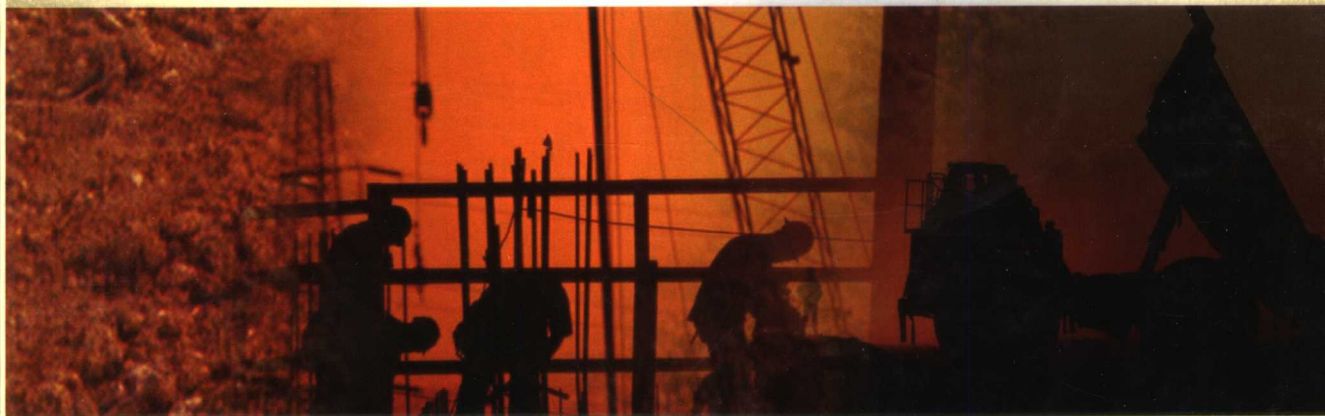


软土地基加固的 理论、设计与施工

THEORY, DESIGN AND CONSTRUCT OF SOFT SOIL IMPROVEMENT



李彰明 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TU471.8

4

软土地基加固的 理论、设计与施工

THEORY, DESIGN AND CONSTRUCT OF SOFT SOIL IMPROVEMENT

李彰明 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

基于作者在软土地基加固领域长期研究与大量工程及监测实践的心得体会和成果积累,介绍和讨论了软土工程特性与地基加固基本理论,重点针对八大类典型与最新发展的软土地基加固方法,系统介绍、讨论与总结了其原理、分析、设计、施工、监测检测与验收方法手段;各类方法均给出了设计或工程实例。作者原创的有限特征比法分析理论、土变形细观机制分析、静动力(复合力)排水固结工法、夯击减振技术,以及工法选择原理及方法等作了详细介绍及分析讨论。

图书在版编目(CIP)数据

软土地基加固的理论、设计与施工/李彰明编著.
北京:中国电力出版社,2006
ISBN 7-5083-4417-0

I. 软... II. 李... III. 软土地基—地基加固
IV. TU471.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第055211号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

责任编辑:梁瑶 责任印制:陈焊彬 责任校对:刘振英

北京丰源印刷厂印刷·各地新华书店经售

2006年7月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm · 1/16 · 36.5印张·888千字

定价:68.00元

版权专有 翻印必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

本社购书热线电话(010-88386685)

前言

软土地基处理加固问题越来越突出地摆在我们面前，一般成为工程建设中的技术关键，并在很大程度上控制着工程投资总量。科学、技术经济合理的设计与施工因此显得尤其重要。众所周知，软土由于其多相性、高压缩性以及时空变异性而表现出十分复杂的性质；为进行科学及技术经济合理的软土地基处理加固设计、施工、监测与检测，客观地描述、分析及预测软土体在工程及使用条件下的响应是基本而必不可少的。遗憾的是，目前软基处理的理论与工程实际之间仍有相当大的距离。鉴于此，本书在讲述软土地基处理常用或最近发展应用迅速的方法之前，对软土性质、描述及分析理论作了介绍，借以帮助有需要的读者进一步利用甚至发展更为合适的理论方法。此外，在长期的工程实践中，作者切身感受到，要做好软基处理，须在理论原理、试验、分析、设计、施工与检测等各方面全面把握好，要形成所谓的“一条龙”的系统知识及技术。

