

# 降雨条件下的基坑边坡渗流场模拟<sup>\*</sup>

刘红岩

王媛媛 秦四清

(中国地质大学(北京)工程技术学院 北京 100083)

(中国科学院 工程地质力学重点实验室 北京 100029)

**摘 要:** 在对多孔介质中的饱和-非饱和渗流数学模型简要分析的基础上,对影响渗流有限元计算分析结果的一些参数选取方法进行讨论,如非饱和土的水土特征曲线、水力传导系数及毛细水头等。利用相关程序对降雨条件下的基坑边坡内部渗流场进行模拟,分析地下水位线、坡体饱和度、压力水头及坡体内不同位置处的渗流速度随降雨时间的变化规律。模拟结果与实际情况比较吻合,可为基坑边坡稳定性的分析提供参考依据。

**关键词:** 降雨 基坑边坡 饱和-非饱和渗流 模拟

## SIMULATION OF SEEPAGE FIELD IN EXCAVATION SLOPE DURING RAINFALL

Liu Hongyan

(College of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing) Beijing 100083)

Wang Yuanyuan Qin Siqing

(Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100029)

**Abstract :** On the basis of briefly analyzing the mathematical model for the saturation-unsaturated seepage flow of porous medium, the selection method of such parameters affecting the seepage finite element calculation result as water and soil characteristic curve, hydraulic conductivity and capillary water pressure is discussed. In the end, the relative program is used to simulate the seepage field inside the excavation slope during rainfall, and the change law of the underground water table, saturation of the slope, pressure head and seepage velocity of different positions inside the slope is analyzed. The simulation results are rather in agreement with the practical condition, which can provide the evidence for the stability analysis of the slope.

**Keywords :** rainfall excavation slope saturation-unsaturated seepage flow simulation

大量的试验资料和研究表明<sup>[1-3]</sup>,对于同样的土质,非饱和土中由于存在基质吸力的缘故,其抗剪强度相对很高,一般来说,非饱和土的抗剪强度大于饱和土的抗剪强度,但当非饱和土含水率增大时,基质吸力会大幅降低,土体强度会大幅下降,进而导致土坡的稳定性降低。

降雨对边坡稳定性的影响主要表现为:雨水入渗使得坡体含水量增加,结果导致坡体下滑力增大,土体强度参数降低;降雨从坡体表面下渗,使其暂态饱和区不断扩展,地下水位不断升高,滑带饱水;同时渗流作用所产生的附加渗透力加大了边坡的下滑力,这种瞬态的地下水运动及其所产生的暂态附加水荷载常常成为非饱和土边坡在雨季失稳的控制因素。另外一个不可忽略的重要因素就是降雨导致土中基质吸力的丧失,从而使土体或岩体软弱夹层抗剪强度大幅度降低。

降雨入渗造成的边坡稳定性降低问题是由典型的饱和渗流与非饱和渗流共同作用而致,因此,导致

边坡稳定性降低的根本原因是边坡内部渗流场发生了变化。而以往对此问题的分析大多集中在由降雨导致的边坡稳定系数降低的计算方面<sup>[4-6]</sup>,很少有文献对导致边坡稳定性降低的根本原因——边坡内部渗流场的变化特征如边坡饱和度、压力水头、质点的渗流速度等进行深入的研究。

因此本文针对以往文献研究中存在的不足,从土体饱和-非饱和渗流共同作用的角度出发,重点讨论在降雨条件下基坑边坡内的渗流场问题,主要采用数值计算的方法对降雨条件下基坑边坡内部的渗流场特征如饱和度、地下水位线、质点流速及压力水头等特征量随计算时间的变化规律进行分析研究,以探讨边坡在降雨条件下稳定性降低的根本原

<sup>\*</sup> 中国博士后科学基金资助项目(20060400498)。

第一作者:刘红岩 男 1975年出生 博士后 讲师

E-mail: lhyan1204@126.com

收稿日期:2007-03-11

因。

## 1 饱和-非饱和渗流的基本微分方程

假设土骨架不变形,水为不可压缩流体,那么任意取流场中的一个单元进行分析,根据能量守恒原理,在非饱和土二维非稳定流情况下,流入流出单元的水量变化等于该单元内水量随时间的变化率,由此可推导出饱和-非饱和渗流的基本微分方程<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{wx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{wy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \rho_w g m_2^* \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $\rho_w$  为水的密度;  $k_{wx}$ 、 $k_{wy}$  分别为非饱和土在  $x$  和  $y$  方向上的渗透系数;  $h$  为总水头,等于压力水头和位置水头之和;  $m_2^*$  为与基质吸力 ( $u_a - u_w$ ) 变化有关的水的体积变化系数,即土-水特征曲线斜率的绝对值,其表达式为:  $m_2^* = -\frac{\partial \theta_w}{\partial (u_a - u_w)}$ , 其中  $\theta_w$  为非饱和土的体积含水量。

