

## 土工格室强化土质道面及其力学响应有限元分析

张馨方<sup>1</sup>, 马鲁宽<sup>2</sup>, 赵磊明<sup>3</sup>, 廖羽<sup>3</sup>, 郭飞<sup>4</sup>

(1. 同济大学民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海 201804; 2. 中国民航大学科技创新研究院, 天津 300300;  
3. 中体飞行(北京)体育产业发展有限公司, 北京 100020; 4. 河北衡通工程项目管理有限公司, 河北 衡水 053010)

**摘要:** 为探究土工格室强化土质道面的强化效果及其力学响应规律, 本文选择德国罗福士土工格室强化材料, 通过承载板试验测试道面回弹模量, 进行了土工格室强化土质道面的效果测试。首先, 采用有限元模拟的方法, 构建并验证了土工格室强化土质道面力学响应有限元分析模型; 其次, 选择典型飞机荷载作用和土工格室强化道面结构参数, 以道面最大竖向压应变、最大竖向位移和道基工作区深度为分析指标, 对土工格室强化土质道面进行了力学响应敏感性及其力学响应规律分析。结果表明, 在90%的压实度下, 土工格室强化土质道面的回弹模量提升了23.7%; 土基回弹模量对土工格室强化土质道面结构的最大竖向压应变和最大竖向位移影响最显著; 道面的最大竖向压应变随土基回弹模量、土工格室弹性模量和厚度的增大而减小, 随土工格室开口尺寸的增大而增大; 道面的最大竖向位移与飞机主起落架单轮重量密切相关, 重量较大的飞机将使得最大竖向位移增大; 道面结构参数对道基工作区深度均无显著影响, 道基工作区深度与飞机单个主起落架重量呈线性正相关关系。本研究可为土工格室强化土质道面的设计及发展提供参考。

**关键词:** 道路工程; 土工格室; 土质道面; 力学响应; 承载能力

中图分类号: V351.11 文献标志码: A 文章编号: 1674-5590(2025)05-0051-07

## Geocell-reinforced soil pavement and the finite element analysis of mechanical response

ZHANG Xinfang<sup>1</sup>, MA Lukuan<sup>2</sup>, ZHAO Leiming<sup>3</sup>, LIAO Yu<sup>3</sup>, GUO Fei<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Tongji University, Shanghai 201804, China;  
2. Research Institute of Science and Technology Innovation, CAUC, Tianjin 300300, China; 3. China Sports Flight Sports Industry Development Co., Ltd., Beijing 100020, China; 4. Hebei Hengtong Engineering Project Management Co., Ltd., Hengshui 053010, HeBei, China)

**Abstract:** To investigate the reinforcement effect and its mechanical response law of geocell-reinforced soil pavement, this study selected the geocell-reinforcement material of Germany Novus. The effect of strengthening soil pavement with geocell was tested by testing the resilient modulus of the pavement through the bearing plate experiment. Firstly, using the finite element simulation method, a finite element analysis model for the mechanical response of the geocell-reinforced soil pavement was established and validated. Secondly, by selecting typical aircraft load effects and structural parameters of the geocell-reinforced pavement, the mechanical response sensitivity and mechanical response law of the geocell-reinforced soil pavement were analyzed using the maximum vertical compressive strain, maximum vertical displacement, and depth of the roadbed working area as analysis indicators. The results demonstrate that under 90% compaction degree, the resilient modulus of the geocell-reinforced soil pavement increased by 23.7%. The subgrade resilient modulus has the most significant impact on the maximum vertical compressive strain and maximum vertical displacement of the structure of geocell-reinforced soil pavement. The maximum vertical compressive strain decreased with increasing subgrade resilient modulus, geocell elastic modulus and thickness, but increased with increasing geocell cutout size. The maximum vertical displacement of the pavement is closely related to the weight of a single wheel of the aircraft main landing gear, and heavier aircraft will increase the maximum vertical displacement. The parameters of the pavement structure have no significant effect on the depth of the roadbed working area, and there is a linear positive correlation between the

depth of the roadbed working area and the weight of a single aircraft main landing gear. This study can provide reference for the design and development of geocell-reinforced soil pavement.

