

六边形结构桥墩柔性防撞装置等效弹性系数研究

杨 峰, 杨黎明*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对我国自主研发的桥梁柔性防撞装置, 引入等效弹性系数研究其结构响应, 并构建物理模型: 2 个六边形结构的钢围环绕在桥墩上, 钢围之间由均布弹簧圈支撑连接. 利用弹性地基梁理论分析该模型在小变形情况下的力学响应, 通过解微分方程确定平动情况下该模型的等效弹性系数. 研究表明: 等效弹性系数是关于六边形结构几何参数、弹簧弹性系数、钢围抗弯刚度、撞击力的作用点位置的函数; 在外钢围没有塌陷的情况下, 结构的几何参数对于等效弹性系数的影响最大; 装置的等效抗弯刚度超过 0.25 时, 外钢围近似认为刚性; 而在远远小于 0.25 时, 在撞击点附近外钢围发生塌陷.

关键词: 船撞桥墩; 柔性防撞装置; 等效抗弯刚度; 等效弹性系数; Winkler 理论

中图分类号: O3; O39

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2011) 02-0089-05

船舶撞击桥梁事故日益增多, 保护桥梁和船舶安全的防撞装置设计研究就显得愈加重要^[1-2]. 现有的桥墩防船撞设计依据主要有标准规范、试验、数值仿真^[1-5]. 由于一方面现有的标准建立在经验和简化理论的基础上, 对于防撞装置的防撞效果研究存在不足^[3-5]; 另一方面, 比例实验不能很好地反映实船碰撞, 而实尺寸碰撞实验又极其昂贵. 所以现在更多的是采用数值仿真方法来确定装置的防撞效果.

但由于防撞装置结构的各个参数选取没有明确的动力学方法, 此外作为一个完全的非线性数值仿真, 其计算量十分庞大. 因此, 希望寻找一个简化的动力学方法, 以期对该防撞装置的主要结构参量做一个初步估计. 在现行的分析中, 通常把防撞装置简化成一个具有多自由度的弹性单元以计算船桥相撞时的撞击力, 这需要准确计算装置的弹性系数^[3-4]. 因此, 根据防撞装置的设计参数评估其等效弹性系数成为一个重要研究课题. 笔者提出了一种桥梁抗船舶撞击的新型柔性防撞装置, 并借助于 LS-DYNA 程序做了数值模拟和定量分析, 给出了各种工况下的撞击力与时间关系^[6-9].

防撞装置刚度影响因数主要有结构几何形状、材料力学性能及弹性元件分布等^[7-9]. 郭丽娜等^[10]简化防撞装置为同心刚性圆环与向心均布弹簧组成的模型, 讨论了在外加荷载和扭矩作用下防撞装置的响应. 李桂花等^[11]在文献[10]的研究基础上, 进一步讨论了外钢围为弹性梁时, 外钢围抗弯刚度对于结构响应的影响. 但由于文献[10-11]讨论的是同心圆模型, 与实际设计的防撞装置六边形模型有较大的出入. 笔者根据 LS-DYNA 分析的结果, 在上述研究基础上提出一个简化的柔性防撞装置模型. 该模型由 2 个相似的六边形梁为内外钢围以及均匀分布且垂直于六边形各边的线弹性弹簧(代表钢丝绳防撞圈)构成, 并对简化模型利用弹性地基梁理论^[12]分析其等效弹性系数, 说明其影响参数, 以期更好地与实际模型相符.

1 桥梁柔性防撞装置简化模型的建立

1.1 几何模型建立

桥梁抗船舶撞击新型柔性防撞装置由内外钢围与钢围之间的均布防撞圈组成. 外钢围直接承受船舶的撞击, 防撞圈连接内外钢围, 可以产生大

收稿日期: 2010-09-09.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金(10872101); 浙江省科技厅科研项目(2009C13008); 宁波大学科研项目(XK109088).

第一作者: 杨 峰(1984-), 男, 浙江嘉兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 结构冲击动力学. E-mail: yangfengzj@yahoo.com.cn

*通讯作者: 杨黎明(1957-), 男, 浙江宁波人, 博导/教授, 主要研究方向: 材料与结构冲击动力学. E-mail: yangliming@nbu.edu.cn

变形, 具有缓冲作用; 内钢围紧靠桥墩, 船舶撞击力通过外钢围、防撞圈、内钢围传递给桥墩. 该防撞装置使得桥墩与船舶承受的撞击力远远低于船舶直接相撞时所承受的撞击力, 对桥墩与船舶都起到了有效地保护作用.

