文章编号：1000－7598－(2008) 08－2302－05

复合加筋排水褥垫加固路基有限元计算

蔡晓光，刘汉龙

（河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室/岩土工程科学研究所，南京 210098）

摘　要：复合加筋排水褥垫是针对沿海缺砂地区开发的，具有水平排水与加筋作用的一项新型专利技术，可取代软基加固中的排水砂垫层。采用二维平面应变 Biot 固结有限元模型对复合加筋排水褥垫软土路堤进行了数值模拟，结果表明复合加筋排水褥垫可以满足水平排水要求，另外与传统的水平排水砂垫层相比，该技术可降低地基附加正应力和超孔隙水压力，有效抑制路基侧向变形的发展，减小路基沉降与不均匀沉降，提高路基稳定性，加筋效果显著。

关　键　词：复合加筋排水褥垫；软基；Biot 固结；有限元

中图分类号：TU 443　　**文献标识码**：A

2-D Biot consolidation FEM Analysis of subgrade improved by combined drainage and reinforcement cushion

CAI Xiao-guang,　LIU Han-long

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China）

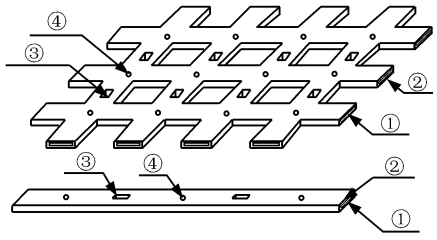
Abstract: The combined drainage and reinforcement cushion (CDRC) is a newly-developed proprietary technology which aims at coastal areas short of sand, is used for horizontal drainage and reinforcement in soft ground treatment and can replace horizontal dewatering sand cushion. The behavior of subgrade improved by CDRC has been analyzed by 2-D Biot consolidation plane strain finite element method. The result shows that the drainage capacity of CDRC can meet the requirement for drainage. Besides, it also shows that the technique can applied to lower foundation additional normal stress and excess pore water pressure, restrain the lateral deformation of foundation effectively, decrease vertical settlement and differential settlement of soft foundation and improve the foundation stability with remarkable effect compared with the traditional horizontal dewatering sand cushion.

Key words: combined drainage and reinforcement cushion; soft foundation; Biot consolidation; finite elements

1　引　言

排水固结法是处理软土地基的有效方法之一。为了加速排水固结作用进程，预压前往往先在地基中设置排水通道，包括竖向的塑料排水带、水平向的砂垫层等。而在我国东部沿海地区，由于部分地区砂土比较缺乏，给软基加固工程的顺利进展带来诸多不便。基于此，针对缺砂地区的软基加固工程，作者开发了同时具有水平排水和加筋作用的复合加筋排水褥垫专利技术[1]，其平面布置如图 1 所示。

本文根据复合加筋排水褥垫应力变形特点，对复合加筋排水褥垫堆载预压加固软基进行数值模拟，并与普通的水平排水砂垫层堆载预压加固软基数值模拟对比分析，来探讨复合加筋排水褥垫技术性能。



①条状排水褥垫；②针刺无纺布；③连接槽；④扒钉

图 1　复合加筋排水褥垫示意图

Fig.1　Combined drainage and reinforcement cushion

收稿日期：2007-4-10

基金项目：国家自然科学基金项目资助（No.50379010）。

作者简介：蔡晓光，男，1979 年生，博士，从事岩土地震工程研究。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2　复合加筋排水褥垫技术介绍

复合加筋排水褥垫技术适用于排水固结软基加固工程。该褥垫可以代替水平排水砂料垫层，并且对路堤有加筋作用，示意如图 1 所示。该复合排水褥垫特征是：选用聚丙烯原料，在高温下热溶后通过模具挤出直径为 1 mm 塑料细丝，塑料细丝互相缠绕（如方便面形状）形成矩形截面的条状排水褥垫，排水褥垫①外包针刺无纺土工布。在条状排水褥垫上面打孔形成连接槽，以便于打设于地基中的塑料排水板插入。通过扒钉使条状塑料褥垫连接成井字形状的复合加筋排水褥垫。软土地基固结时地基孔隙水经由塑料排水板、条状加筋排水褥垫排出加固区外。条状塑料褥垫的断面形式及材料参数见图 2 和表 1。

