

[文章编号] 1003-4684(2019)02-0112-06

# 黄堰塘滑坡稳定性分析及治理

朱 慧

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 以红土乡黄堰塘滑坡为研究对象,采用一种全新的本构模型分析其土体力学特性,同时计算滑坡在自然状态下和暴雨状态下的稳定性系数及最大位移,并分析该滑坡的稳定性。研究结果表明,黄堰塘滑坡目前处于基本稳定状态,但在连续强降雨下易引发山体滑坡。经综合分析后,给出抗滑桩+截排水沟+格构抗滑桩+截排水沟+桩间挡土墙+格构+钢管注浆工程+监测工程+箱涵工程的合理治理方案。

[关键词] 极限平衡条分法;边坡;稳定性系数;新的本构模型

[中图分类号] TU43

[文献标识码] A

当滑坡、泥石流等自然灾害发生时,通常会危及到百姓的生命及财产<sup>[1,2]</sup>。这类地质灾害的发生一般是由于地壳振动、暴雨以及人类工程活动造成的<sup>[3]</sup>。路基两旁的坡面有时会出现变形或遭受破坏,这通常是由于雨水渗透造成的。受到暴雨等天气的影响,土体饱和度增加,当雨水渗入达到一定的深度,会增大山区土质边坡失稳的情况。

当前国际上有许多种针对坡面稳定的研究方法,比如传递系数法、简布(Janbu)法、简化毕肖普(Bishop)法、Sarma法、楔形体法、Fellenius法、有限元强度折减法等<sup>[4-7]</sup>。在传统的边坡稳定分析工程实践中,这些方法大部分都和极限平衡条分法有关<sup>[8-9]</sup>,均对底边法向力作用点和条块之间相互作用力进行了各种假定。随着计算机学科快速发展,数值分析在边坡等地质灾害中快速发展起来,其中,有限元法被越来越多的研究人员广泛运用<sup>[10-12]</sup>。

上面提到的有关坡面稳定性的研究仍然有不足的地方:1)现行的滑坡分析方法都假设滑面应力同时达到临界状态;但这种假设与工程实际极为不符,尤为突出的是滑坡体只有一点处于峰值应力状态。2)计算模型中使用的本构方程,如有限元强度折减法是一种理想弹塑性模型。该模型仅在滑坡条块底边与水平面无夹角或较小夹角时才有用<sup>[13-14]</sup>。3)不能考虑滑坡土体变形对边坡稳定的影响,同时无法分析边坡破坏的发生和发展过程。

通常使用的表示材料本构关系的模型,比如弹性模型以及理想弹塑性模型等,以及与之相关的屈

服准则(摩尔库伦准则、Mises屈服准则等)主要用于描述小于及等于临界应力的理想特性。由于岩土工程、边坡工程和桩基工程等,实际都与破坏后区的材料行为相关,但传统的本构模型不能很好的描述破坏后区的行为,现今所采用的折线进行逼近,很难考虑不同法向应力情况下的破坏后区的不同非线性变化特征。

笔者基于卢应发<sup>[15-18]</sup>教授提出的全新剪应力本构模型,该模型可以同时描述峰值应力以前及峰值应力以后的应力状态。但如今很多推算临界平衡状态的稳定参数均是通过减少坡面抗滑力来推算稳定性系数。该方法使坡面上全部的条块都为极限平衡状态,进一步计算出相关的稳定参数。但在工程实际中,只有峰值应力前的状态可认为存在极限平衡状态,破坏后的状态明显不符合极限平衡状态。将黄堰塘作为案例进行研究,分析该案例中滑坡的相关稳定参数,同时基于各个方面,针对本案例制定具体的预防措施。采用全新的本构模型计算稳定系数时,不像传统的本构模型一样对边坡的抗滑力进行折减,并且更符合现场的实际破坏模式。

## 1 新的本构模型的提出

根据相关理论知识,岩石、土壤发生变形通常是由于固体颗粒的位置发生了变动,在这种情况下,物体本身的变形可以不考虑,但是滑坡推力的传导和岩石、土壤的性质是分不开的。一般情况下,岩石、土壤的荷载和位置变化的关系表现为下图中的一类

[收稿日期] 2018-09-18

[第一作者] 朱 慧(1993-),女,湖北钟祥人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为边坡稳定性

和二类两条曲线,这两条曲线只能够用在周围岩体压力(即围压)比较小的地方,而周围岩石对边坡施加压力较大处,关系曲线就不存在显著的最大应力,通过室内和室外的实验测量,得到的关系曲线为下图中的第三类。

