

桩-土接触面静动力特性研究进展

刘涛¹, 彭华中², 王勇^{3a, 3b}, 王艳丽⁴

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉市测绘研究院, 武汉 430022;

3. 中国科学院 a. 武汉岩土力学研究所; b. 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

4. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

摘要: 寻求合适的方法对接触面的微观变形机理展开深入和系统的研究, 阐明桩-土接触面力学特性的本质; 开展特殊土与桩接触界面的静动力特性研究, 提高桩基在复杂地质条件下的可靠度。简要回顾了国内外有关桩-土接触面静动力学特性的研究进展, 阐述了桩-土接触面在静力和动力试验、接触面本构模型、接触面单元以及桩-土接触模型试验和现场试验中所取得的成果, 并分析了以上研究中存在的问题与不足, 对有效把握桩基承载性能及类似工程的研究具有重要的意义。

关键词: 桩-土接触; 静动力特性; 本构模型; 接触面单元

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-5485(2013)12-0074-08

1 研究背景

随着城市建设、公路、铁路以及桥梁等工程的快速发展, 建(构)筑物面临越来越多的复杂地质条件, 桩基础因其在处理复杂地基方面具有良好的优越性而在实际工程中被普遍采用。然而, 由于桩体与各种地质体之间材料性质的显著性差异, 在不同气候环境以及复杂应力条件下, 桩体与地质体间产生不一致的变形, 致使桩-土接触面上产生错动、滑移或者开裂等非连续变形, 从而形成复杂的桩-土接触面力学特性。特别是对于摩擦桩的侧摩阻力发挥, 桩-土接触面力学特性将产生不容忽视的影响, 进而影响到桩基承载力的发挥。实际工程中的桩基础除承受静力荷载外, 还经常遇到诸如重型车辆、高速列车、波浪以及地震经过时的振动荷载作用, 而桩-土接触面力学特性是解决桩-土相互作用问题的前提, 因此开展在各种复杂应力路径和复杂地质条件下的桩-土接触面静动力学特性研究, 对于有效把握桩基承载性能具有重要的意义^[1]。

目前接触面的试验研究缺乏对于工程实际中广泛存在的桩-土接触面动力学特性的研究, 尤其是缺乏对复杂动力特性的研究、不同应力加载方式的大型试验仪器研发, 缺乏更具有适用性的本构模型来描述复杂应力条件和应力路径下的桩-土接触面

的静动力学特性以及完善接触面单元从而更有效地模拟桩-土相互作用的复杂力学行为。本文从桩-土接触面静动力学特性的试验研究、本构模型、接触面单元和桩-土相互作用的模型试验以及现场试验等方面, 对国内外相关研究展开分析与讨论, 旨在总结现有桩-土接触面力学特性的研究现状, 分析并提出现有研究存在的不足, 以期对今后的研究提供借鉴。

2 接触面静力特性研究

2.1 接触面静力学试验

接触面静力学特性试验是研究土与结构物相互作用受力和变形规律的重要途径, 通过试验揭示接触面受力变形规律, 建立接触面本构模型, 提出计算参数, 并将其应用于实际工程分析中。目前, 研究桩-土接触面静力学特性的常用试验主要有直剪试验、单剪试验和环剪试验等。

Clough^[2]等通过直剪试验研究了砂与混凝土接触面的力学特性。Potynody^[3]利用应力控制式和应变控制式直剪仪研究了多种土与混凝土接触面的力学特性, 总结出影响界面摩擦强度的4个主要因素: 土质、含水率、界面粗糙度和正应力。Desai和Holloway^[4]则对不同密度的砂进行了砂与混凝土接触面的直剪试验, 试验结果用于有限元分析计算来预

收稿日期: 2013-03-25; 修回日期: 2013-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(41102229); 湖北省自然科学基金(2011CDB407)

作者简介: 刘涛(1987-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为软土地基处理。(电话) 15827137341(电子信箱) liutao1987702@126.com。

测桩-土相对变形。殷宗泽^[5]等进行了土与混凝土接触面的大尺寸直剪试验,通过埋在混凝土试样中的微型“潜望镜”装置直接观察相对位移沿接触面的分布来研究接触面在剪切过程中的微观变形,试验中发现接触面的剪切破坏是一个由边缘向内部、远部发展的过程。胡黎明^[6]利用改进的直剪仪对砂土与混凝土接触面进行试验,研究了不同接触面相对粗糙度对接触面物理力学行为的影响,并通过数字照相技术记录了接触面附近土颗粒的位移情况。冯大阔^[7]等利用大型三维接触面试验机作为直剪试验仪器,研究了粗粒土与结构接触面的三维力学特性。

