

# 动荷载后黏性土静力性质研究进展\*

蒋敏敏<sup>1</sup>,蔡正银<sup>1,2</sup>,肖昭然<sup>1</sup>

(1.河南工业大学土木建筑学院,河南郑州450001;2.南京水利科学研究院,江苏南京210024)

摘要:针对国内外关于动荷载后黏性土的静力性质的研究进行了概括和评述。重点讨论了循环荷载后试验研究和循环 荷载后黏性土性质的理论分析。总结了循环荷载后黏性土表现出似超固结性质。基于循环荷载后与卸载后具有相似的超固 结性质的假设,论述了不同研究者建立的循环荷载后强度、模量与似超固结比、孔压等之间的理论关系。

关键词:黏性土;循环荷载后性质;似超固结;强度;模量

中图分类号: TU 432 文献

文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0166-004

# Review of recent advances of post cyclic behavior for cohesive soils

JIANG Min-min<sup>1</sup>, CAI Zheng-yin<sup>1,2</sup>, XIAO Zhao-ran<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** This paper reviews and summarizes the post cyclic behavior of cohesive soil, discusses the experimental study and theoretical study of post cyclic properties of cohesive soil, and analyzes the quasi over consolidation properties after cyclic load. Based on the assumption that post cyclic behavior of cohesive soil is similar with over consolidated soil, this paper summarizes the theoretical relation of post cyclic strength and modulus with quasi over consolidation ratio, and pore pressure.

Key words: cohesive soil; post cyclic behavior; quasi over consolidation; strength; modulus

波浪、地震和交通等动荷载作用后,砂土 会发生孔压上升和液化现象,而对于黏性土,由 于颗粒间存在着粘聚力,使得循环荷载后的力学 性质与砂土有很大的区别。分析评价黏性土在地 震、交通、波浪风暴等动荷载作用后的力学性质 具有重要意义。

本文针对国内外关于黏性土循环荷载作用后 的研究现状进行分析,总结了关于黏性土循环荷 载作用后力学性质的试验研究和理论分析等方面 的研究成果。

## 1 循环荷载后试验研究

针对黏性土循环荷载后静力性质的研究,通

常是在动单剪、静动三轴仪等设备上进行。首先 对固结后的土体施加动荷载,之后再对土体施加 静荷载剪切破坏。

在土体等向固结后,Matsui<sup>11</sup>对其施加相位差 为π/2的竖向和侧向正弦式应力,竖向应力幅值 是侧向应力幅值的2倍,进而保持平均主应力不 变,而偏应力呈正弦式变化。研究了循环荷载对 饱和黏土孔压等静力特性的影响,着重分析了循 环荷载周期、固结应力、循环偏应力幅值、超固 结比等的影响。试验结果表明:循环周期和偏应 力幅值越大产生的孔压越大,超固结比越大产生 的孔压越小,强超固结土甚至会产生负孔压。同 时分析了循环后孔压与偏应力循环幅值、超固结

收稿日期: 2013-01-04

\*基金项目:国家高技术研究发展计划(863)课题(2012AA112510) 作者简介:蒋敏敏(1981-),男,博士,讲师,从事岩土工程专业研究。 比等参量的经验关系。循环荷载会引起黏土不排 水强度和模量发生降低,而循环荷载排水后黏土 强度会得到增强,正常固结黏土在施加循环荷载 排水后具有老黏土的特性,表明循环荷载是引起 黏土超固结的原因。

Hyde<sup>[2]</sup>利用静动三轴试验研究了循环荷载对粉 质黏土循环后有效应力路径、强度等静力特性的影 响。结果表明:对于正常固结和弱超固结土,循环 后孔压增大、有效应力降低,产生似超固结现象; 不排水剪有效应力路径类似于超固结土,剪切破坏 时位于伏斯列夫面,在稳定状态边界面的"干" 面;循环后静强度有明显降低;对于强超固结土 在循环荷载后,孔压和强度的变化均较小;固结 不排水剪和循环后不排水剪破坏时孔压系数A<sub>4</sub>均随 着归一化平均有效主应力的增大而增大。

