

堆石坝材料参数的灵敏度分析

恩戈科

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 对堆石坝材料参数的灵敏度进行了分析 , 计算了堆石料的静力本构模型 . 通过比较 , 选用邓肯 E-B 模型的材料参数进行灵敏度分析 . 利用有限元计算找出了 R_f, n, m, K, K_b 与沉陷变形的关系 . 计算时采用了变化某一个参数而固定其余参数的方法 . 计算分析得知主要参数的敏感性 .

关键词 堆石坝 ; 非线性参数 ; 灵敏度 ; 沉陷变形

中图号 TV641.4

混凝土面板堆石坝从 20 世纪 30 年代的抛填式面板堆石坝发展到 20 世纪 70 年代的碾压式面板堆石坝 , 这是筑坝史上的一个巨大突破 . 碾压式面板堆石坝具有工程量小、工期短、造价低、安全性高等优点 , 目前已成为坝型选择中的一种主要方案 . 按库克(Cook J. B.)对面板堆石坝发展阶段的划分 , 从 1965 年开始 , 面板堆石坝的发展进入了现代阶段 . 其特点是采用大型振动碾压 , 使用的石场爆破石料一般不需要挑选 , 可全部上坝 . 面板只设竖向伸缩接缝和周边缝 , 不设水平伸缩接缝 . 由于堆石体碾压很密实 , 变形减小 , 面板一般不易出现裂缝 . 随着 70 年代以 Cethana(高 110m) , Anchicaya(高 140m) , Golilla(高 127m) , Areia(高 160m) 为代表的百米级高面板坝的建成和运行 , 世界面板坝的设计和施工上了一个新的台阶 , 各国已广泛采用 . 但存在以下两个问题 (a) 构成面板坝堆石体的材料特性 , 目前人们尚无彻底掌握 (b) 要在计算中反映材料的所有特性将使单元特性变得过分复杂 , 不便于应用 . 因此 , 目前面板坝的设计还处于半经验性阶段 , 理论研究颇感不足 . 中国建成的有关门山、成屏、西北口面板堆石坝等 10 余座 , 此外在建的有 180m 高的南盘江天生桥一级水电站面板堆石坝等 .

面板堆石坝材料性能十分复杂 , 且面板堆石坝合理和正确的分析方法至今还没有从理论上得到很好的解决 , 所以有必要对堆石体本构关系进行探讨 . 为此 , 本文对堆石体材料的主要参数进行了灵敏度分析 .

1 堆石体材料的本构关系

在堆石坝的数值分析中必须考虑堆石料的力学性能 , 其中堆石体本构关系的模型对混凝土面板堆石坝的非线性分析有重大影响 . 堆石体的本构关系主要表达堆石体应力应变之间的关系 . 在建立堆石体的本构关系时往往基于已有的理论模型 , 再针对堆石的力学特性确定甚至适当调整本构关系中各种材料的参数 . 已有的理论模型主要有弹性理论模型、非线性弹性理论模型、弹塑性理论模型等 .

要将堆石料作为不连续的颗粒体处理是很困难的 , 目前尚无这方面比较成熟的理论与处理方法 , 而一般仍是依照连续体的处理方法尽量设法反映出堆石料的主要特性 , 因此 , 本文将堆石料作为非线性弹性体或弹塑性体来处理 .

1.1 弹性非线性模型

1.1.1 邓肯-张 E- ν 模型

该模型目前虽在土坝非线性力学分析中得到广泛的应用 , 但在面板堆石坝非线性力学分析中一般采用 E-B 模型 .

1.1.2 邓肯 E-B 模型

Kondner 等人为说明土、砂的非线性应力应变特性 , 采用了一个方便而实用的表达式

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon_a R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}} \tag{1}$$

式中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ——试样破坏时的主应力差 ; ε_a ——轴向应变 ; E_i ——初始切线模量 ; σ_1, σ_3 ——最大和最小主应力 ; R_f ——破坏比 ,是破坏时主应力差与应力应变双曲线的渐近线的纵坐标值的比值 ,即 $R_f = b(\sigma_1 - \sigma_3)_f$

$$= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \text{ 按摩尔-库仑准则}$$
$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = (2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi)(1 - \sin \varphi) \tag{2}$$

式中 c, φ 分别为土的凝聚力与内摩擦角.

