第20卷 第5期 岩石力学与工程学报 20(5): 731～737
2001年9月 Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering Sept., 2001

三峡二期围堰填料参数的反分析

张小平[1] 包承纲[2] 施 斌[1]
([1]南京大学地球科学系 ACEI 南京 210093) ([2]长江科学院 武汉 430010)

摘要 二期围堰工程是三峡水利枢纽建设中的重要组成部分，在比较全面的实测资料基础上，对围堰填料进行参数敏感性分析；在试验资料的基础上确定了参数范围，采用复形法与有限元程序编制反分析程序，进行了参数的优化计算，确定出最适宜参数；最后根据最优参数对围堰进行了应力变形分析，结果表明围堰处于安全运行状态，计算结果与实测资料十分吻合。

关键词 三峡二期围堰，参数灵敏性，复形法，反分析
分类号 TV 551.+1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2001)05-0731-07

1 前 言

三峡二期围堰已经完建并运行了两年多的时间，由于二期围堰在三峡建设中的重要作用，尤其在使用了柔性混凝土防渗墙之后，人们十分关注二期围堰的稳定性。为了评价围堰防渗墙运行过程的安全性，有必要对围堰进行应力变形计算。在设计阶段，国内先后有15个单位和50多位专家对围堰应力应变的数值分析进行了长达15 a 的研究[1]，对比了包括非线性和弹塑性 8 种数学模型。研究表明，Duncan-Chang E-μ 模型用于二期围堰的计算是适合的，且由于材料的参数易于获得，在设计的后期阶段、施工阶段皆是按Duncan-Chang E-μ 模型进行优化设计和验证分析。计算表明[1]，墙体材料参数对计算位移影响很小，即防渗墙的水平位移主要取决于堰体的变形，墙体的刚度对墙体的水平变形作用甚微。故影响防渗墙变形的因素则主要为堰体材料参数，因此根据实际观测资料对其进行反分析是十分必要的。

二期围堰建立了比较全面的监测系统，实测资料充分完整，这就为围堰参数的反分析提供了有力的依据。本文采用正算逆解逼近法进行参数反分析。它是把正分析的数值分析法和数学规划法结合起来，建立寻找使计算位移与实测位移误差最小的基本参数方法。这种方法不需要建立待求参数和实测位移之间的关系式，只需应用最优化理论不断修正未知参数即可。以有限元计算为例，只需将正分析时所用的有限元程序作为优化程序中的一个子程序调用来实现。它的适用性强，可以广泛用于求解线性和非线性反分析问题。这种方法可使计算值和实测值的误差逼近到最小程度，且有现成的计算程序和成熟的优化理论，因此很适合于三峡二期围堰的参数反分析。

参数反分析的可靠性取决于反分析所依据的物理量(如位移、应力等)的计算值和实测值的精确度。由于现场精密仪器的使用，位移的实测值是可信的，因此本文以位移反分析为依据对围堰填料进行了参数反分析，并以合理的参数进行围堰的应力变形分析。

2 参数敏感性及其范围的确定

2.1 围堰中待反分析材料种类的确定

二期围堰的堰体填筑材料主要有：平抛垫底砂砾石、风化砂、石渣堆石和反滤料，堰体的底部是新淤砂和覆盖层。每种材料的Duncan参数为8个，即{ρ，R_f，k，n，G，F，D，k_{ur}}，其中ρ为密度，R_f 为破坏比，k，n为与加荷弹性模量有关的参数，G，F，D为与泊松比有关的参数，k_{ur}为卸荷模量数，

