

边坡模型边界效应及材料孔隙率敏感性研究

刘东燕¹, 郑志明^{1,2}, 侯 龙^{1,3}

(1.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2.重庆市公路局, 重庆 401147; 3.美国科罗拉多矿业大学, 美国 丹佛 80401)

摘 要: 通过自制的新型试验装置进行不同边界情况下的边坡模型变形破坏研究。探讨了边坡模型破坏开始时的坡角(破坏角)与边界条件的关系。试验结果表明, 该破坏角会与模型厚度成一定的反比关系, 但随着模型厚度超过一定值, 边界条件造成的影响将趋于弱化, 同时, 运用数学手段定量地印证了这种关系形式。另外, 还通过试验验证了相比于边界条件而言, 破坏角的变化幅度会对模型材料的孔隙率更加敏感。基于所得结果, 可对试验装置进行改进, 并优化试验手段。

关 键 词: 边坡模型; 破坏角; 边界效应; 孔隙率; 变化幅度

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Research on boundary condition effect and material porosity sensitivity for slope model

LIU Dong-yan¹, ZHENG Zhi-ming^{1,2}, HOU Long^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Chongqing Highway Bureau, Chongqing 401147, China; 3. Colorado University of Mines, Denver 80401, USA)

Abstract: Using a new apparatus which was fabricated by ourselves, some research works on the stability of slope model under different boundary conditions effect were finished. Based on some associated results, the relationship between landslide start degree and boundary condition effect can be got. From the relationship, it can see clearly that the degree will decrease as the slope's thickness increases and it will keep at a constant degree value when the thickness is relative big; namely, the influence induced by boundary condition effect can be ignored at that time. At the same time, one theoretical method was involved to quantify and confirm this relationship. In addition, the comparison between boundary condition effect and porosity indicates that the porosity is a more sensitive factor as to the range in variation of landslide start degree than the boundary condition effect. Based on these results, we can take some modification work for this experimental apparatus and get an optimization resolution for latter tests.

Key words: slope model; landslide start degree; boundary condition effect; porosity; range in variation

1 引 言

我国是地质灾害多发的国家, 灾害类型多、分布范围广^[1-2], 尤以边坡垮塌造成的灾害更为严重。多年来, 相关领域的教研以及工程实践人员从不同方面对滑坡产生机制、治理措施的研究工作投入了大量的精力并取得了丰硕的成果。因利用边坡模型来进行研究具有方便、操作性强、测定目标多样化等优点, 且所得数据易于整合并应用到工程实践之中, 故该类研究方法受到了相关领域研究人员的普遍青睐。

贾官伟等^[3]利用建立的大型模型试验装置来研

究水位骤降对边坡稳定性产生的影响, 得出了水位骤降引致滑坡的机制, 所得结论可为预防和治理此类滑坡提供一定的科学依据。张均锋等^[4]通过含有细砂夹层的饱和砂土在冲击载荷下的滑坡模拟试验, 考察了土层参数不均匀的坡面的滑坡模式、坡体变形、破坏和不均匀渗流引起的滑坡, 特别是散体粒径不均匀时出现的含水层和通道与滑坡的关系, 弥补了现场难以采集到此类条件下的相关数据的缺憾。事实证明, 通过建立与现场地质体成一定比例关系的模型来进行研究的方法是适用且必不可少的。但遗憾的是, 模型毕竟有别于现场地质体, 其试验所得参数往往不能直接应用于工程实践中

去,这源于多种因素。如模型材料的选取、几何形状的构建等。其中边界效应是引起模型试验结果失真的一个重要因素。

模型边界效应指的是模型所处试验装置对其试验结果产生的偏离实际规律的影响。纵观边坡模型试验相关文献,大都着眼于试验方法的改进、试验结果的拟合等方面,鲜有人去探讨边界效应对试验结果的影响。本文利用自制试验装置,研究不同边界条件下滑坡产生时所对应的坡角(破坏角)的变化规律,并研究破坏角的变化对于边界条件和模型材料孔隙率两种因素的敏感度。作者拟采用该试验装置进行不同工况下的边坡模拟试验,前期先利用该试验装置确定边界效应和模型材料孔隙率对边坡模型试验结果造成的不利影响,并将所得结论用于后续的试验改进过程中,以期模型试验结果在最大程度上与现场边坡结果相吻合,这即为本文主要内容。

