

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.009

基于位移等效的复合道面 PCN 计算方法

张献民^{1,2} 陈新春¹ 董倩^{1,3} 章嘉璐⁴

(1. 中国民航大学机场学院, 天津, 300300; 2. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016;
3. 天津大学建筑工程学院, 天津, 300000; 4. 江苏省交通科学研究所股份有限公司, 南京, 211112)

摘要:为了对复合道面承载力进行合理的评估,研究了现行规范中复合道面等级号(Pavement classification number, PCN)计算方法,分析场道承载力的影响因素,确定了进行厚度折算的位移等效原则。通过设计正交试验,经大量有限元试算,回归得到了复合道面厚度折算公式,最后就各因素对厚度折算的影响规律进行了讨论。结果表明:复合道面 PCN 计算时,可按位移等效原则将复合道面简化为一当量厚度的单层刚性板;道面混凝土厚度是影响 PCN 计算结果的最关键因素。不同厚度折算计算方法会导致计算的 PCN 值差异较大;沥青混凝土厚度对厚度折算结果的影响最为显著。

关键词:复合道面;道面等级号(PCN);位移等效;正交试验;回归公式

中图分类号:U416.216 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)04-0532-07

PCN Calculation Method for Composite Pavement Based on Equivalent Displacement

Zhang Xianmin^{1,2}, Chen Xinchun¹, Dong Qian^{1,3}, Zhang Jialu⁴

(1. Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China;
2. Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;
3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300000, China;
4. Jiangsu Transportation Institute Co., Ltd, Nanjing, 211112, China)

Abstract: In order to evaluate the bearing capacity of composite airfield pavement reasonably, pavement classification number(PCN) calculation methods of composite airfield pavement in current specification are researched. The principle of equivalent displacement is established with the analysis of influence factors on airfield pavement bearing capacity. The formula of conversion thickness on composite airfield pavement is established with orthogonal experiment design and a large number of finite element calculations. Finally, the rules of various factors which influence the conversion thickness are discussed. The results show that composite airfield pavement can be simplified to an equivalent thickness single rigid panel when the PCN of composite airfield pavement is calculated. The concrete thickness on surface is the main factor influencing the results of PCN calculation. The difference in PCN calculated by different thickness conversion methods is significant. Thickness of asphalt concrete influences the thickness conversion obviously.

Key words: composite pavement; PCN; equivalent displacement; orthogonal experiment; regression formula

基金项目:国家自然科学基金(51178456)资助项目;中央高校基本科研业务费(3122013P002)资助项目。

收稿日期:2015-07-01; **修订日期:**2015-08-01

作者简介:张献民,男,教授,博士生导师,主要研究方向:岩土工程、桥梁结构诊断及机场工程等。

通信作者:张献民, E-mail:cauczxm@126.com。

当前,机场复合道面等级号(Pavement classification number, PCN)计算方法尚未统一,不同的 PCN 计算方法计算得到的 PCN 值差异达到 20%~30%^[1]。国内外在计算复合道面 PCN 时,根据场道结构状态,将加铺层结构厚度换算成当量厚度的刚性道面或者柔性道面。如果采用不当的折算方法可能会过高地估算道面承载能力,从而导致道面超载运行,造成道面结构承载能力的加速衰减。如果不能依据场道结构状态进行刚柔性道面的分类,往往会采用偏于保守的道面承载力计算方法,即分别按照柔性道面和刚性道面承载力的计算方法进行计算,取偏于保守的计算结果作为通报值^[2],这必然会造成养护频率和养护成本的增加,加之养护期间需要机场进行停航断交施工,会造成巨大的人力物力浪费。可见,科学合理地评估道面承载力,可为场道部门进行道面养护提供科学依据。

针对以上分析,本文研究了常用复合道面 PCN 计算方法,分析场道承载力的影响因素,并提出基于位移等效的厚度折算理论,利用正交试验设计法回归得到了加铺层厚度折算公式,最后分析各因素对厚度折算的影响规律。从而为道面设计、维护与场道结构承载力评价提供参考。

