

高德清.筑坝料动力变形特性试验与颗粒流模拟[J].地震工程学报,2019,41(6):1615-1622.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1615

GAO Deqing. Test and Particle Flow Simulation of Dynamic Deformation Characteristics of Dam Materials[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1615-1622. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1615

筑坝料动力变形特性试验与颗粒流模拟

高德清

(南京师范大学基建处, 江苏 南京 210046)

摘要: 对筑坝反滤料进行室内中型动三轴试验研究,探讨残余变形等动力特性,在此基础上,运用二维颗粒流方法,对相关试验进行数值模拟,为筑坝料的动力特性研究提供一种新的思路和途径。试验结果表明:(1)应力水平对关系曲线斜率无影响;(2)初期体积应变的读数会出现偏小的现象;(3)围压和动应力值过大,会导致模拟结果产生较大误差;(4)正确的细观参数应依据特定的试验结果反复推敲逼近而得。

关键词: 筑坝反滤料; 动力变形; 动三轴试验; 颗粒流方法; 数值模拟

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1615-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1615

Test and Particle Flow Simulation of Dynamic Deformation Characteristics of Dam Materials

GAO Deqing

(Infrastructure Department of Nanjing Normal University, Nanjing 210046, Jiangsu, China)

Abstract: The residual deformation behavior of dam inverted filler was investigated by means of a medium dynamic triaxial test. On this basis, numerical simulation was carried out using the two-dimension particle flow code. Based on comparison and analysis, some conclusions are summarized as follows: (1) Stress level has no effect on the slope of the relationship curve; (2) initial values of volumetric strain are smaller; (3) overvaluing confining pressure and dynamic stress will produce rather large simulation errors; (4) the correct microscopic parameters should be obtained according to results of specific triaxial tests.

Keywords: dam inverted filler; dynamic deformation; dynamic triaxial test; particle flow code; numerical simulation

0 引言

土石坝的坝体及坝基在各种工况下的应力变形

特性异常复杂,为了准确分析坝体及坝基在各种工况下的应力与变形,研究大坝的地震反应与破坏机理,验证结构设计的正确性与合理性,筑坝料的动力

收稿日期:2019-04-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51479059)

第一作者简介:高德清(1985-),男,硕士,工程师,主要从事工程管理和数值模拟研究相关工作。E-mail:gdq@njnu.edu.cn。

特性试验是必不可少的手段。从震害资料分析可看出,土石坝的裂缝、震陷、滑坡等都与地震残余变形有关^[1],而对于筑坝料的动残余变形特性很多学者进行了深入的研究^[2-3]。目前采用的研究思路是,根据室内试验建立合理的计算模型,对土石坝进行残余变形计算分析,用以评价土石坝的抗震安全性。因此,筑坝料室内动残余变形试验显得尤为重要。

本文就某土石坝中的筑坝反滤料运用全自动多功能静动三轴仪进行了动力变形试验,并通过二维颗粒流方法对试验进行数值模拟。

PFC^{2D}即二维颗粒流程序,是通过离散单元方法来模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用^[4]。近年来,颗粒流方法得到越来越广泛的应用,例如文献^[5,6]很好地模拟了岩体材料的破裂机理,印证了颗粒流方法作为离散单元方法的独特性与优越性。室内试验的数值模拟是 PFC^{2D} 方法主要用途之一,主要有室内砂土双轴试验^[7]和粗粒料室内试验^[8,9]等的模拟,已取得较理想的应用效果。相对于室内试验,数值模拟试验的优势在于节约了试验时间和成本,可以突破实际试验条件的限制等,因此,近年来,室内试验的颗粒流模拟得到越来越广泛的应用。

1 室内动力变形试验

由于土体的弹塑性性质的存在,土石坝在地震作用下产生的变形分为弹性变形和塑性变形两部分,产生的弹性变形在地震结束后即消失,但塑性变

形在地震后不能恢复,形成了土石坝的永久变形或残余变形,从而影响大坝的稳定性和使用安全。动力变形试验即研究振动过程中试样产生的残余变形,是研究土石坝地震反应的重要途径。因此,土石坝筑坝料动力变形试验所得参数亦是土石坝抗震稳定性计算和分析的重要依据。

1.1 试验概况

土石坝反滤料分内外两层,即内层的反滤料 1 和外层的反滤料 2。两种反滤料的级配有较大差异,反滤料 1 比反滤料 2 均匀,这是由它们在结构中所处位置和作用所决定的,反滤料 1 兼具黏土心墙过渡层的作用,反滤料 2 则兼具粗堆石料过渡层的作用。

试验所用仪器采用河海大学岩土工程科学研究所与日本圆井株式会社共同合作研制生产的全自动多功能静动三轴仪。该仪器为非定型产品,与传统仪器相比,无论在试验精度还是在动力试验及复杂应力路径模拟方面都有其突出优点。试验控制方式有应力控制和应变控制两种,并且在同一试验的不同阶段可以方便地进行试验控制方式转变。

