

地震波基线漂移校正及结构地震响应分析

吴先敏, 牛超, 卞晶, 王俊杰

(山东省水利勘测设计院, 山东 济南 250014)

摘要: 针对实际地震动采集过程中由于低频噪声、速度和加速度初始值以及人为操作误差等诸多影响因素造成地震波位移时程曲线出现严重基线漂移的问题,以地震波基线漂移校正为目标,在 Iwan 法和 EMD 法的基础上,提出了一种新的基线漂移处理方法。该方法可以保留原始记录的峰值和频谱特性,保证了基线漂移处理后的速度终点值为零,位移终点值平行于时间轴。在文中方法的基础上应用 ANSYS 结合“大质量法”和“位移法”进行了地震响应动力计算。结果表明:采用文中提出的基线漂移处理方法可以保证在不改变原始记录峰值及频谱特性的基础上,对地震波基线漂移现象进行校正。研究成果对低频噪声、初始值及人为操作误差等因素引起的基漂现象滤除具有参考价值。

关键词: 地震加速度; EMD 法; 地震波基线漂移; 基线漂移校正; 大质量法; 位移法; 结构地震响应
中图分类号: TV312; P315.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2019)02-0186-05

Baseline drift correction of seismic wave and response analysis of the structure earthquake

WU Xianmin, NIU Chao, BIAN Jing, WANG Junjie

(Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250014, China)

Abstract: Due to the influence of many factors in the actual seismic acquisition process such as the low frequency noise, initial velocity and acceleration, and human operation error, serious baseline drift occurs in the seismic wave displacement time history curve. Therefore, the acceleration record needs to be corrected in the process of structure earthquake response analysis. Based on the method of Iwan and EMD, a new method is proposed to deal with the baseline drift of seismic wave. The new method retained the characteristics of initial record, such as acceleration peak and frequency features, and can remove the baseline drifts of velocity and displacement curves. The seismic dynamic response of the earthquake was calculated using the ANSYS combined with “large mass method” and “displacement method” based on the new method mentioned above. The results showed that the baseline drift processing method proposed in this paper can ensure the correction of the baseline drift of seismic waves better without changing the peak and spectrum characteristics of the original records. The research results have guiding significance for filtering bleaching phenomenon caused by low frequency noise, initial value and artificial operation error.

Key words: seismic acceleration; EMD method; baseline drift of seismic wave; baseline drift correction; large mass method; displacement method; response of the structure earthquake

1 研究背景

地震是长久以来困扰人类的自然灾害之一,给人类带来无法估量的生命与财产损失。近年来,抗震能力的研究一直是结构工程领域研究的一大热点与难点。目前,研究地震作用下结构响应的方法主

要集中在原观数据的采集分析、模型试验以及有限元数值计算方面,通过识别结构自振频率的变化、加速度以及位移响应等方面来识别结构的损伤及判断结构抗震能力的强弱^[1]。

地震响应分析一般以实测地震动作为激励,依据数值方法计算结构加速度和位移响应。“大质量

收稿日期:2018-06-07; 修回日期:2018-09-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YF0405000)

作者简介:吴先敏(1980-),男,山东夏津人,硕士研究生,从事水工设计及仿真计算研究工作。

通讯作者:牛超(1991-),男,山东定陶人,工程师,硕士研究生,水工设计及仿真计算研究工作。

法”经过近 20 年的研究与发展,已成为地震响应分析计算的一种有效方法^[2],它能够模拟地震激励、行波效应等输入条件。然而,在采用加速度数据进行地震响应分析时,往往存在明显的基线漂移现象。以神户地震为例,其加速度及计算位移曲线如图 1、2 所示。

