

高压喷注水泥土桩基的 设计与计算

池永寿 杨英瑜 刘昆山 汪庆华 编著
辛建勋 张学敏 王筱敏 张馥华



中国铁道出版社
1994年·北京

高压喷注水泥土桩基的 设计与计算

池永寿 杨英瑜 刘昆山 汪庆华
辛建勋 张学敏 王筱敏 张馥华 编著

中 国 铁 道 出 版 社
1994 年 · 北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书详细地介绍了高压喷射注浆法形成的水泥土的力学性能及水泥土桩的工作机理,设计与计算方法,并根据室内外的大量试验结果与混凝土的力学性能、钢筋混凝土灌注桩的工作机理作了系统的对比分析与论述,对具有代表性的工程实例从方案选择、设计与计算、效果评价等均作了深入的分析。

本书所阐述的设计与计算方法及原则,对用其他施工方法形成的水泥土桩基具有一定的参考价值。

高压喷注水泥土桩基的设计与计算

池永寿 杨英瑜 刘昆山

汪庆华 宰建勋 等编著

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条 14 号)

责任编辑 许虹进 封面设计 王毓平

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本:787×1092 毫米 1/32 印张:9.75 字数:202 千

1994 年 2 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:1-4000 册

ISBN7-113-01627-8/TU·352 定价:6.50 元

致 读 者

本书由铁路科技图书出版基金资助出版。

这项基金是1992年由铁道部出资设立的,意在资助一些对铁路现代化建设很有价值但印数较少的铁路科技图书,能够顺利出版。

中国铁路现今成了制约国民经济发展的“瓶颈”,不仅路网建设规模远远不能满足需要,而且技术装备陈旧落后。为了确保国民经济真正走上持续、快速、健康发展的轨道,中国铁路必须有一个历史性的大发展,铁路的科技水平必须有一个全面的大提高,这已成为国人的共识。铁道部制定了科技兴路的宏伟规划,铁路广大科技人员正团结协作,奋力攻关,记载种种科技成果的铁路科技图书也更多地产生出来。在这种情况下,铁道部设立这项出版基金,将不仅促进铁路科技出版事业的繁荣,而且对铁路科技事业的发展也会产生深远影响。

关于铁路科技图书出版基金的使用,铁道部在下达的有关文件中作了如下规定:由出版基金资助的科技图书应为印数少且出版社难以负担的亏损图书,并必须具备下列条件之一:

1. 发展高速铁路、准高速铁路方面的应用技术图书;在提高列车速度、密度、重量及行车安全方面有价值的应用技术图书;以及在铁路现代化经营管理方面有创新的图书。

2. 学术思想新,内容具体实用,对铁路科技发展具有较大推动作用的应用基础理论专著;密切结合铁路现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和重大开拓使用价值、密切结合铁路

现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补铁路专业领域空白且读者面较窄的应用技术图书,以及铁路工程技术人员急需的水平高印量小的工具书。

5. 对发展我国铁路事业有价值的译著,及有特殊价值的科技论文集。

我们这个“铁路科技图书出版基金评审委员会”,也是根据文件精神组成的。评审委员会在铁道部领导下开展工作,由铁道部各部门负责人和有关专家组成,负责掌握出版基金的使用方向;严格按照资助条件评审所受理的图书选题;决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。

鉴于评审委员会成立的时间尚短,对于怎样用好这笔有限的因而更显得珍贵的基金,使其发挥出最大效能,还需要在实践中进一步探索,不断总结改进。我们热切地希望全路广大科技工作者、专家学者对基金的评审工作给予更多的关心和支持。

铁路科技图书出版基金评审委员会

1993年11月

前 言

高压喷射注浆法,60年代后期由日本首创,尔后,意大利、德国、瑞士、原苏联等国家也相继引进和应用。我国于1972年开始对此项技术进行试验研究,围绕施工工艺、设计与计算,做了大量的室内外试验,并将科研成果应用于工程实践,在全国已成功地做了上百项工程,积累了较为丰富的设计与施工经验。

我国幅员辽阔,软土地区分布很广,随着国民经济的发展,软土地基的处理是一个十分突出的问题。高压喷射注浆技术作为一种有效的软土处理方法,必然能得到更广泛的应用。目前,国内有关地基处理的专著并不多,就高压喷射注浆技术而言,也主要是偏重于施工工艺;还没有一本专门系统介绍水泥土力学性能及设计与计算方面的专著。为了交流经验和弥补设计、计算方面资料的不足,我们将多年来积累的设计与计算方面的经验,并收集国内外有关的研究成果,编纂成册,供读者参考。

