

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.06.008

李瑜, 陈灿明, 黄卫兰, 等. 桩基倾斜度对低应变反射波法割桩损伤的影响[J]. 水利水运工程学报, 2015(6): 54-59. (LI Yu, CHEN Can-ming, HUANG Wei-lan, et al. Effects of pile inclination on pile cutting damage by low strain reflected wave method [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(6): 54-59.)

桩基倾斜度对低应变反射波法割桩损伤的影响

李瑜¹, 陈灿明², 黄卫兰², 王曦鹏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 210029)

摘要: 低应变反射波法用于已建高桩码头的桩身结构完整性检测时,需要割桩设置传感器和激振两个平台,因而对桩身产生一定损伤。运用大型通用有限元软件 ANSYS 对比了不同倾斜度桩基在完好状态和检测状态下桩身应力的变化,分析了有割桩损伤侧桩身应力集中程度。结果表明:割桩损伤会导致割桩处出现应力集中,其影响范围主要在割桩处 1.0 m 之内,桩身受力最不利截面从桩基与横梁联接处移至割桩平台处。割桩处的应力集中程度与桩基的倾斜度相关:正斜桩应力集中程度最高,直桩次之,反斜桩应力集中程度最低。因此,对于以船舶撞击力为控制荷载的高桩码头,在低应变检测桩数目的前提下可增大抽检桩中反斜桩的比例。低应变检测桩基后应对割桩处 1.0 m 范围内进行修补,以确保桩基水平承载性能。

关键词: 高桩码头; 低应变反射波法; 割桩损伤; 应力集中; 倾斜度; ANSYS 软件

中图分类号: U656.1⁺13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)06-0054-06

我国已建成 1 400 多个港口,生产性码头泊位 3.4 万余个。随着码头的大量建设及长时间运行,每年都有很多码头需要进行安全性检测^[1]。对于采用 PHC 管桩和钢筋混凝土预应力方桩的高桩码头,桩身完整性检测是不可缺少的项目,可采用低应变反射波法检测桩身结构完整性^[2]。低应变反射波法用于已建高桩码头的桩基检测时,需在桩基侧面切割两个平台放置传感器和激振。割桩后桩身局部面积减少,产生应力集中效应,影响桩基承载力^[3-4]。根据相关检测规定,低应变反射波法检测桩基时检测数目不少于总桩数的 20%^[5]。由于割桩数量多,损伤位置基本一致,桩基检测一定程度上会降低码头整体水平承载性能。本文以长江下游某 5 万 t 级高桩码头的桩基为例,建立单桩有限元模型,计算分析桩基倾斜度对割桩损伤的影响。

1 计算模型与参数

依托长江下游某 5 万 t 级码头,建立单桩模型,研究割桩损伤情况下不同倾斜度桩基的水平承载性能。该码头为高桩梁板式结构,码头平台宽 45 m,前平台 30 m,后平台 15 m,单个结构段长 68 m。前平台基础为直径 800 mm 的 PHC 管桩,每榀排架下设 4 根直桩和 5 根斜度 5:1 的斜桩。桩基外径 0.8 m,壁厚为 110 mm。桩顶高程 $H_1 = 2.53$ m,设计泥面高程 $H_2 = -13.7$ m,桩底高程 $H_3 = -43.37$ m。桩身混凝土强度等级为 C80。

以码头前平台的直桩、叉桩为研究对象。根据 m 法^[6]确定桩基假想嵌固点位置,计算桩基在水平荷载作用下的承载性能^[7-8]。码头区土层主要为粉砂及粉土,取 m 为 10,桩的相对刚度系数为 2.03,计算得到桩基假想嵌固点距泥面线 3.65~4.47 m,最终直桩和斜桩的计算桩长均取 20 m。

根据现场检测情况,切割体一般为半圆锥体,选择圆锥高度 $h = 100$ mm,底面半径 $r = 30$ mm,激振点与传感器平台在同一平面内且相互垂直。切割平面距离桩顶 1.0 m。计算中的桩体材料处于弹性阶段,模型中

收稿日期: 2015-02-26

基金项目: 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y415003)

