

降雨入渗条件下含软弱夹层路堑高边坡 渗流特性数值分析

杨欣

(湖南尚上公路桥梁建设有限公司,湖南 长沙 410000)

摘要:为了研究含软弱夹层路堑高边坡在不同降雨条件下的渗流特性,以湖南龙(塘)琅(塘)高速公路(一标)里程桩号 K17+020 左侧含软弱夹层路堑高边坡为研究对象,基于岩土饱和一非饱和渗流理论,采用 Geo-studio 有限元软件建立含软弱夹层高边坡数值计算模型,开展了不同降雨因素条件下含软弱夹层路堑高边坡坡顶、坡中及坡底位置渗流特性研究。结果表明:当持续降雨时间一定时,不同强度降雨引起含软弱夹层路堑高边坡不同位置的孔隙水压力及体积含水率变化顺序都呈现为:暴雨>大雨>中雨;由于软弱夹层的存在,随着降雨时间的持续,降雨入渗引起该类高边坡滑坡的进程将会提前。

关键词:路堑高边坡;渗流特性;降雨;软弱夹层;孔隙水压力;体积含水率

1 引言

含软弱夹层是介于土体和岩体之间的一种特殊的介质体,物质结构相对杂乱,颗粒结合及渗透性相对岩体具有复杂及难以制样等特点,给研究者带来极大的困难。所以在山区高速公路建设及运营中,含软弱夹层边坡在降雨条件下,极易发生滑坡失稳等破坏问题,给现场施工人员及行驶车辆埋下安全隐患。

雨水是导致边坡失稳的主要诱导因素,以往研究表明大部分边坡失稳都与降雨有密切联系。目前针对降雨入渗下边坡稳定性研究主要采用以下3种方法:①数值模拟:Fei Cai采用数值模拟的方法研究了不同边界条件降雨入渗对边坡稳定性的影响,并将研究成果与统计资料对比验证了模拟的效果;付宏渊等采用二维渗流数值模拟方法,研究了降雨入渗对边坡不同位置深度孔隙水压力和边坡表层饱和层深度的影响过程,评价降雨入渗下软岩边坡的稳定性;②模型试验:Huang Ching-Chuan通过建立实际的降雨模型,研究不同降雨时间下的边坡响应问题,得出土体含水率和孔隙水压力对边坡影响最为明显;朱宝龙等采用室内试验研究废弃高速公路路堑边坡在降雨入渗下的破坏模式,得出降雨越强对边坡影响越大;③现场监测:Mark等在具体研究美国1982年1月的降水对

滑坡的影响时,得出当月降雨量大于300 mm时,边坡可能会出现滑坡失稳现象;谢妮等对甘肃某高速公路的一段路基边坡进行监测,得出降雨入渗软化路基土体,降低土体本身强度,且随着降雨持续,最终也会发生滑坡等破坏。上述研究已经取得了丰硕的研究成果,但到目前为止很少有文献研究含软弱夹层路堑高边坡的渗流问题。

该文以实际工程中含软弱夹层路堑高边坡为背景,在结合现场勘探资料及工程所在地水文地质条件的基础上,通过理论分析和数值模拟相结合的方法,对比分析在不同降雨时间与降雨强度下,降雨入渗对含软弱夹层路堑高边坡渗流场的影响。

2 饱和一非饱和渗流理论

2.1 饱和一非饱和渗流基本方程

当土中孔隙未被水充满时,发生土体的渗流称为非饱和渗流,当孔隙被水充满时,发生岩土体渗流称为饱和渗流。在忽略土颗粒骨架变形的情况下,假设水体不可压缩,以总水头 ϕ_w 为控制变量,令 $m_w = \frac{\partial \theta_w}{\partial u_w}$,则根据二维Richards渗流控制方程,可得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\theta) \frac{\partial \phi_w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\theta) \frac{\partial \phi_w}{\partial y} \right] = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} =$$

$$m_w \rho_w g \frac{\partial \psi_w}{\partial t} \tag{1}$$

式中: θ_w 为土体积含水量; ψ_w 为非饱和土总水头; ρ_w 为水的密度; u_w 为孔隙水压力; $k_x(\theta)$ 、 $k_y(\theta)$ 为非饱和土导水率; t 为时间; m_w 为比水重度; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度。

