

# 碎石桩-水平垫层联合法处理软土路基的 数值仿真分析

秦兴锋, 史冠宇

(江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000)

**摘要:** 软土具有透水性差、强度低、压缩性高等缺点, 在软土上修建道路易发生沉陷、坍塌等问题。依托江苏省某软土地区道路修建工程背景, 采用有限元软件Plaxis2d建立路堤模型, 模拟了软土路堤填筑过程, 分析了经碎石桩-水平垫层联合法加固后的地表沉降以及地基承载力规律, 评估了碎石桩-水平垫层联合法的加固效果。研究表明, 经碎石桩-水平垫层联合法加固后的地基承载力较天然地基提升了近4倍, 可到316.85kPa; 受非均布堆载影响, 路堤填筑过程中会产生不均匀沉降, 且碎石桩桩身会发生鼓胀变形。加设水平垫层后, 地表最大不均匀沉降以及桩身最大鼓胀分别减小了17.1%和16.9%, 说明加设水平垫层对地表沉降和桩身位移限制作用显著。

**关键词:** 软土地基; 碎石桩-水平垫层; 地基承载力; 地表沉降; 数值仿真

中图分类号: TV553 文献标识码: A 文章编号: 1007-7839(2024)09-0064-0005

## Numerical simulation analysis of the combined method of gravel pile and horizontal cushion layer for treating soft soil subgrade

QIN Xingfeng, SHI Guanyu

(Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

**Abstract:** Soft soil has the disadvantages of poor permeability, low strength, and high compressibility. Modifying roads on soft soil is prone to problems such as settlement and collapse. Therefore, based on the background of a road construction project in a soft soil area of Jiangsu Province, the finite element software Plaxis2d is used to establish an embankment model, the filling process of soft soil embankments is simulated, the surface settlement and subgrade bearing capacity after reinforcement by the combined method of gravel piles and horizontal cushion layers are analyzed, the reinforcement effect of the combined method of gravel piles and horizontal cushion layers is evaluated. Research has shown that the bearing capacity of the subgrade reinforced by the combined method of gravel pile and horizontal cushion layer is nearly 4 times higher than that of natural subgrade, reaching 316.85kPa; Due to the influence of non-uniform stacking load, uneven settlement will occur during the embankment filling process, and the gravel pile body will experience bulging deformation. After adding a horizontal cushion layer, the maximum uneven settlement on the surface and the maximum swelling of the pile body decreased by about 17.1% and 16.9%, respectively, indicating that the addition of a horizontal cushion layer has a significant effect on limiting surface settlement and pile displacement.

**Key words:** soft soil subgrade; gravel pile-horizontal cushion layer; subgrade bearing capacity; surface subsidence; numerical simulation

收稿日期: 2027-05-07

作者简介: 秦兴锋(1992—), 男, 工程师, 本科, 主要从事水利工程施工工作。E-mail: caibofe10@163.com

我国软土面积分布广泛,尤其是在东南部沿海经济带,城市经济的飞快发展对基础设施的建设需求极大,因此不可避免地要在这些软基上修建各类大型建筑设施,这对施工技术提出了较高要求<sup>[1-2]</sup>。

软基加固是土木工程中一项重要的前期处理工作,它对于确保建设项目的成功和延长其使用寿命具有决定性影响。徐红日等<sup>[3]</sup>以深圳宝安机场扩建工程深厚软土段为例,通过有限元分析了真空预压排水固结法联合水泥搅拌桩法作为该区段的软土地基处理方案的合理性;徐昌兴<sup>[4]</sup>针对滨海地区软土工程力学性差,孔隙比大,渗透性低,扰动易蠕动,地基处理和桩基选型复杂等问题,以印尼某电厂深厚软土为例,提出了适合电厂各区域地基处理的方案;易耀林等<sup>[5]</sup>结合某高速公路软土地基处理工程,对比分析了钉形搅拌桩和常规搅拌桩的桩身质量、复合地基承载力、地表沉降和水平位移,发现在填土高度相近的情况下,钉形搅拌桩复合地基路中心地表沉降和坡角处深层水平位移远小于常规搅拌桩复合地基;缪婷婷等<sup>[6]</sup>通过软土地区的工程试桩试验发现异型复合桩的破坏模式以桩周土破坏为主,内外芯之间破坏承载力远大于桩周土破坏承载力,同时异型复合桩单桩竖向抗压极限承载力高于同等条件下的异型管桩及钻孔灌注桩;严超群等<sup>[7]</sup>通过载荷试验,动力触探试验等原位试验对砂砾桩加固软基效果进行了检验,结果表明砂砾桩对软土地基的加固作用效果明显,可以达到提高地基承载能力,减小地基变形的目的。