作者简介: 李瑜(1992—),女,江西上饶人,硕士研究生,主要从事港口工程结构研究工作。E-mail: 719433360@qq.com

的桩体弹性模量 $E = 3.8 \times 10^{10}$ Pa, 泊松比 $\nu = 0.2$, 材料密度 $\rho = 2\,500$ kg/m³。

由于码头横梁具有较大刚度, 根据排架受力特点, 模型中允许桩顶有水平位移, 但不能自由转动; 桩底在假想嵌固点处取固定约束。建立码头整体空间坐标系: z 方向为竖向, 向上为正, xy 平面为水平面, x 轴平行码头前沿线, 以上游方向为正方向, y 轴正方向由码头前沿指向码头陆域。同时还作如下规定: 桩身轴线与 y 轴正向夹角钝角时为正斜桩, 直角为直桩, 锐角则为反斜桩 (见图 1)。

网格划分采用 solid 四面体实体单元^[9-10], 自由网格划分。划分后, 整体网格长度不超过 0.1 m, 割桩处优化网格划分, 网格长度不超过 0.01 m, 割桩缺口处至少包含 100 个网格单元。

该码头以船舶水平撞击力为主要设计荷载。本次计算主要研究割桩后桩基水平承载性能变化, 由于未考虑桩身预压应力, 桩基尤其是正斜桩能承担的最大陆域位移偏小很多。因此, 为满足桩基在未检测状态下桩体处于弹性阶段的假定, 通过前期试算取直桩和叉桩桩顶向码头陆域方向水平位移 2 mm 作为本次分析的控制条件。经初步计算分析, 模型计算时取最不利情况, 割桩缺口选择在 $a-a'$ 侧及 $d-d'$ 侧。单桩模型及割桩损伤形状见图 2。

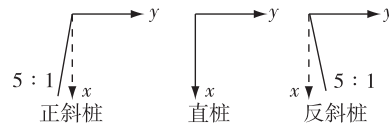


图 1 单桩示意
Fig. 1 A single pile

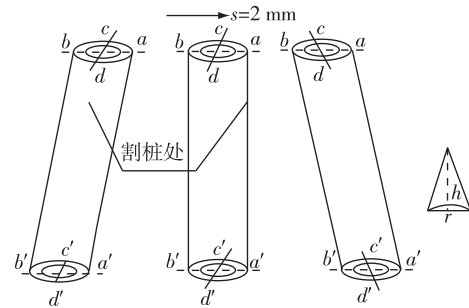


图 2 单桩模型及割桩损伤形状示意
Fig. 2 A single pile model and shape of pile cutting damage

2 计算结果分析

为表达方便, 将图 2 中 $a-a'$ 侧、 $b-b'$ 侧分别设定为沿位移约束方向的前、后侧, $c-c'$ 侧、 $d-d'$ 侧分别设定为垂直位移约束方向左、右侧。计算完好及检测两种状态下不同倾斜度的桩基在割桩侧及未割桩侧从桩底到桩顶的最大应力 σ , σ 以拉为正, 压为负。

2.1 未割桩侧桩身应力分布

不同倾斜度桩基在桩顶向码头陆域方向位移 2 mm 时, 在完好状态和检测状态下桩身 $b-b'$ 侧、 $c-c'$ 侧的桩身应力计算结果见表 1。

表 1 未割桩侧桩身应力
Tab. 1 Pile stresses on the uncut sides

桩型	应力/MPa											
	$c-c'$ 侧, 沿桩轴线距桩底距离/m						$b-b'$ 侧, 沿桩轴线距桩底距离/m					
	0	5	10	15	19	20	0	5	10	15	19	20
检测直桩	0	0	0	0	0	0	0.520	0.227	0	-0.227	-0.410	-0.520
完好直桩	0	0	0	0	0	0	0.520	0.227	0	-0.227	-0.409	-0.520
检测正斜桩	0.712	0.712	0.712	0.712	0.712	0.712	1.132	0.918	0.715	0.512	0.348	0.308
完好正斜桩	0.712	0.712	0.712	0.712	0.712	0.712	1.132	0.918	0.715	0.512	0.349	0.308
检测反斜桩	-0.712	-0.712	-0.712	-0.712	-0.712	-0.712	-0.323	-0.521	-0.720	-0.924	-1.084	-1.129
完好反斜桩	-0.712	-0.712	-0.712	-0.712	-0.712	-0.712	-0.323	-0.521	-0.720	-0.924	-1.085	-1.129