根据 Janbu 的试验研究 ,初始切线模量 E_i 与固结压力之间的关系可表示为

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \tag{3}$$

式中 : p_a ——大气压力 ; K, n ——待定的试验常数 ; K ——弹性模量系数 ; n ——弹性模量指数.

关于 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$,如果假定破坏时 σ_3 不变 ,则可用 Mohr Coulomb 破坏标准表示 ,即式 (2).

在加载情况下 ,邓肯等人根据 Kondner Janbu 等人的试验研究得到任一应力情况下切线模量的表达式为

$$E_t = \left[1 - \frac{R(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right] K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \tag{4}$$

在卸荷再加荷情况下 ,应力与应变接近直线关系 ,如图 1 所示 .这时弹性模量仅取决于周围压力 σ_3 而与 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 无关 ,其数值按下式计算 :

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_{ur}} \tag{5}$$

式中 : K_{ur} ——加载、卸荷再加荷时的弹性模量系数 ; n_{ur} ——加载、卸荷再加荷时的弹性模量指数.

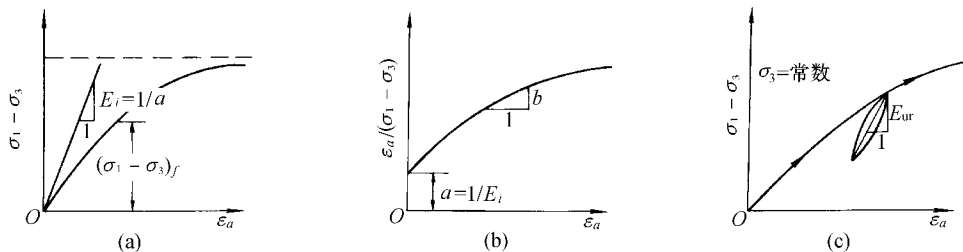


图 1 双曲线应力应变关系

Fig.1 Hyperbolic stress-strain relations

1980 年邓肯等人提出从三轴试验结果整理出切线体积模量 B_t ,由 B_t, E_t 作为参数进而求得 ν_t 的方法.

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \tag{6}$$

式中 : K_b, m ——待定试验常数 ; B ——体积模量系数 ; m ——体积模量指数.

引入切线体积模量系数 B_t 后 ,相当于假定土的泊松比为

$$\nu_t = \frac{1}{2} (1 - E_t / (3 B_t)) \tag{7}$$

计算中限制 B_t 值在 $\frac{E_t}{3} \sim 17 E_t$ 的范围内 ,即相当于 ν_t 在 $0 \sim 0.49$ 的范围内.

E-B 模型由于比较简单、直观 ,便于编制计算机程序 ,并已积累了相当多的实际工程应用的经验 ,目前被工程设计人员广泛采用 .但这个模型尚存在一些不足之处.

在土石坝的静力非线性有限元分析中 ,除了上述两个被广泛采用的模型外 ,还有内勒 K-G 等模型^[1].

1.2 弹塑性模型

堆石体的计算模型很多 ,每个模型都有各自的优缺点 .就土体静力模型而言 ,非线性弹性模型优于线弹性模型 ,弹塑性模型理论上又明显优于非线性弹性模型 .弹塑性模型可以反映土体各向异性的本构关系 ,但目前由于试验设备等问题 ,弹塑性模型中的某些参数值如 C_d, n_d, R_d 很难从试验中得到 ,现在还未进入工程实用阶段.

