

# 修正 D—P 模型在三峡二期围堰分析中的应用

沈细中<sup>1,2,3</sup>, 张俊霞<sup>1,2</sup>, 兰 雁<sup>1,2</sup>, 冯夏庭<sup>3</sup>

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003 shenx007@163.com; 2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 郑州 450003 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩石力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 为了考虑中主应力及材料剪胀性的影响, 并验证堰体填筑材料参数, 运用遗传神经网络对堰体填料进行参数反演, 引入修正 D—P 模型进行围堰施工模拟. 修正 D—P 模型采用非相适应的流动法则, 可以模拟材料的各向同性硬化/软化及中主应力的影响, 并可以考虑流变; 遗传神经网络具有很强的非线性映射能力及全局优化功能. 在运用遗传神经网络对堰体材料进行参数反演的基础上, 利用修正 D—P 模型对三峡二期围堰填筑过程进行了模拟. 实例分析表明, 遗传神经网络能准确反演材料的力学参数; 修正 D—P 模型适合分析围堰材料的力学性能; 两者结合分析土石围堰时, 计算结果与实际情况相符. 修正 D—P 模型克服了 Duncan—Chang 模型不能模拟中主应力及材料剪胀性的缺点; 遗传神经网络反演参数可以使计算参数与实际情况更接近, 两者有机结合可提高分析精度.

**关键词:** 三峡工程; 围堰; D—P 模型; 有限单元法

**中图分类号:** TV642 **文献标识码:** A **文章编号:** 0367—6234(2009)06—0182—05

## Application of modified D—P model to analysis of the second stage cofferdam in Three Gorges Project

SHEN Xi zhong<sup>2,3</sup>, ZHANG Jun xia<sup>2</sup>, LAN Yan<sup>2</sup>, FENG Xia ting<sup>3</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research Yellow River Conservancy Commission Zhengzhou 450003 China shenx007@163.com; 2. Research Center on Levee Safety and Disaster Prevention Ministry of Water Resources Zhengzhou 450003 China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Institute of Rock and Soil Mechanics The Chinese Academy of Sciences Wuhan 430071, China)

**Abstract:** In order to consider the effect of intermediate principal stress and shearing—dilation of materials and verify the material parameters of cofferdam, parameters of the materials are analyzed in reverse based on artificial neural network with genetic arithmetic (GA—ANN). Construction simulation of cofferdam is carried out based on modified D—P model. Non-associated flow laws are used in D—P model so that the characteristic of materials to harden and/or soften isotropically and the effect of intermediate principal stress can be simulated and the creep characteristic of materials can be considered. The capability of GA—ANN is strong in non-linear mapping and optimizing in the whole field. After parameters of the materials are analyzed in reverse based on GA—ANN, filling process of the second stage cofferdam of Three Gorges Project is simulated based on modified D—P model. Analysis of an example shows that mechanics parameters of materials can be analyzed in reverse exactly and mechanics characteristic of materials can be simulated with modified D—P model. Moreover, the results of cofferdam construction of soil and rock simulated with two methods combined agree with those of the fact. In conclusion, without intermediate principal stress and shearing—dilation of material in Duncan—Chang model, these factors can be considered in modified D—P model and calculating parameters can be close to the practice with GA—ANN, thus analysis precision can be improved with the combination of the two methods.

**Key words:** Three Gorges Project; cofferdam; D—P model; finite element method (FEM)

收稿日期: 2006—05—20

作者简介: 沈细中 (1969—), 男, 高级工程师;

冯夏庭 (1964—), 男, 研究员, 博士生导师.

国内多所大学及科研机构<sup>[1]</sup>分析三峡二期

围堰时, 堰体及防渗墙的水平位移与沉降计算结果普遍偏小, 计算选用的材料参数可能与实际情况不符, 且 Duncan-Chang模型的双曲线关系不能模拟中主应力及材料剪胀性的影响. 修正 Drucker-Prager(简称: D-P)模型<sup>[2]</sup>采用非相适应的流动法则, 可以模拟材料的各向同性硬化、软化及中主应力的影响, 并可考虑材料的流变特性. 遗传神经网络<sup>[3,4]</sup>具有神经网络的非线性映射能力强及遗传算法的全局优化特性, 可用于率定材料的力学参数. 本文以三峡二期上游围堰为例, 在运用遗传神经网络对围堰材料进行参数反演的基础上, 利用修正 D-P模型对围堰填筑过程进行模拟, 从而论证修正 D-P模型分析围堰的可行性.

