

# 深层搅拌法在岩溶软弱地基处理中的应用

隆 威, 昌 毅

(中南大学地学与环境工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:**水泥土搅拌桩对软弱土地基具有较好的加固效果, 针对岩溶地区存在有土(溶)洞时, 分析计算水泥土深层搅拌桩复合地基承载力, 并对在地基处理过程中遇到的问题及施工中的一些处理方法进行了探讨。

**关键词:**深层搅拌桩; 岩溶软弱地基; 复合地基; 承载力

**中图分类号:** TU472.3<sup>+</sup>6 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2006)11-0021-02

## 1 工程地质情况

某工程为拟建 4 栋楼房, 从该工程的岩土工程勘察资料反映, 拟建场地类型为中等复杂场地, 地基类型为复杂地基, 施工工地区域边缘地段浅部岩溶相对发育, 局部岩溶向深部发育, 对工程有一定程度的影响。

施工工地现场主要分布有第四系残坡积粘性土层、冲积和冲洪积粘土层, 下伏基岩主要为石炭系灰岩, 泥质灰岩、炭质灰岩及泥灰岩, 从整个厂址地基土整体分析属不均匀地基土。

根据地基土的岩性特征、成因类型及物理力学性质, 将场地内地层自上而下划分为 6 层:

①人工填土, 黄褐、灰黑色, 稍密, 很湿, 由粘性土组成, 厚度一般为 0.3~0.9 m, 分布于施工现场大部分地段;

②淤泥, 深灰色, 富含腐植质, 流塑状, 饱和, 含水量为 47%~105%, 厚度分布不均, 最大厚度为 8.5 m, 最小厚度为 1.5 m, 一般厚 3.5 m, 分布于施工现场大部分地段;

③淤泥质土, 黄色, 可塑, 主要由粘性土组成, 局部含有极少量粗砂, 厚度分布不均, 最大厚度为 7.8 m, 最小厚度为 1.6 m, 一般厚度 4 m, 分布于施工现场大部分地段;

④粘土, 褐黄色、紫红色、黑色, 可塑, 湿, 主要为红粘土, 含有少量黑色铁锰质, 厚度分布不均, 最大厚度为 8.5 m, 最小厚度为 1.6 m, 一般厚度 4.5 m, 分布于施工现场大部分地段;

⑤粘土, 褐黄、紫红、黑色, 硬塑, 稍湿, 主要为红粘土, 局部为次生红粘土, 含有少量黑色铁锰质, 一

般厚 0.5~4 m, 分布于施工现场大部分地段;

⑥灰岩, 灰白色, 中等风化, 中厚层状, 钙质胶结, 裂隙不发育, 岩心呈柱状, 岩心采取率一般大于 85%, 局部地区存在溶洞, 分布于施工现场大部分地段。

根据工程地质测绘和钻探资料揭露, 前 4 层地层为软弱地层, 不能满足上部结构的要求, 同时第⑥层中存在溶洞现象, 可能产生不均匀沉降。因施工现场边缘范围内分布弱岩溶化地层, 可溶岩段被砂页岩段所分隔, 难以形成大规模的水力联系, 且场地范围未发现岩溶漏斗和岩溶洼地, 表明深部岩溶发育较差, 局部地段因软硬岩层抗风化能力的差异形成的地下水通道, 为深部岩溶提供一定的条件。本工程勘察资料表明场地内存在浅层大小不同溶洞, 局部对工程有一定影响。

岩溶分布: 根据钻探资料揭露, 已具体调查出施工现场分布的岩溶情况及位置, 其中溶洞大部分分布于工地边缘地段, 溶洞大小为 0.3~6.5 m。

## 2 地基处理方法

由于场地工程地质条件较差, 而且各层分布不均, 不宜作为建筑物的天然地基, 同时考虑到场地的溶洞现象, 本工程如采用桩基础则有可能造成在施工中无法收桩的问题。根据现场的实际情况, 设计为深层搅拌桩复合地基作持力层, 基础为筏板基础。对上部软弱土地基采用深层搅拌桩处理, 提高整个场地的复合地基承载力, 达到设计要求; 对存在溶洞的区域采用充填注浆处理, 加固深层搅拌桩所不能完全处理的区域, 提高地基的承载力; 同时溶洞区

收稿日期: 2006-04-24

作者简介: 隆威(1962-), 男(汉族), 重庆丰都人, 中南大学地学与环境工程学院副院长、教授, 探矿工程专业, 从事地质工程和岩土工程专业教学、科研、设计及施工管理工作, 湖南省长沙市; 昌毅(1979-), 男(汉族), 湖南益阳人, 中南大学在读硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为岩土工程, 13574105745, changyi000814@sina.com。

