

文章编号:1673-9469(2025)03-0041-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.006

温度驱动下 X 形能量桩单桩承载力演化机理研究

袁晨玮¹, 黄献文¹, 姜玥^{1*}

(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 为揭示温度场、桩形及土的围压对能量桩承载性能的作用机理,开展了温度-桩形-围压多因素耦合作用下能量桩的承载力演化试验。结果表明:(1)随着温度升高,圆形和 X 形能量桩的单桩承载力均增大;(2)在 45 °C 热循环、桩周土压力相同情况下,X 形桩的极限承载力和桩土极限位移量均大于圆形桩,在 100、200、300 kPa 荷载下,X 形桩的承载力是圆形桩的 176%、134%、125%;(3)综合分析发现,桩形和桩周土压力对能量桩的单桩承载力影响较大。温度升高改变了桩-土界面特性,因此单桩承载力显著提高。X 形桩的承载力优势随围压增大而衰减。

关键词: X 形混凝土桩;桩土剪切作用;土拱效应;截面形状;剪胀性;桩侧摩阻力

中图分类号: TU473

文献标识码: A

Research on the Evolution Mechanism of the Single-Pile Bearing Capacity of X-shaped Energy Piles Under Temperature Effect

YUAN Chenwei¹, HUANG Xianwen¹, JIANG Yue^{1*}

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China)

Abstract: To reveal the mechanism of the influence of temperature field, pile shape and soil confining pressure on the bearing capacity of energy piles, a bearing capacity evolution test of energy piles under the combined action of temperature, pile shape and confining pressure was carried out. The results show: (1) With the increase of temperature, the single-pile bearing capacity of both circular and X-shaped energy piles increases; (2) Under the conditions of 45 °C thermal cycling and the same pile-side soil pressure, the ultimate bearing capacity and the ultimate displacement of X-shaped piles are greater than those of circular piles. At loads of 100, 200 and 300 kPa, the bearing capacity of X-shaped piles is 176%, 134% and 125% of that of circular piles; (3) Comprehensive analysis reveals that the pile shape and the pile-side soil pressure have a significant impact on the single-pile bearing capacity of energy piles. The increase in temperature changes the characteristics of the pile-soil interface, thus significantly improving the single-pile bearing capacity. The bearing capacity advantage of X-shaped piles decreases with the increase of confining pressure.

Key words: X-shaped concrete pile; pile-soil shearing; soil arching effect; cross-sectional shape; dilatancy; pile side friction resistance

随着人口数量增长和城市化进程的不断加快,能源消耗问题成为 21 世纪的主要挑战之一。为降低建筑能源消耗,从 20 世纪 80 年代开始,岩土工作者创造性地将地源热泵的传热管埋设在建筑桩基中,使其与已有的建筑结构相结合,解决了

传统地源热泵能源损耗高的问题,这种新型岩土结构被称为能量桩与地下换热结构,而能量桩则是其代表。作为一种新型桩基结构,能量桩可以提高传热效率、节省地下空间,应用前景非常广阔,目前国外实际应用较多,而国内尚处于推广阶

收稿日期:2024-03-05

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52308367)

第一作者:袁晨玮(2000—),男,江苏盐城人,硕士研究生,从事能源岩土工程、隧道稳定性分析等领域的研究。

* 通信作者:姜玥(1993—),女,河南周口人,博士,副教授,从事岩石力学特性及理论、隧道稳定性分析等领域的研究。

段。单U型能量桩是一种新型能量桩技术,主要通过桩内埋设U型钢管作为热交换管,通过热交换管与传统桩体相结合,来达到降低地热能传热损耗和减少钢筋锈蚀等目的。温度是影响能量桩承载力的关键因素。

近年来学者们基于不同研究方法对温度影响下单桩的承载力进行了研究。陈树森等^[1]依托数值模拟方法针对能量桩的热-力学响应进行研究,结果表明入水口温度升高,能量桩在热循环作用下会产生较大的应力峰值,使得桩体变形增大。黄庆伟等^[2]通过提出的计算模型发现桩土传热系数对能源桩传热性能影响最大。陆浩杰等^[3]通过ACMEG-T土体热本构模型在ABAQUS软件中进行二次开发,建立数值模型,研究了土体热-力学特性对能量桩位移、桩-土界面应力及桩身轴力的影响规律。孔纲强等^[4]通过对能量桩施加温度循环荷载,发现桩体内部在每次循环后会遗留残余应变,进而影响整体承载力;X形桩因其侧摩阻力远高于传统桩,得到了国内外学者的广泛关注^[5]。丁选明等^[6]利用低应变反射波法、静载荷试验法和桩头开挖法对现浇X形桩的质量进行了现场检测,得出现浇X形桩混凝土的充盈在凹弧处更为明显,而在凸起段不甚显著。王雪亮等^[7]基于新的理论计算方法,对X形桩成桩过程充盈系数进行了研究。孔纲强等^[8]研究了异形截面X形现浇混凝土(X-Shape Cast-in-place Concrete, XCC)桩的桩侧负摩阻力,得到桩侧负摩阻力计算方法。张敏霞等^[9]开展了竖向荷载下等截面面积XCC桩和圆形桩的对比模型试验,发现XCC桩竖向承载力较圆形桩大。杨挺等^[10]基于现场试验,重点分析了多桩复合地基竖向承载力的变化特性和规律。於慧^[11]开展了新老路堤相互作用下XCC桩的承载特性和变形机制研究。

