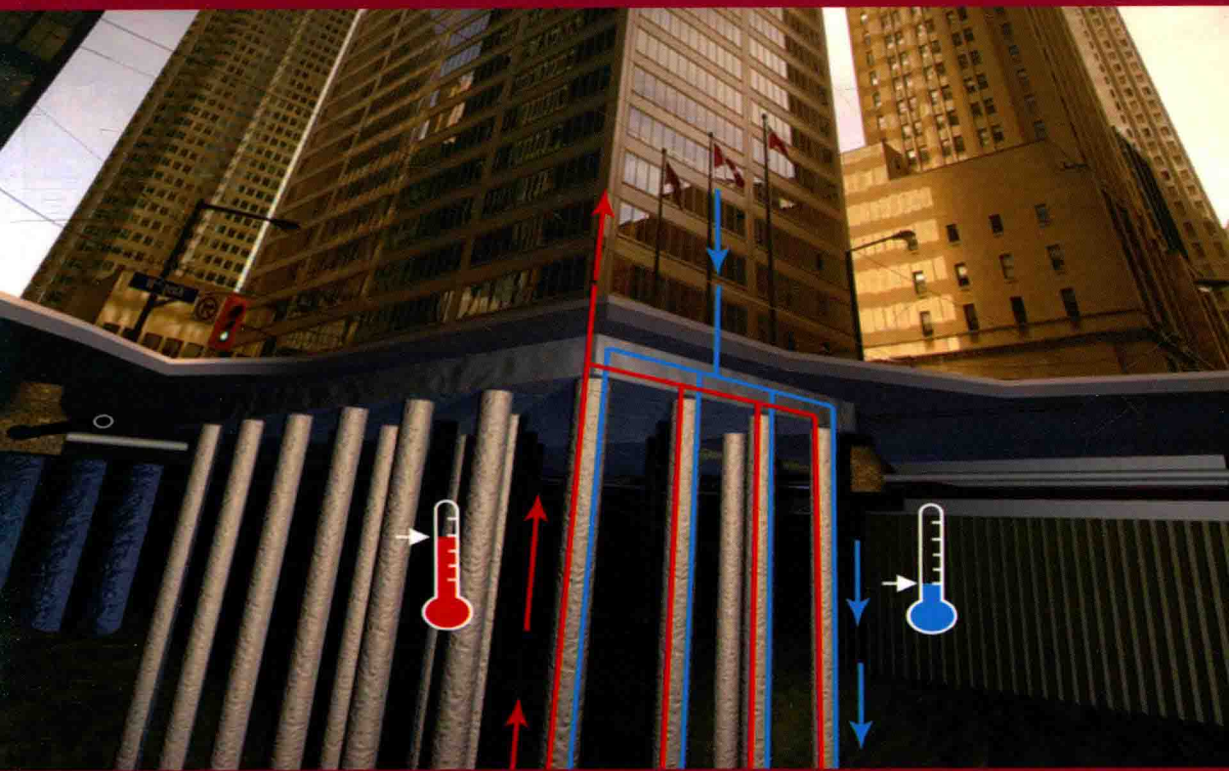


能源地下结构

Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering

吕塞·拉卢伊 编著
[瑞士] 何莉塞·迪·唐纳
孔纲强 等译
刘汉龙 校



中国建筑工业出版社

能源地下结构

[瑞士] 吕塞·拉卢伊 编著
何莉塞·迪·唐纳
孔纲强 等译
刘汉龙 校

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2016-5487号

图书在版编目 (CIP) 数据

能源地下结构 / (瑞士) 拉卢伊, 唐纳编著; 孔纲强等译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016.9

ISBN 978-7-112-19661-6

I. ①能… II. ①拉…②唐…③孔… III. ①地热能-热泵-应用-建筑-节能-研究 IV. ①TU111.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第178721号

Energy Geostructures : Innovation in Underground Engineering / Lyesse Laloui and Alice Di Donna,
978-1848215726/184821572X

Copyright © ISTE Ltd 2013

First published 2013 in Great Britain and the United States by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
Chinese Translation Copyright © 2016 China Architecture & Building Press

All rights reserved. This translation published under license.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

