

一种预填混合料新 Y 形桩在软基处理中的 试验与沉降预测分析

廖克武¹, 李俊², 赵汉金³

(1. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058;

3. 浙江省地矿建设有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要: 本文针对深厚淤泥质土地基处理问题, 介绍了一种新型预填混合料后膨胀混凝土地基处理方法, 通过在 Y 形桩模中灌注预填混合料, 达到控制沉降和提高承载力的目的。预填混合料的主要组分为水泥、生石灰、石屑等。基于温州某项目, 根据处理区域含水量不同, 结合室内试块抗压强度试验, 合理确定混合料配比, 并开展了现场载荷试验, 验证了该地基处理方法的可行性。通过数值模拟计算, 对比了采用该地基处理方法前后沉降位移和孔隙水压力的变化情况, 研究结果表明: 该桩型具有用料省、地基处理深度大、施工效率高等优点, 适合在道路、广场、轻型展区等需进行地基处理的区域应用, 值得进一步研究和推广。

关键词: 预填混合料; 新 Y 形桩; 后膨胀混凝土; 深厚软土; 沉降预测; 地基处理

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)06-0626-07

Experimental study and settlement prediction analysis of a new Y-shaped pile with prefilled mixture in soft ground treatment

LIAO Kewu¹, LI Jun², ZHAO Hanjin³

(1. The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, Zhejiang, China;

2. Department of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

3. Zhejiang Geological and Mineral Construction Co., Ltd., Hangzhou 310052, Zhejiang, China)

Abstract: This article introduces a new ground treatment method for deep mucky soil layers using post expansive concrete combined with a prefilled mixture. The prefilled mixture is poured into the Y-shaped pile mold to control settlement and improve bearing capacity. The main components of the prefilled mixture are cement, quicklime, stone chips, etc. Based on the different water contents in the treatment area and combined with indoor compression strength tests, the mixture ratio was reasonably determined. An on-site load test was conducted to validate the feasibility of this ground treatment method, using a project in Wenzhou as a case study. Numerical simulations were performed to compare settlement and changes in pore water pressure with and without the application of this ground treatment method. Results indicate that this type of pile has the advantages of saving materials, deep ground treatment, and high construction efficiency. It is particularly suitable for application in ground treatment in areas such as roads, squares, and light exhibition areas. This method shows significant potential for further research and broader application.

Key words: prefilled mixture; new Y-shaped pile; post expansive concrete; deep soft soil; settlement prediction; ground improvement

0 引言

我国海相软土在东南沿海地区广泛分布, 随着各类基础设施建设日新月异, 大量地基处理创新技

术被提出^[1]。自龚晓南院士提出广义复合地基框架理论以来^[2], 新的刚性桩和半刚性桩不断涌现, 形成了中国特色的地基处理与加固技术体系。异形截面桩利用等截面异形周边扩大原理, 在不增加桩材料用量的前提下, 通过改变桩截面形状来提高桩侧

收稿日期: 2023-07-16

基金项目: 浙江省交通运输厅项目 (ZJXL-JTT-202201A 和 202303)。

作者简介: 廖克武 (1980—), 男, 安徽舒城人, 博士研究生, 高级工程师, 注册土木工程师 (岩土), 主要从事岩土工程勘察设计和研究工作。E-mail: liaokw80@163.com。

摩阻力,如十字形、T形、I形、H形、X形、Y形等异形截面桩^[3-4]在地基处理工程中得到广泛应用。Y形沉管灌注桩是结合国外Y形桩^[5]的设计理念和国内传统沉管灌注桩的施工工艺派生出的异形灌注桩,最早见陆见华等^[6-7]提出Y形沉管灌注桩概念,运用于国内的嘉兴高速公路软基处理中^[8]。目前关于Y形沉管灌注桩承载性能方面的研究包括:吴跃东等^[9]基于某高速公路Y形桩软基加固,进行现场静载试验和理论计算,结果表明,Y形沉管灌注桩是一种以摩擦为主的摩擦桩或端承摩擦桩;李建委等^[10]研究了异形效应对Y形沉管灌注桩承载力的影响,外包圆半径、模板弧度、开弧间距、夹角弧度均对单桩的极限承载力有一定的影响,其中外包圆半径的影响最大;魏新江等^[11]、王新泉等^[12]考虑了异形桩侧土压力和侧摩阻力沿桩周不均匀分布的特性,基于球形孔扩张理论,建立了侧摩阻力的不均匀分布模型,计算结果与静载实测值吻合度较好。

