

水泥混凝土路面路基应力水平分析

林小平^{1,2}, 凌建明³, 官盛飞³, 李 聪³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 交通运输部科学研究院, 北京 100029;
3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 通过系统的参数分析, 探明了影响路基应力的主要因素, 并确定了相应参数在模型中的取值, 以此建立三维有限元分析模型. 采用该模型对典型水泥混凝土路面结构的荷载应力进行计算, 分析了轴重与轴型对路基应力计算深度和荷载应力分布的影响. 结果表明, 随着轴重和轴数的增加, 路基应力计算深度不断扩展, 该范围内的应力级位也不断提高; 多轴荷载应力的叠加效应在路基深层愈加显著. 通过叠加自重应力获得路基中的应力状态, 经统计分析表明, 路基主应力覆盖范围为 $30 \text{ kPa} < \sigma_1 < 90 \text{ kPa}$, $10 \text{ kPa} < \sigma_3 < 40 \text{ kPa}$, 主应力比的变化范围为 $1.9 \sim 6.0$. 当轴载增加 1 倍时, 路基中的应力级位约提高 10 kPa . 这将对路基性能造成显著影响, 因而在路面结构设计中应予以考虑.

关键词: 混凝土路面; 应力水平; 有限元; 路基

中图分类号: U 416.1

文献标识码: A

overlapped in the deep-seated subgrade. The stress state of subgrade was calculated by adding the at-rest pressure to the load stress which was computed by finite element analysis. The statistical result of stress state illustrates that the maximum and minimum principal stress range in $30 \sim 70 \text{ kPa}$ and $10 \sim 40 \text{ kPa}$ respectively, and the principal stress ration is fluctuated between 1.9 and 6.0. The magnitude of stress in subgrade is increased by 10 kPa when the applied load enhances from 100 kN to 200 kN , which impacts the mechanical behavior of subgrade dramatically. Thus, it is needed to consider the stress-dependent behavior of subgrade in pavement design.

Key words: concrete pavement; stress level; finite element analysis; subgrade

Analysis on Stress Level of Subgrade Under Cement Concrete Pavement

LIN Xiaoping^{1,2}, LING Jianming³, GUAN Shengfei³, LI Cong³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Factors affecting the stress level of subgrade were investigated through systemic parameter analysis, and then a 3D finite element model was established and used for load stress analysis. For typical cement concrete pavement structure, the stress of subgrade was calculated under all kinds of gear weights and configurations. Analysis result indicates that the subgrade workaround is deepened and the stress level in the region is raised with the increasing of the gear weight and the number of axis. The stress induced by multi-axis was

路基是混凝土面层和行车荷载的支承体系. 由于面层混凝土的刚度大、板体性强, 因而具有良好的扩散荷载能力, 一般认为传到路基顶面的荷载应力很小^[1].

但是, 随着交通运输业和汽车工业的迅速发展, 车辆轴重不断增大. 而与此同时, 随着经济的发展, 公路运输车辆超载现象越来越普遍, 超载量不断加大, 由此导致路面所承受的车辆荷载不断增大, 从而引起路基应力水平的提高、分布深度的扩大.

由于路基土的力学性能具有强烈的应力依赖性, 随着应力状况的改变, 其性能(回弹模量、压缩变形等)也发生相应变化. 然而在现行相关设计规范中, 对于路基的应力状况及由此产生的影响缺乏充分的认识. 如在路基设计中, 不考虑公路与交通荷载等级, 而将路基工作区深度统一取为 0.8 m ^[2]; 在路面结构设计中, 采用以静态承载板法测定的回弹模

收稿日期: 2009-01-13

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目(200731822301)

作者简介: 林小平(1981—), 男, 工学博士, 主要研究方向为公路路基与机场工程. E-mail: xplin2005@yahoo.com.cn

凌建明(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为路基路面及机场工程. E-mail: jmling01@yahoo.com.cn

量来表征路基的抗变形性能,忽视路基应力状况的影响^[3-4].

为更真实地表征路基抗变形性能,在路面结构设计中倾向于采用动态回弹模量 M_R ^[5]. 在室内采用动三轴试验来测定该指标时,需要根据路基应力状况制定相应的加载应力组合. 而另一方面,在进行路基变形分析时,需要掌握荷载应力在路基中的分布状况,以确定路基应力计算深度. 因此,需要针对当前水泥混凝土路面的典型结构形式和交通荷载条件,深入分析路基的应力状况,以确定其应力计算深度,并制定相应的动态回弹模量应力加载序列.

