

钻孔桩桩侧摩阻力异化效应的数值分析

琚晓冬^{1,2} 冯文娟¹ 邹正盛¹ 张玉军²

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南焦作 454000; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 基于 Goodman 接触界面模型, 通过设定桩土极限剪切位移 Δ , 运用 Coulomb 剪切强度理论, 得到了剪切刚度随深度的变化规律。并运用该改进界面模型对桩侧摩阻力变化情况及其异化效应进行了数值分析。结果表明异化效应尤其是强化效应的确存在, 但其发生及量级主要与桩端条件, 即桩底沉渣厚度有关, 而桩端岩土性质的改变对强化效应的影响不大。梅耶霍夫深基础破坏模型能够在一定程度上解释桩侧摩阻力的强化效应, 但存在局限性, 需要对之进行更加深入的研究和探讨。

关键词: 钻孔桩; 桩-土界面; 桩侧摩阻力; 异化效应

NUMERICAL ANALYSIS OF ABNORMAL EFFECT OF SKIN FRICTION ON BORED PILE

Ju Xiaodong^{1,2} Feng Wenjuan¹ Zou Zhengsheng¹ Zhang Yujun²

(1. Civil Engineering School, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the Goodman contact interface model, and setting the ultimate shear displacement Δ , using Coulomb shear strength theory, the variation of shear stiffness with depth was gotten. A numerical experimental investigation was performed on the variation law of pile skin friction and its abnormal effect by this improved contact interface model. The result show that the abnormal effect especially the enhancement effect exists in faith, but its emerging and magnitude are related to the condition of pile tip that is the depth of sediment. The effect of property of rock-soil mass under pile tip to the enhancement of shear stress can be neglected. The Meyerhof deep foundation failure model can explain the enhancement effect of skin friction to some extent, and has limitation. Further researches and discussion are needed.

Keywords: bored pile; interface between pile and soil; skin friction; abnormal effect

0 引言

我国的 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》规定, 单桩竖向承载力由桩端承载力和桩侧摩阻力这两部分组成, 两者的计算并不直接相关^[1]。而大量的现场测试及室内试验数据均表明, 这两者之间绝不仅是简单的相加关系, 桩端条件会影响到桩侧阻力的大小和分布形式^[2-7], 即桩侧摩阻力会因桩端条件不同而发生正负异化效应。

70 年代, 北京市桩基小组从现场试验中观察到了桩端阻力对桩侧阻力的增强效应^[3], 这种增强效应是基于灌注桩桩底填充材料不同而产生的。其后公开发表的多组现场试验数据也多集中在桩底沉渣厚度对桩侧阻力的影响上^[3-5, 8], 沉渣厚度小的桩承载能力大于沉渣厚度大的桩体, 其侧摩阻力大小也有类似规律, 由此人们将这种现象归结为桩端岩土

材料的力学性能对桩侧摩阻力有影响, 桩端土性质越好, 桩侧极限阻力也就越大, 相反, 则极限阻力减小。室内的大变形模型试验也证实了这一结论的正确性^[6-7], 另外文献[7]的模型试验还表明不同性质的土层均可导致侧阻的强化效应的产生, 只是其增强程度不同而已。

人们提出了多种观点来解释这一增强现象, 目前比较流行的观点有: 径向压力增强论、挤密作用增强论及两者的共同作用理论, 此外还有成拱作用理论^[2]以及桩端挤压破碎论^[9]等。但所有这些理论观点目前均只能定性地说明桩侧阻力异化效应的存在, 并不能据此进行定量分析、计算。

第一作者: 琚晓冬, 男, 1979 年出生, 博士。

电子信箱: juxiaodong@hpu.edu.cn

收稿日期: 2013-10-18

笔者通过研究认为,钻孔桩桩侧摩阻力的确会产生异化效应,但其出现和量级不是由桩端土体力学性质差异决定的,而是与桩端的填充条件相关。在桩与其下岩土体接触良好的情况下,随桩体受力的增长,桩侧阻力均会出现不同程度的增强。当桩端填充条件不良,存在较厚沉渣或放置草笼时^[2],桩侧阻力会因桩体的快速下沉或桩端附近超孔隙水压力的存在而出现弱化现象^[4]。

1 异化效应的数值试验

基桩及其周围土体内的应力状态与岩土性质、桩型、施工情况甚至时间等因素密切相关,这里探讨桩侧阻力异化效应时所考虑的状态为理想情况。即:桩型为等截面圆柱桩,桩端直接与下部土层水平接触,不考虑桩帽的影响;计算中不考虑施工过程中产生的各种桩体及土体应力,仅计及由其自身重量引起的应力场;为不在土体内部产生额外切应力,桩体的重度设置与土体相同。

