

黏性土中考虑成孔卸荷的灌注桩侧摩阻力研究

谭海洲

(广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 钻孔灌注桩由于机械类型、钻头直径、成孔时间、泥浆性能、土层特性等的不同,使得成孔时间和孔壁形状各不相同,造成成桩后的钻孔灌注桩桩侧极限摩阻力具有一定的不确定性。该文通过建立黏性土中灌注桩侧摩阻力计算模型,依据荷载传递微分方程推算桩体系荷载传递函数,将理论解与模型试验结果对比,研究成孔相关参数对黏性土中钻孔灌注桩承载性能的影响。

关键词: 黏性土; 荷载传递; 灌注桩; 泥浆重度; 泥皮厚度; 桩土界面粗糙度

随着经济的快速发展,中国的高速公路等基础设施建设投入不断加大,桩基工程得到了广泛应用。其中钻孔灌注桩以其施工无挤土、环境噪音小、对地层适应性强及承载力高等优点,在江海大桥、城市高架道路、高等级公路等项目中得到广泛的应用。目前,中国钻孔灌注桩最大直径超过4 m,最大深度超过100 m,每年用量达到100万根以上。然而,由于工程地质条件的复杂性与多样性,高速公路基桩,特别是灌注桩的承载特性研究及其沉降的有效控制技术远落后于工程实践的需要,如何保证灌注桩安全、高效地发挥其承载及减沉性能仍然是桩基工程中的热点与难点问题。

灌注桩施工的现场作业多,影响成桩质量的设备及人为因素较多,质量不够稳定。有时会发生缩颈、断桩、桩身局部夹泥、桩身混凝土离析、桩顶混凝土疏松、混凝土强度较难保证等质量事故;桩侧摩阻力和桩端阻力的发挥常随设备、工艺变化而变化,且又在较大程度上受施工操作影响。

受机械类型、钻头直径、成孔时间、泥浆性能、土层特性等的影响,钻孔灌注桩成孔时间和孔壁形状各不相同,造成成桩后的桩侧极限摩阻力具有一定的不确

定性。目前工程上广泛采用的是以经验方法为主,辅以检测桩试验数据分析,确定桩侧极限摩阻力的大小,但得到的结果往往存在误差。对于灌注桩桩侧极限摩阻力的确定,目前仍处于探索阶段。

综上所述,影响钻孔灌注桩承载力的因素及其沉降控制远比想象复杂。已有众多学者注意到这个问题,对此进行了探讨,赵春风对成孔卸载后灌注桩竖向承载机理进行了研究;潘林有等对卸荷状态下黏性土强度特性进行了试验研究,但都未对黏性土中考虑成孔卸荷的灌注桩承载特性影响因素进行研究。随着钻孔灌注桩的大量使用,有必要对黏性土中钻孔灌注桩承载力特性及其沉降控制关键技术进行研究。

1 依托工程

广东省潮惠高速公路所经过地段软土地基比重较大,路线设置桥梁较多。例如:A1合同段起点位于潮州市潮安县古巷镇横溪西侧,连接规划的漳州至玉林高速公路潮州段,路线经潮州市的潮安县、揭阳市以及汕头市的潮阳区,终点位于揭阳市揭西县灰寨镇连接

- *****
- [3] 崔维久,刘俊岩,刘燕.特殊工况下地铁基坑多支撑荷载响应研究[J].岩土工程学报,2012(S1).
- [4] 郭利娜,胡斌,李方成,等.武汉地铁深基坑围护结构钢支撑轴力研究[J].地下空间与工程学报,2013(6).
- [5] 熊栋栋,杨钊,廖正根.地铁深基坑钢支撑预加轴力分析[J].地下空间与工程学报,2018(4).

- [6] 孙九春,白廷辉.地铁基坑钢支撑轴力伺服系统设置方式研究[J].地下空间与工程学报,2019(S1).
- [7] GB 50911—2013 城市轨道交通工程监测技术规范[S].
- [8] 吴小涛,周文,袁丽佳,等.地下连续墙深基坑支护结构中钢支撑性能研究[J].广西大学学报(自然科学版),2015(1).

收稿日期:2020-11-04

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(编号:2012-01-001-04)

作者简介:谭海洲,男,硕士工程师.

