

土工格栅受力状况的测试新技术

羊 晔, 刘松玉, 邓永锋, 苗永红

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 土工格栅在公路和铁路工程中应用广泛, 但加筋结构中土工格栅效用的发挥仍不明晰。针对土工格栅受力状况测试的现状, 提出采用电感式土工格栅位移计测量加筋结构中土工格栅应变的新技术, 并在室内模型试验及现场土工格栅加筋路基试验段进行应用, 通过电感式位移计测量的土工格栅应变与传统应变片测试结果及数值计算结果的对比, 表明电感式土工格栅位移计测试技术准确可靠, 适用于土工格栅加筋结构的现场测试。

关键词: 土工格栅; 应变; 电感式位移计; 模型试验

中图分类号: TD853.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1133-05

作者简介: 羊 晔(1978-), 男, 博士研究生, 从事特殊地基处理研究。E-mail: callyangye@yahoo.com.cn。

New measuring technology of geogrids under load

YANG Ye, LIU Song-yu, DENG Yong-feng, MIAO Yong-hong

(Institute of Geotechnical Engineering of Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The geogrids have been widely used in highway and railway projects, but the stress of the geogrids in the reinforcement has not been gotten clearly. In view of the present measuring technology of the geogrids under load, the inductance type displacement meter is introduced to measure the strain of the geogrids in the reinforcement as a testing technology innovation. The inductance type displacement meter is used in the laboratory model tests and the trial section of geogrid-reinforced embankment, and the data measured by the inductance type displacement meters is compared with those measured by usual strain foils and the strain of numerical calculation. The results indicate that the data measured by the inductance type displacement meter is accurate and reliable, and it is applicable to measuring the strain of the geogrids in the field reinforcement.

Key words: geogrid; strain; inductance type displacement meter; model test

0 引 言

土工格栅因其强度高、耐久性好、施工便捷等优点, 已广泛应用于公路、铁路的路基处理和边坡防护, 取得了良好的效果。近年来, 土工格栅加筋结构的强度、变形分析、筋土作用机理以及行车荷载对加筋结构影响的研究成果很多^[1-3], 加筋路基和支挡结构已有明确的设计方法及计算模型^[4-5], 土工格栅加筋调节差异沉降的研究也取得了一定的进展^[6-7]。但实际工程应用中, 土工格栅加筋的设计和选材仍存在两个突出问题: ①筋材效用发挥不明显, 造成大量的材料浪费; ②筋材在使用中破坏, 导致加筋结构的失败, 究其原因, 主要是不能准确地检测加筋结构中土工格栅的受力状况, 设计和施工中得不到实测数据进行对比和改进。

目前, 土工格栅受力状况的测试主要采用电阻式应变片。Rowe 等^[8-9]最早在实际工程中采用电阻应变片对加筋路基中的土工织物和土工格栅的应变进行测量, 研究筋材在工作条件下的应变情况。李洪年等^[10]

研制了电阻应变片传感器, 测量土工格栅内力, 并结合试验工程, 介绍传感器的埋设方法, 分析土工格栅受力状况的测试结果。但电阻应变片黏贴程序复杂, 国内应变片测试量程一般不超过 0.5%, 超量程后测得的电阻与应变之间不呈线性关系。实际工程中土工格栅的极限拉伸应变最大可达 10%左右, 远超出其量程, 因此应变片现场测试的量程及准确性还有待提高。

近年来, 一些加筋工程使用柔性位移计测试土工格栅的应变。徐林荣等^[11]使用柔性位移计在桩网复合地基的测试断面上量测基底不同位置土工格栅变形分布, 计算土工格栅的应变。杨广庆等^[12]在土工格栅加筋土挡墙的现场试验中, 在各层位土工格栅拉筋末端埋设柔性位移计, 量测拉筋变形量, 计算土工格栅的应变值。但柔性位移计通常设置于土工格栅的上覆土(砂)层中, 或是筋材的末端, 不能直接反映筋材不

