

台阶格栅加筋土墙土压力的模型试验研究

丁钧巍¹, 何光春², 汪承志^{2,3}, 周世良^{2,3}

(1. 广东省路桥建设发展有限公司, 广东 广州 510635; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

3. 大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为研究多级台阶式格栅加筋墙的工作机制和力学特性, 在室内修建一个长 8.0 m, 宽 3.0 m, 高 4.5 m 的模型槽。在模型槽中对 3.0 m×1.5 m 的 3 级台阶格栅加筋土挡墙和 2 种格栅网格尺寸进行系列模型试验。测试格栅加筋土挡墙面板后的土压力、加筋体后土压力、加筋土各分层土压力及地基应力等。试验发现加筋体内各点的土压力与传统的土压力理论计算值不一致, 土压力分布与基础条件及加筋体高度密切相关; 加筋体基础的位移对加筋体的力学特性影响较大, 它会引起加筋土体内应力的重分配, 即当位移较大时挡墙地基应力呈现 V 型分布, 较小时按斜线分布; 面板后侧竖向和侧向土压力沿墙高均呈现顶部和底部小中间大的外凸型分布, 加筋体后土压力亦有同样的趋势, 只是外凸程度较小; 加筋体内力学特性变化与格栅网格尺寸也有一定关联。

关键词: 土力学; 加筋土; 模型试验; 土工格栅; 土压力

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 4292 - 07

STUDY ON EARTH PRESSURES OF MULTI-STEP GEOGRID REINFORCED SOIL RETAINING WALL BY MODEL TEST

DING Junwei¹, HE Guangchun², WANG Chengzhi^{2,3}, ZHOU Shiliang^{2,3}

(1. Guangdong Road and Bridge Construction Development Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong 510635, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: An indoor model groove, which is 8.0 m long, 3.0 m wide and 4.5 m high, was built to study the mechanical properties of multi-step geogrid reinforced wall. A series of model tests have been performed on the three-step reinforced wall with each step 1.5 m in height with two types of geogrid reinforcements in the groove. The earth pressures near the wall-plate, rear reinforced body and horizontal profile, the compression stress of the bottom, etc. are measured. It is found that the test data of the earth pressure in different points are inconsistent with the values calculated by the traditional earth pressure theory; and the pressure is closely associated with the mechanical behaviors and the height of the wall. At the same time, the displacement of the base is greatly impacted on the mechanical behaviors of the reinforced body whose pressure will be redistributed, i.e. when the displacement of base is large, the distribution of the pressure in ground is V-shaped; otherwise according to slash distribution. And it is shown that the earth pressure behind the panel is distributed with greater value in the middle and less ones at the bottom and the top. So are the earth pressures in the back of reinforced body, but the amplitude of prominent is smaller. It is also shown the mechanical behaviors in the reinforced body will be changed as the aperture of grid.

Key words: soil mechanics; reinforced soil; model test; geogrids; earth pressure

收稿日期: 2006 - 09 - 15; **修回日期:** 2007 - 03 - 27

基金项目: 广东省交通厅科技项目(2003 - 18)

作者简介: 丁钧巍(1971 -), 男, 硕士, 1992年毕业于东南大学公路城市道路及机场工程专业, 现任高级工程师, 主要从事高速公路建设的管理与技术方面的工作。E-mail: wchizhi@126.com

1 引言

与一般的条带式加筋土挡墙相比, 土工格栅加筋土挡墙依靠格栅特有的网孔构造对土的咬合与约束作用使加筋体的稳定性大大提高, 而且由于其具有施工简单、经济效益明显使其在岩土工程中得到日益广泛的应用^[1, 2]。一般加筋土挡墙常采用单级直立式和 2 阶直立式, 而多级直立式(即台阶式)加筋土挡墙由于具有墙体应力分布均匀、变形容易控制、便于绿化和恢复生态环境等优点, 近年来得到工程界的广泛青睐, 但现行手册^[2]和规程^[3]仅限于单级或 2 阶直立式加筋土挡墙。台阶格栅加筋土挡墙结构的设计计算, 沿用目前规范的计算方法, 一是偏于保守, 二是与工程实际情况及实测数据相差很大^[4]。因此, 开展台阶格栅加筋土挡墙结构特性的研究, 对完善加筋土设计理论, 促进加筋土技术的推广应用, 都具有重要的理论意义和工程实用价值。

