

文章编号: 1000-7598(2009)06-1726-05

土工织物与塑料排水板联合处理软基的效果分析

刘金龙¹, 栾茂田², 汪东林³, 王吉利⁴

(1. 合肥学院 建筑工程系, 合肥 230022; 2. 大连理工大学 土木水利学院岩土工程研究所, 大连 116024;
3. 安徽建筑工业学院 土木工程学院; 合肥 230022; 4. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 基于平面应变条件下的 Biot 固结理论, 采用非线性有限元方法对土工织物加筋与塑料排水板联合使用处理软土路基的效果和机制进行了探讨。对比计算表明: 在相同固结时间内加设排水板后路堤的竖向沉降大于无排水板情况下的相应值, 路堤坡趾处的隆起变小, 路堤的侧向位移也变小。塑料排水板极大地缩短了孔压的消散时间, 加快了软土的固结进程, 使软土地基的承载力得到较快的提高, 从而提高了路堤的稳定性。加设排水板后筋材所分担的抗拉力也比无排水板情况下的抗拉力低。为了更好地发挥土工织物的加固效果, 土工织物应尽量布置在高应力区域。加设排水板可以缩短路堤各固结阶段的静置时间而达到优化设计。

关 键 词: 非线性有限元; 土工织物; 塑料排水板; 软土路基; 固结

中图分类号: TU 471.8

文献标识码: A

Effect of disposing soft soil foundation using geotextile and plastic drainage plate

LIU Jin-long¹, LUAN Mao-tian², WANG Dong-lin³, WANG Ji-li⁴

(1. Department of Civil Engineering, Hefei University, Hefei 230022, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. School of Civil Engineering, Anhui Institute of Architecture and Industry, Hefei 230022, China; 4. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on Biot's consolidation theory under plane strain, the effect of disposing soft soil foundation using geotextile and plastic drainage plate is studied with nonlinear finite element method. It is shown that the vertical settlement of foundation with drainage plate is larger than that without drainage plate; the lateral displacement decreases and the uplift at the toe of embankment decreases at the same consolidation time. In general, the dissipation time of excess pore pressure is shortened greatly by using plastic drainage plate; the stability of embankment is improved for accelerating the consolidation so as to enhance the bearing capacity of soil. Meanwhile, the shared tensile force of geotextile becomes lower when plastic drainage plate is used. In order to reinforce the embankment effectively, it is advised that geotextile should be set on high-stress zone. Furthermore, the design can be optimized by shortening the standing time of consolidation when plastic drainage plate is used.

Key words: nonlinear finite element method; geotextile; plastic drainage plate; soft soil foundation; consolidation

1 引 言

土工织物具有加筋、反滤、排水和隔离等多种功能, 且具有质量可靠、施工方便、工效高、工程造价低、对土的扰动小等优点, 因而在软土工程的加固中得到了广泛的应用^[1-3]。

但该技术的设计理论及计算方法还不成熟, 需进行深入研究^[3-4]。如在相关设计规范^[5]和实际工程分析^[6-8]中, 通常采用传统的极限平衡分析方法来探讨土工织物的加固作用。然而, 在利用极限平衡分

析方法探讨加筋路堤的稳定性时, 该方法不能很好地反映土工织物与路堤土之间的变形协调关系, 很难合理地反映土工织物对路堤基底的压力、沉降量、应力场和应变场的影响, 并且往往低估了加筋路堤的稳定性^[5]。

随着计算机技术的发展和大型通用有限元软件的日益完善, 有限元方法逐渐被应用到加筋路堤的稳定性分析中^[9-10, 14]。与极限平衡分析方法相比, 有限元分析方法不仅能够反映土性变化、施工进度及复杂的边界条件, 而且还能给出各阶段应力场和

收稿日期: 2007-08-27

基金项目: 安徽省高等学校省级自然科学基金项目(No. KJ2008B259)与合肥学院引进人才启动基金项目(No. RC027)联合资助。

第一作者简介: 刘金龙, 男, 1979年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: alnile@163.com

应变场的分布情况。有限元法在一定程度上能够合理地分析土工织物与土之间的变形协调关系,能够考察土工织物对路堤应力场和应变场分布的影响,这有助于探讨土工织物对软土路堤的加固效果和作用机制。

本文利用非线性有限元方法考察了土工织物加筋与塑料板排水联合使用处理软土地基的效果。计算中把塑料排水板等效为排水砂墙,得到了加固前后软土路堤的竖向沉降、侧向位移、超静水压力分布及路堤安全性的对比关系,并对土工织物加固软土路堤的效果和机制进行了探讨。

