

DOI: 10.11779/CJGE2015S1040

异形桩桩土荷载传递机理理论分析

吕亚茹^{1, 2}, 刘汉龙^{2, 3}, 王明洋¹, 李平²

(1. 解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007; 2. 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;
3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044)

摘要:近年来, 异形桩成为国内外学者研究的热点之一。所谓的异形桩有两种, 第一是通过改变桩身纵向截面形状得到变截面异形桩, 第二是通过改变桩截面几何形状得到异形截面桩, 其共同目的是通过改变桩身形状来提高桩基承载力。然而, 目前的研究仍着眼于异形桩的宏观承载特性上, 其复杂的桩土荷载传递机理即异形效应并未得到根本的揭示。通过平衡分析方法得到了考虑桩土剪切作用的单桩荷载传递计算方法, 包括桩周土竖向有效应力、桩侧正(负)摩阻力、桩身总侧摩阻力和桩身轴力(下拽力)的计算公式。通过模型试验验证了公式的合理性。通过对比分析等截面面积的圆形桩、H形桩和X形桩, 揭示了桩土剪切作用在异形截面桩中的表现, 初步探讨了异形截面桩的异形效应。
关键词: 异形桩; 荷载传递机理; 桩土剪切作用; 异形效应; 平衡分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0212-06

作者简介: 吕亚茹(1987-), 女, 博士, 主要从事软土地基加固方面的科学研究。E-mail: yaru419828@163.com。

Theoretical analyses of load transfer mechanism for special pile foundations

LÜ Ya-ru^{1, 2}, LIU Han-long^{2, 3}, WANG Ming-yang¹, LI Ping

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098; 3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In recent years, the special piles have been focused at home and abroad, including the piles with non-uniform cross-sectional area along shafts and those with special geometrical cross-sections. The load bearing capacity is enhanced for special piles by means of altering the pile geometry. Since many previous studies mainly emphasize on the bearing capacity, the complex fundamental load transfer mechanisms between special piles and their surrounding soil, called geometrical effects, are not well investigated and fully understood. Theoretical solutions are derived through equilibrium analyses for calculating the effective vertical stress, the unit positive (negative) shaft resistance, the total shaft resistance and the axial force (dragload). Those solutions are calibrated by reported large-scale model tests. The vertical shearing mechanisms of special piles are investigated by comparing a circular pile, an H-pile and an X-shaped pile with the same cross-sectional area. The geometrical effects are preliminarily discussed.

Key words: special pile; load transfer mechanism; vertical shearing mechanism; geometrical effect; equilibrium analysis

0 引言

桩基础作为竖向增强体, 具有刚度大, 变形小, 加固深度灵活, 地质条件适应性强等优点, 在软基加固工程中倍受青睐。随着高速铁路、高速公路等的大规模建设, 对路基沉降的要求标准也越来越高, 给传统桩基础的设计、施工和养护提出了新的挑战, 必须用全新的观念应对。近年来, 异形桩成为国内外学者研究的热点之一, 所谓异形有两种: 一是通过改变桩身纵向截面形状得到的变截面异形桩, 如此可增加桩—土接触面的不平直度和粗糙度, 以求增大侧摩阻力和端阻力, 如楔形桩^[1]、扩底桩^[2]、挤扩支盘桩^[3]等;

二是通过改变桩截面几何形状得到的异形截面桩, 如此可提高桩侧承载力, 节省材料, 如方形桩^[4]、壁板桩^[5]、管桩^[6]、H形和I形钢桩^[7]以及X形桩^[8]等。

1 异形桩的研究与应用

首先介绍通过改变桩身纵向截面形状而成的变截面异形桩。对于摩擦型桩, 由于单桩的轴力分布自桩顶到桩底逐渐减小, 为使材料得到充分利用, 桩身可

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408607, 51408187); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013B01214)

