

A Solution Guide to the Intricate Problems on Engineering Technology
of Ground Improvement

地基处理工程技术 疑难问题解析

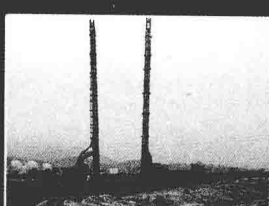
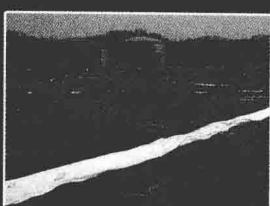
李彰明◎著



A Solution Guide to the Intricate Problems on Engineering Technology
of Ground Improvement

地基处理工程技术 疑难问题解析

李彰明◎著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

基于作者在地基处理领域长期而丰富的工程设计、施工、监测检测与研究的成果积累及心得体会,介绍、分析及讨论在地基处理工程实施全过程中及相关领域内易于混淆或困惑的科学和工程技术问题,包括基本理论及原理与应用、地基处理的方法选择与设计、施工、工程质量监控与检测等问题,为更清楚说明问题,必要时还简介了作者本人负责或指导的工程实例。

本书适合设计、施工、监测、监理、检测、研究、土木建筑业主及有关管理机构等人员参考使用,也适合高等院校土建类专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地基处理工程技术疑难问题解析/李彰明著. —北京:中国电力出版社, 2016.3
ISBN 978-7-5123-8935-9

I. ①地... II. ①李... III. ①地基处理-问题解答 IV. ①TU472—44

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第033380号

中国电力出版社出版发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

责任编辑:梁瑶 电话:010-63412605 E-mail: liangyao0521@126.com

责任印制:蔺义舟 责任校对:王小鹏

北京博图彩色印刷有限公司印刷·各地新华书店经售

2016年3月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·16印张·386千字

定价:58.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

前言

地基土体这一地球上原始而古老的介质，经历了亿万年复杂的地质历史，具有明显的时空变异性与多相性特征。一项地基处理工作，需面对土体复杂的工程性质与千变万化的工程条件，基于不太成熟的理论与局限性经验，相关工程技术又不那么规范可靠，要做好这项工作着实不易，须处理大量问题。长期以来，作者在该领域的理论研究及分析、设计、施工、监测与检测等方面，所受咨询不计其数，及时解决了一些大型或超级工程或其他复杂工程的棘手工程技术等问题。鉴于业界不断的需要及出版社的相邀，作者现就地基处理工程实施全过程中所涉及的、易于混淆或困惑的科学与工程技术问题，加以归纳介绍、分析及讨论，形成本书。

全书分为四章：理论方法应用疑难问题解析；设计及方案比选疑难问题解析；施工疑难问题解析；监测与检测及效果评价疑难问题解析。这种内容的分章编排是着眼于实际工程分析、设计、施工及监测、检测各主要环节的，便于所需者选取所用。具体问题及解答可详见本书目录与各章正文。

这些问题及解析的特点如下：一是均源于作者曾经对业界各同行所请咨询及提问的回答，其中许多问题的解答可以说是帮了所涉及工程的大忙；而在书中前部分内容中包含了常用地基处理方法的简要介绍与适用性问题，则是多用于解答业主甚至设计人员进行地基处理方案比选时的困惑；正如 19 世纪和 20 世纪初最具影响力的数学家、提出和发展了大量的思想观念而被尊为伟大科学家的大卫·希尔伯特 (David Hilbert) 所言，当遇到难以解决的问题时，最好的办法就是回到问题的本源。二是对原问题加以提炼以使得表述更书面化及更简洁，也更好为其他同行借鉴参考。三是问题解析既有各自独立性，又成系列而具有相当的系统性；对一个问题，当从各层面来看或将若干问题联系起来看时，读者将有更多的体会及收获。对于所涉及问题，解答有长有短；有的回答简单，但在工程上很有用，属于“捅破窗户纸”的关键实用技术；有的解答则较为复杂而长篇，反映了问题本身的复杂性及学科发展的不成熟性，也是为更好解决问题之所需。希望读者能各取所需。

上述工作是作者对自己长期在此领域工程一线实践与研究的切身体会、经验与归纳总结的结果。希望能有助于用到本书的设计、施工、监测、监理、检测、建设单位业主、有关管理机构等人员，有助于相关学者、专家以及具有一定专业知识及判断能力的高年级本科生、硕士生与博士生。对于时间有限或专业经历不同的读者，可按所需选择不同问题解答或解析来阅读参考。