目前对于能量桩特性的研究多集中于温度循环荷载作用、压力荷载作用的影响,而单一热循环下考虑桩身与桩周土体热膨胀影响的研究较少^[12-17]。本文利用自行研制的设备分别对圆形和X形桩开展考虑温度、荷载等因素影响的单桩承载力试验研究,获取桩侧摩阻力变化规律,揭示单桩承载力演化机理。研究成果可为不同桩型能量桩在不同情况下的承载力特性提供指导。

1 模型试验

1.1 试验装置

采用自行研制的设备开展相关试验研究,如

图1所示,试验装置主要包括反力架、油压千斤顶、传力架、试验槽、冷热循环槽和各类传感器及控制系统等。其中,升降机位于压力传感器下方,各传感器与监测设备均采用1/4桥连接,数据传入终端。为保证测试的精确性,在传感器与柱底之间加设表面平滑的薄钢板。各装置间采用静态连接,通过油压千斤顶施加荷载,位移计度数即为桩上升的距离。试验槽直径为300 mm,高为320 mm,桩中心与槽壁距离为100 mm。

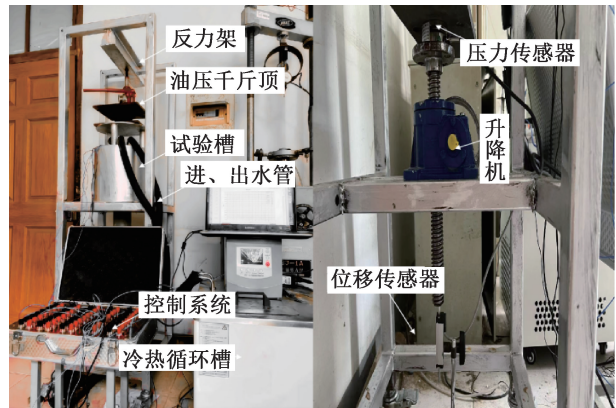


图1 试验布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test layout

1.2 模型材料

分别选用圆形和X形桩开展试验,如图2所示。模型桩均用模具浇筑,其中圆形桩直径90 mm,高378 mm,重7.2 kg,铝制U形管如图2(a)所示安放,露出的两个开口为进出水口;X形桩开弧角为60°,开弧间距20 mm,其截面如图2(a)所示,高度、U形管参数及温度传感器布置与圆形桩一致,重4.5 kg。圆形桩周长565.2 mm,X形桩周长268.4 mm。

试验槽直径300 mm,高320 mm,桩中心与槽壁距离为100 mm。如图2(b)所示,槽中埋设了2个孔隙水压力传感器K1、K2和2个土压力传感器P1、P2。温度传感器(T1、T2、T3、T4)位于能量桩中部,距桩顶189 mm,距试验槽顶端160 mm。桩尾下端布设压力传感器P3,位于升降机上方。位移传感器S1位于升降机下方,采用磁吸方式与钢架固定。

选取砂土开展试验,其颗粒级配如图3所示。最大干密度和最小干密度分别为1.72、1.37 g/cm³,干砂不均匀系数 $C_u = 4.12$,曲率系数 $C_c = 0.72$ 。将干砂与水按体积1:4.5的比例混合,使其达到饱和状态,并且采用分层击实法,分5次均匀围绕柱体铺设至试验槽内。