本文结合广东河龙高速公路加筋土技术的应用研究课题, 在对 3 级台阶格栅加筋土挡墙的结构特性进行室内模型试验研究^[3]的基础上, 重点讨论台阶格栅加筋土挡墙的土压力问题。

2 试验方案

2.1 模型槽

由于加筋土挡墙加筋材料和填料模型试验相当复杂, 本次试验研究采用准原型试验。设计建造的半地下式模型槽长 8.0 m, 宽 3.0 m, 高 4.5 m, 钢筋混凝土结构, 地下深度 1.5 m。

2.2 格栅材料和加筋填料

格栅采用防老化高强塑料土工格栅, 格栅纵向极限强度 $T_u=120$ kN/m, 破断伸长率 $\delta \leq 8\%$, 横向强度不低于 40 kN/m。模型试验采用格栅的肋条宽度为 20 mm, A 型土工格栅网孔尺寸为 300 mm×140 mm; B 型土工格栅网孔尺寸为 300 mm×200 mm(见图 1)。

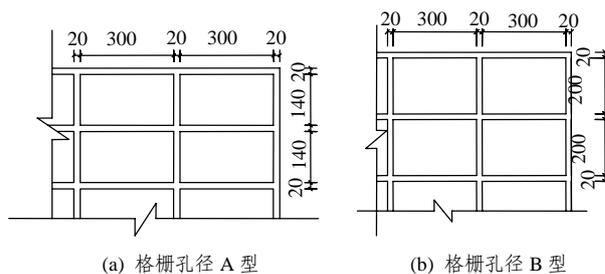


图 1 格栅孔径方案(单位: mm)
Fig.1 Aperture scheme of geogrid(unit: mm)

在模型试验前, 测试了格栅单根纵肋分别在 2 000, 4 000, 6 000, 8 000 N 荷载下, 不同时间的变形量, 通过这些试验研究确定各种规格格栅的材料特性。相关研究^[5, 6]对此作了深入地探讨。

为与现场实际工程的填料基本一致, 模型试验的加筋填料采用黏土和碎石土拌制(见表 1), 最大干密度为 2.10 g/cm³, 最佳含水量为 8.8%, 三轴试验建议黏聚力 $c=16$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=28^\circ$ 。试验中对台阶墙的面板后土体特性进行了取样测试(见表 2)。

表 1 土样筛分表

孔径/mm	分计筛余土质量 百分数/%	小于某粒径的土质量 百分数/%
30.000	0.0	100.0
20.000	9.1	90.9
10.000	15.4	75.5
5.000	20.3	55.2
3.000	12.7	42.5
2.000	5.4	37.1
1.250	10.9	26.2
0.500	10.7	15.4
0.250	4.9	10.5
0.100	5.6	4.9
0.074	1.3	3.6
剩余	3.1	-

表 2 加筋填料土体物理力学指标

Table 2 Material Mechanical properties of geogrid RSRW

相对密度 G_s	湿密度/(g·cm ⁻³)	含水量/%	干密度/(g·cm ⁻³)	压实度/%	孔隙比 e	塑性指数 I_p	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ (°)
2.7	1.99	9.29	1.82	86.63	0.489	10.4	16	28

2.3 试验方案及测试断面

本次试验方案为室内足尺试验，按照实际的施工过程修建模型，每填筑一层测试一次加筋体内各测点的数据。在模型修筑完毕稳定 1~5 d 后，在墙顶利用麻袋装土分 2 次加载，第 1 次堆载 6 kPa 稳定 24 h 以上后再堆载 6 kPa。模型试验根据格栅孔径大小分为方案 A(A 型土工格栅)和 B(B 型土工格栅)。2 个方案有相同的测点布置方式(见图 2)，两组试验测试断面分为 L 和 R 两个，分别距模型槽左右侧壁 1.02 m。

模型格栅加筋墙面板采用矩形单格室 C20 混凝土面板，预制安装，分为 A 和 B 型，A 型面板尺寸为 48 cm×24 cm×24 cm，B 型面板长宽为 A 型的一半。

