

机场道面地基参数的识别与转换

张建霖

张洵安

(厦门大学建筑系, 厦门 361005) (西北工业大学土建系, 西安 710072)

摘要 提出一种机场道面地基参数识别与转换的方法, 基于文克勒地基板理论和弹性半空间理论的计算模型, 应用最小二乘法准则, 通过实测挠度与理论挠度进行拟合来识别地基回弹模量 E_0 和反应模量 K , 并依据实测点挠度相等的方法实现 E_0 和 K 值之间的转换, 实例计算表明所得结果具有较好的精度。

关键词 机场道面, 挠度, 识别, 转换

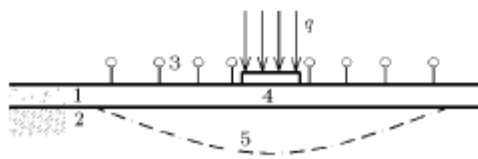
1 引言

当前我国机场道面绝大多数都是混凝土道面, 它与土基之间用砂石等材料铺设较厚的基层, 机轮荷载通过混凝土道面传递给基层, 并经基层进一步扩散给土基, 由于混凝土道面刚度大, 整体性强, 在机轮荷载作用下变形很小, 整个承力结构基本上处于弹性状态, 加上道面板的厚度远小于它的平面尺寸, 所以道面板可按弹性小挠度薄板理论进行计算。

在新机场设计时, 可以先在实验室里对混凝土、基层和土基进行实验, 确定它们的力学性能, 但这些数据用在整体结构上是否能真实地反应实际情况, 还需要进一步地证实, 而对老机场, 如果不做破坏性实验, 这些力学性能就难以确定^[1,2]。一般混凝土道面板的力学参数较易给出, 但作为整体结构的地基力学参数就不易得到^[3]。本文通过现场非破坏实验数据, 应用最小二乘法来识别地基的回弹模量 E_0 和反应模量 K 。由于回弹模量 E_0 和反应模量 K 是从不同侧面揭示机场道面的地基综合参数, 它们之间必存在一定的联系, 但从理论上要寻找二者之间的关系困难较大, 一些学者应用道面板中实测点应力相等的原则进行二者之间的转换^[4], 但由于理论背景的不同, 加上实际工程中应力又难于实测到, 故而产生较大的误差, 本文根据在实测点挠度相等的方法来实现 E_0 和 K 值之间的相互转换, 通过某一机场的实测数据进行计算, 得到令人满意的结果。

2 基本理论

图 1 为机场道面板静力分析模型, 根据弹性地基板理论^[4,5], 对于圆形分布荷载, 其弹性曲面微分方程可写成极



1—道面板 2—地基 3—位移传感器
4—承载钢板 5—挠度曲线

图 1 机场道面板静力分析模型

坐标形式如下

$$D\nabla^2\nabla^2W(r) = q - p \quad (1)$$

其中, q 为圆形单位面积上压力, p 为地基反力, r 为计算点到加载中心的距离, ∇^2 为拉普拉斯算子,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (2)$$

由文克勒地基板理论, 式 (1) 的道面挠度解为

$$W_A(r) = \frac{qR}{Kl} \int_0^\infty \frac{J_0(r/l)J_1(R/l)}{1+t^4} dt \quad (3)$$

而由弹性半空间地基板理论, 则其解为

$$W_B(r) = \frac{2(1-\mu_0^2)Q}{\pi RE_0} \int_0^\infty \frac{J_0(art)J_1(aRt)}{t(1+t^3)} dt \quad (4)$$

其中, K, E_0, μ_0 分别为地基反应模量、回弹模量、波松比, R 为荷载圆半径, Q 为圆形均布荷载合力, t 为积分参数, l 为道面板的相对刚度系数, a 为道面板的弹性特征系数

$$l = \sqrt[4]{\frac{D}{K}} = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)K}} \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{h} \sqrt[3]{\frac{6E_0(1-\mu^2)}{E(1-\mu_0^2)}} \quad (6)$$

其中, E, μ, h 分别为道面板弹性模量、波松比、厚度, J_0, J_1 分别为第一类零阶、一阶贝塞尔函数。

式 (3), 式 (4) 分别为两种理论模型下的计算公式, 当 K 值或 E_0 值给定, 即可通过数值积分得到道面板的理论挠度值, 反之, 若通过现场实验得到道面板上各测点的挠度值, 则可由这些实测点的挠度值与理论挠度值进行拟合, 采用最小二乘法, 建立两种挠度值之间的目标函数分别为

$$\delta(K) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_A(r_i) - W_i)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\delta(E_0) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_B(r_i) - W_i)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

式中 n 为测点数, W_i 为第 i 点的实测挠度值。

逐一调整式 (7), 式 (8) 中的参数 K 及 E_0 值, 使目标函数 $\delta(K)$ 及 $\delta(E_0)$ 达到最小值, 此时的 K 和 E_0 值即为要识别的地基参数。

