

文章编号:1006-2467(2019)06-0696-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.06.009

# 装配式水泥混凝土道面灌浆层的粘结特性

朱懋江<sup>1</sup>, 翁兴中<sup>1</sup>, 张俊<sup>1</sup>, 杨博瀚<sup>2</sup>, 刘军忠<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 机场建筑工程系, 西安 710038; 2. 空军工程设计研究局, 北京 100068)

**摘要:**为解决装配式水泥混凝土道面应用中灌浆层的优选问题,设计了灌浆种类、板底粗糙程度、灌浆厚度和基层结构四因素三水平的正交试验方案,开展了竖向静态和疲劳加载试验以及侧向加载试验.结果表明:板底粗糙程度对灌浆层与面层粘结性能影响最大,灌浆种类对灌浆层与基层粘结性能以及道面结构承载性能影响最大;经疲劳加载后,面层的中性面会出现不同幅度的上移,挠度和压力与疲劳加载次数的关系曲线呈现出剧烈变化、线性变化和稳定3个阶段;侧向荷载作用下,高强无收缩灌浆料(CGM)与基层的粘结性能最好,侧向荷载与上层结构位移满足二次多项式关系.当灌浆材料为CGM、板底光滑、灌浆厚度为2.0 cm、基层结构为12%水泥稳定土时,道面灌浆层的粘结性最好.

**关键词:** 机场工程; 粘结性能; 疲劳加载; 灌浆层; 装配式水泥混凝土道面

**中图分类号:** U 416

**文献标志码:** A

## Bonding and Load Bearing Characteristics of Grouting Layer in Prefabricated Cement Concrete Pavement

ZHU Maojiang<sup>1</sup>, WENG Xingzhong<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, YANG Bohan<sup>2</sup>, LIU Junzhong<sup>1</sup>

(1. Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Air Force Engineering Design Institute, Beijing 100068, China)

**Abstract:** In order to solve the optimization problem of grouting layer in the application of prefabricated cement concrete pavement, an orthogonal test scheme with four factors (grouting type, bottom roughness, grouting thickness and base structure) and three levels was designed. The vertical static and fatigue loading tests and lateral loading test were carried out. Results show that the bottom roughness has the greatest influence on the bonding characteristics between the grouting layer and the surface layer. The grouting type has the greatest influence on the bonding characteristics between the grouting layer and the base layer, as well as the bearing capacity of pavement structure. After fatigue loading, the neutral plane of the surface layer exhibits upper shifts in different degrees. The relationship between deflection, pressure and fatigue loading times has three stages: dramatic change, linear change and stable stage. Under lateral load, high strength non-shrink grouting material (CGM) has the best bond with the base. The relationship between lateral load and superstructure displacement meet the quadratic polynomial pattern. When the grouting material is CGM, the slab bottom is smooth, the grouting thickness is 2.0 cm, the base structure is 12% cement stabilized soil, the pavement grouting layer achieves the best bonding

收稿日期:2017-11-07

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51708550)

作者简介:朱懋江(1994-),男,江苏省镇江市人,博士生,主要从事机场道面设计与研究,E-mail:zhumaojiang@126.com.

通信作者:翁兴中,男,教授,博士生导师,E-mail:wxx2626@sina.com.

characteristics.

**Key words:** airport engineering; bonding characteristics; fatigue loading; grouting layer; prefabricated cement concrete pavement

装配式水泥混凝土道面(Prefabricated Cement Concrete Powement, PCCP)是由工厂标准化生产的水泥混凝土道面板,采用机械化施工的拼装方法,在平整、压实度良好的基层或土基上铺设而成的机场道面<sup>[1]</sup>. PCCP 兼有普通混凝土材料的价格低廉和快速修补材料的早期强度较高的优点,是机场道面修补及快速铺筑高等级机场道面的理想选择,这对于灾后人道主义救援物资的输送、战争时前线机场的开设以及诸如海岛等恶劣条件下修建永备机场都是具有非常重要的意义的<sup>[2-3]</sup>.

现有对 PCCP 的研究也证实了此项技术在机场道面快速修补及高等级机场道面快速建设中的光明前景. 2008~2012 年,美国开展了题为“SHRP2 Project R05-Modular Pavement Technology”的研究,研究报告中介绍了米勒堡超级板块拼接法、Uretek 法、密歇根法和美国空军法等预制混凝土道面板的拼装方法,这些拼装方法大同小异,其主要区别在于板的结构尺寸、调平层的材料和道面接缝处传力杆的设计等方面<sup>[4]</sup>,美国空军对装配式混凝土道面板的研究十分重视,特别创立了名为“美国空军法”的快速修补机场道面方法,实现了在 4~8 h 对机场道面修复完毕并投入使用的目标<sup>[5]</sup>. Doyle 等<sup>[6]</sup>对预制板在机场道面的维修中的可行性进行了详细的评估,结果表明只要基层材料具有足够的强度并且保证传力杆接缝拼装时的施工质量,预制板修复的路面可以服役 15~20 年. 国内有关 PCCP 的研究主要集中在公路方面. 周泽民<sup>[7]</sup>在 1991 年就试铺的装配式路面探讨了其应用前景,田志昌等<sup>[8]</sup>分析了装配式水泥混凝土路面板荷载应力与其尺寸的关系并提出了企口缝的优化方案,王军强等<sup>[9]</sup>以浆锚连接和间接连接为对象,研究了水泥基灌浆材料的性能,并提出了水泥基灌浆施工时的质量控制方法.

