

支盘水泥搅拌桩复合路基的工程应用研究

陈忠云¹, 王佳², 黎磊锋², 单浩³, 洪宝宁^{4,5}

(1. 佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528041; 2. 佛山市建盈发展有限公司, 广东 佛山 528041;
3. 徐州工程学院 土木工程学院, 江苏 徐州 221018; 4. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,
江苏 南京 210098; 5. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 支盘水泥搅拌桩复合路基与等截面水泥搅拌桩复合路基相比, 在提高承载力和减少工后沉降方面具有明显的优越性。为了便于这种新型的复合路基形式在高等级公路路基处理中的应用, 以沉降等效为控制指标, 给出了两种桩型在复合路基中等效桩长和桩间距之间的对应关系表达式。借助工程实例的有限元数值分析和实测值沉降的对比, 论证了支盘水泥搅拌桩复合路基的优越性和对应关系表达式的可靠性。结果表明: 对于均质软土层可选择设置2个支盘, 中心分别布置在0.55倍和0.85倍桩长的深度位置, 对于含夹层的软土层可优先选择性质较好的土层设置支盘。以沉降量为控制指标, 支盘水泥搅拌桩与等截面水泥搅拌桩的桩长存在线性对应关系, 桩间距存在指数函数对应关系。

关键词: 支盘搅拌桩; 有限元分析; 复合路基; 桩间距

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)01-0075-07

Engineering Application of Branch Plate Cement Mixing Pile Composite Subgrade

CHEN Zhongyun¹, WANG Jia¹, LI Leifeng², SHAN Hao³, HONG Baoning^{4,5}

(1. Foshan Highway Bridge Engineering Monitoring Station Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528041, China;
2. Foshan Jianying Development Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528041, China;
3. School of Civil Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou, Jiangsu 221018, China;
4. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,
Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
5. Research Institute of Geotechnical Engineer, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Compared with the composite subgrade with equal section cement mixing pile, the composite subgrade with branch plate cement mixing pile has obvious advantages such as improving the bearing capacity and reducing the post-construction settlement. In order to facilitate the application of this new type of composite subgrade in the treatment of soft foundations of high-grade highway, the expression of the corresponding relation between the length and spacing of the cement mixing pile and the cement mixing pile with an equal section in the composite subgrade is given Under the condition of equivalent settlement. The superiority of the composite subgrade and the reliability of the corresponding relation expression are demonstrated by an engineering example. The results show that for the homogeneous soft soil layer, two branches can be selected, and the center is arranged at the depth of 0.55 times and 0.85 times of the pile length, respectively. For the soft soil layer with interlayer, the branches can be preferred to the soil layer with better properties. Taking settlement as the control index, there is a linear correspondence between the pile length of branch plate cement mixing pile and equal section cement mixing pile, and there is an exponential function correspondence between the pile spacing.

Keywords: branch plate cement mixing pile; finite element analysis; composite subgrade; pile spacing

高等级公路在穿越软弱地基时,为了保障路堤填筑施工的安全,常需要对路堤以下的地基进行处理,其中,等截面水泥搅拌桩复合路基是最常用的处理方法之一^[1]。然而,等截面水泥搅拌桩,在处理深度与承载特性方面受地质条件和施工机械等因素影响,有其局限性,特别是在处理深厚软基时,易出现路基失稳和工后沉降偏大等问题^[2]。为了拓展水泥搅拌桩的适用范围,提高路基处理质量,许多变截面搅拌桩开始被使用^[3-4],其中一种新型的支盘水泥搅拌桩复合路基已开始被引入到软基处理中^[5]。虽然,国内外学者和工程技术人员对这种新型的复合路基已有研究,如:孙涛^[6]提出了使用旋喷和搅拌工艺相结合的方法,完成支盘水泥搅拌桩的成桩,发明了与之配套的施工工艺 SRCP 工法,并研究了变截面桩的破坏形式与承载机理,给出了合理盘间距与桩间距的设置方法;Zhang Minxia 等^[7]通过现场加载试验和数值分析方法,研究了支盘位置、间距、数量和直径对支盘桩承载性能的影响;吴成刚等^[8]采用现场试验的方法对支盘桩抗压、抗拔能力以及荷载传递情况进行了研究,分析了支盘桩在深厚软基中的承载特性;童宁等^[9]研究了扩大盘盘径对桩体工作性能和桩周土体附加应力分布的影响;吴晓龙等^[10]在对挤扩支盘桩地基加固开展了承载力验算、施工质量检测及路基沉降观测的基础上分析了支盘桩地基处理效果;等等。但与等截面水泥搅拌桩复合路基的研究相比,新型支盘搅拌桩复合路基的研究相对较少,许多问题仍有值得进一步研究。

