

基于现场大型承载试验的原级配筑坝堆石料力学参数反演研究

朱 晟¹, 梁现培¹, 冯树荣²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 水电顾问集团中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

摘 要: 基于水布垭面板坝的现场大型承载试验成果, 采用基于 IGA 的反演方法, 研究了栖霞组灰岩、茅口组灰岩两种原级配筑坝堆石料的邓肯 $E-B$ 模型参数。结果表明: 在相同应力加载路径条件下, 现场原级配堆石料比经过缩尺后的室内三轴试验试样具有更大的体积变形和更高的切线弹性模量, 两者的力学性状存在较大差别。对栖霞组原级配灰岩堆石料的回弹模量参数反演分析得到 K_{ur} 约为 K 值的 2 倍, 而 n_{ur} 远大于邓肯建议的直接引用加载时的弹性模量指数 n 值。宜加强现场原级配粗粒堆石料的力学性质研究, 为超高堆石坝的建设提供更为可靠的理论依据。

关键词: 水工结构; 原级配堆石; 大型承载试验; 本构模型参数; 反演分析

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1138-06

作者简介: 朱 晟(1965-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土石坝等水工岩土方面的研究。E-mail: szhu@hhu.edu.cn。

Back analysis of mechanical parameters of naturally graded rockfill materials based on large-scale loading plate tests

ZHU Sheng¹, LIANG Xian-pei¹, FENG Shu-rong²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Mid-south Design & Research Institute of CJCEC, Changsha 410014, China)

Abstract: Based on the results of large-scale loading plate tests of Shuibuya Dam, the Duncan-Chang $E-B$ model parameters under two kinds of naturally graded rockfill materials, Qixia group limestone and Maokou group limestone, are studied by use of the back analysis method based on the IGA. The test results indicate that under the same loading path, the volumetric deformation and tangent modulus of naturally graded rockfill materials are larger than those of the scaled indoor triaxial tests, and there are distinct differences between them in mechanical property. K_{ur} , obtained from the back analysis of the resilience modulus of naturally graded rockfill on Qixia group limestone, is approximately twice as K , however, n_{ur} is much larger than the elastic modulus index n proposed by Duncan. The researches on mechanical property of naturally graded coarse rockfill materials should be strengthened to provide a more reliable theoretical basis for the construction of super-high rockfill dams.

Key words: hydraulic structure; prototype grade rockfill material; large-scale loading plate test; mechanical parameter; back analysis

0 引 言

近年来, 随着超重型振动碾压设备和混凝土面板滑模浇注技术研制成功, 改善了堆石体变形过大而导致面板开裂的问题, 使得面板堆石坝具有明显的经济、安全性而成为坝工界竞争力强大的首选坝型, 发展迅猛, 已建成天生桥一级、Campos-Novos、洪家渡、水布垭等一大批 200 m 级的高坝。

但是, 混凝土面板堆石坝毕竟是一种较新的坝型, 从已建成的 200 m 级高面板坝的运行情况来看, 部分

工程存在面板裂缝和渗漏量偏大等问题。虽然通过国家“七五”、“八五”和“九五”科技攻关专门立项, 对混凝土面板堆石坝筑坝关键技术问题特别在筑坝材料的基本力学特性方面进行了深入研究。可是, 实践证明已有研究成果难以准确预测大坝的结构性态。表 1 为国内已建 200 m 级高面板坝的最大铅直向变形计

基金项目: 水利水电专项基金项目 (2008BAB29B02)

收稿日期: 2008-03-28

算预测值与原型实际监测值, 差异较大。这固然与大坝建设阶段料源性质和实际填筑标准的改变有关, 但是, 合理反映筑坝材料力学特性的理论模型和参数选取是正确揭示大坝工作机理的基础。

表 1 已建 200 m 级高面板坝的最大铅直向变形^[1-4]

Table 1 Maximum vertical deformations of existing CFRDs (200 m in height) cm				
	天生桥 一级	洪家 渡	三板 溪	水布垭
基于三轴试 验计算值	124.0~205.0	75.9	80.0	135.0~184.0
原型实际监 测值	347.0	142.0	156.0	244.0

