

低能量强夯法在围区回填地基处理中的应用

方子杰¹ 陈青青² 吴一禾² 姜保威³

(1. 浙江省围垦技术中心 浙江 杭州 310014; 2. 温州市水利电力勘测设计院 浙江 温州 325011;
3. 上海智夯地基处理工程有限公司 上海 200060)

摘要 介绍用于提高地基土承载力的地基处理方法——传统强夯法及低能量强夯法。说明低能量强夯法与传统强夯工艺的不同,前者不是一次夯到位,而是通过“先轻夯、后重夯”多遍夯击,并逐遍加大夯击能来完成,是一个逐步加强、加深、逐层加固的过程,直到达到工艺设计要求。指出:采用低能量强夯法可以有效地避免传统强夯法施工在软基处理中形成的“橡皮土”,确保加固质量,具有施工期短、工后沉降小、几个月基本稳定、造价低等特点,低能量强夯法适合在滩涂围垦工程围区开发回填中用于淤泥软土地基的加固,尤其适合用于围区道路回填工程的地基加固,突破了传统强夯击不适应软土地基处理的局限,具有更广阔的应用前景。

关键词 围区回填 地基处理 传统强夯法 低能量强夯法

中图分类号: TU472.3+1

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2009)S1-0107-03

1 传统强夯法

浙江省沿海围涂工程围区的地基土常见高含水量、高压缩性、高灵敏度、低强度的淤泥,工程地质条件差,为了提高地基土的承载力以满足城镇开发建设用地要求,并且有效地控制工后沉降,围区内地基需进行处理。处理的方法有换填法(包括换土垫层法、挤淤置换法等)、分层回填压实法、真空预压、振冲法、强夯法、桩处理法(包括砂桩法、水泥搅拌桩法、碎石桩法等)。目前大面积堆场、建设用地的地基处理方式较常见的主要有水泥搅拌桩处理法、强夯法、真空预压法、分层回填压实法等。其中采用后 3 种方法进行地基处理时还可插打塑料排水插板,缩短排水路径,加速地基土排水固结,使地基强度在较短的时间内获得增长,但是成本较高。

传统强夯法是用大吨位起重机将巨型锤提至空中,使其从 8~15 m 高处自由下落,形成巨大的冲击能和冲击波。在夯锤接触地面的瞬间,强制压实与振密地基。强夯加固的原理主要有 2 点:一是动力固结,在强大的冲击能量作用下,土体的物理性能发生变化,土体被压缩,气相体积减小,孔隙水压力增大,砂性土在夯击点的周围出现竖向裂缝,使土体的渗透性发生变化。在孔隙水压作用下,孔隙水和气体沿着这些裂缝排出土体,使土体固结;二是动力置

换,强大的冲击波和冲击能破坏了土体的结构,利用动力置换原理,强夯将开山土石整体挤入淤泥,成整式置换或间隔夯入淤泥成桩式土石墩。

2 低能量强夯法

2.1 低能量强夯法加固软土地基简述^[1]

低能量强夯法即轻夯多遍处理软土地基方法。该方法是经历 10 多年的开发研究逐渐成熟的加固软土新技术。传统强夯加固地基主要是利用夯锤产生的强大冲击能使土体内部产生强烈的震动和应力,从而导致土中孔隙压缩,土体局部液化,夯点周围产生裂隙形成排水通道,孔隙水顺利溢出,土体迅速固结,从而达到减少工后沉降、提高承载力的目的。一般认为该法适合于加固沙土、粗颗粒土、湿陷性黄土和低含水量的填土。对于具有大孔隙、高含水量、低渗透性和低强度的饱和软黏土等不良土体不宜采用强夯,这是由于传统强夯法是基于沙土等渗透性大的土体提出的,它具有大能量、先重后轻和多击数的特征。这种工艺不适应饱和软黏土,在传统夯击法的施工工艺下,夯击产生的强大冲击作用不但会使饱和软土原始结构遭到破坏,原状结构强度大幅度降低,而且会导致地基渗透性明显降低,以至于孔隙水压力难以消散而居高不下,上部土体出现“橡皮土”现象,因此加固失败。较多的地基加固

