



岩土工程西湖论坛系列丛书

# 岩土工程

## 变形控制设计理论与实践

龚晓南 杨仲轩 主编

中国建筑工业出版社



岩土工程西湖论坛系列丛书

# 岩土工程 变形控制设计理论与实践

龚晓南 杨仲轩 主编



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

岩土工程变形控制设计理论与实践/龚晓南, 杨仲轩  
主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 10  
(岩土工程西湖论坛系列丛书)  
ISBN 978-7-112-22596-5

I. ①岩… II. ①龚… ②杨… III. ①岩土工程-研究 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 200010 号

本书介绍地铁、桩基、基坑、建筑、隧道、道路、水利等工程领域变形控制设计理论与实践。全书分 14 章, 主要内容为: 概论; 地铁岩土工程变形控制理论与实践; 邻近地铁设施的软土深基坑工程变形控制设计与实践; 桩基础沉降变形控制设计原理、方法与工程实践; 桩基础设计理论变革: 从强度控制设计到变形控制设计; 深圳地区建筑深基坑变形控制设计实践与探讨; 超高层建筑基础沉降控制设计与实践; 岩体隧道变形精细化分析方法与应用; 软土盾构隧道变形控制分析方法与应用; 高填黄土路堤及结构物沉降计算; 地基的变形控制设计; 道路工程中复合地基沉降与稳定控制设计理论及方法; 软土地区高速铁路路基变形控制设计理论与实践; 水利涵闸的变形控制设计。

本书可供从事土木工程设计、施工、监测、研究、工程管理工程技术人员和大专院校土木工程及其相关专业师生参考。

责任编辑: 王 梅 辛海丽

责任校对: 王 瑞

## 岩土工程西湖论坛系列丛书 岩土工程变形控制设计理论与实践 龚晓南 杨仲轩 主编

\*

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

大厂回族自治县正兴印务有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 29 字数: 722 千字

2018 年 10 月第一版 2018 年 10 月第一次印刷

定价: 88.00 元

ISBN 978-7-112-22596-5

(32681)

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

随着现代化进程的飞速发展，各类土木工程日新月异，呈现高、大、深、重的发展趋势，对岩土工程变形控制提出了更高的要求。为了加强土木工程各行业间的交流，促进岩土工程的变形控制设计理论与实践的发展，中国工程院土木、水利与建筑工程学部，中国土木工程学会土力学及岩土工程分会，浙江省科学技术协会和浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心共同主办的“岩土工程西湖论坛”2018年的主题确定为“岩土工程变形控制设计理论与实践”。为了配合“岩土工程西湖论坛（2018）”，论坛组委会邀请全国各地岩土工程专家编写出版《岩土工程变形控制设计理论与实践》。

任何一个岩土工程都要满足稳定和变形控制要求，传统岩土工程设计大都基于承载力控制设计。随着人民生活质量的提高、国家综合国力的增强，对工程建设项目的变形控制要求也不断提高。我国城市化发展迅速，高层建筑、高速公路、高速铁路、机场、城市地铁等工程建设大规模兴起，对变形控制要求也愈来愈高，甚至十分严苛。工程建设中出现的新需求也进一步促进了工程理论和技术的发展，岩土工程变形控制设计理论和方法近年来也得到快速发展。

本书介绍地铁、桩基、基坑、建筑、隧道、道路、水利等工程领域变形控制设计理论与实践，主要内容包括：概论；地铁岩土工程变形控制理论与实践；邻近地铁设施的软土深基坑工程变形控制设计与实践；桩基础沉降变形控制设计理论、方法与工程实践；桩基础设计理论变革：从强度控制设计到变形控制设计；深圳地区建筑深基坑变形控制设计实践与探讨；超高层建筑基础沉降控制设计与实践；岩体隧道变形精细化分析方法与应用；软土盾构隧道变形控制分析方法与应用；高填黄土路堤及结构物沉降计算；地基的变形控制设计；道路工程中复合地基沉降与稳定控制设计理论及方法；软土地区高速铁路路基变形控制设计理论与实践；水利涵闸的变形控制设计。

本书共14章，由浙江大学龚晓南编写第1章，由深圳市地铁集团有限公司刘树亚、陈湘生编写第2章，华东建筑设计研究院有限公司王卫东、徐中华、李青编写第3章，中国建筑科学研究院刘金波等编写第4章，同济大学杨敏、罗如平、杨军编写第5章，深圳市工勘岩土集团有限公司左人宇、黄天河编写第6章，华东建筑设计研究院有限公司王卫东、吴江斌、常林越编写第7章，同济大学朱合华等编写第8、9章，长安大学谢永利编写第10章，广东省水利水电科学研究院杨光华编写第11、14章，浙江大学俞建霖、龚晓南、李俊圆编写第12章，同济大学宫全美、王炳龙编写第13章。

