

文章编号:1671-8879(2016)04-0048-10

近场地震下深水桥墩响应特性及动水效应 计算方法检验

江 辉¹,王宝喜²,白晓宇¹,朱 晞¹,曾 聪¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044; 2. 中国市政工程西北设计研究院
有限公司,甘肃 兰州 730099)

摘 要:动水效应是深水桥梁抗震设计中需要考虑的重要问题,而近场地震下深水桥墩的响应特性及合理计算方法亟待研究。以某典型深水桥梁为对象,基于可有效考虑墩-水流固耦合效应的完全数值计算方法,建立其等效单墩模型。首先讨论了水域范围对结构自振频率计算结果的影响,然后分析了不同水深下桥墩自振特性及脉冲型近场地震下的响应特征,并检验了几种代表性的解析-数值方法的准确性。研究表明:当水域宽度达到桥墩直径的 10 倍时,自振频率计算结果保持稳定;桥墩自振频率随水深增大而减小,桥墩完全被水淹没时前 3 阶自振频率分别比无水时减小了 5.3%、12.2%和 17.9%;不同方法下各阶频率的误差率随水深增大总体呈增大趋势,日本规范所得频率偏大,最大误差率超过 20%,Morison 方程法所得频率偏小,辐射波浪理论、中国铁路规范所得频率值与流固耦合数值法接近;近场地震下,桥墩弯矩、剪力和位移响应比无水时分别增大了 22%、23%和 20%,Morison 方程法计算结果偏大,其最大误差率超过 6%,日本规范计算结果偏小,最大误差率接近-5%,辐射波浪理论、中国铁路规范及李乔-杨万理简化公式所得结果与流固耦合完全数值法相吻合,5 种方法均可适用于一般尺度深水桥梁的抗震设计。研究成果对于近断层区深水桥梁的抗震设计具有借鉴意义。

关键词:桥梁工程;深水桥梁;等效单墩;流固耦合;解析-数值算法;近场地震;附加质量;动力响应
中图分类号:U442.55 **文献标志码:**A

Response property of deep-water bridge pier under near-fault earthquakes and inspection of calculation methods of hydrodynamic effect

JIANG Hui¹, WANG Bao-xi², BAI Xiao-yu¹, ZHU Xi¹, ZENG Cong¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China State Construction Engineering Corporation AECOM Consultants Co. Ltd., Lanzhou 730099, Gansu, China)

Abstract: Hydrodynamic effect is an important issue which should be taken into account in seismic design of deep-water bridges, and the response property of deep-water bridge pier under near-fault earthquakes and its reasonable computation method needs to be studied. Therefore, taking a typical deep-water bridge as research subject, this paper built the equivalent pier model based on

收稿日期:2016-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51378050);高等学校学科创新引智计划项目("111 计划")(B13002);国家山区公路工程技术研究中心
开放基金项目(gsgzj-2011-12);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014JBM044)

作者简介:江 辉(1977-),男,湖北武汉人,副教授,博士研究生导师,E-mail:jianghui@bjtu.edu.cn。

complete numerical method considering fluid-structure interaction. The influence of water range on stability of results was analysed firstly. Then the vibration and response characteristics of the deep-water pier excited by impulsive near-fault ground motions were discussed. Furthermore, the accuracy of several typical analytical-numerical methods was checked. The results show that the vibration frequency tends to be stable when the water width is 10 times of pier's diameter. The vibration period and dynamic response of pier is amplified by hydrodynamic effect, and this influence becomes more significant with the increase of water depth. The first three vibration periods of pier with full-water around increase by 5.3%, 12.2% and 17.9%, while the maximum bending moment, shear force and displacement increase by 22%, 23% and 20% respectively under near-fault earthquake. The error rates of different methods vary with the change of water depth. The calculated response by Morison equation method is larger than that by complete numerical method, and the error rate is beyond 6%, while that by Japanese code is smaller and its error rate is close to -5%. The calculated results by radiation wave theory, Chinese railway code and Li Qiao-Yang Wan-li's formula are quite close to that by complete numerical method, which means these methods are applicable to deep-water bridge of usual sizes. The above research results could provide reference for seismic design of deep-water bridge near active fault zone. 2 tabs, 9 figs, 21 refs.

Key words: bridge engineering; deep-water bridge; equivalent bridge pier; fluid-structure interaction; analytical-numerical method; near-fault earthquake; added-mass; dynamic response

0 引言

为了跨越宽阔的水面,桥梁在朝着更大跨度发展的同时,也出现了越来越多的深水桥梁,如日本明石海峡大桥,中国杭州湾大桥、港珠澳大桥、青岛海湾大桥及位于小湾水电站库区的滂街渡大桥等。地震作用下,通过粘性效应、惯性力效应和绕射效应,水体运动以动水力的形式作用于桥梁的水中部分,有可能显著改变桥梁的振动性态和地震响应。在1989年美国Loma Prieta地震、1995年日本Kobe地震以及2008年中国汶川地震中,均发生了深水桥梁的严重震害。动水效应是深水桥梁地震设计中必须考虑的重要因素,应针对此类水中结构的特殊抗震问题开展专门研究^[1-4]。

地震作用下深水结构动水效应的研究方法可分为3类:解析法、解析-数值法和完全数值法。解析法主要采用特征函数扩展法研究水对结构地震响应的影响。Westergaard在1933年首次对地震作用下垂直坝体的动水力进行分析并提出了动水压力的解析表达式^[1]; Liaw等推导了柔性圆柱体和重力坝的动水压力解析解^[2-3]。解析-数值法综合了解析法和完全数值法的优点。Morison等针对特征尺寸小于水流波长的细长圆柱体给出了“附加质量”形式的动水压力半解析计算公式,提出了目前被各国规范广泛采用的Morison方程^[4];中国《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)

(2009版)和日本《道路桥示方书(V耐震设计编)·同解说》给出了作用于单位高度桥墩上的地震动水压力附加质量^[5-6];文献[7-10]研究了基于辐射波浪理论的动水作用简化算法;文献[11]采用Morison方程法研究了水中桥梁的动水作用;文献[12]探讨了Morison方程法的改进算法。完全数值法是一种基于多场耦合的有限元计算方法,其中基于势流体单元的完全数值法提出于20世纪80年代,已广泛应用于大坝、深水桥梁等结构的流固耦合分析,方法的可靠性得到了试验验证^[13-14]。Wei等通过采用基于势流体单元的完全数值方法分析了桥梁群桩基础-水耦合系统的动力特性,并通过振动台模型试验验证了该方法的准确性^[15-16]。

