中砂地层中单桩竖向静载模型试验及数值模拟研究

姚赵田¹² 韩光¹³ 陈耀春¹³ 王新国¹³ 王涵¹ 邓月¹ 1 中国地质大学 工程学院,岩土钻掘与防护教育部工程研究中心 2 中铁第四勘察设计院集团有限公司 3 中机三勘岩土工程有限公司

DOI:10.32629/bd.v3i10.2752

[摘 要] 在中砂中开展单桩竖向静载模型试验,研究了中砂地层中不同桩长和桩径下的单桩荷载-沉降关系(Q-S曲线)、桩身轴力和侧摩阻力的分布规律,揭示了中砂地层中单桩的承载特性。随后,利用ABAQUS对单桩静载模型试验进行了模拟分析。结果表明,试桩在桩顶处位移最大, 桩身位移沿深度逐渐减小,应力主要集中在桩身周围,数值模拟得到的Q-S曲线与试验得到的Q-S曲线较为一致,说明了模型的建立方法与参数 的选择是合理的,同时也进一步说明了模型试验装置和试验方法的正确性。

[关键词] 中砂; 单桩; 模型试验; 承载特性; ABAQUS

引言

桩基础由于其承载力高、地层适应性好、经济效益突出等优点而在工 程建设中得到了广泛应用。随着我国经济的快速发展,越来越多的建筑建造 于中砂、粉砂等地层中,研究中砂地层中单桩的沉降特性以及桩身轴力和侧 摩阻力的分布规律具有十分重要的工程意义。其中室内模型试验是研究单 桩承载特性的重要手段,关于砂土地层中的单桩静载模型实验,前人展开了 大量的研究。王浩等[1]通过模型试验及颗粒流程序数值模拟,对砂土中桩端 阻力随位移发挥的内在机理进行了研究。周健等[2]考虑了不同桩径、不同土 体密实度等影响因素,研究了砂土地层中的单桩沉降模式、桩侧摩阻力和桩 端阻力的发挥性状及随沉降的发展模式,并通过拍摄跟踪和图像处理技术, 研究了桩端和桩侧土体的孔隙率的变化规律。金明等[3]在中砂中对长细比分 别为40、50、60的 3根超长单桩进行了室内模型试验,对单桩荷载沉降关系、 轴力以及桩侧摩阻力的荷载传递机理等进行研究,揭示了超长桩的承载特 性。李希楷等[4]通过室内模型试验,研究了粉砂地层中超长桩的荷载-沉降 (Q-S)关系、桩身轴力、桩侧摩阻力、桩身压缩、桩端阻力、桩土相对位移 等承载性状及荷载传递规律。结果表明,粉砂地层中超长桩的Q-S曲线为缓 降型, 与端承摩擦桩的Q-S曲线相似。随桩顶荷载的增加, 桩侧摩阻力沿桩身 分布逐步由一个峰值转变为两个峰值。秦月等[5]、单华刚[6]、江浩[7]、陈杨 等^[8]开展了室内钙质砂单桩模型试验,探究钙质砂地基中单桩在不同受力方 向下的承载性状,进而剖析钙质砂中桩-土相互作用机制。

综上所述,关于中砂地层中的单桩静载模型实验,前人的研究较少。基 于此,在中砂地层中开展了单桩竖向静载模型试验,得到不同桩长和桩径 试桩的荷载沉降曲线即Q-S曲线,通过进一步分析得到试桩的极限承载力。 对桩身应变等相关数据进行整理分析得到不同桩长和桩径试桩的桩身轴 力,桩侧摩阻力随深度的变化曲线,研究桩侧摩阻力和端阻力的分布规律, 分析不同桩身设计参数对试桩承载特性的影响。并利用利用ABAQUS对单桩 静载模型试验进行了模拟分析,进一步探讨了中砂地层中单桩的桩-土相 互作用机制。

1 试验概况

1.1试验装置

本次试验所用的模型箱为高1.2米、直径0.8米的钢桶,钢桶由钢板和 型钢焊接而成,加载架采用自制的伞状加载架,模型桩埋置于模型箱中部, 桩身内壁粘贴有应变片用于测量桩身应变,模型桩的下部埋设有土压力盒 用于测量桩端阻力。为了实现对模型桩的精确加载,试验选用伺服电动缸 作为加载装置,其加载极限为20kN,速度为0-50mm/s,有效行程为80cm,伺 服电动缸的前端装有压力传感器用于测量实际加载到桩顶的荷载量,试验 装置实物图如图1所示:



图1 试验装置实物图

1.2试验砂样

本次试验所用土样为湖北武汉标准砂,试验所用砂土的粒径均小于 10mm,其中粒径大于0.25mm的颗粒质量占全重为79%,根据砂土分类标准, 试验选用的砂土为中砂,土的颗粒级配如图2所示。砂土颗粒的相对密实度 为0.55,土的天然密度为1.67,最大干密度为1.69,最小干密度为1.37,天 然干密度为1.55,土体比重为2.68,土体不均匀系数为3.13,曲率系数为 0.87。模型桩预埋于砂土中,之后填入砂土并进行分层垒实,土体垒实后静 置24h。



图2 砂土的颗粒级配示意图

1.3应变片的粘贴

试验所用电阻应变片的型号为SZ120-5AA,电阻值为120±0.2% Ω, 灵敏系数为2.11±0.52%。为了更好地保护电阻应变片,试验在桩身内壁粘 贴应变片,同时为了对收集到的结果进行对比校正,每间隔10cm在桩身内 部对称粘贴一组应变片,在距离模型桩顶部5cm处设置有一对圆孔用于导 线的引出,模型桩应变片布置示意图如图3所示:

Building Developments



图3 模型桩应变片布置示意图

1.4模型桩的制作

试验选用6061T6无缝铝合金管作为模型桩,其弹性模量为68.9GPa, 泊松 比为0.33,试验共设置二个对照组试验,第一个对照组为不同桩径(分比为 3cm、3.5cm、4.0cm),相同桩长(均为80cm)和土层条件下的单桩竖向加载试验, 第二个对照组为不同桩长(分别为70cm、80cm、90cm),相同桩径(均为3.5cm) 和土层条件下的单桩竖向加载试验,模型桩壁厚均为2nm。利用激光将模型桩 沿中线线切割成两个半桩,再分别在两个半桩的内壁粘贴电阻应变片,最后用 螺栓再次闭合形成完整的试桩。模型桩制作完毕后,为使桩壁达到一定的粗糙 程度,在所有试桩表面用环氧树脂粘一层薄砂,模型桩的实物图如下图所示:





a. 半桩贴应变片示意图

b. 模型桩制作完成后实物图 图4 模型桩实物图

1.5加载方案

试验采用慢速维持加载法,每级加载15min后,分别进行桩顶位移读 取、土压力盒桩底反力读取、应变片桩身轴力等的记录。试验每级加载的 增量为0.2kN,当每小时的位移量小于0.1mm时便施加下一级荷载,当在某 级荷载作用下,桩的沉降量为前一级荷载作用下沉降量的5倍或者达到试 验设计要求的最大的加载量即可终止加载。

2 试验结果分析

2.1荷载-沉降曲线分析



根据荷载及所测得桩顶沉降量结果, 汇总了各试桩的Q-S曲线, 如图5 和图6所示。从图中可以看出试桩的Q-S曲线大致都呈陡降型, 加载初期Q-S 曲线较为平缓, 沉降主要是由于桩身压缩产生的, 当荷载增加到一定数值 以后, 曲线出现明显的拐点, 该点即为单桩的极限承载力。



图6 砂土中不同桩径相同桩长(桩长均为80cm)试桩Q-S曲线 从图5可以看出,在荷载相同时,试桩的桩长越长其桩顶沉降越小,桩 基的承载性能越好。桩长70cm、80cm、90cm的试桩的极限承载力分别为 1.82kN, 2.23kN, 3.01kN,说明了在一定范围内试桩的桩长越长其极限承载 力越高。从图6可以看出在荷载相同时,试桩的桩径越大其桩顶沉降越小, 桩基的承载性能越好。桩径3cm、3.5cm、4cm的试桩的极限承载力分别为 2.02kN, 2.23kN, 2.62kN,说明了在一定范围内试桩的桩径越大其极限承载 力越高。

2.2桩身轴力分析

对桩身应变等数据进行分析处理后得到了各个试桩的桩身轴力的分 布曲线图,如图7-图9所示:





Copyright © This word is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.