1 常见复合道面 PCN 计算方法

1.1 复合道面 PCN 计算方法分析

目前,国际民航组织颁布的《机场道面设计手册Ⅲ-道面》没有给出一套针对机场复合道面结构形式承载力 PCN 值的规范方法,并允许不同国家、部门按照各自的复合道面 PCN 计算方法来通报道面 PCN 值,如表 1 所示。

表 1 常见复合道面 PCN 计算方法^[3-4]

Tab. 1 PCN calculation methods of composite pavement

规范	换算类型	
	刚性道面	柔性道面
中国	$h_f < h_r$	$h_f > h_r$
美国联邦航空局	换算成当量厚度的刚性道面	
国际民航组织	复合道面结构以“刚”为主,且没有出现严重的开裂破坏	复合道面结构以“柔”为主,且出现严重的开裂破坏
加拿大	$h_f < 25 \text{ cm}$	$h_f > 25 \text{ cm}$

注: h_f 为柔性加铺层厚度, h_r 为刚性道面厚度。

由表 1 可知,国内外计算复合道面承载力的通用做法是按某一换算原则,将复合道面简化为一当量厚度的单层板。

对于复合道面中的沥青混凝土加铺层,虽然沥青混凝土是一种黏弹塑性材料,其物理性能与水泥混凝土存在较大差异,但由于一般道面结构中水泥混凝土板的厚度达到了 30 cm 以上,刚度及厚度都较大。在道面结构受荷时,沥青面层表面弯沉较小,加铺层底部拉应力很小,不容易出现受拉状态,其整体道面结构强度表现为“刚性”^[5]。若将旧水泥混凝土板换算为柔性道面,大幅度增加的道面结构厚度会显著影响道面结构整体承载力的评价,即会导致 PCN 值偏大。

文献[6]将复合道面分别换算为刚性道面和柔性道面后对其 PCN 值进行了计算,如图 1 所示。

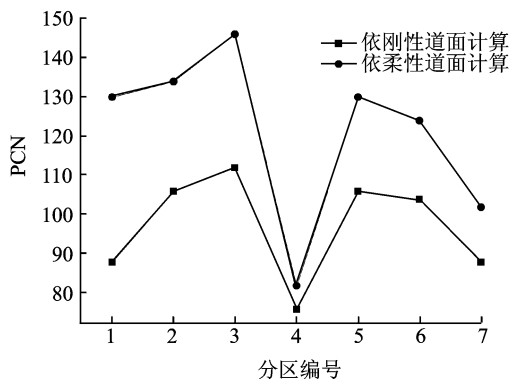


图 1 不同计算方法下的复合道面 PCN 值

Fig. 1 PCN of composite pavement with different calculation methods

由于将旧水泥混凝土板换算为柔性道面时的当量厚度很大,按照柔性道面计算得到的 PCN 值远大于按照刚性道面计算的 PCN 值,最大差值达到了 48%。故本文在以后的道面承载力分析中将柔性加铺层换算成当量厚度的刚性道面进行计算,这种近似换算在计算分析中是较为合理的。

1.2 现行规范厚度折算公式存在的问题

中国现行规范采用有效厚度法进行复合道面厚度折算,折算厚度按式(1)计算得到^[7]

$$h_d = (0.4h_f + C_r h_r) / F \quad (1)$$

式中: h_d 为复合道面折算厚度(cm); h_f 为沥青混凝土加铺层厚度(cm); C_r 为水泥混凝土道面板厚度损坏折减系数,取值范围 0.75~1; h_r 为水泥混凝土道面板厚度(cm); F 为控制原道面开裂程度系数,取值范围 0.7~1.0。

现行规范^[8]关于加铺层折算厚度的计算过程较为繁琐,计算公式中的参数均通过查图表取值确定,取值幅度大,受主观性影响也较大,易造成取值误差。此外,折算厚度公式在结构参数中只考虑了