### 1 修正 D-P模型

#### 1.1 屈服准则

线性 D-P模型的屈服面为一直线, 如图 1, 其  $\pi$  平面上屈服面如图 2

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

$$t = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{K} - \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \left( \frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (2)$$

式中:  $p$  为平均正应力,  $p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ ;  $q$  为广义剪应力;  $\beta$  为线性屈服面的斜率, 即子午面 ( $p-t$  面) 上的摩擦角;  $d$  为子午面上的内聚力;  $K$  为材料参数, 决定中主应力的比例系数,  $0.778 \leq K \leq 1$ . 当  $K=1$  时,  $t=d$ , 不考虑偏应力张量的第三不变量的影响;  $r$  为偏应力张量的第三不变量,  $r = \frac{1}{3} \sqrt{S_1 S_2 S_3}$  其中  $S_1, S_2, S_3$  为偏主应力.

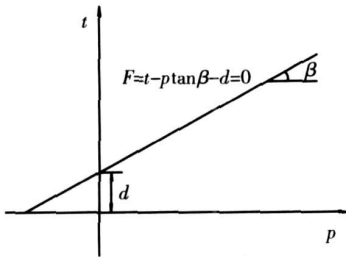


图 1 线性模型在子午面上的屈服面

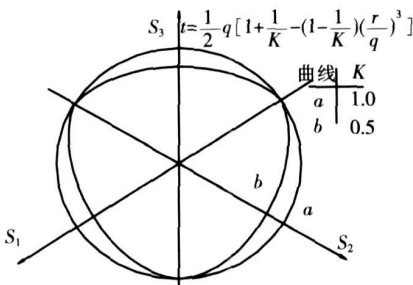


图 2 线性模型在偏平面上的屈服面

#### 1.2 塑性流动

$$G = t - p \tan \psi \quad (3)$$

式中:  $\psi$  为子午面上的膨胀角, 一般  $\psi < \beta$ ; 当  $\psi = \beta$  时为相适应的流动法则, 原始的 D-P模型即为  $\psi = \beta, K=1$ ; 当  $\psi = 0$  时, 为不可压缩材料; 当  $\psi \geq 0$  时, 为可膨胀材料.

#### 1.3 蠕变

##### 1.3.1 等效蠕变面及等效蠕变应力

采用等效蠕变应力  $\bar{\sigma}^{cr}$  来定义蠕变的“程度”. 当以轴向压缩应力定义蠕变时,  $\bar{\sigma}^{cr} = (q - p \tan \beta) \left\{ 1 - \frac{1}{3} \tan \beta \right\}$ ; 当以轴向拉伸应力定义蠕变时,  $\bar{\sigma}^{cr} = \frac{(q - p \tan \beta)}{1 + \frac{1}{3} \tan \beta}$ ; 当以子午面上的内聚力定义蠕变时,  $\bar{\sigma}^{cr} = q - p \tan \beta$ .

##### 1.3.2 蠕变流动

对线性屈服面而言, 其蠕变流动可定义如下

$$G^{cr} = \sqrt{\left( \epsilon \left| \bar{\sigma} \right|_0 \tan \psi \right)^2 + d - p \tan \psi} \quad (4)$$

式中:  $\epsilon$  为定义离心率的参数;  $\left| \bar{\sigma} \right|_0$  为初始屈服应力;  $G^{cr}$  为蠕应变率.