2001年1月9日收到初稿，2001年3月6日收到修改稿。
作者 张小平 简介：女，36岁，2000年于河海大学岩土工程专业获博士学位，现为南京大学博士后，主要从事环境岩土工程方面的研究工作。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于堰体材料的参数众多，不可能对所有的参数进行反分析。首先应分析堰体中各种材料的原设计参数哪些可能与实际不符。图1是根据设计参数和施工期的补充试验参数，采用Duncan模型计算的墙体水平位移曲线与实测墙体水平位移曲线，由图可见，计算的墙体曲线在墙的下部与实测曲线拟合得非常好，而在上部有一定的偏离，计算墙体的最大位移为0.409 m，而实测墙体的最大位移为 0.557 m，相差 0.152 m。新淤砂、覆盖层在施工前后密度变化不大，砂砾石的参数为施工阶段按实际密度进行的大三轴试验所确定，由堰体结构断面图[2]可知，这三种材料分布在墙体为35 m高程以下，分析图1，可见它们的计算参数与实际相符，因此，很有可能是风化砂、石渣堆石和反滤料的填筑密度与设计不符。故需要对这几种材料的参数进行反分析，以便确定出符合实际的参数。

即便是只对风化砂、石渣堆石和反滤料的参数进行反分析，仍有24个参数，无论用哪种反分析方法都难以实现。因此，首先进行这三种材料的参数敏感性分析，然后，选择那些灵敏性高的参数进行反分析。

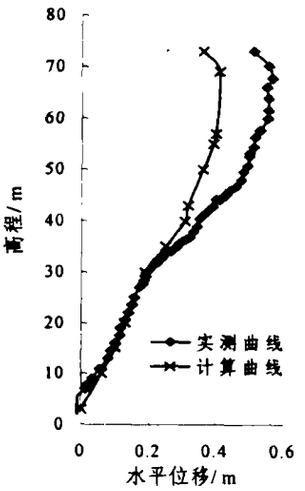

图 1　墙体水平位移沿高程分布

Fig.1　Distribution of horizontal displacement with altitude

2.2 围堰材料参数的敏感性分析

2.2.1 参数敏感性分析的方法

设有一系统[3]，其系统特性为$F=f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，$x_i$为决定系统特性的参数，给定某一基准状态$X^*=(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_n^*)$，系统特性为$F=f(X^*)$，令各参数在其各自的范围内变动，分析由于这些参数的变动特性 F 偏离基准状态 F^*的趋势和程度，这种分析方法即为参数敏感性分析。在实际系统内，决定系统特性的各参数往往是不同的物理量，单位各不相同，为了比较系统特性对各个参数敏感程度的大小，有必要进行无量纲化处理，绘制$\Delta F/F^*$-$\Delta x_i/x_i^*$ ($i=1, 2, \cdots, n$)曲线，该曲线斜率的绝对值定义为参数敏感度函数：

$$\alpha_i=|\Delta F/F^*|/|\Delta x_i/x_i^*| \quad (i=1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

由上式可知：给定不同的Δx_i值，将会得到不同的α_i值，即α_i是Δx_i的函数，α_i在参数的变动范围内的平均值即为该参数的敏感度因子。同时α_i值是在给定的基准状态下的值，随着基准状态的不同，其值也将发生变化。

2.2.2 参数的敏感度

设定的灵敏性分析系统为Duncan参数在一定的范围内变动对防渗墙的最大位移的影响进行计算分析。通过给定的参数$X=\{R_f, k, n, G, F, D\}$(ρ易在实验室确定，k_{ur}为卸荷模量数，它是一个与k相关的量，将在另文中专门讨论)，计算可变参数对防渗墙的最大位移D_{max} 的影响，记为$F=\{D_{max}\}$。图2～4分别是风化砂、石渣堆石及反滤料的各个参数$\Delta D_{max}/D_{max}$-$\Delta x_i/x_i$的关系曲线，由图中曲线可以看出，各个参数对最大位移的影响程度不同，对于风化砂材料，其中G的曲线斜率最陡，依次为k，R_f，n，D，F；石渣堆石材料，以 k 的影响程度最大，依次为G，F，n，R_f，D；对于反滤层材料，影响程度最大的参数为G，依次为R_f，n，k，F。可见材料不同，各参数对防渗墙的最大水平位移的影响程度也不同，这与材料在围堰中所处的位置以及多少密切相关。图5～7分别是风化砂、石渣堆石和反滤料的各个参数 $|\Delta D_{max}/D_{max}|/|\Delta x_i/x_i|$-$\Delta x_i/x_i$的关系曲线，由图可见，$|\Delta D_{max}/D_{max}|/|\Delta x_i/x_i|$并非常数，根据敏感度因子的定义，得到三种材料各参数的敏感度因子见表1。由表1可知，每种材料的Duncan参数敏感度因子都不同，敏感度因子<0.1者，对防渗墙的位移影响仅为1 %左右，在工程的误差范围内。因此，仅将敏感度因子>0.1的参数作为反分析参数，即：风化砂的G，K，R_f，石渣堆石的G，K，

