

文章编号:1673-2049(2015)05-0089-07

基于连跨效应的船撞作用下连续梁桥墩顶 约束刚度分析

孙慧明,方海,祝露,韩娟,刘伟庆

(南京工业大学 土木工程学院,江苏 南京 211816)

摘要:基于弹性分析,重点考察连续梁桥上部结构对被撞桥墩的约束作用,通过分向传播法分析连续梁桥支座横向剪切刚度、桥墩跨数、跨距、边跨桥墩抗侧刚度对被撞桥墩的影响,归纳各参数对被撞桥墩墩顶位移的影响作用。在此基础上,通过有限元软件分析苏通大桥引桥在船舶撞击力作用下上部结构对被撞桥墩的顶端约束刚度,并与理论推导出的约束刚度进行对比。研究结果表明:与悬臂墩模型相比,在相同撞击力作用下,考虑连跨效应的被撞桥墩墩顶位移减小9.94%;随着边跨桥墩抗侧刚度、跨距、支座横向剪切刚度的增大,被撞桥墩墩顶位移逐渐减小;随着跨数的减少,对被撞桥墩的约束作用越小;相邻第1跨对被撞桥墩约束的影响率在90%以上。

关键词:连续梁桥;顶端约束刚度;分向传播法;顶端位移

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Top Restraint Stiffness Analysis of Continuous Girder Bridge Under Ship Collision Based on Effect of Continuous Span

SUN Hui-ming, FANG Hai, ZHU Lu, HAN Juan, LIU Wei-qing

(School of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: Authors focused on the restraint effect of the superstructure of continuous girder bridge on the hitting pier based on the elastic analysis. The effect of transverse shear stiffness of bearings of continuous girder bridge, number of spans, span size, and lateral stiffness of the side pier was studied based on the propagating method along separate route, and the effect of each parameter was concluded. Based on this, the upper restraint stiffness of the hitting pier imposed by the Sutong bridge's superstructure and substructure was analyzed using the finite element software, and was compared with the theoretical value. The study results show that when compared with the single model of the pier, the top of the hitting bridge pier displacement decreases 9.94% at the same impact force. When increasing the lateral stiffness of side spans, span size and transverse shear stiffness of the bearing, the top displacement of the hitting pier is decreased. With the decrease of the number of spans, the restraint effect of the hitting pier is smaller. The effect ratio of the first span on the the restraint of hitting pier is more than 90%.

Key words: continuous beam bridge; top restraint stiffness; propagating method along separate route; top displacement

收稿日期:2015-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51008157);江苏省“333 高层次人才培养工程”科研项目(BRA2013189);

江苏省六大人才高峰项目(JZ-006)

作者简介:孙慧明(1989-),男,安徽合肥人,工学硕士研究生,E-mail:sunhuiming11@njtech.edu.cn。

0 引言

随着世界桥梁建设朝着大跨度、轻型化以及船舶向着高速化、大型化的发展,船舶碰撞事故日益增多,船舶碰撞导致的桥梁结构坍塌风险也逐渐加大^[1-2]。为了减少由于船撞造成的桥梁垮塌,船撞作用下桥梁的整体动力响应逐渐得到关注并研究^[3-4]。各国的规范和标准^[5-8]都按经典的船撞刚性墙模型、船撞单墩力学模型来计算船撞荷载下的桥梁结构需求。然而,经典的船撞刚性墙模型和船撞单墩力学模型虽然简单实用,却难以反映船桥碰撞问题的动力本质,且船撞整桥模型都是依靠有限元软件进行模拟分析^[9-10]。

王俊等^[11]研究表明船撞作用下桥梁结构的惯性力影响十分显著,将其忽略是不合理的。胡薇等^[12]以连续梁桥为例,对船-桥碰撞的复杂过程进行简化模拟分析,研究表明在不同撞击角度船-桥碰撞过程中,应特别关注桥梁支座建立、顶端位移、桩顶剪力和弯矩等对结构的影响。当桥墩受到水平向船舶撞击时,桥墩上受到的变形、位移瞬时通过支座传递到上部结构,上部结构相应产生位移,同时上部结构又约束着桥墩的变形,上部结构与桥墩之间是相互作用、相互影响^[13-14],故在模型简化时必须考虑到连续梁桥上部结构、桥墩跨数、跨距、边跨桥墩抗侧刚度对整个碰撞过程的影响。

