

DOI: 10.11779/CJGE201504024

鲤鱼潭大坝坝料动力参数反演

刘振平^{1, 2}, 迟世春², 赵显波³, 贾宇峰²

(1. 黑龙江工程学院土木与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150050; 2. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

3. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 采用现行的室内外试验方法确定的土石料动力参数是否符合实际是人们关心的问题之一。提出了一种基于坝体加速度峰值和反应谱的土石坝坝料动力参数反演方法。利用鲤鱼潭大坝在集集地震中的加速度响应信息, 反演了坝料的动力参数。结果表明, 该方法是可行的, 计算精度可满足实际工程要求。研究表明室内动三轴试验得到的坝料最大动剪模量系数 K 的值偏小, 应予以修正。

关键词: 鲤鱼潭大坝; 动力参数; 反演; 加速度峰值; 反应谱

中图分类号: TU43; TV641.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)04-0761-08

作者简介: 刘振平(1979-), 男, 山东省商河县人, 博士, 注册岩土工程师, 主要从事岩土工程数值计算和土工模型试验的教学科研。E-mail: lzp7901@126.com。

Back analysis of dynamic parameters of Liyutan dam materials

LIU Zhen-ping^{1, 2}, CHI Shi-chun², ZHAO Xian-bo³, JIA Yu-feng²

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China; 2. Faculty of Infrastructure

Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin

150080, China)

Abstract: Whether or not the dynamic parameters of earth rockfill determined in the laboratory or in situ are corresponding to the reality is a matter of concern. A back-analysis approach for the dynamic parameters of earth-rockfill based on response spectra and acceleration peak is presented. According to the acceleration response information of Liyutan Dam in the Chi-Chi earthquake, and by applying the back-calculation approach, the dynamic parameters are obtained. The results demonstrate that the proposed method is feasible, and the computational accuracy basically satisfies the practical engineering requirements. The dynamic shear modulus coefficient K of the dam materials obtained from the laboratory dynamic triaxial tests is small and should be revised.

Key words: Liyutan dam; dynamic parameter; back analysis; acceleration peak; response spectrum

0 引言

土石坝的抗震设计一般要进行地震动力反应分析, 以确定坝体的动力反应与变形, 并据此判断大坝的抗震安全性。进行土石坝地震动力反应分析的前提之一就是确定筑坝土石料的动力参数。传统的土体动力参数是通过室内动三轴、动单剪或现场波速测试等试验确定的。筑坝土石料的室内试验是在固定的密度下进行的, 室内试验的控制密度与坝体填筑密度往往并不一致, 且坝体实际的填筑密度受施工工艺、施工方法和施工质量的影响而不均匀, 再加上室内试验成果受设备精度影响较大, 所以其测定的筑坝土石料动力参数并不能完全反映实际坝料的动力性质。采用现行的室内外试验方法确定的土石料动力参数与实际坝料的动力参数差异性还需进一步研究。

大坝的静力位移反分析是近年来人们研究较多的一个问题, 许多学者把各种智能算法如复合形算法、人工神经网络算法、遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等引入到土石坝的静力参数反演中^[1-17], 并将其做了改进, 反演了土石坝坝料的邓肯-张模型参数、蠕变模型参数等, 取得了一定的研究成果, 并将这些成果应用到实际工程中。土石坝坝料动力参数反演方面的研究成果较少, 朱晟等^[18]、汪旭等^[19]利用紫坪铺面板堆石坝在汶川地震中的实测位移资料反演了大坝堆石料的永久变形模型参数。但在汶川地震主震中, 并没有获得紫坪坝大坝坝址处基岩的加速度记录, 其反演

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179024, 51109027, 51379029);
黑龙江工程学院博士基金项目(2014BJ01)

收稿日期: 2014-04-17

方法和成果仍有待检验。田强^[20]针对假想的心墙堆石坝和面板堆石坝模型,根据正分析得到的坝体加速度反应,反演了坝料的最大动剪切模量参数以及最大阻尼比,但是否可以应用到实际工程中还需要进一步验证。混凝土坝的动力参数反演^[21-24]研究情况与土石坝类似,也没有应用到实际工程中。综上所述,有关土石坝坝料的静力参数反演分析研究的较多,并应用到了实际工程中。土石坝坝料动力参数的反演目前研究的很少,并且只是针对反演算法方面的研究,没有经过实际工程的检验。

目前一些遭受过地震的土石坝获取了数量可观的坝体反应信息,而这些信息大多没有得到充分利用。本文提出了一种基于加速度反应谱和峰值的土石坝坝料动力参数反演分析方法,利用坝体地震响应信息,反演土石料的动力参数,以检验现行土石坝坝料动力参数确定方法的合理性,为提高土石坝地震反应分析的可靠性及抗震设计水平奠定基础。