本文基于Y形沉管灌注桩的设计理念,提出一种预填混合料后膨胀混凝土Y形桩(简称新Y形桩),并结合某国际会展中心软基处理工程,利用室内试验、现场静载试验及数值模拟,研究新Y形桩加固软土地基的可行性、Y形桩复合地基的承载特性及其沉降规律。

1 新Y形桩的特点与工程概况

1.1 新Y形桩的特点

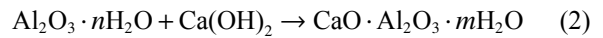
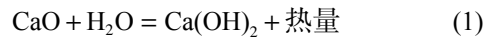
温台平原近年有大面积的新近吹填土人工地基,其上部为吹填土,下部为深厚欠固结淤泥。因吹填土的高含水率、高压缩性等特点,未处理的地基土承载力较低、后期工后沉降较大。根据相关资料,最大沉降可达150 cm,严重影响建筑物的正常使用。传统的沉管灌注桩工法因机械设备重、造价高等原因,已经越来越少被采用;堆载预压法作为软土地区较常采用的一种地基处理方法,尽管造价较低,但工期长,部分工程也不能接受。工程界一直在寻求一种既能满足承载力要求,又能节约造价和提高工程效率的新型地基处理方法。

本文提出的新Y形桩具有如下特点:

(1) 新Y形桩采用的预填混合料组分主要为水泥、生石灰和石屑。其中水泥组分占比7%~15%,生石灰组分占比5%~15%。由于生石灰具有吸水膨胀特性,生石灰通过吸收淤泥质土中的水分,生成氢氧化钙,并产生大量的热量(见式1),同时,水泥中的硅酸盐和铝酸盐会与氢氧化钙反应,形成硬化物质——水泥石(见式2),通

过以上系列反应,桩身强度得到增强。

生石灰(CaO)水化热反应机理为:



(2) 增强了桩身刚度,特别是对模具端头进行了改进,在模具端头设置了内格栅,有效控制了模具端头变形和模具内部的土体闭塞效应。

(3) 为适应该类型场地承载力低的特点,改进了施工机械,该机械小巧灵活,能够在吹填土地基上自由行走,减少了垫板等工程措施,提高了施工效率。

通过以上措施,根据新Y形桩现场试验,能达到日成桩20~30颗,较常规沉管灌注桩施工效率提升了近1倍,单桩复合地基承载力特征值达到75~90 kPa,较处理前场地地基承载力提高了0.9~1.3倍,新Y形桩荷载传递机理见图1。

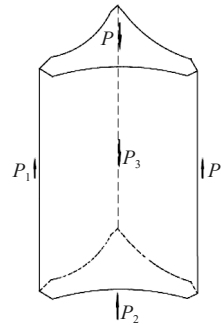


图1 新Y形桩荷载传递机理示意图

Fig. 1 Load transfer mechanism in the new Y-shaped pile

新Y形桩荷载传递的平衡方程可表示为:

$$P = P_1 + P_2 - P_3 \quad (3)$$

式中: P_1 为单元上的摩阻力,kN; P_2 为桩端荷载,kN; P_3 为桩身自重,kN。

1.2 工程概况与地质环境条件

该工程总规划用地面积约437 000 m²,包括展览馆、商业酒店、办公区及商业配套,场地含深厚层海相软土,力学性质差。为确保该项目后期的正常使用,需对除地下室外的室外区域进行地基处理,具体包括室外展馆、场内道路以及绿化区域(内有综合管网)等,共计面积约160 000 m²。

