

DOI: 10.11779/CJGE201412009

超高无面板式土工格栅加筋路堤现场试验研究

贾敏才^{1, 2}, 黄文军^{1, 2}, 叶建忠³, 徐超^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 浙江省交通规划设计研究院, 杭州 310006)

摘要: 结合在建宜巴高速公路 50 m 高的加筋填土断面进行现场试验, 对超高无面板式土工格栅加筋路堤的格栅变形、垂直土压力、水平土压力、分层沉降以及深层水平位移等内容进行了近 2 a 的测试, 研究超高无面板式土工格栅加筋路堤的受力、变形规律, 分析了其作用机理。结果表明: 不同层位土工格栅的最大拉应变出现在离返包面约 4~6 m 处, 格栅应变沿筋长呈双峰值分布, 施工期土工格栅应变具有明显的滞后性, 且工后 1.5 a 格栅出现明显的收缩回弹; 土工格栅的存在对土压力分布具有明显的调整作用, 格栅末端附近实测垂直土压力值略超过理论值, 中间和近坡面部位实测土压力值小于理论值; 水平土压力沿路堤高度呈非线性形式分布, 路堤中部的水平土压力值略大于顶部, 其值小于主动土压力; 分层沉降量在施工期存在较大波动, 在垂直高度上, 上部和底部偏小, 中下部偏大; 深层水平位移随着深度的增加逐渐减小, 填土结束后深层水平位移仍有一定程度增大。

关键词: 超高加筋路堤; 土压力; 土工格栅; 拉伸应变; 现场试验

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)12-2220-06

作者简介: 贾敏才(1973-), 男, 副教授, 主要从事软土地基加固、土动力学、土体细观力学数值模拟等方面的教学和研究工作。E-mail: mincai_jia@tongji.edu.cn。

Field tests on super-high geogrid-reinforced soil embankment without concrete panel

JIA Min-cai^{1, 2}, HUANG Wen-jun^{1, 2}, YE Jian-zhong³, XU Chao^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: Field tests on a 50 m-high geogrid-reinforced soil embankment without concrete panel of Yichang-Badong Highway in Hubei Province are conducted. The tests include the measurements of tensile strain of geogrids, vertical earth pressure, horizontal earth pressure, layered settlement and deep horizontal displacement. The stress and deformation laws are revealed and the mechanism is analyzed. The results show that the maximum tensile strain of geogrids at different layers appears to be about 4-6 m away from the wrapped face, and the tensile strain along reinforcement has two peak values. The strain of geogrids has obvious lag in the construction period, it shrinks and rebounds after construction. The geogrids adjust the distribution of earth pressure. The measured value of the vertical earth pressure at the end of geogrids is slightly larger than the theoretical value, and it is less than the theoretical value in the middle and outside part of the slope. The horizontal earth pressure is nonlinear along the filled earth height. In the middle of the embankment, the horizontal earth pressure is larger than that at the top, and it is less than the active lateral earth pressure. There are a lot of volatilities in the layered settlement, and the value in the middle of the embankment is greater than that in other areas. The horizontal displacement decreases with depth, and it develops to a certain extent after construction.

Key words: super-high reinforced embankment; earth pressure; geogrid tensile strain; field test

0 引言

加筋土是在填土中加入筋材而形成的一种复合体, 筋材通过与土体之间的摩擦力将自身的抗拉强度与土体的抗压强度结合起来, 通过约束土体的侧向变

形改善土体整体受力条件, 提高土体强度和土工构筑

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972214); 湖北省交通科学研究院计划项目(2011700342)

收稿日期: 2014-03-28

物的整体稳定性, 从而可以不同程度地改善地基土抗拉、抗剪性能, 提高地基承载力, 减小沉降^[1-2]。现代加筋土概念和设计理论由法国工程师亨利·维达尔于1963年提出, 并成功应用于工程实践, 修建了世界上第一座加筋土公路挡土墙^[3-4]。法国在加筋技术方面的成功应用, 引起了世界各国工程界、学术界的广泛重视, 其发展速度相当快, 应用范围也日益广泛。加筋土现已广泛地用于软土加固处理、海岸、堤坝防护与加固、路基路面的加固等^[5-6]。

