

静载试验中试桩受桩侧堆载的影响分析*

江杰^{1,2,3}, 韦永超^{4,5}, 陈俊羽¹, 马少坤^{1,2,3}, 刘莹^{1,2}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全重点实验室, 南宁 530004; 3. 广西岩土力学与工程重点实验室 桂林理工大学, 广西 桂林 541004; 4. 中国市政工程 西北设计研究院有限公司, 兰州 730000; 5. 广西交通科学研究院有限公司, 南宁 530004)

摘要:针对单桩静载试验过程中桩侧大吨位堆载对试桩的影响问题, 结合工程实际, 应用FLAC^{3D}程序建立三维弹塑性模型对试桩试验过程进行数值模拟, 着重分析桩侧堆载对土体及试桩受荷性状的影响, 结果表明: 在试验加载前, 桩侧支墩荷载会引起土体附加应力和沉降, 其极限影响深度约为8倍支墩宽度。支墩荷载还会使试桩提前受荷而发生沉降, 在试验加载时, 桩侧支墩荷载减小, 试桩发生一定的回弹而使得试桩的量测沉降量偏小。在加载初期, 堆载法明显夸大了试桩刚度, 需引起重视; 随着加载至试桩极限荷载的一半后, 其夸大作用开始明显减弱, 在接近极限荷载时, 这种影响已不明显, 堆载法仍是确定单桩极限承载力的可靠途径。

关键词:静载试验; 堆载; 数值分析

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-1034-08

Analysis on Test Pile Influenced by Piling-up Weights in Static Loading Tests

Jiang Jie^{1,2,3}, Wei Yongchao^{4,5}, Chen Junyu¹, MA Shaokun^{1,2,3}, Liu Ying^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 3. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, P. R. China; 4. CseccAecom Consultants Co. Ltd., Lanzhou 730000, P. R. China; 5. Guangxi Transportation Research Institute, Nanning 530004, P. R. China)

Abstract: In order to investigate and survey the test pile influenced by the large tonnage surface load beside the pile during static loading tests, a 3D nonlinear numerical simulation analysis is used to simulate the process of static loading test combining with the real engineering test by FLAC^{3D}. The loading character of soil and test pile influenced by the piling-up weights is emphatically analyzed. The results show that before the test loading of static loading test, the loading of piers caused the additional stress and settlement of soil, the extremely influence depth is about 8 times the width of the piers. The loading of piers also brought settlement to test pile by the loading coming from piers in advance. During the loading process of the test, since the loading of piers decreasing, the measured settlement is relatively smaller as the test pile resilience. At the beginning of loading, stack method exaggerate the pile stiffness. As the loading reaching half of the ultimate bearing capacity of test pile, the exaggerated effect present obviously weakening. When it closes to the ultimate bearing capacity, the exaggerated effect would be disappeared. The piling-up weights method remain as a reliable method to estimate the ultimate bearing capacity of single pile.

Keywords: static load test; piling-up weights load; numerical analysis

* 收稿日期: 2017-11-30(修改稿)

作者简介: 江杰(1979-), 男, 湖北麻城人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事岩土地下工程的教学与科学研究。

E-mail: jie_jiang001@126.com

通讯作者: 马少坤(1972-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土地下工程的教学与科学研究。

E-mail: mashaokun@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(51568006, 51678166); 中国博士后科学基金(2017M612865); 广西岩土力学与工程重点实验室资助课题(16-KF-01)

0 引言

堆载压重法桩基静载试验因试桩受荷性状与实际工程桩受荷性状最接近而被认为是确定桩基承载力最可靠有效的办法。然而在试验中,堆载配重须一次加足后再进行桩基的加卸载试验,这就使得试桩两侧土体受到堆载支墩传递的重力荷载作用而产生相对桩的沉降,进而使得试桩受到影响并影响到试验结果的准确性。Poulos^[1]基于弹性半空间假定分析堆载压重法桩基静载试验认为,试桩受荷沉降影响基准点(即基准桩,基准梁支点)下沉,使得试桩沉降测量值偏小。袁从华等^[2]基于弹性理论分析了大吨位堆载法桩基静载试验中支墩荷载对试桩的影响,并指出支墩荷载对地面沉降影响范围比较大,基准桩难以超过其扰动影响范围之外。洪鑫^[3]应用 Mindlin 位移解对小吨位小直径堆载法试桩过程进行理论模拟,着重讨论了支墩荷载影响下基准点的布设对测试结果的影响,并指出可利用加载时支墩卸荷引起的基准桩上抬和测试桩沉降引起的基准桩下沉叠加来降低对试桩的影响。

上述基于弹性理论的研究成果为分析堆载法静载试验中支墩荷载对试验结果的影响提供了理论参考。然而,弹性理论不能考虑土体的塑性特性,且大多研究偏向于研究堆载对基准桩的影响,支墩荷载对试桩的影响尚未引起足够重视。吴文等^[4]通过现场原位试验研究了静载试验中堆载对大直径扩底桩试桩的受荷沉降性状的影响,认为“堆载效应”使得桩周浅部土层压密而提高该部分的桩侧摩阻力。王国遇等^[5]通过对静载试验前的堆载过程中桩身应力监测表明,堆载配重吊装过程中,支墩荷载增加导致桩身荷载应力提前施加,进而对桩身内力测试有影响,并指出精确分析试桩荷载传递性状时应考虑这种影响。基于此,本文结合实际工程试桩情况,采用三维弹塑性数值分析法研究大吨位堆载法静载试验中桩侧支墩荷载变化对大直径灌注桩试桩的影响机理,为评估桩侧支墩荷载对试桩的影响提供参考和借鉴。

