

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.01.014

悬臂式加筋填土复合支挡结构承载特性的有限元分析

黄玉纯¹, 杨泽晨², 祝俊华², 詹刚毅¹, 耿大新²

(1. 南昌铁路勘测设计院有限责任公司, 江西 南昌 330002; 2. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 研究悬臂式挡土墙及加筋填土新型复合支挡结构的承载特性,是应对当前我国公路高速化、重载化所带来的路基承载力不足等问题的重要方法之一。本文基于 ABAQUS 有限元软件,建立悬臂式挡土墙及加筋填土复合支挡结构填筑路基的平面应变模型。通过土工格室加筋填土前后情况对比及改变土工格室的加筋层数进行分析,研究不同铺设层数土工格室对路基及挡土墙的位移、受力特性的影响。结果表明在悬臂式挡土墙填筑路基中采用土工格室加筋填土能够有效限制路基竖向沉降及挡土墙侧向位移,且可有效改善挡土墙受力情况,使挡土墙受力更加均匀。土工格室加筋填土可提高路基的整体稳定性并减小塑性区,且控制效果与土工格室加筋填土的层数成正相关。

关键词: 公路路基; 承载特性; 数值计算; 悬臂式挡土墙; 加筋路基; 土工格室

中图分类号: U411

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)01-0105-07

Finite element analysis of bearing characteristics of cantilever reinforced filling composite retaining structure

HUANG Yuchun¹, YANG Zechen², ZHU Junhua², ZHAN Gangyi¹, GENG Daxin²

(1. Nanchang Railway Survey and Design Institute Co. Ltd, Nanchang 330002, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The research on the bearing characteristics of cantilever retaining wall and new reinforced filling composite retaining structure is one of the important methods for dealing with the problems of insufficient subgrade bearing capacity caused by the high-speed and heavy load of highway in China. Based on the ABAQUS finite element software, the plane strain model for subgrade filled with cantilever retaining wall and reinforced filling composite retaining structure is established in this paper. Through the comparison of the situation before and after the reinforced filling of the geocell and the analysis of changing the number of reinforced layers of the geocell, the effects of different laying layers of the geocell on the displacement and stress characteristics of the subgrade and retaining wall are studied. The results show that the geocell reinforced fill in the cantilever retaining wall filling subgrade can effectively limit the vertical settlement of the subgrade and the lateral displacement of the retaining wall and can effectively improve the stress condition of the retaining wall and make the stress of the retaining wall more uniform. Geocell reinforced fill can improve the overall stability of subgrade and reduce the plastic zone, with the control effect positively related to the number of layers of geocell reinforced fill.

Key words: highway subgrade; bearing characteristics; numerical calculation; cantilever retaining wall; reinforced subgrade; geocell

土工格室是上世纪 80 年代欧美等国家研发的新型土工合成材料,众多室内试验和现场应用^[1-4]已证明其在提高一般填土受荷能力及增强路基稳定性

等方面具有良好效果。在路基填筑过程中铺设土工格室,可将荷载扩散、动应力水平降低、路基刚度提高^[5]。悬臂式挡土墙作为一种施工快、自重轻、经济

收稿日期: 2021-03-02; 网络出版日期: 2021-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20210928.0148.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768021)

