

海洋土工程特性

HAIYANG TU GONGCHENG TEXING

刘润 闫澍旺 等著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

海洋土工工程特性

刘润 闫澍旺 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是在总结作者及所在研究团队最近 30 年来在海洋土工程特性研究方面取得的具有实用价值和创新性研究成果的基础上撰写而成的。

全书共分为 11 章,包括海洋土工程特性研究概况,土性剖面的随机场模型,海上静力触探测试技术,现场十字板强度解析,循环荷载作用下海洋土的强度弱化,吹填超软土的渗透固结特性,吹填超软土的流变特性,吹填土快速加固技术,大型充灌袋挤淤筑路技术,复合筒型基础的地基承载力,防沉板基础的地基承载力等。

本书展示了我国在海洋土工程特性研究领域取得的重要进展,有助于海洋岩土工程施工与设计水平的提高。本书可供海洋工程设计人员、技术人员、管理人员和广大海洋工程工作者查阅、借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

海洋土工程特性 / 刘润等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 7
ISBN 978-7-5170-4931-9

I. ①海… II. ①刘… III. ①海洋工程—岩土工程—研究 IV. ①P752

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第321676号

书 名	海洋土工程特性
作 者	HAIYANG TU GONGCHENG TEXING 刘润 闫澍旺 等著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 31印张 735千字
版 次	2016年7月第1版 2016年7月第1次印刷
定 价	128.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

我国是海洋大国，港口海岸、海上油气与风电工程等的开发潜力巨大。与陆地工程相比，港口、海岸与海洋工程的地基土含水量高、强度低、压缩性大、其原位工程特性获取的难度大、成本高，在海洋风浪流、地震等复杂动力荷载作用下易发生强度弱化和地基失稳等问题。系统研究海洋土工程特性并科学的评价和控制地基的稳定性，是港口、海岸与海洋工程建设和运行的首要难题，对提高我国海洋工程的国际竞争力具有十分重要的意义。

作者及其研究团队结合我国港口工程与海洋工程实践开展了系统的海洋土工程特性研究，不仅深入研究了海洋土的强度特性、变形特性、海洋新型结构的地基稳定性，而且解决了海洋工程中出现的众多技术难题，取得了丰富的研究成果和技术上的突破。

该书是在总结作者最新研究成果的基础上撰写而成的。其主要特色体现在以下几个方面：

(1) 应用随机场模型实现了土性指标的统计与地基可靠度分析，提出了静力触探与十字板获取原位土层抗剪强度的方法。

(2) 揭示了波浪与地震荷载作用下海洋软土强度弱化机理，提出了考虑应力路径确定原位土层强度弱化的定量评价方法和防止软土弱化的工程技术措施。

(3) 建立了海洋吹填软土变系数渗透固结理论，提出了真空预压插板期沉降量的计算方法；开发了海洋深厚吹填软土快速加固技术；发明了超软土地基上充灌袋挤淤筑路方法。

(4) 提出了复合筒型基础筒土协同地基承载力、防沉板基础四维受荷地基承载力分析计算方法。

该书的问世，展示了我国在海洋土工程特性研究领域取得的重要研究进展，有助于提升港口、海岸及海洋工程地基勘察与地基基础稳定性评价的技术水平。该书可为从事海洋土工程特性研究的人员提供有益的参考和借鉴。

中国工程院院士



二〇一六年七月

前 言

了解和掌握海洋土工程特性是海洋工程建设的前提。海洋资源与海洋空间的开发利用是全球经济的增长点。我国是海洋大国，截止到2015年年底，港口吞吐量连续14年居世界首位，累计围海造陆近1.0万 km^2 ，油气增量80%来自海洋、开发水深已达1480m，近海风能技术经济可开发量达2亿kW，开发潜力巨大。海洋地质资料获取困难，加上海洋环境复杂多变，在我国港口海岸与海洋工程发展历程中出现了许多由于地基不稳定导致的工程事故，如长江口导堤地基的失稳破坏、天津港吹填造陆区域的滑坡、渤海中平台的过度沉降等。这是由于对海洋土场地、强度、变形和承载特性的认识不清、理论储备不足所致。因此开展海洋土工程特性研究，对我国港口、海岸及海洋工程的设计、施工与运行安全具有十分重要的意义。