1 数值分析验证

1.1 静载试验概况

南宁市火车东站高架平台工程基础采用机械旋挖灌注桩,场区内地表岩土层主要为填土,下伏第三系泥岩粉砂岩互层与粉砂岩层交互出现。对该工程一桩长为 27 m 的桩基 S1#(其所处场地工程地质条件及其岩土物理力学参数如图 1)进行堆载法静载试验,桩身混凝土采用 C30 混凝土,桩径为 1.2 m,设计承载力特征值为 3.5 MN,试桩时须至少加载至设计荷载的两倍即(7 MN),同时,堆载荷载还要乘以 1.2 倍的安全系数,再考虑到桩侧堆载支墩荷重,总堆载确定为 10 MN。试桩两侧堆载支墩尺寸均为 1.5 m×8 m,则试验加载前桩侧最大支墩荷载为 417 kPa。在试验逐级加载(每级荷载增量 0.7 MN)至本次试验最大加载值 7.7 MN(共分 11 级加载)过程中,对应地,支墩荷载也逐级减小至最小支墩荷载 97 kPa。随后,在桩顶卸载(分 6 级卸载)至 0 MN 过程中,支墩荷载也相应的逐级增加至最大值。

1.2 数值模型建立与验证

为了分析静载试验中试桩受桩侧大吨位堆载的影响,拟借助 FLAC^{3D} 建立三维弹塑性数值模型对桩基 S1#静载试验过程进行数值模拟分析,并将计算结果与试验结果进行对比,以验证数值模型的正确性。

1.2.1 有限差分模型建立

为了较为准确地描述在荷载作用下桩土间的相互作用,桩-土界面采用不共节点的接触面单元模拟,土体和桩均采用实体单元。参照有关学者^[6-7]的计算经验并经试算,确定本文模型尺寸 48 m×48 m×56 m,共 47 756 个单元,51 326 个节点。模型下边界为固定边界,侧边界为滚轴边界,上边界为自由边界。为了简化处理,将支墩荷载简化为条形均布荷载作用于支墩所处地面位置。

1.2.2 本构模型选取及材料参数

土体采用 Mohr-Coulomb 模型,接触面则采用可以描述桩-土相互接触界面在剪应力作用下滑移与分离的 Coulomb 剪切滑移模型,桩基弹性模量和泊松比分别为 30 GPa 和 0.2,容重为 25 kN/m³。岩土材料参数取自室内试验和地勘报告(如图 1)。

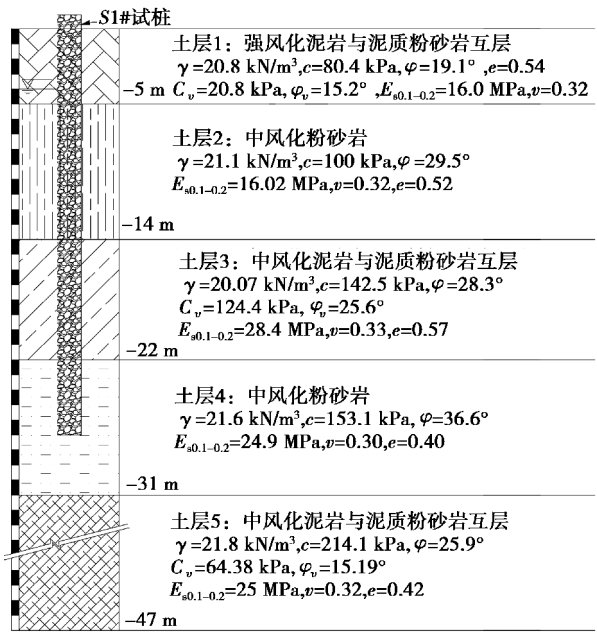


图 1 某高架平台工程 S1#试桩处地质剖面图

Fig. 1 Geological section of S1# test pile at an elevated platform project

桩-土接触面参数取值的准确性是反映桩-土相互作用的关键。Comodromos 等^[8]认为切向刚度 k_s 的取值应该大于 10^7 kPa/m,更高的取值只减缓计算速率而对计算结果没有影响。因此,本文模型接触面刚度取 $k_n=k_s=10^8$ kPa/m。陈育民等^[9]指出,对于模拟桩-土的相对滑移与分离情况,接触面的摩擦参数要比接触面的刚度参数重要得多,对于现场浇筑的灌注桩,其接触面的摩擦参数可以取为桩侧土层对应参数值的 0.8 倍,然后根据现场试验数据进行适当调整。本文根据现场静载试验数据进行反演分析,最终确定桩-土接触面各参数取为桩侧土层对应参数值的 0.75 倍(见表 1)。

