

DOI: 10.11779/CJGE20230667

# 基于超大型三轴试验和原型监测的堆石料模型参数 缩尺效应修正

邹德高<sup>1,2</sup>, 刘京茂<sup>1,2</sup>, 宁凡伟<sup>\*1,2</sup>, 孔宪京<sup>1,2</sup>, 崔更尧<sup>1,2</sup>, 金伟<sup>3</sup>, 湛正刚<sup>4</sup>

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学建设工程学院水利工程系, 辽宁 大连 116024;  
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 4. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 根据常规大型三轴(最大颗粒粒径 60 mm)试验堆石料模型参数计算的土石坝变形值与原型监测值存在显著的差异, 但导致其差异的因素及其影响程度仍不清。采用中国首台超大型三轴仪(最大颗粒粒径 200, 160 mm)及大型三轴仪, 对 5 座世界级高坝筑坝堆石料开展了力学特性缩尺效应(包括缩尺方法、颗粒尺寸效应)试验研究, 系统分析了本构模型(邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型, 广义塑性模型)对坝体计算变形的影响, 结合两河口心墙坝和阿尔塔什面板坝的监测资料探讨了缩尺效应规律和本构模型的合理性, 明晰了缩尺方法、颗粒尺寸效应以及本构模型三类误差是高土石坝计算失真的主要原因。研究结果表明: 控制孔隙率一致时, 混合法缩尺相比相似级配法会高估堆石料的模量, 相似级配缩尺方法更加合理; 基于相似级配法时, 常规大型三轴试验相比超大型三轴会高估堆石料的模量, 超大型三轴试验成果与实际工程监测资料反演结果十分接近, 可以认为基本消除了尺寸效应影响; 广义塑性模型计算结果(尤其是水平位移)比邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型更符合实际。针对工程中应用最多的邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型参数提出了缩尺效应分类修正方法, 易于对大型三轴试验参数进行修正, 避免低估大坝沉降变形。研究成果有助于深入理解堆石料缩尺效应及不同本构模型的影响, 可为同类工程变形预测提供可靠的试验与数值计算依据。

**关键词:** 堆石料; 超大型三轴; 缩尺效应; 本构模型

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)12-2476-08

**作者简介:** 邹德高(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高土石坝和核电工程抗震安全评价、计算土力学和数值分析方法、粗粒土测试技术和本构理论等方面的研究。E-mail: zoudegao@dlut.edu.cn。

## Modification of scale effects of constitutive model parameters using super large-scale triaxial tests and in-situ monitoring data

ZOU Degao<sup>1,2</sup>, LIU Jingmao<sup>1,2</sup>, NING Fanwei<sup>\*1,2</sup>, KONG Xianjing<sup>1,2</sup>, CUI Gengyao<sup>1,2</sup>, JIN Wei<sup>3</sup>, ZHAN Zhenggang<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 4. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081 China)

**Abstract:** The significant discrepancy between the calculated deformation values based on the traditional large-scale triaxial test results on rockfill materials (with the maximum particle size of 60 mm) and the monitoring data from the prototype dam raises concerns about the factors causing this difference and their respective influences. The scale effects (including scaling methods and particle size effects) of the mechanical properties of rockfill materials in five world-class high dams are investigated using the first super large-scale triaxial apparatus in China (with the maximum particle sizes of 200 mm and 160 mm) as well as a large-scale triaxial apparatus. The influences of the constitutive models (such as the Duncan  $E-B$  and  $E-\mu$  models, and generalized plasticity model) on the calculation of dam deformations are examined. Additionally, by incorporating the monitoring data from Lianghekou and Aertashi dams, the rules of the scale effects and the rationality of constitutive models are explored, thereby clarifying that the errors related to the scaling methods, particle size effects and constitutive models are the primary causes of distortion in the calculations of high rockfill dams. The research findings indicate that under

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109114, 52192674, 52079023);  
云南省重大科技专项计划(202102AF080002)

收稿日期: 2023-07-17

\*通信作者 (E-mail: ningfw@dlut.edu.cn)

the same void ratio, the mixed-scale method tends to overestimate the modulus of rockfill materials compared to the parallel grading method. Moreover, the traditional large-scale triaxial tests based on the parallel grading method tend to overestimate the modulus of rockfill materials compared to the results obtained from the super large-scale triaxial tests, which effectively eliminate the size effects. Furthermore, the calculations based on the generalized plasticity model, particularly in terms of horizontal displacement, are more in line with the actual observations than those based on the Duncan  $E-B$  and  $E-\mu$  models. Finally, a scale effect classification correction method for model parameters is proposed specifically for the Duncan  $E-B$  and  $E-\mu$  models. The research outcomes contribute to a deeper understanding of the scale effects of rockfill materials and the influences of different constitutive models. They also provide reliable experimental and numerical calculation references for the deformation prediction in similar engineering projects.

