

文章编号: 1000-7598 (2011) 11-3263-06

荷载作用下黏性土坡位移场应变场分析

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: 通过室内土坡模型试验, 研究了在荷载作用下黏性土坡竖向位移随深度的变化规律、土坡大主应变与最大剪应变分布、土坡的蠕变特性及裂缝作用机制。结果表明, 随着荷载的逐渐增大, 土坡微结构蠕变不断增加, 土体的蠕变过程实质上是土体损伤过程, 是土坡微结构能量耗散的过程。土坡的蠕变和损伤积累随着加荷时间延续而增大, 损伤各向异性更加明显。坡顶和斜坡面处的损伤程度较大, 在坡顶和斜坡面出现裂缝, 坡顶的竖向位移大于侧向位移, 相反坡底处侧向位移大于竖向位移。

关 键 词: 黏性土坡; 模型试验; 荷载; 位移场及应变场; 蠕变; 损伤

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Analysis of displacement field and strain field of clay soil slopes under loading

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

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

Abstract: Through laboratory model tests, the following discussions are performed based on macrostructure and microstructure: the vertical displacements varying with depth, the distribution of maximum principal strain and maximum shear strain of clay soil slopes, creep properties and crack functionary mechanism of clay soil slopes respectively under loading. The results show that, with the increase in loading, the values of creep increase microstructure of soil slopes. Creep of soil slopes can be considered as the process of damage, and process of energy dissipation of microstructure of soil slopes; and anisotropy of damage is made clear. The longer time of loading is, the larger vertical creep and damage accumulation of soil slopes is. At the top and inclined slope of soil slopes, damage becomes serious; and cracks appeared. The top of soil slopes, the values of vertical displacement are bigger than lateral displacement; on the contrary, at the bottom of soil slopes, the values of lateral displacement are larger than that of vertical displacement.

Key words: clay soil slopes; model test; loading; displacement field and strain field; creep; damage

1 引 言

震惊中外的上海 13 层在建商品楼在 1 min 内发生倒塌事故, 分析其原因: 紧贴该楼北侧, 在短期内堆土过高, 最高达 10 m, 对地面产生 170 kPa 的荷载, 上海地表一般能承受 80 kPa, 与此同时, 紧邻大楼南侧的地下车库基坑开挖深度达 4.6 m, 两侧的压力差使地基土体产生水平位移, 过大水平推力超过了桩基抗侧移能力, 桩基基本是在地表面以下同一个平面上被扭断。倒塌事件给人们很深刻的教训和启示: 在实际工程中, 不管是基坑坑壁还是土坡, 都不能在它们的顶部堆积大量荷载, 不然会引发滑坡和坑壁坍塌等工程事故。

当土坡承受各种外来力的干扰时, 使土坡微结构发生变化, 改变土坡中的应力分布并趋于更加不均匀性, 完全变为一个动态应力-应变-强度场, 如用常规方法分析土坡往往忽略瞬间变形, 坡顶承受荷载时瞬间变形很大^[1-13]。随着荷载的逐渐增大, 土体的抗剪强度逐渐降低, 土坡微结构受到损伤, 发生渐进性的破坏, 现有土力学理论不能解决土体早期破坏和渐进性破坏问题, 模型试验是研究黏性土坡稳定性较为理想方法, 能全面了解在荷载作用下黏性土坡的位移及变化规律。本试验采用模型试验, 并用读数显微镜实测整个土坡各个测点的位移变化, 从而利用位移反分析方法, 得出土坡的位移场及应变场, 旨在为研究荷载作用下土坡稳定性提

收稿日期: 2010-03-01

第一作者简介: 王伟, 女, 1952 年生, 硕士, 教授, 主要从事土力学地基基础教学及软土地基处理、抗震等方面的研究工作。E-mail: wangwei_58@126.com

供参考依据。

2 材料与方法

2.1 试验用料和模型试验设计

试验用料选择无锡黏性土, 首先将土晒干、碾碎、过孔径 2 mm 筛备用。模型槽的长、宽、高分别为 1 500、800、800 mm, 在模型槽内筑人工土坡, 将黏性土分层铺设, 并用干密度严格控制装土质量, 土的含水率 $w=18\%$, $\rho_d=1.61 \text{ g/cm}^3$, 土坡角度为 45° , 整个装土过程中沿着土坡深度方向及水平方向间隔 3 cm, 埋入 45 个测点, 图 1 中 $a-a \sim e-e$ 分别表示沿土坡不同深度的水平断面, ①~⑦分别表示不同的铅垂断面, 1~45 为测点。通过在承压板加砝码实现分级加荷, 试验模拟在荷载作用下人工土坡, 按平面应变问题考虑。

