交通荷载作用下软基加筋道路加筋效果分析

刘飞禹[1,2]，蔡袁强[2]，徐长节[2]，王 军[2]

（1.上海大学土木工程系，上海 200072；2.浙江大学土木工程系，浙江 杭州 310027）

摘 要：为了研究交通荷载作用下考虑软土软化效应的软基加筋道路加筋效果的影响因素，首先以室内动三轴试验为基础，通过回归分析得到了软土在循环荷载作用下动模量衰减的经验公式；然后编制了用户子程序将该公式导入有限元分析软件ABAQUS中，采用有限元分析了荷载形式、荷载频率、筋材模量、加筋位置、加筋层数、软土层厚度等对加筋效果的影响。结果表明，随着荷载频率的增大，加筋效果呈减小趋势。加筋效果会随着筋材模量的增大和加筋层数的增多而增大。当筋材铺设在面层和基层之间时，加筋效果最好。在软土层厚度较小时，加筋效果随软土层深度增大有明显提高；但在软土层厚度较大时，加筋效果随软土深度增加提高较少。

关键词：交通荷载；加筋道路；软化特性；加筋效果

中图分类号：TU435 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2007)11－1659－06

作者简介：刘飞禹(1976－)，男，湖北天门人，博士，讲师，主要从事土动力学及加筋土的动力响应研究。E-mail: lfycsu@yahoo.com.cn。

Parametric study of reinforced pavements on soft clay under traffic loading

LIU Fei-yu[1,2], CAI Yuan-qiang[2], XU Chang-jie[2], WANG Jun[2]

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A parametric study was carried out to evaluate the beneficial effect of geogrid reinforcement in the pavement under traffic loading considering softening behavior of clay. Firstly, cyclic triaxial tests were conducted to investigate the effect of initial deviator stress, loading frequency, overconsolidation ratio, and cyclic stress ratio on softening behavior of clay. The empirical equation for softening of clay was proposed by regression analysis method. The equation was imported into FEM program ABAQUS through compiled subroutine. A series of finite element simulations were carried out to investigate the beneficial effect of geogrid reinforcement on the vertical displacement, and how such effects were influenced by the loading forms, loading frequency, geogrid modulus, geogrid location, geogrid layers and subgrade thickness. It was indicated that the greater the loading frequency was, the less the beneficial effect of geogrid reinforcement was. With the increase of geogrid modulus and geogrid layers, the effect of reinforcement increased. Among the three locations examined for the geogrid reinforcement, the best location which resulted in the highest reduction in the value of vertical displacement was at the bottom of pavement. For small subgrade depth, the effect of reinforcement significantly increased with the increase of subgrade depth. But for large subgrade depth, the effect of reinforcement did not significantly increased with the increase of subgrade depth.

Key words: traffic loading; reinforced pavement; softening behavior; effect of reinforcement

0 引 言

软土地基在交通荷载的长期作用下往往会产生软化现象，软土的刚度逐渐减小[1-2]，从而导致道路产生较大的沉降。加筋可以提高道路的整体强度，减小道路的沉降，同时能显著地降低工程造价，因此，加筋技术已被越来越多的应用于软土地区道路工程中。目前的研究多集中于加筋道路的静力特性[3-5]。在对动荷载作用下加筋效果的研究中，Perkins[6]通过试验研究了加筋位置、筋材强度、基层厚度等因素对加筋效果的影响，发现同样的格栅，铺设在基层中央时的加筋效果要好于铺设在基层和地基之间的情况。Miura[7]通过试验发现，筋材模量越大，筋材中的拉应力也越大，加筋减少路面沉降的作用也越明显。S. M. Haeri等[8]通过三轴压缩试验研究了加筋层数、围压、土工

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50478081）；上海大学创新基金资助项目

收稿日期：2006－11－30

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

织物的类型和布筋方式对加筋砂试样的应力应变关系的影响。Canceli Andrea 等[9]通过现场试验研究表明，当软土地基的强度降低时，加筋的效果会更好；基层的强度和厚度增大，加筋的效果也更好。Bassam Saad 等[10]通过有限元的方法对室内模型试验进行了分析，研究了加筋位置、筋材模量等对面层底部的应变和软土地基顶部应变的影响。

