

粉煤灰在地基处理工程中的应用

史春乐 俞仲泉 杨 涛 雷国辉

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

摘要 在深层地基处理中,粉煤灰主要用于二灰桩、二灰土桩、粉煤灰混凝土桩、粉煤灰固结桩、混凝土-二灰组合桩等桩型,与土体共同构成复合地基加固深层软土。在浅层地基处理中,利用粉煤灰作垫层既经济又实用,但应注意地震液化。无论用粉煤灰作深层处理还是浅层处理,虽然不会污染环境,但对地下埋设的金属构件有一定腐蚀性,应采取一定的防腐措施;在寒冷地区用粉煤灰作浅层处理时,要注意其抗冻胀性。

关键词 粉煤灰 地基处理 粉煤灰桩 复合地基 垫层 加固, 桩基

粉煤灰是煤粉燃烧后的残渣,是燃煤电厂常年不断的排出物。目前,我国燃煤电厂每年排出的粉煤灰已在5000万t以上^[1]。随着能源需求的不断增加,预计到本世纪末粉煤灰的年排放量达1.9亿t^[2]。要把如此大量的粉煤灰贮放起来,不仅占用土地,而且对环境构成不同程度的威胁,建造贮灰场又要耗费国家大量的工程投资费用,一旦失事,还会影响附近居民的正常生活。因此,对粉煤灰的处理和利用已成为我国面临的一个较突出的经济和社会问题。

可喜的是,近年来粉煤灰在地基处理工程中的应用受到岩土工程界的广泛重视。粉煤灰具有容重小、渗透性好、较高的静力抗剪强度、较低的压缩性、与石灰等碱性物质产生水化反应后产生凝硬性等特性。但是,饱和疏松状态下的粉煤灰在振动作用下极易产生动力液化,其抗液化强度与颗粒粗细相近的砂土相比并无明显差别。广大工程技术人员在研究粉煤灰基本工程特性的基础上,扬长避短,开发出了许多利用粉煤灰加固地基的新方法、新

技术,取得了很大的社会 and 经济效益。

1 粉煤灰在深层地基处理中的应用

目前,粉煤灰主要用于二灰桩、二灰土桩、粉煤灰混凝土桩、粉煤灰固结桩、混凝土-二灰组合桩等,与土体共同构成复合地基加固深层软土。

1.1 二灰桩

在岩土工程界,用来改良地基的二灰桩有两种,其材料均是粉煤灰与石灰的混合料,只是掺合的比例不同。一种是以粉煤灰为主的二灰混合料。孙连进^[3]等对该种二灰混合料的工程性质及强度机理作过试验研究,且已找出粉煤灰与石灰的最佳配比是9:1至8:2之间(指重量比)。梁新华^[4]、诸国平^[5]、张小平^[6]将这种二灰作为桩体材料,通过室内外大量试验及计算分析,认为该种二灰桩(以下称粉煤灰桩)无论从加固效果、桩身强度还是经济效益来看,均明显优于水泥搅拌桩。俞仲泉等^①将粉煤灰桩首次用于软粘土地基的加固,使复合地基承载力较天然地基提高

①俞仲泉等.二灰挤密桩加固东环路软基的技术总结,河海大学,1994。

第一作者简介:史春乐,男,硕士,从事软土地基加固及桩基检测的研究。

了142%,桩间土承载力提高了46%,取得了显著的经济效果。周芝英^[7]等也将粉煤灰桩用于灰场地基的加固。

粉煤灰桩的加固机理是:①桩间土的挤密作用。在粉煤灰桩成桩过程中,压实桩体用的机具对桩周土体产生一定范围的塑性挤密区,塑性挤密区中的土体,初始孔隙水压力较大,随着时间的推移,产生的孔隙水压力通过粉煤灰桩体逐渐消散,土体得到排水固结,强度得到提高。②桩的置换作用。在桩体密实度较大的情况下,其无侧限抗压强度在龄期为90d时, $q_u = 2.0 \sim 4.7 \text{ MPa}$,变形模量为50~250 MPa,为一般土体模量的数十倍,在荷载作用下,桩体产生应力集中,分担较多的荷载,并传递给深层土体,提高了加固地基的承载力。

