

文章编号:1671-1637(2015)04-0009-09

嵌锁块路面受力特性与设计方法

单景松¹, 李 惠¹, 蒋含莞²

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 新墨西哥州立大学 工程技术与测绘学院, 新墨西哥 拉斯克鲁塞斯 88003)

摘要:为了提高传统路面嵌锁块尺寸与嵌锁块竖向嵌锁能力,开发了大尺寸企口连接嵌锁块,分析了其受力特性。以有限元方法建立了嵌锁块路面整体模型,以弹簧单元模拟嵌锁块间传荷能力,分析了嵌锁块尺寸、嵌锁块传荷能力、碎石基层厚度与路基强度对路表弯沉和路基顶面竖向压应变的影响。以路基顶面永久应变为控制指标,建立了路基顶面应变水平与标准累计轴次的关系。计算结果表明:在相同地基和基层条件下,嵌锁块尺寸由30 cm×20 cm增大到50 cm×30 cm时,路表弯沉可减小25%~30%,路基顶面压应变可减小25%~45%。当接缝弹簧弹性系数由 $10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 增加至 $10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,路表弯沉降低50%~55%,路基顶面压应变降低65%~75%。可见,采用较大尺寸的嵌锁块与加强嵌锁块的传荷能力对提升路面性能有显著作用,路面设计时应依据道路的交通水平查图确定路基顶面的压应变水平,据此确定合理的基层厚度和嵌锁块尺寸,使路基顶面竖向压应变满足要求。

关键词:路面工程;嵌锁块路面;传荷能力;路表弯沉;路基顶面压应变

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Mechanical characteristics and design method of interlocking concrete block pavement

SHAN Jing-song¹, LI Hui¹, JIANG Han-wan²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;

2. Department of Engineering Technology and Surveying Engineering,

New Mexico State University, Las Cruces 88003, New Mexico, USA)

Abstract: In order to improve the sizes and vertical interlocking ability of interlocking concrete block for traditional pavement, the larger-size interlocking concrete block with rabbet joint was developed, and its mechanical characteristics were studied. The finite element model of interlocking concrete block pavement was set up, the load transfer efficiency between interlocking concrete blocks was simulated by using spring element, and the influences of block sizes, load transfer ability, thickness of granular base and subgrade strength on permanent settlement and vertical strain at the top of subgrade were analyzed. The permanent deformation of subgrade was adopted as control index, and the relationship between normative accumulated axle-load acting number and vertical strain at the top of subgrade was established. Computation result shows that based on the same conditions of base and subgrade, when block sizes increase from 30 cm×20 cm

收稿日期:2015-03-02

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2011EEQ027);国家自然科学基金项目(51408346)

作者简介:单景松(1978-),男,山东东营人,山东科技大学副教授,同济大学博士后,从事路面结构与材料研究。

to 50 cm \times 30 cm, pavement deflection decreases by 25%-30%, and subgrade strain decreases by 25%-45%. When the elastic coefficient of rabbit joint increases from $10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ to $10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, pavement deflection decreases by 50%-55%, and subgrade strain decreases by 65%-75%. So the larger-size block with stronger load transfer ability can greatly improve the mechanical characteristics of pavement. In pavement design, the stain level at the top of subgrade can be determined according to the traffic condition of road, based on which the thickness of base layer and the sizes of interlocking concrete block are reasonably designed so that the stain level meets the requirement. 3 tabs, 19 figs, 20 refs.

Key words: pavement engineering; interlocking concrete block pavement; load transfer efficiency; pavement deflection; strain at the top of subgrade

Author resume: SHAN Jing-song(1978-), male, associate professor, PhD, +86-532-86057633, cyhsjs@163.com.

0 引 言

嵌锁块路面是指采用不同形状和尺寸的天然石块或预制块铺筑的路面。相比水泥混凝土和沥青混凝土路面,嵌锁块尺寸较小,对基础变形的适应能力较强,同时,嵌锁块可采用工厂化预制,不仅保证了嵌锁块的质量,而且,施工时借助小型设备即可完成运输、铺筑,将施工过程“化整为零”。通车以后嵌锁块路面的养护与维修工艺简单,养护费用较低,因此,嵌锁块路面结构比较适合投资少与施工机械化程度不高的低等级道路。

预制嵌锁块路面的研究始于二十世纪六七十年代,1976年南澳大利亚技术协会在嵌锁块预制场区入口修建了一条试验路,但因基层的压实不够,试验路最终失败;英国的 Barber 等使用相同的方法修建了试验路,不过只统计了 4 000 标准轴次,试验结果无法完全反映嵌锁块路面的长期使用性能^[1-2]。

现场统计车辆荷载存在困难,因此,逐渐研发、使用加速加载试验设备。1978年澳大利亚新南威尔士大学修建了足尺嵌锁块试验路,使用二十多种嵌锁块路面结构组合与 13 万次重复荷载次数;1979~1983 年南非公路交通协会与波特兰水泥协会在南非 Silvertown 修建了四十多种全尺寸嵌锁块路面试验段,进行了加速加载试验,嵌锁块厚度为 60~100 mm,基层厚度为 60~160 mm^[3];Panda 等系统分析了垫层砂厚度与基层厚度等因素对路面性能的影响,通过路表弯沉测试得出了垫层砂的推荐级配范围,同时指出嵌缝砂使用粗砂效果更好,并根据现场试验得出嵌锁块接缝宽度不应超过 5 mm^[4-5]。

