

文章编号: 1674—8247(2022)06—0001—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2022. 06. 001

饱和松软土刚性桩复合地基失稳变形特性研究

任华锋

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:刚性桩复合地基常用于深厚软土地区,其失稳变形特性是饱和松软土复合地基设计考虑的关键因素之一。本文通过室内离心模型试验和数值仿真,分析了柔性荷载作用下刚性桩复合地基的沉降、变形规律及基桩稳定性,试验结果表明:当桩间距由 3 m 增大到 6 m 时,路基中心沉降及坡脚外侧隆起量均超过 15 mm,地基变形系数达到 0.8,外侧刚性桩均出现断裂现象,复合地基发生失稳,建议桩间距控制在 4 m 以内。

关键词:饱和松软土;刚性桩复合地基;离心模型试验;数值仿真;失稳变形

中图分类号: U461.1 文献标识码: A

Study on the Instability and Deformation Characteristics of Rigid Pile Composite Foundation in Saturated Mollisol

REN Huafeng

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Rigid pile composite foundation is often used in deep soft soil areas, and its instability and deformation characteristics are one of the key factors in the design of composite foundations in saturated mollisol. This paper analyzes the settlement, the law of deformation, and pile stability of rigid pile composite foundations under flexible load through an indoor centrifugal model test and numerical simulation. The test results show that: when the pile spacing is increased from 3 m to 6 m, the settlement of the subgrade center and the uplift outside the slope toe exceed 15 mm, the deformation coefficient of the foundation reaches 0.8, with the outer rigid piles broken, and the composite foundation is unstable. It is recommended that the pile spacing be controlled within 4 m.

Key words: saturated mollisol; rigid pile composite foundation; centrifugal model test; numerical simulation; unstable deformation

刚性桩复合地基由刚性桩、桩间土和褥垫层构成,可有效调节刚性桩和桩间土的受力分担比,具有适用范围广、桩间土承载力发挥充分、地基承载力提高幅度大、地基变形小、施工质量易保证等特点,在处理高速铁路软土地基中得到了广泛的应用^[1-2]。长期以来,科研人员和工程技术人员针对刚性桩复合地基在路堤荷载作用下的沉降规律、承载力特性、桩土承

载比分担规律和荷载传递规律进行了大量的科学研究和工程实践,提出了许多减少路基沉降的措施^[3-6],但对刚性桩复合地基在柔性路堤荷载作用下路基失稳变形特性仍缺乏深入的认识。随着高速铁路的飞速发展,在软土地基上修建的高速铁路路基也越来越普遍,研究刚性桩复合地基在柔性路堤荷载作用下的失稳变形特性也显得尤为重要。

收稿日期: 2022-07-07

作者简介: 任华锋(1980-),男,高级工程师。

引文格式: 任华锋. 饱和松软土刚性桩复合地基失稳变形特性研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(6): 1-5.

REN Huafeng. Study on the Instability and Deformation Characteristics of Rigid Pile Composite Foundation in Saturated Mollisol[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 1-5.

岩土工程试验研究方法主要包括现场原位测试试验、小比尺室内模型试验和土工离心模型试验。现场原位测试试验可用来直接观察结构物的性状和岩土体的性质,但是采用该方法步骤繁杂,成本较高且周期长,现实中很少采用。小比尺室内模型试验相对来说操作方便,经济性较好且针对性较强,但是该方法不能合理地模拟重力荷载,试验结果在数值上与真实结构没有直接的联系。土工离心模型试验可由原型材料制作模型,在原型应力状态下直接观察结构物或土体的变形状态及其破坏过程,并可将试验结果在数值上与真实结构或土体建立直接的联系,该方法省时省力,被广泛用来验证或研究岩土力学的有关理论和解决岩土工程中的关键技术问题。

本试验采用粉质粘土制作软土,并取不同桩间距制作模型,根据土工离心模型试验并结合数值仿真,分析桩间距对复合地基的变形特性和基桩失稳模式的影响,进一步探索饱和松软土中刚性桩复合地基的适用性,以期为高速铁路地基处理提供指导。

1 离心模型试验设计

离心模型试验模拟对象为深厚软土地区双线铁路高路堤,地基上部软土层厚 8 m,路堤中心高 6 m,路基面宽 12 m,边坡坡度为 1:1.5;地基中刚性桩桩径 1 m,桩长 10 m,长方形布置并穿过软土层;路堤底部设 0.5 m 厚砂砾石垫层,中间夹一层双向抗拉强度为 80 kN/m 的土工格栅。离心模型试验典型断面如图 1 所示。