A2 合同段。A1 合同段推荐方案起点桩号 K0+000, 终点桩号 K76+863.015, 路线全长 76.851 km。此外, 共设连接线 3 条, 其中潮州连接线、厦深铁路潮汕站连接线及支线为一级公路连接线, 潮州连接线长 2.981 km, 其支线长 0.936 km; 厦深铁路潮汕站连接线长 5.989 km; 谷饶连接线为利用旧路改造的二级公路连接线, 路线长 9.675 km。主线全线设特大桥、大桥 35 352 m/40 座, 中、小桥 1 288 m/21 座, 隧道 2 991.5 m/3 座, 互通立交 9 处; 桥梁占路线总长的比例为 47.7%, 隧道比例为 3.9%, 桥隧比例为 51.6%。桥梁基础几乎全部采用灌注桩。

2 桩荷载传递函数的建立

2.1 荷载传递微分方程的建立

Seed 和 Colye 提出的荷载传递法中将桩体划分为数个弹性单元体, 每一单元体与土体之间均用非线性弹簧联系, 其桩侧和桩端应力—应变关系分别采用桩侧荷载传递函数和桩端荷载传递函数表示。

如图 1 所示, 取单元体 dz 为分析对象, 建立竖向平衡方程:

$$\tau(z)Udz + Q(z) + dQ(z) = Q(z) \quad (1)$$

$$\text{即: } \tau(z) = -\frac{1}{U} \cdot \frac{dQ(z)}{dz} \quad (2)$$

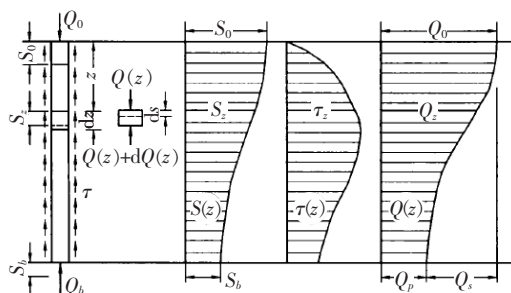


图1 桩土体系荷载传递

单元体的弹性压缩量 $dS(z)$ 为:

$$dS(z) = -\frac{Q(z)}{A_p \cdot E_p} dz \quad (3)$$

式中: A_p 为桩身截面面积; E_p 为桩身弹性模量。

式(3)变换得:

$$\frac{dS(z)}{dz} = -\frac{Q(z)}{A_p \cdot E_p}, \text{该式对 } z \text{ 求导后得到:}$$

$$\frac{dS^2(z)}{dz^2} = -\frac{1}{A_p \cdot E_p} \cdot \frac{dQ(z)}{dz} \quad (4)$$

将式(2)略作变换后代入式(4), 得到桩—土荷载

传递的基本微分方程:

$$\frac{dS^2(z)}{dz^2} = -\frac{U \cdot \tau(z)}{A_p \cdot E_p} \quad (5)$$

边界条件为:

$$S(z) \big|_{z=0} = S_0 \quad (6)$$

$$A_p \cdot E_p \frac{dS}{dz} \bigg|_{z=0} = -P_0 \quad (7)$$

$$S(z) \big|_{z=l} = S_b \quad (8)$$

$$EA \frac{dS}{dz} \bigg|_{z=l} = P_b \quad (9)$$

式中: P_b 为桩端阻力; S_b 为桩端位移; P_0 为桩顶荷载; S_0 为桩顶沉降。

前面推导了桩土荷载传递过程的微分方程, 为准确反映大直径灌注桩的荷载传递规律, 需要确定合理的荷载传递函数。

2.2 桩侧荷载传递函数的确立

荷载传递法的关键在于荷载传递函数的确定, 目前确定荷载传递函数的方法主要有两种: ① 基于数据统计得到的经验公式; ② 从桩土界面荷载传递机理出发分析得到的理论公式。经验计算公式基于工程现场试桩数据得到, 可考虑到现场的实际场地地层和施工工艺条件, 具有很高的可信度, 但不便于进行机理分析。随着灌注桩的大量运用, 急需提出可考虑施工工艺、场地条件、桩体自身因素的理论公式。在实际情况下, 桩土界面荷载传递过程中在发生相对滑移的同时也会在桩周土中形成如图 2 所示的沉降漏斗, Kei-je Kuwajima 在砂土中进行模型桩试验得到的桩周土变形图如图 3 所示, 试验中所得的桩周土受荷影响区半径与模型桩径的比值 r_m/r_0 为 4.3~4.7。 r_m/r_0 的比例可通过单剪试验中的滑移比 S_{ratio} 来确定, 滑移比 S_{ratio} 的定义是界面相对位移占总剪切位移的比例, 具体如图 4 所示。

