

全国重大 工程项目

地基处理 工程实录

王铁宏 主编



中国建筑工业出版社

全国重大工程项目地基 处理工程实录

王铁宏 主编

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

图书在版编目(CIP)数据

全国重大工程项目地基处理工程实录/王铁宏主编. —

北京:中国建筑工业出版社,1998

ISBN 7-112-03535-X

I. 全… II. 王… III. 重大建设项目-地基处理-资料-

中国 IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 04550 号

本书对我国“七五”、“八五”期间国家重大工程项目各类软弱复杂地基共 17 项工程实录进行了全面介绍。每个工程实录均包括地基处理方案的比较、选择、工艺的确定、可行性试验研究、检测与评估方法、经济效益比较等内容。涉及的处理范围有消除砂土液化、砾质粘性土回填处理、消除黄土湿陷性、小区非均匀块石回填地基处理、抛石填海地基处理、高填方地基处理等。

本书突出实用性,对工程技术人员在重大工程项目地基处理方案决策有直接指导意义和实用价值。本书可供土建专业和工程地质专业地基设计和施工人员使用,亦可供工程勘察、建筑设计以及研究人员参考。

* * *

责任编辑 褚冬梅

全国重大工程项目地基处理工程实录

王铁宏 主编

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

有色曙光印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 1/4 字数: 417 千字

1998 年 7 月第一版 1999 年 4 月第二次印刷

印数: 3001—4500 册 定价: 24.00 元

ISBN7-112-03535-X

TU·2756(8768)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

主 要 编 写 人 员

王铁宏	嵇转平	张季超	甘厚义	邢燕生
刘海军	曾祥柱	黄有余	张继文	高广运
李明琛	李立昌	王亚凌		

目 录

【综述】强夯技术在全国重大工程项目地基处理中的应用	王铁宏(1)
一、强夯技术的发展概况与研究动态	(1)
二、强夯法加固地基的原理与应用	(6)
三、强夯法加固地基的试验与检测	(9)
【实录一】北京乙烯工程 23 万 m^2 液化地基的强夯处理	中国建筑科学研究院(14)
【实录二】茂名 30 万 t 乙烯工程 60 万 m^2 砾质粘性土回填地基的强夯处理	李明琛 王铁宏(31)
【实录三】三门峡火力发电厂 20 万 m^2 湿陷性黄土地基强夯处理	曾祥柱 王泽民 王秀格(39)
【实录四】贵阳龙洞堡国际机场 12 万 m^2 山区高填方回填地基处理	中国建筑科学研究院(56)
【实录五】8000kN·m 强夯在惠州马鞭洲原油码头及配套工程 8 万 m^2 大块抛石填海地基处理中的应用	嵇转平 陈雷 孔繁馨(77)
【实录六】惠州威宏仓储油库 1.5 万 m^2 抛石填海夹杂淤泥质土地基高能级强夯处理	邢燕生 孙志学 李晓伟(94)
【实录七】强夯法处理燕化重油催化装置 3 万 m^2 高填方非均匀块石地基	刘海军 刘启贞 杨长洪 王建忠(115)
【实录八】贵州瓮福磷肥重钙工程 15 万 m^2 山区非均匀回填地基高能级强夯处理	黄有余 常青 徐家锦 王锡良 樊旭东(129)
【实录九】岳阳石化总厂原料工程 11 万 m^2 山区非均匀回填地基高能级强夯处理	张继文 韦艳梅 柴世忠 梁玉峰(157)
【实录十】国营七四四厂工程 5 万 m^2 湿陷性黄土地基强夯处理	高广运 刘景言 王文东(180)
【实录十一】首阳山电厂二期扩建工程 4 万 m^2 灰场坝湿陷性和非均匀性地基处理	张季超 薛仁定 刘尚波(200)
【实录十二】秦皇岛输油泵站罐区原油 1 万 m^2 贮罐非均匀地基 8000kN·m 高能级强夯处理	邢燕生 吴延炜 王亚凌(211)
【实录十三】大连西太平洋石油化工有限公司 10 万 m^3 原油贮罐山区非均匀块石回填地基高能级强夯处理	马宝华 邢燕生 王亚凌(230)
【实录十四】中纺总公司廊坊生产基地 2.4 万 m^2 液化地基处理	李明琛 王铁宏 尚锡章(240)
【实录十五】中原油田黄河水源净化厂 13.2 万 m^2 饱和粉土液化地基强夯处理	甘厚义(247)

【实录十六】建设部 2000 年小康住宅示范小区天津市宜白路住宅小区及川府新村工 程排水砂井加强夯处理陆海相饱和粘土地基	甘厚义(256)
【实录十七】强夯法在大庆石化总厂某 5 万 m ³ 大型油罐地基处理中的应用	李立昌 韩华光(268)

【综述】 强夯技术在全国重大工程项目地基处理中的应用

王铁宏(中国建筑科学研究院)

一、强夯技术的发展概况与研究动态

1. 强夯技术的发展与适用范围

从 70 年代初法国人 L. 梅纳提出采用强夯法加固填土地基以来,该项技术已在世界各地广泛应用。我国于 1975 年开始介绍和引进强夯技术,并于 1978 年底开始在工程中试用。由于强夯技术经济易行、效果显著、设备简单、施工便捷、质量容易控制、适用范围广泛、节省材料、施工周期短,在我国得到迅速推广,特别是“七五”、“八五”期间,多项重大工程项目由于适宜地采用了强夯技术而大大缩短了施工周期,节省了可观的工程投资,取得了良好的经济与社会效益。据不完全统计,“八五”期间,全国重大工程项目地基处理中采用强夯技术的有文献记载的就达 300 万 m^2 以上,因而积累了十分宝贵的经验,为强夯技术的不断改进提高创造了有利条件。本书介绍的 17 项全国重大工程项目强夯地基处理实录就是这期间的强夯技术发展结果。强夯处理技术广泛应用于碎石土、砂土,低饱和度的粉土与粘性土、湿陷性黄土、杂填土、素填土等地基。对于饱和度较高的粘土和淤泥质地基通过辅以置换等措施也可以取得一定的加固效果,如形成硬壳层,可作为工业项目的厂区、道路、一般建(构)筑物地基,但不宜用作高重设施基础。关于高饱和度粉土与粘性土等地基,采用夯坑内回填块石、碎石或其它粗颗粒材料进行强夯置换亦取得了一定效果。近年来多项全国重大工程项目采用强夯技术加固地基并取得显著效果,经检测评价满足设计要求,上部结构已建成或已投入使用。本书介绍的项目有:

(1) 北京乙烯工程

强夯消除地基液化,提高地基承载力,处理面积 23 万 m^2 ,能量 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$,处理深度 8m;

(2) 茂名 30 万 t 乙烯工程

强夯加固砾质粘性土回填地基,处理面积 60 万 m^2 ,能量 $2500\text{kN}\cdot\text{m}$,处理深度 5.7m;

(3) 三门峡火力发电厂

强夯消除黄土湿陷性,处理面积 19.3 万 m^2 ,能量 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$, $6500\text{kN}\cdot\text{m}$, $3000\text{kN}\cdot\text{m}$,最大处理深度达 11.5m;

(4) 贵阳龙洞堡国际机场

强夯处理山区高填方回填地基,处理面积 12 万 m^2 ,每层处理深度 4.5m,能量 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$,分 13 层强夯,处理最大深度 54m;

(5) 惠州马鞭洲油罐区工程

强夯处理大深度抛石填海地基,处理面积 8 万 m^2 ,能量 $8000\text{kN}\cdot\text{m} + 8000\text{kN}\cdot\text{m}$ (双层强夯),处理深度 24m;

(6) 惠州威宏仓储油库罐区工程

强夯处理抛石填海夹杂淤泥质土地基,处理面积 1.5 万 m^2 ,能量 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$,处理深度 12m;

(7) 燕化 200 万 t 重油催化装置

强夯处理山区高填方非均匀块石回填地基,处理面积 3 万 m^2 ,能量 $5000\text{kN}\cdot\text{m} + 5000\text{kN}\cdot\text{m} + 5000\text{kN}\cdot\text{m}$ (三层强夯 9 万 m^2),处理深度 21m;

(8) 贵州瓮福磷肥重钙工程

强夯处理山区非均匀块石回填地基,处理面积 15.3 万 m^2 ,能量 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$,局部 $6000\text{kN}\cdot\text{m}$ 或 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$,最大处理深度 10m;

(9) 岳阳石化总厂原料工程

强夯处理山区非均匀块石回填地基,处理面积 11 万 m^2 ,能量 $8000\text{kN}\cdot\text{m} + 8000\text{kN}\cdot\text{m}$,处理深度 17m;

(10) 国营七四四厂工程

强夯消除黄土湿陷性,处理面积 4~5 万 m^2 ,能量 $2000\sim 3000\text{kN}\cdot\text{m}$,处理深度 4~5m;

(11) 首阳山电厂工程

强夯处理灰场坝湿陷性和非均匀地基,处理面积 4 万 m^2 ,能量 $2500\sim 3000\text{kN}\cdot\text{m}$,处理深度 6~8m;

(12) 秦皇岛输油泵站罐区工程

强夯处理山区非均匀块石回填地基,处理面积 1 万 m^2 ,能量 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$,处理深度 10m;

(13) 大连西太平洋石油化工罐区工程

强夯处理山区非均匀块石回填地基,处理面积 1 万 m^2 ,能量 $7200\text{kN}\cdot\text{m}$,处理深度 12m;

(14) 中纺总公司廊坊生产基地

强夯消除地基轻微液化,提高地基承载力,处理面积 2.4 万 m^2 ,能量 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$,处理深度 7m;

(15) 中原油田黄河水源净化厂

强夯消除饱和粉土液化,提高地基承载力,处理面积 13.2 万 m^2 ,能量 $2000\sim 2550\text{kN}\cdot\text{m}$,处理深度 9~11m;

(16) 建设部 2000 年小康住宅示范区天津宜白路住宅小区及川府新村工程

排水砂井加强夯处理陆海相及古河道、渔池、新近沉积的淤泥及淤泥质土地基,处理面积 2.1 万 m^2 ,能量 $1500\sim 2000\text{kN}\cdot\text{m}$,砂井 $\phi 350$,井深 $>7\text{m}$,处理深度 6~8m。

(17) 大庆石化总厂贮罐地基工程

以上工程中,北京乙烯工程由于采用强夯技术消除了 23 万 m^2 地基液化,显著提高了地基承载力,比挤密碎石桩加固方案和直接采用灌注桩方案节省工程投资 3800 万元,缩短施工周期逾 3 个月;茂名 30 万 t 乙烯工程采用强夯技术有效地加固了近 60 万 m^2 ,5~7m 深的砾质粘性土回填地基,消除了部分回填地基的湿陷性,比直接采用灌注桩方案或挤密碎石桩方案节约数千万元投资,大大缩短了施工周期。

重大工程项目的特点之一就是厂区面积大,一经采用适宜的地基加固处理方案,其直接和间接经济效益将十分惊人,因此引起工程技术人员的极大兴趣,倾注了极大热情,同时取

得了丰硕的科研成果。本书所介绍工程实录均经检测部门评价满足设计要求,且多数已建成投产使用。

强夯技术具有以下特点:

(1) 适用各类土层:可以用于加固各类砂性土、粉土、一般粘性土、黄土、人工填土,特别适宜加固一般处理方法难以加固的大块碎石类土以及建筑、生活垃圾或工业废料组成的杂填土,结合其它技术措施亦可用于加固软土地基。

(2) 应用范围广泛:可应用于工业厂房、民用建筑、设备基础、油罐、堆场、公路、铁道、桥梁、机场跑道、港口码头等工程的地基加固。

(3) 加固效果显著:地基经强夯处理后,可明显提高地基承载力、压缩模量,增加干容重,减少孔隙比,降低压缩系数,增加场地均匀性,消除湿陷性、膨胀性,防止振动液化。地基经强夯加固处理后,除含水量过高的软粘土外,一般均可在夯后投入使用。

(4) 有效加固深度:本书介绍的工程实录中,单层 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 高能级强夯处理深度达 12m ,多层强夯处理深度可达 $24\sim 54\text{m}$,一般能量强夯处理深度在 $6\sim 8\text{m}$ 。

(5) 施工机具简单:强夯机具主要为履带式起重机。当起吊能力有限时可辅以龙门式起落架或其它设施,加上自动脱钩装置。当机械设备困难时,还可因地制宜地采用打桩机、龙门吊、桅杆等简易设备。

(6) 节省材料:一般的强夯处理是将原状土施以能量,无需添加建筑材料,从而节约了建筑材料的购置、运输、打入地下的施工费用,大大缩短了施工周期。当有特殊要求时,可辅以砂井、挤密碎石工艺配合强夯施工,其加固效果比单一工艺高出许多,材料亦比单一砂井、挤密碎石方案要少,费用较低。

(7) 节省工程造价:由于强夯工艺无需建筑材料,节省了建筑材料的购置、运输、制作、打入费用,除消耗少量油料外,没有其它消耗,因此工艺价格低廉。北京乙烯工程挤密碎石方案造价 $200\text{元}/\text{m}^2$ 以上,强夯仅 $25\text{元}/\text{m}^2$;茂名 30万t 乙烯工程,回填地基原采用分层碾压,没有达到应有的加固效果,如采用挤密碎石桩加固费用为 $250\text{元}/\text{m}^2$ 以上,强夯工艺仅需 $30\sim 50\text{元}/\text{m}^2$,且加固效果更好,工期大大缩短。

(8) 施工快捷:只要工艺适合,强夯工艺无需建筑材料的制作,打入时间,其施工周期最短,特别是对粗颗粒非饱和土的强夯,周期更短,一般与挤密碎石桩、分层碾压、直接采用灌注桩方案比较更为快捷,因此间接经济效益更为显著,更令建设单位感兴趣。这从另一方面对设计人员提出了更高要求,地基处理方案中时间效益更为凸显,施工快捷是方案可行与否的重要要求。

2. 强夯技术的最新发展动态

近年来,国内强夯技术发展迅速,应用范围更为广泛,其关键技术主要集中在大能量的强夯技术研究和饱和软土复合地基的强夯技术研究。

(1) 大能量强夯技术:为了加固深厚地基,特别是山区非均匀块石回填地基和抛石填海地基,必须施加大能量进行强夯处理,这样对大能量的加固机理和强夯机具提出了新的技术要求。

我国于 1992 年率先在三门峡火力发电厂采用 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 强夯技术,用于消除黄土湿陷性。以后, $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 强夯技术在我国普遍采用,成为目前国内常用的最高能量强夯,其有效加固深度约在 $11\sim 12\text{m}$ 之间,几项工程效果如下:

三门峡火力发电厂 消除黄土湿陷性 有效加固处理深度 11.5m;
惠州马鞭洲油罐区工程 处理抛石填海地基 (双层强夯)处理深度 24m;
惠州威宏油罐区工程 处理抛石填海地基 处理深度 12m;
贵州瓮福磷肥重钙工程 处理山区非均匀回填地基 处理深度 10m;
岳阳石化总厂原料工程 处理山区非均匀回填地基 (双层强夯)处理深度 17m;
秦皇岛输油泵站罐区工程 处理山区非均匀回填地基 处理深度 10m;
大连西太平洋石油化工炼油厂 处理山区非均匀回填地基 处理深度 12m。

《建筑地基处理技术规范》对 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 以上强夯的处理深度没有建议,梅纳公式又显然不适宜。

大能量强夯施工的主要机具是 50t 履带吊,辅以龙门桁架,起吊高度接近 20m,夯锤重量约为 430kN ,直径约为 3.2m,静压强 53.5kPa 。

一般以 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 强夯为限,当强夯能量小于 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 时,施工机具相对简单,50t 履带吊不必辅以龙门桁架,施工便捷、定位快、工效高、移动迅速;当强夯能量大于 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 时,50t 吊车必须辅以龙门架才足以保证安全施工,因而机具移动、定位相对较慢,工效相对降低。

当强夯能量要求大于 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 时,目前施工单位常用的 50t 履带吊难以承受,因此施工机具的制约是过高能量强夯技术发展的关键。目前国内也在加强这方面的研究。以 75t 履带吊辅以龙门桁架进行 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$ 以上能量强夯。显而易见这已成为机具的经济可行性研究,相信在不远的将来会很快得到开发与应用。

