

土体含水率和吸力量测及其对边坡稳定性的影响

Soil moisture and suction measurement and its effect on slope stability

李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 李焯芬
(香港大学 土木系, 中国 香港)

摘要: 为研究暴雨诱发滑坡的机理, 在香港进行了一次大型人工边坡试验。通过检查该边坡坡顶在 2001 年 6 月至 2001 年 12 月期间含水率和吸力与每天及每小时降雨变化曲线, 及含水率和吸力随深度变化曲线, 看到在雨季含水率和吸力变化或者“浸湿前锋”移动通常发生在边坡土体以上 3 m 以内, 而且, 在 2001 年的一次最大暴雨中在边坡土体 1~2 m 之内形成了瞬时地下水位。另外, 还看到在 2001 年旱季由于蒸发在边坡土体中形成了“干燥前锋”。通过对边坡开挖之前的自然边坡的稳定性分析, 降雨入渗可以使边坡土体的安全系数急剧降低而蒸发则可以使边坡土体的安全系数缓慢升高。雨季含水率和吸力的浅层变化或者“浸湿前锋”的浅层移动可解释为何香港地区在暴雨期间极易发生浅层滑坡。而旱季由于蒸发形成的“干燥前锋”可说明吸力对非饱和土边坡抗剪强度的提高。

关键词: 含水率; 吸力; 浸湿前锋; 干燥前锋

中图分类号: TU 413.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)03-0278-05

作者简介: 李爱国(1968-), 男, 香港大学土木工程系博士生。

LI A G, YUE Z Q, THAM L G, LEE C F

(Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism of rainfall-induced slope failure, a full-scale cut slope experiment is being conducted at a being constructed cut slope, Hong Kong. By examining the variations of moisture content and matric suction with daily and hourly precipitation, and the variations of moisture content and matric suction profiles at the crest of the cut slope from June 2001 to December 2002, we observed that the variations of moisture content and matric suction or the movement of “wetting front” during the wet season of 2001 was within the top three meter soil and a transient water table was developed at around one meter to two meter depth during the heaviest rainstorm. We also observed that a “drying front” due to evaporation was developed during the 2001 dry season. Slope stability analysis of the natural slope showed that heavy rainfall infiltration could decrease the factor of safety dramatically while evaporation could increase the factor of safety slowly. The shallow variations of moisture content and matric suction or the shallow movement of the “wetting front” may be useful in the explanation of many shallow slope failures occurred in this region during heavy rainstorms. While the “drying front” due to evaporation during the dry season may illustrate the contribution of the increased matric suction to the increased shear strength of unsaturated soil slope.

Key words: soil moisture; matric suction; wetting front; drying front

0 前言^y

暴雨引起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]。每年都有大大小小成千上万的滑坡发生。尽管在提高边坡安全方面取得了长足进步, 但许多问题仍然没有完全解决。

自然界经常可以看到有些土质边坡很陡但长时间却很稳定而有些土质边坡角度很缓却在暴雨期间或过后发生失稳。据研究土体中的负孔隙水压力(吸力)在非饱和土质边坡的稳定性方面起了重要作用^[7]。当降雨入渗时, 吸力可能部分或全部消失, 从而导致滑坡。

为了研究暴雨诱发滑坡的机理, 在香港进行了一次大型的人工边坡试验, 该试验旨在阐明边坡形态的一些相关问题。一系列诸如测定含水率的含水率计, 测定吸力的吸力计, 测定地下水位的测水管, 测定孔隙水压力的孔隙水压力仪, 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

计等仪器被安装在边坡场地内。

本文介绍了该人工边坡坡顶含水率计和吸力计的量测结果, 并对边坡开挖之前的自然边坡的稳定性进行了分析。

1 研究背景

为研究土体吸力对边坡稳定的影响, 许多学者在野外进行了现场测试^[8~12]。对土体中的吸力通常是用吸力计来量测, 但其量测只局限于-100 kPa^[13]。大多数吸力量测局限于土体浅部 0.3 m 至 1.8 m 以内^[8~11]。文献[12]中的吸力量测达到了 3.2 m。大多数吸力量测是用来研究雨季降雨入渗过程对边坡的影响。土体含水率的现场测试在土壤科学^[14], 农业灌溉水管理和气象变