没有John Wiley & Sons, Inc. 的授权, 本书的销售是非法的

本书经美国John Wiley & Sons, Inc. 出版公司正式授权翻译、出版

责任编辑: 杨允 董苏华

责任校对: 王宇枢 张颖

能源地下结构

[瑞士] 吕塞·拉卢伊 编著
何莉塞·迪·唐纳
孔纲强 等译
刘汉龙 校

*

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

北京嘉泰利德公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 17 字数: 294 千字

2016年11月第一版 2016年11月第一次印刷

定价: 60.00元

ISBN 978-7-112-19661-6

(29160)

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)

译者的话

《能源地下结构》(Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering)是国内外第一部能源地下结构相关的学术专著。该专著的不同章节部分,分别由该领域最优秀学者撰写,从能源地下结构的性能研究、设计到使用分析进行详细描述。该书涵盖面丰富,包括针对能源地下结构的全尺寸现场试验、小比尺模型试验、离心机模型试验、理论计算分析与数值模拟研究,以及土体热力学特性试验与本构模型研究。

Lyesse Laloui 教授组织汇集了瑞士、英国、美国、法国等相关顶级专家,撰写了本书稿、汇集了国外的典型能源岩土结构工程案例。Lyesse Laloui 教授是瑞士洛桑联邦理工学院(2016年QS世界大学排名第14位)终身教授、土木工程系主任、土力学实验室负责人,是国内外最早开展能量桩单桩、群桩现场试验,基于考虑土体热本构模型的数值模型分析能量桩热力学特性的学者之一。

近年来,我国能源岩土地下结构(尤其是能量桩、能源地下连续墙等)得到了越来越广泛地工程应用,上海世博轴能源地下连续墙是目前国内外能源岩土地下结构中使用延米数最大的单体工程之一;同时,南京朗诗国际街区、浙江省温州市双井头小区、上海世博会城市最佳实践区汉堡馆、天津市梅江综合办公楼、同济大学旭日楼、天津市塘沽凯华商业广场以及吴江中达电子营建处办公楼等项目中均应用了能量桩技术。但是,我国能源地下结构相关的研究成果和理论指导,相对落后于实际应用。因此,该书的翻译出版,对该领域的设计、施工和研究等具有重要的参考价值。

本书翻译和校审由刘汉龙长江学者创新团队能量桩研究小组完成,孔纲强教授翻译前言及第11和14章并负责统稿,硕士研究生周杨翻译第2、3和9章,博士研究生彭怀风翻译第6、7和10章,博士研究生李春红翻译第1和8章,博士研究生黄旭翻译第4和5章,硕士研究生郝耀虎翻译第12和13章,刘汉龙教授负责校审。由于时间和译者水平有限,难免存在错误和疏漏之处,恳请大家不吝指正。

译者

2016年9月

前 言

能源地下结构，作为一种可再生的、清洁的能量技术，可用于建筑、基础设施和各类环境中的升温及降温，在世界范围内逐渐得到推广应用。该技术将地下结构的力学特性与浅层地热能供能传递有机地结合在一起；冬季可以从地下提取浅层地热能作为上部建筑供暖，夏季可以将上部建筑中的热量存储在地下土体中以满足上部建筑的制冷需求。

与传统地下结构物相比，能源地下结构具有提供承载和能源传递双重作用，相对更复杂的结构与功能给能源地下结构物的设计提出了更多更高的挑战。除了已知的满足上部建筑荷载需求的设计内容外，还要满足能量供应与利用方面的相关技术问题；包括地源热泵设备的设计及尺寸、热需求量、相应的系统优化、温度变化引起的结构物附加应力与附加沉降，并明确不同设计人员在项目中各自的职责等。能源地下结构作为一种新型的工程技术，非常有必要提高其相关的专业基础知识普及，并明确其设计与计算过程。

本书的目的是结合已有能源地下结构应用实例，全面综述能源地下结构基础知识与设计方法。该书分为三个部分，每部分又划为不同的章节，由在该领域最睿智的工程技术人员与学者撰写。第一部分：能量桩物理模型试验，包括土体热力学特性室内试验，能源地下结构的现场试验、离心机模型试验以及小比尺模型试验。第二部分：数值模拟分析，包括考虑不同气候区域影响下能量桩、隧道、桥梁等基础的数值模拟结果与使用情况。第三部分：工程实例，介绍项目的交付使用及相关岩土工程设计软件的发展以及能源地下结构的实际工程案例应用。

本书作者感谢所有章节撰写人对能源地下结构技术创新所作出的贡献。

吕塞·拉卢伊 (Lyesse Laloui) & 何莉塞·迪·唐纳 (Alice Di Donna)

