

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.037

漳州沿海地区土体的残余变形试验研究

王冬容, 赵俭斌, 刘 潇, 陈 阳
(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 利用 DSC2000 多功能三轴试验系统, 选取粉质粘土和淤泥两种典型海岸地基土进行残余变形特性试验研究。分析了围压、固结比对残余体应变和残余剪应变的影响, 分别整理了沈珠江残余变形模型和改进后修正沈珠江模型参数, 并对两种模型参数进行了对比。研究得出: 残余体应变随着围压的增加而增大, 固结比对残余体应变的影响不是很明显; 残余剪应变随初始固结比、围压和动应力的升高而增加; 针对沈珠江残余变形模型参数与改进后沈珠江模型参数进行了对比, 对模型的剪应变进行修正的结果将会对数值计算的结果产生比较大的影响。

关键词: 海岸地基土; 沈珠江模型; 残余变形; 动三轴试验

中分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0201-06

Experimental Study of Residual Deformation of Soil in Zhangzhou Coastal Areas

WANG Dongrong, ZHAO Jianbin, LIU Xiao, CHEN Yang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: In this paper we adopt DSC2000 multifunction three triaxial test system to select the silty clay and silt soil and two typical coast on their deformation characteristics of residual test research. The effects of confining pressure and consolidation ratio on residual body strain and residual shear strain are analyzed. The residual deformation model of Shen Zhujiang River and the parameters of Shen Zhujiang model are revised respectively, and the two model parameters are compared. The results show that the residual volumetric strain increases with the increase of confining pressure and consolidation ratio of residual volumetric strain is not obvious, the residual shear strain increased with initial consolidation ratio, the confining pressure and dynamic stress also increases; based on the comparison between the residual deformation model parameters and the modified Shen Zhujiang model parameters, it is found that the modified results of the shear strain of the model have a greater influence on the numerical results.

Keywords: coastal foundation soil; Shen Zhujiang model; residual deformation; dynamic triaxial test

我国东南部沿海区域存在着大量的软黏土层, 对于海岸地基土工程, 这些土体性质极其不佳, 存在着高压缩性、低抗剪强度、低渗透性、高含水量且具有一定结构性^[1-2]。在动力荷载作用之下, 对地基土的变形影响严重, 尤其危及到建筑物地基和土工构筑物的安全。由于原状土在取样、运输、保存和成样等各个方面的影响因素较多, 同时也存在一定的难度, 所以, 对于原样土在循环荷载状态下的残余变形研究分析就相对较少。因此针对在震动情况下海岸地基土体的残余变形性质展开分析, 进而评价海

岸地基土的稳定性和安全性。

目前, 王昆耀等^[3]人采用循环三轴试验来研究荷载作用下土体的残余变形; 而大部分学者对筑坝材料^[4-5]和堆石料^[6-8]的残余应变研究成果较多。

截止到目前, 不同土类进行计算残余变形, 一直没有一个相对统一的模型进行计算研究, 进行预测永久的变形时, 里面是否加入残余体应变还存在某些异议的。当前比较常用的计算模型分别有谷口模型、谷口改进模型^[9-11], 水科院模型^[12], 沈珠江模型、沈珠江修正模型^[13-14]。本文通过对海岸地基

土的大量循环三轴试验,分析了围压、固结比对残余体变和残余剪应变的影响,整理出沈珠江残余变形试验的参数,并对两种模型参数进行对比分析。

1 沈珠江残余变形模型

沈珠江等^[13]针对残余变形的试验研究,利用饱和和排水的状态,总结出了残余剪应变与残余体应变分别随着振动次数增量变化的相关性公式:

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

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

$$C_{vr} = C_1 \gamma_d^{C_2} \exp(-C_3 S_1^2) \quad (3)$$

$$C_{dr} = C_4 \gamma_d^{C_5} S_1^2 \quad (4)$$

则残余体应变和残余剪应变增量形式为

$$\Delta \epsilon_{vr} = C_1 \gamma_d^{C_2} \exp(-C_3 S_1^2) \frac{\Delta N}{1 + N} \quad (5)$$

$$\Delta \gamma_r = C_4 \gamma_d^{C_5} S_1^2 \frac{\Delta N}{1 + N} \quad (6)$$

式中: ϵ_{vr} 为残余体应变; γ_r 为残余剪应变; γ_d 为动剪应变幅值; S_1 为应力水平; $S_1 = \tau/\tau_f = (\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$; $\Delta \epsilon_{vr}$ 为残余体应变的增

