

# 高土石坝筑坝材料的力学特性及长期变形规律研究

袁 斌

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 石河子 832000

**摘要：**随着我国水电能源开发向西部高海拔、强地震区纵深推进，300米级超高土石坝的建设已成为重大战略需求。高土石坝的安全稳定直接关系到下游人民生命财产安全和国家能源战略实施。筑坝材料作为高土石坝的物质基础，其力学特性与长期变形行为是决定大坝安全服役性能的核心因素。本文系统梳理了高土石坝常用筑坝材料（堆石料、反滤料、心墙土料等）的力学特性，重点分析了其非线性、剪胀/剪缩性、流变性及应力历史依赖性；深入探讨了高土石坝在施工期、蓄水期及长期运行期的变形演化机制，特别是堆石料的流变变形对坝体长期沉降和心墙开裂风险的影响；综述了当前用于描述筑坝材料力学行为的本构模型（如邓肯-张模型、南水双屈服面模型、考虑流变的弹塑性模型等）及其适用性与局限性；最后，对高土石坝长期变形预测与安全评估的未来研究方向进行了展望。研究表明，建立能真实反映筑坝材料复杂力学行为、特别是长期流变特性的精细化本构模型，并将其与多源监测数据深度融合，是提升高土石坝全生命周期安全管控水平的关键。

**关键词：**高土石坝；筑坝材料；力学特性；长期变形；流变；本构模型

## 引言

土石坝因地基适应性强、材料来源广、施工简便、抗震佳，成为全球应用最广的坝型。近年来，我国“西电东送”等战略推动下，坝高超250米乃至300米的超高土石坝（如双江口、两河口等）相继规划或建设。这些高土石坝面临巨大水荷载、自重应力，还需应对复杂地质、强震及百年服役要求，安全稳定问题突出。筑坝材料作为土石坝的“血肉”，其物理力学性质直接决定大坝应力应变、渗流稳定及长期性能。高土石坝多采用分区设计，核心部分包括堆石体、反滤过渡层及防渗心墙，不同分区材料级配、密度、矿物成分差异大，力学响应各异。高应力下，材料表现出非线性、非弹性、应力路径依赖性和时间效应，使大坝变形复杂。长期变形，尤其是堆石料流变引起的持续沉降，是高土石坝面临的最严峻挑战<sup>[1]</sup>。过大沉降会改变坝体形态，影响泄洪设施，更可能导致防渗心墙产生不可逆拉伸裂缝，破坏完整性，威胁渗流安全。历史上，多座高土石坝因心墙开裂引发渗漏甚至溃坝。因此，深入研究高土石坝筑坝材料力学特性，揭示长期变形规律，对指导工程设计、优化施工、预测大坝性能及保障安全具有重要理论价值和现实意义。

## 1 高土石坝筑坝材料的力学特性

高土石坝的筑坝材料主要包括堆石料、反滤过渡料和心墙土料三大类，它们各自具有独特的力学行为。

### 1.1 堆石料的力学特性

堆石料作为高土石坝的主要承重结构，通常由坚硬

岩石经爆破、破碎和筛分而成，其力学行为在高应力条件下呈现出高度复杂性。首先，堆石料的应力-应变关系表现出显著的非线性特征，初始加载阶段模量较高，但随应变发展迅速衰减，且卸载-再加载过程形成明显的滞回圈，反映出强烈的非弹性性质。其次，堆石料具有典型的剪胀或剪缩特性，这一行为高度依赖于围压水平：在低围压下，颗粒间的滑移与滚动主导变形过程，宏观上表现为体积膨胀；而在高围压下，颗粒破碎效应增强，导致总体积收缩。这种剪胀/剪缩转换不仅影响有效应力路径，还可能诱发孔隙水压力变化，进而影响坝体稳定性。此外，堆石料表现出明显的压硬性，即其强度和变形模量均随围压增大而提高，这是由于高围压抑制了颗粒运动并增强了颗粒间的咬合作用。尤为关键的是，在高土石坝底部等高应力区域，堆石颗粒会发生不可逆的破碎，这不仅改变了材料的级配曲线，使其趋于密实，也显著影响其后续的力学响应。最后，堆石料在长期恒定应力作用下会持续发生变形，即表现出流变（蠕变）特性，这种时间相关的变形虽速率缓慢，但累积效应显著，是高土石坝长期沉降的主要来源。

### 1.2 反滤过渡料的力学特性

反滤过渡料位于堆石体与防渗心墙之间，承担着双重功能：一方面需满足严格的反滤准则，防止心墙土颗粒被渗流水带走；另一方面需在力学上协调两侧材料的巨大刚度差异。因此，其力学特性必须兼顾渗透稳定性和变形协调性。理想的反滤过渡料应具备良好的级配连续性和变形协调性，既能有效拦截细颗粒，又自身不易被淤堵，从而

