



# 扩建船闸基坑开挖范围标准分析方法\*

周千凯<sup>1</sup>, 刘晓红<sup>2</sup>

(1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南长沙 410011; 2. 湖南理工学院, 湖南岳阳 414006)

**摘要:** 针对扩建船闸基坑开挖范围缺乏明确标准, 已建船闸安全受邻近扩建船闸施工影响问题, 为量化界定基坑开挖的临界控制参数, 提出基于破裂面特征的有限土体分析方法。通过概化离心物理模型试验, 系统分析不同宽深比下墙后土体变形机制与土压力分布规律, 明确半无限土体与有限土体的临界宽深比 $k$ 为0.75, 当 $k \leq 0.75$ 时, 土压力分布显著偏离经典库仑理论, 主动土压力系数降幅达18%~35%, 且滑裂面倾角增大至固定边界。将该方法应用于某实际二线船闸工程, 对比90与100 m轴线间距方案(对应宽深比分别为0.367和0.852), 结合非线性有限元模拟与现场监测验证。结果表明, 90 m方案下已建闸墙基底出现拉应力, 而100 m方案基底应力全为压应力, 位移量降低21.4%。提出的分析方法和开挖范围控制标准可为相关规范修订提供理论依据, 为类似工程提供借鉴。

**关键词:** 扩建船闸; 基坑; 开挖范围; 有限土体; 宽深比; 极限平衡法; 现场监测

中图分类号: U641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0101-08

## Analysis methodology of standard for foundation pit excavation limits in ship lock chamber expansion

ZHOU Qiankai<sup>1</sup>, LIU Xiaohong<sup>2</sup>

(1. Hunan Provincial Water Transport Construction Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China;

2. Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

**Abstract:** In view of the issue of lacking clear standards for the foundation pit excavation limits of ship lock chamber expansions and the safety of existing ship locks being affected by adjacent expansion construction, an analysis method for finite soil on the basis of rupture surface characteristics is proposed to quantitatively define the critical control parameters for foundation pit excavation. Through generalized centrifuge physical model tests, the deformation mechanisms of the soil behind the wall and the distribution rules of earth pressure under different width-depth ratios are systematically analyzed. The critical width-depth ratio between semi-infinite and finite soil conditions is identified as  $k=0.75$ . When  $k \leq 0.75$ , the earth pressure distribution deviates significantly from the classical Coulomb theory. The active earth pressure coefficient decreases by 18%–35%, and the inclination angle of the slip surface increases until constrained by the fixed boundary. This method is applied to an actual second-line ship lock project. The schemes with 90 and 100 m centerline spacings (corresponding to width-depth ratios of 0.367 and 0.852, respectively) are compared, and validated by nonlinear finite element simulation and field monitoring. The results show that under the 90 m scheme, tensile stress appears at the base of the existing ship lock wall, whereas under the 100 m scheme, all base stresses are compressive, with displacement reduced by 21.4%. The proposed analysis method and excavation limits control standard can provide a theoretical basis for revising relevant specifications and serve as a reference for similar projects.

**Keywords:** ship lock expansion; foundation pit; excavation limits; finite soil; width-to-depth ratio; limit equilibrium method; field monitoring

收稿日期: 2025-07-10 录用日期: 2025-07-30

\*基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2017JJ2110); 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(201243)

作者简介: 周千凯(1986—), 男, 硕士, 正高级工程师, 注册土木工程师(港口与航道工程), 从事枢纽、船闸及航道项目设计、研究与建设管理工作。

随着经济社会快速发展,水运货运量逐步提升,我国内河航道亟需扩能升级,船闸扩建工程作为航道升级扩能的节点,对于提升航道通过能力具有关键作用。扩建船闸工程属于续建项目,受既有枢纽建筑物及河段自然条件的双重制约,技术问题与新建枢纽同期建设的通航建筑物更为复杂,尤其是在扩建船闸施工过程中,既需要控制已建船闸结构的安全,又受复杂地质或河道防洪安全等边界条件的控制,需要合理确定基坑开挖范围。

