



# 高桩码头在船舶撞击力作用下的应变监测研究

葛浩<sup>1</sup>, 黄坤耀<sup>2</sup>, 朱鹏宇<sup>3</sup>

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 上海维固建筑工程实业有限公司, 上海 201100;  
3. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200080)

**摘要:** 为了得到合理准确地监测上海港口高桩码头的方法, 用有限元软件 ANSYS 计算分析高桩码头在船舶撞击力作用下的应变情况。根据 ANSYS 分析结果得到码头结构中的大应变危险点, 并在现场进行实测。实测数据与 ANSYS 模拟结果数据的对比表明, 船撞力作用下码头受力趋势相近, 各樁排架空间作用明显。

**关键词:** 应变监测; 高桩码头; 空间分析; 船舶撞击

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0063-07

## Strain monitoring of pile-supported wharf under action of ship collision

GE Hao<sup>1</sup>, HUANG Kun-yao<sup>2</sup>, ZHU Peng-yu<sup>3</sup>

(1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Shanghai WEGO Engineering Co., Ltd., Shanghai 201100, China;  
3. Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

**Abstract:** To acquire a reasonable and accurate monitoring method for the pile-supported wharf in Shanghai seaport, we firstly calculate the pile-supported wharf with the finite element method (FEM) and using ANSYS software to analyze the whole 3D model. According to the result of ANSYS calculating, we get that the threatening bigger strain points on the wharf which are to be monitored in the actual place on the wharf. Comparing the monitoring data and the analyzing result, we find that the two groups of data have the similar trend of high-pile wharf mechanical performance. Each cross shelf plays an obvious role in the impacting of ship.

**Keywords:** strain monitoring; pile-supported wharf; spatial analysis; ship collision

我国高桩码头多数面临着加固改造的问题, 因此高桩码头的监测和计算工作尤为重要。传统的高桩码头将空间排架简化为平面单樁排架计算, 可以更容易得到码头各个构件的弯矩和剪力。但高桩梁板式码头作为一个空间整体结构, 应该考虑面板、横梁、纵梁、桩帽和桩的空间协同作用, 这样才能把高桩码头的整体受力作用发挥出来。现在比较流行且实用的空间结构计算方法即有限元法, 而有限元软件 ANSYS 在这方面的应用更是广泛。

上海港某码头面临加固升级改造的问题, 改造前需要对码头在船舶撞击力作用下的应变进行监测。本文先对码头进行数值模拟分析, 得到码头

最大应变位置点, 根据分析结果确定的点现场布置应变片测量, 测量结果与用空间有限元软件模拟计算的空间排架结构模型进行比较, 以判别 ANSYS 有限元软件算法与实际测量结果的差别。

### 1 工程概况

上海外一期码头靠泊等级能级提升, 升级改造前需对现场码头在船舶撞击力作用下的应变进行测量。码头结构段全长 65 m, 横向宽度 42 m, 沿纵向设置两道轨道梁, 轨道梁间距 30 m。纵向共设 10 樁排架, 排架间距 7 m。码头横断面尺寸见图 1。