量; $\Delta \gamma_r$ 为残余剪应变的增量; ΔN 为振次的增量。

沈珠江的残余变形模型是在对砂土的试验基础上总结的,在固结比 $K_c = 1.0$ 时认为残余应变为零,但当固结比 $K_c = 2.0$ 时,反映不出应力水平带来的影响,因此式(5)和式(6)里面直接应用 S_1^2 需要进一步论证。邹德高等^[14]通过进行大量的动三轴试验,重点研究其应力水平在固结比 $K_c = 1.0, 2.0, 3.0$ 条件下对残余剪应变的影响情况,改进了原有的沈珠江模型,同时利用有限元的计算,针对改后的模型进行了更进一步的计算,经过调整后的公式为:

$$C_{dr} = C_4 \gamma_d^{C_5} S_1^n \quad (7)$$

式中: n 为应力水平指数,通常会取 $0.9 \sim 1.0$; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 为试验参数。

2 残余变形三轴试验

2.1 试验材料及仪器

本试验采用的土样来自东南沿海漳州海岸的原状土,取两种典型原状土体粉质黏土与淤泥。表 1 为土工物理力学指标平均值。

表 1 土工试验物理力学指标平均值表

土层名称	含水率 W/%	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	干重度 $\gamma_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	土粒比重 G_s	塑性 指数	液性 指数	压缩系数 a_{1-2}/MPa	压缩模量 E_s/MPa
淤泥	66.0	15.7	0.95	1.764	2.62	26.3	1.45	1.775	1.56
粉质黏土	22.4	20.4	1.66	0.638	2.72	14.0	0.31	0.209	8.29

试验采用沈阳建筑大学的 DSC2000 动力三轴试验系统,通过自带软件,可实时查看土样的动孔隙水压力和动应变,便于了解土样的应力应变状态。

2.2 试验方法

(1) 试样制备。根据《土工试验规程》^[15](SL 237—1999),制成尺寸 80 mm 高,直径 39.1 mm 的圆柱试样。

(2) 饱和阶段。采用水头饱和法以及反压饱和法的方式进行饱和。一般情况下,水头饱和时间为 6 h,水头饱和完成后进行加反压饱和,通过逐步增大反压,试样逐渐接近饱和状态,通常,当反压增至 190 kPa 时,试验的 B 值可增至 0.95 以上。

(3) 固结阶段。采用等压固结,根据东南沿海漳州海域为例,依次选取 50 kPa、100 kPa、150 kPa 为试验典型围压值。粉质黏土固结时间为 1.5 h,淤泥固结时间为 4 h ~ 5 h。

(4) 振动阶段。在等向或非等向固结排水情况

下,对每个试样分别施加轴向动应力 $\sigma_d = 0.2\sigma_3$ 和 $0.4\sigma_3$ 的循环荷载。每个土样在每级动应力下作用进行 30 次循环的荷载试验,应用正弦波为激振波形^[16],取 0.1 Hz 为振动频率。对海岸地基土具体试验安排见表 2。

表 2 残余变形试验工况

土类	振动频率 /Hz	K_c	σ_d/σ_3	围压/MPa
粉质黏土	0.1	1.0、1.5、2.0	0.2、0.4	50、100、150
淤泥		1.0、1.5、2.0	0.2、0.4	50、100、150

3 试验结果分析对比

3.1 海基土残余变形特性

循环荷载残余变形的研究分析中,轴向残余应变为 ϵ_r ,轴向动力应变幅值 ϵ_d 的含义可以见图 1 所表示,残余体应变与振动次数的关系也可以用图 1 类似趋势进行定义。残余剪应变与残余轴应变之间

的关系为： $\gamma_r = (1 + \mu_d) / \epsilon_d$ 。式中 μ_d 为动泊松比。

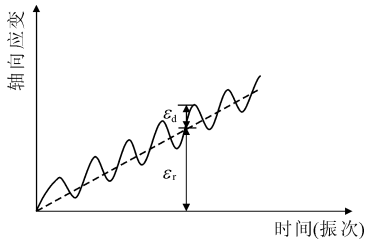
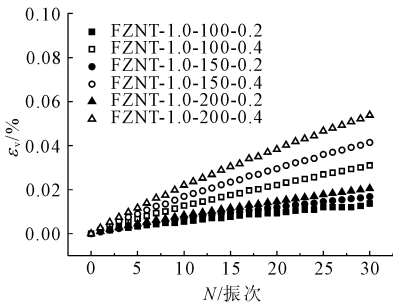