厚度,没有综合考虑沥青混凝土和水泥混凝土这两种材料模量对折算厚度的影响,并且取沥青混凝土加铺层厚度的0.4倍这一定值作为折算后的加铺层厚度,显然该公式取值过于保守。

2 刚性道面承载力计算及影响因素分析

2.1 刚性道面 PCN 计算方法

在现行规范中,刚性道面 PCN 计算方法参照了国际民航组织推荐的当量单轮荷载法。利用 Winkler 地基板的 Westergaard 板中弯曲应力的理论解公式来计算 PCN 值^[9]

$$\sigma = \frac{0.275G}{h_r^2} (1+u) \log \left[\frac{E_r h_r^3}{K b^4} \right] \quad (2)$$

式中: σ 为水泥混凝土的允许弯拉应力,MPa,取90 d弯拉强度(28天设计强度乘以1.1倍)除以安全系数1.8; G 为道面能够安全承受的推导单轮荷载,MN; u 为水泥混凝土泊松比; E_r 为水泥混凝土的弯拉弹性模量,MPa; K 为地基反应模量,MN/m³; $a \geq 1.724 h$ 时, $b = a$; $a < 1.724 h$ 时, $b = \sqrt{1.6a^2 + h_r^2} - 0.675h_r$ 。其中, a 为轮胎接地面积当量圆半径,m,可由假设的单轮荷载和标准胎压1.25 MPa推导得到; b 为荷载作用面积当量半径,m; h 为根厚,m。

假设推导单轮荷载 G' ,代入式(2)并通过多次迭代计算,直到满足条件 $\left| \frac{G-G'}{G} \right| \leq 5\%$ 为止,最后按式(3)计算得到道面承载力 PCN 值,以吨计

$$\text{PCN} = 2G \quad (3)$$

2.2 影响因素分析

采用当量单轮荷载法评价道面承载力时,考虑影响刚性道面 PCN 的道面结构参数主要有:道面厚度、道面混凝土弯拉强度、道面混凝土弹性模量与地基反应模量。考虑到一般机场道面的混凝土弹性模量差异并不大,为便于下文分析,取刚性道面混凝土弹性模量为 $E_r = 36 \text{ GPa}$ 。

(1)道面厚度与地基反应模量对场道承载力的影响

分别计算4种地基类型,5种道面厚度下的 PCN 值,见表2,不同道面厚度与地基反应模量影响曲线图如图2所示。其中道面混凝土28 d弯拉强度取值为 $\sigma = 4.5 \text{ MPa}$ 。

(2)道面混凝土弯拉强度对场道承载力的影响
取道面混凝土厚度为34 cm,地基反应模量为80 MN/m³,分别计算道面混凝土弯拉强度(28 d)

为 $\sigma = 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 \text{ MPa}$ 时的 PCN 值,计算结果如图2所示。

表2 不同道面厚度与地基反应模量下的 PCN 值
Tab. 2 PCN of different pavement thickness and foundation reaction modulus

地基反应模量 $K/$ (MN · m ⁻³)	h/cm				
	28	31	34	37	40
20	30	37	45	54	64
40	33	41	49	59	70
80	36	45	55	66	78
150	40	49	61	73	86

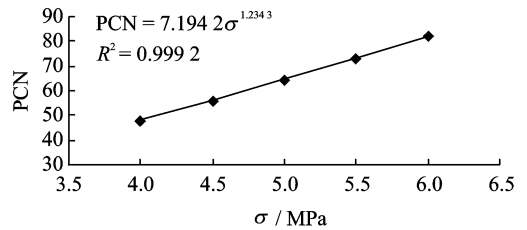


图2 不同混凝土弯拉强度下 PCN 曲线

Fig. 2 PCN curves of different concrete flexural strength

综合分析表2、图2结果,可以看出:

