

面板堆石坝流变分析与预沉降时间措施

王富强¹，张建民²，杨泽艳¹

(1、中国水电工程顾问集团公司，2、清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室)

摘要：堆石体变形控制是保证面板堆石坝防渗体系安全的重要措施，变形控制的重点在于控制面板浇筑后的堆石体变形，预沉降是重要工程措施之一。从应力和变形角度，预沉降时间越长对面板堆石坝的安全性越有利，然而延长预沉降时间会导致施工期拉长和工程投资的相应增加。本文针对积石峡面板堆石坝进行了三维流变变形计算，分析了堆石体流变变形对大坝应力变形的影响；研究了不同预沉降时间大坝应力变形响应；并基于计算结果对预沉降时间的选择进行了探讨。

关键词：混凝土面板堆石坝，流变分析，预沉降，全过程模拟

堆石体变形控制是保证面板堆石坝防渗体系安全的重要措施，变形控制的重点在于控制面板浇筑后的堆石体变形，预沉降是重要工程措施之一。2000 年以后建设的面板堆石坝工程，都很注意在浇筑面板前留有足够的预沉降时间。例如，洪家渡工程首次提出了坝体预沉降控制的双标准：预沉降时间（3~6 个月）、预沉降速率（月沉降变形增量不超过 2~5mm）^[1]。此外，贵州董箐面板堆石坝（坝高 150m，坝体大部分材料为砂泥岩）和冰岛的卡拉努卡尔坝（坝高 185m）也采用了预沉降措施或者理念，目前两座大坝运行状态良好。

根据成因，面板堆石坝堆石体的变形可以分为：堆载变形、湿化变形和流变变形三种。流变变形是长时间运行期坝体堆石料流变产生的变形，堆石料的流变变形会增加坝体运行期的总体沉降，从而使大坝防渗结构如面板或防渗墙的应力和变形发生变化，进而影响到大坝运行期的安全性。一般情况下，面板堆石坝坝体堆石料填筑完成后会待变形稳定一段时间，即预沉降时间，然后再进行面板的施工。选择预沉降时间的关键是堆石体流变特性分析。预沉降时间越长，面板施工完成后的坝体流变变形就会越小，对面板应力和变形的影响也就越小，从应力和变形的角度来说大坝也就越安全；但预沉降时间越长会导致施工期拉长和工程投资的相应增加。因此，应从应力变形和施工期优化两个方面综合考虑以确定坝体填筑完成后的预沉降时间。堆石体的流变特性对大坝应力变形的影响，特别是对不同预沉降时间大坝应力变形的影响规律研究是解决该问题的关键。

本文对积石峡面板堆石坝进行了三维流变变形分析。首先，通过对比蓄水完成期和流变变形后坝体和面板的变形和应力情况，分析了流变变形对大坝应力变形的影响；其次，分析了不同预沉降时间的施工方案对坝体和面板应力变形的影响；最后，基于计算结果对预沉降时间的选择进行了探讨。

1 积石峡面板堆石坝流变分析

本文依托积石峡面板堆石坝进行计算。积石峡水电站位于青海省循化县境内的黄河干流上，是黄河上游规划的第五个大型梯级电站。大坝为混凝土面板堆石坝，最大坝高 100m。大坝主堆石区和次堆石区拟采用混合后的开挖料筑坝，此方案可以大大降低填筑料的开挖运输成本和处理开挖料的成本，具有较大的工程意义。但开挖料会在运行期会产生较大的流变变形，坝体和面板可能会发生较大的应力和变形，从而

对大坝的安全性产生不利的影晌。

积石峡面板堆石坝施工设计方案是将坝体堆石逐级填筑至坝顶，待变形稳定一段时间后再进行面板施工，坝体竣工以后逐级蓄水至设计水位。初步设计的施工方案建议 6 个月的预沉降时间，该方案条件下的坝体和面板应力变形情况有待于研究。另外，在大坝应力和变形满足设计要求的条件下缩短预沉降时间对施工期优化具有很大益处。