表1　Duncan 参数的敏感度因子

Table 1　Sensitivity factors of Duncan parameters

	风化砂	石渣堆石	反滤料
G	0.980 3	0.140 6	0.162 11
K	0.327 7	0.281 8	0.012 70
R_f	0.173 6	0.063 2	0.085 91
n	0.059 5	0.065 9	0.015 15
F	0.041 8	0.071 5	0.002 71
D	0.095 0	0.023 3	

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

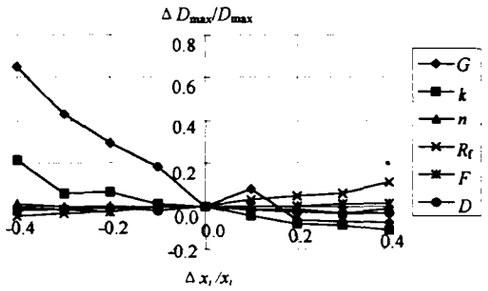

图2 风化砂各参数 $\Delta x_i/x_i$ - $\Delta D_{max}/D_{max}$ 曲线

Fig.2 $\Delta x_i/x_i$ versus $\Delta D_{max}/D_{max}$ curve for weathered sand

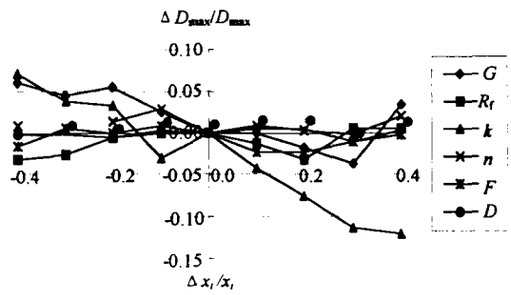

图3 石渣堆石各参数 $\Delta x_i/x_i$ - $\Delta D_{max}/D_{max}$ 曲线

Fig.3 $\Delta x_i/x_i$ versus $\Delta D_{max}/D_{max}$ curve for detritus and rockfill

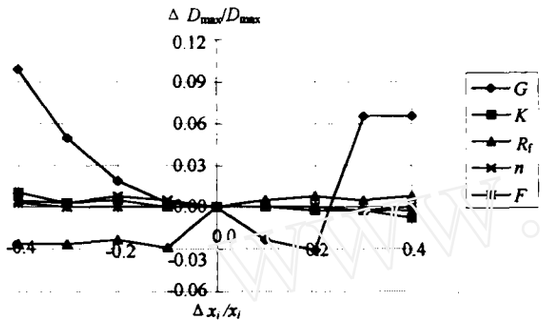

图4 反滤层各参数 $\Delta x_i/x_i$ - $\Delta D_{max}/D_{max}$ 曲线

Fig.4 $\Delta x_i/x_i$ versus $\Delta D_{max}/D_{max}$ curve for filter

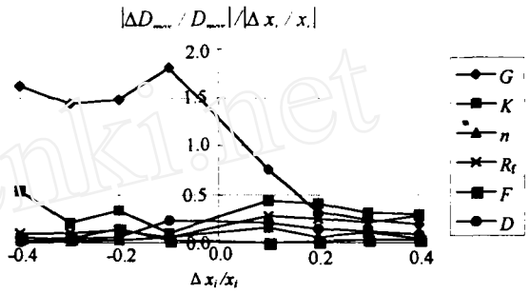

图5 风化砂 $|\Delta D_{max}/D_{max}|/|\Delta x_i/x_i|$ - $\Delta x_i/x_i$ 曲线

Fig 5 $|\Delta D_{max}/D_{max}|/|\Delta x_i/x_i|$ versus $\Delta x_i/x_i$ curve for weathered sand

