

刚性铺面的平衡刚度设计理念与原型结构

陈昊昱¹, GUO Edward², 李琛琛¹, 马鲁宽¹, 赵鸿铎¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 银河科学公司, 纳舒厄 NJ08234)

摘要: 针对传统刚性铺面结构在设计年限内板边、角易开裂的问题, 基于美国国家机场铺面测试中心的 CC1 和 CC2 试验段的测试结果, 结合 Westergaard 的理理解, 提出了结构刚度概念与刚性铺面结构平衡刚度设计理念, 即增加铺面板边、角的结构刚度, 使整个铺面板在板边、板角和板中 3 个荷位处的结构刚度处于平衡状态。随后, 通过 CC6 足尺加速加载试验, 验证了基于平衡刚度设计理念的铺面结构可以有效缓解和预防板边、角裂缝的产生, 并且设有刚性基层的等厚度面层板可以达到同样的效果。最终, 结合平衡刚度设计理念及试验结果, 提出了平衡刚度刚性铺面结构的一般形式, 同时考虑工程应用设计了一种基于平衡刚度设计的刚性铺面的原型结构。研究成果可为刚性铺面结构的平衡刚度设计提供理论基础。

关键词: 刚性铺面结构; 开裂; 足尺试验; 平衡刚度设计; 原型结构

中图分类号: U416. 222

文献标志码: A

Balance-Stiffness Design Concept and Prototype Structure of Rigid Pavement

CHEN Haoyu¹, GUO Edward², LI Chenchen¹, MA Lukuan¹, ZHAO Hongduo¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Galaxy Scientific Corporation, Nashua NJ08234, USA)

Abstract: Aiming at the early crack at the edges and corners in the design life of the traditional rigid pavement structure, based on the experiment result of the full-scale tests in FAA's NAPTF CC1 and CC2, combined with the Westergaard theoretical solution, a balance-stiffness design concept and a structural stiffness concept are proposed in this paper, that is, increasing the structural stiffness in the slab edges and slab corner, balancing them with the centroid of the slab approximately. According to the result of the full-scale test CC6, the effect of crack alleviating of

this concept has been verified, and the rigid pavement with flexible base can also reach the same goal. The general form of the rigid pavement structure and a prototype structure considering engineer application has been proposed based on the balance-stiffness design concept. The research results can provide a theoretical basis for the balance stiffness design of rigid pavement structures.

Key words: rigid pavement; crack; full-scale test; balance-stiffness design; prototype structure

刚性铺面具有强度高、日常养护量小、使用年限长、取材方便等优点, 广泛应用于我国的机场铺面及公路路面建设。目前, 我国机场刚性铺面与水泥混凝土路面均以铺面板在板边中部自下而上的疲劳开裂(Bottom-up 裂缝)作为设计控制的损坏模式, 并且设计年限均为 20 年以上^[1]。然而, 在实际使用过程中, 铺面板早期开裂损坏普遍, 并且大多为自上而下的板边、角开裂(Top-down 裂缝)^[2]。除了水泥混凝土等材料因素外, 此类开裂损坏通常是由 2 个原因造成: 一是板边、角下出现板底冲刷型脱空, 在荷载作用下, 板顶弯拉应力激增, 加剧了 Top-down 裂缝的出现^[3]; 二是温度荷载作用导致刚性铺面板出现翘曲变形, 特别是负温度梯度作用使得板边、角出现板底温度翘曲型脱空, 在荷载与温度耦合作用下, 最大弯拉应力出现于板顶^[4], 使得板角与板边过早出现 Top-down 裂缝。而刚性铺面板一旦出现开裂, 其结构完整性受到破坏, 结构寿命急剧减小, 因此延缓刚性铺面开裂, 对提高铺面结构的服役寿命、保障铺面使用性能具有重要意义。

目前, 国内外除了改善水泥混凝土材料本身及铺面施工技术防止开裂之外, 主要通过 2 种方法解

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(52008310)

第一作者: 陈昊昱(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为刚性铺面结构。Email: haoyuchen@tongji.edu.cn

通信作者: 赵鸿铎(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为铺面智能化技术与智能铺面结构。

E-mail: hdzhao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

决铺面开裂问题。第一种为及时检测并处治铺面板底冲刷型脱空,以防止荷载作用下板顶面产生过大的弯拉应力,如利用落锤式弯沉仪、探地雷达、分布式光纤^[5]等技术检测板底脱空,并通过注浆、压浆^[6]的方式对脱空进行及时处治。这种方式可以在一定时间范围内改善脱空对铺面板使用寿命造成的影响,但是注浆、压浆等处治工艺会对铺面结构连续性产生一定损坏,并且其会对交通产生影响。另一种措施为在铺面结构中增设钢筋形成新结构,包括钢筋铺面结构、连续配筋铺面结构^[7]与斜向预应力铺面结构,可以在提高铺面结构承载力的同时减少铺面结构的横缝数量,从而减缓裂缝的生成。然而,这种方式也会对铺面结构的施工以及材料性能提出更高的要求。

基于上述分析,本文从刚性铺面结构特性出发,基于试验和理论推导,分析了刚性铺面结构开裂与刚度的关系,提出了结构刚度的概念与平衡刚度设计理念;随后,通过足尺实验,以验证平衡刚度设计理念对开裂的改善效果;在此基础上,给出了平衡刚