另一种二灰桩是以石灰为主(以下称石灰-粉煤灰桩),其常用配比为粉煤灰:生石灰为3:7~1:9(重量比)。这是从纯石灰桩发展而来的。为了解决纯石灰桩桩身的软化问题,江苏省建筑设计院率先尝试掺粉煤灰的办法并获得了较好的效果^[8]。目前,石灰-粉煤灰桩也同样得到了广泛的应用。

鉴于石灰-粉煤灰桩以石灰为主,因此其加固机理与前述粉煤灰桩不同。除了同样具有置换作用和成孔挤密作用外,还具有:①膨胀挤密。生石灰吸水膨胀,对桩间土产生很强的挤压力,促使周围土挤密。②脱水挤密。生石灰吸水反应放出大量的热量,使土体产生一定的汽化脱水,从而导致土中含水量下降,孔隙水减少,土颗粒靠拢挤密。③胶凝作用。石灰与土产生反应生成的水化物使土凝聚性增大,改变了土的结构,提高了土的强度。

目前,粉煤灰桩主要用于地下水位以下的各种软弱地基的加固,加固深度不超过12m;而石灰-粉煤灰桩在用于地下水位以上的各种软弱地基的加固中效果明显,如湿陷性黄土、素填土、杂填土等。但也可用于地下水位以下软弱地基的加固。就桩体强度而言,同样条件下(同龄期、同密度)粉煤灰桩较大。

粉煤灰桩及石灰-粉煤灰桩均需开孔挤密成桩,目前常用振动沉管打桩机管外投料挤密而成。因此,掌握好桩体的密实度及桩体的连续性是施工成败的关键,在地下水位以下的软土中施工尤其如此。马鞍山矿院曾研制了螺旋挤密器施工机具^[4],专门用于粉煤灰桩的施工,桩体干密度可达 1.2 g/cm^3 。但该机具施工效率较低,还有待于进一步改进。

1.2 二灰土桩

所谓二灰土桩,是在上述二灰混合料的基础上,在材料混合时再加入一定量的土,按上述同样的方法打入土中而成的桩。对二灰土混合料的工程特性,人们研究得较早,最初主要用于回填地基中。近来,河海大学对二灰土混合料的力学特性进行了大量试验研究,并作为桩体材料在宁通一级公路的软基加固中予以大量应用。

二灰土桩的优点是其材料容重较二灰混合料高,有利于成桩时下料挤密。就强度而言,二灰土桩桩身强度较同条件下(同密度、同龄期)的粉煤灰桩小,与灰土桩接近。其加固机理与灰土挤密桩类似。

1.3 CFG桩

CFG桩又叫粉煤灰混凝土桩。它是在碎石桩基础上加进一些石屑、粉煤灰和少量水泥加水拌和制成的一种具有粘结强度的半刚性桩,该桩型由中国建筑科学研究院地基所率先提出,与碎石桩复合地基相比,CFG桩复合地基具有承载力提高幅度大、沉降量小、沉降快等优点。文献[9]报道了采用CFG桩处理淤泥质粘土地基的工程实例,经测试承载力提高140%,压缩模量提高4%~132%,与其它处理方法相比,经济效益提高显著,基础工程总造价比预制桩方案节省1/3~1/2,比灌注桩方案节省1/4~1/3,比碎石桩方案节省1/6~1/5。

正因如此,这种桩型近来在岩土工程界非常活跃,得到了广泛的应用。一些学者针对CFG桩本身的特点对CFG桩复合地基的设计理论也进行了研究^[9~11]。

目前,CFG 桩桩体强度等级一般按单桩极限荷载确定,分项系数取 1.5,但不宜低于 C5,一般取 C8~C12 为宜。配合比设计可参照规范并根据强度要求由室内试验确定。由于粉煤灰掺入量大,CFG 桩体强度较普通混凝土增长慢,故其龄期宜定为 60d。若以 60d 的强度作为最终强度,则 7d 可达最终强度的 40%~50%,28d 可达最终强度的 70%~80%。

CFG 桩可用于对地基承载力要求较高的地基处理中。与垫层处理结合,CFG 桩还可用于高层建筑的地基处理。

1.4 粉煤灰固结桩^[12]