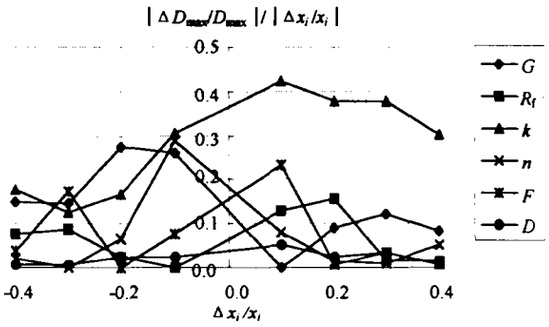

图6 石渣堆石 $|\Delta D_{max}/D_{max}|/|\Delta x_i/x_i|$ - $\Delta x_i/x_i$ 曲线

Fig 6 $|\Delta D_{max}/D_{max}|/|\Delta x_i/x_i|$ versus $\Delta x_i/x_i$ curve for detritus and rockfill

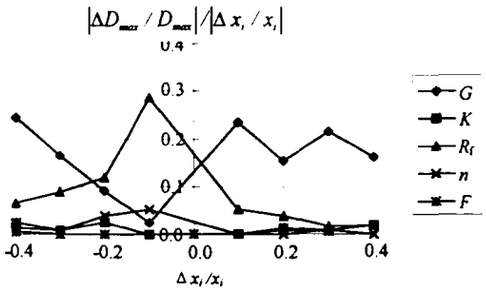

图7 反滤层 $|\Delta D_{max}/D_{max}|/|\Delta x_i/x_i|$ - $\Delta x_i/x_i$

Fig 7 $|\Delta D_{max}/D_{max}|/|\Delta x_i/x_i|$ versus $\Delta x_i/x_i$ curve for filter

反滤料的G，这些参数是与密度密切相关的，因此，还应考虑各自的密度，共9个参数。

2.3 参数变化范围的确定

参数反分析时，往往会出现这种情况，即在计算位移与实测位移拟合很好的情况下，应力的分布可能偏离实际规律。因此，在一定的试验基础上，找出各参数的一定范围及其变化规律，对提高反分析的精度很有必要。据长江科学院1994年科研报告，“三峡二期围堰填料的力学参数及其补充试验”整理出风化砂的各参数与密度之间的关系如图8～11所示。由图分析可以看出，k，R_f，G和 c 随着密度的增加而增加，而D，F 和ϕ随密度的变化规律不明显。经振冲加密的风化砂实际填筑干密度约为1.8 g/cm^3，则各参数的范围大致定为：k (200～400)，R_f(0.7～0.85)，G(0.2～0.4)，n(0.2～0.5)，ϕ (33～38)。

石渣堆石的参数见表2。各参数的变化范围依密度而定，石渣堆石的实际填筑干密度约为1.9 g/cm^3，则各参数的大致范围定为：k(450～600)，R_f (0.7～0.9)，n(0.1～0.35)，G，F，D只有一组数据，根据

