

文章编号: 1674-599X(2021)02-0068-08

大直径超长桩承载性状影响研究

王思, 张永杰, 程鑫, 黄永刚, 李子丰

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为探究桩端土强度对超长桩承载性状的影响, 建立了 3 种不同长度的超长桩。通过改变桩端土的强度, 在荷载作用下, 研究轴力沿着桩身传递、桩侧摩阻力的影响及桩自身变形。分析了桩端土强度的提高对超长桩上段和下段桩侧摩阻力的影响。研究表明: 桩端土强度提高 1~2 倍时, 超长桩极限承载力提高 7.06%~22.49%; 80m 基桩对应 5 种不同长径比时, 长度增加 25%~50%, 其极限承载力提高 35.06%~63.21%; 在同级荷载作用下, 桩端土强度高的桩侧摩阻力发挥小于桩端土强度低的; 端阻强化效应在桩端土强度较弱的土层中也存, 且长径比越小增强的效应越明显; 该研究可以为实际工程中超长直径桩基设计和承载力估算提供参考。

关键词: 超长桩; 桩端土强度; 桩顶沉降量; 端阻强化

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.011

Numerical analysis of influence of soil strength of pile tip on bearing capacity of overlong pile

WANG Si, ZHANG Yong-jie, CHENG Xin, HUANG Yong-gang, LI Zi-feng

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to investigate the influence of soil strength at end of pile on bearing capacity of super-long piles, three kinds of super-long piles with different lengths were established. By changing the strength of soil at end of pile, the transfer of axial force along the pile body, the influence of pile lateral friction resistance and the deformation of pile were studied. The influence of soil strength on the lateral friction of the upper and lower sections of super-long piles was analyzed. The results show that, the ultimate bearing capacity of super-long pile is improved from 7.06% to 22.49%, when the soil strength of pile tip is increased by 1 to 2 times. When the 80 m foundation pile with five different length to diameter ratios, the ultimate bearing capacity increases from 35.06% to 63.21%, when the length increases from 25% to 50%. Under the same load, the lateral friction of pile with strong soil at end of pile is less than that of pile with weak soil. End-resistance strengthening effect also exists in the weak soil layer. The strengthening effect will increase with the decreasing of length to diameter ratio. The numerical simulation results can provide reference for the design and bearing capacity estimation of super-long diameter pile foundation.

Key words: super-long pile; soil strength at pile tip; settlement of pile top; end-resistance strengthening

大直径超长桩在高层建筑中应用广泛, 但是其承载受力相对于传统的短桩和中长桩不同。超长桩因为其自身的高压缩量会限制自身的承载力, 承载

性状往往比较复杂, 所以超长桩也是众多学者关注的焦点。桩端土的强度会对超长桩承载性状造成影响, 且持力层会给基桩带来较大的经济效益。席宁

收稿日期: 2020-08-07

基金项目: 长沙理工大学校级专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJCX201923)

作者简介: 王思(1994-), 男, 长沙理工大学硕士生。

中^[1]提出桩侧阻力与桩端阻力之间存在相互作用, 桩端土强度提高对桩侧摩阻力具有增强作用。张忠苗^[2-5]等人通过现场测试和室内模型试验, 研究了桩端土条件对超长桩极限承载力、桩侧摩阻力的影响, 但成本巨大、现场地址条件复杂, 具有一定的局限性, 未能设置对比实验。董金荣^[6-10]等人通过理论研究, 解释了桩端土强度对桩侧阻力影响的规律和机理。但这些研究考虑的桩型条件比较单一, 而超长桩承载性状会受到土体参数、自身长度、直径等不同的影响。蒋建平^[11-14]等人通过数值模拟, 研究了不同桩端土的弹性模量对超长桩的力学特性, 其结果表明: 桩端土强度对总桩侧阻力具有强化作用, 得到了量化规律, 但在数值模拟中未考虑桩端土的强度、长径比对超长桩极限承载力的影响和量化规律。同级荷载作用下, 桩端土的强度对超长桩桩侧摩阻力的影响, 并且可给出量化规律。因此, 本研究通过建立 3 种不同的桩长及对应的 3 种不同桩径模型, 通过改变桩端土的强度, 研究其对极限承载力、轴力、桩身压缩量、桩侧摩阻力的影响。

1 有限元模型的建立

以上海某高层住宅小区的桩基础为例。该试验桩为钻孔灌注桩, 桩身混凝土强度为 C30, 桩长为 60 m, 桩径为 1 m。受现场场地条件的限制, 测试时采用锚桩法为试桩, 提供反力。现场土体参数见表 1。

