第 22 卷 第 5 期 岩石力学与工程学报 22(5)：790～796
2003 年 5 月 *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* *May*，2003

香港某边坡综合自动监测系统的设计和安装*

李爱国[1] 岳中琦[1] 谭国焕[1] 李焯芬[1] 罗锦添[2]
([1]香港大学土木工程系 香港) ([2]Carleton 大学土木与环境工程系 渥太华 加拿大)

摘要 为了研究边坡性状随时间变化的一些重要问题，在香港一个正在开挖的边坡上进行了一次大型的边坡监测试验。该试验采用了含水量计、吸力计、测水管、孔隙水压力仪、测斜仪、土压力盒以及降雨计等一系列仪器。大部分仪器与数据采集仪连接，从而可以对边坡性状进行自动数字监测。详细介绍了该监测试验综合自动监测系统的设计和安装。

关键词 工程地质，边坡，监测试验，监测系统，设计，安装
分类号 P 642.22，TU 457 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2003)05-0790-07

DESIGN AND INSTALLATION OF COMPREHENSIVE INSTRUMENTATION SYSTEM FOR SLOPE IN HONG KONG

Li A G[1]，Yue Z Q[1]，Tham L G[1]，Lee C F[1]，Law K T[2]
([1]*Department of Civil Engineering，The University of Hong Kong， Hong Kong， China)*
([2]*Department of Civil and Environmental Engineering，Carleton University， Ottawa， Canada*)

Abstract In order to clarify some of the important issues on slope performance，a full-scale slope monitoring experiment has been conducted at a being constructed slope，Hong Kong. The experiment adopts a number of instruments，including soil moisture probes，tensiometers，open standpipes，piezometers，inclinometers，earth pressure cells，and a rain gauge，etc. A high proportion of instruments are connected to dataloggers for automatic monitoring of the slope performance. The design and installation of the instrumentation system for the slope monitoring experiment are presented in detail.

Key words engineering geology，slope，monitoring experiment，instrumentation system，design，installation

1 前 言

暴雨诱发的边坡失稳是世界上特别是香港地区最常见的一种滑坡[1~6]。在香港，每年都有大大小小的滑坡发生，其中，不少滑坡对人民的生命和财产造成了严重的影响。近年来，尽管在治理边坡提高安全度方面取得了长足进步，但许多问题仍然没有完全解决。其原因可能是由于根据室内实验参数预测的边坡性状不能准确反映野外边坡的实际性状。显然，在一定条件控制下，对边坡野外性状的实际监测非常重要。

岩土工程监测开始于上一世纪的 30～40 年代[7]。早期，通常是用一些简单的力学及水利仪器来监测变形、土压力及孔隙水压力[8]。为了研究土体吸力对边坡的影响，通常用吸力计来量测吸力[9~12]。无论是在生产实践还是在科学研究中，岩土工程监测已被广泛应用[13~17]。

本文旨在通过一系列野外边坡监测试验来研究边坡性状随时间变化的一些重要规律。该试验的主要目的是为了提高人们根据室内实验参数预测边坡实际性状的能力。根据室内实验取得的参数，通过经验法、数值模拟法及分析法可对边坡的性状进行预测。然后将预测的边坡性状与野外实际监测的边

2002 年 7 月 24 收到初稿，2002 年 9 月 17 日收到修改稿。
* 香港研究资助局项目(7123/99E)和香港赛马会慈善信托基金资助项目。
作者 李爱国 简介：男，1968 年生，1990 年毕业于长安大学水工系，现为香港大学土木工程系博士生，主要从事岩土工程方面的研究工作。

坡性状进行对比，从而可以建立边坡预测性状与实测性状之间的对比关系。

为此，在香港一个正在开挖的边坡上进行了一系裂边坡监测的试验。该试验采用了一系列种类比较齐全的仪器来进行监测。如测定含水量的含水量计、测定吸力的吸力计、测定地下水位和孔隙水压力的测水管和孔隙水压力仪、测定边坡水平变形的测斜仪、测定水平土压力的土压力盒以及测定降雨强度的降雨计等。大部分仪器通过电缆与数据采集仪连接，从而可以对边坡形态进行自动数字监测。

本文详细介绍了该边坡监测试验综合自动监测系统的设计和安装。

2　监测系统的设计

2.1　场地选择

为了建立一个理想的测试研究场地，在选择一个边坡做监测时考虑了许多因素。首先，场地里面不能有人为破坏；其次，场地土质条件应该在香港地区具典型意义。由于经费限制，不可能专门开挖一个边坡单独用来做研究，因此，所选择监测的人工边坡是一个实际工程项目的一部分。

