

振冲桩、挤密桩和石灰桩

盛崇文

(南京水利科学研究院土工所)

一、引言

振冲桩是指用振动水冲法在土体内设置的散粒桩体(*granular column*)。挤密桩是指用套管藉冲击或振动方法沉入地基中,然后边加填料边上提套管制成的桩体。用砂做填料就是挤密砂桩(*sand compaction pile*)。我国西北黄土地区广泛采用的灰土桩和土桩亦属挤密桩,只不过填料不同而已。石灰桩顾名思义是指用生石灰做填料在土体内制成的桩体。石灰桩的施工方法和挤密砂桩差不多,但由于生石灰的特殊性质,石灰桩的加固机理主要不是成孔挤密作用,故单列一类称为石灰桩(*lime pile*)。上述三类桩的共性是它们与原地基土一起构成所谓复合地基(*composite ground*),使地基的承载力提高,沉降减少。当然它们也有各自的特点。在砂性土中的振冲桩,制桩对桩间土有挤密作用,但在粘性土中振冲桩主要起置换作用,前者称为振冲挤密(*vibro-compaction*),它主要适用于砂土地基;后者称为振冲置换(*vibro-replacement*),它主要适用于粘性土地基,这两种加固方法总称为振冲法(*vibro-flotation method*)。挤密桩施工时对桩间土有强烈的挤密作用,它主要适用于砂性土、填土和不饱和粘性土地基。石灰桩由于生石灰的吸水胀发使桩间土的力学性能得到改善,它主要适用于软粘土。

复合地基概念的提出是人们对加固机理认识的深化;是加固技术的重大发展。近几年来,以振冲桩、挤密桩组成的复合地基为重要议题的学术讨论会有好几起。1984年在日本东京召开了有210人参加的“复合地基强度和变形讨论会”^[1],同年日本土质工学会还出版了一本有关复合地基的文献目录。我国于1983年在江苏无锡举行了“振冲加固法经验交流学术讨论会”,1986年9月在北京举行的“深基础工程国际会议”,地基加固也是主题之一。同年10月在上海召开了第一届全国地基处理学术讨论会,有关振冲桩、挤密桩、石灰桩的论文有18篇。本文主要以国内近期发表的有关论文为基础,重点论述这三类加固方法的新进展。

二、振冲挤密

对有抗震要求的砂基,大量工程实践表明振冲挤密法是提高砂层抗液化能力的有效且经济的方法。这一方法用于地下水位较高、起始密度较低的干净松砂,效果特别显著。只要粘粒含量不超过土重的10%,都可达到很好的挤密效果;若粘粒含量大于30%,则挤密效果明显降低。施工时可以加填料,也可以不加填料。所谓不加填料就是利用原砂的自行坍落填

补振冲器上提后留出的空间; 所谓加填料就是利用填料在砂层中制造桩体。现在的趋势是多数采用加填料的施工工艺。对粉细砂, 特别粘粒含量较多时, 必须用填料制造桩体才能获得较好的加固效果。填料多数为粒径 2—5 cm 的碎石。

砂基中的碎石桩能增强地基的抗液化能力, 这是因为碎石桩的透水性比砂土高, 它能抑制砂基受震后产生的孔隙水压力。张永钧等报导了用振动台进行的碎石桩试验, 他们发现在砂体的相对密度基本相同情况下, 砂体内有碎石桩和没有碎石桩发生液化所需的临界加速度大不一样, 并且桩的间距不同, 临界加速度也不一样, 如表 1 所示。由表可见, 对常用的 2.5 至 3.5 倍桩径间距, 碎石桩的抗液化作用十分显著。

日本柳堀義彦也做过这方面的研究, 他用一种比较均匀的山砂放在振动台上试验。有两种试验情况, 一种是纯山砂, 另一种是山砂中设置砾石桩, 后者面积置换率为 0.17。在振动台加速度为 250 Gal 时, 无砾石桩情况临界相对密度为 66%, 有砾石桩情况为 46%^[2]。

表1 不同碎石桩间距的砂体临界加速度

状 态	有无碎石桩	以桩径为单位的碎石桩间距						
		无碎石桩	5	4.5	4	3.5	3	2.5
相对密度 (%)		46.3	38.6	45.1	42.3	50.4	41.8	43.7
临界加速度 (Gal)		100	150	150	175	200	250	300*