国内外学者^[7-15]对多种类型的加筋土挡墙进行了现场试验, 研究了土压力和拉筋应变的分布规律, 但现有加筋土挡墙或路堤高度大多都在31 m以内, 鲜见超高加筋填土的工程案例, 对加筋填土分层沉降和深层水平位移分布规律的研究也很少见。而规范^[16]仅规定了高度不超过12 m的单级加筋土挡墙设计, 在一定程度上制约了土工格栅加筋土技术在超高填土路堤或挡墙中的应用和发展。

由于超高加筋路堤受力、变形规律更复杂, 测试难度更大, 目前理论与试验研究仍落后于工程实践。因此结合在建的宜巴高速高路一段50 m高的加筋填土路堤, 对超高无面板加筋土路堤受力和变形特征进行现场试验研究具有重大的理论和现实意义。笔者分析了从施工开始到竣工后近两年时间加筋路堤垂直土压力、水平土压力、深层水平位移、分层沉降以及土工格栅拉伸应变等测试数据, 系统研究了超高无面板加筋土路堤的受力、变形形态规律, 分析了其作用机理, 可为今后类似工程研究与设计施工提供参考。

1 工程概况

试验场地位于宜昌市雾渡河镇, 路堤段路线呈东西向展布, 原场地自然坡角37°~47°, 据现场勘察报告, 钻探揭露的地层从上到下主要为第四系残坡积碎石层; 新元古代强风化花岗片麻岩/角闪岩和中风化花岗片麻岩/角闪岩。表1为原场地岩土层物理力学性质指标。地表水主要为暴雨后的短暂性流水, 地下水主要为基岩裂隙水, 水量较贫乏。

表1 原场地岩土层物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical parameters of site rocks and soils

名称	状态	层厚/m	重度/(kN·m ⁻³)	抗剪强度	
				c/MPa	φ/(°)
碎石	稍一中密	0.8~3.0	18.7	—	38
花岗片	强风化	0.0~3.4	24.0	5	42
麻岩/角闪岩	中风化	22.3~28.5	25.8	—	—

本项目因填方很高, 征地有限, 并且有绿化要求, 经综合考虑, 采用无面板式土工格栅加筋土路堤, 路堤填土高度约10~52 m。加筋土路堤坡面由格栅反包土袋形成, 用连接棒将反包格栅与上层主格栅足强度

连接。单向HDPE土工格栅技术指标为: 碳含量为2%, 20℃长期蠕变断裂强度为36.0 kN/m, 考虑蠕变数据外推影响因素的折减系数为1.00, 对于最终极限状态的施工损伤折减系数为1.08, 出厂极限抗拉强度为>90 kN/m, 5%应变时的抗拉强度为>48 kN/m, 采用整体冲孔拉伸工艺。设计强度为蠕变强度考虑各种折减系数后的数值, 折减系数包括施工损伤折减系数、环境因素影响折减系数、考虑生产与数据外推因素影响的折减系数。路堤填料采用附近隧道开挖产生的弃渣, 弃渣为碎石土, 综合内摩擦角不小于35°, 粒径不大于15 cm。每层格栅铺设之前, 路堤填料必须压实平整, 格栅应张紧, 路堤边坡边缘格栅向上回包弯折段长度不小于1.5 m, 在边坡平台位置包弯折段长度不小于2.5 m。

2 试验方案

本次现场试验选取断面YK72+980.5, 断面处填土高度约50 m, 设计坡率为1:1, 加筋长度14~26 m, 土工格栅长16~28 m。为了减小填方路堤差异沉降, 顶部6层格栅满铺至原坡面(见图1)。

