

降雨条件下黏性土坡微结构动态环境能场分析

王 伟,王中华,许芝娟,陈 蔚

(江南大学 环境与土木工程学院,江苏 无锡 214122)

【摘 要】 【目的】研究降雨条件下黏性土坡位移场、应变场、微结构动态环境能场的变化及对土坡稳定性的影响。【方法】通过室内土坡模型试验,用读数显微镜观测降雨前后土坡内 45 个测点的位移,特意选择并全程观测斜坡面(1 个)、坡脚(2 个)、坡底(1 个)的 4 个测点的位移,研究侧向位移和竖向位移随时间的变化,利用反分析方法分析土坡的位移场与应变场的变化,从宏观、中观、微观角度上分析黏性土坡微结构动态环境能场及外部环境条件变化与其内在介质环境变化之间的关系。【结果】降雨条件下坡顶和坡脚处土体的损伤程度较大,最大竖向位移发生在坡脚处;用常规方法分析土坡变形时会低估瞬时变形而夸大固结变形;由斜坡面、坡脚和坡底的蠕变曲线可见,降雨初期的瞬时竖向位移和侧向位移增长较快,但随着降雨时间的延长,土坡微结构受到损伤,竖向位移和侧向位移的增长变慢,最后趋于稳定。【结论】降雨引发的土坡滑移大多数是瞬时的,土坡的蠕变既是土体损伤的过程,也是土坡微结构能量耗散的过程。因降雨劈裂力的作用,在坡顶及斜坡面上会出现裂缝,而斜坡面和坡脚是最容易诱发险情的部位。

【关键词】 黏性土坡;微结构动态环境能场;土坡稳定性;模型试验;降雨;蠕变

【中图分类号】 TU413.6⁺2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)03-0229-06

Analysis of microstructure dynamic environmental energy-field of clays-soil slope under rainfall

WANG Wei, WANG Zhong-hua, XU Zhi-juan, CHEN Wei

(Department of Environment and Civil Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: 【Objective】 Displacement field, strain field, the microstructure dynamic environmental energy-field, and their influence on the stability of clays soil slope were studied under rainfall. 【Method】 Model tests were made in laboratory. During the whole testing process, displacements of 45 observation points of soil slope were obtained by reading microscope under rainfall. It should be noted that 4 observation points were selected specially, which were located at the inclined slope, under the bottom of slope, and at the toe of slope, to study the variation of the lateral and vertical displacement with time. Inverse analysis method was used to obtain the strain field of soil slope. The intrinsic relationship among the microstructure dynamic environmental energy-field, external environmental condition and environmental medium were analyzed based on macrostructure, middle-structure and microstructure. 【Result】 Beneath the top and toe of clays soil slope under rainfall, damage becomes serious. The bigger vertical displacement occurred is in the toe of slope, test results show that the routine method, regardless of damage, underestimates the immediate deformation and overestimates the consolidation deformation. It can be seen from creep curve of beneath the inclined slope, toe of slope and bottom of slope that at the beginning of rainfall, the lateral and vertical displacement increases rapidly. With the increase in time, microstructure of soil slope is damaged, then the lateral and vertical displacement increases slowly, finally tends to remain steady. 【Conclusion】 Conclusions are made that the slope sliding of clays soil happens immediately under rainfall in most cases. Creep of soil

* [收稿日期] 2009-09-26

[作者简介] 王 伟(1952—),女,新疆乌鲁木齐人,教授,硕士,主要从事土力学地基基础和软土地基处理及抗震研究。

slope can be considered as the process,during which damage occurs and energy dissipates under rainfall. Cracks emerges on the top and inclined slope of soil,the most dangerous positions are the inclined slope and the toe of slope,which are subject to collapse.