第一作者: 黄玉纯,男,硕士,高级工程师,研究方向为路基稳定性。E-mail: 35647532@qq.com

通信作者: 耿大新,男,博士,教授,研究方向为路基、隧道检测及病害整治。E-mail: 2263672309@qq.com

指标好的轻型支挡结构,已被广泛应用于公路及铁路建设中^[6]。在我国公路高速化和重载化的今天,对于路基强度和稳定性的要求也随之提高。悬臂式挡土墙与土工格室加筋填土复合支挡结构的应用前景已越来越广,研究此类新型支挡结构的承载特性显得尤为重要。魏明等^[7]通过振动台模型试验研究了悬臂式挡土墙墙后填土布设拉筋后的抗震性能。李浩等^[8]通过离心模型试验研究了衡重式加筋土路肩挡土墙中墙后土体压实度和土中加筋对墙背土压力和路基填土变形的影响规律。王娅娜^[9]通过建立土工格栅加筋墙后土体的有限元模型分析了不同材料、不同间距的筋带对墙后土压力的影响。景兴杰^[10]通过数值模拟分析了高填方重力式挡土墙与土体内部加筋路基的沉降变形及墙体侧向位移规律。综合上述研究可以发现,尽管目前挡土墙与加筋土复合支挡结构的研究已比较丰富,但其研究的加筋材料多为应用较早的土工格栅或土工膜,而对采用土工格室加筋填土情况下的研究还较少。同时,以往研究中挡土墙多为造价较高的重力式挡土墙及衡重式挡土墙,采用悬臂式挡土墙的情况仍需进一步研究。鉴于此,本文利用有限元软件 ABAQUS 建立悬臂式挡土墙填筑路基及土工格室加筋层的平面应变模型,开展了不同土工格室加筋层数下的悬臂式挡土墙填筑路基有限元模型试验,探讨了悬臂式挡土墙及土工格室加筋土复合支挡结构的承载特性。重点研究了填筑路基及挡土墙变形、受力随加筋层数的变化规律,研究成果可进一步丰富复合型支挡结构体系,并为相关工程设计提供参考依据。

1 模型建立及相关参数

1.1 土工格室复合层

分离式分析法、复合模量法以及等效应力替代法是数值分析时土工格室加筋体常采用的三种方法^[11]。分离式分析法是指在数值模拟时土体与土工格室采用不同材料属性及单元类型进行模拟。复合模量法是指将土体和土工格室看作一个复合体进行分析,也是目前采用较多的方法。等效应力替代法是指将土工格室对土体的作用视为等效附加应力来实现加筋作用。合理的建模方法是数值分析正确性的前提,土工格室加筋作用机理大致可分为以下四部分:侧向约束效应、筏板基础效应、网兜效应及换填效应。考虑到复合模量法可有效反应上述四种加筋机理及平面应变模型的特性,且已有大量研究^[12-14]表明在进行数值模拟时将土工格室复合层

考虑为均质线弹性材料是可行的,故本文土工格室加筋体采用较为常用的复合模量法。

1.2 模型尺寸及加筋方案

取半幅路基作为计算模型,宽为 12.5 m,高为 7.2 m,取路基底面以下 10 m 范围内为地基土,悬臂式挡土墙墙高为 8.2 m,墙身厚度 0.5 m,墙趾板 1.5 m,墙踵板 4 m,见图 1。计算模型中施加的荷载为作用在路基顶面的压强荷载,大小为 50 kPa。取土工格室高度内的加筋垫层作为加筋复合层,取每层土工格室高度为 0.3 m,铺设间距分别为 0.6 m、0.9 m、1.2 m、1.5 m、1.8 m(分别对应层数为 12 层、8 层、6 层、5 层、4 层),铺设宽度为 12.5 m。边界条件设置为模型底边 x, y 方向上的变形取为 0,模型左右边 x 方向上的变形取为 0。

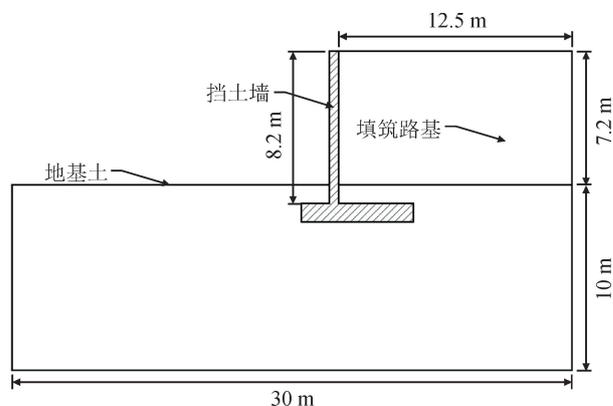


图 1 模型尺寸
Fig. 1 Model size

1.3 网格划分及模型参数

在 ABAQUS 有限元软件中,计算结果精确度与网格划分精细度成正相关,但过密的网格会增加计算时间成本,本文以挡土墙和填筑路基做为重点研究对象,对挡土墙及填筑路基部分的网格进行加密,见图 2。单元族为平面应变模型,单元总数为 7 281,单元类型为四边形 CPE4R。

