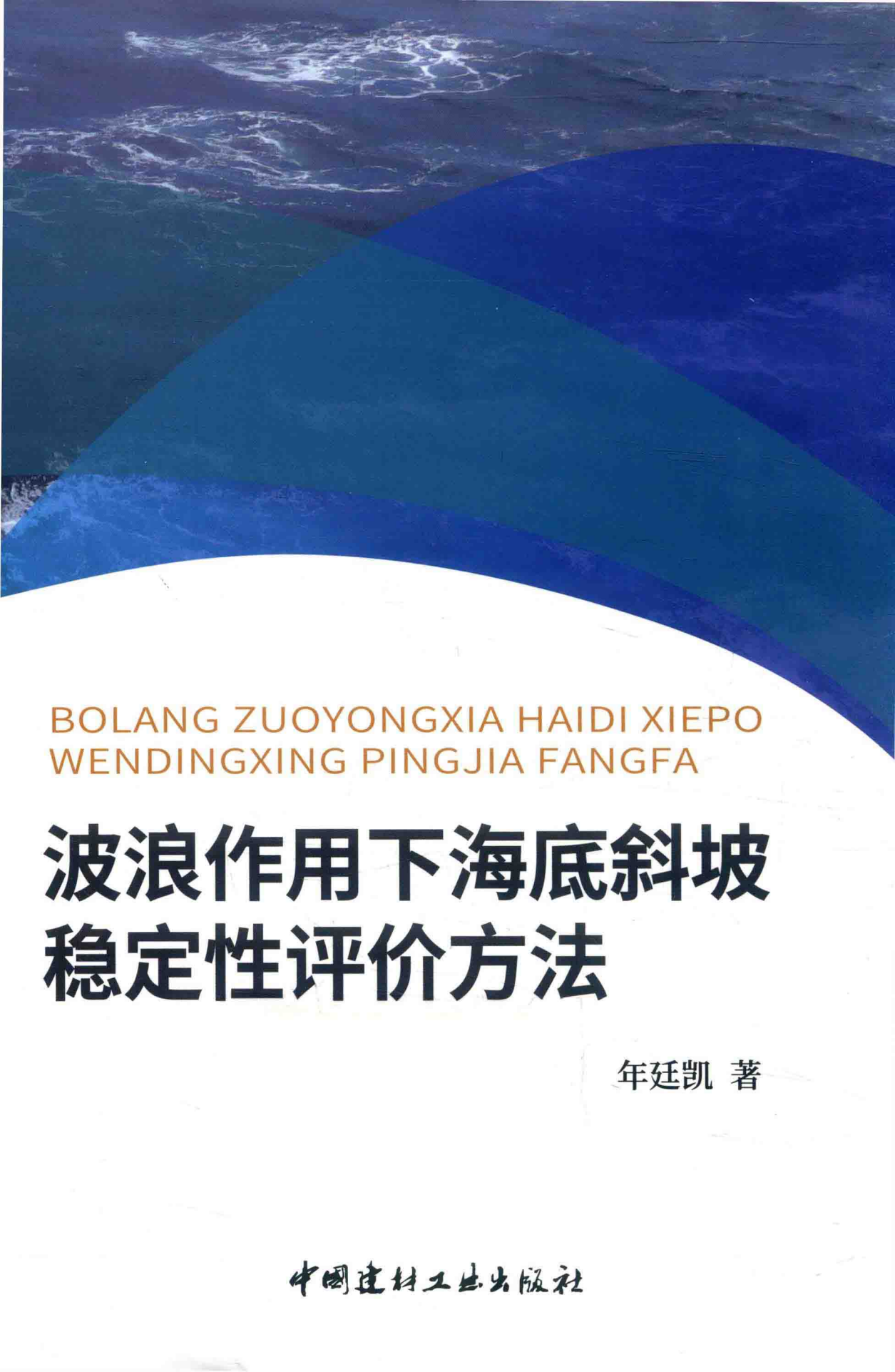




BOLANG ZUOYONGXIA HAIDI XIEPO
WENDINGXING PINGJIA FANGFA

波浪作用下海底斜坡 稳定性评价方法

年廷凯 著

中国建材工业出版社

波浪作用下海底斜坡 稳定性评价方法

年廷凯 著



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

波浪作用下海底斜坡稳定性评价方法/年廷凯著

· 北京: 中国建材工业出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-5160-2111-8

I. ①波… II. ①年… III. ①波浪—作用—海底—斜坡稳定性—研究 IV. ①P737.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 310142 号

内 容 简 介

本书基于塑性力学极限分析运动学方法和有限元强度折减数值方法, 对当前海底斜坡稳定性评价中存在的科学问题进行了深入分析, 提出了波浪荷载作用下海底斜坡稳定性评价的数值与解析方法。书中重点研究了海底斜坡的稳定性与破坏模式及滑坡机制, 包括线性与非线性波浪、拟静力地震荷载、工程扰动状态等复杂环境, 也涉及软黏土灵敏度、土体强度分布的非均质性、海底斜坡多土层分布、波长小于一个波长等特殊工况。这些内容不仅能促进海洋岩土工程与地质灾害的科学理论发展, 而且可以指导海洋工程实践。