基坑开挖后引起墙后土体卸载,将改变原有结构墙后土体状态,墙后有限土体不符合传统土压力理论中“半无限土体”假定,进而改变墙后土体变形机制和土压力值。国内外学者就该问题开展了一系列的研究,如 Khosravi 等<sup>[1]</sup>及杨明辉等<sup>[2]</sup>认为有限土体的主动土压力分布与土拱效应有关; Greco<sup>[3]</sup>及黄东<sup>[4]</sup>则认为有限土体的破坏过程是由多个滑楔体构成; Yang 等<sup>[5]</sup>基于滑楔子理论提出有限土体多折线型滑裂面,并按照多个滑楔体求解主动土压力;戴夏斌<sup>[6]</sup>提出了双曲线型滑裂面,并采用水平薄层法求解有限土体主动土压力。已有的一系列研究表明,有限土体不再满足经典理论半无限土体的假定,其破坏模式是各参数的变化而改变的,其滑裂面的倾角与朗肯理论存在较大的差别。目前多数学者采用理论分析、数值模拟或物理模型试验进行验证分析,鲜有将理论计算结果结合现场监测成果进行验证。

本文通过概化物理试验分析不同土体宽度下墙后土体变形特征,将基于离心物理模型试验得出的“半无限土体”和“有限土体”的宽深比临界值运用于实际工程案例,结合工程现场监测结果进行验证和分析,以期对相关工程设计及施工提供借鉴和参考。

## 1 概化物理试验

### 1.1 原型条件与概化

本文将已建船闸墙概化为刚性挡土墙,墙

后回填土为砂卵石,试验材料采用砂性土,通过室内试验确定的土样参数见表1,铺设的土体在自然状态下达到密实。采用 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》<sup>[7]</sup>的有关规定,墙土摩擦角  $\delta$  按  $0\varphi \sim 0.5\varphi$  取值( $\varphi$  为回填土的内摩擦角)。

表1 土样参数  
Tab. 1 Soil sample parameters

粒径/ mm	内摩擦角/ (°)	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	含水率/ %	孔隙比
0.25~1.00	30	1.488	0	0.64

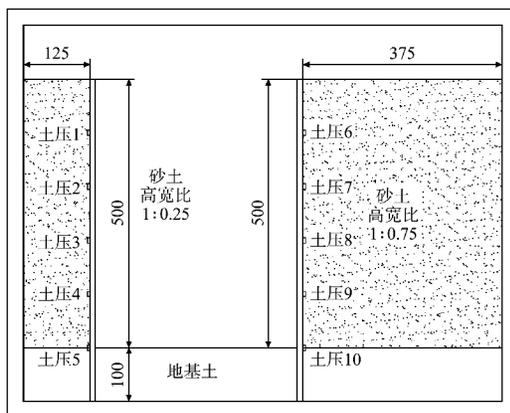
本文离心模型试验制模过程中,假定墙土摩擦角为  $0.5\varphi$ ,试验土体变形情况采用 GeoPIV 系统观测,经过后处理得到土体位移场。墙后土压力计按照每 10 cm 布设一个,共布设 5 个,用于观测土压力分布。

### 1.2 试验设置

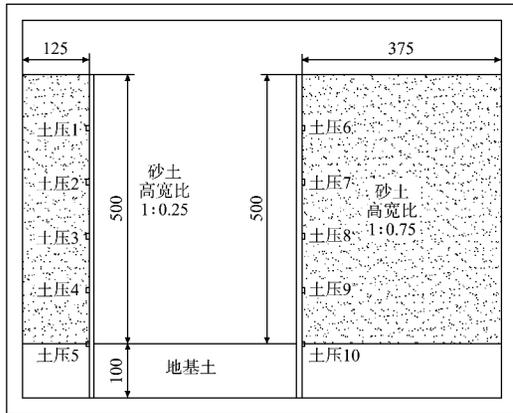
本文离心模型试验共设置两个变量:土体宽度及墙土摩擦角,共有 4 组试验,见表 2。为提高离心试验模型箱的利用率,每次进行两组试验并分为试验 1、2,见图 1。根据试验设计重力相似原则,离心试验加速度采用  $40g$ 。

表2 模型试验工况  
Tab. 2 Model test conditions

墙土摩擦角/(°)	土体宽深比
15	0.25, 0.50, 0.75
30	0.50



a) 试验1(不同宽深比)



b) 试验2(不同墙土摩擦角)

图1 试验方案设计(单位:mm)

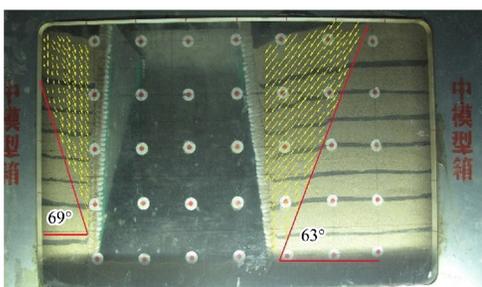
Fig.1 Experimental scheme designs(unit:mm)