**Key words:** rockfill material; super large-scale triaxis; scale effect; constitutive model

## 0 引言

堆石料由其透水性好、填筑密度大、压密性好及不易液化等优点, 在大型土工构筑物中得到广泛的应用, 是人工岛、机场高填方、路基、高土石坝等土工构筑物的主要建筑材料。目前土石坝的坝高已从 200 米级迈向 300 米级<sup>[1]</sup>。然而, 在高土石坝尤其是面板坝坝高达到 200 米级时, 一系列工程问题随之产生, 其中包括面板裂缝、脱空、挤压破坏、止水失效以及渗漏量偏大等现象<sup>[2]</sup>。分析其直接原因主要是堆石体的过量沉降以及不均匀变形。若要对坝体的变形量进行有效控制, 首先需要在施工前对坝体的变形进行准确的预测, 但目前根据室内力学试验参数计算的坝体沉降值与原型监测值存在较为显著的差别, 部分工程可低估实际变形量 50% 以上。

筑坝堆石料的最大粒径普遍在 600~800 mm<sup>[3]</sup>, 常规大型三轴仪满足的最大颗粒粒径仅为 60 mm, 试验材料需要进行大比例的缩尺。缩尺后材料力学特性与原型的差异即为缩尺效应。马洪琪指出: “缩尺效应的存在, 往往导致高坝变形计算值较实际观测值偏小, 低坝变形计算值较实际观测值偏大, 这也是高坝变形预测不够准确的主要原因之一<sup>[2]</sup>”。目前, 学者们普遍认为缩尺效应的影响因素包括缩尺方法, 缩尺的比例 (即颗粒的尺寸效应) 以及制样密度控制方法等<sup>[4-6]</sup>。但由于缺乏统一的缩尺标准, 采用的缩尺方法、制样标准等均不尽相同, 导致对堆石料缩尺引起的强度和变形的变化规律没有统一的认识<sup>[7]</sup>。此外, 大部分研究是通过最大粒径 60 mm 常规三轴试样向更小尺寸方向发展, 不可避免地会有较大的偏差, 甚至可能会扭曲原型筑坝堆石料的结果。

高坝变形预测不准的另一方面原因是高坝变形的计算方法及理论的误差, 例如基于同样的试验成果, 非线性弹性邓肯  $E-B$  模型因无法反映堆石料剪胀特性导致其与弹塑性本构模型计算坝体竖向和水平变形存在较大差别<sup>[8]</sup>。此外, 影响高坝变形预测的因素可能还包括试验样本的代表性、实际筑坝过程中填筑密实

度的随机性、高坝内部监测数据本身的准确性等。

主要针对缩尺效应这一难题, 采用国内首台超大型三轴仪 (最大颗粒粒径 200, 160 mm) 及大型三轴仪 (最大颗粒粒径 60 mm), 依托 5 座世界级高坝的人工开采爆破堆石料, 重点分析了缩尺方法、颗粒尺寸效应对堆石料力学特性的影响, 并通过有限元计算比较邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型和广义塑性本构模型计算结果的差异并与实测值进行对比, 讨论缩尺方法、颗粒尺寸效应以及本构模型 3 类主要误差对高土石坝变形计算的影响, 并研究邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  本构模型参数的缩尺效应修正方法。本文的设备研发工作及试验研究持续近 10 a, 研究得到了一些重要的量化成果, 并可进一步推动堆石料缩尺效应的认识。本文的研究思路见图 1。

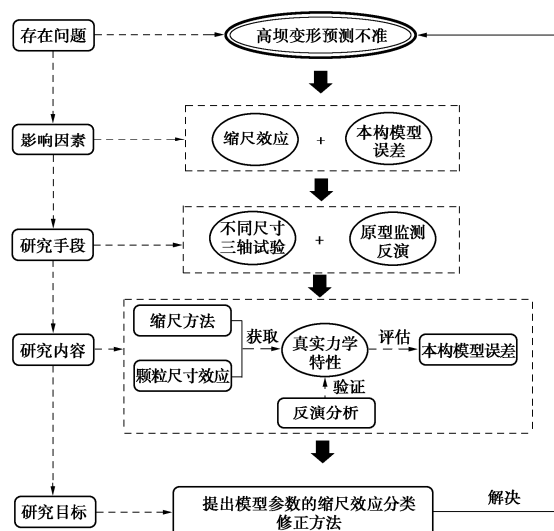


图 1 研究思路图

Fig. 1 Research roadmap

## 1 缩尺方法的影响

目前常用的缩尺方法包括剔除法、等量替代、相似级配以及混合法<sup>[9]</sup>。纵观国外有关堆石料的试验研究, 相似级配法是采用的主要方法<sup>[10-12]</sup>。由于规范<sup>[9]</sup>规定小于 5 mm 粒径的含量不宜超过 30%, 直接采用

相似级配法进行缩尺往往不满足要求,这也导致了混合法是目前国内应用最广泛的缩尺方法。因此,明确不同缩尺方法导致的力学特性差异是进行缩尺效应研究中的重要一环。

1.1 试验内容

本文研究采用了 3 种不同的堆石料(如美英安岩、阿尔塔什灰岩以及两河口板岩),堆石料原型级配见图 2,分别采用相似级配法和混合法进行缩尺,为满足规范<sup>[9]</sup>中径-径比要求,缩尺后级配的最大粒径为 60 mm。其中混合法首先采用  $n=4$  的相似级配缩尺,再进行等量替代。工程上对堆石料往往采用控制孔隙率进行施工碾压<sup>[13]</sup>,因此本文的制样孔隙率均与工程设计保持一致,试验控制条件见表 1。

