

DOI: 10.11779/CJGE2017S1040

# 基底倾斜的管桩复合地基路堤破坏模式研究

顾行文<sup>1,2</sup>, 黄炜旺<sup>3</sup>, 谭祥韶<sup>3</sup>, 任国峰<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏南京 210029; 3. 中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东广州 510000)

**摘要:** 通过4组土工离心模型试验, 研究了山区底面倾斜的软土层管桩复合地基路堤破坏模式。基于底面倾斜的天然软基路堤变形及失稳破坏特点, 分析了桩端嵌入硬土层深度和桩顶格梁对于山区管桩复合地基路堤变形及失稳破坏模式的影响。试验结果表明, 倾斜软土管桩复合地基上的路堤破坏模式主要有: ①当桩端嵌入硬土层较深时, 复合地基易发生下坡脚附近的桩体倾倒和桩间土绕流破坏; ②桩端嵌入硬土层较浅时, 复合地基易发生桩体向一侧的倾覆破坏, 并伴随一定的桩间土绕流破坏, 桩体倾覆程度显著大于桩端嵌入硬土层较深的情况; ③当加格梁联系管桩桩顶时, 复合地基易发生桩间土的绕流破坏。

**关键词:** 管桩; 复合地基; 离心模型试验; 失稳模式

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0204-05

作者简介: 顾行文(1981-), 男, 江苏建湖人, 高级工程师, 主要从事土工离心模型试验研究工作。E-mail: xweng@nhri.cn。

## Failure mechanisms of embankment on inclined soft foundation reinforced by pipe piles

GU Xing-wen<sup>1,2</sup>, HUANG Wei-wang<sup>3</sup>, TAN Xiang-shao<sup>3</sup>, REN Guo-feng<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 3. CRCC Harbour & Channel Engineering Bureau Group Survey & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** Four groups of centrifuge model tests are performed to investigate the failure mechanisms of embankment on inclined soft foundation reinforced by pipe piles. The influences of embedded depth of pile toe into stiff stratum and lattice beams are analyzed with comparison to the natural inclined soft ground situation. The results show that the failure mechanisms are as follows: (1) For the deep embedded situation, soil may flow around piles, leading to leaning of piles at the downhill side and overall failure; (2) For the shallow embedded situation, soil also flows around the piles, leading to more leaning of piles and overall failure; (3) The lattice beams are efficient in preventing piles from leaning, but soil still flows around piles.

**Key words:** pipe pile; composite ground; centrifugal model test; failure mode

## 0 引言

随着社会经济发展, 作为纽带的公路、铁路必将在许多山区修建, 必然会遇到山区软土地基问题。

与一般软土地基不同, 山区软基具有其自身的工程特点, 包括软土厚度变化大、富含有机质、软土底面倾斜、下卧硬土层较薄等, 这些工程特点导致山区软土地基的处理方式、失稳破坏模式、沉降特点等与平原软土地基有所不同<sup>[1-2]</sup>。在以往的工程实践中, 复合地基是山区软基处理的主要方法之一。近年来, 为了满足路堤的整体稳定性要求或工后沉降的要求, 管桩复合地基越来越多地在山区软土地基处理中得到了应用。然而在实际应用中, 验算结果满足规范要求, 甚至安全系数还较高的部分复合地基路堤发生失稳滑

塌的情况却时有发生。例如, 广珠高速公路北段某路堤填方工程在建设期间发生滑塌, 该段采用的是管桩支承路堤的复合地基处理技术<sup>[3]</sup>。

本文通过4组离心模型试验, 探讨山区软土层底面倾斜的管桩复合地基路堤失稳破坏特点。

## 1 试验原理和设备

土工离心模型试验技术是一项崭新的土工物理模型技术。通过施加在模型上的离心惯性力使模型的容重变大, 从而使模型的应力与原型一致, 这样就可以用模型反映、表示原型。离心模型是各类物理模型中相似性最好的模型。中国岩土力学研究的开拓者、两

院院士黄文熙先生称“离心模型是土工模型试验技术发展的里程碑”<sup>[4]</sup>。

试验在南京水利科学研究院 NHRI400gt 土工离心机上进行。该机建于 1992 年, 最大半径 5.5 m, 最大加速度 200g, 最大负荷 2000 kg, 容量 400 g·t, 吊篮平台尺寸为 1100 mm×1100 mm。

山区软基强度非常低, 只能采用泥浆固结的方式制备。本文利用试验室的 NHRI600 型离心模型专用固结仪制备山区软基, 期间用袖珍贯入仪监测模型地基的土体强度, 直至强度达到目标值。

