

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.011

竖向荷载下土工袋的有限元数值模拟

高军军,刘斯宏,王柳江

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:利用有限元数值模拟方法,研究土工袋在竖向荷载下的变形、孔隙水压力、应力及袋子张力。土工袋由土体和编织袋 2 种材料组成,土体采用修正剑桥本构模型,编织袋采用改进的两节点张拉杆单元模拟。计算结果表明,竖向荷载下土工袋的最大水平位移和竖向位移分别发生在土工袋两侧边缘和土工袋表层,孔隙水压力随加载时间先增长后消散,同时,袋子的平均张力与荷载呈近似线性关系。

关键词:土工袋;有限元;竖向位移;水平位移;孔隙水压力;土工袋张力

中图分类号:TU472 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)06-0524-05

Numerical simulation of a soilbag under vertical loads by FEM

GAO Junjun, LIU Sihong, WANG Liujiang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The finite element method (FEM) was used to study the deformation, pore pressure, stress, and bag tension of a soilbag under vertical loads. The soilbag was composed of the soil modeled by a modified Cam-Clay constitutive relationship, and a woven bag modeled by a modified two-node beam element. The simulation results show that the largest horizontal displacement occurred on both sides of the soilbag, while the largest vertical displacement took place on the surface of the soilbag. The pore pressure increased initially, and then decreased with the increase of loading time. In addition, the average tension of the bag was approximately linearly correlated with the loads.

Key words: soilbag; FEM; vertical displacement; horizontal displacement; pore pressure; soilbag tension

已有研究^[1-5]表明,土工袋具有良好的工程特性和绿色环保价值,近年来逐渐发展为一种地基处理新材料,开始用于永久或半永久性水利、岩土工程中。土工袋袋子张力的约束作用可以提高袋内土体的强度,当其埋置于路基或建筑物基础下时能显著提高地基承载力。由于土工袋是柔性结构,可以有效缓解交通或生产带来的振动污染。内装粗颗粒土的土工袋,在寒冷地区使用还具有防止土体冻胀的功能。土工袋直立性较好,可用于建造坡度很陡的挡墙,减少占地面积。袋内土体的材料不受特别限制,可以是砂土、膨胀土、软弱土、甚至建筑弃渣等。目前对土工袋的研究主要集中于室内试验研究^[6-8],而数值计算方面的研究^[9]较少。本文将土工袋视为土体、编织袋 2 种材料,分别建立有限元模型,编织袋与加载板的接触面采用 Goodman 无厚度单元模拟。在比奥固结理论的基础上,计算分析单个土工袋在竖向荷载下的水平位移、竖向位移、孔隙水压力分布、土体应力大小以及袋子张力情况。

1 土工袋的模拟

1.1 土体的本构关系

对土体采用基于 SMP 修正准则^[10]的剑桥弹塑性模型^[11]和相关联流动准则,其中屈服函数 f 和硬化参

收稿日期: 2013-10-14
基金项目: 国家自然科学基金(51379066);“十二五”国家科技支撑计划(2012BAB03B00);江苏省交通科学研究计划(JGZXJJ2005-26)
作者简介: 高军军(1987—),男,江苏启东人,博士研究生,主要从事水工结构、软土加固技术的研究。E-mail: gaojunjun700@163.com

数表示为

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\ln \frac{p}{p_0} + \ln \left(1 + \frac{q^2}{M^2 p^2} \right) \right] - H$$

(1)

其中

$$H = \int dH = \int \frac{M^4(M_f^4 - \eta^4)}{M_f^4(M^4 - \eta^4)} d\varepsilon_{vp} \quad M = \frac{6\sin\varphi_r}{3 - \sin\varphi_r} \quad M_f = \frac{6\sin\varphi}{3 - \sin\varphi} \quad \eta = \frac{q}{p}$$

式中: λ, κ ——土体正常固结曲线和回弹曲线的斜率; e_0 ——土体的初始孔隙比; p, q ——土体的球应力和偏应力; p_0 ——土体塑性体积应变为 0 时的 p 值; ε_{vp} ——塑性体应变; η ——土体的应力比; φ_r ——土体的残余内摩擦角; φ ——土体的峰值内摩擦角。

根据弹塑性理论^[12], 劲度矩阵的计算公式表示为

$$D_{ep} = D_e - \frac{D_e \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T D_e}{\frac{M_f^4(M^4 - \eta^4)}{M^4(M_f^4 - \eta^4)} \frac{\partial f}{\partial \sigma} + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T D_e \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\}}$$