针对地震加速度时程基线漂移问题,国内外学者进行了大量研究。我国周雍年等^[3]和于海英等^[4]提出用加速度时程减去拟合的时程零线,在进行滤波处理,其本质是认为零线漂移从始至终存在并保持稳定,未考虑低频噪声及人为等因素造成的影响;Iwan 等^[5]提出把加速时程分为 3 段,每一段基线偏移是不同常量,由磁滞效应引起的极限偏移发生在中间段强震部分。Iwan 认为基漂现象可能由加速度大于 50 Gal 电磁疲劳引起,不同阶段应有所不同,但这个经验值不是普适的;基线漂移主要是由于低频噪音存在,利用低频滤波处理能够有效消除其对基线影响^[6-9]。但是地震动信息中的长周期信息以及永久位移,在滤波的过程中很可能被滤除。

本文提出的基于 EMD 算法的基线漂移校正方法充分考虑了震前因素、低频噪声、仪器安放及人为等因素的影响,处理后的地震响应时程可以更好地满足工程计算要求。

2 基线漂移校正方法及处理效果判别

在地震动采集过程中实际存在的低频仪器噪声、低频环境噪声、加速度初始值和速度初始值以及人为操作误差等诸多影响因素,可能导致由积分得到的速度和位移时程在终点时刻非零或位移时程在终点时刻与时间轴不平行,该现象即为基线漂移^[10]。很明显,结构地震响应动力计算的关键在于正确地地震波进行基线校正。

2.1 基于 EMD 算法的加速度时程基线校正

(1)从原始加速度时程中减去震前部分均值(无震前记录时可减去整体时程均值),然后积分求其相应速度时程;

(2)对积分求得的速度时程进行 EMD 分解(不包括震前数据,因为震前地震加速度微弱趋于 0,震前数据会对 EMD 分解的准确性产生很大影响),对最后一项趋势项进行一阶微分处理,之后将微分结果从零线调整后的加速度时程中减去,得到零线调整后的加速度时程;

(3)对 EMD 分解后的速度时程剔除趋势项,进行重构,并将其初始速度置零;

(4)对处理后的速度时程曲线再次进行积分,得出的位移时程曲线即为基线漂移校正后的时程曲线。

2.2 基线漂移消除与否判断准则^[11-12]

地震结束后,地震动采集仪器位置处应为静止状态(即加速度、速度为 0);若地震等级较小,未发生地壳移动,则地震动采集仪器位置位移应为 0,若发生地壳移动,则地震结束后位移应为定值(平行于时间轴)。出于以上考虑,得出判别基漂现象消除与否的准则如下:

- (1)地震动结束后速度时程曲线应为零;
- (2)地震动结束后位移时程曲线应平行于时间轴。

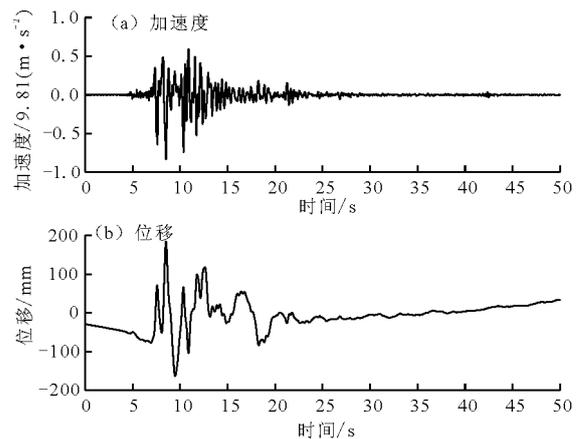


图 1 神户地震加速度曲线与直接积分位移曲线

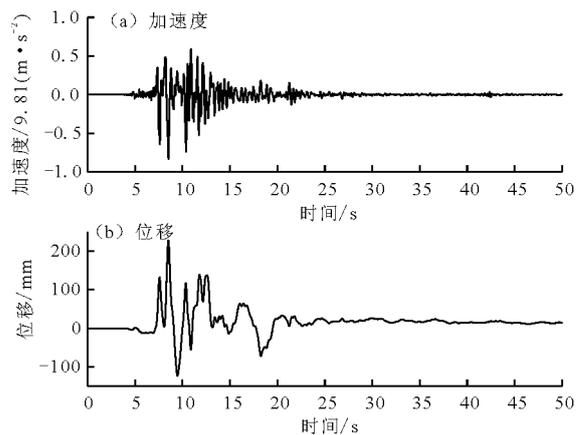


图 2 神户地震加速度曲线与有限元计算位移曲线

3 剔除地震波基线漂移的 EMD 算法

EMD 方法^[13]是由黄锬博士提出的针对非平稳信号的一种分析方法。由 EMD 分解得到的最低阶固有模式函数(IMF)分量通常情况下代表原始信号的振动趋势或均值。

3.1 EMD 方法的基本原理

EMD 方法本质是平稳化处理非平稳信号,利用

其频谱特性将其逐层分解,从而产生多组具有不同特征尺度的数据序列,每一组序列称为一阶固有模态函数(IMF)。

IMF 同时具有以下 2 个特点:(1)对整个时间序列来讲,极值点个数与过零点个数相等或最多相差 1;(2)在任何一点处上下包络线均值为零。任何一条时程线都可以进行 EMD 分解,具体分解方法如下:

(1)给定实测信号 $X(t)$,找出其所有的极大值点、极小值点,利用三次样条函数曲线先后连接所有极大值点和极小值点,得到上包络线和下包络线,连接上、下包络线的均值得平均包络线 $m_1(t)$ 。

(2)将原始信号减去平均包络线可得到一个信号,即:

$$h_1(t) = X(t) - m_1(t) \quad (1)$$

原始信号减去平均包络线的过程称为“筛分”。判断 $h_1(t)$ 是否满足 IMF 的条件,若不满足,则将 $h_1(t)$ 看成新的时程曲线继续分解,可得:

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t) \quad (2)$$

式中: $m_{11}(t)$ 是 $h_1(t)$ 上、下包络线的均值。分解直至满足 IMF 条件时的信号 $h_{1k}(t)$, $h_{1k}(t)$ 即为原始信号的第一阶 IMF 分量,记作 $c_1(t)$ 。 $c_1(t)$ 包含原始时程 $X(t)$ 中频率最高成分。

(3)从 $X(t)$ 中减去第一阶 IMF,得到残差 $r_1(t)$,即:

$$r_1(t) = X(t) - c_1(t) \quad (3)$$

(4)将 $r_1(t)$ 看成一组新的时程,重复步骤(1)~(3)。经过多次运算可得:

$$r_{j-1} - c_j(t) = r_j(t) \quad (j = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (4)$$

当满足以下两个条件之一时,整个振型分解终止:一是 $c_n(t)$ 或 $r_n(t)$ 小于预定误差;二是残差 $r_n(t)$ 为一单调函数,不能提取固有模态函数。最终原始时程曲线 $X(t)$ 可以表示为前 n 阶固有模态函数和残差之和,即:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (5)$$

3.2 基于 EMD 方法的基线漂移校正应用

(1)首先,对原始加速度时程进行基线调整,由于神户地震波震前记录较短,本文采取地震波时程减去整体平均值的方法进行基线调整。之后,对基线调整后的地震加速度时程进行一次积分^[14],得到速度时程;