$$S_{ratio} = \frac{d_s}{d_t} = \frac{d_s}{d_s + d_d} \quad (10)$$

式中: d_s 、 d_t 和 d_d 如图 4 所示。 d_t 为总剪切位移; d_s 为界面相对位移; d_d 为土体内部剪切变化。

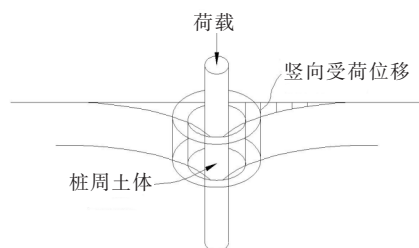


图2 竖向受荷下桩土体系沉降分布图

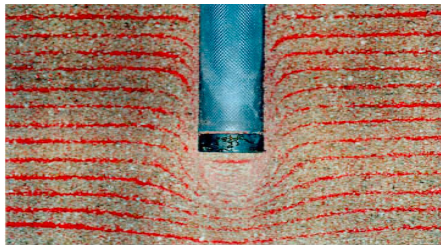


图 3 模型桩桩周土体变化图

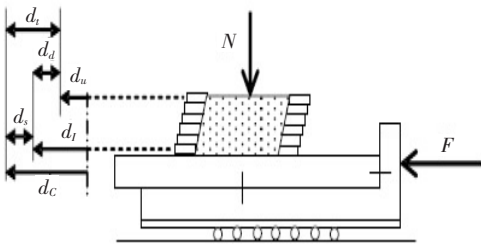


图 4 接触面单剪仪测定的滑移比示意图

Ressol 采用大型单剪仪对 5 个粗糙度等级的黏性土与混凝土板接触面进行试验发现,粗糙度对滑移比的影响没有明显规律。不考虑泥皮效应时的 5 个接触界面的平均滑移比为 0.75,考虑泥皮效应后滑移比下降到 0.38(斑脱土泥皮)或 0.45(聚合物泥皮)。实际情况下桩周土受荷影响区半径可调整为:

$$r_m = 2.5L\rho(1-\nu_s)(1-S_{ratio}) \tag{11}$$

式中: L 为桩长; ρ 为非均匀因素; ν_s 为土泊松比。

对于受荷单桩,桩土界面处的相对位移 S 与界面剪应力 τ_0 和桩周土体的剪切模量 G 有关:

$$S = \tau_0 r_0 \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{Gr} \cong \tau_0 r_0 \int_{r_0}^{r_m} \frac{dr}{Gr} \tag{12}$$

2.3 桩端荷载传递函数

目前桩端荷载传递函数常用的有抛物线形模型、指数形模型、理想弹塑性模型、三段线性模型。蒋建平发现桩端阻力随桩端位移的变化主要有 3 种类型:线弹性模型、双线性硬化模型和理想弹塑性模型。并认为理想弹塑性模型主要对应于桩端刺入破坏,而线弹性模型和双线性硬化模型对应于桩端整体剪切或局部剪切破坏。然而无论是弹塑性模型还是双线性硬化模型都必须确定临界塑性位移值,而这个取值范围很大。Hirayama 得出临界桩端位移为 16~31 倍桩径;而李富文得出为 15 倍桩径,姜立新得出的则大于 40 mm。相应这些值都要比桩侧阻力所需的极限位移大很多,桩端土荷载发挥不是该文研究的主要重点,所以该文桩端荷载传递函数采用最简单的线弹性模型:

$$q_b = k_b S_b \tag{13}$$

式中: q_b 为端阻力; S_b 为桩端位移; k_b 为桩端土抗力刚度系数;Randolph 建议由 Boussinesq 公式得出:

$$k_b = 4E_b / r_b (1-\nu) \tag{14}$$

式中: E_b 为桩端土弹性模量; r_b 为桩径; ν 为桩端土泊松比。

3 模型试验验证

依据潮惠高速公路项目工程现场勘察资料并结合室内试验条件,根据相似理论确定模型土相应土性指标理想值,通过大量试验摸索掌握各组分对人工土土性指标的影响,并据此不断调整配比使人工土相应指标趋于理想值。最终确定模型试验黏性土的配比方案如表 1 所示,基本土性参数见表 2。

表 1 人工土配料及配比

配料	各组分质量/g
黏性土	100.0
重晶石粉	34.0
滑石粉	50.0
工业洗衣粉	10.0
水	45.4

表 2 模型试验黏性土参数

密度 $\rho /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水量 $w /$ %	黏聚力 $c /$ kPa	内摩擦角 $\varphi /$ ($^\circ$)
1.90	23.40	2.20	21.18

模型土的装填、模型桩的设计、加载方案以及模型桩成桩过程同砂土中灌注桩的室内模型试验。

将黏性土中模型桩试验中的模型参数代入荷载传递法中计算,计算结果与试验结果对比如图 5 所示。模型桩桩土界面强度参数取为相应模型土参数的 80%,S1、S2、S3和S4模型桩的泥皮厚度分别为0.10、