中国地处环太平洋地震带和欧亚地震带的交汇处,陆地和海域范围内活动断层众多。深水桥梁通常具有较长的自振周期,由于动水环境下的惯性力效应,其自振周期势必进一步延长,在大幅值、长周期的脉冲型近场地震(也称近断层地震)作用下,对其抗震性能可能存在更高的要求。高学奎等研究表明,脉冲型近场地震显著增大深水桥梁的地震响应^[17-18]。此类地震下深水桥梁的特殊动力响应及既有解析-数值算法的有效性是亟待进一步研究的重要课题。

鉴于此,本文以某典型深水桥梁的等效单墩模型为研究对象,选取代表性的近断层地震记录为输入,以考虑墩-水流固耦合效应的完全数值计算方法

为基础,从自振特性、结构地震响应峰值及其分布等指标的角度,揭示近场地震下深水桥墩的特殊响应特性,并定量检验不同水深条件下 5 种代表性解析-数值法的有效性。

1 地震作用下深水桥梁动水效应计算方法

1.1 完全数值法——流固耦合方法

对于小直径结构,在流体-结构的动力耦合分析中,通常可假定流体为不可压缩、无热传递的无黏性无旋介质,此时其边界处满足小变形条件^[19]。对此类理想流体,必存在速度势 φ , 其是空间流体质点位置及时间 t 的函数,记为 $\varphi(x,y,z,t)$, 有

$$u=\frac{\partial \varphi}{\partial x}, v=\frac{\partial \varphi}{\partial y}, w=\frac{\partial \varphi}{\partial z} \tag{1}$$

式中: u 、 v 、 w 分别为流体内一处在 x 、 y 、 z 方向的流速。

代入理想流体的连续性方程,可得速度势 φ 满足 Laplace 方程

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \tag{2}$$

对于理想流体,任意一点的动水压力和速度势之间的关系可由 Bernoulli 方程得到,即

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \tag{3}$$

式中: p 为水体动水压力; ρ 为水的密度; g 为重力加速度。

对于势流体,由于流体微团运动速度很小,可以忽略速度平方以上的量,则有

$$p = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \rho gz \tag{4}$$

可有效模拟流固耦合效应的完全数值方法在考虑水体对结构动力作用的同时也计入了结构存在对水体运动的影响。本文采用具备强大的多场耦合数值计算能力的 ADINA 有限元软件,引入势流体

单元,实现地震下水中桥墩的流固耦合动力计算^[15,20]。为了确保流固耦合方法分析结果的准确性,还将对模型的合理水体范围进行讨论。

1.2 解析-数值法

解析-数值法通过解析解提出动水压力附加质量的计算公式,通过有限元数值法实现复杂结构的高效率计算,该方法综合了解析法和完全数值法的优点。相关学者及规范在动水作用的附加质量简化计算方法方面开展了工作,代表性的方法有 Morison 方程法^[4]、中国《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)(2009 版)^[5]、辐射波浪理论^[7-8]、日本《道路桥示方书》^[6],以及李乔-杨万理所提出简化方法^[9](以下简称“李-杨简化公式”)。本文首次对上述 5 种方法的有效性开展量化评价。另外,由于中国现行《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)中只规定了地震时作用于桥墩上的总动水压力的计算公式,本文暂不对其进行讨论^[21]。

2 墩-水耦合模型

2.1 模型介绍

以某位于Ⅲ类场地的典型钢箱混凝土深水筒支梁桥为研究对象,抗震设防烈度为 8 度,单跨跨度为 51.1 m,梁高 4.25 m,墩高 30 m,圆形墩直径 5 m。桥墩混凝土弹性模量 3×10^{10} Pa,密度 $2\,700\text{ kg/m}^3$,泊松比 0.2;水体体积模量 2.2×10^9 Pa,密度 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 。采用 ADINA 软件分别建立桥墩-水体流固耦合全数值模型及附加质量模型,如图 1 所示。在流固耦合全数值模型中(图 1(a)、(b)),桥墩和水体分别采用 3D-SOLID 实体单元、3D-FLUID 势流体单元模拟,上部结构简化为集中面质量加在墩顶,其中 B 为桥墩一侧水体宽度。桥墩底面固结,水体表面和侧面分别按自由液面和无限远边界设置。在附加质量模型中,桥墩依然采用 3D-SOLID 实体单元模拟,动水作用采用附加质量单元附着在桥墩单元上(图 1(c))。

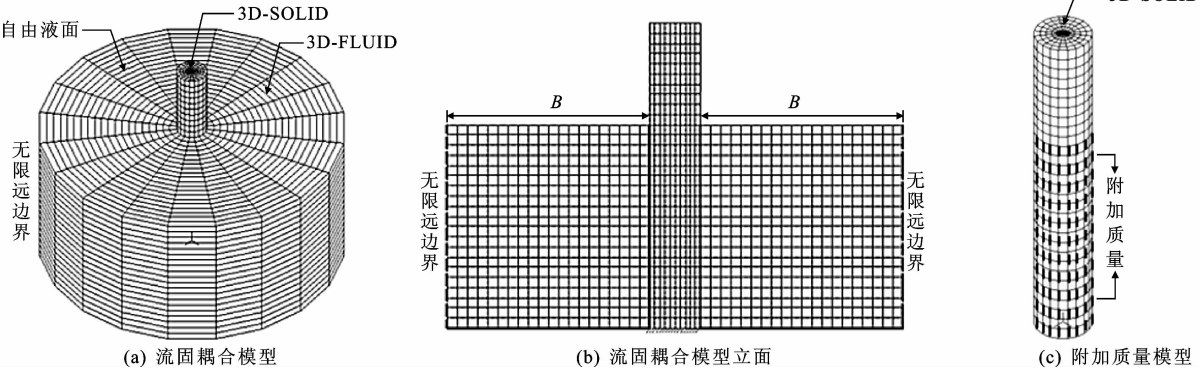


图 1 等效单墩算例模型
Fig. 1 Example models of equivalent bridge pier

2.2 模型网格尺寸及合理水体范围

模型网格划分质量对有限元数值分析结果的稳定性和准确性有重要影响。Wei 等研究表明,当桥墩、水体接触面处相邻的水-结构单元的网格宽度比例接近或小于 1 时,结构第 1 阶自振频率收敛于稳定值^[16],因此,本文在建立墩-水耦合模型时,墩-水接触面处的单元长度比取为 1。

