

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.05.011

碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用

张秀勇¹,王海龙²,李杰¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所,江苏 南京 210029; 2. 东营港经济开发区规划分局,山东 东营 257091)

摘要:大理至丽江的大丽高速公路位于云贵高原西北部,具有湖相沉积软土地基的特点,可采用碎石桩复合地基解决该类湖相沉积软土地基承载力的问题。结合现场勘测资料和室内试验数据分析了工程沿线地区湖相沉积软土的基本特性和碎石桩加固湖相沉积软土地基的效果;利用 FLAC3D 有限差分程序,采用复合模量均质法和群桩典型单元法建立模型对碎石桩复合地基进行了数值模拟。结果表明,路堤在这种柔性基础下,采用加设碎石垫层的碎石桩复合地基可以显著改善深厚软土地基的承载性能。

关键词:高速公路路基;湖相沉积软土;碎石桩;柔性基础;数值模拟;大丽高速

中图分类号:TU41 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)05-0455-05

Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway

ZHANG Xiuyong¹, WANG Hailong², LI Jie¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Planning Branch of Dongying Port Economic Development Zone, Dongying 257091, China)

Abstract: Dali-Lijiang highway is located in the northwest of Yunnan-Guizhou Plateau with the lacustrine soft soil ground. The gravel pile composite foundation is adopted to increase the bearing capacity of the lacustrine soft soil ground. The field application of gravel pile foundation in the southwest highway soft ground treatment is discussed and studied. The basic features of lacustrine soft soil along the highway are investigated using the field and laboratory test data. Then, the effect of gravel pile on the bearing capacity of natural lacustrine soft ground is evaluated based on the field monitoring data. The "Composite modulus homogenization" and "typical pile group element method" are adopted for the simulation of gravel pile foundation in lacustrine soft ground based on FLAC3D. Simulation results show that under the flexible foundation of highway, the use of crushed stone composite foundation with crushed stone cushion is effective to improve the bearing capacity of deep soft ground.

Key words: highway subgrade; lacustrine soft soil; gravel pile; flexible foundation; numerical simulation; Da-Li Highway

碎石桩复合地基是一种典型的散体材料桩复合地基,由基体(软土)和增强体(碎石桩)两部分组成,具有非均质且各向异性的特点,这一特点使得碎石桩复合地基有别于均质地基^[1-3]。碎石桩对砂土地基的加固作用主要通过施工过程的振密和预震作用以及桩体的挤密作用来提高抗液化能力和承载能力^[4-5]。黏土地基中采用碎石桩进行加固,主要体现在减少沉降、提高承载力、增大土坡的抗滑稳定性等方面^[6-7]。碎石桩良好的渗透性使桩体起到了排水砂井的作用,缩短了排水路径,加快了土体固结,减少了工后沉降。若地基中的软弱土层较厚,碎石桩不能穿透整个软弱土层时,经过碎石桩加固的复合地基就发挥了垫层作用。在松散土地基或土坡中应用碎石桩,可以提高边坡的抗滑稳定性,并起到一般抗滑桩的作用,提高土体的抗剪强度,使最危险滑动面移至土体更深层^[8]。

基金项目: 国家自然科学基金(51879090)
作者简介: 张秀勇(1973—),男,高级工程师,博士,主要从事地基处理研究。E-mail:xyzhang@nhri.cn
引用本文: 张秀勇,王海龙,李杰. 碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):455-459.
ZHANG Xiuyong, WANG Hailong, LI Jie. Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 455-459.

