

新丰江强震记录处理

谢建清

(广东省地震局)

摘 要

本文介绍了加速度记录处理的内容和方法,包括零线校正、仪器性能校正、反应谱和富氏谱的计算;给出新丰江强震加速度记录的分析结果;建议在大坝设计中,适当提高动力放大倍数的值。

前 言

强震观测是以强震加速度仪为观测手段,记录地面运动和建筑物在地震作用下的地震反应。其目的是为地震工程、抗震结构的理论分析与试验研究,为设计方法提供有用而且可靠的数据。

强震仪的种类很多。从记录形式大致可分为模拟光记录和磁带记录,数字磁带记录和数掘模块记忆。前两者均为模拟电路。新丰江强震台站主要使用国产RDZ—1型强震加速度仪。此类仪器便是模拟光记录的。自1962年新丰江发生强烈地震后,开展了强震观测工作,并且收到一批有价值的中小地震加速度记录。为了充分利用这些宝贵资料,开展了新丰江强震记录处理工作¹⁾。本文是在记录处理的基础上整理出来的。

一、强震记录的直观分析⁽¹⁾

从一张强震加速度记录图上,可用简单分析方法获取一些有用数据,例如最大加速度,主要周期,地震系数和动力放大倍数等参数。虽然这些数据比较粗造,但却能反映地震时地面运动和结构振动的主要特征。

(1)最大加速度的获得。一般说来,强震仪的灵敏度都是使用标定方法得到的,只要在记录图上量取最大振幅之后,便可算出最大加速度的值。

如果同一个测点的三个方向的最大加速度都已得到,通过分析可估计出某一方向的振动大小。利用三个方向的最大加速度可组合成最大加速度矢量。

有了地基的最大加速度 $A_{地}$,结构上的最大加速度 $A_{结}$,利用这些最大值,可以计算出

1) 参加本工作的人员有:谢建清、叶伟元、甘运芳、崔法正、代国章。本工作得到国家地震局徐宗和、新丰江电厂杨文元、本局张大名、常宝琦等同志的支持和帮助,在此仅表谢意。

地震系数K和动力放大倍数 β 。

$$\beta = (A_{\text{结}} + A_{\text{地}}) / A_{\text{地}}$$

$$K = A_{\text{结}} / g$$

式中 β 称为动力放大倍数， g 为重力加速度， K 称为地震系数。

(2) 结构物的基本振型。在结构物不同部位的测点所测得的最大加速度量取后，根据测点位置和加速度幅值，可以绘制一张结构物在地震作用下的基本振型图。

(3) 周期和频率的量取。在强震加速度记录图上，测量相邻的二个与时间轴相交的点的時間间隔，便可得到记录振动的周期。若量取的二个点正是相应于最大振幅时的点，这个周期便称为主要周期（或称为卓越周期）。周期的倒数即为频率。对于振动持续时间较长的记录，卓越周期可以采用周期—频度曲线的方法确定。

(4) 主震持续时间的计算。地面运动持续时间是表示测点运动从开始到全部停止时所需的时间。持续时间对结构的破坏程度有较大的影响。主震持续时间就是地震时的主要振动所占的时间。人们对它作了一些研究和规定。方法不很统一。其矛盾的焦点在于如何确定系数 α 的值。设 A_0 为振幅最大值，取 $0 < \alpha < 1$ 的系数 α ，则 αA_0 便为一个确定的值。把强震记录中第一次出现 αA_0 振幅所对应的时间记为 TE_1 ，把记录中最后一次出现 αA_0 振幅所对应的时间记为 TE_2 ，主震持续时间则定义为 TE ，

$$TE = TE_2 - TE_1$$

α 的取值各不相同，可取为 $1/3$ ， $1/10$ ，……不一致。在这里取 $\alpha = 1/e$ 。 e 为自然对数的底。由于强震仪是自动触发记录，强震记录往往存在丢头问题。如果地震过小，或者震中过远时，丢头更为严重，这时的记录将出现在最大值前，找不到第一个出现 αA_0 的振幅所对应的时间，这样主震持续时间应为 TE_2 。事实上 TE 比 TE_2 还要长些，但无法确定具体数值。