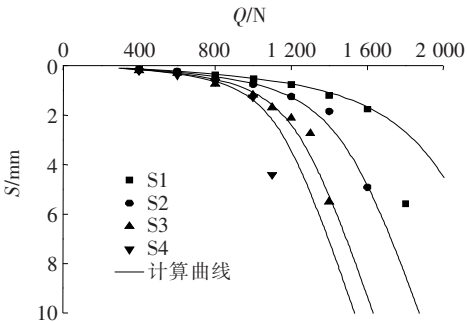


图 5 模型试验桩 $Q-S$ 数据与计算值对比

0.44、0.75 和 0.87 mm, 剪切带厚度为 1.5 mm。将 4 根桩的数据与计算曲线相对比, 发现除个别数据 (S1 和 S4 模型桩后半段) 有一定差异, 是由于桩端荷载传递函数采用线弹性模型所导致, 整体上计算曲线能真实反映模型桩竖向受荷过程。

4 影响因素分析

钻孔灌注桩在施工过程中, 由于要在桩位处钻孔, 从而使得土体侧向先要卸载, 成孔的时间越长, 孔壁受孔外侧土体侧向压力作用时间越长, 孔壁向内侧的变形也会越大; 其次, 钻孔灌注桩采用泥浆护壁, 实际上泥浆除了具有护壁功能外, 还具有排渣及清孔功能。就护壁功能而言, 泥浆与地基土形成泥皮, 泥皮一方面起到保护孔壁不坍塌的作用, 另一方面又起到泥浆与土层相互渗透的隔断作用。然而, 由于泥皮的存在, 势必导致桩的承载力与原土层的不同; 再者, 钻孔灌注桩在成孔阶段, 由于使用的成孔设备不同、或相同成孔设备在各土层中钻进速度不同, 均会造成成孔后的孔壁粗糙度不同, 而不同的孔壁粗糙度对桩的承载能力有着显著的影响, 因此, 该文主要从钻孔时泥浆重度 (成孔卸荷)、钻孔泥皮厚度及桩土界面粗糙度 3 个方面分析对桩承载特性的影响。

为了进行影响因素分析, 以下算例中的基本参数为: 桩长 40 m、桩径 1 m、桩弹性模量 30 GPa; 桩周土初始状态参数: $w_0 = 20\%$ 、 $c = 20$ kPa、 $\varphi = 19^\circ$ 、 $G = 30$ MPa; 饱和状态参数为: $w_{sat} = 27.32\%$ 、 $c_{sat} = 3.603$ kPa、 $\varphi_{sat} = 8.75^\circ$ 、 $G_{sat} = 20$ MPa。参照张广兴得出的结论, 泥皮内摩擦角取黏性土的 80%, 泥皮黏聚力取黏性土的 78%。

4.1 钻孔时泥浆重度 (成孔卸荷) 对桩承载特性的影响

灌注桩在钻孔施工过程中柱形土体被钻取, 为了防止孔壁坍塌和严重缩径, 采用泥浆护壁工艺, 而孔内泥浆一定程度上缓解了孔周土体的卸荷效应。但是考虑到钻进效率, 孔内泥浆重度不可能太大, 所以孔周土体不可避免会发生卸荷缩径。卸荷缩径中的塑性位移部分无法恢复, 所以在灌注混凝土过程中, 即便混凝土侧压大于土体静止土压力, 孔壁也还是有一部分塑性位移。基于此原因, 该文对成孔卸荷时不同泥浆重度的承载形状进行了分析。

