

DOI: 10.7672/sgjs2025110145

山皮石置换软土深度影响因素与现场试验分析

高志斌,常 菲,丁文利,姬生伟,杨 欢
(天津滨海国际机场有限公司,天津 300300)

[摘要] 天津滨海国际机场三期改扩建场地土质软弱,含水量高且不同区域土质差异性显著,为探明双层复合道基反应模量影响因素,以山皮石换填淤泥质土为例,通过建立道基反应模量理论公式,解析山皮石换填厚度求解公式。基于换填山皮石现场试验,结合三维数值模型计算结果验证道基反应模量理论公式的合理性和精确性,得出机场跑道区和非跑道区山皮石换填厚度预测模型,以适时调整山皮石换填厚度,实现对换填材料的优化利用。

[关键词] 道路工程;道基;数值模拟;试验

[中图分类号] U416.1

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0145-06

Factors Affecting the Depth of Replacement of Soft Soil with Hill-skill Stone and On-site Experimental Analysis

GAO Zhibin, CHANG Fei, DING Wenli, JI Shengwei, YANG Huan
(Tianjin Binhai International Airport Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: The soil of the Third Phase Reconstruction and Expansion Site of Tianjin Binhai International Airport is weak, the water content is high, and the soil quality in different regions is significantly different. To find out the influencing factors of the subgrade reaction modulus of the double-layer composite roadbed, taking the replacement of mucky soil with hill-skill stones as an example, the theoretical formula of the subgrade reaction modulus was established, and the solution formula of the replacement thickness of hill-skill stones was analyzed. Based on the field test of replacement hill-skill stones, combined with the calculation results of the three-dimensional numerical model, the rationality, and accuracy of the theoretical formula of the subgrade reaction modulus were verified, and the prediction model of the replacement thickness of the hill-skill stones in the airport runway area and the non-runway area was obtained to adjust the replacement thickness of the hilly stones in time and realize the optimal utilization of the replacement materials.

Keywords: road engineering; subgrade; simulation; experiments

0 引言

淤泥质土是典型的工程软弱土,往往不能直接用于道面影响区下的道基填筑,需对淤泥质土加以处治以满足施工设计要求,一般情况下道基所受道面传递附加应力小,道基强度一般能满足设计要求,然而机场工程中较关注道基变形问题,道基反应模量能够反映道基强度和变形关系,但双层地道基反应模量影响因素的相关研究较少。依托天津滨海国际机场三期改扩建工程,建立道基反应模量理论公式,通过现场试验验证理论公式的精确

性,并给出换填厚度理论求解公式,深入探究道基反应模量、淤泥质土和山皮石回弹模量对软土道基深度的影响,解析机场不同土质和道基反应模量设计值下的换填高度求解公式,为天津滨海机场三期改扩建工程中原状土和山皮石优化利用提供参考。

1 试验段概况

1.1 工程地质条件

天津滨海国际机场三期改扩建场道工程地处华北平原,根据场地地质勘察报告和 DB/T 29—191—2022《天津市地基土层序划分技术规程》,试验段和改扩建工程平面位置及场地地质剖面如图 1 所示,该场地地层结构自上而下分为 8 层,土质埋深 25m 范围内多为粉土和粉质黏土,土层物理力学参