二、强震记录的数字化

当今世界，已有数字磁带记录和数字模块记录的强震加速度仪。然而大多数模拟光记录或是模拟磁带记录的强震仪仍在广泛使用中。这些仪器取得了许多强震加速度记录。这些记录曲线不能直接用于计算。只有通过数字化机把模拟记录曲线变成数字形式，才能被利用。所谓强震记录的数字化，就是把模拟记录按一定的时间间隔，量取相应的振幅值，得到离散加速度记录供计算。

1. 数字化方法及其注意事项

数字化时，首先在记录纸上根据记录纸呈直线的两端作出一条引线，此引线应基本上与记录纸上的固有基线（又称零线）相平行。其次把强震记录纸平放在数字化台上，使引线尽量与数字化机的平台轴线平行，以此为记录数字化时的零线。第三，以振动开始部分为零点，按时间先后，顺序进行量取时间轴和相应的振幅大小，同时用数字形式反应出来。为了使固有基线，即引线能与数字化机平台轴线平行，可将读数机的游标卡尺在开始时全部为零。从零时刻到最终时刻的全过程中，使数字化仪的振幅保持零值（当然时间值不会为零）。如振幅不为零时，挪动记录低的位置，调整到零之后，固定记录低。这时便可从零时刻开始

读数。读数时可采用等步长或不等步长的方式去量取时间和振幅数值。为了使数字化的结果能真实反映原始记录的特征，数字化时，对记录的峰点，谷点和拐点，都要读取。同时要注意数字化的密度，不能过稀，亦不要过密，适中便可。采样时间间隔 Δt ，一般可用下式确定

$$\Delta t \leq 1 / 2 \cdot f_H$$

式中 f_H 为记录的最高频率。同时还需要考虑到分析内容，数字化机的分辨率等等因素去确定数字化的密度。

令 T_N 为数字化的长度，单位为秒。 N 为数字化的点对数，那么

$$T_N = \Delta t \cdot N$$

2. 数字化后时间递增问题的处理

数字化后，设 $T(I)$ 为时间点数值， $X(I)$ 为振幅点数值。显然 $T(I+1) > T(I)$ 是必然的。但是，由于记录中高频成份过严重，记录不清楚，数字化时密度过密，或是数字化者不够熟练等等原因，有可能产生同一时刻读取二个或者二个以上的加速度振幅的结果。即是说，数字化时，振幅虽然有变化，但时间轴仍未有变化，或变化大小，无法区分，这样便产生了 $T(I) = T(I+1)$ ，而 $X(I) \neq X(I+1)$ 的情况。事实上 $T(I) = T(I+1)$ 是不可能的。产生这一问题，称为时间不递增。产生这一问题后，由于同一时间内有两个以上的振幅值，计算机无法确定选取何种，甚至有些计算不能收敛，引起出错。以往的分析程序遇到这类问题，只好下机检查，修改数据。现在，本程序编制了遴选时间递增数值，直接由计算机进行检查和处理。

3. 记录误差分析

强震记录本身，由于仪器设计中的假设条件，由于仪器卷纸过程中的不均匀性，记录冲洗后由于收缩变化，或是由于拾振器的埋设不理想，凡此等等，都会带来观测上的误差。对强震记录进行数字化时，由于数字化机的分辨率、记录基线与数字化机平台零线不平行，甚至是不同数字化者，均会造成数字化本身的误差。上述的观测误差和数字化误差的引进，对数字化结果的精度带来影响，特别是由于记录纸的横向走动，记录纸基线与数字化机平台零线不重合时，都会产生长周期影响。从下面所举的许多例子中可以看到，这些长周期给二次积分产生严重影响。因此对不同的误差应采取不同的方法加于校正，是很有必要的。例如，仪器制作中的假设条件，可进行仪器性能校正；对长周期带来的误差，可采用带通数字滤波方法进行校正。总之需要求得比较合理、精度较高的数字化结果。为说明问题，本文绘图时，对不同的数据作了不同程度的放大或缩小。