同位置的应变分布情况。

本文针对土工格栅受力状况测试的传感器及测试技术的现状,采用东南大学研制的专利土工格栅位移计,直接安装在土工格栅上,测试筋材的应变分布情况,并通过室内模型试验和现场试验段的应用和验证,提出采用电感式传感器测量土工格栅应变的新技术。

1 土工格栅位移计工作原理及优点

1.1 工作原理及构造

土工格栅位移计根据电磁学的原理设计(图1),主要由螺管线圈和铁芯组成。铁芯插入线圈中可来回移动,当其发生位移时,将引起线圈电感的变化。

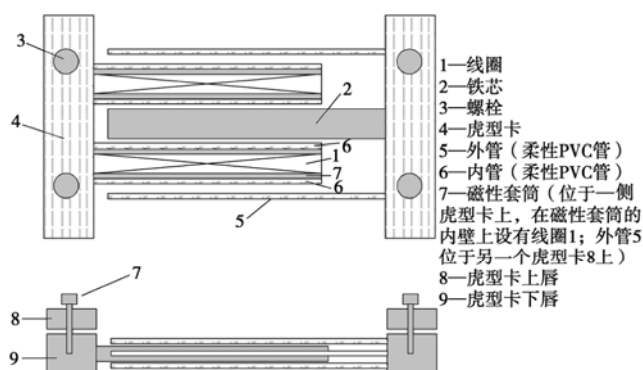


图1 土工格栅位移计构造简图

Fig. 1 Sketch of inductance type displacement meter

线圈的电感量与铁芯插入线圈的长度 l 之间有以下关系:

$$L = \frac{4\pi N^2 \mu A}{l} \times 10^{-7}, \quad (1)$$

式中, μ 为导磁体(线圈)的磁导率($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$), l 为铁芯插入线圈内的长度(m), N 为线圈的匝数(m), A 为圈的横截面积(m^2)。

螺管式传感器可以测得格栅在荷载作用下的产生的位移变化量 Δl ,通过应变与位移的关系可以计算出格栅产生的应变为

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2)$$

式中, l_0 为传感器初始安装时长度(m),实际操作中,土工格栅位移计安装就位后,采用电感测试仪器量测初始电感以确定位移计两虎型卡间距,并作为初始长度 l_0 。

1.2 土工格栅位移计的优点

目前,很多工程的加筋结构采用电阻式应变片测量土工格栅的应变,相比于传统的电阻应变片,电感式土工格栅位移应变计有如下3个优点。

(1) 土工格栅位移计量程大,现场安装方便,操作简单,传感器易于保护。

(2) 土工格栅位移计测试仪器为电感测量仪器,比测量电阻应变片的静态电阻应变仪数据的稳定性好,量测应变的精度高。

(3) 电阻应变片需要长期连续不间断测量,而现场测试中由于电源和测试仪器本身很难保证长时间连续测量,而土工格栅电感位移计测试是一种瞬态测量,每次均可独立量测出位移计两虎型卡中线间距离,进而得出土工的变形和位移,测量数据准确,便于连续观测。

电感式土工格栅位移计的大量程及数据稳定的优点,适宜加筋结构中的土工格栅应变的现场观测,在工程实践中具有较大的应用价值。

2 室内模型试验的应用与对比

工程中,软土地基过渡段经常采用土工格栅加筋路基来调节工后差异沉降,模型试验据此工况进行设计,对土工格栅的应变情况采用电阻应变片和土工格栅位移计进行平行测试,结合数值计算的结果,验证土工格栅位移计测试筋材应变的稳定性和准确性。

2.1 模型试验设计

模型试验在室内混凝土模型槽中进行,模拟实际工程中软土地基过渡段的情况,将模型槽内地基沿路基纵向分为软地基和硬地基两部分。用注满水的橡胶水袋模拟软地基,用混凝土砌体的硬地基部分模拟搅拌桩处理的地基,见图2。试验时,打开橡胶水袋阀门放水,模拟软土地基的下沉,硬地基部分保持不下沉,达到过渡段产生的不均匀沉降。在地基上部构建土工格栅加筋路基,土工格栅水平铺设。地基高40 cm,砌体部分宽0.6 m,水袋宽1.0 m,模型路堤高60 cm,长160 cm,路基顶面宽60 cm,坡比1:1.3。