在软弱地基中采用粉煤灰固结桩,具有成桩可靠、形状任意选择、造价低廉、改良地基效果好、抗变形能力强、桩体密实度高等优点。

粉煤灰固结桩成桩过程如图 1 所示。粉煤灰泥浆是由粉煤灰、水泥、石膏加水制成,加压注入尼龙袋中,挤密周围土体,必要时注浆管可上下反复二次压浆。尼龙袋具有模板、过滤脱水、加压和增强等效果。由于灌注时用加压排水措施,尼龙袋微孔在灰浆向外渗出过程中,水只能向外渗,并被隔在袋外,形成固结硬化均匀的桩体。

该种桩型目前国内使用较少,值得进一步开发研究。

1.5 混凝土-二灰组合桩

文献[13]通过对石灰桩、二灰桩及灰土桩复合地基的桩体受荷特性分析,认为这些柔性桩的处理效果主要由上端(1~2)d 范围内桩身材料强度控制。基于这一点,作者在

黄土状亚粘土地基上,进行了采用桩上段混凝土灌注(长 3d~4d)与下段二灰桩组合的组合桩单桩承载力试验研究,分析了组合桩提高承载力的合理因素,提出了混凝土-二灰组合桩的设计计算方法。

这种组合桩一定程度上克服了像二灰桩那样的柔性桩桩顶强度偏小的缺陷,使得桩身荷载向更深处传递,提高了复合地基的承载力。但该种桩的承载力受二灰桩体强度的限制,上段混凝土强度不可能充分利用。

1.6 其它

目前,在混凝土桩、水泥搅拌桩、旋喷桩中,粉煤灰常用来替代部分水泥,以节约水泥用量,降低工程造价。当然,这可能要以降低桩身强度为代价。因此,这方面的应用要根据实际工程,结合室内配比试验综合确定。

2 粉煤灰在浅层地基处理工程中的应用

垫层处理是浅层地基处理中较为常见的一种形式。研究表明,粉煤灰具有良好的工程特性:①重量轻。粉煤灰的容重一般小于土的容重,因此在作垫层时可减少基础持力层的自重作用,增强地基的承载力。②最优含水量区间较宽,一般 $w_{op} = 28\% \sim 38\%$,便于施工压实时控制最优含水量。③渗透性好。渗透系数 $k = 10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$,且大多数为 10^{-4} cm/s ,相当于粉土,作为垫层时排水效果好,可以加速持力层土体在上部结构荷载作用下的排水固结。④压实后具有较高的强度。一般粉煤灰垫层的地基承载力大于

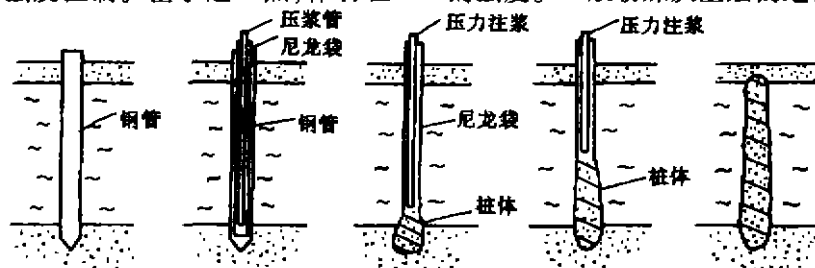


图 1 粉煤灰固结桩成桩示意

(a)打入钢套管;(b)在钢套管中置入尼龙袋及注浆管;
(c)拔出套管加压注入粉煤灰泥浆;(d)在施工中;(e)成桩

等于 120 kPa。上海宝钢产粉煤灰,其垫层标准贯入击数 $N = 7 \sim 11$ 击,平均 9 击;黄砂垫层 $N = 7 \sim 9$ 击,平均 8 击,粉煤灰垫层优于黄砂垫层。文献[14]报道了粉煤灰垫层承载力达 200 kPa 的实例。