2 有限单元法分析理论

有限元分析中采用 Biot 固结理论。平面应变条件下 Biot 固结方程形式为

$$-G\nabla^2 w_x + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon_v + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$-G\nabla^2 w_z + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \varepsilon_v + \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{K}{\gamma_w} \nabla^2 u = 0 \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_v = -\left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_z}{\partial z}\right)$ 为体应变; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为

拉普拉斯算子; w_x 、 w_z 分别为水平向和竖向的位移; u 为孔隙水压力; K 为渗透系数; t 为时间; G 为剪切模量; ν 为泊松比; γ 、 γ_w 分别为土和水的重度。

在平面应变有限元分析中,需要将竖向排水体简化成等效的砂墙进行计算。塑料排水板转换为等效砂井时,其当量换算直径 D_p 按下式计算

$$D_p = \alpha \frac{2(b+\delta)}{\pi} \quad (4)$$

式中: α 为换算系数,在 0.6~0.9 之间取值; b 为排水板截面宽度; δ 为排水板截面厚度。

土体的本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型。为了合理模拟土工织物与路堤土的相互作用,有限元计算中需要引入界面单元,土工织物与土体之间的相互作用通过筋-土的界面强度来实现。界面单元的强度等于周围土体的强度乘以土与界面单元的摩擦系数,即接触面的粗糙程度可以通过摩擦系数的取值变化来控制。摩擦系数的取值可通过试验确定,当土与土工织物变形一致没有相对滑动时,摩擦系数取 1.0。本文有限元计算中摩擦系数取 1.0。

3 加固路段有限元模型的建立

文中利用非线性有限元方法针对某一加筋路堤的典型断面进行稳定性分析。该路堤断面顶宽为 22 m,路堤填筑高度为 4 m,坡度为 1:1.5,软弱地基深度为 7 m,路堤和地基的几何构型如图 1 所示。

根据地勘资料,地基软土按照土性差异可划分为 3 个土层,路堤及地基各土层的强度参数见表 1。土工织物置于路堤底部的砂垫层中,其只能受拉,变形刚度为 8 500 kN/m。砂垫层厚度为 0.3 m,由于其厚度较小而未在图中标出。塑料排水板长 4 m,即打穿路基上部两层黏土而到达渗透系数较小的黏土 3 的顶部。排水板间距 1.5 m,计算中根据式(4)将其等效为 $D_p=5$ cm 的砂墙进行计算。

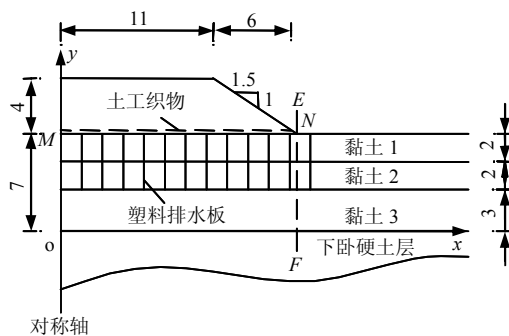


图 1 路堤横断面示意图 (单位: m)

Fig.1 Cross-section of embankment (unit: m)

表 1 各层路基土的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of different foundation soils

土层	干重度 (kN/m ³)	湿重度 (kN/m ³)	渗透 系数 (m/d)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	泊松比	变形 模量 /kPa
路堤土	16.0	20.0	0.01	4.0	24.0	0.30	2 500
砂垫层	17.0	18.0	1.0	1.0	22.0	0.30	1 800
黏土 1	16.0	19.5	3E-4	3.0	13.0	0.30	1 200
黏土 2	15.5	18.5	2E-3	2.0	12.0	0.33	800
黏土 3	16.0	19.0	6E-4	4.0	23.0	0.25	1 400

该路堤的施工步骤为: ①在完成插排水板工作后, 铺设砂垫层和土工织物, 且将路堤填筑至 2 m, 费时 10 d; ②施工间歇 120 d, 使超孔隙水压尽量消散, 记为第一固结阶段; ③将路堤填筑至 4 m 高度, 费时 8 d; ④工后固结期 180 d, 记为第二固结阶段。

4 有限元计算结果分析

4.1 对孔压消散的影响

针对有无塑料排水板的情况进行了对比计算, 得出点 $D(0, 5)$ 在各施工阶段超静水压力的变化曲线, 如图 2 所示。第 2 固结阶段结束时路堤体内的

超静水压力分布如图 3 所示。从图 2 可以看出,若不采用塑料排水板,在第 1、2 固结阶段结束时点 D 处的超静水压力分别为 -8.5 kPa 和 -6.9 kPa ;而采用排水板加速孔压消散后,相应值变为 -0.04 kPa 和 -0.004 kPa ,此时超静水压力基本消散完毕(参看图 3 也可得到类似结论)。可见,塑料排水板极大地缩短了孔压的消散时间,加快了软土的固结进程。