**Key words:** road engineering; geocell; soil pavement; mechanical response; bearing capacity

土质道面是采用现场土壤作为主要材料修筑的机场道面,能够快速铺设并投入使用,以适应临时和应急需求<sup>[1]</sup>。然而,土质道面的承载能力相对较弱,在大型运输机起降数次后就需进行大修<sup>[2]</sup>。在受到飞机荷载作用后,土质道面会产生扬尘等现象,严重影响飞机运行安全并污染自然环境<sup>[3]</sup>。

针对土质道面承载力较弱的问题,工程中常采用土工合成材料强化和固化剂处置等手段<sup>[4]</sup>。土工合成材料强化是将土工合成材料置于土体中,可以起到排水、隔离、加筋、防渗等防护作用<sup>[5]</sup>,能够增加土体的稳定性并减少粉尘的产生<sup>[6]</sup>。现有研究指出,土工合成材料加固土质道面可以增加土基的抗剪强度<sup>[7]</sup>,提高土基的抗变形能力<sup>[8]</sup>。文献[9]提出使用土工合成材料层加固机场跑道和停机坪,能够减少飞机着陆和滑行时引起的垂直应力,最大限度减少结构的轮辙,适应重型飞机运行。文献[10]使用蜂窝土工合成材料加固非铺装跑道,其承载能力可以提高 30%。在现有土工合成材料中,土工格室强化土质道面有施工便捷快速的特点<sup>[11]</sup>,具有较大的应用潜力。但是,国内外土工格室强化土质道面研究尚处于初步阶段,在设计和建造土工格室强化土质道面的材料性能、典型结构、设计参数和方法等方面的研究都有待进一步加强。作为开展土质道面结构设计和性能分析的前提,研究土工格室强化土质道面的力学响应规律,能为土工格室强化土质道面的设计及发展奠定基础。

鉴于此,本文在阐述土工格室强化道面结构的基础上,开展土工格室强化土质道面的效果室内测试;构建并验证土工格室强化土质道面力学响应有限元分析模型;选择典型飞机荷载作用和土工格室强化道面结构参数,以道面最大竖向压应变、最大竖向位移和道基工作区深度为分析指标,探究土工格室强化土质道面力学响应敏感性及其力学响应规律。

### 1 土工格室强化土质道面

#### 1.1 土工格室材料

土工格室是一种常见的土工合成材料,通常由长条形的聚乙烯片通过焊接方法连接而成<sup>[12]</sup>。作为一种三维立体加筋材料,土工格室通过填料与格室的相互作

用,发挥应力扩散、“网兜”效应,从而达到加筋目的<sup>[13]</sup>。

德国罗福士材料是一种特殊的土工格室材料,如图 1 所示,其单个土工格室典型结构长和宽均为 302 mm,深度为 37 mm,壁厚为 2 mm,基本单元格室长和宽均为 50 mm,其中,基本单元格室分为开孔格室和非开孔格室,非开孔格室表面粗糙用于提升强化道面的摩擦性能。在应用中,单个土工格室可通过嵌锁结构连接拼装使用,有效提高了施工便捷性和效率。基于已有研究<sup>[14]</sup>,德国罗福士材料性能参数如表 1 所示。

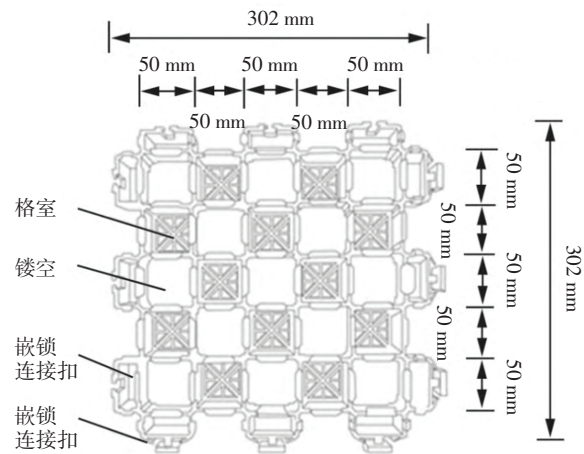


图 1 德国罗福士材料尺寸

Fig.1 Dimensions of German Novus material

表 1 德国罗福士材料性能参数

Tab.1 Performance parameters of German Novus material

试验内容	抗压/抗拉强度/MPa	抗压/抗拉模量/MPa	抗拉强度保持率/%	抗拉模量保持率/%	伸长保持率/%	质量损失率/%
抗压性能	101.09	936.10	—	—	—	—
抗拉性能	6.62	100.52	—	—	—	—
高温老化	5.78	74.87	87.31	74.48	74.69	—
低温老化	6.03	77.16	91.09	76.76	80.22	—
紫外线老化	5.73	79.64	86.56	79.22	79.47	—
汽油侵蚀	5.36	90.01	80.97	89.54	89.79	0.093
除冰剂侵蚀	5.63	92.21	85.05	91.73	92.00	0.080
水侵蚀	6.62	100.15	100.00	99.63	94.06	0.000

