

A Review of the Geophysical Techniques for Investigating the Underwater Landslide Sediments in the Water Reservoirs

Ping-Yu Chang¹, Hanwen Zhou²

¹Institution of Applied Geosciences, National Taiwan Ocean University, Keelung

²The Three-Gorges Reservoir Geohazard Research Center, China University of Geosciences, Wuhan

Email: pingyuc@mail.ntou.edu.tw, hwzhou@cug.edu.cn

Received: May 2nd, 2012; revised: May 17th, 2012; accepted: May 29th, 2012

Abstract: We have reviewed the geophysical methods that were suitable for the exploration of the sediment structures in the water reservoirs. We examined the methods including the single beam, multi-beam echosounders, side-scan sonars, as well as the sub-bottom profiler and underwater resistivity methods for their resolutions and exploration depths. We show several cases that utilizing the aforementioned methods for the studies in the water reservoir environments in the manuscript. After carefully review the different methods, we proposed proper strategies for the future investigation of the underwater landslides in the water reservoirs.

Keywords: Geophysics; Water Reservoir; Underwater Landslide

水库库区水下滑坡与崩坍淤积地形之地球物理探测 技术检讨与回顾

张并瑜¹, 周汉文²

¹国立台湾海洋大学应用地球科学研究所, 基隆

²中国地质大学长江三峡水库库区地质灾害研究中心, 武汉

Email: pingyuc@mail.ntou.edu.tw, hwzhou@cug.edu.cn

收稿日期: 2012年5月2日; 修回日期: 2012年5月17日; 录用日期: 2012年5月29日

摘要: 本文检视目前运用于水库库区水下探测之地球物理方法, 提出适用于水下滑坡监测之各种可行技术, 包括单音束、多音束回声测深仪、侧扫声纳、水下地质剖面探测仪、以及水下地电阻探测等技术, 并整理参考过去应用相关技术于水库、河道、湖岸边坡稳定性之相关研究, 检视各种工具之原理与适用性, 并提出进一步运用于水库库区滑坡监测调查之合适方法, 以提供未来研究者进一步规划研究之参考。

关键词: 水下滑坡监测; 水下探测; 边坡稳定性

1. 引言

水库库区之地质崩坍灾害不仅发生于陆上部分, 水下也存在崩塌滑坡之情形。而崩塌滑坡之结果, 不仅造成水库库容量因为崩坍淤积之土石影响而迅速减少, 水下滑坡所引起之水文水理破坏, 也往往造成进一步滑坡破坏扩大之机制, 而过去对于水下滑坡机制之研究, 多数集中于海洋浊流等大型滑坡崩移之调

查, 对于陆上水库之研究甚为稀少。由于在水下进行钻探之技术不易, 因此对于水下地形地质之探测描绘, 多数采用非破坏性之水下地球物理探测, 例如水中声纳、地电阻等技术进行。配合详细之全球卫星定位系统定位, 可以有效的快速解算水下地质地形。而利用高分辨率之水下地球物理探测影像数据, 持续监测地形地质之改变, 可以协助掌握水库地质滑坡之破坏机

制,更有助于作为滑坡预警之积极作为。目前可用于水库库区之水下地球物理探测技术,包括水下地形测绘之声纳工具、水下地质构造之震测工具、以及水下地电阻施测工具等,本文检视各种工具之原理与适用性,并提出进一步运用于水库库区滑坡监测调查之合适方法,以提供未来研究者进一步规划研究之参考。

2. 水下地形测绘

水下地形测绘主要藉由高分辨率之声纳进行。一般做为水下地形测绘用之水下声纳,依据量测方式可以分为单音束、多音束、以及侧扫声纳等数种。声纳测深之原理系利用发射系统(音鼓)向水下发射一脉冲音波能量讯号,藉由接收系统(麦克风)接收由海床/湖床反射回送之回声讯号。而位于测深船只下之深度,则可以由脉冲音波讯号之双程走时与水团中脉冲音波之平均速度计算而得,此类系统概称为回声测深仪(Echosounders)。

2.1. 单音束回声测深仪(Single-Beam Echosounders)

