



铁路科技图书
出版基金资助出版

振动注浆原理及其理论基础

王星华 周海林 杨秀竹 王建 著

中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

振动注浆原理及其理论基础

王晕华 周海林 著
杨秀竹 王 建

中国铁道出版社

2007年·北京

内 容 简 介

本书是作者根据多个科研项目的成果撰写而成的。全书从分析饱和砂土振动液化的本构模型入手,在综合前人研究成果的基础上,提出了自己的本构模型,借用模糊神经网络的原理来预测、判断砂土液化的可能性与液化程度,并从理论上提出了饱和砂土振动液化的控制方程及其有限元模拟的数值分析过程;阐述了注浆浆液的扩散理论及其振动注浆的数值模拟,并用室内试验验证了所提理论的正确性。最后提出了有限元模拟计算程序,用数值模拟结果分析了饱和砂土振动液化的各种影响因素。

本书供土木工程、铁道工程、水利工程、隧道工程领域进行软土地基处理的科研人员参考,也可作为相关专业研究生、本科生的教材及参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

振动注浆原理及其理论基础/王星华等著. —北京:中国铁道出版社,2007.6

ISBN 978-7-113-07588-0

I. 振… II. 王… III. 振动液化—研究 IV. TU472.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 039620 号

书 名: 振动注浆原理及其理论基础

作 者: 王星华等

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑: 江新锡

责任编辑: 江新锡 徐 艳

封面设计: 薛小卉

印 刷: 北京市兴顺印刷厂

开 本: 850×1168 1/32 印张: 10.375 字数: 270千

版 本: 2007年6月第1版 2007年6月第1次印刷

印 数: 1~1500册

书 号: ISBN 978-7-113-07588-0/TU·868

定 价: 36.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话:(010)63583139 发行部电话:(010)51873172

序 言

1998年长江流域的特大洪水所带来的危害使人们还记忆犹新,特别是长江大堤的“管涌”更是造成重大损失的根源,其中的主要原因在于饱和砂土的渗透性。为了减少饱和砂土的渗透性,对其必须进行防渗处理。

我国客运专线的修建也给路基处理提出了新的问题,为了保证工程质量和行车安全与舒适度,软土路基的工后沉降控制要求越来越高,而饱和砂土的加固处理则是施工难点之一。为了防止饱和砂土在高速列车振动荷载作用下发生振动液化,必须对饱和砂土路基进行加固处理。

因此,饱和砂土的防渗与加固处理是目前岩土工程界比较热门的研究方向之一。为了加固处理饱和砂土层,国内外学者曾进行了不少的探索与研究,并提出了一些比较有效和实用的方法。

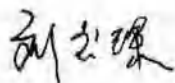
对饱和砂土进行振动注浆处理是王星华所提出的一种全新的软土地基处理方法,它是将振动液化与注浆施工结合起来的独特的地基处理方法,它既有振动液化的优点又具有注浆施工的特点,其关键在于了解饱和砂土地层在振动力作用下液化的范围和影响因素以及在液化条件下注浆浆液在静压力作用下的扩散范围及其影响因素。王星华等人所撰写的《振动注浆原理及其理论基础》一书,从理论上讨论了饱和砂土地层在振动力作用下液化的范围及其影响因素;在液化条件下注浆浆液在静压力作用下的扩散范围及其影响因素;提出了饱和砂土新的本构模型、饱和砂土振动液化的判别方法;从理论上推导了饱和砂土振动液化的控制方程及其注浆浆液的扩散公式,并借鉴有限元方法模拟了饱和砂土振动液化的全过程。这些内容均是作者们多年来研究成果的结晶,从

中亦可看出著者扎实的理论基础和丰富的实践经验。

本书的内容虽然整体上具有一定的超前性,但是其内容对于指导工程实际还是具有很好的实用性和指导性。目前,在京沪高速铁路和其他客运专线的修建过程中,饱和砂土的加固处理是影响到工程质量的关键问题之一,本书所提出的处理方法对提高客运专线的工程质量有一定的指导意义。

