

55-60

地基加固技术在上海地区的应用与发展

叶观宝

(同济大学地下系,上海,200092)

TU 472

摘要 通过介绍地基加固技术在上海地区的应用与发展,探讨了上海地区常用的各种地基处理方法的基本原理、适用土质范围和实际应用效果,提出一些可供实际工程设计、施工和检测的经验。

关键词 软土地基, 地基加固, 复合地基

上海地区

1 上海地区的地质特点

上海地区上部300m左右的土层是在第四纪地质历史年代形成的。上部150m为滨海沼泽相和河流三角洲相的粘性土层和砂层,夹有薄层陆相粘土和粉细砂层;下部150m由河流相砂层和湖相杂色粘土交替组成。对市政工程和地基基础工程直接相关的是上部70m左右的土层,自上而下分为三个压缩层,其主要特点如下:

(1)在不少地区有各种大小、深度不同的暗浜,浜土大多是呈流塑状态的黑色淤泥,有臭味。这种暗浜在市政地下工程与地基基础工程施工前需认真勘察清楚,并采用地基加固或其它方式来进行处理。明、暗浜填土是上海地区地基加固的主要对象之一。

(2)在大致20m深度范围内普遍分布有厚度不同的淤泥粘土层,这层土的塑性指数 I_p 为20左右,液限 $w_L = 40 \sim 45\%$,塑限 $w_p = 20 \sim 25\%$,天然含水量一般为45~50%, $\gamma = 17 \sim 17.5 \text{ kN/m}^3$,孔隙比常大于1.3,压缩系数 $a_{0.1-0.2}$ 在 1 MPa^{-1} 左右,不排水抗剪强度 $S_u = 10 \sim 30 \text{ kPa}$,灵敏度为3~5。这层土的强度低,变形大,常造成地基整体稳定性不够,产生过大的沉降或不均匀沉降,上海地区的地基加固大都是针对这层土而进行的。

(3)在淤泥质粘土、淤泥质粉质粘土层中普遍夹有薄层粉砂或厚度不等的粉砂层,使

上海地区土层的水平向渗透系数比垂直向大二个数量级。这个特点使开挖工程容易产生不同程度的流砂现象,也使得上海的粘性土层中进行井点降水成为可能。这种土的土质不均匀,取土时的扰动和谨慎操作都会造成土工室内试验指标有较大的离散性,从而导致工程措施不当,甚至造成经济损失。为此要充分注意,为解决渗漏或水力坡降超过容许值,需要采用地基加固的措施。

(4)大致在35m深度范围内个别地段的土层含有(10~20)%的有机质。通常认为这类土有明显的次固结特征,会造成该地段的建筑物长期持续的沉降。次固结虽然至今仍是一个有待进一步研究的课题,但采用地基加固的方法来处理这类工程问题还是行之有效的。

2 地基加固技术及其适用范围与条件

地基加固技术的发展很快,种类越来越多,各有特点。各类加固相互交叉、渗透,其加固的范围和功能也不断扩大。下面就目前上海地区采用过的和比较成熟的地基加固技术以及它们各自的适用范围与条件分别进行介绍。

收稿日期:1997-08-05

作者简介:叶观宝,男,副教授,1964年10月出生,1985年毕业于同济大学岩土工程专业,硕士。

2.1 换土垫层法

其基本原理是挖除浅层软弱土或不良土,分层碾压或夯实土,按回填的材料可分为砂(或砂石)垫层、干渣垫层和粉煤灰垫层。干渣分为分级干渣、混合干渣和原状干渣;粉煤灰分为湿排灰和调湿灰。换土垫层法可提高持力层的承载力,减少沉降量,改善土的抗液化性。常用机械碾压和平板振动的方法进行施工。

