



## 船坞坞口水上基坑力学性状数值分析

丁勇春, 顾宽海, 程泽坤, 李光辉  
(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 结合某船坞坞口水上基坑围护结构的设计, 采用有限元数值模拟研究了基坑施工全过程中支护结构的受力与变形性状。采用Plaxis 2D建立考虑结构与土体共同作用的平面应变计算模型, 并考虑不同水位及波浪荷载、地形地质条件及复杂施工工况的影响。研究表明: 外部条件的不对称导致水上基坑围护结构的变形及受力与陆上基坑存在明显差异, 基坑开挖并降水至坑底并非结构受力的最不利状态; 基坑外坡护坡、压脚未施工前坑内降水是基坑围护结构变形的最不利状态; 不同水位及波压条件对单排钢板桩的影响比对双排钢板桩的影响明显, 两种不同类型围护桩的整体受力状态也存在明显差异; 随基坑开挖和降水深度的增加, 第1道混凝土支撑的受力会从受压变成受拉, 下部各道钢支撑均处于受压状态; 施工中应密切关注第1道支撑受力状态的变化。

**关键词:** 坞口; 水上基坑; 钢板桩; 数值模拟; Plaxis 2D

中图分类号: TU 473.2; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)10-0034-06

### Numerical analysis on performance of waterfront dock entrance excavation

DING Yong-chun, GU Kuan-hai, CHENG Ze-kun, LI Guang-hui  
(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** In combination with the design of waterfront excavation for a ship dock entrance, a two-dimensional finite element numerical simulation is conducted to investigate the performance of the retaining structures during the excavating and dewatering process of the dock entrance. The geotechnical analysis program Plaxis 2D is adopted to establish the plain-strain numerical model which takes into account the interaction between the retaining structures and the surrounding strata, different tide levels and wave conditions, on-site topographical and geological conditions, as well as the complicated construction sequences. The numerical results indicate that there are obvious distinctions of the performance of retaining structures between waterfront excavation and conventional onshore excavation. The most disadvantageous construction stage of the waterfront excavation is during the process of dewatering and before the construction of protecting berms outside the retaining steel sheet piles. Tide and wave conditions exert more detrimental impacts on the single-line steel sheet piles than on the double-line compound steel sheet piles filled with sand. More concerns should be focused on the alteration of the axial force of the first-level struts which may change from compression to subsequent tension; correspondingly, the overall cast-in-situ concrete beams ought to be used for the first-level struts to strengthen the integrative stiffness of the retaining structures.

**Key words:** dock entrance; waterfront excavation; steel sheet pile; numerical simulation; Plaxis 2D

船坞坞口是干船坞的重要组成部分<sup>[1]</sup>, 一般处于水陆交界处, 是属于港口工程和岩土工程两

大技术领域交叉的特种结构, 对设计和施工的要求极高。坞口施工可采用设大围堰(堤坝式)或

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 丁勇春(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 从事港口水工结构及岩土工程设计与研究。

基坑围护(直立式)等干施工开挖方案<sup>[2]</sup>。对于原始水下地形既深又陡的情况,采用大围堰方案在造价和工期上都不占优势,这时采用水上钢板桩基坑围护方法先建坞口,后利用坞门挡水干施工后方坞室及水泵房的总体方案,具有影响范围小、总工期短、造价相对较低等优点<sup>[3-4]</sup>。

水上基坑区别于陆上基坑的显著特征是水上基坑围护结构既受外侧水位变动、波浪、潮流的影响,又受水深、天然泥面坡度的影响<sup>[5-6]</sup>。陆上基坑受地下水的影响较为稳定,且天然土层一般为水平沉积,原始地形也不存在天然坡度。水上基坑的外部荷载是不均衡的<sup>[7]</sup>,围护结构受力也是不对称的,因此要求整个基坑围护结构体系必须具有较大的整体刚度和较强的结构整体性。

本文通过对某船坞坞口水上基坑进行考虑不对称外部荷载和施工全过程动态条件的二维平面应变有限元数值分析,为船坞坞口水上基坑的设计与施工提供有益参考。

## 1 工程概况

### 1.1 坞口基坑围护方案

某船厂拟建3万吨级船坞(1<sup>#</sup>)及8 000吨级船坞(2<sup>#</sup>)各1座,船坞工程等级为II级,两坞并列

布置,共用水泵房。船坞主体结构采用设减压排水的轻型分离式结构,坞口采用整体现浇式U形钢筋混凝土结构,坞口围堰工程等级为III级<sup>[1]</sup>。坞口施工未采用常规双排钢板桩大围堰,而是采用水上钢板桩基坑围护方案,该方案将陆上直立式基坑开挖围护施工工艺应用于水上。坞口水上独立基坑平面尺寸为83.2 m×18.2 m,先建坞口,后利用坞门挡水干施工后方坞室。