#### 1.2 土工格室强化土质道面结构

基于德国罗福士材料强化的土质道面结构如图 2 所示,主要包括土基和强化土层。通常在原状土基础上,通过地基整平和压实后铺放拼装成型的土工格室材料(根据需求控制压实度),最后由压路机压实嵌

入, 构筑土工格室强化土质道面。

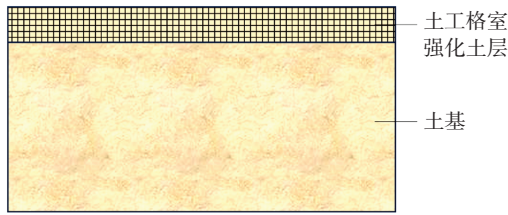


图 2 土工格室强化土质道面结构示意图

Fig.2 Structure schematic diagram of geocell-reinforced soil pavement

### 1.3 土工格室强化土质道面性能

针对德国罗福士材料强化土质道面, 基于室内试验开展了强化土质道面承载能力性能分析。试验分为强化土质道面区域和非强化土质道面区域, 土壤的最佳含水率和最大干密度分别为 13% 和 1.87 g/cm<sup>3</sup>, 控制土基压实度均为 90%, 并采用承载板试验测试 2 个区域的回弹模量, 每个区域测试 6 次, 如图 3 所示。非强化土质道面回弹模量的平均值为 27.9 MPa, 强化土质道面回弹模量的平均值为 34.5 MPa, 强化后土质道面的回弹模量提升了 23.7%。



图 3 测试回弹模量试验

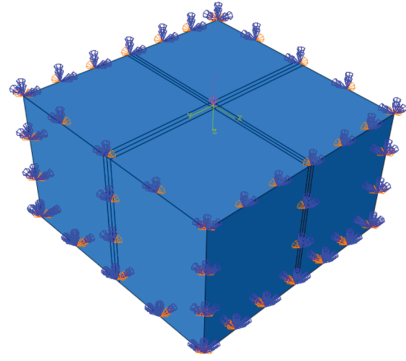
Fig.3 Experiment of testing resilient modulus

## 2 道面力学响应有限元分析模型

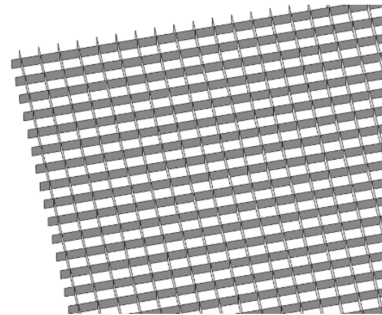
### 2.1 有限元分析模型构建

考虑土质道面受力特点, 将土质道面和土工格室假定为各向同性的线弹性体, 用弹性模量和泊松比表征, 且不考虑重力作用。采用 ABAQUS 软件构建有限元分析模型, 在模型尺寸和边界条件上, 兼顾计算效率和精度, 并避免边界条件对计算结果的影响。土质道面的模型尺寸为 10 m × 10 m × 5 m (长度 × 宽度 × 厚度), 土质道面底部采用固结形式约束所有方向位移, 如图 4(a) 所示; 在单元类型与尺寸方面, 土体结构采用六面体实体单元 C3D8R, 单元尺寸为 10 cm, 土工格室采用梁单元 S4R, 单元尺寸为 5 cm, 如图 4(b) 所示。

有限元模型在土基和土工格室之间设置界面接触来模拟土基与土工格室的相互作用, 界面接触设置为法向刚度  $1.0 \times 10^7$  kN/m<sup>2</sup>, 切向刚度  $2.3 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>, 粘聚力 18 kPa, 内摩擦角 22°。



(a) 土质道面模型



(b) 土工格室模型

图 4 土工格室强化土质道面力学响应有限元分析模型

Fig.4 Finite element analysis model of the mechanical response of geocell-reinforced soil pavement

在荷载作用模拟方面, 选择静态荷载作用, 轮印按照矩形考虑<sup>[15]</sup>, 轮印尺寸计算公式可表示为

$$A = \frac{P_s}{1000q} \quad (1)$$

$$L = \sqrt{\frac{A}{0.5227}} \quad (2)$$

式中:  $A$  为飞机单轮轮印面积;  $P_s$  为飞机单轮荷载;  $q$  为飞机主起落架上单轮接触压力, 可取轮胎的充气压力;  $L$  为当量圆半径。