*仅表层发生局部液化

尽管振冲挤密法早已为工程界接受, 并且在应用方面积累了丰富的经验, 但在加密机理的认识和设计理论的开发方面还处在初级阶段, 远跟不上形势发展的需要, 设计工作基本上是根据已有工程的成功经验或正式施工前的现场试验进行的。徐志英(1983)曾提出一个设置碎石桩的砂基在地震时产生孔隙水压力的计算式。只要给定地震历时和振动周数, 已知砂土的水平向渗透系数、体积压缩系数、发生液化的周数和历时, 和给定桩的直径、间距, 就能计算可能产生的最大孔隙水压力比 $(u/\sigma'_0)_{\max}$ (式中 u 为地震引起的孔隙水压力; σ'_0 为有效上覆压力); 也可根据给定的最大孔隙水压力比, 反求碎石桩的间距。方永凯(1986)也提出一个既考虑加入填料, 还考虑振动引起的砂土孔隙比减少的计算桩间距的式子。当然这些计算式的可靠性有待实践检验。

砂土-碎石桩复合地基的承载力和变形模量多数用大型载荷试验直接测定。大型载荷试验不仅费时费钱, 而且它只能反映小范围土体的性状。在山东省龙口电厂现场曾用剪切波速法检验加固效果, 已取得可喜的结果。这一方法快速、简便, 并能反映较大范围土体的性状, 因而是一种值得推广的检验方法。

如果不用水冲也不加填料, 用各式工具进行深层挤密那就是“振密法”, 如美国的振密管法 (terraprobe method) (主要设备见图 1(a))、日本的振密杆法 (vibro-rod method) (主要设备见图 1(b)、(c))、瑞典的振翼法 (vibrowing method)、比利时的 Y 形振杆法 (Franki Y-probe) (主要设备见图 1(d)) 等^[3,4]。这些振密工具都采用装在顶端的垂直向激振器。各种振密法只适用于饱和干净松砂, 它们的应用范围相当狭。

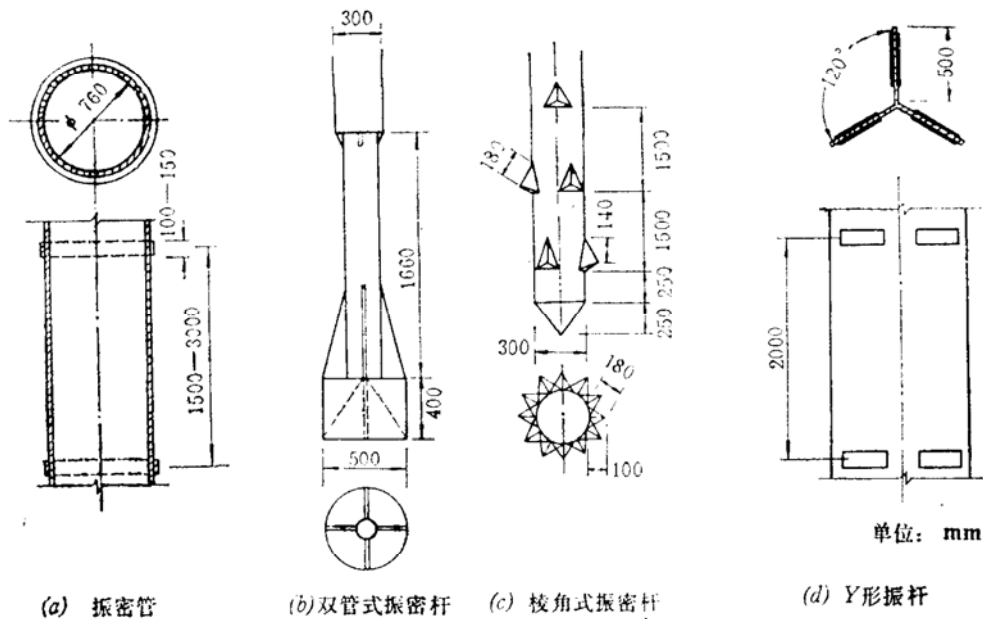


图1 各种振密法使用的工具

三、振冲置换

(一) 加固机理

振冲置换法适用于各种粘性土,有时还可用来处理粉煤灰,甚至垃圾。

按照一定间距和分布打设众多桩体的土层称为“复合土层”,由复合土层组成的地基就是“复合地基”。如果软弱土层不太厚,桩体可贯穿整个软弱土层,直达相对硬层。如果软弱土层比较厚,桩体也可不贯穿整个软弱土层,这样,软弱土层只有部分厚度转变为复合土层,其余部分仍处于天然状态。对桩体打到相对硬层的情况,桩体在荷载作用下主要起应力集中的作用。由于桩体的压缩模量远比软弱土大,故而通过基础传给复合地基的外加压力随着桩、土的等量变形会逐渐集中到桩上去,从而使软土负担的压力相应减少。结果,与原地基相比,复合地基的承载力有所增高,压缩性也有所减少。这就是应力集中作用。

