

动水压力作用下深水桥墩非线性 地震响应分析¹

黄 信¹⁾ 李忠献^{1,2)}

1) 天津大学建筑工程学院, 天津 300072

2) 天津市土木工程结构及新材料重点实验室, 天津 300072

摘要 为研究动水压力作用对深水桥墩地震响应的影响, 本文分别采用 Morison 方程和辐射波浪理论建立了动水压力计算方法, 分析了动水压力作用对桥墩地震响应的影响; 同时分析了考虑材料非线性时动水压力作用对桥墩地震响应的影响。研究表明: 动水压力作用增大了桥墩的地震响应, 其影响随着相对水深的增加而增强; 考虑材料非线性时动水压力对桥墩地震响应的影响, 相对线性材料而言有所变化。

关键词: 深水桥墩 地震响应 动水压力 Morison 方程 辐射波浪理论 材料非线性

引言

地震激励下水与桥墩相互作用会对桥墩产生动水压力作用, 研究表明动水压力作用改变了桥墩结构的动力特性, 同时也增大了结构的动力响应 (Liaw 等, 1974; Goyal 等, 1989), 所以充分认识地震激励下动水压力对桥墩动力响应的影响, 对于新建深水高墩桥梁抗震设计和已建桥梁抗震安全评估具有重要的意义。在国外, Liaw 等 (1974) 基于辐射波浪理论提出了柔性圆截面柱体的动水压力解析解; Goyal 等 (1989) 进一步研究了具有 2 个对称轴的任意截面形状柱体的动水压力, 并考虑了土-结构的相互作用; Yamada 等 (1989) 对悬臂结构进行了波浪和地震共同作用下的动力分析, 并采用 Morison 方程考虑动水压力作用。在国内, 居荣初等 (1983) 较早对梁式结构在液体内的耦联振动进行了研究, 并提出了相应的解析解; 高学奎 (2006) 采用 Morison 方程 (Morison 等, 1950) 计算了动水压力, 对近场地震激励下的水与桥墩动力相互作用进行了分析; 赖伟 (2004) 基于辐射波浪理论提出了一种计算动水压力的半解析半数值解, 并可以考虑自由表面波和流体压缩性的影响。

然而现有考虑动水压力的桥墩地震响应分析时材料仅采用线性材料, 本文分别采用

1 基金项目 国家自然科学基金重大研究计划“重大工程的动力灾变”重点支持项目 (90715032)

[收稿日期] 2010-03-22

[作者简介] 黄信, 男, 生于 1983 年。博士研究生。主要从事结构抗震研究。E-mail: huangxin1395602@163.com

李忠献, 男, 生于 1961 年。长江学者特聘教授, 博士。主要从事工程结构抗震抗爆、减灾控制与健康监测研究。

E-mail: zxli@tju.edu.cn

Morison 方程和辐射波浪理论建立了动水压力的计算方法, 同时考虑材料非线性影响研究了动水压力对桥墩地震响应的影响。

1 动水压力的计算方法

本文分别建立了采用 Morison 方程和辐射波浪理论的两种动水压力计算方法。

1.1 Morison 方程

早在上世纪 50 年代初 Morison 等人提出了用于计算从海底直至自由水表面的小直径垂直柱体的水平波浪力公式, 被称为 Morison 方程。后来许多研究者用该方程表示地震作用下小直径柱体受到的地震动水压力 (高学奎, 2006; 赖伟, 2004)。

本文主要研究地震时水中结构的动力响应, 可不考虑浪与流的影响, 即假定水是静止的, 得到水对单位长度柱体产生的动水压力为:

$$F_w = -\frac{\pi}{4} \rho (C_M - 1) D^3 \ddot{x}_0 - \frac{1}{2} C_D \rho D |\dot{x}_0| \dot{x}_0 \quad (1)$$

动水阻力影响一般可以忽略, 同时对式 (1) 右边第二项进行线性化, 式 (1) 变为:

$$F_w = -(C_M - 1) \rho V \ddot{x}_0 = -M_w \ddot{x}_0 \quad (2)$$

式中, M_w 为动水附加质量; ρ 为水的密度; \ddot{x}_0 为结构绝对加速度; V 为单位柱体体积; C_M 和 C_D 为惯性力系数和粘性摩擦阻力系数。