(1)当地基反应模量相同时,道面混凝土板越厚,计算得到的 PCN 值越大;地基反应模量为20 MN/m³,面层厚度40 cm时跑道 PCN 是面层厚度20 cm跑道 PCN 的2.13倍;地基反应模量为40,80,150 MN/m³,面层厚度40 cm时跑道 PCN 依次是面层厚度20 cm跑道 PCN 的2.12,2.17,2.15倍。

(2)当面层厚度不变时,地基反应模量增大,跑道 PCN 越大;面层厚度为28 cm,地基反应模量由20 MN/m³增大至150 MN/m³,跑道 PCN 增大30%;面层厚度为31,34,37,40 cm时,地基反应模量由20 MN/m³增大至150 MN/m³,跑道 PCN 依次增大32%,35%,35%,34%。

(3)道面混凝土弯拉强度是 PCN 计算公式的重要参数。当混凝土弯拉强度由4 MPa增大至6 MPa时,道面 PCN 值增加幅度达到了70%,且两者呈幂函数关系。

综上,可以看出:道面混凝土厚度是影响 PCN 计算结果的最关键因素,因此不同厚度折算计算方法得到的折算厚度不同,会导致 PCN 值差异较大,影响飞机的起降安全。

3 位移等效原则

复合道面结构主要是指在旧水泥混凝土道面上加铺沥青混凝土面层的一种复合式道面结构,以提高旧道面的承载力。通常,道面结构的整体承载力可由道面竖向位移来表征。道面竖向位移值越大,其整体承载力就越小,反之其承载力就越大。

图 3 给出了道面结构 A,B 的结构示意图。对于原道面结构 A,当道面中心上表面处受轮载 P 作用时,道面中心上表面处的弯沉为 w_1 ;对于加铺沥青混凝土层后的道面结构 B,受相同轮载作用下,旧道面中心上表面处弯沉为 w_2 ,此时相同位置处的弯沉 $w_2 < w_1$ (见图 4),显然由于加铺层的存在加强了道面结构的承载力。

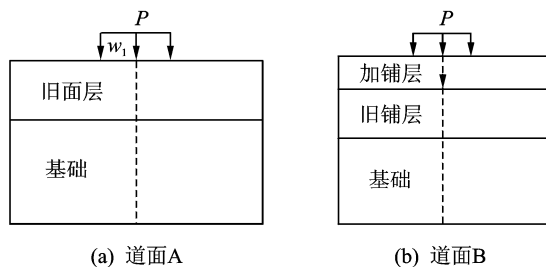


图 3 道面 A,B 结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of pavements A and B

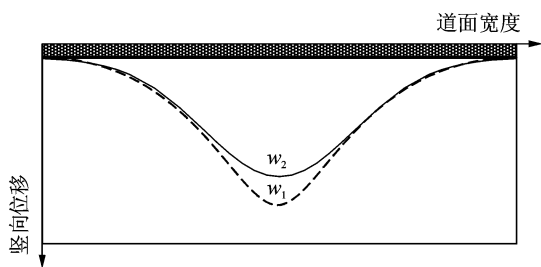


图 4 道面结构 A,B 弯沉示意图

Fig. 4 Deflection of pavements A and B

图 5 给出了复合道面结构 B 和经加铺层换算后复合道面结构 C 的示意图。依据上文分析的逆过程,在加铺层厚度折算时,需保证加铺层换算后

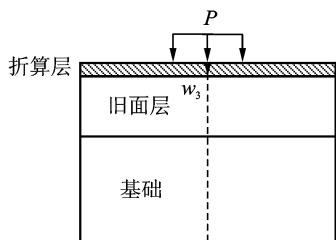


图 5 复合道面结构 C 结构示意图

Fig. 5 Composite structure of pavement C

的复合道面结构 C 中心上表面处弯沉 w_3 等于换算前复合道面结构 B 旧道面中心上表面处弯沉 w_2 ,即保证位移等效。对于经位移等效换算后的复合道面结构 C 与原复合道面结构 B,这两种结构对于原道面结构 A 的承载力,其加强效果是等效的。