##### 1.3.3 蠕变定律

一般蠕变定律主要有时间硬化、应变硬化等, 其中时间硬化定律如下

$$\dot{\epsilon}^{cr} = A (\bar{\sigma}^{cr})^n \bar{t}^m \quad (5)$$

式中:  $\dot{\epsilon}^{cr}$  为等效蠕应变率;  $\bar{\sigma}^{cr}$  为等效蠕变应力;  $\bar{t}$  为整个时间;  $A, m, n$  为材料的蠕变特性参数.

#### 1.4 修正 D-P模型的 ABAQUS实现

在 ABAQUS软件中, 材料采用修正 D-P模型时, 当不考虑材料的流变特性时, 需定义 6 个参数, 即  $\rho$  (密度)、 $E$  (弹性模量)、 $\mu$  (泊松比)、 $d$  (内聚力)、 $\beta$  (内摩擦角)、 $\psi$  (膨胀角); 当考虑材料的流变特性时, 如采用时间硬化定律, 则需另外定义 3 个参数, 即  $A, m, n$ .

### 2 基于遗传神经网络的参数反分析模型

#### 2.1 参数反分析模型

待反演的岩土力学参数与某物理量 (如位移、水头、应力等) 之间的非线性关系可用并行分布式神经网络  $ANN(p, h_1, \dots, h_n, m)$  来描述<sup>[3]</sup>:

$$\begin{cases} ANN(p, h_1, \dots, h_n, m): R^p \rightarrow R^m \\ D = ANN(p, h_1, \dots, h_n, m)(P) \\ P = (P_1, P_2, \dots, P_n) \\ D = (d_1, d_2, \dots, d_m) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_i (i=1, 2, \dots, m)$  为第  $i$  个待反演的参数;  $d_j (j=1, 2, \dots, m)$  为第  $j$  个物理量;  $D$  为神经网络的输入;  $P$  为神经网络的输出;  $n_1, n_2, \dots, n_m$  分别为输入层  $F_0$ 、隐含层  $F_1$ 、隐含层  $F_p$  和输出层  $F_m$  的节点数.

### 2.2 参数反分析目标函数

可定义目标函数如下

$$F(P) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^k (ANN_{ij}(P) - u_{ij})^2 \quad (7)$$

式中:  $P$  为一组待求的参数;  $ANN_{ij}(P)$  为第  $i$  个量测点上某分量的神经网络计算值, 神经网络基本原理可参见文献 [5];  $u_{ij}$  为相应点的实测值;  $q$  为某物理量量测点总数;  $k$  为某物理量的分量数,  $k \times q = m$ .

### 2.3 参数反分析计算方法

参数反分析可分为 2 步进行. 首先根据正交试验方法设计有限元计算样本, 利用有限元计算样本 (经过样本数据预处理后) 对遗传神经网络进行训练与检验, 获取最优网络结构; 其次利用遗传神经网络参数反分析模型, 反演出材料的力学系数. 参数反演完成后, 可将反演所得参数代入  $D-P$  模型进行有限元正分析计算.

## 3 三峡二期上游围堰实例分析

### 3.1 工程概况

长江三峡二期围堰<sup>[1]</sup>是三峡工程最重要的临时建筑物之一, 二期围堰平面布置为突向迎水面的折线方案, 上下游围堰与纵向围堰共同形成基坑. 上游围堰约含 20 m 厚的覆盖层和新淤砂, 采用低塑性混凝土防渗墙接土工膜心墙, 在河床深槽段设两道防渗墙, 两侧浅滩采用单道墙, 如图 3 (桩号 0+500). 堰体下部采用水中抛填施工, 堰体两侧为堆石体, 中间为风化砂, 堰顶高程 88.5 m.

### 3.2 计算模型与参数

#### 3.2.1 计算模型

因修正  $D-P$  模型可采用非相适应的流动法则, 可用于分析砂土材料, 本例中堰体材料采用修正  $D-P$  模型, 其计算网格如图 4. 计算模型的约束条件为: 堰基下边界约束  $Y$  方向位移, 堰基左右边界约束  $X$  方向的位移.

