

胶凝砂砾石料动力特性试验

明 宇^{1,2}, 蔡 新^{1,3}, 郭兴文³, 傅 华⁴

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 青岛市市政工程设计研究院, 山东 青岛 266101;
3. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 4. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:为研究胶凝砂砾石料的动力特性,采用大型动力三轴试验仪进行胶凝掺量为 60 kg/m³ 的胶凝砂砾石料的动力试验,分析了材料最大动弹性模量与围压之间的关系,推导了非线性动弹性模量及阻尼比的表达式。试验结果表明:胶凝砂砾石料的动应力动应变关系具有明显的非线性特征,且受围压的影响较大;材料动弹性模量随动应变的增大而减小,而阻尼比则相应增大,并趋于某最大值;动应变一定时,围压增大引起材料动弹性模量增大,而阻尼比则随之减小。

关键词:胶凝砂砾石料;动力三轴试验;动弹性模量;阻尼比

中图分类号:TV321; TV649 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)01-0049-04

Dynamic characteristic test on cemented sand and gravel material//MING Yu^{1,2}, CAI Xin^{1,3}, GUO Xinwen³, FU Hua⁴(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Qingdao Municipal Engineering Design Research Institute, Qingdao 266101, China; 3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of cemented sand and gravel material, dynamic triaxial tests on cemented sand and gravel material with gel content of 60 kg/m³ were performed by the large-scale dynamic triaxial apparatus, the relationship between the maximum dynamic elastic modulus of the material and confining pressure was derived, and the expressions for the nonlinear dynamic elastic modulus and damping ratio were established. Test results show that the dynamic stress-strain relationship of the cemented sand and gravel material is obviously nonlinear, and is significantly influenced by the confining pressure. The dynamic elastic modulus of the material decreases with the increase of the dynamic strain, while the damping ratio increases with the dynamic strain and tends to a constant. As the dynamic strain is constant, the dynamic elastic modulus increases and the damping ratio decreases with the increase of the confining pressure.

Key words: cemented sand and gravel material; dynamic triaxial test; dynamic elastic modulus; damping ratio

胶凝砂砾石坝起源于 20 世纪 70 年代,是国内外学者在总结面板堆石坝和碾压混凝土重力坝优点的基础上提出的一种新坝型^[1]。胶凝砂砾石坝以坝址附近的河床砂砾料和开挖弃渣为骨料,掺入少量添加剂简易拌和后形成坝料进行填筑。与碾压混凝土重力坝相比,该坝型在筑坝过程中的水泥用量可大大减少;与混凝土面板堆石坝相比,大坝的填筑工程量可减少 50% 左右。已有的研究成果表明,该坝型的位移量与相同高度的碾压混凝土重力坝相当,只有混凝土面板堆石坝相应位移的 1/20 ~ 1/10,而且在竣工期与运行期胶凝砂砾石坝的坝体内部应力变化不大,大坝抗震能力明显较强^[2]。

综上所述,胶凝砂砾石坝具有安全可靠、经济合

理等优点,但现阶段关于胶凝砂砾石料的力学特性研究主要集中在静力特性方面,如孙明权等^[3-6]采用常规三轴试验对胶凝砂砾石料的强度和变形特性进行了试验研究,而国内外对该材料的动力特性研究几乎没有报道。关于胶凝砂砾石坝的抗震分析往往通过理论假设将坝料视为混凝土等线弹性材料^[7-9],而事实上胶凝砂砾石料有明显的非线性特征,采用线弹性假设不能客观地反映该坝型的动力变形特征。本文利用大型动力三轴试验仪进行胶凝砂砾石料的动力力学特性试验,研究材料的动应力与动应变关系及阻尼比的变化规律,为研究胶凝砂砾石坝的抗震性能提供参考依据,进而推动该坝型的应用和发展。