笔者在对路基荷载应力各影响因素深入分析的基础上,建立了相应的三维有限元计算模型;采用该模型对水泥混凝土路面典型结构进行荷载应力计算,分析了轴重、轴型对路基中荷载应力及应力计算深度的影响;通过对计算结果的统计分析,获得了水泥混凝土路面典型结构下路基的应力分布范围和相应的组合,为动态回弹模量测试应力序列的制定提供了参考.

1 三维有限元分析模型

水泥混凝土路面由于接缝的存在而破坏了其面层混凝土的整体性. 当荷载作用于板的不同位置时,产生的荷载应力也有一定的差异. 考虑到结构的非对称性,在研究中采用三维有限元方法进行分析.

1.1 材料模型与荷载模型

(1) 材料本构模型. 水泥混凝土路面是一种多层结构体系. 各结构层所用材料包括水泥混凝土、无机结合料稳定类材料、沥青稳定类材料、级配粒料、土等. 这些材料虽然在应力-应变特性上存在较大的差异,但当应力级位较低时,它们都表现出一定的弹性性质. 因而笔者在分析中,对各结构层材料均采用线弹性模型来模拟其力学行为.

(2) 荷载模型. 按轴型和轴数的不同,可将车辆荷载分为单轴-单轮、单轴-双轮、双轴-双轮和三轴-双轮4种基本类型. 载重卡车的双轮中心轮距变化在25~34 cm之间、轮距为165~186 cm、轴距为112~140 cm. 根据我国主要载重卡车的情况和保守原则(路面结构不利),4种基本类型荷载图式如图1所示^[6]. 然而由于我国采用单轴双轮100 kN作为路面结构厚度设计的标准轴载,因此,在本文研究中对单轴-单轮荷载形式不予考虑.

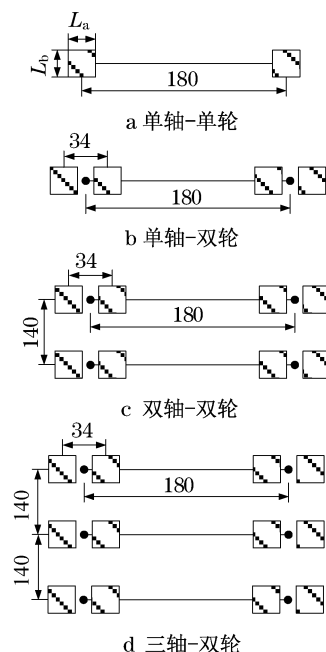


图1 车辆荷载图式(单位:cm)

Fig.1 Typical vehicle load sketch (unit:cm)

轮胎接地形状采用矩形,其宽度取22 cm和24 cm,轮胎接地压力与轮重和内压的关系如式(1)所示^[6-7]:

$$p = 0.004 2P + 0.29 p_i + 0.145 \quad (1)$$

式中: p 为轮胎接地压力,MPa; P 为单轴双轮重,kN; p_i 为轮胎内压,MPa.

1.2 模型尺寸

(1) 面层尺寸. 一般路面板横向尺寸为3.50~4.50 m、纵向尺寸为4.50~5.50 m,常采用的平面尺寸布置有3.50 m×4.50 m,3.75 m×5.00 m,4.00 m×5.00 m和4.50 m×5.50 m等几种^[8]. 在本文研究中,统一将面板尺寸取为4.00 m×5.00 m.

(2) 基层尺寸. 混凝土面层下设置刚性或半刚性基层. 由于基层在纵向和横向上往往都较面层宽,这不仅会影响到面层板的受力状况,也将对基层下路基的受力状况造成一定影响^[9]. 为此,在建立有限元模型之前,就基层超宽对路基荷载应力的影响进行分析,结果表明,当基层纵向超宽大于1.00 m、横向超宽大于0.75 m时,路基荷载应力趋于收敛. 为此,在最终的分析模型中,将基层平面尺寸取为5.50 m×7.00 m(双向超宽).

(3) 路基尺寸. Ioannides等采用三维有限元程序GEOSYS对水泥混凝土路面结构进行分析,结果表明,为保证计算结果的收敛,路基的平面尺寸应为

$7l \sim 10l$, 而深度则至少需要 $10l$, 其中 l 为混凝土板的相对刚度半径^[10]. 考虑到水泥混凝土路面地基板相对刚度半径通常在 $0.40 \sim 1.20$ m 范围, 根据这一结论, 路基的平面尺寸应该为 $2.80 \sim 12.00$ m, 而深度应不小于 4.00 m. 而在另一方面, 为满足基层超宽的要求, 路基的平面尺寸不小于 $7.00 \text{ m} \times 5.50 \text{ m}$. 综合上述要求, 在计算模型中将路基尺寸确定为 $7.00 \text{ m} \times 7.00 \text{ m} \times 7.00 \text{ m}$.

