

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.05.009

胶凝堆石料大三轴试验

蔡新^{1,2}, 宋小波¹, 明宇², 杨杰²

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在大三轴试验的基础上, 得到不同胶凝体质量浓度、不同围压下的应力-应变曲线, 通过试验数据对胶凝堆石料本构模型进行探讨, 并求出了模型中的参数。研究表明: 当胶凝体质量浓度较低时, 对胶凝堆石料运用邓肯-张本构模型基本满足工程精度要求; 随着胶凝体质量浓度的增加, 从应力-应变曲线中发现邓肯-张本构模型已不再适用, 但曲线在弹性阶段表现出明显的线性特性, 线性模型的弹性模量与胶凝体质量浓度、围压有关。通过试验数据, 拟合得出线性模型中相关参数之间关系的表达式。

关键词: 大三轴试验; 胶凝堆石料; 应力-应变曲线; 邓肯-张本构模型

中图分类号: TV321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)05-0424-05

Large-scale triaxial tests for CSG materials

CAI Xin^{1, 2}, SONG Xiaobo¹, MING Yu², YANG Jie²

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on large-scale triaxial tests, stress-strain curves with different cement contents and different ambient pressures were obtained. A constitutive model for CSG materials was investigated using test data, and the model parameters were derived. The results show that the Duncan-Chang constitutive model for CSG materials met the engineering accuracy standard when the cement content was low. With the increase of the cement content, it can be seen from the stress-strain curve that the Duncan-Chang constitutive model was no longer applicable, but the curve showed obvious linear characteristics in the elastic stage, and the elastic modulus of the linear model was related to the cement content and ambient pressure. The expression of the parameters of the linear model was obtained based on the test data.

Key words: large-scale triaxial tests; CSG materials; stress-strain curve; Duncan-Chang constitutive model

胶凝堆石坝是以坝址附近河床砂砾料及开挖弃渣为骨料, 加入水泥等添加剂简易拌和成坝料进行填筑的, 众多学者都认为该坝型具有高安全性、高抗震性和对地基条件要求低的特点, 而且施工简便、快速, 造价低廉。而胶凝材料的力学特性试验及其本构模型研究是胶凝堆石坝相关问题的关键, 目前国内对胶凝堆石料本构模型的研究还不够深入, 本文结合大三轴试验, 对不同胶凝体质量浓度的本构模型进行探讨。

胶凝堆石料的变形模量是碾压堆石料的 10 ~ 100 倍, 使相应坝型的坝体变形大幅度减小, 有利于改善面板和周边缝的工作性态, 上游防渗体系能正常工作。但目前对胶凝堆石料的本构特性认识还不够深入, 多是将胶凝堆石料看作混凝土材料, 采用线弹性本构关系来模拟; 也有将其按照堆石料进行处理, 采用邓肯-张本构关系或将其进行修正来使用^[1-2]。笔者对不同胶凝体质量浓度的堆石料进行大三轴试验, 通过试验数据对胶凝堆石料的本构特性进行探讨。

收稿日期: 2013-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(51179061); 高等学校博士学科点专项科研基金(博士生导师类)(20100094110014); “十二五”国家科技支撑计划(2012BAD10B02)

作者简介: 蔡新(1964—), 男, 江苏启东人, 教授, 博士, 主要从事力学教学和水工结构研究。E-mail: xcail@hhu.edu.cn

1 试验过程

1.1 材料配比

根据前人的试验经验^[3-6],最优水灰比(质量分数)定为 0.6~1.2,最优砂率取 20%,碎石级配取 5~10 mm,10~20 mm,20~40 mm,相应的质量分数分别为 20%,35%,45%。试验材料用量见表 1。

1.2 试件制备

按照《水工混凝土试验规范》对某胶凝材料的配料进行拌和,并用振动碾将拌合物振实。试件成型后,在材料初凝前 1~2 h 需要进行抹面,要求沿模口磨平。模量与阻尼比试验试件要在 4 种围压、1 种固结比下进行试验,也就是每种胶凝体质量浓度的试件要制作 4 个。考虑到试验失败等不良因素的影响,备用试件为 6 个。3 种试件总计 18 个,备用试件共 20 个。在试验前将准备好的止水橡胶模套在试件上。