### 2.2 有限元分析模型验证

针对构建的有限元分析模型, 基于承载板回弹模量测试试验, 可获得荷载作用下对应的位移, 土工格室材料承载力测试与有限元分析的结果对比如图 5 所示, 其中, 土基回弹模量取值由测试确定为 30.2 MPa, 土工格室弹性模量取值为 936.1 MPa。由图 5 可知, 误差平均值为 6.9%, 表明本文构建的有限元模型合理。

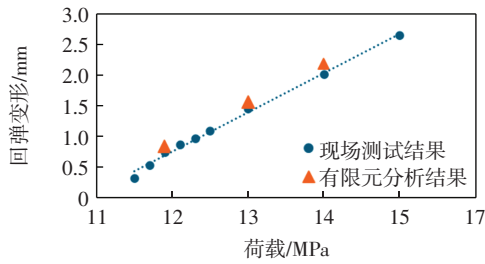


图 5 土工格室强化土质道面承载力测试与有限元分析结果对比  
Fig.5 Comparison between the bearing capacity test and the finite element analysis results of geocell-reinforced soil pavement

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 工况设置与力学分析指标

为分析土工格室强化土质道面的力学响应规律,考虑土工格室强化土质道面在军用和民用领域的使用需求,选择典型的军用飞机、民用客机和通航飞机,具体的飞机荷载作用参数如表 2 所示<sup>[16]</sup>。

表 2 选用的典型飞机主起落架荷载作用参数

Tab.2 Main landing gear load parameters of selected typical aircraft

机型	主起落架 构型	单轮荷载/ kN	主起落架间距/ m	主轮轮距/ m	胎压/ MPa
军用飞机 1	单轴单轮	82.030	2.60	—	1.16
军用飞机 2	双轴四轮	215.260	6.10	0.62,0.82	0.52
B737-800	单轴双轮	187.630	5.72	0.86	1.47
运 12	单轴单轮	23.275	3.60	—	0.55

土工格室强化土质道面的力学响应与土基回弹模量、土工格室弹性模量、土工格室尺寸(开孔尺寸与厚度)等结构参数密切相关。本文参照国际民用航空组织关于土基强度等级的划分,以土基回弹模量 50、100、150、200 MPa 分别代表超低、低、中、高强度地基<sup>[17]</sup>。罗福士材料为聚乙烯材料,其弹性模量值通常在 1 000~1 500 MPa 之间<sup>[18]</sup>,因此,本文设置的土工格室弹性模量取值为 500、1 000、1 500、2 000 MPa。罗福士材料的基本开孔尺寸和厚度分别为 5 cm 和 3 cm,为考虑土工格室尺寸的影响,本文设置的土工格室开孔尺寸为 2、5、8、11 cm,土工格室厚度为 1、3、5、7 cm。具体结构参数如表 3 所示。

表 3 力学响应分析工况参数表

Tab.3 Parameter table of mechanical response analysis working conditions

工况	土基回弹模量/ MPa	土工格室弹性 模量/MPa	土工格室开孔 尺寸/cm	土工格室 厚度/cm
水平 1	50	500	2	1
水平 2	100	1 000	5	3
水平 3	150	1 500	8	5
水平 4	200	2 000	11	7

在分析时,荷载为单个主起落架荷载作用,选择的力学响应分析指标如下:①选择最大竖向压应变以考虑土质道面在荷载作用下的轮辙破坏;②选择最大竖向位移以考虑土质道面对飞机起降的影响;③选择道基工作区影响深度以考虑土质道面处置深度。其中,道基工作区深度是附加应力为土质道面自重应力 1/10 的位置深度,且为计算方便,土的天然密度统一取值为 2 000 kg/m<sup>3</sup>。

#### 3.2 道面力学响应敏感性分析

按照表 5 中的工况参数,开展 4 因子 4 水平正交试验,并开展方差分析研究道面力学响应敏感性。表 4—表 6 为军用飞机 1 在荷载作用下的道面力学响应敏感性分析结果。

表 4 荷载作用下军用飞机 1 最大竖向压应变敏感性分析结果

Tab.4 Sensitivity analysis results of the maximum vertical compressive strain of military aircraft 1 under the load

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性 水平
土基回弹模量	17 426 129	3	5 808 709	539.389	0.000	显著
土工格室弹性 模量	335 162	3	111 720	10.374	0.043	显著
土工格室开孔 尺寸	604 425	3	201 475	18.709	0.019	显著
土工格室厚度	939 699	3	313 233	29.086	0.010	显著
误差	32 307	3	10 769	—	—	—

表 5 荷载作用下军用飞机 1 最大竖向位移敏感性分析结果

Tab.5 Sensitivity analysis results of the maximum vertical displacement of military aircraft 1 under the load

