

基于 HHT 方法的结构模态参数识别

寇立穷, 金 峰

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 基于 Hilbert-Huang 变换和自然激励技术, 结合振动台试验对模型拱坝的频率、阻尼比等参数进行识别, 并对破坏试验过程中模态参数的变化规律进行分析。在数值实现上, 发展了先对信号进行带通滤波再对滤波结果求解互相关函数的方法, 可避免模态分解中的频率混杂, 提高参数识别精度。与传递函数法识别结果的比较表明, 该方法可以有效地识别出结构的频率、阻尼比等模态参数。对破坏试验的分析发现, 随着裂缝的扩展, 模型的自振频率逐渐降低, 阻尼比相应增加。

关键词 工程结构; 模态参数识别; Hilbert-Huang 变换; 自然激励技术; 拱坝; 模型试验

中图分类号 :TU311.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)03-0045-05

Modal parameter identification for engineering structures based on HHT method//KOU Li-hang, JIN Feng (State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract :Based on the Hilbert-Huang transform (HHT) and natural excitation technique (NExT), the natural frequency and damping of a model arch dam are identified through vibrating table tests. To overcome the difficulty of mode mixing and improve the accuracy of identification, a new method of modal parameter identification is proposed, based on HHT and NExT analysis: firstly, the band-pass filtering method is applied to the decomposition process of original signals of the structure, then the filtering results are used to calculate the cross-correlation function. Comparison with the results obtained from a transform function shows that the proposed method can effectively identify the natural frequency, damping ratio and other modal parameters with high precision. Analysis of test results demonstrates that the natural frequency decreases with the development of damage, but the corresponding damping ratio increases.

Key words :engineering structure; modal parameter identification; Hilbert-Huang transform; natural excitation technique; arch dam; model test

基于结构振动特性的损伤诊断是目前大型结构健康检测的主要研究内容之一。对于大型结构,可以利用的激励方式往往受到很大程度的限制,故近年来利用环境激励下的振动响应数据进行模态参数识别在各研究领域中都引起了高度重视。在输入信息未知的情况下,如何有效获取结构的模态参数成为影响基于结构振动特性的损伤诊断方法应用的关键。

近年来,基于振动信号时频分析的系统识别方法得到越来越多的研究和应用,其中有代表性的如小波分析和 Hilbert-Huang 变换(HHT)。HHT^[1-2]是一种近年提出的数据处理办法,由经验模态分解(EMD)和 Hilbert 变换两部分构成。该方法首先通过 EMD 得到有限维的固有模态函数(IMF),然后再利用 Hilbert 变换获得每一个 IMF 的瞬时幅值、瞬时频率等信息。EMD 方法依据数据本身的特征尺度

来进行分解,是一种后验、完备、基本正交的分解方法,比 Fourier 变换、小波分析等依赖于先验函数基的分解方法更适用于处理非平稳、非线性数据,因此一经提出就在各领域中得到广泛应用。

在结构模态参数识别方面,Loeh 等^[3]结合 EMD 和 Hilbert 谱分析,对地震作用下结构的频率、阻尼比进行研究;Yang 等^[4]将 HHT 用于线弹性结构自由振动响应下频率、阻尼比等模态参数的识别,通过计算瞬时频率、瞬时幅值进而得到结构的频率和阻尼比。Yang 等^[5],Chen 等^[6]将 HHT 和随机减量法(RDT)结合,分别对风荷载作用下高层建筑、桥梁的模态参数进行了识别。Lin 等^[7]将 HHT 和自然激励技术(NExT)相结合,并用于 IASC-ASCE 结构健康检测基准结构的模态参数识别,得到了满意的效果。

笔者结合 HHT 和 NExT,对模型拱坝在振动台试验中的结构响应进行分析,对模型的频率、阻尼比

进行识别,并对破坏过程中频率、阻尼比等模态参数的变化规律进行了分析研究。

1 HHT 方法

1.1 EMD

设 $x(t)$ 代表需要分解的信号,EMD 通过一种筛选对信号进行处理。首先找出 $x(t)$ 上的所有极大值点,用三次样条曲线连接,形成信号的上包络线,同理可得到信号的下包络线,上、下包络线均值记为 m_1 。定义 $h_{11} = x(t) - m_1$,如果 h_{11} 满足以下 2 个条件,则认为 h_{11} 为信号 $x(t)$ 的一阶 IMF,否则继续对 h_{11} 重复上述筛选过程:①整个时程中,极值点个数与穿零点个数相等或最多只相差 1 个;②任意时刻上、下包络线关于坐标轴对称。