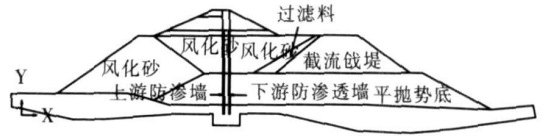


图 3 三峡二期上游围堰设计断面

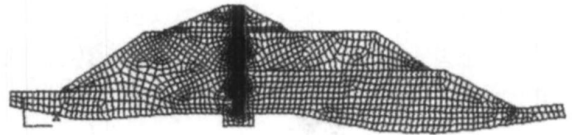


图 4 三峡二期上游围堰计算网格

#### 3.2.2 材料参数

计算墙体水平位移值时, 墙体高程 20~40 m 处的计算值比实际值明显偏小; 其它高程处, 计算误差较小<sup>[1]</sup>, 主要原因可能是 20~40 m 为平抛垫底层, 该层的实际填料参数比计算采用的参数可能要好, 导致计算出现了较大的误差. 因堰体材料复杂, 涉及参数较多, 多个单位计算表明<sup>[1]</sup>, 可能是风化砂 (水下)、石渣、堆石的实际参数与设计不符, 本处只对这三种材料及防渗墙的参数进行反分析. 其它材料参数选自文献 [1] 或比照类似工程指标选取, 如表 1. 计算参数施工模拟时, 建防渗墙前, 墙体位置先设土体单元, 从墙底直至心墙顶部, 两侧设接触单元, 其接触单元计算参数取土体与土体间作用参数, 摩擦系数为 0.78. 建墙后, 取土体与塑性混凝土之间作用参数, 摩擦系数为 0.35.

为减少计算量, 反演上述 4 种材料参数时, 除内聚力和膨胀角外, 对每种材料的其它 7 个参数进行反演. 利用上述遗传神经网络反分析模型进行分析<sup>[4,5]</sup>, 反演这 4 种材料参数如表 1.

表 1 三峡二期上游围堰计算参数

编号	材料名称	$\rho / (kg \cdot m^{-3})$	$E / MPa$	$\mu$	$d / kPa$	$\beta / (^\circ)$	$\psi / (^\circ)$	A	n	m
1	风化砂 (水上)	2010	54	0.30	0	43.3	30.3	3.0E-19	3.0	0.5
2	风化砂 (水下)	2100	35	0.29	0	42.0	30.0	3.7E-19	3.3	1.2
3	堆石	2274	1500	0.26	0	44.7		5.5E-23	5.7	5.2
4	覆盖层	2310	800	0.25	0	45.9		6.0E-22	2.3	3.4
5	砂卵石	2250	1200	0.25	0	43.3		4.0E-20	3.6	-0.7
6	新淤砂	2010	200	0.30	28	44.5	31.5	9.0E-19	3.5	0.7
7	反滤料	2070	500	0.25	0	44.5		3.0E-21	1.3	0.5
8	石渣	2289	900	0.24	135	43.0		6.2E-23	1.7	2.9
9	强风化基岩	2400	500	0.25	339	48.6		3.0E-22	3.1	2.7
10	弱风化基岩	2550	8000	0.20	1020	50.5				
11	塑性混凝土	2174	800	0.20	723	41.2		7.0E-24	2.4	0.7

### 3.2.3 计算工况

根据三峡二期围堰实际施工情况, 按如下工况进行分析<sup>[1]</sup>: 抛填下游堆石截流体至 69 m; 抛填过渡料至 69 m; 抛填风化砂及右上角石渣至 69 m; 抛填上游坡堆石至 69 m; 水上碾压至

73 m; 在 73 m 平台建上游防渗墙; 碾压填筑子堤至 83.5 m; 基坑抽水, 上游水位由 69 m 升至 75 m; 下游水位由 69 m 降至 40 m; 在 73 m 平台面建下游防渗墙; 碾压填筑至围堰顶 88.5 m; 基坑抽水, 上游水位从 75 m 升至 85 m; 下游水位从 40 m 降至 0 m; 围堰进入运行期。

分析时完全模拟上述施工过程<sup>[6]</sup>, 研究围堰碾压填筑至顶高 (88.5 m) 且基坑抽水结束时的堰体及防渗墙的应力变形规律, 并根据围堰监测情况<sup>[7]</sup>, 分析其它特定工况。

