

基于薄板单元的水泥混凝土路面荷载应力分析

周玉民¹, 谈至明¹, 田 波²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 交通部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 将刚性、半刚性基层上水泥混凝土路面结构简化为弹性地基上不等平面尺寸双层结构模型, 在轴(轮)载作用下, 采用薄板单元, 讨论了模型网格划分和计算精度的关系. 研究了移动轴载作用下路面结构最大荷载应力大小和位置的变化规律. 分析了基层超宽对面层和基层自身最大荷载应力的影响, 基层超宽降低了面层的荷载应力, 幅度为 0~33%; 但基层自身荷载应力明显增大. 比较了采用薄板单元及实体单元时面层和基层最大荷载应力的差异, 当面、基层厚度增大时, 采用薄板单元得到的面层荷载应力偏大 0~20%; 而基层荷载应力偏小 2%~30%. 给出了标准轴载作用于纵边中部荷位的荷载应力修正系数.

关键词: 道路工程; 水泥混凝土路面; 薄板单元; 实体单元; 最大荷载应力; 基层超宽

中图分类号: U 416.216

文献标识码: A

Loading Stress Analysis of Double-layered Cement Concrete Pavement Structure Based on Thin Shell Element

ZHOU Yumin¹, TAN Zhiming¹, TIAN Bo²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Highway Research Institute of the Ministry, Beijing 100088, China)

Abstract: The cement concrete pavement on rigid or semi-rigid base is hereof simplified as a model of double-layered structure with unequal planar dimensions resting on an elastic foundation under axle(tire) load by using thin shell element. The relationship between element meshing size and result accuracy is discussed. The locations and magnitudes of the maximum loading stresses in pavement structure under moving axle load along longitudinal edge are thoroughly studied. The effects of base extension on the maximum loading stresses in pavement and base are also analyzed. Results show that with the increase of the base extended amount, the

maximum loading stress in pavement will drop 0~33%; whereas the maximum stress in base will increase remarkably. Furthermore, the difference of the maximum loading stresses in pavement and base by using shell element and solid element is compared, when the thicknesses of pavement exceeding a limited value, the maximum stress in pavement based upon shell element is larger by 0~20% than that of solid element; but in base is smaller by 2%~30%. Finally, the modified coefficient for the maximum stresses in pavement and base by using shell element is provided.

Key words: road engineering; cement concrete pavement; shell element; solid element; maximum loading stress; base extension

近年来,我国大量采用刚性、半刚性材料作为水泥混凝土路面的基层,由于刚性、半刚性材料本身的抗弯刚度较大,刚性、半刚性基层可以承担相当大一部分荷载;而且,刚性、半刚性基层本身的平面尺寸往往较面层大,即基层是超宽的,其最大荷载应力的位置和大小表现出与等平面尺寸结构不同的特点. 文献[1-3]采用 3 维 20 节点实体单元,对双层水泥混凝土土路面结构的应力进行了分析,文献[1-2]比较了单个矩形荷载作用下采用薄板单元和实体单元结果的差异,论证了满足工程精度的单元网格划分要求,即荷载应力变化剧烈的区域单元网格尺寸须小于 0.05 m. 事实上,采用实体单元进行应力分析,可以较好地反映路面结构的应力变化和提高计算精度,缺点是对计算机的配置要求高(高速 CPU、大容量内存、大容量硬盘)和计算时间长,由于 20 节点实体单元自由度是 4 节点薄板单元的 2.5 倍,在模型单元数量相同的情况下,实体单元计算时间 t 与薄板单元计算时间 t_0 之间的近似关系为 $t \approx t_0^{2.5}$,显然采用实体单元的计算效率在单元较多时大大低

收稿日期: 2008-12-30

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目(2007 318 223 01-9);交通部公路科学研究院重点实验室开放基金资助项目

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

于采用薄板单元的.

针对目前水泥混凝土路面结构分析^[4-8]中存在的计算精度、收敛性及计算时间的矛盾问题,采用不等平面尺寸双层结构模型,在薄板单元类型、单元网格划分、最大荷载应力的大小和位置、基层超宽的影响、与实体单元结果的差异等方面开展研究,通过建立薄板单元与实体单元结果之间的对应关系,为继续采用薄板单元分析刚性、半刚性基层上水泥混凝土路面结构的荷载应力提供理论支持.

