

软土地基加固 与质量监控

李彰明 著

中国建筑工业出版社

软土地基加固与质量监控

李彰明 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

软土地基加固与质量监控/李彰明著. —北京: 中国
建筑工业出版社, 2011. 9
ISBN 978-7-112-13498-4

I. ①软… II. ①李… III. ①软土地基-地基处理-
质量管理 IV. ①TU471.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 170836 号

本书共分三篇共九章, 分别是软土地基加固理论与实践发展; 软土工程特性及描述; 软土地基加固原理; 改善土体自身性质的软土地基加固; 设置人工增强体与其他软土地基加固; 工程实例——软基常见处理方案及比选; 大面积高含水量淤泥软基静动力排水固结法处理; 软基的直排式真空预压法处理; 软弱填土层中碎石墩加固。

本书对软土地基加固原理进行了详细的阐述, 全面介绍了软土地基加固的各类方法。针对各种软土地基还提供了大量内容翔实的由作者直接负责或指导的工程实例, 描述了质量控制措施及过程并对其效果加以分析, 以供借鉴参考甚至直接应用。

本书可供从事岩土工程及地基加固的技术、管理人员参考使用, 也可供高等院校岩土工程专业的师生参考使用。

* * *

责任编辑: 郭 栋 万 李

责任设计: 董建平

责任校对: 党 蕾 赵 颖

软土地基加固与质量监控

李彰明 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市铁成印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24 $\frac{3}{4}$ 字数: 615 千字

2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月第一次印刷

定价: 55.00 元

ISBN 978-7-112-13498-4

(21284)

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)

前 言

软土地基加固的重要性被愈来愈多的业内外人士所认识,而许多复杂地基条件下土建等工程建造质量问题与建(构)筑物倒塌事故的实例更是表明科学地进行地基加固又是何等重要。

地基加固最重要问题在于针对实际条件的方案比较选择与实施过程的质量控制;而此两方面的工作易受到来自各方面有意或无意的困扰。究其原因,除了社会生活中难免的各方利益博弈因素外,该领域中科学理论及技术方法依然存在许多问题,概括来讲可以分为四个方面:一是物理力学方面——主要表现为对土体复杂性质认识还远远不够;二是数学及分析工具方面——描述及分析方法依然存在难以克服的问题;三是土体及外界或初始条件的非确定性;四是目前的岩土工程技术几乎均尚不完善。对应上述问题,在理论上讲,存在着已知、可知与暂时未知的理论及方法;而工程技术也对应存在已有、能有与暂时未能有的实际技术。鉴于此,本书试图从以下三部分展开:软土地基加固原理,常用地基加固方法及质量控制与评价,典型的工程实例;而最终落脚于地基加固方案的比选与质量控制过程这两方面重要内容,并给出作者本人全面负责或指导的工程实例。

本书共分为九章。从章节安排顺序具体来讲,鉴于软土地基处理技术的基础学科土力学等在发展方面的困难,首先介绍与讨论土力学等相关基础学科的总体发展状况与基本原理,以知道我们在设计计算与监测、检测及效果评价方面应注意哪些问题;其次,介绍与阐述常用软基处理方法及其质量控制与评价要点,为地基加固方案比选提供基础;第三,详细介绍作者本人全面负责或提供咨询的典型软基工程实例,描述质量控制措施及过程并加以效果分析,以作借鉴参考甚至直接应用。

上述工作均是作者本人长期工程实践与理论方法研究的切身体会、经验与总结。这些来之于本人的理解、切身体验、对比研究及成功经验付诸于书面文字,可以说是针对走出该领域理论方法困境的一种努力,也是在技术方面的一种共享,希望有助于每一位看到本书的建(构)筑物业主、设计、施工、监测、监理、检测、有关管理机构人员、专家、学者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。

本书撰写得到作者的诸多研究生郭亮军、万灵、钱晓敏、黄文强、魏欣欣、胡业游、何钦、张月、华洪勋、邱成君、邱骏伟、宋英学、万小明、刘锦伟、李德地、刘俊雄、曾文秀等同学的协助;得到冯强教授级高工提供部分相关资料的帮助;得到国家自然科学基金项目(项目批准号:51178122)资助;中国建筑工业出版社与该社编辑郭栋、万李的热情坚定支持与耐心给本人写作提供了宽松的条件与持久的动力;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的前期工作表示敬意与谢意!

