

赵国辉, 彭浩, 2010. 深水中大跨径斜拉桥地震响应分析. 震灾防御技术, 5(4): 461—466.

深水中大跨径斜拉桥地震响应分析¹

赵国辉¹⁾ 彭浩²⁾

1) 长安大学, 西安 710064

2) 中国交通建设集团第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075

摘要 本文以某斜拉桥为例, 采用基于 Morison 方程的附加动水质量方法研究了动水压力对深水中大跨径斜拉桥地震响应的影响, 并对中国、日本和欧洲规范中动水惯性系数的取值进行了对比研究。结果表明, 在深水条件下应当考虑动水压力作用对结构地震响应的影响。对比日本和欧洲规范, 我国规范中动水惯性系数取值偏低, 动水压力的影响偏小。

关键词: 斜拉桥 动水压力 Morison 方程 附加动水质量 地震响应

引言

深水中桥梁结构在地震激起的动水压力作用下的响应是一个复杂的问题。一方面周围的水体会改变结构自身的动力特性并产生附加动水压力, 进而影响结构的地震响应(居荣初等, 1983; 李玉成, 1990); 另一方面结构与水体之间的相互作用, 会对结构在地震激励下的响应产生较大影响(刘正兴等, 1995; 房莹光等 1998)。动水压力作用可以采用基于 Morison 方程的附加动水质量法进行模拟(赖伟等, 2004; 高学奎等, 2006; 柳春光等, 2009), 但附加质量大小随结构截面外形、尺寸及水深变化等因素对结构地震响应的影响研究, 目前国内外尚无文献报道。本文基于非线性 Morison 方程, 建立了考虑动水压力作用的深水桥梁有限元模型, 分析讨论了地震作用下考虑附加动水质量分布对深水桥梁的地震响应影响。

1 Morison 方法简介

1950年由 Morison 等人为计算表面光滑刚性的圆柱体上的动水压力, 提出了一个半经验半解析的 Morison 方程, 该方法忽略了结构存在对水运动的影响, 认为水对结构的作用主要由未受扰动的加速度场和速度场引起的沿水运动方向作用于结构上的惯性力和阻力。该方法认为作用在单位长度柱体上的正向波流力 $f(z, t)$ 为:

$$f(z, t) = \frac{1}{2} \rho C_D U(z, t) |U(z, t)| + \rho C_M S \dot{U}(z, t) \quad (1)$$

式中, ρ 为水的密度; C_D, C_M 分别为水阻力系数及惯性力系数; D 为柱体迎波浪面的边长;

1 基金项目 西部交通科技项目(2008318000918)和陕西省交通科技项目(09-13k)资助

[收稿日期] 2010-03-14

[作者简介] 赵国辉, 男, 生于 1978 年。讲师。主要研究方向: 桥梁结构抗震分析。E-mail: zgh@gl.chd.edu.cn

S 为柱体截面积; $U(z, t)$ 为波流场中综合速度; $\dot{U}(z, t)$ 为加速度。

假设水体是理想的无旋、不可压缩的流体, 结构上的动水压力可采用 Morison 方程近似计算。该方法忽略结构对周围水体运动的影响, 认为水对结构的作用分别是没有受到扰动的加速度场和速度场引起的水流在运动方向上作用于结构上的惯性力和阻尼力造成的。由式(1)可得到地震激励下的波动力方程:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C_D A_p [(u - \dot{x} - \dot{x}_g) \left| (u - \dot{x} - \dot{x}_g) \right|] + (C_M - 1) \rho V (\ddot{u} - \ddot{x} - \ddot{x}_g) \quad (2)$$

式中, A_p 为结构截面面积; V 为结构水下部分体积; \ddot{u} 、 \dot{u} 分别为水的绝对加速度和绝对速度; \ddot{x} 、 \dot{x} 分别为结构的相对加速度和相对速度; \ddot{x}_g 为地面运动加速度。

假设桥梁处于静水中, 即 $\ddot{u} = \dot{u} = 0$ 时, 式(2)可写为:

$$F_w = -\frac{1}{2} \rho C_D A_p [(x + \dot{x}_g) \left| (x + \dot{x}_g) \right|] - (C_M - 1) \rho V (\ddot{x} + \ddot{x}_g) \quad (3)$$

式(3)中的阻力项为非线性项, 对该项进行线性化处理后可得到简化的 Morison 方程:

$$F_w = -\frac{1}{2} \rho C_D A_p \sigma_{x+\dot{x}_g} \sqrt{\frac{8}{\pi}} (\dot{x} + \dot{x}_g) - (C_M - 1) \rho V (\ddot{x} + \ddot{x}_g) \quad (4)$$