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

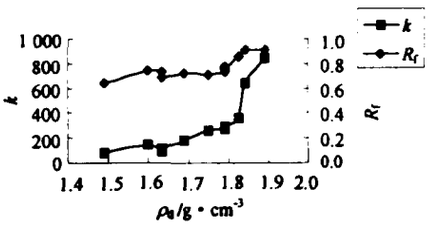

图 8　风化砂 k - ρ_d，R_f - ρ_d 的关系

Fig.8　k and R_f versus ρ_d curves for weathered sand

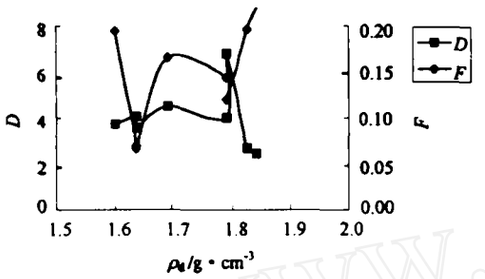

图 10　风化砂 D，F - ρ_d 的关系

Fig.10　D and F versus ρ_d curves for weathered sand

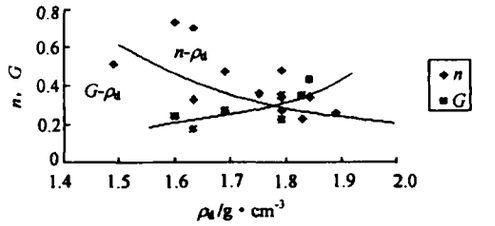

图 9　风化砂 n，G - ρ_d 的关系

Fig.9　n and G versus ρ_d curves for weathered sand

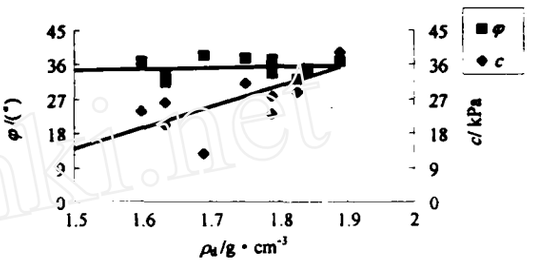

图 11　风化砂 c，φ - ρ_d 的关系

Fig.11　c and φ versus ρ_d curves for weathered sand

表2　石渣堆石的试验参数

Table 2　Experimental parameters for detritus and rockfill

编号	干密度 /g · cm^{-3}	c /kPa	φ/(°)	K	R_f	n	G	F	D
SX01	1.77	91.2	37.2	412	0.82	0.34	0.41	0.30	2.70
SX02	1.91	111	34.3	536	0.89	0.35			
SX03	1.97	103.3	42.0	719	0.71	0.34			
SX04*	1.97	288.3	43.4	760	0.61	0.10			

干密度的变化，可做适当的改变。

3　参数位移反分析的计算模型及其程序实现

3.1　优化位移反分析的计算模型

建立以实测位移和计算位移相差最小的基本参数的反分析方法，是通过优化理论和有限元程序来实现的。将反分析目标未知数记为

$$X=[x_1,\ x_2,\ \ldots x_j \ldots x_N]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中：N为需反分析确定的参数个数；x_j 为目标未知数，j=1，2，3，…，N。

根据“设计参数”分析计算，选出初选参数，将有限元计算位移与观测点实测位移的残差平方和作为参数优化反演问题的目标函数：

$$J(X)=\sum_{t=1}^{T_n}\sum_{i=1}^{N_d}(u_i^t-u_i^{t*})^2 \qquad X\in E^N \tag{3}$$

式中：T_n为时间步长；N_d为观测点总数；u_i^t, u_i^{t*} 为第 i 观测点的计算位移和实测位移值；E^N 为参数的可行域。

在正算逆解逼近的过程中，当反分析的参数较多时，常常导致最终分析结果的不稳定、不唯一。在参数的敏感性计算中也可发现，$\Delta D_{max}/D_{max}$- $\Delta x_i/x_i$ 曲线并非完全单调，因此根据室内试验数据或试算，给出每个反分析参数的估计范围，使各参数的真实值满足：

$$a_i \leqslant X_i \leqslant b_i \tag{4}$$

式中：a_i，b_i 为第i个参数X_i 的上、下限值。这样就使得允许解集大大缩小，有效地避免了不稳定性，提高了寻优效率。

因此，参数反演的优化问题即为：求待定设计变量X，在满足约束条件式(4)的前提下，使式(3)的目标函数成为取极小值的数学规划问题。

3.2　直接反分析程序的实现

最优化技术采用复合形法。复合形法是在单纯形法的基础上发展起来的。在 n 维空间中，不在同一超平面上的n+1个顶点构成凸多面体，在该空间中最简单的图形称为单纯形，而由k>n+1个顶点构成的图形称为复合形。复合形法就是对复形的顶点函数值逐一进行比较，不断地丢掉值最劣的顶点，代之以

