

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20211222001

文章编号:1672-9331(2023)03-0069-10

引用格式:田小革,胡宏立,李光耀,等.双层水泥稳定碎石基层层间压实度差异对基层整体性能的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(3):69-78.

Citation: TIAN Xiaoge, HU Hongli, LI Guangyao, et al. Impact of different degrees of compactness of cement stabilized macadam base on the performance of base[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(3): 69-78.

# 双层水泥稳定碎石基层层间压实度差异对基层整体性能的影响

田小革,胡宏立,李光耀,郭常辉,卢雪蓉

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】研究双层水泥稳定碎石基层上下层压实度差异对基层性能的影响。【方法】首先对层间不同水灰比及水泥浆剂量的试件进行直接剪切试验和直接拉伸试验,得到最佳水泥浆剂量及水灰比;在此基础上,研究了上下层层间压实度差异对水泥稳定碎石基层整体无侧限抗压强度、抗弯拉强度及疲劳寿命的影响;最后,利用有限元软件 ABAQUS 模拟分析了不同上下层压实度差下路表弯沉和各结构层层底弯拉应力。【结果】通过试验得到水泥稳定碎石基层层间最佳水泥浆剂量和水灰比分别为  $0.311 \text{ g/cm}^3$  和 1:1.5,提高基层整体压实度并降低基层上下层压实度差能够提高水泥稳定碎石基层的整体力学强度和疲劳性能,进而降低路表弯沉和提高基层疲劳寿命。【结论】减小水泥稳定碎石基层上下层压实度差能够显著提高基层的力学强度及耐久性。

**关键词:**道路工程;压实度;力学性能;有限元;水泥稳定碎石基层

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

水泥稳定碎石基层早期强度高且板体性好,在我国公路建设中得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。水泥稳定碎石基层设计厚度较大,最大厚度可达 60 cm。受限于机械的施工性能,在公路基层施工中常常采用分层铺筑的方法进行水泥稳定碎石基层的施工。这种施工方法会导致层间出现不连续现象<sup>[4]</sup>,进而造成基层整体强度和耐久性下降<sup>[5-6]</sup>。近年来,随着大厚度水泥稳定碎石基层双层连续铺筑技术<sup>[7]</sup>及全厚式整体铺筑技术的逐步推广,基层的整体力学强度及耐久性得到了显著提高<sup>[8-10]</sup>。相关研究表明,影响双层水泥稳定碎石基层性能的相关因素很多<sup>[11-13]</sup>,其中压实度是较为

关键的因素,众多学者对此展开了系列研究。

蒋应军等<sup>[14]</sup>按照 96.0%、98.0% 和 100.0% 3 种压实度,采用振动成型法<sup>[15]</sup>成型水泥剂量为 3.5% 的骨架密实级配水泥稳定碎石试件,对不同压实度水泥稳定碎石进行了无侧限抗压强度试验,发现压实度每提高 1%,水泥稳定碎石的强度至少可以提高 11%,这说明提高基层的压实度对于提高基层的强度效果显著。孟旭等<sup>[16]</sup>通过成型 3 种具有不同上下层压实度差的水泥稳定碎石基层试件,并对其进行了抗压强度及温缩性能、干缩性能、抗冲刷性能试验,结果表明,压实度对水泥稳定碎石的强度和耐久性有明显影响,随着上下层平均压实度的降低,厚层水泥稳定碎石的路用性能有所降低;在压实度降幅相同的情况下,上层压实度越高,对应的路用性能的降幅越小。田耀刚

收稿日期:2021-12-22;修回日期:2022-01-10;接受日期:2022-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978086);湖南省交通运输厅科技项目(201905)

通信作者:田小革(1970—)(ORCID:0000-0001-9699-7041),男,教授,主要从事道路工程材料方面的研究。

E-mail:tianxiaoge@126.com

等<sup>[17]</sup>通过在室内成型具有不同上下层压实度差的双层水泥稳定碎石试件,研究不同上下层压实度差对整体大厚度水泥稳定碎石基层的耐久性,及温缩、干缩及抗冲刷性能的影响,结果发现,在上下层压实度差相同时,提高上层压实度可以降低整体大厚度基层的干缩性能和温缩性能,并且能够降低基层的平均冲刷量。目前,在有关压实度对水泥稳定碎石基层性能影响的研究中,要么只成型单层水泥稳定碎石基层,然后通过力学试验得到单层水泥稳定碎石基层强度随压实度变化的数据;要么成型双层水泥稳定碎石基层,但是研究者们也只是对试件的温缩、干缩性能及无侧限抗压强度进行了简单试验。水泥稳定碎石基层在道路实际运营中被破坏,往往是因为交通荷载长期作用下的弯拉作用使基层产生了疲劳,此时底基层出现开裂,进而造成基层整体结构断裂破坏。因此,相关文献的研究存在一定的局限性。

为研究水泥稳定碎石基层上下层压实度差对基层整体性能的影响,本文选取几种不同压实度差异方案,制备双层水泥稳定碎石基层复合试件,通过层间剪切试验和直接拉伸试验得到用于增强层间黏结性的水泥浆的最佳水灰比及水泥浆剂量;基于双层复合试件无侧限抗压强度试验、抗弯拉强度试验、疲劳试验,分析了水泥稳定碎石基层上下层压实度差对基层整体力学性能的影响;通