Key words: clays soil slope;microstructure dynamic environmental energy-field;stability of clays soil slope;model test;rainfall;creep

近年来,因降雨引发的滑坡、泥石流频繁发生,造成了巨大的经济损失和无法挽回的生命财产损失,因斜坡失稳造成的滑坡已成为全球性的三大地质灾害之一。据统计,每年因各种滑坡造成的损失达 200 亿元之多^[1]。大量的滑坡实例表明,降雨尤其是暴雨是发生滑坡、泥石流等地质灾害的主要诱因^[2-5]。对全国 290 个县市地质灾害的调查结果显示,滑坡占地质灾害总数的比例高达 51%,而暴雨引发的滑坡竟占滑坡总数的 90%^[6]。Brueckl 等^[7]、Francois 等^[8]分别用地质力学模型分析了地震作用下岩质边坡的滑坡过程;孙英勋^[9]侧重于理论研究,将滑面深度、岩性和滑面倾角三要素作为分类重点,从治理角度对滑坡进行了分类,提出了 12 种滑坡类型;Tacher 等^[10]应用地质力学模型方法,研究了排水系统对滑坡的影响,并对监测数据进行了比较;刘礼领等^[11]在评价降雨入渗对斜坡稳定性的影响时,认为应充分考虑裂隙的影响,只有降雨强度大于某一临界值时,才会有充足的降水通过裂隙渗入到斜坡深部,从而影响斜坡的稳定性。

雨水渗入土坡中,使土坡的微结构动态环境能场发生变化,因而有关土坡微结构动态环境能场的研究对实际工程具有非常重要的意义,且已受到岩土工程界的重视。由于雨水渗入土坡,使其原本多相分散的结构更趋于各向异性,从而改变了土坡中的应力分布,并增加了其不均匀性,使其完全变为一个典型非饱和的动态应力-应变-强度-渗流耦合场,如果用常规方法分析土坡,将无法完全真实地反映实际土坡微结构动态环境能场的变化规律,往往忽略瞬时变形而使固结变形偏大^[12-15]。

模型试验是研究黏性土坡微结构动态环境能场的一个较为理想的方法,其能反映黏性土坡在降雨条件下的位移及变化规律。为此,本试验采用室内土坡模型试验,用读数显微镜实测整个土坡各个测点的位移,利用反分析方法分析土坡位移场、应变场的变化,另在试验中还特意选取了斜坡面、坡脚、坡底测点,全程跟踪观测这些点的位移,分析位移随时间的变化规律,旨在为土坡微结构动态环境能场的研究分析提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验用料及模型设计

试验模拟人工土坡自然降雨环境。试验用料选择江苏无锡黏性土,将土晒干、碾碎、过孔径 2 mm 筛备用。试验于 2004-03-05 在江苏无锡江南大学土木工程系土力学实验室进行。在模型槽内筑人工土坡,严格控制装土质量,将黏性土分层铺设,整个装土过程中沿着土坡深度方向和水平方向每隔 3 cm 埋入 1 个测点,共埋入 45 个测点。图 1 即为土坡模型试验示意图,土坡坡角为 45°,图 1 中 a、b、c、d、e 分别表示沿土坡不同深度的水平断面,A、B、C、D、E、F、G 分别表示土坡不同的铅垂断面。

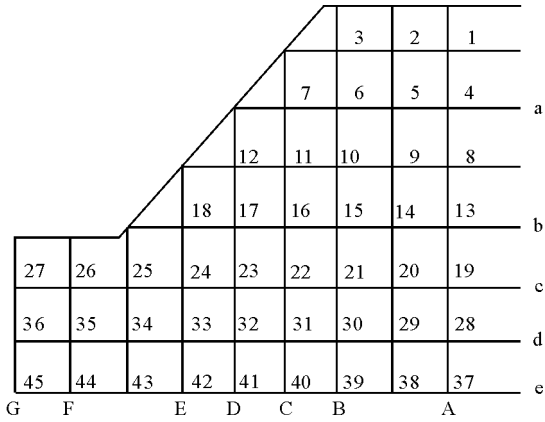


图 1 人工黏性土坡模型试验示意图

Fig.1 Model tests installation of clays soil artificial-slope

1.2 测定项目及方法

在试验过程中,用读数显微镜测定布设于土坡内的 45 个测点(图 1)在自重状态下的初始 X 坐标值和 Y 坐标值,然后再测定自然降雨条件下第 1 天和第 2 天每个测点的铅垂向位移 Y 和侧向位移 X 。在试验过程中,特别选取斜坡面的 17、坡脚的 24 和 34 及坡底的 35 号测点(4 个测点的位置如图 1 所示),首先量测这 4 个测点自重状态下的初始 X 坐标值和 Y 坐标值,然后全程跟踪测定自然降雨条件下每个测点随时间而变化的铅垂向竖向位移 s_y 和侧向位移 s_x ,通过其变化分析土坡斜坡面、坡脚、坡底随时间变化而发生的蠕变。