(2)从(1)中的得到的速度时程中提取出 4 s 以后的数据,另存为 sudu.txt 文件,之后对该时程进行经验模态分解,如图 3 所示。

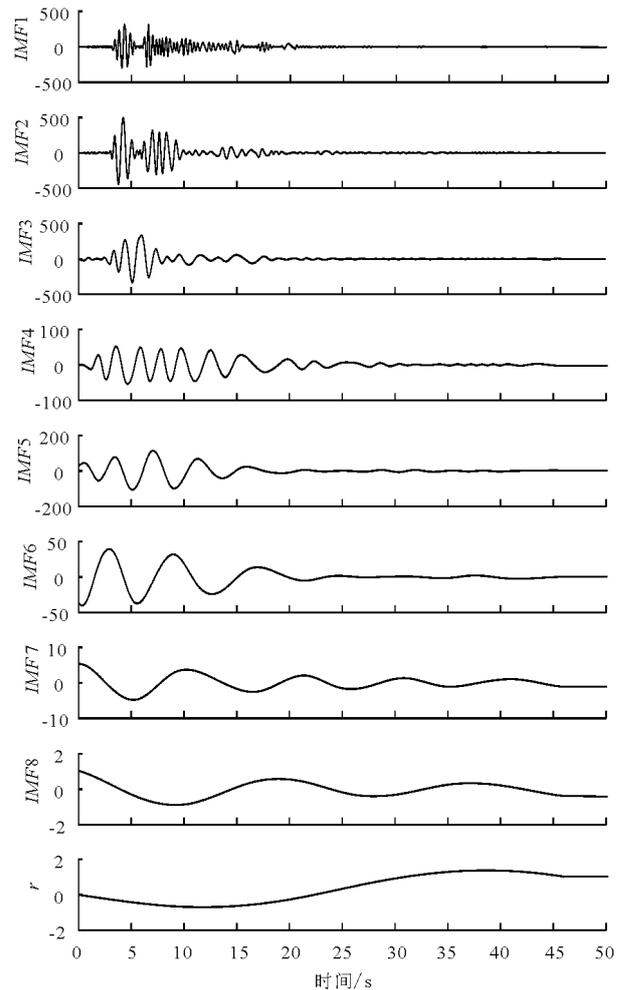


图 3 神户地震波 EMD 分解

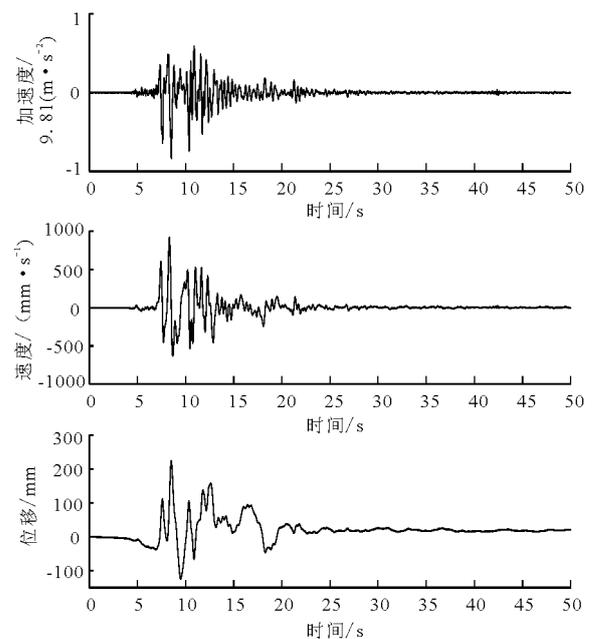


图 4 神户地震波基漂处理后时程曲线

(3)将 EMD 分解的最后一项趋势项 r 从速度时程中剔除^[15],同时将震前部分数据减去其均值(或

者置零),得到剔除趋势项后的速度时程;

(4)将(3)中 EMD 分解得到的趋势项 r 进行一阶微分运算,之后在进行零线调整后的加速度时程中减去 r 的一阶微分结果,得到基线漂移校正后的地震加速度时程线,该时程线用于下文中进行地震动力响应分析;

(5)对(3)中得到的速度时程进行再次积分^[14],得出的时程曲线即为基线漂移校正后的位移时程,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,速度时程和位移时程可以很好地满足 2.2 节中提到的两个判别条件。应用本文提出基漂校正方法校正前后,地震波加速度的频谱图未发生变化,保留了地震记录原有的频谱特性,并且也未改变加速度时程的峰值,如图 5 所示。