假设土体为各向同性,则 $k_x(\theta) = k_y(\theta) = k_w(\theta)$,且当土体饱和时含水率 θ_w 取饱和含水率 θ_s ,渗透系数 $k_w(\theta)$ 取饱和渗透系数 $k_s(\theta)$,且渗透系数为含水率 θ 的函数。

2.2 饱和一非饱和土渗流基本微分方程的定解条件

为了得到一个更贴近实际问题的解析解,不出现大的偏差,依据初始条件和边界条件,补充一些附加条件,才可得出微分方程在特定条件下的具体解。

根据初始渗流区水头分布情况可知:

$$\psi(x,y,t)|_{t=0}=f(x,y) \tag{2}$$

若已知区域边界上水头值,则边界条件可表述为:

$$\psi(x,y)=f(x,y)|_{(x,y)\in\Gamma_1} \tag{3}$$

式中: Γ_1 为渗流区边界; $f(x,y)$ 为已知函数表达式。

该边界条件称为第一类边界条件,又称为 Dirichlet 条件。

若已知某一部分边界单位面积上流量 q 时,则相应表达式为:

$$k \frac{\partial \psi_w}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x,y) |_{(x,y)\in\Gamma_2} \tag{4}$$

式中: Γ_2 为给定的流量边界; n 为界面外法向。

对于二维各向异性的渗流介质,边界条件可写为:

$$k_x \frac{\partial \psi_w}{\partial x} \cos(n,x) + k_y \frac{\partial \psi_w}{\partial y} \cos(n,y) = q \tag{5}$$

若是无水边界上,则 $q=0$ 时边界条件可写为:

$$\frac{\partial \psi_w}{\partial n} = 0 \tag{6}$$

该边界条件称为第二类边界条件,又称为 Neumann 条件。

3 工程概况

龙琅高速公路起于湖南省涟源市龙塘镇,止于新化县琅塘镇,连接已建成的长芷高速公路和新溆高速公路,主线全长约为 74 km,设计速度为 100 km/h。该文依托工程龙琅高速公路一标段位于涟源市、新化县两地管辖范围。以该标段里程桩号 K17+020 含软弱夹层路堑高边坡为例进行分析,由于该路堑含软弱

夹层边坡较高,构成复杂,开挖后岩石裸露,受到自然因素及人为干扰较大,且该地区降雨量较大,土石层相交位置已经出现局部滑坡失稳。

4 数值模拟与分析

4.1 数值模拟

选用 Geo-Studio 有限元软件中 SEEP/W 模块,模拟不同降雨强度和降雨持续时间下边坡的渗流。

采用 4 级台阶,第 1、2、3 级边坡坡高为 10 m,第 4 级边坡坡高为 5 m,且每级边坡坡度为 1:1,地基高为 5 m。综合考虑计算精度和计算时长,确定计算网格以 1 m 为标准,划分单元数 1 080 个,节点数 1 133 个;并在路堑边坡模型的坡顶(3,39) m、坡中(17,25) m 和坡底(31,11) m 位置分别设置了监测点,如图 1 所示,各土层参数的选取采用现场原位试验及室内试验得到的参数,如表 1 所示。

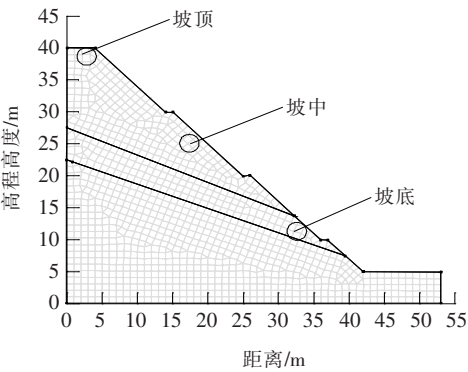


图 1 有限元计算模型

表 1 岩土力学参数

岩土名称	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模 量/MPa	泊松比
粉质黏土	20	18.0	13.70	150	0.49
软弱夹层	22	24.2	16.22	5 000	0.35
岩石	25	25.0	40.00	42 000	0.22