本书难免有欠妥与错误之处,敬请读者指正。期望软土地基加固处理的理论与方法及工程实践不断有着更大实质性的进展。

联系 Email: ukzmli@163.com。

2011年10月30日于广州

目 录

第一篇 软土地基加固原理

第1章 软土地基加固理论与实践发展	2
1.1 软土地基加固理论发展	2
1.1.1 软土地基的基本概念	2
1.1.2 软土地基加固理论的基本问题	2
1.1.3 软土地基加固理论及其发展	3
1.2 软土地基处理工程实践发展	5
1.2.1 地基处理工程实践发展	5
1.2.2 各类地基处理技术发展简况	7
1.2.3 软基处理发展中存在的问题	12
1.2.4 地基处理发展展望及意见	13
本章参考文献	14
第2章 软土工程特性及描述	15
2.1 物理特性及讨论	16
2.1.1 研究成分和性质相互关系的方法	17
2.1.2 黏土相的重要影响	17
2.1.3 黏土矿物的物理特性	19
2.1.3.1 粒径和颗粒形状	19
2.1.3.2 体积变化特点	19
2.1.3.3 水力传导性(渗透性)	19
2.1.3.4 剪切强度	19
2.1.3.5 压缩性	21
2.1.3.6 有机物作用	22
2.1.3.7 稠度和灵敏性	22
2.1.3.8 阿太堡(Atterberg)界限	23
2.1.3.9 活动性	25
2.1.3.10 收缩和膨胀	25
2.1.4 土的组构及其测定	26
2.1.4.1 组构和组构单元的定义	27
2.1.4.2 单个颗粒组构	29
2.1.4.3 多颗粒组构	30
2.1.4.4 细粒土组构的确定	31
2.2 土的强度和变形性状	31
2.2.1 一般特性	32
2.2.2 应力-应变性状	33

2.2.3 应力-应变-时间性状	34
2.2.4 土变形的速率过程理论	34
2.2.4.1 活化理论	35
2.2.4.2 结合键理论	37
2.2.4.3 活化能和结合键数值的重要性	38
2.2.4.4 结合、有效应力和强度假说	40
2.2.4.5 表现为速率过程的剪切阻力	40
2.2.4.6 应变速率效应	41
2.2.5 关于抗剪强度的基本性质的不同观点	41
2.3 软土的流变特性	42
2.3.1 软土的流变性质	42
2.3.2 软土的长期强度	43
2.4 土参数的相互关系	46
2.4.1 密度	46
2.4.1.1 天然密度	46
2.4.1.2 通过相关性确定重度和含水量	49
2.4.1.3 压实密度	50
2.4.2 渗透性	52
2.4.2.1 参考值	53
2.4.2.2 渗透性与级配	54
2.4.3 固结与沉降	55
2.4.3.1 黏土的可压缩性	55
2.4.3.2 黏土固结度	60
2.4.3.3 次压缩	61
2.4.3.4 通过相关性确定变形参数	62
2.4.3.5 砂石的沉降计算	65
2.4.4 抗剪强度	67
2.4.4.1 总应力和有效应力分析的选择	68
2.4.4.2 黏土的不排水抗剪强度	69
2.4.4.3 黏土的有效排水抗剪强度	74
2.4.4.4 粒状土的剪切强度	74
2.4.4.5 土体的侧向压力	75
2.5 珠三角地区软土特性	77
2.5.1 广州地区软土特性	77
2.5.2 深圳地区软土特性	78
本章参考文献	83
第3章 软土地基加固原理	90
3.1 改善土体自身性质	90
3.1.1 饱和土体固结变形机理	90
3.1.2 一维固结微分方程及其解	91
3.1.2.1 微分方程的建立	91
3.1.2.2 固结方程的解	93
3.1.3 固结度及固结系数	93

