

DOI: 10.11779/CJGE202201015

考虑塌孔的随钻跟管桩承载性能物理模拟试验研究

侯振坤^{1,2,3}, 唐孟雄^{*1,3}, 胡贺松¹, 刘春林¹, 苏定立¹

(1. 广州市建筑科学研究院集团有限公司, 广东 广州 510440; 2. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006;
3. 广州市建筑集团有限公司, 广东 广州 510030)

摘要: 随钻跟管桩(DPC桩)是一种新型的非挤土管桩基础,在钻进—成孔—沉桩的过程中桩侧塌孔会影响桩侧注浆液的流动路径和注浆效果,最终影响桩侧摩阻力的发挥。开展了DPC桩桩侧塌孔条件下的注浆及静载物理模型试验,分析了塌孔对DPC桩承载性能、荷载传递特性、桩侧摩阻力分布规律的影响,定量表征了注浆体的三维几何尺寸和空间点位信息,揭示了塌孔影响桩侧摩阻力发挥的原因。得到如下结论:①桩端未嵌岩的条件下DPC桩的荷载—位移曲线均为陡降型,DPC桩的承载本质属性为端承摩擦桩。②注浆后塌孔所形成的孔洞被浆液充填从而引起桩侧摩阻力增大,坍塌渣土填充桩土—间隙引起注浆液的绕流易造成桩侧摩阻力下降。③塌孔影响了桩—土间隙中浆液的流动规律,改变了桩侧注浆体覆盖桩身的面积和厚度,这是其影响桩侧摩阻力发挥的重要原因;桩侧注浆体的面积与厚度是影响桩侧摩阻力发挥的重要因素;桩侧摩阻力与注浆体体积具有较好的三次函数关系。

关键词: 随钻跟管桩; 物理模型试验; 塌孔; 桩侧摩阻力; 注浆; 荷载传递

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)01-0153-10

作者简介: 侯振坤(1988—),男,博士,博士后,高级工程师,主要从事页岩气开采过程中的岩石力学及水力压裂裂缝网络形成机理、非挤土管桩承载特性及桩侧注浆机理等方面的研究工作。E-mail: zhenkunchou@163.com。

Physical model tests on bearing performance drilling with pre-stressed concrete pipe cased pile considering hole collapse

HOU Zhen-kun^{1,2,3}, TANG Meng-xiong^{1,3}, HU He-song¹, LIU Chun-lin¹, SU Ding-li¹

(1. Guangzhou Institute of Building Science Company Limited, Guangzhou 510440, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Guangzhou Municipal Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 510030, China)

Abstract: The drilling with pre-stressed concrete pipe cased pile (Referred to as DPC pile) is a typical non-squeezing soil PHC pipe pile foundation. During the process of its hole drilling, soil dumping and pile sinking, the hole collapse around its pile shaft will affect the flow path and effects of the grouting in the clearance between the DPC pile wall and hole wall, and ultimately affect its skin friction. The physical model and static load tests on the DPC piles are carried out. The load-carrying properties, load transfer characteristics and skin friction distribution characteristics of the DPC piles are analyzed. Three-dimensional geometric size and spatial point information of grouting body for the DPC piles are quantitatively characterized. The essential reason for the skin friction of the DPC piles due to hole collapse is revealed. The following conclusions are drawn: (1) The load-displacement curves of DPC piles are all steep drop types under the conditions of no rock-socketed pile end. The DPC piles are a kind of friction end-bearing ones. (2) After grouting, the collapsed hole is filled with grouting to increase the friction resistance, and the bypass of the slurry in the falling sand area causes the friction resistance to drop. (3) The existence of hole collapse affects the flow law of the grouting in the pile-soil gap, and changes the area and thickness of the pile body covered by the grouting body, which is an important reason for affecting the skin friction. The area and thickness of the grouting body covering the DPC piles are the important factors that affect the skin friction. The skin friction of the DPC piles has a good cubic function relationship with the grouting volume.

Key words: drilling with pre-stressed concrete pipe cased pile; physical model test; hole collapse; skin friction; grouting; load transfer

0 引 言

大直径桩基础具有稳定性好、承载力高等特点,

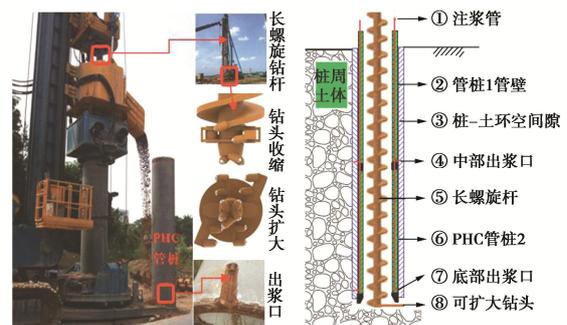
基金项目: 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金课题(Z019018); 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金—青年基金项目(2019A1515110836); 中国博士后科学基金项目(2019M662918, 2020M682671); 国家自然科学基金项目(51908225, 51678171)
收稿日期: 2021-01-06
*通信作者(E-mail: tmx@gibs.com.cn)

是跨海大桥、大型隧道工程、高层建筑、近海采油平台、水利工程等建（构）筑物的重要基础形式^[1-2]。钻孔灌注桩作为最常用的大直径桩基础，具有桩径大、承载力高、地层适应性强等优点，在减少上部结构沉降、提高地基承载力等方面发挥了出色的作用^[3-4]，然而该桩型预先水下成孔、后导管灌注混凝土的施工工艺易造成桩侧塌孔、桩周泥皮和桩底沉渣的存在，导致钻孔灌注桩的桩身缺陷率高、成桩质量不易控制^[5-6]。预应力混凝土管桩（PHC管桩）是一种采用钢筋先张预应力、桩身高速离心成型后经高温高压蒸汽养护而成的中空钢筋混凝土桩，具有成桩效率高、桩身缺陷小、桩身强度大、桩长可灵活控制等优点，克服了钻孔灌注桩桩身易产生缺陷的缺点^[7-8]。