图 1 残余变形示意图

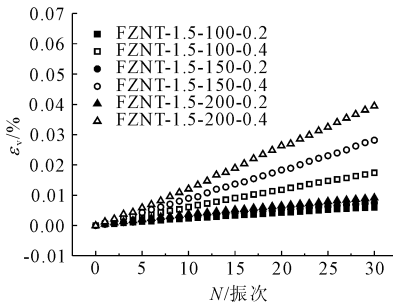
3.1.1 残余体应变特性

图 2、图 3 为试验所得的残余体应变与振次的关系曲线。由图 2、图 3 可以看出,随着循环振次的

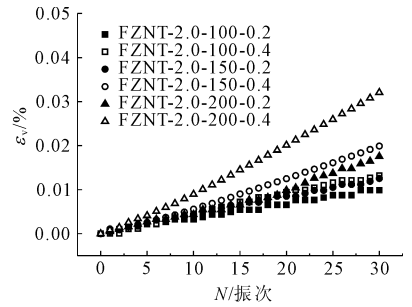
增加,粉质黏土在 $K_c = 1.0$,围压为 50 kPa、100 kPa、150 kPa 的残余体应变增大到 0.009% ~ 0.5% 范围内;在 $K_c = 1.5$ 、相同围压的情况下,残余体应变增大至 0.003% ~ 0.45% 范围内;而在 $K_c = 2.0$ 、相同围压的情况下,残余体应变增大到 0.007% ~ 0.36% 范围内。淤泥在 $K_c = 1.0$,围压为 50 kPa、100 kPa、150 kPa 的残余体应变增大到 0.02% ~ 0.55% 范围内;在 $K_c = 1.5$ 、相同围压的情况下,残余体应变增大至 0.02% ~ 0.18% 范围内。而在 $K_c = 2.0$ 、相同围压的情况下,残余体应变增大至 0.07% ~ 0.18% 范围内。



(a) $K_c=1.0$

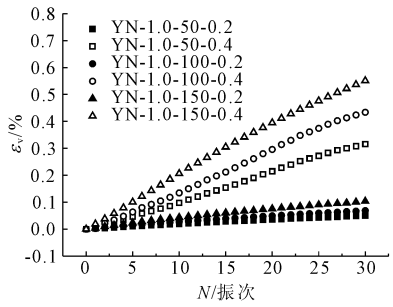


(b) $K_c=1.5$

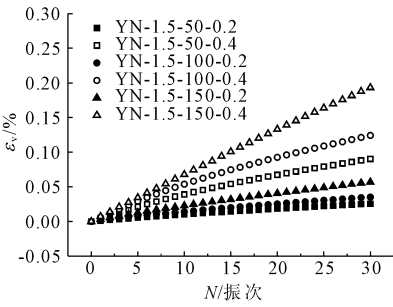


(c) $K_c=2.0$

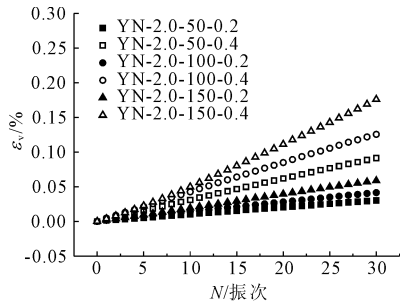
图 2 粉质黏土残余体应变和振次的关系



(a) $K_c=1.0$



(b) $K_c=1.5$



(c) $K_c=2.0$

图 3 淤泥残余体应变和振次的关系

3.1.2 残余剪应变特性

图 4、图 5 为试验所得的残余剪应变与振次的关系曲线。由图 4、图 5 可以看出,随着循环振次的增加,粉质黏土在 $K_c = 1.5$,围压为 50 kPa、100 kPa、150 kPa 的残余剪应变增大到 0.01% ~ 0.41% 范围内;而在 $K_c = 2.0$ 、相同围压的情况下,残余剪应变增大到 0.1% ~ 1.12% 范围内;淤泥在 $K_c = 1.5$,围压为 50 kPa、100 kPa、150 kPa 的残余剪应变增大到 0.01% ~ 1.2% 范围内;而在 $K_c = 2.0$ 、相同围压的情况下,残余剪应变增大到 0.1% ~ 2.0% 范围内。