3.1.3.1	固结度	93
3.1.3.2	固结系数的确定	95
3.1.4	土体固结问题的三维控制方程建立	100
3.1.4.1	假定	100
3.1.4.2	平衡方程	100
3.1.4.3	几何方程	101
3.1.4.4	本构方程 (考虑横观各向同性体)	101
3.1.4.5	有效应力原理	102
3.1.4.6	渗流区空隙流体平衡方程	102
3.1.4.7	渗流连续方程 (渗流速度与微元体位移之间的关系)	103
3.1.4.8	求解的控制方程	103
3.1.4.9	进一步讨论	104
3.1.4.10	总应力分析法及其控制方程	106
3.1.4.11	有效应力分析法、控制方程及与总应力法关系	106
3.2	设置人工增强体	107
3.2.1	人工增强体加固与作用机理	108
3.2.1.1	搅拌桩加固机理	108
3.2.1.2	散体桩振冲法加固机理	109
3.2.1.3	砂石桩的加固原理	110
3.2.1.4	水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩) 加固机理	114
3.2.1.5	加筋地基加固机理	116
3.2.1.6	灌浆法加固机理	116
3.2.1.7	人工增强体复合地基作用原理	117
3.2.2	复合地基承载力与沉降计算	118
3.2.2.1	搅拌桩单桩承载力特征值	118
3.2.2.2	搅拌桩复合地基承载力	118
3.2.2.3	搅拌桩复合地基沉降计算	118
3.3	改变边界条件及荷载分布	120
3.3.1	改变边界条件——侧向约束法	120
3.3.2	改变荷载分布	120
3.4	综合方法	120
3.5	方案选择依据及技术经济比较	120
	本章参考文献	122

第二篇 软土地基加固法与质量控制

第4章	改善土体自身性质的软土地基加固	126
4.1	工法与关键技术	126
4.1.1	静力排水固结法	126
4.1.1.1	概述	126
4.1.1.2	设计及计算	127
4.1.1.3	地基抗剪强度增长的预计	132
4.1.1.4	稳定性分析	133
4.1.1.5	沉降计算	135

4.1.1.6 其他竖向排水体设计中需要注意的问题	136
4.1.1.7 施工工艺	142
4.1.2 堆载预压法及关键技术	145
4.1.2.1 预压处理的概念	145
4.1.2.2 地基条件	146
4.1.2.3 堆载预压的设计和计算	146
4.1.2.4 堆载预压设计中的若干问题	147
4.1.3 真空预压法及关键技术	152
4.1.3.1 基本概念	152
4.1.3.2 真空预压加固软土地基最终效果影响因素	153
4.1.3.3 真空预压法的设计	157
4.1.3.4 真空预压法的施工	158
4.1.3.5 质量检验	158
4.1.3.6 竣工验收检验应符合下列规定	159
4.1.4 真空-堆载联合预压法及关键技术	159
4.1.4.1 真空-堆载联合预压法原理	159
4.1.4.2 真空-堆载联合预压效果的叠加问题	160
4.1.4.3 真空-堆载联合预压设计计算方法特点	161
4.1.5 静动力排水固结法	161
4.1.5.1 概述	161
4.1.5.2 静动力排水固结法的基本思想	162
4.1.5.3 静动力排水固结法设计	164
4.1.5.4 静动力排水固结法试夯	176
4.1.5.5 静动力排水固结法施工要点	176
4.1.5.6 静动力排水固结法检验	182
4.2 相关加固方法比较及效果评价	182
4.2.1 真空预压与堆载预压的比较	182
4.2.2 静动力排水固结法与强夯法及静力排水固结法对比	183
4.2.2.1 与强夯法对比	184
4.2.2.2 与静力排水固结法及堆载预压法的对比	185
4.3 需要注意与改进的问题	186
4.3.1 关于静力排水固结法	186
4.3.1.1 关于真空预压法或直排式真空预压法	186
4.3.1.2 关于真空预压联合堆载预压法（即真空预压法+堆载法）	187
4.3.2 关于静动力排水固结法	187
本章参考文献	188
第5章 设置人工增强体与其他软土地基加固	190
5.1 设置人工增强体软基加固工法与关键技术	190
5.1.1 搅拌桩法	190
5.1.1.1 水泥加固土工程性能	190
5.1.1.2 设计计算	193
5.1.1.3 施工工艺	196
5.1.1.4 质量检验	198