根据当地气象统计资料,选取该地区 50 年一遇降雨标准进行分析,结合现场实际情况,考虑降雨时间和强度的因素,拟定分析方案如表 2 所示。

表 2 降雨下瞬态渗流分析方案

工况	降雨强度/(mm·d ⁻¹)	降雨时间/h
1	19	4、24、72
2	38	4、24、72
3	75	4、24、72

4.2 结果分析

研究不同降雨持续时间及强度对边坡渗流场的影响;计算分析选择 3 种工况的模拟结果进行对比,即:

分析边坡在降雨强度 19、38 和 75 mm/d,持续降雨 4、24 和 72 h 下,孔隙水压力及体积含水率等值线的变化规律,结果如图 2~9 所示。

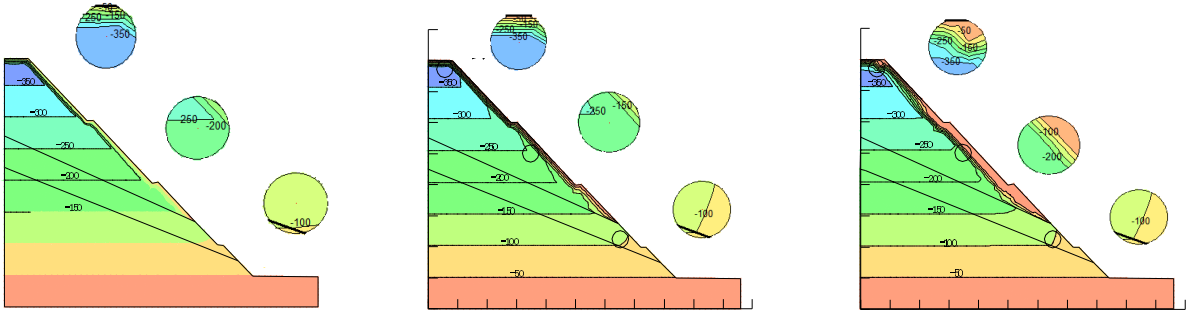


图 2 工况 1 边坡内孔隙水压力(单位:kPa)分布图

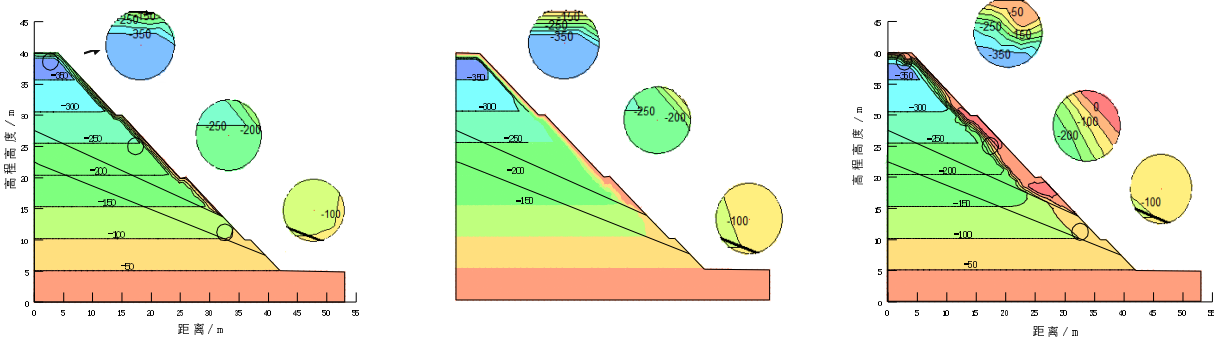


图 3 工况 2 边坡内孔隙水压力(单位:kPa)分布图

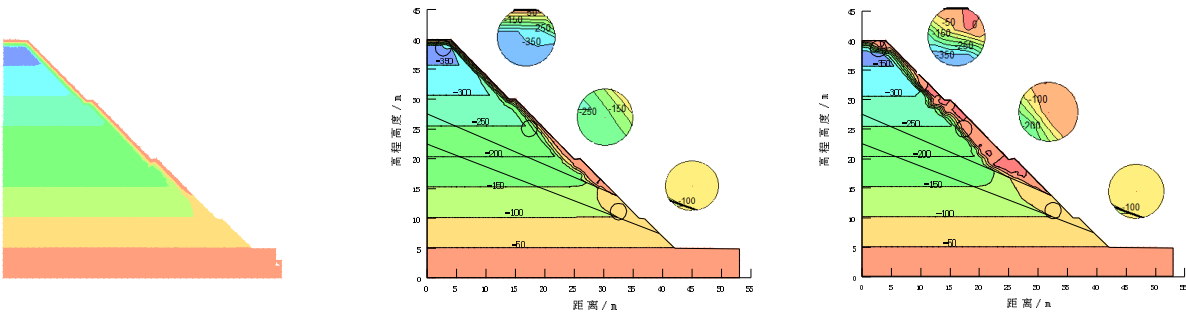


图 4 工况 3 边坡内孔隙水压力(单位:kPa)分布图

由图 2~9 可得:
(1) 随着降雨时间和降雨强度的增加,边坡上部表层土体最先受到降雨的影响,土体中孔隙水压力和体积含水率不断变化,孔隙水压力一直上升直到为 0,然后保持到降雨结束(即形成暂态饱和区,由于坡面上

不具备形成积水的条件,所以孔隙水压力无法上升到正值),降雨入渗引起边坡土体的体积含水率变化,边坡内体积含水率等值线继续向下移动,受降雨影响的范围也在不断扩大。
(2) 边坡软弱夹层处的孔隙水压力及体积含水率