当土体饱和时,土-水特征曲线变化很平缓,  $m_2^*$  近似为零。故式(1)可作为描述饱和-非饱和渗流的控制方程。

## 2 基坑边坡渗流场模拟及结果分析

非饱和渗流场的计算远比饱和渗流场复杂,这不仅表现在非饱和渗流方程比饱和渗流方程复杂,而且在非饱和渗流问题中的材料参数及计算参数的选取也远比饱和渗流问题复杂,如土水特征曲线、渗透系数及毛细管水头的选取等都是影响渗流计算结果的重要参数,这些参数选取的合理与否将直接决定计算结果的可靠性。本文利用加拿大 Geo-slope 公司出品的软件 Geo-slope/seep/w, 首先在对影响非饱和渗流计算结果的参数选取方法进行探讨的基础上,对基坑边坡在降雨条件下的渗流场特征进行计算分析。

### 2.1 土水特征曲线及非饱和渗透系数函数

土水特征曲线是反映毛细管压强或毛细管水头与土壤体积含水量或饱和度的关系曲线,它表明有多少水由于毛细力克服重力而被保持在土壤中,也就是说这些曲线表示非饱和带中水分的能量与数量间的关系,反映了土体的持水能力。而非饱和渗透系数则反映土体在非饱和区导水的快慢。这两个参数是表述土体非饱和渗流特性的重要参数。在目前的研究阶段,这两个指标还很难通过理论分析的方法直接获得,而都是通过试验的方法来确定,试验方法又分为以室内试验和野外现场试验为主的直接法和在少量试验数值的基础上通过相应的数学模型来

估计的间接法。直接试验方法由于费用高、历时长而且可重复性差,难以得到一般规律性的结果;目前普遍采用的间接方法,是利用少量的试验数据根据相应的数学模型来获得水土特征曲线及渗透系数函数。前人研究表明,在土水特征曲线中,土的基质吸力是随着含水量的减小而逐渐增加的,且二者的变化关系曲线呈反“S”型。

Geo-slope/seep/w 程序提供了多种水土特征曲线估计的数学模型,其中 VG 模型与实测数据线型十分相近,而且参数意义明确,所以至今仍为最常用的模型之一<sup>[8]</sup>。因此本文主要选用 VG 模型来进行非饱和渗流计算参数的估计。

在本文中取土体的体积含水量为 0.3,渗透系数为  $1.0 \times 10^{-5}$  m/s。其水土特征曲线及渗透系数函数曲线分别如图 1 和图 2 所示。

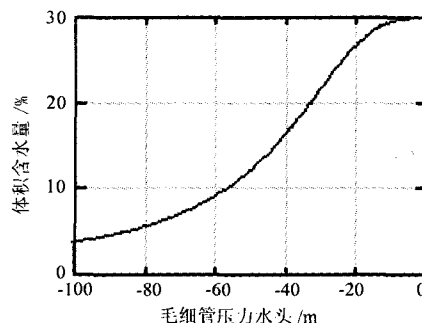


图1 土水特征曲线

Fig.1 Soil-water characteristic curve

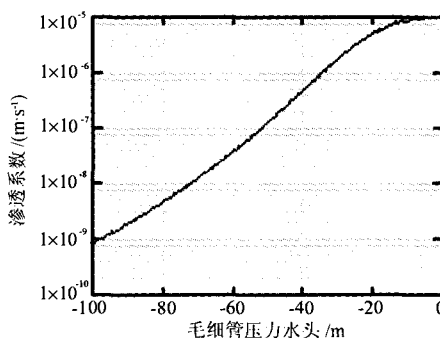


图2 渗透系数函数曲线

Fig.2 The functional curve of penetration coefficient

### 2.2 毛细管压力水头的确定

分布在土颗粒内部相互贯通的孔隙,可以看作是许多形状不一、直径互异、彼此连通的毛细管。而由于表面张力的作用,毛细管内的水会被提升到自由水面以上一定高度处,而被毛细水所占据的这一部分土体区域称为毛细区域,也称为非饱和区,非饱和渗流也就主要发生在这一区域。毛细区域内的水压力与一般静水压力的概念相同,它与水头高度

