

砂土地区钻孔桩孔壁稳定性与评价方法研究

陈维超¹, 杨伟军²

(1. 湖南建工集团有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 长沙理工大学)

摘要: 砂土的黏聚力低, 饱和砂层振动易液化, 在砂土地区钻孔桩成孔过程中易出现孔壁缩径、塌孔等问题。该文采用有限元数值模拟分析方法, 研究了砂土内摩擦角、孔径、钻孔深度、地下水位、护壁泥浆以及钢护筒对砂土地区钻孔桩孔壁稳定性的影响。结果表明: 砂土地区钻孔桩孔壁稳定性问题主要是坍塌问题, 增大砂土内摩擦角、减少钻孔孔径及提高护壁泥浆密度能有效提高孔壁的稳定性, 防止孔壁坍塌; 易坍塌地层可直接采用钢护筒进行支护, 防止塌孔事故的发生。根据孔壁稳定性的影响指标因素, 综合考虑各指标因素组态对权重的影响, 建立了孔壁稳定性的灰色变权综合评价模型及评价方法。

关键词: 砂土地区; 钻孔桩; 孔壁稳定性; 评价方法

钻孔桩因具有承载力大、稳定性高、能协调不均匀沉降的特点, 已在建筑工程、铁路与公路、市政桥梁、港口码头以及大型构筑物等工程中得到了广泛的应用。钻孔桩成孔过程中改变了土体的初始平衡应力状态, 由于砂性土黏聚力低, 如采用的技术或措施不当, 易导致孔壁缩径、塌孔等质量问题。关于钻孔桩孔壁稳定性问题, 可通过孔壁土体应力数学模型分析孔壁土体的应力状况, 研究土体物理性能、护壁泥浆、地下水埋深等因素对孔壁稳定性的影响, 采用桩孔径最小、最大泥浆深度概念来判断孔壁的稳定性。或以弹性理论为基础, 采用莫尔—库仑屈服准则, 建立孔壁稳定性计算式来分析孔壁稳定性的条件。由于成孔后的卸荷效应, 孔壁在土体侧向力及有效竖向应力的作用下, 产生的塑性区将导致桩孔的缩径或孔壁的坍塌, 砂土地区孔壁稳定性问题主要表现为孔壁坍塌问题。在孔壁稳定性评价方面, 张嘉鑫采用模糊数学理论中的综合评价方法, 构建钻孔桩孔壁坍塌的模糊综合评价模型; 谢翔基于统一强度理论对孔壁稳定性进行了分析。

砂土地区钻孔桩孔壁稳定性受地质情况、护壁泥浆、地下水、施工工艺等因素的综合影响, 该文结合工程实践, 采用有限元数值模拟分析对砂土地区钻孔桩孔壁稳定性影响因素及机理进行分析, 并建立砂土地区钻孔桩孔壁稳定性评价模型与评价方法, 可为砂土

地区钻孔桩的施工提供一定的参考。

1 孔壁稳定性分析模型

采用 Plaxis 岩土工程数值分析软件, 分析土质情况、泥浆密度、桩深、桩径、地下水位以及钢护筒埋置深度等因素对孔壁稳定性的影响特性。因桩孔符合轴对称模型条件, 分析模型建立时, 采用 Mohr—Coulomb 理想弹塑性本构关系及二维轴对称模型, 水平方向的孔周土取大于孔半径的 10 倍, 竖向方向的孔底土取大于孔深的 0.5 倍, 护壁泥浆等效成静水压力模拟作用在孔壁上。分析模型及网格划分如图 1 所示。

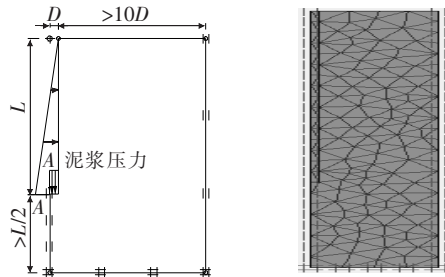


图 1 分析模型及网格划分图

假设砂土为匀质体, 其天然重度为 18 kN/m^3 , 饱和重度为 20 kN/m^3 。钻孔过程中土体向孔内变形为侧向卸荷变形, 其侧向卸荷变形模量应考虑应力路径

