

李琦,李瑞.近断层脉冲型地震下建筑地桩基础沉降分析[J].地震工程学报,2018,40(2):246-251.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.246

LI Qi, LI Rui. Settlement Analysis of Building Pile Foundation Under Near-fault Pulse-like Ground Motions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 246-251. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.246

近断层脉冲型地震下建筑地桩基础沉降分析^①

李琦, 李瑞

(榆林职业技术学院矿业工程系, 陕西 榆林 719000)

摘要:传统基于碰撞回弹系数 Stereo-mechanical 方法在分析建筑地桩基础的沉降位移过程中未考虑地桩基础碰撞的能量损耗,造成分析结果存在准确性和可信度较低的问题。因此提出改进的 Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法,以解决基于碰撞回弹系数 Stereo-mechanical 法存在的问题。采用线性阻尼构建 Kelvin 模型,分析地桩基础碰撞靠近阶段和回弹阶段的阻尼做功,构建地桩基础碰撞转换单自由度体系振动模型,实现对地桩基础的相对沉降速度和相对沉降位移的有效运算,基于建筑地桩基础碰撞沉降发生初始和结束时刻的能量和动量守恒定理,得到建筑地桩基础的最大沉降位移,实现对建筑地桩基础沉降的有效分析。实验结果说明,所提方法能提高地桩基础沉降分析的准确性和可信度。

关键词:近断层脉冲型;地震;建筑;地桩基础;沉降分析;阻尼系数

中图分类号: TU973

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)02-0246-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.246

Settlement Analysis of Building Pile Foundation Under Near-fault Pulse-like Ground Motions

LI Qi, LI Rui

(Department of Mining Engineering, Yulin Vocational and Technical College, Yulin 719000, Shaanxi, China)

Abstract: In the traditional stereo-mechanical method based on the collision resilience coefficient, the energy loss caused by pile foundation collision is not considered in the analysis of settlement and displacement of building pile foundation, resulting in low accuracy and reliability of the analysis results. Therefore, this study proposes an improved Kelvin settlement analysis method for building pile foundation collision to solve this existing problem in the stereo-mechanical method. The Kelvin model is established with linear damping to analyze the damping of the pile foundation during the close and rebound stages of collision. The pile foundation collision is then transformed into the vibration of a single degree of freedom system. The vibration model is established to realize the effective calculation of relative settlement velocity and relative settlement displacement of the pile foundation. The maximum settlement displacement of the pile foundation is calculated based on the conservation laws of energy and momentum at the initial and end moments of the pile foundation collision settlement. The results indicate that the proposed method can improve

① 收稿日期:2017-08-20

作者简介:李琦(1982—),男,陕西绥德人,硕士,讲师,研究方向:建筑工程技术。E-mail:log91035@163.com。

the accuracy and reliability of the settlement analysis of the ground pile foundation.

Key words: near-fault pulse-like; earthquake; building; ground pile foundation; settlement analysis; damping coefficient

0 引言

突发性、毁灭性较强的地震灾害会造成大量的建筑工程结构破坏和人员财产的损失。随着科学技术的不断进步和人们对地震运动规律的不断总结和探索,提出了针对近断层脉冲型地震下建筑地桩基础的沉降分析方法。传统基于碰撞回弹系数 Stereo-mechanical 方法未考虑地桩基础碰撞过程的能量消耗,使分析的沉降结果精度和代表性均较差^[1]。为解决该问题,本文提出改进的 Kelvin 建筑地桩基础碰撞的沉降分析方法,以期提高对建筑地桩基础沉降分析的效果。

1 近断层脉冲型地震下建筑地桩基础的沉降分析

近断层脉冲型地震作用容易造成建筑地桩基础发生碰撞反应,导致结构部件或者整体结构的严重破坏,碰撞反应严重时还会导致地桩基础发生大幅度的沉降。建筑地桩基础的碰撞反应属于复杂的线性问题^[2],构建合理的碰撞模型对分析建筑地桩基础的沉降具有关键作用。本文采用基于碰撞回弹系数 Stereo-mechanical 法分析建筑地桩基础的碰撞沉降反应。