2 试验装置及试验方法

2.1 试验装置

本试验装置主要由两部分组成(见图 1、2),与已有边坡试验装置不同之处在于,本装置可对坡角和厚度不断变化的边坡模型进行研究。装置上面部分为一侧向宽度可以调整的金属箱(箱 1),为便于观察滑坡发展过程,箱子正面板采用透明有机玻璃材料,正前方架设摄像机和设置了连拍功能的照相机,可以将整个试验过程记录下来,以用于分析滑坡发展特征。与正面板平行相对的称为背面板,由金属材料制成。试验箱的背面板以可沿垂直于正面板方向移动的方式设置于两侧面板之间,因此,在滑坡不同的试验阶段可以根据不同的需求调节试验箱的侧向宽度,来制造几何边界不同的边坡模型,能够满足边界效应试验中对不同宽度的边坡模型的要求。装置下面部分是两边进行了加固的动力装置(箱 2),在试验时可通过该装置施加上升力,箱两顶板上打有两组钻孔,以使箱 1 底板上预先安装好的组件能嵌固入箱两顶板内,这样两箱可以融为一体,协同工作。箱两顶板下方安装有自动测角仪,可在试验进行过程中实时测定坡角值。

2.2 试验方法

为便于探讨最主要的规律,本试验所用材料为干燥中砂,具体物理特性指标见表 1。在进行试验前先将箱 1 侧面调到固定宽度(该宽度就是边坡的侧向厚度),然后将砂子加至箱 1 预先设定的高度(在有机玻璃面上以平直红线为记)。由加拿大学者

Vaid 等^[5]的试验结果可知,从不同高度处往试验装置中加砂时,降落高度不同时砂子的能量也会有所不同,故所形成的模型孔隙率也相应不同。为保证边坡模型材料的孔隙率大致相同,亦即避免孔隙率变化较大而对本阶段试验结果造成不利影响,加砂的步骤和方式要严格相同,本试验中使用自制的手动加砂仪完成砂土添加工作。试验前期工作完成后,就可开动箱 2 上的动力装置,进而带动千斤顶不断抬升,箱 1 一端逐渐被抬高,箱内原本表面水平的土体就成为一坡度不断变大的边坡体。经过反复试验,最终确定千斤顶最佳上升速度为 2 cm/min,这样可有效避免上升过快致使箱内土体产生震动的不利现象发生。

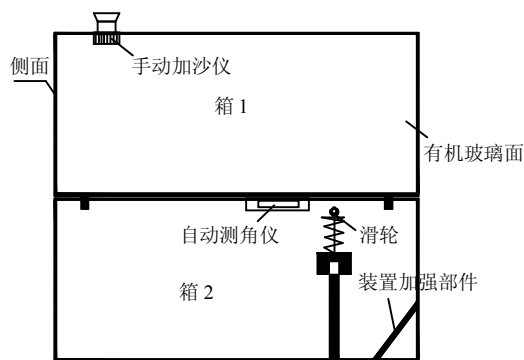


图 1 试验装置草图

Fig.1 The draft of experimental apparatus



图 2 试验装置图

Fig.2 The field picture of experimental apparatus

表 1 试验砂土物理特性指标
Table 1 Properties of experimental sand

类别	密度 /(g/cm ³)	颗粒大小 /mm	黏结力 /kPa	变形模量 /MPa	内摩擦角 /(°)	含水率 /%
中砂	2.65	0.35	0	7.02	34	0

因为属于准备阶段的先期试验,故试验进行过程中仅需时刻关注边坡的表观发展情况,因采用的

是干砂材料, 试验进行时边坡模型表面的零星砂土滑落并不被记录为滑坡开始。当边坡模型表面砂土出现较大规模的滑移时, 认为是滑坡的开始。与此同时, 关闭动力装置, 记录下滑坡产生时所对应的坡角、破坏面形状以及滑坡历时。

3 试验结果及分析

试验分两个阶段进行。第 1 阶段探究边坡模型破坏时的坡角与边界条件的关系, 通过改变边坡模型厚度并重复该试验来完成; 第 2 阶段研究破坏角对模型材料孔隙率的敏感性问题, 通过改变边坡模型的孔隙率并重复该试验来完成。

3.1 第 1 阶段试验结果及分析

3.1.1 第 1 阶段试验结果

该阶段试验包含 10 次分试验, 边坡模型厚度从 5.11 cm 增大到 27.92 cm, 边坡沿长度方向的侧面积均为 406.48 cm^2 。试验结果及相应参数如表 2 所示。将所得结果绘于“ $y-x-y$ ”三轴坐标系中, 可得图 3。由表 2 相关数据及图 3 中“模型厚度与破坏角”关系曲线可以看出, 随着模型厚度的逐渐增加, 边坡发生明显滑移现象时所对应的破坏角随之逐渐变小, 但当模型厚度 $d \geq 17.82 \text{ cm}$ 时 (即图 3 中模型厚度与破坏角关系曲线中第 6 点对应的厚度值, 也是此次试验时试验装置的侧向宽度), 破坏角的变化趋缓, 破坏角也逐渐趋于一个稳定值。这个稳定值大致等于 34° , 这也等于通常条件下该模型材料的内摩擦角。