1 模型与算法

1.1 土石料的动力本构模型

土石坝地震动力反应分析方法大体可分为两大类,一类是基于等价(黏)弹性模型的等效线性分析方法,另一类是基于(黏)弹塑性模型的真非线性分析方法。等效线性分析方法模型简单,概念明确,应用方便,在参数的确定和应用方面积累了较为丰富的试验资料和工程经验;而(黏)弹塑性模型能够较好的反映土体的实际状态,并能够计算动力反应全过程以及直接计算坝体的永久变形,在理论上相对更为合理。尽管弹塑性模型在理论上可以更准确的描述土的动力性质,但在参数确定和计算方法上还很不成熟,在实际工程中应用较少。目前国内外的土石坝动力计算程序,大多还是采用等效线性法,现在该方法仍然是土石坝动力分析的主流方法。

等效线性法最初是由 Seed 等^[25]等提出,这种方法引入小应变($\gamma = 10^{-6}$ 动剪切应变左右)时的动剪切模量 G_{\max} ,以 G_{\max} , $G/G_{\max} - \gamma$ 衰减曲线和 $\lambda - \gamma$ 增长曲线来描述土石料的动应力应变关系。该方法认为,假若在动力分析中所采用的动剪切模量 G 、阻尼比 λ 与分析所得到的等效剪应变幅值 γ_e 相适应,就可以把由线性分析所得到的结果作为非线性问题的近似解答。从理论上讲,一方面,虽然等效线性法比较粗糙,但通过迭代计算,它使计算中采用的 G , λ 值与单元的等效剪应变幅值 γ_e 相适应,可以近似反映材料变形指标的非线性,得到一些线性分析无法得到的结果;另一方面,在每一次迭代中都认为材料的应力应变关

系服从线性变化,从而大大简化了分析过程。

等效线性黏弹性模型是把土看作黏弹性体,采用等效剪切模量 G 和等效阻尼比 λ 这两个参数来反映土的动应力应变关系的两个基本特征:非线性和滞回性,并表示出动剪切模量和阻尼比与动剪应变幅的关系。该模型的关键是确定最大动剪切模量 G_{\max} 与平均有效主应力 σ'_m 的关系,以及动剪切模量 G 和阻尼比随动剪切应变幅 γ 的变化关系。

根据试验结果,最大动剪切模量 G_{\max} 可表示为

$$G_{\max} = K p_a \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n, \quad (1)$$

式中, K 为最大动剪切模量系数, n 为最大动剪切指数, σ'_m 为平均有效主应力, p_a 为大气压, G_{\max} , σ'_m 和 p_a 需采用同一量纲。

许多学者针对动剪切模量比 G/G_{\max} 和阻尼比 λ 与动剪切应变 γ 的关系曲线进行了大量的试验,得到了这两条曲线的各种表达式及参数统计资料^[26],可以在反演分析中直接采用。本文反演的土石料动力参数是最大动剪切模量系数 K 和指数 n 。

1.2 目标函数选取与数学模型构造

本文利用土石坝坝坡测点在地震过程中实测的加速度反应来反演坝料的动力参数。使反演参数进行动力分析得到的测点加速度与实测结果相差最小。

目标函数的选取至关重要,它直接影响参数反演的收敛速度和识别精度。加速度时程可以在时域中描述,也可以在频域中描述,本文尝试下面几种方法构建目标函数:

(1) 在时间域中,用每一个时间点实测与计算的加速度之差的绝对值之和,再与其实测值绝对值之和的比值作为目标函数,显然其值越小的个体越优良。

(2) 取实测与计算的加速度峰值之差的绝对值做为目标函数。

(3) 对加速度时程做傅立叶变换,与方法一类似,比较每一个频率点的傅立叶谱幅值。

(4) 比较傅立叶幅频曲线的特征点,例如基频所对应的特征点,比较实测与计算的加速度时程傅立叶幅值谱的特征点之差的绝对值。

(5) 计算加速度时程的反应谱,用实测与计算的周期点反应谱值之差的绝对值以及加速度峰值之差的绝对值之和做为目标函数。

经过多次试算发现,只有用第 5 种方法建立的目标函数计算效果比较好,原因是第 1 种和第 3 种方法是比较每一个时间点或频率点的值,要求每一个点的值都相差不大,就目前对土的认识水平,土的各种本构模型和计算方法都不能精确地描述土的性质或坝体

的地震反应,所以这样的要求过于严格。第2种和第4种的计算精度较差,原因是仅根据个别特征点给出的信息量太少,不同的参数取值对其不是太敏感,只有第5种方法通过联合控制加速度时程的峰值和频谱特性,使计算精度满足工程需要。

反演方法采用正反分析,把参数反演转化为目标函数的优化问题,其数学模型如下:

$$\begin{aligned} \text{Min} F(\mathbf{X}) = & \alpha \sum_i^N \sum_j^{\text{LT}} \sum_k^{\text{NT}} |S_{ijk} - S_{ijk}^*| / \left\{ \sum_i^N \sum_j^{\text{LT}} \sum_k^{\text{NT}} |S_{ijk}^*| + \right. \\ & \left. (1-\alpha) \sum_i^N \sum_j^{\text{LT}} |a_{\max,ij} - a_{\max,ij}^*| / \left\{ \sum_i^N \sum_j^{\text{LT}} |a_{\max,ij}^*| \right\} \right\} \\ \text{s.t. } & \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g, \quad a_i \leq x_i \leq b_i \end{aligned} \quad (2)$$

