

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.11.015

预应力管桩处理深厚垃圾填埋地基设计与研究

王增运, 凌忠诚, 吴博文

(甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 垃圾土的高压缩性、低承载力、不均匀性及组分复杂等特点为深厚垃圾填埋场处治的难点问题。针对某高速公路路基穿越深厚垃圾填埋场的情况, 选取处治深度大、工后沉降小、施工速度快的预应力混凝土管桩 (PHC 桩) 技术处治垃圾填埋场地基; 通过布设土压力、位移、沉降、孔隙压力等传感器的路基监测系统, 对施工期及完工后的 PHC 桩及路基的力学行为进行全过程监测。经研究发现: 针对厚度达到 38.3 m、有机质含量 5~22%、天然容重 13~17 kN/m³、压缩模量 0.3~5 MPa、黏聚力接近于 0、桩间土承载力 90~110 kPa、具有腐蚀性的垃圾填埋场采用 PHC 桩处理后, 大部分荷载由 PHC 桩承担, 孔隙水压力在 100 d 左右消散, 路基最大沉降约 80 mm, 填筑完成 127 d 后路基沉降趋于稳定。由此表明 PHC 桩技术能显著提升深厚垃圾填埋场的地基承载力。该技术及全过程监测系统综合治理方案可为公路行业处治深厚垃圾填埋场提供参考。

关键词: 预应力管桩 (PHC 桩); 垃圾填埋地基; 复合地基承载力; 工后沉降

中图分类号: U414

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)11-0056-04

0 引言

随着城市化进程加快, 我国城市垃圾产量以约 10% 的年增长率快速上升, 年产量已超过 2.04 亿 t^[1]。目前, 填埋是我国处理垃圾的主要方式, 但垃圾填埋过程中, 浪费了大量的土地资源^[2], 且垃圾填埋后的稳定化过程具有复杂性演变和耗时长等特点^[3], 深厚垃圾土存在承载力低、压缩性高、均匀性差、成分复杂、腐蚀性强等缺陷, 导致在 30~50 a 内垃圾填埋场土地无法得到正常利用, 因此, 研究深厚垃圾填埋场处治具有十分重要的意义。

国内外针对填埋场人工处治再利用进行了丰富的理论研究和工程实践, 如传统的异地填埋、原位封存和设置帷幕灌浆系统等^[4], 田立斌^[5]、戴小松^[6]、Erses A S^[7]通过人工营造好氧反应环境, 加速垃圾降解, 发展了原位氧化分解技术, 通过加快垃圾土分解治理填埋场; 许立斌^[8]、焦瑞玲^[9]等在道路及建筑工程中运用置换法加固、孔内深层强夯的方案处理垃圾土地基。加筋土工合成材料和桩复合基础 (GRPS) 已经在公路工程实践中得到了广泛的应用^[10-13]。预应力混凝土管桩是采用先张法预应力工艺和离心成型方法制成的一种圆管形钢筋混凝土预制桩, 相比于碎石桩、深层搅拌桩和水泥粉煤灰碎石桩, 预应力

高强度混凝土 (PHC) 桩具有较高的抗剪强度和刚度, 具有处治深度大、工后沉降小, 施工速度较快, 施工质量高等优点。预应力高强度混凝土 (PHC) 桩已应用于软弱土广泛分布的地区, 深厚垃圾填埋场属于典型的软弱地基, 关于预应力混凝土管桩技术治理该类软弱地基还鲜有研究。

本文面向公路路基穿越深厚垃圾填埋地基这一问题, 首先结合物探、钻探等多种手段, 查明垃圾填埋场的厚度与成分组成, 然后采用预应力管桩处治方案, 针对深厚填埋场各向异性等特性, 对预应力管桩在垃圾填埋场地基中的水平变形, 以及进入持力层后的遇到压弯失稳情况进行监测, 研究 PHC 桩对深厚垃圾填埋场地基的处理效果。同时对施工完成后的单桩承载力以及复合地基承载力进行检测, 分析复合地基承载力和预应力管桩单桩承载力的对应关系。研究模式及结果有望为同类工程地基处理带来新的启示。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

