

荷载作用堆石流变特性试验研究

王海俊, 殷宗泽

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 堆石体存在流变, 不仅与荷载有关, 而且与干湿循环有关. 堆石坝的长期变形观测资料表明, 雨季产生的变形常显著高于非雨季. 因此, 研究堆石料长期变形时需分别考虑荷载作用和干湿循环所产生的流变规律. 通过室内试验分析了仅考虑荷载作用的堆石流变特性, 重点是应力状态对流变的影响. 试验结果表明, 荷载作用下堆石流变随时间呈衰减趋势, 符合双曲线形式, 最终体积流变和剪切流变与应力状态有关.

关键词: 堆石料; 流变; 土石坝; 荷载作用; 流变模型

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)02-0048-06

Experimental study on creep deformation of rockfill considering load action

WANG Hai-jun, YIN Zong-ze

(Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Creep deformation of rockfill has relations with not only load but also wetting-drying cycle. According to rockfill dam long-time observation, it is also indicated that deformation in rainy seasons is obviously greater than that in other seasons. The deformation caused by load action and wetting-drying cycle should be studied respectively in rockfill long-time deformation research. A creep test only considering load effect is done to study the effect of stress condition on rockfill creep. It shows that creep deformation reduces with time and can be described by hyperbolic curve. Final volumetric and shearing creep deformation has relations with spherical stress and stress level respectively.

Key words: rockfill material; creep; earth-rock fill dam; load action; creep model

流变是堆石的重要变形特性, 国内外多座已建的面板堆石坝现场监测结果表明, 坝体流变现象均比较明显^[1,2]. 堆石体的流变除了引起坝体的沉降变形外, 还会影响面板的应力及周边缝的变位, 严重时会造成面板开裂, 使防渗设施失效. 因此, 随着近年来高坝的不断兴建, 堆石的流变越来越受到重视. 关于堆石体流变已有不少学者进行了室内试验研究^[3-5], 但室内试验中的堆石流变过程完成比较快, 一般只需几十个小时即

收稿日期: 2007-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479019, 50639050)

作者简介: 王海俊(1981-), 男, 江苏泰兴人, 博士研究生. 主要从事堤坝建筑材料的特性研究.

E-mail: wanghaijun@hhu.edu.cn

可趋于稳定.而实际工程坝体蓄水后,3年左右的时间坝体变形才能完成总变形的80%,两者规律有明显的差异.文献[6-7]指出现场条件尤其是天气晴雨引起的干湿循环作用,是引起堆石体长期变形的重要因素.许多堆石坝在雨季过后沉降变形有明显增加,也证明了这一点.文献[8]对堆石体流变机理做了全面的阐述,并通过室内干湿循环试验初步论证了等围压情况下干湿循环作用对堆石体长期变形的影响,试验研究表明干湿循环的影响是不可忽视的;研究堆石料长期变形时,除了考虑荷载作用流变,还需计入干湿循环所引起的流变.因此,可以将堆石体的流变分为两部分,一部分为荷载作用流变,也就是通常情况下室内堆石体流变规律,只是研究恒定荷载作用下颗粒本身的蠕变及接触点错动或破坏所引起的宏观上的变形与时间的关系;第二部分为干湿循环引起的流变,研究不同应力状态堆石流变随干湿循环次数的变化规律.由于文章篇幅有限,本文主要就其荷载作用流变规律进行分析,干湿循环流变规律将在另文中专门进行论述.

1 试验研究方法

本试验在试样尺寸为 $\Phi 101\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的中型三轴仪上进行.试验所用材料为某大坝花岗岩堆石料,试样级配参照原始级配按相似级配法和等量替代法进行缩配,最大允许粒径 20 mm ,颗粒级配见表1.试样均由风干堆石料按照要求的干密度,分5层击实制备而成,控制干密度为 1.96 g/m^3 .试验中未对温度进行控制,平均试验温度为 $19\sim 33^\circ\text{C}$.