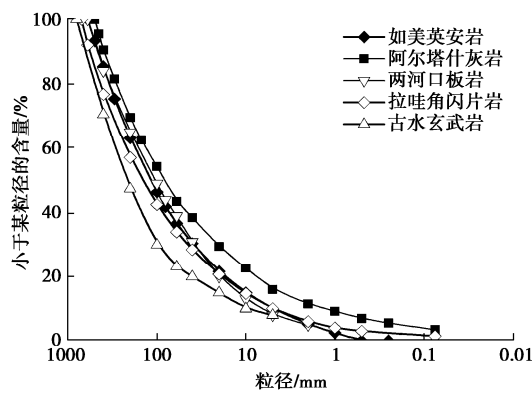


图 2 堆石料原型级配曲线

Fig. 2 Particle-size distribution of prototype rockfill

表 1 缩尺方法研究试验控制条件

Table 1 Control conditions in tests for scaling methods

试验材料	孔隙率/%	制样干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	围压 $\sigma_3$ /MPa	缩尺方法
如美英安岩	20	2.107	0.4, 1.0, 2.0	相似级配法, 混合法
阿尔塔什灰岩	19	2.155	0.5, 1.0, 1.5	
两河口板岩	21	2.147	0.5, 1.0, 1.5	

试验仪器采用大型高压静动三轴仪<sup>[14]</sup>,试样尺寸为直径 300 mm、高 700 mm。按照规范<sup>[9]</sup>相关规定进行试验,试样采用分层振捣法。采用表面振动器击实,激振频率 50 Hz。采用控制试样干密度法制样。试样采用水头饱和法进行饱和。固结完成后以 0.1%/min 的应变速率剪切。

1.2 试验结果

由于混合法改变了土体颗粒间的排列结构<sup>[15]</sup>,不能真实反映堆石料的力学特性,相似级配法理论上更加合理,后文关于颗粒尺寸效应的研究也论证了这一点。以如美英安岩为例,给出了不同缩尺方法下的应力-应变-体变关系(图 3)。从图 3 中可看出,不同缩尺方法对堆石料变形特性有着明显的影响,粗颗粒含

量更高的混合法缩尺试验偏应力-应变关系曲线在粗颗粒含量相对较小的相似级配法试验曲线上方,与混合法缩尺的试验相比相似级配法会高估变形模量。

表 2 给出了 3 种不同的堆石料在不同缩尺方法条件下邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型参数。缩尺方法对邓肯  $E-B$  模型参数的影响主要体现在参数  $K$ ,  $K_b$ , 对参数  $n$ ,  $m$  的影响较小,混合法缩尺的邓肯  $E-B$  模型参数  $K$ ,  $K_b$  分别较相似级配法缩尺高估 21%~28%, 29%~32%。缩尺方法对邓肯  $E-\mu$  模型的影响主要体现在  $G$  上,较相似级配法缩尺高估 8%~13%,对  $F$ ,  $D$  影响程度较小,为方便比较,将不同缩尺方法的  $F$ ,  $D$  固定一致。

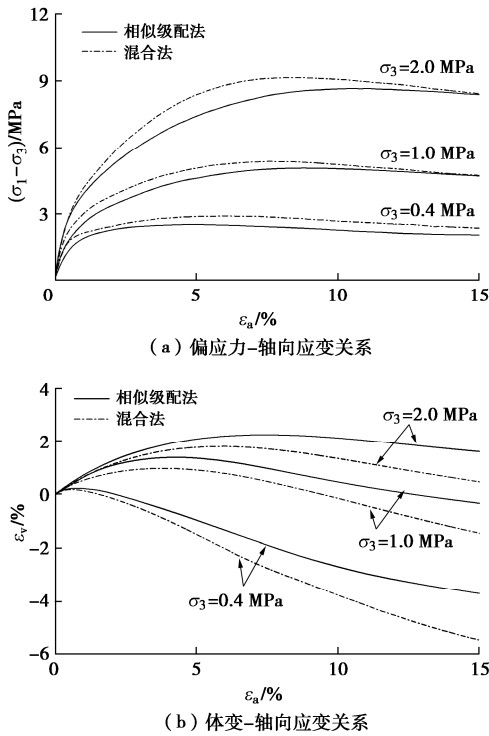


图 3 如美英安岩不同缩尺方法条件下应力-应变-体变关系曲线

Fig. 3  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_a$  and  $\epsilon_v - \epsilon_a$  relations of Rumei rockfill in different scaling methods

2 颗粒尺寸效应影响

2.1 基于超大型三轴仪的颗粒尺寸试验研究

颗粒尺寸效应影响研究的重要方式之一是采用尽可能大尺寸的室内试验设备<sup>[16]</sup>,为此大连理工大学研制了最大试样直径为 1 m 的超大型三轴仪<sup>[15]</sup>,试验的最大粒径可达 200 mm,对于某些筑坝过渡料<sup>[17]</sup>,以及河床砂砾石筑坝料<sup>[18-19]</sup>已达到可进行原型级配试验的标准。为了验证超大型三轴加载系统的准确性,采用硅质砂土对大型三轴仪及超大型三轴仪进行了校准试验,超大型三轴及大型三轴试验系统的砂土单调静力试验结果是一致的<sup>[20]</sup>。与截至目前,该超大型三轴仪已对 5 个世界级高土石坝工程的筑坝堆石料开展了

