



# 地震作用下深水高桩码头 动水压力特性研究\*

宋波<sup>1,2</sup>, 王海龙<sup>1,2</sup>, 林懿翀<sup>2,3</sup>, 陈健<sup>2,3</sup>, 王荣<sup>2,3</sup>

(1. 北京大学, 北京 100083; 2. 强震区轨道交通工程抗震研究北京市国际科技合作基地, 北京 100083;  
3. 中国港湾建设有限公司, 北京 100027)

**摘要:** 随着一些国家高桩码头建设走向强震区和深水区, 地震作用下动水压力对深水高桩码头动力性能的影响成为亟待研究的课题。然而, 世界各国针对考虑动水压力的深水高桩码头的地震动力响应研究很少, 缺乏适用于强震区深水高桩码头的动水压力计算方法。基于附加质量理论, 采用  $p$ - $y$  曲线法模拟桩土相互作用, 通过简化的 Morison 动水力计算式, 研究深水高桩码头结构地震作用下, 考虑动水压力和不考虑动水压力时深水高桩码头各项动力性能指标差异。研究结果表明: 动水压力对结构的自振特性和结构动力特性影响较明显; 强震区深水高桩码头抗震设计需要考虑动水压力对结构的影响。

**关键词:** 强震区; 深水高桩码头; 动水压力; 附加质量; 近远场地震

中图分类号: TU 375.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0051-08

## Characteristics of hydrodynamic pressure about high-piled wharf in deep water under effect of earthquake

SONG Bo<sup>1,2</sup>, WANG Hai-long<sup>1,2</sup>, LIN Yi-chong<sup>2,3</sup>, CHEN Jian<sup>2,3</sup>, WANG Rong<sup>2,3</sup>

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing International Cooperation Base for Science and Technology-Aseismic Research of Rail Transit Engineering in Strong Motion Area, Beijing 100083, China;  
3. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

**Abstract:** In view that more and more high-pile wharves are constructed in the earthquake and deep water zones in some countries, the influence of hydrodynamic pressure on the dynamic performance of high-piled wharf in deep water become an urgent research subject. However, there are few research on the subject both at home and abroad, and it is lack of calculation method for the hydrodynamic pressure on high-piled wharf in deep water and earthquake zones. Based on the added water mass theory,  $p$ - $y$  curve method is used to simulate the pile-soil interaction, and simplified Morison formula is adopted to calculate the hydrodynamic pressure. So the dynamic performance indicators are compared when the hydrodynamic pressure is considered or not, under the action of the earthquake. The results show that the hydrodynamic pressure not only has an impact on the vibration characteristics of the structure, but also has a greater impact on the structure's dynamic performance. Therefore, the hydrodynamic pressure should be taken into consideration in the seismic design for the high-piled wharf in in deep water and earthquake zones.

**Keywords:** meizoseismal area; high-piled wharf in deep water; hydrodynamic pressure; added water mass; near and far field earthquake

收稿日期: 2014-08-27

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51178045)

作者简介: 宋波 (1962—), 男, 博士, 教授, 从事土木工程防灾减灾研究。

随着世界经济和国际贸易的发展,大量处在强震区和深水区高桩码头正处于规划和建设阶段。地震作用下,动水压力对深水区高桩码头结构动力响应的影响是目前急需解决的问题。

考虑水和结构动力相互作用的计算,一般有流固耦合分析方法和附加水质量方法<sup>[1]</sup>两种。Westergaard H M 在 1933 年开始研究水与结构相互作用; Morison 等在 1950 年提出了利用 Morison 方程来计算波浪力<sup>[2]</sup>; Chen Bang-Fuch 采用有限差分-有限元法和有限差分法,分别研究了地震作用下圆柱体结构上的动水压力<sup>[3]</sup>; Chopra A K 在考虑土、水与结构相互作用的基础上,提出了水平地震作用下计算塔式结构动水附加质量的有效方法<sup>[4-5]</sup>; 星隈顺一对罕遇地震下的结构进行了分析,指出了规范计算式中存在的问题<sup>[6]</sup>; 陈国兴<sup>[7]</sup>、朱晞<sup>[8]</sup>、赖伟<sup>[9]</sup>等利用 Morison 方程,对考虑水与结构相互作用下桥墩的地震反应进行了研究。