为了单独分析成孔卸荷对灌注桩承载性状的影响, 在此不考虑泥皮的影响。成孔时不同泥浆重度对

应的灌注桩 (桩径 1 m) $Q-S$ 曲线如图 6 所示。

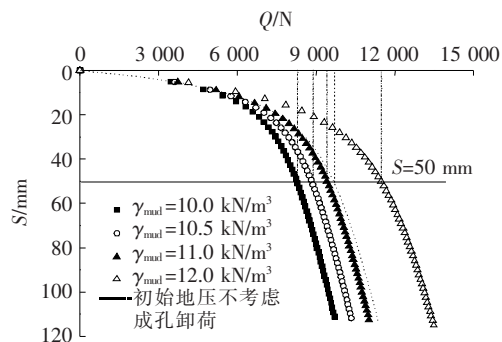


图 6 成孔时泥浆重度对桩 $Q-S$ 曲线的影响

由图 6 可知: 4 种泥浆重度对应的单桩 $Q-S$ 曲线基本走势相同, 沉降小于 20 mm 时荷载与沉降近似呈直线关系, 桩顶沉降为 20~60 mm 时呈曲线, 当桩顶沉降大于 60 mm 后荷载与沉降又近似呈直线, 桩顶沉降大于 60 mm 的直线具有一定斜率没有出现陡降主要是由于桩端荷载传递采用线弹性模型所至。由于无法精确从图中判读出单桩竖向极限荷载值, 所以根据 JGJ 106—2003《建筑桩基检测技术规范》中第 4.2.2 规定, 取桩顶沉降为 $0.05D$ (D 为桩径) 时对应的荷载值为单桩竖向极限承载力。从图中读取的成孔时泥浆重度为 10、10.5 和 11 kN/m^3 对应的单桩竖向极限承载力分别为 8 257.78、8 825.51 和 9 413.28 kN。而当泥浆重度增至 12 kN/m^3 时, 可知卸荷不太明显, 所以得出的单桩竖向极限承载力最大, 为 11 478.67 kN。采用静止土压力计算桩侧阻力的计算方法得到的 $Q-S$ 曲线为图 6 中虚线, 采用静止土压力计算桩侧阻力时得到的单桩竖向极限承载力为 9 655.69 kN, 比泥浆重度为 10、10.5 和 11 kN/m^3 时的单桩竖向极限承载力要大, 比泥浆重度为 12 kN/m^3 时要小。泥浆重度为 10、10.5、11、12 kN/m^3 时的单桩竖向极限承载力分别为以静止土压力计算桩侧阻力所得的荷载传递法的单桩竖向极限承载力的 85.52%、91.40%、97.49% 和 118.88%。

由于所编的荷载传递程序是由底向上进行荷载的传递, 该文分别选取桩端位移为 1、5、10、20、50 和 100 mm 时的桩轴力和桩侧阻摩阻力进行分析。当桩端位移为 1 mm 时, 桩端和桩侧位移都很小, 桩土界面摩擦处于弹性, 所以轴力沿桩身基本呈直线分布。而桩侧阻摩阻力则呈现出中间大两头小的非对称分布模型, 最大侧阻力位置在桩顶往下 10 m 左右。出现这种现象的原因主要是桩顶往下深度越大, 桩土界面接触应力相应增大, 对于不同泥浆重度的条件下, 只是增长的效

率不同而已,相应桩土界面的极限侧阻力也就越大,如图 7 所示,出现浅部的随深度增长段,但深度越大,相应桩土界面相对位移会越小,激发出的桩土界面摩擦阻力也就越小,综合这两个因素考虑,所以出现了下部桩阻力随深度减小或保持不变的分布情况。随着桩端位移的加大,桩侧阻力慢慢被激发出来,在浅部,由于极限侧阻力较小,而且由于桩自身压缩导致桩顶出现最大位移值,所以浅部桩土界面首先被激发并迅速达到极限值。而深部桩土界面处的桩侧阻力是逐步激发的,只有当桩端位移达到一定值后,桩侧阻力才全部激发出来。该文分析中取桩顶沉降为 $0.05D$ 时的桩顶荷载为单桩极限承载力,从桩侧阻力发挥曲线也可看出两种情况下的桩侧阻力差距很小,这也进一步验证了取桩顶位移为 $0.05D$ 对应的桩顶荷载为单桩极限承载力的正确性。在加荷后期(即桩端位移较大时),考虑成孔卸荷时的桩侧阻力分布在中上部有一个拐点,这主要是由于桩侧极限侧阻力沿深度的分布有一拐点,如图 7 所示。不考虑成孔卸荷时,桩端位移从 $1\sim 100$ mm 桩侧阻力分布都较圆滑,没有出现拐点。由图 7 可知:成孔时泥浆重度越小,桩侧阻力发挥越小,最终所能承受的桩顶荷载越小。

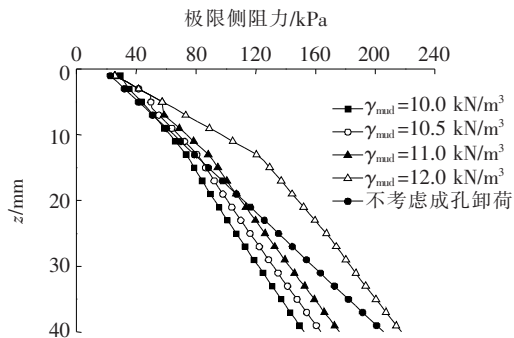


图 7 成孔时泥浆重度对桩极限侧阻的影响

4.2 钻孔泥皮厚度对桩承载特性的影响

在灌注桩施工过程中采用泥浆护壁,泥浆中水分在孔内外压差作用下向孔周土层渗滤。泥浆胶体中的微细固相颗粒凝聚于孔壁形成泥皮,这层泥皮压缩模量小、抗剪强度低。构成桩土荷载传递的薄弱层,大大削减了桩的竖向承载能力。李小勇发现泥皮使桩竖向承载力最大降低 50%;霍凤民发现泥皮过厚的钻孔桩侧阻力下降近 50%。因此,该文对不同泥皮厚度下桩承载特性进行分析。

