

DOI: 10.11779/CJGE201512009

循环偏应力和循环围压耦合效应对饱和软黏土变形特性的影响

孙 磊¹, 王 军², 谷 川^{*2}, 郭 林²

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 利用 GDS 变围压动三轴系统对温州地区典型饱和软黏土进行了一系列循环偏应力和循环围压耦合应力路径下的部分排水循环加载试验, 重点分析了部分排水条件下循环偏应力和循环围压耦合效应对正常固结饱和软黏土变形特性的影响。试验结果表明: 部分排水条件下, 与围压保持恒定, 偏应力单独循环剪切相比, 循环偏应力和循环围压耦合剪切作用有效地促进了饱和软黏土的累积塑性应变的发展, 循环围压和循环偏应力的比值每增加 2/3, 相应的永久轴向应变就增加 32%。进一步根据部分排水条件下饱和软黏土永久轴向应变发展曲线特点, 建立了考虑循环偏应力和循环围压耦合效应的正常固结饱和软黏土的永久轴向应变经验公式。

关键词: 动三轴试验; 循环围压; 部分排水; 永久轴向应变

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)12-2198-07

作者简介: 孙 磊(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事土动力学及基础工程方面的研究。E-mail: leisun2015@163.com。

Coupling effects of cyclic deviator stress and cyclic confining pressure on deformation behaviour of saturated clay

SUN Lei¹, WANG Jun², GU Chuan², GUO Lin²

(1. Coastal City and Geotechnical Engineering Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. College of Civil
Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: A series of partially drained cyclic triaxial tests under coupling of cyclic deviator and cyclic confining pressure are performed on typical Wenzhou soft clay by using GDS cyclic triaxial apparatus. The coupling effects of cyclic deviator and cyclic confining pressure on the partially drained cumulative plastic strain of saturated clay are studied. The experimental results show that under partially drained condition, compared to that of the conventional CCP tests, coupling of cyclic deviator stress and cyclic confining pressure expedites the accumulation of cumulative plastic strain with the increase of confining pressure amplitude, and the increase of the ratio of cyclic confining pressure to cyclic deviator stress of 2/3 will induce an increment of 32% in the cumulative plastic strain. On the basis of the experimental results obtained, an empirical formula incorporating the coupling effect of cyclic deviator stress and variable confining pressure is proposed to estimate the cumulative plastic strain in the partially drained cyclic tests.

Key words: dynamic triaxial test; cyclic confining pressure; partial drainage; permanent axial strain

0 引言

随着中国经济的发展, 沿海地区高速公路、高速铁路、城市地铁和飞机场建设高速发展, 高速交通循环荷载长期作用引起的软基沉陷和结构破坏问题已日益突出。特别是像上海、温州等软土层很厚的城市。交通荷载引起的软土累积沉降控制问题也是造成高速公路和高速铁路投资成本高昂的主要原因之一。因此, 需要对高速交通荷载及其他一些因素作用下软土地基的长期沉降展开更细致和科学的研究。

在交通荷载作用下软土循环应力应变关系研究方

面, Seed 等^[1]首先对长期循环荷载作用引起的路基累积变形进行了试验研究, Monismith 等^[2]提出著名的 Monismith 指数型增长公式。由于长期循环荷载均与恒载联合作用, Li 等^[3]、Chai 等^[4]、黄茂松等^[5]、张勇等^[6]先后对 Monismith 指数型增长公式进行了修正, 使 Monismith 指数型增长公式具有能够评估静、动偏应力等各种影响因素的能力。然而在交通荷载引

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578426, 51308420)

收稿日期: 2014-11-24

*通讯作者

起的动应力场中, 不仅包括循环竖向偏应力分量, 还包含有较大幅值的水平向循环正应力即循环围压, 如图 1 所示^[7]。但目前的 Monismith 型累积变形公式却还难以把循环围压的影响包含在内。大量的试验研究表明, 循环围压对饱和土体动力特性的影响不可忽略^[8-10]。关于循环围压对饱和砂土等颗粒材料在交通荷载下沉降和回弹特性的影响, 已经有学者做过研究^[11-14]。这些研究结果表明循环围压对永久应变的累积速度、应变的发展方向以及回弹模量均产生了较大的影响。由于这方面的研究比较少, 还缺少更多定量的结论, 且针对不同类型土体的研究也有待深入。

