



## 软土和砂土复合地层超深地连墙槽壁稳定性研究

石文广<sup>1</sup>, 卢春雨<sup>2</sup>, 石波<sup>3</sup>, 王山平<sup>3</sup>, 张涛<sup>3</sup>

(1. 广东粤海粤东供水有限公司, 广东 揭阳 522000; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081)

**摘要:** 软土地层超深地连墙基槽深度大, 土层强度低、稳定性差, 成槽时间长, 槽壁稳定性难以控制, 施工过程中失稳风险高。本文以“韩江-榕江-练江水系连通后续优化工程”中的 GX12 号超深地连墙工作井为依托, 采用验证后的数值模拟方法研究深厚软土和砂土复合地层中地下水埋深、泥浆参数和砂土渗透性等因素对超深地连墙槽壁稳定性的影响规律。结果表明: 1) 槽壁水平位移和地表沉降随原始地下水位埋深的增大而减小, 并逐渐趋于稳定; 原始水位为 -1.28、-10.28 m 时, 槽壁水平位移分别为 33、18 mm, 减小约 46%, 地表沉降减小约 57%; 2) 槽壁水平位移和地表沉降随泥浆重度或泥浆液面高度的增加而减小; 当泥浆容重小于 12.5 kN/m<sup>3</sup> 时难以满足槽壁稳定性要求, 从 12.5 kN/m<sup>3</sup> 增加至 13.0 kN/m<sup>3</sup> 时, 槽壁水平位移减小约 68%, 地表沉降减小约 55%; 泥浆液面高度从 2.5 m 降至 1.5 m 时, 槽壁水平位移增加 300%, 地表沉降增加 304.5%; 建议泥浆容重不低于 12.5 kN/m<sup>3</sup>, 泥浆液面高度不低于 2.0 m; 3) 承压含水层为粉砂、细砂、中砂、粗砂 4 种工况下, 粉砂的变形最小, 细砂最大, 水平位移相差约 50%, 地表沉降相差约 53%。

**关键词:** 地连墙; 水平位移; 沉降; 槽壁稳定性; 数值模拟

**中图分类号:** TU476+.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-8993(2025)01-0030-07

**doi:** 10.13402/j.gcjs.2025.01.005

## Research on slot wall stability of ultra-deep diaphragm wall in soft soil and sandy composite strata

SHI Wenguang<sup>1</sup>, LU Chunyu<sup>2</sup>, SHI Bo<sup>3</sup>, WANG Shanping<sup>3</sup>, ZHANG Tao<sup>3</sup>

(1. Guangdong Yuehai Yuedong Water Supply Co., Ltd., Jieyang 522000, Guangdong, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China)

**Abstract:** The ultra-deep diaphragm wall of the soft soil layer has a large depth of base slot, low soil strength, poor stability, long slotting time, difficult to control the stability of the slot wall, and high risk of instability in the construction process. Based on the GX12 ultra-deep diaphragm wall working well in the “Hanjiang-rongjiang-lianjiang river system connectivity follow-up optimization project”, the verified numerical simulation method is used to study the influence law of groundwater depth, mud parameters and sand permeability on the stability of the ultra-deep diaphragm wall in the deep soft soil and sandy composite strata. The results show that: 1) The horizontal displacement and surface settlement of the slot wall decrease with the increase of the depth of the original groundwater level, and gradually tend to be stable. When the original water level is -1.28 and -10.28 m, the horizontal displacement of the slot wall is 33 mm and 18 mm, respectively, which is reduced by about 46%, and the surface settlement is reduced by about 57%; 2) The horizontal displacement of the slot