反滤料相关试验采用 $\phi 100 \times 200$ mm 的实心样,采用干法制样,直接在仪器底座上进行。试验材料采用砂岩、板岩混合料(掺配重量比 7:3)。表 1 为本次试验采用的颗粒级配具体数值,试验过程中反滤料 1 和反滤料 2 的控制相对密度分别为 90% 和 95%。

表 1 反滤料试验级配

Table 1 The gradation of inverted filler in indoor test

粒径/mm	20	10	5	2	0.5	0.25	0.075
小于某粒 反滤料 1	100	86.5	67.5	44	20	11.5	3
径含量/% 反滤料 2	100	64.4	31.5	18	5.5	3.5	1.5

试样制备采用分五层击实的方法。根据试验级配数据分五次称取不同粒径原料,混合均匀后分层直接在仪器的底座上击实,过程中以每层相应的高度来控制击实程度。

动力变形试验中,动荷载的输入波形采取正弦波形式,振动频率为 0.1 Hz,固结应力比取 $K_c=1.0$ 和 $K_c=2.0$ 两种情况,围压 σ_3 取 200 kPa,400 kPa 和 600 kPa 三种情况。试样固结完后,施加一定幅值的动应力进行动力变形试验,动应力幅值的大小分为 $0.4\sigma_3$ 和 $0.8\sigma_3$ 两种。

1.2 试验结果

试验成果的整理主要是作出残余体应变 ϵ_{vr} 、残余剪应变 γ_r 和 $I_g(1+N)$ 的关系曲线确定不同条件

下的 c_{vr} 和 c_{dr} 参数,再作出 $\gamma_d \sim c_{vr}$ 以及 $\gamma_d \sim c_{dr}/S_1^2$ 在双对数坐标中的拟合关系曲线^[10],依据公式(1)和(2)得出拟合直线在坐标中的斜率和截距值,从而得出试验的计算参数 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 。公式中, c_1 为 $\gamma_d \sim c_{vr}$ 双对数关系曲线 $\gamma_d=1\%$ 处的直线截距; c_2 为拟合曲线的斜率; c_4 为 $\gamma_d \sim c_{dr}/S_1^2$ 双对数关系曲线 $\gamma_d=1\%$ 处的直线截距; c_5 为拟合曲线的斜率; S_1 为应力水平; γ_d 为动剪应变幅值; c_{vr}, c_{dr} 为关系曲线的斜率。

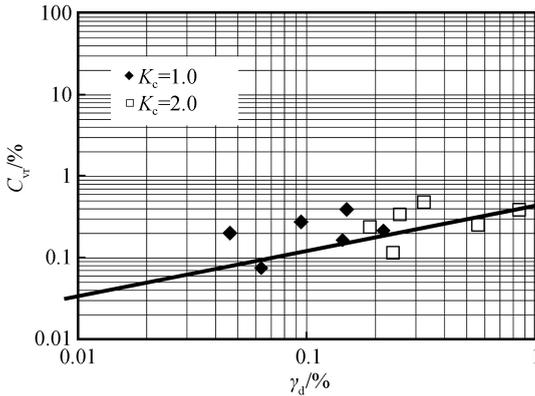
$$c_{vr} = c_1 \gamma_d^{c_2} \exp(-c_3 S_1^2) \quad (1)$$

$$c_{dr} = c_4 \gamma_d c_5 S_1^2 \quad (2)$$

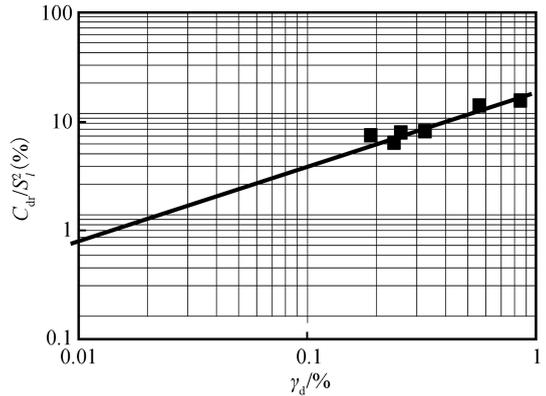
试验中,试样在排水条件下连续振动 30 周,并取 25 周时的残余轴向应变和体积应变的大小为计

算处理依据,作出反滤料 1 和反滤料 2 的 $\gamma_d \sim c_{vr}$ 以及 $\gamma_d \sim c_{dr}/S_1^2$ 在双对数坐标中的关系曲线,如图 1 和 2 所示。图中 $\gamma_d \sim c_{vr}$ 曲线分为 $K_c = 1.0$ 和 $K_c = 2.0$ 两种情况,而 $\gamma_d \sim c_{dr}/S_1^2$ 关系曲线由于 K_c

