物联网技术中的边坡深部位移和地下水位监测的设计、实现与预警方法

王　韬[1]，刘晓宇[2]，林毓敏[3]，李　果[1]

（1. 云南省交通规划设计研究院有限公司，云南　昆明　650041；2. 中国科学院力学研究所，北京　100190；
3. 浙江沪杭甬高速公路股份有限公司绍兴管理处，浙江　绍兴　312000）

摘　要：为了探讨物联网技术中的边坡深部位移和地下水位监测的设计、实现与预警方法，以浙江省某高速公路路堑边坡为例，介绍了最新研发的边坡深部位移监测设备，首次提出了深部位移与地下水位同孔监测技术，深入地分析了边坡的稳定状态和变形演化规律。研究结果表明：深岩仪具有量程大、数据量大、稳定性高、易于实现远程监测等优越性；深部位移与地下水位同孔监测技术为收集边坡深部信息提供了一种经济可靠的途径；边坡处于匀速变形的蠕滑阶段，预警级别属于注意级，降雨报警最小阈值应超过30mm/d。

关键词：物联网；深部位移；地下水位；降雨量

中图分类号：U41　　**文献标识码：**B

近年来，随着传感器技术、计算机技术和通信技术的飞速发展，世界各国开始致力于构建基于物联网技术的地质灾害远程自动化监测系统，以实现对地质灾害的全面感知和可靠传输。美国的滑坡实时监测系统采用地面倾斜仪、伸缩仪、地下水压力传感器、地声监测仪和雨量计等自动化监测设备进行实时监测；欧盟先后启动了基于传感器网络的滑坡实时监测计划；日本的滑坡传感网由雨量计、地面及地下的传感器和视频组成；韩国滑坡实时监测系统主要运用地面伸缩仪和倾斜仪组合传感器、地下水压力传感器和雨量计，实时掌握危险边坡的当前动态；我国也开展了三峡库区、汶川灾区等地区滑坡灾害监测系统研发。

然而，目前我国高速公路边坡监测主要以人工现场巡检、记录资料室内处理为主。对于稳定性差或具较大安全隐患的边坡，每个月监测一次，雨季或强风暴雨期加密监测。此类监测方法不仅劳动强度大、运行成本高，而且效率低，时效性差，难以做到“早发现、早治理、早预防”。利用基于物联网技术的边坡监测技术，公路管理部门可以在任何时间、任何地点，通过台式机、笔记本电脑或移动终端，均可了解管辖区域内边坡体当前状态及未来发展趋势，实现安全隐患的可靠预防、应急管理。

边坡物联网监测技术中，深部信息数据的收集是必不可少的，边坡深部位移和地下水位能够反映出滑坡体的动态变化过程，确定滑动面的位置，评估边坡的稳定性，为治理措施的动态设计和信息化施工提供科学有效的依据。因此，有必要探索边坡深部信息监测设备，更好地构建具有推广应用价值的高速公路边坡自动化远程物联网监测系统。

1　边坡监测工点

1.1　工程地质条件

选取的边坡位于浙江省已运营多年的高速公路K237 + 840 ~ + 980的左侧，马岙岭隧道与排江大桥之间，属丘陵地貌，为二元结构边坡，坡脚为曹娥江河谷，中部发育一条浅沟，地表水丰富，主要为基岩裂隙水和松散岩类孔隙潜水。边坡上部较陡，植被发育，坡顶后沿山体高度约200多米地貌冲沟发育，地形起伏大，地下水发育，地质条件差。该边坡地层岩性从老到新分别为：①上侏罗统大爽组（J_3d）灰岩，为公路沿线主要基岩，局部夹碎屑沉积岩；②第三系上新统嵊县组（N_2s）玄武岩，节理裂隙发育，岩体破碎；③第四系残坡积层，分布于丘陵斜坡，岩性为含粘性土碎石为主，厚度为1 ~ 3m，碎石以玄武岩为主。

边坡区地处亚热带季风气候区，年平均气温16.7℃，最高气温21.8℃，极端天气高温达40.3℃。全年平均降水量1405.6mm，降雨主要集中在上半年，下半年较少，3 ~ 4月为春雨，5 ~ 6月为梅雨，占全年降水量的46%，8月至9月间多为台风带来的雨水。