**收稿日期:** 2024-06-20

**基金项目:** 中国水利水电第七工程局有限公司科技攻关项目(GSSC-科研-2023-001)

**作者简介:** 石文广(1975—),男,高级工程师,从事大型水利工程建设技术分析与管理工作。

**通信作者:** 卢春雨(1999—),女,硕士研究生,从事岩土工程领域方面的研究。

wall and the surface settlement decrease with the increase of the slurry gravity or the height of the slurry level. When the slurry gravity is less than  $12.5 \text{ kN/m}^3$ , it is difficult to meet the stability requirements of the slot wall, and when the slurry increases from  $12.5 \text{ kN/m}^3$  to  $13.0 \text{ kN/m}^3$ , the horizontal displacement of the slot wall decreases by about 68%, and the surface settlement decreases by about 55%. When the slurry level height decreases from 2.5 m to 1.5 m, the horizontal displacement of the slot wall increases by 300% and the surface settlement increases by 304.5%. It is recommended that the slurry gravity should not be less than  $12.5 \text{ kN/m}^3$ , and the height of the slurry level should not be less than 2.0 m; 3) Under the 4 working conditions of silt, fine sand, medium sand and coarse sand in the confined aquifer, the deformation of silt is the smallest, the fine sand is the largest, the horizontal displacement difference is about 50%, and the surface settlement difference is about 53%.

**Key words:** diaphragm wall; horizontal displacement; sedimentation; slot wall stability; numerical simulation

复杂地层地连墙成槽过程中易出现塌孔、槽段偏斜、槽段接头渗漏等问题<sup>[1-2]</sup>,影响施工进度,因此保证地连墙成槽质量至关重要。龚振宇等<sup>[3]</sup>通过泥浆配比试验研究不同制浆材料对泥浆性质的影响,发现纯碱含量对泥浆的黏度有明显的降低效果,基浆膨水比越大黏度降低越明显;LIU等<sup>[4]</sup>基于极限分析,提出了夹层软弱层中沟槽局部破坏的二维和三维转动破坏机制,并推导了局部破坏机制的二维和三维安全系数的上限;此外,结合强度折减法进行数值分析,以研究槽壁的局部稳定性和局部破坏过程,通过与FLAC3D对比验证了所提出分析方法的合理性;YANG等<sup>[5]</sup>利用数值模拟软件ABQUS模拟开槽过程,计算不同泥浆比重和槽壁深度对槽壁的变形规律和槽壁周围地面沉降的影响,发现上部软粉质黏土层和下部粉质砂层易塌陷,适当提高泥浆比重和采用水泥土搅拌加固技术可以提高槽壁稳定性;秦会来等<sup>[6]</sup>采用ABQUS建立对成槽和泥浆护壁、混凝土浇筑、墙体成型硬化等过程合理再现的三维数值模型,分析研究槽段施工诱发地层变形的特点,并研究槽段宽度、泥浆重度等参数对地层变形的影响;尉胜伟<sup>[7]</sup>通过数值模拟软件分析微承压水、施工荷载、抓斗吸力等对槽壁稳定性的影响,提出了制作标准导强及型钢围挡处理空槽、采用高压旋喷桩加固、控制护壁泥浆原料和制作工艺等措施,控制地连墙槽壁坍塌;郑万栋等<sup>[8]</sup>通过数值分析解释了泥皮质量与支撑槽壁的静液压力之间的关系,研究泥皮在防渗性能试验中的形成规律,建立了泥皮形成参数与槽壁稳定性之间的关系式。本文以韩江-榕江-练江水系连通后续优化工程中的GX12号超深地连墙工作井为

依托,采用PLAXIS 3D建立三维数值模型,利用现场监测数据验证模型的准确性,研究深厚软土和砂土复合地层中地下水、泥浆参数及砂土渗透性等因素对超深地连墙槽壁稳定性的影响规律,以期类似工程中地连墙成槽稳定性分析和施工参数优化提供参考。

## 1 工程概况

GX12号工作井是粤东水资源配置“韩江-榕江-练江连通后续优化工程”中的重要节点工程。该工作井为圆形盾构工作井,位于一池塘边缘,以北约100m为榕江北河支流,井身及井底位于第四系冲积层,以淤泥质土、黏土、中粗砂为主,其中②-3、②-5、②-7中粗砂层为含水层,②-2、②-4、②-6为隔水层。GX12号井深基坑周围地层水头高度为2m,工作井开挖深度为34.83m,②-7承压含水层顶面的压力水头高度达80m。工作井的地连墙进入②-6淤泥质土层,深度为78m。