收稿日期: 2020-01-08 (修改稿)

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (编号: 2015JJ4106); 中国路桥工程有限责任公司科技计划项目 (编号: 2014C005); 长沙理工大学桥梁工程湖南省普通高校重点实验室开发基金资助项目 (编号: 10KA01)

作者简介: 陈维超, 男, 博士, 高级工程师, E-mail: wlrwc@163.com

的影响,即:

$$E_0 = E_{0,0} + \lambda \sigma'_z \quad (1)$$

式中: $E_{0,0}$ 为土体变形模量; λ 为应力路径影响系数,砂土 $\lambda = 160$; σ'_z 为竖向有效应力。

2 孔壁稳定性影响机理分析

2.1 内摩擦角对孔壁稳定性的影响特性

钻孔桩孔深 L 为 60 m, 孔径 D 为 2 m, 地下水位标高为 +5 m, 护壁泥浆相对密度 $G_m = 1.05$, 砂土内摩擦角 φ 为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 时对孔壁稳定性的影响如图 2 所示。

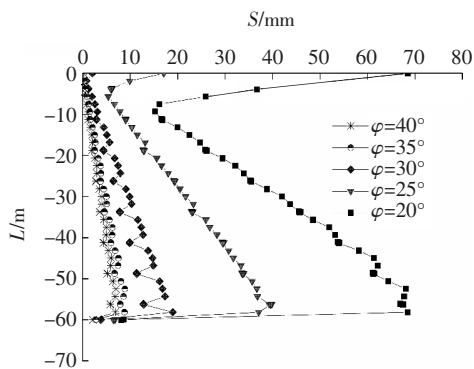


图 2 不同土质孔壁横向位移与孔深的关系

由图 2 可以看出: 土体内摩擦角越大越有利于孔口的稳定, 内摩擦角 φ 为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 时, 孔口边缘横向位移 S 分别为 68.5、17.08、2.02、0.23、0.17 mm; 随钻孔深度增加至地下水位标高时, 孔壁横向位移随孔深逐渐减少, 然后随钻孔深度增加孔壁横向位移逐渐增大, 在距孔底约 2 m 处, 孔壁横向位移达到最大值, 其最大横向位移 S_{\max} 分别为 68.4、37.1、18.97、8.8、6.9 mm (图 3), 至设计孔深时孔壁横向位移迅速减小。

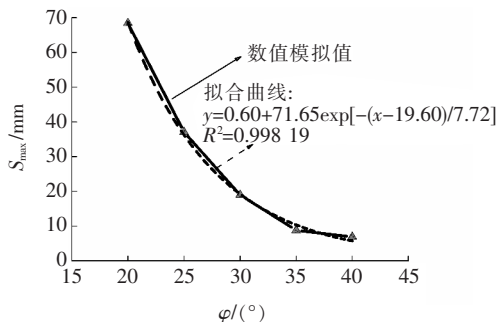


图 3 孔壁最大横向位移与内摩擦角的关系

由图 3 可知: 在其他条件相同时, 孔壁最大横向位

移与土体内摩擦角呈指数函数关系, 其关系式为:

$$y(\varphi) = 0.6 + 71.65e^{-\left(\frac{\varphi - 19.6}{7.72}\right)}, R^2 = 0.998\ 19 \quad (2)$$

式中: $y(\varphi)$ 为砂土内摩擦角 φ 的函数(mm)。

上述结果表明: 砂土地区同一深度钻孔桩孔壁横向位移随土体内摩擦角的增大而减少, 这是因为随着砂土的内摩擦角增大, 砂土的抗剪强度也增大, 越有利于孔壁的稳定; 当内摩擦角 φ 大于 35° 时, 进一步增大砂土的内摩擦角对提高土体稳定性的幅度有限。

2.2 孔径对孔壁稳定性的影响特性

钻孔桩孔深 L 为 60 m, 地下水位标高为 +0 m, 护壁泥浆相对密度 $G_m = 1.05$, 砂土内摩擦角 φ 为 30° , 孔径 D 为 1 000、1 600、2 000、2 600、3 000 mm 时对孔壁稳定性的影响如图 4、5 所示。

