

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.05.010

袋装土平铺层数对路基沉降影响的数值模拟研究

李 伟¹, 孙肇坤¹, 赵 鑫², 田大鹏³, 王挥云²

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 中铁十九局集团 矿业投资有限公司, 北京 100161;

3. 中冶沈勘工程技术有限公司, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:以武汉天河机场第二公路 S6 标段工程为研究背景,为探讨袋装土平铺层数变化对路基加固的影响,依据 S6 标合同段中 K12 + 300 断面的现场观测数据,运用 FLAC^{3D} 软件进行 1:1 数值建模。通过建立 10、20、30、40 层数平铺摆放的袋装土改良路基模型和无加固路基模型,分析有无袋装土处理后的路基沉降变形及承载力变化。结果表明,袋装土改良路基具有良好的承载特性,且随着平铺袋装土数量的增加,路基承载力也随之提高,不均匀沉降量减小,平铺 40 层的处理方案效果最佳。因此,袋装土路基加固法满足路基质量的控制要求,可应用于工程实践中。

关键词:袋装土;平铺层数;路基模型;沉降;承载力

中图分类号: U416.041

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)05—0054—06

Numerical Simulation of the Influence of the Number of Bagged Soil Layers on Subgrade Settlement

LI Wei¹, SUN Zhaokun¹, ZHAO Xin², TIAN Dapeng³, WANG Huiyun²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;

2. China Railway 19th Bureau Group Mining Investment Co., Ltd., Beijing 100161, China;

3. MCC Shenkan Engineering Technology Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: In order to explore the influence of the change of the number of layers of bagged soil on subgrade reinforcement, this paper took the S6 bid section of the second highway of Wuhan Tianhe Airport as an example. FLAC^{3D} software is used to conduct 1:1 numerical modeling according to the field observation data of K12 + 300 section in contract section of S6 bid section. Through the establishment of 10, 20, 30, 40 layers of bagged soil improved subgrade model and non reinforced subgrade model, the settlement deformation and bearing capacity change of subgrade with or without bag soil treatment were analyzed. The results show that the improved subgrade with bagged soil has good bearing characteristics, and with the increase of the amount of soil in bags, the bearing capacity of the subgrade is also increased, and the uneven settlement is reduced. The treatment scheme of 40 layers is the best. Therefore, the bagged soil subgrade reinforcement method can meet the requirements of subgrade quality control and can be applied in engineering practice.

Keywords: bagged soil; number of tiles; subgrade model; settlement; bearing capacity

土工袋由土工合成材料制作而成,砂土和软黏土等各类土都可作为填充物装入土工袋内,起到加固土体的效果。袋装土技术日益成熟,广泛应用于围海工程、路基工程等多个领域。文献[1-5]通过

袋装土的加固原理及试验研究发现,袋装土具有较高的抗压强度、有效处理膨胀土、良好的减振隔振等特性,能够有效提高地基承载力和减小地基沉降变形。文献[6]针对袋装土具有制作简单,施工技术

收稿日期:2020-05-20

修稿日期:2020-06-13

作者简介:李 伟(1968—),男,辽宁朝阳人,博士,硕士研究生导师,主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。

E-mail: liwei680719@163.com

难度低等特点,结合国内外工程实例,认为在公路建设中具有广阔的应用前景。文献[7]介绍了土工袋技术在市政沟槽回填中的实际应用,根据现场观测数据表明,该技术优于传统的回填方法。Shin 等^[8]在实际工程现场进行袋装砂土填充试验研究,得出土工袋的变形形态与填充材料有着密切关系的结论。文献[9]通过试验结果,可知增加砂袋挡土墙的宽度和墙背比,能提高整体的稳定性。周荣官等^[10]采用地质雷达探测手段,为填充袋筑堤技术提供新的思路。文献[11]从能量守恒的角度考虑,研究发现,在加卸载的不同方式下,土工袋和袋内材料的总耗能百分比呈“波浪形”增减趋势,当占总能量的 75% 以上时,消能效果较好。王森^[12]将离散元方法应用到土工袋模拟研究中,发现土工袋之间的侧压力系数对土工袋的形状不产生影响,并简化了侧压力系数和摩擦系数的计算,使土工袋技术应用理论更加完善。文献[13-15]介绍了袋装砂土地基处理加固技术,并进行室内试验,研究袋装砂土摆放形式和数量对地基加固的影响,研究结果可知,袋装砂土地基加固技术能够提高地基承载力,且对地下管道具有良好的保护效果。刘斯宏等^[16]采用弹塑性有限元法,对土工袋加固后的软土地基承载力试验进行模拟,计算结果表明,数值模拟计算值与试验实测值非常接近,证明了该土工袋数值模拟方法的合理性。

