库水浸泡后滑坡体中水分布的实验研究 [1)]

刘曰武　宫　欣　张大为　陈慧新
(中国科学院力学研究所工程科学部，北京 100080)

摘要 建立了室内模拟库水浸泡后滑坡体内水润湿的渗流实验装置，根据清江茅坪滑坡的地形、地貌以及岩土混合比例，填制了岩土体实验模型. 模拟了水位在涨至模拟坡体凌空面一半高度和水位漫过凌空面达到第一平台高度时，坡体内的水分布情况. 在水位降落实验过程中，岩土体部分失稳，证明了润湿滞后在降水期滑坡中起主要作用.

关键词 滑坡，水分布，润湿，水位，实验模型

1 引　言

"无水不成滑坡" 已成为目前地质灾害界对水在滑坡中作用的一个共同认识 [1~5]. 但目前对水在滑坡体中的分析研究甚少. 1980 年，Van Genuchten[6] 提出了不饱和土体中的水力传导模型，后来称为 Van Genuchten 模型，主要描述了毛细管力与水相有效饱和度的关系，即

$$P_c = P_0(S_e^{-1/m} - 1)^{1/n}$$

其中 $S_e = \dfrac{S_w - S_\gamma}{S_w}$，$P_c$ 为毛细压力，S_e 为水相有效饱和度，S_w 是相应于毛细压力 P_c 的水相饱和度，S_γ 是束缚水饱和度，m, n 为拟合参数，m 与开裂度有关.

1994 年，ReitSma 和 Kueper[7] 利用室内实验研究了裂隙岩石体中水压力和水饱和度之间的关系，所采用的模型为 Correy 拟合模型. 关系表达式为：$K_{rw} = (S_e)^4$，式中：K_{rw} 为水相的相对渗透率.

1997 年，国内张有天等 [8] 进行了降雨过程裂隙网络饱和 / 非饱和、非恒定渗流分析. 关于土石混合的岩土体中的渗流研究国内外报道较少，而边坡体多为土石混合体. 本文基于此点，利用室内模拟实验重点研究了库水涨落过程中岩土混合体边坡中水的分布情况. 实验证明，在库水上升过程中边坡体是基本稳定的，而在库水水位降落过程中，边坡体由于水的浸湿滞后，则极易失稳.

2 实验设计及实施

为了进行库水涨落过程中水渗流的实验，专门组建了相应的实验设备. 所建成的模拟实验箱体和可调整坡角的岩土体工作台如图 1 所示. 实验箱体长 2 m，宽 1.5 m，高 0.8 m. 内部平台长 1.6 m，宽 1.1 m. 箱体内可以盛水，用来模拟水库中水位. 里面的平台可以通过滑轮吊起，以模拟滑坡滑面的倾角. 最大倾角为 30°. 所使用的含水率测量仪器为荷兰 Eijkelkamp 公司生产的 ML2x 型土壤含水率测试仪和 HH2 型土壤含水率显示仪.

有了基本的实验仪器和设备之后，我们根据清江茅坪滑坡的有关数据和地质地形地貌图 (如图 2 所示)，以土石质量比为 2:1 的比例堆积成模拟岩土实验体，如图 1 所示. 石块粒径基本均匀，为 2 cm 大小不规则块状体灰岩. 土是河床的沉积土，主要成分为粉质黏土，粒径小于 0.005 mm. 该种土的剪切强度较低，黏聚力 C 为 10.4 kPa，内摩擦角 Φ 为 0.57°. 根据实际坡体的角度将岩土体工作台调整到 15°，至此实验准备工作完成.

图 1　实验箱体结构及实验模型图

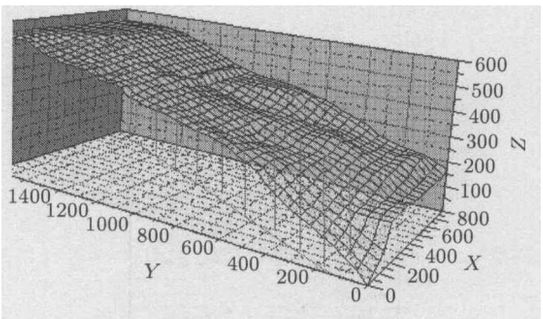

图 2　茅坪滑坡构造形貌图

总体实验设计分为 3 个部分：初次水位上升，二次水位上升，水位降落.

2.1 初次水位上升实验

水流以 50 cm^3/s 流量注入实验箱体，经过 26 min 达到凌空面的一半高度位置，停止注水进行弛豫. 2 h 后岩土体体内浸润达稳定，然后按照一定测点分布测量模拟岩土体中的含水率. 测得的结果如表 1 所示. 实验岩土体的润湿状况如图 3 所示. 根据测量结果插值得到的水分布图如图 4 所示. 对比图 3 和图 4 可以看出，水的分布与地形地貌存在一定关系.