一般而言,通常回声测深仪(见图 1)的解析能力最高解析程度是以音波波长的四分之一为其解析限度(Resolution Limit)^[1,2]。单音束回声测深仪系由声纳的音鼓发射一束音束束宽 10° 以内的脉冲波做为探测讯号,相较于一般鱼探仪(Fishfinders)的音束束宽宽达 35° 以上,单音束回声测深仪之数宽要小了三分之一以上。由于单束式测深所测得的水深值,实际上为音鼓释放之音束束宽涵盖水底面积范围(称之为足印,

Footprint)内离音鼓面最近的距离值,因此单音束回声测深仪较窄的束宽对于水下地形具有较高精确度^[3]。单音束回声测深仪之水下地形测绘量测取样,多采用测线取样方式,在预先决定之船只航行测在线量测海床/湖床之底面(Bathymetric)。原则上测线间距小的量测密度高,推测之海床/湖床之底面较接近真实情况。但相对而言所需之量测时间较长,量测成本也较高。若测线间距增加也不会改变平坦底床的推测面时,可考虑适度增加测线间距以降低成本。一般若以制图比例尺考虑,图面 1 公分应至少具有 1 个水深量测值,亦即 1/5000 的测绘图,测线间距应至多为 50 公尺。浅水用之单音束回声测深仪一般使用频率 200 kHz 以上之发射音鼓,最大测深一般在 200~300 公尺以内,最浅测深约为 0.2~0.5 公尺,深度之分辨率约为 0.01~0.025 公尺。

2.2. 多音束回声测深仪(Multi-Beam Echosounders)

多音束回声测深仪系于船下设置音鼓发射一系列扇形之音束脉冲讯号(图 1),典型的多音束回声测深仪个别束宽约在 2°~3°,接收之波束在 60~160 个,在小于 500 公尺测深之浅水用多音束测深仪,束宽则约为 0.5°~2°。其音束之总数约在 48~240 个左右,每次测带(Swath)之夹角约在 90°~150°。由于个别波束之量测值相当于一个单音束测深仪之量测值,多音束测深仪因此可以同时量测大面积之水底地形^[4]。由于各音束之足印连续而且无缝隙,测区完全被音束足印覆盖,因此可视为全覆式(Full Coverage)测量海床/湖床之底面。一般而言若需较高精度之水底地形测绘,测深间距常需在 50 公尺以下,因此应考虑使用多音束测深系统,以提高测深效率,并且可得到更精确之海床/湖床底面地形之信息。水库库区调查一般使用适合于浅水区(<200 公尺水深)之多音束回声测深仪,发射音鼓频率多在 200~450 kHz 以上,最浅测深约为 0.2~0.5 公尺,深度之分辨率约为 0.01~0.05 公尺左右。

2.3. 侧扫声纳(Side Scan Sonar)

侧扫声纳系统是一种多音束测深仪之应用,能提供海底地貌立体影像的探测仪器(图 2(a));由于回声测深仪一般装置于船只龙骨两侧向下以接近垂直之

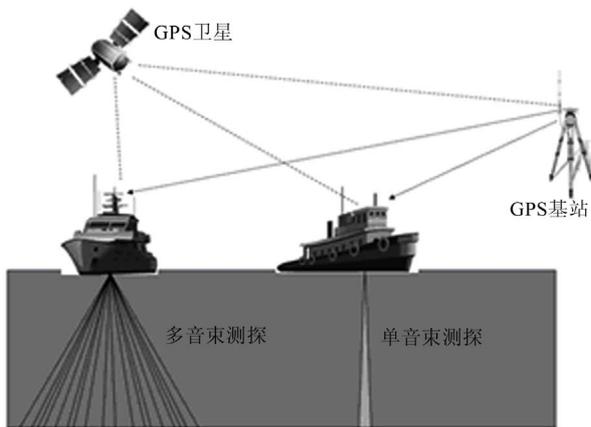


Figure 1. Schematic layout of single- and multi-beam echosounders
图 1. 多音束与单音束回声测深仪运作与空间定位原理曲线

