

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.016

土工袋路基基础加固效果及影响因素试验研究

王艳巧¹, 许凯淇¹, 刘康¹, 鲁洋²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:文章利用室内物理缩尺模型试验,研究不同土工袋加固层数、加固宽度以及首层埋置深度条件下的路基基础加载破坏试验,通过分析路基基础坡面裂缝率、荷载-沉降关系曲线以及路基基础内部土压力沿水平方向传递和竖直方向分布规律等,研究土工袋加固层数、加固宽度及首层埋置深度对路基基础加固效果的影响及其规律。结果表明:土工袋对基础内部土压力的分布有显著影响,且荷载越大土工袋加固效果越明显;土工袋加固层数及加固宽度越大,路基基础加固效果越好,但在保证经济成本的前提下并不是加固层数越多、加固宽度越大越好;顶层土工袋距加载板越近越有利于控制路基基础沉降,但不利于抑制裂缝的开展,因此建议实际工程中适当保留一定的首层埋置深度,以利于控制裂缝的开展。

关键词:路基基础;土工袋;模型试验;承载力;沉降量;土压力

中图分类号:TU441 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)10-1396-08

Experimental study of reinforcement effect of soilbags on subgrade foundation and its influencing factors

WANG Yanqiao¹, XU Kaiqi¹, LIU Kang¹, LU Yang²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract:Based on the indoor physical scale model test, this paper studies the subgrade foundation loading failure test under the conditions of different layers, width and buried depth of the first layer of soilbags. By analyzing the distribution of cracks on the slope surface of the subgrade foundation and the crack rate, the load-settlement relationship curve, as well as the distribution law of the internal earth pressure in the subgrade foundation along the horizontal direction and the vertical direction, the paper studies the influence and law of the number of layers, width and buried depth of the first layer of soilbags on the reinforcement effect of the subgrade foundation. The results show that the soilbags have a significant impact on the distribution of the internal earth pressure of the foundation, and the greater the load, the more obvious the reinforcement effect of the soilbags; the more layers and the larger the width of soilbags, the better the effect of subgrade foundation reinforcement, but it is not the case under the condition of ensuring economic cost; the closer the top soilbag is to the loading plate, the more beneficial it is to control the settlement of the subgrade foundation, but not to control the development of cracks. Therefore, it is suggested that a certain buried depth of the first layer should be appropriately reserved in the actual project to facilitate the control of the development of cracks.

Key words: subgrade foundation; soilbags; model test; bearing capacity; settlement; earth pressure

收稿日期:2023-02-20;修回日期:2023-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51908175;52109123)

作者简介:王艳巧(1983—),女,安徽萧县人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师;

刘康(1988—),男,安徽天长人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师,通信作者, E-mail: k.liu@hfut.edu.cn.

0 引 言

路基基础强度不足不仅会严重影响公路的使用寿命,对道路交通安全造成威胁,还有可能导致一定的人员伤亡和财产损失。因此,研究快速有效的路基基础加固方法是工程界亟需解决的问题之一。

目前常用的路基加固方法有针对软土的灌浆法、排水固结法;针对湿陷性黄土的强夯法、挤密法以及小范围工程常用的开挖换填法等^[1]。但现有的加固方法大多存在工期长、工作量大、施工成本和设备要求高等问题。

土工袋处理技术最早应用于港口建设、防洪抢险及临时性的挡土建筑物。文献[2-3]在进行大量的考察和试验研究的基础上提出土工袋加固地基的新技术,并对其基本原理、基本特性等进行深入研究,为土工袋在工程实际中的推广应用奠定基础。土工袋加固路基具有其自身独特的优势,可很好地改善现有路基加固方法存在的问题。首先土工袋袋内材料没有限制,一方面可节省材料的运输成本,另一方面可再次利用废弃渣料;其次土工袋施工简单无需特殊设备,小型道路仅靠人力便可完成铺设,且土工袋单价低有助于减少工程投资^[4-6]。

目前,国内外许多学者通过试验探究或数值模拟等方法对土工袋加固效果进行研究,并得出土工袋对地基基础确有加固效果的结论。文献[7]提出土工布包裹土的统一应力应变模型,利用该模型可明显提高包裹土的强度;文献[8]从多个角度分析砂袋垫层竖向承载力影响因素和机理,试验结果显示,砂袋垫层可满足一般多层建筑的竖向承载需要;文献[9]采用 FLAC3D 有限差分软件分别对土工格室和土体进行数值模拟,并将该模型扩展到土工格室地基,在此基础上探究效率最高的放置条件;文献[10]进行土工袋加筋土承载力试验及数值研究,结果表明,在地基中使用土工袋可显著提高地基承载力,土工袋的数量是增加地基承载力、减少沉降的重要因素之一;文献[11]对土工袋进行竖向承载及循环压缩特性试验,结果表明土工袋组合体压缩模量在土工袋层数达 3 层以后趋于稳定;文献[12]对土工袋砂桩复合地基进行室内模型静载试验,发现袋装砂桩的性能远远超过传统砂桩,且试验结果与弹塑性理论更为接近;文献[13]利用有限元分析方法探究了袋体包裹长度、土工袋刚度及置换率对复合

