

冯俊迎, 洗巧玲. 动水压力对深水桥墩地震响应影响的研究综述[J]. 华南地震, 2014, 34(4):41-46. [FENG Junying, XIAN Qiaoling. Overview on the Research of the Influence of the Hydrodynamic Pressure on the Seismic Response of the Deep-water Bridge Piers[J]. South china journal of seismology, 2014, 34(4):41-46.]

## 动水压力对深水桥墩地震响应影响 的研究综述

冯俊迎<sup>1, 2</sup>, 洗巧玲<sup>1, 2</sup>

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405)

**摘要:** 地震激励下处于深水中的桥墩和周围水体的相互作用将对桥梁结构的动力响应产生较大影响。首先对地震作用下水-桥墩的相互作用理论做了概括, 给出了动水压力对桥墩的作用效应及各自的适用范围; 对主要的三种考虑流固耦合效应的分析方法做了对比, 探讨了地震作用下影响水-结构相互作用的主要因素, 并对今后的研究提出了建议。

**关键词:** 深水桥墩; 动水压力; 地震响应

中图分类号: U443.22; U442.5+5 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2014) 04-0041-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.04.07

## Overview on the Research of the Influence of the Hydrodynamic Pressure on the Seismic Response of the Deep-water Bridge Piers

FENG Junying<sup>1, 2</sup>, XIAN Qiaoling<sup>1, 2</sup>

(1. *Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;*

*2. Guangdong Province Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology, Guangzhou 510405, China)*

**Abstract:** Under earthquake excitation, the interaction between the bridge piers in deep water and the surrounding water bodies will affect the dynamic response of the bridge structure. The paper outlines the theories on the interaction of water-pier under earthquake excitation, and lists the application scope of the action effects of the hydrodynamic pressure to the bridge pier. Meanwhile, the paper compares the three main analysis methods considering fluid-structure interaction effects, and discusses the main factors of water-structure interaction under earthquake excitation. Suggestions for the future researches are proposed finally.

**Keywords:** Deep-water bridge pier; Hydrodynamic pressure; Seismic response

收稿日期: 2013-11-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2011CB013606); 高铁联合基金重点项目 (U1334209)

作者简介: 冯俊迎 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事地从事工程结构减震工作。

E-mail: 864679190@qq.com.

## 0 引言

进入 21 世纪,随着经济发展的需要,我国正致力于建造更大跨度和规模的跨海桥梁。跨海大桥的桥墩一般都处于深水环境中,例如我国正在规划和建设的沿太平洋海岸的高速公路干线涉及五个大型跨海工程项目(从北向南依次为渤海海峡工程、长江口越江工程、杭州湾跨海工程、珠江口伶仃洋跨海工程以及琼州海峡工程),平均水深都在 50 m 以上。复杂的深水环境对桥梁的设计理论和施工技术都提出了一些特殊的要求。此外,我国位于世界两大地震带(环太平洋地震带和亚欧地震带)交汇处,是一个地震多发国家。大型的跨海桥梁很可能跨越地震带或临近断层。在地震作用下,桥墩和水体之间的动力相互作用不仅会改变桥墩的动力特性,还会增大桥墩的地震响应。另外由于桥梁的下部结构入水较深,一旦在地震作用下出现损伤和破坏,其加固和改造十分困难。因此,作为生命线工程的大跨度深水桥梁,抗震性能必须得到保障。

地震动水压力问题的实质就是结构与水的相互作用问题,涉及到流固耦合,比较复杂。随着研究的深入和实践的需要,各国学者曾先后取得了一定的研究成果。但是对这方面问题进行分析 and 归纳的文章并不多见。本文对关于地震激励下