假定经过 k 次筛选后的结果 h_{1k} 满足上述 2 个条件,则认为 h_{1k} 为 $x(t)$ 的一阶 IMF 分量 C_1 。从分析信号 $x(t)$ 中减去一阶 IMF 分量 C_1 ,得到余量 $r_1(t) = x(t) - C_1$ 。以 $r_1(t)$ 作为新的信号,重复上述筛选过程,依次得到其他各阶 IMF 分量。当 IMF 分量 C_n 或余量 r_n 小于预先设定的值,或者余量 r_n 已经成为单调函数时,整个筛选过程终止。

经过上述步骤后, $x(t)$ 可以分解为 n 个 IMF 分量及余量 r_n 的和,即

$$x(t) = \sum_{j=1}^n C_j(t) + r_n(t) \tag{1}$$

上述分解过程可以理解为对信号 $x(t)$ 在时域内按照不同的时间尺度由高频向低频进行滤波,每个 IMF 分量都反映了分析信号的一个时间尺度,代表着信号的内在模态特性,其中 C_1 包含有原信号中时间尺度最小(即频率最高)的成分,余量 r_n 中包含频率最低的成分(直流分量或变化趋势)。

对信号直接应用筛选过程进行 EMD,有时会出现模态混杂现象,即分解出的一个 IMF 中含有多种特征频率。Huang 等^[2]引入了一种称为间歇性准则的方法来消除模态混杂现象,通过对指定 IMF 分量的分解设定频率下限来保证分解得到的 IMF 中不包含有低于此频率成分的信号。Yang 等^[4]对模态混杂现象进行了研究,通过带通滤波的办法加以解决。

1.2 Hilbert 变换

若 $y(t)$ 为分解得到的某一个 IMF 分量,定义其 Hilbert 变换为

$$\tilde{y}(t) = H[y(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y(u)}{t-u} du \tag{2}$$

式中 H 为 Hilbert 变换算子。

进一步可定义 $y(t)$ 的解析信号 $Y(t)$ 为

$$Y(t) = y(t) + i\dot{y}(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \tag{3}$$

其中
$$A(t) = \sqrt{y^2(t) + \dot{y}^2(t)}$$
$$\theta(t) = \arctan[\dot{y}(t)/y(t)]$$

式中 $A(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别为 $y(t)$ 的瞬时幅值和瞬时相位。对 $\theta(t)$ 进行求导,即可得到 $y(t)$ 的瞬时角频率:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \tag{4}$$

2 NExT 方法

NExT^[8-9]是由美国 SADIA 国家实验室的 James 等人提出的,其基本思想是:白噪声环境激励下结构两点响应之间的互相关函数和脉冲响应函数有相似的表达式,求得两点响应之间的互相关函数后运用时域中各种模态识别方法进行参数识别。

可以证明^[7]线性非时变结构在白噪声激励下结构两点 r,s 响应之间的互相关函数 $R^{rs}(t)$ 可表示为

$$R^{rs}(t) = \sum_{j=1}^n R_j^{rs}(t) = \sum_{j=1}^n B_j^{rs} \exp(-\zeta_j \omega_j t) \cos(\omega_{dj} t + \theta_0) \tag{5}$$

式中: B_j^{rs} 为和 r,s,j 有关的系数; ζ_j 为第 j 阶模态阻尼比; ω_j 为第 j 阶模态角频率; $\omega_{dj} = \omega_j(1 - \zeta_j^2)^{1/2}$ 为第 j 阶阻尼振动角频率; θ_0 为初始相位。

