

双层水泥混凝土路面结构临界点位置分析

周玉民, 谈至明

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对我国水泥混凝土路面刚性、半刚性材料作为基层大量使用的情况, 基于弹性地基上不等平面尺寸双层结构模型, 采用3维20节点实体单元, 讨论了轴载作用下水泥混凝土路面结构(面层和基层)最大荷载应力点的位置、大小和对应的荷位, 多轴荷载对最大荷载应力位置和大小影响, 以及移动轴载作用下的最大荷载应力影响线; 分析了轴载作用于不同荷位时, 基层有无超宽对面层、基层自身最大荷载应力的影响, 以及轴载向面层内侧移动时路面结构最大荷载应力的变化规律; 讨论了温度翘曲和荷载作用的耦合效应. 研究结果可用于确定水泥混凝土路面结构临界点的位置.

关键词: 混凝土路面; 基层超宽; 荷载内移; 应力比; 结构临界点

中图分类号: U 416.216

文献标识码: A

Analysis of Critical Locations in Double-layered Cement Concrete Pavement Structure

ZHOU Yumin, TAN Zhiming

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The rigid and semi-rigid materials widely employed as the base in cement concrete highways construction in China. Based upon a model of double-layered structure with unequal planar dimensions resting on an elastic foundation, an investigation was made into the maximum loading stress locations and magnitudes, corresponding axle load positions and the effect of multi-axle loads with the finite element method, and an analysis was made of the influence lines of the maximum stresses under moving axle loads. A study was made of the axle loads acting on different pavement positions (including offset of axle loads) the loading stresses in pavement structure with/without base extension as well as the coupling effect of temperature curling and axle loads action jointly. Study results are helpful for determining the critical locations in cement concrete pavement structure.

Key words: concrete pavement; base extension; offset of

axle load; stress ratio; critical location of pavement structure

行车荷载和环境因素如温度、湿度变化作用下, 水泥混凝土路面结构内部产生应力场即荷载应力和温度应力, 将水泥混凝土路面结构内部最大应力即荷载应力与温度应力叠加的最大值对应的行车荷载作用位置称为临界荷位, 相应的最大应力点称为结构临界点, 结构临界点是路面设计中控制综合疲劳断裂的依据. 水泥混凝土路面分析通常采用弹性薄板理论^[1-4], 如我国现行规范通过分析比较得出路面板纵边边缘中部底面为结构临界点位置, 建立了以控制纵边边缘中部临界点综合应力不超过水泥混凝土弯拉强度的设计准则. 近几年我国水泥混凝土路面大量采用刚性、半刚性材料作为基层, 基层平面尺寸往往较面层大; 同时, 在面层和基层之间设置有隔离层或运营过程中面层和基层之间的接触出现松动^[5-6], 即面层与基层之间的层间接触条件为竖向受拉可脱开、受压连续的情况. 针对目前路面结构尺寸、层间接触条件和材料的新变化, 采用更为符合实际的不等平面尺寸双层结构模型, 分析轴载作用下水泥混凝土面层和基层最大荷载应力的位置、大小和对应的荷位、基层超宽和荷载内移对面层和基层自身荷载应力的影响规律及温度梯度和荷载耦合作用下的结构临界点位置变化, 为刚性、半刚性基层上水泥混凝土路面结构临界点位置确定、路面设计时疲劳断裂控制提供理论依据.

1 力学模型、荷载图式和计算方法

将水泥混凝土路面结构简化为不等平面尺寸双层结构, 假设面层与基层层间接触水平光滑无摩擦, 竖向受压时连续、受拉时可分离或连续; 面层接缝之

收稿日期: 2008-12-31

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目(200731822301-9)

作者简介: 周玉民(1969—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为道路工程. E-mail: zhouym69@163.com

间设传力杆、拉杆和(或)混凝土接触面之间嵌锁而具有一定的传递荷载能力;地基采用 Winkler 假设. 不等平面尺寸水泥混凝土路面双层结构力学模型见图 1. 图中, h_1, E_1, ν_1 分别为面层板的厚度、弹性模量和泊松比; h_2, E_2, ν_2 分别为基层的厚度、弹性模量和泊松比; k 为地基的反应模量; L, B 分别为面板长度与宽度; $L_{a1}, L_{a2}, B_{a1}, B_{a2}$ 分别为四边的基层超宽量; δ 为接缝宽度; C_w 为接缝剪切刚度.