假设地基是刚性的, 结构由多个单元组成, 整个上部结构简化成集中质量单元。由地震激励下考虑动水压力作用的结构体系动力平衡方程可以表示为:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = -M \ddot{x}_g - \frac{1}{2} \rho C_D A_p [(x + \dot{x}_g) \left| (x + \dot{x}_g) \right|] - (C_M - 1) \rho V (\ddot{x} + \ddot{x}_g) \quad (5)$$

由于动水阻力与动水惯性力相比较小, 可以忽略不计, 式(5)可变为:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = -M \ddot{x}_g - M_w (\ddot{x} + \ddot{x}_g) \quad (6)$$

式中, $M_w = (C_M - 1) \rho V$ 为水中结构的附加动水质量。

作用在结构上每个节点的动水压力是与这个节点相连的所有单元所受动水压力的一半, 则节点 i 处的动水等效质量为:

$$M_{iw} = \Sigma (C_M - 1) A_p l_{ij} \quad (7)$$

式中, A_p 为单位长度上的节点 i 处的结构截面积; l_{ij} 为第 ij 单元有效长度的一半。

2 算例分析

本文以某高速公路跨越三峡库区中梅溪河上的一座大型桥梁为例进行分析。该桥主桥长 766m, 采用 (43 + 147 + 386 + 147 + 43) m 双塔双索面预应力混凝土斜拉桥, 总体布置如图 1 所示。索塔采用 H 型钢钢筋混凝土桥塔, 混凝土标号为 C50, 塔高为 193m, 其中上塔柱高 78.5m, 中塔柱高 42m, 下塔柱高 72.5m, 塔柱截面采用箱形封闭截面。水库蓄水后, 桥塔的水下深度为 55m。本文分别建立了不考虑动水压力作用的模型和基于 Morison 方程的动水压力作用的模型 (图 2), 进行了地震激励下的时程分析, 分析采用的人工地震动时程如图 3 所示。