本书撰写得到冯强教授级高工协助；作者研究生李正东、王茜、招智林、赖建坤

与康斌等同学参加了本书清样的校稿工作。本书撰写得到国家自然科学基金项目（批准号：51178122）资助、广东省自然科学基金项目的资助以及“广州市建设科技发展基金项目”支持；中国电力出版社与该社编辑梁瑶女士的盛情相邀及高度负责地编辑为本书出版及质量保障提供了基础；一并致以十分诚挚的感谢！同时，也谨向本书所有参考文献及资料的作者前期工作表示真挚敬意与谢意！

本书难免有欠妥与错误之处，敬请读者指正。一如既往地期望地基处理领域不断有着更大实质性的进展，更好造福于人类。

联系 Email: ukzmli@163. com。

李彰明

2016 年 1 月 16 日 于广州

目 录

前言

1 第1章 理论方法应用疑难问题解析

1.1	为什么土体及地基工程中理论与实际往往容易出现明显差异? 如何应对?	1
1.2	地基处理有哪几类基本方法?	2
1.3	地基土体工程基本理论及方法有哪些? 存在哪些问题?	3
1.4	如何进行土的固结分析与选取地基处理要求的固结度?	4
1.5	工程中常用的固结理论是什么? 其适用性如何? 固结度如何计算?	5
1.6	固结系数如何确定? 各种方法的适用性如何?	11
1.7	什么是复合地基? 其分类及特点如何?	17
1.8	什么是静力排水固结法?	17
1.9	什么是堆载预压法及超载预压法?	19
1.10	什么是真空预压法?	19
1.11	直排式真空预压法与真空预压法比较有何特点及区别?	20
1.12	什么是强夯法和强夯置换法? 其适用性如何?	21
1.13	什么是振冲法? 其适用性如何?	22
1.14	什么是石灰桩法? 其适用性如何?	22
1.15	什么是砂石桩法? 其适用性如何?	23
1.16	什么是土桩、灰土桩法? 其适用性如何?	24
1.17	什么是水泥土搅拌法及深层搅拌法? 其适用性如何?	24
1.18	什么是高压喷射注浆法? 其适用性如何?	25
1.19	什么是灌浆法? 其适用性如何?	25
1.20	什么是水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)法? 其适用性如何?	25
1.21	什么是桩锤冲扩桩法? 其适用性如何?	26
1.22	什么是静动力排水固结法?(真空预压法+堆载法)	27
1.23	什么是真空-堆载联合预压法?	29
1.24	什么是地基处理的侧向约束法?	29
1.25	什么是夯实水泥土桩法?	30
1.26	水泥搅拌桩如何加固地基?	30

1.27	散体桩振冲法如何加固地基?	31
1.28	砂石桩如何加固松散砂土和粉土地基?	32
1.29	砂石桩如何加固黏土地基?	35
1.30	水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩) 如何加固地基?	37
1.31	加筋法如何加固地基?	38
1.32	灌浆法有哪几类? 如何加固地基?	39
1.33	什么是高压喷射注浆法?	39
1.34	淤泥地基静动力排水固结法处理中夯击作用能有何分布规律?	41
1.35	何种荷载条件下淤泥中结合水可转化为自由水?	42
1.36	排水固结法地基处理中典型工况下淤泥孔隙分布特征是什么?	48
1.37	土体残余力是否存在? 其在静动力排水固结法地基处理工程效用是什么?	53
1.38	饱和土有效应力原理的有效性如何?	57
1.39	从力学角度来看, 土体是一种什么介质? 分析其工程响应时应注意哪些问题?	57
1.40	黏土地基次固结可采用何种理论进行分析计算?	58
1.41	什么是土的触变性? 在地基处理中如何运用?	58
1.42	什么是土的灵敏度? 工程中应注意什么?	58
1.43	层流渗透及达西定律的工程适用性如何判断?	59
1.44	如何看待土力学与地基基础中的经验关系式?	59
1.45	淤泥地基土体中作用力传递有何特点?	59
1.46	人工增强体复合地基作用原理是什么?	60
1.47	各类人工增强体复合地基处理效果如何?	61
1.48	碎石桩有哪几类?	61
1.49	什么是柔性桩或散体桩复合地基桩体临界桩长与有效桩长?	66
1.50	如何形成与利用地基加固综合方法?	66
1.51	什么是微型桩?	67
1.52	微型桩有哪些类别? 其特点如何?	68
1.53	微型桩加固机理是什么?	71
1.54	地基沉降分析及预测有哪些方法?	72
1.55	有限特征比理论有何特点?	73
1.56	有限特征比理论如何反映介质组构对土体力学响应的影响?	73
1.57	固结过程中, 水往纵向流还是横向流? 两者的渗透率比例是多少?	75
1.58	流变对土体变形影响有多大?	75

