

文章编号:1671-6833(2010)06-0078-05

内河单柱式航标防撞有限元动力分析

王 玉,周星德,蒋 扬,刘谦敏,刘广波,石星星

(河海大学 力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘 要:利用 ABAQUS 非线性有限元程序,对船舶撞击航标桩的土体结构进行有限元动力分析,分别对无防撞设施和防撞设施分别为钢飘护舷和钢管防护架的航标桩受到撞击后的动力响应进行分析。通过应力、位移及加速度响应时程曲线对3种情况进行对比分析与优化选择。结果表明,采用钢飘护舷具有更好的防护作用。同时也提出了设计及使用的问题和建议,为今后推广和使用具有一定的指导意义。

关键词:航标桩;撞击;防护装置;有限单元法;动力分析

中图分类号:U443.86

文献标识码:A

0 引言

随着我国国民经济的不断增长,水运流量不断增大,内河航道等级不断提高,船舶大型化趋势越来越强;同时,受气候环境条件等各种因素的影响,船舶驾驶人员误操作时有发生,经常撞击航标,导致标体、桩基受损,航标灯频遭破坏,同时碰撞船舶自身损失也较严重^[1-3]。有关船舶撞击的研究,主要涉及两个方面:其一,船舶与桥墩的撞击;其二,船舶与靠船桩的撞击。

目前船舶碰撞问题的研究方法主要有试验研究法^[4]、简化解析法、经验公式法以及数值模拟方法等。试验研究是一种昂贵的破坏性试验,但也可获得准确可靠的结果。简化解析法主要有经典的 Minorsky 理论^[5]、Woisin 碰撞理论^[6]等。现有规范中的船舶桥碰撞计算公式,主要有我国现行铁路规范公式^[7]、公路规范公式^[8]、美国指导规范(AASHTO)公式^[9]和欧洲统一规范公式^[10]等。这类半经验公式属于从弹性系统能量(或动量)守恒出发的准静态简化分析,既没有应力波的传播,又没有计及材料的应变率效应等冲击动力学问题的特征,也不可能反映碰撞区局部的非线性现象。尤其当桥梁采用防撞装置时,无法对防护设施的作用进行有效的评估。随着计算机技术和碰撞有限元计算理论的日益成熟,可以较为精确地

模拟船舶和桥梁复杂结构以及破坏损伤等信息,从而能够得到更精确的结果^[11-12]。

该研究建立在洪泽湖南线航道的航标现场防撞试验的基础上,采用 ABAQUS 有限元软件对航标桩进行建模与分析。

1 有限元动力分析

1.1 有限元动力分析方法

目前的动力分析一般多采用等效线性化模型。工程中常用的是哈定-德涅维契(Hardin B. C - Dmnevich V. P)模型。该模型用等效剪切模量 G_{eq} 和等效阻力比来反映土体动应力-动应变关系的非线性与滞后性的基本特性。

$$G_{eq} = G_{max} / (1 + \gamma / \gamma_r) \quad (1)$$

式中: γ 为动剪应变; γ_r 为参考剪应变, $\gamma_r = \tau_{max} / G_{max}$, 由动力剪切试验确定; τ_{max} 为抗剪强度; G_{max} 为最大剪切模量, 10^5 Pa。

对于土体,由下式确定:

$$\tau_{max} = [1 + (K_0) \sigma'_2 \sin \phi / 2 + C \cos \phi]^2 + [(1 - K_0) \sigma'_2 / 2]^2 \quad (2)$$

$$G_{max} = \frac{326(2.97 - e)^2}{1 + e} (OCR)^\alpha (\sigma'_m)^{0.5} \quad (3)$$

式中: K_0 为静止侧压力系数, $K_0 = 1 - \sin \phi$; C 为凝聚力; ϕ 为摩擦角; e 为土的孔隙比; OCR 为超固结比(本处假设土为正常固结,取为1), α 为与塑

收稿日期:2010-07-15;修订日期:2010-09-03

作者简介:王玉(1985-),女,山东济宁人,硕士研究生,从事结构抗震与控制研究,E-mail: wangyu_1029@163.com.

通讯联系人:周星德(1964-),男,安徽合肥人,河海大学教授,博导。主要从事结构抗震及可靠性方面的研究。E-mail: xingdezhou@hhu.edu.cn.

性指数有关的参数; $\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$ 为平均有效正应力, 10^5 Pa.