(2) 饱和软土复合地基的强夯技术:对于饱和淤泥质粘土或者淤泥质粉土,由于其含水量高,粘粒含量多,粗颗粒含量少,渗透性差,直接采用强夯效果很差,甚至夯后地基承载力降低。那么决定饱和软土不适宜强夯的关键因素是什么?关键在于强夯过程中和强夯以后,饱和软土中超孔隙水压力不能消散,地下水不能排出,强夯所施加的能量根本不能改变土体结构,全部被超孔隙水压所吸收。甚至由此引起原有土体结构破坏,形成人们所称的“橡皮土”。为了提高在这类饱和软土中应用强夯的加固效果,首先必须解决土中地下水的排出和超孔隙水压力消散的问题,因此可以在饱和软土中打入挤密碎石桩、砂桩,使其在饱和软土中形成竖向排水通道,既有利于地下水的排出,又有利于超孔隙水压力的迅速消散。软土表面辅以铺设一定厚度的粗颗粒使土中排出的地下水有横向通道不致逸出地表造成施工困难,形成地表软化。竖向排水通道的形成同时起到了土体置换的作用,增加了粗颗粒含量,使本来不适宜强夯的软粘土成为适宜强夯的含粗颗粒土。一般工程经验证明,当粗颗粒含量大于 30% 时,地下水位适宜,可以采用强夯;当粗颗粒含量大于 60% 时,地下水位适宜,强夯效果特别理想。在强夯过程中,饱和软土既有竖向变形也有横向变形,因此砂柱、碎石桩的设计要避免被挤断从而失去排水作用,可以从桩径和排水井的柔软性两个方面考虑,使其适应地基土的变形,同时具有一定的刚度和强度。除挤密碎石桩、砂桩以外,常用的排水井型式还有袋装砂井、硬质纸板、聚氯乙烯多孔塑料板等。本书介绍的天津川府新村住宅小区及天津宜白路住宅小区的工程实录中有关于饱和软土辅以砂井进行强夯加固处理的尝试。深圳福田开发区亦有局部饱和吹填软土辅以塑料插板进行小能量强夯的工程实践。目前我国沿海地区是建设项目热点地区,如石化项目多数设置在沿海地区。而沿海地区多数为软土地基,一般处理这类软土地基的方法有直接采用桩基、挤密碎石桩、深层搅拌桩、粉喷

桩及真空预压、堆载预压、塑料插板等,当地基处理面积很大时,上述处理方法的造价、工期将十分惊人,因此工程技术人员对软基处理新工艺的研究兴趣极其浓厚。饱和软土辅以砂桩、碎石桩或其它工艺进行强夯处理技术将是非常具有吸引力的研究课题,应用前景广阔。该技术既可改进原有直接采用桩基、挤密碎石桩、深层搅拌桩等造价过高,同时又可缩短材料购置、制作、打入周期,其主要方法有以下几种:

方法一:挤密碎石桩加强夯(图 0-1)。如本书所介绍的北京乙烯工程(实录一),茂名乙烯工程(实录二)都对挤密碎石桩方案与强夯方案作出比较,挤密碎石桩上部加固效果不如强夯,对于饱和软土,结合挤密碎石桩加上强夯,加固效果会非常显著。挤密碎石桩既可起侧挤密作用又可起竖向排水作用。另外,挤密碎石桩加强夯比单纯挤密碎石桩布桩可稀疏,工艺可简化,使该工艺的总费用与单纯挤密碎石桩方案相比基本持平或略高一点。经该工艺加固后可同时满足一般建筑、工业厂房、设备基础的承载力和变形要求。

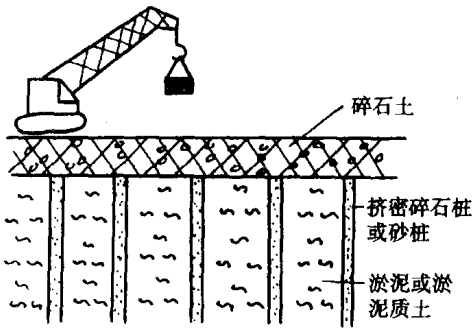


图 0-1 挤密碎石桩加强夯工艺

方法二:砂桩加强夯。砂桩在饱和软土中只起竖向排水作用,因此其总体加密效果比挤密碎石桩加强夯效果要低些,一般可作为大面积厂区地基预处理方案。经过处理后可作为一般建筑,厂房、道路简单设备地基,对于高重设备则需通过验算,必要时还应辅以设备桩基。即便是采用部分桩基也比在饱和软土中直接采用桩基要经济得多,因为此时地基性状经处理后明显改善,桩侧阻力大大提高,消除了湿陷性,液化对桩基承载力的影响,再考虑桩—土共同作用,总体效果更好。

方法三:真空/堆载预压加强夯。目前沿海地区采用真空或堆载预压处理软基的较多。该工艺相对直接采用桩基等方案造价低,但是周期很长,一般需要近一年甚至更长,且加固效果仅能达到 80~100kPa。根据预压 $s-t$ 曲线分析发现(图 0-2)一般情况下堆载预压沉降量在最初的 3 个月发生最多,约占 30%~50%,

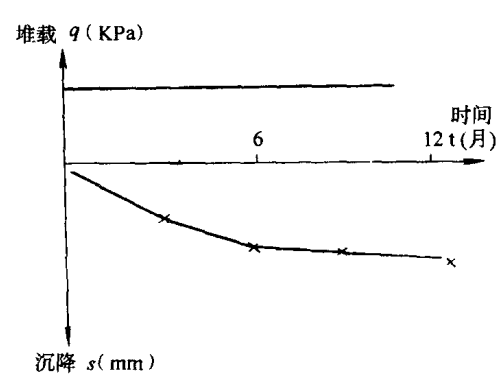


图 0-2 堆载预压曲线

如果工期要求特别紧迫,此前可在软基中设置袋装砂井,在地表铺设一定厚度的碎石土,既有利于形成横向排水通道,又便于施工机具行走,然后就可以采用小能量强夯加固硬壳层,消除软基的其余部分沉降。经这一综合工艺处理后,地基承载力可达到 80~130kPa,一般可作为大面积厂区的一般建筑、厂房、道路、简单设备地基。其特点是比真空或堆载预压工期大大缩短,加固效果更高,费用增加不多。可通过真空预压的插板间距和堆载预压的袋装砂井间距调整来综合考虑成本。由于小能量强夯本身的价格很低,因此两项工艺综合使用的造价并未提高多少,而工期却可大大缩短。