(2)

式中: D_e ——弹性劲度矩阵,按照各向同性弹性体计算。

1.2 编织袋的模拟

编织袋用张拉杆单元^[13]模拟,只承受拉力,不承受压力,在计算中如果出现压缩杆单元,则将杆单元的应力释放到周边单元的节点上,并将其弹性模量设为零。杆单元的力学劲度矩阵 K 的表达式如下:

$$K = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix}$$

(3)

其中

$$c = \cos(l, x) \quad s = \cos(l, y)$$

式中: E ——编织袋的弹性模量,通过室内张拉试验获得; A ——杆单元的截面积; l ——杆单元的长度。

1.3 接触面单元模拟

采用 Goodman 无厚度单元^[14]模拟不同材料界面间的接触特性。以两边节点的相对位移作为变量,不考虑正应力和切应力与对应位移之间的耦合作用。Goodman 无厚度单元能较好地模拟接触面上的错动滑移或张开,且能考虑接触面变形的非线性特性,但其单元厚度为零,有时会使两侧单元重叠。为了防止单元重叠,一般在受压时采用较大的法向劲度系数。理论上,Goodman 单元接触面没有厚度,受压后不可能产生变形,接触面法向刚度 K_{yy} 应为无穷大,但为了能使计算顺利进行下去,取较大值 $K_{yy} = 10^8 \text{ kN/m}^3$;另一方面,接触面不能承受拉应力,当接触面受拉时 K_{yy} 应为零,出于同样的原因,取较小值 $K_{yy} = 100 \text{ kN/m}^3$ 。

2 计算模型及参数

计算中,土工袋的二维模型尺寸为 $100 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽)。由于土工袋两侧呈曲线,为了避免变形时接触单元和节点消失导致计算失败,在土工袋四周设置 4 块混凝土板,并在混凝土板与土工袋之间的间隙用土体填满。有限元离散后的土工袋由 1485 个单元和 1405 个节点组成,其中杆单元 127 个,接触面单元 140 个,如图 1 所示。图中 V1 ~ V3 为竖向位移监测点, H1 ~ H3 为水平位移监测点。

接触面为混凝土板和土工袋之间的接触面。假设袋内土体和土工袋之间无相对滑动,其间不设接触面单元。袋子与混凝土板以及土体和混凝土板之间用 Goodman 无厚度单元模拟。

在计算中编织袋的物理力学参数如下:克重 100 g/m^2 ,厚度 $3 \times 10^{-4} \text{ m}$;经向拉力强度 $\geq 25 \text{ kN/m}$,纬向拉力强度 $\geq 16.2 \text{ kN/m}$,经纬向伸长率 $\leq 25\%$,弹性模量为 5.4 GPa ,渗透系数为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。土体的剑桥模型参数(取自杨林塘地区的地质工程勘探表)为:初始孔隙比 $e_0 1.416$,密度 1676 kg/m^3 ,含水率 46% ,黏聚力 16.4 kPa ,内摩擦角 φ 为 5.9° ,渗透系数 $16.4 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$; λ 和 κ 分别为 $0.144, 0.028$, M 和 M_f 分别为 0.066 、

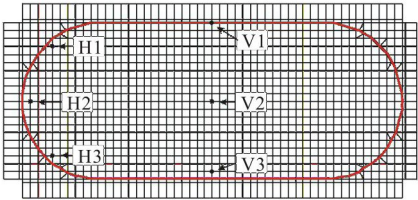


图 1 土工袋模型网络
Fig. 1 Meshes of soilbag model

0.1。而混凝土板密度取 $2\,500\text{ kg/m}^3$,弹性模量取 24 GPa ,泊松比取 0.17 。

3 计算结果分析

利用比奥固结理论^[15]计算模拟土工袋在竖向压力荷载下的固结情况,竖向压力逐级加载,如图2所示。控制模型底部节点为全约束,顶部节点只发生竖向位移,而两侧节点无约束。计算时初始超静孔隙水压力和初始位移均为零;编织袋节点设为自由排水节点。

