

水泥粉喷桩加固粉煤灰地基的机理及设计

辛立民, 王铁成

(天津大学建工学院, 天津 300072)

摘要 水泥粉喷桩是当前工程建设界十分关注的一种地基加固新方法。介绍了粉煤灰的应用现状和粉喷桩技术的发展历史,分析了粉喷桩加固粉煤灰地基的原理,进而提出粉喷桩加固粉煤灰地基的计算方法。最后结合工程实践,介绍粉喷桩技术在粉煤灰地基处理中的应用。

关键词 水泥粉喷桩 加固 复合地基 粉煤灰地基

中图分类号: TU472

Principle and Design of Cement Dry Jet Mixing Pile to Reinforce Fly Ash Foundation

XIN Limin, WANG Tiecheng

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract The cement dry jet mixing technique is a new method for foundation reinforcement, which is of great concern in engineering building field. In this paper, the progress of fly ash application and history of cement dry jet mixing technique are reviewed. The principles of the cement dry jet mixing pile to reinforce the fly ash foundation are analyzed, and the calculation methods of the dry jet mixing pile are put forward. Finally, a engineering example is given to introduce the application of dry jet mixing technique to reinforce the fly ash foundation.

Key words cement dry jet mixing pile, reinforcement, composite foundation, fly ash foundation

粉煤灰是目前工业废渣中对人类生存环境影响较为严重的一类废渣,年排灰量达一亿六千万吨以上,累计堆存量达22亿吨,占地面积达44万亩^[1,2]。随着电力工业的发展,粉煤灰排出量一直以强猛的趋势在增长。这种细粒固体废渣,污染空气和水源,占用土地,给人类赖以生存的环境直接构成了威胁,迫切需要加以利用和解决。而改造加固老灰场建造构筑物或建筑物,则为粉煤灰综合利用开辟出一条新路。

1 粉煤灰应用现状及粉喷桩发展

粉煤灰是火力发电厂燃煤锅炉所排除的废渣,其主要化学成分是 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 及 CaO ,其总量约占粉煤灰的85%左右;另外在粉煤灰中,还含有少量 MgO , SO_3 , K_2O , Na_2O 。

经研究粉煤灰具有火山灰的特性,即在水分存在,特别是在水热处理(蒸压养护)条件下,能与氢氧化钙等碱性物质发生反应,生成水硬胶凝性化合物(在潮湿条件下具有凝硬性)。硅、铝氧化物含量超过70%以上, SiO_2 是玻璃的主要成分,是形成水化硅酸盐胶体的主要来源, SiO_2 含量越高,粉煤灰的活性也就越大。粉煤灰中的 CaO ,对凝胶体的形成是有利的,但在我国的粉煤灰资源中, CaO 含量在3%左右的占大多数,基本上没有自硬性。 MgO 的含量过高以后,会对安定性产生不利的影响。

目前粉煤灰的应用主要在如下几方面:作为水泥的原材料,入窑煅烧成水泥熟料;作为水泥的混合材料,与水泥熟料共同粉磨,配制成粉煤灰硅酸盐水泥;作为混凝土的掺合料,与水泥、集料、水、外加剂一起制备成混凝土^[3,4];用于生产建材制品^[5];作为筑路材料;作为填充材料

或造地等环境工程材料^[6]。而直接加固粉煤灰灰场作为建筑物或构筑物的地基方面的研究及应用很少。

水泥土搅拌法分为干法和湿法,主要是根据固化剂掺入的状态的不同,分为浆液搅拌(湿法)和粉体喷射搅拌(干法)两种。粉体喷射搅拌桩(简称粉喷桩)是目前国内常用的一种加固软土技术,它以水泥或生石灰为固化剂,通过喷粉桩机与原土、地下水强制搅拌形成水泥土桩,以此提高地基承载力。