1.3 试验方法

试件养护 28 d 后进行分组,每组试验 4 个试件,分别在恒定围压 300 kPa,600 kPa,900 kPa,1200 kPa 下饱和固结(固结比 K 均为 1),固结完成后以 0.02 mm/s 的加荷速度进行三轴排水(CD)剪切,并记录轴向压力、轴向位移和排水量。当轴向应变值达到 15% 或试样完全破坏时停止试验。

2 试验数据分析

不同胶凝体质量浓度、不同围压下的胶凝堆石料应力-应变关系曲线即 $\sigma_1-\sigma_3 \sim \varepsilon_a$ 曲线见图 1(σ_1 为轴向应力, σ_3 为围压, $\sigma_1-\sigma_3$ 为偏应力, ε_a 为轴向应变)。

2.1 胶凝材料试验结果分析

a. 由图 1(a)可知:当胶凝体质量浓度为 20 kg/m³ 时,曲线没有明显的应力峰值和应变软化现象,试样应力-应变关系曲线近似于双曲线。

b. 由图 1(b)(c)(d)可知:(a)当胶凝体质量浓度大于 20 kg/m³ 时,胶凝堆石料试样具有明显的应力峰值, $\sigma_1-\sigma_3$ 达到峰值前随 ε_a 的增加而增长,存在明显的线性初始段,而且围压对该直线段斜率的影响不明显,表现出类似混凝土的应力-应变特征;但随着 ε_a 的增长,梯度逐渐变缓,表现出非线性的应力-应变特征。(b) $\sigma_1-\sigma_3$ 达到峰值后, ε_a 继续增大,而 $\sigma_1-\sigma_3$ 逐渐减小,表现出应变软化的特征。(c)随着 ε_a 的继续增大, $\sigma_1-\sigma_3$ 逐步趋于一个定值,即材料的残余强度。(d)峰值强度和残余强度随着围压的增大而增长。

c. 胶凝体质量浓度大于 20 kg/m³ 时,曲线的峰值强度和初始模量随着胶凝体质量浓度的增长而增长,峰值强度对应的 ε_a 比较小。

d. 胶凝体质量浓度越大,应变软化现象越明显。与纯堆石料相比,胶凝堆石料的强度和初始变形模量都有大幅度提高。

2.2 邓肯-张本构模型的适用性

当胶凝体质量浓度为 20 kg/m³ 时,试样的应力-应变关系曲线近似于双曲线。采用修正邓肯-张本构模型进行验证,其表达式^[7-8]如下:

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

(1)

式中: E_t ——切线弹性模量; E_i ——初始弹性模量; φ ——内摩擦角; c ——黏聚力; R_f ——模型参数。

由于胶凝堆石料有一定的抗拉能力,故对原有的表达式进行修正^[9]:

$$E_i = Kp_a \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_t}{p_a} \right)^n$$

(2)

$$\sigma_t = -2c\tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

(3)

