

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201901024



本刊网刊

# 边坡深部不均匀沉降条件下桩基础破坏特性的离心模型试验研究

张 彬<sup>1</sup>, 杨 昆<sup>2</sup>, 赵艺颖<sup>2\*</sup>, 刘应明<sup>1</sup>, 张强永<sup>1</sup>, 刘尧兵<sup>1</sup>, 马昌慧<sup>2</sup>, 张 嘎<sup>2</sup>

(1.六盘水供电局, 贵州 六盘水 553000; 2.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:**中国地质条件复杂, 岩土工程问题复杂多变。随着工程建设开展, 深部不均匀沉降条件下(如: 地下煤炭开采、基坑开挖、地下水位变化等), 上覆边坡及其上的基础容易发生严重的变形乃至破坏。桩基础是目前工程中常用的边坡加固方式, 因此, 边坡深部不均匀沉降条件下的桩基础破坏特性亟待研究。作者采用液压系统模拟深部不均匀沉降条件, 进行不同范围的深部不均匀沉降条件下桩基础破坏特性的离心模型试验, 探究不均匀沉降范围对桩基础变形破坏特性的影响机制, 以及深部不均匀沉降条件下桩基础的破坏机理。研究结果表明: 1) 深部不均匀沉降条件下, 桩基础所在土坡产生了3条主要的滑裂面, 其中深部不均匀沉降区域附近的滑裂面是明显的滑动破坏, 基础附近的滑裂面以张拉破坏为主; 2) 深部不均匀沉降首先导致了土体内部发生由下至上的滑动破坏, 进而使桩基础发生了失稳, 最终导致基础附近发生由上至下的破坏; 3) 深部不均匀沉降范围通过影响上部土体的变形局部化的时空分布情况改变了土坡滑裂面的位置与形状; 4) 深部不均匀沉降条件对土坡的影响存在一定的范围, 影响区边界均呈绕桩分布。

**关键词:**深部不均匀沉降; 桩基础; 边坡; 破坏; 离心模型试验

中图分类号: TU411.93

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2020)03-0093-07

## Centrifuge Model Tests on the Failure Behavior of Pile Foundation Under the Condition of Deep Non-uniform Settlement in Soil Slopes

ZHANG Bin<sup>1</sup>, YANG Kun<sup>2</sup>, ZHAO Yiyang<sup>2\*</sup>, LIU Yingming<sup>1</sup>, ZHANG Qiangyong<sup>1</sup>, LIU Yaobing<sup>1</sup>, MA Changhui<sup>2</sup>, ZHANG Ga<sup>2</sup>

(1. Liupanshui Power Supply Bureau, Liupanshui 553000, China; 2. State Key Lab. of Hydroscl. and Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

**Abstract:** The geological conditions and geotechnical engineering problems are complex and changeable in China. As the construction of engineering projects, deep non-uniform settlement conditions (such as underground coal mining, foundation pit excavation and groundwater level change) can lead to serious deformation and failure of the slopes and foundations overlying them. Pile foundation is a common method of slope reinforcement in engineering projects. Therefore, it is necessary to figure out the failure behaviors of pile foundations under deep non-uniform settlement conditions. Centrifuge model tests were conducted to investigate the deformation and failure behavior of pile foundations under the condition of deep non-uniform settlement which was simulated by the hydraulic system in different ranges. The influence mechanism of deep non-uniform settlement and the failure mechanism of pile foundation were investigated. The observation results are as follows: 1) under the condition of deep non-uniform settlement, there were three main slip surfaces in the slopes, among which the slip surfaces near the deep non-uniform settlement area were obvious sliding failure and the sliding surface near the foundation was mainly tensile failure; 2) the deep non-uniform settlement first led to the slip failure inside the soil from bottom to top, and then led to the instability of the pile foundations, and finally led to the slip surface near the foundation from top to bottom; 3) the range of deep non-uniform settlement changed the location and shape of the slip surfaces of the slopes by influencing the spatial and temporal distribution of the deformation localization; 4) there was an influence range of deep non-uniform settlement condition, and the boundary of the influence range was distributed around piles.