表 1 桩土主要参数表

Table 1 Parameters of soil

名称	H/m	C/kPa	$\varphi/(\circ)$	E/MPa	ν	$\gamma(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
杂填土	2.6	—	—	—	—	19.2
粉细沙	60.0	2	33	35	0.30	18.0
含砾粉细砂	71.0	4	30	105	0.29	19.0

注: H 为层底埋深; C 为黏聚力; φ 为内摩擦角; E 为弹性模量; ν 为泊松比; γ 为重度。

为验证接触模型、网格尺寸、土体参数等合理性, 通过有限元模拟桩基受力提取荷载模拟值与实测值对比, 采用 ABAQUS 有限元软件进行建模分析, 建立四分之一轴对称单桩载荷试验模型, 桩土均采用轴对称实体单元, 根据地层信息建立三维有限元模型, 因杂填土埋深较浅且缺少地层资料, 统

一按照粉细砂进行建模, 如图 1 所示。土体模型的长、宽均为 30 m, 高度为 2 倍桩长 120 m, 划分土体网格时, 对桩周网格进行了加密处理。在模拟过程中, 桩采用线弹性材料进行模拟, 弹性模量取 30 GPa, 土体采用摩尔库伦本构模型。桩土的相互作用通过设置接触面来实现, 通过多次试算, 摩擦系数取 0.42。

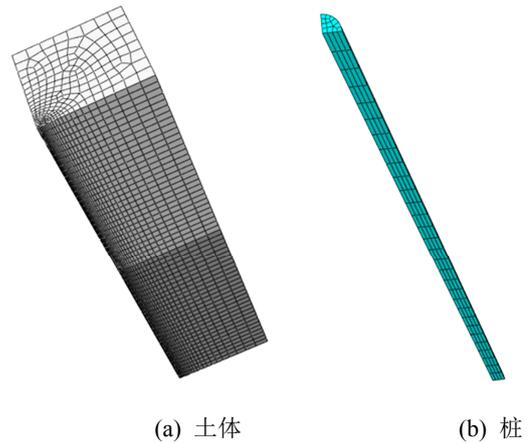


图 1 有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of finite element model

数值计算和现场实测的桩顶荷载 Q -沉降 S 曲线如图 2 所示。以陡降段和缓降段的转折点确定基桩的极限承载力。数值计算的单桩极限承载力为 16 033 kN 时, 模型桩桩顶的沉降为 32.9 mm, 实测值为 16 500 kN, 桩顶对应的沉降为 30 mm。模拟型与实测值的荷载相差 467 kN, 桩顶沉降相差 2.9 mm, 两者较接近, 说明有限元可以反映一定的实际情况。表明: 本研究中计算的选用模型材料参数及网格划分是合理的。

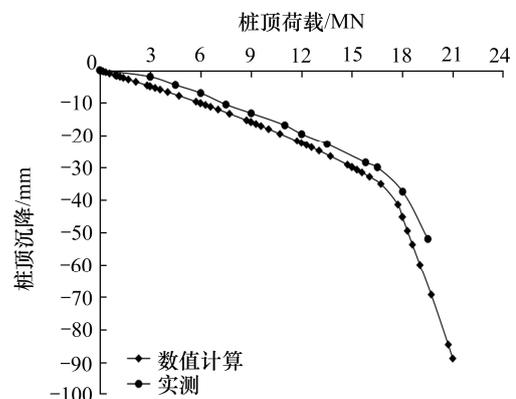


图 2 数值计算与实测值 Q - S 曲线对比

Fig. 2 The Q - S curve of measured value and numerical calculation

2 不同长度单桩计算结果分析

为模拟桩端土体强度对超长桩承载性能的影响,通过建立 80 m、100 m、120 m 3 种长度 L 的超长桩,每种桩长对应 3 种不同直径 D ,分别为 1.0 m、1.5 m、2.0 m。为简化计算,统一采取第四层土粉细砂进行建模,将桩端土的弹性模量定义为 E_s ,本试验中研究静荷载,因此所提到的弹性模量均为静弹模,分别设置为 35 MPa、70 MPa、105 MPa。研究桩端土强度对超长桩在土体中承载性能的影响,计算模型的网格尺寸及网格属性与验证模型相同。

2.1 荷载沉降曲线分析

龚晓南^[15]指出对于大直径桩而言,一般根据上部结构类型和沉降的敏感度,取某一沉降值对应的荷载为极限承载力,该极限值通常取 40~60 mm 或桩径的 3%~6%。因此,分析极限承载力时,都是建立在桩顶沉降为 50 mm 所对应的荷载,各桩极限承载力见表 2。由于不同桩长对应的 $Q-S$ 曲线规律相同,以 80 m 桩为例,荷载沉降曲线如图 3 所示。

