

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.05.014

北京某市政路杂填土路基处理方案研究与应用

郭帅

(中冶京诚工程技术有限公司,北京市 100176)

摘要:随着城市的不断发展壮大,市政路网逐步由城区向郊区扩张,先建小区后修路的整体理念导致市政路中出现了各类杂填土地基。为保证路基的稳定性,需对杂填土地基进行处理。通过详细对比强夯法、换土垫层法、柱锤冲扩桩法、水泥粉煤灰碎石桩法4种路基处理的实用方法,最终确定采用换土垫层和柱锤冲扩桩相结合的方式分段进行路基处理,并对路基处理后的地基承载力及沉降进行相关验算,同时提出相关路基处理方案的施工注意事项,不仅解决了实际工程中杂填土路基处理问题,还为类似的工程提供了参考借鉴思路。

关键词:杂填土;路基处理;换土垫层;柱锤冲扩桩

中图分类号: U416.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)05-0053-04

0 引言

随着城市建设规模的不断扩大,城市路网建设的逐渐向外扩张,在市政道路规划设计过程中难免会遇到不良地基。不良地基的处理不仅直接影响路基的基础承载力,而且也是保证道路建成后安全、高效运营的关键。所以,合理选择路基处理方案对道路的建设及运营具有重大的实际意义。

近些年,随着北京市人口的聚集,各郊区也在不断迅速发展,市政路网不断向北京郊区扩建。很多郊区为了迎合城市的发展,往往住宅楼已建成入住,周边路网设施却仍未完善,导致小区周边各种建材垃圾、生活垃圾乱堆乱放,城市道路红线内杂填土地基由此产生。杂填土一般位于地层表层,由表层素填土与人类生产、生活等各类活动产生的垃圾混合而成,不均匀性是其典型特征,未经处理不能直接作为路基持力层^[1]。杂填土的出现严重影响周边投资地块及路网的开发利用,因此,研究杂填土地基处理技术是当前城市发展的重点之一。

1 项目概况

1.1 工程概况

该项目位于北京市门头沟区,道路规划为城市次干路,红线宽30 m,道路全长约1.7 km。道路横断面设计为一幅路形式,双向4车道,车行道宽21 m(机动车道宽15 m,两侧非机动车道各宽3 m),两

侧人行道各宽4.5 m。根据项目城市详细控制性规划及道路纵断面设计图,该道路全线范围内填挖方高在-0.3~+0.2 m之间,城市排水管道埋深约1.8~3.5 m。

1.2 地质概况

1.2.1 场地地层情况

由于附近小区的先期开发,在道路红线内产生了各类建筑垃圾、生活垃圾堆填。地勘报告显示,本项目范围内土层按成因类型、沉积年代可划分为人工堆积层、新近沉积层及一般第四纪冲洪积层三大类,具体情况如下:

(1)人工堆积层。该层以杂填土①层、粉土-粉质黏土素填土①₁层为主,一般厚度1~2 m,局部厚度达到8~9 m。由于构成物质复杂多样(主要为砖块、混凝土块、生活垃圾、粉土、黏性土、卵石、碎石等),现场进行圆锥动力触探试验验证,击数N值为2~8击不等,地层软硬不均,且回填时间较短,回填过程未采取碾压等密实手段,未经处理极易产生路面塌陷、地面不均匀沉降等现象。因此,未经处理不可作为基础持力层,建议进行换填或其他路基处理方式。