本书正是基于上述思想的一次努力，包含了从理论到设计、施工、检测等各方面内容，详见本书目录。本书的相当一部分内容，诸如有限特征比理论、静动力排水固结法等等，是作者本人原创性工作总结或心得；对各类软基处理方法的评价及重点强调也是基于作者本人长期实际工程经验，希望有助于各位读者。

本书撰写得到作者的研究生赖碧涛、林军华、关炳朋与陈燕等同学在资料收集、整理与文字输入等方面的大力协助；本书在理论及工程试验方面的工作得到了广东省自然科学基金（编号依次为：980413、20010055 与 04009477）长期支持、广州市交通项目办与广州南沙泰山石化发展有限公司等有关单位的大力支持；本书的撰写还基于文后大量的参考文献，其作者的贡献是显而易见的；中国电力出版社建筑图书事业部的成海沛先生给予了本作者特别的合作邀请与非常热情而实际的支持；一并致以衷心感谢！

本书难免有欠妥甚至错误之处，敬请读者指正。希望在未来不太远的将来软基处理的理论与工程实践有着更新、更大的进展。作者 Email: ukzmli@163.com。

李彰明
于广州

目 录

前言

1 第1章 软土地基加固理论发展与工程实践概况

1.1 岩土工程理论及应用发展状况	1
1.2 地基处理技术的发展	6
1.2.1 概述	6
1.2.2 各类地基处理技术发展简况	8
1.3 地基处理发展中存在的问题	12
1.4 对今后软基处理发展的几点意见	13
参考文献	14

16 第2章 软土工程原理与设计准则

2.1 概述	16
2.1.1 软土工程基本原理	16
2.1.2 软土工程设计的特点	17
2.1.3 基本技术要求和设计原则	17
2.1.4 设计基础资料	18
2.2 极限状态与可靠度	19
2.2.1 基本概念	19
2.2.2 极限状态准则	21
2.2.3 作用和岩土性能	22
2.2.4 可靠度	22
2.3 岩土参数的分析与选定	25
2.3.1 岩土参数的可靠性和适用性	25
2.3.2 岩土的参数统计分析	25
2.3.3 岩土参数的特征值和设计值	27
2.4 实体试验和反分析	28
2.4.1 实体试验	28
2.4.2 反分析的基本规则	29
2.4.3 反分析的应用	30

2.5 技术文件	30
2.5.1 岩土工程勘察报告	30
2.5.2 岩土的工程设计文件	31
2.5.3 专门性岩土工程技术文件	33
参考文献	33

35 第3章 软土工程性质及土参数相互关系

3.1 物理特性及多相特性	37
3.1.1 研究成分和性质相互关系的方法	38
3.1.2 黏土相的重要影响	38
3.1.3 黏土矿物的物理特性	39
3.1.4 土的组构及其测定	46
3.2 土的强度和变形性状	51
3.2.1 一般特性	52
3.2.2 应力-应变性状	53
3.2.3 应力-应变-时间性状	54
3.2.4 土变形的速率过程理论	54
3.2.5 关于抗剪强度基本性质的不同观点	60
3.2.6 软土的流变特性	61
3.3 土参数的相互关系	64
3.3.1 密度	65
3.3.2 渗透性	71
3.3.3 固结与沉降	73
3.3.4 抗剪强度	85
3.4 珠三角地区软土特性	94
3.4.1 广州地区软土特性	95
3.4.2 深圳地区软土特性	96
3.5 砂土扰动效应的细观机制分析	99
3.5.1 理想的单元体系统	99
3.5.2 应力比-体变关系	100
3.5.3 小结	101
参考文献	102