我国西南地区的大丽高速公路建设在软土地基之上,地基以湖相淤泥及含有机质淤泥为主,包含较多的植物残余,天然密度小,孔隙比和含水率非常大。本文结合大丽高速公路碎石桩处治软土地基的实际工程情况以及代表性断面的监测数据,探讨碎石桩在软土地基中的应用,并利用 FLAC3D 有限差分程序对碎石桩复合地基进行数值模拟,分析了西南地区湖相沉积软土地在路堤荷载下承载力的变化规律。

1 工程地质概况及软土特性

1.1 工程地质概况

大丽高速公路为国家高速公路网横 12 杭州至瑞丽高速公路的一段,在国家和云南省公路网中具有重要的地位。公路沿线地形以山地和盆地两大类型为主,由于其所处地区独特的地形、地貌、地质构造,该地区除受气候影响雨水充沛外,还具备丰富的黏土矿物质资源,经地质、水文和气象活动日积月累的作用,形成了目前云南高原地区特有的软土结构形式。

1.2 天然软土物理指标

对大丽高速公路沿线土层进行取样,通过室内土工试验,得到该天然软土的基本物理力学指标如见表 1 所示。

表 1 天然软土基本物理力学指标
Table 1 Basic physical and mechanical parameters of natural soft soil

土体	含水率/%	干密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙比	塑性指数	液性指数	压缩系数/ MPa ⁻¹	强度	
							c/kPa	φ/(°)
淤泥	67.3	0.97	1.85	26	1.25	1.39	12.5	3.02
有机质淤泥	114.7	0.65	3.47	38	1.77	2.81	14.7	3.24

2 碎石桩复合地基现场监测数据分析

2.1 现场监测

第 12-1 合同段高速公路软土地基采用碎石桩处理方式,碎石桩直径为 0.5 m,梅花形布桩,桩距为 1.5 m,该段平均桩长为 8.5 m。由于高速公路对工后沉降与稳定性的要求,为控制路基填土速率及间歇时间,确保施工的安全性,同时推算工后沉降量以确定路面铺筑的时间,对路堤填土高度较大的软土地基路段和软土地基深厚易产生较大沉降的路段进行相关监测,监测项目见表 2。

表 2 软土地基监测项目

Table 2 Monitoring items of soft soil foundation

监测类型	监测项目	仪器	监测内容
沉降	软土地基地表沉降	水准仪、沉降管	地表以下土体总沉降量
	孔隙水压力	读数仪、孔隙水压计	观测超静孔隙水压力变化情况
稳定	软土地基深层水平位移	测斜仪、测斜管等	测定地基各层土体侧向位移量

软土地基监测仪器布置如图 1 所示(以第 12-1 合同段 K80+850 断面为例)。软土地基处理路段沉降管断面设置间距为 50 ~ 200 m,布置在距离桩顶 200 mm 处,在桩体两侧对称安置 4 对,桩身布置测点并固定牢固。监测段全长 450 m,共设置监测断面 9 个,沉降管 9 个,测斜管 1 个(深 28 m),孔隙水压计 3 个。3 个孔隙水压计埋设位置分别在地面以下 1.5 m(埋设土层为淤泥)、5.5 m(埋设土层为淤泥)、9 m(埋设土层为黏土)处。

2.2 现场监测资料分析

路堤填土过程 K80+850 断面荷载过程和沉降过程曲线见图 2。沉降和加载过程不一致,表现出一定的滞后性。变形与土中孔隙水压力的消散相关,最后一级荷载加载完毕,沉降仍持续发展。

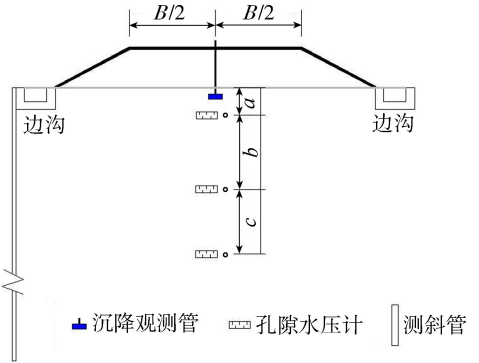


图 1 软土地基 K80+850 断面布置示意图
Fig.1 Schematic map of soft soil monitoring section (K80+850)

