

地下水位与环境岩土工程

周 健

屠洪权 编著

缪俊发



同济大学出版社

地下水位与环境岩土工程

周 健
屠洪权 编著
缪俊发

同济大学出版社

内容提要

本书是一部全面系统介绍因环境变化引起的地下水位变化对岩土工程影响的专著,内容丰富,取材新颖,较多部分含有编著者的最新研究成果和创见,反映了环境岩土工程领域的最新发展。

本书共分六章,主要内容有:地下水位与环境岩土工程的关系;地下水位上升对浅基础的影响;地下水位上升对地基土的液化影响;地下水位上升对震陷的影响;地下水位下降与地面沉降;地下水位变化对特殊土工程性质的影响等。

鉴于目前尚无这方面的专著,本书可供地质、土建、水利和环境工程等部门勘察、设计、施工科研技术人员和高等院校有关专业师生参考,也可作为本科生、研究生的补充教材。

责任编辑 郑元标
封面设计 陈益平

地下水位与环境岩土工程
周健 屠洪权 缪俊发 编著
同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

上海市印刷七厂印刷

开本:850 × 1168 1/32 印张 7.375 字数:210 千字

1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月第 1 次印刷

印数:1~2000 定价:12.00 元

ISBN7-5608-1550-2/TU·160

前 言

近来,由于温室效应,海平面和沿海地区地下水位不断上升。另一方面,随着城市建设的发展,深层地下水位不断下降。因自然环境和人为因素引起的地下水位变化将对岩土工程问题产生较大影响,如地下水位上升将引起地基承载力的下降,增加液化和震陷危害程度,而且对膨胀土及湿陷性黄土的工程性质产生较大的影响。另外,地下水位的下降引起的地面沉降,已成为全球性的专门问题。到目前为止,还没有看到有关这方面的比较系统的书籍。为了促进环境岩土工程的发展和适应环境岩土工程实际的需要,作者学习和总结了国内外有关这方面的理论研究和工程实践,结合工程实际,对地下水位及环境岩土工程进行了一些理论研究。本书首次较全面系统地介绍了以上这些内容,并反映了编著者的最新研究成果和创见。

本书共分六章:第一章:地下水位与环境岩土工程的关系;第二章:地下水位上升对浅基础地基承载力的影响;第三章:地下水位上升对地基土的液化影响;第四章:地下水位上升对震陷的影响;第五章:地下水与地面沉降;第六章:地下水位变化对特殊土工程性质的影响。

本书可供地质、土建、水利和环境工程等部门勘察、设计、施工、科研技术人员和高等院校有关专业师生参考,也可作为本科生、研究生的补充教材。

本书第五章由缪俊发编著,其余各章由周健和屠洪权编著。

本书承蒙同济大学魏道燊教授于百忙之中认真审阅原稿,并提出了不少意见和建议,作者在此表示衷心的感谢。作者同时还要

目 录

第一章 地下水位与环境岩土工程的关系.....	1
1.1 环境对地下水位的影响.....	1
1.1.1 温室效应引起的地下水位变化.....	1
1.1.2 人为开采引起的地下水位的降低.....	2
1.2 地下水位变化引起的岩土工程中的问题.....	3
1.2.1 地下水位上升情况.....	3
1.2.2 地下水位下降情况.....	5
第二章 地下水位上升对浅基础地基承载力的影响.....	9
2.1 浅基础地基承载力理论.....	9
2.1.1 普朗特极限平衡理论.....	9
2.1.2 太沙基极限荷载公式.....	14
2.1.3 地基规范公式.....	17
2.2 地下水位上升影响的最大深度 $Z_{\max}$	21
2.2.1 问题的提出.....	21
2.2.2 影响公式的推导及计算分析.....	23
2.2.3 P_u'/P_u 随 $Z_{\max}$ 的增大而减小的理论证明.....	28
2.2.4 最大影响深度 $Z_{\max}$ 的确定.....	28
2.2.5 举例分析.....	33
2.3 地下水位上升对砂性土地基承载力的影响.....	38
2.3.1 运用泰勒补充公式进行定量分析.....	39
2.3.2 运用太沙基理论及地基规范公式进行分析.....	43
2.3.3 影响规律.....	44
2.3.4 工程实例分析.....	58
2.4 地下水位上升对粘性土地基承载力的影响.....	61
2.4.1 运用泰勒补充公式进行分析.....	61
2.4.2 运用太沙基理论或地基规范公式进行分析.....	64
2.4.3 影响规律.....	71
2.4.4 工程实例分析.....	83
2.5 小结.....	86

