



主桩套板结构受力特性研究

陈 达, 杜 辰, 廖迎娣

(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 主桩套板结构作为一种板桩墙结构形式, 各构件受力情况较复杂。结合工程算例应用 *NL* 法进行水平承载力计算, 并利用 ABAQUS 有限元分析软件建立 3D 桩土模型进行数值模拟, 以验证理论方法的可靠性, 发现主桩承担了绝大部分荷载, 套板所受横向弯矩较竖向要大得多。基于 ABAQUS 研究不同套板尺寸下主桩的力学特性, 着重分析当套板宽度、厚度和入土深度发生变化时主桩的弯矩变化, 结果表明主桩的受力情况深受套板宽度的影响, 其跨中最大弯矩随套板宽度的增加而明显增加, 而套板厚度和入土深度对主桩的影响相对较小, 在实际工程中可以根据需要做适当调整。

关键词: 港口工程; 主桩套板结构; *NL* 法; ABAQUS; 受力特性

中图分类号: U 656.1⁺12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0136-06

Mechanical behaviors of main pile with inserted sheet structure

CHEN Da, DU Chen, LIAO Ying-di

(School of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: As a structure type of sheet-pile wall, the main pile with inserted sheet structure is composed of some certain members, the force condition of which is relatively complicated. Based on an engineering example, the *NL* method is utilized to compute lateral bearing capacity. In order to verify the reliability of theoretical method, a 3D pile-soil model is established by ABAQUS finite element analysis software to carry out numerical simulation. It is revealed that most of the load is carried by main pile, for inserted sheet, horizontal bending moment is much larger than the vertical one. Moreover, mechanical properties of the main pile with different inserted sheet size are studied based on ABAQUS, and the moment variation of the main pile is emphatically analyzed with the change of the inserted sheet width, thickness as well as embedded depth. The results indicate that force conditions of the main pile are greatly affected by the inserted sheet width, and the maximum mid-span bending moment of the main pile increases significantly along with the width. While inserted sheet thickness and embedded depth have less influence on the main pile. According to the actual need in engineering, appropriate adjustments can be made for the thickness or embedded depth.

Key words: port engineering; main pile with inserted sheet structure; *NL* method; ABAQUS; mechanical behavior

为充分发挥长短板桩结构中长板桩的作用, 可加大长桩断面和减小短桩断面, 构成主桩板桩结合的形式。在水深不太大的情况下, 可进一步简化为主桩挡板或套板结构, 即将水平放置的主桩后面的挡板或插放在主桩间的套板取代短桩。虽然主桩板桩和主桩挡(套)板结构可显著降低

工程造价^[1], 但构件类型较多、受力分配不明确、施打较困难, 给设计和施工带来一定困难。在主桩套板结构中, 土质、套板尺寸等因素都会显著影响主桩的工作状态, 但目前相关的研究较少。

NL 法是一种非线性弹性地基反力法, 常应用

收稿日期: 2013-10-01

作者简介: 陈达(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事港口工程结构研究。

于板桩结构的计算中。叶万灵等^[2]用 *NL* 法对 39 根工程桩进行计算, 并将计算结果与实测值对比, 发现 *NL* 法具有较高的准确性。李晓慧等^[3-4]也用 *NL* 法计算分析了柔性板桩墙的受力特性。ABAQUS 软件广泛应用于桩土接触非线性分析, 袁志林等^[5]利用 ABAQUS 研究了不同荷载下桩基横向承载力和水平位移之间的关系; 通过建立圆桩和方桩的深基础模型, Johnson 等^[6]研究了桩基础在组合荷载作用下的响应。针对主桩套板结构, 尚缺乏有效的计算理论和方法。本文提出了主桩套板结构中主桩的简化计算方法, 结合工程算例应用 *NL* 法进行计算, 并借助 ABAQUS 软件分析套板尺寸对主桩内力的影响, 系统研究套板宽度、

厚度和入土深度等对主桩弯矩影响, 研究成果可为主桩套板结构的设计提供参考。

1 工程算例

北方某港资料表明该地区以深度较大黏土层为主, 板桩难以达到嵌固层。码头设计的顶面高程 3.35 m, 港池底泥面高程 -7 m, 拉杆高程 1.35 m, 码头面有 30 kN/m 的均布荷载。本文将就设计低水位这一工况进行计算分析, 忽略泥面以上土的浮重力及剩余水压力作用。主桩及套板厚度分别选为 0.6 m 和 0.3 m, 宽度均为 1 m。本地区土层分布及土层主要物理力学指标见表 1, 板桩墙截面尺寸见图 1。