本书可供从事海洋土力学与岩土工程、海洋工程地质、海洋环境地质和灾害地质、海洋工程、海洋科学等领域的科研人员和高校师生参考, 亦可供从事海洋工程勘察、设计、施工的相关企业技术人员参考。

波浪作用下海底斜坡稳定性评价方法

年廷凯 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 7.5

字 数: 180 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

印 次: 2017 年 12 月第 1 次

定 价: 58.00 元

本社网址: www.jcbs.com 微信公众号: [zgjcgychs](https://www.gdgcgys.com)

本书如出现印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换。联系电话: (010)88386906

前 言

海底滑坡是近海三角洲、大陆架和大陆坡、深海海底常见的一种海洋地质灾害,一旦发生海底滑坡,将对海底管线和海洋平台等基础设施造成危害,严重时威胁海洋平台的稳定与安全。因此,海底斜坡稳定性评价与滑坡演化机制研究已经成为当前海洋岩土工程与工程地质灾害研究领域的热点问题。然而由于问题的复杂性,关于波浪作用下海底斜坡的稳定性评价、海底滑坡的发生机理仍没有彻底解决,目前主要采用极限平衡法分析海底斜坡的稳定性,但该方法只能给出问题的近似解答,无法揭示海底斜坡失稳的破坏模式和滑坡演化机制,亟需开展深入而系统的理论分析与创新方法研究,发展海底斜坡稳定性评价的实用化分析方法;特别是针对复杂荷载和地质环境及特殊工况下的多土层海底斜坡问题,其稳定性分析理论与评价方法仍无显著进展。为此,引入塑性力学极限分析运动学方法和强度折减有限元数值方法,对当前海底斜坡稳定性评价中存在的科学问题进行了深入分析,重点研究了线性与非线性波浪(二阶 Stokes 波)、极端波浪参数、拟静力地震荷载、工程扰动环境和软黏土灵敏度、土体强度分布的非均质性、多土层海底斜坡、坡长小于一个波长等复杂工况下海底斜坡的稳定性与破坏模式及滑坡机制,提出了波浪荷载作用下海底斜坡稳定性评价的数值与解析方法,为海底管线和海洋平台等基础设施建设与工程防护及防灾减灾提供技术支持。

本书共分 7 章,第 1 章介绍海底滑坡的国内外研究现状与发展趋势,指出海底斜坡稳定性评价中存在的主要问题,并引出本书的主要内容。

第 2 章介绍海底斜坡极限分析方法的基本理论、强度折减极限分析方法及计算程序实施。

第 3 章介绍简化波压力作用下海底斜坡稳定性的极限分析运动学方法。简化一阶波浪理论中波浪荷载对海床压力分布的理论公式,将其应用于波浪作用下海底斜坡极限状态方程中,求解考虑波浪力作用的海底斜坡安全系数和潜在滑动面。针对典型算例,探讨了不同波浪参数(如波长、波高及水深)对海底斜坡稳定性的影响。

第 4 章介绍了线性波压力作用下海底斜坡稳定性的上限极限分析方法。考虑线性波浪作用,基于极限分析上限方法与线性波压力理论,推导了波压力对斜坡海床的做功功率,同斜坡海床重力做功功率一起引入到虚功率方程中,建立了波浪作用下斜坡海床稳定性的极限状态方程;引入数值积分技术,结合最优化方法,求解了

不同时刻海底斜坡的安全系数,并深入探讨了不同波浪参数(波高、波长、水深)与坡长小于一个波长等条件下海底斜坡稳定性。

第5章介绍了非线性波加载条件下海底斜坡稳定性的上限极限分析方法。采用二阶 Stokes 波浪理论求解波压力,运用极限分析上限定理,建立了考虑非线性波荷载作用的海底斜坡稳定性上限解法。在此基础上,结合一黏土质海底斜坡,分别考虑线性波与二阶 Stokes 波作用,探讨波长、波高、水深等因素对海底斜坡稳定性的影响规律。

第6章介绍了复杂环境下的海底斜坡稳定性解析方法。将极限分析上限方法拓展到了复杂环境下海底斜坡的稳定性上限分析中。考虑工程施工扰动,引入扰动度的定义,对不同扰动环境下不同灵敏度的海底斜坡稳定性进行了上限分析。进一步考虑土体黏聚力随深度分布的非均质性,推导了海底斜坡的内能耗散功率,从而建立了非均质性海底斜坡稳定性的上限解法。以多土层海底斜坡为研究对象,构造一组对数螺旋线破坏机构,选择旋转中心与滑入点作为独立变量,实现了波浪与地震荷载共同作用下多土层海底斜坡的稳定性上限分析,进一步拓展了极限分析上限方法在海底斜坡稳定性分析中的适用范围,最终将该方法应用于一实例海底斜坡评价。

