

面板坝中堆石流变对面板应力变形的影响分析

王 勇¹, 殷宗泽²

(1. 广东省水电科研所岩土室, 广东 广州 510610 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 根据所选用的包括流变的堆石本构模型及其反分析所得的参数, 以 Cethana 坝为对象进行三维流变有限元计算, 从理论上分析了面板坝中堆石流变对面板的应力和变形的影响, 指出堆石的流变对面板的影响是趋于危险的, 这种影响是不能忽略的。

关键词 混凝土面板堆石坝 堆石流变 面板应力变形

中图分类号 :TV64 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2000)06-0060-06

目前, 工程师们对拟建混凝土面板堆石坝的设计在很大程度上是依靠经验, 并建立在经验和判断的基础上。根据每座新坝的特性对已有设计进行修改, 但对于拟建较高的混凝土面板堆石坝, 连这种经验也没有。在多座已建混凝土面板堆石坝的长期运行实践中, 坝体堆石的流变现象都比较明显, 由此对面板的应力和变形的影响也比较显著^[1~3]。因此对拟建高面板坝而言, 人们非常希望能在设计中计入堆石流变的影响。但由于堆石变形特性特别是长期变形特性比较复杂, 在理论上人们还未能很好地掌握堆石的流变特性及其对面板应力变形的影响规律, 因此目前在设计中如何准确合理地计入堆石的流变效应也还不得而知。

为能与实际观测结果进行对比, 本文以已有长期运行资料的澳大利亚的 Cethana 坝^[3~5]为依据, 在通过模型辨识以及引用神经网络等多种反分析技术准确确定包括流变在内的堆石本构模型及其参数的基础上, 从理论上详细分析了面板坝中堆石发生流变时面板的应力变形规律。

1 宏观上包括流变在内的堆石本构模型^[6]

根据堆石的流变宏观上表现为与土体极为相似的特点, 在土体流变研究成果特别是 Bjerrum L. 的时间概念模型^[7]的基础上, 结合堆石体的变形特性, 为反映坝体堆石的屈服行为和流变特性, 本文将椭圆-抛物双屈服面模型^[8]推广应用于模拟堆石体的瞬时弹塑性变形, 应用双曲函数经验公式模拟堆石体的粘塑性变形。

1.1 屈服准则

a. 与压缩相关的屈服准则

$$f_2 = p + \frac{q^2}{M_1^2(p + p_r)} = p_0(\epsilon_v^{p_2}, t) = \frac{h[\epsilon_v^{p_2} + \epsilon_v^i(t)]}{1 - D[\epsilon_v^{p_2} + \epsilon_v^i(t)]} \quad (1)$$

式中: p ——体积应力; q ——偏应力; M_1, p_r, h, D ——模型参数; $\epsilon_v^{p_2}, \epsilon_v^i(t)$ ——与屈服面 f_2 对应的瞬时塑性体积应变和粘塑性体积应变, 分别反映瞬时屈服与粘滞屈服对屈服面的影响; 在同一级荷载下体积蠕变与体积蠕变时间是一一对应的, 粘塑性体积应变 $\epsilon_v^i(t)$ 采用双曲函数经验公式描述。

b. 与膨胀有关的屈服准则

$$f_1 = \frac{aq}{G} \sqrt{\frac{q}{M_2(p + p_r)} - q} = q_0(\gamma^{p_1}, t) = \gamma^{p_1} + \gamma^i(t) \quad (2)$$

其中剪切模量

$$G = K_0 \left(\frac{p}{p_a} \right)^n$$

式中: a, M_2, K_0, n ——模型参数; $\gamma^{p_1}, \gamma^i(t)$ ——瞬时塑性偏应变和延滞粘塑性偏应变, 分别反映瞬时屈服与

粘滞屈服对硬化函数 q_0 的影响. $\gamma(t)$ 采用双曲函数经验公式描述. 同一级荷载下与蠕变时间 t 一一对应.

1.2 粘塑性变形的双曲函数经验公式

应变张量可分解为体积应变和偏应变：

$$\epsilon_{vt} = \frac{t}{\frac{1}{m_0} + \frac{t}{\epsilon_{vu}}} = \frac{m_0 \epsilon_{vu} t}{\epsilon_{vu} + m_0 t}$$

(3)

$$\gamma_t = \frac{t}{\frac{1}{m_1} + \frac{t}{\gamma_u}} = \frac{m_1 \gamma_u t}{\gamma_u + m_1 t}$$

(4)

式中： ϵ_{vt}, γ_t —— t 时刻蠕变引起的体积应变和偏应变； ϵ_{vu}, γ_u ——蠕变引起的最终体积应变和偏应变； m_0, m_1 ——体积应变和偏应变双曲线函数的初始斜率.