单剪试验是将土样装在叠环内,剪切过程中土样沿叠环面可以产生一定的错动变形,接触面破坏位置不固定,且接触面面积不变,避免了直剪试验中存在人为限定接触面破坏位置、接触面面积在剪切过程中逐渐减小等缺陷。Uesugi^[8]等用矩形断面单剪仪进行了砂和钢板接触面力学特性的研究,定义了接触面相对粗糙度并指出它是影响接触面力学性质的主要因素。卢延浩^[9]通过单剪试验提出了能够反映剪切错动带的应力应变特征、更恰当地模拟土与结构相互作用的接触面薄层单元耦合本构模型。高俊合^[10]等进行土与混凝土接触面特性的大型单剪试验,从试验结果分析得到剪切破坏带及其厚度。张治军、饶锡保^[11-12]等利用联合研制的大型叠环式单剪仪,开展了同厚度不同含水率以及同含水率不同厚度的泥皮与混凝土板的相关单剪试验,研究了含水率及泥皮厚度对接触面力学特性的影响规律。周小文^[13]等运用自行研制的大型叠环式单剪仪,开展了面板与砾层间接触面在不同处理方式下的剪切试验,研究了接触面的不同处理方式对其静力学特性的影响。

直剪试验和单剪试验均存在剪切过程中剪应力和剪应变分布不均匀等问题。相比而言,扭剪试验可以保证接触面的应力应变分布比较均匀、应力条件较为明确且剪切面积不变。Huck^[14]研制了一种环形扭剪仪来进行动荷载作用下的接触面试验,土样上下各有一混凝土试样,形成2个接触面。Yoshimi^[15]等用扭剪仪对接触面的力学特性及其影响因素进行了试验研究。Chen^[16]用扭剪仪进行了砂与混凝土接触面试验,扭剪仪中心为混凝土柱,外部置砂样。环剪仪可用于研究大变形、大剪切位移条件下土体的抗剪能力,其最明显的优点是试验过程中可以保持剪切面面积不变和试样可以在连续的位移条件下进行剪切。Hammound 和 Boumekik^[17]利

用环剪试验仪测定了黏土与不同粗糙度钢板和混凝土板间的界面应力,提出了评估大位移下桩体侧摩阻力的方法。朱俊高^[18]等以土与混凝土接触面的一系列剪切试验为基础,对直剪仪、单剪仪以及环剪仪在应用于接触面应力变形及强度特性试验中的优缺点进行了比较分析,得出环剪试验用于接触面强度特性的研究较合适。目前实验室普遍应用的环剪仪因受到试样尺寸的限制,使其在模拟接触面剪切带厚度方面存在局限,并且接触面的变形过程只有采用特殊技术才能观测到,仅从宏观切向应力应变规律中还难以辨识出真实的接触面力学性状。随着试验要求的不断提高,需要能够更真实地模拟现场条件,因此,未来大型环剪试验仪器将成为今后发展的方向。

采取以上试验仪器基本可以揭示出桩-土接触面的力学特性。但是,接触面力学性能并非只是受制于各种宏观因素,剪切过程中接触面的微观演化特征也同样对其力学特性有着重要的影响。此外,接触面破坏过程是一个渐进式破坏,对其过程进行合理的试验模拟也有助于进一步研究接触面力学特性对桩-土相互作用的影响规律。目前,所用接触面静力学试验仪器大部分是在直剪仪或单剪仪基础上根据研究需要作适当改进而成,改进的仪器只针对特定的研究需要,故存在一定的局限性。因此,研制出适应性更好的试验仪器是桩-土接触面力学特性进一步深入研究的前提。

2.2 接触面静力本构模型

接触面研究中最基础、最重要的内容之一是接触面本构模型的研究,目前已发展的主要模型有:双曲线模型、刚塑性模型、三参数模型、弹塑性模型和损伤模型等。

Clough^[19]等根据直剪试验结果,认为 $\tau-w$ (抗剪强度-含水率曲线)关系呈双曲线关系而建立双曲线本构模型,由于该模型中参数比较容易确定,应用较为广泛。Brandt^[20]经过深入的室内试验和现场试验研究,提出一个简化的刚塑性模型来描述接触面切向应力和变形,用2条折线来描述 $(\tau/\sigma)-w$ (抗剪刚度-含水率曲线)的曲线关系。Boulon^[21]等提出了接触面弹塑性模型,因模型非常复杂而未能得到推广使用。Desai^[22]等首次将损伤力学的基本理论应用于接触面本构关系,为接触面的研究提供了新的思路。