然而锤击法、静压法等现有的PHC管桩沉桩施工方法仅适用于较小沉桩阻力地层，且桩端难以穿透硬夹层，一般只能将桩径为300~600 mm的小直径管桩沉入地层，主要应用在对单桩承载力要求不高的工程中（小直径管桩的单桩承载力一般不超过3500 kN^[9]）。然而超高层建筑等对桩基的承载性能要求高，故这些承载力不足3500 kN的小直径管桩在超高层建筑中的应用受到了限制^[10-11]，需要更大直径的管桩提供更高承载力才能满足大型工程的需求。为克服大直径管桩的沉桩技术难题，国内外学者针对大直径（≥800 mm）预制桩基础的工程应用问题，进行了积极的探索，例如，静钻根植竹节桩、中掘法管桩和随钻跟管桩等。静钻根植竹节桩^[13-15]是一种大直径环保型非挤土桩。利用特制钻机进行钻孔，达到设计标高后通过液压技术打开桩底钻头扩大翼进行扩底，扩底后注入水泥浆并上下反复升降钻机，确保形成有效的水泥土扩大头；随后缓慢拔出钻杆，拔杆的同时注入水泥浆并进行搅拌，将孔内土体与浆液混合形成水泥土；最后将大直径PHC管桩或竹节桩插入充满水泥土的钻孔中，形成一种新型的组合桩基，注浆目的是利用高强度水泥土给基桩提供更大的桩侧摩阻力和端阻力，目前该桩型在软土地区得到应用，但是在坚硬土层中的应用受限。中掘法管桩^[16-18]是一种环保型部分挤土桩。螺旋钻通过管桩内腔进入地层进行钻孔，钻孔孔径接近于管桩内径（小于管桩外径），残渣土通过管桩内腔排出，钻孔取土的过程中采用抱压方式沉桩；钻孔至设计标高后，扩大钻翼继续钻进，直至达到设计深度；钻孔结束后，利用钻头上预制的喷射嘴喷射高压旋喷浆液（5~15 MPa），并通过钻头搅拌底部持力层土体与注浆液，从而形成一个扩大的球根，随后将管桩插入球根内形成桩端扩大头。中掘法管桩有效地降低了

PHC管桩在沉桩过程中的挤土效应，克服了砂砾层等硬土层无法穿透的问题，具有一定的地层适应性。

随钻跟管桩^[19-22]（drilling with PHC pipe cased pile，简称DPC桩）是一种钻孔—沉桩—排土同步进行的无泥浆排放的节能环保型大直径（800~1400 mm）新型非挤土桩。如图1，将钻杆与可扩大—可收缩钻头连接，钻头收缩状态时钻杆和钻头通过管桩内腔伸出后进入土层；随后钻头扩大并进行钻孔，钻孔孔径略大于PHC管桩外径（约20 mm），降低了管桩跟随钻头同步下沉的沉桩阻力，同时钻孔残渣土通过管桩内腔的螺旋叶片带出至地面，实现了钻孔—沉桩—排土同时进行；钻孔结束后收缩钻头，将钻杆和钻头退出管桩内腔；由于钻孔直径大于管桩外径约20 mm，故在成孔孔壁与管桩外壁之间形成一个厚度10 mm左右的间隙（简称“桩—土间隙”）。沉桩结束后，需通过预埋在管桩管壁中的注浆管进行桩侧注浆，以提高桩侧摩阻力。



(a) 大直径随钻跟管桩施工示意图



(b) 专用沉桩-嵌岩钻头、嵌岩段切削的岩渣

图1 大直径随钻跟管桩施工示意图及桩端嵌岩图

Fig. 1 Construction of drilling PHC pipe cased pile with large diameter and rock-socketed pile end

随钻跟管桩承载性能与桩侧注浆效果、桩底沉渣及桩端是否嵌岩密切相关。由于钻孔直径大于管桩外径约20 mm，需要进行桩侧后注浆以提高摩阻力。桩端是否嵌岩需要根据承载力大小及沉降要求来确定，一般对于岩层埋藏较深嵌岩后桩长过大、桩侧土层注浆效果较好注浆后桩侧摩阻力满足承载性能要求，对竖向承载性能要求不高的工程，桩端可不嵌岩或少嵌岩，否则桩端必须有效嵌入岩层且确保沉渣清除干净。

钻进达到设计深度后, 拔出钻杆和钻头, 采用专用钻斗清理桩端沉渣, 待桩端沉渣的清理工作满足设计规范或者被完全清除后再向孔底灌注混凝土, 随后通过桩机激振器将管桩沉至孔底, 使桩靴与基岩完全接触, 桩底混凝土凝固后桩端的管桩管壁、桩靴和桩底基岩相互咬合形成一个整体, 有效提高了嵌岩效果和桩端阻力。如图 1 (b), 为保证嵌岩深度和效果, 采用的专用沉桩-嵌岩钻头从下到上分为 3 层, 钻孔孔径从下到上逐渐增加, 实现了钻头分层切削岩石、桩端逐步入岩。通过超前钻资料确定沉桩孔位对应的岩层埋深、测量钻头和钻杆进入地层的长度、同时实时监测钻杆扭矩, 基于此确定钻头由土层进入岩层的临界深度, 钻头进入岩层后调整钻杆转速, 通过金刚石钻头上镶嵌的子弹头切削岩石, 同时通过实时监测钻杆下沉量, 以达到实时监测嵌岩深度的目的。

综上, 随钻跟管桩通过桩身预埋的注浆管进行桩侧注浆, 大大提高了桩侧摩阻力, 桩底扩孔且嵌岩形成了桩端扩大头, 极大地提高了端阻力。该施工工法解决了因桩径较大或者土层较硬而造成的沉桩难题, 避免了锤击和静压对管桩造成的损伤, 打破了管桩基础只能局限于小直径的局面, 大大提高了管桩的承载性能, 充分发挥了管桩桩身材料具有较高强度的优势, 拓宽了管桩的工程适用范围, 节能环保, 符合传统优势产业升级为高新科技制造和施工技术的发展趋势,

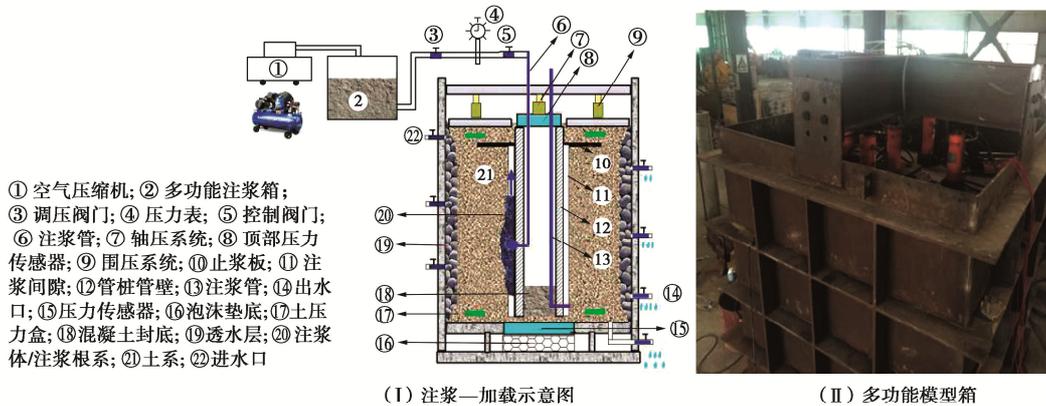
市场前景广阔。然而施工过程中由于桩-土间隙的存在可能使松散砂土层发生局部塌孔, 填充桩侧间隙, 影响注浆液在桩-土间隙中的流动路径, 最终影响桩侧摩阻力的发挥。目前关于管桩施工预成孔时塌孔对随钻跟管桩承载性能的影响暂未见报道。为此, 本文开展了室内模型试验, 借助三维扫描系统, 定量表征了塌孔对桩侧注浆效果、桩侧摩阻力发挥、上部荷载传递规律的影响, 为随钻跟管桩的设计提供了理论基础。