令 $W_A(r) = W_B(r)$, 并有 $Q = q \cdot \pi R^2$, 则有

$$\frac{1}{Kl} A = \frac{2(1-\mu_0^2)}{E_0} B \quad (9)$$

式中

$$A = \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{r}{l}t\right)J_1\left(\frac{R}{l}t\right)}{1+t^4} dt \quad (10)$$

$$B = \int_0^\infty \frac{J_0(art)J_1(aRt)}{t(1+t^3)} dt \quad (11)$$

由于 l 中含有参数 K ， a 中含有参数 E_0 ，要得到参数 E_0 和 K 值之间的相互关系，除了数值积分外，还必须应用迭代法求之。

由 E_0 转换为 K 可由式 (9) 得到

$$K = \frac{A}{2(1-\mu_0^2)Bl} E_0 \quad (12)$$

迭代时须先赋予初值，然后根据给定的 μ_0 ， E_0 分别计算 a, l, A, B 及 K 值，再判断所算 K 值的精度，若精度不满足，重复迭代步骤，一直到收敛为止。对于实际机场道面数据，通常情况下皆会收敛到较佳的结果。

类似地，也可以得到由 K 转换为 E_0 的计算，其迭代过程与由 E_0 转换为 K 相同。值得注意的是在计算参数 A 和 B 时，无限积分的积分限及积分精度要控制在误差的范围内。

3 实例计算

以北京沙河机场为例，机场道面为混凝土道面，混凝土的弹性模量 $E = 3.5 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ ，波松比 $\mu = 0.15$ ，厚度 $h = 18 \text{cm}$ ，地基的波松比 $\mu_0 = 0.35$ 。在刚硬圆盘上加荷载，圆盘半径 $R = 20 \text{cm}$ 。在不同的分布荷载作用下，测出距加载中心不同距离道面的静挠度如表 1 所示。用本文所述方法，识别出的地基参数，如表 2 所示。

表 1 实测道面表面挠度值 (cm)

$q/\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$	r			
	0	50	100	150
3	0.0116	0.0102	0.0041	0.0020
5	0.0201	0.0161	0.0076	0.0034
7	0.0296	0.0229	0.0119	0.0053
9	0.0399	0.0309	0.0175	0.0095
11	0.0500	0.0374	0.0205	0.0103

表 2 地基回弹模量 E_0 与反应模量 K 的识别结果

$q/\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$	$E_0/\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$	$K/\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$
3	2187	8.76
5	2161	8.61
7	2033	7.96
9	1843	7.08
11	1859	7.13

为了检查识别出的地基参数 E_0 和 K 的精度，用识别出来的结果反算挠度，并与实测结果对比计算其误差目标值 $\delta(K)$ 及 $\delta(E_0)$ ，如表 3 所示。

由表 3 可知，所识别的 E_0 和 K 值具有一定的精度，相比之下，各级荷载工况下 K 值的误差目标值显得小一些。

图 2 为当 $q=9\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时实测挠度值与识别出的地基参数进行反算所得的理论挠度值进行比较的挠度曲线。

表 3 道面挠度反算结果及误差 (cm)

q	E_0, K	r				$\delta(E_0, K)$
		0	50	100	150	
3	$E_0=2187$	0.0109	0.0086	0.0058	0.0038	0.0015
	$K=8.76$	0.0117	0.0090	0.0052	0.0026	0.0009
5	$E_0=2161$	0.0183	0.0145	0.0097	0.0064	0.0022
	$K=8.61$	0.0196	0.0151	0.0089	0.0045	0.0010
7	$E_0=2033$	0.0267	0.0213	0.0144	0.0096	0.0030
	$K=7.96$	0.0286	0.0222	0.0132	0.0068	0.0017
9	$E_0=1843$	0.0367	0.0296	0.0203	0.0137	0.0031
	$K=7.08$	0.0391	0.0306	0.0187	0.0099	0.0008
11	$E_0=1859$	0.0446	0.0359	0.0246	0.0166	0.0047
	$K=1.73$	0.0476	0.0373	0.0227	0.0120	0.0018

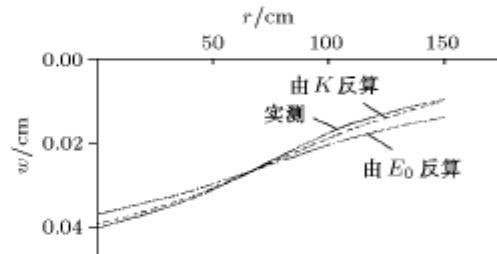


图 2 机场道面实测挠度与反算挠度曲线比较

由于采用最小二乘法，所以理论反算值可能在一端大于实测值，而在另一端小于实测值。由图 2 可以看出，用识别出的 K 计算的挠度比用识别出的 E_0 计算的挠度更接近于实测值。可能是由于文克勒地基模型对地基刚度估计偏小，而薄板理论对混凝土道面板的刚度估计偏大。综合两种效果，有一定的互相补偿作用。