基于此,本文依据位移等效原则进行厚度折算,进而计算得到复合道面 PCN 值。在复合道面 PCN 计算时宜将柔性加铺层换算成当量厚度的刚性道面,将复合道面结构中旧水泥混凝土弹性模量作为当量单层板的弹性模量。

基于位移等效计算的一般步骤是:首先建立基于弹性半空间地基的有限元模型,计算其在轮载作用下的竖向位移;然后将有限元模型中的沥青混凝土加铺层材料参数设置为旧水泥混凝土层材料参数,并在有限元模型中施加相同荷载,调整加铺层厚度,使同一位置处的竖向位移相等,此时得到的加铺层厚度就是其折算厚度。

4 基于位移等效的折算厚度计算

4.1 有限元法折算过程实例分析

本文采用 SOLID45 实体单元建立基于弹性半空间理论的复合道面有限元模型,沿飞机滑跑方向,模型尺寸为 15 m,跑道宽度方向,模型尺寸为 45 m,跑道土基厚度为 12 m。跑道材料参数如表 3 所示,折算后的跑道参数如表 4 所示。沥青混凝土加铺层单元尺寸 0.1 m×0.15 m×0.14 m,旧水泥混凝土面层结构单元尺寸为 0.1 m×0.15 m×0.18 m,基础结构单元尺寸为 0.3 m×0.3 m×0.6 m。

表 3 复合道面结构及材料参数

Tab. 3 Structural and material parameters for composite pavement

模型参数	沥青砼加铺层	水泥砼面层	土基
厚度/m	0.14	0.36	12
弹性模量/MPa	1 800	36 000	80
泊松比	0.25	0.15	0.35
密度/(kg·m ⁻³)	2 300	2 400	1 800

表 4 双层道面结构有限元模型参数

Tab. 4 Structural and material parameters for double-deck pavement

模型参数	折算面层	基础
厚度/m	0.36+h _d	12
弹性模量/MPa	36 000	80
泊松比	0.15	0.35
密度/(kg·m ⁻³)	2 400	1 800

注:h_d为沥青混凝土加铺层折算厚度。

模型原点位于旧水泥板顶面角点处, X 轴垂直于飞机滑跑方向, Y 轴沿深度方向, Z 轴平行于飞机滑跑方向。面层四周无约束, 面层以下结构层边界条件设置为: 在平行于飞机滑跑方向的边界上施加 X 方向约束, 使 X 方向位移为零; 在垂直于滑跑方向的边界上施加 X, Y, Z 三个方向约束, 使 X, Y, Z 方向位移为零; 在土基底面上施加 X, Y, Z 三个方向约束, 使 X, Y, Z 方向位移为零。道面结构层间完全连续接触, 接触面上各节点自由度保持相同且协调变形。