出现“橡皮土”现象主要是因为夯击激发超静孔隙水压力不能及时消散,传统强夯的夯击工艺与饱和土体特性、强度增长规律不符,因此传统强夯不适应软土地基的处理。

低能量强夯法具有静载固结法的绝大部分优点,又克服了其主要的缺点。①附加荷载的问题:动荷载比静荷载(分层回填压实法或真空预压法)大几个数量级,而且多次作用,因而固结更加充分。②动态效果:反射拉伸波的作用使软土的渗透系数增大,在超静孔隙水消散后可进行下一遍强夯,因此相邻2遍的间隔期是很关键的。经加固后的地基,其上表层为超固结的硬壳层,下部为基本固结稳定的土层,该地基成为了强度高、压缩性小的建筑物理想的天然地基。③从载荷方面分析,已经用比建筑附加荷载大2~3个数量级的动荷载多次作用,受到“预应力”,待夯完后间隔一定时间,触变固结后持力层强度很高。④从变形方面分析,地基已受到多次预加变形,因而建筑物建成后的工后沉降极小,实际上该工后沉降不会引起地基明显的差异沉降。因上表层为超固结硬壳层,即使下部分有差异沉降,由于土有“拱”效应,上表硬壳层不会反映出这种差异沉降,仅存在小量的均匀沉降。

软土地基的处理主要是中上层,上层的地基土要承受较大的附加荷载扩散值,是软土地基的主要贡献者,是承托路基的关键所在,因此,软土地基的处理重点在中上层。本工法主要是改善中上层的土壤3项体结构比例,强度提高,沉降在短时间内完成,变形下降,路基被强硬的地基中上层土壤所承托。

本文方法的特点是在没有硬壳层的地方做一个硬壳层,在有硬壳层的区域使其加厚,提高地耐力,使其沉降在短时间内完成。

结合具体工程,在对软基基础工程特性和强度增长规律及静力固结和动力固结理论进行深入研究和试验的基础上,将静力固结理论与动力固结技术结合起来,产生处理软土地基的方法。低能量强夯法的主要特点如下:①通过严格控制单击夯击能量,能量控制很重要。单点的击数也很重要,因为击数多了不仅会使土体破坏、孔压消散过慢,形成“橡皮土”,严格控制单遍的夯击能量和不同夯击遍数的时间间隔,不仅能保证软土地基在夯击时间内受到适度的扰动而导致土体内超静孔隙水压力大幅度增加,从而便于土体排水固结,而且又能保证土体结构在夯击过程中不会产生过分扰动。②本方法是通过“先轻夯、后重夯”多遍夯击,并逐遍加大夯击能来完成,因而它与现行的强夯工艺不同,不是一次夯到位,而是逐步加强,逐步加深,是一个逐层加固的过程,直到达到工艺设计要求。③本方法基于饱和软

黏土的动力特征,采用低击数的夯击工艺,根据土体内激发的超静孔隙压力和土体扰动情况严格单遍的夯击击数。每遍夯击数1~3击。④根据孔隙水压力的消散时间和结构扰动恢复情况,严格控制相邻夯击遍数的间隔时间。

采用低能量强夯法可以有效地避免在软基处理中形成的“橡皮土”,确保加固质量,具有施工期短、工后沉降极小、2个月基本稳定、造价低等特点。

3 低能量强夯设计方案

a. 低能量强夯夯击的技术参数。①单点夯击能量:根据加固要求和土性条件,单点夯击能量为6000~1500 kJ,并遵循“由轻到重,逐遍加能”的原则。第1遍夯能较小,以后夯能量逐渐增大。②夯击遍数:根据加固要求和土性条件,结合经验,每平方米承载12 t,需6遍夯击。③每遍夯击数:根据孔压上升和土体结构扰动情况,每遍夯击数取1~3击。④相邻夯击遍数的间隔时间:根据孔压消散和土体结构恢复情况,相邻2遍夯击间隔时间可取10~15 d。⑤夯点布置采取正方形布点方式。⑥根据土性条件和加固要求可取夯点间距为4~5 m。⑦可以增加遍数,逐步提高地基的承载力。⑧地基土含水量小于或等于60%的垫层铺设1.5~2.0 m,部分地段应先铺设竹编,在部分区域应增设塑料排水板,深度6.0 m,采取4.0 m×4.0 m的布点。