陡角度发射音束，因此缺乏对于立体物体之辨识度。测扫声纳系统将音鼓放置于水下拖曳载具(俗称拖鱼(Towfish))的两侧，向海底以扇形释放多音束声波，由于音束释放角度较大，因此可清楚呈现立体水下物体造成之“阴影”对比，声波经海底反射回之讯号经过影像与讯号处理后，可显示海底/湖底之增强对比的立体地貌(图 2(b))。侧扫声纳系统一般使用 100 KHz~500 KHz 之频率，可依研究者需要调整侧扫范围，最宽可至 600 公尺。主要应用于海底地貌、水下考古、海底电缆与管线铺设，水下建筑/坝体结构检视，及礁石、人工鱼礁、沉船等海底特殊障碍物之调查研究。

由于水体之水位与水流状况随时间变化，船只做水下地形测绘时须做精确之定位，以决定测深仪音鼓之空间位置。对于水库库区的量测，可以藉由全球卫星定位系统(GPS)协助进行公分级的空间相对定位。其原理为运用两部 GPS 接收仪，首先建立一陆上固定之参考基站(Base Station)，另一部装置于船只上之作为空间定位量测移动站。而参考站则利用无线电设备

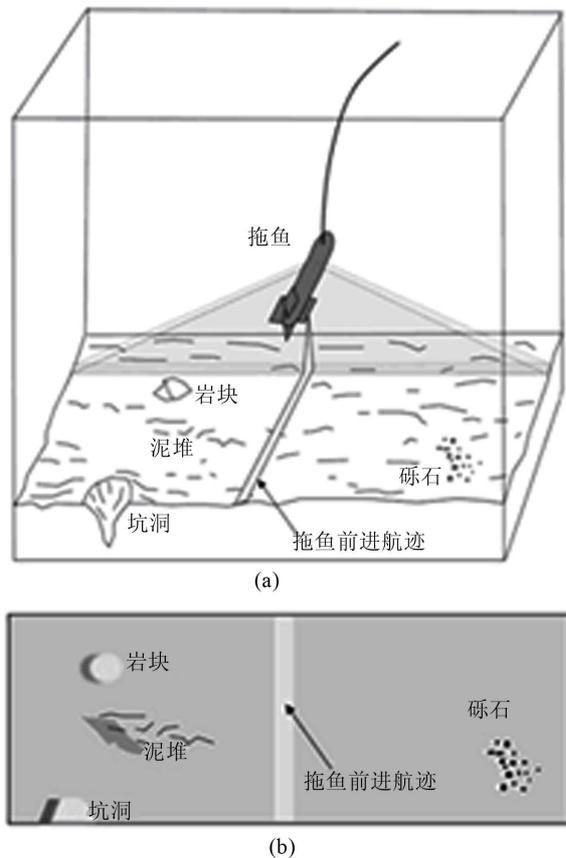


Figure 2. (a) Side-scan Sonar; (b) Side-scan Sonar image
图 2. (a) 侧扫声纳运作示意图; (b) 侧扫声纳图谱

传输所接收到之 GPS 讯号至移动站，由移动站所接收之讯号，经过与参考基站接收讯号做相位差分分析，消去误差并解算后，求得船只之空间位置。此种方式称之为实时动态测量(Real-Time Kinematic, RTK)。实时动态测量适用于任意离岸距离之水上定位，加上近几年来实时动态测量系统与技术之普及与价格逐年下降，功能增强，因此已成为水上定位之主流。

3. 水下地质剖面探测

对于海床/湖床下之地质构造，一般可以利用水下震波探测技术进行研究分析。然而由于多数水下震测为求穿透深度大，采用较高能量之低频震源。但是也同时降低了分辨率。对于水库库区的调查，高能量之震源有时也会引起库区安全之疑虑，因此一般认为水下地质剖面探测仪会有较好之应用。水下地质剖面探测仪(Sub Bottom Profiler)，又称为浅地层剖面仪(图 3)，为水下震波探测技术的一种，不同于空气枪(Air Gun)、激发器(Boomer)、以及火花放电(Sparker)等水下震测技术，探测仪利用低频音鼓做为讯号产生器，水下震波(声波)遇到介质不连续之界面产生反射讯号，藉由分析反射讯号的走时、相位以及振幅变化，可以分析海床/湖床面以下的地质变化，并描绘出地质剖面影像。一般水下地质剖面仪器所发出的讯号源能穿透海床/湖床底面几十公尺至一百公尺深，藉由反射讯号特征，可以提供表层沉积物特性与地质构造，提供海床/湖床面以下构造变化的研究与浅层沉积物的分析研究之用。