1<sup>#</sup>坞口开挖底高程-12.9 m,共设5道水平支撑。第1道支撑采用800 mm×800 mm矩形钢筋混凝土支撑,其余4道支撑均采用双拼H700 mm×300 mm型钢支撑。立柱采用 $\phi$ 700 mm×14 mm钢管,下设 $\phi$ 800 mm钻孔灌注嵌岩桩作抗拔桩兼立柱桩。坞口前侧(海侧)围护采用双排钢板桩,钢板桩A1桩长31 m、型号PU32(Arcelor Mittal集团生产),钢板桩B桩长20 m、型号PU12,桩顶通过圈梁兼防浪墙连成整体,两排桩间回填砂,外侧抛填袋装土、碎石护坡、压脚并设合金笼护面;坞口后侧(陆侧)单排钢板桩A2桩长26 m、型号PU32,外侧设抛填山皮土及碎石护坡、压脚。基坑两侧钢板桩顶均设防浪墙,墙顶高程3.6 m。1<sup>#</sup>坞口基坑围护结构剖面如图1所示。

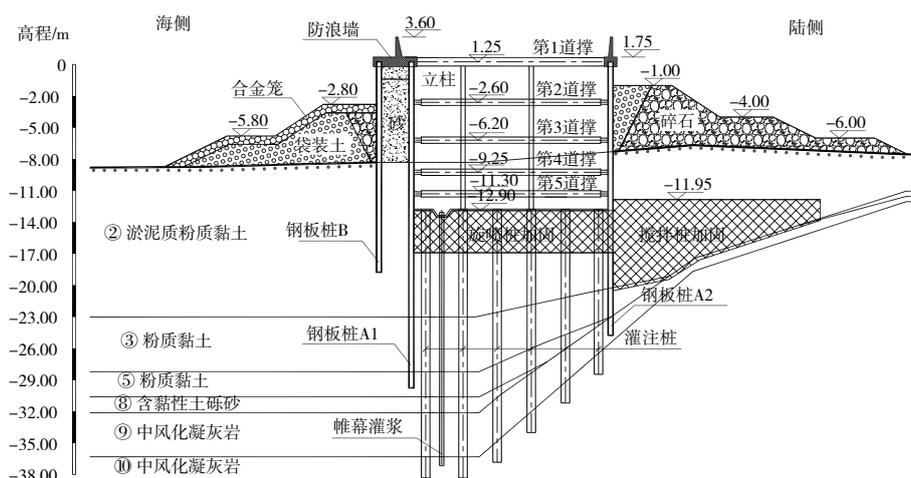


图1 坞口基坑围护剖面

### 1.2 水文及地质条件

潮汐属不规则半日潮<sup>[6]</sup>,设计潮位如下:设计高水位1.85 m,设计低水位-1.45 m;极端高水位3.13 m,极端低水位-2.32 m。

场地勘探揭露深度范围内地基主要由海积、冲积第四纪沉积层及下卧凝灰岩基岩组成。坞口区主要土层自上而下划分如下:②淤泥质粉质黏土、③粉质黏土、⑤粉质黏土、⑦黏土、⑧含黏

性土砾砂、⑨强风化凝灰岩、⑩中风化凝灰岩。各土层主要物理力学性质指标如表1所示，其中强

度指标按直剪固结快剪取用，部分为土体本构模型刚度参数。

表1 主要土层物理力学指标

层号	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$	$E_0/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$
②	17.9	14.1	9.0	3.1		15.5	30.6	77.5
③	19.6	36.3	18.1	7.0		35.0	28.0	175.0
⑤	18.8	28.8	14.0	4.5		22.5	18.0	112.5
⑦	19.5	39.3	18.3	7.8		39.0	31.2	195.0
⑧	18.0	5.0	35.0		28.5	85.5	68.4	427.5