(2)新近沉积层。该层以粉土②层、粉砂-细砂②₁层、卵石③层为主。除人工堆积层厚度达到8~9 m路段,该层平均厚度为3~5 m,可作为地基持力层。

(3)一般第四纪冲洪积层。该层以卵石④层为主,可作为地基持力层。

以上土层代表性参数见表1。

1.2.2 地表水与地下水

勘察期间,工程场地附近无地表水,同时本次勘察对相关钻孔进行地下水测量,未发现场地内地下

收稿日期:2022-08-04

作者简介:郭帅(1989—),男,本科,工程师,从事路桥设计工作。

表1 代表性地层参数一览表

| 土层 | 厚度 | 重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | 地基承载力 / kPa | 压缩模量 / MPa |
|---------------------------|---------------------|--|----------------|---------------|
| 杂填土①层 | 1~2 m (局部 8~9 m) | — | 60~130 不等 | 2~6 不等 |
| 素填土① ₁ 层 | 局部存在 | 18 | 70 | 3.5 |
| 粉土②层 | 1~2 m | 18.8 | 120 | 6.5 |
| 粉砂-细砂 ② ₁ 层 | 局部存在 | 19.6 | 140 | 13 |
| 卵石③层 | 2~3 m | 21.4 | 300 | 40 |
| 卵石④层 | >5 m | 23.2 | 420 | 52 |

水,但场地内不排除局部存在由于管线渗漏、地表生产、生活用水入渗所导致的上层滞水。

2 地基处理方案研究与比选

2.1 强夯法

强夯法又称动力固结法,是反复将夯锤(质量一般在 10~60 t)提到一定高度使其自由落下(落距一般为 10~40 m),给地基以冲击振动能量,从而提高地基的承载力并降低其压缩性,改善地基性能^[2]。强夯法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土和黏性土、素填土、杂填土等地基^[2]。此方案的优点在于地基加固效果显著、操作方便又简单、施工便捷、有效节约材料、造价低廉;缺点在于施工过程中对地面产生巨大震动,对周围环境影响大,一般应远离居住区,适用于人烟稀少地区。本工程红线范围以外为新建居住小区,且入住率已达 70%,杂填土以建筑垃圾、生活垃圾为主,从技术上方案可行。但通过调研周边居民意愿情况,在无法降低噪声影响的情况下,对周边居民生活影响较大。为避免发生纠纷,该方案不予考虑。

2.2 换土垫层法

换土垫层法是将表层不满足设计需求的土全部挖除后,采用较好土进行回填压实。换土垫层法适用于浅层软弱土层或不均匀土层的地基处理^[1]。操作简单、地基处理效果极佳是换土垫层法的主要优点。但随着换填深度的增大,常因地下水位高,需采用降水措施。再则,施工土方量大,弃土多,常使工程处理费用增高,工期拖长,对环境影响的增大^[1]。因此,换土垫层法在本工程中考虑 3 m 以内杂填土地基采用,3 m 以上杂填土地基路段考虑结合其他方案。

2.3 柱锤冲扩桩法

柱锤冲扩桩法又称 DDC 法,是指利用柱状重锤(一般直径 300~800 mm、长度 3~6 m、质量 2~10 t)

自由下落反复冲击地基土成孔,到达设计深度后在成孔内分层填入桩体相应材料(桩体材料可选用级配砂卵石、工业矿渣、水泥混合土等)。柱锤冲扩桩适用于地下水位以上的素填土、杂填土、粉土、黏性土及湿陷性黄土等地基;对地下水位以下饱和土层处理,应通过现场试验确定其适用性^[2]。近几年由于其地基处理适用性强,就地灵活取材,成桩速度快,经济效益、社会效益及环境效益显著等特点被设计者广泛采用。本工程局部范围由于人工开挖回填导致产生 8~9 m 杂填土地基,路基处理方案推荐采用柱锤冲扩桩法。