由图 2 至图 5 可总结出两种海基土残余变形的特性:

(1) 两类土样表现出残余体应变伴随振动次数

增加而渐渐增加;围压值的增大使残余体应变随之变大;固结比对残余体应变的影响不是很明显;也可以看出残余体应变伴随动应变(动应力)的增加而增加。

(2) 在相同的条件下,两类土样的残余剪应变,其初始固结比的增大会引起残余剪应变的增大;围压升高使残余剪应变的增加,围压升高也使动应力(动应变)的增加,围压升高也会使残余剪应变增加。

3.2 沈珠江模型参数整理

选择沈珠江模型^[6]和经过修正的邹德高等^[7]提出的修正沈珠江模型来整理本次的试验参数,并进行对比。图 6 为两种海基土的残余变形研究分析得出的残余体应变 ϵ_v 和振 $N + 1$ 次于半对数坐标下的相关性拟合曲线。

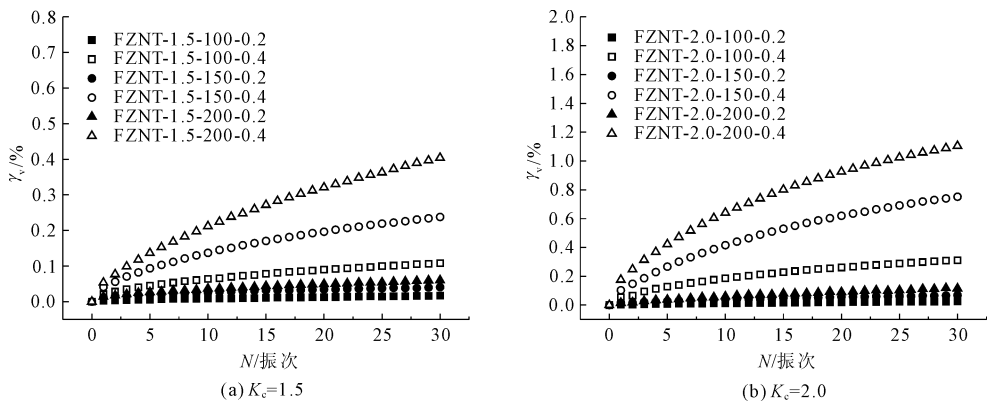


图 4 粉质黏土残余剪应变与振次的关系

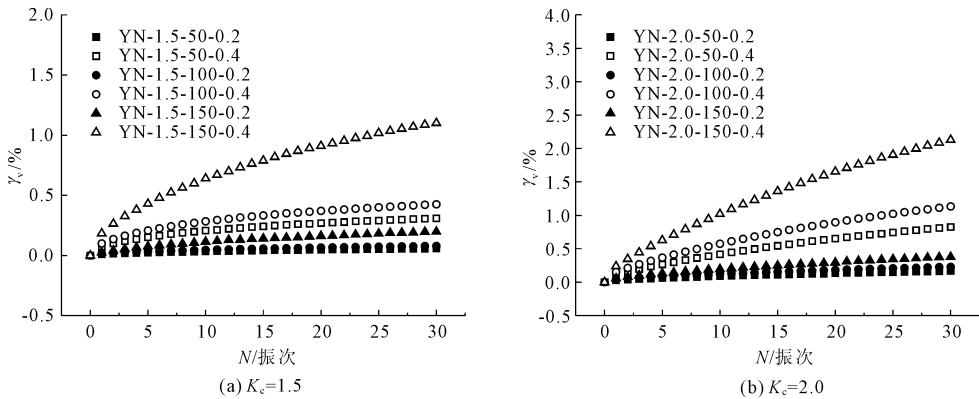