3.1 土工袋的变形

图3为竖向荷载施加后土工袋的位移矢量图。袋内土颗粒在沉降过程中向袋子两侧迁移,土工袋变成扁平状,袋子拉伸产生张力,反过来约束袋内土体,限制其侧向变形。

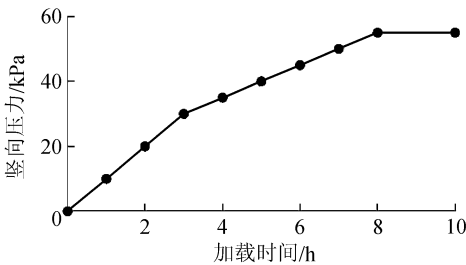


图2 加载过程线
Fig. 2 Loading process

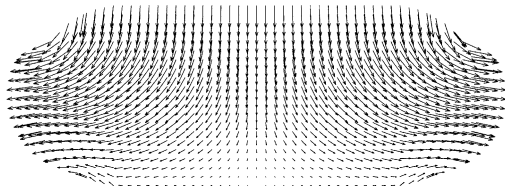


图3 土工袋位移矢量分布
Fig. 3 Vector distribution of displacement in soilbag

图4为土工袋最后一级荷载结束后袋内土体的位移云图。从图4可看出,袋内土体的最大水平位移发生在土工袋两侧边缘,方向均朝着土工袋外侧;而最大竖向位移发生在土工袋表层,且沿着高度方向逐渐减小。土工袋底部两侧的土体有微小的隆起现象是由于底部土体随着袋子一起向两侧延展导致,如图3中底部两侧的位移矢量所示。

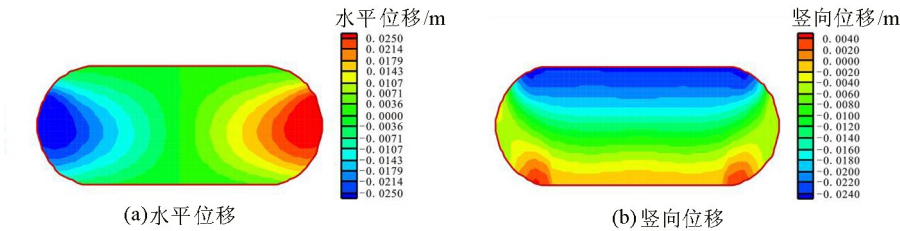


图4 第8级加载后土工袋位移云图
Fig. 4 Displacement cloud diagrams in soilbag after level-8 loading

图5为各监测点的位移情况。图5(a)中H1~H3反映土工袋两侧土体的水平位移情况。显然两侧偏中部的节点水平位移最大,即袋内土体有向土工袋边缘集中的趋势。图5(b)中V1~V3反映土工袋中轴线上土体的竖向位移情况,可见,竖向变形自上往下逐渐减小,底部基本不变形。水平位移和竖向位移均随着荷载的增加而增大,直至 55 kPa 之后,土工袋固结稳定,基本不发生变形。

3.2 土工袋孔隙水压力分布

图6是最后一级加载结束后的孔隙水压力分布云图。由图6可知,最大孔隙水压力分布在土工袋的中心区域,向四周逐渐消散,主要是由于土工袋较强的透水性,袋子四周孔隙水压力趋于零。

图7为土工袋中两测点的孔隙水压力随加载时间的变化曲线。由图7可见:V2测点的孔隙水压力要比V3测点大;孔隙水压力随加载时间先增长后降低,基本上都在第2级荷载下达到最大值;最后一级荷载后,孔隙水压力基本上趋于零,此时固结已基本完成。说明土工袋在竖向荷载达到 20 kPa 后,孔隙水压力的消散速度超过了外加荷载引起的孔隙水压力增长速度,荷载越大,固结速度越快。

3.3 土体应力状态

图8是土工袋中土体的主应力大小分布。土体除了两侧边缘区域外的主应力基本上都比外加荷载大,主要是由于袋内土体不仅受到外加荷载的作用,同时也受袋子张力的约束作用。从另一个角度说明土工袋利用外加荷载提高土体强度的加固机理。