为分析影响柔性防撞装置弹性系数因素, 将防撞装置简化为如图 1 所示的六边形结构, 即建立 1 个内外钢围为六边形梁, 钢围之间均布线性弹簧. 在图 1 中, 六边形 $ABCDEF$ 为外钢围, 六边形 $A_1B_1C_1D_1E_1F_1$ 为内钢围; P 为撞击力, 撞击点为 U .

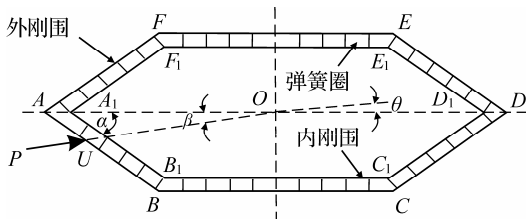


图 1 防撞装置简化模型示意图

1.2 基本假设

参考数值模拟结果^[8-9]与理论模型分析^[10]的结论, 对上述模型提出下列基本假设: (1)防撞圈为线弹性、小变形弹簧模型, 均布在外钢围和外钢围之间, 并垂直于外钢围; (2)外钢围受撞击边为弹性变形梁, 忽略其轴向变形, 仅考虑其弯曲变形, 其余边为刚性梁, 内钢围为固定边; (3)撞击力通过该装置重心, 结构不发生转动.

1.3 模型参量

如图 1 所示, 梁 AB 长度为 l , 并以其为结构特征长度 $L=l$; EF 长度 $l_{EF}=2b=2\mu L$; 防撞装置外钢围总长为 $s=4L(1+\mu)$. 结构角度 $\angle OAB=\alpha$; 撞击角度为撞击力与水平方向的夹角 $\angle AOU_p=\beta$; 撞击边抗弯刚度 EI ; 撞击点 U 到 A 点距离为:

$$u_p = L(\mu + \cos(\alpha)) \frac{\sin(\beta)}{\sin(\beta + \alpha)} = LU_p,$$

若有 N 个垂直于外钢围弹性系数 k 的弹簧, 则单位长度上弹簧的弹性系数为:

$$K = \frac{Nk}{s} = \frac{Nk}{4L(1+\mu)}.$$

2 模型求解

2.1 外钢围的运动

外钢围在运动时, 由于四周边界提供的弹簧力不是关于撞击力对称的, 所以运动的方向与撞

击力的方向并不一致. 由力平衡条件计算可以得到:

$$\tan \theta = \tan \beta \frac{\sin^2(\alpha)}{\cos^2(\alpha) + \mu}, \quad (1)$$

其中, θ 为位移方向与水平正方向间的夹角; μ 为 EF 无量纲长度的一半.

2.2 弹性弯曲梁方程

关于 AB 段的受力运动分析如图 2 所示.

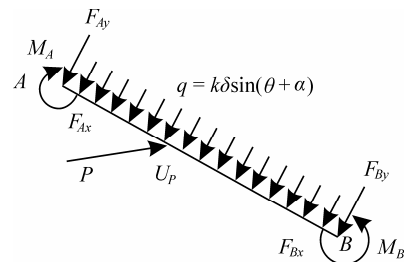


图 2 梁 AB 段受力分析

由于梁方程只考虑弯曲, 不考虑其轴向变形, 建立弹性地基梁弯曲方程如下:

$$\frac{d^4 Y}{dX^4} + \frac{KL^4}{EI} X = 0, \quad (2)$$

其中, X 与 Y 分别为以 A 为原点, 沿 \overline{AB} 方向的无量纲坐标和梁垂直方向无量纲坐标.

$X = x/L \in [0, 1]$, $Y = y/L$, y 为弹簧反方向的实际挠度. A, B 点在 Y 方向满足:

$$F_{Ay} + F_{By} = KL\delta[4\mu \sin(\theta) \cos(\alpha) + \sin(\theta + \alpha) - 2\sin(\alpha - \theta) \cos(2\alpha)], \quad (3)$$

(3) 式为假设钢围刚性五边 θ 方向位移 δ 时, 对弹性梁提供的 Y 方向上的反作用力.