收稿日期: 2015-03-26

改造成楔形, 即楔形桩。楔形桩的桩径沿桩长部分或全部线性变化, 由于桩侧是一斜面而非垂直面, 所以竖向荷载作用下桩身产生向下的位移, 迫使桩周土沿径向受压, 从而提高了桩-土接触面上的摩阻力, 充分调动桩身材料和地基土的承载性能^[1]。对于摩擦端承桩, 要提高单桩承载力通常要增加桩长或桩径, 然而一味增加桩长或桩径会导致桩身混凝土用量增加, 经济性受到影响。如果桩端处的尺寸局部加大(扩大头), 而不改变桩长和上部桩身直径, 就可以同时增大端阻力和桩端部的侧摩阻力, 最终达到增加单桩承载力的效果, 即扩底桩^[2]。研究表明, 广泛使用的 TFP 工法扩底桩, 扩大头的高度可达数米, 但扩大头直径与桩身直径的比值不应大于 2。在扩底桩的基础上, 将一个扩大头发展成多个扩大头的桩型称为挤扩支盘桩^[3], 它不仅可增大承载力, 还可以有效调节桩土荷载分担比, 减小沉降, 节省造价。

其次介绍通过改变截面形状而成的异形截面桩, 也是本文的主要研究对象。异形截面桩的成型理念是等面积异形周边扩大原理, 即通过改变截面形状来增加桩-土接触面积, 方形桩就是其中之一。与等截面面积的圆形桩相比, 方形桩桩侧表面为平面且比表面积大, 因此作用在侧表面上的法向有效应力大, 承载力高。Thasnanipan 等^[4]通过有限单元法得到了方形桩桩周法向有效应力与长宽比的关系, 发现当长宽比小于 3 时, 法向有效应力明显增大; 当长宽比大于 5 时(如壁板桩), 由于长边周围的土体很容易屈服, 因此法向有效应力减小。将方形桩的长边扩大就可得到壁板桩, 壁板桩^[5]是一种采用泥浆护壁, 地下连续墙施工设备开挖成槽的混凝土灌注桩。壁板桩可通过不同的截面布置形式来提高水平抗剪强度, 对场地的适用能力强。

管桩将传统的实心圆形截面优化成环形截面, 达到节省桩身材料、减少桩身自重、增加桩侧表面积的目的, 如图 1(a) 所示。通过改变管桩的施工工艺, 得到大直径现浇混凝土薄壁管桩(PCC 桩)^[6]。PCC 桩不仅充分考虑了管桩的优点, 而且实现了混凝土现浇成型, 减少了中间运输环节, 从而降低了管桩的成本。PCC 桩常用桩径为 1000~1500 mm, 并在向更大直径的方向发展, 壁厚在 150~200 mm, 处理深度可达 35 m。

H 形和 I 形钢桩通常指^[7]型钢焊接而成的部分挤土桩, 一般通过增大翼缘的宽度和长度的方式增大截面面积, 提高承载力, 如图 1(b) 所示。一般的钢板桩仅用于承受水平推力, 不能作为基础桩。而 H 形和 I 形钢桩不仅可用于承受竖向荷载又可用于承担水平

荷载。H 形和 I 形钢桩贯入各类地层的能力强, 对地层的扰动小。但是, 需要注意的是 H 形和 I 形钢桩的刚度虽然大于一般钢板桩, 但长径比过大时, 在打入过程中仍易产生弯曲变形。当弯曲变形过大时, 就不能用于承受竖向荷载。

自 2008 年以来, 一种新型的异形截面桩——现浇 X 形混凝土桩(X-sectional Cast-in-place Concrete pile, 以下简称 X 形桩) 被逐步研发并得以使用^[8], 如图 1(c) 所示。X 形桩通过将圆弧的正拱变成反拱, 最终形成对称的 X 形截面, 达到扩大截面周长、提高承载力的目的。已被用于多个高速公路软基加固工程, 如南京长江第四大桥北接线软基加固工程、南京江大街桥头过渡段软基加固工程、312 国道拼宽段地基加固工程等。通过前期的理论、试验与数值模型研究可知, X 形桩单桩复合地基的极限承载力比等截面的圆形桩单桩复合地基提高 30% 左右, X 形桩群桩复合地基的极限承载力比等截面面积圆形桩群桩复合地基提高 20% 左右, 承载力提高的比例受 X 形桩截面形状和桩周土的影响。