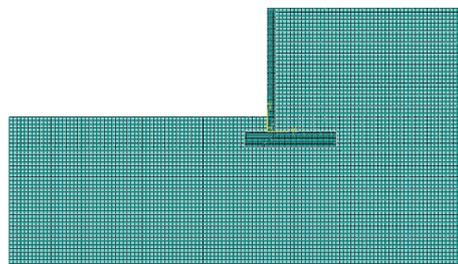


图 2 有限元网格划分图
Fig. 2 Finite element mesh generation diagram

土体的本构模型为 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型,该理论比较完善且简单实用,被广泛应用于岩

土工程和理论实践中^[15]。悬臂式挡土墙及土工格室加筋层采用线弹性本构模型。

由承压板试验结果确定路基层变形模量,取值为 35 MPa。土工格室加筋复合层模量取值与填料有很大关系,已有研究结果^[4]表明,土工格室加筋对于粉性土模量可提高 1.5 倍左右,对于砂性土模量可提高 2 至 3 倍甚至更大,本文计算时模量约取填料的 3 倍计算。其余计算参数由室内试验及参考相关文献^[16]得到,见表 1。

表 1 模型计算参数

Tab.1 Model calculation parameters

结构	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	变形模量 E/MPa	Poisson 比 μ	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
挡土墙	30	20 000	0.20	\	\
路基	19	35	0.35	35	30
地基	17.5	5	0.35	15	20
格室层	19	90	0.30	190	45

1.4 初始地应力平衡

在数值模拟中,初始地应力平衡是为使数值模型获得初始应力场且初始应变为 0 的状态,这与实际工程是相符合的。自重应力作为主要初始应力,在计算前可将重力作用引起的内力提取后施加在数值模型上,开始计算时再施加自重应力,使得模型内外力平衡从而获得较为精确的数值模型初始状态。在 ABAQUS 有限元软件中可使用地应力分析步计算自重作用下的初始应力,并通过结果文件即 ODB 导入法实现初始地应力平衡。通常认为地应力平衡后数值模型位移若达到 10^{-5} 级则符合要求。以未加土工格室计算模型为例,在地应力平衡后自重应力下总位移云图见图 3,可以看出地应力平衡已满足要求。

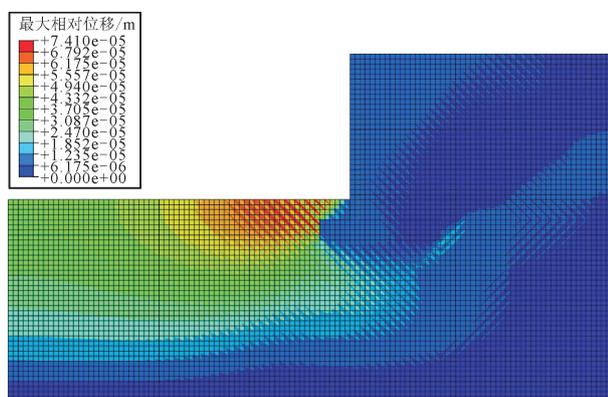


图 3 地应力平衡云图

Fig.3 Earth stress balance cloud map

2 数值模拟结果分析

2.1 路基顶面竖向位移

图 4 为荷载作用下路基顶面竖向位移曲线,表 2 不同层数土工格室加筋下路基顶面的最大竖向位移。从图 4 及表 2 可以看出,采用不同层数土工格室处理悬臂式挡土墙填筑路基,路基顶面的竖向变形均比未加筋时有所减小,同时所有曲线的变化趋势均一致,可知土工格室能有效地约束路基顶面的竖向变形。在加入 4 层土工格室时,路基顶面的竖向位移最大可减小 8%左右,随着土工格室层数的增加,路基顶面的竖向位移相应减小,并且可以注意到,土工格室加筋体作为一个柔性筏基结构层,起到网兜效应,约束了路基的竖向位移。同时由于土工格室层扩散上部荷载及降低附加应力,路基顶面的不均匀沉降的问题也得到了有效的整治。