全书由龚晓南和杨仲轩负责统稿。在编写过程中，编者参考和引用了大量文献资料，在此对其原作者深表谢意。

由于编者水平有限，书中纰漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

# 目 录

<b>1 概论</b> .....	1
1.1 岩土工程变形控制理念及发展态势 .....	1
1.2 地基承载力和地基稳定性 .....	2
1.3 变形控制设计理念在建筑工程中的应用 .....	5
1.4 变形控制设计理论在基坑工程中的应用 .....	6
1.5 变形控制设计理论在道路工程中的应用 .....	6
1.6 复合地基按变形控制设计 .....	10
1.7 岩土工程变形控制的技术措施 .....	13
1.8 发展展望 .....	14
<b>2 地铁岩土工程变形控制理论与实践</b> .....	15
2.1 地铁主要岩土工程变形问题和变形控制论 .....	15
2.1.1 地铁主要岩土工程变形问题 .....	15
2.1.2 控制论及其方法论意义 .....	16
2.1.3 结构变形是目前岩土工程直接易测的数字指标 .....	17
2.1.4 地铁岩土工程变形特点 .....	17
2.1.5 工程变形控制论 .....	18
2.2 地铁岩土工程变形控制理论 .....	20
2.2.1 地铁岩土工程变形控制内容与流程 .....	20
2.2.2 控制内容简析 .....	20
2.2.3 关键性控制原则 .....	23
2.3 明挖法车站或区间基坑工程变形控制方法 .....	24
2.3.1 设计理论 .....	25
2.3.2 变形控制主要方法 .....	27
2.3.3 监测与工程效果信息反馈方案 .....	29
2.4 逆作法车站或区间工程变形控制方法 .....	29
2.4.1 设计理论 .....	29
2.4.2 监测与工程效果反馈方案 .....	30
2.4.3 变形控制措施 .....	31
2.5 轴力伺服内支撑的基坑工程变形控制方法 .....	31
2.5.1 基本原理 .....	31
2.5.2 变形控制主要方法 .....	33
2.5.3 变形控制效果工程案例分析 .....	34
2.6 盾构法隧道工程变形控制方法 .....	40

2.6.1	设计理论	40
2.6.2	变形控制主要方法	43
2.6.3	监测方案	47
2.6.4	变形控制效果工程案例分析	48
2.7	矿山法隧道工程变形控制方法	50
2.7.1	设计理论	50
2.7.2	变形控制措施	51
2.7.3	监测实施	53
2.7.4	案例分析	54
2.8	近接隧道工程变形控制方法	57
2.8.1	设计理论	57
2.8.2	变形控制主要方法	61
2.8.3	既有运营隧道综合监控量测技术	64
2.8.4	变形控制效果工程案例分析	64
2.9	顶管法隧道工程变形控制方法	67
2.9.1	顶管法简介	67
2.9.2	预测变形主要方法	68
2.9.3	变形控制主要方法	70
2.9.4	监测方案	71
2.9.5	变形控制效果工程案例分析	73
3	邻近地铁设施的软土深基坑工程变形控制设计与实践	78
3.1	引言	78
3.2	软土工程特性——以上海软土为例	79
3.2.1	上海土层层序	79
3.2.2	土性描述	79
3.2.3	软土工程特性	80
3.2.4	软土工程问题	82
3.3	邻近地铁设施的软土深基坑变形控制指标	83
3.3.1	地铁隧道变形控制指标	83
3.3.2	邻近地铁的软土深基坑变形控制指标	84
3.4	邻近地铁设施的基坑工程变形控制设计方法	86
3.4.1	分坑实施设计方法	86
3.4.2	坑内土体加固设计方法	89
3.4.3	设置地下连续墙槽壁加固	90
3.4.4	设置隔断墙法	93
3.4.5	承压水控制	93
3.4.6	土方分块开挖设计	96
3.5	工程实例	98
3.5.1	基坑工程概况	98

3.5.2	环境条件 .....	98
3.5.3	工程地质条件 .....	98
3.5.4	基坑支护方案 .....	99
3.5.5	基坑开挖对邻近隧道影响的数值分析 .....	104
3.6	结语 .....	110
<b>4</b>	<b>桩基础沉降变形控制设计原理、方法与工程实践</b> .....	<b>113</b>
4.1	概论 .....	113
4.1.1	桩的基本概念 .....	113
4.1.2	影响桩承载力和沉降变形特性的因素 .....	114
4.2	目前桩基沉降变形控制设计方法及存在的问题 .....	117
4.2.1	目前桩基础的沉降变形计算方法 .....	117
4.2.2	目前计算方法存在的问题 .....	121
4.3	桩基础沉降变形控制设计的目标 .....	124
4.3.1	控制总沉降量 .....	125
4.3.2	限制差异沉降 .....	125
4.3.3	避免出现倾斜 .....	125
4.3.4	保证桩土和承台共同工作 .....	126
4.3.5	减小工后沉降 .....	127
4.4	试验研究及分析 .....	128
4.4.1	试验工作内容 .....	128
4.4.2	试验分析 .....	130
4.4.3	本次试验的一些结论 .....	141
4.5	桩基础的沉降变形控制设计 .....	142
4.5.1	桩基础沉降变形控制设计思路 .....	142
4.5.2	影响桩基础沉降变形的主要因素 .....	142
4.5.3	不同桩基础沉降变形控制设计 .....	147
4.6	沉降控制的工程案例 .....	150
4.6.1	灌注桩后注浆 .....	150
4.6.2	劲性复合桩(组合桩) .....	152
4.7	结论和建议 .....	159
<b>5</b>	<b>桩基础设计理论变革：从强度控制设计到变形控制设计</b> .....	<b>161</b>
5.1	绪论 .....	161
5.2	减沉桩基础设计方法及工程应用 .....	163
5.2.1	减沉桩基础设计概念 .....	163
5.2.2	减沉桩基础的设计方法 .....	165
5.2.3	工程应用 .....	172
5.3	长短桩组合桩基础(杨敏, 1997 <sup>[37]</sup> ) .....	178
5.4	按变形控制设计高层建筑桩基础的理论与应用研究 .....	181
5.4.1	桩土荷载分担特性 .....	182