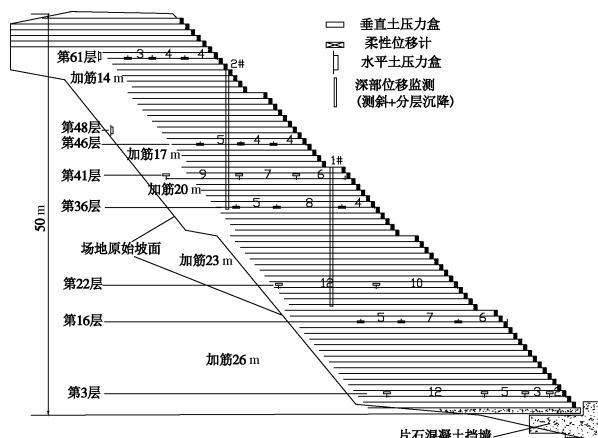


图1 断面YK72+980.5测试元件布置示意图

Fig. 1 Arrangement of instrumentation in YK72+980.5

试验测试元件埋设在断面典型受力处或者比较关键的填土高度处, 具体埋设位置见图1。本工程的高填方路堤最下一级采用片石混凝土重力式挡土墙。挡土墙施工完毕后, 分层施工各加筋土层, 待施工到图1中的相应位置时埋设各测试元件并开始测试。其中深层水平位移管和深层沉降管共用一个测试管, 分层连接测试管直至到露出填土表面。

现场试验用的土压力测试元件采用海岩工程仪器厂生产的TXR型振弦式土压力计, 利用频率计进行测试。格栅拉伸应变测试元件采用HYDG-2405型柔性位移计, 通过XP11系列智能综合读数仪进行测试。不同深度处加筋土的水平和垂直变形通过测试测斜管的水平变形以及不同埋深处磁环的垂直变位计算。

此次试验从开始施工到竣工历时 184 d, 竣工后继续测试了 429 d。图 2 为路堤填土高度随时间的变化曲线。

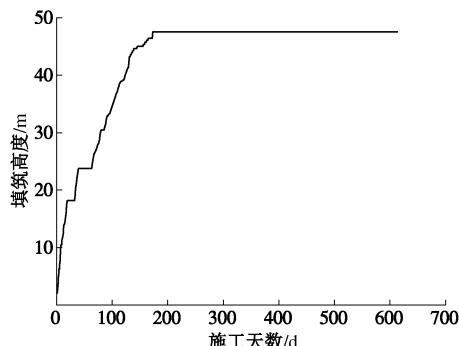


图 2 断面 YK72+980.5 填土高度随时间变化曲线

Fig. 2 Variation of height of filled earth with time in YK72+980.5

3 试验结果分析

3.1 格栅拉伸应变

图 3 (a) ~ (d) 为试验断面典型位置处格栅拉伸应变在施工期和竣工后随时间 (填土高度) 的变化曲线, 由图 3 可知:

(1) 在填方路堤施工过程中, 随着上覆填土厚度的增加, 各层土工格栅的拉伸应变逐渐增大, 相应的受力也逐渐增大。各层土工格栅的拉伸应变一般在刚开始填土时的增加速率相对较大, 之后随填土高度的增加格栅拉伸应变速率略有减小。

(2) 填土厚度变化时, 每层土工格栅的应变沿筋长方向的分布规律大致相同。路堤下部土工格栅端部拉应变随填土高度变化比较大。对于大部分处于同一层位的土工格栅, 其最大拉伸应变出现在离开返包面 4~6 m 处, 然后随距离返包面距离的增加拉伸应变逐渐减小, 后又出现一定程度的增大, 呈双峰值分布规律。这主要是由于土工格栅对上覆土重的调整作用致使格栅与填土间的摩阻力沿筋长呈非线性分布, 及返包段的约束作用所导致的。

(3) 实测加筋土工格栅的拉伸应变范围在 0.1%~1.2% 之间, 相当于土工格栅受到的最大荷载不超过 20 kN/m, 远小于土工格栅的极限抗拉强度, 土工格栅极限抗拉强度只发挥了 20% 左右, 本工程的土工格栅加筋路堤具有足够的稳定性。