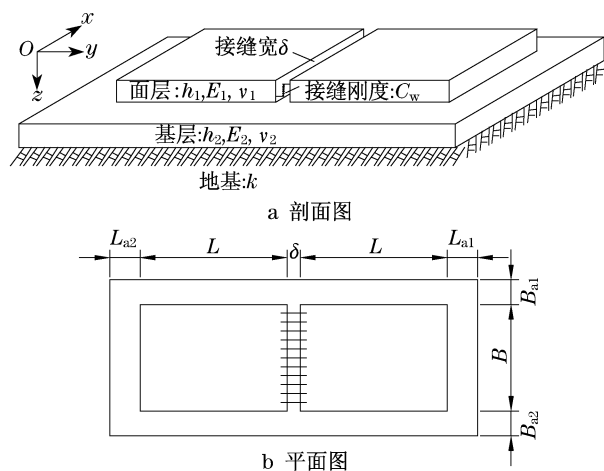


图 1 不等平面尺寸双层结构力学模型

Fig.1 Mechanistic model of double-layered structure with unequal planar dimensions

水泥混凝土路面上作用的车辆荷载可按轴-轮型分类,为单轴-双轮、双轴-双轮和三轴-双轮等,其中单轴-双轮荷载图式(双轮中心轮距、轮距)参见图 2. 采用 Ikeda 公式^[7], 计算得到轮印宽度 $a = 0.220$ m, 轮印高 $b = 0.198$ m, 接地压力 $p = 0.573$ MPa. 双轴-双轮和三轴-双轮荷载轴距统一取为 1.4 m, 相应的轴重 P 分别为 100, 200 和 300 kN, 用于水泥混凝土路面结构分析.

对于路面上行驶的车辆荷载而言,其作用位置

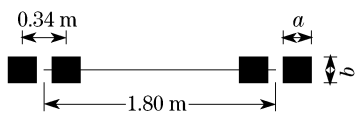


图 2 单轴-双轮荷载

Fig.2 Configuration of single axle-dual wheels load

不同,在路面结构内产生的荷载应力不尽相同,为了找出对应于最大荷载应力的荷载作用位置,考虑单轴-双轮荷载沿纵边向前移动,荷载作用于水泥混凝土路面不同位置示意图见图 3.

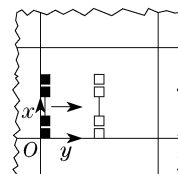


图 3 轴载移动示意图

Fig.3 Schematic of axle loads on pavement slabs

路面结构分析应用有限元方法,采用通用软件 ANSYS10.0. 文献[8]的研究表明,对于采用 20 节点实体单元,为控制面层和基层最大弯曲应力的误差在 5%以内,应力变化剧烈区域单元平面尺寸应小于 $0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$,面、基层层厚方向至少需划分为 2 层.

2 最大荷载应力位置和大小

路面结构层(面层、基层)最大荷载应力大小和位置与结构参数、基层超宽、车辆作用位置等密切相关. 面层长 $L = 5.00$ m, 宽 $B = 3.75$ m. 基层超宽考虑如下 3 种情况:等尺寸双层板 $B_a = 0, L_a = 0$; 基层横向超宽双层板 $B_a = 1.00$ m, $L_a = 0$; 基层纵向超长双层板 $B_a = 0, L_a = 5.00$ m. 考虑如下 3 组不同结构组合,结构参数见表 1,地基反应模量 $k = 30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$. 表中, λ 为基层与面层抗弯刚度之比, $\lambda = D_2 / D_1, D_2 = E_2 h_2^3 [12(1 - \nu_2^2)]^{-1}, D_1 = E_1 h_1^3 / 12(1 - \nu_1^2)$. 考虑标准轴载(图 3)沿板纵边移动,将任一轴载位置的面层板底最大拉应力 $\sigma_{b,1}$ 、板顶最大拉应力 $\sigma_{t,1}$ 与轴载位于纵边边缘中部的板底拉应力 $\sigma_{b,1\max}$ 之比记作 α_1, β_1 , 则 $\alpha_1 = \sigma_{b,1} / \sigma_{b,1\max}, \beta_1 = \sigma_{t,1} / \sigma_{b,1\max}$. 任一轴载位置的基层底部最大拉应力 $\sigma_{b,2}$ 与轴载位于纵边边缘中部的基层层底拉应力 $\sigma_{b,20}$ 之比记作 α_2 . 通过应力比 $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2$ 的大小随标准轴载移动位置 y 即轴中心线的变化来判别路面结构层最大荷载应力大小和位置.