嵌锁块路面也可应用于机场道面。英国鲁顿机场在 1981 年修建了嵌锁块试验段,采用厚度为 65~

80 mm 水泥预制嵌锁块,下铺 20 mm 厚的垫层砂,使用细砂和石灰组成的嵌缝料,经过 3 年的使用,经历了 4 000 多次大型飞机荷载作用后未发现明显病害^[6-7];以色列机场在 1990 年修建了 7 000 m² 的嵌锁块试验段,采用厚度为 80 mm 水泥预制嵌锁块与 40 mm 厚的天然垫层砂,其最大粒径为 4 mm,基层为 230 mm 厚的水泥稳定材料,使用 3 年后路面状况良好,且具有良好的抗滑和排水性能^[8]。

依据相关研究成果,逐渐出现了嵌锁块路面的设计方法,如北美嵌锁块路面协会(ICPI)设计方法,其建议的嵌锁块厚度范围为 60~100 mm。在设计过程中,根据路基的 CBR 值和交通荷载标准累计轴次,通过查图方法确定基层的厚度,要求碎石基层厚度不小于 100 mm,垫层砂厚度为 20~40 mm^[9]。

Nejad 等进行了嵌锁块路面数值分析,建立了三维有限元模型,分析结果表明随接缝宽度增大,嵌锁块弯沉、转动和水平移动量都增大。当嵌锁块平面尺寸从 60 mm 增加到 160 mm 时,路表弯沉可降低 20%,但嵌锁块本身的模量对弯沉影响很小^[10-11]。

国内同济大学孙立军教授从二十世纪八九十年代对嵌锁块路面的性能进行了系统研究,依据大量试验结果,提出了嵌锁块路面轴对称荷载扩散的拱效应机理。根据港口荷载特点,对表面回弹弯沉、车辙与基层底面拉应力进行了分析,分别建立了半刚性基层和碎石基层嵌锁块路面控制指标^[12-13]。

在荷载作用下,嵌锁块位移由竖向整体位移和转动位移两部分组成。整体竖向位移产生时荷载通过嵌锁块之间的接缝砂传递给相邻嵌锁块。转动位移产生时受载嵌锁块对相邻嵌锁块产生水平推力,若嵌锁块间嵌挤紧密,该水平推力将通过相邻嵌锁块传递至路缘石。可见,为减小嵌锁块的竖向位移,

除提高基础的承载能力外,增强嵌锁块间的传荷能力使嵌锁块间共同承担荷载尤为重要^[14-16]。

传统嵌锁块路面仅靠嵌锁块间的嵌缝砂传递竖向荷载,传荷能力较弱且容易出现破坏,另外所使用的嵌锁块尺寸较小,造成基础的局部压力太大,常出现局部沉陷与车辙等病害。为此,本文改进了传统嵌锁块尺寸与形状,设计了较大尺寸企口传荷形式的嵌锁块,研究了该种嵌锁块路面的受力特性与设计方法。

1 嵌锁块设计

目前,用作路面的预制嵌锁块长边尺寸约为20 cm,短边长度为长边的1/2~3/5,厚度一般为6~10 cm。当平面尺寸较小时,车辆荷载作用下受载嵌锁块下部基层和路基承受的压力较大,易产生竖向塑性变形,而且接缝众多,除影响行车舒适性外,车辆行驶过程中的颠簸振动对路面冲击较大,因此,预制嵌锁块设计时应重点考虑有效分散荷载与减小下承层局部受力。可采用2种方式实现上述要求,其一适当增加嵌锁块的平面尺寸,以增加单个嵌锁块的承载面积;其二增强嵌锁块间的传荷能力,以达到多个嵌锁块共同承担荷载的目的。

基于以上考虑,本文设计的嵌锁块见图1,平面尺寸由小到大分别为30 cm×20 cm、40 cm×25 cm、50 cm×30 cm、60 cm×35 cm。为加强嵌锁块间竖向传荷能力,长边一侧设计为企口联结方式,因企口设置需要,同时考虑成本因素,嵌锁块厚度取18 cm。

2 嵌锁块路面受力分析模型

2.1 嵌锁块路面结构模型

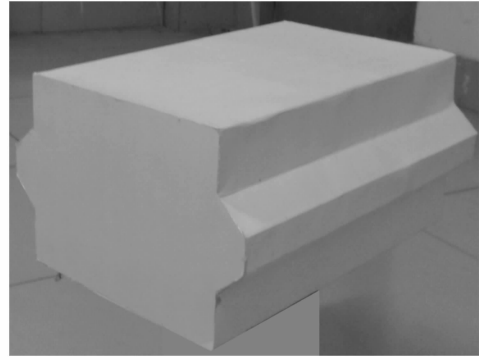
根据国内外嵌锁块路面的结构特点,本文主要研究以级配碎石为基层的嵌锁块路面,其结构形式见图2,有限元模型见图3^[17-18]。碎石基层与嵌锁块之间设砂垫层,其主要功能为调平和稳固嵌锁块,该层厚度较小,在理论模型中不予考虑。