殷宗泽^[5]等认为,接触面的破坏是由边缘向内部逐渐发展的过程,提出了考虑接触面错动变形的刚塑性模型。栾茂田^[23]等将非线性弹性理论与弹

塑性理论相结合,提出了一种用于模拟土与结构相互作用体系的变形与破坏机理的非线性弹性-理想塑性模型。陈慧远^[24]将接触面上的剪应力与剪切位移简化成弹塑性曲线关系,对于界面和材料非线性问题采用双重迭代求解方法,提出了能较客观反映接触面特性的弹塑性模型。钱家欢^[25]认为,接触面的相对位移与应力的关系呈现的是黏弹塑性,提出了接触面的黏弹塑性模型。孙吉主^[26]等基于接触面的宏观物理特征,将弹性模量取为法向压力的指数函数,将滑动面抽象为锯齿面以考虑结构表面粗糙度的影响,将摩擦系数取为塑性功的双曲线函数,建立了单调加载条件下钙质砂与结构接触面的弹塑性增量本构模型。沈珠江^[27]从损伤力学的观点出发,建立了一个可以考虑黏土结构破损的损伤力学模型,该模型能够很好地描述原状土、破损段以及破损后 3 个阶段的不同特性,并且能够定量分析土体结构破损的过程。胡黎明^[6]在考虑接触面的粗糙度的基础上,根据土与结构接触面的直剪试验结果,建立了粗糙接触面的损伤力学模型。杨林德^[28]等以接触面内部缺陷分布的随机性为出发点,依据连续强度理论和统计理论,建立了参数少、概念明确的土与结构物接触面的统计损伤本构模型,并指出存在接触面厚度,但接触面厚度的大小与应力峰值点无关。

目前各研究者根据相应的静力学试验研究成果使接触面静力本构模型的研究取得了相当大的进展,能够理想化地模拟不同地质体与桩体间的接触行为,但由于模型往往存在考虑影响因素单一或者各种影响因素的耦合性不强而不能模拟复杂应力路径的问题,使得现有本构模型还不能满足工程实际的需要。

2.3 接触面静力接触单元

目前用于数值分析的接触面单元主要有无厚度单元、有厚度薄层单元和接触面摩擦单元。

Goodman^[29]提出了能够模拟接触的滑移和张裂的 4 节点无厚度单元,因概念明确、应用方便而被广泛应用。但是法向刚度的选定带有一定的随意性,且不能反映接触面切向变形和法向变形的耦合特征。Desai^[22]等提出了能够模拟黏接、滑移、脱开和愈合等各种接触桩-土的有厚度薄层单元。该接触面薄层单元因剪切刚度由试验确定、法向刚度由薄层单元及相邻的实体单元的性质确定,受到研究者的广泛认可。Katona^[30]提出了一种能够模拟两物体间的滑动摩擦、张开或闭合过程的不同刚度系数的简单接触摩擦两节点单元,从而避免了对刚度系

数测试的困难和不准确性。

邵伟^[31]等综合 Goodman 单元与 Desai 薄层单元的优点,即在单元数值模型中,在有厚度 Goodman 单元模型基础上借鉴 Desai 构筑接触面单元的思想引入控制嵌入的方法,提出了用于接触面模拟的非线性薄层单元。杜成斌^[32]等在接触面的法向采用了考虑法向变形的双曲线模型、切向采用了考虑应变硬化的双曲线模型,提出了能够模拟结构或接触问题的三维非线性接触单元。潘玉涛^[33]等将桩-土接触面由理想弹塑性的切向弹簧简化成薄壁单元,通过理论分析给出了一种弹簧切向刚度与薄壁单元剪切刚度的换算式,通过改变薄壁单元的强度参数来模拟桩-土接触面的强度性质,从而合理地预测桩-土接触面在竖向荷载作用下的变形性状。

总之,接触面单元的研究经历了从无厚度单元到有厚度薄层单元,再到摩擦单元的渐进式发展过程。有厚度薄层单元相对于无厚度单元因其考虑了法向与切向变形的耦合影响而被广泛使用,摩擦单元因其能够综合考虑更多的影响因素而成为今后研究的重要方向。

3 接触面动力特性研究

3.1 接触面动力学试验

桩承受的动力荷载分为纵向和横向 2 种情况。当桩作为不同建筑物基础时,所承受的动力荷载类型是不同的,可大致分为低频率且作用时间较长的循环荷载和短延时冲击型动力荷载。由于振动荷载复杂的动力特性以及加载方式和加载路径的不同,桩-土接触面在动力作用下会产生不同于静力时的力学特性。桩-土接触面动力学特性的研究需要有特殊的动力学试验仪器以及相关的动本构模型,来开展复杂应力下的动力特性研究,以便更深入的揭示接触面动力特性。

Desai^[34]等研制了多自由度循环剪切仪(CYM-DOF)对接触面的静力和动力特性进行了试验研究。Egucki^[35]用单剪仪进行了砂与混凝土接触面的动力特性研究,指出当接触面粗糙时在循环荷载施加初期有应变软化现象。Kishida^[36]等在迭环式单剪仪的基础上把原来固定土样下部的底座用混凝土块代替形成土与混凝土接触面,在法向施加正弦波激振力来模拟振动荷载,利用该改装的振动单剪仪研究了砂与钢板之间的动力学特性。