对 $R_j^{rs}(t)$ 进行 Hilbert 变换,可得到瞬时幅值和瞬时相位:

$$A_j^{rs} = B_j^{rs} \exp(-\zeta_j \omega_j t) \tag{6}$$

$$\theta_j^{rs}(t) = \omega_{dj} t + \theta_0$$

当阻尼比较小时,由式(6)可得

$$\zeta_j = -\frac{1}{\omega_j} \frac{d}{dt} \ln A_j^{rs} \tag{7}$$

$$\omega_j \approx \omega_{dj} = \frac{d}{dt} \theta_j^{rs}$$

3 基于 HHT 的结构模态参数识别

识别的过程可分为 3 个步骤:首先,计算两点响应之间的互相关函数。然后通过 EMD 将互相关函数分解为一系列 IMF 分量和残量的和,IMF 反映各阶模态响应,残量反映数据的变化趋势。最后,对分解得到的各阶 IMF 分量应用 Hilbert 变换,得到瞬时幅值和瞬时相位,根据公式(7)求解各阶频率和阻尼比。

互相关函数的计算可以采用卷积算法直接计算,但实际情况下得到的信号都会有一定的噪声污染,故这种方法得到的结果信噪比会比较低。考虑互相关函数和互功率谱构成一对 Fourier 变换对,可

以先计算出实测信号的互功率谱,再经 Fourier 逆变换得到互相关函数。这种方法在实际操作中采用了统计平均处理,因此和直接采用卷积算法计算得到的结果相比即使会受到一定谱泄漏的影响,所得到的互相关函数的信噪比也有较大幅度的提升。

为了防止各阶模态之间的频率混杂,采用文献[4]中的带通滤波方法对 EMD 过程进行控制。当信号中有能量明显集中的频段时,若直接应用此方法,得到的互相关函数主要包含能量集中频段的频率,从而较难识别出能量较低频段的模态参数(尤其是阻尼比)。因此,本文首先按特征频率的分布对信号进行带通滤波,然后对滤波得到的信号求解互相关函数,此时的互相关函数只包含一定范围的频率成分。应用此方法可以有效防止频率混杂,还能提高识别的精度,并且避免了文献[4]中提到的分解出的 IMF 前面一段不能代表自由振动响应的问题。应用此方法对文献[7]中的 IASC-ASCE 结构健康检测基准结构进行模态参数识别,识别结果见表 1。和文献[7]相比,识别的精度有了一定程度的提高。

表 1 IASC-ASCE 基准结构模态参数识别结果

模 态	f/Hz			$\zeta/\%$		
	理论值	文献[7]结果	本文结果	理论值	文献[7]结果	本文结果
第 1 阶	9.41	9.39	9.42	1.00	1.09	1.03
第 2 阶	25.54	25.41	25.50	1.00	1.16	1.06
第 3 阶	38.66	38.59	38.61	1.00	1.05	1.04
第 4 阶	48.01	48.13	48.02	1.00	1.03	0.98

4 拱坝模型的模态参数识别

4.1 拱坝模型振动台试验简介

为了验证拱坝横缝在动力荷载作用下的反应规律,清华大学水利水电工程系曾进行了拱坝模型的振动台试验^[10]。如图 1 所示,模型根据实际碾压混凝土体形按 1:200 的比尺制作,对坝肩短缝进行了适当简化,重点模拟了位于拱冠梁的横缝。模型采用重晶石膨润土混合料制作,其基本力学参数为:抗压强度 3.0 MPa,抗拉强度 0.09 MPa,密度 2400 kg/m³,泊松比 0.3,动力弹性模量 1 150 MPa。



图 1 试验模型

模型采用刚性地基,没有计入库水的影响。

试验中首先输入频宽为 0~1 000 Hz 的白噪声进行激震,确定拱坝模型的自振频率。之后,采用不同加速度的谐波荷载进行扫频,得到模型坝体在谐波荷载作用下的频响曲线,同时也测得模型在这些荷载下的动力反应历程。谐波试验完成后,选择几条典型的天然地震波进行输入,以测定模型的动力反应。

本文选用白噪声激震的试验数据,结合 NExT 和 HHT 方法对结构的模态参数进行识别,并通过与传递函数法识别结果的对比对该方法进行验证。试验中测到的加速度响应如图 2 所示。