110 第4章 软基工程一般理论与土体本构关系

4.1 弹性力学基本理论	110
4.1.1 弹性力学基本假设和适用性	110

4.1.2	弹性力学中连续体的一般力学方程	112
4.2	塑性本构理论	114
4.2.1	宏观方面	115
4.2.2	广义塑性理论	116
4.2.3	经典塑性理论体系	119
4.3	临界状态与典型的土体塑性模型	120
4.3.1	引言	120
4.3.2	正常固结黏土的临界状态模型	121
4.3.3	关于砂的描述	128
4.3.4	剑桥模型特点及评价	131
4.3.5	拉德 (P. V. Lade) -邓肯 (J. M. Duncan) 模型	132
4.4	高级塑性模型 (描述超固结与循环荷载行为的模型)	132
4.4.1	引言	132
4.4.2	密实模型	133
4.4.3	运动强化模型	134
4.4.4	边界面模型和一般塑性理论	134
4.4.5	次塑性和增量非线性模型	135
4.4.6	黏性土的广义塑性模型	136
4.4.7	砂的广义塑性模型	141
4.5	其他几种代表性的本构关系理论	152
4.5.1	土的非线性弹性模型理论	152
4.5.2	考虑土微、细观结构的模型	153
4.5.3	变形局部化理论与渐进变形	154
4.5.4	基于公理性原理的理论	157
4.6	有限特征比理论 (FCRT)	157
4.6.1	引论	157
4.6.2	基本假定	158
4.6.3	基本理论体系	159
4.6.4	土体响应的有限特征比分析模型	161
4.6.5	有限特征比模型的数值方法	164
4.6.6	砂土试验及其对比研究	165
4.6.7	讨论	169
	参考文献	171

177 第5章 软土地基加固机理与固结

5.1	静力荷载下软土的渗透与固结	177
-----	---------------------	-----

5.1.1	固结变形机理	179
5.1.2	一维固结微分方程及其解	179
5.1.3	固结度	182
5.1.4	外荷载随时间变化的固结	183
5.1.5	固结系数的确定	185
5.1.6	多维固结方程及其差分求解	190
5.2	动力荷载下软土渗透与固结	203
5.2.1	冲击荷载作用下的饱和软黏土性状	203
5.2.2	动力荷载下的软土渗透与固结理论	205
5.3	静、动荷载复合作用下软土渗透与固结	206
5.3.1	动静荷载耦合的孔隙水压力	207
5.3.2	动静荷载耦合的固结计算	207
5.3.3	固结微分方程式解析解的进一步讨论	210
	参考文献	211

213 第6章 动力固结法

6.1	动力密实法	213
6.1.1	重锤夯实法	214
6.1.2	分层碾压法	216
6.1.3	振动压实法	218
	工程实例 1: 重锤夯实法处理软弱杂填土地基	219
	工程实例 2: 重锤碎石冲填法处理软弱杂填土地基	220
	工程实例 3: 重锤垃圾冲填法处理松软杂填土地基	221
6.2	强夯置换法	223
6.2.1	概述	223
6.2.2	强夯置换法机理	223
6.2.3	强夯置换法设计	225
6.2.4	《建筑地基处理技术规范》强夯置换法的设计要求	225
6.2.5	强夯置换法施工	227
6.2.6	强夯置换法效果检验	230
6.3	强夯法	231
6.3.1	国内外进展情况	231
6.3.2	强夯法的适用范围	233
6.3.3	强夯的宏观机理	235
6.3.4	微观机理	239
6.3.5	波动机理及振动影响	243
6.3.6	与重锤夯实法的区别	246

6.3.7 强夯法设计	247
6.3.8 强夯法施工	261
6.3.9 验收需注意问题	279
6.3.10 不均匀厚填土地基强夯法研究与工程实例	282
工程实例 1	284
工程实例 2	285
6.3.11 强夯对环境影响	286
6.3.12 强夯的成本	294
参考文献	295