本文以江苏省某软土地区道路修建工程为背景,采用有限元软件Plaxis2d研究了采用碎石桩协同水平垫层加固后的软基在道路堆填过程中的响应行为,并探讨了路基沉降和桩身变形机理,以期在实际工程中施工优化提供参考。

## 1 工程背景

本文以江苏省某道路施工为工程背景,经勘察,研究区位于长江中下游软土区,属于平原地貌,相对高差在0~30 m之间。根据工程地质钻孔揭露,研究区场地自地面以下各岩土层分布情况如下:

①泥质土:深灰色,软塑,主要由河流环境沉积而成的软土,大多数为粉质黏土和黏质粉土,含各种有机质和贝壳,平均埋深约5.5 m。

②泥岩:灰、灰黑色至红褐色,间隐结构,气孔状构造,柱状节理发育,岩体破碎,其裂隙间由细颗粒化物质充填,平均埋深大于3.0 m。

该路堤拟采用附近基坑开挖产生的工程渣土进行堆填建造,待填渣土以粉质黏土为主,路堤分3层进行填筑,每层厚度2 m。根据场地岩土层条件,路基采用碎石桩和土工格室砂垫层进行加固处理,其中碎石桩桩径0.85 m,桩间距2.0 m,桩长6.5 m,按梅花形方式布桩,桩土置换率为0.13。桩顶铺设0.8 m厚的土工格室砂垫层。

## 2 数值模型及参数取值

### 2.1 分析方法及模型

采用有限元分析软件进行碎石桩协同水平垫层加固后的软土路基在路堤填筑过程中的响应行为分析。土体、桩体及水平加筋体均采用15节点平面应变单元进行模拟,各材料的本构模型均选用Mohr-Coulomb理想弹塑性模型。

在模拟土工格室砂垫层的力学行为时,采取将土工格室及其内部填料整合为一个复合材料体的建模方式来优化模拟过程,此方法不仅准确地重现了土工格室加筋土的力学特性和变形行为,同时也简化了建模步骤,并有效减少了土工复合材料与土颗粒间的接触程度,从而提高了模型的精度。此外,模型采用了标准边界条件,包括对路堤周围水平位移自由度的限制,以及对模型底部水平和垂直自由度的约束。同时,路基表面被设置为渗透边界,而模型的侧面和底部则设置为不透水边界。建立的有限元分析模型如图1所示,共划分6 450个15节点三角形单元。

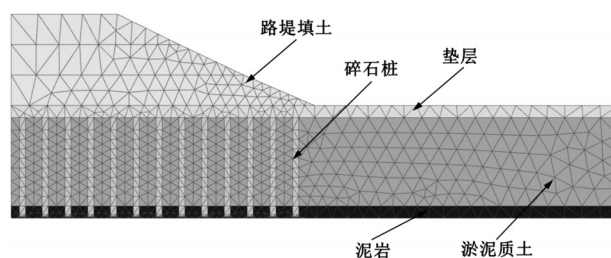


图1 有限元模型

### 2.2 参数取值

根据研究区场地工程地质勘察取样及室内试验测试结果,各材料参数取值如表1所示。

## 3 结果分析

### 3.1 地基极限承载力分析

分别根据式(1)<sup>[8]</sup>及式(2)<sup>[9]</sup>计算路基中心处桩体的单桩极限承载力及加固后的地基极限承载力。

表1 材料模型本构参数

参数	干重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	饱和重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	界面强度 折减因子
路堤填土	15.3	16.1	2.3×10 <sup>4</sup>	0.20	14.3	25.3	0.60
水平垫层	18.2	20.3	2.5×10 <sup>4</sup>	0.20	0.0	35.2	0.60
淤泥质土	12.7	14.8	2.2×10 <sup>4</sup>	0.25	15.1	16.3	0.55
泥岩	18.9	21.1	3.0×10 <sup>4</sup>	0.20	3.4	35.4	0.55
碎石桩	16.2	19.6	5.3×10 <sup>4</sup>	0.20	0.0	45.6	0.55