选择的场地位于香港地区一座山脚下，那里有一条 3 km 长的公路正在修建。场地里面的一个典型剖面被用来做边坡监测。通过航拍解译及有关的记录，场地附近地区曾经发生过许多自然及人工边坡的滑坡。1997 年 7 月 2 和 3 日发生的一个滑坡[17]是本地区发生的一个典型暴雨诱发滑坡。该滑坡距本场地 200 m 左右，滑坡量约 3 000 m^3。

选取的典型剖面(图1)是一个自然山坡，坡面覆盖了许多植被及树木。山坡两边还有两条小溪流。该剖面原坡角很小，坡角为 15°～20°。由于道路的施工，该剖面被开挖成约 17.5 m 高的人工边坡，且坡腰 7.5 m 高处设有一个 1.5 m 宽的平台，开挖之后的人工边坡坡角约 30°。距人工边坡后面 60～70 m 远处有一条小道，该小道为场地勘察及仪器安装提供了方便。

由图 1 可知，监测的人工边坡主要由全风化花岗岩(CDG)、强风化花岗岩(HDG)、中风化花岗岩(MDG)及微风化花岗岩(SDG)组成。

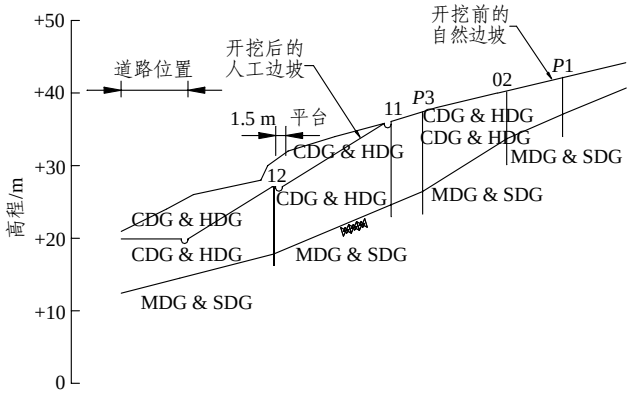


图 1　监测剖面示意图

Fig.1　Schematic diagram of the monitoring cross-section

2.2　土体性质

勘察期间，在人工边坡的坡顶及坡腰平台附近钻取了非扰动土样。勘察揭示的土样为中粒全风化花岗岩，可划分为砂质粘性土。室内土工试验主要包括：(1) 容重，(2) 干密度，(3) 比重，(4) 液塑限，(5) 颗粒筛分。另外，在现场还进行了渗水试验。土工试验结果见表 1。

2.3　仪器标定

除测水管，测斜仪及降雨计外，所有仪器都在实验室进行了标定。

2.3.1　含水计

土体含水量是由 ICT 公司生产的 MP406 型含水计来量测的。其规格是长 215 mm，直径 40 mm，通常有 3 个针头，可以压于或埋在土体中。

含水计的输出信号是电压，对于特定的土，标定后，含水计的精度可达 2%的体积含水量。含水计的标定是将含水计的输出电压(0～1.2 V)与实验室测得的体积含水量进行比较。标定的土体取自工程

表 1　土工试验结果表

Table 1　Detailed parameters of soil tests

位置	容重 / kN • m^{-3}	干密度 /kg • m^{-3}	比重 /Mg • m^{-3}	孔隙比	孔隙度	液限 /%	塑限 /%	塑性指数/%	砾粒含量≤ 62 mm/%	砂粒含量≤ 2 mm/%	粉粒含量≤ 63 μm/%	粘粒含量 ≤2 μm/%	渗透系数 /m • s^{-1}
坡顶	18.8～1.93	1.50～1.54	2.627～2.655	0.731 4～0.787 7	0.42～0.44	54.2～67.1	36.4～44.3	18～23	12.4～22.3	42.8～50.8	15.3～25.9	11.6～18.9	1～6
坡腰平台	17.6～1.83	1.44～1.48	2.629～2.653	0.787 7～0.844 3	0.44～0.46	46.0～49.2	31.5～34.6	12～18	14.4～20.2	67.1～70.3	9.0～18.3	0.24～0.51	4～10

现场。

标定之后，含水计的输出电压与实验室测得的体积含水量的线性回归方程可以表达为

$$y = a + b(x) \tag{1}$$

式中：y 为体积含水量，$0 \leqslant y \leqslant 1.0$；$x$ 为含水计的输出电压，$0 \leqslant x \leqslant 1.2$ V；a，b 为常数。

