

汪闻韶院士土工问题论文选集

SELECTED WORKS ON GEOTECHNICAL ENGINEERING OF
ACADEMICIAN WANG WENSHAO

《汪闻韶院士土工问题论文选集》编委会

THE COMMITTEE OF THE SELECTED WORKS ON GEOTECHNICAL
ENGINEERING OF ACADEMICIAN WANG WENSHAO

中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS



(京)新登字 035 号

汪闻韶从事土工问题科研工作已 40 多年,涉及土中电渗问题、地基沉降分析、土工抗震问题、土的液化问题和粉煤灰问题等 5 个方面。作者在这 5 个方面都取得了重要的科研成果。本书从中选取了 21 篇论文,以飨读者。其中有关土中电渗问题和地基沉降分析两部分是作者早期 50 年代的工作,各取 1 篇(1955 年和 1958 年),由于篇幅过长,书中仅录入其提要、前言或导言和总结或结论等部分,土工抗震问题和土的液化问题两部分是作者中后期主要从事的科研工作,分别选取了 8 篇(1963~1994 年)和 9 篇(1962~1994 年)论文。粉煤灰问题是作者在 80 年代接触到的工作,选取了 2 篇(1986~1988 年)。本书所选 21 篇论文中有 18 篇是作者独著,其他 3 篇中除作者为第一作者外,尚有第二或第二、三作者合著。

本书反映了作者在各个时期中所涉及到的土工问题和在探讨和试图解决这些问题时的思路和方法。作者的工作成果在学术和工程应用上具有促进作用。作者对于所取得的科研进展,大都采取客观科学和实事求是的态度。

本书可供水利、土建等方面的科技人员和高等院校师生参考使用。



汪闻韶院士土工问题论文选集

SELECTED WORKS ON GEOTECHNICAL ENGINEERING

OF ACADEMICIAN WANG WENSHAO

《汪闻韶院士土工问题论文选集》编委会

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

北京云浩印制厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13½ 插页: 1 字数: 329 千字

1999 年 2 月第一版 1999 年 2 月第一次印刷

印数: 1—2,000 册 定价: 18.00 元

ISBN 7-112-00023-8

TU·16 (9206)

版权所有 翻印必究

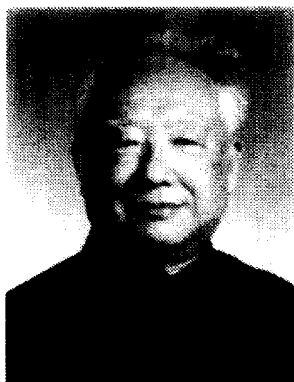
如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

作者简介

BRIEFING OF THE AUTHOR

汪闻韶，1919年生于江苏苏州。1943年毕业于中央大学水利工程学系。1943~1946年曾服务于甘肃水利林牧公司张掖工作站高台通讯处和黄河水利委员会宁夏灌溉工程总队，从事农田水利工作。1946~1947年任中央大学水利工程学系助教，担任土力学试验室工作。1947年底赴美国留学，先后获依阿华大学力学和水力学硕士及伊利诺理工学院土木工程博士学位；1952~1954年任麻省理工学院副研究员及研究工程师，参加土动力性质试验研究工作。1954年底回国，1955~1956年任南京水利实验处（今南京水利科学研究院）高级工程师，从事土工研究；1956年中调北京水利科学研究院（今中国水利水电科学研究院）从事土力学及地基和土坝抗震工程研究工作，现任教授级高级工程师、博士研究生导师（其中1980~1983年任该院抗震防护研究所所长）。1980年被选为中国科学院学部委员（今称院士）。1990年被聘为水利部技术委员会委员。1979年后为国内外多种学术团体的成员；现为国际土力学及基础工程



协会会员、中国土木工程学会荣誉会员、中国水利学会荣誉理事、中国振动工程学会顾问及土动力学专业委员会荣誉主任、中国建筑学会工程勘察学会顾问、中国地震学会地震工程专业委员会会员。他十分关怀边陲科技事业，兼任《西部探矿工程》杂志总顾问。他写的“直流电在土中作用及其对土的物理力学性的影响”论文曾获中国科学院科学奖金1957年三等奖。1958年后主要结合水利水电及电力工程进行土的液化和土坝及地基抗震问题研究，以他为主的“土的液化研究”论文获得国家自然科学奖1987年四等奖。1978年他被水利电力部评为“水利电力科学技术先进工作者”。1985年被城乡建设环境保护部评为“全国抗震系统先进工作者”。1992年被建设部授予“全国抗震防灾先进工作者”称号。1993年获中国科学技术发展基金会茅以升科技教育基金一九九三年度茅以升土力学及基础工程大奖。他主持完成国家自然科学基金重大项目“岩土与水工建筑物相互作用研究”（1989~1992年）。还主编了《中国水利工程震害资料汇编1961~1985》历史性内部资料。专著《土的动力强度和液化特性》，为电力科技专著出版基金资助项目，1997年由中国电力出版社出版。