方法四:强夯碎石墩。在沿海地区软基处理中,部分工程采用了强夯碎石墩工艺,如深

圳机场工程。强夯碎石墩工艺是将普通强夯的夯锤平底面改造成尖锥形底面,直径缩小,将其吊起后砸入地基内,形成锥状夯坑,将夯锤拔出后向夯坑内填注碎石形成碎石墩,然后再次夯击,将碎石墩的碎石夯击挤入软土中,起到置换和加固效果。

由此可以看出,辅以一定工艺后进行强夯处理是有效、经济地加固处理沿海(包括沿江、湖)地区饱和软土地基的重要研究课题,将会成为目前我国在该领域的重点内容,应用前景广阔。

二、强夯法加固地基的原理与应用

1. 加固原理

(1) 强夯加固非饱和土

如将地基视为弹性半空间体,重锤自由下落夯击,这是由势能转化为动能的一个过程。在夯击地面的瞬间,动能的一部分以声波形式向四周扩散,一部分由于重锤与土体摩擦而变成热能,其余大部分动能则使土体产生自由振动,并以压缩波(纵波)、剪切波(横波)和瑞雷波(表面波)三种波形在地基内传波。地基一般均为不均匀的、成层状的,土体中的孔隙为空气、水或其它液体所充填。在夯击地面的瞬间,波在成层状地基中从一个弹性介质传播到另一介质,同时,波能的一部分会反射回第一个介质。传到另一介质的波能起到了强夯加固的作用,反射回来的波能则使地表土层变松。这也是强夯中局部地表隆起的原因,因此需要进行满拍。

强夯加固多孔隙、粗颗粒含量高、非饱和地基是基于动力压密理论,冲击型动力荷载在瞬间使土体中孔隙体积缩小,土体密实,承载力提高。非饱和土夯实变形主要是由于土颗粒相对位移重新排列而引起,亦是土中孔隙中气相(空气)被排出的过程,经强夯处理后,土体达到最密实状态,孔隙体积可减少60%。

(2) 强夯加固饱和土

强夯加固饱和土原理相对较为复杂。饱和土由三相组成:固相、液相、气相。强夯过程中,首先其动力应加速饱和土的排水,使液相的比例减小。在强夯过程中,土体有效应力的变化十分显著,且主要为垂直应力的变化。由于垂直向总应力保持不变,超孔隙水压力逐渐增长且不能迅速消散,则有效力应减小,因此,在强夯饱和土地基中产生很大的拉应力。水平拉应力使土体产生一系列的竖向裂缝,使孔隙水从裂缝中排出,从而加速土体的固结。饱和细颗粒土体经强夯后,在夯坑周围会出现径向或环向裂缝,孔隙水从这些裂缝中冒出。北京乙烯工程采用强夯法消除砂土、粉土液化,由于局部粉土细颗粒含量较高,且地下水位较浅,在强夯中就出现了短时间液化现象,地表出现许多裂缝,孔隙水从裂缝逸出,约2~3天后消失,经检测评价,该局部地基消除液化,且承载力从原来的约100kPa提高到170kPa。

强夯使土中气体释放,饱和土中含有约1%~4%的封闭气体,强夯时产生冲击能,部分冲击能由于锤与土体摩擦及土颗粒在移动过程中的摩擦而转化为热能,热能传入饱和土中使封闭泡移动,加速可溶性气体从水中释放并逐渐从地表逸出。

强夯使饱和土压缩变形,在强夯能量作用下,气体体积首先被压缩,孔隙水排出,超孔隙水压力减少,在强夯瞬间,会发生有效的压缩沉降。当夯击反复进行时,土颗粒相互靠拢,土颗粒表面的薄膜水受到挤压,使其部分薄膜水由物理—化学吸附作用使土颗粒相互联系,由此产生多余的水变为自由水流向土颗粒之间,形成一定孔隙水量后从地表逸出,由于薄膜水的减薄,土颗粒发生相对位移,进一步挤密,由紊乱状态进入稳定状态,孔隙大小亦达到比较

均匀状态,起孔隙水压力消散,土体重新稳定,承载力提高。

饱和软土触变恢复,饱和细颗粒土在强夯冲击波的作用下,土中原来相对平衡状态的颗粒、阳离子、定向水分子受到破坏,水分子的定向排列被打乱,颗粒结构从原先的絮凝结构变成一定程度的分散结构,粒间联系削弱,强度降低,经过强夯后一段时间的休置期后,土骨架中细小颗粒—胶体颗粒的水分子膜重新逐渐联结,恢复其原有的稠度和结构,与自由水又粘接在一起,形成一种新的空间结构,于是土体又恢复并达到新的更高强度,这一过程即为饱和软土的触变恢复特性。有学者试验统计,饱和细颗粒土夯后6个月的平均抗剪切承载力增加20%~30%,变形模量可提高30%~60%。需要说明的是,触变恢复期细颗粒饱和土对振动极为敏感,因此,其后续施工工艺和检测评价方法均应避免振动。

2. 强夯法加固地基的应用

(1) 强夯法加固砂土液化地基

本书所介绍的工程实录中有3项为强夯法加固砂土地基液化技术,其中北京乙烯工程处理面积达23万 m^2 ,中原油田黄河水源净化厂工程处理面积为13.2万 m^2 ,中纺总公司廊坊生产基地处理面积为2.3万 m^2 。