**Key words:** deep non-uniform settlement; pile foundation; slope; failure; centrifuge model test

收稿日期: 2019 - 10 - 24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508503); 中国南方电网有限责任公司科技项目(060200KK52160004)

作者简介: 张 彬(1986—), 男, 工程师。研究方向: 基础工程和安全。E-mail: 191960406@qq.com

\* 通信联系人 E-mail: zhaoyiyang13@163.com

网络出版时间: 2020 - 04 - 20 15 : 48 : 00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200420.1100.002.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>



土坡变形稳定后,启动液压设备,使液压缸下沉5 cm,模拟深部不均匀沉降的条件。在试验P2中,全部液压缸均下沉,模拟沉降范围为15 cm;在试验P1中,只有靠近土坡内部的一半液压缸下沉,模拟沉降范围为8 cm。

土坡的变形破坏情况采用离心场图像采集与位移测量系统观测<sup>[13]</sup>。根据该系统得到的照片系列,通过相关分析进一步测量确定土坡上任意一点的位移。需要指出,为了满足图像位移相关分析对土坡侧面灰度分布的要求,在土坡侧面随机嵌入白色水磨石(图2)。

2 基础响应

从桩基础承台的倾斜程度和中心点位移两个方面,重点关注在深部不均匀沉降条件下桩基础的变形破坏响应。图3分别给出了两组试验中的基础倾斜角度和中点位移的时程图。由图3可见:在深部不均匀沉降的条件下,基础均发生了一定程度的倾斜和位移,在深部不均匀沉降初期,基础的变位均较小且发展比较缓慢;随着不均匀沉降增加,基础的变位逐渐增大,且存在发展速度突然加快的拐点,容易推断这是由于基础发生了失稳。

