

水泥搅拌桩在高层建筑地基处理中的设计与应用

刘建伟

(河南地矿局第一地质工程院,河南驻马店 463000)

摘要:从桩体本身和桩与土相互作用原理出发分析了水泥搅拌桩的加固机理,论述了在高层建筑中水泥搅拌桩的设计与计算过程,并通过某水泥搅拌桩工程实例分析了其承载力提高的原理和变形规律。并从桩基检测和变形观测结果证明水泥搅拌桩可有效地应用于高层建筑的地基加固中。

关键词:水泥搅拌桩;复合地基;高层建筑;地基处理

中图分类号:TU472.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)06-0059-03

Design and Application of Cement Mixing Pile for Treatment of High-rise Building Foundation/LIU Jian-wei(No. 1 Institute of Geo-engineering, Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Zhumadian Henan 463000, China)

Abstract: Reinforcement mechanism of cement mixing pile was analyzed based on pile body and pile-soil interaction principle, the design and calculation process of cement mixing pile for high-rise building were discussed and with the case of a cement mixing pile project, improvement of bearing capacity and deformation were explained. It was proved cement mixing pile was effective in application in foundation reinforcement.

Key words: cement mixing pile; compound foundation; high-rise building; foundation treatment

水泥搅拌桩是利用深层搅拌机械将水泥浆或水泥粉输送到地基深处与软土强制搅拌,形成复合地基。这种地基处理技术具有设备简单、操作方便、质量可靠、施工速度快、成本低、无污染、无振动以及对周围环境无不良影响等优点,尤其适用于当前对环境问题日益重视的城市工程建设,已成为国内高层建筑地基处理技术中应用最广泛的技术之一^[1]。

水泥搅拌桩的强度和刚度介于刚性桩和柔性桩之间,其承载性能又与刚性桩相近。然而,水泥搅拌桩单独应用于高层建筑的工程实例并不多见。本文介绍水泥搅拌法用于高层建筑的设计计算过程,通过工程实例表明水泥搅拌法可以用于高层建筑中。

1 深层水泥搅拌桩作用机理

水泥搅拌桩是通过特制的搅拌轴的轮叶,从地面开始破坏搅拌至需要深度,打开阀门将水泥浆或水泥粉由搅拌头注入土体,用搅拌头强制搅拌均匀使水泥等固化剂与原土充分混合发生物理化学反应后形成强度大、压缩性小的桩体,桩体和桩周土共同承担外部荷载形成复合地基。它可分为深层搅拌法(简称湿法)和粉体喷搅法(简称干法)。

通过机械搅拌,把水泥和软土混合形成水泥石

是一种物理和化学的反应过程。水泥遇水后发生水化和水解作用,生成CaO等多种化合物,其中Ca²⁺与粘土矿物表面吸附的K⁺和Na⁺离子进行当量交换,使粘土颗粒形成较大的土团粒,同时水泥水化后生成的胶体粒子,把土团粒连接起来形成蜂窝状结构。随着水泥水化的深入,溶液析出大量的Ca²⁺与粘土矿物中的SiO₂和Al₂O₃进行化学反应,形成稳定性好的结晶矿物和CaCO₃,这种化合物在水和空气中逐渐硬化成为水泥石。处理后的水泥石与软土比较,其力学特性显著改善,无侧限抗压强度为0.3~0.4 MPa,比天然土大几十倍。

水泥石的抗压强度除了与被加固土体的性质有关外,还与水泥的标号、掺合量、龄期及外加剂等有着密切的关系。水泥标号愈大强度增加愈大,水泥标号增加100号,强度可提高30%,因此实际应用中尽量采用高标号的水泥;水泥的掺入比愈大,水泥石的强度逐渐增加,当掺入比(质量分数)<5%时,对水泥石的强度影响不大,因此掺入比必须大于5%,一般的掺入比采用10%~15%;水泥石的强度随着养护龄期的增大而增大,超过90d后,强度的增长才开始稳定,一般采用90d的龄期作为标准;外加剂如木钙、三乙醇胺和石膏等,对加固土起早强、缓