第7章介绍了波浪作用下海底斜坡稳定性评价的弹塑性有限元数值方法。以大型有限元软件 ABAQUS 中的荷载模块为基础,添加一阶波浪力加载模式,实现波浪力作用下海底斜坡稳定性的二维弹塑性有限元分析与强度折减数值计算。基于典型算例,开展变动参数计算,深入探讨不同波浪参数、海底压力与水深等对计算结果的影响以及波浪力作用下海底斜坡潜在滑动面的变化规律,并将数值计算结果与极限分析上限方法所得解析解进行对比验证。在此基础上,考虑波浪力的影响,对厦门沪救码头近岸海底斜坡的稳定性及破坏模式进行数值分析,获得波浪荷载下海底斜坡这一实际波浪作用下海底斜坡稳定性的极限分析上限方法和数值分析问题的初步认识。

在本书稿完成之际,作者忆起栾茂田教授在海洋土力学与岩土工程领域给予作者的指导和帮助,在此表示由衷的感激;感谢所在的大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室各位同仁一直以来对作者在海洋土力学与防灾工程、地质灾害动力学与减灾技术领域科研工作的支持;感谢国际地质灾害与减灾协会、国家海洋局第一海洋研究所、中国地质调查局青岛海洋地质研究所、中国海洋大学、中国地震局工程力学研究所、辽宁地质海上工程勘察院有关专家在海洋地质调查及滑坡稳定性评价方面给予的支持和帮助。感谢课题组研究生刘博、刘敏、范宁、焦厚滨、霍沿东、鲁双等在相关专题研究中做出的贡献。本书主要内容是在作者指导的部分研究生学位论文的基础上发展起来的,部分成果尚未公开发表过;在本书撰写过程中,

硕士生刘敏、霍沿东提供了许多帮助,在此表示衷心的感谢!本书的部分研究成果得到了国家自然科学基金(No. 41427803, No. 51579032)、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室基金(No. SKLGDUEK1307)、国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室基金(No. MRE201304)、山东省海洋环境地质工程重点实验室基金(No. MEGE1603)及国家自然科学基金委南海东北部及吕宋海峡共享航次科学考察项目的资助,在此表示衷心的感谢。本书能够顺利出版,还要感谢中国建材工业出版社的领导和责任编辑的大力支持。

由于海洋土、海水、波浪流或地震等交织在一起,错综复杂,其稳定性与滑坡发生机制问题,受海洋土性状、土—水相互作用、环境荷载、工程地质条件等影响,海底滑坡在短期内尚难完全弄清楚,其评价理论和计算方法离实际仍有一定差距。因此,进行系统性的深入探索研究,仍是一项富有挑战性的工作。作者希望本书能对从事海洋工程地质调查、海底斜坡稳定性评价、海底滑坡灾害预测与避险、海洋工程防灾减灾的广大设计、施工技术人员及科研、教学人员和研究生有所帮助。鉴于海底滑坡相关问题研究还在不断发展、完善阶段,有一些理论和认识还有争议,一些方法还不成熟,加上著者水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请专家和读者批评指正。对于书中所引用文献的众多作者(列出的和未列出的)表示诚挚的谢意!

作 者

2017年6月于大连

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 海底滑坡研究现状	4
1.2.1 地质调查	4
1.2.2 破坏类型	6
1.2.3 诱发因素	8
1.2.4 海底斜坡稳定性评价方法	13
1.3 主要研究内容	16
第 2 章 静水条件下海底斜坡稳定性上限极限分析	18
2.1 强度折减技术	18
2.2 边坡稳定性上限分析理论	19
2.2.1 上限定理	19
2.2.2 上限方法在边坡稳定性分析中的应用	20
2.2.3 算例验证	22
2.3 静水条件下海底斜坡稳定性上限分析	24
2.3.1 概述	24
2.3.2 孔隙水压力效应的表达方法	25
2.3.3 静水条件下海底斜坡稳定性上限解法	27
2.3.4 算例验证	29
2.4 小结	30
第 3 章 简化波压力下海底斜坡稳定性上限极限分析	31
3.1 概述	31
3.2 波压力简化	32
3.2.1 线性波理论	32
3.2.2 波压力简化处理	32
3.3 考虑波浪荷载的海底斜坡稳定性上限解法	33
3.3.1 波压力做功功率	33

3.3.2	虚功率方程	37
3.3.3	算例分析	38
3.4	小结	40
第4章	线性波加载下海底斜坡稳定性上限极限分析	41
4.1	概述	41
4.2	波浪诱发的海底波压力	42
4.3	线性波加载下海底斜坡稳定性的上限解法	43
4.3.1	海底滑体重力做功的功率	43
4.3.2	波压力做功功率	43
4.3.3	数值积分技术	46
4.3.4	安全系数求解	46
4.3.5	算例验证	47
4.4	参数讨论	48
4.4.1	波浪影响分析	48
4.4.2	坡长小于一个波长工况分析	50
4.5	小结	51
第5章	非线性波加载下海底斜坡稳定性上限极限分析	52
5.1	概述	52
5.2	Stokes 波压力	52
5.2.1	二阶 Stokes 波理论	52
5.2.2	二阶 Stokes 波压力求解	53
5.3	二阶 Stokes 波加载下海底斜坡稳定性上限解法	54
5.3.1	二阶 Stokes 波压力做功功率	54
5.3.2	虚功率方程	55
5.3.3	算例验证	56
5.4	参数分析	56
5.4.1	波高、波长影响分析	56
5.4.2	水深影响分析	57
5.4.3	波长与水深的相关性分析	58
5.5	小结	59
第6章	复杂环境下海底斜坡稳定性的解析方法	60
6.1	扰动环境下海底斜坡稳定性解析	60
6.1.1	概述	60
6.1.2	扰动评价指标	60