在 PCCP 结构层中,除了预制的面层和快速处理的基层,灌浆层是另一个重要的结构层. 灌浆层与相邻结构层的粘结程度、灌浆材料自身的性能都会影响面层、灌浆层和基层三者之间的结合程度,从而进一步影响整个 PCCP 结构的力学响应. 目前,工程

应用的灌浆材料种类繁多,很多学者针对水泥基灌浆材料开展的研究主要集中在软土地基加固、坝体裂缝修补以及公路维修等方面<sup>[10-14]</sup>. 但在装配式的水泥混凝土路面和 PCCP 工程中却很少针对灌浆层的粘结特性开展试验研究,尤其是灌浆材料的性能以及灌浆层在荷载作用下 PCCP 结构的力学响应常常被学者们所忽视,因此在这些方面亟待开展相应的试验研究.

采用小梁试件模拟道面面层开展的室内试验研究表明,用小梁进行模拟道面结构试验是一种较为经济有效的试验手段<sup>[15-16]</sup>. 因此参照相关规范<sup>[17]</sup>,本文采用尺寸为 150 mm×150 mm×550 mm 的小梁试件模拟 PCCP 的面层,针对影响灌浆层与其他结构层粘结性能的 4 个因素,即灌浆种类(A)、板底粗糙程度(B)、灌浆厚度(C)及基层结构(D),以及其不同的水平设计了正交试验方案,对竖向静载、竖向疲劳荷载以及侧向荷载作用下 PCCP 的结构响应进行了分析,并得出了最佳灌浆层方案,可以用以指导下一步的现场试验和施工实际.

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

普通水泥砂浆灌浆料(以下简称为 PTC)采用冀东水泥厂生产的秦岭牌普通硅酸盐水泥为胶凝材料,其强度等级为 42.5,密度为 3 100 kg/m<sup>3</sup>. PTC 的特点是价格低廉,材料来源广泛. 高强无收缩灌浆料(以下简称为 CGM)采用山东千盾灌浆料厂生产的高强无收缩灌浆材料,它是一种自流动微膨胀干粉砂浆,具有早强、高强、自流动和微膨胀等特性. CGM 的特点是价格中等,工厂标准化生产品质较高. 双快水泥灌浆料(以下简称为 SKC)采用中联牌标号为 425<sup>#</sup> 的快凝快硬硫铝酸盐水泥为胶凝材料,其具有碱度低,能适当补偿收缩及快硬、早强的特性. SKC 的特点是硬化快,早期强度高,但是价格昂贵,材料来源有限且不易存放. 3 种灌浆材料的配合比设计均为质量百分比,灌浆材料的流动度、强度和凝结时间测试参考规范(JTG E30-2005)<sup>[17]</sup>,测试结果如表 1 所示.

表 1 3 种灌浆材料的配合比及特性

Tab. 1 Mix proportion and properties of three grouting materials

灌浆材料	水胶比	胶砂比	掺量/%		流动度/mm	强度/MPa		时间/h	
			减水剂	缓凝剂		抗压	抗折	初凝	终凝
PTC	0.5	3	0.1	—	334	33.0	6.2	2.5	3.5
CGM	0.2	—	—	—	322	27.3	5.6	6.0	10.0
SKC	0.5	—	0.8	1.0	297	40.6	5.3	0.5	1.0

1.2 正交试验方案设计

本文开展的灌浆层粘结特性试验是采用道面混凝土小梁模拟装配式水泥混凝土道面板,在小梁与土质基层之间铺筑灌浆层. 试验中涉及到灌浆材料、灌浆层厚度、面层板底粗糙程度以及基层结构等 4 个因素,每个因素还需要考虑几种不同的水平,本文正交试验考虑的因素和水平如表 2 所示. 试验采用四因素三水平的正交试验( $L_9(3^4)$ )如表 3 所示.