水下地质剖面仪一般会利用拖鱼载具以优化接收之讯号强度与减少来自于船只之噪声干扰。多数之

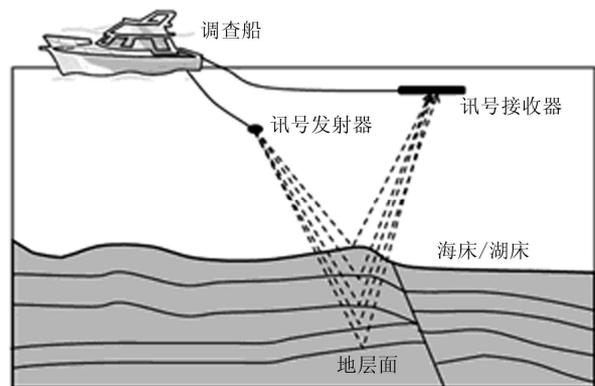


Figure 3. The schematic layout of the sub-bottom profiler
图 3. 水下浅层地质剖面探测示意图

地质剖面仪系统由船上处理单元、水中拖曳电缆以及装有宽带发射音鼓数组及接收数组的拖鱼组成。由于低频的声波具有较大的地层穿透性，因此水下地质剖面仪一般使用讯号频率在2~20 kHz，音束宽度20°~30°的发射源。早期所使用的声源大部份是12 kHz的声波，在1960年代晚期时，发现3.5 kHz的声波具有较大的穿透深度(20~110 m)，能显示更深的沉积物声波反射特征，并且可以清楚解析海底微地形^[5]，因此3.5 kHz的水下地质剖面仪成为传统单频剖面仪之主力。

近年来由于电子仪器技术之进步，有越来越多的水下地质剖面仪采用变频声源技术，称之为变频(Chirp)地质剖面仪。变频地质剖面仪可以提供高分辨率的海床/湖床浅层影像，有别于空气枪(Air Gun)、激发器(Boomer)、以及火花放电(Sparker)等仪器，变频地质剖面仪没有复反射的问题。这种全频(Full Spectrum)的剖面仪的好处为分辨率高，在理想的状况下分辨率可以达到一公尺以下。变频地质剖面仪是以变频的方式传送脉冲讯号，其信号传送频率由低逐渐增高。一般带宽为2 kHz~4 kHz，而利用接收讯号与原来的发射讯号做互对比(Correlation)，可以获得高分辨率的海底声纳回声剖面。在水深较深处，变频地质剖面仪比3.5 kHz地质剖面仪有更深的穿透力与较佳的分辨率。

4. 水下地电阻

地电阻法之测勘原理，乃利用直流电或低频交流电流经由一对电极(A、B)通入地下，于地下建立人工电场。并利用另一对电极(M、N)测量电场在M、N间之电位差，而据此计算地层的视地电阻率(Apparent Resistivity)，进而再运用反推计算方法推求地层真实地电阻率(True Resistivity)。一般影响地下地层电阻的因素有岩性、矿物组成、含水量、孔隙率、孔隙水组成及温度等，当地层层序变化造成有明显的层间电阻率对比，或是欲探测地下不同电阻率目标之存在，例如隧道、埋藏金属物、未爆弹(UXO)等，就适用于地电阻方法作为探测工具。

地电阻探测仪器构造简单，主要含有串联于一安培计之稳定供应直流或低频交流电源，以及量测电位差的高输入阻抗伏特计。地电阻量测可以藉由改变前述发射与量测电极排列方式以及施测之位置与顺序，以测得不同分辨率、不同测深范围之地电阻率剖面。

