

砂土地区超长钻孔桩承载性状研究

陈维超¹, 杨伟军²

(1. 湖南建工集团有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 长沙理工大学)

摘要:加蓬共和国 Ogooué 特大桥桥位处的地层为深厚砂土层, 基桩均采用钻孔灌注桩, 采用数值方法研究了桩长、桩径、桩土弹模比、桩端土与桩侧土弹模比对超长钻孔桩承载性状的影响, 分析了各因素下桩顶位移—荷载曲线、桩端位移—荷载曲线、桩身轴力传递、桩身压缩以及桩侧摩擦力的承载特性。结果表明:在一定桩长范围内增加桩长可提高基桩承载力, 超过一定长度后增大桩长并不能提高基桩承载力;超长基桩在达到承载力时桩顶位移大, 其中桩身压缩量占较大的比例, 在大吨位超长基桩设计时应选择合理的长径比来提高基桩承载力;提高混凝土强度等级对增加基桩承载力较小, 但能改善桩顶的沉降特性, 基桩混凝土强度等级可选用 C30~C35;增大桩端土的弹性模量可改善桩顶荷载—位移特性;其研究成果为砂土地区超长钻孔桩的设计与施工提供了一定的理论参考依据。

关键词:砂土地区; 超长钻孔桩; 承载性状; 数值分析

超长钻孔桩具有较大的承载能力及较高的稳定性, 已广泛应用于工民建工程、高速铁路与公路、市政桥梁、港口码头以及大型构筑物等工程中。超长钻孔桩的承载性能与桩的几何特征、材料性能、土体特性以及受荷形式等因素有关, 受力机理复杂。许多学者采用理论分析、现场试验及模型试验研究了超长桩的承载特性。冯世进等进行了黄土地基中超长钻孔桩承载性状试验, 认为超长桩的荷载—位移曲线为缓变型, 桩周土层性质、桩长以及成孔工艺直接影响桩身轴力的传递以及桩侧阻力的发挥, 尽管超长钻孔桩具有较高的承载能力, 但桩端阻力和桩侧阻力为异步发挥;谭晓琦等通过试验深入研究了软土地基超长桩的承载特性, 认为超长桩的竖向承载力主要是由桩侧摩阻力来提供, 其承载力随桩周软弱土层的埋深、厚度的增大均呈线性减小, 随软弱下卧层埋深的增大而增大;胡念等研究了超长嵌岩钻孔灌注群桩承载特征与受力机理, 认为超长嵌岩钻孔灌注群桩的沉降在加载和卸载阶段均与荷载近似成线性增加关系, 在加载阶段桩侧摩阻力从上往下逐渐发挥且极限摩擦阻力沿深度增加, 在卸载阶段桩侧摩阻力局部存在残余摩擦而整体上呈现疲劳现象;金明等进行了砂土中超长桩的室内模型试验, 研究了单桩荷载—沉降关系、轴力以及桩侧摩擦阻力的荷载传递机理;黄挺等运用模型试验研究了砂土中双桩负摩阻力。

综上, 对砂土地区超长钻孔桩承载特性还有待进一步的研究。加蓬共和国 Ogooué 特大桥位于 Ogooué 入海口, 桥梁全长 4 700 m, 桥位处于深厚砂土层, 基桩均采用钻孔灌注桩。该文以 Ogooué 特大桥为工程背景, 采用数值方法研究桩长、桩径、桩土弹模比、桩端土与桩侧土弹模比对超长钻孔桩承载性状的影响规律, 为砂土地区超长钻孔桩的设计与施工提供一定的理论参考依据。

1 分析模型

采用岩土工程 FLAC^{3D} 软件数值分析方法进行砂土地基钻孔灌注桩承载性状研究, 计算过程中, 综合运用混合离散法及动态松弛法, 利用显示差分法计算大变形问题, 并采用小变形本构关系对各时步进行叠加, 得到大变形解。