粉喷搅拌法(Dry Jet Mixing Method 简称DJM法)最早由瑞典人Kjeld Paus于1967年提出了使用石灰搅拌桩加固15m深度范围内软土地基的设想,并于1971年瑞典Linden Alimat公司在现场制成第一根用石灰粉和软土搅拌成的桩,1974年获得粉喷技术专利,生产出的专用机械的桩径500mm,加固深度15m。1977年,由我国冶金建筑研究总院和交通部水运规划设计院引进,并于1980年应用于工程实践。铁道部第四勘测设计院于1987年研制成功GPP-5型粉喷机并投入工程实践。

粉喷搅拌法适用于处理淤泥、淤泥质土、粉土、粉煤灰和含水量较高且地基承载力特征值不大于120kPa的粘性土等地基。

2 粉喷桩加固地基机理

地基加固的主要目的是提高软弱地基的强度、降低软弱地基的压缩性,以减小基础的沉降和差异沉降。粉喷桩是利用水泥或生石灰作为粉状固化剂,通过压缩空气这一载体,把固化剂输送到搅拌翼片处,并以雾状喷射到加固地基的土层中。借翼片旋转,加以强制搅拌使之充分混合,通过水泥

*天津市建设管理委员会重大科技资助项目(01222073)

辛立民:男,1965年生,副教授,主要从事结构设计理论研究 E-mail: xinhonghan@163.com

的吸水水化固结形成具有整体性、水稳性和一定强度的柱状体，从而加固软弱地基。

水泥粉喷桩在粉煤灰地基的加固作用主要源于粉煤灰三大基本效应：形态效应、活性效应和微集料效应。

所谓形态效应，是指由其粉煤灰颗粒的外观形貌、内部结构、表面性质、颗粒级配等物理性状所产生的效应^[7]。由于粉煤灰具有独特的颗粒特征，因而将使得它具有不同于其它矿物质粉料的形态效应。从对水泥基材料性能的影响来说，粉煤灰的形态效应主要表现为三个作用，即：填充作用、润滑作用和均化作用。对于粉煤灰的均化作用，日本山崎宽司提出了“粉末效应”的概念，认为由于粉煤灰微粒的作用，使水泥浆体中水泥颗粒均匀分散。后来人们发现其实粉煤灰对水也存在着均化作用，甚至在引气混凝土中，粉煤灰对引入的气泡也有均化作用。

粉煤灰具有一定的活性，它能与水泥熟料水化时放出的Ca(OH)₂反应，生成C-S-H凝胶等水化产物。在粉煤灰水泥的水化过程中，水泥熟料的水化反应与粉煤灰的火山灰反应是相互促进的。水泥熟料水化释放出Ca(OH)₂，为粉煤灰的火山灰反应提供了条件；粉煤灰的火山灰反应吸收了Ca(OH)₂，又可以促进水泥熟料的水化^[8]。另外，普通硅酸盐水泥中的硫酸钙和铝酸钙同粉煤灰地基中的水发生水化反应，生成一种被称为水泥杆菌的化合物。水泥杆菌化合物把大量的自由水以结晶的形式固定下来。当水泥的各水化物生成后，其自身继续硬化形成水泥石膏架。同时，水泥水化生成的凝胶粒子比原来水泥颗粒大约1000倍，因而产生很大的表面能，使之具有强大的吸附活性，把较大的粉煤灰颗粒进一步结合，形成水泥中的团粒结构，使水泥的强度提高。更主要的是，水泥水化反应析出的大量钙离子，能与粉煤灰中的二氧化硅及三氧化二铝发生化学反应，逐渐硬化也就是凝硬反应。凝硬反应增大水泥粉煤灰强度，具有足够的水稳性。通过电子显微镜的观察，粉煤灰各颗粒间无任何有机的联系，孔隙很多；拌入水泥1星期后，粉煤灰颗粒周围充满了水泥凝胶体，并有少量水泥水化物萌芽；4个星期后，水泥粉煤灰中生产大量纤维状结晶，并不断延伸充填到颗粒间的孔隙中形成网状结构；21星期后，纤维状结晶辐射向外扩展，产生分叉，并相互联结形成空间网状结构，这时水泥的形状和粉煤灰的形状已不能分辨。