$$P_{pf} = \left[ \frac{1}{h_0} \int_0^{h_0} (\gamma z K_p + 2c \sqrt{K_p}) dz + \frac{T}{R} \right] \tan^2 \left( 45^\circ + \varphi_p / 2 \right) \quad (1)$$

式中:  $P_{pf}$  为单桩极限承载力;  $h_0$  为碎石桩桩体的鼓胀变形段长度;  $R$  为碎石桩 0.5 倍桩径;  $\varphi_p$ 、 $\gamma$ 、 $c$ 、 $\varphi_s$  分别为碎石桩桩体材料内摩擦角、土体饱和容重、土体黏聚力和内摩擦角;  $z$  为计算深度;  $K_p$  为被动土压力系数, 取值参考《复合地基理论及工程应用》<sup>[10]</sup>。

$$P_{cf} = k_1 \lambda_1 m P_{pf} + k_2 \lambda_2 (1 - m) P_{sf} \quad (2)$$

式中:  $P_{sf}$  为桩间土极限承载力;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为修正系数, 具体含义及取值参考《复合地基理论及工程应用》<sup>[10]</sup>;  $m$  为桩土置换率。

根据式(1)计算得到碎石桩的单桩极限承载力  $P_{pf}$  为 756.3 kPa。带入式(2)计算得到经碎石桩及水平垫层加固后的路基极限承载力  $P_{cf}$  为 316.85 kPa, 较天然地基极限承载力提高了约 4 倍。

### 3.2 地表不均匀沉降分析

路堤填筑过程中路基表面的不均匀沉降变化趋势见图 2~3, 计算结果显示, 路基中心处的沉降最大, 自中心处往两侧逐渐减小。若在填筑之前未铺设水平垫层, 路堤填筑完成后, 路基表面的不均匀沉降较大, 填筑第一层、第二层、第三层时路基中心与路基边缘的最大沉降差分别为 0.12、0.27、0.41 m; 若在填筑之前加设水平垫层, 3 层填筑后的最大沉降差分别减少到 0.10、0.23、0.35 m, 降低幅度分别为 18.1%、15.4% 及 16.2%。可见, 土工格室水平砂垫层的存在使得路基表面的不均匀沉降有所降低, 这主要是因为土工格室可与填入其内的填料构成结构体, 组成具有一定抗弯、抗剪和抗压能力的柔性筏板基础, 通过其较坚硬和均匀的材料特性, 能够在较大的面积上分散来自路堤填筑过程中的荷载, 使上部荷载向下传递并由桩体与土体共同承担, 可以解决路堤填筑过程中的不均匀沉降。此外, 因土工格室为多孔状结构, 具有良好的排水性能, 可以控

制水分在土层中的分布, 防止因水分过多或不均匀而导致的土壤膨胀或压缩, 同时加速土体的固结, 使得其快速达到稳定状态。

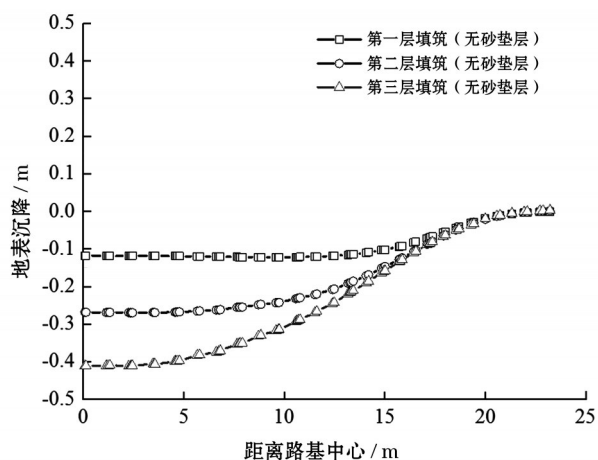


图2 路堤填筑过程中路基表面不均匀沉降(无水平垫层)