由于筑坝原级配堆石料最大粒径一般为 80~100 cm, 研究筑坝材料本构模型的参数, 难以直接进行室内试验。目前, 通用的方法是对试样料采用等量替代法、等比级配法或者两者综合进行缩尺, 采用缩尺后试样的室内三轴试验成果。但是, 堆石等粗粒料是由大小颗粒彼此充填而呈粒状结构的散粒体, 颗粒间常为点接触, 在外荷载作用下, 很容易发生颗粒破碎现象^[5]。其颗粒越粗, 接触点越少, 接触点的相互作用力越大, 颗粒本身或其棱角越易破碎, 材料的压缩性越大, 相对细粒料具有更大的变形。室内三轴试验成果, 由于缩尺效应和颗粒破碎机理的不同, 难以合理反映原级配粗粒料的力学特性。

为此, 本文结合水布垭筑坝现场的大型承载试验, 对原级配堆石料的邓肯 $E-B$ 模型的力学特性参数进行反演研究。

1 原级配筑坝堆石料现场大型载荷试验

水布垭面板堆石坝最大坝高 233 m, 为目前世界上已建同类坝型的第一高坝。在大坝建设初期, 为深入研究原级配筑坝堆石料在超高压作用下的力学特性, 1998 年, 水电顾问集团中南勘测设计研究院负责进行了现场大型荷载板承载试验, 论证其有关技术参数能否达到超高坝设计的要求。试验结合茅口组灰岩料和栖霞组灰岩料两种坝料的不同填筑标准进行, 开采堆石料的典型级配见图 1。由于试验场地基岩破碎现象, 难以承受由高吨位锚杆系统形成的反力, 荷载板试验的碾压场地选在磨盘山山体的陡壁处, 开挖了一个 8.5 m×6.0 m×6.0 m (长×宽×高) 的拱形硐, 同时利用硐顶山体的自重承受高吨位的反力。场地开挖平整后, 在场地的原地面粉填厚度为 0.5 m 的碎石垫层后, 采用汽车前进法铺料, 每层厚 0.8 m, 共分 4 层 (总厚度为 3.2 m, 碾压后为 2.8 m), 碾压后成为

平整的光面。采用千斤顶加荷, 原型承压板直径为 1.3 m, 周边安装沉降变形量测装置, 利用微型计算机自动采集全部数据。现场碾压堆石料及模拟计算网格见图 2, 图 2 中#1~#8 表示位移测点的位置。考虑到试验荷载较大, 碾压堆石区的岩石地基可能产生变形, 计算区域划分时, 在其底部增加一层岩石地基网格。

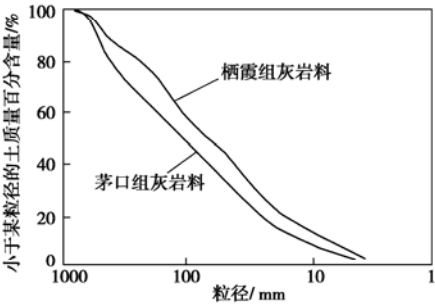


图 1 筑坝堆石料现场试验级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of field loading tests on rockfill

