

文章编号: 1000-7598-(2006)12-2203-06

交通荷载作用下近桥台处差异沉降 与路面结构开裂研究

刘萌成¹, 黄晓明¹, 林云龙²

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院, 杭州 310014; 2. 东南大学 交通学院, 南京 210096)

摘 要: 应用 ABAQUS 有限元软件建立了路桥过渡段地基、路堤与路面动力计算的三维模型。交通荷载表达为反复移动的作用于路面局部区域的均布荷载(移动荷载)形式, 并编制为 VDLOAD 子程序。通过 ABAQUS 有限元 standard 与 explicit 计算模块, 分析了车速 90 km/h、阻尼比 5%、胎压 700 kPa 条件下单次与多次循环荷载作用下过渡路段动应力、位移与裂纹发展的变化规律。分析认为, 随着开放交通后道路使用时间的增长, 路桥过渡段差异沉降的累计将导致裂纹贯穿整个路面结构层, 道面损坏程度加剧, 致使道路服务性水平进一步下降, 从而影响道路的正常使用寿命。

关 键 词: 有限元分析; 过渡段; 交通荷载; 差异沉降; 路面开裂

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Study on approach settlement and pavement cracking adjacent to abutment under traffic loading

LIU Meng-cheng¹, HUANG Xiao-ming¹, Lin Yun-long²

(1. College of Civil Engineering, and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. College of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A 3D finite element model has been presented to investigate the dynamic response of transition zone between the bridge and highway. The traffic load is regarded as a periodically moving load and has been implemented into ABAQUS code as a user subroutine VDLOAD. The dynamic stress, displacement and pavement cracking in transition zone under one cycle or some cycles are closely studied by using ABAQUS standard and explicit module. It can be concluded that the accumulation of the bridge-approach settlement makes pavement cracking under traffic loading; and the pavement will fracture completely as the cracking runs through the pavement structure. So, the service level of highway will be degraded again.

Key words: finite element analysis; transition zone; traffic loading; differential settlement; pavement cracking

1 引 言

交通荷载是随车辆运动引起的随机荷载。在路面结构动力响应分析中, 反复作用的车轮荷载通常被简化为半波正弦变化的周期荷载^[1~3]。对于路面结构各点而言, 交通荷载产生的动应力是时间与坐标的函数。有鉴于此, 采用往复移动的均布荷载来反映交通荷载的动力效应则更为合理^[4,5]。

桥台后回填区域位于刚柔相济处, 回填材料工后沉降可导致桥台与回填区域的非一致性竖向变形(差异沉降)。国内外大量调研资料表明, 开放交通后车辆荷载的反复作用致使路桥过渡段差异沉降不

断发展, 导致路面结构损坏(车辙、沉陷、开裂)程度加剧, 并使道路服务性水平降低^[6,7]。为了深入分析交通荷载作用下桥台后路面结构的动力响应特性及其影响因素, 本文首先给出了交通荷载的模拟方法; 其次, 建立了桥台后路堤路面动力计算的三维有限元计算模型; 最后, 深入分析了单次与多次循环荷载作用下路面动应力、位移以及裂纹发展的变化规律, 并得到了一些有益的结论。

2 交通荷载作用模式

轮胎与路面的接触作用较为复杂, 黄仰贤^[2]认为轮胎与路面的实际接触形状应由一个矩形和两个

收稿日期: 2005-02-28

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目资助 (No. 200231800032)。

作者简介: 刘萌成, 男, 1972 年生, 博士, 主要从事路基路面材料工程特性方面的研究工作。

半圆形组成(如图 1 所示)。椭圆形的接触面积可以等效为一个矩形,其长度 L' 为 $0.871\ 2L$,宽度 B' 为 $0.6L$,矩形面积则为 $0.522\ 7L^2$ 。根据设计规范,胎压 P 等于 $700\ \text{kPa}$,标准轴载为 $100\ \text{kN}$ 作用于 4 个轮胎上,故单轮轴载 F 即为 $25\ \text{kN}$ 。假设接触压力等于胎压,则 L , L' 与 B' 的计算公式为

$$L = \sqrt{\frac{F/P}{0.522\ 7}} = 260\ \text{mm} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} L' &= 0.871\ 2L = 226\ \text{mm} \\ B' &= 0.6L = 156\ \text{mm} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