1 室内物理模拟试验

1.1 试验设备

图 2 为随钻跟管桩桩侧注浆及承载性能测试物理模型试验系统, 该系统包括模型箱、轴压与围压系统、测量系统、地下水模拟系统、注浆系统、三维扫描系统, 可实现地层深度、地下水流、塌孔、不同注浆工艺、不同桩-土间隙等的精细化模拟。

模型箱的长×宽×高分别为 2.2 m×2.2 m×2.4 m, 侧壁采用 30 mm 的钢板加筋焊接而成, 顶部为可拆卸十字形反力架, 可开展静载试验和抗拔试验, 可承受 100 kN 以上的反向压力。桩顶设置压力传感器、激光位移计可实时读取桩顶荷载和位移, 桩身粘贴应变片以获取桩身应变。注浆系统可提供 0~2 MPa 的注浆压力, 注浆液体积容量可达 80 L, 可实现 4 通道



(a) 大直径随钻跟管桩桩侧注浆及承载性能测试物理模型试验系统示意图



(b) 大直径随钻跟管桩桩侧注浆及承载性能测试物理模型试验系统实物图

图 2 随钻跟管桩桩侧注浆物理模型试验系统示意图及实物图

Fig. 2 Schematic and physical diagrams of physical model test system for drilling PHC pipe-cased pile

同时注浆。三维扫描系统可定量表征注浆体三维几何尺寸及空间分布形态。

1.2 试验用砂土参数

试验用砂土参数：天然密度为 2.16 g/cm^3 ，含水率为 3.12%，不均匀系数为 5.75，曲率系数为 2.86，细度模量为 2.25，通过轻型动力触探测得平均击数为 30 次，属于中密实状态。

1.3 模型桩制作及施工过程

结合笔者所在团队开展的随钻跟管桩原位试验（桩长 15.5 m，桩径 1 m）^[12, 21-22]，根据相似比原则，如图 3(a)，模型试验桩选用直径 63 mm、壁厚 5.8 mm、长度 1 m 的 PPR 管。自模型试验桩桩底 5, 20, 35, 50, 65, 80, 90 cm 处对称粘贴 2 组应变片，从而实时监测桩身应变并推算桩身轴力；通过在桩顶位置布置红外遥感位移计和压力传感器实时获取模型桩桩顶轴力和沉降；采用高压防爆 PU 管（外径 16 mm、内径 12 mm）模拟注浆管，为防止浆液从模型桩内腔流出导致注浆失败，试验开展前需提前向管桩桩底的内腔中灌注 5~8 cm 厚的混凝土进行封底，同时将注浆管从模型桩内腔插入桩底并固定在封底混凝土中；封底之前在 PU 管的末端以及模型桩的底部均切割一个方形切口，并通过 502 胶将 2 个方形切口进行黏结，为防止封底混凝土填充注浆管，需提前采用棉花或者报纸封堵出浆口，待封底混凝土凝固后以形成桩侧注浆通道，模拟桩侧注浆。



图 3 模型桩制作及施工

Fig. 3 Production and construction of model piles

1.4 试验方案

随钻跟管桩施工过程中，钻头一般超前管桩 1~3 m 进行同步下沉，孔壁塌孔可发生在钻头超前段，也可发生在管桩下沉过程中管桩桩身对应位置的孔壁处，桩端持力层为砂层，则有以下 4 种工况。

(1) 桩 - 土间隙完整 (工况 1)

若砂层密实、自稳性较好，则无塌孔孔洞存在、无落砂填充桩 - 土间隙，其施工步骤为：通过外径为 66 mm 的双叶螺旋钻杆进行钻孔，残渣土通过螺旋叶片带出孔外，钻孔孔径略大于模型桩外径 0.5~1 cm，以模拟桩 - 土间隙，钻孔至设计标高后，将预先制作

的模型桩沉至孔底后进行桩侧注浆（水灰比 0.5 MPa），如图 2 (b)，将注浆管与注浆箱连接，并通过空气压缩机以及减压阀提供注浆压力，注浆压力为 0.5 MPa。

(2) 桩 - 土间隙局部坍塌填充 (工况 2)

在管桩桩身对应位置的钻孔孔壁土体发生塌孔，造成桩侧土体中留下孔洞，同时部分桩 - 土间隙被塌落的砂土充填，其施工步骤为：首先按 (a) 的方式进行沉桩，沉桩结束后，将“L”型钢条放入桩 - 土间隙中（放入深度为距离桩顶 40 cm 处），旋转钢条在桩侧土体中钻孔，形成一个半径为 5 cm 的孔洞，钻孔形成的砂土局部充填桩 - 土间隙；最后桩侧注浆。

(3) 桩 - 土间隙局部坍塌未填充 (工况 3)

在管桩下沉之前钻头超前管桩 1~3 m 所对应位置孔壁发生局部塌孔，在桩周土体中形成孔洞，坍塌的砂土被螺旋叶片带走，管桩下沉后桩 - 土间隙无落砂充填桩 - 土间隙，其施工步骤为：先在钻孔孔壁预定位置钻球形孔洞，清理干净渣土，再进行沉桩和桩侧注浆。

(4) 桩端侧砂土填充 (工况 4)

桩端侧间隙中充填渣土未被清理干净，从而影响浆液的流动规律和注浆效果，其施工过程如下：首先按照工况 1 的方式完成沉桩，保留少量的渣土不清理，以模拟砂土充填桩 - 土间隙。