在上述理想状态下,桩土模型内部仅存在竖向和水平应力而不存在剪应力。只有当桩体受到竖向的荷载作用时,剪应力才会通过桩-土接触面向土体内部发展。如此处理可以大大减少土体内部的干扰应力,使得计算结果的分析更加简便、直观。

1.1 接触模型的确定

桩-土接触面的力学性质不同于组成其实体的桩、土材料中的任何一方,对于钻孔灌注桩而言由于施工过程中存在的泥皮、水等因素的影响,一般情况下,接触面的力学性质要比周围土体稍差,在较大剪切力的作用下会产生沿接触面的滑移破坏。

数值计算中对诸如此类接触面的模拟多采用接触面计算模型,其中 Goodman 接触面模型由于其算法简单易行、应用方便而在工程计算中得到了广泛的应用。本次计算也采用该界面模型,同时结合 Coulomb 剪切强度理论限定接触面剪切强度。

Goodman 接触面模型可表达如下:

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s \\ u \end{Bmatrix} \quad (1)$$

在计算桩土相互作用时,模型对剪力的表达和传递是最重要的问题,Goodman 接触面模型通过剪切刚度 k_s 与接触面间的相对位移 s 间的乘积来表达其上剪应力的大小,其强度极限由 Coulomb 强度理论决定(图1)。当接触面上剪切力达到强度极限时,产生沿剪切面的滑动,且最大剪应力保持不变。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

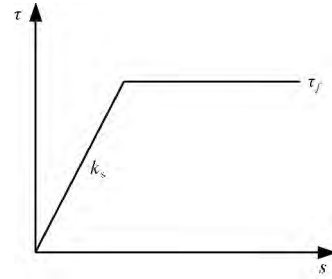


图1 接触面剪力-位移曲线

试验表明,对于较坚硬的结构面,剪切刚度 k_s 一般为常数;而对于诸如土体等松软材质的接触面,剪切刚度会随法向应力的增大而改变^[10]。一般情况下,法向应力增大导致接触面接触更加紧密,从而使接触面剪切刚度增加。实际情况下,桩-土接触面上正应力会随基桩埋深不断增加,由此导致其剪切刚度不断增加。根据文献[11]介绍,桩侧阻力达到极限所需桩土相对极限位移与土的类别有关,黏土一般为 5~7 mm,而砂土一般为 10 mm。此处计算土质为黏性土,取极限位移 Δ 为 5 mm。剪切刚度 k_s 可表达如下:

$$k_s = \frac{\tau_f}{\Delta} = \frac{c + \mu / (1 - \mu) \gamma h \tan \varphi}{\Delta} \quad (3)$$

式中: c 、 φ 分别为桩土界面黏聚力和摩擦角, μ 、 γ 分别为桩侧土体泊松比和容重, h 为计算点深度。

由此对于性质稳定的岩土体来说,基桩随深度的增加,剪切刚度呈线性增长态势。

1.2 计算模型的建立

本次计算采用轴对称算法,将单桩受力的三维问题简化为平面问题来进行讨论,平面模型的宽度为 5 m,高度为 15 m,基桩半径为 0.2 m,埋深 15 m,0~10 m 为 1 号土层(Soil 1),10~15 m 为 2 号土层(Soil 2)。具体模型构成如图 2 所示。

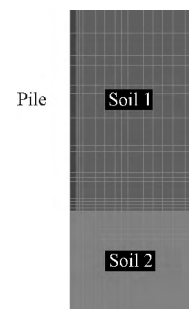


图2 模型组合及网格划分

其中岩土材料(Soil 1、Soil 2)采用 Mohr - Coulomb 强度准则,而基桩则运用线弹性模型。通过改变桩端土 Soil 2 的弹性性质来模拟桩端土硬度变化