根据钻探揭示,对地基处理深度范围内的土层进行划分与定名,各土层分布特征描述如下:

①₁层素填土(mlQ₄):杂色,松散,成分主要由黏性土组成,含腐植物、杂草根系等,含少量碎石土,成分较杂,土质不均,性质差,为新近人工回填而成,欠固结。

①层淤泥质粉质黏土(mQ₄²):灰黄色-褐黄色,流塑,厚层状,偶含贝壳碎屑,局部夹少量粉

砂团块, 稍有光泽, 干强度中等, 韧性中等, 土质不均, 局部为淤泥质黏土。

②₁层淤泥夹砂 (al-mQ₄³): 灰色, 流塑, 层状, 夹粉砂薄层、团块, 含量一般为 5%~28%, 偶含贝壳碎片, 土质不均, 稍有光泽, 干强度中等, 韧性中等。

②₂层淤泥 (mQ₄²): 灰色, 流塑, 厚层状, 含少量贝壳碎屑, 有光泽, 无摇晃反应, 干强度高, 韧性高, 土质不均。

②₃层淤泥 (mQ₄¹): 灰色, 流塑, 厚层状, 含少量贝壳碎屑, 有光泽, 无摇晃反应, 干强度高, 韧性高, 土质不均。

各土层物理力学参数见表 1。

表 1 各土层物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

土层	层厚/m	含水量w/%	容重γ/(kN/m ³)	c/kPa	φ/(°)
① ₁	1.5	—	17.5	10.0	10.0
①	4.9	40.9	17.6	11.7	11.3
② ₁	6.3	48.6	16.9	10.7	10.1
② ₂	28.0	58.6	16.1	9.0	7.0
② ₃	13.0	46.1	17.1	11.5	9.3

2 室内及现场试验

2.1 室内试块抗压强度试验

新 Y 形桩预填混合料以水泥、生石灰、石屑、以及水为原料, 水样取自工程现场。按照水泥 7~15 份、生石灰 5~15 份、石屑 70~80 份的比例, 混合后与水搅拌均匀得到预填混合料。

将预填混合料分 3 次装进模具, 每次装样约 600 g, 装样后锤击 10 次捣密。试块养护 1 d 后脱模, 继而放入恒温恒湿养护箱继续养护, 最终对 14 d 和 28 d 龄期的试件进行轴心抗压强度试验, 待脱模试块及抗压强度试验如图 2 所示。

将加载试块放于上下压板中间, 试块中心与压力机几何对中。试块的加载采取应变控制, 加载速率为 0.001 5 mm/s。不同配比的试块破坏形态较为一致, 均呈“上层剥落, 中间斜裂缝贯穿”破坏。

根据试验得到的应力-应变曲线, 确定强度和压缩模量, 具体如表 2 所示。不同含水量条件下最优骨料配比强度破坏试验如表 3 所示。除一组因样品制备缺陷出现异常外, 从表 2、表 3 可以得出: 试块的破坏强度和压缩模量与试块的材料配比和龄期均有一定的关系; 龄期加长, 试块的强度和刚度指

标加大; 在同一骨料配比、不同含水量情况下, 试块强度呈非线性关系; 试件水泥含量越大, 则破坏强度越大, 压缩模量也越大, 并且在相同水泥含量下, 无碎石试块比含碎石试块强度更高、压缩模量也更大。这主要是因为在无碎石情况下, 相同方法制备的试块密实度更高。因此, 现场 Y 形桩预填骨料级配应尽量均匀, 并且建议减缓拔桩速度, 边振动拔桩边往模具里面灌入预填混合料, 以确保预填料密实。



