

循环荷载下堆积体残余变形特性^①

孙志亮, 孔令伟, 郭爱国, 田 海

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要:通过大型动三轴试验研究堆积体在不同应力水平、不同循环荷载幅值下残余应变与振次的关系, 同时进行不同初始条件下残余应变的对比。试验发现堆积体在循环荷载下的残余应变与 $\lg(1+N)$ 有较好的线性关系 ($N \leq 30$), 沈珠江经验公式适用于堆积体在循环荷载下累积残余应变的计算。初始条件对堆积体的残余应变有重要影响, 饱和不排水条件下残余剪应变最大, 饱和排水条件次之, 风干排气条件最小。应用沈珠江残余应变公式进行堆积体循环荷载下残余变形计算时应选取与工程实际条件相匹配的参数。

关键词: 堆积体; 大型动三轴试验; 残余变形; 初始条件

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0481-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0481

Residual Deformation Behavior of Deposits under Cyclic Loading

SUN Zhi-liang, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, TIAN Hai

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Residual deformation behaviors of deposits under cyclic loading at different stress levels and cyclic loading amplitudes are studied by a large-scale dynamic triaxial test. The residual deformation of the deposits under different initial conditions is also discussed. Residual strains under cyclic loading are found to show a linear relationship with $\lg(1+N)$ when N is less than 30. Shen's empirical equation is suitable for calculating the residual strain of deposits under cyclic loading. The initial conditions have a significant effect on the residual strain of deposits. Residual shear strain is the largest under undrained conditions, medium under drained conditions, and smallest under air dried drainage conditions. When the residual deformation of the deposit under cyclic loading is calculated using Shen's equation, the equation's parameters should match the actual engineering conditions.

Key words: deposit; large-scale dynamic triaxial test; residual deformation; initial condition

0 引言

堆积体主要包括崩坡积体、残坡积体及冲坡积体等, 在我国西南强震区广泛分布。这类介于岩石与土类之间的“土石混合物”成因比较复杂, 结构不

均匀, 颗粒粒径分布差异显著, 材料介质非连续性
强, 地域差异性大。在循环荷载下其动力反应特性
复杂。地震发生时堆积体会产生明显的残余变形,

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372314); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05)

作者简介: 孙志亮(1987-), 男, 湖北黄冈人, 博士研究生, 研究方向为特殊土的力学特性与灾害防治技术研究. E-mail: whrsm_sunzhiliang@163.com

在边坡上表现为过大的沉降或不均匀变形,引起坡顶前缘开裂、坡体崩塌及失稳滑坡,继而与降雨等诱因一起引发泥石流、堰塞湖等地震次生灾害。对于堆积体这类不均匀性强、差异性大的土石混合类岩土材料,动力特性方面的研究相对薄弱,现有的工程实践对这方面的研究亟待深入。

对于动荷载下土体残余变形的主要影响因素,前人研究成果较多,主要可以归纳为两个方面:(1)施加动荷载前土体的初始物理状态及静应力状态,包括含水状态、孔隙比、颗粒特性、固结围压、固结应力比和固结时间等;(2)施加动荷载时条件,包括排水条件、动应力幅值、波形、波序、特征频率和有效持时等。

从国内外已有的研究成果来看,由于试验设备及试验方法的限制,有关粗颗粒散体材料残余应变的试验成果还不丰富,多集中在砂土^[1-3]、粗粒土堆石料^[5-12]等方面,常用的残余变形计算模型有 Eiichi Taniguchi 模型^[4]、沈珠江模型^[5]等,以后的研究者根据研究的需要对这些模型进行了一定的改进^[6-7]。本文主要以室内大型动三轴试验为基础,分析典型堆积体循环荷载下的动残余变形特性并做初步探讨。