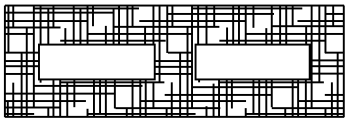


图 2　条状排水褥垫断面形式
Fig.2　The cross section of drainage cushion

表 1　SMJ150×50-2D 矩形中空塑料褥垫主要特性指标
Table 1　Properties of plastic cushion SMJ150×50-2D

外形尺寸 /mm		中空尺寸 /mm		单位长度质量 /g·m^{-1}	孔隙率 /%	抗压强度 /kPa		通水量 /m^3·h^{-1}
长	宽	长	宽			压缩 10 %	压缩 20 %	（i=0.1 时）
150	50	50	20	1163	89	120	180	4

该技术具有以下的优点：（1）复合加筋排水褥垫孔隙率大，排水通畅，可以代替目前软基加固工程中广泛使用的水平排水砂垫层，避免使用大量砂料。在沿海缺砂地区有广泛应用前景。（2）复合加筋排水褥垫抗拉强度高、柔性好，能明显提高路堤稳定性和减少路堤不均匀沉降。（3）复合加筋排水褥垫重量轻，现场施工安装方便，工人劳动强度低，施工效率高。（4）该技术施工不受阴雨天的影响，可大大加快施工进度。（5）此项发明在高速公路、市政及工业与民用建筑中土建工程等软基加固中的使用，将节约成本，缩短工期，提高工程质量，具有广泛应用前景。

3　本构模型及平面应变Biot固结有限元公式

3.1　Biot 固结有限元公式

Biot 固结理论的基本公式包含平衡微分方程和连续性微分方程两部分，对于空间问题，土体中任一点的平衡微分方程为

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z}+\frac{\partial p}{\partial x}=0;\\ \frac{\partial\sigma_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z}+\frac{\partial p}{\partial y}=0;\\ \frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{zy}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_z}{\partial z}+\frac{\partial p}{\partial z}=-\gamma\end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

式中：σ、τ 为有效应力；p 为孔隙压力；γ 为土体饱和重度。

此外，由达西定律，根据饱和土的连续性，假设土体不可压缩，土的渗透性各向相同，并将 ε_v 用位移表示，由微元体体积应变等于流入微元体与流出微元体的水量之差，可得以位移和孔隙水压力表示的连续性方程为

$$\frac{\partial\varepsilon_v}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial t}\left[\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right]=-\frac{k}{\gamma_w}\left[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial z^2}\right]\qquad(2)$$

式中：k 为土体的渗透系数；γ_w 为水的重度；u、v，w 均为位移。

联立式（1）和式（2）即为 Biot 固结方程。对于平面应变问题，计算中令 $w=0$，且所有量对 z 的导数为 0。

3.2　土体本构关系

本文采用扩展的 Drucker-Prager 模型来模拟路堤填土和淤泥质黏土。当扩展的 Drucker-Prager 模型的屈服面在子午面上的形状为直线时，其屈服准则为

$$F=t-p\tan\beta-d=0\qquad(3)$$

式中：t 为偏应力参数；p 为等效围压应力；β 为线性屈服轨迹在 p-t 应力平面上的倾角；d 为与硬化定义有关的参数 [2]。

用修正的剑桥模型（Modified Clay Plasticity）来模拟粉质黏土，其屈服面方程为

$$\frac{1}{\beta^2}\left(\frac{p}{a}-1\right)^2+\left(\frac{t}{Ma}\right)^2-1=0\qquad(4)$$