此外,墩周水体范围的大小势必对计算结果有影响,需综合考虑准确性和计算效率,确定其合理范围。为了探讨合理水体范围,对于图 1(a)、(b)所示模型,将桥墩一侧水体宽度 B 分别取为桥墩半径 a 的 1、3、5、7、10、11、13 和 15 倍,对比研究不同水体范围下桥墩各阶自振频率的分布特征。

不同水体宽度下桥墩各阶频率 $f_n (n=1, \cdots, 6)$ 的取值见表 1,图 2 为桥墩自振频率随水体范围增加的分布。由表 1、图 2 可看出,水体范围越大,计算精度越高,但是当一侧水体宽度达到 25 m($10a$)以后,桥墩各阶频率保持稳定,综合考虑精度要求和计算效率,本文取一侧水体宽度 B 为 25 m。

表 1 不同水体范围下的桥墩自振频率

Tab. 1 Vibration frequencies of pier under different water sizes

一侧水体范围/m		不同振型频率 f_n /Hz			
		1 阶	3 阶	5 阶	6 阶
2.5	(1a)	1.561	10.03	12.13	17.34
7.5	(3a)	1.590	10.40	12.27	17.33
12.5	(5a)	1.599	10.55	12.33	17.32
17.5	(7a)	1.601	10.59	12.35	17.31
25.0	(10a)	1.602	10.60	12.35	17.31
27.5	(11a)	1.602	10.61	12.36	17.31
32.5	(13a)	1.602	10.61	12.36	17.31
37.5	(15a)	1.602	10.61	12.36	17.31

3 近断层地震波选取

按照以下原则选取近断层地震动记录:①桥梁所在场地类别为Ⅲ类场;②所在地震事件的矩震级(M)大于 6 级;③加速度峰值 PGA 大于 0.2g;④记录所在台站的断层投影距离不大于 10 km;⑤具有较明显的单边或双边脉冲。根据上述原则,从 PEER 强震数据库中选取了 7 条具有明显脉冲的近场地震动记录,其基本参数见下页表 2。下页图 3(a)、(b)给出了部分记录的加速度时程,可以看出明显的脉冲波形的存在;从图 3(c)的加速度反应谱可看出,除 TCU052W 记录外,其余各条地震波具有相接近的频谱分布,卓越周期的分布区间也与桥墩基阶自振周期接近,可有效激励墩-水体系的动力响

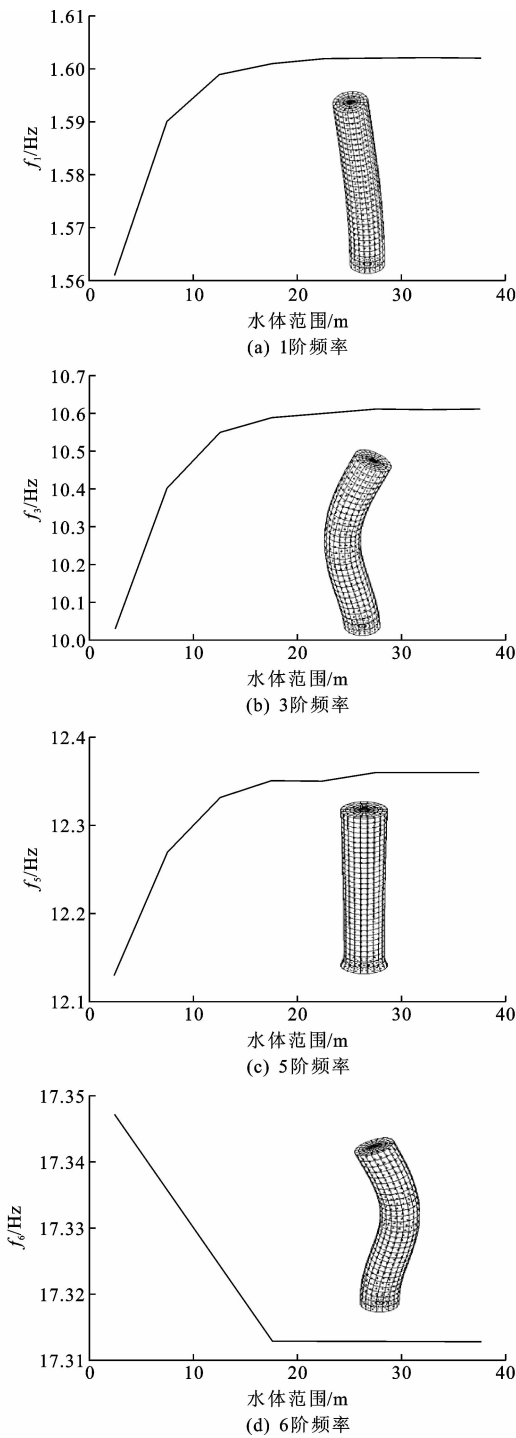


图 2 桥墩自振频率随水体范围改变的分布
Fig. 2 Distribution of vibration frequencies of pier under different water sizes

应。根据算例桥梁的设防烈度,将各记录 PGA 统一调为 0.2g,采用隐式直接积分法进行动力时程分析。

4 不同算法下的附加质量分布

以本文算例为对象,下页图 4 列出了 4 种不同

表 2 所选近断层地震动记录

Tab. 2 Selected near-fault earthquake ground motion records

编号	记录名称	地震事件	日期	震级/M	断层距/km	卓越周期/s	峰值加速度 PGA/g	峰值速度 PGV/ (cm·s ⁻¹)	峰值位移 PGD/cm
1	PET090	Cape Mendocino	1992-04-25	7.1	9.50	0.64	0.662	89.7	29.55
2	RRS228	Northridge	1994-01-17	6.7	7.10	0.72	0.838	166.1	28.78
3	YPT330	Kocaeli, Turkey	1999-08-17	7.4	2.60	0.52	0.268	27.4	10.08
4	TCU052W	Chi-Chi, Taiwan	1999-09-20	7.6	0.24	1.08	0.348	159.0	184.42
5	HEMO000	Imperial Valley	1979-10-15	6.5	0.50	0.66	0.314	71.7	25.53
6	HE07140	Imperial Valley	1979-10-15	6.5	0.60	0.70	0.338	47.6	24.68
7	SCS052	Northridge	1994-01-17	6.7	0.20	0.74	0.613	117.5	54.16