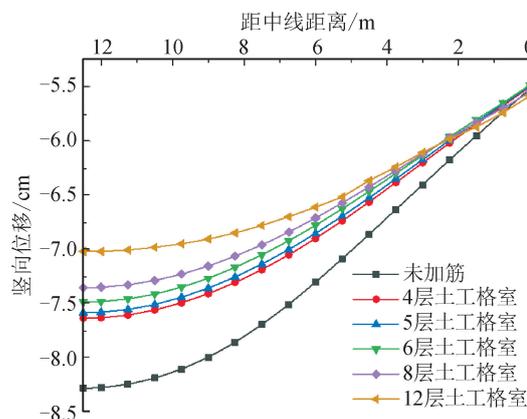


图 4 路基顶面竖向位移曲线

Fig.4 Vertical displacement curve of subgrade top surface

表 2 不同工况下路基顶面最大竖向位移

Tab.2 Maximum vertical displacement of subgrade top under different working conditions

格室层数	最大竖向位移/m	竖向位移减小/%
0	0.082 6	/
4	0.076 2	7.7
5	0.075 7	8.4
6	0.074 7	9.6
8	0.073 4	11.1
12	0.070 1	15.1

2.2 挡土墙水平位移

图 5 为荷载作用下挡土墙墙面沿墙高方向的水平位移曲线,表 3 为不同层数土工格室加筋下挡土墙最大水平位移值。从图 5 及表 3 中可以发现,几种工况下墙面的位移发展趋势一致,挡土墙在土压力的作用下产生向墙趾方向的水平位移,地基在荷

载及填土自重作用下产生不均匀沉降,导致墙体向路基填土一侧倾斜,墙顶处产生向墙踵方向的侧移。总体来看,挡土墙的位移模式为平移的同时绕墙顶转动即 RTT 模式。可以看出土工格室加筋填土后墙体的水平位移在整体上产生减小趋势,具体表现为采用 4 层土工格室时墙面水平位移可减小达 21.8%,并且这种趋势与加筋层数成正相关。同时采用土工格室加筋填土还能够限制墙体的转动来减小墙面的倾斜角度,从而提高了挡土墙的稳定性的。

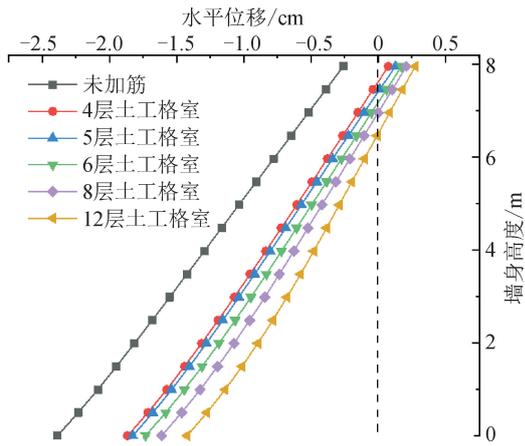


图 5 挡土墙水平位移沿墙高的分布
Fig. 5 Distribution of horizontal displacement of retaining wall along wall height

表 3 不同工况下墙面沿墙高方向的最大水平位移
Tab. 3 Maximum horizontal displacement of wall along wall height under different working conditions

格室层数	最大水平位移/m	水平位移减小/%
0	0.023 9	—
4	0.018 7	21.8
5	0.018 3	23.4
6	0.017 3	27.6
8	0.016 1	32.6
12	0.014 2	40.6

2.3 挡土墙土压力分布

图 6 为不同层数土工格室加筋下挡土墙土压力沿墙高的分布曲线。由图 6 可知,在未进行加筋处理时,土压力的分布并不是线性增加的,而是沿墙顶向下先增大,在墙顶以下 7.9 m 左右达到最大,约为 27 kPa,而后在底板的约束作用下迅速减小。在采用土工格室加筋填土后,土压力沿墙高的分布变得较为复杂,但总体来看,土压力分布情况呈均匀化,并且均匀化的程度与加筋层数成正相关。