进一步分析深部不均匀沉降范围的影响,可以

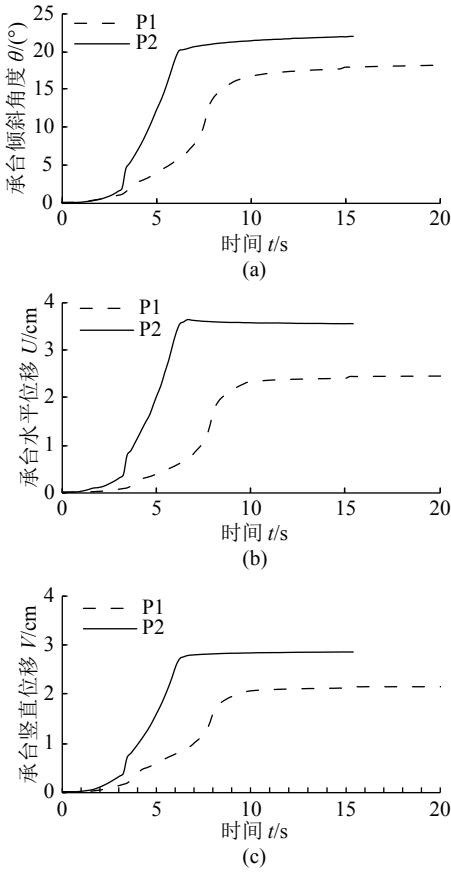


图3 桩基础响应时程图

Fig. 3 Histories of pile foundation's response

看出,开挖范围更大的试验P2中基础的倾斜程度和中心点位移均明显大于试验P1结果且发展更为迅速。这说明增大深部不均匀沉降范围可显著增加桩基础的变位并降低其承载力。

3 破坏特性

3.1 破坏形态

在深部不均匀沉降条件产生后,两组试验土坡内部均产生了明显的滑裂面(图4)。

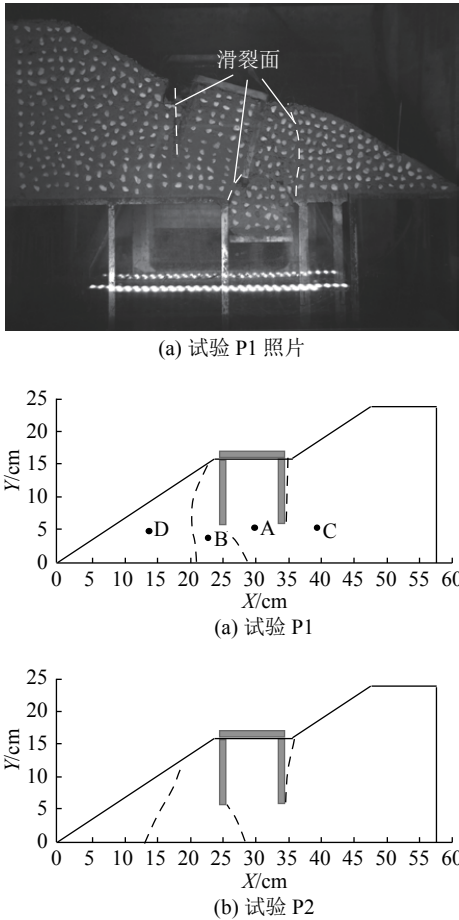


图4 土坡破坏形态

Fig. 4 Morphology of slope failure

图4(a)为P1试验结束后桩基础和土坡最终破坏形态的照片,滑裂面如图中虚线所示。图4(b)为根据试验照片确定的两组试验的滑裂面形态示意图。由图4可以看出,不同深部不均匀沉降范围的土坡均产生了3条主要的滑裂面,其中靠土坡外侧的两条位于深部不均匀沉降区域附近,最内侧一条滑裂面位于桩基础靠近土坡内部的边缘附近。两个土坡的滑裂面的形状和位置有明显的区别,深部不均匀沉降区域附近的两条滑裂面的位置主要由该区域的位置和大小决定。桩基础边缘附近的滑裂面形态主要受桩基础的影响,该滑裂面沿着靠近土坡内侧的桩基础发展至桩基础的底部,形成了绕桩底破坏模式,桩基础

和附近土体一起发生偏转和位移。因此,深部不均匀沉降条件下土坡的破坏形态很复杂,同时受到桩基础与深部不均匀沉降区域的影响。

为便于表述,以坡脚为原点建立了直角坐标系,分别以向边坡内部和向上为正方向(图4(b))。土坡的水平位移以向右为正、竖直位移以向下为正。

### 3.2 破坏过程

进一步分析桩基础及土坡的破坏过程,以试验P1为例,分别在土坡最外侧和最内侧的两条滑裂面的两侧分别选取了一系列点对,每一组点对相距15 mm,点对的具体位置如图5所示。

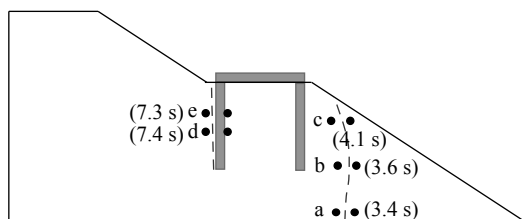


图5 点对位置及滑裂面形成过程

Fig. 5 Locations of point couples and sequence of slip surface

图6分别给出了两条滑裂面点对的切向和法向相对位移的时程曲线图,切向相对位移以滑动体向下滑动为正,法向相对位移以张拉为正。由图6可以看出,对于深部不均匀沉降区域附近的滑裂面,不同高程处点对的切向相对位移均明显大于法向相对位移,说明该滑裂面是明显的滑动破坏。对于桩基础附近的滑裂面,不同高程处的点对的法向相对位移整体均大于切向相对位移,在靠近基础处更为明显,说明该滑裂面既包含滑动破坏也包含张拉破坏,其中,以张拉破坏为主。这表明,土坡不同位置处的滑裂面的破坏模式有所不同。

进一步分析两条滑裂面的破坏过程,对于深部不均匀沉降区域附近的滑裂面,在深部不均匀沉降初期,点对的切向相对位移保持在零附近且增长速率较小,说明点对之间还没有发生明显的滑动破坏;随着深部不均匀沉降的程度逐渐加深,点对的切向相对位移逐渐增大且增长速率加快,说明点对之间的滑裂面逐渐开始形成。切向相对位移的时程曲线上有一个明显的拐点,可以认为该拐点所对应的时刻即为改高程处的滑裂面产生的时刻,具体而言,可以通过分别在采空初期和滑裂面形成后的典型时刻处做点对相对位移曲线的切线,两条切线的交点所对应的时刻即为发生破坏的时刻。因此可以得到该滑裂面在不同高程处的产生时刻(图5),可以看出,靠近深部不均匀沉降区域的下部滑裂面产生时刻较早,位于上部的滑裂面的产生时刻较晚,因此该滑裂面是从下至上逐渐产生的。