对桩侧摩阻力的影响 桩端土性质的弱化、强化各进行 4 种计算 ,弱化中 Soil 2 - 4 采用桩底部分挖空 ,

模拟基桩施工中的桩底残渣过厚的情况。具体计算类型及材料参数情况如表 1 所示。

表 1 模型材料参数表

类别	$E_{\text{Soil 2}}/E_{\text{Soil 1}}$	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /Pa	摩擦角 /($^{\circ}$)
Soil 1	—	20.8	9.6	1 800	1.5×10^5	20
Soil 2 - 1(桩底悬空)	1	20.8	9.6	0.1	1.5×10^5	20
Soil 2 - 2	0.25	5.2	2.4	1 800	1.5×10^5	20
Soil 2 - 3	0.5	10.4	4.8	1 800	1.5×10^5	20
Soil 2 - 4	1	20.8	9.6	1 800	1.5×10^5	20
Soil 2 - 5	2	41.6	19.2	1 800	1.5×10^5	20
Soil 2 - 6	4	83.2	38.4	1 800	1.5×10^5	20
Soil 2 - 7	8	166.4	76.8	1 800	1.5×10^5	20
Soil 2 - 8	16	332.8	153.6	1 800	1.5×10^5	20
Pile	—	8 000	4 800	1 800	—	—

2 计算结果及分析

通常情况下 ,桩端黏性土强度充分发挥所需的桩端位移一般为 $d/4$ ^[11] ,对于本例而言 ,该位移量为 10 cm。由此我们设定桩基破坏的统一标准为桩端位移不小于 10 cm。此标准要大于桩侧摩阻力完全发挥所需要的位移量($\Delta = 5 \text{ mm}$) ,所以在此标准下能够确保桩端与桩侧均达到极限状态 ,从而使得基桩承载力达到最大。

桩顶所加荷载以 1 t 为最小单位逐级增加 ,直至桩端位移大于等于 10 cm 为止 ,规定此时所施加

的力为桩基所能承受的最大载荷。随桩端土体 Soil 2 刚度的变化 ,承载及位移情况如表 2 所示。

当桩端悬空时 ,桩基极限载荷为 21 t ,此时无论桩顶还是桩端的位移都非常小 ,载荷稍有增大 ,则两者位移迅速增加 ,与桩端填实的情况相比表现出明显的“脆性破坏”特征。

表 2、图 3 说明随着桩端条件及岩土体性质的改善 ,桩基极限荷载及桩端阻力迅速提高 ,并逐步趋于稳定 ,同时桩侧总阻力也有一定增长 ,但增长幅度较小 ,且增长率随桩端土刚度呈近似直线形态。

表 2 桩基承载性能情况表

类别	$E_{\text{Soil 2}}/E_{\text{Soil 1}}$	极限荷载/t	桩顶位移 /(10^{-1} m)	桩端位移 /(10^{-1} m)	桩端阻力 /(10^5 N)	桩侧阻力 /(10^5 N)
Soil 2 - 1	—	21	0.0142	0.0143	0	2.058
Soil 2 - 2	0.25	44	1.184	1.160	2.515	1.797
Soil 2 - 3	0.5	53	1.050	1.079	3.335	1.859
Soil 2 - 4	1	67	1.107	1.069	4.624	1.942
Soil 2 - 5	2	83	1.051	1.003	6.073	2.061
Soil 2 - 6	4	107	1.106	1.042	8.231	2.255
Soil 2 - 7	8	134	1.119	1.038	10.631	2.501
Soil 2 - 8	16	160	1.102	1.004	12.096	3.584

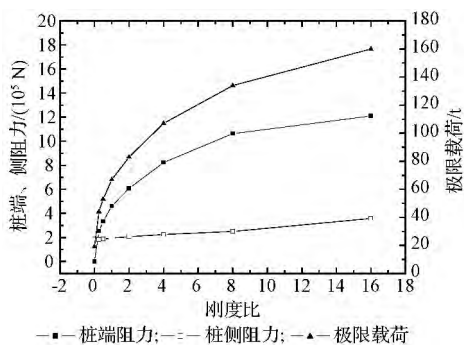


图 3 载荷分配曲线

按照本文中接触面模型特点 ,随桩体深度增加 ,接触面剪切刚度呈线性增长趋势 ,当桩身某处接触

面相对位移超过 5 mm 时 ,则接触面剪力达到极限状态 ,并随相对位移的继续增加而保持不变。那么当桩端位移也超过 5 mm 时 ,桩身的任何深度均已达到并超过极限位移 ,并达到最大剪力状态 ,此时侧阻在桩身全段达到最大状态 ,我们称这一状态为桩侧剪力的标准极限状态。

图 4 表示标准极限状态与桩端悬空时剪应力沿基桩深度分布曲线 ,除在桩端部剪应力大小有一定变化外 ,其余大部近乎相等 ,说明悬空桩对标准桩侧摩阻力改变较小。对于桩端无沉渣或沉渣极少的情况 ,桩侧阻力在整个桩身有较为明显的增长 ,尤其是桩端附近摩阻力增长非常显著 ,而桩端处岩土体的