车胎与路相互作用的等效接触面积大小如图 2 所示。在有限元网格划分时,考虑到车胎与路面的接触面积,将轮迹下路面及其下相应部分的各水平面皆划分为 3×20 个单元。根据公式(2)计算的有效长宽尺寸,每个单元的水平剖面尺寸近似为 $0.16\ \text{m} \times 0.22\ \text{m}$ 。

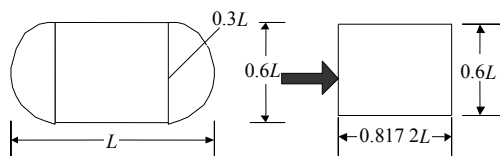


图 1 轮胎与路面的实际接触面积与等效接触面积的转换关系

Fig.1 Transform of actual contact area and equivalent contact area between tire and pavement

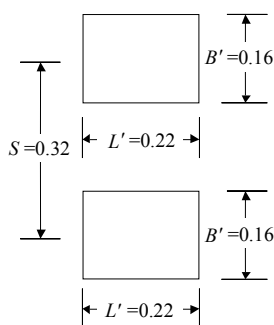


图 2 有限元中双轮等效接触面积的简化处理

Fig.2 Simplification of equivalent contact area of dual tire in FEA

为了模拟路面结构中交通荷载产生的动力效应,采用 ABAQUS 显示积分中 VDLOAD 用户程序来反映荷载随时间与空间坐标的变化^[8]。假定车辆荷载为移动的均布荷载,设定起始位置坐标,通过 VDLOAD 子程序中步长时间 Step Time 与设计时速 V (取值为 $90\ \text{km/h}$)的乘积来反映车辆移动情况,

再用循环语句来实现移动荷载的循环作用。

3 数值计算模型

3.1 几何模型简介

为了研究路桥过渡段地基、路堤与路面结构的动力响应,建立了如图 3 所示的三维有限元计算模型。路面结构组成为: $0.18\ \text{m}$ 厚的沥青混凝土面层和 $0.40\ \text{m}$ 厚的半刚性基层。路堤填土高 $3.6\ \text{m}$,为粉细砂材料。地基 $0 \sim 2\ \text{m}$ 深度内为粉质黏土, $2 \sim 6\ \text{m}$ 深度内为圆砾。地下水位位于粉质黏土层底部。在路线横向,取 $4\ \text{m}$ 宽的行车道为研究对象,路堤边坡坡比为 $1:1.5$ 。在路线纵向,桥台宽 $2\ \text{m}$,基础埋置深度为 $2\ \text{m}$,计算范围沿桥台前伸展 $3.5\ \text{m}$,桥台后伸展 $8.8\ \text{m}$ 。模型的边界约束条件为:地基(填土)竖向边界设置 x 或 y 向约束,地基地部设置 x , y 与 z 向约束。同时,通过设置 ABAQUS 面面接触来模拟桥台与填土、路面与填土的相互作用。

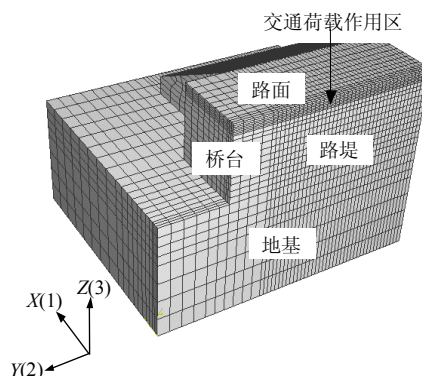


图 3 路桥过渡段三维有限元计算网格

Fig.3 3D finite element mesh of transition zone

有限元数值计算分两阶段进行,第 1 阶段采用 Standard 模块模拟路堤分期填筑过程^[8],填筑速率达 $0.6\ \text{m}/15\ \text{d}$ 。第 2 阶段采用 explicit 显示积分模块模拟道路竣工后交通荷载作用下过渡路段的结构动力响应,采用 VDLOAD 子程序来模拟 $700\ \text{kPa}$ 的双轮荷载在路面一侧 $0.48\ \text{m}$ 宽度范围内沿 y 方向的往复移动(如图 3),荷载作用周期 $0.45\ \text{s}$ 。为合理反映现场条件下过渡段力学性状,计算中同时考虑了道路竣工后地基固结变形与交通荷载共同作用下对过渡段应力变形的影响。