表 2 正交试验的因素和水平

Tab. 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	灌浆料种类	板底粗糙程度	灌浆厚度/cm	基层结构
1	PTC	板底凿毛	3.0	12%水泥稳定土
2	CGM	板底光滑	1.5	9%水泥稳定土
3	SKC	板底刻槽	2.0	6%水泥稳定土

表 3  $L_9(3^4)$  正交试验设计

Tab. 3 Orthogonal experimental design  $L_9(3^4)$

试验组号	代码	因素			
		A	B	C	D
1	$A_1B_1C_1D_1$	1	1	1	1
2	$A_1B_2C_2D_2$	1	2	2	2
3	$A_1B_3C_3D_3$	1	3	3	3
4	$A_2B_1C_2D_3$	2	1	2	3
5	$A_2B_2C_3D_1$	2	2	3	1
6	$A_2B_3C_1D_2$	2	3	1	2
7	$A_3B_1C_3D_2$	3	1	3	2
8	$A_3B_2C_1D_3$	3	2	1	3
9	$A_3B_3C_2D_1$	3	3	2	1

1.3 竖向加载试验方法

试验布置如图 1 所示. 图中:小梁尺寸为 550 mm×150 mm×150 mm,在小梁中心截面上沿梁高设置 5 枚应变片,1 和 5 号应变片在粘贴时分别距离小梁上、下表面各 1 cm 处,其余 3 片应变片等间距均匀分布在 1 和 5 号应变片之间;在灌浆层厚度的中间贴 6 号应变片,中心和小梁上的 1~5 号应变片的中心对齐;在水泥稳定土基层顶面从小梁中间

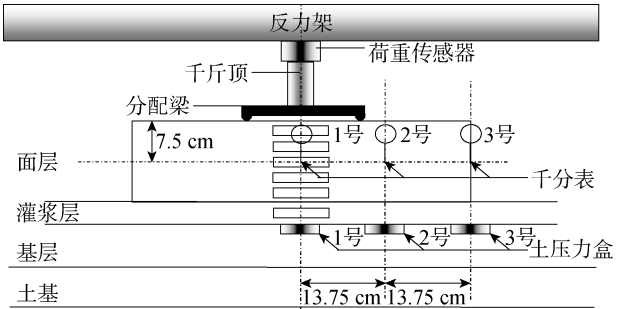


图 1 竖向加载试验布置

Fig. 1 Vertical loading test arrangement

向梁端方向等距离埋设 3 枚土压力盒,依次编为 1~3 号;在小梁中性轴上对应土压力盒的位置布置了 3 枚千分表,从中间向梁端依次编号为 1~3 号.

对每组试件进行加载时,首先进行静态加载,而后再对其进行人工疲劳加载. 试验前先对小梁加载至 5 kN 稳定 2 min 后卸载,然后对小梁进行 20 kN 的竖向加载,稳定 2 min 后对应变、挠度和压力进行读数,而后再重复进行静态加载试验 3 次,试验结果取平均值. 人工疲劳试验采用千斤顶施加荷载,每次加载至 20 kN 后立即卸载,待其压力归零后立即进行下一次加载,控制每个加载周期为 2~3 s. 加载首个 100 次时,每加载 10 次后立即对应变、挠度和压力依次进行读数. 加载第 2 个 100 次时,每加载 20 次采集一次试验数据. 加载第 3 个 100 次时,每加载 50 次采集一次试验数据. 从 300 次以后每加载 100 次采集一次试验数据,每组试件总共进行人工加载 5 000 次. 竖向静态加载情形下,定义应变比  $\eta$ 、压力  $p$ (1 号土压力盒采集的压力值)和挠度  $\Delta$ (1 号千分表采集的挠度值)作为评价灌浆层粘结性能和承载性能的指标. 其中, $\eta$  为面层底面拉应变与灌浆层拉应变的比值,即竖向静态荷载作用下 5 号应变片读数  $\epsilon_5$  与 6 号应变片读数  $\epsilon_6$  的比值.

1.4 侧向加载试验方法

侧向加载试验在竖向人工疲劳加载试验完毕后进行,采用压力传感器、垫板、千斤顶和千分表等试验装置对试件进行侧向加载,使得面层和灌浆层受到侧向加载后与基层产生一定的剪切位移,试验布

置如图 2 所示.采用逐级加载的方式对面层和灌浆层(上层结构)进行侧向加载,采用固定在刚性支架上的 2 个千分表测量上层结构的位移.侧向荷载以 0.5 kN 为一级进行逐级加载,最大侧向荷载取值 4 kN,每一级荷载施加完毕后稳定 10 s,而后记录下 2 个千分表的读数,以 2 个读数的平均值作为试验结果.

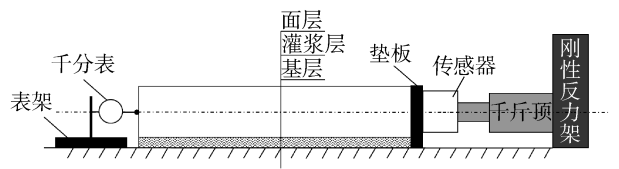


图 2 侧向加载试验布置

Fig. 2 Lateral loading test arrangement

2 试验结果与分析

2.1 竖向静载作用下结构响应

选取  $\eta$ 、 $p$  和  $\Delta$  这 3 个评价指标,分别对灌浆层

的粘结性能和道面结构的承载性能进行分析,结果如表 4 所示.表中: $K$  为某个水平下对应因素的试验结果之和; $R$  为各试验组间极差.

