

DOI: 10.11779/CJGE2022S2013

基础刚度对加筋边坡稳定性影响的离心试验研究

陈凌伟¹, 李波^{*2}, 李从安², 刘伟¹, 彭卫平¹

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060; 2. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 山区采用加筋边坡设计时经常依据现场情况选择基础形式, 而基础刚度直接影响到加筋边坡的稳定性。通过开展离心模型试验, 研究不同基础刚度条件下加筋边坡变形和筋材受力分布规律以及边坡稳定性。研究结果表明: 边坡基础刚度越大, 加筋边坡沉降和水平位移相对较小, 且筋材拉力分布更为均匀, 边坡稳定性更高; 当基础刚度较小时, 边坡底部区域的筋材拉力较大, 容易导致加筋边坡整体产生较大变形甚至破坏; 试验中采用高精度柔性应变片监测得到筋材拉力分布规律, 基础刚度较小时, 边坡下部的筋材拉力显著增大, 比边坡中部的筋材拉力增幅更大, 而基础刚度较大时, 边坡中部和下部筋材拉力更为均匀。

关键词: 加筋边坡; 离心模型试验; 基础刚度; 筋材拉力

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0058-04

作者简介: 陈凌伟(1990—), 男, 江西宜春人, 博士, 高级工程师, 主要从事土的特性试验研究方面的工作。E-mail: lingweichan@163.com。

Centrifugal model tests on influences of foundation stiffness on stability of reinforced slopes

CHEN Ling-wei¹, LI Bo², LI Cong-an², LIU Wei¹, PENG Wei-ping¹

(1. Guangzhou Urban Planning Survey and Design Institute, Guangzhou 510060, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The foundation form is often chosen according to the site condition when the reinforced slope is designed in mountainous areas. The foundation stiffness directly affects the stability of the reinforced slope. The centrifugal model tests were carried out to study the deformation and stress distribution of the reinforced slope as well as its stability under different foundation stiffness conditions. For the slope with larger foundation stiffness, the settlement and horizontal displacement of the reinforced slope are relatively small, and the distribution of reinforcement tension is more uniform, so the slope has higher stability. For the slope with small foundation stiffness, the reinforcement tension at the bottom area of the slope is larger, which is easy to cause the whole reinforced slope to produce large deformation or even damage. The high-precision flexible strain gauge is used to monitor the distribution of reinforcement tension. When the foundation stiffness is small, the tensile force of the reinforcement in the lower part of the slope increased significantly, which is larger than that in the middle part of the slope. When the foundation stiffness is large, the tension of the reinforcement in the middle and lower part of the slope are smaller and more uniform.

Key words: reinforced slope; centrifugal model test; foundation stiffness; tensile force of reinforcement

0 引言

土体加筋技术的使用由来已久, 早期多采用竹、木、草、植被等混杂于土中提高土体整体稳定性, 而现代加筋技术在材料、设计和施工技术方面日趋成熟。随着我国西部基础设施建设的发展, 加筋高陡边坡屡见不鲜, 如攀枝花机场和在建河池机场最大填方高度达 60 m, 重庆万州五桥机场最大填方高度 64 m, 重庆新城巫山处理最大填方高度 57 m, 吕梁机场最大填

方高度达 80 m。高填方加筋边坡基础处理直接影响到加筋边坡的变形和稳定性。

针对高陡加筋边坡以及筋土间相互作用的研究,

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC1501201); 国家自然科学基金青年基金项目(51709017); 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室项目(2020B121202019); 广州市城市规划勘测设计研究院科技基金项目(RDP2220204022, RDI2220204037)

收稿日期: 2022-12-07

*通信作者(E-mail: libo_auliso@126.com)