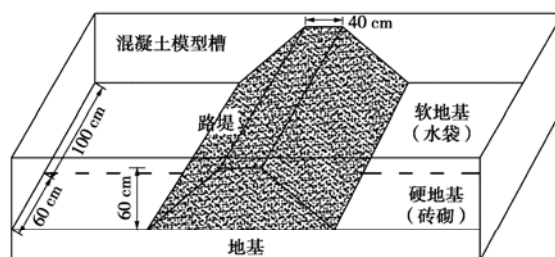


图2 模型试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model tests

试验筋材选用宁杭高速公路二期工程过渡段铺设的TGDG50型单向塑料土工格栅。模型试验分别铺设一层土工格栅在路基的上部、中部和下部3种工况,试验中,为保证路堤的击实效果,底部铺设格栅时,格栅距路堤底部5 cm;上部铺设格栅时,距路堤顶面10 cm。土工格栅位移计的布置如图3所示。

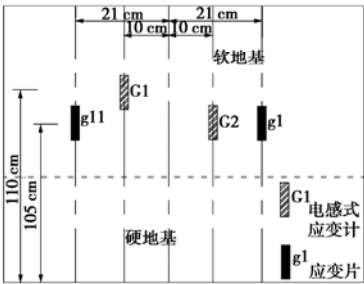


图 3 土工格栅位移计布置图

Fig. 3 Layout of strain gauges for geogrids

2.2 模型路堤数值计算

本文采用 FLAC^{3D} 三维有限差分软件对模型路堤进行数值计算, 计算模型与室内模型一致, 也分为铺设土工格栅在路基的底部、中部和上部 3 种工况, 建立的模型路堤如图 4 所示。

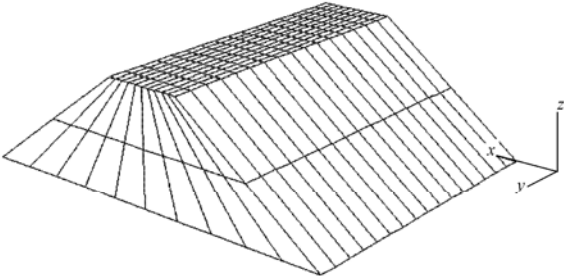


图 4 模型路堤计算简图

Fig. 4 Simplified calculation model for embankments

图 4 中, 路堤的坐标范围为 x (20, 220), y (0, 160), z (0, 60), 其中 y 方向为路基纵向, 长度为 160 cm, 每 10 cm 划分一个网格, 共 16 个网格, y (0, 60) 为硬地基范围, y (60, 160) 为软土地基范围; z 方向为高度方向 60 cm, 每 30 cm 划分一个网格; x 方向为路基横向, 底宽 200 cm, 顶宽 40 cm, 沿宽度方向均匀划分成 10 个网格, 路堤坡比 1:1.33。进行数值模拟时, 固定 y (0, 60), 模拟硬地基不产生沉降; 给 y (60, 160) 施加一个较小的下沉速度, 模拟软土地基产生沉降。根据室内试验及文献[9], 模型路堤的数值计算参数列于表 1, 表 1 中 E 为土工格栅杨氏模量, 为 2%应变对应的模量, t 为土工格栅厚度, c_{sg} 为筋土接触面似黏聚力, φ_{sg} 为筋土接触面内摩擦角, s_k 为土工格栅剪切刚度, 参照文献[12], $s_k=0.94\sigma$ 。

