

# 国内软土地基处理技术现状与发展趋势\*

吴价城 林佳栋

(上海同赫力岩土工程技术事务所 上海 200237)

**摘要** 本文系统地阐述了我国软土地基处理方法的技术现状与趋势,指出了各类软土地基处理方法的适用条件与效果。着重分析了新近吹填造地场地的特点与地基处理的可行方法,进而提出了发展动静排水结合的复合力排水固结法是软土地基快速处理的主要方向,以及通过动力排水固结或动力固结使填土达到超固结硬壳层的重要工程意义。

**关键词** 软土地基处理 排水固结 动静排水固结 复合力排水固结

## THE CURRENT SITUATION AND DEVELOPMENT TREND OF TREATMENT TECHNIQUE FOR SOFT SOIL FOUNDATION IN CHINA

WU Jiacheng LIN Jiadong

(Shanghai Tongheli Geotechnical Engineering Corp, Shanghai 200237)

**Abstract** This paper elucidates the current situation and development trend of treatment technique of soft soil foundation in China, and points out the conditions of application and effect of treatment techniques for various soft soil foundation. It focuses on analyzing the characteristics and feasible treatment methods of hydraulic fill on filled recently, then more ever presents suggest that the method of preloading dynamic statics consolidation is mainly direction of treatment technique of soft soil, and Preloading dynamic consolidation make the filling reach ultra concretion lamella, it makes important engineering significance.

**Key words** Soft soil ground treatment, Dynamic consolidation, Preloading dynamic statics consolidation, Composite power drain off water consolidation

### 1 引言

近 10 年来,随着我国经济建设的高速发展,围海造地工程、码头堆场工程、物流园工程日益增加。设于沿海、沿江、沿湖岸边的这类工程大都存在原地下有较大厚度的饱和软土、原始地面标高较低的特点,对下伏软土进行快速固结和对回填土(含吹填的砂类土、淤泥、淤泥质土、山皮土、碎石土等)进行快速加固而满足建筑场地对沉降和承载力要求则是此类场地的建设要求。

对于厚层淤泥质土的加固,国内已有堆载预压、

真空预压、堆载加真空联合预压等成功经验,但因施工时间太长和不太适应高填土和面积大使用荷载要求:对于下伏为砂类土,填土亦为砂类土的饱水场地,排水强夯法或动力排水固结法已趋成熟,但因高孔隙水压力的消散问题而难以适用于吹填土为饱水的细粒土场地。因此在原有软土地基处理方法的基础上开发出可适用于上述条件的快速加固软土的技术方法是经济建设的急需。

### 2 软土地基处理中的基本问题

软土地基处理是指采取工程措施对不能满足地

\* 第一作者简介:吴价城,工程地质专业. Email:xydytgc2008@126.com

基承载力和变形设计要求的高含水、高压缩性软弱土体加以改良的岩土工程技术方法。主要是对第四纪晚期自然形成的包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等天然含水量大、压缩性高、承载力低,软塑到流塑状态的粘性土,采用不同工程措施提高抗剪强度、降低压缩性、改善透水性能与动力特性。这是传统的软土地基处理概念和内涵。随着围海造地工程项目的迅速开展,在原有沉积软土的基础上产生了新的软土—吹(冲)填软土,这是一类未经固结、含水量极高、呈流态的人为沉积物,其土质可为淤泥、淤泥夹砂、饱水砂及淤泥质土。这类超软土因吹填而覆盖于原生软土之上,使场地形成明显的下伏土体软,覆盖土体更软的二元结构,从而为场地的地基处理带来了新的课题与困难。

当前软土地基处理中面临的问题不少,主要有下述几个基本问题。

(1)流状吹填土的预处理问题。对于围海造地的吹填土场地而言,尤其是以吹填淤泥类土为主的场地,这是目前的首要难题。由于土体呈流态,含水量高达150%以上,加之透水性极差,在较短时间内不具备采取工程加固措施的条件。然而因为建设速度的需要,必须尽快对其进行表层预处理,为大面积地基处理提供施工条件。