表 1 土层参数

序号	土层名称	厚度/m	密度/(t·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	弹性模量/MPa	泊松比
I	粉细砂	5	1.93	35	4	10.44	0.26
II	粉质黏土	7	1.83	13	26	8.20	0.32
III	细砂	15	1.99	36	4	11.00	0.28
IV	粉质黏土	18	1.96	26	34	9.32	0.30

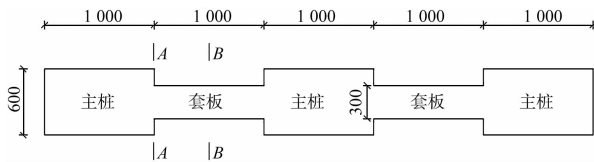


图 1 板桩墙截面尺寸 (单位: mm)

2 *NL* 法应用

NL 法是在大量桩基水平静荷载实测资料基础上提出的一种计算桩基水平承载力的方法, 该方法反映了水平土抗力与深度位移、水平地基反力系数与土质指标的函数关系, 适合承受较大荷载的桩基结构。主桩套板结构的主桩作为支承构件, 多采用工字形或窄翼板 T 形的钢筋混凝土打入桩; 套板作为挡土和传力构件采用钢筋混凝土浇筑。主桩套板结构的套板所承受的弯矩较小, 其主要作用是将土压力通过与主桩连接处的剪力作用传递给主桩, 因此主桩的受力变形是研究重点。

2.1 主桩土压力

泥面以上桩的变形较大, 相应的土压力采用经典土压力理论, 按照主动土压力计算。各构件

处于同一土体环境中, 相同宽度的主桩和套板的土压力分布是一样的。为方便计算, 将主桩与套板间的剪力作用简化为主桩所受的等效土压力。若土压力强度用 e_a 表示, 则主桩单位面积上受到的土压力为:

$$e_2 = k_1 e_a \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{b_1}{b_2} + 1 \quad (2)$$

式中: e_2 为修正后的土压力强度 (kPa); k_1 为主桩土压力扩大系数; b_1 和 b_2 分别为套板和主桩的宽度 (m)。

2.2 主桩弯矩

套板在传递力的同时对主桩变形有一定的约束作用, 同主桩变形协调一致, 此时弯矩的大小与惯性矩有关。在计算出主桩套板结构截面总弯矩后乘以折减系数, 得主桩弯矩:

$$M_2 = k_2 M_3 \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{1}{1 + \frac{b_1}{b_2} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^3} \quad (4)$$

式中： M_2 和 M_3 分别为主桩弯矩和截面总弯矩 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)； k_2 为主桩弯矩折减系数； d_1 和 d_2 分别为套板和主桩的厚度 (m)。

2.3 入土深度

板桩墙的入土深度和内力是否准确关系到整个码头结构的稳定性，板桩墙“踢脚”稳定的破坏过程符合破损阶段理论，计算入土深度时应满足“踢脚”稳定要求^[7-8]：

$$\gamma_0 \left[\sum \gamma_G M_G + \gamma_{Q_1} M_{Q_1} + \psi (\gamma_{Q_2} M_{Q_2} + \gamma_{Q_3} M_{Q_3} + \dots) \right] \leq \frac{M_R}{\gamma_R} \quad (5)$$

式中： γ_0 和 γ_G 分别为结构重要性系数和永久作用分项系数； M_G 为永久作用标准值产生的效应 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)； γ_{Q_1} ， γ_{Q_2} ， γ_{Q_3} ... 为可变作用分项系数； M_{Q_1} 为主导可变作用效应 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)； ψ 为作用组合系数； M_{Q_2} ， M_{Q_3} ... 为非主导可变作用标准值产生的“踢脚”力矩 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)； M_R 为板桩墙前被动土压力的标准值对拉杆锚碇点的稳定力矩 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)； γ_R 为抗力分项系数。

计算时将板桩墙泥面以上的土压力按朗肯土压力理论简化成集中力，在拉杆作用下桩顶位移为零，并假定板桩墙在泥面下处于嵌固状态。通过求解得到拉杆拉力 442 kN，主桩最大弯矩 821 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