度刚性铺面结构的一般形式,并考虑工程应用设计了一种原型结构。

1 刚性铺面结构平衡刚度设计理念

1.1 传统刚性铺面结构的开裂方式

工程实践表明,刚性铺面结构在使用过程中较早先在边角处出现 Top-down 裂缝。为探究 Top-down 裂缝的形成机理,2000 年美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)设立国家机场铺面测试中心(National Airport Pavement Test Facility, NAPTF),并进行了第一轮足尺加速加载测试 CC1(construction circle one)。试验对象为 45 块 $6\text{m} \times 6\text{m} \times 0.3\text{m}$ 的水泥混凝土铺面板,经过 28 个加载周期,在其中 30 块板中出现开裂现象,如图 1 所示。通过对试验结果的分析可以看出^[8],尽管在试验过程中并未出现因为基层损坏而导致的脱空现象,但是在温度翘曲与温度应力的双重作用下,仍然会出现大量的板角 Top-down 开裂。

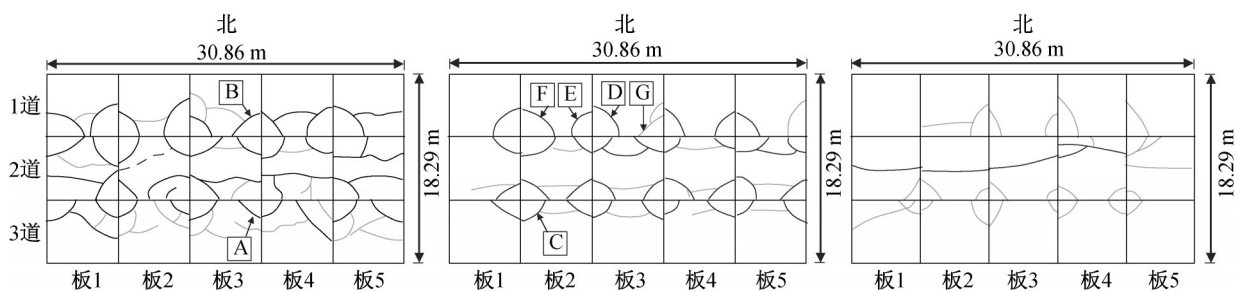


图1 CC1试验铺面结构开裂分布

Fig.1 Cracking map of CC1

2006 年 FAA 进行了第二轮足尺加速加载测试 CC2^[9],试验中出现的裂缝按照产生时间的先后进行编号,记录如图 2 所示。在该试验段中,水泥混凝土铺面板厚为 0.3m,下方均铺设粒料基层,荷载加载区域为图中灰色区域,同时在实验过程中利用在铺面板表面周期性洒水的方式严格控制铺面温度,有效防止了翘曲现象和温度应力的产生。试验结果表明,最早出现的裂缝为位于 S19、S18、S17 这 3 块板上的 1~5 号裂缝,起始开裂位置处于荷载作用位置外的横缝处,属于 Top-down 裂缝;出现于荷载作用范围内,贯穿整块板的裂缝(20 号、28 号、96 号等)属于 Bottom-up 裂缝,出现的时间较晚,但是数量较多。从试验结果可以看出,尽管消除了温度应力、脱空等影响因素,使板角产生的 Top-down 裂缝数量有所减

少,但是总体裂缝数量仍然较多,并未有效改善刚性铺面板的开裂。

上述试验表明,温度应力、脱空会影响板角

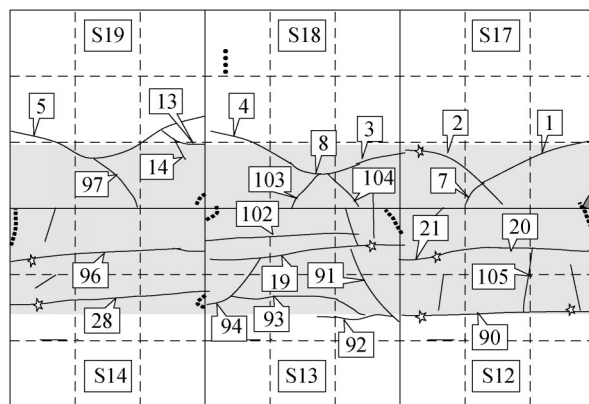


图2 CC2试验铺面结构开裂分布

Fig.2 Cracking map of CC2

Top-down 裂缝的数量,但是并非导致 Top-down 开裂的根本原因,并且通过控制温度与保证基层的完整度也无法有效改善刚性铺面板的整体开裂情况。

1.2 传统刚性铺面结构的开裂机理

为探究传统刚性铺面结构的开裂机理,首先基于 Westergaard 的理论解对铺面板在荷载作用于板中、板边、板角 3 个荷位时产生的挠度与应力进行分析。

荷载作用于板中部位,有

$$\omega_i = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{\delta}{2l} \right) - 0.673 \right] \left(\frac{\delta}{l} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_i = \frac{3(1+\mu)P}{2\pi h^2} \left(\ln \frac{l}{\delta} + 0.6159 \right) \quad (2)$$

