

DOI: 10.11779/CJGE201602023

堆石料的动力残余应变模型

迟世春, 吕小龙, 贾宇峰

(大连理工大学建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于国内多座土石坝筑坝材料的动力试验成果, 研究了堆石料的动力残余变形特性。分析了沈珠江及其改进模型、朱晟模型和水科院模型的差异及存在的问题。在此基础上, 建立了以围压和动应力为自变量, 并考虑应力水平影响的堆石料残余应变模型。分析比较发现, 提出的新模型能够较好地吻合试验结果。

关键词: 土石坝; 堆石料; 残余变形

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)02-0370-07

作者简介: 迟世春(1964-), 男, 山东高密人, 教授, 博士生导师, 从事土石坝工程研究工作。E-mail: schchi@dlut.edu.cn。

Model for dynamic residual strain behavior of rockfill materials

CHI Shi-chun, LÜ Xiao-long, JIA Yu-feng

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: According to the collected dynamic test results of rockfill materials from many earth-rock dams in China, the dynamic residual strain characteristics of these soils are studied. The differences among the primary residual strain models by Shen Zhujiang, Zou Degao, Ling Hua, Zhu Sheng and Zhao Jianming as well as their limitations are analyzed. After that, a new model for residual strain of rockfill materials is proposed based on some collected test results. In this model, the residual shear strain and residual volumetric strain are a function of confining pressure and dynamic cyclic stress, while the residual shear strain is also affected by the static shear stress level. By analyzing the results, it is found that the simulated residual strain curves by the proposed model agree well with the test results under the same stress condition.

Key words: earth-rock dam; rockfill material; residual strain

0 引言

土石坝是最古老的坝型之一, 因其结构简单、工程经济和施工快速而成为应用最广的坝型。随着中国水利水电建设的发展, 土石坝建造数量明显增加, 高度也在不断提高, 最高达到了300 m以上^[1]。然而中国土石坝的建设多位于西部地区。这些坝址地质条件复杂, 地震烈度高, 一旦失事, 将造成灾难性的后果。

从已建大坝发生的震害来看, 坝体的震陷、裂缝、滑坡等震害都与地震残余变形有密切关系^[2]。因此, 为满足大坝抗震设计的需要, 研究坝料在动力荷载作用下的残余变形特性, 为坝体的地震残余变形分析提供可靠的基本参数是十分必要的。

堆石料作为现代土石坝的主要筑坝材料, 具有填筑密度大、抗剪强度高和沉陷变形小等工程特性, 在工程中有极广泛的应用。因此, 深入研究筑坝堆石料的工程特性, 尤其是残余变形特性尤为重要。

在土石坝地震残余变形计算中, 目前常用的模型有谷口及改进模型^[3]、水科院模型^[4]、沈珠江^[5]及其改进模型^[6-8]和朱晟模型^[9]等。谷口及其改进模型只考虑剪

切变形, 未考虑体积变形。这与观测事实明显不符, 已经不再单独应用。沈珠江及其改进模型可以考虑残余剪切和体积应变, 还可以考虑振次的影响, 但残余应变与振次曲线往往不能很好地拟合试验点, 为了改善拟合精度出现了几种改进模型, 如邹德高、凌华及王玉赞的改进模型等。水科院残余应变模型则是针对少数几个固定振次的残余剪切及体积应变的试验点拟合表达式, 计算时需要对固结应力和固结比进行多重插值, 给使用带来一定的不便。朱晟参考了沈珠江模型的形式, 以应力为自变量建立模型, 并着重考虑了模量对残余应变发展的影响。

1 目前常用的堆石料残余变形模型

1.1 沈珠江及改进模型

沈珠江动残余变形模型^[5]在国内土石坝计算中应用最为广泛。它直接或间接地考虑了围压、振前剪应

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179024, 51379029, 51109027)