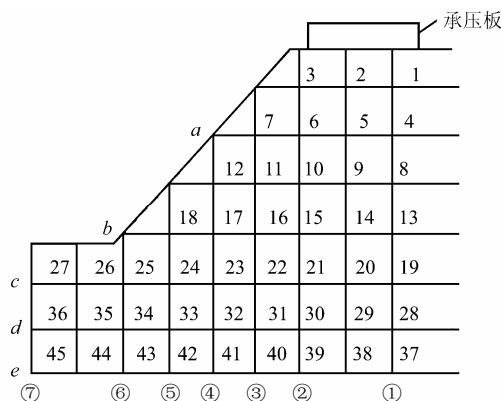


图 1 土坡模型试验示意图

Fig.1 Model tests installation of soil slopes

2.2 测定项目及方法

试验过程中, 用读数显微镜测定 45 个测点在自重状态下初始的 X 坐标值和 Y 坐标值, 再测记各级荷载作用下竖向位移 Y 和侧向位移 X 。在承压板上的 4 个角安装 4 个磁性支座, 用来固定测微表, 测定各级荷载作用下土坡的竖向位移, 同时测定在同一级荷载作用下土坡随时间延续的蠕变过程。

2.3 数据处理

采用弹性模型, 用反分析方法及有限元法通过算法语言编程处理所有实测的位移数据, 然后将所得数据输入绘图软件中, 绘制土坡不同水平断面竖向位移随深度变化曲线、土坡的位移场、应变场, 从宏观到微观上分析土坡在荷载作用下的位移、应力、应变分布规律、发展趋势、损伤机制及破坏机制, 分析荷载对土坡稳定性的影响以及最容易出现问题的部位及潜在的最危险滑动面。

3 土坡位移场及应变场分析

3.1 荷载作用土坡位移场分析

图 2 表示在荷载作用下, 由土坡各个测点竖向位移和侧向位移合成的土坡位移矢量图, 从宏观上反映了土坡整体位移的总趋势。由图 2 可以看出: ①坡顶和斜坡面的竖向位移较大, 相对而言, 侧向位移较小, 沿着土坡向下竖向位移逐渐变小, 在坡底侧向位移大, 而竖向位移小; ②在荷载作用下整个土坡的竖向位移由坡顶沿着斜坡面自上向下到坡底黏土层, 然后在坡底自左向右即向坡外移, 显示潜在最危险圆弧状滑动趋势。

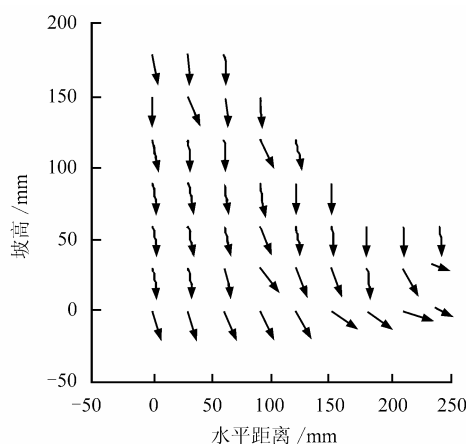


图 2 在荷载作用下黏性土坡位移矢量图

Fig.2 Vector of displacement of clayed soil slopes under loading

3.2 不同水平断面竖向位移随深度变化分析

图 3 表示在荷载作用下, 沿着土坡自上向下选取 5 个不同位置水平断面 (图 1 中的 $a \sim e$) 的竖向位移曲线, 反映了土坡不同深度某一个水平断面上的竖向位移趋势及其随深度的变化规律, 也从微观上表示在整个土坡范围内不同深度处各个点的竖向位移, 图中 3 条曲线分别表示在第 2~4 级荷载作用。由图可以看出: ① $a-a$ 水平断面和 $b-b$ 水平断面位于土坡斜坡范围内, 在荷载作用下, 坡顶处竖向位移最大, 斜坡面处的竖向位移也较大, 坡顶斜坡面处的 3 条曲线之间间距最大, 竖向位移的增量速率随着荷载的逐渐增大而增加, 竖向位移随着土坡的深度增大而逐渐变小; ② $c-c$ 、 $d-d$ 、 $e-e$ 水平断面处于土坡坡底范围内, 随着荷载增大, 竖向位移增量速率变小, 坡底处 3 条曲线的间距变小。随着荷载的逐渐增大土坡微结构损伤程度加大, 并且微结构的损伤随着加荷时间的延续而增加, 在试验过程中坡顶和斜坡面出现裂缝和裂纹。