2.2 接缝传荷模型

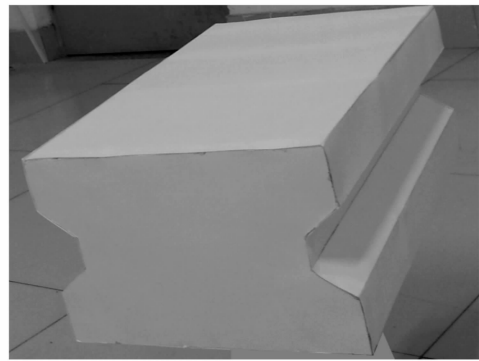
为模拟嵌锁块间的竖向传荷作用,在嵌锁块间长边立面处施加弹簧单元,通过调节弹簧的弹性系数来模拟接缝传荷能力的强弱。如图4所示,假设沿嵌锁块长边 b 区域上分布着一列共 n 个节点,每个节点处分布着如图5所示的弹簧单元。下面推导弹簧弹性系数 k 的取值范围,为便于推导,假设嵌锁块间接缝宽度为0。若嵌锁块间剪应力为 τ ,则有

$$\tau b h = n k \Delta \quad (1)$$

$$\Delta = \gamma h \quad (2)$$



(a) 凸型嵌锁块



(b) 凹型嵌锁块

图1 大型企口嵌锁块

Fig. 1 Large interlocking blocks with tongue and groove

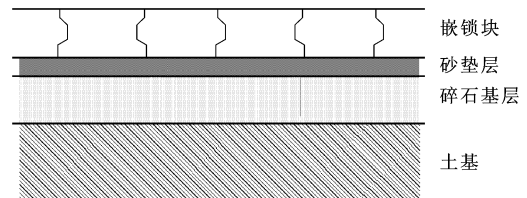


图2 嵌锁块路面结构

Fig. 2 Interlocking block pavement structure

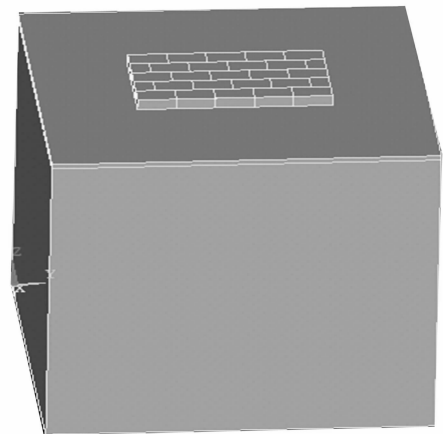


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

将式(2)代入式(1)得

$$\tau b h = n k \gamma h \quad (3)$$

移项得

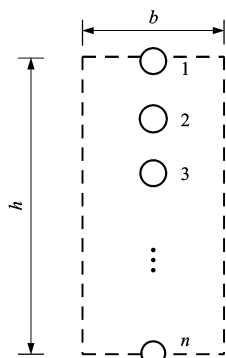


图 4 接缝处节点

Fig. 4 Nodes at joint

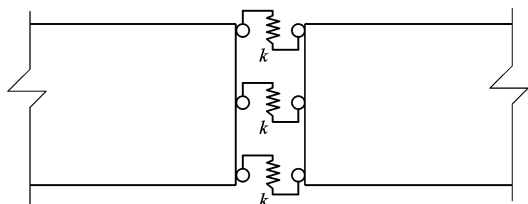


图 5 接缝两侧剪切弹簧

Fig. 5 Shear springs at joint section

$$k = \frac{\Delta b}{\gamma n} = Gb/n = \frac{Eb}{2(1+\mu)n} \quad (4)$$

式中: Δ 为接缝处两侧嵌锁块对应节点竖向位移差; γ 为嵌锁块间剪切应变; h 为嵌锁块厚度; G 为水泥混凝土剪切模量; μ 为泊松比; E 为水泥混凝土弹性模量。

当 k 值达到式(4)计算值时,可认为接缝处材料跟两侧嵌锁块材料相同,荷载作用下接缝两侧无竖向位移差。将混凝土材料参数与节点间距代入式(4), k 值接近 $10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,因此,本文计算时 k

取值区间为 $0 \sim 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

2.3 荷载与材料参数

2.3.1 材料参数

各结构层材料参数见表 1。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

路面结构	厚度/cm	回弹模量/MPa	泊松比	弹性系数/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
路基	—	20~80	0.30	—
碎石层	8~16	300	0.30	—
嵌锁块	18	20 000	0.15	$0 \sim 10^8$

2.3.2 最不利荷载位置

为方便模型加载,将标准轴载双圆荷载等效为双矩形荷载,见图 6, r 与 a 分别为圆的半径与矩形边长之半。通过初步计算比较,嵌锁块横向铺设时的路面响应小于竖向铺设,说明嵌锁块横向铺设方式比较有利,因此,本文后续计算分析统一采用横向铺设的嵌锁块路面模型。选取 4 种嵌锁块尺寸分别为 $30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 、 $40 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 、 $50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 、 $60 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$,将荷载作用于不同位置,根据路面最大响应确定最不利位置,见图 7。

