

离岸深水全直桩码头水平承载力简化计算

王元战, 贺林林

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室 天津市港口与海岸工程重点实验室, 天津 300072)

摘要: 全直桩码头是一种适用于离岸深水海域的新型高桩码头结构型式,其破坏模式与传统高桩码头结构存在较大差异。通过有限元法研究了水平荷载作用下离岸深水全直桩码头结构破坏模式、桩侧土压力及桩身弯矩分布,并验算了规范中 m 法、P-Y 曲线法和 NL 法的适用性。研究结果表明,水平荷载作用下,基桩的塑性破坏是结构失稳的控制因素,且结构失稳时桩身最大弯矩达极限弯矩值,在此基础上,结合简化计算方法计算了结构水平极限承载力。通过对比可知,基于 m 法的简化方法在小位移时与有限元法吻合较好,基于 P-Y 曲线法和 NL 法的简化方法在各种位移条件下与有限元法均吻合较好,且通过桩身极限弯矩与设计荷载作用下桩身最大弯矩之比计算结构安全系数的简化方法是合理的。

关键词: 全直桩码头; 有限元法; 失稳模式; 简化计算方法; 极限弯矩

中图分类号: TV31

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)05-0014-08

离岸深水港建设是我国水运工程发展的方向,全直桩码头结构由于船舶泊稳条件好、外海施工方便,工程造价低,成为适用于软土地基上离岸深水海域的新型高桩码头^[1]。由于离岸深水全直桩码头结构一般位于无掩护的开敞海域,受波浪等荷载作用严重,且随水深增加,桩柱加长,设计中直桩同时承受垂直荷载和水平荷载,其承载机理、破坏模式及简化计算方法等与传统含叉桩的高桩码头结构存在较大差异,需进行全面深入的研究。

现有规范推荐的水平承载桩简化计算方法主要有 m 法、P-Y 曲线法和 NL 法^[2-3]。m 法^[4]是一种线性地基反力法,由于使用方便,在国内外得到广泛应用;P-Y 曲线法属于复合地基反力法,被美国 API 规范^[5]及我国《港口工程桩基规范》选用;NL 法^[6]是我国通过大量试桩资料建立的非线性计算方法,其试桩遍布我国大部分沿海地区,包含了多种类型和尺寸的桩,可以较全面地反映我国的实际情况。NL 法于 2000 年编入我国规范^[7],文献^[8]通过有限元程序对标准桩计算数据进行修正,提高了使用 NL 法理论计算的精度,并于 2012 年新规范中更新相关内容。基于 m 法文献^[9]提出了软土地基中大直径超长群桩位移计算的方法;文献^[10]基于 P-Y 曲线法进行了水平受荷桩非线性有限元分析,推导了作用于桩上的非线性弹簧弹性系数计算公式;文献^[11-12]分别将 NL 法应用于港口柔性靠船桩工作性状和高桩梁板式码头横向排架的分析和计算中,计算结果比较满意。

针对全直桩码头结构,文献^[13-14]将全直桩码头结构整体简化为刚性平台,提出了水平静力简化计算方法和考虑扭转效应的动力简化计算方法,但没有考虑桩土相互作用。文献^[15]基于 P-Y 曲线法建立了全直桩码头静力简化计算方法并提出水平极限承载力判别标准。文献^[16]探讨了土体循环软化效应及结构尺寸对离岸深水全直桩码头结构水平极限承载力的影响。但现有简化计算方法是否适用于离岸深水全直桩码头结构尚未进行全面分析。

为了完善离岸深水全直桩码头静力简化计算方法,通过有限元法研究了波浪力、撞击力等水平荷载作用下结构失稳模式、桩侧土压力及桩身弯矩分布,并验算了规范中 m 法、P-Y 曲线法和 NL 法的适用性。研究得出水平荷载作用下,基桩的塑性破坏是结构失稳的控制因素,且结构失稳时桩身最大弯矩达极限弯矩值,

收稿日期: 2014-05-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279128)

作者简介: 王元战(1958-),男,河北沧州人,教授,博士,主要从事港口海岸及近海工程结构设计理论和方法、土与结构相互作用、结构振动分析理论和方法等方面的研究工作。E-mail: yzwang@tju.edu.cn