假定 $m_0 = m_1$,并引入关系式：

$$\epsilon_{vu} = b_0 \frac{p}{p_a}$$

(5)

$$\gamma_u = d_0 \frac{S_1}{1 - S_1}$$

(6)

式中： p ——体积应力； p_a ——大气压力； S_1 ——应力水平； b_0, d_0 ——待定系数. 由式(5)(6)可以看出 b_0 表示当体积应力 p 为一个大气压力时最终的体积蠕变量， d_0 表示当应力水平为 0.5 时最终的蠕变偏量.

2 堆石流变对面板应力变形的影响

2.1 面板坝流变计算的合理性分析

面板坝进行流变分析的主要目的在于探讨计入流变与否对面板的应力有多大影响,由于面板坝的流变分析从理论上说还不成熟,因此有必要将其计算结果与实测值及实测规律进行对比,以检验流变分析在理论上的合理性. 然后才谈得上与不计入流变的计算相比理论上会存在多大差别. 为此,将应用神经网络等技术反分析所得的参数(见表 1)^[6]用于具有长期观测记录 Cethana 坝的三维计算,其中周边缝和接触面的数学模型按现在通常的模型考虑,混凝土面板按线弹性单元计算. Cethana 坝的俯视图、典型断面及其观测设备的布置如图 1 所示. Cethana 坝达到满蓄水位以后的十余年时间里,库水位变化幅度在 215 ~ 223 m 高程之间,而且变化缓慢,因此这对于 110 m 高的坝来说可以忽略水位变化对面板应力和变形的影响,认为面板应力变化的变化主要由堆石的流变所致. 据此进行计算,图 2 为蓄水后坝体变形的计算值与实测值. 由图 2 可以看出,开始蓄水后坝体内 A、B 点的沉降拟合较好,对坝顶的沉降及下游向水平位移的拟合误差稍大,这主要是由于坝顶变形是整个坝体共同作用的结果,堆石本构模型及其参数的微小误差的综合作用的累积结果将使坝顶位移产生较大的误差. 不过总的来说坝顶变形的误差还是可以接受的. 同时整理出几个断面处面板变形如图 3 所示,面板应力分布如图 4 所示,面板坝轴向和顺坡向的最大压应力随时间的变化如图 5 所示(图 5 中坝轴向应力出现局部减小的“回弹”现象是由于过大的接触面变形导致破坏而进行应力修正的结果). 由于缺乏坝体每个剖面的详细资料,在最后整理结果时发现 7F 剖面处的面板在趾板端比实测挠度图上的结果要长,所以在这种误差作用下,由于趾板端对面板的固定作用,所得该断面面板在垂直面板方向的挠度的计算值比实测值大得多. 在 9F 剖面处随着上述误差的减小,面板挠度的计算值与实测值的差别也减小,在 12F 断面处两者比较接近,这在图 3(a)(b)(c)上比较明显. 由图 4(b)(c)可以看出面板顺坡向应力等值线的分布规律及其大小均与实测值比较接近,在坝轴向误差较大,其具体原因见后述分析,由图 5 面板应力最大值的变化规律与实测规律也比较相符. 因此所选用堆石模型及其反分析所得参数均比较合理,理论计算能够接受,可以在此基础上分析坝体堆石的流变对面板应力和变形的影响.

表 1 本文采用的模型参数

Table 1 Parameters of proposed model

φ	C	a	n	M_1	M_2	K_c	H	D	m_0	b_0	d_0
40.00	2.00	0.6	0.34	3.43	2.04	800	1600	10	0.5×10^{-5}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-3}

