

# 基于PFC<sup>3D</sup>的地下连续墙槽壁稳定性模拟分析

何 焯<sup>1</sup>, 周昌军<sup>1</sup>, 何 鑫<sup>2</sup>, 王 胜<sup>2\*</sup>, 解程超<sup>2</sup>, 唐庆东<sup>1</sup>, 李守信<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司, 四川 成都 611130;  
2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:**针对富水砂卵石层地下连续墙成槽过程中槽壁易发生失稳的问题,通过分析相关的研究资料,在明确失稳形式及机理的基础上,设计了改变流速和粒径比的两种模拟试验方案,采用PFC<sup>3D</sup>颗粒流软件分析了渗流对土颗粒间性质变化的影响。数值模拟结果表明:流速对于颗粒的位移有很大的影响。流速越快,颗粒位移越大,孔隙率越高,墙体所受应力也越大;粒径比对于颗粒的位移同样有很大影响,其表现的作用与流速相似;在有侧限的情况下,颗粒的 $x$ 向位移在达到极限后会产生 $z$ 向的分量,使得颗粒向上位移。在实际工程中就意味着在颗粒位移达到一定程度,必然会突破泥膜,导致土体内细颗粒的流失,土体孔隙率增大,最终使得槽壁发生垮塌。

**关键词:** PFC<sup>3D</sup>; 富水砂卵石层; 槽壁稳定性; 数值模拟; 地下连续墙

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2023)03-0152-07

## Trench wall stability simulation for the diaphragm wall based on PFC<sup>3D</sup>

HE Ye<sup>1</sup>, ZHOU Changjun<sup>1</sup>, HE Xin<sup>2</sup>, WANG Sheng<sup>2\*</sup>, XIE Chengchao<sup>2</sup>, TANG Qingdong<sup>1</sup>, LI Shouxin<sup>1</sup>

(1. Chengdu Hydroelectricity Construction Engineering Co., Ltd. of Sinohydro Bureau No.7 Company,

Chengdu Sichuan 611130, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

**Abstract:** In view of the problem that the trench wall for the diaphragm wall is prone to failure in the process of trench-digging in water rich sand pebble formation, two simulation test schemes are designed with either change of the flow velocity or the particle size ratio by analyzing the relevant research data and on the basis of defining the failure form and mechanism. The numerical simulation results show that the flow velocity has a great influence on the displacement of particles. The faster the flow velocity, the greater the particle displacement, the higher the porosity, and the greater the stress on the wall. The particle size ratio also has a great influence on the displacement of particles, and its effect is similar to that of flow velocity. When there is a lateral limit, the  $x$ -direction displacement of the particles will produce a  $z$ -direction component after reaching the limit, making the particles move upward. In practical works, it means that when the particle displacement reaches a certain degree, it will inevitably break through the mud film, resulting in the loss of fine particles in the soil, the increase of soil porosity, and finally the collapse of the trench wall.

**Key words:** PFC<sup>3D</sup>; water rich sand pebble layer; trench wall failure; numerical simulation; diaphragm wall

## 0 引言

地下连续墙因其优良的挡土、防渗、刚度大、对

环境影响小等优点,在基坑的支护过程中已被广泛使用<sup>[1]</sup>。在地下连续墙的施工过程中,成槽是十分

收稿日期: 2022-07-02; 修回日期: 2022-10-18 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.03.020

第一作者: 何焯,男,汉族,1986年生,高级工程师,项目经理,建筑水工专业,主要从事基础处理工程工作,四川省成都市温江区花都大道西段9号融信智慧广场4栋,283604487@qq.com。

通信作者: 王胜,男,土家族,1982年生,教授,地质工程专业,博士,从事钻探新工艺与新材料的科研与教学工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,yongyuandewangsheng@sina.com。

引用格式: 何焯,周昌军,何鑫,等.基于PFC<sup>3D</sup>的地下连续墙槽壁稳定性模拟分析[J].钻探工程,2023,50(3):152-158.