(2)大厚度淤泥、淤泥质土、有机质土的快速固结问题。此类土的固结沉降已有堆载预压、真空预压、真空—堆载联合预压等成功方法,但有固结速度慢、工期长、表层刚度低等不足,难于满足现代快节奏的建设工期要求,对于上下亦为淤泥、淤泥质土的吹填场地而言更加突出。如广州龙穴造船基地、青岛海西坞造船基地、福建可门港物流园、温州及台州等地的围海造陆场地。

(3)因吹填流体、动力特征所产生的吹填土在平面和垂向上不均一性问题。这一现象在任何吹填场地均存在,表现为吹填管口颗粒粗,随离管口距离的加大而颗粒不断变细,而在回水区往往为极细粒的流状淤泥或淤泥质粉土、粉砂。这种不均一性导致了差异沉降大、表层承载力差异大和必须分区采取不同的地基处理方案,尤其是回水淤泥区必须采取先表层固结提供下层处理的施工条件的复杂处理方案。

(4)大厚度填土的处理与人工地基土的工程意义问题。围海造地项目位于潮差大及风暴潮频发的地域时,往往造地的地面标高较高,吹填土与下伏软土的施工沉降较大,在吹填标高上还须回填一定厚

度土层。导致这种场地在处理产生大厚度(一般大于3m)的人工地基土,如何评价和利用这一处理后表现为均一的超固结硬壳层,已是建设方、设计人员及岩土工程人员十分关注的问题。

(5)吹填场地的沉降量计算问题。吹填场地的沉降量包括原生下伏软土在吹填土荷载和使用荷载作用下产生的固结沉降,吹填土及吹填后填土的排水固结与密实沉降。前者已有规范规定,一般采用分层总和法计算,沉降经验修正系数采用1.1~1.4。在大量的软土场地,规范规定的修正系数难于适应,此系数经常要修正到1.6~2.0才可采用;而吹填土的沉降计算目前还无具体规定,如何处理是施工与设计中的难题。

(6)吹填场地地基处理的施工验收问题。由于围海造地的吹填土场地大量采用了动力排水固结及动静排水固结等新方法,施工验收目前均采用地基处理规范的相关规定,如何确切地定量评价工后沉降量和不均匀沉降量,以及采用人工地基(硬壳层)时下卧层的变形验算,有待长期观测资料的验证与总结之后纳入相关规范和提升到理论的论证。

(7)处理大厚度淤泥类软土时的真空预压有效深度及在较大厚度硬壳层应力扩散作用下的下卧软土处理深度控制问题。真空预压的有效深度已为大量观测资料所证实,由于真空预压的压力衰减作用,预压的排水固结是一个随深度而衰减的过程,其最大影响深度在20m左右,而最佳效果深度不大于15m。但随着动静排水固结的复合采用,竖向排水体在动力冲击波作用下产生的“水柱效应”会加大排水固结深度,这种影响的限度目前还无足够的总结资料。

产生超固结硬壳层是动静排水固结方法的附加效果,超固结硬壳层的应力扩散作用是显然存在的,在大面积硬壳层覆盖下的下卧软土在使用荷载作用下的影响深度如何确定,对于设计和地基处理方案有着十分重要的意义,但目前还无足够的资料予以说明。

(8)强夯用于饱和软土的机理研究问题。根据重塑土的孔隙比远小于原状土的孔隙比的软土结构性特征,在可快速消除因强夯而产生的高孔隙水压力的条件下,软土结构被动力冲击而破坏后再固结,孔隙比会明显减小,结构强度增加。经多遍强夯后会使得软土变为超固结硬壳层。但至今仅为宏观控制,暂无可用于实际操作的强夯参数与软土结构加强的半量化公式。同时,设计人员经常提出强夯