对桩体不打到相对硬层的情况,复合土层主要起垫层的作用。垫层能将建筑物引起的应力向周围横向扩散,使应力分布趋于均匀,从而可提高地基整体的承载力,减少沉降量。这就是垫层的应力扩散和均布的作用。

尽管在制桩过程中由于振动、挤压、扰动等原因,桩与桩之间的地基土中会出现较大的附加孔隙水压力,从而使原土的强度降低。但实测资料表明,制桩结束后一方面原地基土的结构强度会随时间逐渐恢复,另一方面孔隙水压力会向桩体转移消散,结果是有效应力增大,强度提高^[5]。所以说桩体在一定程度上也有像砂井那样的排水作用。总之,复合地基中的桩体有应力集中和桩体排水两重作用;复合土层还起垫层的作用。

(二) 设计计算

地基加固设计主要是估算复合地基的容许承载力和沉降量,少数情况还得估算沉降过程。复合地基承载力和沉降计算这两个问题一直是吸引科研工作者注视的重要研究课题。到

目前为止, 各国学者已经提出若干计算方法。在承载力计算方面有 Hughes and Withers (1974)^[6], Wong(1975)^[7], Thorburn(1976)^[3], Brauns(1978)^[9] 等方法; 在沉降计算方面有 Priebe(1976)^[10], 日本不动建设公司(Fudo Construction Co., 1974)^[11], Goughnour (1983)^[12], Balaam and Poulos(1983)^[13] 等方法。这些计算方法有的出于经验, 有的基于弹性理论或弹塑性理论, 也有用有限元法得出的。这些方法的可靠性有待今后通过实践验证。南京水利科学研究所的软基加固研究小组根据多年来的实践于1983年总结出一套估算方法如下:

$$R_{sp} = [1 + m(n-1)]R_s \quad (1)$$

$$R_{sp} = [1 + m(n-1)](3S_v) \quad (2)$$

$$E_{sp}' = [1 + m(n-1)]E_s' \quad (3)$$

式中 R_{sp} 为复合地基的容许承载力; E_{sp}' 为复合地基的沉降模量; R_s 为地基土的容许承载力; E_s' 为地基土的沉降模量; m 为面积置换率; n 为桩土应力比; S_v 为地基土的十字板抗剪强度。

按式(3)求得 E_{sp}' 后可用常规分层总和法计算复合地基的最终沉降量。

(三) 沉降速率

实践表明碎石桩能加速地基的固结。例如印度 Madras 炼油厂的一只直径 79 m、高 14.4 m 的油罐, 地基为流塑状砂质粘土和疏松粉砂互层, 厚 7 m, 不排水抗剪强度平均为 38 kPa。计算得地基平均固结度 90% 时需要 1.7 年以上。地基用碎石桩加固, 碎石桩等边三角形布置, 间距 2 m, 共制桩 1414 根, 桩长平均 9.5 m, 桩径 0.87 m。油罐试水结束, 发现复合地基沉降已近稳定^[14]。浙江省镇海浙江炼油厂的一只 G-233 罐, 地基为流塑状淤泥质粘土和淤泥质亚粘土, 厚 7.4 m, 十字板抗剪强度上部为 17—19 kPa, 下部平均为 25.5 kPa。地基用碎石桩加固。碎石桩长 8 m, 三角形布置, 排距 1 m, 每排桩的间距 2 m, 共设 87 根。罐体于 1979 年 1 月 11 日建成, 同年 3 月 29 日开始充水, 只用了 54 小时又 20 分钟加水至最大高度 9 m, 此时基底压力为 130 kPa。其后, 罐内水位保持不变, 进行预压。经过 38 天, 地基沉降已经稳定。美国新奥尔良一处地基用碎石桩加固的码头工程也得到类似的经验^[15]。

Goughnour 和 Bayuk(1979) 认为一般常用的排水砂井理论也适用于计算复合地基的沉降过程^[16]。为考虑涂抹作用, Barksdale 和 Bachus(1983) 提出将桩径乘以 $1/2 - 1/15$, 并且一般可假定水平渗透系数为垂直渗透系数的 3—5 倍^[17]。

(四) 桩土应力比

桩上承受的应力与桩间土承受的应力之比称为桩土应力比, 用 n 表示。在复合地基承载力和沉降计算中, 桩土应力比是一个重要计算参数, 它与桩、土的相对刚度、桩长、面积置换率、垫层性质等因素有关。桩土应力比不是一个常量, 它与应力水平或应变水平有关, 也和时间有关。根据理论分析, n 随时间而增大。因为粘性土有次固结效应, 长期的 n 值必大于主固结完成时的值。但是缺少这方面的长期实测资料。表 2 示有 11 项工程和一项模型试验的实测 n 值, 由该表可见 n 最大为 6, 最小只有 1.44, 多数为 2—5。