上式中第1式表示目标函数的最小值, \mathbf{X} 为待反演参数向量; N 为测点数; LT 为加速度方向维数; NT 为反应谱周期的点数; S_{ijk} 和 S_{ijk}^* 分别为测点加速度计算值与测量值的反应谱谱值; $a_{\max,ij}$ 和 $a_{\max,ij}^*$ 分别为测点加速度计算值与测量值的峰值; α 为权系数,取值范围一般为 0.5~0.8,反应谱所占权重大一些。第二式表示目标函数应该满足的约束条件,式中, \mathbf{M} , \mathbf{C} , 分别为质量、阻尼与刚度矩阵; \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$, $\ddot{\mathbf{u}}$ 分别为位移、速度和加速度向量, $\ddot{\mathbf{u}}_g$ 为结构的输入加速度。 a_i , b_i 分别为待求参数范围的下界和上界。

结构的刚度矩阵 \mathbf{K} 是待求材料参数向量 $\mathbf{X} = (x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n)^T$ 的函数,参数反演的目的就是确定刚度矩阵 \mathbf{K} 中的待求材料参数向量 \mathbf{X} ,当目标函数 $F(\mathbf{X})$ 取得最小值时,其所对应的参数 \mathbf{X} 就是反演所需要得到的最优参数值。

1.3 基于遗传算法的参数识别方法

本文采用遗传算法进行土石坝坝料动力参数识别。基本遗传算法的主要运行参数有群体大小、交叉概率、变异概率,这些参数对遗传算法的求解结果和求解效率都有一定影响,但目前尚无合理取值的理论依据。在遗传算法实际应用中,往往需要多次试算后才能确定出这些参数合理的取值大小。

这些参数一般的取值范围如下^[27]:

M 为种群大小,即群体中所含个体的数量,一般取 20~100; BN 为个体串长度,采用浮点制编码时等于其搜索变量的个数; P_c 为交叉概率,一般取 0.40~0.99; P_m 为变异概率,一般取 0.0001~0.1。

基本遗传算法识别过程如下^[28]:

(1) 初始化算法参数:种群大小 M 、个体串长度 BN 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、待优化参数取值范围 $[U_{\min}, U_{\max}]$; 进化结束条件为:满足控制精度或进化代数,随机生成 M 组模型参数 \mathbf{X}_i ($i=1, 2, \dots, M$) 作为初始群体。

(2) 根据问题的目标函数计算初始群体的适应度,做为下一步遗传操作的依据。

(3) 采用精英保留策略,保留适应度最高个体即最优个体,同时杀死最差个体,其被最优个体代替;除最优个体以外的其它所有个体都参与赌轮盘选择,适应度越高的个体被选中的概率越大,优良个体可能会被多次选中,选中的个体 \mathbf{X}_j ($j=1, 2, \dots, M-1$) 作为交叉的对象。

(4) 种群被选择后进行算术交叉,进一步选择优秀的解,随机生成判断参与交叉个体的概率 s ($s < 0.99$ 参与交叉,否则不参与),参与交叉的个体再按照随机生成的概率判断各个变量是否进行交叉运算(若随机概率小于交叉概率 P_c ,则按照下式进行变量交叉运算,否则保持原值不变, α 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数)来生成新个体

$$\begin{cases} X_A^{t+1} = \alpha X_B^t + (1-\alpha) X_A^t \\ X_B^{t+1} = \alpha X_A^t + (1-\alpha) X_B^t \end{cases} \quad (3)$$

(5) 随机产生与变异概率相比较的概率,若小于变异概率 P_m ,则按照下式进行均匀变异运算(r 为 $[0, 1]$ 范围内符合均匀概率分布的一个随机数),最终生成新的下一代个体:

$$X' = U_{\min} + r \cdot (U_{\max} - U_{\min}) \quad (4)$$

(6) 计算子代个体适应度,应用精英保留策略,将父代中优秀个体复制到下一代。

(7) 判断是否满足终止条件,若满足,停止计算,将最优个体作为所求问题的解;否则转至步骤(3)。

遗传算法进行参数设别时,采用了比例选择、算术交叉、非均匀变异和精英保留策略,确保算法在识别过程中能够快速精确的收敛到全局最优。

2 鲤鱼潭大坝坝料动力参数反演分析

2.1 工程概况

鲤鱼潭水库工程位于台湾省苗栗县大安溪支流景山溪下游,主要目标供应苗栗县及大台中地区的公共给水、工业用水,同时具有观光、灌溉、防洪、发电等四大功能,集水面积 53.45 km²,总库容 1.26 亿 m³。鲤鱼潭水库大坝于 1992 年 11 月竣工,坝型为碾压式黏土心墙堆石坝,坝高 96 m,正常蓄水位 300 m,坝顶高程 306 m,坝长 235 m,坝顶宽 10 m,上游坡面为 1:3,下游坡面为 1:2.5,大坝剖面与材料分区如图 1 所示,1 区为不透水心墙料(SM, CL, ML, GC),2 区为下游半透水料(溢洪道开挖料和坝基开挖料),3A 与 3B 区分别为上游透水料(300 mm 粒径以下河床料)与半透水料(300 mm 粒径以下台地红土砾石),4 区为反滤料,5 区为干砌石护坡,6 区为压重杂填料。