(4) 随着上覆填土厚度的增加, 土工格栅拉伸应变略有增大。个别位置处土工格栅应变随填土厚度增加波动幅度较大, 甚至会在应变增大到一定数值后出现较大的收缩, 这可能与部分位置处填土颗粒的直径过大或受到施工机械碾压施工影响有关。

(5) 在填土施工结束大约 2 个月后, 部分深度处的土工格栅拉伸应变速率随时间出现明显增大。这种情况出现可能与土工格栅变形的滞后性有关, 同时也与最后一个月施工速度较快, 外加上路面结构层施工

有关。

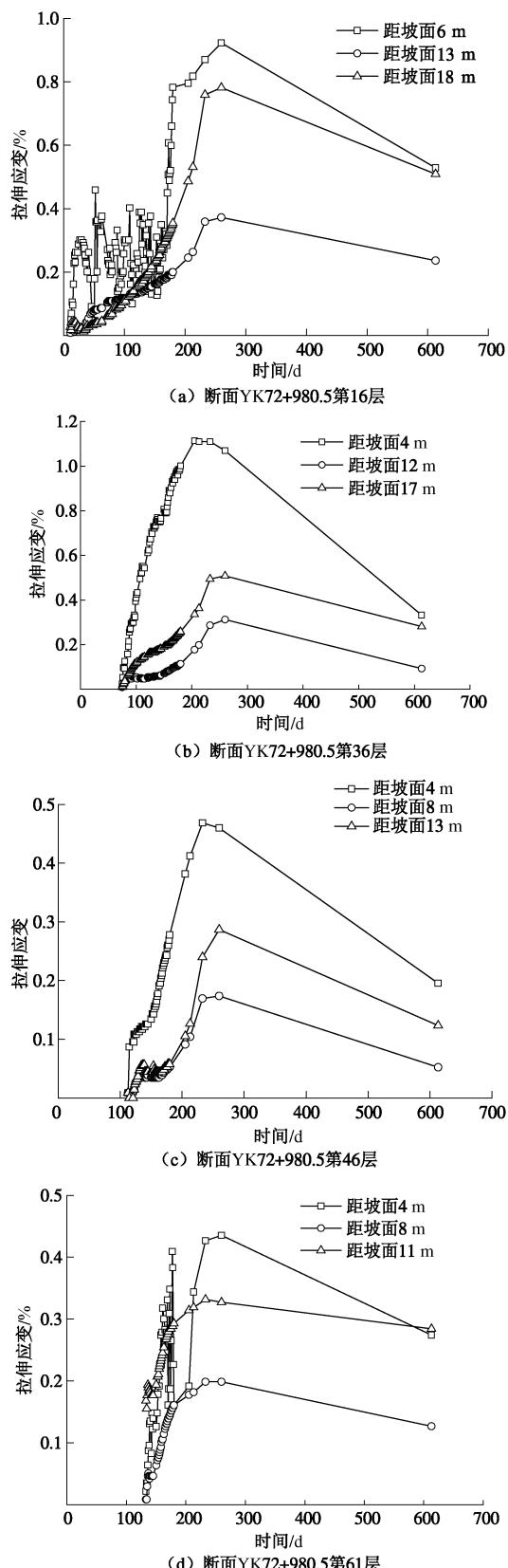


图 3 不同层位格栅拉伸应变随时间变化曲线

Fig. 3 Variation of strain of geogrids with time at different layers

(6) 在施工结束一年半左右时, 所有深度处的土工格栅均出现一定程度的收缩回弹, 经分析其原因为: ① 试验地段在施工结束后接下来的一年多时间内出现

了很多次大的降雨, 雨水渗透到填土里面后, 导致格栅和填土间的作用力减小, 使格栅的应变减小, 导致格栅收回弹; ②施工完毕后上覆荷载不再增大, 随着时间的增加, 格栅界面附近的土颗粒在格栅拉力长期作用下逐渐移动或调整, 也会导致格栅和填土间摩擦系数和相互作用力变化, 引起格栅收回弹。

