

通自然村小尺寸水泥混凝土板结构受力分析

夏志浩^{1,2}, 白桃^{1*}, 李超源³

(1.武汉工程大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430073;2.中冶南方工程技术有限公司 深圳分公司,
广东 深圳 518028;3.武汉道盛交通科学技术有限公司,湖北 武汉 430000)

摘要:为了节省农村公路建设资金,缓解通组公路建设的巨大财政压力,该文开展经济型小尺寸水泥混凝土板路面结构受力研究。通过有限元应力计算,结合水泥混凝土疲劳方程,对轴载换算指数进行回归,同时研究板体尺寸、路面结构等因素对结构受力的影响。结果表明:较薄的路面结构下单轴单轮的换算系数比规范大,单轴双轮的换算系数与规范相似。相较于传统大尺寸板体,小尺寸板体的各项应力均有所下降,更利于结构受力。在通组公路中,使用小尺寸单层水泥板路面结构是最优的,有利于资金紧缺情况下的公路建设。

关键词:水泥混凝土路面;小交通量;小尺寸水泥混凝土路面板;轴载换算指数;应力分析

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

0 引言

针对小交通量公路的研究,美国、英国、意大利等国家开展得较早^[1-4],其中沥青表面处置及沥青碎石封层使用较多,中国对小交通量通组公路的研究开展较迟,主要使用的路面结构为单层水泥混凝土板,经调研厚度集中为16~20 cm,路面宽度集中为3.5~4 m。中国现行《公路工程技术标准》(JTGB01—2014)^[5]在指导通村公路建设中发挥了重要作用,但在指导通组硬化路建设时显示出针对性不足或部分地区实操性欠缺等问题。如在交通量较小的户户通区域,通行车辆只有小客车和摩托车,此时混凝土板内产生的应力很小,引起的疲劳损伤也很轻微,若在硬化道路上继续使用BZZ-100进行设计过于浪费^[6]。对于交通组成中不含大型、重载车辆的小交通量路段,《小交通量农村公路工程技术标准》(JTG2111—2019)^[7]进行了补充,提出了车辆类型、路线、设计速度等设计指标,但是缺乏路面结构的设计参数和指标^[8],在水泥混凝土路面结构设计中标准轴载及轴载换算指数是重要输入参数,对路面结构的设

计寿命有着至关重要的影响^[9-12]。

本文研究对象主要为农村通组公路。依照混凝土疲劳方程,对轴载换算指数进行回归,确定小交通量通组公路的设计参数,在此基础上,利用小尺寸水泥板结构受力较优的特点,优化农村通组公路的路面结构,以达到降低厚度、节约造价的目的。

1 有限元模型的选定

1.1 基本假定

本文选用Abaqus有限元软件分析,在有限元中混凝土是各向同性、均质的弹性材料;双层板时基层为水泥稳定基层,模型中以弹性模量大小进行区分,单层板时不设置基层,地基选用弹性地基模型,接触面尺寸同基层或面层,厚度为1.5 m,不考虑板底脱空情况;层间接触均为小滑移;单元采用C3D20R(20节点六面体单元,减缩积分)。

根据调查结果初步拟定路面宽度为3.5 m,小尺寸路面板板宽为1.75 m,长度为1.5 m、1.75 m和2 m,正常尺寸板体为3.5 m×3.5 m,具体模型如图1所示。

收稿日期:2023-04-16(修改稿)

基金项目:交通运输部重点研发项目(编号:2020-MS1-061)

