

DOI: 10.11779/CJGE2020S1032

堆石料变形特性尺度效应的理论基础及应用验证

魏 然, 吴帅峰*, 汪小刚, 蔡 红

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

摘 要: 针对筑坝料变形特性的尺度效应, 以接触变形理论为基础, 从粒径尺度、试件尺度及外部影响因素角度, 结合试验的方法开展了研究。建立了粒径尺度与归一化压缩模量的指数相关模型, 论证了试件尺度径径比大于 5 时压缩试验的变形可靠性, 揭示了侧限条件、干密度、边缘破碎及荷载等级 5 个外部因素对尺度效应的影响规律和内在机理, 并分别建立了各因素与变形的关系模型。基于试验回溯现场过程, 建立了综合考虑可破碎材料(堆石料)与不破碎材料(砂砾石)的多尺度统一修正模型。通过对大坝堆石料 EB 模型计算参数的修正及变形计算, 验证了多尺度统一修正模型对变形计算的适用性与可靠性, 较直接采用缩尺试验结果准确度提升了约 20%, 为解决坝体变形预测不准确提供了新的思考方法与解决路径。

关键词: 尺度效应; 压缩模量; 影响因素; 修正模型; 坝体变形

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0161-06

作者简介: 魏 然(1992—), 男, 工程师, 主要从事水利工程与岩土工程等方面的研究工作。E-mail: weiran2003bj@hotmail.com。

Theoretical basis and application verification of scale effects of deformation characteristics of rockfill

WEI Ran, WU Shuai-feng, WANG Xiao-gang, CAI Hong

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: In view of the scale effects of deformation characteristics of rockfill, based on the contact deformation theory, the research is carried out from the perspective of particle sizes, specimen sizes and external factors, combined with the test method. The exponential correlation model between the particle sizes and the normalized compression modulus is established. The deformation reliability of compression tests is demonstrated when the particle size ratio is greater than 5. The influence rules and internal mechanism of five external factors on the scale effects, namely, the lateral limit condition, the dry density, the edge breakage and the load level, are revealed, and the relevant models for each factor and deformation are established respectively. Based on the field experiments, a multi-scale unified correction model is established, which takes into account the crushed material (rockfill) and the non-crushed materials (gravel). The applicability and reliability of the multi-scale unified correction model for deformation calculation are verified by modifying the parameters and deformation calculation of the EB model for dam rockfill. The accuracy of the model is about 20% higher than that of the direct scale tests. This provides a new thinking method and solution path to solve the inaccuracy of dam deformation prediction.

Key words: scale effect; compression modulus; influencing factor; correction model; dam deformation

0 引 言

随着筑坝材料的最大粒径越来越大, 高坝筑坝料的最大粒径已经超过 800 mm^[1], 常规土力学试验设备无法直接用于研究原筑坝料的变形特性^[2-3]。为了解决试验粒径限制的问题, 通常将原级配堆石材料进行缩尺得到替代原级配材料, 然后对缩尺料进行试验, 进而确定原型坝的变形特性^[4]。然而, 一些研究成果及监测资料都表明, 缩尺前后粗粒料的力学特性有较大

差异, 缩尺后粗粒料的力学特性并不能完全反应原级配粗粒料的力学性质^[5]。因此, 如何确定原级配筑坝材料力学参数, 是准确预测坝体变形的一个重要因素。对此, 国内外学者进行大量的大尺寸三轴试验。

基金项目: 中国水科院基本科研业务费项目 (GE0145B412019); 国家自然科学基金项目 (U19A2049)

收稿日期: 2020-06-05

*通信作者 (E-mail: wusf@iwhr.com)

Marachi 等^[6]对不同最大粒径的堆石料进行三轴试验得出,大粒径较小粒径压缩性更大。Hunter 等^[7]积累了大量的不同粒径堆石料坝体的变形监测结果,提出堆石料的压缩模量是随粒径的增大而减小的。Varadarajan 等^[8-9]对堆石料和砂砾石料分别进行不同缩尺条件下的对比试验,得出堆石料模量随粒径增加而降低,而砂砾石料的模量则随粒径增大而增加。汪小刚^[10]根据堆石料在压缩中可破碎和砂砾石料不可破碎的特征,进行了石膏和钢材的不同尺度下的压缩试验,得出与 Varadarajan 相同的规律。