利用数据图像采集 (PIV) 系统实时记录土体在试验过程中的变化。然后应用 PIV 技术, 分析土体的位移情况。

## 2 试验方案

### 2.1 模型设计

通过 4 组底面倾斜软基上的路堤离心模型试验, 探讨山区软土层底面倾斜的管桩复合地基路堤失稳破坏特点。模型设计见图 1~4。

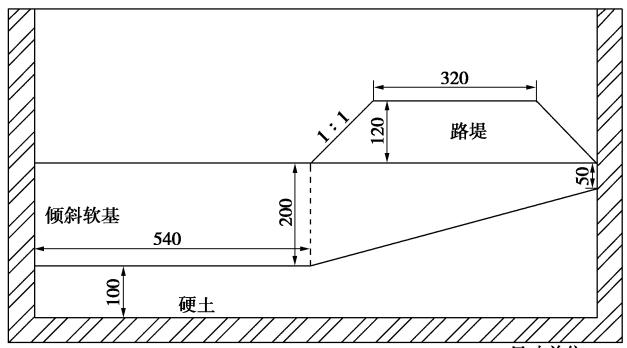


图 1 M1 模型布置图

Fig. 1 Model setup of M1

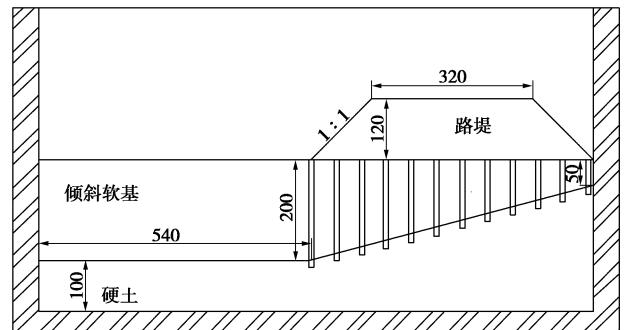


图 2 M2 模型布置图

Fig. 2 Model setup of M2

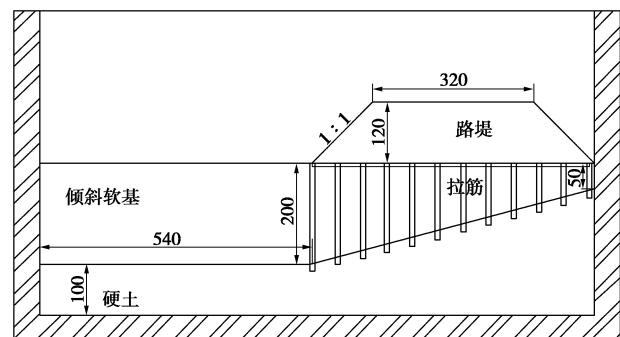


图 3 M3 模型布置图

Fig. 3 Model setup of M3

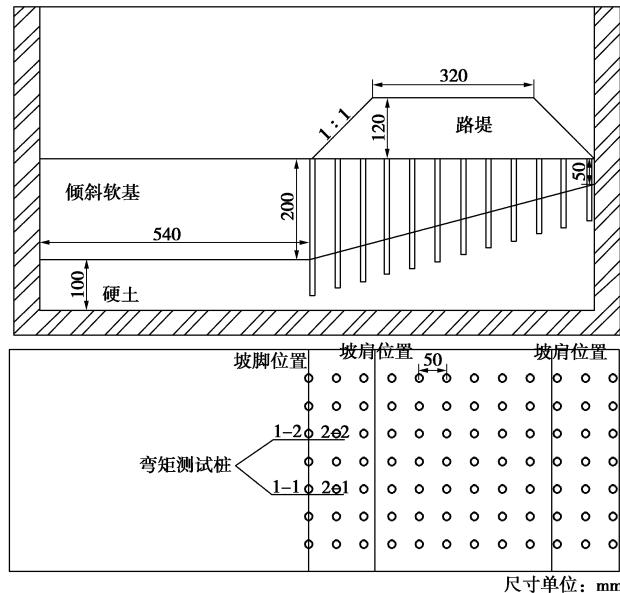


图 4 M4 模型布置图

Fig. 4 Model setup of M4

试验的模型相似率  $n=100$ , 采用分级加载, 模拟路堤分层填筑过程<sup>[5]</sup>。每加载 10g 为一级, 加载时间为 2 min, 加载后运行 5 min。模型具体条件为: M1 为天然软基上的路堤试验; M2 研究进入硬土层 2 d 的管桩复合软基上的路堤破坏特性; M3 探讨进入硬土层 2 d 的、桩顶加格梁联系的管桩复合软基上的路堤破坏特性; M4 模拟进入硬土层 7 d 的管桩复合软基上的路堤破坏特性。各组试验的土层参数均为: 硬土层密度  $2.0 \text{ g/cm}^3$ , 含水率 22.0%; 软基不排水强度 12 kPa; 路堤压实度 98%, 顶宽 32 m, 高 12 m, 坡比 1:

1. 管桩参数均为: 桩径 1 m, 方形布置, 桩间距 5 m。

## 2.2 模型管桩制备

实际工程管桩采用预应力管桩 PHC400AB, 壁厚 95 mm, 抗裂弯矩 64 kN·m, 极限弯矩 106 kN·m。模型桩采用外径 10 mm, 壁厚 1 mm 的圆柱空心铝管。模型管桩的破坏弯矩为 11.61 N·m。

如图 2~4, M2~M4 中分别在对称位置布置 4 根弯矩测试桩, 可以得到路堤坡脚处 (#1, 由 1-1 和 1-2 组成) 和距坡脚 5 m 处 (#2, 由 2-1 和 2-2 组成) 桩身弯矩分布。桩身弯矩测点分布如图 5。

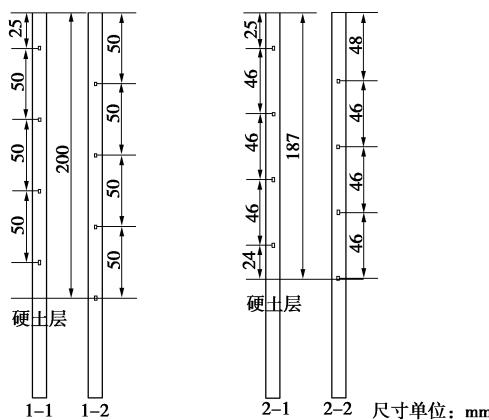


图 5 弯矩测试桩测点布置

Fig. 5 Measuring points for bending moments of piles

## 2.3 试验程序

①制备下卧硬土层; ②固结软土层; ③软基中的管桩施工模拟(除 M1), 先引孔再插入模型桩; ④制备路堤; ⑤在模型土体的侧面布置变形观测标记( $40 \times 40$  mm); 然后在土体表面贴上涂有硅油的薄膜, 以减小土体与模型边界侧摩阻力, 装上有机玻璃面; ⑥称模型质量; 将模型置于离心机上, 按设计过程启动离心机运行模型; ⑦停机, 量测变形网格, 拆模。

## 3 试验结果

### 3.1 M1 试验结果分析

模型 M1 模拟了底面倾斜天然软基上填筑路堤的过程。随着填筑过程, 路堤和路基沿倾斜下坡方向发生较大变形。离心加速度升至 18g 左右时路堤出现裂缝, 之后裂缝不断发展, 并出现明显滑动带。加速度至 60g (填筑高度 7.2 m) 并维持 5 min 后试验停止。图 6 是土体变形矢量图。路堤顶面产生贯通裂缝数条, 最宽处达 2.4 cm。

由试验结果可知, 在底面倾斜的天然软基上填筑路堤, 随着填筑过程, 沉降迅速向倾斜下坡发展, 并沿下卧硬土层形成近似折线的滑动面, 路堤顶面易出现较大贯通裂缝。与平原软基上的路堤对称沉降不同,

底面倾斜软基上的路堤工程土体变形、滑动带受倾斜的底面硬土层影响较大, 路堤稳定性较差。因此, 在山区软基上填筑高大路堤, 需要对天然地基采用一定的地基处理技术进行加固处理, 以提高地基稳定性。

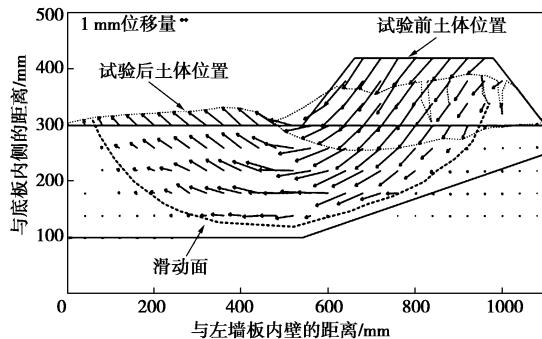


图 6 试验后的整体变形

Fig. 6 Deformation fields of tested M1

### 3.2 M2 试验结果分析

M2 模拟了在底面倾斜的管桩复合软基上填筑路堤的过程, 管桩入硬土层 2 倍桩径。随着填筑过程, 土体沿倾斜下坡方向发生变形, 之后不断发展, 并出现明显滑动带。加速度加至 90g (填筑高度 10.8 m) 并维持 5 min 后停止试验。开挖暴露桩体 (图 7), 各排桩均向下坡侧倾倒破坏, 最大桩顶水平位移为 10.9 cm。