[作者简介] 高志斌,博士,教授级高级工程师,E-mail:424751349@qq.com

[收稿日期] 2025-01-05

数如表 1 所示。北坪场区土质为低液限有机质粉质黏土,南坪场区土质为高液限有机质黏土。

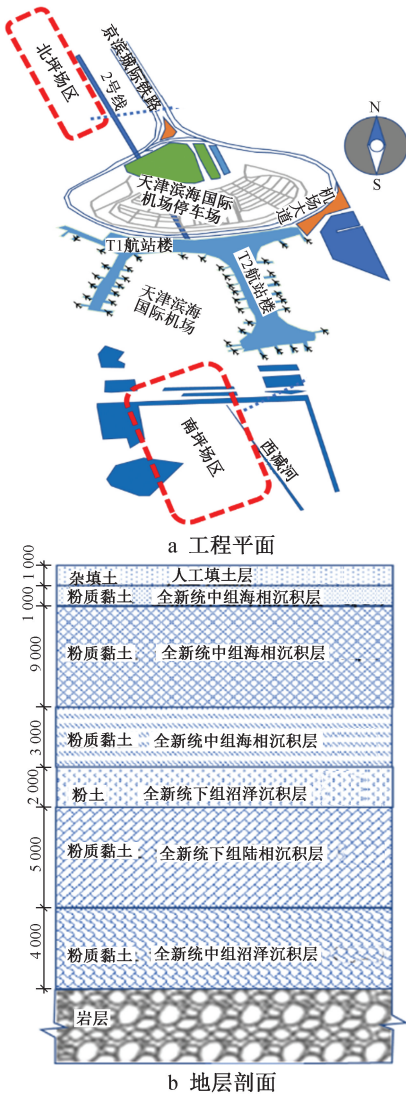


图 1 三期改扩建位置平面及地层分布

Fig.1 Plan and distribution of foundation layers for the phase 3 expansion and renovation location

1.2 现场道基压实

现场对北坪场区高含水率原状土进行压实,压路机与地面接触部分发生较大凹陷,现场原状土压实度为 91%~92%,小于设计值 96%。由于原状土一级加载时发生较大变形,道基反应模量小于设计值 40MN/m³,不满足 MH/T 5027—2013《民用机场岩土工程设计规范》对于道基反应模量和压实度设

计值的要求,需对原状土进行处治。通过开展原状土+山皮石复合道基试验,论证方案可行性。

2 不同土体模量之间的关系

2.1 回弹模量与当量回弹模量

基于双层弹性理论,结合已有文献得出精度和外延性更高的基层顶面当量回弹模量换算公式为:

$$E_t = ah_x^b E_0 (\frac{E_x}{E_0})^{\frac{1}{3}} \tag{1}$$

$$a = \left[0.18 + 0.82 (\frac{E_0}{E_x})^{0.76} \right]^{-1} \tag{2}$$

$$b = 1 - 1.21 (\frac{E_x}{E_0})^{-0.55} \tag{3}$$

式中: h_x 为换算山皮石厚度(m); E_0 为原状土回弹模量(MPa); E_x 为山皮石回弹模量(MPa); E_t 为复合地基当量回弹模量(MPa); a, b 为当量回弹模量换算系数。

2.2 道基反应模量与当量回弹模量

依据已有研究和刚性路面设计规范,假设地基承受竖向荷载处于弹性变形,进行地基当量回弹模量与道基反应模量换算,推演道基反应模量 K_{76} 与 E_t 之间的换算关系。由于本试验未考虑道面板厚度的影响,本文将由道面板厚度引起的模量增长倍数设为 1。

$$E_t = \frac{D_{30} \times (1 - \mu_0^2) \pi}{4 \times 0.4} \times 1.77 K_{76} \tag{4}$$

式中: K_{76} 为道基反应模量(MN/m³); μ_0 为土泊松比,试验测得为 0.30; D_{30} 为承载板直径,本文取 30cm。

将 μ_0, D_{30} 代入式(4)得:

$$E_t = 0.95 K_{76} \tag{5}$$

结合式(1)和式(5)得到道基反应模量与山皮石换填高度、原状土回弹模量、山皮石回弹模量的关系:

$$K_{76} = \frac{a}{0.95} h_x^b E_0 (\frac{E_x}{E_0})^{\frac{1}{3}} \tag{6}$$

根据式(6)解析出道基山皮石换填高度求解公式:

$$h_x = \sqrt[b]{\frac{0.95 K_{76} (\frac{E_x}{E_0})^{-\frac{1}{3}}}{a E_0}} \tag{7}$$

表 1 淤泥质土物理力学参数

Table 1 Physical property index of silty soil

取样位置	有机质含量/ (g · kg ⁻¹)	液限/%	塑限/%	天然 含水率/%	最佳 含水率/%	最大干密度/ (g · cm ⁻³)	塑性 指数	液性 指数	加州承载比 CBR _{2.5}
北坪场区	11.40	31.14	19.14	19.44~30.87	18.7	1.70	12.00	0.98~0.02	4.4~6.0
南坪场区	4.65	64.26	35.45	28.90~50.63	14.8	1.79	28.81	1.23~0.47	0.8~1.4