图9 桩长90cm桩径3.5cm试桩轴力分布图

从上图中可以看出,试桩的轴力随荷载的增加而增加,桩身轴力分 布趋势基本一致,桩顶处轴力值最大,轴力随深度逐渐减小,在桩顶处荷 载减小的速率较小,可能是桩顶处土体较为松散桩侧摩阻力没有充分发 挥,在桩端处减小到最小值,桩侧摩阻力得到了充分的发挥。随着深度的 增加轴力衰减速率加快,表明随着深度的增加侧摩阻力开始逐渐发挥。 由图7和图8可以看出在桩长相同时,试桩的桩径越大其轴力值越大,而 且轴力减小的速率越快,表面其侧摩阻力发挥更明显。由图8和图9可以 看出在桩径相同时,试桩的桩长越长其轴力值越大,轴力减小的速率越 快,表面其侧摩阻力发挥更明显,说明了在一定范围内增大桩长和桩径 可以提高侧摩阻力的发挥。

2.3桩身侧摩阻力分析

对桩身轴力等数据进行分析处理后得到了各个试桩的桩身侧摩阻力 的分布曲线图,如图10-图12所示:



第3卷◆第10期◆版本 1.0◆2019年10月 文章类型:论文|刊号(ISSN): 2425-0082



图12 桩长90 cm桩径3.5 cm试桩侧摩阻力分布图

从图10-图12可以看出,试桩的侧摩阻力随着荷载的增加而增加,在不 同竖向荷载下,其桩身侧摩阻力分布趋势基本一致,侧摩阻力随深度先增 加后减小,在桩顶处荷载减小的速率较小,可能是桩顶处土体较为松散桩 侧摩阻力没有充分发挥,在桩身中部处其侧摩阻力达到最大值,在此处侧 摩阻力得到了充分的发挥,在达到最大值之后,侧摩阻力开始减小,侧摩阻 力出现软化效应。由图10和图11可以看出在相同桩长情况下,试桩的桩径 越大其侧摩阻力值越大,由图11和图12可以看出在相同桩径情况下,试桩 的桩长越长其侧摩阻力值越大,说明了在一定范围内增大桩长和桩径可以 有效地提高侧摩阻力的发挥从而提高桩基的承载性能。

3 单桩静载过程中的数值模拟

3.1模型的建立

本次模拟以砂土单桩静载试验中桩长80cm桩径4cm的试桩为例进行模 机分析,模拟采用三维轴对称有限元模型,利用对称原理取1/2模型,桩长和 桩径与实际尺寸相同。桩体采用线弹性模型,桩的弹性模量为68.9GPa,泊松 比为0.33,土体采用摩尔库伦模型,砂土的密度为1670kg/m³,弹性模量为 15MPa,泊松比为0.30,利用罚函数来模拟桩土接触面的相互作用,摩擦系数 取0.3,选用表格型幅值曲线来模拟实际加载。为了减小边界对数值模拟的 干扰,模型径向区域取20倍桩径范围,深度方向取3倍桩径范围,土中预留好 与桩尺寸相同的圆孔,桩和土的模型建立完成之后再组装起来。模型建立完 成之后需要对其进行网格划分,本模型的桩、土均采用线性六面体网格,采 用结构网格划分技术,单元类型为C3D8R,划分网格后的模型如图13所示:



图13 模型网格划分示意图

3.2定义分析步和输出

本模型由三个分析步构成,分别为初始的通用静力学分析步,地应力 平衡分析步,荷载计算分析步。

3.2.1初始的通用静力学分析步。这里采用系统默认的静力学分析步, 该分析步贯穿整个有限元模拟。

3.2.2地应力平衡步。首先设置土体的自重应力场为初始应力场,之后 通过反复导入外部文件导入各个高斯点的应力值来进行地应力平衡,具体 命令为: *initial conditions, type=stress, input=stress, 地应力平衡

Copyright © This word is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

完成后的示意图如图14所示:

3.2.3荷载计算分析步。本次模拟所施加的荷载与模型试验所施加的 荷载相同,把荷载除以桩顶的受力面积换算为压强,之后将压强以表格幅 值型的形式施加到模型上。



创建作业并利用ABAQUS进行了分析计算,得到了1942kPa荷载作用下 试桩的应力分布云图和沉降云图,如图15和图16所示。由图15可以看出, 在1942kPa荷载作用下试桩在桩顶处位移最大,桩身位移沿深度逐渐减小, 桩身外围距离桩身越近其位移越大,这可能荷载逐渐向外扩散的结果。由 图16可以看出,模型的应力主要集中在桩身周围,在桩顶处其应力达到最 大值,桩身的应力随着深度逐渐减小。

将有限元计算出来的荷载沉降曲线与模型试验得到的结果进行对比, 得到了模型桩的沉降对比图,如图17所示,从图中可以看出数值模拟得到 的Q-S曲线与试验得到的Q-S曲线较为一致,说明了模型的建立方法与参数 的选择是合理的,验证了数值模拟的可行性,同时也进一步说明了模型试 验装置和试验方法的正确性。

4 结论

4.1中砂地层中试桩的Q-S曲线大致都呈陡降型,加载初期Q-S曲线较为平缓,沉降主要是由于桩身压缩产生的,当荷载增加到一定数值以后,曲 线出现明显的拐点,在同级荷载下试桩的桩长越长、桩径越大其桩顶沉降 越小,桩基的承载性能越好,在一定范围内提高桩长和桩径可以提高桩基 的极限承载能力。

4. 2中砂地层中试桩桩身轴力分布趋势基本一致, 桩顶处轴力值最大, 轴力随深度逐渐减小, 在桩顶处荷载减小的速率较小, 在一定范围内桩长 和桩径越大试桩的轴力值越大, 其轴力减小的速率越快, 侧摩阻力发挥越 明显。桩侧摩阻力沿深度方向上先增大再减小, 在桩身中部处其侧摩阻力 达到最大值。当桩长相同时, 试桩的桩径越大其极限侧摩阻力值越大。当 桩径相同时, 试桩的桩长越长其极限侧摩阻力值越大, 说明了在一定情况 下增大桩长和桩径可以提高桩基的极限侧摩阻力。

4.3中砂地层中试桩在桩顶处位移最大,桩身位移沿深度逐渐减小,桩 身外围距离桩身越近其位移越大,应力主要集中在桩身周围,在桩顶处其 应力达到最大值,桩身的应力随着深度逐渐减小。

4.4利用ABAQUS得到的Q-S曲线与试验得到的Q-S曲线较为一致,说明 了模型的建立方法与参数的选择是合理的,验证了数值模拟的可行性,同时也进一步说明了模型试验装置和试验方法的正确性。

[参考文献]

[1]王浩,周健,邓志辉.砂土中桩端阻力随位移发挥的内在机理研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(5):587-593.

[2]周健,郭建军,张昭,等.砂土中单桩静载室内模型试验及颗粒流数值 模拟[J].岩土力学,2010,31(6):1763-1768.

[3]金明,龚维明,葛建光.砂土中超长桩承载性能试验[J].建筑结构,2011,41(1):114-117.

[4]李希锴,李永辉,陈陆杰.粉砂地层中超长桩承载特性室内模型试验研究[J].混凝土与水泥制品,2019,(4):33-37.

[5]秦月,孟庆山,汪稔,等.钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(6):1714-1720.

[6]单华刚.珊瑚礁钙质土中桩基工程承载性状研究[J].岩石力学与工 程学报,2000,19(5):76.

[7]江浩.钙质砂中桩基工程承载性状研究[D].武汉:中国科学院研究 生院(武汉岩土力学研究所),2009.

[8]陈杨,杨敏,魏厚振,等.钙质砂中单桩轴向抗拔模型试验研究[J].岩 土力学,2018,39(8):142-148.

通讯作者:

韩光(1986-),男,汉族,河南商丘人,工程师,硕士,主要从事桩基工 程、岩土工程勘察方面的研究。

基金项目:

国家自然科学基金项目(No.51678547, 51878634),中铁第四勘察 设计院集团有限公司校企合作项目(2017K003-1),广西防灾减灾与工 程安全重点实验室开放基金(2016ZDK015)。

Copyright © This word is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.