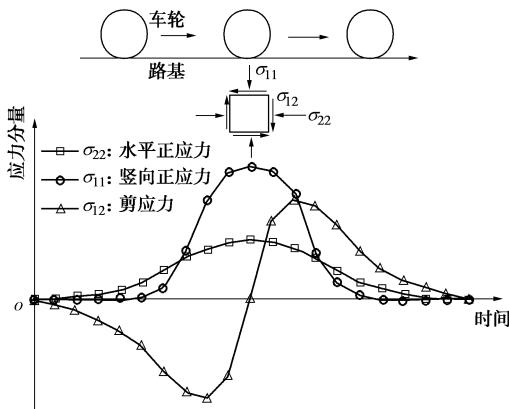


图 1 交通荷载下路基土体中的动应力

Fig. 1 Dynamic stresses under traffic loading

以往的大部分关于饱和软黏土的交通荷载模拟都只考虑了交通荷载引起的循环竖向偏应力分量^[15-19], 几乎没有文献涉及包括循环偏应力和循环围压耦合效应的影响。谷川等^[20]通过包含循环围压的纯压动态应力路径模拟真实交通荷载下竖向循环正应力与水平循环正应力的耦合, 系统地研究了循环围压对重塑饱和软黏土在不排水条件下孔压、永久变形和回弹特性的影响。然而高速交通荷载作用下的地基可认为处于部分排水的状态, 超孔压的产生和消散重复交替进行^[21-22]。

为了能够更加真实地模拟路基土体的受荷状态, 量化循环围压对原状饱和软黏土累积变形的影响进而建立考虑水平循环正应力的软土累积变形经验公式。本文采用英国进口的 GDS 变围压动三轴设备, 通过循环偏应力和循环围压耦合的纯压动态应力路径模拟真实交通荷载下竖向循环正应力与水平循环正应力的耦合, 对温州地区典型原状饱和软黏土的部分排水变形特性进行研究, 并对比循环围压对软黏土累积变形的影响。本文研究对进一步开展高速交通荷载室内试验模拟技术具有一定的借鉴意义。

1 试验条件及方法

1.1 试验土样及制备

试验所用土样取自温州茶山高教园区开挖至一定

深度的基坑内 (5~6 m), 该场地在基坑开挖之前的地质情况根据勘探资料已知: 第一层为平均厚度约 3 m 的素填土, 第二层为平均深度约为 13 m 的淤泥质黏土 (本文所取土样即分布于该层), 地下水位约在地下 4 m。第一层素填土的平均重度约为 18 kN/m³, 第二层黏土的重度约为 16.5 kN/m³, 由此计算可知土样在基坑开挖之前的竖向自重应力约为 85 kPa。为保证原状土样的质量, 将特制的薄壁管 (直径 150 mm, 长 300 mm) 缓缓地插入经人工整平过的基坑底部。然后将薄壁管小心地取出, 将两端密封后运回实验室, 存储在恒温恒湿箱内以备试验使用。试验用土的基本物理力学参数如下: 密度 $\rho = 1.58 \sim 1.62 \text{ g/cm}^3$, 比重 $G_s = 2.66 \sim 2.69$, 天然含水率 $w_n = 59\% \sim 62\%$, 液限 $w_L = 69\%$, 塑性指数 $I_p = 38$, 初始孔隙比 $e_0 = 1.70$, 渗透系数约为 $3.2 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 先期固结压力 $p_c = 96 \text{ kPa}$, 灵敏度 $S_t = 5.8$ 。试验前, 先利用推土器将薄壁钢管中的土样缓缓推出, 然后将土样切成直径 50 mm, 高 100 mm 的试样。将切好的土样装入 GDS 三轴压力室, 首先进行反压饱和, 所有的土样都在围压 310 kPa 和反压 300 kPa 下进行饱和, 待 B 检测中的 B 值大于 0.97 时进行下一步固结试验, 本文所有试样均采用各向同性固结, 初始固结有效围压为 100 kPa, 与土样所承受的先期固结压力 (96 kPa) 基本一致, 以保证再固结过程中土体初始结构性受到较少扰动。待排水体变基本稳定, 结束固结, 然后进行动力加载试验。