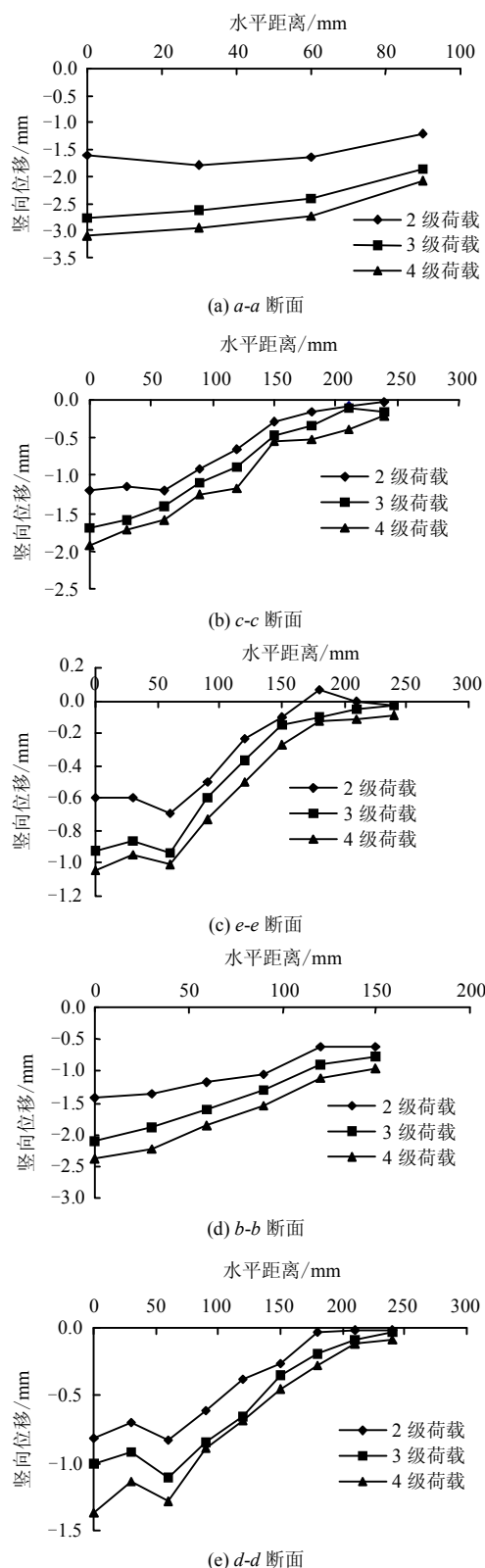


图3 荷载作用下黏性土坡不同水平断面竖向位移曲线
Fig.3 Variation of vertical displacements with depth of clayed soil slopes under loading

3.3 土坡蠕变特性分析

图4表示在各级荷载作用下蠕变与时间 $s-t$ 关系曲线。由图可以看出: 土坡在自重作用下是一条平缓曲线, 这时土坡在上覆土自重压力作用下土颗

粒间相互调整、排列, 直到压缩至稳定。荷载作用后 $s-t$ 曲线发生变化, 在受荷过程中土坡微结构发生变化, 剪应力使颗粒间联结强度弱化, 引发颗粒发生相互错位、滑移, 如此连续不断地蔓延, 土颗粒的主轴发生偏转, 导致土体发生蠕变, 产生较大的、不可恢复的塑性变形。土体蠕变过程是抗剪强度降低的过程, 是土体颗粒间联结损伤的过程。黏性土蠕变所产生的位移变形, 应包括弹性变形和塑性变形。

