

全尾砂膏体约束式碎石桩复合地基数值模拟

张培君 梁 涛

西南交通大学 四川成都 611756

摘 要:目前,碎石桩由于其出色的振实、挤密、置换和排水特性而被广泛用于软土地基的处理。然而,由于桩芯碎石填充物的粘结力不足,当桩周围的土壤强度不高且无法提供充分的限制时,传统的碎石桩很容易在桩顶部位发生变形和损坏。针对这一局限性,本文提出一种新型约束式碎石桩复合地基,通过使用全尾砂膏体换填桩周土并用土工布包裹固定使得碎石桩可以发挥出其最大的性能。尾砂是矿山开采过程中产生的废弃物,污染环境,处理起来十分占用土地资源。但通过一定的工艺结合水泥、废石、化学添加剂等产出的全尾砂膏体是环保无害的,并且不分层,强度高,十分适合作为填充材料。使用有限元分析软件 ABAQUS 模拟对比新型约束式碎石桩复合地基与普通碎石桩复合地基加固软弱地层的效果,印证全尾砂膏体约束式碎石桩复合地基的优良性能。

关键词:碎石桩;软土地基;有限元分析

1. 研究背景及意义

自新中国成立以来,中国经济一直保持着蓬勃发展的态势。随着经济的快速增长,我国在交通运输领域取得了全球范围内令人瞩目的成绩。基础设施建设方面,已拥有全世界最发达的公路网和铁路网,为人们的出行带来了便利。交通技术方面不断创新,高速列车、磁悬浮列车、智能交通系统等技术已经达到世界先进水平。同时中国的航空和海运服务覆盖全球,中国高铁、中国路、中国桥、中国港和中国快递已经成为展现我国实力的标志,为我国的国际贸易和对外交流提供了坚实的支撑。在今后,我国的交通建设仍会不断推进与完善。但工程建设的背后是许许多多需要去解决的难题。例如在公路建设过程中,会遇到各种不同的地质情况,其中软土地基是最为常见的问题之一。软土是一种由黏土、粉质土、泥炭等有机物质组成的土壤,它的含水量高、强度低、可压缩性高且透水性低。这种土质在交通建设中可能会带来一些挑战,如地基不稳、沉降不均等问题,因此需要进行特殊处理和加固,以保证交通设施的安全和稳定。目前常见的处理软土地基的方法包括:1. 置换处理法:是指采用强度高、性能稳定和抗侵蚀特性的材料替换软土。2. 排水固结法:设置排水通道,增加地基强度并减少不均匀变形的一种方法。3. 密实法:采用碾压、夯实、振动或挤压等手段使天然软弱土层变得紧密而提高其压缩性能和承载能力的一种方法。4. 复合地基法:在原有地基基础上通过换土或设置加筋材料建造人工地基的一种处理办法。其中碎石桩由于其出色的振实、挤密、置换和排水特性被广泛用于淤泥、海堤等软弱地层的处理。加之碎石易于就地、就近取材,施工过程对环境相对友好,与新时期国家可持续发展战

略和“双碳”战略高度契合。近年来在软土地基处理中被广泛选用。常见的碎石桩施工方法有强夯置换法;沉管法;振冲法等。这些施工方法可根据工程需要进行选择。但碎石桩也存在一些缺陷,它作为一种散体材料桩,其桩芯碎石填料本身缺乏粘聚力,若桩周土强度较低则可能导致侧向压力无法约束桩体在承载变形过程中所产生的变形,使得碎石桩无法发挥应有的作用。针对碎石桩这一局限性,本文提出一种采用全尾砂膏体换填桩周土并用土工布在膏体外围进行包裹固定的新型约束式碎石桩。尾砂是矿山开采过程中产生的一种废弃物,污染环境,处理起来占用大量土地资源。但通过一定的工艺处理可以形成全尾砂膏体。该工艺以废尾砂为原料,辅以水泥、废石、化学添加剂等,产出的膏体环保绿色。该填料具有泌水性好、不易离析、形成充填体强度高显著优点,非常适合替换桩周土。