分析模型如图 1 所示, 其中桩侧土的范围取大于桩径的 35 倍, 桩端下土层的厚度取大于桩长的 $L/2$, 此时边界对桩基的受力影响较小。砂土地区中钻孔灌注桩的接触面具有较好的摩擦特性, 其接触面摩擦系数取相邻土层的 0.8 倍;同时假设桩周砂土为均质砂土层, 砂土本构模型采用莫尔—库仑模型, 桩土接触面采用无厚度莫尔—库仑接触面模型, 砂土的黏聚力 c 为零, 泊松比 ν 为 0.3, 密度为 $1\ 840\ \text{kg/m}^3$, 内摩擦角

收稿日期:2019-12-25(修改稿)

作者简介:陈维超,男,博士, E-mail:wlrwc@163.com

为 32° , 砂土的弹性模量 E 为 69 MPa; 基桩混凝土的泊松比 ν 为 0.2, 混凝土密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$, 混凝土强度等级为 C35, 其桩身的弹性模量 E_c 为 $3 \times 10^4\text{ MPa}$ 。

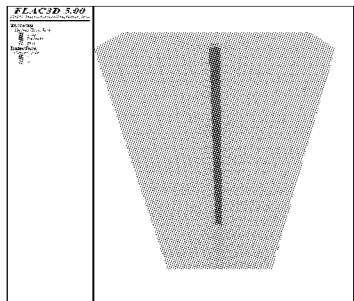


图 1 数值分析模型

2 计算结果及分析

2.1 桩长对承载性状的影响

基桩直径为 1.6 m, 桩长 L 分别取 50、70、90、110 m。

2.1.1 位移—荷载曲线与桩身压缩特性

位移—荷载曲线与桩身压缩特性分别见图 2~4。

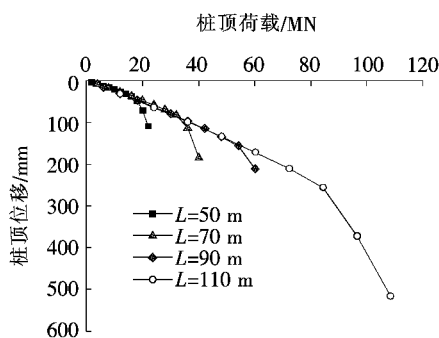


图 2 桩顶位移—荷载曲线

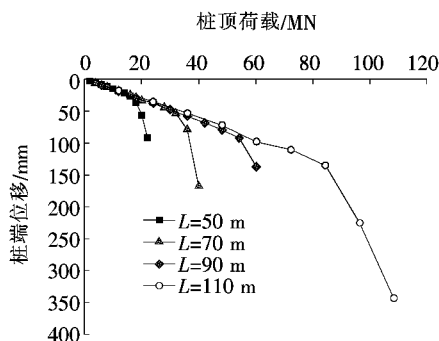


图 3 桩端位移—荷载曲线

由图 2~4 可知:

(1) 随桩长的增加, 桩顶位移—荷载曲线的突变拐点逐渐向右下方下移, 基桩承载力随之增加; 各基桩桩顶位移—荷载曲线在拐点出现前, 位移—荷载曲线

几乎重合, 桩顶位移与荷载呈线性关系, 表现为纯摩擦桩特性; 当桩长为 110 m 时, 基桩承载力为 84 400 kN, 桩顶位移为 255 mm, 此时桩顶位移过大早已不能满足工程的使用要求。尽管增加桩长可提高基桩承载力, 但应考虑超长钻孔桩在荷载作用下对桩顶位移的影响。