三、强震记录的调整和校正

强震加速度记录经过数字化之后，一般都需要进行记录调整和零线校正，才能正式使用。

强震记录的调整方法包括平移调整和抛物线调零的方法。平移法是最基本的处理方法。抛物线法则是在强震加速度记录的固定基线发生了明显折叠，或者是明显倾斜时，才会考虑采用此法。加速度零线配置不理想，将对加速度的幅频结果和二次积分带来严重影响。所以在强震记录的常规分析中，还包括了零线校正这一重要工作。再者，无论采用何种类型的地震

仪器作记录, 所获得的观测结果, 由于受到仪器制作的限制, 其结果都具有一定误差, 因而必须考虑到仪器性能误差的校正问题, 此外, 观测结果还受到了许多不同种类的不同频率干扰。这些干扰必然产生高频或低频影响, 或者说受到长周期或短周期因素影响而产生误差。过去多在频域上去消除这些误差。现在可在时域上进行ormsby高低通滤波, 实现带通滤波去消除。图一便是滤波过程简图。

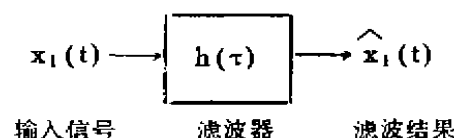


图 1 滤 波 过 程

Fig. 1 Filtering process

在新丰江记录处理过程中, 不但对加速度的零线进行了滤波和校正, 而且对积分出来的速度的零线也进行了滤波和校正, 消除由于速度畸变引起的误差。

表 1 是 EL. Centro 7.1 级和新丰江 4.5 级、3.2 级地震记录处理结果。从表中可以看到加速度积分成速度和位移时, 校正前后两者的差异。速度最小达 34%, 最大达 427%。位移最小达 190%, 最大达 438%。有关校正的方法, 资料〔3〕, 〔4〕有详细介绍。

表 1

计 算 结 果

Table 1 The calculating result

震 级	加 速 度 (gal)			速 度 (Cm/S)			位 移 (Cm)		
	未 校	已 校	差 比	未 校	已 校	差 比	未 校	已 校	差 比
7.1	341.7	385.2	0.11	38.59	28.9	0.34	16.22	5.6	1.9
4.5	45.5	39.9	0.14	2.35	0.62	2.79	2.1	0.39	4.38
3.2	14.4	11.92	0.208	1.37	0.26	4.27	1.48	0.39	2.79

四、反应谱和富里埃谱〔2〕〔6〕

1. 反应谱

具有不同周期和不同阻尼的单自由度体系与地震反应最大值的关系, 定义为反应谱。从物理意义上说, 反应谱可分成绝对加速度反应谱、相对速度反应谱和相对位移反应谱。

设一弹性结构具有刚度为 K , 阻尼系数为 C , 质量为 M , 在地面加速度 $\ddot{x}_0(t)$ 作用下, 产生位移反应 $x(t)$, 速度反应 $\dot{x}(t)$, 加速度反应 $\ddot{x}(t)$ 。根据达朗培尔原理, 结构在地震作用下的运动微分方程式为

$$M(\ddot{x}(t) + \ddot{x}_0(t)) = -c\dot{x}(t) - kx(t)$$

$$\text{令 } w^2 = \frac{K}{M} \quad D = \frac{C}{2\sqrt{KM}}, \quad \text{上方程式可化为}$$