有关学者开展了深入研究。任洋等^[1]针对某超高陡加筋土填方边坡方案, 采用大型土工离心模型试验及数值计算结合的研究方法, 分析了边坡的变形和筋材拉力分布特征。李立等^[2]针对桩承式加筋土应用于高速公路拓宽改造工程, 开展了桩承式加筋土挡墙结构与桩承式加筋路堤(GRPS) 结构的离心模型试验, 对比不同结构形式对路基变形和内部筋材受力的影响。Zhang 等^[3]提出采用土工格栅加筋膨胀土边坡的稳定分析方法, 能够考虑膨胀土侧向膨胀引起的附加拔出力对土工格栅的抗拔稳定性的影响, 计算加筋边坡整体稳定时各土工格栅层的抗拔安全系数。张琬等^[4]采用有限元数值模拟对离心模型进行对比研究, 分析坡高和坡度对筋材拉力分布的影响, 根据筋材受力可对边坡整体进行分区, 为加筋边坡设计和优化提供依据。李飞等^[5]通过模型试验研究了加筋边坡的宏观力学性状以及筋土界面细观作用等, 筋材与土颗粒摩擦和咬合作用提供“似黏聚力”, 宏观变形上呈现为类似黏性土边坡的整体滑移破坏模式。李波等^[6]采用离心模型试验和数值模拟相结合的方法, 对比研究筋材的加入对边坡稳定性的影响, 分析了筋材拉力的分布规律。但现有研究对于基础刚度对于加筋边坡变形和稳定性研究比较少。

本文针对某高陡加筋边坡, 采用土工离心模型试验, 研究不同基础强度对加筋边坡的变形和稳定性的影响, 以及筋材应力应变的分布规律。

1 模型设计和试验模拟方法

某高陡加筋边坡为二级边坡, 边坡总高度为 35.4 m, 下部坡高 13.2 m, 削坡坡比 1:0.7, 上部坡高 22.2 m, 坡比 1:0.5, 筋材极限抗拉强度为 75 kN/m, 层间距 0.6 m。试验设备采用长江科学院 CKY-200 土工离心机。选用模型率为 60, 即最大离心加速度为 60 g。模型分为二级边坡, 试验方案如表 1 所示。

表 1 离心模型试验方案

Table 1 Schemes of centrifugal model tests

| 试验编号 | 上部 | 下部 | 试验内容 |
|------|-----------|------------|-------------------------|
| T-1 | 填料二 加筋 | 填料一 | 研究下部填料软弱下边坡稳定性及筋材应力分布 |
| T-2 | 填料二 加筋 | 填料二 未加筋 | 研究下部回填料未加筋时边坡稳定性及筋材应力分布 |
| T-3 | 填料二 加筋 | 填料二 加筋 | 研究下部回填料加筋边坡稳定性及筋材应力分布 |

1.1 模型监测

本次模型试验主要监测项目如图 1 所示, 主要包括以下内容:

(1) 沉降和水平位移

采用非接触式激光位移传感器, 测量坡顶、平台顶部的沉降, 以及上部坡体中部、坡脚及下部坡体的水平位移。

(2) 筋材拉力

在筋材模型材料上设置环氧树脂条带, 将应变片粘贴在环氧树脂带上, 间距为 5 cm; 分别在下部坡体铺设 4 层筋材, 上部坡体铺设 7 层筋材, 筋材测点布置如图 1 所示。

(3) 断面位移场

在模型断面内设置标识点, 间距为 5 cm×5 cm, 采用离心机高速摄像系统记录断面变化, 通过对比变形前后标识点位置绘制断面位移场。

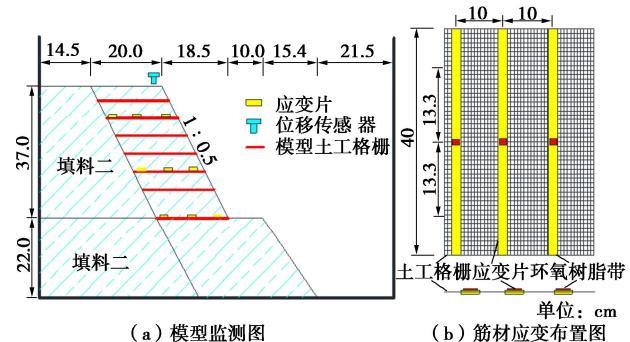


图 1 模型尺寸及监测布置图(以 T-2 为例)