1.3 试验结果分析

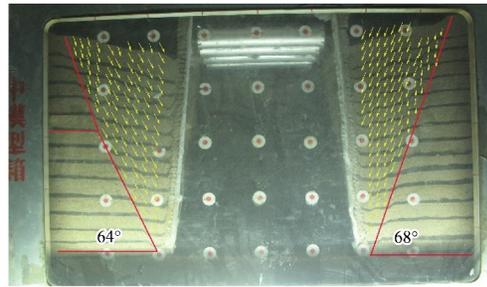
1.3.1 土体变形

本文试验土体变形情况采用 GeoPIV 系统观测, 经过后处理得到土体位移场。

试验 1 结果见图 2a), 当有限宽度土体处于主动极限平衡状态时, 对比宽深比  $k=0.75$  与  $k=0.25$  两种工况:  $k=0.75$  工况下, 土体滑移区范围显著扩大, 滑裂面自活动挡墙的墙趾延伸至土体自由表面; 而  $k=0.25$  工况下, 滑裂面倾角增大, 破坏路径由活动挡墙墙趾发展至固定挡墙墙面<sup>[8-9]</sup>。试验 2 结果见图 2b), 墙土摩擦角的改变显著影响有限宽度土体的变形特性。当摩擦角为  $15^\circ$  时, 滑裂面呈现明显折线特征; 当摩擦角增大至  $30^\circ$  时, 滑裂面转变为自活动挡墙墙趾延伸至土体表面的直线形态<sup>[10]</sup>。由此可见, 随着墙土摩擦角的增大, 土体塑性区范围相应减小, 滑裂面倾角增大。



a) 试验1



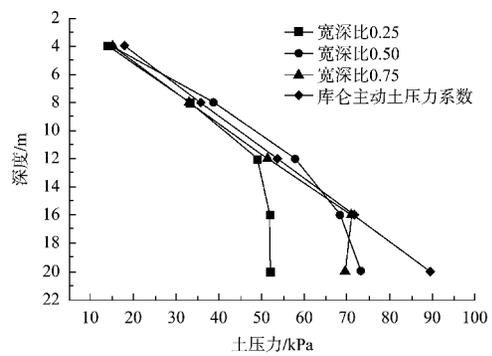
b) 试验2

图2 试验土体变形

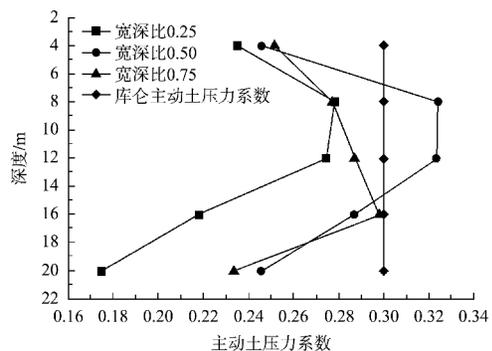
Fig.2 Soil deformation from test

1.3.2 土压力

有限土体的土压力分布见图 3a)。可以看出, 有限土体的土压力分布特征与经典库仑土压力理论存在显著差异。具体表现为, 各深度处的实测土压力值均偏离库仑理论计算值, 且沿深度呈明显的非线性分布特征。主动土压力系数分布结果见图 3b)。可以看出, 有限土体主动土压力系数呈现深度相关的非线性变化规律, 表现为先递增后递减的分布模式。研究表明, 土体宽深比  $k$  的变化会显著影响主动土压力系数的分布特性<sup>[11-12]</sup>。



a) 有限土体主动土压力分布



b) 主动土压力系数分布

图3 不同条件下土体主动土压力和主动土压力系数分布

Fig.3 Distribution of active soil pressure and its coefficient in soils under varying conditions

基于试验结果的对比分析：1) 当  $k=0.75$  时，滑裂面为单一平面，此时土压力分布与库仑理论预测结果最为接近；2) 当  $k=0.50$  时，滑裂面已由单一平面转变为折线型破坏面，主动土压力系数表现为先缓增后骤降的分布规律。其中，浅层土压力略高于理论值，而深层土压力则显著低于理论预测；3) 当  $k=0.25$  时，滑裂面已形成复合型，滑楔体受限于两侧边界条件，其有效体积减小，导致主动土压力系数沿深度急剧衰减，同深度下相比  $k=0.75$  下降 18%~35%。