表 2 不同缩尺方法条件下邓肯 E-B、E-ν 模型参数

Table 2 E-B and E-ν model parameters in different scaling methods

试验材料	缩尺方法	共同参数					邓肯 E-B 参数		邓肯 E-ν		
		$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$G$	$F$	$D$
如美英安岩	混合法	57.9	10.8	1450	0.42	0.78	1190	0.05	0.40	0.15	7.8
	相似级配法	54.3	8.5	1200	0.45	0.80	900	0.06	0.37	0.15	7.8
两河口板岩	混合法	52.2	10.4	1085	0.25	0.73	295	0.09	0.36	0.19	6.0
	相似级配法	50.2	9.4	850	0.26	0.75	225	0.10	0.32	0.19	6.0
阿尔塔什灰岩	混合法	53.4	9.0	1390	0.38	0.79	750	0.01	0.37	0.14	5.6
	相似级配法	52.6	8.7	1150	0.40	0.82	582	0.02	0.35	0.14	5.6

力学特性试验研究, 包括在建世界最高心墙坝(如美心墙坝)、已建国内最高心墙坝(两河口心墙坝)、在建世界第二高与第三高面板坝(古水、拉哇面板坝)以及深覆盖层上已建世界最高面板坝(阿尔塔什面板坝), 超大型三轴试验难度极大, 已有试验成果对缩尺效应的研究具有重大意义。

5 种筑坝堆石料试验均采用相似级配法缩尺, 原型级配见图 2。试样直径与试验最大粒径的比值根据规范规定选取为 5<sup>[9]</sup>。如美英安岩进行了最大粒径分别为 60, 160, 200 mm 的试验, 其他 4 种材料进行了最大粒径分别为 60, 160 mm, 具体试验控制条件见表 3。以如美英安岩试验结果为例, 说明颗粒尺寸效应的影响规律。如图 4 所示, 颗粒粒径对应力-应变-体变关系具有显著的影响。在相同围压条件下, 最大粒径 60 mm 的试验相比于最大粒径 160, 200 mm 的试验具有更高的峰值前割线模量以及更强的剪胀性。峰值应力后, 最大粒径 60 mm 试验的软化程度要高于最大粒径 160, 200 mm 试验。随着轴向应变的增加, 不同最大粒径试验的峰值后应力差距逐渐减小。最大粒径 200 mm 试验的应力-应变关系曲线与最大粒径 160 mm 试验差别较小, 峰值后最大粒径 160 mm 试验的剪胀性要略强一些。

表 3 试验控制条件

Table 3 Control conditions in tests for particle size

试验材料	孔隙率/%	制样干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最大粒径/mm	围压 $\sigma_3$ /MPa
如美英安岩	20	2.107	60, 160, 200	0.4, 1.0, 1.5, 2.0
阿尔塔什灰岩	19	2.155	60, 160	0.5, 1.0, 1.5
两河口板岩	21	2.147	60, 160	0.5, 1.5, 2.5
拉哇角闪片岩	18	2.438	60, 160	0.5, 1.5, 2.5
古水玄武岩	18	2.269	60, 160	0.5, 1.5, 2.5

表 4 给出了 5 种筑坝堆石料不同最大粒径的邓肯 E-B、E-μ 模型参数。与缩尺方法对邓肯模型参数的影响类似, 颗粒尺寸效应对其影响主要体现模型参数  $K$ ,  $K_b$  以及  $G$ , 其他参数影响程度较小。最大粒径 60 mm 的邓肯参数  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  分别较最大粒径 160 mm 高估

18%~27%, 29%~39%, 6%~12%。最大粒径 60 mm 试验在不同围压下邓肯 E-B 模型的弹性模量及体积模量分别较最大粒径 160 mm 高估约 20%~35%, 30%~45%。可以认为最大粒径为 60~160 mm, 筑坝堆石料的颗粒尺寸效应是比较显著的。

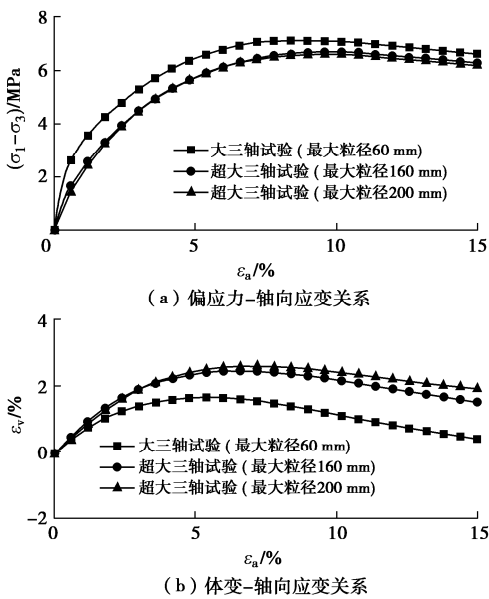


图 4 如美英安岩不同最大粒径条件下应力-应变-体变关系曲线 ( $\sigma_3=1.5$  MPa)

Fig. 4  $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_a$  and  $\varepsilon_v-\varepsilon_a$  relations of Rumei rockfill with different  $d_{max}(\sigma_3=1.5$  MPa)