基于以上研究成果,本文以武汉天河机场二通道 S6 标段 K12+300 路段的填土施工情况为例,建立无砂袋加固路基模型、4 种不同层数平铺摆放的袋装土改良路基模型。通过分级回填施加荷载,将模拟计算结果与实测数据进行对比,验证土工袋加固技术应用于路基处理的可行性,确定最佳袋装土平铺层数。

1 袋装土有限元模型建立

1.1 模型方案

(1) 无加固处理方案:按照实际工程的路基处置方案,分层回填填土,建立数值模型,取各个回填阶段荷载-沉降变化曲线。将该曲线与现场监测数据拟合对比,验证模型建立与参数选取合理性。

(2) 袋装土加固处理方案:在验证模型与参数选取合理性的基础上,在初始条件和边界条件不变情况下,将处理路基与土工袋加固路基进行对比,说明土工袋加固技术对提高路基承载力与控制不均匀沉降方面的效果。

1.2 参数选取

本文模拟过程地层均采用摩尔-库仑本构模型。计算需要的力学参数由室内试验和勘察资料及相关理论推导得到,如表 1 和表 2 所示。

表 1 土层参数

土层名称	高度 /m	干密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / $(^\circ)$
填料	8.6	2460	100.0	30.00	10	20
种植土	2.0	1630	12.5	5.77	6	24
含砾土	3.0	1840	29.8	9.19	8	20
硬黏土	8.0	1730	23.8	7.35	7	17
软黏土	2.0	1360	11.1	4.55	4	15

表 2 接触面力学参数

K_n /MPa	K_s /MPa	接触面粘结力 /kPa	土工袋间摩擦角 / $(^\circ)$	抗拉粘结强度 /kPa
268.8	268.8	30	30	2000

接触面(土工袋)参数中法向刚度 K_n 和剪切刚度 K_s 取周围最硬相邻区域等效刚度的 10 倍,即:

$$K_n = K_s = 10 \max \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{\min}} \right] \quad (1)$$

式中: K 是体积模量; G 是剪切模量; ΔZ_{\min} 是接触面法向方向上连接区域上最小尺寸。

根据文献[17-18]整理简化得到土袋黏聚力为:

$$c = \frac{T}{\sqrt{K_p}} \left(\frac{K_p}{H} - \frac{1}{L} \right) \quad (2)$$

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \quad (3)$$

$$C_T = c + \frac{T}{\sqrt{K_p}} \left[\left(\frac{1}{H} + \frac{1}{L} \right) K_p - \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{L} \right) \right] \quad (4)$$

$$C_{\text{土袋}} = c + C_T \quad (5)$$

式中: T 为土工袋张力, kN/m; $C_{\text{土袋}}$ 为土工袋黏聚力, kPa; c 为土体黏聚力, kPa; K_p 为被动土压力系数,与袋内土体摩擦角有关; φ 为袋内土体摩擦角; H 为装土后土工袋高度, m; L 为装土后土工袋长度, m; C_T 装土后土工袋附加黏聚力, kPa。

1.3 建立模型

本文所用工程实例选自《机场二通道服务区高填土路基沉降预测研究》^[19]。运用 FLAC^{3D} 软件对 K12+300 断面建立模型。K12+300 断面地基宽度为 326 m,填土路堤填高 8.6 m,顶、底面宽度分别为 200 m 和 226 m,分层填土高度 30 cm。根据钻探结