荷载作用于板边中部,有

$$\omega_e = \frac{P\sqrt{2+1.2\mu}}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1 - \frac{(0.76+0.4\mu)\delta}{l} \right] \quad (3)$$

$$\sigma_e = \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100k\delta^4} \right) + 1.84 - \frac{4\mu}{3} + \frac{1-\mu}{2} + \frac{1.18(1+2\mu)\delta}{l} \right] \quad (4)$$

荷载作用于板角,有

$$\omega_c = \frac{P}{kl^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{\delta\sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad (5)$$

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{\delta\sqrt{2}}{l} \right)^{0.72} \right] \quad (6)$$

式中: ω_i 、 ω_e 、 ω_c 以及 σ_i 、 σ_e 、 σ_c 分别为荷载作用于板中、板边与板角时铺面板产生的挠度与应力; P 为荷载; k 为 Winkler 地基模量; h 为铺面板的厚度; l 为铺面板与地基的相对刚度半径; δ 为荷载圆半径; E 、 μ 分别为混凝土材料的弹性模量与泊松比。

由式(1)-(6)可得, $\sigma_e > \sigma_c > \sigma_i$, $\omega_e > \omega_c > \omega_i$, 即在同一轮载与铺面结构条件下,板边中部受荷时产生的最大挠度值与应力值最大,板角次之,板中最小。而在荷载和温度耦合作用下,板角受荷产生的最大挠度值与应力值在其翘起时则会超过板边中部^[1]。这是刚性铺面结构出现 Bottom-up 和 Top-down 开裂的理论基础。

刚度是描述材料或物体在受力时抵抗变形的能力,根据受力模式,可分为弯曲刚度、剪切刚度、扭转

刚度等,此类刚度仅与材料性质、截面特性有关。根据刚度的定义,本文提出结构刚度的概念,即当荷载作用于具有一定边界条件的结构上某处时,结构在该处产生的形变与荷载的比值称为结构在该处的结构刚度,如式(7)所示。因此,结构刚度不仅与材料性质、截面特性有关,也受到边界条件的影响。对于铺面板而言,在相同荷载作用下,某处的挠度越大说明铺面板在该处的结构刚度越低。

$$K = \frac{P}{\omega} \quad (7)$$

式中: ω 为该处在荷载作用下产生的挠度; K 为铺面板在该处的结构刚度。

对于传统等厚度刚性铺面结构,利用式(7)与式(1)、(3)、(5)对铺面板在板中、板边、板角处的结构刚度 K_i 、 K_e 、 K_c 进行计算,可得

$$K_i = \frac{P}{\omega_i} = 8kl^2 / \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{\delta}{2l} \right) - 0.673 \right] \left(\frac{\delta}{l} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

$$K_e = \frac{P}{\omega_e} = \sqrt{\frac{Eh^3k}{2+1.2\mu}} / \left[1 - \frac{(0.76+0.4\mu)\delta}{l} \right] \quad (9)$$

$$K_c = \frac{P}{\omega_c} = kl^2 / \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{\delta\sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad (10)$$

图 3 为不同板厚下传统铺面板在板中、板边中部、板角荷位处的结构刚度的对比。可以看出,传统铺面板在板角与板边中部的结构刚度远低于板中,故在同一荷载下生成的最大挠度与应力大于板中,更容易达到铺面板的临界应力而形成开裂。同时,当铺面板翘曲或基层受损产生脱空时,由于边界条件的改变,板角处由于缺乏支撑导致结构刚度进一步降低,最大弯拉应力出现于板顶横缝处,从而形成板角 Top-down 开裂。

1.3 平衡刚度设计理念

由上述分析可知,传统刚性铺面结构采用等厚度设计,铺面板边中部荷位与板角荷位结构刚度低于板中荷位,是一种非平衡刚度的结构,导致开裂在板边形成的概率高于板中,同时在温度应力、翘曲与脱空状态下,板边、角的结构刚度进一步降低,更易形成板边、角的 Top-down 开裂。相对而言,传统刚性铺面结构板中开裂的概率极低,说明板中荷位的结构刚度足够抵抗开裂的产生。因此,本文考虑将

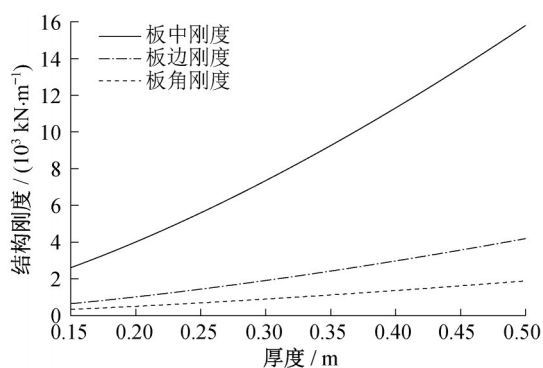


图3 板中、板边中部、板角处在荷载作用下的结构刚度
Fig.3 Structural stiffness of center, edge and corner of the slab with load condition

传统刚性铺面结构等厚度设计原则转变为平衡刚度设计原则,即增加刚性铺面板边缘与板角部位的结构刚度,使其与板中结构刚度达到平衡,形成平衡刚度结构,从而降低板边开裂的概率,延缓刚性铺面板的开裂。