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性 水平
土基回弹模量	12.512	3	4.171	804.912	0.000	显著
土工格室弹性 模量	0.071	3	0.024	4.537	0.123	无影响
土工格室开孔 尺寸	0.034	3	0.011	2.201	0.267	无影响
土工格室厚度	0.096	3	0.032	6.158	0.085	无影响
误差	0.016	3	0.005	—	—	—

表 6 军用飞机 1 荷载作用下道基工作区深度敏感性分析结果

Tab.6 Sensitivity analysis results of the depth of the roadbed working area of military aircraft 1 under the load

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性 水平
土基回弹模量	5.459×10 <sup>-5</sup>	3	1.820×10 <sup>-5</sup>	1.780	0.324	无影响
土工格室弹性 模量	7.048×10 <sup>-5</sup>	3	2.349×10 <sup>-5</sup>	2.299	0.256	无影响
土工格室开孔 尺寸	7.666×10 <sup>-5</sup>	3	2.555×10 <sup>-5</sup>	2.500	0.236	无影响
土工格室厚度	8.295×10 <sup>-5</sup>	3	2.765×10 <sup>-5</sup>	2.705	0.218	无影响
误差	3.066×10 <sup>-5</sup>	3	1.022×10 <sup>-5</sup>	—	—	—

由表 4—表 6 的结果可知, 对于最大竖向压应变, 土基回弹模量、土工格室弹性模量、土工格室开孔尺寸、土工格室厚度对应的  $P$  值均小于 0.05, 表明上述结构参数对最大竖向压应变均有显著影响; 而土基回弹模量的  $F$  值最大, 对最大竖向压应变的影响程度最大; 4 个结构参数的影响程度排序依次为土基回弹模量 > 土工格室厚度 > 土工格室开孔尺寸 > 土工格室弹性模量。对于最大竖向位移, 土基回弹模量的  $P$  值小于 0.05, 表明土基回弹模量对最大竖向位移有显著影响; 土工格室弹性模量、土工格室开孔尺寸和土工格室厚度的  $P$  值均大于 0.05, 表明上述 3 个结构参数对最大竖向位移的影响相对较小。对于道基工作区深度, 土基回弹模量、格室弹性模量、格室开孔尺寸、格室厚度的  $P$  值均大于 0.05, 表明上述 4 种结构参数对道基工作区深度均无显著影响。

### 3.3 道面最大竖向压应变分析

根据上述分析可知, 土基回弹模量、土工格室弹性模量、土工格室开孔尺寸和土工格室厚度均对道面最大竖向压应变有显著影响。本文以土基回弹模量 100 MPa、土工格室弹性模量 1 000 MPa 以及土工格室开孔尺寸 5 cm 和土工格室厚度 3 cm 作为基本结构参数, 采用控制变量的方法, 研究结构参数对道面最大竖向压应变的影响。采用构建的有限元模型, 分别分析军用飞机 1、军用飞机 2、B737-800 和运 12 的荷载作用下, 土工格室强化土质道面的最大竖向压应变 (微应变), 结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 总体而言, B737-800 荷载作用下的最大竖向压应变最大, 运 12 荷载作用下的最大竖向压应变最小, 军用飞机 1 和 2 居中且数值近似。上述结果与不同机型的荷载作用特点有关, 从表 2 可知, 军用飞机 1 重量小而胎压高, 军用飞机 2 重量大而胎压低, B737-800 的重量和胎压均较大, 而运 12 的重量和胎压均较小。因此, 相比较而言, 通用飞机对土质道面轮辙的影响最小, 而民航客机影响最大。此外, 从图 6 还可以发现, 不同飞机荷载作用下, 土工格室强化土质道面的最大竖向压应变均随土基回弹模量、土工格室弹性模量和土工格室厚度的增大而减小, 随土工格室开孔尺寸的增大而增大。具体而言, 以军用飞机 1 为例, 土基回弹模量从 50 MPa 变化到 200 MPa 时, 其最大竖向压应变的减小速率逐渐变小, 由 22.5  $\mu\epsilon$ /MPa 到 8.9  $\mu\epsilon$ /MPa, 因此需要在综合考虑施工成本的前提下提高土基回弹模量。土工格室回弹模量从 500 MPa 变化到 2 000 MPa 时, 其最大竖向压应变近似呈现线性减小趋势, 因此在强化土质道面结构中时应尽可能