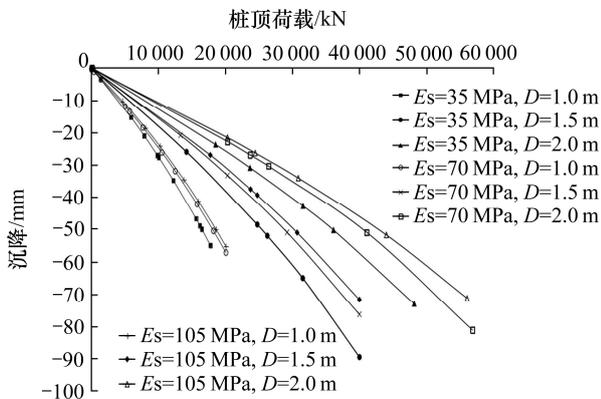


图3 80 m 桩 $Q-S$ 曲线

Fig. 3 $Q-S$ curves of the 80 m pile

从图 3 中可以看出,当桩顶沉降控制极限承载力时,超长桩的荷载沉降曲线一般为缓降型。当桩径为 1 m、80 m 基桩的长度增加 25% 时,其极限承载力提高 6.75%; 桩长值增加 50%、20.9%。当桩径为 1.5 m 和 2.0 m 时,桩长增加 50%,极限承载力提高幅度最大不超过 8.89%,此时极限承载力随着桩长增加而增加的幅度不明显,其原因是超长桩的极限承载力是由桩顶沉降控制。郑刚^[16]通过研究发现各种超长桩在极限荷载作用下,桩身的压缩

表 2 各桩极限承载力汇总表

Table 2 Summary of ultimate bearing capacity of each pile

桩长/m	桩径/m	极限承载力/kN		
		$E_s=35$ MPa	$E_s=70$ MPa	$E_s=105$ MPa
80	1.0	16 480	18 220	18 572
80	1.5	26 256	29 200	30 700
80	2.0	36 116	41 040	43 000
100	1.0	17 592	18 888	19 716
100	1.5	26 648	30 700	32 644
100	2.0	37 796	42 244	45 080
120	1.0	19 924	21 332	22 104
120	1.5	27 500	31 724	33 608
120	2.0	39 160	43 680	47 020

量均占总沉降量的 65% 以上,长度超过 100 m 的超长桩,其占比甚至可以超过 90%。

桩长分别为 80 m、100 m、120 m。当桩径为 1 m 时,桩端土强度提高 1~2 倍,其极限承载力分别提高 10.56%~12.69%、7.37%~12.07%、7.06%~10.94%; 当桩径为 1.5 m 时,极限承载力分别提高 15.62%~21.56%、15.21%~22.49%、15.36%~22.21%; 当桩径为 2.0 m 时,极限承载力分别提高 13.63%~19.06%、11.77%~19.27%、11.54%~20.07%。超长桩以桩顶沉降来控制极限承载力时,桩端土强度提高能减小桩端的沉降,从而提高超长桩承载力。

极限承载力随着桩径的增大而增加。当桩长为 80 m~100 m 时,通过增加 50%~100% 的桩径,其承载力提高 51.47%~119.15%; 当桩长继续增加到 120 m 时,通过增加桩径,其极限承载力提高 38.02%~96.55%,呈减弱趋势。表明:桩长太长,自身的压缩量限制了极限承载力的提高。

2.2 长径比对超长桩极限承载力的影响分析

超长桩与短桩和中长桩的区别点是极限承载力是由陡降段起点控制。一般通过固定桩径,增加桩长,研究长径比对其的影响,得出长径比越大桩极限承载力越大,但超长桩增加桩长自身压缩量也会加大,因此限制了极限承载力的影响。研究长径比 L/D 对超长桩承载力的影响,必须综合考虑桩径、桩长,将 80 m、100 m、120 m 桩长径比设置为 45、50、55、60、65。不同长径比对应的极限承载力如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,长径比相同时,极限承载力随桩长的增加而增大,并且长径比分别为 45、50、

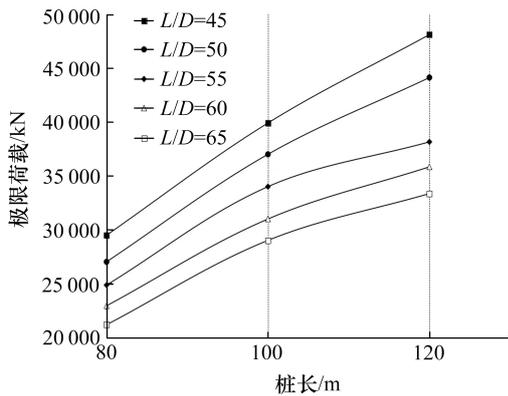


图 4 不同桩径比条件下基桩的极限承载力发挥曲线图
 Fig. 4 Ultimate bearing capacity curve of foundation pile with different pile diameter ratio