收稿日期:2009-04-01; 改回日期:2009-04-29

作者简介:刘建伟(1971-),男(汉族),河南卢氏人,河南地矿局第一地质工程院助理工程师,探矿工程专业,从事岩土工程方面的施工技术工作,河南省驻马店市乐山路90号豫龙公司山西办,zmdljw@163.com。

凝、减水和节省水泥的作用,但必须避免污染环境^[2]。

2 设计与计算

2.1 地下室的设置和其对基底压力影响计算

在高层建筑中设置地下室有几项优点:可以有效地利用地下空间;加大基础刚度,开成箱筏基础;建筑物的设防、消防等结构问题;有利于不均匀沉降调整。

当设置地下室时,将明显降低地基中的附加应力,所以考虑开挖基坑的卸载作用,可以达到经济的目的。设置地下室后的基底平均压力应按下式计算^[4]:

$$P_0 = P - \gamma_m h \quad (1)$$

式中: P ——基底平均压力; γ_m ——基底标高以上天然土层的加权平均重度; h ——从天然地面算起的基础埋深。

2.2 复合地基承载力的确定

水泥搅拌桩复合地基承载力的确定可采用经验计算法及现场载荷试验法确定。

2.2.1 经验计算法

这种方法的思路是分别确定单桩竖向承载力 R_a 和桩间土的承载力 f_{sk} ,再结合搅拌面积置换率 m ,叠加这两部分承载力得到的复合地基承载力 f_{spk} 。其中,桩体的承载力 R_a 由桩身材料强度(90 d龄期的水泥土立方体抗压强度 f_{cu})或由土的支撑强度(桩侧摩阻力与桩端阻力之和)控制,从安全角度考虑,取两者中的较小值,通常应通过现场荷载试验的方法确定。计算公式分别如下:

$$f_{spk} = m(R_a/A_p) + \beta(1-m)f_{sk} \quad (2)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \text{ 或 } R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha A_p q_p \quad (3)$$

式中: β ——桩间土承载力折减系数; u_p ——桩周长, m ; A_p ——桩的截面积, m^2 ; η ——桩身强度的折减系数,可取0.25~0.33; q_{si} ——桩周第 i 层土的侧阻力特征值,kPa; l_i ——桩长范围内第 i 层土的厚度, m ; α ——桩端天然地基土的承载力折减系数,可取0.4~0.6; q_p ——桩端地基土未修正的承载力特征值,kPa。

2.2.2 现场荷载试验法

这种方法的思路是把桩体和桩间土体共同组成的复合土体作为一个整体来考虑,通过现场荷载试验方法直接确定复合地基的承载力。复合地基承载力基本值按以下规定确定^[4,5]:

(1)当荷载沉降 $Q-s$ 曲线(见图1)上有明显的比例极限时,可取该比例极限荷载所对应的荷载(曲线 a 中直线段末端对应的荷载 Q_{cr});

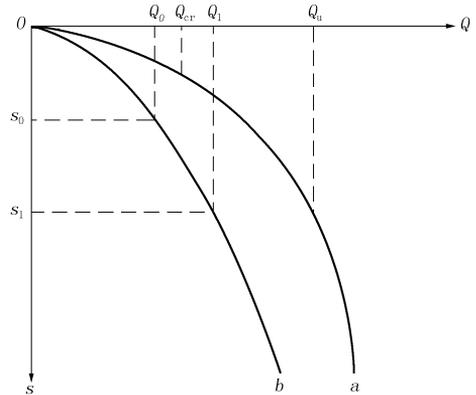


图1 荷载沉降 $Q-s$ 曲线

(2)当极限荷载能确定,而其值又小于对应比例极限荷载值的1.5倍时,可取极限荷载的一半(曲线 a 中 $Q_{cr} < 1.5Q_u$ 时,取 $0.5Q_u$);