粉煤灰的微集料效应是粉煤灰效应中不可忽视的一个重要组成部分，它对混凝土许多性能的改善起着积极的作用。粉煤灰颗粒优越的微集料性能主要体现在三个方面：粉煤灰玻璃微珠本身强度很高，厚壁空心微珠的抗压强度可达700MPa以上；具有较好的界面性能。对于一般的微混凝土来说，硬化水泥浆体结构中最薄弱的联结部分是微集料与浆体之间的界面，但对粉煤灰和水泥浆体界面处显微硬度的研究表明，粉煤灰界面层的显微硬度大于水泥凝胶的显微硬度。大量研究表明，破坏往往不在粉煤灰颗粒界面发生，而在水泥凝胶部分发生；粉煤灰微粒在水泥浆体中分散状态良好，有助于新拌混凝土和硬化混凝土均匀性的改善，也有

助于混凝土中孔隙和毛细孔的充填。

水泥粉喷桩的强度试验表明，水泥粉煤灰地基具有如下特性：水泥粉煤灰地基的强度随着水泥掺合比的增加而增加；水泥粉煤灰地基的强度随着水泥强度等级的提高而增加，水泥强度等级每提高10N/mm²，水泥粉喷桩的无侧限强度增加20%~30%；水泥粉煤灰的无侧限强度随着地基含水量增加而下降。因此，对于含水量高的粉煤灰地基，只能采用干法而不能采用湿法。

3 粉喷桩设计方法

水泥粉喷桩加固的范围由基础尺寸和粉煤灰在场地的范围确定；粉煤灰层的厚度则决定搅拌桩体的长度，且桩体应伸入粉煤灰层底部；根据要求承载力的大小，初步选定搅拌桩的间距，进而定出加固范围内搅拌桩的总数及每平方米内搅拌桩所占的面积。

复合地基承载力特征值，应通过现场复合地基荷载试验确定，初步设计可按《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)^[9]，第9.2.5条的公式

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

式中： f_{spk} 为复合地基的承载力标准值(kPa)； m 为面积置换率； R_a 为单桩竖向承载力标准值(kN)，通过现场单桩载荷试验确定； A_p 为桩的截面面积(m²)； f_{sk} 为桩间天然地基土承载力标准值(kPa)； β 为桩间土承载力折减系数。当桩端土为硬土时，可取0.1~0.4，当桩端土为软土时，可取0.5~0.9。

单桩竖向承载力特征值应通过现场荷载试验确定，初步设计时可按JGJ79-2002第11.2.4条公式(2)估算，并应同时满足公式(3)的要求

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (2)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (3)$$

式中： f_{cu} 与搅拌桩身水泥粉煤灰配比相同的室内加固粉煤灰试块(边长为70.7mm的立方体，也可采用边长为50mm的立方体)在标准养护条件下90d龄期的立方体抗压强度平均值(kPa)； η 桩身强度折减系数，干法可取0.20~0.33； u_p 桩的周长(m)； n 桩长范围内所划分的土层数； q_{si} 桩周第*i*层土的侧阻力特征值。对淤泥可取4~7kPa；对淤泥质土可取6~12kPa；对软塑状态的粘性土可取10~15kPa；对可塑状态的粘性土可以取12~18kPa； l_i 桩长范围内第*i*层土的厚度(m)； q_p 桩端地基土未经修正的承载力特征值(kPa)，可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007的有关规定确定； α 桩端天然地基土的承载力折减系数，可取

0.4~0.6 承载力高时取低值。

竖向承载搅拌桩复合地基的变形包括搅拌桩复合土层的平均压缩变形 s_1 与桩端下土层的压缩变形 s_2 :

搅拌桩复合土层的压缩变形 s_1 可按下式计算 :

$$s_1 = \frac{(p_z + p_{zd})l}{2E_{sp}}$$

$$E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s$$

式中: p_z 搅拌桩复合土层顶面的附加压力值 (kPa); p_{zd} 搅拌桩复合土层底面的附加压力值 (kPa); E_{sp} 搅拌桩复合土层的压缩模量 (kPa); E_p 搅拌桩的压缩模量, 可取 (100~120) f_{cu} (kPa), 对桩较短或桩身强度较低者可取低值, 反之可取高值; E_s 桩间土的压缩模量 (kPa);