3 有限元数值分析

主要研究主桩套板结构在土压力及地面均布荷载所产生的土压力共同作用下的力学性能，采用 ABAQUS 进行分析。考虑到建模和计算过程中的影响因素，采取以下基本假设：1) 不考虑土中排水，采用总应力法分析；2) 土体为服从 Drucker-Prager 屈服准则^[9]的均质弹塑性体，不考虑桩底的滑动，且桩的存在不影响土体的连续性和物理参数；3) 按空间问题进行分析；4) 考虑桩土接触面的接触、滑动与脱开。

3.1 模型建立及边界条件

主桩套板结构具有对称性，由于重点分析主桩的受力，参照算例建立包含 1 个完整主桩、2 个 1/2 套板的三维实体桩土模型。主桩和套板尺寸分别取 25.8 m × 1 m × 0.6 m 和 12.35 m × 1 m × 0.3 m

(长 × 宽 × 厚)。在对单桩载荷的分析中，地基可在水平方向上取桩径的 20 ~ 30 倍，桩端下土层厚度可取桩长的 1 ~ 1.5 倍^[10]，建模时左右土体边界取距码头前沿 30 m，桩底土体厚度取 25 m。拉杆距离桩顶的垂直高度为 2 m，计算荷载取整体自重和码头面均载。为方便分析，将主桩和套板作固定连接处理，并将拉杆简化为约束。模型前后边界采用绕 Z 平面的对称约束，左右边界为垂直于该面的链杆约束，底面为固支约束。土层参数见表 1，板桩墙参数设置见表 2。

表 2 板桩墙参数

构件	材料	长度/ m	截面/ mm	密度/ ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比
主桩	C60	25.80	1 000 × 600	2.5	28	0.2
套板	C60	12.35	1 000 × 300	2.5	28	0.2

3.2 接触模拟及网格划分

土与结构的共同耦合作用属于边界条件非线性问题，通过定义接触对来模拟接触问题，选取刚度较大的桩身表面作为主面，与桩身接触的土面作为从面。考虑到桩土界面的相对滑动、脱离以及周期性的闭合和张开，根据接触面的滑动规律，采用小滑移来模拟相对滑动。接触面的切向作用由罚摩擦公式来定义，参考表 1 中粉质黏土的参数 (内摩擦角 26°)，桩土摩擦系数统一取 0.5；法向接触采用“硬接触”公式，即接触面对法向不传递拉力。桩土单元采用 8 节点六面体线性减缩积分单元 C3D8R，并选择 Hex 类型进行网格划分，包含 5 196 个单元。模型整体网格划分见图 2。

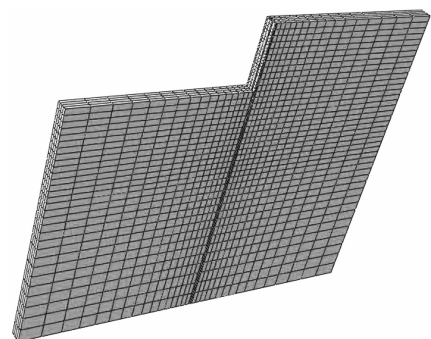


图 2 模型整体网格划分

3.3 计算分析

在水平力的作用下, 锚碇结构的存在使得板桩墙上端受到约束而不能自由移动, 形成一个铰接的支承点, 板桩墙的下端由于入土深度的不同, 产生了不同的工作状态^[11]。其中板桩入土不深时, 板桩受墙后主动土压力的作用产生弯曲变形并围绕上端支承点转动, 板桩中只有一个方向的弯矩且数值较大, 一般按底端自由来考虑; 随着板桩入土深度的增加, 入土段将出现与跨中相反方向的弯矩, 板桩位移小且稳定性较好, 处于弹性嵌固状态; 若入土深度进一步增加, 则出现板桩固端弯矩大于跨中弯矩的情况, 此时板桩的稳定性有富裕。在锚碇结构和墙后回填土等共同影响下, 以弯曲变形为主的柔性板桩墙上下两端位移较小而跨中位移较大, 墙后土体在板桩变形过程中出现拱现象, 跨中一部分土压力将通过滑动土条间的摩擦力传向上下两端, 造成墙后土压力呈“R”形分布。通过 ABAQUS 后处理, 得到的板桩墙总应力云图 (图 3), 其中变形放大 30 倍。