1.1 计算条件

根据大坝设计方案以及积石峡面板堆石坝的地形图，进行了三维有限元网格剖分，网格总体结点数 10562，单元数 8870。在计算中模拟了坝体分层逐渐上升的填筑过程，坝体施工结束后再进行面板施工。坝体竣工以后逐级蓄水至设计水位。计算中考虑了坝体与基岩的接触面、面板与挤压墙接触面以及挤压墙与垫层料间的等效接触面^[2]；接触面模型参数均通过大型接触面试验结果确定。

1.2 堆石料的本构模型及参数

堆石料的加载变形的计算采用混合料加载模型^[3]，该模型能够统一描述不同岩性成分比例的开挖混合料的力学特性，包括在较大应变范围内较好地反映粗颗粒土随着应力水平增长由体缩向体胀发展，以及在低围压作用条件下以体胀为主、高围压下以体缩为主的主要体变特性，该模型参数通过一系列大型三轴试验确定。

流变变形计算采用沈珠江三参数流变模型^[4]，设流变曲线为式 (1)，其中 $\varepsilon_i = \sigma/E_1$ 为瞬时变形，可假定由弹塑性模型求得的变形为此瞬时变形； $\varepsilon_f = \sigma/E_2$ 为随时间发展的最终变形量。对式 (1) 求导得式 (2)， α 为初始相对变形率，即第一天的流变量占总流变量之比，应变率为式 (3)。根据 Prandtl-Reuss 假设，应变率的张量可以表示为式 (4)，其中 $\{s\}$ 为偏应力， σ_s 为广义剪应力，变形速率分量可以由式 (5) (6) 给出，式中 ε_{vf} 和 ε_{sf} 分别为最终体积流变和最终剪切流变由式 (7) (8) 求得。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_i + \varepsilon_f (1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \alpha \varepsilon_f e^{-\alpha t} \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \alpha (\varepsilon_f - \varepsilon_i) = \alpha \varepsilon_f (1 - \varepsilon_i / \varepsilon_f) \quad (3)$$

$$\{\dot{\varepsilon}\} = \dot{\varepsilon}_v \{\delta\} / 3 + \dot{\varepsilon}_s \{s\} / \sigma_s \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}_v = \alpha \varepsilon_{vf} (1 - \varepsilon_{vi} / \varepsilon_{vf}) \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \alpha \varepsilon_{sf} (1 - \varepsilon_{si} / \varepsilon_{sf}) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{vf} = b (\sigma_3 / P_a) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{sf} = d (S_1 / (1 - S_1)) \quad (8)$$

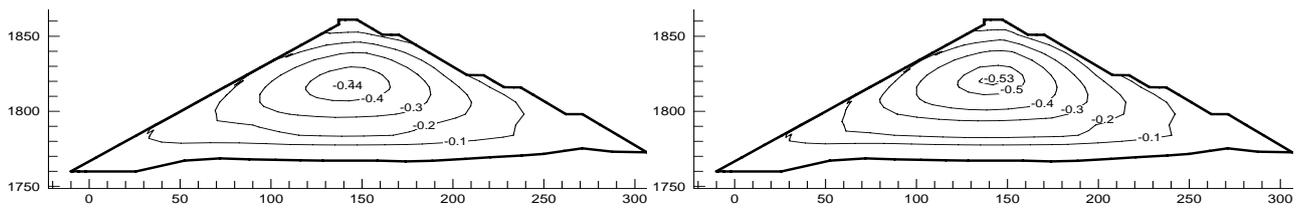
该流变模型的参数共有 3 个，分别为 α 、 b 、 d 。文[3]经过反馈分析得到了 4 种不同软硬程度的坝料流变参数，本文计算采用的参数根据积石峡堆石料特点并类比文[4]中流变参数得到，主堆石区流变参数 (α 、 b 、 d) 分别为 0.006、0.0006 和 0.004；次堆石区坝料的流变参数分别为：0.005、0.0007 和 0.0043。本文的计算不考虑其他分区材料的流变变形。

