

在役高桩码头中低应变检测法的应用

张森¹, 陈灿明², 黄卫兰², 李瑜¹

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 检测桩基完整性常采用低应变检测法, 对于在役高桩码头, 一般需要割桩来设置激振点和安装传感器。以单根直桩为研究对象, 使用 ANSYS 有限元软件, 通过完好桩和切割桩对比分析, 研究割桩导致的桩身应力损伤。计算结果显示, 割桩对桩身位移影响很小, 但会带来应力集中, 桩身最不利截面由桩底移至割桩处, 造成安全隐患。分析了水平力对应力集中及预压应力对水平承载力的影响, 给出应力集中的影响范围, 并提出相关建议。

关键词: 低应变; 割桩; 有限元模型; 应力集中

中图分类号: TV 332.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0081-04

Application of low strain test for high-pile wharf in service

ZHANG Miao¹, CHEN Can-ming², HUANG Wei-lan², LI Yu¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: When detecting the integrity of pile foundation, we usually take the low strain dynamic test. But for the high pile wharf in service, we need to cut pile for setting excitation and sensor. Using the finite element software ANSYS, and taking single straight pile as the research object, we study the pile body stress caused by injury of pile based on the comparison of intact pile and injured pile. Calculation results show that the cutting pile has little impact on the displacement of pile. But it leads to the stress concentration, while the most unfavorable section transforms from pile bottom to the cut areas, causing potential safety hazard. The influence of the stress concentration caused by different horizontal forces and the influence of the preloading stress on the bearing capacity of pile foundation are analyzed. The scope of influence is presented and relevant suggestions are put forward.

Keywords: low strain; cut pile; finite element model; stress concentration

低应变检测法是检测桩身完整性常用的方法^[1], 其理论基础是一维弹性杆纵波理论, 对检测桩基的缩径、夹泥、空洞、断桩等完整性缺陷有一定的可靠性^[2], 在港口工程桩基检测中得到越来越广泛的应用。

低应变法检测桩基时需要在桩顶横截面设置激振点和安装传感器。对于在役高桩码头, 由于桩顶与横梁连接, 没有可供设置激振点与传感器

的平面, 目前一般采取割桩的办法来解决。但割桩会带来应力集中问题, 桩基水平承载能力下降, 本文结合 ANSYS 有限元软件, 选取单根直桩建立模型, 并进行分析探讨。

1 有限元模型建立

1.1 研究对象

取某高桩码头中单根直桩为研究对象, 该桩

收稿日期: 2014-03-23

作者简介: 张森 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事港口工程结构研究工作。

为 $\phi 800$ mm 混凝土管桩，桩基持力层为中粗砂，设计河底高程 -8.50 m，横梁底高程 5.73 m。

传感器安装应与桩顶面垂直，对混凝土管桩，传感器安装位置所在半径与激振点所在半径相互垂直时，测试效果较好^[3]，切割体形状见图 1。

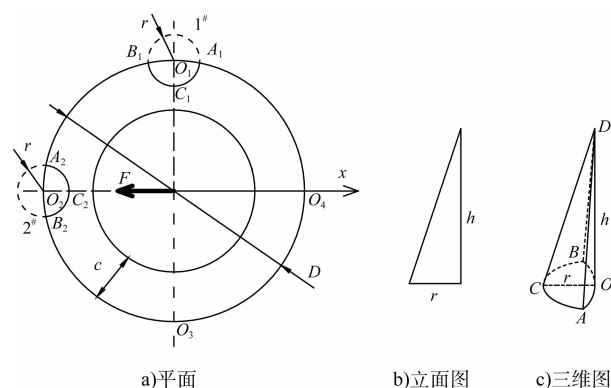


图 1 切割体形状

根据规范要求与现场操作条件（检测时水位、船舶干舷高度、检测人员方便等），并尽量减小对桩的损坏，选取割桩点距离桩顶 1 m 处，割桩半径 $r = 30$ mm， $h = 100$ mm。

1.2 相关参数

1) 材料参数。混凝土强度等级 C80，弹性模量 $E = 3.80 \times 10^{10}$ N/m²，泊松比 $\nu = 0.20$ ，桩径 $D = 800$ mm，壁厚 $c = 110$ mm，密度 $\rho = 2500$ kg/m³。

