



基于建造过程地基土工程特性 基础设计理论和方法

(扫码免费看视频)

滕延京 著

中国建筑工业出版社

非外借

基于建造过程地基土工程特性 基础设计理论和方法

滕延京 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基于建造过程地基土工程特性基础设计理论和方法/

滕延京著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-112-21182-1

I. ①基… II. ①滕… III. ①地基-基础 (工程)

IV. ①TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 218574 号

建筑地基基础设计理论的发展, 重要的问题是要解决采用现代分析技术的地基基础计算模型及计算参数获取的试验方法。基础建造过程, 特别对于深、大基础建造, 地基土经历卸荷再加荷过程, 地基土的工程特性因其应力历史、应力路径不同, 而表现出特殊的性质。正确认知这些特性, 并在地基基础计算分析中使用, 可以得到包括完整过程的地基基础工程行为, 这是地基基础优化设计的基础。书中重点介绍饱和和软黏土抗剪强度的试验方法与抗剪强度指标的关系、地基土回弹再压缩变形的特征及计算方法、支挡结构设计基于基坑开挖应力路径条件下地基土工程特性的试验研究等成果。工程实践证明, 采用工程地基土实际应力历史、应力路径条件下的试验确定地基基础设计参数, 分析地基基础的荷载变形过程, 得到了符合工程实际的分析结果, 进而取得了最优设计成果。

本书可供从事岩土工程勘察、设计、施工的工程技术人员, 以及科研、教学的科技工作者及大专院校师生学习参考。

责任编辑: 王 梅 辛海丽

责任设计: 李志立

责任校对: 李美娜 姜小莲

基于建造过程地基土工程特性基础设计理论和方法

滕延京 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17¼ 字数: 427 千字

2018 年 3 月第一版 2018 年 3 月第一次印刷

定价: 68.00 元

ISBN 978-7-112-21182-1

(30813)

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)

自序

1978年,我已29岁,侥幸有了读大学的机会。大连工学院水利系范煦教授为我们讲授《土力学》课程。作为工业与民用建筑专业的学生,专业基础课以理论力学、材料力学、结构力学为主要学业,而土力学授课时,感觉从理论基础、试验方法到实际应用,都存在一种假定,感觉土力学问题似乎要在一个特定条件下才能解决。浓厚的兴趣使得我在图书馆学习时不免多看了几部参考书,当得到《土力学》课程结业考试的年级最高成绩后,我已经决定报考岩土工程专业的研究生继续深入学习。

我的研究生导师是大连工学院水利系章守恭教授,在国内很知名,非常可惜的是在我们学习了一年后不幸去世了,继续培养的导师是大连工学院水利系王中正教授。当时,王中正教授刚从日本东京大学龙岗试验室访问学者回国,不仅带来了龙岗研究团队先进的研究方法、研究成果,还带回来一台节约自己生活经费而购买的作为教研室研究使用的富士通计算机。在当时国内生活水平较低的情况下,这台计算机的费用可为改善家庭生活提供多少帮助,可想而知。导师的思想品德、严谨的学风,为我的学识成长作出了榜样。在当时,国内的土工试验尚未实现自动控制和数字化,处于图像记录、人工处理数据的阶段。王老师给我的任务,就是通过这台计算机功能的开发,实现当时地震液化强度动三轴试验的自动化,达到当时龙岗试验室的国际先进水平。一年后,利用这台计算机,动三轴试验自动控制及数据处理系统完成,不仅实现了动三轴试验的自动控制,还实现了全部试验数据处理的自动化。1985年5月,我顺利完成了《粉煤灰动力特性的试验研究和灰坝的地震反应分析》硕士论文答辩,并分派到北京中国建筑科学研究院地基所工作至今。

在地基所期间,得以在地基所的老所长黄熙龄院士的领导、关怀下工作,并能与众多建筑地基基础领域的老专家和学者交流,受益匪浅,我的建筑地基基础设计理论知识得到了进一步的丰富、深化。地基基础研究所是我国建筑领域地基基础有关规范的主编单位,能参与修订工作并投身主要修改意见的讨论,知其原委,对确定解决该问题的原则和方法无疑有较大帮助。建筑地基基础结构分析与上部结构分析的重要区别,在于地基基础结构体系为多次超静定结构,作为基础结构内力变形分析的必要输入参数基底反力分布的形态及大小,是上部结构基础地基共同作用的结果。在地基基础设计规范修订的讨论中,进一步深入了解了工程设计中对于基底压力分布模式,从线性反力分布到高层建筑箱形基础“鞍形”反力分布,再到整体大面积基础“盆形”反力分布等在分析工程问题使用上的局限性。20世纪80年代初期进行的高层建筑结构基础地基共同作用分析方法的研究,以及共同作用分析直接用于基础设计的困难和技术难点等,有效的手段均在于提高变形计算的精度。事实上,面对现代城市用地紧张,生存环境恶化以及解决人们日益增长的工作生活需求,整体大面积、地上地下共同开发建设的基础形式,以及投资效益评价的分阶段开发模式,地基基础设计面对日益复杂的设计工况,共同作用设计分析评价是解决问题的唯一有效方法。地基基础共同作用设计分析评价的使用价值,在于能否使计算分析结果同时满足地基反力、基础变形、基础结构内力分析结果与实测结果一致。近20年的研究工作,