1.1 基于碰撞回弹系数 Stereo-mechanical 法

基于碰撞回弹系数 Stereo-mechanical 法进行建筑地桩基础碰撞沉降分析时,基于能量和动量守恒定律,依照发生碰撞前物体速度 v_1 和 v_2 以及损失的回弹系数 e 对碰撞结束后物体的速度 v'_1 和 v'_2 进行确定^[3](图 1)。

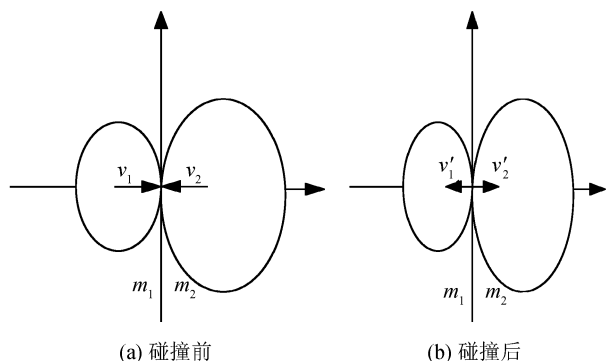


图 1 Stereo-mechanical 碰撞模型

Fig.1 Stereo-mechanical collision model

该方法计算出两物体碰撞后的速度表达式为:

$$v'_1 = v_1 - (1 + e) \frac{m_2(v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \quad (1)$$

$$v'_2 = v_2 - (1 + e) \frac{m_1(v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

$$e = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2} \quad (3)$$

式中: m_1 和 m_2 分别为两物体的质量; e 表示碰撞过程中的能量损失回弹系数。该方法在进行碰撞沉降分析时忽略了碰撞能量损耗以及碰撞过程中建筑地桩基础的结构反应,其局限性较强^[4]。因此,本文提出改进的 Kelvin 碰撞沉降分析方法,以进行建筑地桩基础的沉降分析。

1.2 改进的 Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法

Kelvin 模型基于线弹性建筑地桩基础碰撞沉降分析方法,引入线性阻尼。其表达式为:

$$F_c(t) = k_k \cdot \delta(t) + c_k \cdot \dot{\delta}(t) \quad (4)$$

其中: k_k 表示发生线性碰撞时的弹簧刚度; $\delta(t)$ 为地桩基础的相对沉降速度; c_k 为阻尼系数,由下式确定:

$$c = 2\xi \sqrt{k_k \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}, \quad \xi = -\frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (5)$$

Kelvin 模型中的黏滞阻尼系数在地桩基础碰撞过程中始终不变,改进的 Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法主要通过改变阻尼系数^[5]来提高对建筑地桩基础的碰撞沉降分析效果。

改进的 Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法的数学表达式为:

$$F_c(t) = k_k \cdot \delta(t) + \hat{c}_k \cdot \dot{\delta}(t) \quad (6)$$

式(6)中与时间变化相关的阻尼系数为:

$$\hat{c}_h(t) = \hat{\xi}_k \cdot \delta(t) \quad (7)$$

式中: $\hat{\xi}_k$ 为阻尼常数,分析式(6)和(7)能够看出,改进的 Kelvin 碰撞沉降分析方法能有效弥补在建筑地桩碰撞时回弹过程的能量损失。

式(7)中的阻尼常数为待定参数值,对其的确定应采取如下关系式进行推导^[6]。如图 1 所示,两个物体发生碰撞后,运动能量的损失表达式为:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (1 - e^2) \dot{\delta}_0^2 \quad (8)$$

式(8)中当建筑的两个地桩基础发生碰撞时,

其刚开始的相对速度表达式为 $\dot{\delta}_0=v_1-v_2$ 。碰撞过程中能量消耗由阻尼做功产生,得到:

$$\Delta E=\Delta E_1+\Delta E_2=\oint \dot{c}_k \dot{\delta} d \delta=\oint \dot{c}_k \delta \dot{\delta} d \delta \quad (9)$$

式(9)中在建筑地桩基础碰撞时靠近阶段和回弹阶段由阻尼力消耗的能量分别用 ΔE_1 和 ΔE_2 表示^[7],为凸显出 ΔE ,进行碰撞沉降分析时地桩基础的相对沉降速度 $\dot{\delta}(t)$ 应由相对的沉降位移 $\delta(t)$ 表示。图2为建筑地桩碰撞沉降分析的相对沉降位移 $\delta(t)$ 示意图。

