

文章编号:1671-8879(2008)03-0030-06

接缝设传力杆水泥混凝土面层结构力学分析

锁利军¹,王秉纲¹,陈拴发¹,杨 斌²

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064;

2. 广西大学 土木建筑工程学院,广西 南宁 530004)

摘 要:建立接缝无传力杆及设传力杆时水泥混凝土面层结构的三维有限元模型,运用数值分析方法,分析接缝处水泥混凝土面层的荷载应力、弯沉值和弯沉差,研究了地基模量、传力杆直径对荷载应力及弯沉差的影响规律,并对条件相同的计算结果进行了对比分析。结果表明:计算点的主应力、剪应力、弯沉值和弯沉差随着传力杆直径的增加而呈现减小趋势;当传力杆直径大于 35 mm 时,传力杆直径的增加对降低水泥混凝土面层内计算点的应力值效果已不明显;接缝设传力杆时水泥混凝土面层计算点荷载应力和弯沉差明显小于无传力杆时相应的计算结果;当地基模量不大于 800 MPa 时,建议基于剪应力去估计接缝传荷效率;当地基模量大于 800 MPa 时,建议基于弯沉值或主应力去估计接缝传荷效率。

关键词:道路工程;水泥混凝土面层;传力杆;接缝;剪应力;传荷效率;三维有限元;数值分析

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

Numerical analysis of mechanics of concrete overlay in transverse joint with dowel bars

SUO Li-jun¹, WANG Bing-gang¹, CHEN Shuan-fa¹, YANG Bin²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an

University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil and Architecture

Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: 3D finite element model of concrete pavement in transverse joint with dowel bars or without dowel bars is established by 3D finite element numerical analysis method. The load stress, deflection value and deflection value's difference of concrete pavement in transverse joint are calculated and analyzed by 3D finite element method. The influence of foundation's modulus and dowel's diameter on both stress and deflection is analyzed. And the calculating results with the same factors are compared. The results indicate that principal stress, shearing stress, deflection value and deflection value's difference from calculating points decrease when dowel's diameter increases; when dowel's diameter is more than 35 mm, the increase in dowel's diameter does not contribute to the loss of stress of calculating points in concrete pavement; the stress value and deflection value's difference of calculating points for concrete pavement in transverse joint with dowel bars are smaller than counterpart without dowel bars; when foundation's

收稿日期:2007-04-08

基金项目:湖北省交通科技计划项目(鄂交科教(2002)618号)

作者简介:锁利军(1975-),男,回族,河北徐水人,博士研究生,E-mail:lijunsuo@126.com

modulus is not more than 800 MPa, analysis of transmission efficiency of loading should be based on shearing stress, and when foundation's modulus is more than 800 MPa, analysis of transmission efficiency of loading should be based on either deflection or principal stress. 3 tabs, 20 figs, 7 refs.

Key words: road engineering; concrete pavement; dowel bar; transverse joint; shearing stress; transmission efficiency of loading; 3D finite element; numerical analysis

0 引言

实践证明,接缝是水泥混凝土面层的薄弱部位,其传递荷载能力是影响水泥混凝土路面使用寿命及行车平稳和舒适的关键因素。有学者应用 Timoshenko 关于弹性地基上杆弯曲的公式分析传力杆所需的直径、长度和间距。黄仰贤最先提出用挠度比值作为评定接缝传荷能力的指标^[1]。Friberg 应用 Timoshenko 的公式做进一步分析,提出减小传力杆长度、增加直径和减小间距的建议^[2]。虽然研究者一直致力于传力杆和接缝设计理论方法的研究,但目前中国公路设计规范^[3]主要是根据经验设计传力杆和接缝,所用传力杆的尺寸取决于板厚,在分析设传力杆的接缝传荷效率时,应用最广泛的是基于衡量弯沉和弯拉应力的荷载传递效率^[4-7]。那么传力杆的设计尺寸是否应随着面层厚度的增大而增加,传力杆的设计尺寸有无上限值,当条件变化时基于衡量弯沉和弯拉应力的荷载传递效率是否客观有效。为此,本文采用更符合实际情况的三维模型,对接缝设传力杆水泥混凝土面层结构在荷载作用下的应力状态及接缝处的弯沉差、荷载传递效率进行分析,为进一步完善水泥混凝土路面设计方法提供理论依据。