院士自述

AUTOBIOGRAPHIC NOTE

我于1919年3月15日出生于江南鱼米之乡苏州，地方幽静，读书环境极好。父亲早年就学京师译学馆，后来留美国学农获畜牧学硕士学位，第一次世界大战后回国，长期从事教学工作。母亲早年毕业于天津女子师范学校，生我以后一直在家赡养老人抚育儿女。所以我的童年一直处在父母保护和训导下，并受到祖母和其他尊长的爱护和教育。第一次进入的学校是父亲当时任教的东南大学的幼稚园，当时我仅4岁，得到老师的好评，并得到了第一面奖旗。后来由于父亲工作的变动，家庭搬迁，我又回到苏州，在那里度过了我小学和中学的时代。我在东吴大学附中念书的时候，每个学期都获得品性优良、学业优良、或品学兼优的奖状或银盾，拿回家时，祖母十分高兴。我童年启蒙时期，受到了父母和师长的严格教育和热情鼓励，打下了我人生发展的基础。首先，他们对我品德修养和做人之道要求十分严格，因为这是为人之本，也是人类社会人与人关系的关键所在，使我从小就有敬长、尊师、爱友之心。在求知方面，他们除了帮助、启发、鼓励以外，更着重于实事求是、追求真理、不畏困难、自强不息的教诲，使我确立了“知之为知之，不知为不知，是知也”的学习态度，“失败是成功之母”和“有志者事竟成”的工作毅力，以及“过则勿惮改”的求实精神。

帮助我启蒙成长的父母和师长，现大都已谢世，但是我对他们的感激和怀念是终身不忘的。

1931年“九一八事变”到1937年“七七事

变”，日本帝国主义连续对中国的侵略战争，在我小小心灵中激起了抗日救国的热情，从而立志自我磨炼，刻苦学习。1937年“八一三事变”后，我随父母在战火中离开了我的出生地苏州，流迁湖南、四川。学业一度中断。1938年10月我以同等学力考入重庆中央大学水利工程学系，在艰苦环境中于1943年读完大学课程。毕业后，为了磨炼自己，不顾体弱多病，辞别了双亲，奔赴祖国西北工作，先后在甘肃、宁夏从事农田水利工作两年多，这是我首次离开父母，独立进入社会的开始。亲身体察到我国贫苦地区人民的生活和自然环境，更加深了为中国人民工作的责任感。1945年8月日本投降以后，祖母和母亲相继去世。1946年12月回南京在母校担任黄文熙教授的助教，开始了我从事土力学教学和试验研究工作的生涯。1947年12月去美国留学，先后获衣阿华大学水力学硕士学位和伊利诺理工学院土木工程博士学位。博士后又在麻省理工学院泰勒教授指导下从事土动力学试验研究工作两年多。还见到了几位土力学前辈太沙基等。

1949年在美国得知祖国解放，十分欣喜。同时父亲和母校老师都希望我回国参加祖国建设。1951年6月接家信说父亲在南京病重，我立即去办理回国旅行手续，准备放弃博士学位，提前回国。不料被美国政府所阻，经过三年多交涉，直到1954年12月才返回祖国。知父亲已于1951年6月病逝，十分悲痛。

1955年后，我开始参加祖国社会主义建设工

作。最初在南京水利实验处土工室，1956年后调到北京水利部水利科学研究院（后来改为水利水电科学研究院）。1957年后一直从事土的液化和土坝及地基抗震研究工作。1966年邢台地震时周恩来总理亲临灾区，对防震抗震工作作了“要总结地震经验和减少地震灾害的重要指示。”大大促使了我从事抗震工作的研究。我亲自参加了邢台地震以及1975年海城地震、1976年和林格尔地震和唐山大地震水利工程震害的实地调查工作，并将1961年至1985年间我国15次地震中的水利工程震害资料汇编成册，作为内部历史资料保留下来（88.6万字）。在学术研究方面：探索和澄清了土液化概念和机理中的一些较模糊的问题，以及土体液化与极限平衡状态和破坏间的区别和关系；探讨了土坝和地基地震分析中存在的问题，提出了地震变形分析比地震稳定分析更为重要和抗震工程措施比计算分析更为有效的见解。

我从事科学技术工作，若能有所贡献，完全依靠毛泽东思想的教导。首先是“为人民服务”

