1004-9665-2000-08(01)-0040-06 *Journal of Engineering Geology* 工程地质学报

海洋工程地质的回顾与展望*

顾小芸
(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘 要 本文通过对海洋工程地质发展的简单回顾阐述了其调查和评价的类别、方法与内容,对海底滑坡、砂土液化和原位土工测试等几个问题进行了重点展开,并对21世纪的发展作了展望。

关键词 海洋土工 场地勘查 海底滑坡 砂土液化 原位土工试验
中图分类号: P751 **文献标识码**: A

REVIEW AND PROSPECTS OF MARINE ENGINEERING GEOLOGY

GU Xiao-yun
(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing* 100080)

Abstract In review of the development of marine engineering geology, the types, methods, and contents of the offshore site investigation are described in this paper. Several problems, such as seafloor stability, liquefaction potential of sandy soil, and in-situ geotechnical tests, are presented in more details. Finally, the prospects of marine engineering geology in the 21 century are given.

Key words Marine geotechnology, Site investigation, Seafloor stability, Liquefaction potential, In-situ test

1 前 言

海洋工程地质发展至今已经历了整整半个世纪,它起始于美国着手开采墨西哥湾海洋石油的1947年。工作主要是围绕钻井灾害和海洋结构物场地进行的。前者在油井钻探之前进行,既要探测诸如浅层气存在的浅层地质情况以对付钻井时发生的井喷和着火等灾害,又要调查与钻井船(又称自升式平台)基础有关的土工问题。据资料记载,1955~1980年间美国每年发生钻井船基础严重破坏的事故达3~4起[1]。一条钻井船的灾难性事件会引起众多生命的丧失和高达六千万美元的经济损失。该类调查面积由几平方公里至几十平方公里不等。海洋结构物场地调查的目的是要确定影响固定式平台和海底管线等工程结构物的设计、布局、施工以及安全操作的工程地质条件。有关结构物地基的资料是该类调查的最主要内容,并根据结构物的类别对场地进行评价。调查面积可以在数平方公里至几百平方公里的范围。

1969年卡米尔飓风袭击密西西比河三角洲,引起海底大面积土体滑移,造成3个钢平台破坏,其中之一翻倒并沿斜坡向下滑出30 m,损失1亿多美元[2]。人们意识到,对工程地质条件的了解不能局限于某结构物的场地,必须扩大调查区域范围。70年代末,根据30年间积累的1300个工程地质钻孔的

* 收稿日期: 1999-10-10. 收到修改稿日期: 1999-12-20.
作者简介: 顾小芸,女,研究员,工程地质专业.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

资料, 墨西哥湾海底整体的工程地质情况已能显露出来, 可以用来进行大面积土体滑移的分析。而对于新开发的或边远的海域, 则有必要先做大面积的调查。80 年代初美国公司对非洲象牙海岸进行的调查就成了区域性工程地质调查的先行。区域性海洋工程地质为勘探开发工作的初步考虑提供信息, 调查范围可达几百至几千平方公里, 甚至上万平方公里。

我国的海洋石油开发工作起步较晚。70 年代, 勘探开发工作主要由外国公司进行。1980 年前后, 我国仅有的海底土室内土工试验是从外国公司承担的海洋工程地质工作中反承包过来的。沉垫式钻井船"渤海二号"的滑移造成我国船员丧命和财产损失的惨痛事件, 其原因在相当一段时间中得不到明确解释。直到 80 年代初, 才真正开始了我国的海洋工程地质工作。由于充分吸收了国外的经验, 其发展相当迅速。结合钻井灾害、结构物场地和区域性的工程地质调查和评价工作都相继发展起来, 并得到国外同行的认可。

本文将就海洋工程地质调查的方法、评价的内容, 和几个重点关注的问题进行简述, 并在此基础上对 21 世纪的发展作一展望。

2 调查方法

地球物理、地质和土工的综合调查和评价是海洋工程地质工作的一大特点。一个重要的生产平台的场址调查往往包括以下步骤: 地球物理走线及资料的分析; 在地球物理资料初步分析基础上确定钻孔取样的方案; 土样的室内试验和结果分析; 反映地质和土工条件和讨论对工程的各种可能效应的综合评价报告(图 1)。