常见的地电阻测勘的电极排列法甚多，各有其探测上的优点与限制，野外施测所选定使用的方法，则视欲探测目标及施测地点的地形而异。一般基本之常用电极排列有：施兰卜吉排列(Schlumberger Array)、温奈排列(Wenner Array)、双偶极排列(Dipole-Dipole Array)及双极排列(Pole-Pole Array)等。目前一般现地地电阻测量方式则是运用上述之电极排列法，于地表沿一直线测线，顺序改变电极间距与电极位置，如此可以测得沿测线之不同深度、不同位置之视电阻率分布，此种方法称之为(二维)地电阻影像剖面法(Resistivity Image Profiling, RIP)。由于地电阻影像剖面法需逐次移动电流与电位之电极，因此施测上往往极为耗费时间。对于中小范围的环境监测与地下测勘，可以于地表以一定间距布设电极，运用地电阻仪器内建之智能型电路自动调变频道功能，依预先选定之顺序，逐次选用不同位置之四处电极分别作为电流与电位极，如此可大幅减少移动电极之时间，另外由于可以运用反馈迭加讯号，因此可减少讯号中之噪声并提高分辨率与增加施测深度，大幅提高影像分辨率。

水下地电阻探测采用相同之原理，将一串水下电极置放于水中，由船只拖曳并对水下地层进行扫测(图4)。与陆上地电阻施测所不同的是水下探测因需考虑防水及防腐蚀因素，因此多采用铜或石墨作为电极接口，并用缆线串接个别电极，电极缆线可加以配重以调整缆线于水中沉浮之深度。一般而言，地电阻方法的测深，随电极间距加大而加大，以及电极接近海床/湖床的距离接近而加大，也与水体与海床/湖床底质沉积物之电阻率对比有关。而地电阻方法之分辨率，则随电极间距变小而提高。因此须针对所欲探测之深度与分辨率，预先设计水下电极之间距并订制电极缆线，并注意浮沉之深度，预留串接于船上主机之延伸电极缆线(Leading Cable)空间。由于水下地电阻施测须快速同时接收来自不同电极间距之讯号，因此一般采用多信道系统进行施测，亦即一次可以接收来自6~8个接收电极之电位量测讯号。水中地电阻施测所采用之电极间距，一般在10~20公尺之间。若采用6~8个电极之水中缆线施测，探测范围之深度可达水面下20~40 m。

5. 案例讨论与未来应用

超过数百万立方公尺的大规模滑坡破坏，常见于由颗粒均匀之细粒砂质沉积物构成的峡湾岸陡坡与

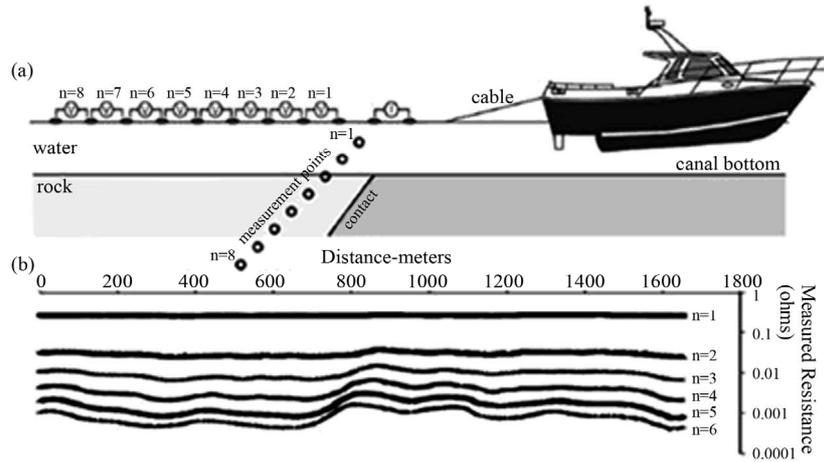


Figure 4. (a) The marine/water resistivity surveys; and (b) The measured resistance signals from the resistivity surveys (from Rucker, et al. ^[5])
 图 4. (a) 水下地电阻施测示意; (b) 水下地电阻扫测讯号示意图(修改自 Rucker, et al.^[5])

