

土石坝流变非线性分析

蔡 新 成 峰 杨建贵 徐瑞祥

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 采用流变学理论,选取 Maxwell 模型和 H-K 模型模拟土石料的流变特性,探讨土石料流变特性对土石坝应力、位移的影响.对梅溪混凝土面板堆石坝实例进行计算分析,结果表明考虑土石料的流变特性能更准确地反映土石坝施工期和运行期的实际工作性态.

关键词 土石坝,流变特性,非线性,有限元

中图号 TV642

土石坝是坝工中普遍采用的一种重要坝型,由土料和石料等散粒体材料组成,其承受的主要荷载为自重和水压力.目前,土石坝的设计仍处于经验阶段.土石坝结构分析一般仅考虑材料的弹塑性非线性性质.事实上,土石料的变形是一个相当复杂的过程,且与时间密切相关.土石料变形包括弹性、塑性、粘滞性三个分量,其本构关系可用流变模型来模拟.在考虑土石料非线性基础上,采用流变学理论,选取 Maxwell 模型及 H-K 模型模拟土石料的流变特性,并初步分析了土石料流变对土石坝应力、位移的影响.

1 土石料的流变模型

1.1 土石料的流变特性

土石料在荷载作用下将产生压缩.土石坝原型观测沉降线表明,土石料的压缩变形可分为两部分,一部分为加荷后立即产生,这是变形的主体部分;另一部分在较长的时间内持续发展,这种变形是目前越来越受到重视的不可忽略的部分,反映了土石料具有蠕变性质.因此可将土石料的压缩变形分为瞬时变形和蠕变变形.它们各自遵循着不同的变化规律,前者主要是由于颗粒的易位,使孔隙体积减小,土石料更加密实而引起的.后者则是由于应力转移,引起颗粒棱角局部破坏,造成整体体积减小而产生的.

土石料流变包括 (a)蠕变:即恒定应力条件下变形随时间增长;(b)松弛:变形恒定时应力随时间减小;(c)流动:给定时间的变形速率随应力变化;(d)长期强度随受荷历时变化.

1.2 土石料的流变模型^[1]

与所有连续介质一样,流变学的研究是从建立微分单元体的基本方程出发的,通过解这些方程求得应力、应变、位移等参量.

1.2.1 Maxwell 模型

一维情况此模型由一个弹模为 E 的弹性元件(H)和粘滞系数为 G_N 的粘性元件(N)串联而成.三维模型很难用形象化的物理元件表达,可利用一维的结果,采用类比方法直接推出.对于大多数工程材料可以认为体积应变是弹性的,没有塑性部分,也没有流变部分,所以涉及流变问题的 Hooke 定律只是其中偏张量部分.三维 Maxwell 模型为:

$$\text{流变方程} \quad \dot{e}_{ij} = \frac{\dot{S}_{ij}}{G_E} + \frac{\sigma_{ij}}{G_N} \quad (1)$$

$$\text{蠕变方程} \quad e_{ij} = \frac{S_{ij}}{2G_N}t + \frac{S_{ij}}{2G_N} \quad (2)$$

松弛方程
$$S_{ij} = 2 G_E e_{ij}^c \cdot e^{-\frac{G_E}{G_N} t} \tag{3}$$

式中： S_{ij} ——应力偏张量； e_{ij} ——应变偏张量； e_{ij}^c ——初始应变偏张量； G_E ——弹性元件的剪切模量； G_N ——粘滞性系数； t ——时间； σ_{ij} ——应力张量。

Maxwell 模型的特性有弹性变形、有蠕变、有松弛，而蠕变属于粘性流动而不是弹性后效，松弛以应力等于零为极限状态。

1.2.2 H-K 模型

一维情况 H-K 模型是由一个弹模为 E_H 的弹性元件 (H) 和 Kelvin 体串联而成，而 Kelvin 体是由一个弹模为 E_K 的弹性元件 (K) 和粘滞性系数为 G_N 的一个粘性元件并联而成的。

三维 H-K 模型为：

流变方程
$$\frac{G_N}{G_H + G_K} \dot{S}_{ij} + S_{ij} = \frac{2 G_K G_H}{G_K + G_H} e_{ij} + \frac{2 G_K G_N}{G_K + G_H} \dot{e}_{ij} \tag{4}$$