此外，需要说明的是本文重点讨论塌孔对桩侧摩阻力的影响，未对“桩端嵌岩”进行模拟。

1.5 加载方式及注浆体三维扫描

将模型桩养护 30 d 后开展静载试验，加载方式为慢速维持荷载法^[23]，通过桩顶预置的压力传感器（精度 0.1 N）和红外遥感位移计（精度 0.01 mm）记录桩顶荷载 Q 与桩顶位移 s 。试验结束后，开挖并清洗模型桩，在模型桩上粘贴标识点，基于三维扫描仪，通过高速激光扫描测量的方法外加外插法多频相激光栅技术，大面积高分辨率地快速获取注浆体的点云数据，得到注浆体三维坐标数据和空间点位信息，定量表征注浆体的三维几何尺寸。

2 试验结果分析

2.1 随钻跟管桩竖向承载性能分析

荷载 - 位移曲线 ($Q-s$) 在一定程度上反映了随钻跟管桩受荷后的变形特征、破坏模式及荷载传递特性。如图 4，小荷载下 4 种工况的 $Q-s$ 曲线均为线性变化，随着荷载的增加，沉降速度加快， $Q-s$ 曲线由线性演变为上凹型曲线；4 个 $Q-s$ 曲线均有较明显的拐点，呈陡降型变化，原因为本模型试验中桩底持力层选择为砂土，当桩侧摩阻力充分发挥后，桩底持力

层继续变形, 桩的沉降量超限, 被判定破坏。当对单桩承载力要求较高的情况下, 随钻跟管桩的桩端需要嵌入岩层, 其荷载 - 位移曲线为缓降型^[19-22], 本文重点探讨塌孔对桩侧摩阻力的影响, 故未对“桩端嵌岩”进行模拟; 达到极限状态前, 相同荷载作用下, 工况 4 沉降最大, 工况 2 和工况 1 次之, 工况 3 的沉降最小。这说明注浆后塌孔形成的孔洞(简称“塌孔孔洞”)被浆液充填造成桩侧摩阻力增大; 浆液在落砂区域的绕流(简称“落砂注浆绕流”)造成桩侧摩阻力下降。达到极限状态时, 最后一级荷载下 4 种工况 $Q-s$ 曲线的陡降速率依次为 103.24, 59.37, 218.25, 67.12 N/mm, 即工况 4 曲线的陡降最大, 工况 2 曲线的陡降次之, 工况 1 曲线陡降再次之, 工况 3 曲线的陡降最小, 这说明塌孔形成的孔洞被浆液充填后增加了桩身抵抗上部荷载的能力, 浆液在落砂区域的绕流则降低了桩身抵抗上部荷载的能力。

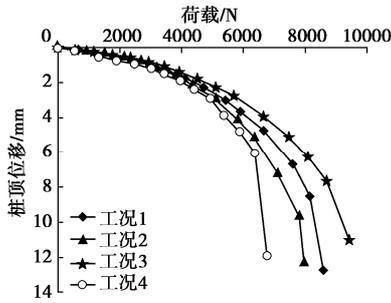


图 4 随钻跟管桩 $Q-s$ 曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of DPC piles

工况 3 的承载性能最高 (8692.60 N, 对应的沉降为 7.64 mm), 工况 1 次之 (8147.62 N, 对应的沉降为 8.51 mm), 工况 2 再次之 (7811.92 N, 对应的沉降为 9.65 mm), 工况 4 的承载性能最差 (6370.00 N, 对应的沉降为 6.05mm), 其中工况 3 的随钻跟管桩承载性能相对于工况 1 提高了 6.69%, 工况 2 和工况 4 的承载性能相对于工况 1 分别降低了 4.12%, 21.82%, 这说明砂土填充间隙后造成浆液在落砂区域的绕流降低了随钻跟管桩的承载性能; 塌孔形成的孔洞被浆液充填与砂土填充间隙后造成浆液在落砂区域的绕流以及注浆不密实的结果差距甚大, 说明沉桩过程中将塌落的渣土清理干净, 增加注浆量, 对保证桩的承载力十分必要。

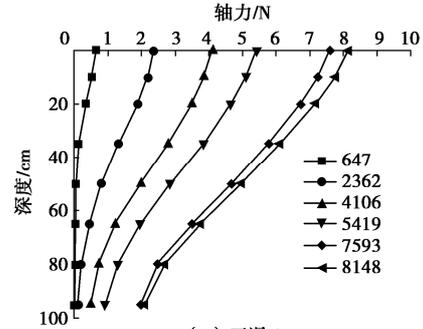
2.2 各级荷载作用下桩身轴力分布规律

通过桩身粘贴的应变片可获得桩身的应变, 从而可计算得到不同深度桩身的轴力分布。图 5 给出各级荷载作用下桩身轴力沿深度的分布规律。

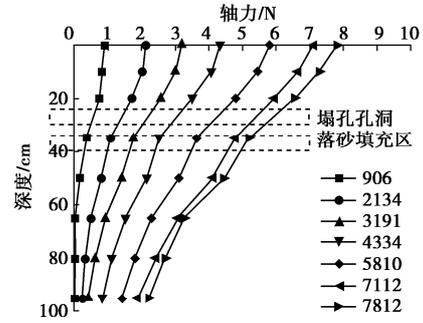
(1) 4 种工况下的随钻跟管桩均为端承摩擦桩, 随着深度的增加, 桩身轴力逐渐减小, 整体上表现出了“上部桩身轴力衰减较慢, 下部衰减较快”的变化

规律; 桩身轴力曲线越陡, 说明桩侧摩阻力越小或者发挥越不充分。

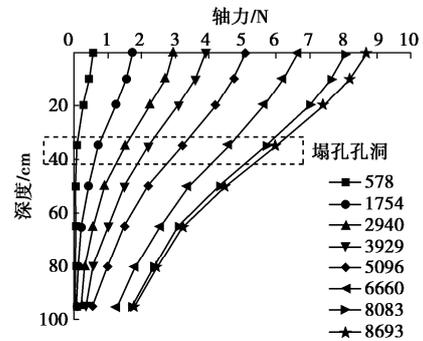
(2) 当荷载较小时, 随钻跟管桩的轴力曲线均比较陡, 随着荷载级别的增加, 轴力曲线逐渐变缓, 说明桩侧摩阻力逐渐得到了发挥; 桩身上部的轴力曲线比桩身上部陡, 说明上部桩侧摩阻力发挥的比下部发挥的充分, 这体现了端承摩擦桩的荷载传递特性。