回弹模量采用杠杆压力仪法测得,不同现场试验段道基反应模量如表 2 所示。

换填材料回弹模量保持不变,山皮石回弹模量为 160MPa,根据现场不同换填山皮石试验段可知,原状土回弹模量 E_0 、换填高度 h_x 和道基反应模量存在函数关系 $K_{76}=f(E_0,h)$,建立三者的二元回归方程,拟合结果如图 2 所示, R^2 为 0.997,具有较好的相关关系。

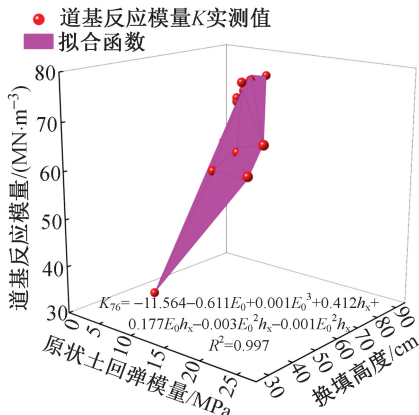


图 2 道基反应模量与原状土回弹模量、换填高度的关系

Fig. 2 Relationship between subgrade reaction modulus and rebound modulus and height of replacement for the intact soil

3 有限元分析

采用 ABAQUS 有限元软件分析换填山皮石复合道基在荷载作用下竖向应力与竖向应变的关系,利用线性内插法求出该模型承载板在竖向位移为 1.27mm 时的地基竖向应力,即为道基反应模量对应的竖向应力,不同试验段双层复合道基材料参数根据 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》及地质

勘察资料得到,如表 3 所示。

表 3 有限元分析计算参数

Table 3 Calculation parameters for finite element models					
试验位置	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/(kN·m ⁻²)	重度/(kN·m ⁻³)
巡场路 1	90.3	0.32	25	15	18
巡场路 2	119.7	0.29	23	18	18
巡场路 3	170.0	0.26	20	18	18
北坪设备停放区	204.0	0.25	23	20	18

由于建立的地基模型具有对称性,取 1/4 三维区域进行分析,模型尺寸为 50m×50m×50m,在模型边角处设置承载板,承载板长和宽均为 1.5m,该承载板允许发生竖向位移。模型近似看作半空间无限体,道基为服从莫尔-库仑屈服准则的理想弹塑性材料,采用 C3D8 平面应力应变单元类型,承载板位移处网格进行加密处理,共划分 10 051 个单元,对于计算模型边界,将模型底面 x,y,z 向位移固定,将模型侧面 x,y 向位移固定,即允许土体产生竖向沉降,北坪设备停放区竖向位移和竖向反力分布云图如图 3、4 所示。

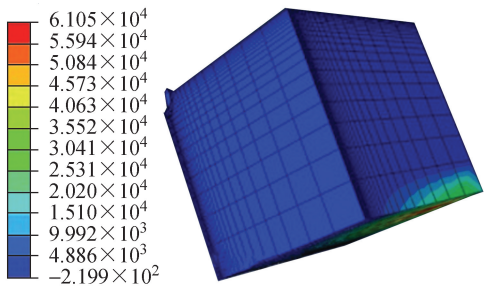


图 3 竖向反力云图(单位:N)

Fig. 3 Vertical force contour map(unit:N)