收稿日期: 2014-05-15

作者简介: 葛浩 (1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为固体力学。

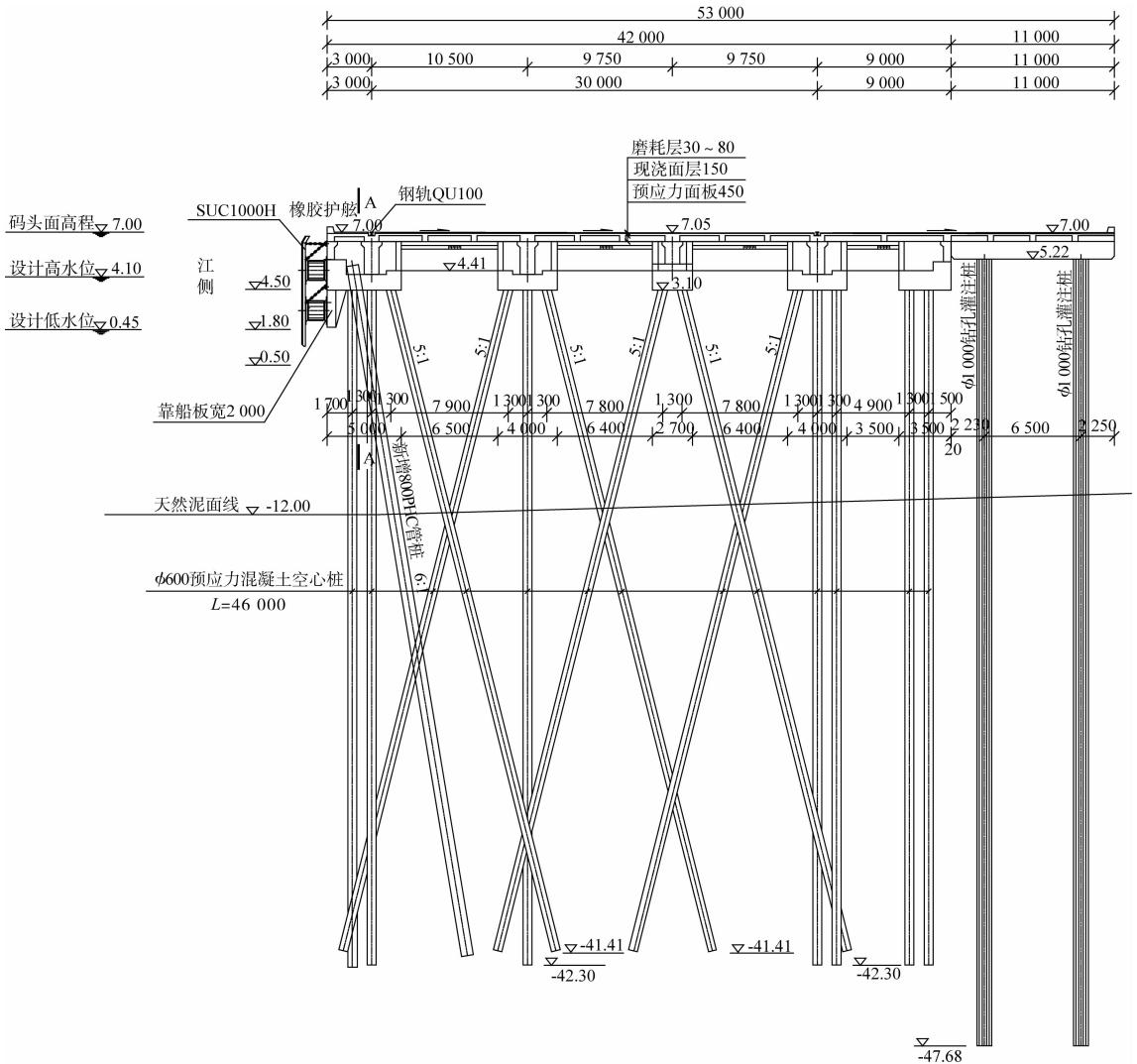


图 1 码头结构横断面

码头整体结构由横梁、纵梁、面板、桩帽、桩构成，码头横梁用来传递横向荷载，桩帽对整个横梁的弯矩有削峰作用，桩承担纵横梁传来的荷载，纵梁将每一榀排架连接起来形成整体，同时轨道梁也用来承担门机荷载、堆载等大型荷载，面板将纵横梁联系起来形成整体，使高桩码头整体刚度更优越，可以承担更大的重载。码头前沿设 SUC1000H (RH) 型二股一板橡胶护舷。

高桩码头长桩桩底高程 -42.30 m，码头接岸结构桩底高程 -47.68 m，在模拟计算中，接岸结构对码头整体结构作用较小，忽略不计。因此在横向撞击力下仅考虑码头前沿结构，且高桩码头长桩根据《港口工程桩基规范》<sup>[1]</sup> 考虑假想嵌固点深度。