收稿日期: 2015-03-19

力水平、振次的影响, 以剪切应变为自变量, 直接给出残余体应变与残余剪应变的表达式,

$$\varepsilon_{vr} = c_{vr} \lg(1+N) , \quad (1)$$

$$\gamma_r = c_{dr} \lg(1+N) , \quad (2)$$

$$c_{vr} = c_1 \gamma_d^{c_2} \exp(-c_3 S_l^2) , \quad (3)$$

$$c_{dr} = c_4 \gamma_d^{c_5} S_l^2 , \quad (4)$$

式中, ε_{vr} , γ_r 为残余体应变、残余剪应变, N 为等效振动次数, c_{vr} , c_{dr} 分别为残余体积应变系数和残余剪切应变系数。 γ_d 为动剪应变幅值, S_l 为振前静应力水平, c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 为试验参数。若不计 S_l 对 c_{vr} 的影响, 可令 $c_3 = 0$ 。

研究发现, 沈珠江模型计算得到的残余应变有时偏大。偏大的残余应变会造成面板坝震后面板应力和缝变位的过大估计, 进而影响面板堆石坝的抗震性能综合评价^[5]。为此, 国内一些学者在大量试验研究的基础上, 提出了对沈珠江模型的改进版本。

邹德高等^[6]提出采用 c_{dr}/S_l 代替 c_{dr}/S_l^2 在双对数坐标系下拟合其与剪应变 γ_d 的关系, 发现试验点与直线的适合度更高, 故提出的残余剪应变模型是改式(4)为: $c_{dr} = c_4 \gamma_d^{c_5} S_l$ 。凌华等^[7]等根据试验成果提出将残余剪应变表达式(4)改为 $c_{dr} = c_4 \gamma_d^{c_5} \sqrt{K_c - 1}$ 的修正公式。王玉赞等^[8]搜集了国内多座土石坝堆石料的动力试验结果, 提出的残余剪应变公式为 $c_{dr} = c_4 \gamma_d^{c_5} S_l^2 K_c^3$ 。然而由于筑坝堆石料动力性质的复杂性, 上述模型对工程料的拟合情况差异很大, 需要采用不同的模型拟合不同坝料的试验结果, 没有一个能够较好地适用于各种坝料, 显然说明这些模型存在局限性。

1.2 水科院模型

赵剑明等^[4]基于龙首二级面板堆石坝坝料的试验成果, 以固结应力、固结比和振动次数 N 为参变量, 整理了堆石料的残余变形公式,

$$\varepsilon_{vr} = K_v (\Delta\tau / \sigma'_0)^{n_v} , \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ar} = K_a (\Delta\tau / \sigma'_0)^{n_a} , \quad (6)$$

$$\gamma_r = (1 + \mu) \varepsilon_{ar} , \quad (7)$$

式中, ε_{vr} , γ_r 为残余体应变和残余剪应变, ε_{ar} 为残余轴应变。 K_v , n_v 和 K_a , n_a 为试验系数和指数, 由试验结果拟合得到, 以 K_c , σ'_0 和 N 为参变量。 $\Delta\tau$ 为试样 45° 剪切面上的最大动剪应力, σ'_0 为平均有效固结应力, μ 为动泊松比, 试验中取 $\mu=0.33$ 。

1.3 朱晟模型

朱晟等^[9]参考沈珠江模型的形式, 认为残余应变随振次的发展基本符合半对数衰减规律。设 c_{vr} 和 c_{dr} 分别为各试验曲线在半对数坐标系下的斜率, 则将残余应变表示为振次 N 的函数:

$$\varepsilon_{vr} = c_{vr} \lg(N+1) , \quad (8)$$

$$\gamma_r = c_{dr} \lg(N+1) . \quad (9)$$

将 $c_{vr}/(\sigma'_m/p_a)^{1-n_{GM}}$ 和 $c_{dr}/(\sigma'_m/p_a)^{1-n_{GM}}/S^{n_s}$ 分别与 τ_d/σ'_m 绘制于双对数坐标系下, 用幂函数进行拟合, 建议如下的残余应变系数经验公式:

$$c_{vr} = c_1 \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{1-n_{GM}} \left(\frac{\tau_d}{\sigma'_m} \right)^{c_2} , \quad (10)$$

$$c_{dr} = c_3 \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{1-n_{GM}} \left(\frac{\tau_d}{\sigma'_m} \right)^{c_4} S^{n_s} , \quad (11)$$

式中, n_s 为应力水平的幂指数。 n_{GM} 为最大剪切模量指数, 即 $G_{max} = k_1 p_a (\sigma'_m/p_a)^{n_{GM}}$ 中的指数。