果,地表以下 15 m 左右见基岩,取黏土地基计算总深度为 15 m,每三层填土建立一次模型。填高分别为 0.9 m、1.8 m、2.7 m、3.6 m、4.5 m、5.4 m、6.3 m、7.2 m、8.1 m 和 8.6 m。路基地层分布从上到下依次为:种植土(0~2 m)、含砾土(2 m~5 m)、硬黏土(5 m~13 m)、软黏土(13 m~15 m)。K12+300 断面如图 1 所示。

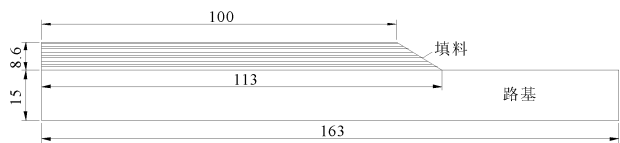


图 1 K12+300 断面示意图(单位:m)

建模计算时,因模型中路基和地基断面的对称性,可取实际工程二分之一进行简化,将路基土层及路面填料分成不同组,即路面填料、种植土、含砾土、硬黏土和软黏土。模型共生成 400 个单元体,672 个网格节点。平铺 10 层时,换填 1.5 m 厚种植土,用土工袋灌装原土样回填,平铺 20 层时,换填 1.5 m 厚种植土、1.5 m 厚含砾土,用土工袋灌装土样回填,平铺 30 层时,换填 1.5 m 厚种植土、3 m 厚含砾土,用土工袋灌装土样回填,平铺 40 层时,换填 1.5 m 厚种植土、3 m 厚含砾土、1.5 m 硬黏土,用土工袋灌装土样回填,每次回填都在袋装土表面平铺 50 cm 厚原种植土,使路基表面平整。如图 2 所示。

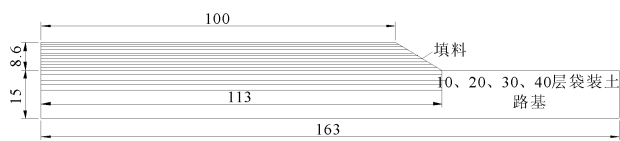


图 2 填土路基模型图(单位:m)

1.4 施工回填阶段模拟

本文选取武汉天河机场二通道 S6 标合同段中的 K12+300 断面,通过全年的现场观测,整理得到 K12+300 断面路基中心点沉降-时间曲线,如图 3 所示。

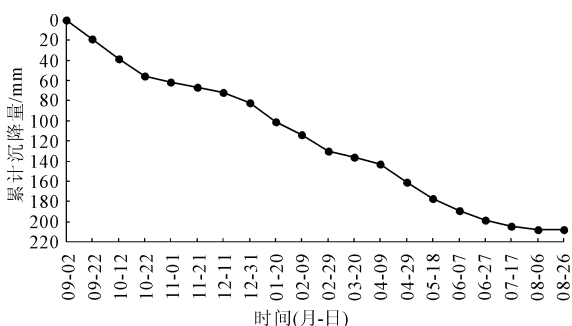


图 3 K12+300 断面路基中心点累计沉降-时间曲线图

根据以上信息,综合数值模拟方法,模拟计算时采用逐级加载方式。一方面,可以计算施工各个阶段的应力应变,找到其中规律;另一方面,通过逐级加载得到土体内部应力应变随填土高度增加的变化规律。路基回填施工阶段模拟过程为:0.9 m、1.8 m、2.7 m、3.6 m、4.5 m、5.4 m、6.3 m、7.2 m、8.1 m、8.6 m 顺序分层激活,共 10 次回填完成,每次回填均进行计算并整理结果。

