

基于 HHT 的钢纤维加固混凝土重力坝损伤指标

徐强^{1,2}, 刘博^{1,2}, 陈健云^{1,2}, 李静^{1,2}, 徐舒桐^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 混凝土结构开裂严重影响结构性能, 采用纤维混凝土加固是减小结构开裂的工程措施之一。基于希尔伯特-黄变换(HHT)提出了钢纤维混凝土加固混凝土重力坝损伤指标识别模型。对纤维含量为1.0%、2.0%和3.0%的三组钢纤维混凝土加固坝体的地震响应时程进行希尔伯特-黄变换。综合考虑结构地震响应频率和幅值的变化, 提出基于HHT的结构位移频谱差损伤指标识别模型, 并与数值分析中坝体的损伤分布进行对比。结果表明: 得到的损伤指标曲线与坝体损伤的分布变化趋势相一致, 说明提出的损伤指标对结构损伤识别有较好的敏感性和准确性。

关键词: 希尔伯特-黄变换; 钢纤维混凝土; 混凝土重力坝; 损伤指标; 加固措施

中图分类号: TV642.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)06-0127-06

Identification of Damage Index of Concrete Gravity Dam Reinforced with Steel Fiber Based on Hilbert - Huang Transform

XU Qiang^{1,2}, LIU Bo^{1,2}, CHEN Jianyun^{1,2}, LI Jing^{1,2}, XU Shutong^{1,2}

(1. State Key Labor of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The cracking of concrete structure seriously affects the performance of the structure. The reinforcement of fiber reinforced concrete is one of the engineering measures to reduce the cracking of the structure. Based on the Hilbert - Huang transform (HHT), a damage identification model for steel fiber reinforced concrete reinforced concrete gravity dam is proposed. HHT was carried out on the seismic response time history of three groups of steel fiber reinforced concrete reinforced dams with fiber contents of 1.0%, 2.0% and 3.0%. Considering the variation of structural seismic response frequency and amplitude, a HHT-based structural displacement spectral difference damage index recognition model is proposed and compared with the damage distribution of the dam in numerical analysis. The results show that the damage index curve obtained is consistent with the distribution trend of dam damage, which shows that the proposed damage index has better sensitivity and accuracy for structural damage identification.

Keywords: HHT; steel fiber reinforced concrete; concrete gravity dam; damage index; reinforcement measures

混凝土重力坝是水利工程中必不可少的一部分, 在防洪、发电等多个重要的领域都发挥着极为关键的作用^[1]。近些年来, 我国混凝土坝的建造技术日益提升, 先后开工并且规划建造了多座世界级规模的混凝土高坝。混凝土高坝的重要性导致其一旦发生破坏, 极有可能造成难以估量的生命安全问题

和财产损失。

目前主要采用抗震配筋的方式对混凝土重力坝进行加固处理, 尽管能够在一定程度上对结构裂缝的生成起到抑制的效果, 但往往不能使坝体达到无缝结构的要求。近些年来, 随着新型材料在混凝土结构加固措施方面的广泛应用, 已有学者采用新型

材料对混凝土坝进行了加固处理^[2-4]。在国内外发展了多种方法对结构损伤的情况进行识别。曹晖等^[5]利用模态柔度曲率差作为损伤指标识别框架结构的损伤。杜成斌等^[6]采用损伤分布指标评价 Konya 混凝土重力坝在非线性地震作用下的损伤程度。Pandey 等^[7]利用柔度矩阵对结构的损伤位置进行识别。

混凝土高坝在强震下的动力响应相当复杂,到目前为止,其遭受强震而受到破坏的实例也较为有限,导致现有的基于结构变形数据的损伤指标难以很好的应用于新型材料加固混凝土高坝的损伤识别当中,如傅里叶变换无法得到非平稳信号的时频局部特征^[8-9]。小波变换可用于对信号的局部化特征进行描述,但其不具备自适应性^[10]。而希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)可以很好用于非线性、非平稳信号的分析及描述^[7]。目前, HHT 方法已在海洋、地震以及结构健康检查等领域的信号处理中较为常见^[11-13]。