因此,在作地基浅层处理时,利用粉煤灰作垫层可达到既经济又实用的效果,较其它材料优越。

国内粉煤灰垫层的常用做法是:以粉煤灰为主,掺合少量石灰或水泥制成混合料,每层铺厚 20~25 cm,用 600 kg 的振动碾碾压而成。常用配比为:粉煤灰 80%~90%,石灰 10%~20%,水泥 5%~10%。各种配比的试块 28 d 强度在 0.5~7.5 MPa 之间。也可将粉煤灰与碎石混合后压实而成,配比为:2%~3% 石灰,8%~12% 粉煤灰,85%~95% 碎石。应用时可根据具体情况由试验确定配比。

为了进一步提高经济效益,人们尝试利用纯粉煤灰作垫层。这在地下水位以下时就遇到了粉煤灰软化的问题。试验及工程实践表明,当粉煤灰垫层位于地下水位以下时,由于浸水饱和的确会使粉煤灰产生结构软化,导致强度或承载力的降低。但降低幅度并不很大,其变化幅度大约为 20%~30%,沉降变形增大 10%^[14]。只要设计人员设计时考虑这一因素,设计时承载力作些折扣,纯粉煤灰垫层还是安全的。

因此,利用纯粉煤灰作垫层是可行的,但地震时要防止其液化。几种垫层处理效果如图 2 所示。

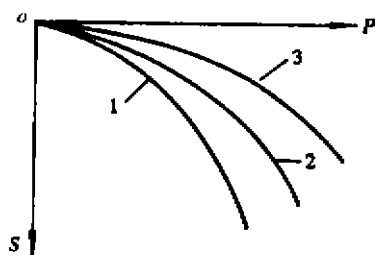


图 2 几种垫层处理效果比较
1. 纯粉煤灰垫层; 2. 掺石灰垫层;
3. 掺石灰、碎石垫层

值得一提的是,粉煤灰是有侵蚀性的物质,但无论是用作深层处理还是浅层处理,不构成对环境的污染,对地下埋设的金属构件具有一定腐蚀性,但不必为此作特殊处理,仅作一般防腐措施即可^[14,15]。另外,在东北地区利用粉煤灰作浅层地基处理时,还要注意其抗冻胀性。

3 结 语

a. 粉煤灰作为一种特殊的工程材料,在地基处理工程中有着广泛的应用。尤其是二灰桩、CFG 桩,在地基处理中有着独特的优势。

b. 由于粉煤灰具有重量轻、最优含水量变化范围大、渗透性好、压实后具有较高的承载力等特性,因此在垫层处理中比其他材料更优越,经济效益更显著。但在地下水位以下应用时应注意其结构软化问题,在地震区应注意其液化问题,此时可掺合少量石灰或水泥以提高其强度。

c. 粉煤灰在地基处理工程中的大量应用不构成环境污染,但对埋入构件有一定的腐蚀作用。

d. 随着人们认识的不断深入,新的应用领域将会被不断开发,粉煤灰这一次生资源将会发挥更大的作用。

参考文献

- 1 陈愈炯,俞培基,李少芬.粉煤灰的基本性质.岩土工程学报,1988,10(5):3~16
- 2 郇能惠.灰渣的贮放和利用.岩土工程学报,1988,10(5):17~32
- 3 孙连进.粉煤灰、二灰工程性质试验研究——兼论其在软基处理中的应用:[学位论文].南京:河海大学,1993
- 4 梁新华.二灰挤密桩加固软土地基试验研究:[学位论文].南京:河海大学,1993
- 5 诸国平.二灰性能及二灰桩复合地基受荷分析:[学位论文].南京:河海大学,1994
- 6 张小平.二灰挤密桩的试验研究:[学位论文].南京:河海大学,1995
- 7 周芝英,方永凯.粉煤灰地基的两灰桩加固.岩土工程学报,1988,10(5):107~112 (下转第 42 页)

效用增量和生产者效益增量的基础上,用协商公理化方法建立分时电价协商模型,提供了制定电价的又一思路。此外,水电项目上网电价亦应按动态考虑,使得投入与产出计算口径一致。