2.3 方程求解

由弹性地基梁的基本理论, 参考 Winkler 地基模型^[11]求解微分方程(2).

2.3.1 微分方程通解

$$Y(X) = Y_0 F_1(\lambda X) + \theta_0' F_2(\lambda X) / \lambda - M_0 F_3(\lambda X) / \lambda^2 EI - Q_0 F_4(\lambda X) / \lambda^3 EI + P_0 F_4(\lambda(U_p - X)) / \lambda^3 EI, \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} F_1(\lambda X) = \cosh(\lambda X) \cos(\lambda X), \\ F_2(\lambda X) = (\cosh(\lambda X) \sin(\lambda X) + \sinh(\lambda X) \cos(\lambda X)) / 2, \\ F_3(\lambda X) = \sinh(\lambda X) \sin(\lambda X) / 2, \\ F_4(\lambda X) = (\cosh(\lambda X) \sin(\lambda X) - \sinh(\lambda X) \cos(\lambda X)) / 4, \end{cases} \quad \lambda = \sqrt[4]{\frac{KL^4}{4EI}}.$$

$P_0 = P \sin(\alpha + \beta)$, 为外加荷载垂直于梁的分力, 其中, P 为外加荷载。

(4)式中 Y_0, θ'_0, M_0, Q_0 分别表示梁 A 点的挠度、转角、弯矩和剪力, AU_p 段时取前4项, U_pB 段时取5项计算; 由材料力学理论可知:

$$\theta'_0 = \frac{dY}{dX}, M = -EI \frac{d^2Y}{dX^2}, Q = -EI \frac{d^3Y}{dX^3}. \quad (5)$$

2.3.2 边界条件

(1) A, B 点无量纲挠度为:

$$Y_A = Y_B = \frac{\delta \sin(\theta + \alpha)}{L} = Y_0.$$

(2) A, B 点转角为 $\theta'_A = \theta'_B = \theta'_0 = 0$.

(3) A, B 点剪力: 由于 B 端与 A 端剪力正方向相反, 所以, 由(3)式的两端剪力满足:

$$Q_A - Q_B = KL\delta[4\mu \sin(\theta) \cos(\alpha) + \sin(\theta + \alpha) - 2\sin(\alpha - \theta) \cos(2\alpha)] = TY, \quad (3')$$

其中:

$$T = \frac{KL^2\delta}{\sin(\theta + \alpha)}[4\mu \sin(\theta) \cos(\alpha) + \sin(\theta + \alpha) - 2\sin(\alpha - \theta) \cos(2\alpha)].$$

2.3.3 力-位移关系

由(4)式可知, 为了求解力位移关系, 必须知道5个量: $Y_0, \theta'_0, M_0, Q_0, P$. 在给定外加荷载 P 时, 只知道 $\theta'_0 = 0$, 所以, 此时需要得到另外3个值. 由边界条件可知:

$$\begin{cases} Y(1) = Y_0, \\ \theta'(1) = \theta'_0 = 0, \\ Q_0 - Q(1) = TY_0. \end{cases} \quad (6)$$

(3')式、(4)式、(5)式代入(6)式, 最终可以得到:

$$\begin{cases} Y_0 = -\frac{[D_3 + \frac{B_3(D_1C_2 - D_2C_1)}{B_2C_1 - B_1C_2} + \frac{C_3(D_1B_2 - D_2B_1)}{B_1C_2 - B_2C_1}]}{[A_3 + \frac{B_3(A_1C_2 - A_2C_1)}{B_2C_1 - B_1C_2} + \frac{C_3(A_1B_2 - A_2B_1)}{B_1C_2 - B_2C_1}]} P_0, \\ M_0 = \frac{(A_1C_2 - A_2C_1)Y_0 + (D_1C_2 - D_2C_1)P_0}{B_2C_1 - B_1C_2}, \\ Q_0 = \frac{(A_1B_2 - A_2B_1)Y_0 + (D_1B_2 - D_2B_1)P_0}{B_1C_2 - B_2C_1}, \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} A_1 = C_3 = F_1(\lambda) - 1, \quad B_1 = C_2 = -\frac{1}{\lambda^2 EI} F_3(\lambda), \\ C_1 = -\frac{1}{\lambda^3 EI} F_4(\lambda), \quad D_1 = -\frac{1}{\lambda^3 EI} F_4(\lambda(1 - U_p)), \end{aligned}$$