大型河道岸坡附近^[6-9]。此类滑坡破坏一般均认为是由孔隙水压升高造成土壤液化所导致之液化型滑坡机制(Liquefaction Slope Failure)造成,但是 Van Den Berg, et al.^[9]则提出水下地形测绘之观察证据,说明部分滑坡破坏不仅发生于陆上部分,在水下也存在崩塌滑坡之情形,因此提出裂口侵蚀破坏(Breaching Failure),造成土壤河岸陡坡逐步后退的滑坡机制。而崩塌滑坡之结果,不仅造成水库库容量因为崩坍淤积之土石影响而迅速减少,水下滑坡所引起之水文水理破坏,也往往引起裂口侵蚀破坏,而持续造成进一步滑坡破坏扩大之机制。过去对于水下滑坡机制之研究,多数运用水下地形测绘工具,如多音束回声测深仪,针对海下浊流等引起之大型滑坡崩移进行调查(e.g., Kostaschuk and McCann^[10]; Prior, et al.^[11]),对于陆上湖泊、水库及深河道河流之研究较少。湖泊或河道之水下地形测绘,由于水下地形深浅起伏很大,因此多数情况下不适合使用易受侧向物体干扰之多音束回声测深仪,束宽较窄的单音束回声测深仪反而较为适用于陆上湖泊、水库及深河道河流之精密地形测绘工作。Strasser, et al.^[12]曾结合 3.5 kHz 的水下地质剖面仪、水下地质岩芯样本以及现地圆锥贯入试验(CPT)等方法,对瑞士阿尔卑斯山区最大深度超过 220 公尺深之 Lucerne 湖,湖中沉积物的沉积历史、沉积构造与滑坡关系以及水下边坡稳定进行调查。Strasser, et al.^[13]利用发生于公元 1601 年以及纪元前 2220 年的两次地震作为滑坡事件分析控制,并发现沉积速率的改变影响了岩性边界面上之沉积物重量,因此在短时间内快速改变了

边坡稳定条件。在巴拿马运河, Rucker, et al.^[13]则是利用水下地电阻方法,利用拖曳于船之后方之浮水电缆线,对于巴拿马运河航道水下 40 公尺内之基盘地层进行探测,配合附近之钻井岩芯资料,协助判释岩层岩性与构造变化。对于水库淤积量之研究,黄仰澤^[14]尝试分别利用单音束、多音束回声测深仪以及水下地质剖面仪,对台湾本岛的尖山埤、鲤鱼潭与曾文水库进行测深与估计淤积量。歐秋聲^[15]则利用无人遥控载具与单音束测深仪对水库淤积测量之精度进行分析。这些于水库、湖泊或是内河航道上进行之研究工作,说明近年来水下地球物理探测之技术发展,已足以提供高分辨率之准确量化数据,让地质与工程学者进行数据计算分析之用。

三峡水库区域地质组成复杂,是中国地质灾害的多发区及重灾区。库区内崩塌滑坡体多达 4000 余处,然而过去的滑坡地质灾害监测以及致灾机制分析研究,均集中于陆上现象之调查(例如[16-19]),缺乏对于水下与江岸边坡稳定之连结关系与机制进行详细研究。然而随着库区水位每年干雨季之计划性消长,以及长江河道之冲刷淤积,我们预期边坡稳定之机制条件会快速改变,因此亟需补充对于水面下滑坡体延伸部分,以及附近河道的冲淤进行持续监测与调查研究,以了解对于三峡库区边坡稳定之冲击。

经过检视过去成功运用相关水下地球物理探测技术之研究案例,我们建议未来应持续以多音束回声探测仪对于滑坡体河道附近大区域进行快速之地形描绘,并以窄束宽的高频单音束回声探测仪对于已存

在之大型滑坡体进行更精细的公分级水下地形测绘监测。同时可采用测扫声纳由水下对滑坡体延伸部分进行立体影像测绘，以了解水下滑坡体表面可能存在之裂缝以及变形位置。对于水下滑坡体部分之演化过程，可以借助水下地电阻与地质剖面仪进行沉积构造的扫描，并于近岸配合扫测之结果选定重点位置进行地质岩芯取样，了解可能之堆积过程与演化历史，以作为边坡稳定机制之研究基础资料，并协助滑坡之安全预警。