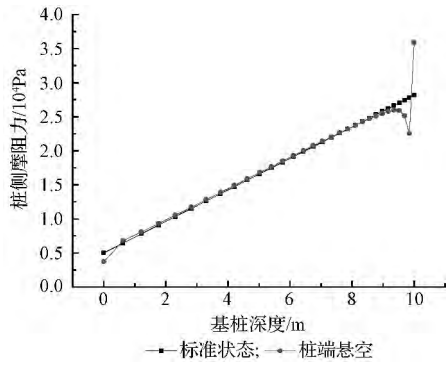


图4 桩端悬空状态下摩阻力 - 深度曲线

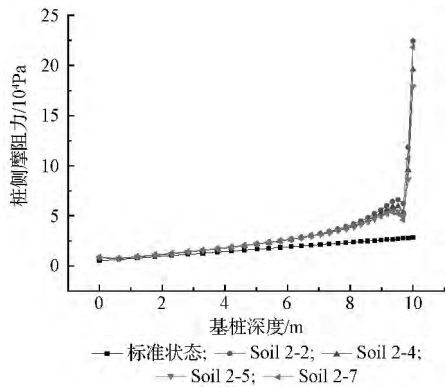


图5 摩阻力 - 深度曲线

性质对摩阻力是否发生强化的关系不大,摩阻力在桩端岩土性质减弱的情况下同样出现的沿整个桩长的强化现象。由此可以初步断定,桩侧摩阻力的强化效应与桩端岩土性质的变化关系不大,而主要与桩端条件有关。

据文中所采用的接触面模型,致使桩侧摩阻力增加的原因不外乎接触面上正应力增大以及相对位移增加这两种情况。而据图6,基桩与其周围土体的相对位移随深度增加呈递减状态,尤其在桩端部分减小趋势更加明显,由此可以确定摩阻力在整个桩长范围内的增强效应与接触面的相对位移关系不大,而应该是接触面上正应力的增加引起的。

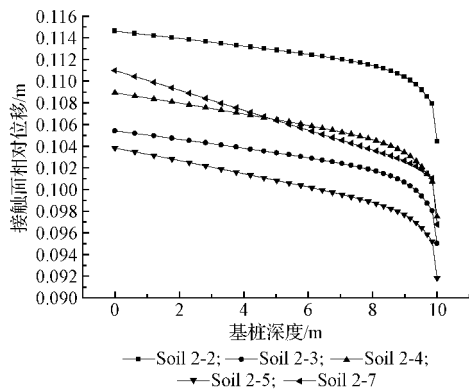


图6 极限荷载下接触面相对位移曲

接触面上正应力的增加情况如图7所示,其曲线形态与桩侧摩阻力近乎一致,由此可以得到接触面上正应力的增加是桩侧摩阻力增强效应产生的主要原因的结论。而正应力的增加与桩端沉渣条件有关,而与桩端岩土体性质关系不大。

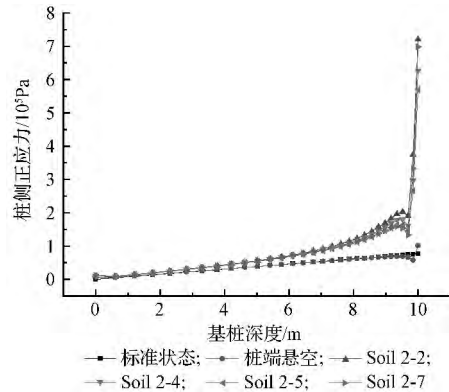


图7 桩侧土体正应力 - 深度曲线

桩侧正应力的增加导致桩 - 土接触面抗剪强度的提高,从而使得桩体在大位移情况下桩侧极限摩阻力得到提高。桩侧正应力的增长主要有三个途径:1) 桩侧摩阻力在桩周土体中产生的竖向应力导致水平应力的增加;2) 由于桩端土体在大变形情况下挤压破坏,土体由桩端上翻,从而挤压桩侧土体,产生水平应力;第三方面是由于桩体压缩产生侧向变形遇桩周土限制而产生的水平应力。据作者计算由第三方面因素引起的水平应力可以忽略。

在桩 - 土接触面强度较低的情况下,由第一种原因引起的水平应力较小,而主要以下部土体向上挤压产生的水平应力为主,本例即为此种情况。由图8可知,桩端土体在基桩大变形情况下上翻,并未因此引起桩端上部附近土体竖向应力的增加,从而使水平应力提高。而是桩端土体下沉引起的附近土体拉伸占据主要地位,而使得桩端附近土体竖向应力急剧下降。由此可知,桩端土体上翻直接导致了水平应力增加,是桩 - 土接触面上正应力提高的真正原因。