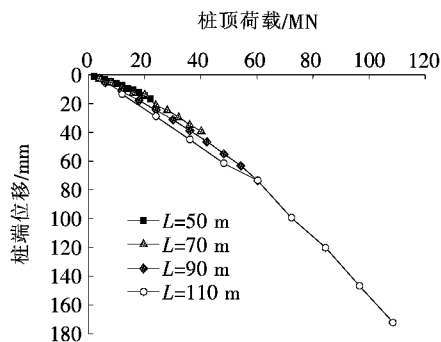


图 4 桩身压缩曲线

(2) 在同一荷载作用下, 桩端位移随桩长增加有所减小, 而桩身的压缩则随桩长增加而增大。以上结果表明, 超长钻孔桩的桩身压缩所占桩顶沉降位移的比例较大, 桩长为 110 m 的基桩, 达到极限承载力时的桩顶位移为 255 mm, 其中桩身压缩为 120 mm, 占桩顶总沉降位移的 47.1%。在以桩顶沉降位移为限制条件时, 增加基桩长度, 所需的荷载反而有所减小。

2.1.2 桩身轴力传递特性

桩身轴力传递特性见图 5。

由图 5 可知: 在荷载较小时, 桩身轴力随深度增加呈线性衰减, 表现为纯摩擦桩特性。基桩在达到极限承载力前, 上部 20% 桩段的桩身轴力传递较快, 衰减减小; 在桩侧摩阻力作用下, 下部桩段的桩身轴力随深度增加大致呈线性衰减。当荷载大于极限承载力时, 上部 0~20 m 桩段的桩身轴力快速传递, 桩身轴力基本无衰减, 至 4/5 桩截面处, 桩身轴力以弧形的方式缓慢衰减; 距桩端 1/5 的桩段, 桩身轴力衰减很快。究其原因: 当荷载大于极限承载力时, 桩顶已发生大的沉降位移, 桩土体之间接触面已发生剪切破坏, 桩身轴力不能通过桩土之间的剪应力有效传递到土体中, 上部桩段的桩身轴力传递表现为轴力衰减很小的现象, 不同桩长的基桩桩身轴力传递特性基本一致。

2.1.3 桩侧摩阻力分布特性

桩侧摩阻力受桩土界面粗糙度、成桩形式、桩周土体性质以及桩身侧向应力等因素的影响, 桩基所受竖向荷载通过桩侧摩阻力以剪应力的方式将荷载传递到桩周土中。图 6 为桩长 50、70、90、110 m 的桩侧摩阻力分布图。从桩身轴力传递曲线, 可以反映出桩侧摩