最终确立的有限元分析模型几何尺寸如图2所示.

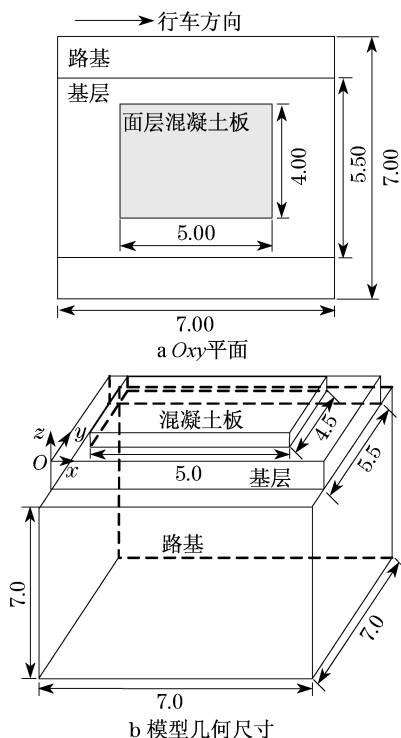


图2 有限元分析模型几何尺寸(单位:m)

Fig.2 Geometrical dimension of finite element model (unit: m)

1.3 边界条件与荷位选取

对于路面, 不考虑混凝土板接缝间的传荷作用, 但考虑其他路面板及硬路肩的水平约束作用, 在计算路面板四周边界时设法向位移约束, 在基层和路基侧面设置法向位移约束, 此外, 在路基底面也同样设置位移为零的法向约束.

路面是一种多层结构, 由于各结构层所采用的材料不同, 导致层间的结合条件也往往不同. 在已有的分析中, 不同学者在层间界面处理方法上存在较大差异. 为此, 笔者在建立分析模型之前, 采用正交试验设计法来分析不同界面接触条件对路基应力计算结果的影响. 在分析中, 将界面条件分别设置为连

续、光滑和部分连续, 将界面摩擦系数 μ 分别设置为 $0, 1, 10, 100$ 和 ∞ , 以此代表完全光滑、部分连续和完全连续. 方差分析结果表明, 仅有面层与基层之间的接触状态对路基应力具有显著影响. 因此, 在计算模型中, 将路基-基层界面设置为完全连续, 而以库伦摩擦模型来表征面层-基层界面特性. 对于界面摩擦系数 μ , 在我国水泥路面温度应力分析中, 一般取值在 $1.0 \sim 2.0$ 的范围内^[1, 11-12]. 通过有限元的进一步分析发现, 当混凝土板与基层之间的摩擦系数在 $0 \sim 2.0$ 范围内变化时, 对路基荷载响应量的影响很小, 如图3所示. 因此, 在本文研究中将这一参数取为 1.5 .

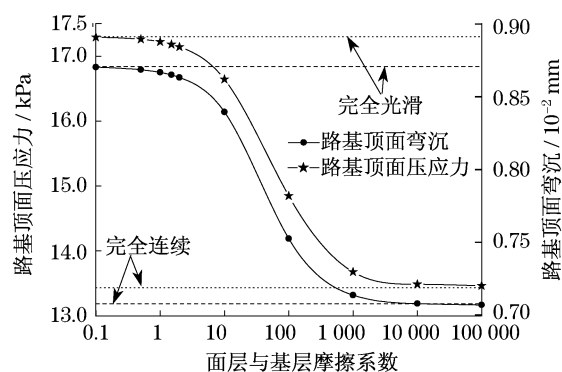


图3 混凝土板与基层摩擦系数对路基荷载响应的影响

Fig.3 Effect of friction coefficient between slab and base

对于水泥混凝土路面, 典型的分析荷位有板中、板边中点和板角. 对于同一结构模型, 当荷载作用在板上不同位置时, 路基的荷载响应如图4所示. 结果表明, 当荷载作用于板角处时, 路基中的荷载响应量最大. 因此, 在本研究中均采用板角荷位进行分析.