模型试验中, 3 组试验在差异沉降分别为 9.0, 7.6, 7.0 mm 时, 模型路堤就已发生开裂, 因此数值计算时软土侧沉降至 10 mm 即停止计算。

2.3 土工格栅应变测试结果对比

表 1 模型试验参数

Table 1 Parameters for model tests

土性参数					格栅参数		接触面参数		
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	K/MPa	G/MPa	E/MPa	t/mm	c_{sg}/kPa	$\varphi_{sg}/(\text{^\circ})$	$s_k/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$
1800	23.8	26.1	15.3	10.9	5.3	0.3	17	21.3	0.94σ

模型路堤进行了 3 种工况的试验, 实时记录模型中土工格栅位移计与电阻应变片的测试结果, 并将实测数据与数值计算的数据进行对比, 见图 5。

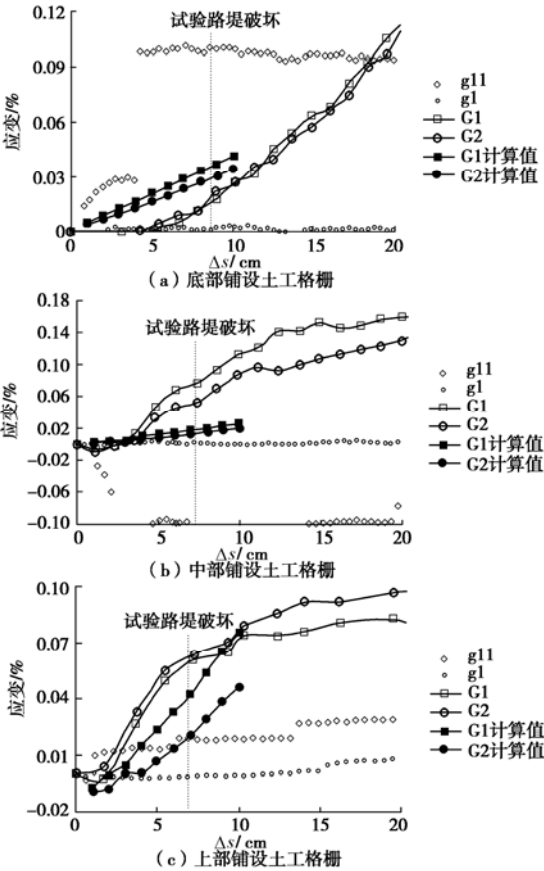


图 5 土工格栅应变对比

Fig. 5 Comparison of strain for geogrids

由图5可看出, 3组试验中土工格栅105 cm处应变片g1、g11的测试值均不稳定, 而且两者的测试值相差较大, 与其平行测试的位移计G2测得的数据则很稳定。G2量测的土工格栅应变值逐步增大, 说明随着差异沉降的增大土工格栅的加筋效用发挥得越大, 这与实际工程情况是相符的。

土工格栅位移计 G1, G2 所测的土工格栅应变与数值计算所得的应变值基本一致。在位置上 G2 更接近软硬地基的分界处, G2 实测值略大于 G1 实测值, 与数值计算的结果及实际筋材效用发挥情况也是一致的。

由上述土工格栅应变数据的对比及分析可见, 电感式土工格栅位移计能够准确、稳定地量测土工格栅的应变。

3 土工格栅位移计的现场应用

室内模型试验已验证了土工格栅位移应变计的可靠性,为进一步检验其在实际工程中的实用性,在宁杭高速二期工程南京至溧水段的试验段,布设了土工格栅位移应变计,观测加筋路基中土工格栅的应变^[13]。

3.1 试验段土工格栅位移计布置

现场试验段为搅拌桩处理路段与预压路段的过渡段,工程中采用土工格栅加筋路基调节过渡段的差异沉降,防治过渡段的“跳车”或者横向开裂。试验段沿公路纵向设置了 8 个电感位移计观测土工格栅的应变(见图 6)。

