

开挖对边坡变形影响的离心模型试验研究

李 明, 张 嘎, 李焯芬, 张建民

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 边坡开挖是工程中经常遇到的问题。采用清华大学土工离心机以及新开发的开挖模拟设备进行了土坡开挖的离心模型试验, 测量了开挖过程中边坡位移场的变化。基于位移测量结果提出了一种确定开挖影响范围的方法, 分析了开挖后边坡的变形响应。结果表明: 开挖后坡体内部根据竖向应变性质的不同可分为开挖松动区、开挖压缩区和无影响区3个区域, 不同区域土体的变形特性有所差别。开挖后边坡内部的潜在滑裂面在变形破坏过程中是变化的, 从坡体内部向坡面方向移动。开挖条件下边坡表现出明显的渐进破坏过程。

关键词: 边坡; 开挖; 变形; 离心模型试验

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)04-0667-06

作者简介: 李 明(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事土质边坡渐进破坏方面的研究。E-mail: tlemon07@gmail.com。

Centrifugal model tests on excavation-induced deformation of slopes

LI Ming, ZHANG Ga, LEE C F, ZHANG Jian-min

(State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The problems induced by slope excavations are quite common in practice. Centrifugal model tests are conducted to investigate behaviors of cohesive slopes under excavation conditions using the excavation simulation devices on the centrifuge of Tsinghua University. The displacement fields are measured during excavation. A method is proposed to identify the excavation influence areas during excavation basing on the displacement measurements, and the deformation of a slope is also analyzed. The results show that the slope can be divided into three areas with different deformation features: excavation-induced relaxation area, excavation-induced compression area and non-influence area, in which the vertical strains are negative, positive and almost zero, respectively. Meanwhile, the potential slip surface moves during the process of deformation, which gradually spreads from the inner to the slope surface after excavation. The excavation causes a significantly progressive failure of the slope.

Key words: slope; excavation; deformation; centrifugal model test

0 引言

边坡开挖是工程中经常遇到的问题。在开挖因素作用下, 边坡内部原始应力平衡体系被打破, 各点的应力状态进行变化和调整, 该点同时发生变形, 直至达到新的平衡状态。在此过程中坡体内部各点变形之间存在相互协调相互影响的内在联系, 坡体变形协调是逐渐发展的一个过程。一般而言, 开挖条件下坡体的变形主要发生在一定范围内。通常把坡体内位移和应变调整变化较大的区域称作开挖影响区域。边坡破坏一般发生在开挖影响区域内, 因此该影响区域对边坡加固设计具有重要意义。目前对于开挖影响范围的研究较少, 对其判断往往以工程经验和现场检测试验为主, 用楔形体理论计算出的结果也往往与实际工程有较大区别^[1], 缺少通过模型试验结果判断开挖影响区域的方法。另外, 在边坡稳定性计算中广泛使用的

极限平衡法假设滑裂面上各点同时达到破坏, 然而研究发现边坡滑裂面的形成也是一个逐渐贯通的过程^[2]。因此, 有必要研究开挖条件下边坡滑裂面的产生变化过程。

离心模型试验由于具有保持模型与原型应力相同的优点, 在边坡的稳定性和破坏机理研究等方面已经得到了广泛应用^[3]。不过, 边坡开挖的离心模型试验研究主要集中在稳定性和破坏形态等方面, 尚未从变形的角度深入探讨开挖引起的边坡破坏规律。本文进行了边坡开挖的离心模型试验, 测量了边坡在整个开挖变形破坏过程中的位移场, 并以此计算相应的应变场。在测量结果基础上分析了开挖条件下边坡的变形

基金项目: 973 课题项目(2007CB714108); 国家自然科学基金项目(50778105)

收稿日期: 2009-12-15

破坏特性，提出了确定开挖影响范围的方法，分析了边坡滑裂面的形成发展过程。

1 试验设备与测量技术

离心模型试验使用清华大学 50 g-t 土工离心机及其上开挖的开挖模拟设备^[4]。该开挖设备采用刀片将坡脚欲开挖土体从边坡上切下并推离，可较好实现离心机运转过程中的土坡即时开挖和多次开挖。