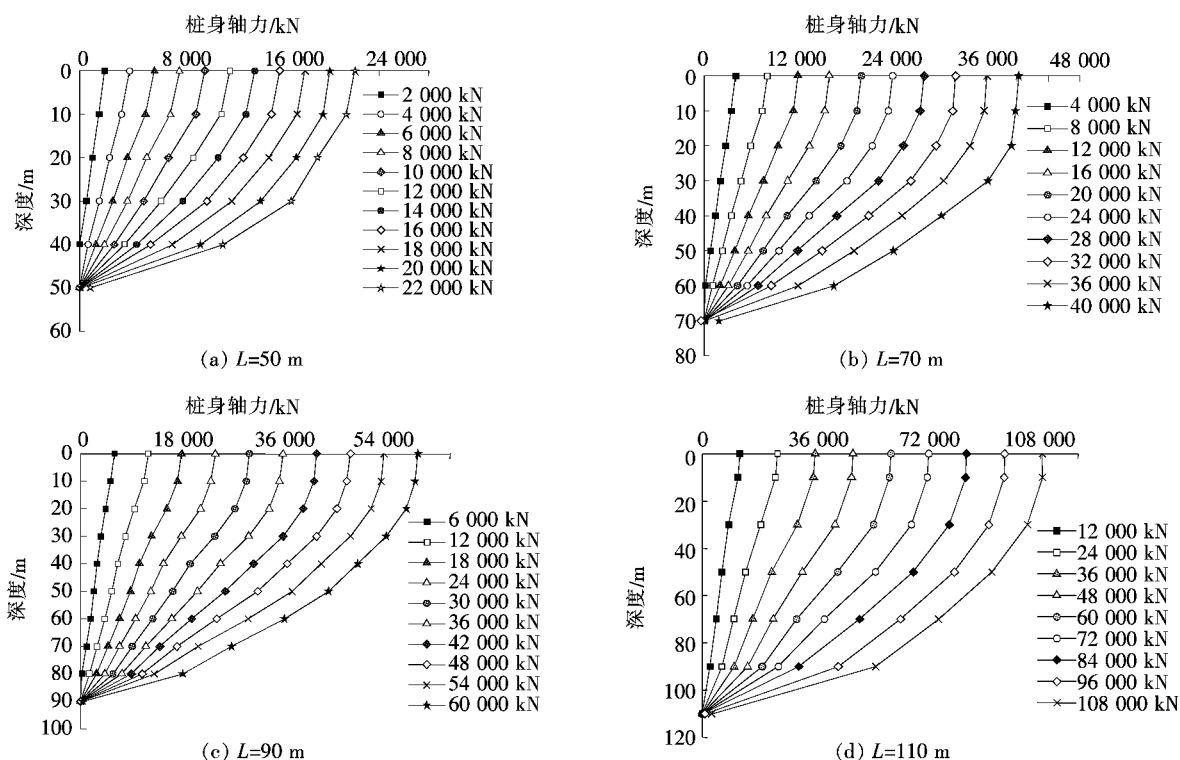


图5 桩身轴力传递曲线

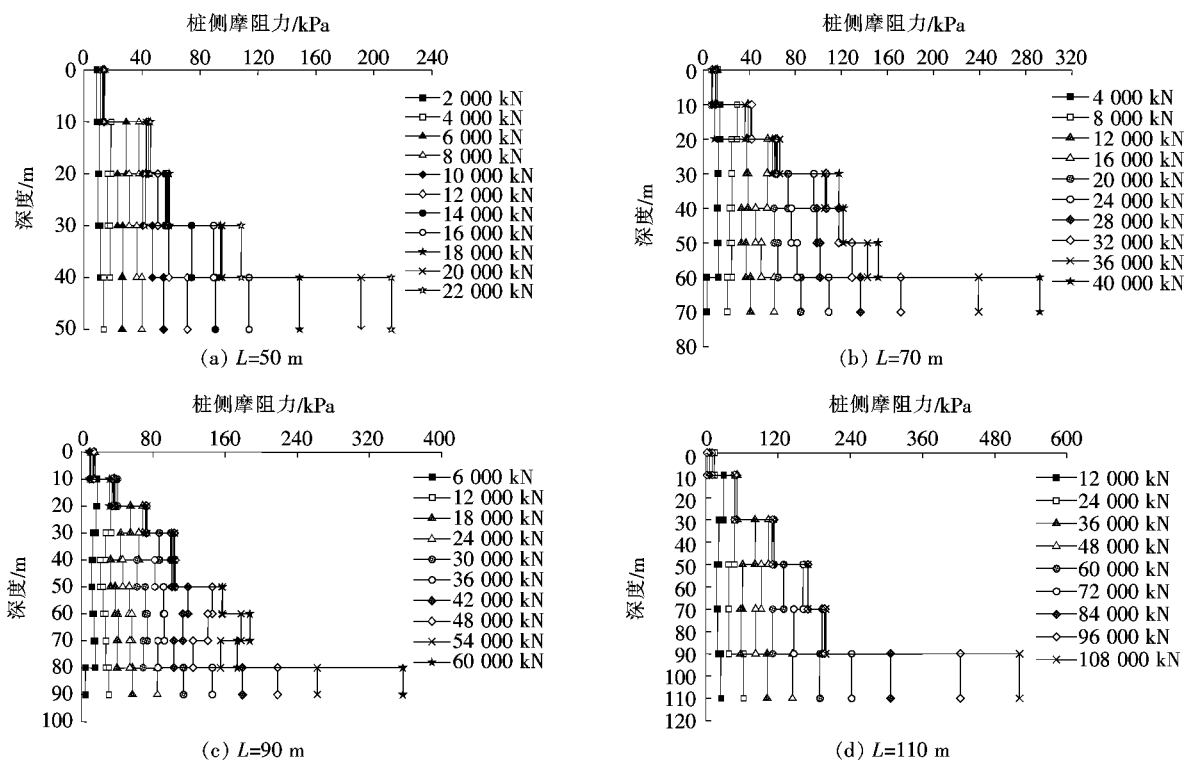


图6 桩侧摩阻力分布

阻力发挥的特性,桩侧摩阻力采用式(1)计算,以每 10 m 计算各桩段桩侧摩阻力。

$$\tau_i = \frac{\Delta Q}{u \Delta l} \quad (1)$$

当荷载较小时,各区段桩侧摩阻力大小相当,均未达到极限值,在达到极限值前,桩侧提供的摩阻力随荷载的增加而增大,且各区段桩侧摩阻力从上至下逐步达到极限值,当荷载进一步增大,已达到极限值的桩侧

摩阻力有所减少,表现为桩侧软化现象。从图 6 可以看出:桩侧摩阻力极限值随深度增加而增加,这是在桩侧摩阻力作用下压密了土层,提高了土体的力学性能;超长钻孔桩的桩土相对位移和桩身压缩较大,桩土相对位移上部分比下部分大,桩侧摩阻力的发挥上部分也比下部更为充分。

2.2 桩径对承载性状的影响

桩长为 90 m,桩基直径分别取 1.2、1.6、2.0、2.5 m 的基桩承载性状如图 7~9 所示。