式中：p 为平均压应力；t 为偏应力参数；M 为临界状态线斜率；a 为初始屈服面大小的强化参数；β 为临界状态线参数。

3.3　复合加筋排水褥垫本构关系

一方面复合加筋排水褥垫具有抗压承载和渗透

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

排水性能，另一方面其具有抗拉性能[3, 4]。一般条件下其抗压与抗拉应力应变关系处在弹性范围之内，故在分析过程中可以将其简化为线弹性材料。

本文采用实体单元来模拟复合加筋排水褥垫抗压与渗透性能；采用一维杆单元模拟其抗拉性能，杆单元只具有抗拉强度，不具有抗压与抗弯强度。具体在 ABAQUS 中，实体单元作为主区（host region），一维杆单元作为嵌入区（embedded region）通过界面约束（Constraints）命令嵌入到主区中，从而实现复合加筋排水褥垫层的模拟。

4 算例分析

4.1 计算条件

复合加筋排水褥垫软土路堤计算模型如图 3 所示，其工程土质条件为：路基土分为 2 层，上层为 11.5 m 的淤泥质黏土，下层为 8 m 的粉质黏土，路堤填土 5 m，计算参数见表 2 和表 3。加筋排水褥垫层采用线弹性模型，其压缩模量为 0.58 MPa，抗拉强度为 6 kN/m。计算网格如图 4 所示，共划分 7 836 个单元，23 911 个节点。模型两侧边界水平固定，底边界固定，复合加筋排水褥垫层上表面及路堤堆载预压加固区外的地基表面，孔压边界为 0。

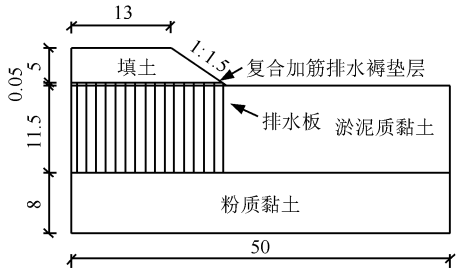


图 3 复合加筋排水褥垫加固路基计算模型（单位：m）
Fig.3 Computation model of subgrade improved by combined drainage and reinforcement cushion (unit: m)

表 2 土体模型参数
Table 2 Parameters of soils

材料类型	γ_d /kN·m^{-3}	c /kPa	ϕ /(°)	E /MPa	ν	ψ
填土	18.3	18	19	28	0.28	19
淤泥质黏土	18.1	14	11.5	1	0.32	11.5
砂垫层	16.5			11	0.3	

注：ψ 为剪胀角。

表 3 Clay plasticity 模型参数
Table 3 Parameters of clay plasticity model

材料类型	γ_d /kN·m^{-3}	E /MPa	ν	λ	κ	M	k /10^{-4} m·d^{-1}
粉质黏土	17.8	6.5	0.31	0.07	0.02	1.27	2.31

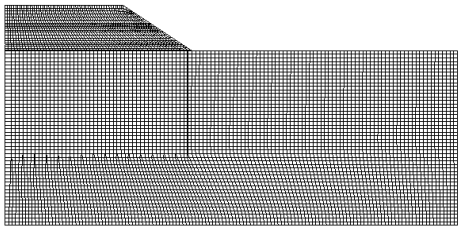


图 4 有限元网格
Fig.4 Grid of FEM

为了研究复合加筋排水褥垫的特性，另取采用 0.5 m 厚砂垫层为水平排水垫层的软土路堤，其他条件保持不变作为平行算例，与本算例进行对比分析。施工过程分级加载，加载曲线如图 5 所示。路堤分 5 次加载，每层厚度为 1 m，在 30 d 内填筑，间歇期为 30 d，工后计算固结时间 500 d。