HE Ye, ZHOU Changjun, HE Xin, et al. Trench wall stability simulation for the diaphragm wall based on PFC<sup>3D</sup>[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 152-158.

重要的工序,直接影响着地下连续墙的质量。然而,在富水卵石层等恶劣地层施工时,槽壁往往会发生垮塌,导致邻近建筑物或人民生命财产遭受损失。地下连续墙槽壁稳定性的问题一直为工程界所重视。

针对地下连续墙槽壁稳定性的问题,相关学者进行了大量研究。李小青等<sup>[2]</sup>着重研究了泥浆对于槽壁稳定性的影响,并解释了泥浆护壁的机理。张涛等<sup>[3]</sup>根据泥浆防塌机理自制泥浆,将其应用于工程实践,维持了槽壁的稳定,有力地促进了工程进度和保障了工程质量。孙立宝<sup>[4]</sup>从施工的角度阐述了避免槽壁发生垮塌的方法,即加高导墙、严格控制成槽时间、减少上部荷载、控制槽壁垂直度。孙晓科<sup>[5]</sup>结合实际工程,采用有限元数值模拟,对富水含砂层地区地下连续墙槽壁稳定性进行了分析。丁勇春等<sup>[6]</sup>采用理论分析的方法,分别从槽壁稳定性影响因素、槽壁失稳机制和各施工阶段应力路径3个方法进行了分析,得出了相关的结论。同样的,曹豪荣等<sup>[7]</sup>也采用理论分析的方法,对广泛的文献资料进行了总结,重点分析了槽壁破坏模式、理论分析方法及影响规律。类似通过力学模型,对影响槽壁稳定性的因素研究成果还有许多,如李志文等<sup>[8]</sup>、刘杨等<sup>[9]</sup>、李毅阳等<sup>[10]</sup>、姜厚停等<sup>[11]</sup>,着重对地下水及泥浆这一影响因素进行了分析,得出的结论有效地指导了工程实际。

以上的研究都表明,地下连续墙的失稳主要为整体、局部失稳。泥浆、土质、地下水位、上覆荷载等多项因素都会影响槽壁的稳定。许多学者利用数值模拟建立相关模型,进行了进一步的模拟分析。殷超凡等<sup>[12]</sup>利用有限元仿真软件,建立了地连墙三维模型,分析了泥浆、槽幅尺寸、上覆荷载的影响。周忠群等<sup>[13]</sup>利用ABAQUS分析了渗流作用对槽壁稳定性的影响。邱明明等<sup>[14]</sup>利用PLAXIS2D建立了模型,分析了各项因素对槽壁稳定性的影响。这些数值模拟研究大多采用有限元法,不能体现颗粒间的复杂相互作用,不能真实刻画散体材料的流动变形特征<sup>[15]</sup>。同时,这些研究很少从渗流的角度考虑流体对土颗粒的作用,进而影响槽壁稳定性。

因此,本文从渗流的角度,基于流体对土颗粒的作用,采用PFC<sup>3D</sup>颗粒流软件分析了渗流对土颗粒间性质变化的影响。研究结果能够反映出富水砂卵地层中,土颗粒间的细观变化对槽壁稳定性的影响。

## 1 计算模型及参数的确定

地下连续墙槽壁失稳通常发生在垂深0~20 m左右,由于计算能力的限制,完整模拟显然是不现实的。选择生成50 mm×100 mm×100 mm的墙体,限制颗粒的生成范围,以墙的边缘模拟槽壁的一小段。颗粒的运动同样都限定在墙的范围。

### 1.1 模型的建立

已有研究表明<sup>[16]</sup>,最大最小粒径比对于计算效率有很大的影响,通常把粒径比控制在10以内。同时为了避免大小颗粒间粒径相差过大,导致流固耦合计算难以收敛。本文选择 $d_{\max}/d_{\min}=1.75$ 、2.25、2.75三种粒径比进行研究。建立的模型如图1所示,当 $d_{\max}/d_{\min}=1.75$ 时,生成的颗粒如图2所示,右侧墙体即表示槽壁。施加的流体网格如图3所示。