表 2 道基反应模量与回弹模量测定结果

Table 2 Determination of subgrade reaction modulus and rebound modulus							
现场试验位置	山皮石回弹模量/MPa	山皮石填料厚度/cm	原状土回弹模量/MPa	山皮石固体体积率/%	道基反应模量理论值/(MN·m ⁻³)	道基反应模量实测值/(MN·m ⁻³)	误差/%
巡场路 1	160	50	4	92.0	35.0	31.0	12.9
滑行道	160	60	14	83.9	75.8	77.6	2.4
巡场路 2	160	70	4	94.0	46.0	45.0	2.2
巡场路 3	160	70	8	83.5	65.8	62.8	4.8
南坪车道	160	70	10	84.9	72.9	71.8	1.5
北坪 C6 滑口	160	70	10	84.9	72.9	72.6	0.4
北坪停放设备区	160	70	12	85.9	78.9	76.7	2.9
北坪场道	160	70	11	84.9	76.1	74.3	2.4
巡场路 4	160	90	8	94.0	79.8	75.0	6.4
南坪沟塘	160	40	20	85.2	68.7	67.8	1.3
南坪道槽	160	32	24	86.7	66.1	65.6	0.8
南坪服务车道	160	42	16	84.6	63.5	62.8	1.1
北坪 C 滑口	160	35	25	85.3	71.1	69.3	2.6

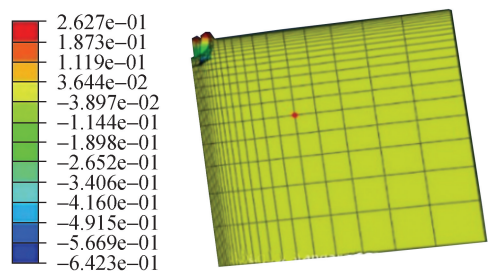


图 4 竖向位移云图(单位:m)

Fig. 4 Vertical displacement contour map(unit:m)

现场通过记录逐级荷载下承载板沉降和相应的竖向反力,对道基反应模量试验数据进行分析,得到荷载-沉降(p - s)曲线,并计算道基反应模量。

$$K_{76} = \frac{P_B}{0.001\ 27}$$

(8)

式中: P_B 为承载板下沉量为 1.27mm 时的单位面积竖向应力(MPa)。

根据承载板节点集合在不同位移下的反力,求出承载板不同位移下的竖向应力,如图 5 所示。由图 5 可知,机场工程中道基反应模量对应的竖向应力在近似弹性阶段内且小于地基极限承载力。

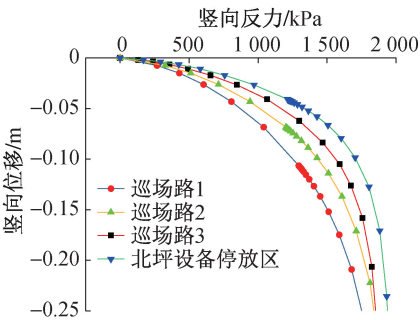


图 5 承载板竖向反力与竖向位移关系曲线

Fig. 5 Vertical reaction force of bearing plates and vertical displacement relationship curve

承载板竖向位移为 1.27mm 时,根据现场试验、数值模拟及理论计算得到的道基竖向应力如表 4 所示。由表 4 可知,通过有限元分析得到的道基竖向应力与实测结果偏差在 8.1%内,通过理论公式计

表 4 现场试验、数值模拟及理论计算得到的道基竖向应力

Table 4 Vertical stress of subgrade obtained from on-site experiments, simulations and theoretical calculations

现场试验位置	山皮石回弹模量/ MPa	山皮石填料厚度/ cm	原状土回弹模量/ MPa	当量回弹模量/ MPa	弹性模量/ MPa	道基实测 竖向应力/ kPa	道基理论 计算竖向 应力/kPa	道基数值 模拟竖向 应力/kPa	数值模拟与 实测结果 误差/%	理论计算与 实测结果 误差/%
巡场路 1	160	50	4	33.2	90.3	39.4	44.5	42.2	6.6	12.9
巡场路 2	160	70	4	44.0	119.7	55.4	58.4	57.2	3.2	5.4
巡场路 3	160	70	8	62.5	170.0	88.5	83.6	82.8	6.4	5.5
北坪设备停放区	160	70	12	75.0	204.0	106.0	100.0	97.4	8.1	6.0

算得到的道基竖向应力与实测结果偏差在 13%内,现场不同试验段的竖向应力实测值分别为 39.4, 55.4, 88.5, 106kPa, 基本<100kPa,这与已有研究结果一致。