1.2 试验方法及过程

本试验采用英国进口的 GDS 变围压动三轴系统。动力加载波形如图 2 所示, 频率采用 0.1 Hz, 所有试样均振至 10000 次。在循环加载过程中将排水阀门打开以实现部分排水。为衡量循环应力水平, 定义循环应力比 (CSR), 即

$$\text{CSR} = q^{\text{ampl}} / (2p'_0) \quad (1)$$

式中, q^{ampl} 为循环偏应力幅值, p'_0 为有效固结围压 100 kPa。

在三轴试验中, 一般使用 $p - q$ 平面来表达应力路径, 其中 p 为平均主应力, q 为广义偏应力, 即

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

$$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 \quad (3)$$

本文进行的循环三轴试验采用的应力路径如图 3 所示。在 $p - q$ 平面, 当循环偏应力幅值保持恒定时, 循环围压幅值的变化会形成不同的应力路径, 为了表征不同的应力路径, 定义应力路径斜率 $\eta^{\text{ampl}} = \text{确} p^{\text{ampl}}/q^{\text{ampl}}$, 其中 $\eta^{\text{ampl}} = 1/3$ 为常规的恒定围压动三轴试验。本文共进行了 15 组循环加载试验, 具体试验方案如表 1 所示。

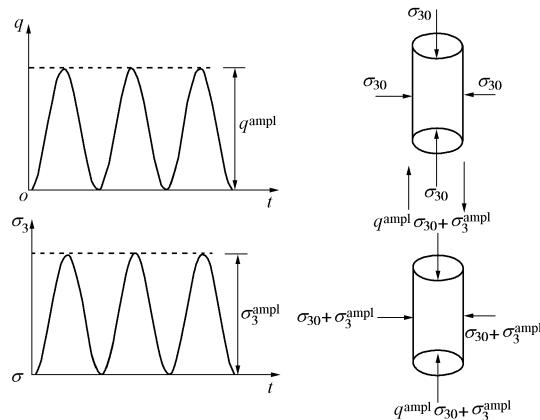


图 2 动力加载过程

Fig. 2 Dynamic loading process used in cyclic stage

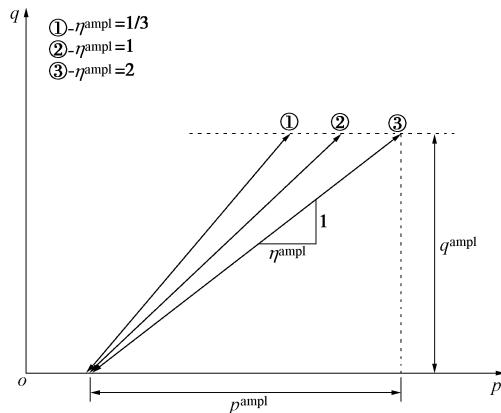


图 3 变围压动三轴应力路径示意图

Fig. 3 Stress paths of VCP tests

表 1 试验方案

Table 1 Test programs

试验 编号	σ_3^{ampl} /kPa	q^{ampl} /kPa	CSR	η^{ampl}	加载次 数
P01	0	15	0.075	1/3	10000
P02	10	15	0.075	1.0	10000
P03	25	15	0.075	2.0	10000
P04	0	21	0.105	1/3	10000
P05	14	21	0.105	1.0	10000
P06	35	21	0.105	2.0	10000
P07	0	27	0.135	1/3	10000
P08	18	27	0.135	1.0	10000
P09	45	27	0.135	2.0	10000
P10	0	36	0.180	1/3	10000
P11	24	36	0.180	1.0	10000
P12	60	36	0.180	2.0	10000
P13	0	45	0.225	1/3	10000
P14	30	45	0.225	1.0	10000
P15	75	45	0.225	2.0	10000

2 试验结果及分析

2.1 典型试验结果

图 4 为部分排水条件下, 典型的恒定围压和变围压应力路径下循环三轴试验得到的正常固结饱和软黏土体应变和轴向应变的发展规律。图 4 (a) 表明, 在相同循环偏应力作用下, 循环围压的幅值越大 (η^{ampl}

越大), 试样产生的体应变就越大。如图 4 (b) 所示, 在循环加载过程中, 不同应力路径下的轴向应变均表现出明显的循环累积效应, 在循环加载初期, 轴向应变迅速累积, 随着循环次数的增大轴向应变的累积速度逐渐减小并最终趋于稳定。曲线同时表明: 同围压保持恒定, 偏应力单独循环剪切 ($\eta^{\text{ampl}}=1/3$) 相比, 循环偏应力和循环围压耦合作用 ($\eta^{\text{ampl}}=1, 2$) 会较大幅度地加快试样的轴向应变向压缩方向累积。