以应变比  $\eta$  为评价指标的极差分析结果表明,各因素对灌浆层与面层粘结性能影响程度的排序为:板底粗糙程度>灌浆种类>灌浆厚度>基层结构,说明板底粗糙程度对面层与灌浆层的粘结性能有非常显著的影响.由于板底粗糙处理增加了面层底部与灌浆层的接触面积,从而使得两者的结合更加牢固,因此对于这两层的粘结性能影响最大.由表 4 可看出,在板底粗糙程度一列(B 列)中, $K_{3\eta}=2.63$  为最大值,说明粗糙程度的第 3 个水平,即板底刻槽后的面层与灌浆层的粘结效果最好.因此,在道面板的生产过程中就要根据灌浆需求考虑板底合适的粗糙度.其次,灌浆种类也是影响灌浆层与面层粘结程度的重要因素,因为灌浆材料本身的胶结性质决定了接触面积相同条件下灌浆层自身与面层的结合能力.在灌浆材料一列(A 列)中  $K_{2\eta}=2.5$  为最

表 4 竖向静态加载试验结果  
Tab. 4 Results of vertical static loading test

组号	因素				粘结性指标		承载性指标
	A	B	C	D	$\eta$	$p/\text{kPa}$	$\Delta/\mu\text{m}$
1	1	1	1	1	0.71	100.5	397
2	1	2	2	2	0.59	71.8	617
3	1	3	3	3	0.93	31.7	584
4	2	1	2	3	0.76	170.1	361
5	2	2	3	1	0.78	289.1	294
6	2	3	1	2	0.96	98.0	314
7	3	1	3	2	0.64	95.2	453
8	3	2	1	3	0.61	60.1	215
9	3	3	2	1	0.74	170.0	316
$K_{1\eta}$	2.23	2.11	2.28	2.23	以 $\eta$ 为评价指标的极差分析		
$K_{2\eta}$	2.50	1.96	2.09	2.19			
$K_{3\eta}$	1.99	2.63	2.35	2.30			
$R_{\eta}$	0.51	0.67	0.26	0.11			
$K_{1p}$	204.0	365.8	258.6	559.6	以 $p$ 为评价指标的极差分析		
$K_{2p}$	557.2	302.0	411.9	265.0			
$K_{3p}$	325.3	299.7	416.0	261.9			
$R_p$	353.2	66.1	157.4	297.7			
$K_{1\Delta}$	1 598	1 211	926	1 007	以 $\Delta$ 为评价指标的极差分析		
$K_{2\Delta}$	969	1 193	1 294	1 384			
$K_{3\Delta}$	984	1 214	1 331	1 160			
$R_{\Delta}$	629	21	405	377			

大值,说明灌浆材料的第2个水平即CGM的粘结性能最强,其次为PTC,SKC的粘结性能最弱.

以 $p$ 为评价指标的极差分析结果表明,各因素对灌浆层与基层粘结性能影响程度排序为:灌浆种类>基层结构>灌浆厚度>板底粗糙程度,说明灌浆种类对灌浆层与基层粘结性能的影响最大.由于基层和灌浆层之间的接触不涉及粗糙度问题,因而不同种类灌浆材料自身的胶结性能就成为了影响灌浆层与基层粘结性能的主要因素.由表4可看出,在灌浆材料一列(A列)中 $K_{2p}=557.2$ 为最大值,说明灌浆材料因素的第2个水平即CGM的粘结效果最好,这与以 $\eta$ 为评价指标的分析结果一致.因此,CGM是较为理想的板底灌浆材料.其次,作为粘结性能的另一考察对象,基层结构也是影响灌浆层与基层粘结程度的重要因素,12%的水泥稳定土基层的粘结效果最佳,其次是9%水泥稳定土基层,6%水泥稳定土基层的粘结效果最差.

以 $\Delta$ 为评价指标的极差分析结果表明,各因素对道面结构承载性能影响程度的排序为:灌浆种类>灌浆厚度>基层结构>板底粗糙程度,说明灌浆材料对道面结构承载性能的影响最大.灌浆材料由于其本身的胶凝材料不同,导致了材料凝结后的强度也各不相同,胶凝材料生成的强度直接决定了灌浆层自身的强度,其强度越高越易将道面承受的荷载传至基层,从而提升道面整体的结构承载性能.由表4可看出,在灌浆材料一列(A列)中 $K_{1p}=1598$ 为最大值,说明灌浆材料因素的第1个水平即PTC的强度最大,其次是SKC,CGM的强度最低,这与灌浆材料强度试验得到的结果一致.综上所述,灌浆材料对道面结构性能的影响程度较大,在选择灌浆材料时要考虑工程应用的背景,针对实际情况权衡利弊后选择较为合理的灌浆材料.