过有限元软件 ABAQUS 建立了水泥稳定碎石基层沥青路面结构模型,通过计算得到标准荷载作用下路表弯沉值及水泥稳定碎石基层的最大弯拉应力和疲劳寿命。研究成果可为实际工程提供指导。

## 1 原材料及配合比

### 1.1 原材料

采用复合硅酸盐水泥 P·C32.5 作为水泥稳定碎石的胶结料,其技术指标满足《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)的要求;粗、细集料均采用石灰岩碎石。参考《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)对试验所用集料的相关指标进行检测,具体测试结果见表 1~3。

表 1 水泥技术指标

Table 1 Technical indexes of cement

检测项目	技术要求	实测结果	试验方法
细度/%	≤10.0	8.20	T0502-2005
初凝时间/min	≥180	198	T0505-2005
终凝时间/min	360~600	512	T0505-2005
安定性/mm	≤5.0	2.30	T0505-2005
3 d 抗折强度/MPa	≥2.5	3.10	T0506-2005
28 d 抗折强度/MPa	≥5.5	6.90	T0506-2005
3 d 抗压强度/MPa	≥10.0	15.60	T0506-2005
28 d 抗压强度/MPa	≥32.5	35.5	T0506-2005

表 2 粗集料技术指标

Table 2 Technical indexes of coarse aggregate

检测项目	技术要求	不同粒径粗集料的实测结果			试验方法
		(20~25] mm	(10~20] mm	[5~10] mm	
压碎值/%	≤26.0		21.3		T0316-2005
毛体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	实测	2.656	2.632	2.598	T0304-2005
吸水率/%	≤2.00	0.85	0.32	1.56	T0304-2005
针片状集料质量分数/%	≤22.0	14.50	9.80	5.60	T0312-2005
直径小于 0.075 mm 粉尘的质量分数/%	≤2.00	0.89	0.55	0.97	T0302-2005
软石质量分数/%	≤5.0	2.20	5.80	3.80	T0320-2005

表 3 细集料技术指标

Table 3 Technical indexes of fine aggregate

检测项目	技术要求	实测结果	试验方法
颗粒分析	满足级配要求	满足级配要求	T0327-2005
塑性指数/%	≤17.0	14.10	T0118-2007
有机质质量分数/%	≤2.00	0.89	T0036-1994

### 1.2 配合比

参考《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)表 4.5.4 中 C-B-1 推荐级配范围的中值(表 4),采用重型击实法对水泥剂量为 5.0% 的水泥稳定碎石进行击实试验,结果是:最大干密度为 2.347 g/cm<sup>3</sup>,最佳含水率为 5.10%。

表4 各筛孔通过百分率

Table 4 Passing percentage of each mesh

筛孔直径/mm	通过百分率/%	筛孔直径/mm	通过百分率/%
26.5	100	2.36	27
19.0	84	1.18	18
16.0	76	0.60	12
13.20	68	0.30	7
9.50	58	0.15	5
4.75	40	0.075	3

## 2 试验方案与方法

### 2.1 试验方案

为保证层间的连续性,在采用双层连续摊铺时,需在层间撒布水泥浆。因此,需确定最佳水泥浆剂量及水灰比。首先,在相同水泥浆剂量下采用2:1、1.5:1、1:1、1:1.5、1:2、1:2.5和1:3共7种不同水灰比成型圆柱体试件,上下压实度均为98.0%,按规定养护7d后进行直接剪切试验与直接拉拔试验得到最佳水灰比;然后,在最佳水灰比条件下,在层间分别喷洒30.0、40.0、50.0、60.0和70.0 g水泥浆,制作双层复合试件,并对其直接剪切试验和直接拉拔试验,得到最佳水泥浆剂量。

根据上述试验确定的最佳水泥浆剂量及水灰比,采用振动成型法<sup>[18]</sup>分两层成型上下层压实度不同的150 mm(直径)×150 mm(高)圆柱体试件和400 mm×100 mm×100 mm中梁试件。对圆柱体试件进行无侧限抗压强度试验,对中梁试件进行抗弯、抗拉强度试验和四点弯曲疲劳试验。根据相关规定,水泥稳定碎石基层压实度不应小于98.0%,因此,本文对上下基层的整体压实度设定98.0%和99.0%两个基准,并分别记为方案A和方案B。试验方案设计见表5。

表5 不同压实度的试验方案

Table 5 Testing schemes of different compactness degree %

试验方案	压实度		水泥稳定碎石基层上下层压实度差
	水泥稳定碎石基层上层	水泥稳定碎石基层下层	
A1	100.0	96.0	4.0
A2	99.0	97.0	2.0
A3	98.0	98.0	0.0
B1	100.0	98.0	2.0
B2	99.0	99.0	0.0

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 直接剪切试验

将双层水泥稳定碎石复合试件置于自制的斜剪仪上,采用万能材料试验机对试件施加竖向荷载,直至试件发生层间滑移破坏,得到位移-荷载曲线。曲线中的荷载峰值即为试件破坏时所能抵抗的最大剪切力,层间抗剪强度按照式(1)计算:

$$\tau = P_d / S \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为层间界面抗剪强度,Pa; $P_d$ 为荷载峰值,N; $S$ 为试件层间界面面积, $m^2$ 。

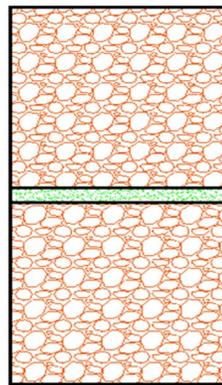


图1 水泥稳定碎石复合试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cement stabilized macadam composite specimen