所有含水计的线性回归方程均列于表 2。通过表 2 中的方程，野外数据采集仪测得的电压可以转换成体积含水量。

表 2　含水计标定的线性回归方程

Table 2　Recalibrated formulae for moisture probes

含水量计编号	线性回归方程
M1(1m)	$y = -0.053\,4 + 0.537\,8(x)$
M1(2m)	$y = -0.056\,7 + 0.530\,1(x)$
M1(3m)	$y = -0.057\,3 + 0.531\,1(x)$
M1(4m)	$y = -0.065\,4 + 0.547\,1(x)$
MT1(1m)	$y = -0.062\,1 + 0.544\,3(x)$
MT2(2m)	$y = -0.055\,1 + 0.530\,1(x)$
MT3(3m)	$y = -0.076\,2 + 0.550\,7(x)$
MT4(4m)	$y = -0.068\,4 + 0.545\,4(x)$

2.3.2 吸力计

土体吸力是由 Soilmoisture 公司生产的 2725 型吸力计来量测的。吸力计通常由高进气值陶瓷头及压力传感器组成，两者由一塑料管连接，吸力计顶部还有一个储水器，主要用于加蒸馏水及排除塑料管中的气泡。

吸力计的压力传感器为振弦式压力传感器，其输出信号是数字信号。振弦式压力传感器通常有两个系数需要标定，一个是同压力有关的压力系数，另一个是同温度有关的温度系数。压力系数的标定是在同一温度下给压力传感器加不同的负压；温度系数的标定是在同一压力下改变压力传感器的温度。

标定之后，压力传感器的负压(吸力)可用下式表示：

$$P_m = G(R_i - R_m) + K(T_m - T_i) \tag{2}$$

式中：P_m 为吸力(kPa)，G 为线性压力系数(kPa/digit)，R_i 为压力传感器的初始数字值(digit)；R_m 为压力传感器在某一时候的数字值(digit)；K 为温度系数(kPa/℃)；T_i 为压力传感器的初始温度值(℃)；T_m 为压力传感器的在某一时候的温度值(℃)。

所有压力传感器的线性回归方程见表 3。通过表 3 中的方程，野外数据采集仪测得的数字值和温度值可以转换成吸力。

表 3　吸力计压力传感器标定的线性回归方程

Table 3　Recalibrated formulae for pressure transducers of tensiometers

压力传感器编号	线性回归方程/kPa
T1 (1m)	$P_m = 0.002\,39(8\,801.3 - R_m) - 0.004\,05(T_m - 24.1)$
T2 (2m)	$P_m = 0.002\,29(8\,737.3 - R_m) - 0.004\,26(T_m - 24.1)$
T3 (3m)	$P_m = 0.002\,18(9\,043.3 - R_m) - 0.004\,34(T_m - 24.2)$
T4 (4m)	$P_m = 0.002\,41(8\,830.4 - R_m) - 0.003\,92(T_m - 24.0)$
MT1 (1m)	$P_m = 0.002\,34(8\,998.8 - R_m) - 0.004\,82(T_m - 21.1)$
MT2 (2m)	$P_m = 0.002\,16(8\,889.3 - R_m) - 0.004\,22(T_m - 19.8)$
MT3 (3m)	$P_m = 0.002\,29(8\,828.0 - R_m) - 0.003\,86(T_m - 19.5)$
MT4 (4m)	$P_m = 0.002\,39(8\,780.0 - R_m) - 0.004\,13(T_m - 20.0)$

从理论上讲，吸力计所能量测的最大吸力应为－100 kPa。但由于气蚀，吸力计的最大量测范围仅为－90 kPa。另外，吸力计还须对其塑料管中的水柱高度进行修正。吸力计的管子愈长，修正的值愈大。修正之后，塑料管长度分别为 1，2，3 及 4 m 长的吸力计的最大量测吸力分别为－80，－70，－60 及－50 kPa。

2.3.3 孔隙水压力仪

土体的孔隙水压力或地下水位是由 Geokon 公司生产的 4500 型振弦式孔隙水压力仪量测的，其规格是：长 133.35 mm，直径 25.40 mm，可埋入土体中或放置于测水管中。

振弦式孔隙水压力仪的输出信号同吸力计的振弦式压力传感器同样是数字信号，且其标定的线性回归方程的形式同吸力计的振弦式压力传感器相同(见表 4)。只不过表 4 的线性回归方程已经转换成了水柱高度。通过表 4 中的方程，野外数据采集仪测得的数字值和温度值可以转换成地下水位。

2.3.4 土压力盒

土体中的水平土压力是采用 Geokon 公司生产的 4800 型振弦式土压力盒量测的，其规格是：长 200 mm，宽 100 mm，可埋入土体中。振弦式土压力盒通常由两块不锈钢板焊接而成，钢板之间的微小空隙用水利油填充，压力传感器与水利油连接。土压力的变化是通过作用于不锈钢板之间的油压测得。