第三章 地下水位上升对地基土液化的影响	91
3.1 概述	91
3.2 砂土液化的机理	92
3.3 影响砂土液化的主要因素	94
3.3.1 内因方面	95
3.3.2 外因方面	98
3.4 砂土液化的判别方法	101
3.4.1 动剪应力对比法	101
3.4.2 规范判别法	106
3.4.3 剪切波速判别法	113
3.5 地下水位上升对砂土液化的影响	115
3.5.1 地下水位上升引起的砂土液化势变化分析	115
3.5.2 地下水位上升引起砂土液化的变化规律	122
3.6 实例分析	133
3.6.1 用Seed-Idriss法	133
3.6.2 用规范判别式分析	134
3.7 地下水位上升对粉土液化的影响	136
第四章 地下水位上升对震陷的影响	142
4.1 震陷产生的原因	142
4.2 震陷的计算分析法	143
4.2.1 软化模式	143
4.2.2 残余变形模式	144
4.2.3 震陷计算的简化法	155
4.3 地下水位上升对液化震陷影响的分析	165
第五章 地下水与地面沉降	172
5.1 地面沉降及其影响因素	172
5.1.1 地面沉降的天然影响因素	172
5.1.2 人类经济活动导致地面沉降的有关因素	172
5.2 地面沉降研究现状	173
5.2.1 地面沉降机理分析	173
5.2.2 地面沉降理论与模型的发展	174
5.2.3 抽水压密引起地面沉降的研究方法	177

5.3 抽水压密导致地面沉降的计算模型.....	178
5.3.1 Gambolati-Freeze模型.....	178
5.3.2 Corapcioglu-brutsaert模型.....	179
5.3.3 Miao-Wu模型.....	181
5.4 人工回灌与地面回弹.....	186
5.4.1 回灌对地面沉降的影响.....	186
5.4.2 地面回弹模型的建立与求解.....	187
5.4.3 人工回灌双层含水层组导致地面回弹的计算模型.....	187
5.5 地面沉降计算实例.....	191
5.5.1 场地水文地质条件.....	191
5.5.2 群井排水工程实施.....	192
5.5.3 群井降水模式分析.....	193
5.5.4 模拟计算.....	194
5.6 控制地面沉降的措施.....	196
5.6.1 统一制定经济发展规划.....	197
5.6.2 制定各种政策,合理控制开采地下水.....	197
5.6.3 人工补给地下水.....	197
5.6.4 各种治理措施.....	198
5.6.5 岩溶塌陷导致地面沉降的防治措施.....	198
第六章 地下水位变化对特殊土工程性质的影响.....	201
6.1 地下水位变化对黄土湿陷的影响.....	201
6.1.1 湿陷性黄土概述.....	201
6.1.2 地下水位上升在湿陷性黄土地区引起的岩土 工程问题.....	202
6.1.3 地下水位变化对湿陷性黄土变形性质的影响.....	205
6.1.4 地下水位上升对湿陷性黄土承载力的影响.....	213
6.1.5 根据经验方法确定土含水量变化对湿陷性 黄土承载力.....	215
6.1.6 根据极限平衡原理确定地下水位上升对湿陷性 黄土承载力的影响.....	218
6.1.7 饱和黄土的基本性质和容许承载力.....	221
6.1.8 地下水位反复变化对湿陷性黄土性质的影响.....	222
6.2 地下水位变化对膨胀土的影响.....	223

第一章 地下水位与环境岩土工程的关系

1.1 环境对地下水位的影响

1.1.1 温室效应引起的地下水位变化

近年来, 大气温室效应及其对全社会各个领域的影晌, 越来越引起人们的注意。长期以来, 人类不加节制, 大规模地伐木燃煤, 燃烧石油及石油产品, 释放出大量的二氧化碳, 工农业生产也排放出大量甲烷等派生气体, 地球的生态平衡在无意识中遭到破坏, 致使气温不断上升。联合国环境总署于 1990 年就曾指出, 前 50 年, 全球气温升高了 2°C 。在下个世纪内, 每 10 年气温上升变化的平均幅度为 0.35°C 。由此推论到下个世纪末, 大气气温累计将升高 6°C 左右。因此引起全球性变暖, 一方面引致降雨特征发生变化, 另一方面使得海洋中的冰雪覆盖减少, 这就是所谓的温室效应。

