

某变电站湿陷性黄土地基处理的方案对比及实施效果

王 丽

智方设计股份有限公司 湖北 武汉 430074

摘 要：湿陷性黄土属于特殊土的一种，在新疆地区分布广泛。以伊犁地区某变电站项目为例，对黄土湿陷性的处理方法进行了深入研究，该项目回填土层较高，并且分布有Ⅰ~Ⅱ级非自重湿陷性黄土层。鉴于新疆地区常年干旱，降雨量较少，故土体含水率极低，对比分析了换填和强夯后，采用了孔内深层强夯灰土挤密桩法处理湿陷地基。处理后的地基承载力特征值满足要求，且湿陷性全部消除，该项目的成功应用可为新疆地区类似工程施工提供参考依据。

关键词：湿陷性黄土；地基处理；孔内深层强夯；灰土挤密桩

引言

湿陷性黄土属于特殊土的一种，在一般情况下其强度较高，压缩性较小，但在一定压力下或在上覆土的自重压力下受到水的浸湿，土的结构会迅速破坏，强度迅速降低，产生显著附加变形。故在湿陷性黄土地基上进行工程建设时，必须采取有效的地基处理措施，防止因为地基的湿陷而引起建筑物附加下沉而对建筑物产生破坏。

本文结合地勘及施工客观因素，分析了消除地基湿陷性的多种方案，并给出了最具性价比的处理方式。

1 工程概况

该项目位于新疆伊犁地区，拟建场地区域地貌环境属山前谷地，地形开阔、平坦，海拔高程在1065.0~1070.5之间，最大高差约4.5m，场区覆盖草地。

该站为户外变电站，远期2台主变，本期主变容量50MVA。站内设置110kV 配电装置楼一栋，单层建筑，轴线尺寸为38.3m×11.0m，层高5.1m。站内地坪设计标高为1067.5m。

根据现场探井揭露，本次勘察深度范围内场地土的主要构成如下：

层耕土：土黄色，层厚0.5~0.8m，成份主要为粉土，承载力0。

层黄土状粉土：浅黄色，层底埋深4.6~6.4m，层厚3.9~5.8m，具有湿陷性，承载力120kpa。

层卵石：层底埋深3.2~10.0m，层厚2.7~9.3m，粒径一般2~10cm，承载力400kpa。

层粉土：层底埋深6.7~9.2m，层厚1.6~4.5m，稍湿，中密~密实，承载力160kpa。

层卵石：揭露层厚0.5~6.5m，稍湿，中密~密实，承载力480kpa。

层粉土：黄褐色，未揭穿，揭露层厚4.8~6.5m，稍湿，密实，承载力180kpa。

2 地基处理方案对比

2.1 地基湿陷等级

根据地勘报告，本工程站址为Ⅰ级（轻微）~Ⅱ级（中等）非自重湿陷黄土地。

2.2 建筑物类别划分

按《湿陷性黄土地区建筑标准》^[1]表5.3-1，本站主要建筑物、主变基础、构支架基础，属丙类。

2.3 地基处理方案对比

站址地基属于轻~中等非自重湿陷性黄土，湿陷性黄土下限4.7~6.4m。根据地勘报告土工试验报告表，土样深度1m深处，湿陷起始压力值为12~36kPa不等，在土样深度约5m处（最低试样标高1060m），湿陷起始压力值基本大于100kPa。

站址整体填高高度约1.5m，基础埋置深度0.8~3.0m，其中建筑物、构支架基础埋深-2.0m。基底标高至湿陷性黄土下限距离约4~6.81m。

主要地基处理方式消除黄土地基的湿陷性，根据《湿陷性黄土地区建筑标准》6.1.11条，消除湿陷性主要考虑以下三种方式：换填垫层法，强夯法，挤密法。

2.3.1 换填垫层法

可处理湿陷性黄土层厚度1~3m^[2]，超过3m，工程量较大，且施工质量不宜保证。

按照地质情况和规范要求，仅换填3m，下部仍有2.4m左右未处理湿陷土层，其湿陷性压力小于100kPa，达不到规范要求。

2.3.2 强夯法

处理范围3~12m，适用于处理饱和度小于60%的湿陷性黄土。

站址区场地内黄土状粉土的含水量极低，在0~18m范围内，其天然含水率平均值为10.1%，根据场地以西约16km处在同一地貌单元和类似巨厚湿陷性土层的某变电

站湿陷性土的两个击实试验可知，黄土状粉土的最优含水率在17%左右。可见含水量的大小直接影响强夯及孔内深层强夯对土的挤密效果，由于土的含水量很低，土的干强度较高，在夯击能的作用下土体垂向、侧向挤密效果不好，采用强夯及孔内深层强夯法地基处理无法取得预期的地基处理效果，无法完全消除处理深度范围内土的湿陷性。