不同文献所反映的缩尺试验结果可能与缩尺方法、密度、侧限条件、荷载及母岩等有关,但笔者认为将筑坝材料整体上分为可破碎的堆石料和不可破碎的砂砾石料分开研究是理清目前尺度效应研究的途径,同时为避免各种因素的交叉影响,本文基于接触变形理论、室内多尺度试验,研究不同粒径尺度、不同试样尺度、不同侧限条件、不同干密度、不同破碎条件、不同荷载等级等多种组合影响下变形模量的演化规律和内在机理,以此为基础建立多尺度变形参数的统一修正模型,为解决坝体变形预测不准确提供新的思考方法与解决途径。

1 颗粒材料尺度效应理论分析

1.1 基本理论

(1) 基本假定

以理想弹性力学作为计算理论基础;接触表面的摩擦力可忽略不计。

(2) 变形方程

点接触物体受力后其接触表面为椭圆;线接触物体受力后其接触表面为矩形。符合变形连续条件。

(3) 物理方程

服从弹性虎克定律,接触表面上应力的变化规律与接触体的应变成线性关系,应变最大的接触面中心压应力最大。根据接触表面压应力分布规律求得表面接触压力所组成的合力应等于外加载荷。

1.2 弹性体接触变形分析

设两圆球体的半径分别为 R_1 , R_2 , 开始时在公切平面上的 O 点相互接触,如图 1 所示。

在两球的子午面截线上,与 z_1 和 z_2 相距距离 r 处的两点 M 和 N 两点的距离为

$$Z_1 + Z_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) r^2 \quad (1)$$

设 w_1 表示球体 1 面上的点 M 由于局部变形所产生的沿 Z_1 轴方向的位移, w_2 表示球 2 面上的点 N 由

于局部变形所产生的沿 Z_2 轴方向的位移,两球的中心 O_1 、 O_2 彼此接近的距离为 δ 。由于对称性,由接触产生的压力 q 和位移 w 对于接触中心 O 都是轴对称的,计算出最终。由此可以计算出:

$$q_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (2)$$

$$a^3 = \frac{3}{4} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) p \quad (3)$$

$$\delta^3 = \frac{9}{16} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2 p^2 \quad (4)$$

式中 q_0 为接触中心的压力最大; a 是接触圆半径; E_1 , μ_1 , E_2 , μ_2 分别是两个弹性体弹性常数; p 为压力分布函数; δ 为变形量; R_1 , R_2 分别是两个弹性体半径。

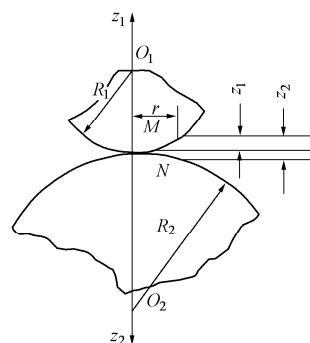


图 1 弹性体接触变形

Fig. 1 Contact deformation of elastomer

由上式得出,最大接触压应力与载荷不是线性关系,而是与载荷的立方根成正比,这时候因为随着载荷的增加,接触面积也在增大,其结果使接触面上的最大压应力的增长较载荷的增长为慢。

当弹性体与平面接触变形时,则可以将 $R_1=R$, $R_2=\infty$, $E_1=E_2=E$, $\mu_1=\mu_2=0.3$ 代入式 (2) ~ (4) 求解,得到下式:

$$q_0 = 0.388 \sqrt[3]{\frac{PE^2}{R^2}} \quad (5)$$

$$a = 1.109 \sqrt[3]{\frac{PR}{E}} \quad (6)$$

$$\delta = 1.231 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2 R}} \quad (7)$$

