

文章编号:1005-0523(2018)01-0009-05

动水压力影响下考虑 SSI 效应的桥墩结构地震响应分析

卢华喜,徐路遥,郑孝辉

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:基于 Morison 方程法,采用附加质量考虑动水压力的影响,利用 ABAQUS 软件计算平台建立了动水压力作用下刚性地基桥墩和考虑 SSI 效应的桥墩结构,对动水压力作用下考虑和不考虑 SSI 效应时桥墩的地震响应进行了比较,分析了考虑 SSI 效应的桥墩的地震响应随水深的变化规律。结果表明:动水压力作用会增大桥墩的地震响应,其受桥墩入水深度的影响;当考虑 SSI 效应后,动水压力作用对桥墩自振频率折减和地震响应增大作用有所降低,但仍不能忽视动水压力作用。

关键词:Morison 方程法;SSI 效应(soil-structure interaction);自振特性;地震响应

中图分类号:TU311.3

文献标志码:A

中国处于太平洋地震带和欧亚地震带之间,受地理位置影响,我国地震频发且震害严重。同时处于深水之中的桥梁一旦遭受地震灾害的破坏,其修复难度和修复造价较裸水中的桥梁将大大增加。因此研究动水压力作用下桥梁的地震响应对预防地震对桥梁的破坏具有非常重要的意义。近年来,国内外相关研究不断涌现。著名学者 Morison 在研究柱体表面上的波浪对柱体的作用时,对于水下直径较小的圆柱体,推导出了半经验半理论的计算公式,即著名的 Morison 方程^[1]。高学奎等^[2]在简化的 Morison 方程基础上,利用附加质量考虑了水深的影响。李乔等^[3]基于改进型的方程和改进型的数值计算模型计算了动水压力对圆柱型空心桥墩的影响。杨万里等^[4]基于一个可以计算内域水和外域水的扩展的 Morison 方程,将内域水产生的动水压力以惯性力的形式表示,且等同于内域水的质量,并得到了验证。刘保东等^[5]利用 Morison 方程法,计算分析了含水率和动水压力对深水桥墩的影响。宋波等^[6]基于 Morison 方程理论,提出了用于计算高桩承台的动水力的简化计算方法验证了动水力简便计算方法的准确性和可靠性。黄信等^[7]基于 Morison 方程法和辐射波浪理论,建立了矩形截面的深水桥墩分析模型,得出当迎水面较大时 Morison 方程法会高估动水压力对桥墩地震响应的影响。李悦等^[8]基于势流体理论,研究了在不同水深和地震波类型等条件下,动压力水对矩形截面实体桥墩的地震响应的影响。大量研究表明,在地震作用下,动水压力对深水桥墩的影响是不可忽略的。

基于 Morison 方程法,利用 ABAQUS 软件计算平台建立了动水压力作用下刚性地基桥墩和考虑 SSI 效应(soil-structure interaction)的桥墩模型,比较了动水压力作用对考虑和不考虑 SSI 效应时桥墩地震响应的影响;进一步分析了考虑 SSI 效应的桥墩桩基的地震响应随水深的变化规律;对考虑 SSI 效应的桥墩结构进行水平双向地震时程分析,与水平单向地震作用进行对比,对所得结果进行分析,得出相关结论。

1 计算模型及参数选择

采用 Morison 方程法,该方法忽略结构对水运动的影响,并假定动水压力是由惯性力和阻尼力线性叠加而成,流体为理想状态下的不可压缩,无旋运动^[9]。

收稿日期:2017-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(50968007);江西省青年科学家培养对象计划(2010DQ01800)

