

文章编号: 1005-0523(2017)02-0001-09

基于粗糙集的传力杆接缝水泥道面力学响应影响因素分析

袁捷, 王宇翔

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:为明晰多因素对传力杆接缝形式的水泥道面结构响应的影响以及优化传力杆系统的设置,将传力杆尺寸、布设间距、空间偏移量、混凝土对传力杆的支撑、约束模量等因子的水平以及通过有限元方法计算出的道面板板底应力、接缝应力传荷系数(LTE_g)、传力杆内力等结果的水平离散化,利用粗糙集算法,对影响道面结构响应的诸多因子水平进行约简,计算条件属性对决策属性的重要度以及决策属性对于条件属性值的隶属度。结果表明:传力杆水平偏角对道面板板底最大拉应力影响最为显著,应力水平随偏角增大而提高;应力传荷系数对传力杆竖向偏移最为敏感,且越接近板底,接缝的传荷能力越大;传力杆间距对所有力学响应均有较大影响,过大的间距会导致道面性能不良。

关键词:道路工程;因素分析;粗糙集;传力杆接缝;力学响应

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.02.001

我国建成的民用机场数量已突破 200 个,其中以水泥混凝土道面(以下简称水泥道面)作为道面结构形式的超过 90%。由于水泥混凝土材料随环境不同具有胀缩性,温度及湿度的变化以及在结构中的分布不均会导致道面结构中产生收缩或翘曲应力,通常采用纵向和横向接缝将道面分割为形状规则的混凝土板。接缝是水泥道面的薄弱部位,在环境荷载和飞机荷载的反复作用下,接缝的传荷能力会逐渐丧失,会加速接缝破坏及道面破损。国内外研究表明,在接缝处设置传力杆可以有效提高接缝性能和道面整体性能,体现在传力杆的设置能有效减小面板最大主应力^[1]、防止板底脱空^[2]、减小弯沉差^[3]、缓解道面板脱空和错台的发展^[4]速度等。Zollinger 等^[5]建立了接缝传荷能力与路面结构之间的相关关系;张军^[6]提出重载交通情况下采用缩缝传力杆是非常必要的;锁利军^[7]通过建立三维有限元模型得到当接缝设传力杆时,混凝土面层计算点荷载应力和弯沉差会明显降低。

在我国目前的水泥道面设计规范中,主要根据工程经验设计传力杆和接缝。传力杆的尺寸大小、布置间距主要依据板厚来选取,这种设计方法的合理性有待商榷。Friberg^[8]应用 Timoshenko 的公式做深入分析,提出减小传力杆长度、增加直径和减小间距的建议。实际工程中,由于施工工艺、施工水平的限制,通常传力杆并不能完全定位于预先设定好的位置,即传力杆在道面板中存在竖向偏位和角度偏转,会影响道面结构的力学响应。张艳聪^[9]通过建立 Winkler 地基上的双层结构模型,进行了基于参数调整的传力杆设置优化研究。高新文^[10]计算了传力杆位置偏差对接缝传荷能力的影响,并通过三元非线性回归构建了接缝传荷能力预估模型。

本文在前人研究的基础上进一步深入分析,利用有限元分析计算方法和数理统计中的粗糙集算法理论,综合分析了传力杆不同尺寸、间距(根数)、偏位情况等对道面结构的力学影响,为完善我国水泥道面设计规范及工程实际应用提供参考依据。

收稿日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(51678444)

作者简介: 袁捷(1971—),男,副教授,博士生导师,工学博士;主要研究方向为道路与机场工程。

通讯作者: 王宇翔(1991—),男,硕士,主要研究方向为道路与机场工程。

1 模型建立

1.1 有限元模型

本文建立三维、线弹性、各向同性的双层道面模型,计算模型如图 1 所示。由上到下分别为面层和基层,采用弹性模量 E 和泊松比 μ 表征并用 20 节点二次固体单元进行离散。地基采用 Winkler 地基模型,采用地基反应模量 k 表征并用 8 节点二次平面单元进行离散。面层为两块板结构,板之间用传力杆相连,偏安全考虑,忽略假缝的集料嵌锁力,故传荷仅由传力杆完成。荷载选取大型机型 B777-300ER 的三轴双轮主起落架荷载,加载位置为对应该机型的横缝板边中部临界荷位。最后对面层施加温度梯度力,即完成了结构的荷载施加。本文重点研究在起落架荷载作用下,不同传力杆尺寸、间距、偏位情况对道面结构力学响应的影响,故假定传力杆与混凝土紧密贴合且工作状态良好。