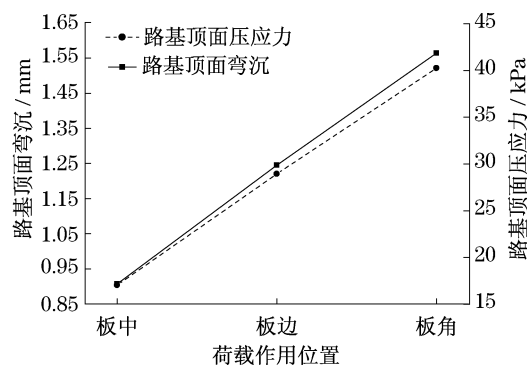


图4 荷载作用位置对路基荷载响应的影响

Fig.4 Effect of loading position on subgrade

1.4 接缝传荷的影响

混凝土面层板的接缝通过集料嵌锁、传力杆等机制而具有一定的传荷能力. 为分析接缝传荷能力对板下路基受力状况的影响, 以弹簧单元来模拟传

荷机制,采用文献[10]中提出的“贡献面积法”进行接缝刚度分配.在计算中,将单位长度接缝刚度 D_L 依次取为 $0, 1 \times 10^1, 1 \times 10^2, 1 \times 10^3, 1 \times 10^4$ 和 1×10^5 MPa,计算结果如图5所示.

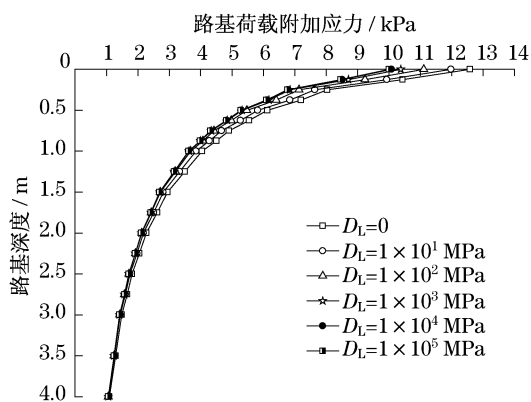


图5 接缝刚度对路基荷载响应的影响

Fig.5 Effect of joint stiffness on subgrade

可见,接缝传荷能力对路基荷载响应的影响较小.与无传荷能力情况相比,接缝刚度变化引起路基顶面压应力和弯沉降低的幅度分别为20.35%和10.70%;而在路基深度方向上,这种差异愈加微弱.由此可以认为,在分析路基力学响应时,可以忽略接缝传荷能力的影响,而仅仅采用单板模型来计算.

2 有限元计算与结果分析

2.1 路基荷载应力分析

为分析不同形式与大小荷载作用下路基中应力的分布状况,选取如表1所示的典型路面结构进行计算.

表1 路面结构参数

Tab.1 Parameters of pavement structure

| 结构层 | 厚度/cm | 模量/MPa | 泊松比 μ | 密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$ |
|-----|-------|--------|-----------|-------------------------------|
| 面层 | 0.22 | 31 000 | 0.15 | 2.4 |
| 基层 | 0.18 | 1 300 | 0.20 | 2.2 |
| 底基层 | 0.15 | 600 | 0.25 | 1.9 |
| 路基 | | 30 | 0.35 | 1.8 |

2.1.1 路基应力计算深度

车辆荷载在路基中引起的附加应力随深度的增加而不断降低,当深度达到一定值后,由于荷载附加应力 σ_z 与路基自重应力 σ_B 的比值很小(0.1~0.2),便可忽略车辆荷载的影响.这一深度即为由车辆荷载引起的路基附加应力分布范围,作为路基应力计算深度.

依据上述定义,采用有限元模型分析不同轴型、轴重作用下的路基应力计算深度.根据轴载调查的结果,单轴轴重主要处于50~250 kN范围^[13-15].由于低于标准轴载的荷载,对路面结构使用寿命影响较小,因此在研究中不予考虑.在本文计算中,选用的单轴轴重分别为100,120,160,200和240 kN;而在轴型影响分析中,将轴重统一取为100 kN.最终的计算结果如表2和表3所示.