3.2 材料特性参数

计算中针对不同材料采用了不同本构模型,以反映材料应力应变响应的差异性。其中,地基粉质黏土、粉细砂与圆砾采用 Drucker-Prager 弹塑性模型(见表 1),硬化规律采用剪切硬化曲线来确定(见

表 2)；桥台水泥混凝土采用线弹性模型，弹性模量为 35.4 GPa，泊松比为 0.15，容重 24.3 kN/m³，渗透系数取值为 2.0E-6 m/d。ABAQUS 有限元中的 Concrete Smeared Cracking 模型可用于模拟路面材料(沥青混凝土与沥青碎石基层)力学性能，并反映微裂纹生成与发展的渐进过程^[9, 10]。该模型材料强度采用 Rankine 型表达式，当应力满足破裂面表达式时，认为材料内出现裂纹^[11]；路面材料模型参数见表 3，其中 σ_c^y 为屈服应力， σ_c^u 为破坏应力， ε_f^p 为破坏时塑性应变， ε_{ult} 为残余应力为 0 时的应变值。 R_{bu} 为压缩状态下双轴破坏应力与单轴破坏应力比 $\sigma_{cu}^{bia} / \sigma_{cu}^{uni}$ ， R_{tc} 为单轴拉、压破坏应力比 σ_t^u / σ_c^u 。

表 3 路面材料模型参数

Table 3 Parameters of pavement materials

材料类型	$\gamma_d / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	E / kPa	ν	$K / \text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	σ_c^y / kPa	σ_c^u / kPa	ε_f^p	ε_{ult}	R_{bu}	R_{tc}
沥青混凝土	22.8	1.26e+6	0.25	4.32e-5	5.17e+3	9.48e+3	0.0015	0.002	1.16	0.084
水泥稳定碎石	20.6	0.83e+6	0.30	3.17e-4	2.08e+3	3.79e+3	0.004	0.005	1.16	0.145

材料阻尼根据 Rayleigh 提出的线性阻尼假设来确定，即为公式 $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ 。实际中常采用简化的取值形式 $\alpha = 2\zeta_1\omega_1$ ， $\beta = 2\zeta_1 / \omega_1$ ，其中 ω_1 为计算体系的基本固有频率， ζ_1 为该频率时的阻尼比。有限元计算中，散体材料（包括粉质黏土、粉细砂和圆砾） ω_1 为 8.2 rad/s，路面材料（包括沥青混凝土和水泥稳定碎石） ω_1 为 18.6 rad/s，材料阻尼比 ζ_1 皆取为 5%，相应的 Rayleigh 阻尼系数 α 和 β 取值如表 4 所示。

表 4 Rayleigh 阻尼系数 α 、 β 与阻尼比 ζ_1 的关系

Table 4 Damping ratio and Rayleigh's damping coefficient

ζ_1	5 %	
	散体材料	混凝土
α	0.410	0.930
β	0.006 1	0.002 7

4 计算结果分析

4.1 单次荷载作用下的动力响应分析

在车速为 90 km/h，阻尼比为 5%，胎压为 700 kPa 情况下，通过计算得到了路面各结构层的应力与应变响应，由图 4 可见：单次循环下路面结构应力与应变随时间的变化规律相同；应力（应变）峰值大小随深度增加而减小；应力（应变）峰值出现时间随深度增加而依次滞后，其中路面顶部在移动荷载经过瞬间达到峰值；应力（应变）随着移动荷

表 1 Drucker-Prager 模型参数

Table 1 Parameters of Drucker-Prager model

材料类型	γ_d / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	c / kPa	ϕ / $^\circ$	E / kPa	ν	β / $^\circ$	K / $^\circ$	ψ / $^\circ$	$k / \text{m} \cdot \text{d}^{-1}$
粉质黏土	17.8	22.4	30.6	5600	0.36	35.8	1.00	32.8	2.31e-4
圆砾	19.8	0.0	38.3	50 000	0.30	48.3	1.00	43.3	1.00
粉细砂	19.2	0.0	34.2	18 000	0.34	39.7	1.00	34.7	0.36

表 2 Drucker-Prager 模型的硬化参数表

Table 2 Tabular data of Drucker-Prager hardening curves

粉质黏土		粉细砂		圆砾	
$\sigma_1 - \sigma_3 / \text{kPa}$	ε^p	$\sigma_1 - \sigma_3 / \text{kPa}$	ε^p	$\sigma_1 - \sigma_3 / \text{kPa}$	ε^p
43.3	0.000	64.1	0.000	97.8	0.000
112.4	0.013	175.8	0.015	218.2	0.010
162.8	0.028	252.1	0.026	339.0	0.023
207.6	0.044	342.2	0.043	428.1	0.039
242.1	0.062	436.7	0.058	517.9	0.056