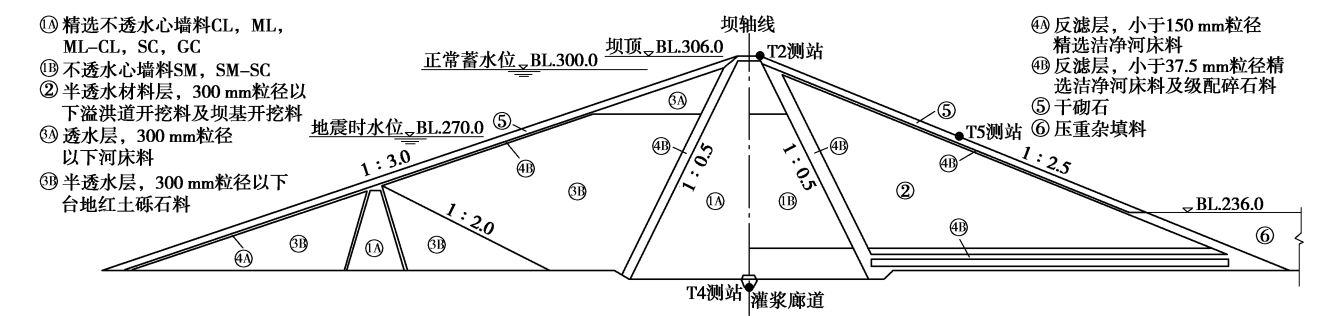


图 1 鲤鱼潭大坝典型剖面及测震仪布置图

Fig. 1 Typical section and seismometer arrangement of Liyutan dam

鲤鱼潭大坝设置了 7 个强震监测仪，其中在河谷剖面下游坡顶是测站 T2，下游坡中部是测站 T5，在坝底灌浆廊道内布置一个测站 T4，在台湾 9.21 集集地震中均测到了地震时的完整的加速度时程。

2.2 计算模型

反滤料占整个坝体体积的比例很小，对计算结果影响较小，为降低计算难度，适当减少筑坝材料的种类，将反滤料等并入相近区域，概化的模型剖面见图 2，分为 1 区心墙黏土料，下游 2 区溢洪道和坝基开挖料，上游 3A 区精选河床料，上游 3B 区台地砾石料。其有限元网格见图 3。

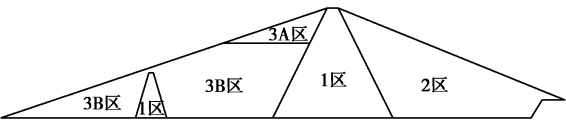


图 2 简化的鲤鱼潭大坝模型典型剖面

Fig. 2 Simplified typical cross-section of Liyutan dam

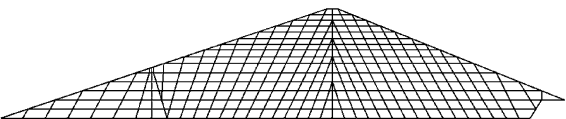


图 3 鲤鱼潭大坝有限元网格

Fig. 3 FEM meshes of Liyutan dam

2.3 震前应力状态计算

初始应力状态直接影响动力计算结果，静力计算的目的是获得大坝受震前的应力状态即初始应力状态，做为推算坝体最大动剪切模量的依据。坝料的本构采用邓肯-张 E-B 模型，计算时考虑坝体分层填筑，坝体材料自重逐层加载并计算应力平衡，共分为 16 层，模拟整个施工过程。9.21 集集地震发生时，鲤鱼潭水库水位为高程 268.8 m，施工完成后，再加上此水位下的水荷载，最后的应力状态做为地震动力分析的初始应力状态。

2.4 动力参数反演计算分析

(1) 输入的地震动

大坝输入地震加速度是台湾省 9.21 集集地震中坝

底灌浆廊道中 T4 测点的实测值。比较的是坝顶 T2 和坝坡 T5 测点计算的与实测的加速度时程。

(2) 计算参数

反演 4 种材料的动力参数，分别为 1 区心墙料，2 区为下游半透水料（溢洪道开挖料和坝基开挖料），3A 区上游透水料（300 mm 粒径以下河床料），3B 区半透水料（300 mm 粒径以下台地红土砾石）。遗传算法参数选取：群体大小 $M=50$ ，个体串长度 $l=8$ ，分别为 4 种材料待反演的参数为最大动剪切模量系数 K 和指数 n ，其初始种群 K 的取值范围心墙黏土料为 500~3000，上下游坝壳料为 1500~5000， n 的取值范围为 0.3~0.7，交叉概率 $P_c=0.85$ ，变异概率 $P_m=0.05$ ，终止条件为最优个体目标函数值 $F(X)$ 连续 20 代都不变。

(3) 识别结果及分析

反演出动剪模量系数 K 和指数 n 如表 1 所示，动剪模量指数 n 大概在 0.5 左右，动剪模量系数 K 在上游 3A 区最大，上游 3B 区最小，下游 2 区居于中间。这是由于 3A 区在上游上部，是精选的河床卵石料，强度和压实度最高，3B 区位于上游下部，是台地红土砾石料，且该区基本在水位以下，强度较低，2 区在下游，是溢洪道开挖料和坝基开挖料，强度居于前两者之间。