3.1.2 第 1 阶段试验结果分析

上述规律反映了边界效应对边坡变形破坏产生的影响会随着边坡模型厚度的增加而减小, 并在模型厚度增加到一定数值开始, 可以在试验过程中忽略这个影响因素。这与法国学者 Courrech 等^[6]的试验结论相一致。这里所指的边界效应主要是由模型装置两侧边对边坡土体的摩擦力造成的。在较为理想的状态下, 当边界效应对试验结果产生的影响可以忽略不计时, 干砂材料的边坡模型所能达到的最大坡角就等于其内摩擦角。由图 3 中“模型厚度与破坏角”关系曲线还可知, 曲线上的第 3 点所对应的破坏角并不依照上述规律而减少, 而是明显大于第 2 点所对应的破坏角, 其原因在于该次试验模型材料的孔隙率较小所致, 由图 3 中“孔隙率与模型厚度关系”可以看出这个原因。虽然该阶段试验中每个分次试验所用模型材料孔隙率略有不同, 但因其差别很小, 不影响对试验结果所呈现的一般性规律的考察。

表 2 第 1 阶段试验结果
Table 2 Experimental results of step one

序号	侧向宽度 / cm	质量 / g	总体积 / cm^3	孔隙率 / %	破坏角 / ($^\circ$)	滑面形状 (俯视)
1	5.11	3 409.62	2 075.243	38.0	37.6	
2	7.69	5 075.14	3 124.222	38.7	35.3	
3	10.13	6 713.77	4 119.512	38.5	35.9	
4	12.64	8 139.79	5 136.485	40.2	35.1	
5	15.18	9 955.75	6 168.944	39.1	35.1	
6	17.82	11 611.90	7 242.701	39.5	34.3	
7	20.66	13 573.70	8 396.991	39.0	34.0	弧形
8	22.80	14 859.50	9 268.386	39.5	33.8	弧形
9	25.35	16 601.70	10 303.940	39.2	34.2	弧形
10	27.92	18 342.00	11 346.730	39.0	34.1	弧形

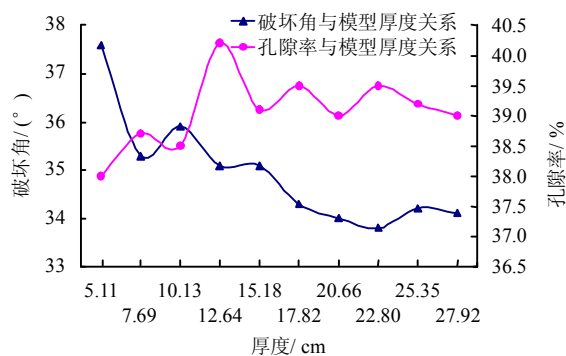


图 3 模型厚度与破坏角关系曲线

Fig.3 Relationship curves between thickness and landslide start degree

另外, 从试验结果还可以得知, 当边坡模型侧面厚度逐渐增大时, 滑坡面俯视图也开始呈现弧形的形式 (图 4)。这源于边界效应对靠近试验装置两侧面的边坡材料的影响要大于坡面中部材料, 使得坡面土体在滑移时的速度大小不一, 坡面两侧靠近试验装置的土体滑移速度要低于坡面中部土体滑移速度。

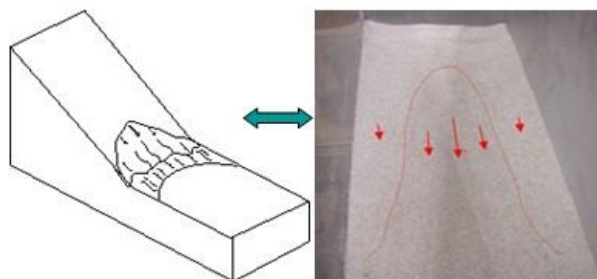


图 4 模型滑面形状 (俯视)

Fig.4 Shape of slide surface (from top view)