2) 桩长确定。计算桩长即位于弹性长桩的受弯嵌固点以上横梁底面以下的桩身长度。横梁底高程为 5.73 m，设计河底高程 -8.50 m，则泥面以上桩长为 14.23 m；泥面以下桩长采用《港口工程桩基规范》中的 m 法，经计算，受弯嵌固点距泥面深度可取 $3.50 \sim 4.51$ m，最终取 3.77 m，计算桩长为 18.00 m。

3) 约束设置。由于横梁刚度较大，假定桩顶不能自由转动，在有限元模型中取桩顶位移自由，转动为 0 ；桩基底部为桩在土中的嵌固点处，在有限元模型中取桩底为固定约束。

4) 荷载参数。有限元模型建立在 $1g$ 条件下；水平集中力作用于排架时，排架内各桩基共同承

受该力，为分析简便，取作用于单直桩桩顶水平力为 8 kN，其方向指向 $2^\#$ 切割处，垂直于 $1^\#$ 切割处（图 1）。

1.3 网格划分

根据完好桩和切割桩 2 种状态，选用四面体单元 (SOLID187)，分别建立实体模型，并划分网格，建立有限元模型。其中四面体单元的最大尺寸设置为 80 mm，在 $1^\#$ 切割处、 $2^\#$ 切割处、桩顶、桩底这些较为关心的部位，采取加密网格的方式（最大尺寸设置为 30 mm），以确保有限元模型计算的精度（图 2）。

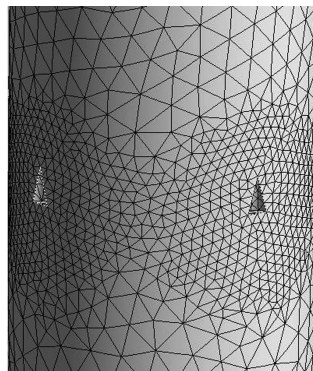


图 2 切割处加密网格

2 计算结果与分析

2.1 桩身位移

在完好桩和切割桩两个有限元模型上选取过 O_4 点轴向直线，起点为桩底，终点为桩顶。该路径通过 $2^\#$ 切割处顶尖角 D_2 ，提取路径上各点的桩身位移数据，对比发现，完好桩和切割桩两种状态下，结果无变化的计算点占大多数，桩身位移变化最大处位于桩顶，其差值也仅为 0.01 mm，变化最大为 0.14% ，说明割桩引起的局部破损对桩身位移影响非常小。

2.2 桩身应力

桩身应力选取轴向正应力 σ_z 为指标，以拉为正，以压为负。分别在完好桩和切割桩有限元模型上沿轴向取 2 个剖面，分别为垂直力剖面（沿 O_1O_3 剖面）和平行力剖面（沿 O_2O_4 剖面），提取剖面上切割侧和完好侧的最大应力值，绘出桩身应力，见图 3。