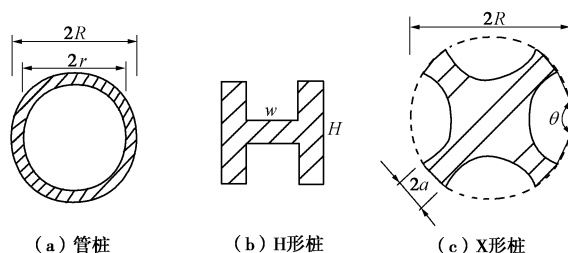


图 1 异形截面桩的异形截面

Fig. 1 Cross-sections of special cross-sectional piles

综上所述, 异形桩已经得到了系统的研究。然而, 目前的研究仍着眼于异形桩的宏观承载特性上, 异形桩与桩周土复杂的荷载传递机理即异形效应, 并没有得到根本的揭示。因此, 从机理上揭示桩土荷载传递特性和异形效应, 是异形桩进一步推广应用的基础, 具有重要的意义。本文选取传统的圆形桩、H 形桩和 X 形桩为研究对象, 通过对桩土剪切特性的分析, 初步探讨了异形截面桩的异形效应。

2 异形桩桩土剪切作用

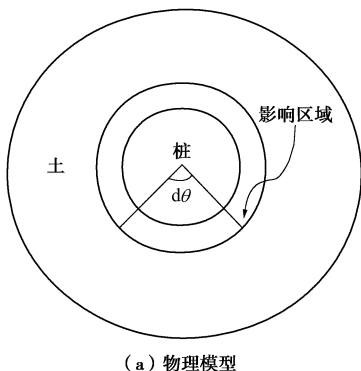
桩土剪切作用(vertical shearing mechanism), 又叫竖向拱效应(vertical arching effect)^[9], 用于分析荷载在桩土之间的竖向传递, 早在 1982 年 Janssen^[10]对粮仓侧壁的受力分析中被提及, 其假设粮仓侧壁与散粒体接触面上发生剪切, 产生的剪应力使原有散粒体的竖向自重应力折减。Write^[9]采用 Janssen 分析粮

仓侧壁竖向剪切作用的方法分析了桩顶竖向荷载作用下管桩内外壁的桩土剪切作用, 分析对象是紧邻桩土接触面的土单元, 分析方法为土单元竖向力的平衡方程。结果表明, 管桩内壁的侧摩阻力可以准确得到, 但由于外侧剪应力影响区域未知, 管桩外壁的侧摩阻力难以准确计算。Lam^[11]采用同样的方法对桩周土竖向均布荷载作用下 H 形桩半封闭区域内的土单元进行了分析, 结合数值模拟结果, 很好地证明了桩土剪切作用的存在, 并分析了剪切作用对 H 形桩侧摩阻力的影响。Ng 等^[12]对地下连续墙周围土体的剪切作用进行了分析, 发现地下连续墙周围一倍墙深范围内土体的法向有效应力有所折减, 从而揭示了地下连续墙的竖向荷载传递机理。事实上, 桩周土剪切作用的产生受桩土接触面形状的影响, 而不受桩土接触面形状的控制。换言之, 不同截面形状的桩受不同程度的桩土剪切作用, 但任何截面形状的桩都受桩土剪切作用的影响。