1 有限元模型和计算参数

1.1 有限元模型

本研究视路面结构为弹性地基单层板,研究对象由有接缝的水泥混凝土面层、接缝传力杆和地基组成,建立空间三维模型。水泥混凝土面层、传力杆和地基等结构层采用 8 节点实体单元,进行应力、位移分析。为反映半空间地基的特性,采用扩大尺寸来模拟,接缝无传力杆的模型如图 1 所示;接缝设传力杆的模型如图 2 所示;传力杆力学模型见图 3。对各结构层作如下假定:①各结构层为均匀、连续、各向同性的连续弹性体;②各层层间竖向、水平位移均连续,地基顶面的垂直位移与薄板中面的垂直位移相等;③地基底面各向位移为 0,地基侧面水平方

向位移为 0,水泥混凝土面板四边自由;④不计路面结构的自重;⑤传力杆是一根埋设于均匀弹性介质中的悬臂梁;⑥接缝宽度为 1 cm,且无传力杆时接缝处无传荷能力,设传力杆时接缝有传荷能力。

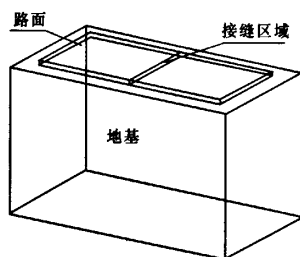


图1 接缝无传力杆水泥混凝土路面结构计算模型

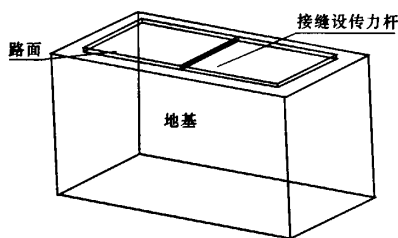


图2 接缝设传力杆水泥混凝土路面结构计算模型

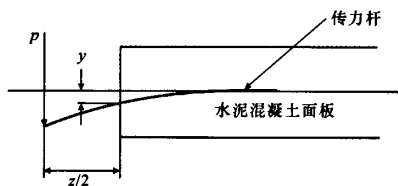


图3 传力杆力学模型

根据文献^[1],传力杆的支承应力与其变形成正比,公式为

$$\sigma_b = Ky \quad (1)$$

$$y = \frac{p(2 + \beta z)}{4\beta^3 E_d I_d} \quad (2)$$

$$I_d = \frac{1}{64} \pi d^4 \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Kd}{4E_d I_d}} \quad (4)$$

式中: σ_b 为传力杆的支承应力; y 为传力杆在接缝面

的变形; p 为作用在一根传力杆上的荷载; z 为接缝宽度; E_d 为传力杆的弹性模量; I_d 为传力杆的惯性矩; β 为埋设在混凝土中传力杆的相对刚度; K 为传力杆的支承模量,其值为 $81.5 \sim 407 \text{ GN/m}^3$; d 为传力杆的直径。

1.2 计算基本参数

计算基本参数为:水泥混凝土面板长为 5 m , 宽为 4.5 m 。经过取地基不同尺寸计算误差分析,地基长、宽和厚度尺寸拟定为 $12.01 \text{ m} \times 6.5 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 。

如无特别说明,行车荷载均采用标准轴载 BZZ-100, 轮胎压力为 0.7 MPa , 单个轮压的作用范围为 $18.9 \text{ cm} \times 18.9 \text{ cm}$, 接触面积为 357.21 cm^2 , 双轮间距为 32 cm , 两侧轮隙间距为 182 cm 。经过不同荷位计算分析比较, 车轮荷载作用在接缝一侧的偏荷载对面层最为不利, 布载方式如图 4、图 5 所示。对接缝处单、双侧轮载对比分析得知, 对称轴上的单侧轮载比双侧荷载对面层产生的不利影响大, 原因在于双侧荷载的另一侧轮载的反翘曲作用抵消了对称轴上的部分应力值, 因此在计算时仅考虑对称轴上的单侧荷载作用, 利用荷载作用位置的对称性, 取模型的一半进行计算。路面整体结构的有限元网格划分如图 6 所示。为满足计算精度要求, 对各关键部位, 如接缝、传力杆及其附近面层结构进行网格细化, 从接缝到远处边界采用适当的网格梯度。如无特殊说明, 图 5 中的点 1、2 为水泥混凝土面层的应力值及弯沉值计算点, 点 3 为传力杆的应力值计算点。各结构层主要计算参数见表 1。