表 1 动力参数反演结果与其他成果

Table 1 Back-analysis and other results of dynamic parameters				
动力参数	坝料分区			
	1 区 心墙料	下游 2 区	上游 3A 区	上游 3B 区
本文反演值	2003	3283	3893	2567
最大动剪模量系数 K	现场剪切波速第一次 1664/ 测试反算值 第二次 1729			
室内动三轴 试验值	828	1364		
黄俊鸿校 正值 ^[29]	2350	3175	3125	
最大动剪模量指数 n	本文反演值	0.454	0.480	0.467 0.450

最优个体目标函数曲线如图 4 所示，各参数优化

曲线如图 5, 6 所示。从图中可以看出, 各参数最终趋于稳定值。

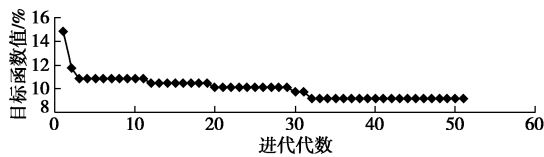


图 4 最优个体目标函数曲线

Fig. 4 Curve of optimal individual objective function

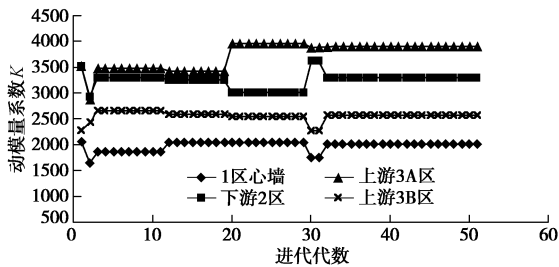


图 5 动剪模量系数 K 优化曲线

Fig. 5 Optimized curve of dynamic shear modulus coefficient K

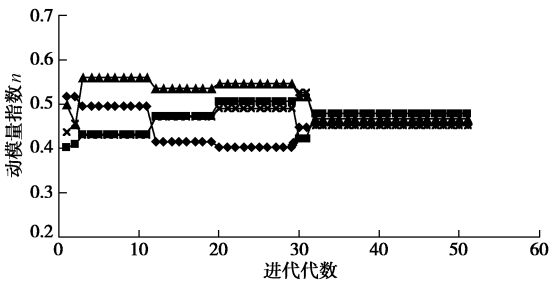


图 6 动剪模量指数 n 优化曲线

Fig. 6 Optimized curve of dynamic shear modulus exponent n

2.5 采用反演参数的动力计算

为进一步验证反演分析所得参数的正确性和分析过程的合理性, 利用反演得到的动力参数进行鲤鱼潭心墙坝在集集地震中的动力计算, 具体比较分析计算成果与实测结果之间的差别。

图 7 是坝顶 T2 测点计算的与实测的加速度时程的比较。从加速度时程的绝对值大小来看, 顺河向加速度峰值计算值和实测值分别为 2.39 和 2.48 m/s^2 , 相差 3.63% ; 竖向加速度峰值的计算值和实测值分别为 1.53 和 1.40 m/s^2 , 相差 9.29% 。顺河向计算的和实测的加速度时程的超前滞后现象较为明显, 竖向计算的和实测的加速度时程相当一致。

图 8 是坝顶 T2 测站计算的与实测的加速度反应谱。可以看出, 顺河向加速度反应谱的计算值和实测值基本吻合, 在周期 $0.4 \sim 0.7 \text{ s}$ 区间, 竖向加速度反应谱的计算值比实测值稍偏大, 除此之外相当一致。总的来说计算的和实测的加速度基本吻合。

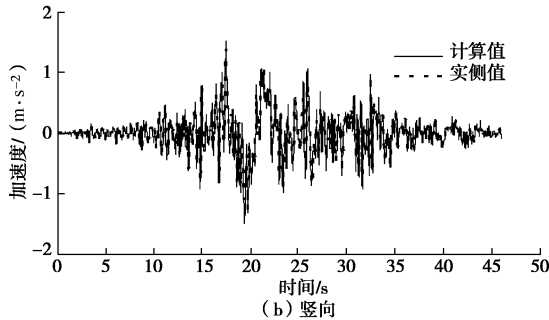
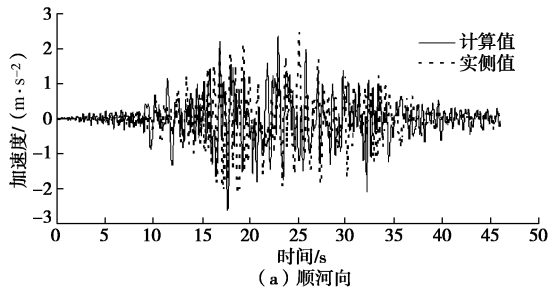