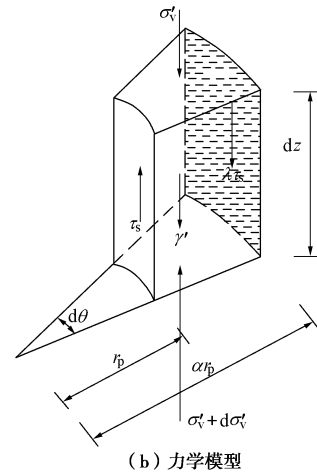
本文的理论基础是桩周土单元力的平衡方程, 假设地下水位与地表面齐平。以传统的圆形桩为例, 分析模型见图 2 所示。理想半无限空间中, 桩周土某一深度处土单元的竖向有效应力与深度呈线性关系, 即 $\sigma'_v = \gamma'z$ 。其中, σ'_v 为土体的竖向有效应力, γ' 为土体的有效重度, z 为计算深度。由物理模型可知, 桩的存在使桩周土存在一个影响区域, 在该区域内, 土单元的竖向有效应力 $\sigma'_v \neq \gamma'z$ 。取桩周土微小土单元作为分析对象, 假设土单元内侧面到圆心的距离(桩半径)为 r_p , 内侧面上剪应力为 τ_s 。土单元外侧面到圆心的距离为 $r_0 = \alpha r_p$ ($\alpha > 1$), 外侧面上剪应力为 $\lambda \tau_s$, 其中, λ 的物理意义为桩侧摩阻力通过剪应力传递的比例。土单元内外侧面上剪应力存在差值, 该差值由土单元的竖向有效应力得以调节, 此为桩土剪切作用的力学模型。

综上所述, 土单元竖向有效应力平衡方程为

$$\frac{d\sigma'_v}{dz} = \chi \tau_s + \gamma' \quad (1)$$



(a) 物理模型



(b) 力学模型

图 2 桩土剪切作用分析模型

Fig. 2 Graphical representations of vertical shearing mechanism

对式 (1) 两边积分得到桩周土竖向有效应力:

$$\sigma'_v = \left(\sigma_{v0} + \frac{\gamma'}{\chi K \tan \delta} \right) e^{\chi K \tan \delta z} - \frac{\gamma'}{\chi K \tan \delta} \quad (2)$$

假设剪应力在桩土接触面极限承载状态下服从莫尔-库仑^[13]准则:

$$\tau_s = K \sigma'_v \tan \delta \quad (3)$$

式中, K 为水平土压力系数, δ 为桩土接触面的内摩擦角。 χ 定义为剪切作用系数, 反映竖向有效应力受桩土剪切作用的影响程度。当 $\chi = 0$ 时, 桩土剪切作用忽略不计, 紧邻桩土接触面的土单元的竖向有效应力恢复为 $\sigma'_v = \gamma'z$ 。因此, 极限桩侧摩阻力为

$$\tau_s = \left(\sigma_{v0} K \tan \delta + \frac{\gamma'}{\chi} \right) e^{\chi K \tan \delta z} - \frac{\gamma'}{\chi} \quad (4)$$

对式 (4) 在桩侧表面积分, 即可得到某一深度以上桩身总侧摩阻力 Q_s 。因此, 当桩周土承受竖向均布荷载 σ_{v0} 作用时, 桩身下拽力计算式为

$$Q = Q_s \quad (5)$$

当桩顶承受轴向荷载 Q_0 作用时, 在式 (1) ~ (5) 中 $\sigma_{v0} = 0$, 桩身轴力计算公式为

$$Q = Q_0 - Q_s \quad (6)$$

不同截面形式的桩, 桩周竖向剪切作用程度不同, 具体表现在: ①公式中 χ 的计算方法不同; ②在桩侧表面积分时, 由于侧表面形状和大小均不相同, 积分形式也不同。对于传统的圆形桩, 桩土剪切作用系数为^[9]

$$\chi = \frac{2(\alpha\lambda - 1)}{(\alpha^2 - 1)r_p} \quad (7)$$

对于 H 形桩, 桩土剪切作用分为腹板处和翼缘处。腹板处桩土剪切作用系数又与土单元大小相关, 具体计算方式参照参考文献[14]。X 形桩桩土剪切作用也分为凸出区和凹弧区, 不同区域桩土剪切作用计算参