在此基础上,结合简化计算方法计算了结构水平极限承载力。

1 有限元分析方法

有限元法可同时满足平衡、破坏及变形协调条件,能够通过设置接触面来模拟桩土相互作用,可考虑三维空间几何特性、土体弹塑性、接触面和材料的非线性,且应用广泛。

1.1 工程简介

以某全直桩梁板式离岸深水码头为依托工程,结构剖面见图1。首尾桩中心距35 m,桩身为 Q345 钢管桩,壁厚 22 mm,Φ1 800 mm;钢管桩弹性模量为 2.1×10^5 MPa,泊松比为 0.3,密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$,最小屈服应力为 355 MPa,最小断裂应力为 510 MPa;混凝土弹性模量为 3.5×10^4 MPa,泊松比为 0.2,密度为 $2\ 500\text{ kg/m}^3$ 。桩身自由高度 32.2 m,入土深度 45 m。采用《海港水文规范》^[17]中 Morison 公式计算小尺度桩柱波浪力的方法计算设计波浪力,取设计高水位波峰作用且总水平波浪力最大时作为最不利情况,设计高水位为 3.82 m,设计波高 6.07 m,波浪周期 10.5 s。取船舶靠岸时的撞击力 1 600 kN 为设计值 P_D ,土层参数见表 1。

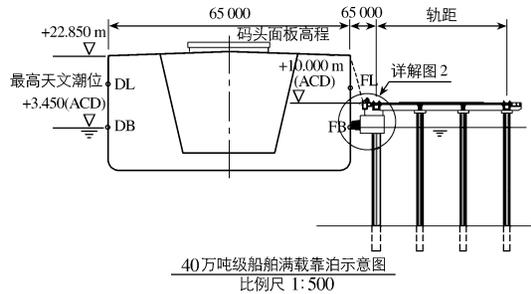


图1 全直桩码头结构剖面

Fig.1 Cross-section of all-vertical-piled wharf

表 1 各土层主要参数

Tab.1 Properties of soil layers

泥面以下深度/ m	土层名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	固结快剪		泊松比	压缩模量/ MPa
			$\varphi/^\circ$	c/kPa		
0 ~ 13.5	极软砂质黏土	1 785	15	16.3	0.35	4.07
13.5 ~ 27.0	中等密实粉砂	1 930	34	3.0	0.31	9.50
27.0 ~ 34.0	非常密实粉砂	2 050	36	5.0	0.28	16.00
34.0 ~ 42.0	硬黏土	1 900	18	30.0	0.25	18.00
42.0 以下	非常密实粉砂	2 050	36	5.0	0.28	16.00

1.2 有限元模型介绍

取码头一榀横向排架作为研究对象,利用 ABAQUS 建立的结构-地基相互作用三维弹塑性有限元模型及边界条件如图 2。在有限元模型中,为降低边界效应对分析区域的影响,地基土体在水平方向取横向排架前后各 30 倍桩径,竖直方向取 2 倍桩基入土深度。通过计算已知,模型尺寸继续增大时,结构位移变化极小,可忽略不计,则所选择的模型尺寸是合理的。有限元模型全部选取三维 8 节点减缩积分实体单元 C3D8R。

土体采用基于 Mohr-Coulomb 屈服准则的理想弹塑性模型模拟,桩身分别采用线弹性和弹塑性模型模拟。桩土相互作用区域设置主从接触面,考虑到桩体的弹性模量远大于土体的弹性模量,指定桩体上的接触面为主接触面,土体上的接触面为从接触面。接触本构模型在切向采用库伦摩擦型,法向采用硬接触方式。

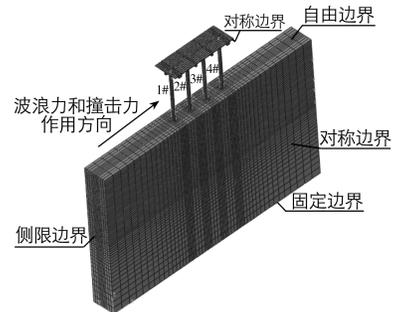


图2 全直桩码头结构-地基相互作用有限元模型

Fig.2 Finite element model for structure and soil

1.3 加载系数及失稳判别标准

在有限元计算过程中,为清晰表述施加荷载与设计荷载之间的关系,引入无量纲的加载系数 α ^[18] 概念:

$$\alpha = P/P_D \tag{1}$$

式中: P_D 为设计荷载; P 为施加荷载。

失稳判别标准:在尚不明确结构破坏模式的情况下宜采用荷载控制方式,通过逐步加载荷载,计算码头

结构的变位,结合加载系数概念,得到加载系数-位移关系曲线,当曲线的斜率接近于零时,根据理想塑性流变概念,结构已失稳。此时 P 即为结构极限承载力 p_u , α 定义为结构安全系数 K 。