地球物理调查提供的遥感信息可用于探测诸如断层、海底滑坡、不规则地形、海底冲刷区、特别软弱的沉积物、浅埋基岩、以及含气沉积物等地质特征, 也可将钻孔得到的土层资料延伸到不取土样的区域。地球物理测量是由带有定位装置和测深仪、侧扫声纳、高分辨率地震剖面仪和磁力仪等设备的调查船通过在区域内走线的方式进行的。

钻取土样、原位试验和室内土工试验通常是海洋工程地质调查中的重头部分。根据不同调查目的采用不同的取土方法。生产平台基础的研究要求钻取的土样深度可达 100～200 m。对于管线线路或其他海底浅层调查, 只要求海底 10 m 左右的土样, 这时采用重力式、活塞式和振动式取土器, 有时还用抓斗。

为避免土样扰动带来的问题, 发展了多种原位试验方法。最常用的是静力触探试验, 在软粘土区有时也用十字板试验。

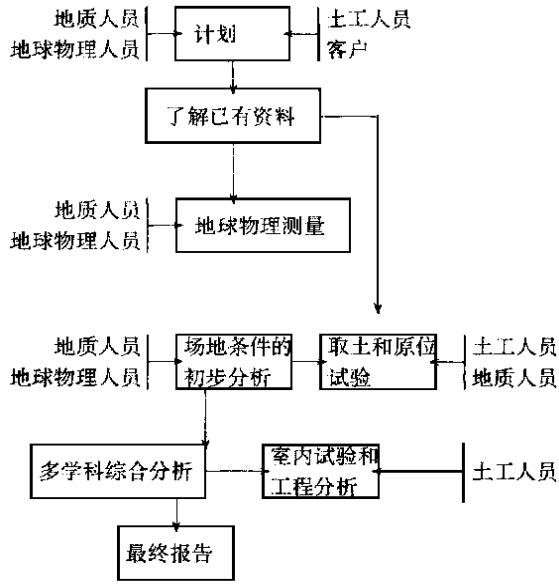

图 1 海洋工程地质调查中多环节的联系图

Fig. 1 Relationship between many links in marine engineering-geological investigation

室内土工试验分船上和岸上两部分。船上进行含水量、容重和简易的强度试验。岸上土工试验包括常规的物性试验和固结、三轴、动力特性等力学性质试验。

在有些调查——尤其是区域性调查中, 运到岸上的土样除进行土工试验外, 还要进行地质试验, 其目的是判断海底土层的沉积年龄、环境和了解其结构和扰动性。采用的手段有古生物、同位素和 X 光照相方法。

由于海上作业的经费昂贵, 调查的时间概念非常重要。对于典型的钻井灾害或结构物场地调查, 约花 36～48 hr 采集地球物理资料。对大的区域性调查, 则需数周甚至数月。取土样可能需要几小时或几天。室内试验、资料分析和完成报告的时间因项目规模而异, 少的只有 2 周, 多的可达 6 个月。

3 评价的内容

一个优秀的工程地质报告应该尽可能多地提供有关海底地形和具有工程意义的地质条件方面的信息。其中通常包括文字部分和一系列图件和剖面。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.1 图件和剖面

在综合调查的基础上,通常形成如下图件:水深图,海底地质图,土层等厚度图,地质特征图等。图件的比例尺因调查目的而异:对于钻井灾害或结构物场地,比例尺从 1:5,000 至 1:25,000;对于区域性调查,则为 1:25,000 至 1:500,000。

由于对地球物理资料的解释有时并不是唯一的,应该综合考虑钻孔和土样试验的结果以及地质环境来最后确定。

所有图件中地质特征图是最重要的一张。该图表示了海底直至 300～900 m 深度的地质特征,其中包括断裂、滑坡、泥流、蠕动区、砂坡、浅层气、陡坎、不规则地形、以及埋藏古河道等。这些地质特征要尽可能定量描述,例如:断层是海底错断的还是埋藏的,海底坡度的陡度,滑坡体的厚度,滑动区的新老不同年龄,不规则地形区的最大起伏等。

3.2 与钻井船毁坏有关的分析

在钻井灾害调查中除井喷事件外,应针对引起基础破坏的土工原因进行分析。其中包括硬土层下卧有软土层造成的穿透破坏,风暴引起的桩腿过度下沉,桩腿下方冲刷引起的不稳定性,由海底土体滑移施加于钻井船的侧向阻力,以及当抗拔能力大于提升力时造成桩腿无法拔出。在工程地质评价中,需要进行承载力分析以预测桩腿插入深度和估计穿透破坏的可能性。

