



# 施工期地连墙整体模型优化

陈小翠<sup>1</sup>, 杜成斌<sup>1</sup>, 江守燕<sup>1</sup>, 钱祖宾<sup>2</sup>, 马志华<sup>3</sup>

(1. 河海大学 工程力学系, 江苏 南京 210098;

2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225009; 3. 江苏省水利工程建设局, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 通过对在建泰州引江河高港枢纽二线船闸工程的研究分析, 基于 ABAQUS 平台建立了适用于船闸闸室的地连墙整体有限元模型, 模拟施工期不同阶段拉锚体系的受力变形。计算结果与现场实测结果的对比表明, 建立的整体模型能够准确地预测施工期不同阶段地连墙和锚碇桩的变形情况以及拉杆的内力变化。同时, 基于该整体模型重点探讨了地连墙板桩结构的拉杆布置、闸室土体开挖和墙后填土方案等对板桩结构体系的影响。研究表明: 闸室土体开挖对板桩墙内力和变形影响最大; 拉杆数量及拉杆高程都应该合理布置, 以避免地连墙的拉应力过大; 先开挖闸室内土体再回填板桩墙后土体的施工方式更利于拉锚体系的整体受力和变形。

**关键词:** 有限元分析; 整体模型; 板桩结构; 地连墙; 锚碇桩; 拉杆; 开挖

中图分类号: U 443.16<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0142-06

## Finite element analysis and numerical verification of sheet-pile structure

CHEN Xiao-cui<sup>1</sup>, DU Cheng-bin<sup>1</sup>, JIANG Shou-yan<sup>1</sup>, QIAN Zu-bin<sup>2</sup>, MA Zhi-hua<sup>3</sup>

(1. College of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Provincial Water Conservancy Survey, Design and Research Institute, Yangzhou 225009, China;

3. Jiangsu Provincial Water Conservancy Construction Bureau, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** According to the research on the second-line lock engineering of Taizhou irrigation channel Gaogang hydraulic schemes and based on the ABAQUS platform, we establish the whole finite element model of sheet-pile structures, which can be employed to predict the deformation behavior of anchor pile and underground retaining wall, and the internal force state of the bar in different stages of the construction period. Moreover, based on the model, we probe into the influence of the bar arrangement for the underground retaining wall's sheet-pile structure. soil excavation in the lock chamber, and soil filling scheme behind the wall on the sheet-pile structure system. The research result reveals that excavation exerts the greatest influence on the internal force and deformation of the sheet-pile wall; Both the bar number and bar elevation shall be reasonable to avoid greater tensile stress on the underground retaining wall; The construction mode of excavating the chamber soil first and filling behind the sheet-pile wall later is more favorable for the overall stress and deformation of the anchor system.

**Keywords:** finite element analysis; whole model; sheet-pile structure; concrete diaphragm wall; anchor pile; bar; excavation

板桩结构是由板桩墙、拉杆和锚碇结构共同维持工作的一种结构形式。该结构具有结构设计简单、施工机械化程度高、耐久性好、对复杂地

质条件适应性强等优势<sup>[1]</sup>, 适用于码头工程、船闸闸墙、船坞坞墙、围堰等挡土、挡水等工程。目前, 板桩结构的内力计算及设计主要采用将拉

收稿日期: 2015-07-15

作者简介: 陈小翠 (1989—), 女, 博士研究生, 从事结构模拟及仿真计算研究。

杆作为媒介、分别进行地连墙和锚碇结构分析的计算方法,忽略了拉杆及地连墙结构变形与内力之间的相互影响。同时,现行规范<sup>[2]</sup>对拉杆布置原则、锚碇位置等的控制并不具体,而且现行设计计算的高板桩墙泥面位移大部分均超出1 cm,已经超出板桩结构设计规范限定范围<sup>[3]</sup>。Ashraf Zekri等<sup>[4]</sup>通过振动台实验研究了土的液化对板桩码头结构的抗震性能影响。朱庆华等<sup>[5]</sup>将单锚板桩墙结构拉锚体系作为一个整体,简化为梁杆体系,建立了单锚板桩墙结构整体模型,提高计算设计精度,但该模型仍是建立在竖向弹性地基梁理论基础上的。汤子扬等<sup>[6]</sup>基于Plaxis考虑桩土之间作用来建立模型,并对2种土体模型参数进行敏感性分析的。Liu等<sup>[7]</sup>进行了桩锚体系的三维模拟分析。