本文以 Koyna 混凝土重力坝为例,采用钢纤维混凝土(Steel Fiber Reinforce Concrete, SFRC)对坝体在地震作用下的主要损伤部位进行置换加固,验证其对于混凝土重力坝抗震加强的效果。利用希尔伯特-黄变换对坝体的地震响应时程信号进行时频分析,从而获得 Hilbert 时频图以及 Hilbert 边界谱,并基于 HHT 方法提出混凝土重力坝的地震响应位移频谱差的损伤指标识别模型,用于评价坝体的抗震性能。

1 HHT 方法原理

HHT 方法主要可分为经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和希尔伯特变换^[14]。

通过 EMD 方法可将复杂信号分解成多个有限元固有模态分量(IMF)以及一个残余分量:

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

对有限元固有模态分量进行 HHT 变换,其能够在不损失信息的情况下,获得复有限元固有模态分量信号:

$$z_i(t) = a_i(t) e^{i\theta_i(t)} \quad (2)$$

式中: $\theta_i(t)$ 是瞬时相位; $a_i(t)$ 是瞬时振幅; $\theta_i(t)$ 是瞬时相位;瞬时频率 $\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt}$ 。

通过上式可以获得 Hilbert 谱,即:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\omega_i(t)t} \quad (3)$$

将公式(3)在时间上进行积分,便可以得到 HHT 边界谱:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (4)$$

2 钢纤维混凝土本构

钢纤维混凝土中钢纤维使得材料的强度和韧性在一定程度上有所提高,其在防护工程建设方面有着较为广泛的应用^[15]。

本文采用文献[16]中提出的改进的混凝土塑性损伤模型,对 Lee-Fenves 模型的应力应变-塑性应变关系进行了改进,可以较好的描述不同钢纤维含量的钢纤维混凝土的应力-应变特性,采用黄承逵^[17]提出的钢纤维混凝土受拉软化段曲线:

$$Y = \frac{X}{\alpha_f(X-1)^{1.7} + X}; \quad \alpha_f = \frac{\alpha_0}{1 + 3.58 \frac{l_f}{d_f} \rho_f} \quad (5)$$

式中: Y 为应力比, $Y = \sigma/f_n$, f_n 为抗拉强度; X 为应变比, $X = \varepsilon/\varepsilon_0$, $\varepsilon/\varepsilon_0 = f_n/E$, f_n 为钢纤维抗拉强度, E 为弹性模量; α_0 为基体曲线系数, $\alpha_0 = 0.312 f_{mt}^2 / f_{mt}$ 为基体混凝土的抗弯强度, MPa; α_f 为钢纤维混凝土的曲线系数; l_f 为钢纤维长度; d_f 为钢纤维直径; ρ_f 为钢纤维体积含量。

f_n 采用式(6)计算:

$$f_n = f_i \left(1 + \alpha_f \frac{l_f}{d_f} \rho_f \right) \quad (6)$$

式中: f_i 为基体混凝土的抗拉强度; α_f 为钢纤维对混凝土抗拉强度的影响系数。

3 钢纤维混凝土加固混凝土重力坝

Koyna 混凝土重力坝是强震下发生破坏的实际例子之一,被很多学者用于结构的动力响应分析及结构抗震性能评价^[18-20]。坝体高度为 103.0 m, 坝顶和坝底的宽度分别为 14.8 m 和 70.0 m。

混凝土的本构采用混凝土塑性损伤模型,基本参数如下:密度 2 643 kg/m³,弹性模量 31 GPa,泊松比 0.2,膨胀角 36.31°,阻尼比 0.05,初始抗压强度,抗拉强度分别为 24.1 MPa 和 2.9 MPa。利用钢纤维混凝土替换坝体薄弱的普通混凝土,加固区钢纤维的含量 V_f 分别为 1.0%、2.0% 和 3.0%,钢纤维混凝土采用和素混凝土相同的密度、弹性模量和泊松比,钢纤维的长径比 l_f/d_f 取 60,基体抗折强度为 2.86 MPa。其他材料参数如表 1 所示。抗压强度 f_c 按基体混凝土抗压强度提高 10% 计算^[17,21]。在加