$$A_2 = B_3 = -4\lambda F_4(\lambda), \quad B_2 = -\frac{1}{\lambda EI} F_2(\lambda),$$

$$D_2 = \frac{1}{\lambda^2 EI} F_3(\lambda(1 - U_p)), \quad A_3 = \frac{K}{\lambda} F_2(\lambda) + T, \\ D_3 = -F_1(\lambda(1 - U_p)).$$

将(7)式回代(4)式及(5)式就可以求得任意点的位移、转角、弯矩以及剪力。

3 结果分析

3.1 无量纲化参数

外钢围的实际位移 $Y_e = Y / \sin(\theta + \alpha)$, 为便于分析外钢围整体力学性能, 引入等效弹性系数:

$$E_{eq} = \frac{P}{\max(Y_e)} \frac{1}{4(1 + \mu)KL}, \quad (8)$$

其中: $4(1 + \mu)KL$ 表示装置内部所有弹簧并联时的弹性系数, 称为特征弹性系数. $P / \max(Y_e)$ 表示模型的实际弹性系数。

在等效弹性系数表达式中, E_{eq} 可能与 $P, \theta, \alpha, \beta, \mu, \lambda, K, L, EI$ 这些量有关. 结合(4)、(8)、(9)式, 不难判断 E_{eq} 与 P, K, L, EI 具体尺寸无关, 而由(1)式可知, θ 是关于 α, β, μ 的函数, 因此 E_{eq} 与 θ 相关性可以消去. 最终, 影响等效弹性系数的因素为 $\lambda, \alpha, \beta, \mu$.

3.2 参数影响

3.2.1 外钢围等效抗弯刚度

引入外钢围等效抗弯刚度的概念:

$$\overline{EI} = \frac{EI}{\Phi} = \frac{EI}{KL^4}, \quad (9)$$

其中, 特征抗弯刚度为 $\Phi = KL^4$, 得到 $\overline{EI} = 1/4\lambda^4$.

由图3(a)可知, 在不同的结构参数与撞击角度下, 当 $\overline{EI} > 0.25$ 时, 等效弹性系数基本不变化, 箱梁可认为是刚性运动; 当 $\overline{EI} < 0.25$ 时, 等效弹性系数下降得很快, 即随着外箱梁弯曲刚度的降低, 模型的等效弹性系数迅速下降. 图3(b)和图3(c)为 $P=1, K=1$ 时, 梁 AB 段的挠度, 可见当 $\overline{EI} = 0.2$, $\overline{EI} = 100$ 时, 挠度曲线影响不大; 当 $\overline{EI} = 10^{-3}, \overline{EI} = 10^{-4}$ 时, 结构位移变形远远大于 $\overline{EI} = 0.2$ 状态下的位移变形; 当 $\overline{EI} = 10^{-4}$ 时, 撞击边出现反转, 说明此时非撞击边的位移为0, 即非撞击边的弹簧已不起作用, 在设计时需要避免。

