

循环荷载作用下土的动力特性及隧道工后沉降分析

喻孟初¹, 任青¹, 马荣全²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200135)

摘要: 选取重塑砾质黏土作为试验土样, 采用室内动三轴试验系统研究循环荷载作用下土体的模量弱化规律, 并考虑多重因素下隧道工后沉降公式拟合。实验表明: 累积应变与累积孔压随围压与动应力比的增大而增大, 并在振动 10000 次达到稳定趋势, 而模量模量弱化幅值呈现相反的规律。在不同激振频率下累积孔压, 累积应变随频率增大而减少, 模量的弱化幅值随频率增大而减小。在前人的基础上进一步考虑了激振频率对累积应变, 和累计孔压公式进行拟合得到相关参数。研究成果对砾质黏性土的动力特性以及隧道工后沉降预测提供了有价值的参考。

关键词: 砾质黏土; 动三轴实验; 土体动力特性; 循环荷载; 隧道沉降

中图分类号: TV16; TU41 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2016)04-0220-05

Dynamic characteristics of soil under role of cycle load and settlement analysis after tunnel construction

YU Mengchu¹, REN Qing¹, MA Rongquan²

(1. School of Environment & Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd. Shanghai 200135, China)

Abstract: The paper selected remodeling gravelly clay soil as test sample, and used the indoor dynamic triaxial testing system to research the modulus regular of soil under cyclic load weakening, and considered the fit of settlement formula after tunnel construction under multiple factors. Experiment showed that accumulated strain and cumulative pore pressure increases with the increase of confining pressure and dynamic stress ratio and reaches a steady after vibrating 10,000 times, while the modulus weakening amplitude shows the opposite rule. If the pore pressure is cumulated at different excitation frequencies, the cumulative strain decreases with the increase of frequency, the weakening amplitude of modulus decreases with the increase of frequency. On the basis of previous research, the paper further considered the effect of excitation frequency on accumulative strain, and fitted the cumulative pore pressure formula to get relative parameter. The result can provide a valuable reference for the prediction of dynamic characteristics of soil frail shield and the settlement of gravel cohesive soil after tunnel construction.

Key words: remodeling gravelly clay soil; dynamic triaxial test; dynamic characteristics of soil; cyclic load; tunnel settlement

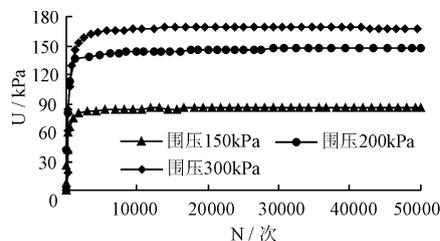
1 研究背景

随着交通工具的高速发展, 地铁作为一种新的交通工具, 对缓解城市的交通压力, 促进交通便利, 发挥着日益重要的作用。地铁在施工和运营期都会对周边的环境产生一定的影响, 例如地铁在施工和运营期都产生沉降, 地铁的沉降对地铁本身以及周围建筑物都会产生很大的影响, 如果沉降得不到控

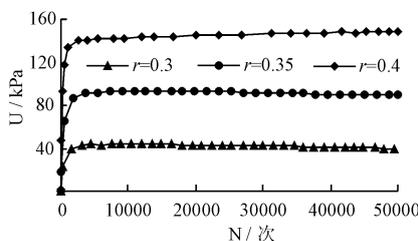
制, 将会产生严重的后果。地铁隧道的不均匀沉降过大会影响地铁的耐久性, 安全性、以及正常使用性能。地铁隧道的工后沉降会对地铁的施工造成很大困难, 隧道的沉降的计算与预测对于地铁和轨道的安全性和耐久性具有十分重要的指导意义。地铁的不均匀沉降主要有施工沉降和长期沉降两部分。地铁动作为一种重要的城市交通工具其主要承受交通荷载作用, 交通荷载作用下隧道土体的沉降是整个

地铁的最主要沉降。在理论和实践中总结出计算由交通荷载作用所产生土体的塑性沉降方法主要有以下两种:其一是复杂弹塑性的力分析,该方法在计算数十万次上百万次的循环次数时计算十分繁琐复杂^[1]。二是分层总和法与拟合经验公式相结合的一种方法,该方法将交通荷载作用下引起的长期沉降划分为两部分,一部分是长期的循环荷载作用下孔隙水消散引起的固结沉降,一部分是不排水状态下长期循环荷载的作用下土体的累积塑性变形引起的不可恢复沉降^[2-3]。