当计算两等直径弹性体接触时,则可将 $R_1=R$, $R_2=\infty$, $E_1=E_2=E$, $\mu_1=\mu_2=0.3$ 代入式 (2) ~ (4) 求解。

$$a = 1.109 \sqrt[3]{\frac{PR}{E}} \quad (8)$$

$$\delta = 1.231 \sqrt[3]{\frac{2P^2}{E^2 R}} \quad (9)$$

1.3 粒径尺度对压缩模量影响研究

首先研究固定试样尺寸, 改变材料的最大粒径情况下对压缩模量的影响, 从材料的粒径改变揭示压缩模量的变化规律。推导假定为: 在相同加载试样尺寸内, 材料从单个半径为 R 的弹性体逐渐减小其半径, 分别为 $R/2, R/4, R/6, \dots, R/1000$, 如图 2 所示。在此过程中密度保持不变, 空间内的孔隙率保持不变, 荷载等级保持不变, 无侧限条件, 受荷载 P 的作用下, 逐步分析粒径逐渐缩小所引起的弹性模量的变化。

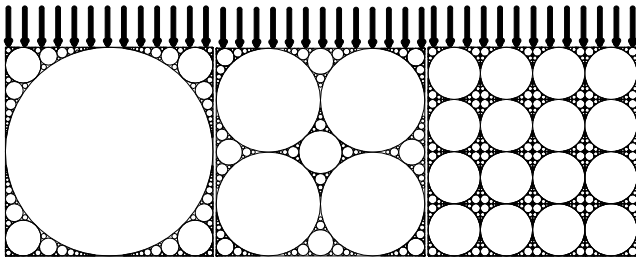


图 2 最大粒径改变示意

Fig. 2 Schematic diagram of change of maximum particle size

利用 1.2 节理论推导结果, 计算图 2 中不同粒径下的变形量, 进而计算更小的最大粒径下变形量, 形成归一化压缩模量。此处定义归一化压缩模量含义为: 设未进行缩尺时试件的压缩模量初始值为 1, 缩尺后压缩模量与初始压缩模量之比为归一化压缩模量。为更直观表达级配组构条件下粒径尺度对压缩模量的影响, 将初始最大粒径设为 1000 mm, 对应的压缩模量归一化为 1, 并化为无量纲量, 则随着粒径的减小, 建立如图 3 所示关系。

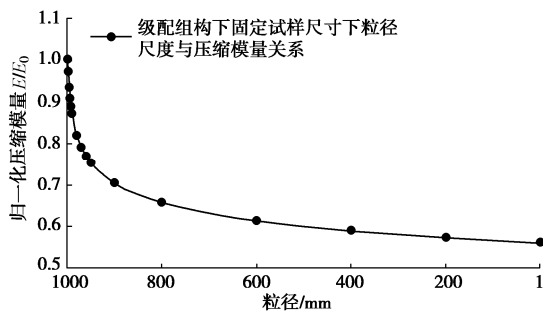


图 3 粒径尺度对压缩模量影响

Fig. 3 Influences of particle size on compression modulus

建立粒径尺度与归一化压缩模量的关系如下式所示:

$$E_{gd} = 0.5691 + 0.2116e^{-\frac{\xi}{9.9617}} + 0.2374e^{-\frac{\xi}{212.3621}}, \quad (10)$$

式中, E_{gd} 为粒径尺度归一化模量, ξ 为固定试样尺寸条件下的归一化粒径。

1.4 试件尺度对压缩模量影响研究

对于有级配组构情况下, 首先确定组构规则, 根据圆形几何组构规则, 空隙部分首先用最大半径进行组构, 组构后每个空间为三角形, 在此三边空隙内继续组构, 直至 $R/1000$ 。组构弹性体的粒径符合指数递减规律, 并形成悬浮型颗粒构架体系, 同时构建最接近实际情况下的级配曲线, 悬浮级配构建如图 4 所示, 与之对应的级配曲线如图 5。