华北地区砂土液化问题一直是岩土工程中地基处理的重要内容,传统做法多采用挤密碎石桩工艺,处理费用很大,周期很长,一般砂土液化厚度为地表以下7~9m,液化如若不消除,直接采用桩基,在地震液化状态,整个桩长 $\phi 7\sim 9\text{m}$ 不能提供摩阻力,亦即有7~9m桩长是白白打入地下,其浪费是惊人的。如果采用挤密碎石桩复合地基工艺,可基本消除液化,但基底地基承载力并不高,对于高重设备和承载力要求较高的建(构)筑物,还不得不再打入一定量的灌注桩,这样两项工艺相加,费用过高,周期过长。如能采用强夯工艺取代挤密碎石桩复合地基工艺其消除液化功能与挤密碎石桩相当甚至更高,基底处地基承载力基本上可以满足一般设计要求,对于特别重要的建(构)筑物当不得不打入一定量的灌注桩时,其7~9m长度范围内的摩阻力在地震时可以充分发挥,因此工程桩数量和桩长均可大大减小,而强夯工艺本身比挤密碎石桩等工艺造价大幅度下降,以北京乙烯工程为例,每平方米处理费用强夯/挤密 $\approx 1/5$ 。如果以提高承载力来比,每提高10kPa承载力,强夯/挤密 $\approx 1/8$ 。强夯的施工周期大大缩短。

强夯工艺消除砂土液化在一定深度范围内是有效的、成功的。其效果主要取决于地下水位,当地下水位过高时(一般3m以内),强夯时所产生的孔隙水将从地表逸出,甚至出现局部液化,而砂土中若夹杂有粉土夹层时,连续强夯一是会使施工机具行走困难,二是会使加固效果下降。因此,对于地下水位过高的砂土液化场地可结合强夯使场地地坪下降综合考虑在地表铺设一定厚度的粗颗粒填土或适当降低地下水两种预处理方案。

评价场地液化的重要指标是常年地下水位,因此,对常年地下水位的评价要相当准确。华北地区地下水位的变化恰恰是应当格外注意的事项,如果单用丰水季水位判断则要求过严,如果单用常年水位判断则可能会出现异常年份偏不安全问题,这是一项有待深入研究的课题。目前,常用计算方法是根据《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)的规定进行验算。

(2) 强夯法加固湿陷性黄土地基

强夯法加固湿陷性黄土地基在国内应用最早,应用实例很多。本实录中介绍了3项重大工程项目强夯消除黄土湿陷性处理技术,其中三门峡火力发电厂处理面积19.3万 m^2 ,是国内率先采用8000kN·m高能级强夯工程项目,处理深度达到11.5m。国营七四四厂和首

阳山电厂两项工程处理面积约 $8\sim 9$ 万 m^2 , 处理深度 $4\sim 8\text{m}$ 。

强夯法消除湿陷性, 提高地基承载力和压缩模量。经强夯处理后的黄土地基可作为一般建(构)筑物, 包括车间、厂房、油罐、机械设备基础地基, 对于有特殊要求的亦可采用部分桩基, 但此时由于消除了湿陷性, 桩基消除了原有的负摩阻力, 增加了侧摩阻力, 桩基数量可以大大减少, 施工周期缩短。

黄土经强夯处理后, 消除湿陷性的评价可根据《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25—90)的有关规定和计算方法确定。

(3) 强夯法加固抛石填海地基

80 年代我国在强夯技术方面取得的突出成果之一就是强夯法加固抛石填海地基。中国建筑科学研究院张永钧研究员等将强夯技术应用于处理填海地基工程并进行专题研究。由于抛石填海地基块石较大、级配很差、堆填厚度大、整个场地非常疏松, 且不均匀, 除了强夯工艺以外的其它工艺都难以保证加固效果, 满足设计要求, 且经济。经强夯处理后的抛石填海地基检测评价是一关键技术, 尤其是场地均匀性, 有效加固深度的评价尤为重要。目前国内应用较为普遍的做法是载荷试验结合标准贯入试验, 如标贯困难亦有载荷试验辅以瑞雷波法检测, 但瑞雷波法误差较大, 经验性较强。

本书介绍了 2 项强夯处理抛石填海地基的工程实录。其中惠州马鞭洲原油码头工程处理面积达 8 万 m^2 , 处理深度达 24m, 采用双层 $8000\text{kN}\cdot\text{m}+8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 能量强夯。惠州威宏仓储油库罐区工程处理面积为 1.5 万 m^2 , 处理深度 12m, 亦采用 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 能量强夯。

(4) 强夯法加固砾质粘性土回填地基

我国部分沿海地区广泛分布有残积土地层, 包括砾质粘性土和砂质粘性土, 且多为丘陵地带, 新建场地较多采用回填地基。对于砾质粘性土回填地基, 场地面积多采用分层碾压, 但加固效果多不理想。本书介绍的茂名 30 万 t 乙烯工程回填地基就是在分层碾压失败基础上探讨强夯处理工艺的。对于面积特别大的场地, 采用分层碾压很难保证质量, 且工期很长, 施工困难, 费用亦不低。因此, 探讨采用强夯法取代多层碾压或其它工艺处理砾质粘性土, 其直接和间接经济效益将特别显著。

砾质粘性土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量超过 20% 的残积土, 具有粘土含量, 同时又具有粗颗粒含量。它是由未经搬运的花岗岩全风化产生, 故又称花岗岩残积土, 其中大于 2mm 的粗颗粒被粘粒所包围, 天然状态孔隙比较大, 液性指数较小, 压缩性较低, 但遇水易崩解, 当饱和度较低时常具有某种程度的湿陷性。当砾质粘性土被搬运用于回填时, 其性质改变较大, 孔隙比更大, 压缩性增大, 湿陷性更明显, 对此采用强夯处理工艺是可行的, 亦是合理的。