图 5 淤泥残余剪应变与振次的关系

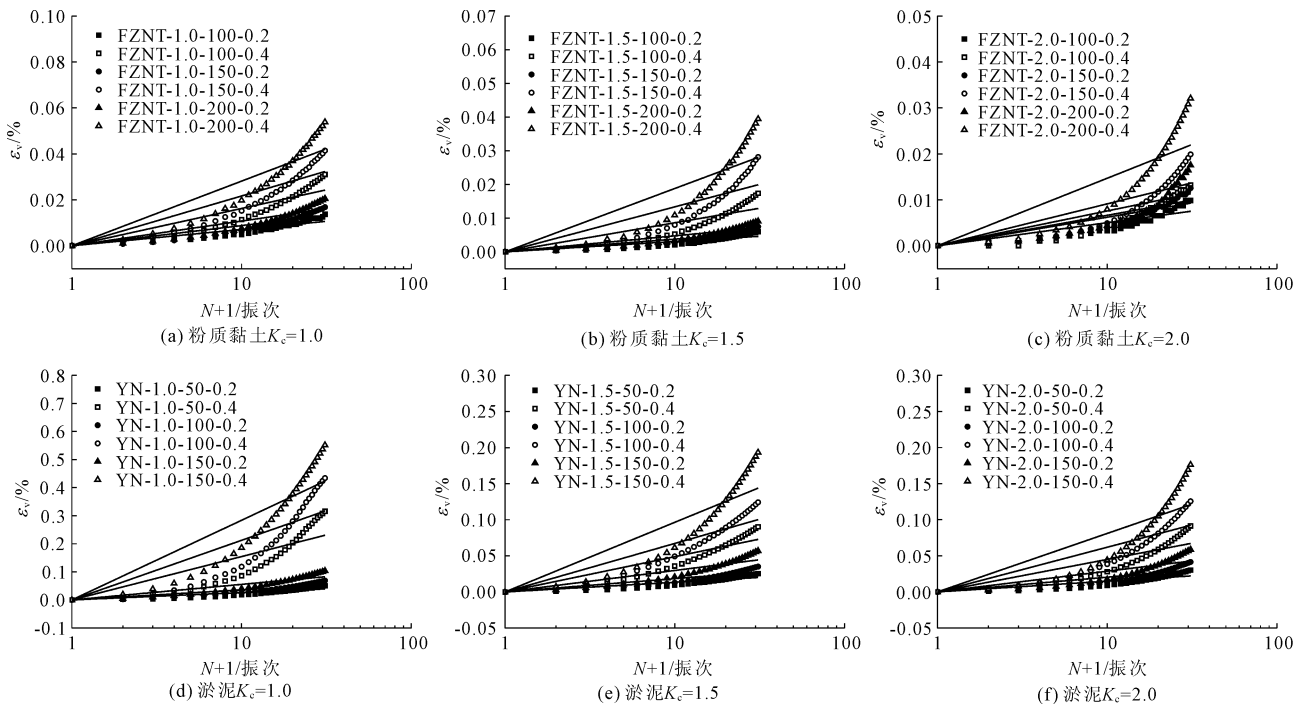


图 6 土样残余体应变与振次关系

由图 6 可以看出,当固结比增高时($K_c = 2.0$),数据表现出明显的偏离,并且当围压高时,不符合线性关系。图 7 为粉质黏土、淤泥的残余体应变试验

中残余剪应变 γ_v 和振次 $N + 1$ 于半对数坐标系下的拟合曲线,可看出其并非线性规律,且在高围压条件下同样不符合。两种典型原状土样的试验结果得

到的研究结论基本类似。

图 8、图 9 分别为粉质黏土,淤泥残余变形的试验结果的 C_{vr} 、 C_{dr}/S_1^2 与 γ_d 分别在双对数坐标之下

的拟合关系的曲线。可以看出,土样 C_{vr} 与 γ_d 离散型较小,较好地满足线性关系;而土样 C_{dr}/S_1^2 与 γ_d 的离散型较大。

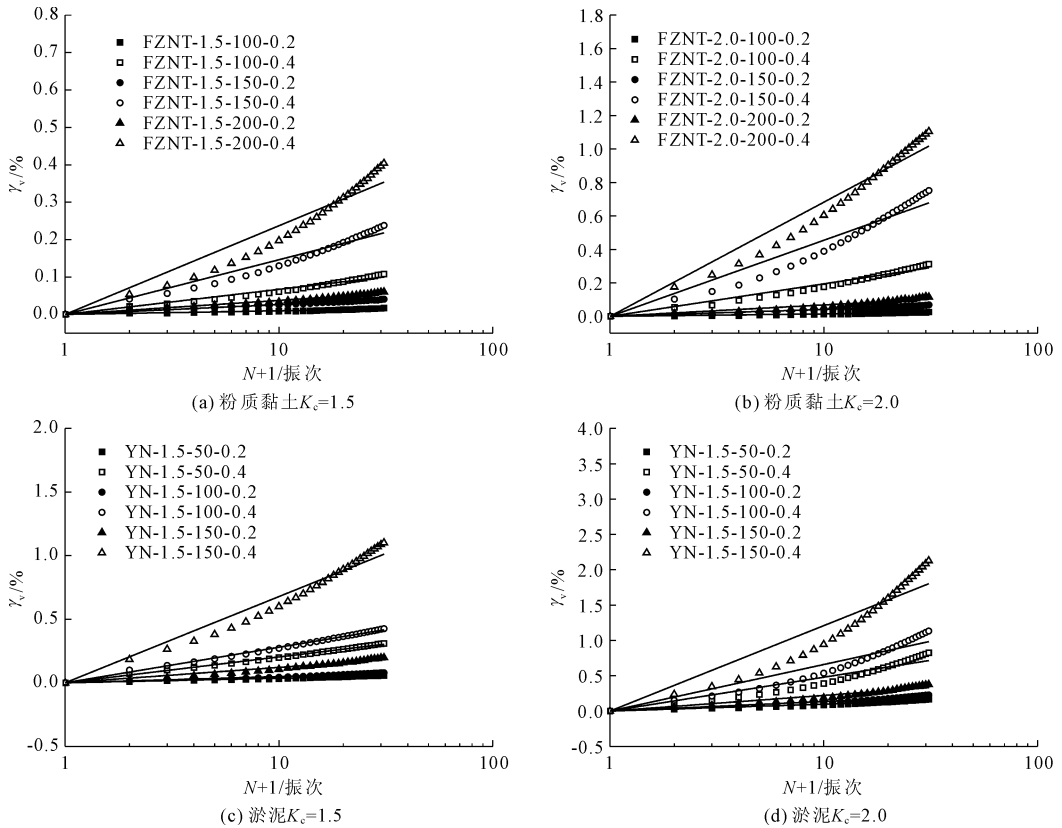