(3)按相对变形值确定:取 S/b 或 $S/d = 0.004 \sim 0.01$ 所对应的荷载(b 、 d 为荷载板的边长或直径;曲线 b 中 $[S_0, S_1]$ 区间对应的荷载 $\in [Q_0, Q_1]$, $S_0 = 0.004d$, $S_1 = 0.01d$)。

2.3 置换率和桩数的计算

根据设计要求的单桩竖向承载力 R_a 和复合地基承载力特征值 f_{spk} ,利用式(4)和(5)计算水泥搅拌法的置换率 m 和总桩数 n 。再根据求得的总桩数 n 进行桩的平面布置。

$$m = (f_{spk} - \beta f_{sk}) / [(R_a/A_p) - \beta f_{sk}] \quad (4)$$

$$n = mA/A_p \quad (5)$$

式中: f_{spk} ——复合地基承载力特征值; β ——桩间土承载力折减系数; f_{sk} ——桩间土承载力特征值。

根据求得的总桩数进行搅拌桩的平面布置。桩的布置采用柱状处理形式,桩的平面可采用三角形、正方形或梅花形布置。布桩时要考虑上部结构特点、上部结构对变形的要求、充分发挥桩的摩阻力和便于施工为原则^[3]。

2.4 地基强度与变形验算

当水泥搅拌桩处理范围下存在软弱下卧层时,可按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002)中的规定进行下卧层的强度验算。复合地基的沉降分为加固区的压缩变形量 s_1 和下卧层土体压缩量 s_2 。其中加固区土层压缩量 s_1 可采用复合模量法、应力修正法和桩身压缩量法等计算,下卧层压缩量 s_2 通常采用分层综合法计算^[3]。

3 工程实例

3.1 工程概况

开封某培训大楼平面分布呈“工”字型。东西向展布,南部长 26.0 m,宽 10.1 m,北部长 42.5 m,宽 18.0 m,楼高 18 层,设一层地下室,深约 5.5 m。拟采用框架剪力墙结构,基础总面积 1015 m²。根据地质勘探揭露,场地土位于第四系冲积层上部,主要为全新统及上更新河流相冲积物,主要岩性为粉土、粉质粘土、粉砂、细砂,自上而下可分为 13 层,最大揭穿深度 53.4 m。若采用水泥搅拌法,则其桩身位于第 2~10 层。水位埋深 8.1 m。第 2~9 层地基承载力为 100~130 kPa,第 9~10 层天然地基承载力可达 150~260 kPa。经设计验算(考虑风、雨、雪等附加载荷),复合地基承载力特征值 260 kPa,单桩承载力 200 kPa,利用公式(4)、(5)求得置换率为 19%,进而确定水泥掺入量为 18.2%。采用三角形布桩方式,桩中心距设定为 1.2 m,计算得出总桩数 n 为 1802 根。加固后的检测证明:复合地基承载力为 310 kPa。为防止局部应力集中和沉降过大,对附加应力较大的电梯井处采用桩径为 600 mm 的水泥搅拌桩^[3](其它部位仍为 500 mm 桩径)。

3.2 施工质量控制措施

- (1) 施工前向施工人员进行详细的技术交底;
- (2) 施工场地事先平整,清除地上地下障碍物;
- (3) 严格控制桩位的准确度,测放桩位误差 ≤ 20 mm,桩位总偏差 ≤ 50 mm,保证桩与桩间的搭接长度;
- (4) 桩架上设置吊锤以便控制垂直度,垂直度误差 ≤ 1.5%;
- (5) 水泥进场时应有产品合格证及化验单,施工时,水泥应无结块,无杂质,同时做好水泥的防雨防潮工作;
- (6) 控制水泥用量以满足技术要求;
- (7) 严格实行“四搅四喷”的成桩工艺,复搅到位,保证桩体的均匀性;
- (8) 施工中如因故停机,接桩长度应 > 500 mm;
- (9) 当遇地下障碍物而无法施工时,应及时通知有关单位及管理人员,进行研究处理;
- (10) 施工中详细记录施工过程,如实反映施工情况。