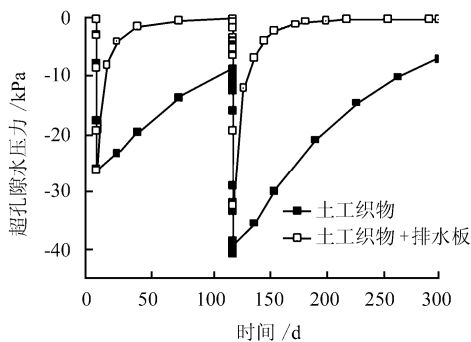


图 2 点 D 处超静水压力的消散规律

Fig.2 Dissipation of excess pore pressure at point D

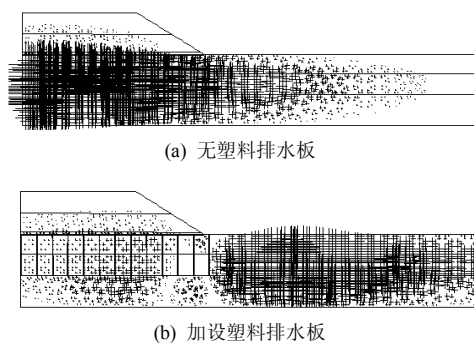


图 3 第 2 固结阶段完成时路堤的超静水压力分布情况
Fig.3 Distributions of excess pore pressure at the end of the second phase of consolidation in embankment

4.2 对竖向沉降和侧向位移的影响

在有无塑料排水板的情况下当路堤填筑至 4 m 时,路堤底面 MN 处的竖向沉降如图 4 所示,路堤坡趾处断面 EF 处的侧向位移如图 5 所示。

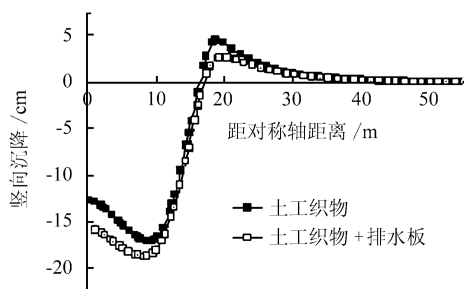


图 4 路堤堤底横断面 MN 上各点的竖向沉降量
Fig.4 Vertical settlements at the bottom surface (MN) of road embankment

可见,在相同固结时间内铺设排水板后路堤的竖向沉降大于无排水板情况下的相应值,路堤坡趾处的隆起变小,路堤的侧向位移也变小。塑料排水板加快了孔压的消散进程,使路堤在相同时间内的固结程度更高。

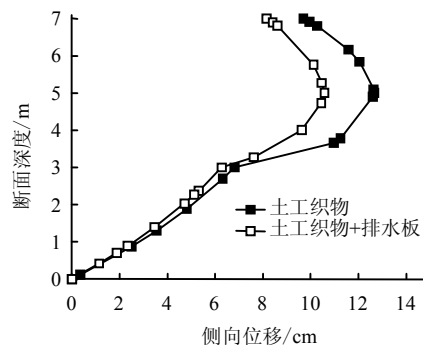


图 5 路堤坡趾处竖向断面 EF 上各点的侧向位移
Fig.5 Lateral displacements at the toe vertical surface (EF) of road embankment

由于路堤施工中包含 2 个固结阶段,故各个阶段的固结度应分别计算,结果见表 2 和表 3。基于强度折减有限元方法^[1],计算得到了路堤在各施工阶段的安全系数,见表 4。可见,塑料排水板大大的缩短了路堤的固结时间,使软土地基的承载力较快的得到提高,从而提高了路堤的稳定性。

表 2 第 1 固结阶段内固结度随时间的变化情况

Table 2 Relationship between consolidation degree with time in the first consolidation phase

时间 /d	9	18	36	72	120
无排水板时的固结度 /%	17	39	52	68	82
有排水板时的固结度 /%	61	80	93	98	100

表 3 第 2 固结阶段内固结度随时间的变化情况

Table 3 Relationship between consolidation degree with time in the second consolidation phase

时间 /d	138	156	228	264	300
无排水板时的固结度 /%	59	69	88	93	97
有排水板时的固结度 /%	87	96	100	100	100

表 4 各施工阶段的路堤安全系数

Table 4 Safety factors of embankment at different construction phases

类型	填筑至 2 m	第 1 固结阶段完成	填筑至 4 m	第 2 固结阶段完成
无排水板	1.472	1.717	1.186	1.286
有排水板	1.534	1.725	1.305	1.287