本文以室内动三轴试验为基础，通过回归分析得到了软土动模量衰减的经验公式，编制了用户子程序将该公式导入有限元软件 ABAQUS 中，采用有限元研究了各种因素对加筋效果的影响，对采用土工格栅加筋的软基低路堤道路具有一定的参考价值。

1 软土软化特性

在交通荷载的长期作用下，软土地基将发生应变软化现象，随着循环次数的增加，动弹模量逐渐减小。在传统的工程设计或计算软件（如 ABAQUS）中，习惯于用一个恒定的弹性模量作为土体的刚度指标，而忽略荷载作用过程中刚度的变化；实际上，即使在静力加载条件下，随着应变的逐渐增加，软土刚度都会表现为非线性软化[11]，动力作用下这种现象就更明显。因此，要想准确模拟长期交通荷载作用下加筋道路的特性，就不能忽视软土的软化现象。

对于循环荷载作用下软土的软化特性，已有的很多研究[12-15]都没有考虑初始偏移应力大小对软黏土动模量的影响。笔者对初始偏移应力、超固结比、荷载频率、循环应力比等因素的影响进行了系统地研究。限于篇幅，本文只给出回归分析的结果。

初始偏移应力作用下典型的滞回圈形状见图 1。图中，σ_d 为动应力；σ_s 为初始偏移应力，定义为初始主应力差的大小，即 $\sigma_1-\sigma_3$；动弹模量

$$E_d=(q_{max}-q_{min})/(\varepsilon_{dmax}-\varepsilon_{dmin}), \quad (1)$$

式中，q_{max} 和 q_{min} 分别为每次循环中土样的最大与最小偏应力，ε_{dmax} 和 ε_{dmin} 分别为其所对应的动应变。

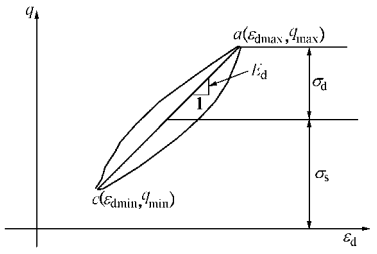


图 1 初始偏移应力作用下的滞回圈曲线

Fig. 1 Hysteresis loop under initial deviator stress

定义循环应力比

$$\tau_c=\frac{\sigma_d}{2c_u}, \quad (2)$$

其中，σ_d 为轴向循环动应力，c_u 为土体不排水强度。由于临界循环应力比的存在[16-17]，使土体的软化规律变得复杂，为了使研究工作简化，只研究了循环应力比大于临界循环应力比的情况。

由于缺乏对循环荷载作用下土体应变软化机理较详细深入的研究，目前从理论上推导建立应变软化模型还不现实，只有根据试验结果进行模拟分析。用来描述 E_d - ε_d 关系常用的就是 MIT-S1 模型[18]，但该公式形式复杂，参数过多，给应用带来了不便。由试验数据分析（另文发表）可以发现，频率和循环应力比的变化对软土动模量的衰减影响很小，因此，为了研究的方便，本文只考虑超固结比和偏移应力对土体软化的影响。通过采用数个不同的曲线函数对试验数据进行回归分析发现，采用如下指数函数对 E_d - ε_d 关系曲线进行描述可得到比较理想的回归结果，

$$E_d=(A_1+B_1\sigma_s)(\alpha_1 OCR^2+\beta_1 OCR+\gamma_1)\varepsilon_d^{(C_1+D_1\sigma_s)(\alpha_2 OCR^2+\beta_2 OCR+\gamma_2)}, \quad (3)$$

其中，A_1，B_1，α_1，β_1，γ_1，C_1，D_1，α_2，β_2，γ_2 为与初始偏应力和超固结比相关的参数。

利用式（3）对图 2 和图 3 中的试验数据进行回归分析，可以看出，采用式（3）可以较好地反映动弹模量 E_d 随动应变 ε_d 的变化规律，通过分析得到不同偏移应力和超固结比情况下 A_1，B_1，α_1，β_1 等参数的值，即 $A_1=5.9401$，$B_1=0.0265$，$\alpha_1=-0.0804$，$\beta_1=0.7425$，$\gamma_1=0.3175$；$C_1=-0.7460$；$D_1=0.0057$；$\alpha_2=0.0219$，$\beta_2=-0.1837$，$\gamma_2=1.1540$。