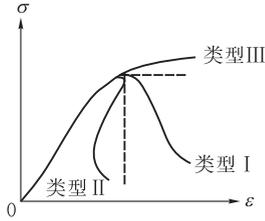


图 1 岩土体荷载-位移的关系曲线

第一类和第三类关系曲线表现的力学性能只受到法线方向作用力的影响,这种情况下仅依据四个系数就能够反映它的性质。基于这样的特性,一种新的剪切应力本构模型被提出,并符合第一类和第三类曲线。

$$\tau = G\gamma [1 + \gamma^m/S]^\rho \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为材料的剪应力,  $\gamma$  为材料的剪应变;  $G$  为依赖于法向应力的初始剪切模量;  $m$ 、 $S$ 、 $\rho$  为依赖于法向应力的常数;  $\tau$ 、 $G$  的单位为 MPa 或 kPa 或 Pa,  $m$ 、 $S$ 、 $\rho$  为无量纲参数,且  $S > 0$ ,  $-1 < \rho \leq 0$  和  $1 + m\rho \neq 0$ 。

受到某个法线方向作用力的影响,这种模型的特点有:

- 1) 若  $\epsilon = 0$ , 则  $\tau = 0$ , 此时不存在作用力,也不存在位置的变化;
- 2) 若  $\rho = 0$ , 则  $\tau = G\gamma$ , 此时描述的是线弹性材料特性;
- 3) 若  $\rho = -0.5$ , 基于理论分析,变形的程度可以无限增加,这是一种理想的弹塑性情况;
- 4) 若  $-0.5 < \rho < 0$ , 荷载与位移的关系如第三类曲线所示;
- 5) 当满足第一类荷载-位移曲线的时候,其特性如下:

- a) 当  $-1 < \rho \leq -0.5$ ,  $1 + m\rho \neq 0$ ;
- b) 当  $\partial\tau/\partial\gamma = 0$ , 并且对应于峰值应力点,则有  $S + (1 + m\rho)\gamma_{peak}^m = 0$  (2)

变换等式(2),能够获得由峰值应力造成的峰值应变:  $\gamma_{peak} = \pm \sqrt[m]{S/(1 + m\rho)}$ 。此时,将  $\gamma_{peak}$  代入式(1),可得相应的峰值应力

$$\tau_{peak} = G \sqrt[m]{-S/(1 + m\rho)} [1 - 1/(1 + m\rho)]^\rho$$

c) 曲线上任一点的切线模量

$$\frac{\partial\tau}{\partial\gamma} = G(1 + \gamma^m/S) + \rho G\gamma (1 + \gamma^m/S)^{\rho-1} m\gamma^{m-1}/S$$

即,当  $\gamma = 0$  或  $\rho = 0$  时,该点切线模量都等于  $G$ ; 而

当  $\gamma \rightarrow \infty$  时,该点的切线模量则为 0。

综上所述,这种模型的关系式涉及到包括  $\rho$  在内的四个参数。四个参数值的求解方法及过程如下:

第一步,求解  $G$ 。由上述本构模型所具有的特征可知:当  $\gamma = 0$  或  $\rho = 0$  时,该点所对应的切线模量即为  $G$ 。也就是说,  $G$  是初始剪切模量,如图 2 所示。

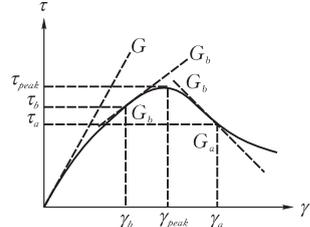


图 2 应力-应变曲线

第二步,求解  $m$ ,  $S$ ,  $\rho$  三个参数。对式(1)求一阶导数,整理得

$$\frac{\partial\tau}{\partial\gamma} = \frac{\tau}{\gamma} \left( 1 + m\rho \frac{\gamma^m}{\gamma^m + S} \right)$$