3.3 平台场址的分析

固定式平台一般有两种:钢管桩平台和重力式平台。因我国仅采用前者,此处只限于钢管桩平台。

在工程地质评价中应根据土层剖面中粘土的不排水强度或砂土的相对密度得到桩的侧摩阻力和端部承载力,并算出桩的极限轴向承载力,给出轴向荷载-位移(t-Z)曲线和桩端荷载-位移(Q-Z)曲线。由于平台受水平向的波浪力作用,需要计算桩的横向承载力和给出横向阻力-挠度(P-Y)曲线。此外,还要进行沉桩可能性分析,和在一定情况下进行群桩效应分析。

3.4 管线场址的评价

评价中应包括对影响管线稳定性和施工的所有海底地形特征的确定,如要求在管线施工前平整或铲除的岩石露头、大型漂石等,以及可能不稳定的斜坡、深谷、凹地、砂坡和其他冲刷形式。对滑坡和液化等海底不稳定因素应予以评价。

为判断管线的在位稳定性,需要计算管道下方土的承载力,保持管、水、土比重及土的强度间的一定关系,确定土对管的侧向阻力。根据水流速度和土颗粒大小可初步确定冲刷的可能性。为增加管线稳定性有时需要挖沟埋管,为此应确定管线埋深。

3.5 区域性工程地质评价

区域性评价根据填图比例尺可以给出调查海区在不同工程设施情况下的可能行为,如为选择钻井船的合适型式、海洋平台场址和管线线路的初选、和海上设施计划和成本的初步估算提供基础。根据区域广大的特点,给出区域海底不稳定性的评价(包括海底滑移、易液化区和易冲刷区的划分等)也是极其重要的内容。清楚的工程概念对评价工作是举足轻重的。在同样的调查资料基础上,若具有更多的土工基础,评价工作能进行得更细微,为工程提供更多的信息,就能做到投资小、收效大的结果。

4 几个重点关注的问题

4.1 海底土体滑移

如前所述,海底滑移对各种海洋工程设施都会产生极大的威胁,因此 70 年代以来海底边坡稳定性评价成为海洋工程地质评价中的一个热门话题。

国际上,根据调查研究工作的进展,大致可以分为两个阶段。

4.1.1 第一阶段

70～80 年代前期为第一阶段。人们分析了海底滑坡的特点,进行了计算,并用实测资料予以验证[3]。

与陆地上的边坡相比,海底边坡有如下特点:(1)坡度很缓,有时还不足 1 时,就可能产生滑动。(2)由于沉积速率快和有时含气,海底土层中存在超孔隙水压力且土质特别软。在密西西比三角洲的淤泥质软粘土中曾测到很高的超孔隙压力,使原位有效应力比静水压力小 74%。关于这点,可以用 Gibson 的固结理论进行计算。(3)波浪载荷对边坡增加了一个外载因素,又导致土层中超孔隙水压力增加。关于土层受谐振波浪荷载的瞬态反应,可以根据多孔弹性介质模型算得土层的孔隙压力和有效应力幅值随土层深度的变化。(4)在波浪的反复荷载作用

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

下, 粘土会软化, 即此时强度比原来的静强度有所下降, 降低值可达 1/3。(5) 由于海底取土和调查的昂贵, 不易获得高质量的原状土和进行多次的重复调查。

海底边坡稳定计算方法分三大类: 极限平衡方法、静态变形有限元方法和动力分析方法。尽管从理论上讲, 排列在后的方法超过排列在前的方法, 但是由于上述第五个特点决定计算所需土性参数的可靠性不易保证, 边坡几何尺寸的准确记录也有一定难度, 除了对发生平台破坏一类的典型重大事故, 可以花钱多次重复调查和进行细微的土工试验以得到准确的参数, 并将动态计算结果和实录资料对比外, 多数情况下还是采用极限平衡分析方法。

极限平衡分析方法包括弯曲面法和无限坡法。弯曲面法中数 Henkel 在 1970 年提出的方法最早。他用圆弧滑动面进行力矩平衡。波浪压力由线性波理论计算。1979 年 Finn 等用有效应力条分法进行计算, 破坏面可以是任意的, 波浪引起的海底压力也用线性波理论计算。地震载荷以准静态水平力作用于每一条的重心处, 周期载荷产生的孔隙压力由室内动力试验结果计算。