(a) 试块

(b) 试块抗压强度试验

图 2 待脱模试块及抗压强度试验

Fig. 2 Sample and compression strength test

表 2 同一含水量条件下不同骨料配比强度试验

Table 2 Strength test of different aggregate ratios under the same water content

编号	水泥:粉煤灰: 石屑:碎石	破坏强度/MPa		压缩模量/MPa	
		14 d龄期	28 d龄期	14 d龄期	28 d龄期
①	4:6:27:63	2.90	3.30	520.26	573.54
②	7:5:30:58	3.40	3.60	652.24	773.48
③	7:5:88:0	4.20	4.75	793.65	951.24

表 3 不同含水量条件下最优骨料配比强度破坏试验

Table 3 Strength failure test of the optimal aggregate ratio under different water content

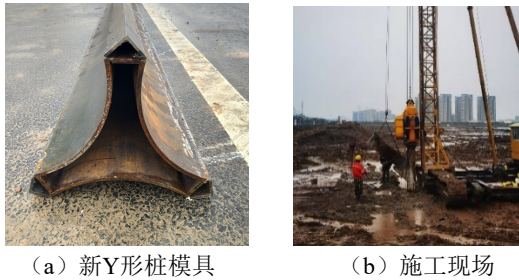
编号	含水量/%	质量/g	最大荷载/kN	强度/MPa
①		708.0	25.50	5.204
②	10	709.4	25.76	5.257
③		735.8	34.00	6.939
①*		572.0	3.69	0.753
②	15	688.6	33.95	6.929
③		735.8	22.17	4.524

注: *代表制备异常样品。

2.2 新 Y 形桩现场试验

为进一步验证该新 Y 形桩的可靠性, 在项目现场开展了原位试验, 选取了面积 10 m×10 m 的范围, 按桩间距 1.2 m 正方形布置, 桩长为 20 m, 共布置了 60 颗新 Y 形桩。新 Y 形桩外包圆直径为 426 mm, 模板弧度为 60°, 开弧间距为 12 mm, 夹角为 90°, 等效截面面积为直径 220 mm 的圆。模板中间设置隔板, 通过自身力平衡抵挡部分土压

力。桩顶设置直径 1 000 mm、高 200 mm 的圆形桩帽, 上部设置厚 200 mm 的中粗砂褥垫层。新 Y 形桩模具及成桩现场如图 3 所示。



(a) 新Y形桩模具 (b) 施工现场

图3 新 Y 形桩模具及成桩现场

Fig. 3 New Y-shaped pile mold and pile forming site

3 桩体质量及检测结果分析

3.1 桩身质量检测

为检查桩身的完整性, 选取了 5 根新 Y 形桩进行现场开挖, 开挖深度为 3 m 左右。除 1 根桩头因浇捣不密实, 稍有瑕疵外, 总体情况较好。新 Y 形桩总体外壁表面光滑, 厚度均匀, 未发现薄壁坍塌、缩颈等不良现象, 充盈情况较好, 新 Y 形桩桩帽及成桩现状如图 4 所示。



(a) 新Y形桩桩帽 (b) 新Y形桩桩身完整性

图4 新 Y 形桩桩帽及成桩现状

Fig. 4 New Y-shaped pile cap and status of pile formation

3.2 静载荷试验

静载荷试验采用 400 kN 反力装置, 由主、次梁搭成堆载平台, 混凝土块配重, 加载采用一台 1 000 kN 的油压千斤顶, 通过电动油泵驱动加载, 压力值由经过检定的压力变送器给出, 再由千斤顶的标定曲线换算成荷载值。

对设计试桩进行单桩竖向抗压和单桩复合地基静载荷试验, 单桩检测根数为 9 根, 复合地基检测点共计 9 点, 共 18 个点, 按照慢速维持荷载法进行试桩, 试桩结果如表 4、表 5 所示。

从桩身质量以及现场监测数据来看, 本次新 Y 形桩主要用于室外展馆、场内道路以及绿化区域(管线)的地基处理, 对承载力要求达到 75 kPa、沉降 30 cm 即可满足设计要求。单桩、单桩复合地基极限 P-S 曲线分别如图 5、图 6 所示, 单桩极限荷载及单桩复合地基极限荷载分别达到 120~140 kPa