3.2.2 撞击角度 β 影响

图4为不同结构参数下, 撞击角度对于等效弹

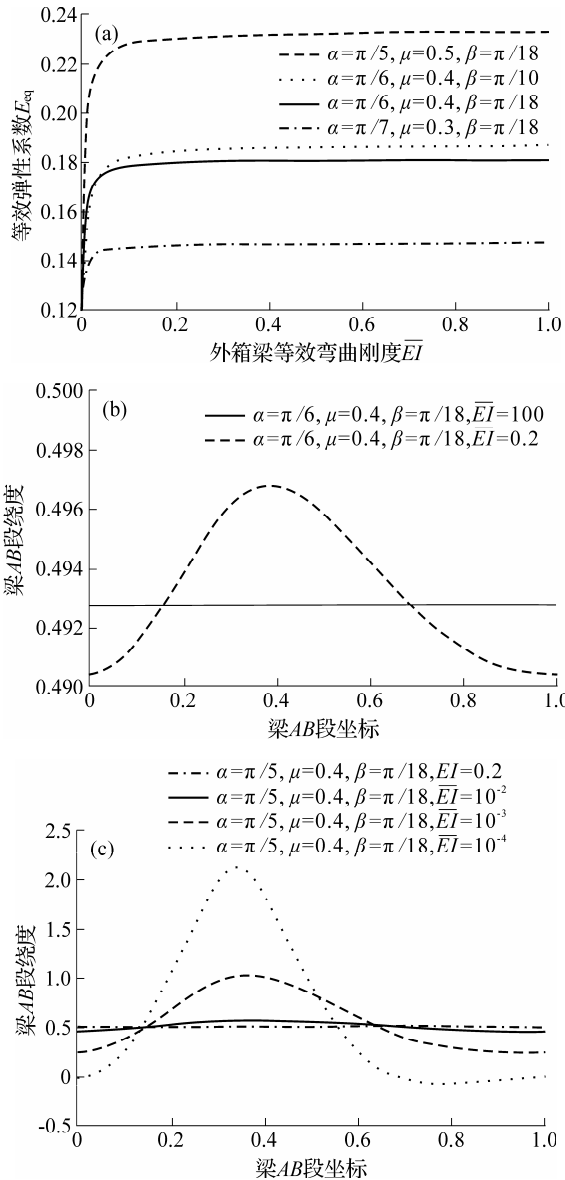


图3 外钢围等效抗弯刚度与等效弹性系数的关系

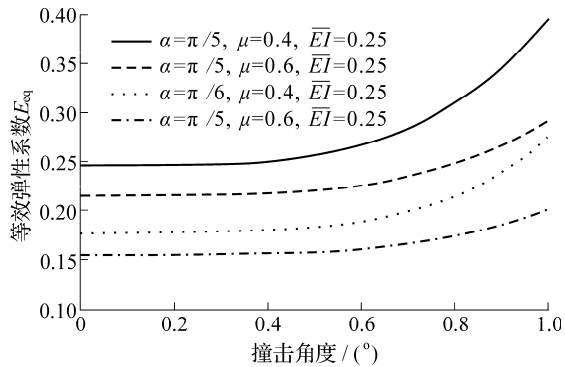


图4 撞击角度-等效弹性系数关系

性系数的影响, 由图可见, 在 $U_p < 0.5$ 时, 撞击位置的改变对于等效弹性系数影响很小, 在 $U_p >$

0.5 后, 随着 U_p 的增加, E_{eq} 迅速增大.

3.2.3 结构系数 α, μ

图 5 为 $\bar{EI} = 0.25$, 时不同结构参数下的等效弹性系数值. 其中图 5(a)为撞击角不变, $\beta = \pi/18$; 而图 5(b)为撞击位置不变, $U_p = 0.4$; 图 5(a)和图 5(b)图形中每条曲线 μ 间隔为 0.1. 从中可以看出, 随着结构角度 α 的增加, 等效长度 μ 的减小, 等效弹性系数增大.

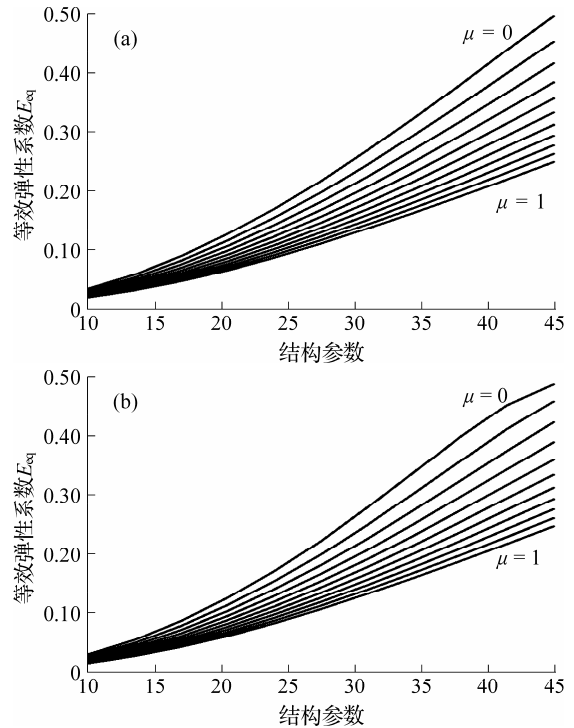


图5 结构参数-等效弹性系数关系

4 结论

(1) 等效弹性系数是关于六边形结构几何参数、弹簧弹性系数、钢围抗弯刚度、撞击力的作用点位置的函数. 在钢围没有塌陷的情况下, 结构的几何参数对于等效弹性系数的影响最大;