表 1 双层板结构组合及参数

Tab.1 Structure combination and material properties for double-layered pavement

结构组合	面层			基层			λ
	h_1/m	E_1/MPa	ν_1	h_2/m	E_2/MPa	ν_2	
结构 1	0.22	30 000	0.15	0.20	3 000	0.25	0.078
结构 2	0.22	30 000	0.15	0.20	10 000	0.25	0.261
结构 3	0.22	30 000	0.15	0.22	30 000	0.15	1.000

2.1 移动单轴荷载作用

面层应力比 α_1, β_1 , 基层应力比 α_2 随轴载移动

位置 y 变化的曲线见图 4.

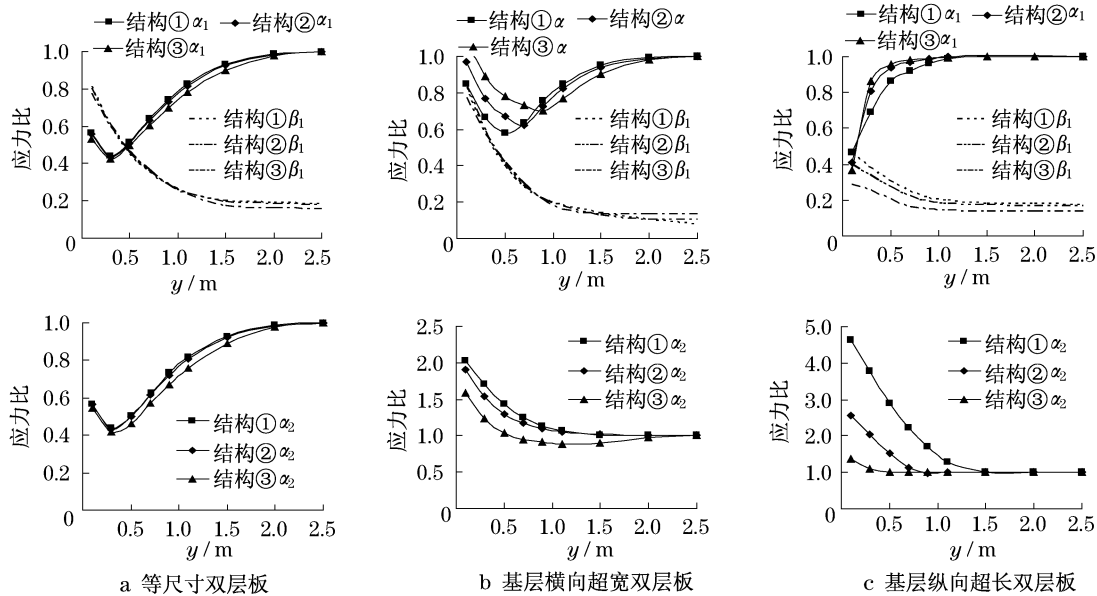


图4 应力比与轴中心线关系

Fig.4 Relationship between stress ratio and the centerlines of longitudinal axes

从图 4a 可发现,等尺寸双层板的 α_1 随 y 的增大先减小后逐渐增大;当 $y \approx 0.30$ m 时, α_1 达到最小值;当 $y = 2.50$ m 时,即荷位处于纵边边缘中部, α_1 达到最大值, $\alpha_1 = 1$. 面层应力比 β_1 随 y 的增大逐渐减小, β_1 最大不超过 0.85, 当 $y = 2.50$ m 时, β_1 达到最小值. α_2 随 y 的变化规律与 α_1 的基本相同, 当 $y = 2.50$ m 时, α_2 达到最大值, $\alpha_2 = 1$. 综合 $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2$ 的变化来看, 移动标准轴载作用下, 等尺寸双层板面、基层最大荷载应力位置分别落在纵边边缘中部荷位下方的面、基层底面, 抗弯刚度比 λ 对等尺寸双层板面、基层应力比 $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2$ 的影响很小. 根据图 4b, 基层横向超宽双层板 α_1, β_1 随 y 的变化规律与等尺寸双层板的类似, 即先减小后逐渐增大, 只是当标准轴载作用于板角隅荷位附近即 $y = 0 \sim 0.30$ m, 且当 λ 较大时, 比如 $\lambda > 0.261$, $\alpha_1 > 1$, 表明此时面层板最大荷载应力位置落在靠近纵向中心线一侧的双轮下方面层底面, 而不是在纵边边缘中部荷位, 即 $y = 2.50$ m 下方的面层底面, 但考虑到横缝的传荷效应(集料嵌锁、传力杆传荷), 靠近纵向中心线一侧的双轮下方面层底面荷载应力有所折减, α_1 不会超过 1. 由于基层横向超宽, α_2 随 y 的增大由大于 1 逐渐减小并趋近于 1. 因此, 移动标准轴载作用下, 基层横向超宽双层板面层最大荷载应力位置仍在纵边边缘中部荷位下方方面层底面, 而基层最大荷