和 150~180 kPa, 试验总体达到项目预期需求。由于该桩属于半刚性桩, 随着后期桩身强度的进一步发挥, 复合地基承载力有望进一步提高。但由于该桩强度一般仅达到 C15 等级, 根据现场开挖情况, 有必要进一步提升桩身段上部 3 m 范围内的强度, 特别是桩头强度, 以避免因桩头破坏而导致局部承载力失稳。

表4 单桩极限承载力

Table 4 Ultimate bearing capacity of single pile

序号	桩号	单桩竖向极限承载力检测值/kN	相应沉降量/mm
1	S17	140	21.0
2	S19	120	15.0
3	S21	140	20.6
4	S33	140	22.7
5	S37	140	21.6
6	S49	120	17.3
7	S51	120	10.5
8	S53	140	11.5

表5 单桩复合地基极限承载力

Table 5 Ultimate bearing capacity of single pile composite foundation

序号	桩号	单桩复合地基极限承载力检测值/kPa	相应沉降量/mm
1	S8	187.5	19.71
2	S10	150.0	18.35
3	S24	150.0	28.24
4	S26	225.0	39.43
5	S28	150.0	23.27
6	S40	150.0	18.73
7	S42	150.0	19.19
8	S44	187.5	26.38

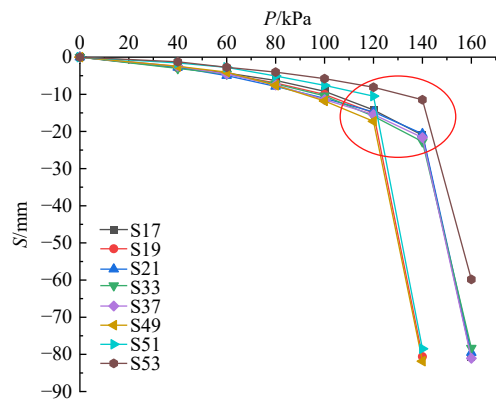


图5 单桩极限 P-S 曲线

Fig. 5 Ultimate P-S curves of single pile

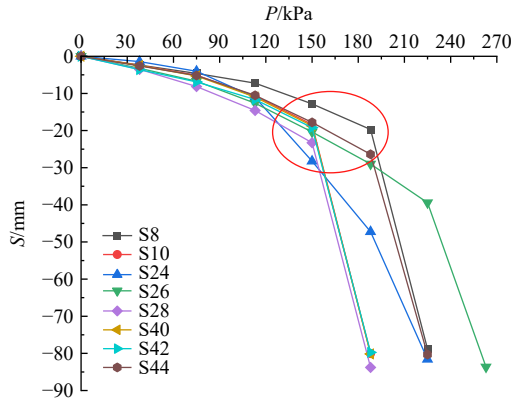


图6 单桩复合地基极限 P-S 曲线

Fig. 6 Ultimate P-S curves of single pile composite foundation

4 数值计算分析

4.1 本构模型

基于室内和现场试验数据，选取了典型断面地质数据，采用小应变土体硬化（HSS）模型进行模拟，HSS 本构模型不仅考虑剪切硬化和压缩硬化，同时还考虑土体小应变刚度特性，而且还增加了对土体小应变情况下的剪切模量衰减行为的考虑，在理论上更进一步。因此，HSS 本构模型能更好地适用于软基处理的数值分析，计算结果能更好地预测场地基础的变形情况。土体及结构模型参数主要依据地质勘察报告，如表 6 所示。