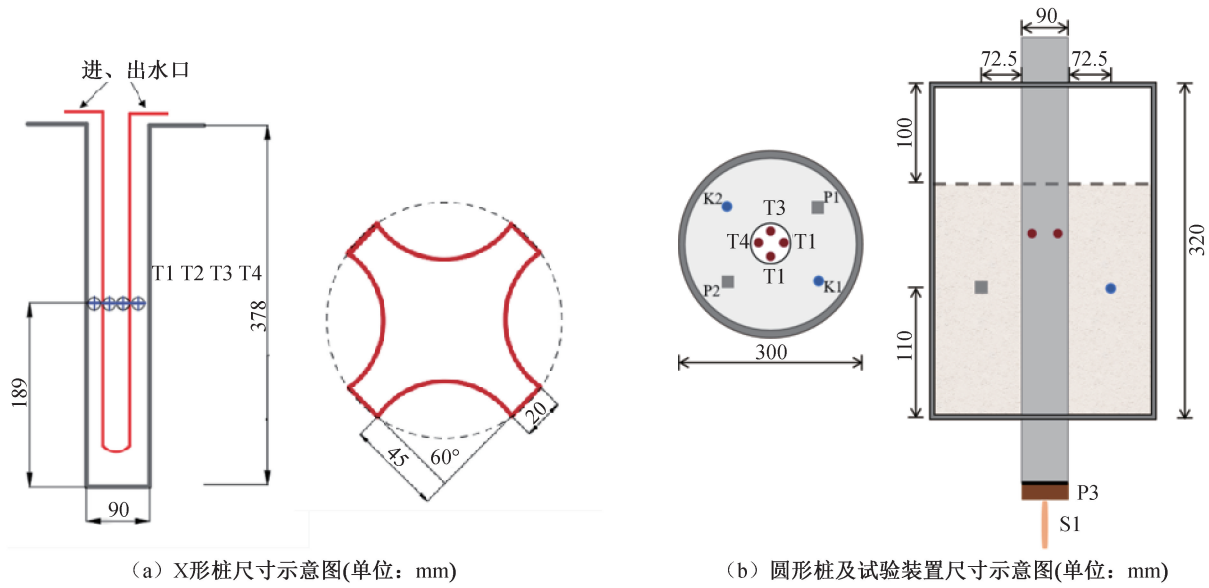


图 2 不同桩形能量桩及其监测布设示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy piles with different shapes and their monitoring arrangements

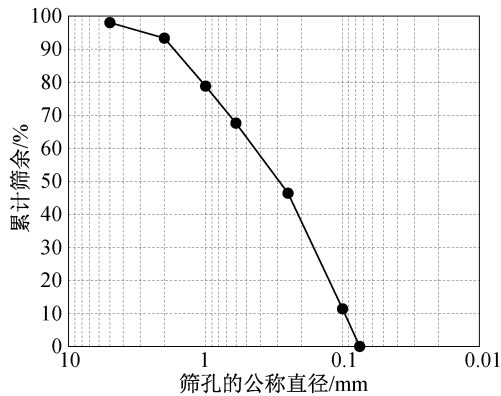


图 3 砂土颗粒级配图

Fig. 3 Grading diagram of sand particles

1.3 试验方案

试验装置中的温控设备为冷热循环槽,能够保持恒定水温(45 ℃)对能量桩进行加热,本试验在封闭的室内进行,昼夜温差不大于 3 ℃,室温为 18 ℃,试验步骤为

(1)在 100、200、300 kPa 荷载、室温条件下,等待土体在荷载作用下固结 8 h,记录此过程中压力传感器读数变化,土体固结完成后,摇动下方升降机,使桩土做剪切运动,此过程中,利用压力传感器与位移传感器同步记录剪切过程中,桩底压力与位移变化。每组试验完成后都需重新制砂,并且挖砂填砂,采用分层击实法分五级填筑,每层以击实器夯实,确保上下土层各参数保持一致。控制试验前土体高度及桩体位置,使其与第一组试验保持一致,土层高度为 220 mm,

桩体距离槽顶高度为 60 mm,大于等于位移计量程。

(2)打开冷热循环炉,设置热循环温度为 45 ℃,待水恒温,圆形桩内部温度传感器读数达到 45 ℃,对土体用油压千斤顶进行加载,设置 3 组加载试验,荷载分别为 100、200、300 kPa,每组维持恒压加载 8 h 直至土体固结稳定,每组试验结束后重新挖砂填砂,并摇动升降机将桩体下降到试验前高度,填的砂土严格按照上述水砂比例混合至均匀,再进行均匀铺设。

(3)待 8 h 固结完成后,在荷载保持恒定的情况下,利用升降机将能量桩升至桩顶触碰传力架,并且等待一段时间直至压力传感器读数稳定。

(4)以上步骤完成后进行第二轮试验,重新挖砂,用 X 形桩替换圆形桩,利用升降机移动到圆形桩初始试验位置,然后填砂高度保持 220 mm,待一切准备就绪后,对土体实施加载,土体高度、荷载大小、加载时间等均与圆形桩试验一致。试验传感器记录过程从开始加压固结直至剪切结束,传感器读数稳定。因此两种桩形在 3 组不同荷载作用下,试验共分为 6 组。

2 结果与分析

考虑到试验过程中先放桩后填土,与实际工程略有不同,因此需要对桩侧摩阻力进行核算。由于压力传感器位于土体下方,在荷载作用下桩体上升产生摩阻力,且桩端无摩阻力,可看作纯摩