为了分析泥皮厚度对单桩竖向承载特性的影响,该文以成孔泥浆重度为 11 kN/m^3 为例,改变泥皮厚度,通过程序得出 $Q-S$ 曲线、桩轴力和桩侧阻力分

布。图 8 为泥皮厚度对单桩荷载沉降曲线的影响,如前面分析,仍然取桩顶沉降为 $0.05D$ 时对应的荷载值为单桩竖向极限承载力。在不考虑泥皮时,单桩竖向极限承载力为 $9\,413.28\text{ kN}$,当桩土界面泥皮厚度分别为 $2、4、6、8$ 和 10 mm 时,单桩竖向极限承载力分别降低到 $8\,045.80、6\,886.66、5\,979.52、5\,336.07$ 和 $4\,990.63\text{ kN}$,分别为不考虑泥皮时单桩竖向极限承载力的 $85.47\%、73.16\%、63.52\%、56.69\%$ 和 53.02% 。可见泥皮对灌注桩的竖向承载特性的影响相当明显,应引起设计人员和施工单位的高度注意。

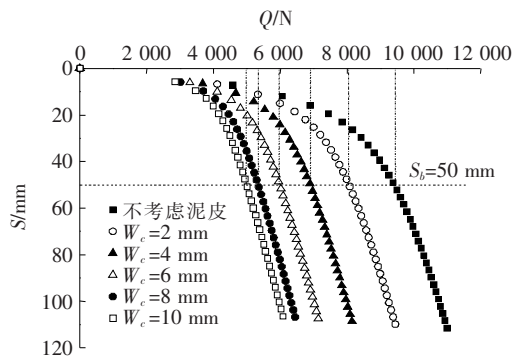


图 8 泥皮厚度对桩 $Q-S$ 曲线的影响

泥皮越厚,桩侧阻力越小。当桩端位移为 1 mm 和 5 mm 时,泥皮对桩身轴力和桩侧阻力的影响不是特别明显,随着桩端位移的加大,深部桩土界面摩阻力慢慢被激发,同时浅部桩土界面摩阻力进入极限状态,泥皮的影响显现出来,泥皮严重降低了桩侧阻力的发挥,这也可从桩端荷载分担比的角度进行分析,如图 9 所示,桩端位移相同条件下,泥皮越厚,桩端荷载分担比越大,取桩端位移为 50 mm 时的桩端荷载分担比作对比分析,不考虑泥皮时桩端荷载分担比为 9.20% ,泥皮厚度为 2 mm 时桩端荷载分担比为 10.80% ,而当泥皮增厚到 10 mm 时桩端荷载分担比增加到 17.56% 。需要注意的是由于桩端采用线弹性模型,所以图 9 显示的桩端荷载分担比并未出现陡变现象。

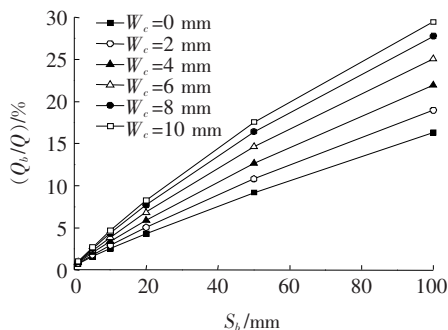


图 9 不同泥皮厚度对应桩端荷载分担比

不同泥皮厚度对应的桩身各种极限侧阻如图 10 所示,由图 10 可知:泥皮越厚,极限侧阻力值越小,但变化规律是非线性的。以桩端处极限侧阻力值为例(图 11),从不考虑泥皮到泥皮厚度为 2 mm,极限侧阻力值急剧减小,随着泥皮厚度的增大,极限侧阻力值随泥皮厚度的变化幅度越来越小。