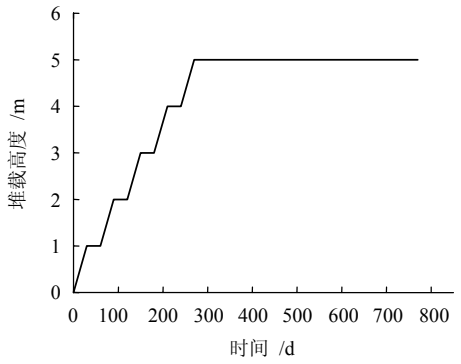


图 5 加载时间历程
Fig.5 Surcharge versus time

4.2 排水板加固区淤泥质黏土水平渗透系数的等效

塑料排水板按正方形布置，间距为 1.3 m，打设深度为 11.5 m，计算时将其换算成相当直径的砂井，砂井直径为 6.5 cm，影响区直径为 1.469 m。把沿路基纵向一定间隔布置的砂井转化成沿纵向连续不断分布的砂墙地基，要求转换前后地基土在任一时刻的固结度保持不变。此时地基可以按平面应变问题来分析。根据式（5）[5]计算得到排水砂墙的等效半宽 $b_w = 0.1276$ cm。

$$b_w = \pi r_w^2 / 2S \qquad (5)$$

式中：b_w 为等效砂墙半宽；r_w 砂井半径；S 为排水体间距。

轴对称砂井等效为平面砂墙时，设其影响区域不变，等效时只需转换土体水平方向的渗透系数。淤泥质粘土渗透系数 $k_h = k_v = 3.1\times10^{-5}$ m/d，对于理想井，等效水平向渗透系数按式（6）计算。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\frac{k_{hp}}{k_h}=\frac{2}{3[\ln(n)-0.75]} \quad (6)$$

式中：n 为井径比，$n=R/r_w$；R 为影响区半径。计算得等效水平向渗透系数 $k_{hp}=8.7\times10^{-6}$ m/d。

4.3　复合加筋排水褥垫排水特性

复合加筋排水褥垫排水排水能力 Q_c 由渗入复合加筋排水褥垫的水流量 Q_s 和复合加筋排水褥垫的排水流量 Q_p 二者中的小值确定，即

$$Q_c=\min(Q_s, Q_p) \quad (7)$$

取芯体截面尺寸为 15 cm×5 cm 复合加筋排水褥垫，外包土工织物，渗透系数为 5×10^{-2} cm/s。本算例中，复合加筋排水褥垫纵向间距与排水板间距相同为 1.3 m。路堤底部纵向宽度为 1.3 m、横向为路堤半宽 20.5 m 范围内复合加筋排水褥垫集水能力为 $Q_s=k\times A=5\times10^{-4}\times2\times(0.15+0.05)\times20.5=4.1$。

复合加筋排水褥垫材料排水流量 Q_p 根据通水量试验得出[3]，符合以下规律：

$$Q_p=Ki^{0.5},\quad (0<K<1) \quad (8)$$

式中：Q_p 为试样通水量（l/s）；i 为水力梯度；K 为通水能力系数。本算例中，芯体截面尺寸为 15 cm×5 cm 复合加筋排水褥垫通水能力系数 $K=4.680\,8$，水力梯度 i 取1 %，则 $Q_p=0.468$ l/s。根据公式（8），复合加筋排水褥垫的排水能力由其排水流量 Q_p 决定，即最大排水量为 0.468 l/s。

砂垫层的排水能力根据达西（Darcy）定律，其渗流量为

$$q=vA=kiA \quad (9)$$

式中：q 为渗流量（m^3/s）；v 为渗透速度；k 为渗透系数；i 为水力梯度；A 为截面积。

对比算例中砂垫层厚 0.5 m，渗透系数为 6.0×10^{-2} cm/s，水力梯度为 1 %，在纵向宽度为 1.3 m 范围内渗流量计算结果如表 4 所示。从表中计算结果可以看出，路堤设计加筋排水褥垫其通水能力是砂垫层的 120 倍。本算例中复合加筋排水褥垫厚度为 0.05 m，其等效渗透系数为 72 cm/s。

表 4　复合加筋排水褥垫与 0.5 m 厚砂垫层排水能力对比
Table 4　The drainage capacity comparison between sand blanket and combined drainage and reinforcement cushion