擦桩(图4)。当压力传感器读数变化,桩侧承载力即初始压力减去实时压力的差值(本文桩侧摩阻力采用桩土单位面积侧摩阻力作为测量值)。另外原土阻力系数与后填土阻力系数在试验加载8 h过程中,已经相接近,可排除此影响因素,以下统称桩承载力为桩底压力变化量。

$$Q = \frac{F - f - G}{\pi D H_i} \quad (1)$$

式中: Q 为土中桩身单位面积桩侧摩阻力,Pa; F 为初始桩底压力值,N; f 为实时桩底压力传感器读数,N; G 为混凝土桩自重,N; D 为混凝土桩直径,m; H_i 为在不同加载作用下,固结完成后土体高度,m, $i=100,200,300$ 。

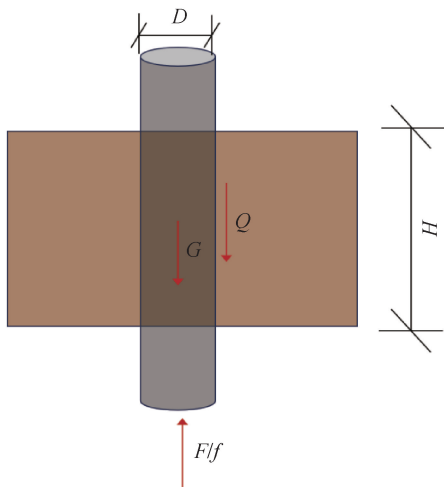


图4 桩侧摩阻力计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of calculation of pile side friction resistance

2.1 温度驱动影响

图5为200 kPa荷载作用下两种桩型在室温和恒温影响下的桩侧摩阻力与位移变化关系。由图5可知,圆形和X形桩的桩侧摩阻力均随温度增加而增大,且这一现象在X形桩更为明显。

两种桩型温度越高桩侧摩阻力越大,因为桩体热胀冷缩,体积增大导致土体对桩体的水平应力增大,因此桩侧摩阻力增加,所以45℃恒温的摩阻力较室温情况下稍大。并且对于X形桩,无论室温或45℃加热情况下,其桩侧摩阻力均大于圆形桩。这是因为在固结过程中,X形桩反弦区域初始土体密实度较低,但在剪切过程中易诱发显著土拱效应。试验表明,温度升高通过改变桩-土界面特性显著影响承载力。

在室温(18℃)与45℃两种情况下,圆形桩与X形桩在200、300 kPa压力加载土体固结后,圆形

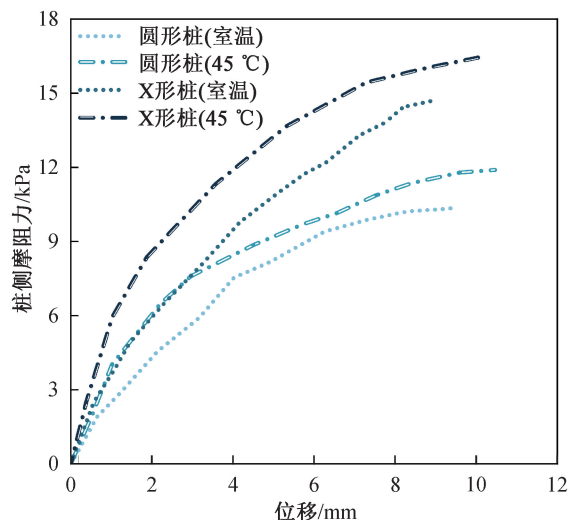


图5 不同温度情况下两种桩形桩侧摩阻力变化图

Fig. 5 Changes of side friction resistance of two pile shapes at different temperatures

桩在相同加载压力下,室温与45℃温度循环中,桩侧摩阻力相差约1 MPa。而X形桩相较于圆形桩,在两种温度情况下,桩侧摩阻力差值略大,接近1.2 MPa。所以,在这两种温度下,加载压力对能量桩的桩侧摩阻力差值几乎无影响,圆形桩、X形桩摩阻力差值分别保持为1、1.2 MPa。

2.2 桩型差异影响

图6为桩体温度达到45℃趋于稳定,加载8 h后,利用升降机提升柱,做模拟剪切试验得到的桩侧摩阻力与位移 $Q-s$ 曲线,两组桩型试验中,加载越大,X形桩与圆形桩差值越大。