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

满足条件且函数值有所改善的新顶点，如此重复，逐步逼近到最优点为止。复合形法不必保持规则图形，较之单纯形法更为灵活可变。此外，由于它在探求最优解的过程中检查了整个可行域，因而所求结果可靠，而且能有效地处理不等式约束问题。鉴于这些特点，复合形法非常适合于复杂函数，因此选用复合形法进行参数反分析。

据此编制了Duncan模型有限元参数复合形法反分析程序，能够对材料种类、参数个数进行自动选取，对观测值的点进行目标函数的自动生成和参数反分析。

4 计算参数的确定及围堰的应力和变形分析

4.1 计算参数的确定

二期上游围堰设有两道防渗墙，靠近上游侧的为上墙，靠近下游侧的为下墙。上墙先施工，下墙后施工。当下墙施工时，对上墙形成临空面，致使上墙产生较大的位移，另外施工车辆也可能产生附加荷载，这些外在因素对墙体位移的影响难以在计算模型中反映，因此，实际的位移可能大于计算位移值。由前分析，墙体的下部与实测值拟合很好，所以，在采用最优化方法进行反分析时，目标函数主要是堰体上部的位移实测值与计算值的误差函数。每计算一次，查看一下各个加荷级次的应力及变形状况是否符合实际规律，若不符合，调整误差及参数的范围值，再进行下一次，如此反复，直到目标函数达到最小，且围堰的应力及变形符合实际规律，这时所确定的参数即为最优参数。其值见表3，没有列出的为原来的设计参数，砂砾石为竣工后试验确定的参数。

根据反分析所确定的参数计算墙体水平位移曲线与实测曲线的比较见图12，由图可以看出两者在墙体的中下部拟合程度相当好，上部计算的水平位移小于实测值，但其变形趋势完全相同，事实上这是合理的，因为上墙的变形受到施工各种外因素的影响，且主要是上部受到影响，致使墙体的上部位移较大。计算所得的墙体最大位移为0.516 m，实测的最大位移为0.557 m，都在69 m高程处，因此计算的最大位移比实测位移小0.041 m，这部分位移即为外界因素影响所致。即：墙体的实际最大位移为69 m高程的计算位移再加上0.047 m。因此，可以按照这个规律进行墙体的变形预测。

表3 优化的邓肯参数

Table 3 Optimum Duncan parameters

材料	湿密度/g·cm^{-3}	K	G	R_f
风化砂	1.82	215	0.352	0.89
石渣堆石	1.97	532	0.331	
反滤料	1.88		0.453	

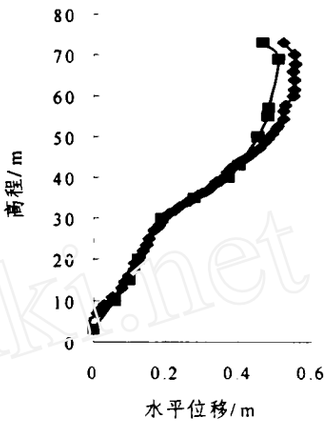

图12 实测位移与计算位移的比较

Fig.12 Comparison of computational displacements with monitoring data

由以上分析得知，Duncan-Chang E-μ模型用于三峡二期围堰的计算，若不考虑外界因素的影响，计算所得的墙体位移曲线与实测墙体曲线几乎完全重合，两条曲线的转折点及弯曲部位非常一致，说明只要计算参数的准确度高，则Duncan模型计算围堰大坝的精度也较高，可以完全满足工程的要求。