作者简介:夏志浩,男,硕士研究生.E-mail:544123551@qq.com

*通信作者:白桃,男,博士,副教授.E-mail:yixiaotian0113@126.com

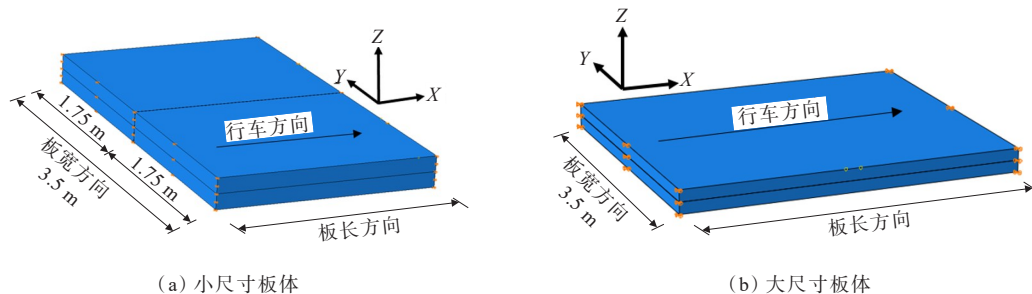


图 1 有限元模型示意图

1.2 汽车参数

根据调查交通组成,依照单轴单轮、双轮进行分类,其中因摩托车荷载较轻,故在路面结构力学计算中不予考虑,同时将中型载重货车排除在外,轴载变

化区间为标准到满载情况,车辆轮载是将双圆均布荷载等效为矩形荷载,长宽比10:7^[13],具体荷载和胎压见表1。

表 1 汽车参数

轴型	轴载/kN	轮压/MPa	轮距/cm	轮胎接地面积/m ²	双轮中心距/cm	位置
单轴—单轮	11 (11~15)	0.25	163	0.022~0.034	—	小客车前轴
	13 (13~17)	0.25	163		—	小客车后轴
	18 (18~30)	0.48	175	0.019~0.031	—	中型客车前轴
	13 (13~25)	0.36	150	0.018~0.035	—	轻型货车前轴
	14 (14~24)	0.58	149	0.012~0.021	—	低速货车前轴
	16 (16~25)	0.34	140	0.018~0.035	—	三轮汽车后轴
单轴—双轮	40 (40~55)	0.48	175	0.020~0.028	23.6	中型客车后轴
	22 (22~34)	0.36	150	0.015~0.024	20.5	轻型货车后轴
	30 (30~40)	0.58	149	0.013~0.017	25.5	低速货车后轴

注:括号内数值为对应车辆常见轴载范围。

2 推导轴载换算公式

2.1 计算回归方程

参照《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)^[14],需要将不同车辆的轴型换算到标准轴载下进行等效换算,所谓等效是指同一路面结构在不同的轴载下达到相同的损伤程度^[15-16]。水泥混凝土路面的轴载换算公式是在混凝土疲劳方程的基础上建立的,根据小梁疲劳试验结果,建立疲劳方程式如式(1)^[17-20]:

$$\lg\left(\frac{\sigma_{pi}}{f_c - \sigma_{ti}}\right) = \lg a - b \lg N \quad (1)$$

式中: σ_{pi} 和 σ_{ti} 分别为荷载应力和温度应力(MPa); f_c 为混凝土的弯拉强度(MPa); N 为疲劳断裂时的重复加荷次数; a 和 b 为回归系数,取 $a=1.0$, $b=0.057$ 。

单层板荷载应力公式:

$$\sigma_{pi} = A r^m \frac{P_i^n}{h_c^2} \quad (2)$$

双层板荷载应力公式:

$$\sigma_{pi} = \frac{A}{1 + D_b/D_c} r_g^m \frac{P_i^n}{h_c^2} \quad (3)$$

式中: P_i 为各级轴重(kN); h_c 为混凝土面板厚度(m); D_c 和 D_b 分别为混凝土面层板和下层板的截面弯曲刚度(MN·m),可参考《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)^[14]进行计算; A , m , n 为回归系数; r_g 为路面结构刚度系数(m)。

将式(2)、(3)代入式(1),得到混凝土板体疲劳寿命与板的刚度半径、轴载之间的换算关系,例如,对于双层板^[21-23]:

$$N_i = \left[\frac{a(f_c - \sigma_{ti})h_c^2(1 + D_b/D_c)}{A_i r_i^m p_i^{n_i}} \right]^{1/b} \quad (4)$$

则任意轴载与标准轴载的换算关系如下:

$$k_{pi} = \frac{N_s}{N_i} = \left[\frac{A_i r^{m_i}}{A_s r^{m_s}} \right]^{1/b} (P_i)^{(n_i - n_s)/b} \left(\frac{P_i}{P_s} \right)^{n_s/b} \quad (5)$$

其中轴载换算指数:

$$\delta = n/b \quad (6)$$

2.2 轴载换算指数

本次计算采用上述假设条件,应力分析所涉及的路面结构参数如表 2 所示,将水泥混凝土板模量 E_c ,水泥板厚度 h_c ,基层模量 E_b ,基层厚度 h_b 和土基顶面回弹模量 E_t 进行正交试验设计,选用 $L_{16}(4^5)$ 5 因素 4 水平标准正交表,双层板路面结构如表 3 所示,单层板为表 3 中去除基层参数。

表 2 路面结构组合及其参数取值范围

水平	E_c/GPa	h_c/m	E_b/MPa	h_b/m	E_t/MPa
1	23 (C20)	0.14	1 000	0.14	30
2	25 (C25)	0.16	1 500	0.16	60
3	27 (C30)	0.18	2 000	0.18	90
4	29 (C35)	0.20	2 500	0.20	120

表 3 路面结构组合

组合	E_c/GPa	h_c/m	E_b/MPa	h_b/m	E_t/MPa
1	23 000	0.14	1 000	0.14	30
2	23 000	0.16	1 500	0.16	60
3	23 000	0.18	2 000	0.18	90
4	23 000	0.20	2 500	0.20	120
5	25 000	0.14	1 500	0.18	120
6	25 000	0.16	1 000	0.20	90
7	25 000	0.18	2 500	0.14	60
8	25 000	0.20	2 000	0.16	30
9	27 000	0.14	2 000	0.20	60
10	27 000	0.16	1 000	0.18	30
11	27 000	0.18	2 500	0.16	120
12	27 000	0.20	1 500	0.14	90
13	29 000	0.14	2 500	0.16	90
14	29 000	0.16	2 000	0.14	120
15	29 000	0.18	1 500	0.20	30
16	29 000	0.20	1 000	0.18	60

单双层板下不同板体尺寸时应力回归公式的拟合参数如图 2~4 所示。由图 2~4 可以得到不同路面结构下的 A 、 m 、 n 及轴载换算指数,其中轴载换算指

数公式如式(6),将不同荷载代入到新公式与有限元结果对比,发现拟合过程中相关系数 R^2 大于 0.95,显著性检验 $P < 0.001$,表明显著性极强,说明回归公式具有较高的可靠性。