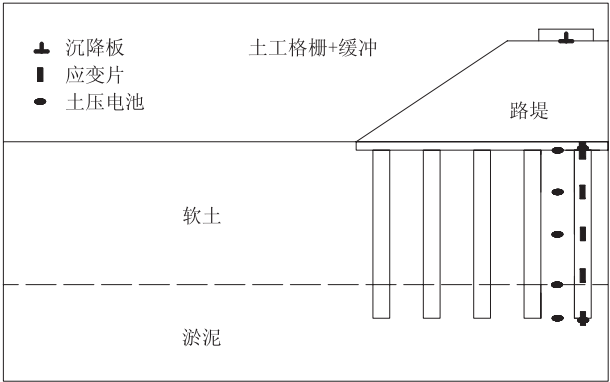


图 1 离心模型试验典型断面图

模型率 N 取 50,共进行 3 组试验,桩间距分别为 3 m、4 m 和 6 m。模型中地基土分为两层,上、下层分别为粉质粘土和粉砂;路基本体采用风化花岗岩填筑;刚性桩分为现浇桩和测试桩,采用适当配合比的水泥、粉煤灰以及碎石拌合而成;砂垫层采用标准

级配的石英砂代替;土工格栅近似采用抗拉强度为 1 738.33 N/m 的纱网模拟。路基顶面放置双线轨道重量与双线列车中活载换算土柱等宽度等质量的钢板,钢板的密度为 7.85 kg/m^3 ,钢板尺寸(宽 \times 高)为 65 mm \times 14 mm。

2 有限元数值仿真

2.1 模型建立

尽管离心模型试验是研究复合地基工作性状的有效的方法,但由于试验本身以及测试方法的限制,复合地基中坡体的刺入量等无法进行测定。因此,建立有限元分析模型不仅可弥补离心试验的不足,也可对离心试验的结果进行验证。

2.2 模型计算假定和参数选取

建立模型时,作如下假设:

- (1)假定桩间土、垫层、下卧层和路堤均为理想弹塑性体,假定桩体和土工格栅为线弹性体。
- (2)不考虑地基土体的固结,忽略地基土模量和泊松比在桩体、路堤填筑的施工过程中的变化。
- (3)除土工格栅外,所有材料均为各向同性均质实体,不考虑温度影响。
- (4)Mohr-Coulomb 模型的偏量偏心率取计算默认值。

数值仿真工况与离心模型试验相同,路堤填料及地基土的计算参数如表 1 所示。

表 1 岩土物理力学参数表

项目	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^3$)	粘聚力/ (c/kPa)	内摩擦角 φ ($^\circ$)	体积模数 K / MPa	剪切变形 模量 G / MPa
路堤	1.9	40	20	50	1.67
缓冲	2.1	0	38	33.3	20
软土	1.86	10	21	7.44	2.48
淤泥	1.85	12	15	7.17	1.54

刚性桩桩体的计算参数分别为:密度为 2.2 g/cm^3 ,弹性模量为 15 GPa,泊松比为 0.2。

根据路堤尺寸的大小,确定模型外界尺寸为 36 m \times 20.5 m \times 20 m;土体采用四节点实体模型,桩、褥垫层采用结构单元进行模拟;模型共有 14 448 个节点和 12 600 个单元,模型上表面为自由边界,两侧为水平约束,底部为横向和竖向约束,如图 2 所示。

2.3 模型计算方案

考虑到路基结构的对称性,选取半幅路基建立模型进行计算,对路堤和垫层沿线路纵向和对称面施加位移边界条件。

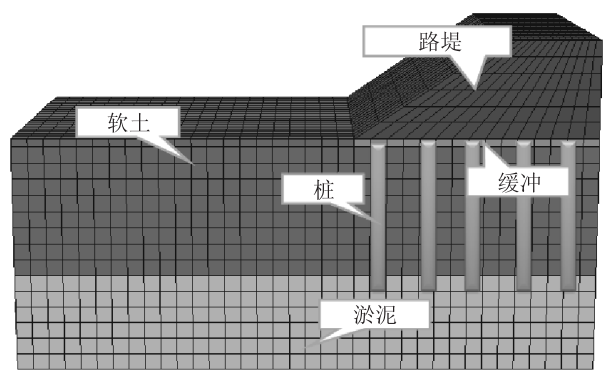


图2 刚性桩复合地基三维数值模型图

桩体、碎石垫层以及土工格栅采用生死单元模拟施工。路堤高度和分层填筑高度按实际情况考虑。在材料参数不变的情况下,通过改变复合地基的桩间距和桩径来模拟桩间距和桩径对复合地基工作性状的影响。