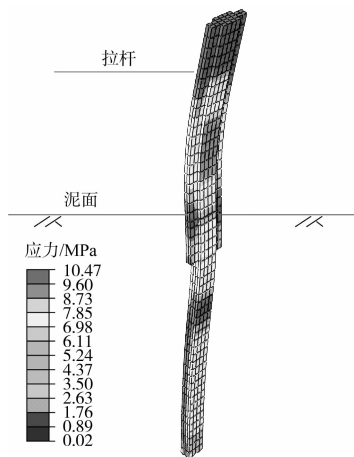


图 3 主桩套板总应力云图

板桩墙陆侧受拉, 拉杆以上土压力较小, 主桩和套板均未发生明显变形, 仅发生转动。拉杆以下至泥面以上是板桩墙的主要受力段, 主桩中部 2.25 m × 1 m 矩形范围应力值较大, 峰值点距离泥面高度 3.35 m。主桩受拉杆拉力的作用, 正向弯矩逐渐增大, 在泥面以上产生了一个最大值, 产生较大侧向变形。随着主动土压力的增加, 泥面以上正向弯矩逐渐减小且在泥面附近产生负向

弯矩。在泥面下 2 m 深度的截面变化处, 负弯矩达到最大值。

板桩墙的弯矩主要取决于土压力的变化, 而前墙陆侧的土压力主要取决于港池的开挖以及荷载的大小。由于荷载较小, 墙体弯矩变化范围不大。主桩与套板变形协调一致, 而主桩抗弯强度大, 承担的弯矩亦较大。图 4 为主桩与套板竖向弯矩的计算结果, 主桩最大弯矩为 843 kN·m, 套板最大弯矩为 44 kN·m, 套板最大弯矩仅相当于主桩的 1/19。对于主桩, NL 法计算出的最大弯矩值为 821 kN·m, 有限元法数值偏大的原因是做了简化处理, 没有考虑拉杆位移产生的影响。

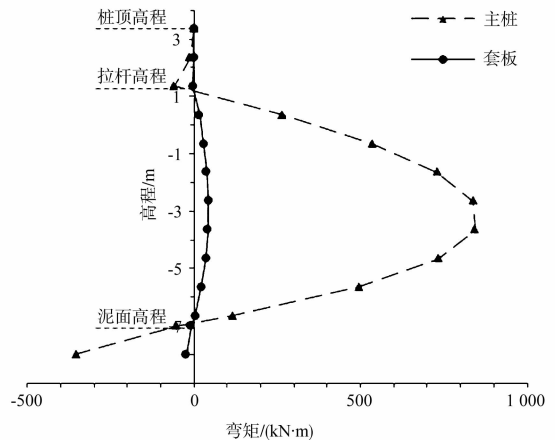


图 4 主桩套板竖向弯矩

在沿码头面方向上, 套板弯矩也有不同。在图 1 的板桩墙截面中, 分别选取套板端部 A 和中部 B 两处截面作为研究对象, 其横向弯矩值如图 5 所示。

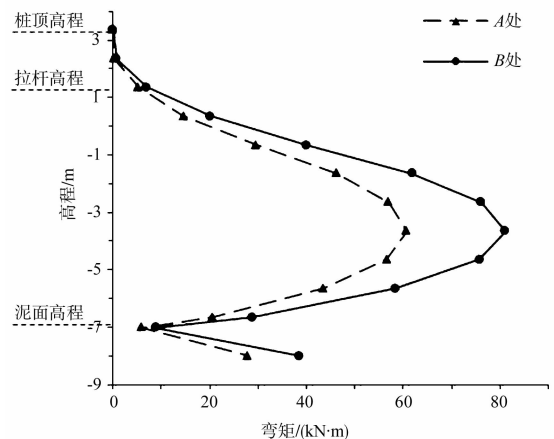


图 5 套板横向弯矩

套板的横向弯矩也是沿桩身向下逐渐增大，最大位置处高程为 -3.65 m，这个位置也是主桩竖向弯矩最大处。高程 -7 m 以下接近截面变化处，套板产生较大变形，容易发生破坏。横向弯矩较竖向要大得多，最大值约为竖向的 1.9 倍。套板的实际受力情况比较复杂，土压力如何进行取值的问题尚未达成共识，往往根据桩间岩土体的稳定情况及工程经验进行取值。