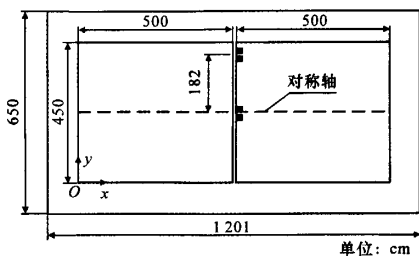
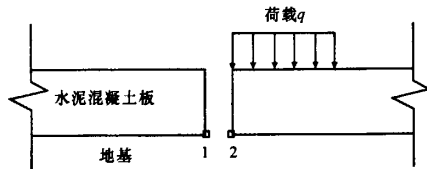


图4 车轮布载平面

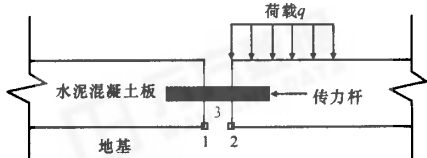
表1 主要计算参数

项 目	厚度或传力杆直径/cm	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
水泥混凝土面层	22.0~30.0	30 000	0.15
传力杆	2.8~3.8	200 000	0.28
地 基		50~1 500	0.35

注: 传力杆的长度、间距分别为 40 cm 、 30 cm ; 传力杆的支承模量取为 300 GN/m^3 ; 地基的弹性模量为原路面、基层、下基层、垫层和路基的当量值。



(a) 无传力杆时偏荷载作用



(b) 设传力杆时偏荷载作用

图5 接缝处车轮荷载作用

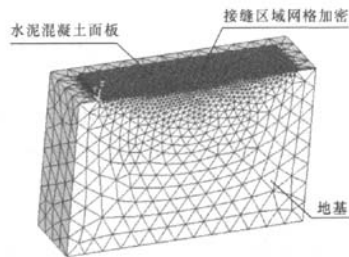


图6 路面整体结构有限元网格划分

2 接缝处水泥混凝土面层应力分析

2.1 接缝无传力杆时水泥混凝土面层荷载应力分析

以图1为结构计算模型, 图5(a)为计算图示。从表2、表3的计算结果可以看出, 当水泥混凝土面层的厚度一定时, 计算点的主应力、剪应力、弯沉值及弯沉差随着地基模量的增大而减小; 当地基模量一定时, 计算点的主应力、剪应力、弯沉值及弯沉差随着水泥混凝土面层厚度的增加而减小。计算点2的应力值和弯沉值明显大于计算点1的计算结果, 表明接缝处靠近荷载作用一侧的应力值和弯沉值较大, 接缝处板的错台明显。

2.2 接缝设传力杆时水泥混凝土面层荷载应力分析

以图2为结构计算模型, 图5(b)为计算图示。在接缝设传力杆的水泥混凝土面层中, 影响荷载应力和弯沉的因素主要有面层厚度与模量、地基模量、传力杆的直径、间距、长度等。以下重点分析地基模量、传力杆直径对荷载应力及弯沉值的影响规律。

2.2.1 地基模量对荷载应力及弯沉值的影响

当水泥混凝土面层厚度为 24 cm , 传力杆直径为 28 mm 、 32 mm 时, 水泥混凝土面层内计算点2的 σ_1 、 σ_2 随地基模量在 $50 \sim 1 500 \text{ MPa}$ 之间变化, 变化情况见图7、图8; 水泥混凝土面层内传力杆计

表 2 接缝处无传力杆水泥混凝土面层计算点应力、弯沉随地基模量的变化

板厚/ cm	地基模 量/MPa	计算点 位置	计算结果			
			σ_1 /MPa	σ_s /MPa	弯沉值/m	弯沉差/m
24	50	2	1.639 540	1.866 610	-0.000 454 95	-0.000 118 16
		1	0.423 739	0.490 167	-0.000 336 79	
	100	2	1.411 030	1.696 090	-0.000 274 89	-0.000 072 30
		1	0.420 595	0.468 785	-0.000 202 59	
	150	2	1.277 450	1.604 060	-0.000 204 88	-0.000 054 33
		1	0.416 886	0.453 636	-0.000 150 55	
	200	2	1.182 570	1.542 130	-0.000 166 30	-0.000 044 37
		1	0.414 750	0.443 609	-0.000 121 93	
	300	2	1.048 080	1.458 910	-0.000 123 88	-0.000 033 34
		1	0.412 591	0.430 973	-0.000 090 54	
	400	2	0.951 822	1.402 270	-0.000 100 46	-0.000 027 19
		1	0.411 128	0.422 494	-0.000 073 27	
	800	2	0.717 606	1.272 330	-0.000 060 34	-0.000 016 47
		1	0.402 435	0.397 564	-0.000 043 88	
	1 500	2	0.508 958	1.161 880	-0.000 037 59	-0.000 010 19
		1	0.379 452	0.363 821	-0.000 027 40	