4 不同参数对山皮石换填高度的敏感性分析

从实际工程角度考虑,由于土体因地质、环境和含水量等方面的影响,天津滨海国际机场三期改扩建工程原状土回弹模量差异较大,而换填材料为均质材料,回弹模量保持不变,针对山皮石换填材料,将山皮石回弹模量设为 160, 180, 200MPa, 机场非跑道区道基反应模量设计值 $\geq 40\text{MN/m}^3$, 跑道区道基反应模量设计值 $\geq 60\text{MN/m}^3$, 计算机场非跑道区和跑道区道基反应模量设计值下山皮石换填高度和原状土回弹模量,并对原状土回弹模量和换填高度进行关系曲线拟合,从而建立山皮石置换软土厚度预测模型,如图 6 所示。

由图 6 可知,山皮石换填高度和原状土回弹模量拟合效果较好,其中非跑道区 $R^2=0.995$, 跑道区 $R^2=0.994$ 。当山皮石回弹模量相同时,山皮石换填高度随着原状土回弹模量的增加而减小,非跑道区山皮石回弹模量为 160MPa, 原状土回弹模量从 5MPa 增加到 25MPa 时山皮石厚度减小了 0.38m, 原状土回弹模量从 25MPa 增加到 40MPa 时山皮石厚度减小了 0.08m。换填厚度对原状土回弹模量增加的敏感性变低,因为在相同道基反应模量设计值下,复合道基所受竖向应力不变,下层原状土所受附加应力通过山皮石传递和扩散,随着山皮石厚度的减小而增大,但随着原状土回弹模量的增加,下层原状土承载力和抗变形能力不断增强,出现换填山皮石厚度减小主要是以上原因的协同作用结果。由图 6b 可知,当原状土回弹模量为 5MPa 时,山皮石回弹模量从 160MPa 增加到 200MPa 时山皮石厚度减小 0.1m, 而原状土回弹模量为 40MPa 时对应的山皮石厚度减小了 0.02m, 山皮石换填厚度随原状土回弹模量、山皮石回弹模量的增加整体呈降低趋势,随原状土回弹模量增加换填厚度对山皮石回

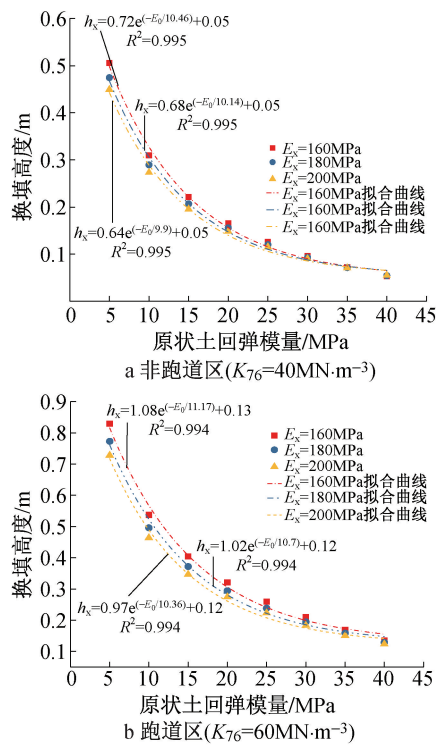


图 6 不同原状土回弹模量下所需山皮石换填高度
Fig. 6 Height of hill-skill stone required for different rebound modulus of intact soil

弹模量变化的敏感性降低,以上分析均说明增加原状土回弹模量对于减小山皮石用量和换填厚度更明显。

5 结语

1)通过理论计算分析了道基反应模量与当量回弹模量的关系,得出了山皮石换填高度的求解公式。通过现场道基反应模量的测定,拟合得到了回归曲面方程,道基反应模量理论值和实测值误差基本保持在5%之内。

2)根据建立的道基反应模量理论公式拟合得到跑道区和非跑道区换填高度预测模型,可以根据场地不同位置及原状软弱土回弹模量,得到所需换填山皮石高度,使工程既满足施工设计要求,又节省造价。

3)山皮石换填高度随山皮石回弹模量、原状土回弹模量的提高而减小,随道基反应模量的提高而增大,提高原状土回弹模量对于提高道基反应模量和减小山皮石用量更明显。

参考文献:

[1] 唐勇斌. 泡沫轻质土换填公路浅埋中厚层软土地基处理分析[J]. 路基工程,2023(4):108-112.
TANG Y B. Foundation treatment analysis of foam light soil replacement in highway shallow buried medium thick soft soil [J]. Subgrade engineering,2023(4):108-112.