3.5 改革水电前期工作经费的筹集机制

我国水力资源丰富,但开发利用程度很低,其项目储备减少是影响因素之一。为使水电前期工作满足水电发展需要,文献[8]建议国家对水电应与石油、煤炭一样,享受一次能源勘探的待遇,增拨资源勘探费;国家开发银行每年按排一定的水电前期工作软贷款,向已建水电站回收水能源勘探前期工作费,可行性研究阶段所需工作经费由项目业主承担。以改变水电前期投入与产出分离的两条线运行机制,走资源勘探与开发一体化的路子,改善前期工作资金短缺的状况。

4 结 语

环境恶化是影响人类生存的三大因素之一,制定有利于环境保护的产业政策已是必然。国家对电力工业的发展方针也是优先发展水电,大力发展火电,积极发展核电,水电建设实行大中小结合,梯级滚动开发,综合利用。这一政策为水电发展创造了机遇,但同时由于水电工程一次性投资较大、工期较长、淹没移民等问题,又给水电开发蒙上一层阴影。如何运用市场经济的思想对水电开发问题进行多方

位的定性、定量研究,以科学的理论来支撑“优先开发水电”这一观点是我们今后努力的方向。

参考文献

- 1 罗西北.关于优先发展我国水电的思考.水能技术经济,1995,15(2):4~9
- 2 中国水力发电工程学会课题组.我国90年代水电科技发展战略研究.水力发电学报,1995(1):1~12
- 3 陈宪.市场经济中的政府行为.上海:立信会计出版社,1995,162,194
- 4 何格高,朱培林.在社会主义市场经济体制下如何加快水电建设的探讨.水能技术经济,1995,15(2):7~10
- 5 张德旺.争取煤炭和环保基金促进我国水电开发.水能技术经济,1995,15(1):12~16
- 6 朱军峰.水电需要国家优惠政策.水能技术经济,1995,15(3):20~25
- 7 王先甲,冯尚友.基于均时电价的分时电价协商模型.水电能源科学,1995,13(3):160~166
- 8 中电联课题组.改革水电前期工作经费筹措及其管理的研究.水能技术经济,1995,15(4):8~14

(收稿日期:1996-03-26 编辑:马敏峰)

(上接第33页)

- 8 叶书麟.地基处理.北京:中国建筑工业出版社,1988
- 9 张雁,黄强.半刚性桩复合地基性状分析.岩土工程学报,1993,15(2):86~93
- 10 吴春林等.CFG桩复合地基承载力简易计算方法.岩土工程学报,1993,15(2):94~103
- 11 宰金珉.复合桩基设计的新方法.见:龚晓南等编.第七届全国土力学与基础工程学术会议文集.北京:中国建筑工业出版社,1994.611~615
- 12 唐业清.工业废料在建筑地基处理工程中的应用.岩土工程学报,1990,12(4):73~78
- 13 张雁.混凝土-二灰组合桩试验研究.见:第三届全国地基处理学术讨论会论文集.杭州:浙江大学出版社,1992.459~462
- 14 沙俊民等.南通粉煤灰填筑工程的试验研究.岩土工程学报,1988,10(5):93~99
- 15 汪肇京.粉煤灰在土工方面的应用——加拿大安大略省粉煤灰处理与利用经验.岩土工程学报,1990,12(3):98~107

(收稿日期:1996-01-25 编辑:许宇鹏)

(上接第39页)

参考文献

- 1 陈怀满.土壤对镉的吸附与解吸.土壤学报,1988,25(1):65~74
- 2 McBride M B. Reaction controlling heavy metal solubility in soils. Advances in soil science, 1989, 10:1~55
- 3 Elliott H A. Adsorption behavior of Cd in response to soil surface charge. Soil science, 1983, 136(5):317~321
- 4 Shuman L M. Fractionation method for soil microelements. Soil science, 1985, 140:11~22
- 5 张效年.土壤电化学性质的研究,Ⅲ红壤胶体的电荷特性.土壤学报,1964,12(2):120~131
- 6 袁朝良.几种土壤胶体电荷零点(ZPC)的初步研究.土壤学报,1981,18(4):345~352
- 7 Elliott H A. Effect of iron oxide removal on heavy metal sorption in acid subsoil water. Air and soil pollution, 1986, 27:237~389

(收稿日期:1996-12-18 编辑:许宇鹏)