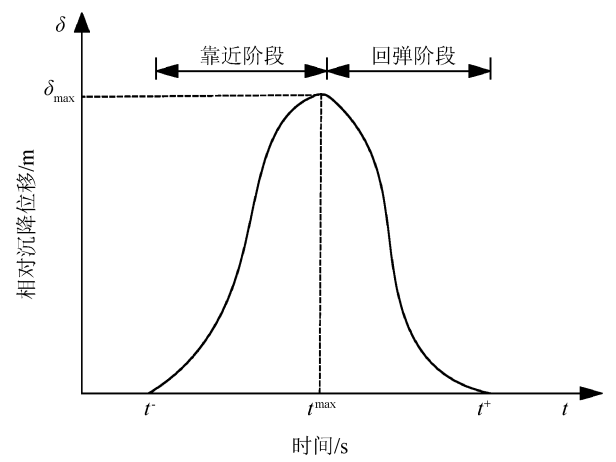


图2 建筑地桩碰撞沉降分析的相对沉降位移示意图
Fig.2 Diagram of relative settlement displacement of collision settlement analysis for building pile

图中的 t^- 、 $t^{\max}$ 和 t^+ 点分别表示建筑地桩发生碰撞开始时间、发生最大相对沉降位移时间以及碰撞沉降结束时间。当建筑地桩基础在碰撞结束时刻,发生碰撞的建筑地桩基础具有一样的速度 v 。

因为改进的 Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法含有非线性的阻尼项^[8],导致地桩基础的相对沉降速度和相对沉降位移的计算过程较复杂(图3),需采取坐标转换的手段将地桩基础的碰撞

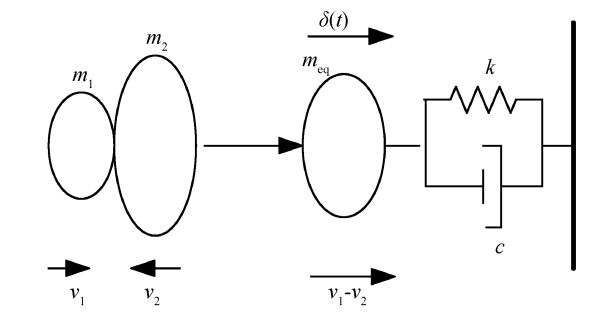


图3 地桩基础碰撞转换为单自由度体系振动模型
Fig.3 Transformation of ground pile foundation collision into a vibration model of a single degree of freedom system

视为单自由度体系的振动^[9],得到初始的沉降位移和沉降速度的表达式为 $\delta_0=\delta(t=0)$ 和 $\dot{\delta}_0=\dot{\delta}(t=0)=v_1-v_2$,则可用式(10)来表示单自由度体系的振动方程。

$$m \ddot{\delta}(t)+c \dot{\delta}(t)+k \delta(t)=0 \quad (10)$$

式中: m 表示单自由度体系的质量;设置 c 和 k 分别为线性阻尼系数和弹簧刚度^[10],以计算 $\dot{\delta}(t)$ 和 $\delta(t)$ 的关系。运算式(10)可得如下两个公式:

$$\delta(t)=e^{-r \omega t} \frac{\dot{\delta}_0}{\omega_d} \sin \left(\omega_d t\right) \quad (11)$$

$$\dot{\delta}(t)=e^{-r \omega t} \dot{\delta}_0 \cos \left(\omega_d t\right)-r e^{-r \omega t} \frac{\omega \dot{\delta}_0}{\omega_d} \sin \left(\omega_d t\right) \quad (12)$$

其中: $\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$ 表示单自由度体系的圆频率; r 表示阻尼比;存在阻尼的圆频率用 $\omega_d(=\omega \sqrt{1-r^2})$ 表示。若不计阻尼效应,计算出 $t^{\max}$ 和 $\delta_{\max}$ 如下:

$$t^{\max }=\frac{\pi}{2 \omega} \quad (13)$$

$$\delta_{\max }=\frac{\dot{\delta}_0}{\omega} \quad (14)$$

若将式(13)和(14)分别代入式(11)和(12),可得:

$$\left(\frac{\delta(t)}{\delta_{\max }}\right)^2+\left(\frac{\dot{\delta}(t)}{\dot{\delta}_0}\right)^2=1 \quad (15)$$