成正比。在自由水位面以下为压力,自由水位面以上为拉力,称为毛细压力,毛细压力呈倒三角形分布,弯液面处最大,自由水面处为零。

对于不同的土体类型、不同的孔隙度,毛细水上升的高度是不同的,相应的非饱和渗流发生的区域也不相同,并最终导致渗流计算结果的差异。因此,合理确定毛细水的上升高度,也是保证计算结果正确的重要因素之一。一般情况下,在砂土中土颗粒的直径愈小,孔隙直径(即毛细管直径)愈细,则毛细水的上升高度愈大。由于在实际工程中毛细水的上升高度是比较难以确定的,因此,在实际应用中可按文献[7]中针对不同类型的土所给出的毛细水上升高度值作为参考,进行估算,在本例中取毛细水升高高度为5m。

### 2.3 计算模型及边界条件

计算模型如图3所示,仅取左边的一半模型进行计算。由于本文的主要目的是考虑降雨对基坑边坡内渗流场的影响,因此未考虑降雨对基坑底部的影响。所采用的边界条件为:取基坑边坡上部边界为降雨入渗边界,取降雨强度为 $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ,降雨时间和计算时间均为240h。其余边界均为自由边界。取初始地下水线距上部地表20m处,且为水平。该降雨类型相应于实际情况中的均匀连续降雨,且降雨时间较长,因为这种工况对边坡的稳定性影响最大,所以本文选择这种工况进行研究,同时为了更清楚地研究基坑边坡内的渗流参量随降雨时间的变化规律,本文选择了大于现实降雨中的降雨时间。

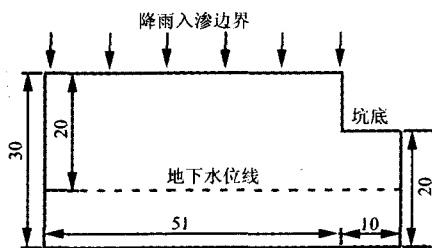


图3 降雨渗流计算模型 m

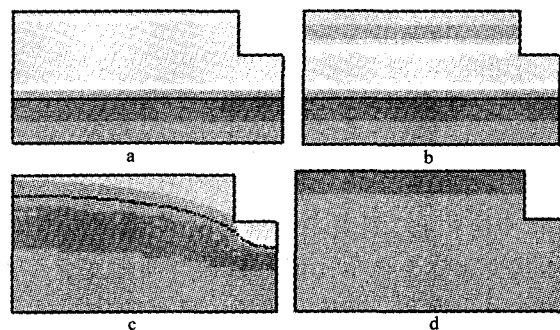
Fig.3 Calculation model of rainfall seepage

### 2.4 计算结果及分析

同时,为了更好地考察在某一纵剖面上渗流参数的变化情况,取距左边界30m处的一个纵断面X进行分析。

#### 2.4.1 饱和度变化情况

从图4~图6可以看出,随着降雨的进行,基坑边坡的上表面首先由于雨水的渗入,导致坡体上部最先形成暂态的饱和区,而由于下部在地下水位面以下,坡体已经处于饱和状态,所以坡体出现上下部



a - 降雨1天时; b - 降雨4天时;  
c - 降雨7天时; d - 降雨10天时

图4 饱和度变化云图

Fig.4 The cloud chart of change in saturation

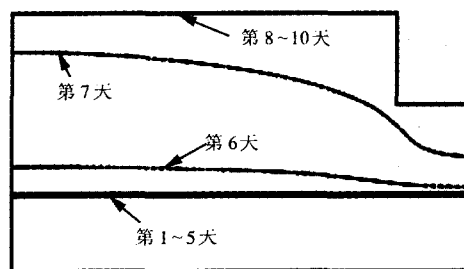
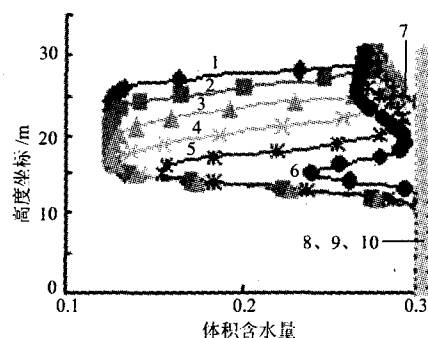