1.2　防护设计及病害情况

边坡按照5级开挖，最大坡高约53.4m，各级坡高、坡率与防护措施见表1所示。在长期降雨和地下水作用下，该边坡岩土体逐渐松弛，地质条件不断劣化，加之2009年8月当地台风的影响，边坡坡顶出现

基金项目：云南省交通厅科技项目（NO. 云交科教［2017］33）；国家重点研发计划项目（NO. 2016YFE0105800）。

土层坍塌、滑落等病害。浙江大学地质勘测测量专家组对坡体状态进行了评价，认为边坡还处于蠕变变形状态。防护工程完成后，边坡一直处于暂时稳定状态，在持续强降雨作用下存在安全隐患，需开展实时监测预警等防范工作。

表 1　边坡防护设计

级数	坡率	高度/m	防护措施
第一级	1∶0.5	8	浆砌片石护面墙
第二级	1∶0.5～1∶0.75	10	六棱块植草
第三级	1∶0.75～1∶1.0	10	六棱块植草
第四级	1∶1.0	10	六棱块植草与片石挡墙
第五级	1∶1.0～1∶1.5	15.4	SNS 主动网

2　物联网监测的构建

由于该边坡的稳定性对运营高速公路的安全威胁较大，因此，需采用具有全面感知、实时采集、可靠传递等优势的物联网技术实施监测，以期做到高效管理、智能分析和科学决策。

2.1　监测内容及采用的设备

基于监测手段有效性、监测数据实时性、监测结果可靠性和预警评估科学性的设计原则，本次监测的内容包括：

(1) 深部位移：采用深部岩土钻孔变形测量仪，实时监测岩土层不同深度地层的水平位移量、水平位移方向和变形速率，对边坡当前变形状态、未来发展趋势进行识别和判定；

(2) 地下水位：采用投入式液位计，实时监测边坡内地下水水位动态，掌握地下水变化规律，分析地下水、地表水、库水、大气降水的关系，进行其与边坡变形的相关分析；

(3) 降雨量：采用 ARN 雨量计，实时监测边坡场区降水量，分析其与边坡变形的关系。

2.2　监测设备

2.2.1　降雨量测量仪

降雨量监测仪主要用于分析降雨量与边坡深部位移和地下水位的关系，对于判定边坡变形机理与发展趋势具有重要作用，实物图及现场安装图见图 1。

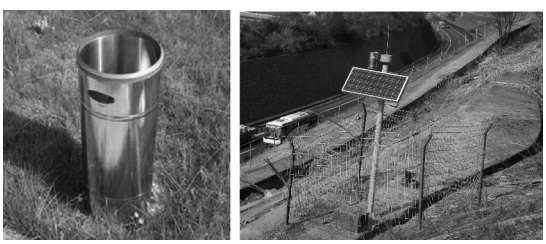
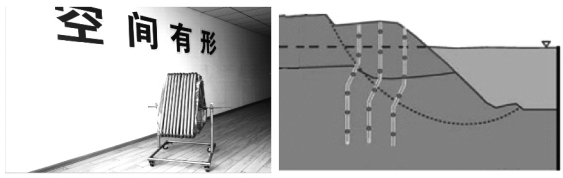


图 1　降雨量测量仪

2.2.2　深部岩土变形测量仪(创新性监测设备)

采用最新研发的深部变形测量仪(简称：深岩仪)对深部位移进行监测，具体见图 2。该设备集成移动式钻孔测斜仪、固定式钻孔测斜仪、MEMS 阵列式位移计等的优点，引入先进的双轴 MEMS 加速度传感器阵列技术，能够满足边坡不同变形演化阶段深部位移监测的需求，通过无线网络进行数据远程实时传输。



(a)实物图　　(b)原理效果图

图 2　深部岩土变形测量仪

2.2.3　深部位移与地下水位同孔测量技术(首创)