E- ν 和E-B模型仍是目前土石坝有限元分析中被广泛采用的模型.其主要原因是:这些模型能基本上反映土体或堆石体材料的物理特性,材料参数可通过现场试验或室内试验得到,计算方法也比较简单,等等. E-B模型对E- ν 模型进行了某些修改,使E-B模型能较好地模拟屈服后堆石体的变形性状. E-B模型计算结果与实测结果符合较好,所以我们选用E-B模型的材料参数进行灵敏度分析.

在讨论E-B模型的材料参数的灵敏度之前,我们先用该模型进行算例分析.

2 算 例

算例采用的为一100 m高的混凝土面板堆石坝,其底宽为205 m,坝段两端加轴向约束,相当于平面应变问题.

2.1 单元剖分和计算参数

单元剖分:面板顶厚0.3 m,底厚0.4 m,沿面板厚度方向剖一层单元,沿坝高度分20层,共剖分542个单元,结点数为571个.其中堆石体单元500个,面板单元20个,接触面单元20个,趾板单元1个,止水连接单元1个(图2).

根据有关资料整理得到的堆石体材料各个参数的变动范围如表1所示.

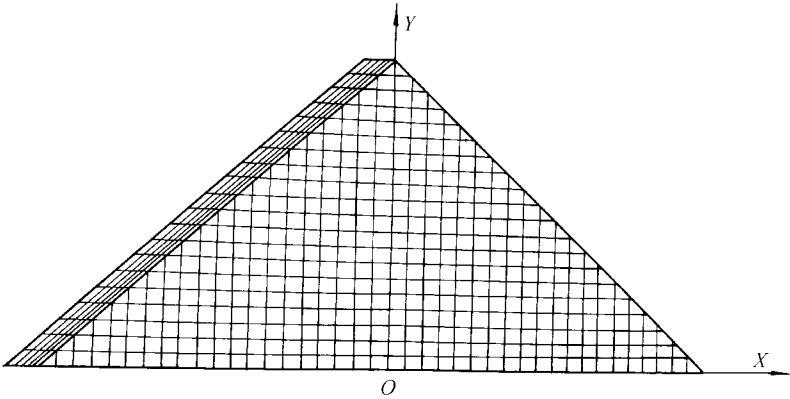


图2 二维单元网格剖分
Fig.2 Two dimensional element net section

表1 参数变化范围

Table 1 The variation limit of parameters

材料	γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	φ ($^{\circ}$)	c	R_f	K	n	K_b	m	u_{ur}	$\Delta\varphi$	K_{ur}
垫层	22.0	55.0~50.2	0.30~0.24	0.60~0.70	1000~10300	0.32~0.36	660~430	0.24~0.30	0.32~0.20	12.0~6.0	2100~2190
过渡层	22.0~21.5	55.0~52.3	0.30~0.21	0.60~0.72	1000~990	0.32~0.36	660~400	0.21~0.30	0.32~0.21	12.0~7.0	2100~2010
主堆石	21.5~21.2	54.0~53.0	0.30~0.20	0.66~0.84	1000~950	0.32~0.35	630~340	0.20~0.30	0.32~0.19	12.0~9.0	2100~1990
次堆石	22.0~20.2	53.0~52.0	0.40~0.10	0.77~0.79	900~720	0.50~0.30	500~340	0.10~0.40	0.50~0.15	10.7~10.0	1890~1550

计算中采用26级加荷方式.堆石体分20级填筑,每级高5 m;面板分两级浇筑,第一级从0~50 m,第二级从50~100 m;蓄水分4级,第一级从0~40 m,第二级从40~65 m,第三级从65~85 m,第四级从85~100 m.加荷级数分得较多,旨在使用中点增量算法.

混凝土面板和趾板采用线弹性模型, $E=18000\text{ MPa}$, $\nu=0.167$.

堆石体部分对应于E-B模型的计算参数见表1.

2.2 计算成果

首先我们取表1中左侧一组参数(简称高参数)和右侧一组参数(简称低参数),两种情况都考虑满库条件,从而计算坝体位移与应力.计算的主要成果列于表2.图3表示高参数时满库工况下坝体的位移、应力等值线.