表 6 HSS 土体本构模型参数表

Table 6 Parameters of HSS soil constitutive model

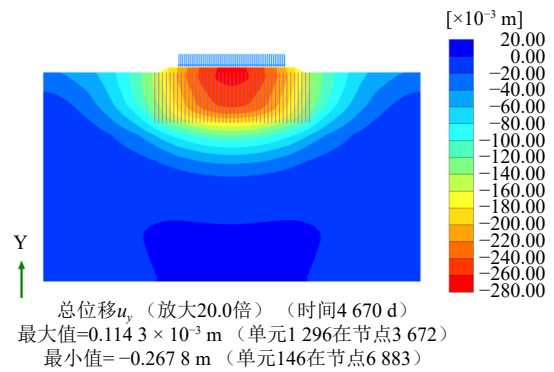
土层编号	天然重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	含水量/%	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	E_{50}/MPa	$E_{\text{oad}}/\text{MPa}$	E_{ur}/MPa	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	渗透系数/(mm/d)	
									k_x	k_y
① ₁	18.0	35.0	4.0	26.0	3.00	3.00	45.00	—	—	—
①	17.6	40.9	4.0	28.0	3.09	3.09	15.45	30.90	0.432	0.432
② ₁	18.2	48.6	3.0	29.0	2.83	2.83	16.98	33.96	0.691	0.691
② ₂	16.0	58.6	3.0	27.0	1.89	1.89	11.34	22.68	0.346	0.346
② ₃	16.1	58.6	3.0	27.0	2.07	2.07	12.42	24.84	0.259	0.259

4.2 沉降对比及预测分析

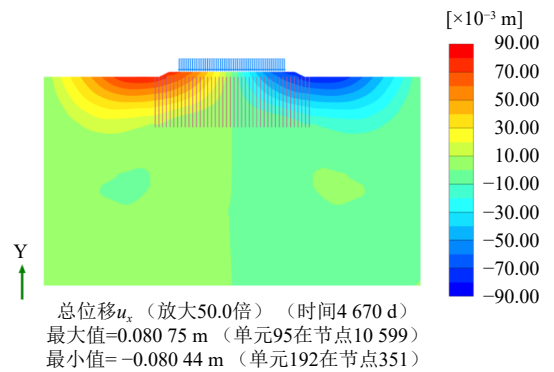
考虑到边界效应，有限元模型尺寸为 150 m × 100 m（长 × 宽），侧向采用法相约束，模型底部采用固定约束，考虑到行人与车辆荷载，工后荷载按常规选取均布荷载 20 kPa 进行分析。其中 Y 形桩按截面尺寸 0.426 m、重度 25 kN/m³、弹性模量 0.98 MPa 考虑。

通过对未进行地基处理和进行地基处理后 10 年的沉降变形情况和孔隙水压力进行分析，为本次软基处理的设计方案及项目决策提供参考。计算结果如图 7、图 8 和图 9 所示。

从图 7、图 8 和图 9 可知，经新 Y 形桩处理后，地基土最大竖向位移为 26.78 cm；水平位移较小，最大为 8.08 cm；最大超静孔隙水压力为 9.37 kPa。经处理后，地基土的最大超静孔隙水压力基本消散完全，固结变形大致稳定。未经地基处理的地基土最大竖向位移为 74.96 cm，最大水平位移为 13.61 cm，最大超静孔隙水压力为 22.19 kPa。由于淤泥层较深，且渗透系数小，超静孔隙水压力消散较慢，工后 10 年仍存在较大的超静孔隙水压力，地基土位移仍然会进一步发展。



(a) 竖向位移云图



(b) 水平位移云图

图 7 新 Y 形桩处理后 10 年地基土位移云图

Fig. 7 Displacement contours of stratum with new Y-shaped pile treatment in ten years