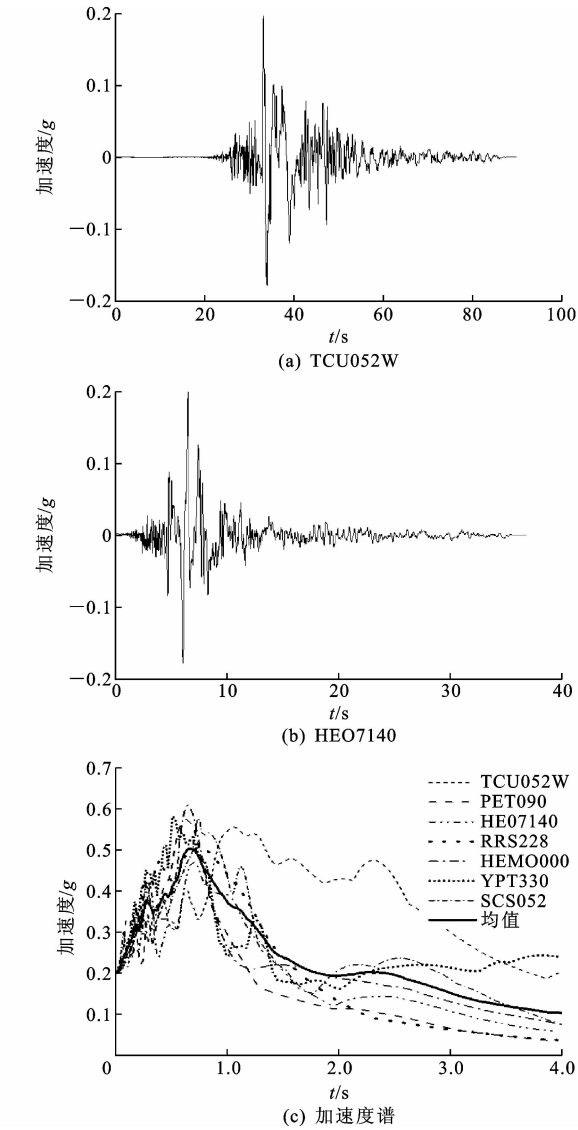


图 3 地震加速度时程及其加速度谱

Fig. 3 Acceleration time histories of selected near-fault records and their acceleration spectra

水深下根据前述 5 种简化方法计算得到的附加质量沿墩高的分布。其中,按照李-杨简化公式计算附加质量时,当桥墩半径 a 为 2.5 m、水深 h 为 5 m 时,所对应的附加质量为 0,因此图 4(a)中只给出了其

他 4 种方法的附加质量。由图 4 可知,5 种方法中, Morison 方程法的附加质量最大,沿墩高度方向为固定值;由中国铁路规范所得附加质量在从墩底到水深 80% 范围内与 Morison 方程法结果一致,而在距离水面为水深的 20% 的高度范围内,附加质量线性递减至 0,可看作是对 Morison 方程法的修正;李-杨简化公式、辐射波浪理论以及日本规范所得附加质量均为类似抛物线形分布,由李-杨简化公式所得附加质量在水深较大(入水深度大于 50%)时与根据辐射波浪理论得到的附加质量比较接近,但随着水深的减小,二者之间的差距增大,李-杨简化公式所得质量在墩底处较小。不同水深下,日本规范所得附加质量均明显小于其他几种方法。对比可看出,当水深较小(入水深度小于 50%)时,由李-杨简化公式、辐射波浪理论所得附加质量明显小于 Morison 方程法和 中国铁路规范 的计算结果。上述分布特征 是不同方法下结构自振特性及地震响应存在差异的重要原因。

5 响应特性及不同算法结果对比

5.1 结构自振特性

为了从自振特性的角度讨论水深的影响及不同方法的差异,下页图 5 给出了流固耦合全数值法及 5 种解析-数值法下桥墩前 3 阶自振频率随水深增加 的分布。可以看出,由于动水效应的作用,桥墩各阶自振频率降低,当水深为 0(无水)时,由流固耦合法得到的桥墩纵向第 1、2、3 阶频率分别为 1.69、11.91、17.31 Hz,而当水深为 30 m 时,这 3 阶频率分别减小为 1.60、10.46、14.22 Hz,分别比无水时减小了 5.3%、12.2% 和 17.9%。这说明桥墩入水越深,水对结构自振周期的延长作用越明显,桥墩的振型阶数越高,水深的影响越大。