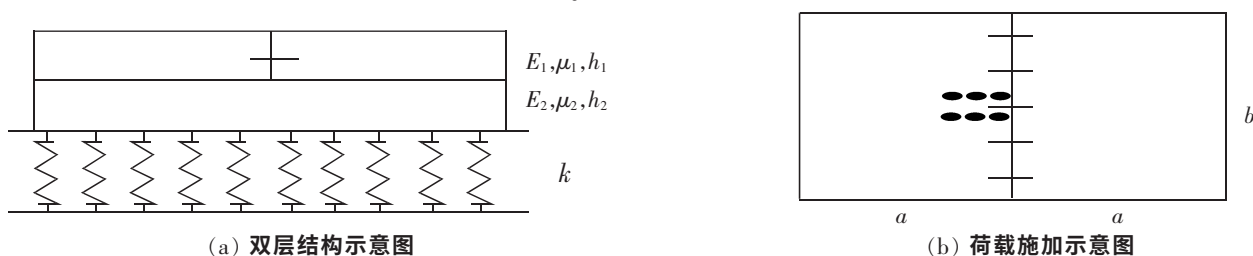


图 1 结构计算模型

Fig.1 Structure calculation model

1.2 计算基本参数

选取由传力杆连接的相邻两块混凝土道面板体系为分析对象,道面由水泥混凝土面层和水泥稳定碎石基层构成,考虑到 B777-300ER 属于 E 类飞机,参考《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MHJ5004-2010)^[11](以下简称《规范》)中 E 类飞行区的规定,结合工程经验确定模型基本参数,如表 1 所示。

表 1 道面模型基本参数
Tab.1 Basic parameters of pavement model

结构层	长 a/mm	宽 b/mm	厚 h/mm	模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$
面层	5 000	5 000	400	36 000	0.15	2 400
基层	5 000	5 000	400	1 500	0.25	2 400

模型结构其他基本参数确定:土基反应模量 k 为 $60 \text{ MN}/\text{m}^3$;传力杆模量 E 为 200 GPa ;为了模拟道面长期运营后接缝处集料嵌锁作用的衰退以及对结构设计偏安全的考虑,接缝宽度设为 1 mm ,不计集料嵌锁剪切刚度;温度荷载取为长期观测的浦东国际机场白天道面温度梯度实测平均值 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{cm}$ 。

飞机荷载基本参数确定:考虑到有限元建模中施加荷载和划分网格的不便之处,将荷载作用的实际区域换算成矩形荷载作用区域。荷载参数如表 2 所示。

表 2 飞机主起落架荷载参数
Tab.2 Load parameters of aircraft's main gear

机型	主起落架单轮荷载/ kN	轮印长度/ mm	轮印宽度/ mm	横向轮间距/ mm	纵向轮间距/ mm
B777-300ER	272.73	510	350	1 440	1 450

1.3 模型网格划分

在有限元分析中,当模型尺寸、材料、荷载情况等确定后,影响计算结果精度的因素主要取决于网格划分情况。本文主要考查面层响应,故采用较粗的网格对基层进行划分,厚度方向划分成一层,平面划分划分同面层。针对面层结构,通过采用不同密度网格,对模型进行了板底最大应力收敛性分析。选择的面层网格

情况及分析结果如表 3 所示。

表 3 网格收敛性分析结果
Tab.3 Analysis result of mesh convergence

编号	网格密度	划分个数(长×宽×厚)	无量纲化板底最大拉应力	计算时间/s
1	粗	8×8×2	0.902	20.45
2	较粗	12×12×4	0.965	28.37
3	正常	16×16×8	0.987	65.30
4	细	20×20×12	0.991	133.11
5	很细	24×24×16	0.997	258.05
6	非常细	28×28×20	1.000	463.94

分析结果可以看出,随着网格密度的增加,位于机轮下面的面层板底最大拉应力逐渐收敛于某一固定解,说明模型的数值模拟结果具有足够精度。鉴于计算代价不大,本文面层模型采用非常细的网格密度进行分析,可以得到合理结果。

1.4 计算工况选择

综合考虑传力杆尺寸、间距、偏位情况对道面板受力的影响,选取了传力杆直径、长度、间距、竖向偏移、水平偏角、竖向偏角、混凝土对传力杆的支撑模量、约束模量等 8 个因子进行分析,每个因子均设置 5 种水平。以尽量符合实际工程的参数取值要求为原则,选取各因子的水平值。依据《规范》中对 400 mm 厚水泥混凝土板层所对应传力杆参数的选取要求,围绕各推荐值设计传力杆直径、长度、间距的因子水平值;依据国内机场现场调研的结果,选取传力杆竖向偏移、水平及竖向偏角的因子水平值;依据室内试验对混凝土与传力杆相互作用及力学参数的研究,设置混凝土对传力杆的支撑及约束模量的因子水平值。8 个因子分别编号为 C1 至 C8,各因子的 5 个水平的离散值分别为 1 至 5,详见表 4。