2 基于平衡刚度设计理念的刚性铺面结构足尺加速加载试验

为验证平衡刚度设计理念对刚性铺面结构开裂的缓解效果,依托FAA的NAPTF开展的CC6足尺加速加载试验,验证平衡刚度设计理念的合理性。

2.1 CC6试验概述

CC6测试开始于2012年,其主要目的是探究铺面结构抗弯刚度对使用寿命的影响。试验段总共由6个刚性铺面试验区域组成,如图4所示,共包含76块水泥混凝土铺面板,尺寸为4.6m×4.6m,材料标号为P-501^[10]。整个实验段根据方向以中线划分为南区(S)、北区(N)2个部分,其区别主要在于底基层材料,其中N区采用标号为P-403的HMA底基层,S区采用标号为P-306的贫混凝土底基层。同时,试验段依据铺面板强度划分为MRS-1、MRS-2、MRS-3这3个部分,各部分的强度如表1所示。

传统结构铺面板										平衡刚度铺面板									
1N	2N	3N	4N	5N	6N	7N	8N	9N	10N	11N	12N	13N	14N	15N	16N	17N	18N	19N	
20N	21N	22N	23N	24N	25N	26N	27N	28N	29N	30N	31N	32N	33N	34N	35N	36N	37N	38N	
1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8S	9S	10S	11S	12S	13S	14S	15S	16S	17S	18S	19S	
20S	21S	22S	23S	24S	25S	26S	27S	28S	29S	30S	31S	32S	33S	34S	35S	36S	37S	38S	
MRS-1					MRS-2					MRS-3									

图4 CC6试验测试区域示意

Fig.4 Test area of CC6

表1 CC6不同测试区域的刚性铺面板强度

Tab.1 Strength of rigid pavement slab in each area for CC6

测试区域	设计抗弯强度/MPa	28天抗弯强度/MPa		28天抗压强度/MPa	
		平均值	标准差	平均值	标准差
MRS-1	3.45	4.56	0.31	25.8	2.51
MRS-2	5.17	5.26	0.74	30.3	3.95
MRS-3	6.89	6.70	1.24	41.0	1.59

选取的试验区域为图4中灰色区域,其中标号为6N、7N、25N、26N、6S、7S、25S、26S的板块为传统等厚度铺面板,标号为13N、14N、32N、33N、13S、14S、32S、33S的板块在传统铺面板的基础上通过增加板边厚度以提升边缘抗弯刚度,从而提高结构刚度,属于平衡刚度铺面结构。2个试验区域中铺面结构均为四边自由板块(free-edges slab),基层采用粒料基层,标号P-154,地基为黏土地基,CBR值为8。所选取试验区的铺面结构横截面特性如图5所示。

试验区域的加载方式为模拟B-747的双轴双轮荷载,如图6、图7所示。加载过程中模拟了飞机轮迹的正态分布,加载区域为图8中阴影部分。加载过程按照荷载大小分为3个等级,分别为Ⅰ级轮载200kN(45 000磅)、Ⅱ级轮载231kN(52 000磅)、Ⅲ级轮载311kN(70 000磅),荷载大小与每一级荷载加载次数情况如表2所示。

2.2 试验结果分析

试验过程中针对试验区域铺面开裂情况进行了

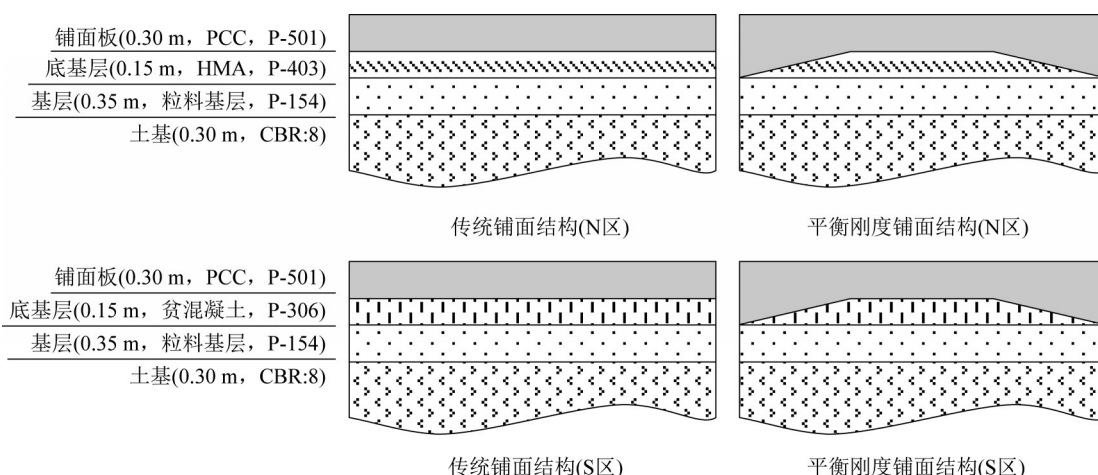


图 5 所选 CC6 测试试验区铺面结构的横截面特性

Fig.5 Cross section character of pavement structure in the selected CC6 test area



图 6 门架式加载设备

Fig.6 Frame loading device

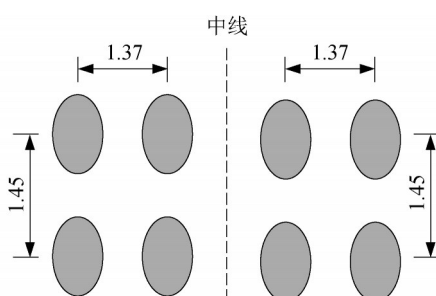


图 7 CC6 试验测试的荷载尺寸(单位:m)