2 模拟计算结果与分析

2.1 模型合理性论证

根据现场勘查资料及室内土工试验参数,通过数值模拟计算,将模拟计算值与 K12+300 断面路基填土实测值进行比较,如图 4 所示。

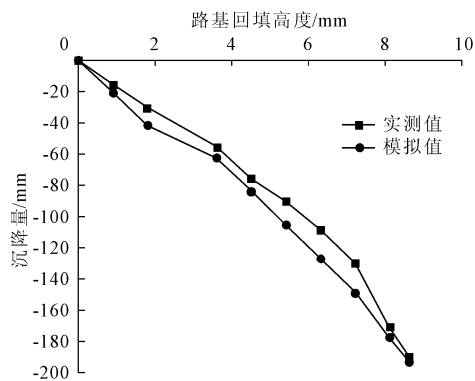


图 4 模拟与实测对比沉降曲线

在模拟计算中假设地基土为饱和土,忽视填土孔隙水压力和地下水位影响,同时,模型设置、参数选取、初始条件与边界条件选择不可能完全接近实际工程。由图 4 可知,路基实测沉降量和模拟沉降值随着回填土高度的增加而增大,且模拟计算值接近于实际观测值,当填筑高度达到最大时,模拟值和实测值基本一致,计算结果拟合度较高。因此,验证了参数选取、初始边界条件设置的合理性。

2.2 土工袋技术有效性论证

2.2.1 模拟路基中心和坡脚沉降结果分析

为验证土工袋技术在控制路基不均匀沉降和提高路基承载力方面的有效性,在原模型基础上分别平铺 0 层、10 层、20 层、30 层和 40 层袋装土。经过对云图计算结果的整理,得到各级回填土下不同方案的路基沉降量与袋装土层数变化关系曲线,部分方案如图 5 所示。

由图 5 可知,在分级回填的情况下,随着上部荷载的增大,路基的最大和最终沉降量均明显增加,这说明上部荷载对地基沉降量的影响较为突出。由图

5(a)—图 5(f)可知,经过袋装土加固处理过的路基,无论是最大或最终沉降量均远小于未处理过的路基,这说明土工袋加固技术可以有效加固处理路基,可以明显减小地基沉降量。进一步分析可知,随着袋装土层数的增加,路基沉降量逐渐减小,路基承载力得到有效提升,当平铺层数接近至 40 层时,路

基沉降量与层数关系曲线趋于平缓,且路基最大沉降量和最终沉降量均达到最小值;分析回填 8.1 m 和 8.6 m 沉降量与层数关系时发现,不同回填高度下,平铺层数为 40 层时对应的最大和最终沉降量几乎一致,故继续增加平铺层数会增加地基沉降量,因此平铺层数为 40 层时的袋装土加固方案最佳。