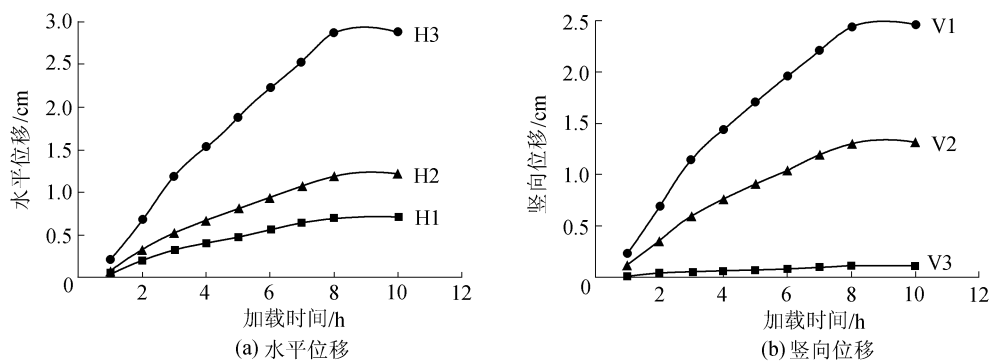


图 5 各监测点的位移过程线
Fig. 5 Displacement history curves at monitoring sites

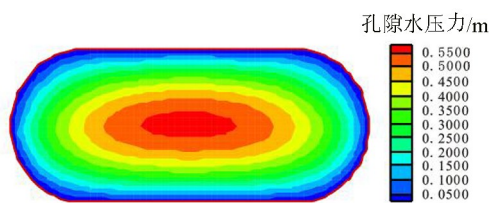


图 6 第 8 级加载后土工袋的孔隙水压力云图
Fig. 6 Pore pressure cloud diagram of soilbag after level-8 loading

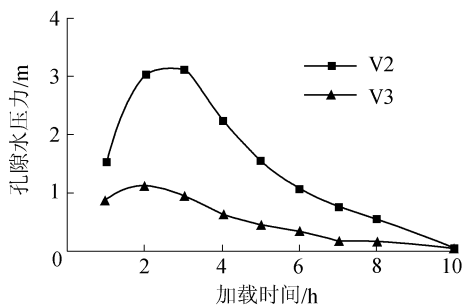


图 7 土工袋测点的孔隙水压力过程线
Fig. 7 Pore pressure history curves at monitoring sites

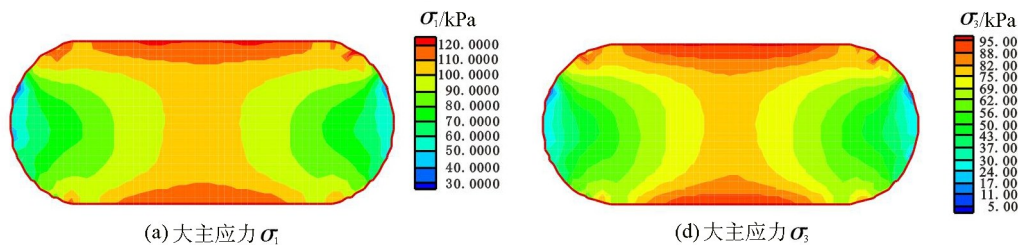


图 8 袋内土体的主应力分布云图
Fig. 8 Principal stress cloud diagrams of soil in bag

3.4 袋子张力

图 9 为土工袋袋子张力的分布情况。箭头长短表示张力大小,箭头向上表示张力为正,即袋子只受拉力。由图 9 可知,袋子的张力分布并不均匀;最大拉力分布在袋子左下角和右下角,主要是由于在竖向荷载下袋内土体向底部两侧偏移导致;上表面的拉力较小,呈中间小、两边大的趋势。由于土工袋张力分布不均,采用平均张力来反映土工袋的整体性能。图 10 为袋子的平均张力 T_a 与外加荷载 P 之间的关系。

可见,平均张力与荷载呈近似线性关系,根据此关系推算土工袋的极限承载力,会使结果更切合实际。

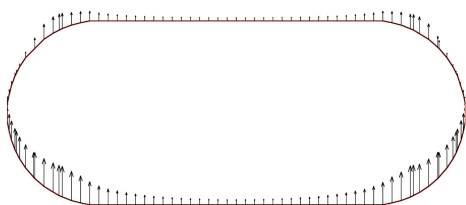


图 9 土工袋拉力分布
Fig. 9 Distribution of soilbag tension

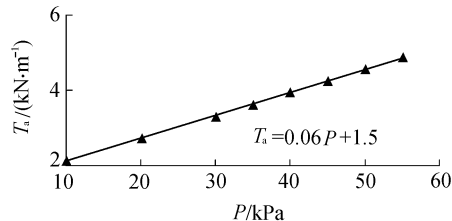


图 10 土工袋的平均张力随荷载变化曲线
Fig. 10 Variation of average tension of soilbag with load

4 结 论

- a. 土工袋在竖向荷载作用下,袋内土体向两侧边缘迁移,在两侧中部发生最大的水平位移;而竖向位移自土工袋表层向下递减。
- b. 土工袋内的孔隙水压力随加载时间先升高后降低,最后在 10h 后趋于零;土工袋中心处孔隙水压力最大,沿径向向四周消散。
- c. 袋内土体的主应力基本上比外加荷载大,反映土工袋能够提高土体强度。
- d. 袋子张力分布不均匀,最大拉力分布在袋子左下角和右下角;平均张力与外加荷载呈近似线性关系。

参考文献:

[1] MATSUOKA H, LIU S H. A new earth reinforcement method using soilbags[M]. The Netherlands:A A Balkema,2005:63-98.