表2 高、低参数情况下计算的主要成果

Table 2 Principal Results of high and low parameters

模型	参数	堆石体最大变位数值/cm			堆石体最大第一主应力数值/MPa
		上游水平向位移	下游水平向位移	铅直向位移	
E-B	高	-13.00	28.00	-49.30	1.999
	低	-33.65	7.00	-58.40	1.994

从表2中可知,高参数与低参数相比,低参数的铅直向位移和上游水平向位移高,分别高出18%左右和40%左右,而主应力值无明显差别.这表明,材料参数的变化对坝体位移的影响较大,但各参数的影响程度是不同的.本文对这一问题作一些探讨.

2.3 E-B模型材料参数的灵敏度分析^[2~4]

E-B模型需要用三轴试验测定 K , n , R_f , K_b , m ,

$c, \varphi_0, \Delta\varphi, K_{ur}, n_{ur}$ 10 个参数, 其中 K_{ur}, n_{ur} 两个参数主要用于卸荷再加荷的情况. 为了不使问题太复杂, 本文假定不考虑上述复杂变化的情况, 而只探讨连续加荷的过程. 这样 E-B 模型共选用了 7 个参数, 即 c, φ (或 $\Delta\varphi, \varphi_0$), R_f, K, K_b, n 和 m . 这 7 个参数值可根据实测曲线来确定. 它们的变化对计算成果都有不同程度的影响. 具体的影响难以用显式函数表示. 为了找出它们各自对计算成果(变形)的影响情况, 本文采用变化其中某一个参数而固定其余参数的方法进行讨论.

2.3.1 参数与位移关系

c, φ (或 $\Delta\varphi, \varphi_0$) 分别为土的凝聚力与内摩擦角. 它们是岩土力学中常用的参数, 其测试技术已成熟, 试验也相对容易并具有较高的精度, 不属于我们讨论的范围之内.

R_f 为破坏比, 定义 $R_f = b(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{极限}}}$ 其值一般在 0.5 ~ 0.9 的范围内. 从形式上看, R_f 并不复杂, 但如何确定 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 则较困难. 三轴试验规定, 当 $\epsilon_a = 15\%$ 时即认为破坏. 计算分析也表明, 当其他参数不变时, 随着 R_f 的增大, δ 增加较快, 如图 4 所示. 经曲线拟合, δ 与 R_f 的关系可用下式表示:

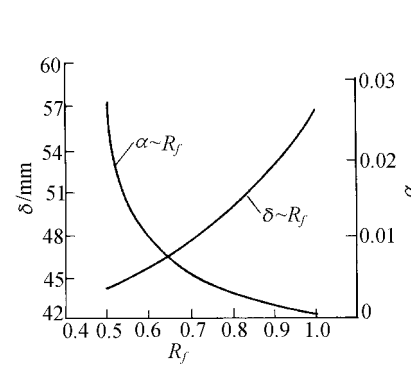
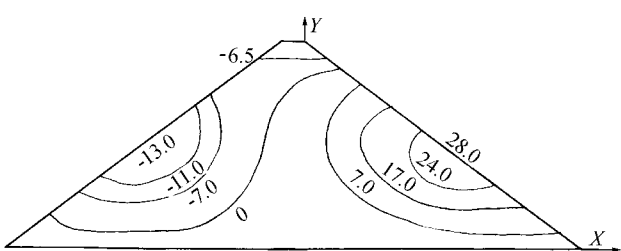


图 4 $\delta \sim R_f$ 和 $\alpha \sim R_f$ 曲线
Fig.4 $\delta \sim R_f, \alpha \sim R_f$ curve