1.2 计算模型

选取的航标桩由 6#裸桩、含钢飘护舷的 5#航标桩及含钢管防护架的 8#航标桩进行计算如图 1 所示.被撞航标桩有限元计算模型由航标桩、防护架(裸桩无防护架)与土体结构两部分组成.其中桩的直径为 2 m,土体结构范围取约为直径的 10 倍,计算深度为 30 m,各个桩的长度以及埋置深度由具体情况而定,用于动力计算的模型见图 2.

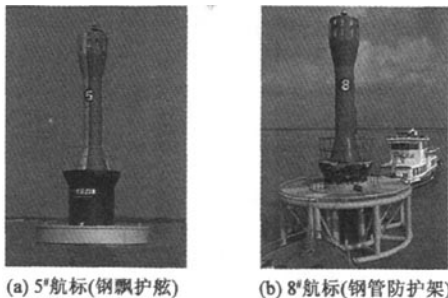


图 1 含防护装置的航标桩
Fig.1 Navigation mark pile with protective device

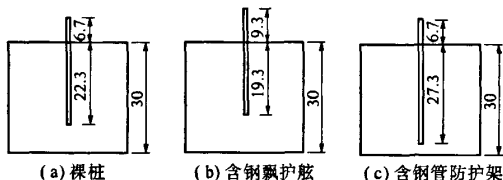


图 2 动力计算模型
Fig.2 Dynamic calculation model

考虑到动力分析耗时太多,须对模型进行简化处理,本项目进行了两方面简化:其一,钢飘护舷的简化,钢飘护舷属于薄壁结构,在有限元划分时自由度较多,但可以简化为集中质量.笔者采用 ANSYS 软件模拟了没有简化时的工况,把其与简化为集中质量时进行了对比分析,误差仅为 1%,所以简化是合理的.其二,航标灯的简化,航标灯重量约为 1.00 t,把其重量移至到桩上,相当于桩伸长 0.127 3 m.因此单元选择了八结点六面体等参单元.其中钢飘护舷的有限元模型与钢管防护架差别不大,均在桩上简化为集中质量,在此给出了裸桩与钢飘护舷的有限元模型见图 3.

1.3 计算参数

本项目采用的钢飘护舷和钢管防护架,主要技术参数见表 1.桩防护装置包含桩、钢架和橡胶

3 个部分,其材料参数见表 2.

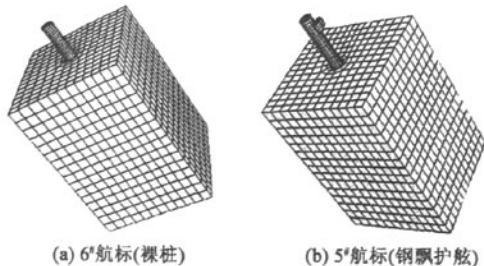


图 3 有限元模型
Fig.3 Finite element model

表 1 主要技术参数 Tab.1 Main technical parameters		
名称	钢飘护舷	钢管防护架
外舷直径/mm	6 400.00	6 200.00
内舷直径/mm	2 900.00	2 900.00
舷高/mm	1 400.00	2 000.00
水密隔舱	12(均分)	8(均分)
筒形橡胶护舷尺寸	Φ0.40 m×1.20 m	Φ0.40 m×1.90 m
总重/kg	15 201.00	13 989.00

表 2 用于裸桩计算的材料参数 Tab.2 Material parameters of bared pile				
名称	材料	$\gamma/(kN \cdot m^3)$	E/MPa	μ
钢飘护舷	Q235 钢	78.00	210 000.00	0.25
桩	C25 混凝土	25.00	28 000.00	0.20
橡胶管	橡胶	12.00	16.00	0.48

有关土层,有 3 种工况:

- (1)6#航标,其桩长为 29.00 m,顶面高程为 16.00 m,用于裸桩的动力分析.河床底面高程 10.20 m;
- (2)5#航标,其桩长为 28.60 m,顶面高程为 16.00 m,用于安装钢飘护舷的桩的动力分析.河床底面高程 7.60 m;
- (3)8#航标,其桩为 34.00 m,顶面高程为 16.00 m,用于安装了钢管防护架的桩的动力分析.河床底面高程 10.30 m.

由于土层原始参数不全,需参考相关土特性的参数,同时,对于厚度较小和属性相近的土层可以归并在一起,最终土层参数见表 3 及表 4.经计算得动力分析时的土层弹性模量见表 5.