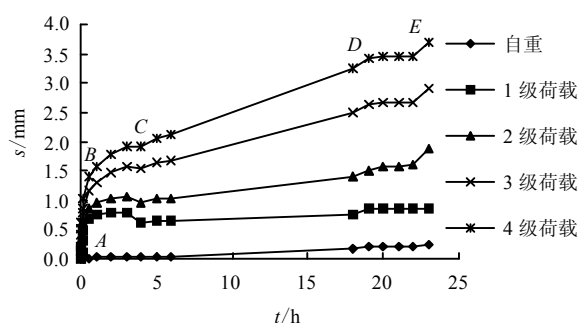


图4 荷载作用下黏性土坡蠕变曲线
Fig.4 Creep curves of clayed soil slopes under loading

第1~4级荷载作用下的蠕变曲线, 明显可分为4个阶段: 初始段 AB 为线性段, 受荷的瞬间土体呈现瞬时弹性阶段; BC 段为非线性阶段, 为不稳定蠕变, 此段虽短, 但变化幅度大, 土的塑性变形是颗粒之间滑移形成的, 必然引起颗粒间重新组合及排列, 当土体局部进入剪切破坏状态时必然引起塑性变形, 土微结构的变化是导致塑性变形的根本原因。土颗粒在受剪过程中, 颗粒间相互滑移、颗粒的主轴方向调整为平行于剪切的方向, 表现出不稳定蠕变; CD 段为稳定蠕变阶段, 基本上是等速变形, 为直线段, 此段较长, 经过调整后颗粒间排列趋向定向性, 颗粒间形成新的塑性联结, 在剪切变形过程中土颗粒之间的内能不断的损耗, 颗粒间的联结强度不断降低, 蠕变继续增加; DE 段为加速蠕变阶段, 曲线有明显的上翘趋势, 意味着土微结构损伤破坏在加速, 实际上土体的稳定蠕变最终必然过渡到破坏阶段。

由图可看出: 在第1级荷载作用下蠕变曲线类似于自重作用下的曲线, 两条曲线之间的增量从头至尾基本是等量的; 第2级荷载作用下蠕变曲线的斜率变大, 特别是第4级荷载作用下的蠕变曲线很陡, 土坡竖向蠕变随着荷载的增加而增大, 土的蠕变增加速率也随着荷载增加而明显增大, 土的蠕变过程就是土的损伤过程, 也是土微结构能量损耗的

过程,所以土的损伤随着荷载的增加而增大。同样,土坡的损伤随着时间的延续而增大,当土的应力水平较高时,土坡会在一定的承载时间内,以不易察觉地持续蠕变而发展到蠕变破坏,土体结构强度弱化的内摩擦可以使部分或全部蠕变变形能损耗,使土微结构产生畸变,导致土结构颗粒之间相互运动,它是土体产生塑性变形、蠕变、滑动剪切破坏的关键因素。

3.4 土坡竖向位移等值线分析

图 5 分别表示在第 2~4 级荷载作用下土坡竖向位移等值线,从宏观上反映土坡在不同荷载作用下竖向位移变化规律、大小分布及发展趋势,由图可看出:荷载作用下土坡竖向位移最大值在坡顶,并随着荷载的增加而增大,竖向位移随着深度的增大而逐渐减小。

在第 2、3 级荷载作用下等值线沿着斜坡面方向向下延伸的曲线型,特别是第 2、3 级荷载作用下,靠近坡顶处曲线下凹突出明显,在第 4 级荷载作用下坡顶的等值线分布明显发生变化,等值线沿着斜坡面向下分布平缓,曲线下凹不明显了,即在加荷初期对靠近坡顶以下沿着斜坡面的影响深度大,随着荷载的逐渐增加,土坡位移的总趋势自上向下向坡底延移。

人工填土土坡结构单元为颗粒较大团聚体散体材料,土坡在外荷载作用下直接影响黏性土微结构的环境能量场,图 5 显示出在各级荷载作用下由于土坡内在微结构环境能场变化而引起竖向位移的变化过程,形象地展示土坡竖向位移的发展、延伸及演变的过程。