除了试验观察的方法之外, 通过数学手段也可以来定量验证边界效应在该试验中所体现出的相应规律: 在不影响规律考察的前提下, 假定模型土体

在试验装置一端逐渐升高时均有下滑趋势,故装置两侧边和边坡模型两侧面之间均能产生摩擦作用,并假定装置两侧边与模型材料之间的摩擦系数是相同的,根据对称性可知,模型两侧面所受摩擦力大小也应相同。根据滑坡极限平衡条件可得安全系数公式如下:

$$F_s = \frac{F_{\text{strength}} + F_{\text{effect}}}{F_{\text{slide}}} = \frac{F_{\text{strength}}}{F_{\text{slide}}} + \frac{F_{\text{effect}}}{F_{\text{slide}}} \quad (1)$$

式中: F_{slide} 、 F_{strength} 、 F_{effect} 分别为滑坡土体下滑力、抗滑力和边界效应产生的作用力。 $\frac{F_{\text{strength}}}{F_{\text{slide}}}$ 项代表了土体自身抗滑力对安全系数所做贡献, $\frac{F_{\text{effect}}}{F_{\text{slide}}}$ 项反映了边界效应对安全系数所做贡献, 本文只研究 $\frac{F_{\text{effect}}}{F_{\text{slide}}}$ 项, 即试验装置边界效应的影响。对于极限平衡状态, $F_s = 1$ 。

$$F_{\text{slide}} = G \sin \beta = \rho g V \sin \beta = \rho g \frac{1}{2} l h T \sin \beta \quad (2)$$

式中: ρ 为模型材料密度; g 为重力加速度; l 为模型底边边长; $h = l \tan \beta$, 为滑坡发生时边坡模型的高度; β 为破坏角 (边坡坡脚); T 为模型厚度。

$$F_{\text{effect}} = 2 F_h f \quad (3)$$

F_h 为试验装置两内侧面与模型两侧面之间的作用力, 沿模型材料与试验装置侧面两者之间的接触面进行积分:

$$\begin{aligned} F_h &= \int_0^l \int_0^{(l-x)\tan\beta} K \rho g [(l-x)\tan\beta - y] dx dy = \\ &= \int_0^l \left\{ \int_0^{(l-x)\tan\beta} K \rho g [(l-x)\tan\beta - y] dy \right\} dx = \\ &= K \rho g \int_0^l \frac{(l-x)^2 \tan^2 \beta}{2} dx = K \rho g \frac{l^3 \tan^2 \beta}{6} \end{aligned} \quad (4)$$

把式 (3) 及干砂侧向压力系数 $K = 1 - \sin \varphi$ 代入式 (4) 中可得

$$F_{\text{effect}} = f \rho g (1 - \sin \varphi) \frac{l^3 \tan^2 \beta}{3} \quad (5)$$

式中: φ 为内摩擦角; f 为试验装置两侧边与边坡材料之间的摩擦系数。

把式 (2)、(5) 以及 $h = l \tan \beta$ 代入到公式项 $\frac{F_{\text{effect}}}{F_{\text{slide}}}$ 中, 有:

$$\frac{F_{\text{effect}}}{F_{\text{slide}}} = \frac{f \rho g (1 - \sin \varphi) \frac{l^3 \tan^2 \beta}{3}}{\rho g \cdot \frac{1}{2} l l \tan \beta T \sin \beta} = \frac{2(1 - \sin \varphi) f l}{3 T \cos \beta} \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 当试验装置侧向宽度 $T \rightarrow \infty$ 时, $\frac{F_{\text{effect}}}{F_{\text{slide}}} \rightarrow 0$ 。这表明该类试验的边界效应影响大小与

模型厚度数值大小成反比, 且该类试验边界效应对试验结果的影响程度与模型的高度无关; 在试验开始前可通过一定方法测得模型材料内摩擦角 φ 、试验装置两边对模型材料的摩擦系数 f 的数值大小, 且在试验过程中可通过自动测角仪获得 β 值。基于这些参数值, 即可以通过调整模型长度 l 与模型厚度 T 的大小来降低边界效应的不利影响, 后续试验可在几何尺寸调整后的试验装置中进行, 进而使所得结果满足工程实践中对数据误差极限范围的要求 (亦即 $\frac{F_{\text{effect}}}{F_{\text{slide}}} \leq 5\%$)。