表 1 截面参数

Table 1 Parameters of cross-section

桩截面形	工况	$F=W/\text{m}$	c/m	$2R$	$2a$	$\theta_x/(\text{^\circ})$	周长/ m	面积/ m^2	桩长/ m	D_0	参考文献
圆形桩	C-1	—	—	0.421	—	—	1.323	0.1392	5.000	0.421	张敏霞 ^[15]
H 形桩	H-1	0.572	0.091	—	—	—	3.250	0.1396	5.000	0.422	—
X 形桩	X-1	—	—	0.530	0.110	90	1.726	0.1395	5.000	0.421	张敏霞 ^[15]

照文献[14]。

3 不同异形截面桩桩土剪切作用对比

3.1 计算案例

为揭示不同截面形状桩的桩土剪切作用，本节对等截面面积的圆形桩、H 形桩和 X 形桩进行了对比分析，分别记为 C-1、H-1 和 X-1 工况。C-1 和 X-1 为张敏霞^[15]开展的砂土中的圆形桩和 X 形桩的大型足尺模型试验。根据试验设计，圆形桩截面直径为 0.421 m，截面周长为 1.323 m。等截面面积的 X 形桩的 3 个截面控制参数分别为外包圆直径 $2R=0.530\text{ m}$ ，开弧间距 $2a=0.110\text{ m}$ 和开弧角度 $\theta_x=90^\circ$ ，因此 X 形桩的截面周长为 1.726 m。等截面面积的 H 形桩的翼缘和腹板长度相同，均为 $F=W=0.572\text{ m}$ ，翼缘和腹板厚度均为 $c=0.091\text{ m}$ ，得到的 H 形桩的截面周长为 3.250 m。3 种截面形式的桩的截面面积均为 0.14 m^2 （等效圆形桩桩径为 0.42 m），桩长均为 5 m。表 1 为三桩的截面参数。综上所述，C-1、H-1 和 X-1 为 3 个不同截面形状的桩，但具有相同的截面面积和桩长，即在等材料用量下探讨 3 个截面形状的桩对桩土剪切作用的反映程度。

文中选取 X-1 作为验证工况，验证桩顶荷载作用下产生的桩身轴力计算公式，为与模型试验保持一致，桩-土接触面摩擦角通过 Randolph 等^[16]的计算式：

$$\delta = \tan^{-1}[\sin \phi' \cos \phi' / (1 + \sin^2 \phi')] \quad , \quad (8)$$

估算得到，文中接触面摩擦角取 18° 。其余参数参照试验提供数据选取，其中，砂土的重度为 15.0 kN/m^3 ，水平土压力系数为 0.5，桩顶荷载取足尺模型试验的某一加载步（ $Q_0=90\text{ kN}$ ）。计算参数见表 2 所示。

表 2 计算参数

Table 2 Parameters of soil

土层	K	δ $/(\text{^\circ})$	重度 $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	σ_{v0} $/\text{kPa}$	Q_0 $/\text{kN}$
砂土	0.5	18	$\gamma_d=15.0$	—	90

3.2 计算结果验证

图 3 为桩顶集中荷载作用下 X 形桩桩身轴力分布图。为验证公式的合理性，图中给出了张敏霞^[15]开展的 X 形桩的大型足尺模型试验结果，如图中离散的实心点所示。作为参考，文中给出了不考虑桩土剪切作

用的桩身轴力，计算式为

$$Q = A_s \gamma' h K \tan(\delta) \quad . \quad (9)$$

式中， A_s 为 h 深度以上的桩侧表面积，计算结果见图 3 中虚线所示。同理，为揭示试验桩桩土剪切作用的影响程度，计算中取 χ 为 0（ -1×10^{-6} 代替），0.5，1.0，1.5，2.0，2.5，3.0，3.5，4.0，4.5，5.0。