图 7 土样残余剪应变与振次关系

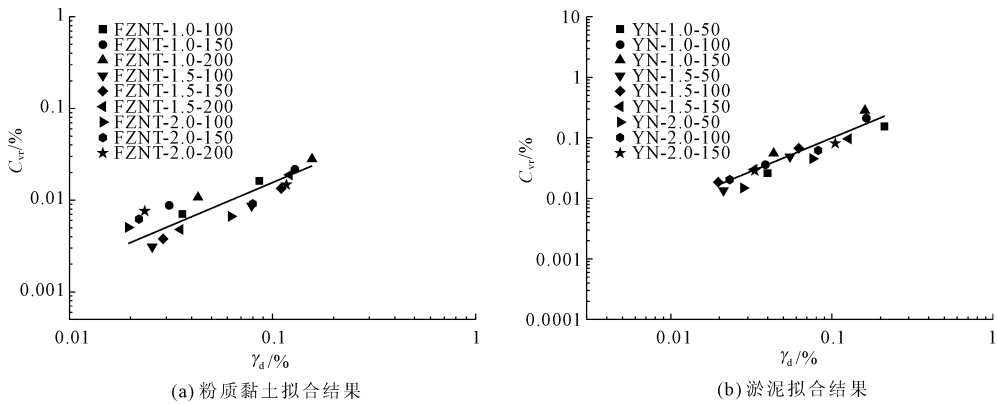


图 8 土样 C_{vr} 与 γ_d 的关系曲线

3.3 沈珠江模型参数对比

根据修正的沈珠江残余变形的模型,考虑到 C_{dr}/S_1^2 与残余剪应变 γ_d 在对数坐标下按直线来拟合,其离散性相对较大,利用 C_{dr}/S_1^n 来代替原模型里面的 C_{dr}/S_1^2 , n 可以选择 0.9,但是考虑到 n 为 1.0 时计算简便, C_{dr}/S_1^n 可近似用 C_{dr}/S_1 来替换,将

C_{dr}/S_1 与残余剪应变 γ_d 在对数坐标纵按着直线进行拟合,取 0.01 处截距值和斜率可得到两种土样的修正沈珠江残余变形参数 C_4 、 C_5 ,并列于表 3 中。由于 C_{vr} 与 γ_d 的数据可以知道,不同固结比的试验点区别不是特别明显,所以假定 S_1 对 C_{vr} 没有影响,即式(3)中 $C_3 = 0$ 。

