

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.008

动水压力和 PSI 对深水高墩桥梁抗震性能的影响*

吴文朋^{1,2,3}, 刘思思¹, 梁鹏¹, 龙士国¹

- (1. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南湘潭 411105;
2. 长沙理工大学南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室, 湖南长沙 410014;
3. 湘潭大学工程结构动力学与可靠性分析湖南省高等学校重点实验室, 湖南湘潭 411105)

摘要: 以我国西部地区某库区一深水高墩大跨连续刚构桥梁为工程背景, 考虑动水压力、桩-土相互作用以及二者联合作用的影响, 确定了六类不同的分析工况, 利用 OpenSEES 源代码分析平台分别建立有限元模型, 通过输入两组空间地震波进行非线性时程分析, 讨论了动水压力和桩-土相互作用对深水高墩大跨桥梁动力特性和抗震性能的影响。研究表明, 考虑动水压力和桩-土相互作用会降低高墩大跨桥梁的振动频率, 且二者的影响主要体现在下部结构振型参与率较高的高阶模态; 动水压力效应会增加高墩在地震作用下的动力响应, 但桩-土相互作用对非线性分析结果的影响没有明显的规律; 同时考虑动水压力和桩-土相互作用时, 深水高墩桥梁的地震响应并不是简单的相互促进或相互抵消, 而与地震动的大小、频谱特性等相关; 强地震作用下桥梁结构的桩顶水平位移较大时, 抗震设计中更适合采用“ $p-y$ 曲线”法模拟桩-土相互作用效应。

关键词: 桥梁; 动水压力; 桩-土相互作用; 动力特性; 地震响应

中图分类号: U442.5+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0067-08

Influence of Hydrodynamic Pressure and Pile-Soil Interaction (PSI) on Seismic Performance of High Pier Bridges in Deep Water

WU Wenpeng^{1,2,3}, LIU Sisi¹, LIANG Peng¹, LONG Shiguo¹

- (1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
2. National Joint Engineering Research Laboratory for Long-term Performance Improvement Technology for Bridges in Southern China (CSUST), Changsha 410014, China;
3. Key Laboratory of Dynamics and Reliability of Structures, College of Hunan Province, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: A high pier long-span continuous rigid frame bridge in the western reservoir region of China is taken as the engineering background. The hydrodynamic pressure, pile-soil interaction (PSI) and the influence of their combined effect were considered to determine six different analysis cases. The finite element models of the six analysis cases were established, respectively, by using the source code computational platform OpenSEES. Then, two groups of ground motions were applied to conduct the

* 收稿日期: 2018-11-15; 修回日期: 2018-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708477, 51908481)、长沙理工大学南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室开放基金(16KF02)、湖南省教育厅科研项目(18C0099)资助

作者简介: 吴文朋(1985—), 男, 副教授, 博士。主要从事桥梁抗震研究。E-mail: wuwenpeng@xtu.edu.cn

nonlinear time-history analysis, in order to investigate the influence of hydrodynamic pressure and PSI on seismic performance of high pier long-span bridges in deep water. The results show that the effect of hydrodynamic pressure and PSI can reduce the vibration frequency of the high-pier long-span bridge, and their influence is mainly reflected in high order modes with more participation rates of vibration mode for the substructure. The effect of hydrodynamic pressure will increase the dynamic response of the high piers under earthquake action. However, the PSI effect on the results of nonlinear time history analysis performs no obvious rules. When both of the hydrodynamic pressure and PSI are considered, the seismic response of high pier bridges in deep-water is not simple mutual promotion or offset, but related to the intensity of ground motion, spectrum characteristics, and so on. The " $p-y$ curve" method is more suitable for seismic design to simulate the PSI effect, if the horizontal displacement of the pile top of a bridge structure is larger under strong earthquake action.

Keywords: bridge; hydrodynamic pressure; pile-soil-interaction; dynamic characteristics; seismic response

引言

我国西部的长江上游地区有很多的深水高墩桥梁结构,这些桥梁多采用桩基础形式且处于高烈度设防区。深水高墩桥梁在地震作用下的响应与常规桥梁有所差别,特别是桩承式高墩结构在强地震作用下会同时与桩周土、墩周水之间发生相互作用效应。在2008年的汶川地震中,庙子坪大桥(典型的深水高墩桥梁结构)就发生了水中墩柱开裂现象^[1]。然而,针对这一新型震害形式,我国现行的桥梁抗震设计规范^[2]中尚缺乏相应的设计方法。