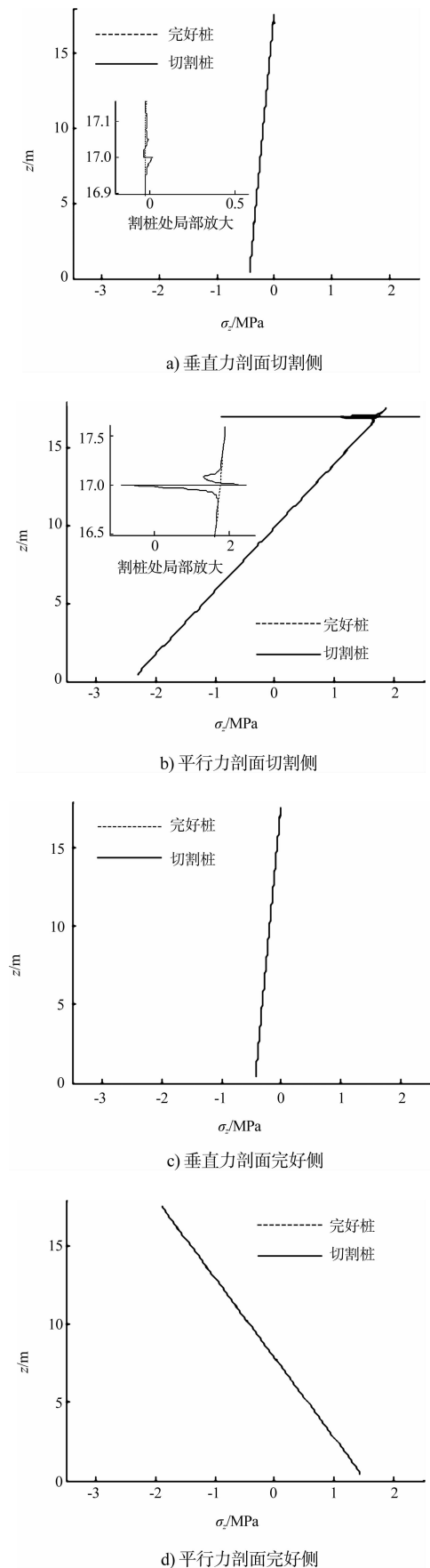


图 3 桩身应力轴向对比结果

在 4 条轴向路径中,完好桩和切割桩的轴向应力 σ_z 折线大部分区域高度重合,在割桩处 ($z = 17 \sim 17.1$ m),垂直力剖面切割侧有小的差异,而平行力剖面切割侧有很大差别,出现了明显的应力集中现象(图 4)。表 1 为差异较大处的数据。

由表 1 数据分析知,1[#]切割平面处 ($z = 17.0$ m) 切割前均为压应力,其中最大压应力 -0.02 MPa 在 O_1 点,切割后 O_1 点变为拉应力,数值变化 0.04 MPa; 2[#]切割平面处 ($z = 17.0$ m) 切割前均为拉应力,其中最大拉应力 1.73 MPa 在 O_2 点,切割后 O_2 点变为切割平面的最大压应力 -0.90 MPa,数值变化 2.63 MPa,切割平面的最大拉应力为 2.43 MPa,移至 C_2 点,数值变化 40.46% 。随着 z 值远离切割处,轴向应力 σ_z 数值变化越来越小,在 $z = 16.8$ m 和 $z = 17.3$ m 处,变化已小于 1.00% 。

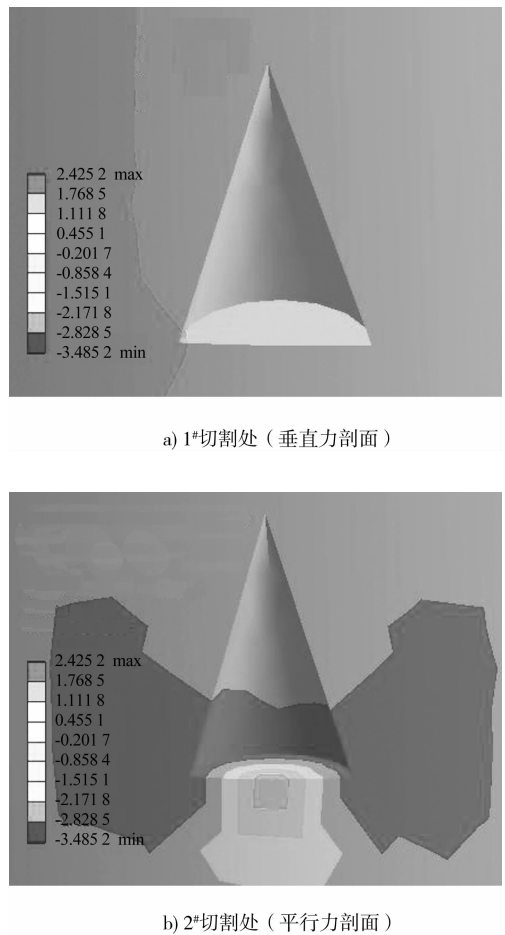


图 4 切割处轴向应力云图 (单位: MPa)

表1 切割对桩身应力影响

位置	z/m	应力/MPa			$\frac{ \sigma_2 - \sigma_1 }{ \sigma_1 } \times 100\%$
		σ_1	σ_2	$\sigma_2 - \sigma_1$	
垂直力剖面切割侧	16.8	-0.03	-0.03	0.00	0.00
	16.9	-0.03	-0.03	0.00	0.00
	17.0	-0.02	0.02	0.04	200.00
	17.1	-0.02	-0.02	0.00	0.00
	17.2	-0.02	-0.02	0.00	0.00
	17.3	-0.02	-0.02	0.00	0.00
平行力剖面切割侧	16.8	1.68	1.67	-0.01	0.60
	16.9	1.71	1.62	-0.09	5.26
	17.0	1.73	-0.90	-2.63	152.02
	17.1	1.76	2.43	0.70	40.46
	17.2	1.78	1.36	-0.40	22.73
	17.3	1.81	1.76	-0.02	1.12
	17.3	1.81	1.80	-0.01	0.55