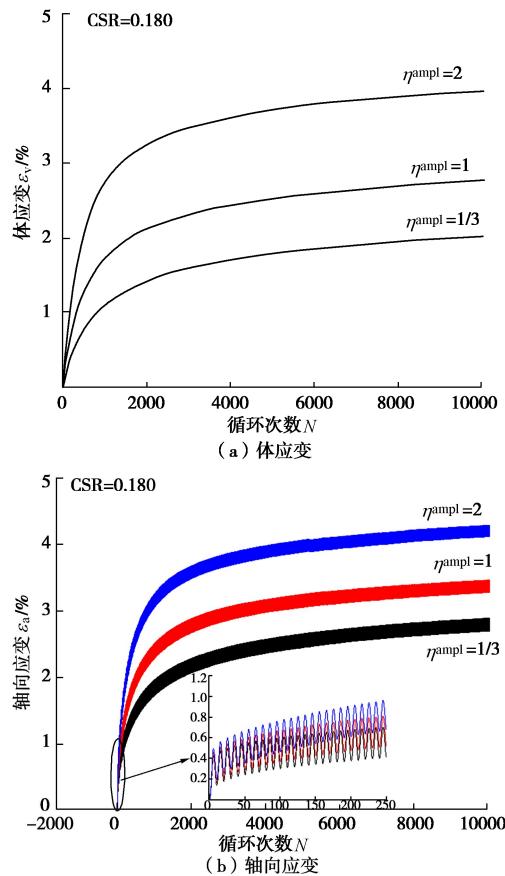


图 4 不同应力路径循环荷载加载下应变发展规律

Fig. 4 Development of strain under cycle loading with different stress paths

2.2 不同循环应力比和应力路径下永久轴向应变发展规律

部分排水条件下, 永久轴向应变 (循环加载过程中每一圈的最小应变) 随循环加载次数的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出, 当其他试验条件相同, 循环偏应力和循环围压耦合作用时, 试样产生的永久轴向应变均大于围压保持恒定时试样的永久变形。此外, 图 5 还表明, 不同试验条件下, 软黏土的永久轴向应变随着循环加载次数的变化规律基本相同。

为定量评价部分排水条件下循环偏应力和循环围压耦合作用对试样永久轴向应变的影响。定义永久轴向应变比 $R = \varepsilon_{a,VCP}^p / \varepsilon_{a,CCP}^p$, 其中, $\varepsilon_{a,VCP}^p$, $\varepsilon_{a,CCP}^p$ 分别为变围压和恒定围压作用时 (其他试验条件相同) 软黏土的永久轴向应变值。图 6 给出了不同循环动应力

比下, R 随 N 的变化关系, 由于本文主要关注试样的长期变形规律, 故只取循环加载 1000 次后变形较稳定的数值。从图 6 可以看出, 当应力路径斜率 $\eta^{\text{ampl}}=1$ 时, R 约为 1.22, 且随循环次数 N 的变化较小; 当应力路径斜率 $\eta^{\text{ampl}}=2$ 时, R 随着循环次数的增大, 先不断减小, 但最终趋于常数。