$$\ddot{x}(t) + 2Dw\dot{x}(t) + w^2x(t) = -\ddot{x}_0(t)$$

考虑了速度、位移初值条件，给出 w 、 D 值后，可求解上述方程，得到加速度反应、速度反应和位移反应。根据反应谱定义有

$$\text{绝对加速度反应谱 } SA = \left| \ddot{x}(t) + \ddot{x}_0(t) \right|_{\max}$$

$$\text{相对速度反应谱 } SV = \left| \dot{x}(t) \right|_{\max}$$

$$\text{相对位移反应谱 } SD = \left| x(t) \right|_{\max}$$

从上述分析，要获得反应谱，归结为地震反应的计算。地震反应的求解方法很多，不一列举。现在介绍最为简明的线性加速度法。

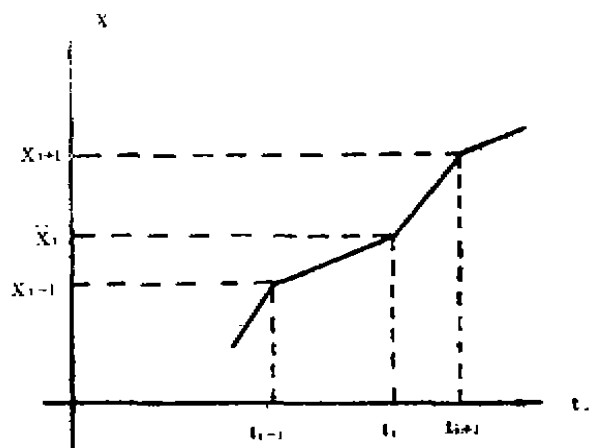


图2 加速度按直线变化

Fig. 2 Change of acceleration following linear

设在时刻 t_i 的加速度反应为 \ddot{x}_i ，速度反应为 \dot{x}_i ，位移反应为 x_i 。在时间增加了 Δt ，成为 $t+\Delta t$ 时的加速度为 \ddot{x}_{i+1} ，速度为 \dot{x}_{i+1} ，位移为 x_{i+1} 。其中 $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ 。为了获得 $t+\Delta t$ 时刻的反应，假定 t 时刻的反应已全部知道，现在再求 $t+\Delta t$ 的反应。同时假定在 Δt 时刻里，加速度的变化是直线的，见图2

这时位移的三次导数为常数，即

$$\dddot{x}_i = (\ddot{x}_{i+1} - \ddot{x}_i) / \Delta t$$

根据假定， t_i 时刻的反应 \ddot{x}_i ， \dot{x}_i 和 x_i 都已知，现求 t_{i+1} 时刻的反应 \ddot{x}_{i+1} ， \dot{x}_{i+1} ， x_{i+1} 。现利用泰勒级数展开式， t_{i+1} 时刻的反应为

$$x_{i+1} = x_i + \dot{x}_i \Delta t + \ddot{x}_i \frac{\Delta t^2}{2} + \dddot{x}_i \frac{\Delta t^3}{6} + \dots$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \ddot{x}_i \Delta t + \dddot{x}_i \frac{\Delta t^2}{2} + \dots$$

由假设知道，反应的四阶以上导数为零。将 \dddot{x}_i 的表达式代入并整理得到

$$\ddot{x}_{i+1} = \ddot{x}_i + \dot{\ddot{x}}_i \Delta t + \ddot{x}_i \frac{\Delta t^2}{3} + \ddot{x}_{i+1} \frac{\Delta t^2}{6} \dots$$

$$\dot{\ddot{x}}_{i+1} = \dot{\ddot{x}}_i + \ddot{x}_i \frac{\Delta t}{2} + \ddot{x}_{i+1} \frac{\Delta t}{2} \dots$$

因此只要求得 \ddot{x}_{i+1} 便可得到 $\dot{\ddot{x}}_{i+1}$, x_{i+1} 。事实上将 x_{i+1} , $\dot{\ddot{x}}_{i+1}$ 代入运动微分方程

$$\ddot{x}_{i+1} = - (\ddot{x}_{0i+1} + 2 D w \dot{\ddot{x}}_{i+1} + w^2 x_{i+1})$$

便可求得 \ddot{x}_{i+1} 的值。

$$\ddot{x}_{i+1} = - \frac{1}{F_i} (\ddot{x}_{0i+1} + 2 D w \dot{\ddot{x}}_{i+1} + w^2 B_i)$$

$$\text{其中} \begin{cases} F_i = 1 + 2 D w \frac{\Delta t}{2} + w^2 \frac{\Delta t^2}{6} \\ A_i = \dot{\ddot{x}}_i + \ddot{x}_i \frac{\Delta t}{2} \\ B_i = \ddot{x}_i + \dot{\ddot{x}}_i \Delta t + \ddot{x}_i \frac{\Delta t^2}{3} \end{cases}$$