表 4 因子水平及对应离散值
Tab.4 Factor level and discrete value

因子及编号	水平				
C1——传力杆直径/mm	32	34	36	38	40
C2——传力杆长度/mm	460	480	500	520	540
C3——传力杆间距/mm	250	300	350	400	450
C4——传力杆竖向偏移/mm	-20	-10	0	10	20
C5——传力杆水平偏角/(°)	0	5	10	15	20
C6——传力杆竖向偏角/(°)	0	5	10	15	20
C7——混凝土支撑模量/MPa	1 000	4 000	7 000	10 000	13 000
C8——混凝土约束模量/MPa	1 000	4 000	7 000	10 000	13 000
水平离散值	1	2	3	4	5

由于因子数和因子水平数较多,总工况数达 390 625 个之多,试图对所有工况分别进行模拟将消耗大量的精力和时间。为进行科学有效的模拟计算,使用 Java 语句编写了生成随机工况的代码,并保证各因子各水平不会遗漏且等概率出现。本文随机生成了 50 种工况,各工况都用一个 8 位数表示,例如:41235243。

8 个数位由左至右分别代表 $C1$ 至 $C8$ 因子。50 个随机工况和对应结构力学响应在后文中一并呈现。

2 粗糙集理论

粗糙集理论是由波兰数学家 Z Pawlak 在 1982 年提出的一种处理模糊问题的新型数学工具^[12], 其主要思想就是在保持分类能力不变的前提下, 通过知识约简, 导出问题的决策或分类规则。对于复杂的问题, 采用粗糙集理论并不需要较多的先验知识, 只要依据决策表本身的数据信息分析即可。它对不确定和不完整信息, 能给出比较满意的结果。

2.1 知识与知识表达

设论域 U 为一非空有限集合, 对任意子集 $X \subseteq U$, 称为 U 中的一个概念或范畴。 U 中的任何概念族称为关于 U 的知识。

一个知识表达系统 S 可以表示为 $S=(U, A, V, f)$ 。 $U=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为研究对象的集合; $A=C \cup D$, C 和 D 分别为研究对象的条件属性和决策属性集合, 且有 $C \cap D = \emptyset$; V 是属性集的集合; $f: U \times A \rightarrow V$ 是一个信息函数, 他给每个研究对象的每个属性赋予一个信息值。

2.2 知识约简

知识约简是粗糙集理论的核心内容。知识库中知识(属性)并不是同等重要的, 甚至其中某些知识是冗余的。所谓知识约简, 就是在保持知识库分类能力不变的条件下, 删除其中不相关或不重要的知识。

若非空集合 $P \subseteq R$, R 为一属性集合, 则 P 中所有等价关系的交集也是一个等价关系, 称为 P 上的不可区分关系, 记为 $IND(P)$ 。设 R 是一个等价关系族, $r \in R$ 。如果 $IND(R) = IND(R - \{r\})$, 则称 r 在 R 中是可被约去的知识; 如果 $P = R - \{r\}$ 是独立的, 则 P 是 R 的一个约简。

2.3 属性重要度

不同的条件属性可能具有不同的重要性, 有些对决策属性至关重要, 而有些则冗余。为了得出某些属性的重要性, 一般方法是从表中去掉该属性, 再考察分类的前后变化情况。若去掉该属性使得相应分类变化较大, 则说明该属性重要度高; 反之, 该属性重要度低。

粗糙集理论中对条件属性重要度的判别方法主要有属性依赖度判别、信息熵判别以及区分矩阵中属性频率判别。通过遗传算法获得矩阵形式的约简集, 进而可以完成属性重要度计算。某条件属性 C_i 对于某决策属性 D_j 的重要度 $Sig(C_i)$ 可由下式计算:

$$Sig(C_i) = \sum_{m=1}^n \frac{k}{Card(C_m)} \quad (1)$$

式中: C_m 为由 D_j 确定的条件属性约简集矩阵; n 为矩阵个数; $Card(C_m)$ 表示矩阵 C_m 包含所有属性的个数, 即属性长度; 当 C_i 在矩阵 C_m 出现, k 取 1; 否则, k 取 0。