## 2 基坑施工数值模拟

### 2.1 计算条件及参数

由于基坑的开挖及降水，基坑围护墙两侧土压和水压的平衡即被破坏，使基坑围护结构产生变形，围护墙及支撑等相继承受作用力。在整个基坑开挖、降水及支护结构施工过程中，支护体系呈现复杂的变形与受力形态，基坑设计规程所采用的弹性地基梁方法难以反映此复杂变化情况<sup>[8-9]</sup>。因此采用能反映支护结构动态变形与受力的平面应变有限元软件Plaxis 2D进行计算分析<sup>[10]</sup>。

计算模型网格如图2所示。坐标原点位于基坑中心高程0 m处，两侧截断面边界距基坑中心点均为75 m并约束水平位移，底边水平及竖向位移均约束。

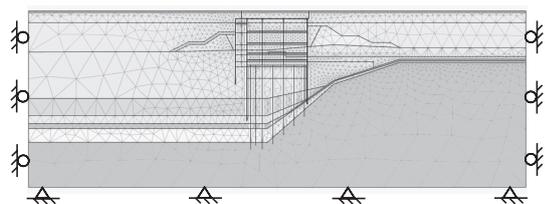


图2 计算模型网格

土体本构模型采用Hardening-Soil模型（简称HS模型），该模型可同时考虑剪切硬化和压缩硬

化，并采用Mohr-Coulomb破坏准则。HS模型共有11个参数（强度参数、刚度参数及高级参数），这些参数可以通过三轴试验和固结试验确定。计算中主要土层物理力学参数见表1，软土地区使用HS模型模拟基坑开挖时模型参数已有一定经验积累，Plaxis参考手册也有相应的刚度参数取值建议，本文取为 $E_{50}^{\text{ref}}=5E_{s0.1-0.2}$ ， $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}=0.8E_{50}^{\text{ref}}$ ， $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=5E_{50}^{\text{ref}}$ 。坑底加固体本构模型采用Mohr-Coulomb模型<sup>[11-13]</sup>，弹性模型取为200 MPa，泊松比取为0.25，重度取为17.8  $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ，粘聚力取为0.2 MPa，内摩擦角取为25°。

钢板桩、坑内立柱及坑底钻孔灌注桩均采用板单元模拟。第1道支撑为现浇钢筋混凝土梁，与坑内钢管立柱、钢板桩、顶圈梁及防浪墙整体现浇，也采用板单元模拟。其余4道支撑均为型钢支撑，只受压不受拉，故采用点对点锚杆单元模拟。设于海侧两排钢板桩间的钢拉杆也采用点对点锚杆单元模拟。板单元与土体间设有无厚度界面单元，模拟结构与土体间的接触、滑移效应，界面单元强度取为相应位置土体强度的0.7倍。进入⑨强风化凝灰岩和⑩中风化凝灰岩层的板单元与土体协同变形，即结构与土体刚性接触无滑移。基坑主要支护结构物理力学性质参数如表2所示。

表2 主要支护结构物理力学指标

结构构件	规格	单元类型	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1})$	$EA/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	间距/m
第1道混凝土支撑	800 mm × 800 mm 方形，C30钢筋混凝土	板	24	0.2	$1.17 \times 10^5$	$2.19 \times 10^6$	7
第2~5道钢支撑	双拼H700 mm × 300 mm × 13 mm × 12 mm 型钢	点对点锚杆	206	0.3		$8.48 \times 10^6$	7
钢板桩A1、A2	PU32 钢板桩，S335GP 钢	板	206	0.3	$1.49 \times 10^5$	$4.99 \times 10^6$	连续
钢板桩B	PU12 钢板桩，S335GP 钢	板	206	0.3	$4.45 \times 10^4$	$2.88 \times 10^6$	连续
立柱	$\phi 700 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 钢管，Q235B 钢	板	206	0.3	$1.04 \times 10^5$	$8.97 \times 10^5$	3.5
钻孔灌注桩	$\phi 800 \text{ mm}$ ，C30 钢筋混凝土	板	24	0.2	$1.38 \times 10^5$	$3.45 \times 10^6$	3.5
顶圈梁兼防浪墙	900 mm 厚，C30 钢筋混凝土	板	24	0.2	$1.46 \times 10^6$	$2.16 \times 10^7$	连续
钢拉杆	$\phi 25 \text{ mm} @ 1\ 000 \text{ mm}$ ，S355JO 钢	点对点锚杆	206	0.3		$1.01 \times 10^5$	1