的思想，它是我一切工作的动力，克服一切困难的精神之源，否则将无所事事，或走到斜路上去，深切希望所有青年朋友们要牢记这个教导。毛主席的《实践论》和《矛盾论》对解决科研工作中的难题是有力的思想武器，因为在事物中充满着很多错综复杂的现象和矛盾，只有通过反复实践、反复认识、找出矛盾的关键，解决矛盾，才能使认识进一步提高，重要的理论和认识上的飞跃，都是由此产生的。

最后，我该说：我能够全力贯注于科学技术事业，我还有一个全力承担我家庭事务的夫人严素秋。她是我父亲在南京中央大学乳业训练班的高材生，我的父母看她忠厚老实、学习努力、生活刻苦就介绍给我，成为终身伴侣。我们同岁，17岁订婚，经过8年抗战分离，26岁结婚，又经过我留学7年分离，到1954年后，才长期生活在一起，她为我作出了很大的牺牲，我是对不起她的。她全力支持了我的学习和工作，使我能专心从事为人民服务的事业，我是非常感谢她的。

《汪闻韶院士土工问题论文选集》编委会

主任委员：梁瑞驹

副主任委员：龚晓南 蒋国澄

委 员：陈祖煜 杨晓东 汪小刚

常亚屏 李万红 赵剑明

序

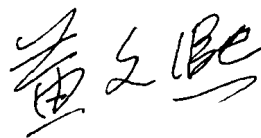
FOREWORD

我与汪闻韶院士相知甚深。早在 40 年代他就读于原中央大学时即有师生之谊，毕业后又作为我的助教，担任学校土力学实验的工作。从此就与土力学结下不解之缘，成为终身事业。1948 年他远涉重洋，赴美国深造。在美国伊利诺理工学院获博士学位之后，又在麻省理工学院参加“动力荷载下土的特性”实验室工作。1955 年以满腔爱国热情，冲破重重障碍，返回祖国参加新中国的建设工作。我们又得以先后在原南京水利实验处和水利水电科学研究院长期合作共事，经常切磋研究，获益良多。

汪闻韶院士有扎实的基础理论知识，刻苦钻研，学风严谨，重视理论与实践的结合，在土力学领域内耕耘了半个世纪，建树良多。他的研究课题多以国家建设需要为前提，密切结合水利水电工程实际。特别是 60 年代以来，中国频发强烈地震，震害严重，他急国家和人民之所急，全身心投入土工抗震的研究和实践。长期的努力工作，使他在砂土液化和土工抗震方面的研究卓有成效，还在创建水科院土动力学试验室和培养科研人才方面付出了毕生心血，成为中国土动力学的学科带头人。道德文章，均为同行称颂。

值此汪闻韶院士八十寿辰之际，从他数十篇著述之中，精选 21 篇各时期的代表作，由中国建筑工业出版社结集刊印，实系学术界之盛事，故乐为之序。

中国科学院资深院士
清华大学教授



1998 年 10 月

前 言

PREFACE

敬蒙中国土木工程学会土力学与基础工程学会地基处理学术委员会的倡议和资助，国家自然科学基金委员会工程与材料科学部的资助，中国水利水电科学研究院及其岩土工程研究所的支持和资助，中国建筑工程出版社的大力协助，为作者八十岁寿辰出版本文选集，衷心感谢。

作者学习土力学始于 1940 年黄文熙教授在中央大学水利工程学系土壤力学课堂上。1946~1947 年又作为黄文熙教授的助教，担任该校土力学实验室工作。1949~1952 年在美国伊利诺理工学院导师 Vey 教授指导下完成博士学位论文“电渗时饱和土中的孔隙水压力”。1952~1954 年在美国麻省理工学院参加 Taylor 教授领导和 Whitman 负责的“动力荷载下土的特性”实验室研究工作。1955 年至今，先后在南京水利实验处（现为南京水利科学研究院）和水利水电科学研究院（现为中国水利水电科学研究院）工作，主要从事水利水电建设中的土工问题研究，共发表论文 60 篇，专著 1 本，主编和参加编写书籍 13 种，还有未发表报告 35 篇。本论文选集主要从已发表的论文中选出 21 篇，可反映作者在不同时期及不同土工问题方面所做的工作，全书分为五卷。

第一卷，土中电渗问题，列入论文 1 篇。作者研究土中电渗问题，始于 1951 年，最初目的在弄清电渗对饱和土中应力和孔隙水压力的影响，后来进一步考虑了直流电在土中产生的物理化学作用，乃写出了“直流电在土中作用及其对土的物理力学性的影响”一文，即本选集中所列的第 1 篇论文，名为“土力学中电渗问题综合报告”。由于篇幅较长，仅选出提要、前言和总结等部分。

第二卷，地基沉降分析，列入论文 1 篇。50 年代初我国整治水利，在江淮平原软土地基上修建水闸，需要研究合理的地基沉降分析方法。根据黄文熙教授的指示，作者与易宏义同志一起，结合大浦闸地基预压加固情况，充分利用室内试验和现场施工观测资料，采用不同方法进行了比较分析和研究，写出“大浦闸地基沉降分析研究报告”，列为本选集第 2 篇论文。由于篇幅较长，仅选出提要、导言和结论等部分。