2.4 属性隶属度

属性约简后, 会生成诸多条件规则, 再次运用遗传算法提取出有用的条件规则, 形成规则集, 进而完成属性值隶属度计算。隶属度表示决策属性值依赖于条件属性值的程度, 属性值的隶属度 $Mem(C_{ij})$ 定义为

$$Mem(C_{i(n)} - C_{j(m)}) = \frac{Mum(C_{i(n)} \cap D_{j(m)})}{Mum(C_{i(n)})} \quad (2)$$

式中: $Mum(C_{i(n)})$ 表示所有包含条件属性为 i , 属性值为 n 的规则集个数; $Mum(C_{i(n)} \cap D_{j(m)})$ 表示所有同时包含条件属性为 i , 属性值为 n 及决策属性为 j , 属性值为 m 的规则集个数。

3 力学响应计算与分析

3.1 力学响应计算

水泥混凝土板的力学强度和弹性模量较高, 水泥道面的承载力大部分由面板提供, 道面板在轮载作用下产生的弯拉应力成为面层厚度设计的主要控制内容, 故道面板的板底拉应力为力学响应的主要考查因

素。本文提取了各工况下受荷板和非受荷板的板底最大拉应力。

在接缝内设置传力杆可以提高相邻板间的荷载传递能力,避免在道面板边缘产生过大的应力集中和挠度。本文采用接缝应力传荷系数 LTE_{σ} 表征接缝的传荷能力(式 3),故提取了受荷板和非受荷板板边缘最大应力。

$$LTE_{\sigma} = \frac{\sigma_U}{\sigma_L} \times 100\% \quad (3)$$

式中: σ_L 为受荷板边缘的最大应力; σ_U 为未受荷板边缘的最大应力。

传力杆具有较大的刚度,而施工后传力杆与混凝土板在接缝处一般会产生微小的位移差,因此,在接缝两侧具有传递弯矩和剪切两种荷载的作用。本文逐个考查每根传力杆的内力,提取了各工况条件下传力杆弯矩峰值及剪力峰值。

道面板板底最大拉应力、板边最大应力及传力杆内力峰值计算结果如表 5 所示。由于工况数量较多,限于篇幅,表格里省略大部分计算结果。

表 5 道面结构力学响应结果

Tab.5 Mechanical response results of pavement structure

工况 编号	受荷板板底 最大拉应力 /MPa	非受荷板板 底最大拉应 力/MPa	受荷板板 边最大应 力/MPa	非受荷板板 边最大应 力/MPa	传力杆弯 矩峰值 /(N·m)	传力杆剪 力峰值 /kN
1	3.33	2.81	2.56	2.41	88.58	1.17
2	3.46	3.45	2.98	2.81	145.05	1.73
3	3.39	2.72	2.49	2.39	189.21	2.06
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	3.20	2.34	2.32	2.21	129.43	2.20

3.2 基于粗糙集算法的结果分析

鉴于计算量巨大,因此计算结果的分析过程采用粗糙集算法软件 RESE 进行。8 个条件属性 $C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8$ 分别代表传力杆直径、长度、间距、竖向偏移、水平偏角、竖向偏角、混凝土对传力杆的支撑模量、约束模量等 8 个因子;5 个决策属性 $D1, D2, D3, D4, D5$ 分别代表受荷板板底最大拉应力、非受荷板板底最大拉应力、接缝应力传荷系数、传力杆弯矩峰值、传力杆剪力峰值等 5 个计算考查对象。

条件属性和决策属性均用 1 至 5 的离散值进行离散,前文已阐述条件属性即模型因子的离散值的取值情况,决策属性的离散值取值根据对应有限元计算结果等分成 5 个数据段进行。把条件属性和决策属性汇总,生成了如表 6 所示的道面结构力学影响因素决策表。

表 6 影响因素决策表

Tab.6 Table of decision-making of influencing factor

编 号	条件属性								决策属性				
	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$	$C5$	$C6$	$C7$	$C8$	$D1$	$D2$	$D3$	$D4$	$D5$
1	2	1	2	4	4	5	1	2	3	1	4	1	1
2	2	1	5	1	3	5	1	2	4	2	4	2	1
3	1	5	5	3	4	3	1	2	3	2	4	3	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	1	4	3	2	5	2	4	1	1	1	4	2	1