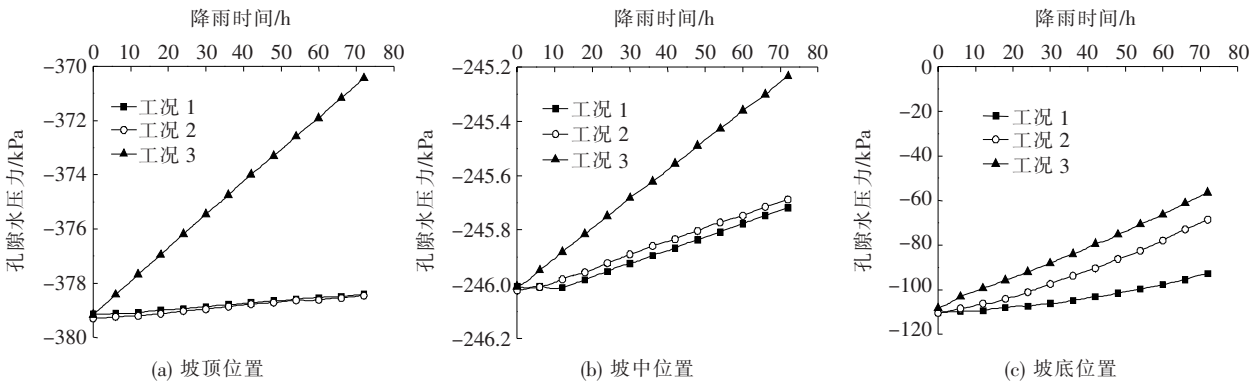


图 5 3 种工况下不同位置边坡内孔隙水压力变化曲线

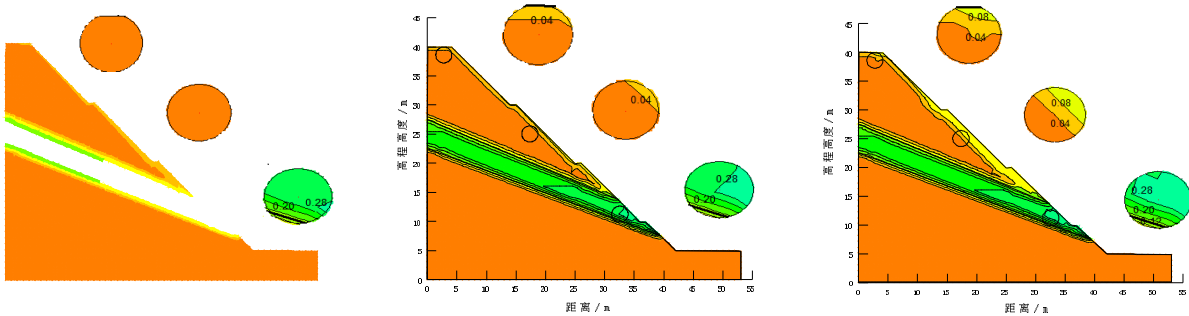


图 6 工况 1 边坡内体积含水率分布图

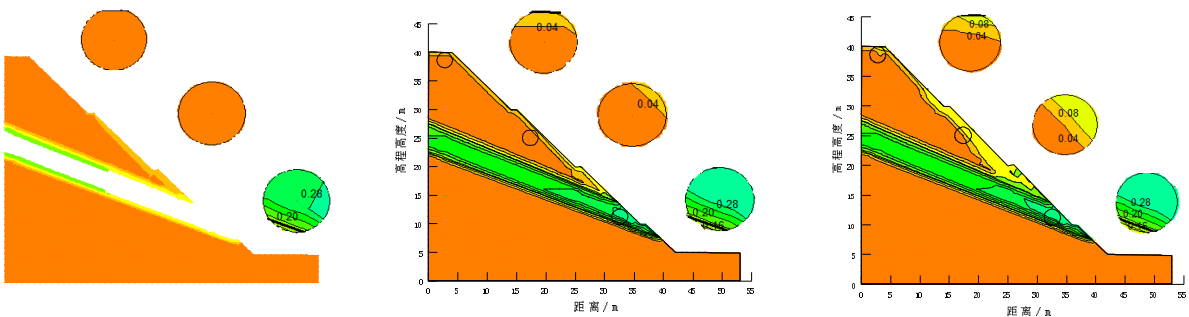


图 7 工况 2 边坡内体积含水率分布图

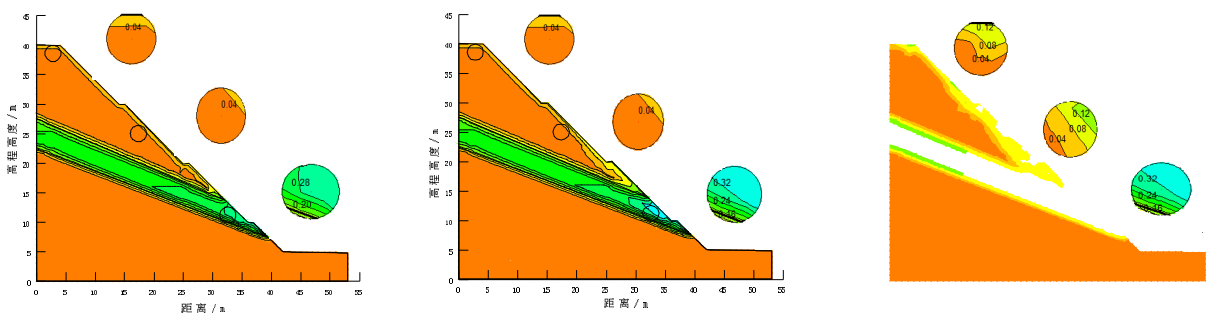


图 8 工况 3 边坡内体积含水率分布图

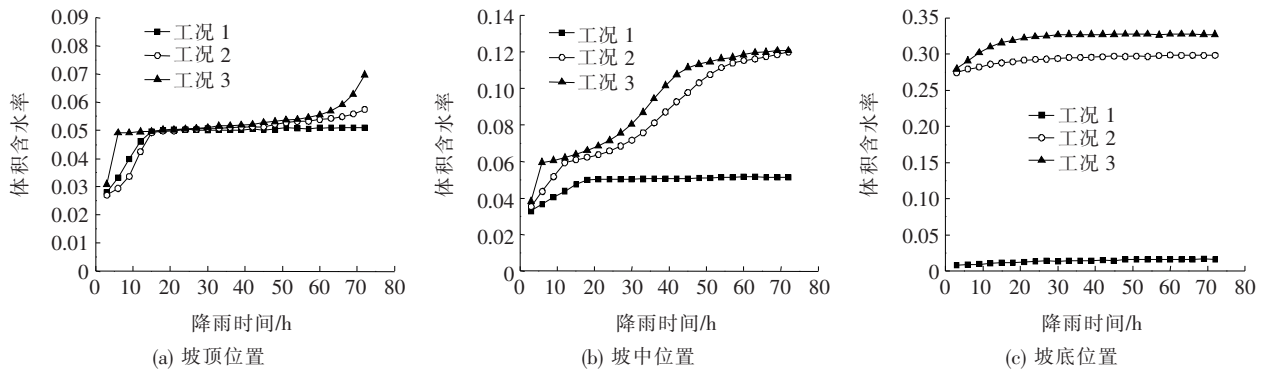


图 9 3 种工况下不同位置边坡内体积含水率变化曲线

变化相对较明显,且外侧位置软弱夹层体积含水率不断增大,孔隙水压力和体积含水率等值线也不断向内移动,上覆土体吸水自重不断增加,边坡抗剪强度将不断降低,极易加速发生滑动破坏;下部分布的岩质层边坡本身渗透系数相对非常小,在相同降雨强度及时间条件下很难入渗,但随着降雨强度和降雨时间的增大,最终也将导致孔隙水压力和体积含水率等值线缓慢移动,但对整个边坡的稳定性影响较小。

5 结论

通过建立实际工程中含软弱夹层边坡渗流模型,采用 Geo-Studio 有限元软件的 SEEP/W 模块,对降雨入渗过程中边坡渗流场变化进行数值模拟,对比分析 3 种工况下边坡孔隙水压力及体积含水率动态变化规律,可得结论如下:

(1) 在降雨入渗过程中,边坡表层土体最先受到降雨的影响,土体的负孔隙水压力及体积含水率开始增大,孔隙水压力及体积含水率等值线不断向边坡内移,受影响的范围也在不断增大,直到降雨结束,且降雨期间边坡出现了暂态饱和区。

(2) 随着降雨持续,边坡软弱夹层上覆土体不断吸水,边坡土体自重不断增加,软弱夹层外侧位置土体体积含水率不断向内移动,边坡抗剪强度将不断降低,极易加速发生滑动破坏。