## 2 桩土相互作用的简化

高桩码头结构力学性能发挥的好坏与桩土相互作用密不可分，国内外很多学者对桩土相互作用有较深刻的研究。土结构是土木工程中比较复杂的结构，它在力的作用下力学性能发生改变，因此很难得到一个能充分说明土性能的模式。

我国桩基规范<sup>[1]</sup> 中采用的一种方法是  $m$  法，假设土的水平地基抗力系数随深度成线性增加，即

$$K = mz \quad (1)$$

式中： $m$  是土的水平抗力系数随深度增长系数； $z$  是计算深度。

另一种方法是 20 世纪 60 年代 Reese 和 Matlock

提出的“反力挠度曲线法”<sup>[2-3]</sup> (即  $P-y$  曲线法), 用来模拟桩土相互作用, 并被许多国家的规范采用。其原理是在 Winkler 地基模型假设的前提下, 土的抗力  $P$  和桩的水平位移  $y$  成一定的非线性关系, 根据桩的位移可以确定土体的抗力。综合反映了桩周土体的非线性、桩基刚度和外荷载作用的性质等特点。曲线能如实地把地基的非弹性性质、由土体地表开始的进行性破坏现象反映到桩基的计算中。

桩土相互作用是个非常复杂的问题, 一般工程中都采用对其简化的方法, 本工程主要分析高桩码头上部结构的受力特性, 因此采用桩基假想嵌固点法, 采用此法对实际工程的模拟已足够。排架计算中桩的受弯计算长度等于桩的自由长度和桩在土中嵌固深度之和<sup>[4]</sup>, 弹性长桩的受弯假定嵌固点深度用下式计算:

$$t = \eta T \quad (2)$$

式中:  $\eta$  反映桩顶与桩帽嵌固程度和桩的自由长度大小的系数,  $\eta = 1.8 \sim 2.2$ ;  $T$  为桩的相对刚度系数 (m)。

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{mb_0}} \quad (3)$$

式中:  $E_p$ 、 $I_p$  分别为桩的弹性模量和截面惯性矩;  $m$  为按“ $m$ ”法计算时土的水平地基系数随深度增长的比例系数;  $b_0$  为考虑桩周土空间受力的换算宽度。

现场高桩码头桩底高程 -46.7 m, 根据以上方法求得的桩基假想嵌固点在泥面以下 8.5 m, 即高程 -20.5 m 处。

### 3 船舶撞击力的简化

船舶撞击力涉及船舶质量、船舶靠岸速度、波浪作用、风力等各种影响因素。为了避免使用复杂的动力荷载模型, 工程中将动力简化成等效的静力方法对码头进行加载。

我国港口工程荷载规范<sup>[5]</sup> 规定了船舶靠岸时的有效撞击能量的计算方法, 船舶靠岸时的有效撞击能量  $E_0$  按下式计算:

$$E_0 = \frac{\rho}{2} M v_n^2 \quad (4)$$

式中:  $E_0$  为船舶靠岸时的有效撞击能量 (kJ);  $\rho$  为有效动能系数, 取 0.7~0.8;  $M$  为船舶质量 (t);  $v_n$  为船舶法向靠岸速度 (m/s)。

船舶撞击过程是一个受多方面影响的过程, 考虑水体附加质量影响系数  $C_1$  (一般货船取 1.59)、靠岸点偏心影响系数  $C_2$  (一般取 0.5)、靠船建筑物影响系数  $C_3$  (高桩码头属于弹性变形较大的码头形式, 取  $C_3 < 1.0$ )、船舶侧板变形影响系数  $C_4$  (取 1.0)<sup>[6]</sup>, 而荷载公式的有效动能系数  $\rho$  综合考虑了这些因素, 取 0.7~0.8。