5.4.2	桩筏基础极限承载力与整体安全度分析	185
5.4.3	基于变形控制设计的高层建筑桩筏基础应用实例	198
5.5	基于变形控制原则的桩基础设计指南	212
5.6	结束语	215
<b>6</b>	<b>深圳地区建筑深基坑变形控制设计实践与探讨</b>	<b>220</b>
6.1	前言	220
6.2	深圳地区常见地层条件	220
6.2.1	人工填土层	220
6.2.2	淤泥层	221
6.2.3	黏性土和砂层	221
6.2.4	残积层	221
6.2.5	基岩	221
6.3	深圳地区深基坑常用支护形式	221
6.4	工程项目资料	224
6.5	统计数据分折	226
6.5.1	地层条件	226
6.5.2	支护形式	226
6.5.3	插入比、支撑刚度系数和围护系统刚度	227
6.5.4	位移和沉降	227
6.6	深圳地区岩土参数及数值分析	228
6.6.1	深圳地区常见土层参数	228
6.6.2	基于 HSS 模型的深圳地区土层参数及应用	231
6.6.3	HSS 模型参数应用	232
6.7	结语	238
<b>7</b>	<b>超高层建筑基础沉降控制设计与实践</b>	<b>240</b>
7.1	前言	240
7.2	超高层建筑桩基础沉降控制要求	240
7.3	基础总沉降控制	242
7.3.1	上部结构荷载	242
7.3.2	基础底板厚度	243
7.3.3	桩型合理选择与优化设计	244
7.3.4	沉渣控制与后注浆技术	246
7.4	基础差异沉降控制	247
7.4.1	优化上部结构体系	247
7.4.2	利用上部结构刚度作用	248
7.4.3	优化桩基布置	249
7.5	工程实例	251
7.5.1	中央电视台 CCTV 新台址	251
7.5.2	天津 117 大厦	252



7.6	结语	254
<b>8</b>	<b>岩体隧道变形精细化分析方法与应用</b>	<b>258</b>
8.1	概述	258
8.2	隧道围岩地层参数的精细化采集	260
8.3	隧道围岩地层的连续分析模型与方法	264
8.4	隧道围岩地层的非连续分析模型与方法	267
8.4.1	块体理论	267
8.4.2	非连续变形分析 (DDA)	268
8.5	典型工程应用	271
<b>9</b>	<b>软土盾构隧道变形控制分析方法与应用</b>	<b>283</b>
9.1	概述	283
9.2	盾构隧道衬砌的精细化设计方法	284
9.2.1	盾构管片衬砌的精细化设计方法	284
9.2.2	盾构管片接缝防水的精细化设计优化	291
9.3	软土盾构隧道施工微扰动控制技术	296
9.3.1	微扰动控制原理	297
9.3.2	适用于软土地层盾构微扰动分析的本构模型	299
9.3.3	软土地层盾构微扰动施工控制体系	302
9.3.4	典型工程应用——盾构侧穿重要建筑物工程中的应用	306
9.4	盾构隧道长期变形分析	310
9.4.1	渗漏水引起的变形分析	310
9.4.2	渗漏水引起的沉降解析方法	313
9.5	结论	315
<b>10</b>	<b>高填黄土路堤及结构物沉降计算</b>	<b>318</b>
10.1	概述	318
10.2	高填黄土路堤实用沉降计算及修正方法	319
10.2.1	高路堤一维沉降计算方法	319
10.2.2	考虑侧向变形的高路堤沉降计算修正	320
10.3	高填黄土路堤工后沉降计算方法	321
10.3.1	考虑蠕变的沉降计算方法	321
10.3.2	次固结系数的确定方法	321
10.4	高填黄土路堤涵洞沉降分析	323
10.4.1	高填黄土路堤涵洞沉降影响因素数值仿真分析	323
10.4.2	EPS 材料对高填黄土路堤涵洞沉降影响离心模型试验分析	329
10.5	高填黄土路堤沉降控制措施	331
10.5.1	减小路堤沉降措施	331
10.5.2	高路堤沉降纵向影响及预留量的计算	332
10.5.3	沉降控制技术	333
10.5.4	沉降监测技术	333