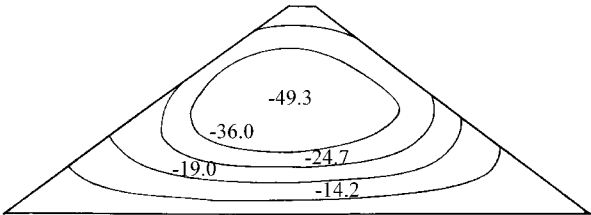
对式 (3) 两边取对数, 得
 $\log(E_i/p_a) = \log K + n \log(\sigma_3/p_a)$
当 $\frac{\sigma_3}{p_a} = 1$ 时, $\frac{E_i}{p_a} = K$, 故可以根据图 5 (a) 中之线定出 K 值, 该线斜率即为 n .

$$n = \frac{\partial \log(E_i/p_a)}{\partial \log(\sigma_3/p_a)} \tag{10}$$

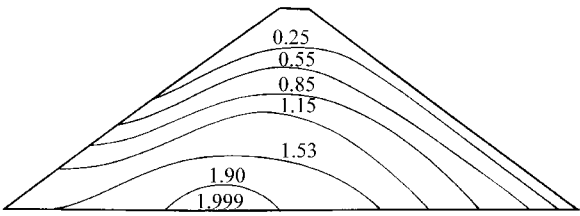
对式 (6) 两边取对数, 得



(a) 堆石体上、下游水水平位移(单位: cm)



(b) 堆石体铅直向位移(单位: cm)



(c) 堆石体第一主应力等值线(单位: MPa)

图 3 满库时高参数坝体等值线

Fig.3 Dam isopleth for high parameter in full water case

$$\delta = 42.5904 + 15.9895 R_f^3 \tag{8}$$

式中 δ 为考察点的沉陷量, mm.
该式是根据原型观测资料得到的.

式 (8) 曲线的曲率
$$\alpha = \frac{\delta''}{[1 + \delta'^2]^{3/2}} = \frac{95.937 R_f}{(1 + 2301 R_f^4)^{3/2}} \tag{9}$$

考察 α 的变化, 可以看出: α 随 R_f 呈单调减小, $\delta \sim R_f$ 曲线与 $\alpha \sim R_f$ 曲线的交点 $R_f = 0.66$. 这表明, 当 $R_f < 0.66$ 时, R_f 的变化对 α 的影响灵敏度高, 而当 $R_f > 0.66$ 时, 影响灵敏度降低. 以 $R_f = 0.66$ 为分界点, 故这里取 $R_f = 0.66$.

关于 n, m 不能由试验直接测得, 但可以通过曲线图解转化得到. 其物理意义见图 5.

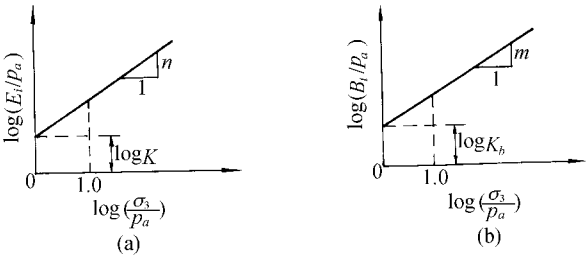


图 5 $\log(E_i/p_a) \sim \log(\sigma_3/p_a)$ 及 $\log(B_t/p_a) \sim \log(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线

Fig.5 $\log(E_i/p_a)$ vs. $\log(\sigma_3/p_a)$ and $\log(B_t/p_a)$ vs. $\log(\sigma_3/p_a)$

$$\log(B_t/p_a) = \log K_b + m \log(\sigma_3/p_a)$$

当 $(\sigma_3/p_a) = 1$ 时 $(B_t/p_a) = K_b$, 故可根据图 5(b) 中之线定出 K_b 值, 该线的斜率即为 m .

$$m = \frac{\partial \log(B_t/p_a)}{\partial \log(\sigma_3/p_a)} \tag{11}$$

n 为 $\log(E_i/p_a)$ 随 $\log(\sigma_3/p_a)$ 的变化率, m 为 $\log(B_t/p_a)$ 随 $\log(\sigma_3/p_a)$ 的变化率. $\log(E_i/p_a)$, $\log(B_t/p_a)$ 随 $\log(\sigma_3/p_a)$ 的变化反映了堆石材料的非线性特征. 在正常情况下, n, m 非负, 当固定其他参数时, 用上述算例算得 n 和考察点的沉陷量 δ 呈单调变化, 并随测点位置不同分别呈单调上升(上游侧垫层处)和单调下降(坝内点); m 和考察点的沉陷量 δ 的关系则不论测点位置在何处均呈单调下降.