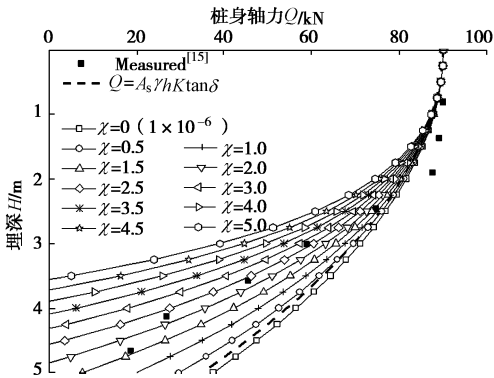


图 3 轴力计算验证， $Q_0=90\text{ kN}$

Fig. 3 Calibration of axial force, $Q_0=90\text{ kN}$

由图 3 可知，桩顶集中荷载（ $Q_0=90\text{ kN}$ ）作用下，桩身轴力随着剪切作用系数 χ 的增大而减小，其原因是桩顶集中荷载作用时，桩沉降引起桩周土沉降，桩土剪切作用系数为正值，桩土剪切程度越大，桩周土竖向有效应力增加越大，桩侧外表面产生的用于抵抗桩顶荷载的正侧摩阻力随之增大，桩身轴力相应减小。同理，对比不考虑桩土剪切作用时两种计算方法（虚线和 $\chi=0$ ）得到的计算结果可知，两者计算得到的桩身轴力分布基本吻合，从而验证了文中计算过程的正确性。然而，为了保证计算结果收敛，文中计算时取 $\chi=1 \times 10^{-6}$ 代替 $\chi=0$ ，因此，两种计算结果存在微小差异。除此，试验结果与 $\chi=2.5$ 的计算结果较好吻合，验证了理论推导的合理性，也证明了桩土剪切作用的存在。

3.3 计算结果分析

为了分析不同荷载形式下异形桩桩土剪切作用，本节考虑了两种荷载形式，一种为桩周土表面作用均布荷载 $\sigma_{v0}=45\text{ kPa}$ ；另一种为桩顶作用均布荷载 $Q_0=90\text{ kN}$ 。式（1）给出了桩土剪切作用的平衡分析方程，土单元分析时（如图 1）均假设荷载形式为桩周土表面受均布荷载，故桩土剪切作用系数 χ 为负

值。然而,对于桩顶轴向荷载作用时, χ 为正值。因此,图 4(a)给出了 χ 从-0.5 到 0.0 范围内桩身下拽力的变化,图 4(b)给出了 χ 从 0.0 到 0.5 范围内桩身轴力的变化。

图 4(a)为计算得到的不同截面形状的桩身下拽力分布图。 $\sigma_{v0}=45$ kPa, $\chi=-0.5$ 时, H 形桩产生的下拽力最大, X 形桩次之, 圆形桩最小, 即相同荷载作用下 H 形桩沉降(downdrag)大于 X 形桩和圆形桩。其原因是相同截面面积和桩长时 H 形桩的截面周长分别为 X 形桩和圆形桩截面周长的 1.88 和 2.46 倍。随着 χ 绝对值的增大, 3 种桩产生的下拽力均有明显削弱, 该现象进一步验证了桩土剪切作用的存在与截面形状无关, 但剪切作用的程度受到截面形状的影响。