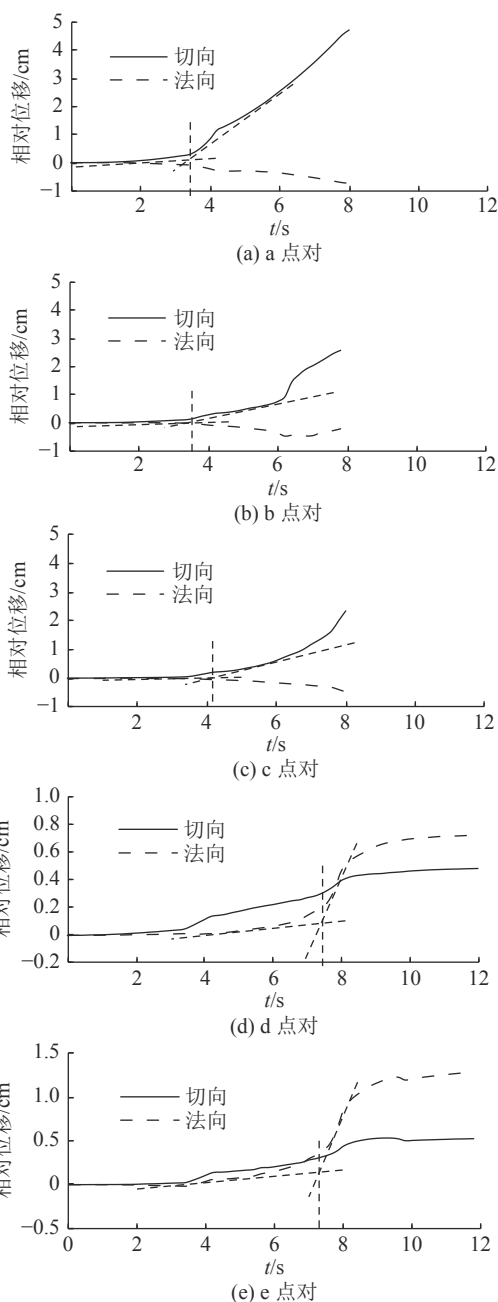


图6 点对的相对位移时程曲线

Fig. 6 Histories curves of relative displacement of point couples

同样地,对于基础附近的滑裂面,以法向相对位移时程曲线的拐点处作为该高程滑裂面产生的时刻。由图6可以看出,靠近基础的上部滑裂面产生时刻较早,土坡下部的滑裂面产生时刻较晚,因此该滑裂面是从上至下逐渐产生的。这表明,对于不同位置处的滑裂面,均表现出了明显的渐进破坏特性,但具体的破坏顺序有所不同。

图6还可看出,位于深部不均匀沉降区域的滑裂面产生较早,在其形成之后,基础附近的滑裂面才开始形成。结合图3,可以看出在位于深部不均匀沉降

区域的滑裂面形成后,基础的变形发展速度开始加快,即基础发生了失稳,随后产生了基础附近的滑裂面。因此,可以认为深部不均匀沉降首先导致土体内部发生滑动破坏,进而使基础发生了失稳,最终导致基础附近土坡发生破坏。

4 变形特性

在深部不均匀沉降条件下,两组试验均表现出显著的变形。为了分析土坡的变形特性,分别在试验P1的基体和滑动体上不同位置选取典型点测量其位移时程,如图7所示。各点的具体位置见图4(b)。