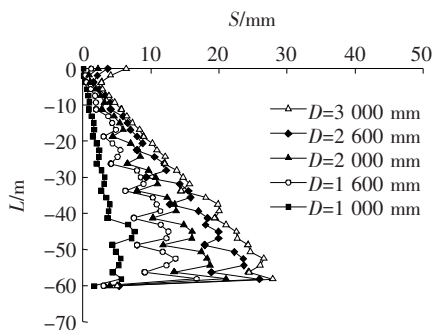


图 4 不同孔径孔壁横向位移与孔深的关系

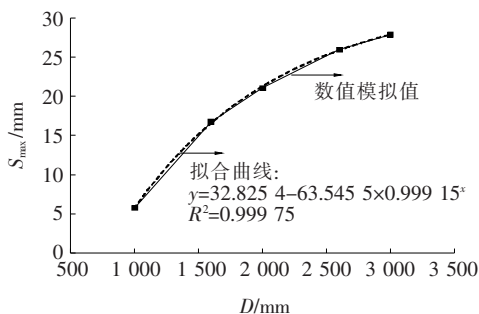


图 5 孔壁最大横向位移与孔径的关系

由图 4、5 可知: 孔壁横向位移随钻孔孔径、孔深度增大而增大, 距孔底约 2 m 位置处, 孔径 D 为 1 000、1 600、2 000、2 600、3 000 mm 的孔壁最大横向位移 S_{\max} 分别为 8、17.34、21.65、27.13、29.73 mm, 并与孔径呈指数函数关系, 其关系式为:

$$y(D) = 32.825\ 4 - 63.545\ 5 \times 0.999\ 1^D, R^2 = 0.999\ 8 \quad (3)$$

式中: $y(D)$ 为钻孔直径 D 的函数(mm)。

根据分析结果及式(3)可知: 减小钻孔直径, 有利于孔壁的稳定; 当孔径小于 3 m 时, 钻孔桩的孔壁最

大横向位移随孔径增大而增大;当孔径大于 3 m 时,孔壁最大横向位移计算值趋于稳定,这是因为钻孔直径增大,孔壁周围土体卸载量也随之增大,孔壁的土拱效应减弱,护壁泥浆侧向力不足以抵抗土体卸载所形成的侧向力而导致失稳,在理论计算模型中以孔壁横向位移的变形来体现,在实践工程中则表现为坍塌现象。建议在砂土地区中钻孔桩直径不宜大于 3 m,其原因为:① 在砂土地区采用大直径钻孔桩难以成孔;② 尽管提高了单桩自身的承载力,但基桩与桩周土侧摩阻承载力提高有限,对于大吨位设计荷载,建议采用群桩基础。

2.3 钻孔深度对孔壁稳定性的影响特性

砂土内摩擦角 φ 为 30° ,地下水位标高为 +0 m,护壁泥浆相对密度 $G_m = 1.05$,钻孔深度 L 为 40、60、80、100、120 m 对孔壁稳定性的影响如图 6、7 所示。

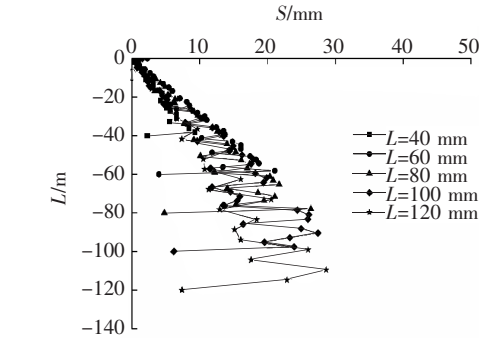


图 6 孔深对孔壁横向位移的影响

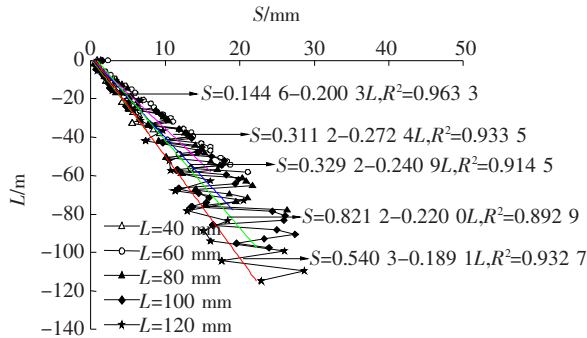


图 7 孔壁横向位移与孔深拟合关系式

由图 6、7 可以看出:钻孔深度为 40、60、80、100、120 m 时孔壁最大横向位移分别为 9.87、21.65、29.58、30.27、37.67 mm;钻孔深度为 40~100 m,孔壁横向最大位移发生在距孔底约 2 m 处;钻孔深度为 120 m 时,孔壁横向最大位移发生在距孔底约 5 m 处。