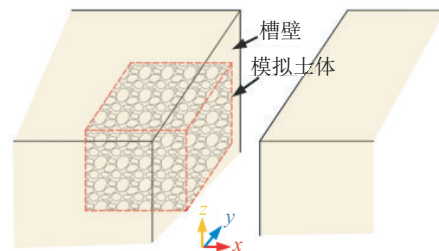


图1 物理模型示意

Fig.1 Physical model

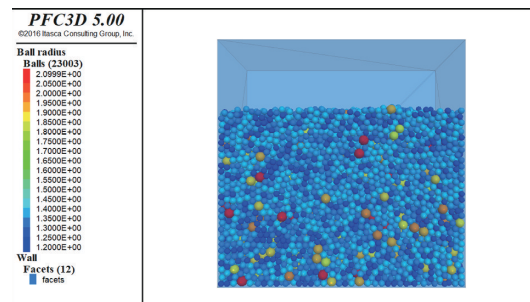


图2 生成的 $d_{\max}/d_{\min}=1.75$ 的颗粒示意

Fig.2 Generated particles with  $d_{\max}/d_{\min}=1.75$

### 1.2 参数的检测

为了记录模拟过程中的一些关键参数,需要添加测量圆及记录部分墙体、颗粒的运动状态。测量圆主要记录孔隙率的变化,墙体记录 $x$ 向应力变化,颗粒则是记录应力及位移的变化。测量圆的位置如图4所示,被记录的颗粒如图5所示。

其中4号颗粒位于右侧表层。同时,为了保证模拟的合理性,需要设置流体及颗粒的各项性质。

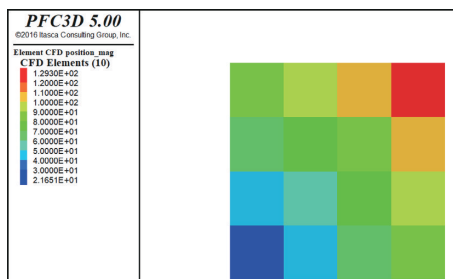


图3 流体网格示意  
Fig.3 Fluid grid

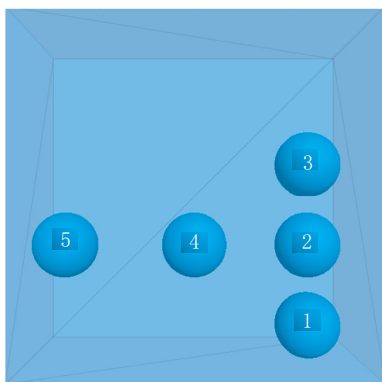


图4 测量圆的位置分布  
Fig.4 Position distribution of the measuring circle

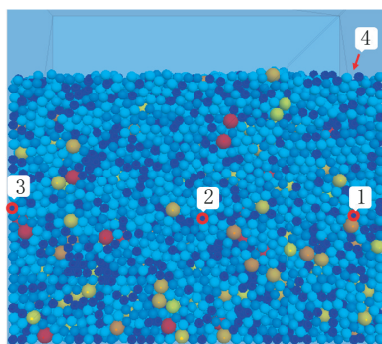


图5 被检测的颗粒位置  
Fig.5 Position of detected particles

由于本文立足于富水砂卵石层的槽壁稳定性问题,砂卵石层间胶结较差,故而颗粒间选择线性接触连

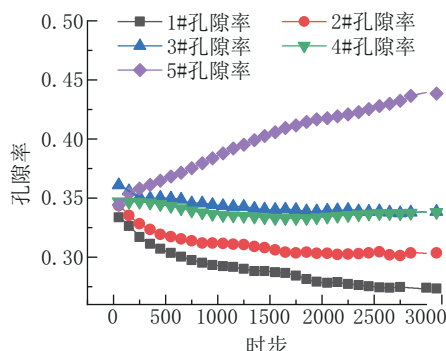
接。通过对比已有研究成果所模拟的砂卵石层性质及颗粒间参数设定<sup>[17-19]</sup>,针对本文模拟对象作相应调整后,将参数设置如表1所示。