1 力学模型与计算方法

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,竖向连续,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 1a 中, h_1, E_1, v_1 分别为面层板的厚度、弹性模量和泊松比; h_2, E_2, v_2 分别为基层的厚度、弹性模量和泊松比; k 为 Winkler 地基的反应模量. 图 1b 中, L 和 B 分别为面层板的长度与宽度; $L_{a1}, L_{a2}, B_{a1}, B_{a2}$ 分别表示基层四边的超宽量.

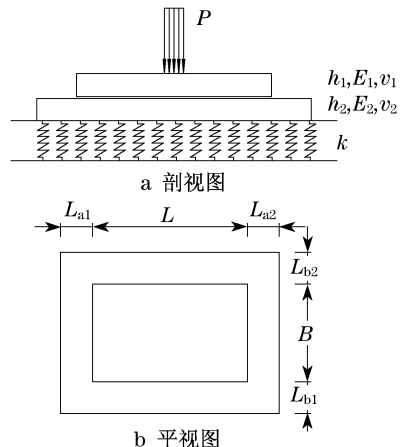


图1 不等平面尺寸双层路面结构模型

Fig.1 Model of double-layered pavement structure with unequal planar dimensions

水泥混凝土路面结构分析采用单轴-双轮(或双轮)荷载,荷载图式(双轮中心距、轮距)见图 2.

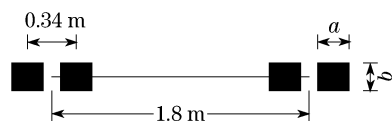


图2 单轴-双轮荷载

Fig.2 Configuration of single axle load

轮印宽度 $a = 0.22$ m, 轮印高 $b = 0.198$ m, 接地压力 $p = 0.573$ MPa, 轴重 $P = 100$ kN. 对于路面上行驶的车辆荷载而言,其作用位置不同,在路面结构内产生的荷载应力不尽相同,荷载作用于水泥混凝土路面不同位置见图 3.

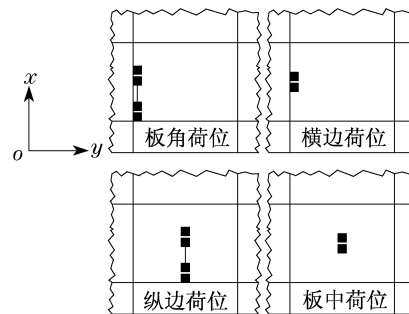


图3 轴(轮)载作用位置示意图

Fig.3 Locations of axle(tires) load on pavements

路面结构分析应用有限元方法,采用通用软件 ANSYS 10.0. 模型单元划分首先采用 4 节点薄板单元(shell 63),然后采用 20 节点实体单元(solid 186)进行比较, Winkler 地基采用 surface 154 单元,面层与基层之间的层间接触采用接触对单元, target 170 和 contac 173 用于薄板模型或 target 170 和 contac 174 用于实体模型.

2 模型网格划分与单元精度

取一典型双层路面结构(单块板)作为算例,计算参数为: $L = 5$ m, $B = 3.75$ m, $h_1 = 0.22$ m, $E_1 = 30\,000$ MPa, $v_1 = 0.15$, $h_2 = 0.20$ m, $E_2 = 3\,000$ MPa, $v_2 = 0.25$, $k = 30$ MN \cdot m⁻³. 基层超宽考虑如下 3 种情况:即等尺寸双层板($B_a = 0, L_a = 0$);基层横向超宽双层板($B_a = 1$ m, $L_a = 0$);以及基层纵、横向超宽双层板($B_a = 1$ m, $L_a = 5$ m).

采用薄板单元进行模型网格划分,荷载应力变化剧烈区域网格适当加密, n 表示荷载作用区等距网格划分的数量,荷载以外区域网格划分由密到稀逐步过渡. 轴载作用于面层角隅和纵边中部荷位的模型网格划分见图 4.

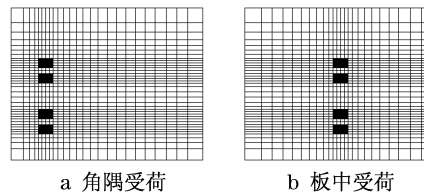


图4 双层路面结构薄板单元网格划分示意图

图4 Schematic of model meshing using shell elements

最大荷载应力比 η (不同网格划分 n 与最大网格划分 n_{\max} 对应的结构层最大荷载应力之比) 随网格划分数量 n 变化的曲线见图 5.