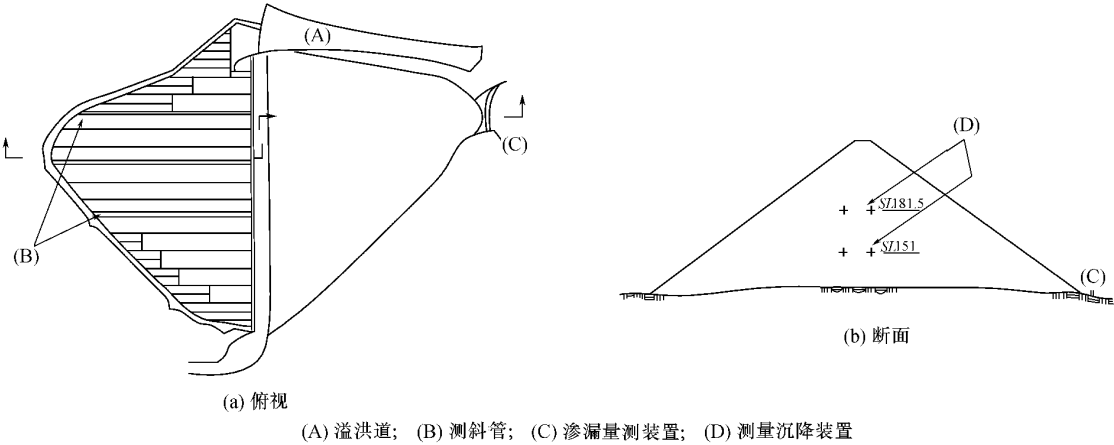


图 1 Cethana 坝^[5]

Fig.1 Cethana dam

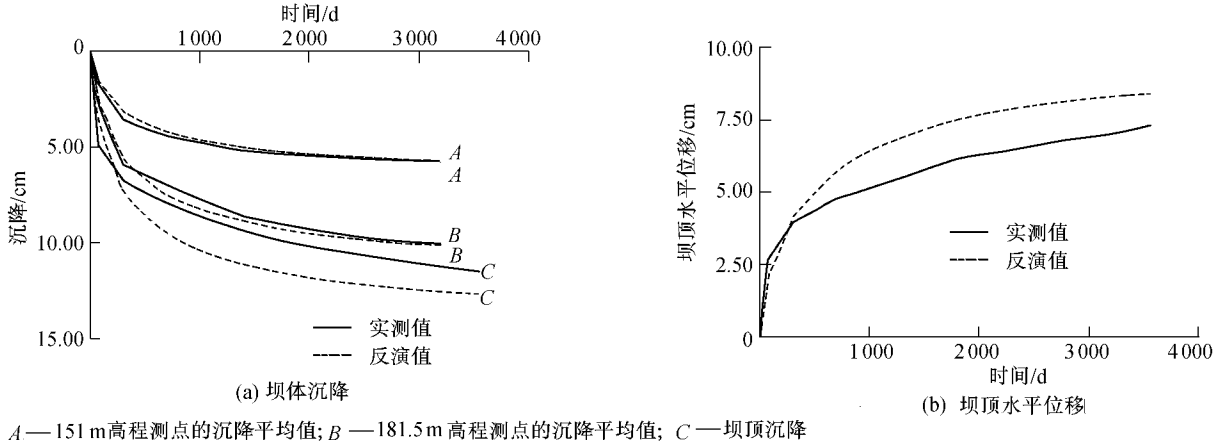


图 2 坝体变形

Fig.2 Deflection of dam body

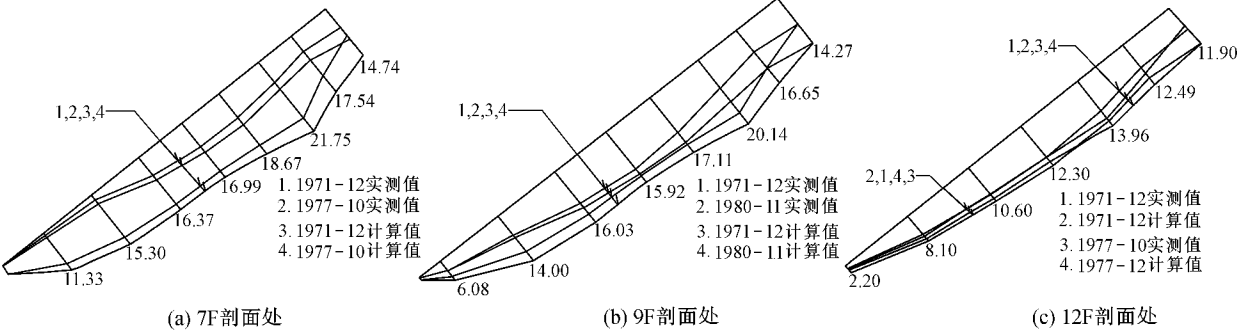


图 3 面板的挠度 (cm)