5.1.2 散体桩(碎石桩、砂石桩)振冲法	198
5.1.2.1 碎石桩的分类	199
5.1.2.2 振动水冲法(振冲法)	203
5.1.3 散体桩中砂石桩法	218
5.1.3.1 设计计算	218
5.1.3.2 施工工艺	223
5.1.3.3 效果检验	227
5.1.4 水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)法	229
5.1.4.1 CFG桩的适用性	230
5.1.4.2 CFG桩设计计算	230
5.1.4.3 CFG桩的施工	242
5.1.4.4 CFG桩效果检验	248
5.1.5 加筋地基	249
5.1.5.1 土工合成材料	249
5.1.5.2 加筋地基设计理论	250
5.1.5.3 地基加筋施工要点	254
5.1.5.4 施工质量控制及监测	255
5.1.6 灌浆法	257
5.1.6.1 化学浆材	257
5.1.6.2 灌浆工艺	259
5.1.6.3 灌浆设计	260
5.1.6.4 灌浆法施工工艺	264
5.1.6.5 灌浆检验	266
5.2 设置人工增强体软基加固方法比较及效果评价	266
5.2.1 适用条件及范围	266
5.2.2 处理效果	267
5.3 设置人工增强体软基加固中需注意与改进的问题	268
5.4 改变边界条件及荷载分布的软土地基加固	268
5.4.1 工法与关键技术	269
5.4.2 相关加固方法比较及效果评价	269
5.4.3 需注意与改进的问题	269
5.5 软土地基加固综合方法	269
本章参考文献	270

第三篇 典型的工程实例

第6章 工程实例——软基常见处理方案及比选	272
6.1 工程基本情况及条件	272
6.1.1 工程概况	272
6.1.2 工程地质与水文地质	272
6.1.2.1 工程地质条件	272
6.1.2.2 水文地质	274
6.1.3 主要土(岩)层物理力学指标	275

6.2 方案考虑与选择	276
6.2.1 考虑的主要因素	276
6.2.2 软基处理荷载标准的分析	277
6.2.3 主要方案的固结与沉降计算分析	279
6.2.3.1 沉降计算中荷载的确定	279
6.2.3.2 沉降计算	279
6.2.3.3 固结计算	280
6.2.4 七种处理方案及比选	281
6.2.4.1 大换填方案	282
6.2.4.2 静力排水固结——插板排水堆载预压法	282
6.2.4.3 真空-堆载联合预压法	283
6.2.4.4 拦淤堤封闭式换填法——淤泥作堆（超）载体的超载预压法	284
6.2.4.5 抛石爆破挤淤法/爆破挤淤置换法	286
6.2.4.6 搅拌桩法	288
6.2.4.7 强夯块石墩法	288
6.2.4.8 方案比选	289
6.3 进一步的问题	290
第7章 大面积高含水量淤泥软基静动力排水固结法处理	291
7.1 工程基本情况及条件	291
7.1.1 工程概况	291
7.1.2 工程地质与水文地质	291
7.1.3 其他条件	291
7.2 方案考虑与选择	292
7.2.1 处理方案	292
7.2.2 各工法及工艺流程	294
7.2.3 工艺参数要求	294
7.3 施工图设计	299
7.3.1 主要的施工图	299
7.3.2 沉降预测、固结度的计算	320
7.4 施工与质量控制	320
7.4.1 质量控制方案	320
7.4.2 沉降、孔压与振动监测分析及其过程控制	321
7.4.3 监测分析与效果预测	321
7.5 质量检测及效果评价	328
7.5.1 质量检测方法手段及效果总体评价	328
7.5.2 分区评价	328
7.6 进一步的问题——加固机理及加固深度	331
7.6.1 工程概况及条件要求	331
7.6.2 软基处理工艺流程及工序时间	332
7.6.3 典型孔压测试结果及分析	335
本章参考文献	336

