

DOI: 10.11779/CJGE201512001

# 分离卸荷式板桩码头的工作机理

蔡正银<sup>1</sup>, 侯伟<sup>1,2</sup>, 关云飞<sup>1</sup>, 徐光明<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 分离卸荷式板桩码头是中国自主开发的一种新型码头结构型式。与传统的卸荷式板桩码头结构不同, 分离卸荷式板桩码头采用卸荷承台与前墙分离设置, 避免了因码头水平位移较大或产生不均匀沉降时, 承台下的基桩会发生桩头混凝土开裂, 影响其耐久性。对于这种新型的码头结构, 如何正确地认识分离式卸荷承台的卸荷作用, 掌握前墙上的土压力作用规律, 是码头结构设计的基础。通过有限元数值分析, 探讨了分离卸荷式板桩码头结构的受力与变形规律, 以及卸荷承台的卸荷机理与码头结构上的土压力分布规律。通过与单锚板桩码头结构的比较, 验证了分离卸荷式板桩码头结构对于板桩码头深水化的作用。

**关键词:** 板桩码头; 卸荷承台; 数值模拟; 土压力

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)12-2133-07

**作者简介:** 蔡正银 (1965-), 男, 江苏海安人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 从事岩土基本理论和试验研究工作。E-mail: zycail@nhri.cn。

## Mechanism of sheet-pile wharf with separated relief platform

CAI Zheng-yin<sup>1</sup>, HOU Wei<sup>1,2</sup>, GUAN Yun-fei<sup>1</sup>, XU Guang-ming<sup>1</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The sheet-pile wharf with separated relief platform is a novel wharf structure designed and developed in China. Different from the traditional sheet-pile wharf with relief platform, the sheet-pile wharf with separated relief platform adopts a separated form of the relief platform and the front wall so as to avoid concrete cracks at head of piles under the platform induced by large horizontal displacement or differential settlement of the wharf and to avoid impact on its durability. With regard to this novel wharf structure, how to correctly understand the relief action of the separated relief platform and to grasp the rules of earth pressures acting on the front wall is the basis for the design of the wharf structure. The stress and deformation rules of the sheet-pile wharf with separated relief platform, the relief mechanism of the relief platform as well as the distribution of the earth pressures on the wharf structure are studied through numerical simulations of FEM. By comparing with the sheet-pile wharf with single anchorage, the deep-water sheet-pile wharf with separated relief platform is validated.

**Key words:** sheet-pile wharf; separated relief platform; numerical simulation; earth pressure

## 0 引言

卸荷式板桩码头是单锚板桩和桩基承台的混合式结构。结构中的单锚板桩用于抵挡地基水平作用力, 桩基承台用于承担码头竖向荷载。由于承台高程适当降低, 分担了部分作用于前墙的土压力, 起到了卸荷作用, 故将这种结构型式的码头称为卸荷式板桩码头<sup>[1]</sup>。

早在 1963 年, 一些学者便对带卸荷板的重力式码头的卸荷效应进行了研究, 但是在对其是否具有卸荷效应方面一直存在着争论<sup>[2]</sup>。鉴于此, 郭鸿仪等<sup>[3]</sup>进行了室内模型试验, 验证了卸荷板的卸荷效应, 并对静止和主动状态下的卸荷效应进行了进一步的总结。对于分离式卸荷板桩码头结构, 由于其卸荷平台与前墙

是相分离的, 导致其卸荷效应远比设置卸荷板的重力式码头结构复杂。

离心模型试验是研究分离卸荷式板桩码头的比较理想的手段。徐光明等<sup>[4]</sup>对分离卸荷式板桩码头进行了离心模型试验研究, 初步探讨了码头结构的整体稳定性及变形规律。龚丽飞<sup>[5]</sup>将单锚式码头结构和分离卸荷式码头结构的离心模型试验结果进行了对比, 验证了分离卸荷式板桩码头的卸荷效应, 并认为卸荷平台的卸荷作用及卸荷平台下的灌注桩对地基土层的遮

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 课题项目 (2012AA112510)

收稿日期: 2014-09-10

帘作用,是降低前墙侧向土压力的最主要的两个因素。但是,离心模型试验往往费用很高,限制了其在分离卸荷式板桩码头研究中的应用。

数值分析的发展在一定程度上弥补了离心模型试验的不足。刘永绣等<sup>[6-7]</sup>、司海宝等<sup>[8]</sup>对遮帘式板桩码头的遮帘桩作用机理和数值计算方法进行了研究,为分离卸荷式板桩码头的数值计算奠定了基础。利用 ANSYS 有限元软件对分离卸荷式板桩码头进行了数值分析,但是其采用的本构模型相对简单,不能很好地描述土的变形特性。且龚丽飞<sup>[5]</sup>和刘延致<sup>[9]</sup>在建模过程中都做了一定程度的简化,如灌注桩和卸荷平台之间采用刚接而不是设计采用的铰接,这对模拟结果的影响是不可忽略的<sup>[10]</sup>。