桩基础是深水高墩桥梁工程中应用较多的一种结构形式,我国桥梁抗震设计规范^[2]建议采用“ m ”法模拟桩-土相互作用的影响,而国外则多采用能考虑土体非线性效应的“ $p-y$ 曲线”法模拟桩-土相互作用效应对桥梁动力响应的影响^[3]。燕斌等^[4]对桥梁桩基设计中的“ $p-y$ 曲线”法和“ m ”法进行了对比分析,指出水平地震力较大时“ m ”法会有较大的误差,且误差会随着水平荷载的增大而增大。吕杨等^[5]基于LS DYNA二次研发的 $p-y$ 相互作用模型分析了桩-土相互作用对桥梁抗震性能的影响。Z.Wang等^[6]研究了地震作用下桩-土相互作用对典型钢桥梁隔震效应的影响。M.Mallick等^[7]研究了非线性 $p-y$ 桩-土相互作用对高速公路斜桥抗震性能的影响。刘春辉等^[8]和张效禹等^[9]针对液化场地桩-土动力相互作用展开了振动台试验,并对液化场

地桩-土动力相互作用的 $p-y$ 曲线特性进行了参数分析。上述研究均表明桥梁抗震分析中桩-土相互作用的影响不容忽视。深水高墩桥梁会遇到的另外一个问题就是结构与水的相互作用。H.M. Westergaard^[10]在早期研究具有垂直坝面的刚性坝在水平地震作用下的动水压力问题时就提出了动水压力的解析表述式。黄信等^[11]分别采用辐射波浪理论以及Morison方程分析了动水压力作用对桥墩地震响应的影响并建立了动水压力方程。刘振宇^[12]将动水附加压力表达为动水附加质量和动水附加阻尼,推导了附加动水压力的求解公式并进行了验证。李富荣等^[13]分析了动水压力对单柱式桥墩地震响应的影响,并指出考虑动水压力会增大桥墩顶的相对位移和墩底的内力,水位变化会影响桥墩的地震反应特性,且对于深水桥墩抗震设计和计算有必要考虑动水压力效应。

由此可见,深水桥梁的动水压力效应及桩-土相互作用效应对桥梁抗震性能的影响都不可忽略。然而,以往研究中对桥梁进行抗震研究时一般只考虑了动水压力的影响或者单独考虑桩-土相互作用的影响。考虑桩-土相互作用会使桥梁结构变柔,考虑动水压力会使桥梁结构产生附加质量,两者对桥梁结构的抗震性能都有不可忽视的影响。因此,本文将某大跨连续刚构桥梁为例,基于OpenSEES程序建立了有限元分析模型,输入空间地震波进行非线性分析,以探讨动水压力及桩-土相互作用效应对深水高墩桥梁抗震性能的影响。

1 动水压力及桩-土相互作用

1.1 动水压力分析方法

深水桥墩与水之间的相互作用按作用机理可分为绕射波浪和辐射波浪两类,而地震作用下的水中桥墩的运动致使水体对桥墩产生地震动水压力作用属于辐射波浪^[11]。深水桥梁地震动水压力求解主要采用辐射波浪理论方法。鉴于在地震作用下动水压力引起的附加阻力和波浪力对桥梁动力响应影响很小^[14],本文中暂不考虑附加阻尼与波浪效应。因此,地震作用下水中结构的动力方程表达式为:

$$[M + M_w]\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -[M + M_w]\ddot{x}_g \quad (1)$$

式中, M 为桥梁的结构质量矩阵; M_w 为动水压力下引起的附加质量; \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 分别为结构的相对加速度、相对速度和位移; \ddot{x}_g 为地面运动加速度; C 为桥梁结构的阻尼矩阵; K 为结构刚度矩阵。

由式(1)可以看出,在动水压力作用下桥梁的运动方程仅增加了动水附加质量。因此,采用附加质量考虑地震动水压力对桥墩的影响。对于矩形薄壁墩动水压力附加质量可表示为^[14]:

$$M_w = S(D, H)S_{rec} \times K_c \rho_w \pi D^2 / 4 \quad (2)$$

其中,各参数可分别用下式计算:

$$S(D, H) = 1.43 + D(H - 100) / 10\,000 \quad (3)$$

$$K_c = \left(1 - \frac{5D}{H^2}\right) \times \left\{1 - \exp\left[\frac{10(z_i - H)}{DH^{1/3}}\right]\right\} \quad (4)$$

$$S_{rec} = \begin{cases} 1 + \frac{15D - DH + 6.5H - 100}{20D^2 + 50H - 800} \ln(l_{ab}), & l_{ab} \leq 1 \\ 1 + \frac{\ln(H) + \ln(l_{ab})}{-0.5D + 0.028H + 28}, & l_{ab} > 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, ρ_w 表示水的密度; H 表示桥墩在水中的深度; z_i 表示桥墩第*i*个结点到水底的深度; D 表示墩柱迎水面的宽度; L 表示墩柱非迎水面的宽度; $l_{ab} = D/L$ 表示宽度比。