b. 施工机械。夯锤质量为8~12 t,锤底直径为2.5~2.7 m。采用专用起重机及自动脱钩设备。

c. 施工程序。①地基土含水量小于或等于50%的,在涂泥上铺设1 m厚的垫层(开山石直径小于0.7 m)。垫层的作用如下:使具有1层能支撑起设备的稍硬表层,使施加的夯击能得到扩散,导致夯击能向深度方向传递;可加大地下水位与表面的距离,以免夯成“橡皮土”。②夯点放线定位。③施工机械就位,试夯确认夯能量的锤击数。④夯坑整平。⑤待孔压消散后进行下一遍强夯。⑥重复②~⑤步,直至达到设计要求。

4 与围区回填地基处理其他工法的比较

采用浙江省洞头县布袋岙围涂填海工程围区回填工程^[2]进行案例分析。

根据钻探揭露,该工程区地基土层为多层结构。上部15 m地基主要由软土组成,属高压压缩性土,工程地质条件较差;下部土层主要由中等压缩性的粉砂、黏性土及含泥砾砂的互层组成。其中3~1层淤泥、高压压缩、低强度、极微透水性、灰色、流塑状、夹少量砂,切面光泽,呈厚层状分布于全区,顶板高程2.68~ -6.78 m,厚1.9~13.4 m。主要物理力学指

标如下 : $w = 72.2\% \sim 50.6\%$; $\rho = 1.70 \sim 1.58 \text{ g/cm}^3$;
 $\rho_d = 1.13 \sim 0.92 \text{ g/cm}^3$; $E_s = 2.138 \sim 0.998 \text{ MPa}$;快剪
 $C = 9.5 \sim 5.7 \text{ kPa}$, $\varphi = 4.2^\circ \sim 1.6^\circ$;固快 $C = 11.3 \sim$
 6.5 kPa , $\varphi = 16.0^\circ \sim 15.0^\circ$;三轴 $C = 15.0 \sim 9.0 \text{ kPa}$,
 $\varphi = 2.0^\circ \sim 0.4^\circ$; $f_k = 50 \text{ kPa}$ 。

根据该工程地质条件 ,回填方案拟采用真空预压联合振动碾压法、传统强夯法、低能量强夯法、强夯联合塑料排水板法、分层回填压实法、分层回填压实联合塑料排水板法等 6 种方案进行比选。各种方案的优缺点及其适应性分析如下 :

a. 真空预压联合振动碾压法利用大气压力作为超载加固软土 ,相对分层回填压实法 ,不需要额外超载预压材料 ,减少弃渣 ,降低投资。加固过程中剪切变形小 ,分级加载间歇期短 ,加载速度相对较快 ,且引起低级失稳可能性小 ,也减少了两侧反压措施。地基侧向挤出较小 ,沉降相对堆载预压小。相同预压荷载下地基土强度增长比堆载预压大。加固过程中 ,土中封闭气泡被真空吸力排出 ,固结过程快。该工法需增加抽真空和密封系统投入 ,较适合处理路基较宽的道路 ,但对围区内路基较窄的次干路、支路效果相对较差。局部存在的透镜透水层可能影响真空预压效果 ,需采取连续深层搅拌桩等措施 ,确保加固区的气密性。

b. 传统强夯法设备简单、工艺方便、原理直观 ,应用范围广 ,加固效果好 ,需要人员少 ,施工速度快 ,造价低。但该工法振动大 ,有噪音 ,振动对周围的影响研究还不够 ,理论还不成熟 ,须采用现场试夯确定强夯参数 ,不适应软土地基处理。

c. 低能量强夯法施工期较短 ,造价较低 ,经夯能由小到大、多遍夯击后 ,土体结构未受破坏 ,表层形成密实的硬壳层 ,工后沉降小。信息化施工 ,在施工中实时调整施工参数。该工法在含一定沙性的软黏土中应用广泛 ,但在淤泥或淤泥质土中应用还不多 ,需先进行试夯已确定施工参数。