4.2 围堰的应力及变形分析

4.2.1. 堰体的变形

根据反分析确定的参数进行计算，三峡工程二期围堰在基坑水位抽干时堰体的水平位移、垂直位移等值线见图13，14。堰体的最大水平位移为0.518 m，发生在围堰防渗墙顶部附近，最大垂直沉降为1.17 m，也发生在围堰防渗墙顶部附近。

4.2.2. 防渗墙的位移和应力

计算得到第一道墙体的最大位移为0.516 m，沿高程的分布见图12，墙体的最大位移随时间的过程线见图15，时间是根据基坑抽水水位确定[4]。可见计算所得的最大位移比实际位移偏小。由计算得上、下墙的最大主应力、最小主应力和应力水平沿高程的分布见图16～18，上墙(第一道墙)的最大主应力为6.16MPa，发生在墙体下游面的底部，最大拉应力为0.95 MPa，发生在墙体上游面的底部；下墙(第二道墙)的最大主应力为5.88 MPa，发生在中部单元的底

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

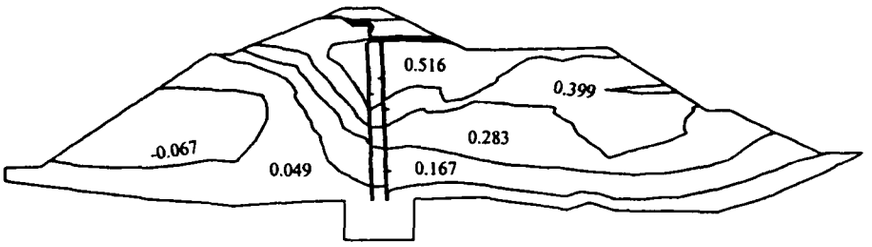

图13 堰体水平位移等值线图

Fig.13　Isoline curve of horizontal displacement for cofferdam

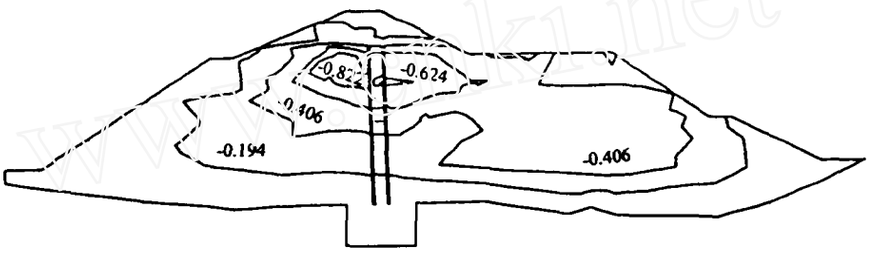

图14 堰体垂直位移等值线

Fig.14　Isoline curve of vertical displacement for cofferdam

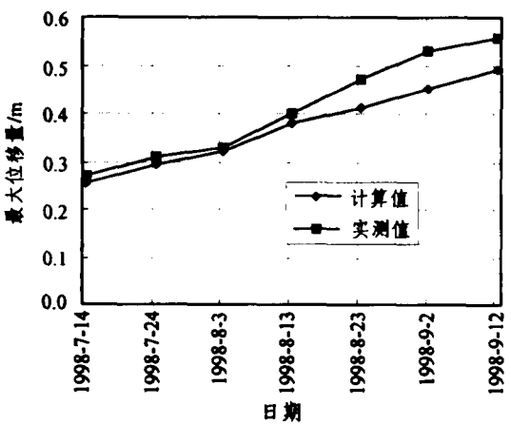

图 15　墙体的最大位移随时间的过程线图

Fig.15　Maximum displacement process curve of the cutoff wall with time

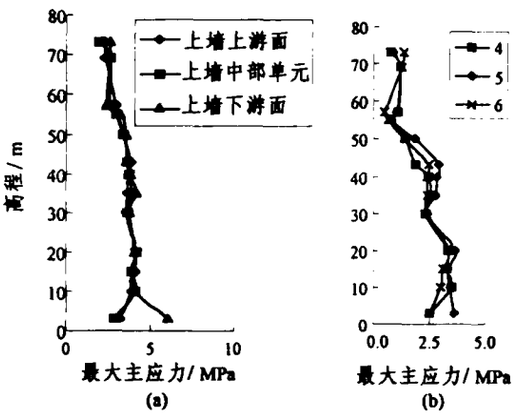

图 16　墙体的最大主应力随高程的分布

Fig.16　Distribution of major principal stress with altitude

部，最大拉应力为1.33 MPa，也发生在墙体的中部单元底部。由图可见墙体的应力水平总体<1，有个别单元应力水平>1，不足以影响墙体的稳定性。由计算说明围堰是安全的。