## 2 工程实例

### 2.1 扩建船闸轴线间距布置

按照前文论述，刚性挡土墙墙后有限宽度土体“半无限土体”和“有限土体”分界范围核心为墙后土体宽深比，相比《基坑工程手册》<sup>[13]</sup>中明确的 0.58，根据前期试验中有限宽度土体的宽深比界限应介于 0.75~1 之间，为进一步将理论应用于实际工程，本文结合各控制断面已建船闸结构的影响，进一步验证扩建船闸基坑开挖范围标准。以某二线船闸工程为例，二线船闸基坑开挖后的断面见图 4。

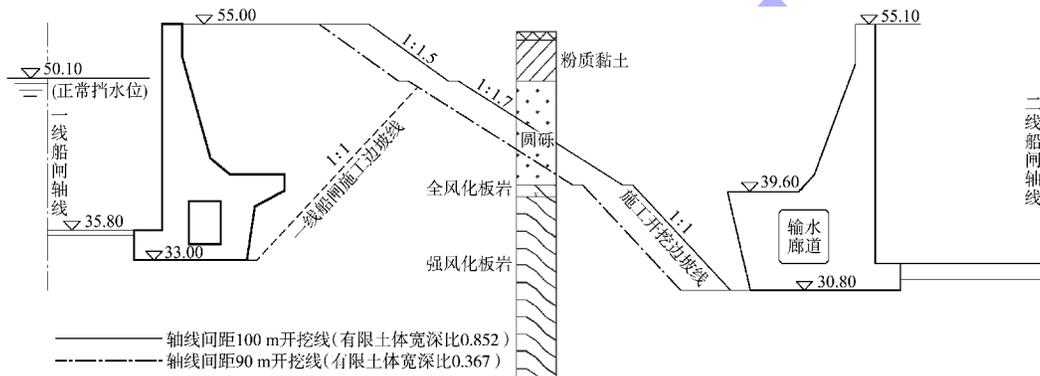


图 4 一线船闸闸室墙段开挖断面(单位: m)

Fig. 4 Excavation section of chamber wall for primary ship lock (unit: m)

### 2.2 边界条件及参数输入

工程实际各土层参数见表 3。

表 3 各土层参数

Tab. 3 Parameters of every soil layer

岩土名称	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	推荐坡比	允许承载力/ kPa	与混凝土摩擦系数
粉质黏土	15	30	1:1.5	220	-
圆砾	38	0	1:1.7	350	-
全风化板岩	25	15	1:1.5	300~350	0.30
强风化板岩	45	0	1:1	400~600	0.35~0.50

### 2.3 数值模拟成果分析

#### 2.3.1 90 m 轴线距方案

1) 位移分析。90 m 方案的数值模拟位移结果见图 5。可以看出，一线船闸闸室墙最大的水平位移为 4.43 mm，发生在闸室墙顶部；最大竖向位移为 1.36 mm，发生在闸室墙右侧承台处。根据位

移分布规律，得知在基坑开挖的作用下，一线船闸闸室整体产生了向基坑方向的位移，但位移数值较小，即基坑开挖对闸室墙所产生的位移小。

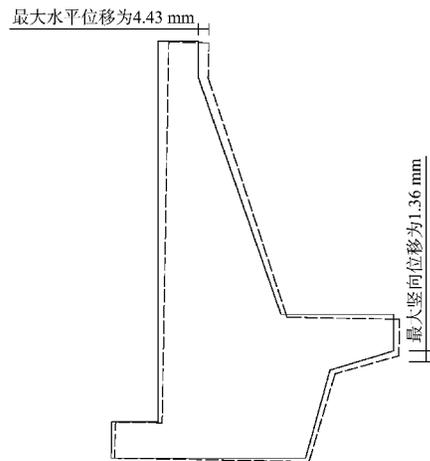


图 5 90 m 方案的数值模拟位移结果

Fig. 5 Displacement results in numerical simulation of 90 m scheme

2) 基底应力分析。根据 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》<sup>[14]</sup> 和岩土工程勘察报告<sup>[15]</sup>, 闸室墙基底既不能出现拉应力, 最大压应力也不能超过奠基面岩土最大允许应力。90 m 方案的应力分析云图见图 6。可以看出, 闸室前趾端受到了拉应力, 最大拉应力数值为 45.7 kPa; 其他区域均受压应力的影响, 通过该处岩基的力学特征, 查询岩土工程勘察报告可知, 闸室基底容许承受的压应力为 400~600 kPa, 即取压应力平均值 500 kPa, 而闸室基底最大压应力为 308.0 kPa, 小于强风化板岩容许应力。综合上述的基底拉压应力的分布特征, 得知该结构段难以满足设计要求。