d. 强夯联合塑料排水板法适合处理上部荷载较大的区域 ,工期比真空预压联合振动碾压法短。高能级击密后表层形成密实的硬壳层 ,工后沉降较小。信息化施工 ,在施工中实时调整施工参数。地基加固效果较强夯法、低能量强夯法好。但基础需要塑料排水板处理 ,与强夯、低能量强夯相比 ,地基处理时间稍长 ,比单独使用真空预压法增加了夯击的费用。该工法在含一定沙性的软黏土中应用广泛。但在淤泥或淤泥质土中尚无应用 ,如采用该工法需先进行试夯。

e. 分层回填压实法比较适合于大面积回填。施工工艺简单 ,原理很直观。受地基强度增长限制 ,需分级加载 ,加荷过程时间较长。相同预压荷载沉

降较大 ,地基土强度增长偏小。

f. 分层回填压实联合塑料排水板法与分层回填压实法相比增加了基础处理成本 ,施工工艺成熟 ,施工方法简单 ,应用较广。地基土排水固结快 ,承载力可有效提高 ,工后沉降小 ,可缩短加载时间。增加了基础处理费用 ,投资比分层回填压实法高。

将拟定的 6 个方案分别从工期、工后沉降经验值、单位面积可比性投资等方面进行综合比较分析 ,见表 1。表 1 中单位面积造价不含回填料 ,根据类似工程经验 ,各种处理方案地基承载力均能达到 80 kPa 以上。

表 1 围区回填地基处理方案综合比较

方 案	施工期/月	工后沉降 经验值/cm	造价/ (元·m ⁻²)
真空预压联合振动碾压法	13	< 30	80
传统强夯法	8	< 30	65
低能量强夯法	10	< 40	55
强夯联合塑料排水板法	11	< 30	85
分层回填压实法	15	< 65	20
分层回填压实联合塑料排水板法	17	< 30	58

经过对初选的 6 个方案比较分析后 ,围区安置建设区回填选择较经济的传统强夯法、低能量强夯法、分层回填压实法 ,围区道路选择真空预压联合振动碾压法、强夯联合塑料排水板法、低能量强夯法、分层回填压实联合塑料排水板法 ,再从沉降量、对周边影响、经济性等方面作进一步比较 ,见表 2。

表 2 围区安置建设区、道路区回填方案比较

功能 区	回填 方案	总沉 降/cm	施工期 沉 降/cm	工后 沉降/ cm	对周 边的 影响	经济性/ (元·m ⁻²)	施工工艺 与难度
围区安置 建设区	传统 强夯法	70.5	42.5	28.0	较大	253	工艺简单 , 施工难度低
	低能量 强夯法	79.0	39.0	40.0	较小	243	工艺简单 , 施工难度低
	分层回填 压实法	91.4	26.8	64.6	较小	211	工艺简单 , 施工难度低
围区道路 建设区	真空预压 联合振动 碾压法	92.3	64.5	27.8	较小	278	工艺复杂 , 施工难度 较高
	强夯联合 塑料排水 板法	92.3	64.5	27.8	较小	283	工艺复杂 , 施工难度 较高
	低量 强夯法	79.0	39.0	40.0	较小	243	工艺简单 , 施工难度低
	分层回填 压实联合 塑料排水 板法	92.0	61.9	30.1	较小	255	工艺复杂 , 施工难度 较高

经以上综合比较分析 ,围区内安置建设区回填工程推荐采用分层回填压实法与低能量强夯法 2 种方案 ,道路回填工程推荐采用低能量强夯法进行。

(下转第 114 页)

膨胀式防水接头,冷却水管在混凝土面上每 2~3 m 用 U 型短锚筋固定。③冷却水管垂直水流方向布置,水平间距约为 1.5 m,垂直间距约为 1.5 m。水管在浇筑过程中细心地加以保护,以防止冷却水管移位或被破坏,尤其是覆盖第一层混凝土料时,避免平仓机或振动碾直接碾压水管。伸出混凝土的管头加帽覆盖或用其他方法加以保护。④冷却水管在坝体冷却结束后灌浆回填。将露出坝面的水管接头割去,并用灰浆完全充填留下的孔洞。