当最大粒径从 160 mm 增大到 200 mm 时, 颗粒尺寸效应影响不再明显, 如美英安岩最大粒径 160 mm 试验的  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  仅较最大粒径 200 mm 试验高估仅 4%, 3%, 3%。筑坝堆石料力学特性颗粒尺寸效应产生的原因是单颗粒强度、形状等特性存在尺寸效应, 上述影响因素随粒径的变化是非线性的<sup>[21]</sup>, 其中岩石抗压强度在试样尺寸达到 200~300 mm 后几乎不再变化<sup>[22]</sup>。因此, 根据如美英安岩最大粒径 160, 200 mm 的试验结果, 可以推测当最大粒径达到 200 mm 左右后, 随着粒径的进一步增大, 堆石料的缩尺效应影响程度较小。下面将结合原型监测资料进一步论证这个结论。

2.2 基于先进弹塑性本构模型的原型监测资料反演结果对比

利用现场监测数据通过智能优化算法进行反演是

表 4 不同最大粒径条件下邓肯  $E-B$ 、 $E-\mu$ 模型参数  
Table 4  $E-B$  and  $E-\mu$  model parameters for different particle sizes

试验材料	最大粒径/ mm	共同参数					邓肯 $E-B$ 参数		邓肯 $E-\mu$		
		$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$G$	$F$	$D$
如美英安岩	60	54.3	8.5	1200	0.45	0.80	900	0.06	0.37	0.15	7.8
	160	52.5	7.6	1020	0.42	0.75	700	0.01	0.34	0.15	7.8
	200	52.2	7.6	980	0.41	0.74	680	0.01	0.33	0.15	7.8
阿尔塔什灰岩	60	52.6	8.7	1150	0.40	0.82	582	0.02	0.35	0.14	5.6
	160	50.2	6.5	980	0.37	0.74	420	0.05	0.33	0.14	5.6
两河口板岩	60	50.2	9.4	850	0.26	0.75	225	0.10	0.32	0.19	6.0
	160	49.8	7.4	720	0.25	0.71	170	0.06	0.30	0.19	6.0
拉哇角闪片岩	60	53.7	9.8	1721	0.25	0.68	780	0.12	0.37	0.13	5.8
	160	52.5	9.3	1356	0.27	0.71	570	0.10	0.33	0.13	5.8
古水玄武岩	60	54.4	11.1	2054	0.35	0.86	720	0.11	0.38	0.16	8.1
	160	54.7	11.3	1620	0.32	0.84	530	0.09	0.34	0.16	8.1

获取客观材料参数一种手段，本文基于阿尔塔什、两河口工程最新的监测资料进行反演，并将反演所得参数拟合的应力应变曲线作为原型级配结果，并将其与大型三轴及超大型三轴试验结果进行对比分析。由于邓肯模型不能很好地反映堆石料的剪胀性，反演的参数无法拟合三轴试验的应力-应变曲线，且高估坝体变形<sup>[8]</sup>，本文采用理论框架更加合理的统一全过程广义塑性模型<sup>[23-24]</sup>和 PSO 反演算法进行反分析，反演过程分为瞬时变形与流变变形两个过程，其中流变参数根据停工期流变量进行反演，反演分析的计算模型及填筑过程与现场施工一致<sup>[25-26]</sup>。

图 5, 6 给出了阿尔塔什、两河口大坝反演值与实测值的对比。

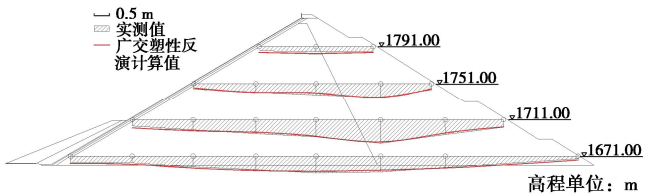


图 5 阿尔塔什面板坝反演与实测沉降对比（竣工期）  
Fig. 5 Comparison between simulated and measured settlements of Aertashi CFRD after construction

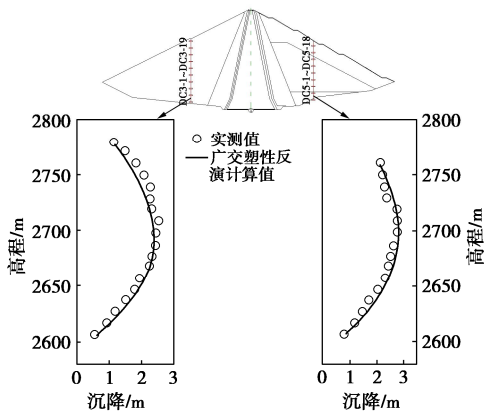


图 6 两河口心墙坝反演与实测沉降对比（竣工期）  
Fig. 6 Comparison between simulated and measured settlements of Lianghekou core rockfill dam after construction

以阿尔塔什灰岩为例，图 7 给出了大型、超大型三轴试验结果以及原型监测反演瞬变参数模拟的三轴应力应变曲线。从图 7 中可以看出，原型监测反演参数拟合结果与超大型三轴试验结果十分接近，表明超大型三轴试验参数能合理地反映实际筑坝材料的力学特性，可以认为超大型三轴试验成果基本消除了尺寸效应影响。