从图 2、3 的(a)、(b)中可以看出:不同板体尺寸下回归得到的 A 和 m 值非常接近,这与式(2)、(3)所表征的含义是一致的,即板体平面尺寸对混凝土面板结构受力影响较小。图 2(c)与图 3(c)表明:不同路面结构及尺寸对 n 值影响较小,但是计算中标准轴载的选择对 n 值影响较大,相应地,获得的轴载换算指数 δ 区别也较大,其中大板的轴载换算指数要大于小板,如图 2(d)和图 3(d)所示。图 4 为单、双层板路面结构下,采用单轴单轮和单轴双轮统计得到的轴载换算指数均值 μ 和标准差 σ 。

从图 4 可以看出:无论是单层还是双层板路面结构,采用不同轴型作为标准轴载时,轴载换算指数存在差异,单轴单轮偏大,与《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)^[14] 推荐的 16 存在差异。单层板的平均轴载换算指数要稍微大于双层板结构相应值,意味着路面结构厚度对轴载换算指数有一定影响。经大量计算后推荐:单轴单轮作为标准轴载时轴载换算指数为 18.73,单轴双轮的推荐轴载换算指数为 16.38。

3 应力分析

结合上述回归参数对路面荷载应力进行计算,再依据有限元对温度应力进行分析,得到板体尺寸、路面结构对荷载应力及温度应力的影响规律。

3.1 荷载应力分析

《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)中采用混凝土的最大荷载应力、设计轴载的荷载疲劳应力、最大温度梯度应力及温度疲劳应力作为路面结构极限状态的判断条件,其中最大荷载应力可以通过回归公式计算直接得到,同样疲劳应力依照水泥混凝土疲劳特性计算可得。