表1 粗粒料的颗粒级配组成

Tab.1 The grain size gradation of coarse materials

颗 粒 级 配						
粒径组(mm)	20~10	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0
含量(%)	45.8	25.2	12.0	5.0	2.0	10.0

荷载作用堆石流变试验方法与软土流变试验相同,分体积变形和剪切变形研究应变分量在不同应力状态下的流变规律.等向压缩流变仅施加等向围压作用,测量体积应变随时间的变化;剪切流变同时施加侧向围压和轴向偏应力作用,分别测量轴向应变和体积应变随时间的变化.受试验仪器的限制,本试验对低围压情况下的三轴流变规律进行研究,试验压力为 100 、 200 和 400 kPa .对不同围压施加的轴向偏应力水平为 0.25 、 0.5 和 0.75 ,轴向偏应力按单级方式施加.每个试验只单独施加一级恒定荷载作用,当轴向位移及体积变形均达到稳定(相邻 24 h 应变差 $\leq 5.0\text{ e}^{-5}$)时停止试验,一般维持 $100\sim 200\text{ h}$.

试验试样为风干压实样,材料透水(气)性强,固结历时较短,无法采用孔隙水压力消散指标作为围压固结稳定判别标准,各类规范中也没有相应的标准.本文统一以围压施加 0.5 h 作为固结完成时间,同时也以此作为三轴剪切试验和剪切流变试验施加偏应力前试样固结稳定时间.各组围压下的三轴流变试验过程如下,等围压流变试验:仅施加 σ_3 作用,试验过程中只测量体积随时间的变化,直至体积变形达到稳定,停止试验.剪切流变试验:①先施加 σ_3 ,让试样在 σ_3 作用下固结稳定 0.5 h ;②将固结稳定 0.5 h 所对应的体积变形作为三轴流变试验的初始固结体变,然后施加轴向偏应力;③轴向偏应力按应变控制方式加载到某一应力状态(控制速率与剪切试验相同为 0.15 mm/min),并保持不变;④保持轴向偏应力不变,观测轴向位移及体积随时间的变化,直至轴向位移及体积变形均达到稳定,停止试验.

由于试验试样为风干料,体变不能通过试样的排气或者排水来量测,需要通过测定压力室进出水量的变化来计算体积变形.计算试样体积变化时,必须扣除轴压杆移动及压力室膨胀引起的压力室进出水量的变化.整个流变试验过程中围压均保持恒定不变,围压所引起压力室的膨胀变形可事先通过试验标定.

2 三轴流变试验结果

按照滞后变形理论,荷载作用下的堆石变形包括加荷初期瞬时变形和恒定荷载作用下与时间有关的滞后变形这两部分. 荷载作用流变可由总的变形扣除瞬时变形得到.

$$\{\varepsilon_i'\} = \{\delta\} - \{\delta_i'\} \quad (1)$$

式中: $\{\delta\}$ 为总的实测变形; $\{\delta_i'\}$ 为瞬时弹塑性变形; $\{\varepsilon_i'\}$ 为荷载作用流变.

粗粒料试验存在膜嵌入问题,等围压流变试验过程中如将围压加载初期膜嵌入变形计入围压作用体积流变,则会导致体积变形量过大. 本文假定围压施加 0.5 h,膜嵌入变形已经全部完成,并从围压加载 0.5 h 计算围压作用体积流变. 剪切流变则以偏应力施加结束时候的应变为瞬时应变.

2.1 等向压缩体积流变

等围压荷载作用下试样的体积应变包括瞬时体积应变和与时间有关的体积应变. 这两部分变形均与应力状态有关,围压愈高,瞬时变形和流变变形均愈大,流变变形趋于稳定时间也愈长. 等围压荷载作用下试样体积压缩,围压越大,瞬时变形和体积流变也越大,趋于稳定时间也越长,不同围压荷载作用下体积流变曲线见图 1. 荷载施加初期 20 h 内变形速率较快,随后增长速率减缓,30 h 后便趋于稳定. 这与软土的流变规律相比是显著不同的,软土的次压缩变形时间较长,一级荷载需要 30 d 才能趋于稳定.