分析式(15)可知 $\dot{\delta}(t)$ 与 $\delta(t)$ 之间能够描绘为椭圆形^[11],因此得到建筑地桩基础碰撞过程中 $\dot{\delta}(t)$ 和 $\delta(t)$ 的函数关系表达式:

$$\dot{\delta}(t)=\dot{\delta}_0 \sqrt{1-\left(\frac{\delta(t)}{\delta_{\max }}\right)^2} \quad (16)$$

同样分析得到在建筑地桩基础回弹过程中的 $\dot{\delta}(t)$ 和 $\delta(t)$ 关系表达式:

$$\dot{\delta}(t)=\dot{\delta}_f \sqrt{1-\left(\frac{\delta(t)}{\delta_{\max }}\right)^2} \quad (17)$$

式(17)中建筑地桩基础碰撞完成后相对速度表达用 $\dot{\delta}_f(=v_1'-v_2')$ 表示。把式(16)和(17)代入式(9),采用数值积分手段得到:

$$\Delta E=\Delta E_1+\Delta E_2=\frac{1}{3} k \dot{\delta}_0 \delta_{\max }^2+\frac{1}{3} k \dot{\delta}_f \delta_{\max }^2 \quad (18)$$

式(18)中 ΔE_1 和 ΔE_2 同式(9)一样表示建筑地桩基础在碰撞沉降过程以及回弹阶段的阻尼力消耗能量^[12]。考虑建筑地桩基础碰撞沉降发生初始和结束时刻的能量和动量守恒关系,则有:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_1 v_1^2+\frac{1}{2} m_2 v_2^2 & =\frac{1}{2} k \delta_{\max }^2+\frac{1}{3} k \dot{\delta}_0 \delta_{\max }^2+ \\ & \frac{1}{2}\left(m_1+m_2\right) V^2 \end{aligned} \quad (19)$$

$$m_1v_1+m_2v_2=(m_1+m_2)V$$

(20)

式(19)中 $\frac{1}{2}m_1v_1^2$ 表示地桩基础碰撞沉降中地桩靠近阶段结束时刻的所有弹性势能^[13]; $\frac{1}{2}m_2v_2^2$ 等同于 ΔE_1 ;地桩基础碰撞沉降中地桩靠近阶段结束时刻地桩基础的共同速度为 V 。根据式(19)和(20)得到建筑地桩基础的最大沉降位移 $\delta_{\max}^2$ 的表达式:

$$\delta_{\max}^2=\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}\frac{3}{2\hat{\xi}\delta_0+3k_k}\delta_0^2$$

(21)

联立式(8)、(18)以及(21),和回弹系数定义公式 $e=|\delta_f|/\delta_0$,得到建筑地桩基础的碰撞沉降的阻尼常数的表达式:

$$\hat{\xi}_k=\frac{3k_k(1-e)}{2e\delta_0}=\frac{3k_k(1-e)}{2e(v_1-v_2)}$$

(22)

表 1 三种方法分析得出的建筑地桩基础沉降反应峰值

Table 1 The peak settlement response value of building pile foundation obtained by three methods

沉降反应峰值变化	线弹性建筑地桩基础 碰撞沉降分析方法	Kelvin 建筑地桩基础 碰撞沉降分析方法	本文方法
地桩基础隔震层的沉降位移/cm	29.2	28.98	28.36
地桩基础上部结构的沉降位移/cm	19.87	18.18	17.68
上部位移变化的加速度/(m·s ⁻²)	41.15	41.31	41.82
地桩基础隔震层的沉降位移变化加速度/(m·s ⁻²)	96.85	131.42	119.11