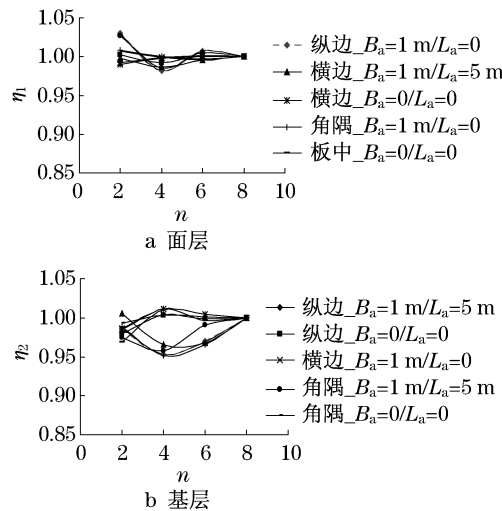


图 5 最大荷载应力比 $\eta \sim n$ 曲线

Fig.5 Maximum stress ratio $\eta \sim n$ curves

从图 5 可以看到,不考虑温度翘曲影响,采用薄板单元,不同基层超宽和不同荷位下,随网格划分数量 n 的增大,水泥混凝土路面面层最大荷载应力比 η_1 波动变化并趋于 1,当 $n \geq 4$ 时,面层最大荷载应力可控制在 2% 以内.对基层而言,纵缝边缘中部、板角隅和横边中部荷位下,随网格划分数量 n 的增大,基层超宽,应力比 η_2 呈现波动增长的趋势,即基层最大荷载应力不收敛;基层不超宽,应力比 η_2 波动变化并趋于 1,当 $n \geq 4$ 时,基层最大荷载应力可控制在 3% 以内.板中荷位下,随网格划分数量 n 的增大,应力比 η_2 波动变化并趋于 1,当 $n \geq 4$ 时,基层最大荷载应力亦可控制在 3% 以内.

采用薄板单元分析,对于因基层超宽而引起基层自身荷载应力不收敛的问题,首先,可以面层荷载应力收敛的网格划分作为计算的依据,得到超宽基层自身的名义最大荷载应力,随后与相应的实体单元计算结果比较,建立修正关系,从而使得薄板单元可方便应用于水泥混凝土路面结构的荷载应力分析中.

3 最大荷载应力大小和位置

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.面层尺寸与基层超宽情况同第 2 节,考虑如下 4

组不同结构组合,结构参数见表 1.考虑标准轴载(图 2)沿板纵边移动,将任一轴载位置的面层板底最大拉应力 σ_1 、板顶最大拉应力 σ_1' 与轴载位于纵缝边缘中部的板底拉应力 $\sigma_{1\max}$ 之比记作 $\alpha_1 (= \sigma_1 / \sigma_{1\max})$, $\beta_1 (= \sigma_1' / \sigma_{1\max})$.任一轴载位置的基层底部最大拉应力 σ_2 与轴载位于纵缝边缘中部的基层底部拉应力 $\sigma_{2\max}$ 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 (轴中心线)变化来判别路面结构层最大荷载应力大小和位置.表 1 中 λ 为基层与面层抗弯刚度之比, $\lambda = D_2 / D_1$, $D_1 = E_1 h_1^3 / 12(1 - \nu_1^2)$, $D_2 = E_2 h_2^3 / 12(1 - \nu_2^2)$.

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 | E_1 | ν_1 | h_2 | E_2 | ν_2 | |
| 1 | 0.22 | 30 000 | 0.15 | 0.12 | 1 000 | 0.25 | 0.006 |
| 2 | | | | 0.20 | 3 000 | 0.25 | 0.078 |
| 3 | | | | 0.20 | 10 000 | 0.25 | 0.261 |
| 4 | | | | 0.22 | 30 000 | 0.15 | 1.000 |