2.1	地基处理的基本技术要求和设计原则是什么?	76
2.2	如何进行地基处理方案选择及技术经济比较?	77
2.3	如何进行水泥搅拌桩复合地基承载力与沉降计算?	79
2.4	如何进行堆载预压的设计及计算?	81
2.5	静动力排水固结法的加固深度可以达到多少? 如何加大其有效加固深度?	82
2.6	什么是静动力排水固结法的水柱效应机制?	84
2.7	软基排水固结法处理中竖向排水体间距如何设置?	84
2.8	工程使用中塑料排水板纵向通水量会受到什么因素影响?	85
2.9	如何选择塑料排水板及确定其纵向通水量?	86
2.10	竖向排水体深度如何确定?	87
2.11	竖向排水体井阻影响有多大?	87
2.12	竖向排水体涂抹对固结的影响有多大?	88
2.13	如何设置水平排水体(透水层)?	89
2.14	如何在超载预压期间消除使用荷载下的主固结沉降?	89
2.15	如何在超载预压期间消除使用荷载下的主固结沉降并减少次固结沉降?	90
2.16	真空法加固效果与地下水赋存情况有何关系?	92
2.17	真空法加固效果与竖向排水体有何关系?	93
2.18	真空预压法设计内容是什么?	94
2.19	真空和堆载联合预压设计与真空预压法设计有何异同?	95
2.20	如何看待真空—堆载联合预压效果的叠加问题?	95
2.21	排水固结法施工图设计对勘察有什么要求?	96
2.22	静动力排水固结法与通常排水固结法中竖向排水体间距设置有何异同?	97
2.23	静动力排水固结法中如何设置集水井(降水井)和盲沟?	97
2.24	高含水量黏土地基静动力排水固结法处理中如何确定其上填土垫层厚度? ...	98
2.25	高含水量黏土地基静动力排水固结法处理中如何确定夯击能?	99
2.26	地基快速固结处理中如何进行沉降速率控制?	100
2.27	如何定量分析静动力排水固结法中的最佳夯击能?	102
2.28	黏土地基静动力排水固结法处理中如何确定夯点间距?	105
2.29	黏土地基静动力排水固结法处理中如何确定单点夯击数?	106
2.30	黏土地基静动力排水固结法处理中如何确定夯击遍数?	107
2.31	黏土地基静动力排水固结法处理中如何确定夯击间隔时间?	108
2.32	黏土地基静动力排水固结法处理中如何确定处理范围?	108
2.33	静动力排水固结法与强夯法有何不同?	108

2.34	静动力排水固结法与堆载预压法(堆载+排水)有何不同?	110
2.35	真空预压法适用的局限性是什么?	111
2.36	真空—堆载联合预压法(真空预压法+堆载法)适用的局限性是什么?	112
2.37	搅拌桩水泥土力学性质指标及影响因素是什么?	112
2.38	水泥搅拌桩设计主要内容是什么?如何设计?	115
2.39	如何处理“橡皮土”?	117
2.40	如何进行砂石桩设计计算?	118
2.41	如何进行真空预压加固的设计及计算?	122
2.42	如何进行条形浅基础加筋土地基设计计算?	124
2.43	如何进行土堤加筋土地基设计计算?	126
2.44	如何进行灌浆法地基加固设计计算?	128
2.45	如何进行土桩与灰土桩加固设计计算?	132
2.46	如何进行夯实水泥土桩加固设计计算?	135
2.47	如何进行微型桩加固设计计算?	136
2.48	超深厚软土地基场地多层建筑地基加固及基础选型有哪些好方法?	145
2.49	如何进行水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)复合地基承载力设计计算?	146
2.50	CFG桩身材料及配合比如何选取与设计?	149
2.51	CFG桩桩体强度和承载力关系如何确定?	152
2.52	CFG桩复合地基变形计算方法有哪些?	153
2.53	CFG桩褥垫层的设计如何确定?	156
2.54	如何选取确定CFG桩桩径?	157
2.55	如何选取确定CFG桩桩距?	157
2.56	如何确定CFG桩桩长?	158
2.57	如何布置CFG桩?	158
2.58	通常CFG桩复合地基设计流程是什么?	159
2.59	如何进行振动水冲密室法(振冲密室法)设计计算?	159
2.60	如何进行振动水冲置换法(振冲置换法)设计计算?	163
2.61	振冲置换法适宜哪些土类?	167
2.62	振冲置换法设计计算中的基本参数如何确定?	168
2.63	振冲置换法表层处理垫层如何设置?	169
2.64	振冲法桩身材料如何选择?	169
2.65	采用强夯法时如何进行减振设计?	170