Fig.7 Load size in CC6(unit:m)

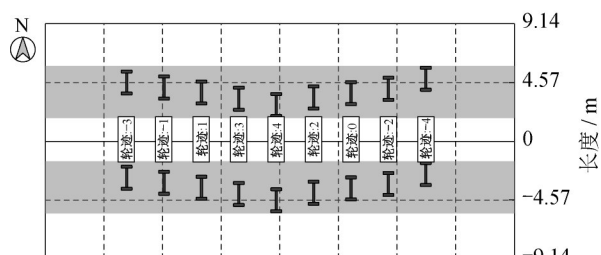


图 8 CC6 测试的荷载加载区域

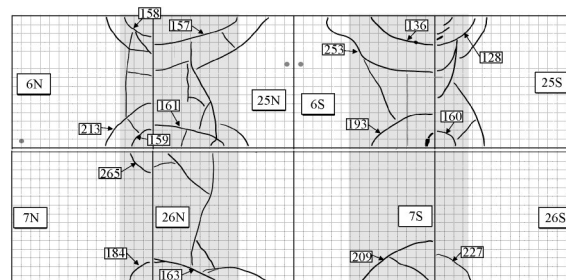
Fig.8 Load area of CC6

表 2 CC6 实验测试的荷载等级与作用次数

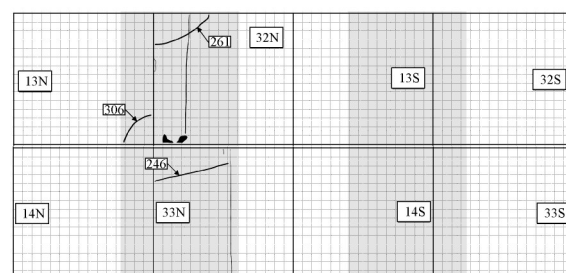
Tab.2 Load class and load number for CC6

荷载等级	开始加载计数	结束加载计数
I级(200kN)	1	15 700
II级(231kN)	15 701	33 529(即 15 700+17 529)
III级(311kN)	33 530	39 270(即 33530+5 741)

记录,包括开裂的位置、裂缝的形状、裂缝出现的时间、裂缝发展至 1/2 板厚的时间以及对应的荷载等级与加载次数。本文所属试验区域内的铺面板中产生的裂缝情况记录如图 9 所示。所有发现的裂缝按出现次序编号,其中主要裂缝编号、出现的时间与对应的加载次数如表 3 所示。



a 传统等厚度铺面结构开裂情况



b 平衡刚度铺面结构开裂情况

图 9 CC6 测试试验区开裂情况

Fig.9 Cracking in test area of CC6

表3 CC6测试的主要裂缝开裂情况
Tab.3 Main cracking record for CC6

区域类型	裂缝编号	板块编号	开裂时加载次数	观测时间	开裂至中间时加载次数	观测时间
N区 传统铺面	157	25N	18 876	2012-01-12	36 564	2012-04-13
	158	6N	20 064	2012-01-26	37 356	2012-04-17
	159	6N	20 658	2012-01-31	37 354	2012-04-17
	161	25N	22 044	2012-02-7	36 564	2012-04-13
	163	26N	22 836	2012-02-10	36 366	2012-04-12
	184	7N	29 833	2012-03-13	37 356	2012-04-17
	213	6N	34 650	2012-04-04	39 270	2012-04-27
S区 传统铺面	265	7N	36 366	2012-04-12	39 270	2012-04-27
	128	25S	6 402	2011-10-13	35 970	2012-04-11
	136	6S	8 382	2011-10-25	34 914	2012-04-05
	160	25S	21 318	2012-02-02	37 752	2012-04-18
	193	6S	31 284	2012-03-19	36 960	2012-04-16
	209	7S	33 924	2012-04-02	36 366	2012-04-12
	227	26S	34 650	2012-04-04	38 742	2012-04-23
N区 平衡刚度铺面	253	6S	35 706	2012-04-10	36 366	2012-04-12
	246	33N	35 706	2012-04-10	36 564	2012-04-13
	261	32N	35 970	2012-04-11	38 742	2012-04-23
S区 平衡刚度铺面	306	13N	39 270	2012-04-27		
未发现裂缝						

2.2.1 结构刚度对结构开裂的影响

从裂缝记录情况可以看出,位于6S、25S的传统铺面板最先出现开裂,出现的裂缝编号为128号与136号,分别在第6 402与第8 382次加载时出现,此时的荷载是200kN的Ⅰ级荷载。位于7S、26S的传统铺面板上出现的209号、227号裂缝分别于33 924次与34 650次加载时出现,此时荷载级别为311kN的Ⅲ级荷载。然而,同样位于S区的13S、14S、32S、33S这4块平衡刚度铺面板上,在3个等级的荷载全部加载结束后仍然未出现裂缝。

对于N区铺面结构,较早出现的开裂为位于传统铺面板6N、7N、25N、26N上的157号、158号、159号、161号、163号、184号裂缝,分别于18 876次、20 064次、20 658次、22 044次、22 836次、29 833次加载时出现,此时荷载等级为231kN的Ⅱ级荷载。