2.4 水泥粉煤灰碎石桩

水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)主要是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加水拌合形成的高黏结强度桩,桩、桩间土和褥垫层一起构成复合地基^[2]。其具有工后变形小、工效高、沉降稳定快的优势。CFG 桩地基处理法包括 CFG 桩身、桩帽(板)、褥垫层三部分。在进行施工时,要根据周边环境及不同地段不同土质,合理准确地使用固化剂和外加固剂。其加固不良地基有桩体作用、挤密作用、褥垫层作用。初始状态,在荷载作用下,CFG 桩压缩性明显小于周围软土,因此复合地基的附加应力随地基的变形逐渐集中到桩体上,出现应力集中^[2]。为使应力分布均匀,在桩顶设置一定厚度的褥垫层,使桩与桩间土共同作用,确保桩间土始终参与受力。复合地基经 CFG 桩处理后,可大大提升其承载力,降低地基变形。该方法可用于处理杂填土、黏性土、粉土及砂性土地基,由于其为刚性桩,主要用于处理厚度较大的不良地基,且处理费用一般偏高。本工程最大杂填土厚度约 8~9 m,处于经济方面考虑,因此未采用该方法进行地基处理。

通过上述方案对比,结合本工程实际情况,对该道路全线车行道范围杂填土深度小于 3 m 的路基采用换土垫层法进行地基处理,局部杂填土深度 8~9 m 路段采用柱锤冲扩桩法进行地基处理。人行道范围由于荷载较小,为节约造价,仅对杂填土地基进行压实处理。

3 方案设计计算

3.1 换土垫层法

(1) 方案设计

根据地勘报告,本工程对车行道范围内 1~2 m 深度的杂填土全部清除,填筑满足设计要求的路基填筑土,并在其基础上分层布设水泥稳定碎石及沥

青等路基路面结构层,具体设计方案如图1所示。

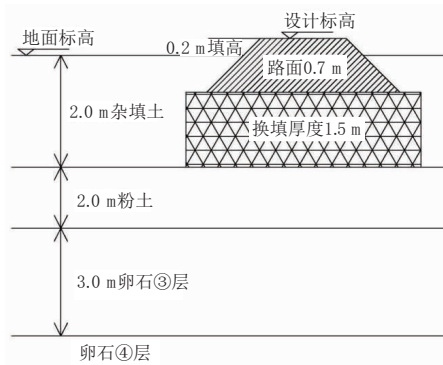


图1 换土垫层方案示意图

(2)承载力计算

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)

4.2.2,垫层底面处承载力应满足下式要求^[1]:

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az}$$

本工程为道路工程,属于带状基础,垫层底面附加应力值可参照建筑条形基础计算公式:

$$p_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b + 2z \tan \theta}$$

本工程车辆附加荷载标准值取 20 kN/m²,路面结构厚度取 0.7 m,重度 23 kN/m³,换填材料重度 19.5 kN/m³,杂填土平均重度取 13.5 kN/m³,根据设计方案简图计算:

基础底面处平均压力值

$$p_k = 20 + 23 \times 0.7 = 36.1 \text{ kPa}$$

基础底面处自重压力值

$$p_c = 13.5 \times 0.5 = 6.75 \text{ kPa}$$

$z/b = 2.5/21 = 0.12$,小于 0.25,压力扩散角 θ 取 0°;

垫层底面处附加压力值

$$p_z = \frac{21 \times (36.1 - 6.75)}{21 + 2 \times 1.5 \times \tan 0^\circ} = 29.35 \text{ kPa}$$

垫层底面处土的自重压力值

$$p_{cz} = 13.5 \times 0.5 + 19.5 \times 1.5 = 36.0 \text{ kPa}$$

垫层底面处经深度修正后的地基承载力

$$f_{az} = 120 + 13.5 \times 1 \times (2.0 - 0.5) = 140.25 \text{ kPa}$$

$p_z + p_{cz} = 29.35 + 36.0 = 65.35 \text{ kPa}$,小于 $f_{az} = 140.25 \text{ kPa}$,满足地基承载力设计需求。