2 有限元分析结果

采用有限元法对离岸深水全直桩码头结构进行分析,在分析结果的基础上得到相关结论。

2.1 结构失稳模式分析

定义 X 点为泥面处桩身节点,图3是波浪荷载作用下 X 点的加载系数-位移关系曲线对比,由图可知随着施加荷载的增大,弹塑性桩模型出现明显的渐近线,表明结构已经失稳,结构安全系数为 $K=16.17$ 。而弹性桩模型始终未出现渐近线,根据失稳判别标准可知结构仍未达极限状态,但由图4经应力换算知此时桩身最大应力约为 633 MPa ,远大于钢管桩屈服应力,结构已破坏。可见,与传统分析方法不同,离岸深水全直桩码头桩身采用弹性模型模拟无法得到正确结果,桩身应采用弹塑性模型模拟。

桩身采用弹塑性模型模拟时,极限状态下结构应力场分布见图5。由图5经应力换算得出桩身最大应力 385 MPa ,达到屈服应力,出现塑性变形,桩身破坏,导致结构失稳。极限状态下地基土塑性变形分布见图6,可见水平极限状态时,地基土体仅在浅层出现塑性变形,可认为地基土体的承载力不是导致结构失稳的主要因素。

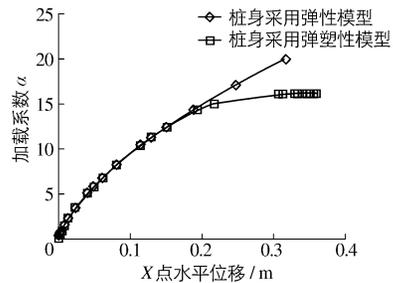


图3 弹性和弹塑性模型加载系数-位移曲线对比
Fig.3 Comparison of relationships between loading coefficient and displacement of elastic and elastoplastic model

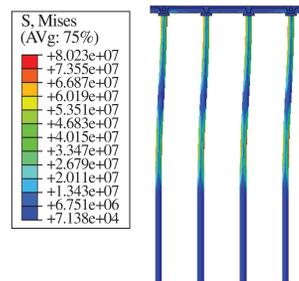


图4 极限状态时弹性桩模型结构应力场

Fig.4 Stress field of structure in the limit state of elastic model

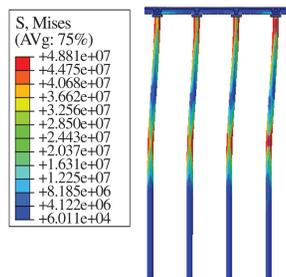


图5 极限状态下结构应力场

Fig.5 Stress field of structure in the limit state

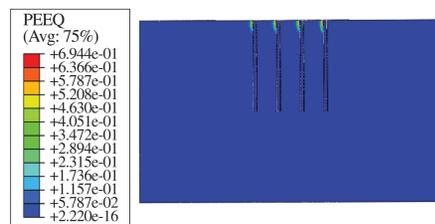


图6 极限状态下地基土塑性变形分布

Fig.6 Plastic deformation of soil in the limit state

2.2 水平向控制荷载分析

撞击力与波浪力加载系数-位移关系曲线对比见图7。由图7可得设计撞击力安全系数 $K=3.32$ 远小于波浪力安全系数。由此可知撞击力是结构水平向控制荷载,故以下以撞击力荷载为设计荷载进行相关分析。

2.3 桩侧土压力分布

为进一步明确结构与土体工作状态,分析了撞击力作用下沿桩基环向、竖向土压力分布及桩身弯矩分布情况。

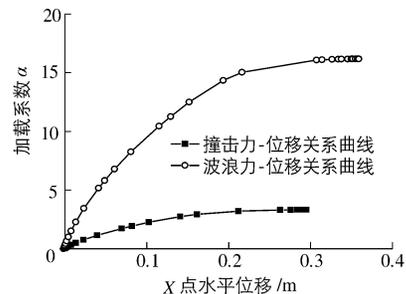


图7 撞击力与波浪力加载系数-位移关系曲线对比
Fig.7 Comparison of relationships between loading coefficient and displacement with different loads