基于以上各式可以求出深水中桥墩在不同水深处的动水附加质量。

1.2 桩-土相互作用分析方法

“m”法是我国桥梁工程等结构设计桩基础时所采用的方法^[15],将之间的相互作用用线性土弹簧单

元来模拟,假设土体在同一层土介质中的应力-应变关系是线性的,即地基系数在同一层土介质中是不变的,与地基的深度成正比关系,并且不考虑桩-土之间的摩擦阻力和黏聚力。因此,“m”法只适用于结构在位移较小的情况(地面处位移 ≤ 6 mm)。基于“m”法的桩-土相互作用模型相对较简单,对于第*i*层土,第*j*个桩的土弹簧可以如下计算:

$$K_{ij} = m_{ij} b_{ij} z_{ij} h_{ij} \quad (6)$$

式中, m_{ij} 为第*j*个桩第*i*层土处的地基土比例系数; b_{ij} 为第*j*个桩第*i*层土处的计算宽度; z_{ij} 为第*j*个桩第*i*层土中心处离地面(或冲刷线)的距离; h_{ij} 为第*j*个桩第*i*层土的厚度。

“*p*-*y*曲线”法主要是将桩-土之间的相互作用用非线性土弹簧单元模拟。我国《港口工程桩基规范》^[16]中“*p*-*y*曲线”法的计算分为黏性土和砂性土2种。

(a) 黏性土的*p*-*y*曲线

不排水抗剪强度标准值 c_u 小于96 kPa的软黏性土,在静载作用下的*p*-*y*曲线可以按下式确定:

$$p/p_u = \begin{cases} 0.5(y/y_{50})^{1/3} & y/y_{50} < 8 \\ 1.0 & y/y_{50} \geq 8 \end{cases} \quad (7)$$

式中, p 表示地面以下作用于桩身上的水平土抗力值(kPa); y 表示地面以下桩身的水平变形(mm); p_u 表示单位面积上土体的极限承载力(kPa),可按公式(8)进行计算; y_{50} 表示土体抗力达到极限承载力一半时桩的水平变形(mm),可按公式(9)进行计算。

$$p_u = \min\left[\left(3 + \frac{\gamma}{c_u} Z + \frac{J}{d} Z\right)c_u, 9c_u d\right] \quad (8)$$

$$y_{50} = 2.5\epsilon_{50} d \quad (9)$$

式中, γ 表示土的重度(kN/m³); c_u 表示原状黏性土不排水抗剪强度的标准值(kPa); Z 表示地面以下桩的任一深度(m); J 为常数,对于软黏土取0.5,对于中等黏土取0.25; d 表示桩径或桩宽(m); ϵ_{50} 表示土体抗力达到极限承载力一半时的应变值,无试验条件时 ϵ_{50} 可按参文[16]中的表D.2.1取值。对 c_u 大于96 kPa的硬黏土,应按试桩资料绘制*p*-*y*曲线。

在往复循环荷载作用下,由于土体在大应变时的抗力会退化,表现为刚度下降。因此,循环荷载作用下的*p*-*y*曲线可以按如下形式确定:

① 当位于曲线段时,

$$p/p_u = 0.5(y/y_{50})^{1/3} \quad (10)$$

② 当位于直线段时,

$$p = \begin{cases} 0.72p_u & (Z \geq Z_r; y \leq 3y_{50}) \\ 0.72p_u \left(\frac{Z}{Z_r} \right) & (Z \leq Z_r; 3y_{50} < y < 15y_{50}) \end{cases} \quad (11)$$

$$Z_r = \frac{6c_u d}{\gamma' d + Jc_u} \quad (12)$$

式中, Z_r 表示临界深度(m), 即极限水平土抗力转折点的深度; 其它参数的意义同前。

(b) 砂性土的 $p-y$ 曲线

砂性土的 $p-y$ 曲线可按下列公式确定。其单位桩长的极限水平土抗力标准值 P_u 可按下列公式计算:

当 $Z < Z_r$ 时:

$$P_u = (C_1 Z + C_2 d) \gamma Z \quad (13)$$

当 $Z \geq Z_r$ 时:

$$P_u = C_3 d \gamma Z \quad (14)$$

式中, P_u 表示 Z 深度处单位桩长的极限水平土抗力标准值(kN/m); C_1 、 C_2 、 C_3 表示极限承载力系数, 参考规范^[16]中的图D.2.3取值; 其它参数的意义同前。