1 试验方案

1.1 试验土料与试验设备

试验用堆积体土料取自四川德阳市绵茂公路某标段处,由灰岩碎石料及其风化物组成,粗颗粒棱角磨圆明显。室内大三轴试验级配根据现场级配数据按相似级配法缩尺,采用 60 mm 以下颗粒,同时用等质量代替法控制 5 mm 以下颗粒的含量,试验土料特性如表 1 所示。试验在 TAJ-2000 大型动静三轴仪上进行,施加静荷载时围压量程 5 MPa,竖向力量程 1 500 kN,施加动荷载时围压量程 2 MPa,竖向力量程 ±350 kN,竖向位移传感器分辨率为 0.01 mm,试样直径 300 mm,高 600 mm。

表 1 试验土料特性

Table 1 Characteristics of soil material used in test

比重 G_s	试验级配/%					强度指 标 φ /(°)
	60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	<5 mm	
1.90	14.23	28.74	26.77	12.32	17.94	47

1.2 试验内容

试样干密度控制为 1.90 g/cm³,制样时土料分 5 层,每层 120 mm,按控制的质量装填,并尽量减少粗细料在装填时的离析。试样装填好以后用真空泵抽真空,然后直接采用水头饱和 10 h 左右。由于

试料颗粒较大,细颗粒较少,上述过程能保证试样充分饱和。为减小固结时间对试验结果的干扰,固结时间均控制为 240 min 左右。

固结后在排水条件下施加正弦波进行 30 次振动。值得注意的是,在进行大型动三轴试验时,仪器的输出性能受输出循环荷载频率的影响,在进行试验前应对仪器装样进行有效的测试。本次测试条件为装样干密度 1.9 g/cm³、围压 $\sigma_3=400$ kPa 及固结比 $K_c=1$,施加 25.4 kN(360 kPa)动荷载,测试 2.0 Hz、1.0 Hz、0.5 Hz、0.3 Hz 与 0.1 Hz 五种频率。测试发现当试验频率选得较大时,仪器无法输出比较规则的波形,动应力幅值达不到设定值,而且有较大相位差。试样干密度越小,动荷载幅值越低,输出效果越差。当频率降低时提高干密度,输出波形的质量提高,如图 1 所示。为评价输出效果,借鉴可决系数的表达形式,定义一个相关系数:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{Y}_i)^2 + \sum (\hat{Y}_i - \bar{y}_i)^2} \quad (1)$$

式中: y_i 为实际输出数据点; \bar{y}_i 为实际输出数据点平均值; \hat{Y}_i 为理想输出数据点。不同频率下输出荷载与理想输出的相关系数关系曲线见图 2。

考虑到为保证试验结果的有效性与可靠性,本次动残余变形试验的正弦波频率选为 0.1 Hz,保证输出荷载与理想输出的相关系数达到 0.9 以上。同时一般认为低频率循环荷载比高频率循环荷载更利于散体材料残余变形的发展,得到的试验结果应用于工程实践时偏于安全。

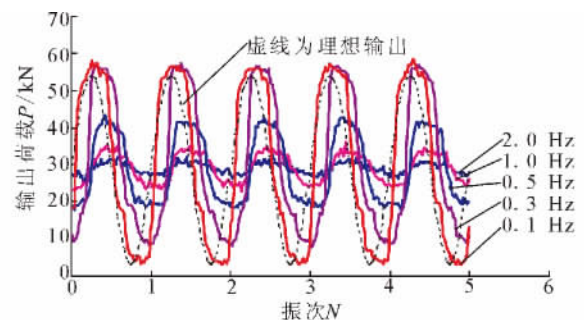


图 1 不同频率下输出荷载

Fig. 1 The output load under different frequencies

主要进行 2 方面试验:①控制干密度 1.9 g/cm³,在排水条件下,研究不同静应力水平、不同循环荷载幅值下残余应变随振次的发展规律;②不同含水状态、密实度与排水条件下残余应变的对比。以干密度 $\rho_{d1}=1.90$ g/cm³ 与 $\rho_{d2}=2.14$ g/cm³,初始应力状态 $\sigma_c=200$ kPa, $K_c=2$,饱和排水、饱和不排水及风干排