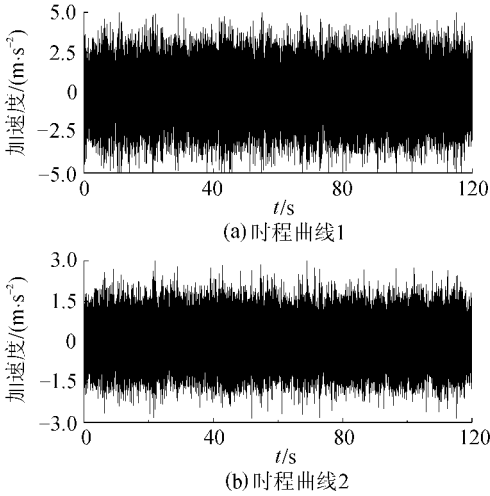


图 2 加速度响应时程

4.2 基于 HHT 的模态参数识别

对于模型试验的加速度响应信号,两点响应的互功率谱和互相关函数分别如图 3、图 4 所示。图 5 为图 4 分解得到的前 3 阶模态响应曲线,其频率分别对应图 3 中的点 A、B、C 的频率。图 6 为第 1 阶模态响应的幅值和相位随时间的变化曲线,据此可识别系统的一阶频率和阻尼比,基于 HHT 方法的识别结果见表 2。

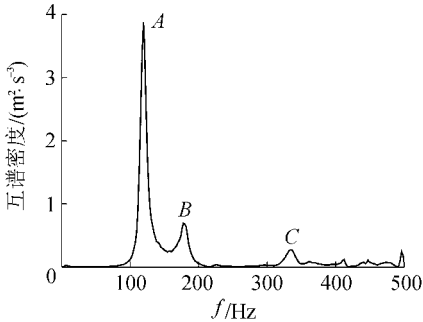


图 3 加速度响应的互功率谱

4.3 基于传递函数法的模态参数识别

对图 2 中记录到的 2 条加速度响应信号,分别

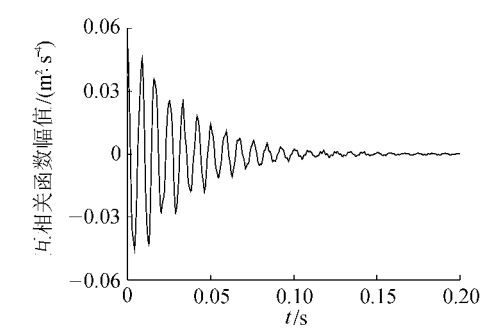
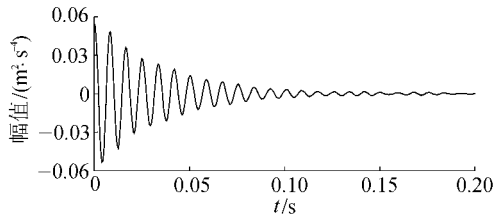
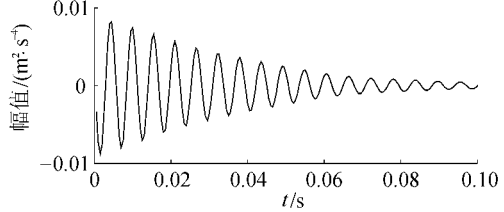


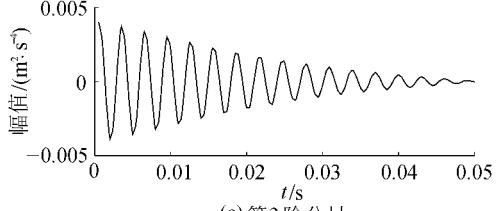
图 4 加速度响应的互相关函数



(a) 第1阶分量



(b) 第2阶分量



(c) 第3阶分量

图 5 互相关函数的模态分解结果

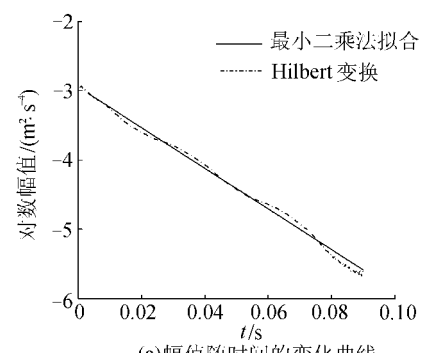
求出其传递函数。传递函数的分析过程中用到了平均周期图法,较好地滤除了采样过程中噪声的影响,得到了光滑的传递函数曲线,如图 7 所示。曲线峰值点对应的频率即为模型的特征频率,利用半功率方法可识别阻尼比。分别识别出 2 个测点的频率和阻尼比,以平均值作为识别结果,见表 2。