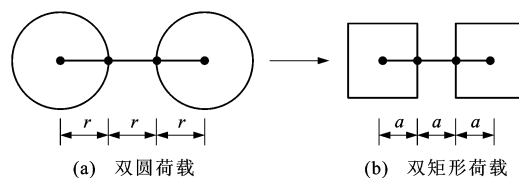


图 6 荷载简化模式

Fig. 6 Simplified loading modes

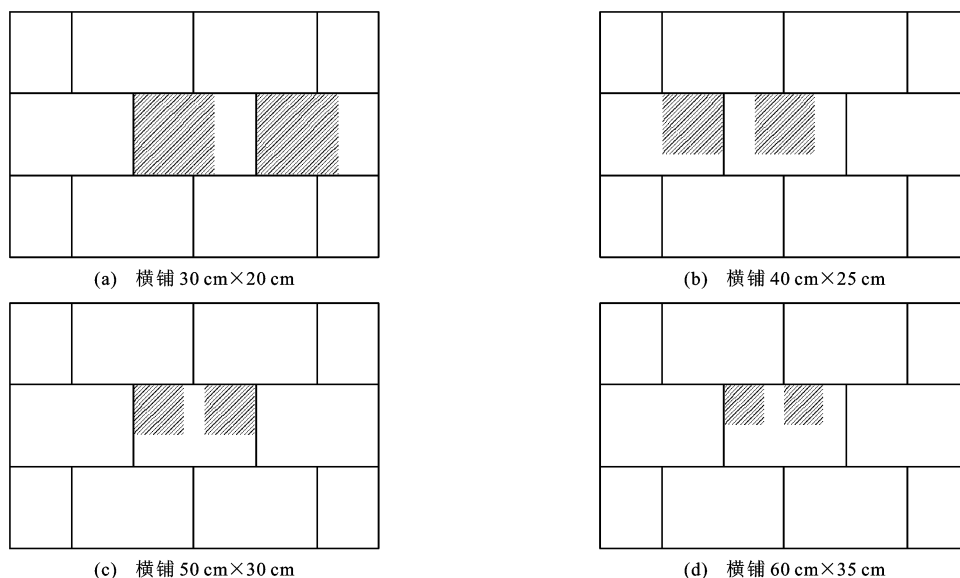


图 7 嵌锁块最不利加载位置

Fig. 7 Critical loading positions of interlocking blocks

3 计算结果分析

3.1 影响因素分析

3.1.1 嵌锁块尺寸的影响

4种嵌锁块尺寸的路表弯沉和路基顶面压应变计算结果分别见图8、9, E_0 为路基回弹模量。从路表弯沉的计算结果可以看出,嵌锁块尺寸对路表弯沉有显著的影响,影响规律与传荷能力有关。当传荷能力较强时,随嵌锁块尺寸增加路表弯沉逐渐减小,嵌锁块尺寸较小时路表弯沉降低率较快,随嵌锁块尺寸增加降低率逐渐变缓。如以路基回弹模量40 MPa为例,当嵌锁块尺寸由小到大30 cm×20 cm、40 cm×25 cm、50 cm×30 cm、60 cm×35 cm变化时,路表弯沉降低率分别为 6.60×10^{-4} 、 2.58×10^{-4} 、 1.18×10^{-4} mm·cm⁻²。

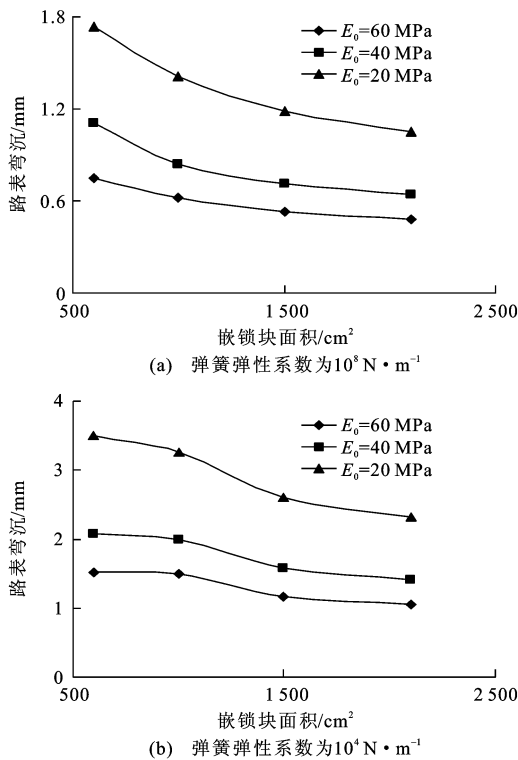


图8 嵌锁块尺寸对路表弯沉的影响

Fig. 8 Effect of interlocking block dimension on surface deflection

当嵌锁块间传荷能力较弱时,随嵌锁块尺寸增加路表弯沉变化曲线的起点段相对平缓,说明在嵌锁块尺寸较小时,增加嵌锁块尺寸对降低路表弯沉的作用不明显。以本文计算的4种嵌锁块尺寸来看,从40 cm×25 cm增加到50 cm×30 cm时,路表弯沉降低率最大,如路基回弹模量为40 MPa时,降低率为 8.38×10^{-4} mm·cm⁻²。考虑到使用过程中嵌锁块间传荷能力可能降低,此时采用较大尺寸

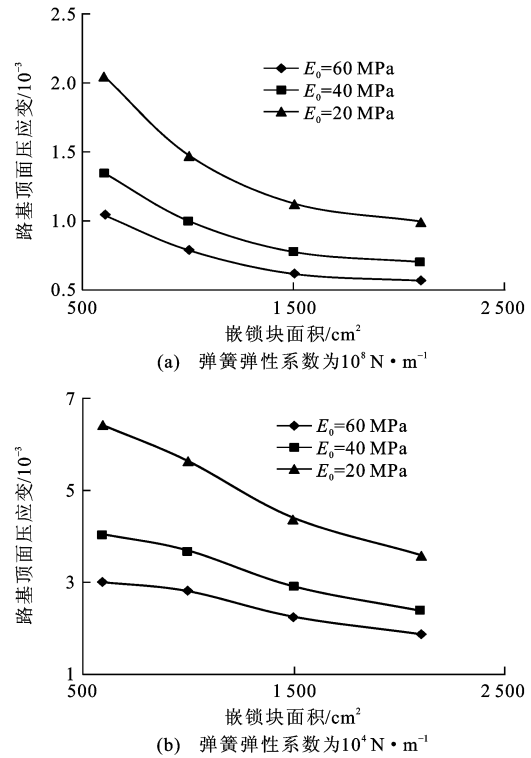


图9 嵌锁块尺寸对路基顶面压应变的影响

Fig. 9 Effect of interlocking block dimension on vertical strain at top of subgrade