3 试验结果及分析

3.1 路基沉降变形

离心模型试验的地基表面沉降实测值与计算值分布如图3所示。路基面沉降最大值均发生在线路中心附近,桩间距为3 m、4 m和6 m时最大沉降值分别为15 mm、20 mm和26.6 mm,比数值计算结果稍大。在上部路堤荷载作用下地基土产生向外的挤出效应,导致坡脚外侧土体出现隆起,隆起量极值出现于坡脚外侧约180 mm处,桩间距为3 m、4 m和6 m时对应的极值分别为8.0 mm、9.2 mm与15.2 mm。

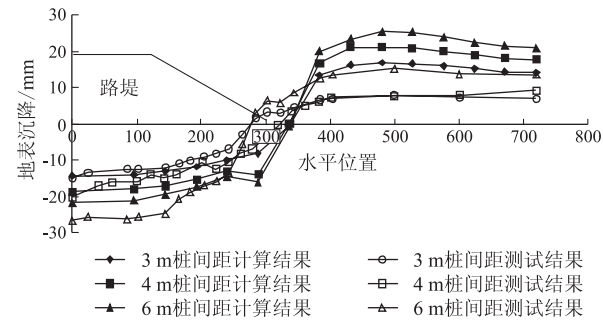


图3 离心模型试验结束后地表沉降计算和试验曲线图

试验结果表明,随着桩间距的增大,路堤中心附近最大沉降和坡脚附近隆起值均逐渐增大。桩间距由3 m增大到4 m时,坡脚外侧隆起量极值增大了15%;桩间距由4 m增大到6 m时则增大了67.8%。这是由于随着桩间距的增大,桩土置换率下降,当上部荷载作用时,桩间土“土拱效应”明显,导致桩间土承受的竖向荷载增大,进而导致地基沉降和坡脚外

侧隆起值明显增加。当桩间距增大到6 m时,此时路基中心地表沉降及坡脚外侧隆起最大值均超过了15 mm,此时复合地基的稳定性受到显著的影响。

路基中心地表沉降随路基填筑高度变化曲线如图4所示,计算结果与试验结果基本一致。桩间距的大小对刚性桩复合地基的稳定及沉降控制有较大的影响,综合考虑造价和处理效果,应将桩间距控制在4 m以内。本次分析基于在固定填方高度为6 m时不同桩间距的边坡变形情况,并未分析不同填方高度情况下复合地基的变形情况。

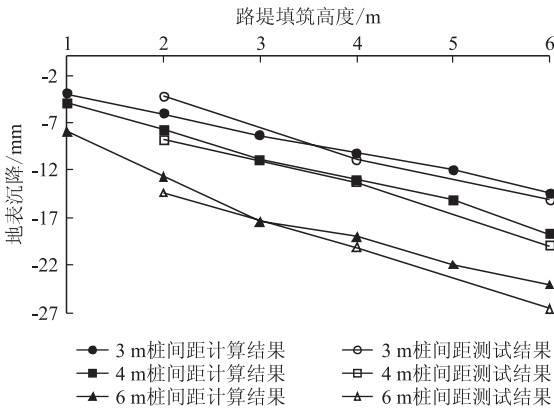


图4 路基中心地表沉降随路基填筑高度变化计算及试验曲线图

3.2 地基水平位移

路堤坡脚处水平位移的大小直接关系到复合地基的变形系数(评价地基的稳定程度),因此,研究刚性桩复合地基的稳定性时,坡脚处水平位移大小是主要技术指标。模型试验中坡脚处剖面水平位移分布曲线随路堤填筑过程变化情况如图5所示(以3 m桩间距为例)。

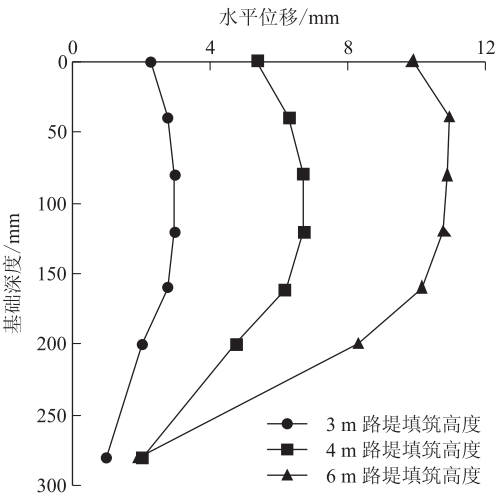


图5 坡脚处剖面随路堤填筑高度变化的水平位移计算典型曲线图

计算结果表明,随着地基深度的增加,水平变形先增大后减小,最大值出现在地基深度约 80 mm 处;在地基深度 200 mm 以下,地基水平位移已大大减小。地基的水平位移主要发生在刚性桩加固区,坡脚处水平位移最大值刚好在加固区中间深度范围内,形成“中间大两头小”的凸面,这主要是由于砂垫层、下卧层及刚性桩对加固区共同约束造成的。