- 3.1 $\times\times$ 静动力排水固结法地基处理项目中淤泥层上填土厚度较厚,交工面标高低于现状地面3m左右,再在表层铺砂垫层造价高,水平排水作用如何不清楚,是否需要? 171
- 3.2 静动排水中的夯锤与强夯法的是否有区别(规格、尺寸和大小等)? 171
- 3.3 处理场地的降水井如何设置,结构如何设计,如何避免夯击中损坏? ... 171
- 3.4 场地内的原有填土不均匀,堆填的时候没有顺序和管理,导致局部淤泥包,面积有大有小,200~1000m²不等,如何处理? 171
- 3.5 排水垫层材料的要求是什么? 172
- 3.6 如何设置排水垫层? 172
- 3.7 如何进行排水砂垫层施工?遇到淤泥地基如何铺设? 172
- 3.8 如何进行砂井施工? 173
- 3.9 如何进行袋装砂井施工? 173
- 3.10 如何插设塑料板排水板(带)? 174
- 3.11 真空预压法中如何控制抽真空作用强度? 175
- 3.12 真空预压法施工的通常要求是什么? 176
- 3.13 静动力排水固结法中如何进行试夯? 176
- 3.14 静动力排水固结法中主要有哪些施工机具?如何选择? 177
- 3.15 如何进行静动力排水固结法信息化施工? 178
- 3.16 浅埋软黏土地基的静动力排水固结法施工应注意什么? 179
- 3.17 水泥浆搅拌法(湿法)施工中要注意哪些事项? 181
- 3.18 如何提高与保证淤泥地基中水泥搅拌桩质量? 182
- 3.19 粉体喷射搅拌法(干法)施工中要注意哪些事项? 182
- 3.20 振冲法施工有哪几种方法及工艺? 183
- 3.21 砂石桩施工工艺是什么?质量如何控制? 186
- 3.22 如何进行CFG桩施工? 191
- 3.23 如何进行地基加筋施工? 197
- 3.24 地基工程中有哪几种常用灌浆材料?有何特点? 198
- 3.25 如何进行灌浆法施工? 199
- 3.26 高压喷射注浆施工有哪些要求? 201
- 3.27 土桩与灰土桩施工有哪些要求? 203
- 3.28 夯实水泥土桩施工有哪些要求? 205
- 3.29 地基处理中密封墙作用是什么?应注意哪些问题? 205
- 3.30 如何进行微型桩施工? 206

209 第4章 监测与检测及效果评价疑难问题解析

4.1	如何科学有效地利用土体原位检测结果? 各测试方法结果之间有何关系? ...	209
4.2	地基检测常采用哪些主要方法? 其适用性如何?	217
4.3	地基检测的基本原则及要求是什么?	219
4.4	测试与检测等专业术语内涵有何关联或区别?	220
4.5	闭环与开环测试系统各自有何特点?	220
4.6	如何处理检测与监测中的系统误差?	221
4.7	可采用哪些均值定义进行数据处理?	221
4.8	堆载预压法现场需做哪些监测? 效果如何判断?	222
4.9	真空预压法施工过程质量检验和监测内容是什么?	222
4.10	真空预压法竣工验收检验基本要求是什么?	223
4.11	水泥土搅拌桩质量控制及检验方法是什么?	224
4.12	如何进行振冲法加固效果及质量检验?	224
4.13	如何进行砂石桩加固效果及质量检验?	225
4.14	如何进行 CFG 桩地基施工质量检验与验收?	227
4.15	如何进行加筋土地基施工质量控制及监测?	228
4.16	如何进行灌浆法加固效果检验?	230
4.17	土桩与灰土桩加固效果检验有哪些要求?	230
4.18	夯实水泥土桩加固效果检验有哪些要求?	231
4.19	深厚软黏土地基施工质量检验应采用什么检测手段?	232
4.20	地基处理常用监测如何进行?	232
4.21	地基土体动力性质测试近年有无新手段?	235
4.22	淤泥或淤泥质土地基处理后深层土体性质可以改善到何种程度?	237
4.23	软土固结研究中为什么关心剪切波的问题?	238

239	参考文献	239
-----	------------	-----

第 1 章

理论方法应用疑难问题解析

1.1 为什么土体及地基工程中理论与实际往往容易出现明显差异？如何应对？

土体工程及地基处理问题的分析求解理论基本属于经典力学范畴，而经典力学问题的求解取决于：求解方程与求解条件；目前，业界一般又将待求解问题视为定解问题（尽管实际问题并不总是如此），故又简称为定解方程与定解条件。这些方程与条件能在多大程度上客观反映实际，则决定了理论解与实际间差异大小。