对于如何简化分析桥梁上部结构对被撞桥墩的约束作用一直是研究的重点。在桥梁抗震研究领域中,张培君等^[15]采用广义自由度的理念,将桥体结构视为以弹性梁相连的多质点体系,建立了一种连续梁桥横向地震力简化计算方法。刘保东等^[16-17]针对连续梁桥的横桥向地震响应,考虑墩梁刚度比对桥梁横向地震反应的影响,推导出含有墩梁刚度比的桥墩墩顶横向剪力分配系数的表达式。这为本文研究船舶撞击力作用下上部结构对被撞桥墩的顶端约束作用提供借鉴。

本文以苏通大桥引桥为例,基于弹性分析,展开在船撞作用下连续梁桥墩顶刚度分析,将船舶撞击力等效为静力荷载,归纳在桥墩跨数、跨距、支座横向剪切刚度与边跨桥墩抗侧刚度不同情况下的被撞桥墩顶端位移数据;同时利用有限元分析在船桥碰撞作用下桥梁各墩墩顶的位移,研究分析连跨效应对被撞击桥墩的顶端约束作用。

1 船撞荷载作用下船-桥系统理论分析模型

船桥碰撞荷载作用下船-桥相互作用分析模型

是由船桥碰撞力模型、桥梁子系统模型组成的,如图1所示,其中 l_1, l_2, l_3, l_4 分别为第1跨、第2跨、第3跨、第4跨跨距, K_1, K_2, K_3, K_4 均为被撞桥墩的抗弯刚度, K_{Zi} 为支座横向剪切刚度, $i=1, 2, 3, 4, 5$, F 为撞击力, K_{Di} 为桥墩抗侧刚度, m_1, m_2, m_3, m_4 均为等效集中质量。

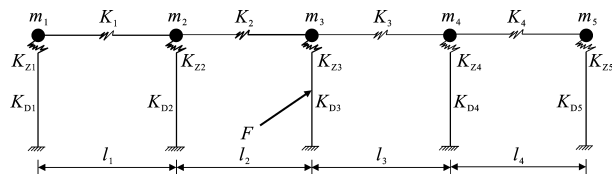


图1 船舶撞击力荷载作用下的连续梁桥力学分析模型

Fig. 1 Mechanical Analysis Model of Continuous Girder Bridge Under Ship Collision Load

船桥简化模型包括:

(1)撞击船舶的简化。船舶与桥墩撞击过程中,船舶撞击力与船艏刚度、撞击速度等因素有关,在本文模型中考虑最不利工况,将撞击力等效为静力荷载,撞击力取为峰值撞击力。

(2)桥墩的简化。在美国 AASHTO 规范、欧洲规范和中国规范中,将桥墩简化为刚性墙。在船舶与整桥撞击过程中,整桥桥墩与上部结构会产生一定变形,因而必须考虑桥墩的柔性作用,将其视作具有一定质量和刚度的悬臂梁。

(3)桥梁上部结构的简化。当桥梁受到水平向船舶撞击时,桥墩上受到的变形、位移瞬时通过支座传递到上部结构,上部结构会产生相应的位移,同时相邻跨又约束着上部结构位移,从而又约束被撞桥墩的变形;上部结构、相邻跨桥墩与被撞桥墩是相互作用、相互影响的,故模型简化时必须考虑到上部结构及相邻跨桥墩对整个碰撞过程的影响,本文将上部结构与连跨桥墩简化为一个受上部梁抗弯刚度与连跨桥墩横向抗侧刚度影响的具有抗侧刚度的弹簧,直接假设在桥墩的顶部。

(4)桥墩基础简化。实际撞击过程中,桥墩基础与土壤的相互作用会对被撞击桥墩的顶端位移产生影响。由于桩-土作用机理较为复杂,涉及到地基土的性质和具体参数,在本文研究中将约束条件简化为固接。

基于以上分析,本文采用的船桥撞击分析简化模型如图2所示,其中, h 为被撞桥墩墩高, η 为墩底至被撞击点的高度 h' 与墩高 h 的比值, K_u 为抗推刚度。将船舶撞击力等效为静力直接作用于底部固接和上部结构都具有横向抗推刚度的桥墩上,假设撞

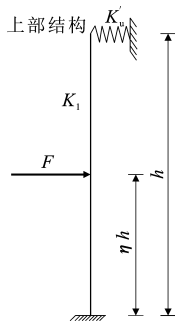


图 2 船桥碰撞理论模型

Fig. 2 Theoretical Model of Collision with Ship and Bridge
击位置在 $h' = \eta h$ 处。

2 连跨效应理论分析

2.1 连跨效应分析模型

对于多跨连续梁桥,假设第 i 号桥墩受到横向船舶冲击力 F 的作用,被撞桥墩墩顶及其相邻跨桥墩墩顶会产生相应的位移,同时上部结构及相邻跨桥墩的抗侧刚度对被撞桥墩墩顶位移具有约束作用。本文将相邻跨桥墩抗侧刚度 K_{Di} 、支座横向剪切刚度 K_{zi} 耦合为一个具有弹性刚度 k'_i 的弹簧,再与上部结构横向抗弯刚度 K 耦合为一个抗推刚度为 K'_u 的弹簧。上部结构简化模型如图 3 所示(l_5 , l_6 分别为第 5 跨、第 6 跨跨距),即将上部结构及相邻跨桥墩所组成的系统简化为弹性支承连续梁模型。