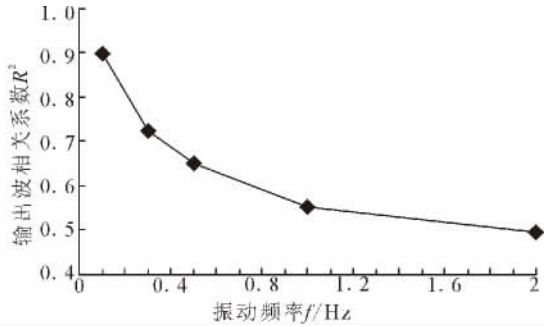


图 2 不同频率下输出荷载相关系数

Fig. 2 The correlation coefficients of output load under different frequencies

气状态的轴向累积应变为例,做一组对比试验。详细的试验安排见表 2,表中动应力比 $\eta = \sigma_d / \sigma_c$ 。

表 2 堆积体残余变形试验内容

Table 2 Residual deformation test scheme of deposits

残余变形试验内容	初始应力状态	动应力比 η		
① $\rho_{d1} = 1.90 \text{ g/cm}^3$	$\sigma_c = 200 \text{ kPa}$	$K_c = 1$ 0.5, 0.9 $K_c = 2$ 0.5, 1.2 $K_c = 3$ 0.9, 1.5		
	$\sigma_c = 400 \text{ kPa}$	$K_c = 1$ 饱和 0.5, 0.9		
		$K_c = 2$ 排水 0.5, 1.2		
	$\sigma_c = 600 \text{ kPa}$	$K_c = 3$ 0.9, 1.5		
		$K_c = 1$ 0.5, 0.9		
	② $\rho_{d1} = 1.90 \text{ g/cm}^3$	$\sigma_c = 200 \text{ kPa}$	$K_c = 2$ 饱和排水 0.5, 0.9 $K_c = 2$ 饱和不排水 0.5, 0.9	
		$\rho_{d2} = 2.14 \text{ g/cm}^3$	$\sigma_c = 200 \text{ kPa}$	$K_c = 2$ 风干排气 0.9, 0.9 $K_c = 2$ 饱和排水 0.5, 0.9

2 残余变形试验结果

2.1 试验内容①结果

试验内容①结果得到的累积体应变与累积轴应变随振次的关系见图 3。对于累积应变的整理需要注意,累积应变分为残余变形与往复应变,图 3 中累积轴向应变的往复应变比较明显,将每一振次完成后残余应变增量逐次累积就是累积残余轴应变,根据 $\gamma_r = (1 + \mu) \epsilon_{ar}$ 求得残余剪应变^[12],其中 γ_r 为残余剪应变, μ 为动泊松比(本次试验取 0.3), ϵ_{ar} 为残余轴应变。由于 Eiichi Taniguchi 模型及其改进模型主要考虑的是残余剪应变,没有考虑残余体积应变,而本次试验结果表明松散堆积体在循环荷载下会产生明显的残余体应变,沈珠江提出的考虑砂土残余变形的经验公式同时考虑了残余剪应变与残余体应变:

$$\epsilon_{vr} = C_{vr} \lg(N + 1), C_{vr} = c_1 \gamma^{c_2} \exp(-c_3 S^2) \quad (2)$$

$$\gamma_r = C_{dr} \lg(N + 1), C_{dr} = c_4 \gamma^{c_5} S^2 \quad (3)$$

式中, γ 代表动剪应变; $S = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 代表初始剪应力水平; c_1, c_2, c_3, c_4 和 c_5 为模型参数,同时假定 S 对 C_{vr} 无影响,即 $c_3 = 0$ 。上述模型关系式是由砂土试验数据提出来的,邹德高等^[7]将其应用于堆石料时对其进行了改进: $C_{dr} = c_4 \gamma^{c_5} S^n$,并推荐堆石料 n 取为 1,将改进后的公式写成振次增量形式:

$$\Delta \epsilon_{vr} = \lg e c_1 \gamma^{c_2} \exp(-c_3 S^2) (\Delta N / (N + 1)) \quad (4)$$

$$\Delta \gamma_r = \lg e c_4 \gamma^{c_5} S^n \lg(N + 1) (\Delta N / (N + 1)) \quad (5)$$