在其他条件相同时,孔壁横向位移随孔深增加而增大,与钻孔深度呈较好的线性关系,这是因为随着钻孔深度的增加,深层土体的卸荷量增大,由于砂土具有

较大的内摩擦角,土体的致塌应力与孔深呈线性关系。

2.4 地下水位对孔壁稳定性的影响特性

砂土内摩擦角 φ 为 30° ,钻孔深度 L 为 80 m,护壁泥浆相对密度为 $G_m = 1.05$,地下水位埋置深度 h 为 0、10、20、30、40 m 对孔壁稳定性的影响见图 8。

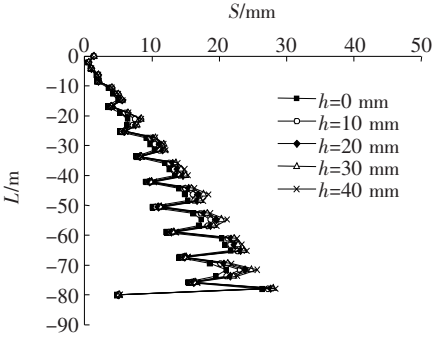


图 8 地下水埋深对孔壁横向位移的影响

由图 8 可知:不同地下水位埋深,其孔壁最大横向位移发生距离孔底 2~3 m 处,其最大横向位移值约为 30 mm,其不同埋置深度的地下水位对孔壁稳定性的影响较少。

2.5 泥浆对孔壁稳定性的影响特性

钻孔桩孔深 L 为 60 m,孔径 D 为 2 m,地下水位标高为 +5 m,土体的内摩擦角为 $\varphi = 30^\circ$,护壁泥浆相对密度 $G_m = 1.05、1.10、1.15、1.20、1.25$ 对孔壁稳定性的影响如图 9 所示。

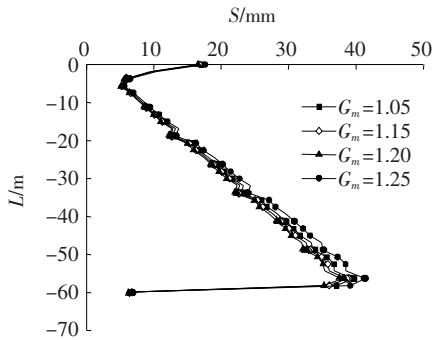


图 9 泥浆相对密度对孔壁横向位移的影响

由图 9 可知:孔口至地下水位段,孔壁横向位移随钻孔深度逐渐减小,然后随孔深增加而增大,距离孔底 2~3 m 处,孔壁横向位移达到最大值,地下水位至孔底区段孔壁横向位移与钻孔深度基本呈线性关系。提高泥浆的密度,孔壁横向位移整体上呈减小的趋势,有利于孔壁的稳定性,但对减小孔壁位移的幅度有限。在工程实践应用中,如果采用高密度的泥浆来增加孔壁的稳定性,则泥浆将会在孔壁上形成一层较厚的泥皮,影响基桩承载力。因此,在工程中应配置优质的泥

浆,在确保孔壁稳定的前提下,尽量减小泥皮效应对基桩承载力的影响,根据以上分析结果,建议砂土地区钻孔桩护壁泥浆的相对密度取 1.15~1.20。

2.6 钢护筒对孔壁稳定性的影响特性

土体的内摩擦角 φ 为 30° ,钻孔深度 L 为 60 m,护壁泥浆的相对密度 $G_m = 1.05$,分析钢护筒埋置深度为 0、5、10 m 对孔壁稳定性的影响;其中钢护筒采用 Q235 钢材制作,壁厚 t 取 10 mm,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa。钢护筒对孔壁稳定性的影响如图 10 所示。