2013年7月

目 录

译者的话
前 言

第一部分 能量桩物理模型试验

第 1 章	能源地下结构周围土体的热力学响应	3
1.1	引言	3
1.2	土体热力学特性	5
1.3	土体热本构模型	11
	致谢	18
	参考文献	18
第 2 章	能量桩足尺现场试验	21
2.1	能量桩热响应测试	21
2.1.1	桩身应变与桩身温度测试	21
2.1.2	桩端阻力测试	24
2.1.3	桩周土体特性测试	24
2.2	足尺现场试验概况	26
2.2.1	单桩现场试验	26
2.2.2	群桩现场试验	28
2.2.3	试验步骤	30
2.3	能量桩热力学特性	32
2.3.1	分析方法	32
2.3.2	单桩热力学响应特性	32
2.3.3	群桩热力学响应特性	35

2.4	本章小结	37
	参考文献	38
第 3 章	能源地下结构现场试验	39
3.1	引言	39
3.2	热量储存与转化	40
3.2.1	概述	40
3.2.2	能量释放 / 吸收率	41
3.2.3	热应力场	45
3.3	热力学效应	50
3.3.1	概述	50
3.3.2	温度对结构的影响	50
3.3.3	温度引起的土体 - 结构相互作用	54
3.4	本章小结	57
	致谢	58
	参考文献	58
第 4 章	能量桩缩尺模型试验研究	67
4.1	引言	67
4.2	常规桩基缩尺模型试验	67
4.2.1	边界条件	68
4.2.2	力学荷载加载系统	69
4.2.3	测试方法	69
4.2.4	桩体力学特性	70
4.3	能量桩缩尺模型试验	71
4.3.1	试验装置	71
4.3.2	热力耦合作用下能量桩力学特性	73
4.3.3	热量交换	75
4.3.4	桩 - 土接触面	77
4.3.5	试验结果与分析	78
4.4	本章小结	80
	致谢	80

参考文献	80
第 5 章 能量桩离心机缩尺模型试验研究	83
5.1 引言	83
5.2 土体 - 结构接触面热力响应特性	84
5.3 离心机模型试验原理	84
5.4 离心机模型组成	85
5.4.1 模型制作及其特点	85
5.4.2 试验装置	87
5.5 摩擦型桩基离心机模型试验	89
5.5.1 土体试样特性	89
5.5.2 工况 A: 隔热条件下极限承载特性	90
5.5.3 工况 B: 热力耦合作用下的应力 - 应变关系	94
5.6 本章小结	97
致谢	97
参考文献	98

第二部分 能源地下结构数值模型

第 6 章 能源地下结构的多样性应用	103
6.1 小型分布式桥面除冰系统	103
6.1.1 小型桥梁桩基的热能需求及其相关特性	104
6.1.2 桩基模型	105
6.1.3 数值模拟结果与分析	108
6.2 热交换锚杆	113
6.2.1 技术特征及其应用	114
6.2.2 研究方法	114
6.2.3 产热优化设计	116
6.2.4 热传递引起的力学特性	117
6.3 本章小结	118
致谢	119

	参考文献	119
第 7 章	竖向循环荷载下能量桩承载特性数值分析	121
	7.1 引言	121
	7.2 附加热荷载下桩基承载特性	122
	7.3 循环荷载下 Modjoin 桩 - 土接触面本构模型	124
	7.4 循环热荷载下能量桩特性数值分析	126
	7.4.1 对上部构建物的影响	128
	7.4.2 桩身轴力	128
	7.4.3 桩侧动摩擦力	129
	7.5 能量桩优化设计建议	130
	7.5.1 上部荷载等级对能量桩的影响	130
	7.5.2 能量桩对桩 - 筏基础的影响	131
	7.6 本章小结	133
	致谢	133
	参考文献	133
第 8 章	非饱和土中的能源地下结构	135
	8.1 引言	135
	8.2 升温引起土体中水分迁移	136
	8.3 非饱和土中热体积变化	138
	8.4 土体强度和刚度热效应	140
	8.5 非饱和土中热效应引起的水力特性	141
	8.6 土 - 土工合成材料相互作用热效应	143
	8.7 本章小结	145
	致谢	145
	参考文献	145
第 9 章	制冷需求为主气候下能源地下结构	153
	9.1 引言	153
	9.2 气候因素对土体环境及性能的影响	153
	9.3 非饱和、饱和土热性能和热传递	155
	9.4 能源地下结构对周围土体的影响	156