板桩结构地下连续墙的变形性态和受力情况直接影响工程的安全及结构的使用寿命。若地下连续墙变位过大,则易造成地下连续墙墙体局部破坏,甚至出现渗漏现象。然而影响地下连续墙墙体受力特性的因素很多,如现场地下土体的土质、施工条件、锚碇结构及拉杆的布置等。目前,国内主要通过对现场实测来观测并控制地下连续墙的变位,但不具备预知性,无法提前采取措施。因此,在施工前期对结构内力的影响因素进行数值分析,在理论分析的指导下进行工程的现场观测控制非常重要。有限元数值分析的结果能够定量、准确地反映施工过程中各种因素的影响程度,通过提供的预测研究成果来指导施工,预防工程的不安全因素,及时规避施工各因素造成的风险<sup>[8-10]</sup>。

本文以在建的泰州引江河高港枢纽二线船闸工程为研究对象,基于ABAQUS平台建立船闸地连墙板桩结构的整体有限元模型,精细模拟船闸典型闸室的施工过程,在与现场实测结果对比的基础上,建立施工预测模型预测在施工期不同阶段锚碇桩、地连墙的受力变形性态以及拉杆的内力状态。根据有限元整体模型重点分析探讨地连墙板桩结构的拉杆布置及开挖、施工方式的原则与优化方案。

## 1 有限元计算模型

地连墙结构的受力与变形情况相当复杂:地连墙在墙后土体的作用下产生挠曲变形,由此引起土压力的重分布,同时,土压力的重分布又反过来影响墙体的内力和变形。因此只有把墙和土体作为一个相互作用的整体来分析才能正确反映出板桩墙的受力和变形状态。在板桩墙与土体的相互作用中,板桩墙一般会产生挠曲变形,这样,沿墙体的深度方向,墙上各点的变形大小不同,与墙体接触的土中各点,其应力状态也就不可能同时达到(有些点甚至不能达到)塑性极限平衡状态,因此仍然采用线性土压力分布显然不能如实反映板桩墙的应力和应变状态。

图1为泰州引江河高港枢纽二线船闸工程的二维有限元整体模型分析网格,分析时采用平面应变模型,计算厚度为单根拉杆的影响范围19.5 m共布置13根拉杆。锚碇桩、地连墙、土体的单元类型均为四结点实体单元,拉杆的单元类型为二结点杆单元,其中地连墙、井字梁、锚碇桩以及拉杆采用线弹性本构模型进行计算,土体采用Duncan-Chang非线性弹性模型。模型不考虑拉杆与锚碇桩以及拉杆与地连墙之间的粘结滑移,假定它们之间粘结完好,土体与混凝土结构的接触采用点面接触模型。二维整体模型共有66 573个节点,65 606个单元,其中地连墙厚度方向剖分为5层单元,井字梁厚度方向剖分为6层单元。

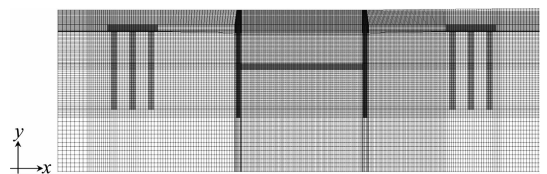


图1 二维有限元计算网格

## 2 材料及模型参数

有限元模拟时,地连墙、井字梁、锚碇桩和拉杆单元均采用线弹性本构模型,土体模拟采用邓肯-张  $E-v$  本构模型,邓肯-张  $E-v$  本构模型的弹性模量是应力状态的函数,可以描述土体应力-应变关系的非线性和压硬性,同时具有模型参数少、

物理概念明确、确定计算参数所需的试验简单易行等优点。采用该本构模拟土体回填及开挖过程时,地连墙板桩结构的变形规律较为符合实际,计算收敛性较好。本文采用文献[12]的利用 UMAT 子程序对邓肯-张材料本构模型进行了二次开发的方法,在 ABAQUS 平台<sup>[13]</sup>对板桩结构整体模型进行模拟。

本文参照文献[14]规范拟定各线弹性材料参数,土体本构模型的材料参数均由现场取样的土

体静三轴试验得到(表1,表2)。对于平面应变模型,将锚碇桩的弹性模量根据刚度等效原则进行折减(5.94 GPa)。土体分层情况见表3。

表1 拉锚体系材料参数

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$
地连墙	2 500	28.0	0.200
井字梁	2 500	30.0	0.200
锚碇桩	2 400	28.0	0.167
拉杆	7 800	200.0	0.300