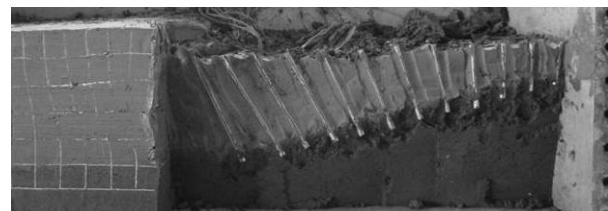


图 7 试验后的管桩

Fig. 7 Pipe piles of tested M2

路堤坡脚处 (#1) 和距坡脚 5 m 处 (#2) 桩身弯矩分布的测试结果分别如图 8, 9 (定义左侧受拉为正, 右侧受拉为负)。随着路堤填筑过程, 桩身弯矩增加, 坡脚处桩身最大弯矩  $M/M_u$  约为 0.31, 位于桩顶下约 10 cm; 距坡脚 5 m 处桩身最大弯矩  $M/M_u$  约为 0.31, 位于桩顶下约 9.4 cm。加载初期软硬土层交界处桩身出现负弯矩, 之后逐渐减小, 最终变为正弯矩。表明桩端嵌入硬土层的部分在填筑初期发挥了锚固作用; 但随着填筑过程中土体位移的发展, 下卧硬土层对管桩的锚固作用逐渐丧失。

试验后桩土位移情况及滑动面如图 10。对比 M1, M2 土体变形明显较小, 说明管桩复合地基能有效控制沉降, 提高路堤稳定性。路堤及软土沿倾斜下卧硬

土层产生了明显的折线形滑动带。在滑动面内, 越靠近下坡脚, 桩体倾倒越厉害, 这与桩身弯矩测试情况相契合。桩侧土体位移情况表明土体在管桩之间发生了一定程度的绕流。因此, 在桩端进入硬土层较浅的斜坡软基管桩复合地基上填筑路堤, 易产生沿倾斜下坡向的桩体倾倒加桩间土绕流的破坏模式。