表3 裸桩及含钢飘护舷时的土层参数

Tab.3 Soil parameters of bared pile and navigation mark pile with floating steel fenders

岩性	淤泥	粉质黏土	粉质黏土	粉土
层厚/m	0.90	9.60	7.30	7.40
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	15.20	19.60	19.70	19.80
E/MPa	0.7467	5.6160	8.5651	14.3417
e	2.269	0.750	0.756	0.710
μ	0.40	0.30	0.30	0.25
C/KPa	4.20	27.15	27.60	2.00
$\varphi/(^{\circ})$	2.80	21.52	23.40	30.00

表4 含钢管防护架的土层参数

Tab.4 Soil parameters of navigation mark pile with steel protective

岩性	淤泥	黏土	淤泥质黏土	黏土	粉砂
层厚/m	8.30	2.20	5.50	6.10	10.90
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	15.20	18.50	17.40	18.90	20.00
E/MPa	0.7467	2.8154	1.4709	3.8406	14.0000
e	2.269	1.013	1.271	0.921	0.682
μ	0.40	0.30	0.30	0.30	0.25
C/KPa	4.20	11.00	7.50	26.80	2.00
$\varphi/(^{\circ})$	2.80	10.60	5.50	14.70	30.00

注:有关阻尼比,参阅有关文献,取值如下:土体均取为0.1,橡胶取为0.07,桩取为0.05.

表5 用于动力分析的土层参数

Tab.5 Soil parameters for dynamic analysis

岩性	裸桩及含钢飘护舷对应的土层				含钢管防护架对应的土层			
	层厚	γ	E	μ	层厚	γ	E	μ
淤泥	0.90	15.20	1.6096	0.40	8.30	15.20	1.2510	0.40
粉质黏土	9.60	19.60	9.4250	0.30	2.20	18.50	3.7610	0.30
粉质黏土	7.30	19.70	9.7268	0.30	5.50	17.40	1.9250	0.30
粉土	13.10	19.80	20.9270	0.25	6.10	18.90	6.9370	0.30
粉砂	—	—	—	—	10.90	20.00	22.6800	0.25

注:1.考虑到河底冲刷,其最大冲刷掉淤泥厚度达1.00 m,所以在计算时要去掉此厚度的淤泥;2.用于裸桩及含钢飘护舷桩的土层厚度小,这里向下扩大,即扩大粉土的厚度,由原先的7.40 m扩大至13.10 m.

1.4 撞击冲击力计算

根据文献资料^[11],撞击力可采用图4的时程曲线,图中: F_{\max} 为最大撞击力; $2T_c$ 为撞击时间.根据试验结果可知:安装钢飘护舷的5#航标桩的撞击时间为1.133 s;安装钢管防护架的8#航标桩的撞击时间为0.956 s;而无防护设施的6#裸桩航标桩撞击时间仅为0.258 s.

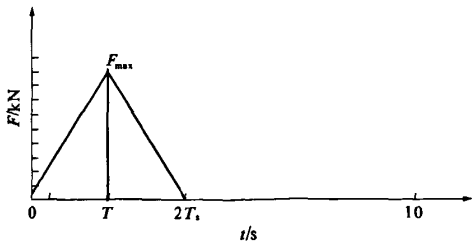


图4 撞击力时程曲线图

Fig.4 Time-history curve of the collision

根据《公路桥涵设计通用规范》^[8]附录四,漂流物撞击力可按下式估算:

$$F = WV/(gT) \tag{4}$$

式中: F 为漂流物撞击力,kN; W 为漂流物重力,

kN,应根据河流中漂流物的情况,按实际调查结果确定; V 为水流速度,m/s; T 为撞击时间,s,应根据实际资料估计,无资料时,取1s; g 为重力加速度, $g=9.81\text{ m/s}^2$.

采用排水量1 000 t的船舶,根据委托单位要求,漂流物重量取为1 200 t,船速分别为15 km/h和12 km/h,根据项目工作大纲规定:取水位14.5 m为撞击点.

撞击力按式(4)进行计算,计算结果见表6.