5　结　论

通过参数的敏感性分析，选择对墙体变位灵敏的参数作为反分析参数。采用最优化理论与有限元程序编制反分析程序，进行参数的优化计算，确定出最适宜参数。用反分析确定的参数对围堰进行应力变形分析，计算结果与实际规律非常吻合，说明当材料参数精度较高时，用Duncan-Chang E-μ 模型对围堰大坝进行计算有很好的精度。因此，正确确定堰体材料的Duncan模型参数对于围堰的计算有着重要意义。另一方面也说明，采用最优化理论进行参数反分析非

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

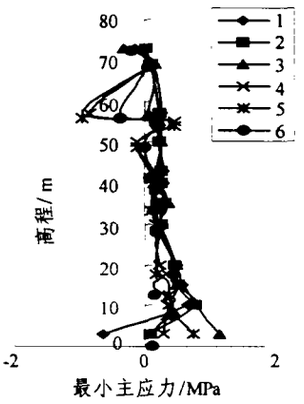

图17　墙体的最小主应力随高程的分布

Fig.17　Distribution of minor principal stress for the wall with altitude

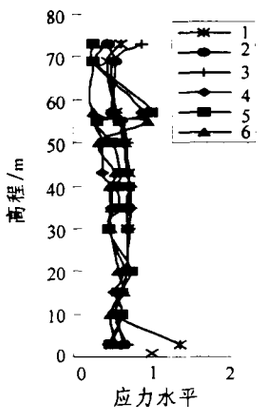

图18　墙体的应力水平随高程的分布

Fig.18　Distribution of stress level for the wall with altitude

常有效，编制的反分析程序对于一般的围堰大坝的反分析具有一定的实用意义。

参 考 文 献

1　包承纲. 三峡围堰建设中若干关键技术问题的解决[J]. 中国三峡建设，1999，(5)：32～36

2　张小平，包承纲，张劲松等. 三峡工程二期围堰防渗墙变形规律及运行状况分析[J]. 水利学报，2000，(9)：91～95

3　熊巨华，杨　敏. 深基坑围护结构的参数敏感性分析[A]. 见：陆培炎，史永胜主编. 第 6 届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集[C]. 广州：广东科学技术出版社，1998

4　张小平. 柔性混凝土和岩土轻质材料的特性与工程应用的研究[博士学位论文][D]. 南京：河海大学，2000

BACK ANALYSIS ON THE MATERIAL PARAMETERS OF THE SECOND STAGE COFFERDAM IN THE THREE GORGES PROJECT

Zhang Xiaoping[1],　Bao Chenggang[2],　Shi Bin[1]

([1]*Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing*　210093　*China*)

([2]*Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan*　430010　*China*)

Abstract　The second stage cofferdam is one of the most important engineerings of the water conservancy construction in the Three Gorges Project. On the basis of the monitoring data, the sensitivity of material parameters of cofferdam is analyzed. The sensitive parameter to displacement of the cutoff wall can be selected as the parameters for back analysis. According to the tests, the ranges of parameter are confirmed. By use of optimum theory and finite element method, the back analysis program is developed, and the optimum parameter is found. Then, the stress and displacement of the cofferdam are computed and analyzed with the parameters. The results show that the cofferdam is safe in running state, and the computed results accord with monitoring data very well.

Key words　the second stage cofferdam in the Three Gorges Projects, sensitivity of parameter, optimum theory, back analysis

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net