载应力位置则位于角隅正下方基层底面, λ 对基层横向超宽双层板面、基层应力比 α_1, α_2 有一定程度的影响, 对面层应力比 β_1 的影响则很小. 从图 4c 可以看到, 基层纵向超长双层板, α_1 随 y 的增大逐渐增大; 当 $y = 0$ 时, α_1 最小; 当 $y = 2.50$ m 时, α_1 达到最大即 $\alpha_1 = 1$. β_1, α_2 随 y 的变化规律与基层横向超宽双层板的相似, 其中 β_1 不超过 0.5.

因此, 移动标准轴载作用下, 基层纵向超长双层板面、基层最大荷载应力位置与横向超宽双层板的相同, λ 对 α_1, β_1 影响不显著, 对 α_2 影响较大.

2.2 移动多轴轴载作用

路面结构参数同结构组合①, 采用多块板系统, 假设板块间接缝剪切刚度 $C_w = 0$, 即不考虑板块间的接缝传荷效应, 基层纵向超宽 $L_a = 5.00$ m, 横向超宽 $B_a = 1.00$ m. 坐标原点设置在第 2 块板的起点 C, 车辆荷载位置用轴心位置表征, 当车辆荷载(单轴、双轴和三轴)沿面层纵边向前移动(y 轴方向)时(见图 5), α_1, α_2 随移动位置变化的曲线见图 6. 图 5 中 A, B 点为板纵边边缘中部可能结构临界点, C 点为板下基层结构临界点(正好位于板角点上). 不同荷载作用位置对应的纵边底部中点荷载应力与该点最大荷载应力之比 $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2$ 随移动位置变化的曲线见图 7. 图 6 和图 7 仅画出对称曲线的 1/2.

从图 6 和图 7 可知, 从面层横缝一端沿纵边向

另一端移动,单轴荷载作用下,面层荷载应力随 y 的增加而增大并趋于稳定,基层荷载应力随 y 的增加而减小并趋于稳定,单轴荷载驶经 1 次,面层纵缝边缘底部中点荷载应力出现 1 次峰值,角隅下方基层底面荷载应力出现 1 次峰值. 双轴荷载作用下,面层、基层荷载应力随 y 的增加波动变化并趋于稳定,面层最大荷载应力并不是发生在双轴荷载运动到纵缝边缘中点的位置,而是在纵缝边缘中点的前后位置,双轴荷载驶经 1 次,面层在纵缝边缘底部中点处荷载应力出现 2 次峰值,角隅下方基层底面荷载应

力出现 2 次峰值(双轴中每轴经过角隅 1 次出现 1 次). 三轴荷载作用下,面层、基层荷载应力随位置坐标 y 的增加亦波动变化并趋于稳定,三轴荷载驶经 1 次,面层在纵缝边缘底部中点处荷载应力出现 3 次峰值,其中,纵缝边缘中点前后各 1 次,纵边中点处 1 次. 与纵边中点前后的面层荷载应力峰值比较,纵边中点处面层的应力峰值约为前者的 0.90~0.93 倍,而角隅下方基层底面荷载应力出现 3 次峰值(三轴中每轴经过角隅 1 次出现 1 次). 对基层而言,单轴、双轴和三轴荷载作用于面层角隅时最危险.