的嵌锁块对降低路表弯沉才能起到显著作用。

图9嵌锁块尺寸对路基顶面的压应变影响规律与对路表弯沉的影响规律相似,如以路基回弹模量为40 MPa为例,当传荷能力较强时,嵌锁块面积由600 cm^2 增加至1500 cm^2 过程中路基顶面的压应变减小了42.5%,说明增大嵌锁块尺寸可明显降低路基顶面的压应变,因此,增加嵌锁块尺寸有利于减小路基的塑性变形病害。

综合上述分析结果,将嵌锁块尺寸设定为50 cm×30 cm及更大尺寸可明显降低嵌锁块路面的表面弯沉和路基顶面压应变,此时可有效提高路面承载能力,减少路面车辙。

3.1.2 传荷能力的影响

图10为传荷能力对路基顶面压应变的影响,因传荷能力对路表弯沉的影响规律与之相似,在传荷能力从较弱状态变化到较强状态的过程中,路基顶面压应变显著降低。以50 cm×30 cm嵌锁块为例,当路基回弹模量为20 MPa时,在 k 由 $10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 增加至 $10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 过程中,路基顶面压应变从 4.433×10^{-3} 减小至 1.122×10^{-3} ,降低幅度达74.7%。这是由于嵌锁块间传荷能力的增强可将车辆荷载传递至周边嵌锁块,由多个嵌锁块共同承担荷载,降低了受载嵌锁块下方路基顶面压应变,避免

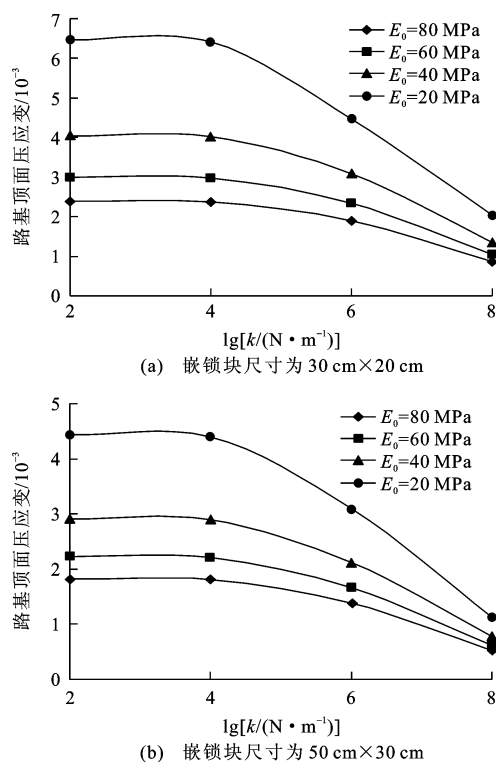


图 10 弹簧弹性系数对路基顶面压应变的影响

Fig. 10 Effect of spring elastic coefficient on vertical strain at top of subgrade

表 2 路基顶面压应变比

Tab. 2 Vertical strain ratios at top of subgrade

路基模量/MPa	嵌锁块尺寸为 $30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$			嵌锁块尺寸为 $50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$		
	k 为 $10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时的 路基顶面压应变/ 10^{-3}	k 为 $10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时的 路基顶面压应变/ 10^{-3}	路基顶面 压应变比	k 为 $10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时的 路基顶面压应变/ 10^{-3}	k 为 $10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时的 路基顶面压应变/ 10^{-3}	路基顶面 压应变比
80	0.867	2.384	0.364	0.520	1.824	0.285
60	1.044	2.991	0.349	0.616	2.229	0.276
40	1.346	4.048	0.333	0.774	2.913	0.266
20	2.142	6.491	0.332	1.175	4.433	0.265

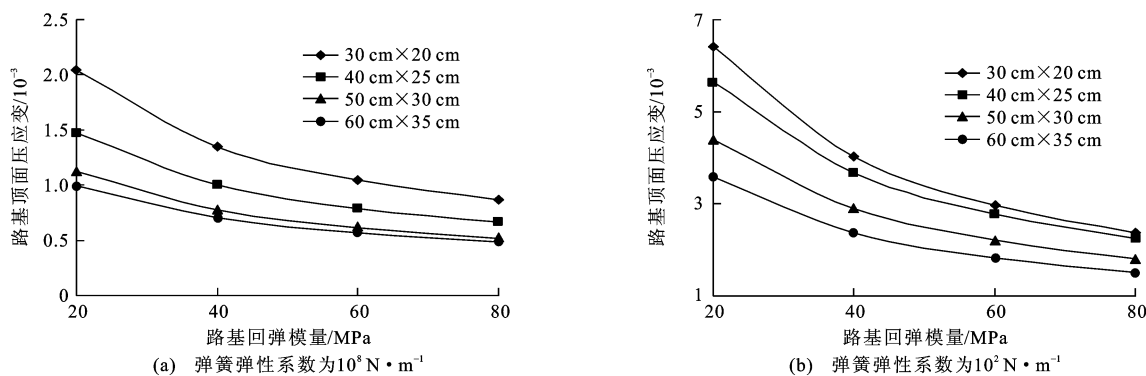


图 11 路基支承对路基顶面压应变的影响

Fig. 11 Effect of subgrade resilient modulus on vertical strain at top of subgrade

3.1.4 碎石层厚度的影响

3 种基层厚度 h_1 分别为 8、12、16 cm 时对路基顶面压应变的影响规律见表 3。可以看出增加基层

受力集中现象。

为进一步分析传荷能力的影响,将图 10 中传荷能力强弱 2 种状态下的结果列于表 2 中,路基顶面压应变比表示传荷能力强与传荷能力弱时路面响应比值,该值越小说明传荷能力的作用越明显。可以发现路基顶面压应变比在 0.26~0.36 之间,在嵌锁块尺寸大时取低值,嵌锁块尺寸小时取高值,其不受路基支承强弱的影响。