2.3.1 土压力沿桩身环向分布 为清晰表述沿桩身环向土压力和竖向土压力分布情况,图8给出了桩侧土压力参考点分布。

撞击力极限状态时,以1#桩为例,取泥面A点、泥面以下2.4 m处B点、泥面以下4 m处C点、泥面以下13.5 m处D点、泥面以下27 m处E点以及泥面以下34 m处F点,按照图8所示方向(从 O_1 点顺时针经M、 O_2 、N回到 O_1 点)展开,所得土压力沿桩身环向分布见图9。

由图可知,A、B、C点桩侧环向土压力分布形式相同,M点土压力最大,并向两侧沿环向逐渐减小,而迎浪侧各点土压力为零,桩土间呈分离状态;D、E点桩侧环向土压力分布形式相同,均为M点处土压力值最小,并向两侧沿环向逐渐增大,在迎浪侧土压力继续增大,在N点处土压力达最大。F点沿桩侧环向均有土压力分布,M点土压力值最大,N点土压力最小。由图可知点D、E、F桩侧环向土压力明显小于点A、B、C。分析可知,极限状态时地表及以下一定范围内土体达到极限,但入土较深处土体仍处于弹性状态。

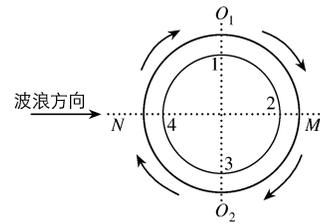


图8 桩侧土压力参考点分布

Fig. 8 Distribution of reference point on pile

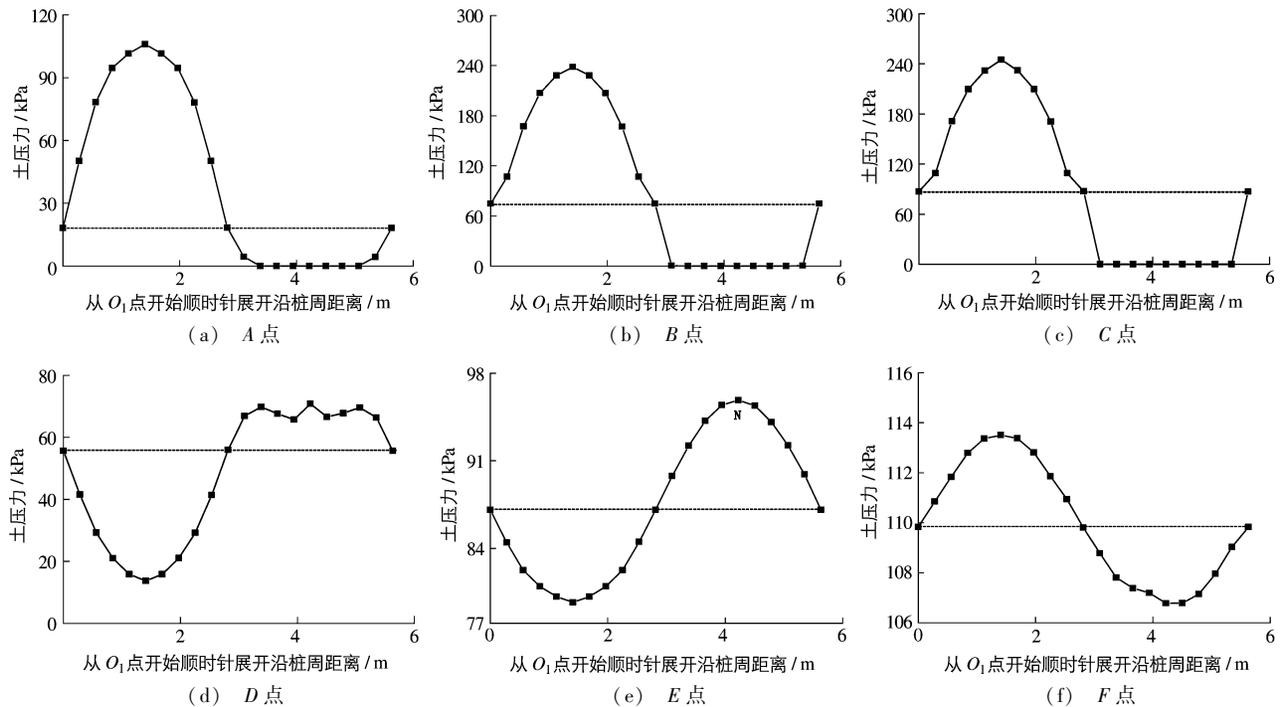


图9 极限撞击力作用下,各点桩外壁环向土压力分布

Fig. 9 Circumferential distribution of earth pressure around outer wall of pile in the limit state