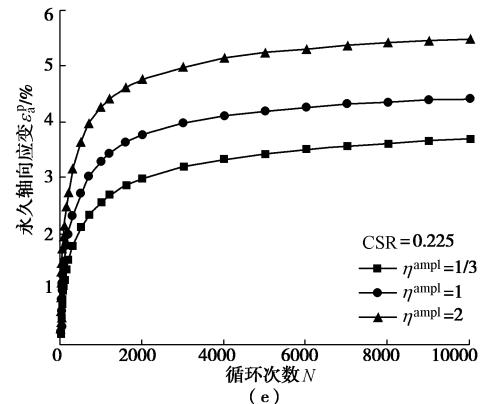
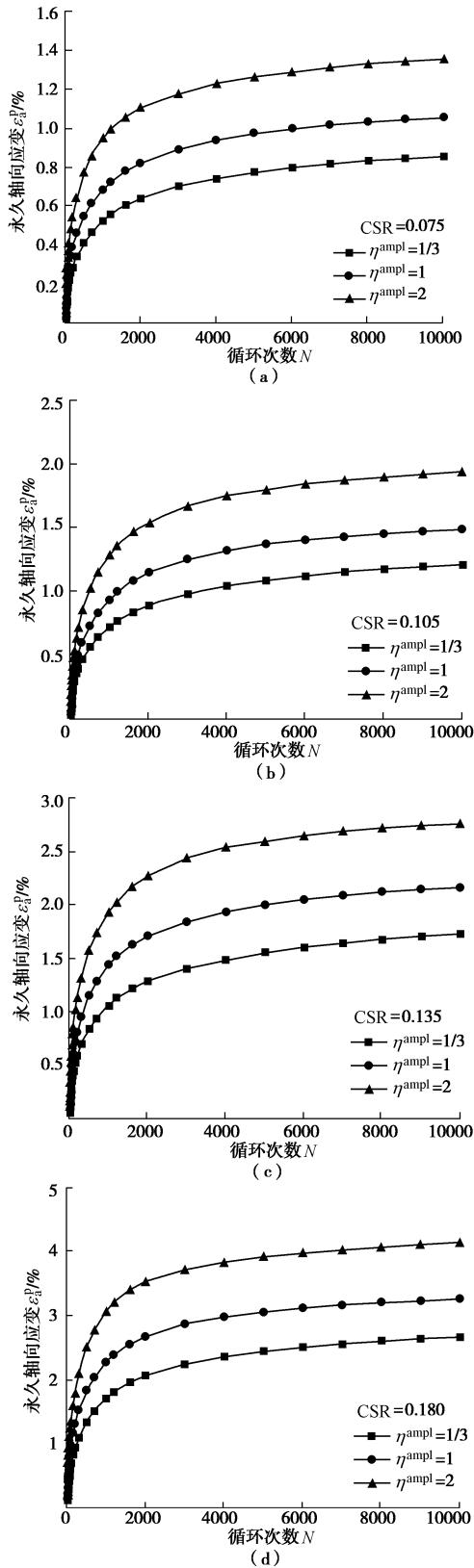


图 5 不同循环应力比和应力路径下永久轴向应变与加载周数的关系

Fig. 5 Relationships between permanent axial strains and number of loading cycles under different CSRs and stress paths

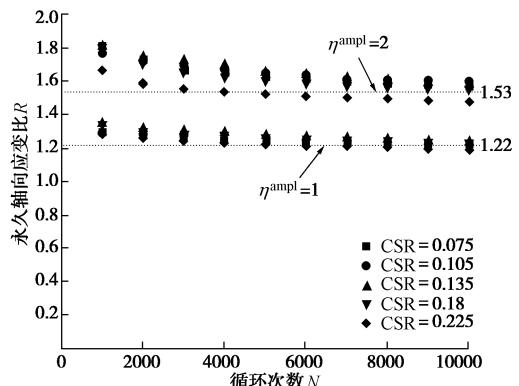


图 6 变围压和恒定围压作用时软黏土永久轴向应变的比值

Fig. 6 Ratios of permanent axial strain between VCP and CCP tests

图 7 为变围压和恒定围压下永久轴向应变比值 R 与应力路径斜率 η^{ampl} 的关系曲线。两者基本呈线性关系。从图中可以看出, 应力路径斜率 η^{ampl} 每增加 1, 即循环围压和循环偏应力的比值 $\sigma_3^{\text{ampl}}/q^{\text{ampl}}$ 每增加 $2/3$, 试样的永久轴向应变将增加 32%。因此可以通过恒定围压下, 偏应力单独循环剪切产生的永久轴向应变来预估循环偏应力和循环围压耦合作用下产生的永久轴向应变, 即

$$\varepsilon_a^p = \varepsilon_{a, \text{CCP}}^p \left(1 + 0.32 \frac{\sigma_3^{\text{ampl}}}{q^{\text{ampl}}} \right) \quad (4)$$

图 8 为围压恒定, 偏应力单独循环剪切作用下, 永久轴向应变随循环加载次数的变化曲线。如图 8 (b) 所示, 在双对数坐标下, 当循环次数 N 超过 1000 后, $\lg \varepsilon_{a, \text{CCP}}^p$ 和 $\lg N$ 近似成直线, 在 Monismith 指数函数基础上, 可以建立如下方程:

$$\lg \varepsilon_{a, \text{CCP}}^p = \lg \varepsilon_{a, 1000}^p + k \lg \left(\frac{N}{1000} \right) \quad (5)$$

式中, $\varepsilon_{a, 1000}^p$ 为第 1000 圈永久轴向应变, k 为图 8 (b)