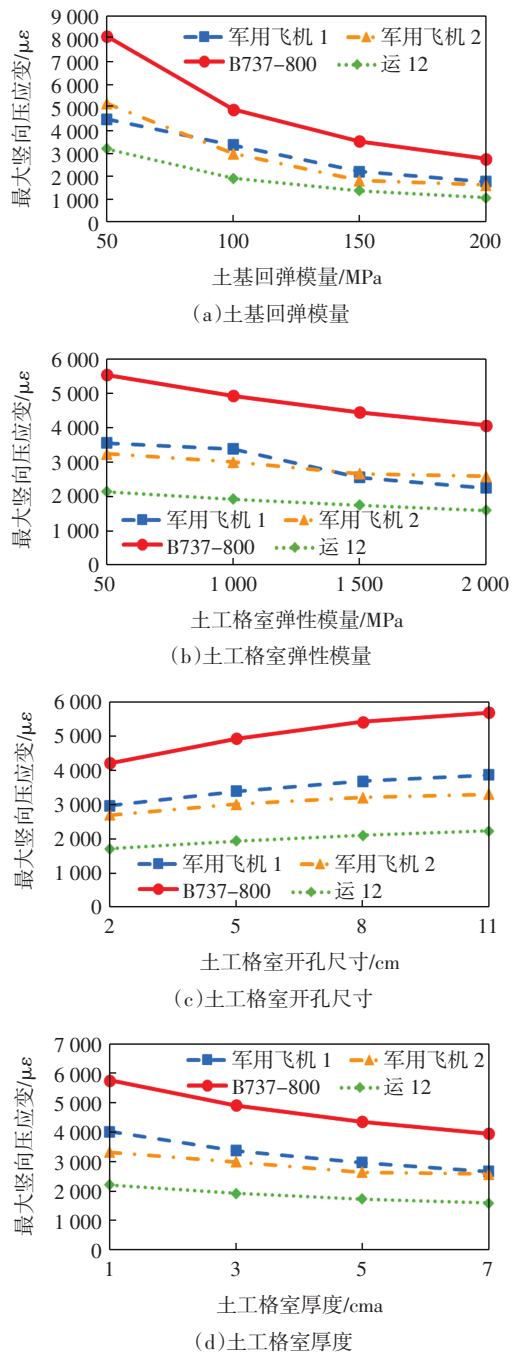


图 6 不同飞机荷载下土工格室强化土质道面最大竖向压应变  
Fig.6 The maximum vertical compressive strain of geocell-reinforced soil pavement under different aircraft load

选择弹性模量较大的土工格室材料。土工格室开口尺寸从 2 cm 变化到 11 cm 时, 其最大竖向压应变逐步增大, 表明较小的土工格室开口尺寸可以实现更好的强化效果, 但增大速率逐步变小, 综合考虑土工格室嵌入土基的施工难度和效果, 推荐土工格室开口尺寸为 4~6 cm。土工格室厚度从 1 cm 增加到 7 cm 时, 最大竖向压应变的减小速率也呈现逐渐变小的趋势, 综合考虑材料成本, 推荐的土工格室厚度为 3~5 cm。

### 3.4 道面最大竖向位移分析

由上述分析可知,土工回弹模量对道面最大竖向位移有显著影响,而土工格室弹性模量、土工格室开孔尺寸和土工格室厚度均对道面最大竖向位移的影响不显著。因此,本文以土工回弹模量 100 MPa、土工格室弹性模量 1 000 MPa、土工格室开孔尺寸 5 cm 和土工格室厚度 3 cm 作为基本结构参数,采用控制变量的方法,仅研究土工回弹模量对道面最大竖向位移的影响。采用构建的有限元分析模型分别分析军用飞机 1、军用飞机 2、B737-800 和运 12 作用下,土工格室强化土质道面的最大竖向位移,结果如图 7 所示。

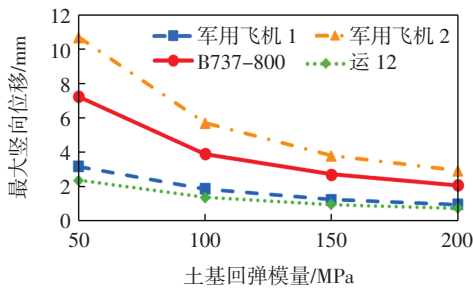


图 7 不同飞机荷载下土工格室强化土质道面结构最大竖向位移  
Fig.7 The maximum vertical displacement of the geocell-reinforced soil pavement under different aircraft load