## 2 数值模拟结果分析

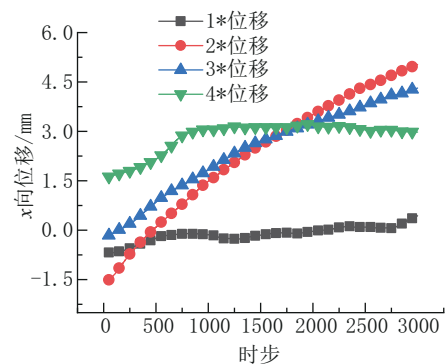
### 2.1 不同位置的变化

设置流体速度为4 mm/s进行模拟分析。分别记录在模拟过程中各个测量圆(1#、2#、3#、4#、5#)、记录颗粒(1\*、2\*、3\*、4\*)的相关参数,试验结果如图6所示。

从图6(a)可以看到,在右侧有限颗粒x向位移的墙体存在时,靠近右侧测量圆的孔隙率都是逐



(a) 孔隙率变化



(b) 颗粒x向位移变化

图6 同一流速下各测量圆/点参数变化

Fig.6 Parameter change of each measuring circle/point at the same flow rate

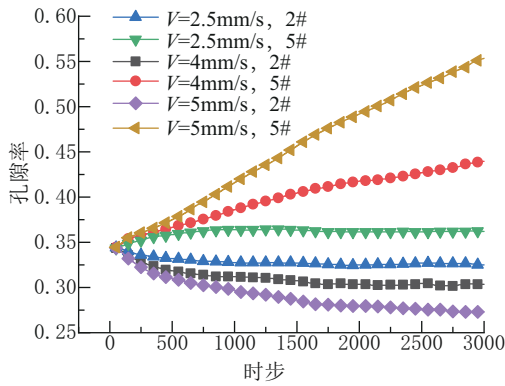
表1 材料参数的设置

Table 1 Setting of material parameters

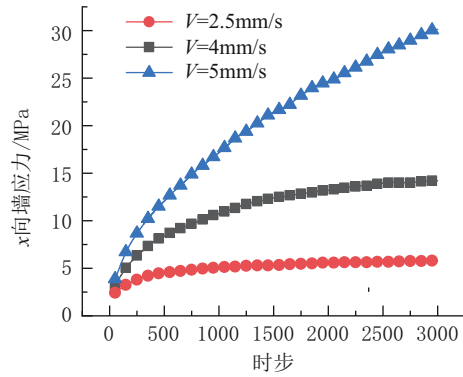
材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	小粒径/mm	大粒径/mm	粘滞系数/(Pa·s)	法向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	切向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )
$d_{max}/d_{min}=1.75$	2600	1.2~1.4	1.8~2.1		$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
$d_{max}/d_{min}=2.25$	2600	1.2~1.4	2.5~2.7		$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
$d_{max}/d_{min}=2.75$	2600	1.2~1.4	3.1~3.3		$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
流体	1000			$1 \times 10^{-3}$		

渐降低的,说明在流体的作用下,颗粒渐渐向右移动,压缩了之间的空隙,使得孔隙率都有所降低。而最左侧的5#测量圆由于没有颗粒补充,导致了孔隙率逐渐升高。而1#测量圆孔隙率最低是因为右侧有墙体,限制了颗粒的 $x$ 向位移,使得颗粒产生向