表2 单轴不同轴重下水泥混凝土路面
路基应力计算深度

Tab.2 Depth of stress calculation for
different axial loads

| σ_z / σ_B | 车辆轴重/kN | | | | |
|-----------------------|---------|------|------|------|------|
| | 100 | 120 | 160 | 200 | 240 |
| 0.1 | 2.00 | 2.25 | 2.60 | 3.00 | 3.50 |
| 0.2 | 1.25 | 1.38 | 1.75 | 2.00 | 2.25 |

表3 不同轴型作用下水泥混凝土路面
路基应力计算深度

Tab.3 Depth of stress calculation for different
gear configurations

| σ_z / σ_B | 单轴双轮 | 双轴双轮 | 三轴双轮 |
|-----------------------|------|------|------|
| 0.1 | 2.00 | 2.25 | 2.60 |
| 0.2 | 1.25 | 1.38 | 1.75 |

由表3知,轴重对路基应力计算深度的影响十分显著,两者之间近似呈线性增长关系.同时注意到,在标准轴载作用下,路基应力计算深度均大于现行规范中所规定的0.8 m^[2].

在轴重相同的情况下,随着轴数的增加,路基应力计算深度略有增大,导致这一现象的主要原因是多轴荷载应力在路基中的扩散与叠加.

综上所述,在分析水泥混凝土路面路基应力水平时,为满足超载和多轴型荷载工况的要求,路基应力计算深度应不小于3.0 m.因此,在本研究中将这一深度设定为3.0 m.

2.1.2 荷载应力的分布

为分析路基荷载应力沿深度方向的分布规律,选取各工况路面加载板角下路基的压应力值,结果如图6所示.

由计算结果可见,路基中荷载压应力随深度的增加而迅速减小,在路基应力计算区底部,荷载压应力仅为路基顶部压应力的15%~25%.在路基浅层0~1 m范围,荷载压应力的衰减速率非常大,而随着深度的增加,其衰减速率在不断减小.在路基应力计算区以外,荷载应力的变化幅度很小.

由上述计算结果还可进一步看出,轴重与轴型对路基中压应力具有显著影响.不同深度路基的压应力都随着轴重的增大而提高,其中以路基顶面压应力的变化最为显著.由此可见,超载在增大路基应力计算深度的同时,也将显著提高应力计算区内的荷载压应力,并进而改变路基的应力状态与工作性

状.而轴型对路基中压应力分布的影响主要表现在以下 2 个方面:①多轴荷载在整个路基深度范围内产生的压应力均高于单轴荷载;②随着路基深度的增加,由双轴荷载与三轴荷载产生的路基压应力的差异逐渐增大.多轴荷载应力之间的扩散与叠加是造成这一现象的根本原因.

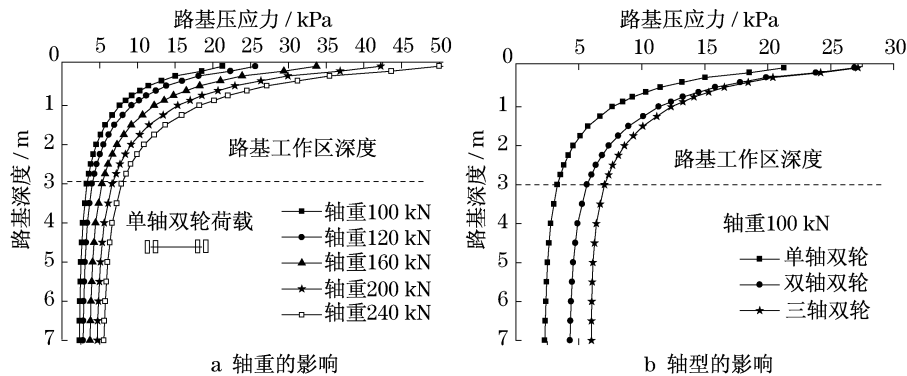


图 6 轴重与轴型对路基压应力竖向分布的影响
Fig.6 Effect of gear weight and configuration on distribution of stress in subgrade

2.2 路面典型结构与材料参数

根据全国各地典型水泥混凝土路面结构及实际路面结构的调研结果,按基层及底基层材料类型将水泥混凝土路面结构划分为以下 4 种类型:①半刚性基层路面(图 7a),基层主要采用水泥或石灰粉煤灰稳定粒料;②贫混凝土或碾压混凝土基层路面(图 7b),基层主要采用贫混凝土或碾压混凝土,其结构介于双层板与半刚性基层水泥混凝土路面之间;③柔性基层路面(图 7c),基层主要采用沥青混凝土、沥青稳定碎石等材料;④排水性基层路面(图 7d),基层主要采用级配粒料或多孔隙水泥、沥青稳定碎石材料.