10.6	高填黄土路堤涵洞沉降减沉措施	334
10.6.1	高填黄土路堤涵洞减沉机理	334
10.6.2	高填黄土路堤涵洞减沉设计方法	334
10.7	小结	336
<b>11</b>	<b>地基的变形控制设计</b>	<b>338</b>
11.1	概述	338
11.2	地基变形控制设计的案例	338
11.3	地基沉降计算的切线模量法	342
11.3.1	地基沉降计算的原位土切线模量法	343
11.3.2	原位土的双曲线割线模量法	347
11.3.3	原位土的任意曲线的切线模量法	348
11.3.4	原位土切线模量法在桩基沉降计算中的应用	350
11.3.5	简化的土的沉降本构模型	351
11.3.6	工程应用	352
11.3.7	小结	354
11.4	按变形控制确定地基承载力的方法	355
11.4.1	前言	355
11.4.2	地基承载力取值的双控原则	355
11.4.3	现有地基承载力确定方法分析	356
11.4.4	地基承载力的正确确定方法及其应用	363
11.4.5	小结	370
11.5	刚性桩复合地基沉降计算的变形协调法	371
11.5.1	引言	371
11.5.2	基于桩土位移协调的刚性桩复合地基沉降计算方法	374
11.5.3	工程实例应用	376
11.5.4	小结	382
11.6	结论	382
<b>12</b>	<b>道路工程中复合地基沉降与稳定控制设计理论及方法</b>	<b>385</b>
12.1	前言	385
12.2	道路工程中复合地基沉降分析理论	385
12.2.1	研究现状	385
12.2.2	柔性基础下复合地基荷载传递机理	386
12.2.3	柔性基础下复合地基沉降分析方法	387
12.3	道路工程中复合地基稳定分析理论	394
12.3.1	研究现状	394
12.3.2	路堤下复合地基的渐进破坏过程	396
12.3.3	路堤下复合地基中桩体破坏模式的差异性	399
12.3.4	考虑桩体破坏模式差异的路堤下复合地基稳定分析方法	400
12.4	算例及工程实例分析	402

12.4.1	路堤下复合地基沉降分析 .....	402
12.4.2	路堤下复合地基稳定分析 .....	403
12.5	结论 .....	406
<b>13</b>	<b>软土地区高速铁路路基变形控制设计理论与实践</b> .....	<b>409</b>
13.1	引言 .....	409
13.2	高速铁路路基工后沉降控制标准及设计理念 .....	411
13.2.1	高速铁路路基工后沉降控制标准 .....	411
13.2.2	高速铁路路基结构设计理念 .....	413
13.3	高速铁路路基荷载特性及计算方法 .....	415
13.3.1	高速铁路路基面上的竖向设计荷载 .....	416
13.3.2	路基面上的动荷载特性及估算方法 .....	417
13.4	高速铁路路基工后沉降计算方法 .....	422
13.4.1	高速铁路路基工后沉降组成 .....	422
13.4.2	列车动荷载长期作用引起的路基变形计算方法探讨 .....	424
13.5	高速铁路路基软土地基加固方法及沉降性状 .....	428
13.5.1	高速铁路路基软土地基加固方法简介 .....	428
13.5.2	桩网、桩筏及桩板结构路基沉降变形性状 .....	431
13.5.3	桩网、桩筏及桩板结构沉降计算方法 .....	432
13.5.4	工程实例 .....	434
<b>14</b>	<b>水利涵闸的变形控制设计</b> .....	<b>438</b>
14.1	穿堤涵的变形控制问题 .....	438
14.1.1	换填处理 .....	438
14.1.2	桩基处理 .....	439
14.1.3	地基处理后涵顶荷载问题 .....	439
14.1.4	不同基础形式沉降引起的穿堤涵的问题 .....	440
14.1.5	泵房不同基础形式引起的变形问题 .....	440
14.2	穿堤水闸的变形控制问题 .....	441
14.2.1	软基中的浮运闸 .....	441
14.2.2	软基水闸的桩基础问题 .....	441
14.2.3	复合地基的应用 .....	441
14.3	软土地基刚性桩复合地基的沉降计算 .....	442
14.4	考虑侧向变形的软土地基非线性沉降计算 .....	444
14.4.1	侧限条件下的压缩沉降 .....	444
14.4.2	侧向变形引起的沉降计算 .....	445
14.4.3	$e-p$ 曲线的简易求取方法 .....	446
14.4.4	工程案例 .....	447

# 1 概论

龚晓南

(浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

## 1.1 岩土工程变形控制理念及发展态势

众所周知, 任何一个岩土工程都要满足稳定和变形控制要求。在岩土工程设计中什么是按稳定控制设计? 什么是按变形控制设计? 按变形控制设计和按稳定控制设计究竟有什么不同? 是近年来经常遇到的问题, 也是值得我们去思考、去探讨的问题。下面通过建筑基础设计和基坑围护结构设计为例对什么是按稳定控制设计? 什么是按变形控制设计? 两者究竟有什么不同? 作简单分析。

