

混凝土重力坝弹性参数识别的灵敏度分析及实例^{*}

Sensitivity analysis and example of elastic parameters identification for concrete gravity dam

李守巨 刘迎曦 王登刚

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连, 116024)

马龙彪 张 军

(丰满发电厂, 吉林, 132108)

中图法分类号 TU 452

文献标识码 A

文章编号 1000-4548(2000)03-0381-03

作者简介 李守巨, 男, 1960年生, 副教授, 1986年于中国矿业大学矿山建筑系获硕士学位, 现从事岩土力学及其反问题研究。

1 引言

在岩土工程中经常需要进行稳定性分析、应力场和位移场计算以及结构变形预报, 而在分析和计算中最棘手的问题是合理并切合实际地选取介质的材料物性力学参数(如容重、弹性模量、泊松比、内聚力和内摩擦角等)。为了监控混凝土重力坝的安全运行状态, 需要建立大坝的安全监控指标的数学模型, 而正确估计坝体混凝土和坝基岩石基础的弹性参数是建立大坝安全监控指标所必须的参数。众所周知, 在混凝土体内或天然岩体中, 普遍存在裂隙、层理、解理等不连续结构面, 使得室内实验得出的结果与实际情况有较大的出入, 即所谓的“尺寸效应”; 而现场测试又存在着数据离散、代表性不强、工艺复杂和成本昂贵等问题。根据位移(包括绝对位移和相对位移)观测数据, 采用有限元数值计算方法识别材料的物性参数得到迅速发展。但是, 如何合理布置位移观测点位置的研究相对进行的比较少, 应用灵敏度分析方法可以解决这一问题。本文采用有限元数值计算方法, 通过在位移观测点的计算位移与待识别参数的偏导数定义灵敏度。灵敏度表征了由于待识别参数的变化引起位移计算值的变化大小。

2 灵敏度分析与位移观测点布置

由弹性理论和材料力学理论分析得知, 在水压作用下, 引起坝体变形的主要因素有: ①水压力作用在坝体和坝基产生弯矩和剪力, 在水位一定的条件下, 使坝体在高程 ξ 产生的水平位移 $\delta_1 \propto C_1 \xi + C_2 \xi^2 + C_3 \xi^3$, 其中 C_1, C_2, C_3 为常数; ②水压力作用于库区, 使得坝体产生向上游方向的转角 θ , 使得在坝体不同高程产

生向上游水平位移, 它与测点高程 ξ 成正比, $\delta_2 \propto -\theta \xi$ 。因此, 坝体不同高程 ξ 的水平位移, 可近似表达成如下形式:

$$\delta(\xi) = b_0 + b_1 \xi + b_2 \xi^2 + b_3 \xi^3 \quad (1)$$

式中 b_0, b_1, b_2, b_3 为常数, 可通过回归方法确定。

从上式很难看出观测点布置在哪个高程, 其灵敏度的高低。因此必须进行灵敏度分析。对于尚未布置观测点的工程, 给出合理的观测点布置; 或者对根据已有的观测点的位置进行参数识别的可行性进行分析, 研究其可识别性。目标函数选取如下:

$$J(\mathbf{X}) = \|\mathbf{U}(\mathbf{X}) - \mathbf{U}^*\|_2^2 \quad (2)$$

式中 $J(\mathbf{X})$ 为目标函数; $\|\cdot\|$ 为欧拉范数; $\mathbf{U}(\mathbf{X})$ 为与材料弹性参数有关的计算位移矢量, $\mathbf{U}(\mathbf{X}) = \{U_1, U_2, \dots, U_M\}$; $\mathbf{U}^*$ 为观测位移矢量, $\mathbf{U}^* = \{U_1^*, U_2^*, \dots, U_M^*\}$ 。当采用多测点一次观测时, M 为位移观测点的数目; 当采用一个观测点多次观测时, M 为荷载的工况数, 即观测次数。 $\mathbf{X}$ 为待识别的材料参数矢量, $\mathbf{X} = \{E_C, \mu_C, E_R, \mu_R\}$, 其中 E_C, μ_C 为混凝土的弹性模量和泊松比, E_R, μ_R 为坝基岩石的弹性模量和泊松比。灵敏系数矩阵中各元素按下式计算:

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_j} = \frac{U_i(X_j + \Delta X_{ej}) - U_i(X_j)}{\Delta X_j} \quad (3)$$

式中 e_j 为单位矢量的第 j 个分量。现以丰满混凝土重力坝 47 坝段为例, 分析不同高程水平位移水压分量对坝体混凝土弹性模量和坝基岩石弹性模量的灵敏度分布。该大坝 47 坝段混凝土与基岩接缝高程为 200 m, 坝顶高程 267.7 m, 坝基宽 54 m, 坝顶宽 9 m。将混凝土重力坝的变形简化为平面应变状态, 采用三角形单元, 共分为 900 个单元, 506 个节点。其中, 坝基岩石的计算范围在上游、下游和垂直向下各取 300 m 作为有限元计算边界。按照式(3)计算所得结果见