1.3 数据处理及分析内容

利用有限元方法,用算法语言编程处理所有实测位移数据,将所得数据输入 GT 软件中,通过 GRAFTOOL 绘图软件,绘制土坡不同水平断面竖向位移随深度的变化曲线及土坡位移场、应变场和斜坡面、坡脚、坡底随时间变化而发生的蠕变曲线,从宏观、中观、微观角度分析降雨条件下土坡位移、应变的分布规律、发展趋势、损伤机理和破坏机理,研究降雨对土坡稳定性的影响,分析容易出现问题的部位及潜在的最危险滑动面。

2 结果与分析

2.1 降雨条件下黏性土坡位移场、应变场的宏观与微观结构特性

2.1.1 土坡位移矢量图 图 2 表示降雨条件下,由土坡各个测点的竖向位移和侧向位移合成的位移矢量图,其从宏观上反映了土坡整体位移的总趋势。由图 2 可以看出,降雨条件下,土坡竖向位移较大,侧向位移较小,土坡位移表现为从坡顶沿着斜坡面自上向下及在坡底自右向左延移的变化趋势。

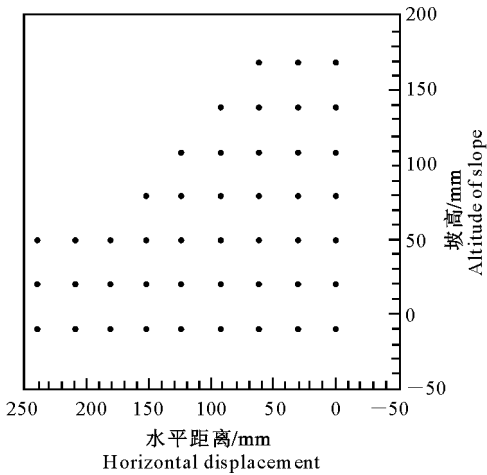


图 2 降雨条件下黏性土坡的位移矢量图

Fig. 2 Vector of displacement of clayed soil slope under rainfall

2.1.2 土坡不同水平断面铅垂方向竖向位移随深度的变化 图 3 表示在降雨条件下,沿着土坡自上向下选取的 5 个不同位置水平断面(图 1 中的 a~e)铅垂方向的竖向位移曲线,其从中观上反映了土坡不同深度某一个水平断面上竖向位移的变化情况。由图 3 可以看出,在降雨时,同一水平断面上不同水平距离处的竖向位移并不相同,其中 a-a、b-b、c-c、d-d 和 e-e 断面的竖向位移最大值分别位于水平断面的 60,120,120,150,150 mm 处,综合分析竖向位移

最大值的位置以及逐渐延伸的路径,可以推断试验土坡潜在的最危险滑动面。实践中发现,具有一定斜度的坡面,由于其临空面及坡脚所处特殊位置的边界条件,为雨水渗入创造了有利的外部条件,潜在的滑动面自坡顶起,在距斜坡表面一定水平距离向下延伸至坡脚处,在坡底呈由右向左滑移的趋势,这与试验中观察到的结果完全吻合。