3.3 桩基检测和沉降观测

该项工程在桩基施工结束后和上部结构竣工后分别进行了桩基检测和沉降观测,以检验桩基的承载性能和沉降变形。

(1) 本工程施工结束 28 d,对 14 根桩(500 mm)进行了静载荷试验,结果如图 2 所示,沉降量随荷载增大而增大,在荷载 200 kPa 前时,基本上成线性变化。随着荷载的增加,沉降速率有逐渐增加的趋势,但趋势较平缓,50 号试桩沉降量较大,最大沉降量也只有 38.2 mm,369 和 1264 号试桩沉降较小,其最大沉降量分别为 22.4 和 24.0 mm。对 14 根试桩通过数理统计分析,复合地基承载力特征值为 307.5 kPa,满足设计要求。取心试验 18 组,岩心的无侧限抗压强度 7.1~15.2 MPa。并抽检 500 根桩做低应变动力试验,测试结果表明桩身完整性较好。

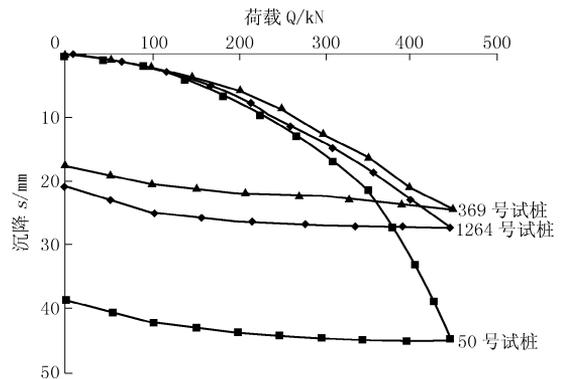


图 2 三根试桩 Q-s 曲线图

(2) 本工程在上部结构施工过程中和竣工后,分别对其进行了沉降变形观测。图 3 和图 4 是第二阶段的观测结果(设竣工时的沉降量为 0 mm),从图 3 可以看出,沉降速率随着时间虽有起伏,但总体趋势有明显减缓,并有沉降迅速稳定的趋势。从图 4 可以看出累计沉降量随着时间增长,曲线比较平缓,在 171 d 后趋势明显减缓。在 1 号观测点沉降量较大,231 d 的累计沉降量为 58.4 mm。其余各点沉降较小,231 d 累计沉降量为 9.1~36.4 mm,各点累计沉降量均未达到 60 mm^[3]。

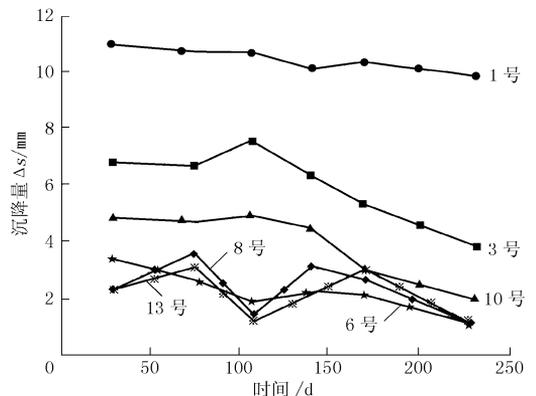


图 3 观测点沉降趋势图

密泥岩,钻进效率达到3.5 m/h,比普通硬质合金钻头提高40%;用 $\varnothing 104$ mm交错式圆片状复合片钻头钻进黑灰色致密泥岩,钻进效率达到3.67 m/h,比普通硬质合金钻头提高53%,每米钻头成本降低4%;用 $\varnothing 104$ mm交错式圆片状复合片钻头钻进灰白色致密泥岩,钻进效率达到3.6 m/h,比普通硬质合金钻头提高64%,每米钻头成本降低4%;用 $\varnothing 104$ mm齿形复合片钻头钻进浅灰色硬致密泥岩,钻进效率达到2.6 m/h,比 $\varnothing 104$ mm交错式圆片状复合片钻头提高73%,每米钻头成本降低35%。