$= 1.0$ 时, $S_1 = 0$, (2) 式退化为 $c_{dr} = 0$, 故仅存在 $K_c = 2.0$ 时的数据结果。图 1(a) 和图 2(a) 中 $K_c = 1.0$ 和 $K_c = 2.0$ 的数据点无明显差异,可验证文献[11]中认为的 S_1 对 c_{vr} 无影响的观点,即 $c_3 = 0$ 。



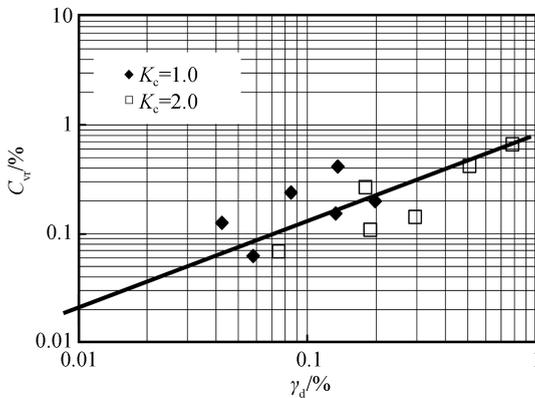
(a) $\gamma_d \sim C_{vr}$ 关系曲线



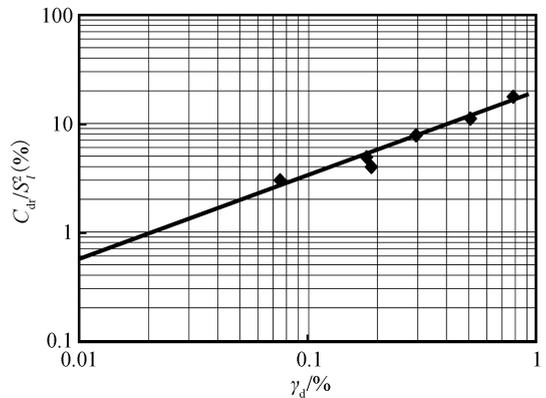
(b) $\gamma_d \sim C_{dr}/S_1^2$ 关系曲线

图 1 反滤料 1 动残余变形试验结果

Fig.1 Test results of dynamic residual deformation of inverted filler 1



(a) $\gamma_d \sim C_{vr}$ 关系曲线



(b) $\gamma_d \sim C_{dr}/S_1^2$ 关系曲线

图 2 反滤料 2 动力变形试验结果

Fig.2 Test results of dynamic deformation of inverted filler 2

最终,根据上述过程的直线拟合得出反滤料 1 和反滤料 2 的计算参数 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 , 具体数值结果见表 2, 其中 $c_3 = 0$ 。

表 2 动力变形试验结果参数

Table 2 Parameters of dynamic deformation test

试样	$c_1 / \%$	c_2	$c_4 / \%$	c_5
反滤料 1	0.24	0.57	8.25	0.73
反滤料 2	0.36	.79	8.69	0.76

从计算结果看,反滤料 1 和反滤料 2 差别不大,尤其是 c_4, c_5 参数值,说明残余剪切应变与试样级配关系不大。另外,从图 1 和 2(a)、(b) 的比较可以看出, $K_c = 1.0$ 时数据点的离散度较 $K_c = 2.0$ 的大,这点从残余应变的时程曲线亦可看出, $K_c = 1.0$ 时规律性没有 $K_c = 2.0$ 时明显。

2 动力变形试验的数值模拟

数值模拟的主要思路是:建立反滤料 1 和反滤料 2 的数值模型,选取某一围压下的动力变形试验结果为数值逼近目标,调整数值模型的细观接触参数,直至得到与室内试验结果相吻合的宏观力学响应,即认为此时的细观接触参数为反映真实材料力学性质的合理参数。进而运用这些参数继续模拟其他应力条件下的动力变形试验。本次数值模拟选取的 Hertz-Mindlin 模型包含剪切模量 G_n 、细观泊松比 V_u 、颗粒摩擦系数 f_c 、阻尼系数 α 及颗粒密度等细观参数。其中,细观参数 G_n 与材料的宏观剪切模量没有直接联系^[12]。文献[13-14]通过调整比

较,得出砂土模型的 G_n 值为 500 GPa 时较为理想。本次模拟选取 600 kPa 围压下数值试验动应力-应变的骨干曲线在细观参数不断调整后与室内试验结果的逼近吻合,并由此得到表 3 的颗粒细观接触参数。进而可以运用这些参数进行 200 kPa 和 400 kPa 围压下的相关数值试验。与砂土试样对比,表 3 中的 G_n 值略大,似与反滤料为级配试样有关。

表 3 数值试样细观参数的设置

Table 3 Micro-parameters of numerical samples

参数	G_n/Pa	V_u	f_c	α	$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
反滤 1	1.1×10^{13}	0.25	0.8	0.6	2 000
反滤 2	7.0×10^{12}	0.22	0.8	0.5	2 000