边坡的位移场采用离心场图像采集与位移测量系统进行测量^[5]。该测量系统能够对多点同时进行测量，得到土体表面任意时刻任意区域的位移场。

2 模 型

试验用土料为北京某地铁站地下 20 m 深度处的粉质黏土。该土的颗粒比重为 2.71，最优含水率为 16%，液限为 30，塑性指数为 15。

试验土坡的坡高为 25 cm，坡度为 1.2:1，宽度为 20 cm。模型地基的干密度为 1.51 g/cm³，含水率为 18%。制样过程中，对土体进行分层击实，每层厚 5 cm。在模型箱非观测面贴有 2 层塑胶膜并在两层膜之间刷上硅油来减小侧壁摩擦对土坡变形的影响。

模型制作完成后安装开挖设备，然后将模型箱吊入离心机吊斗，将两台电机的电源线通过滑环与控制室内的电机控制开关相连。接好试验中所需的其他测试设备并进行调试。打开离心机，将离心加速度逐渐加到 50g，稳定一段时间，待坡体不再发生明显变形后进行开挖。开动牵引电机使刀片移动至预定开挖位置上方处停机，开动直线电机控制刀片下切直至坡底，然后控制牵引电机将刀片向远离边坡方向推动，将切下来的坡体推离土坡，完成开挖。试验过程中进行了一次开挖，开挖高度为 6 cm。

在开挖过程中，采用非接触位移测量系统记录并测量边坡侧面各点的位移变化，图像分析如图 1 所示。本文所给出的位移测量结果均基于模型尺寸。每次开挖以刀片完全插入坡脚并将欲开挖土体开始推离边坡的时刻作为该次开挖的初始时刻。

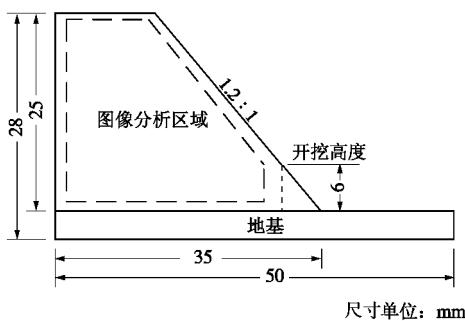


图 1 土坡模型示意图

Fig. 1 Model for a slope

3 试验结果

图 2 给出了开挖后不同开挖时刻边坡的形态照片以及开挖引起的水平和竖向位移等值线图。需要指出，等值线图中坡的边界如图 1 中的虚线所示。从图中可以看出，在开挖时间（以刀片完全插入预定位置并即将使土体脱离边坡为零时刻）为 4.2 s 时，边坡的位移场较为均匀，等值线分布较平行，此时边坡处于小变形条件下的均匀变形阶段。开挖时间达到 8.3 s 时，边坡的位移等值线朝顶部和边坡中下部开挖临空面附近聚集。这意味着变形开始朝这两个方向集中，此时坡顶上部对应等值线集中的区域已经有一条拉裂缝出现。坡体此时已经进入了应变局部化阶段，变形不再均匀。开挖时间达到 20.8 s 时，边坡中下部的位移等值线出现较明显的集中区域，这是应变局部化发展的结果，该区域的变形很大，并已经产生了明显的错动裂缝。当开挖时间达到 25.6 s 时，裂缝从下部发展贯通到上部，形成整体的滑动破坏。

上述分析表明，边坡从开始开挖到破坏共经历了小变形条件下的均匀变形阶段、应变局部化阶段、破坏阶段（滑裂缝产生至贯通）^[6]和破坏后阶段（滑裂面贯通后下滑）等 4 个阶段。可以推断，应变局部化阶段是坡体内部应力应变不断调整的阶段，后面的裂缝乃至最终滑裂面的形成是变形累积不均衡的结果。