6. 结论

水库库区之地质崩坍灾害不仅发生于陆上部分，水下也存在崩塌滑坡之情形。而崩塌滑坡不仅造成水库库容量迅速减少，水下滑坡所引起之水文水理改变，也往往引发进一步滑坡破坏扩大。本文检视目前运用于水库库区水下探测之地球物理方法，提出适用于水下滑坡监测之各种可行技术，包括单音束、多音束回声测深仪、侧扫声纳、水下地质剖面探测仪、以及水下地电阻探测等技术，并提供建议，于各个可能之水库滑坡体进行持续之监测工作，例如以多音束回声探测仪对于滑坡体河道附近大区域进行快速之地形描绘，并以高频单音束回声探测仪对于已存在之大型滑坡体进行更精细的水下地形测绘监测。同时可采用测扫声纳由水下对滑坡体延伸部分进行立体影像测绘，以了解水下滑坡体表面可能存在之裂缝以及变形位置。并借助水下地电阻与地质剖面仪进行沉积构造的扫描，并于近岸配合扫测之结果选定重点位置进行地质岩芯取样，以了解陆上与水下滑坡体、崩坍构造之空间与时间演化关系，并提供滑坡之安全预警分析之用。

参考文献 (References)

[1] 宋国土, 邱协栋. 近岸测深技术之探讨及其发展现况[J]. 海

- 下技术季刊, 1996, 6: 3-9.
- [2] 宋国土, 邱协栋. 测深系统误差效应之考虑[J]. 海下技术季刊, 1993, 3: 31-35.
- [3] 郑文菁. 测深波浪补偿的修正研究[D]. 国立台湾大学, 2008.
- [4] 洪嘉贤. 适用台湾地区水库淤积测量手册研拟[D]. 国立成功大学, 1992.
- [5] J. E. Damuth. Use of high-frequency (3.5 - 12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea: A review. *Marine Geology*, 1980, 38(1-3): 51-75.
- [6] J. M. Coleman. Brahmaputra river: Channel processes and sedimentation. *Sedimentary Geology*, 1969, 3(2-3): 129-239.
- [7] F. Silvis and M. De Groot. Flow slides in the Netherlands: Experience and engineering practice. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(6): 1086-1092.
- [8] J. H. Van Den Berg, C. J. L. Jeuken and A. J. F. Van Der Spek. Hydraulic processes affecting the morphology and evolution of the Westerschelde estuary. In: K. F. Nordstrom, C. T. Roman, Eds., *Estuarine Shores: Evolution, Environment and Human Alterations*, London: John Wiley & Sons, 1996: 157-184.
- [9] J. H. Van Den Berg, A. Van Gelder and D. R. Mastbergen. The importance of breaching as a mechanism of subaqueous slope failure in fine sand. *Sedimentology*, 2002, 49: 81-95.
- [10] R. Kostaschuk, S. Mccann. Subaqueous morphology and slope processes in a fjord delta, Bella Coola, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1987, 24(1): 52-59.
- [11] D. B. Prior, Z. S. Yang, B. D. Bornhold, et al. Active slope failure, sediment collapse, and silt flows on the modern subaqueous Huanghe (Yellow River) delta. *Geo-Marine Letters*, 1986, 6(2): 85-95.
- [12] M. Strasser, S. Stegmann, F. Bussmann, et al. Quantifying subaqueous slope stability during seismic shaking: Lake Lucerne as model for ocean margins. *Marine Geology*, 2007, 240(1-4): 77-97.
- [13] D. F. Rucker, G. E. Noonan and W. J. Greenwood. Electrical resistivity in support of geological mapping along the Panama Canal. *Engineering Geology*, 2011, 117(1-2): 121-133.
- [14] 黄仰泽. 台湾本岛水库淤积测量方法之探讨[D]. 国立台湾海洋大学, 2008.
- [15] 欧秋声. 遥控载具运用于水库淤积测量之精度分析[D]. 国立成功大学, 2004.
- [16] 吴亚子, 傅荣华, 王小群等. 三峡水库区陈家沟滑坡地质特征与防治措施[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(1): 44-48.
- [17] 吴树仁, 金逸民, 石菊松等. 滑坡预警判据初步研究: 以三峡库区为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2004, 34(4): 596-600.
- [18] 肖学沛, 李天斌, 张志龙. 三峡水库区严家坡滑坡成因分析及稳定性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(1): 39-43.
- [19] 谢晓佳, 杜建军. 用 GPS 技术进行滑坡监测中的数据采集及控制[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2005, 28(3): 110-113.