GX12号工作井坑底高程为-32.33m,外径为24m,采用圆形地下连续墙支护结构,具体支护结构设计:地下连续墙槽段共12幅,单幅深度为78m,厚度为1.0m,地连墙的混凝土强度等级采用C30,工作井的地质剖面及地连墙支护结构如图1所示;导墙的混凝土强度等级采用C20,导墙尺寸如图2所示,其中导墙顶面高于平整后地面0.1m。

GX12号井地连墙深度范围内存在深厚软土地层,淤泥质土承载能力低,地层的透水性强弱交互,强透水层与榕江连通,地连墙成槽过程中易造成泥浆流失和影响泥膜质量甚至发生塌孔,施工难度大,风险高。

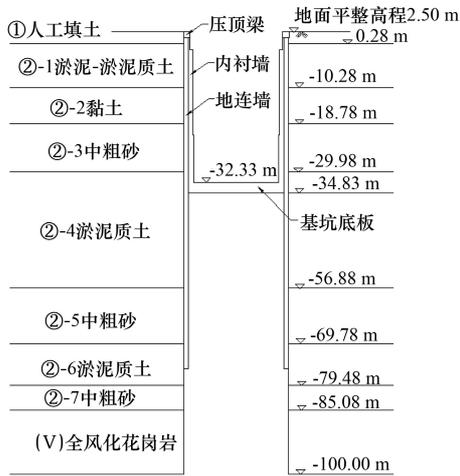


图 1 地层剖面及地连墙支护结构

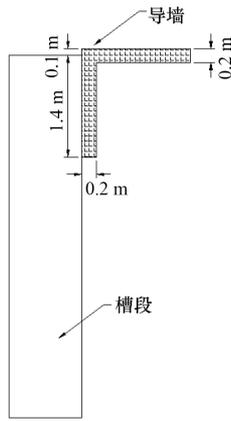


图 2 导墙尺寸示意

型尺寸为 110 m × 150 m × 102.5 m，四周设置约束法向位移，底面设置固定约束，顶面为自由边界。模型如图 3 所示。材料的本构模型选用硬化土模型，根据 PLAXIS 对硬化土模型中的参数设置， $E_{\text{oad}}^{\text{ref}} = E_{50}^{\text{ref}}$  ( $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$  为侧限压缩试验切线刚度，MPa； $E_{50}^{\text{ref}}$  为三轴排水试验割线刚度，MPa)， $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 4E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$  ( $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  为卸载/重加载刚度，MPa)；土层参数结合地勘资料取值，其中根据文献<sup>[9-11]</sup>， $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$  取  $1.5E_s$  ( $E_s$  为压缩模量，MPa)，具体参数如表 1 所示。导墙采用实体单元建模，地连墙采用板单元建模，地连墙与土体之间的界面强度因子为 0.67。

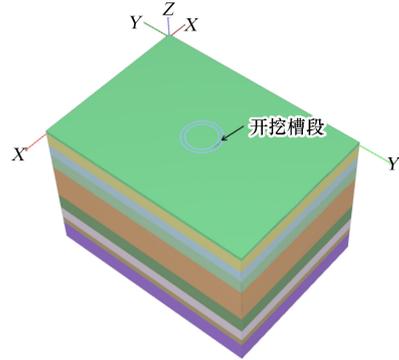


图 3 数值模型

地下连续墙成槽过程挖土时先开挖槽段两侧土体，再开挖中间段土体。模型中成槽具体过程(图 4)：第 1 阶段开挖土方 1、2，同时在槽段内部施加泥浆压力；第 2 阶段开挖土方 3，同时在槽段内部施加泥浆压力。