域在上述处理后应再加钢管桩处理,以防止不均匀沉降的产生,达到上部结构对沉降的要求。

本工程深层搅拌桩按“两喷四搅”的施工工艺,采用 $\varnothing 600$  mm 搅拌桩,32.5 普通硅酸盐水泥,水灰比为 0.5,同时加入 0.2% 的木质素磺酸钙作为减水剂,2%~4% 的水玻璃作为速凝剂。对溶洞的处理是应钻孔至溶洞处,先用水泥砂浆充填,再封住孔口进行注浆,注浆压力为 0.8~1.0 MPa,如果出现浆液流失过快则应反复多次,以达到效果。

同时,考虑到场地的溶洞充填灌浆受地质因素的客观影响,效果可能不理想,溶洞内糊状粘性物难以与水泥浆有效渗透胶结,水泥浆可能被洞内的流动液体带走,故需对这部分搅拌桩进行补强处理。

对溶洞范围的搅拌桩用壁厚 3.8 mm 的 $\varnothing 140$  mm 钢管桩进行加强处理,即在原搅拌桩中钻 $\varnothing 168$  mm 的孔,钻进至溶洞底部进入灰岩时吊放 $\varnothing 140$  mm 钢管,钢管沿管身每隔 500 mm 开 4 个 $\varnothing 10\sim 15$  mm 孔形成“花管”,通过埋在管中的注浆管,将水泥浆灌进钢管内,并通过管身的 $\varnothing 10\sim 15$  mm 孔扩散至管外,以增加钢管桩与搅拌桩的固结作用。

### 3 深层搅拌桩复合地基设计

深层搅拌桩复合地基承载力的计算方法通常采用桩土共同作用的概念,即认为复合地基承载力是由搅拌桩和桩间土这两部分承载力按面积比加权复合而成。

本场地加固深度为 10~17.5 m,平均 13 m,桩端进入第④层可塑粘土 4.5 m,平均有效桩长约 12 m。天然地基平均承载力为 60 kPa,加固后要求复合地基承载力 $>170$  kPa。

#### 3.1 单桩承载力标准值计算

$$R_k = aA_p q_p + U_p \sum q_{si} l_i \quad (1)$$

式中: $R_k$ ——单桩竖向承载力标准值,kN; $q_p$ ——桩端土的承载力标准值,kPa; $A_p$ ——桩的截面积,本工程桩径 600 mm,则 $A_p = 0.283 \text{ m}^2$ ; $U_p$ ——桩的周长, $U_p = 1.884 \text{ m}$ ; $q_{si}$ ——桩周土的摩阻力,对淤泥可取 $q_{si} = 4.0 \text{ kPa}$ ,对泥质粘性土可塑层可取 $q_{si} = 6.0 \text{ kPa}$ ,对粘性土可塑层可取 $q_{si} = 12.0 \text{ kPa}$ ; $l_i$ ——桩周第*i*层土的厚度,桩端进入第④层 4.5 m; $a$ ——桩端土的承载力折减系数,根据本工程的地质情况,从安全因素考虑,取 $a = 0$ 。

经计算得 $R_k = 173 \text{ kN}$ 。

按桩身强度:

$$R_k = A q_u / (2K) \quad (2)$$

式中: $K$ ——混凝土强度安全系数,取 1.2; $A$ ——桩端截面积; $q_u$ ——桩身混凝土强度值,取 $q_u = 1400 \text{ kPa}$ 。

计算得 $R_k = 165 \text{ kN}$ 。

综合上述计算情况,取 $R_k = 165 \text{ kN}$ 。

#### 3.2 搅拌桩面积置换率计算

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002),采用的搅拌桩复合地基承载力标准值计算公式,可得:

$$m = (f_{sp,k} - \beta f_{s,k}) / (R_k / A_p - \beta f_{s,k}) \quad (3)$$

式中: $m$ ——桩土的面积置换率; $f_{sp,k}$ ——设计要求的复合地基承载力标准值,取 $f_{sp,k} = 170 \text{ kPa}$ ; $f_{s,k}$ ——搅拌桩桩间天然地基土的承载力标准值,根据资料,取 $f_{s,k} = 30 \text{ kPa}$ ; $\beta$ ——桩间天然地基土承载力折减系数,当桩端土为软土时可取 0.5~1.0,桩端为硬土时可取 0.1~0.4,当不考虑桩间软土的作用时可取零,一般情况下不考虑桩间土的作用,故本工程取 $\beta = 0$ ,这样偏于安全。

于是可算得搅拌桩面积置换率 $m = 0.292$ 。

现取搅拌桩面积置换率 $m = 0.3$ ,则每根桩所需分担的面积 $F$ 为:

$$F = A_p / m = 0.94 \text{ m}^2$$

取桩间距为 0.95 m,则:

$$0.95 \times 0.95 = 0.90 \text{ m}^2 < 0.94 \text{ m}^2$$

这时,搅拌桩的复合地基承载力要求可以满足,并且搅拌桩复合地基的承载力有一定的安全储备。

#### 3.3 地基验算

将以上计算的结果代入复合地基承载力标准值 $f_{sp,k}$ 计算公式,可得:

$$\begin{aligned} f_{sp,k} &= mR_k / A_p + \beta(1-m)f_{s,k} \\ &= 174.9 \text{ kPa} > 170 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (4)$$