9.4.1	模型试验设计	156
9.4.2	数值模型	157
9.4.3	模型试验及数值模拟结果	160
9.4.4	足尺桩模型	162
9.5	能量桩足尺现场试验	163
9.6	本章小结	165
	致谢	166
	参考文献	166
第 10 章	能量桩对周围土体的瞬时热扩散影响	169
10.1	引言	169
10.2	热传递现象	170
10.2.1	土体参数	170
10.2.2	瞬时变化中的能量守恒	171
10.3	能量桩热扩散数值模型	172
10.3.1	能量桩内部热扩散二维模型	173
10.3.2	桩周土体热扩散三维模型	176
10.4	长期热交换的影响	177
10.4.1	地下水流对热扩散的影响	177
10.4.2	循环热荷载下的耐久性	179
10.5	本章小结	181
	致谢	181
	参考文献	181
第 11 章	基于能量桩的桥面除冰系统	183
11.1	引言	183
11.2	地源热泵加热桥面	184
11.3	地源热泵桥面除冰系统的热传递过程及能量需求计算	185
11.4	数值模拟及结果分析	187
11.5	本章小结	193
	致谢	193
	参考文献	194

第三部分 工程实例

第 12 章	能源地下结构应用	199
12.1	引言	199
12.2	规划和设计	200
12.2.1	合作与交流	200
12.2.2	设计管理	200
12.2.3	其他系统设计	201
12.2.4	认识和技能培训	202
12.3	施工	205
12.3.1	质量控制要求	205
12.3.2	安装与施工细节	206
12.4	系统的集成与调试	226
12.5	本章小结	226
	致谢	228
	参考文献	228
第 13 章	Thermo-pile 能量桩设计软件	231
13.1	基本假设	231
13.2	数学模型与数值实现	231
13.2.1	荷载传递方法	231
13.2.2	荷载引起的位移	233
13.2.3	温度变化引起的位移	234
13.3	计算方法的验证	235
13.4	能量桩桩-筏结构	236
13.4.1	常规方法	237
13.4.2	积分常数确定	238
13.4.3	算例分析	240
13.5	本章小结	241
	致谢	242
	参考文献	242

第 14 章 苏黎世机场航站楼现场试验研究	243
14.1 航站楼工程概况	243
14.2 能量桩系统设计过程	244
14.2.1 能量桩系统概念	244
14.2.2 需要解决的问题	244
14.2.3 初步计算	245
14.2.4 第二次验算	246
14.2.5 第三次最终计算	248
14.2.6 基于 TRNSYS 软件的数值模拟	249
14.3 PILESIM 软件	249
14.4 系统设计与测量点布置	250
14.5 实测的系统热性能	251
14.6 系统的集成优化	254
14.7 本章小结	255
致谢	255
参考文献	255
作者列表	257

第一部分 能量桩物理模型试验

第1章

能源地下结构周围土体的热力学响应

Alice Di Donna & Lyesse Laloui

建筑物基础作为结构物与支撑土体之间的承接体，起到连接两者的作用，并能够使上部结构物荷载通过基础传递到支撑土体。为了保证上部结构物的稳定性和舒适性，基础必须满足以下几点需求：(1) 允许位移；(2) 允许（实际）应力；(3) 相对于失效的极限安全系数 [BSI 95]，而这些要求与周围土体的类型和性质息息相关。工程地质勘察是土体响应数据的来源，也是相关基础设计的依据；土体热力学响应特性对地下结构设计具有重要作用，因为每种结构都需要将荷载传递到土体中。能源地下结构除了需要考虑支撑上部荷载的作用，还需要增加考虑能源供应的功能。如此一来，建筑基础结构将会受到从桩体传输到地基的力学和热学双重荷载作用影响。所以，非常有必要针对土体热力学响应特性进行系统地研究。因此，本章基于能源地下结构影响的土体范围，研究分析土体热力学特性；提出了一个能够模拟能源地下结构周围土体热力学特性的本构模型，并将该模型应用于典型区域土体中能量桩的设计与计算。