^y 基金项目: 香港研究资助局资助项目(7123/99E); 香港赛马会慈善信托基金资助项目

收稿日期: 2002-07-09

化研究中应用很广^[15, 16]。除 O' Kane 等^[17] 在尾矿区工程土覆盖层设计研究中同时采用了含水率计和吸力计外, 在岩土工程中似乎很少发现类似的例子。

暴雨诱发滑坡的机理及其与降雨类型的关系已被广泛研究^[1, 2, 3, 18, 19]。Lumb^[2] 注意到当 24 h 降雨超过 100 mm 和 15 d 前期降雨超过 350 mm 滑坡灾害事件可能发生。Brand 等^[3] 则调查发现前期降雨不是导致滑坡的主要因素, 香港地区大多数滑坡是由高强度 (70 mm/h) 的瞬时降雨引起的。Finlay 等^[18] 推断降雨诱发滑坡的数量用 3 h 的瞬时降雨预测最准确。Dai 等^[19] 分析认为 12 h 累计降雨在预测滑坡数量方面最重要。

尽管已有大量的现场和室内试验数据, 在准确估计同降雨有关的土体含水率和吸力时仍有较大的不确定性。显然, 在一定条件下控制的一个大型现场试验将会有助于我们理解边坡形态的许多重要问题。

2 场地描述

选择的场地位于香港地区一座山脚下, 有一条正在修建的 3 km 长的公路。场地里面的一典型剖面被用来做边坡监测。通过航片解译及有关的记录, 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 2/3 日发生的滑坡^[20] 是本地区发生的典型暴雨诱发滑坡。该滑坡距场地 200 m 左右, 滑坡量约 3000 m³。

选取的典型剖面是一个自然山坡, 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, 约 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°。

根据勘察, 监测的人工边坡主要由全风化花岗岩, 强风化花岗岩, 中风化花岗岩及微风化花岗岩组成。全风化花岗岩的厚度约 5~15 m, 主要为砂质黏性土。其矿物成分主要为长石、石英及黏土矿物。同残积土不一样, 在全风化花岗岩中还残留了不少的节理等结构面。监测区岩性的详细情况见文献[21]。

3 监测系统

本次监测试验之监测系统详见李等一文^[21], 本文只作简单介绍。

3.1 含水率计

在人工边坡坡顶总共安装了 4 个含水率计, 全部安装在钻孔 M1 (安装含水率计之钻孔) 中, 其安装深度分别为 1 m (M1 (1 m)), 2 m (M1 (2 m)), 3 m (M1 (3 m)) 及 4 m (M1 (4 m))。含水率计测量土体中的体积含水率, 通常有 3 个针头, 可以压于或埋在土体中。

3.2 吸力计

在人工边坡坡顶总共安装了 4 个吸力计, 分别安装在坡顶钻孔 T1 (安装吸力计之钻孔, 下同), T2, T3 及 T4 中, 其安装深度分别为 1 m (T1 (1 m)), 2 m (T2 (2 m)), 3 m (T3 (3 m)) 及 4 m (T4 (4 m))。吸力计测量土体中的吸力, 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。

3.3 数据采集系统

为了连续监测边坡含水率及吸力, 在边坡场地建立了自动数据采集系统。降雨强度则是由降雨计中的内置数据采集仪自动采集。自动数据采集系统包括仪器, 电缆, 数据采集仪及电源。数据采集仪调到每 15 min 采一次数据, 数据采集仪储存的数据定期下载。本文土体含水率及吸力的量测属于人工边坡试验自动数据采集系统中的一部分。

4 现场监测结果

4.1 含水率和吸力变化

图 1~4 显示了坡顶土体体积含水率及吸力随时间的变化及其与降雨的关系。通过分析 2001 年 6 月与 2001 年 12 月期间体积含水率及吸力的变化及其与每天降雨的比较 (见图 1, 2), 我们发现:

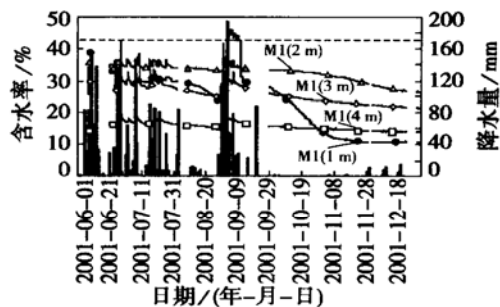


图 1 (M1) 体积含水率记录及其与每日降雨之比较

Fig. 1 (M1) volumetric water content record and its comparison with daily precipitation