吴军师^[37]等利用 Kishida 等改装的振动单剪仪研究了土与混凝土接触面动力剪切劲度与土的剪切

模量的关系,建立了能反映接触面动力性质的关系式。俞培基^[38]等借助 DTC - 158 型扭转型共振柱仪开展了粗糙与光滑接触面的对比试验,在理论分析的基础上证实了土体在粗糙或者光滑接触面上发生相对滑移的剪应变临界条件,并采用刚度适中的薄层单元模拟了接触面动力学特性。张嘎^[39-41]等研制了大型土与结构接触面循环加载剪切仪(TH = 20T CSASSI),接触面尺寸为 50 cm × 36 cm,并用其进行了大量的粗糙土与结构接触的静动力学特性研究,探讨了接触面的可逆性与不可逆性剪胀规律。冯大阔^[1,42]等运用 80T 三维多功能土工试验机,研究了粗粒土与人造粗糙钢板形成的接触面在单剪条件以及切向加载路径和切向控制方式等循环剪切作用下的动力学特性。

以上接触面动力学试验基本上都是在静力学试验仪器(直剪仪和单剪仪)的基础上作适当改进而成,通过改变加载方式来模拟动力荷载,或者将阻尼比考虑为接触面特性的影响因素等方式来开展接触面的动力试验,能够较系统地研究各影响因素对接触面动力特性的影响规律。但是对于复杂动力荷载,如海洋桩基承受的风荷载、海浪冲击荷载和地震荷载等多种动力荷载耦合作用的模拟试验研究,以及考虑动载荷的加载速率对接触面微观变形机制的研究相对较少。另外,膨胀土等特殊土与基桩接触时,在动力荷载作用下产生的变形与一般砂土和黏性土等与基桩接触时存在其特殊性。因此,需要进一步深入地开展特殊土与桩接触界面动力学特性的试验研究。

3.2 接触面动力本构模型

目前国内外关于动力本构模型的研究不多,在大部分桩 - 土接触面的动力分析中还是借助静力本构关系,少数在此基础上提出非常简单的非线性弹性动力本构模型。

Desai^[43]在弹性模型的基础上根据接触面的循环荷载试验,提出了循环荷载作用下接触面的非线性弹性模型。Drumm^[44]等将接触面的法向压力、切向应力、砂的密度和循环次数作为切向刚度的影响因素,采用修正的 Ramberg - Osgood 模型描述了混凝土接触面性能试验的循环剪应力 - 相对错动位移关系。张嘎^[39-41]等根据大量的粗粒土与结构接触面静动力学实验观测结果建立的接触面弹塑性损伤模型能够合理地模拟诸如循环荷载作用下接触面的动力响应。孙吉主^[45]等基于界面思想,建立了能同时考虑法向应力和相对密度、适用于动力分析的接触面的界面塑性模型,通过砂与混凝土接触面

循环剪切试验成果验证了模型的合理性。

3.3 动力接触单元

Toki^[46]等最早将 Goodman 单元引进到结构与地基的动力相互作用的分析中来模拟地震作用下土与结构接触面的滑移和分离现象,并编制了有限元程序来解决具有表面基础和埋入基础的结构物的动力相互作用问题。Zaman^[47]等采用 Desai^[47]的薄层单元模拟了土与结构接触面在动荷载下的滑移、分离以及重新闭合现象,进一步验证了薄层单元在描述接触面动力性能上的合理性。王满生^[48]等在 Goodman 单元的基础上引入了阻尼比提出了桩 - 土接触面单元的阻尼矩阵,依此研究桩 - 土动力分析中的能量耗散问题。

目前,接触面的动力接触单元主要是根据动力荷载作用时接触面的变形特性,在静力接触单元的基础上改进而成。虽然能够反映部分动力接触的宏观特性,却忽视了在动荷载作用下桩 - 土接触的微观变形过程。完善接触面动力特性研究,需要结合接触面微观变形机理对动力接触单元有更深入和细致的了解。

4 接触面模型试验和现场试验研究

桩 - 土接触面的力学特性研究是桩 - 土相互作用研究的重要内容,通过接触面的力学特性演化规律揭示桩侧摩阻力的发展规律,进而研究桩基荷载传递规律及其承载性能。模型试验是在室内模拟试验的基础上进一步将理论研究进行验证,对各种影响因素进行综合分析。

徐和^[49]等在室内钢圆筒中开展了不同砂土干重度与模型单桩轴向抗拔力的模型试验,研究了砂土内摩擦角与桩的侧向抗拔系数的关系。张国强^[50]等通过室内模型静载试验,研究了不同荷载下膨胀土地基中桩基的荷载传递特性、桩侧摩阻力和桩端阻力的变化规律以及二者的荷载分担比例关系,试验结果表明:模型桩的荷载传递以侧摩阻力为主;桩侧摩阻力和桩端阻力均与桩顶荷载呈线性增加关系。苗鹏^[51]等开展了膨胀土收缩过程中基桩负摩阻力的产生与变化规律。王年香^[52]等通过大型模型试验研究了膨胀土浸水软化及膨胀过程中桩侧摩阻力和胀切力的变化规律。