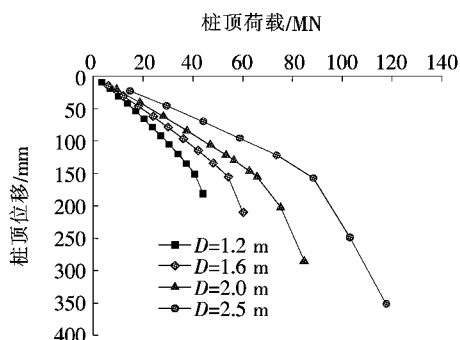


图 7 桩顶位移-荷载曲线

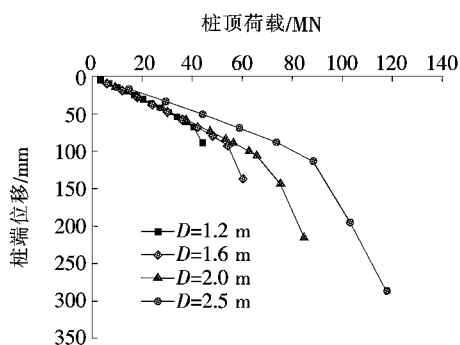


图 8 桩端位移-荷载曲线

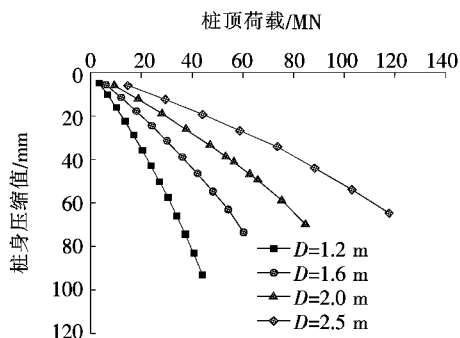


图 9 桩身压缩曲线

从图 7 可以看出:桩长 90 m 而不同直径基桩的桩顶位移-荷载曲线突变拐点基本出现在同一沉降位移值处,但桩顶位移-荷载曲线随桩径的增加而逐渐变缓,基桩承载力随桩径增加而增大,桩径 2.0 m 的基

桩承载力为 65 940 kN,桩径 2.5 m 的基桩承载力为 88 312 kN;在同一荷载作用下,增加桩径能有效减少桩顶的沉降,提高桩顶的沉降特性。

从图 8 可以看出:桩径不大于 2.0 m 时,各基桩的桩端位移-沉降曲线在突变拐点出现之前基本重合,表明在同一荷载作用下桩端沉降随桩径的增大变化较小;当桩径增加到 2.5 m 时,同一荷载作用下桩端沉降有所降低。由于增大桩径增加了基桩的刚度,在同一竖向荷载作用下,桩身的压缩随桩径的增大而减小,如图 9 所示。