某高速公路以路基形式穿越垃圾填埋场, 路基填土高度最大为 7.4 m。垃圾填埋场位于黄河阶地上, 阶地地形较平坦、宽阔, 黄土冲沟发育, 多呈“V”型, 最大沟深超过 30 m。填埋区地层简单, 主要为第四系全新统人工填筑土 (Q₄^{me}) 和上更新统冲洪积黄土 (Q₃^{al+pl}), 其工程地质特征如下:

(1) 人工填筑土 (Q₄^{me}): 主要为建筑垃圾和生活垃

收稿日期: 2021-12-30

作者简介: 王增运 (1975—), 男, 本科, 高级工程师, 从事公路工程设计工作。

圾,结构松散。建筑垃圾主要为碎砖块、水泥块等;生活垃圾由塑料袋、生活废弃物等组成,有恶臭味。

(2)冲洪积黄土(Q_3^{al+pl}):浅黄色,稍湿,硬塑,土质较均匀,主要以粉粒组成,含砂量较高,较密实,局部显层理。

1.2 垃圾填埋场分布规模

该场地自1980年起一直倾倒垃圾,根据勘探与调查,最深处大于30 m。垃圾场沿路线方向呈不规则状分布,最大长度约650 m,最大宽度500 m,线路附近揭露最大厚度达38.3 m,沿原有冲沟填筑,厚度不均。

1.3 埋埋物评价

如图1所示,整个埋埋体结构松散,物质组成复杂,均匀性差。结合原位测试,上覆填土动力触探 $N_{63.5}$ 变化范围大,且无规律可循,主要与动力触探试验点埋埋物质组成有关。对砖块、水泥块等建筑垃圾埋埋体结构,动力触探击数 $N_{63.5}$ 一般大于50,对松散生活垃圾埋埋体结构,动力触探击数约为5击。根据物探测试结果,上覆垃圾填筑体电阻率在 $15\sim 150\ \Omega\cdot m$ 之间,电阻率范围大,表明介质均匀性较差。



图1 垃圾填埋区现场情况

揭露垃圾平均含水量19%,其含水量在埋深5~19 m附近较大;有机质含量5~22%,下部黄土被渗透严重污染2~5 m。根据易溶盐化学分析资料, SO_4^{2-} 离子含量在200~800 mg/L之间, Cl^- 离子含量在135~410 mg/L之间, Mg^{2+} 离子含量在8~20 mg/L之间, Ca^{2+} 离子含量在100~240 mg/L之间,电导率在 $1.25\sim 1.51\ \mu s/cm$ 之间,属弱腐蚀性。

主要岩土层工程物理力学指标见表1。该段场地

表1 主要岩土层物理力学指标表

岩土名称	天然含水量 $w/\%$	天然容重 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	摩阻力标准值 q_{ik}/kPa	承载力基本容许值 $[f_{a0}]/kPa$
Q_4^m 人工填土	10~22	13~17.0	0.5~3			0~35(表层0~8 m 按-15 kPa考虑)	90~110
Q_3^{al+pl} 冲洪积黄土	10.0	15.0	5~10	28	29	35~55(表层0~8 m 按-15 kPa考虑)	150~180

土均匀性差,压缩性高,主要工程地质问题为总沉降量及工后沉降量均较大,一般不满足规范要求。

2 方案比选

2.1 潜在病害分析与设计原则

填埋区垃圾厚度大且分布不均,成分变异性大,结构松散,高压缩性,承载力低,极易产生不均匀沉降。另外,由于冲沟纵坡较大,路基填筑完成后在自重及附加荷载作用下,路基和垃圾可能会沿着深层软弱面产生蠕滑,造成路基沉降、拉裂等病害。

由于垃圾覆盖层填土质均匀性差,压缩性高,宜选用抗压及抗剪性能良好的桩体进行处治。另外,由于垃圾埋埋土孔隙大,且生活垃圾与浆液黏结性差,高压旋喷桩、灌注桩可能出现跑浆、夹层等现象,因此适用性较差。