联立求解式(13)、(14)可得浅层土与深层土分界线深度 Z_r , 然后计算不同位置处的 P_u 。当缺乏现场试验资料时, 砂土中桩的 $p-y$ 曲线可按下列确定:

$$P = \psi P_u \text{th} [KZY / \psi P_u] \quad (15)$$

式中, P 表示地面以下 Z 深度处作用于桩上的水平土抗力标准值(kN/m); ψ 表示计算系数, 当荷载为静荷载时, $\psi = [3.0 - 0.8Z/d] \geq 0.9$, 当荷载为周期荷载时, $\psi = 0.9$; Y 表示地面以下 Z 深度处桩的侧向水平位移(mm); K 表示土抗力的初始模量(kN/m³), 可参考规范^[16]中的图D.2.4取值。

2 算例简介及有限元建模

本文算例桥梁为向家坝水电站库区复建公路G213线横跨越金沙江的一座公路特大桥, 桥型为117.5 m+200 m+117.5 m的预应力混凝土变截面箱梁连续刚构桥, 主墩高为80 m, 墩柱外尺寸为6.5 m×7.5 m, 壁厚为0.5 m; 承台长为23.8 m, 宽为15.8 m, 高为5 m; 桩直径为2.8 m, 呈2×4群桩基础。上部结构为C55钢筋混凝土; 桥墩为C40的钢筋混凝土, 保护层厚度为0.05 m; 承台和桩的强度等级为C35; 支座采用减震球形钢支座; 水库蓄水设计水深为70 m, 场地类型为Ⅱ类, 抗震烈度按Ⅷ度设防。

算例桥梁的OpenSEES有限元模型如图1所示。

主梁采用弹性梁单元模拟, 桥墩则采用非线性梁柱单元模拟, 混凝土采用Concrete 04材料, 钢筋采用修正的Giuffre-Menegotto-Pinto模型(Steel 02材料本构)。刚性承台和大直径桩基在地震作用下通常不会进入塑性, 本文采用弹性梁柱单元模拟。

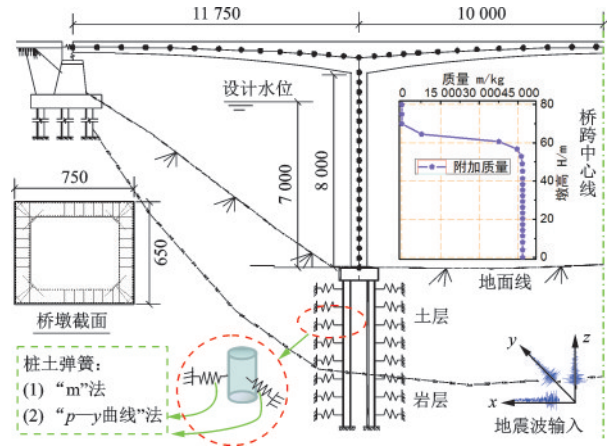


图1 1/2算例桥梁计算简图

Fig.1 1/2 calculation diagram of the bridge example

本文将分别采用“m”法和“ $p-y$ 曲线”法两种方法对桩-土弹簧进行模拟。算例桥梁桩基础长度为60 m, 其中, 桩基础0~40 m为土层, 40 m以下为岩层, 如图1所示。对于0~40 m的土层, 当采用“m”法模拟桩-土相互作用时, 本文基于我国《公路桥涵地基与基础设计规范》^[15]来计算桩-土弹簧的线性刚度(公式(6)); 当采用“ $p-y$ 曲线”法模拟桩-土相互作用时, 可用OpenSEES程序中的Py Simple 1材料进行模拟, 具体的模型参数可由前文给出的算法, 并结合算例桥梁的地质情况进行计算。对于40 m以下为基岩层, 本文近似地采用固结的方式进行模拟。此外, 由公式(2)可以算出桥梁在设计水位时(70 m)动水附加质量沿桥墩高度方向上的分布情况, 如图1所示。

3 分析工况和地震波输入

为分析动水压力和桩-土相互作用对深水高墩桥梁地震响应的影响, 本文共选取了以下六种分析工况进行研究: ①工况1: 既不考虑动水压力也不考虑桩-土相互作用; ②工况2: 仅考虑动水压力的影响; ③工况3: 不考虑动水压力, 采用“m”法对桩-土相互作用进行模拟; ④工况4: 不考虑动水压力, 用“ $p-y$ 曲线”法对桩-土相互作用进行模拟; ⑤工况

5:考虑动水压力,用“m”法对桩-土相互作用进行模拟;⑥工况6:考虑动水压力,用“ $p-y$ 曲线”法对桩-土相互作用进行模拟。此外,本文选取了EI Centro波和 Taft波两组不同强度的原始地震波记录作为地震动输入,输入方向为三向同时输入。两组实测地震波在桥梁纵向、横向和竖向三个方向的地震动时程曲线,以及每条波的峰值地面加速度(PGA)如图2所示。由图2可知,EI Centro波的强度远大于Taft波的强度。