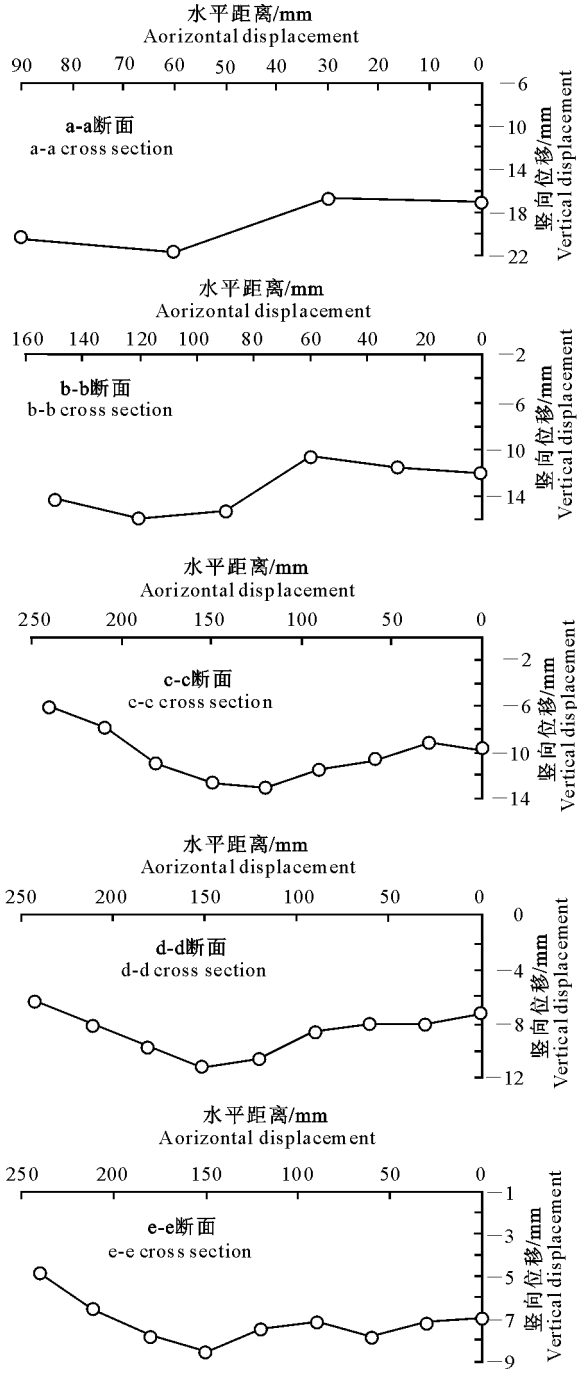


图 3 降雨条件下黏性土坡不同水平断面竖向位移的变化

Fig. 3 Variation of vertical displacement with depth of clayed soil slope under rainfall

2.1.3 土坡斜坡面、坡角、坡底的蠕变特性 图 4 为土坡斜坡面 17 号测点及坡脚 24、34 号测点和坡底 35 号测点 4 个测点的侧向位移和竖向位移随时

间变化的蠕变曲线,其从微观上反映了土坡某一个点的位移情况。

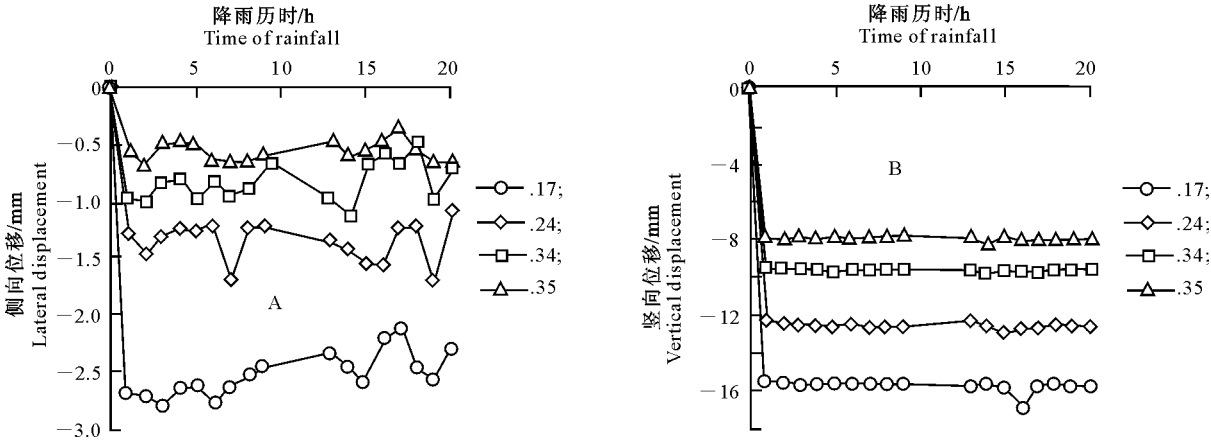


图 4 降雨条件下黏性土坡侧向位移(A)和竖向位移(B)与时间的关系曲线

Fig. 4 Curve of the lateral (A) and vertical displacement (B) the variation with depth of clayed soil slope under rainfall