297 第7章 静力排水固结法

7.1 概述	297
7.2 排水固结法原理	298
7.3 排水固结法的设计与计算	300
7.4 排水体设计及施工	301
7.4.1 有关砂井的计算	301
7.4.2 地基抗剪强度增长的预计	305
7.4.3 稳定性分析	306
7.4.4 沉降计算	307
7.4.5 其他竖向排水体设计中需要注意的问题	308
7.4.6 施工工艺	314
7.5 堆载预压法	317
7.5.1 预压处理的概念	318
7.5.2 地基条件	318
7.5.3 堆载预压的设计和计算	318
7.5.4 堆载预压设计中的若干问题	319
7.6 真空预压	324
7.6.1 基本概念	324
7.6.2 真空预压与堆载预压的比较	325
7.6.3 真空预压加固软土地基最终效果影响因素	325
7.6.4 真空预压法的设计	330
7.6.5 真空预压法的施工	330
7.6.6 质量检验	331
7.6.7 竣工验收检验应符合下列规定	332
7.7 真空-堆载联合预压法	332
7.7.1 真空-堆载联合预压法原理	332
7.7.2 真空-堆载联合预压效果的叠加问题	332
7.7.3 真空-堆载联合预压设计计算方法特点	334

工程实例 1: 静力排水固结法 (插塑料排水板+堆载预压)	334
工程实例 2: 真空联合堆载预压设计深圳机场软基处理中的应用	336
参考文献	340

347 第 8 章 静动力排水固结法

8.1 静动力排水固结法的发展	347
8.1.1 前言	347
8.1.2 研究现状	349
8.2 静动力排水固结法原理	352
8.2.1 静动力排水固结法的基本思想	352
8.2.2 加固机理	353
8.2.3 振动波机理及其解释 (传播规律与划定影响区)	355
8.2.4 夯锤与地表接触动应力的特点	358
8.2.5 夯击下孔压增长与消散规律	358
8.2.6 静动力排水固结法对土微结构及次固结的影响	362
8.2.7 饱和软土的触变恢复	363
8.2.8 加固过程的影响深度及加固深度	365
8.2.9 静动力排水固结法减震试验研究	366
8.2.10 静动力排水固结法与强夯法及静力排水固结法对比	370
8.3 静动力排水固结法设计	373
8.3.1 对工程地质勘察的要求	373
8.3.2 排水体系设计	374
8.3.3 填土垫层	378
8.3.4 夯击参数的设计	379
8.4 静动力排水固结法试夯	384
8.4.1 试夯目的	384
8.4.2 试夯的步骤和程序	385
8.5 静动力排水固结法施工要点	385
8.5.1 机具与设备	385
8.5.2 静动力排水固结较为系统的施工工艺流程	387
8.5.3 静动力排水固结法信息化施工	387
8.5.4 夯击现场施工要点	389
8.5.5 安全施工和注意事项	390
8.6 静动力排水固结法检验	391
8.6.1 检验的数量	391
8.6.2 检验的时间	391

8.6.3	检验的方法	391
	工程实例 1: 广州某道路软基处理工程	391
	工程实例 2: 海南省某图书馆工程软基处理	396
	工程设计实例 3: 虎门连升路某软基处理工程	398
	工程实例 4: 广州南沙泰山石化仓储区软基处理工程	399
	参考文献	407
410	第 9 章 碎石桩和砂石桩	
9.1	碎石桩 (gravel pile)	410
9.1.1	概述	410
9.1.2	碎石桩的分类	411
9.1.3	振动水冲法 (振冲法)	414
9.1.4	振冲法的施工	424
9.1.5	振冲法的质量检验	428
	工程实例 1: 振冲碎石桩复合地基在工程实践中的应用	429
9.2	砂石桩法	435
9.2.1	概述	435
9.2.2	作用原理	436
9.2.3	设计计算	441
9.2.4	施工工艺	445
9.2.5	效果检验	449
	工程实例 2: 砂石桩在实际中的应用	451
	参考文献	453
455	第 10 章 水泥搅拌桩与灌浆法	
10.1	水泥土搅拌法	455
10.1.1	概述	455
10.1.2	加固机理	456
10.1.3	水泥加固土工程性能	457
10.1.4	设计计算	460
10.1.5	施工工艺	462
10.1.6	质量检验	464
	工程实例 1: 水泥搅拌桩在实际中的应用	464
10.2	灌浆法	465
10.2.1	概述	465
10.2.2	化学浆材	466
10.2.3	灌浆工艺	467