表 2 模型模态参数识别结果

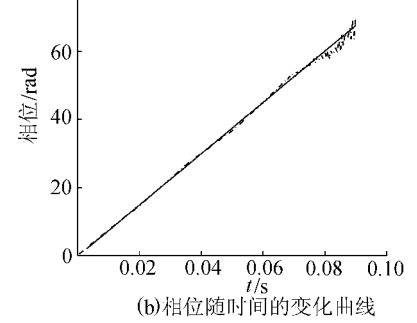
频谱峰值点	HHT 方法		传递函数法	
	f/Hz	$\zeta/\%$	f/Hz	$\zeta/\%$
A	119	3.9	119	4.0
B	176	4.4	178	4.5
C	330	2.7	331	2.6

4.4 参数识别结果分析

模型拱坝的高阶振型是非常密集的,从图 7 中也可以看出,在 200 ~ 300 Hz 之间还有很多特征频率。但是,这些频段的信号能量较低,并且由于实际工作中的采样误差、信号受噪声污染等各种原因,准确识别这些模态参数尤其是阻尼比比较困难,故本文只识别了图3、图7中标号为 A、B、C 3 个点的频

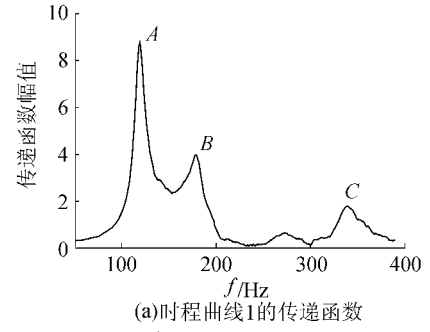


(a) 幅值随时间的变化曲线

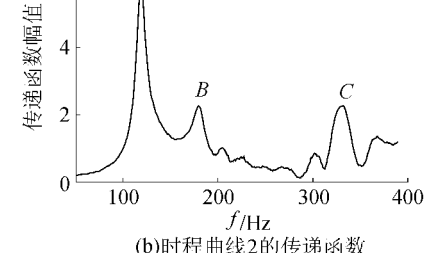


(b) 相位随时间的变化曲线

图 6 第 1 阶模态幅值和相位随时间的变化曲线



(a) 时程曲线1的传递函数



(b) 时程曲线2的传递函数

图 7 加速度传递函数

率和阻尼比,识别结果见表 2。从表 2 可以看出,模型拱坝的一阶自振频率为 119 Hz,相应的阻尼比约为 4.0%。对比识别结果可以看出,基于 HHT 方法和传递函数法识别出的模态参数是基本一致的,表明基于 HHT 方法可以较好地识别结构的模态参数。

考虑原型和模型的比尺关系,几何比尺 $C_L = L_p/L_m = 200$,质量比尺 $C_\rho = \rho_p/\rho_m = 1$,动弹性模量比尺 $C_E = E_p/E_m = 27.8$,因此频率比尺为

$$C_f = \frac{1}{C_L} \sqrt{\frac{C_E}{C_\rho}} = 0.026$$

由此可推算得到原型拱坝的基频约为 3.1 Hz。

对于振动台试验,输入信息是已知的,用 HHT 识别方法和传递函数法均是有效的。而实际工程结构的环境激励试验,输入信息是未知的,传递函数无法获得,此时可以测量结构中 2 个不同测点的响应值,用 HHT 方法进行识别。