表2

实测桩土应力比

序号	工程名称	主要土层	n		文献
			范围	均值	
1	江苏连云港临洪东排涝站	淤泥		2.5	[18]
2	塘沽长芦盐场第二化工厂	粘土、淤泥质粘土	1.59—3.83	2.83	[18]
3	浙江台州电厂	淤泥质亚粘土	max 3, 3.5		[18]
4	山西太原环保研究所	亚粘土、轻亚粘土		2	[18]
5	江苏南通天生港电厂	粉砂夹薄层亚粘土		2.0, 2.4	[18]
6	上海江桥车站附近路堤	亚粘土、淤泥质亚粘土	1.44—2.39		[18]
7	宁夏大武口电厂	亚粘土、中粗砂	2.54, 3.11		[18]
8	美国Hampton (I64)路堤	极软粉土、含砂粘土	2.6—3.0		[19]
9	美国New Orleans 试验堤	有机软粘土夹粉砂	4—5		[20]
10	美国New Orleans 码头后方	有机软粘土夹粉砂	5—6		[15]
11	法国Ile Lacroix 路堤	软粘土	2—4	2.8	[19]
12	美国乔治工学院模型试验	软粘土	1.5—5.0		[7]

表3示有几家著名施工公司在设计碎石桩加固地基时采用的 n 值, 南京水利科学研究所的采用值亦一并列出, 以资比较。由该表可见, 国外的采用值相对说来比较保守。

(五) 桩长

对厚层软土, 要使碎石桩贯穿整个软土层达到具有支承能力的硬土层是有困难的。在这种情况下, 可用满堂短碎石桩组成复合土垫层, 这种垫层也可看作是一种筏基。根据英国的经验, 垫层厚通常不超过6 m, 一般为3—6 m。江苏省无锡市房屋修建公司经常采用长7—8 m的部分贯穿桩处理厚层软弱土, 已成功地加固了许多工程。例如社会福利院老人住宅软基, 采用长7—7.5 m的碎石桩加固, 住宅竣工时的实测最大沉降量为4.2 cm, 平均2.05 cm。南京自来水公司上元门水厂第二期扩建工程中的快滤池地基为流塑至软塑状态的淤泥质亚粘土, 层厚在20 m以上, 最软弱部位的十字板抗剪强度最小为26 kPa, 平均为33 kPa。用6 m长碎石桩满堂加固, 桩位等边三角形布置, 间距1.5 m, 共制桩819根。整个工程于1980年6月竣工投产。至1983年4月, 实测沉降量为23.7—34.0 cm, 平均30.2 cm; 相对倾斜0.01—0.51%, 平均0.17%。池壁完好无缝, 运行正常。以上实例表明短碎石桩复

表3 各单位设计碎石桩地基时采用的 n 值

单位	n
Vibroflotation Foundation Co.(美)	2.0
GKN keller (联邦德国)	20
PBQD, Inc. (美)	1.0—2.0
日本营造公司设计挤密砂桩	3—5
南京水利科学研究所	3—6

*在预压前和预压中, 各土层均用 $n=1$, 预压后用 $n=2.0$
(引自Barksdale and Bachus, 1983)

合土层虽然与硬土层不相接, 仍能起到提高承载力、减少沉降量特别是减少不均匀沉降量的作用。

(六) 泥水处理

在粘性土地基中进行振冲置换施工时会产生大量泥水。如果不把这些泥水妥善处理, 将使施工场地满布积水, 泥泞不堪, 影响施工; 如果让泥水直接流入天然河道或城市下水道, 将造成公害。所以泥水处理是振冲法的一个相当重要也是十分棘手的问题。常规做法是预先在施工场地上开设排泥水明沟系统, 使泥水集中引入沉淀池, 然后将沉下来的稠泥浆挖出运走。最近有人采用草包围堰集污处理, 方法简单易行, 效果佳, 值得推广。当然, 解决泥水问题的另一途径是少用水, 甚至不用水。为此, 可用气冲代替水冲, 南京水利科学研究院在南京长江边进行的试验表明对稍硬的土层仅用气冲很难开孔。印度开发了一种不用水冲而用锤击制造碎石桩的方法, 称为“锤击碎石桩法”(rammed stone column method)^[21]。河北省建筑科学研究所也开发了用干振制造砂石桩的方法。不过这些方法已不属振冲法范畴, 干振法似乎更接近于挤密砂桩法。