(1) 最大荷载应力

利用上述回归参数及公式计算得到最大荷载应力(荷载 55 kN,中型客车后轴),如图 5 所示。

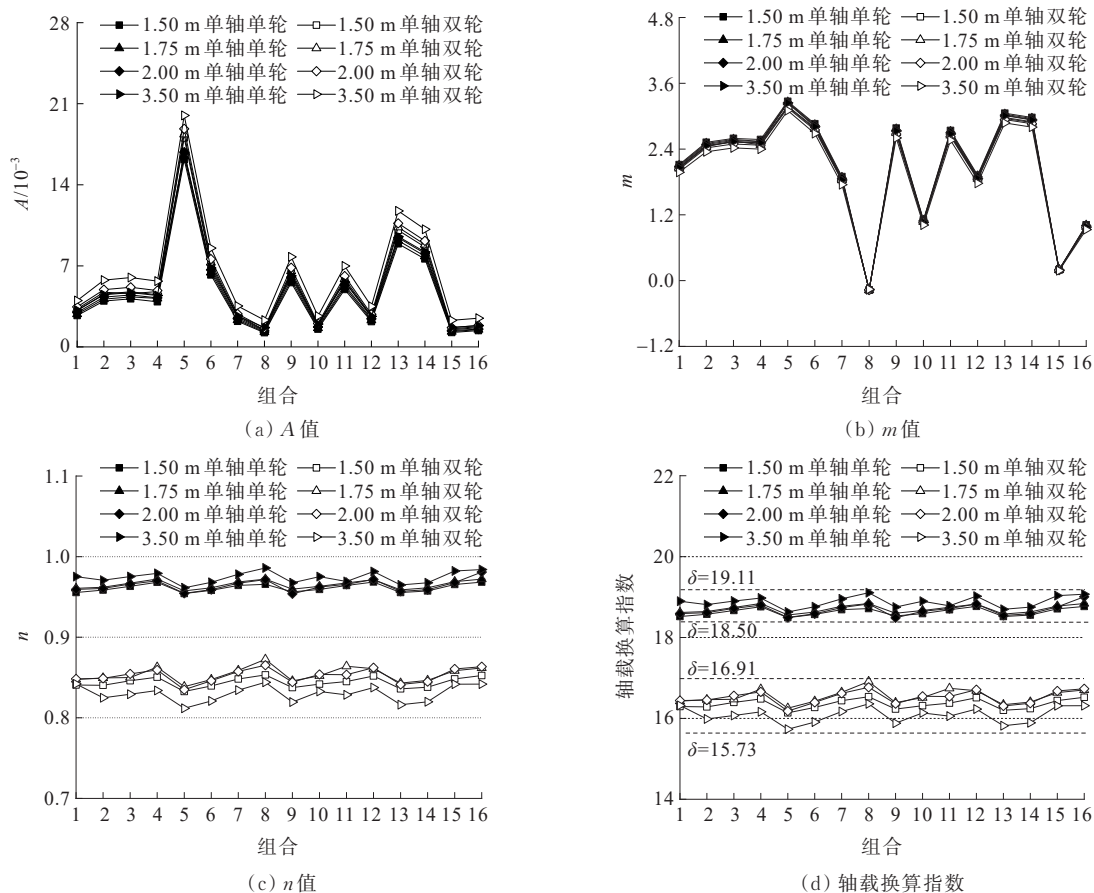


图 2 单层板下不同板体尺寸时应力回归公式的拟合参数

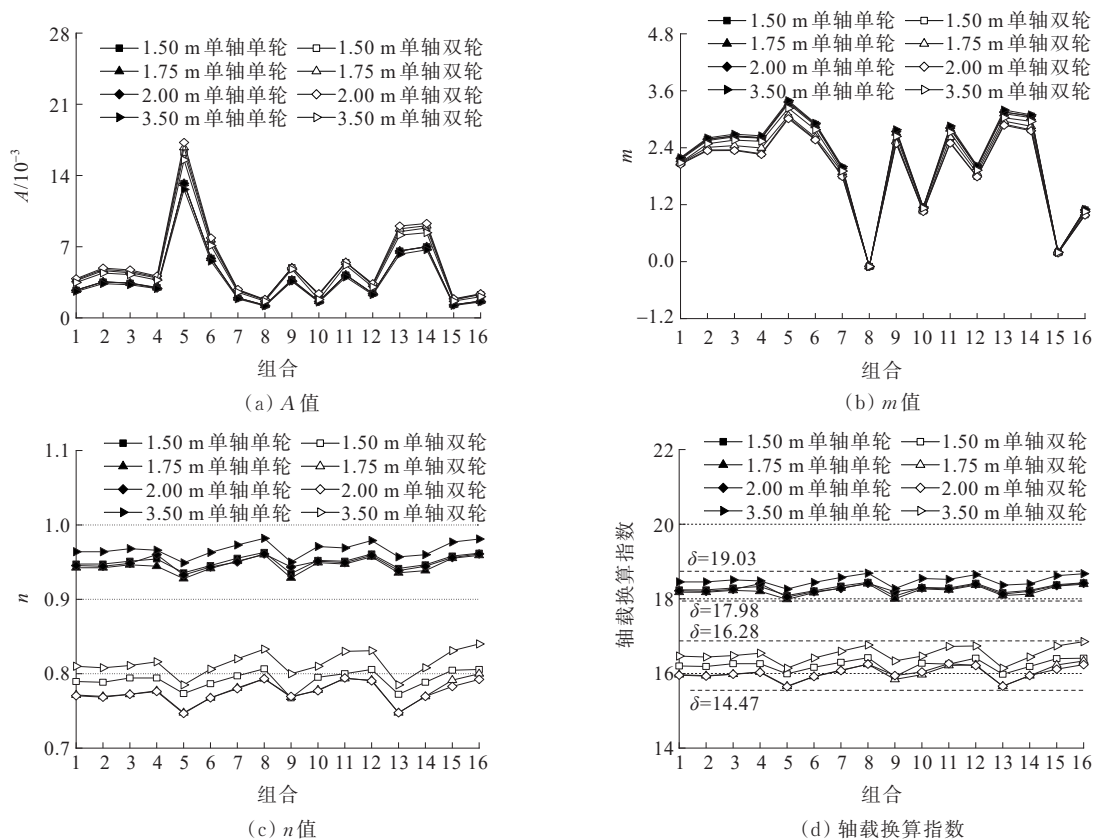


图 3 双层板下不同板体尺寸时应力回归公式的拟合参数

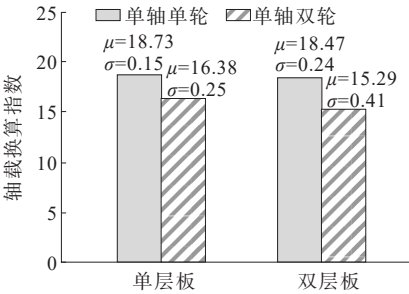


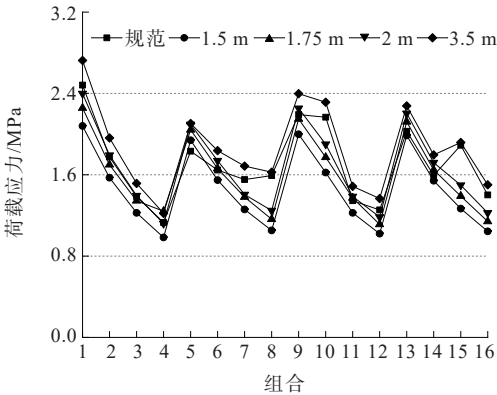
图4 路面结构分别为单、双层板时的轴载换算指数

单、双层板荷载应力极差分析如表4所示。

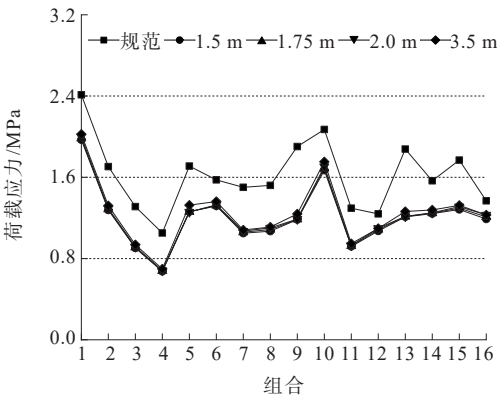
由图2~5及表4可知:不同路面结构下拟合的结果趋势基本同规范一致。通过正交试验结果与荷载应力的极差分析,可以得到对路面结构受力影响最大的是水泥混凝土面层厚度,影响最小的是水泥混凝土面层模量,影响程度由大到小排序为:面层厚度、土基模量、基层模量、基层厚度、面层模量。