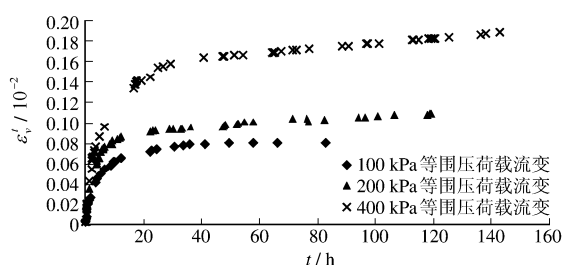
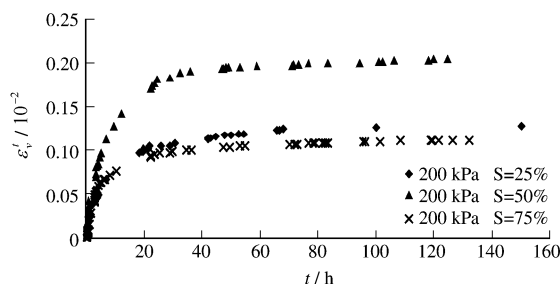


图 1 荷载作用等围压流变试验曲线

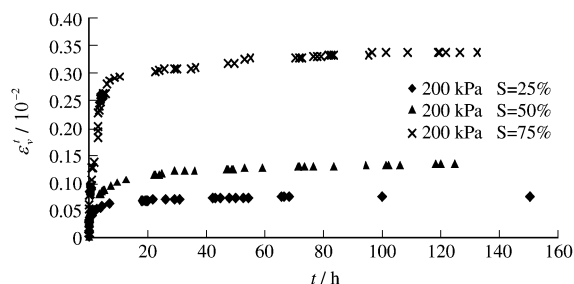
Fig. 1 Test curves of creep test under isotropic confining pressure

2.2 剪切流变

200 kPa 围压不同应力水平剪切流变试验扣除瞬时应变后轴向应变和体积应变随时间的变化关系曲线见图 2.



(a) 体变~时间关系曲线



(b) 轴向应变~时间关系曲线

图 2 荷载作用剪切流变试验曲线

Fig. 2 Test curves of creep test under shear pressure

由图 2 可见,轴向变形及体积变形随时间呈衰减趋势. 应力水平越高,轴向应变初期变形速率越快,趋于稳定时间越长,最终轴向变形也越大. 由图 2(a) 体积应变与时间关系曲线可以看出,最终体积变形随着应力水平的增大而增大. 当应力水平 $s \geq 0.6$ 时,由于在轴向偏应力施加过程中,堆石体颗粒已经被进一步挤压填充密实,材料的体积可压缩性降低,偏应力主要引起轴向变形的不断发展,而体积流变相对于 $s=0.5$ 情况有所降低,表现为轴向压缩和侧向膨胀.

2.3 荷载作用流变规律分析

由图 1、2 的流变试验曲线可以看出,体积变形和轴向变形随时间均呈衰减趋势. 分别采用双曲线和指数衰减两种形式对流变曲线进行拟合,拟合结果表明,指数衰减形式拟合曲线前期变形发展较快,后期的变形

明显偏小;双曲线形式能够较好的拟合试验结果. 本文采用双曲线形式对流变曲线进行拟合,荷载作用体积变形和轴向流变变形均可表示成:

$$\varepsilon^t = \frac{t}{a + bt} \tag{2}$$

式中: a 为应变~时间关系曲线初始斜率 k 的倒数; b 为荷载作用最终蠕变量的倒数. $t/\varepsilon^t \sim t$ 关系曲线见图 3.