55、60、65, 桩长提高 25%~50%时, 其极限承载力分别提高 35.27%~63.05%、36.87%~63.21%、36.68%~53.37%、35.06%~56.13%、36.91%~57.37%。桩长相同时, 长径比越小, 超长桩极限承载力提高的幅度越大。超长桩极限承载力的大小由桩长和长径比决定。实际工程设计中, 应该同时考虑桩长和长径比对超长桩承载力的影响。

2.3 极限荷载作用下桩身压缩量的影响分析

极限荷载作用下, 随着桩径增加桩身压缩量占桩顶沉降量的比例如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 桩身压缩量占桩顶沉降量的比例, 随桩径增加呈现下降趋势, 并且桩径越大效应越明显。桩端土强度为 35 MPa 时, 桩径增加 1 倍, 桩身的压缩量约减小 25%, 随着桩端土强度的提高, 该值会进一步减小。桩端土条件相同的情况下, 桩长越长, 自身压缩量占比就会越大。

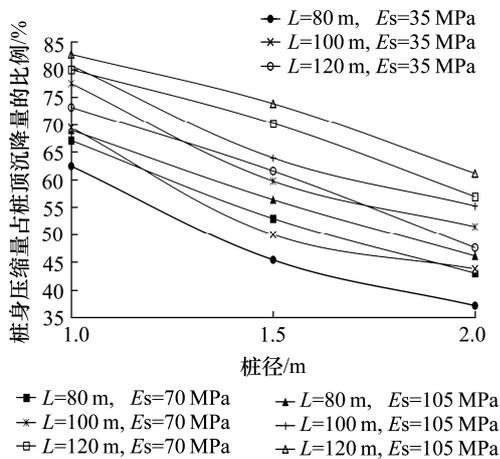


图 5 桩身压缩量占桩顶沉降量随桩径变化
 Fig. 5 The compression of pile body accounts for the settlement of pile top with the change of pile diameter

极限荷载作用下, 长径比一定时, 80 m 桩端土强度提高 1 倍, 压缩量比例与桩端土桩侧土强度一致时, 压缩量能减小 4.6%以上; 桩端土强度提高两倍, 压缩量能够减小 6.5%。压缩量随着桩长的增加而增大, 即长径比一定时, 桩端土强度越高, 极限荷载作用下的桩身压缩量越大。通过分析发现桩端土强度为 105 MPa、70 MPa 时的桩身压缩量占比接近, 相差值不超过 4.2%。

通过提取直径为 1 m, 桩长为 120 m 的桩, 在桩端土强度为 35 MPa 条件下, 工作荷载为 9 982 kN(极限荷载的二分之一)、极限荷载为 19 964 kN、28 320 kN 荷载作用下节点。研究 120 m 超长桩身的 30 个节点在荷载作用下桩身的位移情况, 如图 6 所示。

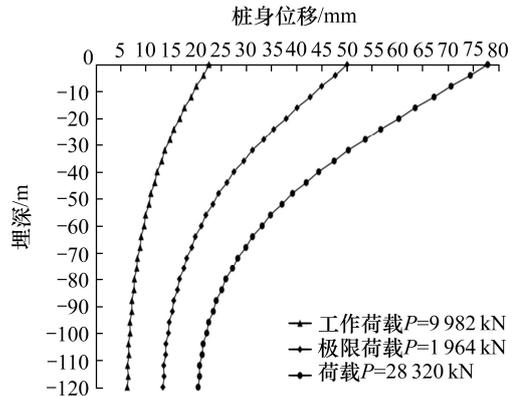


图 6 120 m 桩长在荷载作用下桩身位移图
 Fig. 6 Displacement diagram of the 120 m pile body caused by the different load

从图 6 中可以看出, 超长桩在工作荷载 7 820 kN 作用下, 桩顶的位移为 17.58 mm, 桩端的位移为 5.07 mm, 此时桩身位移主要集中在三分之一桩身以上处; 在埋深 40 m 以下, 桩身的位移相差不大, 此时下段的位移主要是因为产生桩端沉降。极限荷载 19 964 kN 作用下, 桩顶位移为 50 mm, 桩端位移为 13.5 mm, 桩身的压缩量占桩顶沉降量的 73%, 此时在埋深 80 m 以上的桩自身压缩量占桩顶位移的 66.5%。当桩顶荷载达到 28 320 kN 时, 桩顶沉降达到 78 mm, 桩端位移为 20.5 mm, 在埋深 100 m 以上的压缩量占桩顶位移的 71%。当桩顶位移达到 78 mm 时, 可以认为在实际工程中基桩已经失稳^[15], 虽然在此荷载下桩身位移并未出现陡降段, 但是由于桩自身材料的限制, 桩身自身压缩较大, 导致桩顶位移过大, 不能满足实际工程的承载