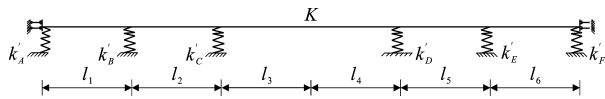


图 3 考虑连跨效应的理论模型

Fig. 3 Theory Model Considering Continuous Span Effect

2.2 连跨效应理论分析

对于如图 3 所示的弹性支承连续梁理论模型具有多种解法,如五弯矩方程法、定点系数法、初参数法、分向传播法等。分向传播法是利用一套与荷载无关的刚构常量作为计算的准备工作,当荷载给出时,应用这些刚构常量可容易求出结果^[18]。对于 A-B 跨中 A 处滑动支座边界条件,文献^[18]给出了修正弹性常量,即

$$\left. \begin{aligned} S'_{BA} &= \frac{\alpha l_1^2 k'_1}{3} \frac{\alpha + 2}{2\alpha + 1} \\ T'_{BA} &= \frac{\alpha l_1 k'_1}{2\alpha + 1} \\ J'_{BA} &= 2k'_1 \frac{\alpha}{2\alpha + 1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\alpha = \frac{6K}{k'_1 l_1^3}$; $k'_1 = \frac{K_{D1} + K_{Z1}}{K_{D1} + K_{Z1}}$; S'_{BA} 为修正后的抗弯

刚度; T'_{BA} 为修正后的相关系数; J'_{BA} 为修正后的抗侧刚度。

根据分向传播系数法,其形变传播系数分别为

$$\left. \begin{aligned} C_{CB}^{00} &= \frac{1}{D'_{B(C)}} [-T_{CB} \sum T'_{BC} - S_{CB} C_{CB} (\sum J'_{BC} + k'_2)] \\ C_{CB}^{0\Delta} &= \frac{1}{D'_{B(C)}} (-S_{CB} C_{CB} \sum T'_{BC} + T_{CB} \sum S'_{BC}) \\ C_{CB}^{\Delta 0} &= \frac{1}{D'_{B(C)}} [-J_{CB} \sum T'_{BC} + T_{CB} (\sum J'_{BC} + k'_2)] \\ C_{CB}^{\Delta\Delta} &= \frac{1}{D'_{B(C)}} (-T_{BC} \sum T'_{BC} + J_{CB} \sum S'_{BC}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中

$$\sum S'_{BC} = S'_{BA} + S_{BC}$$

$$\sum T'_{BC} = T'_{BA} + T_{BC}$$

$$\sum J'_{BC} = J'_{BA} + J_{BC}$$

$$S_{BC} = S_{CB} = \frac{4K}{l_2}$$

$$C_{BC} = C_{CB} = 0.5$$

$$T_{BC} = -T_{CB} = \frac{6K}{l_2^2}$$

$$J_{BC} = J_{CB} = \frac{12K}{l_2^3}$$

$$D'_{B(C)} = \left| \begin{array}{cc} \sum S'_{BC} & \sum T'_{BC} \\ \sum T'_{BC} & \sum J'_{BC} + k'_2 \end{array} \right|$$

式中: C_{CB}^{00} 为节点 C 至节点 B 的角变传播系数,即节点 C 处有单位正向角变(无位移)时,节点 B 所发生的角变; $C_{CB}^{0\Delta}$ 为节点 C 至节点 B 的角变位移交互传播系数,即节点 C 处有单位正向角变(无位移)时,节点 B 所发生的位移; $C_{CB}^{\Delta 0}$ 为节点 C 至节点 B 的角变传播系数,即节点 C 处有单位正向位移(无角变)时,节点 B 所发生的位移; $C_{CB}^{\Delta\Delta}$ 为节点 C 至节点 B 的位移角变传播系数,即节点 C 处有单位正向位移(无角变)时,节点 B 所发生的角变; S_{BC} 为抗弯刚度,即 C 端固定, B 端发生单位正向角变(无位移)时, B 端的力矩; C_{BC} 为力矩传递系数,即 C 端固定, B 端发生单位正向角变(无位移)时, C 端力矩与 B 端力矩的比值; J_{BC} 为抗侧刚度,即 C 端固定, B 端发生单位正向位移(无角变)时, B 端的竖向力; T_{BC} 为