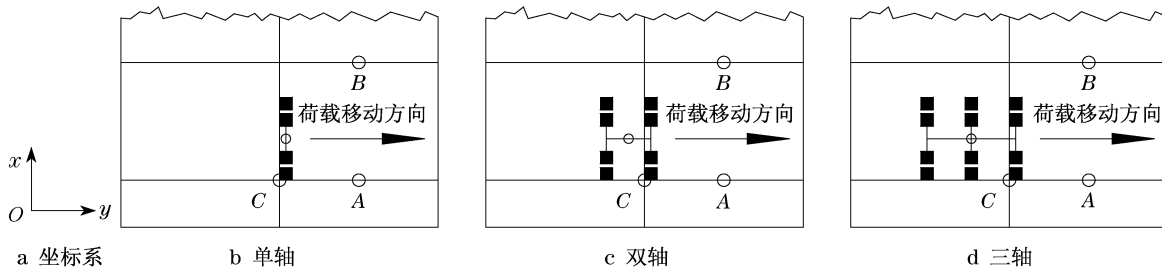


图 5 移动荷载作用示意图

Fig.5 Schematic of moving axle loads on pavement slabs

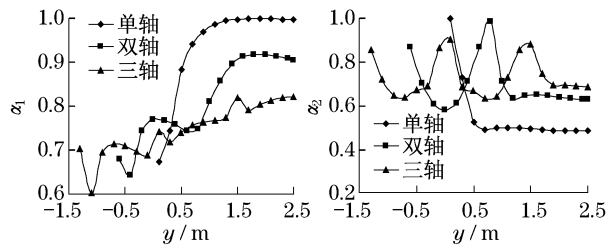


图 6 最大荷载应力比与 y 关系

Fig.6 Relationship curves of maximum stress ratio and y

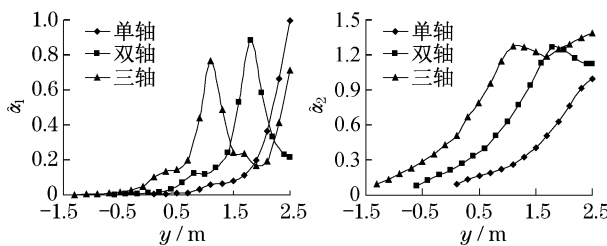


图 7 纵边中点最大荷载应力比与 y 关系

Fig.7 Relationship curves of maximum stress ratio

in mid of longitudinal edge and y

3 基层超宽和荷载内移的影响

3.1 基层超宽的影响

采用刚性、半刚性材料作基层,基层平面尺寸往往比面层大,根据方向不同分横向和纵向超宽(见图 1). 对半刚性基层,基层除了纵向超宽,还有横向超

宽;刚性基层由于要设置与面层对应的横缝,基层仅有横向超宽. 考虑基层纵向、横向超宽组合的 3 种情形(见图 8),采用结构组合①参数,水泥混凝土路面结构最大荷载应力比为 $\alpha_{B,i}$,即为横向有限超宽与横向无超宽时各结构层最大荷载应力之比,基层相对超宽为 B_a/r_2 , r_2 为基层相对刚度半径, $r_2 = (D_2/k)^{1/4}$.

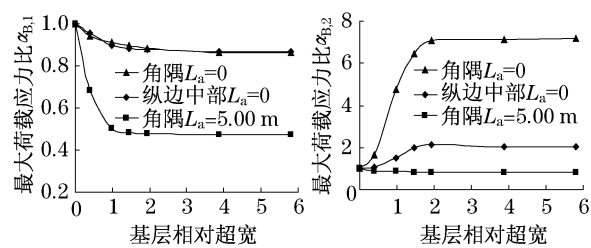


图 8 基层超宽应力比与相对超宽关系

Fig.8 Relationship curves of stress ratio of base extension and relative base extension

从图 8 可以看到,对面层来说,随基层相对超宽度 B_a/r_2 的增大,不同荷位对应的面层应力比 $\alpha_{B,1}$ 减小, $B_a/r_2 > 2$ 时, $\alpha_{B,1}$ 趋于稳定. 其中基层横向超宽 1.00 m、纵向超宽 5.00 m 时,角隅荷位对应的应力比 $\alpha_{B,1}$ 减小幅度最大;基层横向超宽 1.00 m、纵向超宽为零时,角隅和纵边边缘中部荷位对应的应力比 $\alpha_{B,1}$ 减小幅度较小且基本相同. 对基层而言,随相对超宽度 B_a/r_2 的增大,不同荷位对应的基层应力

比 $\alpha_{B,2}$ 或者减小或者增大, $B_a/r_2 > 2$ 时, $\alpha_{B,2}$ 趋于稳定. 基层横向超宽 1.00 m、纵向超宽 5.00 m 时, 角隅荷位对应的应力比 $\alpha_{B,2}$ 减小, 但减小幅度很小; 基层横向超宽 1.00 m、纵向超宽为零时, 纵边边缘中部和角隅荷位对应的应力比 $\alpha_{B,2}$ 增大.

3.2 荷载侧移的影响

单轴双轮荷载由纵边边缘中部或角隅荷位向内侧移动, 荷载应力比为 $\alpha_{d,i}$, 即侧移一定距离与无侧移时对应的各结构层最大荷载应力之比随侧移距离 d 变化的曲线见图 9. 从图 9 可以看到, 在给定计算参数条件下, 随着荷载侧移距离 d 的增大, 无论纵向是否超宽, 基层横向超宽 1.00 m, 不同荷位对应的面、基层应力比 $\alpha_{d,1}, \alpha_{d,2}$ 均减小, 面层应力比减小幅度在 27%~35% 之间, 基层应力比减小幅度介于 25%~64%. 基层横向超宽为零, 不同荷位对应的面层应力比 $\alpha_{d,1}$ 亦减小, 减小幅度在 33%~54% 之间; 除角隅荷位在基层纵向超宽为零时对应的基层应力比 $\alpha_{d,2}$ 略有增大之外, 其余荷位对应的应力比 $\alpha_{d,2}$ 减小, 且减小幅度达 34%.