4.3 土工织物上轴力的分布

无排水板情况下各施工阶段土工织物所受的

轴力分布如图6所示,有无排水板时各固结阶段土工织物所受的轴力分布如图7所示。从图中可以看出,土工织物在路堤中部发挥的作用比较大,而在靠近路堤坡脚处的轴力大大减小,即土工织物在坡脚处发挥的作用很小,这与文献[12]中的数值计算结果是一致的。事实上,土工织物是通过与土体之间的摩擦来发挥作用的,这种摩擦作用的大小取决于作用点处正应力的高低。对于同一水平断面而言,在路堤中部的应力较大,而靠近坡脚处的应力较小,土工织物上轴力的分布正是与这种路堤应力分布相适应的。而在传统的极限平衡分析方法中假定土工织物所受的拉力是固定不变的,其不能合理地描述实际工程中土工织物的作用机制。因此,为了更好地发挥土工织物的加固效果,土工织物应尽量布置在高应力区域。同时还可以看出,固结阶段的筋材轴力相对填筑阶段有所减小。这主要是由于超孔隙水压力消散,软土地基的承载力逐步提高,导致相应筋材所分担的抗拉力也有所减小^[13-14]。

另外,铺设排水板后由于孔压消散加快,在相同固结时间下软土地基的承载力提高更多,从而导致筋材所分担的抗拉力也比无排水板情况下的抗拉力低(参见图7)。

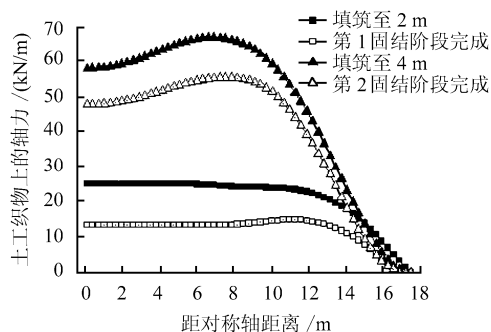


图6 无排水板情况下土工织物上轴力分布情况
Fig.6 Distribution of axial force along the geotextile without plastic drainage plate

4.4 缩短工期后孔压的变化情况

分析铺设排水板前后路堤体内的孔压消散规律(参见图2)及各阶段的固结度(参见表2、3)可知,铺设排水板后堤体内的超静水压力和固结度在不到设定固结时间内早已达到理想值。因此,可以缩短路堤各固结阶段的静置时间而达到优化设计。把第一固结阶段时间由120 d缩短为60 d、第2固结阶段时间由180 d缩短为60 d后,点D处的超静水压力消散规律如图8所示。可见,缩短工期后路堤体内的孔压消散还是很理想的。

综合上述各点可见,土工织物加筋与塑料排水板排水联合使用加固软土地基的机制是:土工织物通过与土体之间的摩擦作用,约束了路堤及基础的侧向变形,从而导致地基中的附加应力从新分布而趋于均匀,进而限制了竖向沉降峰值的发展,并提高了路堤的稳定性;同时,利用插设在软土地基中的塑料排水板建立起的竖向排水系统和塑料排水板上部铺设的砂垫层建立起的横向排水系统,并通过填土和预压建立起加压系统,使软土中的孔隙水产生压差而渗出,从而达到加速软土固结、提高地基土强度的目的。

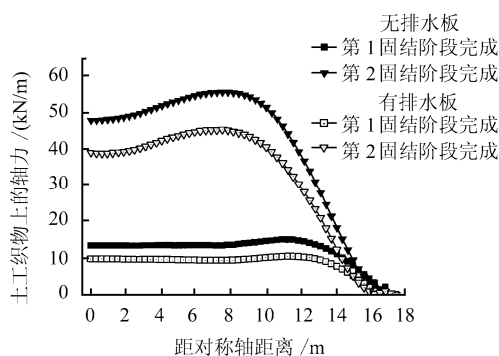


图7 各固结阶段土工织物上轴力分布情况
Fig.7 Distribution of axial force along the geotextile at different phases of consolidation

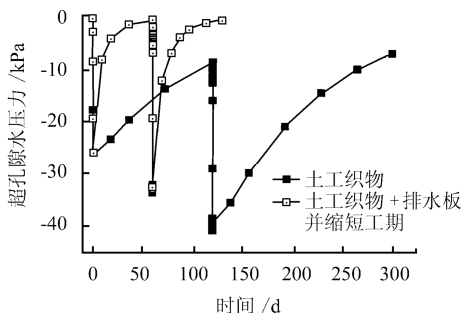


图8 缩短工期后点D处超静水压力的消散规律
Fig.8 Dissipation of excess pore pressure with time at point D when the time of construction shortened