由于室内模型试验模拟因素有限,使桩 - 土相互作用、受力特性以及变形特性等仍与实际工程有较大差别,试验结果也不能反映原型形态,因此开展现场试验能够有效弥补室内试验的不足。Neil^[53]等

在超固结硬黏土中开展了钢管桩高承台群桩静载试验,研究了桩-土相对位移对桩侧摩阻力的影响规律。刘金砺^[54]等在粉土地基中开展了不同桩径、不同桩长的单桩和双桩的现场模型试验,研究了群桩效应对桩间土压实变形和地基整体压缩变形的影响、桩在载荷作用下沉降的相互作用以及桩群外侧土的变形范围等相互作用规律。

室内模型试验与现场模型试验是接触面力学特性的综合研究,有利于清晰地认识桩-土相互作用机理,能够为实际工程提供更为可靠的理论指导。然而,受试验设备和经费等诸多因素的影响,以及桩基边界条件和土层特性的不可控性,大比例模型试验一般条件下难以实施。

5 研究不足及建议

桩基础是工程建设中最常采用的基础形式之一,因桩-土接触面问题对于桩基承载性能具有重要的影响,所以接触面力学特性的研究在桩-土相互作用研究中占有举足轻重的地位。在前述分析现有研究进展的基础上,笔者认为有以下几个方面值得后续研究关注。

(1) 目前接触面的试验研究主要集中在接触面静力特性上,而对于工程实际中广泛存在着的动力接触问题研究还比较缺乏。考虑复杂动力特性及应力加载方式的大型试验仪器亟待发展,以便为接触面动本构模型、动接触单元的进一步探索提供充分可靠的试验基础。此外,大部分桩-土接触面试验主要针对的是一般砂土和黏土,而较少有湿陷性黄土、膨胀土、红黏土和冻土等特殊地质体的研究。开展特殊土与桩接触界面的静动力学特性试验是桩-土接触的研究深入发展的需要。

(2) 桩-土接触面力学特性的研究最重要的是接触面静动本构模型的研究,目前静力本构模型的研究较多,主要是各研究者根据研究需要而提出的具有特殊针对性的模型,适应性不强,且模型参数多,计算复杂,考虑影响因素相对单一,耦合性不强。因此,需要发展更具有适用性的本构模型来描述桩-土接触面的动力学特性。

(3) 接触面单元是接触面数值模拟的关键问题之一。对于接触面单元的选取,研究者根据各自的研究提出了相应的改进与创新。但是,目前数值模拟中接触单元还存在不足,对于接触面单元需要开展更进一步的深入研究,以便完善现有的数值模拟方法。

(4) 对于桩-土接触面问题的研究,目前较多的是针对接触面影响因素的研究,而对于接触面在剪切过程中的微观变形机理涉及较少。土体是由非连续性碎散介质组成,在剪切过程中接触面产生的错动、滑移以及开裂等非连续性变形会导致其力学特性出现很大的差异性,特别是动力荷载作用时,同时存在的剪胀剪缩现象对桩-土相互作用以及桩体受力变形造成不容忽视的影响。因此,有必要寻求合适的方法对剪切过程接触面的微观变形展开深入研究,才能阐明桩-土接触力学特性的本质。

参考文献:

- [1] 冯大阔,侯文峻,张建民.法向刚度切向应力控制接触面动力特性试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(6):846-852.(FENG Da-kuo,HOU Wen-jun,ZHANG Jian-min. Experimental Study on Cyclic Behavior of Gravel-structure Interface with Stress-control Mode under Constant Normal Stiffness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(6):846-852.(in Chinese))
- [2] CLOUGH G W,DUNCAN J M. Finite Element Analyses of Retaining Wall Behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division,ASCE,1971,97(12):1657-1673.
- [3] POTYONDY J G. Skin Friction between Various Soils and Construction Materials[J]. Geotechnique,1961,11(4):339-353.
- [4] DESAI C S,HOLLOWAY D M. Load Deformation Analysis of Deep Foundations[C]//Proceedings of Symposium on Application of the Finite Element in Geotechnical Engineering,Vicksburg,Mississippi,May 1-4,1972:629-656.
- [5] 殷宗泽,朱泓,许国华.土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J].岩土工程学报,1994,16(3):14-22.(YIN Zong-ze,ZHU Hong,XU Guo-hua. Numerical Simulation of the Deformation in the Interface between Soil and Structural Material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1994,16(3):14-22.(in Chinese))
- [6] 胡黎明.土与结构物接触面力学特性研究和工程应用[D].北京:清华大学,2000.(HU Li-ming. Mechanical Characteristics of Soil-Structure Interface and Engineering Applications[D]. Beijing: Tsinghua University,2000.(in Chinese))
- [7] 冯大阔,侯文峻,张建民.粗粒土与结构接触面三维力学特性的直剪试验研究[J].土木工程学报,2012,45(5):169-175.(FENG Da-kuo,HOU Wen-jun,ZHANG Jian-min. Large-scale Direct Shear Test Investigation of the 3D Behavior of a Gravel-structure Interfaces[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(5):169-175.(in Chi-