固区周围进行了网格加密,图 1 为坝体有限元模型,图 2 为钢纤维混凝土加固范围示意图。坝体后踵处加固区上边界高程为 2 m,宽度为 1.85 m,坝体中部加固区上下高程分别为 56.50 m 和 76.50 m,上游处加固区宽 1.85 m,下游处加固区宽 1.5 m。

表 1 不同钢纤维含量的钢纤维混凝土塑性损伤模型参数

f_t/MPa	f_c/MPa	$\alpha_t/\times 10^{-4}$	$V_f/\times 10^{-2}$
3.77	26.5	1.70	1.00
4.20	26.5	1.12	2.00
4.64	26.5	0.85	3.00

计算荷载包括重力、静水压力、动水压力及地震荷载。地震荷载加速度如图 3 所示。通过公式 (5) 对钢纤维混凝土的本构关系进行描述,设置三组加固方案,其纤维含量分别是 1.0%、2.0% 及 3.0%。

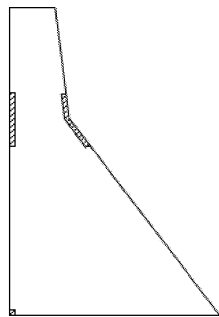
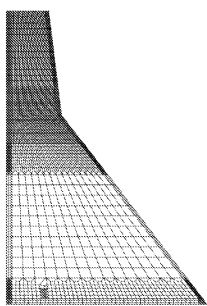
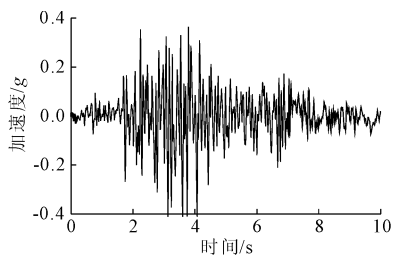
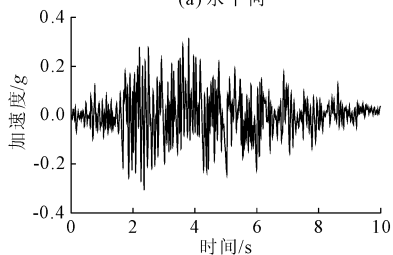


图 1 Koyab 混凝土重力坝有限元模型

图 2 钢纤维混凝土加固范围示意图



(a) 水平向



(b) 竖直向

图 3 Koyab 地震波的加速时程

1.0%、2.0% 和 3.0% 的坝体,其残余位移分别为 0.44 cm、0.63 cm 和 0.71 cm。未加固的坝体在 4.61 s 时达到最大相对位移,其值为 0.04 m,之后坝体整体呈向上游倾斜的趋势,且随着加固区钢纤维含量的增多,坝体整体向上游倾斜的趋势越小,在 4.61 s 时加固后的坝体水平相对位移较大于未加固时,说明在加固之后坝体上部刚度有所增强,地震动能向上的传递具有一定恢复,能够明显的增强混凝土坝的整体性。

未加固坝体损伤演化如图 5 所示,2.73 s 时在坝踵处首先出现损伤;在 4.01 s 时坝体后折坡处出现裂缝;在 4.41 s 后坝体后折坡处的损伤区域呈水平方向扩展,此时裂缝的宽度近似为坝体宽度的一半,在 10.00 s 时裂缝近乎贯穿坝体。