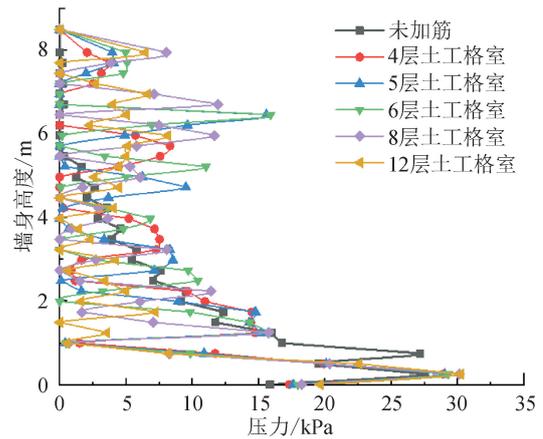


图 6 土压力沿墙高的分布

Fig. 6 Distribution of earth pressure along wall height

为进一步分析说明土工格室加筋填土对土压力分布的影响,以采用 4 层土工格室及 6 层土工格室加筋为例,其挡土墙土压力沿墙高分布见图 7 和图 8。

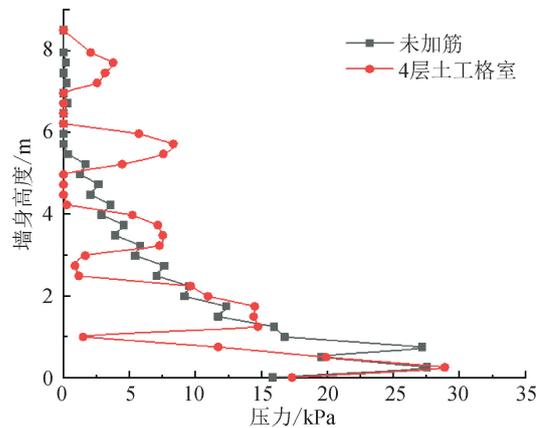


图 7 4 层土工格室下土压力沿墙高的分布
Fig. 7 Distribution of earth pressure along wall height under 4-story geocell

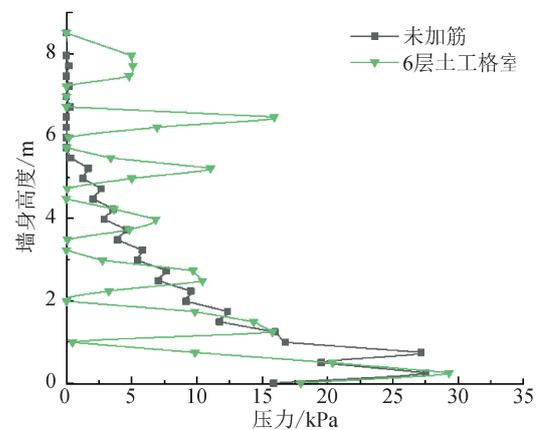


图 8 6 层土工格室下土压力沿墙高的分布
Fig. 8 Distribution of earth pressure along wall height under 6-story geocell

由图 7 及图 8 可知,在铺设土工格室的路基区

域挡土墙所受的土压力明显减小,这是由于当土体在荷载作用下被压实时,将产生侧向移动的趋势,土工格室受到张拉作用,进而对土体产生一个环箍作用,即土工格室对土体具有侧向约束的作用,从而减小了对应区域的土压力。

2.4 挡土墙剪力分布

图 9 为挡土墙所受剪力沿墙高方向的分布曲线。由图 9 可知,在墙身高度 1/3 左右以下,土工格室的加入有效减小了墙身所受的剪力,且作用随加筋层数增加而越发明显。在墙身高度 1/3 左右以上,墙内剪力与未加筋时相比有增加的趋势,但总体来看,土工格室的加入使挡土墙所受剪力趋于均匀。