可见,取 $m = 0.3$ 的面积置换率可满足设计要求。

#### 3.4 软弱下卧层地基承载力验算

当水泥搅拌桩置换率 $>20\%$ 且非单行排列时,应验算软弱下卧层地基承载力,但本工程在搅拌桩持力层下无软弱下卧层,故不需验算此项。

#### 3.5 水泥搅拌桩复合地基变形计算

复合地基变形包括复合土层的压缩变形和桩端以下未处理土层的压缩变形,其中复合土层的压缩变形可根据上部荷载、桩长、桩身强度等按经验取 10~30 mm,桩端以下未处理土层的变形值可按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002)的有关规定确定。  
(下转第 31 页)

(5) 钻孔终孔后,应及时清除孔底沉渣、安放钢管和灌浆导管及预埋管,灌注桩身混凝土。

(6) 在灌注水下混凝土过程中,应保持灌注的连续性,避免因灌注不连续造成桩身混凝土断桩等质量事故。

(7) 预埋管必须密封完好,否则无法完成注浆和二次注浆。

(8) 灌注纯水泥浆应掌握桩身混凝土的初凝、终凝时间,灌注纯水泥浆的最好时机应在混凝土初凝之后、终凝前进行;二次注浆应在桩身混凝土终凝后进行。终灌标准:灌浆压力 $\geq 5.0$  MPa 或浆量控制以地层吸浆量 $\leq 1$  L/min,并保持 10 min,达到以上条件之一者终灌。

(9) 在进行下一道工序施工前,应将封底混凝土面上的钻屑或废水泥清除干净。

## 6 工程质量检测

工程施工完工后,由建设单位委托第三方采用钻心法对桩身混凝土完整性进行检测。检测结果表

(上接第 22 页)

## 4 结语

深层水泥搅拌桩是软基处理中采用较多的一种方法,与桩基础等方法相比具有造价低、施工方便等优点,但在进行设计和施工时必须充分了解工程地质条件,以保证达到可靠的加固效果。

本工程场地属于岩溶地区,通过对场地内的土(溶)洞的详细勘探,确定了土(溶)洞的位置及发育状况,并对土(溶)洞进行了处理后解决了地基承载力不足的问题,使复合地基承载力能够达到设计要求,满足工程需要。溶洞内往往有地下水流动,或有

(上接第 27 页)

## 8 结语

(1) 基桩经过压浆补强处理,单桩承载力有了明显提高,补强后的静压测试结果表明,单桩承载力由原来的 3000 kN 左右提高到 3500~3800 kN,提高了 16%~27%。同时也增强了桩基的嵌固力,连同基坑底板承台间下翻地梁,提高了工程整体结构的刚性和稳定性,消除了地下室抗浮不足的隐忧。补强后经水泥浆液压密渗透胶结的桩端圆砾持力层又在一定程度上隔离了地下承压含水层,成为地下室

明;桩身混凝土完整,无蜂窝、离析现象,施工质量满足设计及有关规范要求。检测完后,由检测单位采用同一强度等级的细石混凝土回灌。

## 7 施工体会

(1) 钢管桩施工设备简单,操作方便,施工工期短,工程造价低,与钻(冲)孔灌注桩相比,工程成本节约 1/3 左右;

(2) 采用钢管桩施工穿过溶洞或溶槽等复杂地层,可以把建筑物上部荷载传递到承载力高、完整性好的基岩上,可缩短人工挖孔桩的桩长;

(3) 采用纯水泥浆对钢管桩外环状间隙进行填充和二次注浆,有利于提高钢管桩整体性和桩周极限侧阻力,从而提高钢管桩的承载力;

(4) 采用钢管桩穿过溶洞或溶槽等不良地质条件的地层,对软弱地基进行处理,给类似工程提供了新的思路;

(5) 本工程采用敞口式钢管桩,承载力稍低,若采用闭口式钢管桩,其承载力会得到提高。

黄褐色流动性粘土,可将水泥浆带走或被稀释,故在地基处理方案和现场施工中应特别注意。本工程通过对溶岩地区的局部土(溶)洞处理,给类似地质条件地区的地基处理方案起借鉴作用。

## 参考文献:

- [1] 叶书麟. 地基处理与托换技术(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [2] JGJ 79-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [3] 顾晓鲁. 地基与基础(第三版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [4] 李慧莹. 土(溶)洞地区施工地基处理[J]. 建筑技术开发, 2002, (8).

工程坑底的一道止水帷幕,为地下室工程的施工创造了较为有利的水文地质施工环境,在整个地下室施工过程中,基坑坑底疏干排水顺畅,坑内渗水较少。

(2) 岩土勘察工作对于工程建设的投资、质量、进度、安全至关重要。要提高取样分析的准确性,更要重视综合分析、综合研究的能力。在对某一工程进行勘察时,还要观察与调研周边的地貌、地层、构造、岩相古地理等相关信息,进行认真分析与论证,才能为设计部门提供有价值的依据。