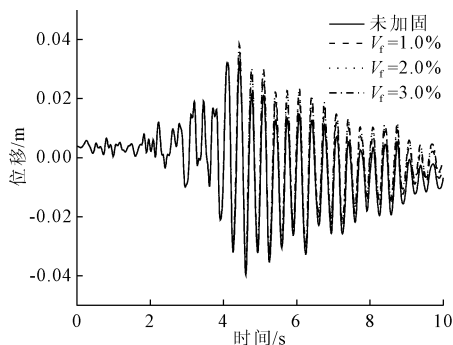


图 4 坝顶节点相对位移时程

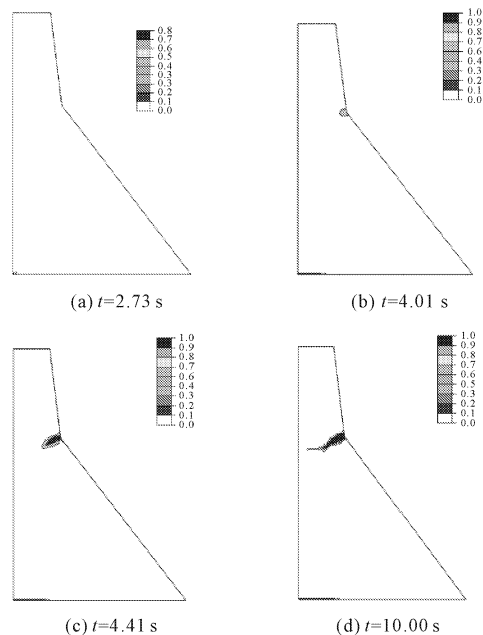


图 5 未进行加固坝体的损伤分布图

4 数值分析

未加固与采用三种加固方案的坝顶节点水平相对位移时程如图 4 所示。对于加固区纤维含量为

钢纤维含量为 2% 的加固坝体损伤演化如图 6 所示。在 3.13 s 时,首先在坝体后踵处的加固区周围出现裂缝;随着地震动的进行,损伤区域主要沿着

坝体加固区的水平方向进行扩展,而加固区并没有发生损伤;在 4.28 s 时,坝体后折坡处的未加固区开始出现裂缝,相比于未采用加固方案的坝体,裂缝区域主要在竖直方附着于坝体加固区的内表面,随后坝体裂缝逐渐沿水平向下的方向扩展,形成上、下两条主要的损伤区域;在 4.48 s 时,坝体后折坡处加固区的上界面处出现裂缝,随后其下界面同样出现少量损伤区域,坝体后折坡处上方的主裂缝区不再继续扩展,下方的主裂缝区继续向后下方扩展,损伤已到达 0.9;在 10.00 s 时,裂缝宽度相较于未加固时明显减小,并且未形成贯穿型损伤带。