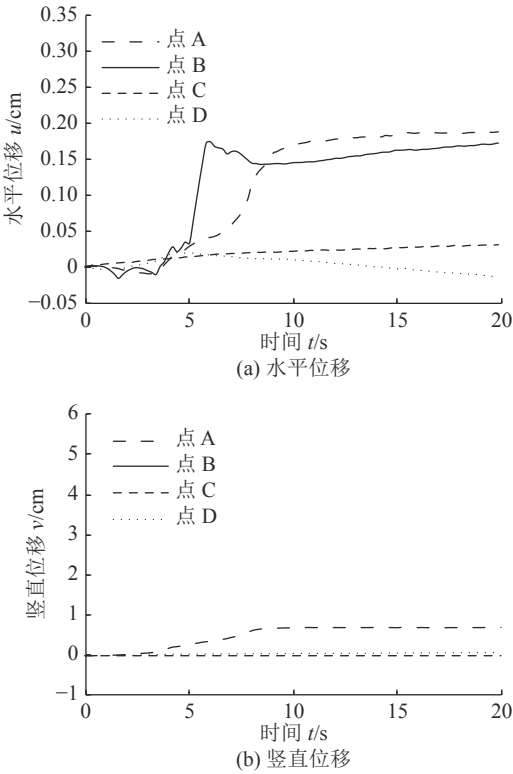


图7 试验P1土坡典型点的位移时程

Fig. 7 Displacement histories of typical points of test P1

由图7可以看出,滑动体与基体上的点的变形特性的差异很大:位于基体上的点C和点D的水平位移和竖直位移均较小,其中点C的位移基本稳定在零附近,点D有向左的水平位移,说明土坡内侧的基体基本不受深部不均匀沉降条件的影响,土坡外侧的基体产生了较小的向内部的位移。位于滑动体上的点A和点B的竖直位移均随着时间的推移逐渐增大,可以推断,这主要是由于土坡发生了破坏,且点B的竖直位移明显大于点A的竖直位移,表明滑动体内部仍存在复杂的变形,深部不均匀沉降区域附近的土体的沉降更为明显。点A的水平位移也随时间的推移逐渐增大,但点B的水平位移随时间的推移先增大后略有减小,最后趋于稳定,这是由于滑动体中靠近坡表部

分受到了外侧基体的影响,产生了少量向左水平位移。

图8为试验P1在滑裂面产生前后的4个典型时刻的不同高程上土坡的竖直位移的水平分布图。由图8可以看出,在深部不均匀沉降的初期,土坡的竖直位移均较小,且分布比较均匀,说明此时变形局部化尚不明显。随着时间的推移,土坡各点的竖直位移均随之增大,而且位移分布表现出逐渐增强的不均匀程度,位移分布曲线出现了两个明显的拐点,这意味着土坡出现了变形局部化。滑裂面形成后,土坡位移分布曲线在滑裂面附近出现了明显的拐点,表现出很大的位移变化梯度。

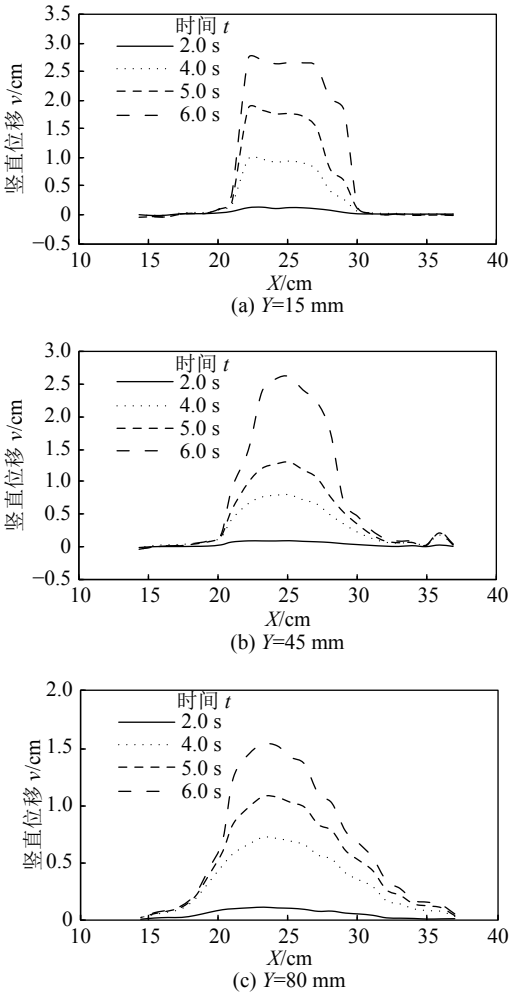


图8 试验P1土坡典型高程处不同时刻竖直位移的分布  
Fig. 8 Distribution of vertical displacement of test P1 at typical elevation