2.3.2 土压力沿桩基竖向分布 撞击力极限状态时,以图8中2和4点作为参考点,桩内壁沿竖向土压力分布如图10所示。由图可知其分布形式基本重合,桩内土体与桩身几乎构成整体,忽略桩内土体对桩的水平作用进行分析是合理的。

撞击力极限状态时,以图8中桩外壁 O_1 、 O_2 、M、N四点为参考点,桩外侧竖向土压力分布如图11所示。由图可见, O_1 、 O_2 两点桩侧竖向土压力分布情况相似,上部略大于静止土压力,为被动土压力。M点桩侧竖向土压力

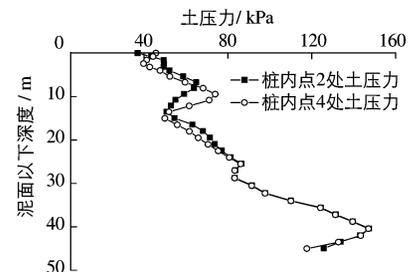


图10 极限状态时,1#桩内壁2、4点土压力沿竖向分布
Fig. 10 Vertical distribution of earth pressure through No. 2 and No. 4 points at inner wall of 1# pile in the limit state

值变化最大,上部土压力远大于静止土压力,为被动土压力。 N 点桩侧土压力在泥面至泥面以下10 m范围内为0,其下10~30 m范围内大于静止土压力,但 O_1, O_2, M, N 点在泥面30 m以下均与静止土压力接近或略小于静止土压力。这进一步说明,极限状态时地表及以下一定范围内土体达到极限,但入土较深处土体仍处于弹性状态。

2.3.3 桩身弯矩分布有限元分析 在有限元计算过程中,采用 *section print 命令输出截面弯矩,得到桩身弯矩分布如图12。

1#~4#点桩身弯矩最大值设计状态下分别为6 221.60, 6 659.50, 6 403.20, 6 172.00 kN·m, 极限状态下分别为23 496.00, 24 037.50, 23 982.00 和 23 909.80 kN·m, 设计状态下与极限状态下最大弯矩的比值分别为3.78, 3.60, 3.75 和 3.87, 其中最小值与有限元法所得安全系数3.32 非常接近。且由桩身极限弯矩计算式 $M_u = \sigma_s(S_1 + S_2)$ (其中 $S_1 = S_2 = 4(R^3 - r^3)/3$, σ_s 为桩身材料屈服应力, S_1, S_2 为半圆环对圆心所在轴线的静矩, r, R 为桩的内、外半径) 可得, 桩身极限弯矩 $M_u = 23 995.37$ kN·m, 与有限元计算极限状态时桩身弯矩值基本吻合。说明结构失稳时桩身最大弯矩达极限弯矩值, 由此可通过桩身极限弯矩与设计荷载作用下桩身最大弯矩之比的简化方法计算结构安全系数。