### 2.2 施工方案及计算步

坞口基坑主要施工工序包括: 钢板桩、立柱、立柱桩(灌注桩)施工, 顶圈梁、防浪墙和第一道支撑整体浇筑, 坑底旋喷桩加固及坑外陆侧水泥土搅拌桩加固, 围护结构形成后的分步分层逐步

坑内降水、土体开挖和架设每道支撑等。基坑开挖并降水至坑底浇筑坞底板后, 自下而上逐步拆除各道支撑。因此, 基坑施工主要计算步考虑至基坑开挖至坑底, 并考虑海侧极端高水位加正向波压作用的不利施工工况。基坑施工主要计算步如表3所示。

表3 基坑施工主要计算步

计算步	施工内容	备注
0	初始地应力平衡	平均水位
1	施打钢板桩及桩间填充砂(设钢拉杆), 灌注桩、立柱施工	
2	现浇第1道钢筋混凝土支撑(1.25 m)、防浪墙, 坑底及坑外地基加固	计算前位移清零
3	坑内降水至-3.10 m	
4	架设第2道双拼钢支撑(-2.60 m), 坑内降水至-6.70 m	
5	架设第3道双拼钢支撑(-6.20 m), 施工两侧护坡、护底	
6	坑内降水并开挖至-9.75 m	
7	架设第4道双拼钢支撑(-9.25 m), 坑内降水并开挖至-11.8 m	
8	架设第5道钢双拼支撑(-11.30 m), 坑内降水至-13.40 m, 开挖至-12.90 m	
9	海侧极端高水位(3.13 m)+正向波压(最大波压14.45 kPa至3.13 m)	陆侧平均水位

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 基坑变形

不同计算步海侧钢板桩A1、B和陆侧钢板桩A2侧向变形如图3所示。钢板桩A1、A2和B均在计算步4产生最大侧向变形, 分别为73.1 mm, 64.2 mm和73.1 mm。就基坑围护结构整体侧向变形而言, 计算步4为最不利工况, 这是由于该阶段基坑围护桩两侧水头差为6.9 m(自平均水位), 而此时基坑海侧和陆侧护坡尚未施工, 第1道混凝土支撑将两侧钢板桩通过顶圈梁形成类似于门式刚架的超

静定结构; 尽管基坑两侧水头差相同, 但海侧充填砂双排钢板桩刚度明显大于陆侧单排钢板桩, 围护结构刚度的不对称导致钢板桩在水头差压力作用下整体向陆侧变形。

计算步5基坑两侧护坡、压脚的反压作用使钢板桩向陆侧的侧向变形得到有效控制, 钢板桩A1最大侧向变形降至48.1 mm, 钢板桩A2最大侧向变形降至24.3 mm。由于陆侧护坡高于海侧约1.8 m, 作用于的陆侧钢板桩的土压力大于海侧, 使得陆侧钢板桩A2的变形降低幅度大于海侧钢板桩A1。