反滤料 1 和反滤料 2 动力变形试验中固结应力比 $K_c=1.0$ 和 $K_c=2.0$,围压 σ_3 取 200 kPa,400 kPa 和 600 kPa,动应力幅值取 $\sigma_d=\pm 0.4$ 和 $\pm 0.8\sigma_3$ 两种,组合起来,共有 24 组不同工况下的动力变形试验数值模拟。试验在加载过程中的排水条件,此处采用围压伺服程序段,保持颗粒的有效围压不变,即实现了排水条件的模拟。循环动应力的施加为贴合实际,选择振动 30 周,最终的残余变形相关数值则取 25 周时的结果。

数值模拟时的主要成果是动应变的时程变化图和动应力振动 25 周时产生的残余体积应变及残余轴向应变。两个重要的试验结果都涉及到应变值,故需要增加应变值的计算和测试精度,减少测试圆边界包含大颗粒时产生的测量误差,最终动应变的取值以三个测试图结果的平均值为准,数值试样及测试圆设置如图 3 所示。另外,通过“History”命令可以输出试验中各个变量的数值变化,如轴向应变和体积应变,从而通过这些变量的数值比较来检验

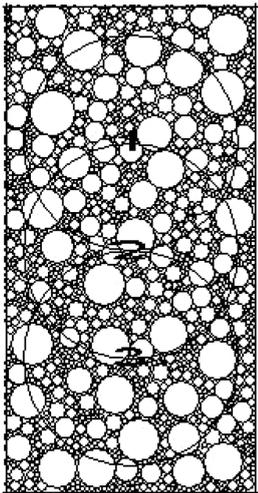


图 3 数值试样

Fig.3 Numerical sample

数值模拟的正确性和合理性。每一振动周次下的残余轴向应变和体积应变取应变时程曲线在相应周次下峰值和谷值的平均,在振动 25 周时产生的最大动应变(曲线峰值)即为轴向动应变幅值 ϵ_d ,再经式(3)转换即得动剪应变幅值 γ_d 的大小。大量试验表明,大多数试样的动泊松比在 0.3~0.4 之间变化,此处取 $\nu_d=0.33$ 。数值模拟中动应力振动 25 周时产生的残余体积应变及残余轴向应变的具体数值与试验所得结果的比较见表 3。从表 3 中的数值比较可以看出,大部分试验条件下,两者都较接近。

$$\gamma_d = (1 + \nu_d)\epsilon_d \quad (3)$$

PFC^{2D}方法数值模拟中,通过“Plot History”命令可以作出变量间的图像关系。据此,分别作出轴向应变和体积应变与应力作用时间的关系图,即相关的时程曲线,如图 4,5 所示。以反滤料 2 在固结比为 2,围压为 600 kPa,动应力幅值 $\sigma_d=\pm 0.4\sigma_3$ 时轴向动应变和体积应变的时程曲线为例。从图中可看出,数值模拟结果曲线的大体规律符合动力变形试验的典型结果。图 5 中的体积应变在初始振动周次较室内试验典型结果大,文献[11]中发现试验中体积应变会出现初期读数偏小的现象,这点似与孔隙水在短时间内来不及排出有关,而数值模拟试验

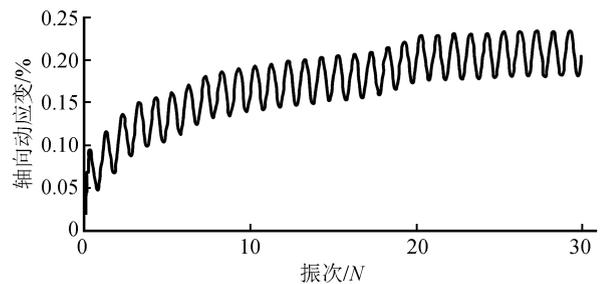


图 4 数值模拟的轴向动应变时程曲线

Fig.4 Time-history curve of axial dynamic strain in numerical simulation

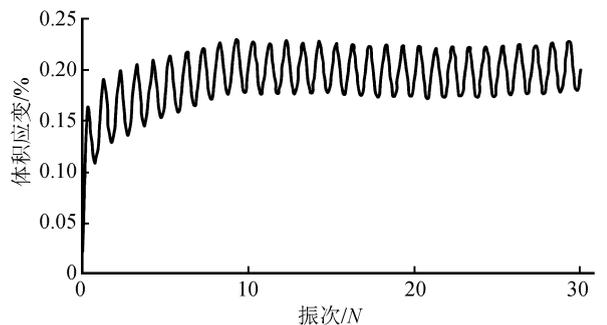


图 5 数值模拟的体积应变时程曲线

Fig.5 Time-history curve of volume strain in numerical simulation

不存在此问题,因此图 5 中的体积应变时程曲线应更贴合实际。

通过应变时程曲线分别得出 1~25 振次下的残余剪切应变和体积应变,再依据式(4)和(5)在十进制对数坐标中拟合得出各试验条件下的 c_{vr} 和 c_{dr} 值,并和室内试验结果进行比较,具体见表 5 所列。模拟的精确度类似于残余轴向应变和残余体积应变,即固结比为 2.0 时的数值模拟较固结比为 1.0 时