1 试验方法

1.1 试验仪器与试验材料

动力特性试验在南京水利科学研究院 TYD-1500 大型动力三轴仪上(图 1)进行。试验仪器采用高精度传感器和数据采集系统,精度的综合指标优于 1%。进行动力特性试验时,仪器的最大围压为 4.0 MPa,最大轴向荷载为 1 500 kN,最大轴向振动荷载为 500 kN,振动频率为 0.01 ~ 5 Hz。



图 1 大型动力三轴仪

试验采用胶凝掺量为 60 kg/m³ 的胶凝砂砾石料,胶凝剂采用 P32.5 普通硅酸盐水泥。堆石级配如下:20 ~ 40 mm、10 ~ 20 mm、5 ~ 10 mm、0.5 ~ 5 mm 的土石颗粒质量分数分别为 42%、35%、20%、3%。试样砂率为 20%,水灰比为 1 : 0.8,干密度为 2.190 g/cm³,孔隙率为 12.72%。

1.2 试验方法与试验内容

参考南京水利科学研究所编写的《土工试验技术手册》^[10]进行试验,按照 300 mm×300 mm×700 mm 的标准制作试件,根据试验要求的干密度和级配曲线,分 7 次按试验级配配料,并按照 SL352—2006《水工混凝土试验规程》^[11]对配料进行拌和后装入内壁覆有止水膜的成型筒内,再用振动碾振捣实,试样成型后带模养护 28 d。

在进行动弹性模量与阻尼比试验前,先将养护好的试样从成型筒拆离,装入压力室,然后对其进行饱和,饱和结束后按一定的固结应力比对试样施加围压和轴向荷载进行固结。进行动弹性模量与阻尼比试验时,激振频率取 0.3 Hz,各组试样的围压 σ_3 分为 300 kPa、600 kPa、900 kPa、1 200 kPa 共 4 级,固结应力比 $K_c = \sigma_1 / \sigma_3 = 2.0$ (σ_1 为初始轴向应力)。试样固结完成后,对不同围压的材料施加轴向循环动荷载,测出相应的动应力、动应变幅值及滞回曲线,由此得出不同围压的动弹性模量和阻尼比。

2 试验结果分析

2.1 动应力与动应变的关系

胶凝砂砾石料的动应力与动应变的关系是表征

胶凝砂砾石料动力特性的基本关系。本次试验中每级动荷载均采用 3 次循环,由于第 2 次循环的动应力和动应变的数据较稳定,因此在绘制动应力与动应变的关系曲线和滞回曲线时均采用每级荷载中第 2 次循环的试验数据。图 2 为胶凝砂砾石料在 4 种围压时的动应力 σ_d 与动应变 ε_d 关系曲线,即骨干曲线。

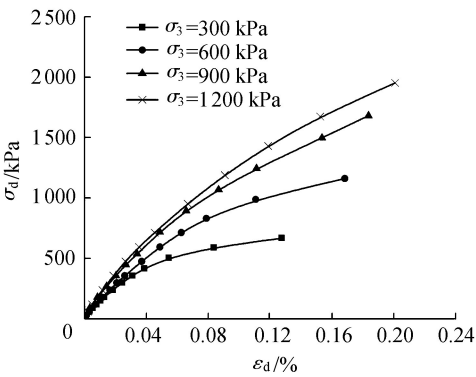


图 2 动应力与动应变关系曲线

由图 2 可知,胶凝砂砾石料的动应力与动应变的关系具有明显的非线性特征,当动应力较小时,曲线变化较快,随着动应力的增大,曲线的变化趋势减缓;动应变一定时,动应力随着围压的增大而增大,材料的动力本构关系受围压 σ_3 的影响较大。胶凝砂砾石料的动应力与动应变的关系特征说明线弹性的动力本构关系不能客观地反映该材料的动力变形特性。

2.2 动弹性模量与动应变的关系

根据试验测得的动应力和动应变幅值,利用文献[12]中的方法可以确定材料相应的动弹性模量 E_d ,图 3 为胶凝砂砾石料在不同围压时的动弹性模量与动应变关系曲线。