中 $\lg \varepsilon_{a,CCP}^p$ 和 $\lg N$ 关系曲线的斜率, N 为循环加载次数。

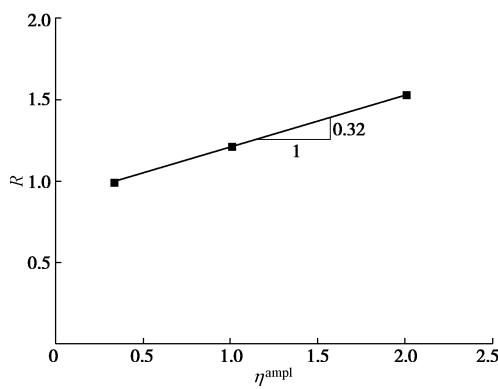


图 7 R 与 η^{ampl} 的关系曲线

Fig. 7 Relationships between R and η^{ampl}

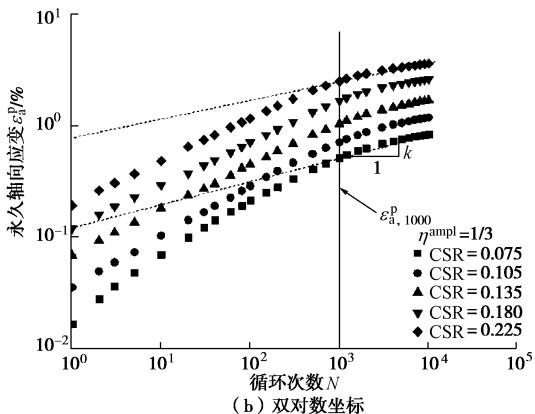
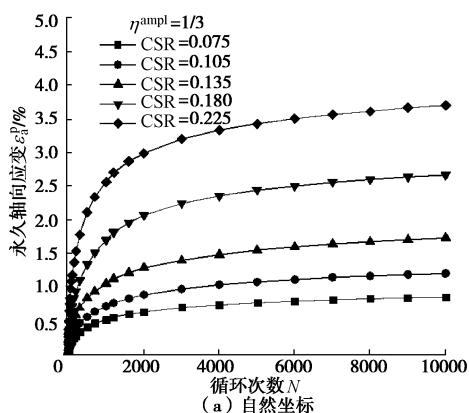


图 8 恒定围压下软黏土永久轴向应变

Fig. 8 Permanent axial strains in CCP tests

为了便于计算可将式(5)改写为如下形式:

$$\varepsilon_{a,CCP}^p = \varepsilon_{a,1000}^p \left(\frac{N}{1000} \right)^k \quad (6)$$

恒定围压下, 永久轴向应变的计算参数如表 2 所示, 从表 2 可以看出, 参数 k 随着循环动应力比变化不大, 可取做常数 0.195 (平均值), 参数 $\varepsilon_{a,1000}^p$ 与 CSR 的关系曲线如图 9 所示, 可表示如下:

$$\varepsilon_{a,1000}^p = 0.241e^{10.69 \times CSR} \quad (7)$$

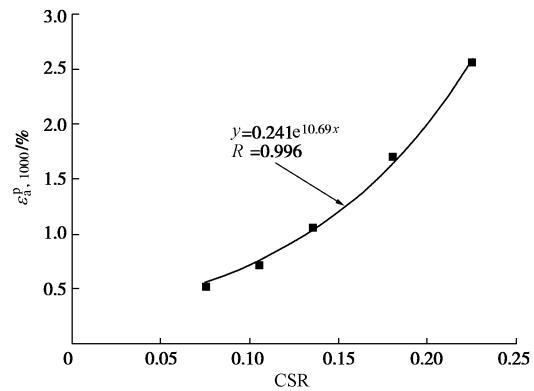


图 9 $\varepsilon_{a,1000}^p$ 与 CSR 的关系曲线

Fig. 9 Relationships between $\varepsilon_{a,1000}^p$ and CSR

表 2 永久轴向应变计算参数

Table 2 Parameters for calculating permanent axial strains

试验编号	$\varepsilon_{a,1000}^p / \%$	k
P01	0.218	0.208
P04	0.294	0.220
P07	0.458	0.207
P10	0.724	0.188
P13	1.190	0.154

将式(7)和参数 k 代入式(6)即可得到恒定围压下, 累积塑性应变的计算公式如下:

$$\varepsilon_{a,CCP}^p = 0.241e^{10.69 \times CSR} \left(\frac{N}{1000} \right)^{0.195} \quad (8)$$

