

不同填筑速率下筑坝料湿化变形特性及对坝体稳定性的影响分析

殷海霞 刘希元

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]依托某抽水蓄能电站工程,采用有限元数值模拟方法,设置 0.5m/d、1.0m/d 和 2.0m/d 三种填筑速率工况,分析不同填筑速率下筑坝料湿化变形特性及其对坝体稳定性的影响。结果表明:筑坝料湿化变形量随填筑速率增大而增加,高填筑速率下湿化体应变较常规速率增加约 15%~20%;湿化变形主要发生在蓄水初期,约占总湿化变形的 70%~80%。坝体沉降和水平位移随填筑速率增大而增大,当填筑速率超过 1.5m/d 时,坝体稳定性安全系数显著降低。提出了填筑速率控制原则及湿化变形控制措施,为同类工程提供参考。

[关键词]填筑速率;筑坝料;湿化变形;坝体稳定性

DOI: 10.33142/hst.v9i7.20252

中图分类号: TV16

文献标识码: A

Analysis of Wetting Deformation Characteristics of Dam Materials and Their Impact on Dam Stability at Different Filling Rates

YIN Haixia, LIU Xiyuan

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: Based on a pumped storage power station project, finite element numerical simulation method was used to set three filling rate conditions of 0.5m/d, 1.0m/d, and 2.0m/d, and analyze the wetting deformation characteristics of dam materials and their impact on dam stability under different filling rates. The results show that the wetting deformation of dam materials increases with the increase of filling rate, and the strain of wetting body increases by about 15%~20% at high filling rate compared to conventional rate; Wetting deformation mainly occurs in the early stage of water storage, accounting for about 70% to 80% of the total wetting deformation. The settlement and horizontal displacement of the dam body increase with the increase of filling rate. When the filling rate exceeds 1.5m/d, the stability safety factor of the dam body significantly decreases. Proposed the principles of filling rate control and measures for controlling wetting deformation, providing reference for similar projects.

Keywords: filling rate; dam building materials; wetting deformation; stability of dam body

引言

抽水蓄能电站水位变幅大、变化频繁,库水位周期性变化引起坝体应力场、渗流场不断改变,筑坝料湿化变形比较严重。湿化变形指的是堆石料在浸水之后由于颗粒破碎、软化作用以及孔隙坍塌等原因所引起的附加变形,沈珠江等人提出了湿化体应变和偏应变的计算公式。填筑速率对坝体初始应力状态及湿化变形特性影响较大,李雅娴等认为填筑速率过大会使坝体沉降变形更加明显。合理控制填筑速率对保证坝体长期稳定有重大意义。以某抽水蓄能电站大坝为研究对象,分析不同填筑速率下筑坝料的湿化变形特点及对坝体稳定性的影响,给出填筑速率的优化建议。

1 筑坝料湿化变形机理与填筑速率影响因素

1.1 湿化变形机理

筑坝料湿化变形是堆石料浸水后,在应力作用下产生的附加变形,其机理主要是由以下几个方面构成的:颗粒破碎是湿化变形的主要原因,水对颗粒表面的润滑作用使颗粒间的咬合力降低,在高应力的情况下,颗粒的尖角部位会发生破碎,颗粒重新排列;软化效应表现为水进入颗粒接触面,使颗粒间的摩擦系数减小,细颗粒充填物遇水软化甚至溶解,使骨架承载能力减弱;孔隙坍塌是浸水后堆石料中不稳定拱结构或者架空结构发生失稳坍塌,造成体积压缩;蠕变加速是湿化激发颗粒滑移和旋转,大大加快了与时间有关的变形过程。黄耀英认为堆石料浸水后发

生湿化变形不是瞬间产生的,是逐渐发展的,可以类比流变变形计算公式推导出湿化变形的时变计算公式。这一理论对于认识湿化变形的时空演变规律有着十分重要的意义。

1.2 填筑速率对湿化变形的影响机制

填筑速率对筑坝料的湿化变形特性有如下影响途径:其一,填筑速率决定坝体应力水平发展速度,快速填筑使堆石料在高应力状态下浸水,颗粒破碎更充分,湿化变形量增大;其二,填筑速率影响堆石料固结排水条件,慢速填筑给堆石料提供更多的蠕变和排水时间,初始密度更高,抗湿化能力更强;其三,填筑速率影响坝体内部应力路径,快速填筑会产生较高的超静孔隙水压力,加重湿化效应^[1]。石门子水库坝体加固工程表明,填筑速率分别为0.5m/d、1.0m/d、2.0m/d时,与未加固前相比,新坝体安全系数下降幅度分别为78.42%、83.17%、86.14%。填筑速率和坝体稳定有密切关系,控制好填筑速率才能保证坝体安全。