作者简介:卢华喜(1976—),男,副教授,博士,主要研究方向为地基与结构振动。

以某圆形直坡式实体桥墩为例,如图 1(a)所示,桥墩高 $H_2=40$ m,直径 6 m,模型忽略桩基础与地基土相互作用的影响,混凝土密度 $\rho_1=2\ 400$ kg/m³,弹性模量 $E=3.0\times 10^{10}$ Pa,泊松比 0.2,水密度 $\rho_2=1\ 000$ kg/m³。考虑 SSI 效应的桥墩模型上部桥墩与刚性地基桥墩相同,如图 1(b)所示,下部结构承台尺寸 10 m×10 m×3 m,承台下部采用 9 根灌注桩基础支撑,直径 1 m,桩长 30 m。

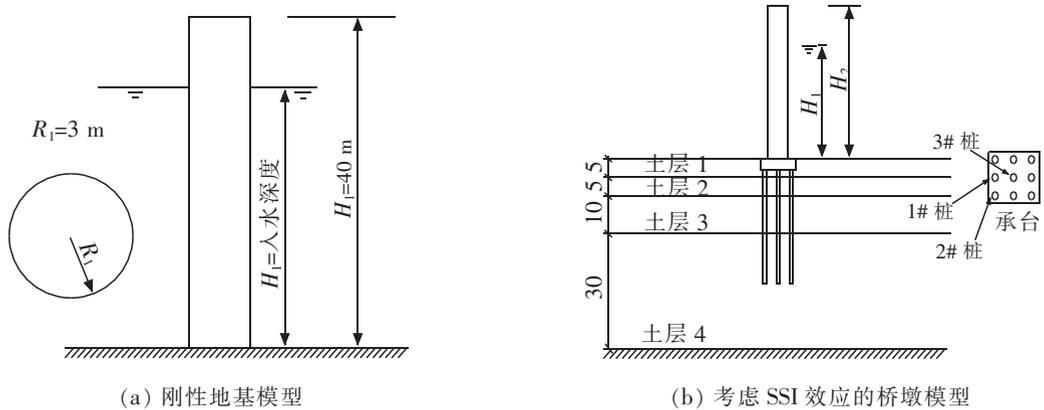


图 1 有限元分析模型

Fig.1 Finite element analysis model

土体本构模型选择 Drucker-Prager^[10]模型,采用三维粘弹性边界,取 10 倍土体计算区域,桥墩采用梁单元,承台和土体采用实体单元,桩土接触设置接触对。桥墩用梁单元,桩、承台和土体都用三维实体单元来模拟。土体计算参数如表 1 所示。

表 1 土层参数
Tab.1 Soil parameters

土体	厚度/m	弹性模量/(N/m ²)	粘聚力/(N/m ²)	内摩擦角/(°)	膨胀角/(°)	密度/(kg/m ³)	泊松比
土层 1	5	8.38×10^6	15 200	10.8	0	1 800	0.35
土层 2	5	12.8×10^6	17 140	13.4	0	1 800	0.35
土层 3	10	76.6×10^6	18 170	17.3	0	1 800	0.35
土层 4	30	97.6×10^6	20 170	20.8	0	1 800	0.35

地震波选择东西向唐山地震波,假设防烈度为 8 度,将地震波的最大加速度调为 0.2 g,如图 2 所示,模拟出了唐山波的加速度时程曲线,分别对两种结构进行地震响应分析。

2 计算结果

2.1 自振特性

为考虑水深对桥墩动力特性和地震响应的影响,引入无量纲参数 R :

$$R = \frac{\text{有水时桥墩响应幅值} - \text{无水时桥墩响应幅值}}{\text{无水时桥墩响应幅值}} \times 100\%$$