4 边坡开挖变形分析

4.1 开挖影响区域

在土坡不同高程处沿水平线取一系列测点，得到开挖时刻 $t=8.3$ s 的土坡水平位移沿水平线的分布（图 3）。图中用实线标示了坡面的位置，其中横坐标 x 是测点距开挖临空面的距离、以向右为正，纵坐标 y 为测点到地基的距离、以向上为正。从 $y=9.6$ cm 处土坡的水平位移分布来看（图 3（e）），距开挖临空面左侧约 16 cm 处存在一个明显的拐点。该拐点左侧各点的水平位移很小，水平位移分布曲线也较为平缓，但拐点右侧各点的水平位移自坡内向外表现出较快速增大的趋势。其他高程的水平位移分布都表现出类似的规律。

拐点两侧土坡表现出不同的水平位移变化趋势，因此可以把该拐点作为开挖对土坡水平位移影响的一个分界点。把各分界点用虚线相连可以得到一个面，本文定义为开挖影响边界面。该面右侧坡体受开挖的影响较为显著，而左侧坡体可以认为基本不受开挖的影响。经过分析，不同开挖时刻下该面位置变动较小，开挖造成的变形主要发生在该面的右侧区域。

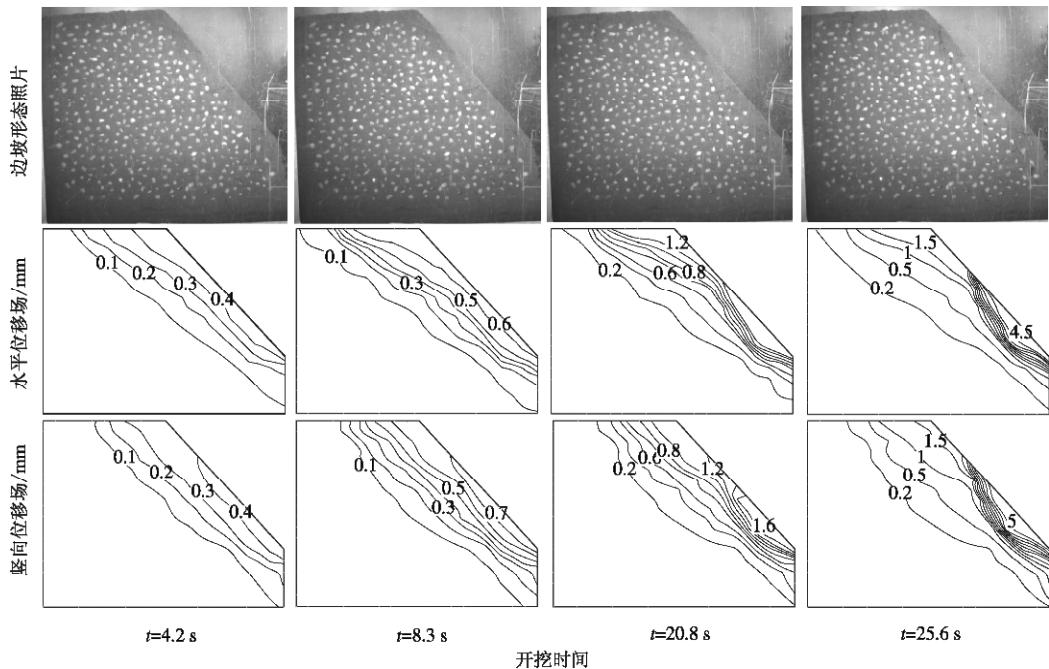


图2 开挖后的土坡变形场

Fig. 2 Displacement fields of slope after excavation

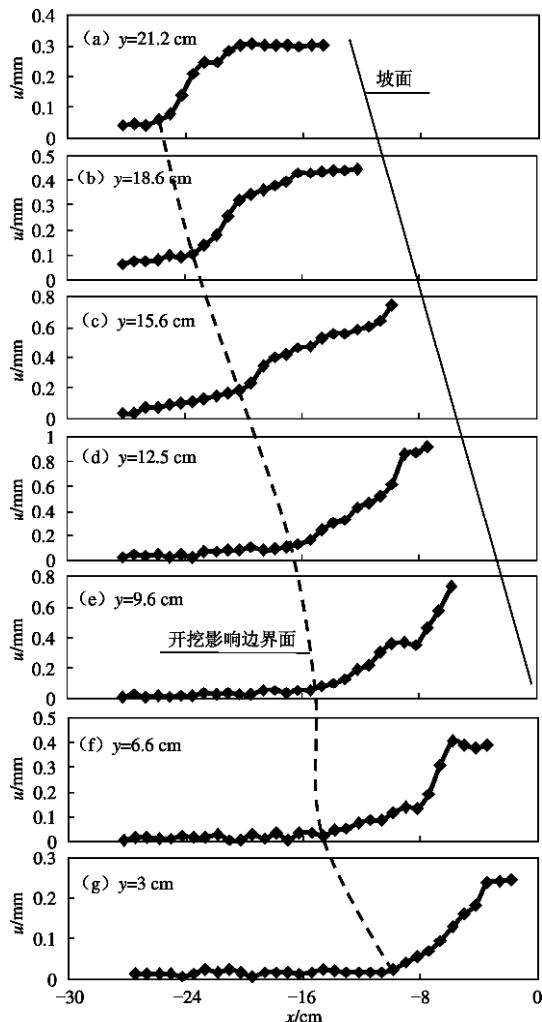
图3 不同高程的水平位移分布 ($t=8.3$ s)

Fig. 3 Distributions of horizontal displacements at different heights at some excavation time

4.2 坡体变形特性

选取边坡上中下三排单元分析开挖后变形过程中边坡不同区域单元应变的发展变化。单元为正方形，边长1 cm，每排内部两两单元间距0.5 cm（图4）。利用式（1）通过节点位移来计算单元应变，竖向和水平应变均以受压为正。