泥浆压力的分布规律用式(1)表示。

## 2 数值模型及验证

### 2.1 数值模型建立

采用 PLAXIS 3D 有限元模拟软件建立模型。模

表 1 各地层物理力学参数

土层序号	土层名称	天然容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	黏聚力/ kPa	有效内摩 擦角/( $^{\circ}$ )	渗透系数/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	压缩模 量/MPa
①	人工填土	19.1	12	10	14	$3.00 \times 10^{-6}$	5.00
②-1	淤泥~淤泥质土	15.0	4	4	6	$6.86 \times 10^{-7}$	1.86
②-2	黏土	19.1	12	10	15	$6.12 \times 10^{-6}$	6.45
②-3	中粗砂	19.7	28	0	28	$1.21 \times 10^{-2}$	9.14
②-4	淤泥质土	18.1	8	8	10	$5.3 \times 10^{-7}$	5.61
②-5	中粗砂	19.7	31	0	31	$1.62 \times 10^{-2}$	10.58
②-6	淤泥质土	18.4	11	9	13	$2.10 \times 10^{-6}$	5.29
②-7	中粗砂	20.0	32	0	32	$1.52 \times 10^{-2}$	12.15
②-8	黏性土	19.1	13	15	15	$2.00 \times 10^{-6}$	7.89
(V)	全风化花岗岩	18.8	26	12	26	$7.58 \times 10^{-5}$	8.29

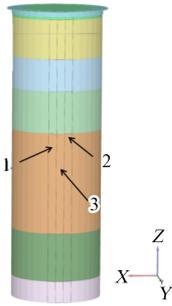


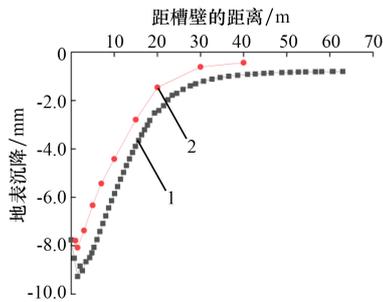
图 4 开挖槽段模型示意

$$F_{\text{泥浆}} = \gamma \cdot h \quad (1)$$

式中:  $\gamma$  为泥浆容重, 若无特别说明, 取  $12.5 \text{ kN/m}^3$ ;  $h$  为成槽深度,  $\text{m}$ 。

## 2.2 数值模型验证

在地连墙成槽施工时, 为了解各个施工对槽壁外侧土体的扰动影响, 沿垂直于地连墙槽壁方向, 布设地表沉降监测点。地表沉降监测点布置在距离槽壁外侧 1、3、5、7、10、15、20、30、40  $\text{m}$  的位置, 采用钻孔方法进行埋设。图 5 为地连墙成槽施工时地表沉降的模拟数据和现场监测数据对比。由图 5 可知: 数值模拟和现场监测的地表沉降变化规律一致, 沉降值随着离开槽壁距离的增大非线性减小, 然后逐渐趋于稳定; 受到导墙影响, 槽壁边缘沉降略小于最大值。总体上看, 模拟结果符合现场实际情况, 数值模型可用于分析地连墙成槽过程的稳定性。



1—模拟; 2—监测。

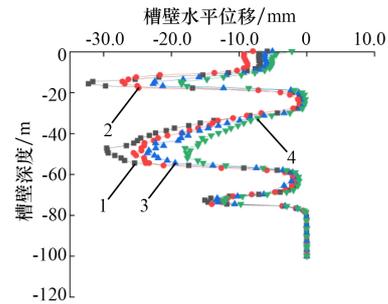
图 5 数值模型验证

## 3 模拟结果分析

### 3.1 地下水对槽壁稳定性的影响

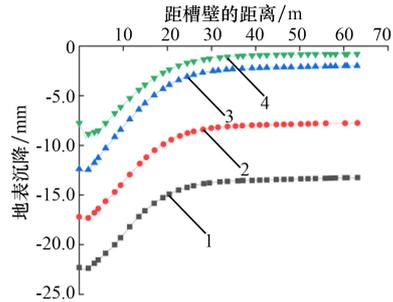
为研究原始地下水位对槽壁稳定性的影响, 建立三维数值模型, 模拟原始水位地下水分别为  $-1.28$ 、 $-4.28$ 、 $-7.28$ 、 $-10.28 \text{ m}$  工况下地连墙成槽过程, 其中泥浆容重取  $12.5 \text{ kN/m}^3$ , 泥浆液面高度取  $2.5 \text{ m}$ 。地下水位埋深对槽壁水平位移

