

粉黏土地层螺杆桩与CFG桩承载特性对比研究

孙 雷

中交(西安)铁道设计研究院有限公司 陕西 西安 710061

摘 要: 为研究粉质黏土地层中螺杆桩与CFG桩承载力特性,通过对比不同规范中单桩承载力计算模型,发现企业标准更接近现场实际情况;为进一步探究螺杆桩特性,采用现场载荷试验,发现桩径0.4m时桩基承载力达不到设计要求,为满足工程需求,调整桩径为0.5m并通过ABAQUS建立CFG桩和螺杆桩的计算模型分析得到:两种桩型的桩身轴力均沿深度的增大而减小,而螺杆桩受力则相对均匀,呈逐级衰减趋势;在几何尺寸一致下:相同荷载,螺杆桩沉降降低约1.4~1.9倍;相同沉降,螺杆桩极限承载力提高均大于50%。

关键词: 铁路路基;承载力;数值计算;现场试验;螺杆桩;粉质黏土

引言

高速铁路沉降要求严格,采用半刚性桩是常用的处理措施^[1-2],螺杆桩是利用长螺旋钻杆成孔,相比于CFG桩,螺杆桩的侧阻力(摩阻力)主要是桩与土界面构成了机械型咬合力产生,使土体形成三维应力,强化了土体强度,从而提高单桩承载力^[3]。胡金山^[4]以吴忠至中卫铁路为背景,利用室内模型试验得到桩径和桩长一致下,螺杆桩在复合地基中承载力明显比CFG桩高;陈亚东等^[5]通过采用离散单元法的颗粒流程序,发现随着桩径的增大,承载力呈线性增加。

分析以上诸多学者的研究发现,螺杆桩具有承载力高、适应地层能力强的特点。然而目前螺杆桩应用于粉黏土层的研究较少,为进一步满足工程实际,本文采取现场试验与数值模拟相结合的方法,研究粉质黏土层中CFG和螺杆桩的单桩承载特性,为类似工程的地基处理提供技术参考。

目前螺杆桩的计算模型较多,首先,根据现有规范,对比分析铁路标准、企业标准及地方标准的计算模型。

1 螺杆桩承载力计算分析

1.1 铁路标准

铁路工程地基处理技术规程中,按照水泥粉煤灰碎石桩及素混凝土桩章节的单桩竖向容许承载力 $[P]$ 取值,公式如下:

$$[P] = (U * \sum f_i l_i + A_p q_{pk}) / 2 \quad (1)$$

式中: $[P]$: 单桩竖向容许承载力,为极限承载力标准值的1/2 (kN)

A_p : 桩身圆柱体截面积 (m^2)

U : 桩身圆柱体截面周长 (m)

f_i : 第*i*层土的极限侧阻力标准值 (kPa)

l_i : 第*i*层土的厚度 (m)

q_{pk} : 极限端阻力标准值 (kPa)

从公式(1)可知,当桩的周长及面积固定不变时,计算螺杆桩变截面存在一定误差,由于螺纹段的螺牙与周边土体的物理咬合作用,使螺杆桩的端阻力不仅局限于桩端阻力,而应加以考虑土体对螺牙的端阻力。

1.2 企业标准

企业标准《螺杆桩设计与施工技术规程》公式如下:

$$[P] = (Q_{sk1} + Q_{sk2} + Q_{pk}) / 2 \quad (2)$$

式中: $Q_{sk1} = U * \sum f_i l_i$: 直杆段总极限侧阻力标准值 (kN)

$Q_{sk2} = U_1 * \sum s_i l_i$: 螺纹段总极限侧阻力标准值 (kN), $s_i = c_i + \delta * \tan \varphi_i$

$Q_{pk} = A_{p1} * q_{pk}$: 总极限端阻力标准值 (kN)

U_1 : 桩身螺纹段内径截面周长 (m)

A_{p1} : 桩身螺纹段内径截面积 (m^2)

s_i : 第*i*层土抗剪强度,根据室内实验:

c_i : 第*i*层土的粘聚力 (kPa)

φ_i : 第*i*层土的内摩擦角 ($^\circ$)

δ : 抗剪强度法向应力,当 $0.5 \leq IL < 0.75$ 时取 200kPa。

1.3 地方标准

安徽省《螺杆桩基础技术规程》,该规范中除螺纹段外,其余与企业标准一致,螺纹段计算公式如下:

$$Q_{sk2} = U_1 * \sum \beta f_i l_i \quad (3)$$

式中: β : 侧阻力增强系数为1.3~1.7。

地方规范的螺纹段总极限侧阻力标准值只考虑了一个增强系数 β ;相比之下,企业规范更加接近实际情况,考虑了土体间的效应,根据以上三种计算方法,通过以

下案例加以论证分析。

2 工程案例

2.1 工程概况

某高速铁路路基以浅挖形式通过，路基采取路堤式路堑形式，填高2.7m。地层主要以第四系全新统、上更新统为主。

(1) 第四系全新统

粉质黏土 (Q_4^{all})：与黏土呈交互层分布于地表，厚度3~5m。褐黄色为主，颗粒成份以黏粒为主，土质较均匀，可塑~硬塑，Ⅱ级普通土， $\sigma_0 = 100 \sim 160 \text{ kPa}$ 。