Hyde<sup>[3]</sup>对不等向固结的粉土在循环荷载后的 压缩、静强度和刚度等特性进行了研究。表明: 不等向应力相差越大,循环后再固结体变和轴向 变形越小;双向循环荷载条件下土体的破坏形式 主要表现为应变幅值逐渐增大而破坏,单向循环 荷载条件下土体破坏形式主要表现为产生较大 的轴向塑性变形;循环排水后的强度随荷载不等 向的增强而增大;等压固结土体在双向循环荷载 下,会引起土体结构、模量、强度的弱化。

Wijewickreme<sup>[4]</sup>通过动单剪试验,对Fraser河 粉土在循环荷载后的再固结特性进行了研究, 表明:再压缩体积应变随着循环荷载中最大超 静孔压和最大循环剪应变的增大而增大,循环 荷载后固结体变与最大超静孔压比值成相关关 系,当最大超静孔压比值大于0.8时,体积应变达 1.5%~5%。

Soltani-Jigheh<sup>[5]</sup>对黏土-砂混合土在循环荷载 后的力学性质进行了研究,表明:循环荷载后不 排水强度和变形模量发生弱化,强度和模量的弱 化受砂含量、循环应变幅值和固结应力等因素的 影响。

#### 2 循环荷载后性质理论分析

基于应力控制动单剪试验, Yasuhara<sup>[6]</sup>分析

了循环后正常固结土的固结压缩特性。研究表明 循环后再固结体积应变主要决定于循环后孔压大 小。在孔隙比-对数有效应力(e-lgσ')平面内,不 排水循环荷载的作用过程中,孔隙比不变,而 孔压逐渐增大、有效应力逐渐降低,如图1中AC 线,正常固结土自B点沿BC线卸荷,形成超固结 土。认为循环荷载作用(AC路径)后和卸载(BC路 径)后具有相同的性质。循环后的再压缩体积应变 表示为:

$$\varepsilon_{vr} = \frac{\alpha C_r}{1 + e_c} 1g\left(\frac{1}{1 - \Delta u/\sigma_{vc}'}\right) \tag{1}$$

式中: $e_c$ 为再压缩排水前的孔隙比; $C_r$ 为再压缩 指数; $\Delta u$ 为循环荷载后的孔压; $\alpha$ 为试验参数;  $C_r/(1+e_c)与应力比\sigma'_v c/\sigma'_v$ 成幂函数关系。



#### 图1 正常固结土循环荷载后再压缩性质

通过对重塑和原状黏土的静动三轴试验, Matsui<sup>[7-8]</sup>研究了循环荷载后黏土的应力应变特性 和强度的变化。假定由循环荷载引起的似超固结 土与卸载引起的超固结土性质相同,即不同应力 路径在C点具有相同的超固结性质,如图1所示。 由循环荷载引起的似超固结比OCR<sub>eq</sub>为:

$$1gOCR_{eq} = \left(1 - \frac{C_s}{C_c}\right)1gOCR \tag{2}$$

式中: *C*<sub>c</sub>和*C*<sub>s</sub>分别为压缩指数和回弹指数。循环 荷载后不排水剪孔压、强度发生降低,循环应力 幅值越大土体强度降低越显著,根据似超固结假 设,提出了循环不排水后黏土的强度弱化模型:

$$\frac{\tau_f}{\tau_{f_0}} = \frac{1}{\left[\alpha_\tau + (1 - \alpha_\tau)OCR_{eq}\right]}$$
(3)

和割线模量的弱化模型:

$$\frac{E_{50}}{(E_{50})_0} = [OCR_{eq}]^{\alpha_E}$$
(4)

吴明战<sup>191</sup>在研究上海淤泥质黏土的基础上, 将等效超固结比用于分析循环荷载后的强度和模 量退化性质,得出了与Matsui相似的强度、模量与 似超固结比关系的结论,并认为循环荷载后应力 应变仍成双曲线的关系。