由图 7 可知,总体而言,对于不同飞机荷载作用,最大竖向位移从大到小依次为军用飞机 2、B737-800、军用飞机 1 和运 12,与表 1 所示的飞机主起落架单轮重量大小基本一致,表明最大竖向位移与飞机主起落架单轮重量密切相关。相比较而言,单轮重量较大的飞机作用下最大竖向位移较大,在强化土质道面上滑跑所需的长度也较大<sup>[19-20]</sup>。经过计算,从运 12 到军用飞机 2,滑跑所需长度将从 380 m 变化至 1 300 m。此外,从图 7 还可以发现,不同飞机荷载作用下,土工格室强化土质道面的最大竖向位移随土工回弹模量的增大而减小。具体而言,以军用飞机 1 为例,土工回弹模量从 50 MPa 变化到 200 MPa 时,最大竖向位移的减小速率逐渐变小,由 0.026 mm/MPa 减少到 0.006 mm/MPa,因此,需要在综合考虑施工成本的前提下提高土工回弹模量,以满足强化土质道面适用飞机的起降需求。

### 3.5 道基工作区深度分析

由上述分析可知,土工回弹模量、土工格室弹性模量、土工格室开孔尺寸和土工格室厚度均对道基工作区深度的影响不显著。因此,本文以表 4 的分析结果为基础,统计分析了不同飞机荷载下土工格室强化土质道面的道基工作区深度。图 8 为土工回弹模量 100 MPa、

土工格室弹性模量 1 000 MPa、土工格室开孔尺寸 5 cm 和土工格室厚度 3 cm 时道面结构的附加应力计算结果。由图 8 可知,飞机荷载作用下道面结构的附加应力随道基深度呈现先减小后趋于平缓的趋势,其中 4 种机型荷载作用下的附加应力从大到小依次为,军用飞机 2、B737-800、军用飞机 1、运 12。

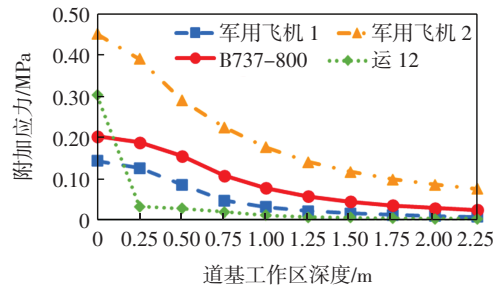


图 8 不同飞机荷载下土工格室强化土质道面的附加应力  
Fig.8 The additional stress of the geocell-reinforced soil pavement under different aircraft load

基于图 8 中附加应力的计算,可计算出道基工作区深度自大到小依次为军用飞机 2、B737-800、军用飞机 1、运 12,结果如图 9 所示。在图 9 的基础上,进一步分析可发现,道基工作区深度与飞机单个主起落架重量呈线性正相关性,结果如图 10 所示。

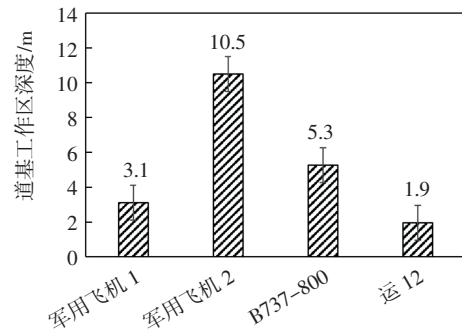


图 9 不同飞机荷载下土工格室强化土质道面道基工作区深度  
Fig.9 The depth of the roadbed working area of the geocell-reinforced soil pavement under different aircraft load

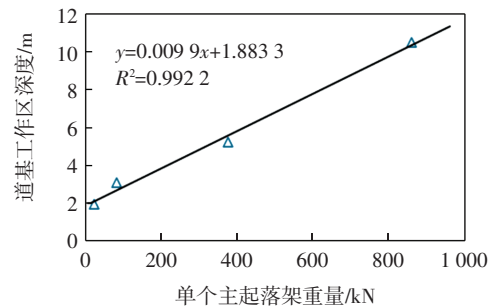


图 10 道基工作区深度与飞机单个主起落架重量的关系  
Fig.10 The relationship between the depth of the roadbed working area and the weight of the aircraft single main landing gear

## 4 结语

本文以德国罗福士土工格室为强化材料, 通过承载板测试其强化土质道面的效果, 并基于有限元分析构建并验证相关力学响应分析模型, 最后结合典型飞机荷载与道面结构参数, 以道面最大竖向压应变、最大竖向位移及道基工作区深度为指标, 分析土工格室强化土质道面的力学响应规律, 可得出以下结论。

(1) 相较于土工格室厚度、土工格室开孔尺寸和土工格室弹性模量, 土基回弹模量对土工格室强化土质道面结构的最大竖向压应变和最大竖向位移影响最显著, 应在综合考虑施工成本的前提下提高土基回弹模量。