目前国内外关于动水压力对深水高桩码头结构影响的研究较少,而关于动水压力对桥梁影响的研究较多。王君杰<sup>[10]</sup>对深水高桩基础桥梁地震水动力效应进行了相关研究。曹梦强<sup>[11]</sup>对深水高桩承台桥墩地震反应的影响进行研究。杨万理<sup>[12]</sup>研究了动水压力对连续刚构桥梁地震响应的影响。张国明等<sup>[13]</sup>对动水压力对深水桥梁性能设计的影响开展了研究。

综上所述,目前关于地震作用下动水压力对深水桥梁的影响研究较多,研究成果均表明动水压力对深水桥梁各项动力性能指标影响不能忽略;然而国内外关于动水压力对深水高桩码头影响的研究几乎空白。水深超过 15 m 的港口为深水港<sup>[14]</sup>,本文选取国外某强震区 18.61 m 水深的高桩码头结构,基于附加质量法原理,通过  $p$ - $y$  曲线法模拟桩土相互作用,定量评价不同类型地震作用下动水压力对高桩码头各项动力性能指标的影响。

## 1 工程背景

某码头宽度为 46.1 m,排架间距为 8 m,每榀排架包含 8 根桩。钢管桩直径 1 200 mm,壁厚

22 mm, 420 级钢,全直桩,桩长为 32 m。上部采用桩帽节点+纵横梁面板体系,桩内部采用钢筋混凝土灌芯,码头的立面如图 1 所示。

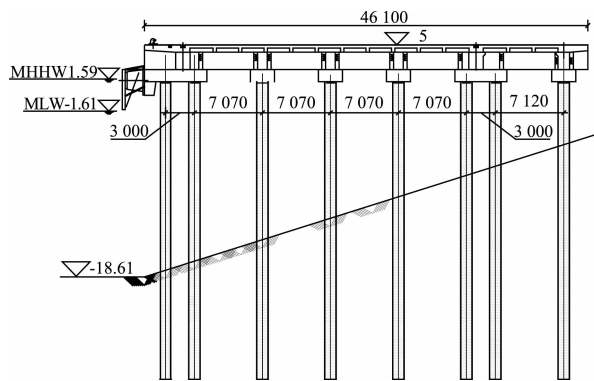


图 1 码头立面图(尺寸: mm, 高程: m)

恒载为码头与引桥的自重,考虑混凝土与钢筋的密度分别为  $2\,450\text{ kg/m}^3$  和  $7\,850\text{ kg/m}^3$ 。码头面的均载为 35 kPa,码头前沿到前轨道梁范围内均载为 15 kPa。码头面均载为集装箱堆载,因此不与运输车辆、正面吊及其他类似荷载同时考虑。

表层以粉土、砂土为主。根据钻孔揭露的地层结构、岩性特征、埋藏条件及物理力学性质,结合原位测试成果、室内试验和区域地质资料,勘探深度内(勘探孔最深 40.61 m)均为第 4 系沉积物,本场区勘探深度范围内上部 1~3 层为第 4 系全新统( $Q_4$ )冲海相粉土、粉砂,下部为晚更新世( $Q_3$ )陆相、滨海相沉积物。土的物理力学参数见表 1。

表 1 设计土层参数

土层编号	土层名称	厚度/m	干密度/ ( $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ )	土粒 比重	孔隙比
1	粉砂	6	1.59	2.73	0.715
2	粉土	1	1.61	2.70	0.684
3-1	层状粉土	3	1.53	2.70	0.770
3-2	层状粉土	6	1.46	2.71	0.863
3-3	层状粉土	4	1.53	2.70	0.770
4	粉细砂	6	1.54	2.69	0.752

## 2 动水压力对码头结构的自振特性影响

对于深水高桩码头,在地震作用下,基础周围的水将作为结构质量的一部分一起振动,为了准确地评价高桩码头结构地震作用下的动力特性,

需要考虑动水压力对动力响应的影响进行高桩码头结构的振动特性研究。本节基于附加质量法考虑动水压力,对 18.61 m 水深的深水高桩码头结构进行考虑地震作用下的动力响应分析。

### 2.1 附加质量法原理

基于流体结构互动的基本原理,在有限元分析常用的方程中引入附加质量的概念。设流体的非定常运动在振动结构上产生的作用力为如下形式:

$$F(t) = -M_a \ddot{x} - C_a \dot{x} - K_a x \quad (1)$$

振动方程为:

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = F(t) \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),得:

$$(M_s + M_a) \ddot{x} + (C_s + C_a) \dot{x} + (K_s + K_a) x = 0 \quad (3)$$

式中:  $M_s$ 、 $C_s$ 、 $K_s$  为结构质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$ 、 $x$  为加速度、速度以及位移向量;  $M_a$ 、 $C_a$ 、 $K_a$  为附加质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵。