1.2 辐射波浪理论

辐射波浪理论是应用分离变量法或 Green 函数构造水体控制方程中速度势的一般解, 并由边界条件求出速度势一般解中的待定常数, 最后通过 Bernoulli 方程求得动水压力 (李远林, 1999; Sun 等, 1991; Aviles 等, 1989; Wepf 等, 1988)。本文采用赖伟 (2004) 基于 Trefftz 完备函数推导的辐射波浪理论。

假定水体无旋不可压缩, 在柱坐标系下水体的速度势可表示为 $\Phi(r, \theta, z, t) = \phi(r, \theta, z) e^{i\omega t}$ 。将 $\phi(r, \theta, z)$ 代入 Laplace 方程得到水体控制方程为:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

根据 Trefftz 完备函数 (赖伟, 2004), $\phi(r, \theta, z)$ 可表示为:

$$\phi(r, \theta, z) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \phi_{mn}(r, \theta, z) \quad (4)$$

同时, 对于整个水体的底面和表面以及水体与桥墩交界面处还要满足相应的边界条件, 式 (5) 为水与桥墩交界面的边界条件, 式 (6) 为水体自由表面边界条件, 式 (7) 为水体底部边界条件, 式 (8) 为无限远处水体辐射边界条件。

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{\partial X}{\partial t} \cos \theta \right)_{r=a, c < z < d} \quad (5)$$

$$\phi_{z=d} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=d} = 0 \quad (7)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} - ik\phi \right) = 0 \quad (8)$$

式中, a 为圆柱体桥墩半径; d 为水深; $k=w/c$; c 为水中音速; X 为桥墩的位移, 包括刚体位移和弹性位移, 产生的速度势分别为刚体速度势和弹性速度势; 柱坐标系中 z 轴沿桥墩轴线向上, 坐标原点位于墩底。

将式 (4) 代入式 (3), 并结合边界条件式 (5) — 式 (8), 可分别求得流场中的刚体速度势和弹性速度势。将求得的刚体速度势和弹性速度势代入 Bernoulli 方程, 可得到结构动水压力表达式, 此时便可对桥墩结构进行动水压力作用下的地震响应分析。

上述推导是基于圆截面桥墩, 对于矩形截面桥墩, 动水附加质量可通过等效圆截面桥墩的动水附加质量乘修正系数得到 (赖伟, 2004)。

2 考虑混凝土非线性时动水压力对桥墩地震响应的影响

在强震作用下桥墩混凝土材料势必进入非线性阶段, 采用损伤本构考虑混凝土非线性, 对某桥梁工程中所采用的钢筋混凝土桥墩进行动水压力作用下的地震响应分析。

2.1 分析模型

某钢筋混凝土桥墩, 墩高 30m, 截面为 3m×6m。桥梁上部结构为预应力混凝土简支梁, 计算跨度为 51.1m, 梁高 4.3m。采用附加质量来考虑桥梁上部结构对桥墩墩顶的约束作用, 墩顶集中质量取一跨梁桥面系的质量为 501798kg; 抗震设防烈度为 VIII 度。

在分析中混凝土的密度取值为 2643 kg/m^3 , 弹性模量为 30127 MPa , 泊松比为 0.2。忽略自由表面波的影响, 动水压力采用附加质量进行考虑。地震激励选用天津波 (1976 年, EW 方向) 和 El-Centro 波 (1940 年, EW 方向) 的加速度时程, 加速度幅值调整为 0.2g, 沿桥墩长边方向进行单向地震激励。

混凝土材料本构模型采用 Lee 等 (1998) 建立的混凝土损伤本构模型。

2.2 桥墩的地震响应

天津波沿桥墩结构长边作用, 且水深为 20m 时辐射波浪理论计算下的桥墩的拉伸破坏变量 (DAMAGET) 和刚度退化变量 (SDEG) 分别如图 1(a) 和图 1(b) 所示。其中, 拉伸破坏变量代表混凝土结构的破坏情况; 刚度退化变量代表混凝土结构的开裂情况。