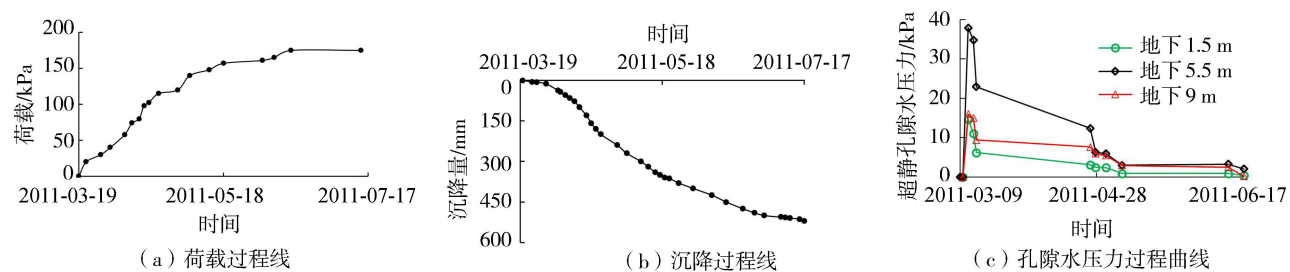


图 2 K80+850 断面荷载、沉降和孔隙水压力过程线

Fig. 2 Timeline of loading, sinking and excess pore water pressure of monitoring section (K80+850)

孔隙水压力的消散过程如图 2(c) 所示。由图 2(c) 可以看出,在填土荷载初期超静孔隙水压力较大,并随荷载的增加而减小,说明初期排水系统的畅通性较差,经过填土荷载作用,形成了有效的排水体系。

图 3 是填土荷载超过 9 m 时高填土条件下的水平位移实测数据,土体的水平位移主要发生深度为 5 ~ 16 m 内,其绝对数值与沿海地区超软地基土相比要小很多,说明西南多山地区地基总的情况要好于沿海地区,处理难度低,沿海地区传统成熟的软土地基处理技术容易移植到西南高山、高海拔地区。

图 4 为施工 28 d 后 12-1 合同段 K80+373 和 K80+513 断面重型动力触探试验曲线。该合同段碎石桩的设计承载力为不小于 400 kPa,实际检测平均值为 415 kPa。通过比较分析,大丽高速公路软土地基采用一般软土地基的处理手段可以达到预期效果;实测数据表明,碎石桩适宜于对湖相沉积软土地基的处理。

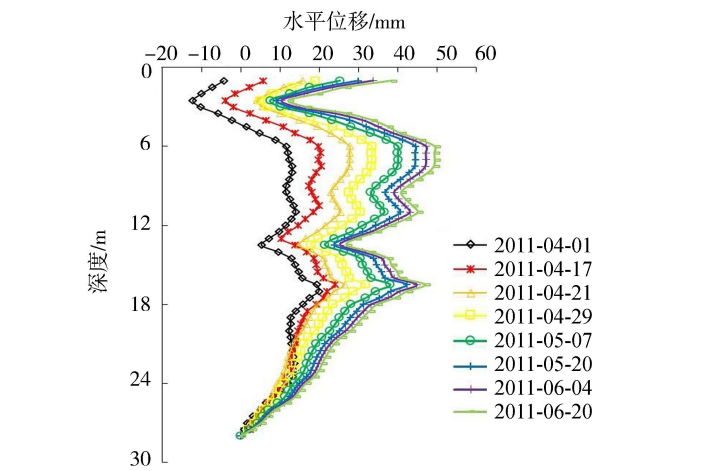


图 3 K80+850 断面侧向水平位移曲线

Fig. 3 Horizontal displacement curve of monitoring section (K80+850)