将上述参数代入式（3），就得到了试验土样在不同超固结比和不同偏移应力作用下动弹性模量随应变变化的表达式

$$E_d=(5.9401+0.0265\sigma_s)(-0.0804OCR^2+0.7425OCR+0.3175)*\varepsilon_d^{(-0.7460+0.0057\sigma_s)(0.0219OCR^2-0.1837OCR+1.1540)}。 \quad (4)$$

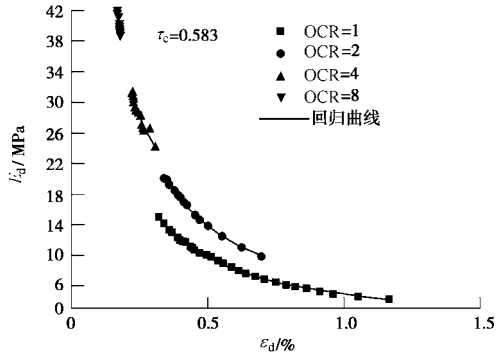


图 2 不同超固结比时土样的 E_d-ε_d 归一化曲线图

Fig. 2 Regression curves for E_d-ε_d under different overconsolidation ratios

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

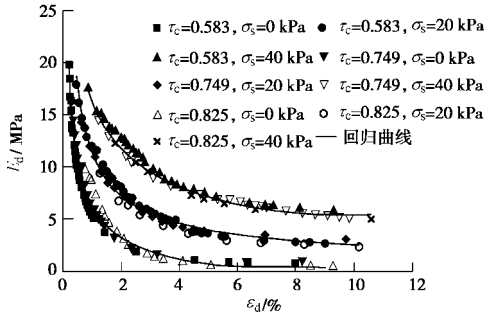


图 3 不同偏移应力下土样的 E_d–ε_d 归一化曲线图

Fig. 3 Regression curves for E_d–ε_d under different initial deviator stresses

2　加筋道路计算模型

采用 ABAQUS 来分析加筋道路的影响因素。采用线弹性的模型来模拟面层特性，采用弹塑性的一维杆单元来模拟格栅，用扩展的 Drucker Prager 模型模拟基层和软土地基的塑性特性。为了反映软土地基在循环荷载作用下的软化特性，通过编写用户子程序，将式（4）导入 ABAQUS 中，使得在计算中软土地基的动弹性模量能随应变增大而衰减。

对于筋材和土体之间的相互作用，目前还没有形成一个统一的认识[19]，还难以用数值方法来准确模拟这种筋土相互作用。同时，如果在筋材和土体之间设置常用的摩擦界面单元，会使计算的时间成本大大增加。基于以上因素，假设格栅和土体之间没有相对滑移，处于紧密接触状态。由于格栅具有较好的约束土体位移的作用，Saad 等[10]认为此假设是可以接受的。

3　影响加筋效果的因素分析

采用平面应变有限元分析方法进行分析。假设有一列汽车行驶在路面中央，汽车的中轴线与路面的中轴线重合，两轮间距 2 m，车轮与地面的接触面宽 0.5 m，以双轮组单轴 100 kN 为标准轴载，轮胎压力为 0.7 MPa，交通荷载作用模拟成半波正弦荷载，荷载频率 2 Hz。加筋材料采用高强度的土工格栅，铺设在路堤和软土地基分界面处。路堤（基层）顶宽 12 m，坡度为 1∶1.5。利用对称性，取结构的一半进行计算，除文中特别说明外，道路的基本尺寸及模型的网格划分如图 4 所示。面层、路堤和软土地基均采用八节点四边形实体单元，土工格栅采用三节点杆单元，单位宽度横截面面积为 0.002 m^2。取路面上荷载作用中心点处为节点 1。计算所用的参数见表 1。