2 问题的提出

沈珠江及其修正模型的残余应变公式以动剪应变 γ_d 为自变量, 整理了残余应变参数与动剪应变的幂函数关系, 动剪应变越大, 残余应变亦越大。水科院模型的残余应变公式则是以动剪应力 $\Delta\tau$ 为自变量, 整理了残余应变与动剪应力的幂函数关系式, 动剪应力越大残余应变越大。由于动剪应力与动剪应变的关系在粗粒土产生残余变形的塑性变形阶段是复杂的, 无法进行两种模型公式等价性的比较。

在土石坝动力分析中, 动剪应力和动剪应变的变化并不同步。如与坝体中底部的坝料相比, 坝顶和坝坡部位围压不大, 动剪模量较小。地震时坝顶部位的动剪应变 γ_d 很大, 但动应力则较小。这样在预测地震残余应变时, 沈珠江模型与水科院模型就会存在差异。分析原因认为是由两种模型选择的自变量不同以及对围压等参变量的处理方式不同所致。

沈珠江模型未考虑围压的影响, 而水科院模型是给出不同围压结果进行插值。沈珠江模型采用动剪应变为自变量, 不区分围压, 整理参数时实际上是无法兼顾围压低颗粒破碎少残余应变小的问题。因此, 在坝顶和坝坡附近沈珠江模型预测的残余变形结果往往偏大。

水科院模型对各个设防烈度相应的等效振次分别拟合不同应力条件下的参数, 进行有限元计算时, 采用插值的办法计算残余应变, 但需要对每个单元进行固结应力、固结比甚至振次的插值运算, 较为不便。虽然水科院模型直接对试验数据进行拟合, 得到的经验公式可以避免归一化引起的误差。但由于工作量关系, 试验围压及固结比一般很少, 较难兼顾土石坝围压与固结比变化大的问题, 且每种试验条件的试样只进行一次试验, 试验结果的代表性也难以评估, 这些都会对残余应变的插值计算带来不确定和不可靠。

朱晟模型与沈珠江模型一样认为残余应变的发展与振次的关系符合半对数规律。然而大量的试验资料表明, 在高围压、大动应力比条件下, 残余应变与振

次的拟合曲线存在较大的偏差。且残余应变系数与 τ_d/σ_m' 在双对数坐标系下的拟合，也出现了离散性大的问题。朱晟模型考虑了静应力条件变化引起剪切模量的改变，用 $(\sigma_m'/p_a)^{1-n_{GM}}$ 对残余应变数据归一化后，拟合效果有所改良。然而围压和固结比对残余应变发展的影响机理是复杂的，颗粒棱角破碎、重排列等是残余应变产生的主要因素，仅从剪切模量角度考虑是片面的。

3 本文模型及参数确定

本文采用糯扎渡堆石料的试验结果，以及文献[6, 10]中收集到的堆石料和砂砾料的试验结果进行了整理和分析，试验密度、围压、固结比以及动应力列于表 1。

表 1 动力试验条件

Table 1 Dynamic test conditions

坝料	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	K_c	$R_d = \frac{\sigma_d}{\sigma_3}$	σ_3/kPa
糯扎渡 ^[11]			0.3	400
堆石料	2.07	1.5	0.6	1100
		2.5	0.9	2200
堆石料 ^[6]	2.08	1.0 2.0 3.0	0.3, 0.6 0.5, 1.0	200 400 600
砂砾料 ^[10]	1.80	1.5 2.0	0.3 0.6 0.9	200 700 1200

3.1 残余体应变

将糯扎渡堆石料等效振次 30 时的残余体应变与动应力的关系^[11]绘制于图 1。可以看出，固结应力条件一定时，残余体应变随动应力的增大而增大。围压和固结比对残余体应变与动应力关系的影响也比较明显。

