

# 夯实水泥土桩的强度和变形特性

姜彬生 李宏义

(中国兵器工业北方勘察设计研究院, 石家庄 050021)

**【摘要】** 夯实水泥土桩是近几年发展起来的一种地基处理方法, 阐述了水泥土桩的适用条件, 桩体不同配比的强度变化规律以及水泥土桩的变形特性。

**【关键词】** 夯实水泥土桩 强度 变形

**【Abstract】** The compaction soil - cement pile is a method of foundation treatment developed in a recent few years. The applied condition of soil - cement pile, the regular pattern of strength change for pile shaft with the different gradation and the deformation features of soil - cement pile are expounded.

**【Key words】** compaction soil - cement pile strength deformation

## 0 前言

夯实水泥土桩处理地基是近几年来发展起来的一种新型的地基处理方法。水泥土桩作为半刚性桩, 有很好的强度, 它们与桩间土构成复合地基, 提高地基承载力, 改善地基土的变形特性, 从而满足建筑物对地基土的需求。这种方法施工简便、造价低、效果明显, 有很好的应用前景。

夯实水泥土桩加固地基的机理是利用机械或人工成孔, 然后将水泥和土按一定比例拌合均匀, 分层填入孔内, 用重锤夯实形成桩体, 由桩体和桩间土构成复合地基。通过两方面作用使地基土强度提高, 一是成桩夯实过程中挤密桩周土, 使桩周土强度有一定程度提高, 二是水泥土桩本身夯实成桩, 且水泥与土混合后可产生离子交换等一系列物理化学反应, 使桩体本身有较高强度, 具水硬性。处理后的复合地基强度和抗变形能力都有明显提高。

几年来, 我们利用这种方法进行了几十个地基处理项目, 也应用此方法进行过危房

地基加固, 都取得了较好的效果。

## 1 水泥土桩适用条件

水泥土桩可用于杂填土、素填土、新近沉积土以及黄土状土中, 但在砂类土中, 由于成孔问题, 该方法不太适用。使用该方法能够消除地基土的湿陷性, 提高地基强度。同时该方法可用于公路、铁路地基土加固以及大面积堆载场地的加固。

据一些资料介绍, 含水量大于 23%, 饱和度 65% 以上的地层中不太适用此方法。但我院在几项工程中, 地基土为粉质粘土, 含水量在 25% ~ 30% 之间, 饱和度在 80% ~ 85% 之间, 应用此方法处理的地基均获得成功。笔者认为: 在以粉质粘土为主构成的地基中, 地基土的含水量小于 30%, 饱和度小于 85% 均可应用此方法。在地下水位以下, 由于填料、夯实等困难, 所以很少应用此种方法。但近几年实践, 对于地下水位以下地层通过人工降水, 亦可采用水泥土桩进行处理, 疏干后的地基土应该满足上述要求, 否则会出现缩颈等现象。

## 2 强度特征

夯实水泥土桩的施工,最主要工序体现在对拌合料的夯实成桩,为保证桩体强度,在最优含水量的情况下,工程控制一般要经过足够的夯击能,使桩体的压实系数  $D_r \geq 0.95$ 。这主要是从锤重、落距、夯击次数进行控制,需根据地层条件、填料量、试桩和工程经验获得。

### 2.1 水泥土桩的微观结构特征

从理论上讲,用于成桩的土颗粒越细,土颗粒的比表面积越大,掺入水泥后,更易使水泥与土结合,进行离子交换反应,强度越好。从工程意义上讲,土料能实现过 1~2cm 网筛就足够了,一般施工用的土料多是就地取材,从成孔中取出的土料就可使用,多数为素填土,粉质粘土或粉土,也有应用杂填土的工程,但无论何种土料必须过 1~2cm 网筛,且有机质的含量小于 5%。