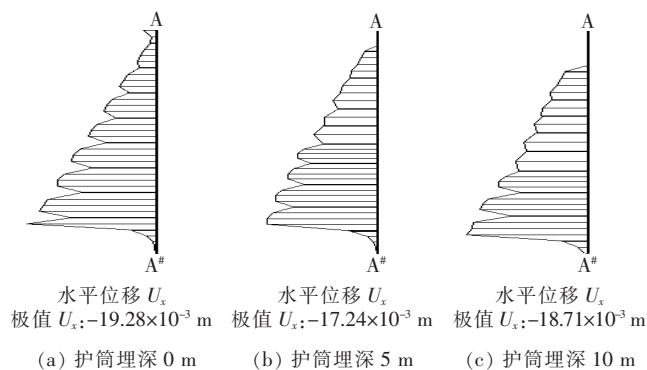


图 10 钢护筒对孔壁横向位移的影响

由图 10 可以看出:孔口处采用钢护筒支护,由于钢护筒具有较大的刚度和强度,孔壁横向位移为零,能够直接消除孔壁坍塌的风险。对于易坍塌的地层,可采用钢护筒全孔支护以确保成孔的质量。由于孔口位置处土体受力复杂,为防止孔口塌孔,通常在孔口位置设置钢护筒进行支护,以确保施工机具、人员的安全。

3 钻孔桩孔壁稳定性评价方法

3.1 孔壁稳定性评价指标因素

影响钻孔桩孔壁稳定性有定量化和非量化因素,包括土质、土层结构、钻孔深度、钻孔直径、护壁泥浆密度、地下水位、钢护筒埋深等,这些构成了砂土地区钻孔桩壁稳定性的因素空间。该文采用灰色系统理论,对影响孔壁稳定性因素进行灰色分析,建立钻孔桩孔壁稳定性评价模型及评价方法。在确定评价指标体系时采取专家经验法以及评价指标。评价指标按以下原则确定:评价指标对评价目标是充分与必要的;评价指标对应的要素数据可以从当前工作阶段获得;评价指标之间相互独立,并应着重考虑重要的控制因素。砂土地区钻孔桩孔壁稳定性影响因素如下:砂土土质

x_1 、土层结构 x_2 、钻孔深度 x_3 、钻孔直径 x_4 、泥浆密度 x_5 、地下水位 x_6 、钢护筒埋深 x_7 、施工工艺 x_8 。

3.2 变权集的确定及综合评价模型

评价模型的精度与因素权重的确定有着重要的关系,在实际工程中,评价因素的重要性一般采用常权的方法来反映,而对于变权的方法,在可变的权重中,需要考虑各评价因素的相对重要性,同时也要考虑它们的组态,因此,采用变权法更能符合工程的实际情况。

3.2.1 因素常权的确定

指标相对于评价目标的重要性程度通过因素的权重来反映,在确定因素变权之前,先要确定因素的常权,常权的权重集可表示为 $U^0 = (u_1^0, u_2^0, \dots, u_n^0)$ 。

利用灰色关联法确定因素常权,对非定量因素进行定量分析。

以 $w_0 = \{w_0(k) | k=1, 2, \dots, n\}$ 为参考数列, $w_i = \{w_i(k) | k=1, 2, \dots, n\}$ ($i=1, 2, \dots, m$) 为比较数列。

则 $w_i(k)$ 与 $w_0(k)$ 的关联系数:

$$\eta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |w_0(k) - w_i(k)| + \xi \cdot \max_i \max_k |w_0(k) - w_i(k)|}{|w_0(k) - w_i(k)| + \xi \cdot \max_i \max_k |w_0(k) - w_i(k)|} \quad (4)$$

取 $\xi = 0.5$,各因素的关联度按下式计算:

$$\rho_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \eta_i(k) \quad (5)$$

采用归一化处理其关联度,可得到因素的权重集。

3.2.2 变权集的确定

根据 3.2.1 节的计算,常权向量采用以下表示:

$U^0 = (u_1^0, u_2^0, \dots, u_n^0); u_j^0 \in [0, 1], j=1, 2, \dots, n; u_1^0 + u_2^0 + \dots + u_n^0 = 1$ 。引入状态变权向量 S_W :

$S_W = \{S_1(W), S_2(W), \dots, S_n(W)\}$, 其中 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n) \in [0, 1]^n$ 。

将常权向量与状态变权向量的 Hardarmard 积得到变权向量:

$$U(W) = \frac{U^0 \cdot S_W}{\sum_{k=1}^n u_k^0 \cdot S_k(W)} = \frac{u_j^0 \frac{\partial B(W)}{\partial w_j}}{\sum_{k=1}^n u_k^0 \cdot \frac{\partial B(W)}{\partial w_k}} \quad (6)$$

式中: $B(W)$ 为惩罚型均衡函数,取 $B(W) = \sum_{j=1}^n w_j^a$, ($0 < a < 1$),代入式(6),则因素的变权公式可表

示为:

$$u_j(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \frac{u_j^o \omega_j^{b-1}}{\sum_{k=1}^n u_k^o \omega_k^{b-1}}, (0 < b \leq 1)$$

(7)

因素的变权集可表示为:

$$U(W) = \left(\frac{u_1^o \omega_1^{b-1}}{\sum_{k=1}^n u_k^o \omega_k^{b-1}}, \frac{u_2^o \omega_2^{b-1}}{\sum_{k=1}^n u_k^o \omega_k^{b-1}}, \dots, \frac{u_n^o \omega_n^{b-1}}{\sum_{k=1}^n u_k^o \omega_k^{b-1}} \right)$$

(8)

根据工程经验,取 $b=0.5$ 为宜。

3.2.3 评价关系矩阵及综合评价模型

指标因素为 n 个,评估对象为 m 个,评估对象的各指标作单因素进行评价,其评价关系矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{21} & \omega_{31} & \cdots & \omega_{m1} \\ \omega_{12} & \omega_{22} & \omega_{32} & \cdots & \omega_{m2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \omega_{1n} & \omega_{2n} & \omega_{3n} & \cdots & \omega_{mn} \end{bmatrix} = (\omega_{ij})_{m \times n}$$

(9)

在工程实际应用中,可采用专家评分的方法来确定 m 个评价对象的评价关系矩阵,其指标计分应遵循以下规则:以 100 分制进行打分;指标集中的某一因素评价的平均值计为 l ;低于 l 的某一评价因素平均值计为 A ;高于 l 的某一评价因素平均值计为 B 。则每位专家对评价指标因素及某一因素平均的估计值为:

$$W_{ij} = (A + 4l + B) / 6$$

(10)

式(10)的评价值去除了评价的最大值、最小值和异常的数值,同时也重视了专家评价的平均值,较为符合实际,可得 $\omega_{ij} = W_{ij} / 100$ 。

对单个对象进行评价,评价模型为:

$$B = \sum_{j=1}^n u_j^o(W) \omega_j = \{u_1(W), u_2(W), \dots, u_n(W)\} [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$$

(11)

对 m 个对象进行评价,其评价模型为:

$$B = \left(\sum_{j=1}^n u_{1j}(W) \omega_{1j}, \sum_{j=1}^n u_{2j}(W) \omega_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^n u_{mj}(W) \omega_{mj} \right) = \left(\sum_{j=1}^n \frac{u_j^o \omega_{1j}^{b-1}}{\sum_{k=1}^n u_k^o \omega_{1k}^{b-1}}, \dots, \sum_{j=1}^n \frac{u_j^o \omega_{mj}^{b-1}}{\sum_{k=1}^n u_k^o \omega_{mk}^{b-1}} \right)$$

(12)

式中: u_j^o 、 u_k^o 为第 j 、 k 个因素的常权值,其中 $j, k = 1, 2, 3, \dots, n$; ω_{ij} 、 ω_{ik} 为第 i 个评价对象的第 j 、 k 个因素