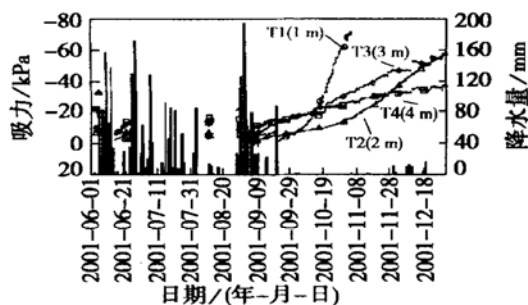


图 2 (T1~T4) 吸力记录及其与每日降雨之比较

Fig. 2 (T1~T4) matric suction record and its comparison with daily precipitation

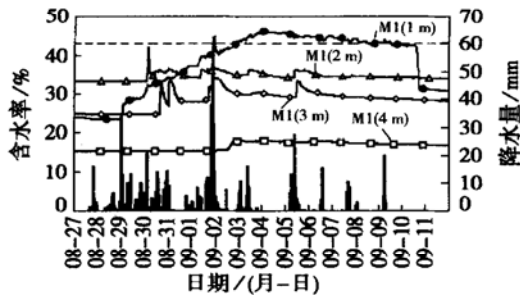


图3 (M1) 体积含水率记录及其与每小时降雨之比较

Fig. 3 (M1) volumetric water content record and its comparison with hourly precipitation

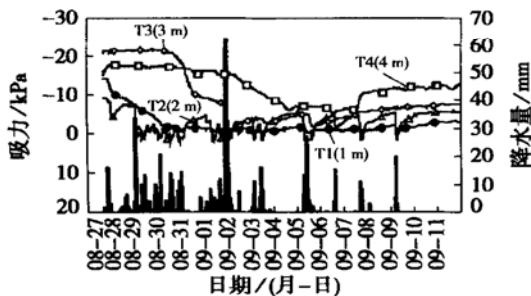


图4 (T1~T4) 吸力记录及其与每小时降雨之比较

Fig. 4 (T1~T4) matrix suction record and its comparison with hourly precipitation

(1) 坡顶土体的体积含水率及吸力在 1, 2, 3 m 及 4 m 等不同深度不均一且不相同。

(2) 坡顶土体体积含水率在 2001 年雨季因降雨入渗较高, 而在 2001 年旱季因土体水分蒸发则较低。土体吸力则反之。

(3) 坡顶土体体积含水率在雨季因降雨入渗而升高, 在旱季因土体水分蒸发而降低。在雨季, 坡顶土体体积含水率也会随降雨停止而降低。土体吸力则反之。

(4) 坡顶土体体积含水率及吸力在 1, 2, 3 m 及 4 m 等不同深度因降雨入渗随时间变化不同, 最大变化通常发生在地表浅部(1 m 左右)。另外, 体积含水率及吸力因降雨入渗随时间的变化通常随深度降低。

(5) 坡顶土体体积含水率及吸力因降雨入渗随时间的变化通常发生在地面以下 3 m 以内。只有特大暴雨(如 2001 年 9 月 1 日, 194.5 mm)才能改变 4 m 土体的体积含水率及吸力。坡顶土体体积含水率及吸力因降雨入渗随时间的浅部变化或许可以解释本地区暴雨期间发生许多滑坡的原因。

(6) 由于 2001 年 9 月 1 日的暴雨(194.5 mm), 在坡顶 2 m 以内的土体里形成了瞬时地下水位。

通过分析 2001 年 8 月 27 日与 2001 年 9 月 11 日期间体积含水率及吸力的变化及其与每小时降雨的比较(见图 3, 4), 我们进一步发现:

(1) 坡顶土体的体积含水率及吸力在地表附近(1

m 深左右) 最先受降雨入渗影响。在 4 m 深, 只有特大暴雨(如 2001 年 9 月 1 日的暴雨)才能影响其体积含水率及吸力。

(2) 坡顶土体的体积含水率及吸力亦随记录的每小时降雨急剧变化。由此可见, 短时间的高强度降雨似乎比长时间的低强度降雨更能影响滑坡。

(3) 前期降雨对土体体积含水率的升高或吸力的降低有一定的影响, 但土体体积含水率的升高或吸力的降低取决于前期降雨强度的大小。

4.2 含水率和吸力变化剖面

图 5~8 显示了坡顶土体体积含水率及吸力随深度的变化曲线。其中, 1, 2, 3 m 及 4 m 深的体积含水率及吸力为含水率计和吸力计的实测值, 而地下水位处的含水率及吸力可以通过孔隙水压力计推算, 其饱和度为 100%, 吸力为零。图 5 及图 7 的体积含水率转换成了饱和度。图 5 及图 6 显示了 2001 年雨季一场最大暴雨“浸湿前锋”的移动过程。图 7 及图 8 显示了 2001 年旱季“干燥前锋”的移动过程。