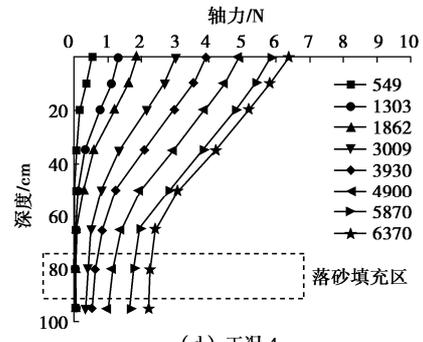
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4

图 5 桩身轴力沿深度分布规律

Fig. 5 Distribution law of axial force along depth of drilling PHC pipe-cased pile

(3) 上部荷载传递至桩底时均存在着较大衰减,这是因为砂土层作为持力层时,由于强度不足造成桩端阻力较小,桩顶的荷载大部分由桩侧摩阻力分担;对于端承摩擦桩,桩侧摩阻力一般先于桩端阻力发挥作用,桩端阻力发挥具有明显的滞后性。

图5中不同工况下随钻跟管桩桩身轴力沿深度分布规律也具有独特的特点:①接近破坏时,工况3曲线最缓(桩侧摩阻力最大),工况1次之,工况2再次之,工况4最陡(桩侧摩阻力最小),说明塌孔所形成的孔洞(简称“塌孔孔洞”)被浆液充填后增强了桩侧摩阻力,浆液在落砂区域的绕流(简称“落砂注浆绕流”)造成桩侧摩阻力下降;工况2的桩侧摩阻力小于工况1,说明浆液在落砂区域的绕流有害作用大。②同一荷载级别情况下,工况3的桩身轴力最小,桩侧摩阻力最大,工况1次之,工况2再次之,工况4桩身轴力最大,桩侧摩阻力最小,同样说明桩侧间隙被砂土填充造成浆液绕流的有害作用大。③达到极限承载力时,上述4种情况的桩端阻力分别为2085.97, 2220.92, 1777.31, 2233.26 N,分别占各自的极限承载力(8147.62, 7811.92, 8692.60, 6370.00 N)的25.60%, 28.43%, 20.45%, 35.06%,这说明孔壁坍塌并未改变以砂土为持力层的随钻跟管桩为端承摩擦桩的特性。④塌孔所形成的孔洞对应区域的曲线斜率较小,砂土填充区对应曲线的斜率较大;从塌孔所形成的孔洞区到砂土填充区曲线斜率由缓变陡,从侧面反映了塌孔孔洞对桩侧摩阻力具有提高作用、砂土填充造成注浆绕流对桩侧摩阻力具有明显的削弱作用。

2.3 各级荷载作用下桩侧摩阻力分布规律

通过两个相邻断面的桩身轴力差除以该段桩身面积可以获得两断面间的平均桩侧摩阻力^[24]。如图6所示,分别计算出不同荷载级别下桩身标高5, 15, 27.5, 42.5, 57.5, 72.5, 87.5 cm处的桩侧摩阻力,不同工况和不同荷载级别下桩侧摩阻力曲线表现出了不同的变化规律:①随着上部荷载的增加,桩侧摩阻力逐步向深部转移,桩下端摩阻力的发挥晚于上端;塌孔孔洞、落砂的存在使得桩侧摩阻力沿深度发挥程度不同。②工况1的桩侧摩阻力表现出了“两头小、中间大”的变化规律,即桩侧摩阻力曲线上存在一个峰值,随着荷载的增加,该峰值的位置由桩身标高15 cm处逐渐下移,最终稳定在标高72.5 cm处。③工况2的桩侧摩阻力表现出了“2个峰值、一个谷值的M形”变化规律,第一个峰值是由于塌孔孔洞被注浆液充填造成的,第二个峰值与工况1相同,谷值是由于砂土填充桩-土间隙造成桩侧注浆液绕流,浆液覆盖桩身面积降低从而造成桩侧摩阻力下降,形成谷值。④工况3的桩侧摩阻力曲线与工况1的变化规律类似,不同

的是塌孔孔洞的存在造成峰值的位置由桩身标高15 cm处逐渐下移,最终稳定在标高42.5 cm处(塌孔孔洞所在位置)。⑤工况4的桩侧摩阻力曲线相对于工况1来说,其桩端侧砂土填充区域对应的桩侧摩阻力较小,这说明浆液在落砂区域的绕流降低了随钻跟管桩的桩侧摩阻力。

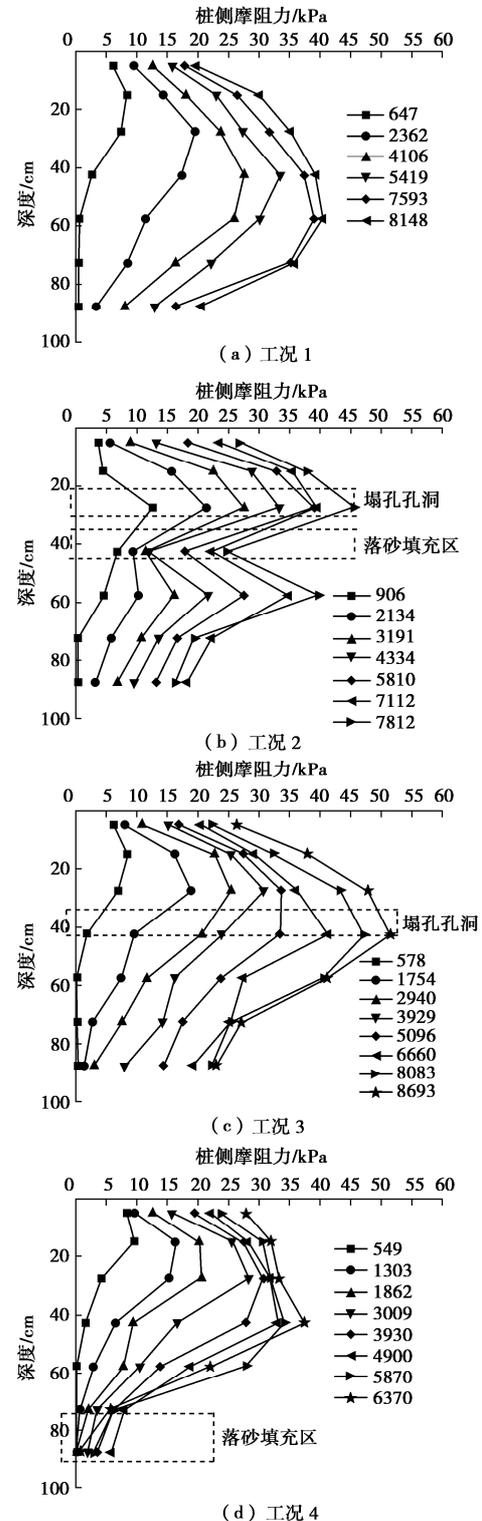


图6 随钻跟管桩桩侧摩阻力沿深度分布规律

Fig. 6 Distribution characteristics of skin friction of different pile foundations along pile depth