关于 K, K_b , 它们是堆石体的两个重要参数, 对沉降变形的影响较大. 针对上述算例中一组参数确定时, 对不同的 K 值可以算出不同的 δ 值, 在 $\delta - K$ ($\beta = K/K_b$, 假设个数而定) 曲线上可以找到对应 δ_a 的 $K_1, \dots, K_n$. 根据假定的 n, m 值, $K_1, \dots, K_n$ 及其相应的 $K_{b1}, K_{b2}, \dots, K_{bn}$ 可绘制以 K 为横坐标、 K_b 为纵坐标的 $K \sim K_b$ 线, 如图 6 所示. 对不同的 n, m 组合, 可得到一簇 $K \sim K_b$ 线. 由图 6 可知, β 增大, $\frac{d\delta}{dK}$ 增大, 反之减小, 当 $K > 950$ 时 $\frac{d\delta}{dK}$ 变化甚小. $\delta = \delta_a$ 时, K 与 K_b 呈反比变化. 总的来说, K, K_b 对考察点的沉陷量 δ 均有较大影响, 但随着 β 的变化, 影响程度也发生变化. β 越大且 K 值越小时, 影响越明显.

图 6 中的 n, m 值为表 1 中左侧一组参数(即高参数)的值; β 的值是按 K_b 变化、 K 不变得出来的. 其中 K 取了主堆石高参数的值; δ 的值是根据算例按不同的 K 值得出来的, 其曲线是由计算点的值拟合画出来的.

2.3.2 算例分析

通过计算公式分析和计算经验等, 选取参数 m, K, n, K_b 进行灵敏度分析. 对上述 4 个参数的变化范围, 取表 1 中介于高低两个参数之间的两个值进行计算. 在具体分析计算时, 变化某一个参数的值, 而其他参数值都取表 1 中的高参数值.

- a. 第一种工况: m 改变, 计算参数列于表 3.
- b. 第二种工况: K 改变, 计算参数列于表 4.

表 3 参数 m 的计算值

Table 3 Calculated value of parameters m				
材 料	垫 层	过渡层	主堆石	次堆石
m_1	0.27	0.255	0.25	0.25
m_2	0.30	0.30	0.30	0.40

- c. 第三种工况: n 改变, 计算参数列于表 5.
- d. 第四种工况: K_b 改变, 计算参数列于表 6.

表 5 参数 n 的计算值

Table 5 Calculated value of parameters n				
材 料	垫 层	过渡层	主堆石	次堆石
n_1	0.337	0.34	0.33	0.402
n_2	0.355	0.36	0.35	0.303

表 4 参数 K 的计算值

Table 4 Calculated value of parameters K				
材 料	垫 层	过渡层	主堆石	次堆石
K_1	1015	995	975	810
K_2	1030	990	950	720

表 6 参数 K_b 的计算值

Table 6 Calculated value of parameters K_b				
材 料	垫 层	过渡层	主堆石	次堆石
K_{b1}	545	530	485	420
K_{b2}	430	400	340	340