本文通过前期开发的基于 ABAQUS 有限元平台的土和结构相互作用分析软件,采用“南水双屈服面弹塑性本构模型”来模拟地基土的应力应变关系,考虑土与结构的相互作用以及卸荷承台的影响,建立了单锚式和分离卸荷式板桩码头结构的数值计算模型。通过两种结构前墙土压力和位移的分析对比,研究分离卸荷式板桩码头的卸荷效应。

## 1 有限元分析模型

### 1.1 模型的建立

本文模型是基于京唐港#36 泊位所采用的分离卸荷式板桩码头结构建立的,模拟的码头结构如图 1 所示。前墙采用厚度为 1 m 的钢筋混凝土地下连续墙,墙高为 38.2 m。在前墙陆侧设有现浇混凝土桩基承台,承台宽度为 14.05 m,顶标高为 0.2 m,底标高为-0.8 m,厚 1.0 m。承台下横向(垂直于码头岸线方向)设置 3 根断面尺寸为 1.15 m×1.15 m、长度为 37.2 m 的灌注桩,桩顶与承台都采用铰接。海侧桩(最左边)离码头前沿线 4.4 m,横向桩间距 5.0 m,纵向(平行于码头岸线方向)桩间距 4.11 m。前墙和锚碇墙净距为 44.0 m,采用 Φ70 的钢拉杆连接,拉杆标高为 0.4 m,平均间距 1.33 m。锚碇墙厚为 1.1 m,墙底标高为-16.0 m,墙顶标高为 3.0 m,墙高为 19 m。将分离卸荷式板桩码头的桩基承台去掉,就变成单锚式板桩码头结构,如图 2 所示。

为了消除地基土层变化对卸荷效应研究的影响,两种模型的地基土都假定为纯砂,重度为 19.3 kN/m<sup>3</sup>,水位以下取浮重度。地基土的本构模型采用“南水模型”,相关参数由三轴固结排水试验获得,如表 1 所示。

两种码头结构的计算模型尺寸均取 100 m×60 m×4 m。水位线在离地面 5 m 深度处,港池开挖面标高为-11.8 m,距地面 16 m。

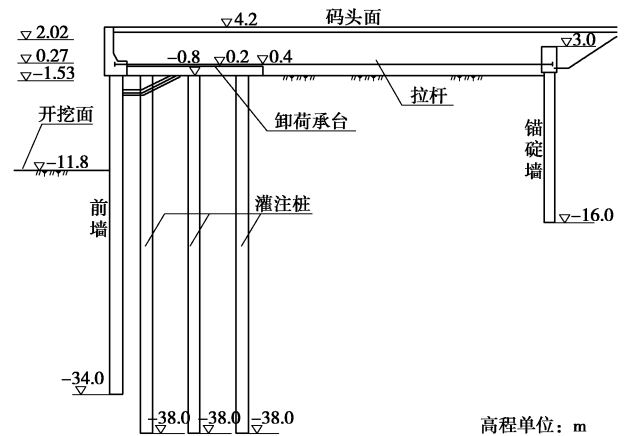


图 1 分离卸荷式板桩码头

Fig. 1 Sheet-pile wharf with separated relief platform

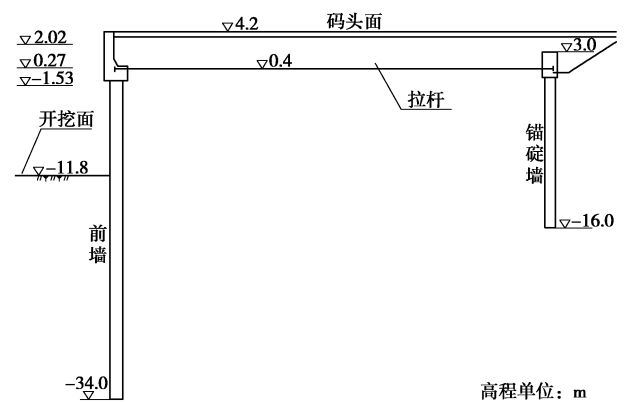


图 2 单锚板桩码头

Fig. 2 Sheet-pile wharf with single anchorage

表 1 地基土南水模型参数

Table 1 NHRI model parameters of soils

土层	$c$	$\varphi$ ( $^{\circ}$ )	$R_f$	$K$	$K_{ur}$	$n$	$c_d$	$n_d$	$r_d$
细砂	0	32	0.92	206	476	0.38	0.012	0.5	0.91