3.2.1 影响因素的重要度分析

按照 5 个决策属性,通过遗传算法分别进行知识约简,获得对应的约简集。每集约简集的稳定系数及正域均为 1,而约简集的条件属性及属性长度不完全相同。

以 $D1$ (受荷板板底是最大拉应力)为例,系统生成了 26 组矩阵形式的约简集,8 个条件属性按所有矩阵中的出现频数从大到小排列,依次为: $C5 > C3 > C8 > C7 > C2 > C6 > C1 > C4$,频数分别为:19,17,16,15,13,12,11,10。由属性 C 的重要度公式(式 1),计算得到 8 个条件属性对于决策属性 $D1$ 的重要度指数如下:

$$\text{Sig}(C1) = (\frac{1}{4} \times 1) \times 9 + (\frac{1}{5} \times 1) \times 2 = 2.65$$

$$\text{Sig}(C2) = (\frac{1}{4} \times 1) \times 7 + (\frac{1}{5} \times 1) \times 6 = 2.95$$

$$\text{Sig}(C3) = (\frac{1}{4} \times 1) \times 10 + (\frac{1}{5} \times 1) \times 7 = 3.90$$

$$\text{Sig}(C4) = (\frac{1}{4} \times 1) \times 5 + (\frac{1}{5} \times 1) \times 5 = 2.25$$

$$\text{Sig}(C5) = (\frac{1}{4} \times 1) \times 16 + (\frac{1}{5} \times 1) \times 3 = 4.60$$

$$\text{Sig}(C6) = (\frac{1}{4} \times 1) \times 5 + (\frac{1}{5} \times 1) \times 7 = 2.65$$

$$\text{Sig}(C7) = (\frac{1}{4} \times 1) \times 10 + (\frac{1}{5} \times 1) \times 5 = 3.50$$

$$\text{Sig}(C8) = (\frac{1}{4} \times 1) \times 10 + (\frac{1}{5} \times 1) \times 6 = 3.70$$

条件属性对于 $D1$ 的重要度指数经过归一化后分别为:0.101,0.112,0.149,0.086,0.176,0.101,0.134,0.141。按同样方法,对于 $D2$ 的重要性指数分别为:0.104,0.107,0.145,0.141,0.159,0.073,0.133,0.138;对于 $D3$ 的重要性指数分别为:0.102,0.093,0.172,0.188,0.063,0.161,0.163,0.058;对于 $D4$ 的重要性指数分别为:0.051,0.168,0.157,0.129,0.163,0.131,0.158,0.043;对于 $D5$ 的重要性指数分别为:0.188,0.047,0.178,0.054,0.153,0.166,0.175,0.039。 $D1, D2$ 为水泥板板底应力水平,两者归为一类; $D3$ 为接缝传荷系数,单独为一类; $D4, D5$ 为传力杆内力情况,两者归为一类。每种条件属性对于三类决策属性的重要度分别如图 2、图 3、图 4 所示。