相干系数,即 C 端固定, B 端发生单位正向角变(无位移)时, B 端的竖向力。

对于 S_{CB} , T_{CB} , J_{CB} 的修正弹性常量 S'_{CB} , T'_{CB} , J'_{CB} 分别为

$$\left. \begin{aligned} S'_{CB} &= S_{CB}(1 + C_{CB}C_{CB}^{00}) - T_{CB}C_{CB}^{0\Delta} \\ T'_{CB} &= T_{CB} - T_{BC}C_{CB}^{00} - J_{CB}C_{CB}^{0\Delta} \\ J'_{CB} &= J_{CB} - T_{BC}C_{CB}^{\Delta 0} - J_{CB}C_{CB}^{\Delta\Delta} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

依次按式(3)计算前半部分传播不平衡力矩和竖向力,使不平衡力矩和竖向力集中于被撞桥墩 i 的相邻跨桥墩 $i-1$ 处,求出此节点的实际变形;然后计算后半部分传播形变,使不平衡力矩和竖向力集中于被撞桥墩 i 的相邻跨桥墩 $i+1$ 处,求出此节点的实际变形。对于 $i+1$ 处,其修正弹性常量 S'_{i+1} , T'_{i+1} , J'_{i+1} , D'_{i+1} 分别为

$$\left. \begin{aligned} \sum S'_{i+1} &= S'_{(i+1)(i-1)} + S'_{(i+1)(i+2)} \\ \sum T'_{i+1} &= T'_{(i+1)(i-1)} + T'_{(i+1)(i+2)} \\ \sum J'_{i+1} &= J'_{(i+1)(i-1)} + J'_{(i+1)(i+2)} \\ D'_{i+1} &= \sum S'_{i+1} (\sum J'_{i+1} + k'_{i+1}) - (\sum T'_{i+1})^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

依此进行分向传播,对于 $i+1$ 处,其形变传播系数分别为

$$\begin{aligned} C_{(i+1)(i-1)}^{00} &= \frac{1}{D'_{(i-1)(i+1)}} [-T_{(i+1)(i-1)} \sum T'_{(i-1)(i+1)} - \\ &\quad S_{(i+1)(i-1)} C_{(i+1)(i-1)} (\sum J'_{(i-1)(i+1)} + k'_{i-1})] \\ C_{(i+1)(i-1)}^{0\Delta} &= \frac{1}{D'_{(i-1)(i+1)}} (S_{(i+1)(i-1)} C_{(i+1)(i-1)} \cdot \\ &\quad \sum T'_{(i-1)(i+1)} - T_{(i+1)(i-1)} \sum S'_{(i-1)(i+1)}) \\ C_{(i+1)(i-1)}^{\Delta 0} &= \frac{1}{D'_{(i-1)(i+1)}} [-J_{(i+1)(i-1)} \sum T'_{(i-1)(i+1)} + \\ &\quad T_{(i-1)(i+1)} (\sum J'_{(i-1)(i+1)} + k'_{i-1})] \\ C_{(i+1)(i-1)}^{\Delta\Delta} &= \frac{1}{D'_{(i-1)(i+1)}} (-T_{(i-1)(i+1)} \sum T'_{(i-1)(i+1)} + \\ &\quad J_{(i+1)(i-1)} \sum S'_{(i-1)(i+1)}) \end{aligned}$$

当单位力作用于 i 处时,根据结构力学理论可知,分配至 $i+1$, $i-1$ 处的不平衡力矩 M_{i+1}^1 , M_{i-1}^1 及不平衡竖向力 V_{i+1}^1 , V_{i-1}^1 分别为

$$\left. \begin{aligned} M_{i+1}^1 &= \frac{l_i^2 l_{i-1}}{l_{i-1} + l_i} \\ M_{i-1}^1 &= -\frac{l_i^2 l_{i-1}}{l_{i-1} + l_i} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} V_{i+1}^1 &= -\frac{l_{i-1}^2}{l_{i-1} l_i} (1 + \frac{2l_i}{l_{i-1} + l_i}) \\ V_{i-1}^1 &= \frac{l_i^2}{l_{i-1} l_i} (1 + \frac{2l_{i-1}}{l_{i-1} + l_i}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