2003–06–02 收到第 1 稿，2003–11–11 收到修改稿.
1) 中国科学院重点项目 (KJCX2-SW-1) 和 "973" 项目 (2002CB412703) 资助.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 水位升至模拟茅坪滑坡模型凌空面一半时滑坡体内含水率实验数据

Y	X			
	150 mm	350 mm	550 mm	750 mm
300 mm	35.4%	36.3%	39%	39.2%
500mm	32.5%	32.4%	35.6%	32.1%
700mm	19.1%	26.1%	19.4%	20.9
900mm	16.1%	20.1%	17.4%	18.9%

表 2 水位升至模拟茅坪滑坡模型第一平台时滑坡体内含水率实验数据

Y	X			
	150 mm	300 mm	550 mm	750 mm
700 mm	42.8%	36%	42.2%	40.3%
900 mm	42.9%	39.8%	42.5%	40.1%
1100 mm	36.9%	31.9%	36%	34.5%
1300 mm	18.9%	22.7%	17.8%	25.4%

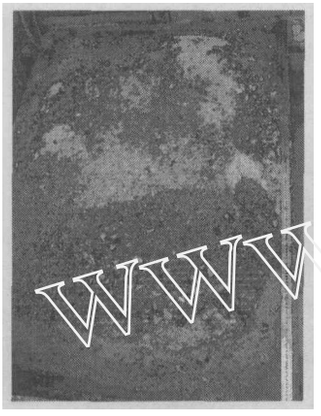

图 3 实际实验照片

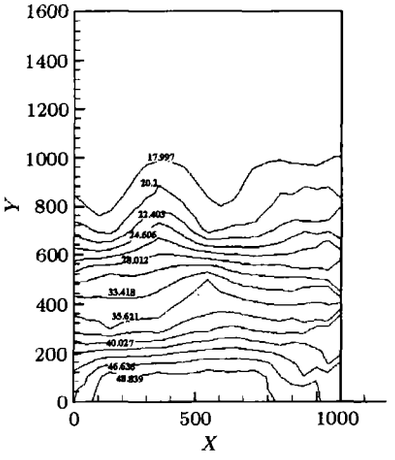

图 4 实验数据模拟图

2.2 二次水位上升实验

在初次水位上升实验完毕后，经过 2 h 弛豫，再进行第二次水位上升. 水流依然以 50 cm^3/s 的流量注入箱体，当水位漫过模拟岩土体的凌空面的第一平台后停止注入水，时间为 12 min. 重复第一次水位上升实验步骤，弛豫 2 h 后，按照一定布点分布测量模拟岩土体中的含水率. 测得的结果如表 2 所示. 实验岩土体的润湿状况如图 5 所示. 根据测量结果插值得到的水分布图如图 6 所示. 对比图 5 和图 6 同样可以看出水分布与岩土体形貌存在密切关系.

图 5 水位升至第一平台时实验照片

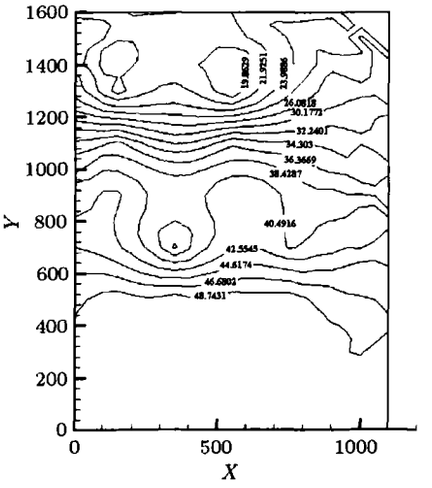

图 6 水位升至第一平台时实验数据模拟图

2.3 水位降落实验

在进行完第二次水位上升实验后，弛豫 2 h 进行水位降落实验. 水流以 100 cm^3/s 的流量从实验箱体底部排出. 当排水 20 min 时，水位降至模拟岩土体边坡凌空面下缘，在第一平台中部出现与坡体前缘平行的拉裂缝. 在此后 30 min 内不断发展，同时仍然有一定的水从模拟岩土体中渗出. 持续 30 min 后，水的流量变得很小. 模拟岩土体裂缝不再发展，达到一个相对稳定状态. 从这一过程可以明显看出，在水位降落过程中，由于岩土体的润湿使岩土体的水排出存在严重的滞后现象. 模拟岩土体达到相对稳定状态的状况如图 7 所示.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

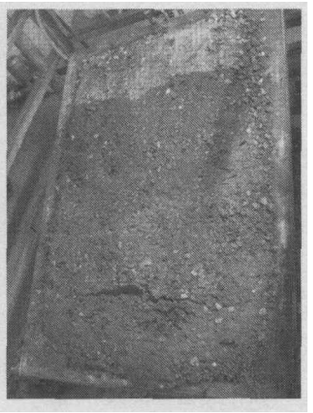

图 7　降水实验坡体产生裂缝的稳定状态图

3　库水浸泡过程含水率动态变化及分析

为了确定含水率随时间的变化，在库水浸泡模拟的整个实验过程中选取 (600 mm, 600 mm) 点作为整个测试过程中的含水率变化监测点，每隔 10 min 测量一次含水率. 含水率的实验监测数据如表 3 所示.