的影响规律如图 6 所示, 对地表沉降的影响规律如图 7 所示。



地下水位/ $\text{m}$ : 1— $-1.28$ ; 2— $-4.28$ ;  
3— $-7.28$ ; 4— $-10.28$ 。

图 6 不同水位高度下槽壁水平位移



地下水位/ $\text{m}$ : 1— $-1.28$ ; 2— $-4.28$ ;  
3— $-7.28$ ; 4— $-10.28$ 。

图 7 不同水位高度下地表沉降

由图 6 可知: 槽壁水平位移曲线出现“鼓肚”, 在  $-18$ 、 $-50$ 、 $-70 \text{ m}$  深度处槽壁水平位移明显增大, 该深度分别处于黏土和中粗砂界面, 淤泥质土层以及中粗砂和淤泥质土层界面。槽壁深度由淤泥质土层进入中粗砂层, 原土土压力作用变化为土压力和水压力共同作用, 导致槽壁出现较大的水平位移, 说明地下水高度对槽壁的位移影响较大; 槽壁水平位移随着地下水位高度的降低而逐渐减小, 地下水位  $-1.28 \text{ m}$  时的槽壁水平位移约为  $33 \text{ mm}$ , 是成槽深度的  $0.42\%$ , 地下水位为  $-10.28 \text{ m}$  时的水平位移约为  $18 \text{ mm}$ , 是成槽深度的  $0.23\%$ ; 原始地下水位高度  $-10.28 \text{ m}$  与原始地下水位高度  $-1.28 \text{ m}$  相比, 槽壁水平位移减小了  $45.5\%$ 。

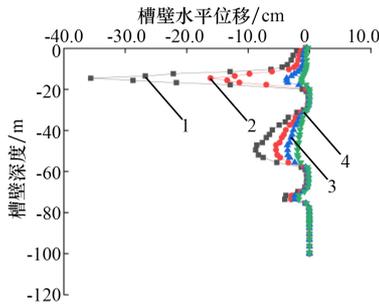
由图 7 可知: 槽壁周边地表沉降随着距槽壁的距离增大呈现先增大后减小的趋势, 沉降值随着地下水位的降低而减小, 成槽引起地表沉降的范围在距离槽壁  $30 \text{ m}$  范围内, 是成槽深度的  $38.5\%$ ; 地下水位  $-1.28 \text{ m}$  的地表沉降约为  $23 \text{ mm}$ , 地下水位

-10.28 m 的地表沉降约 10 mm;原始地下水位高度 -10.28 m 与原始地下水位高度 -1.28 m 相比,槽壁周边地表沉降减小了 56.5%,相比于槽壁水平位移,原始地下水位高度对地表沉降的影响效果更明显。

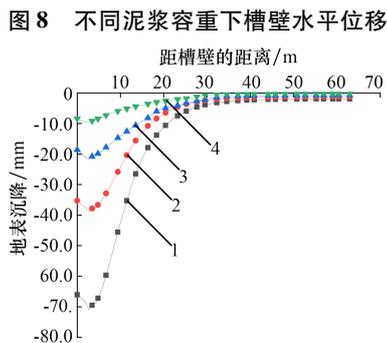
### 3.2 泥浆参数对槽壁稳定性的影响

#### 3.2.1 泥浆容重

为研究泥浆容重对槽壁稳定性的影响,建立三维数值模型,模拟泥浆容重为 11.5、12.0、12.5、13.0 kN/m<sup>3</sup> 时对槽壁稳定性的影响,其中地下水位高度为 2.0 m,泥浆液面高度取 2.5 m。泥浆容重对槽壁水平位移的影响规律如图 8 所示,泥浆容重对地表沉降的影响规律如图 9 所示。