6.1.3	考虑扰动效应的海底斜坡稳定性上限解法	61
6.1.4	算例分析	61
6.2	考虑非均质效应的海底斜坡稳定性解析	62
6.2.1	非均质性	62
6.2.2	内能耗散功率	63
6.2.3	基于优化技术的安全系数求解	64
6.2.4	算例验证	65
6.3	多土层海底斜坡稳定性上限分析	65
6.3.1	破坏机构	66
6.3.2	坐标转换	67
6.3.3	虚功率方程	68
6.3.4	安全系数求解	71
6.3.5	算例验证	72
6.4	线性波加载下多土层海底斜坡稳定性解析	73
6.4.1	线性波压力与重力共同作用下的外力功率	73
6.4.2	功能平衡方程及优化求解	75
6.4.3	算例验证	75
6.5	非线性波加载下多土层海底斜坡稳定性解析	76
6.5.1	二阶 Stokes 波压力做功功率	76
6.5.2	安全系数优化求解	77
6.5.3	算例验证	77
6.6	波浪与地震耦合作用下多土层海底斜坡稳定性解析	78
6.6.1	地震力与二阶 Stokes 波压力共同作用下的外力功率	78
6.6.2	安全系数优化求解	80
6.6.3	算例验证	80
6.7	工程实例分析	82
6.7.1	工程背景	82
6.7.2	实例分析	83
6.8	小结	84
第 7 章	基于弹塑性有限元强度折减法的海底斜坡稳定性分析	86
7.1	引言	86
7.2	有限元法基本理论与数值实施	86
7.2.1	分析软件 ABAQUS 简介	86
7.2.2	计算模型	87
7.2.3	本构模型	88
7.3	波浪作用下海底斜坡稳定性数值分析	90

7.3.1	边坡失稳判据	90
7.3.2	基于 ABAQUS 的有限元建模	90
7.3.3	波浪加载过程实施	91
7.3.4	算例对比分析	91
7.4	波浪作用下海底斜坡实例分析	95
7.4.1	工程背景	95
7.4.2	算例分析	96
7.5	小结	98
参考文献		99

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着科学技术的不断进步与发展,人类的脚步开始由陆地走向海洋。近几十年来,人类发现海洋含有丰富的油气资源。据统计,全世界范围内海洋石油储量为 1450 亿 t, 约占全球石油总储量的 34% (中国海洋学会, 1998), 这一发现极大促进了世界各国对海洋资源的开发, 海洋开发已经成为当前任何一个拥有海洋资源的国家发展战略中的重中之重。

中国作为世界上第二大能源消耗国, 能源短缺问题日益凸显, 严重制约着我国经济的快速发展。然而, 我国拥有约 300 万 km^2 的海洋国土, 海岸线长达 18000km, 蕴含着丰富的油气资源; 截至 2008 年, 已探明的海洋石油资源量达到了 246 亿 t, 占全国石油资源总量的 23%, 海洋天然气资源量为 16 亿 m^3 , 占总量的 30% (中国油气勘探, 1999; 徐嘉信等, 2001)。因此, 海洋油气资源的开发已成为我国的必然趋势 (黄建钢, 2007)。海底输油管道作为一种输送流体或气体介质的工具, 具有输送连续、效率高、输送量大、成本低等诸多优点, 是海上油气田开发中油气输送的主要方式。随着我国对海洋资源开发力度的加大, 不仅需要铺设大量的海底管线, 而且还需建设各种海洋工程基础设施, 如石油钻井平台、储油基地等。除此之外, 为了经济的快速发展, 还在海底建造了大量的通信设备海底电缆以及海底隧道。

然而, 海洋环境复杂多变, 地震、海啸、火山喷发和海底滑坡等自然灾害时常发生, 这势必会影响这些海洋基础设施的安全和正常运行。尤其是海底滑坡 (图 1.1 所示), 斜坡失稳后形成的泥流可以迁移数百公里, 并对海底基础设施造成毁灭性破坏 (Macpherson, 1978; Masson 等, 2006; Parker 等, 2008; Mosher 等, 2010), 这使得人类对于海洋地质灾害的研究变得越来越迫切。海底滑坡与陆地滑坡不同, 其具有坡度缓、规模大、荷载条件复杂等特点 (顾小芸, 1989; Hampton 等, 1996), 由于长期受海水冲刷、浸泡, 导致斜坡土体结构松散, 强度降低, 在外部荷载作用下, 即使坡度很小的斜坡也极易发生大范围滑动 (尹延鸿, 1995; 冯启民等, 2005)。近几百年来, 世界范围内已发生的海底滑坡事故已数不胜数, 世界范围的海底滑坡分布图 1.2 所示。据 Milne 统计, 在 1616~1886 年期间, 世界上由于地震、火山喷发等引发的海底斜坡失稳事件达 333 次, 大量的电缆在滑坡过程中遭到破坏, 损失不计其数 (Saxov, 1990)。此外, 1888 年, 挪威特隆赫姆湾在水深 100m、距离海岸 1500m 处发生的海底滑坡, 随着滑坡后缘向内陆方向发育, 导致沿海岸线的三条铁路受到严重的破坏, 影响交通的正常运行 (Summerhayes 等, 1979; Wynn 等, 2000)。