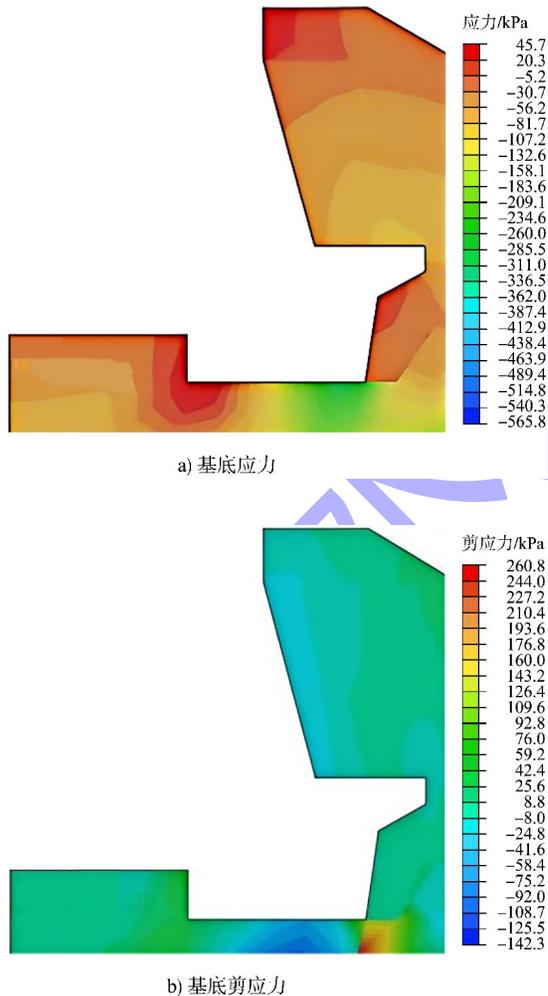


图 6 90 m 方案的应力分析云图  
Fig. 6 Stress analysis nephogram of 90 m scheme

3) 基底剪应力分析。根据地质勘察资料, 得知闸室基底位于强风化岩层上, 闸室墙奠基面剪切应力允许值即抗剪强度 175 kPa。根据图 6b) 可知, 闸室后踵段基底剪应力较大, 最大的剪应力值为 125.0 kPa, 但小于该处岩体的容许抗剪强度 175 kPa, 满足剪应力设计要求。

2.3.2 100 m 轴线距方案

1) 位移分析。100 m 方案的数值模拟位移结果见图 7。可以看出, 一线船闸闸室最大的水平位移为 3.48 mm, 发生在闸室墙顶部; 最大竖向位移为 2.18 mm, 发生在闸室墙右侧的承台处。通过位移分布规律, 得知在基坑开挖的作用下, 一线船闸闸室整体产生了朝基坑方向的位移, 但位移数值较小, 即基坑开挖对闸首所产生的位移小。

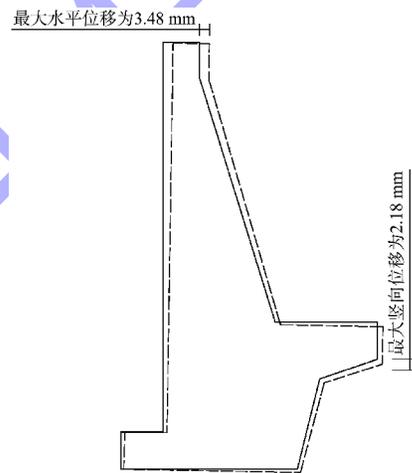


图 7 100 m 方案的数值模拟位移结果  
Fig. 7 Displacement results in numerical simulation of 100 m scheme

2) 基底拉压应力分析。根据地质勘察资料可知, 闸室基底位于强风化岩层上。100 m 方案的应力分析云图见图 8。可以看出, 闸室基底所受的应力皆为压应力, 通过该处岩基的力学特征, 闸室基底容许承受的压应力为 400~600 kPa, 即取压应力平均值 500 kPa, 而闸室基底最大压应力为 280.1 kPa, 小于强风化板岩容许应力, 即满足设计要求。