由图 7 与图 2 可知:增大基桩桩径比增加桩长来提高基桩的极限承载力以及控制桩顶的沉降效果更明显。对于超长钻孔桩,尽管增大桩径能够较明显地提高基桩承载力,但混凝土用量增大,增加了工程造价,在大吨位超长钻孔桩设计时,应合理地选择桩径和桩长。基桩的轴力传递及桩侧摩阻力分布特性与 2.1 节相似,此处不再另行论述。

2.3 桩土弹模比对承载性状的影响

桩身混凝土强度等级分别为 C30、C50、C60、C80 时,混凝土弹性模量分别为 3.0×10^4 、 3.45×10^4 、 3.60×10^4 、 3.80×10^4 MPa,桩径为 1.6 m,桩长为 90 m,桩周土的弹性模量为 $E=69$ MPa,桩土弹模比对基桩的承载性状影响如图 10~12 所示。

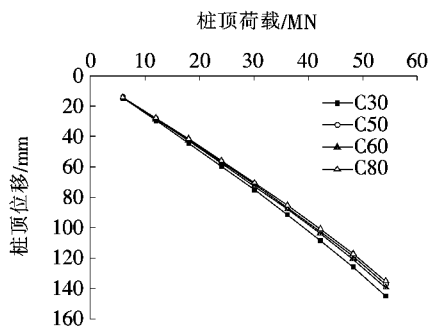


图 10 桩顶位移-荷载曲线

从图 10~12 可以看出:在同一桩土环境、相同荷载作用下,桩顶沉降随混凝土强度增加而有所减少,即采用高强度混凝土,其混凝土弹性模量也相应提高,基桩刚度增大;当加载荷载为 54 250 kN 时,混凝土强度为 C30 的桩顶沉降位移为 145 mm、桩身压缩为 55 mm,混凝土强度为 C80 的桩顶沉降位移为 135 mm、桩身压缩 44 mm,桩顶位移减小 10 mm,桩身压缩减少 11 mm。提高基桩混凝土强度,基桩承载力并没有显著提高,这是因为基桩承载力取决于桩侧摩阻力及桩端阻力;提高混凝土强度等级,在一定程度上改善了

桩顶的荷载沉降特性,但对桩端沉降的影响很小;在基桩设计中,基桩混凝土强度等级可选 C30~C35。

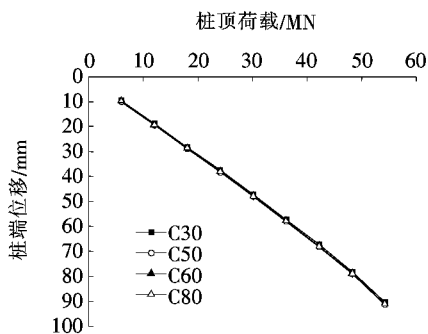


图 11 桩端位移-荷载曲线

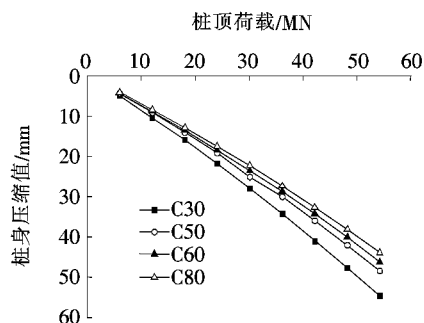


图 12 桩身压缩曲线

2.4 桩端、桩侧土弹模比对承载性状的影响

桩周土的弹性模量为 $E=69\text{ MPa}$,取桩端土弹性模量分别为桩侧土弹性模量的 1、2、4、10 倍,计算桩长为 60 m,研究桩端土、桩侧土弹性模量比对桩基承载性状的影响,各基桩的桩顶位移-荷载曲线见图 13。