3 结论

(1)在较软的弹塑性致密泥岩中,采用中八角阶梯肋骨钻头可以高效钻进,防止钻头泥包和减少缩径卡钻事故。

(2)在具有一定脆性的致密泥岩中,采用交错式圆片状复合片钻头,可大幅度提高钻进效率和降低成本。

(3)在硬的弹塑性致密泥岩中,采用齿形复合片钻头,是钻进该类型难钻进地层的最佳途径。可

以实现快速钻进和大幅度降低成本。

总之,该矿区3种不同类型的泥岩中,分别设计采用3种典型的钻头,实现分层钻进,取得的效果是显著的,设计理念是科学的,可以推广使用。

参考文献:

- [1] 李雨,蔡家品,贾美玲,等.硬致密泥岩钻进的新型复合片钻头的研制与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(9):60-61.
- [2] EJ/T 1140-2002,地浸砂岩型铀矿钻探规范[S].
- [3] 韩广德.中国煤炭工业钻探工程学[M].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [3] 要二仓,杨爱军,张富兰.地浸砂岩型铀矿中一深孔钻探技术研究科研成果报告[R].内蒙古包头:核工业二〇八大队,2007.
- [4] 胡辰光.钻探工程技术及标准规范实务全书[M].合肥:安徽文化音像出版社,2003.
- [5] 刘晓阳,段隆臣.泥岩层钻进鼠齿式金刚石复合片取心钻头:中国,200720084717[P].2007.
- [6] 要二仓,邢预恩,杨爱军.软硬互层金刚石复合片钻头在地浸砂岩型铀矿中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(1):68-70.

(上接第61页)

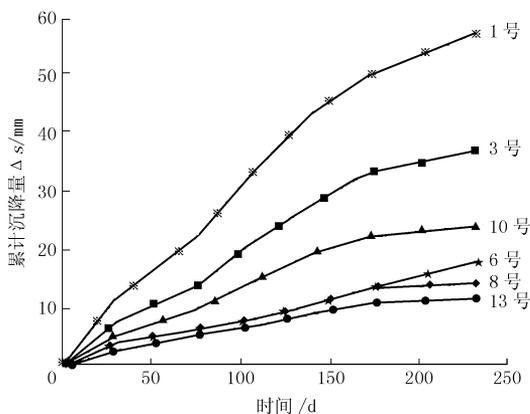


图4 观测点 $s-t$ 累计趋势图

4 结语

本文介绍了水泥搅拌桩的作用原理,论述了水泥搅拌桩应用于高层建筑的设计和计算过程,并通过工程实例说明水泥搅拌桩复合地基可以应用于高层建筑。桩基检测和沉降观测结果表明,这种复合地基承载力能够满足设计要求,沉降量符合规范要求。

水泥搅拌法因其本身固有的优点在地基处理和

加固中应用广泛,已经成为地基处理最重要的方法之一。实践证明,经过合理设计,严格控制施工质量,水泥搅拌法复合地基用于高层建筑时既可以使承载力达到设计要求,又可将沉降变形控制在允许范围之内。由于水泥搅拌桩施工快、成本低,所以采用水泥搅拌法复合地基与采用混凝土灌注桩基和刚柔组合桩复合地基相比,既缩短了工期又极大地降低了工程投资。本文为水泥搅拌法复合地基在高层建筑中的应用提供了实践经验,为高层建筑的地基处理方案的选择提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 马克生,梁仁旺,白晓红.水泥搅拌桩复合地基承载力的试验确定[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15).
- [2] 陈水龙,巨建勋.深层水泥搅拌桩在基坑支护中的应用[J].水利与建筑工程学报,2006,4(3).
- [3] 王博,高有斌,王俊林.在高层建筑中水泥土搅拌桩的设计与应用[J].河南科学,2005,23(5).
- [4] 王燕波.水泥搅拌桩复合地基承载力的探讨[J].昆明冶金高等专科学校学报,2005,21(5).
- [5] JGJ 79-2002,建筑地基处理技术规范[S].
- [6] 洪忠景,罗磊坚.深层水泥搅拌桩在砂层及淤泥层中的应用[J].西部探矿工程,2003,(9).