作者在这本著作中将研究成果翔实地向同行们作了系统的介绍,相信这不仅可以帮助人们在工作中分析问题和解决问题,还将促进学术上的相互交流和研究水平的提高。

中南大学教授、博导
中国工程院院士
波兰科学院外籍院士



2006年5月4日

前 言

注浆浆液在孔隙地层中的扩散规律与扩散范围是我涉及注浆工程时遇到的第一个学术难题,同时这也是注浆工程界一直在关注的工程难题。1993~1994年,我们在江西九江城门山铜矿进行注浆施工时,就遇到了这个难题:在给定的注浆压力条件下,注浆浆液的扩散范围无法确定,这同时也关系到施工的成败与施工成本的高低。而注浆浆液在孔隙地层中的扩散规律与范围除了与孔隙地层的地质条件以及注浆压力有关以外,还与浆液的流变性能密切相关。为此,特申请了教育部的博士点基金项目,以研究新型廉价注浆材料的性能——黏土固化浆液的流变性能,为在施工中确定注浆浆液的扩散范围提供一定的理论基础。

在将黏土固化浆液应用于广州地铁施工时,则遇到了饱和砂土层的加固处理问题。饱和砂土特别是饱和细砂-粉细砂层的加固处理,更是工程界的一大难题。在学长兼师兄王梦恕院士的帮助下,将黏土固化浆液应用于广州地铁杨箕至体育西区间隧道饱和砂层的注浆、加固、开挖的工程实际中。广州地铁一期工程杨箕至体育西区间隧道饱和砂层的砂土基本上是细砂-粉细砂,如何将浆液注入到这些地层中去,是我所遇到的第二个学术难题。为此,申请了人事部博士后科研基金、西南交通大学科研基金和中铁隧道局研究基金,在这些基金的资助下,开始了饱和砂土注浆加固的初步研究。

从西南交通大学“铁路、公路、水运”博士后流动站出站后来到了长沙铁道学院工作,正遇上1998年长江流域的特大洪水,在高水位的洪水作用下,洪水通过大堤的砂砾地基产生很多管涌,从而造成溃堤,给人们的生命财产造成很大的损失。这些管涌产生的原因主要在于大堤的砂土地基没有被加固处理,使得地基的渗透

性大。此时的关键在于对大堤的砂土地基进行加固处理,以降低地基土的渗透性,来达到防止发生“管涌”的目的。为此,在湖南省常德市水电局的资助下,开始了饱和砂土加固处理的研究,也就在此时提出了“振动注浆”的概念,开始研究饱和砂土的振动液化问题。我们的设想是:首先将饱和砂土进行人工振动液化,在饱和砂土由于发生液化而失去强度的同时,借助特殊的机具,将注浆浆液注入到饱和砂土中,充填这些地层的孔隙,这些注浆浆液在砂土地层中固化以后,将大大降低砂土层的孔隙度,提高这些地层的强度,从而达到加固饱和砂土地层的目的。因此,在湖南省常德市水电局、中铁隧道局、湖南省科技厅、国家自然科学基金委员会等单位的资助下,开始了对饱和砂土进行振动注浆的理论研究与工程实际应用的研究工作。

本书是根据作者多个科研项目研究成果整理而成,希望在该学科领域为有关的研究人员提供一本有关振动注浆方面比较全面的参考文献与研究生教材,因此,本书内容较多,共分九章。前五章主要介绍振动注浆的机理及其理论问题,第六、七章介绍注浆浆液的扩散规律、扩散范围的理论以及数值模拟的理论,第八章介绍了室内振动试验的结果与分析,最后一章介绍了振动注浆的有限元模拟及其程序的实现。

作者虽然在本书的各章中试图对饱和砂土的动力特性以及浆液扩散规律进行一些有意义的探讨,但限于篇幅,尤其是限于水平,难免有不妥之处,希望得到读者的批评与指正。本书的一些观点和见解虽然已经得到了一些试验资料的支持与验证,但在有些方面,还只停留在理论分析与推理求索上。对此,作者将在尽快作出新工作的基础上与读者作进一步的讨论。

本书的出版得到了铁道部出版基金的资助,感谢中国铁道出版社有关人员为本书的出版所付出的辛勤劳动和努力。

王星华

2006年5月于长沙

Preface

The diffusion law and scope of grouting slurries in the pore soil layer is the first problem I have met in grouting engineering. This is a difficulty as well which grouting engineers have paid close attention to all along the time. From 1993 to 1994, when we carried out a grouting engineering at Chengmenshan Coper Mine in Jiujiang, Jiangxi, such a problem confronted us: how to determine the diffusion scope under a certain grouting pressure. This problem was also related to the success and the cost of the grouting engineering. The diffusion rule and scope of grouting slurries in the pore soil is not only related to the geological conditions and grouting pressure, but also closely related to the rheological behavior of the grouting slurries. Hence, I have applied a doctoral foundation project sponsored by the Ministry of Education to study the rheological behavior of a new cheap grouting material – Clay Hardening Grouting (CHG) and to provide theoretical base for determining the diffusion scope of fluid grouts.