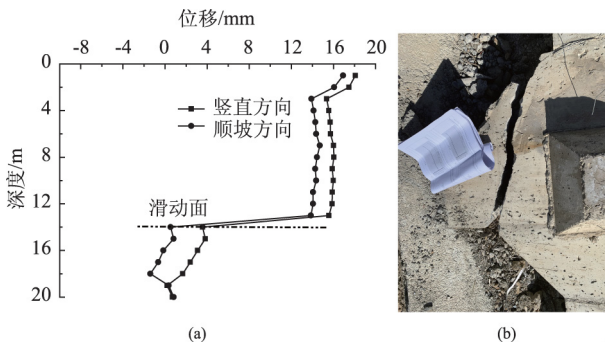
将地下水位传感器上安装透水石以及透水土工布，然后固定安装于深部位移监测设备端部，开创性的结构设计实现了水位与深部位移同孔测量，该设备对于减少测量钻孔，节省施工费用起到了重要作用，具体实物图以及现场安装图见图 3 所示。



图 3　地下水位测量仪

2.2.4　监测设备测试

采用多种手段对自主研发的深部位移监测设备深岩仪的稳定性、防水等级、性能等进行了一系列测试，同时委托了权威机构中国计量科学研究院测试了其精度。测试结果表明：深岩仪的长期精度为 3mm/30m，分辨率为 0.01°，完全满足边坡深部位移的监测需求。



(a)　　(b)

图 4　深岩仪现场测试：(a) 现场监测；(b) 地表裂缝

在某高速公路 K92＋200～＋600 左侧滑坡中部安

装了深岩仪，监测结果见图 4(a) 所示。可见，由深岩仪监测得到的深部位移曲线能够确定滑动面的深度，即为岩土交界面位置处，另外，通过现场人工巡视，在监测孔附近发现了多条裂缝，多个框格梁被拉断(见图 5(b)) ，张开度约为 2. 0cm。经比较分析深部位移监测和现场巡视结果进一步说明了深岩仪的可靠性。

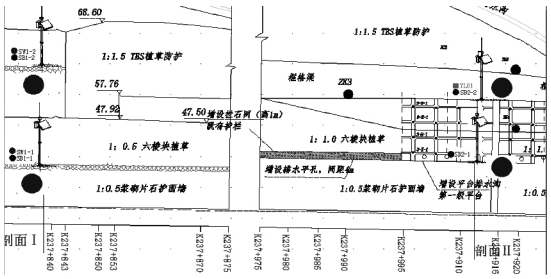


图 5　边坡监测点布设平面布置图

2. 3　监测点布设

根据边坡变形区的特点，设置两个监测剖面(剖面 I 和剖面 II) ，构成二横二纵监测网，具体布置见图 5 所示。边坡变形区布设 1 个雨量监测点; YL01; 布设 2 个地下水位监测点: SW1_1 和 SW1_2; 设置 4 个深部位移监测孔: SB1_1、SB1_2、SB2_1 和 SB2_2。其中，SB1_1 内部布设 14 只 MEMS 传感器; SB1_2 内部布设 18 只 MEMS 传感器; SB2_1 内部布设 12 只 MEMS 传感器; SB2_2 内部布设 18 只 MEMS 传感器和一只错动位移传感器。

3　边坡监测数据分析

3. 1　降雨量

2015 年 2 月 1 日至 12 月 1 日，边坡区域月降雨量统计表、日降雨量的统计图见图 6。可以看出，降雨总量为 1713mm，与常年 1300mm 平均值相比，雨量增加 30%。其中，7 月、8 月、9 月、11 月的降雨量比常年同月相比，雨量增加近 1 倍; 日降雨量超过 30mm 的强降雨量共出现 18 次，日降雨量超过 60mm 的强降雨共出现 3 次，最大日降雨量出现在 7 月 11 日，为 115. 8mm。

3. 2　深部位移

2015 年 2 月 1 日至 12 月 1 日，4 个钻孔的水平位移曲线见图 7 所示。图中 6 条曲线的监测时间段分别为: 2015 年 2 月(春季) 、3 ~ 4 月(春雨) 、5 ~ 6 月(梅雨) 、7 月(夏季) 、8 ~ 9 月(台风季) 、以及 10 ~ 11 月(秋季) ，位移数据为时间段内多次监测的平均值。