## 2.2 竖向疲劳荷载作用下结构响应

根据竖向静载试验结果,灌浆层厚度和基层结构两因素对于灌浆层粘结性能的影响并不明显,因而在疲劳作用试验设计时控制了实验组中灌浆层厚度为2cm和基层结构为12%的水泥稳定土的条件保持不变,选取第1、3、5和9组进行了试验,人工疲劳加载下的应变测试结果如图3所示,图中 $C_L$ 为加载次数.为了能够清晰地观察应变规律,避免数据点重叠,在图3中仅显示了每组试验中1、3、5和6号应变片采集的数据.

由图3可以看出:在相同疲劳次数作用下,各应变片的读数随着应变片编号的增大逐渐从负值过渡到正值,即测量点的应变状态从压应变逐渐过渡到

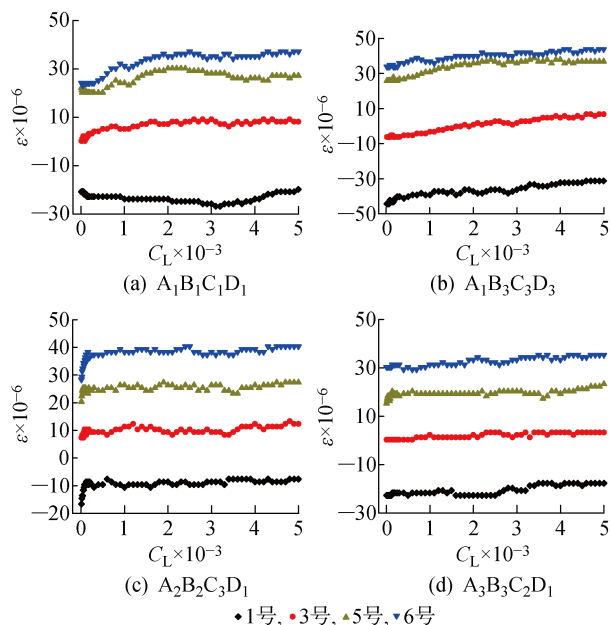


图3 疲劳加载应变测试结果

Fig. 3 Changes of strain under fatigue loading

拉应变;随着疲劳次数的逐渐增加,各应变片测量出的结果都呈现出基本一致的变化规律,即应变与疲劳加载次数的关系曲线一开始变化都较为剧烈,而后呈现出近似线性增加的规律,最后应变值基本处于稳定状态;经过疲劳加载作用后,各组试验结果中3号应变片测量的数值由0逐渐向正值过渡,说明各组道面的中性面都会出现不同幅度的上移,即中性面移动到在3号应变片所处位置以上且应变为0的某个平面.在静载试验中,中性面一致处于道面厚度的1/2处,但在各组疲劳试验中的中性面却开始逐渐上移,这是因为道面结构在经受疲劳荷载的作用时,在整个道面结构中会产生细微的疲劳损伤,疲劳损伤的逐渐积累使得面层的中性面逐渐上移,板底拉应变增大致使板底拉应力提高,道面产生不良的受力状态,最终会造成道面的疲劳破坏.从这一点来看,第5组道面结构 $A_2B_2C_3D_1$ 的抗疲劳性能比较优越.

人工疲劳加载下的挠度测试结果如图4所示.其中:图4(a)、(b)和(c)中显示的9条曲线分别为9组试验中1、2和3号千分表测量的试验结果.由图可以看出:在同一组试验中,处于中间的1号千分表测量的结果最大,其次是2号千分表的测量结果,3号千分表的测量结果最小;在同一疲劳加载次数的条件下,第6组的挠度测量结果均大于其他各实验组,而第5组的试验结果均小于其他各组;各组试验中挠度与疲劳加载次数的关系曲线都呈现出基本一致的变化规律,每条曲线大致可以分成3个阶段,第

1 阶段为剧烈变化阶段(疲劳加载次数在 0~300 次左右),在这一阶段挠度的变化幅度较大,第 2 阶段为线性变化阶段(疲劳加载次数在 300~4 500 次左右),在这一阶段挠度随疲劳次数的增加基本呈线性增加的规律,第 3 阶段为稳定阶段(疲劳加载次数在 4 500~5 000 次),在此阶段挠度值比较稳定,基本不随疲劳次数的增加而变化.在第 1 个阶段,装配式道面与灌浆层构成的组合结构经历了一个压密的阶段,因此该阶段的挠度变化较为剧烈;而在第 2 个阶段,由于组合结构已经经历了第 1 个阶段的压缩,能产生的应变已经很小了,所以挠度随加载次数基本呈现斜率很小的线性变化;而在稳定阶段的结合结构已经达到了压缩极限,因此几乎没有应变的变化.在经过相同次数的疲劳荷载作用后,道面结构的挠度值越小,表明道面结构的抗疲劳性能和承载性能越优良.由此可见,第 5 组道面结构  $A_2B_2C_3D_1$  的承载性能比较优越.