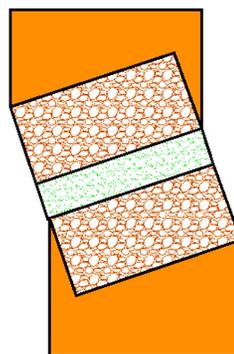


图2 斜剪仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of oblique shear apparatus

#### 2.2.2 直接拉伸试验

用快硬环氧树脂胶将双层水泥稳定碎石复合试件上下表面黏结在两块带有拉杆、直径为150 mm的圆形钢板上。待环氧树脂胶完全固化后,将试件固定于万能材料试验机上,以100~200 N/s的加载速度对拉杆进行拉伸加载,直至双层水泥稳定碎石试件上下层界面被破坏。位移-荷载曲线的荷载峰值即为试件所能抵抗的最大拉拔力,层

间抗拉强度按照式(2)计算:

$$\sigma = F/S \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为抗拉强度,MPa; $F$ 为荷载峰值,N; $S$ 为试件层间界面面积, $\text{mm}^2$ 。

### 2.2.3 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度是反映无机结合料稳定材料承载能力的一项重要技术指标<sup>[19-20]</sup>。在测定水泥稳定碎石试件的无侧限抗压强度时,设定加载速率为1 mm/min。试件尺寸为150 mm(直径) $\times$ 150 mm(高)。为确保试验数据准确,每组试验制备3个平行试样。试验时记录导致试件破坏的最大荷载 $P_U$ 。无侧限抗压强度根据式(3)计算:

$$R_c = P_U/A \quad (3)$$

式中: $R_c$ 为无侧限抗压强度,MPa; $P_U$ 为试件破坏的最大荷载,N; $A$ 为试件截面积, $\text{mm}^2$ 。

### 2.2.4 抗弯拉强度试验

先按压实度组合方案采用轮碾压实法成型梁板件,标准养护28 d后再用切割机将试件切割成400 mm $\times$ 100 mm $\times$ 100 mm的中梁试件。采用三点加载法进行抗折试验。抗弯拉强度按式(4)进行计算:

$$R_s = 3P_w L/2bh^2 \quad (4)$$

式中: $R_s$ 为抗弯拉强度,MPa; $P_w$ 为破坏极限载荷,N; $L$ 为有效跨径,mm; $b$ 为试件宽度,mm; $h$ 为试件高度,mm。

### 2.2.5 疲劳试验

根据无机结合料稳定材料疲劳试验方法T0856-2009的要求,对尺寸为400 mm $\times$ 100 mm $\times$ 100 mm的复合梁试件采用四点受力荷载模式进行疲劳试验。荷载的施加频率为10 Hz,加载波形

根据路面在实际中的受力情况采用半正弦函数。

## 3 试验结果

### 3.1 层间水泥浆剂量及水灰比

双层连续铺筑层间状态是影响水泥稳定碎石基层强度的重要因素。为使喷洒的水泥浆能最大限度地提供层间黏结力,需合理选取水泥浆剂量及水灰比。不同水灰比及水泥浆剂量下水泥稳定碎石基层上下层层间抗剪强度与抗拉强度如图3~6所示。

由图3~4可知:在相同水泥浆剂量下,随着水灰比的减小,层间抗剪强度先增大后减小,当水灰比为1:2时,层间抗剪强度达到最大。原因是当水灰比过大时,水泥胶结料含量较低,不能有效提供层间黏结力;而当水灰比过小时,水泥浆流动性变差,具有有效黏结作用的集料的比表面积减小,致使层间黏结力降低。同理,随着水灰比的下降,层间抗拉强度也呈现出先增大后减小的趋势,当水灰比为1:1.5时,层间抗拉强度达到最大;当水灰比由1:1.5减小到1:2时,层间抗剪强度提升不明显。综合考虑,层间撒布的水泥浆的水灰比宜为1:1.5。

由图5~6可知:当水灰比为1:1.5时,随着水泥浆撒布量的增加,层间抗剪强度先增大后减小。原因是当水泥浆撒布量较小时,水泥浆不能最大限度地提供层间黏结力;随着水泥浆撒布量的逐渐增加,层间抗剪强度逐渐增大,当水泥浆的撒布量为55.0 g时,层间黏结力最大;当水泥浆的撒布量超过55.0 g时,层间抗剪强度呈降低趋势。层间