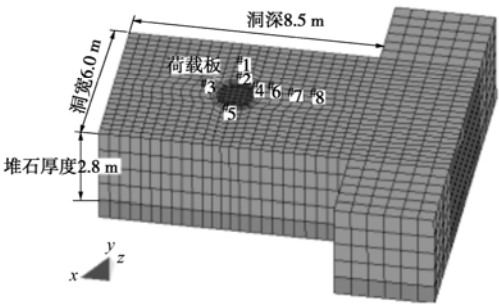


图 2 堆石料现场大型荷载试验区

Fig. 2 Large-scale loading plate tests on rockfill

堆石体的压缩变形主要由颗粒自身变形 (包括颗粒破碎引起的变形) 和孔隙压缩组成。图 3 为栖霞组第一组灰岩料 (q01) 现场荷载板试验中心点的荷载-变形测量曲线。可以看出, 试验刚开始阶段, 荷载板上作用的荷载较小, 对应堆石体的围压较低, 而初始孔隙率较大, 易于压缩, 使得图中 OA 段变形曲线较平缓, 荷载相对堆石体变形的增长较慢, 堆石体的初始压缩变形较大; 随着荷载不断增大, 变形进一步发展, 当堆石体被压缩到一定程度, 使得外荷载克服了颗粒间的咬合, 逐渐传递转化为颗粒间的摩擦作用, 此时孔隙更加难以压缩, 导致荷载相对堆石体变形增长更快, 变形曲线更陡, 形成了荷载-变形的反弯曲线, 两段曲线连接处出现明显的拐点 A 。

堆石体的初始压缩曲线 OA 段的应力-应变关系接近线性, 且变形占整体变形的比重较小。在本文的计算分析过程中, 对图 3 中荷载试验观测数据的初始压缩段进行如下修正: 做现场压实曲线 AB 段的外包线, 并外推至 C 点, 然后将荷载纵坐标的原点由 O 点向右平移至 C 点。

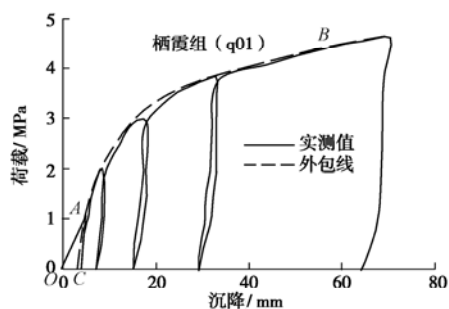


图3 栖霞组第一组灰岩料荷载板现场试验曲线

Fig. 3 Curves for field loading plate tests on Qixia group limestone (q01)

2 现场大型载荷试验成果的反演分析

考虑到堆石料本构模型参数和现场量测位移等信息之间的非线性映射关系,基于堆石体现场量测信息求取其本构模型参数,是具有多目标、多参数的复杂系统的全局优化问题。反演分析时,利用基于全局搜索的遗传算法基础上,同时可较好地解决早熟和漫游现象的免疫遗传算法 (Immune Genetic Algorithm, IGA)。

2.1 目标函数与反演参数

筑坝原级配粗粒料力学参数的反演分析,通过原型观测点的变形差值,构筑目标函数,成为 IGA 的抗原。考虑到观测仪器在埋设初期,受施工因素的干扰较大,采用分时段计算建立的目标函数为

$$F(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (u_{ij}^c / u_{ij}^m - 1.0)^2 \quad (1)$$

式中 m 为反演分析所选取的计算时段总数; n 为选取观测点总数; u_{ij}^c 为第 i 个时段第 j 个测点对应某级载组合作用时的计算变形值; u_{ij}^m 为相应的实测值; ω_{ij} 为在第 i 个时段第 j 个测点测量值的权重。试验共有 8 个测点,考虑到试验加载时承压板存在偏转现象,将 #2~#5 点测值平均后作为承压板中心的变形,权重为 0.85; 而 #6~#8 测点由堆石泊松效应引起的变形较小,目标函数的各点权重取 0.05。

筑坝堆石料的力学参数主要包括重度、孔隙率、强度等基本物理力学特性参数和应力-应变模型参数。Marachi 等^[6]对不同尺寸的粗粒料试样进行三轴压缩试验的成果表明:在不同侧压力下用直径 12 cm 试样测得的内摩擦角比直径 36 cm 试样测得的内摩擦角大 $1.0^\circ \sim 1.5^\circ$, 缩尺效应对粗粒料强度影响较小。因此,近似认为筑坝材料的强度与颗粒尺寸无关,直接利用室内试验成果,即栖霞组和茅口组灰岩料的 φ_0 与 $\Delta\varphi$ 分别为 $50.0/8.4^\circ$ 和 $52.4/8.6^\circ$ 。反演计算仅研究邓肯非线性 $E-B$ 模型的参数。