图 7 坝顶 T2 测站计算和实测的地震波时程

Fig. 7 Calculated and recorded earthquake waves at T2 station of dam crest

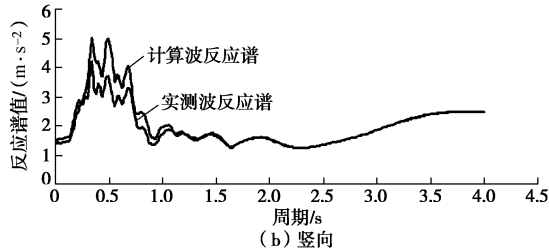
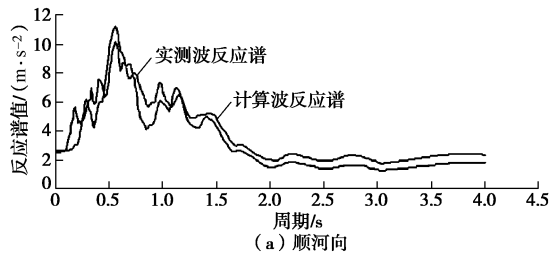


图 8 坝顶 T2 测站实测和计算地震波反应谱

Fig. 8 Calculated and recorded earthquake wave response spectra at T2 station of dam crest

同时也比较了坝坡 T5 测点计算的与实测的加速度时程, 其结果与 T2 测点类似。

图 9~12 是利用反演的动力参数计算的加速度和动位移分布, 可以看出均符合一般心墙堆石坝的动力反应分布规律。

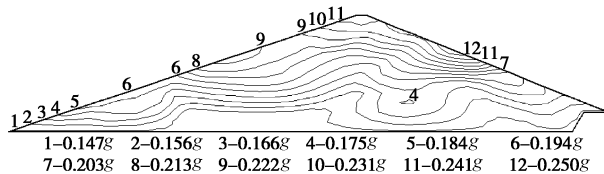


图 9 顺河向加速度

Fig. 9 Distribution of transverse accelerations

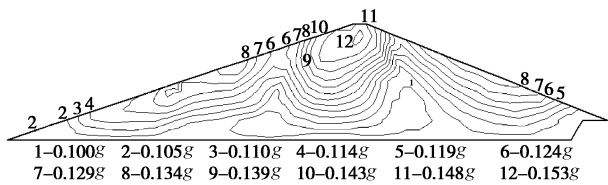


图 10 竖向加速度分布

Fig. 10 Distribution of vertical accelerations

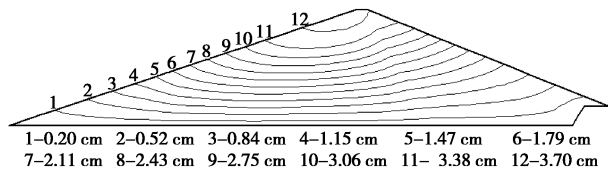


图 11 顺河向水平位移

Fig. 11 Distribution of transverse dynamic displacements

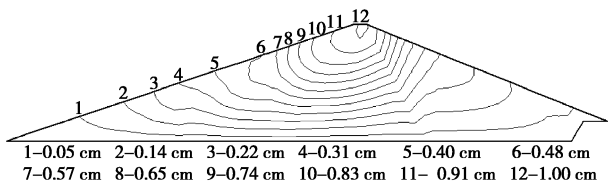


图 12 竖向位移

Fig. 12 Distribution of vertical dynamic displacements

2.6 反演的动力参数与室内外试验成果的比较

(1) 与现场剪切波速试验成果的比较

在鲤鱼潭施工过程中，利用既有的监测孔，在黏土心墙区按下孔式并测法进行了两次现场剪切波速试验^[30]，根据波动方程求得心墙料的最大动剪切模量，再根据不同孔深得到动剪模量系数 K 。

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (5)$$

式中， V_s 为横波波速， ρ 为材料的密度。

由图 13，第一次试验得到的动剪切模量系数 K 为 1664，第二次为 1729，两次平均结果约为 1700，反演的心墙料最大动剪切模量系数 K 为 2003，是该值的 1.18 倍。

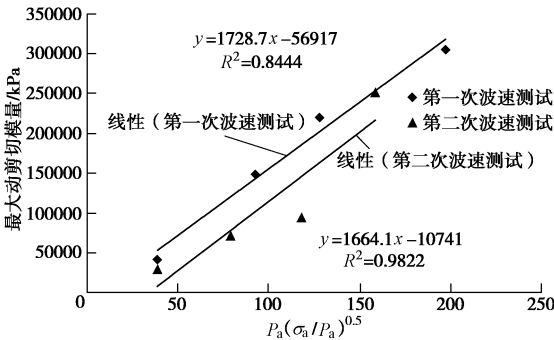


图 13 最大动剪切模量与平均有效应力平方根的关系

Fig. 13 Relationship between maximum dynamic shear modulus and square root of average effective stress of core clay materials

(2) 与室内动三轴试验成果的比较

根据鲤鱼潭大坝在施工过程中所做的室内动三轴试验成果^[30]，心墙黏土料的最大动剪切模量系数 K 为 828，下游 2 区砾石料为 1364，而反演结果分别为 2003 和 3283，分别为室内动三轴试验成果的 2.42 倍和 2.40 倍。