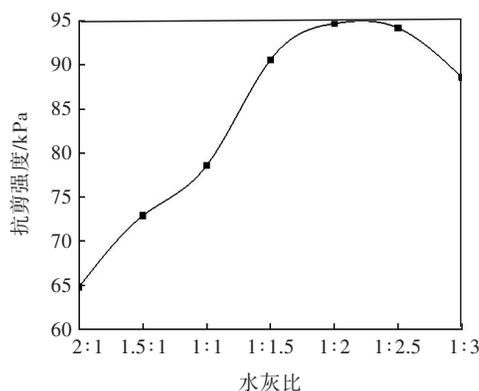


图3 不同水灰比条件下的剪切试验结果

Fig. 3 Shear test result under different water-cement ratio

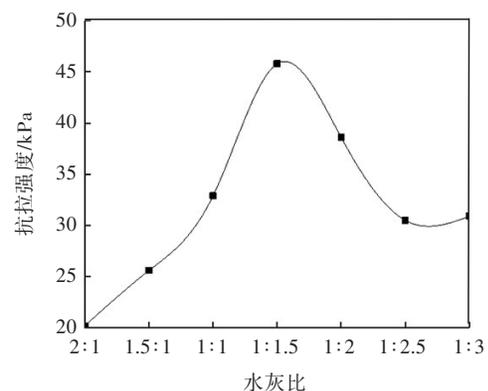


图4 不同水灰比条件下的拉拔试验结果

Fig. 4 Pull-off test result under different water-cement ratio

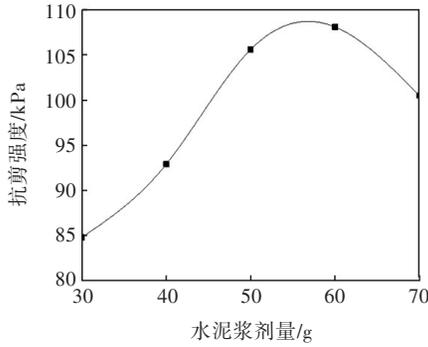


图 5 不同水泥浆剂量下的剪切试验结果

Fig. 5 Shear test result of different cement slurry dosage

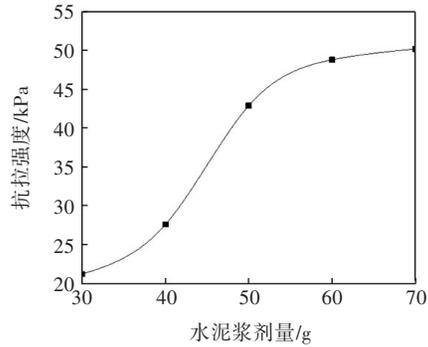


图 6 不同水泥浆剂量下的拉拔试验结果

Fig. 6 Pull-off test result of different cement slurry dosage

抗拉强度随水泥浆撒布量的增加而增加,原因是随着水泥浆剂量的增加,水泥浆与集料相接触的面积增大,层间黏结力提高。当水泥浆剂量超过 60.0 g 时,层间抗拉强度增长速率随水泥浆剂量的增加而放缓,因此水泥浆剂量宜为 55.0 g。综上所述,水泥稳定碎石基层上下层间水泥浆剂量和水灰比宜分别取为 0.311 g/cm<sup>2</sup>(换算值)和 1:1.5。

### 3.2 无侧限抗压强度

将上下层混合料具有不同压实度差异的圆柱体复合试件按规定条件养护至设计龄期(7、28 d)的前一天。饱水 1 d 后将试件取出,擦干表面,对试件分别进行 7、28 d 无侧限抗压强度试验。试验结果见表 6。

分析表 6 可知:① 双层水泥稳定碎石试件的 7、28 d 无侧限抗压强度均随着上下层压实度差的增大而减小。② 当整体压实度为 98.0% 时,随着上下层压实度差由 0.0% 增大至 2.0%、4.0%,7 d 无侧限抗压强度代表值分别减小了 8.9%、30.2%;28 d 无侧限抗压强度代表值分别减小了 5.6%、15.0%。表明当上下层压实度差为 2.0% 时,无侧限抗压强度代表值下降幅度不大;当压实度差为

4.0% 时,无侧限抗压强度代表值下降幅度明显增大,且 7 d 无侧限抗压强度代表值已不满足强度不小于 4 MPa 的技术要求。当整体压实度为 99.0% 时,随着上下层压实度差由 0.0% 增大至 2.0%,7 d 无侧限抗压强度代表值减小了 10.0%,28 d 无侧限抗压强度代表值减小了 7.5%,无侧限抗压强度代表值下降幅度不大。由此可知:上下层压实度差超过 2.0% 对抗压强度有明显影响,基层强度降幅较大;随着龄期的增长,压实度对抗压强度的影响有所减小,原因可能是后期随着水化程度的提高,基层的强度逐渐形成,上下层的压实度差逐渐减小,同时层间接触面附近胶结材料的水化反应增强了层间黏结力,进而提高了整体性能,削弱了压实度差异对抗压强度的不利影响。③ 整体压实度为 98.0%、上下层压实度相同时的无侧限抗压强度与整体压实度为 99.0%、上下层压实度差为 2.0% 时的相当,表明提高基层的抗压强度不仅需要控制整体压实度,也需要控制上下层之间的压实度差。

表 6 水泥稳定碎石无侧限抗压强度

Table 6 Unconfined compressive strength of cement stabilized macadam

养护龄期/d	试验方案	平均值/MPa	代表值/MPa
7	A1	4.28	3.75
	A2	5.42	4.89
	A3	5.82	5.37
	B1	5.85	5.42
	B2	6.32	6.02
	28	A1	6.65
A2		7.13	6.68
A3		7.56	7.08
B1		7.42	6.98
B2		7.99	7.55

### 3.3 抗弯拉强度

依照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中的 T0851-2009 试验方法,采用三点加载方式对水泥稳定碎石中梁试件进行 28 d 抗弯拉强度试验,测试结果见表 7。

分析表 7 可知:① 当整体压实度为 98.0% 时,随着上下层压实度差由 0.0% 增大至 2.0%、4.0%,试件的抗弯拉强度代表值分别减小了 2.2%、8.1%,表明当压实度差超过 2.0% 时,试件抗弯拉强度代表值的下降幅度明显增大。② 当整体压实度为 99.0% 时,随着上下层压实度差由 0.0% 增大