路基填筑完成后,坡脚处的水平位移试验值与计算值对比曲线如图 6 所示,两者吻合良好。随着桩间距的增大,坡脚处的水平变形逐渐增大;桩间距为 3 m、4 m 和 6 m 时坡脚处水平位移分别为 12 mm、15 mm 与 22 mm;当桩间距由 3 m 增加到 6 m 时,地基的变形系数(坡脚处的水平位移与路堤中心处的沉降比值)由 0.663 增大到 0.8,增幅明显,刚性桩复合地基的稳定性有所降低。

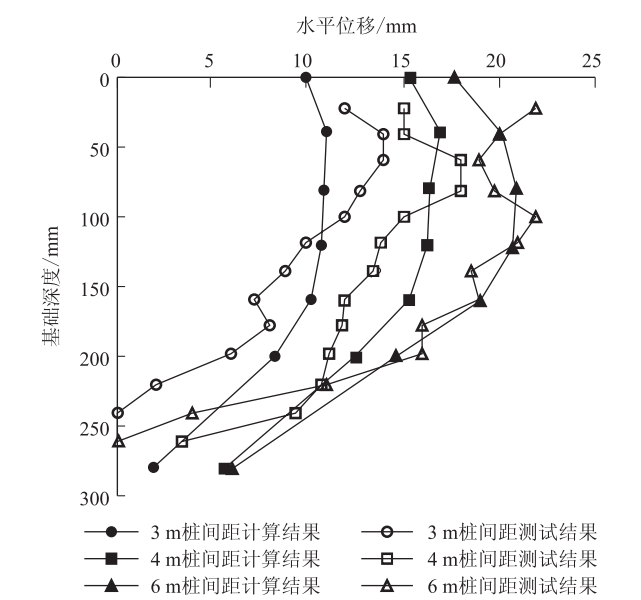


图6 地基坡脚剖面水平变形对比图

3.3 基桩的稳定性分析

随着桩间距的增大,基桩倾斜程度增大。3 m 桩间距模型断面 5 根基桩均比较完整,只有坡脚处基桩发生微小倾斜,倾斜角度在 5° 左右;4 m 桩间距模型断面坡脚处基桩在软土层与下卧层交界面的上方断裂成两半,上半部分已向外侧滑移了 2 mm 左右;3 m 桩间距模型断面靠近坡脚的 2 根基桩均在软土层和下卧层交界面的上方发生断裂,坡脚处基桩倾斜 20° 左右。

从试验结果可知,在路堤柔性荷载作用下,刚性桩复合地基的侧向变形使桩发生侧向倾斜,桩体的倾斜程度与桩间距和上部荷载有关。桩间距越大,桩的

倾斜程度越大;离坡脚越近,桩倾斜程度越明显;主要原因是随着桩间距的增加,地基土体在水平荷载作用下容易发生整体滑移,从而使桩体容易被剪断,部分断裂面与水平面成 45° 角。随着桩体被剪断,桩体承担的荷载大幅度降低,进而引起复合地基桩间土破坏,造成刚性桩复合地基的整体失稳变形。

从基桩剪坏的位置可以得出,桩体剪坏的位置一般位于软土层和下卧层交界面的上方 1~2 m 左右,随着桩体离路基中心距离的增大,断桩位置逐渐下移。这主要是由于上部土体在荷载作用下向外滑移挤出,上部土体的弹性模量小于下部土体的弹性模量,桩身剪应力增大,剪应力最大值出现在土层分界面附近,而此时桩身应变最大值也在土层分界面附近如图 7 所示,当最大值超过桩体抗剪强度时,桩基被剪断,此时刚性桩无法约束软土地基的侧向位移,造成复合地基整体失稳。