桩端以下未加固土层的压缩变形 s_2 可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB5007 的有关规定进行计算。

设计内容及程序如下: 根据上部结构荷载要求及拟处理粉煤灰地基的性质, 设定复合地基承载力; 单桩承载力的估算及置换率的确定; 选择适宜的桩长、桩径及水泥掺入比; 确定布置桩形式、数量。

4 工程实例

2002 年以来, 淮南市已开工建设第一污水处理厂工程、第一污水处理配套管网工程、西部污水处理厂工程和凤台县污水处理厂工程等 4 项工程, 累计投资近 6 亿元。目前, 第一污水处理厂工程已全面完工并投入运营, 日处理污水能力达 10 万吨; 其余工程将相继于 2005 年和 2006 年建成。

淮南市第一污水处理厂工程靠近淮河南岸, 总占地面积为 66550m²。建造在淮南市田家庵电厂粉煤灰排放池上, 为一软弱地基。工程对变形及工期要求较高, 采用常规办法不易满足, 经比选, 采用粉喷桩技术进行地基加固处理。

4.1 地质情况及地基处理要求

工程地质勘察部门对该建筑场地的评价表明, 工程地点位于淮河南大堤北侧。属于淮河高漫滩地带, 原为洼地, 现为电厂的事故灰场, 场地四周高, 中间低, 高差在 1m 左右。场地工程地质条件为: 素填土, 局部存在, 分布在东、南、北侧堤坝处, 主要成分为粘性土; 粉煤灰, 全场分布, 除堤坝处较薄外, 其他部位均较厚, 一般在 9~10 m, 呈松散或半松散状态, 含水量随季节变化明显, $f_{sk} = 55 \sim 75$ kPa;

粘土, 场区大部分存在, 为黄褐色, 厚度 0~5.6 m, 埋深在 15.86~20.17m 标高处, 硬塑, 含少量铁锰结核和钙结核, $f_{sk} = 240$ kPa。

厂区内构筑物 and 建筑物占地面积为 23598m², 厂前区综合楼占地面积为 600m², 需要在粉煤灰软弱地基上打粉喷桩的面积约为 24199m²。要求加固后的复合地基承载力达到 100kPa。

4.2 复合地基设计

根据 $f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk}$ 可反算出面积

置换率 m , 具体计算如下: $f_{spk} = 100$ kPa, $R_a = 100$ kN, $A_p = (0.5/2)2\pi$, $\beta = 0.2$, $f_{sk} = 65$ kPa 代入 (1) 求得 $m = 0.175$, 当桩正方形布置时:

$$m = \frac{d^2}{d_e^2} \quad (4)$$

d 为桩的直径, m; d_e 为等效影响圆的直径, m,

$d_e = \sqrt{\frac{4}{\pi}}s = 1.13s$; s 为桩间距, m。把 $m = 0.175$,

$d = 0.5$ m, $d_e = 1.13s$, 代入(4)式, 求出: $s = 1.12$ m。

本工程为了验证设计, 前后两次在场内打试验桩, 并通过静载试验, 最后确定固化剂采用 425# 矿渣硅酸盐水泥, 桩喷灰量为 60kg/m, 桩径 500mm, 氧化沟和厌氧池桩距 1m, 终沉池 6-1、6-2 桩距 800mm, 6-3、6-4 桩距 1m; 因老土表面不平, 以粉喷桩插入老土 0.5m 为原则来确定桩长。

4.3 加固技术要求

(1) 施工前平整场地, 氧化沟和厌氧池土方推平至 23.35 m 标高, 终沉池土方推平至 24.10 m 标高。根据桩位平面布置图, 排桩号和施工流水段。同时组装架立喷桩机, 检查主机及其他各系统正常后, 移动搅拌主机对准设计桩位。