表 3　固定测点的含水率实验监测数据

第一实验阶段		第二实验阶段		第三实验阶段	
时间 /min	含水率 /%	时间 /min	含水率 /%	时间 /min	含水率 /%
0	16.1	158	28.3	298	41.2
26	16.1	168	28.3	308	41.2
36	16.1	178	29.1	318	41.2
46	16.1	188	30.2	328	41.2
56	16.1	198	32.3	338	40.1
66	16.6	208	34.6	348	39.8
76	17.8	218	38.5	358	39.2
86	18.9	228	39.5	368	39.1
96	20.3	238	40.8		
106	25.8	248	41.1		
116	27.3	258	41.2		
126	28.1	268	41.2		
136	28.3	278	41.2		
146	28.3				

将实验数据进行整理，可以得到如图 8 所示的测点含水率动态变化历程图. 从图中可以看出：(1) 润湿过程是一个比较缓慢的过程，每一次水位变化从含水率开始增加到达到相对稳定平台都需要较长的一段时间.　(2) 在每一个含水率上升的过程中都有一个含水上升较快的短时间段. 而且第二次的速度要比第一阶段的大.　(3) 润湿滞后在本实验中表现十分明显. 在模拟水位降落的试验阶段，含水率一直保持不变. 只有当第一平台中部出现与坡体前缘平行的拉裂缝 20min 后，才有一个小幅度的降低. 这可能是拉裂缝形成后，缝壁边缘产生一定的排水所造成的. 接下来含水率的变化又变得非常缓慢.

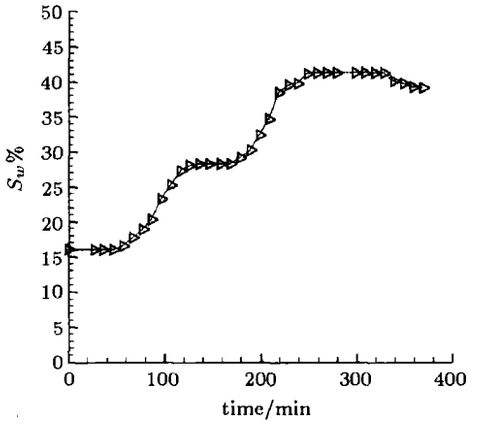

图 8　固定测点的含水率动态变化历程图

4　实验结果的分析和讨论

(1) 水位上升过程中水的分布是一个动态的不定常过程

从第一次水位上升和第二次水位上升的实验中都可以观察到岩土体中水的润湿线是一个不断发展的过程，即使水位上升到某一位置停止后，水润湿线在一定时间内仍然继续上升，这是水位上升过程中的润湿滞后效应. 在本文中认为模拟岩土体的滞后时间为 2.0 h，但是对一个实际的边坡达到稳定的时间会很长.

(2) 水位降落是滑坡体失稳的积极推动因素

水位降落过程中，由于水的湿润滞后，岩土体中的水并非立即从岩土体中排出，因此岩土体的容重是增加的. 在斜坡条件下，增加的容重在沿斜坡面方向产生一个方向力，推动斜坡向下运动，导致斜坡失稳. 另外，黏土遇水后，在黏土的晶格间增溶一定量的水，使黏土膨胀. 这样，由于水的作用，使黏土的黏聚力和内摩擦角降低，因此有利于在岩土体内产生软弱面，致使坡体滑动，这就是水位降落导致滑坡失稳的重要原因.

(3) 简单毛管压力计算公式不适合模拟水位上升和降落过程

对于本文中实验结果，我们试图用毛管压力公式模拟，但结果相差较大. 关于此问题将另文进行讨论.

5　结　论

根据岩土体中渗流的特点，建立了适合研究库水涨落中水分布的实验装置及实验方法. 根据清江茅坪滑坡的有关地质资料建立了模拟实验体模型. 通过两次的水位上升实验，测得了模拟岩土体中的水分布，发现了润湿滞后现象. 通过水位降落得到了润湿滞后对坡体失稳所起的作用的影响，并观察到了坡体失稳过程，这将有助于进一步深入研究水在滑坡中的作用. 本文得到的水分布是推算坡体水容重变化，判断滑坡稳定性的一个基础依据.