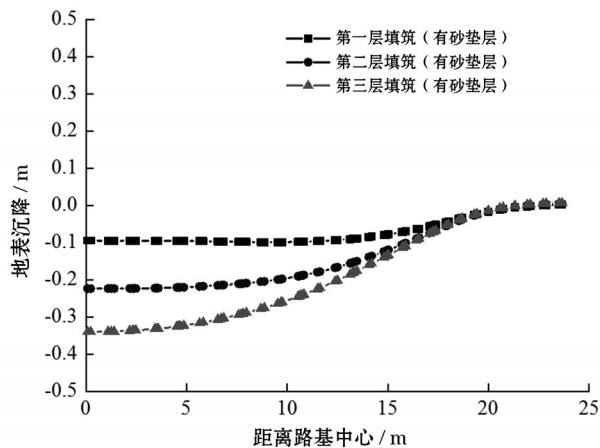


图3 路堤填筑过程中路基表面不均匀沉降(有水平垫层)

### 3.3 桩身侧向位移分析

路堤填筑过程中中心桩的桩侧位移变化趋势见图 4~5。从图 4~5 可以看到, 随着上部荷载的增加, 碎石桩出现明显的鼓胀趋势, 填筑层数越大, 鼓



胀越明显,当填筑第一层和第二层时,桩身最大鼓胀变形出现在桩顶以下两倍桩径处,当填筑第三层时,最大鼓胀出现在桩端处。这主要是因为当碎石桩承受持续或变化的荷载时,桩内部的应力会重新分配,初期桩顶部可能会先出现鼓胀现象,随着时间的推移,随着荷载的持续作用和应力的调整,鼓胀位置可能会向下移动到桩身的底部位置;此外周围土壤的支撑条件不均匀也可能引起碎石桩鼓胀位置的下移,尤其上部土层较硬而底部土层较软的情况下,底部土层在承受桩身压力时可能发生较大变形,导致桩身鼓胀位置向下移动。

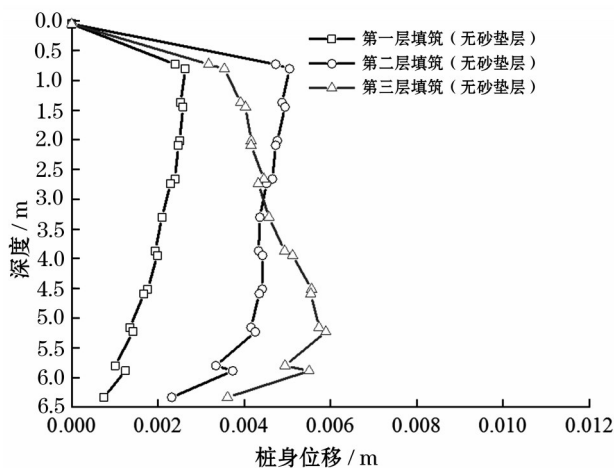


图4 路堤填筑过程中中心桩侧向变形(无水平垫层)

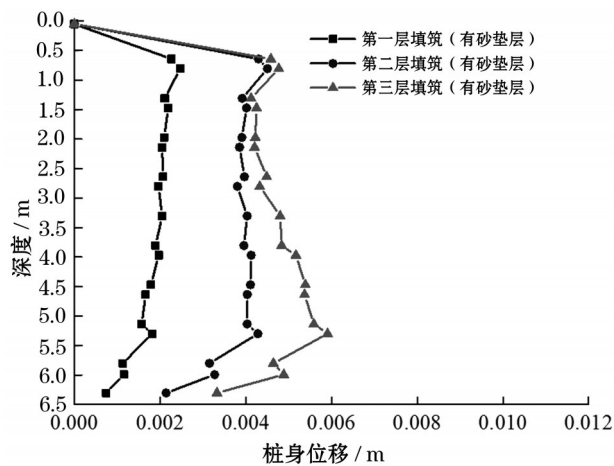


图5 路堤填筑过程中中心桩侧向变形(有水平垫层)