- nese))
- [8] UESUGI M, KISHIDA H. Influential Factors of Friction between Steel and Dry Sands [J]. *Soils and Foundations*, 1986, 26(2): 33 - 46.
- [9] 卢延浩 鲍伏波. 接触面薄层单元耦和本构模型 [J]. *水利学报*, 2000, (2): 71 - 75. (LU Ting-hao, BAO Fu-bo. A Coupled Constitutive Model for Interface Thin-layer Element [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, (2): 71 - 75. (in Chinese))
- [10] 高俊合, 于海学, 赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验及数值模拟 [J]. *土木工程学报*, 2000, 33(4): 42 - 46. (GAO Jun-he, YU Hai-xue, ZHAO Wei-bing. Characteristics Study of Interface Between Soil and Concrete by Using Large Size Single Shear Apparatus and Numerical Analysis [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(4): 42 - 46. (in Chinese))
- [11] 张治军, 饶锡保, 丁红顺, 等. 不同含水率泥皮对接触面力学特性影响的试验研究 [J]. *长江科学院院报*, 2007, 24(5): 60 - 64. (ZHANG Zhi-jun, RAO Xi-bao, DING Hong-shun, *et al.* Influence of Slurry with Different Water Capacities on Behavior of Gravel-structure Interface [J]. Influence of Slurry with Different Water Capacities on Behavior of Gravel-structure Interface, 2007, 24(5): 60 - 64. (in Chinese))
- [12] 张治军, 饶锡保, 王志军, 等. 泥皮厚度对结构接触面力学特性影响的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(9): 2433 - 2437. (ZHANG Zhi-jun, RAO Xi-bao, WANG Zhi-jun, *et al.* Experimental Study on Influence of Slurry Thickness on Mechanical Behavior of Interface between Gravel and Concrete [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2433 - 2437. (in Chinese))
- [13] 周小文, 龚壁卫, 丁红顺, 等. 砾石垫层 - 混凝土接触面力学特性单剪试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(8): 876 - 880. (ZHOU Xiao-wen, GONG Bi-wei, DING Hong-shun, *et al.* Large-scale Simple Shear Test on Mechanical Properties of Interface between Concrete Face and Gravel Underlayer [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8): 876 - 880. (in Chinese))
- [14] HUCK P J, LIBER T, CHIAPETTA PL, *et al.* Dynamic Response of Soil/Concrete Interface at High Pressure: Report No. AIWL-TR-73-264 [R]. Washington: Illinois Institute of Technical Research Institute, 1974.
- [15] YOSHIMI Y, KISHIDA T. A Ring Torsion Apparatus for Evaluation Friction between Soil and Metal Surface [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1981, 4(4): 831 - 834.
- [16] CHEN Z, SCHREYER H L. Simulation of Soil-Concrete Interfaces with Non-local Constitutive Models [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1987, 113(11): 1665 - 1667.
- [17] HAMMOUDA F, BOUMEKIKB A. Experimental Study of the Behavior of Interfacial Shearing between Cohesive Soils and Solid Materials at Large Displacement [J]. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 2006, 7(1): 63 - 80.
- [18] 朱俊高, SHAKIR R R, 杨有莲, 等. 土与混凝土接触面特性环剪单剪试验比较研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 692 - 696. (ZHU Jun-gao, SHAKIR R R, YANG You-lian, *et al.* Comparison of Behaviors of Soil-concrete Interface from Ring-shear and Simple Shear Tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 692 - 696. (in Chinese))
- [19] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite Element Analysis of Retaining Wall Behavior [J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 1971, 97(12): 1657 - 1673.
- [20] BRANDT J R. Behavior of Soil-Concrete Interface [D]. Edmonton: University of Alberta, 1985.
- [21] BOULON M, NOVA R. Modeling of Soil Structure Interface Behavior: A Comparison between Elastoplastic and Rate Type Laws [J]. *Computers and Geotechnics*, 1990, 17(9): 21 - 46.
- [22] DESAI C S, ZAMAN M M. Thin Layer Element for Interface [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1984, 8(1): 19 - 43.
- [23] 梁茂田, 武亚军. 土与结构间接接触面的非线性弹性 - 理想塑性模型及其应用 [J]. *岩土力学*, 2004, 25(4): 507 - 513. (LUAN Mao-tian, WU Ya-jun. The Contact Surface between the Soil and Structure Nonlinear Elastic Perfectly Plastic Model and Its Application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(4): 507 - 513. (in Chinese))
- [24] 陈慧远. 摩擦接触面单元及其分析方法 [J]. *水利学报*, 1985, (4): 44 - 50. (CHEN Hui-yuan. Friction Contact Element Analysis Method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, (4): 44 - 50. (in Chinese))
- [25] 钱家欢, 詹美礼. 接触面剪切流变特性实验及分析 [G] // 岩土与水工建筑物相互作用研究成果汇编. 南京: 河海大学, 1990: 228 - 234. (QIAN Jia-huan, ZHAN Mei-li. Experiments and Analysis of the Contact Surface Shear Rheological Properties [G] // *Geotechnical and Hydraulic Structures Interaction Compilation of Research*. Nanjing: Hohai University, 1990: 228 - 234. (in Chinese))
- [26] 孙吉主, 王 勇. 钙质砂与结构接触面的本构模型研究 [J]. *力学季刊*, 2006, 27(3): 476 - 480. (SUN Ji-zhu, WANG Yong. Constitutive Model of Calcareous Sand Structure Interface [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2006, 27(3): 476 - 480. (in Chinese))
- [27] 沈珠江. 结构性粘土的弹塑性损伤模型 [J]. *岩土工程学*