船舶靠泊速度对船舶撞击能量有着极重要的影响, 根据具体条件确定, 实际中要考虑船舶靠泊时受风浪的影响程度, 不同吨位的船舶靠泊的速度也有不同的考虑, 这里根据《橡胶护舷选型手册》<sup>[6]</sup> 中有关规定确定具体船舶的法向靠泊速度  $v_n$ 。

因此计算简化的船舶撞击力是首先根据船舶质量 (这里船舶质量的计算考虑了水体附加质量) 计算得到船舶有效撞击能量, 转化为橡胶护舷吸能量  $E_s$ , 进而查手册<sup>[6]</sup> 得到船舶等效静态撞击力。

根据以上方法计算船舶撞击荷载, 实际监测了 3 个船舶撞击的数据。船舶吨位、撞击荷载见表 1。

表 1 船舶撞击荷载

船舶载质量/万 t	法向靠泊速度/(m·s <sup>-1</sup> )	有效撞击能量/kJ	船撞力/MN	撞击位置
3.53	0.20	565.28	1.29	74 <sup>#</sup> 排架
1.68	0.20	268.80	0.61	76 <sup>#</sup> 排架
0.98	0.35	481.87	1.10	74 <sup>#</sup> 排架

### 4 ANSYS 有限元建模

许多学者针对高桩码头的空间结构有限元模型建模方法进行过研究, 致力于寻求一种最能说明高桩码头受力情况的有限元模型。王婷婷提出多种简化方法, 并与实体单元模拟法对比说明纵横梁用 BEAM 梁单元模拟、面板用 shell 壳单元模拟并考虑结构偏心的情况是最贴近实体单元结果

的<sup>[7]</sup>。杨锡鏊研究“新规范”中忽略面板作用的模拟方法，忽略面板设计结果偏大，对工程偏安全<sup>[8]</sup>。李王红将 beam 梁单元建模和 solid 实体单元建模方法对比，提出两种方法的优缺点<sup>[9]</sup>。

本工程主要目的是得到高桩码头具体位置的应变值，为了更清晰地得到整个高桩码头的应变分析结果，从而分析高桩码头的危险点，本文采用的建模方法是全部用 solid45 实体单元模拟高桩码头的纵横梁、桩、桩帽和面板结构。在船舶撞击力作用下，码头橡胶护舷受直接荷载作用，从而横梁受到传递力，再将力传递在纵梁及桩帽和桩上，同时面板约束纵横梁的整体变形，这样高桩码头整体空间作用得到充分发挥。

通过 ANSYS 有限元软件数值模拟分析，得到高桩码头在设计船舶吨位靠泊撞击力作用下的应变云图，根据云图结果判别码头薄弱部位进行重点监测。为得到码头模型的较准确的应变分析结果，采用 solid45 实体单元建模，建好的整个空间模型见图 2。

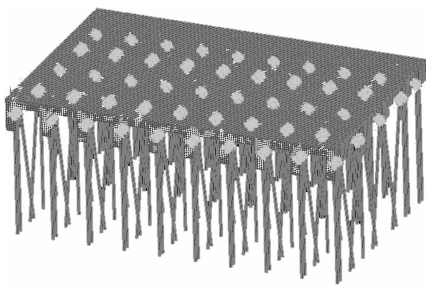


图 2 高桩码头 ANSYS 整体空间模型

高桩码头重点部位局部计算结果应变云图见图 3，云图显示在设计吨位的撞击力作用下，被撞击排架的横梁上下端的应变比较大，是整个撞击过程中码头应变最大值的部位。由图 3 可知，排架作用等效的集中静态撞击力作用下，被撞击排架靠近海侧横梁顶部的拉应变、底部的压应变以及第 1 个桩帽下端的 3 根桩桩顶应变值均较大。按设计吨位 5 万 t 的船舶靠泊撞击作用下，取 74# 排架作为被撞击排架，最大的拉应变值为  $24 \times 10^{-6}$  (横梁顶部)，最大压应变值为  $-76 \times 10^{-6}$  (横梁底部)。