梅耶霍夫在求解深基础极限承载力时运用了如下图所示的破坏模式,多数学者在探讨桩基摩阻力强化问题时也使用该模式进行说明。认为在载荷作用下,桩端土体产生挤压破坏,并通过 I → II → III → IV 各块体后到达桩 - 土接触面,致使其上正应力增加(图9)。多数学者认为IV区的影响范围仅在桩端附近,从而得出摩阻力增强效应也仅局限在桩端1~2倍桩径范围内的结论。而笔者通过数值计算发现,IV区的影响范围要远大于桩端附近1~2倍桩

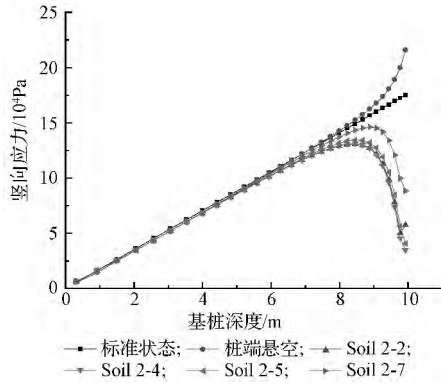


图8 桩侧土体竖向应力曲线

径的范围,对于笔者模拟计算的10 m短桩,其影响范围接近整个桩长,从地表下2 m开始即可明显看出摩阻力的增强,至桩端附近影响急剧增加。

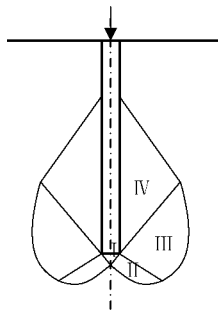


图9 Meyerhof 桩基础破坏模式

3 结语

1) 在 Goodman 接触面模型的基础上,通过设定极限相对位移 Δ ,结合 Coulomb 强度准则计算不同深度结构面的剪切刚度。从考虑到了不同深度结构面上剪切刚度不同对桩侧摩阻力的影响。然而实际情况可能要复杂的多,需要通过系统试验得到剪

切刚度的真实变化规律。

2) 模拟计算发现,桩侧摩阻力的增强效应的确存在,但其大小和桩端岩土体的性质有一定联系,并非其决定因素。起决定作用的是桩端沉渣厚度及含水状况,当含水量较大时,可能会在桩端附近的桩-土接触面上出现超孔隙水压力,降低桩侧摩阻力,形成弱化现象^[4]。

3) 梅耶霍夫深基础破坏模式能够在一定程度上解释摩阻力强化效应,但实际上其发挥作用的范围要远大于1倍~2倍的桩径,这是传统破坏模式所不能很好解释的。摩阻力强化效应的确切形成机理及影响范围还有待进一步研究。

参考文献

- [1] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 叶真华, 周健, 唐世栋. 黏土中不同桩端条件下桩承载力性状的模式试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 733-737.
- [8] 董金荣. 桩底沉渣对桩侧摩阻力影响及桩承载力的估算[J]. 工业建筑, 2009, 39(4): 93-97.
- [9] 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.
- [10] 张永兴. 岩石力学[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [11] 刘金砺. 桩基础设计与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.

· 信息 ·

由上海方循建筑工程咨询公司主办,盾安集团、山东卓力桩基有限公司、武汉地质勘查基础工程有限公司等共同协办的第四届中国国际桩与深基础峰会于2014年3月26-28日在上海召开,本次大会邀请了600多位桩基技术专家参与会议。26-27日,大会主席沈保汉教授进行致辞,并就“全套管全回转钻机在喀斯特地层灌注桩的施工技术”进行了演讲,来自国内外的40多位专家学者围绕“桩基础和深基坑工程创新技术及高效施工”的主题进行专题报告。28日,针对“嵌岩灌注桩”、“锚杆静压桩工法”、“完成高质量的高应变动力测试(HSDT)的正确做法”以及“桩基础施工新技术”开展了专题技术讨论。大会主要讨论了国内外桩基础领域前沿科技和各种桩基工程难题的解决,交流了桩与深基础工程技术、工程安全及工程管理、工程信息化方面的科技成果,以推动桩基础施工技术的发展。大会为促进世界桩基础工程质量的不断提高,实现桩基础行业持续和谐发展提供了一个高水平的国际化学术交流平台,会议拟收录百余篇具有科技含量的中、英文论文。