振弦式土压力盒的输出信号同吸力计的振弦式压力传感器输出信号一样，也是数字信号，且其标

表 4　振弦式孔隙水压力仪标定的线性回归方程

Table 4　Recalibrated formulae for vibrating wire piezometers

孔隙水压力仪编号	线性回归方程/m
P1(A)	P_w = 0.003 94(10 474.9−R_w)−0.006 12(T_w−19.5)
P1(B)	P_w = 0.003 86(10 515.8−R_w)−0.010 26(T_w−22.3)
P2(A)	P_w = 0.003 94(9 404.0−R_w)−0.011 25(T_w−23.6)
P2(B)	P_w = 0.004 08(10 698.8−R_w)−0.00 478(T_w−23.6)
P3(A)	P_w = 0.003 94(10 150.6−R_w)−0.00 471(T_w−25.1)
P3(B)	P_w = 0.004 08(10 671.3−R_w)−0.00 548(T_w−25.1)
P4(A)	P_w = 0.005 02(10 596.3−R_w)−0.00 366(T_w−21.7)
P4(B)	P_w = 0.004 01(10 529.4−R_w)−0.01 322(T_w−21.7)

定的线性回归方程的形式同吸力计的振弦式压力传感器相同(见表5)。通过表 5 中的方程，野外数据采集仪测得的数字值和温度值可以转换成水平土压力。

振弦式土压力盒测得的土压力是总压力，它既包括土压力又包括水压力。

表 5　振弦式土压力盒标定的线性回归方程

Table 5　Recalibrated formulae for vibrating wire earth pressure cells

土压力盒编号	线性回归方程/kPa
E1(A)	P_e = 0.099 97(8717.3−R_e) + 0.164 78(T_e−25.2)
E1(B)	P_e = 0.104 80(8079.8−R_e) + 0.271 65(T_e−25.2)
E1(C)	P_e = 0.095 15(7977.8−R_e) + 0.146 86(T_e−25.0)

2.4　自动监测系统

为了连续监测人工边坡中含水量、吸力、孔隙水压力及水平土压力，在边坡现场设计安装了综合自动数据监测系统来采集以上参数。综合自动数据监测系统包括仪器，电缆，数据采集仪及电源。为了堆放数据采集仪及电源等方便起见，在人工边坡坡后约 40 m 处专门设计了一个监测用的小屋，且在屋顶上设有测定降雨强度的降雨计。为了不使电缆遭受人为破坏，连接监测仪器的电缆通过埋入土体的 PVC 保护管与数据采集仪连接。另外，为了方便电缆的走线，从监测用的小屋每隔一定距离设有电缆连接盒。自动监测系统示意图见图 2。数据采集仪设计每 15 min 采集一次数据，数据采集仪储存的数据可以定期通过手提电脑下载。

对于测水管中的地下水位及测斜仪套管中的土体水平位移，是通过水位计及测斜仪探头人工定期量测的。降雨强度是由降雨计中的内置数据采集仪自动采集。

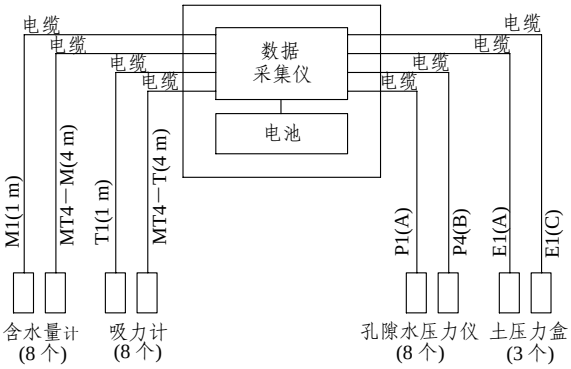


图 2　自动监测系统示意图

Fig.2　Schematic diagram of the automatic instrumentation system

3　监测系统的安装

监测系统野外仪器的安装主要分两个阶段。第 1 阶段主要包括坡顶仪器安装，该阶段在边坡开挖之前进行，时间开始于 2001 年 3 月，完成于 2001 年 7 月。该阶段总共安装了 4 个含水量计、4 个吸力计、6 个测水管、6 个孔隙水压力仪、1 个测斜仪、3 个土压力盒以及1个降雨计。场地人工边坡的开挖从 2001 年 11 月开始。开挖期间，在坡腰平台附近进行了第 2 阶段的仪器安装，仪器安装于 2001 年 12 月完成。此时，人工边坡的开挖也已完成。第 2 阶段总共安装了 4 个含水量计、4 个吸力计、2 个孔隙水压力仪及 1 个测斜仪。