3.2 土压力

图4, 5 (a) ~ (c) 分别为测试断面加筋路堤中的垂直土压力和水平土压力随时间 (填土高度) 变化曲线。

(1) 水平土压力

根据图4所示的水平土压力结果可知: ①随着上覆填土厚度的增加, 不同层位处的水平土压力逐渐增大, 但增加速率随填土厚度增加略有减小, 这主要是由于填土随上覆土重增加发生了一定的水平变形。②水平土压力沿加筋路堤高度呈非线性分布, 路堤中部的水平土压力数值略大于顶部, 其值均小于主动土压力。这说明土工格栅通过与土体之间的摩擦力提高了土体的抗压强度, 使路堤的整体性得到加强, 减小了路堤填料对坡面土体的水平土压力。

(2) 垂直土压力

根据图4所示的垂直土压力测试结果可知: ①随着上覆填土厚度的增加, 不同层位处的垂直土压力近似线性增大, 但增加速率略有减小。说明土工格栅的存在, 使上部加筋填土能在一定程度上减小在下部土

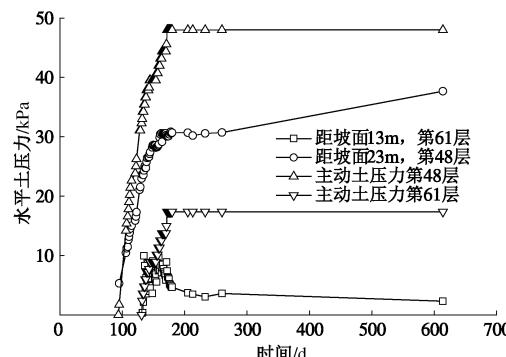
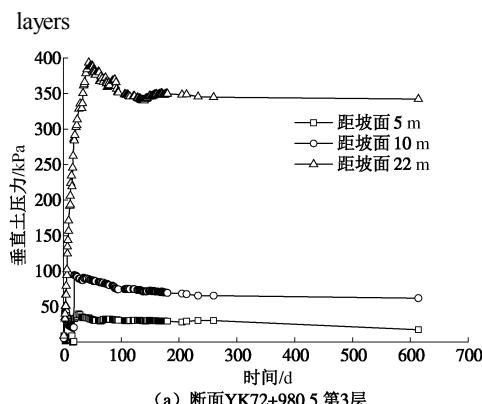