路基性状的影响,结果表明复合路基桩土应力有所提高,沉降及桩身变形均有所减小;文献[14]利用 3D 弹塑性有限元对土袋桩复合地基的动力特性进行研究,结果表明,土袋可有效分散应力并显著降低桩头的弯矩。

土工袋加固原理日趋成熟,加固效果在众多工程中也已得到证明,目前对土工袋加筋基础的研究多侧重于提高承载力、减小沉降方面,但对于基础整体稳定性、具体变形特性、破坏形式及结构内部土压力分布等方面的研究较少,土工袋布置方式对加固效果的研究也不全面。因此,本文通过室内物理缩尺模型试验,验证土工袋对路基基础的加固效果,并通过改变土工袋的层数、加固宽度及首层埋置深度,对比路基坡面裂缝分布与裂缝率、路基沉降量、土压力沿水平方向传递及沿竖直方向分布规律等,探求土工袋加固层数、加固宽度和首层埋置深度等对路基基础加固效果的影响及其规律,分析土工袋加固路基最佳布置方式,以提高资源的利用率。

1 试验概况

1.1 试验装置及材料

试验在内部尺寸为 240 cm × 100 cm × 100 cm(长 × 宽 × 高)的模型箱内进行。为便于观察试验现象及模型在试验过程中的变化,模型箱前、后、右侧三面均采用 20 mm 厚的有机玻璃板粘合而成,左侧采用可抽拉式铁板以便于模型的制作。为防止模型箱在加载过程中因发生较大的侧向变形而影响试验结果的准确性,有机玻璃板与槽钢间的微小空隙用超薄塑片进行填充,在箱体前后两侧面板上均用高强度槽钢配置上下间距为 50 cm、左右间距为 40 cm 的条状加强件(加筋肋),并用相同型号的槽钢对箱体底部和顶部框架结构进行加固。在堆筑模型时,沿高度方向每 10 cm 绘制一条白色沉降标识线以便观察模型的沉降变化。

试验选用尺寸为 20 cm × 10 cm × 3 cm(长 × 宽 × 高)的普通土工袋,土工编织袋原材料为 60 g/m²的聚丙烯(PP),其经向、纬向的抗拉强度分别为 8、4 kN/m,经向、纬向伸长率均小于 20%。编织袋内装土体与路基基础所用的土体材料相同,其物理力学参数为:密度 1.40 g/cm³,含水率 6%,黏聚力 3.48 kPa,内摩擦角 18.3°。

1.2 试验方案及方法

为探究土工袋加固层数、加固宽度 b 以及土

工袋首层埋置深度 h 对路基基础加固效果的影响及其规律,采用控制变量法进行 9 种不同工况下的室内物理缩尺模型试验。试验采用断面形式为矩形辅以等腰梯形的路基基础。基础底部矩形尺寸为 $240\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高),上部梯形尺寸为 $70\text{ cm} \times 220\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ (上底 \times 下底 \times 宽 \times 高)。为减小箱体前、后两侧壁内摩擦力的影响,试验前对两侧壁内表面进行擦拭清洁。在侧壁板上事先绘制多条 5 cm 高的分层线及路基基础坡比线,模型在填筑过程中按侧壁板指示线位置分层填筑、分层压实。借助电子秤确保每桶填料等重,保证相同体积路基基础所用填料质量相同,以确保各分层基础填料密实度相同。基础内部土工袋均采用错缝方式放置,避免通缝对基础强度产生影响。为防止填土密实度不足导致试验初期路基沉降过大,待模型填筑完成后在坡顶施加 2 kN 荷载预压 12 h 。试验工况见表 1 所列。

表 1 试验工况

工况编号	是否加固	加固层数	加固宽度/cm	首层埋置深度/cm
对照组	否	0	0	
A-1	是	2	90	17
A-2	是	4	90	17
A-3	是	6	90 <td 17	
B-1	是	6	30	17
B-2	是	6	50	17
B-3	是	6	70	17
B-4	是	6	90	17
C-1	是	6	90	12
C-2	是	6	90	17
C-3	是	6	90	22

首先进行素土路基(对照组)、2 层土工袋加固(工况 A-1)、4 层土工袋加固(工况 A-2)和 6 层土工袋加固(工况 A-3)4 种不同土工袋加固层数的加筋土路基试验,以验证土工袋的加固效果和土工袋加固层数对路基基础加固及其规律。然后验证土工袋加固宽度这一因素对路基基础加固效果影响及其规律,在加固层数为 6 层的条件下分别进行加固宽度为 30 cm (工况 B-1)、 50 cm (工况 B-2)、 70 cm (工况 B-3)、 90 cm (工况 B-4)的试验并与对照组进行对比。在加固层数为 6 层、加固宽度为 90 cm 的条件下,分别进行首层埋置深度为 12 cm (工况 C-1)、 17 cm (工况 C-2)、 22 cm (工况 C-3)的对比试验,探究土工袋首层埋置深度对