正是这种引起世人日益关注的温室效应, 致使全球趋于暖化, 进而将引发一系列的物理现象并引伸出众多的工程问题。由于全球暖化引起的连锁反应, 可用表 1-1 予以概括。

温室效应使得全球暖化, 这在加长降雨历时、增大降雨强度的同时, 加速了海洋中冰雪的消融, 促使海平面上升。据联合国预测, 到 2030 年, 海平面将上升 20cm, 到 2100 年, 海平面将升高 65cm。我国中科院地学部专家对我国三大三角洲和天津地区进行考察后所作的评估是, 预期到 2050 年, 全球变暖将使珠江三角洲海平面上升幅度为 40 ~ 60cm。上海及天津地区上升的幅度会更高。

海平面的上升, 加上地面径流的增加, 将导致地下水位的上升。处于这种情况下有必要对各类工程的影响程度作一分析和评估,

这对于从事该方面的研究或设计，无疑是有益的。

表 1-1 全球暖化引起的连锁反应

		产生的自然影响	伴随的物理现象	引起的具体问题
全球暖化	海面	地下水位上升	孔隙应力发展	液化及震陷加剧
			有效应力降低	承载力降低
	吸水		浸水下沉	
	浮力增加		自重应力减少	
	上升	河川水位上升	水头增大 波浪冲击	堤防标准降低 浸透破坏
		水深加大	潮汐变化 波浪冲击	变形下沉 滑动
化	大气循环变化		台风加大 降雨增加	风暴洪涝灾害加重 地滑山崩泥石流
	地表温度上升		冻土消融 风化加剧 沙漠化	承载力下降 风化残积灾害增加

1. 1. 2 人为开采引起的地下水位的降低

随着世界人口的不断增长和工农业生产的不断发展，今天人类不得不面对全球性缺水这样一个严重的环境问题。长期以来，人类在发展过程中，在改造自然的同时，没有注意对环境的保护。大量淡水资源被污染，使得原先就很有限的水资源越发不能满足人们的需要。在许多地区，地下水被大量不合理地开采。地下水的开采地区、开采层次、开采时间过于集中。集中过量地抽取地下水，使地下水的开采量大于补给量，导致地下水位不断下降，漏斗范围亦相应地不断扩大。由于开采设计上的错误或工业、厂矿布局不合理和水源地过分集中，也常导致地下水位的过大和持续下降。据上海的观测，由于地下水位下降引起的最大沉降量已达 2.63m。

除了人为开采外，另外许多因素也能引起地下水位的降低。如对河流进行人工改道；上游修建水库、筑坝截流或上游地区新建或扩建水源地，截夺了下游地下水的补给量；矿床疏干；排水疏干、改良土壤等都能使地下水位下降。另外，工程活动如降水工程、施工排水等也能造成局部地下水位下降。

1.2 地下水位变化引起的岩土工程中的问题

1.2.1 地下水位上升情况

1. 浅基础地基承载力降低

根据极限荷载理论,我们对不同类型的砂性土和粘性土地基,以不同的基础型式,分析不同地下水位情况下的地基承载力,得出的结果是,无论是砂性土还是粘性土地基,其承载能力都具有随地下水位上升而下降的必然性。由于粘性土具有粘聚力的内在作用,故相应承载力的下降率较小些,最大下降率在 50 % 左右,而砂性土的最大下降率可达 70 %。

2. 砂土地震液化加剧

地下水与砂土液化密切相关,没有水,也就没有所谓砂土的液化。经研究发现,随着地下水位上升,砂土抗地震液化能力随之减弱。在上覆土层厚度为 3m 的情况下,地下水位从埋深 6m 处上升至地表时,砂土抗液化的能力降低可达 74 % 左右。地下水位埋深在 2m 处左右为砂土的敏感影响区。这种浅层降低影响,基本上是随着土体含水量的提高而加大,随着上覆土层的浅化而加剧。

3. 建筑物震陷加剧

首先,对饱和疏松的细粉砂地基土而言,在地震作用下,因砂土液化,使得建在其上的建筑物产生附加沉降,即发生所谓的液化震陷。分析得到,地下水位上升的影响作用为:①对产生液化震陷的地震动荷因素和震陷结果起放大作用。当地下水位由分析单元层中点处开始上升至地表时,将地震作用足足放大了一倍。当地下水位从埋深 3m 处上升至地表时,6m 厚的砂土层所产生的液化震陷值增大倍数的范围为 2.9 ~ 5。②砂土越疏松或初始剪应力越小,地下水位上升对液化震陷影响越大。