平均值, $i = 1, 2, \dots, m, j, k = 1, 2, \dots, n$ 。

3.3 工程应用

加蓬共和国的奥果韦河特大桥,其地质为厚砂土层,采用超长钻孔灌注桩基础,设计桩长为 60~90 m,直径为 1 600、1 800 mm,选取 5 根基桩进行试桩,对试桩的孔壁稳定性进行评价,并对试桩的成孔质量进行现场检测。邀请科研院校、建设单位、设计单位、施工单位和监理单位的 5 位专家对权重和因素进行咨询评价,得到各评价指标权重的评价信息如表 1 所示。并依据各专家对钻孔桩孔壁稳定性影响因素的评价,采用式(10)可得到钻孔桩孔壁稳定性评价指标的统计信息,结果见表 2。

表 1 评价指标权重的评价信息

| 指标 | 权重 | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|
| | 专家 1 | 专家 2 | 专家 3 | 专家 4 | 专家 5 |
| x_1 | 0.12 | 0.15 | 0.13 | 0.14 | 0.11 |
| x_2 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.10 |
| x_3 | 0.08 | 0.10 | 0.07 | 0.10 | 0.11 |
| x_4 | 0.04 | 0.05 | 0.08 | 0.08 | 0.06 |
| x_5 | 0.30 | 0.28 | 0.26 | 0.26 | 0.24 |
| x_6 | 0.08 | 0.05 | 0.08 | 0.10 | 0.11 |
| x_7 | 0.20 | 0.16 | 0.17 | 0.13 | 0.18 |
| x_8 | 0.10 | 0.13 | 0.12 | 0.10 | 0.09 |

表 2 评价指标的统计信息

| 指标 | 各桩孔壁稳定性得分 | | | | |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | ZK ₁ | ZK ₂ | ZK ₃ | ZK ₄ | ZK ₅ |
| x_1 | 87.5 | 85.6 | 82.4 | 83.6 | 84.5 |
| x_2 | 79.8 | 83.5 | 80.7 | 77.5 | 81.2 |
| x_3 | 86.3 | 78.6 | 85.4 | 82.6 | 82.1 |
| x_4 | 84.7 | 82.4 | 90.6 | 83.2 | 79.4 |
| x_5 | 95.6 | 92.7 | 93.5 | 90.8 | 89.8 |
| x_6 | 85.8 | 80.6 | 81.1 | 81.1 | 82.3 |
| x_7 | 88.9 | 84.5 | 82.1 | 84.5 | 85.6 |
| x_8 | 78.6 | 80.6 | 79.5 | 82.1 | 82.3 |

从表 1 可以看出:其最大权重为 0.30,设定参考数列 $\omega_0 = (0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3)$,将参考数列及表 1 代入式(4)、(5)得到评价指标的权重见表 3 所示。

表 3 评价指标权重计算值

| 指标 | 关联系数 $\eta_i(k)$ | | | | | 关联度 | 权重 u_i^0 |
|-------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
| | 专家 1 | 专家 2 | 专家 3 | 专家 4 | 专家 5 | ρ | |
| x_1 | 0.419 4 | 0.464 3 | 0.433 3 | 0.448 3 | 0.406 3 | 0.434 3 | 0.118 9 |
| x_2 | 0.371 4 | 0.371 4 | 0.382 4 | 0.382 4 | 0.393 9 | 0.380 3 | 0.104 1 |
| x_3 | 0.371 4 | 0.393 9 | 0.361 1 | 0.393 9 | 0.406 3 | 0.385 3 | 0.105 5 |
| x_4 | 0.333 3 | 0.342 1 | 0.371 4 | 0.371 4 | 0.351 4 | 0.353 9 | 0.096 9 |
| x_5 | 1.000 0 | 0.866 7 | 0.764 7 | 0.764 7 | 0.684 2 | 0.816 1 | 0.223 5 |
| x_6 | 0.371 4 | 0.342 1 | 0.371 4 | 0.393 9 | 0.406 3 | 0.377 0 | 0.103 3 |
| x_7 | 0.565 2 | 0.481 5 | 0.500 0 | 0.433 3 | 0.520 0 | 0.500 0 | 0.136 9 |
| x_8 | 0.393 9 | 0.433 3 | 0.419 4 | 0.393 9 | 0.382 4 | 0.404 6 | 0.110 8 |