本文面向工程实际问题,在已有研究成果的基础上,着重开展支盘水泥搅拌桩复合地基与等截面水泥搅拌桩复合路基在桩间距和桩长之间的对应关系研究,为这种形式的复合路基的实际工程应用提供参考依据。

1 支盘水泥搅拌桩的受力形式

支盘水泥搅拌桩(下文简称“支盘桩”)是一种类似“树根”结构的仿生学桩型。从承载特性上看,属于多端摩擦端承桩;从桩身结构上看,属于变截面桩;从受力形式上看,与等截面水泥搅拌桩(下文简称“等截面桩”)有明显区别^[11]。

等截面桩和支盘桩受力平衡条件表达式分别为:

$$Q_c = \sum q_{pc} + \sum q_{sc} \quad (1)$$

$$Q_z = \sum q_{pz} + \sum q_{sz} + \sum q_z \quad (2)$$

式中: Q_c 和 Q_z 分别为等截面桩和支盘桩桩顶荷载, kPa; q_{pc} 和 q_{sc} 分别为等截面桩桩端阻力和桩侧摩阻力, kPa; q_{pz} 、 q_{sz} 和 q_z 分别为支盘桩桩端阻力、桩侧摩阻力和支盘阻力, kPa。其中,支盘阻力 q_z 可采用上下支盘截面处的轴力差值来进行估算,也可采用水平净投影面积阻力的方法求取,具体表达形式如下:

$$q_z = \frac{\pi(D-d)^2}{4} q_{zl} \quad (3)$$

式中: D 为支盘的直径, m; d 为桩身的直径, m; q_{zl} 为桩身水平净投影面积的阻力, kPa。等截面桩和支盘桩受力平衡条件示意图,如图 1 所示。

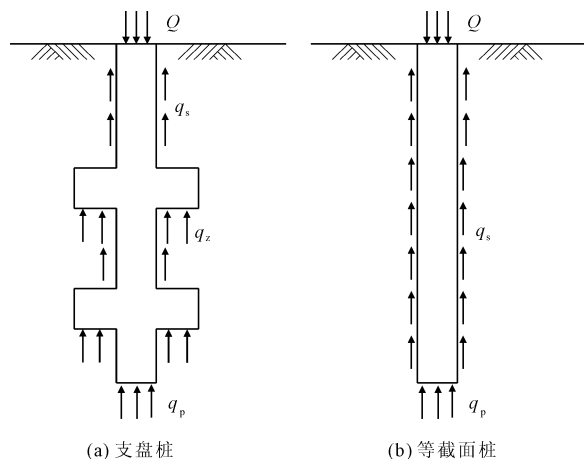


图 1 桩的静力平衡示意图

考虑等截面桩与支盘桩的受力形式的不同,在同一地质条件和路堤荷载作用下,当不同桩型复合路基发生相同沉降量时,等截面桩与支盘桩的桩长和桩间距必然存在着差异。因此,可以从沉降等效的角度出发,研究复合路基采用不同桩型时的桩长和桩间距对应关系。

2 复合路基沉降的数值模拟计算

2.1 模型的建立

为了掌握支盘桩复合路基与等截面桩复合路基的沉降对应关系,采用 Plaxis 3D 进行数值模拟计算。在相同地层条件和荷载水平下,通过不同桩长、桩间距的变化,分别计算对应的沉降量。计算模型采用梅花形布置的复合路基模型,模型尺寸为 20 m × 20 m × 30 m,模型水平边界法向约束,竖向自由,底部为全约束,即限制 x 方向与 y 方向水平位移为 0,以及模型底部水平位移与竖向位移为 0。支盘桩复合路基布置方式、断面和简化模型示意图,如图 2—图 3 所示。