在建筑基础工程设计中, 按稳定控制设计通常称为按承载力控制设计, 按变形控制设计通常称为按沉降控制设计。地基稳定性和地基承载力两个概念有较大的异同, 在下一节再作简要分析。在建筑基础工程设计中, 控制地基变形主要是控制地基沉降, 因此按变形控制设计这里称为按沉降控制设计。目前, 建筑基础工程设计中的常规思路是按承载力控制设计。按承载力控制设计中, 首先, 按建造建筑物对地基承载力要求进行设计。如果天然地基的承载力不能满足要求, 则要求对场地地基进行处理。如对天然地基进行土质改良, 或采用复合地基, 或采用桩基础, 使形成的人工地基的承载力满足要求。然后, 验算满足承载力要求的人工地基沉降量是否满足沉降量控制的要求, 如满足则完成设计; 如沉降量超过允许沉降量, 则需要进一步提高人工地基的承载力, 然后再验算人工地基沉降量是否满足要求, 如满足则完成设计; 如还不满足, 则需要进一步提高人工地基的承载力, 再验算人工地基沉降量是否满足要求; 通过不断修改设计, 达到人工地基沉降量不超过允许沉降量, 满足要求为止。按沉降控制设计的思路与按承载力控制设计的思路不同。按沉降控制设计中, 首先按建造建筑物对地基沉降量控制要求进行设计。如果采用天然地建筑物沉降量控制不能满足要求, 则要求对场地地基进行处理。如对天然地基进行土质改良, 或采用复合地基, 或采用桩基础, 使形成的人工地基上的建筑物沉降量控制满足要求。然后, 验算人工地基承载力是否满足要求。一般情况下, 沉降量控制能满足要求, 承载力一般也能满足要求。如承载力不能满足要求, 则需进一步采取加强措施, 直至满足要求。从以上分析可以看到下面几点: 无论是按承载力控制设计, 还是按沉降控制设计, 设计采用的地基承载力和地基沉降量控制都要满足要求; 按承载力控制设计和按沉降控制设计两者设计思路和设计过程是不一样的, 前者从承载力入手, 后者从沉降控制入手; 前者侧重控制承载力要求, 后者侧重控制沉降要求。

在基坑工程围护结构设计中, 以悬臂式围护结构 (图 1.1-1) 设计为例。在悬臂式围

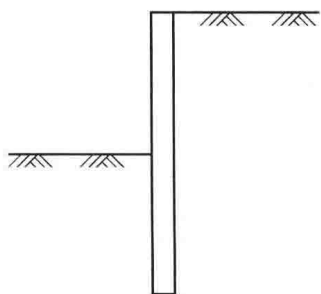


图 1.1-1 悬臂式围护结构

护结构设计中,按稳定控制设计则要求在最不利工况下,围护结构不会产生失稳破坏就满足设计要求了,围护结构产生多大变形都是允许的;按变形控制设计则要求在最不利工况下,围护结构不会产生超过变形的控制量。在围护结构变形得到合理控制下,一般不会产生失稳破坏。在基坑周围环境条件允许围护结构产生较大变形的条件下,基坑围护结构设计应按稳定控制设计;在基坑周围环境条件不允许围护结构产生较大变形的条件下,基坑围护结构设计应按变形控制设计。基坑周围环境条件允许围护结构产生的最大变形量就是

围护结构设计变形控制量。作用在围护结构上的土压力大小直接与围护结构变形量有关,围护结构设计变形控制量一定要合理。在基坑围护结构设计中,是采用按稳定控制设计还是按变形控制设计,主要取决于周围环境对基坑围护结构变形控制量的要求。对变形控制基本上没有要求,采用按稳定控制设计;对变形控制有要求,则应采用按变形控制设计。需要按变形控制设计时,应合理选用设计变形控制量。变形控制量的大小直接影响工程投资,有时是指数增长关系。变形控制量减小,工程投资以指数比例增长。

上面以建筑基础工程设计和基坑工程围护结构设计为例,简要分析了什么是按稳定控制设计?什么是按变形控制设计?按变形控制设计和按稳定控制设计两者的区别。下面简要介绍岩土工程变形控制设计发展态势。

稳定和变形控制是每个岩土工程必须考虑的两个基本问题。稳定是每个岩土工程的最基本要求,失去稳定意味着破坏。稳定是变形控制的前提。制约变形控制的因素很多。以地基承受荷载而言,有荷载作用,地基就会产生变形。荷载作用大,地基变形量大;地基刚度小,地基变形量大。变形控制量受使用要求、上部结构形式和综合工程投资能力的影响和制约。以建筑地基为例,随着人民生活质量的提高、国家综合国力的增强,对变形控制要求也不断提高。高层建筑比低层建筑对变形控制量要求要高。改革开放以来,土木工程建设发展很快,城市化发展迅速,高层建筑、高速公路、高速铁路、机场等工程建设迅猛发展,对变形控制要求越来越高。工程建设中的需求促进工程技术的发展,促进工程理论的发展。岩土工程变形控制设计理论近年来得到快速发展。