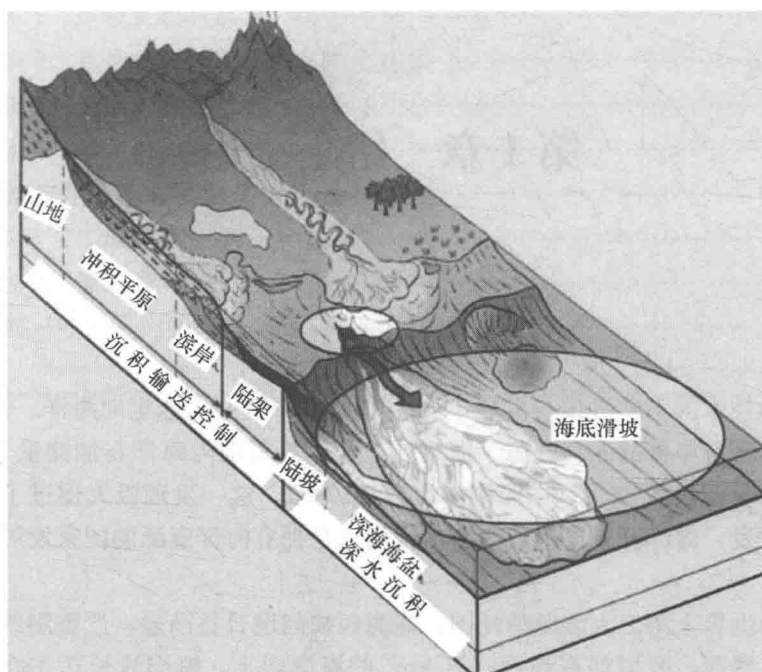


图 1.1 海底滑坡示意图 (马云, 2014)

人类进入 20 世纪以来, 全球海底滑坡现象亦非常频繁。如 1929 年 11 月 18 日, 发生在纽芬兰岛以南 280 海里处的特大海底滑坡, 滑坡体体积达 200km^3 , 滑坡土体在水流的作用下转化成浊流, 携带着泥沙以大约 $60\sim 100\text{km/h}$ 的速度向东移动了 1000km , 造成 12 根海底电缆被切断, 滑坡引发的海啸造成 27 人死亡, 是加拿大有史以来最大的海洋地质灾害 (Heezen 等, 1952, 1964; Piper 等, 1999); 1946 年温哥华岛 7.2 级地震诱发佐治亚海峡深湾及 Grief point 海底斜坡发生滑动, 滑动的沉积层对 Texada 岛与主岛之间的电缆造成了严重的损坏, 海上的一艘船被诱发的海啸波吞没 (Locat, 2002); 1964 年, 发生在阿拉斯加的海底滑坡, 造成财产损失达 4.5 亿美元, 伤亡 130 余人 (Haeussler 等, 2008); 1969 年, 发生在美国密西西比河三角洲的海底滑坡 (图 1.3 所示), 导致南 70 通道 B 平台破坏, 财产损失达 1 亿美元 (Bea 等, 1971; Earle 等, 1975); 1979 年, 法国海岸的 Nice airport 海底滑坡, 其滑坡体体积达到 0.15km^3 , 滑坡之后引发的海啸对海岸周边造成了巨大的破坏, 导致 11 人伤亡 (Dan 等, 2007); 1998 年, 巴布亚新几内亚近海发生海底滑坡, 滑坡引发的海啸波及整个东南亚地区, 给当地人民造成了巨额的财产损失, 伤亡高达 3000 人 (Tappin 等, 1999); 2006 年, 中国南海大陆架海床在地震诱发下发生大规模滑坡, 导致海底电缆严重损毁 (陈颢, 2007); 2009 年, 日本骏河湾发生地震导致海底滑坡, 斜坡区的两条水管线遭到破坏 (Matsumoto 等, 2011); 2011 年, 日本东北近海在地震期间发生了长 10km 、宽 $2\sim 3\text{km}$ 的海底滑坡, 滑坡后产生的次生灾害——海啸, 给当地沿海居民的房屋建筑造成了巨大破坏 (Strasser 等, 2015), 这一系列海底滑坡造成的灾难触目惊心, 给人类的生命与财产造成了严重的危害。



图 1.2 (a) 世界范围内海底滑坡分布图 (马云, 2014)