对于峰值应力之前任意一点,同时定义  $G_b = \tau_b/\lambda_b$ , 则有

$$m\rho \frac{\gamma_b^m}{\gamma_b^m + S} = \frac{G_b - G}{G_b} \quad (3)$$

式中:  $G_b$  为点 b 的切线模量。此时 b 点表示最大应力点,则  $G_b = 0$ , 那么

$$(1 + m\rho)\gamma_b^m + S = 0 \quad (4)$$

对于 b 点之后的其他点,都可令  $G_a = \tau_a/\gamma_a$ , 则

$$m\rho \frac{\gamma_a^m}{\gamma_a^m + S} = \frac{G_a - G}{G_a} \quad (5)$$

式中:  $G_a$  为点 a 的切线模量。

联合式(3)~(5),可求得  $m$ ,  $S$  和  $\rho$ 。

## 2 工程概况

### 2.1 地形描述

红土乡稻池村黄堰塘滑坡位置处清江南岸的构造剥蚀低山丘陵区。岩层走向北偏东,为一单斜滑坡,滑坡倾向东偏南,剖面形态呈折线形,地形坡度  $30^\circ \sim 38^\circ$ , 坡体被植被密集覆盖,坡脚现为黄堰塘,滑坡平台区上部为陡坎,坎高  $3 \sim 8$  m, 为岩土质边坡,坡面高程在  $775.00 \sim 816.57$  m。整个滑坡垂直高差约  $32.35 \sim 35.81$  m。黄堰塘滑坡北距黄堰塘约 50 m, 茅平路约 50 m, 通过茅平路到达县道通往恩施市, 距离约 80 km, 如图 3 所示。

黄堰塘滑坡上平台区: 为工程建设用地, 长约 400 m, 宽约 30 m, 平台区上已建有房屋, 平面形态近似长方形, 地形平缓, 地形坡度小于  $5^\circ$ , 地面高程  $780.30 \sim 782.00$  m, 相对高差 1.70 m。

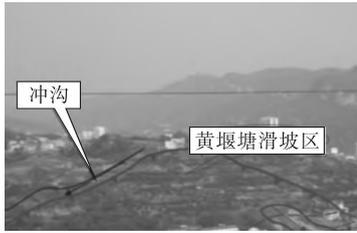


图3 黄堰塘滑坡地区图

稻池村黄堰塘滑坡位于黄堰塘南侧斜坡上,清江南岸高山斜坡顶部,属构造、剥蚀低山地貌。工程区地形坡向西北,地面坡度一般 $30^{\circ}\sim 38^{\circ}$ ,局部地形较为平缓,坡度 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。

滑坡坡面形态呈曲线型,当前开挖工作已经完成,坡面距离绝对基面的距离是 $813\sim 816\text{ m}$ ,高度是 $4\sim 5\text{ m}$ ,坡度 $30^{\circ}\sim 38^{\circ}$ ,勘察期间滑坡体积 $72\times 10^4\text{ m}^3$ 。

黄堰塘滑坡变形主要为:一是滑坡地表变形,二是下部挡土墙断裂。2016年7月以来,黄堰塘滑坡受连续暴雨影响,滑坡上部发生了大规模的土体滑塌,滑动坡体的长度为 $200\text{ m}$ 左右,宽度为 $240\text{ m}$ 左右,厚度为 $15\text{ m}$ 左右,坍塌的体积为 $72\times 10^4\text{ m}^3$ 。滑坡坡体上出现大量表面裂缝,裂缝走向与滑坡走向基本平行,主要表现为拉张和向下裂缝。拉伸裂缝的宽一般在 $50\sim 100\text{ mm}$ 之间,开口最多可达到 $300\text{ mm}$ ,深度一般在 $20\sim 40\text{ cm}$ ;下错裂缝一般下错高差 $30\sim 200\text{ mm}$ ,上部建筑出现裂缝。下部旧挡土墙断裂,挡土墙未断裂段有裂缝,裂缝贯穿整个

挡土墙。图4展现了不同的变形情况。黄堰塘滑坡后缘的房屋有明显裂缝,上部房屋地基属于大石块垫基,上部茅平路有明显裂缝。

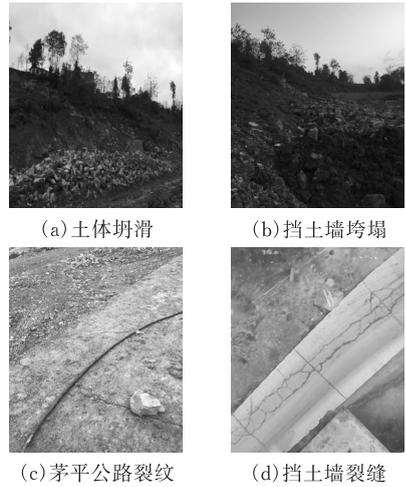


图4

2.2 计算参数选取

在黄堰塘滑坡现场调查期间,取一定量的滑体和滑床岩土体进行室内试验。而稳定性计算所需的岩土参数取值主要遵循以下原则进行综合确定:滑坡表层杂填土计算时的岩土参数主要基于本次试验并结合当地区域经验值,参考与其他工程参数类比的结合,以土壤剪切强度的最优参考值为计算值,并根据黄堰塘滑坡已经坍塌的滑体对参数进行反演,具体参数见表1。