土体的工程特性涉及其场地特性、强度特性、变形特性及地基稳定性。与陆地工程相比，海洋环境条件复杂多变，常用的土体原位测试方法在海上无法开展或难度巨大，如何有效获取海洋土体原位工程特性是海洋工程建设的首个技术难题。静力触探(CPT)与十字板(FVST)实验是海上获取土体原位静强度的主要方式。受到海上环境条件与测试手段的限制，通常测试数据稀少，因此构建随机场模型与科学的数据解析相结合是准确获取工程设计参数的有效途径。海洋工程经受波浪、地震等循环动力荷载作用，海洋软黏土在循环荷载作用下会出现强度弱化现象，导致地基失稳，定量评价海洋土的强度弱化程度并实现有效控制是海洋工程长期稳定的根本保证。海洋土变形特性研究也是地基稳定性的重要方面，伴随大规模的围海造陆工程对吹填软土的研究不断深入，吹填土明显不同于天然沉积土层，含水率极高、孔隙比超大、强度极低，处于欠固结的流塑状态，揭示深厚吹填土的渗透固结特性，提出有效的地基加固措施及快速筑路技术，是保证新增陆域长期稳定的理论关键。对应不同基础结构地基的稳定性具有不同的分析方法。近年来，为了满足特定的使用功能和海上施工条件，一些新型的海洋基础形式应运而生，在海上风、浪、流等复杂多维静动力耦合荷载作用下的地基稳定性评价是保障工程安全的关键技术。

天津大学于 20 世纪 80 年代，结合我国港口工程与海洋工程的建设，开始研究近海与海洋软土的工程特性及其相关问题，研究内容不仅包括土体的常规物理力学特性、原位测试方法、原位强度分布规律、地基沉降与承载力计算、软基加固方法等，更是解决了众多的工程技术难题。例如：由于对土体原位测试数据解析的偏差导致的岸坡稳定计算安全系数偏小，由于未考虑软土在循环荷载作用下的强度弱化导致的地基失稳等。本书是在总结作者及所在团队近 30 年来在海洋土工程特性研究方面的成果基础上撰写而成。

全书共分为 11 章，包括海洋土工程特性研究概况，土性剖面的随机场模型，海上静力触探测试技术，现场十字板强度解析，循环荷载作用下海洋土的强度弱化，吹填超软土的渗透固结特性，吹填超软土的流变特性，吹填土快速加固技术，大型充灌袋挤淤筑路技术，复合筒型基础的地基承载力，防沉板基础的地基承载力等。

本书由刘润、闫澍旺、邱长林、孙立强、李飒、陈广思撰写，为本书付出辛勤劳动的还有郭绍曾、刘孟孟、马鹏程、梁超、马文冠、王秀妍、郭欣玥等。感谢国家重点基础研究计划（973 计划 2014CB046802）、国家自然科学基金优秀青年科学基金（51322904）对本项研究工作的支持，同时感谢中交天津港湾工程研究院有限公司、天津市北洋水运水利勘察设计院有限公司对我们科学研究工作的支持及为本书提供的宝贵工程资料！

由于作者的学识和水平有限，难免存在疏漏、不妥或错误之处，诚恳希望读者与专家指正。

作 者

2016 年 3 月于天津大学

目 录

序

前言

第 1 章 海洋土工程特性研究概况	1
1.1 海洋土的成因及特点	1
1.1.1 海洋沉积物	1
1.1.2 海洋土的组成及微观结构	1
1.1.3 海洋土的原位应力状态	3
1.1.4 海洋土的工程特性	5
1.2 海洋土的强度特性研究	7
1.2.1 土性剖面空间随机场特性	7
1.2.2 海洋土强度的获取方法	8
1.2.3 海洋土的强度弱化	9
1.3 海洋土的变形特性	11
1.3.1 超软土沉积与固结特性	12
1.3.2 真空预压加固技术研究	13
1.4 海洋新型基础地基稳定性	14
1.4.1 复合式筒型基础	15
1.4.2 深海防沉板基础	16
1.5 本书的主要内容	17
参考文献	18
第 2 章 土性剖面的随机场模型	25
2.1 随机场的基本理论	25
2.1.1 随机场的基本概念	25
2.1.2 随机场的数字特征	26
2.1.3 随机场的平稳性和各态历经性	28
2.1.4 相关函数的形式选择	32
2.2 相关距离的计算方法及其改进	36
2.2.1 相关距离的概念	36
2.2.2 相关距离的常用计算方法	38
2.2.3 相关距离的改进计算方法	43
2.2.4 相关距离计算方法的比较与新算法	46