3.1 面层最大荷载应力大小和位置

面层应力比 α_1 与 β_1 随标准轴载移动位置 y (轴中心线)变化的曲线见图 6.从图 6a 可以发现,等尺寸双层板($B_a = 0, L_a = 0$),面层应力比 α_1 随标准轴载移动位置 y 的增长先减小后逐渐增大,当 $y \approx 0.3\text{ m}$ 时, α_1 达到最小;当 $y = 2.5\text{ m}$ 时(纵缝边缘中部), α_1 达到最大($\alpha_1 = 1$).面层应力比 β_1 随标准轴载移动位置 y 的增长逐渐减小,当 $y = 2.5\text{ m}$ 时, β_1 达到最小, β_1 最大不超过 1.综合面层应力比 α_1 与 β_1 的变化来看,移动标准轴载作用下,面层最大荷载应力位置在纵缝边缘中部荷位下方的面层底面.抗弯刚度比 λ 对等尺寸双层板面层应力比 α_1 与 β_1 的影响很小.根据图 6b,基层横向超宽双层板($B_a = 1\text{ m}, L_a = 0$),面层应力比 α_1 与 β_1 随标准轴载移动位置 y 的变化规律与等尺寸双层板的类似,只是标准轴载作用于板角隅荷位附近($y = 0 \sim 0.3\text{ m}$),且当面层抗弯刚度比 λ 较大时(比如 $\lambda > 0.26$), $\alpha_1 > 1$,表明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,而不是在纵缝边缘中部荷位($y = 2.5\text{ m}$)下方的面层底面,但考虑到横缝的传荷效应(集料嵌锁和传力杆传荷),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,因此,移动标准轴载作用下,面层最大荷载应力位置仍在纵缝边缘中部荷位下方面层底面.

抗弯刚度比 λ 对基层横向超宽双层板面层应力比 α_1 的影响在标准轴载作用于板角隅荷位附近时 ($y = 0 \sim 0.3$ m) 影响较大, 对 β_1 略有影响. 从图 6c 可以看到, 基层纵横向超宽双层板 ($B_a = 1$ m, $L_a = 5$ m), 面层应力比 α_1 与 β_1 随标准轴载移动位置 y 的变化规律亦与等尺寸双层板的类似. 移动标准轴载作用

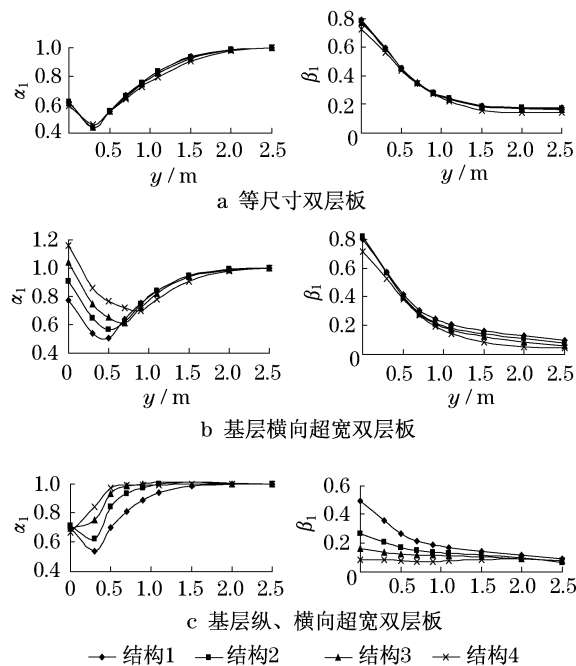


图6 面层应力比 α_1, β_1 与 y 曲线
Fig.6 Stress ratio α_1, β_1 and y curves

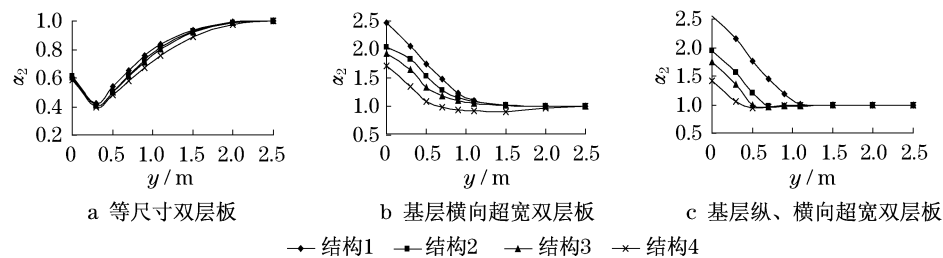


图7 基层应力比 α_2 与 y 曲线
Fig.7 Stress ratio α_2 and y curves

4 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, 即基层是超宽的, 根据超宽方向的不同分为横向超宽和纵向超宽 (见图 1b), 对于半刚性基层, 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, 定义基层超宽对面层和基层自身最大荷载应力影响的系数为

下, 面层最大荷载应力位置保持不变, 即仍在纵缝边缘中部荷位下方层面底面. 抗弯刚度比 λ 对基层纵横向超宽双层板面层应力比 α_1 与 β_1 的影响较明显.

