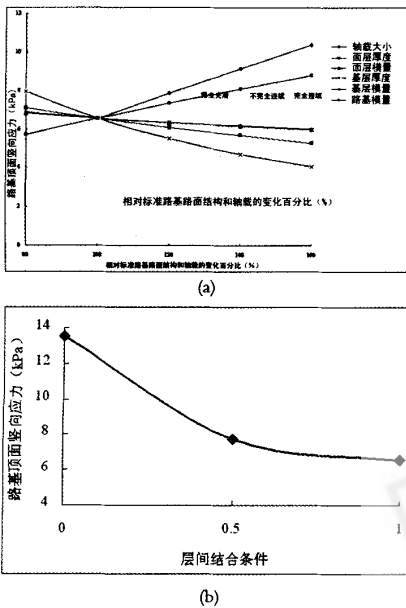


图 8 路基顶面轮组中心处竖向应力随不同参数条件的变化曲线

以标准轴载和圀临高速标准路基、路面结构为基准,按照一定的百分比改变相关参数,计算分析有代表性的轮组中心处路基顶面的竖向应力(图 8),掌握其发展变化规律。图 8 表明:

(1)路基顶面竖向应力对轴载大小和基层厚度的反应最为灵敏,面层厚度和基层模量次之,面层模量和基层模量最不灵敏。

(2)层间结合条件对路基顶面竖向应力影响显著,完全光滑条件下的竖向应力是完全连续的 2 倍多,因此,施工时,应尽量避免层间出现完全滑动状况。

(3)面层模量和基层模量所引起的路基顶面轮组中心处

的竖向应力变化趋势基本一致,且影响程度弱,说明依靠改变路面结构层的模量来控制路基顶面竖向应力的效果有限。

(4)结构设计上,可以通过提高基层厚度和路基模量来有效控制路基顶面的竖向应力。

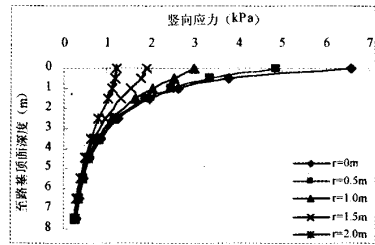
3 路基土的竖向应力特征

行车荷载作用下湿软路基的残余变形不仅受路基顶面竖向应力的影响,而且与路基土中竖向应力密切相关<sup>[9]</sup>。利用上述分析理论与方法,本文进一步研究了行车荷载作用下路基土中的竖向应力特征及其敏感因子。

3.1 路基土竖向应力的分布特征

以圀临高速公路标准路基、路面结构为研究对象,行车荷载取标准轴载,则路基土中的竖向应力如图 9 所示。图 9 表明:

(1)路基土中竖向应力沿路基深度呈非线性减小,随着深度的增加,减小的趋势越来越平缓。



注:图中 r 为计算点距轴载中心的径向距离

图 9 路基土中竖向应力分布曲线

(2)相同路基深度处,路基土中的竖向附加应力随着距轮载中心水平径向距离的增大而减小,且其减小幅度越来越大。

(3)距路基顶面 5m 以下,不同径向距离的竖向应力曲线基本重合;轮组中心处深度 5m 处竖向应力的值约为路基顶面竖向应力的 7% 左右,因此,标准轴载作用下路基土中竖向应力的影响范围可取为 5m。

3.2 路基土竖向应力的敏感因子分析

2.2 节中分析表明,路基、路面结构中对路基顶面竖向附加应力影响最大的是基层厚度和路基模量,而路基土竖向应力与路基顶面竖向应力具有较好的相关性,因此,本节主要研究基层厚度和路基模量对轮载中心下路基土竖向附加应力的影响。

(1)基层厚度对路基土竖向附加应力的影响

为分析基层厚度对路基土中附加应力的影响,将表 2 中的基层厚度分别取 25.6、32、38.4cm,其余参数不变,行车荷载采用标准轴载,利用 BISAR 程序计算轮组中心下路基土中的竖向应力,计算结果如图 10 所示。