When applying CHG to Guangzhou subway construction, another problem of the reinforcement of saturated sand occurred. The reinforcement of saturated sand, especially the saturated fine sand – powder fine sand layer, is a big challenge in engineering. Under the instruction of my elder alumni academician Mr. Wang, Mengshu, CHG was applied to the grouting, reinforcing and excavating of the saturated sandy layer in the tunnel between Yangqicun and Tiyuxiqu of the Guangzhou subway phase 1 construction. The sand and soil of the saturated sandy layer of this tunnel are mainly fine sand and powder fine sand. Here I met the second problem of how to grout the slurry into this kind of lay-

er. So, I have applied post - doctoral research funds sponsored by the Ministry of Personnel and research funds from both Southwestern Jiaotong University and the Tunnel Bureau of the Railway Ministry of China to start the research on the reinforcement of saturated sand with grouting.

After I left the post - doctoral station of "Railway, Highway and Water Transport" at Southwestern Jiaotong University, I came to the former Changsha Railway University. It was just at that time we witnessed the big flood of Yangtze basin in 1998. Affected by the high level of the flood, many "pipe surges" occurred in the grit foundations and thus caused the collapse of embankments and further caused the great loss of people's life and property. The main reason of "pipe surges" and collapse is the big permeability of the sandy foundations of the embankment which have not been properly reinforced. The key to solve this problem is to reinforce the embankment foundation in order to decrease its permeability and to prevent "pipe surges". In this circumstance, research on the reinforcement treatment of saturated sand was launched funded by Changde Hydropower Bureau and a new concept of "vibration grouting" has been first put forward at this time to study the vibrating liquefaction of saturated sand. Our assumption is: first vibrate and liquefy the saturated sand by manpower, then at the same time when the saturated sand lose their strength because of liquefaction, use specified instruments and tools to grout the slurries into the saturated sand to fill the pore space. The solidification of grouting slurries in the saturated sand will greatly decrease the pores and voids in the soil layer and increase the strength of the layer. In this way, the purpose of reinforcement of the saturated sand layer will be achieved. So, sponsored by Hunan Changde Hydropower Bureau, the Tunnel Bureau of the Ministry of Railway in China, Hunan Science and Technology Department and the National Natural Science Foundation, I began

my work on the theoretical research and real engineering application of vibration grouting in saturated sand.

This book is written on the basis of the results of some of my research projects with an expectation of providing a relatively comprehensive reference and graduate textbook on vibration grouting for researchers in this field. The book is divided into 9 chapters. The first 5 chapters introduce the mechanism and theories of vibration grouting. Chapter 6 and chapter 7 describe the theories of diffusion law and scope of grouting slurry and the theories of numerical simulation. Chapter 8 gives the results and analysis of in-door vibrating experiment. The last chapter gives an introduction on the finite element simulation and the realization of its procedures of vibration grouting.

In this book, the authors intend to discuss the dynamic characteristics of saturated sand as well as the diffusion law of grouting slurry. Comments and criticisms are welcome. Although some opinions and concepts in this book have found support and proof from some experiments, they are only on the basis of theoretical analysis and reasoning approach, the author still needs to conduct further research work to deepen the discussion with readers in the near future.

This book is published with the sponsorship of the Publication Foundation of the Ministry of Railway of China. I would like to take this opportunity to express my heartfelt thanks to the Chinese Railway Publisher for their hard work and great effort.