2.4 土压力测点布置

土压力测试采用振弦式土压力盒，分别测试各测点的竖向和侧向土压力。根据预估土压力值范围，底部 3 层土压力盒的最大量程为 0.1 MPa，其余为 0.05 MPa。

本次试验土压力测点共布置了 9 层(见图 2)。其中加筋体底部距离面板后 0.1 m 起间距 1.5 m 布置 4 个测点；每级台阶第 1 层面板上侧距离面板后 0.2 m 起间距 1.0 m 布置 4 个测点；与之对应在第 4 层面板上侧距离面板后 0.2 m 起间距 1.0 m 布置 2 个测点；最后在上 2 层台阶面板底部布置 1 个测点。为了表述方便，在本文以后分析中，测点采用 $kL(R)n$ 表示，其中 k 为测试层号，最底面为第一层即 $k=1$ ； $L(R)$ 表示左(右)测试断面； n 为测点距离面板后的个数，如面板后第一个为 $n=1$ 。

3 试验结果分析

3.1 单测点土压力分析

从图 3(a), (b)中可以看出，竖向土压力虽然随填高的增加而变大，但存在着一个临界高度(大约为 1.5 m)，当填高小于它时，土压力与填高成线性变化；当填高大于它时，土压力基本保存不变或略有减少。对于这个临界高度，广东省路桥建设发展有限公司^[5]进行了详细分析，认为不同高度的加筋结构，其临界高度不同，且与基础的力学特性密切相关。

进一步分析竖向土压力与侧向土压力比值与填高的变化曲线发现，该比值与填高之间也没有线性关系(见图 3(c), (d))，且与土压力对应的在 1.5 m 左右填高处比值达到最大，随后逐渐减小并趋于稳定。通过数值拟合发现材料的软化曲线能够较好地反映这种变化规律。这说明土压力系数随填高会“软化”，根据这个规律，底层土压力系数很小，故侧向土压力亦小；而顶层填土少，其侧向土压力也小。这与加筋体内面板后的土压力随墙高呈现两端小中间大的趋势基本吻合。

分析测点土压力随时间变化曲线(见图 4)可以发现，在模型修建完毕后竖向土压力都有一定的减小，并且竖向土压力在加筋墙顶部加载时并没有明显的增大，反而略有减小，而侧压力在整个过程中都没有明显的变化。由此可以看出在加筋墙顶部适当加载，加筋体内应力会继续“软化”，然后增大。

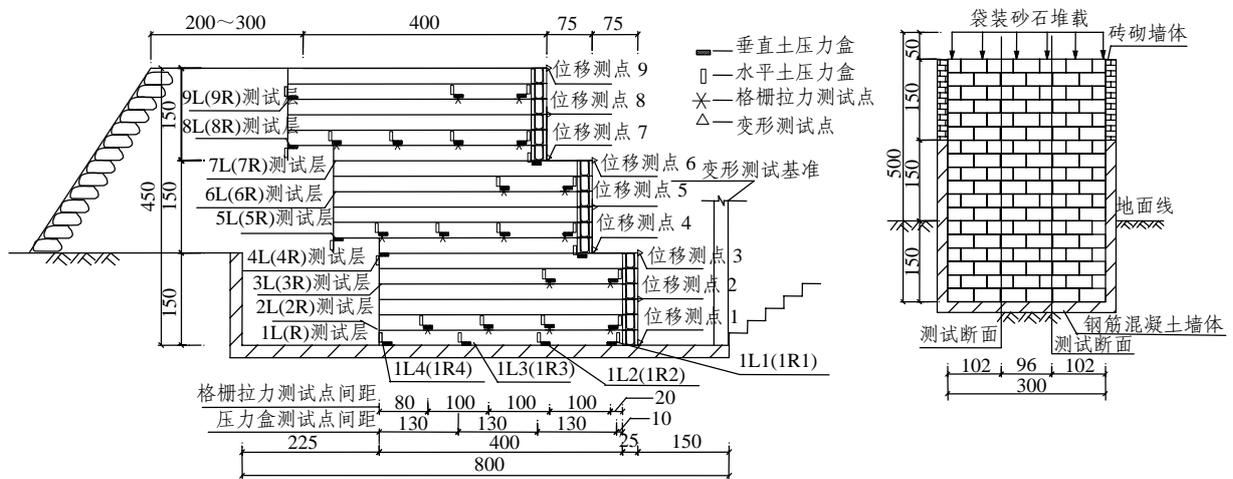
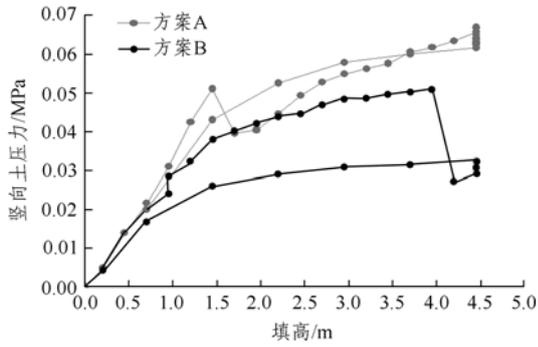
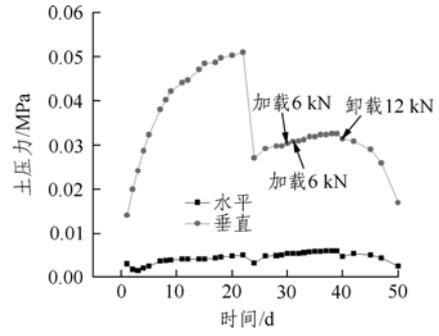