从实测结果分析、大比尺模型试验出发,研究变形计算精度提高的办法,在原有固结变形计算结合实测结果修正方法的基础上,研究回弹再压缩变形计算方法,研究建筑物建造过程基础结构刚度形成、竖向荷载施加基础变形产生的时间效应,提出共同作用分析应采用符合各阶段地基工程特性及地基变形参数的三阶段分析(不引起基础结构内力的回弹再压缩变形阶段、引起基础结构内力的回弹再压缩变形阶段、固结变形阶段);在每一阶段分析时应采用迭代方法保证地基反力计算结果收敛,且使得地基反力计算结果与输入地基变形参数对应的反力大小相匹配的原则,保证了同时满足地基反力、基础变形、基础结构内力分析结果与实测结果一致的目标实现。

在上部结构基础地基共同作用设计分析方法的研究过程中,我也悟出一个简单的道理,即地基基础设计理论的发展,重要的一个问题是如何利用现代土力学的计算分析方法,再现建筑物建造过程的地基基础变形的工程行为,实现更精准设计及真正“优化”设计成果。最近10年间,我和我的学生围绕基于建造过程地基土工程特性研究课题进行了若干试验研究,其中包括石金龙“大底盘基础结构荷载传递特征的试验研究”、李建民“深大基础回弹再压缩变形计算方法的试验研究”、李钦锐“既有建筑地基基础工作性状的试验研究”、李勇“既有建筑桩基础工作性状的试验研究”、李平“既有建筑地基承载力时间效应评价的试验研究”、盛志强“与基坑开挖过程有关的土体工程特性试验研究”等。这些试验研究成果对于研究的问题,如何解决变形计算的适用性及精度,无疑提供了理论基础和工程应用方法。同时,也认识了一个道理,岩土工程问题的工程应用方法,可能并不需要更复杂的本构关系,重要的是确定计算分析采用的参数不仅应与计算模型的应力应变关系相符合,同时应符合工程土体的应力历史、应力路径。

本书详尽介绍了这些试验成果,以期给相关工程技术人员和研究工作者参考和启发,促进地基基础设计理论及工程应用技术的发展。

滕延京

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 地基基础设计理论的新进展	2
1.2 现代土力学的分析方法	7
第 2 章 与建造过程相关的地基土工程特性	9
2.1 与应力历史有关的地基土工程特性	9
2.2 获取地基设计参数的原位试验及室内试验	12
2.3 地基土的回弹再压缩变形试验研究	20
2.4 基坑开挖卸荷应力路径地基土工程特性试验研究	49
第 3 章 结构与地基基础荷载传递及共同作用分析方法	78
3.1 结构与地基基础的荷载传递特性	78
3.2 结构与地基基础共同作用分析方法	83
3.3 结构与地基基础共同作用荷载传递特征的试验研究	109
第 4 章 基于建造过程地基土工程特性的基础结构分析	154
4.1 单体高层建筑基础变形和地基反力分布	154
4.2 大底盘高层建筑基础变形和地基反力分布	161
4.3 基于建造过程地基土工程特性的基础结构分析方法	186
4.4 L 形“大底盘”基础结构设计计算实例	188
4.5 Z 形“大底盘”基础结构设计计算实例	196
第 5 章 基于基坑开挖过程地基土工程特性的支挡结构设计	205
5.1 基坑开挖支挡结构土压力及变形的现场试验	206
5.2 基坑开挖支挡结构土压力及变形数值计算分析	223
5.3 基坑工程支挡结构设计分析方法	256
第 6 章 基础结构分析技术发展展望	267
参考文献	269

第 1 章 概 述



本书内容总论

对于正常固结的地基土，随着距离地表的建筑物埋置深度增加，其地基承载能力增大，相同附加荷载作用下土层的变形会变小；对于建筑物的稳定来说，埋深越大越稳固。建筑地基基础一般需要一定的基础埋深，满足地基承载力、地基变形及稳定性要求。而人类进步对于城市建设及发展规律的认识，地下空间开发利用成为新世纪城市建设的重要内容。城市地铁建设带动的区域开发、整体开发的体量可达数百万平方米，开发深度可达近 40m；地下商场、地下车库、地下影院等与人类活动密切相关的公共设施建设，与建筑群成为一体。这些工程建设已占据建筑工程的主要部分。也就是说，整体大面积开发的深基础建造，其设计施工技术，成为地基基础工程的主要工作。

相对于浅埋的基础而言，深层地基土的工程特性存在哪些异同，在地基基础设计分析计算中应采用哪些参数？如何获得？基础内力计算分析方法如何进行？这些问题，尚需研究解决。

首先，埋深较大的房屋基础建造，要经历基槽开挖的建设过程，其地基是在原址所受上覆压力下卸荷，经历回弹变形过程后再随建造过程逐步施加建筑荷载，房屋地基变形的较大部分为回弹再压缩变形；与浅埋基础相比，同等建筑高度时建筑物的总体变形较小。由于大部分变形发生在回弹再压缩过程，地基的变形刚度大，地基变形小，基底压力的分布与浅埋基础地基较大变形的形态相比，“鞍形”分布的反力趋于平缓。由于地基作用的附加荷载变小，地基变形可控性好，整体稳定性提高，大大提高了建筑物采用天然地基的可能性和可靠性。地基的回弹再压缩变形特征及其基础内力分析计算方法成为深、大基础地基设计计算应该解决的问题。