第8章 软基的直排式真空预压法处理	338
8.1 工程基本情况及条件	338
8.1.1 工程概况	338
8.1.2 工程地质条件及软土主要物理力学指标	338
8.2 方案考虑与选择	339
8.2.1 处理方案	339
8.2.2 工法及工艺流程	340
8.2.3 工艺参数要求	341
8.3 施工图设计	343
8.3.1 主要的施工图	343
8.3.2 沉降预测、固结度的计算	346
8.3.2.1 沉降计算	346
8.3.2.2 固结度计算	347
8.4 施工与质量控制	348
8.4.1 质量控制方案	348
8.4.2 沉降、孔压等监测分析及其过程	348
8.4.2.1 沉降监测分析及其过程	348
8.4.2.2 孔隙水压力、真空传感器真空度监测结果	348
8.4.3 监测分析与效果预测	350
8.5 质量监测与效果评价	352
8.6 进一步问题——直排式真空预压法与常规真空预压法区别	355
本章参考文献	358
第9章 软弱填土层中碎石墩加固	359
9.1 工程基本情况及条件	359
9.1.1 工程概况	359
9.1.2 工程地质与水文地质	359
9.1.3 其他条件——工前静力触探试验结果	361
9.2 方案考虑与选择	367
9.2.1 处理方案	367
9.2.2 工艺流程	368
9.2.3 参数设计及施工要求	369
9.3 施工图设计	373
9.3.1 主要的施工图	373
9.3.2 设计计算	379
9.3.2.1 计算方法及公式	379
9.3.2.2 典型计算示例——碎石墩复合地基设计计算	380
9.4 质量控制与效果检验	383
9.4.1 质量过程控制	383
9.4.2 效果检验	384
本章参考文献	384

第一篇

软土地基加固原理

第 1 章 软土地基加固理论与实践发展

1.1 软土地基加固理论发展

1.1.1 软土地基的基本概念

地基加固又称地基处理,是指承托建(构)筑物基础的岩土体(地基)很软弱,通过采取人工行为而提高其承载力、改善其变形或渗透性质的一种活动。我国的现行规范《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)中明确规定:“软弱地基系指主要由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土或其他高压缩性土层构成的地基”。而软土是淤泥和淤泥质土的总称,是在静水或非常缓慢的流水环境中沉积,经生物化学作用形成的物质。软土的天然含水量 w 大于液限 w_L , 天然孔隙比 e 大于或等于 1.0, 压缩系数 a_{1-2} 大于 0.5MPa^{-1} , 不排水抗剪强度 C 小于 20kPa 。当软土由生物化学作用形成,并含有机质,其天然孔隙比 $e > 1.5$ 时为淤泥;天然孔隙比 $1.0 \leq e \leq 1.5$ 时为淤泥质土。需要指出的是,在工程上,所谓的软基通常指此处的“软弱地基”,而软土地基是其中承载与变形性能差的淤泥和淤泥质土地基。软土地基加固就是提高淤泥和淤泥质土承载力、改善其变形或渗透性质的人工行为。目前我国工程界,常常将软弱地基与软土地基均简称为软基;鉴于加固机理、工法造价、处理难度都有所区别,故作者认为,随着科学技术的进步,应该将软土地基与软弱地基中的其他地基加以必要的区分。