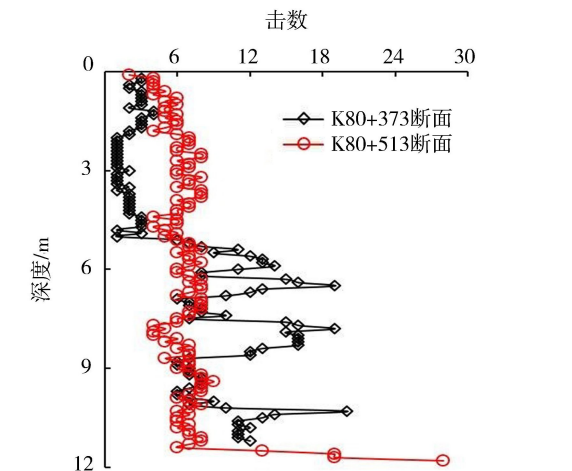


图 4 碎石桩体重型动力触探试验曲线

Fig. 4 Curve of heavy dynamic penetration test for gravel piles

3 碎石桩复合地基的数值分析

对岩土工程问题进行数值模拟分析的有效性在有关研究中得到验证^[9-10]。FLAC3D 中的单元网格可以随材料产生相应的变形,从而较准确地模拟岩土材料的屈服、塑性流动、软化以及大变形特性^[9-11]。故选用有限差分软件 FLAC3D 对大丽高速公路碎石桩复合地基进行模拟分析。选取第 12-1 合同段 (K80+650 ~ K81+100) 对碎石桩加固效果进行模拟分析,图 5 为填土过程路基沉降模拟曲线。

3.1 模型和参数的选取

依据现场勘测土体参数,采用适用于低摩擦角软质黏土的 Drucker-Prager 塑性模型,模型所用参数见表 3。其中,Drucker-Prager 模型中所用参数 q_φ 、 k_φ 和黏聚力 c 、内摩擦角 φ 有以下关系:

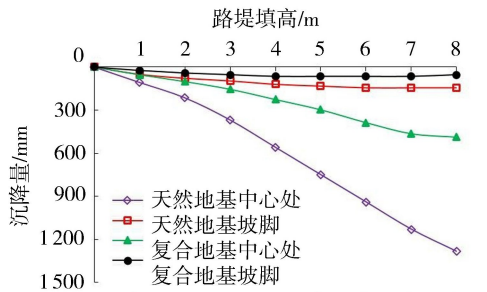


图 5 填土过程路基沉降模拟曲线

Fig. 5 Subgrade settlement curve in filling process from simulation

$$q_{\varphi}=\frac{6}{\sqrt{3}(3-\sin \varphi)} \sin \varphi \quad k_{\varphi}=\frac{6}{\sqrt{3}(3-\sin \varphi)} c \sin \varphi$$

(1)

表3 Drucker-Prager 模型土体参数

Table 3 Soil parameters in Drucker-Prager model

土体	E/MPa	μ	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	K/MPa	G/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	k_{φ}/kPa	q_{φ}
淤泥	2.03	0.35	1620	2.26	0.75	12.45	3.02	14.61	0.062
黏土	3.94	0.30	1760	3.28	1.52	21.00	6.00	24.99	0.125

3.2 路堤填土过程复合模量均质法模拟分析

在天然地基模型的基础上,对路堤范围下的地基土体采用复合模量均质法对碎石桩复合地基部分重新赋值进行填土过程模拟,填土过程即增加荷载的过程。天然地基监测沉降量和复合地基的特征点沉降量随路堤填土过程的关系如图6所示。填土过程两种地基沉降表现的规律基本一致:路基中心线处土体沉降最大,土体沉降随距中心线距离的增加而减小,随土体深度的增加而减小。

由图6可见,因实际施工中填土存在时间间隔,故沉降变化呈曲线;而数值模拟填土过程为连续加载,故沉降变化为直线,二者沉降量基本一致,则数值模拟结果基本合理,可以较有效地反映实际现象及规律。经碎石桩处理后,地基沉降量最大值由1215 mm降低为517 mm,沉降减少57.4%,碎石桩对该路段地基土体的加固效果十分显著。