2.2 设计方案比选

从工程造价、处治效果、施工工艺要求、工期等方面综合考虑,对高强度预应力管桩(PHC)+桩帽、高强度预应力管桩(PHC)+筏板、孔内深层强夯及桥梁跨越四种处理方案进行比较,高强度预应力管桩(PHC)+桩帽方案因具有处治深度大、工程造价低、工后沉降小、施工速度快、施工质量易保证的优点而被采用,具体如下:

路基基底范围内采用直径40 cm,壁厚95 mm的高强度预应力管桩对垃圾填埋场地基进行加固处理,桩间距2.0 m,正方形布置,桩底嵌入原状土深度不小于3 m。桩帽采用尺寸为长1.2 m×宽1.2 m×高0.35 m的现浇C30钢筋混凝土,桩顶设置0.6 m厚级配碎石褥垫层并铺设一层土工格栅,以减小桩体向上的刺入变形,见图2。

3 试验结果与讨论

3.1 传感器布置

路基监测系统的横截面见图3,具体标号与传感器类型见图3中标注,路基填土高度约7.4 m,顶宽16.75 m。路基填筑总耗时约240 d,在施工阶段及施工后对PHC桩的力学行为进行了监测。对PHC桩在

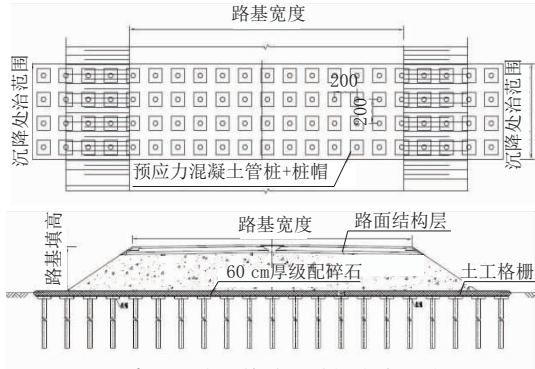


图2 高强预应力管桩+桩帽方案设计图

深厚垃圾填埋场地基处理施工过程中的水平位移、进入持力层阶段的失稳状况进行了研究。

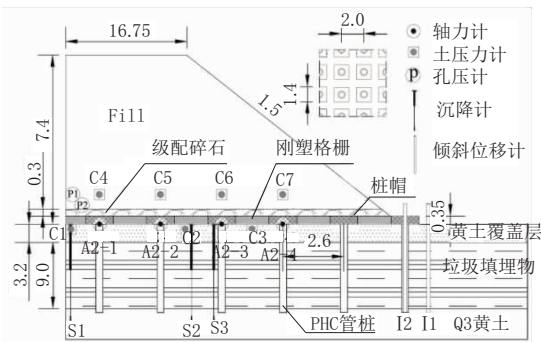


图3 高强预应力管桩+桩帽传感器设计图(单位:m)

3.2 桩顶轴力

图4为桩顶轴力随填土高度的变化曲线。结果显示,桩顶荷载与路基填充高度呈正相关。路基中部的桩顶轴力大于路基边部,这与路基底面的应力分布相关。最大桩顶轴力发生在桩#2上,而位于靠近路堤中心线的桩#1甚至更小,最小桩顶轴力位于离坡脚更近的桩#4上。当填筑高度达到7.4 m时,堤顶下试验桩头部的负荷略有增加,趋于稳定,而位于肩部外的桩#3和#4则呈过早稳定趋势。

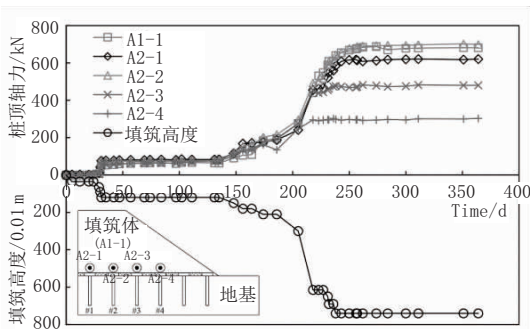


图4 桩顶轴力随填筑高度的变化曲线

3.3 桩间土压力

图5显示桩顶和柱间土压力。可以看到,当填土高度达到7.4 m时,周围土体产生的垂直应力小于27 kPa,而C1压力单元的垂直应力仅占路基均布荷载的20%左右。相比之下,桩头上的压力增加至120 kPa左右(例如C5的压力单元),接近路基基底压力。总