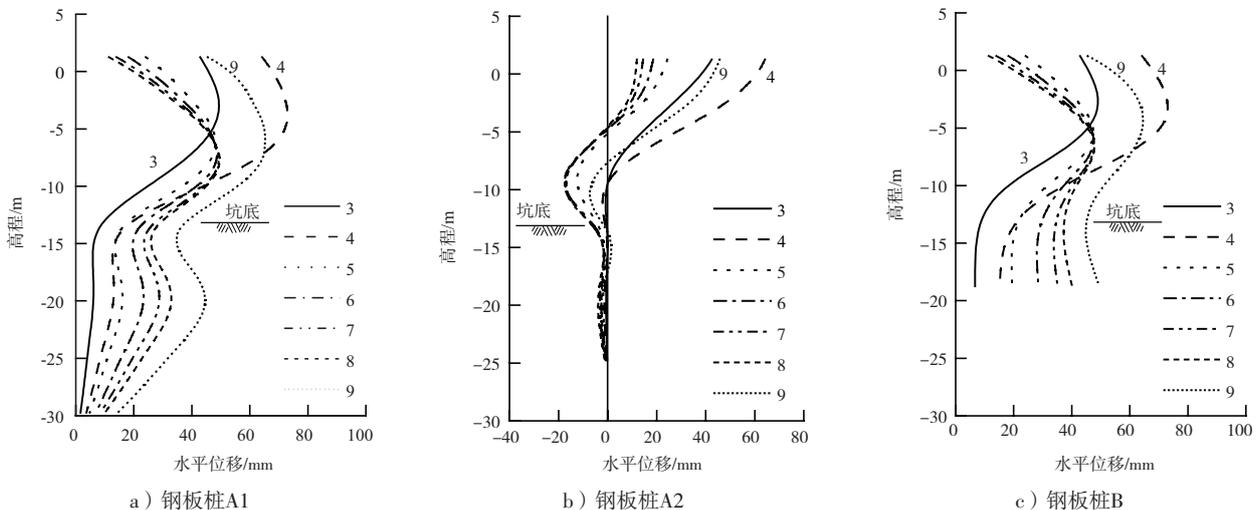


图3 钢板桩侧向变形

相对计算步8，计算步9极端高水位加正向波压作用下A1桩向坑内的最大水平位移由49.6 mm增加至65.3 mm，增加幅度为31.6%，最大侧向变形点高程约-6.0 m；A2桩向坑外的最大水平位移由11.6 mm增加至45.7 mm，增加2.9倍，最大侧向变形点位于桩顶。

对比不同计算步钢板桩A1、A2和B的整体侧向变形曲线形态可以看出，海侧钢板桩A1和B的整体侧向变形形态相似。尽管由于钢板桩B桩端入土深度不足，导致钢板桩B桩端踢脚变形较大。但由于桩顶处圈梁和钢拉杆的刚度约束，不同计算步钢板桩B上部侧向变形曲线与钢板桩A1相近。最大侧向变形点均位于-8 ~ -4 m高程范围，而不是位于桩顶，表明海侧双排钢板桩的整体受力性态类似于门架结构。陆侧单排钢板桩A2的受力性态与海侧双排钢板桩A1和B存在明显差异，由于为单排桩，其受力性态类似于悬臂梁，荷载和结构刚度的不对称导致其桩顶变形最大。

计算步9海侧极端高水位加最大波压作用下基坑围护钢板桩整体变形矢量如图4所示（变形放大100倍）。海侧钢板桩A1桩长31 m，陆侧钢板桩A2桩长26 m，但由于原始地层的不均匀分布，钢板桩A2进入⑨强风化层，而钢板桩A1仅进入⑤粉质黏土层，桩底嵌固层刚度的差异导致桩底位移性态差别较大。另外，基坑外侧（陆侧）

搅拌桩最大地基加固体厚度为8.5 m，而坑底加固（坑内）旋喷桩加固体厚度仅4 m，坑外加固对陆侧钢板桩A2下部的侧向变形约束刚度更大。钢板桩A1桩端侧向位移为14.4 mm（向坑内），沉降为12.8 mm；钢板桩A2桩端侧向位移仅-0.6 mm（向坑内），沉降仅0.4 mm。海侧钢板桩A2桩长仅20 m，桩端位于②淤泥质粉质黏土层，桩端土体约束刚度条件较差，导致桩端侧向位移达49.4 mm（向坑内），沉降为-42.4 mm。

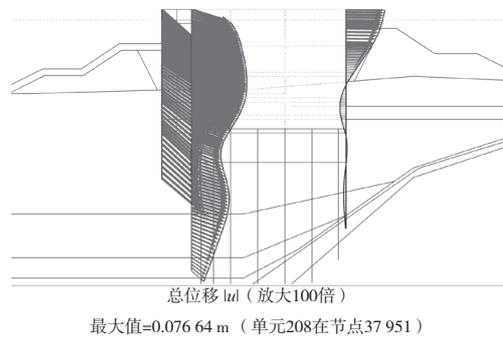


图4 基坑围护钢板桩整体变形矢量

### 3.2 支护结构内力

不同计算步钢板桩弯矩M和剪力V标准值如表4所示（延米值），钢板桩A1、A2和B最大弯矩分别为563.7，395.5和95.6 kN·m/m。海侧钢板桩A1和B均在计算步9极端高水位加正向波压作用下产生最大弯矩，而陆侧钢板桩A2在计算步6产生最大弯矩。

表4 不同计算步围护结构主要内力

计算步	钢板桩A1		钢板桩A2		钢板桩B	
	M/(kN·m·m <sup>-1</sup> )	V/(kN·m <sup>-1</sup> )	M/(kN·m·m <sup>-1</sup> )	V/(kN·m <sup>-1</sup> )	M/(kN·m·m <sup>-1</sup> )	V/(kN·m <sup>-1</sup> )
3	383.5	128.5	168.6	58.0	75.0	54.9
4	545.7	235.2	319.8	126.0	51.2	61.5
5	492.7	262.3	287.5	173.2	68.1	54.9
6	505.5	320.0	395.5	272.1	73.9	61.5
7	517.4	384.4	355.2	333.6	75.3	63.7
8	517.1	408.0	388.4	356.0	76.3	65.3
9	563.7	384.1	343.7	365.8	95.6	59.5