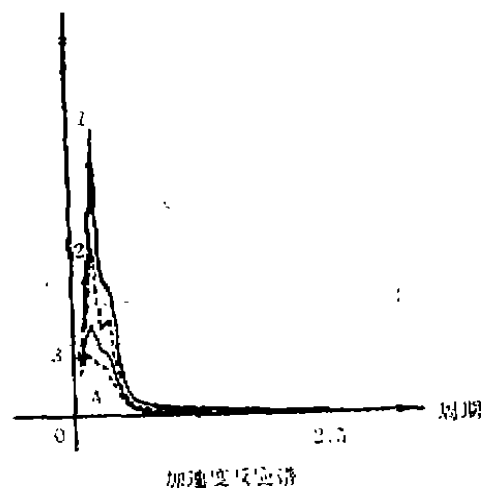
因此只要第*i*时刻的反应已知, 便可得到 F_i , A_i , B_i 和 \ddot{x}_{i+1} 。再用 \ddot{x}_{i+1} 求 $\dot{\ddot{x}}_{i+1}$ 及 x_{i+1} 。

在反应计算时, 先固定一个阻尼, 选定某一频率(周期)后, 可求得一组反应结果。从这组中选收最大值。如此反复计算, 便可得到不同阻尼的各种反应谱。图3为EL Centro 7.1级地震在不同阻尼下的加速度、速度和位移三种物理量的反应谱曲线。从反应谱曲线可以发现, 加速度反应谱和速度反应谱在短周期部分的反应都较大, 而且具有跳动性质。即是加速度和速度反应谱的周期有多个峰值, 而周期增长后, 显示出两种反应谱随着周期增大而逐渐衰减, 趋于一个较为平稳的状态。相反, 位移反应谱除了短周期有跳动外, 在某一周期内, 则有增大的趋势。这些结果与其他作者所给结果是较一致的。

2. 富里埃谱

地震记录中包涵了许许多多极为丰富的振动频率。不同地区的主要振动频率不同。同一地区不同地震的主要振动频率仍有差异。考虑到结构物本身所具有的自身不同频率和复频响应, 因而在不同频率振动作用下, 结构振动便不相同。为了避免地震作用下结构物发生共振现象, 确保结构的安全, 因而必须对地震频率成份、结构的响应进行分析便显示出它的特别意义了。

一个函数的富里埃谱, 是指它的富里埃展开的系数与频率的关系, 而地震加速度 $\ddot{x}_i(t)$, 从 $t=0$ 到 $t=T_N$ 的富里埃变换可以从下式得到



- 1. 阻尼比 = 0
- 2. 阻尼比 = 0.03
- 3. 阻尼比 = 0.1
- 4. 阻尼比 = 0.25

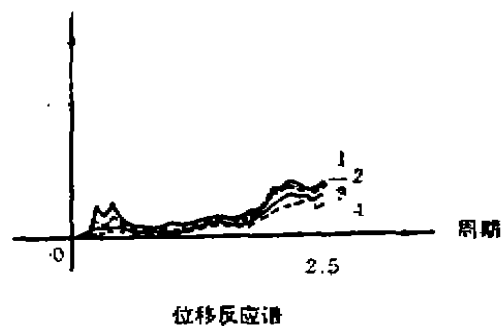
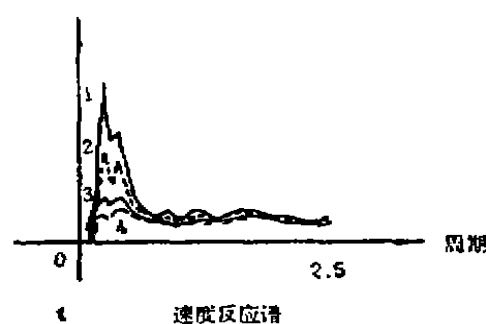