由式(3)可知,附加质量即为使周围流体达到一定加速度时,需要的附加力与该加速度的比值。

关于附加质量的计算方法可参考下列附加质量公式<sup>[15]</sup>:

$$\frac{b}{h} \leq 2.0 \text{ 时,}$$

$$m = \frac{\omega_0 A_0}{g} \cdot \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b}{4h}\right)^3 \sqrt{\frac{y}{h}} \quad (4)$$

$$2.0 < \frac{b}{h} \leq 4.0 \text{ 时,}$$

$$m = \frac{\omega_0 A_0}{g} \cdot \frac{b}{a} \left(0.7 - \frac{b}{10h}\right)^3 \sqrt{\frac{y}{h}} \quad (5)$$

$$\frac{b}{h} > 4.0 \text{ 时,}$$

$$m = \frac{3}{10} \cdot \frac{\omega_0 A_0}{g} \cdot \frac{b}{a} \sqrt{\frac{y}{h}} \quad (6)$$

式中:  $M$  为水面以下结构单位长度的附加质量(t/m);  $b$  为地震时与动水压力作用方向垂直的边长(m);  $h$  为水深(m);  $\omega_0$  为单位体积的水产生的重力(kN/m<sup>3</sup>);  $A_0$  为结构断面面积(m<sup>2</sup>);  $a$  为地震时动水压力作用方向的结构边长(m);  $y$  为水面以下结构某点至水面的距离(m)。

### 2.2 高桩码头有限元模型的建立

利用 ANSYS, 选取 BEAM188 单元模拟整体高桩码头结构, 对于桩周的水体, 以附加质量的形式采用 MASS21 单元模拟。

根据前面对桩基与地基不同相互作用方法的研究, 当结构进入塑性状态以后,  $p$ - $y$  曲线法可以比较准确地模拟结构的实际状态。由于本码头位于强震区, 要对结构在强震作用下桩基的塑性进行研究, 因此, 桩基础与土体的相互作用采用 COMBIN39 单元模拟, 竖向弹簧的间距为 1.0 m。整体结构的有限元计算模型见图 2。

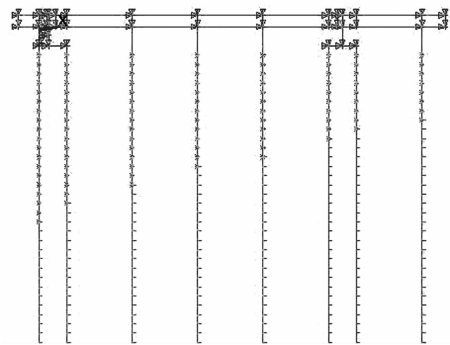


图2 结构整体有限元模型

### 2.3 自振特性分析

分别建立考虑动水压力和不考虑动水压力的高桩码头结构有限元模型后, 为了研究结构的固有频率、自振周期、振型等结构的自振特性, 需要对结构进行模态分析。通过分析, 结构的前六阶频率见表 2。

表 2 结构频率分布

振型	频率/Hz		差异/%
	考虑附加质量	不考虑附加质量	
一阶	1.454	1.476	1.443
二阶	6.432	7.249	12.699
三阶	8.359	9.452	13.067
四阶	9.889	11.175	12.995
五阶	11.768	13.201	12.177
六阶	12.883	14.320	11.154

由表 2 可得结构的自振周期, 对是否考虑动水压力进行比较, 从前六阶频率来看, 一阶频率相差最小, 为 1.44%; 三阶频率相差最大, 为 13.07%, 且从第二阶到第六阶频率差异都在