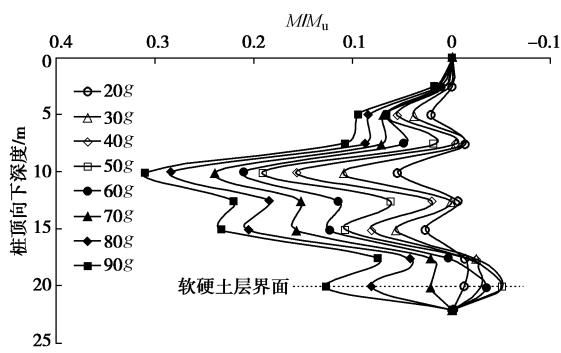


图 8 填筑过程中的#1 桩身弯矩

Fig. 8 Bending moments of pile No. 1 during filling process

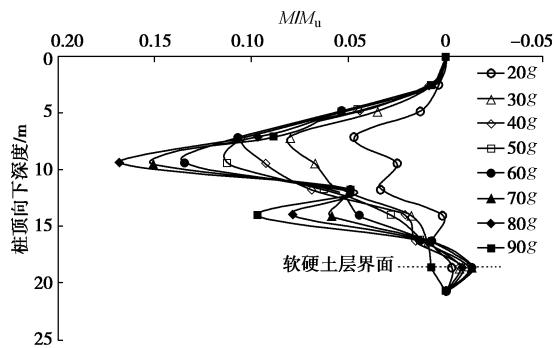


图 9 填筑过程中的#2 桩身弯矩

Fig. 9 Bending moments of pile No. 2 during filling process

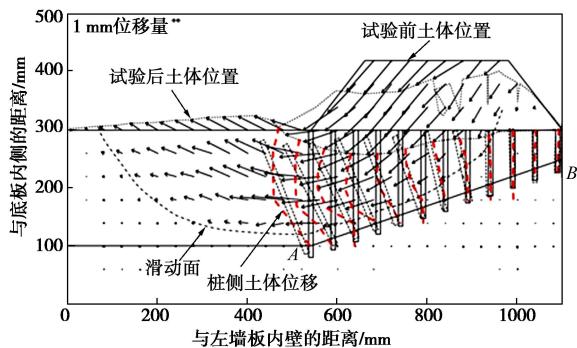


图 10 试验后的整体变形

Fig. 10 Deformation fields of tested M2

### 3.3 M3 试验结果分析

M3 模拟了在底面倾斜的桩顶有格梁联系的管桩复合软基上填筑路堤的过程, 桩端入硬土层 2 d。与 M1、M2 相比, 土体稳定性明显得到提高, 加载至 110g (填筑高度 13.2 m) 左右时路堤才出现裂缝和明显滑

动带; 继续加载至 120g (填筑高度 14.4 m) 并维持 5 min 后停止试验。

开挖暴露桩体和格梁显示各排桩均产生了轻微倾倒, 如图 11。桩顶最大水平位移 2.3 cm, 较 M2 有大幅减小。弯矩测试表明格梁联系有利于减小桩身弯矩, 但导致弯矩分布变得较为复杂。本文不做深入分析。

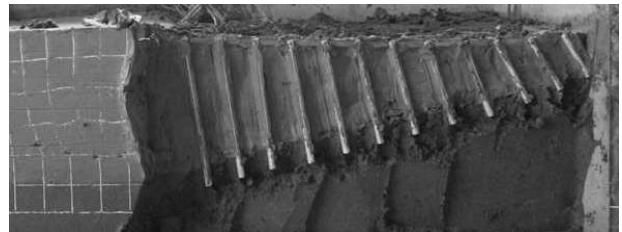


图 11 试验后的管桩

Fig. 11 Pipe piles of tested M3

试验后桩土位移情况及滑动面如图 12 所示。与 M1 和 M2 相比, M3 土体变形进一步减小, 说明加格梁联系的管桩复合地基能更加有效地提高路堤稳定性。软土沿倾斜下卧硬土层产生了明显滑动带。由于格梁的联系, 桩倾倒程度较小; 桩间土的绕流现象较 M2 更为严重, 特别是桩中段附近。因此, 采用顶部格梁联系的管桩复合地基时, 斜坡软基的破坏模式主要是沿倾斜底面下坡方向的桩间土绕流破坏。

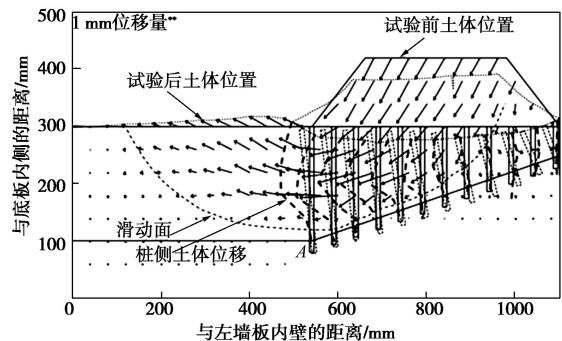


图 12 试验后的整体变形

Fig. 12 Deformation fields of tested M3

### 3.4 M4 试验结果分析

M4 模拟底面倾斜的管桩复合软基上填筑路堤的过程, 桩入硬土层 7 d。随着路堤填筑, 土体变形不断向下发展, 并出现明显滑动带。加速度加至 120g (填筑高度 14.4 m) 并维持 5 min 后停止试验。试验后开挖暴露桩体显示各排桩的倾倒程度均较小, 如图 13。

桩身弯矩测试结果分别如图 14, 15。桩身弯矩随着填筑过程增加, 最大负弯矩均分布在软硬土交界处; 相比 M2, 嵌入硬土层较深的桩发挥了更好的近于极限的锚固作用。同时, 弯矩反弯点随填筑过程不断下降, 表明软土下滑的影响不断加深。