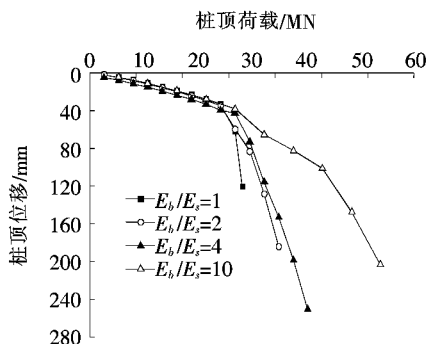


图 13 不同 E_b/E_s 的位移-荷载曲线

从图 13 可以看出:桩顶沉降拐点出现前,提高桩端土的弹性模量,所引起的桩顶位移-荷载曲线的变化很小,基桩的承载力大小基本一致,约为 15 MN,表现为纯摩擦型桩特性。沉降拐点出现后,随荷载的进一步增加,由于桩侧摩阻力已不能足够抵抗桩顶所受的竖向荷载,其承力模式转变为与桩端土体共同承担荷载,随着桩端土弹性模量的增大,其拐点后的荷载沉降曲线斜率逐渐变缓,说明弹性模量较小的桩端土,更

容易出现桩端刺入破坏的现象,此时在少量增加荷载时其桩顶沉降增加较大。对于桩端土与桩侧土弹性模量比 $E_b/E_s=2、4、10$ 的基桩,当荷载达到一定值后桩顶沉降会迅速增大,但随桩端土弹性模量的增加,其桩顶的沉降速率有所减缓,这是因为桩端土刚度越大所承受的桩端阻力也越大,抵抗基桩刺入土体破坏的能力也就越强。综上可知,增大桩端、桩侧土的弹性模量比,有利于改善基桩的荷载-沉降曲线特性以及基桩承载性能,但对于提高超长钻孔桩的承载能力不是特别明显。

3 结论

(1) 桩径一定时,增加桩长能有效提高基桩的承载力,但桩顶位移也相应增加;基桩越长,基桩达到承载力时的桩身压缩值所占桩顶位移的比例越大,对于超长钻孔桩,应考虑桩身压缩对桩顶位移的影响;桩身轴力传递从上至下逐渐衰减,桩侧土所提供的侧摩阻力随深度增加而增加,上部桩段侧摩阻力的发挥比下部桩段更充分。

(2) 桩长一定时,增加桩径能有效提高基桩的承载力及改善桩顶的沉降特性,在大吨位超长钻孔桩设计时,基桩应选择合理的长径比,在保证基桩的承载力及桩顶沉降特性的前提下,减少工程造价。

(3) 提高桩端土弹性模量有利于改善桩顶荷载-位移特性,在工程实际中,可通过桩端后注浆改善桩土端的环境;提高基桩混凝土强度等级在一定程度上能减小桩顶的沉降位移,但对基桩承载力的增加较小,这是因为砂土地区的基桩承载力取决于桩侧摩阻力及桩端阻力,工程实际中,对耐久性要求不高的情况下,基桩混凝土强度等级可采用 C30~C35。

参考文献:

- [1] 冯世进,柯瀚,陈云敏,等.黄土地基中超长钻孔桩承载性状试验研究[J].岩土工程学报,2004(1).
- [2] 谭晓琦.软基超长灌注桩承载性能的试验研究[J].公路,2006(12).
- [3] 胡念,高睿,曾亚武.超长嵌岩钻孔灌注群桩承载特征与受力机理研究[J].长江科学院院报,2008(5).
- [4] 金明,龚维明,葛建光.砂土中超长桩承载性能试验[J].建筑结构,2011(1).
- [5] 黄挺,戴国亮,付守印.砂土中双桩负摩阻力模型试验研究[J].中外公路,2016(3).
- [6] 孙书伟,林杭,任连伟.FLAC^{3D}在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2011.