水-桥墩动力相互作用的相关研究内容进行归纳总结,并提出一些尚待解决的问题。

## 1 地震作用下水-桥墩动力相互作用机理

### 1.1 水-桥墩动力相互作用理论

水-桥墩相互作用是典型的流固耦合振动问题,涉及固体力学、流体力学和动力学等多个学科。目前国内外对深水桥墩动水压力这方面的研究还比较少,而在海洋工程中对波浪力的研究已取得了丰硕的成果,二者具有一定的共同点,因此可以将分析波浪力问题中的有关理论应用于深水桥墩动水压力的研究。

一般认为在地震过程中,桥墩随地基一起运动时带动周围水体运动,桥墩周围水体的惯性使桥墩振动周期增加,墩顶位移响应增大。另外,桥墩周围水体的惯性力作用对墩身产生较大的压力使桥墩内力增加。对深水桥墩的动水压力进行分析,其关键是对水体运动状态的描述。为了避开数学上的难题,一般基于波浪是单一频率的线性波动,可把水-桥墩在地震激励下的相互作用问题分为三类:辐射波浪问题、小尺寸问题和绕射波浪问题(表 1)。

表 1 地震激励下水-桥墩相互作用的三类问题

Table 1 Three problems of the interaction of water-bridge pier under earthquake excitation

三类问题	假定和原理	一般适用范围
辐射波浪问题	水在桥墩运动前保持静止,在地震激励下桥墩在水中运动从而激起水体波动。	动水压力作用下的大尺寸墩柱。
小尺寸问题	墩柱的运动不影响水的运动状态。	小尺寸结构
绕射波浪问题	远处传来的波浪由于结构的存在改变了波浪的运动形式使波浪作散射运动,入射波与散射波叠加成新的波浪场。	考虑动水压力和波浪力共同作用

### 1.2 动水压力对结构的作用效应

地震作用下动水压力对结构的作用效应可从以下三个方面考虑:粘性效应、惯性力(附加质量)效应和绕射效应。为方便使用针对不同的波长( $L$ )、结构物的横向尺寸( $D$ )及波高( $H$ ),表2、图

1 给出动水压力计算中粘性阻力、惯性力和绕射力的主要支配范围。表 2 是对图 1 的解析。

## 2 水-桥墩相互作用分析方法

地震激励下考虑动水作用的桥梁动力响应分

表 2 动水压力作用效应的适用范围(对图 2 的解析)

Table 2 The application scope of the effects of hydrodynamic pressure (explanation to Fig.2)

区域	条件	考虑的作用效应	原因
I	$H/D < 1$ 且 $D/L < 0.15$	只考虑惯性力效应	流体粘性的影响柱体绕流的影响都很小
II	$H/D < 1$ 且 $D/L > 0.15$	不考虑粘性效应,需考虑绕射效应	柱体的相对尺寸大,绕流效应较大,粘性效应可忽略
III	$H/D > 1$ 且 $D/L < 0.15$	需考虑惯性力效应和粘性效应,不考虑绕射效应	柱体的相对尺寸较小,绕流效应可忽略,因波高较大,粘性效应需考虑
IV	$H/D > 1$ 且 $D/L > 0.15$	----	$H/L > 0.143$ 时,波浪破碎

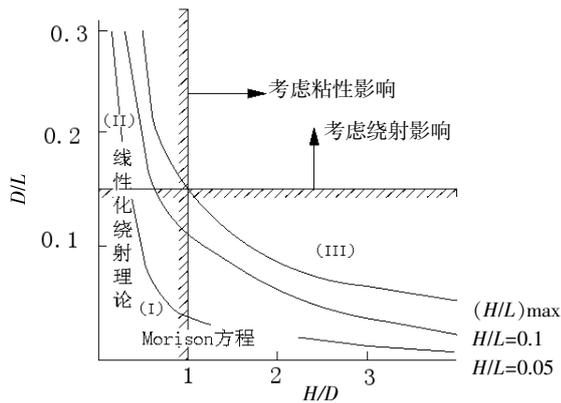


图 1 动水压力作用效应的适用范围  
Fig.1 The application scope of the effects of hydrodynamic pressure