2.3	天津港地基土性剖面的随机场模型	50
2.3.1	地基土特性指标的统计和分析	50
2.3.2	平稳性和各态历经性检验	53
2.3.3	相关函数表达式的确定	55
2.3.4	相关距离的统计分析	60
2.3.5	取样间距与相关距离的关系	66
2.3.6	土性参数与相关距离的关系	68
2.4	渤海 SZ36-1 油田地基土性剖面的随机场模型	69
2.4.1	地基土特性指标的统计和分析	69
2.4.2	平稳性和各态历经性检验	74
2.4.3	相关函数表达式的确定	76
2.4.4	相关距离的统计分析	80
2.5	随机场理论在土体抗剪强度指标统计中的应用	80
2.5.1	抗剪强度指标统计方法概述	80
2.5.2	抗剪强度指标的随机场统计方法	81
2.5.3	地基承载力可靠度分析算例	84
2.6	随机场理论在土工可靠度计算中的应用	87
2.6.1	完全不相关距离的提出	87
2.6.2	完全不相关距离的确定	88
2.6.3	方差折减函数的确定原则	91
2.6.4	天津港地区典型土层方差折减的范围	91
2.6.5	地基基础设计算例	92
2.6.6	岸坡稳定性分析算例	94
	参考文献	96
第 3 章	海上静力触探测试技术	102
3.1	概述	102
3.1.1	静力触探测试技术发展历程	102
3.1.2	深海静力触探	104
3.1.3	我国海洋静力触探的发展历程	105
3.2	海上静探的仪器设备和测试方法	106
3.2.1	海上静力触探的仪器设备	106
3.2.2	海上静力触探的程序	113
3.2.3	海上静力触探测试数据的整理	115
3.2.4	影响测试数据的主要因素	117
3.3	静力触探的测试原理与强度解析	118
3.3.1	理论分析	118
3.3.2	有限元分析	122

3.3.3 实测数据分析	128
3.4 海床浅表层软土的原位测试技术	133
3.4.1 全流动贯入仪研究	134
3.4.2 全流动贯入仪阻力系数	135
参考文献	136
第4章 现场十字板强度解析	139
4.1 概述	139
4.2 软黏土的破坏理论及抗剪强度理论	141
4.2.1 软黏土的破坏理论	141
4.2.2 软黏土的抗剪强度机理	142
4.2.3 抗剪强度的影响因素	142
4.3 各类抗剪强度指标测定方法比较	143
4.3.1 直接剪切试验	143
4.3.2 三轴压缩试验	144
4.3.3 无侧限抗压强度试验	144
4.4 用十字板强度统计回归抗剪强度指标参数	145
4.4.1 抗剪强度在软黏土边坡稳定分析应用中的发展	145
4.4.2 十字板强度统计回归土体抗剪强度指标的方法	146
4.4.3 十字板强度统计回归土体抗剪强度指标的计算实例	148
4.5 岸坡稳定性分析实例	149
4.5.1 软黏土岸坡设计参数及断面	149
4.5.2 各强度指标计算结果分析比较	152
4.6 十字板回归指标的其他应用	153
参考文献	157
第5章 循环荷载作用下海洋土的强度弱化	159
5.1 概述	159
5.2 软土抗剪强度弱化机理	160
5.3 动荷载作用下的软土弱化	163
5.3.1 软土弱化特性研究的试验设计	163
5.3.2 波浪作用下的软土弱化试验	167
5.4 地震作用下软土的弱化	191
5.4.1 试验设计	192
5.4.2 试验用土	192
5.4.3 试验数据结果	192
5.5 控制软土弱化的工程措施	194
5.5.1 软土弱化的地基处理方案	194
5.5.2 长江口 NIIB 标段软土地基处理	195