根据图8可知,深部不均匀沉降条件对上覆土坡的影响存在一定的范围,在影响区范围之外的土体位移接近于零,可以认为曲线的拐点对应的位置是影响区的边界,因而可以得到深部不均匀沉降条件的影响范围(图9)。比较试验P1和试验P2可知,深部不均匀沉降范围越大,其对土坡的影响范围越大。影响区边界均呈绕桩分布,即桩基础全部在影响范围内。

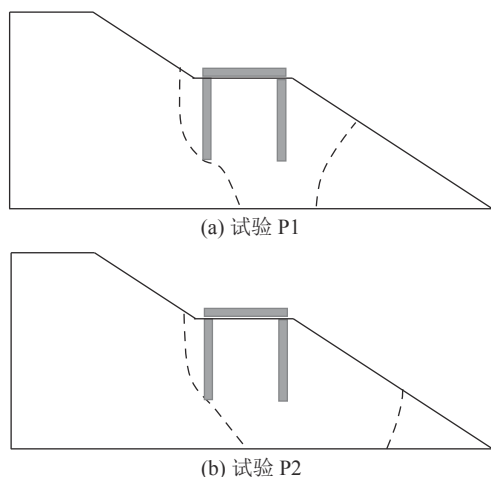


图 9 土坡影响区形态

Fig. 9 Influence area morphology of slopes

## 5 破坏机理

图8表明,在深部不均匀沉降条件下,土坡的位移差异逐渐增大,这意味着变形局部化增强并最终导致了滑裂面的形成。为进一步探究土坡变形与破坏耦合机理,图10给出了试验P1滑裂面形成前后不同高程处土坡的竖直位移梯度分布。容易推断,该位移梯度的大小反映了变形局部化程度。图10还用虚线标出了滑裂面在该高程的位置。

由图10可以看出,在深部不均匀沉降产生的初期,土坡的位移梯度均较小且分布均匀,没有出现明显的变形局部化。随着时间的推移,土坡内部一定区域的位移梯度迅速增加,出现了明显的梯度峰值,说明在这个位置已经产生了变形局部化现象。该梯度峰值出现后,其附近的变形局部化程度继续增大,最终导致了滑裂面的产生,滑裂面的位置恰好在变形局部化的区域内部。这表明,在深部不均匀沉降条件下,土坡内部变形局部化的产生和逐渐增强,最终导致了土坡滑裂面的产生。

由图10还可以看出,滑裂面出现后,其附近的位移梯度继续表现出显著增长,滑动体内部仍发生显著的变形。这意味着滑裂面出现进一步增强了其附近区域的变形局部化程度。也就是说,在深部不均匀沉降条件下,土坡的变形和破坏是耦合的,变形局部化导致了局部破坏,而破坏发生后进一步在其出现位置附近区域引起了新的变形局部化。

图11给出了试验P2滑裂面形成前后典型时刻的竖直位移梯度分布。可以看出,该桩基础土坡在破坏之前也出现了从变形均匀向变形局部化的发展过程,变形局部化逐渐增大并导致在其峰值附近出现了破坏。局部破坏发生之后进一步加剧了其附近的变形局部化。滑裂面出现后,滑动体内部仍发生显著