2.2 反演分析方法

基于 IGA 的筑坝粗粒料力学参数反演分析的流

程见图 4。主要包括 3 个部分:①原级配筑坝粗粒料现场大型载荷试验的荷载-变形观测资料分析,参照相关规范和文献对现场监测数据进行误差分析,消除仪器的系统误差和测量的偶然误差,体现原型观测资料的客观性;②原型结构的有限元数值计算模型,采用河海大学水电学院为土石坝静、动力数值计算开发的 TSDA 程序^[7]计算,通过模拟原级配筑坝粗粒料实际填筑加载过程,对各个体分别进行有限元数值计算,得到观测点变形的计算预测值;③利用 IGA 进行反演分析。通过原型观测点的实测变形量与计算预测值的差异,构筑目标函数,计算个体适应度;利用遗传算子和免疫算子产生新个体,通过适应度值指导算法的搜索方向,寻求最优个体,得到原级配筑坝粗粒料的力学参数。利用 IGA 进行反演分析的实现流程详见参考文献^[8]。

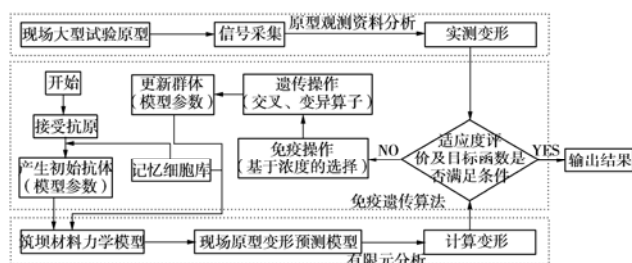


图4 基于 IGA 的筑坝粗粒料参数反演计算流程

Fig. 4 Flow chart of back analysis of parameters for coarse grain rockfill based on IGA

2.3 试验成果反分析

考虑到堆石体经过重型振动碾预先分层碾压的因素,在载荷试验的初期,试验堆石体实际应力较小而处于超固结状态,为卸载后的再加载阶段,具有较高的变形模量。根据本次试验中 YZT16 振动碾的主要性能指标,其实测的附加总作用力 684.0 kN,折算其对试验堆石体的压实应力大约为 1.0 MPa,对应堆石体的应力设为初始的应力状态量。在有限元分析中,当外荷载小于此值时,认为试验堆石体处于卸载后的再加载阶段,采用回弹模量计算,以模拟初始超固结应力的影响。

(1) 邓肯 $E-B$ 模型加荷参数

在加荷过程中,邓肯 $E-B$ 模型中的切线弹性模量和体积模量分别为

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (2)$$

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (3)$$

待反演参数设为

$$X = \{K, n, R_f, K_b, m\} \quad (4)$$

式中, X 为自变量,对应反演分析备选抗体。参考坝

料室内三轴试验资料,选取参数 X 估计范围,成为 IGA 的初始搜索范围,即式 (4) 的约束条件。

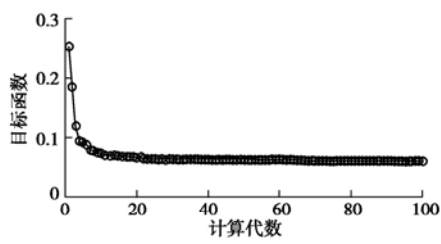


图 5 栖霞组灰岩料(q01)反演过程中的目标函数
Fig. 5 Variation of object function for back analysis of Qixia group limestone (q01)

图 5 为依据栖霞组第一组灰岩料 (q01) 荷载板现场试验资料进行反演分析的目标函数变化过程,当反演计算到第 20 代以后,目标函数已经基本稳定;而当计算到 80 代后,目标函数基本无变化,基于 IGA 反演计算的效率较高。图 6 为反演参数在计算过程中的变化曲线,可以看出,对于反演分析的各参数而言,收敛过程差别较大,如 K 值计算到 20 代时已经稳定,而 R_f , n 等参数收敛相对较慢,如 R_f 计算到 60 代后,才稳定下来。分析原因可能跟待求参数与目标函数的相关关系不同有关。