该法常用于基坑面积宽大和开挖土方量较大的回填土方工程,一般适用于处理浅层软弱地基(淤泥质土、松散素填土、杂填土、浜填土以及已完成自重固结的冲填土等)与低洼区域的填筑。一般处理深度为2~3m。砂(或砂石)垫层一般适用于中小型建筑工程的浜、塘、沟等的局部处理;干渣垫层一般适用于中小型建筑工程,尤其适用于地坪、堆场等工程大面积地基处理和场地平整,对易受酸性或碱性废水影响的地基不得用干渣作垫层;粉煤灰垫层适用于厂房、机场、道路、港区陆域和堆场等工程大面积填筑。

砂(或砂石)垫层由于垫层原材料的来源以及价格问题,大规模应用砂(或砂石)垫层在上海已受到制约,作者认为主要可用于对较小范围明、暗浜的处理;根据上海具体情况,砂(或砂石)垫层一般厚度为1~3m,其承载力可取150~200kPa,但应满足软弱下卧土层的强度与变形要求;同时应保证有足够的宽度以防止垫层向两侧挤出。

干渣垫层的承载力和变形模量可按表1选用,且应满足软弱下卧土层的强度与变形要求。

干渣在力学性质上的最重要特点是:一方面当压实其荷载—变形关系符合直线变形关系,具有直线变形体的一系列特点;另一方面,当压实不够,强度不足时会引起显著的非线性变形。所以保证干渣垫层的充分压实,使其具有足够强度是干渣地基采用线性变形

表1 干渣垫层的承载力 f 和变形模量 E_0 的参考值

Tab. 1 Reference Value of bearing capacity(f) and deformation module(E_0)of the dry residue cushion

施工方法	干渣类别	压实指标	f (kPa)	E_0 (MPa)
平板 振动器	分级干渣	密实(同一点)		
	混合干渣	前后两次压	300	30
	原状干渣	陷差<2mm	250	25
8~12t 压路机	分级干渣	同上		
	混合干渣		400	40
	原状干渣		300	30
2~4t 振 动压路机	分级干渣			
	混合干渣		400	40
	原状干渣		300	30

理论的先决条件。因此,设计人员除应了解干渣的组成特点外,更应与施工部门结合,根据现场条件与施工机械条件等确定合理的施工方法,选用适宜的压实机械,然后选择各种设计计算参数。

粉煤灰垫层的承载力受到浸水的影响,但仍有较高的承载力,实际应用选值时一般不应超过200kPa;在压实系数 $\lambda = 0.9 \sim 0.95$ 时, $\varphi = 23^\circ \sim 30^\circ$, $c = 5 \sim 30$ kPa, $E_s = 8 \sim 20$ MPa, $k = 2 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-5}$ cm/s(压实初期)。

2.2 排水固结法

其基本原理是软土地基在附加荷载的作用下,逐渐排出孔隙水,使孔隙比减小,产生固结变形。在这个过程中,随着土体超静孔隙水压力的逐渐消散,土的有效应力增加,地基抗剪强度相应增加,并使沉降提前完成或加快沉降速率。

排水固结法主要由排水和加压两个系统组成。排水可以利用天然土层本身的透水性,

尤其是上海地区多夹薄砂层的特点,也可设置砂井、袋装砂井和塑料排水板之类的竖向排水体。加压主要是地面堆载法、真空预压法和井点降水法。为加固软弱的粘土,在一定条件下,采用电渗排水井点也是合理而有效的。

在上海的板桩开槽埋管工程、地下连续墙工程和其它支护工程中,较多地采用内井点预先降水加固坑底土体,以减少基坑土体位移和基坑附近的地面变形。

上海地区常用的竖向排水体中,普通砂井直径一般不小于200mm,袋装砂井直径不小于70mm,塑料排水带的宽度不小于100mm,厚度不小于3.5mm。

排水固结法主要适用于油罐地基、堆场、机场、港区陆域大面积填土和建筑等工程。堆载预压法适用于淤泥质土、淤泥和冲填土等软土地基,一般处理深度为10m左右;后者适用于能在加固区形成(包括采取措施后)稳定负压边界条件的软土地基,一般处理深度为15m左右。对沉降和不均匀沉降要求控制严格的建筑物,应采用超载预压法加固。对重要工程,应预先在现场进行预压试验,在预压过程中应进行沉降、侧向位移、孔隙水压力和十字板抗剪强度等测试,据此分析加固效果,并与原设计进行比较,以便对设计作必要的修正,并指导现场施工。