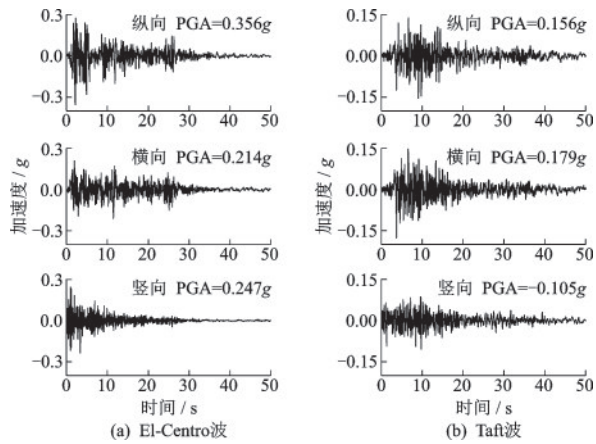


图2 选取的地震波
Fig.2 Selected ground motions

4 桥梁动力特性比较分析

根据上一节给出的六种分析工况建立了算例桥梁的六个OpenSEES有限元模型,分别进行结构动力特征分析。图3为不同分析工况下算例桥梁结构前15阶模态的频率比较情况。由图可知,动水压力和桩-土相互作用效应对结构前8阶模态频率的影响相对较小。例如,动水压力效应对结构第1阶模态的影响率仅有0.76%,采用“m”法和“ $p-y$ 曲线”法模拟桩-土相互作用时,对结构第1阶模态的影响率也只有4.6%和5.7%。然而,从第9阶模态至第13阶模态,动水压力和桩-土相互作用对结构振动频率的影响逐渐变大。例如,动水压力效应以及采用“m”法和“ $p-y$ 曲线”法模拟桩-土相互作用对结构第13阶模态频率的影响率分别达到了16%、12%和24%。从第14阶开始这种影响又开始逐渐变小。

动水压力和桩-土相互作用效应导致桥梁自振频率降低的作用机理并不相同,考虑动水压力效应

是由于增加了桥梁结构质量而导致结构频率有所减小,而考虑桩-土相互作用是由于减小了桥梁结构的侧向刚度而导致结构频率减小。然而,深水高墩桥梁结构前8阶模态的振型主要表现为上部结构主梁的侧弯和竖弯,下部结构桥墩和桩基础的振型参与率相对较少。然而,从第9阶模态开始,下部结构的振型参与率越来越高,这是动水压力效应和桩-土相互作用效应从第9阶模态开始影响更大的主要原因之一。由图3还可发现,当同时考虑动水压力和桩-土相互作用时,桥梁结构的自振频率降低的幅度更大,从第9至第14阶模态,考虑动水压力效应并采用“ $p-y$ 曲线”法模拟桩-土相互作用时,对结构振动频率的影响率均达到了25%以上。

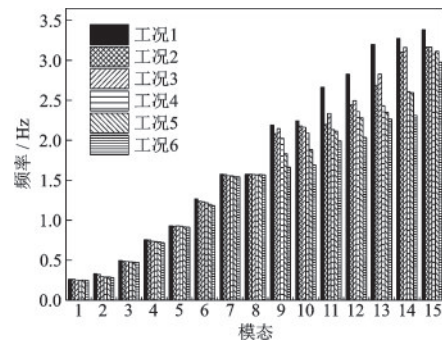


图3 不同分析工况下前15阶模态的频率比较
Fig.3 Frequency comparison of the former 15 modes for different analysis cases

综上所述,考虑动水压力效应和桩-土相互作用效应均会降低高墩大跨桥梁结构的振动频率,尤其是考虑二者耦合作用时的影响较大,在深水高墩大跨桥梁的抗震分析中不可忽略。此外,与规则桥梁以及一般高墩桥梁有所不同,本文算例中的高墩大跨桥梁结构上、下部结构质量比相对较大,因此,动水压力和桩-土相互作用的影响主要体现在下部结构振型参与率较高的高阶模态。

5 桥墩动力响应分析

将两组三向地震波分别输入六个OpenSEES模型进行地震非线性时程分析。图4为在EI Centro波和Taft波作用下,桥墩顺桥向位移峰值沿墩高方向的分布情况。由图可知,当仅考虑动水压力效应时,墩顶的最大水平位移量会有所增大,且随着地震强度的增加这种增大效应越来越明显。而当考虑桩-土相互作用效应时,尽管墩底的最大水平位移