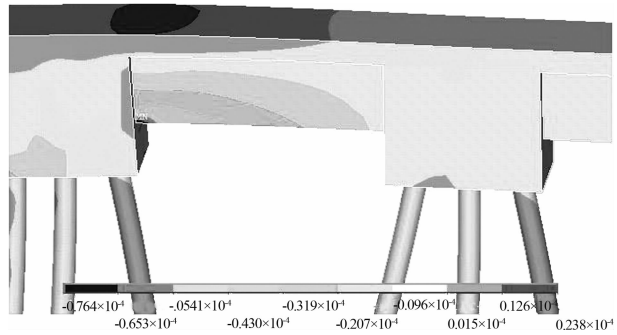


图 3 74# 排架的应变云图

理论上，现场监测应该在每一榀排架的横梁顶部和底部以及第 1、2 个桩帽下的桩顶布置应变片进行测量，但考虑工程经济的问题，只重点监测 3 榀排架 (73# ~ 75# 排架)。因此，现场监测前，根据 ANSYS 分析结果确定现场布测的测点位置，对测点编号见图 4~5，图 4 表示横向排架与纵梁的编号 (数字表示排架，字母代表纵梁轴线)，图 5 标出了每个排架上测点的具体位置，编号 1~10。

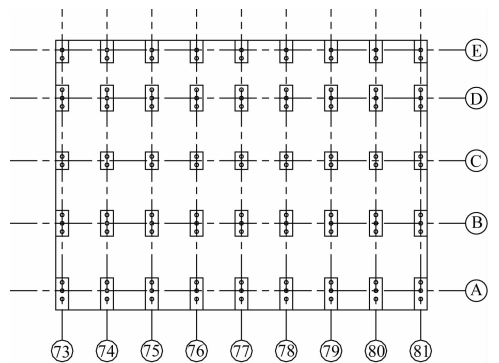


图 4 排架编号

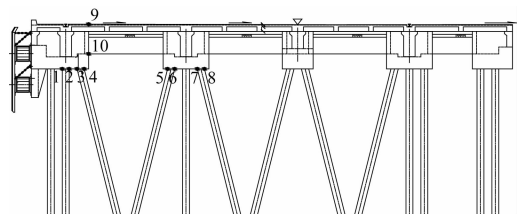


图 5 单个排架上每个测点的具体位置 (编号 1~10)