第三卷，土工抗震问题。1958 年迄于今，由于任务需要，作者主要投入土坝和地基抗震问题研究。本卷列入论文 8 篇。从“土坝地震稳定问题综述”和“水工建筑物抗震设计中的地基问题”两篇论文开始。泛述了“土的动力性质和抗震问题”。通过写“我国土坝抗震与水库安全”和“对我国几个土坝和土堤震害的若干研究”两篇论文，逐步体察到土坝抗震的主要关节。为了补充土坝地震稳定分析原则上的缺陷，作者写了“高土石填筑坝地震变形分析综述”一文。在“土工抗震研究进展”一文中总结了自 50 年代到 90 年代土工抗震问题研究中的重要进展。最后，专门叙述了“土工抗震减灾工程中的一个重要参量—剪切波速”。

第四卷，土的液化问题。它是土工抗震问题中的一个重要组成部分，作者对两者的研究几乎是同时和交错进行的。本卷列入论文 9 篇。在黄文熙教授 1959 年发表的“砂基和砂坡的液化研究”论文的开导下，作者进行研究，陆续提出了“饱和砂土振动孔隙水压力试验研究”、“饱和砂土振动孔隙水压力的产生、扩散和消散”、“一个饱和粉质壤土的振动试验”和“土液化特性中的几点发现”等 4 篇论文，曾受到国际同行加拿大 Finn 教授的重视。1980 年底在土的动力特性学术讨论会（第一届全国土动力学学术会议）水平报告“土的液化机理”中作者阐述了土液化的定义、形成机理、与极限平衡和变形的关系、以及孔隙水压力的演化机理等问题。后来在“关于饱和砂土液化机理和判别方法的某些探讨”一文中又建议了一种采用剪切波速评价地基饱和砂土液化可能性的初判方法。“饱和砂砾料在振动作用和往返荷载下的液化特性”是作者与常亚屏和左秀泓同志先后结合岳城、密云和布西水库土坝坝料进行的试验研究成果。“饱和砂的循环应力应变关系”一文报导了通过不同方式试验，所得饱和砂的应力应变关系并不能用等效线性模式加以概括。最后，“砂土液化问题研究”一文是为“海峡两岸土力学及基础工程·土工技术学术研讨会”所写，介绍了中国水利水电科学研究院在土液化研究方面的主要进展。

第五卷，粉煤灰问题。80 年代中作者与何昌荣和秦蔚琴同志先后对东北 3 个电厂贮灰库中的粉煤灰进行了强度和液化试验，提交了 3 个试验报告和一个总结报告。本卷列入了“电厂粉煤灰的强度和液化特性以及对贮灰坝设计的看法”和“粉煤灰的处理和利用——致粉煤灰贮放和利用中的土工问题学术讨论会”2 篇论文。

在完成上述研究工作中，除了深切感谢我的老师黄文熙教授的长期教诲以外，还必须感谢各个时期中对我指导、与我合作或配合和协助工作的下列同志：蒋彭年、蒋国澄、郭崇元、李碧玉、葛祖立、易宏义、秦蔚琴、霍永基、李树棻、陈慰权、李连昌、常亚屏、黄锦德、刘咏、陈福华、于东南、杨宗连、左秀泓、梁永霞、郭锡荣、何昌荣、阮元成、李新、赵冬、易锋、牛建新、李万红、刘小生、王昆耀、张文正、孔繁玲、陈宁、王宏、梁文杰、刘启旺、王钟宁、吴仲谋、李菊、赵凤鸣。

汪闻韶
1998 年 8 月

目 录

序

前言

第一卷 土中电渗问题	1
1. 土力学中电渗问题综合报告(提要、前言及总结部分)	1
第二卷 地基沉降分析	7
2. 大浦闸地基沉降分析研究报告(提要、导言及结论部分)	7
第三卷 土工抗震问题	11
3. 土坝地震稳定问题综述	11
4. 水工建筑物抗震设计中的地基问题	30
5. 土的动力性质和抗震问题	46
6. 我国土坝抗震与水库安全	50
7. 对我国几个土坝和土堤震害原因的若干研究	68
8. 高土石填筑坝地震变形分析综述	81
9. 土工抗震研究进展	105
10. 土工抗震减灾工程中的一个重要参量——剪切波速	108
第四卷 土的液化问题	113
11. 饱和砂土振动孔隙水压力试验研究	113
12. 饱和砂土振动孔隙水压力的产生、扩散和消散	124
13. 一个饱和粉质壤土的振动试验	134
14. 土液化特性中的几点发现	141
15. 土的液化机理	149
16. 关于饱和砂土液化机理和判别方法的某些探讨	162
17. 饱和砂砾料在振动和往返加荷下的液化特性	170
18. 饱和砂的循环应力应变关系	177
19. 砂土液化问题研究	182
第五卷 粉煤灰问题	190
20. 电厂粉煤灰的强度和液化特性以及对贮灰坝设计的看法	190
21. 粉煤灰的处理和利用——致粉煤灰贮放和利用中的土工问题学术讨论会	196
附录: 汪闻韶主要科技论著目录	198