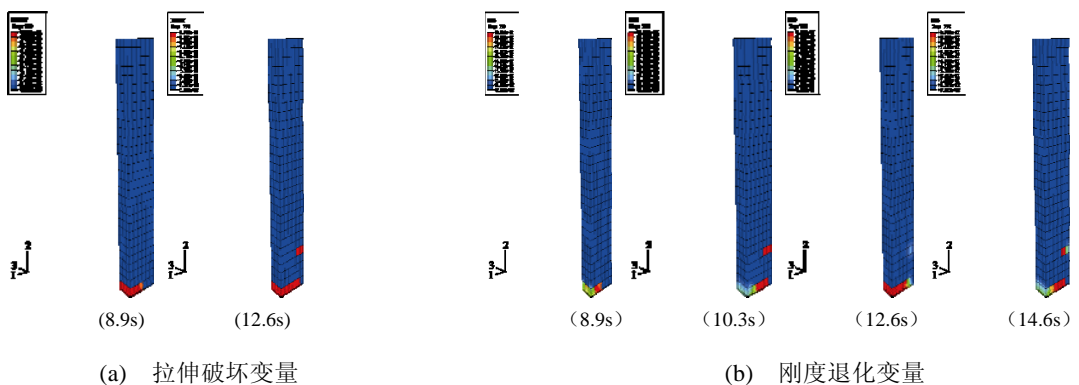


图 1 拉伸破坏变量和刚度退化变量

Fig.1 Graphical representation for calculation of earthquake hydrodynamic of bridge pier

从图 1(a) 可以看出, 拉伸变量的大小随着材料的拉伸破坏只增不减; 而从图 1(b) 中可以看出, 退化刚度变量的大小随着裂纹的开合情况却是或增或减, 它反映了混凝土结构刚度自

我恢复的性质。

为了衡量动水压力对桥墩地震响应的影响程度，采用无量纲参数表示动水压力引起桥墩动力响应的增幅，式（8）为墩顶相对位移的增幅，式（9）为墩底应力的增幅，式（10）为相对水深：

$$D_{\Delta}=(\Delta_d-\Delta_s)/\Delta_s \tag{8}$$

$$D_{\sigma}=(\sigma_d-\sigma_s)/\sigma_s \tag{9}$$

$$D_w = d / H \tag{10}$$

式中， Δ_d 为考虑动水压力时墩顶相对位移的幅值， Δ_s 为不考虑动水压力时墩顶相对位移的幅值， σ_d 为考虑动水压力时墩底应力的幅值， σ_s 为不考虑动水压力时墩底应力的幅值， d 为水深， H 为墩高。

图2和图3分别给出了天津波和El-Centro波地震作用下考虑和不考虑混凝土材料非线性时，动水压力引起桥墩墩顶相对位移响应和墩底应力响应的增幅规律。

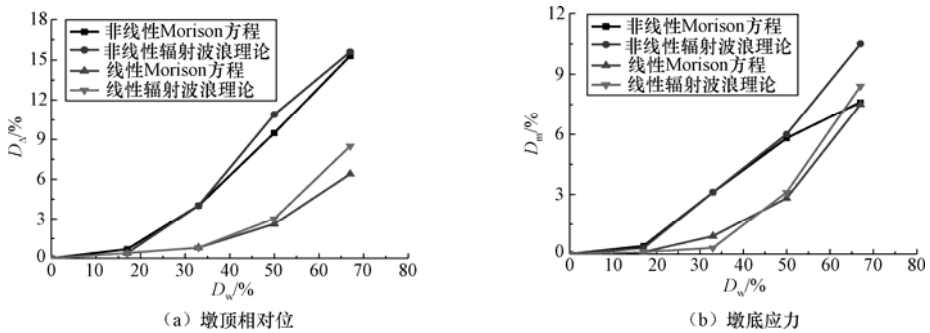


图2 天津波作用下动水压力引起桥墩地震响应的增幅

Fig. 2 Amplitude increase of seismic response of pier by hydrodynamic pressure under Tianjin wave excitation

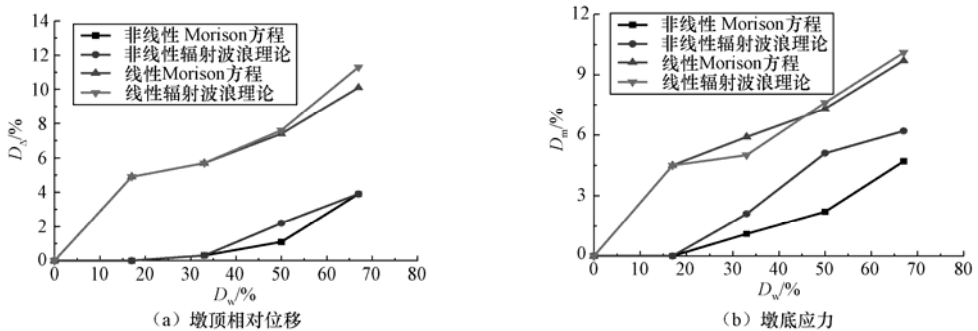


图3 El-Centro波作用下动水压力引起桥墩地震响应的增幅

Fig.3 Amplitude increase of seismic response of pier by hydrodynamic pressure under El-Centro wave excitation