从表 2 看出，同一个机场道面，在不同分布荷载作用下，识别出的模量值有一定的差别。这主要是由于地基参与程度不同所致。实际应用时，可以按实际承载情况进行选择，也可以取一定范围的识别结果进行平均。

下面取 $q = 9 \text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时，由识别出的 E_0 转换为 K ，结果如表 4 所示；再由得到的 K 转换为 E_0 ，结果如表 5 所示。从表中看出，转换的结果具有较高的精度，可以满足工程的要求。

表 4 由 $E_0 = 1843 \text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 转换为 $K/\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$

r/cm	0	50	100	平均	误差 (%)
k	7.98	7.48	6.35	7.27	2.7

表 5 由 $K = 7.27 \text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$ 再转换为 $E_0/\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$

r/cm	0	50	100	平均	误差 (%)
E_0	1719	1801	2063	1861	1

4 结论

(1) 用本文提出的方法, 由识别出来的模量反算得到的理论挠度与实测挠度比较吻合, 尤其是在距离 50 cm 以内, 实测值和计算值非常接近, 而在 100 cm 以外时, 误差略大一些。但是, 一般在校核道面强度时, 只用靠近加载中心处的挠度值。

(2) 由 E_0 转换成的 K 值, 同识别的 K 值基本相同, 误差为 2.7%。而由 K 转换成的 E_0 值, 就更加接近识别出的数值了, 误差仅有 1%。证明了该方法的可靠性。由于该方法简单易行, 计算量也较小, 很适合工程应用。

(3) E_0 和 K 对于同一机场道面会出现多个数值, 这是由于它与荷载大小、环境变化等因素有关。建议取实际机载情况下的识别结果。至于由同一 E_0 在不同 r 处, 转换得到的 K 值也不相同, 是由于两种理论模型不同而引起的。取其平均值是合理的。

参考文献

- 1 万希存. 机场道面承载力的评定方法与提高途径. 民航经济与技术, 1997, 7(8): 21~23 (Wan Xicun. Methods of evaluating and improving the load-bearing capacity of airport pavement. *Economy and Technology Civil Aviation*, 1997, 7(8): 21~23 (in Chinese))
- 2 隋玉东, 牛开民. 刚性道面结构强度的检测与评价. 民航经济与技术, 1999, 9(7): 36~37 (Sui Yudong, Niu Kaimin. The test and evaluation of the rigid pavement strength. *Economy and Technology Civil Aviation*, 1999, 9(7): 36~37 (in Chinese))
- 3 凌建明, 郑悦峰, 金维明. 机场道面评价体系研究. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 29~33 (Ling Jianmin, Zheng Yuefeng, Jin Weiming. On airport pavement evaluation system. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2001, 1(1): 29~33 (in Chinese))
- 4 余定选, 冷培义, 于龙, 翁兴中. 机场道面强度的通报方法. 北京: 中国铁道出版社, 1991 (Yu Dingxuan, Leng Peiyi, Yu Long, Wen Xingzhong. The Evaluation Method of Airport Pavement Strength. Beijing: China Railway Press, 1991 (in Chinese))

- 5 朱照宏. 路面力学计算. 北京: 人民交通出版社, 1985 (Zhu Zhao-hong. Pavement Mechanics Calculation. Beijing: People's Communications Press, 1985 (in Chinese))

IDENTIFICATION AND TRANSFORMATION OF THE FOUNDATION PARAMETERS FOR AIRPORT PAVEMENT

ZHANG Jianlin

(Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

ZHANG Xun'an

(Department of Civil Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract In this paper, an identification and transformation method for foundation parameters of airport pavement is proposed. Based on the theory of Winkler foundation plate and the theory of elastic semi-space model, the theoretical deflections of the airport pavement are derived. The least square method is used to identify the resilience modulus of foundation E_0 and the response modulus K by fitting the testing and theoretical deflections. The transformations from E_0 to K and from K to E_0 are also realized by using the equal deflection values of testing points. A testing deflection of an airport pavement is used as a numerical example. Table 2 shows the identification results of K and E_0 . Table 3 and Fig.2 show the high accuracy of the results by comparing the testing deflection with the identification deflection. Table 4 and Table 5 show that we may easily transform E_0 to K and then transform K to E_0 of the airport pavement.

Key words airport pavement, deflection, identification, transformation

用三维电镜图像数据测试空穴形状

买买提明·艾尼 尼加提·玉素甫 艾尔肯·核木都拉 菊池 正纪

(新疆大学机械工程学院, 乌鲁木齐 830008)

(日本东京理科大学, 日本东京)

摘要 用碳化硅强化金属基复合材料制作的不同切口的拉伸试样进行了拉伸试验并使用三维电子扫描显微镜对拉伸延性断面进行了微小空穴的三维形状测试。分析了在不同应力三维度下空穴聚合时空穴几何形状的变化。为准确模拟金属基复合材料在多向外载荷下的损伤过程, 判断延性损伤机理提

供了科学依据。

关键词 应力三维度, 空穴形状, 延性损伤

1 引言

延性材料的实际构造含有基体, 各种不同程度的夹杂,