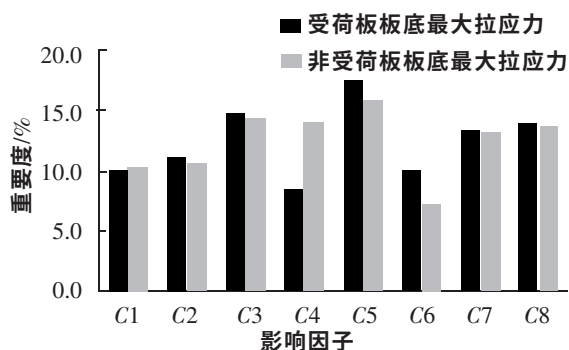


图2 Factor importance to tensile stress of the slab-bottom

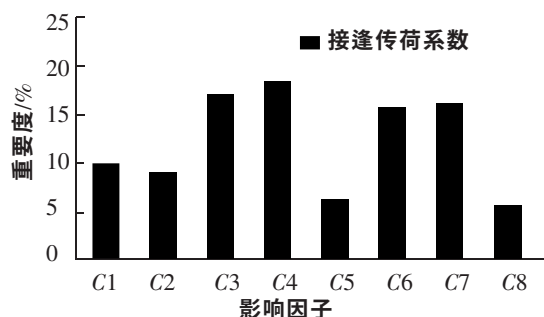


图3 因子对接缝传荷系数重要度

Fig.3 Factor importance to the LTEσ

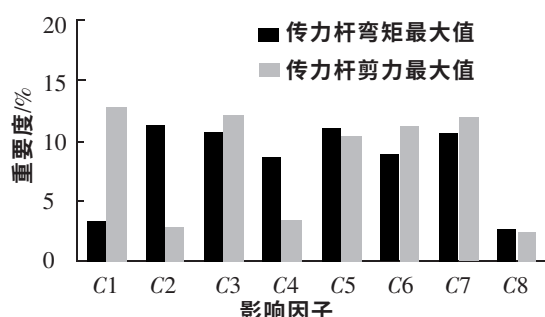


图4 因子对传力杆内力重要度

Fig.4 Factor importance to internal force of dowel bar

由图 2 可知, $C5$ (传力杆水平偏角)对 $D1$ (受荷板板底最大拉应力)和 $D2$ (非受荷板板底最大拉应力)影响最为显著,分别占各自影响因素的 17.6%和 15.9%; $C3$ (传力杆间距)、 $C7$ (混凝土支撑模量)和 $C8$ (混凝土约束模量)对板底拉应力影响次之,且影响程度接近; $C4$ (传力杆竖向偏移)对受荷板板底最大拉应力影响最小,但对非受荷板板底最大拉应力影响显著; $C1$ 、 $C2$ (传力杆尺寸)及 $C6$ (传力杆竖向偏角)对板底最大拉应力影响较其余因素不显著。

由图 3 可知, $C3$ (传力杆间距)、 $C4$ (传力杆竖向偏移)、 $C6$ (传力杆竖向偏角)、 $C7$ (混凝土支撑模量)对 $D3$ (接缝传荷系数)影响均很显著,重要度均大于 16%; $C1$ 、 $C2$ (传力杆尺寸)对传荷系数影响较小; $C5$ (传力

杆水平偏角)、C8(混凝土对传力杆的约束模量)的影响可忽略不计。

由图4可知,传力杆尺寸中,C2(传力杆长度)对D4(传力杆最大弯矩值)影响很显著,C1(传力杆直径)则影响很小;相反,传力杆直径对D5(传力杆最大剪力)影响最为显著,重要度高达18.8%,传力杆长度则影响很小;C3(传力杆间距)、C5(传力杆水平偏角)、C6(传力杆竖向偏角)、C7(混凝土支撑模量)对传力杆弯矩、剪力均有较大影响;C4(传力杆竖向偏移)对弯矩的影响明显大于剪力;C8(混凝土对传力杆的约束模量)对弯矩、剪力影响均同比最小。

3.2.2 影响因素的隶属度分析

在得到的条决策规则的基础上,运用粗糙隶属函数属性值的计算方法(式(2)),可以得出决策表中各决策属性的属性值相对于不同条件属性值的隶属度。

水泥道面在飞机轮载、温湿荷载的反复作用下会出现疲劳破坏,研究者通常希望道面结构的力学响应水平维持在较低水平,这样的疲劳寿命才能大大延长。本文的5个决策属性中,D1,D2,D4,D5(板底拉应力、传力杆内力)在值为1的时候水平最低,故提取决策属性值为1的规则集进行分析;D3(接缝传荷系数)在值为5的时候,接缝传荷能力最佳,故提取决策属性值为5的规则集进行分析。

以D5(传力杆最大剪力)为例,系统生成了1176组规则集。由于数据巨大,运用Java语句编写提取目标属性及目标属性值的代码进行数据统计。对于决策属性规则集,提取决策属性为D5,属性值为1的规则集;对于条件属性规则集,基于前文重要度计算,提取显著影响决策属性的条件属性对应规则集进行分析,故含C1,C5,C6,C7的规则集为分析对象。

$$Num(C1_{(1)} \cap D5_{(1)}) = 82$$

$$Num(C1_{(1)}) = 119$$

$$Mem(C1_{(1)} \rightarrow D5_{(1)}) = 0.689$$

同样的算法计算得到: $Mem(C1_{(2)} \rightarrow D5_{(1)})$ 为0.501; $Mem(C1_{(3)} \rightarrow D5_{(1)})$ 为0.232; $Mem(C1_{(4)} \rightarrow D5_{(1)})$ 为0.126; $Mem(C1_{(5)} \rightarrow D5_{(1)})$ 为0.101。由计算结果可知,条件属性C1属性值为1时,决策属性D5,属性值为1时的隶属度最高,故传力杆的直径越小,传力杆剪力峰值越小。计算决策属性D5,属性值为1对于其余影响显著的条件属性(C5,C6,C7)各属性值的隶属度,经分析可知,传力杆水平偏角越小、竖向偏角越大、混凝土对传力杆支撑模量越大,传力杆剪力峰值越小。