(2) 疲劳荷载应力

《小交通量农村公路工程技术标准》(JTG 2111—2019)中年平均交通量为400 pcu/d,结合车辆通行比例和上述轴载换算关系,其中标准轴载为30 kN单轴双轮,参照规范中疲劳应力系数计算方法,得到不同路面结构下的疲劳应力系数 k_f ,如图6所示。



(a) 单层板



(b) 双层板

图5 最大荷载应力

表4 单、双层板荷载应力极差分析

项目	单层板			双层板				
	E_c/GPa	h_c/m	E_t/MPa	E_c/GPa	h_c/m	E_b/MPa	h_b/m	E_t/MPa
K_1	3.83	4.83	4.60	3.67	4.47	4.20	3.80	4.40
K_2	3.75	4.06	3.92	3.57	3.91	3.63	3.62	3.66
K_3	3.94	3.49	3.57	3.68	3.33	3.56	3.65	3.40
K_4	3.91	3.04	3.34	3.72	2.93	3.24	3.56	3.18
\bar{K}_1	0.96	1.21	1.15	0.92	1.12	1.05	0.95	1.10
\bar{K}_2	0.94	1.02	0.98	0.89	0.98	0.91	0.91	0.92
\bar{K}_3	0.98	0.87	0.89	0.92	0.83	0.89	0.91	0.85
\bar{K}_4	0.98	0.76	0.83	0.93	0.73	0.81	0.89	0.80
R	0.04	0.45	0.32	0.04	0.39	0.24	0.06	0.30

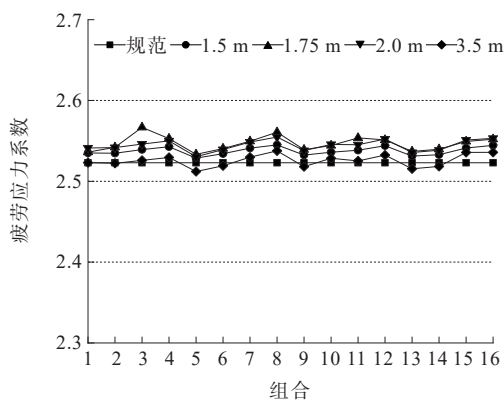
由图6可以看出:单层板路面结构的疲劳应力系数要略大于双层板路面结构,其中单层板下小板的疲劳应力系数要大于大板,而双层板下是相反的,因轴载换算指数的变化,导致设计轴载累计作用次数有所差别,分析原因是:轻型轴载对不同路面结构的疲劳损伤是不同的,应根据不同的路面结构选定不

同的轴载换算指数,从而确定设计轴载累计作用次数,再进行疲劳应力计算。

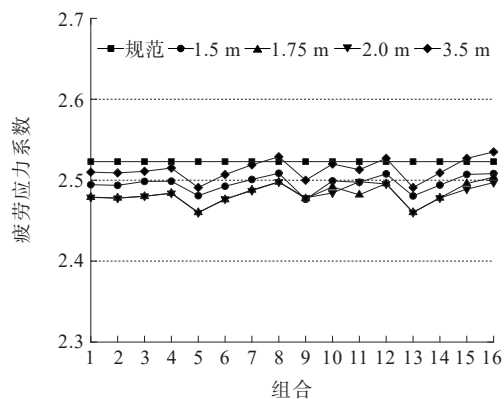
根据上述疲劳应力系数,将标准荷载应力代入式(7)进行计算,得到疲劳荷载应力如图7所示。