图 2 模型墙测点布置图(单位: cm)

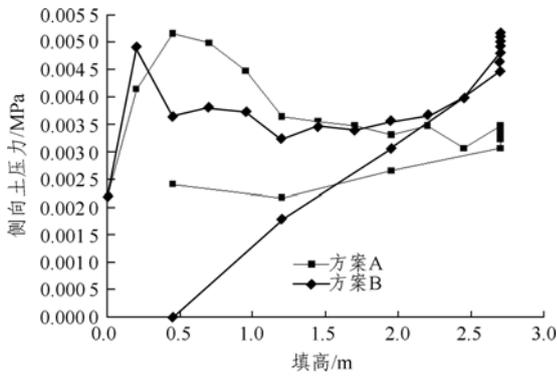
Fig.2 Arrangement of the RSRW measuring points(unit: cm)



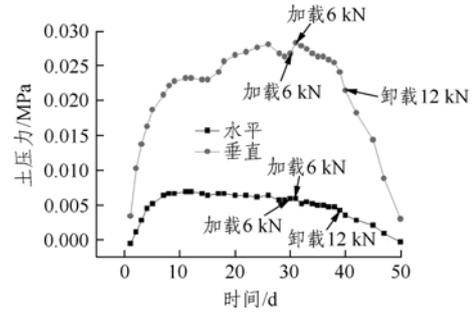
(a) 方案 A, B 的 1L1 测点竖向土压力与填高关系



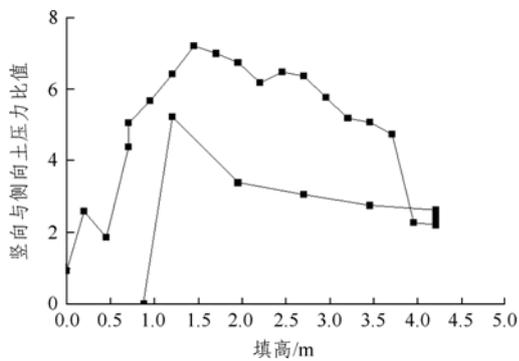
(a) 1L1 测点土压力



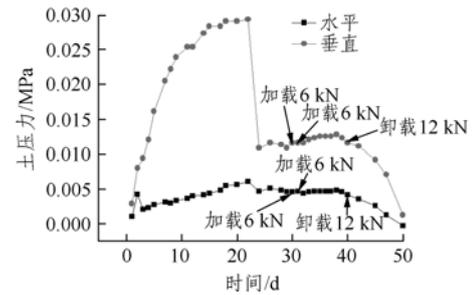
(b) 方案 A, B 的 5L2 测点侧向土压力与填高关系



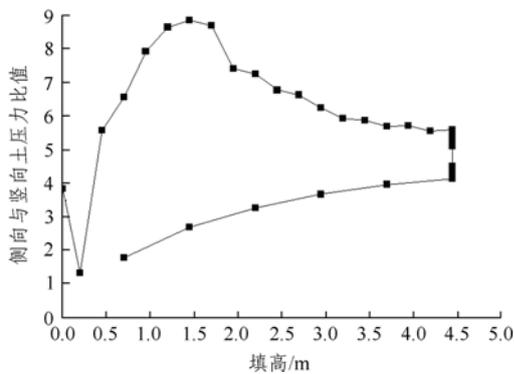
(b) 1R4 测点土压力



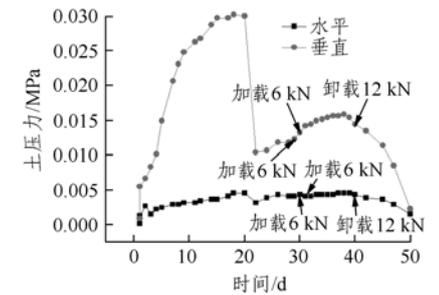
(c) 方案 A 的 2R1 点竖向与侧向土压力比值与填高关系



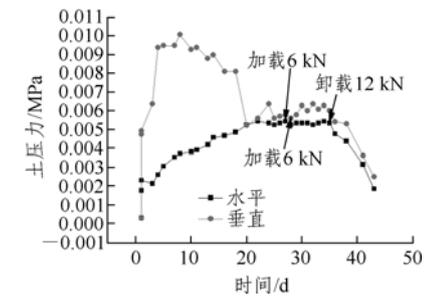
(c) 2L1 测点土压力



(d) 方案 B 的 1L4 点侧向与竖向土压力比值与填高关系



(d) 2R1 测点土压力



(e) 3L1 测点土压力

图 3 方案 A, B 相同测点土压力分布图

Fig.3 Soil pressures at same measuring points between cases A and B