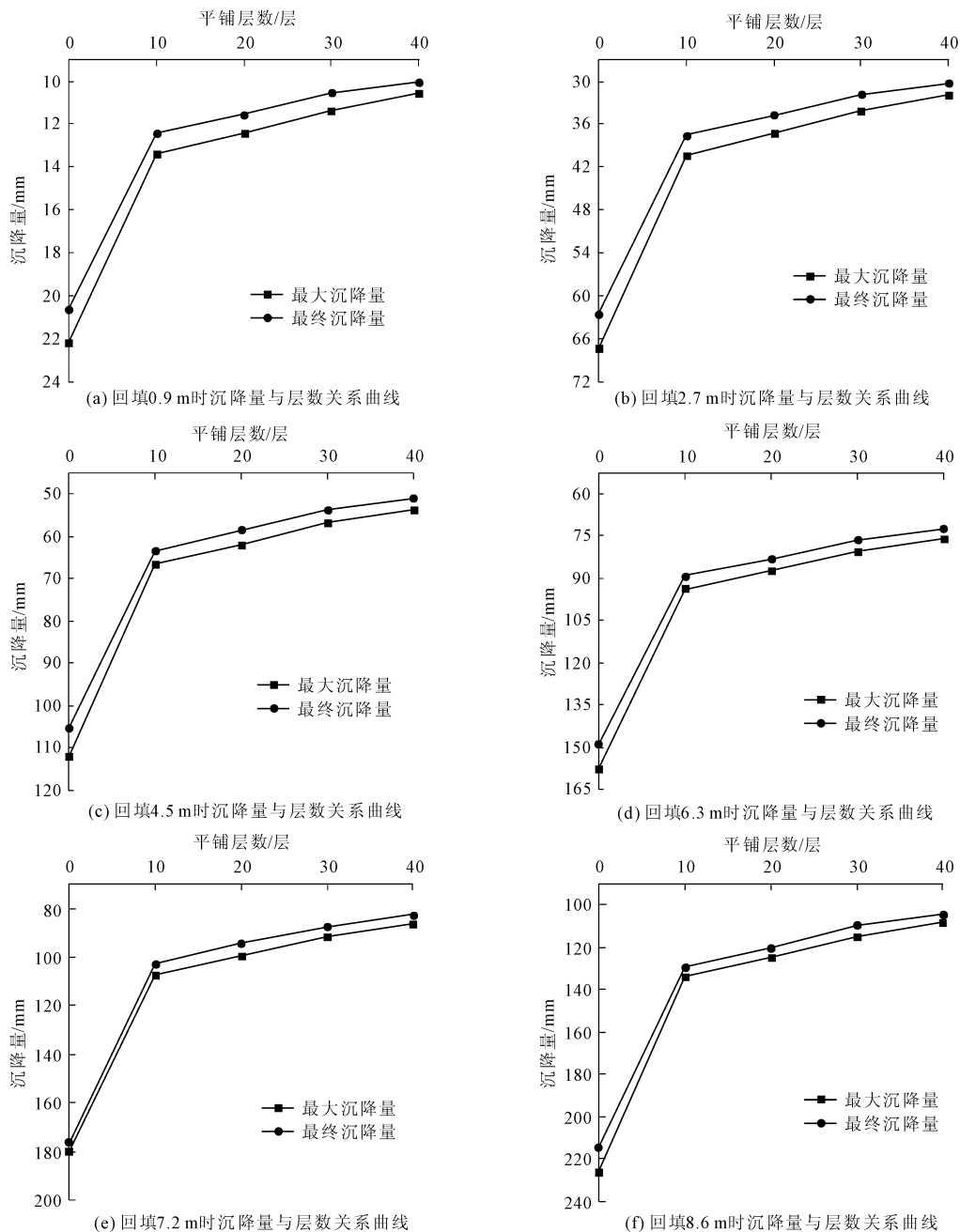


图 5 各级回填时各处理方案沉降曲线(单位:mm)

为了更加清晰说明土工袋技术对提高路基承载力,减少路基沉降方面的作用,经过对各个处理方案下的计算结果整理,分别得到 $P - S_1$ 曲线(路基中心处荷载 - 沉降曲线)与 $P - S_2$ 曲线(路基坡脚处

荷载 - 沉降曲线)如图 6 所示。

从图 6 可知,在相同荷载作用下,无论是路基中心还是坡脚位置的沉降,未处理路基的沉降量均为最大值。这也说明,路基未进行处理时,在上部回填

土荷载作用下,路基的不均匀沉降及总体沉降均大于袋装土处理后的复合路基。这一点可以从土工袋力学性能来解释,相比于松散土体易发生受拉屈服破坏的特点,土工袋因自身具有较高的抗拉强度,能将抗拉材料与松散土体结合为整体受力部件,通过两者之间的接触产生摩擦作用,将土体中受到的上部填土荷载向外扩散,能够有效增加土体的弹性模量。根据摩尔-库仑本构理论,弹性模量的增加必伴随应变(变形)减小。土体中的拉应力在土工袋中传递时,能起到限制袋中土体侧向变形得作用,从而在整体上提高土体抗剪与抗拉强度。