其次，地基基础设计理论对于地基承载力计算、支挡结构作用土压力计算等均采用经典土压力理论，即采用土体发生主动或被动破坏极限状态的土压力，地基土的抗剪强度指标的确定成为设计计算的基础。获取地基土抗剪强度指标的试验方法，工程应用中主要采取室内直剪试验及三轴试验得到。模拟建造过程，剪切时一般采用不固结不排水剪或固结不排水剪。对于不固结不排水剪或固结不排水剪的理解，应认为地基土的固结过程与建造过程的相对关系，是在剪切时是否固结或排水。针对地基基础的建造过程而言，采用建造过程不固结不排水剪切的土性指标，应是安全性高并符合实际情况的。针对实际工程作为地基使用的岩土一般应为正常固结状态或超固结状态（不满足设计要求的地基土应进行地基处理），所以现场取得的土样应在实验前进行恢复土样原始应力状态的工作，然后在工程要求的应力路径和排水条件下进行剪切试验，获得抗剪强度指标。对于深、大基础的地基基础设计采用的设计参数，应区分地基土工作的应力历史及应力路径的影响。目前，工程勘察提供的地基土抗剪强度指标，基本属于加荷路径试验结果，也未区分地基土的应力历史及工作的应力路径，使得工程设计结果与实际差距很大。对于饱和软黏土中的支挡结构设计，由于内摩擦角接近于零，使得设计无法确定支挡结构的嵌入深度。事实上，如果

基坑开挖前饱和软黏土处于正常固结状态,其支挡结构的主动土压力处于周围压力减少的卸荷应力路径,而其被动土压力则处于上覆压力减少的超固结应力状态下的加荷应力路径,应采取相应应力历史、相应应力路径进行试验确定的计算参数。

再次,经典土力学描述了地基土的渗流模型、固结模型、抗剪强度模型、临界状态模型,以及有效应力原理、极限平衡原理等内容,建立了经典土力学的理论体系。经典土力学的理论以某一状态时的力学模型描述为主,而对于发展过程的描述,由于计算分析手段的限制,显得比较粗糙。随着现代计算技术的进展,特别是计算机技术的快速发展,为土力学建立完整过程分析、进而得到完整分析结果创造了条件。采用现代计算分析技术解决实际工程问题的条件,应确定地基土实际工作的应力历史、应力路径条件,进而采用现场试验或室内试验方法,模拟地基土的力学过程,取得计算分析应力应变关系及必要的参数,进而计算分析出能够与实际工程结果相近的结果,从而找到基础工程优化设计的要素,取得最优结果。而以往认为针对工程实施方案的多方案比对结果的优化,并未得到符合实际工程的分析结果(大多靠经验判断),仅能认为是优化方案结果,不能认为是优化设计结果。

1.1 地基基础设计理论的新进展

1. 地基基础基本概念

地基基础设计理论,即运用土力学和结构力学的基本知识,计算分析地基及基础结构真实的工程行为,使得基础结构能够抵御建造期间、使用期间各种不利工况作用,满足安全性、经济性、适用性、耐久性要求的设计理论。

建筑物对大地的各种作用,通过基础传递到其下的土(岩)体。支撑基础的土体或岩体称之为地基,而将上部结构各种作用传递给地基的下部结构称之为基础。一般情况下称为“地基”的岩土体都是对拟建的建(构)筑物而言。而无拟建的建(构)筑物的情况,特别是对于自然存在的岩土体,我们一般并不称为“地基”。经过人类活动利用的土地,即使地表面并无建(构)筑物,当有绿化、自然景观等人类活动的足迹,这种情况我们一般称之为建筑场地。

构成地基的物质是地壳的岩石和土体。地球的岩浆活动和地壳运动的结果,形成了各种类型的地质构造和地球表面的各种形态。气温变化、雨雪、山洪、河流、湖泊、海洋、冰川、风、生物等外界活动,使地球表面形态不断发生变化,使得原岩风化物质在水流、冰川、风等作用下,产生剥离、搬运、沉积作用,形成了建筑物地基的多样性。由于火山、地震等地球活动,形成的断裂、覆盖,增加了其复杂性。人类在利用天然的岩石和土作为建筑地基使用时,必须掌握和确定其工程性质。

建(构)筑物的种类很多,按使用用途划分,有工业与民用建筑、市政、港口、水利、电力、公路、铁路、桥梁等;按结构形式划分有刚架结构、排架结构、重力式结构、索结构、网架结构等;按建筑材料分有木结构、砌体结构、钢筋混凝土结构、钢结构、混合结构等;按建筑物高度分有高耸构筑物、地下建筑、中低层建筑、高层建筑等。各种不同建(构)筑物的荷载传递体系不同,对地基基础的作用不同,使得地基基础面对不同场地地基情况下的工作特性不同,不能简单地采用特定场地的建设经验而简单采用等同设

计。目前,对于地基基础设计采用的上部结构各种荷载作用,一般采用假定地基不变形情况下的结构分析方法确定,而由于地基实际情况多存在变形(地基变形的完成时间视土性不同约需5~8年),使得传递的上部结构作用的各种荷载与实际存在差异,实际的基础设计构件验算均要在一定经验基础上进行调整,或调整作用荷载的大小,或调整构件材料的强度发挥度,使之满足结构的使用安全。上部结构各种荷载对地基基础的作用效应是不同的,永久荷载作用在建筑物建设开始就始终存在,而活荷载的作用有其随机性。因此地基基础设计的作用荷载应按最不利工况的组合效应考虑。同时还应考虑地基变形对基础结构产生的附加应力的影响。

建(构)筑物的形式及其功能,是随着人类生存的需求以及对自然客观规律的认知,随着人类文明的发展而不断发展变化。早期,人类生产力低下,使用棍棒、石器获取猎物、野果生存,住在简陋的茅草屋、天然洞穴中;随着火、陶器、青铜、铁等的使用技术,开始定居生活,居住在土或石垒造的房屋中;而随着灰土、砖石、混凝土、钢铁等材料技术的发展,人类对生产、工作环境和生活、居住条件的需求不断发生变化,进而出现了生土建筑、砌体建筑、混凝土或钢结构建筑,建筑的类型包括住宅、办公楼、厂房、学校、医院、商场、影院、剧场、体育场等。随着人们日益增长的生产、生活和各种文化需求,现代建筑的艺术和结构形式日新月异。