这样每个测点都可以用字母和数字组合的形式表示，用 ANSYS 软件分别模拟 3 次船舶撞击作用下高桩码头的应变情况见表 2。

表 2 ANSYS 计算的不同船舶撞击作用下的应变

测点 编号	测点位置	应变/ $10^{-6}$		
		1# 船舶	2# 船舶	3# 船舶
73#1	73#排架 A 轴线直桩海侧	-0.50	-0.05	-0.43
73#2	73#排架 A 轴线直桩岸侧	1.19	0.47	1.02
73#3	73#排架 A 轴线斜桩海侧	-6.94	-1.96	-5.92
73#4	73#排架 A 轴线斜桩岸侧	1.46	0.39	1.25
73#5	73#排架 B 轴线海侧斜桩海侧	-2.16	-0.61	-1.84
73#6	73#排架 B 轴线海侧斜桩岸侧	8.82	2.57	7.52
73#7	73#排架 B 轴线岸侧斜桩海侧	-6.96	-2.35	-5.93
73#8	73#排架 B 轴线岸侧斜桩岸侧	1.50	0.53	1.28
73#9	73#排架 A、B 轴线之间横梁顶部	10.01	1.15	8.53
73#10	73#排架 A、B 轴线之间横梁底部	-23.61	-2.28	-20.13
74#1	74#排架 A 轴线直桩海侧	-0.71	-0.09	-0.61
74#2	74#排架 A 轴线直桩岸侧	0.89	0.39	0.76
74#3	74#排架 A 轴线斜桩海侧	-6.35	-1.89	-5.42
74#4	74#排架 A 轴线斜桩岸侧	1.31	0.39	1.12
74#5	74#排架 B 轴线海侧斜桩海侧	-2.11	-0.58	-1.80
74#6	74#排架 B 轴线海侧斜桩岸侧	8.29	2.42	7.06
74#7	74#排架 B 轴线岸侧斜桩海侧	-5.61	-2.11	-4.79
74#8	74#排架 B 轴线岸侧斜桩岸侧	1.15	0.47	0.98
74#9	74#排架 A、B 轴线之间横梁顶部	17.6	1.10	10.57
74#10	74#排架 A、B 轴线之间横梁底部	-44.4	-2.87	-21.64
75#1	75#排架 A 轴线直桩海侧	-0.43	-0.19	-0.37
75#2	75#排架 A 轴线直桩岸侧	0.83	0.26	0.70
75#3	75#排架 A 轴线斜桩海侧	-5.26	-1.93	-4.48
75#4	75#排架 A 轴线斜桩岸侧	1.13	0.42	0.96
75#5	75#排架 B 轴线海侧斜桩海侧	-1.62	-0.59	-1.38
75#6	75#排架 B 轴线海侧斜桩岸侧	6.57	2.39	5.61
75#7	75#排架 B 轴线岸侧斜桩海侧	-5.08	-1.76	-4.33
75#8	75#排架 B 轴线岸侧斜桩岸侧	1.08	0.37	0.92
75#9	75#排架 A、B 轴线之间横梁顶部	6.23	2.83	5.31
75#10	75#排架 A、B 轴线之间横梁底部	-17.41	-8.09	-14.85

注:  $X$  为码头纵向即海流方向,  $Y$  为码头横向即排架方向; 应变值负表示压应变。

由表 2 可以得出以下结论: 1) 在船舶水平撞击力作用下, 高桩码头桩基顶部岸侧受拉, 海侧受压。2) 斜桩的应变值比直桩大得多, 因此, 斜桩在承担水平作用力方面发挥着很大的作用。在高桩码头的设计中, 有斜桩的码头需要在斜桩桩顶部分采取构造措施。3) 被撞击排架的监测结果显示, 被撞击排架产生的水平应变比非被撞击的排架大, 这是理所当然的。但是, ANSYS 的计算结果显示不尽然。这是由于 ANSYS 分析模型只选取了部分码头, 而实际中工作的码头纵向长度很

长。4) 同一排架中, 不同桩帽下桩的应变不同。这与桩帽下桩基的布置方式有关。

## 5 现场监测结果与 ANSYS 分析结果对比

本工程采用应变传感器对现场进行监测, 应变传感器是一种用于监测构件在外力作用下产生的应变大小的元件。传统的应变传感器不足之处在于基座与构件接触面积有限, 构件表面材质不均匀导致应变不均匀, 而且基座与构件表面粘结不防水, 在潮湿环境中或水作用下容易脱落。而在码头监测工程中, 传感器不可避免地要接触水, 而且码头作为一个相对巨大的建筑结构, 纵横梁尺寸较大, 实际应变较小, 得到的数据敏感性很强, 如果只采用传统的应变传感器会产生很大的误差。

为克服这些问题, 本工程特申请了一个实用新型传感器专利, 通过在支座下面焊接一块薄钢片, 并在薄钢片下面焊接一个钢条, 实际监测时将钢条插入预留孔洞并粘结固定, 提高基座的粘结稳定性。

现场监测面临几大问题: 1) 不确定船舶会撞在哪一榀排架上, 因此最终数据结果对比要由相应排架被撞击的 ANSYS 模型分析结果来对比; 2) 船舶的吨位也不确定, 因此不同的船舶撞击力也要有相应的模型计算结果来对比; 3) 船舶撞击后的监测数据也有一定程度的不确定性, 船舶撞击过程比较短, 现场监测数据也只有两个波峰值, 而实际应变取最大最小值的差值作为应变值; 4) 码头上某些特定的位置 (比如 A、B 轴线之间的横梁底部) 实际贴片时无法将应变片恰好贴在应变值最大处, 现场处理也只能尽量使监测结果贴近最大值。