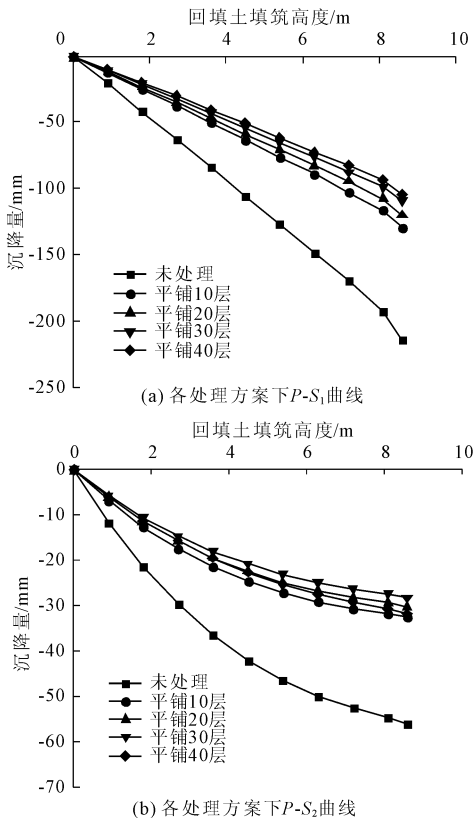


图6 各处理方案下沉降曲线

2.2.2 模拟路基断面沉降结果分析

为进一步说明土工袋技术应用到路基处理方面的可行性,能够有效地控制路基的总体沉降,同时减小不均匀沉降,根据模拟数据绘制出无处理、平铺10层、平铺20层、平铺30层和平铺40层各级回填后的路基断面沉降曲线,通过分析路基断面沉降曲线可知,采用土工袋技术处理的路基可以大幅度提高路基承载力,路基土体的模量不仅得到提升,且路基的整体稳定性还有所加强,使路基在承受相同荷载作用下能减小路面沉降。以最后一级回填为例,最大沉降值由 225.88 mm(无处理)减小至 108.11

mm(平铺40层),降幅52%;路基不均匀差值由 165.93 mm(无处理)减小至 76.26 mm(平铺40层),降幅54%;同时地基水平位移由 56.52 mm(无处理)减小至 27.38 mm(平铺40层),降幅51.55%。

2.2.3 模拟路基水平位移结果分析

水平位移方面,根据自编 Fish 程序将模拟计算时路基中最大沉降值进行记录,以便后期数据处理。将记录得到数据整理如图7所示。由图7可知,各平铺方案路基与未处理路基相比,发生在坡脚以下深处的水平位移均有所减小。从力学性能上来说,由于砂袋间存在的摩擦作用,能够抵消土体间产生的水平张力,阻止砂袋在水平方向上有限滑动,达到减小水平位移的效果。采用土工袋技术将道路路基中部分土体挖出、换填,使得土体-土工袋组合体形成柔性的“硬壳体”,其本身具有较大的压缩强度,在提高路基承载能力和有效限制土体侧向变形方面均发挥巨大作用。

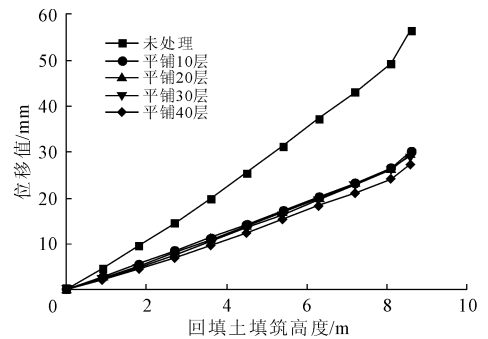


图7 各处理方案下路基最大水平位移曲线

综上所述,在各平铺方案中,随着袋装土层数增加,路基沉降及水平位移都有所下降。最后一级回填时,最大沉降值由 134.1 mm(平铺10层)减小至 108.11 mm(平铺40层),降幅19.38%;沉降差值由 102.72 mm(平铺10层)减小至 76.26 mm(平铺40层),降幅25.76%;最大水平位移由 30.17 mm(平铺10层)减小至 27.38 mm(平铺40层),降幅9.25%。相比于未处理路基,所有袋装土平铺方案均能减小总体及不均匀沉降,其中平铺40层时效果最显著,由此可以论证土工袋技术在该工程中作为路基处理手段是有效可行的;在各个平铺袋装土方案中可以看到,随着袋装土层数增加,路基总体沉降和不均匀沉降逐渐减小,这也符合相同受力条件下,应变随材料强度增加而减小的力学规律,但沉降量减小幅度不大,均在6%~7%之间。