路基基础加固效果影响及其规律。

为分析加载过程中路基基础内部土压力的变化并探究其沿水平及竖直方向分布规律,在模型的中轴线上从距基础顶面 15 cm 深度处开始沿基础深度方向每隔 10 cm 布置 1 个电阻式土压力盒(共计 7 个),在距基础顶面 45 cm 深度处沿水平方向每隔 15 cm 增设 1 个电阻式土压力盒(共计 6 个),埋设位置如图 1 所示。在埋设过程中为确保土压力盒的受力面保持竖直,用部分砂预先固定住土压力盒。

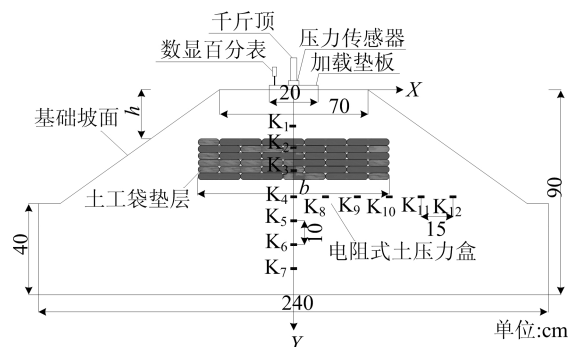


图 1 加筋路基基础试验模型

采用油压千斤顶对土工袋加筋土路基基础以 15 kPa 为一级进行分级加载,鉴于素土路基承载力相对较低,以 7.5 kPa 为一级进行分级加载。所施加的荷载均通过 $98\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ (长 \times 宽)的加载板均匀传递给路基基础,加载直至在某一级荷载作用下路基基础表面出现明显裂缝时停止加载。为监测路基基础模型在不同荷载下对应的沉降量,在模型顶面对称放置 2 个量程为 100 mm 的数显百分表,待每级荷载作用下模型沉降稳定之后读取相应沉降量,取两者平均值以减少误差。

试验结束后观察、记录并用相机拍摄路基坡面的裂缝分布,对比不同加固条件下路基坡面裂缝分布与裂缝率、路基沉降量、土压力水平和竖向分布规律。

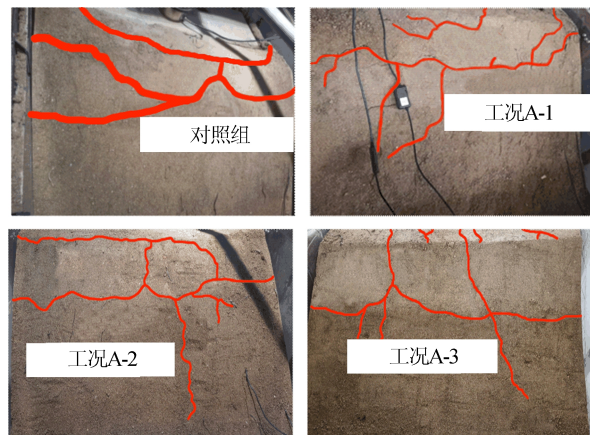
2 试验结果及分析

2.1 路基坡面裂缝率变化

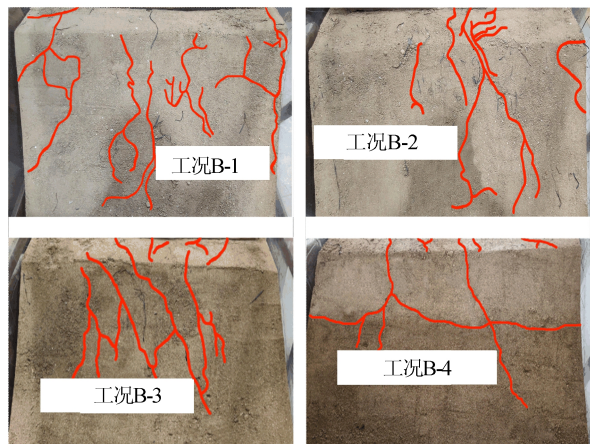
上部、素土路基荷载分别为 120 kPa 、 90 kPa 时路基基础坡面裂缝分布如图 2 所示。上述荷载作用下、不同加固条件下基础坡面裂缝率(基础坡面裂缝面积/基础坡面面积)的变化如图 3 所示。由图 3 可知,与素土路基相比,加筋土路基基础坡面裂缝率明显减小,不同加固条件下路基基础坡面