人工疲劳加载下的压力测试结果如图 5 所示.其中:图 5(a)、(b)、(c)显示的 9 条曲线分别为 9 组

试验中 1、2 和 3 号土压力盒测量的结果.由图可以看出:在同一组试验中,处于中间的 1 号土压力盒测量的结果最大,其次是 2 号土压力盒,3 号土压力盒的测量结果最小;在同一疲劳加载次数的条件下,第 5 组试验中各个土压力盒测量的压力值均大于其他各组;在 1 和 2 号土压力盒测量的结果中第 3 组均小于其他各组试验的测量结果;与挠度测试的结果相似,各组试验中压力值与疲劳加载次数的关系曲线也呈现出基本一致的变化规律,每条曲线大致可以分成 3 个阶段,即剧烈变化阶段、线性变化阶段和稳定阶段;在经过相同次数的疲劳荷载作用后,灌浆层与基层的粘结状况越差,基层顶面承受的压力就越小,从而导致面层和灌浆层承担的荷载就越大,对道面结构的受力状态产生不利的影响;在经过相同次数的疲劳荷载作用后,灌浆层与基层的粘结性能越好,基层顶面承受的压力就越大,可将更多的荷载分散到基层和地基之中,因此道面结构的承载性能就越好.由此可见,第 5 组道面结构  $A_2B_2C_3D_1$  的承载性能比较优越.