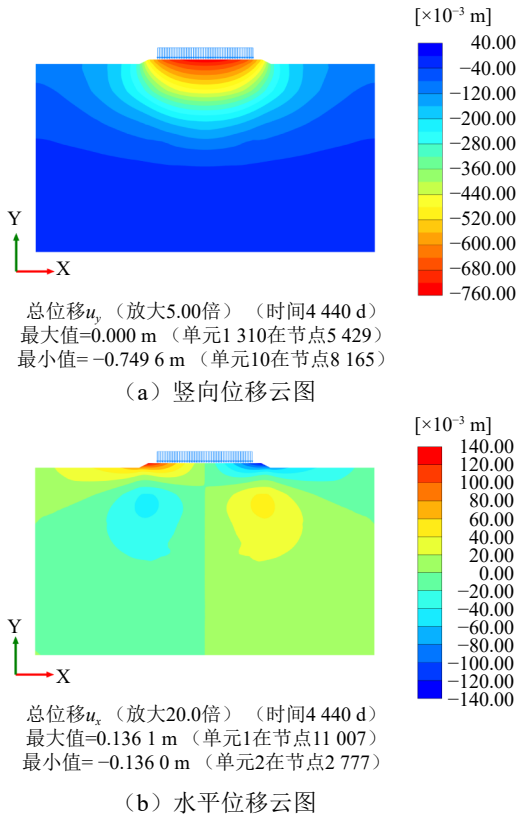


图 8 未进行地基处理 10 年地基土位移云图

Fig. 8 Displacement contours of stratum without treatment in ten years

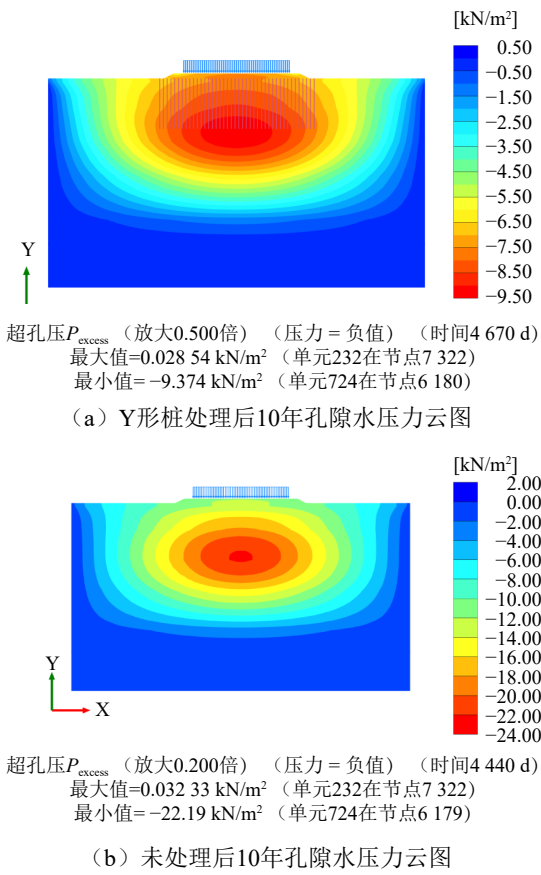


图 9 超静孔隙水压力云图

Fig. 9 Contours of excess pore water pressure

5 结 论

预填混合料后膨胀混凝土新 Y 形桩是一种新的软基处理方法, 通过利用混合料的吸水膨胀特性, 降低桩周土的含水量, 加速桩周土的固结, 提升桩侧摩阻力, 起到了地基加固的目的。同时该型桩施工机械小巧灵活, 能够在吹填土地基上自由行走, 减少了工程措施, 提升了施工效率。

(1) 通过室内、现场试验, 静载荷试验和理论计算分析, 表明新 Y 形桩是一种以摩擦为主的摩擦型半刚性桩, 适用于展厅、道路等深厚软土区的地基处理。

(2) 试验表明, 试块的破坏强度和压缩模量与试块的材料配比和龄期均有一定的关系; 龄期加长, 试块的强度和刚度指标加大; 试块水泥含量越大, 则破坏强度越大, 压缩模量也越大, 但在同一骨料配比、不同含水量情况下, 试块强度呈非线性关系。

(3) 由于该桩属于半刚性材料桩, 桩身强度等级相对较低, 根据试验反馈有必要进一步提升桩身段上部 3 m 范围内的强度, 特别是桩头的强度, 以避免因桩头破坏而导致承载力无法加载。