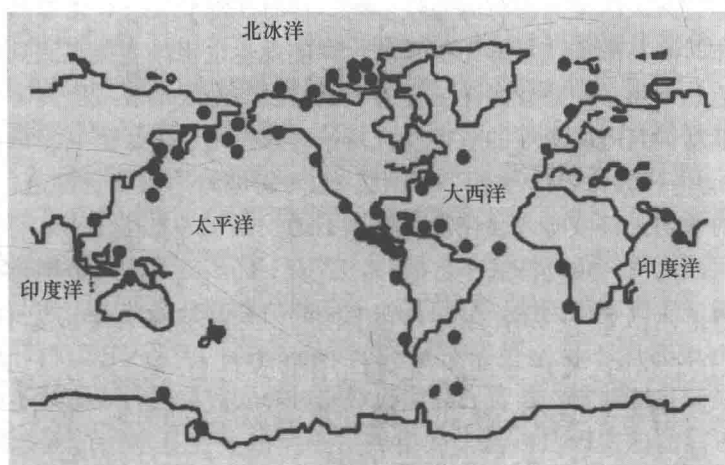


图 1.2 (b) 世界范围内海底滑坡分布图 (据 Milkov (2000) 修改)



图 1.3 密西西比河三角洲海底滑坡 (Teb Moon 摄于 2006)

海底滑坡作为一种常见的海洋灾害,能将沉积物运移数百千米,导致海洋平台倾覆、海底铺设的输油管线扭曲,同时还可能引发破坏性极大的次生灾害——海啸(周建平, 2008; Kawamura 等, 2015),威胁沿海居民的生命与财产安全,因此对海底滑坡的发生机理、稳定性评价及地质灾害风险分析,引起了国内外学者的高度重视。在海洋工程领域,海底输油气管线、通讯光缆、海洋平台等基础设施往往建在或穿越斜坡海床,考虑到长期运行的安全,其选址也是必须考虑海底滑坡问题,因此研究海底斜坡的稳定性对于维护海洋平台等构造物的长期安全具有重要的现实意义。

1.2 海底滑坡研究现状

1.2.1 地质调查

海底滑坡是近海大陆架与深海海底发生的一种海洋地质灾害,由于其处在水下,其发生破坏的具体时间与准确位置都无法预测,即使发生也很难直接观测到,因此人们对其知之甚少。近几十年来,随着海洋工程的不断建设与海底滑坡地质灾害事件的频繁发生,人们才逐渐意识到海底滑坡的危害性,开始对其稳定性进行研究。最早开展这方面研究的是 Terzaghi (1956), 20 世纪 50 年代,他对斜坡海床的稳定性进行了调查研究,发现一定坡度的软弱土斜坡海床会在重力作用下诱发滑动。20 世纪 70 年代,卡米尔飓风诱发美国密西西比河三角洲海底平台滑移,造成 1 亿多美元的经济损失,这一重大事故促成了以美国地质调查局为主,会同其他地质部门和部分高校对密西西比河水下三角洲进行了特定海域海底不稳定性系统研究(Coleman, 1983; 卫聪聪, 2009)。然而,由于受当时探测设备的限制,学者们只能粗略地对海底滑坡进行观测,了解其发生的海底地形条件、可能的诱发因素以及海底滑坡后土体的一些基本特征等。随着声纳探测学、地震勘探学的快速发展以及许多先进探测设备,如侧扫声纳仪、高分辨率地震勘探仪、高分辨率底层剖面仪以及多波束探测系统、全球定位系统等的问世与应用,才使得获取更详细海底地质资料成为可能,海底斜坡的稳定性研究也跨入了一个新的台阶(Clarke 等, 1996; McAdoo 等, 2000; Locat, 2000; Bruce 等, 2001; Haflidason 等, 2004; Hühnerbach 等, 2004; Canals, 2004, 胡光海等, 2006)。1984 年,Okusa 等采用精密的测量设备对日本 Shimizu 港附近海底孔隙水压力的变化趋势进行了持续观察,获得了波浪持续作用下孔压随时间的变化曲线,这为现今的理论研究提供了科学依据。美国的 STRATAFORM 计划专门对 Ele 河海底地质灾害进行了调查,发现了世界上著名的洪堡德滑坡(常方强, 2009)。1974~2000 年期间,日本先后进行了三轮的海洋地质调查计划,包括 1974 年的 1:5 万和 1:20 万的“大陆架基础地质调查计划”、1979 年的“大陆架详查计划”、1983 年实施的 1:50 万专属经济区调查,几乎掌握了日本近海大陆架区域的地质情况(孙振娟, 2013)。2001 年~2002 年,加拿大地质调查局大西洋分部联合其他部门采用超高精度和高精度的地震探测仪器及现场调查仪器对 Hudson 湾到格兰特滩、Hudson 湾的深水区、Hudson 湾到 Scotia 半岛的大陆边缘、Saguenay 峡湾、Outardes 三角洲区、加拿大西海岸等海域进行了详细调查研究,建立了海底沉积物