从图2可以看出，桥墩结构在动水压力作用下的动力响应随着相对水深的增加而增大；如天津波作用下，当相对水深为5%时，辐射理论计算的墩底应力增幅小于1%；当相对水深为66.7%时，辐射理论计算的墩底应力增幅达到10.5%。图3也可得到类似结论。

从图 2 可以得出, 天津波作用时, 相对线性材料而言, 考虑材料非线性时桥墩结构动力响应增幅有所增大; 如当考虑材料非线性时, 墩顶位移增幅为 15.6%, 墩底应力增幅为 10.5%; 而材料采用线性材料时, 墩顶位移增幅仅为 8.5%, 墩底应力增幅为 8.4%。从图 3 可以得出, 当 El-Centro 波作用时, 相对线性材料而言, 考虑材料非线性时桥墩结构动力响应增幅有所减小; 如考虑材料非线性时墩顶位移增幅为 3.9%, 墩底应力增幅为 6.2%; 而对于线性材料时墩顶位移增幅为 11.3%, 墩底应力增幅为 10.1%。

因此, 考虑混凝土材料非线性时, 地震作用下的动水压力对桥墩地震响应的增幅, 相对线性混凝土材料而言有所差异。

3 结论

通过本文研究可以得到, 动水压力作用增大了桥墩结构的地震响应, 其影响随着相对水深的增加而增强; 考虑混凝土非线性时, 动水压力对桥墩结构动力响应的影响与不考虑混凝土非线性时有所差别。

参考文献

- 高学奎, 2006. 近场地震作用下深水桥墩的特殊地震响应分析. 北京: 北京交通大学硕士学位论文.
- 居荣初, 曾心传, 1983. 弹性结构与液体的耦联振动理论. 北京: 地震出版社.
- 赖伟, 2004. 地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究. 上海: 同济大学博士学位论文.
- 李远林, 1999. 近海结构水动力学. 广州: 华南理工大学出版社.
- Aviles J., Sanchez-sesma F.J., 1989. Water pressures on rigid gravity dams with finite reservoir during earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18** (4): 527—537.
- Goyal A., Chopra A.K., 1989. Earthquake analysis of intake-outlet towers including tower-water-foundation-soil interaction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **8** (3): 325—344.
- Lee J, G L Fenves. 1998. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **27**: 937—956.
- Liaw C.Y., Chopra A.K., 1974. Dynamics of towers surrounded by water. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **3** (1): 33—49.
- Morison J R, Obrien M P, Johnson J W. et al. 1950. The force exerted by surface wave on piles. *Petroleum Transactions. AIME*, **189**: 149—154.
- Sun K., Nogami T., 1991. Earthquake induced hydrodynamic pressure axisymmetric offshore structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **20** (5): 429—440.
- Wepf D.H., Wolf J.P., Bachmann H., 1988. Hydrodynamic-stiffness matrix based on boundary elements for time-domain dam-reservoir -soil analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **16** (3): 417—432.
- Yamada Y., Iemura H., Kawano K. et al., 1989. Seismic response of offshore structures in random seas. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **18** (7): 965—981.

Nonlinear Seismic Response Analysis of Bridge Pier in Deep Water under Hydrodynamic Pressure Influence

Huang Xin¹⁾ and Li Zhongxian^{1,2)}

1) School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2) Tianjin Key Laboratory of Civil Engineering Structure and New Materials, Tianjin 300072, China

Abstract The influence of hydrodynamic pressure on seismic response of bridge pier is studied basing on Morison equation and radiation wave theory. In addition, influence of hydrodynamic pressure on seismic response of a pier with nonlinear material is analyzed. The results indicate that: seismic response of pier is augmented because of hydrodynamic pressure effect, and this effect on seismic response of pier becomes more significant with the increase of the relative water depth. The action of hydrodynamic pressure about pier with nonlinear material will be differece from pier with the linear material.

Key words: Bridge pier in deep water; Seismic response; Hydrodynamic pressure; Morison equation; Radiation wave theory; Material nonlinear