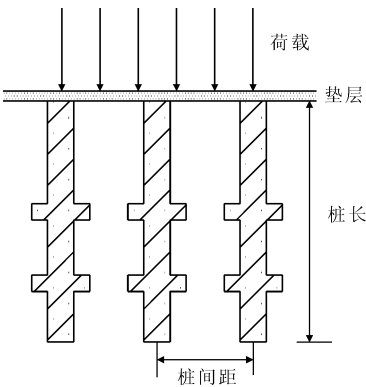


图 2 群桩复合路基剖面图

2.2 计算参数的选取

以实例工程地质条件为背景,为便于计算,本文作出如下假设^[12]:

- (1) 计算中各地层土体均服从 Mohr-Coulomb 屈服准则。
- (2) 忽略地下水的影响。
- 土层参数的取值如表 1 所示。

表 1 计算土层参数

土层	深度 h/m	侧摩阻力标准值 q_{si}/kPa	端阻力标准值 q_{p}/kPa	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
路堤填土	—	—	—	20.0	22.0	0.33	24	23
碎石垫层	0.6~0.0	—	—	25.0	25.0	0.35	—	32
素填土	0.0~-2.0	0	—	19.8	6.5	0.33	18	18
淤泥质黏土	-2.0~-15.0	40	600	17.0	5.2	0.30	12	15
粉质黏土	-15.0~-20.0	30	750	18.0	20.0	0.25	20	25
强风化砂岩	-20.0~-30.0	—	—	20.3	28.0	0.43	30	42

虽然 Plaxis 3D 中自带 Embedded 桩单元,可以实现对等截面桩体的模拟,但无法反映支盘桩的变截面特点,为保证对不同桩型计算的一致性,本文对两种桩型复合路基均使用自建的结构单元进行模拟,即:在进行等截面桩和支盘桩模型构建后,在界面参数土层和界面选项卡中,赋予桩体与支盘材料

参数,取值结合设计资料与相关参考文献[13-14]共同确定。其中,对于材料间的接触采用强度折减系数 R_{inter} (即界面强度)来模拟桩体与土体之间接触的界面强度,一般取值在 $2/3 \sim 1$ 之间,本文依据试算结果选取强度折减系数 R_{inter} 为 0.8。具体桩体单元材料参数,如表 2 所示。

表 2 桩体单元材料参数

材料模型	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	有效杨氏模量 E/kPa	有效泊松比 ν	剪切模量 G/kPa	压缩模量 $E_{\text{oed}}/\text{kPa}$
线弹性	20	2.0×10^5	0.25	8.0×10^4	2.4×10^4

注:剪切模量 G 和压缩模量 E_{oed} 均为替代参数,其中 $G = \frac{E'}{2(1 + \nu')}$, $E_{\text{oed}} = \frac{E'(1 - \nu')}{(1 + \nu')(1 - 2\nu')}$ 。

经过对不同支盘数、支盘盘径、盘厚和不同设置位置的大量数值模拟计算结果和相关参考文献的分析^[5,15-16],增大支盘数和盘径能显著影响支盘桩的承载性状,减小复合路基沉降量,但过大的支盘直径设置会严重增大后续的施工难度。因此,工程实践中合理的选取支盘桩设计参数,能够达到最佳的性价比。本文数值模拟计算中,等截面桩和支盘桩的直径均取 0.5 m,在支盘桩中,取支盘的盘径为 0.8

m、盘厚为 0.5 m;计算中取每根桩设置 2 个支盘,中心布置深度分别为 $-0.55L$ 、 $-0.85L$ (L 为桩长),可获得最佳性价比。根据实际路堤填筑情况,数值计算过程,取每级加载 12 kPa,分 10 级加载,间隔 20 d,最终荷载水平为 120 kPa。