在相同荷载作用下, 桩侧摩阻力由小到大排序依次为工况 4, 工况 2, 工况 1, 工况 3; 达到极限承载力时, 工况 1 到工况 4 的桩侧摩阻力分别为 6061.65, 5590.99, 6914.96, 4136.68 N, 分别占各自的极限承载力 (8147.62, 7811.92, 8692.60, 6370.00 N) 的 74.40%, 71.57%, 79.55%, 64.94%。塌孔并未改变以砂土为持力层的随钻跟管桩为端承摩擦桩的承载特性, 注浆后塌孔形成的孔洞 (简称“塌孔孔洞”) 被浆液充填造成桩侧摩阻力增大; 浆液在落砂区域的绕流 (简称“落砂注浆绕流”) 造成桩侧摩阻力下降, 落砂注浆绕流的降低作用要大于塌孔孔洞产生的积极作用, 工程上的塌孔对桩侧摩阻力的发挥是不利的。

2.4 塌孔影响桩侧摩阻力的本质探讨

桩侧摩阻力主要由注浆液在桩 - 土间隙中的流动特性 (桩侧注浆结石体覆盖桩身的面积与厚度) 和桩侧注浆液在土体中的扩散特性 (单位面积浆 - 土黏结强度) 决定。图 7 为开挖后的桩侧注浆结石体及其三维扫描云图, 4 种工况采用同样的注浆工艺、注浆参数、注浆材料, 浆液在相同土体中的扩散性能相同, 这一点在图 7 中不同工况下注浆体的粗糙度特征可以得到证明。故下文重点分析桩 - 土间隙中浆液的流动特性。

如图 7, 塌孔对桩 - 土间隙中浆液的流动规律影响较大, 图 7 (a), 工况 1 注浆液流动效果较好, 浆液几乎覆盖了整个桩身 (覆盖率 100%); 图 7 (b), 工况 4 中桩端侧砂土填充导致浆液从出浆口流出后, 沿着某一薄弱通道向上流动, 填充砂土区域对应桩身的浆液覆盖面积小, 即填充砂土区域浆液的绕流导致工况 4 的桩侧摩阻力相对于工况 1 下降了 31.76%; 图 7 (c), 工况 3 中, 浆液沿着桩身流动的同时填充了空的塌孔孔洞, 增加了注浆体的厚度, 导致工况 3 的桩侧摩阻力相对于工况 1 提升了 14.08%; 图 7 (d), 工况 2 中空的塌孔孔洞被充填增加了注浆体厚度, 落砂充填区域浆液的绕流降低了桩身注浆体覆盖的面积, 导致工况 4 的桩侧摩阻力相对于工况 1 降低了 7.76%。综上, 注浆体覆盖桩身的面积与注浆体厚度均为影响桩侧摩阻力的重要因素, 坍塌形成的孔洞及砂土填充桩 - 土间隙主要通过改变桩侧注浆结石体的积与厚度对桩侧摩阻力产生影响。



图 7 注浆结石体及其三维扫描点云云图

Fig. 7 Grouting stones and their 3D scanning point cloud images

2.5 桩侧注浆体的定量表征

通过三维扫描仪获得空桩与注浆后模型桩的点云数据, 从而获得三维坐标数据和空间点位信息; 采用 Geomagic Control 2014 (64 bit) 专业点云处理软件将空桩和带有注浆体的试验桩进行基准点对齐, 通过 3D 比较和数据分析计算获得桩侧任意位置的注浆体厚度、桩侧注浆体覆盖桩身的面积和注浆体体积。如图 8 所示, 将桩侧摩阻力与注浆体体积进行拟合, 可以得到

$$q = -149093.29 + 158739.53V - 55023.16V^2 + 6462.98V^3 \quad (R^2 = 0.9967) \quad (1)$$

由式 (1) 可以看出, 桩侧摩阻力 q 与注浆体体积 V 具有较好的三次函数关系, 通过式 (1) 可根据注浆量预测注浆后桩侧摩阻力大小。式 (1) 来自于模型试验, 虽然预测现场试验未必准确, 但可为现场注浆提供思路, 为寻找表征注浆后桩侧摩阻力大小的经验公式提供参考。

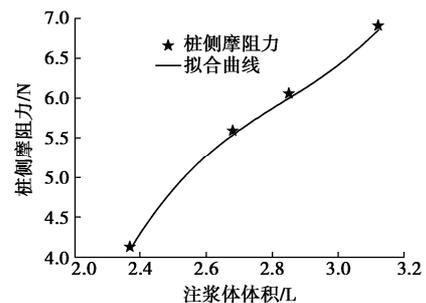


图 8 随钻跟管桩桩侧摩阻力 - 注浆体体积

Fig. 8 Relationship between skin frictions of DPC pile and grouting volume

3 随钻跟管桩的现场试验

图9给出了2根随钻跟管桩试验桩原位试验荷载-位移曲线, 试验工程地质条件详见文献[25], 其中#1桩桩长15.55 m, 桩侧注浆量为 1.04 m^3 ; #2桩桩长15.04 m, 桩侧注浆量为 0.89 m^3 。#1桩桩底沉渣清除较干净, 属于桩端嵌岩工况, #2桩桩端保留了较厚的沉渣, 属于非嵌岩工况; 抽芯结果显示, #1桩封底细石混凝土强度达到了 46.5 MPa , #2桩封底凝土与沉渣混合体强度仅为 14.7 MPa 。

图9中#2桩(非嵌岩工况)的荷载-位移曲线为典型的陡降型曲线(与本文模型试验结论一致), 其动测承载力为 14406 kN , 其中端承力为 4633 kN , 摩阻力为 9773 kN (摩阻力占比 67.84%), 模型试验中工况1的承载力为 8147.62 N , 其中摩阻力为 6061.65 N (占比为 74.40%), 二者摩阻力占比接近, 说明了模型试验结果的准确性。#1桩(嵌岩工况)的荷载-位移曲线为典型的缓变形曲线, 其动测承载力为 22283 kN , 其中摩阻力(16233 kN)和端承力(6050 kN)均高于#2桩; 开挖桩侧注浆界面后发现, #1桩的桩侧注浆效果明显优于#2桩。#2桩桩顶位置处的桩-土间隙被掉落的渣土填充, 造成桩侧后注浆时浆液在落砂区发生绕流, 导致#2桩形成的桩侧摩阻力相对于#1桩减小 39.80% (约 6460 N), 本文模型试验中工况4的填充砂土区域浆液的绕流造成其桩侧摩阻力相对于工况1下降了 31.76% , 二者摩阻力下降量占比接近, 同样证明了桩-土间隙被落砂填充后易造成浆液在落砂区域绕流而造成桩侧摩阻力下降, 再次说明了本文模型试验结果的准确性。