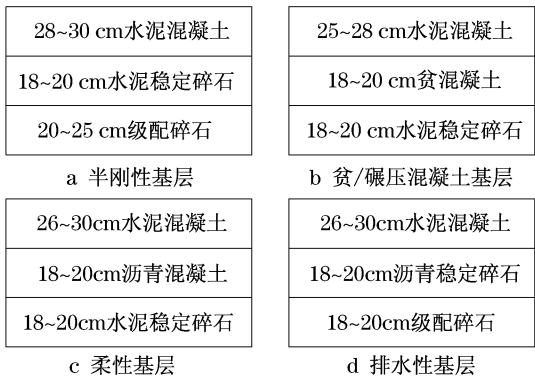


图 7 水泥混凝土路面典型结构
Fig.7 Typical structure of rigid pavements

在本研究中,针对以上 4 类结构,共计选取 168 个典型路面结构形式进行路基荷载应力计算.在计算中,各结构层材料的计算参数主要参考

现行相关规范的推荐值予以确定,具体参数取值如表 4 所示^[3-4].

表 4 材料计算参数取值范围
Tab.4 Range of material parameters for calculation

| 材料类型 | 模量/MPa | 泊松比 μ | 密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$ |
|---------|---------------|-----------|-------------------------------|
| 水泥混凝土 | 30 000~31 000 | 0.15 | 2.4 |
| 贫混凝土 | 15 000~30 000 | 0.15 | 2.3 |
| 无机结合料 | 1 300~1 700 | 0.20 | 2.0~2.3 |
| 稳定类材料 | 1 300~1 700 | 0.20 | 2.0~2.3 |
| 沥青处治类材料 | 600~1 200 | 0.25 | 2.2~2.4 |
| 未处治粒料 | 200~350 | 0.30 | 2.0~2.2 |
| 路基土 | 20~60 | 0.35 | 1.7~2.0 |

2.3 路基应力水平统计

2.3.1 应力计算

路基中的应力由两部分组成,即由土体上覆路面结构自身有效重量而产生的自重应力和车辆荷载作用下产生的荷载应力组成.对于前者,采用式(2)计算:

$$p_0 = h_n \gamma_n + \sum_{i=1}^{n-1} h_i \gamma_i \quad (2)$$

式中: p_0 为上覆结构自重引起的垂直压力; h_n 为计算点距其所在层层顶的距离; γ_n 为所在层的容重; $n-1$ 为计算点位所在层(第 n 层)的上覆结构层层数.

而对于荷载应力,采用有限元模型进行分析.在计算中,分别采用单轴、双轴和三轴静力加载方式,单轴轴重取为 100 kN;此外,用单轴增加轴重为 200

kN 的工况代表车辆超载. 计算中采用的路面结构形式和材料参数如 2.1 节所述.

在获得不同位置自重应力 p_0 和竖向荷载应力 σ_z 后, 路基中某点的应力状态可按式(3)计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_z + p_0 \\ \sigma_3 &= \sigma_{x,y} + k_0(p_0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: σ_1 为计算点处总垂直压力; σ_3 为计算点处的侧向应力, 假定 $\sigma_2 = \sigma_3$; $\sigma_{x,y}$ 为车辆荷载在计算点处

产生的水平向应力, $\sigma_{x,y} = (\sigma_x + \sigma_y)/2$; k_0 为路基土的侧压力系数.

需要说明的是, 由于未考虑剪应力的影响, 所获得的 σ_1 和 σ_3 不是真正意义上的主应力, 但由于剪应力量值较小, 对路基应力水平统计分析影响不大.

2.3.2 应力统计

不同轴载作用下, 典型水泥混凝土路面结构路基中应力水平的统计结果如表 5 所示.

表 5 各种轴载作用下路基应力水平统计

Tab.5 Stress level of subgrade with different axial loads

| 主应力 | 公路等级 | 标准轴载 | | 单轴超载 | | 双轴超载 | | 三轴超载 | |
|---------------------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | 分布范围/ kPa | 累计分布 频率/% | 分布范围/ kPa | 累计分布 频率/% | 分布范围/ kPa | 累计分布 频率/% | 分布范围/ kPa | 累计分布 频率/% |
| σ_1 | 一级 | 30~70 | 99.13 | 40~70 | 91.13 | 50~80 | 94.21 | 60~90 | 92.09 |
| | 二级 | 30~70 | 85.63 | 40~70 | 89.43 | 50~90 | 93.15 | 60~90 | 90.25 |
| σ_3 | 一级 | 10~30 | 67.50 | 10~40 | 94.31 | 10~30 | 76.47 | 10~40 | 94.12 |
| | 二级 | 10~30 | 65.23 | 10~40 | 93.52 | 10~30 | 76.47 | 10~40 | 94.49 |
| σ_1/σ_3 | 一级 | 1.9~4.0 | 90.65 | 1.9~6.0 | 92.48 | 2.0~6.0 | 90.94 | 2.0~6.0 | 94.60 |
| | 二级 | 1.9~4.0 | 88.83 | 1.9~6.0 | 90.62 | 2.0~6.0 | 90.17 | 2.0~6.0 | 94.19 |