$$\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps} \tag{7}$$

式中: k_r 为接缝传荷能力的应力折减系数; k_c 为受计



(a) 单层板

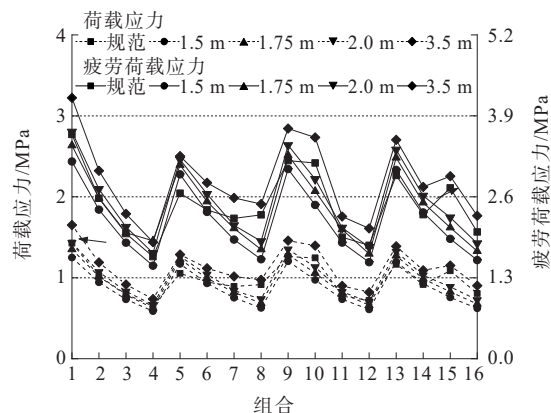


(b) 双层板

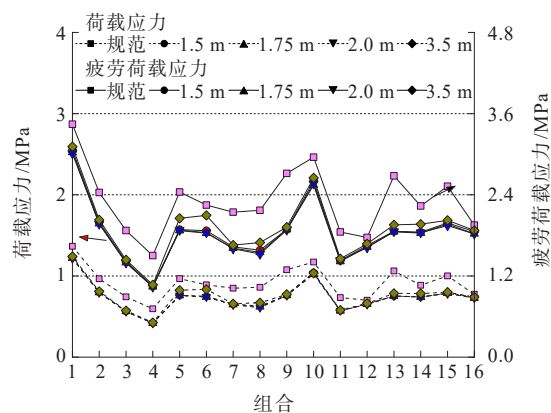
图 6 疲劳应力系数

算理论与实际差异以及动载等因素影响的综合系数。 k_r 、 k_c 参考规范均取 1。

从图 7 可知:由于疲劳应力系数相差较小,导致疲劳应力的变化趋势同标准荷载应力一致。在单层板路面结构下,规范公式(2)计算所得荷载应力结果与回归公式计算相当。在双层板路面结构下,规范公式(3)计算所得荷载应力结果均大于回归公式计算所得,说明在进行双层板路面结构设计时,规范以 BZZ-100 为条件建立的公式对路面结构受力计算较为保守。大板的荷载应力均大于小板,在单层板中较为明显,故在单层板结构下对路面板块进行“切割”可以有效降低水泥混凝土路面的荷载应力及疲



(a) 单层板



(b) 双层板

图 7 标准荷载应力及疲劳荷载应力

劳荷载应力。

3.2 温度应力

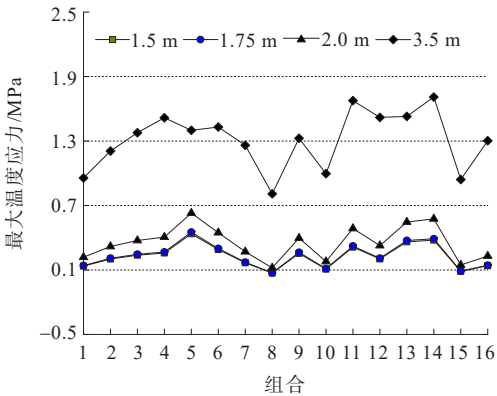
由规范可知:水泥混凝土路面的温度应力与板体尺寸、路面结构、温度梯度及地区参数有关,本小节利用有限元软件,在确定温度梯度及地区参数不变的基础上,对板体尺寸和路面结构进行分析,当混凝土线膨胀系数 $\alpha_c = 7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,温度梯度 $T_g = 92^\circ\text{C}/\text{m}$,得到最大温度应力如图 8 所示,再根据规范方法可以得到温度疲劳应力如图 9 所示。最大温度应力极差分析如表 5 所示。

表 5 单、双层板最大温度应力极差分析

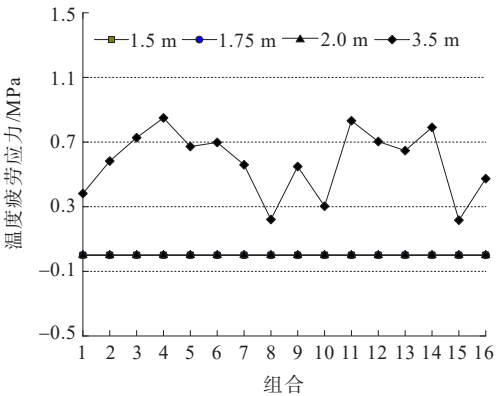
项目	单层板			双层板				
	E_c/GPa	h_c/m	E_t/MPa	E_c/GPa	h_c/m	E_b/MPa	h_b/m	E_t/MPa
K_1	3.70	4.41	2.19	3.75	4.33	3.49	4.02	2.88
K_2	3.44	4.06	3.61	3.68	4.16	3.77	3.94	3.75
K_3	3.93	3.48	4.35	4.06	3.82	3.95	3.68	4.32
K_4	3.79	2.91	4.70	4.09	3.26	4.36	3.94	4.64

续表5

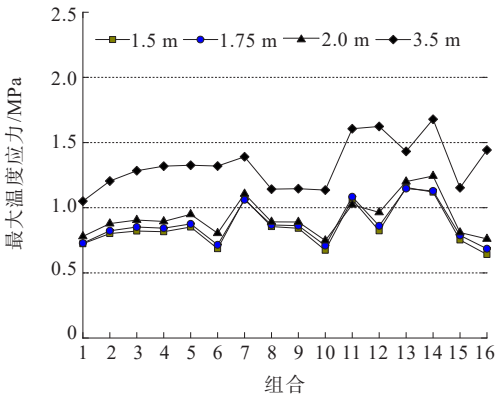
项目	单层板			双层板				
	E_c/GPa	h_c/m	E_t/MPa	E_c/GPa	h_c/m	E_b/MPa	h_b/m	E_t/MPa
\overline{K}_1	0.93	1.10	0.55	0.94	1.08	0.87	1.01	0.72
\overline{K}_2	0.86	1.02	0.90	0.92	1.04	0.94	0.98	0.94
\overline{K}_3	0.98	0.87	1.09	1.01	0.96	0.99	0.92	1.08
\overline{K}_4	0.95	0.73	1.18	1.02	0.82	1.09	0.99	1.16
R	0.12	0.38	0.63	0.10	0.27	0.22	0.09	0.44