$$\begin{cases} e_x = \frac{1}{2a}(u_2 + u_3 - u_1 - u_4), \\ e_y = \frac{1}{2a}(v_3 + v_4 - v_1 - v_2), \\ g_{xy} = \frac{1}{2a}(u_3 + u_4 - u_1 - u_2) + \frac{1}{2a}(v_2 + v_3 - v_1 - v_4), \end{cases} \quad (1)$$

其中， e_x 为单元的水平向应变， e_y 为单元的竖向应变， g_{xy} 为单元 xy 方向的剪切应变， a 为单元的边长。对于二维平面应变问题而言，单元体应变 $e_v = e_x + e_y$ 。

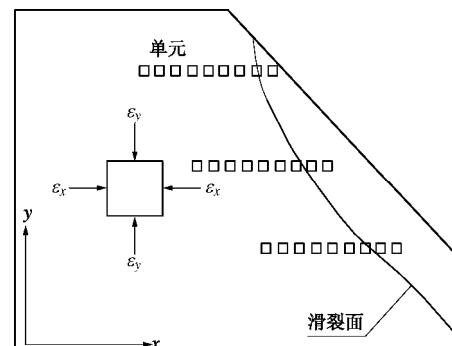


图4 应变分析单元位置

Fig. 4 Position of elements for strain analysis

图5给出了在开挖时间 $t=8.3$ s 时边坡上中下三排单元的应变空间分布。三排单元的竖向变形相比水平

向变形更为显著, 以中部水平排单元为例分析, 图 5 (b) 中该排单元的水平向应变均为负值(拉伸)且同竖向应变相比数值较小, 这意味着体应变的压缩膨胀变化主要由竖向应变的变化所造成。其他排单元的应变状态也有相同的规律。因此本文以竖向应变作为应变指标用于分析边坡内部不同区域的变形规律。可以看出三排单元的竖向应变分布曲线分为正负即压缩和拉伸两种状态。需要说明, 拉伸是指同开挖前相比竖向应变有一个拉伸增量, 土体此时仍处于受压状态。将竖向应变为零的点相连可得到一个竖向压缩拉伸转换面, 作为开挖后不同区域土体变形特性的分界。