1.3 计算结果及分析

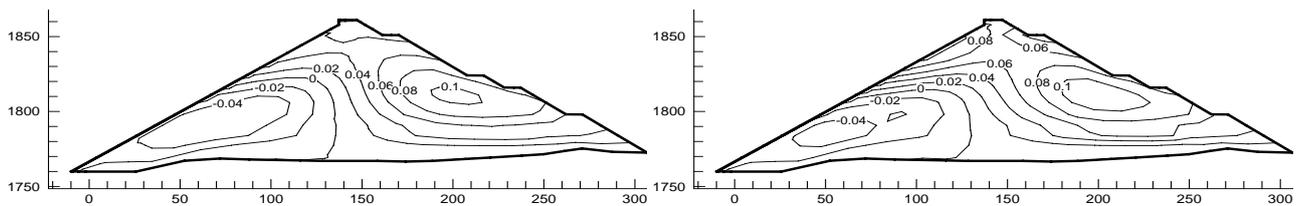
图 2 中各图示出了蓄水完成期和流变变形后的坝体及面板应力变形等值线，其中左侧图形为蓄水完成期计算结果，右边图形为大坝运行 800 天流变变形后的计算结果。

由计算结果可以看出，流变变形对大坝的位移场有一定影响，坝体竖向沉降及顺河向位移均有所增加。其中竖向沉降的最大值由 0.44m 增大至 0.53m，增加约 20%；由流变引起的竖向位移增量沿坝体高程逐渐增加，使得坝体总体沉降最值出现的位置较蓄水完成期有所抬高，如图 1 (a) 所示。坝体顺河向位移的增量方向指向下游，使得坝体总体水平向位移向上游有所减小，向下游有所增加，如图 1 (b) 所示。流变变形对大坝的应力场影响较小，限于篇幅本文没有给出坝体应力的等值线图。

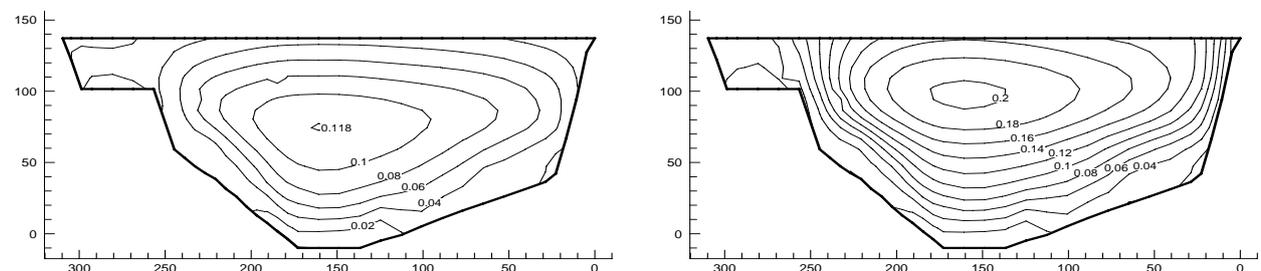
流变变形引起了坝体变形增加，从而使得面板挠度增大和应力发生较为明显的变化。如图 1 (c) 给出了蓄水完成期和运行 800 天后面板挠度等值线图，堆石料流变变形引起的面板挠度增量沿高程逐渐增大，在面板顶部达到最大，使得面板挠度最大值出现的位置有所抬高。流变变形对面板应力产生了较大的影响，其中顺坡向应力压应力增大至原来的 3 倍左右，流变变形后压应力最大值达到了 6MPa；但流变变形对拉应力大小和分布影响不大，如图 1 (d)。面板水平向应力有所增大，最大值由蓄水完成期的 3.5MPa 增加至 5MPa，拉应力大小变化不明显而区域略有缩小，如图 1 (e)。