在标准轴载作用下, 路基典型应力组合为: $30 \text{ kPa} < \sigma_1 < 40 \text{ kPa}$, $10 \text{ kPa} < \sigma_3 < 20 \text{ kPa}$; 对于单轴超载情况, 典型应力组合则为 $40 \text{ kPa} < \sigma_1 < 50 \text{ kPa}$ 与 $10 \text{ kPa} < \sigma_3 < 20 \text{ kPa}$, $50 \text{ kPa} < \sigma_1 < 60 \text{ kPa}$ 与 $10 \text{ kPa} < \sigma_3 < 20 \text{ kPa}$, 以及 $50 \text{ kPa} < \sigma_1 < 60 \text{ kPa}$ 与 $20 \text{ kPa} < \sigma_3 < 30 \text{ kPa}$. 可见, 当轴载提高 1 倍时, 路基应力大约提高 10 kPa, 这将引起其力学性能发生较大的变动. 因此在路基和路面结构设计中, 应充分考虑超载对路基路面结构产生的影响.

双轴荷载作用下路基典型的应力组合为: $50 \text{ kPa} < \sigma_1 < 60 \text{ kPa}$ 与 $10 \text{ kPa} < \sigma_3 < 20 \text{ kPa}$, $60 \text{ kPa} < \sigma_1 < 70 \text{ kPa}$ 与 $10 \text{ kPa} < \sigma_3 < 20 \text{ kPa}$, $60 \text{ kPa} < \sigma_1 < 70 \text{ kPa}$ 与 $20 \text{ kPa} < \sigma_3 < 30 \text{ kPa}$, 以及 $70 \text{ kPa} < \sigma_1 < 80 \text{ kPa}$ 与 $30 \text{ kPa} < \sigma_3 < 40 \text{ kPa}$. 对于三轴荷载情况, 典型的应力组合为: $60 \text{ kPa} < \sigma_1 < 70 \text{ kPa}$ 与 $10 \text{ kPa} < \sigma_3 < 20 \text{ kPa}$, $60 \text{ kPa} < \sigma_1 < 70 \text{ kPa}$ 与 $20 \text{ kPa} < \sigma_3 < 30 \text{ kPa}$, 以及 $70 \text{ kPa} < \sigma_1 < 80 \text{ kPa}$ 与 $30 \text{ kPa} < \sigma_3 < 40 \text{ kPa}$. 对比不同轴型的计算结果可以看出, 路基应力水平随着轴数增加而不断提高, 其中竖向压应力 σ_1 尤为突出. 这也验证了多轴荷载之间应力叠加效应.

综上所述, 对于典型水泥混凝土路面结构, 在不同轴型和轴重荷载作用下, 路基中主应力覆盖范围大致为: $30 \text{ kPa} < \sigma_1 < 90 \text{ kPa}$, $10 \text{ kPa} < \sigma_3 < 40 \text{ kPa}$. 路基主应力比在 1.9~6.0 之间变化, 且主要集中在 2.0~4.0 范围内. 此外, 公路等级对路基应力水平的

影响不显著, 这为路基回弹模量测试采用单一的加载条件提供了依据.

在确定典型水泥混凝土路面结构下路基的应力水平后, 即可根据降低材料潜在破坏可能性和覆盖路基主应力范围的原则, 制定路基土动态回弹模量测试的应力级位与加载序列.

3 结论

(1) 采用三维有限元方法系统分析了影响水泥混凝土路面路基荷载应力的主要因素, 结果表明, 基层、路基计算尺寸、面层-基层之间的界面特性以及荷载作用位置均对路基荷载应力具有显著影响. 采用正交实验设计方法, 通过系统的参数分析, 确定了路基应力收敛所需的基层与路基尺寸, 并以此建立了相应的分析模型. 在模型中以库伦摩擦模型来反映面层-基层之间的界面特性, 并以板角荷位作为路面应力计算的临界荷位.