不同计算步各道支撑轴力标准值如表5所示，负值表示受压，第1道混凝土支撑为单根轴力，第2 ~ 5道钢支撑为双拼（2根）轴力。第1道支撑随计算步由受压变为受拉，计算步3最大压力

为-525 kN；其余4道钢支撑均受压，且各道钢支撑压力均随计算步不断增大，在计算步9产生最大压力；各道支撑中第3道支撑轴力最大，最大轴力达-2 458 kN。基坑施工过程中，第1道混凝

表5 不同计算步各道支撑轴

计算步	kN				
	第1道	第2道	第3道	第4道	第5道
3	-525				
4	-198	-894			
5	218	-1 620	-1 065		
6	329	-1 538	-2 039		
7	375	-1 527	-2 027	-794	
8	402	-1 540	-1 999	-857	-382
9	218	-2 336	-2 458	-1 313	-1 360

土支撑受力状态由受压变为受拉须引起注意, 表明本工程第1道支撑采用与坑内钢管立柱、钢板桩、顶圈梁及防浪墙整体现浇的钢筋混凝土支撑以满足不同受力状态和增强支护结构整体性是合理的。

对比不同施工工况下各道支撑轴力可以看出, 尽管第1道混凝土支撑的整体轴力明显小于其余4道钢支撑, 但基坑施工过程中各道钢支撑均处于受压状态, 而第1道支撑会随施工工况变化产生拉压状态的改变。

#### 4 结语

1) 由于外部荷载条件、围护结构刚度及原始地形地质条件的不对称, 导致水上基坑围护结构钢板桩呈现明显的不对称侧向变形状态, 结构整体向陆侧变形。

2) 开挖并降水至最大深度并非水上基坑围护结构受力与变形的最不利状态, 坑外护坡未施工时坑内降水施工阶段围护结构钢板桩整体侧向变形最大。

3) 不同水位及波压条件对陆侧单排钢板桩的影响比对海侧双排钢板桩的影响更明显。海侧双排钢板桩由于顶圈梁的整体刚接, 受力性态类似于门架结构, 侧向变形性态明显改善; 陆侧单排钢板桩由于桩顶缺少有效的刚度约束, 受力性态类似于悬臂梁, 桩顶侧向变形较大。

4) 基坑施工过程中第1道混凝土支撑的受力

状态产生明显变化, 从受压变成受拉状态, 而下部各道钢支撑均处于受压状态, 各道钢支撑受压轴力大小与基坑两侧钢板桩间的相对侧向变形大小对应, 第3道钢支撑整体受压轴力最大。

5) 水上基坑设计与施工过程中应密切关注第1道支撑在不同计算工况下受力状态的改变, 注意增强基坑支护结构的整体刚度, 设置多道防线的整体门架结构是水上基坑围护推荐的支护结构形式。

#### 参考文献:

- [1] CB/T 8524—2011 干船坞设计规范[S].
- [2] 李小军, 陈映华, 宣庐峻. 采用水上深基坑围护法建造特大型船坞坞口的创新设计[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1 560-1 564.
- [3] 宣庐峻, 顾倩燕, 李小军. 大型水上基坑工程稳定性分析及设计技术研究[J]. 水运工程, 2009, 431(8): 56-60, 64.
- [4] 李耀良, 王理想, 余振栋, 等. 超大面积港池基坑的陆上和水上开挖施工技术[J]. 建筑施工, 2008, 30(10): 848-850.
- [5] 丁勇春, 李光辉, 王建华. 海上人工岛内深基坑变形与稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 519-524.
- [6] JTS 145-2-2013 海港水文规范[S].
- [7] 丁勇春, 程泽坤, 王建华, 等. 临江基坑变形及受力性态三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 243-247.
- [8] 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.
- [9] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].
- [10] 丁勇春, 杭建忠, 顾群, 等. 水上基坑围护结构方案设计与分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1 338-1 343.
- [11] 龚晓南. 地基处理手册 [M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [12] JGJ 79—2013 建筑地基处理技术规范[S].
- [13] 丁勇春, 王建华. 深基坑施工对高架基础的变形影响及控制研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 155-161.

(本文编辑 郭雪珍)