为了对影响加筋效果的诸多因素进行研究，引入概念 TBR，即 traffic benefit ratio[20]，表示几何形状和材料组成都相同的加筋和未加筋道路，在达到指定的变形（或破坏）状态时，在加筋状态下所需要的循环荷载作用次数与不加筋状态下所需要的循环次数的比值。一般情况下，TBR 越大，加筋的效果越好，

$$\mathrm{TBR}_{2000}=\frac{2000}{N_u}\quad 。\tag{5}$$

式中　TBR_{2000} 为达到加筋情况下加载 2000 次时的竖向永久位移时，加筋道路的加载次数（2000）与不加筋道路需要的加载次数的比值；N_u 为不加筋道路要达到加筋道路加载 2000 次时的竖向永久位移所需要的加载次数。

表 1 模型基本参数

Table 1 Model parameters

名称	密度 /(kg • m^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比	屈服应力/kPa
面层	2490	4134	0.30	
基层	1900	50	0.35	150
格栅	1800	4224	0.42	3000
软土	1850		0.42	43.6

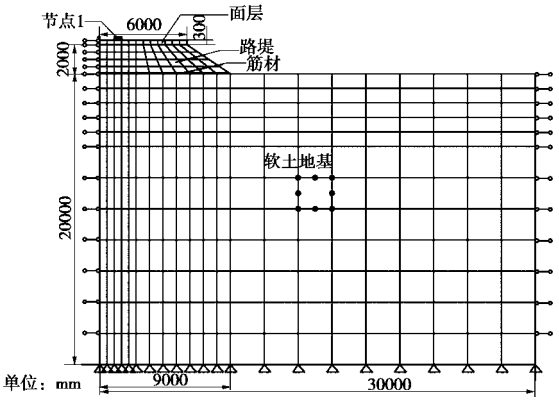


图 4 有限元网格划分图

Fig. 4 Finite element mesh

3.1　荷载形式的影响

图 5 为在循环半波正弦荷载和循环三角形荷载作用下，加筋和不加筋道路节点 1 竖向位移随加载次数的变化曲线。可以看出，不论是加筋还是不加筋道路，半波正弦荷载作用下路面的竖向沉降都比三角形荷载作用下稍大。当荷载分别为半波正弦和三角形形式时，对应的 TBR_{2000} 为 6.09 和 5.97，两者相差很小，表明这两种荷载作用形式对加筋效果的影响不明显。

图 6 为在循环半波正弦荷载和循环三角形荷载作用下，经历 2000 次循环荷载作用后软土层顶面各点的竖向位移曲线。可以看出，加筋与不加筋道路软土层顶面的竖向位移在两种荷载形式下差别很小，进一步表明这两种荷载作用形式对加筋效果的影响不明显。

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

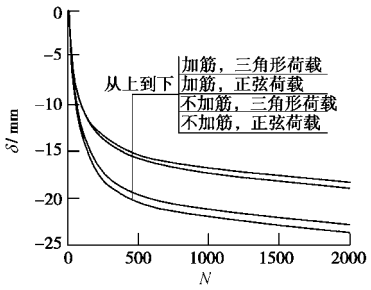


图 5 荷载形式对竖向位移的影响

Fig. 5 Effect of loading forms on vertical displacement

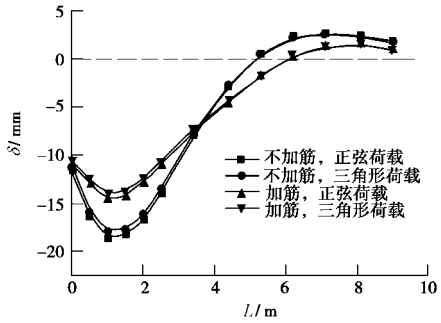


图 6 荷载形式对软土层顶部竖向位移的影响

Fig. 6 Effect of loading forms on vertical displacement on the top of subgrade

3.2 加载频率的影响

图 7 为加载频率分别为 1，2，5 Hz 时，节点 1 竖向位移随加载次数的变化曲线。由图可知，随着加载次数的增大，加筋与不加筋的区别逐渐明显，表明加筋效果随着荷载次数的增大而增大。另外，随着加载频率的增大，加筋和不加筋路面的竖向位移都逐渐减小。当加载频率分别为 1，2，5 Hz 时，对应的 TBR_{2000} 分别为 6.9，6.09，4.5，表明随着加载频率的增大，加筋效果呈减小趋势，尤其是当频率由 2 Hz 增大到 5 Hz 时，加筋效果减小的很明显。