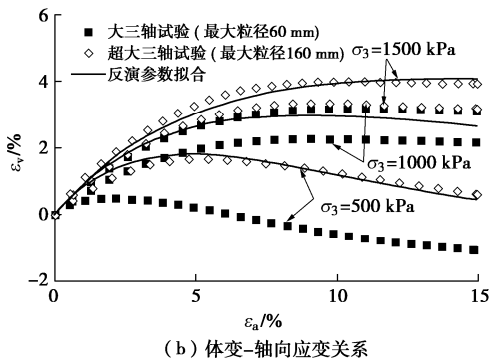
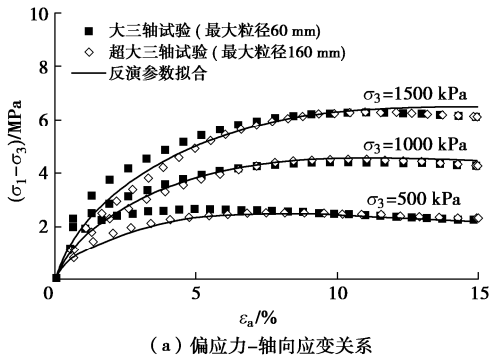


图 7 阿尔塔什试验结果与反演参数拟合结果对比  
Fig. 7 Comparison between test results and those simulated by parameters from back analysis of Aertashi rockfill

### 3 本构模型对大坝变形的影响

堆石料本构模型是影响高土石坝计算变形精度的重要因素之一。基于相同试验成果，不同类型的本构模型会存在较大的差别<sup>[8]</sup>，例如，邓肯  $E-B$  本构模型会高估计算变形，尤其是水平变形<sup>[8]</sup>。章为民等<sup>[27]</sup>认

为邓肯模型存在致命的定性错误, 邓肯模型所得的面板拉应力过大, 蓄水期坝体变形不合理, 弹塑性模型能更好地反映堆石体的基本特性, 计算数值上的大小偏差可以认为是实验室与现场的差别。由于缩尺效应存在会使计算结果偏小, 导致邓肯  $E-B$  本构模型计算变形偏大的问题有一定的缓解, 邓肯  $E-B$  本构模型不合理性未引起足够的重视。

为研究不同本构模型对土石坝计算变形的影响, 本文基于超大型三轴试验结果, 分别采用邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  以及广义塑性模型对阿尔塔什面板堆石坝变形进行数值分析, 并与坝体原型观测资料进行对比。

图 8 给出了坝体 0+475 m 断面基于超大型三轴试验 (最大颗粒粒径 160 mm) 的邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型以及广义塑性模型计算得到的坝体变形与实测值的对比。通过对比可以发现, 广义塑性模型参数计算结果与实测吻合良好, 在数值上更加接近实测结果; 实测坝体最大沉降 60.6 cm, 邓肯  $E-B$  模型计算最大沉降 74.3 cm, 与实测误差 23%; 邓肯  $E-\mu$  模型计算最大沉降 73.5 cm, 与实测误差 21%; 广义塑性模型计算最大沉降 63.3 cm, 与实测值相比误差仅 4%。广义塑性模型参数计算的顺河向最大误差值为 11.6 cm, 邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型的最大误差值则达到了 50.3, 61.6 cm, 广义塑性模型计算顺河向位移误差较邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型分别降低了 77%, 81%。计算结果说明采用基于超大型三轴试验的广义塑性模型计算结果可以较好地反映坝体实际变形情况。但基于超大型三轴试验参数的邓肯模型计算结果会明显高估坝体变形, 尤其会高估顺河向位移。

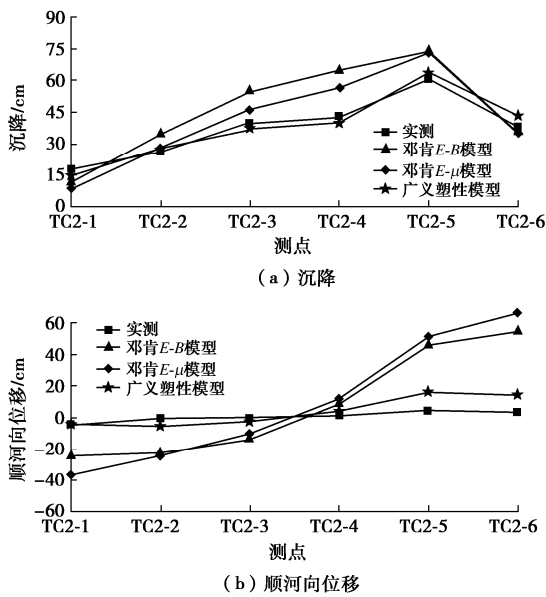


图 8 0+475 m 断面 1711 m 高程实测与计算变形量对比  
Fig. 8 Comparison between simulated and measured settlements of Aertashi CFRD

这就说明即使采用接近原级配的试验曲线, 邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型计算时, 由于存在理论上的缺陷, 计算误差依然比较明显。因此需将模量进行修正才可获得较为准确的坝体沉降结果, 采用邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型进行反演, 结果表明,  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  在最大粒径 160 mm 超大型三轴试验结果基础上需要分别乘以系数 1.17, 1.26, 1.06, 才能得到较为准确的坝体沉降值。

为进一步验证上述得到的邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  本构模型的修正系数, 采用二维的混凝土面板堆石坝 (坝高 250 m, 坝坡 1:1.5, 坝体分 50 层填筑), 比较基于如美英安岩超大型三轴试验 (最大粒径 160 mm) 的邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型和广义塑性模型计算的坝体竣工期变形, 见图 9 (a), 不考虑参数修正的邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型计算的大坝沉降较广义塑性模型高估约 25%。当采用第 2 节本构模型修正系数后邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型计算的大坝沉降与广义塑性本构模型基本一致, 差别仅为 3% 以内 (图 9 (b)), 验证了对邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  本构模型参数进一步修正是合理的。