⑤坝内冷却水管按接触灌浆分区范围结合坝体通水计划就近引到下游坝后,作好进出口及分层标记。出露管口的长度不小于 15 cm,并对管口妥善保护,防止堵塞。立管布置控制不能过于集中,以免混凝土局部超冷。

b. 水质要求。冷却用水除控制其流量外,应保持水质干净,无泥和岩屑。

c. 通水冷却及温度监测。对于大坝高温期和次高温期所有浇筑的混凝土,均通制冷水或天然河水进行冷却,以有效降低混凝土早期温度,确保坝体最高温度在设计允许范围内。通过每条冷却水管的冷却水总量一般控制不低于 $1.2\text{ m}^3/\text{h}$,一期通水温度与混凝土最高温度之差控制在 25.0°C 以内。冷却水管入口处的冷却水温度保持在 10°C ,冷却时间控制在 20 d 左右。冷却水采用闭路循环方式,冷却水供水方向 24 h 调换一次。坝体降温速度控制每天不大于 1°C 。

2.6.3 其他温控、防裂措施

高温期,为进一步降低坝体混凝土最高温度,减小基础温差和内外温差,有效改善坝体施工期温度分布状况,除进行一期通水冷却之外另采取以下措施以加强温控效果。

a. 中期通水冷却。根据南方气候情况,对于当年浇筑的混凝土入冬前不能进行接缝灌浆,主体坝块 10 月初开始中期通水冷却,有效削减混凝土内外温差。中期通水采用天然河水,通水时间控制在 2 个月之内,以坝体混凝土最高温度降到设计允许范围为准。

b. 后期通水冷却。后期冷却利用前期冷却时已埋设的水管,其水质要求以及温度和流量检测方法同一期冷却。后期冷却采用 10°C 制冷水通水 20~40 d,以满足大坝不同部位分期、分批通水冷却达到灌浆温度。闷水测温,以检验是否达到灌浆温度,闷水时间为 5~6 d。在通水冷却 30 d 左右进行一次闷水测温,根据测温结果调整水管进水口水温和通水时间,闷水时间为 1~2 d。经实验室检测、计算,用 10°C 冷水、以 $1.2\text{ m}^3/\text{h}$ 的进水流量通水进行坝体

后期冷却,通水 28~33 d 后,坝体平均温度即可达到接缝灌浆要求的平均稳定温度。

3 结 论

a. 碾压混凝土坝施工质量控制的重点为混凝土配合比控制、混凝土拌和物质量控制、混凝土层间结合面质量控制、混凝土浇筑及碾压质量控制等。

b. 碾压混凝土坝施工质量控制的难点为混凝土温控、防裂措施。光照水电站主坝碾压施工过程中,根据碾压混凝土的特点,采取降低混凝土入仓温度和浇筑温度、通水分期冷却等有效的措施,防止了裂缝的产生。

参考文献:

[1] 李守义,赵基花.碾压混凝土重力坝温度场与温度徐变应力仿真分析[J].西安理工大学学报,2004(1):58-62.
[2] 陈能平,龙起煌.光照水电站碾压混凝土重力坝设计[J].水利水电技术,2005,36(9):55-57.
[3] 中国建设监理协会.建设工程质量控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:47-156.
[4] GB 50319—2000,建设工程监理规范[S].
[5] GB 50204—2001,混凝土结构工程施工质量验收规范[S].

(收稿日期:2008-06-25 编辑:方宇彤)

(上接第 109 页)

5 结 语

低能量强夯法,即轻夯多遍处理软土地基方法,是在传统强夯法基础上开发研究逐渐成熟的加固软土新技术。通过“先轻夯、后重夯”多遍夯击,并逐遍加大夯击能来完成,因而与传统的强夯工艺不同,不是一次夯到位,而是逐步加强、逐步加深,是一个逐层加固的过程,直到达到工艺设计要求。采用低能量强夯法可以有效地避免传统强夯法施工在软基处理中形成的“橡皮土”,确保加固质量,具有施工期短、工后沉降小、2 个月基本稳定、造价低等特点。因此,该工法适合在滩涂围垦工程围区开发回填中用于软土地基加固,尤其适用于围区道路回填工程的地基加固。

参考文献:

[1] 上海智夯地基处理工程有限公司.洞头县布袋岙安置围涂填海工程初步基础加固设计报告[R].上海:上海智夯地基处理工程有限公司,2008.
[2] 温州市水利电力勘测设计院.洞头县布袋岙安置围涂填海工程初步设计报告[R].温州:温州市水利电力勘测设计院,2008.

(收稿日期:2009-02-17 编辑:高建群)