冲击荷载同真空预压压力、堆载预压压力的对比问题,目前尚无可供利用的研究结果。

### 3 国内软土地基处理方法的进展

#### 3.1 软土地基处理的基本传统办法

列入国家和地方规范的软土地基处理方法及其适用条件、优缺点见表1。

表1 列入我国国家及地方规范的软土地基处理方法

Table 1 The retreatment methods of soft soil in local and national regulations

处理方法	适用条件	缺点
换填垫层法	浅层软弱地基及不均匀地基	不适用于软土厚度大于3m场地
真空预压法	厚层淤泥、淤泥质土、冲填饱和软粘土	承载力 $\leq 80\text{kPa}$ ,工期长
堆载预压法	同上	工期长,表层刚度低
真空-堆载联合预压法	同上	工期较长,表层刚度低,造价高
动力排水固结法	淤泥厚度小于10m,变形控制不严场地	处理深度浅
降水预压法	表层有大于4m厚砂层和淤泥质土厚度小于10m场地	处理深度浅,必须有厚度大于4m的砂类土表层
振冲置换法	不排水抗剪强度大于20kPa的粘性土场地	不适用于淤泥
振冲挤密法	粘粒含量小于10%的粉土或松散砂土地基	不适用于淤泥及淤泥质土
砂石桩法	不控制变形的场地	工后变形大
石灰桩法	浅层淤泥质土及浅层粘性土场地	不适用于厚度大的软土地场
水泥搅拌法	适用于厚度小于15m的非泥炭土的软土地场	成本高,不适用于厚度大于15m的软土地场
高压喷射注浆法	适用于软土的局部加固及防渗	成本高,不适用大面积加固
静压注浆法	适用于特殊工程及局部软土加固	成本高,不适用于大面积加固

对于吹填场地为流状淤泥时一般采用土工布加土工格栅(化工类)再铺土工布上填砂为深层加固处理建立施工层的办法,但其效果反映为工期长、造价高、并留有石化类产品的环境污染问题。

#### 3.2 软土地基处理新方法

一些岩土工程施工、设计及科研单位,在表1所

列方法的基础上开发出了一些适用于不同地质条件的新工法,但大多为原有工法的组合,也有一些新的创意工法。目前正在应用的新工法见表2。

表2 软土地基处理新工法

Table 2 New methods of treatment of soft soil

方法名称	基本内容	适用条件
降水强夯法	井点(含管井、大井)降水+强夯	$K > 10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的砂土地场
	简易降水强夯	$K > 10^{-3} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,处理深度 $< 5\text{m}$ 的砂土地场
覆水真空预压法	真空预压+围堰覆水超载预压	承载力要求为85~100kPa的淤泥质土地场
动静排水固结法	真空预压、堆载预压、联合预压、降水预压+强夯	下层为厚度大于5m的淤泥或淤泥质土,其上为大于2m的填砂类土或山皮土的场地,地基上承载力要求高,软土工后沉降小的工程
高真空击密法(专利技术)	真空管主动降水+强夯	① $K > 10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的粉、砂土地场;②处理深度 $< 8\text{m}$ 。
复合力排水固结法	低位真空预压同步堆载超载预压+动力冲击排水固结+强夯排水固结	①淤泥或淤泥质土厚度大于8m;②原始地形低可回填2m以上填土;③有可与低位真空预压同步形成的超载土料;④工后沉降小,承载力高的项目

从表2中所列方法可见,近年内软土地基处理方法的重大进展在于动力排水固结法,即强夯法与各类排水固结法的组合应用上。大量的应用效果表明,采用适当方法的排水固结与低能量多遍数的强夯相结合,对高含水的细颗粒地层可取得较满意的处理结果。在国内的大范围软土地基处理过程中几乎都采用了综合降水加强夯的办法。

#### 3.3 正在开发的软土地基处理工法

据调查,目前国内正在开发、研究的新的软土地基处理工法可归纳为下述方向。

(1)极软场地的表层预处理。为了为极软的吹填土地场创造施工条件而进行的地基土表层预处理。其开发方向为固化剂表层加固、竹栅加土工布覆土加固、表层机械搅拌加固剂加固等,固化剂表层加固在道路及小面积上已有较多使用。但因造价较高而未大面积推广。竹栅或荆笆加土工布覆土已在试用,表层机械搅拌加固则在处于引进试验中。

(2)处理原生大厚度、低渗透软土的各类组合工法:如真空预压与电渗降水组合、立体式低压真空复合预压、振动增压与真空排水固结组合、超载一低

位真空—动力固结组合等。

(3)同时处理吹填土和原生下卧软土的组合方法:如真空预压加强夯,堆—超载预压加强夯,真空预压—超载加强夯,分层自重、预压排水固结加强夯等。

(4)不均一吹填场地的综合地基处理工法:该类场地均在精确分区的基础上进行,如综合降水加强夯、双面降水预压加强夯、塑料排水板加强夯等等,针对砂类土、粉类土、淤泥类土同一场地采用不同的组合和不同的施工参数。