另外,不同方法的计算结果也存在差异,且随着水深的增大,不同方法的差异趋于明显。由图 5

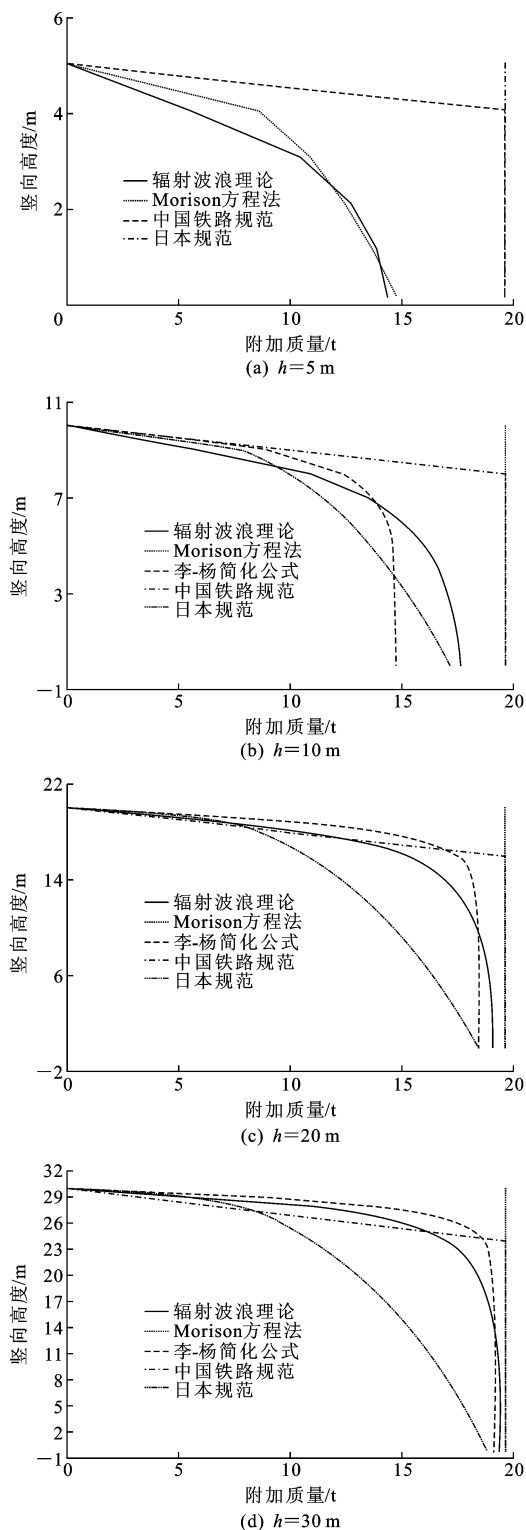


图4 不同方法的附加质量对比

Fig. 4 Comparison of added-masses by different methods

可看出,根据 Morison 方程法得到的桥墩自振频率最小,根据日本规范得到的频率最大,而根据辐射波浪理论、中国铁路规范以及李-杨简化公式所得结果比较接近,且与流固耦合法结果更加接近。上述差别可从第4节中不同方法给出的附加质量

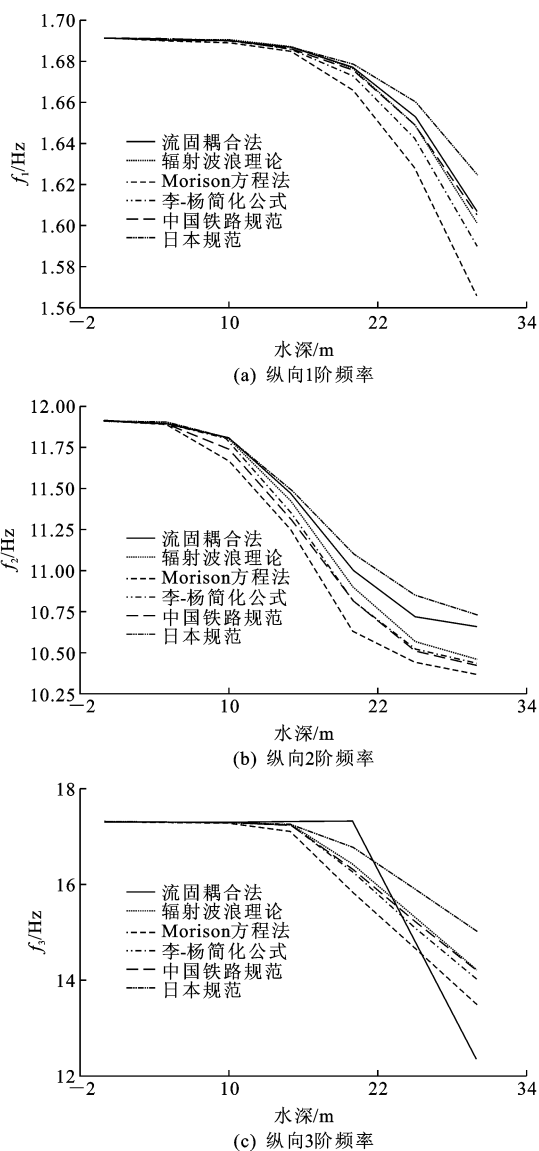


图5 桥墩自振频率随水深增加的分布

Fig. 5 Distribution of natural vibration frequencies of pier with different water depths

的差异中得到解释。由图4可知,不同水深下根据 Morison 方程法计算得到的附加质量最大,其次是铁路规范、辐射波浪理论和李-杨简化算法,日本规范算法的结果最小,附加质量越大导致结构自振频率越小,这与图5中桥墩自振频率的分布规律是一致的。

为了定量评估不同方法所得桥墩自振频率的误差率随水深的分布,定义前3阶频率误差率 R_{in} ($n=1,2,3$)为

$$R_{in} = \frac{f_{AM} - f_{PBF}}{f_{PBF}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: f_{AM} 、 f_{PBF} 分别为依据简化的附加质量法和流固耦合全数值法计算得到的桥墩自振频率。

图 6 给出了按照不同方法所得结构纵向前 3 阶自振频率误差率 R_{fn} 随水深的分布。可以看出,随着水深的增加,不同方法下各阶频率的误差率总体呈增大趋势,尤其是当水深超过墩高的 70% 时,第 3 阶频率的误差率明显增大。具体地,对于结构的前 3 阶频率,根据日本规范所得结果偏大,其误差率分别为 1.1%、1.2% 和 21%;根据李-杨简化公计算得到的前 3 阶频率的误差率分别为 0.8%、1.1% 和 18.6%;根据 Morison 方程法计算得到的频率偏小,误差率分别为 -3%、-2.7% 和 9.3%。如前文所述,这是由于不同方法计算给出的附加质量大小不同所导致的。另外,根据辐射波浪理论和中国铁路规范计算所得结果与流固耦合全数值法的计算结果比较吻合。