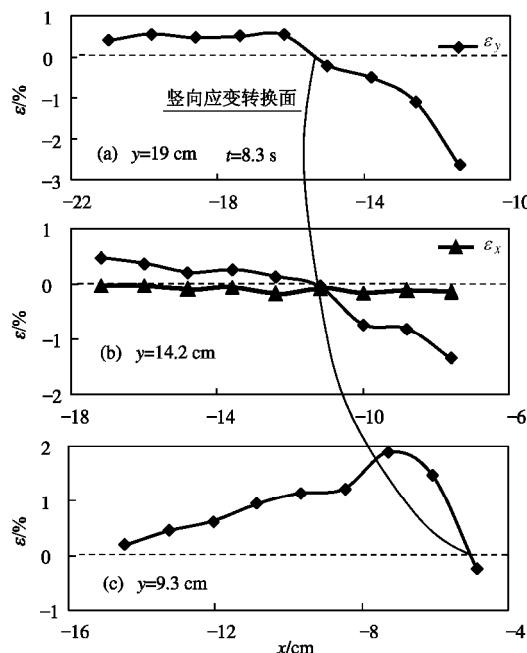


图 5 单元应变分布

Fig. 5 Distributions of strains of elements at different heights at some excavation time

竖向压缩拉伸转换面左右区域土体的变形特性有所不同。研究表明, 边坡坡脚开挖对剩余坡体的影响等效于在开挖临空面处施加一个指向外下侧的等效开挖力系^[7]。临空面附近土体在等效开挖力系作用下最先发生朝向外侧的变形^[8], 该部分变形对其上一定区域土体斜向牵拉造成其竖向应变和水平应变均为拉伸。竖向压缩拉伸转换面右侧区域受开挖临空面变形的牵拉作用显著, 这也是该区域单元竖向应变为负(拉伸)的原因, 本文将之定义为开挖松动区。相应来说, 转换面左侧与开挖影响边界之间的区域为开挖压缩区。由于水平位移场的连续性性质, 该区域土体水平向位移受开挖松动区土体变形影响而为正(向坡面运动), 在上覆应力(自重应力)基本不变的情况下右侧约束减小导致该区域土体变形以竖向压缩为主, 水平向拉伸应变主要由竖向压缩应变的泊松效应和协调变形组成。开挖影响边界左侧土体单元的变形和应变

均很小, 主要是位移场连续的性质产生的, 认为基本不受开挖影响, 为无影响区。

综上所述, 开挖后边坡内部可分为开挖松动区、开挖压缩区和无影响区 3 部分, 不同区域内土体的变形特性不同。进一步研究发现, 在不同的开挖时刻, 开挖松动区与压缩区的位置是发展变化的。在上排单元中选取最终滑裂面左右两侧的两个单元, 分析其竖向应变随开挖时间的变化(图 6)。滑裂面右侧的单元 b 竖向应变一直为负, 意味着整个开挖过程中, 单元 b 的竖向应变均为拉伸增量。而单元 a 在开挖时间 $t=23$ s 之前竖向应变为负, 之后则为正。这说明单元 a 的竖向应变随着开挖时间的增加由拉伸增量而逐渐转为压缩, 也即是拉伸压缩转换面的位置随着时间发展而不断变化, 转换面中下部变动较小, 上部逐渐由坡内向坡面发展(图 7)。值得指出的是坡体破坏时的拉伸压缩转换面与最终滑裂面位置基本相同。