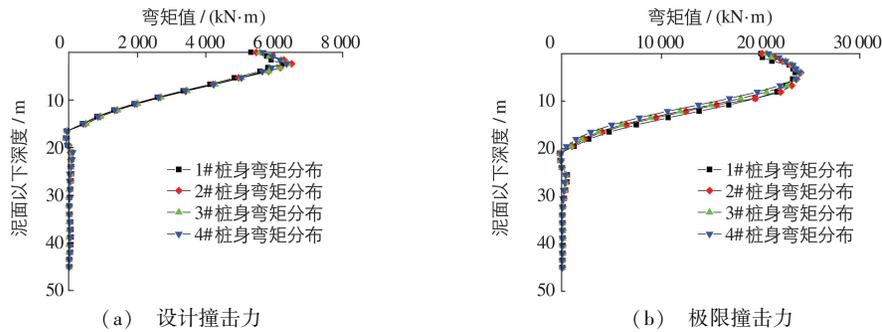


图12 泥面以下桩身弯矩分布
Fig.12 Distribution of moment of piles under mud surface

图13 为水平极限状态时各桩桩身等效塑性变形分布。分析已知,该码头结构失稳是由桩身强度控制的,而较大水平荷载作用下,桩身破坏一般由于所受弯矩过大所致。由图13可见,结构失稳时在泥面以下一定距离桩身中段出现较为明显的塑性变形区,且塑性区几乎扩展至整个横截面而形成塑性铰。进一步说明,结构失稳时桩身最大弯矩达极限弯矩值。

3 水平承载力简化计算方法

针对离岸深水全直桩码头结构,验算了规范中简化计算方法 m 法、P-Y 曲线法和 NL 法的适用性。由有限元分析结果已知,基桩的塑性破坏是结构失稳的控制因素,结构失稳时桩身最大弯矩达极限弯矩值。由此,结合简化计算方法计算了结构水平极限承载力。

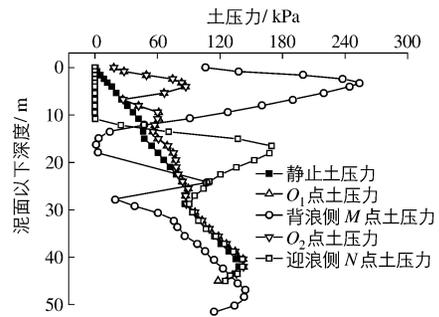


图11 桩外壁4点土压力沿竖向分布
Fig.11 Vertical distribution of soil pressure of 4 points at outer wall of 1# pile in the limit state

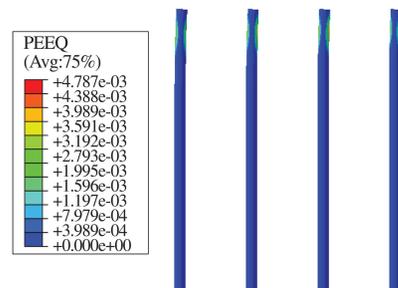


图13 极限状态时各桩身等效塑性变形分布
Fig.13 Equivalent plastic deformation of piles in the limit state

3.1 简化方法计算步骤

基于 m 法、P-Y 曲线法和 NL 法的离岸深水全直桩码头结构静力简化计算方法计算步骤如下:

(1) 按照 m 法的假定嵌固点模型对桩头设计荷载进行分配,计算得到排架中桩顶的弯矩和剪力。

(2) 根据结构力学理论,结合已知泥面以上桩身受力情况,对于 m 法、P-Y 曲线法需要计算出泥面处桩身弯矩和剪力,对于 NL 法需要计算出桩身弯矩零点的剪力值及该点到泥面的距离。

(3) 基于 m 法、P-Y 曲线法、NL 法建立静力简化计算方法,可求出泥面处桩身位移及泥面以下任意深度处的桩身位移和内力。

(4) 推求桩顶的水平位移 y 与转角 φ :

$$y = y_0 - \varphi_0 L_0 + y_1 \quad (2)$$

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_1 \quad (3)$$

式中: $y_0(\varphi_0)$ 为泥面处桩身位移(转角); $y_1(\varphi_1)$ 为泥面以上的桩身在外荷载共同作用下产生的桩顶水平位移(转角); L_0 为桩顶至泥面的桩身自由长度。

(5) 由有限元分析结果已知,基桩的塑性破坏是结构失稳的控制因素,结构失稳时桩身最大弯矩达极限弯矩值,结构的安全系数可由极限弯矩与简化计算方法所得设计荷载作用下桩身最大弯矩之比得到。

3.2 简化方法与有限元法比较

撞击力取不同值时,采用 m 法、P-Y 曲线法和 NL 法进行计算,所得桩身在泥面和桩顶的位移值与有限元法计算结果对比见表 2。设计撞击力时,根据极限弯矩与简化计算方法所得桩身最大弯矩之比计算结构安全系数分别为 4.33,3.56 和 3.61。通过对比得知,m 法所得结构安全系数偏于危险,P-Y 曲线法和 NL 法所得结构安全系数与有限元法计算安全系数基本吻合,该简化计算方法合理。