(3) 与工程经验资料的比较

鲤鱼潭心墙坝上下游坝壳料取自台地砾石土、溢洪道和坝基开挖料或河床料，分类属于 SM、GW 或 GP-GW。根据碾压式土石坝最大动剪模量的经验资料^[31]，由中等至坚硬颗粒所组成属于砾石的分层碾压土，其最大动剪切模量系数 K 的范围在 2200~3300 之间，反演的鲤鱼潭大坝上下游坝壳料的 K 值基本在此范围内。

另外，由鲤鱼潭大坝多次小震的加速度记录，获取大坝的基频，再采用三角形弹性坝的周期理论计算公式对坝料的最大剪切模量进行校正^[29]，由此推算出心墙黏土料的动剪切模量系数 K 值约为 2350，与反演值 2003 相差 14.8%；下游坝料的 K 值为 3175，与反演的值 3283 相差 3.4%；上游坝料的 K 值为 3125，而反演的上游上部 3A 区坝料的 K 值为 3893，下部 3B 区坝料的 K 值为 2567，与反演的上游坝料 K 的平均值相差为 3.4%。

3 结 论

(1) 本文提出的联合采用加速度反应谱和峰值做为目标函数的土石坝坝料动力参数反演方法可行，计算精度基本满足实际工程要求。

(2) 利用鲤鱼潭心墙堆石坝在集集地震中实测的加速度记录，反演了坝料的最大动剪模量系数 K 和指数 n ，并与室内动三轴试验和现场波速测试成果比较，结果表明室内动三轴试验得到的最大动剪模量系数 K 的值偏小，建议予以修正。

致 谢：感谢台湾省中区水资源局鲤鱼潭水库管理中心和台湾省中央研究院地球科学研究所提供监测与地震记录等相关资料。同时非常感谢台湾交通大学潘以文教授、中央研究院地球科学研究所黄文纪研究员、中兴大学冯正一教授在收集资料过程中给予的帮助。

参考文献：

[1] 沈珠江. 鲁布革心墙堆石坝变形的反馈分析[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 1 - 13. (SHEN Zhu-jjiang. Back analysis deformation of Lubuge earth core rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 1 - 13. (in Chinese))

- [2] 张社荣, 何 辉. 改进的遗传算法在堆石体参数反演中的应用[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 182 - 186. (ZHANG She-rong, HE Hui. Application of improved genetic algorithm to back analyzing parameters of rockfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(2): 182 - 186. (in Chinese))
- [3] 张丙印, 袁会娜, 孙 逊. 糯扎渡高心墙堆石坝心墙砾石土料变形参数反演分析[J]. 水力发电学报, 2005, **24**(3): 18 - 23. (ZHANG Bing-yin, YUAN Hui-na, SUN Xun. The back-analysis of deformation parameters of core gravelly soil of the Nuozhadu high rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, **24**(3): 18 - 23. (in Chinese))
- [4] 张丙印, 袁会娜, 李全明. 基于神经网络和演化算法的土石坝位移反演分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 547 - 552. (ZHANG Bing-yin, YUAN Hui-na, LI Quan-ming. Displacement back analysis of embankment dam based on neural network and evolutionary algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 547 - 552. (in Chinese))
- [5] 田明俊, 周 晶. 基于蚁群算法的土石坝土体参数反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **25**(8): 1411 - 1416. (TIAN Ming-jun, ZHOU Jing. Inversing soil mechanical parameters of embankment dam using ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **25**(8): 1411 - 1416. (in Chinese))
- [6] 田明俊, 周 晶. 土石坝土体参数反演的一种新方法[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(8): 118 - 122. (TIAN Ming-jun, ZHOU Jing. An inverse analysis of embankment dam parameters by using a virtual displacement method[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(8): 118 - 122. (in Chinese))
- [7] 李金凤, 杨启贵, 徐卫亚. 基于改进粒子群算法CHPSO-DS的面板坝堆石体力学参数反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(6): 1229 - 1235. (LI Jin-feng, YANG Qi-gui, XU Wei-ya. Back analyzing mechanical parameters of rockfill based on modified particle swarm optimization CHPSO-DS[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(6): 1229 - 1235. (in Chinese))
- [8] 朱 晟, 张美英, 戴会超. 土石坝沥青混凝土心墙力学参数反演分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 635 - 639. (ZHU Sheng, ZHANG Mei-ying, DAI Hui-chao. Back analysis of mechanical parameters for asphalt-concrete core earth-rock dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 635 - 639. (in Chinese))
- [9] 朱 晟, 梁现培, 冯树荣. 基于现场大型承载试验的原级配筑坝堆石料力学参数反演研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(7): 1138 - 1143. (ZHU Sheng, LIANG Xian-pei, FENG Shu-rong. Back analysis of mechanical parameters of naturally graded rockfill materials based on large-scale loading plate tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(7): 1138 - 1143. (in Chinese))
- [10] 朱 晟. 水布垭面板堆石坝施工与运行性状反演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 2): 3689 - 3695. (ZHU Sheng. Back analysis on construction and operation properties of shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S2): 3689 - 3695. (in Chinese))
- [11] 江沛华, 魏 松, 汪 莲, 等. 改进复合形法及其在堆石坝参数反演中的应用[J]. 水力发电学报, 2011, **30**(4): 168 - 174. (JIANG Pei-hua, WEI Song, WANG Lian, et al. Modified complex method and application to parameters back-analysis for rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, **30**(4): 168 - 174. (in Chinese))
- [12] 董威信, 袁会娜, 徐文杰, 等. 糯扎渡高心墙堆石坝模型参数动态反演分析[J]. 水力发电学报, 2012, **31**(5): 203 - 208. (DONG Wei-xin, YUAN Hui-na, XU Wen-jie, et al. Dynamic back-analysis of material parameters of Nuozhadu high earth-rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, **31**(5): 203 - 208. (in Chinese))
- [13] 马 刚, 常晓林, 周 伟, 等. 高堆石坝瞬变一流变参数三维全过程联合反演方法及变形预测[J]. 岩土力学, 2012, **33**(6): 1889 - 1895. (MA Gang, CHANG Xiao-lin, ZHOU Wei, et al. Integrated inversion of instantaneous and rheological parameters and deformation prediction of high rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(6): 1889 - 1895. (in Chinese))
- [14] 何 敏, 李 宁, 张西前, 等. 黑河黏土心墙土石坝分期位移反分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(1): 259 - 265. (HE Min, LI Ning, ZHANG Xi-qian, et al. Back analysis of displacements of Heihe clay core rockfill dam at different stages[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(1): 259 - 265. (in Chinese))
- [15] YU Yu-zhen, ZHANG Bing-yin, YUAN Hui-na. An intelligent displacement back-analysis method for earth-rockfill dams[J]. Computers and Geotechnics, 2007, **34**(4): 423 - 434.
- [16] ZHOU Wei, HUA Jun-jie, CHANG Xiao-lin, et al. Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam[J]. Computers and Geotechnics, 2011, **38**(2): 269 - 280.