5.5.3 天津港半圆体沉箱防波堤地基处理	201
参考文献	206
第6章 吹填超软土的渗透固结特性	207
6.1 概述	207
6.2 变系数固结理论	208
6.2.1 吹填土压缩特性	208
6.2.2 超软吹填土的固结特性	214
6.2.3 超软吹填土的渗透特性	222
6.3 天然沉积特性	234
6.3.1 自重固结理论计算方法	234
6.3.2 水土分离试验	239
6.3.3 吹填超软土含水量变化规律	241
6.3.4 自重沉积的模型试验	249
6.4 真空预压沉降计算	254
6.4.1 超软土的沉降特点	254
6.4.2 插板期地基沉降计算	256
6.4.3 预压期固结沉降计算	257
6.4.4 超软土沉降量的室内试验研究	258
6.4.5 超软土沉降量的现场试验研究	266
参考文献	270
第7章 吹填超软土的流变特性	271
7.1 概述	271
7.2 滨海新区软黏土的流变特性试验研究	272
7.2.1 试验用土的基本特点	272
7.2.2 不固结不排水流变试验	273
7.2.3 流变曲线及力学性能能量分析	284
7.2.4 长期强度极限和残余强度	285
7.3 滨海新区软黏土流变模型的建立及分析	290
7.3.1 软黏土流变的非线性经验模型	290
7.3.2 滨海新区软黏土的非线性流变本构模型	295
7.3.3 滨海新区软黏土的非线性流变特性研究	303
参考文献	307
第8章 吹填土快速加固技术	309
8.1 概述	309
8.2 硬壳层理论	310
8.2.1 硬壳层地基承载机理	310
8.2.2 硬壳层理论室内模拟实验	311

8.2.3	硬壳层地基承载特性的有限元分析	313
8.3	加固受荷层与浅表层插板	315
8.3.1	加固受荷层工程实例	315
8.3.2	浅表层插板真空预压工程实例	318
8.4	排水板通水量与二次加固	322
8.4.1	实验设计	322
8.4.2	第一次加固效果分析	324
8.4.3	第二次加固效果分析	332
8.4.4	加固效果差异分析	334
8.5	砂垫层置换技术	337
8.5.1	粉细砂代替中粗砂技术	338
8.5.2	无砂垫层技术	344
8.6	可控通气真空预压新工艺探索	348
8.6.1	实验设计	348
8.6.2	加固效果分析	350
8.6.3	机理分析	352
	参考文献	355
第9章	大型充灌袋挤淤筑路技术	356
9.1	概述	356
9.2	大型充灌袋挤淤筑路施工工艺	357
9.3	充灌袋填充材料的选择	360
9.3.1	充灌粉质黏土的固结试验	360
9.3.2	充灌粉土水上、下固结试验	363
9.3.3	充灌袋填充材料的确定	365
9.4	充灌袋挤淤筑路机理及计算方法	366
9.4.1	挤淤置换原理	366
9.4.2	挤淤深度的确定	366
9.4.3	固结度及沉降计算	367
9.4.4	充灌袋的状态与张拉力计算	369
9.5	工程实例	373
9.5.1	工程概况	373
9.5.2	工程设计	374
9.5.3	主要工序施工方案	375
9.5.4	施工监测	379
9.6	充灌袋挤淤筑路有限元分析	380
9.6.1	建模过程	380
9.6.2	排水板的平面应变等效方法	381

9.6.3 计算结果分析	383
参考文献	385
第 10 章 复合筒型基础的地基承载力	387
10.1 概述	387
10.2 筒土协同承载模式	389
10.2.1 模型试验分析	389
10.2.2 数值计算分析	399
10.3 地基承载力的极限分析	411
10.3.1 竖向向极限承载力的上限解	411
10.3.2 竖向向极限承载力的下限解	422
10.3.3 水平向极限承载力上限解	429
10.3.4 抗弯极限承载力上限解	437
10.4 复合加载的地基承载力	444
10.4.1 复合加载数值模拟方法	445
10.4.2 二维荷载空间承载力包络线	445
10.4.3 三维荷载空间 ($V-H-M$) 承载力包络面	449
参考文献	452
第 11 章 防沉板基础的地基承载力	454
11.1 概述	454
11.2 防沉板基础的形状	455
11.3 防沉板的单向受荷研究	456
11.3.1 理论计算方法	456
11.3.2 数值计算方法	457
11.3.3 极限分析方法	465
11.4 四维加荷防沉板的承载力	471
11.4.1 二维荷载空间	471
11.4.2 三维荷载空间	479
11.5 新型防沉板基础	480
参考文献	482

第 1 章 海洋土工程特性研究概况

1.1 海洋土的成因及特点

海洋土是相对于陆上土而言的，是物理、化学和生物过程综合作用的结果。海洋土的组成包括陆源物质、生物物质、宇宙物质、火山物质、化学物质等，它们形成了海底特殊的地形地貌和分布特征。海洋土的形成、分布规律及工程特性与各种海洋结构的地基稳定性密切相关。