1.1.2 软土地基加固理论的基本问题

软土地基加固理论属于土体工程理论范畴,而对于后者,基于以土力学(及土动力学)等为代表的基础理论及应用基础理论。如前言所叙,土力学与土体工程学科的理论及方法依然存在许多问题,就作者体会而言,概括起来大致可分为三个方面:

- (1) 物理力学方面——主要表现为对土体性质认识还远远不够;
- (2) 数学及分析工具方面——描述及分析方法依然存在难以克服的问题;
- (3) 周围及外界条件的非确定性。

上述的问题(1),主要又包含两类问题:基本问题与特性问题。

基本问题主要是一般变形体力学中目前仍未解决的关于独立变量个数及非独立变量之间关系问题,诸如:何种条件下可能影响结果的量中起控制性作用的是哪些量?哪些量是独立的?独立的量在数量上是否确定?共有多少?非独立量之间存在何种关系?这些量是如何相互影响(本构)甚至导致本身发生质的变化?在何种自然与外界条件下土体有何种物理(与化学)力学响应及演变?其中关于独立变量个数的确定目前还做不到。特性问题则是土力学及土体工程学中的问题,即不同外界环境条件下土体本身性质(以及参数)及

其变化如何?这一问题的回答通常是非确定的。与之相伴的是其本构关系及强度理论描述的非客观性。

上述的问题(2),主要也包含两类问题:工具的不适合性与数学本身的困难。

求解数学工具的不适合性,其表现如:①非确定性问题用确定性数学方法处理——由于土的三相性与时空变异性特点,土体工程问题呈现明显的非确定性,而目前却一般用确定性的求解方法来分析处理,自然存在由此带来的许多问题;②非线性问题用线性方法及工具描述——土体的力学响应一般是物理非线性与几何非线性的,线性只是其特例,用线性方程描述非线性问题本身就带来固有差别;③非连续性问题用连续性方法处理——连续性对于土体来讲完全是相对的,在许多情况下关键力学量不存在足够高的连续性,甚至连应力与应变量的采用都存在概念上意义的丧失,求解结果的非客观性是可想而知的;④非适定性问题用适定性理论处理——就变形体力学而言,除了弹性力学等少数学科分支外,对于大多数复杂条件下土体工程中的力学问题,目前尚未能从理论上证明是适定性的,而在许多情况下实际是非适定性的。

数学的困难,其表现又如:①非适定性问题描述的困难——由于解的存在性、唯一性与稳定性都可能存在问题,如何求解分析是基本的困难;②非连续性问题描述的困难——诸如连应力、应变等基本概念均基于连续性条件,非连续性问题的描述存在很大的局限性,更难以解决复杂的实际问题;③非线性问题及联立微分方程组解析求解的困难——即使变形体力学中最简单的弹性力学空间问题,15个基本未知量用15个基本方程在某一定解条件下求解,是一个适定性问题,但往往还采用逆解法或半逆解法或数值近似解法(如有限元法等);而对于非弹性力学问题,解析求解的难度是可以想像的,而其适定性没有保证,期望数值近似解也常常令人困惑。

上述的问题(3),主要是外界条件(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;④初始条件的非确定性。

上述这些困难给我们带来极大的挑战,也给试图将理论方法应用于实际工程问题并希望有较好准确度的同仁带来一定的打击。但有意思的是,这些并不妨碍土体工程建设的大力推进,其原因一方面是社会发展的驱动,另一方面则来自本领域土力学等学科在相当程度上的支撑,尽管在很多情况下是粗糙的。