[2] 秦志光,袁晓铭,牛犇,等. 深水海洋环境下砂土换填地基振冲加固应用研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(10):1940-1946.
QIN Z G, YUAN X M, NIU B, et al. Vibroflotation method for foundation treatment of replaced sandy soil in deepwater marine environment [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2020,42(10):1940-1946.
[3] 陶学诗. 基于换填法的水闸工程软土地基处理[J]. 水上安全,2023(10):169-171.
TAO X S. Soft soil foundation treatment of sluice project based on replacement and filling method [J]. Maritime safety, 2023(10):169-171.
[4] 姜启珍,陈忠平,汪建斌,等. 软基路堤换填轻质土厚度确定方法[J]. 公路,2019,64(4):84-88.
JIANG Q Z, CHEN Z P, WANG J B, et al. Determination method of thickness of light soil for embankment replacement on soft foundation [J]. Highway, 2019, 64(4):84-88.
[5] 袁以堂,张杜锋,吴春伟,等. 高速公路改扩建软基换填拓宽段地基变形分析[J]. 公路,2023,68(3):86-89.
YUAN Y T, ZHANG D F, WU C W, et al. Analysis of foundation deformation in widening section of soft foundation replacement for expressway reconstruction and expansion [J]. Highway, 2023, 68(3):86-89.
[6] 雷宇,刘希重,宣明敏,等. 基于服役需求的机场粉土道基临界动应力研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(3):950-960.
LEI Y, LIU X Z, XUAN M M, et al. Determination of critical dynamic stress for airport silt subgrade based on serviceable requirement [J]. Journal of railway science and engineering, 2023,20(3):950-960.
[7] 姜爱锋,姚祖康. 路面结构中地基顶面当量回弹模量的换算[J]. 同济大学学报(自然科学版),2001,29(5):536-540.
JIANG A F, YAO Z K. Calculation of surface equivalent modulus of subgrade in the pavement structure [J]. Journal of Tongji University (natural science), 2001,29(5):536-540.
[8] 罗其奇,张升,李强,等. 飞机荷载作用下湿化对粉土道基应力响应的影响[J]. 工程科学与技术,2023,55(3):87-99.
LUO Q Q, ZHANG S, LI Q, et al. Influence of wetting on the stress response of silt subgrade under aircraft loading [J]. Advanced engineering sciences, 2023,55(3):87-99.
[9] 罗其奇,张升,叶新宇,等. 飞机荷载作用下湿化粉土道基变形特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2188-2199.
LUO Q Q, ZHANG S, YE X Y, et al. Investigation on deformation characteristics of wetting silt subgrade under aircraft loading [J]. Journal of Central South University (science and technology), 2021,52(7):2188-2199.
[10] 易文妮,刘津丞,余虔,等. 循环荷载作用下非饱和盐化粉土动力特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(6):125-133.
YI W N, LIU J C, YU Q, et al. Dynamic characteristics of unsaturated salinized silt under cyclic loading [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023,55(6):125-133.
[11] 蒋应军,戴经梁,陈忠达. 不同等效原则的基层顶面当量回弹

模量算法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2005,25(3): 1-6.

JIANG Y J, DAI J L, CHEN Z D. Calculation method of equivalent modulus of elasticity of foundation under principles of different equivalence[J]. Journal of Chang'an University (natural science edition),2005,25(3): 1-6.

[12] 张献民,刘小兰. 基于路表应变和基频的基顶当量回弹模量研究[J]. 振动·测试与诊断, 2021, 41(6): 1182-1189, 1241-1242.

ZHANG X M, LIU X L. Equivalent modulus of elasticity based on surface strain and fundamental frequency [J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2021, 41(6): 1182-1189, 1241-1242.

[13] 马士宾,孙敬福,袁文瑞,等. 石灰处理软土路基深度与土基当量回弹模量关系研究[J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(5): 97-101.

MA S B, SUN J F, YUAN W R, et al. The relation between the depth of lime treating soft soil subgrade and the soil base equivalent resilience modulus[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2015, 44(5): 97-101.