为研究桥墩自振特性和地震响应随水深的变化情况,取每 5 m 水深为一个工况。图 3 为刚性地基桥墩和

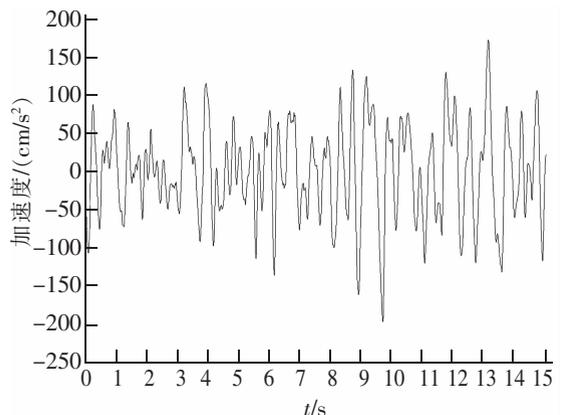


图 2 唐山地震波加速度时程曲线

Fig.2 The acceleration-time curve of the Tangshan seismic waves

考虑 SSI 效应的桥墩的一阶频率随水深的变化情况。可以看出:对于刚性地基桥墩,当水深小于 15 m 时,其下降不超过 1%,当水深从 15 m 到 35 m 时 R_{FQ} 增大较快;对于考虑 SSI 效应的桥墩,当水深为 35 m 时,桩基础桥墩结构的一阶频率影响系数仅为 0.99%。可见当考虑桩土相互作用后,动水压力作用对桥墩频率影响大大降低。

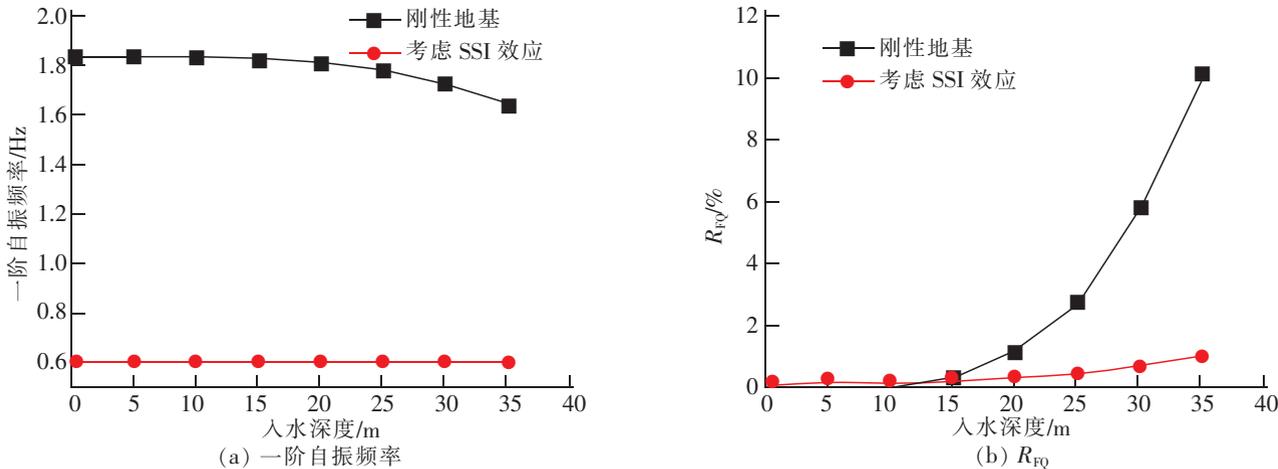


图 3 桥墩自振频率影响系数 R_{FQ} 随水深的变化

Fig.3 Change of pier vibration frequency influence coefficient R_{FQ} at different water depths

2.2 桥墩地震响应

如表 2 中所示,提取不同水深工况下刚性地基和考虑 SSI 效应下的桥墩结构墩顶位移、墩底剪力、墩底弯矩幅值。可以看出:在地震波作用下,随着水深的增大,刚性地基桥墩和考虑 SSI 效应的桥墩地震响应幅值都有所增大;另外,考虑 SSI 效应的桥墩墩顶位移幅值要比刚性地基桥墩要大,但刚性地基桥墩的墩底剪力和墩底弯矩幅值都要比考虑 SSI 效应的桥墩要大,并且随着水深的增大,刚性地基桥墩地震响应幅值的增大速度要大于考虑 SSI 效应的桥墩。