3.1.3 路基支承的影响

不同路基回弹模量下路基顶面压应变见图 11,可以看出路基顶面的压应变随路基支承强度增加而减小,在路基支承较弱时,路基顶面压应变降低速度较快,随着路基支承能力增强,路基顶面压应变降低的速度逐渐减小。不同嵌锁块尺寸时变化规律相似,以 $50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 嵌锁块为例,嵌锁块间传荷能力较弱时,路基模量从 20 MPa 分别增加到 40、60、80 MPa 过程中,路基顶面压应变分别降低 34.0%、49.6% 和 58.7%。由此可见,对地基支承较差的地区,应尽可能地通过增强压实或掺加黏结料等方式提高路基的支承能力,可有效减小路面和路基的变形,增强道路的整体承载能力。

厚度可较大幅度降低路基顶面压应变,这是由于基层厚度的增加对车辆荷载起到有效的扩散作用,使荷载传递到路基顶面时单位压应力明显降低。碎石

表 3 基层厚度对路基顶面压应变的影响

Tab. 3 Effect of base thickness on vertical strain at top of subgrade

嵌锁块尺寸			30 cm×20 cm		40 cm×25 cm		50 cm×30 cm		60 cm×35 cm	
路基模量/ MPa	弹性系数/ (N·m ⁻¹)	基层厚度/ cm	路基顶面 应变/10 ⁻³	应变降低 率/%	路基顶面 应变/10 ⁻³	应变降低 率/%	路基顶面 应变/10 ⁻³	应变降低 率/%	路基顶面 应变/10 ⁻³	应变降低 率/%
20	10 ⁸	8	2.042		1.472		1.122		0.993	
		12	1.491	27.0	1.065	27.6	0.851	24.2	0.794	20.0
		16	1.060	48.1	0.825	44.0	0.707	37.0	0.618	37.8
	10 ⁶	8	4.471		3.921		3.099		2.664	
		12	2.643	40.9	2.140	45.4	2.039	34.2	1.704	36.0
		16	1.520	66.0	1.338	65.9	1.238	60.1	1.085	59.3
40	10 ⁸	8	1.346		0.999		0.774		0.702	
		12	0.985	26.8	0.718	28.1	0.668	23.7	0.566	19.3
		16	0.683	49.3	0.541	45.8	0.476	38.5	0.423	39.7
	10 ⁶	8	3.088		2.606		2.117		1.817	
		12	1.702	44.9	1.392	46.6	1.385	34.6	1.181	35.0
		16	0.964	68.8	0.856	67.2	0.808	61.8	0.714	60.7

基层厚度对路基顶面压应变还有以下影响规律。

(1)与嵌锁块间传荷能力关系很大,传荷能力越弱,基层厚度对路基顶面压应变的影响越显著。

(2)与路基支承的强弱相关性不大。

(3)与嵌锁块尺寸变化有一定关系,嵌锁块越小,影响越明显。

以上规律同样适用于对路表弯沉的影响,本节不再赘述。

3.2 嵌锁块路面响应计算方法

基于各因素对路表弯沉和路基顶面压应变的影响规律,以嵌锁块尺寸为 30 cm×20 cm、传荷能力为 10² N·m⁻¹(弱)为基准状态,路表弯沉 l 和路基顶面压应变 ϵ 计算结果分别见图 12、13,计算式分别为

$$l = l_0 A_1 B_1 \tag{5}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 A_2 B_2 \tag{6}$$

式中: l_0 为基准状态下路表弯沉; ϵ_0 为基准状态下路

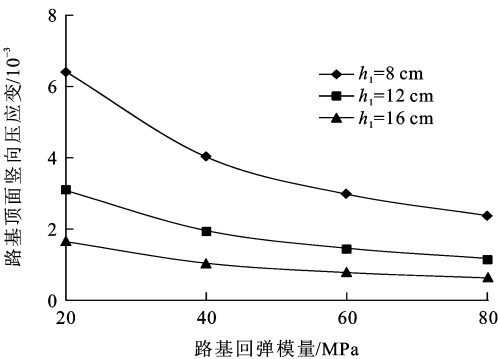


图 13 路基顶面压应变与路基支承能力的关系

Fig. 13 Relation between vertical strain at top of subgrade and subgrade resilient modulus

基顶面压应变; A_1 为嵌锁块尺寸对路表弯沉的影响系数(图 14); A_2 为嵌锁块尺寸对路基压应变的影响系数(图 15); B_1 为传荷能力对路表弯沉的影响系数(图 16); B_2 为传荷能力对路基压应变的影响系数(图 17)。