物理力学性质数据库,为评价斜坡稳定性提供了依据(刘乐军,2004;常方强,2009)。2004年,Hafliðason等人采用旁扫声呐技术、高分辨率的地震剖面仪系统对挪威Storegga滑坡地质情况进行了调查研究,获得了海底沉积物性质和结构变化特征。此外,20世纪90年至今,北美、欧洲、日本等国家联合联合国教科文组织和国际地球科学联盟等国际组织开展了一系列海底滑坡的专项研究项目,主要有大陆边缘沉积过程研究(1995~2001年)、欧洲大陆斜坡稳定性研究(2000~2004年)、国际地质对比计划工程511(2005~2009年)和585(2010~2014年)等(Locat等,2002;胡光海等,2006;缪成章,2007;常方强,2009;刘锋,2010;杨晓云,2010;杨林青,2012;史慧杰等,2013;马云,2014;刘博,2014;周庆杰,2015);同时围绕这些项目还举办了一系列的专题报告会,如:2003年的法国尼斯报告会、2005年挪威奥斯陆报告会、2007年希腊圣托里尼报告会、2009年美国奥斯丁报告会、2011年日本京都报告会等(马云,2014)。

相比其他国家而言,我国的研究起步相对较晚。最早始于1958年的“中国近海综合调查及开发”项目,34个参加单位对渤海、黄海、东海及南海北部近海海域78.9万 km^2 的地质、地貌、水文等进行了综合普查,并绘制了1:100万~1:500万比例尺图幅(孙振娟,2010;张延清,2013)。进入20世纪80年代,青岛海洋大学河口海岸带研究所相继开展了《渤海中南部及黄河口沉积动力学研究》与《中国河口主要沉积动力过程及其应用》项目的研究,对黄河口水下斜坡的不稳定性进行深入研究,分析论述了黄河口三角洲区域(图1.4所示)的坍塌、滑坡、沉积物重力流等块体运动,揭示了黄河口沉积动力过程及河口灾害地质现象(杨作升等,1991;叶银灿等,2012)。1986~1991年,我国使用多波束测深系统、高分辨率侧扫声纳仪、三维地震检测仪等高精度仪器对珠江口盆地的海岸进行了地质调查,获得了水深在50~200m范围内的石油开发区工程地质评价,为后来的油气资源开发和国际合作与交流做出了一定的贡献(广州地质调查局,2005;刘博,2014;夏真等,2014)。1990~1995年,国家海洋局、地质矿产部等部委参加了“八五”重点项目“中国海岛资源综合调查”,摸清了我国海岛的基本情况,为海岛经济社会环境协调发展提供了科学依据(马志华,1996;杨林青,2012)。1997~2001年间,国家海洋局组织实施了“我国专属经济区和大陆架勘测”项目,内容包括灾害地质环境调查和评价(李培英等,2003;杜军等,2004)。2003年,我国又进一步开展了“我国近海海洋综合调查和评价专项”(“908”专项)调查研究。调查范围包括内水、领海和领海以外部分海域,总面积达 $67.6 \times 10^4 \text{km}^2$ 。海洋灾害调查是该专项的重要内容,主要有:台风、风暴潮、巨浪、海啸、海水灾害等海洋环境灾害调查,海岸侵蚀、海水入侵、土地盐渍化、湿地退化和海底滑坡、海床砂土液化等海洋地质灾害调查(叶银灿等,2012)。此外,还有2002年中国地质调查局南海幅和永暑礁幅1:100万海洋区域地质调查(邱燕等,2006),2006年实施的1:1000万上海幅和海南岛幅海洋区域地质调查(陈泓君等,2014),2008~2015年期间由青岛海洋地质研究所和广州海洋地质调查局实施的“海洋地质保障工程”等(张永明等,2012)。

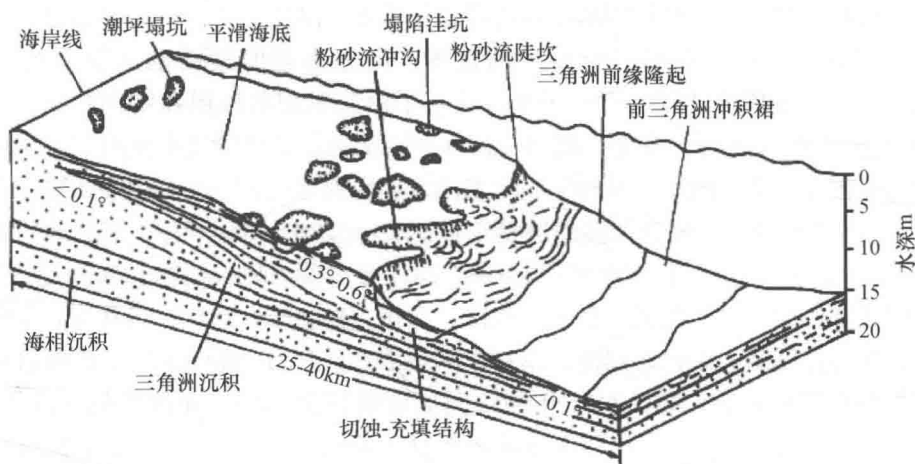


图 1.4 现代黄河口水下三角洲格局 (贾永刚等, 2000)