10.2.4	灌浆设计	468
10.2.5	灌浆法施工工艺	472
10.2.6	灌浆检验	474
	工程实例 2: 灌浆法在实际中的应用	474
	参考文献	476

479 第 11 章 水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩)

11.1	概述	479
11.2	CFG 桩的适用性	480
11.3	CFG 桩的作用机理	481
11.4	CFG 桩设计计算	482
11.4.1	《建筑地基处理技术规范》的一般规定	482
11.4.2	复合地基承载力设计	483
11.4.3	CFG 桩身材料及配合比设计	485
11.4.4	桩体强度和承载力关系	488
11.4.5	复合地基变形研究及计算方法	488
11.4.6	褥垫层的设计	491
11.4.7	桩径	491
11.4.8	桩距	492
11.4.9	桩长	492
11.4.10	桩的布置	493
11.5	CFG 桩的施工	494
11.5.1	《建筑地基处理技术规范》的一般规定	494
11.5.2	其他要求	495
11.5.3	施工设备	496
11.5.4	施工程序	497
11.6	CFG 桩效果检验	500
11.6.1	桩间土的检测	500
11.6.2	CFG 桩的检测	500
11.6.3	复合地基检测	500
11.6.4	施工验收	501
	工程实例	501
	参考文献	503

505 第 12 章 微型桩

12.1	概述	505
12.1.1	微型桩的定义	505

12.1.2	微型桩的发展	506
12.1.3	微型桩加固机理	507
12.2	微型桩的分类	508
12.2.1	按设计应用分类	508
12.2.2	按施工方法分类	509
12.3	建筑物基础的微型桩设计	511
12.3.1	微型桩的设计原则	511
12.3.2	微型桩的设计步骤	511
12.3.3	地基设计	512
12.3.4	微型桩的结构设计	514
12.3.5	施工工艺	520
	工程实例 1: 微型桩复合地基在工程上的应用	522
	工程实例 2: 微型桩复合结构在滑坡整治中的应用	526
	参考文献	529

531 第 13 章 其他常用地基加固方法

13.1	加筋地基	531
13.1.1	土工合成材料	532
13.1.2	加筋地基设计理论	532
13.1.3	地基加筋施工要点	537
13.1.4	施工质量控制及监测	537
13.2	换填法	539
13.2.1	压实原理	539
13.2.2	垫层设计	540
13.2.3	垫层施工	542
13.2.4	质量检测	543
	工程实例: 土工织物在广州抽水蓄能电站边坡中的应用	543
	参考文献	547

549 附录 1 张量初步

1.1	直角坐标系与单位向量	549
1.1.1	连加惯例	549
1.1.2	点积	549
1.1.3	叉积	550
1.1.4	Kronechet delta δ_{ij}	550
1.1.5	置换符号 e_{ijk}	550
1.2	微积分运算中的公式	551

1.2.1	向量的微分	551
1.2.2	向量算子: 梯度, 散度和旋度	551
1.2.3	积分中的散度定理	552
1.3	坐标变换	553
1.4	Descartes 张量, 张量代数和张量演算	554
1.4.1	Descartes 张量	555
1.4.2	Descartes 张量的性质	555
1.4.3	张量函数的演算	557
1.5	两种张量表示方法的说明	559
1.6	张量的代数运算	560
1.7	几种特殊张量	561
1.7.1	对称张量和反对称张量	561
1.7.2	球形张量 (各向同性张量) 和偏量	562
1.7.3	正交向量	562
1.7.4	相似张量	562
1.8	张量的主值和主方向	563
	参考文献	564