表1 土体岩土参数建议值表

层号	岩土名称	天然			饱和		
		$r/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/\text{kPa}$	$\Phi/(\text{°})$	$r/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/\text{kPa}$	$\Phi/(\text{°})$
①	杂填土	17.5	—	—	20.10	—	—
②	强风化灰岩	22.6	8	17	23.6	4	15

首先,假定1各个条块之间作用力的传递满足不平衡推力法的原理;假定2各个条块之间的位置变化符合位移协调条件 $\gamma_i = \gamma_{i-1} / \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1})$ 。

其计算过程如下:1)采用条分法对坡面进行分块(图5),运用不平衡推力法,得到各条块下滑力和抗滑力,进而推算其比值,即 $P_i/T_i$ ,设 $i$ 条块计算出的比值最大,则该条块最先下滑;2)假定这时候该条块的状态为极限平衡状态,那么其剪切应变应该是临界剪切应变,它符合临界状态相关方程,根据第一节中的系数能够推算出该条块的 $\gamma_{\text{peak}}$ ,根据假定2能够推算出 $i$ 条块之外所有条块的位移,进一步能够推出其抗滑力;3)慢慢提高该条块的剪切应变,直达到达某一临界值,使最后一个条块也即将达到破坏平衡的状态,这时候该条块的位移就等于其力学性能遭受破坏时的位移。

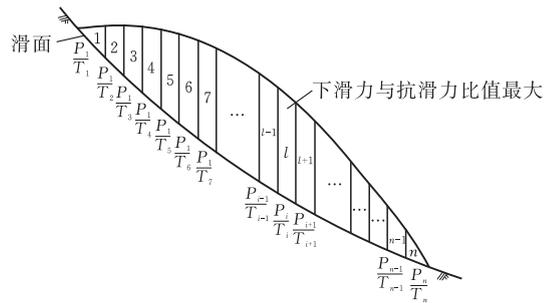


图5 滑坡分块及下滑力与抗滑力之比示意图

在此基础上,以黄堰塘滑坡II-II'剖面为例,其稳定性安全系数天然状态取1.35,暴雨状态取1.20。根据图6可以看出,两种作用力的比值最大的条块是第12个,基于上面提出的新的本构模型可以推算出坡面不同的条块在不同自然状况下的最终剪切应变以及稳定参数,见表2。根据得到的数值可

以看出,本案例中在自然状况下最大位移0.029 854 289 m,在暴雨状况下位置的变化量最大为0.035 640 741 m。

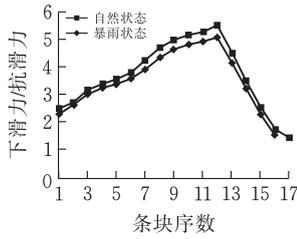


图6 下滑力与抗滑力比值图

黄堰塘滑坡为土质边坡,以杂填土松散土体、强风化灰岩为主,其中杂填土主要为场地平整时的新近人工堆积,分布于平台外侧一带,物质成份以粘土夹粉砂质泥岩碎块组成,土体结构松散,强度极低,土体具吸水饱和的特性,属强透水层。

由表2可得,在自然条件下,本案例能够处于基

本稳定状态,然而地面的负载以及暴雨状况会对平衡状态造成破坏,由于长时间降雨的影响,结构面长期在地下水侵蚀的作用下,岩体结构面强度不断降低,泡水软化加后期,因人类工程活动的影响,滑坡发生的可能性加大。对滑坡下房屋居民和公路造成极大的威胁,鉴于此,对黄堰塘滑坡的整治刻不容缓。

对坡面稳定状态产生影响的外部因素主要是指自然天气,比如下雨等,以及人类工程活动,比如建筑、伐木等,在下雨时坡面遭到雨水的渗透,使其不稳定性增加,尤其是在夏天暴雨天气时有发生,影响会更加严重。降雨后,雨水渗入岩体中导致滑坡土体饱和,随着大量雨水注入岩土体裂缝中,长期沿着结构面软化填充物,使其内部水量增多,导致其剪切强度下降,使滑坡等灾害出现的可能性大大增加。