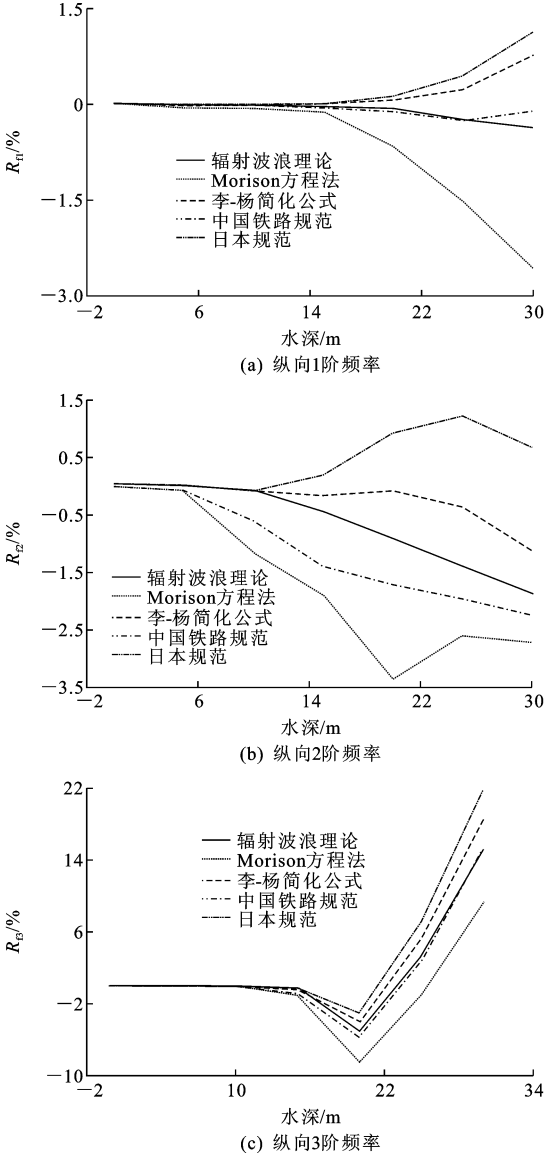


图 6 R_{fn} 随水深增加的分布

5.2 桥墩动力响应的分布特征

为了直观地对比动水作用对深水桥梁地震响应的影 响,下页图 7 给出了水深 h 分别为 5、25、30 m 时 7 条近断层记录下弯矩均值沿桥墩高度的分布。从图中可以看出,不同水深下,不同方法所得弯矩沿墩高的分布形状一致,在墩底处取得最大值。不同水深计算结果的对比表明,随着水深的增大,各截面处地震响应随之增大,且不同方法所得弯矩的差别更加明显。当水深为 0 时,墩底弯矩和剪力均值(限于篇幅,剪力值未列出)分别为 $163 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 和 7.2 MN ;当水深为 5 m 时,不同方法的动力响应包络曲线基本上和 无水时重合,此时动水效应不明显;水深为 25 m 时,弯矩响应介于 5~30 m 之间,不同方法的结果出现差异;当水深为 30 m 时,5 种方法之间的差别突出,根据流固耦合法得到的墩底弯矩和剪力均值分别为 $199 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 和 8.9 MN 。说明随着水深的增加,几种解析-数值法计算结果的差异不断增加,水深增大后的动水累积效应会放大不同方法的误差,在水深较大时务必考虑动水作用的影响。

5.3 不同水深下的桥墩响应增幅

为了评价近场地震作用下动水效应对桥墩动力响应的影 响程度,定义量纲一参数 R_M 、 R_Q 、 R_D 分别表示动水效应引起的桥墩弯矩、剪力和位移响应峰值的增幅

$$\begin{cases} R_M = \frac{M_w - M_0}{M_0} \times 100\% \\ R_Q = \frac{Q_w - Q_0}{Q_0} \times 100\% \\ R_D = \frac{D_w - D_0}{D_0} \times 100\% \end{cases} \quad (6)$$

式中: M_w 、 Q_w 、 D_w 分别为不同水深时墩底弯矩、剪力和墩顶位移在 7 条记录下的峰值均值; M_0 、 Q_0 、 D_0 分别为水深为 0(无水)时的峰值均值。

根据前述 5 种解析-数值简化算法及流固耦合全数值方法,下页图 8 给出了 7 条近场地震波激励下桥墩动力响应均值的增幅随水深的分布。可看出,随着水深的增大,不同方法下桥墩动力响应的增幅均增大。当水深为 30 m 时,Morison 方程法所得结果增幅最大,弯矩、剪力以及位移分别增大了 29%、30% 和 28%;根据流固耦合方法、辐射波浪理论以及中国铁路规范计算得到的动力响应增幅比较接近,弯矩、剪力以及位移的增幅在 22%、23% 和 20% 左右;依据李-杨简化公式所得动力响应增幅介于 Morison 方程法和辐射波浪理论之间,其弯矩、剪