由表 1 可知, 不同倾斜度桩基在未割桩侧桩身应力分布高度吻合, 说明割桩损伤并不会对未割桩侧桩身应力产生明显影响。

2.2 割桩侧桩身应力分布

不同倾斜度桩基在桩顶位移 2 mm 时, $a-a'$ 、 $d-d'$ 两割桩侧桩身应力计算结果列于表 2。计算结果表明, 割桩损伤对桩身应力的影响主要集中在割桩损伤处一定范围: 在割桩处附近 1.0 m 范围内, 桩身应力出现不重合, 在割桩平面处, 不重合现象最严重; 即低应变检测的割桩损伤对于桩基的影响是局部的, 影响长度约 1.0 m。1.0 m 范围外切割桩和完好桩的应力高度重合。

表 2 割桩侧桩身应力

Tab. 2 Pile stresses on the cut sides

桩型	应力/MPa											
	$a-a'$ 侧, 沿桩轴线距桩底距离/m						$d-d'$ 侧, 沿桩轴线距桩底距离/m					
	0	17	18.5	19	19.5	20	0	17	18.5	19	19.5	20
检测直桩	-0.520	0.318	0.387	1.240	0.429	0.520	0	0	1e-5	1.11e-4	1e-5	0
完好直桩	-0.520	0.318	0.386	0.409	0.428	0.520	0	0	0	0	0	0
检测正斜桩	0.260	1.003	1.061	3.830	1.111	1.260	0.712	0.712	0.713	1.477	0.713	0.712
完好正斜桩	0.260	1.003	1.060	1.072	1.110	1.260	0.712	0.712	0.712	0.712	0.712	0.712
检测反斜桩	-1.223	-0.435	-0.375	0.049	-0.327	-0.313	-0.712	-0.712	-0.711	0.520	-0.711	-0.712
完好反斜桩	-1.223	-0.435	-0.370	-0.356	-0.330	-0.313	-0.712	-0.712	-0.712	-0.716	-0.712	-0.712

2.3 割桩处桩身应力状态

为进一步了解倾斜度对桩基割桩损伤的影响, 对直桩、正斜桩和反斜桩在割桩前后桩顶位移 2 mm 时割桩损伤处的应力状态进行了分析比较。图 3 为不同倾斜度桩在完好及检测两种状态下 $a-a'$ 侧、 $d-d'$ 侧割桩处应力分布。表 3 为不同倾斜度桩 $a-a'$ 侧、 $d-d'$ 割桩处桩身应力计算结果。计算结果显示: ①割桩处 1.0 m 范围内桩身应力逐渐开始分离, 5 倍割桩损伤长度范围内, 检测桩与完好桩应力分离逐渐增大, 并在割桩处达到最大。②桩身 $a-a'$ 侧正斜桩应力分离程度最严重, 最大变幅 257.27%; 直桩分离程度次之, 最大变幅 203.18%; 反斜桩应力分离程度相对较小, 最大变幅 113.76%。③桩身 $d-d'$ 侧反斜桩应力分离程度最严重, 最大变幅 172.63%; 正斜桩分离程度相对较小, 最大变幅 107.44%; 直桩 $d-d'$ 侧整体应力均很小。④不同倾斜度的桩基均在距桩底 19 m 的切割平台处应力分离达到最大。⑤不同倾斜度的桩身应力分离有一定区别: 正斜桩 $a-a'$ 侧桩身应力分离比 $d-d'$ 侧桩身应力分离要严重, 而反斜桩 $d-d'$ 侧比 $a-a'$ 侧的桩身应力分离要严重。