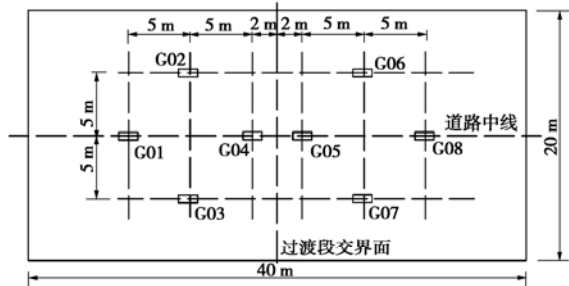


图 6 现场应变计平面布置

Fig. 6 Layout of field strain gauges for geogrids

土工格栅位移计现场安装时,首先铺设土工格栅,然后在传感计部位铺设一层砂层,再安装土工格栅位移计。在土工格栅位移计安装就位后,采用电感测试仪器量测初始电感以确定位移计两虎型卡间距,并作为初始长度 10,根据不同阶段的电感测试仪器实测数据,即可计算出不同阶段土工格栅的应变值。

3.2 土工格栅应变测试结果

试验段土工格栅的应变进行了定期的测量,在试验段路堤的填筑期,土工格栅的应变逐渐增长,路堤填土完成后土工格栅的应变趋于稳定,测试结果参见图 7。

由图 7 可见,各点应变计的测试数据都很稳定。在前 50 d 土工格栅应变增长较快,实际工程中此阶段为路基填土阶段,土工格栅应变比较明显;50 d 后土工格栅应变增长缓慢,在 100 d 后趋于稳定,此阶

段路基填筑完成。土工格栅应变的测量值与实际情况是一致的,其在试验段中的使用效果良好。

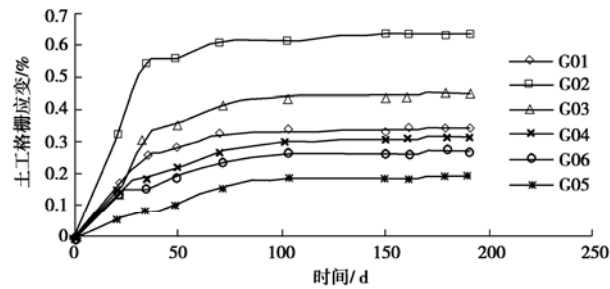


图 7 现场土工格栅应变

Fig. 7 Strain of geogrids in field

3.3 土工格栅应变数值计算结果对比

试验段平均设计路堤填高为 2 m,格栅铺设离路基底部约 20 cm。根据试验段的实际情况,采用 FLAC3D 数值分析软件对土工格栅加筋路基处理的试验段进行数值模拟。试验段各结构层计算参数见表 2,其中搅拌桩处理地基的模量采用复合模量法进行计算,土工格栅及筋土接触面的计算参数参见表 1。

计算路堤填筑完成后半年(180 d)的情况,土工格栅的应变分布见图 8。

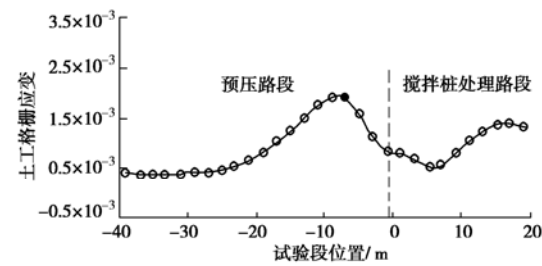


图 8 土工格栅应变的数值模拟结果

Fig. 8 Strain of geogrids in numerical calculation

试验段中 G02 点的应变值最大,位置为预压路段一侧 7 m 处,由图 8 可以看出,这与数值计算的是一致的;过渡段交界面两侧 15 m 范围内,预压路段土工格栅的实测平均应变大于搅拌桩处理路段的平均应变,这与数值模拟的结果也是一致的。

通过数值计算土工格栅应变值的对比可知,土工格栅位移计测得的应变是准确可靠的,土工格栅位移

表 2 过渡段各结构层计算参数

Table 2 Parameters for structural layers

参数	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	E/MPa	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	ν	K/MPa	G/MPa
路基	28.00	29.8	27.20	21.0	0.25	18.10	10.88
软土	5.00	21.6	3.00	18.5	0.35	3.30	1.10
搅拌桩	15.00	24.0	6.73	18.5	0.30	5.61	2.59
下卧层	30.81	29.1	12.00	19.0	0.25	8.00	4.80
硬壳层	15.00	29.5	5.00	19.1	0.25	3.30	2.00