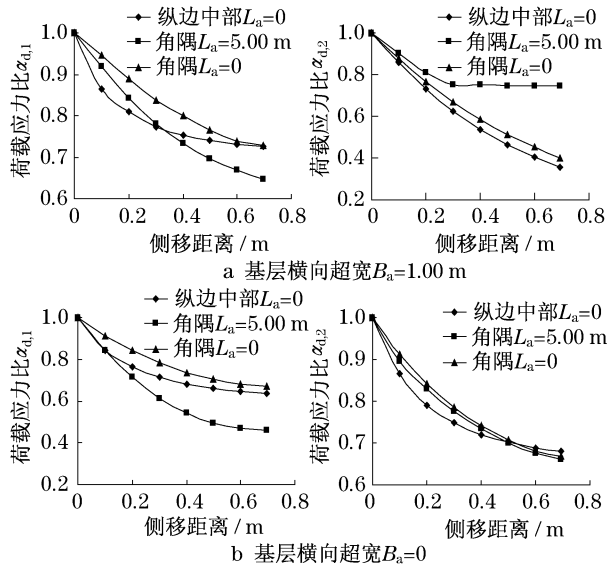


图 9 荷载应力比与侧移距离曲线

Fig.9 Relationship curves of maximum stress ratio and offset distance

面层应力比 $\alpha_{d,1} = 0.8$ 时, 不同荷位、基层超宽情况下的荷载侧移距离 d 见表 2.

4 温度翘曲耦合效应

水泥混凝土路面受环境温度(温度梯度)的影响而发生翘曲变形, 正温度梯度(面层顶面温度高于底

表 2 不同荷位、基层超宽情况下的荷载侧移距离($\alpha_{d,1} = 0.8$)
Tab.2 Axle load offset distance from edge for different load positions and base extension ($\alpha_{d,1} = 0.8$)

基层超宽/m	角隅/m	纵边边缘中部/m
$B_a = 0, L_a = 5.00$	0.134	0.146
$B_a = 0, L_a = 0$	0.269	0.146
$B_a = 1.00, L_a = 5.00$	0.270	0.210
$B_a = 1.00, L_a = 0$	0.400	0.210

面温度)作用下, 角隅和边缘部分与地基接触, 中部区域可能出现脱空; 负温度梯度作用下, 角隅和边缘部分与地基脱开而出现脱空, 在自重荷载作用下, 路面结构内产生翘曲应力. 对于纵边边缘中部来说, 荷载与温度翘曲耦合作用是不会引起结构临界点(纵边边缘中部层底)变化的. 荷载与温度翘曲耦合作用的应力最大值等于荷载应力与翘曲应力之和. 对角隅板顶拉应力来说, 荷载与温度翘曲耦合作用时, 其应力最大值发生点是随着负温度梯度的增大而趋向板中心的. 实测表明, 路面最大负温度梯度不超过其最大正值的 1/2.

采用路面结构组合①, 以等尺寸、基层横向超宽、基层纵、横向超宽($B_a = 1.00$ m, $L_a = 5.00$ m)及不同轴型(单轴、双轴和三轴双轮)、单轴重为 100 kN 轴载位于纵边边缘中部、角隅(靠紧横缝边)与温度梯度共同作用所生产的面层最大拉应力列于表 3. 其中, 纵边边缘中部受荷与正温度梯度、角隅受荷与负温度梯度共同作用, 正、负温度梯度之比取 2, 如 $T_g = 100, -50, 80, -40$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$. 表 3 中的系数为 γ_1 , 为面层角隅应力(荷载及负温度梯度)与板边应力(荷载及正温度梯度)之比.

从表 3 列出的结果可见, 荷载与温度梯度耦合作用下, 无论基层是否超宽, 面层角隅应力(荷载及负温度梯度)与纵边边缘中部应力(荷载及正温度梯度)之比 γ_1 均小于 1, 也就是说, 车辆荷载与温度梯度耦合作用下, 纵边边缘中部荷位下方层面底面位置的综合应力最大, 起控制作用.