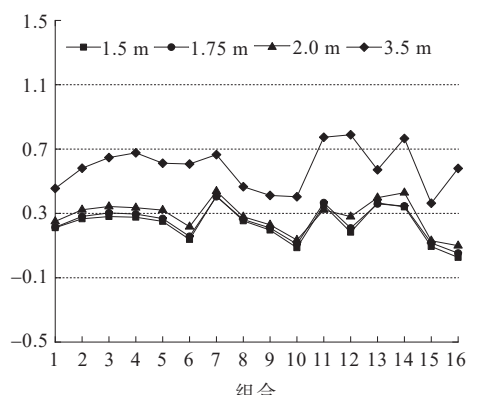
(a) 单层板



(a) 单层板



(b) 双层板



(b) 双层板

图8 最大温度应力

图9 温度疲劳应力

由表5可知:在此水平范围内对单、双层路面结构受力影响最大的是土基模量,单层板中影响最小的是水泥混凝土面层模量,双层板中影响最小的是基层厚度,影响程度由大到小排序为:土基模量、面层厚度、基层模量、面层模量、基层厚度。

由图8、9可见:无论是单层板或是双层板路面结构,当板体尺寸增大时,板体的最大温度应力及温度疲劳应力随之增大,这点符合经验。将温度应力与路面结构总相对刚度半径 r_g 进行比较分析,如图10所示。可以发现:当路面结构改变导致相对刚度半

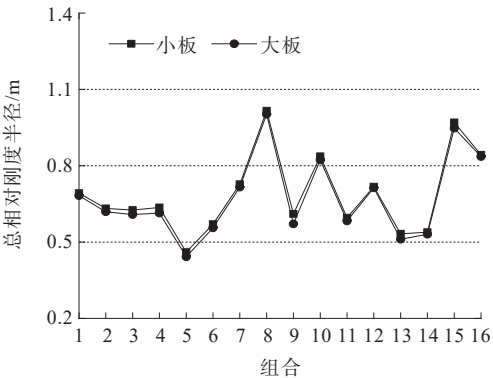
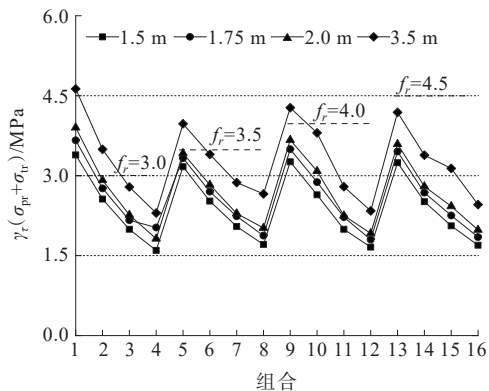


图10 总相对刚度半径

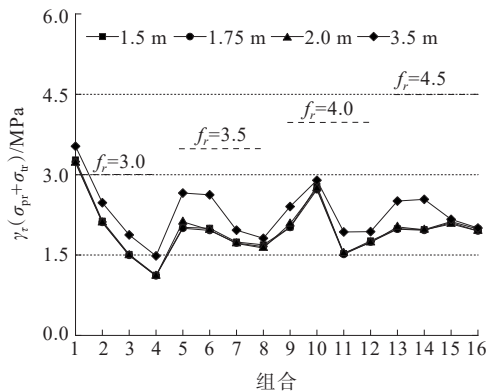
径增加时,路面板的温度应力随之减小。将大尺寸板体与小尺寸比较时,单层板路面结构下小板的温度应力与大板的温度应力相差较多,而双层板路面结构下的却相差较小,所以在单层板路面结构下对板体进行“切割”可以更有效地减小温度应力。

(3) 极限状态校核

针对上述若干种路面结构组合进行极限状态校核,对比单、双层板结构。根据《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)给出的可靠度设计标准及可靠度系数 γ_r 进行取值,农村公路安全等级为三级,变异系数条件按照较差情况选择等级高,目标可靠度为70%,则可靠度系数 γ_r 取1.07,其中 f_r 为混凝土设计弯拉强度。得到综合疲劳应力、综合极限应力结果如图11、12所示。



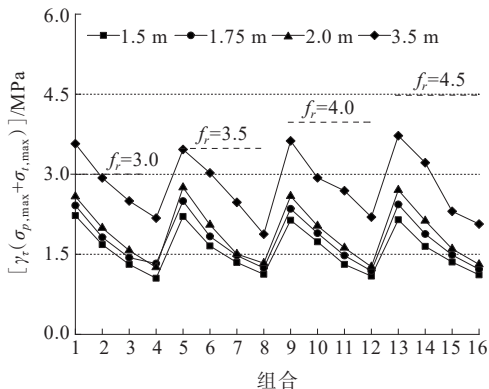
(a) 单层板



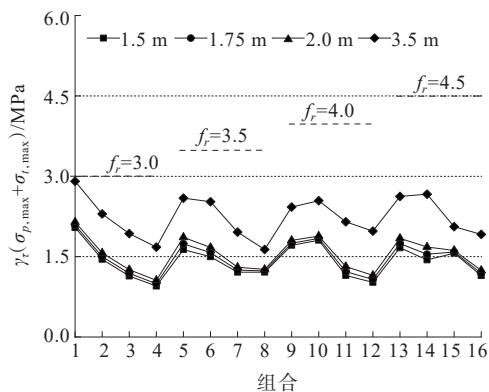
(b) 双层板

图 11 综合疲劳应力

由图11、12可知:①组合1情况下,单、双层路面结构均不能通过验算,单层大板路面结构下组合2、5、9也不能通过验算,但将组合2、5、9下单层大板结构进行“切割”,发现小尺寸板体均能通过验算,所以将板体“切割”成小尺寸板可以有效提高路面结构的