1.1.1 海洋沉积物

海洋沉积物是由陆源碎屑物质和生物、化学过程的溶液中形成分解出的物质组成。陆源碎屑主要是由河流、冰山和风携带的微粒组成，有机物质大多数来源于贝壳和海洋生物体的骨骼。按其成因可将海洋土颗粒分为 3 大类。岩成颗粒：主要是硅酸盐类矿物和颗粒，由风化作用时陆地岩石破碎而来，此外还有火山喷发和宇宙的尘埃陨石等天体带来的外来物。生物颗粒：它是海洋生物体的骨骼、牙齿和贝壳等难溶解的残余部分。水成颗粒：它是海水或沉积物水和其他物质发生化学反应形成的，多金属结核就是这种类型突出的例子。

河流是海洋中沉积物的最大来源，它每年将大约 200 亿 t 的沉积物质贡献给海洋，其中大部分来自亚洲，其次是欧洲。年输沙量在 10 亿 t 以上的大河由恒河和黄河，1 亿~10 亿 t 的有长江、伊洛瓦底江、湄公河、印度河、布拉马普特拉河、密西西比河、亚马孙河和科罗拉多河。风每年能够将 10 亿 t 的尘埃物质搬运到海洋中，其中主要来源于沙漠和高山。生物成因沉积物在成分上可能是钙质或硅质的。钙质的碳酸盐沉积物分布的范围比较广，包括大陆边缘和大洋底，大洋钙质生物沉积根据其固结度不同可分为钙质软泥、白垩和石灰岩，其中钙质软泥分布最广。钙质软泥根据生物门类可分为有孔虫软泥、钙质超微化石软泥及翼足虫软泥，它们约占洋底面积的 47.7%。远洋硅质沉积是含生物骨屑 50% 以上，硅质生物遗骸 30% 以上的沉积物，根据固结度的不同可分为硅质软泥、硅藻土、放射虫土、瓷质岩和燧石。根据生物类型可将硅质软泥分为硅藻软泥和放射虫软泥，它们约占洋底面积的 14.2%。

1.1.2 海洋土的组成及微观结构

来源多样的海洋沉积物，在复杂的海底动力环境下，经过了不同的搬运与沉积过程形成了不同物质组成和结构特征的沉积物。

1. 海洋土的物质组成

海洋土和陆地土相比，在物质成分上有很大区别，特别是土中含有很高的可溶盐生物

组分和碳酸盐组分,影响着海洋土的工程性质。

不同环境的沉积物来源不同,它们的沉积类型和物质成分也有很大差别。在大陆边缘的沉积物中生物组分相对较小,以陆源岩成物质为主,而深海大洋中的沉积物生物组分较高,有时甚至高于非生物组分(陆源、自生、火山及宇源),使得它们在矿物成分、化学成分和粒度成分以及物理力学性质方面和陆源沉积物都有不同。

大陆台阶(大陆架和大陆坡)、深海丘陵和深海平原不同环境中沉积物的粒度成分和颗粒密度有较大的差别。大陆边缘的沉积物中粗粒沉积物较多,平均粒径和颗粒密度比深海平原和丘陵要高。大洋中的火山沉积和浊流沉积的平均粒度比硅质和碳酸盐软泥要高,褐色和红色黏土最细。由于沉积类型不同,它们的饱和容重、孔隙度和声波在其中的传播速度(声速比即沉积物声速/海水声速)也不同。

海洋沉积物中的矿物成分和化学成分与沉积物来源密切相关,因此在世界大洋中很难找到一个统一的规律,但它们都在不同程度上影响着沉积物的物理性质。沉积物中的黏土矿物是构成黏土颗粒的主要成分,是控制黏性土工程性质与变化的主要因素之一。高岭石的晶体化学结构特点决定了高岭石与水相互作用所表现的物理、化学性质较弱,因此含高岭石矿物的黏性土工程性质不易因外界条件变化而变化。蒙脱石晶体结构特点决定蒙脱石具有很大的亲水性、吸附性、离子交换容量,与水相互作用表现了强烈的物理-化学性能,并对外界条件非常敏感。因此蒙脱石含量较高的土具有含水量大、压缩性高、强度低、吸水膨胀、失水收缩及高塑性等特点,其性质易随外界条件变化而变化。伊利石的亲水性、置换与吸附等物理-化学性能介于蒙脱石与高岭石之间,绿泥石的物理-化学作用的活跃性与伊利石相似。沉积物中的化学成分,特别是可溶盐类的含量对松软土工程性质的影响,以及难溶盐类的含量对海洋土工程性质的影响均较大,碳酸盐含量增加,内摩擦角 φ 增大,液限和塑性指数减小,塑性降低,表现为粒状土的倾向。