Fig.3 Deflection of face slab

2.2 计算中计入堆石流变与否对面板应力的影响

根据前述分析结果,采用同一组模型参数对 Cethana 坝进行不计入堆石流变的三维有限元分析,整理出达到满蓄水位后面板的应力等值线如图 6 所示,面板的挠度等值线如图 7 所示(同时整理出计入堆石流变时刚达到满蓄水位及满蓄 104 个月后面板的挠度等值线如图 8 所示,以作比较)。比较图 7 和图 8 可以看出,堆石的流变对面板应力分布的影响不大,但其量值上的差别却不能忽视;比较图 6 和图 4(a)(b)可知堆石流变对面板变形的分布和量值的影响均较大,其中计入堆石流变后的结果更为合理。两种情况下应力、变形最大值的比较如表 2 所示,由此不难看出堆石流变对面板应力变形在量值上的影响。这里结合计算结果分析堆

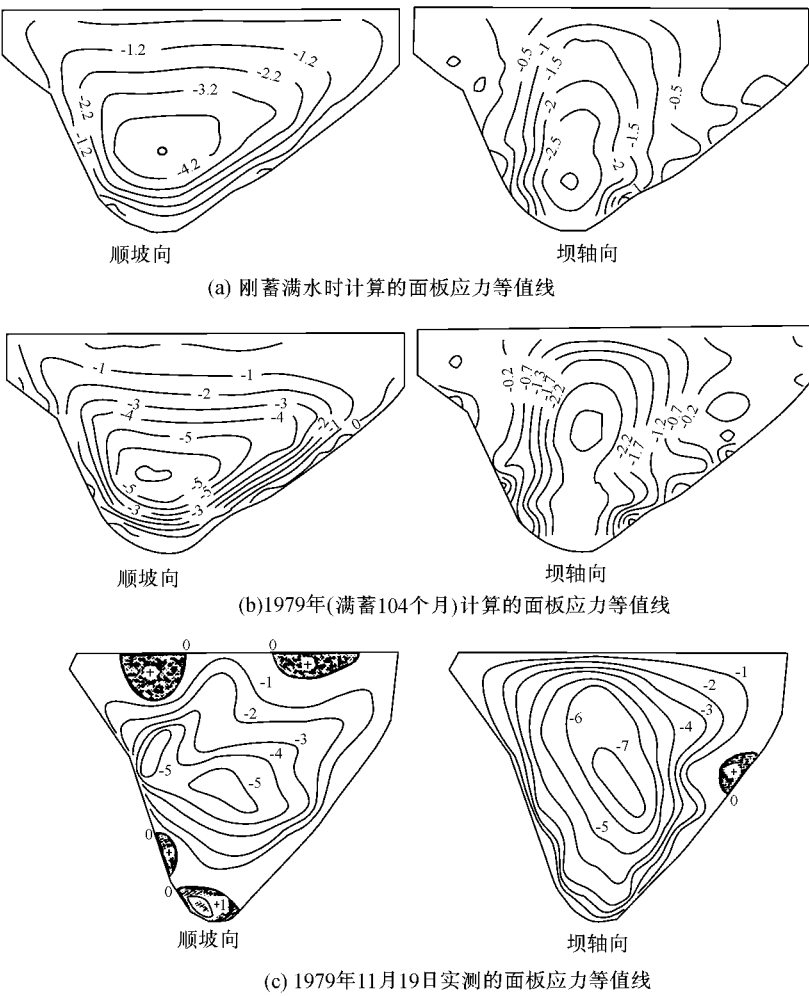


图 4 面板应力分布(MPa)