CONTENTS

FOREWORD

PREFACE

PART I . PROBLEM OF ELECTRO-OSMOSIS IN SOIL MECHANICS 1

1. ABOUT THE PROBLEM OF ELECTRO-OSMOSIS IN SOIL MECHANICS 1

PART II . PROBLEM OF SETTLEMENT ANALYSIS OF SOIL

FOUNDATION 7

2. A STUDY ON THE SETTLEMENT ANALYSIS OF THE FOUNDATION OF THE
DAH-PUU SLUICE 7

PART III . PROBLEM OF GEOTECHNICAL EARTHQUAKE

ENGINEERING 11

3. REVIEW ON THE SEISMIC STABILITY OF EARTH DAMS 11
4. FOUNDATION PROBLEMS IN ASEISMATIC DESIGN OF HYDRAULIC
STRUCTURES 30
5. DYNAMIC PROPERTY OF SOILS AND EARTHQUAKE ENGINEERING 46
6. ASEISMATIC BEHAVIOR OF EARTH DAMS AND SECURITY OF RESERVOIRS
IN CHINA 50
7. SOME STUDIES ON EARTHQUAKE DAMAGES OF EARTH DAMS AND LEVEES
IN CHINA 68
8. A REVIEW ON EARTHQUAKE INDUCED PERMANENT DEFORMATION OF
EMBANKMENT DAMS 81
9. ADVANCES IN GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH 105
10. AN IMPORTANT PARAMETER IN GEOTECHNICAL ENGINEERING FOR
EARTHQUAKE DISASTER MITIGATION——SHEAR WAVE VELOCITY 108

PART IV . PROBLEM OF SOIL LIQUEFACTION 113

11. STUDY ON PORE WATER PRESSURES OF SATURATED SANDS DUE TO
VIBRATION 113
12. GENERATION, DISPERSION AND DISSIPATION OF PORE WATER PRESSURES
OF SATURATED SANDS DURING VIBRATION 124
13. VIBRATION TESTS ON A SATURATED SILTY LOAM 134
14. SOME FINDINGS IN SOIL LIQUEFACTION 141
15. MECHANISM OF SOIL LIQUEFACTION 149
16. SOME NEW THOUGHTS ON MECHANISM OF LIQUEFACTION AND ASSESSMENT

OF LIQUEFACTION POTENTIAL OF SATURATED SANDS	162
17. LIQUEFACTION CHARACTERISTICS OF SATURATED SAND-GRAVELS UNDER VIBRATION AND CYCLIC LOADING	170
18. CYCLIC STRESS-STRAIN RELATIONSHIP OF SATURATED SAND	177
19. STUDIES ON LIQUEFACTION OF SANDS	182
PART V . PROBLEM OF FLY ASH	190
20. STRENGTH AND LIQUEFACTION CHARACTERISTICS OF FLY ASHES AND DESIGN OF FLY ASH DAMS	190
21. TREATMENT AND UTILIZATION OF FLY ASHES——FOR SYMPOSIUM ON GEOTECHNICAL PROBLEMS IN DISPOSAL AND UTILIZATION OF FLY ASHES	196
APPENDIX	198
LIST OF PUBLICATIONS OF WANG WENSHAO	198

第一卷 土中电渗问题

PART I . PROBLEM OF ELECTRO-OSMOSIS IN SOIL MECHANICS

1. 土力学中电渗问题综合报告^①

ABOUT THE PROBLEM OF ELECTRO-OSMOSIS IN SOIL MECHANICS

提 要

本文内容，首先回溯了电渗和直流电在土工中应用的发展简史和概述了饱和土中的电重层及其作用（包括电动现象和电重层与细粒土的物理力学性之间的关系）；继则推演了电渗中的力学规律，和介绍了关于直流电在粘土中作用的理论和试验；然后再从现象上和理论上来分析和讨论直流电对土的三个基本力学性（包括孔隙水动力学性、固结和强度）的影响；最后总结了直流电在土中的作用规律，直流电对土的物理力学性的影响，和直流电在土工中的工程价值，并建议了数条关于这个问题的今后研究方向。

ABSTRACT

This report is treated in a comprehensive form.