10% ~ 15%，第二阶到第六阶周期见图 3。由表 3 可知，考虑动水压力和不考虑动水压力质量阻尼系数相差 6.82%，刚度阻尼系数相差 11.01%。

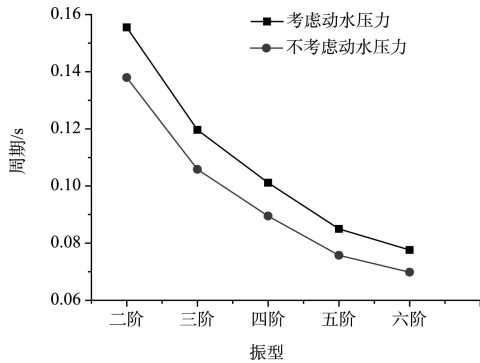


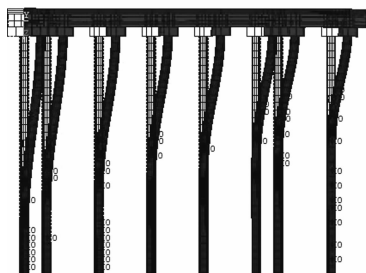
图 3 前六阶自振周期分布

表 3 结构阻尼系数分布

类型	阻尼系数		差异/%
	考虑动水压力	不考虑动水压力	
质量阻尼系数	0.44	0.47	6.82
刚度阻尼系数	0.001 21	0.001 09	11.01

应用 ANSYS 进行结构的模态分析，提取支撑结构前六阶模态，结构的振型见图 4。

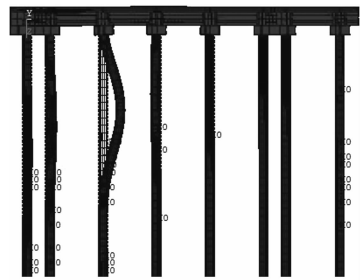
分别将考虑动水压力与不考虑动水压力的结构有限元模型进行模态分析，由图 4 可知两种结构前六阶振型相同，说明考虑动水压力对结构的振型没有影响。



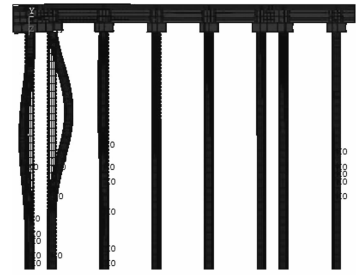
1) 一阶振型



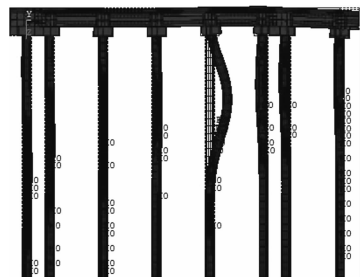
2) 二阶振型



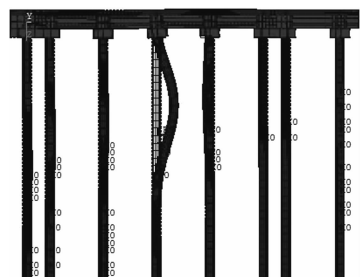
3) 三阶振型



4) 四阶振型



5) 五阶振型



6) 六阶振型

图 4 结构的前六阶振型

### 3 动水压力对结构地震动力响应的影响

为了研究动水压力对结构动力响应的影响，选取日本兵库县南部地震波（代号为 TII-III），研究结构在地震作用下的动力响应特征。由于 8# 桩出土长度最短，分担的水平地震力最大，最容易破坏。因此，本节选取 8# 桩为终点研究对象。

### 3.1 动水压力对高桩码头曲率的影响

为了研究动水压力对高桩码头结构在地震作用下的动力响应的影响, 本节选取结构在地震作用下桩身曲率变化规律进行分析。

将不同峰值加速度的兵库县南部地震波(TII-III)作用于高桩码头结构, 研究结构在考虑和不考虑动水压力两种情况下, 桩身曲率的变化规律。图 5 为结构在 TI-III 地震波、TII-III 地震波作用下 8# 桩的曲率包络线。

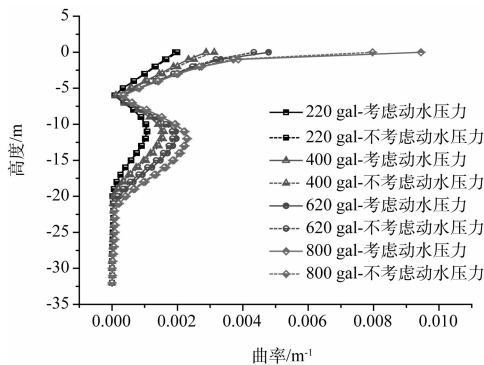


图 5 TII-III 波作用下 8# 桩的曲率包络线

如图 5 所示, 从 8# 桩桩身的曲率可以发现, 考虑动水压力与不考虑动水压力两种情况下的桩身曲率分布规律相同, 从桩底到桩顶曲率逐渐增加, 在 -12 m (泥面以下 4 m) 附近达到极值, 随后又进一步减小, 在反弯点处 (-6 m) 达到极小值, 然后又迅速增加, 在桩顶达到峰值。而且, 当曲率较小时, 两种情况下的响应基本相同, 而在桩顶附近和泥面以下 4 m 附近, 考虑动水压力的地震响应较无水时的大。