Fig. 1 Model sizes and monitoring layout of Test T-2

1.2 填筑材料的模拟

本次离心模型试验土料选用压实黏土, 填料一和填料二的物理力学参数如表 2 所示。

表 2 模型填筑材料物理力学参数表

Table 2 Physical and mechanical parameters of model filling materials

| 填料 | 压实度 ρ_f /(g·cm ⁻³) | w/% | c/kPa | ϕ /(°) | E/MPa |
|-----|--|------|-------|-------------|-------|
| 填料一 | 0.80 | 1.56 | 12.1 | 32.3 | 18 |
| 填料二 | 0.88 | 1.71 | 12.1 | 35.3 | 9.1 |

1.3 加筋材料的模拟

对于加筋材料, 根据等效抗拉强度相似的原则选择模型材料。原型土工格栅抗拉强度为 75 kN/m, 通过多种材料的抗拉强度比选试验, 选定材质为高密度聚乙烯, 网目为 18 目, 丝径为 0.18 mm, 采用平织而成的塑料窗纱, 作为本次离心模型试验的加筋材料。拉伸试验测量得到极限抗拉刚度 5.25 kN/m, 平均极限延伸率为 96.9%, 对应 2%, 5% 应变材料强度分别为 0.69, 1.6 kN/m。试验结果如表 3 所示。

1.4 加筋材料拉伸标定试验

基于窄条拉伸试验, 在模型材料塑料纱窗窄条上粘贴环氧树脂条带, 环氧树脂带的设计尺寸为 50 mm×15 mm×2.5 mm (长×宽×厚), 在窄条两侧涂抹环氧树脂胶, 待其固化后, 贴上应变片, 具体布置

如图2所示。拉伸轴力-应变关系见图3。

表3 模型筋材拉伸强度参数

Table 3 Experimental parameters of geogrid used in model

| 试验 编号 | 每延米极限抗 拉强度 $/(kN \cdot m^{-1})$ | 2%应变拉 伸强度 | 5%应变拉 伸强度 | 延伸率 |
|----------|---------------------------------------|--------------|--------------|-------|
| 1 | 5.35 | 0.79 | 1.70 | 108.9 |
| 2 | 5.12 | 0.68 | 1.59 | 90.4 |
| 3 | 5.16 | 0.66 | 1.58 | 94.1 |
| 4 | 5.36 | 0.80 | 1.73 | 100.1 |
| 5 | 5.00 | 0.63 | 1.50 | 84.8 |
| 平均值 | 5.25 | 0.69 | 1.60 | 96.92 |

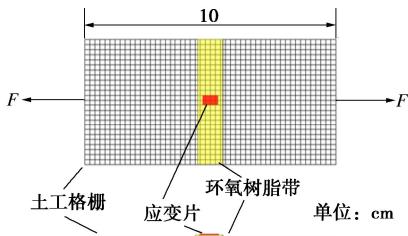


图2 模型格栅应变布置图

Fig. 2 Details of strain gauge on model geogrid

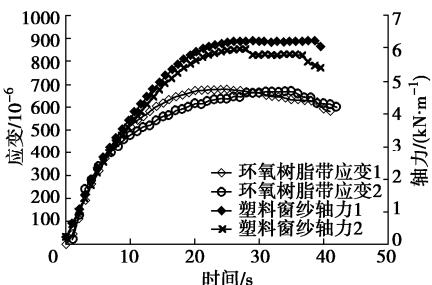


图3 拉伸轴力-应变关系图

Fig. 3 Relationship between tensile stress and strain

拉伸试验得到格栅应力与应变关系为

$$y = \begin{cases} 0.5605e^{0.0037x} & (0 \leq x \leq 645\mu\varepsilon) \\ 6.10 & (x > 645\mu\varepsilon) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, x 为应变测量值。