Fig.4 Stress distribution of face slab

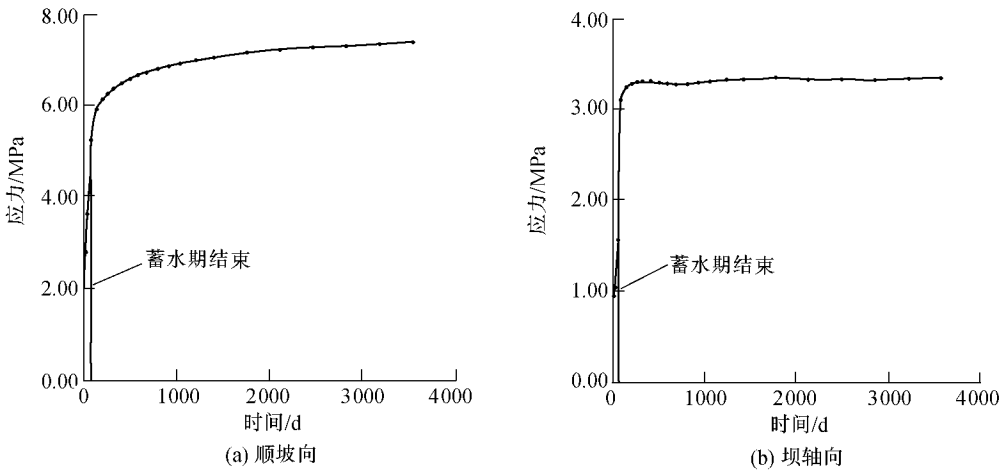


图 5 面板应力最大值随时间的变化

Fig.5 Maximum value of face slab stress vs. time

石流变对面板应力变形的影响规律如下。

a. 在荷载作用下,堆石的蠕变使面板在顺坡向和坝轴向均有总体受压的趋势,面板挠度的增加使其在坝轴向和顺坡向的长度增加,这样会引起面板在这两个方向上都有受拉的趋势(指面板中心平面),而且这种趋势对两个方向上应力的影响程度也不尽相同:由于坝顶自由,在坝坡方向面板可以被视为能够绕着趾板端

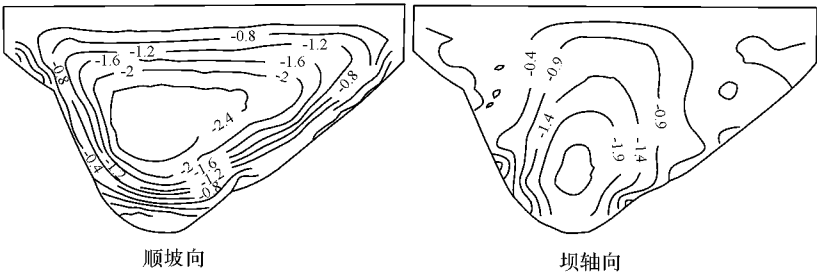


图6 不计入堆石流变达到满蓄水位时的面板应力(MPa)

Fig.6 Face slab stress at maximum water level without considering rheology

“转动”,因此,挠度引起拉应力的趋势较小,而在坝轴向,由于面板可视为两端固定,因此挠度产生的拉应力趋势将比坝坡向明显。

b. 在水库蓄水刚刚结束的一段时间里,堆石的蠕变速率较大,但是其总变形较小,导致面板的挠度也较小,因此,在坝坡方向,由于挠度引起面板受拉的趋势也较小,而堆石在较大的蠕变速率下使得面板在坝坡方向的压应力迅速增加.由于面板的挠度是在堆石变形的基础上产生的,即若堆石没有变形则面板也不会发生变形,因此在坝轴线方向,堆石一开始的蠕变就使得它有向河谷位移的趋势,对面板的影响是立即使其坝轴向压应力增大,只不过堆石向河谷位移的趋势相对较小,因此面板坝轴向压应力的增量也比较小.堆石发生变形后,接着面板立即产生挠度(甚至是同时),受拉的趋势明显增加,其结果使面板在坝轴向的压应力增量减小甚至为负。

c. 堆石的蠕变趋于平稳后,面板挠度也趋于平稳,它对面板应力的影响几乎可以忽略,但蠕变引起堆石的变形使得面板在两个方向的应力都还有增加的趋势.正如前述,蠕变引起面板压应力的趋势在坝坡向强于坝轴向,因此,顺坡向压应力增加的速率大于坝轴向压应力增加的速率,这一点图5中也比较明显.当这些影响都小到可以忽略后,坝轴向和坝坡向的最大压应力就比较平稳了。

比较图4(a)(b)也可以看出,面板发生挠度对其应力的影响在坝坡方

表2 堆石流变对面板应力变形的影响

Table 2 Influence of rheology of rockfill on stress and deformation of face slab

	挠度最大值 /cm	应力最大值/MPa	
		坝轴向	顺坡向
不计入堆石流变	7.0	2.55	2.75
计入堆石流变 刚满蓄时	13.9	3.08	5.22
石流变 满蓄104月	19.9	3.34	7.34

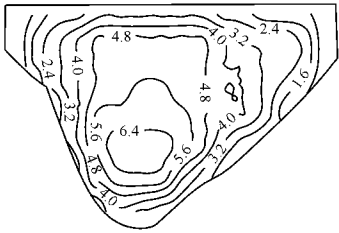


图7 不计入堆石流变达到满蓄水位时的面板挠度(cm)