从现场桩体开挖情况看,土颗粒被水泥吸附包裹,颗粒间水泥形成了网络,构成了一定格架作用(见图 1)。夯实桩体密度增大,加上水泥在土颗粒间充填空隙,形成坚固联

接。土颗粒表面阳离子与水泥表面阳离子吸附交换,由于离子交换的团粒化作用,使土体形成较紧密的团粒结构。因此,桩体强度增高。

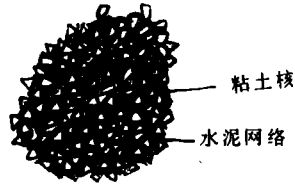


图 1 水泥土桩微观结构图

### 2.2 不同水泥配比下桩体强度

水泥土桩强度取决于水泥标号、含量以及夯实程度。考虑经济条件,一般采用 325 号或 425 号矿渣硅酸盐水泥,配比一般采用 10%、20% 水泥。

为了比较不同配比水泥土桩的强度,我们曾对 10%、12%、15% 水泥含量(水泥含量均为重量比,以下同)的夯实水泥土进行试验,其结果见表 1。

表 1 不同水泥含量击实水泥土试块抗压强度表

养护时间 t/d	养护条件	抗压强度 $p$ /MPa			试件尺寸 mm	备注
		水泥含量(10%)	水泥含量(12%)	水泥含量(15%)		
7	自然	1.70	1.70	1.80	$\phi 100 \times 110$	土质 均为 粉质 粘土
18	自然	3.02	2.52	3.29	$\phi 100 \times 110$	
38	自然		3.98		$\phi 100 \times 110$	
60	自然	5.60	5.70	6.40	$\phi 100 \times 110$	
90	自然	5.60	5.80	6.50	$\phi 100 \times 110$	

从表 1 可以看出,夯实水泥土具有较高的抗压强度值,随水泥加入量的增加,强度有所提高。在 10%~15% 水泥含量范围内,随水泥量增大,强度并无大幅度提高。从经济角度,可考虑适当的水泥配比。

### 2.3 夯实水泥土强度随时间增长规律

水泥土桩具有较高强度是因为水泥与土发生离子交换、吸水硬结等反应,因此其机理决定了强度的提高是随时间逐步完成的,早期强度和后期强度有很大差别。为了指导施工,应对水泥土桩的强度规律进行研究。

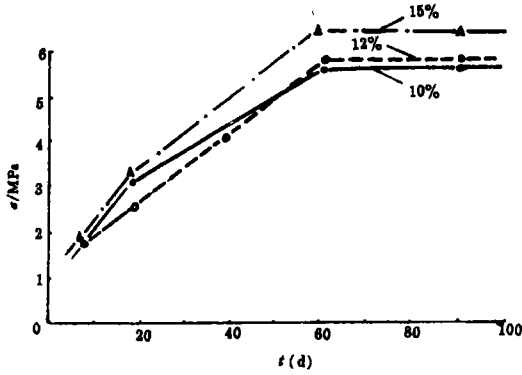


图2 击实水泥土试块随时间变化的强度规律

从表1可以看出, 夯实水泥土强度随时间延长强度有很大提高, 早期强度与最终强度有很大差别, 其规律见图2。

从图2可看出, 在初期, 由于水泥与土的反应尚没有充分进行, 强度较低, 而且不同水泥含量的强度差别不大, 主要是夯实的增密起主导作用, 7天以后, 强度增长很快, 到30天时, 强度基本达到最终的60%左右, 至60天时, 将基本达到最高强度, 之后, 强度增长不明显。10%~15%水泥含量的击实水泥土试块, 最终强度将达到5.60~6.50MPa。

取某工程试验柱制成试块, 分不同的时间做抗压强度试验, 其结果见表2、图3。

表2 现场桩取试块强度试验成果表

工程部位	试件尺寸 mm	养护 方法	水泥含量 (%)	试件 组数	不同时间强度 $p$ /MPa			
					4d	15d	30d	70d
桩	100×100×100	自然	12%	2组 6~8块	0.40	1.63	3.20	5.70

表3 夯实水泥土的压缩模量表

试样条件	水泥 含量	试验条件	压缩模量 $E_s$ /MPa			备注
			$P$ /kPa	$P$ /kPa	$P$ /kPa	
			100~200	200~300	300~400	
室内击实试块	12%	击实后, 马上做, 未养护	70.6	90.6	95.5	土质 均为 粉质 粘土
现场夯实桩体取样	12%	击实后, 马上取样试验, 未养护	85.5	93.1	105.9	
室内击实试块	12%	击实后, 自然养护7天	181.3	153.3	221.3	

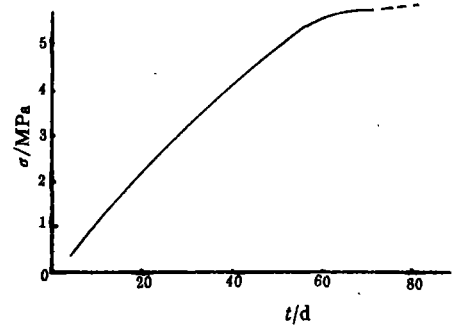
从表2及图3可以看出, 其最终强度与室内试块强度基本接近。但早期强度要比室内制样提高慢些, 这可能主要是由于养护环境的差异。尽管这样, 10天以后亦具有了较高的强度, 30天左右时, 基本达到了最终强度的60%。