图 7 为栖霞组第一组 (q01) 和第二组 (q02) 灰

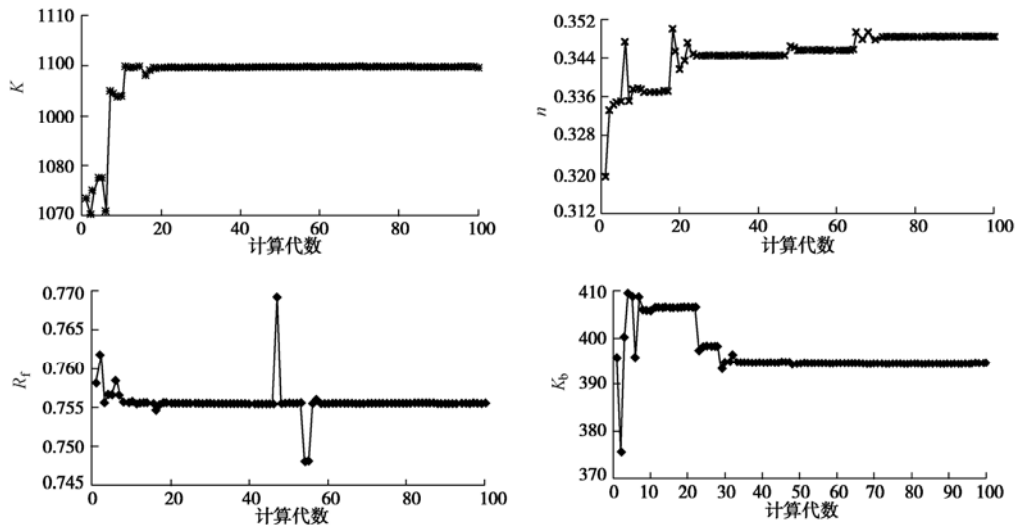


图 6 栖霞组灰岩料(q01)各反演参数的变化过程

Fig. 6 Variation of parameters for back analysis of Qixia group limestone (q01)

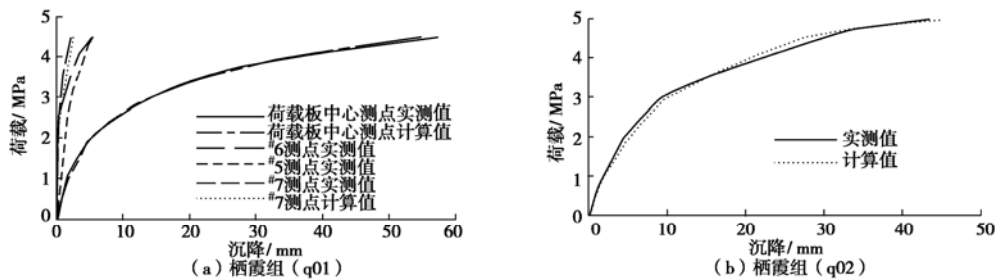


图 7 栖霞组灰岩料荷载板试验与反演的荷载 - 变形曲线

Fig. 7 Results of back analysis and loading plate tests on Qixia group limestone

岩料荷载板现场试验资料进行反演分析的成果对照曲线,图 8 为茅口组灰岩堆石料现场试验资料进行反演计算的拟合图,图中实线为试验实际测得的曲线,虚线为基于 IGA 反演分析的计算值,各测点荷载 - 变形曲线的拟合较好。表 2 给出相应的反演最终参数。