The authors
May, 2006 in Changsha

目 录

1 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.1.1 注浆的应用范围	2
1.1.2 注浆方法与注浆材料性能要求	2
1.2 注浆技术发展的历史、现状与趋势	4
1.2.1 注浆法发展历史	4
1.2.2 注浆工艺发展现状	4
1.2.3 注浆材料发展现状及浆液的流变性	6
1.2.4 注浆技术研究和发展的趋势	11
1.3 注浆理论与数值模拟研究现状	11
1.3.1 注浆理论发展现状与存在的问题	11
1.3.2 土体动力学本构模型	16
1.3.3 饱和土层的解析分析	19
1.3.4 砂土液化孔压的研究现状	21
1.3.5 饱和和多孔介质波动的有限元数值模拟	24
1.3.6 数值模拟在注浆中的发展现状及存在的问题	26
2 砂土液化的本构模型	28
2.1 广义塑性模型简介	28
2.1.1 三个不变量	28
2.1.2 流动方向	28
2.1.3 塑性模量	29
2.2 等效非线性模型	30

2.3	砂土液化组合模型	34
2.3.1	组合结构模型理论	34
2.3.2	考虑在达到极限状态面前的加载与卸荷	35
2.3.3	砂土沿极限状态面的本构关系	38
2.3.4	本构模型的孔隙水压力	39
2.3.5	模型参数的确定	40
2.3.6	模型验证	41
3	砂土液化的模糊神经网络预测	46
3.1	模糊推理系统	46
3.1.1	模糊化和模糊器	47
3.1.2	规则库	48
3.1.3	推理机	49
3.1.4	去模糊化	51
3.1.5	模糊在砂土液化中的应用	51
3.2	适用于推理的神经网络	53
3.2.1	神经网络基础	53
3.2.2	无监督学习与 Kohonen 网络	57
3.3	模糊神经网络算法建模及运用	58
3.3.1	空间结构	58
3.3.2	模糊神经网络算法分析(时间划分)	62
3.3.3	算 例	65
4	动力作用下的饱和砂土物理场研究	69
4.1	动力作用下的饱和砂土运动控制方程	69
4.1.1	基本假设	69
4.1.2	平衡方程	69
4.2	动力作用下饱和砂土物理场的解	72
4.2.1	动力作用下运动方程的基本解	72
4.2.2	在有一定埋深动力作用下运动方程的解析解	75
4.2.3	算 例	84
4.3	振动力作用下饱和砂土中的波	89

4.3.1	各向同性多孔介质的波动方程	89
4.3.2	各向同性饱和土体中波的讨论及算例	95
5	饱和砂土在振动力作用下的有限元计算	100
5.1	饱和砂土在振动力作用下的有限元方程	100
5.1.1	平衡理论与基本方程式	100
5.1.2	有限元方程的建立	101
5.2	振动力作用下的饱和砂土大应变有限元方程	105
5.2.1	几何非线性理论	105
5.2.2	饱和砂土大应变公式推导	106
5.2.3	非线性本构关系的引入	109
5.2.4	有限元格式求解	110
5.3	八节点四边形轴对称等参单元	113
5.4	饱和砂土动力无限元	115
5.4.1	乘子型无限元的建立	115
5.4.2	轴对称双向无限元构造(频域)	116
5.4.3	轴对称单向无限元构造(时域)	118
5.5	计算中液化单元的处理	119
5.5.1	砂土液化状态准则	119
5.5.2	液化单元的应力调整	119
5.6	有限元数值分析过程	122
5.6.1	静力分析	122
5.6.2	动力分析	123
5.6.3	土的动应力应变关系	124
5.6.4	饱和砂土地基振动液化分析	124
6	渗透注浆浆液扩散公式	127
6.1	宾汉体浆液扩散半径计算公式	127
6.1.1	宾汉体浆液流变方程	127
6.1.2	宾汉体浆液渗流公式(广义达西定律)	127
6.1.3	在砂土中进行渗透灌浆时宾汉体浆液扩散 公式的推导	129