1.1.3 软土地基加固理论及其发展

土力学的发展大致可分为三个阶段,一是以库伦(Charles Augustin de Coulomb, 1736—1806)贡献为标志的第一阶段,二是以太沙基(Karl von Terzaghi, 1803—1963)贡献为标志的第二阶段,三是太沙基后的现代发展阶段。让人深有感触的是,诸如太沙基这样的开拓者,其所有的创造几乎都与现场第一线切身体验与长期独立思考分析分不开。国内外学术界一致认为库伦为土力学先驱,国际专业网站上称其为 The Grandfather of Soil Mechanics;他在1773年发表的论文《极大极小准则在若干静力学问题中的应用》,为土体破坏理论奠定了基础。太沙基则为土力学的另一里程碑式的人物,国际专业网站上称其为 The Father of Soil Mechanics;他发表的论文《黏土中动水应力的消散计算》,提出了土体一维固结理论,接着又在另一文献中提出了著名的有效应力原理,从而建立起一

门独立的学科——土力学。一般认为,在1925年以前,主要是考虑以Mohr-Coulomb原理为依据的最大剪应力理论;从1925年到1960年是以太沙基有效应力原理为象征的土力学阶段,注意到了有效应力、超静水压力以及不扰动土样与三轴试验等;1960年以后的土力学注意到了应变的重要性,应力与应变历史及加卸载循环的影响,应变发展过程对强度的影响,不同阶别连续性、非线性、变形梯度、变形特征尺度与变形局部化对于土体介质力学响应的影响;近些年还特别注意到土力学学科及其基础学科本身固有的局限性等。有关土力学与土(岩)体工程学科的发展状况可参考本书著者2006年出版的《软土地基加固的理论、设计与施工》的第一章。

地基加固理论的发展与土力学及地基加固技术的发展紧密相关,理论的主要构成及发展大致可以划分为以下几方面:①考虑土体主固结变形的固结理论;②考虑土体次固结的流变理论;③各种地基加固工法技术相对应的力与变形理论以及物理化学作用理论,诸如:真空与堆载联合作用下软土固结与力传递理论,冲击荷载下软土变形及固结与力传递理论,复合地基变形与力传递理论,搅拌桩固结机理,电渗固结机理,加筋土作用机理等等;④考虑瞬时变形的有关理论也可认为是地基加固理论的基本组成部分。

固结及流变理论包括:均匀地层的线弹性、黏弹性、弹塑性、黏弹塑性、黏弹黏塑性等变形(固结)理论,成层地基的各种固结理论,考虑软土结构性效应的固结理论,基于作者提出的有限特征比本构关系的固结理论等;其中以考虑小变形的线弹性固结理论应用的最为广泛。

线弹性固结理论是以1925年太沙基提出一维固结理论为开创标志,以比奥(M. A. Biot)1941年建立固结理论为系统理论较为完备而为代表的。而巴隆(R. A. Barron)于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。

太沙基固结理论与比奥固结理论的假定是基本一致的,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。比奥方程推导的方式与太沙基方程稍有不同,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1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。

为了科学合理应用线弹性固结理论,在此将比奥固结理论的假定与主要结果作一简单介绍。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。

有着工程经验的读者不难看出,上述假设(1)与(4)在大多数情况下与实际条件有大的偏差。

依据平衡方程、几何方程与线弹性本构方程(胡克定律),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 与一个孔压量 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:

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

式中 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ——拉普拉斯算子;

G ——材料的剪变模量;

ν ——材料的泊松比;

K_x, K_y, K_z ——分别为三个互交方向的渗透系数;

ρg ——重力。

上述四个偏微分方程对应四个未知变量 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时,参照上述方法亦不难得到更一般的弹性固结方程。

1.2 软土地基处理工程实践发展

1.2.1 地基处理工程实践发展

在国际上,荷兰等欧洲国家的地基处理技术发展较早。然而,近二十几年来,我国基本建设规模不断扩大,其建设规模及速度前所未有,因而在诸如建筑、码头、水利、国防、市政、道路和铁道等土木工程建设中,愈来愈多地遇到大量复杂的不良地基及地基加固问题。地基加固是否恰当关系到整个工程的质量、投资和进度。合理地选择地基加固方法和基础形式是降低工程造价的重要途径之一;地基加固日益得到人们重视。