2. 数值模拟

2.1 有限元分析与计算软件

有限元分析是一种强大的数学工具,被广泛应用于各种工程领域。它通过将复杂的真实物理系统分解为许多小的、互相关联的部分(有限元),并对每个部分进行数学建模,以获得整体系统的近似解。这种方法允许我们处理形状复杂、边界条件多样的系统,同时保持高计算精度。本文将采用 ABAQUS 有限元计算软件。ABAQUS 是岩土工程领域使用最多的有限元计算软件,其提供了多种本构模型、有效应力计算等功能,使得工程师能够准确地模拟和分析各种复杂的边界条件和荷载条件等。通过 ABAQUS 的数值模拟,我们能够获得与实际情况高度一致的结果,从而为工程设计和优化提供可

靠的依据。在国际上, ABAQUS 的数值模拟和分析结果已被广泛接受, 成为工程领域中的重要参考工具。

2.2 设计思路

探究两种地基模型在相同荷载条件下沿竖向和侧向的土体位移大小: 模型一: 普通碎石桩复合地基; 模型二: 全尾砂膏体约束式碎石桩复合地基。最后比较两种模型的土体最大竖向位移与土体最大侧向位移从而判断全尾砂膏体约束式碎石桩复合地基对软弱地层的改良效果。

2.3 材料的建模与材料属性的定义

结合工程实例以及现场勘测资料对模型进行简化。模型一: 土体长宽均为 6 m, 深度为 10 m, 分为上、中、下三层, 依次为上层的垫层, 厚度为 0.2 m; 中层的粉质黏土, 厚度为 8.8 m; 下层的坚硬土层, 厚度为 1 m。将一根直径 0.8m, 长 8.8m 的碎石桩放置于粉质粘土层正中。模型二: 土体模型和碎石桩模型与模型一相同, 在桩外包裹一层厚 0.4m 的全尾砂膏体再附加一层厚 0.01m 的土工布进行固定。结合勘测资料以及相关文献, 对材料的属性进行定义如表 1。将填土简化为 100kpa 的力均匀分布在褥垫层上, 各层土体、碎石桩以及全尾砂膏体采用摩尔-库伦模型。

表 1 材料属性

	质量密度 (kg/m ³)	弹性模量 (Mpa)	泊松比	粘聚力 (Kpa)	内摩擦角 (°)	膨胀角 (°)
粉质粘土	1857	15	0.35	20	9.6	0.1
坚硬土层	1887	25	0.3	38.9	35.6	0.1
褥垫层	1549	50	0.3	1	38	0.1
碎石桩	1350	50	0.25	2	45	0.1
全尾砂膏体	2090	652	0.26	1100	36	0.1
土工布	1224	65	0.3	无	无	无

2.4 分析步的设置

首先是地应力平衡 (GEO) 分析步的设置, 通常我们可以认为若软土的竖向最大位移小于 1.0×10^{-5} 单位长度则可以认定地应力平衡。本模型土体竖向位移的最大值小于 1.0×10^{-15} , 平衡良好。为模拟施工方法, 建立两个分析步, 采用“生死单元法”模拟碎石桩的填充和回填垫层以及回填土。第一步, 先将垫层“消灭”, 对施工土体的地应力平衡。第二步, 将土体钻孔, 并回填垫层和简化为 0.1MPa 的上部填土。