图4 不同层位水平土压力随时间变化曲线

Fig. 4 Variation of horizontal earth pressure with time at different layers



(a) 断面YK72+980.5第3层

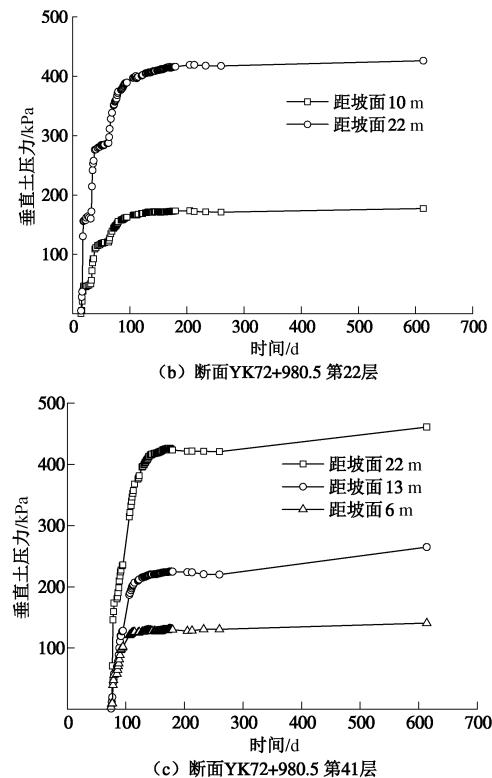


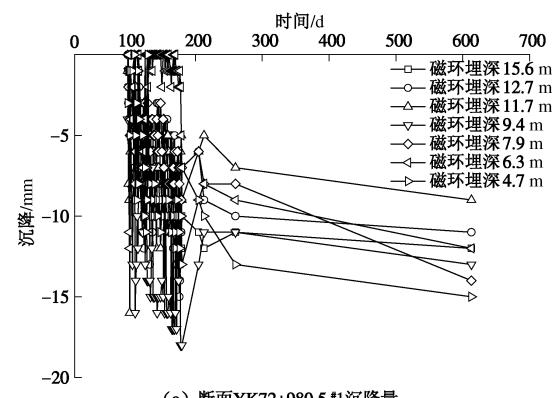
图5 不同层位垂直土压力随时间变化曲线

Fig. 5 Variation of vertical earth pressure with time at different layers
体所产生的附加应力; ②同一层位不同位置处的垂直土压力呈非线性分布, 靠近坡面测点的实测土压力较路堤中部测点的实测土压力小, 且靠近坡面和中间部分的土压力小于理论计算值, 而路堤内侧实测垂直土压力接近或略大于理论计算值, 说明土工格栅的存在对加筋填土的垂直土压力分布具有明显的调整作用。

3.3 分层沉降

土工格栅加筋土路堤分层沉降的发生也分施工期和竣工后两个阶段。由图6 (a)、(b) 沉降量 - 时间 (填土高度) 的曲线关系可知 (其中负数代表下沉):

(1) 在填土施工的前2个月, 各测点的分层沉降量受机械碾压施工影响存在很大波动。在垂直高度上, 上部和底部偏小, 中下部偏大。填土沉降量随着填土高度增加而略有增加, 但增加速率很小。不同深度各测点的实测数值在-18~0 mm内, 各深度累计沉降量相对偏小。



(a) 断面YK72+980.5*1沉降量

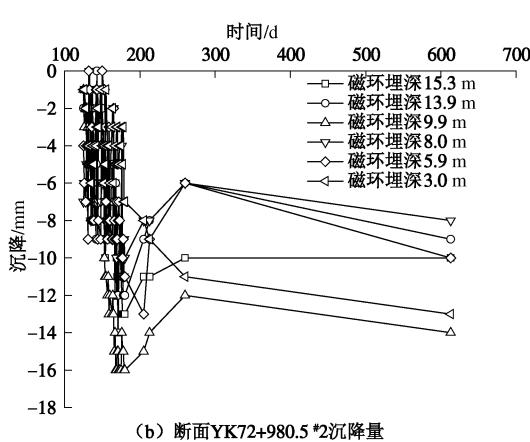


图 6 不同层位加筋土沉降量随时间变化曲线

Fig. 6 Variation of settlement of reinforced soils with time at different layers

(2) 竣工后, 随着时间的延续, 大部分测点的分层沉降数据随时间略有减小, 还有部分测点的分层沉降速率略有增大, 但增大速率很小。说明填土施工期结束后, 填方路堤不同深度处的沉降速率迅速趋于减小, 并逐渐稳定。

3.4 深层水平位移

试验断面的 2 个测斜管孔深 17 m, 测斜管以最后一次接管完成后的测试值作为初始值, 以后的监测结果与之对比来反映其位移变化情况。通过对图 7 (a)、(b) 中不同深度处加筋填土的水平位移实测结果可知:

(1) 随着填方路堤填筑高度的增加, 开始阶段各个深度的水平位移均发展较快, 至施工结束, 试验断面 2 个测点的最大水平位移分别为 22.50 mm 和 23.75 mm, 填土结束后加筋路堤的最大深层水平位移与墙高的比例不大于 0.054%。测点的最大水平位移速率为 0.132 mm/d, 远小于 1 mm/d。

(2) 填土结束到最后一次测试, 试验断面 2 个测点的最大水平位移增量分别为 14.96, 5.00 mm, 累计最大水平位移约为墙高的 0.08%, 所有测点均远小于美国 AASHTO 规定的 1.67% 的限值。测点的最大水平位移速率为 0.045 mm/d, 较施工期有很大的减小。