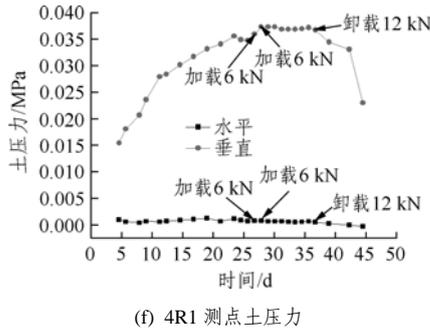


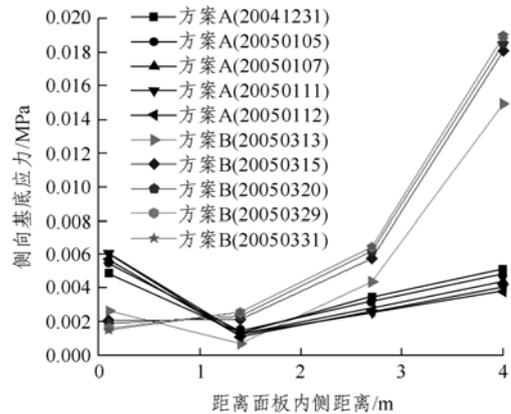
图 4 方案 A 测点土压力随时间变化曲线

Fig.4 Soil pressures at same measuring points of case A

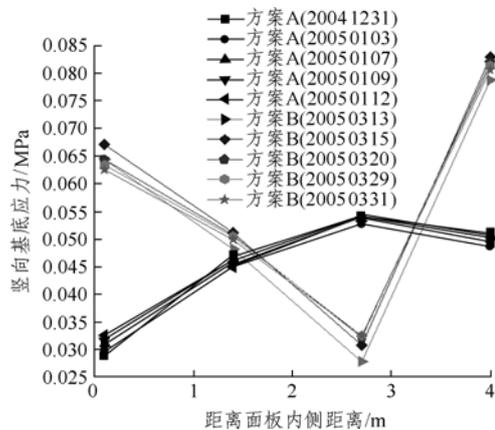
从图 4 中方案 A 中部分测点土压力随时间变化曲线发现，部分测点的竖向土压力出现明显的减小，分析这些测点的位置发现，它们大都位于模型墙基础的面板处。比较相同位置方案 B 的土压力，并未发现这种情况。本文分析认为，这种现象是加筋结构分析中极其重要的一部分，即基础的约束类型直接影响加筋结构的内力分布。在加筋结构中，当外部原因导致基础有较大的移动时(如方案 A 基础位移 5 mm，而方案 B 基础位仅为 1 mm)，加筋体内的应力会出现调整。至于这种调整是否有利于结构的自身稳定，是否可以使得加筋材料与土骨架的咬合作用更加牢固，以及这种现象与加筋结构有很好的抗震性能是否有必然的联系，还需要进一步的研究。不过可以肯定的知道这个位移同基础特性相关，因此可以认为基础对加筋结构影响是不容忽视的，分析相关研究的试验和数值计算结果^[6-13]都能体现这个问题。笔者对不同基础约束条件下的台阶墙进行了数值分析发现，不同基础约束条件会使模型墙产生不同的应力分布和基础位移模式^[5]。基于以上分析，本文认为提出考虑基础与加筋体一体化的设计方法十分必要，且加筋结构的土压力计算方法应增加考虑一个能反映地基特性的参数。