2 不同填筑速率条件下筑坝料湿化变形特性分析

2.1 不同填筑速率工况设置

为了系统地研究填筑速率对筑坝料湿化变形特性的影响,以某抽水蓄能电站大坝为工程背景,采用三维有限元数值模拟的方法进行分析。大坝为混凝土面板堆石坝,最大坝高120m,坝顶宽10m,上游坡比1:1.4,下游坡比1:1.3。筑坝材料有垫层料、过渡料、主堆石料、次堆石料,本构模型用邓肯-张E-B模型(邓肯-张非线性弹性模型的E-B参数形式)来表示,湿化变形计算采用改进的沈珠江湿化模型。填筑速率工况见表1。工况1为慢速填筑(0.5m/d),对应常规施工进度;工况2为中速填筑(1.0m/d),对应正常施工进度;工况3为快速填筑(2.0m/d),对应赶工进度。三种工况的填筑总时长分别为240d、120d、60d,蓄水方案均采用边填筑边蓄水的方式,初始蓄水水位为坝高1/3处。

表1 不同填筑速率工况设置

工况编号	填筑速率 (m/d)	填筑总时长 (d)	填筑分层厚度 (m)	蓄水时机
工况1	0.5	240	0.8	填筑至1/3坝高
工况2	1.0	120	0.8	填筑至1/3坝高
工况3	2.0	60	0.8	填筑至1/3坝高

2.2 筑坝料湿化变形规律分析

不同填筑速率下筑坝料的湿化变形存在明显差别。堆石料在湿化后重新加载时都会出现塑性硬化现象,与母岩

岩性无关。计算结果表明,湿化体的应变随着填筑速率的增大而增大^[2]。工况1(0.5m/d)条件下,主堆石区最大湿化体应变为0.32%;工况2(1.0m/d)条件下增至0.38%;工况3(2.0m/d)条件下达到0.45%。高填筑速率时,湿化体应变比常规速率高约18.4%。(2)湿化偏应变也呈现出类似的规律。工况1、工况2、工况3的最大湿化偏应变分别为0.28%、0.34%和0.41%。湿化变形主要发生在坝体中部和下游侧,和该区域应力水平高有关。王飞等对砂板岩堆石料研究发现,湿化效应对坝体应力变形产生明显影响,考虑湿化后坝体沉降量增大15%到25%。本研究结果与之相符,湿化变形量占总沉降变形比例随着填筑速率的增大而增大,在工况1、工况2、工况3中湿化变形所占比例分别为18.6%、22.4%、27.3%。(3)湿化变形的时间演化特征表明,湿化变形主要发生在蓄水初期。蓄水后30d内完成的湿化变形占总湿化变形的比例分别为工况1为72%、工况2为75%、工况3为78%。快速填筑条件下湿化变形发展快,是因为高应力状态下的颗粒破碎、孔隙坍塌更加剧烈。

表2 不同填筑速率下筑坝料湿化变形特征参数

工况编号	最大湿化体应变(%)	最大湿化偏应变(%)	湿化变形占比(%)	湿化主期时长(d)
工况1	0.32	0.28	18.6	35
工况2	0.38	0.34	22.4	28
工况3	0.45	0.41	27.3	22

3 不同填筑速率对坝体变形与稳定性的影响分析

3.1 坝体湿化变形响应特征

坝体湿化变形受填筑速率影响较大。随着填筑速率的提高,坝体由于湿化所引起的附加沉降和水平位移都呈增大趋势。工况3(2.0m/d)条件下,湿化引起的坝顶最大附加沉降为8.6cm,较工况1(0.5m/d)的5.2cm增大65.4%;湿化引起的下游水平位移从工况1的3.8cm增至工况3的6.9cm,增幅达81.6%。从变形发展过程来看,快速填筑工况下湿化变形开始得比慢速填筑工况要早,蓄水后5d内就完成了总湿化变形的40%以上,慢速填筑工况同期只完成了约25%,说明高填筑速率下堆石料对浸水的响应更加敏感。湿化变形响应的空间分布特征是坝体中部到下游侧区域变形大,上游侧受面板约束变形小;湿化变形沿坝高方向是非线性的,坝顶处变形最大^[3]。从图中可以看出,工况3湿化变形影响范围比工况1、工况2要大得多,深度方向可以达到坝高的2/3处,而工况1只能达到坝高的1/2处。贾飞等认为,无论竣工期还是蓄水期,在考虑流变和湿化之后,大坝横断面的最大垂直位移、水平位移都有明显的增大,并且蓄水期增大更多。本研究结