(2) 邓肯 $E-B$ 模型卸荷与再加荷参数

假定在卸荷与再加荷过程中堆石体的弹性模量相同,且

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_{ur}}, \tag{5}$$

则待反演的参数为

$$X = \{K_{ur}, n_{ur}\}. \tag{6}$$

参考邓肯等的试验研究成果,反演分析取 K_{ur} 范围为 $1.2 \sim 3.0 K$, 而 n_{ur} 范围取为 $0.1 \sim 0.8$ 。

图 9 为相应的实际加载和反演计算拟合曲线示意图。在进行现场堆石体测点变形的有限元计算时,除初始加载阶段采用卸荷模量外,加载过程中材料力学参数取上节的反演分析成果,认为计算单元应力的卸荷与再加荷过程与外荷载同步。得到栖霞第一组灰岩料 (q01) 的 K_{ur} 为 2319, 相当于 K 值的 2.1 倍, n_{ur} 为 0.51, 比加载弹性模量的指数 n 增大大约 50%。

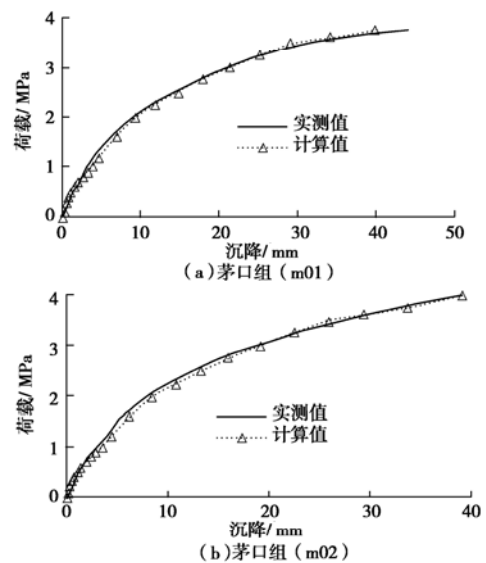


图 8 茅口组灰岩料荷载板试验与反演的荷载 - 变形曲线
Fig. 8 Results of back analysis and loading plate tests on Maokou group limestone

表 2 灰岩堆石料的 E - B 模型参数

Table 2 E-B model parameters of limestone rockfill

编号			R_f	K	n	K_b	m
茅口组	反	m01	0.785	1161	0.260	606	0.09
	演	m02	0.770	1231	0.296	636	0.15
	三轴试验		0.830	1200	0.300	520	0.08
栖霞组	反	q01	0.760	1099	0.348	394	0.03
	演	q02	0.770	1069	0.339	424	0.02
	三轴试验		0.790	1010	0.270	420	0.05

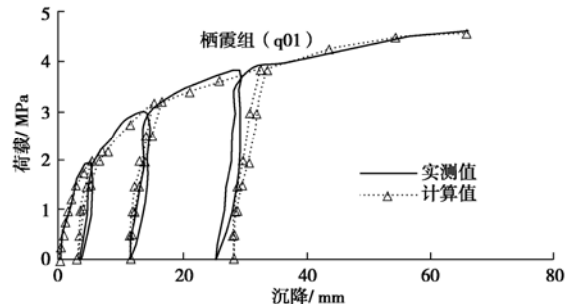


图 9 栖霞组灰岩料(q01)加荷 - 卸荷试验与反演拟合曲线
Fig. 9 Pressure-settlement curves of loading plate tests and back analysis fitting

3 现场承载试验反演参数与室内三轴试验参数的对比分析

模拟常规三轴固结排水试验的应力路径, 图 10 为栖霞组灰岩基于现场承载试验反演得到的应力 - 应变曲线, 可见两组反演曲线较为一致, 说明试验的可信度较高。为了比较反演得到的原级配筑坝堆石料的参数与室内三轴试验成果的差异, 将其室内三轴试验

曲线也绘于图中。

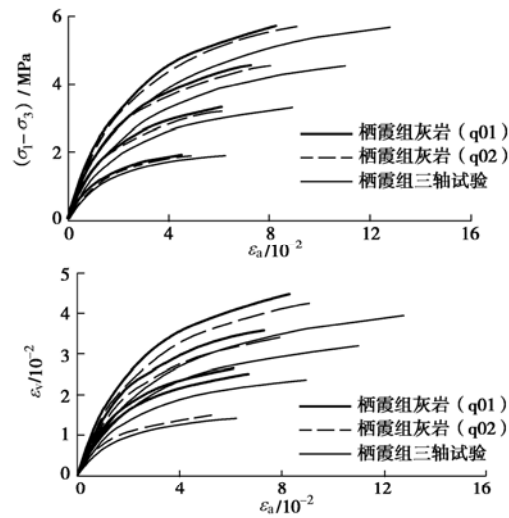


图 10 现场试验反演与室内三轴试验的应力 - 应变曲线
Fig. 10 Stress-strain curves of field back analysis and lab triaxial tests on Qixia group limestone