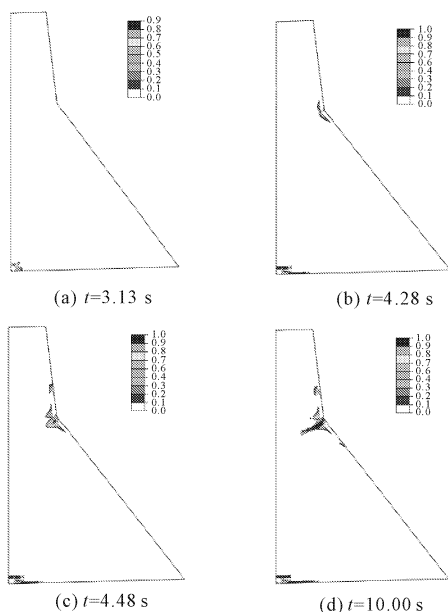


图 6 含量为 2% 的钢纤维混凝土加固坝体损伤分布

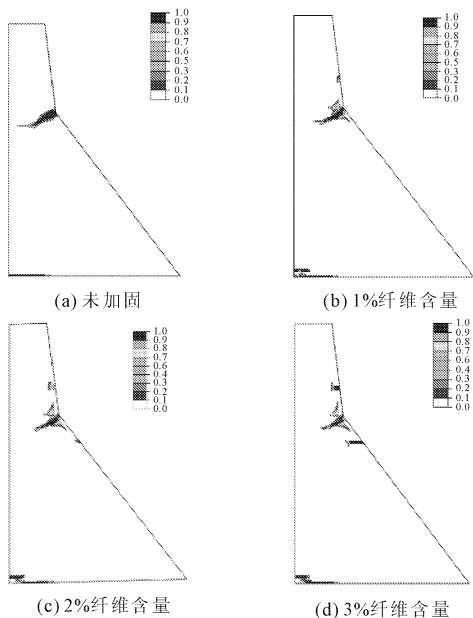


图 7 坝体损伤分布图

钢纤维含量的钢纤维混凝土加固重力坝的地震响应损伤分布如图 7 所示,可以看出:未进行加固的坝体损伤区域较大,对坝体进行加固之后,由于坝体加固区域的钢纤维混凝土的抗拉能力较强,因而损伤发生坝体内部的混凝土区域,损伤区域趋于离散化,并且裂缝深度明显减小。综合来看,坝体主裂缝深度会随着坝体加固区钢纤维含量的增加而减小,其中加固区纤维含量为 2% 和 3% 的坝体裂缝程度相近,且相对较小,加固区钢纤维含量为 3% 的坝体在加固区的上下交界面处出现了较大的裂缝。这说明当坝体加固区钢纤维的含量达到某个值之后,继续增加纤维含量不会十分显著的提高坝体的抗震效果;且加固区与非加固区交界面的刚度变化较大时,容易在交界面处产生一定程度的损伤,但其损伤程度远小于主裂缝区域。

5 基于 HHT 方法损伤指标识别方法

采用数值方法虽然可以模拟坝体的损伤过程,由于计算效率的限制,其难以实时的判断坝体的损伤情况。而在实际工程中坝体的变形数据更容易测量,因此需要一种可以通过实测的变形数据去判断坝体在地震作用下损伤情况的方法。本文提出了基于 HHT 方法的损伤指标识别方法,并通过数值模拟得到的坝体损伤体积比对该方法进行验证。

未加固及使用三组加固方案的坝体响应频率随时间的变换规律较为一致,坝体的响应频率在 4 s 后从高频变为低频。在 3 s ~ 4 s 之间时,坝体的响应幅值相对较大。

分别对四组 HHT 时频分布图在时间上进行积分,得到 HHT 边界谱如图 8 所示。可以看出当频率为 2.935 Hz 时,未加固及三组加固方案坝体的 HHT 边界谱幅值均达到极大值,其值分别为 5.757 w/Hz、6.006 w/Hz、6.204 w/Hz 和 6.194 w/Hz。

对各种坝体顶点位移时程进行傅里叶变换,得到信号峰值与频率的对应关系,如图 9 所示。从图 8 可以看出:HHT 变换和傅里叶变换在频率与峰值关系曲线的变化趋势大致相同。在频率为 2.949 Hz 时,未加固及采用三组方案加固坝体的 HHT 边界谱的幅值均达到极大值,其值分别为 5.553 w/Hz、5.782 w/Hz、5.845 w/Hz 以及 5.903 w/Hz。二者在加固后的极值点相较于未加固时均有较为明显的增加,说明 HHT 变换和傅里叶变换一样,均能够对坝体结构在地震作用下的响应信号进行处理和分析,并且 HHT 变换能够对结构响应频率及幅值随时间

的变化进行描述。

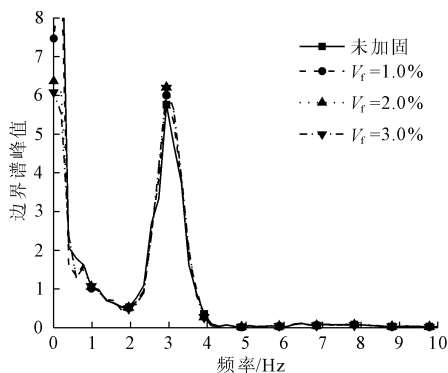


图 8 HHT 边界谱

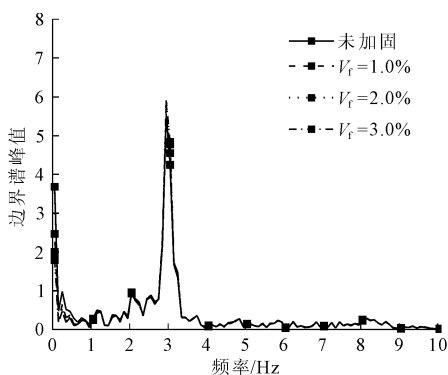


图 9 傅里叶变换

为了能够更为准确地评价钢纤维混凝土对混凝土重力坝的抗震加固效果,本文基于 Hilbert 的时频分析,综合考虑结构在地震动作用下的响应信号幅值以及频率的变化情况,提出基于 HHT 变换的钢纤维加固混凝土重力坝损伤指标识别方法:将 Hilbert 时频曲线中的起始频率与结束频率和峰值的面积差作为钢纤维混凝土加固坝体的 HHT 损伤指标, HHT 损伤指标的提取示意图见图 10。