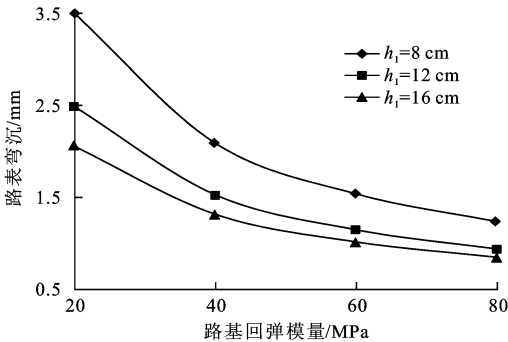


图 12 路表弯沉与路基支承能力的关系

Fig. 12 Relation between surface deflection and subgrade resilient modulus

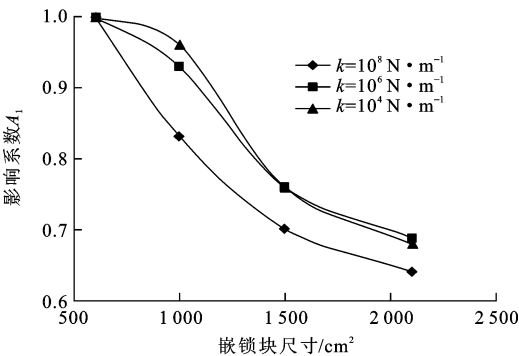
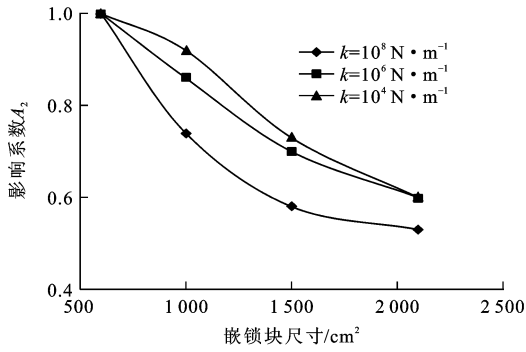
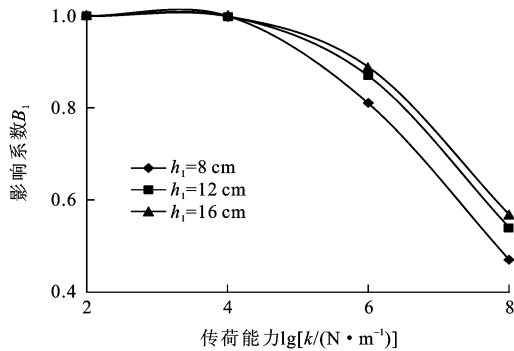
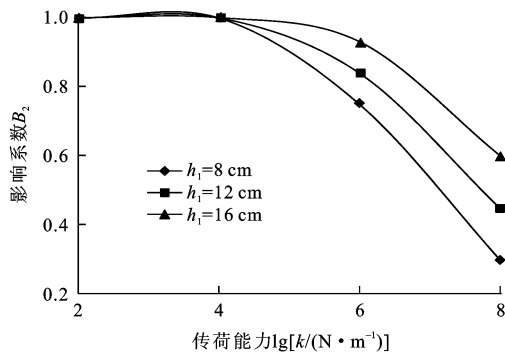


图 14 尺寸影响系数 A_1

Fig. 14 Dimension factor A_1

图 15 尺寸影响系数 A_2 Fig. 15 Dimension factor A_2 图 16 传荷能力影响系数 B_1 Fig. 16 Load transfer factor B_1 图 17 传荷能力影响系数 B_2 Fig. 17 Load transfer factor B_2

4 嵌锁块路面设计方法

车辙是嵌锁块路面主要病害之一,严重影响行车舒适性,同时,车辙产生过程中路面嵌锁块会产生松动,雨水进入后的唧浆作用会加速道路的破坏。车辙主要由碎石基层和路基的竖向塑性变形决定,考虑到嵌锁块路面主要应用于低等级道路,碎石基层较薄,本文重点研究路基的塑性变形。路基的塑性变形主要由材料本身特性、竖向回弹应变和疲劳荷载次数决定^[19-20],具体形式如下

$$\delta_N = \lambda \left(\frac{\alpha}{\epsilon_1} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N} \right)^\beta} \epsilon_2 h_2 \quad (7)$$

$$\lg(\beta) = -0.61119 - 0.017638W$$

$$\rho = 10^9 \left(\frac{4.8929}{10^{9\beta} - 1} \right)^{1/\beta}$$

$$\frac{\alpha}{\epsilon_1} = 0.075e^{\rho^\beta} + 10e^{\left(\frac{\rho}{10^9} \right)^\beta}$$

式中: δ_N 为结构层永久变形; N 为标准累计轴次; λ 为路基的修正系数,对于路基取 1.35; α 为材料性能相关参数; ϵ_1 为获取材料参数 α 、 β 、 ρ 时所施加的回弹应变; ϵ_2 为结构层竖向回弹应变; h_2 为结构层厚度; W 为路基含水量。

路基不同深度处竖向压应变见图 18,路基压应变随深度的衰减速率与路基顶面压应变和路基模量相关,通过对计算数据拟合,可以得到路基不同深度处竖向压应变为

$$\epsilon_z = \epsilon \epsilon e^{-[0.69 \ln(\epsilon) + 0.346 + 0.0243E_0]z} \quad (8)$$

式中: ϵ_z 为路基深度 z 处的竖向压应变。

将式(8)代入式(7)后沿深度方向积分可以得到路基表面的塑性变形。以路基累计塑性变形 8 mm 为控制条件,路基顶面竖向压应变与荷载疲劳作用次数的关系见图 19,嵌锁块路面设计时可根据图 19 的计算曲线确定某一交通条件下路基需满足的压应变。

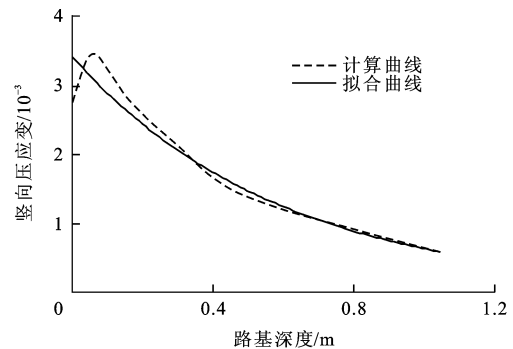


图 18 竖向压应变随深度的变化规律

Fig. 18 Changing rules of vertical strain with depth

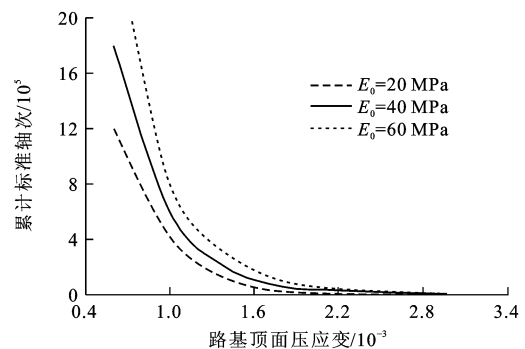


图 19 路基压应变与累计标准轴次的关系

Fig. 19 Relation between vertical strain of subgrade and normative accumulated axle-load acting number