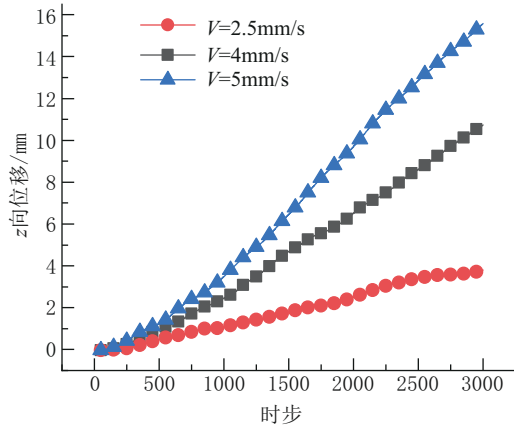
上、下两个方向运动的分量,向下再次压密了1#测量圆。从图6(b)可以看到,颗粒间的 $x$ 向位移都是呈逐渐增加的趋势,而4\*颗粒初始位置就靠近墙,在位移一段时间后, $x$ 向位移就已接近极限, $z$ 向位移逐渐占据主要地位(图7c)。



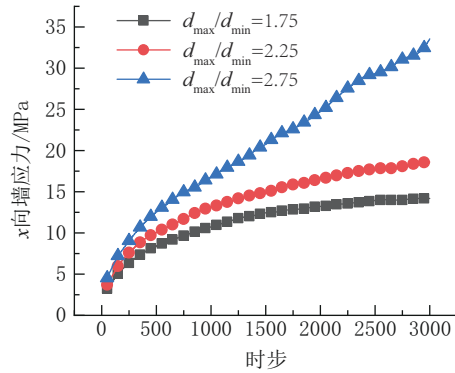
(a) 不同流速孔隙率变化



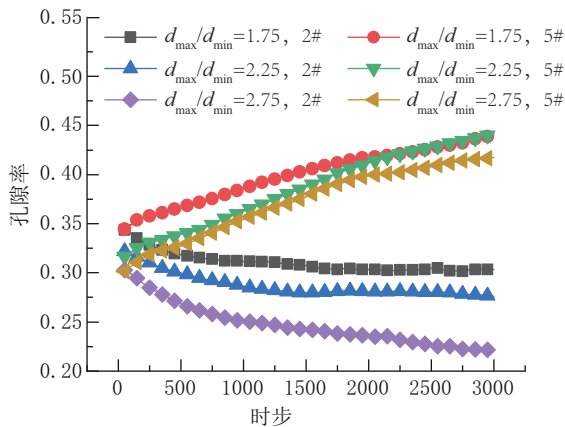
(b) 不同流速墙体所受应力



(c) 4\*不同流速颗粒z向位移



(d) 不同粒径比墙体所受应力



(e) 不同粒径比孔隙率变化

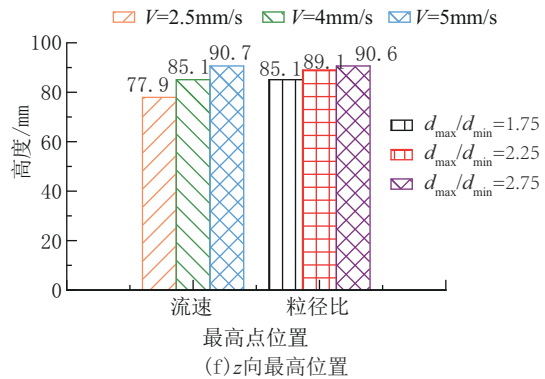


图 7 不同流速/粒径比模拟试验结果

Fig.7 Simulation test results at different flow velocity / particle size ratio



## 2.2 不同流速的影响

地下水在颗粒间隙中的渗流速度是偏慢的,为了加快计算过程,设置了2.5、4、5 mm/s三挡速度进行模拟。试验结果如图7所示。

由图7(a)可以看到,在不同流速下2#、4#测量圆孔隙率的总体变化趋势与前文所述相近。不同之处在于各曲线斜率的变化。很明显,流速越快斜率也就越大。图7(b)中,右侧墙体的 $x$ 向应力呈上升趋势,在流速为2.5和4 mm/s时,曲线逐渐稳定,说明颗粒的 $x$ 向运动已经接近极限,作用在墙上的力变化减小。