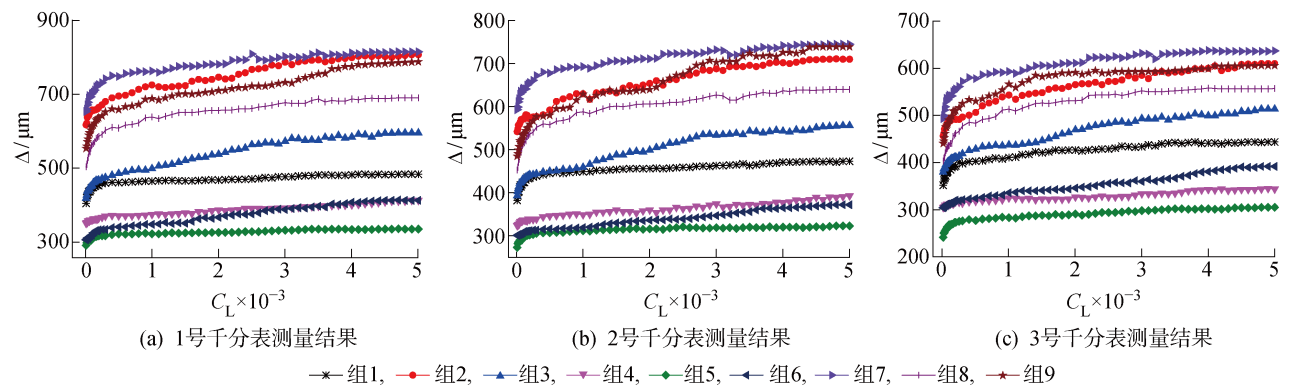


图 4 疲劳加载下挠度测试结果  
Fig. 4 Test results of deflection under fatigue loading

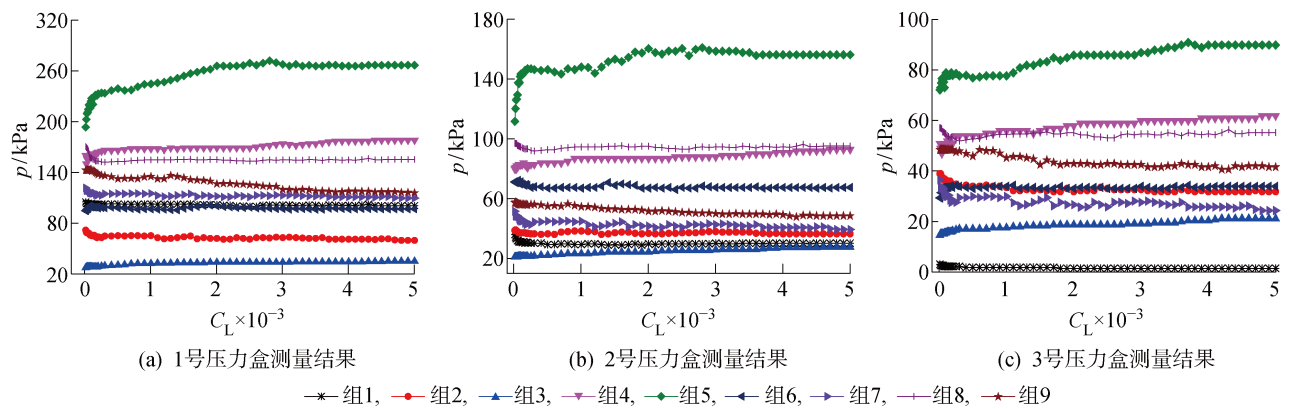


图 5 疲劳加载下压力测试结果  
Fig. 5 Test results of pressure under fatigue loading



2.3 侧向荷载作用下结构响应

侧向荷载作用下上层结构的位移变化如图 6 所示,并拟合了侧向力(X)与上层结构位移(Y)之间的关系曲线.由图可以看出:第 5 组的试验结果曲线位于其他组曲线之下,说明当同一级的侧向荷载施加到上层结构时,第 5 组的位移最小,相比之下第 9 组试验的结果位于所有曲线之上,说明当同一级的侧向荷载施加到上层结构时,第 9 组的位移最大;相同灌浆材料的曲线基本都在相邻位置,并且拟合曲线随着灌浆材料的不同有比较明显区别,CGM(第 4、5、6 组试验)的拟合曲线基本位于最下方,PTC(第 1、2、3 组试验)的拟合曲线基本位于中间,而 SKC(第 7、8、9 组试验)的拟合曲线基本位于最上方.当不同的上层结构受到相同的侧向荷载时,上层结构的位移越小,说明灌浆层与基层的粘结界面承受相同的剪切力作用时界面产生的位移越小,因此灌浆层与基层顶面的粘结性能就越强.据此分析可以判断出,CGM 与基层的粘结性能最佳,其次为 PTC,SKC 与基层的粘结性能最弱.图 6 拟合曲线的拟合方程如表 5 所示.由表可以看出,拟合方程的相关系

数  $R^2$  均在 0.99 以上,说明侧向荷载与上层结构的位移能够很好地满足二次多项式的关系.

3 结语

(1) 各因素对灌浆层与面层粘结性能影响程度的排序为:板底粗糙程度>灌浆种类>灌浆厚度>基层结构,且当板底粗糙程度为刻槽时粘结性最好;各因素对灌浆层与基层粘结性能影响程度的排序为:灌浆种类>基层结构>灌浆厚度>板底粗糙程度,且当灌浆种类为 CGM 时粘结性最好;各因素对道面结构承载性能影响程度的排序为:灌浆种类>灌浆厚度>基层结构>板底粗糙程度,且当灌浆种类为 PTC 时道面结构的承载性能最好.

(2) 经过疲劳加载作用后,道面面层的中性面会出现不同幅度的上移.挠度和压力与疲劳加载次数的关系曲线呈现出基本一致的变化规律,每条曲线大致可以分成 3 个阶段,第 1 阶段为剧烈变化阶段(疲劳加载次数在 0~300 次左右),第 2 阶段为线性变化阶段(疲劳加载次数在 300~4 500 次左右),第 3 阶段为稳定阶段(疲劳加载次数在 4 500~5 000 次).当灌浆材料为 CGM,板底光滑,灌浆厚度为 2.0 cm,基层结构为 12%水泥稳定土(第 5 组)时,道面结构抗疲劳荷载作用性能最好.

(3) 侧向荷载作用下,CGM 与基层的粘结性能最佳,其次为 PTC,SKC 与基层的粘结性能最弱;侧向荷载与上层结构(即面层和灌浆层)位移拟合曲线随着灌浆材料的不同有比较明显的区别,侧向荷载与上层结构的位移能够很好地满足二次多项式的关系.同样第 5 组道面结构的抗侧向荷载作用性能最好.

(4) 综合竖向和侧向加载试验结果,当灌浆材料为 CGM、板底光滑、灌浆厚度为 2.0 cm、基层结构为 12%水泥稳定土时,灌浆层的粘结特性最佳.该组合在 5 000 次疲劳荷载作用下的挠度仍小于 0.3 mm,在保证灌浆层粘结性能和道面板平整程度的情况下最大程度地确保了疲劳荷载下道面板的使用性能,并且对应材料的基本性能符合施工实际,可作为下一步指导现场试验和施工的依据.

(5) 本文从实际应用出发,针对机场装配式混凝土道面板灌浆层的优选问题进行了一定的探究,但由于本文中的试验限制,无法论证灌浆层的疲劳压缩与否和基层与灌浆层间接触面相关,也未能探究出最佳灌浆层方案中灌浆层的疲劳性能,而这 2 个问题对于灌浆层的实际使用情况影响较大,下一步将针对这 2 个问题继续设计试验进一步进行

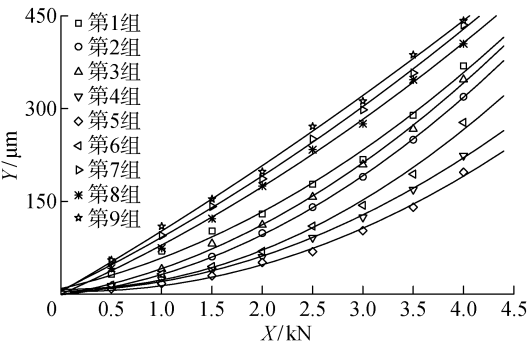


图 6 侧向力与上层结构位移的关系

Fig. 6 Relationship between lateral force and displacement of superstructure

表 5 侧向力与上层结构位移的拟合方程  
Tab. 5 Fitting equation of lateral force and displacement of superstructure

组序号	拟合方程	$R^2$
1	$Y=9.32+36.66X+12.67X^2$	0.994
2	$Y=-0.87+17.15X+15.68X^2$	0.999
3	$Y=-0.38+27.32X+14.56X^2$	0.998
4	$Y=5.03+2.79X+12.79X^2$	0.998
5	$Y=4.98-3.74X+12.57X^2$	0.995
6	$Y=8.03-1.22X+16.45X^2$	0.992
7	$Y=6.25+79.51X+6.55X^2$	0.998
8	$Y=0.16+72.14X+7.39X^2$	0.999
9	$Y=4.57+93.96X+3.91X^2$	0.998

研究.