本书共分六章,第一章、第二章以工程实践及大量试验为依据,较系统地介绍了水泥土的基本性能及力学性能,并与混凝土进行了详细的对比分析,是本书的理论基础;第三章在第一、二章的理论基础上,通过真型桩的静载试验,对水泥土单桩的工作机理、设计与计算的方法、设计参数的取值原则、质量检查等方面,进行了系统的分析与讨论;第四章,结合室内外复合地基的试验资料,对水泥土桩复合地基的工作机理、设计与计算方法,进行了系统的分析与讨论;第五章对水泥土在三向应力作用下的力学性能作了初步的试验与探讨;第六章从我们所设计施工的三十多项工程中,选择六项有代表性的

目 录

第一章 水泥土的基本性能	1
第一节 水泥土的定义及施工方法.....	1
第二节 水泥土强度与龄期的关系.....	4
第三节 桩体水泥土强度与桩体工作环境的关系	11
第四节 高压喷注水泥土的容重	14
第五节 水泥土的软化问题	15
第六节 高压喷注水泥土的应用前景	17
第二章 水泥土力学性能的试验研究	19
第一节 概 述	19
第二节 水泥土单轴受压应力与应变的试验研究	20
第三节 水泥土弹性模量的测试	37
第四节 水泥土与钢筋之间的粘结力试验	43
第五节 水泥土抗折强度试验	61
第六节 水泥土的抗剪强度	65
第七节 从水泥土的力学性能对其用做桩基的可靠性的分析	65
第三章 水泥土桩基的设计与计算	70
第一节 水泥土桩基设计与计算的概况	70

第二节	由水泥土单桩垂直静载试验,分析水泥土桩基的工作机理	72
第三节	单桩轴向受压容许承载力的确定及安全系数取值的分析	91
第四节	对水泥土桩桩体材料的抗压强度及安全系数取值的分析	95
第五节	水泥土桩基的沉降分析.....	101
第六节	水泥土桩基的质量检测与控制.....	120
第七节	水泥土桩基设计与计算中应注意的几个问题	124
第四章	水泥土桩复合地基的设计与计算.....	135
第一节	概 述.....	135
第二节	高压喷注水泥土桩复合地基的特性.....	137
第三节	水泥土桩复合地基的设计与计算.....	158
第四节	复合地基桩体的应力集中对承台(桩帽)配筋影响的分析.....	171
第五节	对几个问题的分析.....	177
第五章	水泥土三轴受压力学性能的试验研究.....	180
第一节	水泥土三轴受压的基本概念.....	180
第二节	三向应力试验装置简介.....	185
第三节	水泥土三轴受压的应力与应变关系.....	189
第四节	水泥土试块三轴受压的破坏形态.....	209
第五节	水泥土三轴受压试验结果在桩基工程中的应用	219

第六章 具有代表性的工程实例介绍	230
实例一 河北省某五层住宅楼地基加固.....	230
实例二 河南省某列检楼地基加固.....	240
实例三 某市复兴南路立交桥纠偏工程顶起方案的 设计与计算.....	249
实例四 某箱涵地基加固.....	267
实例五 北京市某路水泥土地下拱结构在市政工程 中的应用.....	275
实例六 湘江某公路大桥地基加固.....	289
参考文献	297

第一章 水泥土的基本性能

第一节 水泥土的定义及施工方法

一、水泥土的定义及其抗压强度与土质、水泥掺入量的关系

我们的祖先在 1000 多年前,就采用石灰与土,按一定的比例均匀拌合形成灰土,作为建筑物的基础材料,有不少还完好地保存至今,这是用石灰对土性进行改良的实例。现在,随着水泥的广泛使用,仿照灰土的做法,以水泥为主剂,就地取材,对土体进行改良,以获得经济实用的建筑材料,已呈现广阔的发展前景;这种用水泥浆或水泥粉,按用途选取适当的配合比,与土体搅拌均匀,使水泥与土起物理化学作用,形成整体的、坚硬的、水稳性的生成物,对于这种生成物有的书中称为水泥加固土,有的书中称为水泥改良土,为了统一起见,本书统称为水泥土。