地基模型为长方体,高度为 60 m,长度为 100 m,宽度为 4 m,如图 3 所示。模拟的地基为水平地基,模拟过程中不考虑土层的空间变化。

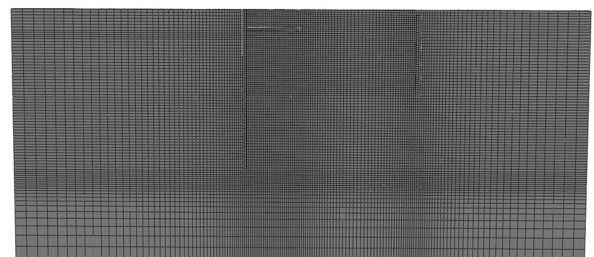


图 3 地基模型

Fig. 3 Model of soil foundation

模拟的分离卸荷式板桩码头结构如图 4 所示。前墙、锚碇墙、基桩和卸荷承台都为钢筋混凝土结构,数值模拟时采用实体单元模拟(C3D10M),本构模型采用 ABAQUS 有限元平台自带的线弹性模型。钢筋

混凝土的模量取为 26 GPa, 泊松比为 0.167。

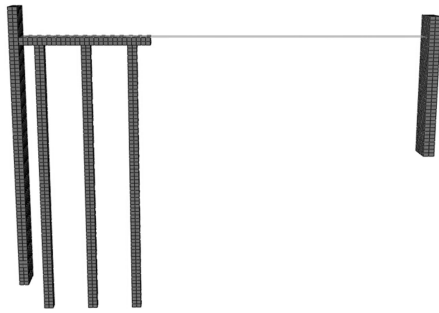


图 4 分离卸荷式板桩码头结构模型

Fig. 4 Structural model of sheet-pile wharf with separated relief platform

前墙与锚碇墙之间采用拉杆连接。拉杆采用桁架单元来模拟 (T3D2), 以方便获取拉杆的轴力及变形。拉杆的材料本构模型也采用线弹性模型, 钢材的模量取为 206 GPa, 泊松比为 0.3。

前墙、锚碇墙与拉杆之间的链接采用绑定约束, 在链接处具有相同的自由度。卸荷承台与灌注桩之间的链接采用耦合约束, 灌注桩只能在左右方向绕参考点转动, 即为铰接。码头结构与地基土体之间的接触采用基于接触力学的接触模型, 桩土接触采取有限滑移, 法向为硬接触。

## 1.2 施工过程的模拟

分离卸荷式板桩码头的施工过程大体分为三步, 包括码头结构的施工、港池的开挖和码头面荷载的施加。其中, 港池的开挖分两步模拟, 第一步开挖至 -2.8 m, 第二步开挖至 -11.8 m, 采用单元“生死”的办法来实现。码头面载的施加过程也比较简单, 即在码头面上施加 20 kPa 的均布荷载。

较为复杂的是码头结构的施工过程, 具体包括:

- ①前墙、锚碇墙和灌注桩的设置;
- ②前墙与锚碇墙之间土体的开挖;
- ③卸荷承台的设置以及拉杆的布置;
- ④前墙与锚碇墙土体的回填。

结构的设置都采用地基模型中预留位置的办法, 也是通过单元的“生死”来模拟结构的去除和施加过程。

## 2 考虑卸荷效应的土压力计算方法

对于分离卸荷式板桩码头, 如何确定港池开挖前结构上的初始应力, 特别是作用于前墙上的初始侧向土压力, 是非常重要的。此时, 码头前墙、桩基承台、锚碇墙都处于静止状态, 可以近似地将前墙和卸荷承台看成是带卸荷承台的刚性结构。对于带水平卸荷承台的刚性挡土墙, 由于卸荷承台的卸荷作用, 导致卸荷承台以下土体表面的竖向应力为零, 使得作用于墙

身的侧向土压力的重新分布。下面介绍考虑卸荷作用时刚性挡土墙后静止、主动和被动土压力的理论计算方法。

### 2.1 地基土的竖向应力

根据传统的土压力理论, 挡土结构上的静止、主动和被动土压力的计算, 第一步均要计算土体的竖向应力。由于卸荷效应的作用, 使得设置卸荷承台的地基土的竖向应力的计算要比未设置卸荷承台时更为复杂。