因此，当采用强夯及孔内强夯地基处理方案时，建议预先对地基土进行增湿处理，使地基土的含水量达到或接近最优含水量时再进行强夯处理。

对含水量低、不具备增湿条件或增湿成本很大时，若经济上可行，也可考虑采用大能量级强夯。根据《湿陷性黄土地区建筑标准》6.3.4条，新疆地区含水量低于10%的黄土采用强夯法时强夯能级和夯实厚度的经验数值，土层含水量低于7%时夯实厚度取低值，见表2.3-2。

本工程几个试验点，4m内浅层土含水量多小于7%，采用大能量级强夯8000kN·m，处理深度仅能达到4.5m；采用强夯能级6000kN·m，处理深度仅能达到3.5m。而常见的夯实机械，强夯能级多为1000~4000kN·m，因此采用强夯不仅造价高，且处理效果差。

表1 新疆地区含水量低于10%的黄土强夯能级与夯实厚度

强夯能级 (kN·m)	夯实厚度 (m) [全新世 (Q ₄) 或晚更新世 (Q ₃) 黄土]
4000	2.5~3.0
5000	3.0~3.5
6000	3.5~4.5
8000	4.5~5.0

2.3.3 孔内深层强夯灰土挤密桩

孔内深层强夯法又称DDC工法^[1]，其主要特点是：

先用长螺旋钻头在场内地内钻成直径一般为400mm的孔（或冲孔、洛阳铲成孔），然后在孔内填入素土（或灰土）、建筑垃圾或其他材料，利用杆状或橄榄状质量几吨~十几吨高动能特制的重力夯锤夯实，由下而上重复操作，直至形成直径为550~600mm的桩体，并使桩间土挤密，从而形成DDC桩复合地基。

褥垫层填料宜采用3:7灰土，厚度不宜大于0.5m。

DDC法是一种有效的地基处理方法，较之传统的土或灰土挤密桩法，DDC法处理后的复合地基的承载力更高且均匀，处理深度更深（一般可达20~25m），处理黄土湿陷性的效果更为理想。该方法具有技术成熟、工程造价较低，处理深度大等特点，尤其适用于大厚度的自重湿陷性黄土地基。

DDC挤密桩法，适用于本工程，能够有效消除湿陷性，杜绝隐患。

2.3.4 结论

综上所述，单独使用换填和强夯，处理深度和效果均不能保证，因此本工程对比两种处理方法：换填灰土垫层+强夯，孔内深层强夯法灰土挤密桩。

对两种处理方法进行对比如下：

表2 孔内深层强夯法灰土挤密桩工程量

挤密桩长度 (桩长m)	地基处理平面范围 (m)	灰土桩 (m ³)	灰土褥垫层 (m ³)
5.5	围墙基础外缘3m	5250	3528
换填灰土深度 (m)	灰土垫层 (m ³)	强夯处理深度 (m)	强夯能级 (kN·m)
2	11474	3.5	6000

本工程站址含水量较低，如做增湿措施再打桩，造价比较高。而不增湿处理5m的深度则需要采用8000 (kN·m) 大能量级强夯，该设备不常见，造价同样较高。对两种地基处理方式进行对比，相比换填+强夯的处理方式，孔内深层强夯法灰土挤密桩的造价约低206万。因此本工程推荐孔内深层强夯法灰土挤密桩进行地基处理。

3 孔内深层强夯法灰土挤密桩详细措施

3.1 确定桩径、桩间距

根据地勘报告及建、构筑物的荷载情况，本工程采用孔内深层强夯灰土挤密桩法进行地基处理，桩顶标高约-2.5m，上部铺设0.4m厚3:7灰土褥垫层，地基基础做于褥垫层上方。

根据《复合地基技术规范》^[4]8.2.1条，挤密桩孔宜按正三角形布置，孔距可取桩径的2.0倍~2.5倍。8.2.3条，桩孔间距较大且超过3倍的桩孔直径时，设计不宜计入桩间土的挤密影响。

根据《建筑地基处理技术规范》7.5.2条、《电力工程地基处理技术规程》^[5]8.2.5条：桩孔直径宜为300mm~600mm。桩孔宜按等边三角形布置，桩孔之间的中心距离，可为桩孔直径的（2.0~3.0）倍。