需求, 可以认为此时已经失稳破坏。因此, 实际工程设计中, 为了满足承载的需求, 单纯增加桩长并不可取, 必须综合考虑长径比的影响。

2.4 不同桩长桩身轴力分布曲线分析

不同桩在不同桩端土和极限荷载作用下轴力归一化曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 当桩径较小时, 曲线在桩身中部比较平缓, 但桩顶以下

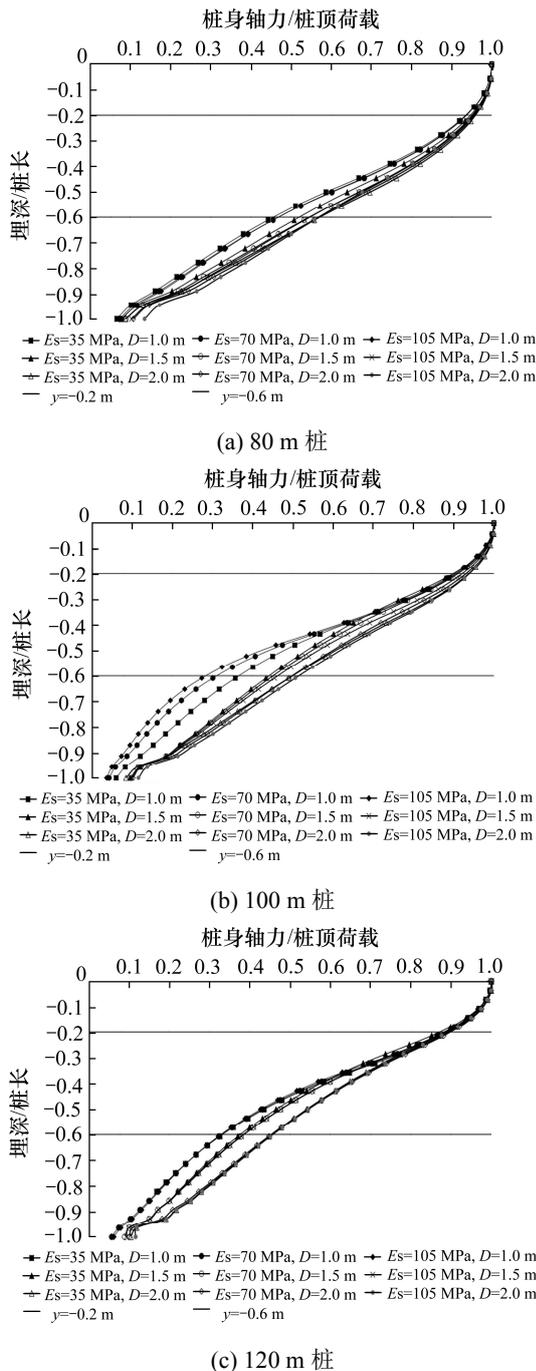


图 7 不同桩长在荷载作用下桩身位移

Fig. 7 Loading inducing displacement of pile body with different pile lengths

五分之一和桩端以上五分之三处曲线变得更陡; 当桩径增大到 1.5 m、2.0 m 时, 桩顶以下五分之一处曲线变得更陡, 其他段走势比较平缓。表明: 桩径较小时, 轴力的衰减主要集中在桩身的中部; 桩径较大时, 轴力的衰减主要分布在中下部。

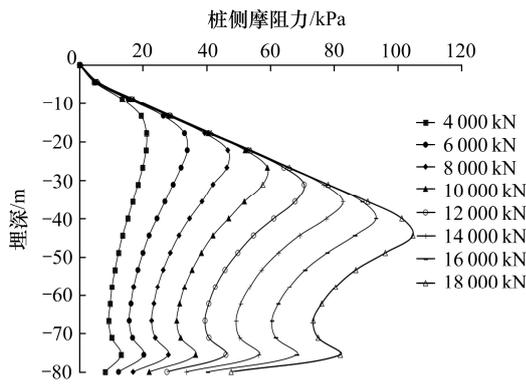
通过对端阻比进行分析, 发现随着桩端土强度和桩径的增加, 端阻比也逐渐增大。桩端土强度为 70 MPa 和 105 MPa 时, 在极限承载力状态下, 直径为 80 m、100 m 的 2 m 桩的端阻比为 10.7%~13.57%, 直径为 120 m 的 2 m 桩在 3 种强度桩端土条件下, 端阻比均大于 10%。参照文献[12], 将端阻比超过 10% 的分类为端承摩擦桩, 其余的均为摩擦桩。