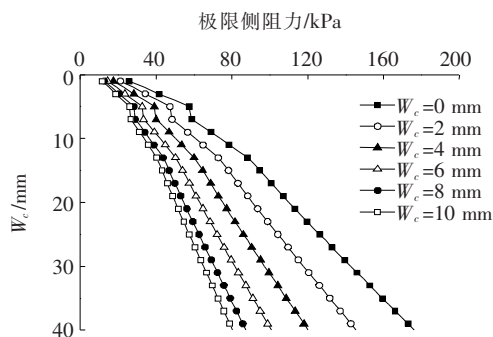


图 10 泥皮厚度对桩极限侧阻的影响

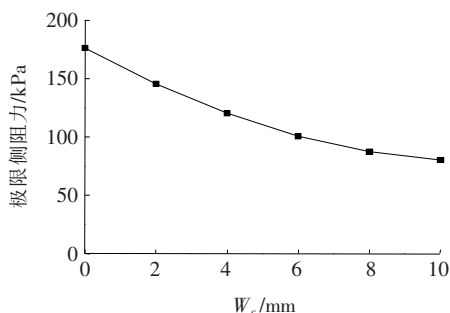


图 11 桩端处极限侧阻力随泥皮厚度的变化规律

4.3 桩土界面粗糙度对单桩承载特性的影响

与预制桩不同的是,灌注桩在成孔过程中由于钻具不可避免发生晃动会造成桩土界面粗糙不平。赵春风以某高架道路一期工程为依托,对近万根不同桩长、不同桩径的灌注桩及旋挖成孔灌注桩中典型试桩进行现场孔径测试,发现在同一工程、同一规格、同一持力层、同一测试方法的情况下,采用不同钻机和钻头,会形成不同粗糙度的桩土界面,单腰带钻头导向性能较差,对应的桩土界面类似于锯齿状,粗糙度较大。双腰带钻头导向性能相对较好,钻进平稳,容易保证钻孔的垂直度,形成的桩土界面相对光滑。通过大型结构面剪切试验发现,界面粗糙度越大对应的界面剪切强度越高。基于此原因,该文开展粗糙度对单桩承载特性的分析。

基于大型结构面剪切试验结果,采用如图 12 所示的规则界面,通过改变锯齿齿高来量化粗糙度,并建立了考虑粗糙度的桩侧荷载传递函数,得出的灌注桩荷载沉降曲线如图 13 所示(算例中成孔时泥浆重度为

11 kN/m³,没有考虑泥皮),桩土界面量化后的锯齿越高,相同桩顶沉降对应的竖向荷载值越大。

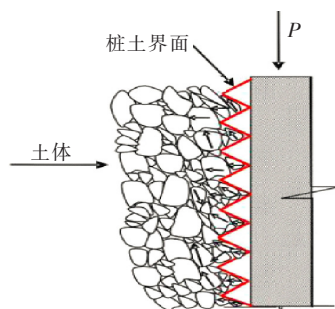


图 12 界面锯齿示意图

取桩顶沉降为 $0.05D$ 时的桩顶荷载值为单桩竖向极限承载力。当锯齿齿高为 0,即界面完全光滑时,从图 13 中读取的灌注桩单桩竖向承载力值为 9 413.28 kN,而当锯齿高 h 为 2、4、6、8 和 10 mm 时,对应的灌注桩单桩竖向承载力值分别为 9 794.65、10 169.80、10 556.46、10 906.56 和 11 238.94 kN。与界面完全光滑条件下的对应值相比,单桩竖向承载力值分别增加了 4.05%、8.04%、12.14%、15.86% 和 19.39%,可见界面粗糙度对桩竖向承载特性的发挥有利。

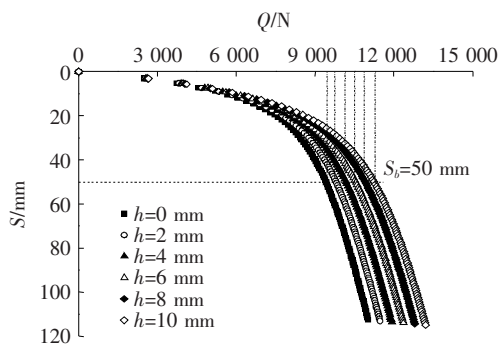


图 13 界面粗糙度对灌注桩 $Q-S$ 曲线的影响

桩土界面粗糙度主要是通过影响桩周侧阻力的分布来间接影响桩身轴力。加荷初期(桩端位移较小时),桩端位移为 1、5 和 10 mm 对应的桩身轴力和桩周侧阻力受桩土界面粗糙度影响很小,只有当桩土界面相对位移较大时,界面粗糙度对桩侧阻力的增大效应才得以体现。桩土界面越粗糙,桩侧极限侧阻力值越大(图 14),通过文献分析可知,桩侧极限侧阻力并不会随着界面粗糙度无限制的增长,当量化的锯齿齿角大于 45° 以后,桩土界面剪切破坏面发生在土体内部,粗糙度继续增加不会改变桩侧极限侧阻力。而实际工程中的灌注桩桩土界面经过量化后的锯齿齿角极

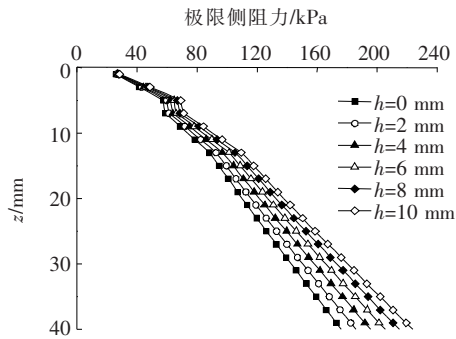


图 14 界面粗糙度对桩侧极限侧阻力的影响

少大于 45° 。

5 结论

基于提出的荷载传递函数对灌注桩承载性状进行分析,研究了灌注桩施工过程中泥浆重度、泥皮厚度、桩土界面粗糙度等因素对灌注桩竖向承载特性的影响,得出如下结论:

(1) 灌注桩成孔过程中,泥浆重度越小,卸荷效应越明显,缩径越严重,最终得到桩土界面径向应力也就越小,竖向承载过程中,桩侧所能提供的摩擦阻力也越小。规范中采用静止土压力计算桩极限侧阻与实际情况不相符,没有考虑到成孔卸荷效应,实际情况下的桩土界面径向应力大部分情况下比静止土压力要小,而在泥浆重度较大的情况下,桩土界面径向应力则大于原始土侧压。

(2) 成孔过程中桩土界面产生的泥皮影响了桩侧阻力的发挥,泥皮越厚,桩侧极限侧阻力越小,桩端情况相同时所能提供的单桩竖向承载力越小。当桩土界面泥皮厚度达 10 mm 时,单桩竖向承载力仅为不考虑泥皮时单桩竖向承载力的 53.02%。

(3) 与泥皮相比,灌注桩在成孔过程中孔内钻具晃动造成的粗糙孔壁则有利于灌注桩竖向承载性能的发挥。孔壁粗糙度直接影响到最终桩土界面的界面摩擦角,量化后的桩土界面锯齿齿高越高,桩土界面所激发的桩侧阻力越大,最终得到的灌注桩单桩竖向承载力越大。

参考文献:

[1] 陈维超,杨伟军,任立等.砂土地基钻孔灌注桩轴心温度场及应变试验研究[J].中外公路,2018(5).

[2] 蒋文鹏,邢尔文,杜文杰,等.复杂地质条件下公路悬索桥索塔桩基承载性能分析[J].公路工程,2019(6).

[3] 鲁嘉,诸茗,黄安芳,等.土层性质及成孔机具对钻孔灌注桩孔径变化的影响[J].建筑科学,2009(9).

[4] 陈辉,李江.钻孔灌注桩侧摩阻力试验研究及修正计算[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009(4).

[5] 郑刚,颜志雄,雷华阳,等.大直径深长钻孔灌注桩单桩竖向承载性能研究[J].岩土力学,2008(5).

[6] 潘林有,胡中雄,程玉梅.卸荷状态下黏性土强度特性试验研究[J].岩土力学,2001(4).

[7] 马兴峰,董城,刘文劫.路基黏土改良填料的动剪应变门槛研究[J].公路工程,2017(1).

[8] Seed H B, Reese L C. The Action of Soft Clay along Friction Piles[J]. Transaction of ASCE, 1957, 122: 731—754.

[9] Colye, H. M., and Reesc, L. C. Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay[J]. Journal of Soil Mechanical Foundation Division, 1966, 92(2): 1—26.

[10] Keiji Kuwajima, Masayuki Hyodo, Adrian F. L. Hyde. Pile Bearing Capacity Factors and Soil Crushability[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(7): 901—913.

[11] 蒋建平,章杨松,高广运.基于现场试验的超长桩端阻力承载性状研究[J].工程力学,2010(2).

[12] Hirayama H. Load—Settlement Analysis for Bored Piles Using Hyperbolic Transfer Functions[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(2): 14—19.

[13] 李富文,李大伟.人工挖孔桩桩端土承载力的确定[J].吉林地质,2004(4).

[14] 姜立新,张亦静,张春顺.大直径桩荷载传递的桩端土效应[J].株洲工学院学报,2006(4).

[15] Randolph, M. F. Wroth C. P. Ananalysis of the Vertical Deformation of Pile Groups[J]. Geotechnique, 1979, 29(4): 423—439.

[16] 张广兴.泥皮性状对钻孔桩工程特性的影响研究[D].浙江大学硕士学位论文,2006.

[17] 李小勇,谢康和,曾国熙,等.钻孔灌注桩泥浆护壁性状试验研究[J].建筑结构,2000(5).

[18] 霍凤民.浅析泥皮对钻孔灌注桩承载力的影响[J].地基基础工程,2002(4).

[19] 邱志雄,黄磊,等.大直径超长旋挖桩桩端注浆承载特性试验研究[J].中外公路,2008(5).

[20] 赵春风.成孔卸载后灌注桩竖向承载机理及其应用研究[R],2009.

[21] 冯忠居,董芸秀,戴良军,等.超大直径空心独立复合桩基础的承载特性研究[J].岩土力学,2008(5).