对于未设置卸荷承台的地基竖向应力, 可直接采用土体的自重压力, 即

$$p_z = \gamma z \quad (1)$$

式中,  $\gamma$  为填土的重度,  $z$  为计算点到土体表面的距离。

对于设置卸荷承台的地基土竖向应力, 需要分成 4 个区域分别进行计算, 如图 5 所示。

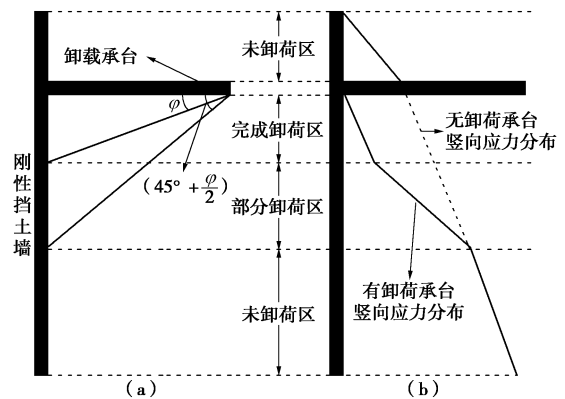


图 5 考虑卸荷效应的地基土竖向应力计算

Fig. 5 Calculation of vertical stress for soil layers with relief platform

图 5 (a) 为 4 个区域界面划分方式。其中,  $\varphi$  为土的内摩擦角。下面将按从上至下的顺序对 4 个区域的土压力计算方法进行介绍:

第一个区域为未卸荷区, 即未受卸荷承台影响的区域, 此区域中的土压力按照式 (1) 计算。

第二个区域为完全卸荷区, 卸荷承台以下土体表面的竖向应力为零。此区域自重应力计算方法仍按式 (1) 计算, 但式中  $z$  取计算点到卸荷承台下表面的垂直距离。

第三个区域为部分卸荷区, 该区域为完全卸荷区域与未卸荷区域的过渡区, 一般假设该区域的土压力为线性分布。该区域土层上表面的竖向应力按完全卸荷区算出, 土层底面的竖向应力按未卸荷区算出。

第四个区域为未卸荷区, 计算方法与第一个区域的计算方法相同。

图 5 (b) 为设置和未设置卸荷承台的地基土竖向应力分布。

### 2.2 带卸荷承台的刚性挡土墙土压力计算方法

有了地基土的竖向应力计算方法，刚性挡土结构上的侧向土压力可以按照下列公式进行计算：

$$\left. \begin{aligned} p_0 &= p_z(1 - \sin \varphi), \\ p_a &= p_z \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \\ p_p &= p_z \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $p_0$  为静止土压力， $p_a$  为主动土压力， $p_p$  为被动土压力。 $p_z$  为按照 2.1 节方法计算得到的地基土竖向应力值。必须说明，此处的静止土压力系数是按 Jack 公式给出的，适用于砂和正常固结黏土。

数值模拟时将卸荷承台下部与土体的接触面处设置一定距离的缝隙，以保证其后的回填、港池开挖和码头面载施加过程中，卸荷承台底部位置处的土压力为零。图 6 是数值模拟得到的竖向土压力分布和理论计算结果的对比，可以看出采用上述方法所计算出的卸荷效果与理论值比较吻合。

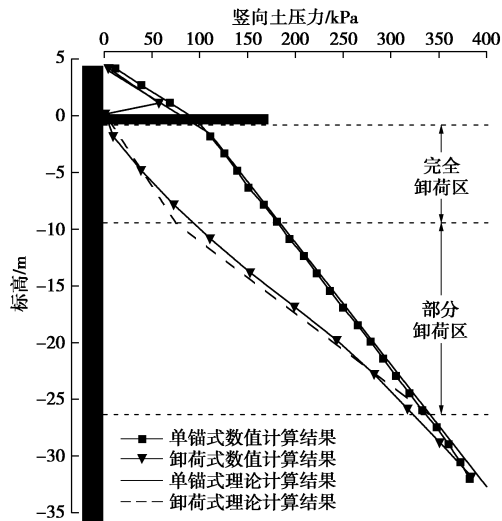


图 6 卸荷效果的数值模拟

Fig. 6 Relief effect by numerical simulation

### 3 卸荷承台对前墙土压力的影响

图 7 为计算得到的单锚式板桩码头开挖至不同深度及施加码头表面荷载后前墙陆侧土压力的分布情况。其中虚线为数值计算结果，实线为静止土压力与主动土压力的理论计算结果。

从图 7 中可以发现，随着开挖的进行，前墙陆侧土压力逐渐由静止土压力向主动土压力发展，开挖结束后土压力整体呈“R”形分布。在开挖面以上，土压力的大小已经接近甚至小于主动土压力（土体局部破坏）；在开挖面以下，土压力大小介于静止土压力与主动土压力之间，且更接近于静止土压力。可以看出，