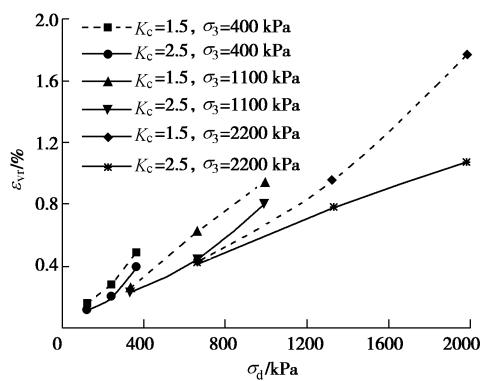


图 1 残余体应变与动应力的关系

Fig. 1 Relationship between ε_{vr} and σ_d

根据图 1 的试验点整理堆石料 30 振次时残余体

应变与 σ_d/σ_m 的关系，见图 2。这里 σ_d 为施加在试样上的轴向动应力， $\sigma_m = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 为平均主应力。

由图 2 可以看出，相同围压下残余体应变 ε_{vr} 与 σ_d/σ_m 基本满足线性关系，且直线汇交于原点。各围压下直线斜率 k 及直线拟合的相关系数见表 2，相关参数均大于 0.985，可以满足工程精度要求。

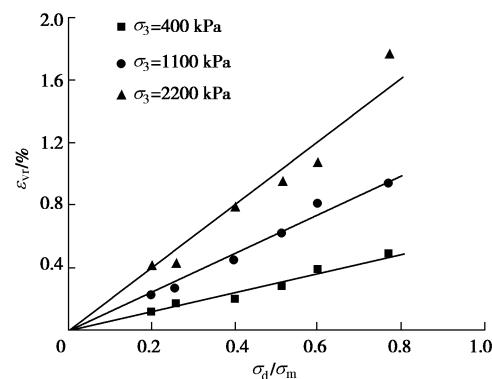


图 2 糯扎渡堆石料 $\varepsilon_{vr} - \frac{\sigma_d}{\sigma_m}$ 关系曲线

Fig. 2 Relationship between ε_{vr} and $\frac{\sigma_d}{\sigma_m}$

表 2 残余体应变拟合斜率

Table 2 Fitting slopes of residual volumetric strain

σ_3/kPa	k	R^2
400	0.610	0.991
1100	1.231	0.995
2200	2.029	0.985

各围压下的斜率不同，绘制斜率 k 与围压 σ_3 的关系曲线，发现可以用幂函数形式拟合，见图 3。为量纲一致，水平轴用 σ_d/p_a 进行归一化。

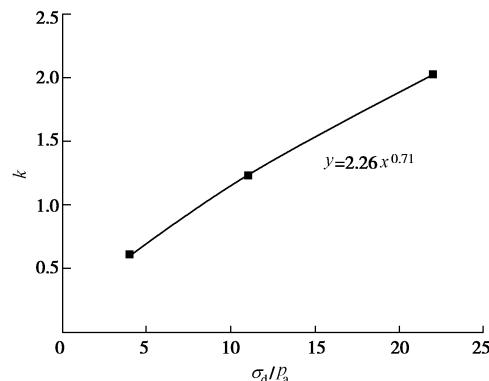


图 3 斜率 k 与 σ_3/p_a 的关系

Fig. 3 Relationship between slope of fitting curve and confining pressure

因此，堆石料残余体应变与固结应力条件及动应力的关系可用下式表示：

$$\varepsilon_{vr} = c_1 \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{c_2} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_m} \right), \quad (12)$$

式中, ε_{vr} 为残余体应变, σ_3 为围压, p_a 为大气压力, $p_a = 101.4 \text{ kPa}$ 。 ε_{vr} 采用%形式, c_1 , c_2 为模型参数, 以等效振次为参变量, 其数值根据动力试验结果拟合确定, 见表 3。

表 3 糯扎渡堆石料残余体应变参数

Table 3 Residual volumetric strain parameters of rockfill materials

等效振次 N	c_1	c_2
12	0.163	0.705
20	0.206	0.692
30	0.226	0.710

采用本文模型对文献[6]中等效振次为 30 时的残余体应变进行拟合, 见图 4, 模型参数见表 4。文献[7]中等效振次为 30 时的残余体应变拟合结果见图 5, 拟合参数见表 5。可以看出, 拟合结果比较理想。