注： σ_1 为完好桩轴向应力， σ_2 为切割桩轴向应力。

综上所述，割桩对整根桩桩身应力整体影响非常小，但在割桩破损处桩身应力影响较大，出现应力集中现象；在割桩平面处的变化比割桩顶角处的变化更为剧烈；越远离割桩处，桩身应力变化越小；割桩导致的破损对桩身应力的轴向影响半径约为3倍切割尺寸，仿照表1，同样可得环向影响半径约为2倍切割尺寸。

2.3 最大应力

根据ANSYS计算结果，完好桩的最大压应力 $\sigma_z = -3.61$ MPa，位于桩底受压侧，最大拉应力 $\sigma_z = 2.15$ MPa，位于桩底受拉侧；切割桩的最大压应力 $\sigma_z = -3.61$ MPa，位于桩底受压侧，最大拉应力 $\sigma_z = 2.43$ MPa，位于2#切割处C₂点（图1）。

C80混凝土的轴心抗拉强度设计值为2.22 MPa，轴心抗压强度设计值为-35.9 MPa^[4]。对比可见，全桩最大压应力均位于桩底受压侧，数值远小于设计值，均处于安全状态，而全桩最大拉应力位置发生改变，由桩底上移至2#切割平面处，且完好桩处于安全状态，切割桩最大拉应力大于设计值，桩身可能出现破坏，说明桩基水平承载能力下降。

2.4 水平力对应力集中的影响

为了研究桩顶施加水平力的大小对割桩处应力集中的影响，选取水平力1、3、5、7、9、

10、11 kN分别计算，并对比完好桩和切割桩在切割处的最大拉应力变化（其中完好桩选取O₁、O₂点处应力，切割桩选取切割平面上最大拉应力）。

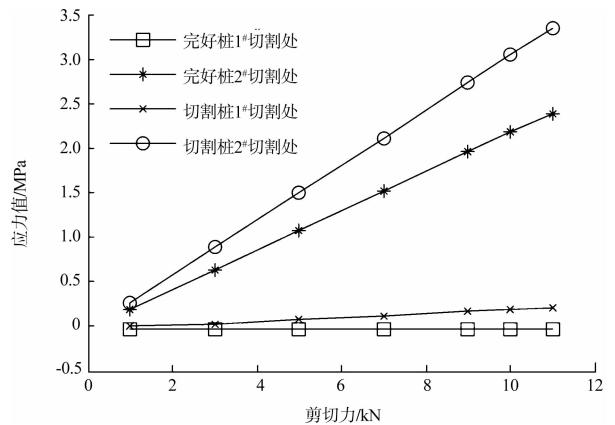


图5 水平力对应力集中的影响

由图5可见，在桩顶施加不同的水平力，1#和2#割桩处均会出现应力集中现象。且桩顶施加水平力越大，应力的变化值也越大，应力集中现象越明显。

2.5 预应力对水平承载力的影响

对于无预应力情况，结合图5及C80混凝土的轴心抗拉、压强度设计值，经试算，可得完好桩的水平承载力为8.21 kN，切割桩的水平承载力为7.33 kN，割桩引起桩基水平承载力的降低10.72%。

对于有预应力情况，参考A型PHC管桩，在桩顶施加4 MPa的预压应力。经计算得，完好桩最大拉、压应力均位于桩底，切割桩最大压应力位于桩底不变，但最大拉应力位于1#切割处A₁点，且切割处的应力集中现象更明显。进一步试算得，完整桩水平承载力为25.27 kN，切割桩水平承载力为11.04 kN，降低56.31%。

对比发现，无论是否施加预应力，割桩处均会出现应力集中现象；无预应力时，最大拉应力位置在2#切割处，有预压应力时，最大拉应力位置在1#切割处；施加预应力能够大幅提高完好桩承载力，但割桩后预应力桩承载力下降也更为显著。

(下转第96页)