^{*} 国家自然科学基金(No. 59779003)和工业装备结构分析国家重点实验室资助项目
到稿日期: 1999-07-16

表 1。

从表 1 可以看出, 对于坝体弹性模量, 当观测点高程从 200 m 到 265 m, 灵敏度的变化范围为 (0.93~1.15) mm/MPa, 变化范围很小, 也就是说单从识别坝体混凝土弹性模量的角度, 观测点布置在 200~265 m 高程并不会影响反问题的可识别性。但是, 对于坝基岩石来讲, 当观测点高程从 265 m 到 200 m, 灵敏度的变化范围为 (4.2~0.32) mm/MPa, 变化范围较大。观测点布置在坝顶时比观测点布置在接缝处 (高程 200 m) 灵敏度大, 也就是说用坝顶水平位移观测数据识别坝基岩石的弹性模量比观测点布置在接缝处要好, 参数的可识别性强。

表 1 水平位移对坝体混凝土弹性模量 E_C 、坝基岩石弹性模量 E_R 的灵敏度分布

Table 1 Sensitivity distribution of horizontal displacements with respect to E_C , E_R

测点高程/m	265	255	245	230	200
E_C 灵敏度/mm·MPa ⁻¹	0.93	0.95	0.99	1.04	1.15
E_R 灵敏度/mm·MPa ⁻¹	4.20	3.72	2.96	2.25	0.32

尤其需要指出的是, 与渗流参数识别问题所不同之处在于, 渗流反问题必须要求在每个子区域必须至少有一个观测点, 这样才能保证参数识别结果的唯一性; 对于位移反问题, 不一定要每个子区域都布置观测点, 采用单测点 (在坝顶) 多工况同时识别坝体混凝土和坝基岩石的弹性模量是可行的。那种认为用坝顶水平位移观测数据只能识别坝体混凝土的弹性模量, 不适合识别坝基弹性模量的观点是没有足够理论依据的。

3 混凝土坝弹性参数识别的数值方法

修正 Gauss-Newton 方法的叠代过程如下:

$$X^{k+1} = X^k - \rho D^k \quad (4)$$

$$A^k D^k = B^k \quad (5)$$

式中 $A^k = (S^k)^T S^k$; S^k 为灵敏系数矩阵, 详细计算方法见文献[1]; $B^k = (S^k)^T (U(X^k) - U^*)$; D^k 为高斯-牛顿搜索方向, ρ 为步长, 采用“成功-失败”方法确定。当法方程的系数矩阵 A 出现病态或奇异时, 可采用 Levenberg-Marquardt 方法[2]或 Tihonov 的正则化方法[3]。

BFGS 方法是分别由 Broyden, Fletcher, Goldfarb 和 Shanno 在 1970 年研究开发的。假定 $J(X)$ 二次连续可微, X^k 为其极小点的某一近似。在该点附近取 $J(X)$ 的二阶台劳展开, 得:

$$J(X) \approx J(X^k) + G(X^k)^T (X - X^k) + \frac{1}{2} (X - X^k)^T He(X^k) (X - X^k) \quad (6)$$

式中 $G(X^k)$ 和 $He(X^k)$ 分别为 $J(X)$ 在点 X^k 的梯度和 Hessian 矩阵。对式(6)两边求得:

$$G(X) \approx G(X^k) + He(X^k)(X - X^k) \quad (7)$$

引入极小化 $J(X)$ 应满足的条件 $G(X) = 0$, 得:

$$X = X^k - He(X^k)^{-1} G(X^k) \quad (8)$$

但由于海森矩阵的逆矩阵计算量较大。在拟牛顿法中, 可构造一近似矩阵 H , 用来近似 Hessian 矩阵的逆矩阵[4]。

$$H^{k+1} = H^k + \frac{\left| 1 + \frac{(Y^k)^T H^k Y^k}{(Z^k)^T Y^k} \right| Z^k (Z^k)^T}{(Z^k)^T Y^k} - \frac{H^k Y^k (Z^k)^T + Z^k (Y^k)^T H^k}{(Z^k)^T Y^k} \quad (9)$$