的精确。式中, ϵ_{vr} 为残余体应变; γ_r 为残余剪应变; N 为振动次数。

依据表 5 中数值模拟的 c_{vr} 和 c_{dr} 值以及从表 4 中转换而来的动剪应变幅值 γ_d ,可以分别作出反滤料 1 和反滤料 2 的 $\gamma_d \sim c_{vr}$ 和 $\gamma_d \sim c_{dr}/S_{l2}$ 在双对数坐标中的关系曲线,如图 6 和 7 所示。可以从图中得出用以动力永久变形计算的 c_1 、 c_2 、 c_4 、 c_5 值,注意的是参数 c_1 和 c_4 要乘以坐标转换系数 0.434 3,另

表 4 试验和数值模拟残余轴向应变和体积应变比较

Table 4 Comparison between tested and simulated values of residual axial strain and volume strain

围压 /kPa	结果类别	固结比 $K_c=1.0$				固结比 $K_c=2.0$				
		动应力= $0.4\sigma_3$		动应力= $0.8\sigma_3$		动应力= $0.4\sigma_3$		动应力= $0.8\sigma_3$		
		$\epsilon_a/\%$	$\epsilon_v/\%$	$\epsilon_a/\%$	$\epsilon_v/\%$	$\epsilon_a/\%$	$\epsilon_v/\%$	$\epsilon_a/\%$	$\epsilon_v/\%$	
反滤料 1	200	试验结果	0.048 7	0.101 9	0.035 6	0.371 9	0.145 2	0.145 4	0.183 3	0.188 1
		模拟结果	0.032 6	0.112 0	0.042 4	0.402 5	0.141 2	0.152 4	0.188 7	0.198 7
	400	试验结果	0.110 4	0.210 9	0.072 8	0.507 7	0.196 3	0.175 5	0.431 6	0.349 9
		模拟结果	0.091 9	0.233 5	0.102 0	0.532 2	0.186 7	0.180 2	0.425 4	0.351 2
	600	试验结果	0.166 6	0.276 6	0.115 1	0.770 9	0.250 3	0.239 4	0.652 6	0.537 4
		模拟结果	0.175 5	0.302 5	0.125 0	0.740 0	0.278 4	0.242 2	0.701 2	0.552 5
反滤料 2	200	试验结果	0.044 7	0.084 5	0.032 6	0.335 0	0.057 7	0.040 9	0.137 7	0.119 8
		模拟结果	0.031 2	0.102 5	0.051 2	0.361 3	0.050 1	0.047 5	0.151 4	0.131 4
	400	试验结果	0.102 2	0.195 2	0.065 3	0.455 3	0.144 6	0.102 2	0.391 7	0.317 5
		模拟结果	0.088 7	0.201 5	0.083 9	0.472 1	0.151 6	0.120 1	0.424 1	0.324 4
	600	试验结果	0.152 0	0.253 8	0.104 4	0.734 2	0.226 9	0.138 0	0.602 6	0.488 5
		模拟结果	0.125 2	0.232 9	0.124 0	0.760 1	0.229 8	0.158 7	0.631 2	0.501 6

表 5 试验和数值模拟的 c_{vr} 和 c_{dr} 参数值比较

Table 5 Comparison between tested and simulated values of c_{vr} and c_{dr}

围压 /kPa	结果类别	固结比 $K_c=1.0$				固结比 $K_c=2.0$				
		动应力= $0.4\sigma_3$		动应力= $0.8\sigma_3$		动应力= $0.4\sigma_3$		动应力= $0.8\sigma_3$		
		c_{vr}	c_{dr}	c_{vr}	c_{dr}	c_{vr}	c_{dr}	c_{vr}	c_{dr}	
反滤料 1	200	试验结果	0.075 2		0.261 9		0.088 4	0.110 0	0.115 6	0.148 5
		模拟结果	0.083 5		0.221 8		0.095 5	0.124 2	0.154 2	0.154 1
	400	试验结果	0.165 4		0.377 7		0.112 4	0.180 4	0.254 1	0.415 3
		模拟结果	0.179 8		0.301 4		0.126 3	0.192 5	0.241 4	0.521 4
	600	试验结果	0.217 0		0.623 6		0.153 3	0.235 5	0.390 3	0.627 9
		模拟结果	0.250 2		0.554 5		0.158 9	0.252 1	0.395 4	0.662 5
反滤料 2	200	试验结果	0.062 4		0.235 9		0.028 8	0.055 2	0.088 2	0.112 6
		模拟结果	0.085 4		0.128 7		0.041 2	0.064 7	0.052 4	0.105 3
	400	试验结果	0.153 2		0.338 8		0.076 0	0.135 4	0.230 6	0.376 9
		模拟结果	0.184 7		0.217 2		0.102 3	0.124 9	0.300 4	0.401 2
	600	试验结果	0.199 1		0.593 9		0.102 7	0.213 5	0.354 8	0.579 8
		模拟结果	0.232 0		0.345 6		0.121 0	0.220 1	0.421 6	0.612 4