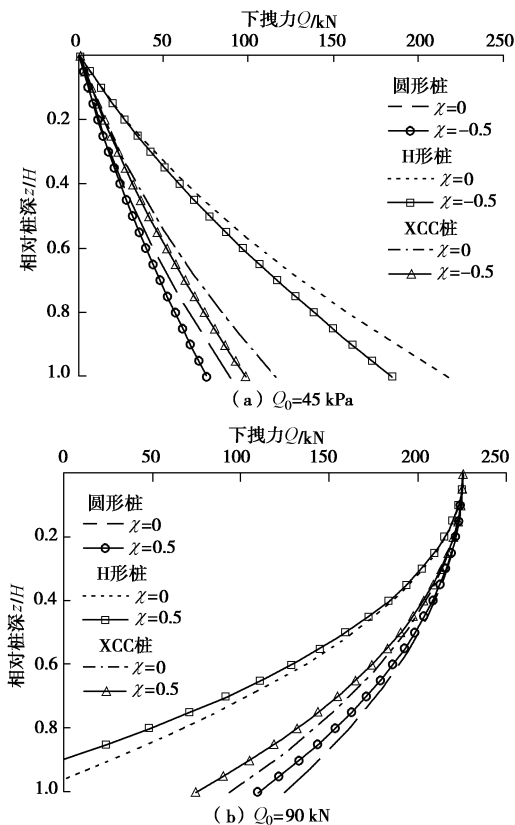


图 4 截面形状分析

Fig. 4 Analysis of cross-sectional geometry

$Q_0=90$ kN, $\chi=0.5$ 时, 圆形桩产生的桩身轴力最大, X 形桩次之, H 形桩最小, 即相同荷载作用下 H 形桩桩侧承载力大于 X 形桩和圆形桩, 相反 H 形桩桩端承载力小于 X 形桩和圆形桩。其原因仍为相同截面面积下截面周长不同所致。随着 χ 的增大, 三种截面形状桩产生的桩身轴力均有削弱, 但削弱程度较均布荷载作用下微弱。该现象进一步证明了桩土剪切作用是否存在与截面形状和荷载形式无关, 而由桩-土相对模量(相对位移)决定。然而, 由于半开口截面在

相等截面面积(材料用量)下可有效增加截面周长, 因此, H 形桩和 X 形桩产生的下拽力较圆形桩大, 而桩身轴力较圆形桩小。

在文中给定的桩截面参数和土层参数下, 桩顶竖向荷载作用时桩土剪切作用明显大于桩周土表面均布荷载作用时的结果, 其原因为: 桩土剪切作用的力学响应为桩周土一定范围内(紧邻桩周)存在剪切区域, 物理响应即桩-土相对位移。桩顶荷载作用下桩-土相对位移往往大于桩周土均布荷载时的结果, 因此, 桩土剪切作用相对明显。然而, 公式的应用需要对桩土剪切作用系数 χ 进行一系列的试验和数值研究, 得到不同截面形状桩与剪切作用系数的经验关系。此不足将在后续研究中逐步开展, 本文不再进行详细阐述。

4 结 论

本文对目前常用的异形截面桩进行了分类综述, 提出了异形桩异形效应(异形桩桩土荷载传递机理)的概念, 通过对比分析等截面面积的圆形桩、H 形桩和 X 形桩, 揭示了桩土剪切作用在异形截面桩中的表现, 初步探讨了异形截面桩的异形效应, 得到以下 3 点结论。

(1) 采用平衡分析法推导得出了考虑桩土剪切作用的圆形桩、H 形桩和 X 形桩的桩周土竖向有效应力、桩侧正(负)摩阻力和桩身轴力(下拽力)的计算公式。桩周土均布荷载作用下, 桩侧产生负摩阻力, 桩身产生下拽力, 竖向剪切效应系数取负值。桩顶集中荷载作用下, 桩侧产生正摩阻力, 桩身产生轴力, 竖向剪切效应系数取正值。

(2) 通过张敏霞^[15]开展 X 形桩的大型模型槽静载荷试验($Q_0=90$ kN)结果, 验证了文中得到的轴力计算公式。验证结果证明了理论分析的合理性, 也证明了桩土剪切作用的存在, 揭示了桩土剪切作用的作用效果。