3.3 碎石桩复合地基模型模拟分析

建立单桩复合地基模型和梅花形布置的群桩复合地基模型,以模拟路基中心处复合地基的承载过程。图7为群桩平面布置及群桩复合地基模型的网格划分。碎石桩长取该合同段平均桩长8.5 m,碎石桩体穿过5 m厚淤泥土层及3.5 m黏土层,桩底未接触到岩石等较硬持力层。采用群桩典型单元法建立群桩模型,即以图7(a)所示1、2、3号桩所构成的典型单元为研究对象,认为只有其周围距离最近(1倍桩距)的桩体与之产生相互作用,而超过1倍桩距的桩体对其作用忽略不计。按照工程实际情况,梅花形布置为桩距1.5 m,桩径0.5 m。

复合地基模型中,桩体、碎石垫层均采用各向同性弹性模型,弹性模型参数见表4。在碎石桩复合地基模型中,桩体与周围土体之间均设有接触面,根据反演计算,接触面的内摩擦角和黏聚力取其接触土层内摩擦角和黏聚力的0.8倍。

采用群桩典型单元法对填土过程进行模拟,将沉降量与监测数据进行对比(图8),模拟值与监测值相比偏大,基本规律趋势较一致,且因填土荷载的加载方式为连续加载,故呈现模拟值变化趋势为直线。可以认为群桩典型单元法对碎石桩复合地基的模拟较有效。图9为复合地基沉降曲线,取曲线的拐点对应荷载为极限承载力,则单桩和群桩的地基承载力分别为80 kPa和300 kPa。该现象说明群桩复合地基中的群桩效应使得复合地基承载力大大提高。同时,填土荷载达到160 kPa,即填土高度8 m时,群桩典型单元法的沉降量约为680 mm,复合地基在填土荷载下沉降量监测数值约为510 mm,采用复合模量均质

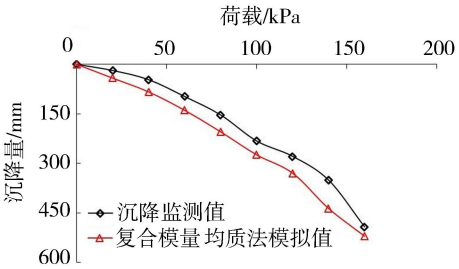


图6 天然地基沉降对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of natural foundation settlement

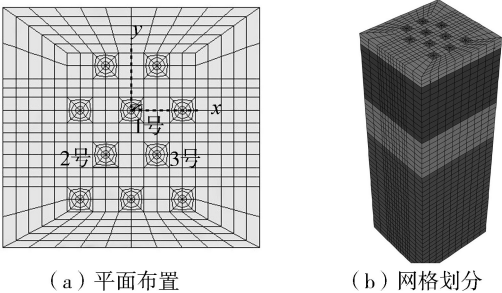


图7 群桩平面布置与复合地基模型网格划分

Fig. 7 Schematic map of group pile and mesh division of composite foundation

表4 弹性模型参数

Table 4 Parameters of elastic model

结构	E/MPa	ν	K/MPa	G/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
碎石桩	250	0.30	20.83	9.02		
砂垫层	90	0.30	75.00	34.60	0	35
碎石垫层	80	0.15	38.10	34.80	0	41

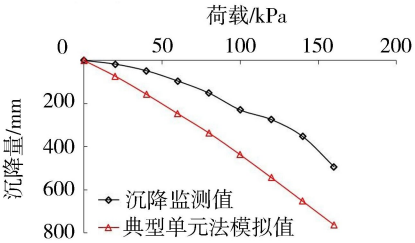


图8 群桩复合地基沉降对比曲线

Fig. 8 Comparison curve of settlement for pile group composite foundation

法计算所得复合地基沉降量为 1 014 mm。模拟结果介于实测值与计算值之间,可认为采用群桩典型单元法建立模型对群桩复合地基进行模拟较合理。

4 结 论

- a. 针对湖相沉积软土的特性和实际地质条件,采用碎石桩作为竖向排水通道、填筑碎石垫层为水平向排水通道,以排水固结的方式对该处地基进行的处理技术可行、效果明显。
- b. 采用复合模量均质法和群桩典型单元法建立的数值模型模拟结果与实测结果基本吻合,可用于湖相沉积软土碎石桩复合地基工程特性的模拟分析。
- c. 采用建立的路基模型模拟填土过程的沉降数值与现场监测结果基本吻合,表明碎石桩对天然软土地基的加固处理效果比较显著。