外, $c_3=0$,则计算参数的最终模拟结果见表 6 所列。

$$\epsilon_{vr} = c_{vr} \lg(1 + N) \quad (4)$$

$$\gamma_r = c_{dr} \lg(1 + N) \quad (5)$$

由表 6 中的数值模拟结果与试验结果比较得知,两者在数值上差别不大。但 c_1 、 c_2 数值模拟的偏差较 c_4 、 c_5 大,这是由于确定 c_1 、 c_2 值的 $\gamma_d \sim c_{vr}$ 关系曲线中包含了误差较大的固结比为 1 的数据点,从而影响了整个点集的离散度,降低了直线拟合

表 6 动力变形试验与模拟结果参数比较

Table 6 Comparison between parameters of dynamic deformation test and simulation

试样	结果	$c_1/\%$	c_2	$c_4/\%$	c_5
反滤料 1	试验结果	0.24	0.57	8.25	0.73
	模拟结果	0.19	0.41	7.82	0.68
反滤料 2	试验结果	0.36	0.79	8.69	0.76
	模拟结果	0.23	0.60	8.16	0.65

的精确度。如图 6 和图 7 中(a)的数据点明显比图 7(b)

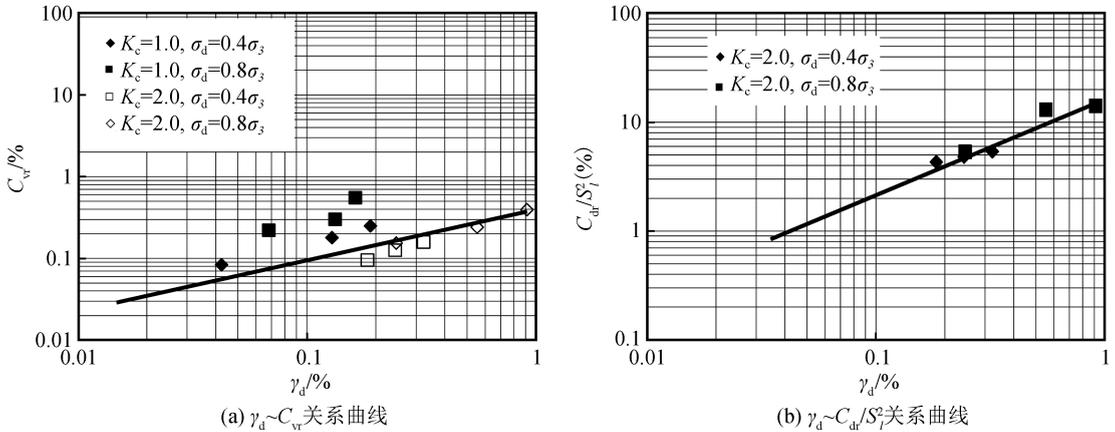


图6 反滤料1动力变形试验数值模拟结果

Fig.6 Numerical simulation results of dynamic deformation test on inverted filler 1

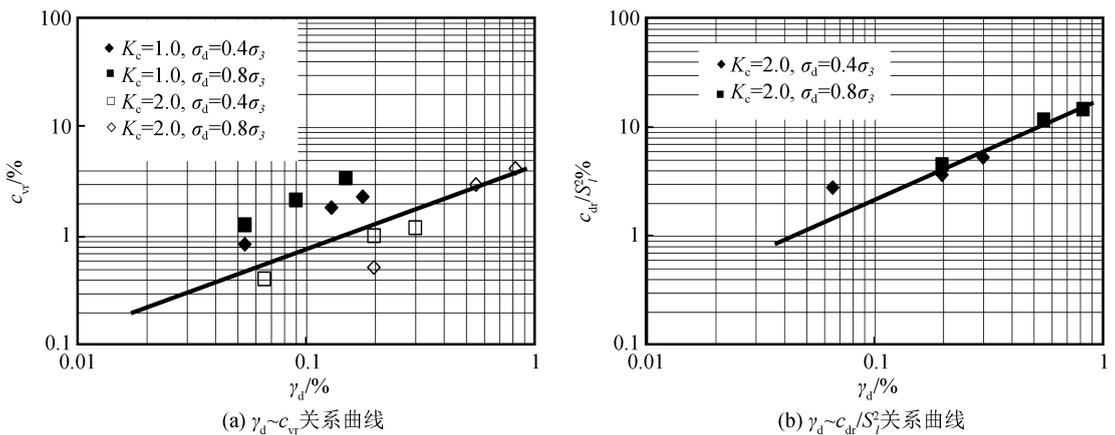


图7 反滤料2动力变形试验数值模拟结果

Fig.7 Numerical simulation results of dynamic deformation test on inverted filler 2