(2) 采用所建立的有限元模型, 以某一典型路面结果为例, 对路基应力计算深度和荷载应力分布进行了全面、系统的分析, 结果表明, 随着轴重的增大, 路基应力计算深度近似呈线性增长; 而多轴荷载由于应力扩散与叠加, 将增大路基应力计算深度, 并提高该范围内的应力级位.

(3) 荷载应力在路基浅层(0~1 m)衰减速率非常大, 当到达路基应力计算区底部时, 这一速率降至

较低水平.增大轴重或增加轴数,都将引起路基应力计算区内荷载应力级位的提高.多轴荷载引起的应力叠加效应在路基深部愈加显著.

(4) 应用所建立的三维有限元分析模型对水泥混凝土路面典型结构进行荷载应力计算,并通过叠加自重应力获得路基中的应力状态.经统计分析表明,路基主应力覆盖范围为 $30 \text{ kPa} < \sigma_1 < 90 \text{ kPa}$, $10 \text{ kPa} < \sigma_3 < 40 \text{ kPa}$,主应力比的变化范围为 $1.9 \sim 6.0$.

(5) 应力分析结果表明,轴载的增加将显著提高路基的应力水平.当轴载增加1倍时,路基中的应力级位约提高 10 kPa ,由此将对路基性能、水泥混凝土路面受力状况产生影响.因此在路基与路面结构设计中,有必要根据路基的应力状况来确定其设计参数,以真实反映路基路面实际工作状况,提高设计的准确性.

参考文献:

- [1] 姚祖康.水泥混凝土路面设计[M].合肥:安徽科学技术出版社,1999.
YAO Zukang. Design of cement concrete pavement[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1999.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. JTG D30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D30—2004 Specifications for design of highway subgrades [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. JTG D40—2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2002.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D40—2002 Specifications of cement concrete pavement design for highway [S]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D50—2006 Specifications for design of highway asphalt pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [5] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures-final report [R]. Champaign: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 2004.
- [6] 谈至明,姚祖康,田波.水泥混凝土路面的荷载应力分析[J].公路,2002(8):15.
TAN Zhiming, YAO Zukang, TIAN Bo. Analysis of loading stresses in cement concrete pavements [J]. Highway, 2002 (8): 15.
- [7] 田波,姚祖康,赵队家,等.承受特重车辆作用的水泥混凝土路面应力分析[J].中国公路学报,2000,13(2):16.
TIAN Bo, YAO Zukang, ZHAO Duijia, et al. Stress analysis of cement concrete pavement with heavy loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 16.
- [8] 谈至明,刘伯莹,唐伯明.水泥混凝土路面断板分析与防治技术研究[R].上海:同济大学交通运输工程学院,2005.
TAN Zhiming, LIU Boying, TANG Boming. Research on fracture mechanism and cracking prevention and treatment of cement concrete pavements [R]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2005.
- [9] 周玉民,谈至明,赵军.考虑基层超宽的水泥混凝土路面荷载应力计算[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(10):1347.
ZHOU Yumin, TAN Zhiming, ZHAO Jun. Loading stress in cement concrete pavement structure with base widening [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35 (10): 1347.
- [10] Hammons M I. Development of an analysis system for discontinuities in rigid airfield pavement [D]. Baton Rouge: Louisiana State University. College of Engineering, 1997.
- [11] 邓学钧,黄晓明.路面设计原理与方法[M].北京:人民交通出版社,2001.
DENG Xuejun, HUANG Xiaoming. Pavement design principle and method [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [12] 邓学钧,陈荣生.刚性路面设计[M].2版.北京:人民交通出版社,2005.
DENG Xuejun, CHEN Rongsheng. Rigid pavement design [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [13] 沈鹃,孔令云.渝长高速公路轴载调查与分析[J].公路,2007(9):105.
SHEN Juan, KONG Lingyun. Investigation and analysis of the axial load for Yu-Chang freeway [J]. Highway, 2007(9): 105.
- [14] 杭文,李旭宏,何杰,等.公路货物超载运输轴载调查及数据分析研究[J].公路交通科技,2005,22(8):145.
HANG Wen, LI Xuhong, HE Jie, et al. Overloading vehicles axle-loads survey and analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(8): 145.
- [15] 赵鸿铎.轴载测定与轴载谱分析[J].公路,2002(12):70.
ZHAO Hongduo. Axial load investigation and table of axial load analysis [J]. Highway, 2002(12): 70.