5 路面结构临界点

根据水泥混凝土路面结构最大荷载应力大小、位置及对应荷位的分析, 温度翘曲与荷载作用耦合的讨论, 可确定水泥混凝土路面结构临界点位置.

面层结构临界点位于纵边边缘中部荷位下方层面底面位置(图 5 中 A 点或 B 点). 在单向 2 条或 2 条以上行车道的公路上, 重车道为靠路肩侧的慢车

道,面层结构临界点位于快车道或慢车道的纵边缘中部底面(图5中A点或B点),具体情况视基层超宽、纵缝拉杆传荷效率而定。

表3 单轴(双轴、三轴)荷载与温度翘曲耦合应力比

Tab.3 Stress ratio of single (tandem and tridem) axle dual-tires load and temperature gradient

荷位	基层超宽	$T_g/(\text{°C} \cdot \text{m}^{-1})$	单轴双轮		双轴双轮		三轴双轮	
			σ_1/MPa	γ_1	σ_1/MPa	γ_1	σ_1/MPa	γ_1
纵边缘中部	等尺寸	100	4.70		4.37		3.96	
	横向超宽	100	4.68		4.49		4.03	
角隅	等尺寸	-50	2.48	0.53	2.03	0.46	1.92	0.49
	横向超宽	-50	2.15	0.46	1.91	0.43	2.10	0.52
	纵、横向超宽	-50	1.69	0.36	1.46	0.33	1.37	0.34
纵边缘中部	等尺寸	80	4.22		3.87		3.46	
	横向超宽	80	4.11		4.04		3.46	
角隅	等尺寸	-40	2.36	0.56	1.87	0.48	1.84	0.53
	横向超宽	-40	2.04	0.50	1.83	0.45	1.97	0.57
	纵、横向超宽	-40	1.46	0.35	1.27	0.32	1.16	0.33

基层结构临界点的变化较为复杂,因基层超宽不同而异。

(1) 基层与面层同平面尺寸($L_a = 0, B_a = 0$)。基层平面尺寸与面层平面尺寸相同,基层与面层构成了真正意义上的双层板,基层结构临界点位于纵边缘中部下方基层底面,对应纵边缘中部荷位(图5中A点或B点)。具体视基层超宽而定。

(2) 基层纵向无超宽,但横向有超宽($L_a = 0, B_a \neq 0$)。当基层纵向无超宽,但横向超宽时,基层结构临界点位于角隅下方基层底面,对应角隅荷位(图5中C点)。基层横向无超宽或超宽量较小,C点的主应力方向平行面层纵边,刚性或半刚性基层的结构裂缝呈横向形态产生和发展;基层横向超宽量较大,C点的主应力方向垂直面层纵边,即主应力由 σ_{2y} 转为 σ_{2x} ,基层的结构裂缝呈现纵向扩展。

(3) 基层纵横向超宽($L_a \neq 0, B_a \neq 0$)。基层纵横向超宽(基层不设纵、横缝),基层结构临界点位于角隅下方基层底面(图5中C点),主应力方向与面层纵边垂直或平行,视纵横超宽量不同而异。也就是说,不设纵、横缝的基层最可能出现与面层横缝相对应的结构裂缝,并形成贯穿基层的横缝,进而雨水沿缝下渗,若底基层或垫层耐冲刷能力不足会发展为唧泥、脱空和错台等病害。

6 结论

基于弹性地基上不同平面尺寸双层结构模型,通过一些算例的计算分析,得出结论如下:

(1) 基层无超宽时,水泥混凝土路面面层、基层最大荷载应力点位于纵边缘中部各层的底面,单

轴双轮荷载产生的荷载应力最大。基层纵向无超宽但横向超宽,面层最大荷载应力点位置落在横边中部底面,单轴双轮一侧荷载产生的荷载应力最大,基层最大荷载应力点位于角隅下方的基层底面。基层纵横向超宽,面层最大荷载应力点位于纵边缘中部底面,单轴双轮荷载产生的荷载应力最大,基层最大荷载应力点位于角隅下方的基层底面。

(2) 车辆荷载沿纵边向前移动,单轴、双轴和三轴荷载在面层纵边缘中部分别产生1次、2次和3次应力峰值,对三轴荷载的3次峰值而言,其中纵边中点前后应力峰值大于纵边中点处的峰值,后者约为前者的0.90~0.93倍。基层超宽,单轴、双轴和三轴荷载在角隅下方基层底面分别产生1次、2次和3次应力峰值。