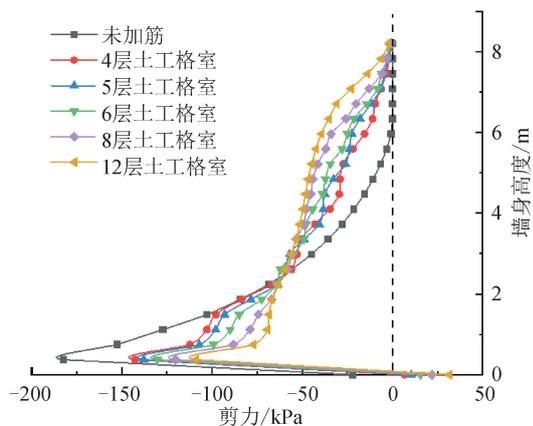


图 9 剪力沿墙高的分布

Fig. 9 Distribution of shear force along wall height

2.5 塑性区分析

墙后填土和地基土均为弹塑性材料,在承受荷载时会发生塑性变形,图 10 为未加筋情况下路基的塑性区云图。分析可知,在挡土墙位移模式为平移的同时绕墙顶转动即 RTT 模式的情况下,地基土由于强度及刚度较差将产生范围较大的塑性区域。在使用土工格室加筋后(以 4 层和 12 层为例),其塑性区云图见图 11 和图 12,塑性区的大小和影响范围均得到了有效控制,且控制效果与加筋层数成正相关。这说明采用土工格室加筋填土后路基沿原有地面整体滑动的趋势被有效弱化,减小了对地基承载力的要求。

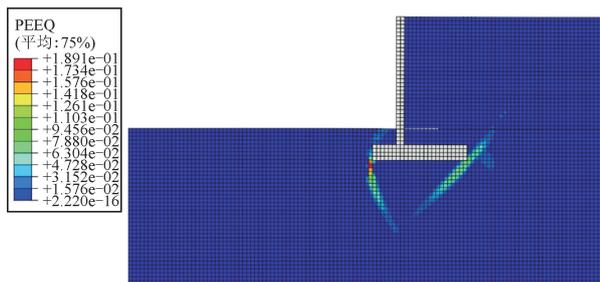


图 10 未加筋路基塑性区云图

Fig. 10 Cloud map of plastic zone of untreated subgrade

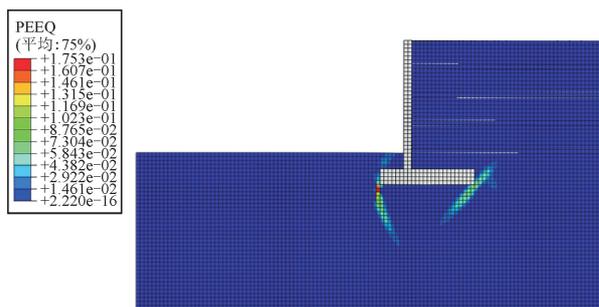


图 11 4 层土工格室加筋路基塑性区云图

Fig. 11 Cloud map of plastic zone of 4-layer geocell reinforced subgrade

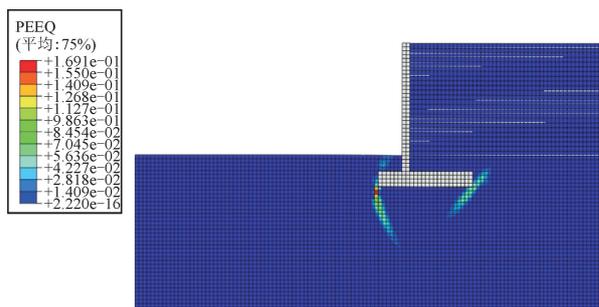


图 12 12 层土工格室加筋路基塑性区云图

Fig. 12 Cloud map of plastic zone of 12-layer geocell reinforced subgrade

3 数值计算结果讨论

本次数值模拟的结果与其他类型的挡土墙-加筋土复合支挡结构研究成果进行了比较分析。

1) 在填土加筋对挡土墙侧向位移及路基沉降变形的影响方面,本文的计算结果与其他研究的结论一致,比如景兴杰^[10]高填方重力式挡土墙土体加筋研究和蒋鑫等^[17]衡重式挡土墙土体加筋研究,其研究结果均表明填土加筋技术可有效减小挡土墙的水平位移及平面转动,同时减小路基的竖向沉降,且处理效果与加筋间距(层数)成正相关。

2) 在填土加筋技术对挡土墙土压力的影响方面,王娅娜^[9]悬臂式挡土墙土体加筋研究、周应兵等^[18]重力式挡土墙土体加筋研究,其结果表明采用土工格栅进行填土加筋,可使挡土墙土压力在变化趋势相近的前提下整体减小。本文采用土工格室作为加筋材料,计算结果表明填土加筋后,与未加筋相比,铺设土工格室的填土区域挡土墙所受的土压力明显减小,同时挡土墙土压力变化趋势较未加筋前发生改变,表现为沿墙高趋向均匀。