天然状态残积土的检测评价在《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)中尚未包括, 可参照广东省标准《建筑地基要求设计规范》(DBJ15—3—91)进行评价。但对于大面积残积土回填地基经强夯处理后的检测评价不能简单照搬上述标准, 因为在标准中没有这方面的资料, 可酌情采用现场载荷试验辅以标贯, 建立 $f_K-N_{63.5}$ 曲线进行大面积场地评价。

(5) 强夯法加固山区非均匀回填地基

采用强夯加固山区非均匀回填地基效果较为理想, 特别是随着 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 高能量强夯工艺的广泛应用, 为山区高填方非均匀回填地基处理提供了既经济又可行的方法, 用其取代分层碾压等方法更有经济效益, 加固效果很好, 承载力和压缩模量更高, 工期更短。

本书所介绍的工程实录中有6项为山区非均匀回填地基强夯处理项目,总面积达53万 m^2 ,处理深度最深达12m,最高能量8000 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 。经高能量强夯处理后山区非均匀回填地基承载力一般可达到250~300 kPa ,其压缩模量可达10~15 MPa ,一般工业场区的建(构)筑物包括车间、厂房、油罐基础地基都可适用,多层民用住宅、办公写字楼亦适宜。

山区非均匀回填地基经强夯处理后的检测评价方法与上述抛石填海强夯地基的检测评价方法基本相同。对于起伏较大、山坡较陡的回填地基,经处理后还应注意评价场地抗滑稳定性。

(6) 强夯法加固饱和土地基的尝试与探索

饱和软土不适宜强夯已成为人们共识,其主要原因是饱和软土没有气相排水通道,施加强夯能量后孔隙水无法从排水通道排出,超孔隙水压力一方面吸收能量,使土体不能得到加固,另一方面侧向作用扰动土体,使原有承载力降低。一般认为,将饱和软土改良使其适宜强夯有两点:一是增大粗颗粒含量形成自然排水通道,二是打入砂桩、碎石桩或置入袋装砂井使其成为人工排水通道。可以称以上过程为饱和软土的预处理。经预处理和强夯处理两项工艺,可以找到沿海地区软土地基大面积场区的更为经济合理的处理办法。这种处理方法已在天津、镇海等石化项目上进行了深入探讨,并已逐渐为工程技术人员所接受。用该方法取代真空、堆载预压费用增加不多却可以大大缩短施工周期,间接经济效益特别突出,且承载力提高,可作为场区车间、办公楼、一般设备的基础地基。对于建设场区特别大,高重设备较多,要求较高的项目亦可如前所述内容,适当采用真空/堆载预压3~6个月,在回填土上进行小能量强夯处理硬壳层的方案,对整个场区进行预处理,经预处理后的场区地基承载力一般可达80 kPa 以上,可作为一般轻型建(构)筑物、车间、厂房、小型设备基础和道路地基,高重设备可再采用部分桩基,这种方案的特点是工期大大缩短,造价提高不多,承载力有所提高,桩基数量减少。

三、强夯法加固地基的试验与检测

1. 试验的基本要求

强夯法加固地基的试验包括两类,一类是工艺性试验,确定强夯的夯击能量、夯击次数、有效夯实系数等,主要由单点夯试验确定;另一类是方案可行性试验,在整个强夯处理场区选择若干具有代表性地层的区域进行群夯试验,确定夯击能量、夯击方式(遍数)、夯击间距、间隔周期、地面下沉量及强夯地基承载力、压缩模量、有效处理深度,一般群夯区域面积20m×20m,经强夯处理后在上面进行2~3组载荷试验,标准贯入试验或其它原位、土工试验,并与未进行强夯处理的原状地基试验结果进行对照比较,从而确定评估强夯加固效果。

2. 试验方法

(1) 载荷试验:确定强夯后地基承载力标准值,并与原状地基载荷试验结果对照,判断强夯法对提高地基承载力标准值的影响,载荷试验可按《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)进行。地基经强夯处理后一般成为低压缩性土,故取每一载荷试验 $P\sim s$ 曲线的 $P_{0.01}$ 作为承载力的基本值,取试验区域的载荷试验承载力基本值的平均值为该区强夯地基承载力标准值。

当强夯加固深度较深,或上部结构特别重要时,应选择大尺寸载荷试验,压板直径(边长)可在1~3m之间适当选取。

(2) 标准贯入试验:辅助载荷试验判断强夯加固工艺提高地基承载力并确定有效加固

深度。标准贯入试验按《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)进行,标准贯入试验用于判断强夯加固效果,强夯有效影响深度是非常直接和有效的,当用其确定强夯地基承载力和压缩模量时当格外慎重,对于重要的建(构)筑物应当遵照规范的要求进行载荷试验确定,对于一般建(构)筑物亦应当根据有充分依据的试验对照结果来评价,切忌简单直接查表(包括规范中的建议表或地区的经验表)确定承载力,规范 GBJ7—89 条文说明中明确指出:“用经验关系或经验公式,诸如标准贯入、静(动)力触探以及旁压仪等”作为“第二类原位测试方法确定地基承载力时,必须有相当数量的、直接对比的载荷试验为依据”。不允许通过物理指标查用规范承载力表值来建立间接经验关系。因为这类间接关系,既不符合统计原则,也是不可靠的。它包含了两次统计误差,真正的使用价值可能很低,而且可能是不安全的。同时强调“对于重要的一级建筑物必须进行载荷试验”。本文作者参与了许多重大工程项目地基处理方案讨论,发现地基承载力的确定已成为值得深入研究的课题,因此建议设计、勘察单位技术人员一定要深入研究规范。

(3) 其它试验方法:包括静(动)力触探、旁压试验瑞雷波试验等原位试验方法和土性分析压缩试验等室内土工试验方法。这些方法均可作为设计人员确定强夯地基承载力提供参考值。但需注意这些方法均是间接检测手段,与标贯试验一样,亦必须有相当数量的、直接对比的载荷试验作为评价依据。