载的远离以及阻尼的作用而衰减为 0。

图 5 给出了 YOZ 截面上单元相应应力的动响应情况，由图可知：在移动荷载作用下，路面结构层单元中剪应力与正应力随时间的变化规律是不同步的；路面顶部剪应力值远小于正应力，表明单元主应力方向始终与坐标轴平行，而基层底部受剪应力的影响较大，即单元主应力方向随荷载的移动而发生旋转。

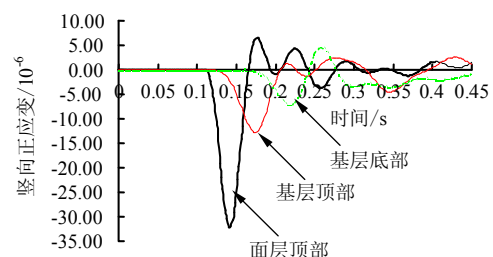
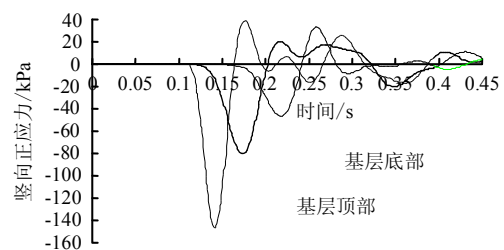


图 4 路面结构中竖向正应力与正应变历时曲线

Fig.4 Time curves of S_{33} and LE_{33} in pavement

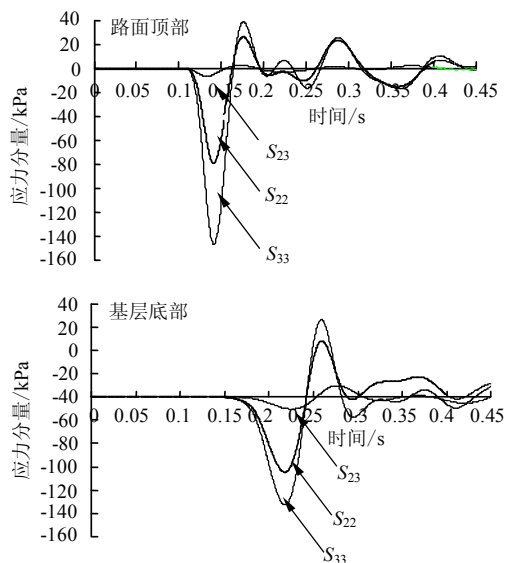


图5 YOZ 截面内路面顶、底应力分量 S_{23} , S_{22} , S_{33} 历时曲线

Fig.5 Time curves of S_{23} , S_{22} and S_{33} of pavement in YOZ plane

4.2 循环荷载下的差异沉降分析

在车速为 90 km/h, 阻尼比为 5 %, 胎压为 700 kPa 情况下, 通过 ABAQUS 有限元计算得到了移动荷载反复作用下的路面各结构层应力与应变响应。如图 6 所示, 基层底部应力中 S_{11} , S_{22} 为拉应力, 随循环次数增加而不断增加, S_{33} 为幅值保持稳定的典型周期荷载; 而图 7 表明: 基层底部单元拉应变 LE_{11} , LE_{22} 变化规律与相应应力 S_{11} , S_{22} 相同。受移动荷载的激励作用, 压应变 LE_{33} 与塑性应变 PE_{33} 随移动荷载的反复作用不断累积增加。

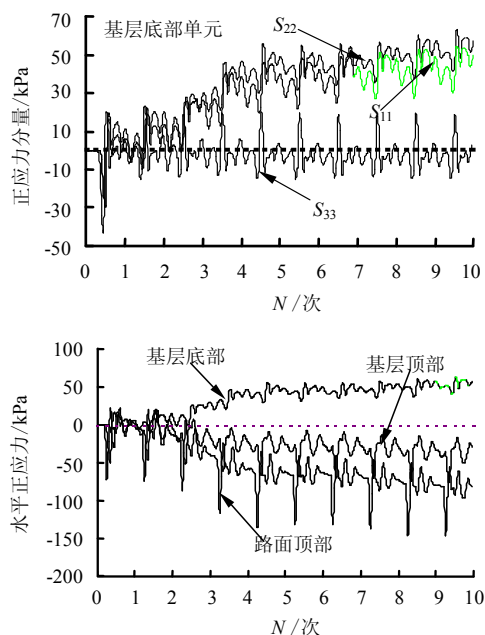


图6 路面顶、底应力历时曲线($N=10$)