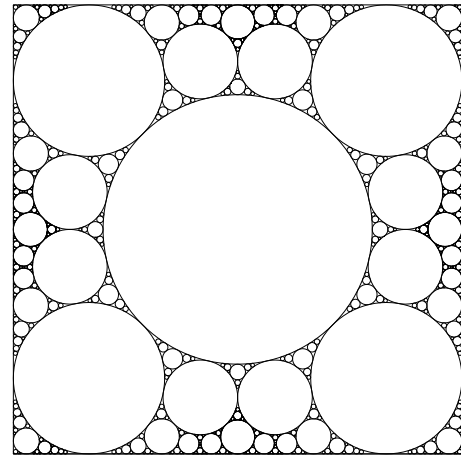


图 4 $D_{\max}=0.6D$ 时排列状态

Fig. 4 Arrangement state of $D_{\max}=0.6D$

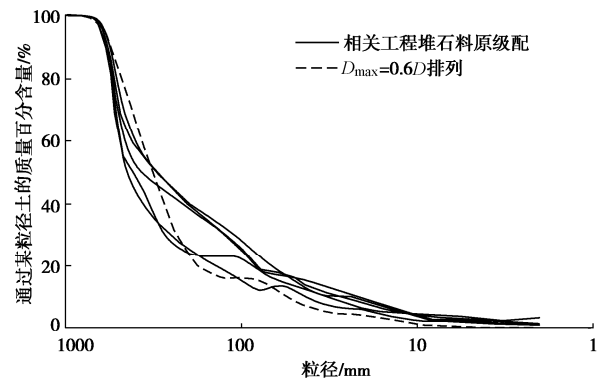


图 5 $D_{\max}=0.6D$ 的级配曲线

Fig. 5 Grading curves of $D_{\max}=0.6D$

为从材料的试样尺度角度揭示加载试验的面积改变对压缩模量的影响, 逐渐增大试样尺度, 分别为 $2R, 4R, 6R, \dots, 1000R$, 求解在不同荷载加载面积下的压缩模量, 如图 6 所示。

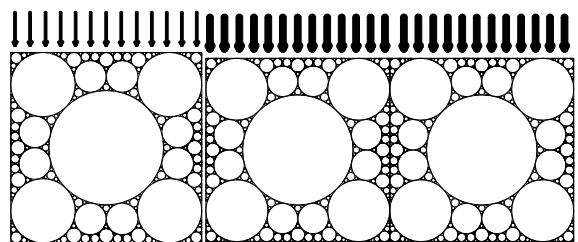


图 6 试样尺度逐渐增大示意

Fig. 6 Increase of sample size

根据不同试样尺度条件下的归一化压缩模量,引入径径比的概念,既试样尺寸与最大粒径之比,建立径径比与压缩模量的关系如图7所示。可得出,当径径比大于5时,归一化压缩模量变稳定,从理论角度论证了压缩试验可靠性的必要条件。

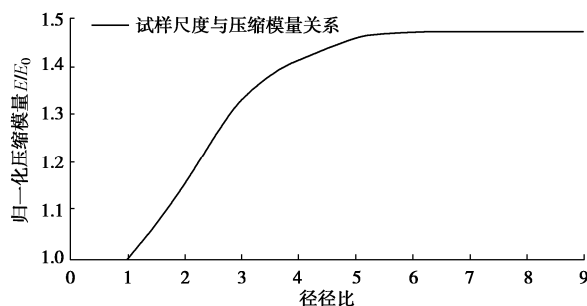


图7 压缩模量与径径比的关系

Fig. 7 Relationship between compression modulus and diameter ratio

2 变形特性的外部影响因素研究

2.1 侧限条件对压缩模量的影响

对侧向不允许变形的压缩弹性体,取一个单元进行分析其弹性阶段受力变形。该单元受到三向应力 σ_x , σ_y , σ_z 作用,在 z 方向的压力作用下,试样中的竖向有效应力为 σ_z ,又因为试样的受力条件属于轴对称问题,故水平向有效应力 $\sigma_x = \sigma_y$,由于土体的侧向变形被限制住,故 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$,于是:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_s} - \mu \frac{\sigma_y}{E_s} - \mu \frac{\sigma_z}{E_s} = 0 \quad (11)$$