根据日本港湾技研资料《刚直桩码头弹塑性解析和耐震性能照查简便方法》No. 943, 结构的塑性率按式(7)~(11)式计算:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{0.44t}{D} \quad (7)$$

$$\phi_{\max} = \frac{2\varepsilon_{\max}}{D} \quad (8)$$

$$\phi_p = \frac{M_p \phi_y}{M_y} \quad (9)$$

$$\phi_y = \frac{M_y}{EI} \quad (10)$$

$$u = \frac{\phi_y}{\phi_p} \quad (11)$$

式中:  $t$  为钢管桩的厚度;  $D$  为钢管桩的直径;  $\varepsilon_{\max}$  为最大允许应变;  $\phi_{\max}$  为最大曲率;  $\phi_p$  为屈服曲率;  $u$  为塑性率。

钢管桩的屈服弯矩见图 6, 根据式(7)、(8)算得桩身最大曲率为  $0.00131 \text{ m}^{-1}$ , 根据图 7 中桩身屈服弯矩算得桩身屈服曲率为  $0.000299 \text{ m}^{-1}$ , 代入式(11)得高桩码头的最大允许塑性率为 4.37。

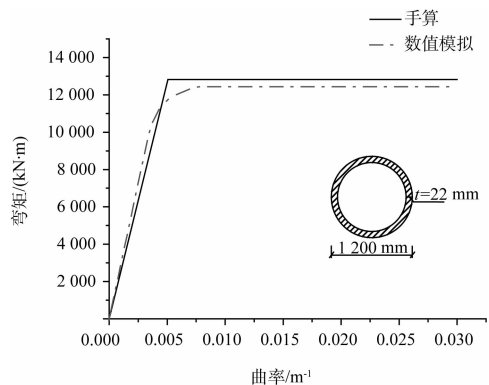


图 6 钢管桩的弯矩-曲率曲线

图 7 为在不同性质的地震波作用下, 在考虑和不考虑动水压力的条件下结构的塑性率变化曲线。从图 7 可以看出, 当峰值加速度为 400 gal ( $\text{cm/s}^2$ ) 和 620 gal 时, 考虑动水压力时结构的塑性率比不考虑时分别大 6.9% 和 11.6%; 当峰值加速度达到 800 gal 和 1 000 gal 时, 考虑动水压力时结构的塑性率比不考虑时分别大 18.8% 和 32.7%。因此, 动水压力对结构桩身塑性开展影响较大, 且随着地震烈度的增加, 差异有增大的趋势。当峰值加速度为 800 gal, 考虑和不考虑动水压力时, 结构的塑性率均未超过最大允许塑性率; 而当峰值加速度达到 1 000 gal 时, 塑性率均已超过最大允许塑性率。考虑动水压力时, 结构的最大允许塑性率对应的极限峰值加速度约为 850 gal, 不考虑动水压力时, 结构的最大允许塑性率对应的极

限峰值加速度约为 920 gal。

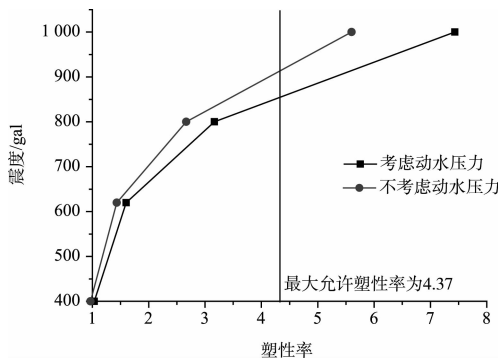


图7 地震动作用下结构的塑性率变化曲线

### 3.2 动水压力对高桩码头内力的影响

在地震作用下，结构桩基容易发生破坏，其原因是某部位的内力响应值超过其承载能力值，从而产生塑性铰。为此，本节将比较在考虑动水压力和不考虑动水压力两种情况下桩顶和泥面附近地震剪力和弯矩，以考虑地震动作用下动水压力对桩身内力的影响。