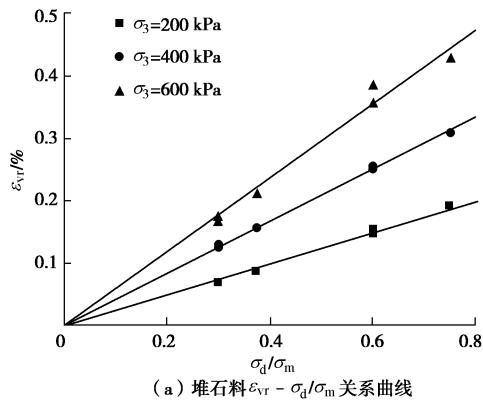
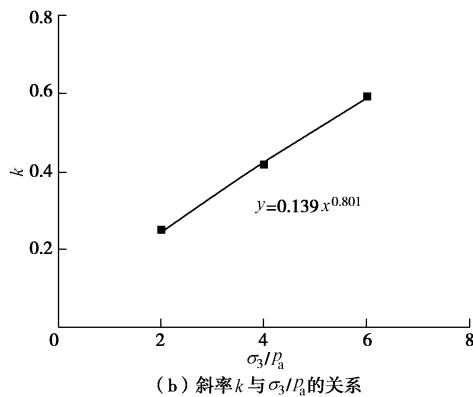
(a) 堆石料 ε_{vr} - σ_d/σ_m 关系曲线(b) 斜率 k 与 σ_3/p_a 的关系

图 4 本文模型对文献[6]试验数据拟合结果

Fig. 4 Fitting results for experimental data of Reference 4 by proposed model

表 4 文献[6]堆石料残余体应变参数

Table 4 Residual volumetric strain parameters of rock-fill materials

等效振次 N	c_1	c_2
12	0.095	0.761
20	0.117	0.793
30	0.139	0.801

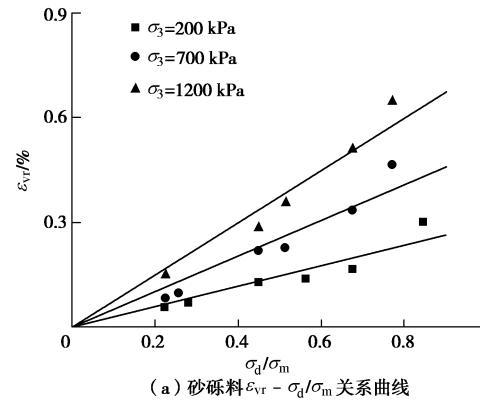
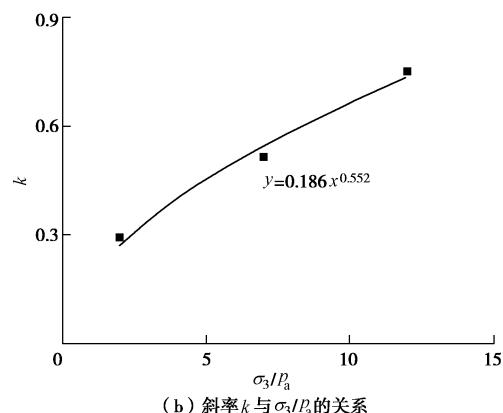
(a) 砂砾料 ε_{vr} - σ_d/σ_m 关系曲线(b) 斜率 k 与 σ_3/p_a 的关系

图 5 本文模型对文献[7]试验数据拟合结果

Fig. 5 Fitting results for experimental data of Reference 7 by proposed model

表 5 文献[7]砂砾料残余体应变参数

Table 5 Residual volumetric strain parameters of sandy gravel

等效振次 N	c_1	c_2
12	0.127	0.487
20	0.163	0.517
30	0.186	0.552

3.2 残余剪应变

根据糯扎渡堆石料试验成果^[11], 得等效振次 30 时残余剪应变与动应力的典型曲线, 见图 6。

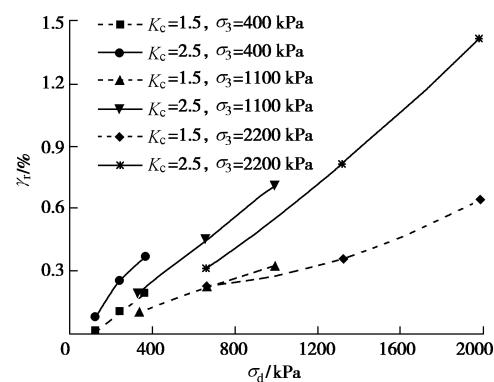


图 6 残余剪应变与动应力的关系

Fig. 6 Relationship between γ_r and σ_d

如图 6 所示, 固结应力条件一定时, 作用在试样上的动应力越大, 所引起的残余剪应变就越大。又根据以往的工程经验, 认为残余剪应变的发展与试样的应力水平直接相关。则取等效振次 30 时的残余剪应变, 以 $\gamma_r / S_1^{0.95}$ 为纵坐标, σ_d / p_a 为横坐标进行拟合, 见图 7。