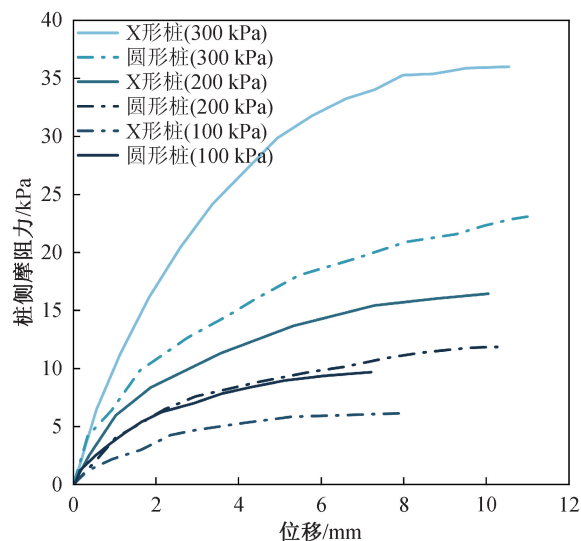


图6 不同荷载下桩侧摩阻力变化图

Fig. 6 Variation of pile side friction resistance under different load levels

在不同桩型的3组加载试验中,利用不同载荷对土体施压,开展了3组不同围压下单桩承载力试验。从图6中可以看出,两种桩型的桩侧摩阻力均迅速增加最后趋于稳定,并且X形桩侧摩阻力增加速率远大于圆形桩。在剪切过程中,两种桩形在相同荷载情况下,X形桩桩侧摩阻力曲线从增大到稳定的转变点所对应的位移量均大于圆形桩。

在固结过程中,土颗粒间距减小,桩身在下沉趋势力的作用下,有向下移动的趋势,但由于下端约束,此时桩土间的摩擦力随着固结时间不断增大,压力传感器读数不断增加并最终达到最大值。在随后的剪切过程中,随着桩土相对位移增大,柱体与土体间的桩侧摩阻力充分发挥,此时的桩整体侧摩阻力为负桩侧摩阻力,方向向下。并且随着荷载不断增加,两种桩的桩侧摩阻力极限值与极限承载力对应的位移值也在不断增加。但随着位移不断增加直至超过土体极限位移,整个桩土界面发生滑移,土体产生破坏,剪应力大小逐渐衰减成残余强度,因此桩侧摩阻力开始保持稳定。

在相同温度条件下,圆形桩在剪切过程中位移不断增大,土颗粒剪胀性明显,水平应力增大,导致桩侧摩阻力迅速增大,但在土体达到位移极限值破坏时,桩侧摩阻力也逐渐退化趋于稳定。

而对于X形桩,由于桩侧面积、横截面积及开口角度等因素影响,桩侧摩阻力大于圆形桩,所以在剪切过程中,桩底压力变化远大于圆形桩,即此时的桩土承载力大于圆形桩。这是由于在位移开始阶段,X形桩侧的凹区域法向应力较小,导致在位移逐渐增加的过程中,发生土拱效应,而土拱效应增加的是凹凸交接面的法向应力,所以凹面两翼的侧摩阻力要远大于凹面的侧摩阻力。固结过程中,土拱效应并未发生,因此对于各组试验开始前的桩底初始压力值,圆形桩均大于X形桩。从图6中可看出, $Q-s$ 曲线是一条变化速率不断降低的平滑曲线。这是因为位移过程中反弦促使土拱效应的发生,导致反弦两端侧摩阻力快速增大,所以 $Q-s$ 曲线不断增加且一直大于圆形桩,最终在某个转变点土体发生破坏,曲线趋于平稳。

图7左侧为圆形桩剪切完成后的土体,右侧为X形桩,由此可验证上述机理。在剪切过程中,圆形桩土体在桩体上升过程中只发生了明显的剪胀效应,桩土界面土颗粒较X形桩密实,但并无土体

带出,所以并无土拱效应。而图7右侧,土体随X形桩剪切上升被带出形成土拱,土拱效应在X形桩试验过程中较为明显。由于X形桩桩形因素和土拱效应,凸区域及反弦两端总桩侧摩阻力远大于圆形桩,所以无论加载大小,X形桩的承载力总大于圆形桩。

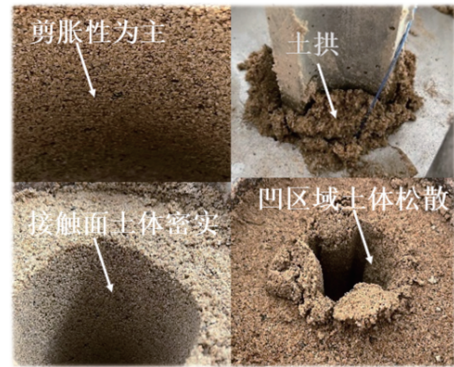


图7 剪切后桩土状态图

Fig. 7 State diagram of pile and soil after shearing

施加100、200、300 kPa荷载后,圆形桩与X形桩在室温与45℃恒温条件下侧摩阻力差值相接近,分别为3.3、3.6、7.1 kPa。X形桩承载力是圆形桩的176%、134%、125%。所以,在相同温度情况下,X形桩相对于圆形桩的桩侧摩阻力高,但X形桩增长速率较圆形桩慢,并且围压越大,两者承载力差距越明显。

2.3 桩侧围压影响

图8为能量桩在100、200、300 kPa 3组荷载试验中桩侧摩阻力变化曲线,随着荷载增大,桩侧摩阻力不断增加,并且增幅加大。在同等荷载情况下,X形桩侧摩阻力仍大于圆形桩,在300 kPa加载下,这种差异最明显。