蠕变方程
$$e_{ij} = \left(\frac{1}{2 G_0} - \frac{1}{2 G_\infty} \right) S_{ij}^c e^{-\frac{G_K}{G_N} t} + \frac{1}{2 G_\infty} S_{ij}^c \tag{5}$$

松弛方程
$$S_{ij} = (2 G_0 - 2 G_\infty) e_{ij}^c e^{-\left(\frac{G_K + G_H}{G_N}\right) t} + 2 G_\infty e_{ij}^c \tag{6}$$

式中： S_{ij}^c ——初始应力偏张量； G_K ——弹性元件 (K) 的剪切模量； G_H ——弹性元件 H 的剪切模量； G_N ——粘滞性系数； G_0, G_∞ —— $t = 0, \infty$ 时的剪切模量。

H-K 模型的特性有弹性、有蠕变、又有松弛，而且蠕变不致无限变形，松弛不致到应力为零，这些特点能比较全面地反映出工程中的岩土特性。

2 土石坝流变非线性分析

土石坝施工是分层碾压逐步填筑的，按施工期的安排，以每层的施工时间作为时间增量或时间步长，坝体每层填筑的荷载用一次施加来模拟，在其作用下产生堆石体的弹塑性变形及弹塑性应力，再结合该层的时间步长，利用流变模型对应力、应变进行修正。修正后的单元应力和应变作为本级荷载下的应力和应变。用流变模型分析土石坝蓄水运行后，应力、位移随时间变化时，与施工期分析类似，把土石坝竣工后的应力应变作为初值，按分级蓄水的时间步长，分别计算各级水荷下的应力应变，再用流变模型分析得出该蓄水时段的应力应变状态，进而可确定土石坝在达正常蓄水位后的长期工作性态。

采用流变模型进行土石坝二维非线性有限元分析时，其平面应变问题的应力偏量及应变偏量由下式求得：

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \qquad \sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y) \tag{8}$$

$$e_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_x - \epsilon_m & \frac{1}{2} \gamma_{xy} \\ \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \epsilon_y - \epsilon_m \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\epsilon_m = \frac{1}{3}(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) \qquad \epsilon_z = 0 \tag{10}$$

由应力偏量和应变偏量反算应力张量和应变张量：

$$\sigma_x = \frac{(2 - \mu) S_{11} + (1 + \mu) S_{22}}{1 - 2\mu} \qquad \sigma_y = \frac{(2 - \mu) S_{22} + (1 + \mu) S_{11}}{1 - 2\mu} \qquad \tau_{xy} = S_{12}$$

则
$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{(2 - \mu) S_{11} + (1 + \mu) S_{22}}{1 - 2\mu} & S_{12} \\ S_{21} & \frac{(2 - \mu) S_{22} + (1 + \mu) S_{11}}{1 - 2\mu} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\epsilon_x = 2e_{11} + e_{22} \qquad \epsilon_y = 2e_{22} + e_{11} \qquad \gamma_{xy} = e_{12}$$

即

$$\boldsymbol{\epsilon}_{ij} = \begin{bmatrix} 2e_{11} + e_{22} & e_{12} \\ e_{21} & 2e_{22} + e_{11} \end{bmatrix} \qquad (12)$$

由上述分析可得土石坝流变非线性分析的步骤如下：

- a. 将施工期或蓄水期分成若干级(即若干时段),由本级荷载形成荷载增量 ΔR_i ,并进行非线性弹性分析: $K\Delta\delta = \Delta R_i$,其中 K 为整体劲度矩阵 $\Delta\delta$ 为位移;
- b. 由 $\Delta\delta$ 求本级的应变、应力增量 $\Delta\epsilon_i, \Delta\sigma_i$,并求得本级结束时的应力、应变状态: $\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta\sigma_i, \epsilon_i = \epsilon_{i-1} + \Delta\epsilon_i$;
- c. 将上述应力、应变按式(7)(9)转化成应力偏量和应变偏量;
- d. 用流变模型的蠕变方程 $e_{ij} = f(S_{ij}^c, \Delta t)$ 和松弛方程 $S_{ij} = g(e_{ij}^c, \Delta t)$ 如式(2)(3)或(5)(6))对应力和应变偏量进行修正;
- e. 再按式(11)(12)由 S_{ij} 和 e_{ij} 计算出应力张量和应变张量,此时所得的应力和应变即为本级结束时的应力和应变;
- f. 重复上述过程可得出土石坝在施工期和蓄水运行期各时刻应力、位移的工作性态.