图5 地下水位线变化情况

Fig.5 Change in underground water



1 - 第1天; 2 - 第2天; 3 - 第3天; 4 - 第4天; 5 - 第5天;  
6 - 第6天; 7 - 第7天; 8 - 第8天; 9 - 第9天; 10 - 第10天

图6 断面X上的体积含水量随纵坐标的变化关系

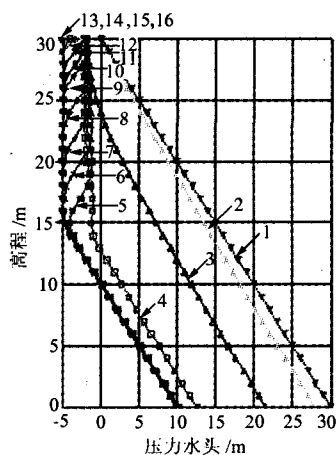
Fig.6 Change in water content by volume with  
coordinate at section X

分饱和,中间部分不饱和的情况,而随着降雨的继续,雨水由坡体上部逐渐下渗,并且导致地下水位线的逐渐上升,从而形成由上下向中间逐渐饱和的情况,并最终导致坡体的全部饱和。地下水位线的上升规律可以由图5明显看出,即随着降雨的进行,地下水位线逐渐上升直至达到坡体表面,使坡体完全达到饱和。不过由图5还可以发现,在第1天~第5天地下水位线变化很小,而在第6天~第7天则变化很大,这主要是由于降雨是由坡体顶部向下入渗

的,在初始阶段降雨主要被坡体上部的土体吸收,因而降雨渗入到地下水位线处所需的时间较长,而后由于上部的土体已经部分饱和,所以水位线上升速度较快。同时由图 6 可以看出,坡体中部的饱和度是随时间的推移而逐渐增加的。

#### 2.4.2 压力变化情况

由图 7 可以看出,在开始时刻即  $t = 0$  时,在初始地下水位线即 10m 处,压力水头为零,而由地下水位线向下,压力水头为正,且呈线性增加的趋势;而在地下水位线以上,压力水头则为负值,因为在本算例中假定毛细水所能上升的最大高度为 5m,所以其绝对值在 10m 处为最小,而在 15m 处达到最大,这是考虑负孔隙水压力,即水沿着自由水面以上的毛细管水上升后而产生张力的结果。而在基坑坡顶表面处,最初压力水头也为负值,即通常所说的基质吸力,边坡在最初时刻之所以比较稳定,就是因为有基质吸力的作用,而随着降雨的进行,坡顶处的基质吸力逐渐消失,到最后时刻达到零,即完全丧失基质吸力,基质吸力丧失是导致边坡在降雨后容易产生失稳的一个重要原因。



1- $8.64 \times 10^5$  s; 2- $6.91 \times 10^5$  s; 3- $6.05 \times 10^5$  s; 4- $5.18 \times 10^5$  s;  
5- $4.32 \times 10^5$  s; 6- $3.46 \times 10^5$  s; 7- $2.59 \times 10^5$  s; 8- $1.73 \times 10^5$  s;  
9- $0.86 \times 10^5$  s; 10- $0.66 \times 10^5$  s; 11- $0.33 \times 10^5$  s; 12- $0.16 \times 10^5$  s;  
13- $0.08 \times 10^5$  s; 14- $0.04 \times 10^5$  s; 15- $0.02 \times 10^5$  s; 16-1s