表 1 桩-土接触面参数

Table 1 Parameters of pile-soil interface

| 接触面 部位 | 法向刚度 | 切向刚度 | 黏聚力 | 摩擦角 | 膨胀角 |
|-----------|----------------------------|----------------------------|---------|------------|------------|
| | $k_n / (P_a \cdot m^{-1})$ | $k_s / (P_a \cdot m^{-1})$ | | | |
| 桩侧接触面 | 1.0×10^8 | 1.0×10^8 | $0.75c$ | 0.75ϕ | 0.75Ψ |
| 桩底接触面 | 1.0×10^8 | 1.0×10^8 | 0 | 0.75ϕ | 0.75Ψ |

1.2.3 数值模拟步骤

(1)初始地应力平衡计算。首先视桩基为土

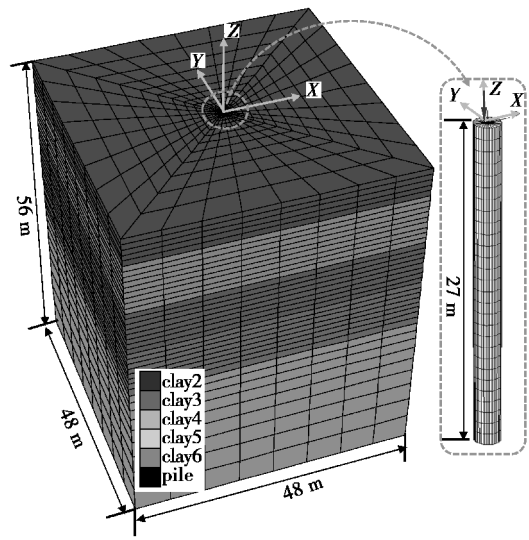


图 2 有限差分网格模型

Fig. 2 Finite difference meshes model

体,让模型在自重作用下进行地应力平衡计算,获得初始地应力场,然后改变桩基材料属性(即视桩基为 C30 混凝土),再进行地应力平衡。

(2)荷载施加。在经过自重平衡计算之后,清除位移场和速率场,只保留应力场。先施加桩侧支墩荷载 417 kPa 计算至平衡(桩顶沉降稳定),然后再进行桩顶逐级加载,并同时伴有支墩荷载逐级卸载计算。当桩顶荷载加载至最大试验荷载值 7.7 MN 时,支墩荷载为 97 kPa。此后,按试验工况进行卸载及再加载计算。

(3)为了获得桩基的极限承载力,对试桩加载至最大试验荷载之后,支墩荷载维持 97 kPa 不变,桩顶荷载继续逐级增加直至极限荷载。

1.2.4 结果分析

数值模型计算结果与试验结果对比,如图 3 所示。由图可知,试桩荷载沉降与卸载回弹曲线的计

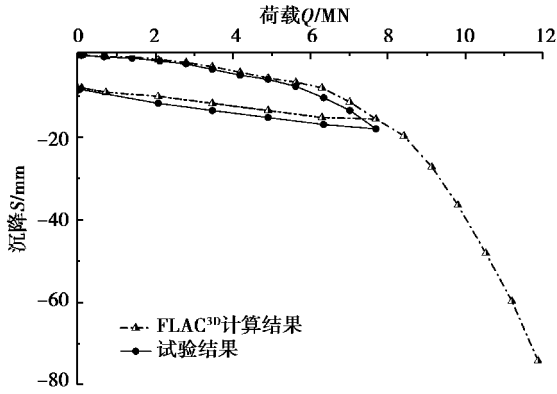


图 3 荷载沉降曲线

Fig. 3 Load settlement curve

算值和试验值吻合较好,证明数值模型的可靠性和计算参数的准确性。

2 静载试验中试桩受桩侧堆载影响

2.1 计算方案

为了探究堆载法桩基静载试验中支墩荷载对试桩的影响机理,设计了 3 种计算方案,如图 4 及表 2。其中,方案 1 是为了分析仅在桩侧支墩荷载 SL 变化作用下试桩的响应,方案 2 和方案 3 是为了比较分析试桩分别在仅受桩顶荷载 Q 作用(这也是理想的试桩状态)和试桩同时受到桩顶荷载和桩侧支墩荷载耦合作用(这是实际工程中的试桩状态)下的荷载沉降性状。相关模型建立、计算参数和模拟过程同上。