量明显增大,但墩顶的最大水平位移量变化并不大。然而,同时考虑桩-土相互作用和动水压力效应时,墩底的最大水平位移量略有减小,但墩顶的最大水平位移量有增大的趋势。值得指出的是,当采用“ $p-y$ 曲线”法模拟桩-土相互作用且地震动激励水平较高时,墩顶的水平位移反而会减小,如图4中EI Centro波作用下工况6下的墩顶位移值。

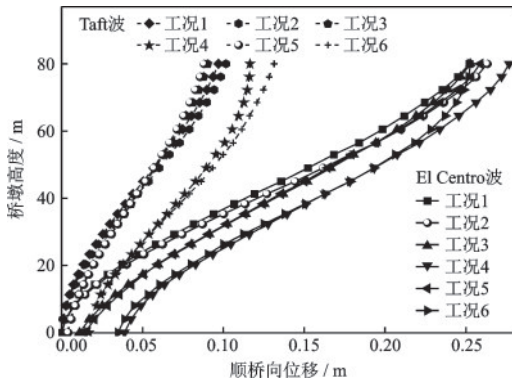


图4 不同分析工况下沿墩身的顺桥向位移峰值

Fig.4 Maximum displacements in the longitudinal direction along the pier for different analysis cases

图5和图6分别为在EI Centro波和Taft波作用下,桥墩顺桥向弯矩和剪力响应峰值沿墩高方向的分布情况。由图5可知,考虑动水压力效应会增大墩底和墩顶的最大弯矩响应。在Taft地震波作用下,桩-土相互作用会增加墩顶的最大弯矩效应,但同时会减小墩底的弯矩效应;在EI Centro地震波作用下,桩-土相互作用会减小墩底和墩顶的最大弯矩响应,特别是墩底弯矩的减小量十分明显。与墩底固结和无水状态相比较,同时考虑桩-土相互作用和动水压力效应时,高墩连续刚构桥墩底截面和墩顶

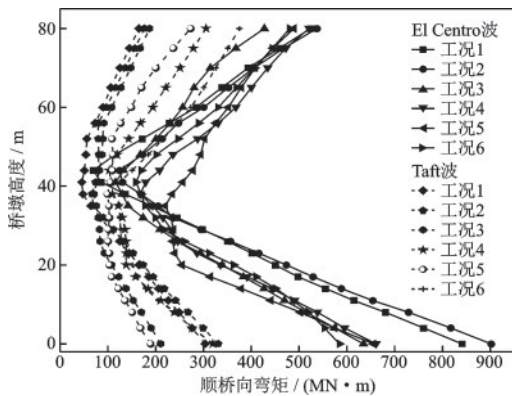


图5 不同分析工况下沿墩身的顺桥向弯矩峰值

Fig.5 Maximum moments in the longitudinal direction along the pier for different analysis cases

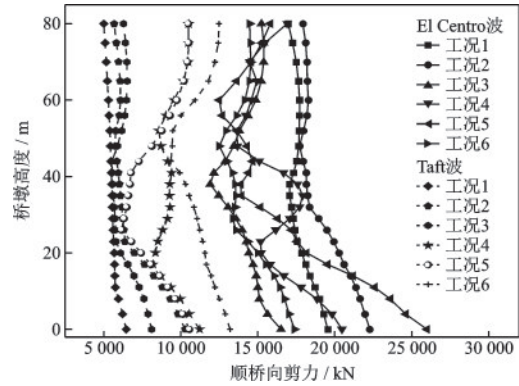


图6 不同分析工况下沿墩身的顺桥向剪力峰值

Fig.6 Maximum shear forces in the longitudinal direction along the pier for different analysis cases

截面最大弯矩的差异要小得多。同时,由图5还可以发现,考虑桩-土相互作用效应以后,高墩结构的反弯点位置有下移的趋势。由图6可知,考虑动水压力效应会增大墩底和墩顶的最大剪力响应。在Taft地震波作用下,桩-土相互作用会增加墩顶和墩底的最大剪力;在EI Centro地震波作用下,采用不同的方法模拟桩-土相互作用时,对桥墩最大剪力的影响完全不同。

前面分析了动水压力和桩-土相互作用对桥墩纵向地震响应的影响,限于篇幅,表1直接给出了两组地震波作用下桥墩在横桥向的位移峰值、剪力峰值和弯矩峰值,表中, D_y 为墩顶横桥向位移, F_y 为墩底横桥向剪力, M_x 为墩底横桥向弯矩。由表1可知,仅考虑动水压力的情况下,桥墩顺桥向的各种动力响应都会增大,其中,动水压力对墩底剪力响应的影响最大。采用“m”法和“ $p-y$ 曲线”法时,不同地震波对墩柱横向地震响应峰值的影响规律不同。总的来说,动水压力和桩-土相互作用联合效应的影响较大,且影响规律取决于二者的相对影响大小,但也并不是简单的相互促进或相互削弱的关系,而是与高墩大跨桥梁的结构体系特征、输入的地震波强度大小以及频谱特性等都相关。