可以看出: 在相同的应力条件下, 无论应力 - 轴向应变曲线还是体积应变 - 轴向应变关系曲线, 现场大型承载试验反演参数对应曲线都位于相应室内三轴试验曲线的上方, 且试验的周围压力和轴向应力越大, 这种差异越大。说明原级配堆石料与经缩尺后的室内试验试样的力学特性有较大差异。在相同的应力条件下, 原级配堆石料具有更高的切线弹性模量和更大的体积变形, 且随着周围压力和轴向应力的增加, 这种趋势更加明显。

图 11 为分别依据本文各筑坝堆石料反演参数平均值和设计阶段的室内三轴试验参数 (见表 2), 对水布垭大坝进行有限元计算得到河床最大剖面竣工时的变形分布。

可见两者分布规律基本一致, 但极值差别较大。如向上、下游的水平位移极值分别为 37 cm 和 44 cm、43 cm 和 56 cm, 反演参数计算值比三轴试验参数计算值分别减小了 15% 和 23%; 铅直向变形则分别为 217 cm 和 196 cm, 反演参数计算值比三轴试验参数计算值增大了 11%。分析原因, 主要是由于在相同应力条件下, 与室内三轴试验结果相比, 原级配堆石料切线弹性模量提高, 体积变形也增大, 两个因素共同作用使得大坝计算预测的铅直向变形更大; 同时, 由于在相同的轴向变形条件下, 原级配堆石料的体积变形更大, 根据泊松比的定义 $\nu_l = (0.5 - d\varepsilon_v / 2d\varepsilon_a)$ 可知, 相对缩尺后的室内三轴试验试样, 原级配堆石料的泊松效应减弱, 泊松比更小, 使得大坝计算预测的水平变形相对减小。图中还可发现, 两组不同参数对应上游堆石区的计算变形更为接近, 这可能与茅口组灰岩料更完整坚硬、岩性更好、加载过程中的颗粒破碎更少等因素有关。

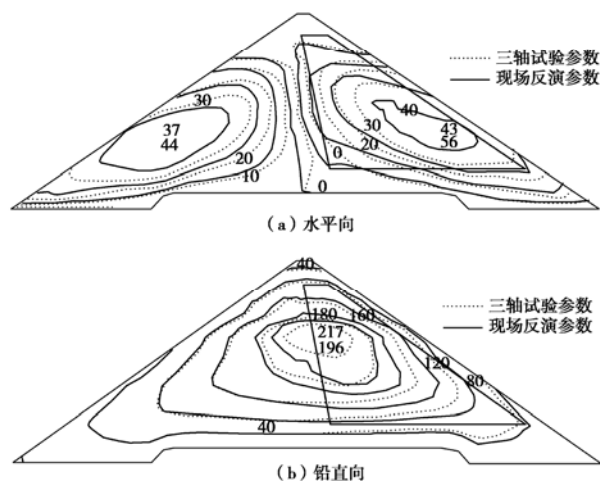


图 11 竣工期大坝的计算变形分布

Fig. 11 Predicted deformation of Shuibuya Dam

目前, 土石坝的数值计算主要利用筑坝粗粒料经缩尺后试样的室内三轴试验成果。对于中等高度以下的坝, 筑坝堆石体的应力较低, 原级配堆石料与经缩尺后的室内三轴试验试样的力学性质较为接近, 计算预测值的精度较高。对于坝高较高的土石坝, 特别是目前建设的 200 m 以上的超高土石坝, 筑坝堆石体处于高应力工作状态, 堆石料的室内试验成果难以合理反映原级配堆石料的力学性质。这也是当前土石坝计算预测值与原型实际监测值差异较大的重要原因。