不同的建筑形式和结构体系,为保证建(构)筑物的使用功能,均应坐落在稳定的场地上,并保证建构筑物在使用期间的稳定性、地基承载力和地基变形要求。在每个国家不同的历史时期,地基基础设计理论随着人们认识和社会生产力的提高也在不断发展,赋予其新的内涵。

2. 地基基础设计理论的主要内容

地基基础设计理论的内容通常包括地基土(岩)的工程性质、地基设计参数的确定方法、基础结构类型选择、地基与结构的荷载传递特性及内力分析方法、基础结构可靠性设计、天然地基不满足的地基处理技术、基础施工的基坑支护和环境保护技术、地基基础的检验验收评价方法等。近年来,面对人类生存环境恶化及可供使用资源有限等提出的可持续发展理念、“绿色”理念等,对于基础工程的耐久性设计、面向未来基础功能可改造性以及投入地下的材料更有效利用等研究课题提到了该技术领域应解决问题的日程中。

地基土(岩)的工程性质,主要指建(构)筑物作用荷载通过基础结构的传递作用在地基上,使其承载变形的特性。由于地基岩土成因各异,地基岩土的承载变形特性千变万化。设计者对于地基土(岩)工程性质的认识,应主要识别其成因、颗粒组成及其孔隙率、应力历史、地下水影响等。地基基础的建造过程,使得基础对地基的作用,表现为一定埋深的作用条件。不同埋深条件的地基性状,房屋基础的沉降量中地基土回弹再压缩变形量与地基土固结变形量的比例关系,对基础设计的影响很大。研究分析确定地基土(岩)的工程性质,必须结合地基土的成因、应力历史、地下水影响等通过原位试验或原状土试验确定,尚应根据实现地下建筑功能的基础设计情况,采用符合施工过程地基土应力历史影响的测试分析结果进行设计,才能得到真正意义上的优化设计成果。

地基设计参数的确定,一般采用原位测试或室内试验测试方法。原位测试技术是针对拟建建筑物情况,对地基岩土工程特性的测试,一般包括载荷板试验、标准贯入试验、动力触探试验、静力触探试验、十字板剪切实验、原位剪切试验等。室内试验测试技术是取

得原状土样在实验室模拟工程情况进行土的抗剪强度、应力应变关系以及地基土的物理力学指标测试、包括含水量、重度、相对密度等基本实验,以及地基土的颗粒组成、压缩性质、渗透性质测试。这些测试得到的地基设计参数,有些是地基土自身现状的工程特性,有些是在原状应力状态基础上针对工程实际将发生工况的工程特性。按照目前工程实践的认识,地基设计参数的确定应在地基土应力历史的基础上,考虑工程将发生的应力应变状态进行的地基岩土工程特性的测试,得到设计参数进行设计分析,可以得到与实际结果较接近的设计成果。地基基础设计参数不仅是地基承载力、地基变形计算参数,还应包括地基稳定计算、基础内力计算参数。符合建筑结构受力变形特性及建造过程地基土应力应变关系及应力历史的地基参数,是进行基础设计可靠性分析的基础。深大基础更要求按照施工条件引起的地基土应力路径进行内力分析和设计。

地基基础选型是指基于工程的地下功能设计及对于结构传递荷载大小、地基强度、地基变形、基础稳定性要求等工程经验,经设计计算分析确定的基础形式,可以看做地基基础“概念设计”的基本内容。随着人类开发地下空间的需求,与地铁车站、地下商场、地下道路等地下结构物的衔接等功能要求,使得地基基础形式及作用在基础上的荷载类型均发生了较大变化,使得传统的基础类型的工程经验需要更进一步的工程实践总结和深化。

基础结构内力分析方法,目前主要采用传统的工程经验方法(即采用地基不变形假定得到的上部结构作用以及基于工程经验推荐的地基反力分布进行基础结构内力分析),对于复杂条件的建筑物应采用符合建筑物建造过程变形特点的共同作用分析方法。目前,随着地下空间开发利用,基础埋深很大,且多为主裙楼一体结构,整体大面积基础上建有多栋多层或高层建筑的基础形式,面积可达几万或数万平方米。此时,建筑物沉降量的较大部分,为地基土回弹再压缩变形,其余为地基土的固结变形。不同荷载压力段引起地基变形处于不同应力历史的变形过程,在基础结构形成过程中引起的基础结构内力也不同,必须分别计算。

基础结构可靠性设计,应从构件可靠性,进一步深化到结构可靠性,直至工程可靠性,切不可把设计表达式的可靠性等同工程可靠性;应在正确确定上部结构传递到基础上的荷载作用前提下进行基础结构可靠性设计的分析研究,不能忽视按照传统的工程经验设计方法(在一定条件下应是安全的设计)带来的设计不确定性对基础结构可靠性设计指标的影响。

天然地基不满足时的地基处理技术,应正确认识工法的适用条件和可能达到的加固效果,按照全面满足建筑物功能要求的地基承载力、变形设计及工程验收评价标准进行地基处理的设计、施工及工程验收。