3 等效桩长分析

以沉降等效为评价指标,通过计算不同桩长的

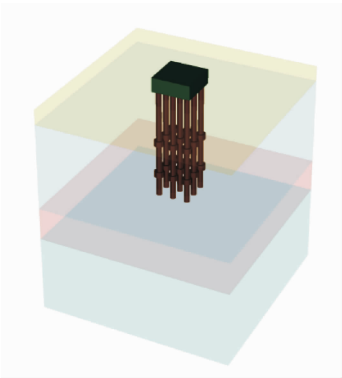


图 3 支盘桩复合地基简化模型

等截面桩与支盘桩复合路基随荷载变化的沉降曲线,并对比二者的差异性,获取两者之间的等效桩长,从而给出不同桩型复合路基之间的桩长对应关系曲线。

3.1 等效桩长计算

根据实际工程水泥搅拌桩有效处理深度(一般

<15 m),支盘桩桩长选取 10 m,等截面桩桩长选取 10 m、11 m、12 m、13 m、14 m、15 m,两种复合路基的桩间距均取 5.0*d*(*d* 为桩径)。支盘桩复合路基随着荷载变化的沉降值见表 3,不同桩长等截面桩复合路基沉降随荷载的变化情况如图 4 所示。

表 3 支盘桩复合路基随着荷载变化的沉降值

荷载/kPa	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
沉降/mm	17.05	27.90	38.75	51.15	65.10	77.50	94.55	111.60	131.75	156.55

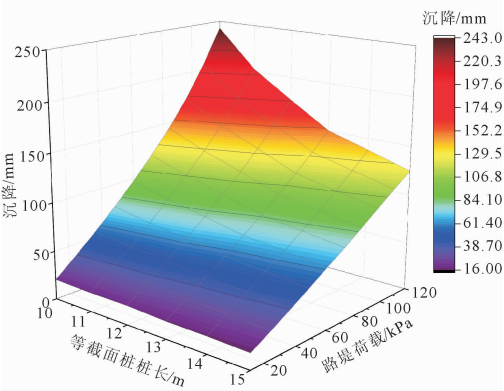


图 4 不同桩长等截面桩复合路基沉降云图

从图 4 沉降云图上看,对于等截面桩,当桩长小于 12 m 时,随着荷载的增大,沉降量增大速率逐渐增大,而在桩长大于 12 m 时,总沉降量随着荷载的增大基本呈线性增大,分析其原因为随着桩长的增大,路基承载力提高,当路基承载力较大时,在路堤荷载变化范围内路基呈线弹性变形规律,而在桩长较短,路基承载力较小时,随着路堤荷载的增大,路基呈弹塑性变形规律。这与复合路基静载试验的路基沉降规律一致,表明计算结果具有一定的准确性。

对等截面桩与支盘桩复合路基沉降分析,在相同地层条件、荷载水平和桩间距条件下,桩长 10 m 的支盘桩与桩长 13 m、14 m 的等截面桩复合路基的沉降曲线均较为接近,即:荷载在 60 kPa 前接近于桩长 14 m 的等截面桩复合路基沉降曲线;在 60 kPa 后接近于桩长 13 m 的等截面桩复合路基沉降曲线,各点沉降量平均偏差均在 10% 以内。取二者算术平均值 13.5 m,即:认为桩长 10 m 的支盘桩与桩长 13.5 m 的等截面桩等效,复合路基的沉降量接近。

3.2 等效桩长对应关系

当桩长低于 5 m 时,不利于支盘的布设;当桩长超过 10 m 时,支盘桩也会产生与等截面桩类似的深层成桩质量较差问题。因此,采用上述类似的沉降

曲线对比方法,分别取桩长 5 m、6 m、7 m、8 m 和 9 m 的支盘桩与不同桩长的等截面桩复合路基的沉降曲线对比,在等效沉降评价指标基础上,建立两种桩型等效桩长的对应关系。经数值模拟计算,获得两种桩型等效桩长的对应关系曲线,如图 5 所示。