考虑形变传播系数和修正弹性常量的影响,在 $i+1$ 处的不平衡力矩 M_{i+1} 及不平衡竖向力 V_{i+1} 分别为

$$\left. \begin{aligned} M_{i+1} &= \frac{l_i^2 l_{i-1}}{l_{i-1} + l_i} - \frac{l_i^2 l_{i-1}}{l_{i-1} + l_i} C_{(i+1)(i-1)}^{00} + \\ &\quad \frac{l_{i-1}^2}{l_{i-1} l_i} (1 + \frac{2l_i}{l_{i-1} + l_i}) C_{(i+1)(i-1)}^{0\Delta} \\ V_{i+1} &= -\frac{l_{i-1}^2}{l_{i-1} l_i} (1 + \frac{2l_i}{l_{i-1} + l_i}) + \frac{l_{i-1}^2}{l_{i-1} l_i} (1 + \\ &\quad \frac{2l_i}{l_{i-1} + l_i}) C_{(i+1)(i-1)}^{\Delta\Delta} - \frac{l_i^2 l_{i-1}}{l_{i-1} + l_i} C_{(i+1)(i-1)}^{\Delta 0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$i+1$ 与 $i-1$ 处的位移 Δ_{i+1} , Δ_{i-1} 分别为

$$\Delta_{i+1} = \frac{1}{D'_{i+1}} (-V_{i+1} \sum S'_{i+1} + M_{i+1} \sum T'_{i+1}) \quad (8)$$

$$\Delta_{i-1} = \frac{1}{D'_{i-1}} (-V_{i-1} \sum S'_{i-1} + M_{i-1} \sum T'_{i-1}) \quad (9)$$

对于连续梁桥,当船舶撞击第 i 号桥墩时,此时相邻跨桥墩第 $i+1$ 号桥墩墩顶位移为 Δ_{i+1} ,相邻跨桥墩第 $i-1$ 号桥墩墩顶位移为 Δ_{i-1} ,分向传播模型如图 4 所示。顶端约束刚度 K' 为

$$K' = \frac{K'' K_{Zi}}{K'' + K_{Zi}} \quad (10)$$

其中

$$K'' = \frac{1}{\Delta_p + \Delta'_{i+1}}$$

$$\Delta'_{i+1} = \frac{l_{i-1}^3 l_i^2 + l_{i-1}^2 l_i^3}{3(l_{i-1} + l_i)^2 K}$$

$$\Delta_p = \min\{\Delta_{i+1}, \Delta_{i-1}\} + \frac{l_{i-1}}{l_{i-1} + l_i} |\Delta_{i+1} - \Delta_{i-1}|$$

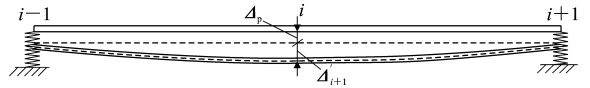


图 4 分向传播模型

Fig. 4 Propagating Model Along Separate Routes

在撞击力 F 作用下考虑连跨效应,被撞桥墩墩顶位移 Δ_d 为

$$\Delta_d = \frac{3F\eta^2 h^3 - F\eta^3 h^3}{2hK' + 6K_1} \quad (11)$$

3 算例分析

3.1 基本参数

苏通大桥南汉引桥为连续梁桥,其桥墩为等截面薄壁桥墩,上部梁为箱梁结构,梁体采用 C50 混凝土,其横向抗弯刚度 $K = 8.07 \times 10^8$ kPa;基础采用钻孔灌注桩,如图 5 所示。支座采用板式橡胶支座,支座横向剪切刚度 $K_{Zi} = 9.424 \times 10^3$ kN · m⁻¹,

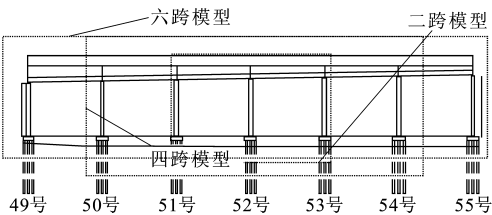


图 5 苏通大桥桥型布置

Fig. 5 Arrangement of Sutong Bridge Structure

墩身采用 C40 混凝土,其弹性模量 $E=32.5\text{ GPa}$ 。苏通大桥南汉引桥桥墩基本参数见表 1。

表 1 苏通大桥南汉引桥桥墩基本参数

Tab. 1 Basic Parameters of Pier of South Branch Bridge

墩号	截面长 a/m	截面宽 b/m	墩高 h/m	抗侧刚度 $K_{\text{Di}}/$ $(10^5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1})$	单跨跨距 l_i/m
49	6.5	4.2	43.967	8.27	75
50	6.5	4.2	45.092	7.86	
51	6.5	4.2	46.217	7.48	
52	6.5	4.2	47.342	7.13	
53	6.5	4.2	48.467	6.82	
54	6.5	4.2	49.592	6.50	
55	6.5	4.2	50.737	6.21	