至2.0%,试件抗弯拉强度代表值减小了2.1%,表明提高整体压实度可以降低上下层压实度差对水泥稳定碎石抗弯拉强度的影响。

表7 中梁试件抗弯拉强度试验结果

试验方案	平均值	代表值
A1	1.28	1.24
A2	1.35	1.32
A3	1.39	1.35
B1	1.41	1.37
B2	1.43	1.40

### 3.4 疲劳性能

依照相关规程分别对具有不同上下层压实度差的中梁试件进行四点弯曲疲劳试验。本疲劳试验的龄期设定为28 d,疲劳试验采取的应力强度比分别为0.5、0.6、0.7、0.8,疲劳寿命见表8。

表8 中梁试件疲劳试验结果

应力强度比	疲劳寿命				
	A1	A2	A3	B1	B2
0.5	21 203	32 669	45 645	52 562	64 781
0.6	6 213	7 938	9 755	10 250	11 780
0.7	654	810	912	1 045	1 255
0.8	112	134	158	179	223

分析表8可知:当水泥稳定碎石基层的应力强度比由0.5增加到0.8时,试件的疲劳寿命均呈下降趋势;在应力强度比相同的情况下,B2试验方案下试件的疲劳寿命最大,A1试验方案下试件的疲劳寿命最小,且B1、B2方案下试件的疲劳寿命均大于A1、A2、A3方案下试件的疲劳寿命。这表明整体压实度的提高有助于提升基层的疲劳寿命;当整体压实度相同时,增大上下层的压实度差,水泥稳定碎石基层的疲劳寿命也会增大。

## 4 有限元分析

### 4.1 概述

为研究水泥稳定碎石基层上下层压实度差对路面变形和各结构层层底受力的影响,利用有限元软件ABAQUS建模,通过改变结构层材料参数来模拟水泥稳定碎石基层上下层压实度的不同,从而对具有不同上下层压实度差的大厚度水泥稳定碎石基层沥青路面进行三维空间有限元分析。所选取的典型路面的结构参数见表9,其中,水泥

稳定碎石基层的抗压回弹模量及密度在不同压实度条件下的具体数值见表10。

表9 典型路面结构参数

Table 9 Structure parameters of typical pavement

结构层名称	厚度/m	抗压回弹模量/MPa	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	泊松比
沥青混凝土面层	0.18	1 800	2.3	0.25
沥青柔性基层	0.11	1 600	2.3	0.25
水泥稳定碎石上基层	0.18			0.25
水泥稳定碎石下基层	0.18			0.25
水泥稳定碎石底基层	0.20	1 600	2.6	0.25
碎石垫层	0.20	300	2.1	0.35
土基		60	1.8	0.40

表10 不同压实度下水泥稳定碎石基层抗压回弹模量及密度

Table 10 Compressive resilience modulus and density of cement stabilized macadam base with different compactness

压实度/%	抗压回弹模量/MPa	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
96	1 479.97	2.48
97	1 679.15	2.51
98	1 967.83	2.54
99	2 118.95	2.57
100	2 312.86	2.60

### 4.2 有限元模型的建立

本文有限元模型的计算单元采用C3D8R三维实体单元(图7)。模型的网格划分方式如下:全局网格尺寸为0.2 m×0.2 m×0.2 m,路面各结构层荷载施加处的细分网格尺寸为0.02 m×0.02 m×0.02 m,土基的细分网格尺寸为0.04 m×0.04 m×0.10 m。采用的荷载为BZZ-100,将单轮的触地面积简化为直径为21.3 cm的圆面积,均布荷载为0.7 MPa。

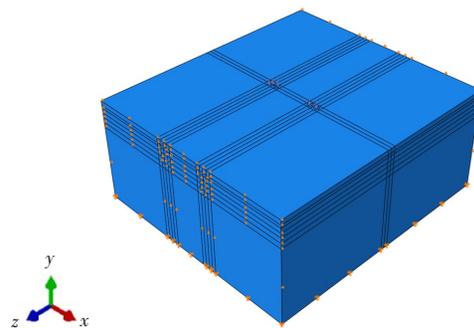


图7 水泥稳定碎石基层沥青路面实体模型  
Fig. 7 Entity model of cement stabilized macadam base asphalt pavement

### 4.3 路面荷载结构效应分析

#### 4.3.1 标准荷载作用下路表弯沉

路表弯沉值反映了路面结构层的整体强度和刚度,弯沉值越小代表路面在荷载作用下抵抗弯拉变形的能力越强。不同试验方案下的路表弯沉值见表11。

分析表11可知:①当整体压实度为98.0%、上下层压实度差为2.0%和4.0%时,路表弯沉值较无压实度差时的路表弯沉值分别增长了0.30%、3.80%,表明在上下层压实度差超过2.0%后,上下层压实度差对路面结构整体强度的影响明显增大;②当整体压实度为99.0%、上下层压实度差为2.0%时,路表弯沉值较无压实度差时增长了0.13%,说明提高整体压实度可以降低上下层压实度差对路面结构整体强度的影响。综上所述,当大厚度基层整体压实度满足规范要求且上下层压实度差不超过2.0%时,上下层压实度差对路面结构整体强度影响不大。

表11 不同试验方案下路表弯沉的试验结果

Table 11 Test result of road surface deflection for different test schemes

试验方案	路表弯沉值/ (0.01 mm)	试验方案	路表弯沉值/ (0.01 mm)
A1	24.33	B1	23.28
A2	23.51	B2	23.25
A3	23.44		