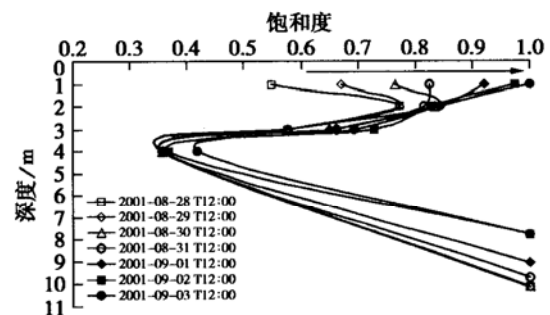


图5 (M1) 饱和度随深度的变化显示雨季“浸湿前锋”的移动

Fig. 5 (M1) Variation of degree of saturation with depth showing the movement of the “wetting front” during the wet season

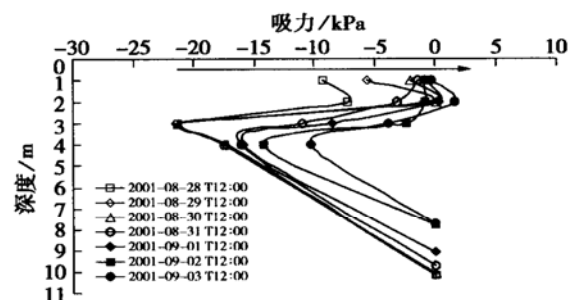


图6 (T1~T4) 吸力随深度的变化显示雨季“浸湿前锋”的移动

Fig. 6 (T1~T4) variation of matrix suction with depth showing the movement of the “wetting front” during the wet season

通过分析 2001 年 8 月 28 日与 2001 年 9 月 3 日期间坡顶土体饱和度及吸力的变化剖面曲线或“浸湿前锋”的移动过程(见图 5, 6), 笔者发现:

(1) “浸湿前锋”可以以非饱和状态向下移动, 但并不一定以饱和状态向下移动。这说明低强度的降雨也可以提高土体中的体积含水率或降低土体中的吸力。

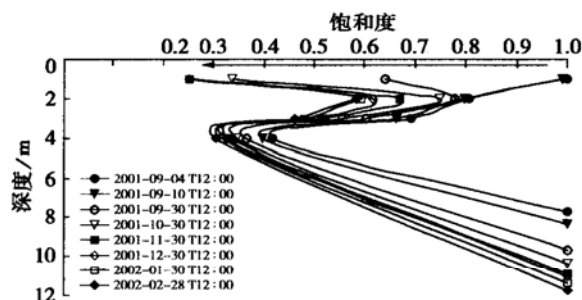


图7 (M1) 饱和度随深度的变化显示旱季“干燥前锋”的移动

Fig. 7 (M1) Variation of degree of saturation with depth showing the movement of the “drying front” during the dry season

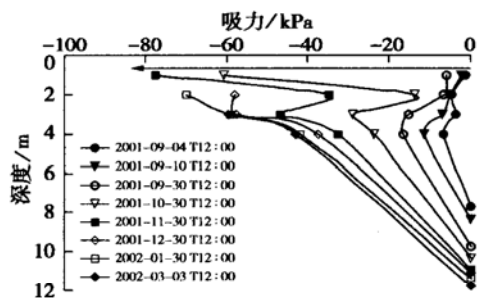


图8 (T1~T4) 吸力随深度的变化显示旱季“干燥前锋”的移动

Fig. 8 (T1~T4) variation of matric suction with depth showing the movement of the “drying front” during the dry season

(2) “浸湿前锋”只有在特大暴雨下才以近饱和状态向下移动,形成瞬时地下水位。这说明高强度的暴雨可以将土体中的体积含水率提高到近饱和状态。

(3) 坡顶土体4 m深的体积含水率及吸力在2001年9月1日后才轻微改变,而该位置的深部地下水位则升高了2.5 m以上。这说明深部地下水的补给来源可能是降雨通过山顶边坡中风化花岗岩中的裂隙补给的。