当荷载等级变为311kN的Ⅲ级荷载时,213号、265号裂缝出现,对应的加载次数为34 650次与36 366次。在同样位于N区的平衡刚度铺面板13N、32N、33N上,裂缝246号、261号以及306号分别在35 706次、35 970次、39 370次加载时才出现,出现时间晚于多数传统铺面板上的裂缝。同时,加厚板边铺面板14N同样在3个等级的荷载全部加载结束时仍未出现裂缝。

主要裂缝的开裂时间轴如图10所示,其中黑色标记为出现在加厚板边铺面结构上的裂缝。总体来看,平衡刚度铺面结构产生裂缝的时间以及产生裂缝的数量均优于传统铺面结构。为排除强度的影响,可以比较同样位于MRS-2区的7N、26N、7S、26S的传统铺面板与平衡刚度铺面板13N、32N、13S、32S,可以发现上述结论仍然满足。

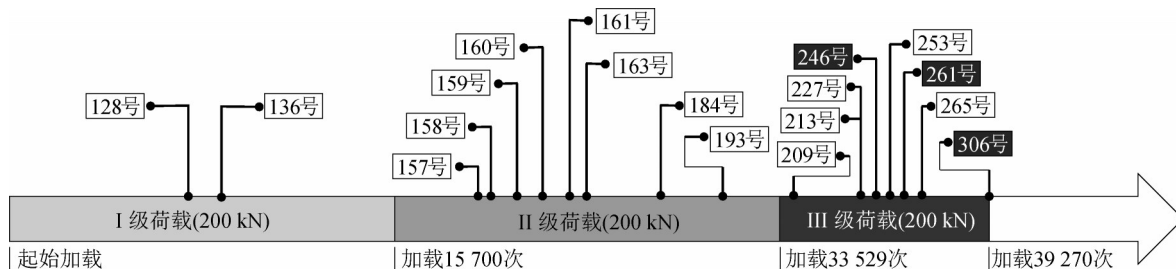


图10 CC6测试铺面结构开裂时间轴

Fig.10 Time bar of cracking for CC6

2.2.2 基层类型对开裂的影响

从试验结果可以看出,除了铺面板边缘厚度,基

层类型对铺面开裂同样具有一定影响。对比位于刚性基层(贫混凝土基层)上的6S、25S2块板与位于柔

性基层(HMA基层)上的6N、25N这2块板的开裂情况可以看出,128号与136号开裂时间(6 402次与8 382次加载时)早于157号、158号裂缝的开裂时间(36 564次于37 356次加载时),但是裂缝发展至1/2板厚的时间(128号的35 970次加载,136号的34 914次加载;157号的36 564次加载,158号的37 356次加载)相差不多。前者先开裂是因为在温度的影响下发生了翘曲,位于刚性基层上的铺面板在发生翘曲时,板底与基层的接触面积相较于柔性基层上的铺面板更小,支撑不足而导致了裂缝的更早出现。上述结果表明,刚性基层可以在铺面板开裂后帮助其更好地抵抗继续开裂。

总体来看,位于刚性基层上的S区铺面结构裂缝产生的平均时间晚于位于柔性基层上的N区铺面结构,同时产生的裂缝总数量也更少。

2.3 CC6试验中结构的平衡刚度解析

(1)从2.2.1节的结果可以看出加厚板边的平衡刚度铺面结构相较于传统的等厚度铺面结构具有更好的抗开裂效果。根据式(11)可知,加厚刚性铺面板的边缘部分显著提升了板边与板角的抗弯刚度,而根据式(7)可知,抗弯刚度的增加可以提升结构刚度,故荷载作用于边角部位时产生的挠度与应力更小,提升了造成裂缝所需的应力上限,所以对开

裂具有较为明显的抑制作用。

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (11)$$

(2)根据2.2.2节的结果可以看出,刚性基层对刚性铺面的开裂也具有良好的缓解作用。由于刚度较大的底基层可以为板边提供良好支撑,增加了刚性铺面板的板边在垂直方向上的抗弯能力,降低了板边在荷载作用下的垂直位移以及板顶产生的最大弯曲应力,减少了板边裂缝产生的可能,提升了铺面结构边角处的结构刚度,与增加面层板边缘的厚度具有同样的效果。然而,在面层板下方全部布设刚性基层会导致面层板在温度影响下产生翘曲时与基层的接触面积减少,使铺面结构的边角处的结构刚度因缺少下方支撑而降至更低的水平,但是这种情况在柔性基层便有所改善,因为处于柔性基层上的铺面板在温度翘曲时(负温度梯度作用下的向上翘曲)会使基层变形,铺面板整体会产生向下的位移,边角处下方仍然会受到基层的支撑,刚度的下降情况相较于前者有所缓和,如图11所示。同时,由于板中下方改为柔性基层,导致板中结构刚度有所下降,但是在实验过程中仍然未发现板中开裂的现象,说明板中下方采用柔性基层的情况下,结构刚度仍然足以抵抗开裂。