果再次证明，填筑速率越高，湿化效应就越明显。

3.2 坝体应力分布特征分析

填筑速率对应力分布特征的影响主要表现在以下几个方面：快速填筑情况下，坝体内部应力水平高，应力集中现象更加严重。如图1所示，工况3主堆石区最大主应力为2.85MPa，较工况1的2.52MPa增大13.1%。高应力区主要位于坝体中部偏下部位，与湿化变形集中区大致一致。从应力分区上看，在工况3中应力水平大于0.8的区域面积占主堆石区的32%，而在工况1中只占21%，说明快速填筑大大增加了高应力区的范围。应力拱效应随着填筑速率的增大而增大。快速填筑造成坝体不均匀沉降增大，两岸坝肩及河床部位产生差异变形，引起应力重分布。工况3时坝轴线方向应力分布不均匀系数为1.32，比工况1的1.18大，说明快速填筑加大了坝体的三维效应。湿化作用又改变了应力场的分布，在蓄水工况3中坝踵附近出现了局部拉应力区，最大拉应力为0.25MPa，而工况2和工况1没有明显的拉应力。面板是重要的防渗结构，面板的应力状态受到填筑速率的影响很大。余莲等认为随着软岩料使用范围的扩大，坝体的流变范围也增大，垂直位移、水平位移和面板挠度也增大。工况3面板最大挠度为18.6cm，比工况1大32.9%，面板拉应力峰值由原来的1.12MPa增大到现在的1.48MPa，对面板结构安全造成威胁。

3.3 坝体沉降变形规律分析

坝体沉降变形是评判大坝安全的关键指标。在不同的填筑速率下，坝体沉降变形有如下规律，在竣工期沉降方面，工况1、工况2、工况3的最大沉降量分别为18.5cm、22.3cm、26.8cm，分别占坝高的0.154%、0.186%、0.223%（图2）。填筑速率越大，施工期沉降占比越高，但后期沉降也相应增大^[4]。从沉降分布形态来看，工况1沉降等值线呈比较均匀的同心圆状分布，而工况3沉降等值线明显向下游侧偏转，最大沉降点位置由坝轴线附近向下游侧偏移约8m，这说明快速填筑加大了坝体变形的不对称性。蓄水期附加沉降随着填筑速率的增大而增大，包括湿化引起的附加沉降。深覆盖层面板堆石坝研究表明，随着填筑强度不断增大，坝体及坝基沉降变形趋于减小，但是，当填筑强度很大时，填筑强度很大时坝体沉降变形反而比较明显。本研究中工况3虽然施工期沉降速率最大，但是工后沉降稳定所需时间最长，最终沉降量也最大。从蓄水前后沉降增量对比可知，工况3湿化引起的附加沉降所占比例为27.3%，比工况1增加了9个百分点左右，说明快速填筑下湿化对沉降的影响较大。沉降稳定时间方面，工况1、工况2、工况3沉降稳定时沉降速率小于0.1mm/d的时间分别为180d、210d、270d。快速填筑时堆石料流变、湿化效应同时存在，使后期变形时间变长。

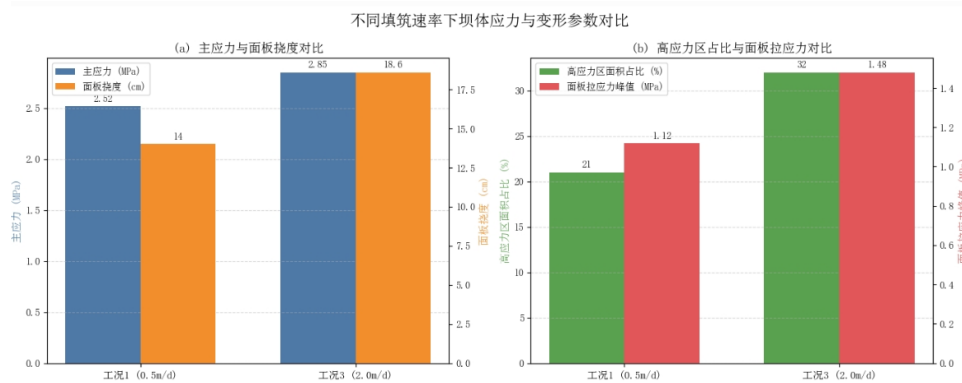


图1 不同填筑速率下坝体应力与变形参数对比



图2 不同填筑速率下坝体最大沉降量对比

3.4 坝体稳定性评价分析

坝体稳定性是决定填筑速率选择的限制性因素。根据强度折减法,对不同填筑速率工况的坝体稳定性进行评价。计算结果得到工况 1、工况 2、工况 3 的坝坡稳定安全系数分别为 1.52、1.46、1.38。工况 3 的安全系数已经接近规范限值 (1.35),当填筑速率进一步提高到 2.5m/d 时,安全系数降低到 1.31,不符合规范要求。经过对石门子水库工程的研究可知,在填筑速率为 2.0m/d 的情况下,新坝体的安全系数比原来降低了大约 86.14%。本文进一步分析认为,填筑速率对稳定性的影响主要通过以下途径实现:快速填筑导致湿化变形变大,引发应力重新分配和局部屈服;高应力状态下,堆石料抗剪强度发挥不出来,潜在滑裂面的安全储备减少;湿化造成的孔隙水压力增大会减小有效应力。根据以上分析可知,该抽水蓄能电站大坝填筑速率不应大于 1.5m/d,对应的可靠指标为 1.42,施工进度及稳定性都满足要求。