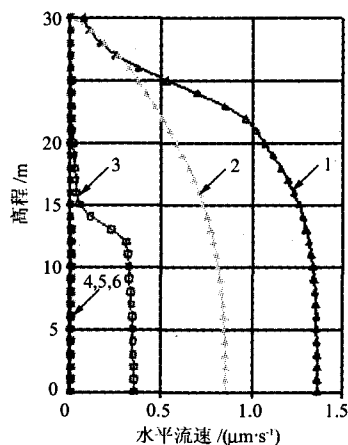
图 7 断面 X 上的压力水头

Fig. 7 Water head at section X

#### 2.4.3 流速变化情况

同样取  $x = 30$ m 竖向剖面上的流速变化规律进行分析,由图 8、图 9 可以看出,随着降雨的进行,水平和竖向流速都发生着不同程度的变化,且呈现出不同的变化规律。在初始及最终时刻,由于都不存在水头差,所以都没有渗流发生,其水平和竖向流速均为零。而渗流主要发生在中间时刻,即存在水头差的情况下,当  $t = 6.05 \times 10^5$  s 时,水平流速达到最

大,而且水平流速的变化规律为在基坑边坡顶部最小,然后随着由顶部至底部距离的增加而逐渐增加,在边坡底部达到最大。竖向流速的变化规律与水平流速有所不同,随着降雨的进行,坡度处的竖向流速逐渐增加,并在  $t = 5.18 \times 10^5$  s 时达到最大,然后随着由顶部至底部距离的增加而迅速减小。

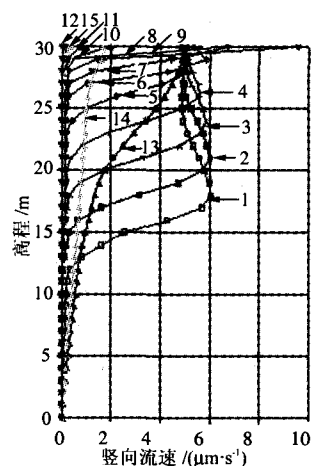


1- $6.05 \times 10^5$  s; 2- $6.91 \times 10^5$  s; 3- $5.18 \times 10^5$  s;

4- $4.52 \times 10^5$  s; 5- $8.61 \times 10^5$  s; 6-1s

图 8 断面 X 上的水平流速

Fig. 8 Horizontal flow speed at section X



1- $5.18 \times 10^5$  s; 2- $4.32 \times 10^5$  s; 3- $3.46 \times 10^5$  s; 4- $2.59 \times 10^5$  s;

5- $1.73 \times 10^5$  s; 6- $0.86 \times 10^5$  s; 7- $0.66 \times 10^5$  s; 8- $0.33 \times 10^5$  s;

9- $0.16 \times 10^5$  s; 10- $0.08 \times 10^5$  s; 11- $0.04 \times 10^5$  s; 12-1s;

13- $6.04 \times 10^5$  s; 14- $6.91 \times 10^5$  s; 15- $8.64 \times 10^5$  s

图 9 断面 X 上的竖向流速

Fig. 9 Vertical flow speed at section X

### 3 结 语

降雨条件下的边坡稳定性问题是关系到基坑边坡安全性的一个重要问题,尤其是对于降雨周期比较长且降雨强度比较大的地区,该问题显得尤为重

(下转第 72 页)

试件 PECC 的延性系数介于试件 CC、PEC 之间, 相比试件 CC 提高了 37%。混杂纤维的破坏有一缓慢发展过程和应力重分布过程, 当极限应变小的碳纤维布先部分破坏后, 聚乙烯纤维承受碳纤维传递来的应力, 并抑制碳纤维裂纹的发展, 混杂纤维逐渐破坏, 被约束柱表现出较好的变形性能。

### 3 结 论

1) 聚乙烯纤维布、碳纤维布、芳纶纤维布约束混凝土柱承载力相比未约束柱分别提高了 38%、167% 和 159%, 聚乙烯纤维布对混凝土柱承载力的提高程度低于碳纤维布、芳纶纤维布。

2) 聚乙烯纤维布与碳纤维、芳纶纤维布混杂约束柱的承载力相比未约束柱分别提高了 164%、154%, 接近于单一碳纤维、芳纶纤维布约束柱的承载力; 相比聚乙烯纤维布约束柱分别提高了 91%、83%。

3) 聚乙烯纤维布约束柱达到极限承载力后有应变强化现象, 其延性系数比碳纤维、芳纶纤维布约束柱分别提高了 4.5 倍、5 倍, 柱的抗变形性能明显改善。

4) 聚乙烯纤维布与碳纤维布混杂约束柱下降段

曲线呈台阶状, 其延性系数相比碳纤维布约束柱提高了 37%, 混杂效应良好, 既能充分发挥碳纤维布高强度、高弹性模量的优点, 又能发挥聚乙烯纤维布变形能力强的优势。