(4) 根据技术经济比较, 新 Y 形桩较传统地基处理方法具有对场地条件要求低、施工效率高以及工程造价低等优势。根据现场对比试验, 新 Y 形桩每延米造价约为传统沉管灌注桩的 60% 左右。

(5) 笔者计划进一步研究新 Y 形桩预填混合料不同组分配比的桩身强度及其桩周土含水量变化与地基承载力的关系。

参考文献

[1] 刘松玉, 周建, 章定文, 等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93-110.
LIU Songyu, ZHOU Jian, ZHANG Dingwen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93-110.

[2] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望——纪念中国土木工程学会岩土工程分会地基处理学术委员会成立三十周年 (1984—2014)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
GONG Xiaonan. Foundation Treatment Technology and Development Prospect—Commemorating the 30th Anniversary of Foundation Treatment Academic

- Committee of China Civil Engineering Society Geotechnical Engineering Branch (1984—2014)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [3] DAVIDSON R R. Foundation innovations cut costs[J]. *Civil Engineering*, 1987, 57(12): 54-56.
- [4] 杨挺, 刘汉龙, 孔纲强. 现浇 X 形桩复合地基静载荷试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(3): 662-669.
YANG Ting, LIU Hanlong, KONG Gangqiang. Static load field test of X-section cast-in-place pile composite foundation[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(3): 662-669.
- [5] LEI Guohui. Barrette Foundations[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [6] 陆见华, 程林, 赵刚. Y 型沉管灌注桩初探[J]. *岩土工程界*, 2001, 4(10): 33-34.
LU Jianhua, CHENG Lin, ZHAO Gang. Preliminary study on Y-shaped driven cast-in-place pile[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2001, 4(10): 33-34.
- [7] 陆见华, 陆小曼. Y 形-异形沉管灌注桩的试验研究[J]. *浙江水利水电专科学校学报*, 2002, 14(4): 40-42.
LU Jianhua, LU Xiaoman. Field test and study of Y-shaped pile, an unusual type of driven cast-in-situ concrete pile[J]. *Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College*, 2002, 14(4): 40-42.
- [8] 陈匀序, 朱艳. 软土加固新工艺 Y 形桩在嘉兴高速公路软基的应用[J]. *施工技术*, 2007, 36(8): 10-14.
CHEN Yunxu, ZHU Yan. Application of driven cast-in-situ Y pile in reinforcement of soft soil foundation as a new technology[J]. *Construction Technology*, 2007, 36(8): 10-14.
- [9] 吴跃东, 戴洪军, 乐陶. Y 形沉管灌注桩复合地基荷载变形特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增 1): 3036-3041.
WU Yuedong, DAI Hongjun, YUE Tao. Bearing capacity and deformation characteristic of a composite foundation with driven cast-in-place Y piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S1): 3036-3041.
- [10] 李建委, 王新泉, 刘安远. 异形效应下 Y 形桩沉降和单桩极限承载力研究[J]. *世界地震工程*, 2015, 31(2): 162-171.
LI Jianwei, WANG Xinquan, LIU Anyuan. Research on settlement and bearing capacity of Y-section pile considering abnormality effect[J]. *World Earthquake Engineering*, 2015, 31(2): 162-171.
- [11] 魏新江, 刘安远, 王新泉. 挤土作用下 Y 型桩侧摩阻力分布模型研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(增 1): 14-21.
WEI Xinjiang, LIU Anyuan, WANG Xinquan. Research on skin friction distribution model of Y-shaped vibro-pile under soil-compacting effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(S1): 14-21.
- [12] 王新泉, 张世民, 崔允亮, 等. 考虑异形效应 Y 形桩侧摩阻力产生附加应力研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(8): 194-204.
WANG Xinquan, ZHANG Shimin, CUI Yunliang, et al. Research on additional stress caused by skin friction of Y-section pile considering abnormality effect[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8): 194-204.