表 3 $a-a'$ 及 $d-d'$ 侧割桩处桩身应力变化

Tab. 3 Pile stresses on $a-a'$ side and $d-d'$ side

距桩底 距离/m		割桩前/MPa			割桩后/MPa			变幅/%		
		直桩	正斜桩	反斜桩	直桩	正斜桩	反斜桩	直桩	正斜桩	反斜桩
18.8	$a-a'$ 侧	0.400	1.066	-0.367	0.394	1.060	-0.360	1.50	0.56	1.91
	$d-d'$ 侧	0	0.710	-0.713	-1.98e-4	0.703	-0.700	/	0.99	1.50
18.9	$a-a'$ 侧	0.404	1.070	-0.361	0.373	1.007	-0.335	7.67	5.88	7.20
	$d-d'$ 侧	0	0.711	-0.714	-1.92e-4	0.652	-0.666	/	8.30	6.72
19.0	$a-a'$ 侧	0.409	1.072	-0.356	1.240	3.830	0.049	203.18	257.27	113.76
	$d-d'$ 侧	0	0.712	-0.716	1.11e-4	1.477	0.520	/	107.44	172.63
19.1	$a-a'$ 侧	0.413	1.705	-0.351	0.279	0.798	-0.313	32.44	53.20	10.83
	$d-d'$ 侧	0	0.712	-0.717	-1.71e-4	0.596	-0.585	/	16.29	18.41
19.2	$a-a'$ 侧	0.417	1.079	-0.345	0.406	1.052	-0.337	2.63	2.50	2.32
	$d-d'$ 侧	0	0.713	-0.718	-2.02e-4	0.689	-0.693	/	3.37	3.48
19.3	$a-a'$ 侧	0.421	1.082	-0.339	0.419	1.078	-0.340	0.47	0.37	0.29
	$d-d'$ 侧	0	0.713	-0.719	-2.07e-4	0.710	-0.712	/	0.42	0.97

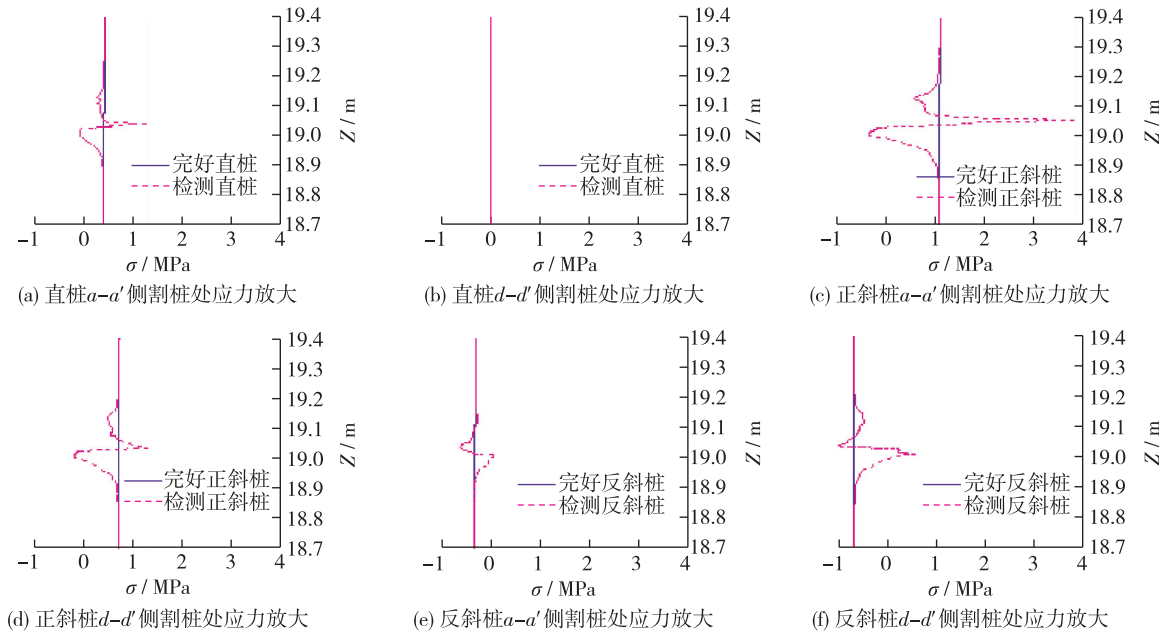


图3 割桩损伤处附近桩身应力

Fig. 3 Pile stresses near the pile cutting damage

2.4 应力集中程度分析

应力集中是指当构件的截面、几何形状发生变化后,局部应力远大于名义应力的现象,一般用理论应力集中系数 K 来表征应力集中对固体局部区域的影响程度,其值等于应力集中处的最大局部应力 σ_{max} 与基准应力 σ_n 的比值^[11-12]。本模型中以检测桩中最大应力值 σ_{max} 对应位置上完好桩的桩身应力作为基准应力 σ_n 。