致谢　感谢饶莹同志提供的茅坪滑坡的地质数据和地形形貌图.

参　考　文　献

1 Hoe KE, Bray JW. 岩石边坡工程. 北京：冶金出版社，1982

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(Hoe KE, Bray JW. Engineering of Rocky Coast. Beijing: Metallurgy Industry Publishing House, 1982 (in Chinese))

2 孙纳正. 地下水流的数学模型与数值方法. 北京: 地质出版社, 1982(Sun Nazheng. Mathematical Model and Numerical Solution of Groundwater Flow. Beijing: Geology Publishing House, 1982 (in Chinese))

3 申润植 (日). 滑坡整治理论和工程实践. 北京: 中国铁道出版社, 1996(Shin YS. Treatment Theory and Engineering Practice of Landslide. Beijing: China Railway Publishing House, 1996 (in Chinese))

4 崔政权, 李宁. 边坡工程: 理论与实践最新发展. 北京: 中国水利水电出版社, 1999 (Cui Zhengquan, Li Ning. Slope Engineering: Recent Advances in Theory and Practice. Beijing: Water Power Press, 1999)

5 张有天. 重视岩体渗流研究, 确保工程设计安全. 岩石力学与工程学报, 1989, 8(3): 269~272(Zhang Youtian. Regard institute of seepage of rock, insure safety of engineering design. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1989, 8(3): 269~272 (in Chinese))

6 van Genuchten MT. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J*, 1980, 44: 892~989

7 Reitsma S, Kueper BH. Laboratory measurement of capillary pressure-saturation relationships in a rock fracture. *Water Resour Res*, 1994, 30(4): 865~878

8 张有天, 刘中. 降雨过程裂隙网络饱和 / 非饱和、非恒定渗流分析. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 103~111(Zhang Youtian, Liu Zhong. Saturated/unsaturated, unsteady seepage analysis of rock fractured networks due to the percolation of rainfall. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(2): 103~111 (in Chinese))

EXPERIMENTAL STUDY ON WATER DISTRIBUTION IN LANDSLIDE WITH RESERVOIR TABLE CHANGED

LIU Yuewu GONG Xin ZHANG Dawei CHEN Huixin

(DES, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The experimental equipment is established for simulating water distribution in landslide with reservoir table changed. The laboratory model is made based on the shape, geometric characters and soil-rock ratio of Maoping slide. The water distributions in the simulated slide are simulated with water table at the half height of the soared interface and the height of the first platform. When the reservoir table drops down in the experiment, a part of the slide fails. The results show that wetting lagging is the main factor of slide failure during the reservoir table drop-down.

Key words landslide, water distribution, wetting, water table, experimental model

土质边坡失稳的突变性分析[1)]

房营光

(华南理工大学建筑学院, 广州 510641)

摘要 对土质边坡圆弧滑动稳定性问题, 采用应力软化模型, 由系统能量导出极限平衡方程, 运用突变理论方法对土坡失稳进行了分析. 分析表明, 边坡参数变化为某一临界值时, 土坡的滑动位移突然增大, 发生突变失稳现象, 由刚体极限平衡稳定理论无法体现应力软化土质边坡的这种失稳的突变性.

关键词 边坡, 应力软化, 稳定性, 突变

边坡稳定性分析是工程设计中经常遇到的问题. 对于土质边坡通常采用滑动弧极限平衡稳定分析方法 [1,2], 在给定滑动弧的条件下, 由刚体极限平衡理论给出边坡的稳定系数计算, 从而作出边坡的稳定性评估和设计. 上述的分析方法通常假定滑动弧上各点的剪应力同步达到抗剪强度值, 且与变形无关. 这一假定虽然大大地简化了分析计算, 但不能体现边坡失稳突发性的客观现象. 实际上, 边坡土体中的应力与土体变形密切相关, 特别是非均匀土质边坡情况, 滑动弧上的剪应力是不可能同步达到抗剪强度值的. 为对土质边坡稳定性问题作出更合理的分析, 本文把土体的剪应力与变形位移联系起来, 采用应力软化模型, 由系统能量导出平衡方程, 运用突变理论方法对土坡失稳进行分析. 分析结果表明, 参数在一定范围内变形时, 土坡的滑动位移缓慢变化, 而参数变化到某一临界值时, 滑动位移突然增大而发生失稳, 这一理论结果与边坡实际失稳现象相符. 此外, 研究还发现, 边坡的失稳与参数变化的"路径"有关, 体现了边坡滑动位移不可逆的边坡失稳的实际性质.

1 边坡稳定的突变性分析

1.1 稳定分析模型

2003-04-11 收到第 1 稿, 2003-09-03 收到修改稿.

1) 广东省自然科学基金 (010054), 广东工业大学科研基金项目 (202015, 982020) 资助.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net