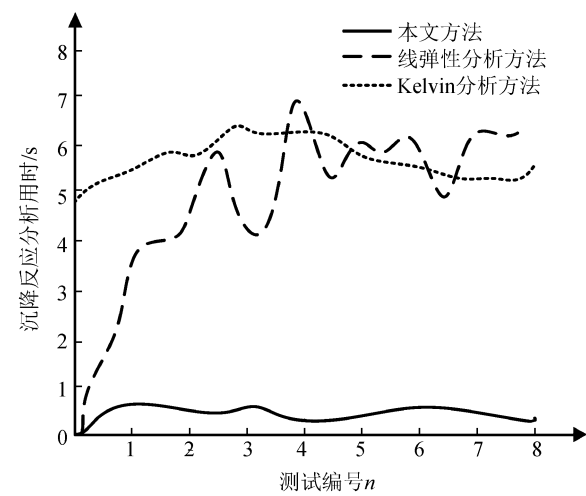


图 4 三种方法分析沉降反应用时情况

Fig.4 Time for analyzing the settlement response with three methods

从表 1 中分析可以看出,除地桩基础隔震层的沉降位移变化加速度相差较大之外,三种方法计算得出的其他沉降反应峰值变化差别较小。线弹性和 Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法由于在计算沉降位移时未考虑能量的损失,得到位移变化较

由式(22)能够得到: e 值为 1 时, $\hat{\xi}_k$ 值为 0; e 值等于 0 时, $\hat{\xi}_k$ 值趋向于无穷大^[14]。说明改进的 Kelvin 碰撞沉降分析方法中阻尼系数中的阻尼常数可信度较好,阻尼系数的可信度也较高,其可用于计算近断层脉冲型地震下建筑地桩基础的沉降位移。

2 实验分析

为分析本文方法是否能有效应用于近断层脉冲地震下建筑地桩基础的沉降分析中,实验分别利用线弹性建筑地桩基础碰撞沉降分析方法^[15]、Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法以及本文方法,对某高层建筑在近断层脉冲型地震影响下建筑地桩基础的沉降反应峰值变化和用时情况进行分析。表 1 为三种方法分析得出的建筑地桩基础沉降反应峰值,图 4 为得到沉降反应的用时情况。

大而加速度变化较小的结果,而本文方法在计算时考虑了能量损失,对实际建筑在近断层脉冲型地震影响下得到的各种沉降反应峰值结果的准确度较高。分析图 4 能够得到,本文方法的沉降反应分析用时始终在 1 s 以内,而线弹性和 Kelvin 分析方法的地桩基础沉降分析用时较长,且增幅较快,说明本文方法能快速地对建筑地桩基础做出准确的沉降分析。

为验证本文方法是否能够稳定有效地对建筑地桩基础在不同隔震周期下的沉降反应做出准确的分析,实验以 Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法分析结果为参照,比较两种方法在不同隔震周期下对地桩基础沉降位移变化情况的分析结果(图 5 和图 6)。

分析图 5 可知,采用本文方法分析近断层脉冲型地震作用下建筑地桩基础沉降位移时,地桩基础不同层次的沉降位移变化各不相同,具体表现为低层的沉降位移较大,中部和上部的沉降位移变化较小。从图中清晰看出低层曲线随隔震周期的不同沉降位移变动较大;当隔震周期达到 3.5 s 后沉降位移

维持在一个稳定的数值,且随隔震周期的变化波动较小。地桩基础中层和顶层沉降位移随隔震周期变化几乎没有波动,保持在 4 和 2 cm 左右的变化,说明本文方法的稳定性较强。