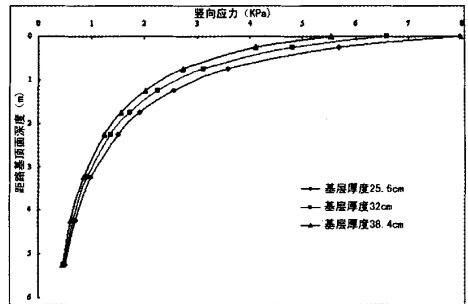


图 10 基层厚度对路基土竖向应力的影响

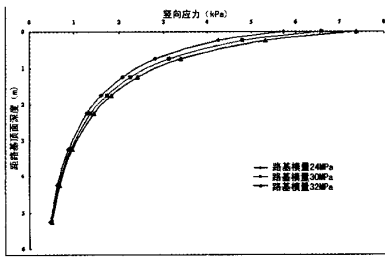


图 11 路基模量对路基土竖向应力的影响

由图可见,随着基层厚度的增加,路基土中竖向附加应力随之减小;在 0~1.5m 的范围内,竖向应力值的减小比较明显,超出这一范围,减小的趋势不明显。根据上述分析,为减小行车荷载作用下路基土中的竖向附加应力,可适当增加基层厚度。

(2)路基回弹模量对路基土竖向附加应力的影响

采用祁临高速公路标准路面结构,路基回弹模量分别取 24, 30, 36MPa, 分析路基回弹模量对路基土竖向附加应力的影响,结果如图 11。

由图 11 可见,随着路基回弹模量的增加,标准轴载作用下路基土中的竖向应力随之增加,且分布趋势大致相同;路基回弹模量对路基土中竖向附加应力的主要影响深度为 0~1.5m。

4 现场测试与分析

为检验多层弹性体系理论的正确性,笔者选取了某城市外环线进行了现场测试。现场选择了两个测试断面,按照车道划分将测点布于车道边缘 0.9m 处,深度分别位于路基顶面和路基顶面以下 80cm,测试了行车荷载下路基顶面及路基土中的竖向应力。测点的平面布置见图 12。

路基顶面及路基土中竖向应力的现场测试结果如图 13 所示。

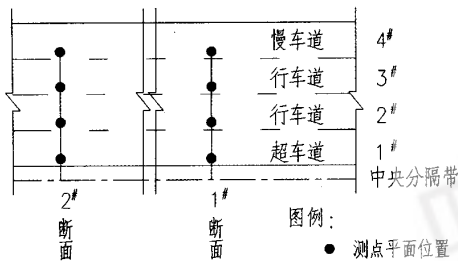


图 12 测点平面布置示意图

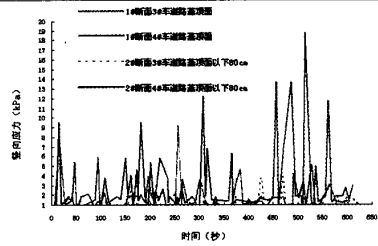


图 13 行车荷载作用下路基顶面及路基土中竖向应力历时曲线

由图 13 可以看出,行车荷载作用下路基顶面的竖向应力一般在 5~10kPa 之间变化,路基土中的竖向应力均小于路基顶面的竖向应力;轴重对竖向应力的影响较大,最大可达近 19kPa,与理论分析结果较为一致,表明采用多层弹性体系理论计算行车荷载作用下路基顶面及路基土中的竖向应力是可行的,本文的研究成果具有较强的可靠性和实用性。

5 结论

以祁临高速典型路基路面结构为研究对象,采用多层弹性体系理论,计算分析了行车荷载作用下路基顶面及路基土中的竖向应力,并在实体工程中得到了验证,结果表明:

- (1)典型高等级沥青路面结构条件下,标准轴载作用引起的轮组中心处路基顶面竖向应力水平不高,一般在 5~8kPa 之间。
- (2)路基顶面竖向应力影响范围为距轮组中心径向距离的 0~4m,主要分布范围集中在 0~1.8m。
- (3)对于不同路基、路面结构和轴载大小,行车荷载作用下路基顶面竖向附加应力的空间变化趋势和应力扩散角大致相同。
- (4)行车荷载作用下的路基竖向应力对基层厚度、路基模量以及轴载大小的反应最为灵敏;层间结合条件对路基顶面竖向应力影响较大,施工过程中应采取必要的技术措施,以防止层间滑动造成较大的路基竖向应力;
- (5)路基土中的竖向应力随路基、路面结构参数的变化规律与路基顶面大致相同,竖向附加应力的主要影响深度为 0~1.5m,为地基处理的深度范围提供了依据。
- (6)现场测试分析表明,采用多层弹性体系理论计算行车荷载作用下路基顶面及路基土中的竖向应力,理论计算结果与现场测试结果吻合较好,因此,本文的研究成果具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 凌建明,等. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. 同济大学学报, 2002, 30(11): 1315-1320.
- [2] 姚祖康. 路面(第二版)[M]. 北京:人民交通出版社,1998.9.
- [3] JTJ 014-97 中华人民共和国行业标准公路沥青路面设计规范. 北京:人民交通出版社,1997.