对真空预压法,我国以在真空度和大面积加固方面处于国际领先地位,其膜下真空度达610~730mmHg柱,相当于80~95kPa的等效荷载,历时40~70天,固结度达80%,承载力提高到3倍,单块膜面积已达30000m²,已在300多万m²工程中使用,得到满意效果。

2.3 振密、挤密法

其原理是采用振动、挤压的方法使地基土体的孔隙比减小,提高土体强度。当加固对象是表层回填土时,常用机械碾压或夯实的方法。当加固深层土体时可采用重达10t以

上的铁锤从高处自由落下,反复冲击地基,即强夯法。强夯法主要适用于加固砂土、含水量低于25%的杂填土地基,对粘性土的粉性土也可采用。对是否适用于上海的饱和软粘土地基的问题是有争议的,成功和失败的工程实例均有。强夯法的处理深度一般为10m左右。强夯法一般适用于堆场、港区陆域及大面积填土的地基加固,在某种程度上比机械的、化学的和其它力学的加固方法应用更为广泛和有效。在一般情况下,对砂性土其单位夯击能量取1000~5000kN·m/m²,粘性土可取1500~6000kN·m/m²。夯锤质量一般为8~20t,锤底面积为3~6m²,锤重/锤底面积为25~35kPa,起重机的起重能力一般为锤重的2~3倍。挤密砂桩是采用激振器把钢套管压入地基,然后边拔管边投砂料,反复上下振捣,利用侧向挤压作用加固地基。这种方法在上海使用的实例表明,对饱和粘性土地基的加固效果不理想。挤密砂桩的处理深度一般为10m左右。挤密砂桩一般适用于油罐地基、地面堆载、陆堤、岸坡和六层及六层以下建筑地基。

2.4 置换及拌入法

其原理是以砂、碎石等材料置换软土,或在土中掺入水泥、石灰之类的固结剂,使原地基成为复合地基,达到提高地基强度的目的。其方法有水泥土搅拌法、高压喷射注浆法、振冲碎石桩法等。

水泥土搅拌法是采用搅拌机将水泥之类的固化剂和地基中的原土拌和,形成圆柱状加固体。该法近年来在上海发展很快。它适用于处理淤泥、淤泥质土、地基承载力不大于120kPa的粘性土和粉性土等地基,适用于多层建筑物地基加固、挡土结构、机场、道路和防水帷幕等工程,一般处理深度为15m左右。对浅层10m深度以内存在较好土层的情况,使用水泥土搅拌法加固其效果和经济效益更加明显。在水泥土桩复合地基的设计中,

应注意几个控制指标:①最优置换率;②有效桩长;③界限桩体刚度。

高压喷射注浆法是采用高压喷射流破坏土体,使水泥浆液和土体相拌和,形成高强度的加固体。高压喷射注浆法主要适用于淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、砂土、人工填土和碎石土等地基,对砾石直径过大,含量过多及有大量纤维质的腐殖土,高压喷射流受到阻挡或削弱,处理效果较差;如果土层中有机质含量较多,则会影响水泥固结体的化学稳定性,其加固质量也差。高压喷射注浆法可适用于:作为基础承重桩、基坑防渗、挡土支护、坑底加固、建造地下防水和防渗帷幕、托换加固、配合盾构等管道施工和加固周围软土。

振冲碎石桩是利用一种单向或双向振动的冲头,边喷高压水流边下沉成孔,然后边填入碎石边振实,形成碎石桩。碎石桩法适用于地基土的不排水抗剪强度大于20kPa的淤泥、淤泥质土、砂土、粉性土、粘性土和人工填土等地基。对不排水抗剪强度小于20kPa的软土地基,采用振冲碎石桩法加固的成功经验是:施工时要有一支素质很好的施工队伍,设计时应采用大置换率(0.3~0.4)。其处理深度一般可达10m左右。该法的主要缺点是排污问题,对环境造成一定的影响。同时采用振冲碎石桩法处理饱和淤泥质土地基,荷载初期将产生较大的沉降变形。