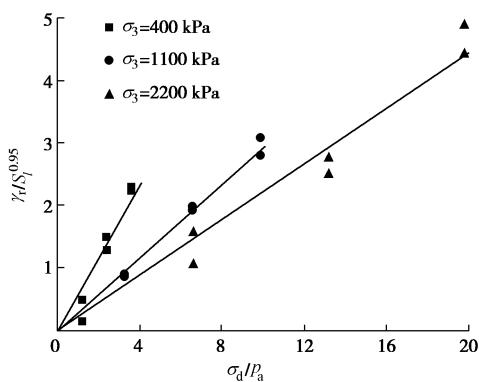


图 7 糯扎渡堆石料 $\frac{\gamma_r}{S_1^{0.95}} - \frac{\sigma_d}{p_a}$ 关系曲线

Fig. 7 Relationship between $\frac{\gamma_r}{S_1^{0.95}}$ and $\frac{\sigma_d}{p_a}$

由图 7 可以看出, 相同围压下的 $\gamma_r / S_1^{0.95}$ 与 σ_d / p_a 基本成线性关系, 且直线均汇交于原点。拟合得斜率 k 及相关系数见表 6。如表 6 所示, 拟合得到的直线斜率与围压有直接关系, 采用幂函数进行拟合, 见图 8。

表 6 糯扎渡堆石料残余剪应变拟合斜率

Table 6 Fitting slopes of residual shear strain

σ_3 / kPa	k	R^2
400	0.585	0.963
1100	0.294	0.997
2200	0.223	0.988

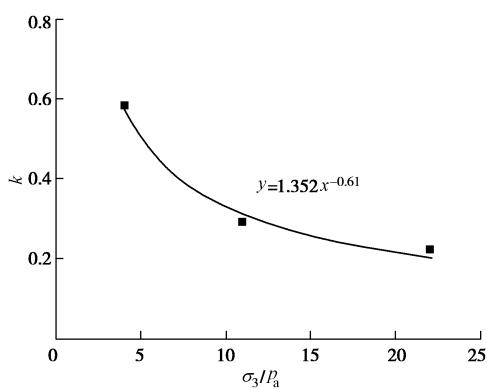


图 8 斜率 k 与 σ_3 / p_a 的关系

Fig. 8 Relationship between slope of fitting curve and confining pressure

综上, 堆石料残余剪应变与动静应力条件的关系可用下式表述

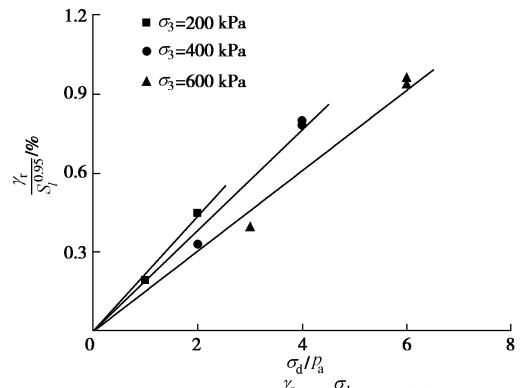
$$\gamma_r = c_3 \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{c_4} \left(\frac{\sigma_d}{p_a} \right) S_1^n \quad (13)$$

其中指数 n 反映了应力水平对残余剪应变发展的影响程度, γ_r 采用%形式, c_3 , c_4 为模型参数。公式以 σ_3 、 K_c 和 N 为参变量, 其值根据动力试验结果拟合确定, 见表 7。