裂缝率也不同。由图 2a、图 3a 可知,加筋路基基础坡面裂缝宽度减小,随着土工袋加固层数的不断增加,基础坡面的裂缝率也有所减小。

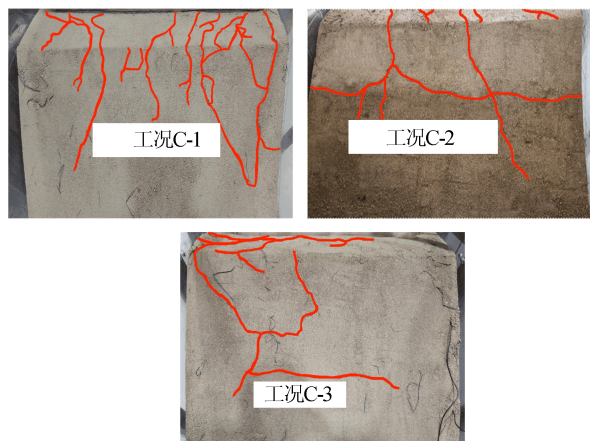
这是由于土工袋垫层对路基基础内部附加应力扩散角有扩大作用^[15],土工袋加固层数越多垫层的范围越大,附加应力分布范围也越大,坡面承受的应力更为均匀,因此基础坡面产生的裂缝越少。



(a) 不同加固层数

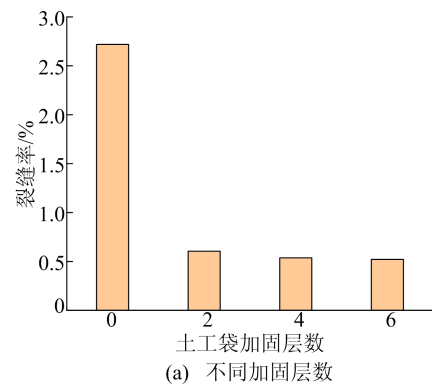


(b) 不同加固宽度

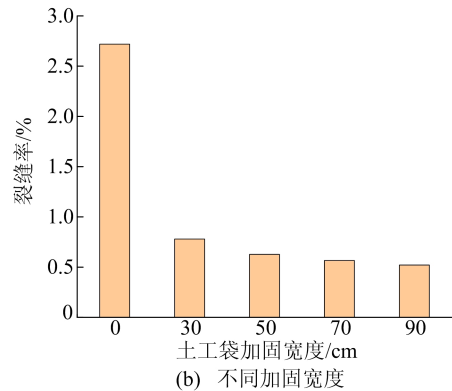


(c) 不同首层埋置深度

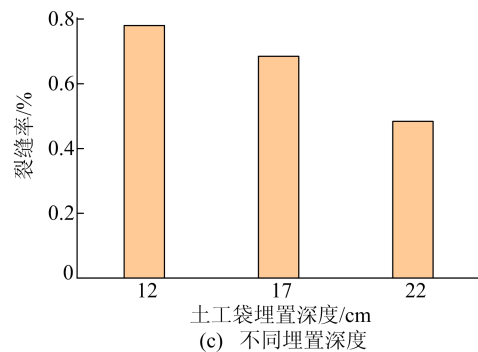
图 2 不同工况下基础坡面裂缝分布图



(a) 不同加固层数



(b) 不同加固宽度



(c) 不同埋置深度

图 3 不同工况下基础坡面裂缝率变化

由图 2b、图 3b 可知,基础坡面裂缝率随土工袋加固宽度增大整体呈减小趋势。这是由于土工袋对基础内部附加应力的扩散效果优于素土,土工袋加固宽度越大越有利于上部荷载的扩散,从而缓解部分坡面承受应力过大的问题,进而减小裂缝率。

由图 2c、图 3c 可知,土工袋首层埋置深度越小,坡面裂缝率越大。这是由于土工袋垫层距加载板越近,垫层承受的附加应力越大^[16],基础表面破坏越严重,由基础表面延伸至坡面的裂缝越多,导致坡面裂缝率升高。