泥浆容重/(kN·m<sup>-3</sup>): 1—11.5; 2—12.0; 3—12.5; 4—13.0。



泥浆容重/(kN·m<sup>-3</sup>): 1—11.5; 2—12.0; 3—12.5; 4—13.0。

#### 图 9 不同泥浆容重下地表沉降

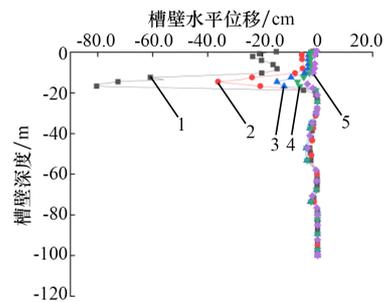
由图 8 可知:当泥浆容重为 11.5、12.0 kN/m<sup>3</sup> 时,容重不足以抵挡作用在槽壁上的孔隙水压力和土压力,导致槽壁坍塌失稳。槽壁产生向槽内的水平位移且水平位移随着泥浆容重的增加逐渐减小。槽壁水平位移曲线在 -18、-50、-70 m 时出现“鼓肚”,是因为该深度处于中粗砂含水地层。槽壁由只受到土体的压力变为同时受到孔隙水压力和土压力。槽壁受到的压力增加,产生的水平位移增大。泥浆容重为 12.5 kN/m<sup>3</sup> 时,槽壁水平位移为

37 mm,是成槽深度的 0.47‰。泥浆容重为 13.0 kN/m<sup>3</sup> 时,槽壁水平位移值为 12 mm,是成槽深度的 0.15‰,减小了 67.6%。

由图 9 可知:槽壁周边地表沉降随着离开槽壁距离的增大呈现先增大后减小的趋势。沉降范围在距离槽壁 30 m 内,是成槽深度的 38%;地表沉降最大值约出现在距离槽壁 1.5 m 的位置,是成槽深度的 1.9%。地表沉降值随着泥浆容重增加逐渐减小,泥浆容重为 11.5 kN/m<sup>3</sup> 时,地表沉降为 75 mm,地表沉降过大,不满足安全施工要求。泥浆容重为 12.5 kN/m<sup>3</sup> 时,地表沉降约为 22 mm,泥浆容重增加至 13.0 kN/m<sup>3</sup> 时,地表沉降约为 10 mm,减小了 54.5%。

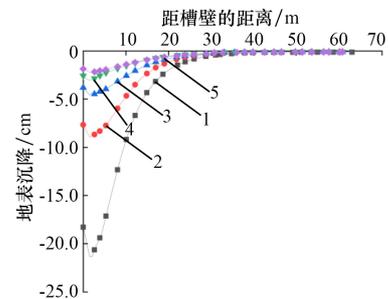
#### 3.2.2 泥浆液面高度

为研究泥浆液面对槽壁稳定性的影响,取变化之后的液面高度分别为 2.0、1.5、1.0、0.5 m,模拟不同泥浆液面高度对槽壁稳定性的影响,其中地下水位高度为 2.0 m,泥浆容重取 12.0 kN/m<sup>3</sup>。泥浆液面高度对槽壁水平位移的影响规律如图 10 所示,对地表沉降的影响规律如图 11 所示。