仪器安装期间进行了详细的工程地质勘察。工程地质勘察主要包括钻孔(18 个)，非扰动土取样(19 个)及钻孔降水头渗透试验(4 次)。18 个钻孔中有 9 个钻孔用来安装含水量计及吸力计，6 个钻孔安装测水管和孔隙水压力仪，2 个钻孔安装测斜仪及 1 个钻孔安装土压力盒。钻孔和仪器的平面布置图见图 3(图中，等高线单位为 m)。

3.1　监测仪器的安装

3.1.1　含水量计

在人工边坡不同位置总共安装了 8 个含水量计，其中 4 个在第 1 阶段安装在坡顶的钻孔 M1 中，其安装深度分别为 1，2，3 及 4 m。另外 4 个在第 2 阶段安装在坡腰平台附近的钻孔 MT1，MT2，MT3 及 MT4 之中，其安装深度分别为 1，2，3 及 4 m。

坡顶含水量计安装时，先用水力钻机钻一个直径为 89 mm，深度为 4 m 的钻孔。钻孔完成后马上将第 1 个含水量计压于孔底(4 m 处)，然后回填并压

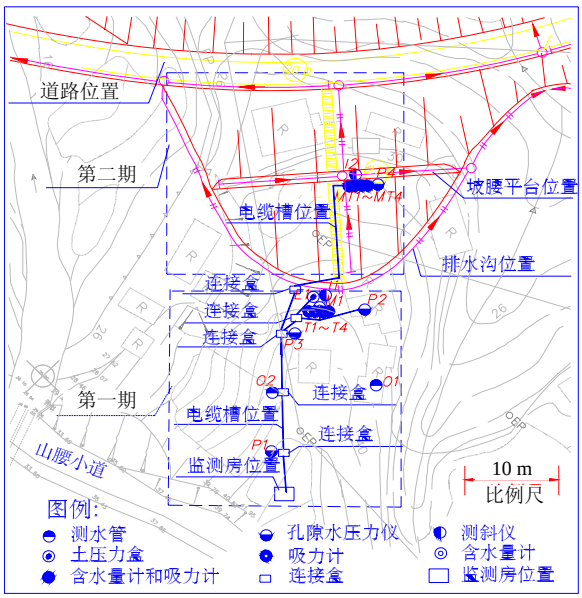


图 3　钻孔(仪器)平面布置图

Fig.3　Layout plan of boreholes and instrumentation

实钻孔至 3 m 处，回填压实的土样取自现场相同的土样，随后将第 2 个含水量计压于钻孔 3 m 处。其他 2 个含水计的安装与第 2 个含水量计的安装相同，分别安装在钻孔 2 及 1 m 处。为了防止雨水直接从钻孔入渗，在钻孔 3.5，2.5，1.5 及 0.5 m 处增加了一层 200 mm 厚的粘土水泥浆。坡腰平台附近含水量计的安装与坡顶含水量计的安装基本相同，只是在每 1 个钻孔中分别安装了 1 个含水量计及 1 个吸力计。

3.1.2 吸力计

在人工边坡不同位置总共安装了 8 个吸力计，其中，4 个在第一阶段分别安装在坡顶钻孔 T1，T2，T3 及 T4 中，其安装深度分别为 1，2，3 及 4 m。另外，4 个在第 2 阶段分别安装在坡腰平台附近的钻孔 MT1，MT2，MT3 及 MT4 之中，其安装深度也分别为 1，2，3 及 4 m。

坡顶吸力计安装时，先用水力钻机在坡顶钻一个直径为ϕ89 mm 的钻孔，当钻孔深度距设计深度还差 100 mm 时，再用一个直经为ϕ 25 mm 的钻具钻一个 100 mm 深的小孔。钻孔完成之后，要对压力传感器的初始值进行量测，然后，将吸力计的陶瓷头插入 100 mm 深的ϕ25 mm 小孔中。小孔的目的是让吸力计陶瓷头与土体紧密接触。吸力计陶瓷头插入之后，钻孔马上用现场相同的土样回填压密。为了防止雨水直接从钻孔入渗，在钻孔每隔 0.5 m 深处增加了一层 200 mm 厚的粘土水泥浆，另外，吸力计塑料管与地面交接处的土样也需夯实抹平，以防地表积水。坡腰平台附近吸力计的安装同坡顶吸力计的安装基本相同，只不过是在每一个钻孔中分别安装了 1 个含水量计及 1 个吸力计。

3.1.3 测水管和孔隙水压力仪

在人工边坡坡顶的不同位置总共安装了 6 个测水管，所有测水管都在第一阶段进行，其中，2 个安装在坡顶钻孔 O1(O1(A)和 O1(B))中，2 个安装在坡顶钻孔 O2(O2(A)和 O2(B))中，1 个安装在坡顶钻孔 P2(P2-O(A))中，1 个安装在坡顶钻孔 P3(P3-O(A))中。