3. 检测评价的基本要求及方法

强夯地基的检测评价应依据设计要求,对于强夯地基承载力、变形与压缩模量进行试验与评价,其方法与上述试验方法相同。

由于场地面积大,如本书实录所介绍,有些工程处理面积达几十万平方米,上千个建(构)筑物,其中许多为重要建(构)筑物,若按规范要求都做载荷试验,其工作量和试验周期将成为制约工程进度的因素,无疑是办不到的。

针对这一情况,建议对大面积场区经强夯处理后选择有代表性的特别重要的建(构)筑地基进行专题的载荷试验—标准贯入试验或其它间接检测方法对比试验,可结合工程检测进行,进而指导整个场区强夯地基的检测评价。这种建立的载荷试验—标准贯入试验或其它间接检测方法对照结果对于该场区地基承载力的评价具有直接指导意义,比查规范表格更为可靠。

《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—91)第 2.0.4 条规定“经处理后的地基,当按地基承载力确定基础底面积及埋深而需要对本规范确定的地基承载力标准值进行修正时,基础宽度的地基承载力修正系数应取 0.0,基础埋深的地基承载力修正系数应取 1.0”。该条规定的意义是,如按规范 GBJ7—89,有

$$f = f_k + \eta_b \cdot \gamma(b - 3) + \eta_d \gamma_0(d - 0.5)$$

式中 f ——强夯地基承载力设计值;

f_k ——强夯地基承载力标准值;

η_b ——基础宽度修正系数,按规范 JGJ79—91 规定取 0.0;

η_d ——基础埋深修正系数,按规范 JGJ79—91 规定取 1.0;

b 、 d ——基础宽度和埋深;

γ ——土的重度;

γ_0 ——基础底面以上土的加权平均重度。

按规范 JGJ79—91 则应当改变为:

$$\begin{aligned} f &= f_k + \eta_d \gamma_0 (d - 0.5) \\ &= f_k + \gamma_0 (d - 0.5) \end{aligned}$$

关于该条规定的原因,规范 JGJ79—91 条文说明中并未作出具体解释。本文作者对原因分析之管见是,经地基处理后,许多是为了工业建设,如油罐地基、仓储、堆料。这类基础多为柔性基础,变形协调,不能考虑基础的调节作用,因此不应考虑基础宽度对承载力的修正作用、当对于刚性基础,由于地基处理范围、深度有限,基底压力的影响范围已超出加固区域,使其变得极为复杂,难以准确考虑。

4. 强夯振动对环境影响的测试,分析及对策

为了确定强夯振动对周围环境、建(构)筑物的影响,应在试验阶段对强夯振动可能产生的影响作出评估,一般可采用加速度测试办法进行评价。为了减少强夯振动对周围环境的影响,有效方法就是设置隔振沟,通过加速度测试评价隔振沟对强夯振动的衰减作用。

北京乙烯工程强夯地基可行性试验中对强夯振动的影响进行加速度测试,测试布置方案如图 0-3 所示。

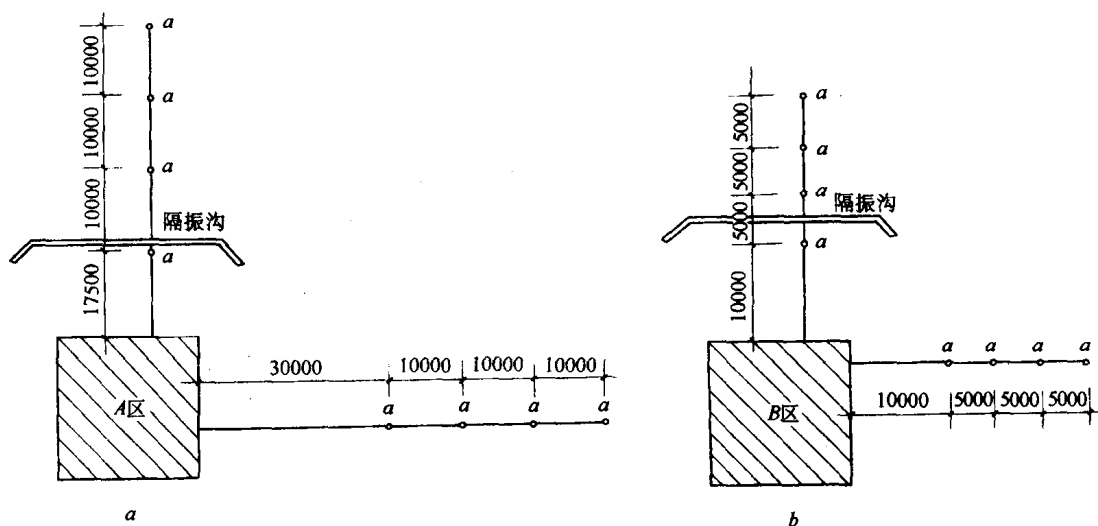


图 0-3 群夯区加速度测点布置图

加速度测试结果则如表 0-1。当未设隔振沟时,30m 处三维最大加速度分别为 0.062g, 0.073g、0.022g、而 60m 处三维最大加速度分别为 0.032g、0.037g、0.015g,从 30m 到 60m,加速度减弱近 50%。

当设有隔振沟时,17.5m 处隔振沟以内三维最大加速度达 0.24g、0.125g、0.055g,而隔振沟外侧仅隔 10m(27.5m 处)的三维最大加速度为 0.058g、0.078g、0.028g,加速度减弱达 75%,说明隔振沟减弱强夯振动的影响非常显著。试验结果表明,距夯点 30m 范围之内振动加速均按负幂函数曲线形式迅速衰减,大于 30m 以后,则以较低的振动强度影响到很远的范围,虽然这种振动强度对结构物已不会造成严重损坏,但对某些有特别要求的精密