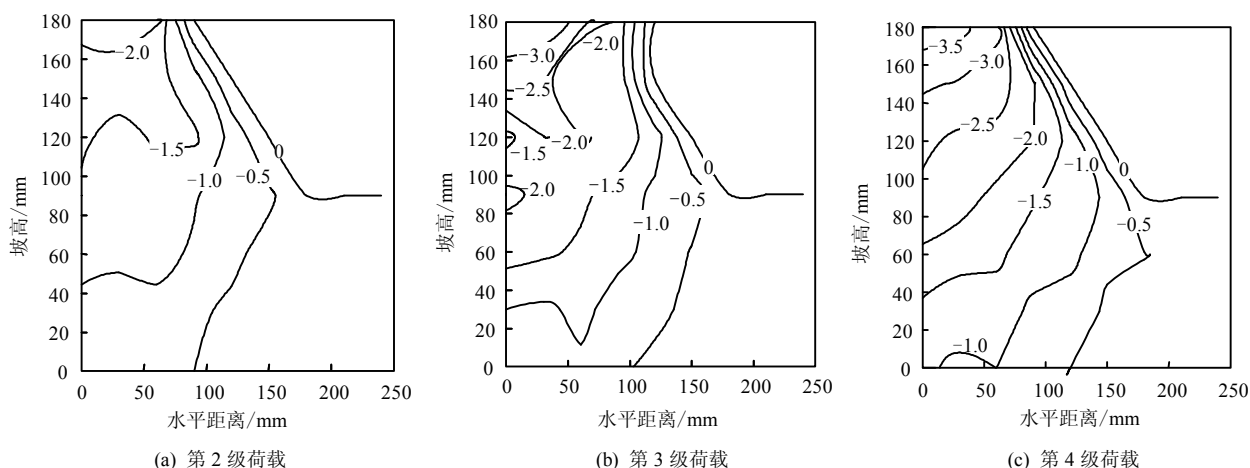


图 5 荷载作用下黏性土坡竖向位移等值线 (单位: mm)

Fig.5 Isopleth of vertical displacements of clayed soil slopes under loading (unit: mm)

3.5 土坡最大剪应变等值线分析

图 6 表示荷载作用下土坡最大剪应变 $\gamma_{\max}$ 等值线分布图。由图可以看出:①荷载作用下土坡最大剪应变 $\gamma_{\max}$ 的最大值在坡顶,等值线分布较密,斜坡面处的最大剪应变 $\gamma_{\max}$ 分布密集,坡底处的等值线分布稀疏较杂乱。②随着应力水平的逐渐增大,对土坡的稳定性越不利,土坡坡顶和斜坡面由于微结构损伤出现裂缝、裂纹,使土的应力状态发生变化,剪应变使颗粒间的联结力遭到弱化直至破坏,颗粒或结构单元发生位移、错动,颗粒之间又形成新的塑性联结,颗粒间联结损伤也是逐步完成的,随着土微结构的损伤逐渐积累,形成连续不断地迁移、蔓延,使土的剪切变形随时间而延长,土的抗剪强度降低,土坡内出现应力薄弱区,从而土微结构损伤加剧,最终形成从坡顶自上而下沿着斜坡面

向坡底延伸潜在的最危险滑动面。

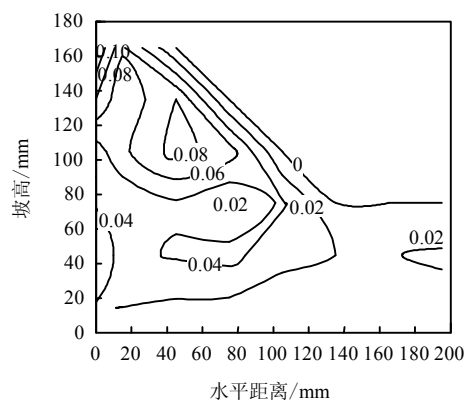


图 6 荷载作用下黏性土坡最大剪应变 $\gamma_{\max}$ 等值线
Fig.6 Isopleth of maximum shear strain $\gamma_{\max}$ of clayed soil slopes under loading

3.6 土坡大主应变 ε_1 等值线分析

图 7 表示荷载作用下土坡大主应变 ε_1 等值线分布图。由图可以看出: ①大主应变 ε_1 最大值在坡顶并分布较密, 斜坡面处的大主应变 ε_1 分布也较密。②大主应变 ε_1 随着荷载逐渐增大而增加, 并呈现局部的不均匀性、不连续性, 对土微结构发生各向异性损伤。随着荷载的逐渐增大, 土坡内不同部位大主应变相应增加, 土微结构损伤也不断增加, 造成土坡内各处的剪切损伤各向异性更加明显。