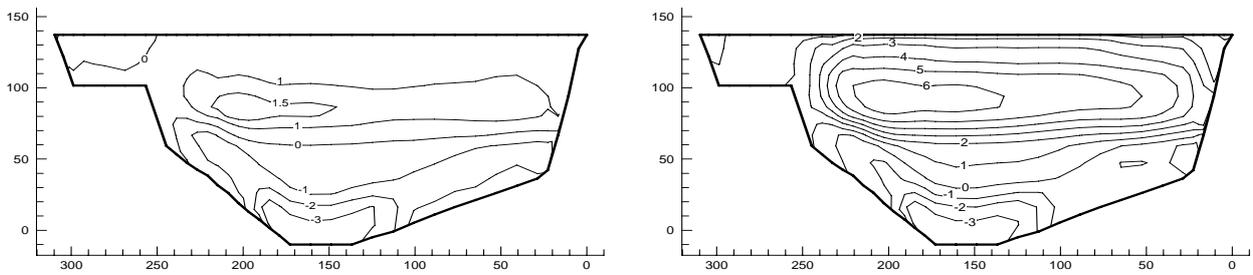
(a) 坝体典型断面竖向位移等值线 / m



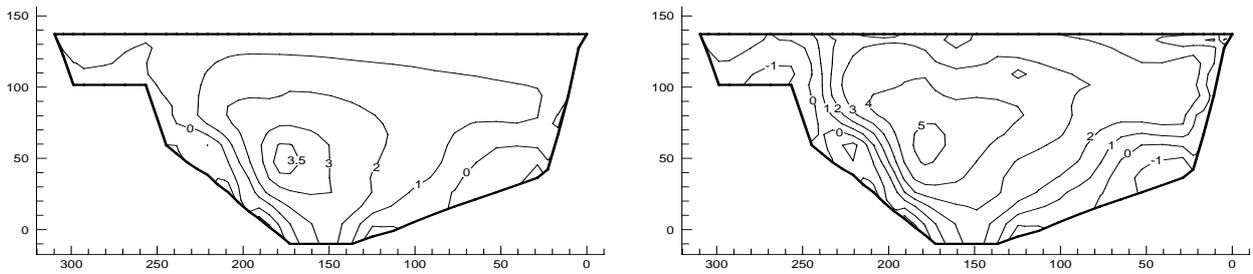
(b) 坝体典型断面水平向位移等值线 / m



(c) 面板挠度等值线 / m



(d) 面板顺坡向应力等值线 / MPa



(e) 面板水平向应力等值线 / MPa

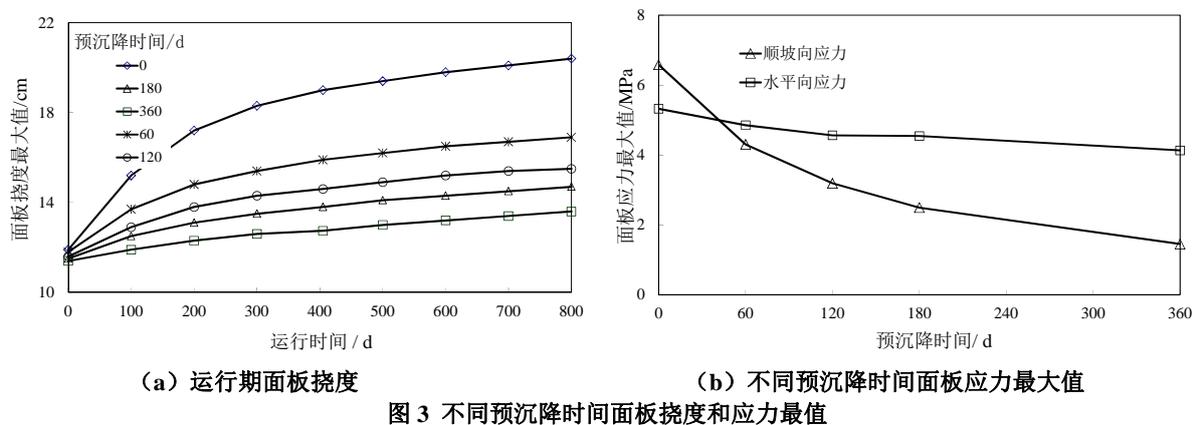
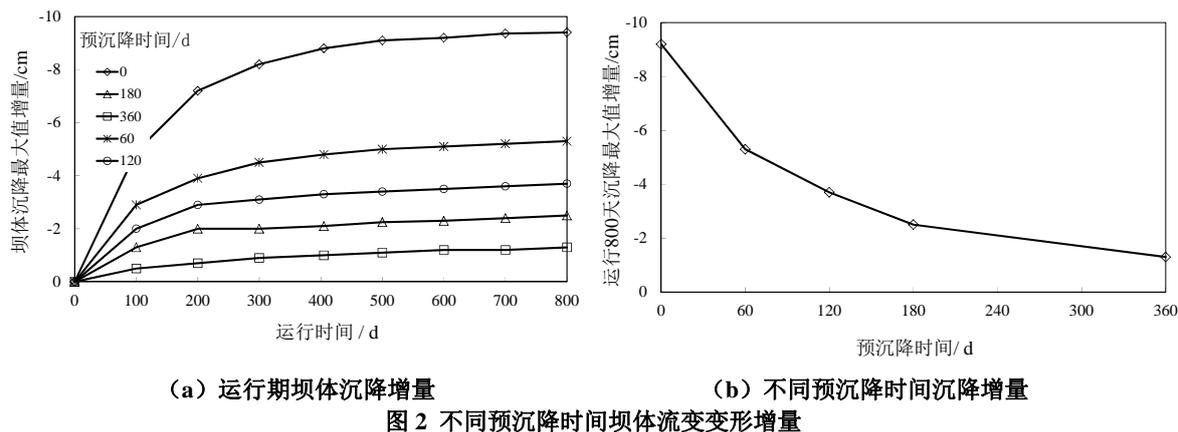
图 1 蓄水期和流变后坝体应力应变等值线图

2 不同预沉降时间影响分析

上述分析是针对坝体填筑完成后立即浇筑面板的施工方案，也即预沉降时间为 0 天的施工方案进行的计算，计算结果表明堆石料的流变变形对坝体特别是面板的应力和变形具有较大影响。为了减小流变变形对面板应力变形的影响，实际工程施工中一般会采取一定的预沉降时间。研究坝体填筑完成后不同预沉降时间的影响是选择预沉降时间的关键，本文进一步计算了预沉降时间分别为 60 天、120 天、180 天和 360 天的施工期方案。