(2) 土工格室强化土质道面的最大竖向压应变均随土基回弹模量、土工格室弹性模量和土工格室厚度的增大而减小, 随土工格室开孔尺寸的增大而增大。在综合考虑材料成本的前提下, 应尽可能选择弹性模量较大的土工格室材料, 提高土工格室厚度, 同时平衡施工与强化效果确定土工格室开孔尺寸。最终推荐的土工格室厚度为 3~5 cm, 土工格室开口尺寸为 4~6 cm。

(3) 土工格室强化土质道面的最大竖向位移与飞机主起落架单轮重量密切相关, 单轮重量较大的飞机作用下最大竖向位移较大, 在强化土质道面上滑跑所需的长度也较大。

(4) 飞机荷载作用下, 道面结构的附加应力随道基深度呈现先减小后趋于平缓的趋势, 道基工作区深度与飞机单个主起落架重量呈线性正相关性, 即飞机单个主起落架重量越大对道基的影响深度越大。

(5) 综合考虑轮辙、跑道所需长度和道基所需处置深度, 土工格室强化土质道面对通航飞机的适用性最好。

### 参考文献:

- [1] 秋路, 房圣友. 国外运输机简易跑道试飞进展及关键技术研究[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(27): 16-18.
- [2] ZHANG D Y, CAI L C, ZHOU S H. An airfield soil pavement design method based on rut depth and cumulative fatigue[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019, 2019(1): 6032305.
- [3] TINGLE J S, GROGAN W P. Behavior of unsurfaced airfields supporting operations of C-17 aircraft[J]. Journal of Transportation Engineering, 1999, 125(1): 75-84.
- [4] WESOŁOWSKI M, KOWALSKA D, KOWALEWSKA A. Geocell reinforcement in natural airfield pavement structure in the aspect of the safety of conducted flight operations[C]//Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL). September 22-26, 2019.
- [5] 魏武, 顾强康, 郑汝海. 土工合成材料在简易机场中的应用初探[C]//中国公路学会. 第四届国际道路和机场路面技术大会论文集, 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [6] 卢硕. 土工格室加固路基机理及应用研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.
- [7] GUO J L. Experimental studies on geocells and mat systems for stabilization of unpaved shoulders and temporary roads[D]. Lawrence, KS, USA: University of Kansas, 2014.
- [8] KOWALEWSKA A, WŁODARSKI P, PIETRUSZEWSKI P. Analysis of the possibility of using a geogrid to improve load bearing capacity of natural airfield pavements[J]. Journal of KONBiN, 2021, 51(3): 135-148.
- [9] YADAV D K. A new approach in design of a pavement reinforced by a geosynthetic layer in severely stressed area of the airport pavement to accommodate stresses imposed by aircraft landing and ground movements[J]. Journal of Transportation Technologies, 2022, 12(3): 346-356.
- [10] WESOŁOWSKI M, KOWALEWSKA A. The impact of a geogrid system on load-bearing capacity of natural airfield pavements[J]. Archives of Civil Engineering, 2020, 66(2): 45-61.
- [11] WESOŁOWSKI M, PIETRUSZEWSKI P, KOWALEWSKA A. Cellular geosynthetics in the aspect of application in airfield construction [J]. Journal of KONBiN, 2019, 49(4): 341-362.
- [12] 王晓晖. 拉伸取向自增强聚丙烯土工格室的制备与应用研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
- [13] 吕峰. 土工格室加固级配碎石基层沥青路面力学特性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016.
- [14] 张馨方, 赵磊明, 廖羽, 等. 强化草地路面土工格室材料性能及应用效果分析[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(5): 46-52.
- [15] 严明星, 王金昌. ABAQUS 有限元软件在路面结构分析中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2016.
- [16] 翁兴中. 机场道面设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [17] ICAO, Aerodrome design manual—runways: 4th edition, ICAO, 2020.
- [18] WESOŁOWSKI M, WŁODARSKI P, IWANOWSKI P, et al. Analysis and assessment of the usefulness of recycled plastic materials for the production of airfield geocell[J]. Materials, 2021, 14(13): 3557.
- [19] 谭旭宏. 大型运输机起落架轮壤接触模型与柔性道面承载能力数值仿真研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- [20] 韩文德, 窦炳耀. 大型运输机土质简易跑道运行能力评估方法研究[C]//第六届中国航空科学技术大会论文集. 嘉兴, 2023: 1673-1677.

(责任编辑: 刘雅婷)