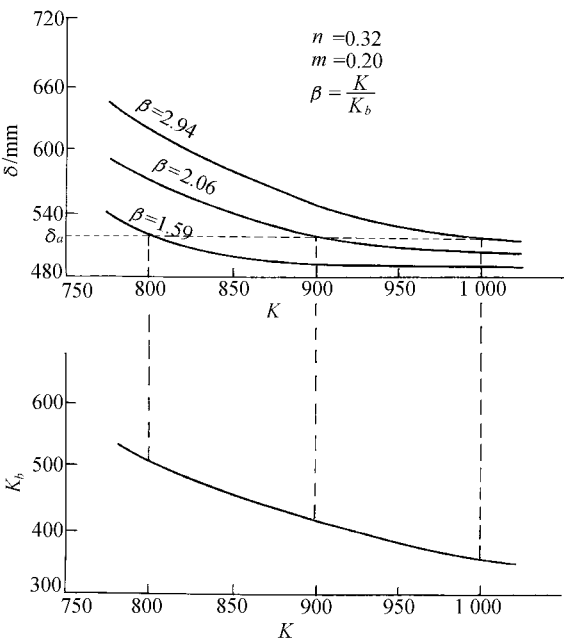


图 6 $K \sim K_b, K \sim \delta$ 关系曲线
Fig.6 K vs. K_b and K vs. δ

e. 四种工况坝体满库时位移、应力成果比较见表 7.

表 7 坝体主要计算成果

Table 7 Principal results of dam calculation

工 况	参 数	堆石体最大位移/cm			堆石体最大第一主应力数值/MPa
		上游水平向	下游水平向	铅直向	
I	m_1	- 22.04	18.82	- 53.28	1.997
	m_2	- 22.33	17.50	- 53.85	1.997
II	K_1	- 18.17	22.75	- 51.57	1.998
	K_2	- 20.75	20.13	- 52.71	1.997
III	n_1	- 25.91	14.87	- 54.99	1.996
	n_2	- 28.49	12.25	- 56.13	1.995
IV	K_{b1}	- 17.52	23.41	- 51.29	1.998
	K_{b2}	- 19.78	21.12	- 52.29	1.998

将表 7 中成果与表 2 高参数成果相比可知 第 I ,II ,III ,IV 种工况的最大上游位移和铅直位移有明显增大 ,前者分别为 18% ,15% ,30% 和 13% 左右 ,后者分别为 9% ,7% ,14% 和 6% 左右 ;最大下游位移有明显降低 ,分别为 37% ,28% ,56% 和 25% 左右 ;主应力值都无明显改变 .从以上 4 个参数的计算表明 ,参数的改变对位移影响较大 , n 敏感度最大 ,其次是 m ,然后是 K 和 K_b .

3 结 语

- a. 对现有各种数学模型要进行各种形式的检验和比较确定其正确性和适用范围后才能选用.
- b. 各类材料参数的变动范围必须适当选用 ,因其对成果有很大的影响 ,要通过试验测定和反演分析计算后选定.
- c. 对文中讨论的 4 个材料参数的灵敏度分析得知 ,参数 n 敏感度最大 ,其次是 m ,然后是 K 和 K_b .
- d. 对上述 4 个材料参数进行试验时应设法提高其精度 ,这可获得好的成果.

参 考 文 献

1 顾淦臣 ,黄金明.混凝土面板堆石坝的堆石本构模型与应力变形分析.水力发电学报 ,1991(1) :12 ~ 23
2 沈长松 ,顾淦臣.面板堆石坝参数反分析及变形规律探讨.河海大学学报 ,1996 ,24(6) :13 ~ 19
3 沈珠江.一个计算软土地基固结变形的弹塑性模式.见 沈珠江主编.第三届土力学及基础工程学术讨论会论文选集.北京 : 建筑工业出版社 ,1981.3 ~ 81
4 Lade P V ,Duncan J M.Elastoplastic stress strain theory for cohesionless soil.Proc ASCE JGTD ,1975 ,101(GT10)

Sensitivity Analysis of Parameters for Rockfill Dams

NGOKO

(College of Civil Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098)

Abstract A sensitivity analysis of parameters for rock fill dams is made.Static analysis models have been discussed. Through comparison ,Duncan E-B model is chosen to analyze the sensitivity of parameters.The relation among parameters R_f , n , m , K , K_b and settlement deformation is calculated by the finite element method ,by varying the data of one parameter and fixing the others.From analysis and calculations ,the sensitivity of all parameters is achieved.

Key words rockfill dams ;non linear parameter ;degree of sensitivity ;settlement deformation