不同倾斜度桩基在 $a-a'$ 侧, $d-d'$ 侧割桩缺口处的应力集中系数计算结果列于表4。由表4可知:正斜桩 $a-a'$ 侧割桩处应力集中系数最大,为 3.57;直桩 $a-a'$ 侧应力集中系数为 3.03;反斜桩 $a-a'$ 侧和 $d-d'$ 侧应力集中系数相对较小,分别为 1.14 和 1.73。因此,正斜桩割桩处应力集中程度最高,反斜桩应力集中最小。

表4 割桩侧应力集中系数

Tab. 4 Stress concentration factors on the cut side

桩	$a-a'$ 侧			$d-d'$ 侧		
	σ_n /MPa	σ_{max} /MPa	K	σ_n /MPa	σ_{max} /MPa	K
直桩	0.409	1.240	3.03	0	1.11e-4	/
正斜桩	1.072	3.830	3.57	0.712	1.477	2.07
反斜桩	-0.356	0.049	1.14	-0.716	0.520	1.73

2.5 桩身承载性能分析

割桩前后桩身最大拉应力位置及大小变化见表5。根据结果分析,不同倾斜度的桩基在割桩损伤前后承担 2 mm 水平位移时,桩体最大拉应力有明显提高,提高幅度最大为 2.573 倍,割桩处的应力集中使桩基受力最不利截面从桩顶与横梁联接处移到割桩平台处。桩顶与横梁联接处一般设有桩芯混凝土,抗弯能力有所提高。割桩后,最不利截面下移至未设置桩芯混凝土的割桩损伤处,相比之下,抗弯能力略有下降。因此割桩损伤对桩身应力的增加以及最不利截面下移会严重影响桩身承载性能。

表 5 割桩前后桩身最大拉应力变化

Tab. 5 Change in maximum tensile stress after cutting pile

桩	完好桩		检测桩	
	最大拉应力/MPa	位置	最大拉应力/MPa	位置
直桩	0.53	桩顶与横梁联接处	1.24	a-a'割桩平面处
正斜桩	1.24	桩顶与横梁联接处	3.83	a-a'割桩平面处
反斜桩	/	/	0.52	d-d'割桩平面处

本次计算分析由于未考虑 PHC 桩的预应力,因此对桩顶施加的水平位移值相对偏小^[13]。当码头承受设计船舶撞击力,桩顶出现较大位移时,检测的割桩损伤对桩基承载能力影响可能会更大。

3 结 语

基于大型通用有限元软件 ANSYS,计算分析了已建高桩码头不同倾斜度桩基低应变检测中割桩对桩基受力性能的影响,得到以下主要结论:

(1) 割桩损伤会引起桩身产生应力集中效应,其影响范围主要在割桩处 1.0 m 内,在割桩平台处完好桩与检测桩桩身应力分离达到最大。

(2) 桩基的倾斜度对割桩引起的应力集中效应影响较大:正斜桩应力集中程度最高,直桩次之,反斜桩应力集中程度相对较小。

(3) 割桩会引起桩基最不利截面位置发生相应改变:直桩和前叉桩在割桩后最不利截面移至右侧割桩平面处,后叉桩中移至前侧割桩平面处。

根据上述分析结果,建议对以船舶撞击力为控制荷载的高桩码头,为减小低应变反射波法的割桩损伤对桩基水平承载性能的影响,抽检时可优先选取反斜桩作为检测对象;割桩损伤会导致桩身水平承载性能下降,因此码头桩基在运用低应变反射波法检测后应及时修补,修补的有效长度应不小于 1.0 m,以确保桩基水平承载性能。

参 考 文 献:

- [1] JTJ 302—2006 港口水工建筑物检测与评估技术规范[S]. (JTJ 302—2006 Technical specification for detection and assessment of harbor and marine structures[S]. (in Chinese))
- [2] JTJ 249—2001 港口工程桩基动力检测规程[S]. (JTJ 249—2001 Specification for dynamic testing of piles in port engineering [S]. (in Chinese))
- [3] 陈灿明, 黄卫兰, 苏扬, 等. 加固改造码头检测和评估方法与有关问题探讨[C]// 第八届港口工程技术交流大会暨第九届工程排水与加固技术研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 444-452. (CHEN Can-ming, HUANG Wei-lan, SU Yang, et al. On detection and assessment of strengthened wharf[C]// The Eighth Harbour Engineering Technical Exchange Conference and the Ninth Symposium of Drainage and Reinforcement Technology. Beijing: China Water & Power Press, 2014: 444-452. (in Chinese))
- [4] 张淼, 陈灿明, 黄卫兰, 等. 在役高桩码头中低应变检测法的应用[J]. 水运工程, 2014(10): 81-84. (ZHANG Miao, CHEN Can-ming, HUANG Wei-lan, et al. Application of low strain test for high-pile wharf in service[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(10): 81-84. (in Chinese))
- [5] 梁卓仁. 港口码头结构安全性检测与评估指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (LIANG Zhuo-ren. Guidelines for safety detection and assessment of quay and pier constructions[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [6] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S]. (JTS 167-4—2012 Specification for pile foundation in harbour engineering[S]. (in Chinese))
- [7] 刘俊生. 基于水平和倾斜荷载的桩基 m 法研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. (LIU Jun-sheng. Research on method of pile

- foundation based on horizontal and inclined loads [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese))
- [8] 陈林. 桩基水平荷载计算理论研究现状述评[J]. 江苏建筑, 2013(1): 76-79. (CHEN Lin. Research review for present situation of horizontal loading calculation theory about pile foundation [J]. Jiangsu Construction, 2013(1): 76-79. (in Chinese))
- [9] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (WANG Xin-min. ANSYS numerical analysis of engineering structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))
- [10] 吕琳. ANSYS 有限元结构分析及实例解析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014. (LV Lin. Analysis and examples of ANSYS finite element structural analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014. (in Chinese))
- [11] 董志航, 廖志忠. 理论应力集中系数的有限元求法[J]. 航空兵器, 2005(3): 15-18. (DONG Zhi-hang, LIAO Zhi-zhong. Theoretical stress concentration factor with FEA[J]. Aero Weaponry, 2005(3): 15-18. (in Chinese))
- [12] 冯占闯, 张翼, 苗会, 等. 理论应力集中系数的有限元计算方法研究[J]. 河北农机, 2014(10): 44-46. (FENG Zhan-chuang, ZHANG Yi, MIAO Hui, et al. Research on the theoretical stress concentration factor by the calculation method of the finite element[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2014(10): 44-46. (in Chinese))
- [13] 梁发云, 李彦初, 袁贵兴, 等. PHC 管桩水平承载特性现场试验研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(2): 133-137. (LIANG Fa-yun, LI Yan-chu, YUAN Gui-xing, et al. Field test for the behavior of PHC pipe piles under lateral loads[J]. Structural Engineers, 2014, 30(2): 133-137. (in Chinese))

Effects of pile inclination on pile cutting damage by low strain reflected wave method

LI Yu¹, CHEN Can-ming², HUANG Wei-lan², WANG Xi-peng¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: When applying a low strain reflected wave method to the high-pile wharf in service life, two platforms are cut in the pile in order to set up the sensor and excitation, thus a certain damage to the pile can be created. Based on a finite element software ANSYS, this paper compares the stress change of piles with different inclination when piles are in good conditions and detecting conditions. It also makes analyses of the degree of stress concentration in the cut side. Analysis results show that the pile cutting damage can lead to the stress concentration at the cutoff, and the impact range of cutting is mainly close to the cutting of 1.0 m. The most disadvantaged section of the pile moves from the connection of the pile with the beam at the top of the pile to the cut platform. The stress concentration is related to the pile inclination. The highest stress concentration occurs in the battered pile, then the vertical pile, and finally the backslash pile. Therefore in the case of the high-pile wharf where the impact force given by ships is taken as a control load, the proportion of backslash piles to be detected can be increased under the conditions of the low strain detection. The range of 1.0 m to the cutting damage should be repaired in order to ensure the horizontal bearing capacity of the piles foundation. The research results can be taken as a reference for detection of the piles in high-pile wharfs.

Key words: high-pile wharf; low strain reflected wave method; cutting pile damage; stress concentration; inclination; ANSYS software