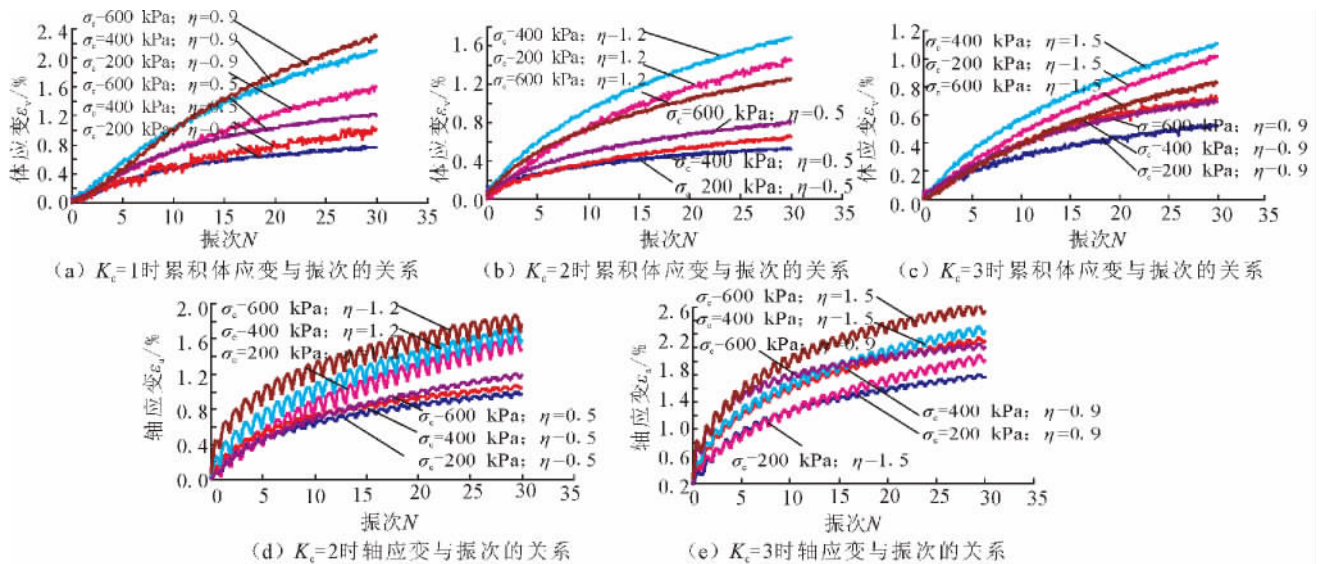


图 3 堆积体累积应变与振次的关系

Fig. 3 The relationship between accumulated strain and vibration number

将图3的试验数据按沈珠江的半对数公式拟合,可以发现轴应变的累积基本符合半对数的假设,而体应变的累积在初期更接近于线性,慢于半对数曲线。出现这种现象的一种解释就是在大三轴的循环荷载试验中试样较大,渗透路径较长,孔隙水的排出有一定滞后,使得初始值偏小,实际体变应该更接近于对数关系。拟合的结果见表3。