近年来,人们对岩土体的应力-应变关系有了进一步的认识,建立了一些岩土体的工程实用本构模型,土工计算机分析能力得到很大提高,岩土工程变形计算能力有了长足的进步,为岩土工程变形控制设计理论的快速发展提供了技术支撑。

在 1.2 节简要介绍地基稳定性和地基承载力的异同,在 1.3~1.6 节分别讨论变形控制设计理念在建筑工程、道路工程、基坑工程和复合地基设计中的应用,在 1.7 节简要介绍岩土工程变形控制的技术措施,在 1.8 节讨论变形控制设计理论发展展望。

## 1.2 地基承载力和地基稳定性

先讨论地基承载力,再分析地基承载力和地基稳定性的异同。

我国在不同时期、不同行业的规范中,对地基承载力的表达采用了不同的形式和不同的测定方法。因此,在已发表的论文、工程案例、出版的著作和已完成的设计文件中,对

地基承载力也采用了多种不同的表达形式。

对地基承载力的表达形式主要有下述几种：地基极限承载力、地基容许承载力、地基承载力特征值、地基承载力标准值、地基承载力基本值以及地基承载力设计值等。在介绍上述不同表述的地基承载力概念前，先介绍土塑性力学中关于条形基础 Prandtl 极限承载力解的基本概念。

条形基础 Prandtl 极限承载力解的极限状态示意图如图 1.2-1 所示。

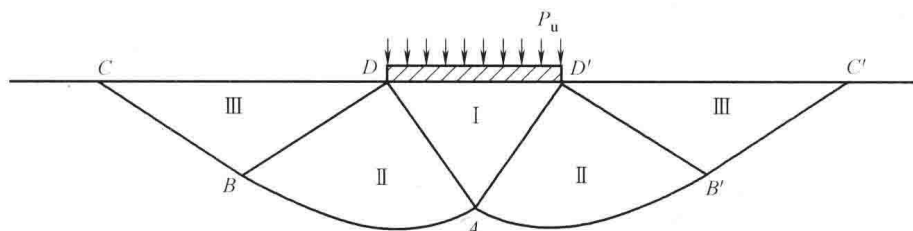


图 1.2-1 条形基础 Prandtl 解示意图

设条形基础作用在地基上的压力为均匀分布，基础底面光滑，即摩擦系数等于零。地基为半无限体，土体本构模型服从刚塑性假设，即土体中应力小于屈服应力时，土体表现为刚体，不产生变形，当土中应力达到屈服应力时，土体处塑性流动状态。土体的抗剪强度指标为  $c$ 、 $\varphi$ 。在求解中不考虑土体的自重，即假设土体自重等于零。根据土塑性力学理论，当条形基础上荷载处于极限状态时，地基中产生的塑性流动区如图 1.2-1 中所示。图中 I 和 III 区为等腰三角形，II 区为楔形，其中  $AB$  和  $AB'$  为对数螺线。图 1.2-1 中  $\angle ADD'$  和  $\angle AD'D$  为  $\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ ， $\angle BCD$  和  $B'C'D'$  为  $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ ， $\angle ADB$  和  $\angle AD'B'$  为  $\frac{\pi}{2}$ 。

根据极限分析理论或滑移线理论，可得到条形基础极限荷载表达式为：

$$P_u = c \tan \varphi \left[ \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \exp(\pi \tan \varphi) - 1 \right] \quad (1.2-1)$$

式中  $c$ ——土体黏聚力；

$\varphi$ ——内摩擦角。

当  $\varphi=0$  时，式 (1.2-1) 蜕化成

$$P_u = (2 + \pi)c \quad (1.2-2)$$

上述条形基础 Prandtl 极限承载力解是在设条形基础作用在地基上的压力为均匀分布，基础底面光滑，地基为半无限均质体，土体服从刚塑性模型等假设前提下取得的。它是唯一解，而且与基础宽度等因素无关，只与土体的强度指标有关。

土力学及基础工程中的太沙基地基承载力解等表达形式均源自该 Prandtl 解，可根据一定的条件，通过对式 (1.2-1) 进行修正获得。

地基极限承载力是地基处于极限状态时所能承担的最大荷载，或者说是地基产生失稳破坏前所能承担的最大荷载。

地基极限承载力也可通过荷载试验确定。在荷载试验过程中，通常取地基处于失稳破坏前所能承担的最大荷载为极限承载力值。通过荷载试验确定的地基极限承载力值与理论



计算值会有差异，误差主要源于理论计算时的几项假设前提。

对某一地基而言，一般说来其地基极限承载力值是唯一的。或者说对某一地基，其地基极限承载力值是一确定值。

地基容许承载力是通过地基极限承载力除以安全系数得到的。影响安全系数取值的因素很多，如安全系数取值大小与建筑物的重要性、建筑物的基础类型、采用的设计计算方法以及设计计算水平等因素有关，还与国家的综合实力、生活水平以及建设业主的实力等因素有关。