#### 4.3.2 标准荷载作用下层底弯拉应力

层底弯拉应力越大表明路面结构抵抗开裂的能力越差。不同试验方案下各结构层层底最大弯拉应力见表12。

分析表12可知,水泥稳定碎石基层上下层压实度差对沥青混凝土面层、沥青柔性基层、碎石垫层的层底最大弯拉应力影响较小,在各结构层层底的最大弯拉应力中,底基层层底的最大。按照规范中的无机结合料稳定材料疲劳公式,分别计算不同压实度差下水泥稳定碎石底基层的疲劳寿命,结果见表13。

表12 不同试验方案下各结构层层底最大弯拉应力

Table 12 The maximal bottom bending tensile stress of different layers for different test schemes MPa

试验方案	沥青混凝土 面层	沥青柔性基层	水泥稳定碎 石上基层	水泥稳定碎 石下基层	水泥稳定碎 石底基层	碎石垫层
A1	$-2.02 \times 10^{-2}$	$-9.27 \times 10^{-3}$	$3.12 \times 10^{-2}$	$2.66 \times 10^{-2}$	$6.03 \times 10^{-2}$	$-6.66 \times 10^{-4}$
A2	$-1.83 \times 10^{-2}$	$-7.53 \times 10^{-3}$	$2.15 \times 10^{-2}$	$3.14 \times 10^{-2}$	$6.01 \times 10^{-2}$	$-6.78 \times 10^{-4}$
A3	$-1.77 \times 10^{-2}$	$-7.10 \times 10^{-3}$	$1.50 \times 10^{-2}$	$3.51 \times 10^{-2}$	$5.93 \times 10^{-2}$	$-6.78 \times 10^{-4}$
B1	$-1.92 \times 10^{-2}$	$-1.17 \times 10^{-2}$	$1.92 \times 10^{-2}$	$3.95 \times 10^{-2}$	$5.92 \times 10^{-2}$	$-6.73 \times 10^{-4}$
B2	$-1.85 \times 10^{-2}$	$-9.78 \times 10^{-3}$	$1.57 \times 10^{-2}$	$3.88 \times 10^{-2}$	$5.91 \times 10^{-2}$	$-6.80 \times 10^{-4}$

表13 不同试验方案下底基层的疲劳寿命

Table 13 Fatigue life of subbase for different test schemes

试验方案	疲劳寿命	试验方案	疲劳寿命
A1	$1.711\ 03 \times 10^{10}$	B1	$1.741\ 70 \times 10^{10}$
A2	$1.719\ 22 \times 10^{10}$	B2	$1.743\ 13 \times 10^{10}$
A3	$1.732\ 03 \times 10^{10}$		

分析表12~13可知:①当整体压实度为98.0%时,随着上下层压实度差的增大,上下基层层底的最大弯拉应力呈现出不同的变化趋势。其中,当压实度差为2.0%和4.0%时,上基层层底的最大弯拉应力较压实度差为0.0%时分别增大了43.3%、108.0%;而下基层层底的最大弯拉应力呈现出了下降趋势。原因是随着上下层压实度差的增大,

上下基层材料的差异性随之增大,基层的受力状况发生了变化。上基层承受的拉应力逐渐增大,这使得基层的受力状况逐渐处于不利状况,基层在车轮荷载和温度应力的反复作用下更易出现裂缝。②当整体压实度为99.0%时,上下基层层底的最大弯拉应力均随着压实度差的增大而增大。与无压实度差的情况相比,当压实度差为2.0%时,上基层层底的最大弯拉应力增长了22.3%,说明提高整体压实度可以降低上下基层压实度差对上基层层底的最大弯拉应力的影响。③当整体压实度为98.0%、上下层压实度差为2.0%和4.0%时,底基层的疲劳寿命较无压实度差时分别降低了0.74%、1.21%;当整体压实度为99.0%、上下层压实度差为2.0%时,底基层的疲劳寿命较无压实

度差时降低了0.08%,说明减小上下层压实度差可以提高底基层的疲劳寿命,进而提高路面结构的耐久性。

## 5 讨论

本研究针对双层水泥稳定碎石基层实际施工时上下层存在压实度差这一现象,对基层整体力学强度及耐久性进行了研究。通过直接剪切试验和直接拉伸试验,得到了水泥稳定碎石基层间的最佳水泥浆剂量及水灰比,通过成型试件得到不同压实度差下双层水泥稳定碎石基层整体无侧限抗压强度、抗弯拉强度及疲劳寿命,最后利用有限元软件ABAQUS对典型水泥稳定碎石基层沥青路面的路表弯沉、层底弯拉应力及基层的疲劳寿命进行了计算。田耀刚等<sup>[17]</sup>针对整体大厚度水泥稳定碎石基层力学性能的研究表明,增大水泥浆剂量、提高层间状态的连续性,同时降低层间压实度差可显著提高基层的力学性能,并指出层间压实度差应控制在1.5%以内,这与本研究的结论(应控制在2.0%以内)较为接近,这也从侧面印证了本文研究结果的正确性。

在研究水泥稳定碎石基层上下层压实度差时,假设材料均质且水泥稳定碎石的级配相同。在试验过程中,受所制备的试件数量的限制,本试验的样本数量较少。在路面结构数值模拟中,本文只针对典型路面结构进行了计算,未探讨路面结构层及厚度设计是否合理;且在模拟过程中只模拟了标准轴载作用下的情况,得到的层底拉应力较小,其相对于材料的弯拉强度而言,处于非常低的应力水平;得到的疲劳寿命也存在一定的偏差。这些不足之处需要在今后的研究中逐一进行探索。