液面高度/m: 1—0.5; 2—1.0; 3—1.5; 4—2.0; 5—2.5。

#### 图 10 不同泥浆液面高度下槽壁水平位移



液面高度/m: 1—0.5; 2—1.0; 3—1.5; 4—2.0; 5—2.5。

#### 图 11 不同泥浆液面高度下地表沉降

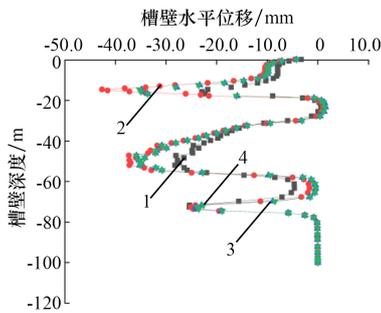
由图 9 可知:槽壁水平位移随着泥浆液面高度的降低而增大。当泥浆液面高度为 1.0、0.5 m 时,槽

壁的水平位移过大,此时槽壁已坍塌失稳;当泥浆液面高度为 2.5 m 时,槽壁的水平位移约为 37 mm;当液面高度降至 2.0 m 时,槽壁水平位移约为 73 mm,增加了 97.3%;当泥浆液面高度降至 1.5 m 时,槽壁水平位移约为 148 mm,增加了 300%。

由图 10 可知:槽壁周边地表沉降随着离开槽壁的距离的增加呈现先增大后减小的趋势,且随着泥浆液面高度的减小而增大;地连墙成槽引起的周边地表沉降范围为 30 m,是成槽深度的 38.5%。当泥浆液面高度为 1.0、0.5 m 时,槽壁周边地表沉降过大,不满足施工要求;当泥浆液面高度为 2.5 m 时,地表沉降约为 22 mm;当液面高度降至 2.0 m 时,地表沉降约为 30 mm,增加了 36.4%;当液面高度降至 1.5 m 时,地表沉降约为 89 mm,增加了 304.5%。

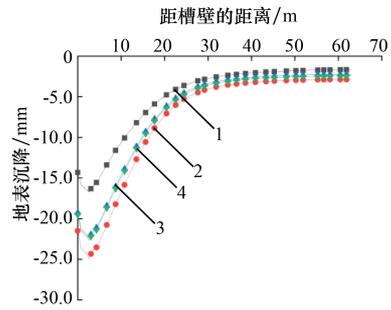
### 3.3 砂土渗透性对槽壁稳定性的影响

工程承压含水层为中粗砂地层。为了从理论上研究透水砂土层对槽壁稳定性影响,分析承压含水层砂土的渗透性对槽壁稳定的影响规律。研究对象选用砂土层中粉砂、细砂、中砂、粗砂。取地下水位高度为 2.0 m,泥浆容重为 12.0 kN/m<sup>3</sup>,泥浆液面高度为 2.5 m。砂土层物理、力学参数如表 2 所示,其他土层的物理力学参数参考表 1。砂土渗透性对槽壁水平位移的影响规律如图 12 所示,对地表沉降的影响规律如图 13 所示。



1—粉砂; 2—细砂; 3—中砂; 4—粗砂。

图 12 不同砂土渗透性槽壁水平位移



1—粉砂; 2—细砂; 3—中砂; 4—粗砂。

图 13 不同砂土渗透性地表沉降

由图 12 可知:4 种情况下,槽壁水平位移曲线均表现为“鼓肚”型,槽壁水平位移最大值均出现在砂土层所在位置。粉砂层引起的槽壁水平位移最小,为 28 mm。细砂层引起的槽壁水平位移最大,为 42 mm;中砂和粗砂引起的水平位移相近,为 35 mm。细砂层比粉砂层引起的槽壁水平位移大 50%,比中砂和粗砂层引起的槽壁水平位移大 20%。

由图 13 可知:槽壁周边地表沉降随距槽壁的距离增大呈现先增大后减小的趋势。成槽引起地表沉降在距离槽壁 30 m 范围,是成槽深度的 38.5%。4 种工况下,粉砂层引起地表沉降值最小,为 17 mm;细砂引起地表沉降值最大,约为 26 mm;中砂和粗砂引起的水平位移相近,为 23 mm。细砂比粉砂层引起地表沉降大 52.9%,比中砂和粗砂层引起地表沉降大 13%。由此可知,含水层的砂土渗透性对槽壁稳定性的影响显著。