由图 8 可以看出，坡脚位置处的坡体浅表层和深层岩土体蠕滑变形较大，变形速率随降雨量变化而变化，8 ~ 9 月份达到最大值; 对于中部位置的坡体，降雨

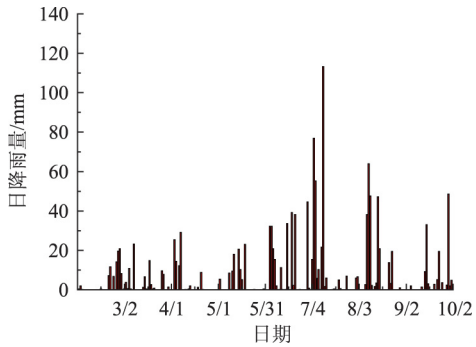


图 6　降雨量与时间之间的关系

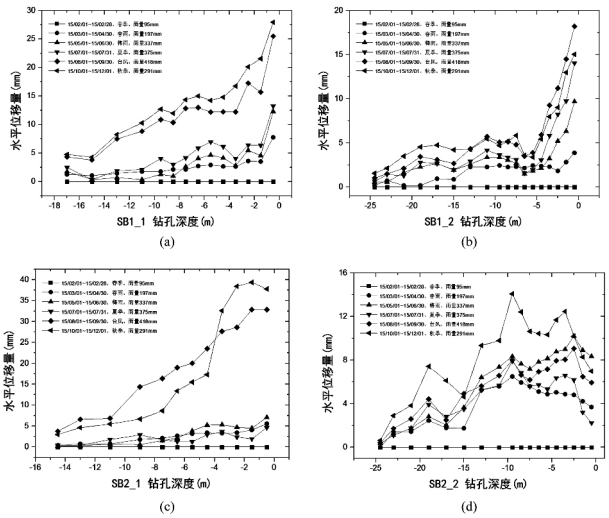


图 7　不同时间下边坡水平位移与钻孔深度之间的关系:
(a) SB1_1; (b) SB1_2; (c) SB2_1; (d) SB2_2

只影响其浅表层岩土体变形，对其深层岩土体蠕滑变形影响不明显。钻孔 SB1_1 处存在 3 个潜在变形区，分别位于孔口以下 - 2m、- 6m 和 - 16m 位置处; 钻孔 SB1_2 存在 3 个潜在变形区，分别位于孔口以下 - 5m、- 10m 和 - 18m 位置处。根据剖面 I 位置区岩土体的变形特征，结合地下水位时程曲线，剖面 I 位置区岩土体变形破坏自下而上发展，坡体底部位移量大于坡体中部位移量，属于牵引式; 钻孔 SB1_1 位置处已处于整体变形阶段，主滑面已形成，位于深部变形区，在地下水位线以下; 钻孔 SB1_2 位置处仍处于局部变形阶段，浅表层变形主要由于降雨入渗诱发，中部变形区和深部区均在地下水位线以上，受地下水影响小，尚未形成主滑面。

3. 3　地下水位

2015 年 2 月 1 日至 12 月 1 日期间，剖面 I 的地下水位分布见图 8 所示，每日地下水位的变化情况见图 9 所示。可以看出，边坡地下水位的上升完全来源于地表降雨补给，枯水期时，SW1_1 的地下水位在路面以下 - 5m 处，SW1_2 的地下水位在路面以上 1. 8m

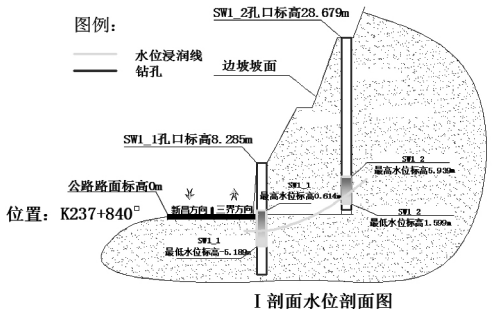


图8 边坡剖面I地下水位分布图

处，进入雨季后，SW1_1 的地下水位通常上涨 0.7m，SW1_2 的地下水位通常上涨 1.0m；SW1_1 水位上升与降雨同步，SW1_2 水位上升滞后于降雨发生时间。SW1_1 水位最大上升位置与高出地面位置 0.5m，SW1_2 水位最大上升位置约在地面以上 6m 处。SW1_2 水位超2m涨幅均出现于日降雨量超过30mm情况下。