2.5 施工过程的模拟

(1): 在地应力平衡分析步中“消灭”已经装配好的碎石桩、垫层、简化的回填土。将待施工土体进行地应力平衡。

(2): 在静力通用分析步中, “消灭”待钻孔去除的那部分土体, 将碎石桩“复活”, 再将垫层“复活”, 在垫层顶面施加 0.1MPa 压强以表示回填土。

2.6 荷载与边界条件的设置

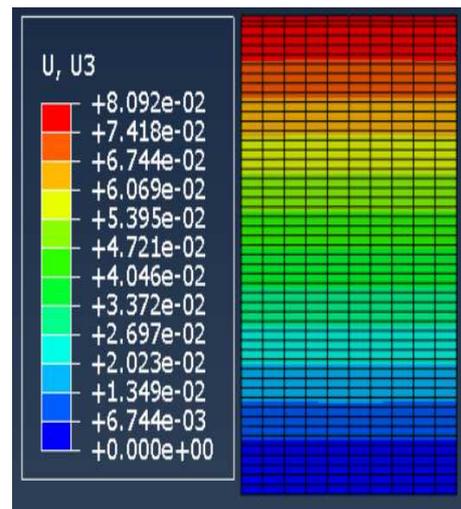
对模型施加重力荷载, 以及简化为均匀作用在褥垫层 100kpa 的填土。由于在实际工程中采用的是碎石桩群, 这里为方便计算简化为单碎石桩, 故需在边界条件设置中在土体四周加上对称荷载, 底部加上固定约束。

2.7 网络划分

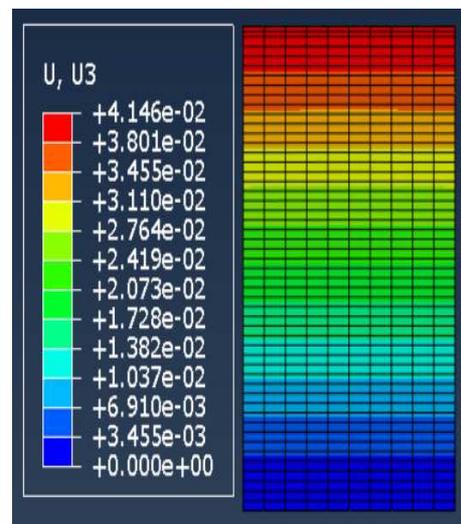
首先将土体沿着对角线进行分区, 同时也使得中间钻孔部分的圆柱平均分割为 1/4 圆柱, 碎石桩也按照同样方法进行分区。尺寸设置为 0.2, 进行部件布钟。定义网格控制的属性, 单元的形状为六面体, 划分技术为采用中性轴算法进行扫掠划分。接着指派单元类型, 土体和碎石桩均采用默认的静力学三维应力单元。最后划分网格。

2.8 位移云图与结论

模型一、模型二的土体竖向位移云图分别如图 1、图 2 所示

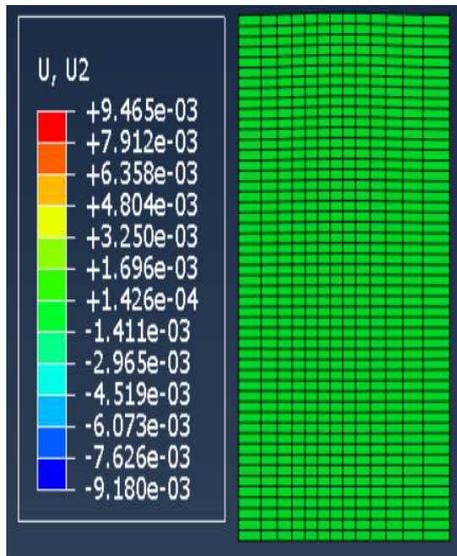


(图 1)

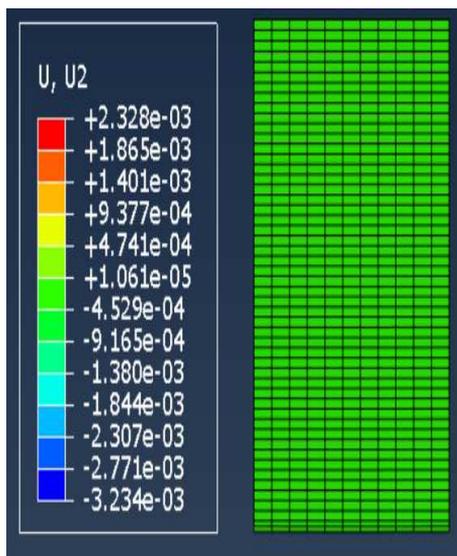


(图 2)