3.2 基底应力分析

从图 5 中可以看出，方案 A 与方案 B 的侧向基底应力比较吻合，而竖向压力相差很大。分析后认为 2 个方案基础的位移差异导致了基底应力的差别。尽管如此，从 2 个方案中可以发现，基底应力并非呈梯形分布，其分布趋势与基础位移约束相关，当位移较大时加筋土挡墙基底应力呈现 V 型分布，较小时按斜线分布，且其最大数值比刚性墙要小；故而按刚性墙的地基理论对这类结构进行分析是有很大的出入的。因此，台阶式格栅加筋土挡墙的计算应同时考虑格栅与基础的作用。



(a) 方案 A, B 侧向基底应力变化曲线



(b) 方案 A, B 竖向基底应力变化曲线

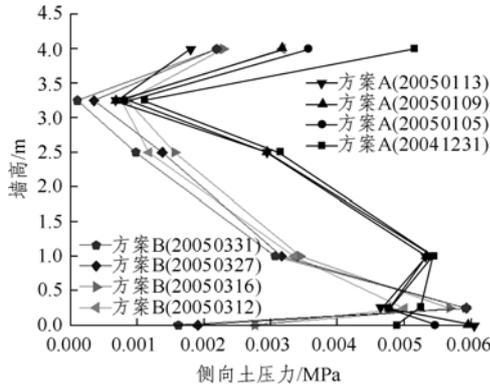
图 5 各种方案地基应力分布曲线

Fig.5 Basement stress curves for each case

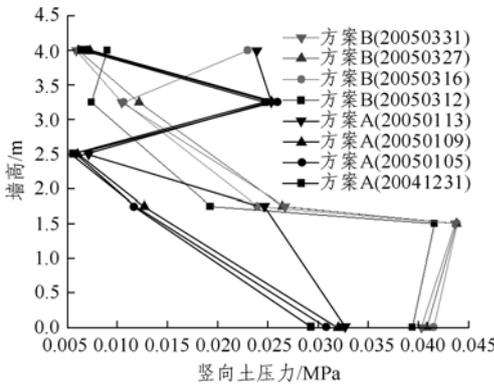
从图 5 中还可以看出，格栅网孔尺寸对加筋墙侧向基底应力有明显的影 响，方案 A 的基底应力明显小于方案 B。可以推论，格栅网孔尺寸越大，基底应力就相对较大。但这并不意味着网孔尺寸越小基底应力就越小，对此广东省路桥建设发展有限公司^[5]提出了考虑格栅三维效应的层板分析方法，分析得到的结论基本能够反映加筋结构的格栅网孔尺寸的影响。