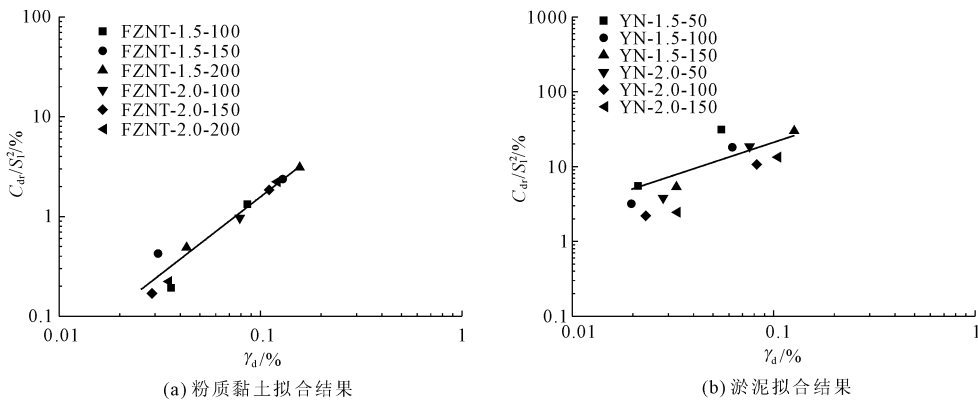
图 9 土样 C_{dr}/S_1^2 与 γ_d 的关系曲线

表 3 残余变形模型参数

名称	$C_1/\%$	C_2	C_3	$C_4/\%$	C_4 修正/ $\%$	C_5	C_5 修正
粉质黏土	0.17054	0.82329	0	1.42603	1.19787	0.86802	0.86628
淤泥	0.08861	0.32672	0	1.25479	0.95364	0.32485	0.3229

对沈珠江残余变形模型中的系数和修正后的模型系数进行比较能够得到:运用修正沈珠江的残余变形模型与沈珠江模型的参数结果有一定区别,粉质黏土的值 C_4 减小了 16%, C_5 值减小了 0.2%;淤泥的 C_4 值减小了 24%, C_5 值减小了 0.6%;可以看出对模型的剪应变进行了修正后的结果将会对数值计算的结果影响较大。

4 结 论

本文通过对海岸地基土的两种土样的残余变形特性进行了分析研究,得出了以下的结论:

(1) 在循环加载试验过程中两种土体的残余体应变跟着振动次数的增加也渐渐增加,且起初增加的速度相对较快,而后期增大的速度渐渐减慢;围压值的增大使残余体应变随之变大;残余体应变伴随动应力的增加而变大,而固结应力比的变化对残余体应变影响较小。

(2) 在相同的状态下,初始固结比的增加会引起残余剪应变的增加;围压力增加至使残余剪应变的值增加,动应力值的变大也会使残余剪应变的值增加。

(3) 试验研究分析整理了沈珠江残余应变试验的参数,同时将沈珠江残余应变模型系数和改进修正后沈珠江模型系数逐一的展开对比,将模型的剪应变进行了改进后得出的参数改变将会对数值计算的最终结果发生相对大的改变。

参考文献:

[1] 韩舰辉,王宁伟,白小航,等.海相软黏土电化学改性固结试验研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):10-13.

[2] 万勇,杨清,杨钢,等.电势梯度对海相淤泥电渗试验的影响[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):94-98.

[3] 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.

[4] 朱最,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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 迟世春,林皋,孔宪京,等.堆石料残余体应变对计算面板堆石坝永久变形的影响[J].水力发电学报,1998(1):59-67.

[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.

[9] Eiichi T, Whitman R V, Allen M W. Prediction of earthquake-induced deformation of earth dams[J]. Soils and Foundations, 1983,23(4):126-132.

[10] 孔宪京,韩国城,等.粗粒料动应力—应变关系试验研究[R].大连:大连理工大学,1994.

[11] 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.

[12] 汪闻韶,金崇磐,王克成.土石坝的抗震计算和模型实验及原型观测[J].水利学报,1987(12):1-16.

[13] 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.

[14] 邹德高,孟凡伟,孔宪京,等.堆石料的残余变形特性研究[J].岩土工程学报,2008,30(6):807-812.

[15] 南京水利科学研究所.土工试验规程:SL 237—1999[S].北京:中国水利水电出版社,1999:262-271.

[16] 谢定义.土动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1988.