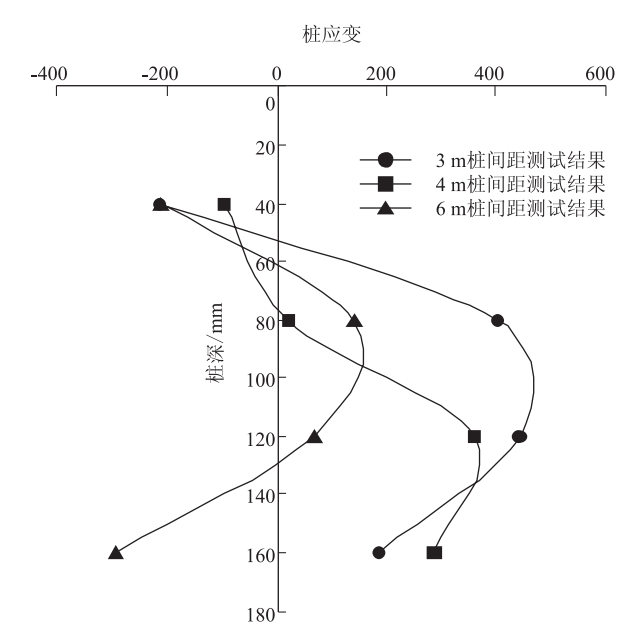


图7 路堤中心附近基桩桩身应变随桩间距变化试验曲线图

3.4 复合地基破坏模式

素混凝土桩复合地基破坏模式受多种因素影响,不仅与基础刚度、地基土强度和土层分布有关,还与复合地基的设计参数(包括桩体强度、桩间距、桩长)有关。试验中主要通过改变桩间距对复合地基的破坏模式进行了分析,在桩间距为 6 m 时,路基坡脚发生了局部剪切破坏。坡脚外侧土体出现明显外移现象,靠近坡脚处的路堤边坡出现较大裂缝,最外排桩具有明显的刺入现象;靠近坡脚最外排桩体向外倾斜最严重,第二排次之,其余桩体倾斜不明显;部分桩体

出现断桩,坡脚局部出现滑裂面,滑裂面切断最外排桩体,贯穿至路堤坡面。

4 结论

本文采用离心模型试验和数值模拟,探索了在不同桩间距下饱和松软土中刚性桩复合地基的沉降变形规律、水平位移特性以及基桩的稳定性,得出以下结论:

(1) 不同桩间距对路基沉降有较大的影响,桩间距越小,路基表面沉降越小;当桩间距增大到6 m时,线路中心沉降及坡脚隆起值均超过了15 mm,此时复合地基稳定性受到较大影响,应将桩间距控制在4 m以内。

(2) 随着深度的增加,土体侧向位移先增大后减小,最大侧向位移发生在软土加固区的中间深度范围内,主要由于垫层、下卧层及桩体共同作用造成的。不同桩间距对坡脚处的水平位移影响较大,桩间距越大,复合地基整体稳定系数越小。

(3) 随着桩间距的增大,基桩稳定性越差,坡脚处的基桩容易发生倾斜和断桩。基桩断裂的位置在软土层和下卧层交界面附近,主要原因是下卧层模量比软土层模量大,基桩在交界面附近受到的剪应力突然增大,进而导致基桩断裂,复合地基形成局部剪切破坏模式。

参考文献:

[1] 郑俊杰,彭小荣. 桩土共同作用设计理论研究[J]. 岩土力学,

2003, 24(2): 242–245.

ZHENG Junjie, PENG Xiaorong. Study on Design Theory of Pile-Soil Cooperative Work [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 242–245.

[2] 徐至钧,王曙光. 水泥粉煤灰碎石桩复合地基[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

XU Zhijun, WANG Shuguang. Cement Fly Ash Gravel Pile Composite Foundation [M]. Beijing: Machinery Press, 2004.

[3] 王炳龙,宫全美. CFG桩复合地基设计参数对地基沉降影响的数值分析[J]. 铁道建筑, 2009, 49(7): 24–26.

WANG Binglong, GONG Quanmei. Numerical Analysis of the Influence of Design Parameters of CFG Pile Composite Foundation on Foundation Settlement [J]. Railway Engineering, 2009, 49(7): 24–26.

[4] 丁桂伶,王连俊,刘升传,等. 刚性和柔性载荷试验中高速铁路CFG桩复合地基沉降变形特性对比分析[J]. 铁道标准设计, 2008, 52(5): 1–3.

DING Guiling, WANG Lianjun, LIU Shengchuan, et al. Comparative Analysis of Settlement and Deformation Characteristics of CFG Pile Composite Foundation of High-speed Railway in the Rigid and Flexible Load test [J]. Railway Standard Design, 2008, 52(5): 1–3.

[5] 刘吉福. 路堤下复合地基桩、土应力比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 674–677.

LIU Jifu. Analysis on Pile-Soil Stress Ratio for Composite Ground under Embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 674–677.

[6] 刘杰,张可能. 柔性基础下群桩复合地基荷载传递规律及计算[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 178–182.

LIU Jie, ZHANG Keneng. Load Transfer Law and Deformation of the Pile Group Composite Foundation under the Flexible Foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 178–182.