由图 4-A 可以看出,降雨初期,这 4 个测点的侧向位移均产生了比较大的瞬时变形,即土的微结构体系只要一旦受到水的渗入,土体结构内的各种介质环境顷刻发生变化,颗粒表面的化学亲合势弱化,使各种介质间已建立的键桥和链逐渐软化、解体,甚至彻底摧毁,同时水膜的楔入作用增强,致使颗粒间的联结吸力弱化,矿物颗粒间的联结强度急剧降低,即土体的蠕变过程是土体抗剪强度逐渐降低、土体结构逐渐损伤破坏的过程,也是土坡微结构能量耗散的过程。在 4 个测点中,斜坡面 17 号测点的侧向位移最大,其次为坡脚的 24 号测点及 34 号测点,坡底 35 号测点最小。随着降雨历时的延长,侧向位移变化幅度较小,其中坡脚 34 号测点和坡底 35 号测点的侧向变形基本是在小范围内波动,斜坡面 17 号测点在发生最初瞬时侧向变形之后,其侧向变形呈现稍有减小又有回弹的变化趋势,具有 2 个临空面的坡脚位置上的 24 号测点,其侧向位移总体呈增大的趋势。由图 4-B 可以看出,在降雨初期,17,24,34 和 35 号 4 个测点的瞬时竖向位移均比较大,之后随着降雨历时的延长迅速变小并基本上稳定于某一个值,但以斜坡面 17 号测点的竖向位移最大,其次依次为坡脚 24,34 号测点和坡底 35 号测点。坡脚处应力状态异常复杂,竖向位移变化幅度较大,所以土坡斜坡面、坡脚处潜在的危險性最大,且由降雨引发的土坡滑移大多数是瞬时的。

2.1.4 土坡竖向位移等值线分析 图 5 为降雨条件下土坡竖向位移的等值线。由图 5 可以看出:(1)

在降雨条件下,竖向位移最大值出现在坡顶附近,斜坡面的竖向位移也较大,沿着土坡向下,随着土层深度的增大竖向位移逐渐减小。(2)降雨条件下,潜在滑动面从坡顶右上角沿着斜坡面到土坡的左下角,竖向位移自上而下向外延移,再由坡脚向坡底推挤而逐渐形成,潜在滑动面的脊线在坡底靠近坡脚处加深,所以降雨时斜坡面、坡脚是最易诱发险情的部位。

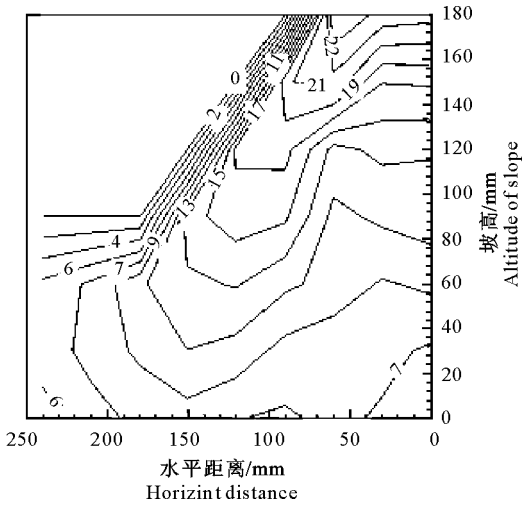
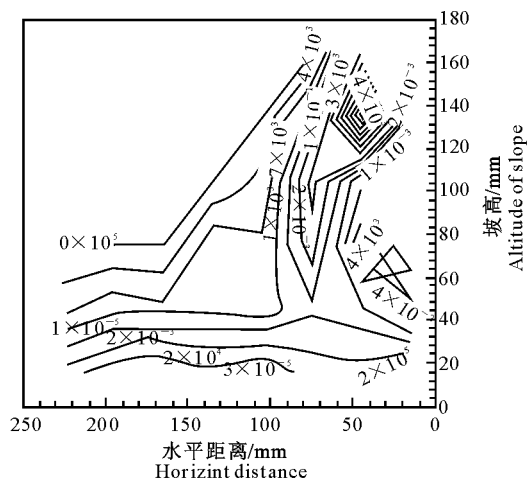