无限坡方法适合于多数滑动土体厚度大大小于水平尺度的特点。由于无限坡分析的自由体要求沿坡长的应力条件保持恒定, 因此波浪引起的海底压力没有包含在该分析中, 对于水深小于 150 m 的海底边坡, 波浪的影响用超静水压力值(由多孔弹性介质模型计算) 反映。

4.1.2 第二阶段

80 年代以后, 海洋石油开发工作进入深水区, 调查区域由大陆架进到大陆坡, 海底滑坡的实例大增。据统计, 在北美大西洋的大陆坡, 水深 150 m 处的滑坡数量小于 1%, 3/4 滑坡都发生在水深大于 800 m 的区域[4]。

在资金雄厚的发达国家对一些海域进行了覆盖性的地球物理调查, 并建立了数据库。例如, 美国地质调查局对北美大西洋的大陆坡阿拉斯加白令海和太平洋中夏威夷岛等区域都进行了调查, 仅大西洋的大陆坡上就发现有 179 例滑动土体。其典型坡度为 4°, 而极限值为 1°～30°。滑动土体的宽度为 0.2～50 km (典型值为 1～2 km), 长度为 0.3～380 km (典型值为 2～4 km), 最大厚度达 650 m。

对于水深大于 150 m 的情况, 波浪载荷已不起作用, 引起土体中超孔隙压力的主要因素有两个: 地震以及天然气水合物(gas hydrate) 的分解。天然气水合物是天然气被包在冰的坚硬晶格之中的一种固溶复合物。这种复合物存在于高压和低温条件下, 大陆坡的自然条件正适合于其存在。海平面下降和沉积物湿度的上升都会使天然气水合物分解。例如, 更新世的海退中海平面下降了约 100 m, 作用在海底的总应力下降了约 1000 kPa。这时, 在天然气水合物的底部就会出现超孔隙水压力。该超孔隙水压力值也依赖于天然气水合物的热传导率和沉积物的固结系数。计算了超孔隙水压力后, 可用前述的无限坡分析方法计算海底边坡的安全系数。

此外, 地球物理资料还揭示, 多数海底滑动土体在一次滑动后会继续崩解, 其可能原因有: (1) 诱发应力的再度提高, 如地震的作用; (2) 土体中软弱黏土层的蠕变引起长期强度的降低; (3) 在海水作用下滑动土体逐渐软化而转变为泥流, 这种泥流以一定速度延伸一定距离。研究者们曾用塑性模型、粘性模型和宾汉模型(有一屈服阻力和线性粘度的粘性模型) 计算泥流的深度和速度, 得到一些满意的结果, 但有现场资料检验的计算结果还不多。

目前还处于第一阶段。由于大多数调查工作在极浅海和大陆架进行, 实测到的海底滑坡为数还不多, 计算方法也仅限于极限平衡方法。

4.2 砂土液化分析

地震引起砂土液化造成的灾害是众所周知的, 推动人们发展了评估砂土液化势的多种方法。对于地震活动区的海域, 当土层由砂土或粉土组成时, 采用陆地上的液化分析方法也是适合的。但是, 对于水深小于 150 m 的非地震活动区, 波浪载荷是引起砂土液化的诱发力。虽然这方面的实例报导比起陆地上的情况要少得多, 但是砂土液化会使海底管线上浮、倾斜的砂质海底会因此滑移、浅基础结构物也会遭到损坏, 因此促使人们对波浪引起液化势的评估。

波浪和地震都是周期载荷, 但两者有下列不同特点: ①传播方向不同——前者由上向下, 后者由下向上; ②周期载荷的特点不同——波浪载荷有主应力方向旋转的特点, 地震则无; ③频率不同——地震频率约为 1 HZ, 波浪频率约为 0.1 HZ; ④历时不同——地震历时以秒、分计算, 风暴浪历时以小时、天计算。

室内土工试验结果表明, 频率由 1 HZ 变为 0.1 HZ 的周期荷载对砂土动力特性的影响不大, 因此第三个不同点可以暂不考虑。

历时不同产生的效果是周期载荷引起的孔隙压

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力能否消散, 地震历时很短, 孔压不能消散; 而波浪历时较长, 累积的孔隙压力值随时间部分地消散。由此工程上有采用地震工程中的方法, 只是将其抗液化能力提高 10% 作为波浪荷载下的经验方法。较精确的理论计算则为同时考虑周期荷载引起的孔隙压力增长和随时间消散两种作用下的孔隙压力反应。为此需要从土工试验中获得液化强度曲线以及土的渗透系数、压缩系数和相对密度。