3 结 论

本文以武汉天河机场第二公路 S6 标段工程为研究背景,依照路基处理施工中的各项参数指标和监测数据,运用 FLAC^{3D} 软件建立有无袋装土加固路基处理的数值模型。模拟袋装土在不同平铺层数的条件下,路基发生的沉降变形情况。研究袋装土对路基不均匀沉降及承载力的影响,现得到以下结论:

(1) 运用土工袋加固技术处理后的路基,其沉降变形、不均匀沉降量均明显小于未处理的路基,说明土工袋加固技术在路基加固处理应用中是完全可行的。

(2) 采用土工袋技术加固路基不仅可有效提高路基承载力,还可使路基沉降分布更加均匀合理。

(3) 根据二维有限元袋装土路基模型的计算结果表明,随着袋装土平铺层数的增加,路基不均匀沉降和路基总体沉降程度会越来越小。依据武汉天河机场二通道 S6 标段 K12 + 300 断面结构尺寸,袋装土平铺 40 层的效果要优于其他平铺层数。

参考文献:

- [1] 刘斯宏,高军军,王艳巧.土工袋减振隔振机制分析及试验研究[J].岩土力学,2015,36(2):325-332.
- [2] 刘斯宏,汪易森.土工袋技术及其应用前景[C]//2007 重大水利水电科技前沿院士论坛暨首届中国水利博士论坛论文集.南京,2007:649-653.
- [3] 刘斯宏,松冈元.土工袋加固地基新技术[J].岩土力学,2007(8):1665-1670.
- [4] Matsuoka H, Liu S H. A New Earth Reinforcement Method Using Soilbags[M]. London:Taylor & Francis Group, 2006.
- [5] 刘斯宏,白福青,汪易森,等.膨胀土土工袋浸水变形及强度特性试验研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(6):54-58,129.
- [6] 程雪松,廖洁,方斌昕.土工袋技术在农村公路建设

中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(7):25-27.

- [7] 刘斯宏,高军军,王自健.土工袋技术在市政沟槽回填中的应用研究[J].岩土力学,2014,35(3):765-771.
- [8] Shin E C. Consolidation process geotextile tube filled with fine-grained materials[J]. Internation Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004,14(2):150-158.
- [9] 肖玉强,李伟,耿莹莹,等.砂袋挡土墙土压力和变形特性的试验研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(4):176-181.
- [10] 周荣官,朱群峰,黄康理,等.利用 GPR 探测充填袋结构的试验与研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(1):26-29.
- [11] 王艳巧,王丽娟.土工袋减振与耗能的数值模拟[J].岩土力学,2014,35(2):601-606.
- [12] 王森.土工砂袋变形与受力特性研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [13] 李伟,边宏亮,王成元,等.袋装砂土堆放形式对地基承载性能影响模型试验研究[J].施工技术,2016,45(15):104-108.
- [14] 单新宇.摩擦性袋装砂土地基加固法试验研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2014.
- [15] 李伟,李福栋,郎雷.袋装砂土加固地基并维护地下管道的模型试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(28):133-142.
- [16] 刘斯宏,王柳江,李卓,等.土工袋加固软土地基现场荷载试验的数值模拟[J].水力水电科技进展,2012,32(1):78-82.
- [17] Matsuoka H, Liu S H. A New Earth Reinforcement Method Using Soilbags[M]. A Balkema Publishers - Taylor & Francis, the Netherlands, 2005.
- [18] 刘斯宏,陈越.加筋土堤表层壁体效果的评价[J].岩土力学,2001(4):361-365.
- [19] 刘兵.机场二通道服务区高填土路基沉降预测研究[D].武汉:华中科技大学,2013.