表2 邓肯-张  $E-v$  模型参数

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量中的无因次系数		破坏比 $R_f$	有效应力强度		侧向变形系数			卸荷模量 $k_{ur}$
		$k$	$n$		$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$G$	$F$	$D$	
土体1	1 960	319.0	0.423	0.823	30.0	33.4	0.25	0.158	8.2	957.0
土体2	1 910	255.0	0.542	0.822	23.7	40.2	0.35	0.108	3.4	765.0

表3 土体分层情况

土层	高程/m	材料
回填土	6.00~2.00	土体1
土层1	2.00~1.00	土体1
土层2	1.00~-15.00	土体1
土层3	-15.00以下	土体2

### 3 有限元计算及结果分析、优化

#### 3.1 模拟施工工况

数值模拟过程中将施工期分为5个工况,分别为锚碇桩、地连墙及锚杆已施工完毕,尚未填土;板桩墙后土体回填至高程4.38 m;闸室土体开挖至-5.7 m高程;闸室1.2 m厚井字梁浇筑完闭和继续回填板桩墙后土体至高程6 m(图2)。

工况1:施工期水位为闸室侧-5.7 m,闸室外侧-4.2 m,锚碇桩、地连墙及锚杆已施工完毕,尚未填土,此时板桩墙后土体高程与闸室土体高程为2.5 m。

工况2:施工期水位为闸室侧-5.7 m,闸室外侧-4.2 m,板桩墙后土体回填,回填至高程4.38 m。

工况3:施工期水位为闸室侧-5.7 m,闸室外侧-4.2 m,闸室土体开挖至-5.7 m高程。

工况4:施工期水位为闸室侧-5.7 m,闸室

外侧-4.2 m,闸室1.2 m厚井字梁浇筑完闭。

工况5:施工期水位为闸室侧-5.7 m,闸室外侧-4.2 m,继续回填板桩墙后土体至高程6 m。

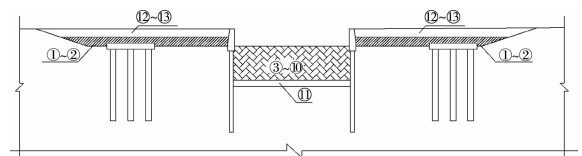


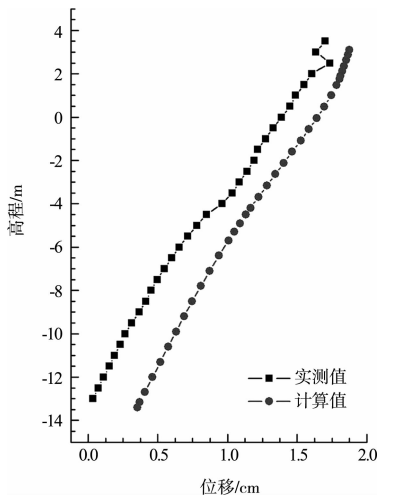
图2 施工步骤

#### 3.2 现场实测与计算结果对比

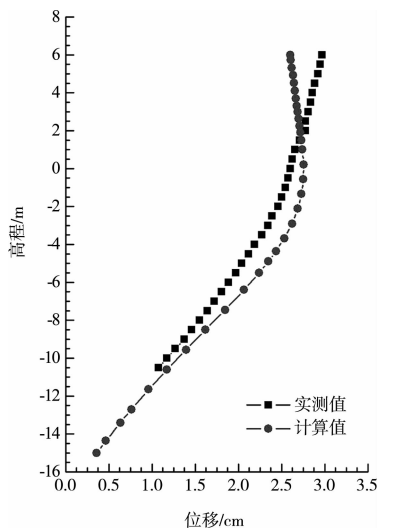
闸室内深基坑的开挖施工是动态过程,与之有关的稳定和环境的影响也在动态变化。因此,在施工过程中,必须对基坑围护结构、周边环境进行全方位、全过程的监控。本工程在施工前期,预先在锚碇桩、地连墙上埋设了测斜管,在拉杆上也安装了应变计,为工程决策、设计修改、工程施工和工程质量管理提供大量的监测资料和依据,给数值模拟结果的验证提供可靠的依据。

图3为闸室段现场实测结果和数值计算结果的对比。图中显示,数值模拟的锚碇桩、地连墙结构的变位情况及不同施工阶段拉杆的内力变化趋势与现场实测结果吻合较好,验证了有限元整体分析模型的合理性。根据有限元模拟分析结果,