其次,对于大量的软弱粘性土而言,地下水位上升既促使其饱

和，又扩大其饱和范围。这种饱和粘性土的土粒空隙中充满了不可压缩的水体，本身的静强度就较低，故在地震作用下，在短瞬间即产生塑性剪切破坏，同时产生大幅度的剪切变形。该结果可达到砂土液化震陷值的 4 ~ 5 倍之多，甚至超过 10 倍。

海南某地一建在细砂地基上的堤防工程，砂层厚 4.5m，地下水埋深 2m，考虑地下水位上升 0.5m 或 1m 时，地基承载力则从 320kPa 降至 310kPa 或 270kPa，降低率为 6.3 % 或 19 %。而砂土的液化程度，则从轻微液化变为近乎中等液化或已为中等液化。液化震陷量的增加率达 6.9 % 或 14.1 %。在地基设计中，必须考虑由地下水位上升引起的这些削弱方面。

4. 土壤沼泽化、盐渍化

当地下潜水位上升至接近地表时，由于毛细作用的结果，而使地表土层过湿呈沼泽化或者由于强烈的蒸发浓缩作用，使盐分在上部岩土层中积聚形成盐渍土，这不仅改变了岩土原来的物理性质，而且改变了潜水的化学成分。矿化度增高，增强了岩土及地下水对建筑物的腐蚀性。

5. 岩土体产生变形、滑移、崩塌失稳等不良地质现象

在河谷阶地、斜坡及岸边地带，地下潜水位或河水位上升时，岩土体浸润范围增大，浸润程度加剧，岩土被水饱和、软化，降低了抗剪强度；地表水位下降时，向坡外渗流，可能产生潜蚀作用及流砂、管涌等现象，破坏了岩土体的结构和强度；地下水的升降变化还可能增大动水压力。以上种种因素，促使岩土体产生变形、崩塌、滑移等。因此，在河谷、岸边、斜坡地带修建建筑物时，应特别重视地下水位的上升、下降变化对斜坡稳定性的影响。

6. 地下水位的冻胀作用的影响

在寒冷地区，地下潜水位升高，地基土中含水量亦增多。由于冻结作用，岩土中水分往往迁移并集中分布，形成冰夹层或冰椎等，使地基土产生冻胀、地面隆起、桩台隆胀等。冻结状态的岩土体具有较高强度和较低压缩性，但温度升高岩土解冻后，其抗压和抗剪强度大大降低。对于含水量很大的岩土体，融化后的粘聚力约为冻

胀时的 $1/10$ ，压缩性增高，可使地基产生融沉，易导致建筑物失稳开裂。

7. 对建筑物的影响

当地下水位在基础底面以下压缩层范围内发生变化时，就将直接影响建筑物的稳定性。若水位在压缩层范围内上升，水浸湿、软化地基土，使其强度降低、压缩性增大，建筑物就可能产生较大的沉降变形。地下水位上升还可能使建筑物基础上浮，使建筑物失稳。

8. 对湿陷性黄土、崩解性岩土、盐渍岩土的影响

当地下水位上升后，水与岩土相互作用，湿陷性黄土、崩解性岩土、盐渍岩土产生湿陷、崩解、软化，其岩土结构破坏，强度降低，压缩性增大。导致岩土体产生不均匀沉降，引起其上部建筑物的倾斜、失稳、开裂和地面或地下管道被拉断等现象，尤其对结构不稳定的湿陷性黄土更为严重。

9. 膨胀性岩土产生胀缩变形

在膨胀性岩土地区，浅层地下水多为上层滞水或裂隙水，无统一的水位，且水位季节性变化显著。地下水位季节性升、降变化或岩土体中水分的增减变化，可促使膨胀性岩土产生不均匀的胀缩变形。当地下水位变化频繁或变化幅度大时，不仅岩土的膨胀收缩变形往复，而且胀缩幅度也大。地下水位的上升还能使坚硬岩土软化、水解、膨胀、抗剪强度与力学强度降低，产生滑坡(沿裂隙面)、地裂、坍塌等不良地质现象。导致自身强度的降低和消失，引起建筑物的破坏。因此对膨胀性岩土的地基评价应特别注意对场区水文地质条件的分析，预测在自然及人类活动下水文地质条件的变化趋势。