水泥土从组成成分而言,不同于土,因它掺入了水泥,对土进行了改性;但它也不同于一般的混凝土,因为没有粗骨料,而细骨料也因地质情况不同而各异;从强度而论,主要受工程地质条件及水泥掺入量两个因素控制。

在水泥土桩基工程中,土体起着两个作用,其一,土体是水泥土桩桩材的组成成分;其二,土体是水泥土桩基的养护及工作环境。前者主要是指土体的类别、土体含水量、地基承载力等;后者对桩基的影响,将另立一节详述。下面对第一个问

题进行分析。

一般说来,砂类土及原地基承载力较高的土,所形成的水泥土的强度也较高,淤泥及淤泥质土(尤其含有有机质多的土),形成的水泥土的强度则较低。同一类土,含水量高,则形成的水泥土的强度则较低。水泥土的这些属性,在本书所介绍的试验中,都得到了验证,如第二章的表 2—4、表 2—5 所示的两组试验,表 2—4 的土质比表 2—5 的土质好,水泥土的抗压强度值前者比后者为高;又如有甲乙两组土^[9],同样掺入土重 15% 的水泥,但甲土的有机物质与可溶盐的含量分别为 9.15%、0.81%,而乙土则为 12.10%、1.50%,试验测得甲土的 7 天、28 天抗压强度分别为 0.8MPa、2.08MPa,乙土则为 0.59MPa、0.85MPa,相差比较大。所以,在设计时,一定要对土质进行详细勘察。

当地质条件一定时,水泥土的抗压强度,基本随水泥掺入量的增加而提高,表 1—1 表示室内人工配制的水泥土抗压强

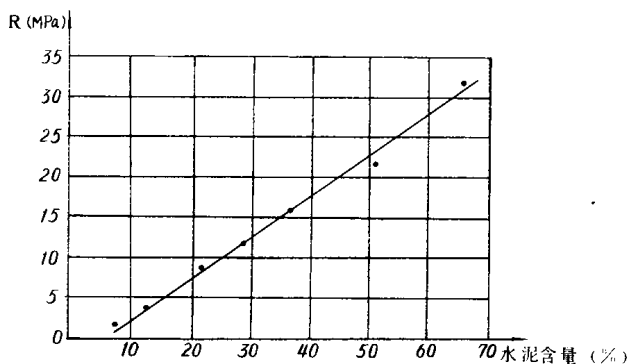


图 1—1

度与水泥掺入量的关系。土质为黄河北岸的粉细砂,因砂土未

经烘干,故实际含水量比表中所列的要大,试块为 $150 \times 150 \times 150\text{mm}$ 立方体,图 1—1 为相应的试验曲线。表 1—2 为室外模拟桩的试验结果,土质为黄褐色轻亚粘土,试件平均桩径为 376mm ,图 1—2 为其相应的曲线。从图 1—1 及图 1—2 可见,水泥土的抗压强度与水泥掺入量基本成线性关系,故增大水泥用量,是提高水泥土强度的措施之一。

水泥土抗压强度与水泥掺入量的关系 表 1—1

试件组号	81	82	83	84	85	86	87
水泥用量(kg)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
砂土用量(kg)	11.5	7.7	4.9	3.4	2.6	1.9	1.5
水泥含量(%)	8.7	13.0	20.5	29.1	37.9	51.5	66.7
水用量(kg)	3.0	2.0	1.4	0.9	0.8	0.6	0.5
水灰比	3.0	2.0	1.4	0.9	0.8	0.6	0.5
抗压强度(MPa)	2.23	3.90	8.50	12.40	16.20	23.70	33.20