### 3.3 计算成果及分析<sup>[7]</sup>

#### 3.3.1 堰体的位移与应力

在正常蓄水位高程 85 m 和基坑水已抽干情况下, 堰体的水平位移和垂直位移等值线分别绘于图 5、图 6 相应的大小主应力情况如图 7、图 8。

由图 5、图 6 可知, 堰体在库水压力作用下, 变形趋势主要是向下游, 堰体的最大位移和沉降分别为 0.67 m、1.59 m, 均发生在 2/3 堰高处, 其变形规律是合理的。由图 7、图 8 可知, 堰体大小主应力的最大值分别为 1.28 MPa、0.51 MPa, 均发生在堰体下部靠近下游墙的部位, 与一般土石坝的应力分布规律是一致的, 说明修正 D-P 模型可用于分析土石坝及围堰。

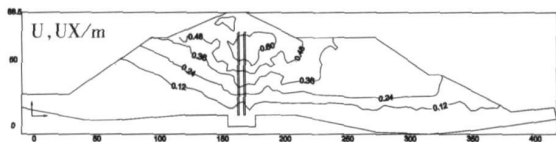


图 5 堰体水平位移等值线

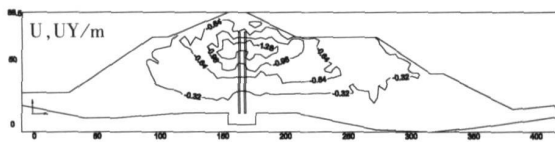


图 6 堰体垂直位移等值线

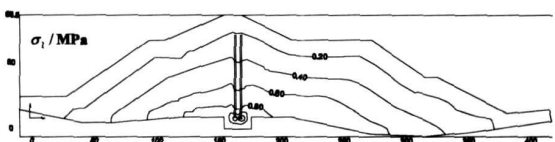


图 7 堰体垂直位移等值线

#### 3.3.2 防渗墙的位移和应力

##### (1) 双墙承担水头

当围堰挡水达到设计正常蓄水位高程 85 m

时, 墙间水位在高程 28 ~ 57 m 变化, 基坑抽水至 10 m 0 m 时, 计算上游墙的最大变位为 59.66 ~ 59.74 cm, 下游墙的变位约为 17 cm、18 cm。以 1999 年 7 月 20 日为例, 当上游水位为 77.54 m, 墙间水位实测为 67.74 m, 基坑水位为 25.96 m 时, 其计算值与实测墙体变位的分布曲线如图 9、图 10。计算可知上游墙最大变位为 59.67 cm, 实测变位为 58.71 cm, 最大值发生在高程 61.5 m 处, 表明在相近水位下, 计算值与实测值相近。

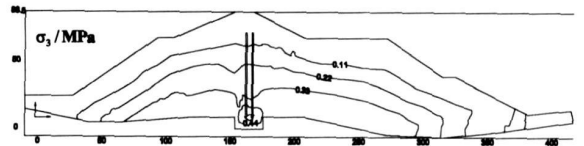


图 8 堰体小主应力等值线

##### (2) 防渗墙水平位移随时间变化规律

墙体的最大位移随时间变化的过程线如图 10。其时间是根据基坑抽水水位确定。由图 10 可知, 随着时间的变化, 墙体的变位随着水头的增加而增大, 计算所得的最大位移比实测位移偏小; 考虑围堰材料的流变特性时, 误差相对变小, 计算精度提高。