保证长期渗透稳定性。在力学性能方面,其变形模量需介于高刚度的堆石料与低刚度的心墙土料之间,以避免在界面处因刚度突变而产生应力集中或脱空现象<sup>[2]</sup>。同时,反滤料在高应力作用下应表现出较低的压缩性,确保其在长期运行中能持续为心墙提供均匀、稳定的侧向支撑,防止心墙因局部失稳而发生弯曲或开裂。

### 1.3 心墙土料的力学特性

心墙作为高土石坝的防渗核心,通常采用低渗透性的黏性土填筑,其力学行为直接关系到大坝的渗流安全。心墙土料普遍具有极低的渗透系数,但压缩性相对较高,在自重和水荷载作用下会产生显著的固结沉降。其抗剪强度由黏聚力和内摩擦角共同构成,但整体强度远低于堆石体,尤其抗拉强度极低,对任何形式的拉伸变形都极为敏感。天然心墙土料常具有一定的结构性,其力学性质受前期应力历史(如超固结比)影响显著;而人工重塑土料则结构性较弱,力学响应更趋近于理想黏土。在实际运行中,心墙并非独立受力,而是受到两侧堆石体的强烈约束。当堆石体因自重或流变发生不均匀沉降时,会对心墙施加附加的弯曲和拉伸应力。一旦该拉应力超过心墙土料的微弱抗拉强度,便极易诱发贯穿性裂缝,从而破坏防渗体系的完整性,构成重大安全隐患。

## 2 高土石坝的长期变形规律与机理

高土石坝的变形全过程可分为施工期、蓄水期和长期运行期三个阶段,每个阶段的主导变形机制不同。

### 2.1 施工期变形

施工期变形主要源于坝体逐层填筑所产生的自重应力。在此阶段,堆石料在碾压作用下被压实,形成初始应力场,其变形行为主要表现为瞬时加载下的弹塑性响应。由于堆石料固有的非线性特性,坝体沉降随填筑高度呈非线性增长,且在上游坡脚区域常观测到指向下游的水平位移。这一阶段的变形过程相对明确,可通过常规的弹塑性有限元方法进行较为准确的模拟和预测,是大坝变形控制的关键窗口期。

### 2.2 蓄水期变形

水库蓄水标志着大坝进入运行状态,此阶段的变形由水荷载、坝体自重及内部渗流场共同驱动。水荷载作用于上游坝面,使坝体整体向下游发生位移;同时,坝体内形成的渗流场会产生指向下游的渗透力,进一步加剧坝体的下游向变形。此外,心墙土料在浸水后可能发生湿化变形(collapse deformation),即因土体结构软化而导致强度降低和体积收缩,这一过程会加速心墙的沉降速率<sup>[3]</sup>。蓄水期变形通常在短时间内完成大部分,但其

对坝体最终形态和应力状态的塑造至关重要,也是检验大坝初期稳定性的关键时期。

### 2.3 长期运行期变形(核心问题)

长期运行期(可持续数十年甚至上百年的)变形是高土石坝安全评估的核心难点,主要由心墙土料的次固结和堆石料的流变共同主导。心墙土料在主固结完成后,其黏土骨架在长期有效应力作用下,通过结合水膜的缓慢调整和颗粒的微幅重排,继续发生极其缓慢的次固结压缩。尽管其速率微小,但长期累积效应不可忽视。相比之下,堆石料的流变变形是长期沉降的最主要来源。其微观机理涉及颗粒接触点的徐变、颗粒在摩擦阻力下的缓慢重排以及高应力区颗粒的持续破碎等多个物理过程。宏观上,堆石料的流变变形与应力水平正相关,且随时间呈对数或幂函数形式增长,绝大部分为不可恢复的永久变形。这种持续的、不均匀的沉降(坝体中部最大)会使坝顶呈现“凹陷”形态,并对心墙施加持续增大的弯曲和拉伸应力。一旦拉应力超过心墙的抗拉极限,将不可避免地产生裂缝,进而可能引发渗流通道扩展、管涌甚至溃坝等灾难性后果。因此,准确刻画和预测堆石料的长期流变行为,是保障高土石坝百年安全服役的生命线。

## 3 筑坝材料本构模型研究进展

为了在数值计算中准确模拟筑坝材料的复杂力学行为,学者们提出了多种本构模型。

### 3.1 非线性弹性模型

以邓肯-张E- $\mu$ 模型和E-B模型为代表的非线性弹性模型,因其概念清晰、参数易于通过常规三轴试验获取,在工程实践中得到了广泛应用。这类模型通过双曲线关系描述应力-应变行为,并引入切线模量和切线体积模量来表征材料的非线性。然而,其根本缺陷在于将卸载/再加载过程简化为弹性行为,无法真实反映材料的塑性体积变形和能量耗散特性。更重要的是,该类模型完全忽略了时间效应,无法描述堆石料的流变行为,因此在模拟高土石坝长期变形时存在显著不足,仅适用于对短期稳定性要求较高的初步分析。