针对以上问题, 每次船舶撞击采用不同的模型, 在码头的不同位置加载不同的载荷, 模拟得到码头模型相应位置的应变值。现场监测得到许多结果, 取其中较典型的一个曲线来说明 (图 6)。

由图 6 可看出, 船舶撞击的动态过程中, 有两个波峰值, 第 1 个波峰值较大, 船舶刚靠岸, 然后码头受撞击后反弹给船舶 1 个类似的撞击作用, 于是又有第 2 个波峰值, 能量耗散后, 波峰值较小。

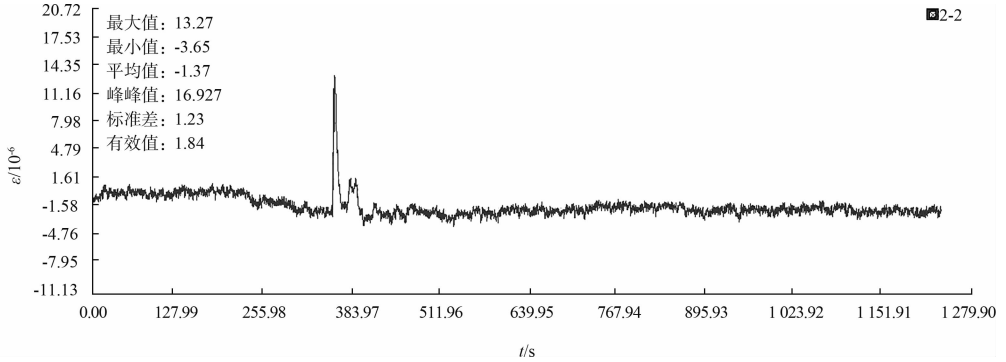


图 6 现场监测结果应变曲线

现场实测中，所贴应变片很难靠近理想位置（即与 ANSYS 分析结果中相对应的位置），因此横梁顶部、底部的应变值大小与 ANSYS 分析结果相差较大。典型测点结果见表 3。

表 3 现场监测结果与计算结果对比

船舶编号	测点编号	应变/10 <sup>-6</sup>	
		测点结果	计算结果
1#	73#6	16.27	8.82
	73#7	-26.82	-6.95
	73#8	16.94	1.50
	74#5	-5.20	-2.11
	74#6	15.09	8.28
	74#8	6.78	1.16
	74#9	8.00	17.60
	74#10	-7.30	-44.40
	75#7	-7.00	-5.08
	75#8	4.07	1.09
2#	74#1	-3.94	-0.09
	74#2	2.50	0.39
	74#3	-7.00	-1.89
	74#4	8.00	0.39
	74#6	15.60	2.41
	74#7	-6.13	-2.11
	74#8	3.00	0.48
	74#10	-6.70	-2.87
	75#5	-4.00	-0.60
	75#7	-3.50	-1.75
75#8	3.00	0.37	
3#	74#2	1.50	0.77
	74#3	-2.50	-5.42
	74#8	3.00	0.99
	74#10	-3.00	-21.64

注：表中测点编号意义参见表 2，应变值为负表示压应变。

根据表 3 可得出以下结论：1) 总体而言，实测结果与计算结果显示的高桩码头在船舶撞击力作用下的应变趋势相同，这说明用 ANSYS 模拟分析高桩码头的应变结果是有意义的。2) 有些测点的实测值和计算值相差较大，这是因为现场测点布设很难完全监测到计算模拟的测点，尤其是表中横梁的测点（1# 船舶 74#9、74#10，3# 船舶 74#10 等，普遍小很多），从这点而言，ANSYS 计算模拟可以弥补现场监测不能达到的目的；另外一方面也说明码头监测水平还有待改进。3) ANSYS 分析结果普遍比实测结果偏小，这是由于 ANSYS 模型中采用的参数较保守。