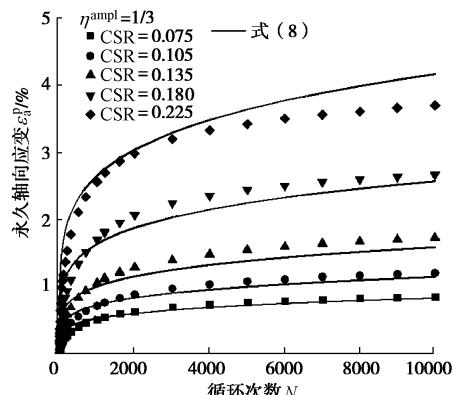


图 10 计算值与实测值对比

Fig. 10 Comparison between predicted results and measurements

将式(8)计算得到的永久轴向应变与实测值的比较如图 10 所示, 二者较为吻合, 说明式(8)可以较好地预测部分排水条件下正常固结饱和软黏土在围压恒定, 偏应力单独循环剪切作用下产生的永久轴向应变。

将式(8)代入式(4)可以进一步得到可以考虑循环偏应力和循环围压耦合效应的软黏土的永久轴向应变公式, 即

$$\varepsilon_a^p = 0.241e^{10.69(q^{\text{ampl}}/2p'_0)} \left(\frac{N}{1000} \right)^{0.195} \left(1 + 0.32 \frac{\sigma_3^{\text{ampl}}}{q^{\text{ampl}}} \right)。 \quad (9)$$

3 结 论

通过部分排水条件下正常固结饱和软黏土循环偏应力和循环围压耦合应力路径循环三轴试验, 对比了恒定围压下, 偏应力单独循环剪切变形和循环偏应力和循环围压耦合剪切变形, 得出以下3点结论。

(1) 部分排水条件下, 当其他试验条件相同, 与恒定围压, 偏应力单独循环剪切作用相比, 循环偏应力和循环围压耦合作用有效地促进了正常固结饱和软黏土永久变形的发展。

(2) 通过对不同循环应力比作用下, 循环加载1000次后的试样永久轴向应变进行归一化, 发现变围压与恒定围压作用产生的永久轴向应变的比值R近似为常数且与循环动应力比和循环次数无关。此外, 永久轴向应变的比值R与应力路径斜率 η^{ampl} 基本呈线性关系。

(3) 在Monismith指数模型的基础上, 通过土体分别在变围压和恒定围压作用下永久轴向应变的比值同应力路径斜率的关系, 建立了部分排水条件下, 可以考虑在循环偏应力和循环围压耦合效应的正常固结饱和软黏土永久轴向应变经验公式。

参考文献:

- [1] SEED H B, MCNEILL R L. Soil deformation in normal compression and repeated loading test[J]. Highway Research Board Bulletin, 1956, **141**: 44 - 53.
- [2] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975, **537**: 1 - 17.
- [3] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(12): 1006 - 1013.
- [4] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(11): 907 - 916.
- [5] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7): 891 - 895. (HUANG Mao-song, LI Jing-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(7): 891 - 895. (in Chinese))
- [6] 张 勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(6): 1542 - 1548. (ZHANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1542 - 1548. (in Chinese))
- [7] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A. State of the art I: resilient response of unbound aggregates[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, **126**(1): 66 - 75.
- [8] 施明雄. 多向振动下砂土动力特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (SHI Ming-xiong. Sand response to multi-way dynamic loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [9] 陈存礼, 谢定义, 高 鹏. 球应力往返作用下饱和砂土变形特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 513 - 520. (CHEN Cun-li, XIE Ding-yi, GAO Peng. Testing study on deformation characteristics of saturated sand under repeated spherical stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 513 - 520. (in Chinese))
- [10] RASCOL E. Cyclic properties of sand: dynamic behavior for seismic applications[D]. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, 2009.
- [11] RONDON H A, WICHTMAN T, TRIANTAFYLLOIDIS T, et al. Comparison of cyclic triaxial behaviour on unbound granular material under constant and variable confining pressure[J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 2009, **135**(7): 467 - 478.
- [12] WICHTMANN T, NIEMUNIS A, TRIANTAFYLLOIDIS T H. On the influence of the polarization and the shape of the strain loop on strain accumulation in sand under high-cyclic loading[J]. Soil Dyn and Earthquake Eng, 2007, **27**(1): 14 - 28.
- [13] SIMONSEN E, ISACSSON U. Soil behavior during freezing and thawing using variable and constant confining pressure triaxial tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**: 863 - 875.
- [14] ZAMAN M, CHEN D, LAGUROS J. Resilient moduli of granular materials[J]. J Transp Eng, 1994, **120**(6): 967 - 988.
- [15] 周 健, 屠洪权, 安原一哉. 动力荷载作用下软黏土的残余变形计算模式[J]. 岩土力学, 1996, **17**(1): 54 - 60. (ZHOU Jian, TU Hong-quan, YASUHARA K. A model for predicting the cyclic behaviour of soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, **17**(1): 54 - 60. (in Chinese))