析, 需从桥墩与周围水体的流固耦合方面考虑。研究水-桥墩相互作用是分析深水桥梁地震响应的关键, 其分析方法可大致分为解析法、数值法和半解析法三大类见表 3 所示。

### 2.1 解析法

解析法主要包括加权余量法和特征函数扩展法。其中, 加权余量法的特点是寻求满足一定边界条件的解析形式的近似解, 若能够恰当地选取试函数, 则可用较小的计算量获得高精度的解答。实际上, 相当一部分研究工作是将结构简化为圆柱体, 采用特征函数扩展法来分析动水对结构地震响应的影响, 并得到相应的封闭解。

表 3 三种分析方法之比较

Table 3 Comparison of the three methods

分析方法	原理	特点
解析法	建立在对耦合系统大量简化的基础上, 先求得桥墩所受的地震动水压力解析解, 然后将动水压力代入桥墩结构的振动方程, 从求得桥墩结构的地震响应。	计算量最小, 适合几何形状规则的结构, 便于理论上的探讨; 由于桥墩按悬臂梁进行处理, 不能考虑桥面系对桥墩的影响, 难于在复杂的实际工程中直接应用。
数值法	以有限元法和边界元法为主, 把结构和水域进行离散, 建立耦合系统有限元格式后, 对其进行数值求解。	计算量最大, 便于分析几何形状复杂的结构, 能够很好的解决实际工程问题; 由于水体和结构计算自由度较大, 前期处理工作繁琐, 对计算机性能要求高、计算效率低。
半解析法	先求得地震动水压力的解析解, 再采用有限元法建立桥墩结构分析模型, 进而对桥墩进行动水压力作用下的地震响应分析。	计算量次之, 利用有限元建立桥墩模型, 可以方便的考虑桥面系对桥墩的影响, 同时仅对桥墩建立数值模型相对数值法而言计算效率高。

1933 年 Westergaard 采用“附加质量”的概念研究了具有光滑垂直壁面的刚性坝体在水平地震作用下的动水压力问题, 并给出了在水平地震作用下垂直坝面上动水压力的计算公式。这种利用附加质量的概念来考虑水-结构流固耦合效应的方法对其后的研究工作产生了深远的影响。Tanaka 考虑了水体的可压缩性, 采用特征函数扩展法给出了水中刚性圆柱在简谐地震动作用下的解析反应<sup>[1]</sup>。Keming Sun 引入 T-完备函数作为权函数, 利用边界元理论(分别考虑和不考虑表面波效应)得到边界积分方程, 求得动水压力分布的解析值, 并认为此方法大大地减小了计算量<sup>[2]</sup>。Zhou 等分析了水中任意截面柱体弯扭振动的动力特性, 利用辐射波浪理论建立动水压力计算公式, 代入柱体振动方程对结构进行动力响应分析<sup>[3]</sup>; 居荣初等采用弯曲梁和剪切梁振动方程考虑柱体运动, 利用辐射波浪理论求解动水压力, 研究了水中柱体的地震响应<sup>[4]</sup>。杜修力等基于频域有理函数近似和时域辅助变量提出了一种计算大直径深水圆柱结构受动水压力的时域算法<sup>[5]</sup>。

### 2.2 数值法

数值分析方法常在实际工程中用来解决复杂的水-结构(流固)耦合体系。有限元法将水体和结构均采用有限单元进行离散, 根据流固耦合体系的特点, 固体域的离散一般采用位移模式描述, 而流体域的离散方法有 Lagrange (拉格朗日) 法、Euler (欧拉) 法和 ALE (Arbitrary Lagrange-Euler) 法, 见表 4。此外, 边界元和边界积分法可将三维问题转化为二维问题, 且只需求解边界节点上的积分方程, 可以有效的降低问题的复杂程度, 适宜于研究流固耦合问题。