试验中,荷载越大,土的固结沉降量越大,土体越密实,水平围压越大,桩体的位移差越大,因此各组试验中的初始桩底压力就越大。如图8所示,圆形桩的3组试验中,荷载越大即围压越大,极限承载值出现的越晚且变化量越大。随着荷载变大,土样密实度增大,水平应力增大并且剪胀性变强,所以剪切过程延长即土体极限破坏位移值增大,桩侧摩阻力增大。

在图8中,X形桩变化与圆形桩一致,这是因为密实度越高越土拱效应越明显;侧摩阻力越大,桩土的承载力越大。同样地,在同组桩形试验中,围压越大,桩体极限承载值越大,土体极限位移越大。

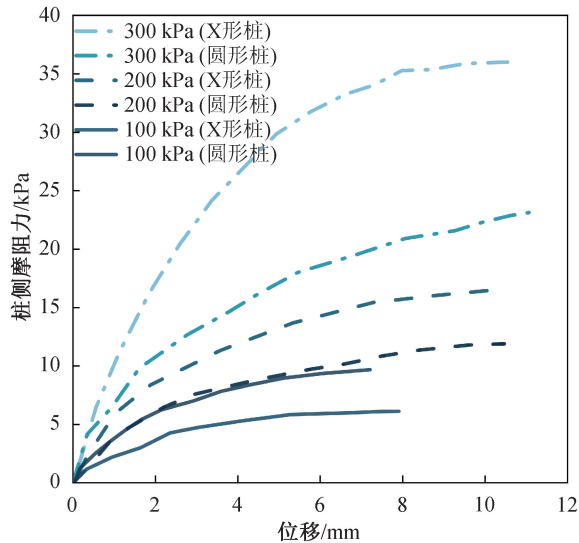


图8 不同加载压力下同种桩形压力变化图

Fig. 8 Diagram of pressure variation of the same pile under different load levels

在图9中,同种桩型随着围压增大,侧摩阻力增长速率加快,差值明显。其中45℃圆形桩在100、200、300 kPa荷载下,桩侧摩阻力为5.256、11.837、27.853 kPa,增长比例为225%、235%;45℃X形桩摩阻力为9.274、15.883、34.892 kPa,增长比例为171%、220%。由此可知,围压对圆形桩的侧摩阻力增长速率影响较X形桩更大,但X形桩在围压影响下侧摩阻力增长值较大。

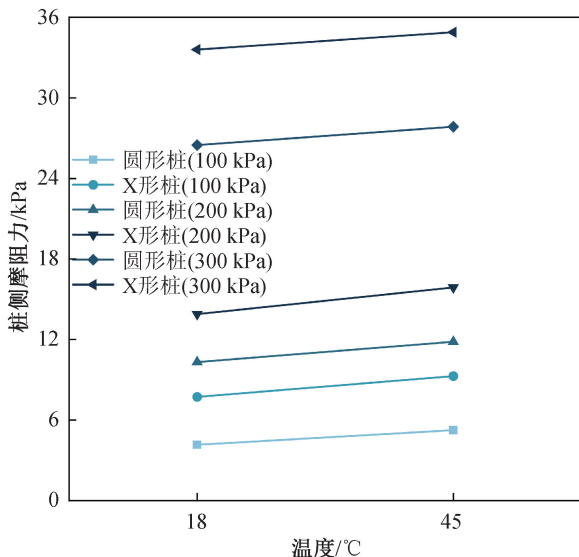


图9 不同温度下两种桩形在各加载压力下最大桩侧摩阻力对比图

Fig. 9 Comparison of the maximum pile side friction resistance of two pile shapes under each loading pressure in the case of different temperatures

3 讨论与展望

上述影响说明,温度、围压、桩形对单桩承载力有着极大的影响。在试验剪切过程中,桩土的剪胀性、土拱效应等原因导致侧摩阻力不同。土体固结过程中,由于施加恒压,土体逐渐密实,并且相对于桩体向下位移,此时土颗粒整体向下,桩体固定;由于水平应力逐渐增大,砂土带动桩体下移,此时达到最大初始桩底压力值。桩侧摩阻力提供了较大的单桩承载力使桩土结构不易被破坏。在上升过程中,桩土界面发生滑动,圆形桩剪胀性明显,X形桩反弦土拱效应明显,均在剪切过程中,为桩体结构提供了保护作用。

3.1 温度驱动桩土机理分析

为研究温度影响情况,本试验设置了室温条件对照组。由图10可知,45℃情况下,桩体不仅膨胀,而且通过温度传递带动桩土界面土颗粒膨胀,紧接着桩周土颗粒相互挤压,桩土界面内摩擦角和粘聚力增大,桩土间水平应力增大,土体抗剪强度增加,因此在高温情况下,桩侧摩阻力及土体极限位移均高于室温条件下的对应值。