计算时先取值进行试算, 直至满足两种有限元模型位移等效为止, 折算过程完成。调整完成后, 两种有限元模型中的旧道面结构层表面竖向位移, 如图 6 所示。

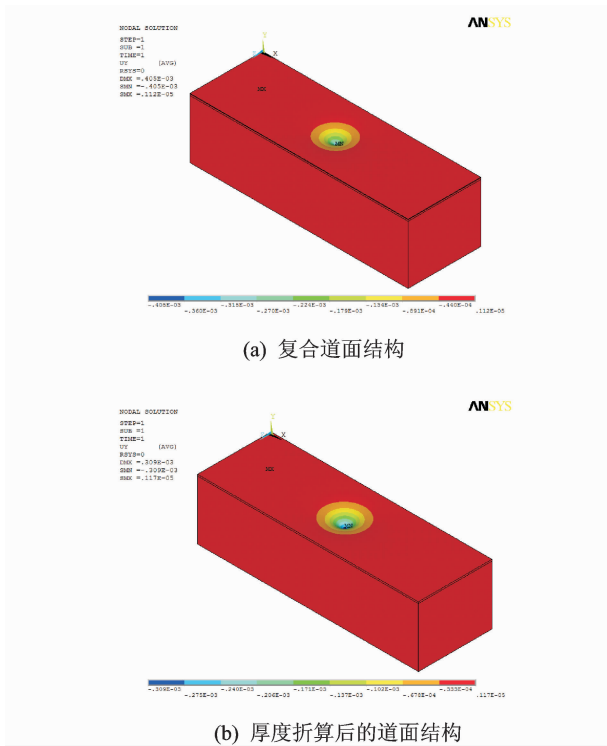


图 6 两种有限元模型位移云图

Fig. 6 Displacement images of two kinds of finite element model

4.2 正交试验分析

对于回归分析而言, 正交试验设计法可以减少有限元程序的运行次数, 得到更具代表性的试验数据。本文在进行正交试验设计时, 以折算厚度为试验指标, 设计了 $L_{25}(5^6)$ 正交表。综合考虑各因素可能的取值范围, 将各因素水平列于表 5。正交试验方案及分析结果如表 6, 7 所示。

极差分析可以简单直观地判断出各个因素对试验指标的影响程度, 从表 7 可以看出: 各因素对

表 5 道面结构参数因素水平表

Tab. 5 Parameter factor level of pavement

因素水平	沥青砼厚度 h_f/cm	沥青砼模量 E_f/MPa	水泥砼模量 E_r/MPa
1	10	1 000	20 000
2	15	1 300	25 000
3	20	1 600	30 000
4	25	1 900	35 000
5	30	2 200	40 000

表 6 正交试验方案及结果

Tab. 6 Orthogonal test scheme and results

序号	沥青砼厚度 h_f/cm	沥青砼模量 MPa	水泥砼模量 E_r/MPa	折算厚度/cm
1	10	1 000	20 000	1.5
2	10	1 300	25 000	1.5
3	10	1 600	30 000	1.5
4	10	1 900	35 000	1.5
5	10	2 200	40 000	1.5
6	15	1 000	25 000	2.4
7	15	1 300	30 000	2.4
9	15	1 900	40 000	2.4
10	15	2 200	20 000	4.2
11	20	1 000	30 000	3.2
12	20	1 300	35 000	3.3
13	20	1 600	40 000	3.3
14	20	1 900	20 000	5.9
15	20	2 200	25 000	5.4
16	25	1 000	35 000	3.9
17	25	1 300	40 000	4.1
18	25	1 600	20 000	7.4
19	25	1 900	25 000	7.0
20	25	2 200	30 000	6.6
21	30	1 000	40 000	4.6
22	30	1 300	20 000	8.7
23	30	1 600	25 000	8.3
24	30	1 900	30 000	8.0
25	30	2 200	35 000	7.7

折算厚度均有不同程度的影响。各因素对折算厚度均有不同程度的影响, 沥青砼厚度对折算厚度结果的影响最显著。按极差值大小排列, 依次是: 沥青砼厚度 > 水泥砼模量 > 沥青砼模量。

表 7 极差分析结果

Tab. 7 Range analysis results

因素	均值 1	均值 2	均值 3	均值 4	均值 5	极差
沥青砼厚度	1.50	2.76	4.22	5.80	7.46	5.96
沥青砼模量	3.12	4.00	4.58	4.96	5.08	1.96
水泥砼模量	5.54	4.92	4.34	3.76	3.18	2.36

4.3 各因素对加铺层厚度折算的影响分析

本文基于位移等效原则提出了加铺层厚度折算方法,着重考虑可能对位移等效产生影响的因素,具体包括:沥青混凝土层厚度与弹性模量、水泥混凝土弹性模量。通过大量的试算工作,分析得到了各因素对加铺层折算厚度的影响规律,为深入研究加铺层厚度折算理论提供了理论依据。