(3) 随着降雨的入渗,雨水增加上覆边坡土体的含水量,上部和中部分布边坡体内孔隙水继续向内移动,受影响的范围也在不断增大,出现孔隙水压力及体积含水率等值线向边坡内移动。下部分布的岩质边坡本身渗透系数相对非常小,在相同降雨强度及时间条件下很难入渗,随着降雨强度和降雨时间的增大,也出现孔隙水压力和体积含水率等值线向内缓慢移动。

参考文献:

- [1] SLIZOWSKI J, LANKOF L. Salt, Mudstones and Rock-salt Suitabilities for Radio-Active-Waste Storage. Systems, Rheological, Properties[J]. Applied Energy, 2003, 75(1): 137-144.
- [2] 姚远, 简文星, 王璐, 等. 含缓倾软弱夹层的矿山高边坡长期稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2018(8).
- [3] 戴加祺. 含软弱夹层的岩质边坡稳定性影响因素的定性分析[J]. 西部探矿工程, 2017(12).
- [4] 王桂尧, 付强, 吴胜军. 降雨条件下路基边坡渗流分析[J]. 中外公路, 2010(5).
- [5] 翁新海, 王家鹏. 降雨入渗对非饱和边坡稳定性影响分析研究[J]. 科技通报, 2018(2).
- [6] 孙刚志. 降雨条件下非饱和土质公路边坡稳定性分析[J]. 北方交通, 2011(5).
- [7] Fei Cai, Keizo Ugai. Numerical Analysis of Rainfall Effects on Slope Stability[J]. International Journal of Geomechanics, 2004: 69-78.
- [8] 付宏渊, 杨晴霞, 蒋中明, 等. 公路边坡岩体的软化时效特性研究[J]. 中外公路, 2012(6).
- [9] Ching-Chuan Huang, Chien-Li Lo, Jia-Shiun Jang, et al. Internal Soil Moisture Response to Rainfall-Induced Slope Failures and Debris Discharge[J]. Engineering Geology, 2008, 101(3): 134-145.
- [10] 朱宝龙, 胡厚田, 等. 降雨条件下固体废弃物边坡变形及破坏模式试验研究[J]. 工程地质学报, 2004(3).
- [11] Mark R K, Newman E B. Rainfall Totals Before and During the Storm: Distribution and Correlation with Damaging Landslides [A]. Ellen S E, Wiczored G F. Landslides, Floods and Marine Effects of the Storm of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay Region [C]. California: U S Geological Survey Professional Paper 1 434, 1989: 12-26.
- [12] 谢妮, 邹维列, 严秋琰, 等. 黄土路基边坡降雨响应的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009(4).
- [13] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999(1).