通过对重塑、原状饱和粉质黏土的试验,王 淑云<sup>[10-11]</sup>研究了不排水强度与累积孔压、动应变 等参量的关系,发现累积孔压、动应变相对较小 时,原状土强度弱化较小,相同条件下重塑土强 度的弱化比原状土显著,根据波浪等动荷载作用 下土体中孔压上升、有效应力降低,形成拟超固 结的理论,提出土体不排水强度衰减的关系:

$$\frac{S_{u,c}}{S_{u,c}} = \left(1 - \frac{u_o}{u_{f,s}}\right)^m \tag{5}$$

式中: $S_{u,c}$ 为动载后静强度; $S_{u,s}$ 为静强度; $u_0$ 为循环后累积孔压; $u_{f,s}$ 为剪切破坏时的孔压;m为参数。

Yasuhara<sup>[12-15]</sup>通动单剪、动三轴等试验,系统 研究了黏土、粉土等土体在循环荷载后的静力性 质。认为尽管卸荷和循环荷载的应力路径不同, 循环荷载引起的似超固结土和卸载引起的超固结 土具有相同的强度、模量等性质,图2中DCB为由 循环荷载引起的似超固结条件,*AB*为由卸载引起 的超固结条件,建立了循环后不排水强度的公式:

$$\frac{S_{u,cy}}{S_{u,NC}} = \left(\frac{1}{1 - \Delta u/p_i'}\right)^{\frac{\Lambda_0}{1 - C_s/C_c} - 1} \tag{6}$$

式中: *p<sub>i</sub>*'为平均有效固结应力; *A*<sub>0</sub>为材料参数。 基于似超固结假定、临界状态理论等,分析了正 常固结、弱超固结等土体割线模量的计算公式:



并提出刚度指数用于计算循环荷载后地基土体的 刚度:

$$\frac{I_{r,cy}}{I_{r,NCi}} = \frac{1 - \frac{C}{\Lambda} \ln OCR_q}{OCR_q^{\Lambda_0/\Lambda}}$$
(8)

式中: *C*为参数; *A*=1-*C<sub>s</sub>/C<sub>c</sub>。同时对低塑性粉土 进行了系统研究,得出了与循环荷载后黏土相似 的性质。* 

## 3 结语

1)试验研究结果方面。循环荷载后土体中 孔压上升,有效应力降低,表现出似超固结的性 质,孔压和有效应力路径均表现出与超固结土类 似的性质;循环荷载不排水后静有效应力路径位于 伏斯列夫面,在稳定状态边界面的"干"面;循环 后不排水剪孔压系数随着归一化平均有效应力成线 性增大关系;循环不排水后土体强度和模量发生弱 化,而循环荷载排水后土体强度得到增强;循环后 排水体变与循环最大超静孔压相关;双向荷载作用 下应变幅值增大而破坏,而单向循环荷载以轴向变 形增大而破坏,双向循环荷载后土体结构发生弱 化,而单向循环荷载排水后土体静强度随着应力不 等向程度增大而增强;对于黏土-砂混合土,砂含 量也会对循环后强度、模量等特性产生影响。

2)理论研究方面。基于土体在循环荷载后与 卸载后具有相似性质的假设,似超固结比与卸荷 引起的超固结比之间存在双对数关系;循环荷载 后再压缩体变与再压缩指数、孔隙比和循环后孔 压等有关,循环后再压缩体变与循环后孔压之间 存在着对数关系;强度比值、模量比值与似超固 结比、孔压成指数关系或对数关系,并提出了循 环后地基刚度的估算。

## 参考文献:

- Matsui T, Ohara H, Ito T. Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division: ASCE, 1980, 106(GT10): 1 101–1 120.
- [2] Hyde A F L, Ward S J. The effect of cyclic loading on the undrained shear strength of a silty clay [J]. Marine Geotechnology, 1986, 6(3): 299-314.
- [3] Hyde A F L, Higuchi T, Yasuhara K. Postcyclic recompression, stiffness, and consolidated cyclic strength of silt [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering:

· 169 ·

ASCE, 2007, 133(4): 416-423.