离散,则相应参数的确定自然存在精度偏差。

总体而言,模拟结果在规律的定性表现和数值计算方面都表现的与试验较符合,PFC^{2D}方法可以较好地模拟筑坝反滤料的室内动力变形试验。

3 数值模拟误差分析

数值模拟过程中通过细观参数的调整可以使某个围压条件下(本文中以600 kPa围压下的试验结果为逼近目标)的动应力应变骨干曲线得到比较理想的吻合,但继续运用这些参数模拟其他围压条件下的动应力应变骨干曲线时就会出现一定的偏差。综合比较分析,造成模拟偏差的主要原因有:

(1) 与室内试验相比,数值模拟试验在数据采集方面存在较大差异,数值模拟试验过程中的应力是通过记录颗粒对上,下墙体的作用力而得,与颗粒的接触数有关,而整个试验过程中,颗粒的接触数在不断变化,这就自然引起了应力和应变与实际的差

异。这方面的误差有望通过测试圆的设置来减小,但加载的迭代过程中无法避免地要进行墙体的应力计算来实行外应力的施加和维持,所以这一误差很难消除。

(2) PFC^{2D}方法是通过二维圆盘颗粒单元来模拟真实颗粒,在力学表现方面与实际颗粒存在明显的差异^[15-16]。本次试验中的反滤料为砂岩和板岩混合料,存在角砾特性,组构也存在三维空间效应,这些方面的特性用PFC^{2D}很难仿真。

(3) 程序中假设刚性的墙体为边界条件,这与实际条件中的边界,尤其是左右墙体与实际中的橡皮膜有一定的差异。

(4) 二维颗粒流方法数值模拟时,代表材料颗粒的圆盘单元是刚性的,无法实现颗粒破碎的模拟,而角砾状颗粒材料(筑坝反滤料颗粒为角砾状)在高围压和高应力条件下受循环动应力作用时存在一定的颗粒破碎现象。这方面的误差有望通过引进颗粒

簇单元模拟颗粒破碎来改进^[17]。

(5) 动力特性试验的影响因素较多,如端部约束、尺寸效应影响^[18]等,试验和数据处理过程复杂多变,结果带有一定的随机性,这点从试验数据点的离散程度可以看出,即室内动力特性试验本身无法避免的误差给数值模拟的精确度带来了一定的负面影响。

4 结论

本文对筑坝反滤料 1 和 2 进行了室内动力变形试验,并运用二维颗粒流方法,对室内试验进行了数值模拟。经比较分析,得出以下结论:

(1) 从室内动力变形试验的 $\gamma_d \sim c_{vr}$ 关系曲线得知, $K_c = 1.0$ 和 $K_c = 2.0$ 的数据点无明显差异,可验证文献^[11]中认为的 S_1 对 c_{vr} 无影响的观点,即 $c_3 = 0$ 。

(2) 颗粒流方法作为离散单元法的一种,其力学原理与筑坝反滤料类散粒体材料相近,经本文应用证实筑坝反滤料的动力变形试验可以运用 PFC^{2D} 方法进行数值模拟,从而减少了试验工作量和成本,并突破了室内试验颗粒尺寸、围压、动应力大小等的限制。

(3) 验证了在颗粒流方法中,通过少量试验确定材料细观接触参数后,进行材料其他相关试验的数值模拟思路的正确性和可行性。

(4) PFC^{2D} 方法模拟筑坝反滤料的动三轴试验时,围压和动应力值过大,会导致模拟结果产生较大误差。这是因为数值模型中的颗粒圆盘单元是刚性的,无法模拟真实试验中应力过大而导致的颗粒破碎现象,这方面有望通过引用颗粒簇单元得以改进。

(5) 动力变形试验数值模拟时,固结比 $K_c = 2.0$ 的结果比 $K_c = 1.0$ 精确,这和数值模型中的颗粒细观接触参数由 $K_c = 2.0$ 时的试验结果确定有关,可见细观参数的确定与试验条件有关,这点也是细观参数组合的复杂多变造成的。因此,正确的细观参数应依据特定的试验结果反复推敲逼近而得。

(6) 动力变形试验中,初期体积应变的读数会出现偏小的现象,这点似与孔隙水在短时间内来不及排出有关,而数值模拟试验不存在此问题,因此数值模拟的体积应变时程曲线应更贴合实际。

(7) 与室内试验相比,数值模拟方法的突出优势在于不再受试样尺寸的限制,可以进行任意尺寸

的模拟试验。因此,数值模拟方法是研究筑坝堆石料等大尺寸材料的力学特性的可行方法。

参考文献(References)