2 试验结果与分析

2.1 边坡变形

坡顶沉降试验结果如表4所示, 试验结果对比表明, 加筋边坡下部填料强度增加坡顶位移明显减小, 对下部填料进行加筋可以减小坡顶的竖向位移。

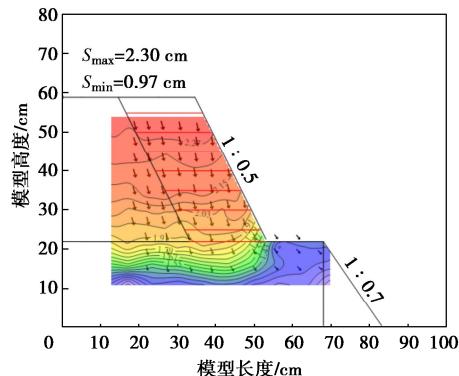
表4 不同加速度下坡顶竖向位移

Table 4 Vertical displacements of slope top under different accelerations (mm)

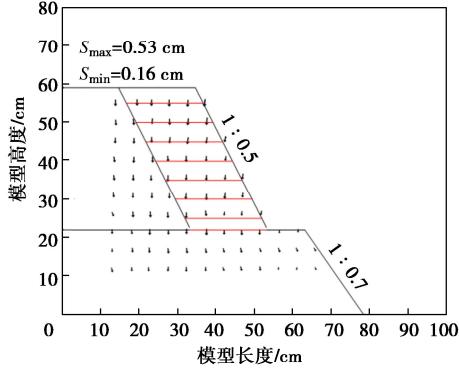
| 试验编号 | 20g | 40g | 60g | 80g |
|--------|------|-------|-------|------|
| 试验 T-1 | 0.85 | 11.30 | 22.62 | — |
| 试验 T-2 | 0.35 | 1.18 | 3.23 | 7.77 |
| 试验 T-3 | 0.30 | 1.13 | 2.80 | 6.60 |

断面位移场如图4所示。分析表明, 试验前后模型发生竖向变形与水平变形, 最大位移位于模型顶部,

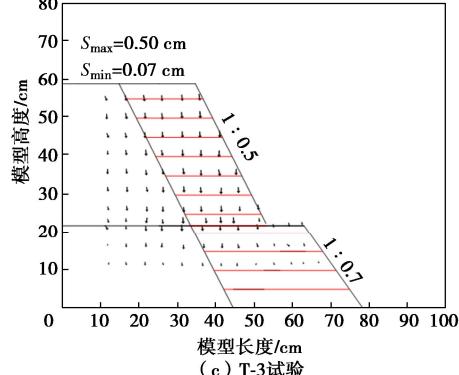
20g~60g时3组试验的最大位移分别为2.3, 0.53, 0.50 cm, 结果表明地基强度增加后, 边坡整体变形减小。



(a) T-1试验



(b) T-2试验



(c) T-3试验

图4 试验20g~60g位移矢量图

Fig. 4 Displacement vectors under 20g~60g

2.2 筋材内力

图5为试验T-1破坏后照片, 图6为加速度为60g时筋材内力分布(以T-1为例)。分析表明, 60g时T-1底层筋材临近坡脚位置筋材内力最大, 为6.10 kN/m, 中部筋材最大受力值为3.17 kN/m, 位于加筋边坡与既有山体交界位置, 说明加筋体内部坡脚至H/3高度位置形成潜在滑动面, 下部坡体在上覆荷载作用下侧向挤出坡体失稳破坏, 潜在滑动面上筋材拉力最大。

试验T-2和T-3加载至60g时坡体未发生明显变化, 后继续逐级加载至80g。T-2试验第7层筋材轴力为0.83, 6.06, 0.22 kN/m, 该层中间点位置受力最大; T-3试验第7层筋材轴力为1.58, 1.16, 1.28 kN/m, 筋