(2) 为了保证成桩质量, 成桩时提升速度不得大于 一档 (慢挡), 同时, 为保证桩底部施工质量, 使桩能真正支承在硬土层, 当下钻到距硬土层 1m 时, 就开始送灰。

(3) 当钻至设计桩底并确认已插入底部硬土层后, 应保证送灰已到达桩底方可提升, 严禁造成浮桩现象。

(4) 成桩过程中要保证送灰均匀, 如喷灰量不能满足设计要求要对全桩进行二次成桩, 二次成桩喷灰量总和不得小于设计灰量的 1.4 倍。

(5) 由于机械故障造成的断桩, 要求搭接长度不小于 1m, 搭接间隔时间不超过 24h, 否则, 应作加桩处理。

4.4 成桩质量控制

(1) 桩位中心线偏位规范允许 ± 0.1 m, 实际施工中有个别桩超标, 如 6-3 终沉池 1470# 桩打偏 0.250m, 1720#、4011# 桩亦超标, 均作补桩处理;

(2) 钻杆被水泥堵塞, 造成成桩中断, 这种故障在开始时较多。当重新成桩时, 钻杆要下钻 1m, 再喷灰成桩;

(3) 严格控制桩长, 当遇到地质情况变化时, 要增加成桩长度, 以保证粉喷桩插入硬土层 0.5m;

(4) 停灰面以下相当长一段距离不能成桩, 如脱水机房, 571# 桩空桩长达 2m (停灰面以下 2 m 没有桩, 是个空洞), 564# 桩、566#、567# 桩分别空桩 1.2m, 这四根桩作接桩处理, 为了保证地基加固质量在每根桩旁都加打一根桩;

(5)对于低应变检测发现的少部分桩身灰土不连续,分析产生的具体原因,采取相应措施。如:机械开挖土方时挖断,做接桩处理;搅拌不匀,则应在桩旁加打一根桩。

4.5 加固效果

工程1999年2月23日开工,1999年9月21日完工,共计完成粉喷桩32984根239533m,耗用425#矿渣硅酸盐水泥12564t。通过对粉喷桩随机抽样,进行复合地基垂直静载等方面的试验结果分析,得出各单点复合地基承载力达到设计要求,其复合地基加固效果显著。工程被评定为优良工程。

5 结论

(1)水泥粉喷桩加固粉煤灰地基效果显著,加固后形成的复合地基强度满足工程设计要求,利用水泥粉喷桩加固粉煤灰地基是可靠的。

(2)粉煤灰地基处理的工程实例也进一步表明,粉煤灰地基加固的设计路线和计算方法是可行的。

(3)水泥对粉煤灰地基的加固作用是多方面的,它源于粉煤灰的三大基本效应,即形态效应、活性效应和微集料效应,是多种胶结作用共同作用的结果。

(4)通过对粉煤灰灰场的改造,既节约建筑土地,也为粉煤灰灰场再利用开辟了新途径。

参考文献

- 1 阎明礼,吴春林,扬军.水泥粉煤灰碎石桩复合地基试验研究[J].岩土工程学报,1996(3):55
- 2 王爱勤.粉煤灰三大效的研究及其在三峡工程中的应用[D].南京:东南大学,1999
- 3 Brink R H, Halstead W J. Studies relating to the testing of fly ash for use in concrete[J]. Proceedings of ASTM, 1956,56:1161
- 4 Ghosh R S. Proportioning concrete mixes incorporating fly ash[J]. Canadian Journal of Civil Engineering (Ottawa), 1976, (3): 68
- 5 辛立民.利用锅炉渣及烟囱灰生产空心砌块[J].新型建筑材料,1998,(6):15
- 6 Kuan-Yeow Show, et al. Reuse of incinerator fly ash in soft soil stabilization[J]. Journal of Materials in Civil Engineering(ASCE), 2003,(8): 335
- 7 高大钊.地基加固新技术[M].北京:机械工业出版社,1996
- 8 阎明礼.地基处理技术[M].北京:中国环境科学出版社,1996
- 9 JGJ79-2002,建筑地基处理技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002