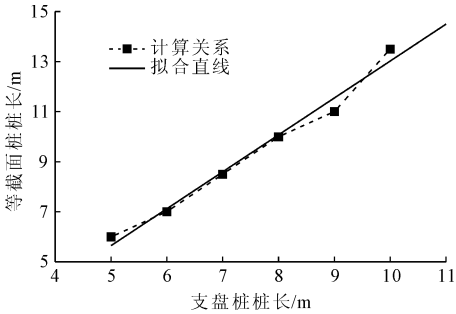


图 5 等效替代桩长曲线

由关系曲线拟合的表达式为:

$$L_e = 1.48L_z - 1.73 \quad (R^2 = 0.991) \quad (4)$$

式中: L_z 为支盘桩桩长,m; L_e 为等截面桩桩长,m; R^2 为线性拟合相关系数。

数值模拟计算结果表明,支盘桩复合路基的等效桩长随等截面桩桩长增加而不断增加。从式(4)中可以看出,桩长 5 m 的支盘桩与桩长 5.67 m 的等截面桩复合路基等效;桩长 10 m 的支盘桩与桩长 13.07 m 的等截面桩复合路基等效。因此,在处理 10 m 以上的深厚软土路基时,支盘桩相比于等截面桩复合路基有着更好应用优势,特别是下卧层软土层较厚时。值得指出,在处理 10 m 以下的软土路基,支盘桩的等效率较低,优势不明显,而且还会增加施工的难度。另外,对于含夹层的软土层,数值模拟计算表明,选择性质较好的土层设置支盘可获得更高的承载力,更大程度的减少复合路基沉降。

4 等效桩间距分析

仍以等效沉降为评价指标,通过不同桩间距的

等截面桩与支盘桩复合路基随荷载变化的沉降曲线差异性对比,获取两者之间的等效桩间距,从而给出不同桩型复合路基之间的桩间距对应关系。

4.1 等效桩间距计算

取等截面桩和支盘桩桩长均为 10 m,二者桩径为 $d=0.5\text{ m}$,支盘桩桩间距为 $5.0d$,对等截面桩桩间距分别选取 $2.5d$ 、 $3.0d$ 、 $3.5d$ 、 $4.0d$ 、 $4.5d$ 和 $5.0d$ 。支盘桩复合路基随着荷载变化的沉降值见表 3,不同桩间距的等截面桩复合路基沉降随荷载的变化情况如图 6 所示。

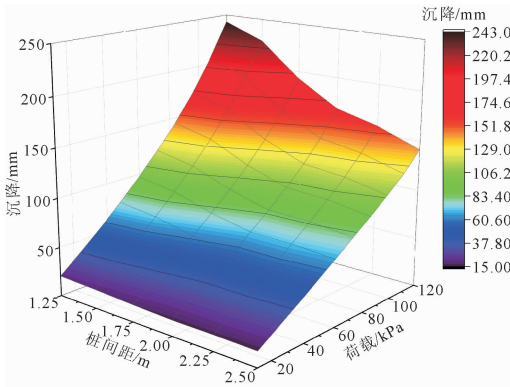


图 6 不同桩间距等截面桩复合路基沉降云图

结合表 3 和图 6,在相同地层条件、荷载水平和桩长条件下,桩间距 $5.0d$ 的支盘桩复合路基与桩间距为 $3.0d$ 的等截面桩复合路基的沉降曲线均较为接近,在整个加载过程中沉降量差异性均保持在 5% 以内。即:认为 $5.0d$ 桩间距的支盘桩与 $3.0d$ 桩间距的等截面桩等效,复合路基的沉降曲线最为接近。

4.2 等效桩间距对应关系

当桩间距低于 $3.5d$ 时,不利于支盘桩的布设;当桩间距超过 $6.5d$ 时,经数值模拟计算将会产生较大的沉降变形,复合路基使用效果较差。因此,采用上述类似的沉降曲线对比方法,分别取桩间距 $3.5d$ 、 $4.0d$ 、 $4.5d$ 、 $5.0d$ 、 $5.5d$ 、 $6.0d$ 和 $6.5d$ 的支盘桩与不同桩间距的等截面桩复合路基的沉降曲线对比,在等效沉降评价指标基础上,建立两种桩型等效桩间距的对应关系。经数值模拟计算,获得两种桩型等效桩间距的对应关系曲线,如图 7 所示。