四、振冲机具的改进和发展

在初期, 振冲器的功率比较小, 一般为10—30kW, 这是第一代产品。例如我国常用的30kW振冲器, 美国和日本采用的22kW振冲器, 苏联采用的25kW振冲器等。为监控和提高制桩质量, 沙炳春等人(1982)研制了振冲施工自动记录仪, 它能自动记录深度和电流值。虽然第一代振冲器的功率在粘性土地基中制造振冲桩绰绰有余, 但对砂土地基, 特别是粗砂、砂砾地基进行振冲挤密似嫌不足。于是功率35—75kW的第二代振冲器应运而生。目前我国功率最大的振冲器为75kW, 它已应用于挤密坝基砂砾土层。在联邦德国, 功率为120kW的振冲器已经问世并开始应用, 这一振冲器的最大加速度可达50g, 最大振力350kN^[22]。对第二代振冲器, 每一挤密点加固的地基面积为2—5m², 对120kW振冲器, 每一挤密点加固的地基面积可达5—10m², 工效倍增, 因此可以说这是第三代振冲器。

为提高在软粘土层中的制桩速率, 减少制桩产生的泥水, 南京水利科学研究院研制了一种“双向振动连续喂料振冲机”。联邦德国亦推出了可在管底喂料的振冲装置。这一装置能在很软的粘土(不排水抗剪强度只有15kPa)中制造振冲桩, 并且可用压缩空气代替水冲^[18]。联邦德国Keller公司还用这一装置以混凝土代替砾石作填料制造桩体, 这种桩体称为“振冲混凝土桩”(concreted vibro-column); 或者在碎石内加水泥和膨润土制造桩体, 这种桩体称为“水泥碎石桩”(mortared stone column)^[23]。不过上述两种桩体与其说振冲桩, 不如说就地灌注桩更贴切。

五、挤密桩

(一) 概述

凡在成桩过程中能对桩周围土产生横向挤压或同时也能产生竖向振实从而使地基性状得到改善的桩体都可称为挤密桩(compaction pile或compaction column)。目前常用的有挤

密砂桩(也有人叫振密砂桩)、土桩和灰土桩。土桩挤密桩和振冲桩的区别从功能来说,前者主要起挤密作用,后者主要起应力集中作用。从施工工艺来说,前者用干式排开土体法施工、开孔成桩主要靠竖向冲击力或竖向振动力,后者借助压力水置换土体法施工、开孔成桩主要靠横向振动力。但是,用振冲挤密法在砂基中设置的碎石桩从功能上说应归属挤密桩类,可是从施工工艺上说应归属振冲桩类,为此暂且称为振冲挤密桩。

挤密桩的制作有三道工序:成孔、加填料和夯实或压实。有时还要复打一、二次,使桩体变粗、密实。桩体按一定布置和间距设置,与原地基土构成复合地基。所以就构成复合地基这点来说,挤密桩和振冲桩有共性。由于成孔方法、采用的成孔机具、填料的不同,派生出许多第二层次的加固方法。

(二)挤密砂桩

在国外用挤密砂桩法加固地基已有悠久历史。我国首次采用这一方法的有太原钢铁公司三号高炉系统热风炉工程,时间为1958年。在初期,都用冲孔捣实法制造桩体,桩体质量欠佳且处理深度较浅。随着振动打桩机的问世,开始应用振动打拔管施工法,桩体质量和工效均有很大提高。1959年日本研制成功振动重复压拔管砂桩施工法,他们称之为“vibro-compozer工法”,制成的砂桩称为“vibro-compozer pile, (VCP)”。VCP的出现使挤密砂桩加固技术发展到了一个崭新的阶段,不仅桩体质量、加固深度和施工监控水平有很大提高,并且使应用范围从砂性土扩大到粘性土,甚至软粘土;从陆上施工发展到海上施工。相应的设计计算理论也由村山朔郎、谷本喜一等人建立起来了^[23]。我国已于1978年引进这一制桩设备用于宝山钢铁总厂工程建设。

除振动重复压拔管施工法外,我国还采用分段拔管和双管冲击两种方法。前者是往沉入土层中的桩管内灌砂后边振动边分段提升桩管。每提高一段桩管,留振若干秒,再提高一段桩管,如此重复操作直至完成整根桩体。后者是将底端封闭的内管和底端开口的外管套在一起,一并打入土层中,拔出内管向外管中灌入一批砂料,再将内管放回到外管内砂面上,提升外管使两管底面齐平,然后按事先规定的要求将内外管共同打下一定距离。这就形成一段直径大于管径的桩体,重复上述步骤直至完成整根桩体。上述两种方法只要严格操作,完全可以保证桩体密实和地基加固效果。