2.5 桩端土强度对超长桩桩侧摩阻力的影响

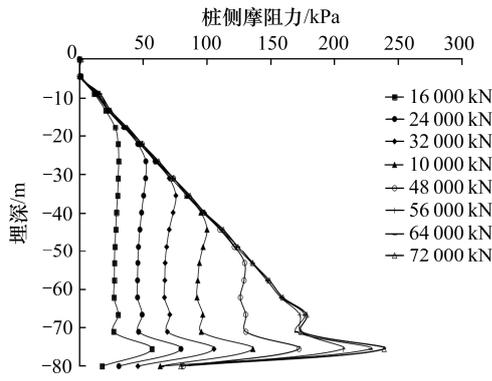
为探究桩端土强度与桩侧摩阻力的关系, 通过改变桩端土的强度, 比较其侧摩阻力的发挥情况。提取 80 m、120 m 桩长, 直径为 1.0 m、2.0 m 的桩, 桩端土强度为 35 MPa 情况下, 分析桩侧摩阻力沿桩身分布的情况, 桩侧摩阻力曲线如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 超长桩桩径不同, 桩身侧摩阻力曲线有所区别。桩径为 1.0 m 时曲线呈 R 分布; 桩径较大时, 呈梯形分布。超长桩的桩侧摩阻力由上往下逐步发挥, 沿着桩身先增大后减小, 随着荷载的增大转折点沿着桩身下移。桩径较大时, 转折点下方的摩阻力发挥程度一致。当桩长达到 120 m 时, 有减小的趋势。

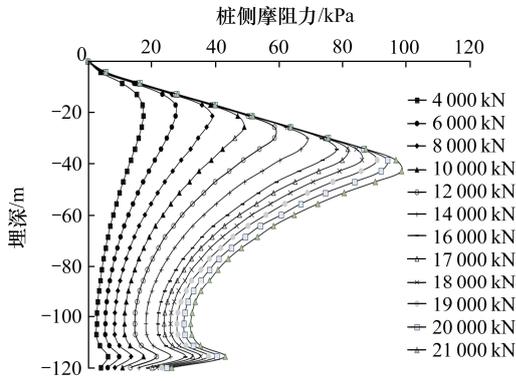
为探讨端阻增强效应对不同桩长、桩径、桩端土强度的影响程度, 以及桩侧摩阻力在同级荷载作用和不同桩端土强度下的发挥情况。同种桩型对应的桩顶荷载 P 相同, 荷载对应的桩侧摩阻力曲线如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 桩长为 80 m, 桩直径为 1.0 m 的桩端土强度为 35 MPa~105 MPa 时, 端阻附近的顶峰摩阻力相对于上个截面提高 9.26%~13.4%; 桩长为 100 m 时, 顶峰摩阻力提高 60.95%~79.2%, 桩长为 120 m 为 20.02%~22.45%; 当桩径为 2.0 m 时, 桩长为 80 m、100 m、120 m 的顶峰摩阻力分别提高 31.89%~46.11%、76.94%~101.33%、130.1%~191.46%。同级荷载作用下, 端阻增强效应不出现在高的土层中; 同种长度不同直径的桩端阻增强效应不同, 直径越大, 端阻增强效应越明显。