1978 年, Zienkiewicz 最早使用有限元和无限元结合的方法模拟了水平地面运动下蓄水-混凝土坝体的动力反应分析; Hall 与 Chopra 利用子结构分析方法对坝体和地域分别采用有限元及无限元方法模拟了在简谐地面荷载作用下的动力响应。Bathe 等基于 ADINA 有限元软件提出了可以考虑非线性响应、接触条件影响及流体的可压缩性、大变形影响下的高效流固耦合分析方法<sup>[6]</sup>; Fan 等采用边界元处理近场和远场水域, 利用有限元来考

表 4 三种流体域离散方法之比较

Table 4 Comparison of the three discrete methods for the fluid domain

分析方法	原理	特点
Lagrange 法	把流体域看成不能承受剪切作用的弹性体, 对其采用位移模式进行离散, 结构和流体共同使用固体力学中的 Lagrange 坐标系。	单元矩阵对称且正定, 流固界面耦合易于实现, 但存在大量的“零能模态”不易于分析。
Euler 法	对流体域以势函数为变量。结构和水体采用不同的坐标系, 结构采用 Lagrange 坐标系, 水体采用 Euler 坐标系。	不会出现流体矩阵奇异的问题, 克服了“零能模态”。但单元矩阵大型非对称特且数值不稳定。
ALE 法	在流体与结构界面处吸收了 Lagrange 法长处, 有效地跟踪物质结构边界的运动; 其次在流场网格的划分上吸收了 Euler 法长处, 使流场网格单元独立存在且可按需要调整。	综合以上两种方法的优点, 使网格划分和计算都有了显著地改善。

考虑结构, 建立了流固耦合相互作用的计算方法<sup>[7]</sup>。席仁强根据运动控制体的雷诺输运定理, 采用 ALE 法描述推导了控制流体运动的 N-S 方程, 并考提出了虑流固耦合效应的水中结构物地震响应的分析方法<sup>[8]</sup>。

### 2.3 半解析法

半解析法是深水桥梁地震响应分析最为实用的分析方法, 主要以 Morison 方程(半解析半经验)和辐射波浪理论(半解析半数值)为主。对于小直径墩体通常采用 Morison 方程考虑动水压力对桥墩的作用; 而对于大直径的墩柱, 由于柱体的存在对水体运动的影响不可忽略, 应采用辐射波浪理论建立桥墩地震动水压力计算公式。

#### 2.3.1 Morison 方程法

1950 年 Morison 等人提出了一个半经验半解析的 Morison 方程, 用于计算从海底直至自由水面的小直径垂直柱体的水平波浪力。后来许多学者用该方程计算地震作用下小直径桩柱受到的动水压力。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力主要由未受扰动的加速度场和速度场沿水运动方向分别作用在结构的惯性力和阻力引起的。Martinelli 等利用 Morison 方程计算动水压力, 考虑地震输入的空间效应分析了水下隧道的地震响应<sup>[9]</sup>; 柳春光等基于非线性 Morison 方程, 建立了深水桥墩流固耦合作用的有限元模型, 并提出了求解该耦合非线性方程的算法<sup>[10]</sup>。

Morison 方程中的惯性力和阻力不仅与结构的外形尺寸和水质点运动状态有关, 还分别与惯性力系数  $C_M$  和阻力系数  $C_D$  有关。在应用 Morison 方程计算动水压力时, 需要合理地选取动水系数 ( $C_M$ 、 $C_D$ )。对于这方面的研究, 不少学者已经进行了大量的模型试验和现场观测工作。一般认为形状规则的结构,  $C_M$  可由理论分析确定, 而形状一般的结构,  $C_M$ 、 $C_D$  必须通过实验数据和分析得到。各国的有关设计标准也对  $C_M$ 、 $C_D$  的取值给出了建议(表 5)。