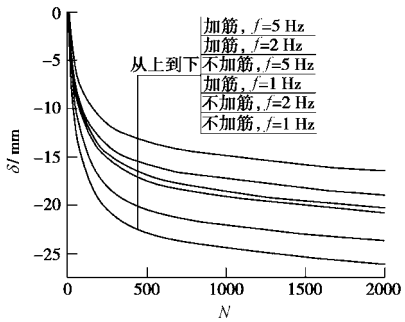


图 7 加载频率对竖向位移的影响

Fig.7 Effect of loading frequency on vertical displacement

3.3 筋材模量

图 8 为筋材模量不同时，节点 1 竖向位移随循环次数发展的曲线，图 9 为筋材模量对加筋效果的影响曲线。可以看出，随着筋材模量的增大，加筋效果逐渐提高。当筋材模量为 500 MPa 时，TBR_{2000} 仅为 1.45，加筋效果并不明显，表明筋材模量如果过小，加筋效果会比较差；在筋材模量由 500 MPa 增大到 3000 MPa 过程中，加筋效果的提高很明显；在筋材模量大于 3000 MPa 后，模量的增大对加筋效果的提高影响较小。由此可知，加筋效果随着筋材模量的增大而增大，但达到一定值后，这种趋势会逐渐变得不明显。

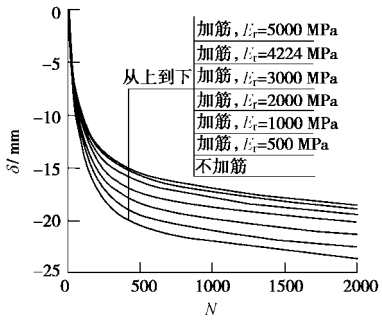


图 8 筋材模量对竖向位移的影响

Fig. 8 Effect of geogrid modulus on vertical displacement

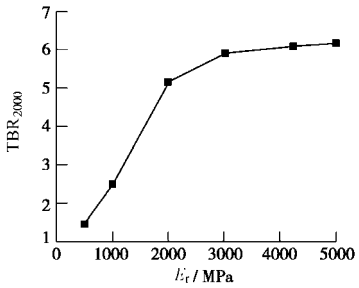


图 9 筋材模量与加筋效果的关系

Fig. 9 Relationship between geogrid modulus and reinforcement effect

3.4 筋材位置

图 10 为筋材位置示意图。图 11 为加筋位置对路面竖向位移的影响。对于三种加筋位置，加筋道路的表面竖向位移都比未加筋的小。对应于图 10 中（b），（c），（d）三种加筋位置时的 TBR_{2000} 分别为 6.09，7.04，7.7，在达到 2000 个循环时竖向位移分别比不加筋情况减少了 20.1%，22.28%，23.9%，可见加筋效果最好的是将筋材放置于面层和基层之间的情况，这与 Ashmawy[21]对加筋土做的循环荷载三轴试验和 Perkins[6]的室内模型试验得出的结论一致；其次是将筋材放置在基层的中间，效果最差的是将筋材放置在基层和软土地基之间。对于铺设在面层下的筋材，由于其拉力加劲作用明显，筋材的抗拉强度得到了充分发挥，降低了路基中垂直和水平应力，加筋效果最好。