565 附录 2 计量单位换算表

567 附录 3 地基基础检测方法 & 检测目的*

第 1 章

软土地基加固理论发展与 工程实践概况

1.1 岩土工程理论及应用发展状况

现代科学技术发展的一个突出特点是各学科间的渗透与综合,岩土工程(Geotechnical Engineering)便是具有这种特点的典型产物,它是以岩土体(包括一些建筑于地下的人工材料、构件及结构)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。

岩土工程学科是在岩土工程实践与技术的发展历史中逐渐形成的,是随着人类的出现与发展,不断获得进展的工程技术。岩土工程技术活动的产生可以追溯到史前时期,其经历了漫长的知识积累和升华的历史过程,而形成现代意义上的岩土工程学科尚不足 100 年。软土地基处理工程是岩土工程最新发展迅速的一重要领域,在我国 20 年以来的建设与经济发展中起着十分重要的作用,在很大程度上控制着工程投资总量与工期的长短。

岩土工程及软基工程的重要基础学科是土力学。因此有必要首先简要回顾其发展。

国内外学术界一致认为,库仑(Charles Augustin de Coulomb,生于 1736 年 6

月 14 日, 法国; 1806 年 8 月 23 日在法国巴黎去世) 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 (Karl von Terzaghi, 生于 1883 年 10 月 2 日, 布拉格; 1963 年 10 月 25 日在温彻斯特去世) 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 Molar-Coulomb 原理为依据的最大剪应力理论。从 1925~1960 年是以 Terzaghi 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, 应力与应变的历史, 应变发展过程对强度的影响, 还注意到不同次别连续性、变形梯度、变形特征尺度与变形局部化对于介质力学响应的影响等。另外, 不可否认的是, 近代以来固体力学及岩石力学、复合材料力学等力学分支理论的发展为土力学发展提供了广阔而坚实的平台。

18 世纪工业革命以前, 岩土技术仅是在实践中积累了一些零星的工程经验, 是岩土工程发展的第一历史时期。从 18 世纪 60 年代工业革命开始, 岩土工程进入了理性发展的第二历史时期, 先后建立了一系列经典的土力学理论; 20 世纪初, 铁路、大坝和高层建筑的兴建, 为岩土工程的发展提供了客观条件; 太沙基提出的有效应力原理为代表, 在试验技术和计算方法方面形成了完整的土力学体系, 标志着岩土工程已进入了较为成熟的第三历史时期。

1. 第一历史时期

岩土工程第一历史时期区别于以后各历史时期的特征在于:

(1) 此时期, 特别是史前时期, 缺乏对地质勘探的认识和手段。我国古代虽有“堪舆学”与“择地术”, 为房屋建筑选择场地, 但只能讨论场地地面, 没有能了解地基的深部。由于对地质条件缺乏了解, 因地基基础问题而引发的工程病害或事故并不少见, 给人们留下了许多力不从心的遗憾。

(2) 尚无地基基础的设计可言, 主要凭工匠的经验。由于缺乏设计和施工计划, 因此有些工程常边建边改, 甚至经几次停工才建成。如意大利比萨斜塔, 奠基动工于 1173 年而竣工于 1372 年, 历时整整 200 年, 在塔身建至 3 层半时发生了不均匀沉降, 因无法处理而被迫停工, 一停就是 94 年, 后于 1272 年带着倾斜复工, 倾斜加剧又被迫停工, 一停又是 82 年。

(3) 生产方式停留在手工劳动阶段, 施工消耗巨大的人力物力, 施工周期长, 效率低下。著名的历史遗址, 如埃及金字塔、中国长城等, 每项工程都历时几十年, 动用数以万计的劳动力, 耗资巨大。

(4) 建筑材料以天然材料为主, 石灰和砖瓦在当时已是最好的人工材料, 材料限制了建筑物的高度与重量, 对地基承载力的要求一般不高。

该时期给我们留下了岩土工程方面的许多宝贵经验:

(1) 在《考工记》、《营造法则》、《工程做法》、《鲁班经》和《式样雷》等传世之作中包含了许多地基处理和基础的做法。

(2) 对地基土的换填、夯筑在许多现存古建筑中都有发现, 如在 3000 多年前商小屯遗

址中可以看到分层夯实、各层榫卯衔接的工艺遗迹。这种技术在后代多应用于河泊堤岸，在大型建筑中也有应用。

(3) 从虎丘塔中心轴线呈折线状抛物线的形态可以看出，建塔时已发现塔身倾斜，并在施工中逐层纠偏，说明施工中已有测量控制的做法。局部开挖发现，工匠竟将此自重达63MN的结构支承在互不相连，基础也不扩大的几个砖墩上。

(4) 浙江平湖软土地基上的报本塔，建于明末清初，原拟采用天然地基建7层，但因屡建屡塌，后加了木桩并只建5层而封顶，并在碑文中详细记载了塔基的修筑经过，是不可多得的历史技术资料。

2. 第二历史时期

18世纪60年代的欧洲工业革命和19世纪中叶的第二次工业革命，推动了社会生产力的发展，出现了水库、铁路和码头等现代的工程，提出了许多有待解决的岩土工程问题，如地基承载力、边坡稳定、支挡结构物的稳定性等。同时，施工机械的出现，为现代岩土工程的发展提供了物质条件，工程中出现的事故和难题促使人们进行土力学理论探索和岩土工程技术创新，拉开了岩土工程学术研究的序幕，开始出现土力学的许多经典理论。这个过程延续了大约160年，为20世纪太沙基土力学体系的形成准备了条件。

如前所述，有关土力学的第一个理论是1773年由法国科学家库仑(C. A. Coulomb)建立，并后来由莫尔(O. Mohr)发展了的土的M-C强度理论，为土压力、地基承载力和土坡稳定分析奠定了基础。1776年Coulomb发表了建立在滑动土楔平衡条件分析基础上的土压力理论；1846年，柯林(Collin)用曲线的滑裂面对土坡稳定进行了系统研究，发表了关于斜坡稳定性的理论；1856年，法国工程师达西(H. Darcy)通过室内渗透试验研究，建立了有孔介质中水的渗透理论，即著名的达西定律；1857年英国学者朗肯(W. J. M. Rankin)提出了建立在土体的极限平衡条件分析基础上的土压力理论，它与库伦理论被后人并称为古典土压力理论，至今仍具有重要理论价值和一定的实用价值。1869年俄国学者卡尔洛维奇(KapoBnh)发表了世界上第一本《地基与基础》教程；1885年法国学者布西涅斯克(J. Boussinesq)和1892年弗拉曼(Flamant)分别提出了均匀的、各向同性的半无限体表面在竖直集中力和线荷载作用下的位移和应力分布理论，迄今仍为计算地基中应力的主要方法；1889年俄国学者库迪尤莫夫(KyhomoB)首次应用模型试验研究地基破坏基础下沉时地基内的土粒位移的情况。20世纪初，土力学继续取得进展，1920年普朗德尔根据塑性平衡的原理，研究了坚硬物体压入较软的、均匀的、各向同性材料的过程，导出了著名的极限承载力公式。这些早期的著名理论奠定了土力学的基础。

在第二历史时期中，新材料的应用对岩土工程的发展有着深刻的影响，如果没有钢铁、水泥和混凝土的使用，便没有现代意义的土木工程，也没有岩土工程的发展。

1885年，美国芝加哥建成了世界上第一座具有现代意义的钢结构高层建筑，10层的家庭保险公司大楼，高55m。1902年，美国辛辛那提建成16层的登格尔斯大楼，是世界上第一座钢筋混凝土高层建筑。随之，在美国纽约等城市，乃至世界各地，兴起了建造高层建筑之风。

桥梁和高层建筑的兴建，对地基承载力提出了更高的要求，桩基开始大量被采用。在19世纪末，芝加哥在遭受特大火灾后重建工程中成功地采用了“人工挖孔桩”。这种桩型是对桩基技术乃至岩土工程技术的一大贡献，100余年来一直受到世界各地的青睐。1899年，