3.2 基层最大荷载应力大小和位置

应力比 α_2 随轴载移动位置 y 变化曲线见图 7. 从图 7 中可以看出, 等尺寸双层板基层的最大荷载应力位置位于纵缝边缘中部荷位下方的基层底面. 而基层纵向超宽或纵、横向都超宽时, 最大荷载应力位置位于板角隅荷位下紧靠横缝和纵缝相交处下方的基层底面, 此时基层最大荷载应力数值很大, 是标准轴载作用于纵缝边缘中部荷位时基层最大荷载应力 $\sigma_{2\max}$ 的 1~3 倍不等. 造成这种情况的原因在于计算模型中假设材料是线弹性的, 角点为应力奇异点, 随着单元网格尺寸细分, 荷载应力还会不断增大. 实际上当角点下方基层应力超过某一数值时, 材料进入屈服状态, 基层自身荷载应力因重新分配而大大减小.

综上, 标准轴载作用下, 面层最大荷载应力位置位于纵缝边缘中部荷位下方层面的底面. 而基层最大荷载应力位置随基层超宽不同而变化, 或者位于纵缝边缘中部荷位下方基层的底面; 或者位于板角隅荷位紧靠横缝和纵缝相交处下方基层的底面. 鉴于面层荷位在路面设计中的重要性, 下面分析纵缝边缘中部荷位下混凝土路面结构荷载应力变化.

$$\xi_i = \frac{\sigma_i - \sigma_i^0}{v_i^\infty - \sigma_i^0} \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

式中: ξ 称为基层超宽系数; σ_1 和 σ_1^0 表示面层在基层任意超宽和无超宽时的最大荷载应力; σ_2 和 σ_2^0 表示基层任意超宽和无超宽时的最大荷载应力; σ_1^∞ 和 σ_2^∞ 表示基层无限超宽时面层和基层的最大荷载应力; 下标 1, 2 分别表示面层和基层.

对常用混凝土路面结构, 参数变化范围为: $E_1 = 30\,000 \sim 40\,000$ MPa; $v_1 = 0.15$; $h_1 = 0.16 \sim 0.36$ m; $E_2 = 1\,000 \sim 35\,000$ MPa; $v_2 = 0.25 \sim 0.15$; $h_2 =$

0.12~0.25 m; $k = 30 \sim 240 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$. 大量计算表明,对面层而言,纵缝边缘中部荷位下,基层超宽降低了面层的荷载应力,但基层超宽无一例外地增大了基层自身的荷载应力. 比值 $\sigma_1^\infty / \sigma_1^0 = 0.67 \sim 0.97$, $\sigma_2^\infty / \sigma_2^0 = 2.2 \sim 120$.

纵缝边缘中部荷位下,基层超宽影响系数 ξ 与 B_a/r_2 之间的关系见图 8, $r_2 = (D_2/k)^{1/4}$.

从图 8 中可见,基层超宽系数 ξ 与基层横向相对超宽 B_a/r_2 之间有很好的相关关系,基层超宽系数 ξ 的近似计算式可表示为

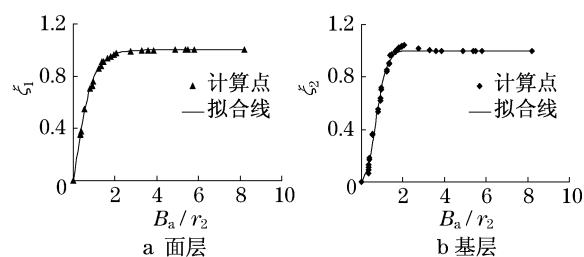


图 8 基层超宽系数 $\xi \sim B_a/r_2$ 关系曲线

Fig. 8 Base extension coefficient $\xi \sim B_a/r_2$ diagrams

$$\xi_i = 1 - \exp\left[-c_i \left(\frac{B_a}{r_2}\right)^{d_i}\right] \quad (2)$$

式(2)中的回归常数 c, d 随基层超宽不同而异. 单轴荷载作用于面层纵边中部荷位,基层纵向超宽对面、基层相应的回归常数 c, d 几乎无影响. 面层: $c_1 = 1.64, d_1 = 1.00$; 基层: $c_2 = 1.54, d_2 = 1.98$.