(2) 上更新统

粉质黏土 (Q_3^{all})：主要分布于地表，厚度0.5~30m。褐黄色为主，颗粒成份以黏粒为主，土质较均匀，可塑~硬塑，Ⅱ级普通土， $\sigma_0 = 110 \sim 180 \text{ kPa}$ 。

(3) 地层土工试验报告：

天然密度： $\rho = 1.85 \sim 2.03 \text{ g/cm}^3$ ，液性指数 $I_L = 0.25 \sim 0.71$ ，处于可塑状态，剪切值分别为：粘聚力 19.8 kPa ，内摩擦角 23.5° 。

2.2 工程设计

(1) 地基采用螺杆灌注桩处理，桩径0.4m，桩间距1.8m，正三角形布置，桩长10.0m，桩顶设桩帽。

(2) 根据液性指数 $0.21 < I_L < 0.71$ ，判定为可塑，桩周土的极限侧摩阻力及极限端阻力参考《建筑桩基技术规范》^[13]及静力触探结果综合取值，极限侧阻力： $f_i = 60 \text{ kPa}$ ，极限端阻力： $q_{pk} = 890 \text{ kPa}$ ，分别采用以上三种公式计算桩径0.4m，10m长螺杆桩单桩竖向容许承载力如表1。

表1 $\phi 0.4 \text{ m}$ 单桩容许承载力

标准	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^\circ$)	抗剪强度法向 应力 (kPa)	容许承载力 (kN)
铁标				437
企标	19.8	23.5	200	485
地标	19.8	23.5	200	355

由表1可知：相同地质条件下，企标的单桩容许承载力最大，为进一步确定桩的实际承载力，进行现场试桩。

2.3 现场试验

(1) 现场按相关要求，进行了4根桩径0.4m的螺杆桩工艺性试桩，并在28d后进行了载荷试验，每100kN逐级加载，分别测得单桩极限承载力如表2。

表2 $\phi 0.4 \text{ m}$ 单桩极限承载力检测值

编号	混凝土 (MPa)	极限承载力 (kN)	低应变检测
1	C20	400	断桩
2	C20	400	断桩
3	C25	600	未断桩
4	C25	700	未断桩

由表2可知：C20标号螺杆桩存在断桩情况，测得C25标号螺杆桩极限承载力最大值为700kN，均不满足上述三种规范计算容许承载力的2倍。

(2) 为进一步确定相关参数，进行了挖探、补充静探及钻孔取芯等验证，具体如下：

1) 钻孔取芯：补充布置了6个钻孔，取得黏土土样40组并进行了土常规及压缩试验，通过实验统计结果判断，粉质黏土液性指数 $I_L = 0.32$ ，判定塑性状态以硬塑为主。

2) 挖探：开挖螺杆桩周围土体，测量桩径、桩长、桩身强度等，基本满足设计要求，但成桩质量一般，螺旋段长度、螺距、叶片厚度等均不满足设计要求，同时断桩位置处存在混凝土搅拌不均匀的情况，如图1。



图1 现场挖探

3) 静探：在试桩周边补充实施静力触探8孔，测得端阻力极限值 q_{pk} 均大于890kPa，但在距地表4m以下深度侧阻力极限值 f_i 在45kPa左右。

(3) 根据现场补充的原位测试及钻探结果得到，静力触探比原设计值偏高，因此在端阻不变的情况下，调整侧阻力 $f_i = 45 \text{ kPa}$ ，为达到设计单桩允许承载力值及沉降控制标准，调整螺杆桩桩径为0.5m，桩间距2.0m，混凝土标号为C25，其余参数不变。采取极限侧阻力： $f_i = 45 \text{ kPa}$ ，极限端阻力： $q_{pk} = 890 \text{ kPa}$ ，按公式(1)、(2)和(3)分别计算桩径0.5m，桩长10m的螺杆桩单桩竖向容许承载力如表3。

表3 $\phi 0.5 \text{ m}$ 单桩容许承载力

标准	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^\circ$)	抗剪强度法向 应力 (kPa)	容许承载力 (kN)
铁标				438
企标	19.8	23.5	200	597
地标	19.8	23.5	200	365

为考虑经济成本及进一步论证设计容许承载力可靠性，以下采取数值模拟方法分析螺杆桩和CFG桩两种桩型承载特性。

3 数值计算

3.1 数值模拟

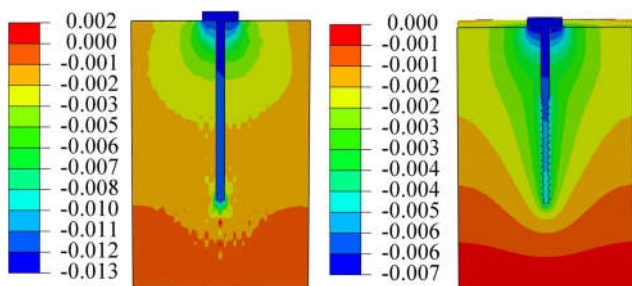
采用ABAQUS有限元分别进行CFG桩与螺杆桩在不同荷载值下承载特性对比分析:

(1) 连续介质模拟: 有限元数值计算中土体采用“摩尔-库伦塑性”模型, 桩采用弹性模型。

(2) 边界条件的模拟: 对桩周边土体的侧面进行法向位移约束, 并且对桩周边土体底面进行固定, 地表为自由面。

(3) 模拟顺序: 首先进行地应力平衡, 通过生死单元“杀死”土中的桩并替换混凝土桩, 后对桩顶承台进行加载, 建立模拟模型。

(4) 分别采用250kN、450kN、650kN、850kN、1050kN、1300kN的集中荷载来模拟现场逐级加载的过程, 对CFG桩和螺杆桩施加6级集中荷载, 当CFG桩荷载达到1300kN时沉降约14mm已接近高铁要求的不大于15mm的控制值, 因此荷载在1300kN时停止加载, 并得到对应的荷载沉降值, 各级荷载作用下CFG桩与螺杆桩的荷载—沉降关系曲线, 如图3、4。



(a) CFG桩荷载位移云图 (b) 螺杆桩荷载位移云图

图2 位移云图

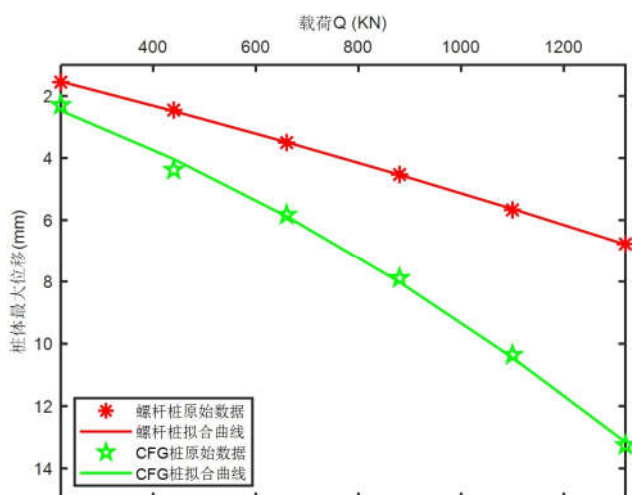


图3 Q-s关系曲线

(5) 根据CFG桩和螺杆桩的荷载位移云图-图2及Q-s关系曲线图3得到:

1) 由图2可知: 两种桩型的桩身轴力均沿深度的增大而减小, 但CFG桩受力主要集中在桩的1/4~1/2范围内, 易出现断桩情况, 而螺杆桩受力则相对均匀, 由上到下呈逐级衰减趋势, 这主要是由于螺杆桩螺纹段的螺旋叶片与土体产生机械咬合力所致。

2) 由图3的Q-s曲线可知: CFG桩呈抛物线形式变化, 而螺杆桩基本呈线性变化, 由此可见螺杆桩沉降趋势相对缓慢, 所承受的荷载更大; 在几何尺寸一致下: 相同荷载, 螺杆桩沉降值较CFG桩降低约1.4~1.9倍; 相同沉降, 螺杆桩较CFG桩极限承载力提高值均大于50%。

3.2 对比分析

通过以上两种不同桩型承载特性对比, CFG桩虽然成本低约30%, 但承载力却降低50%以上且沉降较大, 同时CFG桩易出现断桩的情况; 后期荷载试验中依据数值模拟结论, 直径0.5m的螺杆桩单桩荷载试验值可达到1300kN, 与企标设计容许承载力2倍值更接近, 且实际Q-s关系曲线与模拟值相当, 现场成桩质量良好, 低应变检测无断桩情况, 考虑工程安全可靠及沉降要求, 本工程下建议采用直径0.5m的螺杆桩。

4 结语

(1) CFG桩受力主要集中在桩的1/4~1/2范围内, 对于荷载较大的桩, 建议采取螺杆桩加固, 避免断桩风险。

(2) 调整螺杆桩桩径后螺杆桩的单桩极限承载力明显提升, 相同桩径及桩长下, 0.5m桩径螺杆桩较CFG桩极限承载力提升大于50%, 沉降降低1.4~1.9倍。

(3) 工程应用实例证明: 采用大桩径、高强度螺杆桩解决了本工程承载力不足、断桩等难题, 且企业标准计算值更接近现场实际情况, 为今后螺杆桩在该地层工程应用提供了宝贵的实践依据。

参考文献

- [1]成孝玉.基于螺杆桩的高铁梁场软土地基加固技术研究[J].铁道建筑技术,2022(01):139-142.
- [2]高峰.螺杆桩在京雄城际铁路固安东站路基地基处理中的应用[J].铁道建筑,2020,60(06):105-107.
- [3]张伟,彭振斌,李志平.螺杆桩在地基处理中的应用[J].岩土工程界,2007(11):38-39.