3.2 桩形影响下桩土机理分析

在桩体上升与土体剪切过程中,桩土界面土颗粒不断移动,而随着距桩心水平的距离增大,土体几乎不受影响,此时主要由桩周周围土体为桩体提供桩侧摩阻力。而上述土拱效应及剪胀性,从微观上都是由于土颗粒间的颗粒力链在桩体上升带动下,颗粒主应力方向发生偏移,如图11所示。剪胀性的发生本质上是:本试验土体经过加载固结,密实度增大,土颗粒间咬合紧密,当受到剪切荷载时,颗粒间发生错动、翻滚、转动,导致土颗粒间孔隙体积增大,从而发生剪胀作用。此时孔隙水压力在固结作用下减小,有效应力进一步增大,所以桩土界面水平应力增大,桩的极限承载力增大,因此圆形桩在温度、荷载影响下,极限桩侧摩阻力及土体极限破坏位移较大。

对于X形桩,土拱效应是桩土承载力增大的主要因素,同样由于剪切力的影响,土颗粒链方向发生偏移,但是由于X形桩反弦的存在导致桩土界面颗粒位移不均匀,土拱产生^[18],进而改变了土颗粒间的应力状态,引起应力重新分布,把应力传递到拱脚及周围稳定土体中,所以土拱效应增大了反弦两端的承载力。因此,相对相同条件下的

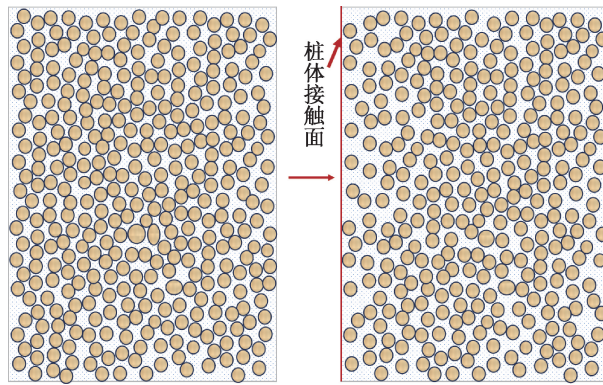


图 10 热荷载作用下桩土界面土体积膨胀示意图

Fig. 10 Schematic diagram of soil volume expansion at the pile-soil interface under thermal loading

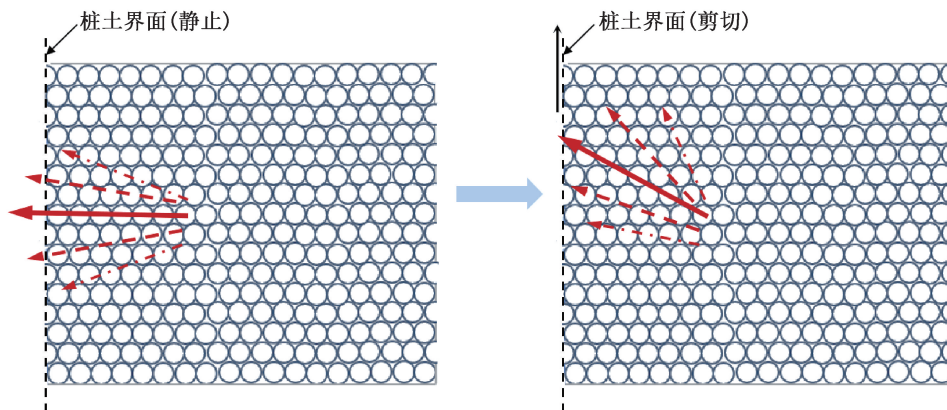


图 11 土颗粒颗粒力链方向偏移示意图

Fig. 11 Schematic diagram of directional offset of soil particle force chains

圆形桩, X 形桩极限承载力和桩土极限位移都较大。

3.3 围压影响下演化机理分析

随着荷载的增加,土体高度减小,密实度增加,桩周土体刚度增加,且施压过程中孔隙水压力减小,土中气排出,有效应力增大。这是由于在荷载压力作用下,土颗粒间隙减小,把颗粒间多余的水与气被挤出,如图 12 所示。这导致了加载至固

结过程中,土体慢慢处于塑性变形阶段,水平应力增大。桩侧摩阻力因此增大,桩的承载力也随之增大。

试验从控制温度、荷载、桩形 3 个影响因素出发,分别得出不同温度、围压对两种桩形的桩侧摩阻力影响,并将圆形桩与 X 形桩 $Q-s$ 进行比对,从微观机理分析得出 3 种因素改变桩的桩侧摩阻力的原因。但限于试验条件仍有不足,未来试验可对