由此可根据线性拟合得到等向压缩、剪切流变试验曲线拟合参数. 拟合结果见表 2 和表 3,表中下标 v,a 分别表示与体积、轴向变形有关的变量; $\varepsilon_{vi},\varepsilon_{ai}$ 分别表示瞬时体积和轴向应变; $\varepsilon_{vf},\varepsilon_{af}$ 表示体积及轴向应变的最终蠕变量.

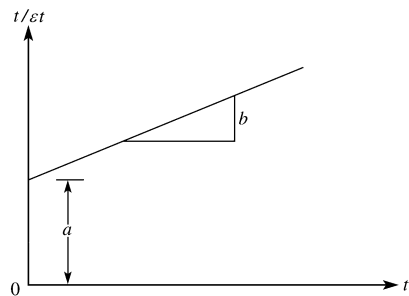


图 3 $t/\varepsilon^t \sim t$ 关系曲线
Fig. 3 Relationship between t/ε^t and t

表 2 等向压缩流变试验参数

Tab. 2 Parameter of creep test under isotropic confining pressure

σ^3/kPa	体 积 应 变			
	a_v	b_v	$k_v/10^{-3}$	$\varepsilon_{vf}/\%$
100	3 552	1 191.5	0.282	0.084
200	4 770	846.3	0.210	0.118
400	2 584	541.2	0.387	0.185

表 3 剪切流变试验参数

Tab. 3 Parameter of creep test under shear pressure

σ_3/kPa	s	轴 向 应 变			体 积 应 变		
		$\varepsilon_{ai}/\%$	a_a	b_a	$\varepsilon_{vi}/\%$	a_v	b_v
100	0.20	0.22	3 865	1 615	0.13	2 897	879
	0.40	0.42	2 533	920	0.16	3 764	603
	0.60	0.84	877	395	-0.02	4 002	706
200	0.25	0.32	1 330	1 211	0.15	1 576	768
	0.50	0.44	1 666	735	0.21	2 129	472
	0.75	1.09	487	306	0.18	4 428	865
400	0.20	0.21	1 973	1 237	0.15	927	518
	0.40	0.44	619	731	0.29	626	407
	0.60	1.24	382	279	0.36	1 549	462

对于不同应力状态的流变规律,不少学者提出了相应的假定. 沈凤生等^[9]曾选用三元件 Merchant 粘弹性模型考虑面板坝的流变变形,假定体积流变只由体积应力引起、偏应力只引起体积不变的流变变形,并推导了相应的流变计算公式. 沈珠江^[10]假定体积流变量只与围压有关,剪切流变量只与应力水平有关,对鲁布革心墙堆石坝进行了反馈分析. 李国英等^[5]根据公伯峡面板坝堆石料流变试验结果认为堆石料流变主要是颗粒破碎引起颗粒滑移和重新分布,颗粒破碎决定于围压和剪力的大小,最终体积流变不仅与围压有关,而且与剪应力有关.

分析本次试验结果,可以得到以下几点认识:

(1) 各向等压作用最终的体积流变 ε_{vf} 随围压呈非线性增加;不同偏应力荷载作用下, ε_{vf} 随偏应力的增加先增大后减小. 堆石体碾压均比较密实,应力水平较低时,偏应力作用下颗粒滑移、破碎会引起颗粒结构的重新排列,体积压缩流变也会随着偏应力增加而增大. 应力水平较高时,荷载施加过程中堆石体颗粒被进一步挤压填充密实,材料的可压缩性降低,体积压缩量也会减小,即使堆石颗粒发生破碎,所能引起的体积压缩变形也应该很小. 因此,低围压应力水平较高时体积变形相对减少是合理的.