3.5 加筋层数

图 12 为加筋层数对路面竖向位移的影响。从图中

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

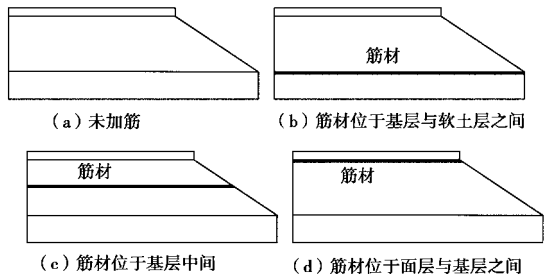


图 10 筋材位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of geogrid location

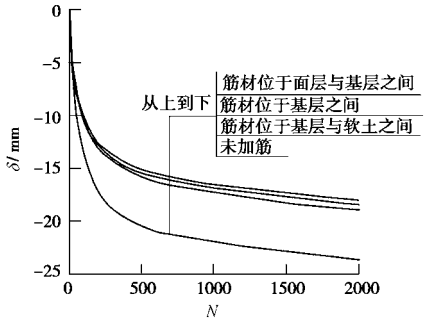


图 11 筋材位置对竖向位移的影响

Fig. 11 Effect of geogrid location on vertical displacement

可以看到，加筋道路的竖向位移都比未加筋道路的竖向位移小，当加筋层数分别为一层、两层、三层时，对应的 TBR_{2000} 分别为 6.09，11.07，16.4，表明随着加筋层数的增加，加筋对于减小路面竖向位移的效果越好。但同时可以发现，随着加筋层数的增加，增大层数所带来的路面竖向位移的减小量越来越小，加一层筋比不加筋竖向位移减少了 20.1%，加两层筋比加一层筋竖向位移减少了 18.39%，加三层筋比加两层筋竖向位移减少了 13.26%，表明通过增加加筋层数的方法来减小路面竖向位移的方法也是有一定限制的。

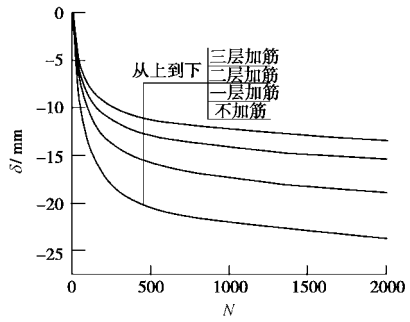


图 12 加筋层数对竖向位移的影响

Fig. 12 Effect of geogrid layers on vertical displacement

图 13 为距道路中心线水平距离 1.5 m 处垂线方向土体水平位移沿深度变化的曲线。从图中看出，加筋后筋材附近土体的水平位移明显小于不加筋的情况，同时发生水平位移的土体在深度方向也明显减小。与不加筋时相比，加一层、两层、三层筋材时，水平位移的最大值分别减小了 27.7%，42.1%，52.2%，可见采用多层加筋对土体水平位移的约束作用非常明显。

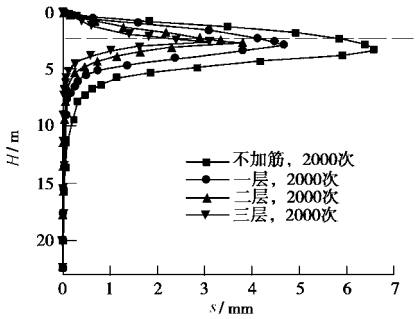


图 13 水平位移沿深度变化曲线

Fig. 13 Horizontal displacement versus depth

3.6 软土地基厚度

图 14 为软土层厚度分别为 10，20，30 m 时，加筋和不加筋道路路面节点 1 的竖向位移随循环次数发展的曲线。从图中可以看出，随着软土层深度的增大，加筋和不加筋道路的路面竖向位移都是逐渐增大的。当软土深度分别为 10，20，30 m 时，对应的 TBR_{2000} 分别为 5.7，6.09，6.3，表明随着软土层深度的增大，加筋效果也会逐渐提高，但软土层厚度增大到一定值后，再增大厚度时加筋效果的增大就不明显了。

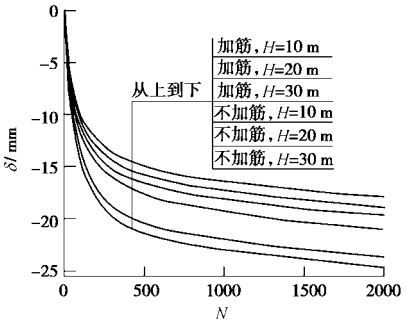


图 14 软土层厚度对竖向位移的影响

Fig. 14 Effect of subgrade thickness on vertical displacement

4 结　　论

（1）加筋效果随着荷载次数的增大而增大。采用循环半波正弦荷载和循环三角形荷载模拟交通荷载作用时，两种荷载形式对加筋效果的影响不明显。

（2）加筋位置对加筋效果有明显影响，从本文对比的三种情况来看，以将筋材铺设在沥青和基层之间时加筋效果最好。

（3）随着加载频率的增大，加筋效果呈减小趋势；加筋效果会随筋材模量的增大而增大，但达到一定值以后，这种增大的趋势会逐渐变得不明显。

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

（4）随着加筋层数的增加，加筋的效果逐渐增大；但随着加筋层数的增加，增大层数所带来的路面竖向位移的减小量越来越小。

（5）随着软土层深度的增大，加筋效果也会逐渐提高，但软土层厚度增大到一定值后，再增大厚度时加筋效果的增大就不明显了。

参考文献：

[1] 周 建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, **32**(5): 62－68. (ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Study on strain soften in saturated soft clay under cyclic load[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **32**(5): 62－68. (in Chinese))