6 桩基动力响应分析

图7和图8分别表示在EI Centro波和Taft波作用下各工况对应桩基的峰值位移随桩身的分布情况,图中 $y_c=0.006$ m表示“m”法适用的临界值。在EI Centro地震波作用下,四种分析工况得到的桩顶最大水平位移分别为0.014、0.041、0.012、0.035 m。在Taft地震波作用下,四种分析工况得到的桩顶最

表1 不同工况下桥墩横桥向峰值响应比较

Table 1 Peak seismic responses of the high pier in the transverse direction under different cases

工况	EI Centro 地震波			Taft 地震波		
	$D_y/$ m	$F_y/$ kN	$M_z/$ (kN·m)	$D_y/$ m	$F_y/$ kN	$M_z/$ (kN·m)
1	0.270	11 253	728 265	0.075	6 335	282 323
2	0.280	17 554	775 746	0.076	8 981	296 397
3	0.284	11 889	771 726	0.077	7 341	207 684
4	0.334	15 935	627 109	0.168	9 483	374 072
5	0.303	20 320	709 640	0.080	8 975	233 694
6	0.365	22 232	809 710	0.159	13 079	333 053

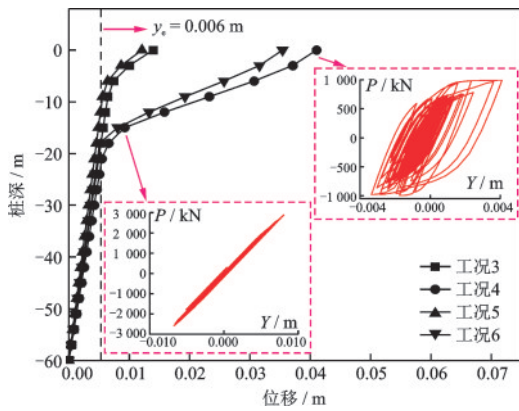


图7 桩基在EI Centro震波作用下的最大位移

Fig.7 Maximum displacements along the pile under the EI Centro wave for different analysis cases

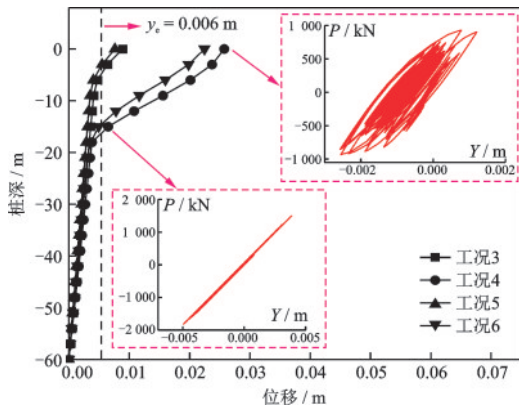


图8 桩基在Taft地震波作用下的最大位移

Fig.8 Maximum displacements along the pile under the Taft wave for different analysis cases

大水平位移分别为0.009、0.026、0.008、0.022 m。由图可知,考虑动水压力效应会使得桩顶最大位移量略有减小。此外,还可以发现,无论采用“m”法还是采用“p—y曲线”法模拟桩-土相互作用,桩顶的最大水平位移均超过了临界值0.006 m。不同的是,采

用“m”法模拟桩-土相互作用时,随着地震动强度的增加,桩身位移超过临界值的截面数量在逐渐增多;然而,采用“p—y曲线”法模拟桩-土相互作用时,随着地震动强度的增加,只是桩顶部分截面的位移在逐渐增大,而桩身位移超过临界值的截面数量几乎没有增多。这表明在强地震作用下,高墩大跨桥梁结构的桩顶水平位移较大,桥梁抗震设计中不再适合采用“m”法考虑桩-土相互作用效应。

图7和图8还分别给出了工况4在EI Centro波和Taft波作用下,桩顶以及距离桩顶15 m深处的桩-土相互作用的p—y滞回响应曲线。由图可知,距离桩顶15 m以下的桩周土层基本还保持在线弹性阶段,因此,不同方法模拟的计算结果基本重合。然而,桩顶处桩周土层已经进入了明显的非线性阶段,且随着桩顶最大水平位移量的增加,这种桩-土非线性效应越来越显著。