表 7 糯扎渡堆石料残余剪应变参数
Table 7 Residual shear strain parameters of rockfill materials

等效振次 N	c_3	c_4	n
12	1.199	-0.593	1.00
20	1.202	-0.572	0.97
30	1.352	-0.610	0.95

采用本文模型对文献[6]中等效振次为 30 时的残余剪应变进行拟合, 见图 9, 模型参数见表 8。文献[10]中等效振次为 30 时的残余剪应变拟合结果见图 10, 拟合参数见表 9。可以看出, 拟合结果较为理想。



(a) 堆石料 $\frac{\gamma_r}{S_1^{0.95}} - \frac{\sigma_d}{p_a}$ 关系曲线

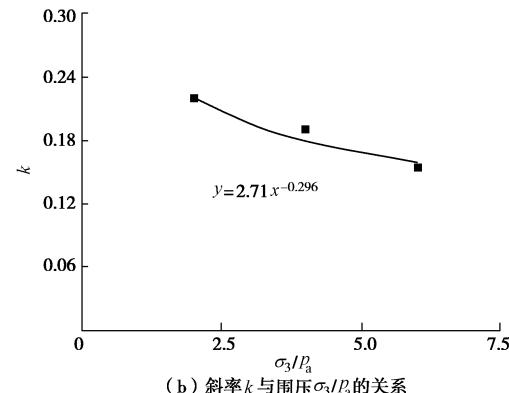


图 9 本文模型对文献[6]试验数据拟合结果

Fig. 9 Fitting results for experimental data of Reference 6 by proposed model

表 8 文献[6]堆石料残余剪应变参数

Table 8 Residual shear strain parameters of rockfill materials

等效振次 N	c_3	c_4	n
12	0.187	-0.302	0.18
20	0.209	-0.282	0.17
30	0.271	-0.296	0.15

表 9 文献[10]砂砾料残余剪应变参数

Table 9 Residual shear strain parameters of sandy gravel

等效振次 N	c_3	c_4	n
12	0.385	-0.741	0.50
20	0.462	-0.693	0.50
30	0.576	-0.750	0.50

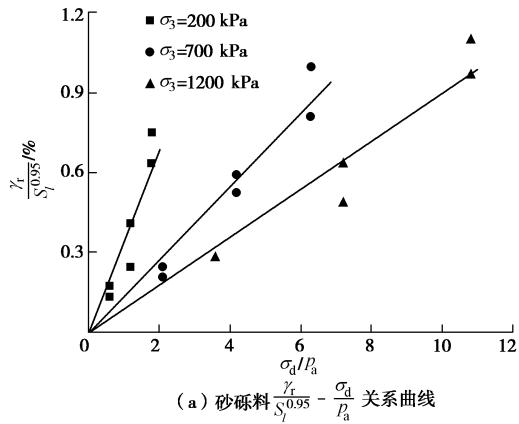
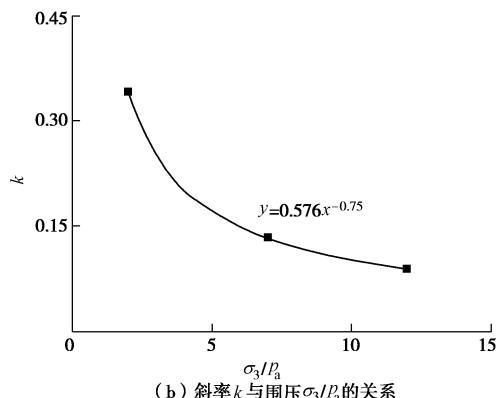
(a) 砂砾料 $\frac{\gamma_r}{S_l^{0.95}} / \%$ - $\frac{\sigma_d}{P_a}$ 关系曲线(b) 斜率 k 与围压 σ_3 / P_a 的关系

图 10 本文模型对文献[10]试验数据拟合结果

Fig. 10 Fitting results for experimental data of Reference 10 by proposed model

由以上拟合结果知, 从文献[6]中的堆石料, 到文献[10]中的砂砾料和糯扎渡堆石料^[11], 应力水平指数 n 有增大的趋势。结合试验条件分析, 糯扎渡堆石料的试验围压最大, 砂砾料次之, 文献[6]中堆石料最小。即随着围压增大, 应力水平指数 n 逐渐增大。这是因为围压增大引起剪切过程中的颗粒破碎趋于严重, 颗粒更容易发生翻越, 进而引起更大的残余剪切变形。该现象与堆石料围压增大则摩擦角减小的试验结论相协调。但因为 $S_l < 1$, 随着 n 的增大, 导致残余剪应变的发展趋缓, 反映了围压越大, 颗粒破碎越严重, 试样越密实, 残余剪应变发展速率降低。从 3 组试验结果可知, n 对等效振次的变化并不敏感, 故可取均值。