Fig. 6 Distribution of R_{fn} with the increase of water depth

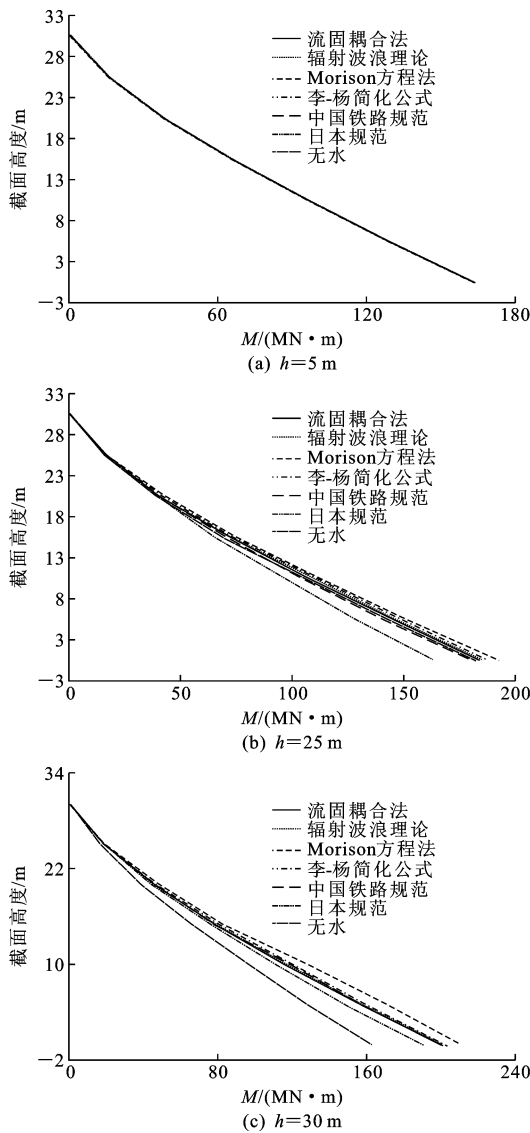
图7 不同方法下截面弯矩 M 沿墩高的分布

Fig. 7 Section moment along the pier by different methods

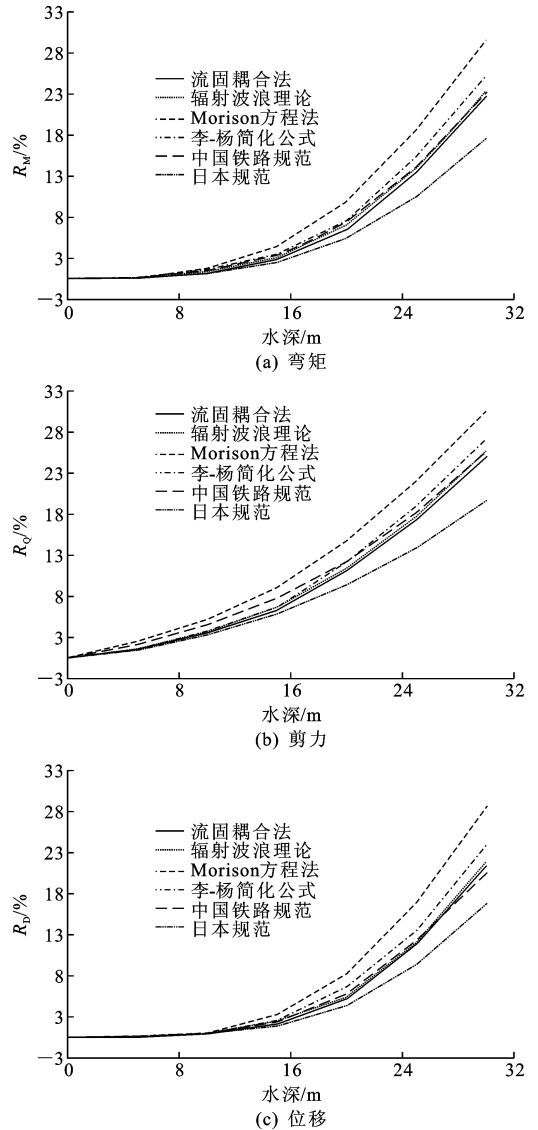
力和位移增幅分别为 24%、27% 和 24%，而日本规范对应的最大动力响应增幅最小，3 项指标的增幅均在 18% 左右。

5.4 不同水深下各种算法地震响应的误差率

为了定量评价不同解析-数值法在地震响应计算上的准确性，定义如下无量纲参数表示不同方法计算所得弯矩、剪力和位移的误差率 E_M 、 E_Q 和 E_D

$$\begin{cases} E_M = \frac{M_{AM} - M_{PBF}}{M_{PBF}} \times 100\% \\ E_Q = \frac{Q_{AM} - Q_{PBF}}{Q_{PBF}} \times 100\% \\ E_D = \frac{D_{AM} - D_{PBF}}{D_{PBF}} \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

式中： M_{AM} 、 Q_{AM} 、 D_{AM} 分别为根据几种解析-数值法得到的墩底弯矩、剪力和墩顶位移； M_{PBF} 、 Q_{PBF} 、 D_{PBF}

图8 最大地震响应均值增幅 R_M 、 R_Q 和 R_D 随水深增大的分布Fig. 8 Distribution of R_M , R_Q and R_D with the increase of water depth by different methods

分别为根据流固耦合全数值法所得结果。

以流固耦合全数值法所得单墩模型动力响应结果为基准，下页图 9 列出了 5 种解析-数值法的误差率随水深的分布。从图中可看出，Morison 方程法的误差率最大，且随水深的增加而增大，不同水深下墩底弯矩、剪力和墩顶位移的最大误差率分别达到 5.7%、4.7% 和 6.1%。辐射波浪理论的误差率随水深的增加也有增大的趋势，但增幅不大，其误差率没有超过 1%，说明该方法的精确度较高。李-杨简化公式的误差率随水深的增大而有所增大，3 项指标的误差率分别在 2.1%、1.8% 和 2.2% 左右。从图 9 中还可看出，中国铁路规范的误差率随水深的增加先增大后减小，在水深为桥墩高度的 55% 左右时，其误差率达到最大值，随着水深的继续增加，该方法的

误差率逐渐减小,总体来看,该方法的误差率在 2%以内。日本规范的误差率为负值,且随水深的增加而增大,最大误差率接近 5%,是唯一的地震响应结果偏小的方法。

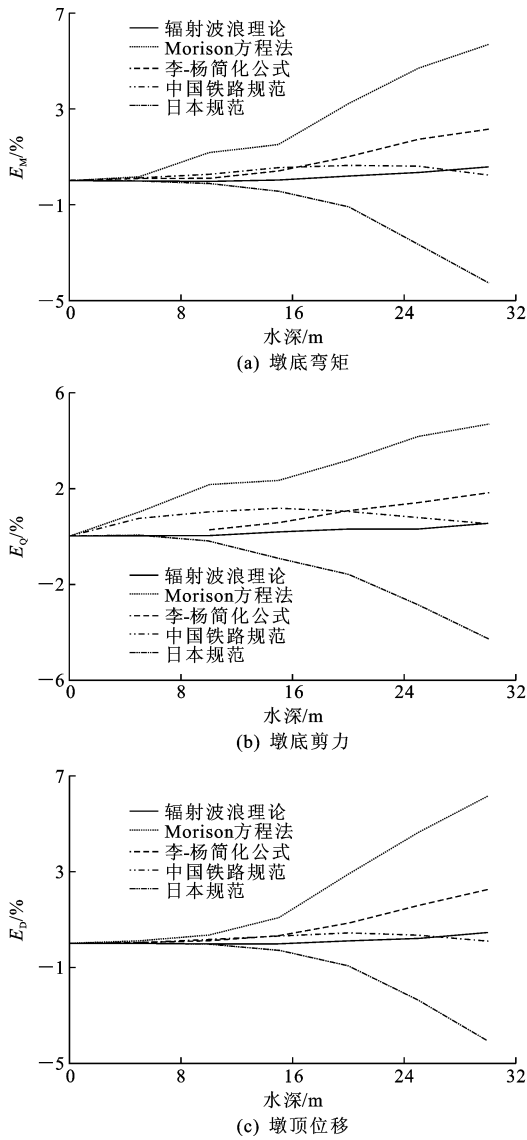


图 9 不同算法的地震响应误差率 E_M 、 E_Q 和 E_D 随水深增大的分布

Fig. 9 Distribution of E_M , E_Q and E_D with the increase of water depth by different methods