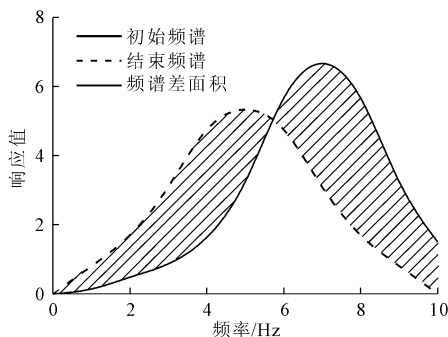


图 10 HHT 损伤指标示意图

按照上述方法,分别提取未加固及三组加固方案坝体的 HHT 损伤指标,从而得到损伤指标与钢纤维含量的关系,如图 11 所示。采用数值分析中未加

固及采用三组加固方案的坝体损伤面积对 HHT 损伤指标进行验证,混凝土坝体的损伤面积与加固区的钢纤维含量之间的关系如图 12 所示,通过对比图 11 和图 12 可以发现:坝体结构的 HHT 损伤指标与损伤面积都随着坝体加固区钢纤维含量的增加而逐渐减小,且二者的变化趋势大致相同,在钢纤维含量为 1.0% ~ 2.0% 这一区域内,曲线的下降趋势较大,其余范围内则相对平缓,这说明 HHT 损伤指标能够准确地坝体加固效果进行描述。

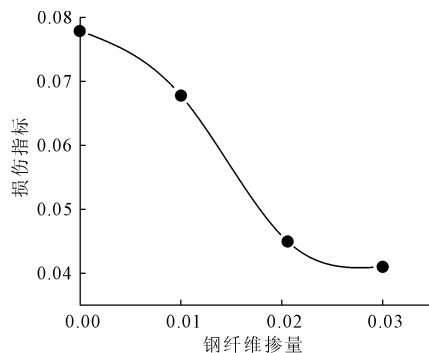


图 11 HHT 损伤指标与加固区钢纤维含量的对应关系

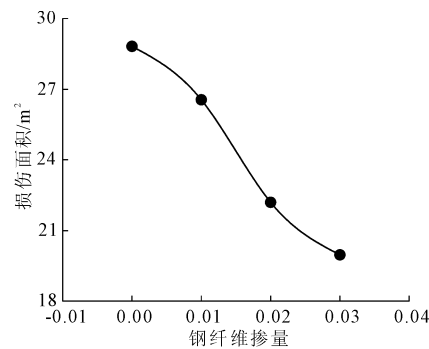


图 12 坝体损伤面积与加固区钢纤维含量的关系

从图 11 中可以看出:随着加固区钢纤维含量的增加,坝体的损伤指标逐渐减小,说明地震频率的传递效果越好,坝体的整体性越好。当加固区钢纤维的含量在 0.0% 与 1.0% 之间时, HHT 损伤指标曲线下降的趋势较为平缓,这说明当加固区的钢纤维含量小于 1.0% 时,其对坝体结构的抗震加固效果不是十分显著;当加固区的钢纤维含量在 1.0% 与 2.0% 之间时, HHT 损伤指标曲线的则下降趋势相对较大,说明此区域内的加固区钢纤维含量对坝体抗震性能的影响较大,适当增加钢纤维的含量可以十分有效的提高坝体结构的抗震性能;当钢纤维含量在 2.0% 于 3.0% 之间时, HHT 损伤指标曲线又趋于平稳,这说明由于当钢纤维含量超过 2% 时,继续增加加固区钢纤维的含量,对坝体抗震性能的增

强效果并不是十分明显,这也与前文数值分析中对与不同钢纤维含量加固坝体的损伤分布图的分析结果相一致;当坝体加固区的钢纤维含量在 2.0% ~ 3.0% 之间时,结构的损伤指标相对较低,说明当坝体加固区的钢纤维含量在这一区域内时,对坝体抗震性能的增强效果最佳。