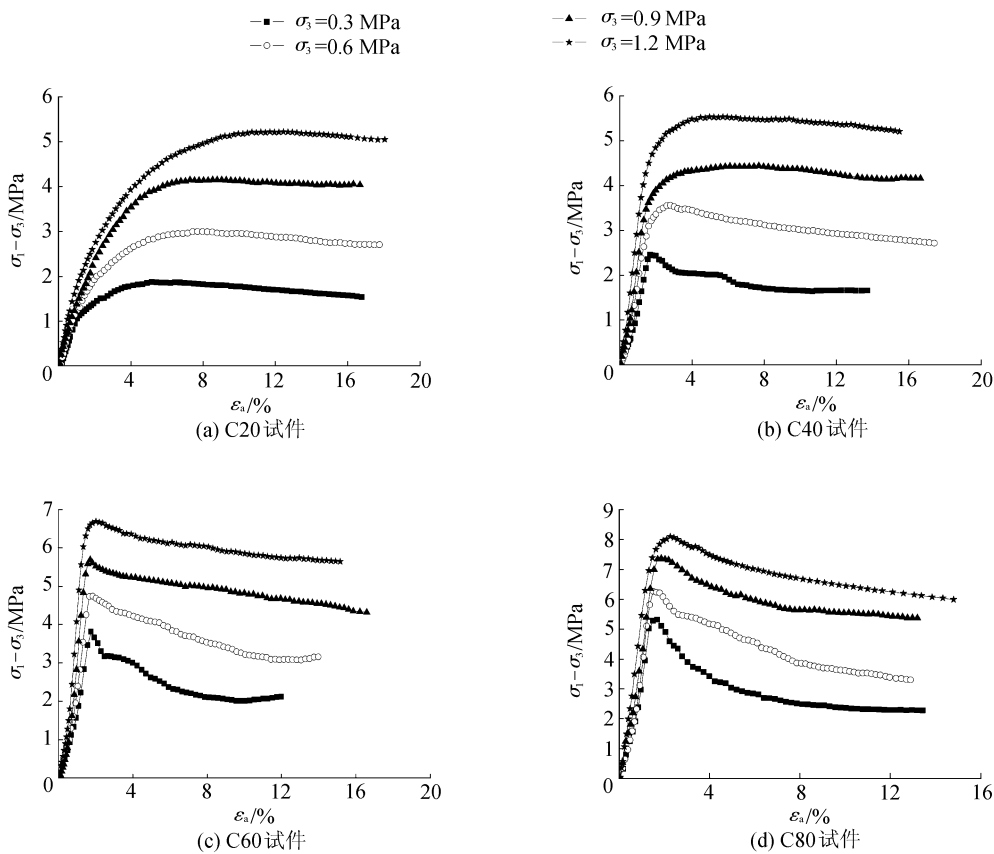


图1 三轴试验应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves for specimens in triaxial tests

得到修正模型的表达式如下:

切线弹性模量

$$E_t = \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi} \right]^2 K p_a \left[\frac{\sigma_3 + 2c\tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{p_a} \right]^n \tag{4}$$

切线体积模量

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \tag{5}$$

式中: K, n ——模型参数; p_a ——大气压强; σ_1 ——胶凝堆石料的抗拉强度; K_b, m ——模型参数。

利用试验数据拟合^[10-11],最终得到参数 $c=174.4\text{ kPa}$, $\varphi=40.6^\circ$, $K=1\,196.74$, $n=0.207$, $R_f=0.79$, $K_b=407.72$, $m=0.36$ 。当胶凝体质量浓度大于 20 kg/m^3 时,应力-应变曲线和拟合的试验数据表明邓肯-张本构模型已经不再适用,对其本构模型还要进行深入的探讨。

3 本构模型探讨

从应力-应变关系曲线中可以看到:当胶凝体质量浓度大于 20 kg/m^3 时曲线在初始弹性阶段表现出明显的线性特征;随着轴向应变的增长,梯度逐渐变缓,表现出非线性的应力-应变特征。然而通过图1可以看到曲线在应变软化之前非线性部分基本接近于曲线峰值点,此时应已脱离弹性阶段而达到了屈服阶段。因此,在弹性阶段内认为应力-应变关系可以用线弹性模型来描述^[12]。

3.1 弹性模量的计算

从应力-应变关系曲线中可以发现弹性模量的大小与胶凝体质量浓度、围压有关,为此可以列出表达式:

$$E_j = f(\sigma_3, H) \tag{6}$$

式中: E_j ——弹性模量; $f(\sigma_3, H)$ ——弹性模量随围压与胶凝体质量浓度增长的函数; H ——胶凝体质量浓度。

要得出弹性模量的表达式,先要通过试验得出材料在不同胶凝体质量浓度和围压下的 E_i 。所得结果见图 2。

对图 2 曲线进行拟合,发现用指数函数拟合效果较好,拟合结果见表 2。可以看出,拟合方程的一般式为 $y=ae^{kx}$, k 值变化不大(在 0.001 6 左右),参数 a 随围压的增大而增大,二者基本呈线性关系。拟合的 $\sigma_3 \sim a$ 的关系线见图 3,拟合方程为 $y=49.74x+94.23$ 。