体而言,桩顶上方换填层的垂直压力比周围土体表面的压力大得多。周围土体的低应力水平表明,大部分荷载由PHC桩承载。图5还表明,在恒定荷载作用下,土体上的垂直应力明显减少(例如,在156 d的观察期内,填筑高度1.8 m)。这种变化意味着应力转移到相邻的桩,这是由于上覆填土的重力作用下垃圾土的固结,应力发生转移。另一方面,位于右侧路肩的传感器C3,始终处于低水平的应力,且没有随填筑过程显著增加。这可能是PHC桩基础承担了较大的荷载,减轻了垃圾土的上覆荷载。

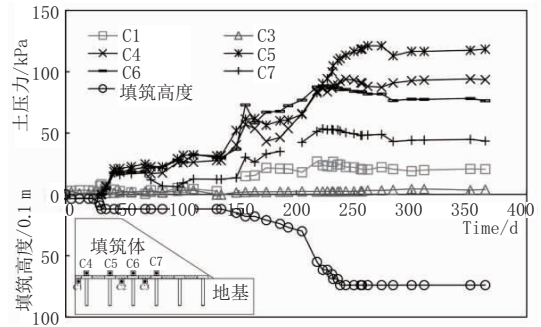


图5 桩间土压力变化曲线

3.4 孔隙水压力消散

图6表明,在路基中心下方6 m(P1)和10 m(P2)深的垃圾土中存在超孔隙水压力。结果表明,由于路基填筑,孔隙水压增加,随着时间的推移而减少。填土高度达到1.2 m后,超孔隙水压力增加,然后在大约100 d孔隙水压消散。间歇期孔压几乎保持不变。图6还表明,6 m深的孔隙水压力比10 m深的小。填筑结束时P1和P2剩余的孔隙水压力分别稳定在5 kPa和9 kPa左右,这一结果是由于孔隙率的变化所导致。

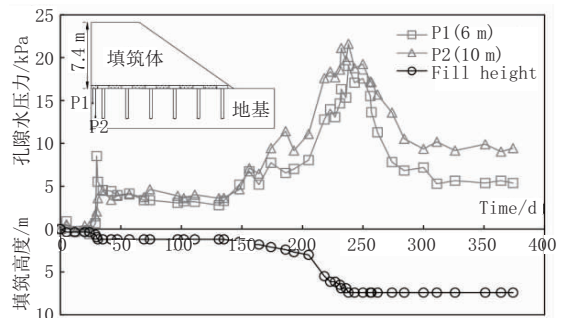


图6 桩间土压力的变化曲线

3.5 地基沉降量

图7表示三个沉降位移计的测量结果。如图所示,最大的沉降量发生在路基中心线附近的地基中。填筑结束时,S1、S2、S3沉降量分别为65.2 mm、44.9 mm和31.6 mm。监测结束时(即填筑完成后127 d),S1、S2、S3沉降测量值达到80.0 mm、52.0 mm

和 41.4 mm,分别增加了 22.7%、15.8%和 31.0%。结果表明,路基填筑结束时的工后沉降满足设计要求,路基中心与路肩处地基差异沉降量较小,且监测结束时,地基沉降已经趋于稳定。