表 2 唐山波作用下桥墩地震响应幅值

Tab.2 Seismic response amplitude of pier under the Tangshan seismic waves

水深/m	位移/mm		剪力/kN		弯矩/(kN·m)	
	刚性地基	考虑 SSI 效应	刚性地基	考虑 SSI 效应	刚性地基	考虑 SSI 效应
0	5.80	8.78	9 468	9 570	24 710	23 690
5	5.81	8.80	9 641	9 581	24 777	23 780
10	5.85	8.82	9 897	9 591	25 069	23 890
15	5.96	8.85	10 290	9 603	25 714	23 930
20	6.13	8.88	10 859	9 865	26 696	23 980
25	6.35	8.93	11 443	10 007	27 890	24 120
30	6.83	8.99	12 190	10 190	29 979	24 440
35	8.68	8.89	14 863	10 130	38 090	24 210

如图 4 所示,给出了两种工况下桥墩地震响应幅值影响系数随水深的变化情况对比图。可以看出,相比于刚性地基桥墩,动水压力作用下和考虑 SSI 效应的桥墩结构地震响应幅值影响系数有较大不同,其影响系数并不一定随着水深的增加而一直保持增大趋势。

将两种工况的地震响应幅值影响系数进行对比可以发现:对于墩顶位移影响系数 R_D ,在地震波作用下,

考虑 SSI 效应的桥墩水深从 30~35 m 墩顶位移影响系数减小;当水深较小时考虑 SSI 效应的桥墩略大于刚性地基桥墩,当入水深度达到 35 m 时,地震波作用下考虑 SSI 效应的桥墩墩顶位移影响系数为 1.2%,比刚性地基桥墩要小得多;对于墩底剪力影响系数 R_F ,在地震波作用下,考虑 SSI 效应的桥墩的影响系数小于刚性地基桥墩;当入水深度达到 35 m 时,唐山波作用下考虑 SSI 效应的桥墩墩底剪力影响系数为 5.8%,比刚性地基桥墩要小得多;对于墩底弯矩影响系数 R_M ,和墩底剪力影响系数相似,考虑 SSI 效应的桥墩的弯矩影响系数要小于刚性地基;当入水深度达到 35 m 时,唐山波作用下考虑 SSI 效应的桥墩墩底剪力影响系数为 7.73%。