[14] 吴德华,王选仓,姚爱玲. 陕西关中地区土基回弹模量研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(2): 28-30.

WU D H, WANG X C, YAO A L. Research on rebound modulus of embankment in Shaanxi Guanzhong area [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2005, 22(2): 28-30.

[15] 王国胜. 浅谈土基的承载能力[J]. 黑龙江交通科技, 2011, 34(8): 81, 83.

WANG G S. Talking about the bearing capacity of soil foundation [J]. Communications science and technology Heilongjiang, 2011, 34(8): 81, 83.

[16] 刘涛,刘焕存,孙凤玲,等. 干湿循环对道基材料中粗砂的性能影响研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(6): 115-117.

LIU T, LIU H C, SUN F L, et al. Research on the influence of drying and wetting cycle on mechanical properties of coarse sand in road base materials [J]. Shanxi architecture, 2021, 47(6): 115-117.

[17] 蒋应军,侯传岭,秦宪峰,等. 基层顶面当量回弹模量换算新方法[J]. 公路交通科技, 2005, 22(5): 38-42.

JIANG Y J, HOU C L, QIN X F, et al. Calculation method of composite resilient modulus of foundation under cement concrete pavement[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2005, 22(5): 38-42.

[18] 陈雅贞. 水泥混凝土路面板下地基的综合模量问题[J]. 南京工学院学报, 1988, 18(1): 88-93.

CHEN Y Z. The problem of the composite modulus of foundation under concrete pavement slab[J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 1988, 18(1): 88-93.

[19] 赵云. 飞机荷载作用下高填方机场道基动力响应及累积沉降研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.

ZHAO Y. Dynamic responses and accumulative settlement of subgrade under aircraft load in high-filled airport[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

(上接第 117 页)

2) 随着风荷载的增加,结构侧移及应力比增加;随着提升高度的增加,提升结构组合应力与侧向变形均减小。提升过程中,结构抗风性能满足要求。

3) 提升区监测杆件应力较小,变形可控,略小于计算值,满足施工安全及安装精度要求,验证了施工提升和卸载方案的合理性。

4) 单层平板网格结构施工成型过程会对结构使用阶段应力及竖向变形产生影响,但仍满足结构设计要求,且关键铸钢件节点应力可满足罕遇地震要求。

参考文献:

[1] 李颖. 广州新白云国际机场 10 号维修机库钢屋架整体提升技术及计算[D]. 北京:清华大学, 2004.

LI Y. Integral lifting technology and calculation of steel roof truss of No. 10 maintenance hangar of Guangzhou New Baiyun International Airport[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.

[2] 卢福生,蒋国平,杨林,等. 温州永强机场新建航站楼项目主楼钢屋盖施工技术[J]. 施工技术, 2015, 44(11): 5-9.

LU F S, JIANG G P, YANG L, et al. Steel roof construction

technology of main building of the new terminal for Wenzhou Yongqiang airport [J]. Construction technology, 2015, 44(11): 5-9.

[3] 陈适才,闫维明,周海洋,等. 首都机场大跨网架结构累积提升施工技术的相关问题分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(11): 105-110.

CHEN S C, YAN W M, ZHOU H Y, et al. Related issues of accumulation hoisting technology of long-span lattice framed structure at Beijing international airport [J]. Industrial construction, 2010, 40(11): 105-110.

[4] 刘彪,刘航,李晨光,等. 首都机场 A380 机库屋盖整体提升施工过程分析[J]. 施工技术, 2008, 37(4): 50-52.

LIU B, LIU H, LI C G, et al. Analysis on integral lifting process of A380 air craft hangar roof at capital international airport [J]. Construction technology, 2008, 37(4): 50-52.

[5] 郭彦林,王永海,刘学武,等. 首都国际机场 A380 机库屋盖整体提升一体化建模分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(9): 35-40, 15.

GUO Y L, WANG Y H, LIU X W, et al. Integrated model analyses of the whole lift of steel roof for A380 air craft hangar in Beijing capital international airport [J]. Industrial construction, 2007, 37(9): 35-40, 15.