本领域定解方程通常包含：介质整体（连续介质可以反映介质平均性质的微元体代表）平衡方程、几何方程（或相容方程）与物性方程，不少情况下还需要渗流连续方程及渗流区孔隙流体平衡方程、渗流定律（其简单理想的是达西定律）以及有效应力原理方程等。严格来讲，对于土体，上述每组方程都会引起程度不同的误差，如由于运用基于连续性假定的应力与应变概念带来的误差等；其中的关键是物性方程、几何方程与渗流定律本身带来的误差，这些问题在很大程度上将本学科领域区别于其他领域，包括钢结构甚至钢筋混凝土结构领域等。

物性方程是指介质内部各种物理力学量（包括其历史与不同速率下）内在本质关系的数学表达，故力学上称之为本构方程。目前，物性方程在描述介质行为的客观性方面，对土体的描述比土木工程其他领域所涉及的主要对象如钢甚至混凝土的描述都要差很多，其差别在很多情况下是数量级的；其基本原因可归纳为两方面：一是土介质本身的复杂性，这种经历漫长地质历史时期、不同条件下生成的自然介质实在是太复杂了，即使是同一种土，在不同地区，其性质差异也可能非常大，复杂性远非人工材料如钢、混凝土等材料可比；二是到目前为止，构建物性方程的试验对象基本是土样而不是实际问题的土体，无法避免扰动的小尺寸土样与原位土体的力学性质本身已相差很大。

在欧几里得空间，几何方程本身问题不大，在土力学作为独立学科分支之前，就有考虑小变形、有限变形等各种变形程度的几何方程。然而，由于数学上的复杂性，在很多情况下业界（包括大量的商业分析软件）均采用考虑小变形的几何方程，加之通常采用的应变定义（工程应变等定义在有限变形下误差不可忽略，仅对数应变可避免这类误差）问题，故仅这两种因素带来的总误差就很明显。要知道，许多黏土在实际问题中其应变值超过 3%；而地

基处理中,多数淤泥土体应变值则可达 $10\%\sim 20\%$ 。

需用到渗流定律时,一般工程分析多采用达西定律,该定律要求渗流场呈层流状态,可又有多少土体渗流不是紊流呢?即使采用修正的渗流定律,欲处理的问题也难以符合。

以上讲到定解方程引起的误差可能性很大,而定解条件造成的误差在目前也是难以克服。

定解条件造成的误差:边界与初始条件的非确定性;若只考虑静力学问题,则只是边界条件(特别是非自由面及非临空面处)的非确定性,包括:①荷载条件的非确定性;②位移边界条件的非确定性;③水力边界条件的非确定性。而非确定性至少包括两方面:随机性(因果关系不确定,即一定的因不一定有唯一确定的果)与模糊性(离散性明显)。

要正确分析上述误差,就是要逐一考查可能的误差、原因与误差范围等,并评估其影响程度;同时,分析不利因素组合下发生不利影响或不可接受结果的概率,再做决断。

1.2 地基处理有哪几类基本方法?

软土地基处理可分为以下几种方法:改善土体自身性质,设置人工增强体,改变地基土体边界条件(以位移边界条件为主的改变)与荷载分布,以及上述的综合方法。

改善土体自身性质方法以不添置人工增强体而以土体自身性质改善来达到要求为目标;一般而言,即指需预先完成在大小相当于使用荷载下地基土的固结或超固结。该类方法多属于力学方式加固方法,诸如静动力排水固结法等。土体变形随时间的发展包括两种不同的过程,即固结与流变。固结又可分为主固结与次固结。所谓主固结,就是在荷载作用下,水从土孔隙中被挤出,土体收缩的过程。所谓流变,是指(对于土体而言,是指其土骨架的)力与变形和时间有关的现象;其中,蠕变是流变的一种基本现象,对土体而言,是指土骨架应力不变情况下土体所发生的随时间而增长的变形,这是一个漫长的过程。次固结,或称次压缩,就是在孔隙压力完全消散后,有效应力随时间不再增加的情况下,随时间发展的压缩。若用力学中一般性概念来表述,次固结即为土体的流变;也就是说,次固结被认为是一种流变。对于实际工程问题,改善土体自身性质的地基加固处理实质上是预先完成在大小相当于使用荷载下地基土的主固结或超(主)固结。饱和土体加固基本符合传统意义下的饱和土体固结机理。该方法中通常有堆载预压法及超载预压法、强夯法(动力固结法)、真空预压法、真空—堆载联合预压法与静动力排水固结法等。

设置人工增强体是另一种基本方法。在地基中设置人工增强体有很多种方法,应用较多的有:搅拌桩法、散体桩(碎石桩、砂石桩)法、水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)法、加筋地基法与灌浆法等,以及在此基础上派生的各类多向增强体以及长短桩复合地基等。上述所列的是5种方法也是常用的主要方法。