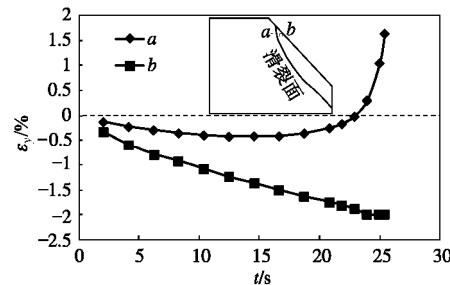


图 6 典型单元竖向应变时程曲线

Fig. 6 Vertical strain of a typical element at different excavation time

拉伸压缩转换面的变化特性表明边坡在开挖之后中下部土体的变形特性变化不大, 主要受开挖临空面影响, 上部土体的变形状态则随着坡体变形导致坡度变化后而有较大的改变。

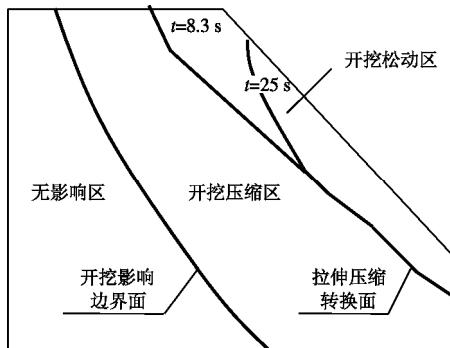


图 7 坡体分区

Fig. 7 Division of slope area

4.3 边坡剪切特性

坡脚开挖后剩余坡体发生变形。在变形过程中伴随着应力转移应变软化等现象, 同时坡体内部存在剪应变较大的剪切集中区域^[9-11]。通过分析坡体上部沿水平线上的一排单元的沿坡向剪应变来研究坡体上部

剪切集中区域的发展趋势。

图8给出了3个不同的开挖时段内该排单元($y=19\text{ cm}$)的沿坡向剪应变空间分布图。图中横坐标 x 是单元距开挖临空面的距离,纵坐标 g 为某时段内的沿坡向剪应变增量, g 为沿坡向剪应变在该时刻的累计值。从图8(a)中可以看出,随着开挖时间的不断增加,该排单元的沿坡向剪应变总量也不断增大,同一开挖时间内靠近坡面的单元沿坡向剪应变较大。图8(b)~(d)给出了3个开挖时段内该排单元的沿坡向剪应变增量。在开挖时间 $t=8.3\text{ s}$ 到 $t=12.5\text{ s}$ 的区间内,该排单元的沿坡向剪应变增量分布在中间单元处明显有一个峰值,说明在该时间段内中部单元附近区域相对剪切变形较大,为此时刻的剪切变形集中区域。而在开挖时间为 14.6 s 到 18.8 s 之间(图9(c)),该排单元的沿坡向剪应变增量分布显得较为均匀,但在中部单元处仍有较大的峰值,且峰值相比之前开挖时段有向坡面方向移动的趋势。而开挖时间达到 20.8 s 和 22.9 s (图9(d))时应变峰值的位置移动趋势更为明显,发生在靠近坡面的单元处,最终形成的滑裂面也通过该单元。

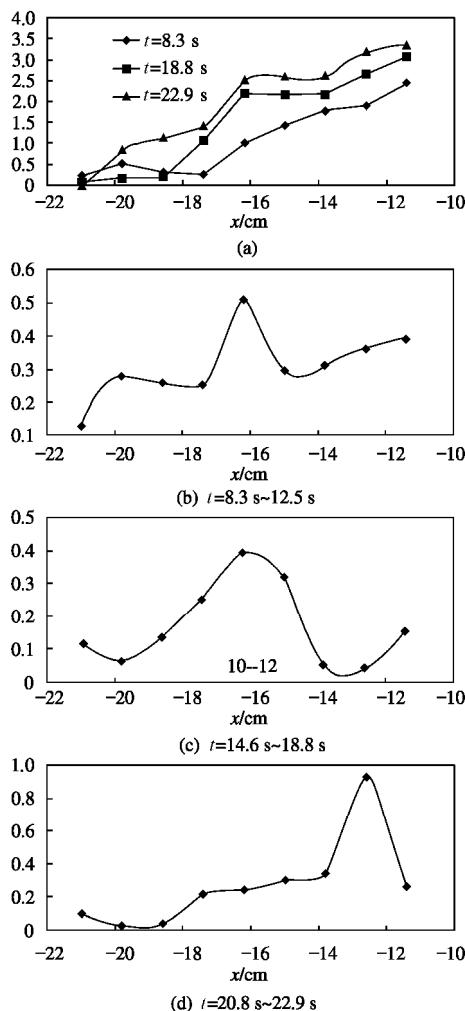


图8 剪切集中区域移动趋势

Fig. 8 Spread trend of shear convergence band

上述分析表明,在不同的开挖时段内坡体上部剪切集中区域是不断变化的。同样在坡体中部和下部各取一排单元来分析剪切集中区域的变化也存在类似的规律,但移动趋势较小,坡体中下部剪切集中区域在开挖过程中变化不大。剪切集中区域代表着坡体内剪应变的发展集中状况,其变化表明在边坡开挖渐进破坏过程中潜在滑裂面也随开挖时间的增加而不断发生变化,直至变形发展到一定程度后剪切集中区域逐渐贯通形成剪切带,也即是最终滑裂面生成。结合图7,8的分析发现,上部土体剪切集中区域的移动趋势与竖向应变拉伸压缩转换面的移动趋势大致相同,说明二者之间存在一定的联系,转换面的移动是坡体变形发展的结果。