土工格室与土工格栅在加筋机理方面的不同点可能是导致上述研究结果不同的原因之一。土工格栅的加筋作用是主要在于通过筋材与填土之间的界面对土体的约束而产生的,界面上的摩阻力阻止了

土体的过大侧向位移,并改变了整个土体的应力场和应变场,从而改变了土体的破坏模式^[19]。土工格室加筋作用主要是通过格室限制土体塑性区向外侧移动的趋势,使活动面不能继续发展,从而提高了路基的承载力^[20]。同时,由于加筋层整体的筏基效应及网兜效应,上部结构的荷载进一步扩展,使传递到地基中软弱下卧层顶面处的附加应力大大减小,以达到增强地基稳定性并提高地基承载力的目的。郑刚等^[21]指出,相对于二维的平面格栅,三维立体状的土工格室在均化动应力峰值、减小动应力沿深度的传递、降低基床下部承受的动应力水平等方面的效果要更为显著。Krishnaswamy等^[22]和Latha等^[23]的研究也表明,相对于二维平面格栅,三维土工格室在提高地基承载力、限制土表变形方面具有明显的优势。综上所述,作为挡土墙-填土加筋复合支挡结构的筋材,土工格室应当优于土工格栅。

4 结 论

1) 悬臂式挡土墙加筋填土复合支挡结构与传统的悬臂式挡土墙相比可以有效地减小路基沉降和挡土墙的侧向位移,同时减小路基不均匀沉降及挡土墙墙面倾斜角度,起到提高路基承载力和稳定性的作用。

2) 使用土工格室加筋能够有效约束土体的侧向位移,从而改善悬臂式挡土墙填筑路基中挡土墙的受力情况。

3) 使用土工格室加筋对路基结构中塑性区的大小和影响范围均可进行有效控制。

4) 悬臂式加筋土复合支挡结构是一种有效提高路基承载力和稳定性的防护措施,且效果与加入的土工格室层数成正相关。

5) 在挡土墙-加筋土复合支挡结构中,土工格室效果要优于土工格栅,在实际工程中若土工格栅无法达到预期效果,可考虑土工格室加筋。

参考文献:

[1] LATHA G M, DASH S K, RAJAGOPAL K. Numerical simulation of the behavior of geocell reinforced sand in foundations[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2009, 9(4): 143.

[2] 王广月,韩燕,王杏花. 降雨条件下土工格室柔性护坡的稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(10): 3020-3024.

WANG Guangyue, HAN Yan, WANG Xinghua. Stability analysis of geocell flexible slope protection in rainfall[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2012, 33(10):

3020-3024.

[3] 赵明华,陈炳初,尹平保,等. 土工格室碎石基层+刚性路面承载特性模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(4): 577-581.

ZHAO Minghua, CHEN Bingchu, YI Pingbao, et al. Model tests on bearing capacity characteristics of geocell gravel base and rigid pavement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(4): 577-581.

[4] 谢永利,俞永华,杨晓华. 土工格室在处治路基不均匀沉降中的应用研究[J]. *中国公路学报*, 2004, 17(4): 7-10.

XIE Yongli, YU Yonghua, YANG Xiaohua. Application study of treating differential settlement of subgrade with geocell[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2004, 17(4): 7-10.

[5] 李俊伟. 土工格室加筋软岩巷道底板试验研究及理论分析[D]. 上海:同济大学,2006.

LI Junwei. Experimental study and theoretical analysis of geocell reinforced soft rock roadway floor [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.

[6] 李海光. 新型支挡结构设计 with 工程实例[M]. 北京:人民交通出版社,2011.

[7] 魏明,罗强,蒋良淮,等. 悬臂式加筋土复合支挡结构振动台模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(3): 607-618.

WEI Ming, LUO Qiang, JIANG Liangwei, et al. Shaking table model test of cantilever reinforced soil retaining walls[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(3): 607-618.

[8] 李浩,罗强,张良,等. 衡重式加筋土路肩挡墙土工离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(3): 458-465.