通过分析2001年9月与2001年12月期间,坡顶土体饱和度及吸力的变化剖面曲线或“干燥前锋”的移动过程(见图7,8),我们还发现:

(1) “干燥前锋”以非饱和状态向上移动,“干燥前锋”的移动过程是动态的。

(2) 最大“干燥前锋”可能会在旱季结束及下一个雨季开始时形成。

5 边坡稳定性分析

为了理解吸力在雨季及旱季对土体抗剪强度影响,对人工边坡开挖之前的自然边坡进行了边坡稳定性分析。边坡稳定性分析采用了无限边坡法。无限边坡法假定潜在的滑裂面同边坡的表面平行且滑裂面的深度同边坡的长度相比小得多。对于坡角为 β ,滑裂面深度为 z 的无限边坡,其安全系数可写成

$$F = \frac{c' + (\gamma_1 z - u_w) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma_1 z \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

式中 c' 为有效凝聚力; ϕ' 有效内摩擦角; β 为无限边坡坡角; z 为滑裂面深度; γ_1 土的总容重; u_w 为孔隙水压力。

方程(1)假设土的抗剪强度参数 c' 和 ϕ' 与土的吸力无关。据 Fredlund 和 Rahardjo (1993), 对于非饱和土,在考虑土的吸力的情况下,其抗剪强度公式如下

$$\tau = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2)$$

式中 τ 为土的抗剪强度; σ 为法向总应力; u_a 为孔隙气压力; ϕ^b 表示抗剪强度随吸力 $(u_a - u_w)$ 速率增加的摩擦角。

当考虑非饱和土强度参数 ϕ^b 时,且孔隙气压力 u_a 为零时,无限边坡的安全系数可通过下式计算:

$$F = \frac{c' + (\gamma_1 z - u_w) \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma_1 z \sin \beta \cos \beta} \quad (3)$$

对于饱和土,因 ϕ^b 等于 ϕ' , 方程(3)变得同方程(1)一样。根据2001年8月至2001年11月监测的吸力值,通过方程(3),对开挖之前的自然边坡用无限边坡法进行了稳定性分析。分析中,我们取自然边坡坡角 β 为 18° ,土的总容重 γ_1 为 19 kN/m^3 ,土的有效凝聚力为 2 kPa ,土的有效内摩擦角 ϕ' 为 35° ,表示抗剪强度随吸力 $(u_a - u_w)$ 速率增加的摩擦角 ϕ^b 为 12° [22]。对于潜在滑裂面的深度取了两个,深度分别是 1 m , 2 m 。开挖之前的自然边坡在 1 m 深及 2 m 深的安全系数随时间的变化见图9。

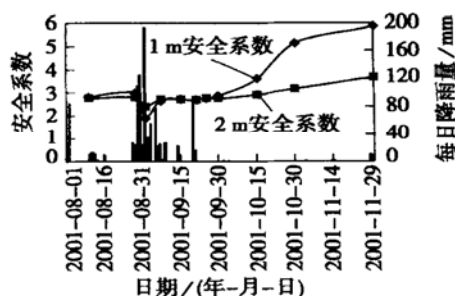


图9 2001年8月至2001年11月安全系数的变化

Fig. 9 Variation of factor of safety from August 2001 to November 2001

由图9可知,①在雨季,由于特大暴雨(如2001年9月1日, 194.5 mm)使自然边坡的安全系数急剧降低,但滑裂面深度为 1 m 的安全系数比滑裂面深度为 2 m 的安全系数降得更低;②在旱季,由于蒸发使自然边坡的安全系数逐步升高,但滑裂面深度为 1 m 的安全系数比滑裂面深度为 2 m 的安全系数升得更高。

通过监测期间自然边坡的无限边坡法稳定性分析,降雨入渗可以使边坡的稳定性急剧降低。因分析的自然边坡的坡角只有 18° ,如果坡角更陡,那么因降

雨入渗可以使土中的吸力部分或全部消失,其结果可能会诱发滑坡。另一方面,如果非饱和土边坡中的吸力在雨季可以部分或全部保留,则非饱和土边坡可以以较陡的角度稳定很长时间。尽管吸力在岩土工程设计中仍然具有争议性,但在旱季,由于吸力对非饱和土边坡抗剪强度的大幅度提高,非饱和土力学理论可用于临时支挡结构的设计,特别是当该临时支挡结构的施工也是在旱季进行时。