从图8可以看出，结构在兵库县南部地震波 TII-III（直下型）作用下，考虑和不考虑动水压力对桩身的影响，剪力沿桩身分布规律相似。从桩底到桩顶剪力逐渐增加，在 -15 m（泥面以下 7 m）附近达到极值，随后又进一步减小，最后又迅速增加，到泥面处往上又略微减小，剪力的峰值出现在泥面附近。而且，当剪力较小时，两种情况下的响应基本相同，而在桩顶附近和泥面以下 7 m 附近，考虑动水压力的地震响应较无水时的大。综合分析，结构最大剪力出现在泥面附近，因此，这个区域容易产生塑性铰。

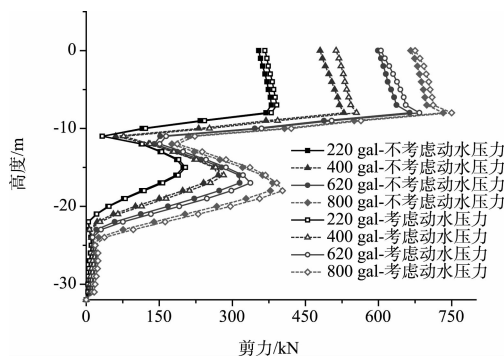


图8 TII-III波作用下桩身剪力包络曲线

图9为桩身的弯矩包络曲线。可以看出，结构在兵库县南部地震波 TII-III（直下型）作用下，考虑和不考虑动水压力对桩身的影响，弯矩沿桩身分布规律与剪力相似。不同之处在于，结构的最大弯矩出现在桩顶。因此，基于对弯矩的分析，桩顶附近容易产生塑性铰。

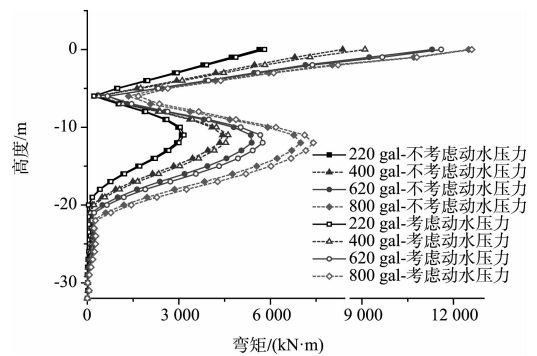


图9 TII-III波作用下桩身弯矩包络曲线

图10为结构桩身的应力包络曲线。可以看出，结构在兵库县南部地震波 TII-III（直下型）作用下，考虑和不考虑动水压力对桩身的影响，各节点最大应力沿桩身分布规律与剪力和弯矩分布规律大致相似。观察图10可知，桩身应力的极大值出现在泥面以下 3 ~ 4 m 处，峰值出现在桩顶。因此，基于对桩身应力分布规律的分析，桩顶附近容易产生塑性铰。

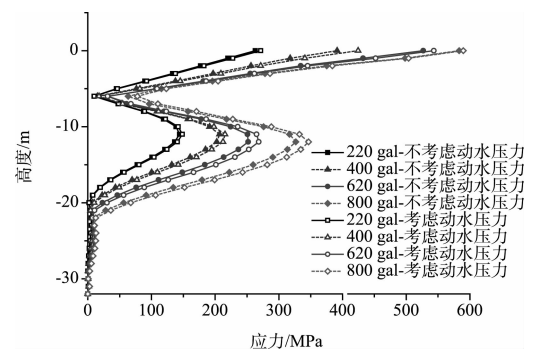


图10 TII-III波作用下桩身应力包络曲线

图11为桩顶滞回曲线，从图中可以看出当地震峰值加速度小于 400 gal 时，结构仍处于线性状态，考虑和不考虑动水压力的影响对滞回曲线没有影响。当峰值加速度达到 620 gal 和 800 gal 时，结构进入塑性状态，动水压力对滞回曲线影响较大，且随着峰值加速度的增加有增大的趋势。