图3 反应谱曲线

Fig. 7 Response spectrum curves of acceleration, velocity and displacement

$$F_s(\omega) = \int_0^{T_N} \ddot{x}_1(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

根据欧拉公式，可把 $e^{-i\omega\tau}$ 化作三角函数的形式，即

$$F_s(\omega) = \int_0^{T_N} \ddot{x}_1(\tau) \cos\omega\tau d\tau - i \int_0^{T_N} \ddot{x}_1(\tau) \sin\omega\tau d\tau$$

令

$$a = \int_0^{T_N} \ddot{x}_1(\tau) \cos\omega\tau d\tau$$

$$b = \int_0^{T_N} \ddot{x}_1(\tau) \sin\omega\tau d\tau$$

则

$$F_s(\omega) = a - ib$$

那么, 富里埃振幅谱 F_s 为

$$F_s = \left| F_s(w) \right|$$

$$= \sqrt{a^2 + b^2}$$

而富里埃相位谱为 FIK ,

$$FIK = \text{tg}^{-1} (a/b)$$

显然 F_s , FIK 均为地震动频率 w 的函数。将 F_s 与 w 绘成曲线, 即得富里埃振幅谱曲线 FIK 与 w 则绘成了富里埃相位谱曲线。

在富里埃分析中, 采用离散形式进行快速富里埃分析。同时利用了三角函数为0和1的性质。利用了单一元素的富里埃变换便是它本身的特性, 将计算数据化成2的 N 次方, 并且进行对分, 直至分出单一元素为止。这样便加速了计算速度, 节省了时间。图4为分析新丰江大坝和黄壁庄地震记录所得的富里埃振幅谱曲线。从图中大致可获得新丰江大坝第一振型频率为5.8HZ, 第二振型频率为11.0HZ。

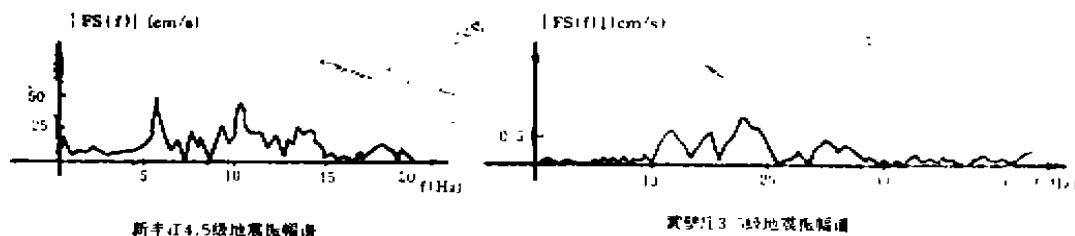


图4 富里埃振幅谱曲线

Fig. 4 Fourier amplitude spectrum

3. 功率谱

功率谱计算时, 若采用有限富里埃系数示时⁽⁶⁾, 则有

$$C = \left| \frac{1}{N} \bar{X} \cdot e^{j(2\pi km/N)} \right|^2$$

K 为0, 1, 2, $N-1$ 。

功率谱的单位要根据采用的富里埃分析时的数据是什么, 才能决定。本文采用的数据 \ddot{X}_1 是加速度, 所以其单位为厘米/秒²。不同数据进行分析时, 功率谱单位也不相同。

五、初步分析结果及建议

新丰江强震台站已经收到一批可供使用的, 有价值的强震加速度记录。表2、表3和表4初步分析结果。其中最大震级为 $M_s 4.7$ 级。地面最大加速度为84伽, 坝基最大加速度为56伽, 坝顶最大加速度为580伽, 图5为4.3级地震作用下时的新丰江大坝基本振型。表2为简

单分析时得到的动力放大倍数 β 和地震系数 k 。从表2中可以看到，动力放大倍数在100高程和124高程之间有一个突然变化。事实上，由于新丰江大坝在100米高程在结构上就有较大的变化，质量相对集中，所以坝顶加速度为100米高程的3至5倍。这就说明了地震力便是新丰江大坝在地震时造成损坏的主要原因。应引起足够重视。