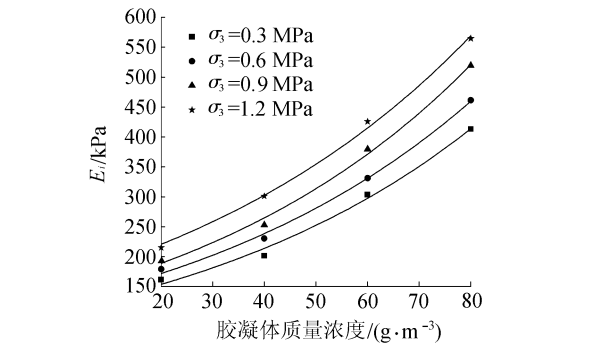


图 2 初始弹性模量与胶凝体质量浓度关系曲线

Fig. 2 Relationship between initial elastic modulus and CSG content

综上,可以得到

$$E_i=f(\sigma_3,H)=(49.74\sigma_3+94.23)e^{0.0016H}\tag{7}$$

4 结 语

a. 通过试验数据总结得出结论:胶凝堆石料在胶凝体质量浓度较低时符合邓肯-张本构模型。在此基础上推导出切线弹性模量 E_t 与切线体积模量 B_t 表达式中的参数值。

b. 随着胶凝体质量浓度的增加,由应力-应变曲线可以看出邓肯-张本构模型已不再适用,但曲线初始段表现出明显的线性特征,非线性部分基本都接近于曲线峰值点。因此,认为在弹性阶段内应力-应变关系可以用线弹性模型来描述,它是围压 σ_3 与胶凝体质量浓度 H 的函数。通过试验数据拟合得出了该函数的表达式。

c. 目前工程界对于胶凝堆石料的拌和方式还没有较一致的认识,文中介绍的试验是在室内较理想条件下进行的,试验采用的胶凝材料掺量、最大料径、拌和方式和抽样方法与工程实际有较大出入,得出的结果距工程实际应用有差距,今后还有大量的工作要做。

参考文献:

[1] 蔡新,武颖利,李洪煊,等. 胶凝堆石料本构模型研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1340-1344. (CAI Xin, WU Yingli, LI Hongxuan, et al. Constitutive equation for CSG materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(9):1340-1344. (in Chinese))

[2] 孙明权,杨世峰,张镜剑,等. 超贫胶结材料本构模型[J]. 水利水电科技进展,2007,27(3):35-37. (SUN Mingquan, YANG Shifeng, ZHANG jingjian, et al. Study on constitutive model for over lean cemented material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(3):35-37. (in Chinese))

[3] 李永乐,侯进凯,孙明权,等. 超贫胶结混凝土的力学特性试验研究[J]. 人民黄河,2007,29(3):59-60. (LI Yongle, HOU Jinkai, SUN Mingquan, et al. Test and study on mechanical property of super-short cement concrete[J]. Yellow River,2007,29(3):59-60. (in Chinese))

[4] 孙明权,彭成山,李永乐,等. 超贫胶结材料三轴试验[J]. 水利水电科技进展,2007,27(4):46-49. (SUN Mingquan, PENG Chengshan, LI Yongle, et al. Triaxial test of over lean cemented material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(4):46-49. (in Chinese))

[5] 彭成山,张学菊,孙明权. 超贫胶结材料特性研究[J]. 华北水利水电学院学报,2007,28(2):26-29. (PENG Chengshan,

表 2 拟合方程

Table 2 Fitting equations

胶凝体质量浓度/ (kg·m ⁻³)	σ ₃ / MPa	直线方程	拟合相关 系数
20	0.3	$y=110.53e^{0.00164x}$	0.991
40	0.6	$y=123.69e^{0.00158x}$	0.994
60	0.9	$y=135.59e^{0.00161x}$	0.993
80	1.2	$y=156.3e^{0.00167x}$	0.998