注: σ_1 为第一主应力; $\sigma_s=2\tau_{\max}$; τ_{\max} 为最大剪应力; 路面结构的坐标系如图 4 所示。

表 3 接缝处无传力杆水泥混凝土面层计算点应力、弯沉随水泥混凝土面层厚度的变化

板厚/cm	计算点位置	计算结果			
		σ_1 /MPa	σ_s /MPa	弯沉值/m	弯沉差/m
22	2	1.339 130	1.723 390	-0.000 178 58	-0.000 047 42
	1	0.471 630	0.506 441	-0.000 131 16	
24	2	1.182 570	1.542 130	-0.000 166 30	-0.000 044 37
	1	0.414 750	0.443 609	-0.000 121 93	
26	2	1.051 090	1.386 450	-0.000 155 70	-0.000 041 72
	1	0.368 611	0.393 069	-0.000 113 99	
28	2	0.939 166	1.255 930	-0.000 146 30	-0.000 039 10
	1	0.327 060	0.343 569	-0.000 107 19	
30	2	0.845 658	1.139 670	-0.000 138 47	-0.000 037 39
	1	0.298 847	0.315 879	-0.000 101 08	

算点 3 的 σ_1 、 σ_s 随地基模量在 50~1 500 MPa 之间变化,变化情况见图 9、图 10;水泥混凝土面层弯沉差随地基模量在 50~1 500 MPa 之间变化,变化情况见图 11。从图 7~图 10 可知,水泥混凝土面层内计算点 2 和传力杆计算点 3 的 σ_1 和 σ_s 随地基模量的增大而减小;随着地基模量的增大,主应力的降低幅度要大于剪应力的降低幅度,表明地基模量的增大对降低水泥混凝土面层内计算点的主应力效果明显。图 11 中,水泥混凝土面层内计算点的弯沉差随地基模量的增大而减小。

2.2.2 传力杆直径对荷载应力及弯沉值的影响

由图 12、图 13 可看出,计算点 2 的 σ_1 、 σ_s 随传力杆直径(28~35 mm)的增大而减小;当传力杆直

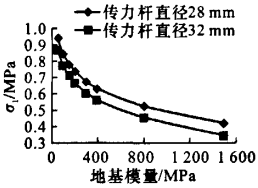


图 7 地基模量对计算点 2 的 σ_1 的影响

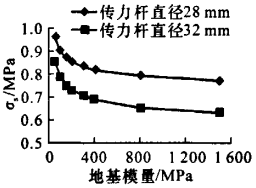


图 8 地基模量对计算点 2 的 σ_s 的影响

径达到 38 mm 时, σ_1 、 σ_s 又有所增加,表明传力杆直径大于 35 mm 时,其荷载传递的效果已经不明显。当传力杆直径不大于 35 mm 时,随着传力杆直径的增大,剪应力的降低幅度要大于主应力的降低幅度,表明传力杆直径的增大对降低水泥混凝土面层内计算点的剪应力效果明显。

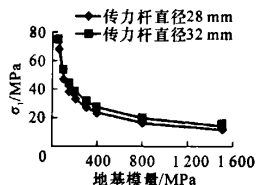
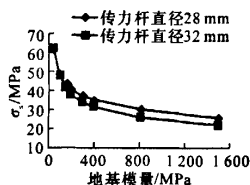
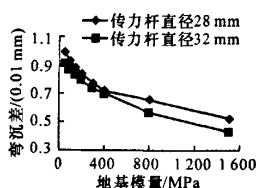
图9 地基模量对计算点3的 σ_1 的影响图10 地基模量对计算点3的 σ_x 的影响