2.5 注浆法

其原理是用压力泵把水泥或其它化学浆液注入土体,以达到防渗、堵漏或加固的目的。这类方法使用方便灵活,在上海地区有较大的适用性。它适用于处理砂土、粉性土、粘性土和一般填土层。对有机质含量较高的暗浜土,用注浆法进行加固时应慎重。其处理深度一般可达6m左右。注浆法的处理目的是防渗堵漏、提高地基土的强度和变形模量、进行托换技术和控制地层变形。

注浆法按工艺所依据的基本原理,可分

为渗入性注浆、劈裂注浆、压密注浆和电化学注浆四类。在上海,最常用的是渗入性注浆和劈裂注浆。平时泛称的压密注浆加固实际上是渗入性注浆和劈裂注浆的结合,浆液在地基中往往成脉状分布,它形成空间网架,是作为整体效果对地基进行加固。注浆点的覆盖土应大于2m。

2.6 其它

除上述几类方法之外,常用于上海地区的地基加固方法还有树根桩、锚杆静压桩、沉降控制复合桩基、土层锚杆等方法。

树根桩像小直径的灌注桩,可以做成直桩或斜桩,也可受拉或承压,使用和施工都很灵活方便。它特别使用于基础托换加固。树根桩直径一般在100~300mm范围内,桩长通常不超过30m。上海地区的树根桩大都用于承受垂直荷载,在开槽埋管和基坑开挖工程中也用于侧向围护和防渗堵漏。在用作防渗堵漏时,其可靠性高于注浆方法,低于水泥土搅拌法。

锚杆静压桩是结合锚杆和静压桩技术而发展起来的,它是利用建筑物的自重作为反力架的支承,用千斤顶把小直径的预制桩逐段压入地基,在将桩顶和基础紧固成一体后卸荷,以达到减少建筑物沉降的目的。它主要用于加固处理淤泥质土、粘性土、人工填土和松散粉土。可应用于新建或已建多层建筑物、中小型工业厂房的地基处理或托换工程。对新建的建筑物需要采用桩基但不具有单独打桩工期或条件的情况下,也可采用锚杆静压桩桩基逆作法进行地基处理。

沉降控制复合桩基是指桩与承台共同承担外荷载,按沉降要求确定用桩数量的低承台摩擦桩基。目前上海地区沉降控制复合桩基中的桩,宜采用桩身截面边长250mm、长细比在80左右的预制混凝土小桩,同时工程中实际应用的平均桩距一般在5~6倍桩径以上。它主要适用于较深厚软弱地基土,以沉降

控制为主的八层以下多层建筑物。

土层锚杆是依赖于土层与锚固体之间的粘结强度来提供承载力的,它使用在一切需要将拉应力传递到稳定土体中去的工程结构,如边坡稳定、基坑围护结构的支护、地下结构抗浮、高耸结构抗倾覆等。土层锚杆的应用成功关键,很大程度上依赖土层锚杆锚固段所处地层的地质条件。在砂土地层和硬粘

土地层中,土层锚杆已被广泛应用,经验也比较成熟。在软土地层中,土锚的承载力较低,变形也比较大,为了限制支挡结构的位移量,在软土地层中的土层锚杆一般需施加预拉力形成预应力锚杆。

综上所述,地基加固方法种类繁多,各种地基处理方法的适用范围如表2:

表2 地基处理方法及其适用范围表

Tab. 2 The techniques and application range of soil improvement

序号	处理方法	对各类地基土的适用情况										加固效果		常用处理深度 (m)	特 点
		人工填土					粘性土					提高强度	抗防		
		素填土	杂填土	冲填土	湿陷性黄土	淤泥质土	粉土	砂土	粘土	淤泥	淤泥质土				
1	换填法	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2~3	适用于浅层软弱土处理与低洼区域的填筑
2	预压法	堆载预压	※	※	○	○	○	※	○	○	○	○	○	10	用于油罐地基、堆场、机场、港区陆域、大面积填土和建筑等工程
		真空预压	※	※	○	○	○	※	○	○	○	○	○	15	
3	强夯法	○	○	※	○	※	○	○	○	○	○	○	○	10	适用于堆场、港区陆域、大面积填土
4	碎(砂)石桩法	振冲法	○	○	※	○	※	○	○	○	○	○	○	10	适用于不排水抗剪强度大于20kPa的淤泥质土
		沉管法	○	○	※	○	※	○	○	○	○	○	○	10	适用于油罐地基、地面堆场、路堤、岸坡和六层及六层以下建筑地基
5	注浆法	○	○	※	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6	适用于局部加固地基、抗震、防渗
6	高压喷射注浆法	○	※	※	○	※	○	○	○	○	○	※	○		适用于托换、挡土、坑底加固、防水帷幕
7	水泥土搅拌法	深层搅拌法	○	※	※	○	※	○	○	○	○	○	○	8~12	用于多层建筑地基加固、挡土结构、机场、道路、防水帷幕
		水泥粉体喷搅法	○	※	※	○	○	○	○	○	○	○	○	8~12	
8	树根桩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	※	○		适用于基础托换加固
9	锚杆静压桩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		适用于托换、加固地基、对有缺陷的桩进行补桩加固	
10	沉降控制复合桩基	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15~20	适用于八层及八层以下建筑地基加固	
11	土层锚杆					○	※	○	○	○	○	○		适用于挡土、抗浮	

注: ○—表示可以 ※—表示慎用

Application and Development of Soil Improvement Techniques in Shanghai

Ye Guanbao

(Dept. of Geotechnical Engineering, Tongji University, 200092)

Abstract: This paper is mainly about the application and development of soil improvement techniques in Shanghai. The emphases have been placed on the study of the basic principle, the applied soil types and applying results of each soil treatment methods which have been usually used in Shanghai. Some practical experience has been put forward which can be consulted during the design, construction and test of a project.

Key words: soft soil foundation, soil improvement, composite foundation

上接第37页

表6 主厂房、烟囱桩型技术经济分析表

Tab. 6 Technical Economic Analysis of Pile Type in the Main Plant and Its Chimney

比较内容		PHC 桩 $\Phi 800 \times 110$ 入土 70.0m	SP $\Phi 762 \times 13$ 入土 77.0m	SP $\Phi 609 \times 11$ 入土 71.0m
设计方面	容许承载力	3300kN	3600kN	2300kN
	沉降量	能满足要求	能满足要求	能满足要求
	4×300m 主厂房、烟囱 桩数量(根)	2400	2200	3000
	每根桩耗钢量(t)		19.2	12.0
施工前准备工作	加工桩靴、特制桩垫、桩帽			
施工条件	桩锤情况	用 MH72或以上吨级	据了解:当时 MH72或以上级别的桩锤全市仅7台	MH45、KB60能满足施工需要
	打桩总锤数击数	4800击左右	7000击左右	1700击左右
	每根桩总耗时	6小时	4.5小时	2.5小时
	每节桩自重(以15m/节)计	9.3	3.7	2.5
	打桩时排土量	较小	小	小
对持力层适应条件	差(翻桩、接桩工作量大)	好	好	
桩材供应	桩材制作情况	当时只有三航预制压弯管卷管厂能生产满足要求的产品,流水线生产,生产期约12月,其它生产厂尚有沙州、宝鸡卷管厂的产品		
	桩材制作国产化情况	当时高强度预应力钢筋基本依靠进口	国产 A3钢能满足要求	
造价	总耗钢量(t)		42240	36000
	主材及制作费	750万元	422万元	360万元
	总造价		10060万元	9000万元