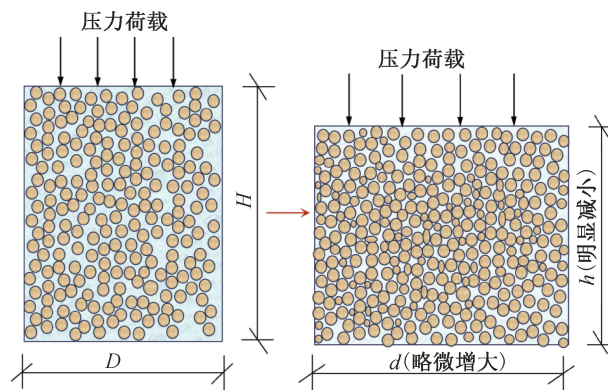


图 12 压力荷载作用下土体压缩和孔隙气、孔隙水排出示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the soil compression under the action of pressure load and the expulsion of pore air and pore water

以下3方面进行改进:

(1)提高试验设备尺寸,并在桩身按固定距离放置力传感器以及静态位移传感器,并将温度传感器在桩和土中从下往上、从桩心向外,分层分级布置,得出桩身各位置应变、应力、温度变化。

(2)加大温差,并且进行多次冷热循环,测试多次循环温度荷载下,桩的极限承载力变化情况。

(3)将摩擦桩替换为端承桩,将升降机更新成拉拔装置,测试端承桩在3种影响因素情况下的极限承载力变化情况。

4 结论

本文通过开展模型试验,针对圆形和X形桩分别考虑温度、荷载的影响,分析了单桩承载力演化规律。得出以下结论:

1)在室温与45℃恒温、土体施加相同荷载的情况下,X形桩桩侧摩阻力明显高于圆形桩。但对于这两种桩形,在温度高的情况下,桩侧摩阻力总大于室温条件下的值,即温度升高,桩体及桩土界面土体膨胀,桩土间水平应力增加,导致桩侧摩阻力增加,承载力增强。

2)在相同温度、加载的情况下,X形桩桩侧摩阻力极限值及对应转变点的位移量皆大于圆形桩,即在相同情况下,X形桩因其截面形状,桩-土相互作用过程中土拱效应显著增强,桩侧摩阻力明显增大,能承受更大的剪应力和位移。

3)在不同围压情况下,对于两种桩形而言,围压越大,桩土间产生的桩侧摩阻力越大,即土的固结度越大,密实度越高,桩侧法向应力越大,桩土极限承载能力越大。因此在土体承压条件允许范围内,适当增加竖向荷载,可以增强桩体的承载能力。

参考文献:

- [1] 陈树森,赵蕾,刘华. 释热工况下能源桩的群桩效应系数分析与修正[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1):36-43.
- [2] 黄庆伟,刘齐建,高文华. 基于桩土相互作用的嵌岩能源桩传热计算[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4):1102-1107.
- [3] 陆浩杰,孔纲强,刘汉龙,等. 黏土热-力学特性对能量

桩力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 53-61.

- [4] 孔纲强,王成龙,刘汉龙,等. 多次温度循环对能量桩桩顶位移影响分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(4):958-964.
- [5] 吕亚茹,刘汉龙,王明洋,等. 异形桩桩土荷载传递机理理论分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S1):212-217.
- [6] 丁选明,孔纲强,卢一为. 现浇X形混凝土桩质量检测现场试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S2):1989-1995.
- [7] 王雪亮,夏梦然. 现浇X形桩成桩过程充盈系数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1):229-235.
- [8] 孔纲强,周立朵,孙广超,等. 水平荷载下X形桩承载特性简化计算方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(10):2104-2110.
- [9] 张敏霞,丁选明,陈育民. 现浇X形混凝土桩竖向承载特性试验及其极限承载力预测[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2):267-272.
- [10] 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.
- [11] 於慧. 高速公路拓宽现浇X形桩复合地基加固机制研究[D]. 南京:河海大学, 2013.
- [12] 吕亚茹,丁选明,刘汉龙,等. X形桩桩土相互作用对截面形状的力学响应[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2):357-364.
- [13] 卢一为,丁选明,刘汉龙,等. 循环加载下X形桩竖向承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1):281-288.
- [14] 王新泉,陈永辉,张世民,等. 反拱曲面X形异形桩产生附加应力计算方法研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12):220-227.
- [15] 方鹏飞, BOUAZZA Abdelmalek, Wang B, 等. 温度对地热能桩承载性状的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4):540-545.
- [16] 吕亚茹,丁选明,刘汉龙,等. 刚性荷载下现浇X形桩复合地基桩侧摩阻力数值分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11):2134-2140.
- [17] 孔纲强,丁选明,陈育民,等. 现浇X形群桩竖向抗拔特性及影响因素分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(3):49-54.
- [18] ZHAO M H, LIAO B B, LIU S S. Calculation of anti-slide piles spacing based on soil arching effect[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4):1211-1216.

(责任编辑 周雪梅)