(2) 外钢围的等效抗弯刚度 $\bar{EI} > 0.25$ 时, 钢围近似认为刚性, 而在 $\bar{EI} \ll 0.25$ 时, 钢围撞击力作用点附近发生塌陷. 因此在实际工程设计中, 建议外钢围等效刚度取 $\bar{EI} = 0.25$, 以期在外钢围刚度尽量小的情况下, 所有弹簧能最大地参与变形, 提高整个装置的弹性系数;

(3) 在保证撞击时外钢围不发生破坏的前提下, 六边形结构中 与航道平行的部份应设计得尽量短, 以提高弹簧使用效率. 适当地增加 A 点附近

外钢围的抗弯刚度有利于提高防撞装置的整体抗撞能力.

参考文献:

- [1] 陈诚. 桥梁设计船撞力及损伤状态仿真研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [2] 罗荣. 船桥碰撞机理及桥墩防护装置研究[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2005.
- [3] AASHTO. Guide specifications and commentary for vessel collision design of highway bridge[C]//Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Official, 1994.
- [4] BS EN1991-1-7:2006. Eurocode 1 : Actions on structures Part 1-7: General actions-accidental actions[S].
- [5] AASHTO. Guide specifications and commentary for vessel collision design of highway bridge (2nd ed)[C]// Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Official, 2009.
- [6] 陈国虞. 防御船撞桥的新装置及其机理研究[J]. 船舶工程, 2007, 29(4):40-43.
- [7] Wang Lili, Yang Liming, Huang Dejin, et al. An impact dynamics analysis on a new crashworthy device against ship-bridge collision[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35:895-904.
- [8] 杨黎明, 陈国虞, 周风华, 等. 象山港公路大桥主桥柔性防撞装置方案研究(研究总结报告)[M]. 宁波: 杭州湾大桥工程部, 2009.
- [9] 张海明, 曹映泓, 段乃民, 等. 湛江海湾大桥主墩防撞设施结构设计[J]. 中外道路, 2006, 26(5):82-84.
- [10] 郭丽娜, 唐长刚, 周风华, 等. 桥墩柔性防撞装置的静态等效弹性系数[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2010, 23(2):114-120.
- [11] 李桂花, 杨黎明, 余同希, 等. 弹性基础上封闭型梁的等效刚度[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2011, 24(1):115-120.
- [12] 张裕怡. 有限深弹性基础梁计算用表[M]. 北京: 水利出版社, 1980:10.

Study on Equivalent Elastic Coefficient of a Hexagon-shape Crashworthy Device for Bridge Piers

YANG Feng, YANG Li-ming*

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 351211, China)

Abstract: The equivalent elastic coefficient (EEC) is introduced to study the structure response of the flexible crashworthy system which is developed independently in China. The physical model is built, which is composed of distributed springs linking and supporting two hexagonal-shape box-beam structures that encircle the bridge pier. Based on the elastic foundation theory, the mechanical response equation is derived in the case of small strain. By solving the differential equation, the translational equivalent stiffness of the model is identified. The result shows that EEC is the function of the geometric parameter of the hexagonal-shape structure(HSP), the elastic coefficient of the spring, the bending stiffness of the box beam, and the location of the impact point; When the outer box beam is in stable state, HSP has the largest effect on EEC; When the equivalent bending rigidity of the outer box beam is about 0.25, the box beam can be considered as a rigid one, and when the rigidity is far below 0.25, the collapse of the box beam is to happen around the location of the impact point.

Key words: ship-pile collision; flexible crashworthy device; equivalent bending rigidity; equivalent elastic coefficient; Winkler theory

(责任编辑 章践立)