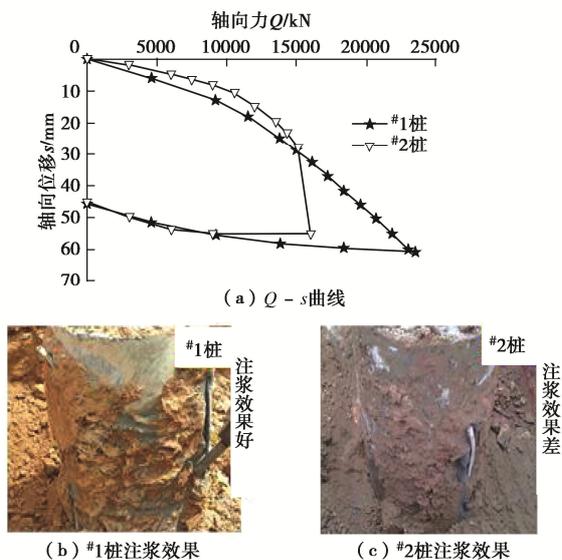


图9 #1桩和#2桩原位试验荷载-位移曲线^[25]

Fig. 9 Load-displacement curves of in-situ tests on piles No. 1 and No. 2

上述数据表明, 同等条件下嵌岩效果越好, 桩端阻力越高; 桩端阻力的发挥也影响桩侧阻力的发挥, 本文重点研究预成孔时塌孔及桩-土间隙中渣土填充对桩侧摩阻力的影响, 未对桩端嵌岩进行模拟, 后续试验需进一步研究嵌岩条件下塌孔对随钻跟管桩承载性能的影响。

4 结 论

(1) 预成孔时塌孔且桩端未嵌岩的条件下, 4种工况下的随钻跟管桩荷载-位移曲线均有较明显的拐点, 为陡降型变化; 注浆后塌孔形成的孔洞被浆液充填造成桩侧摩阻力增大、浆液在落砂区域的绕流造成桩侧摩阻力下降; 坍塌砂土填充间隙引起浆液绕流加速了 $Q-s$ 曲线的陡降。

(2) 4种工况下均表现为端承摩擦桩的特性, 桩身上部的轴力衰减较慢、下部衰减较快; 桩身上部侧摩阻力发挥的比下部发挥的更早更充分、桩端阻力的发挥具有滞后性。

(3) 预成孔时塌孔渣土填充桩-土间隙影响了桩-土间隙中浆液的流动规律, 改变了桩侧注浆体覆盖桩身的面积和厚度, 桩侧注浆体的面积与厚度是桩侧摩阻力的重要影响因素; 桩侧摩阻力与注浆体体积具有较好的三次函数关系。

参考文献:

- [1] 邢皓枫, 李浩铭, 安新, 等. 超大直径嵌岩桩受力特性的数值模拟及其规律性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊2): 1126-1129. (XING Hao-feng, LI Hao-ming, AN Xin, et al. Numerical simulation and analysis of mechanical characteristics for large-diameter rock-socketed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 1126-1129. (in Chinese))
- [2] 任青, 高战士, 吕洪勇. 层状地基中大直径端承桩的竖向振动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊2): 4193-4202. (REN Qing, GAO Zhan-shi, LÜ Hong-yong. Vertical vibration characteristics of large-diameter end-bearing pile in layered soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S2): 4193-4202. (in Chinese))
- [3] HUANG F Y, WU S W, LUO X Y, et al. Pseudo-static low cycle test on the mechanical behavior of PHC pipe piles with consideration of soil-pile interaction[J]. Engineering Structures, 2018, **171**: 992-1006.
- [4] 吴建涛, 叶霄, 李国维, 等. 高路堤下PHC桩加固软土