(a) 单层板



(b) 双层板

图 12 综合极限应力

受力能力,从而使极限承载能力及疲劳寿命得以提升;②在单层板结构下,“切割”板体使得应力结果相差较大,而在双层板结构下,“切割”板体使得应力结果相差较小,说明单层板路面结构比双层板对荷载和温度更敏感。

4 结论

(1) 通过荷载应力公式重新回归公式中的 A 、 m 、 n 系数,得到不同轴载下与标准轴载的换算系数,通过正交分析多种路面结构,为了方便路面结构的设计,取单轴单轮、双轮中最大的轴载换算指数值进行计算,推荐单轴单轮的轴载换算指数为18.73,单轴双轮的轴载换算指数为16.38。

(2) 通过荷载及温度应力分析,得出单、双层路面结构下不同板体尺寸及路面结构参数对结构受力的影响规律,发现在该试验条件下,面层厚度对荷载应力影响最大,模量对温度应力影响最大。

(3) 通过对板体尺寸进行分析,发现板长的变

化对应力结果影响较小。对大、小尺寸板体进行应力分析,发现将大尺寸板体切割成小尺寸能够降低各项应力指标,荷载应力平均降低43.8%,温度应力平均降低78.5%,说明小尺寸板体的结构受力要优于大尺寸;将单、双层板路面结构应力结果进行比较,发现单层板路面结构对荷载和温度更敏感。经分析后推荐在农村通组公路中使用单层小板路面结构。

参考文献:

- [1] PRATICÒ F, SARIDE S, PUPPALA A J. Comprehensive life-cycle cost analysis for selection of stabilization alternatives for better performance of low-volume roads[J]. Transportation Research Record, 2011, 2204(1): 120-129.
- [2] 弥海晨,韩瑞民.国外小交通量道路研究发展综述[J].中外公路,2008,28(2):219-222.
- [3] SARIDE S, AVIRNENI D, JAVVADI S C P. Utilization of reclaimed asphalt pavements in Indian low-volume roads[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(2): 1-10.
- [4] GALLEGO E, MOYA M, PINIES M, et al. Valuation of low volume roads in Spain. Part 2: Methodology validation[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(1): 135-142.
- [5] 交通运输部公路局,中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路工程技术标准:JTG B01—2014[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [6] 仲燕飞.西藏农村低等级公路典型简易路面结构研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [7] 北京交科公路勘察设计研究院有限公司.小交通量农村公路工程技术标准:JTG 2111—2019[S].北京:人民交通出版社,2019.
- [8] 宋琦,杨国峰.JTG 2111-2019《小交通量农村公路工程技术标准》编制要点研究[J].中外公路,2019,39(4):279-282.
- [9] 朱靛雯,刘黎萍.高速公路路段交通量分析及轴载换算[J].交通科技,2016(4):134-137.
- [10] 段同军,郑帅,裴福才,等.水泥混凝土路面大件运输车辆轴线荷载限值研究[J].中外公路,2022,42(4):31-36.
- [11] 杨永刚.水泥混凝土修补道面结构参数敏感性分析[J].中外公路,2021,41(4):79-84.
- [12] 单景松,刘建,王敏,等.聚丙烯纤维透水水泥混凝土受力性能研究[J].中外公路,2020,40(6):276-280.
- [13] 白桃,黄晓明,李昶,等.连续配筋水泥混凝土路面的临界荷位[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(6):14-19.
- [14] 中交公路规划设计院有限公司.公路水泥混凝土路面设计规范:JTG D40—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [15] 李镇.重载交通水泥混凝土路面结构设计与施工关键技术研究[D].西安:长安大学,2012.
- [16] 王艳萍.法标轴载换算及不同 C_{CAM} 值路面结构对比研究[J].中外公路,2022,42(6):41-46.
- [17] 刘巍,荣辉.国内结构混凝土疲劳性能研究现状[J].材料导报,2011,25(19):134-142.
- [18] 辛雷,姜福香,蒋金洋,等.混凝土疲劳性能试验研究现状[J].青岛理工大学学报,2011,32(3):14-20.
- [19] 高维成.水泥混凝土路面疲劳特性研究[D].西安:长安大学,2000.
- [20] 江照伟,梁乃兴.基于Weibull分布的沥青混合料疲劳性能分析[J].中外公路,2022,42(4):175-179.
- [21] 马新卫,田欣平,李昊.山区通村公路水泥混凝土路面轴载换算方法的研究[J].路基工程,2014(6):91-94,101.
- [22] 曹竞荣.纳米 SiO_2 改性水泥混凝土优选及疲劳寿命预估.中外公路,2020,40(4):286-291.
- [23] 李盛,陈尚武,刘朝晖,等.旧水泥混凝土路面弯沉测试的若干问题研究[J].中南大学学报,2015,46(12):4713-4718.