模型一、模型二的土体侧向位移云图分别如图 3、图 4 所示



(图 3)



(图 4)

通过比较位移云图可以得到：在相同荷载条件下，全尾砂膏体约束式碎石桩复合地基的土体最大竖向位移与最大侧向位移均小于普通碎石桩复合地基土体。充分说明全尾砂膏体约束式碎石桩对软弱土层加固效果的良好性能。

3. 结语

在今后的交通工程建设设计工作中，得益于有限元软件能够快速、准确地分析复杂的交通工程结构，提供详细的应力、应变等数据。能够模拟各种复杂的几何形状和边界条件，提供高精度的计算结果。能够适应各种复杂的交通工程问题，如结构优化、材料非线性、几何非线性等。能够支持各种扩展功能，如前后处理、优化分析、多物理场耦合等。使得设计工作变得更具有高效性、精确性和可扩展性等。在对软弱土层的处理中，全尾砂膏体约束式碎石桩不

仅比普通碎石桩性能更优越，还将尾砂这一废弃物进行环保处理二次利用，十分符合可持续发展战略和“双碳”战略，拥有广阔的工程应用前景。相信随着有限元计算软件等计算软件不断发展，土木工程在互联网+的背景下，还有源源不断的潜力值得去探索。

参考文献：

- [1]徐飞.公路软土路基加固处理及沉降分析[D].安徽建筑大学, 2020.
 - [2]杨飞.粉质粘土包裹式散体材料桩复合地基承载特性研究[D].西南交通大学, 2022.
 - [3]孙京阁, 刑其岭.全尾砂膏体充填采矿技术现状及展望[J].世界有色金属, 2022, (17): 43-45.
 - [4]陈春.某高铁 CFG 桩加固软土地基开裂病害分析及加固措施[J].福建建材, 2015 (02): 51-52+57.
 - [5]谭鑫, 尹心, 胡政博等.筋箍碎石桩承载机制的三维离散-连续介质耦合数值模拟 [J].铁道学报, 2023, 45 (04): 139-147.
 - [6]谭鑫, 胡政博, 冯龙健等.软土中碎石桩模型试验的三维离散-连续介质耦合数值模拟 [J].岩土工程学报, 2021, 43 (02): 347-355.
 - [7]孙立强, 邵丹丹, 冯守中等.土工合成材料约束碎石桩承载特性研究 [J].岩土工程学报, 2019, 41 (S2): 29-32.
 - [8]夏博洋, 郑刚, 周海祚等.筋箍长度及刚度对加筋碎石桩复合地基承载力影响分析 [J].岩土工程学报, 2019, 41(S2): 209-212.
 - [9]赵明华, 马思齐, 肖尧等.基于厚壁圆筒模型的筋箍碎石桩沉降计算[J].湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46 (05): 86-93.
 - [10]张玲, 刘长捷, 赵明华等.筋箍碎石桩复合体抗剪性能研究 [J].土木工程学报, 2022, 55 (05): 86-96.
 - [11]欧阳芳.包裹碎石桩复合地基静动力特性及其设计方法研究 [D].西南交通大学, 2017.
 - [12]袁涌笙, 赵明华, 杨超炜等.循环荷载下筋箍碎石桩复合地基动力特性数值分析 [J].湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49 (11): 198-205.
- 基金项目：2023 年国家大学生创新创业训练计划项目，高速公路软土地基碎石桩地基沉降特性及改进研究，编号：202310613003。
- 作者简介：张培君（2002-），男，汉，四川达州人，西南交通大学本科生在读，主要研究方向：桥梁工程。
- 梁涛（2002-），男，汉，甘肃榆中人，西南交通大学本科生在读，主要研究方向：桥梁工程。