4 套板尺寸变化对主桩的影响

主桩作为主要承力构件，其力学特性与套板尺寸密切相关。本文研究了套板宽度、厚度和入土深度等因素对主桩弯矩的影响。

4.1 套板宽度的影响

由图 6 可知，随着套板宽度的增加，泥面上下主桩的弯矩都明显增加，且泥面以下的负弯矩的范围也有所扩大。套板宽度从 1 m 增加到 2 m 时，主桩最大弯矩增加约 36%，从 2 m 增加到 3 m 时，增加约 58%。套板宽度对主桩的抗弯刚度影响不大，但会将土压力成倍传递给主桩，从而使主桩跨中弯矩迅速增加。套板宽 1 m 时的主桩最大弯矩是普通板桩的近 2.5 倍，与普通板桩相比，主桩承受了更大的土压力作用，需要具有更强的抗弯能力和耐久性。泥面下 2 m 位置处主桩的负向弯矩达到最大值，由于 2 m 也是套板的入土深度，板桩墙的截面在此发生突变，负弯矩曲线发生转折。在主桩入土较深处，弯矩值随套板宽度的变化并不明显。在对结构的设计中，节省材料的同时适度增加套板宽度是可行的，但也不能过大。

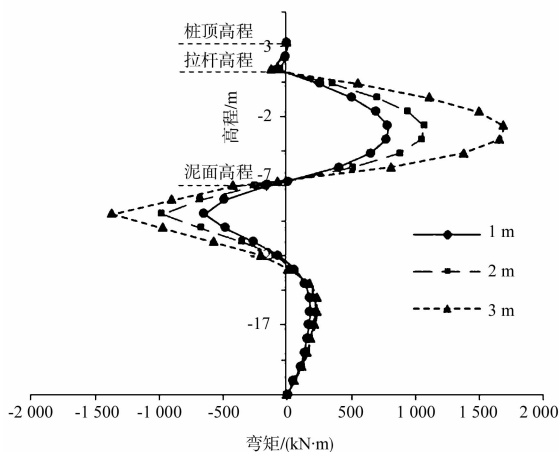


图 6 不同套板宽度下的主桩弯矩

4.2 套板厚度的影响

由图 7 可知，随着套板厚度的增加，在截面变化处以上位置，主桩弯矩逐渐减小，且弯矩的变化范围也在缩小。套板厚度从 0.2 m 增加到 0.3 m 时，主桩最大弯矩减小约 8.5%；从 0.3 m 增加到 0.4 m 时，减小约 10.6%。在截面变化处以下，主桩抗弯刚度并无变化，最大负弯矩基本没有变化。由此可见，套板厚度对主桩的影响相对较小。当套板厚度较小时，主桩整体变形较大，套板部分区域将产生塑性变形；而套板厚度的增加可以有效增大套板的抗弯刚度，在同样变形条件下套板将替主桩分担更多的弯矩，从而降低主桩的弯矩值。在码头设计中可以适当增加套板厚度来提高泥面以上主桩的抗弯能力。

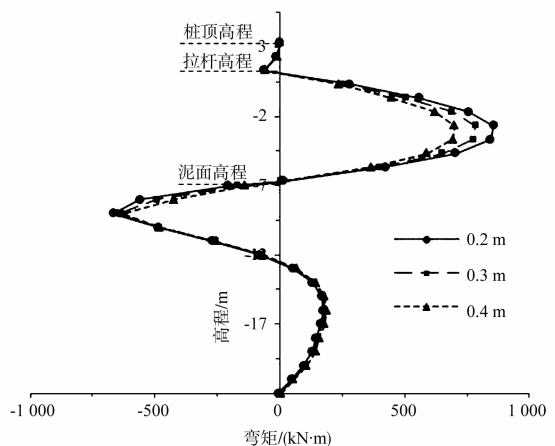


图 7 不同套板厚度下的主桩弯矩

4.3 套板入土深度的影响

由图 8 可知，随着套板入土深度的增加，泥面以上主桩弯矩有小幅增加，而泥面下负向弯矩明显减小，弯矩变化范围有所缩小。套板入土深度从 2 m 增加到 5 m 时，主桩最大负弯矩减小约 33%；从 5 m 增加到 8 m 时，减小约 26%。套板的加长使得主桩和套板接触面积增大，板桩墙整体刚度变大，抵抗弯曲变形的能力得到增强。套板的入土深度可以改变主桩负弯矩的分布情况，但是最大负弯矩通常小于跨中最大弯矩。主桩入土较深处弯矩变化不明显，泥面下最大正弯矩所在位置逐渐下移，入土深度每增加 3 m，峰值点下移约 1 m。套板入土深度的增加会导致桩土相互作用