在存在右、下侧极限的条件下,表层颗粒的 $z$ 向位移就可相当于颗粒达到 $x$ 向极限后的受力的延续。结合图7(b)和图7(c)中,用4\*颗粒的 $x$ 向位移在1500时步时就已接近极限,后续时步就主要以 $z$ 轴方向上的分力和位移为主。该处所得的结论与已有研究的结论相同,即地下水位与泥浆水位的相对高度对槽壁稳定性有重要影响。若地下水位与泥浆水头差越大,土颗粒间流体的渗流速度也就加快,槽壁也就越易失稳。因此,实际施工过程中一般

要保证泥浆水位高于地下水位0.5 m。

## 2.3 粒径比的影响

为了探究不同粒径比对模型的影响,简化了实验组,在流速为4 mm/s时,设置了3种粒径比进行模拟实验。从图7(d)中可以看出,粒径比越大,相同时间下对墙所造成的压力也就越大。孔隙率方面,从图7(e)可以看出,粒径比越大,初始孔隙就越小,测量圆的孔隙率与粒径比成反比。分析原因认为,粒径比越大,小颗粒就越能填补大颗粒之间的孔隙。在流体的作用下,小颗粒更容易被流体带动,随着时间的进行,逐渐向右侧墙体压密,孔隙率也就随之减小。联系实际可推测,粒径比较大的模型更像是槽壁中的级配不均的软弱夹层,粒径较小的土颗粒在渗流作用下运移,导致大颗粒土失去胶结、支撑,从而造成局部失稳的发生。从2次模拟的最终结果(图7f、图8)可以看到,流速与粒径比对颗粒的位移都有影响,在无右侧墙体限制的情况下,颗粒必然会由槽壁脱落,造成内部土颗粒流失,最终使得上覆土层失去支撑,导致槽壁发生垮塌失稳。