挤密砂桩原先只用于处理砂土、填土以及塑性指数不高的非饱和粘性土,因为这些土可在短暂作用的挤压力和振动力下变密。如果企图用于加固饱和粘性土地基,则应着眼于构成复合地基。为此,应尽量减少挤密、扰动等因素,因为饱和粘性土受到挤密、扰动,孔隙水压力将增大,强度将降低,这与加固目的背道而驰。有些工程之所以达不到预期的加固效果,就因为没有认识这点。凡是认识了这点,对施工设备和施工工艺作了必要的改进,就能取得较好的加固效果。对主要土层为塑性指数较高、且位于地下水位以下的粘性土地基,下列各点经验值得重视。

1. 宜用直径较大的桩管。国内采用的桩管直径多数为30—50cm,似嫌太小。日本在陆上施工采用60—80cm,在海上施工采用80—100cm,最大可达200cm^[24]。

2. 不宜用扩大直径的桩头,因为这能严重扰动地基土。

3. 为便于孔隙水压力消散,宜采用间隔跳打的施工顺序。

4. 用级配良好的干净砂作桩料。

(三)土桩、灰土桩

60年代以来,在我国西北、华北地区应用土桩和灰土桩处理湿陷性黄土和杂填土地基日益广泛,积累了丰富的实践经验,设计计算理论也有一定的发展。

土桩、灰土桩的施工方法与挤密砂桩相同。若为消除黄土地基的湿陷性,采用土桩较合适。制桩材料可用就地的纯净黄土或一般粘性土,有机质含量不宜大于8%,土料要过筛,筛孔小于20mm。由于土桩的力学性能与经挤密后的桩间土相差无几,所以算不上是复合地基,有人称为“挤密地基”。事实上,这仅仅是一个由密实素填土组成的垫层,为此,可用垫层理论进行地基设计,至于桩的布置和间距可根据要求垫层达到的密实程度来确定。

土桩的概念最早是由苏联 Ю.М. Абелев 提出的,1948年开始应用于工程^[25]。这一方法在50年代中期流传到我国,可见我国起步并不晚。目前已有数以千计的工业民用建筑采用这一方法处理湿陷性黄土地基获得成功。近期发展趋势是用灰土桩代替土桩。这是因为灰土桩的强度高,桩体可和经挤密处理后的地基土一起构成复合地基,从而进一步提高地基的承载力和压缩模量。

灰土桩挤密法是西安地区为解决城市杂填土地基的深层处理问题提出的,它是从土桩发展来的。1965年起西安地区的一些单位开展灰土桩挤密法的研究。经多年室内和现场试验,终于达到了实用阶段,于1975年进入全面推广时期。到1978年,西安市已有70多项重要工程采用灰土桩挤密法处理地基,累计处理面积达20多万m²。事后调查表明所有建筑物没有出现任何不良现象,使用情况良好。

关于用土桩、灰土桩处理湿陷性黄土和杂填土地基,经廿多年的科研和工程实践得到的主要认识有:

- 1.只适用于地下水位以上、天然含水量不大于25%的黄土和杂填土。土桩主要用来消除黄土地基的湿陷性,而灰土桩不仅能消除黄土地基的湿陷性,还能显著提高地基的承载力。处理深度一般为5—15m。

- 2.用爆扩法成孔既简单又经济。

- 3.灰土是土与熟石灰粉的混合物,常用的配比为2:8(体积比)。制备灰土时,土的含水量宜控制在最优含水量附近,熟石灰粉的颗粒不得大于5mm,石灰质量不低于Ⅲ级,CaO和MgO含量不低于50%(以重量计)。拌和均匀,随拌随用,不宜过夜。

- 4.为消除黄土的湿陷性,桩间土在挤密后的平均压实系数不得小于0.93。桩孔多数为等边三角形布置,间距为桩孔直径的二至三倍。

- 5.地基用土桩处理,容许承载力可提高150—170%,用灰土桩处理,可提高150—250%。压缩模量可提高200—400%。

- 6.建筑物的沉降观测资料表明,地基经处理后,沉降量一般都小于5cm,有的甚至不到2cm。

六、石灰桩

用石灰处理地基已有悠久的历史。我国的万里长城、古罗马的道路建设都曾用石灰处理地基。但在本世纪50年代以前,绝大多数为浅层处理。50年代之后,随着建设规模的扩大,开始把石灰用于深层处理。用石灰处理深层地基现在有两种做法。一种是先在地基中成孔,