LI Hao, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Centrifugal model tests on shoulder balance weight retaining wall with reinforced earth [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(3): 458-465.

[9] 王娅娜. 悬臂式挡土墙力学特性及结构优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.

WANG Yana. Mechanical properties and structural optimization of cantilever retaining wall [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[10] 景兴杰. 高填方重力式挡土墙的力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.

JING Xingjie. Study on mechanical properties of high fill gravity retaining wall [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[11] 许淋颖. 土工格室加筋土挡墙试验研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2019.

XU Linying. Experimental study on geocell reinforced

- earth retaining wall [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [12] 傅舰锋. 土工格室柔性结构层力学性状的试验研究 [D]. 西安:长安大学,2002.
FU Jianfeng. Experimental study on mechanical properties of geocell flexible structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2002.
- [13] 冯进. 土工格室加筋路堤作用机理及有限元分析 [D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
FENG Jin. Mechanism and finite element analysis of geocell reinforced embankment [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [14] 李广信,陈轮,蔡飞. 加筋土体应力变形计算的新途径 [J]. 岩土工程学报,1994,16(3):46-53.
LI Guangxin, CHEN Lun, CAI Fei. A new approach to analysis of stress and deformation of reinforced earth [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 46-53.
- [15] 贾善坡,陈卫忠,杨建平,等. 基于修正 Mohr-Coulomb 准则的弹塑性本构模型及其数值实施 [J]. 岩土力学, 2010,31(7):2051-2058.
JIA Shanpo, CHEN Weizhong, YANG Jianping, et al. An elastoplastic constitutive model based on modified Mohr-Coulomb criterion and its numerical implementation [J]. Geotechnical Mechanics, 2010, 31(7): 2051-2058.
- [16] 杨晓华,李新伟,俞永华. 土工格室加固浅层饱和黄土地基的有限元分析 [J]. 中国公路学报,2005,18(2): 12-17.
YANG Xiaohua, LI Xinwei, YU Yonghua. Finite element analysis of geocell strengthening shallow saturated loess foundation [J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 12-17.
- [17] 蒋鑫,陈滔,吴玉,等. 刚性挡土墙拓宽加筋路基稳定性演变数值模拟 [J]. 西南交通大学学报,2018,53 (5):1000-1008.
JIANG Xin, CHEN Tao, WU Yu, et al. Numerical simulation on stability development of geogrid reinforced widening embankment with rigid retaining wall [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(5): 1000-1008.
- [18] 周应兵,陈廷君,刘大伟,等. 加筋重力式挡土墙主动土压力的上限分析方法 [J]. 铁道建筑,2019,59(4): 99-102,107.
ZHOU Yingbing, CHEN Tingjun, LIU Dawei, et al. Upper bound limit analysis for active earth pressure of gravity retaining wall with geogrids support [J]. Railway Engineering, 2019, 59(4): 99-102, 107.
- [19] 包承纲,汪明远,丁金华. 格栅加筋土工作机理的试验研究 [J]. 长江科学院院报,2013,30(1):34-41.
BAO Chenggang, WANG Mingyuan, DING Jinhua. Mechanism of soil reinforced with geogrid [J]. Journal of Yangtze River Academy of Sciences, 2013, 30(1): 34-41.
- [20] 曾锡庭,于志强. 土工格室及其应用 [J]. 中国港湾建设,2001(2):33-37.
ZENG Xiting, YU Zhiqiang. Geocell and its application [J]. China Harbour Engineering, 2001 (2): 33-37.
- [21] 郑刚,龚晓南,谢永利,等. 地基处理技术发展综述 [J]. 土木工程学报,2012,45(2):127-146.
ZHENG Gang, GONG Xiaonan, XIE Yongli, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (2): 127-146.
- [22] KRISHNASWAMY N R, RAJAGOPAL K, LATHA G M. Model studies on geocell supported embankments constructed over a soft clay foundation [J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(1):45-54.
- [23] LATHA G M, RAJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R. Experimental and theoretical investigations on geocell-supported embankments [J]. International Journal of Geomechanics, 2006, 6(1):30-35.

(责任编辑 王绪迪)