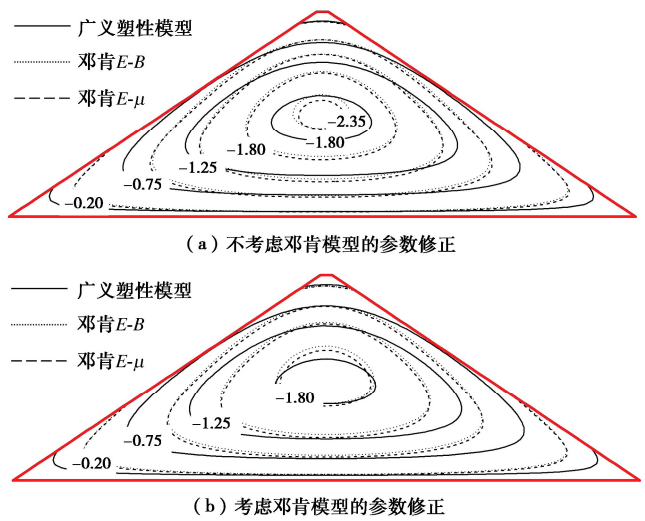


图 9 二维面板坝计算等值线结果  
Fig. 9 Contour lines of displacement of 2D CFRD

表 5 二维面板坝计算结果对比 (模型修正)		
Table 5 Comparison of calculated results for 2D CFRD		
(Modification of model parameters)		单位: %
本构模型	竖向沉降差 (与广义塑性模型相比)	
	修正前	修正后
邓肯 $E-B$	26	3
邓肯 $E-\mu$	25	2

#### 4 模型参数分类修正系数

综合上述缩尺方法、颗粒尺寸效应以及本构模型误差的研究结果, 本文提出了邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型参数的缩尺效应分类修正方法, 如表 6 所示。

建议采用邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型进行计算时, 对于采用混合法缩尺至最大粒径 60 mm 的试验结果, 模型参



数  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  的修正系数为 0.65~0.75, 0.65~0.75, 0.80~0.85; 对于采用相似级配法缩尺至最大粒径 60 mm 的试验结果, 模型参数  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  的修正系数为 0.85~0.95, 0.85~0.95, 0.90~0.95。

表 6 邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型参数分类修正系数

Table 6 Parameter correction coefficients considering scaling effects and constitutive model for  $E-B$  and  $E-\mu$  models

本构模型	修正参数	修正系数		
		缩尺方法 (混合法)	颗粒 尺寸效应	本构 误差/%
邓肯 $E-B$	$K$	0.75~0.80	0.75~0.85	1.17
	$K_b$	0.75~0.80	0.70~0.75	1.26
邓肯 $E-\mu$	$K$	0.75~0.80	0.75~0.85	1.17
	$G$	0.89~0.93	0.89~0.94	1.06

5 结 论

(1)控制孔隙率一致时,混合法缩尺的邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型参数  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  分别较相似级配法缩尺高估 21%~28%, 29%~32%, 8%~13%。

(2)采用相似级配法缩尺时,最大粒径 60 mm 试验的邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型参数  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  分别较最大粒径 160 mm 高估 18%~27%, 29%~39%, 6%~12%。如美英安岩最大粒径 160 mm 试验的  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  仅较最大粒径 200 mm 试验高估 4%, 3%, 3%。

(3)基于最大粒径 160 mm 超大型三轴试验结果的广义塑性模型计算变形与阿尔塔什、两河口大坝原型监测结果差别约 4%,超大型三轴试验结果基本消除了颗粒尺寸效应的影响。由于邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$ 本构模型存在理论缺陷,需将模型参数  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  在最大粒径 160 mm 超大型三轴试验结果基础上进一步修正才能得到准确的沉降变形。

(4)提出了邓肯  $E-B$ ,  $E-\mu$  模型参数的分类修正方法,采用混合法缩尺至最大粒径 60 mm 的试验结果,模型参数  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  的修正系数为 0.65~0.75, 0.65~0.75, 0.80~0.85;采用相似级配法缩尺至最大粒径 60 mm 的试验结果,模型参数  $K$ ,  $K_b$ ,  $G$  的修正系数为 0.85~0.95, 0.85~0.95, 0.90~0.95。

本文提出的本构模型参数缩尺效应修正方法已经应用于十多项高土石坝工程和抽水蓄能工程,可为其他同类工程变形预测提供可靠的试验与计算依据。需要指出的是,本文缩尺方法以及颗粒尺寸效应影响研究针对的材料为人工开采的爆破堆石料,天然河床砂砾料在级配、颗粒形状上、母岩强度均与人工爆破堆石料有着较为显著的差别,缩尺效应对砂砾料力学特性的影响将在下一步进行研究。

参考文献:

[1] 孔宪京,邹德高. 紫坪铺面板堆石坝震害分析与数值模拟

[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (KONG Xianjing, ZOU Degao. Seismic Damage Analysis and Numerical Simulation of Zipingpu Concrete Face Rockfill Dam[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))

[2] MA H Q, CHI F D. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams[J]. Engineering, 2016, 2(3): 332-339.