因此，一般说来对某一地基而言，其地基容许承载力值不是唯一的。

在工程设计中安全系数取值不同，地基容许承载力值也就不同。安全系数取值大，工程安全储备也大；安全系数取值小，工程安全储备也小。

在工程设计中，地基容许承载力是设计人员能利用的最大的地基承载力值，或者说地基承载力设计取值不能容许超过地基容许承载力值。

地基极限承载力和地基容许承载力是国内外最常用的地基承载力概念。

地基承载力特征值、地基承载力标准值、地基承载力基本值、地基承载力设计值等都是与相应的规范规程配套使用的地基承载力表达形式。

现行《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011 采用的地基承载力表达形式是地基承载力特征值，对应的荷载效应为标准组合。在条文说明中对地基承载力特征值的解释为“用以表示正常使用极限状态计算时采用的地基承载力的设计使用值，其涵义即为在发挥正常使用功能时所允许采用的抗力设计值”。规范中还在地基承载力特征值的试验测定作出了具体规定。

《建筑地基基础设计规范》GBJ 7—89 采用地基承载力标准值、地基承载力基本值和地基承载力设计值等表达形式。地基承载力标准值是按该规范规定的标准试验方法经规范规定的方法统计处理后确定的地基承载力值。也可以根据土的物理和力学性质指标，根据规范提供的表确定地基承载力基本值，再经规范规定的方法进行折算后得到地基承载力标准值。对地基承载力标准值，经规范规定的方法进行基础深度、宽度等修正后，可以得到地基承载力设计值，对应的荷载效应为基本组合。这里的地基承载力设计值应理解为工程设计时可利用的最大的地基承载力取值。

在某种意义上，可以将上述规范中所述的地基承载力特征值和地基承载力设计值理解为地基容许承载力值，而地基承载力标准值和地基承载力基本值是为了获得上述地基承载力设计值的中间过程取值。

笔者认为掌握了地基极限承载力、地基容许承载力以及安全系数这些最基本的概念，就不难在此基础上理解各行业现行及各个时期的规范内容，并能够使用现行规范进行工程设计。

在了解上述关于地基承载力分析后，就不难分析地基承载力和地基稳定性的异同。前面已谈到地基承载力中的地基极限承载力是地基处于极限状态时所能承担的最大荷载，或者说地基产生失稳破坏前所能承担的最大荷载。前面介绍的条形基础 Prandtl 极限承载力解是在几项假设前提下求得的。在同样情况下，可以说地基极限承载力是地基稳定性的量度。对于一地基，地基极限承载力是一定值。地基极限承载力和地基稳定性两者概念是一致的。除地基极限承载力以外的地基承载力与地基稳定性，在概念上有较大的区别。另



外，还要注意地基承载力的概念主要应用于建筑地基设计，在堤坝工程、道路工程和边坡工程等岩土工程设计中强调稳定分析和变形计算。岩土工程三个基本问题是稳定问题、变形问题和渗流问题。岩土工程基本问题中没有明显指承载力问题。因为除极限承载力以外，承载力概念中既包含有稳定的概念，又包含有变形的概念，但又不能包含稳定和变形概念的全部。极限承载力是客观的量度，是唯一值。其他承载力概念都与技术标准（规程、规范）相应的规定有关，是主观的量度，不是唯一值。因此，承载力验算通过，也许还不能满足稳定性要求；满足稳定性要求，承载力验算还不能通过。

不能仅仅拘泥于承载力和稳定性概念上的讨论，而应针对不同的工程应用，如建筑基础工程、堤坝基础工程、道路基础工程和边坡工程等分开讨论分析。

对于建筑基础工程，地基承载力满足要求时，其沉降变形量一般会控制在某允许值内，一般不会发生各种剪切破坏，可认为也满足了稳定性。地基承载力的验算包含了变形和稳定。若该建筑物对沉降变形量控制要求很高，超出规范要求，则地基承载力满足规范要求时，沉降变形量控制不一定能达到要求。若建筑物对沉降变形量控制要求比较高时，应按沉降控制设计。

对堤坝基础工程、道路基础工程和边坡工程等岩土工程当地基承载力满足要求时，其稳定性不一定能满足要求。仅仅验算承载力是不够的，一定要重视稳定分析和变形计算分析。对沉降变形量控制要求比较高时，应按沉降控制设计。

### 1.3 变形控制设计理念在建筑工程中的应用

建筑工程基础设计经常会遇到这种情况，采用浅基础地基承载力可以满足要求，而沉降量超过标准规定不能满足要求。遇到这种情况，目前在设计中多数改用桩基础，也有采用减少沉降量，以满足沉降量不超过标准规定的要求。下面通过一实例分析，说明按沉降控制设计的思路。例如：某工程采用浅基础时地基是稳定的，天然地基在荷载作用下不会产生失稳破坏。但采用浅基础时地基沉降量达 500mm，超过标准规定，不能满足要求。