### 6 结语

1) 用有限元方法对高桩码头进行空间分析结果与实测应变结果趋势相近；ANSYS 软件模拟计算高桩码头应变的空间计算方法是可取的，能弥补现场监测所不能监测到的危险点。

2) 码头整体结构工作的协调性比较好。斜桩在抵抗水平撞击力作用方面可以发挥很大作用；实测结果和计算结果均显示，不同排架中，与被撞击排架相邻的排架的应变值接近被撞击排架，这说明该工程中面板和纵梁的连接作用也发挥得很好。

高桩码头的监测对码头改造工程起到至关重要的作用，可以使改造方案设计更具有针对性，而且可以验证改造方案的正确性、适用性，因此

针对码头监测方面的研究是有很大的意义。接下来的研究可以从以下几点出发:考虑桩土相互作用后,高桩码头有限元模型可以改进,以更加切实地模拟码头实际受力情况;现场监测设备继续改进,以便能适应现场复杂的测试条件,得到更加全面的测试数据。

#### 参考文献:

- [1] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].
- [2] Matlock H. Correlation for design of lateral loaded piles in soft clay [C]. Houston: Proceedings of 2nd offshore Technology Conference, 1970: 577-594.
- [3] Cox W R, Koop F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay [C]. Houston: Seventh Annual

offshore Technology Conference, 1975: 671-690.

- [4] 韩理安. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [5] JTS 144—1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [6] 大连万春护舷科技发展有限公司技术研发中心. 橡胶护舷设计选型手册[R]. 大连: 大连万春护舷科技发展有限公司技术研发中心, 2006.
- [7] 王婷婷, 陈振民, 何文钦. 高桩梁板码头结构设计中的空间有限元分析[J]. 水运工程, 2009(7): 118-123.
- [8] 杨锡鏊, 陈振民. 高桩梁板式码头空间结构计算中忽略面板作用的方法[J]. 水运工程, 2012(9): 93-99.
- [9] 李王红, 何良德. 两种 ANSYS 有限元模型在高桩码头计算中的对比研究[J]. 现代交通技术, 2007(5): 84-86.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 57 页)

#### 4 结语

1) 本研究建立了大型原油码头通过能力仿真模型, 能够详细模拟船舶从到港至离港的主要作业过程, 并能够模拟潮汐、风浪雾以及特殊交通管制因素对码头通过能力的影响, 基于港口服务水平评价指标, 能够得出码头的合理通过能力, 为大型原油码头的建设提供了科学的决策依据。

2) 与传统的经验计算公式相比, 仿真模型可以获取更多的与码头运营相关的数据。比如能够获取船舶在锚地的等待情况, 并对锚地规模进行研究和分析, 为大型原油码头建设的合理论证提供多方面的支撑。

3) 对大型原油码头的作业进行了一定的简化, 特别是陆域原油的运输、存储以及石油炼化工厂的生产过程, 后续可以在以下几个方面进行

进一步的扩展研究: 在仿真模型中, 增加原油在陆域储油罐的存储过程, 对储油罐的合理规模进行分析和研究; 增加石油炼化工厂的生产过程, 对原油进口码头对炼化工厂的生产保障性与可靠性进行分析和研究。

#### 参考文献:

- [1] 王敏功, 黄兵年, 冯学军. 原油码头通过能力规范计算公式的不足与改进思路[J]. 港口科技, 2014(2): 58-60.
- [2] 曾庆宝. 2013 年石油产品市场形势综述[J]. 能源市场, 2014(2): 41-45.
- [3] UNCTAD. Port Development: A Handbook for Planners in Developing Countries[R]. New York: UNCTAD, 1985.
- [4] 吴澎, 商剑平. 沿海港口航道通过能力仿真模型研究[J]. 中国港口建设, 2010(S1): 42-45.

(本文编辑 武亚庆)