水泥土强度与水泥含量的关系 表 1—2

水泥含量(%)	水灰比	圆柱体强度(MPa)
20	1.5 : 1	1.03
30	1.5 : 1	1.31
40	1.5 : 1	1.57

二、水泥土的施工方法

水泥土在土建工程的地基处理中,其施工方法可分为下面两种方式。

(一)浅层搅拌加固法

同施工灰土基础那样,将就近挖出的土,经筛分后,按一

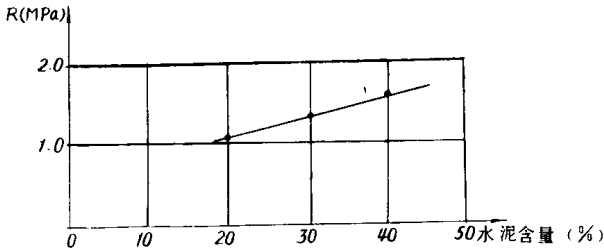


图 1—2

定的比例,将水泥与土用人力或机械搅拌均匀,然后填入基槽,用人工夯实或用机械压实,如公路工程的基层就有这样处理的。

(二)深层搅拌加固法

深层搅拌加固法,是利用特制的机械,在地层深处原位加固软土地基。依使用的机械而分,有深层搅拌法、粉体喷射法、高压喷射注浆法(简称高压喷注法)。这三种方法的施工工艺,已有很多专著^{[1][2][3]}作了详细论述,本书不再介绍;本书着重阐述高压喷注法施工的水泥土桩基的设计与计算。上述三种方法施工的水泥土桩基,由于工艺不同,虽有某些差别,但就力学本质而言,还是有共性的,故本书所讨论的设计与计算原则,对深层搅拌法及粉体喷射法形成的桩基,是有参考价值的。

第二节 水泥土强度与龄期的关系

一、水泥土强度的发展过程

水泥土强度随龄期的增长而提高,使人们很容易将这种

性质与混凝土强度随龄期的增长而提高联系起来,从表面看,这两者都是强度与龄期的关系问题,事实上,它们是有一定的差别的。混凝土的硬化机理,主要是水泥进行水解和水化作用,所以凝结速度很快,一般在 28 天后强度增长显著减缓,故混凝土强度的评定以 28 天强度为准;以后随着龄期的延长,强度虽然还会增长,但速度很慢,这种增长过程要延续几年,尤其在潮湿的环境中,延续的时间更长;在这个过程中,水泥的水解和水化作用所形成的水泥石,与粗骨料(碎石)及细骨料(砂子)的内部,是不起化学作用的,仅有表面的物理结合及化学结合作用,是一种具有堆聚结构的复合材料。而高压喷注法施工所形成的水泥土则不然,所用的水泥浆是先用水泥浆搅拌装置将水与水泥粉强力搅拌均匀,然后用高压旋喷机械,产生高速水泥浆流,在原位将土体切削粉碎,水泥浆与土体颗粒搅拌均匀,成为水泥土浆。在水泥土浆中,水泥的水解和水化反应是在具有活性的土介质围绕并参与下进行的,致使物理化学作用更为复杂,其硬凝速度比混凝土缓慢,延续时间比混凝土还要长些。凝结初期,水泥土浆中的一部分自由水,从桩底及桩侧向土层渗透和从桩顶蒸发,此时,水泥土浆在重力作用下不断下沉,随着自由水的逐渐消失和水泥水化的继续进行,水泥土浆慢慢终凝成水泥土桩体。在龄期五个月时,水泥土中水泥的形状和土颗粒的形状,用电子显微镜放大 4000 倍进行观察,已不能分辨出来了。这就是两者的差别之处。

水泥土的物理化学反应过程的详细叙述,可参考有关专著^{[1][9]},本节仅以宏观的力学试验为依据,阐述水泥土强度与龄期的关系。表 1—3 为淤泥质粘土和不同配方的水泥浆拌合均匀后,所形成的水泥土的试验结果;表 1—4 为水泥浆中掺入粉煤灰在粉砂土中形成的水泥土的试验结果。

(一)有关表 1—3、表 1—4 的若干说明

1. 所用水泥为 425 号普通硅酸盐水泥,水泥浆和淤泥质土按 1:1 的体积比混合均匀,制成 $7.07 \times 7.07 \times 7.07\text{cm}$ 试块,在试验室的养护池水中常温养护。

2. 淤泥质土的容重为 17.9kN/m^3 ,含水量为 40.7%。

3. 水灰比为重量比,外加剂掺入量均为水泥重量的百分比。

4. 表 1—4 的试件,为高压喷注成桩后 5 天挖出,从桩体上锯取 $7.07 \times 7.07 \times 7.07\text{cm}$ 试块,移入室内养护池内,在水中常温养护。