Fig.7 Face slab deflection at maximum water level without considering rheology

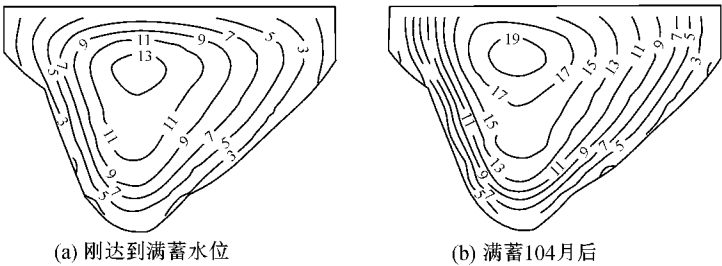


图8 计入堆石流变时面板挠度(cm)

Fig.8 Face slab deflection when rheology is considered

向上不明显,所以应力等值线的分布规律相近.而在坝轴线方向,面板挠度使压应力减小的这种影响显然在面板下部要强于上部,导致面板下部压应力减少较多,上部则较少,结果是随着时间的推移,坝轴向应力等值线的最大值逐渐向上移动,甚至有可能使面板中部应力增大,直至平稳.由以上可以得出结论,面板在顺坡向的应力主要决定于堆石的变形特性尤其是流变性能,而在坝轴向的应力则主要决定于河谷形状,本文由于缺乏 Cerhana 坝的详细河谷资料,所以可能误差较大,这也解释了图4(b)(c)中坝轴向应力的计算值与实测值误差较大的原因。

3 结 论

由于堆石的流变 ,若计入混凝土徐变等因素的影响 ,水库蓄水后在 4 a 左右的时间内面板的变形和应力将还会有很大的变化 ,特别是顺坡向应力的变化更大 ,这种变化总体上是趋于危险的 ,是不能忽视的 .罗马尼亚的 Lisu 坝满库运行 4 a 后 ,面板产生了显著的裂缝也说明了这一点 .另外 ,对面板坝进行不计入堆石流变的理论分析所得结果与实测值差别较大 ,应予以重视 .因此 ,对于拟建高坝以及坝址形状比较特殊、突变大的面板坝 ,设计中必须充分考虑堆石的流变对面板应力的影响 ,以便采取相应的处理措施 .

参考文献 :

[1] Materon B. Alto Anchicaya dam-ten years performance ,concrete face rockfill dam-design , construction and performance[A]. ASCE , Geotechnical Engineering Division , Detroit Symposium on Concrete Face Rockfill Dam[C]. 1985. 73 ~ 87 .
[2] Marques Filho P L , Maurer E , Toniatti N B. Deformation characteristic of Foz do areia concrete face rockfill dam[A]. As Revealed by A Simple Instrumentation System ,15th ICOLD Congress[C]. Lausanne :1985. 417 ~ 449 .
[3] Fitzpatrick M D , Liggins T B , Barnett R H W. Ten years surveillance of Cethana dam[A]. 14th ICOLD Congress[C]. Rio de Janeiro : 1982. 847 ~ 865 .
[4] Wilkins J K , Mitchell W R , Fitzpatrick M D , et al. The design of Cethana concrete face rockfill dam[A]. 11th ICOLD Congress[C]. Madrid : 1973. 25 ~ 42 .
[5] Fitzpatrick M D , Liggins T B , Lack L J , et al. Instrumentation and performance of Cethana dam[A]. 11th ICOLD Congress[C]. Madrid : 1973. 145 ~ 164 .
[6] 王勇 . 考虑混凝土面板堆石坝流变的静力分析 [D][学位论文]. 南京 :河海大学 ,1998 .
[7] Bjerrum L. Engineering geology of Norwegian normally consolidation maring clays as related to the settlements of buildings[J]. Geotechnique ,1967 ,17(2) 83 ~ 117 .
[8] Yin Z Z. A constitutive model with two yield surface for soil[A]. 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics [C]. Innsbruck :1988. 447 ~ 452 .

Analysis of Effects of Rockfill Rheology on Deformation and Stress of Force Slabs of Concrete Face Rockfill Dams

WANG Yong¹ ,YIN Zong-ze²

(1. Institute of Water Conservancy and Hydropower Science of Guangdong Province , Guangzhou 510610 , China ;
2. College of Civil Engineering ,Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract :With Cethana dam as an example , this paper performs three dimensional finite element analysis based on the selected constitutive model which includes rheology , and its parameters . This paper also analyzes theoretically the effects of rheology of rockfill on the deformation and stress of face slabs of concrete face rockfill dam . It is indicated that these effects are dangerous and thus , cannot be neglected .

Key words :concrete face rockfill dam ; rheology of rockfill ; stress and deformations of concrete face slab