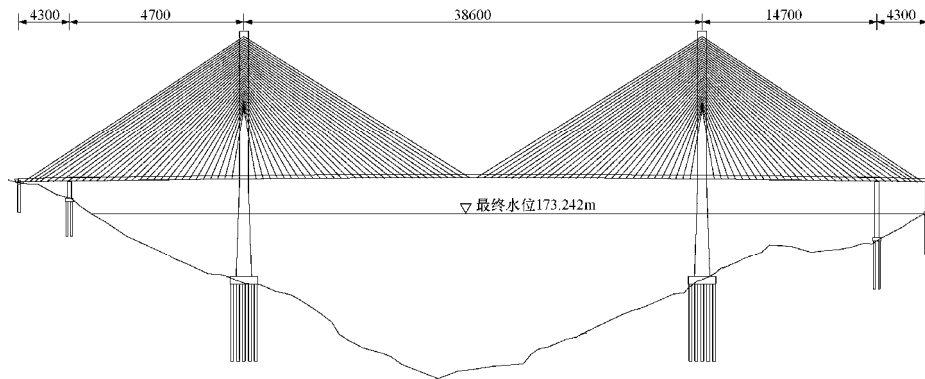


图1 全桥总体布置图

Fig.1 Over-all setup of the structure

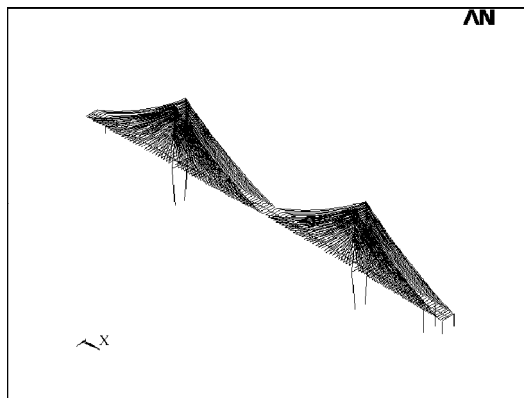


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

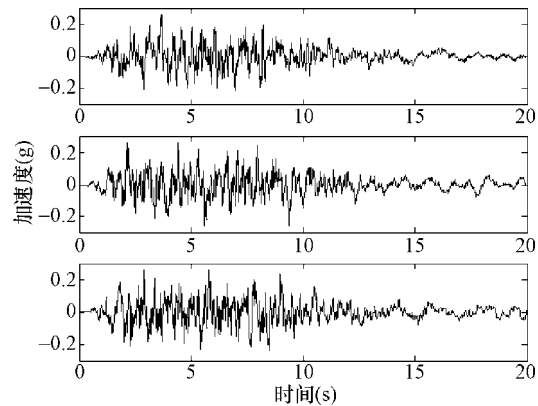


图3 人工地震动时程

Fig.3 Artificial time history curves

3 动水惯性系数的选取

应用 Morison 方程计算动水压力的关键是合理地选取动水惯性力系数 C_M ，一般认为 C_M 与雷诺数、Keulegan-Carpenter 数以及结构表面相对粗糙度有关（赖伟等，2004；高学奎等，2006；柳春光等，2009）。由于 Morison 方程是基于圆柱体模型推导出的动水压力计算公式，对于非圆柱体上附加动水质量可以将其等效为圆柱体来计算，根据其截面的外形尺寸计算得到的修正系数 K_c 来对圆柱体计算结果进行修正，其公式为：

$$M_w^r = K_c M_w^c \quad (8)$$

式中， M_w^r 、 M_w^c 分别为矩形截面柱体和以 D 为直径的圆柱体单位高度上的附加动水质量。目前，国内外桥梁抗震设计规范中对 K_c 的取值差异较为显著，以本桥为例：①按我国《铁路工程抗震设计规范（GB 50111-2006）》（中华人民共和国铁道部，2006）规定，在 0—0.8 倍水深时， K_c 取 1；在 0.8—1.0 倍水深时，线性缩减至 0。②按《日本桥梁抗震设计规范》（日本道路协会，2002）规定，在 K_c 沿水深呈抛物线变化时，最大值在塔底为 1.25。③按《欧洲桥梁抗震设计规范》（European Committee for Standardization，2005）规定， K_c 是结构截面尺寸相关的函数，对于长宽不等的矩形截面，在 2 个方向上的取值是不同的。

根据上述 3 种规范算出的 K_c 对比如图 4 所示。由于欧洲规范中的 K_c 与平行于结构运动方向截面边长和垂直于结构运动方向截面边长的比值有关, 当截面两个方向尺寸不等时, 两个方向的 K_c 取值也不同。

由图 4 可见, 我国《铁路工程抗震设计规范 (GB 50111-2006)》(中华人民共和国铁道部, 2006) 中规定的 K_c , 直接采用了等效圆柱体面积代替矩形截面进行计算而未做修正, 并考虑了水底边界层效应的影响;《日本桥梁抗震设计规范》(日本道路协会, 2002) 中, K_c 值沿水深呈抛物线分布, 侧重于考虑动水压力沿水深的变化并考虑了水面的边界层效应, 但未考虑截面形状对 K_c 取值的影响;《欧洲桥梁抗震设计规范》(European Committee for Standardization, 2005) 则严格按照 Morison 方程原理, 主要考虑截面形状对 K_c 取值的影响, 但未计入水体上下边界层效应和水深对动水压力的影响。

就 K_c 取值及其变化规律而言, 上述 3 种规范都没有全部计入水深、水体边界层及截面形状的影响, 但欧洲规范取值考虑了外形尺寸影响, 较中国和日本规范更符合 Morison 方程的分析原理。作者设想在欧洲规范取值的基础上, 适当参考中国和日本规范对水体边界层效应和水深的影响, 应为最合理的取值方法。

4 分析结果

对算例桥分别采用上述 3 种规范规定的附加动水质量分布规律, 建立附加质量模型与原模型进行地震响应分析, 对比不同附加动水质量分布规律对结构地震响应的影响。3 条人工地震动时程分析结果的最大值如表 1、表 2 所示。

表 1 顺桥向激励下结构响应峰值

Table 1 Peak responses of the structure under longitudinal excitation

作用、荷载	无动水	中国规范	日本规范	欧洲规范
塔底顺桥向剪力 (kN)	9008.62	9723.51	9882.40	11427.33
塔底顺桥向弯矩 (kN·m)	209212.56	224365.24	226458.46	258665.52
塔顶顺桥向位移 (cm)	33.52	35.62	35.93	42.52
主梁梁端纵向位移 (cm)	89.93	90.37	90.55	92.05

表 1、表 2 的结果表明, 在考虑动水压力作用后, 桥塔内力及位移响应显著增大, 采用中国规范的结果较原结构增加 7% 左右; 采用日本规范为 8% 左右; 采用欧洲规范为 25% 左右。由于本桥为半漂浮体系, 动水压力作用对主梁位移响应影响较小。