对比表明,在近场地震作用下,5 种解析-数值法中,Morison 方程法计算结果偏大最明显,误差率超过 6%,日本规范计算结果偏小,误差率接近 -5%,而李-杨简化公式、辐射波浪理论和中国铁路规范计算结果与流固耦合法结果较为吻合。上述差别同样也可从第 4 节中不同方法给出的附加质量的差异中得到解释。不同水深下根据 Morison 方程法计算得到的附加质量最大,其动力响应也最大,其次是铁路规范、辐射波浪理论和李-杨简化算法,日本

规范算法的结果最小,这与图 9 中桥墩动力响应的分布规律一致。

6 结 语

(1)水对结构振动特性的影响明显。桥墩自振频率随水深增大而减小,桥墩完全被水淹没时其前 3 阶自振频率分别比无水时减小了 5.3%、12.2%和 17.9%。不同方法下各阶频率的误差率随水深增大总体呈增大趋势,日本规范所得频率偏大,最大误差率超过 20%,而根据 Morison 方程法得到的频率偏小,辐射波浪理论、中国铁路规范法的结果与流固耦合法比较接近。

(2)近场地震作用下,水深对桥墩动力响应的影响明显。随着水深的增大,不同算法得到的桥墩动力响应相应增大且分布趋势基本一致,桥墩完全被水淹没时根据流固耦合法计算得到的桥墩弯矩、剪力和位移比无水时增大了 22%、23%和 20%。

(3)对于近场地震下的结构动力响应计算,几种解析-数值法的误差率随水深增大而变化。Morison 方程法计算结果偏大最明显,其最大误差率超过 6%,日本规范计算结果偏小,误差率接近 -5%,李-杨简化公式、辐射波浪理论、中国铁路规范和流固耦合法结果较为吻合,5 种方法的计算结果在不同水深下的最大误差率在 2%以内,可适用于一般尺度深水桥梁的抗震设计。

(4)本文研究是以一般高度和直径的水中桥梁单墩为对象开展的,上述各种解析-数值法对于具有更大墩高和直径的大跨度深水桥梁是否适用,将是下一步的研究方向,且条件具备时,还可开展缩尺模型的振动台试验。

参考文献:

References:

[1] WESTERGAARD H M. Water pressure on dams during earthquakes[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1933, 98(2): 418-433.

[2] LIAW C Y, CHOPRA A K. Dynamics of towers surrounded by water[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974, 3(1): 33-49.

[3] CHAKRABARTI P, CHOPRA A K. Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1973, 2(2): 143-160.

[4] MORISON J R, JOHNSON J W, SCHAAF S A. The force exerted by surface waves on piles[J]. Journal of

- Petroleum Technology, 1950, 2(5): 149-154.
- [5] GB 50111—2006, 铁路工程抗震设计规范(2009 版) [S].
GB 50111—2006, Code for seismic design of railway engineering (2009 Edition) [S]. (in Chinese)
- [6] 日本道路协会, 道路桥示方书(V 耐震设计编)·同解说[S].
Japan Road Association, Road and bridge design and explanation; chapter V seismic design [S]. (in Chinese)
- [7] 赖 伟, 王君杰. 沿水平向运动的水中截断圆柱体辐射波浪问题的解析解答[J]. 工程力学, 2007, 24(4): 81-86.
LAI Wei, WANG Jun-jie. Radiation wave loadings on a truncated cylinder due to sway motion [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(4): 81-86. (in Chinese)
- [8] 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.
LAI Wei. Dynamic response study of bridge in deep water under earthquake and wave action [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)
- [9] LI Q, YANG W L. An improved method of hydrodynamic pressure calculation for circular hollow piers in deep water under earthquake [J]. Ocean Engineering, 2013, 72(11): 241-256.
- [10] DU X L, WANG P G, ZHAO M. Simplified formula of hydrodynamic pressure on circular bridge piers in the time domain [J]. Ocean Engineering, 2014, 85(3): 44-53.
- [11] 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): 65-73.
HUANG Xin, LI Zhong-xian. Influence of hydrodynamic pressure on seismic response of bridge piers in deep water [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 65-73. (in Chinese)
- [12] SONG B, ZHENG F, LI Y. Study on a simplified calculation method for hydrodynamic pressure to slender structures under earthquakes [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2013, 17(5): 720-735.
- [13] BATHE K J, ZHANG H, JI S H. Finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interactions [J]. Computers and Structures, 1999, 72(1/3): 1-16.
- [14] BOUAANANI N, LU F Y. Assessment of potential-based fluid finite elements for seismic analysis of dam-reservoir systems [J]. Computers and Structures, 2009, 87(3/4): 206-224.
- [15] WEI K, YUAN W C, BOUAANANI N. Experimental and numerical assessment of the three dimensional modal dynamic response of bridge pile foundations submerged in water [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(10): 1032-1041.
- [16] WEI K, YUAN W C. Seismic analysis of deep water pile foundation based on three-dimensional potential-based fluid elements [J]. Journal of Construction Engineering, 2013, 2013(3): 1-10.
- [17] 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.
GAO Xue-kui, ZHU Xi, LI Hui. Seismic response analysis of bridge pier in deep water excited by near-fault earthquakes [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(3): 83-87. (in Chinese)
- [18] 江 辉, 楚 芹, 王宝喜. 近、远场地震下深水桥墩动力响应特性对比研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(22): 58-66.
JIANG Hui, CHU Qin, WANG Bao-xi. Comparative study of the dynamic response feature of bridge pier in deep water excited by near-fault and far-field earthquake ground motions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(22): 58-66. (in Chinese)
- [19] 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.
JU Rong-chu, ZENG Xin-chuan. Theory for coupled vibration of elastic structure-fluid system [M]. Beijing: Earthquake Press, 1983. (in Chinese)
- [20] ADINA R&D. Theory and modeling guide. volume I: ADINA solids & structures [M]. Watertown: ADINA R&D, 2011.
- [21] JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].
JTG/T B02-01—2008, Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. (in Chinese)