4 结 论

(1) 与室内三轴试验成果相比, 在相同应力路径条件下, 原级配堆石料具有更大的体积变形和更高的切线弹性模量, 两者存在明显的差异。目前基于室内三轴试验成果的土石坝计算分析, 可能导致其水平变形增加而铅直向变形减小。

(2) 栖霞组原级配灰岩堆石料的回弹模量参数 K_{ur} 约为 K 值的 2 倍, 与室内试验成果一致; 但指数 n_{ur} 远大于加载模量的指数 n 。

(3) 利用现场大型承载试验成果反演原级配堆石料力学性质参数的精度, 与堆石体厚度、载荷板尺寸等因素有关, 有待于更深入的研究。

参考文献:

[1] 杨 键. 天生桥一级水电站面板堆石坝沉降分析[J]. 云南水力发电, 2001, 17(2): 59 - 63. (YANG Jian. Settlement analysis of tsq-1 hydropower project concrete faced rockfill dam[J]. Yunnan Water Power, 2001, 17(2): 59 - 63. (in Chinese))

[2] 吴兴征, 栾茂田, 阴吉英. 面板堆石坝应力与变形弹塑性有限元计算与分析[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(5):

602 - 608. (WU Xing-zheng, LUAN Mao-tian, YIN Ji-ying. Elastic plastic finite element analyses of stresses and deformations of concrete faced rock-fill dam[J]. Journal Of Dalian University of Technology, 2000, 40(5): 602 - 608. (in Chinese))

[3] 宋文晶, 伍 星, 高莲士, 等. 三板溪混凝土面板堆石坝变形及应力分析[J]. 水力发电学报, 2006, 25(6): 34 - 38. (SONG Wen-jing, WU Xing, GAO Lian-shi. Deformation and stress analysis of Sanbanxi concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(6): 34 - 38. (in Chinese))

[4] 李金凤, 杨启贵. 水布垭面板堆石坝施工期沉降变形分析[J]. 人民长江, 2006, 37(8): 94 - 95. (LI Jin-feng, YANG Qi-gui. Analysis of settlement deformation during SBY concrete face rock-fill dam's construction[J]. Yangtze River, 2006, 37(8): 94 - 95. (in Chinese))

[5] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill[C]// Embankment Dam Engineering, Casagrande Volum. New York: Wiley, 1973: 109 - 200.

[6] MARACHI N D, CHAN C K, SEED H B, et al. Strength and deformation characteristics of rockfill materials[R]// Berkeley: Univ of California, 1969: 116.

[7] 顾淦臣, 朱 晟. 混凝土面板堆石坝三维非线性有限元静力动力分析程序[M]//水利水电工程设计分析计算软件包使用指南. 北京: 科学技术出版社, 1991: 298 - 310. (GU Gan-chen, ZHU Sheng. Procedure of three-dimensional static and dynamic analysis with nonlinear finite element[M]// Guidebook of water conservancy and hydropower project's design and analysis software package. Beijing: Science and Technology Publishing House, 1991: 298 - 310. (in Chinese))

[8] 朱 晟, 王永明, 胡祥群. 免疫遗传算法在土石坝筑坝粗粒料本构模型参数反演中的应用研究[J]. 岩土力学, 待刊. (ZHU Sheng, WANG Yong-ming, HU Xiang-qun. IGA's application research on embankment [1]dam coarse-grained materials' Model parameters back-analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, to be released. (in Chinese))

[9] 周福田. 土工试验及地基承载力检测[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000. (ZHOU Fu-tian. Soil test and bearing capacity detection[M]. Beijing: China Communications Press, 2000. (in Chinese))

[10] 孟高头. 土体原位测试机理、方法及工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997. (MENG Gao-tou. In-situ test on soils' mechanism, method and its engineering application[M]. Beijing: Geological Press House, 1997. (in Chinese))