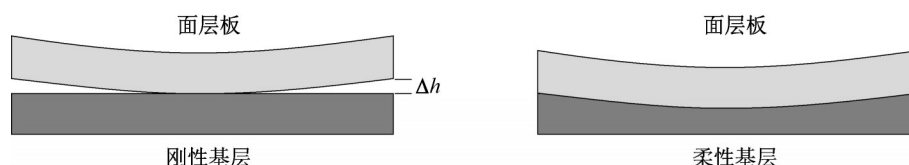


图11 刚性基层与柔性基层上面层翘曲变形示意

Fig.11 Scheme of slab curling on rigid base and flexible base

总体来看,无论是增加面层板边缘厚度,还是设置刚性基层,都可以提高刚性铺面结构在板边与板角处的结构刚度,具有良好的缓解开裂效果。上述分析表明,当荷载条件、边界条件与材料性质不变的情况下,板边、角处的结构刚度是影响刚性铺面结构开裂的主要因素,同时也说明了平衡刚度设计的理念可以有效缓解铺面结构的开裂。

3 平衡刚度刚性铺面原型结构

3.1 平衡刚度刚性铺面结构的一般形式

根据足尺加速加载试验结果的分析可知,基于平衡刚度设计理念,通过增加铺面板边缘部位的厚度可以显著提升边缘区域的抗弯刚度,进而提升结

构刚度,使其与板中的结构刚度形成平衡,从而有效延缓裂缝的生成时间、减少裂缝的产生数量。但是在实际建造的过程中,加厚板边的面层板属于异形板,对建造工艺的要求较高。

同样从试验结果可以看出,除了对板边进行加厚,刚性基层也可以达到相同的效果。在试验过程中由于铺面板下方全部区域均为刚性基层,在提高结构边缘结构刚度的同时,板中的结构刚度也被提高。但是面层板中部结构刚度本身就已足够,在板中下方布设刚性基层的效果与意义远小于在板边与板角下方布设,同时这种布设方式会使铺面板在温度翘曲(负温度梯度下的向上翘曲)的情况下产生较大的脱空区域,反而降低了边角部位的结构刚度,增大了边角开裂的概率。而在板中下方布设柔性基层

虽然降低了板中的结构刚度,但是仍然足以抵御开裂的发生。

综上所述,基于平衡刚度设计理念,提出一种平衡刚度刚性铺面结构的一般形式。平衡刚度刚性铺面结构同时采用刚性材料与柔性材料相结合的复合基层结构,即在面层板边缘下方采用刚性基层,为面层边缘提供足够的竖向支撑以提高结构刚度;在面

层板中心区域下方采用柔性基层,降低板中结构刚度的同时,可以在面层板产生温度翘曲时为其提供更多的接触面积以减小脱空区域,如图 12 所示。由于提高了边缘的结构刚度,降低了板中结构刚度,整体结构可以认为是一种平衡刚度结构,符合平衡刚度设计的理念。

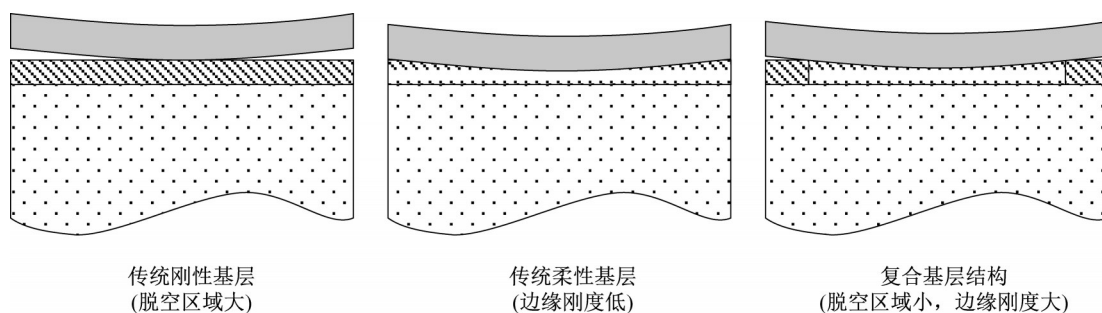


图 12 3 种基层结构对比

Fig.12 Comparison of three base structure

3.2 梁基础铺面结构

基于平衡刚度刚性铺面结构的一般形式,考虑工程应用,提出一种梁基础铺面结构。该结构主要由三部分组成,分别为混凝土铺面板、混凝土基础梁以及粒料基层。其中混凝土铺面板为等厚度设计,混凝土梁布设在相邻混凝土面层板的接缝下方,在面层板中间区域下方即混凝土梁包围的区域内填充碎石粒料。同时依据 Guo 在 2009 年的研究^[11]可知,采用传力杆作为接缝的刚性铺面结构,在冬季由于板的遇冷收缩,以剪力为主要传荷形式的传力杆式接缝的传荷效果会明显降低。梁基础铺面结构在接缝下方布设刚性基层,主要以压力的形式传递荷载,降低了在不同温度下接缝大小变化对传荷效果的影响,相较传力杆式接缝更为稳定,所以面层板可以设置为无传力杆的四边自由板块(free-edges slab),整体结构如图 13 所示。梁基础铺面结构在保证了平衡刚度设计理念的基础上,降低了温度翘曲产生的脱空,可以有效延缓结构的开裂;同时面层板、混凝