(3) 车辆荷载沿板边向内移动,可有效降低面层和基层的荷载应力,基层超宽对降低面层的荷载应力是有利的,但也引起基层应力的增长。荷载内移效果比基层超宽的效果更好,且没有基层超宽带来基层应力增大的危害。

(4) 层间接触可分离,水泥混凝土路面面层结构临界点在纵边缘中部底面,对应于纵边缘中部荷位;基层无超宽,基层结构临界点位于纵边缘中部下方基层底面,对应纵边缘中部荷位;其余情况下,基层结构临界点在角隅下方基层底面,对应角隅荷位。

由于面层结构间断(设纵、横缝),面层角点与基层的接触点有明显的应力集中现象,随着单元网格细分,其接触压应力有趋于无穷之势,因而,面层角点下方拉应力必然受其影响而失真。另一方面,面层角点与基层之间很大的压应力会造成基层塑性变

形,用线弹性理论求得的值是偏大的.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部. 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 P R China. JTG D40—2002 Specification of cement concrete pavement design for highway [S]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [2] 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 pavements[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1999.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO guide for design of pavement structures[S]. Washington D C. AASHTO, 1993.
- [4] Huang Y H. Pavement analysis and design [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.
- [5] 谈至明,刘伯莹,唐伯明,等. 水泥混凝土路面断板分析与防治技术研究总报告[R]. 上海:同济大学. 中交公路规划设计院有限公司,重庆:重庆交通大学,等,2005.
TAN Zhiming, LIU Boying, TANG Boming. et al. General Report (2005): Research on fracture mechanism and cracking prevention & treatment of cement concrete pavements [R]. Tongji University. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Chongqing Jiaotong University, et al, 2005.
- [6] Huang Y H, Wang S T. Finite element analysis of rigid pavements with partial subgrade contact [J]. HRR, 1974, 485:39.
- [7] Himeno K, Kamijima T, Ikeda T, et al. Distribution of tire contract pressure of vehicles and its influence on pavement distress[C]// Proceedings of 8th International Conference on Asphalt Pavements. Washington: International Society for Asphalt Pavements, 1997: 129-139.
- [8] 谈至明,周玉民,刘少文,等. 不等尺寸双层混凝土路面结构力学模型研究[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 132.
TAN Zhiming, ZHOU Yumin, LIU Shaowen. et al. A study on mechanistic model of double-layered concrete pavement structure with unequal planar dimensions [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 132.

(上接第 537 页)

表 3 各运行图方案下乘客经济效益值

Tab.3 Passenger economic benefit of different timetable variants (人·s)

附加时间 比例/%	运行图 方案 1	运行图 方案 2	运行图 方案 3	运行图 方案 4
5	6 055	3 380	8 275	- 6 435
10	8 740	7 095	12 255	- 12 790
15	21 755	16 850	21 655	- 23 000

4 结语

提出一种优化预留时间设置的方法——CTP策略,并利用轨道交通运营仿真软件 Railsys® 对该策略进行仿真测试,证明了它对延误时间减小、铺图能力挖掘的有效性. 针对 CTP 策略在实际铺图中的应用、运行图方案的选择,提出乘客经济效益最大原则. 并以实际线网为例,计算了各运行图方案的乘客经济效益,确定了不同附加时间比例下最优的运行图方案.

参考文献:

- [1] Joern Pachl. Railway operation and control [M]. 2nd ed.

Mountlake Terrace: Gorham Printing, 2004.

- [2] 江志彬. 基于列车运行图的城市轨道交通运营可靠性研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2007.
JIANG Zhibin. Operation reliability in urban mass transit system based on timetable[D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2007.
- [3] Ralf Kaminsky. Pufferzeiten in Netzen des spurgeführten Verkehrs in Abhängigkeit von Zugfolge und Infrastruktur[M]. Hamburg: Eurail Press, 2001.
- [4] Raphäla Rudolph. Entwicklung von Strategien zur optimierten Anordnung und Dimensionierung von Zeitzuschlägen im Eisenbahnbetrieb [M]. Hamburg: Eurail Press, 2001.
- [5] Jörg Dermitz. Pufferzeiten im Fahrplangefüge [R]. Hanover: Hanover University, Institut für Verkehrswesen Eisenbahnbau und-Betrieb, 2000.
- [6] Natascha Sonnenberg. Verspätungsübertragung im Eisenbahnbetrieb [R]. Hanover University, Hanover: Institut für Verkehrswesen Eisenbahnbau und-Betrieb, 2003.
- [7] International Union of Railways. UIC Code 406, Capacity[S]. Paris: International Union of Railways, 2004.