1.2.2 地下水位下降情况

地下水位下降往往会引起地表塌陷、地面沉降、海水入侵、地裂缝的产生和复活以及地下水源枯竭、水质恶化等一系列不良地质问题。并将对建筑物产生不良的影响。

1. 地表塌陷

塌陷是地下水动力条件改变的产物。水位降深与塌陷有密切的关系。水位降深小, 地表塌陷坑的数量少, 规模小; 当降深保持在基岩面以上且较稳定时, 不易产生塌陷; 降深增大, 水动力条件急剧改变, 水对土体的潜蚀能力增强, 地表塌陷坑的数量增多, 规模增大。

2. 地面沉降

由于不断地抽汲地下水, 导致地下水位巨幅下降引起了区域性地面沉降。国内外地面沉降的实例表明抽汲液体引起液压下降使地层压密是导致地面沉降的普遍和主要的原因。国内有些地区, 由于大量抽汲地下水, 已先后出现了严重的地面沉降。如 1921 ~ 1965 年间, 上海地区的最大沉降量已达 2.63m; 70 年代初到 80 年代初的 10 年时间内, 太原市最大地面沉降已达 1.232m。地下水位不断降低而引发的地面沉降越来越成为一个亟待解决的环境岩土工程问题。

3. 海(咸)水入侵

近海地区的潜水或承压水层往往与海水相连, 在天然状态下, 陆地的地下淡水向海洋排泄, 含水层保持较高的水头, 淡水与海水保持某种动平衡, 因而陆地淡水含水层能阻止海水的人侵。如果大量开采陆地地下淡水, 引起大面积地下水位下降, 可导致海水向地下水开采层入侵, 使淡水水质变坏, 并加强水的腐蚀性。

4. 地裂缝的复活与产生

近年来, 我国不仅在西安、关中盆地发现地裂缝, 而且在山西、河南、江苏、山东等地也发现地裂缝。据分析, 地下水位大面积、大幅度下降是发生地裂缝的重要诱因之一。

5. 地下水源枯竭, 水质恶化

盲目开采地下水, 当开采量大于补给量时, 地下水资源就会逐渐减少, 以至枯竭, 造成泉水断流, 井水枯干, 地下水中有毒离子含量增多, 矿化度增高。

6. 对建筑物的影响

当地下水位升降变化只在地基基础底面以下某一范围内发生变化

时，对地基基础的影响不大，地下水位的下降仅稍增加基础的自重。当地下水位在基础底面以下压缩层范围内发生变化时，若水位在压缩层范围内下降时，岩土自重应力增加，可能引起地基基础的附加沉降。如果土质不均匀或地下水位突然下降，也可能使建筑物发生变形破坏。

参 考 文 献

1. IPCC. Climate Change —The IPCC Response Strategies. Island Press, 1990, F.1 ~ 10
2. 《经济参考报》 1993.4.14
3. 洪毓康主编. 土质学与土力学. 第二版. 北京: 人民交通出版社, 1990
4. 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992
5. 周健, 屠洪权. 全球暖化引起的若干工程问题. 上海环境科学, 1994 年第 11 期

第二章 地下水位上升对浅基础地基承载力的影响

地下水对浅基础地基承载力的影响通常有两种可能,一是沉浸在水下的土将失去由毛细管应力或弱结合力所形成的表观凝聚力,使承载力降低;二是由于水的浮力作用,将使土的有效重量减小而降低土的承载力。前一影响因素在实际应用上尚有困难,因此目前一般都假定水位上下的强度指标相同,而仅仅考虑由于水的浮力作用对承载力所产生的影响。

在考虑地下水位对地基承载力产生影响作详尽分析前,有必要将现行有关的地基承载力的确定方式作一介绍。

2.1 浅基础地基承载力理论

2.1.1 普朗特极限平衡理论

对于平面问题,土中任一点微分单元的应力分量为 σ_x , σ_y , $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, 如图 2-1 所示。微分单元的重力为 $\gamma dx dz$, 故微分单元的静力平衡方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = \gamma \end{cases} \quad (2-1)$$

若地基中某点位于塑性区范围内,则该点就处于极限平衡状态。我们知道,土中某点达到极限平衡时,其最大、最小主应力 σ_1 及 σ_3 间满足下列条件:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (2-2)$$