对于单锚式板桩码头，数值计算得到的土压力要大于理论计算得到的主动土压力值。在码头面施加 20 kPa 荷载后，土压力在整个深度范围内都有增大的趋势。这些都与前人的研究成果非常一致<sup>[3-6]</sup>。

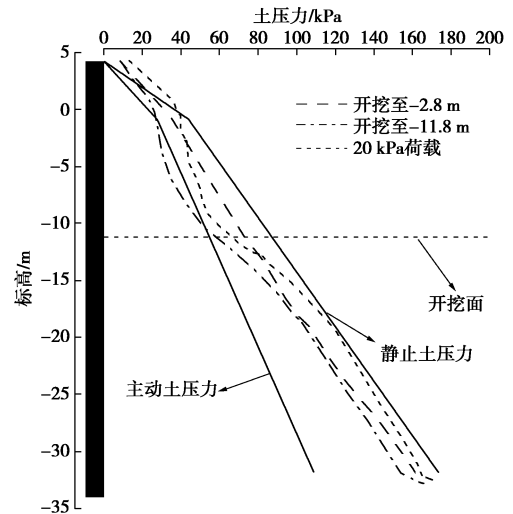


图 7 单锚式板桩码头前墙陆侧土压力分布

Fig. 7 Earth pressures on front wall at landward side for sheet-pile wharf with a single anchorage

分离卸荷式板桩码头前墙陆侧土压力的分布如图 8 所示。从图 8 中可以发现，当开挖深度较浅时，前墙陆侧土压力的值在卸荷影响区域要大于根据卸荷理论计算出的静止土压力的值。这是因为由于卸荷承台的卸荷作用，使前墙陆侧土压力的值小于海侧土压力的值，在开挖深度较浅时，两者仍不能达到平衡。相对于刚性挡土墙，前墙是柔性结构，若其两侧土压力的大小不同，则前墙会通过局部变形的方式，调整两侧的土压力大小，使两者趋于相等，这样便导致前墙局部区域向陆侧变形。因此，在局部范围内，数值计算得出的结果要比理论计算值大。

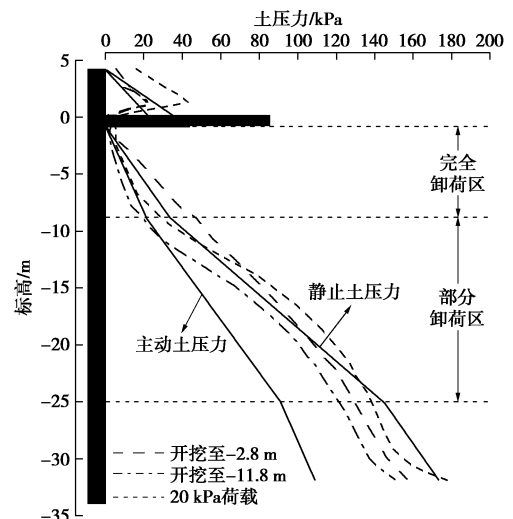


图 8 卸荷式板桩码头前墙陆侧土压力分布

Fig. 8 Earth pressures on front wall at landward side for sheet-pile wharf with separated relief platform

随着开挖深度的增加, 前墙卸荷区域内的土压力逐渐减小。开挖结束后, 开挖面 (-11.8 m) 以上的土体已经达到主动土压力状态, 而开挖面以下的土体处于静止土压力和主动土压力之间。施加 20 kPa 码头表面荷载后, 前墙陆侧土压力整体变大。由于卸荷平台的卸荷作用, 完全卸荷区域范围内的土压力增大趋势明显要小于部分卸荷区。

对比单锚板桩码头和分离卸荷式板桩码头前墙陆侧土压力计算结果可以发现, 由于设置了卸荷承台, 作用于前墙陆侧的土压力在完全卸荷区和部分卸荷区都有非常明显的减小, 说明卸荷承台在降低前墙土压力方面发挥了很好的作用。

图 9 是单锚板桩码头前墙海侧开挖面以下土压力随开挖和码头面载施加过程的变化规律。图 10 给出了分离卸荷式板桩码头前墙海侧开挖面以下土压力随开挖和码头面载施加过程的变化规律。

在开挖深度较浅时 (标高 -2.8 m), 两种结构型式的海侧土压力的分布规律基本相同。当开挖结束后以及施加 20 kPa 荷载时, 两种结构型式在标高 -25 m (对应于陆侧的卸荷影响区和未卸荷区的边界线) 的分布规律也是基本相同: 土压力介于静止土压力与被动土压力之间, 呈线性分布, 且平行于静止土压力。而在 -25 m 以上, 两种结构有明显的差别。单锚式板桩码头结构在邻近开挖面处的土压力有明显的增大现象, 甚至大于其下部的土压力, 表明开挖面处局部土体发生破坏。而对于分离卸荷式板桩码头结构, 由于卸荷承台的卸荷作用, 并没有出现开挖面处土压力增大的现象。