表3 试验曲线拟合数据

Table 3 Fitting data of test curves

初始应力状态	体变系数 C_{vr}	轴变系数 C_{dr}	应力水平 S	应变幅值 $\gamma_d/\%$	
$K_c=1$	200-0.5	0.587 3	-	0	0.040 9
	200-0.9	1.131 1	-	0	0.116 1
	400-0.5	0.703 6	-	0	0.055 6
	400-0.9	1.434 6	-	0	0.150 0
	600-0.5	0.857 8	-	0	0.069 7
	600-0.9	1.567 4	-	0	0.200 5
$K_c=2$	200-0.5	0.356 3	0.763 9	0.206 5	0.017 3
	200-1.2	1.029 3	1.307 4	0.206 5	0.094 9
	400-0.5	0.516 6	0.893 9	0.239 5	0.019 8
	400-1.2	1.136 4	1.402 3	0.239 5	0.073 2
	600-0.5	0.549 5	0.957 4	0.253 0	0.024 7
	600-1.2	0.814 2	1.426 3	0.253 0	0.083 3
$K_c=3$	200-0.9	0.360 3	1.352 1	0.412 9	0.019 5
	200-1.5	0.652 2	1.586 9	0.412 9	0.046 5
	400-0.9	0.512 4	1.664 1	0.479 1	0.025 2
	400-1.5	0.855 8	2.051 5	0.479 1	0.057 8
	600-0.9	0.439 0	1.872 4	0.494 0	0.028 5
	600-1.5	0.584 7	2.322 6	0.494 0	0.063 8

根据表3试验曲线拟合数据得到斜率 C_{vr} 与 C_{dr} ,然后将 C_{vr} 与 C_{dr}/S 与动应变幅值 γ_d 绘于双对数坐标中(图4)。由斜率及截距即得到改进沈珠江残余变形模型试验参数 c_1 、 c_2 、 c_4 和 c_5 ,详细参数及已有文献参数数据详见表4。值得一提的是关于相关系数 R 与 n 的关系见图5,图中引用了邹德高等^[7]的数据。本次试验数据相关性最好时 n 为0.8,文献^[7]的试验数据相关性最好时 n 为0.9,而沈珠江残余应变公式最初是由砂土得到的,推荐 n 值为2。由表4的颗粒组成数据来看,粗颗粒越大,相关性最好时的 n 值相应越小,应力水平 S 的指数 n 表征了静应力水平对残余变形的影响,其与土体材料颗粒级配特性及试验条件有关,深入的机理还有待进一步研究。本次试验数据得到的模型参数中,由于相关性最好时 n 接近于1,为方便应用,取为1。

2.2 试验内容②结果

试验结果见图6,由于无法直接测出风干排气条件下的体应变,图6(b)中只绘出了饱和和排水条件下的累积体变曲线。

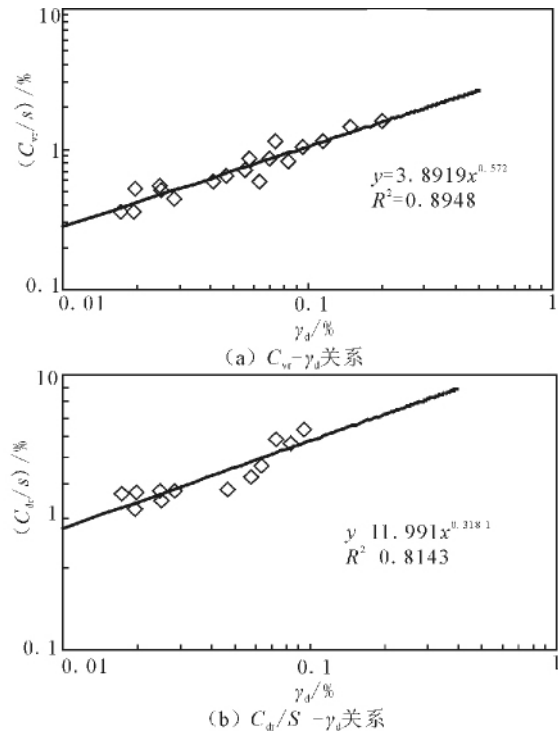


图4 松散堆积体的 $C_{vr}-\gamma_d$ 和 $C_{dr}/S-\gamma_d$ 关系

Fig. 4 The relationship of $C_{vr}-\gamma_d$ and $C_{dr}/S-\gamma_d$ of loose deposits