[3] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999. (GUO Qingguo. Engineering Character and Application of Aggregate Soil[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Press, 1999. (in Chinese))

[4] 周 伟,常晓林,马 刚,等. 堆石体缩尺效应研究进展分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(1): 17-23. (ZHOU Wei, CHANG Xiaolin, MA Gang, et al. Analysis on the research development of rockfill scale effect[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2017, 3(1): 17-23. (in Chinese))

[5] 武利强,朱 晟,章晓桦,等. 粗粒料试验缩尺效应的分析研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2187-2197. (WU Liqiang, ZHU Sheng, ZHANG Xiaohua, et al. Analysis of scale effect of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2187-2197. (in Chinese))

[6] 傅 华,韩华强,凌 华. 堆石料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2645-2649. (FU Hua, HAN Huaqiang, LING Hua. Effect of grading scale method on results of laboratory tests on rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2645-2649. (in Chinese))

[7] 孔宪京,宁凡伟,刘京茂,等. 基于超大型三轴仪的堆石料缩尺效应研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 255-261. (KONG Xianjing, NING Fanwei, LIU Jingmao, et al. Scale effect of rockfill materials using super-large triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 255-261. (in Chinese))

[8] 沈珠江. 鲁布革心墙堆石坝变形的反馈分析[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 1-13. (SHEN Zhujiang. Feedback analysis of deformation of Lubuge core rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 1-13. (in Chinese))

[9] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Tesing Method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))

[10] MARSCHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, 98(1): 95-114.

[11] VARADARAJAN A, SHARMA K G, VENKATACHALAM K, et al. Testing and modeling two rockfill materials[J].

- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(3): 206-218.
- [12] BOLTON M D, LAU C K. Scale effects arising from particle size[C]// Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modeling. Paris, 1988: 127-131.
- [13] 混凝土面板堆石坝设计规范: DL/T 5016—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011. (Design Code for Concrete Face Rockfill Dams: DL/T 5016—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011. (in Chinese))
- [14] NING F W, LIU J M, KONG X, et al. Critical state and grading evolution of rockfill material under different triaxial compression tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**: 04019154.
- [15] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高. 堆石料尺寸效应研究面临的问题及多尺度三轴试验平台[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(11): 1941-1947. (KONG Xianjing, LIU Jingmao, ZOU Degao. Scale effect of rockfill and multiple-scale triaxial test platform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(11): 1941-1947. (in Chinese))
- [16] 汪小刚. 高土石坝几个问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(2): 203-222. (WANG Xiaogang. Discussion on some problems observed in high earth-rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(2): 203-222. (in Chinese))
- [17] 李 翀, 何昌荣, 王 琛, 等. 粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增刊 1): 563-566. (LI Chong, HE Changrong, WANG Chen, et al. Study on size effect of large-scale triaxial test of coarse grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(S1): 563-566. (in Chinese))
- [18] XIAO Y, LIU H L, CHEN Y M, et al. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests: I influences of density and pressure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(12): 4014070.
- [19] 陈生水, 凌 华, 米占宽, 等. 大石峡砂砾石坝料渗透特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 26-31. (CHEN Shengshui, LING Hua, MI Zhankuan, et al. Experimental study on permeability and its influencing factors for sandy gravel of Dashixia Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 26-31. (in Chinese))
- [20] 宁凡伟. 基于超大型三轴仪的筑坝粗粒料缩尺效应研究[D]. 大连理工大学, 2020. (NING Fanwei. Research on the Scale Effect of Coarse Grained Materials Based on Super Large Triaxial Apparatus[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [21] LE PEN L M, POWRIE W, ZERVOS A, et al. Dependence of shape on particle size for a crushed rock railway ballast[J]. Granular Matter, 2013, **15**(6): 849-861.
- [22] 刘宝琛, 张家生, 杜奇中, 等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(6): 611-614. (LIU Baochen, ZHANG Jiasheng, DU Qizhong, et al. A study of size effect for compression strength of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(6): 611-614. (in Chinese))
- [23] LIU J M, ZOU D G, NING F W, et al. A unified constitutive model for instantaneous elastic-plastic and time-dependent creep behaviour of gravelly soils under complex loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2023, **60**(11): 1613-1628.
- [24] LIU J M, ZOU D G, KONG X. A two-mechanism soil-structure interface model for three-dimensional cyclic loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020, **44**: 2042-2069.
- [25] 宁凡伟, 孔宪京, 邹德高, 等. 筑坝材料缩尺效应及其对阿尔塔什面板坝变形及应力计算的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(2): 263-270. (NING Fanwei, KONG Xianjing, ZOU Degao, et al. Scale effect of rockfill materials and its influences on deformation and stress analysis of Aertashi CFRD[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(2): 263-270. (in Chinese))
- [26] 邹德高, 姜秋婷, 刘京茂, 等. 超高土石坝心墙孔压不均匀分布特征及其机理研究[J]. 水利学报, 2022, **53**(12): 1467-1475, 1489. (ZOU Degao, JIANG Qiuting, LIU Jingmao, et al. Characteristics and mechanism of inhomogeneous pore pressure of core wall in super-high rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, **53**(12): 1467-1475, 1489. (in Chinese))
- [27] 章为民, 沈珠江. 混凝土面板堆石坝三维弹塑性有限元分析[J]. 水利学报, 1992, **23**(4): 75-78. (ZHANG Weimin, SHEN Zhujiang. Three-dimensional elastic-plastic finite element analysis of concrete face rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, **23**(4): 75-78. (in Chinese))