(3) 对比等截面面积(相同材料用量)和等长度的圆形桩、H 形桩和 X 形桩可知, 桩周土均布荷载作用下, H 形桩产生的下拽力最大, X 形桩次之, 圆形桩最小, 即相同荷载作用下 H 形桩沉降(downdrag)大于 X 形桩和圆形桩。桩顶集中力作用下, 圆形桩产生的桩身轴力最大, X 形桩次之, H 形桩最小, 即相同荷载作用下 H 形桩桩侧承载力大于 X 形桩和圆形桩, 相反 H 形桩桩端承载力小于 X 形桩和圆形桩。因此, 桩周土剪切作用的产生受桩土接触面形状的影响, 而不受桩土接触面形状的控制。换言之, 不同截面形状的桩可产生不同程度的桩土剪切作用, 但任何截面形状的桩都受桩土剪切作用的影响。

参考文献:

- [1] GHAZAVI M. Analysis of kinematic seismic response of tapered piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 2007, **25**(1): 37 - 44.
- [2] NG C W W, YAU T L Y, LI J H M. Side resistance of large diameter bored piles socketed into decomposed rock[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2001, **127**(8): 642 - 657.
- [3] 吴兴龙, 李光茂, 魏章和. Dx 桩单桩承载力设计分析[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(5): 581 - 585. (WU Xing-long, LI Guang-mao, WEI Zhang-he. Design and analysis for the end-capacity of the single DX pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(5): 581 - 585. (in Chinese))
- [4] THASMANIPAN N, ANWAR M A, MAUNG A W, et al. Performance comparison of bored and excavation piles in the layered soils of Bangkok[C]// *Symposium on Innovative Solutions in Structural and Geotechnical Engineering*, 1999.
- [5] NG C W W, RIGBY D B, NG S W L, et al. Field studies of wall-instrumented barrette in Hong Kong[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, **126**(1): 60 - 73.
- [6] 刘汉龙, 费康, 马晓辉, 等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(I): 开发研制与设计[J]. *岩土力学*, 2003, **24**(2): 164 - 168. (LIU Han-long, FEI Kang, MA Xiao-hui, et al. Cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile with vibrated and steel tube mould technology and its application I : development and design[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(2): 164 - 168. (in Chinese))
- [7] SO A K O, NG C W W. Performance of long-driven H-piles in granitic saprolite[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2009, **135**(2): 246 - 258.
- [8] LV Y R, LIU H L, DING X M et al. Field Tests on Bearing Characteristics of X-section Pile Composite Foundation [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2012, **26**(2): 180 - 189.
- [9] WHITE D J. An investigation into the behaviour of pressed-in Piles[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2002.
- [10] JANSSEN H A. Versuche über getreidedruck in Silozellen [J]. *Zeitschrift, Verein Deutscher Ingenieure*, 1895(39): 1045 - 1049.
- [11] LAM S Y. Effects of axial load, shielding and shape on negative skin friction on piles[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2006.
- [12] NG C WW, YAN R W M. Three dimensional modelling of a diaphragm wall construction sequence[J]. *Géotechnique*, 1999, **49**(6): 825 - 834.
- [13] LEHANE B M, JARDINE R J, BOND A J et al. Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests [J]. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, **119**(GT1): 19 - 35.
- [14] 吕亚茹. 现浇 X 形桩桩—板结构承载特性与变形机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2014. (LÜ Ya-ru. Bearing capacity and deformation mechanism of XCC piled raft[D]. Nanjing: Hohai University, 2014. (in Chinese))
- [15] 张敏霞. 现浇 X 形桩单桩竖向承载形状足尺模型试验与计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2011. (ZHANG Min-xia. Full-scale model test and calculation method study on the bearing behavior of Cast-in-situ X-section pile[D]. Nanjing: Hohai University, 2011. (in Chinese))
- [16] RANDOLPH M F, WROTH C P. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles[J]. *Géotechnique*, 1981, **31**(1): 143 - 157.

(本文责编 孙振远)