(3)沉降计算

本项目为市政道路工程,路面结构层沉降相对于其他地基层可忽略,沉降计算深度取至卵石③层底,计算深度为 5 m。根据《建筑地基基础设计规范》,换填处理后沉降计算如下^[2]:

$$s = \psi_s s' = \psi_s \cdot \sum \frac{p_0 \cdot h_i}{E_{si}}$$

其中:

$$p_0 = 20 + 23 \times 0.7 + 19.5 \times 1.5 - 13.5 \times 2 = 38.35 \text{ kPa}$$

换填后地基沉降

$$s = 1.2 \times 38.35 \times \left(\frac{2}{6.5} + \frac{3}{40} \right) = 17.61 \text{ mm}$$

满足规范设计要求。

3.2 柱锤冲扩桩法

(1)方案设计

根据项目城市详细控制性规划及道路纵断面设计图,本段道路填方高约 0.2 m,城市排水管道最深埋深 2.2 m。为方便管道铺设施工,本次设计将管道底标高以上土层全部清除,对管道底面不良地基用柱锤冲扩桩法进行处理,然后铺设管道,同时填筑路基实用土至路面设计标高。为达到地基处理良好效果,使地基土性质分布均匀,本工程采用正三角形布桩,桩径为 0.6 m,桩间距 1.5 m,桩长 $h = 9 - 2 = 7 \text{ m}$,具体设计方案如图 2 所示。

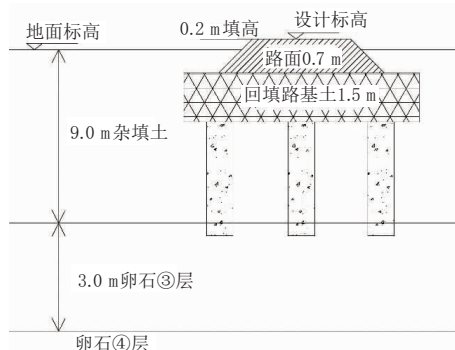


图2 柱锤冲扩桩方案示意图

(2)承载力计算

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)

7.1.5,计算如下^[1]:

$$f_{spk} = [1 + m(n - 1)] f_{sk}$$

本工程采用正三角形布桩,桩径为 600 mm,桩间距 1.5 m,计算面积置换率 $m = 0.6^2 / (1.05 \times 1.5)^2 = 0.145$,取桩土应力比 $n = 3.5$ 。

根据《建筑地基处理技术规范》附录 7.8.4 规定,查找现场重力触探试验资料, $\bar{N}_{63.5} = 2.8$,则:

$$f_{sk} = 0.9 \times \left[80 + \frac{2.8 - 2}{3 - 2} \times (110 - 80) \right] = 93.6 \text{ kPa}$$

复合地基承载力计算如下:

$$f_{spk} = [1 + 0.145 \times (3.5 - 1)] \times 93.6 = 127.53 \text{ kPa}, > 120 \text{ kPa}$$

满足路基承载力设计要求。

(3)沉降计算

a. 分层综合法

根据《建筑地基处理技术规范》7.1.7、7.1.8 规定,各复合土层的压缩模量等于该层天然地基压缩

模量的 ζ 倍^[1]。

$$\zeta = 1 + m(n-1) = 1 + 0.145 \times (3.5-1) = 1.363$$

$$E_{sp} = \zeta E_s = 1.363 \times 3 = 4.09 \text{ MPa}$$

根据《建筑地基基础设计规范》^[2]查附表 G,按照分层总和法列表计算如下(见表 2)。

表 2 分层总和法沉降计算

| z_i | l/b | z_i/b | $\bar{\alpha}_i$ | $4z_i \bar{\alpha}_i$ | $4(4z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1})$ | E_s |
|-------|-------|---------|------------------|-----------------------|---|-------|
| 0 | 条形 | 0 | 0.25 | — | — | — |
| 7 | 条形 | 0.67 | 0.229 1 | 6.414 8 | 6.414 8 | 4.09 |
| 10 | 条形 | 0.95 | 0.208 8 | 8.352 | 1.937 2 | 40 |