4.5 破坏试验的模式参数分析

模型的破坏试验中,通过逐级加大谐波荷载使模型拱坝产生开裂直至破坏。在每一级谐波荷载施加之后都利用较低强度的白噪声进行测频,确定模型的模式变化情况。在较低强度的荷载作用下,模型可视为一个等效线性体系,可利用本文前述的模式识别方法对破坏过程中各阶段的频率和阻尼比进行分析。为简便起见,只考虑第 1 阶模式。破坏试验的过程如下:①在峰值为 0.4 g 的系列谐波荷载作用下,模型未出现破坏。白噪声测频得到基频为 119 Hz。②在峰值为 0.5 g 的系列谐波荷载作用下,左坝肩出现开裂。此时利用白噪声测频发现基频急剧下降到 86 Hz。③在峰值为 0.6 g 的系列谐波荷载作用下,左坝肩附近的裂缝继续扩展,同时右侧坝肩也出现开裂,白噪声测频发现基频下降到 70 Hz。④用峰值为 0.7 g 的谐波扫频,裂缝继续扩展,白噪声测频得到基频为 64 Hz。至此,已经达到振动台的极限荷载(0.7 g),破坏试验结束。

随着裂缝的扩展,模型的破坏程度不断加剧,刚度随之降低,因而必然会导致自振频率的逐渐下降。对破坏试验过程中的模型的一阶频率、阻尼比进行识别,结果如表 3 所示。识别结果非常明确地表明了基频随着破坏的发展而逐渐降低,阻尼比则相应增加,并在破坏发展到一定程度后趋于稳定。值得注意的是,在峰值为 0.5 g 的系列谐波荷载作用下,模型的基频由原来的 119 Hz 急剧下降到 86 Hz,下降为原来的 72%,此时的刚度已下降到完好模型的 50% 左右,可以认为模型已经破坏。

表 3 破坏试验的模式参数

谐波荷载强度	f/Hz	$\zeta/\%$
0.4 g	119	3.9
0.5 g	86	6.5
0.6 g	70	10.6
0.7 g	64	10.7

5 结 论

本文基于 HHT 和 NExT,结合振动台试验对模型拱坝的模式参数进行了识别。本文发展了按特征频率分布先对信号进行带通滤波再对滤波得到的信

号求解互相关函数的方法,对于拱坝这样频率密集的结构,可以有效防止频率混杂。

通过与基于传递函数法的识别结果进行对比,表明基于 HHT 方法可以有效地识别结构的模式参数。通过对破坏试验的分析,可以发现随着破坏的进一步发展,模型的自振频率逐渐降低,阻尼比相应增加。

对于实际工程结构,可采用的激震形式往往只限于环境激励,难以得到传递函数信息。对这种情况下结构模式参数的识别,本文方法仍然有效。

参考文献:

[1] HUANG N E, SHEN Zheng, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 1998, 454: 903-995.

[2] HUANG N E, SHEN Zheng, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.

[3] LOH C H, WU T C, HUANG N E. Application of the empirical mode decomposition: Hilbert spectrum method to identify near-fault ground-motion characteristics and structural responses[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1339-1357.

[4] YANG J N, LEI Ying, PAN Shu-wen, et al. System identification of linear structures based on Hilbert-Huang spectral analysis: part 1 normal modes[J]. Earthquake Engng Struct Dyn, 2003, 32(9): 1443-1467.

[5] YANG J N, LEI Ying, LIN Si-lian, et al. Identification of natural frequencies and dampings of in situ tall buildings using ambient wind vibration data[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004, 130(5): 570-577.

[6] CHEN Jun, XU You-lin, ZHANG R C. Modal parameter identification of Tsing Ma suspension bridge under typhoon victor: EMD-HT method[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92: 805-827.

[7] LIN Si-lian, YANG J N, ZHOU Li. Damage identification of a benchmark building for structural health monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(3): 162-169.

[8] JAMES G H III, CARNE T G, LAUFFER J P. The natural excitation technique(NExT) for modal parameter extraction from operating wind turbine[R]. Sandia: Sandia National Laboratories, 1993.

[9] FARRAR C R, JAMES G H III. System identification from ambient vibration measurements on a bridge[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 205(1): 1-18.

[10] 盛志刚.带横缝拱坝抗震性能的模式试验研究及数值验证[D].北京:清华大学, 2002.

(收稿日期 2007-07-12 编辑 骆超)