5 薄板、实体单元结果的差异与修正

应用不等尺寸双层结构力学模型模拟水泥混凝土路面结构,可采用实体单元或薄板单元进行荷载应力分析. 采用 20 节点实体单元(solid 186)时,层间接触可以模拟竖向从连续到分离,水平向摩擦为 0 到无限大的任意情形;采用 4 节点薄板单元(shell 63)分析时,层间接触模拟在竖向上受到限制,不能处理层间接触可分离的情况. 另外,薄板单元不考虑层厚方向上的压缩和剪切变形对荷载应力的影响. 因此,两种单元得到的路面结构荷载应力结果必定存在差异,可通过在两种单元结果之间建立关系,对薄板单元结果进行修正.

5.1 基层超宽双层路面结构

改写式(1),双层路面结构各层最大荷载应力为

$$\sigma_i = \sigma_i^0 [1 + \xi_i \varphi_i], \quad \varphi_i = \frac{\sigma_i^\infty - \sigma_i^0}{\sigma_i^0} \quad (3)$$

式中: φ_i 称为基层无限超宽时面层和基层荷载应力变化幅度.

对于基层超宽双层结构,单元类型对路面结构层荷载应力的影响可分解为单元类型对等尺寸双层结构荷载应力 σ_i^0 的影响,对基层超宽系数 ξ_i 的影响,以及对基层无限超宽时面层和基层荷载应力变化幅度 φ_i 的影响. 对于第一种影响将讨论解决;对于后两者,可通过比较薄板单元和实体单元对应的基层超宽系数 ξ_i ,基层无限超宽时面层和基层荷载应力变化幅度 φ_i 的差异来反映.

图 9 所示为标准轴载作用于纵缝边缘中部荷位下采用薄板单元和实体单元基层超宽系数 ξ_i 随基层相对超宽量 B_a/r_2 变化关系的比较.

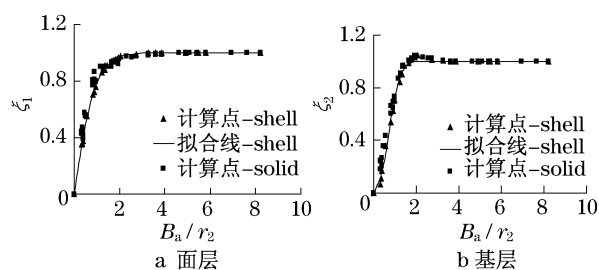


图 9 基层超宽时薄板、实体单元的 $\xi \sim B_a/r_2$ 关系比较

Fig. 9 Comparison of base extension coefficient $\xi \sim B_a/r_2$ based on shell element and solid element

从图 9 可以看到,无论是采用薄板单元还是实体单元,所得到的基层超宽系数 ξ_i 与基层相对超宽量 B_a/r_2 之间的变化关系吻合很好,也就是说,计算采用的单元类型(薄板、实体)不改变基层超宽系数 ξ_i 的大小.

图 10 所示为标准轴载作用于纵缝边缘中部荷位下采用薄板单元和实体单元基层无限超宽时面层荷载应力变化幅度 φ_1 随抗弯刚度比 λ 变化关系的比较. 从图 10 可以看到,总体趋势上,基层无限超宽时面层荷载应力变化幅度 φ_1 随抗弯刚度比 λ 的增大而增长, λ 较小时, φ_1 增幅很大,随后增幅变平缓,

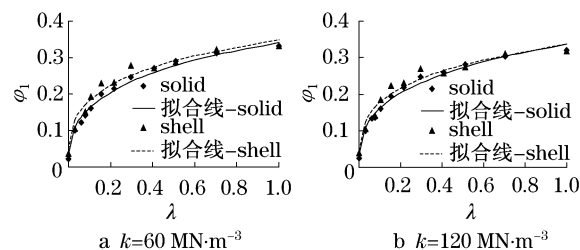


图 10 基层超宽时薄板、实体单元的 $\varphi_1 \sim \lambda$ 关系比较

Fig. 10 Comparison of relative stress variation $\varphi_1 \sim \lambda$ based on shell element and solid element

二者之间呈现较好的相关性. 两种单元对应的 φ_1 略有差异. 地基反应模量 k 对 φ_1 也有一定程度影响, 但不大.

采用薄板单元, 基层无限超宽时面层荷载应力变化幅度 φ_1 与抗弯刚度比 λ 及地基反应模量 k 的近似关系式为

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= 1 - \exp[-f_1(k)\lambda^{0.325}] \\ f_1(k) &= 3.580 \times 10^{-7} k^2 + 3.663 \times 10^{-4} k - 0.4496\end{aligned}\quad (4)$$

在实际应用时, 可以认为薄板单元的面层荷载应力变化幅度 φ_1 与实体单元相当, 由此引起的荷载应力误差不超过 3%.