根据《孔内深层强夯法技术规程》^[3]4.1.7条，机械钻孔直径最小为400mm，夯扩后直径采用500mm，中心成孔间距取2~3d。冲击成孔直径最小为500mm，夯扩后直径为600mm。

综合上述规范，本工程灰土桩桩径拟采用0.5m，桩间距1.1m，桩间距为桩径的2.2倍。

根据《湿陷性黄土地区建筑标准》6.4.3条文解释：

挤密地基属于复合地基，由填料形成的桩体和挤密后的桩间土组成。挤密地基的面积置换率一般不超过0.3，桩间土在复合地基中面积占比较大，提高桩间土的强度是提高复合地基强度的一条简单而经济的途径，因

此规定桩间土平均挤密系数不宜小于0.93。

现场地基土未处理前实测平均干密度为 $1.44\text{g}/\text{cm}^3$ ，最大值 $1.53\text{g}/\text{cm}^3$ ，最小值 $1.30\text{g}/\text{cm}^3$ 。最大干密度需要现场击实试验确定，是未知数，为了达到挤密系数0.93的处理效果，根据《湿陷性黄土地区建筑标准》公式6.4.3进行试算，得出如下结果。

表3 砂土桩间距和置换率、干密度对应表

桩间距s (d)	对应置换率m	对应干密度 ρ_{dmax}
0.87	0.3	1.785
1	0.226	1.71
1.1	0.186	1.675
1.2	0.155	1.65
1.5	0.1	1.61

以上表格仅为理论计算值，另参考兰州理工大学学报第45卷第6期文献《挤密桩法处理自重湿陷性黄土地基的试验》^[6]，作者朱彦鹏对西北某综合管廊工程挤密桩法处理自重湿陷性黄土地基的现场试验以及室内土工试验做了分析。

由文中表2可知，当桩身直径为400mm时，不同桩间距、同一相对位置的挤密系数有明显变化。深度7m处，当桩间距为0.9m时，挤密系数为0.93；当桩间距为1.0m，挤密系数为0.89；间距越大，挤密系数越小。

最佳处理效果的桩间距/桩径 = $0.9/0.4 = 2.25$ 。

本工程桩径为0.5m，较上述实验数据大；本工程湿陷性土层厚度远小于上述工程的38m。

结合理论计算值和文献实验数据，本工程拟采用桩径0.5m，桩间距1.1m，为桩径的2.2倍，小于最佳处理效果的桩间距/桩径比2.25。

梅花形布置，处理范围为围墙基础外缘3m，处理深度为5.5m，经处理后可消除湿陷性，地基承载力特征值需达到130kPa，可满足变电站使用要求。

3.2 处理效果

灰土桩施工完毕，经第三方检测后，复合地基承载

力特征值大于130kPa，湿陷性分析参数如下：

表4 地基处理检测结果表

测点	测点深度 (m)	对应干密度 ρ_{dmax}	挤密系数	湿陷系数
1	1	1.6	0.97	0.013
2	2	1.58	0.96	0.009
3	3	1.57	0.95	0.014
4	4	1.53	0.93	0.010
5	5	1.60	0.97	0.012
6	5.5	1.58	0.96	0.009

可知，土层挤密系数大于0.93，湿陷性系数均小于0.015。经灰土桩挤密处理后，地基土已消除湿陷性，处理效果满足要求。

4 结论

本文根据地勘报告和工程所在地的特点，分析了多种消除黄土湿陷性的地基处理方法，最终采用孔内深层强夯灰土挤密桩法，桩径0.5m，桩间距1.1m，桩长5.5m，全场地处理，经检测分析后，最终可完全消除湿陷性。

参考文献

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部.湿陷性黄土地区建筑标准:GB50025-2018.北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [2]中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基处理技术规范.JGJ79-2012.北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [3]中国工程建设标准化协会.孔内深层强夯法技术规范:CECS197-2006.北京:中国计划出版社,2006.
- [4]中华人民共和国住房和城乡建设部.复合地基技术规范:GB/T 50783-2012.北京:中国计划出版社,2012.
- [5]国家能源局.电力工程地基处理技术规范:DLT 5024-2020.北京:中国计划出版社,2012.
- [6]朱彦鹏.挤密桩法处理自重湿陷性黄土地基的试验.兰州理工大学学报.2019年45(6)133-137页。