表2

动力放大倍数和地震系数

Table 2 The amplifying power and seismic coefficient

震级 M_s	顺河向			轴 向		垂 直 向		注
	β		k	β	k	β	k	D—为高程
	124 ^D	100 ^D						
4.5	10.62	2.078	0.086	3.6	0.045	5.45	0.049	
4.3	8.22	2.813	0.037	2.54	0.029	4.95	0.025	

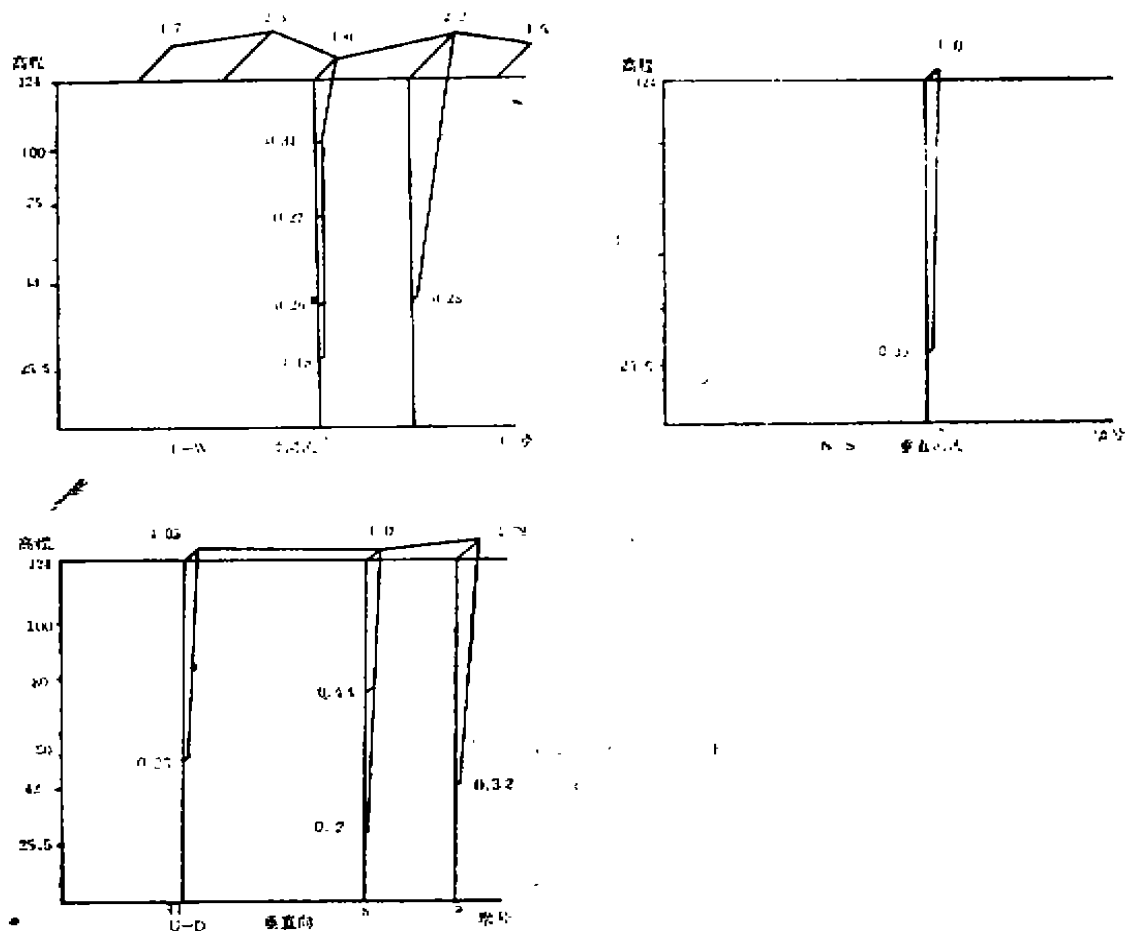


图5 新丰江4.3级地震时大坝的基本振型图

Fig. 5 Fundamental mode of Xinfengjiang dam when earthquake occur

分析测点各个方向的加速度可知,顺河向最大,垂直向次之,轴向最小。表2列出的垂直向的动力放大倍数也较大,其数值已超过了大坝设计中所沿用的标准。所以,垂直方的振动也应引起重视。