根据图 7 曲线变化规律,采用指数关系对不同桩型复合路基桩间距关系进行拟合,得拟合表达式:

$$S_e = 1.65 + 0.11e^{\frac{S_d}{2.02}} \quad (R^2 = 0.9997) \quad (5)$$

式中: S_e 为等截面桩桩复合路基桩间距; S_d 为支盘桩复合路基桩间距; R^2 为线性拟合相关系数。

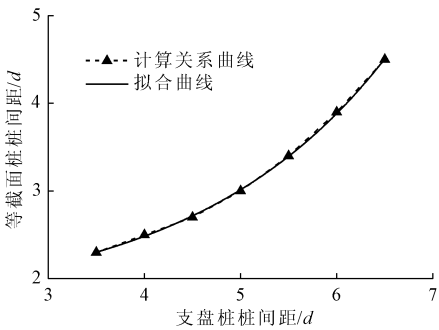


图 7 等效桩间距曲线

数值模拟计算结果表明,支盘桩复合路基桩间距在 $3.5d \sim 6.0d$ 范围内均具有较好的处理效果。从式(5)中可以看出, $3.5d$ 桩间距的支盘桩复合路基与 $2.3d$ 的等截面桩复合路基等效;桩间距为 $6.5d$ 时支盘桩复合路基与桩间距 $4.5d$ 的等截面桩复合路基等效。

值得指出,对于含夹层的软土层,实际桩的承载性能的发挥,除了与桩体本身的设计相关,也和桩体所在的地层条件密切相关。为了研究桩体所在土层性质对桩体承载力性质的影响,保持土层的其他参数设置不变,取 $2\text{ m} \sim 10\text{ m}$ 土层的弹性模量 E 的值分别为 2 MPa 、 4 MPa 、 6 MPa 、 8 MPa 、 10 MPa 、 12 MPa 。获取不同土层弹性模量条件下的桩顶荷载为 480 kPa 时支盘桩沉降量的对应关系,计算结果见表 4。

表 4 不同土层弹性模量下荷载沉降关系表

土层弹性模量/MPa	2	4	6	8	10	12
沉降/mm	8.9	7.1	6.1	5.3	4.8	4.4

由表 4 可知,随着桩间土的弹性模量提高,沉降量大幅降低。在弹性模量从 2 MPa 提高到 4 MPa 时,沉降量减少显著,土体弹性模量继续增加不能明显减少沉降量。数值模拟计算表明,选择性质较好的土层设置支盘可获得更高的承载力,更大程度的减少复合路基沉降,更具优势的等效桩间距。

5 工程实例分析

广东某高速公路的软基路段,软土层厚度 13 m ,上覆土层(素填土)厚度 2 m ,即:处理深度为 15 m 。由于工期的限制,需采用复合路基处理方法。若采用预制管桩或 CFG 桩复合路基处理方法,工程造价较高;若采用等截面水泥搅拌桩复合路基处理方法,虽然工程造价降低了,但工程质量难以保证,特别是 10 m 以下部分,由于施工机械、施工工艺等

方面的限制,往往成桩质量较差,难以发挥处理后的承载效果,工后沉降较大。经专家会议专题讨论,决定采用桩长 10 m 的二支盘水泥搅拌桩复合路基处理方法,该方法具有如下特点:(1)可以避免 10 m 以下部分水泥搅拌桩成桩质量难控制问题;(2)可以保证有足够的承载能力,减少工后沉降;(3)桩间距的增加,能够有效控制施工成本,缩短施工时间。

5.1 设计参数

该路段路堤填土高度 6 m,坡比 1:1.5,路堤顶面宽度 35 m,路堤底面宽度 53 m,地下水埋深地表以下 1.8 m。各土层相关物理力学指标,参见表 1。路段剖面图和桩体布置平面示意图,如图 8—图 9 所示。