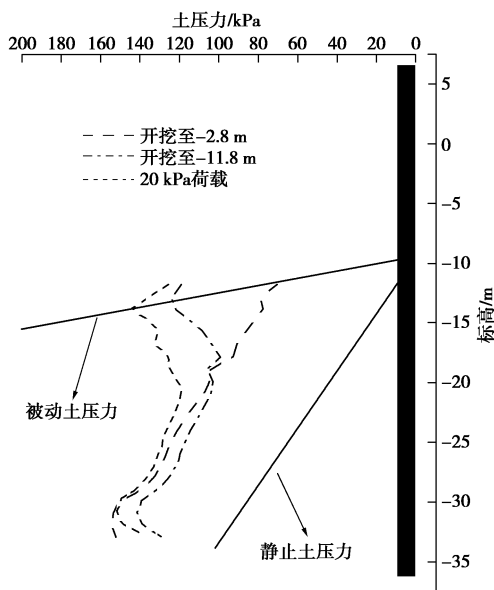


图 9 单锚式板桩码头前墙海侧土压力分布

Fig. 9 Earth pressures on front wall at seaward side for sheet-pile wharf with a single anchorage

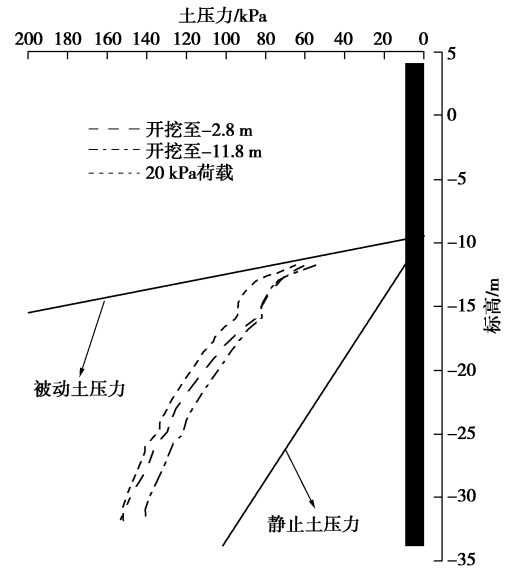


图 10 卸荷式板桩码头海侧土压力分布

Fig. 10 Earth pressures on front wall at seaward side for sheet-pile wharf with separated relief platform

#### 4 卸荷承台的卸荷效应分析

卸荷承台最直接的效果是降低作用于前墙陆侧的土压力, 而该土压力的大小又与前墙的位移密切相关, 下面将从土压力和位移两个方面对卸荷承台的卸荷效应进行分析。

为了更直观地反映卸荷承台的卸荷效应, 将单锚式与分离卸荷式板桩码头的前墙陆侧土压力和位移分别绘于图 11, 12 中。直观来看, 不管是前墙陆侧的土压力还是前墙的位移, 分离卸荷式都比单锚式小得多, 这从定性上充分反映了卸荷承台对于减小作用于前墙土压力的作用。