Morison 方程自诞生以来在工程界得到了广泛的应用。随着实际应用及研究工作的深入, 对其评价也日益增多。这些评论可分为两类: 一类主要持否定态度, 认为该方法无严密的理论基础, 实际应用中存在很多问题, 提倡用新的方法取而代之; 另一类持基本肯定的态度, 并致力于寻求合适的途径克服其缺点。

#### 2.3.2 辐射波浪理论

辐射波浪理论以流体速度势作为基本变量, 结合流固边界条件、自由表面边界条件、无限远边界条件等建立动水压力解析解, 求解动水压力时涉及特殊函数其求解较为复杂。通常假设辐射波为小波幅的线性波(Airy 波), 并认为波浪与结构的相互作用也是线性的, 此时称之为线性辐射波浪理论。如图 2 为基于辐射波浪理论的动水压力求解流程图。

表 5 各国规范所采用的  $C_M$ 、 $C_D$  值Table 5  $C_M$ ,  $C_D$  values given in the codes of different countries

各国规范	美国 API 规范(1981)	英国 DTI(1974)	挪威船检局规范(1974)	我国规范(海港水文)(1998)
采用的波浪理论	Stokes 五阶波理论或流函数理论	对应水深采用适当的波浪理论	Stokes 五阶波理论	线性(Airy)波理论
惯性力系数 $C_M$	1.5~2.0(不小于 1.5)	取可靠的试验结果或观测值	2.0	2.0
阻力系数 $C_D$	0.6~1.0(不小于 0.6)		0.5~1.2	1.2
备注	$C_M$ 与 $C_D$ 与采用的波浪理论有关	--	采取其他的波浪理论时可取适当的 $C_M$ 和 $C_D$ 值; 高雷诺数是 $C_D > 0.7$	--

赖伟基于辐射波浪理论,采用 Trefftz 完备函数分别构造了流体的弹性振动速度势和刚体运动速度势,采用梁单元有限元方法求解耦联运动方程<sup>[11]</sup>。刘振宇采用辐射波浪理论推导了圆形空心墩内域和矩形空心墩内、外水域的附加动水压力的计算解析式<sup>[12]</sup>。黄信基于辐射波浪理论,推导出深水桥墩地震动水压力作用下考虑水体压缩性和自由表面波影响的计算公式,深入分析了水体压缩性和自由表面波对桥墩地震动水压力的影响<sup>[13]</sup>。

由于辐射波浪理论便于描述地震激励、波浪荷载等动力荷载作用下深水桥墩结构对周围水体的运动状态的影响及水的运动对结构动力特性的影响。因此,基于辐射波浪理论建立深水桥墩地震荷载作用下动水压力解答,并分析动水压力对深水桥梁地震动力响应的影响,成为目前研究的

进行研究。我们知道这种假定与实际情况并不相符,但与考虑水体压缩性相比,不考虑水体的压缩性在分析时要简单的多。Chopra 研究表明:当激励频率远小于水体第一自振频率时,水体可压缩性影响很小;当激励频率大于水体第一自振频率时,水体可压缩性减小了顺流向和竖向地面运动引起的结构物的动力响应。张升明通过对简支矩形板在流体中的运动进行分析,认为流体的可压缩性,对流体中的结构固有频率的影响很小,可以忽略;但是流体的可压缩性对结构动力响应的影响不容忽视<sup>[14]</sup>。

### 3.2 水位变化的影响

2008 年汶川地震中,在建的都汉高速公路庙子坪岷江大桥(位于水库中),地震后发现一墩身水下开裂,付出了很大的代价才将其修复。这一个教训表明,在桥梁抗震设计中应考虑水位变化的影响。刘保东等人针对不同水深情况对深水桥墩地震响应进行了分析,表明随着相对水深的增加,桥墩的地震响应在增加,并建议采用相对水深来考虑地震动水压力对桥墩的影响<sup>[15]</sup>。黄信,李忠献研究了动水压力对深水桥墩地震响应的影响,得出动水压力改变了桥墩的动力特性,且随着相对水深的增大,对桥墩地震响应的影响越大<sup>[16]</sup>。