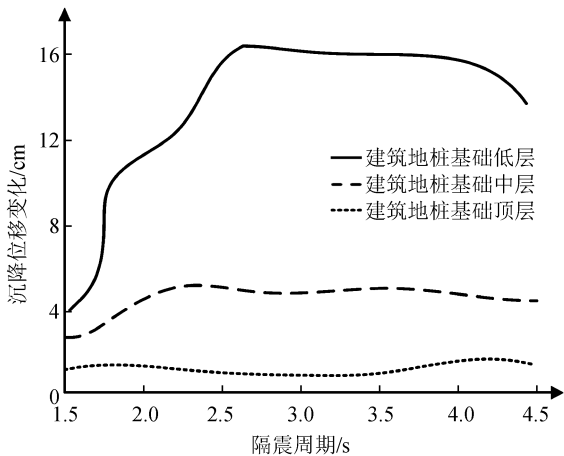


图 5 本文方法分析的沉降位移变化图

Fig.5 Settlement displacement change obtained by the method in this paper

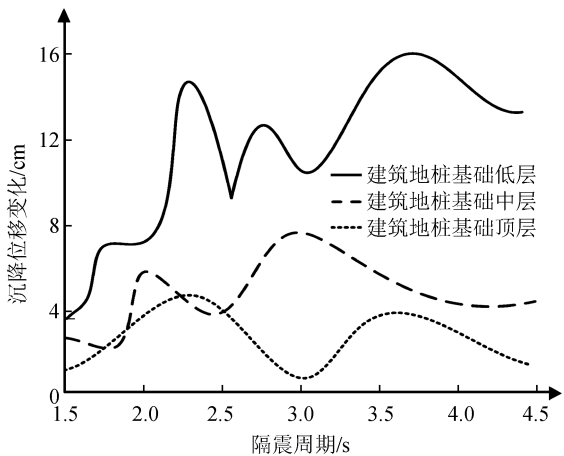


图 6 Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法的沉降位移变化图

Fig.6 Settlement displacement change obtained by Kelvin pile foundation collision settlement analysis method

分析图 6 可知,Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法的沉降位移变化随隔震周期变化的波动较大,得到建筑地桩基础不同层次的沉降位移值变化的可信度不高,说明 Kelvin 碰撞沉降分析方法的稳定性较差。

综上分析可知,本文提出的改进 Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法分析近断层脉冲型地震下建筑地桩基础的沉降位移变化效果较好,分析结果的可信度较高。

3 结论

本文提出改进的 Kelvin 建筑地桩基础碰撞沉降分析方法,将构建地桩基础碰撞转换单自由度体系振动模型,能准确运算地桩基础的相对沉降速度和相对沉降位移,高效分析建筑地桩基础的沉降反应,从而提高沉降位移结果的准确性和可信度。

参考文献(References)

- [1] 韩建平,张丽丽,徐阳.近断层脉冲型地震作用下 RC 框架结构抗整体性倒塌能力分析[J].结构工程师,2017,33(1):32-42.
HAN Jianping,ZHANG Lili,XU Yang.Investigation on Global Collapse Resistant Capacity of RC Frame under Near-fault Pulse-type Ground Motions[J].Structural Engineers,2017,33(1):32-42.
- [2] 贺秋梅,李小军,杨宇.近断层速度脉冲型地震作用基础隔震建筑位移反应分析[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(1):1-13.
HE Qiumei,LI Xiaojun,YANG Yu.Displacement Response Analysis of Base-isolated Buildings Subjected to Near-fault Ground Motions with Velocity Pulse[J].Journal of Basic Science and Engineering,2014,22(1):1-13.
- [3] 章磊,韩爱民.隔离桩对隧道侧穿邻近建筑物的沉降影响分析[J].城市轨道交通研究,2017,20(1):87-90.
ZHANG Lei,HAN Aimin.Impact of Isolation Pile to Adjacent Buildings Side-crossed by Metro Tunnels [J].Urban Mass Transit,2017,20(1):87-90.
- [4] 周继磊,杨迪雄,陈国海,等.近断层强震作用结构动力可靠度分析[J].建筑结构学报,2016,37(7):136-143.
ZHOU Jilei,YANG Dixiong,CHEN Guohai,et al.Dynamic Reliability Analysis of Structures Subjected to Near-fault Strong Ground Motions[J].Journal of Building Structures,2016,37(7):136-143.
- [5] 高子瑞,徐永福,李淑娥,等.混凝土内修正的氯离子运移模型及耐久性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):432-437.
GAO Zirui,XU Yongfu,LI Shue,et al.Modified Migration Model for Chloride Ions in Concrete and Durability Analysis of Concrete[J].Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(5):432-437.
- [6] 王寒冰,魏焕卫,白世和.某基础沉降原因分析及托换加固处理[J].四川建筑科学研究,2015,41(2):124-128.
WANG Hanbing,WEI Huanwei,BAI Shihe.Settlement Analysis and Underpinning Reinforcement of Building Foundation [J].Sichuan Building Science,2015,41(2):124-128.
- [7] 钱思众,樊育豪.高层建筑物地基沉降监测与分析[J].西安科技大学学报,2014,34(3):284-289.
QIAN Sizhong,FAN Yuhao.Monitor and Analysis of Ground Subsidence for High-rise Building[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology,2014,34(3):284-289.