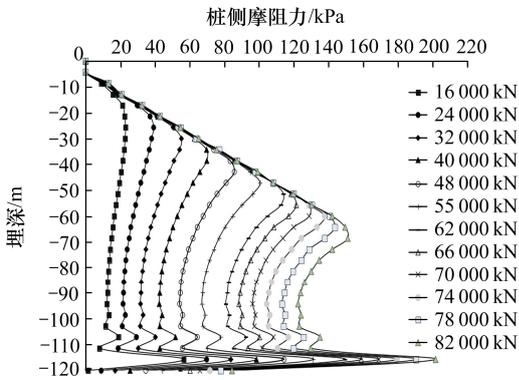
(a) $E_s=35$ MPa, $L=80$ m, $D=1$ m



(b) $E_s=35$ MPa, $L=80$ m, $D=2$ m



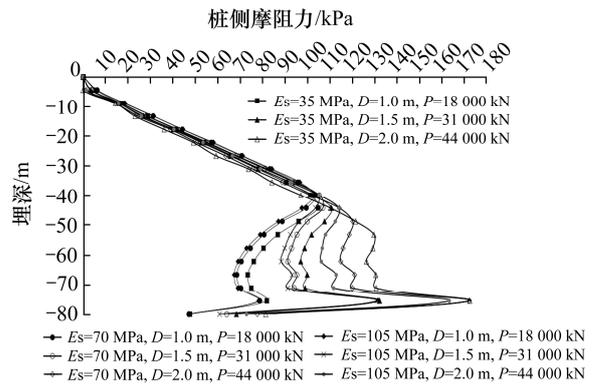
(c) $E_s=35$ MPa, $L=120$ m, $D=1$ m



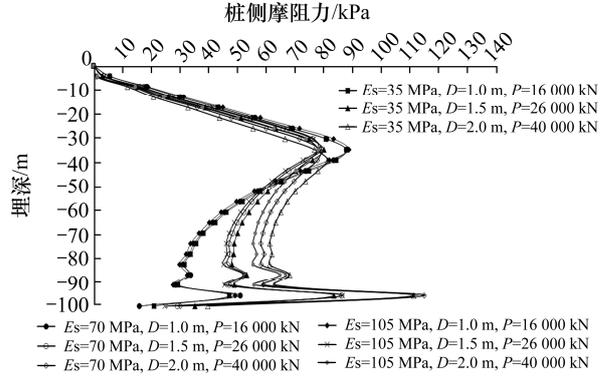
(d) $E_s=35$ MPa, $L=120$ m, $D=2$ m

图 8 不同桩长侧阻力分布曲线

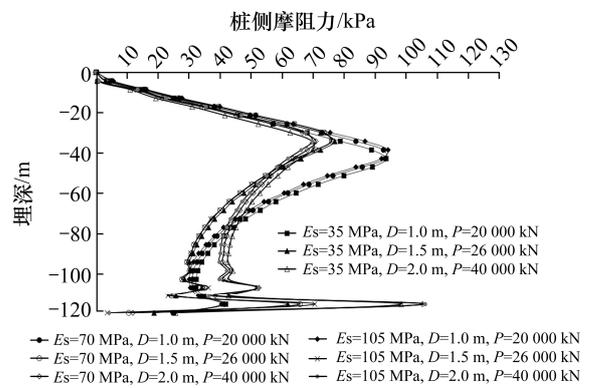
Fig. 8 Lateral resistance distribution curves of pile with different length



(a) 80 m 桩



(b) 100 m 桩



(c) 120 m 桩

图 9 极限荷载条件下桩身侧摩阻力分布曲线

Fig. 9 Distribution curve of pile lateral friction caused by ultimate load

端阻增强效应的影响深度范围主要集中在桩底以上 2~8 m 的范围。同种桩长条件下, 桩径越大, 端阻增强效应越明显。一般同桩长同桩径条件下, 桩端土强度越高端阻增强效应越明显。工作荷载作用下, 超长桩桩侧摩阻力的发挥, 随着桩端土强度的不同, 发挥程度也不相同, 在转折点处呈现两种不同形式的发挥, 在转折点的上方, 桩端土的强度越高, 其摩阻力发挥的程度稍微大于强度低

的; 转折点的下段, 桩端土强度越高, 其摩阻力发挥的程度越小。这是由于桩端土强度高, 导致桩端的位移较小, 摩阻力发挥程度小, 同时桩端土强度高的桩总侧阻力小于强度低的, 并且影响幅度不超过 5%。

3 结论

通过对 80 m、100 m、120 m 桩与其对应的 3 种不同桩径的研究, 分析了其桩端土的强度对超长桩承载力的影响, 得出结论:

1) 超长桩的极限承载力是由桩顶沉降来控制, 桩端土强度的提高, 不仅能有效减小桩端和桩顶的沉降, 提高极限承载力, 而且桩端土强度越高效果越显著。80 m、100 m、120 m 桩的桩径为 1 m 时, 通过提高 1~2 倍的桩端土强度, 其极限承载力相对于桩侧土的提高 7.06%~12.69%。当桩径为 1.5 m 时, 极限承载力提高 15.21%~22.49%, 当桩径为 2 m 时, 极限承载力提高 11.54%~20.07%。

2) 增大基桩的极限承载力应该综合考虑长径比的影响。通过研究发现 80 m 基桩的长径比分别为 45、50、55、60、65 且将桩长提高 25%~50% 时, 其极限承载力提高的范围为 35.06%~63.21%。

3) 桩长、桩径越大, 端阻强化效应越明显。桩长为 80 m, 桩径为 1 m 的桩, 桩端土为 35 MPa~105 MPa 时, 埋深 75.5 m 桩侧摩阻力比埋深为 71 m 处提高了 9.26%~13.4%。当桩长为 120 m、桩径为 2 m 时, 侧摩阻力提高 130.1%~191.46%。

参考文献(References):

[1] 席宁中. 试论桩端土强度对桩侧阻力的影响[J]. 建筑科学, 2000, 16(6): 51-54, 60. (XI Ning-zhong. A discussion on influence of soil strength underneath a pile on the pile shaft resistance[J]. Building Science, 2000, 16(6): 51-54, 60. (in Chinese))