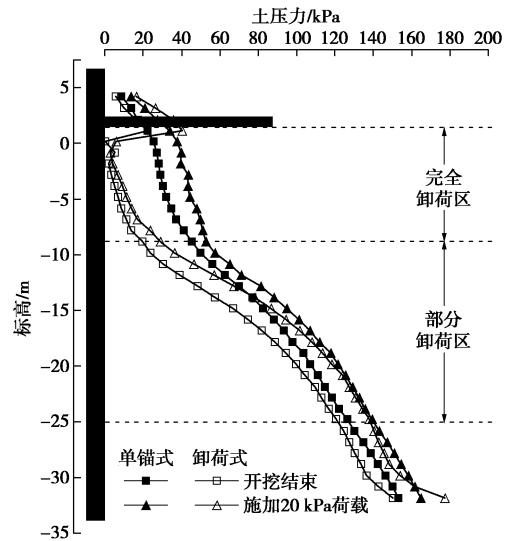


图 11 前墙陆侧土压力对比

Fig. 11 Comparison of earth pressures on front wall at landward side

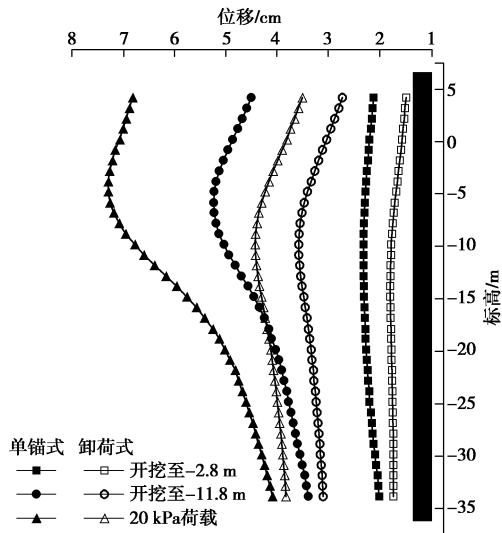


图 12 前墙水平位移对比

Fig. 12 Comparison of lateral displacements of front wall

如何定量地通过土压力和位移的对比来反映卸荷效应，对于位移，笔者更关心的是位移的最大值，因此可以通过位移曲线的最大值来评价卸荷承台的卸荷效应。

对于土压力，卸荷效应可以通过单锚式和卸荷式的土压力分布曲线所围的面积进行评价。一般面积是通过曲线的积分求得，由于土压力分布曲线不太规则，很难得到连续光滑的条件，积分时会出现很多问题。

本文利用积分的定义来计算总土压力的近似值。具体方法如下：将图 7, 8 沿深度方向做等间距  $d$  的平行于横坐标的平行线。这样水平线与土压力分布线及纵坐标便形成了  $n$  个曲面梯形。假设平行线之间的土压力是线性分布的，曲边梯形便等价为梯形，将所有梯形面积相加便得到总土压力的近似值。 $d$  取值越小，则计算得到的总土压力值越接近于真实值。本文取  $d=0.5\text{ m}$ ，计算出各种工况下的总土压力值，如表 2 所示。

表 2 前墙总土压力汇总

Table 2 Total earth pressures of front wall

结构型式	工况	总土压力 /kN	总主动土压力/kN	总静止土压/kN
单锚式	开挖至-2.8 m	3063		
	开挖至-11.8 m	2781	2350	3740
	20 kPa 荷载	3209		
分离卸荷式	开挖至-2.8 m	2660		
	开挖至-11.8 m	2263	1837	2925
	20 kPa 荷载	2775		

从表 2 可以发现，两种码头结构型式的前墙陆侧总土压力值均随着开挖深度的增加而减小。同时，任何工况下，单锚式板桩码头前墙的总土压力都要小于

分离卸荷式板桩码头前墙的总土压力。

通过比较单锚式和分离卸荷式板桩码头前墙的总土压力值，可以定量地反映卸荷承台的卸荷效率。卸荷效率为

$$\eta_{ep} = \frac{P_{DM} - P_{XH}}{P_{DM}} \times 100\% \quad (3)$$

式中， $\eta_{ep}$  为土压力的卸荷效率， $P_{DM}$  为单锚式板桩码头前墙总土压力， $P_{XH}$  为分离卸荷式板桩码头前墙总土压力。将根据式 (3) 计算得出的各工况下的卸荷效率如表 3 所示。

表 3 用总土压力表示的卸荷效率

Table 3 Relief efficiency with total earth pressures

工况	卸荷效应		$\eta_{ep} / \%$
	$P_{DM} / \text{kN}$	$P_{XH} / \text{kN}$	
开挖至-2.8 m	3063	2660	13.2
开挖至-11.8 m	2781	2263	18.6
20 kPa 荷载	3209	2775	13.5

从表 3 中可以看出，随着开挖深度的增加，卸荷承台的卸荷效率逐渐提高，开挖结束后的卸荷效率为 18.6%。施加荷载后，土压力的卸荷效率变为 13.5%，比开挖结束时的卸荷效率要低，这一点可以通过图 11 来进行分析。如图 11，当施加荷载以后，在部分卸荷区域，单锚式和卸荷式的土压力分布线趋于重合，卸荷承台的卸荷区域变小，卸荷效率降低。对于分离卸荷式板桩码头，施加荷载后的卸荷范围要小于理论计算卸荷范围。

将式(3)中的总土压力  $P$  改为水平位移最大值  $U$ ，则可以得到用水平位移表示的卸荷效率。各工况下计算得到的卸荷效率如表 4 所示。

表 4 用水平位移表示的卸荷效率

Table 4 Relief efficiency with maximum lateral displacements

工况	水平卸荷效应/cm		卸荷效率
	$U_{DM}$	$U_{XH}$	
开挖至-2.8 m	2.32	1.79	22.9%
开挖至-11.8 m	5.24	3.58	31.7%
20 kPa 荷载	7.29	4.42	39.4%