由此可见堆石体的体积流变规律比较复杂,它与应力状态、堆石材料性质、密实程度等因素有关.本文主要针对低围压情况流变规律进行试验研究,对于高坝,堆石体颗粒级配不均匀,其相应的 σ_3 要比试验围压大的多,偏应力引起的颗粒错动和破碎明显,较高偏应力情况体积变形仍会表现为明显的压缩,与本次试验规律会有所不同.本文对本次试验结果做修正,假定体积流变量与球应力有关.根据不同应力状态体积流变结果,点绘 $\log(\varepsilon_{vf}) \sim \log(p/p_a)$ 关系曲线,有较好的线性规律(见图4).可采用指数形式表示成

$$\varepsilon_{vf} = \beta_v \left(\frac{p}{p_a} \right)^{m_1} \quad (3)$$

式中: $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$, p_a 为大气压力.对所试验材料 $\beta_v = 0.00086$,表示 $\sigma_3 = 100$ kPa 时的最终体积流变量, $m_1 = 0.516$.

(2) 偏应力引起的剪切流变量随围压的变化规律并不明显,可以假定其只与偏应力水平有关,点绘 $\log \varepsilon_{sf} \sim \log\left(\frac{s}{1-s}\right)$ 关系曲线,有较好的线性规律(见图5).可采用指数形式表示

$$\varepsilon_{sf} = \beta_s \left(\frac{s}{1-s} \right)^{m_2} \quad (4)$$

式中:应力水平 $s = (\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, $s = 1.0$, $\varepsilon_{sf} \rightarrow \infty$ 计算时若 $s \geq 1.0$,可限定 $s = 0.95$.剪应变由轴向应变和体积应变按下式计算得到.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_a - \frac{\varepsilon_v}{3} \quad (5)$$

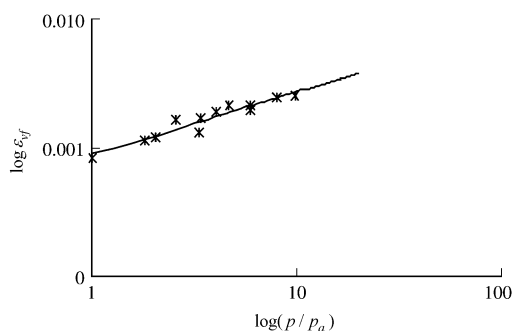


图4 $\log \varepsilon_{vf} \sim \log\left(\frac{p}{p_a}\right)$ 关系曲线

Fig. 4 Curves of $\log \varepsilon_{vf}$ and $\log\left(\frac{p}{p_a}\right)$

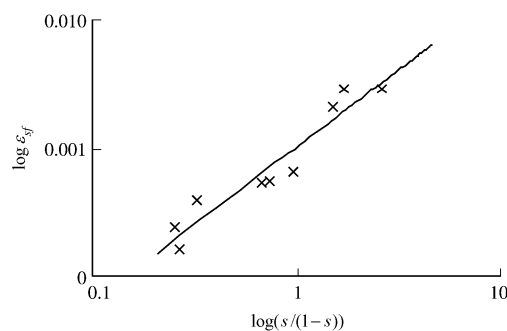


图5 $\log \varepsilon_{sf} \sim \log\left(\frac{s}{1-s}\right)$ 关系曲线

Fig. 5 Curves of $\log \varepsilon_{sf}$ and $\log\left(\frac{s}{1-s}\right)$

(3) k 表示应变与时间关系曲线的初始切线斜率,其中 k_v 、 k_s 分别与体积应变、剪切应变有关, k_v 与应力状态关系并不明显,取值范围在0.0002~0.0004之间.实际应用中做简化,取其平均值. k_s 与应力水平有明显的关系.应力水平越高,初始剪切应变随时间变化越快,点绘 $k_s \sim \frac{s}{1-s}$ 关系曲线,有较好的线性规律(见图6).用公式表示成

$$k_s = m_0 \frac{s}{1-s} \quad (6)$$

式中: $s = 1.0$, $k_s \rightarrow \infty$, 计算时若 $s \geq 1.0$,可限定 $s = 0.95$.