从表 3~5 和表 7~9 可以看出, 模型参数具有较好的稳定性。对同种坝料, 残余剪应变参数 c_1 , c_2 随振次增加而增大, 但变化幅值不大。不同坝料时, c_1 , c_2 的差别亦不大。残余体变参数 c_3 , c_4 亦然。

值得注意的另一个问题是参数 c_4 为负值。参数 c_2 为正值意味着随围压的增大, 残余体积应变增大。但残余剪切应变却相反, 在应力条件及振次相同的前提下, 随着围压的增大而减小, 也就是围压增大越难发生剪切残余变形。

4 结语

本文分析了沈珠江及其改进模型、水科院模型和朱晟模型的差异, 指出当前残余应变模型存在的问题。在此基础上, 建立了以围压和动应力为自变量, 并考虑应力水平影响的堆石料残余应变模型。通过与试验结果的比较发现, 新模型具有较高的拟合精度, 且模型参数变化幅度不大, 具有很好的稳定性。

新模型直接以固结应力、动应力及静剪应力水平(固结比)为自变量, 在分析土石坝地震永久变形时, 就不需要对围压及固结比进行插值。尽管模型以等效振次为参变量, 但就具体工程而言, 其设计地震对应的等效振次在可研阶段是给定的, 可直接关注相应振次的残余变形, 直接给出其残余变形参数, 因此在实际计算中也不需对振次进行插值。该模型采用真实试验数据点的公式及参数, 可提高土石坝地震永久变形的计算精度, 为土石坝抗震设计提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 赵剑明, 常亚屏, 陈宁. 高面板堆石坝面板的地震反应分析与安全评价[C]// 第七届全国土动力学学术会议论文集. 北京, 2006: 578 - 583. (ZHAO Jian-ming, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Seismic response analysis and safety evaluation of concrete face of high CFRD[C]// The 7th National Conference on Soil Dynamics. Beijing, 2006: 578 - 583. (in Chinese))
- [2] 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 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))
- [3] 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))
- [4] 赵剑明, 陈宁, 常亚屏, 等. 龙首二级面板堆石坝地震永久变形分析[J]. 世界地震工程, 2004, 19(4): 57 - 62. (ZHAO Jian-ming, CHEN Ning, CHANG Ya-ping, et al.

- Study on earthquake-induced permanent deformation of Longshou CFRD[J]. World Earthquake Engineering, 2004, 19(4): 57 - 62. (in Chinese))
- [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, 6(2): 143 - 150. (SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation behavior of rock material under cyclic loading[J]. Hydro-Science and Engineering, 1996, 6(2): 143 - 150. (in Chinese))
- [6] 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): 808 - 812. (ZOU De-gao, MENG Fan-wei, KONG Xian-jing, et al. Residual deformation behavior of rock-fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 808 - 812. (in Chinese))
- [7] 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 Zheng-yin, et al. Experimental study on dynamic residual deformation characteristics of dam materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(5): 532 - 537. (in Chinese))
- [8] 王玉赞, 迟世春, 邵 磊, 等. 堆石料残余变形特性与参数敏感性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 856 - 862. (WANG Yu-zan, CHI Shi-chun, SHAO Lei, et al. Residual deformation behavior of rockfill materials and sensitivity analysis of parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 856 - 862. (in Chinese))
- [9] 朱 晟, 周建波. 粗粒筑坝材料的动力变形特性[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1375 - 1380. (ZHU Sheng, ZHOU Jian-bo. Deformation behavior of coarse grained materials under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1375 - 1380. (in Chinese))
- [10] 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(8): 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(8): 211 - 215. (in Chinese))
- [11] 李国英. 糯扎渡水电站心墙堆石坝坝料动力特性试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010. (LI Guo-ying. Study on dynamic characteristics of materials in Nuozhadu core wall rockfill dam[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)