式中, E , E_s 分别为无侧限和完全侧限条件下的模量, μ 为组构材料的泊松比。 μ 取0.3时,建立完全侧向与无侧限模量的关系为

$$E_s = 1.346E \quad (12)$$

由此可得完全侧向与无侧限模量随粒径整体的增大倍数,在 μ 取0.3时增大35%。

2.2 干密度与压缩模量的关系研究

本研究推导成立的边界条件是从原型尺度到实验室尺度均保持同样的干密度或孔隙比,而在实际室内试验中,由于粒径的缩小通常表现为筑坝原型干密度大,而室内实验试件的干密度小,且很难使压缩试件的干密度达到现场的大小,这就为实现同密度或孔隙率条件下的室内试验造成一定的障碍。为解决这一障碍,找出室内试验密度或孔隙率与压缩模量的关系,采用此规律修正后即便在密度未达到原型密度下亦可进行实验并进行回溯。

对若干个工程的材料均进行不同干密度下的压缩试验,建立如图8所示趋势图。

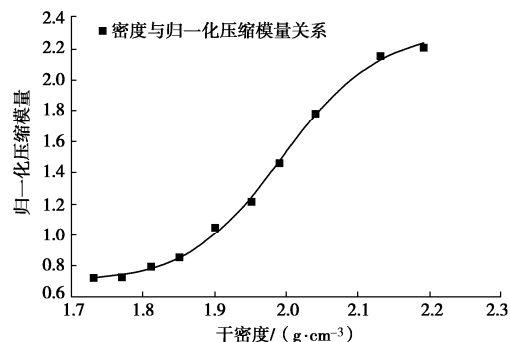


图8 密度与压缩模量关系

Fig. 8 Relationship between density and compression modulus

建立如下式所示的关系。

$$f(\rho_d) = 2.331 + \frac{0.702 - 2.331}{1 + \left(\frac{\rho_d}{1.996} \right)^{29.891}} \quad (13)$$

式中, $f(\rho_d)$ 为受密度影响下试样的压缩模量, ρ_d 为干密度。

2.3 颗粒边缘破碎影响分析

为分析堆石料破碎与粒径间的关系,在单一粒径情况下假定大小颗粒的粒径在特定比例下,某一应力状态中发生破碎,保持该应力状态不变,不断减小最大粒径。计算基本参数为:大粒径与小粒径之比为20,在缩小大粒径过程中,保持该比例不变。

图9不同粒径下的试样破碎变形计算。由式(2)~(4)可计算小粒径上的最大应力。在粒径不断缩小的过程中,单个小颗粒承受的外部应力会逐渐减小,化为等效破碎变形量,建立破碎量与粒径变化如图10所示。

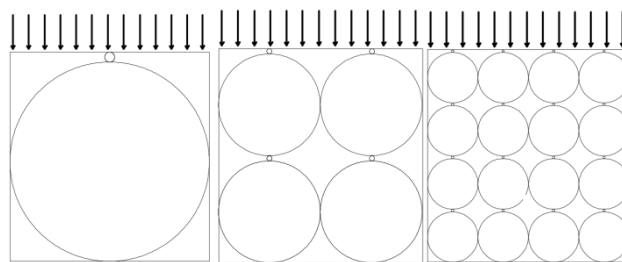


图9 不同粒径下试样破碎变形计算

Fig. 9 Calculation of crushing deformation of samples with different particle sizes

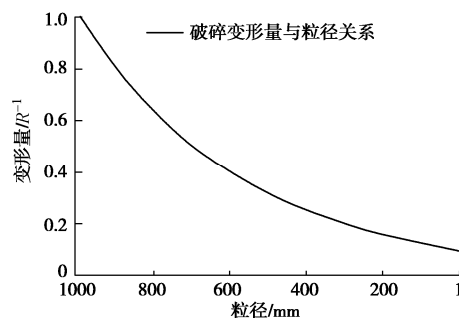


图10 粒径与破碎变形量的关系

Fig. 10 Relationship between particle size and crushing deformation

该曲线采用函数表示为

$$\delta = 1.023e^{-\frac{D}{42.848}} \quad (14)$$

2.4 荷载等级对压缩模量影响研究

为了解荷载等级对压缩模量的影响关系, 在有填充条件下, 分别计算半径为 R/n 的弹性体, 在有填充作用下分别受荷载 $2p$, $3p$, $4p$, \dots , $10p$ 作用下的压缩模量。压缩模量的增大倍数仅与荷载大小直接相关, 绘制压缩模量与荷载等级趋势关系如图 11 所示。并可用下式:

$$f(p) = 2.7354 - 1.9981e^{-\frac{p_i}{6.4893}} \quad (15)$$

式中, $f(p)$ 为荷载影响下的压缩模量放大倍数, p_i 为荷载等级倍数, 为当前加压等级与初始加压等级的比值。

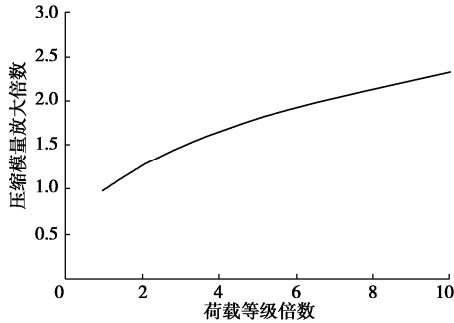


图 11 荷载等级与压缩模量的倍数关系

Fig. 11 Relationship between load grade and compression modulus

3 堆石料多尺度统一修正模型的建立

3.1 模型的提出

多尺度统一修正模型在于将缩尺材料的压缩模量求解为筑坝原型材料的压缩模量, 在此过程中综合考虑缩尺过程、荷载等级、干密度和侧限状态、破碎效应的影响, 对此提出涵盖此参数的统一修正模型公式为

$$F(\xi, p, \rho_d, \mu, D) = f_1(\xi) \cdot f_2(p_i) \cdot f_3(\rho_d) \cdot f_4(\mu) \cdot f_5(D) \quad (16)$$

式中 $f_1(\xi)$ 为粒径影响下的回溯函数; $f_2(p_i)$ 为荷载等级影响下的修正函数; $f_3(\rho_d)$ 为干密度影响下的修正函数; $f_4(\mu)$ 为泊松比影响下的侧限修正函数。 $f_5(D)$ 为粒径影响下的破碎修正函数。根据回溯过程, 建立粒径尺度和试样尺度影响下归一化压缩模量的关系, 如图 12 所示。

具体函数关系为

$$f_1(\xi) = \frac{A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + (\xi_1 / A_3)^{A_4}}}{A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + (\xi_0 / A_3)^{A_4}}} \cdot \frac{B_1 + B_2 e^{-\frac{\xi_2}{B_3}} + B_4 e^{-\frac{\xi_2}{B_3}}}{B_1 + B_2 e^{-\frac{\xi_1}{B_3}} + B_4 e^{-\frac{\xi_1}{B_3}}}$$

$$\frac{A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + (\xi_3 / A_3)^{A_4}}}{A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + (\xi_2 / A_3)^{A_4}}} \quad (17)$$

式中 A_i 表示固定材料最大粒径下, 试样尺寸对归一化压缩模量的影响系数; B_i 表示固定试样尺寸条件下材料粒径变化与归一化压缩模量的系数; ξ 为转换过程的粒径。

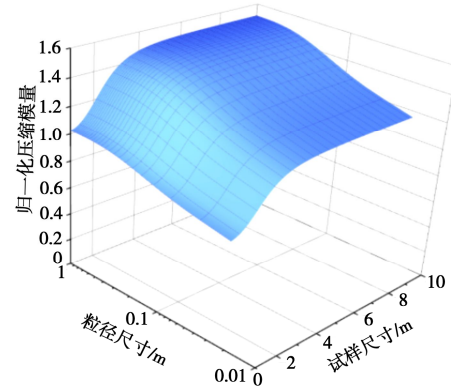


图 12 粒径影响下的回溯函数图

Fig. 12 Backtracking function under influence of particle size

3.2 基于外部影响因素的统一修正

(1) 泊松比影响下的侧限修正

侧限条件是筑坝料变形应力状态的具体描述, 侧限所引起的压缩模量改变可通过泊松比表示, 泊松比对压缩模量的影响关系, 可用下式表示:

$$f_4(\mu) = 1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \quad (18)$$

式中, μ 为筑坝料的泊松比, 可通过压缩试验获取。

(2) 干密度影响下的修正

由 2.4 节所提出的干密度对变形模量的影响模型, 可得到在未达到原型密度下的回溯。如下式所示:

$$f_3(\rho_d) = D_1 + \frac{D_2 - D_1}{1 + (\rho_d / D_3)^{D_4}} \quad (19)$$

式中, $D_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为待定系数, ρ_d 为干密度。

(3) 破碎效应影响修正

筑坝材料整体上可分为可压缩破碎的堆石料和不破碎的砾石料, 当采用堆石料筑坝时, 往往表现出粒径越大压缩模量越低的情况, 由此引入破碎效应的修正, 如下式。当采用砂砾石料时不发生材料颗粒破碎, 可不考虑破碎效应。

$$f_5(D) = \alpha e^{D/r} \quad (20)$$

式中, D 为最大粒径, α , r 为待定系数。

(4) 荷载等级影响下的修正函数

对于筑坝料, 其压缩模量与试验施加的荷载应力大小有关, 表现为荷载应力水平越大压缩模量越大, 呈非线性正相关, 具体如下式表示:

$$f_2(p_i) = C_1 + C_2 e^{C_3 p_i} \quad , \quad (21)$$

式中, C_i 为受荷载等级影响下的压缩模量关系的非线性表达系数。

综合以上各影响因素, 选取实际试验中所涉及到的情况进行选用。

3.3 多尺度统一修正模型的应用

以河口村大坝为例, 坝体为混凝土面板堆石坝, 最大坝高 122.5 m, 面板堆石坝设计主要考虑的因素是大坝的应力变形状态, 而大坝应力变形分析的主要手段是有限元数值分析。将室内缩尺三轴试验所得 $E-B$ 模型参数进行的坝体沉降计算与经统一修正模型修正后的模型参数计算结果进行对比, 并与工程监测值相校核。

主要考虑主堆石料计算参数的影响, 主堆石区填筑材料为级配碎石, 室内三轴试验所得主应力差与轴向应变如图 13 所示。根据该三轴试验结果计算主堆石材料的 $E-B$ 模型参数如表 1 所示。采用该参数计算所得最大竖向沉降竣工时 61.2 cm, 蓄水期 68.1 cm。

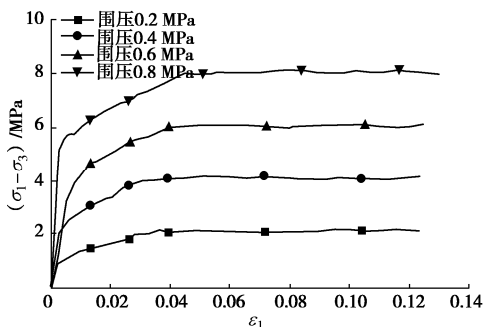


图 13 主堆石料三轴试验
Fig. 13 Triaxial tests on main rockfill

表 1 修正前后河口村主堆石材料 $E-B$ 模型参数
Table 1 $E-B$ model parameters of main rockfill materials in Hekou Village

分类	干重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	K	n	R_f	K_{ur}	c (kPa)	ϕ_0 ($^\circ$)	$\Delta\phi$ ($^\circ$)	K_b	m
修正前	20.7	1660	0.21	0.85	3320	0	54	10.6	380	0.14
修正后	20.7	1312	0.25	0.82	3320	0	54	10.6	581	0.14

本文的模型最要考虑变形参数的影响, $E-B$ 模型中与变形相关的过程量为 E_i , 根据三轴试验过程和材料属性, 采用统一修正模型进行尺度及各影响因素的影响系数计算, 如表 2 所示。

表 2 河口村主堆石材料修正计算
Table 2 Correction calculation of main rockfill materials in Hekou Village

项目	$f_1(\zeta)$	$f_2(\mu)$	$f_3(\rho_d)$	$f_4(D)$	$f_5(p)$	综合影响 $F(\cdot)$
修正值	1.19	1.0	1.47	0.56	1.0	0.84