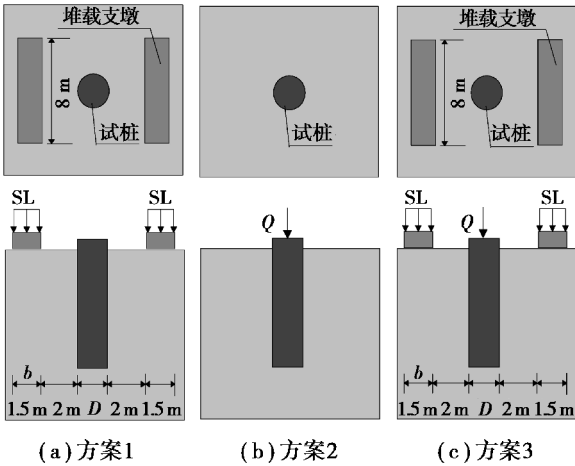


图 4 3 种计算方案图示
Fig. 4 Three calculation scheme

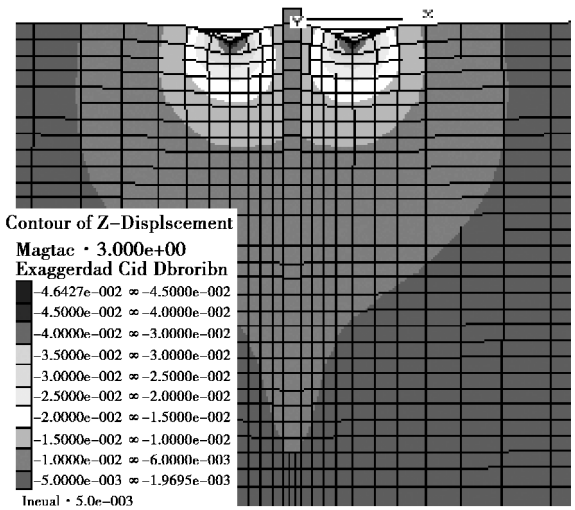
表 2 数值计算方案
Table 1 Numerical calculation scheme

| 编号 | 荷载工况 | 加载方式 | 目的 | 备注 |
|------|------------------------|---|---------------|---|
| 方案 1 | SL (仅支墩荷载) | 试验前 SL 一次施加 再分 11 级卸载和 6 级再加载 | 单独分析 SL 影响 | SLmax = 416 kPa SLmin = 97 kPa |
| 方案 2 | Q (仅作用桩顶荷载,理想试桩状态) | Q 按每级 0.7 MN 加载 加载至总沉降大于 120 mm | 比较分析理想试桩状态 | |
| 方案 3 | SL + Q (两者耦合作用,实际试桩状态) | SL 一次加载至沉降稳定后 Q 每级 0.7 MN 加载 同时伴有 SL 每级 29 kPa 卸载 | 和实际试桩状态的差别 | SLmax = 416 kPa SLmin = 97 kPa Qmax. = 7.7 MN |

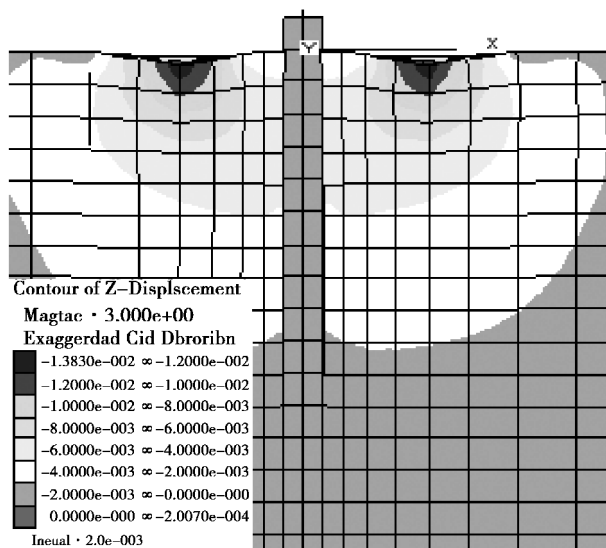
2.2 计算结果分析

2.2.1 支墩荷载作用下桩侧土体沉降与回弹

图 5 为静载试验中支墩荷载作用下的试桩和桩周土体竖向位移云图。由图中可以看出,在支墩荷载作用下,桩周土体相对桩身下沉明显。在最大堆载荷载(SL=416 kPa,对应于试验前 $Q=0$ MN 时支墩堆载)作用下的主要影响深度约为 6 倍支墩荷载宽度,即 $6b$ ($b=1.5$ m, b 为支墩荷载宽度)。当支墩荷载减小时,桩周土发生回弹,在最小堆载荷载(SL = 97 kPa, 对应于试验最大加载值 $Q = 7.7$ MN 时支墩堆载)作用下的主要影响深度约为 $3.3b$ 。桩土相对沉降量及其中性点位置可由桩土相对竖向位移图得出(如图 6)。