A brief historical review of the developments of the theory of electro-osmosis and of its applications in the field of soil engineering is given in the first section.

The basic concepts of the electric double layer and electrokinetic phenomenon in saturated soils and the interrelations between the physico-chemical and chemical aspects of the

① 本文原刊于水利部南京水利实验处 1955 年研究试验报告汇编第 199~258 页。由于篇幅较长，本集仅刊登其中的提要、前言及总结等部分。

作者对本项研究始于 1951 年。1952 年在美国伊利诺理工学院完成博士学位论文 Pore Water Pressures in Saturated Soil during Electro-osmosis。1952 年与 E. Vey 合写 Stress in a Saturated Soil Mass during Electro-osmosis。被选刊 Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 76~79, Switzerland, 1953。

1955 年在南京水利实验处写出“直流电在土中作用及其对土的物理力学性的影响”论文（曾获中国科学院 1957 年科学奖金三等奖），当编入水利部南京水利实验处 1955 年的研究试验报告汇编时，题名改为“土力学中电渗问题综合报告”。

electric double layer around the soil particles and the physical and mechanical properties of the fine grained soils are introduced in the second section.

The mechanical aspects of electro-osmosis in the saturated soil mass are described analytically in the third section. In this section the interdependence of hydraulic seepage flow and electro-osmotic flow is emphasized and equations of combined electro-osmotic and hydraulic seepage flow are set up. The equations show not only that the velocities of flow of pore water are affected by the electro-osmotic action but also that the pore water pressures are affected. By taking an inside view of the forces acting upon the soil particles and pore water under the actions of both the hydraulic and electric potentials it is also proved that at steady flow conditions there could exist no so called "electro-osmotic seepage pressures" as a counterpart of the well defined "hydraulic seepage pressures" which push the soil particles in the direction of negative hydraulic gradient. However, at the very beginning of switching on the external electric field the soil particles would be felt a momentary push toward the anode due to the unbalanced electric forces acting upon the soil particles while the electro-osmotic flow has not been fully developed.

The complex features of the physico-chemical and chemical reactions created in the soil by the action of direct electric current in accompanying with the electrokinetic phenomenon are described in the fourth section, where works of V. S. Sharov, K. P. Shukla, S. Murayama, T. Mise, B. F. Relitov and A. V. Novikov are reviewed.

In the fifth section the effects of the action of direct electric current upon the fundamental mechanical properties of soils are discussed in details.

Finally, in the sixth section, the practical values of electric treatment in soil engineering are estimated and the topics for further research are proposed.

前 言

由于近年来祖国社会主义建设,在土建和水利工程中要求解决的土工和地基问题很多,需要很多种的技术来配合。

直流电处理对土的工程性质的改善近年来已被人所注意,认为它在土工中有特殊的功用。但是这方面的技术到现在还没有发展得很成熟,至少对我们自己来讲,目前对于这方面的知识亦还是很不够的。本文拟就已接触到的关于直流电在土中的作用及其对土的物理力学性的影响方面的资料根据编者目前的认识加以综合和分析,希望能供给研究和应用上的参考。

本文中并没有包括对于工程实例的具体分析,主要因为缺少该方面的详细资料。对实际工程的分析是很重要的,今后希望能够获得该方面的报导。

本文在资料收集方面还是很偏缺不全的,在理论上特别在物理化学和胶体化学方面还存在着很多不够透澈而尚待继续研究的问题,有疏漏错误的地方希望大家补充和纠正。

本文中有很多苏联资料是由蒋国澄、郭崇元和李碧玉等同志供给的。草稿曾请蒋国澄同志阅读并提意见。初稿曾蒙科学院徐晓白同志和浙江大学曾国熙同志阅读和提供意见,

插图由方家庆同志描制。他们对本文的完成都有很大的帮助。谨此深表谢意。

- (一) 发展简史 (略)
- (二) 饱和土中的电重层及其作用 (略)
- (三) 电渗中的力学规律 (略)
- (四) 直流电在粘土中的作用 (略)
- (五) 直流电对土的基本力学性的影响 (略)
- (六) 总结
- (1) 直流电在饱和土中的作用规律

直流电在土中的作用, 视土的性质不同可以很复杂, 尚难用一种单纯的规律来表示, 就目前所知, 直流电在饱和土中, 可有下列种种作用:

1. 电解: 主要以水的分解为基础。 H^+ 离子在阴极放电成气态氢排出, OH^- 离子在阳极放电有气体氧排出, 这些气体如果聚积在电极与土接触面上, 即会造成极化现象, 若然聚积在土体中也会阻碍电流的通过。

2. pH 值变化: 由于电解放电, 阳极 H^+ 离子浓度增加会造成阳极地区土中 pH 值下降 (酸性加强), 同时阴极 OH^- 离子浓度增加会造成阴极地区土中 pH 值上升 (盐基性加强)。