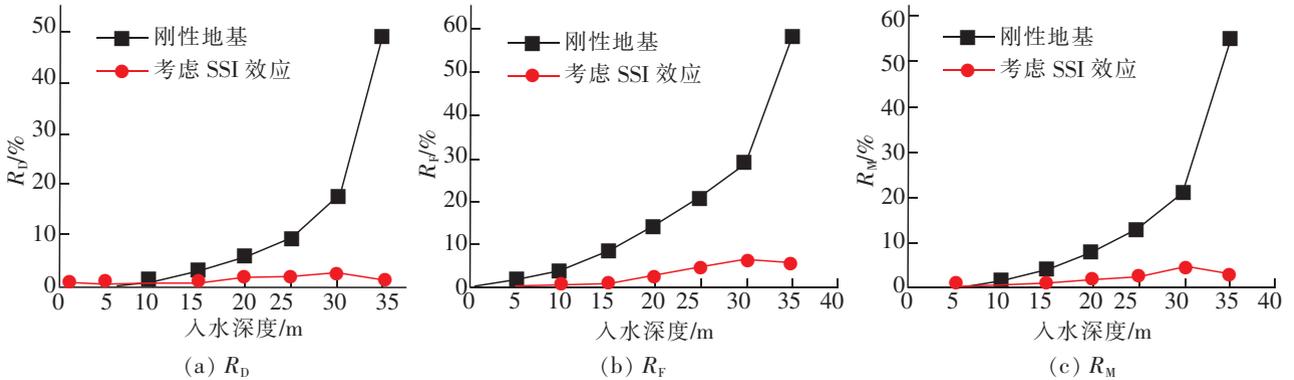


图4 唐山波作用下桥墩的 R 参数变化曲线

Fig.4 Variation curves of R parameters of piers under the Tangshan waves

动水压力作用会增大桥墩的地震响应,增大幅度与桥墩入水深度有关;相对于刚性地基桥墩,动水压力作用对考虑 SSI 效应的桥墩地震响应的影响更小,当桥墩入水深度较小时,考虑 SSI 效应的桥墩地震响应幅值影响系数与刚性地基相差不大;当入水深度较大时,考虑 SSI 效应后动水压力作用对桥墩地震响应的影响有所减小。

3 结论

采用 Morison 方程法,利用 ABAQUS 有限元软件建立刚性地基桥墩与考虑 SSI 效应的桥墩模型,将动水压力转化为随桥墩一起运动的附加质量,比较了动水压力作用对考虑和不考虑 SSI 效应时桥墩地震响应的影响,分析了考虑 SSI 效应的桥墩的地震响应随水深的变化规律,得到以下结论:

- 1) 动水压力作用会增大桥墩的地震响应,其受到桥墩入水深度的影响。
- 2) 当考虑 SSI 效应后,动水压力作用对桥墩自振频率折减和地震响应增大作用有所降低,但仍不能忽视动水压力作用。相比于刚性地基桥墩,动水压力作用对考虑 SSI 效应的桥墩地震响应影响更小。

参考文献:

- [1] MORISON J R, O'BRIEN M P, JOHNSON J W, et al. The Force Exerted by Surface Wave on Piles[J]. Petroleum Transactions, 1950(19):149-158.
- [2] 高学奎,朱晞.地震动水压力对深水桥墩的影响[J].北京交通大学学报:自然科学版,2006,30(1):55-58.
- [3] LI Q, YANG W. An improved method of hydrodynamic pressure calculation for circular hollow piers in deep water under earthquake[J]. Ocean Engineering, 2013:241-256.
- [4] YANG W, LI Q. The expanded Morison equation considering inner and outer water hydrodynamic pressure of hollow piers[J]. Ocean Engineering, 2013:79-87.
- [5] 刘保东,李鹏飞,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(S2):199-203.
- [6] 宋波,李悦.高桩承台动水力简便计算方法[J].北京科技大学学报,2011,33(4):509-514.

- [7] 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.
- [8] 李悦,宋波,黄帅.地震时作用于深水桥墩上的动水力及对桥墩动力响应的影响[J]. 北京科技大学学报,2011,33(3):388-394.
- [9] 卢华喜,郑晓辉,周珍伟.考虑动水压力作用影响的矩形深水桥墩地震响应分析[J].建筑技术,2017,48(3):245-248.
- [10] 刘金龙,栾茂田,许成顺,等. Drucker Prager 准则参数特性分析[J]. 岩土力学与工程学报,2006,25(S2):4009-4015.

Seismic Response Analysis of Bridge Pier Structure of Considering SSI Effect under Dynamic Water Pressure

Lu Huaxi, Xu Luyao, Zheng Xiaohui

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the Morison equation method, the influence of the dynamic water pressure was considered by using the additional mass. The rigid foundation bridge pier and the bridge pier structure taking into account SSI effect under the dynamic water pressure were established by using ABAQUS software computing platform. Then the seismic responses of the bridge pier structure with and without consideration of SSI effect were compared under the dynamic water pressure. Finally, the change regulation of seismic response of bridge pier at different water depths considering SSI effect was analyzed. The research results show that under the dynamic water pressure, the seismic response of the pier increases, and it is influenced by underwater penetration of bridge pier; when considering SSI effect, the dynamic water pressure on the decrease of the natural vibration frequency and the increase of the seismic responses are reduced. However, the dynamic water pressure can not be neglected.

Key words: Morison equation method; SSI effect (soil-structure interaction); natural vibration characteristics; seismic response