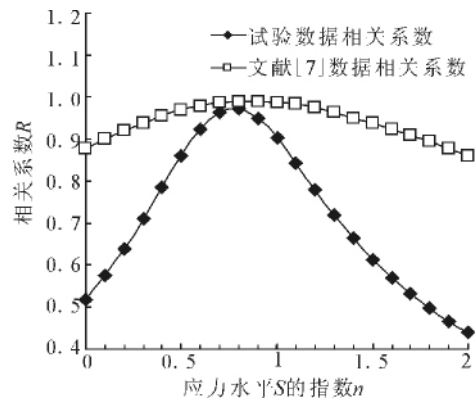


图5 相关系数与应力水平指数的关系

Fig. 5 The relationship between correlation coefficients and stress level indexes

由图6的累积应变曲线可以看出:相同干密度(1.9 g/cm³)、相同振次下,饱和不排水的累积应变最大,饱和排水条件下次之,风干排气累积应变最小。以 $N=20$ 次、 $\eta=0.9$ 为例,饱和不排水累积应变为1.38%,饱和排水累积应变0.93%,而风干排气累积应变只有0.38%。饱和排水条件下,干密度越大累积应变越小。以 $N=20$ 次、 $\eta=0.9$ 为例,干密度1.9 g/cm³ 下的累积轴应变为0.93%,累积体应变为0.57%,而干密度2.1 g/cm³ 下的累积轴应变仅为0.22%,累积体应变仅为0.31%。由此发现,不同的初始物性状态与不同的排水条件都会对

松散堆积体的残余变形产生显著影响。

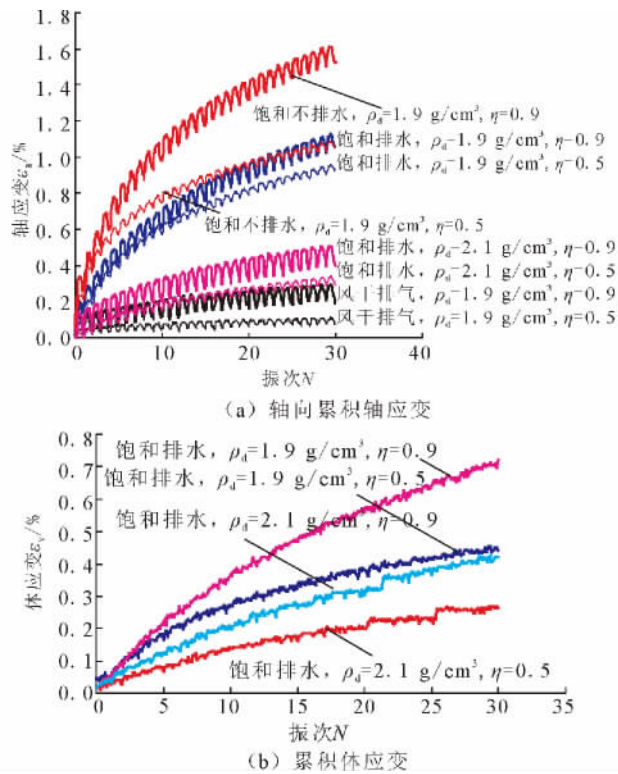


图 6 不同状态松散堆积体轴向累积轴应变及累积体应变曲线

Fig. 6 Accumulated axial strains and accumulated volumetric strains of loose deposits in different conditions

3 试验结果讨论

试验内容①研究不同静应力水平、不同动荷载幅值下残余应变随振次的发展规律,通过改进沈珠江模型对试验数据进行拟合,得到模型的拟合

参数。沈珠江模型可以写成增量显式形式,参数容易获得,并且一套参数就能求得不同静应力水平及不同动应变条件下残余应变随振次的累积关系,同时考虑残余剪应变与残余体应变,因此该模型得到了较广泛的应用,积累了大量的试验数据,如表 4 所示。