- 报,1993,15(3):21-28. (SHEN Zhu-jiang. Elastoplastic Damage Model for Structured Clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1993,15(3):21-28. (in Chinese))
- [28] 杨林德,刘齐建. 土-结构物接触面统计损伤本构模型[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(1):79-83. (YANG Lin-de, LIU Qi-jian. Research on Statistical Damage Model for Soil structure Interface [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2006,2(1):79-83. (in Chinese))
- [29] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A Model for the Mechanics of Jointed Rock [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE,1968,94(3):637-659.
- [30] KATONA M G. A Simple Contact-Friction Interface Element with Applications to Buried Culverts [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1983,7:371-384.
- [31] 邵炜,金峰,王光纶. 用于接触面模拟的非线性薄层单元[J]. 清华大学学报(自然科学版),1999,39(2):34-38. (SHAO Wei, JIN Feng, WANG Guang-lun. The Non-linear Thin Layer Unit for Interface Modeling [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science),1999,39(2):34-38. (in Chinese))
- [32] 杜成斌,任青文. 用于接触面模拟的三维非线性接触单元[J]. 东南大学学报(自然科学版),2001,31(4):92-96. (DU Cheng-bin, REN Qing-wen. Three-dimensional Nonlinear Contact Elements for Interface Modeling [J]. Southeast University (Natural Science),2001,31(4):92-96. (in Chinese))
- [33] 潘玉涛,郑俊杰. 竖向受荷桩的桩-土接触面简化模型[J]. 土木工程与管理学报,2011,28(4):16-19. (PAN Yu-tao, ZHENG Jun-jie. A Simplified Model of Soil-pile Interface of Pile Under Vertical Loads [J]. Journal of Civil Engineering and Management,2011,28(4):16-19. (in Chinese))
- [34] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic Testing and Modeling of Interfaces [J]. Journal of Geotechnical Engineering,1985,111(6):793-815.
- [35] EGUCKI M. Frictional Behavior between Dense and Steel under Repeated Loading [D]. Tokyo: Tokyo Institute of Technology,1985.
- [36] KISHIDA H, UESEGI M. Tests of Interface between Sand and Steel in the Simple Shear Apparatus [J]. Geotechnique,1987,37(1):45-52.
- [37] 吴军师,姜朴. 土与混凝土接触面的动力剪切特性[J]. 岩土工程学报,1992,14(2):61-66. (WU Jun-shi, JIANG Pu. Dynamic Shear Properties of Soil in Contact with the Concrete Surface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1992,14(2):61-66. (in Chinese))
- [38] 俞培基,秦蔚琴. 在共振柱仪上研究接触面的动力变形特性[J]. 水利学报,1995,(1):81-85. (YU Pei-ji, QIN Wei-qin. Cyclic Deformation Behavior of Interface Studied on Resonant Column Test Device [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1995,(1):81-85. (in Chinese))
- [39] 张嘎. 粗粒土与结构接触面静动力学特性及弹塑性损伤理论研究[D]. 北京:清华大学,2002. (ZHANG Ga. Theoretical Research on the Static and Dynamic Characteristics and Elastoplastic Damage of the Interface between Coarse-grained Soil and Structure [D]. Beijing: Tsinghua University,2002. (in Chinese))
- [40] 张嘎,张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报,2003,25(2):149-154. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Development and Application of Cyclic Shear Apparatus for Soil structure Interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2003,25(2):149-154. (in Chinese))
- [41] 张嘎,张建民. 粗粒土与结构接触面的可逆性与不可逆性剪胀规律[J]. 岩土力学,2005,26(5):699-705. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Reversible and Irreversible Dilatancy of Soil-structure Interface [J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(5):699-705. (in Chinese))
- [42] 冯大阔,张建民. 粗粒土与结构接触面静动力学特性的大型单剪试验研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(7):1201-1208. (FENG Da-kuo, ZHANG Jian-min. Monotonic and Cyclic Behaviors of Coarse-grained Soil-structure Interface Using Large-scale Simple Shear Device [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(7):1201-1208. (in Chinese))
- [43] CHANDRA S D, SHASHANK K P, DAVID C. Cyclic Testing and Constitutive Modeling of Saturated Sand-Concrete Interfaces Using the Disturbed State Concept [J]. International Journal of Geomechanics,2005,5(4):286-294.
- [44] DRUMM E C, DESAI C S. Determination of Parameters for a Model for the Cyclic Behaviour of Interfaces [J]. Earthquake Engineering & Structure Dynamics,1986,14(18):1-18.
- [45] 孙吉主,施戈亮. 循环荷载作用下接触面的边界面模型研究[J]. 岩土力学,2007,28(2):311-314. (SUN Ji-zhu, SHI Ge-liang. Bounding Surface Model for Soil-Structure Interface under Cyclic Loading [J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(2):311-314. (in Chinese))
- [46] TOKI K, SATO T, MIURA F. Separation and Sliding be-