的变形。这表明了在更大的深部不均匀沉降范围下桩基础土坡表现出了相似的变形与破坏耦合特性。

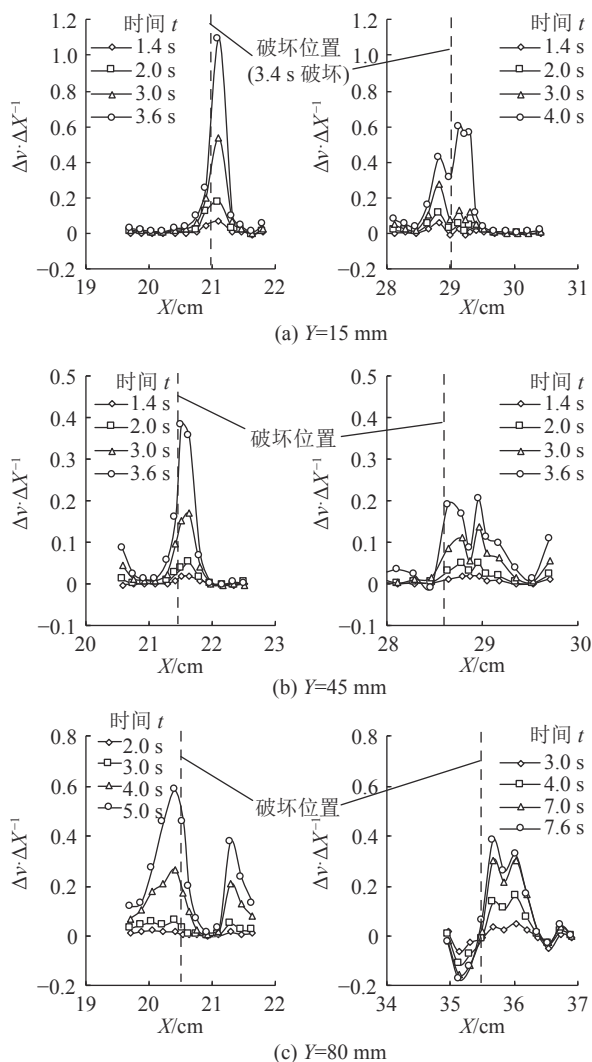


图 10 试验P1土坡不同高程处竖直位移梯度的水平分布

Fig. 10 Horizontal distribution of vertical displacement gradient at different elevations of test P1

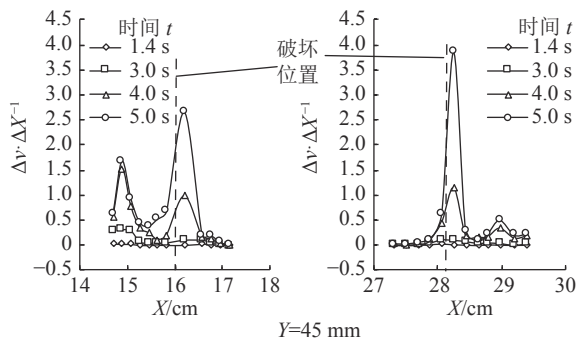


图 11 试验P2土坡典型高程处竖直位移梯度的水平分布

Fig. 11 Horizontal distribution of vertical displacement gradient at typical elevation of test P2

比较图10和图11可以发现,不同深部不均匀沉降范围的土坡的变形局部化显著区域及产生时刻并

不一致。这说明深部不均匀沉降范围通过影响上部土体的变形局部化的时空分布情况改变了土坡滑裂面的位置与形状。

## 6 结 论

采用离心模型试验手段研究了深部不均匀沉降条件下桩基础的变形破坏特性,通过对比不同不均匀沉降范围的试验结果,探究了不均匀沉降范围对桩基础变形破坏特性的影响机制,揭示了深部不均匀沉降条件下桩基础的破坏机理。主要得出以下结论:

1)深部不均匀沉降条件下,桩基础所在土坡均产生了3条主要的滑裂面,最内侧一条滑裂面位于基础靠近土坡内部的边缘附近。土坡不同位置处的滑裂面的破坏性质有所不同:深部不均匀沉降区域附近的滑裂面是明显的滑动破坏;基础附近的滑裂面以张拉破坏为主。

2)深部不均匀沉降首先导致了土体内部发生滑动破坏,进而使桩基础发生了失稳,最终导致桩基础附近发生破坏。土坡表现出明显的渐进破坏的特性,但不同滑裂面的形成顺序有所不同:靠近深部不均匀沉降区域的滑裂面从下至上逐渐产生的;基础附近的滑裂面是从上至下逐渐产生的。

3)不同深度不均匀沉降范围条件下的土坡均表现出相似的变形与破坏耦合特性。一方面,变形局部化的发展最终导致了土坡破坏;另一方面,局部破坏发生之后进一步引起其附近区域新的变形局部化。深部不均匀沉降范围通过影响上部土体的变形局部化的时空分布情况改变了土坡滑裂面的位置与形状。