基础施工需要的支挡结构设计,一般按经验方法进行。按土力学基本理论符合实际应力路径确定的岩土力学参数,从而得到符合实际的支挡结构内力及变形,才能进行真正的“优化”设计。基础施工需要的支挡结构,传统的理念是把它作为地基基础施工的临时措施,因而采用了许多经验的设计方法,例如采用库仑或朗肯土压力的极限状态作为支挡结构的外荷载,按弹性地基梁计算理论计算结构内力和变形,采用经验系数调整弯矩计算值及配筋等。进入新的世纪,面对生存环境恶化及资源贫乏的现状,将基础施工需要的支挡结构,不仅作为地基基础施工的支挡措施,并考虑其对永久地下结构的有利作用发挥的设计新理念已在实际工程中采用,产生了重要的经济效益和社会效益。

地基基础的检验验收评价,不仅要检验施工后地基基础性状与原设计的符合性,更要评价荷载作用的地基主要持力层、下卧层性状能否满足建筑物地基承载力、地基变形以及地基稳定性要求。对于采用地基基础新方法新技术的工程,尚要检验评价采用的地基基础设计参数的可靠性。

基础工程技术随着土木工程兴起、发展的过程,是伴随着成功与失败的总结而发展。进入新的世纪,在全球应对生存环境恶化、资源日益减少而提出节能减排、可持续发展的人类科技进步的新理念时,为从事这项技术研究的人们提出了新的课题和挑战。基础工程的耐久性设计、面向未来基础功能可改造性以及投入地下的材料更有效利用等研究课题已取得一定成果,给地基基础设计理论的发展注入新的内容和动力。

3. 地基基础的“概念设计”

地基基础概念设计,是指基于设计理论和工程经验,对工程场地资料、建筑物设计要求以及地下结构施工方法充分了解基础上,对地基基础设计安全性、经济性作出的基本评价,其基本内容以及应符合的条件包括:

1) 场地地质灾害评价和地基稳定性评价应作为地基基础设计的前提条件认定并解决相关问题。

2) 作用在地基基础上的荷载效应具有明显的时间效应,地基变形引起的基础结构内力应作为评价基础结构设计安全性的重要内容。

3) 正确评价地基基础设计地基压力以及基础内力计算的方法及计算结果的可靠性,依靠经验加以调整,确保安全(整个方法体系的完备性、适用性、可靠性)。

4) 目前基础结构验算的验算表达式采用简单应力状态的表达,而地基基础一般处于复杂应力状态(超静定结构),验算后的结果应留有余地。

5) 地基课题均具有时间效应,包括土的固结状态、抗剪强度、地基变形计算等,工程中应分别对待。地基设计参数的选取应符合地基的工作状态、加荷路径等。

6) 地基基础设计水平一定是地区勘察、设计、施工、检测评价水平的综合反映。

7) 应采用能反映地基及基础真实受力状态的设计(共同作用分析)成果用于实际工程设计。

8) 面向未来的地基基础设计应包括地基基础的耐久性、功能可改造性及对资源的充分利用等内容(真正技术经济统一的观点)。

9) 上部结构与基础的连接条件应能满足复杂应力条件对基础材料的要求。例如,简单应力条件下独立基础承担的弯矩剪力较小、条形基础承担线性分布荷载(弯矩较小),可采用无筋扩展基础形式;复杂应力条件下则应采用扩展基础形式。

10) 地基基础设计的成果,在任何可能的工况下应能满足建筑物的正常使用功能要求;在超越设防工况条件下(地震、抗浮、偶然爆炸或撞击荷载、其他可能引起地基失效的下沉、冲刷等作用)应能保证地基基础不失效或仅产生可修复的损伤。

4. 地基基础设计理论的新进展

随着人们生活水平的提高,对物质文化的需求日益增长,城市建设的压力不仅是人口增加、住房需求、城市交通等需求的压力。近十年来日益增长的私家车用量、大都市建设

需要的大型公共设施、文化休闲场所、商场、车库等需求的压力也越来越大。增加城市容量和人类的活动空间,缓解交通堵塞,不占或少占土地的目的,开发利用地下空间将成为必然的选择。解决大城市住房用地紧张的措施之一是建造高层、超高层建筑。

中国的主要城市已经进入地下空间高速开发的时期。我国地下空间资源丰富,开发地下空间是节省土地资源,提高利用率,缓解城市压力,减少环境污染,改善生态环境的有效途径。针对我国工程建设的进展,地基基础设计带来了新问题,促进了地基基础设计理论新的进展。

1) 深、大基础带来的地基基础设计问题

为了满足使用功能的需求,地下结构的层数由1~2层发展到4~5层,基础埋深已达30m以上;基础的面积已达数万平方米,同时基础结构的开间由以6~8m为主发展为更大开间(9~12m)。在同一大面积整体基础上建有多栋高层建筑或多层建筑已成为大城市建设的主要基础形式。其带来的新问题包括地基反力和地基变形特征、回弹以及再压缩变形特征、深大基础的地基承载力和变形控制设计方法等。基础工程的抗浮稳定性的重要性引起人们的重视。

2) 深基坑施工带来的环境安全问题

由于基坑开挖深度大,深基坑开挖对周边环境的影响范围加大,其引起后果也越来越严重。其主要问题包括周边已有建筑由于基坑开挖变形引起的差异沉降、周边管线变形引起的上下水渗漏、燃气爆炸危险、道路交通安全等。深基坑施工降水引起的地下水资源保护问题也应引起重视。

3) 深、大地下建筑建设对已有周边建筑设计条件以及使用条件改变引起的基础设计评价问题

新建地下建筑的基础埋深比既有建筑基础埋深大,且体量较大,对既有建筑整体稳定以及地基承载力的评价已是基础工程应该解决的新问题。其评价方法应考虑既有建筑地基的受力历史,对既有建筑不同的地基基础形式的评价方法亦有不同。