3 工程算例

梅溪水库面板坝^[2]位于浙江鄞县境内.坝高 40 m,坝长 642 m,典型剖面(图 1)处坝基覆盖层为 26 m 厚的砂卵石,面板等厚为 0.35 m,趾板长 6 m,厚 0.58 m,防渗墙厚 0.8 m,深入基岩.

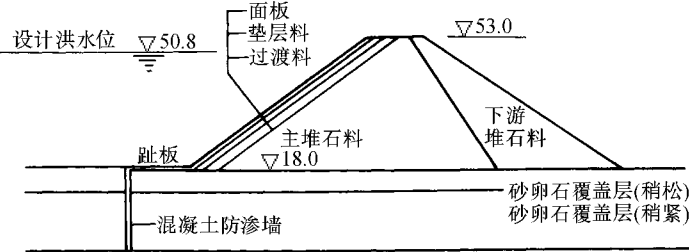


图 1 梅溪水库面板坝典型剖面图

Fig.1 Typical section diagram of Meixi concrete face rockfill dam

在 Duncan E- μ 非线性模型基础上考虑土石料的流变特性,计算参数见文献[2].流变模型中的参数选用罗马尼亚里苏坝土石料流变模型参数. Maxwell 模型: $E = 50 \text{ MPa}$, $G_N = 20 \text{ MPa}$; H-K 模型: $G_H = 58 \text{ MPa}$, $G_K = 40 \text{ MPa}$, $H = 20 \text{ MPa}$. 计算时将施工期和蓄水期共分 16 级,拟定每级半个月.

3.1 流变分析成果(限篇幅仅给出部分)

- a. 坝体部分典型单元应力见表 1.

表 1 竣工期应力比较

Table 1 Comparison of stress during completion

kPa

单元号	20		200		280		346	
主应力	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3
E- μ	627.10	393.54	98.72	46.10	550.83	183.82	152.28	52.94
Maxwell	600.76	376.13	95.68	44.21	535.01	177.90	149.44	52.28
H-K	605.93	350.64	87.46	40.88	501.88	163.24	138.28	48.36

- b. 坝体部分典型结点位移见表 2.

表 2 竣工期位移比较

Table 2 Comparison of displacement during completion

结点号 位移方向	10		50		113		230	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
E- μ	0.77	-0.66	1.37	-4.81	2.93	-1.45	4.18	-6.86
Maxwell	0.78	-0.65	1.38	-4.82	2.95	-1.45	4.21	-6.87
H-K	1.02	-0.78	1.93	-5.19	3.24	-1.96	4.87	-7.26

注 表中 X——上下游方向 ,Y——铅直方向 “-”表示铅直向下载移(沉降)。

c. 混凝土防渗墙的位移和应力分布见图 2 3。

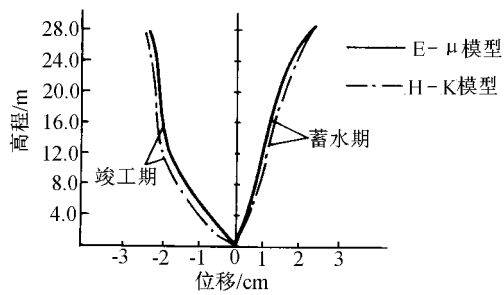


图 2 防渗墙 X 方向位移(“ - ”向上游 ; “ + ”向下游)

Fig.2 X direction displacement of diaphragm walls

(“ - ”upper-stream ; “ + ”down-stream)