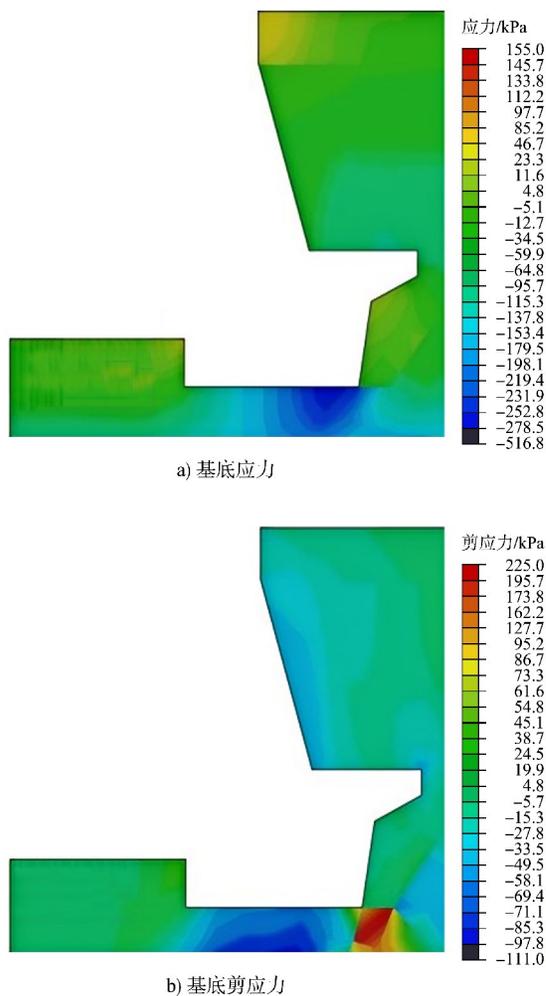


图8 100 m方案的应力分析云图

Fig. 8 Stress analysis nephogram of 100 m scheme

3) 基底剪应力分析。根据地质勘察资料可知,一线船闸下游出水墙基底位于强风化岩层上,根据地勘报告成果,闸室墙奠基面剪切应力允许值即抗剪强度 175 kPa。根据图 8b)可知,出水墙后踵段基底剪应力最大,最大的剪应力值为 61.7 kPa,但小于该处岩体的容许抗剪强度 175 kPa,满足剪应力设计要求。

### 2.4 现场监测成果分析

为进一步验证计算结果,对已实施的 100 m 轴线距方案进行现场监测分析。工程土方开挖量总计约 630 m<sup>3</sup>,工程基坑开挖始于 2016 年 11 月初,船闸主体基坑开挖至底高程在 2017 年 8—10 月。为便于分析,选取控制性典型断面(图 4),即一线船闸闸室墙与二线船闸闸室墙基坑的断面进行对比分析,基坑开挖进程见表 4。

表 4 典型断面基坑开挖进程

Tab. 4 Excavation progress schedule for foundation pit of typical section

时间	开挖高程/m	节点
2016-11-05	55.10	开挖起始
2016-12-03	49.10	-
2016-12-13	46.10	-
2016-12-29	44.10	-
2017-02-28	42.10	-
2017-03-27	41.10	-
2017-04-11	40.10	支护桩施工开始
2017-05-05	34.10	支护桩施工完毕
2017-05-27	31.10	-
2017-06-11	27.10	达到基坑设计底高程

SC12 观测点位于一线闸墙墙顶,其位移和沉降历时分布见图 9。根据基坑开挖开始至基坑底部移动变形量及沉降变形量趋势,一线闸墙顶位移随基坑开挖的进程,有逐步偏向基坑内侧的趋势<sup>[16]</sup>。

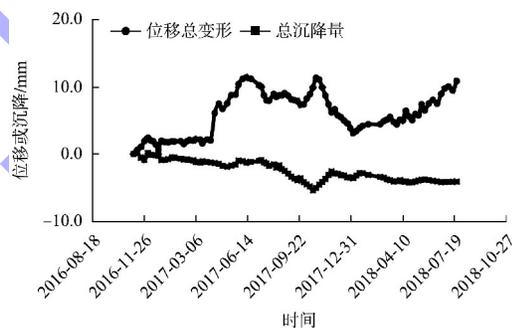


图9 SC12 观测点位移和沉降历时分布

Fig. 9 Time-history distribution of displacement and settlement for monitoring point SC12