同样方法对决策属性D1,D2,D4在属性值为1,D3在属性值为5时,对应高重要度决策属性的属性值进行隶属度计算。分析可知,决策属性为D1时,传力杆水平偏角越小、间距越小、混凝土支撑模量越大、约束模量越小,受荷板板底最大拉应力越小;决策属性为D2时,传力杆水平偏角越小、间距越小、竖向位置越靠近板顶,非受荷板板底最大拉应力越小;决策属性为D3时,传力杆间距越大、竖向位置越远离板顶、竖向偏角越小、混凝土支撑模量越大,接缝应力传荷系数越大;决策属性为D4时,传力杆长度、间距、水平偏角、混凝土支撑模量均越小时,传力杆弯矩峰值越小。

3.2.3 响应表征量对影响因素的敏感性分析

由于传力杆主要在两相邻板间传递剪力,而传递的弯矩、扭矩很有限,故在敏感性分析时,只取受荷板板底最大拉应力、非受荷板板底最大拉应力、接缝传荷系数、传力杆剪力这4个力学响应表征量。基于前文粗糙集分析,提取对这4个力学响应的重要度排前两位的影响因素,分别进行敏感性分析,涉及到传力杆水平偏角、传力杆间距、传力杆竖向偏移、传力杆直径等4个影响因素。敏感性分析采用单因素分析法进行,因素的水平按前文表4取值,偏角的基准值为0°,其余因素水平的基准值均取为中间值。分析时,改变某一因素的水平值,而其他因素均取基准值。

将分析结果汇成四张曲线图,如图5所示。受荷板和非受荷板的板底最大拉应力与传力杆水平偏角、间距成正相关关系,由于传荷能力随偏角和间距的增大而降低,受荷板板底最大拉应力与两个影响因素的关系曲线成上凸状,而非受荷板板底最大拉应力与两个影响因素的关系曲线成下凹状;接缝的应力传荷能力随着传力杆间距的增大近似线性减小,并随着传力杆埋设深度的增加而增加,传荷能力的增加量趋于收敛;

传力杆的剪力峰值随传力杆直径和间距的增加线性增加,直径的影响较间距稍大。

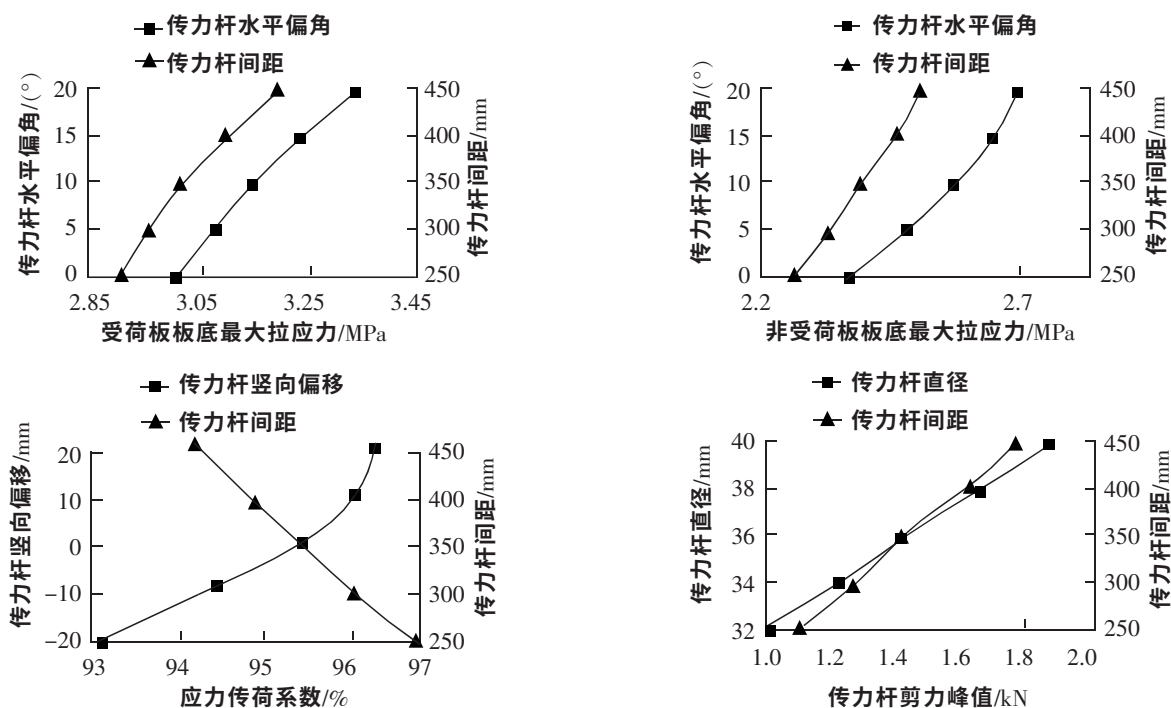


图5 响应表征量与对应主要影响因素的关系

Fig.5 Relationship between response characterization and corresponding major influence factors