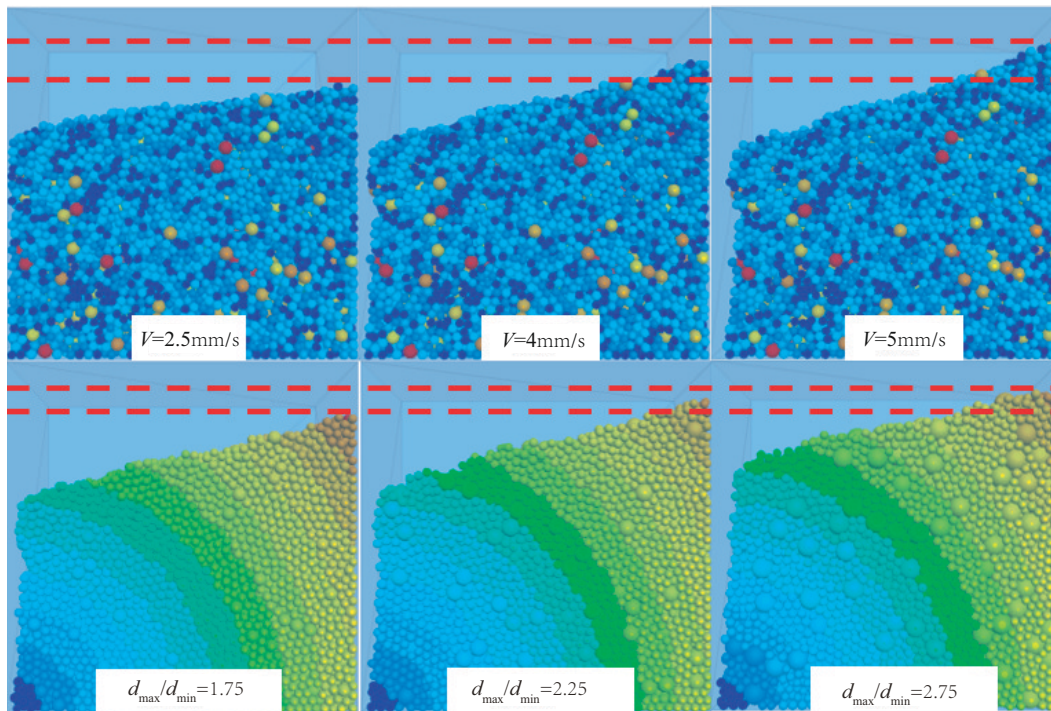


图8  $z$ 向最终位置比较

Fig.8 Final position comparison in  $z$  direction

### 3 结论

通过调整流体流速和颗粒的粒径比大小进行了2种类型的模拟试验,得出了以下结论:

(1)颗粒的位移与流体的速度成正比,颗粒在流体的作用下会向 $x$ 正方向即槽壁方向运移,导致模型内侧孔隙率增加,墙体所受应力增加。

(2)颗粒的最大最小粒径比与颗粒位移成正比,粒径差异越大,小颗粒的位移越快速,墙体所受应力越大,孔隙率同样是增加的,但小颗粒会填补大颗粒间的空隙,这也就使得孔隙率增加程度相对小粒径比较小。

(3)在有墙体限制的情况下,颗粒的 $x$ 向位移会在达到极限后转而产生 $z$ 向的分量,使得颗粒会逐渐向上抬升。意味着在实际情况中,土颗粒的位移在无侧限或达到突破泥膜的压力后,会进入泥浆内,导致土体孔隙率增加,上覆土体失去支撑,也就使得槽壁发生失稳。

(4)渗流速度(地下水位高度)、土颗粒粒径比(胶结程度)对于地下连续墙槽壁稳定性有很大的影响。地下水位越高,土颗粒胶结程度越差,土颗粒在渗流的作用下被裹携向槽内运移速度越快,土颗粒损失累积到一定程度后,对上层土体承载力不足,诱发槽壁周围土体发生垮塌。