水泥石抗压强度与龄期关系表 表 1—3

序号	水泥浆配方 (水:水泥)	抗压强度(MPa)					
		1d	3d	14d	28d	180d	360d
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	1.5:1	0.125	0.32	0.66	0.91	1.17	1.46
		13.7	35.2	72.5	100	128.6	160.4
2	1.5:1 掺入 3.5%CaCl ₂	0.274	0.38	0.74	0.81	1.51	1.50
		33.8	46.9	91.4	100	186.4	185.2
3	1.5:1 掺入三乙醇胺 0.05%,NaCl1.0%	0.214	0.42	0.95	1.16	1.67	1.94
		18.4	36.2	81.9	100	144.0	167.2
4	1.5:1 掺入三乙醇胺 0.05% NaCl1.0%,CaCl ₂ 3.5%	0.344	0.57	0.98	1.26	1.70	1.76
		27.3	45.2	77.8	100	134.9	139.7
5	1.5:1 掺入三乙醇胺 0.05%,NaCl1.0% NaNO ₂ 0.5%	0.20	0.42	0.96	1.27	1.80	2.00
		15.7	33.1	75.6	100	141.7	157.5

掺粉煤灰的水泥土抗压强度与龄期关系表 表 1—4

序号	水泥浆配方 (水:水泥:粉煤灰)	土质	桩 径 (cm)	抗压强度(MPa)							
				3d	7d	28d	60d	90d	180d	365d	730d
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	2:1:0.7	粉 细 砂	85			3.44		6.89	8.95	12.09	15.38
						100		200.3	260.2	351.5	447.1
2	2.25:1:1	粉 细 砂	85			1.82		3.65	4.95	6.13	7.80
						100		200.5	272.0	336.8	428.6
3	3.6:1:1.32	粉 细 砂	72	0.80	1.06	4.76		6.99			
				16.8	22.3	100		146.8			
4	3.6:1:1.32	中 砂	50	1.50	3.20	8.54		10.8			
				17.6	37.5	100		126.5			
5	1.5:1:0	粉 细 砂	90		1.56	2.38	3.00		6.60		
					65.5	100	126.1		277.3		
6	1.5:1:0.25	粉 细 砂	86		1.32	2.00	2.50		6.10		
					66.0	100	125.0		305.0		
7	1.5:1:0.25 掺入 CaCl ₂ 2%	粉 细 砂	86		1.40	2.10	3.10		6.18		
					66.7	100	147.6		294.3		
8	1.5:1:0.25 掺入三乙醇胺 0.03% Na ₂ SO ₄ 1.0%	粉 细 砂	90		1.37	1.73	3.25		6.34		
					79.2	100	187.9		366.5		

5. 表中的强度增长率是以 28 天的强度为基准(100%)进行计算的。

(二) 试验结果分析

1. 从表 1—3 中可以看出,水泥土的后期强度增长率较为明显,180天比28天的强度增长率为28.6%~86.4%,最

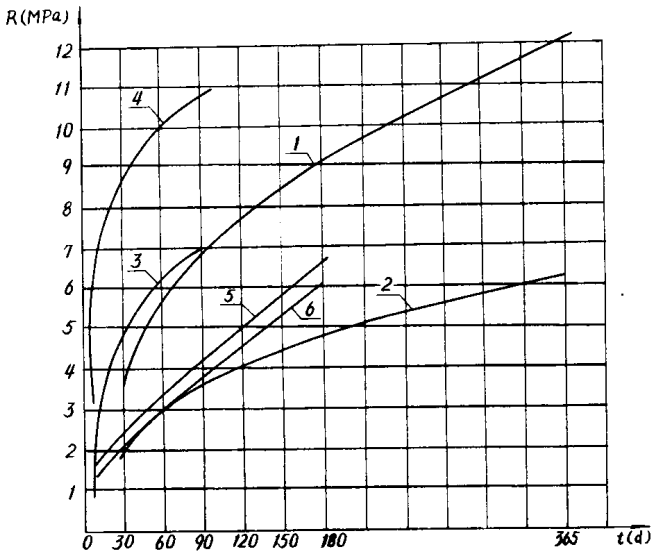


图 1-3

高的增长近一倍,平均增长率为 41.7%,半年以后,强度发展趋缓,但始终在增长。

2. 表 1-4 为掺粉煤灰试件的试验结果,图 1-3 为相应的曲线。由曲线可以看出,不论采用什么配方的水泥浆,也不论水泥土强度的高低,试件 28 天后的强度增长值均极为明显,3 个月的强度为 28 天强度的 1.27~2.0 倍,强度平均增长率为 68.5%;半年的强度为 28 天强度的 2.6~3.67 倍,强度平均增长率达 196%。

3. 对比表 1-3 和表 1-4 中的强度增长率,可以看出,掺入粉煤灰的水泥土的早期强度相对较低,后期强度的增长