表 2 撞击力静力简化方法与静力有限元法计算结果比较

Tab. 2 Comparison of the simplified calculation method and ABAQUS under static impact load

撞击力/ kN	计算方法	泥面位移/mm				桩顶位移/mm			
		1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#
800	m 法	7.63	8.05	8.04	7.61	112.43	112.28	112.20	112.19
	P-Y 曲线法	8.55	9.27	9.28	8.52	116.15	117.80	117.77	116.04
	NL 法	8.19	8.89	8.88	8.17	115.45	117.06	117.03	115.36
	有限元法	11.60	11.69	10.99	9.63	116.00	115.83	115.75	115.77
1 600	m 法	15.25	16.09	16.08	15.23	214.87	214.55	214.40	214.73
	P-Y 曲线法	25.38	27.82	27.78	25.33	264.01	270.96	270.54	264.71
	NL 法	23.17	25.18	25.16	23.18	255.07	260.90	260.51	255.52
	有限元法	26.67	27.46	26.81	24.63	245.40	245.17	245.10	245.19

4 结 语

全直桩码头是一种适于离岸深水海域的新型高桩码头结构型式,为了完善其简化计算方法,本文开展了相关研究工作并得到如下结论:

(1) 通过有限元计算分析得出,水平极限状态时,基桩的塑性破坏是结构失稳的控制因素,且桩身弯矩最大值达极限弯矩。

(2) 验算了现有简化计算方法 m 法、P-Y 曲线法和 NL 法的适用性,通过对比可知,基于 m 法的简化方法在小位移时与有限元法吻合较好,基于 P-Y 曲线法和 NL 法的简化方法在各种位移条件下与有限元法均吻合较好,且通过桩身极限弯矩与设计荷载作用下桩身最大弯矩之比计算结构安全系数的简化方法是合理的。

参 考 文 献:

- [1] 王朝阳. 全直桩码头动力计算方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (WANG Zhao-yang. Research on dynamic calculation method of all-vertical-piled wharf in offshore deep-water[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [2] 胡人礼. 桥梁桩基础分析与设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987. (HU Ren-li. Analysis and design of bridge pile foundation[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1987. (in Chinese))
- [3] JTS 167-4-2012, 港口工程桩基规范[S]. (JTS 167-4-2012, Code for pile foundation of harbour engineering[S]. (in Chinese))
- [4] 胡立万, 周建国. 单桩水平承载力计算方法的比较分析[J]. 辽宁交通科技, 2003(4): 19-22. (HU Li-wan, ZHOU Jian-guo. Single pile horizontal loaded force calculation methods comparison[J]. Liaoning Communication Science and Technology, 2003(4): 19-22. (in Chinese))
- [5] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning I, designing and constructing fixed offshore platforms[M]. Washington, D C: API Publishing Services, 2000.
- [6] 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. (YE Wan-ling, SHI Bei-ling. A practical non-linear calculation method of pile's lateral bearing capacity-NL method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(2): 97-101. (in Chinese))
- [7] JTJ 254-98, 港口工程桩基规范局部修订(桩的水平承载力设计)[S]. (JTJ 254-98, Code for pile foundation of harbour engineering supplement(horizontal bearing capacity of piles)[S]. (in Chinese))
- [8] 吴锋, 卓杨, 时蓓玲. 水平推力桩 NL 法相似原理计算表格的修正[J]. 水运工程, 2008(11): 5-8. (WU Feng, ZHUO Yang, SHI Bei-ling. Amendment of calculation forms for laterally loaded pile based on similar principle of NL method[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(11): 5-8. (in Chinese))
- [9] 刘鹏, 丁文其, 周正明. 软土中大直径超长群桩位移的适用计算方法[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(3): 39-44. (LIU Peng, DING Wen-qi, ZHOU Zheng-ming. A practical method of calculating the displacement of large-diameter and ultra-long pile group in soft soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(3): 39-44. (in Chinese))
- [10] 苏静波, 邵国建, 刘宁. 基于 P-Y 曲线法的水平受荷桩非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1781-1785. (SU Jing-bo, SHAO Guo-jian, LIU Ning. Nonlinear finite element analysis of piles under lateral load based on P-Y curves[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1781-1785. (in Chinese))
- [11] 肖政, 江诗群, 韩时琳. NL 法在港口柔性靠船桩工作性状分析中的应用[J]. 湖南交通科技, 2008, 34(3): 134-136. (XIAO Zheng, JIANG Shi-qun, HAN Shi-lin. Application of NL method in operation properties analysis of flexible berthing pile at ports[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2008, 34(3): 134-136. (in Chinese))
- [12] 周建国, 胡立万. NL 法在高桩梁板式码头横向排架计算中的应用[J]. 水运工程, 2003(3): 23-27. (ZHOU Jian-guo, HU Li-wan. Application of NL method in calculation of transverse bent of slab-beam type wharf on high-piles[J]. Port & Waterway Engineering, 2003(3): 23-27. (in Chinese))
- [13] 张志明, 何良德, 李新国. 在水平静力作用下全直桩码头结构整体简化计算方法[J]. 中国港湾建设, 2011(5): 1-6. (ZHANG Zhi-ming, HE Liang-de, LI Xin-guo. Simplified overall calculation method of all-vertical-piled wharf under lateral static loads[J]. China Harbour Engineering, 2011(5): 1-6. (in Chinese))
- [14] 何良德, 张海荣, 杨洋, 等. 考虑扭转效应的全直桩码头动力简化计算方法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, 41(3): 265-270. (HE Liang-de, ZHANG Hai-rong, YANG Yang, et al. Simplified dynamic calculation method for all-vertical-piled wharf considering torsional effect[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013, 41(3): 265-270. (in Chinese))
- [15] 王元战, 龙俞辰, 王禹迟, 等. 离岸深水全直桩码头承载特性与简化计算方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1573-1579. (WANG Yuan-zhan, LONG Yu-chen, WANG Yu-chi, et al. Bearing behavior and simplified calculation method of all-vertical-piled wharf in offshore deep water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1573-1579. (in Chinese))
- [16] 王元战, 贺林林. 离岸深水全直桩码头承载性能有限元分析[J]. 海洋工程, 2013, 31(6): 45-52. (WANG Yuan-zhan,