3.3 加筋体内土压力分析

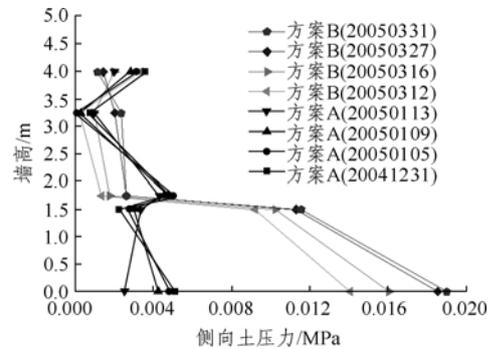
取 1L1, 2L1, 3L1, 5L1, 6L1, 8L1 和 9L1 作为一组绘制加筋墙面板后土压力沿墙高变化曲线(见图 6(a), (b))，同时取出 1L4, 3L2, 5L5, 8L5 及 9L3 作为另一组用于绘制加筋体后土压力沿墙高变化曲线(见图 6(c), (d))。从这些曲线中可以发现，面板后的竖向土压力沿墙高的分布很复杂，但是基本上在每级小台阶上都呈现两端压力小中间压力大的外凸式变化。而侧向土压力却规则的多，即在全墙高段呈现两端压力小中间压力大外凸式分布，且



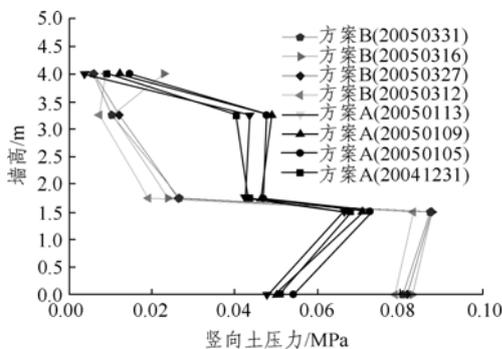
(a) 方案 A, B 面板后侧向土压力



(b) 方案 A, B 面板后竖向土压力



(c) 方案 A, B 加筋体后侧向土压力



(d) 方案 A, B 加筋体后竖向土压力

图 6 各方案的加筋体土压力分布

Fig.6 Soil stress in the reinforced soil body for each case

在数值上与直立结构无较大的差别。因此可以认为台阶式加筋结构相对于直立式加筋墙而言, 其侧向土压力无太大的改善。

加筋体后土压力比面板后土压力复杂的多, 其侧向土压力和竖向土压力在最上一阶台阶呈现上端小、下端大的趋势, 而第 2 阶台阶内却是两端小中间大, 随后在最下级台阶内变成了上端小下端大。如果将台阶格栅加筋墙看成是 3 个独立的直立墙相组合的, 那么在每阶台阶上的加筋墙后土压力趋势都应该是相同的, 而模型测试出的数据与之相背。由此可见, 台阶式加筋结构之间的相互影响不仅仅反映在上一级的荷载作用在下一级上, 更重要的是上下级台阶墙之间的力学特性的影响, 也即不同阶数的台阶墙其加筋体内的力学特性不尽相同。这也从一个侧面说明了不同基础的加筋墙, 其内部压力分布的趋势也不尽相同。

从图 6 中可以发现, 加筋结构较大的基础位移(如方案 A 约 5 mm)在面板后和加筋体后的应力体现是不尽相同。此时面板后的侧向应力与竖向应力无太大的变化, 而加筋体后的应力却有很大程度上的提高, 显然这对加筋结构的稳定性是不利的, 现行的规程^[3]对加筋结构的计算并未引入基础的影响因素, 分析一些加筋结构补强实例^[14], 发现相同结构和施工工艺下的不同基础(如砂卵石基础与回填基础), 加筋体后侧的应力和加筋材料的拉力完全不同, 这说明了本文分析结论的一般性。

比较图 6 中 2 个方案的土压力, 发现方案 B 面板后的侧向土压力在加筋墙的中部小于方案 A 的侧向土压力, 在加筋体后的下部它却大于方案 A, 而竖向土压力在整个过程中都恰好相反。通过以上分析本文认为, 加筋格栅的网孔尺寸大小对加筋墙的侧向土压力和竖向土压力均有明显的影响, 具体表现为加筋结构侧向土压力和竖向土压力在不同的部位均有不同程度的变大, 而不是在整个墙高上服从同一变化规律。

4 结 论

通过模型试验和以上分析可以得到以下结论:

- (1) 台阶式格栅加筋墙加筋体内各点的土压力与传统的土压力理论不一致, 其随填高的变化特性和竖侧土压力系数也不是简单的线性关系; 实际的土压力分布曲线应考虑基础的力学特性和最大的影响深度, 而对于不同高度的加筋土结构和基础条件