砂垫层		复合加筋排水褥垫		
渗透系数 /cm·s^{-1}	流量 Q_1 /l·s^{-1}	通水能力系数 /l·s^{-1}	通水量 Q_2 /l·s^{-1}	Q_3
6.0×10^{-2}	3.9×10^{-3}	4.6808	0.4681	120

4.4　计算结果与分析

4.4.1　复合加筋排水褥垫对地基附加应力的影响

路堤堆载结束即第 270 d 时，地基表面竖向附加应力沿横向分布如图 6 所示。由图可见，复合加筋排水褥垫可降低地基表面土体的附加应力。比较路堤中点竖向附加应力，复合加筋排水褥垫堤为 93.7 kPa，砂垫层堤为 99.7 kPa，前者降低了 6 %。

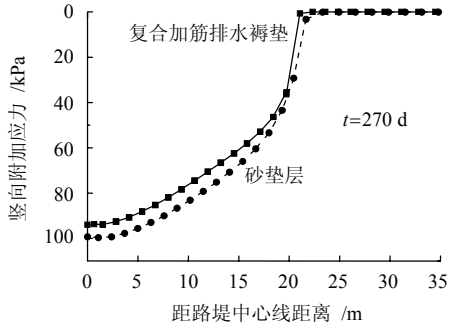


图 6　地基表面竖向附加应力横向分布曲线
Fig.6　Vertical subsidiary stress of ground's suface

4.4.2　复合加筋排水褥垫对地基孔隙水压力的影响

路堤堆载至第 270 d 时，复合加筋排水褥垫堤和砂垫层堤地基淤泥质粘土层超静孔隙水压力分布如图 7 所示。比较地基超静孔隙水压力最大值，复合加筋排水褥垫层堤为 66.2 kPa，砂垫层堤为 84 kPa，前者降低了 21 %，设置复合加筋排水褥垫层可有效降低地基的超孔隙水压力。

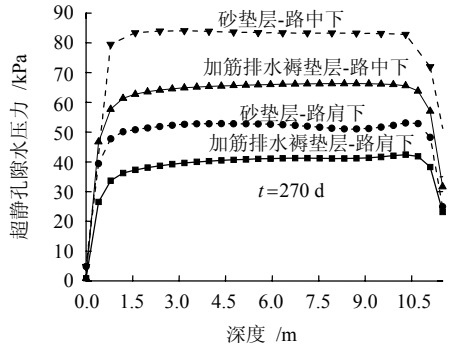


图 7　淤泥质粘土层不同深度超静孔隙水压力
Fig.7　Excess pore water pressure of warp clay

4.4.3　复合加筋排水褥垫对侧向变形的影响

路堤堆载至第 270 d 时，堤址点下沿地基深度各点的侧向位移由图 8 所示。复合加筋排水褥垫堤堤趾垂直深度下其最大侧向变形为 0.37 m。而相应的普通砂垫层堤最大侧向变形为 0.43 m，前者减小

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

了 14 %。复合加筋排水褥垫层对地基侧向变形的约束作用是非常显著的，且影响深度在 10 m 以上。

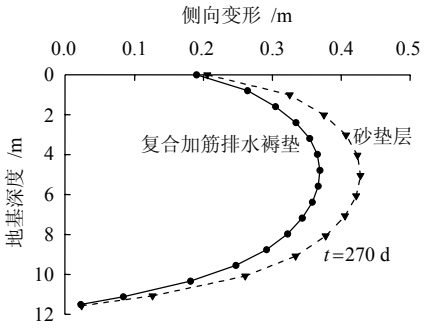


图 8 堤址点下沿地基深度各点的侧向位移

Fig.8 Lateral displacement versus depth of foundation at embankment toe

4.4.4 复合加筋排水褥垫对竖向位移的影响

复合加筋排水褥垫堤与砂垫层堤路基中点沉降时程和两堤路肩与路中沉降值分别见图 9 和表 5。当路堤堆载到设计标高时，路肩与路中点地基处，复合加筋排水褥垫堤沉降与砂垫层堤相比分别减少 9.23 %和 5.29 %；堆载结束后固结 500 d 时，路肩与路中点地基处，复合加筋排水褥垫堤沉降分别减少 7.51 %和 5.04 %。图 10 为两堤第 270 d 时路基表面沉降。由图可见，设置复合加筋排水褥垫层可以减小地基不均匀沉降和降低堤趾隆起。