在人工边坡不同位置总共安装了 8 个孔隙水压力仪，其中，6 个在第 1 阶段安装在坡顶钻孔 P1(P1(A)和 P1(B))，P2(P2(A)和 P2(B))及 P3(P3(A)和 P3(B))中。另外 2 个在第 2 阶段安装在坡腰平台附近钻孔 P4(P4(A)和 P4(B))中。

测水管和孔隙水压力仪安装基本相同。但是，孔隙水压力仪野外安装开始时，要对其初始值进行量测。测水管或孔隙水压力仪安装时，先用水利钻机钻 1 个直径为 114 mm 的钻孔，钻孔深度要求进入基岩(中风化花岗岩)2.0～5.0 m 深，另外，钻孔过程中不能用粘土浆护壁，以免睹塞孔隙。测水管或孔隙水压力仪根据钻孔土层和岩层的深度可分别安装在土层、土岩分界层或岩层。测水管或孔隙水压力仪在每一个钻孔中的安装数量及深度应根据钻孔的土性和岩性现场决定。

由于同一钻孔分别安装了 2～3 个测水管或孔隙水压力仪，因而测水管或孔隙水压力仪之间必须要有良好的滞水层。测水管或孔隙水压力仪钻孔结束后，用清水将孔底残渣清洗干净。钻孔清洗后，将灌浆管放入孔底，然后灌一定体积的粘土水泥浆至钻孔一定深度，粘土水泥浆的重量配比是粘土：水泥：水=1：1：6。待粘土水泥浆稳定约 5 h 后，将粘土球放入孔底至钻孔一定深度，然后加水使粘土球膨胀一段时间(约 3 h)。粘土球膨胀稳定后，将测水管或孔隙水压力仪放入钻孔设计深度，然后向孔底放过滤砂至钻孔一定深度。接着再将粘土球放入孔底至钻孔一定深度，然后加水使粘土球膨胀一段时间(约 3 h)。至此，单个测水管或孔隙水压力仪的安装基本完成。如果要在同一钻孔中安装 2 个或 3 个测水管或孔隙水压力仪，其安装方法同单个测水管或孔隙水压力仪的安装基本相同，只不过在最后一个测水管或孔隙水压力仪安装结束后，在粘土球层与地面之间须加灌一层粘土水泥浆。

3.1.4 测斜仪

在人工边坡不同位置总共安装了 2 个测斜仪，其中，1 个在第 1 阶段安装在坡顶的钻孔 I1 中，另外 1 个在第 2 阶段安装在坡腰平台的钻孔 I2 中。

测斜仪安装时，先用水利钻机钻 1 个直径为 114 mm 的钻孔，钻孔深度进入基岩约 1 m。钻孔结束后，用清水将孔底残渣清洗干净。钻孔清洗后，将绑有灌浆管的测斜仪套管放入孔底中，且测斜仪套管的十字内槽应与人工边坡的开挖面平行，十字内槽的方向是通过罗盘确定的。另外，测斜仪套管内应注满清水以保持测斜仪套管的稳定。然后，通过灌浆泵向钻孔中灌粘土水泥浆，其重量配比是粘土：水泥：水＝1：1：6。最后，灌浆结束后，利用钻机将护壁套管拔出。

由于人工边坡的水平位移是通过便携式的手动测斜仪双轴探头量测的，测斜仪套管安装结束数天后，应进行初始值量测。而通过双轴探头，还可以发现测斜管安装后十字内槽方向与边坡开挖面方向不一致引起的侧扭问题。

3.1.5 土压力盒

在人工边坡坡顶位置总共安装了 3 个土压力盒，所有土压力盒都在第一阶段进行，且都安装在坡顶的钻孔 E1(A)，E1(B)和 E1(C))中。

土压力盒安装时，首先，用水利钻机钻一个直径为 140 mm 的钻孔，钻孔深度为 9 m。钻孔结束后，用清水将孔底残渣清洗干净，然后，将第一个土压力盒放入孔底 9 m 处，且要求土压力盒的平面与人工边坡的开挖面互相平行。土压力盒在钻孔中放置的方向是通过自制的小工具确定的，小工具顶端设有十字槽，其中，十字槽方向与孔底的土压力盒的平面方向一致。当土压力盒在孔底的方向确定后，即刻回填 200 mm 厚的细砂，接着将小工具从孔底拉出。最后回填并压实钻孔至 6 m 处，回填压实的土取自现场相同的土层。其他 2 个土压力盒的安装与第一个土压力盒的安装相同，分别安装在钻孔 6 m 及 3 m 处。