- [1] 王昆耀,常亚屏,陈宁.往返荷载下粗粒土的残余变形特性[J].土木工程学报,2000,33(3):48-53.
WANG Kunyao, CHANG Yaping, CHEN Ning. Residual Deformation Characteristics of Coarse-grained Soils under Cyclic Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 48-53.
- [2] 凌华,傅华,蔡正银,等.坝料动残余变形特性试验[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(5):532-537.
LING Hua, FU Hua, CAI Zhengyin, et al. Experimental Study on Dynamic Residual Deformation Characteristics of Dam Materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(5): 532-537.
- [3] 杨正权,刘启旺,刘小生,等.超深厚覆盖层中深埋细粒土动力变形和强度特性三轴试验研究[J].地震工程学报,2014,36(4):824-831.
YANG Zhengquan, LIU Qiwang, LIU Xiaosheng, et al. Triaxial Tests on Dynamic Deformation and Strength Characteristics of Fine-grained Soil in Super-deep Overburden Layer[J]. Northwestern Seismological Journal, 2014, 36(4): 824-831.
- [4] CUNDALL P A, STRACK O D L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [5] 陈鹏宇,曾红彪,师华鹏,等.危岩稳定性评价的颗粒流断裂力学法[J].自然灾害学报,2016,25(3):87-95.
CHEN Pengyu, ZENG Hongbiao, SHI Huapeng, et al. Stability Evaluation of Unstable Rock Based on Particle Flow Simulation and Fracture Mechanics[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(3): 87-95.
- [6] 喻军,李云海,王克忠.深部隧道围岩分区破裂颗粒流模拟研究[J].地震工程学报,2017,39(4):759-766.
YU Jun, LI Yuanhai, WANG Kezhong. Particle Flow Simulation of Zonal Disintegration in Deep Tunnel Surrounding Rock[J]. Northwestern Seismological Journal, 2017, 39(4): 759-766.
- [7] 周健,池毓蔚,池永,等.砂土双轴试验的颗粒流模拟[J].岩土工程学报,2000,22(6):701-704.
ZHOU Jian, CHI Yuwei, CHI Yong, et al. Simulation of Biaxial Test on Sand by Particle Flow Code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 701-704.
- [8] 刘汉龙,高德清,陈育民,等.筑坝反滤料动模量和阻尼比试验的颗粒流模拟[J].防灾减灾工程学报,2009,29(4):361-367.
LIU Hanlong, GAO Deqing, CHEN Yumin, et al. Simulation of Dynamic Modulus and Damping Ratio Test on Filter Material by Particle Flow Code[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(4): 361-367.
- [9] 刘汉龙,杨贵.土石坝振动台模型试验颗粒流数值模拟分析[J].防灾减灾工程学报,2009,29(5):479-484.

- LIU Hanlong, YANG Gui. PFC2D Numerical Analysis of Model Testing of Earth and Rock-Fill Dam on Shaking Table[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(5): 479-484.
- [10] KOKUSHO T. Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range[J]. Soils and Foundations, 1980, 20(2): 45-60.
- [11] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 南京水利科学研究院水利水电科学研究所, 1996, 2: 143-150.
Shen Zhujiang, Xu Gang. Deformation Behavior of Rock Materials Under Cyclic Loading[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1996, 2: 143-150.
- [12] CUNDALL P A, ST RACK O D L. Particle Flow Code in 2 Dimensions[M]. America: Itasca Consulting Group Press, 1999.
- [13] 周健, 史旦达, 贾敏才, 等. 砂土单调剪切力学性状的颗粒流模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(10): 1299-1304.
ZHOU Jian, SHI Danda, JIA Mincai, et al. Numerical Simulation of Mechanical Response on Sand under Monotonic Loading by Particle Flow Code[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(10): 1299-1304.
- [14] 卜春尧, 王志华, 张云妹, 等. 基于颗粒流数值模拟的饱和砂土流动性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(6): 129-135.
BU Chunyao, WANG Zhihua, ZHANG Yunmei, et al. The Analysis of Liquidity of Saturated Sand Based on Numerical Simulation of Particle Flow[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(6): 129-135.
- [15] 张翀, 舒赣平. 颗粒形状对颗粒流模拟双轴压缩试验的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1281-1286.
ZHANG Chong, SHU Ganping. Effect of Particle Shape on Biaxial Tests Simulated by Particle Flow Code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1281-1286.
- [16] 王鹏程, 刘建坤. 颗粒形状对不良级配碎石集料剪切特性的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2198-2202.
WANG Pengcheng, LIU Jiankun. Effect of Particle Shape on the Shear Behavior of Open-graded Crushed Aggregate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2198-2202.
- [17] 李杨, 余成学, 焦小亮. 堆石料碾压试验的颗粒流模拟新方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 3029-3038.
LI Yang, SHE Chengxue, JIAO Xiaoliang. A New Method for Simulating Rockfill Roller Compaction Using Particle Flow Code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 3029-3038.
- [18] 杨贵, 刘汉龙, 陈育民, 等. 堆石料动力变形特性的尺寸效应研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 121-126.
YANG Gui, LIU Hanlong, CHEN Yumin, et al. Research on Size Effect of Rock-fill Materials on Dynamic Deformation Property[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 121-126.