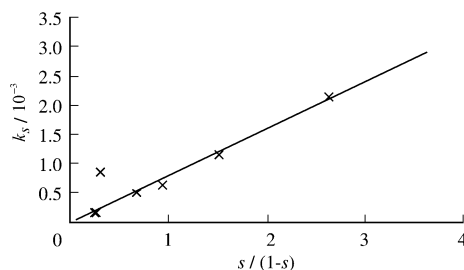


图6 $k_s \sim \frac{s}{1-s}$ 关系曲线

Fig. 6 Curves of k_s and $\frac{s}{1-s}$

3 荷载作用下流变计算模型

根据上述试验结果的分析,荷载因素作用下的堆石流变可用双曲线形式表示,最终体积应变和剪切流变分别按(3)、(4)式计算.该模型包含 $\beta_v, \beta_s, k_v, m_0, m_1$ 和 m_2 六个模型参数,本次试验材料模型参数见表4.

表4 荷载作用流变模型参数

Tab.4 Parameters of creep model with load action

β_v	β_s	k_v	m_0	m_1	m_2
0.000 86	0.001 1	0.000 3	0.000 9	0.516	1.25

将该模型用于增量计算时,由(3)式可计算 t 时候的流变速率

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_f} \right)^2 \quad (7)$$

由积分中值定理,采用欧拉显式积分, $t+\Delta t$ 内的流变增量为

$$\Delta \varepsilon_v^t = \dot{\varepsilon}_v^t \Delta t = k_v \left(1 - \frac{\varepsilon_v^t}{\varepsilon_{vf}} \right)^2 \Delta t \quad \Delta \varepsilon_s^t = \dot{\varepsilon}_s^t \Delta t = k_s \left(1 - \frac{\varepsilon_s^t}{\varepsilon_{sf}} \right)^2 \Delta t \quad (8)$$

有限元计算中,采用初始应变法,将其流变变形看成初始应变,算出相应的附加节点荷载,施加于网格,求解总体平衡方程,求得相应的应力应变.

4 结 语

堆石体的体积流变规律与应力状态、堆石材料性质、密实程度等因素有关.本文通过堆石荷载流变试验研究表明,堆石体荷载作用流变随时间呈双曲线形式衰减趋势,体积流变不仅与围压有关,而且与剪应力有关.各向等压作用最终的体积流变随围压呈非线性增加;而剪切体积流变量在低围压情况下,会随着应力水平的增加先增大后减小.本文做简化处理,假定堆石的体积流变与球应力有关;剪切流变与应力水平有关.体积应变与时间关系曲线的初始切线斜率 k_v 与应力状态关系不明显,剪切应变流变曲线初始切线斜率 k_s 与应力水平有明显的关系.应力水平越高,初始剪切应变随时间变化越快.

参 考 文 献:

- [1] 蒋国澄,傅志安,凤家骥.混凝土面板坝工程[M].武汉:湖北科学技术出版社,1997:158-160.
- [2] 彭正光.西北口面板堆石坝蓄水7年变形分析[J].水利水电科技,1999,30(9):24-27.
- [3] 沈珠江,左元明.堆石料的流变特性试验研究[C]//孙钧.第六届土力学及基础工程学术会议论文集.上海:同济大学出版社,1991:443-446.
- [4] 汪明元,丁红顺,饶锡保,等.高堆石坝粗粒料的流变特性研究[C]//周晶.中国水利水电工程发展与未来.大连:大连理工大学出版社,2002:381-385.
- [5] 李国英,米占宽,傅华,等.混凝土面板堆石坝堆石料流变特性试验研究[J].岩土力学,2004,25(11):1712-1716.
- [6] 王勇.考虑混凝土面板堆石坝流变的静力分析[D].南京:河海大学,1998.
- [7] 王勇.堆石流变的机理及研究方法初探[J].岩石力学与工程学报,2000,19(4):526-530.
- [8] 王海俊,殷宗泽.堆石料长期变形的室内试验研究[J].水利学报,2007,38(8):914-919.
- [9] 沈凤生,陈慧远,潘家铮.混凝土面板堆石坝的蓄水变形分析[J].岩土工程学报,1990,12(1):74-81.
- [10] 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.