- tween Soil and Structure during Strong Ground Motion [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamic*, 1981, (9): 263 - 277.
- [47] ZAMAN M M, DESAI C S, DRUMM E C. Interface Model for Dynamic Soil-Structure Interaction [J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1984, 110(GT9): 1257 - 1273.
- [48] 王满生, 周锡元, 胡聿贤. 桩 - 土动力分析中接触模型的研究 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(6): 616 - 620. (WANG Man-sheng, ZHOU Xi-yuan, HU Yu-xian. Studies on Contact Model of Soil-Pile Dynamic Interaction [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(6): 616 - 620. (in Chinese))
- [49] 徐 和, 陈竹昌. 不同砂土密度对竖直桩轴向抗拔承载力影响 [J]. *特种结构*, 1996, 13(2): 53 - 57. (XU He, CHEN Zhu-chang. Influence of Sand Density on Axial Up-lift Capacity for Vertical Piles [J]. *Special Structures*, 1996, 13(2): 53 - 57. (in Chinese))
- [50] 张国强, 张春顺, 肖宏彬. 膨胀土中桩的荷载传递模型试验研究 [J]. *株洲工学院学报*, 2006, 20(4): 90 - 94. (ZHANG Guo-qiang, ZHANG Chun-shun, XIAO Hong-bin. Model Test Study on Load Transfer Characteristics of Piles in Expansive Soils [J]. *Journal of Zhuzhou Institute of Technology*, 2006, 20(4): 90 - 94. (in Chinese))
- [51] 苗 鹏, 肖宏彬, 张春顺. 膨胀土中桩的负摩阻力时程性研究 [J]. *株洲工学院学报*, 2006, 20(6): 98 - 100. (MIAO Peng, XIAO Hong-bin, ZHANG Chun-shun. Study on Negative Friction and Time-Related Characteristics for Pile in Expansive Soils [J]. *Journal of Zhuzhou Institute of Technology*, 2006, 20(6): 98 - 100. (in Chinese))
- [52] 王年香, 顾荣伟, 章为民, 等. 膨胀土中单桩性状的模型试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(1): 56 - 60. (WANG Nian-xiang, GU Rong-wei, ZHANG Wei-min, et al. Model Tests on Behaviour of Single Pile in Expansive Soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(1): 56 - 60. (in Chinese))
- [53] O' NELL M W, HAWKINS R S, MAHAR L J. Load Transfer Mechanisms in Pile and Pile Groups [J]. *Geotechnical Engineering, ASCE*, 1982, 108(12): 1606 - 1623.
- [54] 刘金砺, 黄 强, 李 华, 等. 竖向荷载下群桩变形性状及沉降计算 [J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(6): 1 - 13. (LIU Jin-li, HUANG Qiang, LI Hua, et al. Deformation Behaviour and Settlement Calculation of Pile Group under Vertical Load [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(6): 1 - 13. (in Chinese))

(编辑: 姜小兰)

Research Progress in Static and Dynamic Characteristics of Pile-Soil Interface

LIU Tao¹, PENG Hua-zhong², WANG Yong³, WANG Yan-li⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan Institute of Surveying and Mapping, Wuhan 430022, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of MWR, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The research progresses in static and dynamics tests, constitutive models, interface elements, model tests and field tests of pile-soil interface are summarized, and the problems and deficiencies in the current research are analyzed. It is pointed out that research on the dynamic characteristics of pile-soil interface widely seen in practical engineering are in lack. Especially, big-size experimental instruments which can realize different loading methods to research the complex dynamic characteristics should be developed. More suitable constitutive model should be developed to describe the complex mechanical behaviors under complex stress conditions and different stress paths, and the interface element should be improved. It is necessary to seek a suitable method to intensively and systematically study the microscopic deformation mechanism so as to clarify the mechanism of its mechanical properties. Research on static and dynamic characteristics of interface between piles and problematic soils should be carried out to improve the reliability of pile foundation under complex geological conditions.

Key words: pile-soil interface; static and dynamic characteristics; constitutive model; interface element