若不考虑水平垫层,填筑第一层、第二层、第三层时碎石桩的最大鼓胀变形分别为0.26、0.51、0.59 cm,加设水平垫层后最大鼓胀变形分别减小0.22、0.43、0.49 cm,降低幅度分别约为15.4%、15.7%及16.9%。可见,水平垫层的存在可以减小桩身变形,提高路基稳定性。主要是因为水平垫层减

少了直接作用在碎石桩顶部的局部荷载,从而降低了桩身区域的压力,减轻了桩体的鼓胀程度。同时水平垫层通过其材料和结构特性,增加了整个地基的刚性和稳定性,这种增加的刚性有助于抵抗因土壤不均匀沉降或桩身变形引起的不稳定性。此外,水平垫层通常具有良好的排水性能,能够有效地控制桩周围土壤的水分条件,减少由于土壤湿度变化引起的体积变化,从而降低因土壤膨胀或收缩导致的碎石桩鼓胀。

#### 4 碎石桩和水平垫层协同作用机理讨论

碎石桩和水平垫层协同作用在提升地基性能方面有着明显的效果,这种结合利用了两者的优势,形成了一种有效的加固机理,主要包括以下几个方面:

(1)荷载分散效应。如图6所示,水平垫层作为一层均匀、刚性较强的材料层,可以有效地分散上部结构传递下来的荷载。通过这种方式,荷载被更广泛地分布到下面的碎石桩上,从而减少了单个碎石桩上的压力,增强了整体的承载能力。

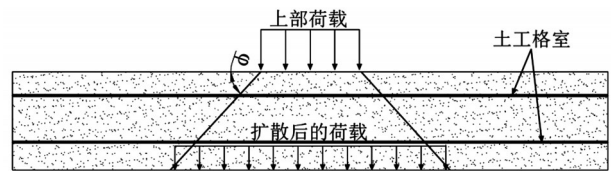


图6 水平垫层应力扩散示意

(2)改善应力传递路径。如图7所示,碎石桩作为一种深层地基加固方法,能够将荷载直接传递到较深的承载层。与水平垫层结合使用时,水平垫层有助于将荷载更均匀地分配到各个碎石桩上,优化了应力的传递路径,使得深层土壤更有效地参与承载,提高了地基的整体稳定性。

(3)增强地基整体刚性和稳定性。碎石桩通过其粗粒结构在土中形成加固体,与周围土壤形成摩擦和咬合,增强土体的整体结构强度。而水平垫层则通过其平面内的刚性提供一个坚实的压实层,这不仅增加了整体地基的刚性,还提高了地基对不均匀沉降的抵抗力。

(4)改善排水性能。碎石桩本身具有良好的排水性,能够促进地基内部水分的垂流流动。水平垫层的设置,尤其是在使用排水性良好的材料时,可以进一步改善地基的水平排水,减少水对土壤的剪切强度降低和其他不利影响。

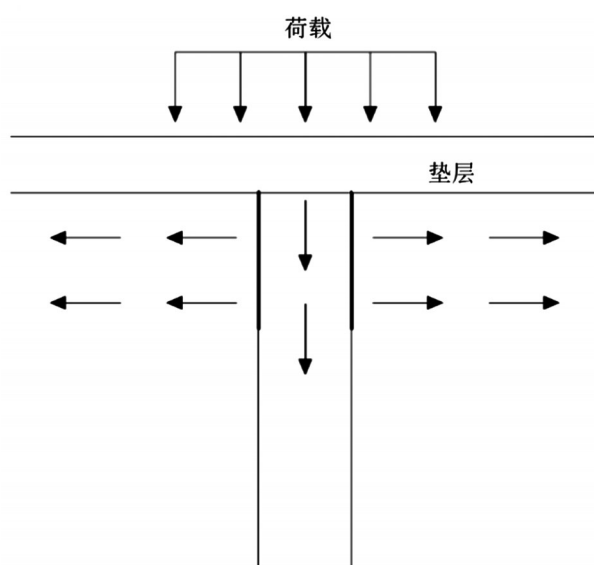


图7 碎石桩荷载传递路径示意

## 5 结 论

本研究以江苏省某软土地区道路修建工程为研究对象,对采用碎石桩协同水平垫层加固后的软基在道路堆填过程中的响应行为进行了分析,得出以下结论:

(1)采用碎石桩协同水平垫层对软土路基进行加固,加固后的路基极限承载力可达316.85 kPa,较天然地基极限承载力提高了约4倍。

(2)受非均布堆载影响,路堤填筑过程中会产生不均匀沉降,中心处沉降最大,自中心往两侧递

减,加设水平垫层可使最大沉降差降低约15%~17%。

(3)上部荷载作用下,碎石桩桩身会发生鼓胀变形,鼓胀位置受荷载大小、土体强度等因素影响;水平垫层的存在可降低桩身变形16%左右。

### 参考文献:

- [1] 龚逸,王良民. 基于案例的真空堆载联合预压法对软土路基加固效果分析研究[J]. 土工基础,2023,37(5): 703-706,711.
  - [2] 王永松. 数值模拟方法在软土路基沉降因素分析中的应用[J]. 土工基础,2020,34(5):580-582.
  - [3] 徐红日,杨阳,吴文栋,等. 下卧隧道区段机场软土地基处理方案研究[J]. 科技通报,2022,38(3):85-89.
  - [4] 徐昌兴. 滨海电厂深厚软土地基处理及桩基选型[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(S1):279-282.
  - [5] 易耀林,刘松玉,朱志铎. 钉形搅拌桩在高速公路软土地基处理中的应用[J]. 常州工学院学报,2008,21(S1): 19-22,36.
  - [6] 缪婷婷,陈赞,齐金良,等. 异型复合桩在软土地基处理中的应用[J]. 建筑结构,2023,53(S1):2755-2758.
  - [7] 严超群,雷叶,张齐. 挤密砂砾桩在公路软土地基处理中的应用[J]. 杨凌职业技术学院学报,2008(3):51-53.
  - [8] 赵明华,陈庆,张玲,等. 加筋碎石桩承载力计算[J]. 公路交通科技,2011,28(8):7-12.
  - [9] 杨宇. 双向增强体复合地基承载性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2006.
  - [10] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- 
- (上接第63页)
- 率暗管排水系统布局[J]. 农业工程学报,2017,33(12): 122-129.
  - [2] 耿其明,闫慧慧,杨金泽,等. 明沟与暗管排水工程对盐碱地开发的土壤改良效果评价[J]. 土壤通报,2019,50(3):617-624.
  - [3] 谭攀,王士超,付同刚,等. 我国暗管排水技术发展历史、现状与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(4):633-639.
  - [4] 杜春雪,徐超,彭善涛. 土工织物反滤作用研究进展[J]. 长江科学院院报,2022,39(2):108-114.
  - [5] DÜST R, BUCHER F, SCHAERER C. Permeameter for investigating the hydraulic characteristics of fleotextiles [J]. Materiaux et Construction. 1981,7(14):319-324.
  - [6] STUYT L, DIERICHX W, BELTRAN J M. Materials for subsurface land drainage systems[J]. FAO Irrigation and Drainage Paper,2005,60(1):5-19.
  - [7] 刘文龙,罗纨,贾忠华,等. 黄河三角洲暗管排水土工布外包滤料的试验研究[J]. 农业工程学报,2013,29(18): 109-116.
  - [8] 荣臻,王少丽,郝瑞霞,等. 宁夏银北灌区排水暗管土工布外包料透水与防淤堵性能[J]. 农业工程学报,2021,37(8):68-75.
  - [9] NIEUWENHUIS G, WESSELING J. Effect of perforation and filter material on entrance resistance and effective diameter of plastic drain pipes [J]. Agricultural Water Management, 1979,2(1):1-9.
  - [10] 胡玲玲,杨树青,梁志航,等. 河套灌区下游排水暗管外包料筛选试验研究[J]. 灌溉排水学报,2022,41(4): 141-148.
  - [11] 鲍子云,全炳伟,张占明. 宁夏引黄灌区暗管排水工程外包料应用效果分析[J]. 灌溉排水学报,2007(5):47-50.