图11 地基模量对弯沉差的影响

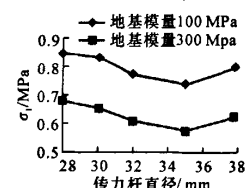
图12 传力杆直径对计算点2的 σ_1 的影响

图14表明,当传力杆直径从28 mm增大到32 mm时,传力杆计算点3的 σ_1 逐渐增加,此时对应于图12中水泥混凝土面层内计算点2的 σ_1 逐渐减小,表明传力杆承受了荷载并有效地将荷载传递到相邻板,从而减小了面层内的主拉应力值;当传力杆直径从32 mm增大到38 mm时,传力杆计算点3的 σ_1 呈现减小趋势,此时对应的水泥混凝土面层内计算点2的 σ_1 呈现增加趋势,表明传力杆直径大于35 mm时,其对降低面层内计算点2的 σ_1 的效果已不明显。从图15可以看出,水泥混凝土面层传力杆计算点3的 σ_x 随传力杆直径增大而呈现减小趋势,特别是当地基模量增大时,此趋势更为明显。图16表明,水泥混凝土面层弯沉差随着传力杆直径的增大而呈现减小趋势。

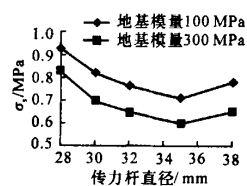
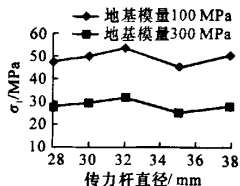
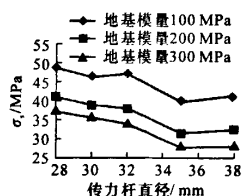
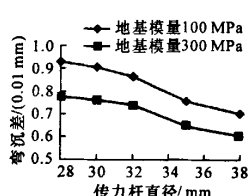
图13 传力杆直径对计算点2的 σ_x 的影响图14 传力杆直径对计算点3的 σ_1 的影响图15 传力杆直径对计算点3的 σ_x 的影响

图16 传力杆直径对弯沉差的影响

3 计算结果分析

3.1 接缝无和设传力杆时的计算结果对比分析

接缝无传力杆和接缝设传力杆水泥混凝土面层计算点荷载应力值及弯沉差对比结果见图17~图19。通过比较可以看出,接缝加传力杆时水泥混凝土面层计算点的主应力、剪应力和弯沉差明显小于接缝无传力杆时的相应计算结果,表明接缝处板的错台作用明显降低。

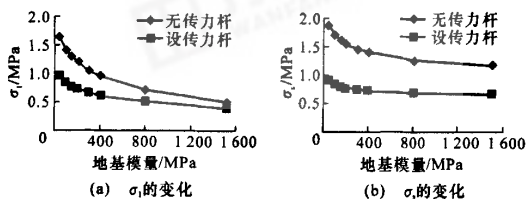


图17 接缝无和设传力杆水泥混凝土面层

计算点2荷载应力值对比

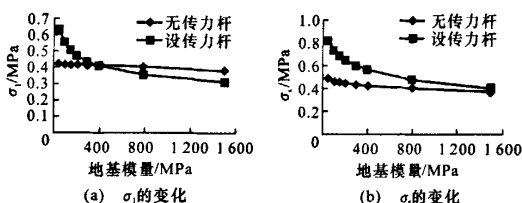


图18 接缝无和设传力杆水泥混凝土面层

计算点1荷载应力值对比

3.2 荷载传递效率分析

分析设传力杆时接缝的传荷效率,目前应用最广泛的是基于衡量弯沉值和主应力的荷载传递效率。以弯沉值为基础的荷载传递效率(k_1)是未加载板弯沉值与加载板弯沉值的比值;而基于弯拉应力的效率(k_2)是未加载板弯拉应力值与加载板弯拉应力值的比值。通过前面分析可知,考虑到接缝处传力杆承受了较大的剪应力,并将荷载传递到相邻板,从而有效地降低了水泥混凝土面层内计算点的剪应力。本文提出基于剪应力的荷载传递效率(k_3),即未加载板剪应力值与加载板剪应力值的比值。对3种不同荷载传递效率进行计算分析,结果见图20。由图20可看出,当地基模量不大于800 MPa时, k_1 最大, k_2 最小, k_3 位于二者之间;通过分析表明,当地基模量不大于800 MPa时, k_1 的分析结果过高地估计了传递荷载效率,而对 k_2 的分析结果又过低地估计传递荷载效率,因此建议使用 k_3 估计传递荷载效率。当地基模量接近且大于800 MPa时,表明 k_2 与 k_3 的两条曲线相交后, k_2 呈现增大趋势并逼近 k_1 ,而 k_3 呈现减小趋势;且当地基模量达到1500 MPa