4) 地下交通线路施工或穿越工程以及地下使用功能实现引起的有关基础工程问题

城市地下交通的线路建设一般埋深较大,施工引起的地应力损失造成地面沉降,对周边环境的影响范围内的建筑物影响较大;穿越工程改变了原有建筑物的地基基础受力条件,需进行评价,进行结构或地基托换加固;为实现地下交通与地下空间的人流、商业及综合使用功能,需进行既有建筑地下结构改造等。

5) 建设节约型和环境友好型社会对基础工程的要求

建设节约型和环境友好型社会是人类对保障其自身生存环境的共同认识。我国由于人口众多,资源相对匮乏,对这个问题更有深刻的认识。“节能、节地、节水、节材、保护环境”是我国的长期国策。在保证安全的基础上,追求基础工程的技术经济的统一,也是我们应该追求的目标。因此在基础工程中研究新的设计方法,新材料、新工艺、新设备的使用以及绿色施工技术的研发等仍是基础工程技术的重要内容。

6) 基础工程的耐久性

《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008规定:工程结构设计时,应规定结

构的设计使用年限。基础工程结构应满足建筑物结构使用年限的要求。基础工程结构中,其地下水和土壤环境与上部结构使用环境不同,应根据其特点进行耐久性设计和维护。新中国成立 60 年来的情况调查,位于地下水位以上或完全位于地下水位以下、地下水和土壤无腐蚀性,基础工程结构的耐久性有保障,但对位于雨水渗透区、地下水位变化范围内的砌体结构、混凝土结构,有一定损坏。近年来我国主要大城市地下水位均在下降阶段,雨水渗透区、地下水位变化范围也在变化。对于这些情况以及腐蚀性环境的基础工程结构耐久性设计以及维护仍应加以重视和研究。

针对上述需求,我国科技工作者进行多年研究,得到了若干积极成果,满足工程建设的需求。例如,在同一大面积整体基础上建有多栋高层建筑或多层建筑的地基基础设计方法、基础变刚度调平设计方法、深大基础回弹以及再压缩变形特征及计算方法、基础结构抗浮设计、桩基工程新技术、既有建筑地基基础的工作性状及工程应用方法、地铁交通枢纽工程的地基基础加固改造等。这些成果体现出我国基础工程技术的特点和技术先进性。结合国外技术的发展,我国基础工程技术应在大跨地下结构的设计理论方法、按变形控制设计、深基坑施工引起环境影响评价的方法和工程措施、深大地下建筑建设对已有周边建筑设计条件以及使用条件改变引起的基础设计评价方法及加固技术、基础工程的抗浮稳定性及抗浮构件设计、地下交通线路施工或穿越工程以及地下使用功能实现引起的有关基础工程技术、基础耐久性问题、新材料、新工艺、新设备的使用以及绿色施工技术 etc 需进一步深入研究。

可以看出,面对新的需求,地基基础设计面对的工程对象,其地基性状由于深、大基础建造过程发生了变化。首先,地基受荷的应力状态经历正常固结到超固结、或正常固结到超固结再到正常固结的阶段,其地基受荷的应力路径经历卸荷再加荷的阶段;其次,地基变形回弹再压缩变形比例大,可能起控制作用,附加应力所占的比例变小,固结变形大幅减少。

所以,基础设计参数不能用单一参数表达,应按地基受荷的应力状态按不同阶段工程性质确定,获取计算参数的试验方法应反映应力历史、应力路径影响。

由于人类工程建设活动的实施,导致土体的应力状态与原始状态相比发生变化,进而引起土体变形及强度指标的变化,这种变化又影响着工程建设行为模拟准确性,例如基坑开挖回弹再压缩变形计算中指标的确定、基坑开挖引起的土体抗剪强度指标的变化、基坑开挖支挡结构内力及变形分析等。建筑物基槽开挖前,地基土体状态为天然状态,即土性试验的初始状态,然后应根据地基土的实际应力路径进行试验,获取设计参数。以往的研究,加荷应力路径已有若干成果,而卸荷应力路径研究成果较少。同时应指出,地基基础设计参数尚与地基基础共同工作的结果关系密切。而目前的研究还不全面,需要进一步深入研究。

1.2 现代土力学的分析方法

某些学者提出了“现代土力学”的概念。事实上,所谓“现代土力学”的理论,比较经典土力学来说,仅仅增加了现代分析技术而已。现代分析技术为经典土力学的发展创造了条件,主要表现在,现代土力学可以揭示土体力学特性的发展过程,从而建立包括过程

内涵统一的地基土力学模型，使之不仅揭示极限状态的平衡条件、屈服条件和流动法则等状态参数的规律和特性，还可揭示土体力学过程的规律和特性，从而解决地基土实际工作的应力历史、应力路径条件下的优化设计。

赋予地基基础设计理论新的内涵，即运用土力学和结构力学的基本知识，计算分析地基及基础结构真实的工程行为，使得基础结构能够抵御建造期间、使用期间各种不利作用，满足安全性、经济性、适用性、耐久性要求的设计理论。针对建筑地基基础设计理论的发展，重要的问题是要解决现代计算分析采用的应力应变关系及计算参数获取的试验方法。发展中的地基基础工程技术，随着人们不断增长的生活、工作物质需求的增长，以及基础建设的深度、体量，施工工法的改进，都可改变地基土实际的应力历史、应力路径条件，随之而来的研究课题包括地基土实际的应力历史、应力路径条件下工程特性的试验方法、设备；分析模型、计算参数；结果的应用条件及优化设计等。