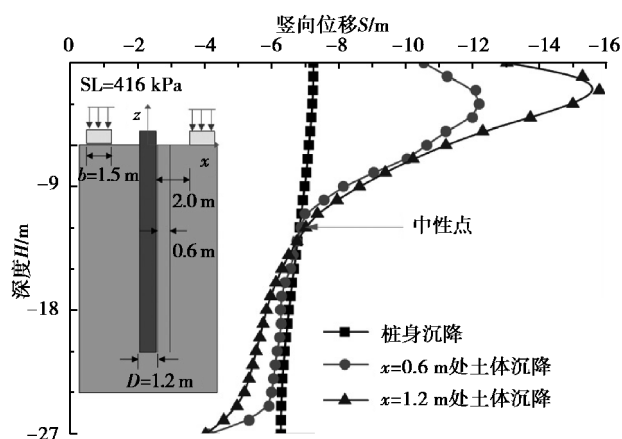
(a) 最大堆载荷载(SL=416 kPa)作用下土体位移



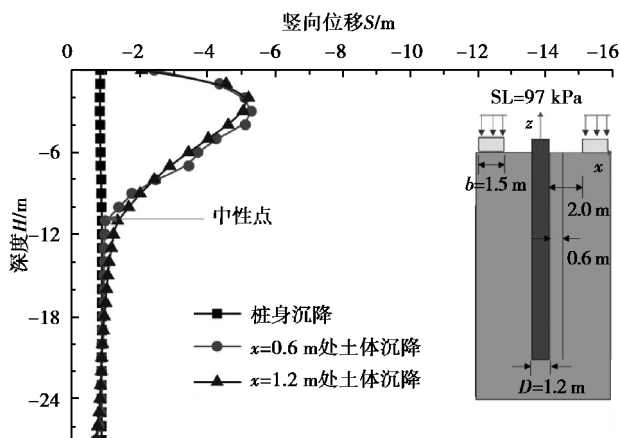
(b) 最小支墩堆载荷载(SL=97 kPa)作用下土体位移

图5 静载试验中支墩堆载荷载引起的土体变形与竖向位移云图

Fig. 5 Vertical displacement nephogram of soil around test pile caused by surface load in surcharge loading tests



(a) SL=416 kPa(对应 $Q=0$ MN)桩土沉降



(b) SL=97 kPa(对应 $Q=7.7$ MN)桩土沉降

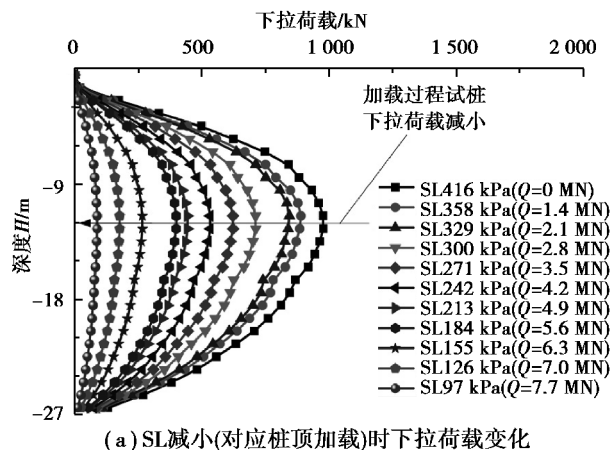
图6 静载试验中支墩荷载作用下的桩土沉降

Fig. 6 Pile-soil settlement caused by surface load in surcharge loading tests

图6为试桩在堆载荷载作用下桩身和桩周土体的相对沉降关系图。图中显示,在最大支墩堆载荷载作用下,桩土沉降较大且相对位移也较大,当支墩荷载减小至最小值时,桩周土回弹,相对位移随之减小,中性点位置发生改变(前者中性点位置在 $H=12$ m处,而后者中性点位置为 $H=11$ m),在中性点以上桩土相对沉降很大而在中性点之下土体沉降仅略小于桩的沉降。产生上述现象主要是因为土体在堆载支墩条形均布荷载作用下影响深度有限。研究表明^[10],土体在条形均布荷载作用下会产生“应力泡”,在深度为6倍荷载宽度处的竖向附加应力仅为该均布荷载的0.1倍(对应于本文为 $6b=9$ m、 $b=1.5$ m),其极限影响深度可认为是中性点位置所在深度(约12 m处)。由图5的竖向位移云图中也可以反映出这种“应力泡”的分布。在中性点以上,土体在荷载作用下相对桩身沉降而产生负摩阻力,进而使试桩受到下拽力(即下拉荷载,如图7)作用诱发沉降,而桩相对于土体可认为是一刚性体,其桩身压缩可忽略不计,可认为发生整体沉降,这就使得在桩沉降产生的剪应力圈作用下,带动桩周土体发生倒钟形沉降(如图5(a))。

2.2.2 支墩荷载作用引起的下拉荷载和桩顶位移

图7为堆载法静载试验中仅在支墩荷载作用下桩身受到的下拉荷载的变化图。图中显示,在支墩荷载作用下,桩周土体相对试桩沉降,进而对试桩产生较大的下拽力(即下拉荷载)作用,其分布呈“中间大,两端小”的分布规律,在中性点处,下拉荷载达到最大值,在中性点以下,桩身受到正摩阻力作用,下拉荷载减小;在随着支墩荷载的逐级减小(对应试桩桩顶加载),桩周土体回弹,下拉荷载随之减小(如图7(a)),反之,随着支墩荷载的逐级增加(对应试桩桩顶卸载),桩周土相对桩身下沉,下拉荷载增大(如图7(b))。



(a) SL减小(对应桩顶加载)时下拉荷载变化

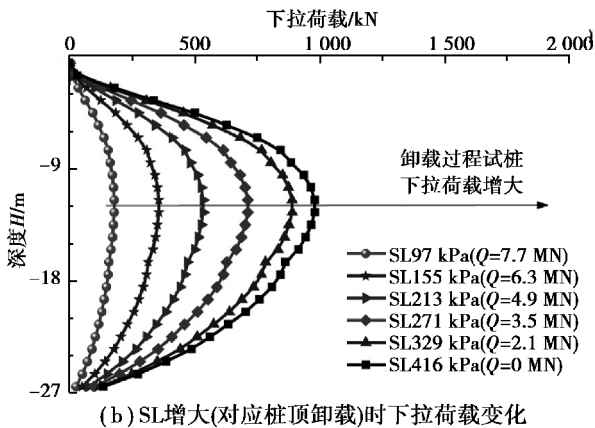


图7 静载试验中支墩荷载引起的下拉荷载变化分布图

Fig. 7 Drag load of test pile caused by surface load in surcharge loading tests

图8为桩基静载荷试验中支墩荷载作用下引起的桩顶竖向位移的变化图。由图中可以看出:

(1)在试验加载支墩荷载作用开始,至土体沉降稳定后,试桩产生约7.2 mm的附加沉降。这是因为在支墩荷载作用下桩周土相对桩身下沉,试桩受到下拽力作用所致。应该指出,在实际中,当桩周土体在荷载作用下沉降尚未稳定时,桩顶沉降小于该值,此外,此部分桩顶沉降在试验加载之前发生,对试桩沉降量测不会产生影响。

(2)当支墩荷载逐级减小(对应试桩逐级加载)时,试桩受到下拉荷载减小,桩顶竖向位移随桩周土体卸荷回弹而回弹,这会导致静载试验中受支墩荷载影响的桩顶沉降与仅受桩顶荷载作用的桩顶沉降相比偏小。

(3)当支墩荷载减小至最小值后再逐级加载(对应试桩加载至最大值后逐级卸载),试桩桩顶附加沉降增加,这就使得堆载法静载试验中试桩的实际回弹量偏小。

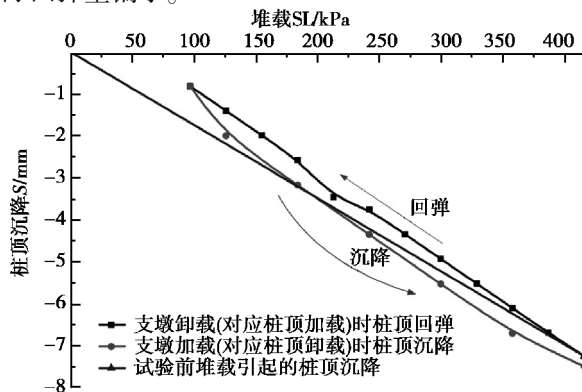


图8 桩顶竖向位移随支墩荷载变化

Fig. 8 Pile head vertical settlement caused by surface load in surcharge loading tests

2.2.3 支墩荷载作用下桩侧土附加土压力变化

图9为试桩仅在支墩荷载作用下荷载变化引起的桩侧附加水平土压力的变化图。由图中可以看出,支墩荷载引起的附加水平土压力极限影响深度约为8倍支墩荷载宽度(即 $8b$),这也与前述的支墩条形均布荷载引起的地基沉降变形极限影响深度相对应。随着堆载荷载的减小,附加水平土压力也随之减小,且影响深度也减小。附加水平土压力在约1~2倍荷载宽度处达到峰值,而在 $8b$ ($8b=12$ m)处几乎减小到0 kPa,这主要与地基附加应力“应力泡”的分布有关。

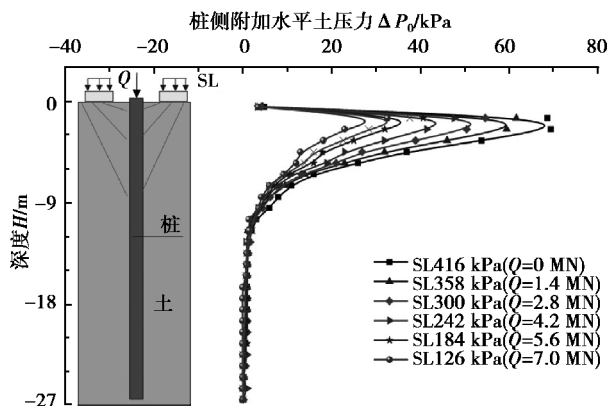


图9 堆载法静载试验支墩荷载引起桩侧附加水平土压力

Fig. 9 Additional horizontal earth pressure of pile caused by surface load in static loading test

2.2.4 支墩荷载对试桩轴力的影响

图10为加载过程中试桩仅受桩顶荷载作用(理想状态试桩)和同时受桩顶荷载与桩侧支墩荷载耦合作用(实际试桩状态)的轴力对比图。图中 Q 表示仅有桩顶荷载作用(即理想试桩状态方案2), $Q+SL$ 表示同时有桩顶荷载和支墩荷载耦合作用(即实际试桩状态方案3)。由图中可以看出,在初始加载时,方案3试桩桩身轴力明显比方案2试桩轴力要大,随着加载的进行,两者轴力之差逐渐减小,当加载到最大试验荷载7.7 MN时,两者轴力基本相同。这是因为方案3试桩在试验加载之前,桩侧土体受大吨位支墩荷载作用而产生相对桩身沉降,这就在试桩桩侧产生负摩阻力而使桩身提前受荷,此时试桩下拉荷载也最大;随着桩顶荷载增加,试桩沉降并带动桩周土体沉降,同时,桩侧支墩荷载减小,桩侧土体部分回弹,下拉荷载减小,正是这两者的复杂的相互作用,使得两种情况下试桩桩身轴力之差减小,并在最大试验荷载时两者轴力趋于一致。