采用表 2 中修正后的 $E-B$ 模型参数, 计算总体沉降量对比如表 3 所示。

表 3 河口村坝体沉降计算对比
Table 3 Comparison of settlement calculation of Hekou Village Dam

项目	计算最大沉降/cm		提升准确度 /%
	竣工	蓄水	
室内缩尺试验 监测数据	61.2	68.1	17.43~28.89
统一修正模型	78.9	109.7	
统一修正模型	75.6	99.7	

4 结 论

针对筑坝料的变形特性的尺寸效应, 以接触变形理论为基础, 从粒径尺度、试件尺度及外部影响因素角度, 结合试验的方法进行了研究, 主要得到以下结论:

(1) 基于弹性力学接触变形理论, 建立了粒径尺度与归一化压缩模量的指数相关模型, 论证了试件尺度中径径比大于 5 时压缩试验的变形可靠性。

(2) 揭示了与尺度效应相关的 5 个外部因素, 侧限条件、干密度、边缘破碎及荷载等级等多种组合对变形特性的影响规律和内在机理, 并分别建立了各因素与变形的相关模式。

(3) 基于试验回溯现场过程, 建立了综合考虑缩尺过程、侧限条件、干密度、边缘破碎及荷载等级因素下的多尺度变形参数统一修正模型。

(4) 通过对大坝堆石料变形 $E-B$ 模型计算参数的修正及变形计算, 验证了多尺度变形参数统一修正模型的适用性与可靠性, 较直接采用缩尺试验结果准确度提升了约 20%。

参考文献:

[1] IJHD. 2018 World Atlas & Industry Guide[R]. Wallington: International Journal of Hydropower and Dams, 2018.

[2] MA H Q, CHI F D. Technical progress on researches for the safety of high CFRDs[J]. Engineering, 2016, 2(4): 332 - 339.

[3] 秦红玉, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1575 - 1580. (QIN Hong-yu, LIU Han-long, GAO Yu-feng, et al. Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1575 - 1580. (in Chinese))

[4] 徐志华, 孙大伟, 张国栋. 堆石料应力 - 应变特性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1565 - 1572. (XU Zhi-hua, SUN Da-wei, ZHANG Guo-dong. Study on stress-strain behavior of rockfill using large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1565 - 1572. (in Chinese))

- 体位移场模型试验研究[J]. 工程力学, 2014, **8**: 168 - 174. (CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Model test on deformation characteristic of pile driving in sand using PIV technique[J]. Engineering Mechanics, 2014, **31**(8): 168 - 174. (in Chinese))
- [7] DEJONG J T, WHITE D J, RANDOLPH M F. Microscale observation and modelling of soil-structure interface behaviour using particle image velocimetry[J]. Soils and Foundations, 2013, **46**(1): 15 - 28.
- [8] 张 嘎, 张建民, 梁东方. 土与结构接触面试验中的土颗粒细观运动测量[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(8): 903 - 907. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, LIANG Dong-fang. Measurement of soil particle movement in soil-structure interface test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 903 - 907. (in Chinese))
- [9] YATES J R, ZANGANEH M, TAI Y H. Quantifying crack tip displacement fields with DIC[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, **77**(11): 2063 - 2076.
- (编校: 黄贤沙)
-
- (上接 166 页)
- [5] KONG X, LIU J, ZOU D, et al. Stress-dilatancy relationship of Zipingpu gravel under cyclic loading in triaxial stress states[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, **16**(4): 4016001.
- [6] MARACHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1972, **98**(1): 95 - 114.
- [7] HUNTER G, FELL R. Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(10): 909 - 917.
- [8] VARADARAJAN A, SHARMA K G, ABBAS S M, et al. Constitutive model for rockfill materials and determination of material constants[J]. International Journal of Geomechanics, 2006, **6**(4): 226 - 237.
- [9] VARADARAJAN A, SHARMA K G, VENKATACHALAM K, et al. Testing and modeling two rockfill materials[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(3): 206 - 218.
- [10] 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 Xiao-gang. Discussion on some problems observed in high earth-rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(2): 203 - 222. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)