- 地基的承载及变形特性[J]. 岩土力学, 2018, **39**(增刊 2): 351 - 358. (WU Jian-tao, YE Xiao, LI Guo-wei, et al. Bearing and deformation behaviors of PHC pile-reinforced soft foundation under high embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S2): 351 - 358. (in Chinese))
- [5] 王奎华, 肖 偲, 吴君涛, 等. 饱和土中大直径缺陷桩振动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(7): 1722 - 1730. (WANG Kui-hua, XIAO Si, WU Jun-tao, et al. Dynamic characteristics of defective large diameter piles in saturated soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(7): 1722 - 1730. (in Chinese))
- [6] 范小雪, 李 原, 吴文兵, 等. 饱和土中大直径缺陷桩水平振动响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(2): 413 - 423. (FAN Xiao-xue, LI Yuan, WU Wen-bing, et al. Horizontal vibration response of defective large-diameter piles embedded in saturated soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(2): 413 - 423. (in Chinese))
- [7] 薛力梨, 蒋元海, 杨 琳, 等. PHC 管桩蒸压养护混凝土的力学性能与界面亚微观结构[J]. 硅酸盐通报, 2015, **34**(9): 2662 - 2667. (XUE Li-li, JIANG Yuan-hai, YANG Lin, et al. Mechanical property and interface microstructure of autoclaved curing concrete of PHC pile[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, **34**(9): 2662 - 2667. (in Chinese))
- [8] 马加骁, 张明义, 王永洪. 预应力高强度混凝土管桩桩身受力特性测试技术研究进展[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(4): 896 - 906. (MA Jia-xiao, ZHANG Ming-yi, WANG Yong-hong. Current status and prospects of test techniques for prestressed high strength concrete pipe pile[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(4): 896 - 906. (in Chinese))
- [9] 唐孟雄, 戚玉亮, 周治国, 等. 空心与填芯 PHC 管桩抗弯试验及其理论计算研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 1075 - 1080. (TANG Meng-xiong, QI Yu-liang, ZHOU Zhi-guo, et al. Comparative study on bending performance between hollow PHC pipe piles and PHC pipe piles with concrete core[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 1075 - 1080. (in Chinese))
- [10] 胡贺松, 陈晓斌, 唐孟雄, 等. 随钻跟管桩桩-土接触面作用机制大型直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(12): 4325 - 4334. (HU He-song, CHEN Xiao-bin, TANG Meng-xiong, et al. Investigation on shearing failure mechanism for DPC pile-soil interface in large-scale direct shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(12): 4325 - 4334. (in Chinese))
- [11] 吴 锋, 汪冬冬, 时蓓玲, 等. 后张法预应力混凝土大直径管桩耐久性与寿命预测研究[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(3): 122 - 128. (WU Feng, WANG Dong-dong, SHI Bei-ling, et al. Research on durability and life prediction for raymond cylinder pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(3): 122 - 128. (in Chinese))
- [12] 吴声扬. 填芯大直径随钻跟管桩竖向抗压承载性能试验及数值分析研究[D]. 广州: 广州大学, 2019. (WU Sheng-yang. Experimental Study and Numerical Analysis of Vertical Compression Bearing Capacity of Filling Core Drilling With Large Diameter PHC Pipe Cased Pile[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019. (in Chinese))
- [13] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩在软土地基中的应用及其承载力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 2): 4359 - 4366. (ZHOU Jia-jin, GONG Xiao-nan, WANG Kui-hua, et al. Application of static drill rooted precast nodular pile in soft soil foundation and calculation for bearing capacity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S2): 4359 - 4366. (in Chinese))
- [14] 张日红, 吴磊磊, 孔清华. 静钻根植桩基础研究与实践[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 1200 - 1203. (ZHANG Ri-hong, WU Lei-lei, KONG Qing-hua. Research and practice of JZGZ pile foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 1200 - 1203. (in Chinese))
- [15] 周佳锦. 静钻根植竹节桩承载及沉降性能试验研究与有限元模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. (ZHOU Jia-jin. Test and Modeling on Behavior of the Pre-Bored Grouting Planted Nodular Pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese))
- [16] 李志刚, 张 雁, 朱合华, 等. 软土地区大直径中掘扩底法管桩承载性能现场试验分析[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(9): 78 - 86. (LI Zhi-gang, ZHANG Yan, ZHU He-hua, et al. Experimental study on load-bearing behavior of large-diameter belled PHC pipe pile by NAKS- construction-method in soft soil area[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(9): 78 - 86. (in Chinese))
- [17] 赵 程, 杜兴华, 赵春风, 等. 中掘预应力管桩竖向抗压承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 393 - 398. (ZHAO Cheng, DU Xing-hua, ZHAO Chun-feng, et al. Vertical bearing capacity of inner-digging prestressed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,

- 35(S1): 393 - 398. (in Chinese))
- [18] 赵春风, 杜兴华, 赵程, 等. 中掘预应力管桩挤土效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 415 - 421. (ZHAO Chun-feng, DU Xing-hua, ZHAO Cheng, et al. Squeezing effect of inner-digging prestressed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 415 - 421. (in Chinese))
- [19] 唐孟雄, 胡贺松, 刘春林, 等. 砂土中不同管桩桩型承载性能的对比试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 2): 229 - 237. (TANG Meng-xiong, HU He-song, LIU Chun-lin, et al. Comparative experiments on bearing behavior of different types of pipe piles in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S2): 229 - 237. (in Chinese))
- [20] 刘春林, 唐孟雄, 胡贺松, 等. 考虑桩底沉渣的随钻跟管桩竖向承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 177 - 186. (LIU Chun-lin, TANG Meng-xiong, HU He-song, et al. An experimental study of vertical bearing capacity of DPC piles considering sediment effect at pile bottom[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 177 - 186. (in Chinese))
- [21] TANG M X, HU H S, CUI J, et al. The vertical bearing mechanism of hybrid bored pre-stressed concrete cased piles[J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, 18(3): 293 - 302.
- [22] 杨晓松. 大直径随钻跟管桩竖向抗压承载性能及抗震性能试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2018. (YANG Xiao-song. Experimental Study on Vertical Compressive Bearing Capacity and Seismic Performance of Drilling with Large Diameter PHC Pipe Cased Pile[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018. (in Chinese))
- [23] 建筑基桩检测技术规: JGJ 106—2014[S]. 2014. (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. 2014. (in Chinese))
- [24] 闫楠, 白晓宇, 水伟厚, 等. 大直径超长冲孔灌注桩竖向抗压承载特性原位测试研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(7): 2571 - 2580. (YAN Nan, BAI Xiao-yu, SHUI Wei-hou, et al. In-situ test study on vertical compressive bearing capacity characteristic of large diameter super-long impact-cone concrete pile[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(7): 2571 - 2580. (in Chinese))
- [25] 侯振坤, 唐孟雄, 胡贺松, 等. 随钻跟管桩竖向承载性能原位试验与室内物理模拟试验对比研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 419 - 429. (HOU Zhen-kun, TANG Meng-xiong, HU He-song, et al. Comparative study on the vertical load-bearing capacity of the drilling with pre-stressed concrete pipe cased pile based on in situ and physical simulation tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 419 - 429. (in Chinese))

新书介绍:《非饱和土与特殊土力学——理论创新、科研方法及治学感悟》

陈正汉教授的专著《非饱和土与特殊土力学——理论创新、科研方法及治学感悟》由科学出版社于2021年7月出版发行。全书内容分为三篇及附录。正文分为7章:第一篇(第1章和第2章)系统介绍作者及其学术团队在非饱和土与特殊土力学的基本理论和本构模型研究方面取得的主要创新成果,对非饱和土与特殊土力学及其工程应用的新进展进行全面系统的总结,并对今后的研究工作提出若干建议;第二篇(第3章至第5章)对土力学的理论模型和科研方法进行系统论述,总结作者在加强团队创新文化建设和学风建设方面的经验,阐述知行合一理念的形成为及发展岩土力学理论体系的思考;第三篇(第6章和第7章)是作者的学术奋斗生涯和治学感悟。书末

附录共17个,主要介绍第十届全国土力学及岩土工程学术会议的盛况和办会经验、非饱和土与特殊土专业委员会的章程及开展的国内外学术交流活动、部分同行专家对作者学术成果的评价。内容丰富、自主创新、深入系统、推理严谨、数据翔实、旁征博引、表述精炼是该书的鲜明特色。

该书可供从事岩土力学与工程的教学、科研人员及研究生参考阅读。

顺便指出,陈正汉教授与秦冰博士合著的《缓冲/回填材料的热-水-力耦合特性及其应用》一书已由科学出版社在2017年7月出版发行。该书共10章,是国内关于高放废物深地质处置库的缓冲/回填材料研究成果的第一本专著。

(本刊编辑部)