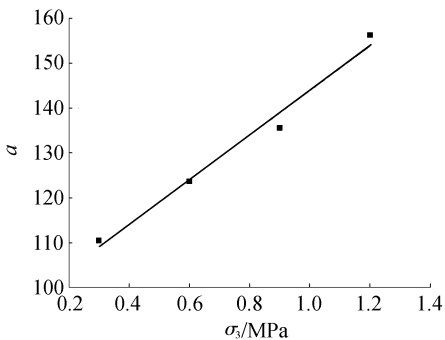


图 3 $\sigma_3 \sim a$ 曲线

Fig. 3 σ_3 - a curve

ZHANG Xueju, SUN Mingquan. Research of super poor cemented material characteristic[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2007,28(2):26-29. (in Chinese))

[6] 唐新军,陆述远. 胶结堆石料的力学性能初探[J]. 武汉水利电力大学学报,1997,30(6):15-18. (TANG Xinjun, LU Shuyuan. Preliminary research on mechanical behaviors of cemented rockfill material[J]. Engineering Journal of Wuhan University,1997,30(6):15-18. (in Chinese))

[7] 朱俊高,周建方. 邓肯 $E-\nu$ 模型与 $E-B$ 模型的比较[J]. 水利水电科技进步,2008,28(1):4-7. (ZHU Jungao, ZHOU Jianfang. Comparison of Duncan $E-\nu$ and $E-B$ models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2008,28(1):4-7. (in Chinese))

[8] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996:220-265.

[9] 宿辉,党承华. 邓肯-张非线性模型研究及其在 ANSYS 中的实现[J]. 中国农村水利水电,2010(3):76-79. (SU Hui, DANG Chenghua. Duncan-Chang nonlinear elastic model and realization in ANSYS[J]. China Rural Water And Hydropower, 2010(3):76-79. (in Chinese))

[10] 吴文峰,来妙法. 堆石材料邓肯模型参数统计规律研究[J]. 浙江水利水电专科学校学报,2008,20(2):5-8. (WU Wenfeng, LAI Miaofa. Statistical research on parameters of Duncan model of rock-fill materials[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College,2008,20(2):5-8. (in Chinese))

[11] 张波,汪传斌,黄德强,等. 邓肯模型参数 k, n, R_f 整理方法研究[J]. 西部探矿工程,2012(7):156-159. (ZHANG Bo, WANG Chuanbin, HUANG Deqiang, et al. Method research for Duncan model parameters of k, n, R_f [J]. West-China Exploration Engineering,2012(7):156-159. (in Chinese))

[12] 吴梦喜,杜文武,姚元成,等. 筑坝硬填料三轴试验及本构模型研究[J]. 岩土力学,2011,32(8):2241-2250. (WU Mengxi, DU Wenwu, YAO Yuancheng, et al. Triaxial tests and a new constitutive model of hardfill material[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(8):2241-2250. (in Chinese))

· 简讯 ·

第 35 届国际水利学大会在成都召开

2013 年 9 月 8—13 日,由中华人民共和国水利部、国际水利与环境工程学会(IAHR)共同主办的第 35 届国际水利学大会在成都召开,大会组委会主席、中华人民共和国水利部副部长矫勇在开幕式上致辞并作大会总报告。来自 78 个国家和地区约 1 400 名政府官员、国际组织负责人、科研人员、工程师、青年学者、企业展商参加了会议。联合国教科文组织助理总干事卡隆吉也在大会上作了报告。

本届大会以“智者乐水:水科学与工程之求索”为主题,通过组织全体大会、学术分会、论文墙展、大师讲堂、学生论文竞赛、专题研讨、技术参观及展览等活动,围绕水工程与社会文明、水环境与水生态、河流水力学及河流管理、海洋水力学与海岸工程、水资源与水信息、气候变化及灾害应对等多个议题展开交流与研讨。大会由中国水利水电科学研究院、四川大学、清华大学、香港大学、成都市政府共同承办。

(本刊编辑部供稿)