式中 $Y^k = G^{k+1} - G^k$, $Z^k = X^{k+1} - X^k$, $H^0 = I$ (单位矩阵)。搜索方向按下式确定:

$$D^k = H^k G^k \quad (10)$$

叠代方程仍为式(4), 将经式(10)计算所得到的搜索方向代入到方程(4), 即可进行弹性参数识别问题的叠代求解。

4 工程实例

丰满大坝自 1954 年开始采用视准线测量坝顶水平位移, 1971 年改用引张线测量坝顶的水平位移, 到 1984 年建成真空激光测坝系统。大坝坝顶水平位移 d 按其成因可分为三个分量: 由水位变量 h 所产生的弹性分量, 即水位分量 $f_h(t)$; 由温度变量 T 所产生的弹性分量, 即温度分量 $f_T(t)$; 由坝体混凝土和坝基岩石的徐变、塑性变形以及基岩地质构造的压缩变形和坝体裂缝引起的不可逆变形 (非弹性分量), 即时效分量 $f_r(t)$ 。

$$d = f_h(t) + f_T(t) + f_r(t) \quad (11)$$

坝顶观测点水平位移的水位分量可采用逐步回归方算法分离出来, 并记为 $U^* = f_h$, 又称 U^* 为位移观测矢量。

$$U^* = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + a_3 H^3 \quad (12)$$

式中 a_0, a_1, a_2, a_3 为回归系数; $H = (h - 200)/60$; h 为上游水位, 单位 m; 位移的单位为 mm。根据 1993 年 1 月~1997 年 12 月的坝顶水平位移观测数据, 所得到的回归方程系数如表 2 所示。其中上游水位 h 的变化范围为 244.23~264.68 m。

表 2 激光测坝系统的回归方程系数

Table 2 Regression coefficients of laser monitoring system

坝段	a_0	a_1	a_2	a_3
14	-5.756	0.000	11.752	0.000
32	-19.633	21.994	0.000	0.000
47	1.127	0.000	10.685	0.000

由于材料的泊松比对应力和位移分析结果影响比较小^[4], 因此, 泊松比未参与参数识别, 而采用现场试验以及室内试验所确定的数值, 坝基岩石的泊松比取为 0.20, 坝体混凝土的泊松比取为 0.18。利用布置在 265 m 高程廊道内水平位移观测值经回归分析所得到的水位分量作为反演模型的“观测值”, 并且利用水位分别为 266.5, 260.75, 257.875, 255, 250, 245 m 的相对水平位移识别坝体混凝土和坝基岩石的弹性模量, 参数识别结果见表 3。

表 3 坝体混凝土和坝基岩石参数识别结果
Table 3 Identified results of the elastic moduli

坝段	混凝土弹性模量/GPa	岩石弹性模量/GPa
14	24.448	15.808
32	21.835	12.630
47	20.775	21.718

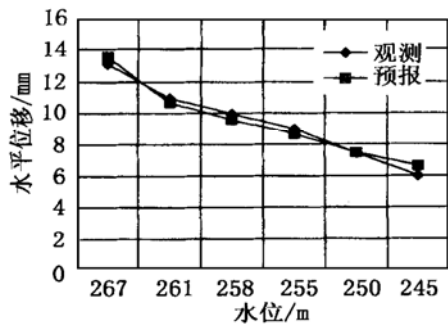


图 1 坝顶水平位移分离值与预报值的对比
Fig. 1 Contrast of forecasted values with separated values of displacements

将参数识别值代入到有限元方程中, 预报由于水压所产生的坝顶水平位移, 与按式(12) 计算坝顶水平位移水压分量分离值的对比见图 1。

5 结 论

灵敏度表征了由于待识别参数的变化引起位移计算值的变化大小。对于尚未布置观测点的参数识别问题, 通过灵敏度分析, 能够给出合理的观测点布置。对根据已有的观测点, 通过灵敏度分析, 进行参数识别的可行性研究, 可以确定各待识别参数的可识别性。对于混凝土重力坝, 采用布置在坝顶高程的单测点, 利用在多个水位(工况) 情况下的水平位移观测值, 同时识别坝体混凝土和坝基岩石的弹性模量是可行的。

参 考 文 献

1 李守巨, 刘迎曦等. 岩石和混凝土材料参数识别的修正高斯-牛顿法. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 93~ 96
2 Okabe T. Inverse of drilling-induced tensile fracture data obtained from a single inclined borehole. Int J Mech Min Sci, 1998, 35(6): 747 ~ 758
3 李守巨, 刘迎曦等. 含水层参数识别的正则化方法. 力学与实践, 1999, 21(4): 32~ 35
4 Miko Shoji. Two-dimensional consolidation back-analysis. Soils and foundations, 1990, 30(2): 60~ 78

常见废弃单位及换算因数示例

单位名称	符号	换算因数
微(米)	μ	1 μ = 1 μ m
千克力	kgf	1 kgf= 9. 806 65 N
吨力	tf	1 tf= 9. 806 65 kN
标准大气压	atm	1 atm= 101. 325 kPa
工程大气压	at	1 at= 9. 806 65 $\times 10^4$ Pa
毫米汞柱	mmHg	1 mmHg= 133. 322 Pa
毫米水柱	mmH ₂ O	1 mmH ₂ O= 9. 806 65 Pa
泊	P	1 P = 0. 1 Pa $\otimes$ s