3.2 监测仪器的连接

监测系统仪器安装结束后，监测含水量、吸力、孔隙水压力及水平土压力的仪器通过电缆(这些电缆穿过已经埋入土体的 PVC 保护管)与数据采集仪连接。为了防止电缆长度对仪器的影响，需对每一种仪器在电缆接线前与接线后的读数进行比较。比较后发现，现场电缆长度对仪器没有影响。

3.3 监测系统的自动监测

坡顶含水量、吸力、孔隙水压力及水平土压力的自动监测开始于 2001 年 6 月 2 日。2001 年 6 月 9 日由于暴雨(156.6 mm)，边坡监测系统第一次遭到了破坏。本次暴雨造成数据采集仪不能正常工作及 1 m 深的 1 个含水量计损坏。在检修好因暴雨影响的数据采集仪后，吸力、孔隙水压力仪及水平土压力的监测又于 2001 年 6 月 14 日重新开始工作。检修结果发现数据采集仪的破坏与埋在浅层的含水量计在暴雨期间遭到雷击有关。2001 年 6 月 27 日由于暴雨(171 mm)，数据采集仪又不能正常工作。由于防雷电设备十分昂贵，且项目经费有限，因此，监测系统未能进行防雷设计。于是在数据采集仪检修期间，只能增加一台新数据采集仪，作为备用。直到 2001 年 8 月 8 日，通过启用新数据采集仪，监测系统的自动监测才得以重新开始。此后，边坡监测系统一直正常工作直到现在。

3.4 监测结果

为了检查监测系统是否正常工作，本文提供了含水量计、吸力计及孔隙水压力仪在 2001 年的一次最大暴雨期间(2001 年 9 月 1 日，194.5 mm 降雨)的自动监测结果。图 3～5 显示了含水计、吸力计及孔隙水压力仪在 2001 年 9 月 1～2 日的自动监测结果及其与每 15 min 降雨的比较。监测结果表明：自动监测系统暴雨期间运行良好，监测数据合理。含水量计及吸力计监测结果的解释及其对边坡稳定性的影响详见文[18]。

4 总　结

本文介绍了香港某边坡综合自动监测系统的设计和安装，监测结果表明：该自动监测系统总体运

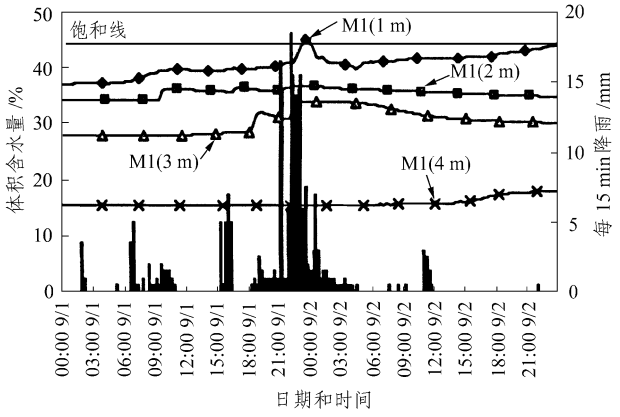


图 3　(M1)体积含水量记录及其与每 15 min 降雨之比较

Fig.3　(M1) volumetric water content record and its comparison with 15 min rainfall