可以看出，用前墙水平位移最大值表示的卸荷效率要远远大于用前墙陆侧总土压力表示的卸荷效率，随着开挖深度的增加，卸荷效率也是增大的。

施加荷载后，用水平位移表示的卸荷效率是增加的，这与用土压力表示的卸荷效应不同。

## 5 结 论

通过前期开发的基于 ABQUS 有限元平台的土和结构相互作用分析软件，建立了单锚式和分离卸荷式板桩码头的有限元计算模型。通过对两种板桩码头结构型式的前墙陆侧土压力和水平位移进行对比分析，来研究卸荷承台的卸荷效应，得出的以下 4 点结论。

(1) 通过对卸荷承台与土体之间设置缝隙的方式, 可以很好地模拟卸荷承台的卸荷效应。

(2) 分离卸荷式板桩码头前墙陆侧土压力与开挖深度密切相关。开挖深度以上, 土体基本处于主动土压力状态, 开挖面以下土体处于主动与静止土压力之间, 且更接近于静止土压力。

(3) 卸荷承台可以有效地降低前墙陆侧土压力和前墙的位移。

(4) 卸荷承台的卸荷效率可以定量地用前墙陆侧总土压力值或前墙水平位移的最大值来表示。开挖深度越大, 卸荷效率越高。

### 参考文献:

- [1] 刘进生, 刘永绣. 卸荷式板桩码头结构在汉堡港的应用[J]. 港工技术, 2005(4): 20 - 21. (LIU Jin-sheng, LIU Yong-xiu. Application of relieving type of sheet pile wharf structure to Hamburg port[J]. Port Engineering Technology, 2005(4): 20 - 21. (in Chinese))
- [2] 杜勃洛瓦 Г. А. 水工建筑物减载与降低造价的方法[M]. 顾鹏飞, 译. 北京: 人民交通出版社, 1963: 189 - 190. (DUBROWA G A. Methods for reducing loads and construction costs for hydraulic structures[M]. GU Peng-fei, trans. Beijing: China Communications Press, 1963: 189 - 190. (in Chinese))
- [3] 郭鸿仪, 吕宝柱. 卸荷板卸荷效应的模型验证[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(1): 81 - 85. (GUO Hong-yi, LÜ Bao-zhu. Model tests on relief effects of relief plates[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(1): 81 - 85. (in Chinese))
- [4] 徐光明, 蔡正银, 曾友金, 等. 京唐港 18#、19#泊位卸荷式地连墙板桩码头方案离心模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007. (XU Guang-ming, CAI Zheng-yin, ZENG You-jin, et al. Report of centrifugal model tests on sheet-pile wharf with relief diaphragm of berth No. 18 and 19 of Jingtang Port[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [5] 龚丽飞. 分离卸荷式地下连续墙板桩码头结构与土相互作用研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007. (GONG Li-fei. Researches on structure-soil of sheet-pile wharfs with relief platform and diaphragm wall[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [6] 刘永绣, 吴荔丹, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头工作机制[J]. 水利水运工程学报, 2006(2): 8 - 12. (LIU Yong-xiu, WU Li-dan, XU Guang-ming, et al. Working mechanism of sheet pile wharf with barrier piles[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(2): 8 - 12. (in Chinese))
- [7] 刘永绣. 板桩和地下墙码头的设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (LIU Yong-xiu. Design theories and methods for wharfs with sheet piles and diaphragms[M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [8] 司海宝, 蔡正银, 俞 缙. 遮帘式板桩码头结构与土共同作用 3D 数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2012(5): 182 - 190. (SI Hai-bao, CAI Zheng-yin, YU Jin. 3D Numerical modeling of pile-soil interaction for covered sheet-piled wharf[J]. China Civil Engineering Journal, 2012(5): 182 - 190. (in Chinese))
- [9] 刘延致. 分离卸荷式板桩码头结构受力分析及优化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012. (LIU Yan-zhi. Force analysis and optimization of sheet-pile wharfs with relieving platform[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese))
- [10] 李景林, 王剑平, 蔡正银, 等. 遮帘桩方案改造板桩码头离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 978 - 982. (LI Jing-lin, WANG Jian-ping, CAI Zheng-yin, et al. Centrifuge model tests on sheet-piled wharf renovated by barrier pile project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 978 - 982. (in Chinese))
- [11] 吴 明. 深基坑工程若干土力学问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. (WU Ming. Study on some problems of soil mechanics in deep excavation engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese))
- [12] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005: 431 - 432. (GU Wei-ci. Retaining wall earth pressure calculation manual[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2005: 431 - 432. (in Chinese))