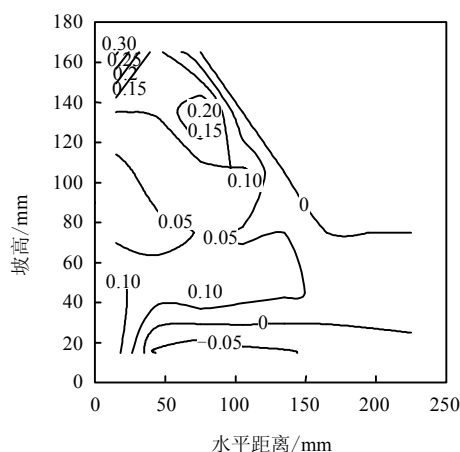


图 7 荷载作用下黏性土坡大主应变 ε_1 等值线
Fig.7 Isopleth of major principal strain ε_1 of clayed soil slope under loading

4 土坡裂缝-土微结构强度弱化及损伤分析

(1) 土坡为人工填土结构, 与原状土的结构形态不同, 原状黏性土颗粒联结强度相对较大, 而填土破坏了原始结构形态, 主要结构单元团聚体颗粒较大, 因而颗粒间的联结强度变弱, 填土结构单元体的凝聚力主要取决于填土的密实度和含水率。黏性土坡的稳定性不仅取决于微结构晶体结构类型, 而且在很大程度上取决于结构畸变。土坡坡顶在外荷载作用下土体结构变为动态应力-应变-强度场, 只要外力持续不断变化, 这个动态系统就会不断运作, 土结构内部颗粒间的联结和排列重新调整、定位, 其内部就一直处于相应的畸变, 畸变的过程就是土体损伤的过程, 在这个过程中土体出现张拉裂缝, 土坡坡顶和斜坡面出现裂缝、裂纹。

(2) 土坡随着荷载的增大使土体内部各向异性加剧, 土坡内部不同部位处于不同的应力状态, 分别会出现受拉区、受压区、受剪区。当单元的最大拉应力达到填土单元结构颗粒间的抗拉强度时, 土颗粒间发生拉伸破损; 当单元的最大剪应力达到

填土单元结构颗粒间的抗剪强度时, 土颗粒间就会出现大的错位滑移, 在颗粒间发生剪切破损; 当单元的最大拉主应变达到极限应变时, 填土结构单元完全失去承载能力, 填土结构单元损伤而发生裂缝, 土坡在这样复杂的应力状态下承受拉、压、剪的作用, 拉、压、剪均会产生张拉裂缝, 应力的不均匀引发变形的不均匀性, 特别对裂隙的尖端, 会产生应力分布的奇异性, 使裂隙不断扩展、扩容, 形成空穴, 导致土的抗剪强度更加各向异性, 抗剪强度急剧降低, 土微结构损伤, 土体的损伤过程就是张拉裂纹的过程, 即裂纹扩展、延伸及相互联结而贯通形成破损带, 成为应力薄弱区, 土坡最终会以剪切滑移的形式破坏。

5 结 论

(1) 随着荷载的逐渐增大, 土坡内的抗剪强度逐渐降低, 土微结构逐渐受到损伤, 土坡发生渐进性的破坏, 而现有土力学理论不能解决土渐进性破坏的问题, 室内模型试验模拟荷载作用下黏性土坡随时间延续的蠕变、裂缝及潜在的滑动面等等, 演绎了土坡微结构复杂多变环境能场的动态变化、演变及发展的过程, 是一个较为理想的方法。

(2) 随着应力水平的提高, 土坡的蠕变不断增加, 土坡的蠕变过程实质上是土的损伤过程, 是抗剪强度降低的过程, 是土微结构能量损耗的过程, 损伤各向异性更加明显。土坡的蠕变和损伤积累随着加荷时间的延续而增大。

(3) 在荷载作用下坡顶处竖向位移最大, 坡顶和斜坡面处的损伤程度较大, 出现裂缝, 坡顶的竖向位移大于侧向位移, 相反坡底处的侧向位移大于竖向位移。

(4) 在荷载作用下引发土坡内在微结构环境能场相应变化, 促使土颗粒移位、错动、偏转及滑移, 整个土坡的位移由坡顶沿着斜坡方向自上向下到坡底黏土层, 然后在坡底自右向左即向坡外延伸, 潜在着最危险圆弧状滑动面。