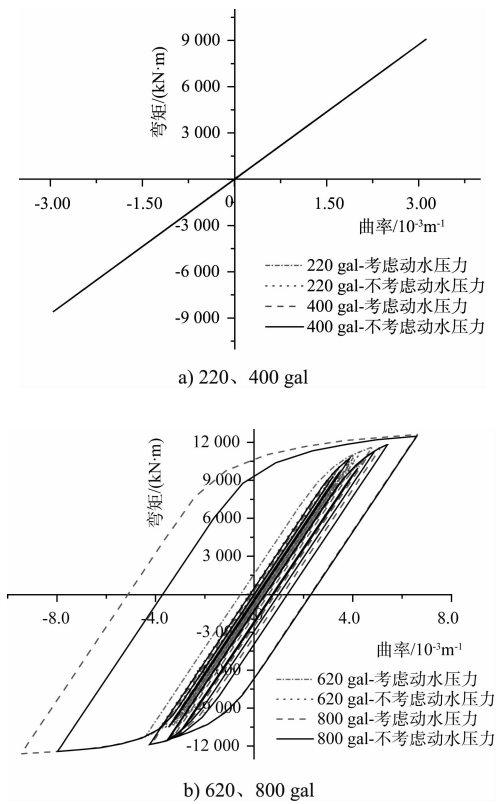


图 11 TII-III 波作用下桩顶滞回曲线

综上所述, 高桩码头结构在地震作用下, 桩顶和泥面到泥面以下 4 m 附近是容易产生塑性较的区域, 而动水压力对该区域也有一定程度的影响, 因此, 对于深水直桩高桩码头结构的抗震设计, 考虑动水压力的影响是有必要的。

### 3.3 动水压力对高桩码头位移的影响

为了研究动水压力对高桩码头结构在地震作用下的动力响应的影响, 本节选取结构在地震作用下桩身位移变化规律进行分析。

为了分析动水压力对高桩码头桩身地震响应的影 响, 选取 8# 桩为研究对象。画出结构在兵库县南部地震波 TII-III 作用下, 8# 桩身位移曲线见图 12。

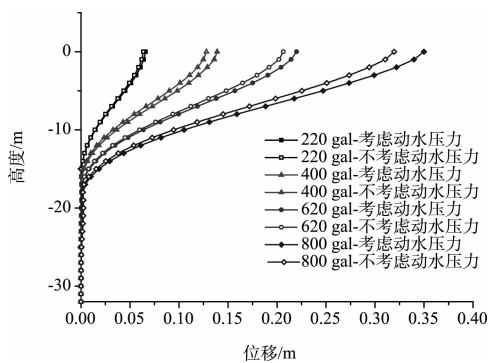


图 12 TII-III 波作用下 8# 桩桩身位移曲线

结构在考虑动水压力的影响时, 在峰值加速度为 220 gal 的直下型地震 (TII-III) 作用下, 桩顶最大位移增大约 5%, 且随着峰值加速度的增加有增大的趋势; 当峰值达到 800 gal, 考虑动水压力时, 桩顶最大位移增大 13.9%。因此, 在峰值加速度较大的强震作用下, 不能忽略动水压力对深水高桩码头的影 响。

图 13 中给出了高桩码头桩顶在考虑和不考虑动水压力作用下桩顶的残余位移。

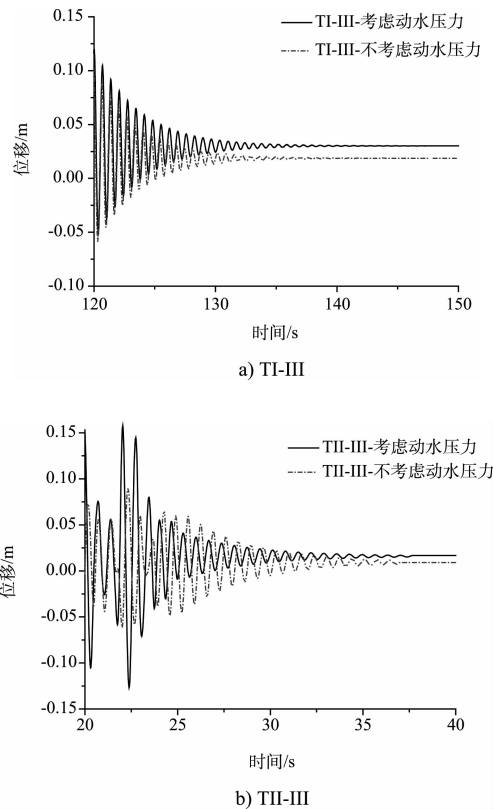


图 13 峰值加速度为 800 gal 的桩顶残余变形

图 13 为在峰值为 800 gal 的北海道東方冲地震 TI-III (长周期) 和兵库县南部地震波 TII-III (直下型) 作用下, 高桩码头结构桩顶位移时程曲线。在 TI-III 地震波作用下, 截取结构桩顶动力位移响应时程的 120 ~ 150 s; TII-III 地震波作用下, 截取结构桩顶动力位移响应时程 20 ~ 40 s。由图 13a) 可知, 在 TI-III 地震波作用下, 考虑动水压力对结构的影响时, 桩顶残余位移为 3.02 cm, 不考虑动水压力时, 桩顶的残余位移为 1.87 cm。由图 13b) 可知, 在 TII-III 地震波作用下, 考虑动水压力对结构的影响时, 桩顶残余位移为 1.68 cm, 不