表6 5#、6#和8#航标撞击力

Tab.6 The collision of 5#,6# and 8# kN

撞击速度	5#	6#	8#
15 km/h	4 498.5	19 755.0	5 331.4
12 km/h	3 598.8	15 804.0	4 265.1

2 计算结果

2.1 计算工况

3种航标桩均承受排水量1 000 t的船舶撞击时的动力响应(包括桩身应力、应变、加速度、速度、位移).根据委托单位要求,漂流物重量取为1 200 t.

工况 1:船速为 15 km/h、正撞;工况 2:船速为 15 km/h、30°斜撞;工况 3:船速为 12 km/h、正撞;工况 4:船速为 12 km/h、30°斜撞.

2.2 计算结果

3 种航标桩各工况应力、应变、位移、速度和加速度的计算结果见表 7.

表 7 各种工况计算结果

Tab.7 Calculation results under different conditions

航标桩	工况	撞击力/ kN	最大应力/ MPa	最大应变/ 10 ⁻³	最大位移/ m	最大速度/ (m·s ⁻¹)	最大加速度/ g
6#	1	19 755	195.80	6.742	1.288	12.89	18.77
	2	17 108	169.56	5.839	1.115	11.16	16.25
	3	15 804	156.64	5.394	1.030	10.31	15.02
	4	13 686	135.65	4.671	0.892	8.928	13.01
8#	1	5 331	52.01	1.855	0.751	1.963	1.20
	2	4 617	45.04	1.606	0.650	1.700	1.04
	3	4 265	41.61	1.484	0.601	1.570	0.96
	4	3 694	36.03	1.285	0.520	1.360	0.83
5#	1	4 499	49.10	1.756	0.016	1.11	0.84
	2	3 896	42.52	1.521	0.014	0.96	0.73
	3	3 599	39.28	1.405	0.013	0.89	0.67
	4	3 117	34.02	1.217	0.011	0.77	0.58

由于 4 种工况应力、位移和加速度动力响应形式一样,这里给出最危险工况(即工况 1)的响应时程曲线见图 5 以及最大 Mises 应力云图(见图 6).

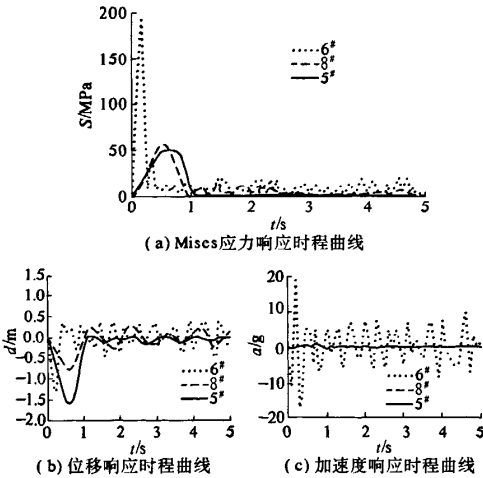


图 5 时程曲线

Fig.5 Time-history curve

由表 7 的计算结果以及图 5 和图 6 可知:

对于排水量 1 000 t 的船舶、船速为 15 km/h 和 12 km/h,对裸桩进行撞击,正撞时的最大应力为 195.80 MPa,30°斜撞时的最大应力为 169.56 MPa,发生在距桩顶部 11.81 m 的桩身处(由图 6 可知),而 Q235 钢的许用应力为 170 MPa 可见此时钢筋都会被拉断,均造成桩的断裂;对安装钢管防护架的桩进行撞击,相对于裸桩来讲,最大应力下降达 73.56%,均发生在距桩顶部 18.89 m 的桩身处,并且钢筋处于安全状态,但由于混凝土许用应力为 25 MPa,不论正撞,或者斜撞,桩均会出现裂纹,由于桩顶位移偏大,影响正常工作;对安装钢飘护舷的桩进行撞击,相对于裸桩,钢飘护舷可以降低撞击响应达 78.29%,最大应力均发生在距桩顶部 14 m 的桩身处,但不论正撞,或者斜撞,桩均会出现少量裂纹,且考虑到桩顶最大位移为 0.016 m,所以说可以继续工作.采用钢飘护舷最优,为首选.