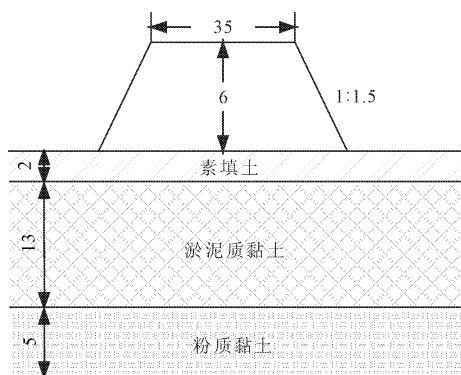


图 8 路段剖面图

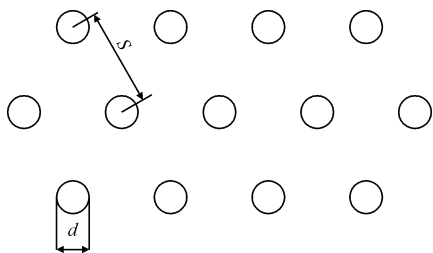


图 9 桩体布置平面图

原设计采用等截面水泥搅拌桩复合地基处理方法,设计桩长 $L_c = 15$ m,桩间距 $S_c = 1.5$ m,桩径 $d = 0.5$ m,梅花形布置。

根据上文分析的等效桩长和等效桩间距对应关系,设计变更时,分别计算可得如下两种工况:

①桩间距保持 $3.0d$ 不变,按式(4)进行桩长等效,则支盘桩等效替代桩长 11.3 m。

②桩长保持 15 m 不变,按式(5)进行桩间距等效,则支盘桩等效替代桩间距 $5.1d$ 。

鉴于上文数值模拟计算未考虑地下水位影响,同时综合考虑成桩质量和专家意见,设计变更后取桩长 10 m,较计算工况桩长缩短 11.5%,则桩间距

同比例减小 11.5% 时为 $4.5d$,即桩间距为 2.26 m,偏安全的,取支盘桩桩间距为 $4.0d$,即 2.0 m。此外,设计变更时取每根支盘桩设置 2 个支盘,盘径为 0.8 m,盘厚为 0.5 m,中心布置深度分别为 -5.5 m 和 -8.5 m,梅花桩形布置。路堤填筑按薄层轮加实施,分 12 次填筑高度 6 m,加强施工过程的现场观测。

5.2 沉降数据对比分析

按原设计参数和变更后设计参数的等截面桩与支盘桩复合路基沉降随填筑荷载增加的变化情况,由数值模拟计算获取。不同桩型和实测数据的沉降曲线,如图 10 所示。

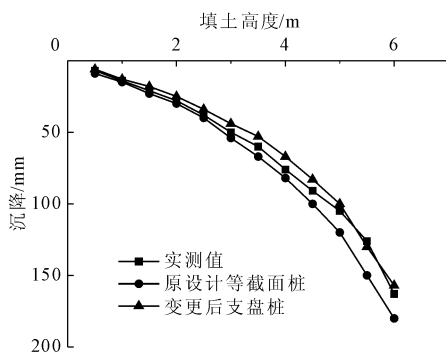


图 10 沉降变化对比曲线

从图 10 中可以看出:三条曲线的沉降量均表现出了随填筑高度而增加,在填筑高度为 1 m~5 m 之间时,等截面桩复合路基(注:考虑水泥搅拌桩成桩质量问题,10 m 以下桩体强度按 70% 取值)计算值明显大于实测值,最大偏差为 11.7%;实测值大于支盘桩复合路基计算值,最大偏差为 12.0%,这是由于填筑施工较快所致;随后实测值变化逐渐变缓,趋于计算值;在填筑高度为 6 m 时,实测值、支盘桩和等截面桩复合路基的沉降量分别为 163 mm、157 mm 和 180 mm(注:若等截面桩桩长为 10 m,其复合路基的沉降量为 236 mm)。沉降曲线对比说明,采用支盘桩处理的效果要好于等截面桩;实测值与计算值较吻合,说明提出的桩间距和桩长之间的对应关系具有较好的可靠性。该路段已通车近 2 a,现场观测数据显示,工后沉降最大值只有 17 mm,路面比较平顺。

6 结 论

本文以实际工程为背景,通过数值模拟计算,分析了支盘水泥搅拌桩和等截面水泥搅拌桩复合路基的沉降对应关系,主要结论如下:

(1) 对于软基处理深度大于 10 m 的复合路基,

采用支盘水泥搅拌桩的处理效果明显好于等截面水泥搅拌桩;对于软基处理深度小于 10 m 的复合路基,采用等截面水泥搅拌桩仍有较高的性价比。

(2) 以沉降量为控制指标,支盘水泥搅拌桩与等截面水泥搅拌桩的桩长存在一个等效桩长对应关系,即:支盘水泥搅拌桩与等截面水泥搅拌桩的桩长存在线性对应关系,桩间距存在指数函数对应关系。

(3) 在处理实际工程问题时,可根据等效桩长和桩间距对应关系,综合选择合理的支盘水泥搅拌桩的桩长和桩间距设计值。对于均质软土层可选择设置 2 个支盘,中心布置深度分别为 $-0.55L$ 、 $-0.85L$ (L 为桩长),对于含夹层的软土层可优先选择性质较好的土层设置支盘。

参考文献:

- [1] 李 然,刘 润,徐 余,等. 水泥搅拌桩法处理软土地基中桥头跳车现象的影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(S2):725-729.
- [2] Memar M, Zomorodian S M A, Vakili A H. Effect of pile cross-section shape on pile group behaviour under lateral loading in sand[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2020,20(5):308-319.
- [3] 黄财明,杨 涛,盛志成. 中字形变径水泥土搅拌桩复合地基固结分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(3):152-158.
- [4] 曹 洋,郑林达. 钉型水泥土搅拌桩加固软土路堤的数值分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4):217-222.
- [5] 鞠彦忠,宋明择,王德弘,等. 支盘群桩在复合荷载作用下的承载特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2019,27(4):918-930.
- [6] 孙 涛. 变截面劲性水泥土旋喷搅拌桩关键技术

载机理研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.

- [7] Zhang Minxia, Xu Ping, Cui Wenjie, et al. Bearing behavior and failure mechanism of squeezed branch piles[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018,10(5):935-946.
- [8] 吴成钢,姚传勤,朱 兵. 多支型挤扩支盘桩在深厚软土地基中的应用[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2021,37(6):49-52.
- [9] 童 宇,马宏伟,吴怡颖,等. 挤扩支盘桩-土相互作用的机理研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2020,40(2):13-18.
- [10] 吴晓龙,孙克强,林泽航. 挤扩支盘桩在高速公路桥头软土地基处理中的应用[J]. 广东公路交通,2020,46(4):57-60,66.
- [11] Ma Hongwei, Wu Yiyang, Tong Yu, et al. Research on bearing theory of squeezed branch pile[J]. Advances in Civil Engineering, 2020,2020(1):1-12.
- [12] 赵四汉,刘 鑫,洪宝宁,等. 路堤荷载下含硬壳层软土地基破坏模式[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):337-345.
- [13] 李连祥,李先军. 不同扩径体数量、位置对支盘桩承载力的影响[J]. 山东大学学报(工学版),2016,46(5):88-94.
- [14] 陈海军,孙志彬,张聚文. 淤泥层中沉管隧道基础形式选型及沉降数值分析[J]. 公路交通技术,2022,38(3):95-102.
- [15] 张金保,韩玉花,王海静,等. 挤扩支盘灌注桩承载力影响因素的数值模拟研究[J]. 公路,2021,66(7):81-87.
- [16] 王伊丽,徐良英,李碧青,等. 挤扩支盘桩竖向承载力特性和影响因素的数值研究[J]. 土木工程学报,2015,48(S2):158-162.

(上接第 67 页)

- [24] Eduardo Alonso, Gens A A, García-Tornel A J. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Geotechnique. 1990,3(40):405-430.
- [25] Chijimatsu M, Nguyen T S, Jing L, et al. Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository-BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 1: Conceptualization and characterization of the problems and summary of results[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2005,42(5/6):720-730.

- [26] 刘月妙,蔡美峰,王 驹. 高放废物处置库缓冲材料导热性能研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(S2):3891-3896.
- [27] Hoffmann C, Alonso E, Romero E. Hydro-mechanical behaviour of bentonite pellet mixtures[J]. Phys. Chem. Earth Parts A/B/C, 2007,32(8-14):832-849.
- [28] 孙文静,刘仕卿,孙德安,等. 饱和高庙子膨润土的渗透特性[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(1):115-119.