根据 3.2 节及表 2 数据得到指标评价矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 0.875 & 0.856 & 0.824 & 0.836 & 0.845 \\ 0.798 & 0.835 & 0.807 & 0.775 & 0.812 \\ 0.863 & 0.786 & 0.854 & 0.826 & 0.821 \\ 0.847 & 0.824 & 0.906 & 0.832 & 0.794 \\ 0.956 & 0.927 & 0.935 & 0.908 & 0.898 \\ 0.858 & 0.806 & 0.811 & 0.811 & 0.823 \\ 0.889 & 0.845 & 0.821 & 0.845 & 0.856 \\ 0.786 & 0.806 & 0.795 & 0.821 & 0.823 \end{bmatrix}$$

将各数据代入式(6)~(12),得到 5 根基桩孔壁的稳定性评价结果 $B = (0.870, 0.846, 0.852, 0.840, 0.842)$,从上述评价结果可以看出,各基桩孔壁的稳定性 $ZK_1(0.870) > ZK_3(0.852) > ZK_2(0.846) > ZK_5(0.842) > ZK_4(0.840)$ 。根据稳定性评价结果,可以相对地反映各因素对钻孔桩孔壁稳定性的影响程度以及各钻孔桩孔壁的稳定性。

4 结 论

- (1) 砂土的内摩擦角愈大,其抗剪强度愈高,孔壁越稳定,当内摩擦角达到 35°后,再一步增大内摩擦角对提高土体的稳定性有限;钻孔直径愈大,孔壁周围土体的卸荷量也随之增大,土拱效应减弱,孔壁越不稳定;但地下水位的埋深对孔壁稳定性影响较小。
- (2) 砂土钻孔桩孔壁的稳定性随护壁泥浆的密度增大而提高,但提高的幅度有限,在确保孔壁稳定的前提下,应尽量减小泥皮效应对基桩承载力的影响,建议砂土地区钻孔桩护壁泥浆的相对密度宜取 1.15~1.20。对于坍塌风险区域,可采用钢护筒支护措施直接解决塌孔事故。
- (3) 孔壁的最大横向位移与土体的内摩擦角以及孔径呈指数函数关系,孔壁横向位移与钻孔深度呈线

性函数,随孔深增加而增大。
(4) 综合考虑了砂土地区钻孔桩孔壁稳定性指标因素组合对权重的影响,构建了孔壁稳定性的灰色变权综合评价模型及评价方法,满足现场实践工程的需要。

参考文献:

[1] 蒋红心,胡中雄. 钻孔孔壁的稳定性分析[J]. 工程勘察, 1999(3).

[2] 石得权,刘刚. 钻孔孔壁坍塌掉块现象的分析研究及处理[J]. 西部探矿工程,2004(7).

[3] 李小肯,乌效鸣. 钻孔桩孔壁稳定性分析[J]. 地质与勘探,2001(2).

[4] 胡晓敏,李之达. 厚冲积覆盖层地区桥梁钻孔桩成孔的力学分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007(4).

[5] 陈国灿. 钻孔桩孔壁稳定的条件[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2002(3).

[6] 刘之葵,梁金城,黄英娣. 人工挖孔灌注桩的孔壁稳定性[J]. 矿产与地质,2003(5).

[7] 李尚飞,黄安芳,鲁嘉,等. 钻孔桩成孔孔径变化及其卸荷效应机制研究[J]. 建筑科学,2010(1).

[8] 王中文. 钻孔桩孔壁稳定性的影响因素研究[J]. 公路交通科技,2011(1).

[9] 王云岗,章光,胡琦. 钻孔桩孔壁稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011(S1).

[10] 张嘉鑫. 复杂富水地土大型钻孔灌注桩孔壁稳定性评价及加固方法研究[D]. 青岛理工大学硕士学位论文, 2015.

[11] 谢翔. 基于统一强度理论的钻孔孔壁稳定性分析[D]. 浙江大学硕士学位论文,2013.

[12] 马永峰,周丁恒,张志豪,等. 灌注桩钻孔塌孔实测及孔壁稳定性评价[J]. 人民长江,2017(19).

[13] 胡琦. 超深基坑水、土与围护结构相互作用及设计方法研究[D]. 浙江大学博士学位论文,2008.