### 3.3 水-结构-土相互作用的影响

处于深水中的桥墩地基一般较弱,地震作用下,水-结构-土之间的相互作用势必会给桥墩的地震响应带来较大影响。Goyal 和 Chopra 在考虑土及柔性地基分析时,得出相比于刚性地基结构时,位移增大、弯矩和剪力减小<sup>[17]</sup>。Y.Yamada 等在研究随机波浪荷载对海洋结构的地震响应,表明考虑了土-结构相互作用后,相对刚性支承而言结构的振动频率减小、动力响应增大<sup>[18]</sup>。房营光,孙钧考虑了群桩与水流和地基土之间的动力相互作用问题,用解析法给出了系统对地震响应的分析<sup>[19]</sup>。

### 3.4 其他因素的影响

高学奎等考虑不同类型的近场地震,对深水桥墩的地震响应进行了分析,表明近场地震的速度脉冲效应增大了桥墩的地震响应<sup>[20]</sup>。陈国兴等基于 Morison 方程,采用 Stokes 五阶波浪理论考虑波流共同作用的影响,分析了地震作用下群桩基础桥墩的地震反应特性,结果表明:波流作用对桩体加速度反应的影响较小,但对桩体相对位移和弯矩的影响显著<sup>[21]</sup>。刘保东采用 Morsion 方程,考虑含水

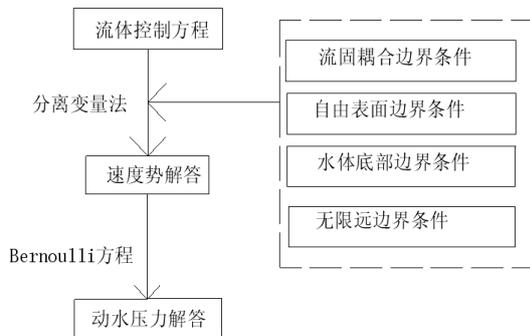


图 2 辐射波浪理论的动水压力求解流程图

Fig.2 Flowchart for solving the hydrodynamic pressure by the radiation wave theory

前沿。

解析法仅能对简单规则的桥墩结构进行动水压力下的地震响应分析;数值法因需要建立水域的有限元模型其计算效率很低,较难进行地震动水压力作用下全桥动力响应分析;半解析法可以方便的考虑桥面系对桥墩的影响,同时仅对桥墩结构建立有限元模型其计算效率高,并且还方便的考虑土-结构相互作用、材料非线性等因素的影响,所以现有深水桥墩地震响应分析以半解析法为主。由于桥墩震害常常是引起桥梁倒塌及难以修复的主要原因,因此有必要进一步探讨影响水-桥墩地震响应的主要因素。

## 3 影响水-桥墩相互作用的主要因素

### 3.1 水体的可压缩性的影响

一般分析中假定水体为不可压缩的理想流体

率对混凝土材料性能影响的试验,分析了含水率对深水桥墩地震响应的影响程度,得出综合考虑含水率和动水压力的作用后桥墩底部内力有增大的趋势<sup>[15]</sup>。杨万里,李乔以声波理论为基础建立了墩-水耦合有限元模型,指出当桥墩基频接近地震波有效带宽区间时,动水力的影响越明显<sup>[22-23]</sup>。

## 4 结语

我国《公路桥梁抗震设计细则》和《铁路工程抗震设计规范》均给出了桥梁在动水压力作用下的计算方法。但是规范中的方法属于静力计算方法,即仅以集中力的形式给出总动水压力,不能反映出动水压力的分布情况。且仅适用于中等跨度的桥梁,随着大跨度超水深跨海大桥的建设需要,急需解决以下问题:

(1) Morison 方程计算动水压力虽得到广泛的应用,但对其适用范围的界定还比较模糊,需对其做认真细致的研究。此外, Morison 方程是基于地震作用时水是静止的假设,与实际不符。

(2) 现有的理论研究大多基于单墩圆柱截面,而实际工程中深水桥墩很多为群桩且截面形形色色,更为详细地深究群桩效应和不同截面的动水压力分布情况,并给出群桩与单桩、其他类型的截面与圆柱截面之间的关系是必要的。

(3) 由于目前的计算理论做了不少假定和限定,需要大量的试验来验证和补充理论。

(4) 目前的研究大多是针对单个桥墩建立模型进行分析,缺乏对整体桥梁的分析,因此需要建立全桥模型,考虑多点地震输入的行波效应,分析其动水作用下全桥的地震响应。

## 参考文献:

[1] Tanaka Y., Hudspeth RT. Restoring forces on vertical circular cylinders forced by earthquake[J]. 1988 (16): 99-119.

[2] Keming Sun. Hydrodynamic pressure analysis of Arch Dams with T-complete functions [J]. Engineering Mechanics Journal. 1990 (9): 2054-2069.

[3] Zhou D, Liu W Q. Bending-torsion vibration of a partially submerged cylinder with an arbitrary cross-section [J]. Applied Mathematical Modeling, 2007, 31 (10): 2249-2265.

[4] 居荣初, 曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论 [M]. 北京: 地震出版社, 1983.

[5] 杜修力, 赵娟, 赵密. 大直径深水圆柱结构动水压力的时域算法[J]. 土木工程学报, 2012, 45 (增刊): 316-320.

[6] Bathe K J, Zhang H, Ji S H. Finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interaction [J]. Computers & Structures, 1999, 72 (1): 1-16.

[7] Fan S C, Li S M, Yu G Y. Dynamic fluid-structure interaction analysis using boundary finite element method-finite element method [J]. Journal of Applied Mechanics, 2005, 72 (4): 591-598.

[8] 席仁强, 陈国兴, 王志华. 考虑流固耦合的水中结构物地震反应方法[J]. 世界地震工程, 2009 (25): 60-67.

[9] Martinelli L, Barbella G, Feriani A. A numerical procedure for simulating the multi-support seismic response of submerged floating tunnels anchored by cables [J]. Engineering Structures, 2011, 33 (10): 2850-2860.

[10] 柳春光, 齐念. 考虑流固耦合作用的深水桥墩地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29 (4): 433-437.

[11] 赖伟. 地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.

[12] 刘振宇. 深水桥梁的地震响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

[13] 黄信. 水-桥墩动力相互作用机理及深水桥梁非线性地震响应研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.

[14] 张升明. 流体的可压缩性对弹性结构振动的影响[J]. 动力学研究与进展. 1994, 9 (4): 429-436.

[15] 刘保东, 刘鹏飞, 高超. 不同水深情况下水中桥墩地震响应研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (增刊): 199-203.

[16] 黄信, 李忠献. 动水压力作用对深水桥墩地震响应的影响[J]. 土木工程学报, 2011, 44 (1): 66-73.

[17] Alok Goyal, Anil K. Chopra. Earthquake analysis of intake-outlet towers including tower-water-foundation-soil interaction [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18: 325-344.

[18] Y. Yamada, H. Iemura. Seismic response of offshore structures in random seas [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989 (18): 965-981.

[19] 房营光, 孙钧. 平台-桩-水流-土体系统的地震反应分析[J]. 土木工程学报, 1998, 31 (5): 56-63.

[20] 高学奎, 朱晞, 李辉. 近场地震作用下深水桥墩的地震响应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28 (3): 83-87.

[21] 陈国兴, 白德贵, 王志华. 考虑波流影响的深水群桩基础桥墩地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28 (5): 170-177.

[22] 杨万里, 李乔. 墩-水耦合计算模式及深水桥墩动力响应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32 (3): 130-137.