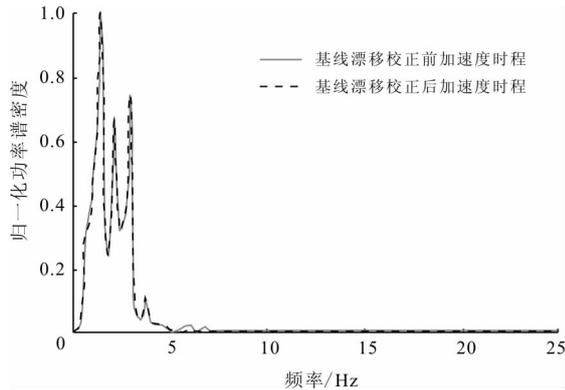


图 5 基线漂移校正前后加速度曲线频谱

对比应用本文方法及 seis 软件处理前后位移时程曲线,如图 6 所示。由图 6 可以很清楚看出,seis 软件处理后的位移时程线在速度为 0 部分并不能很好地平行于 x 轴(或为 0),而本文方法可以很好地消除地震波的基线漂移现象。可见,该方法满足工程时域分析中有效输入地震波的需要。

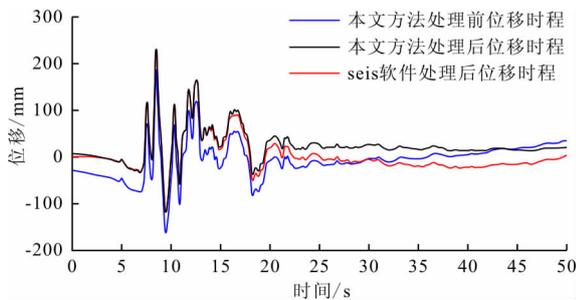


图 6 本文方法及 seis 软件处理前后位移时程曲线对比

4 不同输入方式的地震响应计算

地震加速度的正确输入是结构地震响应计算的关键环节,采用有限元软件进行地震响应分析计算

时,一般有底部位移法和大质量法^[2]。

4.1 底部位移法

底部位移法是一种在结构的底部输入地震位移激励的方法,该方法在各种有限元软件中都能非常方便地实现,并且在计算地震地面运动作用下的结构反应时,在同一积分时间步长的情况下,位移输入比加速度输入模型解更精确^[16]。但是以往的地震观测记录是加速度时程,而位移时程的记录很少,由加速度时程求解位移时程,往往存在积分偏差。所以采用位移法输入地震波时,需要对地震波记录进行基线校正。

4.2 大质量法

大质量法是将有限元模型在加载方向处理为无约束模型,在结构基础的适当位置构造一大质量点,并在大质量点与原约束节点间建立刚性连接。在 ANSYS 动力分析时,大质量点采用 mass21 单元模拟,单元质量 M_i 至少取结构质量的 100 倍以上时,大质量法的计算精度在可接受的范围内^[17]。在输入地震波记录时,需在附加质量单元的节点上施加与加速度方向相同的质量力 $F_i = M_i \ddot{x}_g(t)$ 。其中 M_i 取大值的目的是尽量消除或减小结构单元质量对计算结果的影响。

图 7 为大质量法求解单自由度结构体系地震响应的原理示意图^[2]。其中,图 7(a)为单自由度弹性结构体系地震响应分析计算简图。

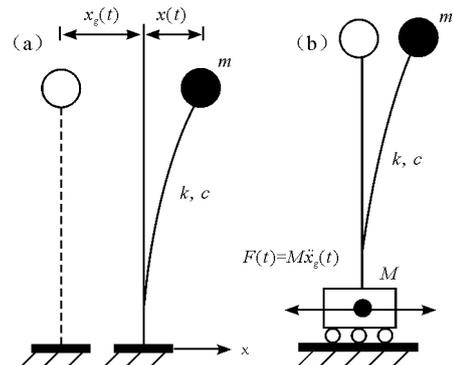


图 7 单自由度体系结构地震响应分析示意

由图 7 可知,质点 m 在水平方向上的地震响应方程为:

$$m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = -m\ddot{x}_g \quad (6)$$