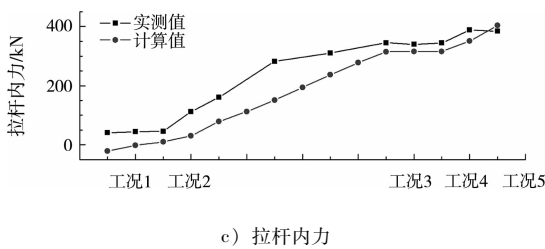
地连墙最大位移(计算值 2.76 cm)与地连墙深度(21 m)的比值为 0.13%, 地连墙处于稳定状态。



a) 锚碇桩水平位移沿高程变化曲线(工况 5)



b) 地连墙水平位移沿高程变化曲线(工况 5)



c) 拉杆内力

图 3 现场实测结果和计算结果的对比

### 3.3 拉杆数量对地连墙变形及应力的影响

对于地连墙板桩结构, 拉杆布置的数量与地连墙体变位具有直接的关系, 对地连墙体受力有着重要的影响, 现行规范 JTS 167-3—2009 规定拉杆间距

可采用 1.0 ~ 3.0 m, 本工程实际布置的拉杆量为每 19.5 m 布置 13 根拉杆, 即拉杆间距为 1.5 m。

图 6~8 给出了拉杆间距为 3.0 (拉杆量减小 1 倍)、1.5、0.75 m (拉杆量增加 1 倍) 以及无拉杆情况下墙体及拉杆的变形、内力曲线。从计算结果可以看出, 在没有拉杆的情况下(悬臂式地连墙), 地连墙的水平位移大幅增加, 位移最大值为 9.39 cm, 且地连墙水平位移最大值的位置发生变化, 地连墙水平位移的大幅度增加严重影响闸室的稳定性。

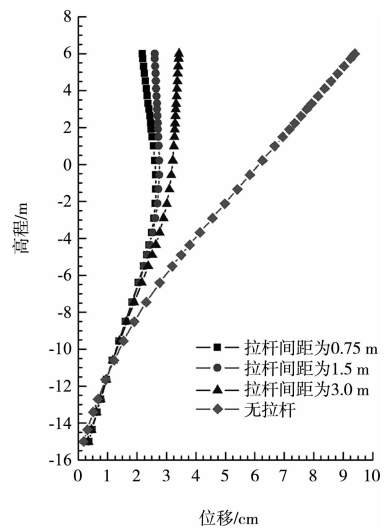


图 6 不同拉杆间距下地连墙水平位移沿高程变化曲线

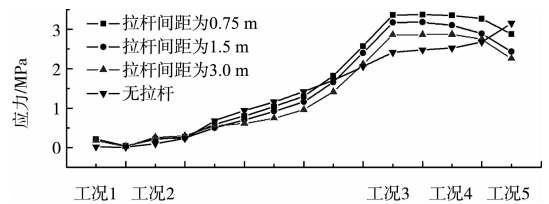


图 7 不同拉杆间距下施工期地连墙主拉应力最大值变化曲线

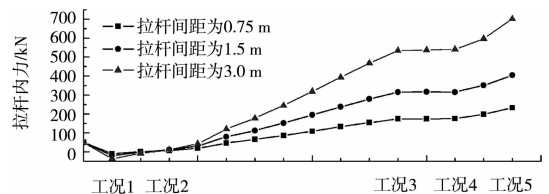


图 8 不同间距下施工期拉杆内力的变化曲线

在拉杆间距为 3.0 m 情况下, 闸室井字梁浇筑完毕(工况 4)时, 地连墙主拉应力最大, 为 4.25 MPa, 比拉杆间距为 1.5 m 时主拉应力最大值 4.69 MPa 小, 主拉应力变化规律与拉杆间距为

1.5 m 时近似。但是拉杆间距为 3.0 m 时单根杆件的内力最大值达到 701.13 kN。在无拉杆情况下，地连墙主拉应力在工况 5 时达最大，且在施工过程中地连墙主拉应力最大值一直呈明显上升状态，土体填筑和开挖完毕（工况 5），地连墙主拉应力最大值达 4.57 MPa。