5 结 语

(1)增大嵌锁块尺寸可有效减小路表弯沉和路基竖向压应变,该规律受嵌锁能力的影响。当嵌锁能力较强时,随嵌锁块尺寸增大路面响应降低的速度呈现由快变慢的特点,而嵌锁能力较弱时则呈现慢-快-慢的特点,因此,制作较大尺寸的嵌锁块可提升嵌锁块路面性能,但应结合现场搬运施工的难易性。

(2)增强嵌锁块传荷能力可显著增加嵌锁块面层的整体性,使受载嵌锁块和相邻嵌锁块共同承担车辆荷载,大大提升道路的承载能力。

(3)应在地基支承良好地区使用嵌锁块路面,且同时保证碎石基层强度与排水通畅。结构设计时应首先根据当地的地质条件确定路基的强度,然后依据道路的交通服务要求确定路基顶面的压应变水平,以此为指标,根据理论计算结果确定所需的基层厚度和嵌锁块尺寸,使其满足路基竖向压应变要求。

参 考 文 献 :

References :

- [1] BARBER S D. Pavement design for port areas[D]. Newcastle: University of Newcastle upon Tyne, 1980.
- [2] BARBER S D, KNAPTON J. An experimental investigation of the behaviour of a concrete block pavement with sand subbase[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part2, 1980, 69(1): 139-155.
- [3] SHACKEL B. The design of interlocking concrete block pavements for road traffic[J]. Concrete Block Paving, 1981: 23-32.
- [4] PANDA B C, GHOSH A K. Structural behavior of concrete block paving II: concrete blocks[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(2): 130-135.
- [5] NUR H A H, HASANAN M N, AZMAN M. Effect of jointing sand sizes and width on horizontal displacement of concrete block pavement[J]. Journal Teknologi: Sciences and Engineering, 2014, 71(3): 83-86.
- [6] EMERY J A. Concrete block paving for aircraft hardstandings and turning areas[C]//ICPI. Proceedings of Second International Conference on Concrete Block Paving. Chantilly: ICPI, 1984: 176-182.
- [7] EMERY J A. An evaluation of the performance of concrete blocks on aircraft pavements at Luton airport[C]//ICPI. Proceedings of 3rd International Conference on Concrete Block Paving. Chantilly: ICPI, 1988: 340-344.
- [8] ISHAT I, MAURER U. Design and performance of concrete block pavements for hangar aprons serving heavy-duty aircrafts[J]. Geotechnical Special Publication, 1993, 35(2): 394-403.
- [9] Interlocking Concrete Pavement Institute. Structural design of interlocking concrete pavement for roads and parking lots[R]. Washington DC: Interlocking Concrete Pavement Institute, 2003.
- [10] NEJAD M F, SHADRAVAN M R. A study on behavior of block pavement using 3D finite element method[C]//ICPI. Proceedings of 8th International Conference on Concrete Block Paving. Chantilly: ICPI, 2006: 349-358.
- [11] GHOLAM A, AFSHIN F, BABAK P. Numerical analysis of concrete block pavements and comparison of its settlement with asphalt concrete pavements using finite element method[J]. Engineering Journal, 2014, 18(4): 39-51.
- [12] 孙立军. 联锁块铺面的结构承载理论[J]. 土木工程学报, 1995, 28(4): 15-21.
SUN Li-jun. Bearing-capacity theory of interlocking concrete block paving[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(4): 15-21. (in Chinese)
- [13] 孙立军. 港区联锁块铺面结构设计方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1996, 24(1): 17-22.
SUN Li-jun. Structural design method of interlocking block paving for port areas[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1996, 24(1): 17-22. (in Chinese)
- [14] SHACKEL B. The challenges of concrete block paving as a mature technology[C]//ICPI. Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Block Paving. Chantilly: ICPI, 2003: 1-11.
- [15] AHMED A M, SINGHI B. Overview on structural behaviour of concrete block pavement [J]. International Journal of Scientific and Engineering Research, 2013, 4(7): 782-789.
- [16] SARKAR H, HALDER P C, RYNTATHIANG T L. Behavior of interlocking concrete block pavement over stone dust grouted subbase[J]. International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering, 2014, 3(1): 44-48.
- [17] 单景松, 郭忠印. 旧水泥路面沥青加铺改造中弯沉指标研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(4): 540-545.
SHAN Jing-song, GUO Zhong-yin. Deflection criterion at the joint of existing JPCP pavement overlayed with HMA[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(4): 540-545. (in Chinese)
- [18] 阳恩慧, 艾长发, 邱延峻. 采用刚度矩阵法的弹性层状体系数值解法[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(4): 14-24.
YANG En-hui, AI Chang-fa, QIU Yan-jun. Numerical method of multi-layer elastic system by using stiffness matrix method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 14-24. (in Chinese)
- [19] WU Zhong, CHEN Xing-wei. Prediction of permanent deformation of pavement base and subgrade materials under accelerated loading [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2011, 4(4): 231-237.
- [20] NCHRP. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2004.