其影响程度也是不同的。

(2) 加筋墙基础的位移对加筋墙体的力学特性有非常重要的影响；不同的基础位移尽管不会过大的影响侧向土压力，但会导致结构内部应力的重分配。

(3) 实测的加筋墙体基础应力分布同手册^[2]假定的计算方法有较大的出入；实测土压力基本上按斜线分布或 V 型分布，与基础特性相关。

(4) 台阶式格栅加筋墙面板后和加筋体后的土压力分布在各自台阶内呈两端小、中间大的规律分布，面板后侧向土压力与直立式墙相差不大，但竖向土压力和加筋体后土压力相差较大。

(5) 对于格栅式加筋墙，格栅网孔尺寸大小对加筋墙力学特性有一定的影响，其影响机制比较复杂，尚需做进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 何光春. 加筋土结构设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.(HE Guangchun. Design and construction of the reinforced soil[M]. Beijing: China Communications Press, 2000.(in Chinese))
- [2] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.(The Compile Committee of the Engineering Application Manual of the Geotechnical Composite Material. The engineering application manual of the geotechnical composite material[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000.(in Chinese))
- [3] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ015 - 91 公路加筋土工程设计规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTJ015 - 91 The design directive rules of reinforced soil in road[S]. Beijing: China Communications Press, 1993.(in Chinese))
- [4] 孙 钧, 迟景魁, 曹正康, 等. 新型土工材料与工程整治[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.(SUN Jun, CHI Jingkui, CAO Zhengkang, et al. The new geotechnical material and regulation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998.(in Chinese))
- [5] 广东省路桥建设发展有限公司. 山区公路高填方加筋陡坡应用技术研究[R]. 广东省路桥建设发展有限公司, 2006.(Guangdong Road and Bridge Construction Development Co. Ltd.. The application technology research of high filling reinforced steep in mountain road[R]. Guangzhou: Guangdong Road and Bridge Construction Development Co., Ltd., 2006.(in Chinese))
- [6] 汪承志. 加筋陡坡有限元分析及试验研究[硕士学位论文][D]. 重庆: 重庆交通学院, 2005.(WANG Chengzhi. Numerical analysis and experiment for reinforced soil slopes[M. S. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [7] 周世良. 格栅加筋土挡墙结构特性及破坏机制研究[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2005.(ZHOU Shiliang. Study on structural characteristics and failure mechanism of geogrid RSRW[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.(in Chinese))
- [8] 杨广庆. 台阶式加筋土挡土墙设计方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 695 - 698.(YANG Guangqing. Study on design method of setback type of reinforced wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 695 - 698.(in Chinese))
- [9] HELWANY S M B, REARDON G, WU J T H. Effects of backfill on the performance of GRS retaining walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, 17(2): 1 - 16.
- [10] BATHURST R J, WALTERS D L, HATAMI K. Full-scale performance testing and numerical of reinforced soil retaining walls[C]// Proceedings of International Symposium on Earth Reinforcement. Fukuoka: IS Kyushu, 2001: 202 - 231.
- [11] RAJAGOPOL K, RICHARD J B. Behaviour of geosynthetic reinforced soil retaining walls using the finite element analysis[J]. Computers and Geotechnics, 1995, 17(4): 279 - 299.
- [12] ROWE R K, SKINNER G D. Numerical analysis of geosynthetic reinforced retaining wall constructed on a layered soil foundation[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(7): 387 - 412.
- [13] HE G C, WANG C Z, HUANG Y Q. Elastoplasticity finite element analysis of soil-reinforcement composite material through model test on stepped reinforced soil retaining wall[C]// The 4th Asian Joint Symposium on Geotechnical and Geo-environmental Engineering. Dalian: [s. n.], 2006: 70 - 76.
- [14] 重庆交通学院. 重庆长江滨江路护岸综合整治工程安全性评估[R]. 重庆: 重庆交通学院, 2004.(Chongqing Jiaotong University. The security appraisal of synthesis regulatory engineering of breast wall on Yangtze Bingjiang Road[R]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004.(in Chinese))