聚乙烯纤维具有强度高、变形性能好、耐腐蚀、价格低等优点, 是继碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维之后的新型材料, 具有广阔的应用前景。

### 参考文献

- 1 Lim Yun Mook, Wu Hwai-Chung, Li Victor C. Development of Flexural Composite Properties and Dry Shrinkage Behavior of High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites at Early Ages. *ACI Materials Journal*, 1999, 96(1): 20-26
- 2 滕锦光, 陈建飞, 史密斯 S T, 等. FRP 加固混凝土结构. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 144-185
- 3 孙秀红, 徐向东, 徐茂波. FRP 约束素混凝土短柱轴压性能的研究. *山东建筑工程学院学报*, 2005, 20(5): 1-7
- 4 吴 刚, 吕志涛. FRP 约束素混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究. *建筑结构学报*, 2003, 24(5): 1-9
- 5 金熙南, 潘景龙, 刘广义, 等. 增强纤维约束混凝土轴压应力-应变关系试验研究. *建筑结构学报*, 2003, 24(4): 47-53
- 6 熊光晶, 姜 浩, 杨建中, 等. 混杂纤维复合材料及其在混凝土梁柱加固中的应用研究. *工业建筑*, 2001, 31(9): 11-13
- 7 邓宗才, 阚德新. 高强聚乙烯纤维及其混杂纤维加固混凝土结构性能试验研究报告: [研究报告]. 北京: 北京工业大学, 2006

(上接第 53 页)

要。本文针对这一问题, 在介绍饱和-非饱和渗流数学模型的基础上, 分析了影响渗流有限元计算结果的一些相关问题, 对某边坡在降雨条件下的渗流场特征进行了模拟分析。从模拟结果可以看出, 在恒定的降雨强度下, 随着降雨持续时间的增长, 边坡顶部负压区缩小, 在边坡非饱和区局部出现由坡顶向下的暂态饱和现象。由于暂态饱和区的出现和扩大, 将使土体内基质吸力降低, 抗剪强度下降, 从而导致边坡稳定性的下降。因此, 应该尽可能地对基坑边坡顶部的土质表面实行硬化处理, 如铺设水泥等, 以防止降雨由坡顶向下入渗而造成边坡稳定性降低。

### 参考文献

- 1 梁茂田, 李顺群, 杨 庆. 非饱和土的基质吸力和张力吸力. *岩*

土工程学报, 2006, 28(7): 863-868

- 2 吴俊杰, 王成华, 李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响. *岩土力学*, 2004, 25(5): 732-736, 744
- 3 Tsaparas I, Rahardjo H, Toll D G, et al. Controlling Parameters for Rainfall-Induced Landslides. *Computers and Geotechnics*, 2002 (29): 1-27
- 4 Rahardjo H, Li X W, Toll D G, et al. The Effect of Antecedent Rainfall on Slope Stability. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2001, 39: 371-399
- 5 Casmo J M, Rahardjo H, Leong E C. Infiltration Effects on Stability of a Residual Soil Slope. *Computers and Geotechnics*, 2000 (26): 145-165
- 6 娄一清, 郑东健, 岑黛蓉. 降雨条件下边坡地下水渗流有限元分析. *水利与建筑工程学报*, 2007, 5(1): 5-7, 15
- 7 苑连菊. *工程渗流力学及应用*. 北京: 中国建材工业出版社, 2001
- 8 Van Genuchten M T. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44(2): 892-898

## ·信 息·

### 北京瑞图科技发展有限公司发起向灾区人民献爱心活动

今年入汛以来, 我国淮河、长江等流域部分地区发生特大洪水, 人民群众生命和财产遭到严重损失, 为帮助灾区人民重建家园, 渡过难关, 北京瑞图科技发展有限公司全体员工, 发起了“情系灾区, 心系灾民, 爱心无价”的捐款活动。

在公司领导号召下, 广大员工慷慨解囊, 踊跃捐款, 纷纷向灾区人民伸出援助之手, 他们通过自己的行动向灾区人民献上了一片爱心, 并由公司代表将救灾款转交中华慈善总会, 充分体现了“一方有难, 八方支援”的社会主义良好风尚。

请登陆本公司网站 [www.reit.com.cn](http://www.reit.com.cn)