2. 海洋土的微结构特征

(1) 结构类型。土的结构是其物质成分的存在形式,它反映土的形成及存在条件,与土的物质成分一样,是决定土的工程性质,特别是变形及强度的基本内在因素。一般地说,土的物质成分对其外界条件变化的反应比较迟钝,而结构却非常灵敏,因此要研究海洋土的工程特性及其在动荷作用下的变化首先就需要研究它的结构,特别是它的微观结构。海洋土的微结构类型大体可以分为以下4种类型:

1) 粒状胶结结构。粒状胶结结构是指以集粒或粉粒为骨架,颗粒间基本上互相接触,粒间孔隙较小的土体结构。由于胶结材料的不同,粒状结构又可以分为粒状盐晶胶结结构和粒状黏土胶结结构两个亚类。

2) 粒状链接结构。粒状链接结构是指以集粒或粉粒为骨架,颗粒间有一定距离,粒间由黏土“疇”构成的链把粒状连接在一起,是粒间空隙较大的土结构。

3) 絮状链接结构。絮状链接结构是指以絮凝体为骨架,由黏土“疇”构成的链把凝聚体连接在一起,构成絮状链接结构。根据絮凝体的疏密程度和连接链的长短,可以分为致密絮凝长链结构、致密絮凝短链结构、开放絮凝长链结构和开放絮凝短链结构4个亚类。

4) 黏土基质结构。这种结构含有大量黏土“疇”凝聚成规则或不规则的凝聚体,凝

聚体再进一步聚合在一起,形成黏粒基质结构。如果黏土基质中凝聚体排列比较紧密,而生成面-面叠聚形态,称之为定向黏粒基质结构,一般存在于较深的沉积物中;如果凝聚体内孔隙大,而且互相连通呈开放排列,称之为开放黏粒基质结构,这种结构一般存在于浅层土中。

(2) 微结构类型与工程性质的关系。海洋沉积物的微结构对其工程性质具有重要影响。粒状胶结结构的土具有较小的孔隙度,较高的强度,较低的压缩性。粒状链式连接的沉积物强度较高,但孔隙度较大,压缩性中等偏高。絮凝结构的沉积物却往往具有高压缩性、高流变性、高灵敏性和低强度的特点,这种不良的工程性质在开放絮凝长链结构中表现尤为突出。

高压缩性一般发生在开放长链结构中,因为“长链”连接意味着存在着大量的不稳定的粒间空隙。“开放”凝簇结构意味着有较多的絮凝体内的粒内孔隙,具有这种结构的土,在一定的压力作用下就会产生较大的变形。

高流变性主要产生在长链结构中,不管骨架颗粒是粒状还是絮凝体,在长期应力作用下都将发生长期的流动变形,根据一些学者的研究主要是剪切应力使连接链条拉长和畸变的结果。

高灵敏性与开放絮凝结构中“畴”的排列方式有关,如果黏土畴呈边-面-角的空间网格排列,这种排列具有一定的空间刚度,破坏时强度将急剧降低,因此表现为高灵敏性。

低强度是开放絮凝链式连接的一大特点,这种连接一般发生在集粒和黏土凝聚体之间,这些黏土凝聚体是在海水条件下,由黏粒和黏土畴凝聚成各种大小不同的凝聚体,凝聚体之间并不互相接触,两者之间相隔一段距离,一些小凝聚体有的像链条那样把两个大凝聚体控制住,有的像桥那样把凝聚体连接在一起,这种连接强度低,链的长细比越大,强度越低,在剪应力的作用下将产生长时间的流动变形。

粒状胶结结构和定向黏粒基质结构强度较高,因为粒状胶结结构中颗粒基本上是相互接触的,粒间孔隙较小,定向黏粒基质结构的基质黏土中凝聚体内“畴”的排列比较紧密,而且是面-面的叠聚,凝聚体内微孔隙较少而小,所以强度较高,不像开放黏粒基质结构那样,凝聚体内“畴”的排列比较疏松,而且是边-面连接,凝聚体内微孔隙大,互相连通,所以强度较低。