4)深部不均匀沉降条件对土坡的影响存在一定的范围,影响区边界均呈绕桩分布。深部不均匀沉降范围越大,其对土坡的影响范围越大。

## 参考文献:

- [1] Xia Kaizong, Liu Xiumin, Chen Congxin, et al. Surface deformation in west area of Chengchao iron mine induced by underground mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(8): 1572–1588. [夏开宗, 刘秀敏, 陈从新, 等. 程潮铁矿西区地下开采引起的地表变形规律初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(8): 1572–1588.]
- [2] Zhang Yun, Xue Yuqun, Ye Shujun, et al. Analysis of deformation of sand strata and land subsidence based on modes of groundwater level changes in Shanghai city[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(3): 103–109. [张云, 薛禹群, 叶淑君, 等. 地下水位变化模式下含水砂层变形特征及上海地面沉降特征分析[J]. *中国地质灾害*

与防治学报, 2006, 17(3): 103–109.]

- [3] Fu Hua, Chen Congxin, Xia Kaizong, et al. Analysis of rock deformation caused by underground mining of metal mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(9): 1859–1868. [付华, 陈从新, 夏开宗, 等. 金属矿山地下开采引起岩体变形规律浅析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(9): 1859–1868.]
- [4] Liu Teng, Wang Jin'an, Gao Zhiguo, et al. Similarity simulation research of slope deformation during underground mining in mountainous area[J]. *Metal Mine*, 2014(10): 161–165. [刘腾, 王金安, 高治国, 等. 山区地下开采地表移动相似模拟实验研究[J]. *金属矿山*, 2014(10): 161–165.]
- [5] Wang Rong, Yang Yan, Jia SanMan, et al. A numerical analysis of the influence of land subsidence on the engineering stability of the Beijing-Tianjin intercity railway[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2014, 35(1): 64–67. [王荣, 杨艳, 贾三满, 等. 地面沉降对京津城际铁路工程稳定性影响的数值分析[J]. *上海国土资源*, 2014, 35(1): 64–67.]
- [6] Gong Shengwu, Wang Wen. Stability analysis of slope influenced by mined-out areas with FLAC[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2008, 28(2): 20–23. [龚声武, 王文. 地下老采空区对边坡稳定性影响的FLAC分析[J]. *矿冶工程*, 2008, 28(2): 20–23.]
- [7] Lin Pengzhen, Wu Fahui, Yang Zijiang. Mechanic analysis of bridge pile foundation considering slope effect[J]. *China Railway Science*, 2016, 37(4): 54–60. [蔺鹏臻, 武发辉, 杨子江. 考虑边坡效应的桥梁桩基受力分析[J]. *中国铁道科学*, 2016, 37(4): 54–60.]
- [8] Zhou Jianfeng, Wang Junxing, Chen Wei. Surface deformations and failure mechanisms of deposit slope under seismic excitation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(12): 2300–2305. [周建烽, 王均星, 陈炜. 非饱和和非稳定渗流作用下边坡稳定的有限元塑性极限分析下限法[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(12): 2300–2305.]
- [9] Viswanadham B V S, Rajesh S. Centrifuge model tests on clay based engineered barriers subjected to differential settlements[J]. *Apply Clay Science*, 2009, 42(3-4): 460–472.
- [10] Zhang Ga, Hu Yun, Wang Liping. Behaviour and mechanism of failure process of soil slopes[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(4): 1701–1713.
- [11] Zornberg J G, Sitar N, Mitchell J K. Performance of geosynthetic reinforced slopes at failure[J]. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(8): 670–683.
- [12] Wang L P, Zhang G. Progressive failure behavior of pile-reinforced clay slopes under surface load conditions[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(12): 5007–5016.
- [13] Zhang Ga, Hu Yun, Zhang JianMin. New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests[J]. *Measurement*, 2009, 42(1): 87–96.

(编辑 张凌之)

引用格式: Zhang Bin, Yang Kun, Zhao Yiying, et al. Centrifuge model tests on the failure behavior of pile foundation under the condition of deep non-uniform settlement in soil slopes[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(3): 93–99. [张彬, 杨昆, 赵艺颖, 等. 边坡深部不均匀沉降条件下桩基础破坏特性的离心模型试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(3): 93–99.]