(5)沉降高要求的地基处理组合工法,对于差异沉降要求高的建筑场地,正在开发桩与地基土加固的结合,如动力排水固结加打入桩,动力排水固结加搅拌桩等。

## 4 国内大面积围海造陆场地的软土地基处理主要工法

### 4.1 围海造陆场地的岩土工程分类

目前国内从广西到辽宁沿海及长江口到武汉的长江沿岸,正在进行大规模的围水造地工程,小者为数万平方米,大者达数十平方公里,从岩土工程角度大致可分为表3所列5个类型:

表3 围海造陆场地的岩土工程分类

Table 3 The category of geotechnical of gain land from the sea

类别	类型名称	特征	分布地域
I	全淤泥、淤泥质土类型	上、下全为淤泥,厚度巨大,上部为高含水流态淤泥	深圳、浙江南部、福建北部、青岛、天津
II	砂土、淤泥二元结构类型	上为厚度大于2m砂类土,下为厚层淤泥	宁波、珠江口、舟山、泉州、福州、嘉兴
III	砂、粉类土类型	上、下均为砂类、粉类土	长江下游、山东营、江苏沿海、广西等
IV	大厚度填土(山皮土)、大厚度淤泥类土二元结构类型	上为厚度大于4m的山皮土或碎石、下为大厚度淤泥、淤泥质土	闸北、象山、台州、舟山、珠海、江门等
V	大厚度砂类土、小厚度(小于5m)淤泥类土二元结构类型	上为厚度大于4m的砂域花岗岩残积土,下为小于5m厚的淤泥	厦门、潮汕

### 4.2 围海造陆场地的主要软土地基处理工法

当前在围海造陆的软土地基处理中采用的主要方法见表4。

表4 围海造陆场地的主要软土地基处理方法

Table 4 The main methods of treatment of soft soil of gain land from the sea

类别	类型名称	处理方法
I	全淤泥、淤泥质土类型	真空预压、覆水真空预压、真空—堆载联合预压,表层使用土工格栅加砂垫层
II	砂类土、淤泥及淤泥质土二元结构型(上层砂类土厚度大于2m)	真空预压—动力排水固结,低位超载预压强夯联合法
III	砂土、粉土类型	降水强夯法,动力排水固结法
IV	大厚度填土(山皮土)、大厚度淤泥类土二元结构型	真空—堆载联合预压,超载预压强夯联合法,低位真空—堆载联合预压强夯联合法(复合力排水固结法)
V	大厚度砂类土,小厚度(小于5m)淤泥类土二元结构型	堆载预压强夯联合法,降水预压强夯联合法,动力排水固结法

## 5 软土地基处理技术的发展趋势

### 5.1 场地预处理技术

许多建设场地,为了满足大规模的机械化施工及大重型施工机械的进入工地,必须对高含水率的表层土或吹填土进行预处理,如天津的滨海开发区,青岛、广州、江苏的大规模造船基地,厦门、温州、舟山的经济开发区,场地吹填后一片稀泥,用传统的等待表层蒸发固化不能满足工期要求;用化工类格栅因本身无刚度而使工序变得极复杂和因采用化工产品而与节能政策、环保政策相背,而且价格越来越高。为适用大面积施工,国内外已采用青竹、毛竹格栅,荆笆等与土工布相结合设置地基处理施工面;为设置临时道路采用了固化剂;对于透水性较好的场地则采取综合降水加强夯的措施;对于岩性极不均一的吹填场地则分区分别采用上述措施,达到了快速预处理的目的。

### 5.2 组合工法在迅速发展

近年来,为了快速满足软土地基处理对沉降和承载力的要求,使以往分别为加大排水固结沉降为主和以提高表层承载力为主的处理方法得以重组,

针对不同场地条件出现了静力排水固结(真空预压、堆载与亚、降水预压等)与动力固结、动力排水固结相组合的各种施工工艺。在一些平面和垂向均不均一的大型吹填场地甚至同时采用4~5类工艺组合,这就充分发挥了各种工法的优势,形成了在工期、造价和工程质量均具优势各类组合工法,表4中已列出主要组合工法。