考虑动水压力时, 桩顶的残余位移为 0.9 cm。

结构在 TI-III 作用下, 残余位移比 TI-III 地震波作用下的残余位移小 1 倍左右。其主要原因是北海道東方沖地震 TI-III 作用时间长达 120 s, 持续时间长, 结构耗能多; 兵库县南部地震波 TII-III 作用时间仅为 25 s, 持续时间短, 结构耗能少; 因此, 结构在峰值加速度为 800 gal 的 TI-III 地震波作用下的残余变形要远大于 TII-III 地震。

#### 4 结论

针对高桩码头结构, 基于附加质量法考虑动水压力, 综合考虑桩土相互作用; 在考虑和不考虑动水压力两种情况下, 分别研究结构在近远场地震作用下动水压力对结构地震动力响应的的影响。主要结论如下:

1) 基于附加质量法计算动水压力时, 由于水体引起了高桩码头结构质量的增加, 从而使结构的自振特性产生变化。对是否考虑动水压力进行比较, 从前六阶自振周期来看, 考虑动水压力时, 一阶周期变化不大, 仅增加 1.5%; 而二到六阶周期变化明显, 均在 10% 以上。

2) 动水压力效应对结构的抗震能力有一定的影响。考虑动水压力时, 结构的最大允许塑性率对应的极限峰值加速度约为 850 gal, 不考虑动水压力时, 结构的最大允许塑性率对应的极限峰值加速度约为 920 gal。同时动水压力对结构桩身塑性率开展影响较大, 且随着地震烈度的增加, 差异有增大的趋势。

3) 结构在考虑动水压力的影响时, 在峰值加速度为 220 gal 的地震波作用下, 桩顶最大位移增大 5% 左右, 且随着峰值加速度的增加有增大的趋势; 峰值为 800 gal 的地震作用下, 考虑动水压力时, 桩顶最大位移增大 13.9%。

4) 动水压力对结构的残余位移影响明显, 在 TI-III 和 TII-III 地震波作用下, 峰值加速度为 800 gal, 考虑动水压力对结构的影响时, 桩顶残余位移分别增加 38.10% 和 46.43%; 因此, 动水压力对强震作用下深水高桩码头结构的残余位移

影响较大, 不能忽略。

#### 参考文献:

- [1] Olson L G, Bathe K J. A study of displacement based fluid FE for calculating frequencies of fluid and fluid-structure systems[J]. Nucl Engrg Des, 1983, 76: 137- 151.
- [2] Morison J R, O' Brien M P, Johnson J W, et al. The force exerted by surface wave on piles[J]. Petroleum Transactions: AIME, 1950, 189: 149-154.
- [3] Chen Bang-Fuch. The significance of earthquake-induced dynamic forces in coastal structures design [J]. Ocean Engineering, 1995, 22(4): 301-315.
- [4] Chopra A K, Goyal A. Simplified earthquake analysis of intake-outlet towers[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(3): 767-788.
- [5] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamic of towers surrounded by water [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974(3): 33-49.
- [6] 星隈 顺一. 地震時保有水平耐力法による動水圧の評価[C]//第 4 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2000.
- [7] 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(10): 171-177.
- [8] 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, 2006, 30(2): 56-64.
- [9] 赖伟, 王君杰, 胡世德. 地震下桥墩动水压力分析[J]. 同济大学学报, 2004, 32(1): 1-5.
- [10] 王君杰, 赖伟, 胡世德. 深水高桩基础桥梁地震水动力效应分析[J]. 同济大学学报, 2011, 39(5): 650-655.
- [11] 曹梦强, 夏修身, 罗斌. 深水对高桩承台桥墩地震反应的影响[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(4): 73-78.
- [12] 杨万理, 李乔. 动水压力对连续刚构桥梁地震响应的影响[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(3): 373-378.
- [13] 张国明, 宋波. 动水压力对深水桥梁性能设计的影响[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(9): 1 086-1 094.
- [14] 程泽坤. 洋山深水港区工程设计关键技术[J]. 水运工程, 2008(10): 35-41.
- [15] Japan Road Association. Road and Bridge Design and Explanation: Chapter V. Seismic Design[M]. Tokyo: Japan Road Association, 1996.

(本文编辑 武亚庆)