第2章 与建造过程相关的地基土工程特性

影响地基土工程性质的主要因素，除土的成因、颗粒成分、孔隙比、含水量等基本条件因素外，地基土的应力历史及建造过程的应力路径等也是确定地基土工程性质的必要条件。

地基土的工程性质与地基土受荷后的应力应变关系直接相关，也直接影响结构、基础、地基共同作用的基础变形及地基反力分布。我们认识地基岩土的工程性质，不仅应认识其基本性质，还应认识应力历史及建造过程的应力路径变化产生的工程特性。

2.1 与应力历史有关的地基土工程特性

与应力历史有关的地基土工程特性有两类问题。第一类问题：在地基土形成过程中地基土的应力历史对其工程特性的影响；第二类问题：建筑物建设过程中由于基坑或土方开挖卸荷及再加荷过程产生的地基土工程特性。与应力历史有关的地基土工程特性主要表现为地基岩土的强度及变形特性。

1. 地基土的固结应力状态及抗剪强度

在很漫长的地质年代形成的地基岩土，可能经受多次冲刷沉积过程，或由于地壳运动地面上的升降过程，地基岩土的应力历史可能经历多次加载、卸载或再加载的过程。按照工程地质的区分，其中河漫滩（河床两侧在洪水期淹没而在平水期又露出水面的部分）、古河道（在地质历史上自然改道断流或人类历史上被废弃的河道）、河流阶地（由于地壳升降在河流两岸交替侵蚀与堆积而形成的阶梯状地）、冲沟（坡地上由间歇性地面水流冲刷形成的沟槽）等包含形成过程的定名，以及前期固结压力或先期固结压力（土的历史上承受过的最大垂直有效压力又称先期固结压力）、超固结比（土层的前先期固结压力与现有的有效覆盖压力的比值）等定义和概念有益于理解地基岩土的应力历史对其工程特性指标的影响。

自然界存在的地基土，依其成因和应力历史，均存在一个固结应力状态，在此固结应力状态下有相应的强度和变形性质。对于地基土来说，土的应力历史影响变形性质的概念一般用土的固结应力状态表达，即欠固结土、正常固结土、超固结土。在自重压力下尚未完成固结的土称为欠固结土；在自重压力下已完成固结的土称为正常固结土；在自重压力下已完成固结且土体自重压力小于先期固结压力的土称为超固结土。

土力学基本理论对于地基土的强度和变形问题的认知，应是同一问题的两个方面，即强度理论是与应力应变关系直接相关的。例如，摩尔库仑强度理论，在确定地基土的抗剪强度指标时，是在原位取得土样后，在实验室首先进行恢复土样原始应力状态的准备（主要是恢复地基土的初始固结状态），然后针对不同固结压力进行模拟工程使用情况的剪切试验（不固结不排水剪、固结不排水剪或固结排水剪），确定破坏标准，然后得到以 c 、 φ 表达的土样抗剪强度。在确定每一个试验土样的破坏强度时，或采用峰值，或采用某一破坏标准应变值的试验值。这时确定的地基土摩尔库仑强度是与土样试验的应力应变关系密

切相关的。而目前对于抗剪强度指标的应用，并未与试验过程的应力应变关系发生关系，直接用到地基承载力计算或地基稳定性计算中。只有在岩土工程计算分析采用的本构关系与协调方程采用统一的试验结果时，两者才是统一的。例如邓肯-张模型的计算参数。

目前，工程中针对土的应力历史影响的抗剪强度已有的成果如下：

① 砂土的抗剪强度

砂性土渗透系数大，受压力作用后土体结构的变形稳定时间短，因此砂性土的抗剪强度受水的作用影响较小。但从地基土的强度和变形问题是一个统一体来看，强度理论与应力应变关系过程直接相关来研究过程，不同含水量的砂性土达到其抗剪强度的变形量不同，含水量大的土样明显变形量大。所以，对于砂性土抗剪强度的影响因素分析，除传统认知的土样的密实度、土颗粒大小、土颗粒形状、土颗粒矿物成分以及颗粒级配状况等外，处于干湿交替环境不同含水量的土样抗剪强度会由于试验过程中的变形不同而产生变化。

砂性土抗剪强度一般用下式表达：

$$s=\sigma\tan\varphi$$

(2.1)

式中 s ——土的抗剪强度 (kN/m²)；
 σ ——作用在剪切面上的正应力 (kN/m²)；
 φ ——土的内摩擦角 (°)。

目前，对于砂性土抗剪强度，尚较少考虑应力历史影响的研究结果。从砂土结构出发，历史上受过较大上覆压力与未受过该压力的土样，在同等上覆压力条件剪切，历史上受过较大上覆压力的土样抗剪强度高于未受过该压力的土样。

② 正常固结和超固结黏性土的抗剪强度

与砂土性质不同，黏性土的抗剪强度受应力历史的影响很大。

如果取几个相同的试样分别在三轴仪中以不同的压力室压力固结，然后都在不排水条件下剪切，这些试样的不排水强度也将是随着剪切前的固结压力而改变的，图 2.1 为正常固结和超固结黏性土的抗剪强度，图 2.2 为模拟自然存在的粉质黏土试样在不同固结应力的三轴试验结果。