7 结论

(1) 动水压力和桩-土相互作用效应均会降低高墩大跨桥梁结构的振动频率,尤其是考虑二者联合作用时的影响较大,此外,动水压力和桩-土相互作用的影响主要体现在下部结构振型参与率较高的高阶模态,在深水高墩桥梁抗震分析中不可忽略。

(2) 考虑动水压力效应会增加高墩大跨桥梁桥墩地震作用下的位移和内力响应;受高阶振型的影响,在高墩大跨桥梁结构的非线性时程分析中,桩-土相互作用的影响并没有明显的规律;同时考虑动水压力和桩-土相互作用作用时,桥墩的地震响应并不是简单的相互促进或相互抵消,而应该与地震动强度大小、频谱特性等有关。

(3) 强地震作用下高墩大跨桥梁结构的桩顶水平位移较大,抗震设计中不适合采用“m”法考虑桩-土相互作用,而更适合采用能考虑桩周土的非线性特性的“p—y曲线”法模拟桩-土相互作用。

(4) 桩-土相互作用和墩-水相互作用的力学模型和影响因素十分复杂,本文只选择了相对简单实用的分析模型,且只选择了两条常见的地震波激励进行非线性时程分析。选择更多的地震波输入以模拟地震波的不确定性影响,并考虑桩-土和墩-水相互作用模型的不确定性,进行概率性桥梁抗震性能评估仍值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈乐生. 汶川地震公路震害调查-桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
Chen L Sh. Report on highway's damage in the Wenchuan Earthquake-bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)
- [2] 公路桥梁抗震设计细则: JTG/TB 02-01—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
Guidelines for seismic design of highway bridges: JTG/TB 02-01—2008 [S]. Beijing: China Communication Press, 2008. (in Chinese)
- [3] Boulanger R W, Curras C J, Kutter B L, et al. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(9): 750-759.
- [4] 燕斌, 王志强, 王君杰. 桥梁桩基础计算中 $p-y$ 曲线法与 m 法的对比研究[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 62-68.
Yan B, Wang Zh Q, Wang J J. Study on comparison of $p-y$ method and m -method in computation of bridge pile foundations [J]. Structural Engineers, 2007, 23(4): 62-68. (in Chinese)
- [5] 吕杨, 刘喆, 李忠献. 考虑桩-土相互作用的等高墩桥地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(23): 114-120.
Lyu Y, Liu Zh, Li Zh X. Seismic response analysis for unequal height pier bridges considering soil-pile interaction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(23): 114-120. (in Chinese)
- [6] Wang Z, Dueñas-Osorio L, Padgett J E. Influence of soil-structure interaction and liquefaction on the isolation efficiency of a typical multispan continuous steel girder bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(8): A4014001.
- [7] Mallick M, Raychowdhury P. Seismic analysis of highway skew bridges with nonlinear soil-pile interaction [J]. Transportation Geotechnics, 2015, 3: 36-47.
- [8] 刘春辉, 唐亮, 凌贤长, 等. 液化场地桥梁群桩基抗震分析简化方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(5): 566-570.
Liu Ch H, Tang L, Ling X Zh, et al. Simplified method for seismic analysis of bridge pile group foundation in liquefiable soils [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(5): 566-570. (in Chinese)
- [9] 张效禹, 唐亮, 凌贤长, 等. 液化场地桥梁桩-土动力相互作用 $p-y$ 曲线特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(5): 619-625.
Zhang X Y, Tang L, Ling X Zh, et al. Analysis on characteristics of dynamic $p-y$ curves for soil-pile interaction in liquefiable ground [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(5): 619-625. (in Chinese)
- [10] Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes [J]. Transactions of American Society of Civil Engineers, 1933, 98(2): 418-432.
- [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 X, Li Zh X. Influence of hydro dynamic pressure on seismic response of bridge piers in deep water [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 65-73. (in Chinese)
- [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.
Liu Zh Y. The earthquake response study of deep-water bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [13] 李富荣, 陈国兴, 王志华. 考虑动水压力影响的单柱式桥墩地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(2): 114-121.
Li F R, Chen G X, Wang Zh H. Seismic responses of single-column pier considering the effects of hydrodynamic pressure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2008, 28(2): 114-121. (in Chinese)
- [14] 杨万理. 深水桥梁动水压力分析方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
Yang W L. Study on hydrodynamic analysis methods of deep-water bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [15] 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG D63—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Code for design of ground base and foundation of highway bridge and culverts: JTG D63—2007 [S]. Beijing: China Communication Press, 2007. (in Chinese)
- [16] 港口工程桩基规范: JTS 167—4—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012
Code for pile foundation of harbor engineering: JTS 167—4—2012 [S]. Beijing: China Communication Press, 2012. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)