图 13 试验后的管桩

Fig. 13 Pipe piles of tested M4

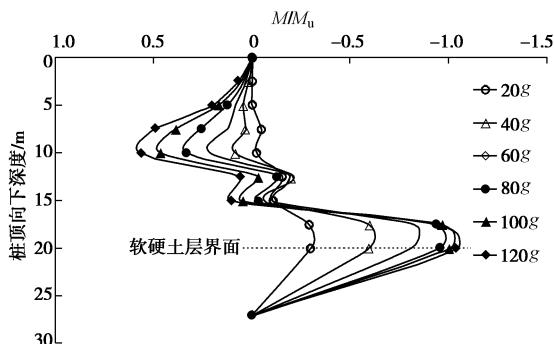


图 14 填筑过程中的#1 桩身弯矩

Fig. 14 Bending moments of pile No. 1 during filling process

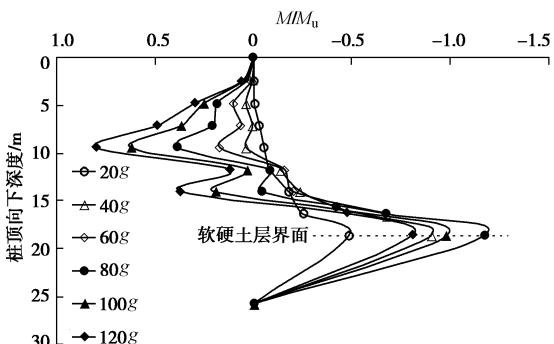


图 15 填筑过程中的#2 桩身弯矩

Fig. 15 Bending moments of pile No. 2 during filling process

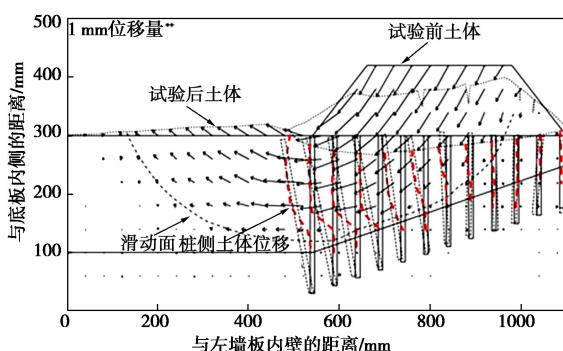


图 16 试验后的整体变形

Fig. 16 Deformation fields of tested M4

试验后的桩土位移及滑动面情况如图 16。对比 3 种复合地基的试验, M3 沉降值小于 M4, M4 沉降值小于 M2。说明加格梁联系管桩桩顶和增加管桩桩端入硬土层深度均能较好的控制路堤沉降, 提高稳定性; 而在沉降控制效果方面, 在桩顶加格梁的方法, 要优

于增加桩端入硬土层深度的方法。随着填筑过程, 软土沿下卧硬土层产生了明显呈折线形的滑动带。滑动带内的桩体发生了一定程度的倾覆。变形较大的下坡脚附近, 土体位移在桩顶小于而在桩中部大于桩体, 发生了一定程度的绕流。因此, 桩端入硬土层较深时, 斜坡软基管桩复合地基路堤易产生沿倾斜底面下坡方向的桩体的倾倒加桩间土绕流的破坏模式。

## 4 结 论

- (1) 当桩端嵌入硬土层较深时, 复合地基易发生下坡脚附近的桩体倾倒和桩间土绕流破坏。
- (2) 桩端嵌入硬土层较浅时, 复合地基易发生桩体向一侧的倾覆破坏, 并伴随一定的桩间土绕流破坏, 桩体倾覆程度显著大于桩端嵌入硬土层较深的情况。
- (3) 当加格梁联系管桩桩顶时, 复合地基易发生桩间土的绕流破坏。

## 参 考 文 献:

- [1] 魏永幸, 罗 强, 邱延峻. 斜坡软弱地基填方工程技术研究与探讨 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (WEI Yong-xing, LUO Qiang, QIU Yan-jun. Research and discussion on filling engineering techniques on sloped soft soil foundation[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 魏永幸. 基于填方工程的斜坡软弱地基及其成因[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(1): 56 - 63. (WEI Yong-xing. Embankment-based sloped soft soil foundation and its cause of formation[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2006, 17(1): 56 - 63. (in Chinese))
- [3] 黄炜旺. 山区复合地基路堤离心模型试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2015. (HUANG Wei-wang. Research on embankment stability on montane composite foundation by centrifugal model tests[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015. (in Chinese))
- [4] 朱维新. 土工离心模型试验研究状况[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 82 - 90. (ZHU Wei-xin. State of geotechnical centrifuge modeling test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1986, 8(2): 82 - 90. (in Chinese))
- [5] 章为民, 徐光明. 土石坝填筑过程的离心模拟方法[J]. 水力学报, 1997(2): 10 - 13. (ZHANG Wei-min, XU Guang-ming. Simulation method of earth and rockfill dam filling process with centrifuge[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(2): 10 - 13. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)