如图 2 (a) 给出了计算得到的 5 种不同的施工期方案坝体沉降最大值增量随时间变化的曲线，坝体沉降最值增量由运行期的最值减去相应蓄水完成期的最值得到，各种施工方案坝体沉降增量均随着运行时间增加而增大；由图 2 (b) 可以看出，预沉降时间较长的施工方案运行期流变变形较小，引起的坝体沉降增量也较小。

图 3 (a) 给出了不同的施工方案的面板挠度随时间变化曲线，各种方案的面板挠度均随着运行时间逐渐增加，而预沉降时间较长的施工方案运行期流变变形较小，运行期的面板挠度也就越小。不同施工方案计算得到流变变形对面板应力影响规律与上一节类似，但面板应力大小受预沉降时间的影响较大。图 3 (b) 示出了不同施工方案面板顺坡向和水平向应力最值，可以看出预沉降时间越长，面板的压应力最值越小，对面板的安全性也越有利。



3 预沉降时间选择的探讨

由上述计算成果可知，预沉降时间越长，面板施工完成后的坝体流变变形就会越小，对面板应力和变形的影响也就越小，从应力和变形的角度来说大坝也就越安全。然而，预沉降时间越长会导致施工期变长和工程投资的相应增加。因此，在确保大坝应力变形安全的前提下，应选择对施工和工程投资有利的预沉降时间。