从图 7 和 8 的计算结果可以看出，设置拉杆的情况下拉杆数越多，地连墙的变形越小，墙体的主拉应力呈增大趋势，且在原基础上继续增大拉杆数量，对于地连墙的侧向位移和主拉应力等的影响比减少拉杆数对地连墙的侧向位移和主拉应力等的影响小。拉杆间距为 0.75 m 时地连墙水平位移最大值为 2.64 cm，位移最大值减小了 4.35%，主拉应力最大值为 4.96 MPa，主拉应力最大值增大了 6.0%；拉杆间距为 1.5 m 时水平位移最大值为 2.76 cm，主拉应力最大值为 4.69 MPa；拉杆间距为 3.0 m 时地连墙水平位移最大值为 3.42 cm，位移最大值增大了 23.9%，主拉应力最大值为 4.25 MPa，最大值减小了 9%。因此，拉杆数量应该合理布置，否则会导致拉杆内力变形过大、墙体产生裂缝等。

计算结果表明：地连墙水平位移随拉杆间距的增加而增大，拉杆内力随拉杆间距的增加而增大，而墙体拉应力随拉杆间距的增加而减小。当拉杆间距为 1.75 ~ 2.00 m 时，地连墙侧向位移的变形率最小，同时地连墙的最大拉应力也趋于稳定。因此将拉杆间距进一步扩大为 1.75 ~ 2.00 m，更利于地连墙的稳定。

### 3.4 闸室土体每层开挖深度的敏感性分析

从前面计算结果的分析可以看出，闸室土体的开挖扰动对锚碇桩、地连墙的变形以及拉杆内力的影响均较大。这里主要研究了闸室土体的施工开挖方式对地连墙的变形以及拉杆内力的影响，考虑了 3 种不同的开挖方式，总开挖深度为 8.2 m：1) “先薄再厚”式开挖方式，先开挖 3 层，每层

各 1 m，再每层开挖 2 m 至 3 m；2) “先厚再薄”式开挖方式，先开挖 3 m 至 2 m，再每层开挖 1 m；3) “等厚度”开挖方式，每层开挖 1 m(图 9 ~ 11)。结果表明：“先薄再厚”式开挖方式，地连墙最大位移、地连墙最大拉应力及拉杆内力均较小。因此，从拉锚体系受力情况的角度出发，类似工程建议采取“先薄再厚”式开挖方式。