然后在孔中灌入生石灰碎块或在生石灰中掺入适量的水硬性掺合料(如粉煤灰、火山灰等)形成桩体,桩的直径通常不大于40cm。另一种是将石灰粉末或石灰浆利用专用的设备在地基中强制与地基土拌和形成直径较大的桩柱^[26,27,41]。对用拌和法制成的桩柱,由于石灰与土的接触面积较大,两者之间能有更多的机会发生物理、化学反应,故能更充分利用石灰对土的加固作用,这是一种发展潜力很大的加固方法。本文只讨论前一种做法的石灰桩(lime pile)。

天津市从1953年起用石灰桩加固了一批工业和民用建筑的软弱地基,取得了一定的成功。在这个基础上于1959年9月编制了《石灰桩加固地基设计施工规程(草案)》,对石灰桩的适用范围、承载力估算、施工机具、操作步骤等作了初步总结。其后,在江苏、浙江亦相继采用这一方法加固了几十幢房屋的软土地基,并且对加固机理、设计方法进行了探索,对机具和施工方法亦有不少改进。近年来,天津市建筑科技设计研究院、天津大学对石灰桩又开始了新的探索。

在软弱地基中设置的石灰桩之所以能改善土的性质是由于生石灰的水化胀发挤密、放热、离子交换、胶凝反应等作用 and 施工时成孔挤密的缘故。当然也还由于桩群的置换作用。其中水化胀发挤密是最主要的,从这点来说,石灰桩也是一种挤密桩。据分析,石灰桩群的置换作用对地基承载力的提高也是十分重要的。从这点来说,石灰桩与地基土一起也构成一种复合地基,也可借用复合地基理论进行地基加固设计。自然,石灰桩还有它自己的特点,这就是石灰与土之间发生的物理化学反应,这些反应是决定石灰桩复合地基特性随时间而变的根源。

关于用石灰桩加固软弱粘性土地基,经30多年的科研和工程实践得到的主要认识有:

1.石灰与土的化学反应中,活性氧化钙是主角。活性氧化钙含量愈高,则化学反应愈强烈。故要求使用的石灰中氧化钙含量不低于80%,活性氧化钙含量不低于60%。一般新鲜生石灰块可满足这一要求,但必须注意保管,尽可能随用随进。

2.在石灰桩加固软土地基的机理中扮演主要角色的是生石灰的水化、胀发挤密、离子交换和胶凝反应,而放热与成孔挤密作用则是次要的。

3.1974年在天津塘沽曾用生石灰桩处理路基软粘土,经五年后将桩体挖出检查,发现桩周有一圈硬壳,中心部分并未吸水软化,这表明桩体的加固效果是持久的。天津地区50年代地基用石灰桩加固的那些建筑物至今都没有出现因地基问题引起的任何损坏,这再次表明石灰桩地基是可靠的。

4.为提高石灰桩本身的强度,可在石灰中掺加水硬性掺合料。常用的掺合料有火山灰和粉煤灰两种,配比多数为2:8或3:7。

5.为约束石灰桩的向上胀发,可在桩孔内灌80cm厚的素土压顶。

七、结 语

振冲桩、挤密桩和石灰桩都能和地基土构成复合地基,使地基的承载力增大,沉降减小。三种桩各有特点,各有长短和适用范围。当前的发展趋向并不是一种方法代替另一种方法。例如,谁都不会相信挤密桩有朝一日会全面让位于振冲桩,或者振冲桩让位于挤密桩。灰土桩是从土桩演变来的,它特别适用于处理湿陷性黄土和杂填土,能不能说土桩加固法从此就销声匿迹了呢?恐怕也是不可能的。近年来,灰土桩和土桩遇到了一个很有竞争力的对

手——强夯法。但强夯法未必能全部取代灰土桩和土桩。发展的主流是加固方法的相互渗透和联合使用。例如,灰土桩法就是土桩法和石灰桩法相互渗透的产物。联邦德国Keller公司提出的振冲混凝土桩实际上就是振冲法和灌注桩法相互渗透的产物。至于联合几种方法解决复杂地基问题更是近期发展的一个特点。提交第一届全国地基处理学术讨论会的论文中有两篇记述联合使用的好处。一篇是介绍用真空预压联合碎石桩加固天津新港堆场地基,使地基的容许承载力从不到40kPa提高到200kPa,另一篇是介绍在淤泥质土上进行填土,淤泥质土用碎石桩法加固,填土用重夯法处理的试验结果。