## 参考文献:

- [1] 翁兴中, 陈卫星, 殷民动. 机场规划建设与场道维修技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2011.  
WENG Xingzhong, CHEN Weixing, YIN Mindong. The construction of airport and runway repair technology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2011.
- [2] ASHTIANI R, JACKSON C, SAEED A, *et al.* Precast concrete panels for contingency rigid airfield pavement repairs[R]. Florida: US Air Force Research Laboratory, 2010.
- [3] ZHANG J, WENG X Z, LIU J Z, *et al.* Anti-slip and wear resistance performance of three novel coatings as surface course of airstrip[J]. **International Journal of Pavement Engineering**, 2018, 19(4): 370-378.
- [4] TAYABJI S, YE D, N BUCH. Modular pavement technology final report: Final report of project R05 [R]. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, 2012.
- [5] PRIDDY L P, BLY P G, JACKSON C J, *et al.* Full-scale field testing of precast portland cement concrete panel airfield pavement repairs [J]. **International Journal of Pavement Engineering**, 2014, 15(9): 840-853.
- [6] DOYLE J D, PRIDDY L P, FLINTSCH G W, *et al.* Three-dimensional modelling of precast concrete pavement repair joints[J]. **Magazine of Concrete Research**, 2015, 67(10): 513-522.
- [7] 周泽民. 装配式水泥混凝土路面的施工[J]. **中南公路工程**, 1991, 58(3): 20-23.  
ZHOU Zemin. Constructions on fabricated cement concrete pavement[J]. **Central South Highway Engineering**, 1991, 58(3): 20-23.
- [8] 田志昌, 孟亚楠, 韩育民, 等. 装配式水泥混凝土路面荷载应力分析与接缝优化[J]. **山东农业大学学报(自然科学版)**, 2016, 47(5): 753-759.  
TIAN Zhichang, MENG Yanan, HAN Yumin, *et al.* Analysis on load stress of fabricated cement concrete pavement slabs and joint optimization[J]. **Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)**, 2016, 47(5): 753-759.
- [9] 王军强, 李清. 装配式混凝土结构灌浆材料的性能试验与施工技术[J]. **混凝土**, 2013(10): 142-144.  
WANG Junqiang, LI Qing. Performance test and the construction technology of cementitious grouting material used in precast reinforced concrete structure [J]. **Concrete**, 2013(10): 142-144.
- [10] HONG C Y, YIN J H, PEI H F. Comparative study on pullout behaviour of pressure grouted soil nails from field and laboratory tests[J]. **Journal of Central South University**, 2013, 20(8): 2285-2292.
- [11] 钟正强, 喻奕, 刘波. 胶层厚度对预应力 CFRP 加固混凝土梁粘结应力的影响试验[J]. **中国公路学报**, 2014, 27(11): 55-62.  
ZHONG Zhengqiang, YU Yi, LIU Bo. Experimental study on influence of adhesive layer thickness on bond stress of concrete beams strengthened with prestressed CFRP [J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2014, 27(11): 55-62.
- [12] WANG S, CHEN L, HUANG R, *et al.* Long-term hardening characteristics of prestressed anchorage grout[J]. **Journal of Mountain Science**, 2012, 9(6): 752-759.
- [13] 李锐, 郑毅敏, 赵勇. 配置 500 MPa 钢筋套筒灌浆连接预制混凝土柱抗震性能试验研究[J]. **建筑结构学报**, 2016, 37(5): 255-263.  
LI Rui, ZHENG Yimin, ZHAO Yong. Experimental research on seismic performance of precast concrete columns with 500 MPa reinforcements splicing by grout-filled coupling sleeves[J]. **Journal of Building Structures**, 2016, 37(5): 255-263.
- [14] 钱春香, 王安辉, 王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. **岩土力学**, 2015, 36(6): 1537-1548.  
QIAN Chunxiang, WANG Anhui, WANG Xin. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1537-1548.
- [15] YAN X, WENG X, KOU Y. Influence of fiber grid on interlayer bond property of airport double-layer pavement[J]. **Journal of Reinforced Plastics & Composites**, 2014, 33(1): 101-111.
- [16] YANG B, WENG X. The influence on the durability of semi-flexible airport pavement materials to cyclic wheel load test[J]. **Construction and Building Materials**, 2015, 98: 171-175.
- [17] 中华人民共和国交通部. 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程: JTG E30-2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of cement and concrete for highway engineering: JTG E30-2005[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.

(本文编辑:钱宝珍)