Fig.6 Curves of stress component of pavement and cyclic number

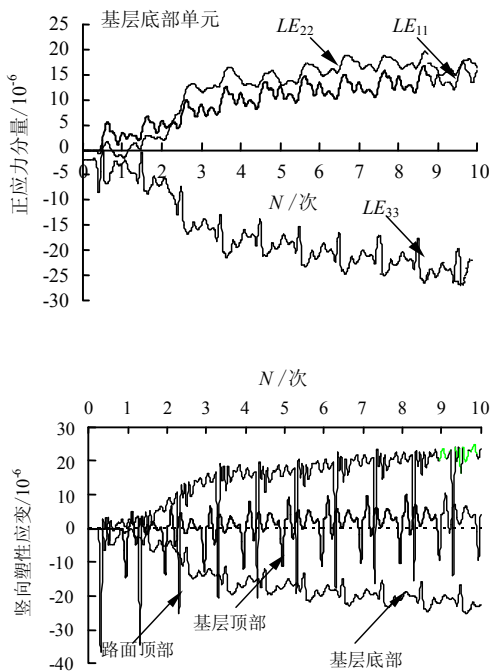


图7 路面顶、底应变历时曲线($N=10$)

Fig.7 Curves of strain component of pavement and cyclic number

路桥过渡段设置相应长度搭板情况下的割线斜率计算公式为

$$(S_a - S_b) / L \quad (3)$$

式中 S_b 为桥台与回填区衔接处的阶跃式工后沉降量; S_a 为距桥台 L 长度处工后沉降量。

当过渡段不设置桥头搭板时, 沥青路面及其下填土共同下沉, 桥台与回填区衔接处差异沉降呈阶跃型, 过渡段将发生严重跳车现象, 此时采用切线坡差 (即为沉降曲线的切线斜率, 沉降 U_3 关于距离 S 的导数) 来反映路桥过渡段坡差随距离 S 的连续变化情况。

图 8 给出了轮迹下路面结点 (结点 18896, 18926 与桥台距离分别为 1.1 m, 7.7 m) 差异沉降、切线坡差与循环次数 N 的关系曲线。随着作用次数的增加, 路堤与路面的塑性变形得到发展, 路桥过渡段差异沉降与切线坡差不断增加。由图 8(a) 与 8(b) 可知, 循环次数 $N=50000$ 时结点 18896 沉降量达到 0.193 cm, 切线坡差达到 0.048 %; 而结点 18926 沉降量达到 0.375 cm, 切线坡差达到 0.175 %。可见, 随着开放交通后道路使用时间的增长, 路桥过渡段差异沉降的累计将导致近桥台处路面结构的损坏程度加剧, 从而影响道路的正常使用寿命。