5 结 论

(1) 塑料排水板极大地缩短了孔压的消散时间,加快了软土的固结进程。在相同固结时间内铺设排水板后路堤的竖向沉降大于无排水板情况下的相应值,路堤坡趾处的隆起变小,路堤的侧向位移也变小。在塑料排水板使孔压消散加快,致使软土地基的承载力得到较快的提高,从而提高了路堤的稳定性。

(2) 土工织物是通过与土体之间的摩擦来发挥

作用的,这种摩擦作用的大小取决于作用点处正应力的高低。为了更好地发挥土工织物的加固效果,土工织物应尽量布置在高应力区域。由于超孔隙水压力消散,软土地基的承载力逐步提高,固结阶段的筋材轴力相对填筑阶段有所减小。另外,铺设排水板后由于孔压消散加快,在相同固结时间下软土地基的承载力提高更多,从而导致筋材所分担的抗拉力也比无排水板情况下的抗拉力低。

(3) 铺设排水板后堤体内的超静水压力和固结度在不到设定固结时间内早已达到理想值。因此,铺设排水板可以缩短路堤各固结阶段的静置时间而达到优化设计。

本文主要考察了用非线性有限元方法考察土工织物加筋和塑料板排水联合处理软土地基的可行性和合理性。诚然,基于实际工程的复杂性,有限元分析中还有需进一步考虑更多因素的影响,如井阻、涂抹对孔隙水渗透的影响、地基变形后排水板弯曲对排水速率的影响等。

参考文献

- [1] 杨果林. 现代加筋土技术应用与研究进展[J]. 力学与进展, 2002, 24(1): 9—17.
YANG Guo-lin. Research progress on reinforced earth[J]. **Mechanics in Engineering**, 2002, 24(1): 9—17.
- [2] 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 Shu-ping, LIU Zu-de. Application of Biot's consolidation theory to improving soft ground by preloading method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 307—310.
- [3] 赵维炳, 雷国辉, 陈永辉, 等. 土工织物加筋与塑料板排水联合加固软基的计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 61—65.
ZHAO Wei-bing, LEI Guo-hui, CHEN yong-hui, et al. Study on calculational method of geotextile-reinforced and plastic board-drained foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(3): 61—65.
- [4] 刘汉龙, 吴维军, 高玉峰. 土工织物加固堤防非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 79—82.
LIU Han-long, WU Wei-jun, GAO Yu-feng. Nonlinear finite element analysis of reinforced dike with geotextile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(1): 79—82.
- [5] 王建曾. 土工合成材料应用技术规范汇编[M]. 北京: 中国计划出版社, 2000: 1—20.
- [6] ROWE R K, SODERMAN K L. An approximate method for estimating the stability of geotextile-reinforced embankments[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1985, 22(3): 392—398.
- [7] BERGADO D T, LONG P V, LEE C H, et al. Performance of reinforced embankment on soft Bangkok clay with high-strength geotextile reinforcement[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 1994, 13: 403—420.
- [8] PALMEIRA E M, PEREIRA J H F, SILVA D. Back analyses of geosynthetic reinforced embankments on soft soils[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 1998, 16: 273—292.
- [9] HINCHBERGER S D, ROWE R K. Geosynthetic reinforced embankments on soft clay foundations: Predicting reinforcement strains at failure[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2003, 21: 151—175.
- [10] BERGADO D T, LONG P V, MURTHY, B R S. A case study of geotextile-reinforced embankment on soft ground[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2002, 20: 343—365.
- [11] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403.
- [12] 朱湘, 黄晓明, 邓学钧. 土工格栅加筋路堤机理研究[J]. 公路交通科技, 2000, 17(1): 1—4.
ZHU Xiang, HUANG Xiao-ming, DENG Xue-jun. Research of reinforced embankment mechanism[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2002, 17(1): 1—4.
- [13] 刘春虹, 肖朝昀, 王建华, 等. 土工织物加固软土路堤的有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增2): 325—328.
LIU Chun-hong, XIAO Zhao-yun, WANG Jian-hua, et al. Finite element analysis of road embankment on soft soil reinforced with geotextiles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp. 2): 325—328.
- [14] 刘金龙, 栾茂田, 王吉利, 等. 土工织物加固软土路基的机理分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1009—1014.
LIU Jin-long, LUAN Mao-tian, WANG Ji-li, et al. Mechanism of road embankment reinforced with geotextile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 1009—1014.