现采用 250mm×250mm 钢筋混凝土预制方桩，桩长 15m。布桩 200 根时，地基沉降量为 50mm；布桩 150 根时，地基沉降量为 70mm；布桩 100 根时，地基沉降量为 120mm；布桩 50 根时，地基沉降量为 250mm。地基沉降量  $s$  与布桩数  $n$  的关系曲线如图 1.3-1 所示。若沉降量要求控制小于 150mm，则由图 1.3-1 可知，布桩大于 90 根即要满足要求。从该例可看到按沉降量控制设计的实质及设计思路。

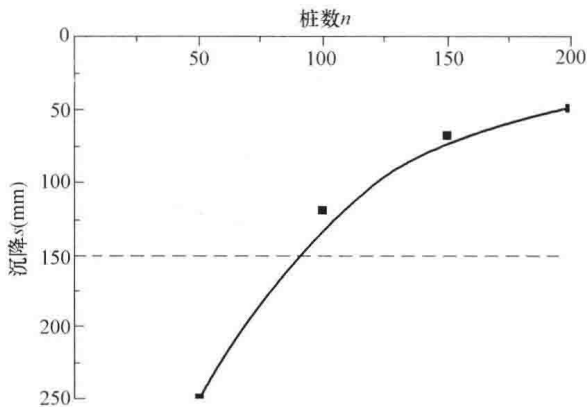


图 1.3-1 桩数  $n$  与沉降  $s$  关系曲线示意图

图 1.3-1 为地基沉降量  $s$  与布桩数  $n$  的关系，实际上图示规律也表示工程投资与沉降量的关系。减小沉降量，提高沉降量控制值，意味着增加工程投资。于是，按沉降控制设计可以合理控制基础工程的投资，达到

节省工程投资的目的。

按沉降控制设计思路特别适用于深厚软弱地基上的基础工程设计。

## 1.4 变形控制设计理论在基坑工程中的应用

在基坑工程围护体系设计时,要重视由于围护体系失效或土方开挖产生的周边地基变形对周围环境和工程施工造成的影响。当场地开阔,周边没有建(构)筑物和市政设施时,基坑围护体系的主要要求是自身的稳定性,此时可以允许围护结构及周边地基发生较大的变形。在这种情况下,可按围护体系的稳定性要求进行设计。当基坑周边有建(构)筑物和市政设施时,应评估其重要性,分析其对地基变形的适应能力,并提出基坑围护结构变形和地面沉降的允许值。在这种情况下,围护体系设计不仅要满足稳定性要求,还要满足变形控制要求。围护体系往往按变形控制要求进行设计。

按稳定控制设计只要求基坑围护体系满足稳定性要求,允许产生较大的变形;而按变形控制设计不仅要求围护体系满足稳定性要求,还要求围护体系变形小于某一控制值。由于作用在围护结构上的土压力值与位移有关,在按稳定控制设计或按变形控制设计时,作为荷载的土压力设计取值是不同的。在选用基坑围护形式时,应明确是按稳定控制设计,还是按变形控制设计。当可以按稳定控制设计时,采用按变形控制设计的方案会增加较多的工程投资,造成浪费;当需要按变形控制设计时,采用按稳定控制设计的方案则可能对环境造成不良影响,甚至酿成事故。

基坑围护体系按变形控制设计时,基坑围护变形控制量不是越小越好,也不宜统一规定。设计人员应以基坑变形对周围市政道路、地下管线、建(构)筑物不会产生不良影响,不会影响其正常使用为标准,由设计人员合理确定变形控制量。

根据基坑周边环境条件,首先要确定采用按稳定控制设计,还是按变形控制设计。该设计理念至今尚未引起充分重视,或者说尚未提到理论的高度。现有的规程、规范、手册及设计软件,均未能从理论高度给予区分,多数有经验的设计师是通过综合判断调整设计标准来区分的。笔者认为,我国已有条件推广根据基坑周边环境条件采用按稳定控制设计还是按变形控制设计的设计理念,从而进一步提高我国的基坑围护设计水平。

## 1.5 变形控制设计理论在道路工程中的应用

在软弱地基上修建道路时,特别是在深厚软弱地基上修建道路时,工后沉降控制显得非常重要。在一般路段其按沉降量控制设计的实质及设计思路基本同建筑工程按沉降量控制设计。减小道路的沉降量,提高沉降量控制值,意味着增加工程投资。于是,按沉降控制设计可以合理控制道路工程的投资,达到节省工程投资的目的。

对道路工程,变形控制设计理论在保证桥和桥头引道沉降量平稳过渡,避免“桥头跳车”现象有重要的意义。还有在软弱土层厚薄变化较大地段的道路、涵洞的两侧等路段。在上述路段,地基处理应按沉降控制设计。

下面通过一工程案例,介绍变形控制设计理论在道路工程中的应用。

杭宁高速公路浙江段跨越杭嘉湖平原,大部分地区为河相、湖相沉积,软土分布范围