4.3 路面结构裂纹扩展分析

根据 ABAQUS 混凝土 smeared cracking 模型, 当应力满足 Rankine 破裂面表达式时, 材料内出现

首条裂纹, 该裂纹面正交于该点最大主拉应力方向; 该点处后续裂纹则将沿最大主拉应力方向生成; 一旦裂纹生成, 即认为不可恢复, 但可能合拢或再张开^[8]。

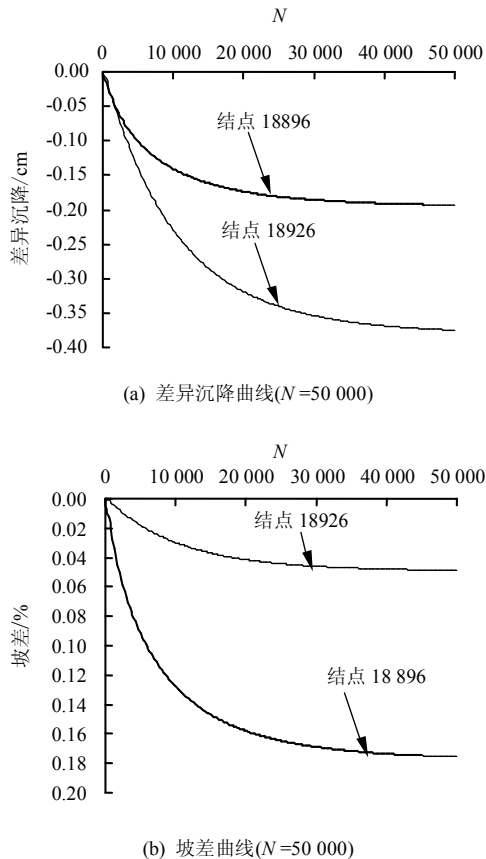


图 8 交通荷载作用下路面顶部结点差异沉降曲线
Fig.8 Variation of differential settlement or slope with cyclic number

图 9 给出了循环次数 $N=1\ 000$ 与 $N=50\ 000$ 时差异沉降导致路面结构裂纹扩展直至破坏的裂纹分布云图, 计算结果与大量调研所得路桥过渡段断裂破坏情况较为吻合。分析认为: 随着填土与桥台差异沉降的加大以及上部交通荷载的施加, 交通荷载作用区域正下方基层底部拉应力也逐步增大到材料的拉裂强度而出现初始裂纹。图 9 (a) 表明, 路面结构内损伤裂缝起初主要出现在荷载作用下路面局部区域内, 并在近桥台处主要沿基层竖向扩展; 图 9 (b) 则表明, 随着循环作用次数的增大, 差异沉降与交通荷载的继续作用将导致开裂区域主要沿基层横断面方向不断发展。可以预见, 随着开放交通后道路使用时间的增长, 路桥过渡段差异沉降的累计将导致裂纹贯穿整个路面结构层, 道面损坏程度加剧, 致使路面结构承载能力与服务性水平进一步下降, 从而影响道路的正常使用的。

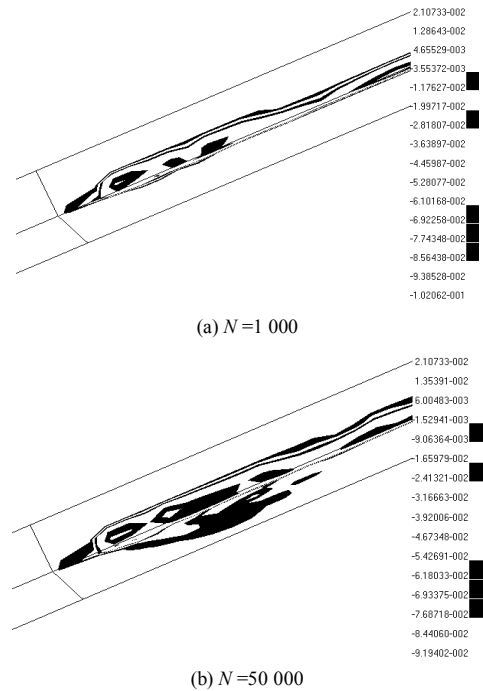


图 9 路面裂纹分布云图
Fig.9 Nephograms of pavement cracking distribution

5 结 论

通过 ABAQUS 有限元计算分析了车速 90 km/h、阻尼比 5 %、胎压 700 kPa 条件下单次与多次循环荷载作用下的路桥过渡路段动应力、位移及裂纹发展的变化规律, 相应结论归纳如下:

(1) 在移动荷载作用下, 路面顶部单元剪应力值远小于正应力, 而基层底部受剪应力的影响较大, 表明单元主应力方向随荷载的移动而发生旋转。

(2) 基层底部水平拉应力与拉应变随循环次数增加而不断增加; 受移动荷载的激励作用, S_{33} 为幅值保持稳定的典型周期荷载; 压应变 LE_{33} 与塑性应变 PE_{33} 随移动荷载的反复作用不断累积。

(3) 路堤与路面的塑性变形随着作用次数的增加而不断发展, 路桥过渡段差异沉降与切线坡差不断增加。

(4) 路面结构内裂缝初期主要出现在轮迹下路面局部区域, 并在近桥台处主要沿基层竖向扩展; 随着循环作用次数的增加, 差异沉降与交通荷载的持续作用导致开裂区域主要沿基层横断面方向不断发展。

参 考 文 献

- [1] Famiyesin O O, Davies T G, Chan A H C. Numerical modeling of cyclic loading on reinforced unbound