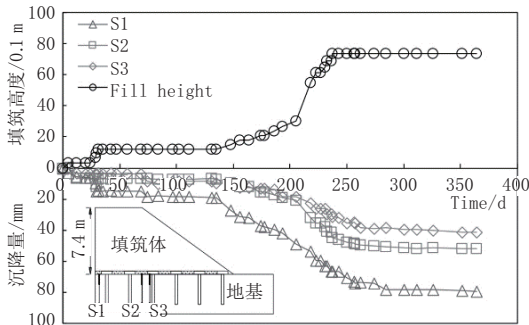


图 7 地基变形曲线

4 结论

本文面向公路路基穿越深厚垃圾填埋地基这一问题,首先结合物探与钻探等多种手段,对填埋物的组成进行分析;然后采用预应力管桩方案进行地基加固,并对施工后地基的单桩承载力、复合地基承载力、桩间土压力、孔隙水压力和沉降量进行监测和检测。主要结论如下:

- (1)不同垃圾填埋体结构的动力触探击数的变化范围大。垃圾土电阻率在 15~150 Ω·m 之间,均匀性差,且属于高压缩性土,结构松散、承载力低,极易产生不均匀沉降;孔隙水离子以 SO₄²⁻、Cl⁻、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 为主,电导率在 1.25~1.51 μs/cm 之间,属弱腐蚀性。
- (2)从工程造价、处治效果、施工工艺要求、工期等方面,对预应力管桩+桩帽、高强度预应力管桩+筏板、孔内深层强夯和桥梁通过四种方案进行比选,并最终选用预应力管桩+桩帽的方式进行处治。
- (3)当填筑高度达到 7.4 m 时,最大桩顶轴力发生在路基中心位置,达到约 700 kN;桩间土的应力小于 27 kPa,未达到地基极限承载力;大约 100 d 孔隙

水压消散,固结完成;路基中部最终沉降约 80 mm,其余位置为约 31.6 mm 和约 44.9 mm,路基填筑结束时,工后沉降满足设计要求,填筑完成后 127 d 沉降趋于稳定,中心与坡脚的差异沉降量较小,且最终达到稳定。

参考文献:

- [1] 魏潇潇,王小铭,李蕾,等.1979~2016年中国城市生活垃圾产生和处理时空特征[J].中国环境科学,2018,38(10):3833-3843.
- [2] 闵庆文,裴晓菲,余卫东.我国城市垃圾及其处理的现状、问题与对策[J].城市环境与城市生态,2002(6):51-54.
- [3] 刘辉,黄涛.城市生活垃圾降解率分析研究[J].环境污染与防治,2010(3):14-17.
- [4] 蒋良伟,茹凌云,李蕾,等.应用于道路建设工程的封场垃圾填埋场综合整治案例[J].环境工程学报,2021,15(8):2839-2848.
- [5] 田立斌,王海东,杨勇,等.原位好氧稳定化技术在非正规垃圾填埋场修复治理中的应用[J].环境工程,2019(37):940-945.
- [6] 戴小松,邵靖邦,叶亦盛,等.垃圾填埋场好氧生态修复技术在武汉金口垃圾填埋场治理工程中的应用[J].施工技术,2016(12):45:699-703.
- [7] Erses A S, Onay T T, Yenigun O. Comparison of Aerobic and Anaerobic Degradation of Municipal Solid Waste in Bioreactor Landfills[J]. Bioresour Technol, 2008, 99(13):5418-5426.
- [8] 许立斌,王书芳.强夯置换法在处理生活垃圾地基中的应用[J].勘察科学技术,2004(5):44-45.
- [9] 焦瑞玲,吴连海,崔维孝,等.北京高速铁路动车段垃圾填埋场地基处理现场试验研究[J].铁道标准设计,2009(2):76-80.
- [10] Han J. Recent research and development of ground column technologies[J]. Proc Inst Civil Eng-Ground Improve 2015(168):246-264.
- [11] Liu HL, Chu J, Deng A. Use of large-diameter, cast-in situ concrete pipe piles for embankment over soft clay[J]. Can Geotech J, 2009, 46(8):915-927.
- [12] Liu HL, Ng CWW, Fei K. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: case study[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2007, 133(12):1483-1493.
- [13] Liu ZP, Liu HL, Tan HM. Application of PCC pile in soil improvement of highway[J]. J Cent South Univ Technol, 2008, 15(2):108-113.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com