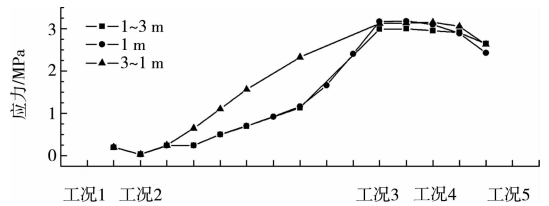


图 9 不同开挖方式下地连墙拉应力随开挖深度的变化曲线

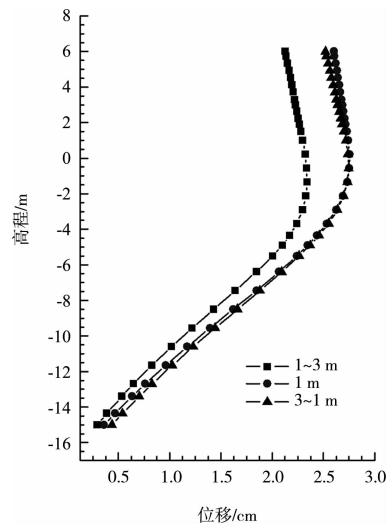


图 10 不同开挖方式下地连墙最大水平位移随开挖深度的变化曲线

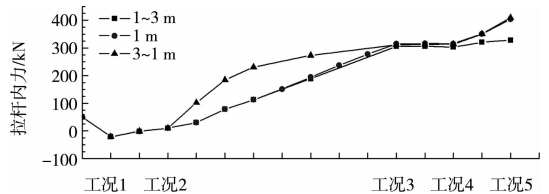


图 11 不同开挖方式下拉杆内力随开挖深度的变化曲线

### 3.5 墙后土体回填与闸室土体开挖顺序的优化

为观察墙后土体回填与闸室土体开挖顺序对地连墙受力变形的影响，根据施工可能情况，研究了 6 种施工开挖顺序、填土方式(图 12)。

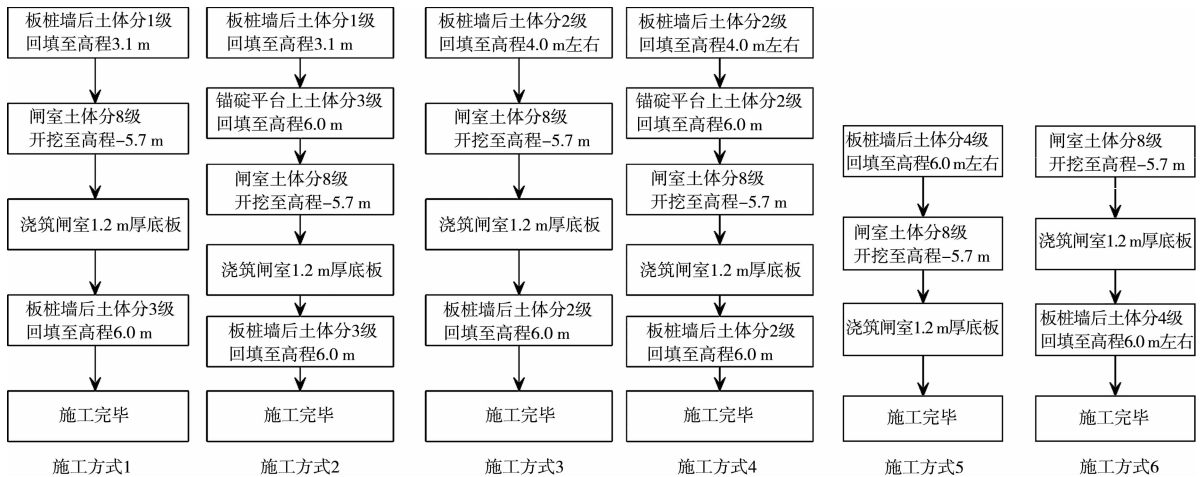


图 12 墙后土体回填与闸室土体开挖顺序

表 4 给出了不同施工方式下地连墙、锚碇桩水平位移、地连墙拉应力和拉杆内力的对比。计算结果表明, 6 种施工方式下地连墙受力变形及拉杆内力等的变化规律一致, 但是, 施工方式 6 的地连墙位移、锚碇桩位移、地连墙拉应力和拉杆内力计算结果最小。施工方式 2 先在锚碇平台上填筑一部分土体, 在拉杆距离达到一定长度时, 土压力向下传递的荷载效应大于土压力向闸室侧传递的荷载效应时, 可以控制锚碇桩和地连墙向闸室侧的变形, 这种施工方式是十分有利的。本工程数值计算结果表明, 由于锚碇平台上土体的填筑, 土压力向闸室侧传递的荷载效应大于土压力向下传递的荷载效应, 不能有效控制锚碇桩和地连墙向闸室侧的变形。

表 4 不同施工方式时锚碇桩位移、地连墙拉应力 (位移)、拉杆内力最大值

施工方式	锚碇桩位移/cm	地连墙位移/cm	地连墙拉应力/MPa	拉杆内力/kN
1	1.83	2.51	2.98	354.33
2	2.09	2.90	3.30	382.43
3	1.88	2.76	3.18	403.46
4	2.26	3.13	3.38	419.87
5	2.46	3.39	3.38	449.50
6	1.72	2.47	2.64	317.50

因此, 对于本工程, 在施工过程中, 为了控制地连墙的水平位移及拉杆的受力, 可采用先开挖再回填的施工方式, 但为了防止施工过程中对拉

杆、锚碇桩的干扰, 在闸室土体开挖之前, 板桩墙后可以预填一部分土体, 与总的填土高度 ( $H_s$ ) 相比, 预填部分填土高度建议为  $(1/6 \sim 1/2)H_s$ 。

#### 4 结论

对泰州引江河高港枢纽二线船闸地连墙板桩结构的二维有限元分析计算与现场实测结果对比表明, 建立的整体分析模型能够较好地预测施工期不同阶段拉锚体系的内力情况。根据建立的整体模型对拉杆布置、开挖及墙后土体回填施工顺序进行分析和优化, 研究结果对实际工程的设计施工有重要的指导意义: 1) 闸室土体的开挖对锚碇桩、地连墙变位的扰动较大, 闸室土体开挖时拉杆内力迅速增长。2) 地连墙水平位移和拉杆内力随拉杆间距的增加而增大, 而墙体拉应力随拉杆间距的增加而减小。对于本工程, 当拉杆间距为 1.75 ~ 2.00 m 时, 地连墙侧向位移的变形率最小, 地连墙的最大拉应力也趋于稳定。3) 先开挖闸室土体再回填墙后土体的施工方式、每层开挖土体厚度“先薄再厚”式开挖方式, 有利于控制地连墙的水平位移及拉杆的受力, 但也要考虑施工过程中对拉杆、锚碇桩的干扰。

虽然地连墙结构整体有限元计算结果与现场实测结果吻合较好, 但文中有限元模型是二维, 后期还需进行三维有限元模拟, 以更好地指导实际工程的设计施工。  
(下转第 166 页)