2.2 路基沉降量对比分析

为对路基基础沉降进行全过程监测,填筑模型时用石英砂在模型内部预先埋设沉降标识线。通过基础顶面垫板上预先放置的压力传感器及数

显百分表测定各级压力对应的基础沉降。各种不同工况下路基荷载-沉降曲线(P - S 曲线)如图 4 所示。

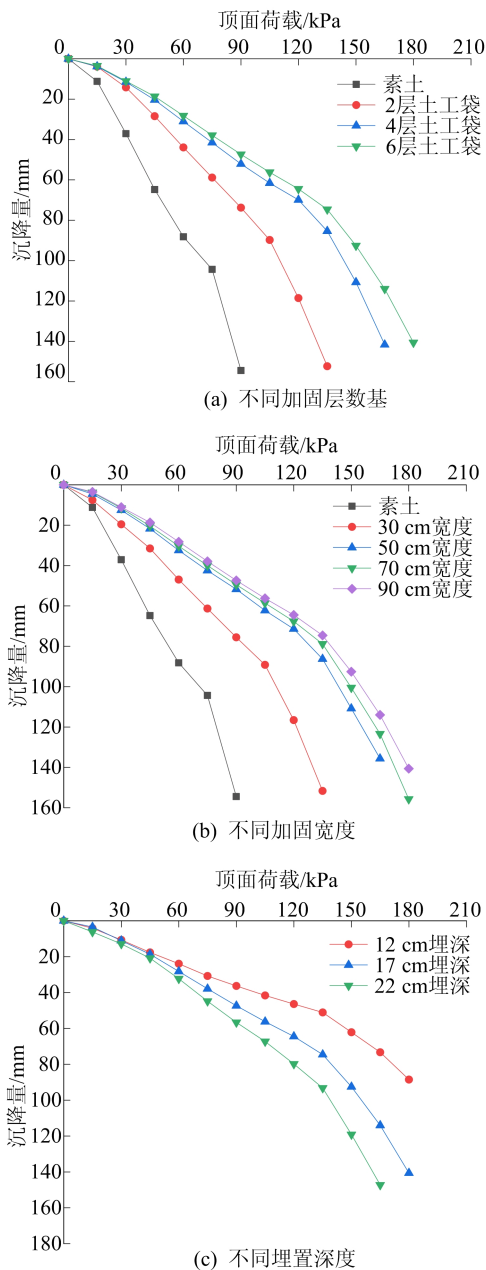


图 4 不同工况下路基荷载-沉降曲线

由图 4 可知,与素土路基相比,相同荷载作用下土工袋加固路基沉降量明显减小,可见土工袋可有效抑制路基基础的沉降,与文献[17-18]研究结论一致。

在加载初期,由于坡顶施加荷载较小,路基产生沉降量也较小,各加固土路基曲线斜率相近,沉降差异不明显;随着荷载的持续增加,基础沉降量持续增大,曲线斜率亦有所增加。

此外,由于土工袋的包裹作用,袋体与砂土结

合为整体的受力单元体,其刚度远大于砂土的刚度,因此在相同外力作用下,加固土路基沉降量小于素土路基的沉降量,即其荷载-沉降曲线斜率小于素土路基的。

由图 4a 可知,当荷载较大时,在相同荷载作用下,土工袋加固层数越多路基基础沉降量越小,曲线斜率也逐渐变小,可见增大土工袋层数可有效减小基础沉降量。但对比 4 层与 6 层土工袋加固路基基础发现,两者荷载-沉降曲线相近,增加土工袋层数对减小基础沉降量作用不明显。因此,在保证经济成本的前提下,并不是土工袋加固层数越多越好。

由图 4b 可知,当荷载较大时,在相同荷载作用下,路基基础沉降量随土工袋加固宽度增大逐渐减小。对比 50 cm 及以上加固宽度下 3 种工况荷载-沉降曲线可知,3 条曲线较为接近,此时继续增大土工袋加固宽度对减小沉降作用不明显。可见适当增大土工袋加固宽度可有效减小基础沉降,但超过 2~3 倍基础宽度后再继续增大土工袋加固宽度对减小沉降量作用不明显。

由图 4c 可知,当上部荷载较小时,各加固土路基荷载-沉降曲线相近。这是由于此时土工袋对基础的加固效果尚未全部发挥,各加固土路基沉降量差异较小。当荷载较大时,在相同荷载作用下,随着土工袋首层埋置深度的减小,加固土路基各部分的沉降量亦有所减小。

这是由于土工袋垫层具有较大的抗压强度,顶层土工袋距加载板越近,应力向土工袋垫层越集中,附近沙土承担的附加应力越小,控制沉降量的效果越明显。可见减小土工袋首层埋置深度可有效减小路基基础的沉降量。

竖向荷载加至 75 kPa 并稳定时,借助有机玻璃板透明特性,沿加载板外沿每隔 5 cm 量取一次基础顶面沉降,结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,不同工况下路基顶面各点沉降曲线与对应工况荷载-沉降曲线规律一致。且基础顶面沉降均呈自加载板两端向坡面逐渐减小的趋势。与素土路基相比,加固土路基基础顶面沉降量有所减小且分布更为均匀,基础顶面加载板范围内的沉降量均大于其他范围。