[2] 张忠苗, 张乾青. 桩端土强度对桩侧阻力影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 59-63. (ZHANG Zhong-miao, ZHANG Qian-qing. Influences of soil strength at pile end on friction of lateral surface of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 59-63. (in Chinese))

[3] 刘锴, 赵春风. 不同桩端土承压钻孔灌注桩模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 490-495. (LIU Kun, ZHAO Chun-feng. Model tests on bored piles under vertical load on different pile-tip soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 490-495. (in Chinese))

[4] 熊玉春. 沉渣强度特性及桩侧摩阻力强化弱化效应研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(1): 107-114. (XIONG Yu-chun. Research on strength characteristics of sediment and hardening and softening effect of skin friction[J]. Industrial Construction, 2019, 49(1): 107-114. (in Chinese))

[5] 胡超. 湘府路高架桥桩基沉降计算及影响因素分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2): 98-103. (HU Chao. Settlement calculation and influencing factor analysis of pile foundation in Xiangfu viaduct[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 98-103. (in Chinese))

[6] 董金荣. 灌注桩侧阻力强化弱化效应研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 658-662. (DONG Jin-rong. Enhanced and weakened effect of skin friction of cast-in-situ piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 658-662. (in Chinese))

[7] 张乾青, 李术才, 李利平, 等. 考虑侧阻软化和端阻硬化的群桩沉降简化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 615-624. (ZHANG Qian-qing, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Simplified method for settlement prediction of pile groups considering skin friction softening and end resistance hardening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 615-624. (in Chinese))

[8] 孟明辉, 邢皓枫, 刘之葵, 等. 基于桩侧阻力强化效应的嵌岩桩承载力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2925-2933. (MENG Ming-hui, XING Hao-feng, LIU Zhi-kui, et al. Calculation of bearing capacity of rock-socketed pile based on enhanced effect of skin friction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2925-2933. (in Chinese))

[9] 张建新, 吴东云. 桩端阻力与桩侧阻力相互作用研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 541-544. (ZHANG Jian-xin, WU Dong-yun. Research on interaction between resistance at

- pile and lateral resistance of pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 541–544. (in Chinese)
- [10] 周天应,周援衡,鲁智勇.嵌岩桩水平承载力计算方法的讨论和分析[J].*交通科学与工程*,2019,35(3):65–71. (ZHOU Tianying, ZHOU Yuanheng, LU Zhiyong, Analysis and discussion of calculation methods for rock socketed piles under lateral load[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2019, 35(3): 65– 71.(in Chinese))
- [11] 蒋建平,高广运,章杨松.桩端岩土强度提高对超长桩桩身总侧阻力的强化效应研究[J].*岩土力学*,2009,30(9): 2609–2615.(JIANG Jian-ping, GAO Guang-yun, ZHANG Yang-song. Strengthening effect of total pile lateral friction by improving rock or soil strength at pile tip[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(9): 2609–2615. (in Chinese))
- [12] 李前,王来义.桩端土特性与桩侧阻力关系的有限元分析[J].*兰州工业学院学报*,2015,22(2):12–14.(LI Qian, WANG Lai-yi. Finite element analysis of relationship between soil characteristics at pile end and resistance of surface of piles[J]. *Journal of Lanzhou Institute of Technology*, 2015, 22(2): 12–14. (in Chinese))
- [13] 席宁中,刘金砺,席婧仪.桩端土刚度对桩侧阻力影响的数值分析[J].*岩土工程学报*,2011,33(S2):174–177.(XI Ning-zhong, LIU Jin-li, XI Jing-yi. Numerical analysis of influence of stiffness of pile tip soil on shaft resistance[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(S2): 174–177. (in Chinese))
- [14] 刘耀东,聂闯,梅靖宇,等.超长桩竖向承载力模型试验及有限元研究[J].*中外公路*,2019,39(4):1–5.(LIU Yao-dong, NIE Chuang, MEI Jing-yu, et al. Study on vertical bearing capacity of super long pile using model test and finite element[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(4): 1–5. (in Chinese))
- [15] 龚晓南.桩基工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2016.(GONG Xiao-nan. *Pile and pile foundation handbook*[M].Beijing:China Architecture & Building Press,2016.(in Chinese))
- [16] 郑刚,张立明,王琦.超长桩荷载传递机理有限元分析[J].*天津大学学报*,2012,45(11):945–952.(ZHENG Gang, ZHANG Li-ming, WANG Qi. Finite element analysis on load transfer mechanism of overlength piles[J].*Journal of Tianjin University*,2012,45(11):945–952.(in Chinese))