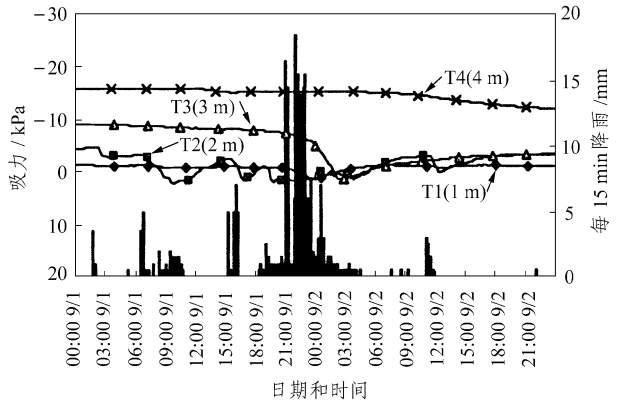


图 4　(T1～T4)吸力记录及其与每 15 min 降雨之比较

Fig.4　(T1～T4) matric suction record and its comparison with 15 min rainfall

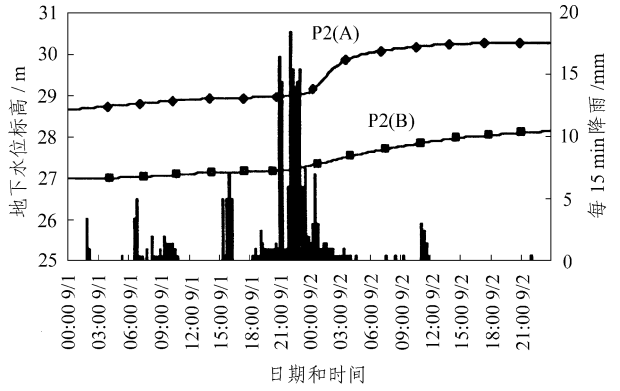


图 5　(P2)地下水位记录及其与每 15 min 降雨之比较

Fig.5　(P2) ground water level record and its comparison with 15 min rainfall

行良好，到本文投稿时仍在继续工作。现将该自动监测系统设计和安装过程中的有关经验总结如下：

(1) 为了获得监测仪器的有关参数及提高监测仪器的量测精度，所有自动监测仪器都要在实验室进行重新标定。

(2) 对于吸力计，孔隙水压力仪及土压力盒的压力传感器，在野外安装开始时一定要进行初始值量测。另外，测斜仪套管安装结束后也应进行初始值量测。

(3) 为了防止雨水入渗，含水计及吸力计安装时应设有粘土水泥浆隔水层。

(4) 土压力盒的安装要注意方向性和压实性。

(5) 暴雨期间的雷电对监测系统的仪器及数据采集仪可能有严重的影响。

致谢　本文中的监测试验由香港研究资助局项目(7123/99E)和香港赛马会慈善信托基金资助。试验期间，得到了香港拓展署、茂盛土力工程顾问有限公司、中国港湾建设(集团)总公司和 Vibro (HK) Ltd. 的大力协助，在此一并深表谢意。

参 考 文 献

1　Lumb P. Effect of rainstorms on slope stability[A]. In：Lumb P ed. Proc. Symp. Hong Kong Soils[C]. Hong Kong：Local Properties & Printing Co.，1962，73～87

2　Lumb P. Slope failures in Hong Kong[J]. Q. J. Engng. Geol.，1975，8(1)：31～65

3　Brand E W，Premchitt J，Phillipson H B. Relationship between rainfall and landslides[A]. In：Brand E W ed. Proceedings of the Fourth International Symposium on Landslides[C]. Ontario Canada：BiTech，1984，1：377～384

4　Au S W. Rain-induced slope instability in Hong Kong[J]. Q. J. Engng. Geol.，1998，51(1)：1～36

5　Franks C A M. Characteristics of some rainfall-induced landslides on natural slopes，Lantau Island，Hong Kong[J]. Q. J. Engng. Geol.，1999，32(3/4)：247～259

6　Dai F C，Lee C F，Wang S J，et al. Stress-strain behavior of a loosely compacted volcanic-derived soil and its significance to rainfall-induced fill slope failures[J]. Q. J. Engng. Geol.，1999，53(3/4)：359～370

7　Brown E T. Geotechnical monitoring in surface and underground mining-an overview[A]. In：Szwedzicki T ed. Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Open Pit and Underground Mining[C]. Rotterdam：A. A. Balkema，1993

8　Dunnicliff J. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance[M]. New York：Wiley，1988

9　Anderson M G. The prediction of soil suction for slopes in Hong Kong[R]. Hong Kong：Geotechnical Control Office，Public Works Department，Hong Kong，1984

10　Krahn J，Fredlund D G，Klassen M J. Effect of soil suction on slope stability at Notch Hill[J]. Can. Geotech. J.，1989，26(2)：269～278

11　Lim T T，Rahardjo H，Chang M F，et al. Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope[J]. Can. Geotech. J.，1996，33(4)：618～628

12　Gasmo J M，Hritzuk K J，Rahardjo H，et al. Instrumentation of an unsaturated residual soil slope[J]. Geotechnical Testing Journal，2000，22(2)：128～137

13　Cooper M R，Bromhead E N，Petley D J，et al. The Selborne cutting stability experiment[J]. Geotechnique，1998，48(1)：83～101

14　Angeli M G，Pasuto A，Silvano S. A critical review of landslide monitoring experiences[J]. Q. J. Engng. Geol.，2000，55(3)：133～147

15　Corominas J. Measurement of landslide displacements using a wire extensometer[J]. Q. J. Engng. Geol.，2000，55(3)：149～166

16　Bhasin G，Grimstad E，Larsen J O，et al. Landslide hazards and mitigation measures at Gangtok，Sikkim Himalaya[J]. Engineering Geology，2002，64(4)：351～368

17　Geotechnical Engineering office. Investigation of Some Selected Landslide Incidents in 1997 (Volume 4)[M]. Hong Kong：Halcrow Asia Partership Ltd.，1999

18　李爱国，岳中琦，谭国焕等. 土体含水量和吸力量测及其对边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报(已录用)