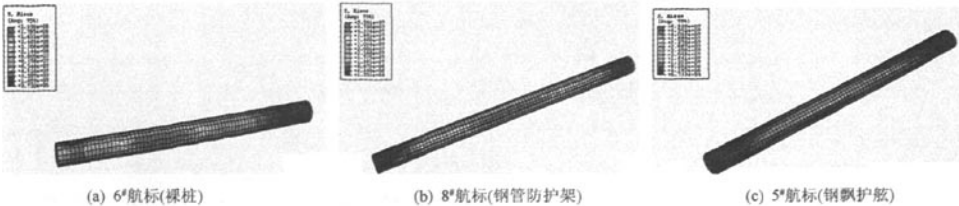


图 6 最大 Mises 应力云图

Fig.6 The maximum Mises stress contour plot

3 结论

(1) 钢管防护架消能效果不及钢漂护舷, 尤其用于固定钢管防护架的下部承托盘, 会随时间推移而锈蚀, 可能导致钢管架的沉没. 钢飘护舷容积变大是有利的. 不仅可以延长撞击时间, 减少撞击力, 而且可以降低撞击部位. 从计算结果来看, 若能再增加 10% 的容积, 可以使排水量 1 000 t 的船舶撞击产生的最大位移控制在 1 cm 以下, 这就意味着航标保护更加完好.

(2) 对于桩来讲, 在距桩顶 9 ~ 14 m 区域, 受力最大, 需在配筋时加强, 混凝土强度建议提高到 C30. 应提高防护装置中橡胶的直径和高度. 对钢飘护舷来讲, 其圆周处可考虑设计为齿形, 这可以增加旋转力, 进一步缓解撞击力. 防护装置与航标桩之间的间隙建议进一步减小.

(3) 目前采用的钢飘护舷, 由于能够降低船舶撞击能量达 78.29%, 具有很好的航标保护作用, 可以推广至国内的内陆河流. 但由于笔者所设计的钢飘护舷, 仅适合于排水量为 1 000 t 级的船舶, 若超过排水量 1 000 t 级的船舶, 需重新设计. 三维有限元仿真分析中没有考虑大风大浪的影响, 因此本项目的计算结果不适合于大海中的船舶撞击桩的情况.

参考文献:

- [1] 戴彤宇, 聂武船. 撞桥事故综述[J]. 黑龙江交通科技, 2003, 2: 1-3.
- [2] 戴彤宇. 船撞桥及其风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 2002.

- [3] 耿波. 桥梁船撞安全评估[D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2007.
- [4] RECKLING K A. Mechanics of minor ship collisions [J]. International Journal of Impact Engineering, 1983, 1(3): 281-299.
- [5] MINORSKY V U. An analysis of ship collision with reference to protection of nuclear power ships [J]. Journal of Ship Research, 1959, 3: (2) 208-214.
- [6] WOISIN G. Design against collision [C] // Proceedings of International Symposium on Advances in Marine Technology. Trondheim, 1979, 309-336.
- [7] 中华人民共和国铁道部. TB 10002 1-99. 铁路桥涵设计基本规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- [8] 中华人民共和国交通部. JTG D60-2004. 公路桥涵设计通用规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [9] IABSE. Mutual Influence between Transport Vessels and Bridge Structure (Overview and Directory) [C] // Paper Florilegium for Impact between Ship and Bridge. Shanghai: Shanghai Institute of Ocean Steel Structures, 2000.
- [10] AASHTO. Design Guide Regulation and Interpretation for Impact between Highway Bridge and Ship [S]. Washington D. C.: American Association of State Highway and Transportation official, 1991.
- [11] 罗林阁, 曹映泓, 陈国虞, 等. 船舶撞击桥梁的撞击力计算方法探讨 [J]. 中外公路, 2006, 26(5): 78-81.
- [12] 何勇, 金伟良, 张爱晖, 等. 船舶碰撞力学过程的非线性数值模拟 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(6): 1065-1075.

Finite Element Dynamic Analysis of Navigation Mark of Single Pile with Anti-collision Facilities in the Inland River

WANG Yu, ZHOU Xing-de, JIANG Yang, LIU Qian-min, LIU Guang-bo, SHI Xing-xing

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Employing ABAQUS nonlinear FEM program, analyzed dynamic response of the soil structure among three kinds of navigation mark pile which are bared navigation mark pile, navigation mark pile with floating steel fenders and navigation mark pile with steel protective. Proved that the navigation mark pile with floating steel fenders has be the best protective effect among the three kinds of devices by comparing response curves of stress, displacement and acceleration. Some suggestions are given on design of the navigation mark pile and how to use the method of finite element simulation which are of great value for promotion and use in the future.

Key words: navigation mark pile; collision; protective device; FEM; dynamic analysis