- HE Lin-lin. Finite element analysis of bearing capacity of all-vertical-piled wharf in offshore deep-water [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 31(6): 45-52. (in Chinese))
- [17] JTJ 213-98, 海港水文规范[S]. (JTJ 213-98, Code of design and construction for breakwater[S]. (in Chinese))
- [18] 王刚, 陈杨. 大圆筒结构倾覆稳定分析的有限元法[J]. *岩土力学*, 2006, 27(2): 238-241. (WANG Gang, CHEN Yang. Finite element method for analyzing overturn stability of large cylindrical structures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(2): 238-241. (in Chinese))
- [19] 张连丽, 王元战, 商丹. 倒T型导管墙桩基防波堤桩基土抗力及稳定性简化计算方法[J]. *岩土力学*, 2013, 34(4): 1131-1139. (ZHANG Lian-li, WANG Yuan-zhan, SHANG Dan. Simplified calculation methods for lateral earth resistance on piles and stability of the inverse T type breakwater with jackets and pile foundations[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4): 1131-1139. (in Chinese))

Simplified calculation methods for horizontal bearing capacity of all-vertical-piled wharf in offshore deep-water

WANG Yuan-zhan, HE Lin-lin

(*State Key Laboratory for Simulation & Safety of Hydraulic Engineering, Tianjin University, Tianjin Key Laboratory of Harbor & Ocean Engineering, Tianjin 300072, China*)

Abstract: All-vertical-piled wharf is a new type of high-pile wharf suitable for offshore deep seas, but its failure mode is quite different from the traditional type. The failure mode, earth pressure on piles and the bending moment along piles have been studied under wave loads and impact loads by use of FEM, and the applicability of m method, P-Y method and NL method for the all-vertical-piled wharf is verified. The analysis results show that in the horizontal limit state, plastic failure of the pile body is the key to the buckling damage, and the maximum bending moment along the piles reaches the ultimate bending moment. On this basis, the horizontal limit bearing capacity of structure has been calculated using simplified calculation methods. By comparison, m method is in good agreement with that given from FEM under small displacement conditions, P-Y method and NL method are in good agreement with that given from FEM in both large and small displacement conditions, and the simplified calculation method of safety coefficient through the ratio of the ultimate bending moment to the maximum bending moment along piles under design load is reasonable.

Key words: all-vertical-piled wharf; finite element method; instability mode; simplified calculation method; ultimate bending moment