长期从事地震作用下砂土液化研究的 Ishihara 在 1985 年考虑了波浪与地震的前两个不同点[5]。他提出用主应力旋转的扭剪试验进行液化强度试验得到液化时的周期剪应力比, 并用波浪理论得到给定水深下的波长, 继而用多孔介质弹性模型算得该波长下土层中的周期剪应力分布, 计算值大于试验所得液化剪应力比时, 土层液化。

砂土能否液化, 其相对密度是关键因素。而砂层中不易取得原状土样, 其相对密度往往靠原位静力触探试验(CPT)资料确定。这样, 根据 CPT 资料判断砂土液化势也是一个很好的途径, 地震工程中用标贯试验(SPT)判断砂土液化可能性是一个成熟的方法。CPT 的锥尖阻力 和 SPT 的 N 值间有经验关系: 对于砂, $q_c/N = 5$, 对于粉砂 $q_c/N = 4.5$。由 q_c 值换算成 N 值后, 可借用地震工程中的经验估计液化可能性。此外, 也可用测孔隙压力的静力触探试验(PCPT)所得差动孔隙压力比判断粉质砂的液化可能性。

当工程地质调查的比例尺很小, 既不具备原位试验, 也没有进行室内液化强度试验的可能时, 可以根据粒径大小的资料粗估液化可能性。

关于砂土液化的研究, 至今还在继续进行。对于由液化引起的滑坡, 虽然有所报导, 但分析计算和预测方法还未进行。

4.3 原位土工试验的发展

自 70 年代初开始, 原位土工试验就在海洋工程地质调查中起着重要的作用。测试通常在钻管底部进行, 采用通过综合电缆操纵的液压系统将仪器以固定的速度贯入土中。感应探头所得的连续资料经综合电缆传至操控单元的记录器。测试设备的种类和功能是与海洋结构物大型化和复杂化带来的设计要求同步发展的。

用得最多的要推锥形探头的静力触探仪 CPT。借助于探头内的电子应变片可测定锥尖阻力和侧壁摩擦力。根据 CPT 资料可以确定土的种类、砂土的相对密度、粘土的不排水剪切强度、以及承载力、桩的磨擦阻力等。80 年代初在 CPT 基础上又发展了孔隙水压触探仪 PCPT。它由 CPT 加装压力传感器和陶瓷滤头而成。压力传感器部分直接与经滤头的水接触, 只需极小的排水量(譬如 0.2 mm)就能使传感器产生高输出讯号。在贯入过程中能记录到连续的动态孔隙压力, 当试验停止后可记录超静水压力的消散过程。根据 PCPT 资料, 可以获得土层中小于 70 cm 的薄夹层、应力历史、固结系数以及砂土液化势等信息[7]。

遥控十字板是确定海底软粘土不排水强度的另一种常用原位试验设备。它可在钻管底部等速贯入 1.5 m, 这样保证试验区越过了钻井造成的扰动区。十字板的转动和扭矩测量系统都安装在孔下。试验从船上遥控进行。

在海底特有的钙质土区域, 由于土质的密度和强度异常低, CPT 的应用受到一定限制。近年来发展了探头形状为 T 型杆和球的触探仪, 探头的承载面积增大具有适应深水中高围压和低强度土的优点。

测定动力特性的原位测试设备有地震触探仪(Seismometer), 是在 PCPT 探头内加一个微型地震仪, 在贯入过程中可得到剪切波速剖面图, 从而计算动剪模量。最近也有人在试用剪切板荷载试验(Torsional Plate Loading Test), 既可进行低强度土的垂向贯入试验, 也可进行扭剪试验, 扭剪试验可以是单调加载, 也可施加周期荷载, 因此除静强度外, 还可得到动态特性和评估液化可能性。

90 年代以来, 随水深的增加, 原位土工试验的难度增大, 一系列间接测量物性参数的方法开始出现。例如, 用 X 射线扫描仪测试深海沉积物组构以换算密度和渗透性, 用一种称作地球物理滑车的设备测量地震波速用于计算沉积物的弹性参量和物理参数, 还有用磁法测量土层不同深度的沉降量。