### 3 夯实水泥土桩的变形特性

#### 3.1 水泥土试块的变形特性

取水泥含量12%的室内击实试验制样和工程桩试样, 在未养护的条件下, 马上进行压缩试验, 并取养护7d的试样进行试验, 其压缩模量统计结果见表3。再往后试样强度增大, 制样困难, 无法进行试验。

试验表明, 12%水泥含量的室内击实

图3 现场桩取试块抗压强度与时间关系曲线图  
(水泥含量12%)

水泥土、现场夯实水泥土  $E_{s1-2}$  均表现了很好的抗变形能力。现场由于锤重、夯击能量大,压缩模量更高一些。自然养护 7d 后的室内击实试块  $E_{s1-2}$  有了大幅度提高。可以预见,随养护期的延长,压缩模量还会有更大幅度的增长。

### 3.2 桩体的变形特性

对现场 12% 水泥含量的夯实水泥土桩,施工后 28d 进行桩体载荷试验,其试验成果曲线见图 4。

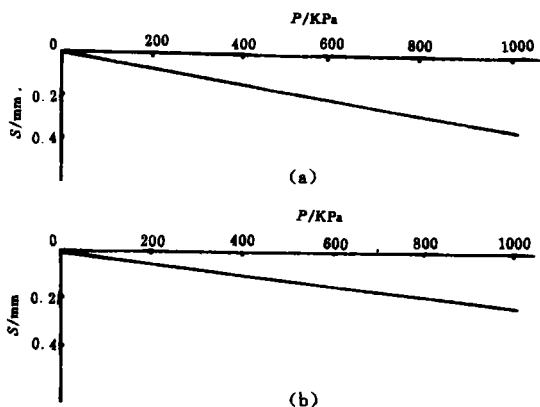


图 4 夯实水泥土桩载荷试验曲线  
(a) 试桩 1 (b) 试桩 2

其中桩直径 50cm, 圆形压板面积 2 500cm<sup>2</sup>。

根据  $E_0 = 0.79(1 - \mu^2) \frac{d \cdot p}{s}$ , 地层  $\mu = 0.25$ ,

压板直径  $d = 56.4\text{cm}$ , 试桩 1 及试桩 2 的变形模量  $E_0$  分别为 137.54MPa 和 192.14MPa, 反映了很高的抗变形能力。

由于桩体具有很高的模量, 因此, 用夯实水泥土桩加固后的复合地基比原地基变形模量会有较大增长, 抗变形能力有明显提高。

## 4 工程实例

### 4.1 工程条件

石家庄某 18 层大厦, 由于地基土强度和变形均不能满足设计要求, 需进行处理。该建筑物的基础型式为钢筋混凝土箱型基础, 基础埋深 -6.70m, 处理后的承载力标准值

$f_{ksp} \geq 270\text{kPa}$ , 压缩模量  $E_s \geq 20\text{MPa}$ 。地基条件为: 表土、杂填土①: 厚度 0.50 ~ 1.20m; 黄土状粉质粘土②: 可塑, 厚度 2.00 ~ 2.80m,  $f_k = 155\text{kPa}$ ,  $E_s = 8.09\text{MPa}$ ; 黄土状粉土③: 中密, 稍湿, 厚度 1.20 ~ 1.70m,  $f_k = 160\text{kPa}$ ,  $E_s = 9.76\text{MPa}$ ; 黄土状粉土④: 稍密、湿, 厚度 1.80 ~ 2.50m,  $f_k = 145\text{kPa}$ ,  $E_s = 8.20\text{MPa}$ ; 粉土⑤: 稍密, 很湿, 厚度 1.10 ~ 1.80m,  $f_k = 130\text{kPa}$ ,  $E_s = 6.0\text{MPa}$ ; 中砂⑥: 中密, 厚度 1.20 ~ 2.20m,  $f_k = 240\text{kPa}$ ; 粉质粘土⑦: 可塑饱和, 厚度 4.90 ~ 5.50m,  $f_k = 200\text{kPa}$ ,  $E_s = 12.1\text{MPa}$ ; 粉土⑧: 稍密, 很湿, 厚度 3.90 ~ 5.40m,  $f_k = 160\text{kPa}$ ,  $E_s = 4.08\text{MPa}$ ; 中粗砂⑨: 密实, 稍湿, 未揭穿,  $f_k = 400\text{kPa}$ 。由于天然地基在沉降与变形上不能满足设计要求, 经论证采用夯实水泥土桩进行地基加固。

### 4.2 设计参数选择

配比: 水泥含量 12% (重量比);

设计桩径:  $D = 400\text{mm}$

桩体承载力标准值:  $f_c = 5.7/3 = 1.9$  (MPa)