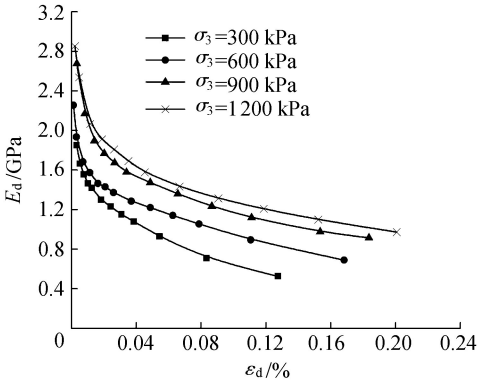


图 3 动弹性模量与动应变关系曲线

从图 3 可以看出,胶凝砂砾石料在不同围压时的动弹性模量均随着动应变的增大而呈现衰减的趋势,衰减速度随着动应变的增大而减缓,说明材料随着动应变的增大出现了刚度软化现象。此外,在动应变一定时,胶凝砂砾石料的动弹性模量随着围压的增大而增大,材料的动弹性模量受围压的影响较大。

2.3 阻尼比与动应变的关系

阻尼比 λ 是材料动力特性中的另一项重要特征参数,它反映了材料动应力与动应变关系之间的滞后性,本文通过动力特性试验获得滞回曲线,利用文献[13]中的方法计算了胶凝砂砾石料在不同工况下的阻尼比。为研究胶凝砂砾石料的阻尼比随动应力变化的趋势及材料是否存在最大阻尼比 $\lambda_{\max}$,绘制不同围压时的阻尼比倒数 $1/\lambda$ 与动应变关系曲线,如图4所示。

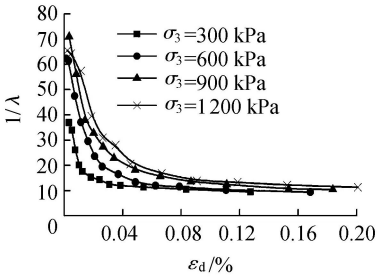


图4 阻尼比倒数与动应变关系曲线

由图4可见,胶凝砂砾石料在各种围压时的阻尼比倒数随着动应变的增大而减小,最终趋向于某一个定值,由此可以推断,胶凝砂砾石料的阻尼比近似存在最大值,在本试验中其约为0.12。另外,围压对胶凝砂砾石料的阻尼比有一定的影响,在动应变一定时,材料的阻尼比随着围压的增大而减小。

3 胶凝砂砾石料动力本构关系

3.1 胶凝砂砾石料的动弹性模量

通过分析本次试验数据以及相关研究成果,发现胶凝砂砾石料的动弹性模量 E_d 与最大动弹性模量 $E_{\max}$ 及动应变 ε_d 有关。现行的一些土工试验规范基于双曲线模型的假定,建议用 $1/E_d - \varepsilon_d$ 关系曲线在纵坐标轴上的截距的倒数求出最大动弹性模量,但对胶凝砂砾石料而言, $1/E_d - \varepsilon_d$ 关系并不满足直线关系,因此上述方法并不适用。根据文献[14]提供的方法,可较精确地计算本次试验中的最大动弹性模量。由试验数据发现,胶凝砂砾石料的最大弹性模量受围压的影响较大,考虑到该材料与普通堆石料的不同,围压可能为零甚至为负,为了保证对数函数在围压为零时具有数学意义,本文在沈珠江动力模型^[15]的基础上进行了改进调整,作 $\lg(E_{\max}/p_a) - \lg[(\sigma_3 + p_a)/p_a]$ 关系曲线 (p_a 为标准大气压力),如图5所示,由图5可见, $\lg(E_{\max}/p_a) - \lg[(\sigma_3 + p_a)/p_a]$ 关系曲线可近似用以下直线方程拟合:

$$\lg\left(\frac{E_{\max}}{p_a}\right) = n \lg\left(\frac{\sigma_3 + p_a}{p_a}\right) + \lg k \tag{1}$$