### 5.3 同一场地的分区处理工法会日益重要

由于原始地形、地层土条件、吹填土岩性与渗透性的差别,使一个场地内部显示明显的沉降、承载力的差异性,加上各地段使用条件和荷载的不同,不同范围必须采用不尽相同的工法和施工参数才可达到工后沉降、不均匀沉降及承载力的要求。而要对场地的不同地段采用不同的施工工法和施工参数,必须建立在对场地详尽工程分析后做出施工分区的基础上,因此,一个完美的施工设计方案离不开综合分析研究的精确分区,它将成为贯彻于地基处理全过程中的信息化施工的基本依据。

### 5.4 复合排水固结法将会获得广泛采用

复合排水固结法的基本点是在静力排水固结(各种预压排水固结法)的同时,利用动力冲击荷载下竖向排水体具有“水柱效应”而加速参与淤泥、淤泥类土的排水固结,且其深度可达竖向排水体末端以下的特性,可在短时间内同时完成软土的固结沉降和表层土的密实,满足工后沉降和承载力的要求,克服场地的不均一性。在闽北的某工程场地中,采用低位真空预压加覆水堆载预压加强夯的组合工艺,在半年时间内完成了10万 $\text{m}^2$ 的原始淤泥厚度大于20m,填土厚度大于4m的厂房地基处理,不仅实现了工业厂房桩基不用打桩,地基土承载力特征值大于200kPa,淤泥土固结度大于90%的工程效果,而且获得了强夯促使竖向排水体快速排水固结而加大软土沉降的可贵数据,为进一步发展、应用复合排水固结法的方案设计提供了技术依据。

我国东南海沿岸的围海造地场地就具有采用复合排水固结方法的地层与填土条件,相信该方法可以快速得到推广。

### 5.5 硬壳层可减小或延缓下伏软土的工后沉降会越来越得到重视

动力固结或动力排水固结的基本目的是在动力作用的影响深度内形成高密实度的均一硬壳层。点荷载下的硬壳层的应力扩散效应正广泛用于设计,大面积大厚度的均一硬壳层在大面积荷载作用有无应力扩散效应?按现有理论是不考虑的。然而许多实际资料表明,一定厚度的均质硬壳层可明显减少或延缓下伏软土的工后沉降,这一现象可从下述几方面得到解释。

(1)复合排水固结法或动静排水固结在形成硬壳层时,同时对下伏软土进行了排水固结,使软土表层的强度有较大提高,具备了 $f_{\text{软土}} \geq 1.1f_0$ 的条件。

(2)动力固结使下伏软土变为重塑土,孔隙比小于原状土,强度得到了提高。

(3)经动力冲击作用后,竖向排水体被击毁而不具向上排水的能力,经排水固结孔隙比变小的透水性极差的软土,在大面积硬壳层作用下使排水固结受到限制而减小或难于进一步排水固结,从而使工后沉降减少或延迟沉降时间。

(4)由于经大面积处理后形成的硬壳层远大于使用荷载的使用范围,当硬壳层达到一定厚度和土体压缩模量达到一定数值时,即 $H \times E_{s1-2}$ 达到某一数值时,其应力扩散效应也是具备的。

由于硬壳层表现出的对工后沉降的影响具有重大的工程意义,应该得以充分利用和深入研究。

## 6 结 语

我国由于土地资源贫乏,大面积的围海造地项目而产生的软土地基处理工程甚多,经过岩土工程界的长期努力,我们既有成熟的排水固结处理工艺,又开辟了一些新的组合工法。目前正处于一个重要的开发发展期,为了适应大面积围海造地工程的需要,软土地基处理施工还要再上一个台阶,须在各工法组合的机理研究、沉降计算、施工参数优化、硬壳层的工程作用、规范指导等方面努力。

### 参 考 文 献

- [1] 黄绍铭,高大钊. 软土地基与地下工程(第二版)[M]. 中国建筑工业出版社,2005,7.
- [2] 李彰明. 软土地基加固的理论、设计与施工[M]. 中国电力出版社,2006,7.