原位土工试验的发展通常是通过两个方面进行的。一方面是设备装置的发展, 另一个方面是资料分析解释的发展。前者要适合海上作业的要求, 其中包括对海水波动的补偿、试验的遥控操作、数据的自动采集和探头传感器的研制等。后者的发展要求一定的理论分析、误差校正、与室内试验的比较和数据的大量积累等。例如, 对砂土峰值摩擦角的解释方面, 不同研究者曾基于承载力和空穴扩张两种不同的理论得到不同的经验或半经验方法, 目前比较推崇的是加拿大 UBC 的方法。UBC 还系统研究了套筒与

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

圆锥面积比、温度零漂、探头内空气的进入、贯入速度等各种因素对 PCPT 结果的影响, 得到了在解释应力历史时用差动孔压比值优于孔压比值的结果, 并用多种整理方法由 PCPT 结果判断砂土液化可能性。此外, 在解释原位资料的经验或半经验关系式中, 一些经验参数受到地区的影响, 既要有室内试验的对比, 又要有大量(国外有多达上千次)的现场试验资料来验证。

原位土工设备方面是一个薄弱环节。国内还没有一家拥有钻孔内进行原位土工试验的设备, 在多次调查中靠雇佣荷兰公司来完成 CPT 试验。对于 CPT 资料进行了分析, 但由于资料数量尚少, 没有我国海域的经验参数适用范围。

5 对于 21 世纪的展望

21 世纪中, 海洋油气开发领域的水深将越来越大, 人类对海洋资源的开发还将扩展到深海矿物。此外, 陆地上各种废物向海洋排出, 尤其是核废料向深海的排出, 将使深海环境保护问题提到日程上。核废料需要长期处于隔离的空间, 应该避开地震的高发区和断层密集的地区, 应设在没有很多海洋资源的地区。需要了解海底沉积物和废料间的热力学相互作用, 其中包括对海底土热传导性能强度、孔隙水、离子运移、孔隙水压力反应以及数百度的温度变化对土性的影响等的了解。这一方面表明海洋工程地质调查的主要领域为深水, 服务对象将扩大; 另一方面也面临更多学科互相渗透的综合性和复杂性。有些问题甚至要在国际间进行合作。多学科、多部门、多国家的合作迹象在本世纪末已有显露, 它将会成为国际上 21 世纪的发展趋势。而这种合作都是强强联合, 因此想要进入这种领域, 必须靠自身发展的基础。

尽管我国的海洋工程地质工作自 80 年代以来得到了比较迅速的发展, 但是与国际水平相比, 还有一定差距。尤其是在原位土工试验方面, 没有自己的设备; 还没有一个完整的海洋工程地质调查的独立单位; 按海域积累的资料亦还未形成数据库。调查海域主要在大陆架区域, 还未跨入深水领域。因此建议在 21 世纪初先从加强原位土工试验、建立完整的独立队伍和形成数据库方面着手, 真正达到国际水平, 和加入深水调查的行列。

参 考 文 献

[1] McClelland B., Young A. Q. & Remmes B. D. Avoiding Jack - up Rig Foundation Failures[A]. Symposium on Geotechnical Aspects of Offshore and Nearshore Structures, Bangkok [C], Thailand, 1981.

[2] Bea R. G. How Seafloor Slides Affect Offshore Structures [J]. Oil and Gas Journal, 1971, Vol. 29, 88～92.

[3] 顾小芸. 海底边坡稳定分析方法综述[J]. 力学进展, 1981, **19**(1).
Gu Xiaoyun. Review on the analysis of the slope stability in the sea. Advances of Mechanics, 1981, 19(1).

[4] Booth J. S. & Leary D. W. A Statistical Overview of Mass Movement Characteristics on the North American Atlantic Outer Continental Margin[J]. Marine Geotechnology, 1991, **10**, 1～18.

[5] Ishihara K. & Yamazaki A. Wave-induced Liquefaction in Seabed Deposits of Sand[A]. in: Seabed Mechanics[C], B. Denness (ed.), London: Graham & Trotman. 1984, 139～148.

[6] Seed H. B., Idriss I M. & Arango I. Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. ASCE[J], J. of Geotechnical Eng. 1983, **109**(3).

[7] Campanella R. G., Robertson P. K. & Gillespie D. 1983. Cone Penetration Testing in Delatic Soils. [J]Can. Geotechnical Journal, 1983, (20), 23～35.

[8] Fahey M. Panel Discussion: Some Unusual Calcareous Soils Proc. of XIV Intern[A]. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng. [C], 1997, **4**, 2197～2198.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net