在社会需求不断的大力推动下,自第五届全国土力学及基础工程学术讨论会(厦门,

1987年)以来,国内在各种地基处理技术的普及和提高及综合利用等各方面都得到了较大的发展,积累了丰富的经验。中国建筑科学研究院会同有关高校和科研单位,编写组织了两版《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—1991)(JGJ 79—2002)。上海、天津、深圳、浙江、福建与广东等地已经编制了地区性地基和地基处理规范,根据各自的情况,因地制宜,把一些地基处理方法编入规范;各种地基加固综合方法也在实际工程中大量应用。

近二十几年来,地基处理的发展主要表现在以下几个方面:

(1)对各种地基处理方法的适用性和优缺点有了进一步的认识,在根据工程实际选用合理的地基处理方法上减少了盲目性。能够注意从实际出发,因地制宜,选用技术先进、确保质量、经济合理的地基处理方案。对有争议的问题,能够采取科学的态度,注意调查研究,开展试验研究,在确定地基方案时持慎重态度。能够注意综合应用多种地基处理方法,使选用的地基处理方案更加合理。

(2)地基处理能力的提高。一方面,已有的地基处理技术本身的发展,如施工机具、工艺的改进,使地基处理能力提高;高含水量软黏土地基处理方法诸如静动力排水固结法的发展就是一个例证。另一方面,近年来,各地在实践中因地制宜发展了一些新的地基处理方法或综合运用一些处理技术优点而派生出的方法,取得了较好的社会效益。

(3)复合地基理论的发展。随着地基处理技术的发展和各种地基处理方法的推广使用,复合地基概念在土木工程中得到愈来愈多的应用。工程实践要求加强对复合地基基础理论的研究。然而对复合地基承载力和变形计算理论的研究还很不够,复合地基理论正处于发展之中,还不够成熟。

复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强,或被置换,或在天然地基中设置加筋材料,加固区是由基体(天然地基土体)和增强体两部分组成的人工地基,加固区整体是非均质和各向异性的。根据地基中增强体的方向又可分为纵向增强体和横向增强体复合地基。纵向增强体复合地基根据纵向增强体的性质,可分为散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基。复合地基的分类如图1-1所示。

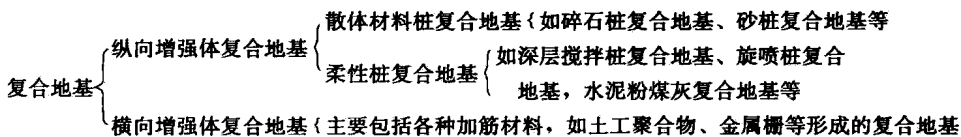


图 1-1 复合地基的分类

横向增强体复合地基、散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基各自荷载传递机理是不同的,应该分别加以研究。国内也有人狭义地只将以桩柱形式置换形成的由填料与地基土相互作用并共同承担荷载的地基定义为复合地基。

复合地基有两个基本特点:①它是由基体和增强体组成的,是非均质和各向异性的;②在荷载作用下,基体和增强体共同承担荷载的作用。后一特征使复合地基区别于桩基础。一般来说,对桩基础,荷载是先传给桩,然后通过桩侧摩擦阻力和桩底端承力把荷载传递给地基土体的。若钢筋混凝土摩擦桩桩径较小,桩距较大,形成所谓疏桩基础,桩土共同承担荷载,也可视为复合地基,应用复合地基理论来计算。

人工地基中有均质地基、双层地基和复合地基等。事实上,对人工地基进行精确分类是很困难的。大家知道,天然地基也不是均质的、各向同性的半无限体;天然地基往往是