(5) 在荷载作用下使土坡内部经历极复杂的应力状态, 拉、压、剪均会使土坡产生张拉裂缝, 应力不均匀引发变形的不均匀性, 特别对裂隙的尖端, 会产生应力分布的奇异性, 形成空穴, 土体的损伤过程就是张拉裂纹的过程, 是裂纹的扩展、扩容、延伸及加深、相互联结而贯通形成破损带, 成为应力薄弱区, 诱发土坡不稳定因素会牵制土坡潜在的滑动面, 土坡最终会以剪切滑移的形式破坏。

参考文献

- [1] 胡柳青, 李夕兵, 温世游. 边坡稳定性研究及其发展趋势[J]. 矿业研究与开发, 2000, 20(5): 7—8.
HU Liu-qing, LI Xi-bing, WEN Shi-you. The stability research of slope and its developing trend[J]. **Mining Research and Development**, 2000, 20(5): 7—8.
- [2] 郑孝玉. 滑坡预报研究方法综述[J]. 世界地质, 2000, 19(4): 370—374.
ZHENG Xiao-yu. Summary on the method of prediction to landslide[J]. **World Geology**, 2000, 19(4): 370—374.
- [3] ZHU D Y, LEE C F. Explicit limit equilibrium solution for slope stability[J]. **International Journal for Numerical and Analytical method in Geomechanics**, 2002, 26(15): 1573—1590.
- [4] 王震宇, 孟陆波. 滑坡预报的多元回归分析方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 21—23.
WANG Zhen-yu, MENG Lu-bo. The multivariate regression analysis method for landslide prediction[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2003, 14(3): 21—23.
- [5] MICHALOWSKI R L. Three dimensional analysis of locally loaded slopes[J]. **Geotechnique**, 1989, 39(1): 27—38.
- [6] KUMAR J, SAMUI P. Stability determination for layered soil slopes using the upper bound limit analysis[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2006, 132(24): 1803—1819.
- [7] 易念平, 吴恒, 张信贵. 确定边坡最危险滑动面的计算机模拟[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 326—330.
YI Nian-ping, WU Heng, ZHANG Xin-gui. Computer simulation for identifying the most dangerous sliding surface[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2002, 10(3): 326—330.
- [8] 王平, 刘东升. 简单土坡稳定可靠度计算方法的研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 494—498.
WANG Ping, LIU Dong-sheng. Calculative research on reliability of simple soil slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 494—498.
- [9] 夏元友, 李梅. 边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1087—1091.
XIA Yuan-you, LI Mei. Evaluation method research of slopes stability and its developing trend[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 1087—1091.
- [10] ERIK L J, BURRILL F, STEPHEN G. Quasi-three-dimensional slopes stability analysis method for general sliding bodies[J]. **Journal of Geotechnical Geoenvironment Engineering**, 2004, 130(6): 551—560.
- [11] SRBULOV M. Analyses of stability of geogrid reinforced steep slopes and retaining walls[J]. **Computers and Geotechnics**, 2001, 28(3): 255—268.
- [12] 唐天国, 万星, 刘浩吾. 高边坡安全监测的改进 GM 模型预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 307—312.
TANG Tian-guo, WAN Xing, LIU Hao-wu. Improved GM model for safety monitoring high rock slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(2): 307—312.
- [13] 马宗源, 廖红建, 祁影. 复杂应力状态下土质高边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 328—334.
MA Zong-yuan, LIAO Hong-jian, QI Ying. Stability analysis of high soil slope under complex stress state[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp. 2): 328—334.

中国科学家冯夏庭出任国际岩石力学学会主席

本报讯(记者郑欣荣)从中科院武汉岩土力学研究所获悉, 该所岩土力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭研究员在近日举行的第 12 届国际岩石力学大会上, 出任国际岩石力学学会 (ISRM) 主席 (2011—2015 年)。

国际岩石力学学会成立于 1962 年 10 月, 是世界岩石力学研究的顶尖学术团体, 在全球 48 个国家拥有约 6 000 名会员。冯夏庭出任国际岩石力学学会主席, 成为该学会成立以来担任主席职务的首位中国人, 也是中国科协所属全国学会中出任国际学会主席的第三人。

47 岁的冯夏庭长期从事岩石力学智能分析方法及其工程应用研究。他曾任中科院武汉岩土力学研究所所长, 被科技部聘为 973 项目首席科学家。

冯夏庭在接受采访时透露, 作为一名中国科学家, 能通过激烈的竞争成功出任这个国家科学学会组织主席, 靠的是中国的国家魅力。