## 6 结论

1) 在相同的水泥浆剂量下,层间抗剪强度与抗拉强度随着水灰比的减小均呈先增大后减小的趋势,水灰比为1:1.5时层间抗拉强度达到最大;当水灰比为1:1.5且水泥浆撒布量为55.0 g时,层间抗剪与抗拉强度均较大。因此,层间水泥浆剂量

与水灰比宜分别为0.311 g/cm<sup>3</sup>和1:1.5。

2) 无侧限抗压强度试验结果表明:在整体压实度相同的情况下,只要水泥稳定碎石基层上下层压实度差不超过2.0%,提高上下层压实度差,此时试件整体力学强度变化不大;但当压实度差超过2.0%时,提高上下层压实度差,此时试件的整体力学强度变化明显。提高整体压实度可以降低上下基层压实度差对水泥稳定碎石整体力学强度的影响。抗弯拉强度试验结果与上述类似。

3) 四点弯曲疲劳试验结果表明:整体压实度的提高有助于提升基层的疲劳寿命。当整体压实度相同时,上下基层压实度差越小,水泥稳定碎石基层的疲劳寿命也会有所增加。

4) 有限元软件ABAQUS模拟结果表明:随着水泥稳定碎石基层上下层压实度差的增大,路表弯沉值随之增大,基层及底基层受力状况变化较大。当整体压实度满足规范要求且水泥稳定碎石基层上下层压实度差不超过2.0%时,上下层压实度差对路面结构、路表变形及基层疲劳寿命影响不大。因此,水泥稳定碎石基层上下层压实度差不宜超过2.0%。

### [参考文献]

- [1] 李昊,安平,高俊启,等.水泥稳定碎石长期强度发展规律[J].公路,2021,66(6):59-62.  
LI Hao, AN Ping, GAO Junqi, et al. Long-term strength development rules of cement stabilized macadam[J]. Highway, 2021, 66(6): 59-62.
- [2] 栾晓强,陈强,颜如玉,等.水泥稳定碎石基层双层连铺技术的应用[J].公路,2016,61(6):98-103.  
LUAN Xiaoqiang, CHEN Qiang, YAN Ruyi, et al. Application of double-layer continuous paving technology of cement stabilized macadam base[J]. Highway, 2016, 61(6): 98-103.
- [3] 陈超峰,张向北.抗裂型水泥稳定碎石基层双层连铺技术在高速公路中应用[J].公路,2018,63(10):47-50.  
CHEN Chaofeng, ZHANG Xiangbei. Application of double-layer paving technology for cracking-resistant cement stabilized macadam base course in expressway[J]. Highway, 2018, 63(10): 47-50.
- [4] 彭小荡,李海雁.水稳基层大厚度摊铺与分层摊铺的对比研究[J].技术与市场,2020,27(9):55-57.  
PENG Xiaodang, LI Haiyan. Comparative study on thick paving and layered paving of stabilized base course[J]. Technology and Market, 2020, 27(9): 55-57.