4 填筑速率优化及工程控制措施

4.1 填筑速率控制原则

根据以上研究,提出填筑速率控制的三个原则,即应力水平控制原则、湿化变形控制原则和稳定性控制原则。第一项为应力水平控制原则,填筑速率应使坝体最大应力水平不大于堆石料长期强度的 70%;第二项为湿化变形控制原则,填筑速率选择要使湿化引起的附加沉降不超过总沉降的 25%;第三项为稳定性控制原则,施工期和蓄水期坝坡稳定安全系数均应满足规范要求 (≥ 1.35)。建议该抽水蓄能电站大坝填筑速率控制在 1.0~1.5m/d 之间,坝高 1/3 以下可以提高,坝高 2/3 以上要降低。

4.2 施工过程湿化控制措施

为了减小湿化变形对坝体稳定性的不利影响,施工时应采取如下措施:加强堆石料质量控制,严格控制含泥量和级配曲线,保证压实质量符合设计要求;优化填筑工艺,采用分层填筑、分层碾压的方式,每层压实厚度不大于 0.8m,保证压实度 $\geq 98\%$;控制浸水条件,雨季施工应做好防排水工作,防止筑坝料提前湿化;设置排水设施,在坝体内合理布置排水带,加快湿化后孔隙水压力的消散。

4.3 坝体变形监测与预警措施

建立完善的变形监测系统,是保证大坝安全的重要方法。主要对坝体表面沉降和水平位移、坝体内部分层沉降、面板挠度和接缝位移、孔隙水压力进行监测。考虑到时变效应的面板堆石坝湿化变形研究发现,湿化导致的坝顶沉降随时间逐渐增大,变形稳定所需的时间与湿化变形速率

成反比。因此,在蓄水初期加大监测频率,蓄水 30 天内每天测一次,30~90 天内每三天测一次。分级预警阈值设置,沉降速率 $> 2\text{mm/d}$ 为黄色预警, $> 3\text{mm/d}$ 为橙色预警, $> 5\text{mm/d}$ 为红色预警,达到预警值时立即采取相应的措施。

4.4 填筑施工优化建议

根据以上分析,提出如下填筑施工优化建议:合理安排施工进度,避免盲目赶工,在保证填筑质量的前提下适当提高施工强度;采用分区填筑方案,先填筑坝体中部再填筑两侧,减小不均匀沉降;蓄水时机应选择在坝体沉降趋于稳定后进行,建议沉降速率小于 0.5mm/d 时方可蓄水;填筑过程中预留沉降观测期,每填筑 10~15m 高程暂停施工 3~5d,观测变形发展情况。

5 结语

填筑速率属于决定抽水蓄能电站大坝湿化变形及稳定性的主要施工参数。利用数值模拟的方法,对不同填筑速率下筑坝料的湿化变形规律以及对坝体稳定性的不利影响进行研究。三种工况对比可知,填筑速率从 0.5m/d 提高到 2.0m/d 时,湿化变形占总变形的比重由原来的 18.6% 增加到了现在的 27.3%。研究结果表明,填筑速率增大会明显加重湿化变形,降低坝体稳定性,填筑速率应控制在 1.0~1.5m/d 之间。相关研究成果可以为同类工程的设计施工提供一定的借鉴,之后还可以根据现场监测数据反演参数来改进分析结果的准确性。

[参考文献]

- [1]张省身.石门子水库坝体加固方案比选及优化[J].陕西水利,2024(11):182-184.
- [2]王飞,黄文斌,米占宽,等.砂板岩堆石料填筑 200m 级面板堆石坝的应力变形分析研究[J].小水电,2024(5):4-9.
- [3]李雅娴,王玉才,王馨梅.深覆盖层面堆石坝不同填筑速度应力变形分析[J].中国水运(下半月),2021,21(14):153-155.
- [4]周雄雄,黄佳钰,范志东,等.基于变形规律的堆石料弹、塑性湿化力学参数研究[J].岩土工程学报,2025,47(5):1082-1088.

作者简介:殷海霞(1987—),女,工程师,现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司,长期从事水利水电工程项目管理工作;刘希元(1987—),男,高级工程师,毕业于中国石油大学,现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司,项目副经理,长期从事水利水电、抽水蓄能工程项目管理工作。