3. 电渗: 由于土粒上电重层可移层中阳离子在直流电场作用下发生移动, 就带动了土中孔隙水由阳极向阴极移动 (如果孔隙水中有浮游颗粒, 这些浮游颗粒, 同时也会产生电泳现象, 向阳极移动)。除了根据电重层的观念来解释电渗现象外, 尚有主张用水化离子运动的观念来解释的, 后一种主张对含盐多的土是值得注意的。

4. 离子交换: 依照离子交换规则, 阳极土粒表面常首先开始离子交换作用, 在阳极过剩的 H^+ 离子, 首先进入土粒表面代换向阴极移动的阳离子, 继则又被由阳极金属溶入的 Al^{+++} (或 Fe^{+++} 等) 和由土粒矿物结晶中分解出来的 Al^{+++} (或 Fe^{+++} 等) 所代换。经过这样的离子交换作用, 土粒表面的电重层与束缚水膜常会减薄。离子交换作用常由阳极向阴极逐渐扩展, 离子交换作用对土的性质影响在粘土中最显著。

5. 土粒矿物结晶的核心分解: 在直流电作用下, 粘土矿物在适当的环境中会发生局部核心分解 (可能由于 pH 值的增大和减小所致) 而放出 Al^{+++} 、 Fe^{+++} 等金属离子, 这些阳离子可在土粒表面进行交换作用, 同时也会与 OH^- 离子结成氢氧化物。

6. 新化合物的产生与胶积: 向阴极移动的阳离子和由矿物结晶中分解出来的阳离子, 常可与在阴极的和向阳极移动的阴离子组成新的化合物, 凡是可溶性的新化合物 (如 $NaOH$ 、 KOH 、 $Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ 等), 常会由阴极随电渗水流排出, 但是如 $Al(OH)_3$ 、 $Fe(OH)_3$ 等化合物, 则常要在土中胶积。关于新化合物的产生和在土中胶积的规律尚没有得到完善的资料和统一的见解, 例如: 列里托夫和诺维可夫在海淤电化加固试验中推断阳极地区土中, 除了可能有铝和铁的氢氧化物外, 还可能会有铝和铁的硅酸盐的积集, 在阴极地区土中可能还有铝和铁与有机质反应所产生的物质; 又如: 村山朔郎和三濑贞在粘土电化加固试验中认为 $Al(OH)_3$ 必须在 $pH = 7$ 的区域中才会积集, 然后经过脱水作用又会转变为水矾 $AlO(OH)$ 或氧化铝 Al_2O_3 晶体。可见这个作用是很复杂的。

7. 其他

(1) 温度变化: 在直流电作用下土的温度一般是上升的, 而与电流强度和土中电阻的大小和分布情况有关。

(2) 电阻变化：在直流电作用的过程中，土中电阻发生不均匀的变化，可以影响到土中电场的分布，原因尚待查明。

(3) 结构变化：在直流电作用下粘土中常发生结构性的变化，最引人注意的是土中缝隙的发展，它的原因到目前还没有明确。

上面的种种作用和现象虽经分别列述，但是它们相互间是有密切关连的，不能分开来单独看的，同时在不同的土中直流电所引起的各种作用和影响，在程度上亦是各有差别的。

(II) 直流电对土的物理力学性的影响

直流电对土的主要物理力学性的影响，正就是它在土中所起作用的结果，今且将一般常遇情况列述于下：

1. 土粒比重：普通没有显著改变。

2. 塑性：由于离子交换和电渗排水的结果，粘土的塑性可以减低，主要表现在流性限度的降低和塑性指数的减小。

3. 干缩：由于离子交换，减薄了土粒上的束缚水膜，同时也增进了土粒的絮凝性，因此土的干缩量会减小，而缩性限度则会略有增大。

4. 膨胀：经过离子交换，降低了土粒表面（主要是表面阳离子）的水化能力，因此土的膨胀量也会减小。

5. 湿化：由于离子交换减弱了土的吸水膨胀性，同时由于新化合物的胶结作用也巩固了土粒间的联系，因此土的对水稳定性可以增加，亦即不易湿化。

6. 渗透：由于离子交换，土中束缚水膜的减薄和絮凝性的提高以及土中缝隙的发展都可以促进土的透水性（表现在水力渗透系数的增加）；但是在某些情况中，如当土在荷重压缩下孔隙率减小或孔隙中有大量新化合物淤积堵塞水流通道时，土的透水性也会降低。

7. 固结：由于电渗作用推动了土粒上束缚水膜和自由水的移动，由于离子交换有减薄束缚水膜的作用以及其它力学因素（如：电渗平衡水头压力、孔隙水张力和电场变动时的不平衡电作用力等的影响），都足以增加土在直流电作用下的固结量和固结速率，在粘土中常可远远超过在一般静荷重下固结（渗压）所能达到的数量。