[2] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7): 891－895. (HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(7): 891－895. (in Chinese))

[3] HAAS R. Structural behavior of tensar reinforced pavement and some field applications[C]// Proc Polymer Grid Reinforcement Conf. London: Thomas Telford, 1984.

[4] VARADARAJAN A, GSHARMA K, ALY M A A. Finite element analysis of reinforced embankment foundation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, **23**(2): 103－114.

[5] 朱 湘, 黄晓明. 有限元方法分析影响加筋路堤效果的几个因素[J]. 土木工程学报, 2002, **35**(6): 86－92. (ZHU Xiang, HUANG Xiao-ming. Effects of reinforcements on embankment analyzed by finite element method[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, **35**(6): 86－92. (in Chinese))

[6] PERKINS S W. Numerical modeling of geosynthetic reinforced flexible pavements[R]. Bozeman: Department of Civil Engineering Western Transportation Institute, Montana State University, 2001.

[7] MIURA N, SAKAI A, TAESIRI Y, et al. Model and field tests of reinforced pavement on soft clay ground[C]// Int Geotechnical Symp on Theory and Practice of Earth Reinforcement, Fukuoka, Japan, 1988.

[8] HAERI S M, NOORZAD R, OSKOOROUCHI A M. Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000, **18**(6): 385－402.

[9] CANCELLI A, MONTANELLI F. In ground test for geosynthetic reinforced flexible paved roads[C]// Proc Geosynthetics '99 Conference. Boston, USA. 1999.

[10] SAAD Bassam, HANI Mitri, HORMOZ Poorooshasb. 3D FE analysis of flexible pavement with geosynthetic reinforcement[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, **132**(5): 402－415.

[11] ATKINSON J H. Non-linear soil stiffness in routine design[J]. Geotechnique, 2000, **50**(5): 487－508.

[12] NEVEN Matasovic, MLADEN Vucetic. Generalized cyclic-degradation-pore-pressure generation model for clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, **121**(1): 33－42.

[13] NARASIMHA RAO S, PANDA A P. Non-linear analysis of undrained cyclic strength of soft marine clay[J]. Ocean Engineering, 1998, **26**(3): 241－253.

[14] 朱登峰, 黄宏伟, 殷建华. 饱和软黏土的循环蠕变特性[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(9): 1060－1064. (ZHU Deng-feng, HUANG Hong-wei, YIN Jian-hua. Cyclic creep behavior of saturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical engineering, 2005, **27**(9): 1060－1064. (in Chinese))

[15] KAZUYA Yasuhara, SATOSHI Murakami, SONG Byung-woong. Postcyclic degradation of strength and stiffness for low plasticity silt[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(8): 56－769.

[16] LAREW H G, LEONARDS G A. A repeated load strength criterion[C]// Proc Highway Res Board, 1962.

[17] KAZUYA Yasuhara, TOYOTOSHI Yamanouchi, HIRAO Kazutoshi. Cyclic strength and deformation of normally consolidation clay[J]. Soil and Foundations, 1982, **22**(3):77－91.

[18] DOMINIC Assimaki, EDUARDO Kausel, ANDREW Whittle. Model for dynamic shear modulus and damping for granular soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(10): 859－869.

[19] PALMEIRA E M, MILLIGAN G W E. Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand[J]. Geotechnique, 1989, **39**(33): 511－524.

[20] BERG R R, CHRISTOPHER B R, PERKINS S W. Geosynthetic reinforcement of aggregate base course of flexible pavement structures[S]. Geosynthetic Materials Association: GMA White Paper Ⅱ, 2000.

[21] ASHMAWY A K, BOURDEAU P L, DRNEVICH V P, DYSLI M. Cyclic response of geotextile-reinforced soil[J]. Soils and Foundations, 1999, **39**(1): 43－52.

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