用面的加大, 套板能够替主桩分担更多的土压力, 造成泥面下主桩弯矩值的减小。

情况下, 套板厚度和入土深度可以适当减小。

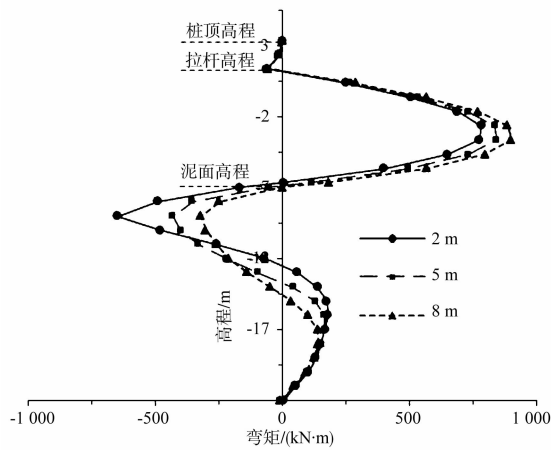


图 8 不同套板入土深度下的主桩弯矩

5 结论

1) 将 NL 法计算结果与 ABAQUS 模拟值进行比较, 两种方法获得的主桩最大弯矩值相差很小, 说明 NL 法和有限元法计算板桩结构的准确性相当。

2) 主桩套板结构中, 主桩承担绝大部分的荷载, 具有一定的嵌固和支承作用; 套板作用仅是将墙后土压力传递给主桩, 自身承受的弯矩非常小, 其中套板竖向的最大弯矩仅相当于主桩的 1/19。

3) 套板宽度对主桩内力影响较大, 在保证主桩不发生剪切破坏和码头不发生整体稳定性破坏的前提下, 为降低造价可适当增大套板宽度。虽然套板厚度、套板入土深度对主桩弯矩有所影响, 但两者对其影响较小, 因此在满足挡土和抗渗的

参考文献:

[1] 陈万佳. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.

[2] 叶万灵, 时蓓玲. 桩的水平承载力实用非线性计算方法——NL 法[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 97-101.

[3] 李晓慧, 孙旻. NL 法在板桩墙计算中的应用[J]. 水运工程, 2006(11): 34-37.

[4] 李晓慧. 板桩码头板桩墙计算方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

[5] 袁志林, 陈祥余, 段梦兰, 等. 基于 ABAQUS 的桩土相互作用分析[C]//左其华, 窦希萍. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2011: 502-505.

[6] Johnson K, Lemcke P, Karunasena W, et al. Modelling the load-deformation response of deep foundations under oblique loading[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(9): 1 375-1 380.

[7] 王浩芬. 有锚板桩墙计算方法[J]. 港工技术, 1989(1): 10-22.

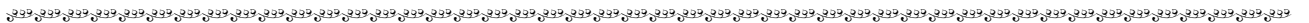
[8] 李荣庆, 贡金鑫, 杨丽民. 板桩结构可靠度分析[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1 265-1 271.

[9] 刘世涛, 程培峰. 基于 ABAQUS 土体数值分析的本构模型[J]. 低温建筑技术, 2010(2): 90-92.

[10] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

[11] 韩理安. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

三航局中标湖北荆州港木沉渊港区江陵跃进综合码头工程

5 月 28 日, 三航局中标湖北荆州港木沉渊港区江陵跃进综合码头工程。

该码头位于长江中游沙市河段的瓦口子水道下段左岸, 工程中标金额 1.93 亿元, 合同工期为 24 个月; 工程内容包括 1 个 3 000 吨级散货泊位和 3 个 3 000 吨级件杂货泊位, 以及相应的生产辅助和配套设施; 设计年通过能力为 303 万 t。

该项目是湖北省“十二五”期间重要的交通港口项目, 建成后将有效提升当地港口通行能力, 改善投资环境, 促进经济发展。

(来源: 三航局)