材受力较为均匀。并且 T-3 第 10 层筋材轴力也明显小于 T-2 相同位置, 表明下部坡体进行加筋处理后, 下部坡体整体刚度增加, 限制了下部加筋体侧向挤出, 调整了加筋边坡的不均匀沉降, 上部加筋体筋材受力得到明显改善, 筋材受力更为均匀, 边坡整体稳定性增加。



图 5 试验 T-1 地基失稳破坏

Fig. 5 Foundation failure at 60g for Test T-1

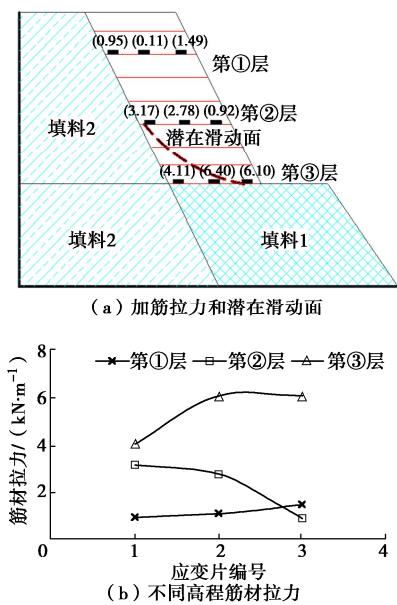


图 6 试验 60g 时筋材内力 (T-1)

Fig. 6 Internal forces of reinforcement at 60g (T-1)

3 结语

采用土工离心模型试验, 研究不同基础强度对加筋边坡的变形和稳定性的影响以及筋材应力应变的分布规律。试验结果表明, 基础强度对加筋边坡的变形和稳定性起决定性作用, 基础强度增加可有效减小坡体变形, 且下部坡体加筋处理后, 上部坡体筋材受力不均匀现象得到明显改善; 当基础较软时, 坡体内部

筋材受力不均匀, 筋材最大可达到塑性屈服, 边坡下部的筋材拉力显著增大, 比边坡中部的筋材拉力增幅更大。

参考文献:

- [1] 任洋, 李天斌, 杨玲, 等. 基于离心模型试验与数值计算的超高陡加筋土填方边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 836 - 844. (REN Yang, LI Tian-bin, YANG Ling, et al. Stability analysis of ultra-high-steep reinforced soil-filled slopes based on centrifugal model tests and numerical calculation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 836 - 844. (in Chinese))
- [2] 李立, 曹文昭, 刘洋, 等. 桩承式加筋土结构拓宽路基工作特性离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 2): 3357 - 3366. (LI Li, CAO Wen-zhao, LIU Yang, et al. Centrifugal model test on the performance of pile-supported reinforced-earth structure for subgrade widening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3357 - 3366. (in Chinese))
- [3] ZHANG R, LONG M, LAN T, et al. Stability analysis method of geogrid reinforced expansive soil slopes and its engineering application[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7): 1965 - 1980.
- [4] 张琬, 许强, 陈建峰, 等. 加筋土边坡筋材拉力分布与分区[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6): 28 - 35. (ZHANG Wan, XU Qiang, CHEN Jian-feng, et al. Distribution and zoning of reinforcement loads for reinforced soil slopes[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(6): 28 - 35. (in Chinese))
- [5] 李飞, 周健, 张姣. 土工合成材料加筋边坡宏细观机理模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1080 - 1087. (LI Fei, ZHOU Jian, ZHANG Jiao. Model tests on macro-mesoscopic mechanism of geosynthetic-reinforced slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1080 - 1087. (in Chinese))
- [6] 李波, 徐丽珊, 龚壁卫, 等. 加筋高陡边坡离心模型试验与数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(3): 65 - 68, 76. (LI Bo, XU Li-shan, GONG Bi-wei, et al. Centrifugal tests and numerical modeling of high and steep geosynthetic-reinforced slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(3): 65 - 68, 76. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)