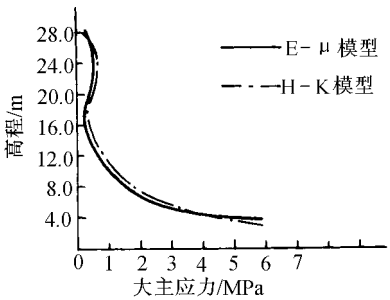


图 3 防渗墙大主应力

Fig.3 Major principal stress

of diaphragm walls

- d. 面板与趾板间周边接缝相对位移见表 3。
- e. 混凝土面板的位移与应力分布见图 4 5。

3.2 成果分析

- a. 考虑了土石料流变特性后 ,坝体应力减小 ,而位移增大 ,这与土石料流变现象中的松弛、蠕变规律相吻合。
- b. 考虑了土石料流变特性后 ,混凝土面板及混凝土趾板的变位增大 ,而其应力总体上也增大。这与混凝土弹性材料的应力应变规律是一致的。
- c. 考虑了土石料流变特性后 ,大坝在蓄水运行期混凝土面板与趾板间周边接缝的相对位移也逐渐增大 ,故在周边缝止水设计时须引起注意 ,以确保大坝运行期的安全。

表 3 周边接缝相对错动位移

Table 3 Relative displacement of periphery joints cm			
工况	E- μ	Maxwell	H-K
竣工期	0.412	0.425	0.443
蓄水期	0.457	0.464	0.470

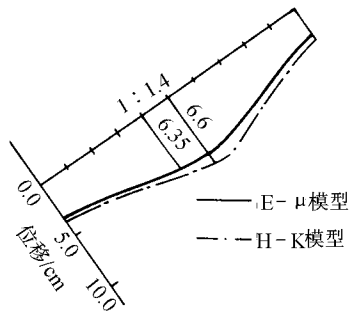


图 4 蓄水期面板法向位移分布

Fig.4 Normal displacement distribution

for face during reservoir filling

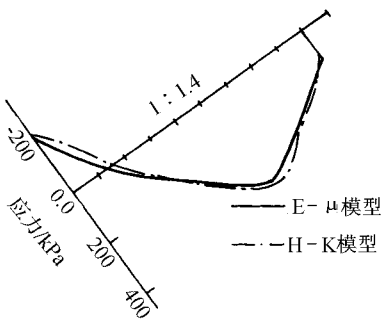


图 5 蓄水期面板顺坡向应力分布

Fig.5 Stress distribution for face along

slope during reservoir filling

4 结 束 语

考虑了土石料流变特性后,计算成果显示坝体位移随时间增大,使得混凝土面板和防渗墙的变位也相应增加,也使面板与防渗墙内出现较大拉应力,并使周边缝产生较大的错动位移,从而可能引起防渗结构的开裂及止水系统的失效、渗漏等问题。

流变特性是土石料的一个很重要性质,在土石坝非线性分析中不可忽视。考虑土石料的流变后更准确地反映了土石坝的实际工作性态,为土石坝设计、施工及坝建成后的运行和维护提供了有参考价值的依据。

用流变模型来表征土石料的流变特性,是从宏观角度分析土石料变形的弹性、塑性和蠕变的性质以及应力松弛现象,但本文采用的仅为较成熟简单的模型,如何选得更适合土石料的流变模型及其参数,以更准确地反映土石坝的工作性态,尚有待于更深入研究。

参 考 文 献

1 于学馥.现代工程岩土力学基础.北京:科学出版社,1995.182~193

2 郭兴文,王德信,蔡新.覆盖层上面板坝优化设计研究.河海大学学报,1998,26(4):53~58

Rheological Analysis of Earth-Rock Dams

Cai Xin Cheng Feng Yang Jiangui Xu Ruixiang
(College of Civil Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098)

Abstract On the basis of the rheologic theory ,the Maxwell model and the H-K model have been used to simulate the rheologic characteristics of rockfill materials ,and the effect of the rheologic property on the stress and displacement of rockfill dams is also discussed. Finally ,the Meixi concrete face rockfill dam is studied. The results show that the stress and displacement of the dam obtained are more reasonable when the rheologic property of rockfill material is considered.

Key words earth-rock dam ;rheologic characteristics ;nonlinearity ;FEM