土梁均为常规形状的结构,其建造也可以通过预制装配的方式^[12]实现。

4 结论

(1)传统刚性铺面结构开裂通常是由冲刷型脱空与温度翘曲造成的,基于 CC1 与 CC2 足尺加速加载试验结果,并结合 Westergaard 理论解,可知传统等厚度设计的铺面为非平衡刚度结构,即板边、板角部位结构刚度低于板中,挠度与应力较大,更易发生开裂。

(2)提出了刚性铺面结构的平衡刚度设计理念,即提升结构边缘部位的结构刚度,使其与板中间部位的结构刚度达到平衡,从而缓解刚性铺面结构的开裂问题。

(3)CC6 试验结果表明,增加刚性铺面结构的面层板边缘部分厚度,从而提升边缘结构刚度,可以显著延缓裂缝产生的时间,减少裂缝产生的数量,验证了平衡刚度设计理念的有效性。同时,试验结果还表明,调节基层刚度同样可以改善铺面的结构刚度,但基层设置需要综合考虑温度翘曲变形的影响。

(4)提出了平衡刚度刚性铺面结构的一般形式,即面层采用等厚度设计,基层采用刚性基层与柔性基层相结合的复合基层结构,并在此基础上考虑工程应用设计了由混凝土面层板、混凝土基础梁、碎石粒料组成的梁基础铺面结构。

提出了平衡刚度设计理念与基于该理念的原型

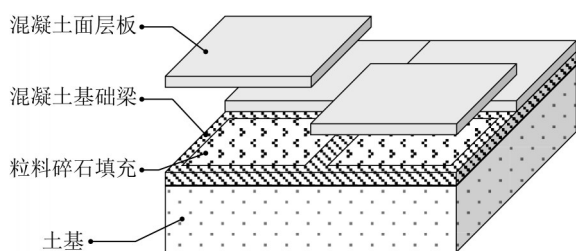


图 13 梁基础铺面结构

Fig.13 Beam-based rigid pavement structure

结构,但尚未对原型结构进行建造与实验研究,后续建议考虑结构性能、功能性能,针对原型结构的力学性能展开进一步研究,以验证设计理念的有效性。

作者贡献声明:

陈昊昱:论文整体撰写,提出梁基础路面结构的具体形式。

Guo Edward:CC6实验主要研究人员,提供实验数据。

李琛琛:实验数据整理,理论公式推导与计算。

马鲁宽:论文审定,论文整体结构指导。

赵鸿铎:研究选题,提供研究思路和技术指导。

参考文献:

- [1] 孙立军. 铺面工程学[M]. 上海:同济大学出版社, 2012.
SUN Lijun. Pavement engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2012.
- [2] BAE H, SENIORER K. Top-down cracking of jointed plain concrete pavements[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2010, 8: 1529.
- [3] 周玉民, 谈至明, 刘伯莹. 水泥混凝土路面脱空状态下的荷载应力[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 341.
ZHOU Yumin, TAN Zhiming, LIU Boying. Loading stresses in cement concrete pavement slab with void underneath [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(3): 341.
- [4] 黄勇, 袁捷, 谭悦, 等. 机场水泥混凝土道面脱空判定及影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 861.
HUANG Yong, YUAN Jie, TAN Yue, *et al.* Identification of void beneath airport cement concrete pavement and its influence [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(6): 861.
- [5] 曾孟源, 赵鸿铎, 吴获非, 等. 基于振动感知的混凝土铺面板底脱空识别方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(3): 42.
ZENG Mengyuan, ZHAO Hongduo, WU Difei, *et al.* Identification of cavities underneath concrete pavement based on pavement vibration [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3): 42.
- [6] 赵健, 邹金锋, 曾胜, 等. 水泥路面板底脱空注浆布孔方案设计及注浆压力计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010(6): 2344.
ZHAO Jian, ZOU Jinfeng, ZENG Sheng, *et al.* Design of holes arrangement and grouting pressure for void road panel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010(6): 2344.
- [7] 高英, 黄晓明, 陈锋锋. 基于可靠度的连续配筋混凝土路面配筋率设计方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(4): 835.
GAO Ying, HUANG Xiaoming, CHEN Fengfeng. Reinforcement ratio design of continuously reinforced concrete pavement based on reliability [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39(4): 835.
- [8] Federal Aviation Administration. CC1 rigid pavement distress map[EB/OL]. [2021-09-15]. <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Pavement/NAPTF/Construction-Cycles/Construction-Cycle-1/CC1-Rigid-Pavement-Distress-Map>.
- [9] BRILL D R, HAYHOE G F, RICALDE L. Analysis of CC2 rigid pavement test data from the FAA's national airport pavement test facility [C]// Proceedings of the International Conferences on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Trondheim: [S.n.], 2005: 1-10.
- [10] Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Standards for specifying construction of airports [S]. Washington D C: Advisory Circular, 1974.
- [11] GUO E H. Joint modeling for JPCP: successes and pending problems [C]// Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields 8th International Conference (BCR2A'09), Leiden: CRC Press, 2009: 531-514.
- [12] 赵兰若, 赵鸿铎, 蔡爵威, 等. 考虑邻板高程差的装配式水泥路面行驶舒适性研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(3): 10.
ZHAO Lanruo, ZHAO Hongduo, CAI Juewei, *et al.* Study on driving comfort of precast concrete pavement considering joint faulting [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(3): 10.