4.3.1 沥青混凝土层弹性模量

保持复合道面结构中旧水泥混凝土板厚度与弹性模量不变,使沥青混凝土加铺层弹性模量由 1 000 MPa 变化至 2 000 MPa,分析沥青混凝土弹性模量对加铺层折算厚度的影响。计算结果见图 7。

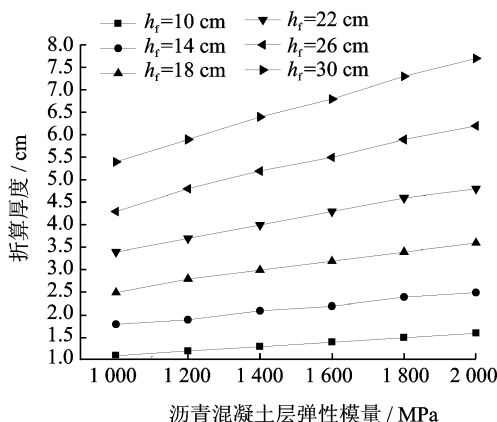


图 7 沥青混凝土加铺层弹性模量对厚度折算的影响曲线

Fig. 7 Influence of elastic modulus of overlay asphalt concrete on thickness reduction

由图 7 可以看出,沥青混凝土加铺层弹性模量与折算厚度关系曲线呈缓慢上升趋势。沥青混凝土加铺层厚度越大,则折算厚度关系曲线的斜率也越大,当 $h_i=30$ cm 时,折算厚度最大增幅达到了 2.3 cm,这表明沥青混凝土加铺层弹性模量对折算厚度的影响较大,沥青混凝土加铺层弹性模量越大,折算厚度也越大。

4.3.2 旧水泥混凝土层弹性模量

保持复合道面结构中旧水泥混凝土板厚度与沥青混凝土加铺层弹性模量不变,使旧水泥混凝土层弹性模量由 20 000 MPa 变化至 40 000 MPa,分析旧水泥混凝土层弹性模量对加铺层折算厚度的影响。计算结果见图 8。

由图 8 可知,旧水泥混凝土层弹性模量与折算厚度关系曲线呈下降趋势。沥青混凝土加铺层厚度越大,则折算厚度关系曲线的斜率也越大,当

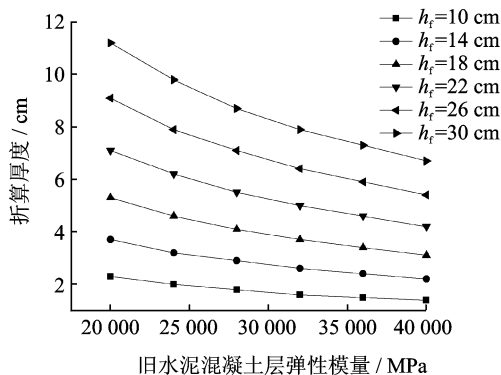


图 8 旧水泥混凝土层弹性模量对厚度折算的影响曲线
Fig. 8 Influence of elastic modulus of old cement concrete on thickness reduction

$h_i=30$ cm 时,折算厚度最大变化幅度达到了 4.1 cm,这表明旧水泥混凝土层弹性模量对折算厚度的影响显著,旧水泥混凝土层弹性模量越大,折算厚度则越小。

4.4 折算厚度回归公式

基于大量有限元模型试算工作,根据正交试验计算结果,对复合道面加铺层折算厚度进行多元线性回归。由于各道面参数变化幅值较大,为消除参数之间存在一定的量值差异,保证数据模型的准确性,需将各参数值取对数处理,待各参数归一化处理后回归得到了折算厚度回归公式

$$h_d = 1.667h_i^{1.4431} E_i^{0.5254} E_r^{-0.7093} \quad (4)$$

式中: h_d 为沥青混凝土加铺层折算厚度, cm; h_i 为沥青混凝土加铺层厚度, cm; E_i 为沥青混凝土加铺层弹性模量, MPa; E_r 为水泥混凝土板弹性, MPa。