4 结论

1) 传力杆水平偏角对道面板板底最大拉应力影响最为显著,应力水平随水平偏角增大而提高;传力杆间距、混凝土对传力杆的支撑、约束模量影响次之,且影响程度接近。

2) 接缝传荷能力可以用应力传荷系数表征,诸多因子中,传力杆竖向偏移对其影响最大,且越接近板底,接缝的传荷能力越大。不同于以板边挠度比表征传荷能力时,传力杆在面板中部传荷能力最大的情况。故综合考虑接缝传荷能力,传力杆在面板中部偏下存在最佳位置。传力杆间距、竖向偏角以及混凝土对传力杆的支撑模量对接缝传荷能力的影响也较可观。

3) 传力杆尺寸对传力杆内力峰值影响最为显著,其中,弯矩、剪力峰值均随传力杆长度增大而增大。传力杆间距、偏角均对其内力值有较大影响。传力杆竖向偏移对弯矩的影响明显大于剪力。

4) 传力杆接缝形式的水泥道面涉及诸多参数,如何合理地综合考虑这些参数进行结构设计还没有统一的说法。本文采用的方法可以避免过多因素对结构响应影响判断的干扰,为机场水泥道面传力杆接缝的力学特性研究提供了参考。

参考文献:

- [1] GUO H, SHERWOOD J A, SNYDER M B. Component dowel-bar model for load transfer systems in PCC pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 1995, 121(3): 289-298.
- [2] 石春香, 杨群, 郭忠印. 公路隧道水泥路面板底脱空有限元分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(11): 6-10.
- [3] CROVETTI J A. Design and evaluation of jointed concrete pavement systems incorporating open-graded permeable bases[D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994.

- [4] 阳宏毅. 脱空状态下水泥混凝土路面最大弯拉应力及疲劳寿命的响应分析[J]. 公路工程, 2011, 36(6): 90-92.
- [5] ZOLLINGER D G, SOARES J. Performance of continuously reinforced concrete pavements: volume VII; summary[R]. Virginia: Federal Highway Administration, 1999.
- [6] 张军, 李剑波, 边惠英. 刚性路面缩缝传力杆的受力分析与设计[J]. 中南公路工程, 2001, 26(4): 7-8.
- [7] 锁利军, 王秉纲, 陈拴发, 等. 接缝设传力杆水泥混凝土面层结构力学分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(3): 30-35.
- [8] FRIBERG B F. Design of dowels in transverse joints of concrete pavements[J]. Transactions of ASCE, 1940, 105: 1076-1095.
- [9] 张艳聪, 申俊敏, 田波, 等. 考虑层间接触的刚性路面传力杆设置的力学分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(4): 22-27.
- [10] 高新文, 张艳聪, 高玲玲. 考虑传力杆位置偏差的刚性路面接缝传荷预估模型[J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 57-62.
- [11] MHJ5004-2010, 民用机场水泥混凝土道面设计规范[S]. 北京: 中国民航总局, 2010.
- [12] PAWLAK Z. Rough Sets: Theoretical aspects of reasoning about data[M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1991.

Analysis of Influencing Factors of Mechanical Response in Cement Concrete Airport Pavement with Doweled Joint Based on Rough Set

Yuan Jie, Wang Yuxiang

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This work investigated the influence factor of structural responses on concrete pavement with doweled joints and optimize dowel bars system. Dowel bar size, spacing, offset, supporting and bounding modulus were evaluated, as well as the finite element simulation results which include stress of concrete slabs, stress load transfer efficiency (LTE_{σ}) and internal force of dowel bars. Rough set algorithm method was utilized to compute the significance of condition attributes and the membership of decision attributes. The results showed that: (1) The dowel bar horizontal angle is the most significant factor on the maximum tensile stress of the pavements. Stress on the bottom of the slab increases with the angle increases. (2) LTE_{σ} is mostly sensitive to bars' vertical offset and LTE_{σ} increases as the dowel bars are approaching the bottom of slab. (3) The dowel bars spacing has considerable influence on all mechanical responses. Excessive spacing will result in poor properties of pavements.

Key words: road engineering; factor analysis; rough set; doweled joint; mechanical response

(责任编辑 王建华)