根据实际工程数据,苏通大桥撞击船舶为载重吨数 3 000 t 级的内河船,撞击速度 $V=3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,根据美国 AASHTO 2009 规范^[7]可得船舶撞击力 $F=19.72\text{ MN}$ 。

3.2 本文结果与单墩模型的对比

假定船舶撞击力 F 撞击的位置为距 52 号桥墩墩底 $h'=15.78\text{ m}$,不考虑桩-土作用,底部为固接。利用有限元软件 MIDAS 进行在船舶撞击力作用下被撞桥墩顶端位移的计算,有限元模型如图 6 所示。表 2 中给出了在撞击力作用下利用公式(10)计算得到的按单墩模型不考虑上部结构作用悬臂桥墩顶端位移及考虑不同跨数对被撞桥墩顶端位移的理论值及有限元计算值。

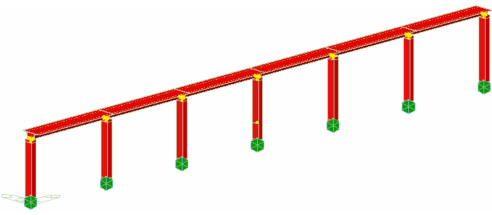


图 6 苏通大桥有限元模型

Fig. 6 Finite Element Model of Sutong Bridge

由表 2 可知:考虑边跨对被撞桥墩的约束作用得出的顶端位移与单墩模型相比相差较大;在相同撞击力作用下,随着跨数的增加,被撞桥墩顶端位移

表 2 顶端位移对比

Tab. 2 Comparison of Top Displacement

桥跨模型	F/MN	Δ_1/mm	Δ_2/mm	$K'_n/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\Delta_1\Delta_2^{-1}$
六跨	19.72	44.279	40.890	6 094.03	1.083
四跨	19.72	44.397	40.931	5 919.54	1.085
二跨	19.72	44.891	41.276	5 195.05	1.088
悬臂墩	19.72	48.786	45.404	0.00	1.074

注: Δ_1,Δ_2 分别为被撞桥墩顶端位移理论值和有限元计算值。

逐渐减小;利用六跨模型、四跨模型和二跨模型所得到的顶端位移较悬臂墩模型分别减小 9.94%,9.85%,9.09%。由此可以看出,相邻跨对被撞桥墩的约束作用最明显,其影响率达到 91.6%。同时利用本文方法得到的理论值与有限元计算值比较接近,理论值较有限元计算值大 8%左右,这是由于本文理论方法没有考虑上部梁结构剪切刚度对被撞桥墩的影响。

3.3 顶端位移与各边跨桥墩刚度的关系

在相同撞击力作用下,各边跨桥墩抗侧刚度的变化对被撞桥墩顶端位移的影响如图 7 所示。

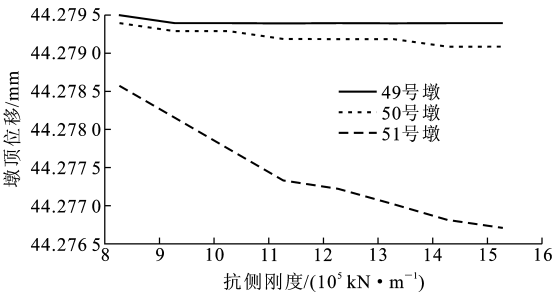


图 7 墩顶位移与各边跨抗侧刚度的关系

Fig. 7 Relations Between Displacement of Pier and Lateral Stiffness of Side Spans

由图 7 可以看出:随着各边跨桥墩抗侧刚度的增加,被撞桥墩顶端位移 Δ_d 逐步减小,当 49,50,51 号桥墩抗侧刚度分别增至 $1.527\times10^6\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 时,其对被撞桥墩顶端位移影响率之比为 1:3:18。由此可见,相邻跨桥墩(51 号墩)刚度对被撞桥墩顶端位移影响最大,第 2 跨桥墩(50 号墩)刚度的影响次之,远离被撞桥墩第 3 跨桥墩(49 号墩)刚度对被撞桥墩的约束作用最小。因此,本文建议对于船舶碰撞问题,桥墩模型可选取二跨模型进行船舶桥击碰撞问题的相关计算,该方法为在船舶撞击力作用下准确评估桥梁的力学安全行为提供了依据。