1.1 引言

与浅基础相比，桩基础（深基础）的作用主要是穿越承载能力较差的浅层土、将上部建筑物荷载传递到承载力相对更好的土体持力层，从而有效控制上部建筑物沉降。桩基础设计与计算过程中，有两个方面与周围土体性状相关：一是结构承载力评估，二是位移预测。考虑单根桩的力学平衡（图 1.1），桩体能承受的最大的荷载 Q_{LIM} ，可以由下式计算：

$$Q_{LIM} = Q_S + Q_P - W_P \quad (1.1)$$

式中， Q_S 为桩侧摩阻力； Q_P 为桩端阻力； W_P 是桩体重量 [LAN 99]。

一般情况下，桩侧摩阻力和桩端阻力的计算公式如下：

$$Q_s = \int_0^H \int_0^{2\pi} \sigma'_h \cdot \tan \delta \cdot R d\omega dz \quad (1.2)$$

$$Q_p = \int_0^R \int_0^{2\pi} (9c_u + \sigma_v) \cdot r d\omega dr \quad (1.3)$$

式中， H 为桩体高度； σ'_h 为垂直于桩 - 土接触面的水平有效应力； δ 为接触面摩擦角； R 为桩体半径； c_u 为不排水剪切强度； σ_v 为桩端竖向应力； r 、 ω 和 z 分别代表径向、环向和垂直方向的圆柱坐标。

由式 (1.2) 和式 (1.3) 可见，桩侧摩阻力值不仅取决于接触面摩擦角，而且还取决于桩 - 土接触面的应力状态；桩端阻力与桩端以下土体的承载能力直接相关。

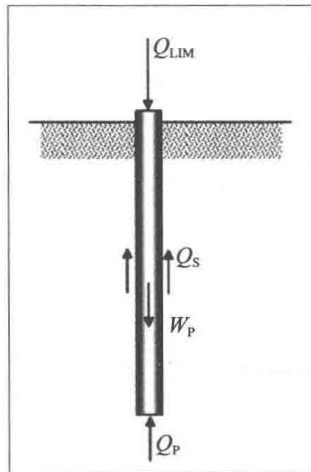


图 1.1 单根桩基受力平衡示意图

当桩体热荷载传递到土体时，热荷载会引起土体的体积改变；而土体在热荷载作用下的体积变化特性主要取决于土体的类型。因此，土体温度的变化可以（积极地或者消极地）影响桩 - 土接触面的应力状态，改变桩端处土体的剪切强度。更重要的是，土体的体积变化会引起基础的位移，导致土体膨胀时基础向上运动、收缩时向下运动。土体温度变化对基础的影响，与能源地下结构应用时受影响的土体体积以及所能引起的土体温度变化范围相关。尽管目前应用的能量桩，施加的温度荷载范围在 $2\sim 30^\circ\text{C}$ 之间（见第 3 章中与目前应用相关的数据）；但是，未来的发展会通过其他技术手段（例如，太阳能电池板技术等）往地下注入或存储热量，这将会在土体中引起更大的温度变化。

1.2 土体热力学特性

土体是由土骨架、孔隙水和空气组成的多孔材料，土骨架一般为颗粒或者聚集物，孔隙中充满水时为饱和土体，孔隙中混合充填的水和空气时为非饱和土体。本章不考虑部分饱和土体情况（详见第8章中关于非饱和土体中能量桩 [FRA 08] 和非饱和土体的非等温性状介绍）。土骨架可以分为两类：(1) 粗粒土（砂或者碎石）；(2) 细粒土（粉土或者黏土）。砂性土排水加热时，土颗粒和水都会产生热膨胀、体积增加，且水的热膨胀系数高于颗粒；但是在排水条件下，孔隙水会在加热过程中自由排出土体，从而不影响整体土体材料的体积变化。黏性土的热力学响应特性则相对复杂得多，因为这种响应是黏土微观结构和电化学平衡共同作用的结果；下一节将着重介绍。关于这部分的详细情况还可以见参考文献 [HUE 92]。部分常见土体矿物质和水的膨胀系数见表 1.1。

体积热膨胀系数 (T 代表温度) [MCK 65, DIX 93]

表 1.1

材料	体积热膨胀系数 [$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]
白云母	24.8
高岭石	29.0
绿泥石	31.2
伊利石	25.0
蒙脱石	39.0
水	$139+6.1 \cdot T$

饱和黏性土的各组成部分（晶粒 / 聚集物和水）在加热时会产生热弹性膨胀。相关试验观察结果表明，排水条件下黏性土加热引起的土体体积收缩或者膨胀取决于应力历史。应力历史通常可以通过超固结比（OCR）描述，超固结比定义如下：

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v} \quad (1.4)$$

式中， σ'_p 为前期固结应力； σ'_v 为现有有效应力。

前期固结应力是指土体在历史上曾受到过的最大有效应力。土体对于所承受