6.1.4	扩散公式的求解	131
6.1.5	公式的适用范围	132
6.1.6	公式的应用	132
6.2	幂律型浆液扩散公式	133
6.2.1	幂律型浆液流变方程	133
6.2.2	幂律型浆液渗流公式(广义达西定律)	133
6.2.3	在砂土中进行渗透灌浆时幂律型浆液扩散 公式的推导	135
6.2.4	有效扩散半径公式的求解	136
6.2.5	公式的适用范围	137
6.2.6	注浆压力差与浆液流变参数、扩散半径 的关系	137
6.3	柱形扩散公式	138
6.3.1	宾汉体柱形扩散公式	138
6.3.2	幂律体柱形扩散公式	139
7	压密注浆理论与数值模拟	141
7.1	概 述	141
7.2	圆筒形孔扩张理论在压密注浆中的应用	142
7.2.1	圆筒形孔扩张理论	142
7.2.2	圆筒形孔扩张理论在压密注浆中的应用	145
7.3	弹性固结理论及其在压密注浆中的应用	145
7.3.1	轴对称 Biot 固结理论的推导	146
7.3.2	算例分析	155
7.4	弹塑性大变形理论在压密注浆数值模拟中的应用	158
7.4.1	土的弹塑性理论	158
7.4.2	几何非线性的考虑	164
7.4.3	算例	173
8	饱和砂土动力学试验	176
8.1	试验仪器与方法	176
8.1.1	试验仪器	176

8.1.2	试验步骤	178
8.1.3	饱和砂土物理力学指标	180
8.1.4	试验模型设计	181
8.1.5	试验内容	183
8.2	孔隙水压力	184
8.2.1	概 述	184
8.2.2	孔压发展变化规律	186
8.2.3	振动孔压计算模型	188
8.2.4	孔压的应变路径模型	191
8.2.5	应力路径与孔隙水压力	192
8.2.6	孔压与滞回圈面积关系	196
8.2.7	增加动应力幅值孔压变化情况	197
8.3	饱和砂土轴向动应变	197
8.3.1	应力应变回滞环	197
8.3.2	剪胀、卸荷体缩与孔隙水压力	200
8.3.3	应力路径与轴向应变	204
8.3.4	轴向应变与孔隙水压	206
8.3.5	轴向弹性模量	207
8.4	饱和砂土的应力路径研究	208
8.4.1	应力路径形状	209
8.4.2	剪胀剪缩	210
8.5	强度变化规律研究	211
8.6	砂土液化动稳态强度分析	212
8.6.1	动稳态阶段的定义	212
8.6.2	流动液化和极限状态破坏的判别	215
8.6.3	稳态阶段的动强度与极限状态面	216
8.6.4	砂土液化破坏的影响因素分析	219
8.7	固结比对饱和砂土液化的影响	223
8.7.1	引 言	223
8.7.2	固结比对液化应变的影响	224

8.7.3	固结比对砂土液化动强度的影响	228
8.7.4	固结比对砂土液化孔压发展的影响	230
9	振动注浆机理及有限元模拟	232
9.1	振动对土体起始劈裂压力的影响	232
9.2	弹性饱和多孔介质轴对称动力固结方程	233
9.2.1	轴对称 Biot 动力固结方程推导	233
9.2.2	轴对称 Biot 动力固结方程的有限元表示 (空间离散)	236
9.2.3	轴对称 Biot 动力固结方程的求解	239
9.2.4	算例分析	241
9.3	振动注浆数值模拟	243
9.3.1	土体动力本构模型	243
9.3.2	弹塑性土体大应变动力平衡方程及有 限元表示	252
9.4	程序研制	253
9.5	算 例	260
9.5.1	简 介	260
9.5.2	土性参数的选取	263
9.5.3	计算结果分析	264
附 录	279
参考文献	288
中英文专业名词对照	303

The Principle and Theoretical Basis of Vibration Grouting Content

1 Introduction	1
1.1 Introduction of grouting engineering	1
1.1.1 Applied range of grouting engineering	2
1.1.2 Grouting methods and required properties of the grouting materials	2
1.2 Developing history, actuality and trend of grouting engineering	4
1.2.1 Developing history of grouting engineering	4
1.2.2 Developing actuality of grouting technology	4
1.2.3 Developing actuality of grouting materials and rheology of slurry	6
1.2.4 Trend of developing and study of grouting technique	11
1.3 Study actuality of grouting theory and numeric simulation	11
1.3.1 Developmental actuality and existing questions of grouting theory	11
1.3.2 Dynamic constitutive relation of soil	16
1.3.3 Analysis of analytics solves of saturated soils	19
1.3.4 Study actuality of pore pressure of sand during liquefaction	21
1.3.5 Finite element numeric simulation of fluctuation in porous medium	24
1.3.6 Developing actuality and existing questions	