3.4 顶端位移与支座横向剪切刚度的关系

在相同撞击力作用下,各跨桥墩上部支座横向剪切刚度的变化对被撞桥墩顶端位移的影响如图 8

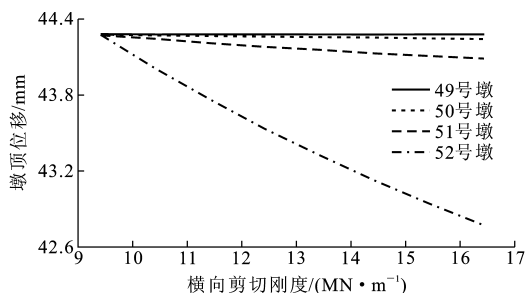


图8 墩顶位移与各跨支座横向剪切刚度的关系

Fig. 8 Relations Between Displacement of Pier Top and Transverse Shear Stiffness of Bearing

所示。

由图8可知:随着各跨上部支座横向剪切刚度的增加,被撞桥墩的顶端位移 Δ_d 逐步减小,且被撞桥墩上部支座52号墩的横向剪切刚度对被撞桥墩等端位移影响最大,越远处支座横向剪切刚度对被撞桥墩的约束作用越小。对比图7,8可知,支座横向剪切刚度对被撞桥墩的约束比桥墩横向抗侧刚度的作用明显,这为保证船舶碰撞作用下桥梁的安全和支座的选型提供了参考依据。

3.5 顶端位移与各桥跨跨距的关系

在船舶碰撞过程中,相邻桥墩的跨距对被撞桥墩的顶端位移具有重要的约束作用。为了解跨距对被撞桥墩的影响,在桥墩抗侧刚度与跨数不变的情况下,对各跨跨距进行参数化分析。图9为在撞击力不变的情况下相邻第1跨、第2跨、第3跨跨距变化对被撞桥墩顶端位移的影响。

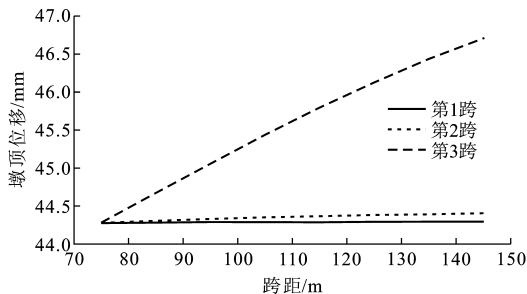


图9 墩顶位移与各跨跨距的关系

Fig. 9 Relations Between Displacement of Pier Top and Different Span Sizes

由图9可知:随着各跨跨距的增加,被撞桥墩的顶端位移 Δ_d 逐步增大,当第1,2,3跨跨距分别由75 m增至145 m时,其对被撞桥墩顶端位移影响率之比为1:9:165。由此可见,第3跨相邻跨跨距的变化对被撞桥墩等端位移影响最大,越远处桥跨跨距对被撞桥墩的约束作用越小,第3跨跨距的约束作用可以忽略不计。对比图9与图7可知,相邻

跨的跨距对被撞桥墩的约束比桥墩横向抗侧刚度的作用明显,这进一步说明本文建议桥墩模型选取二跨模型进行船舶碰撞问题的相关计算是合理的。

4 结语

(1)本文方法考虑了相邻跨及上部结构对被撞桥墩的顶端约束作用,从而分析顶端约束刚度与相邻跨桥墩刚度、支座横向剪切刚度、跨距、跨数的关系,这比较符合实际工况;同时基于分向传播法,将上部结构简化为弹性支承连续梁,分析各影响参数与顶端约束刚度的关系,进而得到顶端约束刚度计算公式。

(2)本文以苏通大桥引桥为例,针对连续梁桥,在相同撞击力作用下与悬臂墩相比,考虑连跨效应的被撞桥墩墩顶位移减小9.94%;随着连跨桥墩抗侧刚度、支座横向剪切刚度的增大,被撞桥墩墩顶位移逐渐减小;随着各跨跨距增大,被撞桥墩墩顶位移逐步增大,且相邻跨对被撞桥墩的约束作用最明显,影响率在90%以上。

(3)本文基于弹性分析,通过分向传播法及结构力学方法得到撞击力作用下被撞桥墩顶端位移,并通过有限元软件MIDAS分析苏通大桥引桥在船舶撞击力作用下被撞桥墩的顶端位移,并与理论值进行对比,理论值较有限元计算值高8%,可用于评估在船舶撞击力作用下桥梁的安全行为。

参考文献:

References:

- [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.
DAI Tong-yu, NIE Wu. Overview of the Vessel Bump Bridge Accident[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2003(2): 1-3.
- [2] 王君杰, 喻志然. 船撞设计冲击谱研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(14): 11-14.
WANG Jun-jie, YU Zhi-ran. Design Impact Spectrum for Vessel-bridge Collision Analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 11-14.
- [3] WRIGGERS P. Computational Contact Mechanics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [4] 罗旗帜, 何云勇, 徐中山. 连续刚构桥船舶碰撞的计算模型和动力响应[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 501-505.
LUO Qi-zhi, HE Yun-yong, XU Zhong-shan. Calculation Model and Dynamic Response of Continuous Rigid Frame Bridge in Collision with Ship[J]. Journal of

- Chongqing Jiaotong University; Natural Science, 2010, 29(4): 501-505.
- [5] JTJ D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].
JTJ D60—2004, General Code for Design of Highway Bridges and Culverts[S].
- [6] TB 10002.1—2005,铁路桥涵设计基本规范[S].
TB 10002.1—2005, Fundamental Code for Design on Railway Bridge and Culvert[S].
- [7] AASHTO 2009, Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges[S].
- [8] PEDERSEN P T, VALSGARD S, OLSEN D, et al. Ship Impacts; Bow Collisions[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993, 13(2): 163-187.
- [9] 吴永固. 桥梁船撞有限元动力数值模拟分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
WU Yong-gu. Dynamic Finite Element Numerical Simulation of Vessel-bridge Collision[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [10] 樊伟, 袁万城, 李丽平, 等. 千米级斜拉桥船撞动力响应分析实用方法研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2010, 34(4): 669-673.
FAN Wei, YUAN Wan-cheng, LI Li-ping, et al. Practical Procedure for Dynamic Response Analysis of Thousand-meter Scale Cable-stayed Bridge Subjected to Ship Collision[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2010, 34(4): 669-673.
- [11] 王俊, 刘伟庆, 汪凤泉. 考虑桥梁约束的桥墩复合基频近似算法[J]. 计算力学学报, 2008, 25(5): 717-720.
WANG Jun, LIU Wei-qing, WANG Feng-quan. Approximate Algorithm of Fundamental Frequency of Pier Constrained by Bridge Beam[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 25(5): 717-720.
- [12] 胡薇, 袁万城, 杨智. 连续梁桥船撞响应的简化分析研究[J]. 结构工程师, 2011, 27(6): 66-70.
HU Wei, YUAN Wan-cheng, YANG Zhi. Simplified Analysis of Continuous Girder Bridges Under Ship Collision[J]. Structural Engineers, 2011, 27(6): 66-70.
- [13] 姜华, 王君杰, 贺拴海. 钢筋混凝土梁桥船舶撞击连续倒塌数值模拟[J]. 振动与冲击, 2012, 30(10): 68-73.
JIANG Hua, WANG Jun-jie, HE Shuan-hai. Numerical Simulation on Continuous Collapse of Reinforced Concrete Girder Bridge Subjected to Vessel Collision[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 30(10): 68-73.
- [14] 刘建成, 顾永宁. 基于整船整桥模型的船桥碰撞数值仿真[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 155-162.
LIU Jian-cheng, GU Yong-ning. Simulation of Ship-bridge Head-on Collision Based on Finite Element Model of Whole Ship-bridge[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(5): 155-162.
- [15] 张培君, 胡世德. 连续梁桥桥墩横向地震力简化计算方法探讨[J]. 结构工程师, 2005, 21(4): 17-22.
ZHANG Pei-jun, HU Shi-de. Discussion for Simplified Calculation Method of Seismic Load to Piers of Continuous Bridges[J]. Structural Engineers, 2005, 21(4): 17-22.
- [16] 刘保东, 李鹏飞, 陈海波. 考虑连续梁桥布置方案的横向地震反应规律研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(6): 33-37.
LIU Bao-dong, LI Peng-fei, CHEN Hai-bo. Seismic Response Analysis for Continuous Beam Bridges in Transverse Direction Considering the Bridge Layout Scheme[J]. China Railway Science, 2009, 30(6): 33-37.
- [17] 宋一凡, 周勇军, 贺拴海, 等. 连续梁桥横桥向地震动分析[J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 147-151, 192.
SONG Yi-fan, ZHOU Yong-jun, HE Shuan-hai, et al. Transverse Seismic Analysis of Continuous Bridges[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(2): 147-151, 192.
- [18] 钟明, 刘铮, 张文普, 等. 弹性支承连续梁的计算[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1959.
ZHONG Ming, LIU Zheng, ZHANG Wen-pu, et al. The Calculation of Elastic Support Continuous Beam[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1959.