3.2 第2阶段试验结果及分析

3.2.1 第2阶段试验结果

由第1阶段试验结果可知, 孔隙率的不同会对试验结果造成一定的影响。因此, 第2阶段试验用于验证模型破坏角对模型材料孔隙率的敏感程度。

本阶段试验一共进行6次分试验, 均在固定侧向宽度下进行。试验开始前, 先设定一个合理的孔隙率变化范围, 根据孔隙率 n 和固定的模型体积 V , 用公式 $m_s = \rho_s V (1 - n)$ 计算出每次试验所需干砂质量。每次试验时把相应质量的干砂加入装置中, 然后用不同的碾压次数使干砂达到同一体积, 随后进行试验。第2阶段试验结果及相应参数如表3所示。将所得结果绘于“ $x-y$ ”两轴坐标系中, 可得图5。

表3 第2阶段试验结果

Table 3 Experimental results of step two

序号	侧向宽度 / cm	总体积 / cm ³	质量 / g	孔隙率 / %	破坏角 / (°)
1	12.64	5 550.0	9162.8	37.8	37.9
2	12.64	5 550.0	8971.6	39.0	37.4
3	12.64	5 550.0	8751.0	40.5	35.7
4	12.64	5 550.0	8530.4	42.0	34.8
5	12.64	5 550.0	8236.2	44.0	34.2
6	12.64	5 550.0	8015.6	45.5	33.4

3.2.2 第2阶段试验结果分析

由表3相关数据及图5中“孔隙率与破坏角”关系曲线可以看出, 边坡模型破坏时的角度会随着孔隙率的减小而增大, 且变化幅度很大, 超过了第1阶段的变化幅度。这说明了相对于边界条件而言, 破坏角对模型材料孔隙率的变化更加敏感。在进行同类试验时, 模型材料添加的步骤和方式要严格按照相应规定进行。

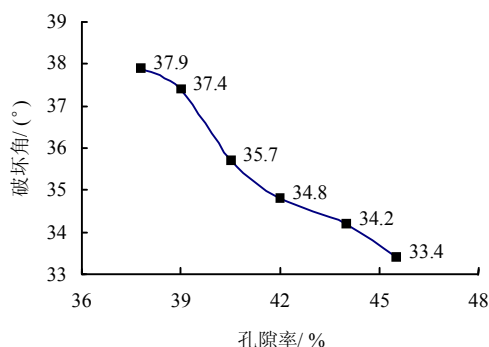


图 5 孔隙率与破坏角关系曲线

Fig.5 Relationship curve between porosity and landslide start degree

4 结 论

通过自制试验装置所做的试验以及推导出的数学公式,可以得到以下主要结论:

(1) 模型试验装置的边界条件会对试验结果造成一定的影响,对于本文试验而言,这种边界效应主要体现为模型破坏角随着侧向厚度增加而减小,最后趋近于一个常数,亦即这种边界效应对试验结果的影响会随着模型侧向厚度的增加而减弱。故可以通过调整试验装置的几何尺寸来降低边界效应对试验结果的不利影响。

(2) 随着边界效应的减弱,边坡模型滑面形状(俯视图)逐渐呈现出弧形面的形式,这说明产生滑坡现象时,坡面中部的滑移速度要比两边材料的速度大,亦即边界效应对坡面中部材料几乎不造成影响。

(3) 相对于边界条件而言,破坏角对模型材料孔隙率的变化会更加敏感。

参 考 文 献

- [1] 王哲, 易发成. 我国地质灾害区划及其研究现状[J]. 中国矿业, 2006, 15(10): 47—50.
WANG Zhe, YI Fa-cheng. Geological hazards regionalization and research status quo in China[J]. **China Mining Magazine**, 2006, 15(10): 47—50.
- [2] 邢庆祝, 黄真萍. 地质灾害的现状与建立减轻地质灾害系统工程[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 766—769.
XING Qing-zhu, HUANG Zhen-ping. The present conditions of geological hazard and building the systems engineering of reducing geological hazard[J]. **Journal of Fuzhou University(Natural Science)**, 2003, 31(6): 766—769.
- [3] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1798—1803.
JIA Guan-wei, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(9): 1798—1803.
- [4] 张均锋, 孟祥跃, 俞善炳, 等. 含弱透水夹层饱和砂土坡体滑坡的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2001—2005.
ZHANG Jun-feng, MENG Xiang-yue, YU Shan-bing, et al. Testing study on landslide of saturated sand slope sandwiched with low-permeability layer[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(12): 2001—2005.
- [5] VAID Y P, NEGUSSEY DAWIT. Relative density of pluviated sand samples[J]. **Soils and Foundations**, 1984, 24(2): 101—105.
- [6] COURRECH DU PONT S, GONDRET P, PERRIN B, et al. Wall effects on granular heap stability[J]. **Europhysics Letters**, 2002, 9(4): 1—7.