6 结 论

(1) 边坡坡顶土体不同深度中的体积含水率及吸力并不相同。

(2) 边坡坡顶土体体积含水率在雨季因降雨入渗而较高,而在旱季因蒸发而较低。土体吸力则反之。

(3) 在雨季“浸湿前锋”既可以以饱和状态向下移动,也可以以非饱和状态向下移动。而在旱季“干燥前锋”则以非饱和状态向上移动。

(4) 坡顶土体体积含水率及吸力随时间的变化通常发生在地面以下 3 m 以内。

(5) 前期降雨对坡顶土体体积含水率的升高或吸力的降低非常明显,但只有短时间高强度的特大暴雨才可能在坡顶形成瞬时地下水位。

(6) 边坡稳定性分析显示降雨入渗可以降低边坡的稳定性,而蒸发则可以提高了边坡的稳定性。

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,作者在此深表谢意。另外,写作期间亦得到了加拿大 Carlton 大学罗锦添教授的仔细审阅,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Lumb P. Effect of rainstorms on slope stability[A]. Proc Symp Hong Kong Soils[C]. Hong Kong, 1962. 73- 87.
- [2] Lumb P. Slope failures in Hong Kong[J]. Q J Engng Geol, 1975, 8: 31- 65.
- [3] Brand E W, Premchitt J, Phillipson H B. Relationship between rainfall and landslides[A]. Proceedings of the Fourth International Symposium on Landslides[C]. Canada, 1984. 377- 384.
- [4] Au S W C. Rain induced slope instability in Hong Kong[J]. Engineering Geology, 1998, 51: 1- 36.
- [5] Franks C A M. Characteristics of some rainfall-induced landslides on natural slopes, Lantau Island, Hong Kong[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology. 1999, 32: 247- 259.
- [6] Dai F C, Lee C F, Wang S J, Feng Y Y. Stress-strain behavior of a loosely compacted volcanic-derived soil and its significance to rainfall-induced fill slope failures[J]. Engineering Geology, 1999, 53: 359- 370.
- [7] Dunncliff J. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance[M]. New York: Wiley, 1988.
- [8] Anderson M G. The prediction of soil suction for slopes in Hong Kong[R]. Hong Kong: Geotechnical Control Office. Public Works Department, 1984.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Zhang J, Jiao J J, Yang J. In situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China[J]. Engineering Geology, 2000, 57(1): 31- 38.
- [12] Gasmo J M, Hritzuk K J, Rahardjo, et al. Instrumentation of an unsaturated residual soil slope[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 22(2): 128- 137.
- [13] Stannard D I. Tensiometers: theory, construction, and use[J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, 15(1): 48- 58.
- [14] Nissen H H, Moldrup P, De Jonge, et al. Time domain reflectometry coil probe measurements of water content during fingered flow[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(3): 493- 500.
- [15] Inoue Y, Watanabe T, Kitamura K. Prototype time-domain reflectometry probes for measurement of moisture content near the soil surface for applications to “on the move” measurements[J]. Agricultural Water Management, 2001, 50(1): 41- 52.
- [16] Jipp P H, Nepstad D C, Cassel D K, et al. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally-dry amazonia[J]. Climatic Change, 1998, 39(2, 3): 395- 412.
- [17] O' Kane M, Wilson G W, Barbour S L. Instrumentation and monitoring of an engineered soil cover system for mine waste rock[J]. Can Geotech J, 1998, 35(5): 828- 846.
- [18] Finlay P J, Fell R, Maguire P K. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall[J]. Can Geotech J, 1997, 34(6): 811- 824.
- [19] Dai F C, Lee C F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides[J]. Engineering Geology, 2001, 59(3, 4), 253- 266.
- [20] Investigation of some selected landslide incidents in 1997 (4) [R]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, 1999.
- [21] Gan J K M, Fredlund D G. Direct shear and triaxial testings of a Hong Kong soil under saturated and unsaturated conditions[R]. Hong Kong, : Geotechnical Engineering Office, 1996.
- [22] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 香港某边坡综合自动监测系统的设计和安装[J]. 岩土力学与工程学报(待刊).