6 结 论

采用钢纤维混凝土对坝体结构加固后,其在地震动作用下的裂缝宽度明显减小,当钢纤维含量为 2.0% 和 3.0% 时,对坝体的抗震性能的增强效果较为显著。

对地震作用下的坝体顶点的水平位移的时程信号进行希尔伯特 - 黄变换,得到了在地震的作用下坝体结构的频率峰值与时间的关系,并与坝体地震响应的傅里叶变换进行对比验证,得出 Hilbert - H 变化可以较好的对结构的地震响应进行时频分析。

通过 Hilbert 时频分布图,综合考虑坝体结构地震响应频率和峰值的影响,提出的基于 HHT 变换的混凝土重力坝结构损伤指标可以准确地评价坝体的损伤情况。对坝体加固效果最好的加固区钢纤维含量范围是在 2.0% ~ 3.0%;并且当混凝土重力坝加固区的纤维含量超过 2.0% 时,再增加加固区的纤维含量,对坝体抗震性能的影响有限。

参考文献:

- [1] 姚霄雯,蒋建群,刘 国. 基于拱冠位移的拱坝地震易损性[J]. 浙江大学学报(工学版),2013,47(10): 1839-1845.
- [2] 王娜丽,钟 红,林 泉. FRP 片材表面加固混凝土重力坝坝踵抗震性能数值模拟[J]. 水利水电技术,2011,42(2):12-16.
- [3] Maalej M, Li V C. Introduction of strain hardening engineered cementitious composites in the design of reinforced concrete flexura members for improved durability [J]. Structural Journal, ACI,1995,92(2):167-176.
- [4] Mallat S G. Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1989, 37(12): 2091-2110.
- [5] Cawley P, Adams R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1979, 14(2):49-57.
- [6] 杜成斌,苏擎柱. 混凝土坝地震动力损伤分析[J]. 工程力学,2003,20(5):170-173.
- [7] Pandey A K, Biswas M, Samman M M. Damage detection in structures using changes in flexibility [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994,169(1):3-7.
- [8] 许康生,李 英,李秋红. 近地震波的小波相对能量分布特征分析[J]. 地震工程学报,2013,35(1):166-170.
- [9] 张泰源,宋郁民,孟雨泽. 铝合金人行天桥人群荷载动力特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4): 193-197.
- [10] 王宁伟,朱 丰,韩 旭,等. 基于小波去噪的灰色马尔柯夫基坑变形预测[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(4):215-219.
- [11] 李书进,虞 晖,翟伟廉. 基于 Hilbert - Huang 变换的结构损伤诊断[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(8): 44-47.
- [12] 冯红武,王建昌. 希尔伯特 - 黄变换在地震信号时频分析中的应用研究[J]. 高原地震,2018,30(4):11-15.
- [13] Wu Z, Huang N E. A study of the characteristic of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004, 460(2046):1597-1611.
- [14] 谭善文,秦树人,汤宝平. Hilbert - Huang 变换的滤波特性及其应用[J]. 重庆大学学报,2004,27(2):9-12.
- [15] Almansa E M, Canovas M F. Behaviour of normal and steel fiber-reinforced concrete under impact of small projectiles[J]. Cement & Concrete Research, 1999, 29(11):1807-1814.
- [16] 孔宪京,屈永倩,邹德高,等. 钢纤维混凝土面板堆石坝的抗震性能数值分析[J]. 水利学报,2016,47(7): 841-849.
- [17] 黄承逵. 纤维混凝土结构[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [18] Sarkar R, Paul D K, Stempniewski L. Influence of reservoir and foundation on the nonlinear dynamic response of concrete gravity dams [J]. ISET Journal of Earthquake Technology, 2007,44(2):377-389.
- [19] 郭胜山,陈厚群,李德玉,等. 重力坝与坝基体系地震损伤破坏分析[J]. 水利学报,2013,44(11):1352-1358.
- [20] 刘章军,曾 波,周宜红,等. 地震动过程的概率模型及在重力坝抗震可靠度分析中的应用[J]. 水利学报,2014,45(9):1066-1074.
- [21] 程庆国,高路彬. 钢纤维混凝土理论及应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.