由试验内容②初步的对比分析可以看出,不同干密度、含水状态及排水条件是残余应变的重要影响因素,在应用沈珠江残余应变公式时应选取与工程实际条件相匹配的参数,否则计算结果不可靠。试验内容②的结果也说明,无论是天然的松散堆积体边坡还是以其为材料人工填筑的高路堤,从工程角度来看,保持坡面良好的排水条件,缩小松散堆积体的浸水范围,提高人工填筑料的密实度,对减小其地震沉降及残余变形非常有利。如果以变形作为动强度的标准,这也从另一个方面说明排水条件好的松散堆积体动强度要高于排水条件差的松散堆积体。王昆耀等^[12]关于筑坝粗粒土的残余变形研究也得出了相似的结论。

与其他残余应变的经验拟合公式一样,沈珠江模型是基于室内规则的循环荷载三轴试验数据拟合得到的经验公式,当应用于不规则地震荷载作用下的残余应变计算时,不能考虑波序、先期振动历史、土性的影响。其次,由于不是从根本的残余应变产生的力学机理上来建立残余变形公式,在有限元框架下进行工程计算时该方法需要一些假设来作为桥梁,有一定的局限性。考虑波序、先期振动历史等条件,并易于与有限元结合是该方法以后可以深入研究的地方。

表 4 模型参数数据综合

Table 4 Summary data of model parameters

数据文献	模型参数 ($c_3=0$)				试验土料	颗粒组成 / %				
	c_1	c_2	c_4	c_5		60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	<5 mm
本试验	3.892	0.572	11.991	0.318	松散堆积体	14.23	28.74	26.77	12.32	17.94
文献[7] $f=0.1$ Hz	1.40	0.979	13.7	1.11	堆石料	-	32.82	28.76	21.15	17.27
	2.56	1.21	14.97	0.737	主堆石料	-	-	-	-	17
文献[8]*	2.19	0.92	6.93	0.582	次堆石料	-	-	-	-	25
	9.00	0.14	9.12	0.372	河床覆盖料	-	-	-	-	21
文献[9]* $f=0.1$ Hz	0.998	0.934	36.014	0.582	主堆石料	22.4	29.4	21.8	16.4	10.0
	1.343	1.247	13.852	0.642	垫层料	15.7	19.8	14.1	10.4	40.0
文献[10] $f=0.1$ Hz	0.861	0.777	16.032	0.931	过渡料	22.0	28.6	20.9	13.5	15.0
	0.69	0.53	6.51	0.71	素堆石料	16.99	25.48	20.63	19.41	17.50
文献[11] $f=0.1$ Hz	c_1	c_2	c_4	c_5	试验土料	>5	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	<0.5
	0.368	1.311	1.183	0.886	细砂砾料	-	16.1	15.8	18.1	50
	0.151	0.818	0.686	0.734	粗砂砾料	14.0	33.3	22.9	23.8	6.0

*:文献[8]、[9]以 e 为底的自然对数进行拟合,在总结对比时,将文献数据转换为以 10 为底的常用对数下的拟合参数

4 结论

通过 TAJ-2000 大型动静三轴仪研究松散堆积体残余变形随振次的累积规律,用改进的沈珠江模型进行描述,并对比不同干密度、初始含水状态及排水条件下松散堆积体残余变形的差异,得到如下结论:

(1) 采用大型动三轴仪进行循环荷载残余变形试验时,测试了不同频率下仪器与松散堆积体试样相互作用下的输出,发现频率对循环荷载的输出效果有显著影响,与试验仪器性能及试样特性有关。为保证试验结果的可靠性,循环荷载试验应结合具体的研究问题选取适当的加载频率,本次残余变形试验频率取为 0.1 Hz。

(2) 在较低的围压范围内(200~600 kPa)松散堆积体残余剪应变与 $\lg(1+N)$ 基本成线性关系,残余体应变由于排水测体变的滞后,先期残余体应变慢于半对数关系,后期快于半对数关系,实际情况应该更接近半对数关系。试验曲线用改进的沈珠江残余变形经验公式拟合,效果较好。