则
$$E_{\max} = k p_a \left(\frac{\sigma_3 + p_a}{p_a}\right)^n \tag{2}$$

式中: $\lg k$ 和 n 分别为 $\lg(E_{\max}/p_a) - \lg[(\sigma_3 + p_a)/p_a]$ 关系曲线在纵坐标轴上的截距和直线斜率。

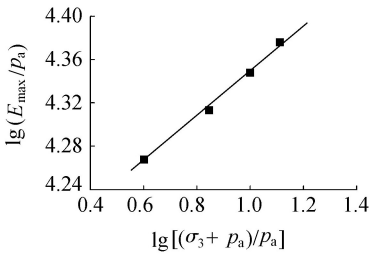


图5 $\lg(E_{\max}/p_a) - \lg[(\sigma_3 + p_a)/p_a]$ 关系曲线

为研究胶凝砂砾石料动弹性模量与最大动弹性模量、动应变的数学关系,且使数据关系更为集中,引入归一化的动应变 $\bar{\varepsilon}_d$ ^[15],令 $\bar{\varepsilon}_d = \varepsilon_d \left(\frac{\sigma_3 + p_a}{p_a}\right)^{n-1}$,得到不同围压时的 $E_{\max}/E_d - \bar{\varepsilon}_d$ 关系曲线,如图6所示。

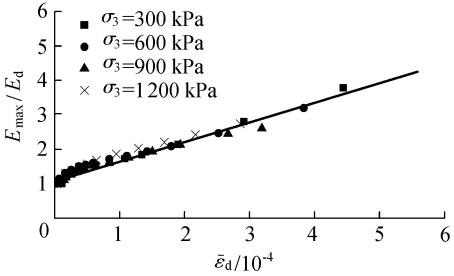


图6 $E_{\max}/E_d - \bar{\varepsilon}_d$ 关系曲线

由图6可见, $E_{\max}/E_d$ 与 $\bar{\varepsilon}_d$ 的试验数据相当集中,基本集中在一条曲线上,可近似用以下直线方程拟合 $E_{\max}/E_d - \bar{\varepsilon}_d$ 关系:

$$E_{\max}/E_d = a \bar{\varepsilon}_d + b \tag{3}$$

式中: a 为直线斜率; b 为直线在纵坐标轴上的截距,由于直线过(0,1)点,则 $b=1$ 。

结合式(2)和式(3),胶凝砂砾石料的非线性动弹性模量的完整表达式如下:

$$E_d = p_a \left(\frac{\sigma_3 + p_a}{p_a}\right)^n \frac{k}{a \bar{\varepsilon}_d \left(\frac{\sigma_3 + p_a}{p_a}\right)^{n-1} + 1} \tag{4}$$

3.2 胶凝砂砾石料的阻尼比

由于胶凝砂砾石料存在最大阻尼比,本文借鉴沈珠江关于堆石料的阻尼比经验公式^[15],从最大阻尼比和动应变两个角度考虑该材料非线性阻尼比。通过对试验数据的分析和整理,发现胶凝砂砾石料在不同围压时的阻尼比与归一化动应变 $\bar{\varepsilon}_d$ 之间的关系曲线较密集,可作为一条基本曲线。绘出不同围压时的 $\bar{\varepsilon}_d/\lambda - \bar{\varepsilon}_d$ 关系曲线,如图7所示。

由图7可见, $\bar{\varepsilon}_d/\lambda - \bar{\varepsilon}_d$ 的试验数据较为集中,大体集中在一条曲线上,可近似用以下直线方程拟合 $\bar{\varepsilon}_d/\lambda - \bar{\varepsilon}_d$ 关系:

$$\bar{\varepsilon}_d/\lambda = c \bar{\varepsilon}_d + d \tag{5}$$

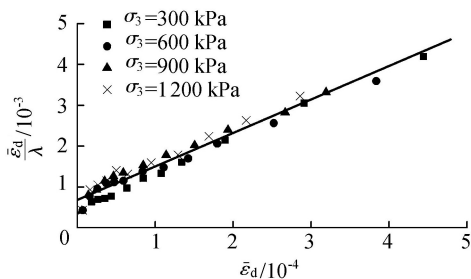


图7 $\bar{\varepsilon}_d/\lambda-\bar{\varepsilon}_d$ 关系曲线

式中: c 为直线斜率; d 为直线在纵坐标轴上的截距。

由式(5)可知 $\bar{\varepsilon}_d-\lambda$ 关系曲线可视为一条以 $\lambda_{\max}$ 为渐近线的双曲线,可用下式表示:

$$\lambda = \frac{\bar{\varepsilon}_d}{c\bar{\varepsilon}_d + d} \quad (6)$$

其中

$$c = \frac{1}{\lambda_{\max}}$$

综上所述,胶凝砂砾石料的非线性阻尼比的完整表达式如下:

$$\lambda = \frac{\varepsilon_d \left(\frac{\sigma_3 + p_a}{p_a} \right)^{n-1}}{\frac{\varepsilon_d}{\lambda_{\max}} \left(\frac{\sigma_3 + p_a}{p_a} \right)^{n-1} + d} \quad (7)$$

4 结 论

a. 胶凝砂砾石料的动应力与动应变关系具有明显的非线性特征,且受围压的影响较大,说明胶凝砂砾石料的动力本构关系不能用线弹性本构来反映。

b. 动弹性模量随着动应变的增大而减小,衰减速度随着动应变的增大而减缓,出现了刚度软化现象;在动应变一定时,动弹性模量随着围压的增大而增大,且最大动弹性模量与围压满足对数线性关系。

c. 材料的阻尼比随着动应变的增大而增大,最终趋向于某一定值,表明材料存在最大阻尼比;围压对阻尼比有一定的影响,在动应变一定时,材料的阻尼比随着围压的增大而减小。

参考文献:

[1] LONDE P, LINO M. The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC [J]. International Water Power & Dam Construction, 1992, 44(2): 19-24.

[2] 杨首龙. CSG 坝坝填材料特性与抗荷载能力研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 97-103. (YANG Shoulong. Characteristics and load carrying capacity of CSG dam construction materials [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 97-103. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 蔡新, 武颖利, 李洪煊. 胶凝堆石料本构特性研究[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))

[5] 武颖利. 胶凝堆石坝坝料力学特性及大坝工作性态研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.

[6] 孙明权, 杨世锋, 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))

[7] 何蕴龙, 肖伟, 李平. Hardfill 坝横向地震反应分析的剪切楔法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008, 41(4): 38-42. (HE Yunlong, XIAO Wei, LI Ping. Shear wedge method of lateral seismic response analysis of Hardfill dams [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(4): 38-42. (in Chinese))

[8] 何蕴龙, 张艳锋. Hardfill 坝自振特性分析的剪切楔法[J]. 人民长江, 2008, 39(13): 98-100. (HE Yunlong, ZHANG Fengyan. Analysis of free vibration characteristics of shear wedge method for Hardfill dam [J]. Yangtze River, 2008, 39(13): 98-100. (in Chinese))

[9] 于跃, 张艳锋, 何蕴龙, 等. 基于剪切楔法的 Hardfill 坝自振特性和动力反应分析[J]. 天津大学学报, 2009, 42(4): 327-334. (YU Yue, ZHANG Yanfeng, HE Yunlong, et al. Analysis on free vibration and dynamic response of hardfill dams based on shear wedge method [J]. Journal of Tianjin university, 2009, 42(4): 327-334. (in Chinese))

[10] 南京水利科学研究院土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

[11] SL352—2006 水工混凝土试验规程[S].

[12] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soil: measurement and parameter effects [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 1972, 98(6): 603-624.

[13] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[14] 王伟, 周爱兆. 一种土体应力应变曲线临塑点和初始弹性模量的测定方法; 中国, CN102359910A[P]. 2012-02-22.

[15] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学研究, 1996, 6(2): 143-150. (SHEN Zhujiang, XU Gang. Dynamic deformation characteristics of rockfill material [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1996, 6(2): 143-150. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-01-28 编辑: 周红梅)