[8] 孙晓晨,朱杰江.考虑沉桩时效性的新旧桩变形特性与沉降分析[J].施工技术,2016,45(20):101-105.
SUN Xiaochen, ZHU Jiejiang. Analysis of Pile Deformation Characters and Settlement of Pile Group Including New and Old Piles Considering Pile Timeliness[J]. Construction Technology, 2016, 45(20): 101-105.

[9] 汤永净,赵锡宏.软土地基超高层建筑补偿桩筏基础案例再分析[J].岩土力学,2016,37(11):3253-3262.
TANG Yongjing, ZHAO Xihong. Re-analysis of Case Studies of Piled Raft Foundation for Super-tall Building in Soft Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3253-3262.

[10] 颜桂云.近场脉冲型地震下层间隔震减震分析与层间混合隔震控制[J].建筑科学,2015,31(1):115-121.
YAN Guiyun. Analysis on Reduction of Seismic Response and Hybrid-isolation Control for Mid-story Isolated Structure under Near-field Pulse-like Ground Motions[J]. Building Science, 2015, 31(1): 115-121.

[11] 刘念武,龚晓南,俞峰,等.软土地区基坑开挖引起的浅基础建筑沉降分析[J].岩土工程学报,2014,36(增刊 2):325-329.
LIU Nianwu, GONG Xiaonan, YU Feng, et al. Settlement of Buildings with Shallow Foundations Induced by Excavation in Soft Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(Supp2): 325-329.

[12] 肖遥,汪基伟,冷飞.适用于有限元片状裂缝模型的钢筋与混凝土粘结滑移关系[J].水利水电技术,2016,47(4):24-28.
XIAO Yao, WANG Jiwei, LENG Fei. Bond-slip Relationship between Reinforcement and Concrete Applicable to FEM Smeared Crack Model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(4): 24-28.

[13] 陈汉宝,彭义峰,黄定强,等.湖北省水利水电工程坝基岩体分类与软岩坝基抗剪强度经验值研究[J].水利水电技术,2016,47(7):14-17.
CHEN Hanbao, PENG Yifeng, HUANG Dingqiang, et al. Study on Dam Foundation Rock Mass Classification and Shear Strength Empirical Value of Soft Rock Dam Foundation for Water Conservancy and Hydropower Project in Hubei Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(7): 14-17.

[14] 张景奎,张燎军.一种综合强度和稳定的高拱坝—坝肩抗震安全评价方法[J].水利水电技术,2016,47(5):16-20.
ZHANG Jingkui, ZHANG Liaojun. A Seismic Safety Evaluation Method of Integrating Strength and Stability for High Arch Dam-abutment System[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(5): 16-20.

[15] 陈建生,何会祥,王涛.基于熵权-可变模糊集模型的堤坝渗漏探测[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):358-363.
CHEN Jiansheng, HE Huixiang, WANG Tao. Dam Leakage Detection Based on Entropy Weight-variable Fuzzy Set Model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(4): 358-363.



(上接第 232 页)

[10] BHATTACHARYA S, ADHIKARI S. Experimental Validation of Soil-Structure Interaction of Offshore Wind Turbines[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 315: 805-816.

[11] NOVAK M, NOGAMI T. Soil-Pile Interaction in Horizontal Vibration[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1977, 5: 263-281.

[12] GAZETAS G. Analysis of Machine Foundations: State of the Art[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1983, 2: 2-42.

[13] ZAAIJER M B. Foundation Modeling to Assess Dynamic Behavior of Offshore Wind Turbines[J]. Applied Ocean Research, 2006, 28: 45-57.

[14] INMAN D J. Engineering Vibration[M]. Englewood: Prentice Hall, 2003.

[15] TEMPEL D P, MOLENAAR D P. Wind Turbine Structure Dynamics——A Review of the Principles for Modern Power Generation, Onshore and Offshore[J]. Wind Energy, 2002, 26(4): 211-220.