图 7(b)为大质量法地震波输入原理,在结构底部附加一个大质量块,假定解除底部边界的水平约束后新增加的自由度位移为 x_B ,此时系统的运动方程为:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_B \end{Bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ x_B \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} -m\ddot{x}_g \\ -M\ddot{x}_g \end{Bmatrix} \quad (7)$$

由于 $M \geq m$, 在展开公式(7)时允许忽略其他较小各项, 因此结构底部附加的大质量体的运动加速度基本可以表示为:

$$\ddot{x}_B \approx \ddot{x}_g \quad (8)$$

由此, 大质量法实现了由结构基底近似输入地震加速度激励的目的。

4.3 应用算例

如图8所示为一重力坝段的有限元地震动力分析模型, 分别采用大质量法和底部位移法进行地震动力计算, 地震加速度和位移分别采用经本文方法处理后的神户地震波作为激励。

对比底部位移法与大质量法计算结果, 提取重力坝段坝顶同一节点 U_x 方向的位移时程, 如图9所示。从图9中可以看出采用本文基线校正方法处理后, 两种地震动力分析方法计算结果拟合较好, 相关系数达到0.985。由此可知, 采用本文提出的基线校正方法, 应用两种地震波加载方法进行地震动力计算, 其计算结果均能很好满足要求。

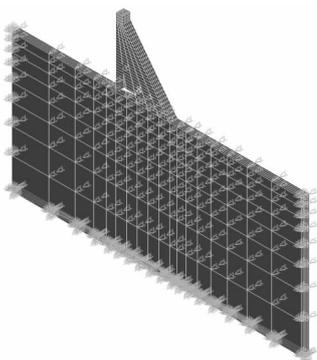


图8 有限元地震动力分析模型

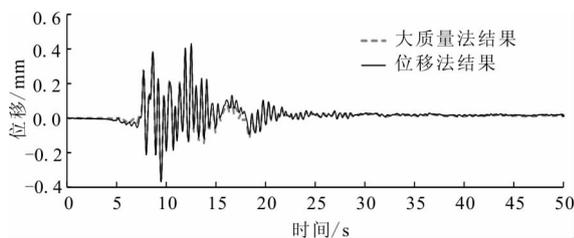


图9 大质量法与位移法计算结果对比

5 结论

本文针对地震记录存在的基线漂移现象, 分析了基线漂移存在的原因, 在 Iwan 法和 EMD 法的基础上提出了新的基线漂移校正方法, 并结合重力

坝地震数值仿真计算, 得出以下结论:

(1) 本文提出的方法对存在低频噪声影响的地震动记录可以实现很好的校正。

(2) 基于 EMD 分解的自适应性可以实现积分速度基线的调整。EMD 方法不需预设基函数, 其对信号进行分解主要依据数据自身的时间尺度特征。EMD 方法理论上可以实现任何类型的信号分解, 其优势主要在处理非平稳及非线性数据。通过 EMD 法对速度基线调整后, 速度的长周期漂移现象得到了很好的消除。

(3) 采用本文方法进行基线漂移校正, 在不改变地震动峰值加速度情况下, 能够较完整地保留地震加速度记录的频谱特性。

(4) 通过对本文提出方法处理基线漂移的结果与应用 Seismosignal 软件进行基线校正后的结果进行对比, 本文提出的方法较 Seismosignal 软件处理低频趋势项的效果更好, 能够有效地消除地震波的基线漂移现象, 具有一定工程应用价值。

参考文献:

- [1] 张志, 孟少平, 周臻, 等. 振动台试验加速度积分方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(4): 627-633+725.
- [2] 傅光耀, 段晨东, 刘健新. 经验模态分解剔除结构地震响应位移漂移[J]. 振动工程学报, 2009, 22(4): 438-442.
- [3] 周雍年, 于海英. 数字强震仪记录的低频误差校正方法[C]//大型复杂结构的关键科学问题及设计理论研究论文集. 大连:大连理工大学出版社, 1999:13-17.
- [4] 于海英, 江汶乡, 解全才, 等. 近场数字强震仪记录误差分析与零线校正方法[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(6):1-12.
- [5] IWAN W D, MOSER M A, PENG C Y, et al. Some observation on strong-motion earthquake measurement using a digital accelerograph [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75(5):1225-1246.
- [6] 李成业. 泄流结构水力拍振机理及动态健康监测技术研究[D]. 天津:天津大学, 2013.
- [7] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理[M]. 北京:中国铁道出版社, 1986.
- [8] 赵雯雯, 曾兴雯. 一种新的 EMD 去噪方法[J]. 电子科技, 2008, 21(5):30-32+36.
- [9] 唐进元, 陈维涛, 陈思雨, 等. 一种新的小波阈值函数及其在振动信号去噪分析中的应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7):118-121+217.
- [10] 李吉涛, 杨庆山. 地震波基线漂移的处理方法[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(1):95-99.

(下转第 197 页)

- sistance and microstructure of engineered cementitious composites: Influence of fly ash and micro poly - vinyl - alcohol fiber[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34: 156 - 165.
- [7] YAZICI H. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22:456 - 462.
- [8] 李阳,王瑞骏,闫菲,等. 粉煤灰对混凝土抗冻及抗硫酸盐性能的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(2):219 - 226.
- [9] 姚军,程宁. 基于复掺矿物掺合料的高性能混凝土耐久性研究[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2016, 33(8):44 - 47.
- [10] 何智海,刘运华,钱春香,等. 双掺粉煤灰和石灰石粉对混凝土抗冻融性能的影响研究[J]. *新型建筑材料*, 2010(2):1 - 4.
- [11] 张小龙,曾馨花,张会苹,等. 复掺矿物掺合料混凝土性能试验研究[J]. *铁道建筑*, 2015(9):121 - 124.
- [12] 李琛. 复掺矿物掺合料混合骨料混凝土微观抗冻性研究[J]. *商品混凝土*, 2013(10):63 - 64.
- [13] 霍俊芳,李伟玲,杨慧,等. 矿物掺合料对混合骨料混凝土抗冻性能的影响[J]. *混凝土*, 2013(9):63 - 65.
- [14] 陆建飞. 大掺量粉煤灰混凝土冻融循环作用下的力学性能研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2011.
- [15] 胡晓鹏,杨兰,杨超,等. 早期受冻掺合料混凝土服役性能试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(5):93 - 99.

(上接第 190 页)

- [11] 郑水明,周宝峰,温瑞智,等. 强振动加速度记录基线校正问题探讨[J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30(3):47 - 50.
- [12] 邓天鑫,巨能攀,李龙起,等. 陡倾顺层岩质斜坡动力倾倒变形机理研究[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(12): 146 - 152.
- [13] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non - stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903 - 995.
- [14] 王济. *Matlab 在振动信号处理中的应用*[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006. 105 - 108.
- [15] 姚艳华,彭刚,陈灯红. 拟合水工设计反应谱的人工地震波的生成与 Huang 变换校正[J]. *西北地震学报*, 2008, 30(3):255 - 260.
- [16] 田玉基,杨庆山. 地震地面运动作用下结构反应的分析模型[J]. *工程力学*, 2005, 22(5):170 - 174.
- [17] 陈驰,杨迪. ANSYS 在航空发动机控制器结构应力分析时大质量法应用的研究[C]//中国航空学会,中国航空学会第十三届发动机自动控制学术交流会,北京:北京航空航天大学出版社, 2006:255 - 264.