1.1.3 海洋土的原位应力状态

天然土层在历史上所受过的固结应力(指土体在固结过程中所受的有效压力)称为前期固结压力,黏性土的压缩性因所经历的应力历史不同而异,按照土层所受的前期固结压力与现有压力相对比的情况,可将黏性土分为正常固结土、超固结土和欠固结土3种。正常固结土层在历史上所经受的前期固结压力 P_c 等于现有上覆土层的有效应力 P_1 ,即 $P_c = P_1$;超固结土层历史上曾经受过大于现有上覆土层有效应力的前期固结压力,即 $P_c > P_1$;欠固结土层的前期固结压力则小于现有上覆土层的有效应力,即 $P_c < P_1$ (图1.1.1)。

海洋土也存在这3种原位应力状态。一般而言,陆架和陆坡上的沉积物处于超固结状态。在海洋中正常沉积过程所形成的海洋土应是正常固结的,但海底土因沉积环境的改变有时在同一地区上下土层可能处于不同的固结状态。

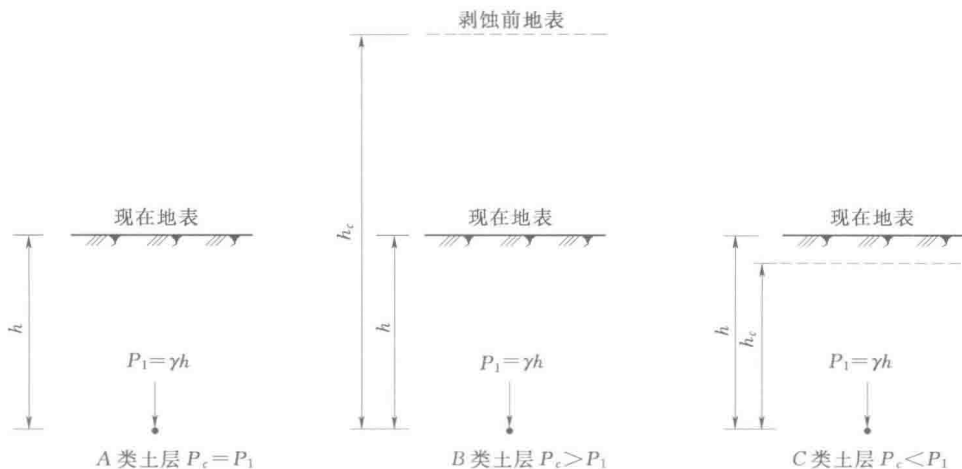


图 1.1.1 沉积土层按前期固结压力 P_c 分类

(1) 超固结作用的可能机制。超固结作用起因于固结后的应力解除，即图 1.1.1 中的 B 类土层，历史上本是相当厚的覆盖沉积层，在土的自重作用下已达到固结稳定状态，图中虚线表示当时沉积层的地表，后来由于流水或冰川剥蚀作用而形成现在地表。因此前期固结压力 $P_c = \gamma h_c$ (h_c 为剥蚀前地表下的计算深度)，超过了现有土层自重应力 P_1 ，所以 B 类土是超固结的。

在海洋条件下它可能由于潜水环境的海洋侵蚀和以前冰川作用而引起的，也可能由以往波浪加载的影响而引起，特别是浅水区前期固结压力可能因此而得以增加。

(2) 欠固结的可能机制。欠固结通常与土中超孔隙压力的存在有关，按照有效应力原理，欠固结土的原位有效应力 $\sigma' = \sigma - u$ 要小于上覆土层的有效覆压力 γz ，如果总应力不变，则有效应力与孔隙压力（孔隙压力 u_w 和孔隙气压力 u_a ）有关，因此造成超孔隙压力的因素也就是欠固结土存在的可能机制，归纳起来有 4 种，如图 1.1.2 所示。