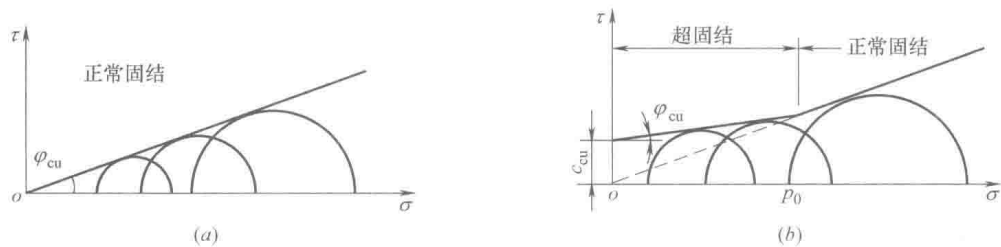


图 2.1 正常固结和超固结黏性土的抗剪强度

正常固结黏土从未经受过超过剪切前的固结压力，如果剪切前的有效固结压力等于零，土的不排水强度也等于零，所以摩尔包线是通过原点的直线（图 2.1a），因此固结不排水剪的黏聚力 c_{cu} 等于零。当固结压力增大时，不排水强度就随着增大。 φ_{cu} 是固结不排水剪的内摩擦角。超固结土曾经受过的固结压力大于剪切前的有效固结压力，其试验结果如图 2.1 (b) 所示，图中三个应力圆的试样都在相当于天然土层压力 p_0 的作用下发生过固结，三个试样的初始孔隙比或含水量都相同。将这些试样分别在不同的压力室压力 σ_3

下再固结, 其中 σ_3 大于 p_0 的试样属于正常固结, 摩尔包线与图 2.1 (a) 一样是通过原点的直线, σ_3 小于 p_0 的试样属于超固结, 摩尔包线是一条略平缓的曲线, 与正常固结土的摩尔包线相交。实用上这条曲线常连成直线, 即超固结土的固结不排水剪黏聚力 $c_{cu} > 0$, p_0 越大 c_{cu} 就越大, 内摩擦角则比正常固结土的小。

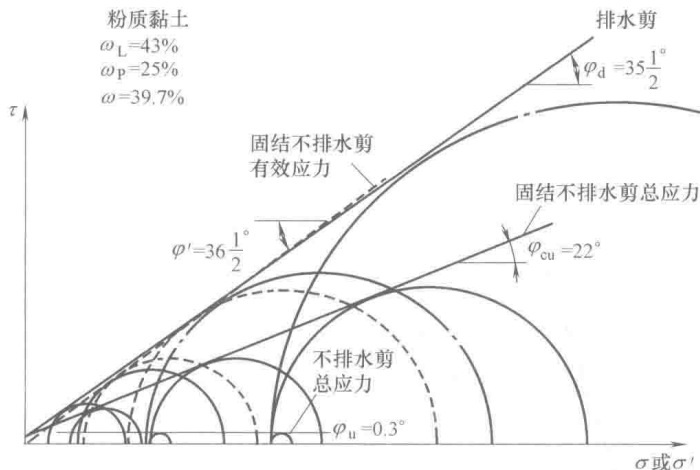


图 2.2 不同固结应力的三轴试验结果

③ 不同应力路径时的抗剪强度

饱和黏性土的工程特性指标, 由于重塑土样难于正确模拟土的沉积、固结历史, 应采用原位试验或通过原状土的室内试验测定。饱和黏性土的工程行为, 与其应力历史关系密切, 由图 2.3 所示结果^[1]可知, 在不同的应力状态和应力历史条件时, 地基土的应力应变、固结变形、抗剪强度等工程特性应采用不同的指标表达。

2. 地基岩土固结应力状态及变形特性

无论是自然界存在还是由于人为开挖加载形成的土体应力历史, 其固结应力状态的改变、土体变形性质均有较大变化, 应按其土体所处应力状态具有的变形性质进行变形计算。土体应力状态不同而变形性质改变的典型试验结果^[8]见图 2.4。

由图 2.4 可知, 土样卸荷回弹过程中, 当卸荷比 $R < 0.4$ 时, 已完成的回弹变形不到总回弹变形量的 10%; 当卸荷比增大至 0.8 时, 已完成的回弹变形仅约占总回弹变形量的 40%; 而当卸荷比介于 0.8~1.0 之间时, 发生的回弹量约占总回弹变形量的 60%。

土样再压缩过程中, 当再加荷量为卸荷量的 20% 时, 土样再压缩变形量已接近回弹变形量的 40%~60%; 当再加荷量为卸荷量

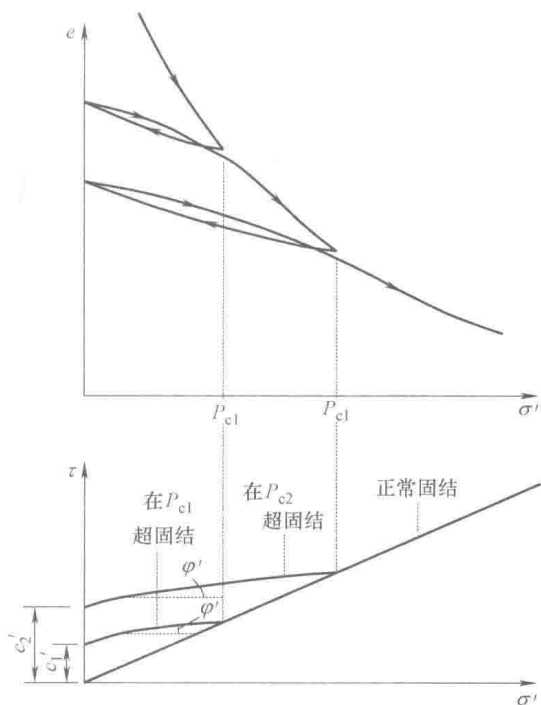


图 2.3 土的应力历史及抗剪强度