该回归公式的相关系数为 0.999 3,均方误差平方根为 0.028 3,这说明加铺层折算厚度回归公式与各结构参数存在很好的相关性。通过该回归公式计算得到的加铺层折算厚度与有限元模型计算结果之间的最大误差控制在 6.6% 以内,因此该公式具有很高的精度,当已知复合道面结构层参数时,便可按照上式快速进行加铺层折算厚度计算。

5 结束语

本文基于位移等效原则,对复合道面 PCN 计算方法进行了探讨,并分析了各因素对折算厚度的影响规律,结果表明:竖向位移可以表征整体结构承载力,按位移等效原则将复合道面简化为一当量厚度的单层刚性板,在复合道面承载力分析中是较为合理的;道面混凝土厚度是影响 PCN 计算结果

的最关键因素。不同厚度折算计算方法得到的折算厚度也不同,会导致计算的 PCN 值差异较大;按各因素对折算厚度的影响程度,大小排列为:沥青砼厚度>水泥砼模量>沥青砼模量,说明沥青砼厚度对厚度折算结果的影响最为显著;本文回归得到的折算厚度计算公式,使用方便,拟合精度高,研究成果可为道面设计、维护与场道结构承载力评价提供参考。

参考文献:

- [1] 李萌,谭悦. 基于机场刚性道面 PCN 评价方法研究[J]. 上海空港, 2012,1(5):13-16.
Li Meng, Tan Yue. PCN appraisal method for airport rigid pavement[J]. Shanghai Airport, 2012, 1(5):13-16.
- [2] 王龙. 机场刚性道面 PCN 计算方法的对比分析研究[J]. 西部交通科技, 2013, 12(77):12:67-71.
Wang Long. Comparative analysis studies on PCN calculation method of rigid airport pavements[J]. Western China Communications Science & Technology, 2013, 12(77):67-71.
- [3] 国际民航组织. 机场道面设计手册 III——道面[S]. 北京:人民交通出版社,1983.
International Civil Aviation Organization. Pavement design manual III—Pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 1983.
- [4] 中国民航建设总公司. 民用机场水泥混凝土道面设计规范(MHJ 5004-2010) [EB/OL]. <http://www.docin.com/p-458328388.html>, 2015-06-20.
China Airport Construction Group Corporation. MHJ 5004-2010 Code for design of cement concrete pavement civil transport airports[EB/OL]. <http://www.docin.com/p-458328388.html>, 2015-06-20.
- [5] 马翔,倪富健,顾兴宇. 复合式机场道面结构设计方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 2(10):36-40.
Ma Xiang, Ni Fujian, Gu Xingyu. Structure design method of composition airfield pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 2(10):36-40.
- [6] 赵忠进,袁捷,周正峰. 机场复合道面 PCN 计算方法分析[J]. 城市道桥与防洪, 2006, 11(6):19-22.
Zhao Zhongjin, Yuan Jie, Zhou Zhengfeng. Analysis on PCN calculation method for airport composite pavement[J]. City Bridges & flood, 2006, 11(6):19-22.
- [7] 中国民航中南机场设计研究院. 民用机场沥青混凝土道面设计规范(MHJ 5010-1999) [EB/OL]. <http://www.docin.com/p-200374365.html>, 2015-06-20.
Civil Aviation South Airport Design And Research Institute. MHJ 5010-1999 Specifications for asphalt concrete pavement design of civil airports[EB/OL]. <http://www.docin.com/p-200374365.html>, 2015-06-20.
- [8] 中国民用航空总局. 民用机场飞行区技术标准(MHJ 5001-2013) [EB/OL]. <http://www.docin.com/p-734311508.html>, 2015-06-20.
Civil Aviation Administrator of China. MHJ 5001-2013 Technical standards for airfield area of civil airports [EB/OL]. <http://www.docin.com/p-734311508.html>, 2015-06-20.
- [9] 冷培义. 机场道面设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
Leng Peiyi. Pavement design [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.