对于常用路面结构, 基层无限超宽, 采用实体单元与采用薄板单元得到的基层自身荷载应力之比变化在 0.94~1.07 的范围内. 由于影响因素较复杂, 在实体单元与薄板单元对应的基层荷载应力之间要给出一个较准确的修正是困难的, 好在两种单元结果的差异不大, 采用薄板单元计算时, 对无限超宽基层自身荷载应力不加修正.

5.2 等尺寸双层路面结构

对于等尺寸双层路面结构, 涵盖通常的路面结构参数变化范围: $E_1 = 30\,000 \sim 40\,000$ MPa; $\nu_1 = 0.15$; $h_1 = 0.16 \sim 0.36$ m; $E_2 = 1\,000 \sim 35\,000$ MPa; $\nu_2 = 0.25 \sim 0.15$; $h_2 = 0.12 \sim 0.25$ m; $k = 30 \sim 240$ MPa/m. 计算标准轴载作用于纵缝边缘中部荷位时等尺寸双层的荷载应力. 分析结果表明, 纵边中部荷位下, 当结构层厚度较小时, 采用薄板单元的面层最大荷载应力比实体单元的基本一致; 当结构层厚度增大时, 采用薄板单元的面层最大荷载应力比实体单元的大, 幅度在 0~20%. 而基层最大荷载应力始终较实体单元的小, 幅度在 2%~30%之间变化.

图 11 所示为纵边中部荷位下采用实体单元和薄板单元的等尺寸双层板各结构层最大荷载应力之比 $\zeta_i (= \sigma_i^{\text{solid}} / \sigma_i^{\text{shell}}, i=1, 2, \text{意义同前})$ 随抗弯刚度比 λ 变化的关系图. 从图 11 可以看到, 对面层而言, 比值 $\zeta_1 \leq 1$, 随着抗弯刚度比 λ 的增大, 面层厚度较大时 (>0.12 m), 比值 ζ_1 减小; 仅当面层较薄时 (<0.12 m), 比值 $\zeta_1 \approx 1$, 表明在面层厚度较大时薄板单元的结果偏大. 对基层来说, 比值 $\zeta_2 > 1$, 从总体趋势看, 随着抗弯刚度比 λ 的增大, 比值 ζ_2 减小并趋近于 1; 面层厚度较大时对应的比值 ζ_2 也较大, 表明薄板单元的结果偏小.

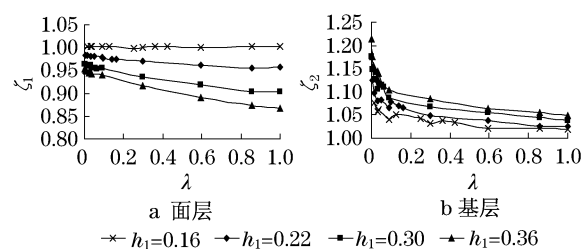


图 11 薄板、实体单元荷载应力比 $\zeta_i \sim \lambda$ 关系 ($k = 30$ MPa/m)
Fig. 11 Diagram of loading stress ratio $\zeta_i \sim \lambda$ curves based on shell element and solid element ($k = 30$ MPa/m)

计算表明, 面层厚度相同, 地基反应模量 k 增大, ζ_1 、 ζ_2 降低的幅度增大. 因此, 采用薄板单元, 当路面板较厚时, 计算得到的荷载应力必须予以适当的修正.

5.3 面层基层最大荷载应力修正

由分析可知, 要得到双层路面结构较为准确的最高荷载应力数值 (无论基层是否超宽), 只需比较等尺寸双层板在采用薄板单元和实体单元时的荷载应力差异, 并在二者之间建立修正关系即可, 具体而言, 在采用实体单元和薄板单元得到的等尺寸双层路面结构各层最大荷载应力比值 ζ_i 与抗弯刚度比 λ 、面层厚度 h_1 之间建立近似函数关系, 比值 ζ_i 又称为薄板单元荷载应力修正系数, 水泥混凝土路面结构各层最大荷载应力计算式如

$$\sigma_i = \zeta_i \sigma_i^{\text{shell}} \quad (5)$$

当基层面层抗弯刚度比 $\lambda \rightarrow 0$ 时, 等尺寸双层路面结构退化为单层板, 标准轴载作用于纵缝边缘中部荷位, 薄板单元荷载应力修正系数 ζ_1 有较为简单的近似计算式, 如

$$\zeta_1 = 1.05 r_g^{0.055} h_1^{1.48} h_1^{-0.195} \quad (6)$$

对于一般意义上的等尺寸双层板, 基层面层抗弯刚度比 $\lambda > 0$, 薄板单元荷载应力修正系数 ζ_i 的函数关系较为复杂, 表示为

$$\zeta_i = s_i(h_1) + g_i(h_1) \exp(-b\lambda) \quad (7)$$

式中: $s_i(h_1)$ 与 $g_i(h_1)$ 为与面层厚度有关的函数; b 为回归常数.