最后,从环境保护方面提出的种种规定必将对加固方法的发展产生一定的影响。可以相信国内外工程界面对这种挑战是无所畏惧的。

参 考 文 献

- [1] 奥村树郎, 复合地盘の强度および变形に関するシンポジウム概要, 土と基础, Vol.33, No.2, 1985, pp.100—104.
- [2] 柳堀義彦, 落合真, 半沢秀郎, 广瀬诚, 水门置换砂の液化化予測と対策, 土と基础, Vol.23, No.6, 1975, pp.11—16.
- [3] Massarsch, K.R., Deep Compaction of Sand Using Vibratory Probes, 3rd International Geotechnical Seminar, Singapore, 1985.
- [4] Mitchell, J.K., Katti, R.K., Soil Improvement——State-of-the-Art Report (Preliminary), 10th ICSMFE, 1981, pp. 261—317.
- [5] Sheng, C.W., Some Experiences in Construction and Design of Stone Column Reinforced Ground, Proc. Intern. Conf. on Deep Foundations, 1—5 Sept., Beijing, (1), 1986, pp. 1—6.
- [6] Hughes, J.M.O., Withers, N.J., Reinforcing Soft Cohesive Soils with Stone Columns, Ground Engineering, Vol.7, No. 3, 1974.
- [7] Wong, H.Y., Vibroflotation——Its Effect on Weak Cohesive Soils. Civil Engineering, 4, 44.
- [8] Thorburn, S., Building Structures Supported by Stabilized Ground, Ground Treatment by Deep Compaction, Inst. of Civ. Engrs, London, 1976.
- [9] Brauns, J., Die Anfangstraglast von Schotterssäulen im Bindigen Untergrund, Die Bautechnik, 8, 1978, pp.263—271.
- [10] Priebe, H., Abschätzung des Setzungsverhaltens Eines Durch Stopfverdichtung Verbesserten Baugrundes, Die Bautechnik, Mai, 1976, pp. 160—162.
- [11] Fudo Construction Co., Ltd., Research Laboratory, Design Manual for Compozer System, 1974.
- [12] Goughnour, R.R., Settlement of Vertically Loaded Stone Columns in Soft Ground, Proc. of 8 ECSMFE, (1), 1983, pp. 235—240.
- [13] Balaam, N.P., Poulos, H.G., The Behaviour of Foundations Supported by Clay Stabilised by Stone Columns. 8 ECSMFE, Helsinki, Finland, (1), 1983, pp.199—204.
- [14] Bhandari, R.K.M., Behaviour of a Tank Founded on Soil Reinforced with Stone Columns, 8 ECSMFE, Helsinki, Finland, (1), 1983, pp.209—212.
- [15] Castelli, R.J., Sarkar, S.K., Munfakh, G.A., Ground Treatment in the Design

- and Construction of a Wharf Structure, Symp. on Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations, Inst. of Civ. Engrs., London, 1983, pp.209—215.
- [16] Goughnour, R.R., Bayuk, A.A., Analysis of Stone Column-soil Matrix Interaction under Vertical Load, Proc. ENPC LCPC C.R. Coll, Int. Renforcement des Sols, Paris, 1979, pp. 271—277.
- [17] Barksdale, R.D., Bachus, R.C., Design and Construction of Stone Columns, vl, Report to Federal Highway Administration, U.S. Dept. of Transportation, 1983, p. 143.
- [18] 南京水利科学研究所, 软基加固新技术——振动水冲法, 1983年振冲加固法经验交流学术讨论会论文选编, 水利电力出版社出版, 1986.
- [19] Besancon, G., Iorio, J.P., Soye, B., Analyse des Parametres de Calcul Intervenant dans le Dimensionnement des Colonnes Ballastées, Colloque International sur le Renforcement en Place des Sols et des Roches, ENPC—LSU, Paris, 1984, pp.119—126.
- [20] Munfakh, G.A., Sarkar, S.K., Castelli, R.J., Performance of a Test Embankment Founded on Stone Columns, Symp. on Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations, Inst. of Civ. Engrs., London, 1983, pp.193—199.
- [21] Nayak, N.V., Recent Innovations in Ground Improvement by Stone Columns, Symp. on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, Nov. 29—Dec. 3, 1982, pp.17—29.
- [22] Jebe, W., Bartels, K., The Development of Compaction Methods with Vibrators from 1976 to 1982, 8 ECSMFE, (1), 1983, pp. 259—266.
- [23] 本英三郎, 末松直幹, サンドコンパクションパイル工法, 土と基礎, Vol.29, No.5, 1981, pp.13—20.
- [24] 中垣光弘, 地盘改良用机械, 基础工, 1978, 2.
- [25] Abelev, M. Yu., Compacting Loess Soils in the USSR, Ground Treatment by Deep Compaction, Inst. of Civil Engrs., London, 1976.
- [26] 奥村树郎等, 石灰による深层混合处理工法(第1版), 港湾技术研究所报告, Vol.11, No.1, 1972.
- [27] Broms, B., Boman, P., Lime Stabilized Columns, Proc. 5th Asian Regional Conference, Bangalore, India, (1), 1975, pp.227—234.