- [4] Dharma Wijewickreme, Maria V Sanin. Postcyclic reconsolidation strains in low-plastic fraser river silt due to dissipation of excess pore-water pressures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: ASCE, 2010, 136(10): 1 347–1 357.
- [5] Hossein Soltani–Jigheh, Abbas Soroush. Post–cyclic behavior of compacted clay–sand mixture [J]. International Journal of Civil Engineerng, 2006, 4(3): 226–243.
- [6] Yasuhara K, Andersen K H. Recompression of normally consolidated clay after cyclic loading [J]. Soils and Foundations, 1991, 31(1): 83–94.
- [7] Matsui T, Bahr M A, Abe N. Estimation of shear characteristics degradation and stress-strain relationship of saturated clays after cyclic loading [J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 161–172.
- [8] Matsui T, Abe N. Behavior of clay on cyclic-stress-strain history[C]// Stockholm: Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1981: 261–264.

- [9] 吴明战,周洪波,陈竹昌.循环加载后饱和软黏土退化性 状的试验研究[J].同济大学学报,1998,26(3): 274–278.
- [10] 王淑云, 楼志刚. 原状和重塑海洋黏土经历动载后的静 强度衰减[J]. 岩土力学, 2000,21(1): 20-27.
- [11] 王淑云, 鲁晓兵, 赵京, 等. 粉质黏土周期荷载后的不排 水强度衰化特性[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2 991-2 995.
- [12] Yasuhara K, Hirao K, Hyde A F L. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 100–116.
- [13] Yasuhara K. Postcyclic undrained strength for cohesive soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering: ASCE, 1994, 120(11): 1 961-1 979.
- [14] Yasuhara K, Hyde A F L. Method for estimating postcyclic undrained secant modulus of clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: ASCE, 1997, 123(3): 204–211.
- [15] Yasuhara K, Murakami S, Song B W. Postcyclic degradation of strength and stiffness for low plasticity silt[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: ASCE, 2003, 129(8): 756–769.

(本文编辑 武亚庆)

(上转第165页)

# 3 结论

1)遮帘桩的存在使桩间土产生土拱效应,桩
间土压力向两侧遮帘桩上传递,大大减小了前排
桩承受的土压力。

2)土体粘聚力和内摩擦角对遮帘桩与土的 相互作用影响较大,随着两者数值的增加,遮帘 桩承担荷载比有显著增加。当粘聚力达到一定值 时,内摩擦角对桩土相互作用影响较小。

3)随着遮帘桩间距逐渐增加,土拱效应逐渐 降低,遮帘桩承担荷载也随之降低,应该结合码头 总造价和码头稳定性来设计适当的间距。随着遮帘 桩与前板桩的距离加大,遮帘桩荷载承担比有所增 加,但是码头卸荷平台尺寸也因此增加,反而前板 桩的承担荷载增加,影响码头的整体稳定性。

4)土的弹性模量、泊松比、桩土摩擦系数对 桩土相互作用影响较小,可作次要因素考虑。 模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1 182-1 187.

- [2] 蔡正银, 徐光明, 曾友金, 等. 遮帘式板桩码头土压力离 心模型试验研究[J]. 港工技术, 2005(S1): 51-55.
- [3] 刘永绣, 吴荔丹. 遮帘式板桩码头计算理论和方法[J]. 港工技术, 2005(S1): 33-36.
- [4] 李元音, 刘永绣. 遮帘式板桩码头结构的空间有限元法 分析[J]. 港工技术, 2005(S1): 37-40.
- [5] 蒋良潍,黄润秋,蒋忠信. 黏性土桩间土拱效应计算与 桩间距分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 445-450.
- [6] 李邵军,陈静,练操.边坡桩-土相互作用的土拱力学模型与桩间距问题[J].岩土力学,2010,31(5):1352-1358.
- [7] 赵明华, 廖彬彬, 刘思思. 基于拱效应的边坡抗滑桩桩 间距计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1 211-1 216.
- [8] 张建勋,陈福全,简洪钰.被动桩中土拱效应问题的数 值分析[J].岩土力学,2004,25(2):174-178,184.
- [9] 陈福全, 侯永峰, 刘毓氚. 考虑桩土侧移的被动桩中 土拱效应数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1 333-1 337.

## 参考文献:

[1] 李景林,蔡正银,徐光明,等. 遮帘式板桩码头结构离心