## 4 结 论

(1) 槽壁水平位移和地表沉降随着原始地下水位埋深的增大而减小,并逐渐趋于稳定;原始水位从 -1.28 m 降至 -10.28 m 时,槽壁水平位移值减小了约 46%,槽壁周边地表沉降值减小了约 57%。

表 2 砂土层物理力学参数

土层名称	天然容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)	渗透系数/(cm·s <sup>-3</sup> )	压缩模量/MPa
粉砂	17.9	21	8	23	6.0 × 10 <sup>-5</sup>	3.50
细砂	18.5	26	4	27	5.0 × 10 <sup>-4</sup>	6.00
中砂	19.0	28	0	28	2.4 × 10 <sup>-3</sup>	8.95
粗砂	19.5	34	0	34	6.0 × 10 <sup>-2</sup>	10.18

(2) 槽壁的水平位移和地表沉降随着泥浆容重或泥浆液面高度的增加而减小; 泥浆容重为 11.5、12.0 kN/m<sup>3</sup> 时, 槽壁坍塌失稳; 泥浆容重由 12.5 kN/m<sup>3</sup> 增至 13.0 kN/m<sup>3</sup> 时, 槽壁水平位移值减小了 67.6%, 地表沉降值减小了 54.5%; 建议工程中泥浆容重不低于 12.5 kN/m<sup>3</sup>。

(3) 泥浆液面高度为 1.0、0.5 m 时, 槽壁坍塌失稳; 泥浆液面高度由 2.5 m 降至 2.0 m 时, 槽壁水平位移增加了 97.3%, 地表沉降增加了 36.4%; 泥浆液面高度由 2.5 m 降至 1.5 m 时, 槽壁水平位移增加了 300%, 地表沉降增加了 304.5%; 建议工程中泥浆液面高度不低于 2.0 m。

(4) 承压含水层为粉砂、细砂、中砂、粗砂的 4 种工况中, 槽壁水平位移和地表沉降最小的是粉砂层, 最大的是细砂层, 中砂和粗砂的槽壁水平位移和地表沉降大致相同; 细砂层比粉砂层的槽壁水平位移大 50%, 地表沉降大 53%; 细砂层比中砂和粗砂层的槽壁水平位移大 20%, 地表沉降大 13%; 砂土渗透性对槽壁的稳定性影响明显。

#### 参考文献:

- [1] 方能榕,余国梁,吴剑秋,等. 软土地区地下连续墙槽壁稳定性分析[C]//2023 年全国工程建设行业施工技术交流会. 北京:施工技术编辑部,2023.
- [2] 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.
- [3] 龚振宇,徐前卫,孙梓栗,等. 超深地下连续墙泥浆材料特性及配比试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(6):101-108.
- [4] LIU W,SHI P X, CAI G Q, et al. Seepage on local stability of slurry trench in deep excavation of diaphragm wall construction[J]. Computers and Geotechnics,2021,129:103878.
- [5] YANG B Z,ZHANG S C, LUAN K Y. Numerical analysis of slot stability during the super-deep diaphragm wall construction[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,438:1043-1047.
- [6] 秦会来,李峰,郭院成. 超深地连墙槽段施工的三维数值分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊2):335-340.
- [7] 尉胜伟. 复杂地质条件下超深基坑地连墙成槽施工技术[J]. 铁道建筑,2010,50(12):51-54.
- [8] 郑万栋,申翊,靳利安,等. 泥浆的有效静液压力及在泥浆护壁中的作用[J]. 土工基础,2019,33(6):704-708.
- [9] 冷伍明,姚康,门小雄,等. 考虑工程桩效应的滨海深基坑变形特性分析[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(4):1347-1358.
- [10] 张誉津,刘俊城,谭勇. 深厚富水砂性地层深基坑开挖降水变形特性研究[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(9):1511-1522.
- [11] 林世杰,付浩,宋二祥,等. 圆形竖井变形特性及其计算分析方法[J]. 地基处理,2023,5(3):195-204.