计算后, 置换率  $m = 0.075$

按正方形布桩, 桩间距  $L = 1.30\text{m}$ 。

根据计算, 有效桩长为  $H = 7.0\text{m}$ 。

### 4.3 复合地基的检测结果

该项工程施工后 28d, 对复合地基应用载荷试验进行检测, 结果见图 5。压板为正方形, 面积 1.69m<sup>2</sup>。

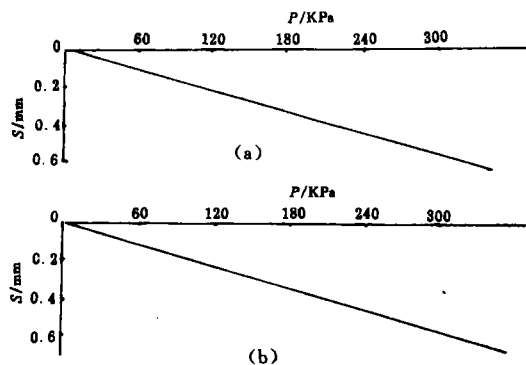


图 5 复合地基载荷试验成果曲线图(施工 28 天后)  
(a) 复合地基 1 (b) 复合地基 2

从图5中可以看出,比例界限  $P_0 \geq 306.9 \text{ kPa}$  (由于是工程桩,未压至破坏),完全满足设计要求的  $f_k \geq 270 \text{ kPa}$ 。

根据  $E_0 = 0.79(1 - \mu^2) \frac{b \cdot p}{s}$ , 其中  $\mu =$

0.26,  $b = 130 \text{ cm}$ , 复合地基1及复合地基2的变形模量  $E_0$  分别为  $59.05 \text{ MPa}$  和  $5.94 \text{ MPa}$ , 根据压缩模量与变形模量的经验系  $E_s \geq 20 \text{ MPa}$ , 完全满足设计要求。

## 5 结语

(1) 夯实水泥土桩处理地基是一种效果明显的处理方法,有很好的应用价值。

(2) 夯实水泥土桩以其重锤夯实作用及水泥与土体的离子交换作用使桩体具有较高强度,在工程意义上的10%~15%水泥加入

量时,夯实水泥土的强度可达  $5.50 \sim 6.50 \text{ MPa}$  的抗压强度。具体工程应视设计要求而采用合适的配比。

(3) 夯实水泥土桩的抗变形性能好,自然养护一个月,变形模量可达  $100 \text{ MPa}$  以上,具有很高的抗变形能力,利用水泥土桩加固后的地基可有效改善地基土的变形特性。

(4) 夯实水泥土桩的效果与现场施工控制关系很大,包括土料搅拌质量,湿度控制,夯击能量的选择,填料量等施工技术,都应很好控制,否则会影响其效果。

(5) 笔者对夯实水泥土桩的强度和变形特性进行了初步探讨,但还需不断完善并作进一步总结和研究。

收稿日期:1998-05-08

(上接36页)

### (2)与公路档墙挖土方有关

由于公路路基土为素填土,在做公路砌石档墙时,不宜利用。必须彻底清除,将基础砌置在性质较好的(2a')层砂质粉土和(2a)层粘质粉土中。因此,采用人工开挖,挖成一条宽3m,深2~3m的深沟,使土体应力释放产生蠕变松动而影响建筑物。因此,在此时间内建房最容易发生墙体裂缝,这从表1的资料中也确证了这一点。

### (3)与公路自重有关

由于该公路路面较宽,达42m,而路基又较高,一般回填土厚度达2m以上,最厚达3.8m(如9#楼附近)。如此厚的回填土直接使素填土层受压,由于自重大、应力传递深,而影响到下伏的含有机质粘土(2b层)和淤泥质粘土(2d)、(3)层等软弱土层,造成了地基发生不均匀沉降而影响建筑物。

### (4)与房屋结构有关

据杭州市房屋安全鉴定所资料的反映,凡是墙体裂缝严重的房屋,一般房子结构较差(如9#楼),多为简易砖混结构,条形基础,很少设钢筋砼圈梁,而基础埋置较浅,为0.8~1.2m,多在素填土中。特别是老房子(如14#楼等),由于年久失修,墙体本身就有裂缝出现,加之建公路各种因素的影响,造成了这些裂缝进一步的扩展和新裂缝的出现,因此,出现了老房子开裂严重的情况。

### (5)与车流量大,振动有关

该公路于1994年开始通车后,车流量很大,汽车昼夜不停地往复振动,造成房屋走样,而促使墙体裂缝发育。

另外,有的房屋地势较低,或落水管等渗漏,经常受地表水或降水的影响,房屋基础又常年处于地下水位变动带中,也能进一步促进墙体裂缝的发育,这也是一个不能排除的因素之一。

收稿日期:1998-05-20