(3) 不同干密度、初始含水状态及排水条件下松散堆积体残余变形之间差异较大。饱和排水条件,相同动应力及相同振次下,干密度越小,残余变形越大;相同干密度 (1.9 g/cm^3)、相同动应力及相同振次下,饱和不排水的累积应变最大,饱和排水条件下次之,风干排气累积应变最小。在应用沈珠江残余变形公式进行松散堆积体工程计算时,选取的参数应当充分考虑不同的工程条件。

(4) 应力水平 S 的指数 n 表征了初始静应力水平对动残余变形的影响,在沈珠江残余变形经验公式中,其对残余剪应变的影响比对残余体应变的影响要显著。指数 n 的大小应当与土体材料特性及试验条件相关, n 的取值对拟合的效果有重要影响,因此不同的土体材料下应力水平 S 对残余变形的影响规律还需更多的试验数据积累及深入研究。

参考文献(References)

- [1] P M Duku, J P Stewart, D H Whang, et al. Volumetric Strains of Clean Sands Subject to Cyclic Loads[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2008, 134(8): 1073-1085.
- [2] Nario Yasuda. Dynamic Deformation Characteristics of Sands and Rockfill Materials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(1): 747-757.
- [3] Shunichi Sawada, Yoshimichi Tsukamoto, Kenji Ishihara. Residual Deformation Characteristics of Partially Saturated Sandy

- Soils Subjected to Seismic Excitation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(2-4): 175-182.
- [4] Eiichi Taniguchi, Robert V Whitman, W Allen Marr. Prediction of Earthquake-induced Deformation of Earth Dams[J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 126-132.
- [5] 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(2): 143-150.
SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation Behavior of Rock Materials Under Cyclic Loading[J]. Hydro-science and Engineering, 1996(2): 143-150. (in Chinese)
- [6] 贾革续,孔宪京.粗粒土动残余变形特性的试验研究[J].岩土工程学报, 2004, 26(1): 26-30.
JIA Ge-xu, KONG Xian-jing. Study on Residual Deformation Characteristics of Coarse-grained Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 26-30. (in Chinese)
- [7] 邹德高,孟凡伟,孔宪京,等.堆石料残余变形特性研究[J].岩土工程学报, 2008, 30(6): 807-812.
ZHOU De-gao, MENG Fan-wei, KONG Xian-jing, et al. Residual Deformation Behavior of Rock-fill Material [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 807-812. (in Chinese)
- [8] 于玉贞,刘治龙,孙逊,等.面板堆石坝筑坝材料动力特性试验研究[J].岩土力学, 2009, 30(4): 909-914.
YU Yu-zhen, LIU Zhi-long, SUN Xun, et al. Experimental Study of Dynamic Properties of Materials of a Faced Rockfill Dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 909-914. (in Chinese)
- [9] 董威信,孙书伟,于玉贞,等.堆石料动力特性大型三轴试验研究[J].岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 296-301.
DONG Wei-xin, SUN Shu-wei, YU Yu-zhen, et al. Large Scale Triaxial Shear Test on Dynamic Properties of Rockfill Materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp2): 296-301. (in Chinese)
- [10] 刘汉龙,林永亮,凌华,等.加筋堆石料的动残余变形特性试验研究[J].岩土工程学报, 2010, 32(9): 1418-1421.
LIU Han-long, LIU Yong-liang, LING Hua, et al. Residual Deformation Behaviors of Reinforced Rock-fill Materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1418-1421. (in Chinese)
- [11] 曹培,王芳,严丽雪,等.砂砾料动残余变形特性的试验研究[J].岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 211-215.
CAO Pei, WANG Fang, YAN Li-xue, et al. Experimental Study of Residual Deformation Behavior of Sandy Gravel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Supp1): 211-215. (in Chinese)
- [12] 王昆耀,常亚屏,陈宁.往返荷载下粗料土的残余变形特性[J].土木工程学报, 2000, 33(3): 48-53.
WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Residual Deformation Characteristics of Coarse-grained Soils Under Cyclic Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 48-53. (in Chinese)