表3 实测与计算频率比较⁽⁷⁾

Table 3 Comparison between real surveying and calculating frequency

	第一频率	第二频率	第三频率	第四频率	注
实测	5.8	10.3	16.0	25.0	水位116.12M (HZ)
计算	5.53	11.36	18.52	28.6	满 库 (HZ)

表4 顺河向坝顶各墩加速度和频率

Table 4 Acceleration and frequency of every mound at the top of the dam (in the direction along the river)

墩 号 容 震 级	14*		11*		8*		5*		6/2		注
	a	f	a	f	f	f	a	a	a	f	
4.5	486.7	10.0	468.8	16	521.1	16	586.8	16	416.0	15.8	6*
4.3	185.0	8.9	240.0	16	128.0	5.3	240.0	16	176.0	7.6	2*

表4中的频率f是直接从记录图中加速度幅值最大时刻所对应的频率,称为主要频率。分析表3、表4的结果可知各坝墩的最大加速度是有较大差别的,主要频率也不相同,出现最大值的时刻也不一致,但相差很少。从上述分析来看,新丰江大坝各单支墩在地震作用下的反应呈非整体振动。这一结果与大坝脉动测量有较大差异。应引起注意,加强观测,多收取较大地震的记录。表3和表4所给出的频率,前者是经动力反应分析的结果,后者则直接测量最大加速度所对应的周期换算得到,所以频率有较大差异。对于所获得的每一个地震加速度记录,进行各种谱和结构动力反应分析,都是必须的。此外,新丰江地震主震持续时间较短,多数约为1至2秒,亦有较长者,达3.8秒。这是由于浅震近震的缘故。

从简单分析中可知,坝基加速度约为基岩的四分之三。即是说新丰江大坝在地震时具有抑制振动的效用。

经过长期观测及对记录进行分析后,提出下列几点建议,供参考。

- (1) 在考虑新丰江大坝抗震性能时,应改善100米高程与坝顶间的不合理的结构。
- (2) 在有地震发生的地区建立大坝时,设计中应提高动力放大倍数 β ,以期改善大坝的抗震能力。
- (3) 在大坝设计的强度校核时,不可忽视垂直向的振动作用。建议作矢量分析。计算应力状态。

对于新丰江强震加速度的数字化记录,校正后的加速度,以及反应谱,富氏谱等分析结

参 考 文 献

- 〔1〕谢礼立、于双久，强震观测与分析原理，地震出版社，1982。
- 〔2〕Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology University "Kiril Metodij" —Skopje, yugoslavia 《processing of strong motion Accelerograms》，PART——1 analytical Methods, 1979.
- 〔3〕谢建清，Ormsby 低通滤波器，《PC—1500程序集及通讯接口》，地震出版社，1987。
- 〔4〕谢建清，强震加速度记录的校正，华南地震，1987。
- 〔5〕何楹如，邵世勤，松潘强震记录的谱分析，地震出版社，1979。
- 〔6〕大崎顺彦，地震动的谱分析入门，地震出版社，1975。
- 〔7〕王良深：混凝土坝地震动力分析，地震出版社，1981。

PROCESSING OF STRONG EARTHQUAKE DATE RECORDED IN XINFENGJIANG

Xie Jiangqing

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

Abstract

In this paper, the content and method of processing accelerogram, including zero correction, calibration of instrument performance, calculation of response spectrum and Fourier spectrum are introduced, the analytic results of strong accelerogram recorded at Xinfengjiang dam, are also showed in this paper. It is suggested that when projecting a dam, the values of dynamic amplification factor should be increased appropriately.