[2] 刘斯宏,松冈元. 土工袋加固地基新技术[J]. 岩土力学,2007,28(8):1665-1670. (LIU Sihong, MATSUOKA H. A new earth reinforcement method by soilbags[J]. Rockand Soil Mechanics,2007,28(8):1665-1670. (in Chinese))

[3] 刘斯宏,汪易森. 土工袋技术及其应用前景[J]. 水利学报,2007(增刊1):644-649. (LIU Sihong, WANG Yisen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007(Sup1):644-649. (in Chinese))

[4] 刘斯宏,汪易森. 土工袋加固地基原理及其工程应用[J]. 岩土工程技术,2007,21(5):221-225. (LIU Sihong, WANG Yisen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications[J]. Geotechnical Engineering Techniques,2007,21(5):221-225. (in Chinese))

[5] 刘斯宏,汪易森. 岩土新技术在南水北调工程中的应用研究[J]. 水利水电技术,2009,40(8):61-66. (LIU Sihong, WANG Yisen. Application of new geotechnologies to South to North Water Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009,40(8):61-66. (in Chinese))

[6] 刘斯宏,王艳巧,金远征. 土工袋基础减振隔震试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(1):87-90. (LIU Sihong, WANG Yanqiao, JIN Yuanzheng. Experimental study on vibration reduction and isolation of bases with soilbags[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(1):87-90. (in Chinese))

[7] 薛向华,刘斯宏,张奕泽. 土工袋柔性挡土墙土压力试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(增刊1):29-30. (XUE Xianghua, LIU Sihong,ZHANG Yize. Experimental research on soil pressure in soft retaining wall with soilbags[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(Sup1):29-30. (in Chinese))

[8] 王珊,刘斯宏. 土工袋处理膨胀土渠坡的压坡效果[J]. 水利水电科技进展,2012,32(增刊1):26-28. (WANG Shan,LIU Sihong. Slop-pressing effect of soilbag treatment on expansive canal slope[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012,32(Sup1):26-28. (in Chinese))

[9] 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]. 水利水电科技进展,2012,32(1):78-82. (LIU Sihong, WANG Liujiang,LI Zhuo,et al. Numerical simulation of in-situ loading tests on a soilbag-reinforced soft foundation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(1):78-82. (in Chinese))

[10] 江强,朱建明,姚仰平. 基于 SMP 准则的土体三维应力状态土压力问题[J]. 岩土工程学报,2006,28(增刊1):1415-1417. (JIANG Qiang,ZHU Jianming,YAO Yangping. Earth pressures of three-dimensional soil stress states based on SMP failure criterion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(Sup1):1415-1417. (in Chinese))

[11] 殷杰. 结构性软黏土的修正剑桥模型[J]. 工程力学,2013,30(1):190-196. (YIN Jie. A modified Cam Clay Model for structured soft clays[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 190-196. (in Chinese))

[12] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007:246-254.

[13] 唐建民. 柔性结构非线性分析的杆单元有限元法[J]. 中南工学院学报,1996,10(1):50-55. (TANG Jianmin. A nonlinear finite element method with straight-line element for the analysis of flexible structures[J]. Journal of Central-South Institute of Technology,1996,10(1):50-55. (in Chinese))

[14] 彭芳乐,曹延波,小竹望,等. 基于 Goodman 界面单元的加筋砂土变形破坏有限元数值分析[J]. 岩土力学与工程学报,2010,29(增刊2):3893-3904. (PENG Fangle,CAO Yanbo,KOTAKE N,et al. Numerical analysis of deformation and failure of reinforced sand with Goodman interface elements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(Sup2):3893-3904. (in Chinese))

[15] 徐书平,刘祖德. 比奥固结理论在堆载预压加固工程场地中运用[J]. 岩土力学,2003,24(2):307-310. (XU Shuping,LIU Zude. Application of Biot's consolidation theory to improving soft ground by preloading method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(2):307-310. (in Chinese))