### 参考文献(References):

- [1] 路乾,胡长明,王晓华,等.地下连续墙成槽施工槽壁整体稳定性分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(3):864-871.  
LU Qian, HU Changming, WANG Xiaohua, et al. Analysis on the overall stability of trenching construction of diaphragm wall [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 864-871.
- [2] 李小青,潘鸿宝.成槽作业中泥浆的护壁作用分析[J].探矿工程,2001(4):21-23.  
LI Xiaoqing, PAN Hongbao. Analysis of the wall protection function of mud in trenching operations [J]. Exploration Engineering, 2001(4): 21-23.
- [3] 张涛,陈礼仪,彭建华,等.深基坑围护超深地下连续墙护壁泥浆的研究及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(2):68-70.  
ZHANG Tao, CHEN Liyi, PENG Jianhua, et al. Research on slurry in ultra deep underground continuous wall for deep foundation pit bracing [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(2): 68-70.
- [4] 孙立宝.超深地下连续墙施工中若干问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(2):51-55.  
SUN Libao. Discussion on the construction of super-deep underground diaphragm wall [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(2): 51-55.
- [5] 孙晓科.富水含砂地层中地下连续墙施工技术[J].市政技术,2015,33(2):180-185.  
SUN Xiaoke. Construction technology of diaphragm wall in water-rich sand stratum [J]. Journal of Municipal Technology, 2015, 33(2): 180-185.
- [6] 丁勇春,李光辉,程泽坤,等.地下连续墙成槽施工槽壁稳定机制分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S1):2704-2709.  
DING Yongchun, LI Guanghui, CHENG Zekun, et al. Analysis of trench face stability of diaphragm wall panel during slurry trenching [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2704-2709.
- [7] 曹豪荣,彭立敏,雷明锋,等.地下连续墙槽壁失稳模式及其稳定性计算方法研究现状[J].铁道科学与工程学报,2019,16(7):1743-1750.  
CHAO Haorong, PENG Limin, LEI Mingfeng, et al. Research status of the instability mode and its stability calculation method of underground diaphragm wall [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(7): 1743-1750.
- [8] 李志文,魏刚,郭运华,等.超深地下连续墙施工槽壁局部稳定判据[J].水利水电快报,2021,42(4):49-53,58.  
LI Zhiwen, WEI Gang, GUO Yunhua, et al. A new stability criterion of trench wall in constructing superdeep diaphragm wall [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(4): 49-53, 58.
- [9] 刘杨,刘维,史培新,等.超深地连墙成槽富水软弱层局部失稳理论研究[J].岩土力学,2020,41(S1):10-18.  
LIU Yang, LIU Wei, SHI Peixin, et al. Local instability analysis of the ultra-deep wall-to-slotted in water rich soft layer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S1): 10-18.
- [10] 李毅阳,李新平,郭运华,等.基于泥膜压力平衡的地连墙槽壁稳定判据研究[J].土工基础,2021,35(4):482-486.  
LI Yiyang, LI Xinping, GUO Yunhua, et al. Diaphragm wall stability based on pressure balance of slurry [J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(4): 482-486.
- [11] 姜厚停,周秀普,李志强,等.厚卵石地层地下连续墙槽壁失稳机理及护壁泥浆性能研究[J].市政技术,2019,37(6):220-223.  
JIANG Houting, ZHOU Xiupu, LI Zhiqiang, et al. Study on instability mechanism of diaphragm wall and the performance of wall-protecting slurry in thick pebble formation [J]. Journal of Municipal Technology, 2019, 37(6): 220-223.
- [12] 殷超凡,邓稀肥,王圣涛,等.地铁超深地下连续墙槽壁稳定性综合化数值仿真[J].地下空间与工程学报,2021,17(S1):312-320.  
YIN Chaofan, DENG Xifei, WANG Shengtao, et al. Trench stability analysis of ultra-deep diaphragm wall in the subway sta-

- tion through comprehensive numerical simulation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 312-320.
- [13] 周忠群,张孟喜,王鑫,等.含双承压水地层中地连墙槽壁稳定性有限元分析[J].水力发电,2021,47(12):35-41.  
ZHOU Zhongqun, ZHANG Mengxi, WANG Xin, et al. Finite element analysis of trench stability of diaphragm wall in the formation with double confined water[J]. Water Power, 2021, 47(12):35-41.
- [14] 邱明明,杨果林,申权,等.深厚砂层地下连续墙槽壁稳定性特征及影响因素研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(5): 1129-1139.  
QIU Mingming, YANG Guolin, SHEN Quan, et al. Study on characteristics and influence factors of slurry trench stability of diaphragm wall in deep sandy stratum [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(5): 1129-1139.
- [15] 石崇,张强,王盛年.颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.  
SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Shengnian. Numerical Simulation Technology and Application of Particle Flow (PFC5.0) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [16] 王宇.基于流固耦合理论的管涌侵蚀机理细观数值模拟[D].西安:西安理工大学,2020.  
WANG Yu. Numerical simulation of piping erosion mechanism based on fluid-solid coupling theory [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [17] 王月明.隧道断层带土石混合体渗流特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.  
WANG Yueming. Study on seepage characteristics of earth-rock mixture in tunnel fault zone [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [18] 姜伟.渗流作用下盾构隧道端头土体的稳定性研究[D].烟台:鲁东大学,2019.  
JIANG Wei. Study on stability of soil at end of shield tunnel under seepage [D]. Yantai: Ludong University, 2019.
- [19] 郑刚,戴轩,张晓双.地下工程漏水漏砂灾害发展过程的试验研究及数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2014,33(12): 2458-2471.  
ZHENG Gang, DAI Xuan, ZHANG Xiaoshuang. Experimental study and numerical simulation of leaking process of sand and water in underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2458-2471.

(编辑 李艺)