计适用于现场加筋结构的土工格栅应变测量。

4 结 论

(1) 电感式土工格栅位移计安装方便, 易于保护, 量程大, 稳定性好, 测试精度高, 便于连续观测。

(2) 室内模型试验及现场试验的应用表明, 电感式土工格栅位移计适用于加筋工程中土工格栅应变的现场观测, 测试结果稳定、准确。

(3) 电感式土工格栅位移计在实际工程中具有较大的应用价值, 为公路、铁路的加筋工程中准确测试筋材的效用发挥提供一种新技术。

参考文献:

- [1] ROWE R K, LI L L. Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations[C]// Geosynthetics International, Special Issue on the Giroud Lectures, 2005, **12**(1): 50 - 85.
- [2] GIROUD J P, HAN J. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. I, II[J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **130**(8): 775 - 797.
- [3] 王 陶, 王 钊. 考虑薄膜效应的土工合成材料加筋道路模型[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(6): 706 - 709. (WANG Tao, WANG Zhao. Model of the load reinforced with geosynthetics under the consideration of membrane effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(6): 706 - 709. (in Chinese))
- [4] 《土工合成材料工程应用手册》编委会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 179 - 240. (Compilation Committee of Manual for Application of Geosynthetics to Engineering. Manual for application of geosynthetics to engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000: 179 - 240. (in Chinese))
- [5] 王 钊, 王协群. 土工合成材料加筋地基的设计[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(6): 731 - 733. (WANG Zhao, WANG Xie-qun. Design of foundation reinforced with geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(6): 731 - 733. (in Chinese))
- [6] HELWANY Sam M B, WU Jonathan T H, FROESSL Burkhard. GRS bridge abutments-an effective means to alleviate bridge approach settlement[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2003, **21**: 177 - 196.
- [7] 朱 湘, 黄晓明. 加筋路堤的室内模拟试验和现场沉降观测[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(3): 386 - 388. (ZHU Xiang, HUANG Xiao-ming. Laboratory simulating test and field settlement observation of reinforced embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(3): 386 - 388. (in Chinese))
- [8] ROWE R K, GNANENDRAN C T. Geotextile strain in a full scale reinforced test embankment[J]. International Journal of Geotextiles and Geomembranes, 1994, **13**(12): 781 - 806.
- [9] ROWE R K, MYLLEVILLE B L J. A geogrid reinforced embankment on peat over organic silt: a case history[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**: 106 - 122.
- [10] 李洪年, 唐秋生, 王炳龙, 等. 土工格栅受力状况的测试技术[J]. 地下空间, 2001, **21**(5): 540 - 543. (LI Hong-nian, TANG Qiu-sheng, WANG Bing-long, et al. Measuring technology of geogrid under load[J]. Underground Space, 2001, **21**(5): 540 - 543. (in Chinese))
- [11] 徐林荣, 牛建东, 吕大伟, 等. 软基路堤桩-网复合地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2149 - 2160. (XU Lin-rong, NIU Jian-dong, LÜ Da-wei, et al. Experimental study on pile-net composite foundation of high-speed railway on soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2149 - 2160. (in Chinese))
- [12] 杨广庆, 吕 鹏, 张保俭, 等. 整体面板式土工格栅加筋土挡墙现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(10): 2077 - 2083. (YANG Guang-qing, LÜ Peng, ZHANG Bao-jian, et al. Research on geogrids reinforced soil retaining wall with concrete rigid face by field test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(10): 2077 - 2083. (in Chinese))
- [13] 东南大学. 高速公路软土地基过渡段处理关键技术研究报告[R]. 南京: 东南大学, 2007: 123 - 124. (Southeast University. Abutment modification of soft ground in highway engineering[R]. Nanjing: Southeast University, 2007: 123 - 124. (in Chinese))