改变地基土体边界条件——侧向约束法也是一种可考虑方法。在使用地基两侧打入刚性桩体如钢板桩、搅拌桩、木桩、钢筋混凝土桩等,或设置各类(水泥、砖石、钢筋混凝土)墙体等,可限制软土的横向变形及挤动。当分布荷载不大于受影响的地基土强度,该方法可以保证地基稳定。该方法主要可用于含水量较大的软土地基,特别适用于当该类软基为一夹层或下卧层、上部荷载传递至该层时产生的附加应力已被其所承受,而地基总体变形需要得到控制的情况。

改变荷载分布也可称为结构法。常常可以见到的地基失效原因之一是局部应力集中,从

设计的角度考虑,可以调整荷载分布,使得地基土恰当地发挥其作用。尽管这一思想非常简单且不属于地基加固本身问题,但问题不是仅仅为加固而加固。当审慎细密地考虑使用地基及荷载特点时,该法可带来出乎意料的益处。

地基处理加固的综合方法即为以上各类改善土体自身性质方法、各类设置人工增强体方法与各种改变边界条件及荷载分布方法的某种组合。合理的组合并不是多种方法的简单相加拼凑,而各自机理及作用的科学、巧妙的结合,诸如土体自身性质改善与设置人工增强体相结合,土体自身性质改善与改变边界条件相结合等。近些年来,地基处理方法的改进在很大程度上是朝着这一方向而发展的,并将产生更强大的生产力及效益。

1.3 地基土体工程基本理论及方法有哪些? 存在哪些问题?

工程是将自然科学的理论应用到具体工农业生产部门中形成的各学科的总称。地基土体工程是以土体(包括一些构筑于土体的人工材料及构件)为基本对象,以力学为基本原理,以工程勘察、设计、施工、监测及检测为基本内容的综合性技术学科,是土木工程的一个组成部分。

土体工程及地基处理工程基本理论包括一般工程原理、物理学及力学(含固体力学及土力学、流体力学及渗流理论)与工程地质学等理论。土体工程方法一般是指为达到土体工程目的而采取的手段与行为方式,包括勘察、设计、施工、监测及检测等。土体工程的突出特点是各学科间的渗透与综合。

土体工程及地基处理工程基本理论及其发展也采用了自然科学技术范畴内的一般方法:

(1) 逻辑、经验以及演绎和归纳方法(科学方法论):

1) 即规律(认识)、假设、推理、理论及模型、试验及参数确定、计算方法及技术、应用及验证、修正假设与理论等;通常更多地借助于上述各种方法综合分析比较。

2) 测试——包括试验(大量样本)、总结规律及归纳为经验关系式、在一定条件下推算为更为一般的关系式。

(2) 试图建立普遍适用的法典,致力于分类和量化。

在基本理论建立及描述分析中,采用了一般工程学科的基本假定及方法:

(1) 土体工程问题一般为均匀流逝时间下的欧几里得空间问题,即认定牛顿定律及力学具有普适性。

(2) 唯象法。简要讲,是主要描述与分析土体的宏观行为及结果。即在解释物理与工程现象时,不追究微观原因,而是由经验总结和概括实验事实得到自然界的基本规律作出演绎的推论。这是一种对简单巨系统最常用的建模方法;其根据系统的宏观性质,不考虑系统的内部机制,直接利用系统宏观层次上功能的特点建立演化方程。因此,用这种方法建立演化方程不必研究子系统之间的相互作用。唯象方法是经典物理学与力学运用的主要方法。

(3) 隔离体法与整体法综合应用。实际问题中,绝大多数物体都是相互关连、相互作用的,因而问题显得较为复杂。为使复杂问题简单化以及凸显关注对象,在解决力学问题时,常将研究对象与其他物体隔离出来,用力学条件模拟或替代其他物体及条件的作用,单独对隔离出来的物体进行受力分析,应用相应的定律来分析求解得到隔离体的力学响应。当需要以整体为研究对象(此时要求整体内部有相同的加速度)时,又对整体进行研究。隔离体法与整体法在解决土体工程力学问题时,往往交替使用。

(4) 因素分析法。即利用体系分析现象总变动中各个因素影响程度的一种分析方法。使用这种方法能够将一组反映事物性质、状态、特点等的变量简化为少数几个能够反映出事物内在联系的、固有的、决定事物本质特征的因素。其最大作用就是运用数学方法对可观测的物体或事物在发展中所表现出的外部特征和联系进行由表及里、由此及彼、去粗取精、去伪存真的处理,从而得出客观事物普遍本质的概括;其次,也可以使复杂问题大为简化,并保持其基本的信息量。这一方法对于复杂的土体工程问题十分有用。

为了更好地奠定地基土体工程理论基础,尚需:

(1) 更多地重视土体基本性质与基本行为研究,尤其是其工程性质的研究。就目前而言,土体性质研究大部分来之室内小试样的简单荷载及边界、初始条件试验。简单来看,就如目前土力学,其基本理论大致上属于小土样力学理论,与实际工程相差较大。

(2) 还需更多地发展试验与监测、检测技术,尤其重视足尺测试技术,以能够模拟并较客观反映实际土体工程行为。

(3) 发展更利于一般工程技术人员应用、功能强大的数学模拟分析技术。目前,各种数值模拟技术,对于一线工程技术人员而言还是不太容易掌握使用;同时,这种分析技术目前主要还是诸如有限元等数值分析技术,而其核心问题依然是变形介质(土体)本构方程问题。

长期以来,鉴于土力学及地基工程理论与实际工程一直有难以克服的鸿沟,因此作者认为,还应就研究方法进行改进。一是如金属力学那样对待,必须将各类土体介质在物理、化学方面做更多的界定,极大地细化土体介质分类,在此前提下进行分类研究及应用积累;二是恐怕要跳出传统牛顿力学框架,进行微观力学与宏观力学关联性研究及应用积累。

总的来看,在目前理论发展阶段,土体工程及地基处理工程问题的计算分析基础理论主要还是变形体力学,其广泛应用的即为弹性力学(其巧妙地运用了上述方法,并在数学上得到适定性证明),其发展涵盖了上述问题。然而,从数学上讲,变形体力学问题由平衡方程、几何方程或相容方程、物理方程(力学上多称为本构方程)与边界条件或/及初始条件构成求解基本方程(通常假定为适定性问题控制方程)及条件。一般而言,平衡方程、几何方程在假定条件下适合任何性状的介质,而本构方程本身则是关于介质性状的;土行为的本构模型在预言及描述土体行为中是最为关键的。因而,在尽可能了解与掌握土体工程性状及力学响应规律的基础上,建立较为客观且方便使用的本构方程便成为众多学者坚持不懈而苦苦追求的目标。

1.4 如何进行土的固结分析与选取地基处理要求的固结度?

固结(通常是主固结的简称)是指土体在一定荷载作用下,孔隙水压力消散(或称降低)及孔隙水被排出、有效应力增加的过程。是否还处于主固结阶段的简便判断是看土体中孔隙压力降低是否已停止。固结分析有多种方法,常用的有理论分析法与原位测试法。前者中常用的是太沙基(Terzaghi)固结理论及其改进方法、比奥(Biot)固结理论方法与非线性固结理论方法等;后者则利用原位监测中沉降稳定后的沉降量比上预测的最终沉降的比值得到。衡量地基土固结程度用固结度(地基在一定荷载作用下,历经的时间 t 的固结沉降量 S_{ct} 与其最终沉降量 S_c 的比值)来表示,地基处理要求的固结度由建设项目服务期内允许最终沉降量要求来控制;据此,实际工程多在80%~95%之间选取固结度。

需要注意的是,由于理论前提条件与实际情况之间往往存在较明显差异,故理论分析结果的利用还需同时借助监测数据或实际经验;此外,原位测试法中须用到的最终沉降量是一个实际难以确定的值,故该法结果也存在一定的不确定性。

1.5 工程中常用的固结理论是什么?其适用性如何?固结度如何计算?

1. 常用固结理论及适用性

固结理论包含弹性固结理论与非弹性固结理论。工程中常用的固结理论是线弹性固结理论,以1925年太沙基(Karl Terzaghi)提出一维固结理论为开创标志,以比奥(M. A. Biot)1941年建立的较为完备弹性固结理论为代表的;巴隆(R. A. Barron)1948年在太沙基固结理论基础上,建立了轴对称固结基本微分方程并导出其解析解,其在砂井地基设计中得到广泛应用。比奥固结理论较为完备,但求解较为困难,故其应用在计算机技术与数值分析技术发展普及后才得到推广;而即使在目前,太沙基固结理论由于其简便性等特点,应用依然十分广泛。

太沙基(Terzaghi)一维固结理论给出下述简化假设:

(1) 土层只有竖向压缩线性弹性变形,而无侧向膨胀,渗流也只有竖向,这样就简化成一维问题。

(2) 土体是饱和的,只有土骨架和水二相。

(3) 土体是均匀的,在荷载作用下土体的压缩仅仅是孔隙体积的减小,土粒本身以及水体的压缩量可以忽略不计,且假定压缩系数 α 为常量。

(4) 水的渗透流动符合达西定律,渗透系数 k 为常量。

(5) 外荷载为均布连续荷载,且一次施加于土层。

在此基础上,可导出单向固结微分方程式:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1.5-1)$$

式中

$$C_v = \frac{k}{m_v r_w} = \frac{k(1+e_1)}{\alpha r_m} \quad (1.5-2)$$

C_v 称为土的固结系数,常用单位为 cm^2/s ,它是反映孔压消散快慢的一个参数, C_v 值高,单位时间内孔压的改变量便大。由上式可见, C_v 与渗透系数 k 成正比而与压缩系数 α 成反比。土的渗透系数高,排水快,自然孔压消散得快;压缩系数高表示同一荷载下压缩的体积大,而这些被压缩的土体体积就等于排出的水量,这意味着需要排出的水量大,才能达到相同的孔压消散效果,因此当压缩系数较大时,固结系数将较小。

在连续性、均质性与各向同性等线弹性力学基本假定基础上,比奥理论的附加假设为:

(1) 土骨架为线弹性变形;

(2) 土体是饱和的,只有土骨架和水二相;

(3) 荷载作用下孔隙水的压缩量忽略不计(当考虑稳定渗流时,土粒本身压缩量也忽略不计);

(4) 水的渗透流动符合达西定律,渗透系数 k 为常量;

(5) 渗流速度很小,不考虑动水压力;

(6) 不考虑温度效应。

依据平衡方程、几何方程与线弹性本构方程（虎克定律），同时利用有效应力原理、达西定律及渗流区孔隙流体平衡方程、渗流连续方程，可得到以三个位移分量 w_x 、 w_y 、 w_z 与一个孔压力 u 共四个基本变量为表达的偏微分方程组作为控制方程，即比奥固结方程：

$$\left. \begin{aligned} G \nabla^2 w_x + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ G \nabla^2 w_y + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial u}{\partial y} &= 0 \\ G \nabla^2 w_z + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial u}{\partial z} &= -\rho g \end{aligned} \right\} \quad (1.5-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{\gamma_w} (K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) = 0$$

式中， $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯算子， G 与 ν 分别是材料的剪变模量与泊松比， K_x 、 K_y 与 K_z 分别为三个互交方向的渗透系数， ρg 为重力。上述四个偏微分方程对应包含四个未知变量 u 、 w_x 、 w_y 、 w_z 均是坐标 x 、 y 、 z 和时间 t 的函数，在一定的边界条件及初始条件下，可解出这四个基本变量，并由此得到其他未知量。

当采用横观各向同性的线弹性本构方程并考虑土体惯性力，参照上述方法也不难得到弹性固结方程。

由上述可见，比奥固结理论与太沙基固结理论的假定基本是一致的，即骨架线性弹性、变形微小、渗流符合达西定律等；但有一个很大区别，即太沙基理论实际包含了一个假定——在固结过程中法向总应力和 ($\Theta' = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$) 不随时间而变，而比奥固结理论假定则不需该假定。比奥方程推导的方式与太沙基方程有所不同，但若增加此假定，就会得出与太沙基方程完全一致的形式。由于这两种理论在假定上的差别，导致了建立的方程形式不同；太沙基方程中只含孔隙压力一个未知变量，与位移无关；比奥方程则是包含孔隙压力和位移的联立方程组。太沙基方程在推导过程中应用了有效应力原理、连续性方程式，对本构方程只用了与体积变形有关的表达式，在假定总应力和不变后，就可将应力或应变从方程中消去；进而，孔隙压力的消散仅仅决定于孔隙压力的初始条件和边界条件，与固结过程中位移的变化无关。而比奥固结理论没有作总应力和为常量的假定，在方程中不能将应力或应变消去，故需完整地引入本构方程，进而引入几何方程，最后把孔隙压力与位移联系起来。这就可以反映固结过程中位移与孔隙压力的相互影响，或者说反映了两者的耦合。

有工程经验的读者不难看出，比奥与太沙基固结理论共有的假设“土骨架为线弹性变形”和“水的渗透流动符合达西定律，渗透系数 k 为常量”在大多数情况下与实际条件有大的偏差，而两者共有的小变形假设在分析高压压缩性软土固结时也与实际情况有较大的偏差，此外，太沙基一维变形假设在多数情况下的误差不可忽略；其固结过程中法向总应力和不随时间变化的假定也与多数情况不符。上述这些问题导致了单纯理论分析的可靠性及准确性受到质疑，因而对于重要或复杂工程的固结问题，还有赖于借助经验及其他手段进行综合判断。

2. 工程常用的固结度计算

(1) 太沙基固结方程的解

按式 (1.5-1) 在一定的初始条件和边界条件下，可以解得任一深度 z 在任一时刻 t 时的孔隙水压力 u 的表达式。对于饱和土层，假定附加应力随深度 z 而变化，其初始条件和边