#### 2.4.1 整体趋势分析

在基坑初期,沉降和位移均开始同步进行,其中位移在 2016 年 12 月初出现一次峰值,达到 2.4 mm,随后位移方面达到相对稳定状态,一直控制在 2.0 mm 以内,而沉降则继续开展,一直随时间持续下降。在 2017 年 5 月,达到最大沉降值 -1.94 mm,随后有一定程度的回弹,沉降又缩小至 -0.99 mm,在回弹完成后则继续下降,直至基坑开挖至设计底高程。

#### 2.4.2 历时位移分析

观测点 SC12 位于一线闸室墙第 10 结构段,一线闸墙为衡重式结构,对水平力变化非常敏感,由图 9 可知,开挖初期有一次位移峰值,达到 2.4 mm,

基坑内开挖高程为 49.10 m。由于典型断面闸墙与上游导航墙断面有一定差异,观测点结构段均采用已有一线闸墙帷幕灌浆(永久结构)作为临时防渗线,一线船闸每一次灌泄水均会对闸墙产生一定位移。试验过程中,在枯水期(坝下水位 40.00 m 左右)每一次灌泄水完成后,即一线闸墙墙前水位在 50.10 和 40.00 m 变换后,实际闸墙墙顶会出现约 1.5 mm 的变动,因此反映在图 9 中,2017 年 3 月以后位移变化不明显,此时开挖土体均在 40.00 m 以上(一线闸墙衡重台以上)直至 2017 年 5 月,而后基坑开始大规模开挖,位移有较大幅度变化,最大已达到 11.38 mm。

#### 2.4.3 历时沉降分析

沉降方面典型断面与上游导航墙断面趋势一致,在基坑开挖后,沉降一直持续至 2017 年 5 月初,而后基本稳定,并在一定程度上有回弹的现象,根据施工进度分析,支护桩施工基本在 4 月底完成,表明支护桩对深层土体的抗滑移作用明显。由于土体在一定位移范围内可视为弹性体,在支护桩的抵抗作用后,土体有一定回弹作用,使得沉降有上升的趋势,在回弹完成后,沉降继续增加,直到基坑开挖至底高程。

### 3 闸室墙位移对比及位移控制探讨

根据 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》,船闸闸墙除施工期外,其他工况不允许出现拉应力。经分析,施工期允许出现不超过 100 kPa 的拉应力是因为在施工期局部位置出现,可通过重复灌浆或加密灌浆的方式,将闸墙基底与奠基面充分接触,杜绝防渗帷幕与闸墙结构脱开的问题;运行期和检修期完全不能出现拉应力,一旦出现将可能导致闸室墙漏水或检修期间室内无法抽干事故。

根据数值模拟计算结果,可知 100 m 方案下,一线船闸闸室墙最大的水平位移为 4.43 mm,发生在闸室墙顶部;最大竖向位移为 1.36 mm,发生在闸室墙右侧承台处。通过位移分布规律,得知在基坑开挖的作用下,一线船闸闸室整体产生了向基坑方向的位移,但位移数值较小,即基坑开挖对闸室墙所产生的位移小<sup>[17]</sup>。

实际监测闸室墙顶位移为 11.38 mm,而数值计算结果为 4.43 mm,经分析,主要存在以下原因:1)实际基坑开挖期间为南方梅雨季节,数值模拟并未考虑降雨条件下导致的边坡变形,从而导致墙后有限土体含水率大幅增加,降低土体抗剪指标,导致有限土体土压力大幅降低,闸室墙作为衡重式结构,基坑内侧水平抵抗荷载的降低,叠加水位持续变化,使得闸室墙向基坑内侧倾倒趋势;2)开挖速率对位移变化值影响较大,即从开挖历时分析,4—5 月开挖速率明显大于前期,对位移结果影响较大,大于数值模拟值。

### 4 结论

1) 本文通过离心物理模型试验,对不同有限宽度与深度的墙后有限土体土压力进行试验分析,得出介于半无限土体和有限土体的临界值在  $k = 0.75$  左右。

2) 本文创新地将半无限土体和有限土体界限研究成果运用于扩建船闸工程,分别采用 90 和 100 m 轴线间距方案,对应有限土体宽深比分别为 0.367、0.852,采用非线性有限元进行计算分析,得出 90 m 方案闸墙已出现拉应力,100 m 方案均满足地基允许承载力和规范要求,为考虑安全,工程期间采用 100 m 方案进行实施。