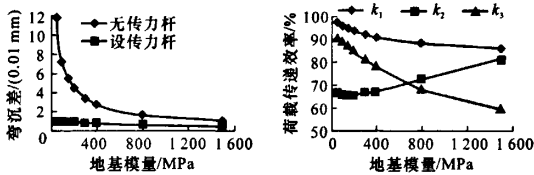


图19 水泥混凝土面层弯沉差对比 图20 荷载传递效率对比
时,3者的排序为 $k_3 < k_2 < k_1$,且 k_2 与 k_1 结果较为接近。在这种条件下,建议使用 k_1 或 k_2 估计接缝的传荷效率。

4 结 语

(1) 接缝设传力杆时水泥混凝土面层荷载应力分析表明:当水泥混凝土面层的厚度、地基模量一定时,计算点的主应力、剪应力、弯沉值及弯沉差随着传力杆直径的增大而呈现减小趋势;当水泥混凝土面层的厚度、传力杆直径一定时,计算点的主应力、剪应力、弯沉值及弯沉差随着地基模量的增大而呈现减小趋势。

(2) 在接缝处设传力杆的水泥混凝土面层中,地基模量对荷载应力及弯沉的影响分析表明:随着地基模量的增大,主应力的降低幅度要大于剪应力的降低幅度,表明地基模量的增大对降低水泥混凝土面层内计算点的主应力效果明显。传力杆直径对荷载应力及弯沉的影响分析表明:随着传力杆直径的增大,剪应力的降低幅度要大于主应力的降低幅度,表明接缝处传力杆承受了较大的剪应力并有效地将荷载传递到相邻板,从而降低了水泥混凝土面层内计算点的剪应力;当传力杆直径不大于35 mm时,随着传力杆直径的增大,剪应力的降低幅度要大于主应力的降低幅度,表明传力杆直径的增加对降低水泥混凝土面层内计算点的剪应力效果明显。但当传力杆直径大于35 mm时,主应力和剪应力值随着传力杆直径的增大而有所增加,表明荷载传递的效果已经不明显。

(3) 接缝无与设传力杆时水泥混凝土面层荷载应力及弯沉差对比分析表明:接缝设传力杆时水泥混凝土面层计算点荷载应力和弯沉差明显小于接缝无传力杆时相应的计算结果,表明接缝处传力杆可以使荷载有效传递至邻板,接缝处板的错台作用明显降低。

(4) 提出基于剪应力的荷载传递效率(k_3),即未加载板剪应力值与加载板剪应力值的比值,用来分析接缝的荷载传递效率。分析表明,当地基模量不

大于800 MPa时,基于位移的分析结果过高地估计了传递荷载效率,而基于弯拉应力的分析结果又过低地估计了传递荷载效率。因此,建议使用基于剪应力的传荷效率(k_3)估计传递荷载效率。当地基模量接近且大于800 MPa时,表征 k_2 与 k_3 的两条曲线相交后, k_2 呈现增大趋势并逼近 k_1 ,而 k_3 呈现减小趋势;当地基模量达到1500 MPa时,3者的排序为 $k_3 < k_2 < k_1$,且 k_2 与 k_1 结果较为接近,在这种条件下,建议使用 k_1 或 k_2 估计接缝的传荷效率。

参考文献:

References:

- [1] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
- [2] Friberg B F. Design of dowels in transverse joints of concrete pavements[J]. Transactions of ASCE,1940, 105:1076-1095.
- [3] JTG D40-2002,公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [4] 李淑明,许志鸿,蔡喜棉. 土工织物对复合式路面结构内力影响分析[J]. 中国公路学报,2006,19(1):28-31.
LI Shu-ming, XU Zhi-hong, CAI Xi-mian. Analysis of impact of geo-textile on stress of composite pavement structure[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(1):28-31.
- [5] 张 擎,蔡友清,冯 勇. 水泥混凝土路面加铺层的疲劳性能[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(4):26-29.
ZHANG Qing, CAI You-qing, FENG Yong. Fatigue performance of overlay on concrete pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2006,26(4):26-29.
- [6] 谈至明,孙明伟,李立寒. 水泥混凝土路面接缝嵌缝料的性能[J]. 交通运输工程学报,2006,6(3):27-31.
TAN Zhi-ming, SUN Ming-wei, LI Li-han. Joint sealant performance of cement concrete pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006,6(3):27-31.
- [7] 陈 飞,张 宁,林亚萍,等. 刚性路面传力杆接缝传荷能力评价新方法[J]. 交通运输工程学报,2006,6(4):47-51.
CHENG Fei, ZHANG Ning, LIN Ya-ping, et al. New load-transferred evaluating method at doweled joint of rigid pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2006,6(4):47-51.