5 结 论

(1) 坡脚开挖对边坡变形的影响限定在一个影响区域内,该影响区域之外土体变形较小。在一次开挖过程中该影响区域的范围基本不变。

(2) 边坡破坏是变形不断累积的结果。开挖后边坡内部可分为开挖松动区、开挖压缩区和无影响区3部分,不同区域内土体的变形特性不同。随着开挖时间的增加,松动区和压缩区的范围不断发生变化。

(3) 开挖后边坡内部的潜在滑裂面随着坡体变形的发展而不断变化,表现为随开挖时间的增加而从坡内向坡面不断移动。

参考文献:

- [1] 曹兴松,周德培.边坡开挖影响范围和潜在滑面的研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(17): 2882~2886. (CAO Xing-song, ZHOU De-pei. Study on slope cut-induced influence zone and potential slide surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2882~2886. (in Chinese))
- [2] MIAO Tian-de, MA Chong-wu, WU Sheng-zhi. Evolution model of progressive failure of landslides[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999: 827~831.
- [3] 濮家骝.土工离心模型试验及其应用的发展趋势[J].岩土工程学报,1996,18(5): 96~98. (PU Jia-liu. Geotechnical centrifuge model test and its application development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 92~94. (in Chinese))
- [4] 李明,张嘎,李焯芬,等.离心模型试验中边坡开挖设备的研制与应用[J].岩土工程学报,待刊. (LI Ming, ZHANG Ga, Lee C F, et al. Development and application of a

- slope excavation device in centrifuge model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, in press. (in Chinese))
- [5] ZHANG G, HU Y, ZHANG J. New image-analysis-based displacement-measurement system for centrifuge modeling tests[J]. Measurement, 2009, **42**(1): 87 - 96.
- [6] 李明, 张嘎, 李焯芬, 等. 边坡开挖破坏过程的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, **31**(2): 366 - 370. (LI Ming, ZHANG Ga, LEE C F, et al. Centrifuge model tests on excavation-induced failure of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, **31**(2): 366 - 370. (in Chinese))
- [7] 王敏强, 许原. 有限元分析中开挖释放荷载计算的讨论[J]. 武汉大学学报, 2001, **34**(1): 56 - 59. (WANG Min-qiang, XU Yuan. Discussion of released loads in calculation of excavation by finite element method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, **34**(1): 56 - 59. (in Chinese))
- [8] 王爱霞. 土坡变形破坏过程的离心模型试验研究[D]. 北京: 清华大学. (WANG Ai-xia, Centrifuge moding on failure and deformation process of soil[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese))
- [9] 高长胜, 徐光明, 张凌, 等. 边坡变形破坏离心机模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(4): 478 - 481. (GAO Chang-sheng, XU Guang-ming, ZHNAG Ling, et al. Centrifuge modeling of deformation and failure of slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(4): 478 - 481. (in Chinese))
- [10] 王庚荪. 边坡的渐进破坏及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(1): 29 - 33. (WANG Geng-sun. The progressive failure of slope and the stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(1): 29 - 33. (in Chinese))
- [11] 肖克强, 周德培, 李海波. 软岩高边坡开挖变形规律的物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(1): 111 - 115. (XIAO Ke-qiang, ZHOU De-pei, LI Hai-bo. Physical modeling of deformation properties for soft rock slope under excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(1): 111 - 115. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京金土木软件技术有限公司
 封 3 重庆市永固工程拉筋带厂有限公司
 封 4 上海分元土木工程科技有限公司
 后插 1 广州市中海达卫星导航技术股份有限公司
 后插 2 常州金土木工程仪器有限公司
 后插 3 北京理正软件设计研究院有限公司
 后插 4 中仿科技