3) 本文将现场监测成果与计算成果比较,实际监测闸室墙顶位移为 11.38 mm,远大于数值计算成果为 4.43 mm,经分析,数值模拟并未考虑降雨条件下导致的土体抗剪指标大幅降低情况,后续需要进一步开展降雨条件对有限土体土压力的影响研究。

#### 参考文献:

- [1] KHOSRAVI M H, PIPATPONGSA T, TAKEMURA J. Theoretical analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode [J]. Soils & foundations, 2016, 56(4): 664-675.
  - [2] 杨明辉,戴夏斌,赵明华.墙后有限宽度无黏性土主动土压力试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(1):131-137.
- YANG M H, DAI X B, ZHAO M H, et al. Experimental study on active earth pressure of cohesionless soil with limited width behind retaining wall [J]. Chinese journal

- of geotechnical engineering, 2016, 38(1): 131-137.
- [3] GRECO V R. Analytical solution of seismic pseudo-static active thrust acting on fascia retaining walls [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2014, 57: 25-36.
- [4] 黄东. 临近既有地下室挡土墙主动土压力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- HUANG D. Study on active earth pressures on retaining walls adjacent to existing basement [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [5] YANG K H, KNISS K T, ZORNBERG J G, et al. Finite element analyses for centrifuge modelling of narrow MSE walls [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2010, 136(3): 435-448.
- [6] 戴夏斌. 墙后有限宽度无粘性土主动土压力试验及数值模拟[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- DAI X B. Experimental study of active earth pressure of cohesionless soil with limited width behind the retaining wall and numerical simulation [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [7] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of building foundation: GB 50007-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [8] 曾晓鑫. 稳定渗流和振动荷载下有限宽度砂土主动土压力试验及数值模拟[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- ZENG X X. Experimental and numerical investigation of active earth pressure against sandy soil with limited width subjected to stable seepage and vibration loads [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.
- [9] 徐日庆, 徐叶斌. 考虑剪应力作用的有限土体被动土压力分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版) 2020, 47(9): 76-84.
- XU R Q, XU Y B. Analysis of passive earth pressure for limited soils considering action of shear stress [J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2020, 47(9): 76-84.
- [10] 张振波, 李秉欣, 杨茜, 等. 近接基坑工程有限土体失稳模式研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 266-277.
- ZHANG Z B, LI B X, YANG Q, et al. Instability mode of limited soil in adjacent foundation pit engineering [J]. Rock and soil mechanics, 2025, 46(1): 266-277.
- [11] 梁发云, 华建, 李林, 等. 考虑土体有限宽度的邻近建筑基坑土压力计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(11): 1711-1719.
- LIANG F Y, HUA J, LI L, et al. Calculation method of earth pressure considering finite soil width in adjacent building foundation pits [J]. Journal of Tongji University (natural science), 2024, 52(11): 1711-1719.
- [12] 唐捷朗, 刘洪一, 高君杰, 等. 二线船闸基坑施工对既有一线船闸扰动实测影响分析[J]. 水运工程, 2023(9): 203-210.
- TANG J L, LIU H Y, GAO J J, et al. Measured influence of disturbance of second-line ship lock foundation pit construction on existing first-line ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 203-210.
- [13] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- LIU G B, WANG W D. Excavation engineering manual [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [14] 船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- Code for design of hydraulic structures of shiplocks: JTJ 307-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [15] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 湘江二级航道二期工程勘察设计 A 合同标段岩土工程勘察报告[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2014.
- Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd. Geotechnical engineering investigation report for contract section a of the survey and design for the second phase of the Xiangjiang River second-class channel project [R]. Changsha: Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 2014.
- [16] 周千凯, 祝伟程, 周丁, 等. 桩基重力式支护结构的不同计算模型[J]. 水运工程, 2019(3): 94-98, 153.
- ZHOU Q K, ZHU W C, ZHOU D, et al. Different calculation models of pile foundation gravity support structure [J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 94-98, 153.
- [17] 宋旭明, 李小龙, 唐冕, 等. 深基坑开挖致高铁桥墩位移的 SVM 预测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025, 59(6): 1233-1240, 1252.
- SONG X M, LI X L, TANG M, et al. SVM prediction method for displacement of high-speed railway piers caused by deep foundation pit excavation [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2025, 59(6): 1233-1240, 1252.