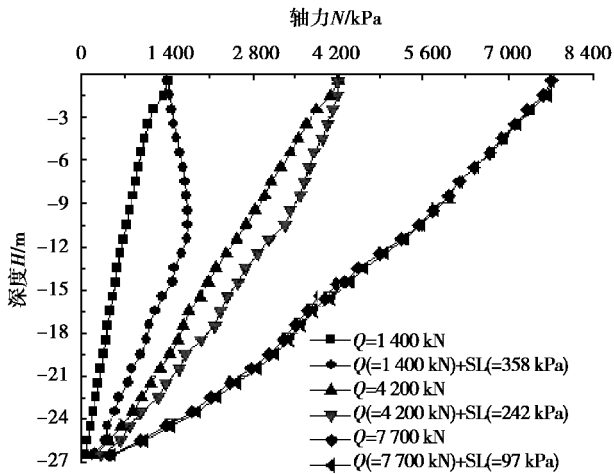


图10 两种情况下的桩身轴力对比

Fig. 10 Axial force comparison of test pile in two cases

2.2.5 支墩荷载对试桩承载沉降性状影响

图11为不同加载情况下桩的荷载-沉降曲线图。比较图中试桩仅受桩顶荷载 Q 作用(理想试桩状态)和在桩顶荷载 Q 与支墩荷载 SL 耦合作用(实际试桩状态)下的荷载沉降曲线变化趋势,显示在相同的桩顶荷载作用下,前者的桩顶沉降大于后者,且随着荷载增加两曲线的沉降差先增大、后减小,并维持一定的沉降差。当取桩顶沉降 $S=5\% D$ 时,对应的荷载为试桩的极限荷载可知,受支墩荷载影响的试桩的极限承载力为11.4 MN,略高于其实际的极限承载力11.2 MN,承载力提高1.8%。究其原因,主要是由于试桩桩侧土受桩侧支墩堆载作用下土体的压密和土体水平土压力增大引起桩侧摩阻力增加所致。吴文等^[4]的静载荷试验结果也说明了这种现象。但由于支墩荷载宽度小($b=1.5$ m),荷载影响深度有限(极限影响深度约为 $8b=12$ m),且其影响大小随着深度增加减弱,同时,

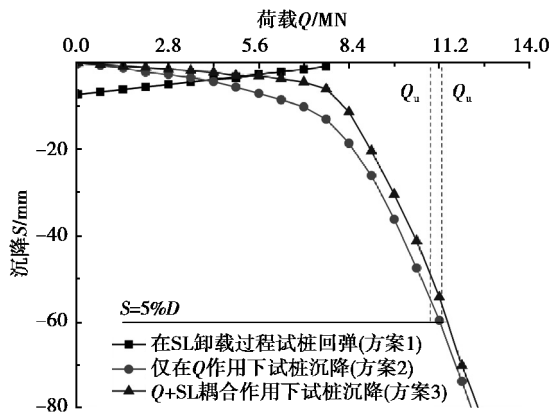


图11 荷载沉降曲线

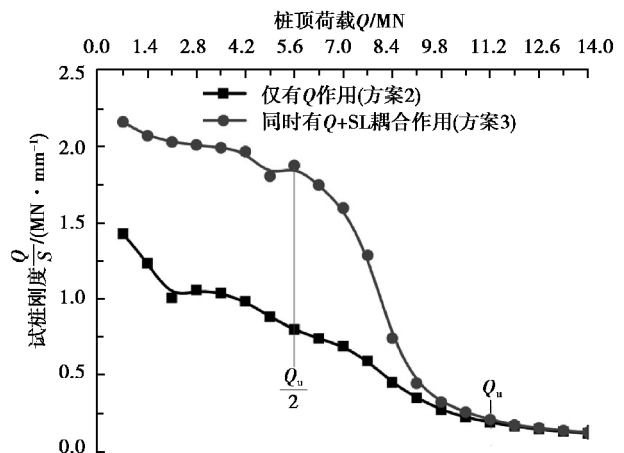
Fig. 11 Load-settlement curves

在试桩加载过程中由于支墩荷载减小,土体的附加水平土压力也随之减小,故对试桩极限承载力提高不明显。

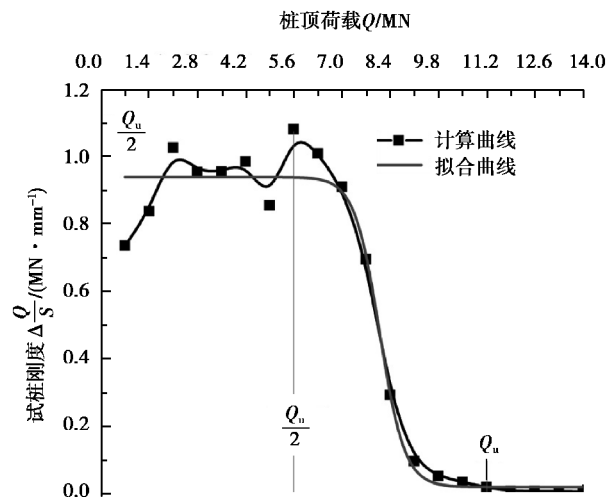
由于桩基实际的工作荷载一般要小于其极限荷载,舒翔等^[11]认为研究桩的割线刚度更有实际意义。图12(a)为两种情况下试桩割线刚度随荷载的变化规律。图中显示:

(1) 试桩刚度变化规律随着荷载增加而减小;

(2) 同时有桩顶荷载和桩侧支墩荷载耦合作用下,试桩的刚度明显较仅有桩顶荷载作用的试桩刚度要大,即堆载法静载试验夸大了试桩的刚度,这是因为桩侧支墩荷载对土体的压密作用和引起桩侧附加水平土压力提高所致;但随着荷载的增加,两者的刚度趋于一致。



(a) 两种情况下试桩刚度变化规律



(b) 两种情况下试桩刚度之差变化规律

图12 两种情况下试桩刚度随加载变化规律

Fig. 12 Test pile stiffness changes with loading in the two cases

由图 12(b)两种情况下的刚度之差随桩顶荷载的变化趋势(拟合)曲线可以看出,在初始加载阶段,其刚度差较大,而后加载至约为试桩极限荷载的一半($Q_u/2$),其刚度差开始减小并趋于零。这是由于加载过程中,桩侧支墩荷载卸载,其附加水平土压力减小所致。由此知,堆载法静载试验对试桩刚度的影响规律是:在初始加载阶段,堆载法对试桩刚度的夸大作用显著,但加载到一定值后随着加载进行,这种夸大作用减弱,并趋于零(即不受影响),尤其是在接近极限荷载之后,其影响已经很小。

3 结论

基于实际工程中桩基大吨位堆载法静载试验背景,建立弹塑性数值模型,研究了试验过程中桩侧堆载对试桩的影响,得出以下结论:

(1)堆载法静载试验过程中,在试验加载前,桩侧支墩荷载会引起土体附加应力和沉降,其极限影响深度约为 8 倍支墩宽度。

(2)在试验加载前,桩侧支墩荷载会使试桩提前受荷而发生沉降;在试验加载时,桩侧支墩荷载减小,试桩发生一定的回弹而使得试桩的量测沉降量偏小。

(3)在加载初期,堆载法对试桩刚度有明显的夸大作用;随着加载至约为试桩极限荷载的一半(即 $Q_u/2$)后,其夸大作用开始明显减弱,在接近极限荷载时,其作用已不明显。

(4)堆载法静载试验高估了处于工作荷载作用下的试桩刚度,需引起重视。但堆载法对评估试桩极限承载力的影响不大,仍是测试单桩极限承载力的可靠途径。

参考文献(References)

- [1] Poulos H G. A theoretical examination of errors in measured settlements of test piles [A] // 17# Australia-New Zealand and Conference on Geomechanics [C]. Australia: 1975:174-178.
- [2] 袁从华,章光.大吨位堆载法对单桩承载力试验的影响[J]. 岩土力学, 1997, 18(1): 78-83. (Yuan Conghua, Zhuang Guang. Analyses of effects of high-tunage piling-up weights method on static load for bearing capacity of a single pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(1): 78-83. (in Chinese))
- [3] 洪鑫. 单桩静载荷试验的理论模拟及影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 176-183. (Hong Xin. Theoretical simulation and factors for static loading tests on a single pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 176-183. (in Chinese))
- [4] 吴文,徐松林,吕福庆,等. 大型堆载条件下桩土性状的试验研究[J]. 岩土力学, 1998, 19(3): 65-71. (Wu Wen, Xu Songlin, Lü Fuqing, et al. The test study of pile-soil behavior under high piling-up weights [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(3): 65-71. (in Chinese))
- [5] 王遇国,梅志荣,张季超.单桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 7-11. (Wang Yuguo, Mei Zhirong, Zhang Jichao. Experimental researches on bearing characteristics of a single pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 7-11. (in Chinese))
- [6] Comodromos E M, Papadopolou M C, Rentzeperis I K. Pile foundation analysis and design using experimental data and 3D numerical analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 819-836.
- [7] 杜家庆,杜守继,赵丹蕾,等. 竖向荷载下群桩-土-承台相互作用数值分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2414-2420. (Du Jiaqing, Du Shouyi, Zhao Danlei, et al. Numerical analysis of interaction of pile group-soil-raft under vertical load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2414-2420. (in Chinese))
- [8] Comodromos E M, Bareka S V. Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(3): 210-221.
- [9] 陈育民,徐鼎平. Flac/Flac3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (Chen Yumin, Xu Dingping. Fundamentals of Flac/Flac3d with engineering example [M]. Beijing: China Water Power Press, 2013. (in Chinese))
- [10] 龚晓南. 土力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (Gong Xiaonan. Soil Mechanics [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [11] 舒翔,黄雨,陈竹昌.单桩轴向刚度的非线性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(10): 1142-1146. (Shu Xiang, Huang Yu, Chen Zhuchang. Nonlinear analysis for the axial stiffness of single pile [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2001, 29(10): 1142-1146. (in Chinese))