- [17] ZHENG Dong-jian, CHENG Lin, BAO Teng-fei, et al. Integrated parameter inversion analysis method of a CFRD based on multi-output support vector machines and the clonal selection algorithm[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 47(1): 68 - 77.
- [18] 朱 晟, 杨 鸽, 周建平, 等. “5.12”汶川地震紫坪铺面板堆石坝静动力初步反演研究[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2010, 42(5): 113 - 119. (ZHU Sheng, YANG Ge, ZHOU Jian-ping, et al. Back analysis on static and dynamic characteristics of Zipingpu CFRD under “5.12”Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 113 - 119. (in Chinese))
- [19] 汪 旭, 康 飞, 李俊杰. 土石坝地震永久变形参数反演方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 279 - 286. (WANG Xu, KANG Fei, LI Jun-jie. Back analysis of earthquake-induced permanent deformation parameters of earth-rock dams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 279 - 286. (in Chinese))
- [20] 田 强. 土石坝动力参数的反演算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012. (TIAN Qiang. The research of inversion algorithms on dynamic parameters of earth-rock dam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [21] 冯 新, 周 晶, 范颖芳. 基于模态观测的混凝土坝反演分析[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 101 - 105. (FENG Xin, ZHOU Jing, FAN Ying-fang. Inverse analysis of concrete dam with modal measurements[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 101 - 105. (in Chinese))
- [22] 康 飞, 李俊杰, 许 青. 混合蜂群算法及其在混凝土坝动力材料参数反演中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 736 - 742. (KANG Fei, LI Jun-jie, XU Qing. Hybrid simplex artificial bee colony algorithm and its application in material dynamic parameter back analysis of concrete dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 736 - 742. (in Chinese))
- [23] 王登刚, 刘迎曦, 李守巨. 混凝土坝振动参数区间逆分析[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(5): 522 - 526. (WANG Deng-gang, LIU Ying-xi, LI Shou-ju. In terval invers ion analys is for vibration parameters of concrete dam[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2002, 42(5): 522 - 526. (in Chinese))
- [24] WANG Wei-qiang, KUANG Ya-hong. Back analysis of dam parameter under seismic action[J]. Procedia Engineering, 2012(28): 429 - 433.
- [25] SEED H B, IDRIS I M. Influence of soil conditions on ground motions during earthquake[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969, 95(1): 99 - 138.
- [26] 陈崇茂. 土石坝料的变参数 R-O 模型及其热力学解释[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (CHEN Chong-mao. R-O model with varying parameters for dam materials and its thermodynamic explanation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.6(in Chinese))
- [27] 周 明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (ZHOU Ming, SUN Shu-dong. The principle and application of genetic algorithm[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. (in Chinese))
- [28] 李敏强. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (LI Min-qiang. The basic theory and application of genetic algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [29] HWANG Jin-hung, WU Chia-pin, WANG Sheng-chin. Seismic record analysis of the Liyutan earth dam[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44: 1351 - 1377.
- [30] 台湾省中区水资源局. 鲤鱼潭水库施工中安全评估计划总报告书[R]. 台中: 中区水资源局, 1993. (Central Water Resources Office. The overall safety assessment report of Liyutan Reservoir during construction[R]. Taichung: Central Water Resources Office, 1993. (in Chinese))
- [31] SEED H B, IDRIS I M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses[D]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1970.