对面层

$$\begin{aligned}s_1(h_1) &= 1.127 - 0.8495h_1 \\ g_1(h_1) &= -0.0762 + 0.5332h_1 \\ b &= -1.457\end{aligned}\quad (8)$$

对基层

$$\begin{aligned}s_2(h_1) &= 1.025 \\ g_2(h_1) &= 0.01703 + 0.3243h_1 \\ b &= -2.096\end{aligned}\quad (9)$$

标准轴载作用于纵缝边缘中部荷位下,式(7)~(9)为采用薄板单元的荷载应力修正系数计算式.对面层而言, $\lambda = 0.001 \sim 1$,修正式的误差可控制在3%以内.就基层来说, $\lambda < 0.04$,修正式的误差较大,超过10%; $\lambda = 0.04 \sim 1$,误差可控制在4%以内.

至此,解决了一般双层路面结构在标准轴载作用于纵缝边缘中部荷位下采用薄板单元的荷载应力计算.实际计算时,对于单层板或等尺寸双层板,只需将薄板单元的结果乘以荷载应力修正系数 ζ_i 即可,对于基层超宽的情况,再采用式(3)进行计算.经修正后薄板单元结果的精度可以满足要求.

6 结论

基于弹性地基上不同平面尺寸双层结构模型,在轴(轮)载作用下,讨论了采用薄板单元分析水泥混凝土路面结构荷载应力的可行性,结论如下:

(1) 采用薄板单元分析水泥混凝土路面结构的荷载应力,荷载作用区单元尺寸小于0.05 m时,面层荷载应力收敛,基层超宽时基层自身荷载应力不收敛,可以用面层荷载应力收敛的网格划分进行模型单元划分,基层超宽时的自身荷载应力称为名义荷载应力.

(2) 基层超宽对面层和基层自身荷载应力的影响可用超宽系数表征,基层超宽系数 ξ 与 B_a/r_2 之间有较好的相关关系,可用回归计算式(2)表示.纵缝边缘中部荷位下,基层超宽,面层荷载应力有所降低,降幅在0~33%;但基层自身荷载应力无一例外地增大.

(3) 通过与实体单元结果对比,建立了纵缝边缘中部荷位下薄板单元应力结果与实体单元结果的对应关系,给出了单层板和等尺寸双层板的荷载应力修正系数计算式.当面层厚度取较大值时,采用薄板单元,面层荷载应力结果偏大0~20%;基层荷载

应力偏小2%~30%.

通过研究,解决了采用薄板单元分析时因基层自身荷载应力不收敛而难以准确取值的难题,为应用薄板单元分析水泥混凝土路面结构荷载应力奠定基础.

参考文献:

- [1] 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. Mechanistic model of double-layered concrete pavement structures with unequal planar dimensions[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3):132.
- [2] 周玉民,谈至明,刘少文,等.水泥混凝土路面角隅应力分析[J].工程力学,2010,27(4):105.
ZHOU Yumin, TAN Zhiming, LIU Shaowen, et al. Analysis of near-corner stresses in cement concrete pavement structure[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(4):105.
- [3] 周玉民,谈至明.水泥混凝土路面结构临界点位置分析[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(4):538.
ZHOU Yumin, TAN Zhiming. Analysis of critical locations in cement concrete pavement structure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(4):538.
- [4] 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[M].北京:人民交通出版社,2002.
Ministry of Communications of the P R China. JTG D40—2002 Specification of cement concrete pavement design for highway [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [5] 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.
- [6] Huang Y H. Pavement analysis and design [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.
- [7] Huang Y H, Wang S T. Finite element analysis of rigid pavements with partial subgrade contact [J]. HRR, 1974, 485:39.
- [8] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). AASHTO guide for design of pavement structures[M]. Washington: AASHTO, 1993.