图 5 降雨条件下土坡竖向位移等值线图
Fig. 5 Isopleth of vertical displacement of clayed soil slope under rainfall

2.1.5 土坡最大剪应变 $\gamma_{\max}$ 和大主应变 ϵ_1 的等值线分析 由图 6、7 可以看出,降雨时,坡顶附近的 $\gamma_{\max}$ 和 ϵ_1 值均最大,表现出应变集聚现象;斜坡面和坡底黏土层的 $\gamma_{\max}$ 和 ϵ_1 值也均比较大。由此可以断

定,潜在的最危险滑动面沿斜坡面由上向下到坡底

黏土层,在坡底自右向左向外延移。



裂力,使土坡经历了极复杂的应力状态,拉力、压力、剪力均会使土坡产生张拉裂缝。由于雨水的渗入,土体微结构内在介质环境发生变化,黏土矿物颗粒吸水膨胀,使颗粒间的化学亲合势弱化,土体颗粒骨架间的联结支撑点湿化、软化、恶化,使已建立的各种介质间的键桥逐渐解体,甚至彻底摧毁,颗粒间的引力转变为斥力,颗粒间联结强度下降,在裂缝的尖端会产生应力分布的奇异性,使裂缝不断扩展、延伸、加深,最终导致滑坡的发生。

[参考文献]

[1] 谢全敏,边翔,夏元友. 滑坡灾害风险评价的系统分析[J]. 岩土力学,2005,26(1):71-74.
Xie Q M, Bian X, Xia Y Y. Systematic analysis of risk evaluation of landslide hazard[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1):71-74. (in Chinese)

[2] Chen C Y, Chen T C, Yu F C, et al. Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide[J]. Environmental Geology, 2005, 48(5):466-479.

[3] Daop L, Robert L. Coupled creep and seepage model for hybrid media[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134(3):217-223.

[4] Finlay P J, Fell R, Maguire P K. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6):811-824.

[5] 张玉成,杨光华,张玉兴. 滑坡的发生与降雨关系的研究[J]. 灾害学,2007,22(1):82-85.
Zhang Y C, Yang G H, Zhang Y X. Research on the relationship between landslide and rainfall[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(1):82-85. (in Chinese)

[6] 李媛,孟晖,董颖,等. 中国地质灾害类型及其特征:基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004(4):29-34.
Li Y, Meng H, Dong Y, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China: Based on the results of geohazard survey in 290 counties[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004(4):29-34. (in Chinese)

[7] Brueckl E, Parotidis M. Estimation of large-scale mechanical

properties of a large landslide on the basis of seismic results[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(6):877-883.

[8] Francois B, Tache L, Bonnard C, et al. Numerical modelling of the hydrogeological and geomechanical behaviour of a large slope movement the Triesenberg landslide (Liechtenstein)[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(7):840-857.

[9] 孙英勋. 滑坡的处治分类与治理模式探讨[J]. 地质与勘探, 2006, 142(1):85-88.
Sun Y X. Discussion on the treatment category and modules for landslides[J]. Geology and Prospecting, 2006, 142(1):85-88. (in Chinese)

[10] Tacher L, Bonnard C, Laloui L, et al. Modelling the behaviour of a large landslide with respect to hydrogeological and geomechanical parameter heterogeneity[J]. Landslides, 2005, 2(1):3-14.

[11] 刘礼领,殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4):1061-1066.
Liu L L, Yin K L. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4):1061-1066. (in Chinese)

[12] 曹林卫,彭向和,李德,等. 变形场和渗流场耦合作用下的尾矿坝静力稳定性分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(5):112-118.
Cao L W, Peng X H, Li D, et al. Analysis of the static stability of tailings dam under coupled deformation and seepage fields[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(5):112-118. (in Chinese)

[13] Gasmol M, Rahardjo H, Leong E C. Infiltration effect on stability of a residual soil slope[J]. Computers and Geotechnics, 2000, 26(2):145-165.

[14] Collins B D, Znidarcic D. Stability analysis of rainfall induced landslides[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(4):362-372.

[15] 沈良峰,李启明. 基于风险管理的滑坡灾害预防思想[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5):142-147.
Shen L F, Li Q M. Thought about landslide disaster prevention based on risk management[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(5):142-147. (in Chinese)