从变形速率看，见图 3 (a) 和 4 (a)，当预沉降时间为 120 天时，面板浇筑后 100 天内的坝体沉降速率约为 6mm/月，且变形速率已趋于收敛，从这个角度来说，预沉降时间不小于 120 天是合适的。从沉降量来看，见图 3 (b) 和 4 (b)，预沉降时间小于 180 天时，大坝沉降和面板应力最大值随预沉降时间增加显著减小；而预沉降时间大于 180 天时，这种变化则不太明显，所以选择预沉降时间不需大于 180 天。

根据实际工程需要，对于积石峡面板堆石坝，选择 120 天~180 天的预沉降时间均是可行的。

4 结论和展望

本文针对积石峡面板堆石坝进行了流变变形分析，并对不同的预沉降时间方案进行了对比分析，得出以下结论：

- 1) 流变变形对大坝的位移场有一定影响，坝体竖向沉降及顺河向位移均有所增加。其中竖向沉降最大值增加约 20%，流变变形引起的坝体沉降增量随坝体高程而增加，从而使坝体沉降最值位置较蓄水期上移；坝体顺河向位移的增量方向指向下游；流变变形对坝体的应力场影响较小。

2) 流变变形引起面板挠度增大和较为显著的面板应力变化,流变引起的面板挠度增量随高程增加从而使挠度最大值也发生一定程度上移;面板顺坡向应力和水平向应力的压应力受流变变形的影响较为明显,增加量显著。

3) 预沉降时间对坝体的流变变形和面板应力变形有较大影响,预沉降时间越长,运行期的流变变形也就越小,从应力变形角度来说大坝也就越安全。

4) 目前,我国混凝土面板堆石坝已经迈入 250m 级,对于 200m 以上的高坝,其预沉降标准应根据堆石料流变特性和大坝变形控制要求选择。本文进行的研究工作为 250m 级面板堆石坝预沉降时间的定量选择提供了技术支撑。

5) 对于超高面板堆石坝而言,施工运行全过程模拟和应力变形反演分析是未来的发展方向,可以更好模拟大坝施工运行期大坝的应力变形形态。

(1) 堆石坝施工运行全过程模拟:本文的流变分析仅考虑了坝体填筑完成后预沉降时间的影响,未考虑坝体填筑期间的堆石体流变变形。其实,堆石体在施工期间既有堆载变形,也有流变变形,蓄水期堆石体还会产生湿化变形,堆石坝施工运行全过程模拟有利于更为精确地反映大坝变形形态。

(2) 堆石坝应力变形反演分析:堆石坝流变分析的难点在于堆石体流变模型参数的确定,目前室内流变试验尚不能很好的模拟堆石料实际的流变特性,流变参数的确定主要依靠工程类比。基于实际监测数据的应力变形反分析方法为流变参数的确定提供了新的途径。根据堆石体填筑过程中的监测数据反演模型参数,然后基于该参数预测施工运行全过程的大坝形态,为预沉降时间等措施的选择提供依据。

(3) 大规模精细化计算分析:目前工程常用的计算分析方法和程序中,混凝土面板常常被分为一层单元且采用线弹性本构模型,计算得到的面板混凝土应力往往偏大。大规模精细化的计算分析,可更细致地模拟防渗结构,更合理的反应防渗结构的应力状态,从而更有效的模拟预沉降措施的有效性。

参 考 文 献

- [1] 杨泽艳, 蒋国澄. 洪家渡 200m 级高面板堆石坝变形控制技术[J]. 岩土工程学报, 2008(8): 1241-1247
- [2] 张建民, 张嘎, 刘芳. 面板堆石坝挤压式边墙的概化数值模型及应用. 岩土工程学报, 2005, 27 (3): 249-253
- [3] Zhang Ga, Zhang Jian-Min, Yu Yilin. Modeling of gravelly soil with multiple lithologic components and its application. Soils and Foundations, 2007, 47 (4): 799-810
- [4] 沈珠江. 土石料的流变模型及其应用[J]. 水利水运科学研究, 1994(4): 335-342