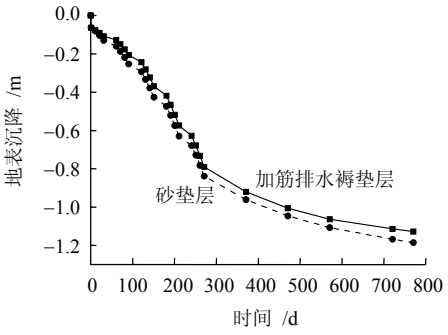


图 9 路基中点沉降曲线

Fig.9 Settlement of foundation's center

表 5 加筋排水褥垫堤与砂垫层堤沉降比较

Table 5 Settlement of embankment improved by combined drainage and reinforcement cushion and embankment improved by sand blanket

(m)

沉降点	270 d			770 d		
	1	2	(1-2) /1	1	2	(1-2) /1
路肩	0.65	0.59	9.23 %	0.945	0.874	7.51 %
路中点	0.84	0.79	5.29 %	1.19	1.13	5.04 %

注：1 为砂垫层堤，2 为复合加筋排水褥垫堤。

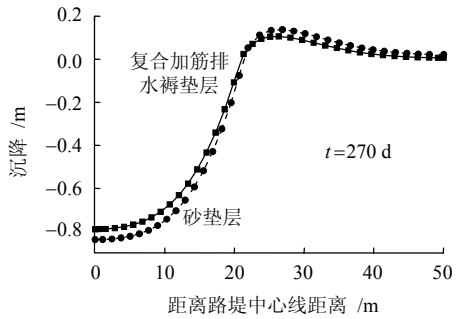


图 10 路基表面沉降曲线

Fig.10 Settlement of foundation's surface

5 结 论

本文介绍了复合加筋排水褥垫专利技术，对软土路堤设置复合加筋排水褥垫层和砂垫层进行了对比计算，得出以下结论：

（1）与传统的水平排水砂垫层相比，复合加筋排水褥垫层可以调整降低地基附加正应力，降低超孔隙水压力，增加路堤本身的变形刚度与整体性，从而有效抑制路基侧向变形、减小地基的沉降与不均匀沉降。

（2）复合加筋排水褥垫技术可有效满足水平排水技术要求，加筋效果比较显著。在堆载预压加固软基中采用复合加筋排水褥垫专利技术是可行的。

参 考 文 献

[1] 刘汉龙，王保田，陈永辉，等. 复合加筋排水褥垫：中国，ZL02218323.X[P]. 2002-12-16.

[2] 王金昌，陈页开. Abaqus 在土木工程中的应用[M]. 杭州：浙江大学出版社，2006.

[3] 刘建华，郭忠印. 塑料盲沟材料性能测试分析与应用技术探讨[J]. 公路，2004，(11)：113－117.

[4] 武良金，吴福生，刘永强. 塑料盲沟材料性能指标初探[J]. 河海大学学报，2003，31（3）：264－267.
WU Liang-jin, WU Fu-sheng, LIU Yong-qiang. Research on material performance indexes for plastic blind drains[J]. **Journal of Hohai University** (Natural Sciences), 2003, 31(3): 264－267.

[5] INDRARATNA B, REDANA I W. Plane-strain modeling of smear effects associated with vertical drains[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 1997, 123(5): 474－478.

[6] HIRD C C, PYRAH I C, RUSSELL D. Finite element modeling of vertical drains beneath embankments of soft ground[J]. **Geotechnique**, 1992, 42(3): 499－511.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net