Mechanics, 1996, **17**(1): 54 – 60. (in Chinese))

[16] 王常晶, 陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1742 – 1747. (WANG Chang-jin, CHEN Yun-min. Study on effect of traffic loading induced static deviator stress on undrained cyclic properties of saturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(11): 1742 – 1747. (in Chinese))

[17] MILLER G A, TEH S Y, LI D, et al. Cyclic shear strength of soft railroad subgrade[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(2): 139 – 147.

[18] SHAHU J T, YUDHBIR, KAMESWARA R N S V. A simple test methodology for soils under transportation routes[J]. Géotechnique, 1999, **49**(5): 639 – 649.

[19] 黄 博, 丁 浩, 陈云敏. 高速列车荷载作用的动三轴模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 195 – 201. (HUANG Bo, DING Hao, CHEN Yun-min. Simulation of high-speed train

load by dynamic tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 195 – 201. (in Chinese))

[20] 谷 川, 王 军, 蔡袁强, 等. 考虑变围压因素的饱和软黏土循环纯压动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(7): 1307 – 1315. (GU Chuan, WANG Jun, CAI Yuan-qiang, et al. Undrained dynamic behaviors of saturated clays under compressive stress paths considering cyclic confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(7): 1307 – 1315. (in Chinese))

[21] 蒋 军, 陈龙珠. 长期循环荷载作用下黏土的一维沉降[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(3): 366 – 369. (JIANG Jun, CHEN Long-zhu. One-dimensional settlement due to long-term cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(3): 366 – 369. (in Chinese))

[22] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behaviour and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(1): 33 – 46.

河海大学岩土工程研究所施建勇教授课题组招聘博士后

项目背景: 依托国家自然科学基金面上和重点项目等课题, 河海大学岩土工程研究所、堤坝与岩土力学教育部重点实验室施建勇教授研究组现公开招聘博士后 1~2 名。拟从事的课题研究包括但不限于:

(1) 垃圾土变形与强度变化理论

开展不同恒定温度下垃圾土的应力路径三轴试验, 建立温度影响垃圾土变形和强度特性模型。根据不同恒定温度下垃圾土应力路径三轴试验成果, 研究垃圾土在复杂应力路径下的屈服特性和破坏特性, 建立考虑温度影响的垃圾土弹塑性本构模型和强度理论。

(2) 衬里界面特性试验与力学模型

由可控恒温大型叠环式界面剪切仪, 开展垃圾填埋场土工膜界面细观变化规律和含有多种土工合成材料多层复合衬里在加载过程中剪切特性研究, 建立考虑温度分布影响的垃圾填埋场多层复合衬里界面剪切变形和强度模型。

岗位要求: ①具有岩土工程、工程力学或与上述学科密切

相关的博士学位; 有垃圾填埋、非饱和土力学相关研究经历的更佳。②具有独立开展科学的研究工作的能力, 在所属研究领域至少发表过 1 篇 SCI 检索论文; ③具有弹塑性力学、非饱和土力学理论基础, 较强的材料本构模型相关试验与计算分析能力; ④具有优秀的职业道德和素养, 诚实可信、责任心强、具有团队合作意识; ⑤具有良好的写作和交流能力, 身体健康。

其他需符合河海大学博士后工作管理办法的基本要求。

岗位待遇: 基本工资及福利待遇依据河海大学博士后工作管理办法执行; 其他待遇与岗位奖励面议。

截止日期: 此招聘长期有效, 招满为止。

应聘方式: 联系人徐冉老师, E-mail: tenderlily@163.com, 电话: 025-83787606。

应聘者请将个人简历以及相关科研能力证明材料(如学历学位证书、论文、科研经历证明等材料复印件)发送至联系人, 邮件主题请注明博士后应聘。我们会在收到材料的 2 周之内与应聘者联系后续事宜。