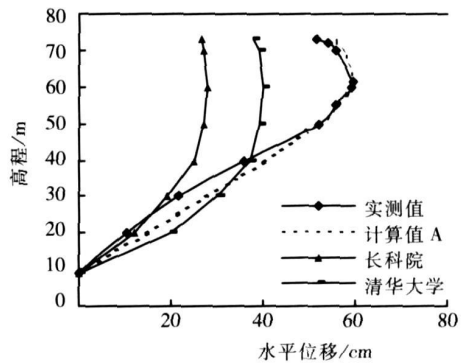


图 9 墙体变位实测值与计算值

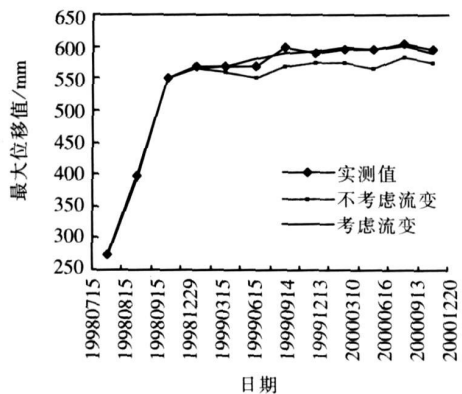


图 10 墙体的最大位移随时间变化过程线

##### (3) 防渗墙应力分布规律

当围堰挡水达到设计正常蓄水位高程 85 m

时, 墙间水位在高程 28 ~ 57 m 变化, 基坑抽水至

10 m 0 m时, 计算所得上下墙的最大主应力沿高程的分布如图 11. 上游墙的最大主应力为 5.18 MPa, 下游墙最大主应力为 4.25 MPa. 两墙所承担的荷载比较均匀, 上游墙承担的荷载稍大一些, 这是由于优化设计采用了先施工上墙后施工下墙的方案, 有利于改善墙体应力.

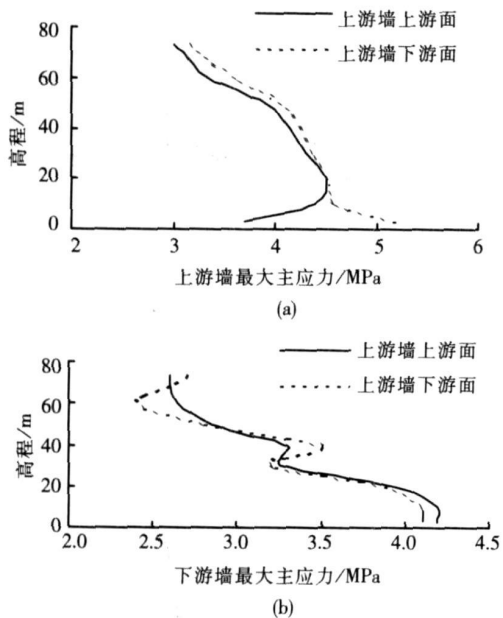


图 11 墙体最大主应力随高程的分布

#### 4 结论

1) 采用修正 D-P 模型分析三峡二期上游

围堰实例分析表明, 堰体及防渗墙的位移与应力与土石坝的基本规律一致. 计算结果与围堰的实际情况相符, 说明修正 D-P 模型可用于分析土石坝及围堰. 考虑堰体材料流变特性时, 更符合实际情况, 计算精度更高.

2) 基于遗传神经网络的参数反分析模型综合了神经网络的非线性映射能力强及遗传算法的全局优化特性, 对于精确率定材料参数, 提高有限元分析精度有较重要的作用.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 包承钢. 三峡工程二期深水围堰的建设和研究 [ J ]. 水利水电科技进展, 2001, 21(4): 21-25
- [ 2 ] Hibbit Karlsson Sorensen ABAQUS 6.2.2 Theory Manual [ R ]. Pawtucket, America ABAQUS Inc, 2001
- [ 3 ] 冯夏庭. 智能岩石力学引论 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2000
- [ 4 ] WANG L. A hybrid genetic algorithm— neural network strategy for simulation optimization [ J ]. Applied Mathematics and Computation, 2005(170): 1329-1343
- [ 5 ] 丛爽. 面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用 (第 2 版) [ M ]. 合肥: 中国科学技术出版社, 2003 45-73
- [ 6 ] 陈慧远. 土石坝有限元分析 [ M ]. 南京: 河海大学出版社, 1988 38-53
- [ 7 ] 长江水利委员会综合勘测局. 长江三峡水利枢纽二期上游土石围堰变形监测分析报告 [ R ]. 武汉: 长江水利委员会综合勘测局, 2000

(编辑 姚向红)