1.2.2 破坏类型

由于海底地质环境多样、地质构造条件、水动力条件复杂等原因,海底滑坡在发育规模、发生机制及运动方式等方面非常独特,与陆地滑坡截然不同(刘乐军, 2004)。为了更好认识与理解海洋土失稳的运动规律,海底滑坡破坏类型的研究显得尤为重要。

最早对海底斜坡破坏类型研究的是 Dott, 他根据滑坡后海底地形探测资料,将海底滑坡分为塌陷、滑动、块状流和浊流四个类型。1972 年, Pettijohn 等把蠕动纳入海底滑坡范畴,进一步把破坏类型划分滑动、滑塌和蠕动,并指出滑动代表较大位移的变形,滑塌一般指局部运动,蠕动是缓慢的顺坡运动。Moore (1977) 在 Vaines (1958) 提出的陆地滑坡分类基础上进行了修改,从物质状态的角度对海底滑坡进行了重新分类,分为塌陷、滑动和流动。Nardin 等 (1979) 从力学特性的角度,根据沉积物从陆地向深海运移过程的块体运动形态,将海底滑坡划分为岩崩与滑动、块体流、粘性流三类。块体流又进一步分为碎屑流、泥流与塑性颗粒流;粘性流细分为粘性颗粒流、液化流与浊流。Mulder 等 (1998) 根据海洋块体运动形式、结构特征以及破坏面形状将其划分为三种类型:滑动或滑塌、塑性流、浊流,并分析了海底滑坡整个运动过程中各类运动类型的动态关系。到了 21 世纪初,Locat 等 (2002) 在总结前人研究成果的基础上,结合国际土力学与土木工程技术委员会的陆地滑坡分类方案,建立了海底滑坡分类模式,如图 1.5 所示。根据滑坡机理将海底滑坡分为滑动、倾倒、扩张、坠落、流动五种类型;滑动模式又细分为平移滑动与旋转滑动,而坠落与流动被细分为崩流、碎屑流和泥流。该分类方法几乎包含了海底滑坡的所有破坏类型,但却无法反映各种破坏类型之间的相互影响关系。

2004 年,Canal 等又进一步对 Locat 的分类方法进行了发展完善,把海底滑坡重新划分为蠕变、崩落、滑动或滑移、碎屑流以及泥流五类,并对各类运动的基本特征进行了总结,这些特征包括破坏特征、滑面形状以及力学行为等。在这其中,Canal 强调了蠕变对于海底斜坡失稳起到了极大的作用,蠕变常发生在粘质海底,并且可以随时间演

变成为滑坡或者碎屑流，也是发生海底失稳的前期过程，值得关注（Marsset 等，2004）。2006 年，Masson 等在 Mulder 分类的基础上进行了修改，将破坏类型划分为滑动、岩屑崩落、碎屑流、浊流，并指出滑动、碎屑流、浊流是沉积物顺坡运移的主要重力驱动过程。2007 年，Weimer 等提出了一个新的概念“块体搬运复合体系”简称 MTCs 来描述深水沉积物的搬运机制；Moscardelli & Wood（2008）对这种体系进行了分类，分为块体搬运复合体（简称 MTC）与浊流，块体搬运复合体又可细分为滑动、滑塌与碎屑流，如图 1.6 所示。Kalligeris 等（2010）认为海底滑坡包括斜坡海床破坏的所有类型，很大程度上继承了 Locat（2002）对海底滑坡的分类，并对每类破坏形式进行了归纳总结，使各种海底滑坡类型易于区分辨别。Shanmugam 等（2015）认为块体搬运体系（简称 MTD）的所有类型都属于海底滑坡的范畴，将海底滑坡划分为滑动、滑塌、碎屑流、倾倒、蠕变、岩屑崩落。

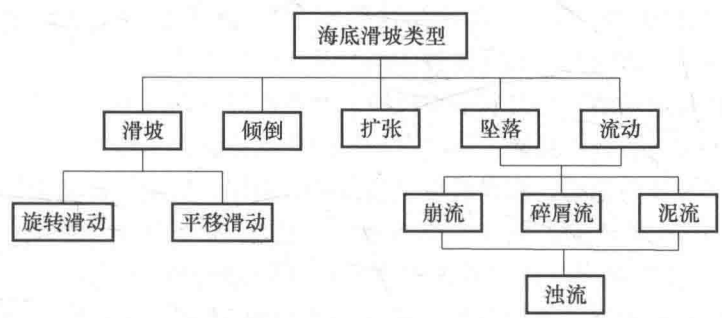


图 1.5 海底滑坡分类（Locat 等，2002）

分类			图解
块体搬运复合体系	块体搬运复合体	滑动	
		滑塌	
		碎屑流	
	浊流		

图 1.6 MTCs 分类图解（Moscardelli 等，2008）

与国外相比，我国在海底滑坡研究方面起步较晚。近年来，随着对海底滑坡的深入研究，国内学者在海底斜坡破坏类型方面也取得了一定的进展。如陈自生（1988）根据