这是由于加载板范围内的基础直接承受上部均布荷载作用,土压力值最高,因此对应的路基沉降量也最大。

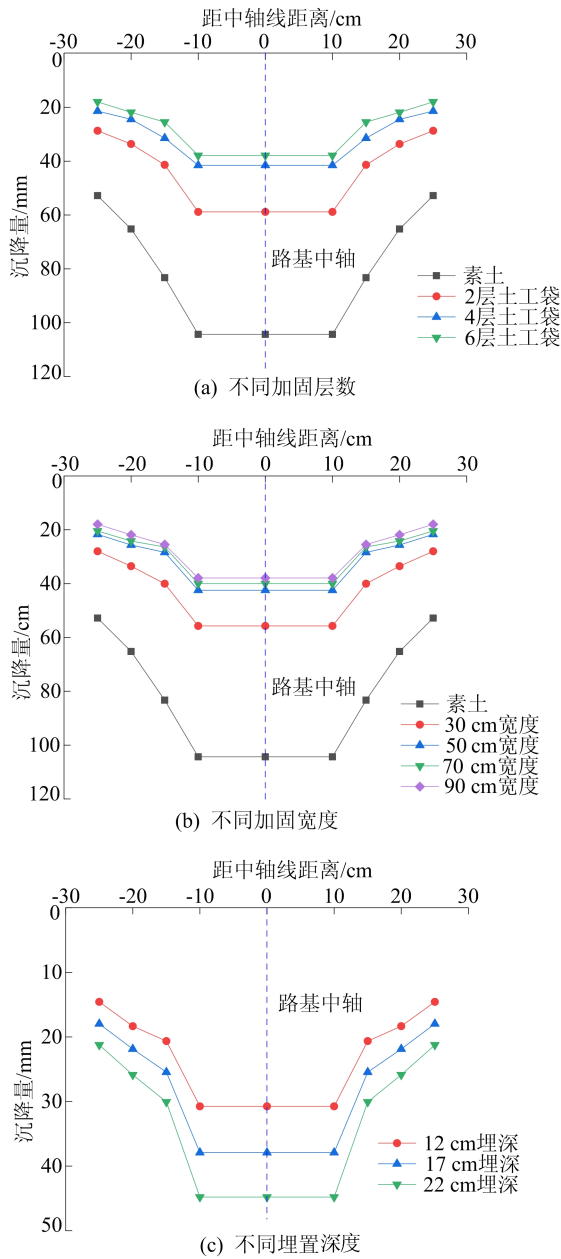


图 5 不同工况下路基顶面各点沉降量分布曲线

2.3 土压力沿水平传递和竖向分布规律

不同工况下竖向荷载为 75 kPa 时,在距基础顶面 45 cm 深度处土压力沿水平方向分布规律如图 6 所示。

由图 6 可知,土压力呈自加载板中心向坡面两端逐渐减小的趋势。这是由于荷载中心作用于路基基础中轴线处并逐渐向两端扩散,中轴线区域直接承受上部荷载,土压力值最高,越远离中轴线土压力越小。由图 6 还可知,土工袋加筋土路基土压力曲线沿水平方向变化平缓,即在中轴线附近加筋土路基土压力明显小于素土路基,而远离中轴线处土压力缓慢降低,基础内部各位置土压力的分布较素土路基更为均匀。可见土工袋可

有效重调路基基础内部土压力分布,使路基内部各处土压力分布更趋均匀。

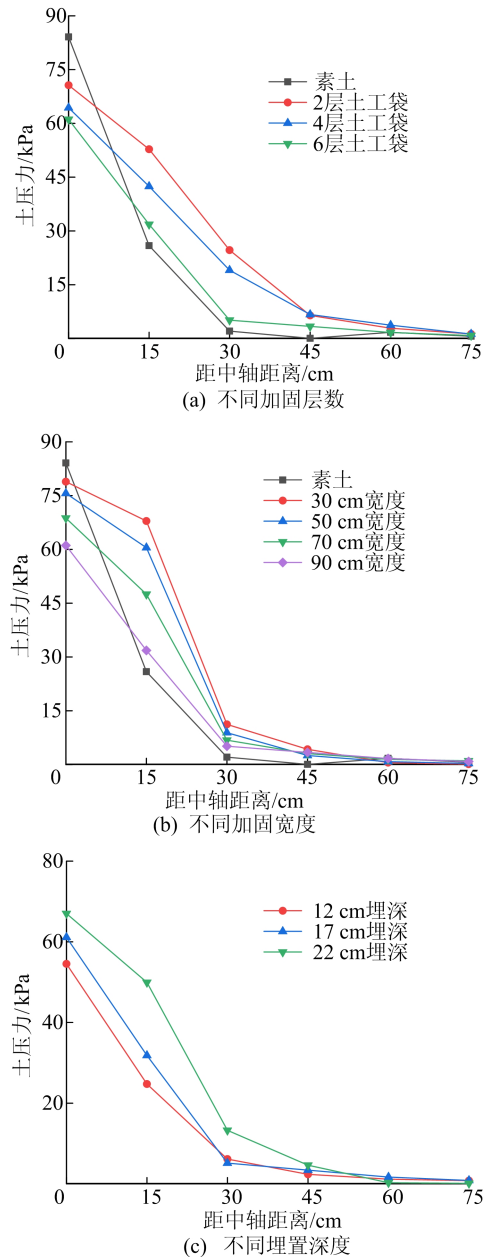


图 6 不同工况下土压力水平方向分布规律

由图 6a 可知,随着土工袋加固层数的增加,土压力峰值逐渐减小,且其分布更趋均匀。这是由于加筋土路基内部土工袋垫层对路基基础内部应力传递及扩散有增强作用,随着土工袋层数增加,土工袋垫层范围沿竖向逐渐增加,进而增大附加应力沿竖向扩散程度,增大附加应力的作用范围,从而使土压力分布更为均匀。

由图 6b 可知,随着土工袋加固宽度增大,路基中轴线处土压力值明显减小。这是由于土工袋垫层宽度越大,附加应力沿水平向扩散范围越广,

中轴线处土压力扩散越多,因此峰值土压力降低。可见增大土工袋加固宽度可有效降低基础中轴线处土压力。

由图 6c 可知,土工袋首层埋置深度越大,曲线峰值也越大,土压力分布的均匀性下降。这是由于距加载板越近,土工袋垫层受到的竖向附加应力越大。随着土工袋首层埋置深度的增加,土工袋垫层承担的附加应力降低,垫层下方土体承担的附加应力升高,因此随着土工袋首层埋置深度的增加,距基础顶面 45 cm 深度处的土压力亦有所增加。