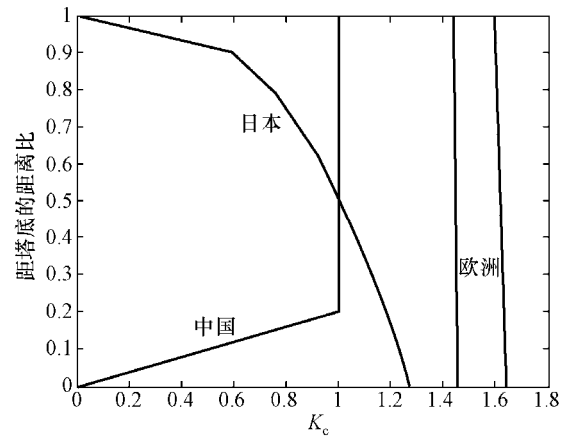


图 4 中国、日本、欧洲规范 K_c 对比图

Fig. 4 Comparison of K_c among the specifications of China, Japan and Europe

表 2 横桥向激励下结构响应峰值

Table 2 Peak responses of the structure under transverse excitation

作用、荷载	无动水	中国规范	日本规范	欧洲规范
塔底横桥向剪力 (kN)	7558.27	8133.60	8280.88	10009.11
塔底横桥向弯矩 (kN·m)	99856.02	108972.49	111058.85	124466.87
塔顶横桥向位移 (cm)	15.88	17.02	17.53	20.36
主梁跨中横向位移 (cm)	95.33	96.06	96.35	99.01

5 结论

(1) 在地震作用下, 由于动水压力的作用, 桥塔的位移和内力响应明显增大, 特别是塔顶位移、塔底弯矩、塔底剪力。对于深水中桥梁抗震设计考虑动水压力作用是非常必要的。

(2) 采用我国《铁路工程抗震设计规范(GB 50111-2006)》(中华人民共和国铁道部, 2006)计算的动水压力作用偏小, 应当考虑非圆断面的尺寸效应修正系数, 来计算动水压力对结构的地震响应影响。

(3) 附加动水质量沿水深的分布规律在各国规范的取值不尽相同, 在上下边界层附近差异明显, 但在深水区域趋向于直线分布。笔者认为, 考虑截面形状的欧洲规范取值方法辅以中国和日本规范中的边界层效应和水深影响, 应为最合理的附加动水质量分布规律。

参考文献

- 房营光, 孙均, 1998. 平台-群桩-水流-土体系统的地震反应分析. 土木工程学报, **31** (5): 56—63.
- 高学奎, 朱晞, 2006. 地震动水压力对深水桥墩的影响. 北京交通大学学报, **30** (1): 55—58.
- 居荣初, 曾心传, 1983. 弹性结构与液体的耦联振动理论. 北京: 地震出版社.
- 李玉成, 1990. 波浪对海上建筑物的作用. 北京: 海洋出版社.
- 刘正兴, 孙雁, 1995. 流体介质中结构的动力特性及响应分析. 上海交通大学学报, **29** (4): 7—16.
- 赖伟, 王君杰, 2004. 地震下桥梁动水压力分析. 同济大学学报, **32** (1): 1—5.
- 柳春光, 齐念, 2009. 考虑流固耦合作用的深水桥墩地震响应分析. 防灾减灾工程学报, **29** (4): 433—436.
- 中华人民共和国铁道部, 2006. 铁路工程抗震设计规范 (GB 50111-2006). 北京: 中国计划出版社.
- 日本道路协会, 2002. 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編. 东京: 丸善出版社.
- European Committee for Standardization, 2005. Eurocode 8 Design of Structures for Earthquake Resistance Part 2: Bridges (EN1998-2-2005). London: British Standards Institution.

Seismic Response Analysis of Long Span Cable-stay Bridge in Deep Water

Zhao Guohui¹⁾ and Peng Hao²⁾

1) Chang'an University, Xi'an 710064, China

2) China Communications Construction Company First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China

Abstract A cable-stay bridge is taken as an example to analyze the effect of hydrodynamic pressure on seismic response of the bridge, which is built in deep water. Associated hydrodynamic mass method based on Morison equation is used in this paper. Comparative study on hydrodynamic inertia coefficient in specifications of China, Japan and Europe is performed. It is shown that hydrodynamic pressure should be considered when the bridge is built in deep water. Compared with specifications of Japan and Europe, the value of hydrodynamic inertia coefficient in our Chinese specification is relatively smaller than that of specifications of other countries mentioned above.

Key words: Cable-stay bridge; Hydrodynamic pressure; Morison equation; Associated Hydrodynamic mass; Seismic response