- [5] 第海东,商艳.大厚度摊铺与双机分层摊铺水稳基层施工工艺比较分析[J].公路,2016,61(6):89-94.  
DI Haidong, SHANG Yan. Comparative analysis of construction technology of water-stabilized base course with large thickness paving and double-machine layered paving[J]. Highway, 2016, 61(6): 89-94.
- [6] 孔鑫.水泥粉煤灰稳定碎石基层耐久性研究[J].黑龙江科技信息, 2008(20): 261. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1328.2008.20.260.  
KONG Xin. Study on durability of cement fly ash stabilized macadam base[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2008(20): 261. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1328.2008.20.260.
- [7] 陈健,郝伟.浅谈水泥稳定碎石上下基层连铺施工[J].价值工程, 2013, 32(16): 115-116. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4311.2013.16.064.  
CHEN Jian, HAO Wei. Continual construction of up and down layers of cement stabilized macadam[J]. Value Engineering, 2013, 32(16): 115-116. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4311.2013.16.064.
- [8] 郭海波.水泥稳定碎石基层双层连铺技术在京沪高速中的应用[J].佳木斯职业学院学报, 2018(4): 495-496. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9795.2018.04.321.  
GUO Haibo. Double layer continuous paving technology of cement stabilized macadam base application in Beijing-Shanghai expressway[J]. Journal of Jiamusi Vocational Institute, 2018(4): 495-496. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9795.2018.04.321.
- [9] 李丽慧.双层水泥稳定碎石层间作用分析[J].许昌学院学报, 2018, 37(12): 36-39. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9824.2018.12.009.  
LI Lihui. Interlayer interaction analysis of double-layer cement stabilized macadam[J]. Journal of Xuchang University, 2018, 37(12): 36-39. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9824.2018.12.009.
- [10] 王洪涛.抗裂型水泥稳定碎石基层双层连铺施工工艺研究[J].北方交通, 2019(3): 68-71. DOI: 10.15996/j.cnki.bfjt.2019.03.018.  
WANG Hongtao. Research on construction technology of double-layer continuous paving of crack-resistant cement stabilized macadam base[J]. Northern Communications, 2019(3): 68-71. DOI: 10.15996/j.cnki.bfjt.2019.03.018.
- [11] 李丹.水泥掺量对水泥稳定碎石基层性能的影响规律[J].内蒙古公路与运输, 2020(5): 12-15.  
LI Dan. Influence of cement content on performance of cement stabilized macadam base[J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2020(5): 12-15.
- [12] 海梅,王玉果.水泥稳定基层双层联铺时间影响分析[J].公路, 2015, 60(11): 57-60.  
HAI Mei, WANG Yuguo. Analysis on the influence of Time of double-layer paving of cement base course[J]. Highway, 2015, 60(11): 57-60.
- [13] 田小革,韩海峰,李新伟,等.抗裂型沥青稳定碎石的双面剪切疲劳性能研究[J].建筑材料学报, 2018, 21(1): 165-168. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.01.027.  
TIAN Xiaoge, HAN Haifeng, LI Xinwei, et al. Double side shear fatigue property of anti-cracking asphalt stabilized macadam[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1): 165-168. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.01.027.
- [14] 蒋应军,李明杰,张俊杰,等.水泥稳定碎石强度影响因素[J].长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(4): 1-7. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2010.04.001.  
JIANG Yingjun, LI Mingjie, ZHANG Junjie, et al. Influence factors of strength properties of cement stabilization of crushed aggregate[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30(4): 1-7. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2010.04.001.
- [15] 应荣华,黎凯,胡恒武.水泥稳定碎石搅拌方式研究[J].公路与汽运, 2018(5): 61-64, 68. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2018.05.018.  
YING Ronghua, LI Kai, HU Hengwu. Study on mixing method of cement stabilized macadam[J]. Highways & Automotive Applications, 2018(5): 61-64, 68. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2018.05.018.
- [16] 孟旭,范文东,韩庆.厚层水稳碎石压实度差异对路用性能影响研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(3): 512-515. DOI: 10.3963/j.issn.1006-2823.2011.03.019.  
MENG Xu, FAN Wendong, HAN Qing. Effect of compaction differences on the road performance of thick layer of cement stabilized macadam[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(3): 512-515. DOI: 10.3963/j.issn.1006-2823.2011.03.019.
- [17] 田耀刚,石帅锋,刘芳,等.整体大厚度水泥稳定碎石基层耐久性研究[J].河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 420-425. DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2015.03.023.  
TIAN Yaogang, SHI Shuaifeng, LIU Fang, et al. Study on durability of entirety large thickness cement stabilized macadam[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 34(3): 420-425. DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2015.03.023.
- [18] 李雪连,宁佐飞,叶峻宏,等.振动搅拌水泥稳定碎石的强度及其形成机理[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3): 8-15. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgdxzbk.2021.03.001.  
LI Xuelian, NING Zuofei, YE Junhong, et al. Strength and its formation mechanism of vibration mixing cement

- stabilized macadam[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(3): 8-15. DOI: 10.19951/j.cnki.csjgdxxbzk.2021.03.001.
- [19] 刘新海, 彭小林. 水泥粉煤灰稳定碎石力学参数影响因素研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 38-43. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.007.
- LIU Xinhai, PENG Xiaolin. Study on influence factors of mechanical parameters of cement fly ash stabilized crushed stone[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 38-43. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.007.
- [20] 周志刚, 王梓龙, 蒋少稀. 级配对低剂量水泥改性级配碎石性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(4): 9-16. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.04.002.
- ZHOU Zhigang, WAN Zilong, JIANG Shaoxi. Effect of gradation on performance of low-dose cement modified graded gravel[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(4): 9-16. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.04.002.

## Impact of different degrees of compactness of cement stabilized macadam base on the performance of base

TIAN Xiaoge, HU Hongli, LI Guangyao, GUO Changhui, LU Xuerong

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] This work aims to study the influence of the compaction difference between the upper and lower layers of double-layer cement stabilized macadam base on the performance of the base. [Methods] Firstly, the specimens with different water to cement ratio and cement slurry dosage between layers were subjected to direct shear test and tensile test to obtain the optimum water to cement ratio and cement content. On this basis, the effects of the compaction difference between layers on the unconfined compressive strength, flexural tensile strength and fatigue life of double-layer water stabilized macadam were studied. Finally, ABAQUS was used to simulate the road surface deflection of the actual pavement with different compactness of the upper and lower layers, and the bending tensile stress at the bottom of each structure layer. [Findings] The optimum cement slurry dosage and water to cement ratio between water stabilized macadam layers were  $0.311 \text{ g/cm}^2$  and 1:1.5, respectively. Improving the overall compactness of the base and reducing the compactness difference between the upper and lower layers of the base could improve the overall mechanical strength and fatigue performance of the cement stabilized macadam base, reduce the road surface deflection and improve the fatigue life of the base. [Conclusions] Reducing the compaction difference between the upper and lower layers of water stabilized macadam base could significantly improve the strength and durability of the base.

**Key words:** road engineering; compactness; mechanical properties; finite element method; cement stabilized macadam base

**Manuscript received:** 2021-12-22; **revised:** 2022-01-10; **accepted:** 2022-01-22

**Foundation item:** Project (51978086) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (201905) supported by science and technology program of Hunan Provincial Department of Transportation

**Corresponding author:** TIAN Xiaoge (1970—) (ORCID: 0000-0001-9699-7041), male, professor, research interest: road engineering materials. E-mail: tianxiaoge@126.com

(责任编辑: 刘国奇; 校对: 赵冰; 英文编辑: 田湘)