### 3.2 弹塑性模型

弹塑性模型基于屈服面、流动法则和硬化法则的理论框架,能够更真实地描述筑坝材料的非弹性、剪胀/剪缩等复杂特性。其中,由中国学者提出的南水双屈服面模型通过分别定义剪切屈服面和体积屈服面,成功捕捉了堆石料在不同围压下剪胀与剪缩的转换行为,因而在国内众多高土石坝工程中获得了成功应用。剑桥模型及其针对堆石料的改进版本,则引入了临界状态概念和压

硬性法则，能较好地反映材料的状态相关性，但对于颗粒破碎这一关键机制的描述仍显薄弱<sup>[4]</sup>。近年来，一些研究尝试将颗粒破碎作为一个独立的硬化变量引入本构框架，使模型能够动态反映级配演化对力学性质的影响，但此类模型参数繁多，标定过程复杂，工程实用性有待提高。

### 3.3 考虑流变的本构模型

针对高土石坝长期变形预测的核心需求，考虑流变效应的本构模型成为当前研究的前沿热点。早期的经验或半经验模型，如Singh-Mitchell幂律模型和Mesri对数模型，通过直接建立应变与时间、应力的函数关系来描述蠕变行为，形式简洁但缺乏坚实的物理基础，外推预测能力有限。更为先进的方法是基于内时理论或统一硬化理论构建弹塑性流变耦合模型，这类模型试图在一个统一的热力学框架下，将瞬时加载变形与时间相关的流变变形有机融合。例如，通过定义与时间相关的流变势函数，将流变应变增量表达为当前应力状态、硬化参量和时间增量的函数。此类模型物理机制更为清晰，理论上具有更强的普适性，但其数学形式复杂，所需参数数量庞大，且难以通过常规试验完整标定，目前仍主要处于理论探索和特定工程验证阶段。

### 4 未来展望

面向300米级超高土石坝的建设需求，未来关于筑坝材料力学特性与长期变形规律的研究应重点关注以下几个方向：（1）多尺度力学机理研究：结合离散元（DEM）等细观模拟手段与室内宏-微观联动试验，从颗粒尺度揭示堆石料剪胀、破碎及流变的耦合演化机制，为构建物理机制更清晰的本构模型奠定基础。（2）高性能智能本构模型构建：探索将机器学习（如神经网络、高斯过程回归）与传统力学理论相结合，利用海量试验数据和监测数据，构建能够自动学习材料复杂非线性、非弹性及时变行为的“数据-知识”双驱动智能本构模型。（3）多场耦合长期性能仿真：发展能够耦合应力场、渗流场、温度场（考虑气候变暖影响）乃至化

学场（考虑碱骨料反应等）的高精度、长历时数值仿真平台，实现对高土石坝全生命周期性能的精细化预测。

（4）基于数字孪生的大坝安全评估：整合BIM、物联网、大数据和AI技术，构建高土石坝的数字孪生体。通过实时接入GNSS、InSAR、光纤传感等多源监测数据，动态更新和校准数值模型，实现对大坝长期变形趋势的滚动预测和安全风险的智能预警。

### 5 结语

高土石坝筑坝材料的力学特性复杂，尤以堆石料的非线性、剪胀/剪缩性及显著的流变特性为核心。由堆石料流变引发的长期不均匀沉降，是威胁高土石坝防渗心墙完整性和长期安全的最主要风险源。现有的本构模型在描述这些复杂行为时各有侧重，但普遍存在物理机制不够完善或工程实用性不足的问题。未来的研究必须打破传统单一学科的壁垒，深度融合岩土力学、材料科学、计算力学、数据科学等多学科知识。通过深化对材料多尺度力学机理的认识，发展新一代智能本构模型，并依托数字孪生技术实现模型与监测数据的深度融合与动态交互，方能真正实现对高土石坝长期变形行为的精准预测和全生命周期的主动式安全管控，为国家重大水利水电工程的安全建设与长效运行保驾护航。

### 参考文献

- [1]《高土石坝筑坝材料力学特性与变形控制理论研究及工程实践》及《深厚覆盖层上高面板坝建设与长效性能评估关键技术及实践》2项科技成果通过中国水力发电学会科技成果鉴定[J].西北水电,2022,(02):119.
- [2]周恒,高土石坝筑坝材料力学特性与变形控制理论研究及工程实践.陕西省,中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,2022-03-03.
- [3]王冉.胶凝砂砾石筑坝材料力学特性研究及坝体优化设计[D].云南农业大学,2024.
- [4]周伟,高堆石坝筑坝颗粒材料宏细观力学特性及工程应用.湖北省,武汉大学,2015-06-27.