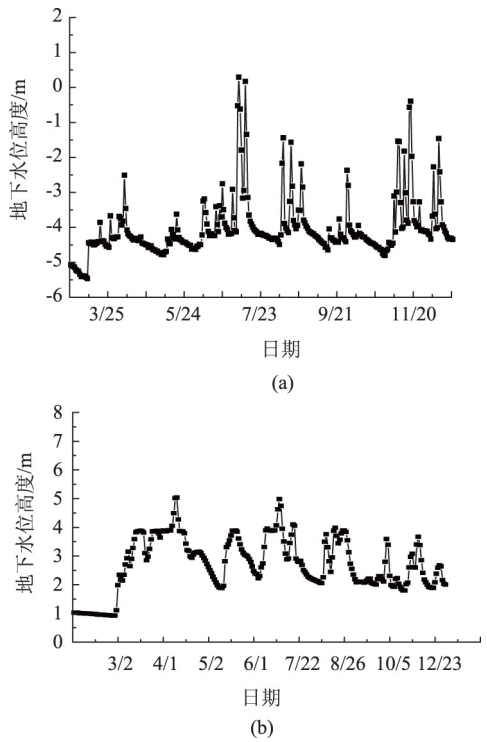


图9 边坡地下水位监测曲线：
(a) SW1-1；(b) SW1-2

此时，坡体表面的入渗量已远大于坡体内部的排泄量，坡体内部出现地下水平急剧抬升，短时产生超孔隙水压力和浮托力，容易诱发边坡发生地质灾害。因此，该边坡降雨报警最小阈值定为日降雨量超过 30mm。

4 结论

(1) 深部岩土变形测量仪能够很好地监测边坡深部位移，具有量程大、数据量大、稳定性高、易于实现远程监测等优越性，满足滑坡预警预报的要求；

(2) 边坡深部位移与地下水位同孔监测技术能够减少测量钻孔，节省施工费用，为构建物联网监测技术中收集边坡深部信息提供了一种经济可靠的途径；

(3) 浙江省某高速公路 K237+840～+980 左侧边坡处于匀速变形的蠕滑阶段，预警级别属于注意级，降雨报警最小阈值应超过 30mm/d。

参考文献：

[1] 张路欣. 高速公路边坡远程监测预警系统的探讨. 山西建筑，2016，42(4)：138-139.

[2] 陈旺，张社荣，潘飞. 基于物联网的边坡工程稳定性评价方法及系统开发，2015，41(12)：36-39

[3] 于远亮，靳静. 公路高边坡稳定性远程监控技术研究. 河北工业科技，2014，31(3)：239-242.

[4] Li，C.，Fernandez，T. M.，Link，J. A.，Use of MEMS Accelerometers/Inclinometers as a Geotechnical Monitoring Method for Ground Subsidence. Acta Geodyn. Geomater.，2014，11，4，337-349.

[5] 丁卫进. 高速公路地质灾害监测、预警与决策系统的建设. 浙江国土资源，2013(4)：34-36.

[6] 刘晓宇，陈猛，侯岳峰，丁志林. 基于 MEMS 阵列的组装式深部位移监测设备及系统. 发明专利(201310711825X).

[7] 李文辉. 浅谈物联网技术在高速公路高陡边坡安全监测预警中的应用. 山西交通科技，2013(3)：103-104.

[8] 曹百岗. 基于物联网的道路边坡稳定性预测. 东南大学，2012.

[9] 赵文忠，杨广庆，周乔勇. 边坡稳定性监测方法及预警系统分析. 交通世界：运输，2012(22)：194-195.

[10] 柳和平，陈荣卓，潘炬坤. 公路边坡自动测斜技术及远距离监测系统. 广东公路交通，2005(3)：51-53.