参考文献:

[1] 龚晓南. 有关复合地基的几个问题[J]. 地基处理,2000 (3):42-48. (GONG Xiaonan. Several problems about composite foundation[J]. Ground Improvement,2000 (3):42-48. (in Chinese))

[2] 魏广华,郑艳新. 水利工程施工中软基基础的处理技术分析[J]. 水利科学与寒区工程,2020,3 (1):128-129. (WEI Guanghua,ZHENG Yanxin. The technology analysis about soft foundation in hydro engineering[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering,2020,3 (1):128-129. (in Chinese))

[3] 任毅,周琼,裴友强,等. 砾石桩复合地基桩土应力比确定方法探讨[J]. 路基工程,2019 (6):18-23. (REN Yi,ZHOU Qiong, QIU Youqiang, et al. The analysis method of stress ration in composite foundation of gravel pile[J]. Subgrade Engineering, 2019 (6):18-23. (In Chinese))

[4] 陈建峰,李良勇,徐超,等. 套筒长度对加筋碎石桩复合地基路堤变形和稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019,50 (7):1662-1669. (CHEN Jianfeng, LI Liangyong, XU Chao, et al. The impact of sleeve length to the deformation and stability of reinforced composite foundation and embankment of gravel pile[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019,50 (7):1662-1669. (in Chinese))

[5] 康舜,赵其华,彭社琴,等. 碎石土土体性状对桩基水平承载能力的影响[J]. 工程地质学报,2019,27 (3):559-568. (KANG Shun,ZHAO Qihua,PENG Sheqin, et al. The impact of the properties of gravel soil to the horizontal bearing capacity of pile foundation[J]. Journal of Engineering Geology,2019,27 (3):559-568. (in Chinese))

[6] 谭鑫,冯龙健,赵明华,等. 刚性基础下筋箍碎石桩复合地基桩土应力比计算模型[J]. 中国公路学报,2019,32 (9):42-50. (TAN Xin,FENG Longjian,ZHAO Minghua, et al. Calculation model of pile-soil stress ratio of reinforced gravel pile composite foundation under rigid foundation[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32 (9):42-50. (in Chinese))

[7] 肖成志,夏博洋,郑刚,等. 基础埋深对碎石桩复合地基桩体破坏模式的影响[J]. 重庆大学学报,2019,42 (7):63-69. (XIAO Chengzhi, XIA Boyang, ZHENG Gang, et al. Influence of foundation depth on failure mode of gravel pile composite foundation[J]. Journal of Chongqing University,2019,42 (7):63-69. (in Chinese))

[8] 霍锦宏. 碎石桩单桩复合地基的承载性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.

[9] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009:1-5.

[10] 邹佑学,王睿,张建民. 碎石桩加固可液化场地数值模拟与分析[J]. 工程力学,2019,36 (10):152-163. (ZOU Youxue, WANG Rui, ZHANG Jianmin. Numerical simulation and analysis of liquefiable site reinforced by gravel pile[J]. Engineering Mechanics,2019,36 (10):152-163. (in Chinese))

[11] 刘胜群,卜睿. 碎石桩加固的软土路基承载特性分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2018,49 (5):796-799. (LIU Shengqun,BU Rui. Analysis on bearing characteristics of soft soil subgrade reinforced by gravel pile[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2018,49 (5):796-799. (in Chinese))

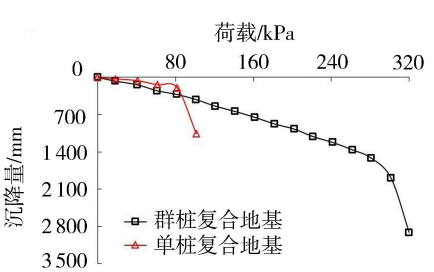


图 9 复合地基沉降曲线
Fig. 9 Pressure-Settlement curve of composite foundation