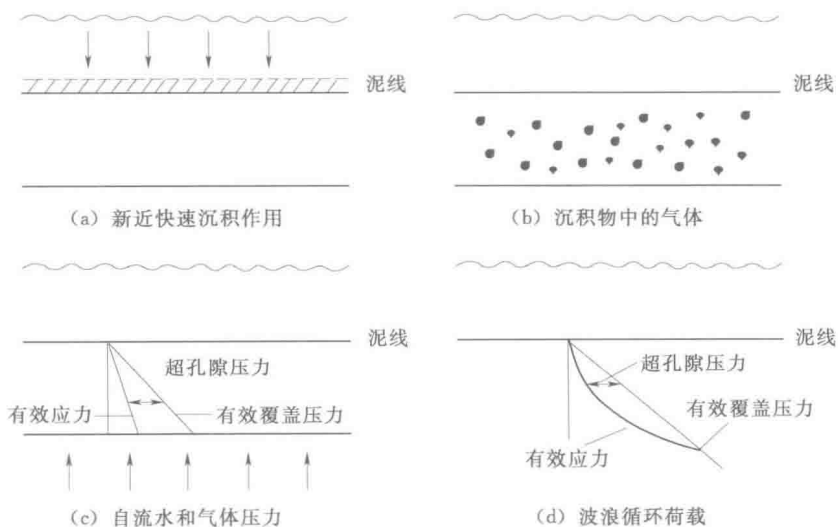


图 1.1.2 不完全固结的可能机制

1) 新近快速沉积作用。在沉积期间,随着超孔隙水压力的增加,总应力也增加,但超孔隙水压力的消散可能相当慢,它取决于沉积厚度及固结系数,还有排水情况,因此,有效应力会小于最终值 $r'z$,土体将保持欠固结状态,直到超孔隙水压力 u 消散到与静水压力相等,即 $\sigma' = r'z$ 时沉积物成为正常固结状态。

2) 沉积物中的气体。这里主要指的是沉积物中的密闭气体,它的压力可导致沉积物的超孔隙压力的增加,从而造成有效应力 ($\sigma' = \sigma - u$) 小于土体相应的上覆自重应力 ($P_1 = r'z$),即处于欠固结状态。密闭气体可由原与大气相通的吸附气体或游离气体转变而成,或由生物作用而成。气体产生越多,孔隙压力越高。

3) 沉积物中渗透压力的存在。土层中的地下水或海水,只要有水头差的存在(地形或涨落潮的影响),受到静水压力的作用,就会有一个渗透压力,此压力可使孔隙水压力增加,尤其是在有水流溢出地表时,有效应力 σ' 将等于总应力减去孔压 u ,再减去在孔隙中渗透的孔隙水压力。

4) 波浪循环荷载。大的暴风产生的周期性荷载,能够在土层中产生超孔隙压力,尤其是在饱和的松软土中,这样又将使有效应力小于有效覆盖压力。对于渗透性低的沉积物而言,一次风暴产生的孔隙水压力可能叠加在早期风暴和其他机制产生的孔隙水压力上,使土层的有效应力进一步减小。但风暴引起的有效应力减小是一个短暂的现象,因超孔隙压力在风暴期间或期后将趋于消散,所以当风暴过后,孔隙压力消散时,土体可能又处于正常固结或超固结状态。

1.1.4 海洋土的工程特性

现有的海洋土工程性质资料绝大部分是大陆边缘的,深海资料较少。主要包括无机黏土、钙质沉积物、硅质沉积物、半远洋沉积物及浊流沉积物和火山灰。

1. 无机黏土

海洋黏土沉积与陆上黏土的差异在于海洋土中有原位应力状态并可能有气体存在,但大量实验资料也证明,海洋黏土和陆地黏土的基本性质是相同的,特别是在滨海地区,陆上黏土工程性质中的某些关系可应用到海洋中。深海大洋中的黏土在塑性、强度、固结特性、变形参数等许多方面与陆地黏土也有许多相似之处。主要差别在结构上多以絮状结构出现而具有高压缩性、高灵敏度、高流动性、低强度的特点。

2. 钙质沉积物

钙质土的有效内摩擦角 φ 较高,通常高于硅质砂,随着围压的增大,抗剪强度显著减小。原因是钙质砂含有大量的角状颗粒及相应的粒间孔隙,故其摩擦角高于石英砂。其工程性质在很大程度上取决于以下因素。

(1) 平均有效应力效应:随着平均有效应力效应的增加,土从破裂时膨胀变化到更具塑性性质,在此情况下剪切呈现出体积的减小,此种转变一般在较低围压(200kPa)时出现,而陆上的硅质砂通常要在 2000kPa 时才出现这一转变。

(2) 压碎效应: φ' 值随平均有效应力增大而减小,归因于颗粒的压碎效应,颗粒破碎的发生使钙质砂剪胀性减小,体积收缩应变增大,峰值强度降低。

(3) 胶结效应:有研究表明,在很小应变下胶结的样品实际上不产生孔隙压力,但在