8. 强度：由于离子交换、新化合物的胶积以及电渗排水降低土中含水量等作用，都足以增加土的强度；同时，在电渗过程中由于孔隙水动力学性的改变，在适当条件下可使土中孔隙水压力下降（包括由于水流方向逆转而在土体表面上形成毛细管弯液面所造成的毛细管张力作用），则土体的稳固性亦可暂时得到加强。

(III) 直流电在土工中的工程价值

从直流电在土中所起的作用和它对土的物理力学性质的影响中，就可以对于直流电在土工中的实用价值，得到一个粗略的概念。谈到实用价值或工程价值时，就不能不同时考虑效果和经济两方面的配合。从已得的文献和资料中，这里还不能够提出很具体的论断，下面仅是根据过去应用中所得到的经验与试验研究中所导出的理论，将直流电在土工中的工程价值罗列出来，以供参考：

1. 利用水渗对孔隙水动力学性的影响，在适当的布置下可以改变土体中的孔隙水流方向和速度，以及降低土体中的孔隙水压力，使土体稳固性暂时获得加强。这方面的实际

应用，可以使在开挖软湿土坡和坑底迅速达到稳定，以利开挖和建基工程的进行。它的效果大小主要决定于土的水力渗透系数 k_h ；对于 $\frac{k_c}{k_h} > 1$ (k_c 为电渗系数) 或 $k_h < 10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/s 的细粒土是会产生显著效果的。同时，在费用和时间上都可以认为是经济的。但是它只适合于临时性的措施。这种措施过去已被多次运用而获得了良好结果（虽然当时还没有完全认识到本文中所引的理论，同时在这些应用中还挟带有下面 2 和 4 两点中所述的两种加固因素）。

2. 利用电渗排水，降低土中含水量。降低含水量的目的虽然很多，但是这里大多是为了增加软粘土的强度。电渗排水对含水量的降低是有限度的，要使含水量降低到小于土的塑性限度，一般是比较困难的，并且当土中含水量愈小时，耗电量则愈大，所以一般认为电渗排水是不太经济的。但是对于透水性很低的细粒土 ($k_h < 10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/s)，用一般方法（如井点法、真空法等）不能使它有效排水的时候，电渗排水法是会产生特殊效用的；同时，在直流电作用下土中缝隙的发展亦可间接增进土的排水性能。

3. 利用电渗促进粘土中束缚水膜（和自由水）移动的作用，在适当的布置下可以促进地基软粘土层的固结；这方面的应用，存在着很大的可能性和发展希望，并且还可能与目前我国推行的软土地基预压加固处理配合进行。

4. 利用直流电在土中所引起的离子交换和新化合物形成与胶积等物理化学作用，可以增进土的强度，同时还可以减小土的塑性、干缩量、膨胀量和增加土的对水稳定性（抵抗湿化作用），使土发生几乎不可逆的性质转变；所谓“电动铝化加固”即属于这个类型。为种处理最适用于软粘土。但是若要使大量土体基本上发生物理化学性的转变，所需要消耗的电量和电极材料是很巨大的，所以从经济上看，对于这种处理方法会加犹豫的。过去曾发现此种处理可以使铝桩（和铁桩）周围粘土硬化以增加桩的荷载量，这种应用是有可能的。此外，对小量和特殊情况的处理，亦是可行的。

5. 利用电渗作用在土中灌注化学溶液以改进土的工程性质；例如：“电动硅化”即属于这个类型。它的适用性将决定于化学溶液的稠度、土的渗透性和化学成分以及化学反应规律和硬结速度等因素，此处不加详论。

6. 利用连续而间歇的电场作用减小阴极物体与土接触面间的摩阻力，从而使阴极物体在土体中拿动时，阻力可以减低；这种作用可以应用到打桩拔桩和沉箱等工程。这个现象的发生原因最可能是由于电场改变时，不平衡电作用力使土粒向阳极压缩所致，同时在阴极排出（或挤出）的水分亦起有润滑作用。但是当继续通电时，电渗流速充分发展后，在土粒上的不平衡电作用力即会被水流的拖拉力所平衡，并且阴极地区的土亦逐渐发生膨胀（可能还有其他原因），从而阴极物体与土接触面间的摩阻力又会上升，甚至超过原有的摩阻力。

（IV）今后研究方向

本文中虽已叙述了直流电在土中所起的种种作用及其对土的物理力学性质的影响，并且指出了它在土工中的工程价值，但是这些都还只是一些初步而不完整的记录；为了要掌握它的规律，使它更有效的为我们服务，就须要做进一步的研究，这里暂时拟出了下面的今后研究方向，以供大家参考：

1. 理论上的研究