不同工况下竖向荷载为 75 kPa 时,土压力沿垂直方向的分布规律如图 7 所示。由图 7 可知,路基基础内部竖向土压力均呈非线性分布。加筋土路基内部土压力峰值均出现在土工袋垫层附近,且不同加固条件下的加筋土路基之间内部土压力竖向传递规律也有较大差异,土工袋对路基基础内部土压力的竖向传递有一定影响。

由图 7a 可知,加筋土路基土压力峰值均出现在距基础顶面 25 cm 深度处。这是由于土工袋垫层集中分布于该区域,与基础内部其他区域相比土工袋垫层刚度较大,承担的土压力也较大。由图 7a 还可知,随着土工袋加固层数增加,加筋土路基基础内部竖向土压力峰值也有所增加,土压力变化幅度增大。这是由于加固层数越多,土工袋垫层整体刚度越大,其承担基础内部的附加应力也越大。

由图 7b 可知,随着加固宽度的增加,加筋土路基内部竖向土压力的峰值减小,土压力分布更为均匀。这是由于土工袋对基础内部附加应力的扩散作用显著大于砂土。增大土工袋加固宽度可直接扩大基础中轴线两侧土工袋垫层对应力的扩散范围,进而减小基础中轴线处的土压力。由图 7b 还可知,当土工袋加固宽度大于 50 cm 时,加筋土路基竖向峰值土压力减小幅度明显降低,因此超过一定加固宽度后,基础内部竖向土压力峰值减小的效果增加不大。

由图 7c 可知,不同首层埋置深度条件下路基基础内部竖向土压力有明显差异,土工袋首层埋置深度对基础内部竖向土压力有很大影响。这是由于土工袋垫层承担的土压力较大,使得垫层附近土压力值大于基础内的其他区域。顶层土工袋埋置深度不同,对应基础内部土工袋垫层的位置不同,基础内部承受较大土压力的位置亦有所不同,因此不同首层埋置深度条件下各加筋土路基

内部土压力竖向传递有较大差异。

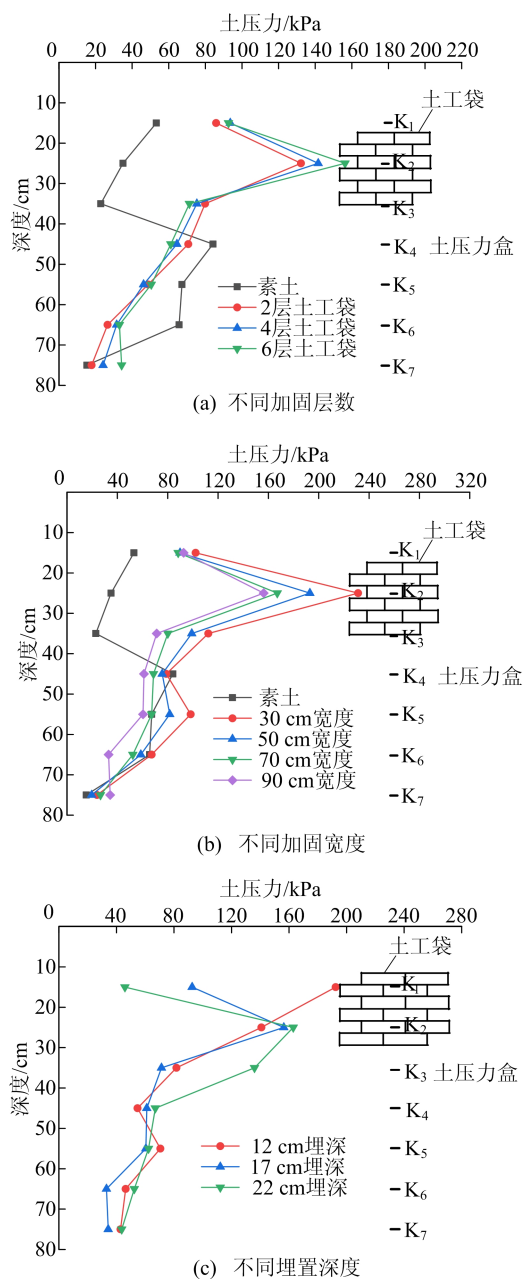


图 7 不同工况下土压力竖向分布规律

3 结 论

本文基于室内模型试验研究土工袋加固层数、加固宽度及首层埋置深度对路基基础加固效果的影响及其规律,并分析路基基础坡面裂缝分布与裂缝率、路基沉降量、土压力沿水平方向传递及沿垂直方向分布规律,得到以下结论。