(3) 深层水平位移随着深度的增加逐渐减小, 变形速率也逐渐减小, 深部的水平变形明显比浅部的变形小, 路堤内侧的水平位移较外侧靠近坡面处小。

(4) 填土路堤的深层水平位移主要发生在施工期, 施工结束后深层水平位移仍有部分发展, 但发展速率明显减小。这说明高填方路堤在采用土工格栅加强后, 有效地限制了路堤填土不同高度处的水平位移, 路堤各部位的水平位移均满足路堤稳定要求, 说明加筋效果较为理想。

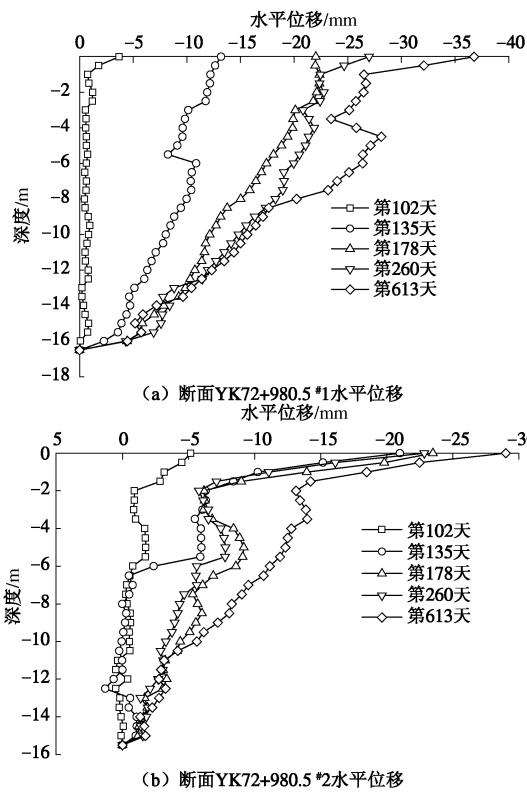


图 7 不同层位加筋土深层水平位移随深度变化曲线

Fig. 7 Distribution of deep horizontal displacement with depth

4 结 论

结合现场测试结果对高填方土工格栅加筋路堤受力和变形的分析, 得出以下 5 点结论。

(1) 整体而言, 本工程高填方路堤土工格栅加筋效果良好。路堤填土在采用土工格栅加强后, 有效地限制了不同高度处的水平位移, 调节了不同层位处土体的土压力和垂直位移, 工后沉降很小, 有效避免了路面出现较大不均匀沉降, 并保证了高填方路堤的整体稳定。

(2) 不同深度处土工格栅的拉伸应变主要发生在填土施工阶段。随着上覆填土的增加, 各层土工格栅变形逐渐增大。格栅变形发展随填土荷载增大具有明显的滞后性。大部分深度处土工格栅的最大拉伸应变出现在离开返包面 4~6 m 处, 然后随离返包面距离的增加拉伸应变逐渐减小, 后又出现一定程度的增大, 呈双峰值分布规律。实测土工格栅的拉伸应变均小于 1.2%。

(3) 加筋路堤的垂直和水平土压力均随着上覆填土增加而增大。同一层位不同位置处的垂直土压力呈非线性分布, 靠近坡面和中间部分的土压力小于理论值, 而路堤内侧实测垂直土压力略大于理论值。水平土压力沿加筋路堤高度呈非线性形式分布, 中部的水平土压力略大于顶部, 且其值小于主动土压力。

(4) 各测点的分层沉降随着填土高度的增加而略有增加, 最大累计沉降均没有超过 18 mm。填土结束后, 路堤不同深度处的沉降速率迅速趋于减小。

(5) 填土路堤的深层水平位移大部分发生在施工

期, 填土结束后加筋路堤的最大深层水平位移与墙高的比例不大于 0.054%, 试验结束后的累计最大水平位移与墙高的比值均不大于 0.08%, 远小于规范规定的限值, 加筋效果较为理想。

参考文献:

- [1] 周健, 孔祥利, 王孝存. 加筋地基承载力特性及破坏模式的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1265–1269. (ZHOU Jian, KONG Xiang-li, WANG Xiao-cun. Bearing capacity behaviors and failure modes of reinforced grounds[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1265–1269. (in Chinese))
- [2] 傅华, 凌华, 蔡正银. 加筋土强度影响因素的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 481–484. (FU Hua, LIN Hua, CAI Zheng-yin. Experimental study of factors affecting strength of reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S0): 481–484. (in Chinese))
- [3] 王祥, 徐林荣. 双级土工格栅加筋土挡墙的测试分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 220–224. (WANG Xiang, XU Lin-rong. Test and analysis of two-step retaining wall reinforced by geogrid[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 220–224. (in Chinese))
- [4] 何昌荣, 陈群, 付海鹰. 两种支撑结构的实测和计算土压力[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 55–60. (HE Chang-rong, CHEN Qun, FU Hai-ying. Measurement and computation of earth pressures on two retaining structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 55–60. (in Chinese))
- [5] 杨果林, 沈坚, 陈建荣, 等. 柔性生态型加筋土结构工程应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (YANG Guo-lin, SHEN Jian, CHEN Jian-rong, et al. Application of flexible and eco-reinforced construction[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [6] 王伟, 王俭, 薛剑豪, 等. 土工格栅加筋垫层加固软土地基模型试验分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1885–1891. (WANG Wei, WANG Jian, XUE Jian-hao, et al. Analysis of model tests on soft soil subgrade reinforced by geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1885–1891. (in Chinese))
- [7] 杨广庆, 蔡英. 多级台阶式加筋土挡土墙试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 254–257. (YANG Guang-qing, CAI Ying. Study on the multi-steps reinforced earth retaining wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 254–257. (in Chinese))
- [8] 杨广庆, 蔡英, 苏谦. 高路堤加筋土挡土墙的变形和受力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 321–326. (YANG Guang-qing, CAI Ying, SU Qian. Study on the deformation and stress of reinforced earth retaining wall for high embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 22(2): 254–257. (in Chinese))
- [9] 杨广庆, 吕鹏, 庞巍, 等. 反包式土工格栅加筋土高挡墙现场试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 517–522. (YANG Guang-qing, LÜ Peng, PANG Wei, et al. Research on geogrid reinforced soil retaining wall with wrapped face by in-situ tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 517–522. (in Chinese))
- [10] 陈群, 何昌荣. 一种新型楔形拉筋加筋土挡墙的原型观测[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 289–293. (CHEN Qun, HE Chang-rong. The prototype measurement of retaining wall reinforced by a new type of wedgy tied reinforcement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 289–293. (in Chinese))
- [11] 陈建峰, 顾建伟, 石振明, 等. 软土地基加筋土挡墙现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊): 3370–3375. (CHEN Jian-feng, GU Jian-wei, SHI Zhen-ming, et al. Field test study of reinforced soil wall on soft ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S0): 3370–3375. (in Chinese))
- [12] 王祥, 周顺华, 顾湘生, 等. 路堤式加筋土挡墙的试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 119–128. (WANG Xiang, ZHOU Shun-hua, GU Xiang-sheng, et al. An experimental study on the reinforced retaining wall for embankment[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10): 119–128. (in Chinese))
- [13] WALTERS D L. Behaviour of reinforced soil retaining walls under uniform surcharge loading[D]. Kingston: Queen's University, 2004.
- [14] YOO C, KIN S B. Performance of two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: full-scale load test and 3D finite element analysis[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26: 460–472.
- [15] LIU Hua-bei. Long-term lateral displacement of geosynthetic-reinforced soil segmental retaining walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 32: 18–27.
- [16] JTJ 015—91 公路加筋土工程设计规范[S]. 1991. (JTJ 015—91 Technical specification for design of highway reinforced earth engineering[S]. 1991. (in Chinese))
- [17] 李志勇. 陡坡路堤土工格栅加筋机制与合理铺设参数研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 925–930. (LI Zhi-yong. Study on reinforced mechanism and laid parameters of steep slope of highway embankment reinforced with geogrids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 925–930. (in Chinese))