压缩模量当量值:

$$\bar{E}_s = \frac{8.352}{\frac{6.4148}{4.09} + \frac{1.9372}{40}} = 5.166 \text{ MPa}$$

基础底面附加应力

$$p_0 = 20 + 23 \times 0.7 + 19.5 \times 1.5 - 13.5 \times 2 = 38.35 \text{ kPa}$$

最终沉降计算

$$s = 1.2 \times 38.35 \times \left(\frac{6.4148}{4.09} + \frac{1.9372}{40} \right) = 74.4 \text{ mm}。$$

b. 应力面积法

应力面积法估算复合土层的沉降:

$$s = 1.2 \times 38.35 \times \frac{7}{4.09} = 78.8 \text{ mm}。$$

两种方法验证沉降计算差距在 5% ~ 6% 之间,均满足规范要求。

4 施工注意事项

4.1 换土垫层法

(1)施工时,应避免对垫层底部土体的扰动,可保留 18~20 cm 土层厚度暂不挖除,待铺填垫层前再由人工挖除至设计标高。

(2)垫层施工需分层碾压,并应分层密实,分层厚度宜为 20~30 cm。

(3)为保证分层压实的质量,应控制机械碾压的速度。

(4)垫层分层施工,每层压实次数需现场试验确定,每层的压实度达到要求后方可进入下一道工序。

4.2 柱锤冲扩桩法

(1)柱锤冲扩桩法夯击能量较大,易发生地面隆起,造成表层桩和桩间土出现松动,从而降低处理效果。因此,成孔及填料夯实的施工顺序宜间隔进行^[1]。

(2)柱锤冲扩桩法采用隔排隔行、间隔 1 孔跳打,成孔后应立即回填材料。回填过程不得间隔停顿

或隔日回填,以免缩孔和雨水及异物等进入孔内。

(3)成孔时若出现缩孔、塌孔现象,在成孔过程中可不断将碎石、三合土等填料挤入孔壁周围土体中,增加其稳定性,必要时可适当调整冲孔速率。

(4)施工过程中应随时检查施工记录及现场施工情况,并对照预定的施工工艺标准,对每根桩进行质量评定^[1]。

5 理论与实际比较

根据设计需求,对柱锤冲扩桩地基处理方案进行实测与理论值进行对比。

(1)承载力对比

本项目在竣工验收时,选取部分成桩对其承载力进行相关检验,现场采用动力触探试验检验承载力,经检验单位根据触探数与规范数值表对比,选取的成桩承载力达到 130 ~ 140 kPa,与理论计算值 127.5 kPa 差距不大,满足实际使用需求。

(2)沉降对比

后期对本项目进行设计回访,与建设单位及施工单位搜集相关数据,据建设单位反馈,施工单位对采用柱锤冲扩桩方案的路段路基工后沉降进行监测,沉降数据值在 60 ~ 90 mm 之间,与设计计算基本吻合,设计方案较好地解决了杂填土不均匀沉降问题。

6 结语

(1)本文结合实际工程,对杂填土地基处理方案进行比选,最终根据杂填土深度的不同,采用换土垫层法与柱锤冲扩桩法结合的方式对该工程进行相应地基处理。

(2)本文分别对换土垫层法及柱锤冲扩桩法地基处理方案的承载力及沉降进行验算,根据验算结果,分析得出经处理后的地基强度及承载力得到了大幅提高,地基不均匀性及地基沉降得到了有效改善,满足设计需求及路基工后沉降要求。

(3)通过与实际工程结合,利用柱锤冲扩桩处理杂填土地基,不仅施工速度快、处理效果好,而且能大量消耗砖渣、混凝土碎块等建筑垃圾,节省水泥、石灰等建筑材料,大大降低了投资造价,为其他地基相似的工程提供了理论依据及宝贵经验。

参考文献:

[1] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范[S].

[2] GB 50007—2011, 建筑地基基础设计规范[S].