1) 与素土路基相比,加筋土路基坡面裂缝率及基础沉降量明显减小。水平方向加筋土路基内部土压力峰值有不同程度的减小,土压力分布更

为均匀。竖直方向基础内部土压力呈非线性分布,加筋土路基内部土压力峰值均出现在土工袋垫层附近。

2) 土工袋加固层数对路基基础加固效果的增强作用存在有效区间。在一定加固层数范围内,土工袋加固层数越多,路基坡面裂缝率及基础沉降量越小,加固效果越好。超出该范围后,加固效果虽有提升但不明显。可见在保证经济成本的情况下并不是加固层数越多越好。

3) 相同荷载作用下,路基坡面裂缝率及沉降量随土工袋加固宽度增大逐渐减小,基础内部土压力分布更趋均匀。当土工袋加固宽度超过一定值后,继续增大土工袋宽度对加固路基及改善土压力分布的作用提升有限。

4) 土工袋首层埋置深度对路基基础沉降有明显影响。相同荷载作用下,土工袋首层埋置深度越小基础沉降量越小,水平方向土压力分布越均匀,然而对控制裂缝率的效果越差。因此,建议留有一定的首层埋置深度以有效抑制路基基础坡面裂缝的开展。

[参 考 文 献]

- [1] 刘松玉,周建,章定文,等.地基处理技术进展[J]. 土木工程学报,2020,53(4):93-110.
- [2] 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.
- [3] MATSUOKA H, LIU S H. New earth reinforcement method by geotextile bag ("Donow")[J]. Soils and Foundations, 2003,43(6):173-188.
- [4] 文华,曹兴,邹娇丽,等. 建渣土工袋力学特性试验研究[J]. 浙江工业大学学报,2017,45(2):217-222.
- [5] 毕鑫洋. 土工袋地基处理加固技术发展前景[J]. 山西建筑,2016,42(31):80-81.
- [6] 黄波,刘斯宏,吴平,等. 土工袋技术在农村地区的应用[J]. 水利水电技术,2020,51(增刊2):401-404.
- [7] SHEN C M, FAN K W. A simple unified stress-strain model for geotextile-wrapped soils [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021,27(9):27-31.
- [8] 盛涛,肖畅,李水明,等. 砂袋垫层的竖向承载力试验研究[J]. 工业建筑,2018,48(6):96-100.
- [9] MOHAMMAD O, SAEED K. Efficiency of cellular geosynthetics for foundation reinforcement [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016,45(2):11-22.
- [10] NADER H, MEHDI S. Experimental and numerical study on the bearing capacity of soils reinforced using geobags [J]. Journal of Building Engineering, 2018,15:290-297.
- [11] 方斌昕,刘斯宏,鲁洋,等. 土工袋竖向承载及循环压缩特性试验研究[J]. 西南交通大学学报,2023,58(1):210-218.
- [12] 段园煜,张仪萍,郭书魁,等. 土工袋装砂桩复合地基室内模型静载试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2013,34(5):599-604.
- [13] 杨平,赵磊军,刘星,等. 土工袋装砂桩复合路基的理论研究和数值模拟分析[J]. 公路交通科技,2017,34(4):32-38.
- [14] TATSUYA D, YOSHITAKA M. Numerical investigation of dynamic behavior of composite foundation composed of soilbags and piles by 3D elastoplastic FEM[J]. Soils and Foundations, 2022,62(3):1-20.
- [15] 李丽华,崔飞龙,肖衡林,等. 轮胎与格室加筋路堤性能及承载力研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(1):81-88.
- [16] 李丽华,肖衡林,郑俊杰,等. 废旧轮胎加筋路堤边坡模型试验研究[J]. 工程力学,2015,32(11):79-85.
- [17] 李伟,张帆,郎雷. 外墙围袋装砂土地基室内模型试验研究[J]. 科学技术与工程,2019,19(19):274-281.
- [18] 李伟,孙肇坤,赵鑫,等. 袋装土平铺层数对路基沉降影响的数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(5):54-59.

(责任编辑 张 镛)

(上接第 1376 页)

- [11] BALASUBRAMANIYAN V, DHAR D K, WARNER A E, et al. Importance of Connexin-43 based gap junction in cirrhosis and acute-on-chronic liver failure [J]. Journal of Hepatology, 2013,58(6):1194-1200.
- [12] IADECOLA C, ZHANG F, CASEY R, et al. Inducible nitric oxide synthase gene expression in vascular cells after transient focal cerebral ischemia [J]. Stroke, 1996,27(8):1373-1380.
- [13] 胡樱凡,符佳,张艳,等. 妇科千金胶囊对 LPS 诱导 RAW 264.7 细胞炎症及氧化应激的影响 [J]. 中成药, 2021, 43(11):3152-3158.
- [14] 许家栋,上官熳婉,徐孟杰,等. 类风湿关节炎的氧化应激与 SOD 抗氧化研究进展 [J]. 风湿病与关节炎, 2016, 5(7):65-70.
- [15] SALEEM A, SALEEM M, AKHTAR M F, et al. Moringa riv-ae leaf extracts attenuate complete Freund's adjuvant-induced arthritis in Wistar rats via modulation of inflammatory and oxidative stress biomarkers [J]. Inflammoparmacology, 2020,28(1):139-151.

(责任编辑 闫杏丽)