表2 滑坡参数及各条块稳定系数

条块	角度/(°)	有效滑动面 长度/m	最终决定剪应变		稳定系数	
			自然状态	暴雨状态	自然状态	暴雨状态
1	63.294	11.126	0.100 430 525	0.082 186 621	1.006	0.827
2	34.239	6.048	0.007 393 166	0.008 867 542	1.015	0.835
3	29.148	5.725	0.008 934 209	0.010 755 364	1.024	0.846
4	25.553	5.542	0.010 348 151	0.012 831 819	1.037	0.856
5	23.183	5.439	0.011 269 511	0.014 535 653	1.049	0.863
6	22.099	5.396	0.011 342 336	0.014 622 219	1.059	0.871
7	22.135	5.398	0.010 369 219	0.012 74 095	1.065	0.881
8	21.657	5.38	0.009 385 272	0.011 317 583	1.079	0.889
9	19.343	5.299	0.008 610 606	0.010 378 402	1.093	0.901
10	15.99	5.201	0.007 826 708	0.009 431 796	1.101	0.906
11	12.299	5.117	0.006 862 723	0.008 264 272	1.110	0.915
12	10.88	5.092	0.005 862 979	0.006 999 36	1.123	0.922
13	7.902	5.048	0.006 236 194	0.007 473 346	1.132	0.931
14	5.203	5.021	0.006 449 867	0.007 699 664	1.145	0.941
15	3.002	5.007	0.006 433 255	0.007 653 204	1.153	0.949
16	1.452	5.002	0.005 330 282	0.006 360 965	1.167	0.958
17	0	5	0.002402367	0.061601	1.172	0.963

### 3 治理方案

#### 3.1 防治工程等级

综合上述分析得出,天然状态下,黄堰塘滑坡处于欠稳定状态,但岩土结构面长期在干湿交替作用下,强度持续降低,当结构面出现临空或结构面强度达到极限平衡状态时,易诱发滑坡。基于有关防范滑坡的相关规定以及对边坡施工建设的相关文件,本案例属于使用年限超过两年的工程,其安全等级为一级。

#### 3.2 治理措施

方案一:采用抗滑桩+截水沟+桩板式挡土墙+格构+箱涵。

方案二:采用截水沟+桩板式挡土墙+锚索+箱涵+工程监测。

方案三:抗滑桩+截排水沟+桩间挡土墙+格构+钢管注浆工程+监测工程+箱涵工程。

#### 3.3 治理方案选择

基于本案例的具体状况,滑坡上方出现了体积为 $72 \times 10^4 \text{ m}^3$ 较为严重的土体坍塌,滑坡后缘的房屋有明显裂缝,上部房屋地基属于大石块垫基,上部

茅平路有明显裂缝。为防止黄堰塘滑坡更进一步的滑塌对上部公路及房屋造成更大的损失,同时对滑坡的变形进行监测,以及对开裂公路进行注浆修复,确定方案三为本滑坡的优选方案。治理方案示意如图7所示。完成后,边坡在自然状况下的稳定参数是1.135,安全系数为1.28;边坡在暴雨条件下的稳定参数是0.915,安全系数为1.15。

由上述计算可知,全新的本构模型可以很好的模拟岩土材料的基本力学行为特征,其计算结果与工程实测结果相比,误差较小,且在实际工程的允许偏差内,所以全新的本构模型可以很好的应用于工程。

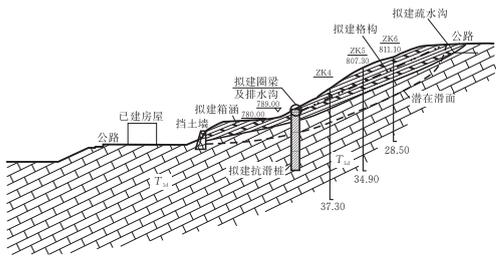


图7 黄堰塘滑坡治理方案示意图

## 4 结论

基于卢应发教授提出的一种新的本构模型研究了黄堰塘边坡的稳定性,并提出了相应的治理方案,根据计算的结果可以发现:

1)通过利用全新本构模型的计算方法,可以看出,黄堰塘滑坡后缘的稳定区段对整个滑坡起到阻滑作用,这个区间的影响更加满足本文研究的实际条件。

2)边坡抗滑设计治理法的基本思想是在打入抗滑桩和修建桩间挡土墙等之后,沿滑面每一条块和整体稳定性必须满足稳定要求。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2006,26(3):433-454.  
 [2] 韩晶晶,李军杰,彭丹. 浅谈水对边坡稳定性的影响[J]. 四川建筑,2013,39(2):86-88.  
 [3] 谈至明,赵振岐. 文克勒地基上四边自由矩形薄板温度翘曲解[J]. 中国公路学报,2016(7):10-14.  
 [4] 殷坤龙. 降雨对滑坡的作用机制及动态模拟研究[J]. 地质科技情报,2002,21(1):75-78.

[5] 姚海林,郑少河,陈守义. 考虑裂隙对雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(5):606-609.  
 [6] 卢应发,吴延春,罗启先,等. 土-水特征曲线及其相关性研究[J]. 岩土力学,2008,29(9):2481-24896.  
 [7] 卢应发,周盛沛,罗启先,等. 渗流对抗滑桩加固滑坡后的影响效果评价[J]. 岩土力学与工程学报,2007,26(9):1840-1846.  
 [8] ZHU Dayong, Qian Qihu. Rigorous and quasi-rigorous limit equilibrium solutions of 3D slope stability and application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(8):1513-1528.  
 [9] LI Ning, Qian Qihu. Four criteria of stability analysis and assessment of high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1754-1759.  
 [10] LIU Yangzhang, GE Xiurun, LI Chunguang, et al. Stability analysis of slope and dam foundation based on vector method safety factor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2130-2140.  
 [11] Guo M W, Ge X R, Wang S L. Slope stability analysis under seismic load by vector sum analysis method[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(3): 282-288.  
 [12] 唐春风,李学武. 有限单元法在边坡稳定安全分析中的英语[J]. 科学技术与工程,2012,12(1):234-237.  
 [13] 李永亮,周国胜,李永鹏. 有限元强度折减法边坡失稳判据的适用性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(5):125-129.  
 [14] 高桂云,杨家修,吴梦喜. 有限元强度折减法在边坡稳定性分析者的有效性及结果检验方法[C]. 2017全国工程地质学生年会论文集,2017.  
 [15] 卢应发. 一种新的本构模型及参数标定[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2138-2144.  
 [16] 卢应发,杨丽平,刘德富. 一种新的节理本构模型及几种新的滑坡稳定系数计算方法[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(12):2431-2438.  
 [17] 卢应发,路韬,周建军,等. 一种新的本构模型及其在基桩分析中的应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 967-973.  
 [18] TU M Y, Lu M F, Liu D F. Study of mechanical properties of landslides in different stress state[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18: 863-868.

## Analysis and Treatment of Stability of Huangyantang Landslide

ZHU Hui

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** In the current slope stability analysis, the most commonly used method is the limit equilibrium slice method. A new constitutive model is adopted to analyze the soil mechanical properties of the Huangyantang landslide at Hongtu Town. Meanwhile, the stability coefficient and maximum displacement of the landslide under natural state and rainstorm state are calculated respectively, and the stability of the landslide is analyzed. The results show that the Huangyantang landslide is in a basic steady state at present, but it tends to cause landslides when there is continuous heavy rainfall. Based on a comprehensive analysis, a reasonable management plan is finally proposed.

**Keywords:** limit equilibrium slice method; slope; stability coefficient; new constitutive model

[责任编辑: 裴 琴]

(上接第 86 页)

## A Fractal Study on Thermal Conductivity of Clay Based on Box Dimension

HU Qizhi, LIU Xuan, PAN Haochuan, CHENG Jiahui

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** The soil pore structure parameters are important indexes for evaluating the thermal conductivity of soil. The thermal conductivity of clay under different dry density and different consolidation pressures is measured by DRE-III multi-function rapid thermal conductivity tester. CT is performed on the measured samples and Matlab2016B software is applied, from which the binarized graph is obtained. Then, based on the fractal theory of the box-counting dimension method, the influence of the number, area and porosity of the soil structure on the thermal conductivity of the clay was analyzed. The results indicate that with the increase of dry density and consolidation pressure, the porosity of clay samples decreases, with which the fractal dimension decreases. The variation of fractal dimension can be used to obtain the thermal conductivity of clay with its fractal increasing in dimension.

**Keywords:** remodeling clay; thermal conductivity; box dimension

[责任编辑: 裴 琴]