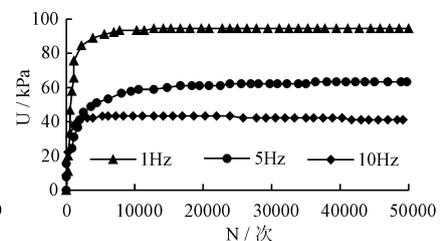
显示模型分层总和法与拟合经验公式的相结合的方法主要考虑了循环荷载作用下土体长期累积孔压和累积塑性应变及其主要影响因素。如土的初始固结状态、侧向压缩系数、动偏应力水平、初始应力状态、振动频率偏应力水平,以及循环次数等的有关经验拟合曲线。为了预测循环荷载作用下土体的不可恢复沉降,国内外学者进行了大量的实验与理论研究。其中 Monismith^[4]提出的简单指数模型,该模型由于参数较少、计算简单被工程实际所接受。同时该模型对不同土层的参数取值范围过大不够精确,造成较大的离散性。此外该模型在计算上百万的循环次数时计算误差较大计算结果不够精确。此后, Li 等^[5]以及 Chai 等^[6]通过进一步考虑初动偏应力、始静偏应力的影响的基础上,将指数模型作了进一步的修正。解决了 Monismith 指数模型中参数取值范围过大不够精确的问题。第二种是定义循环破坏的概念上循环累积变形,如 Sugiyama 等^[7]、周健等^[8],其模型引入了破坏标准时的循环应力比,总结实验与工程实际建立了循环荷载作用下累积孔压模型。



(a) 不同围压



(b) 不同动应力比



(c) 不同频率

图1 饱和砾质黏性土累计孔压与循环次数的关系

图1(a)表示不同围压的压下载累积孔压与循环次数关系曲线。从图中可以看出,重塑饱和砾质黏性土累积孔压与循环次数呈现出非线性的递增规律,循环次数达到10 000次时累积孔压增长基本达到稳定趋势。相同循环加载次数下不同围压下,围压越

2 试验土样及试验过程

2.1 土层性能及试验方案

土样为砾质黏性土,天然含水量 $w = 26.5\%$,质量密度 $\rho = 1.99 \text{ g/cm}^3$,天然孔隙比 $e = 0.615$,黏聚力 $c = 20 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 21.0^\circ$,压缩系数 $a = 0.621 \text{ MPa}^{-1}$,渗透系数 $K = 0.30 \text{ m/d}$,液限含水量 $w_l = 36\%$,塑限含水量 $w_p = 27\%$ 。

表1 循环三轴试验方案

方案	频率/Hz	σ_{3c} /kPa	r
1	1	150	0.4
2	1	200	0.4
3	1	300	0.4
4	1	200	0.3
5	1	200	0.35
6	1	200	0.4
7	1	200	0.4
8	5	200	0.4
9	10	200	0.4

注:定义动应力比 $r = q_d/\sigma_{3c}$, q_d 为动应力幅值。

2.2 试验结果

为了研究饱和砾质黏性土动力循环弱化特性,本文对累计轴向应变 ε ,累计孔压 U ,以及割线动变形刚度模量 E_{sd} 进行了分析。

$$E_{sd} = \frac{q_{cyc}}{\varepsilon_{dmax}} \quad (1)$$

式中: q_{cyc} 为循环偏应力幅值, kPa; ε_{dmax} 为一个循环振次下土体累积塑性应变 ε_{acc} 和循环应变幅值 ε_{amp} 之和,即每个循环振次下的最大动应变值。饱和砾质黏性土循环三轴试验累积孔压如图1所示。

大累积孔压也越大,同样随着围压的增大累积孔压的幅值也会逐渐减小。

图1(b)为不同动应力比下的累积孔压与循环次数关系曲线。从图中可以得出不同动应力比与不同围压下累积孔压呈现相类似的变化规律。并且当

循环次数在 1 000 次以内时,累积应变增长幅度十分显著,在最后会趋于稳定。

图 1(c)为不频率压下的累积孔压与循环次数的关系曲线.从图中可以看出来不同激振频率下累积孔压呈现出与前面相反的规律,累积孔压随振动频率的

增大而减小,在同一个激振频率下累积孔压随循环次数增加而增加。

比较图 1(a)、(b)、(c)可以得出动应力比对累积孔压的增长最为显著,而围压与激振频率的影响相对小。饱和软黏土循环三轴试验累积应变如图 2 所示。

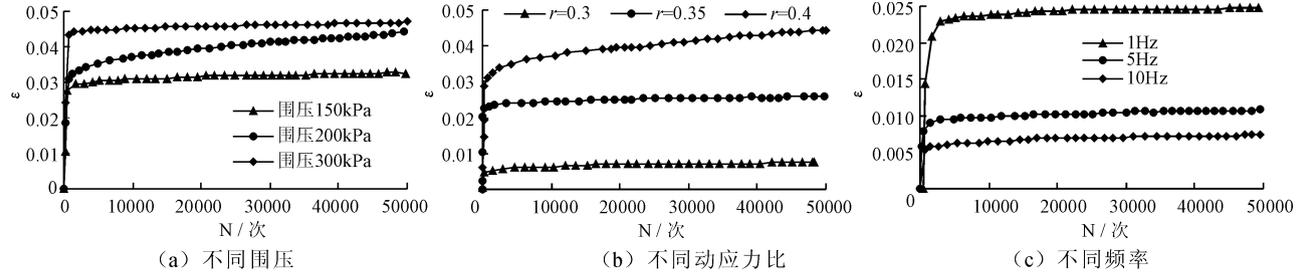


图 2 饱和砾质黏性土累积应变与循环次数的关系

图 2(a)为不同围压下的累积应变与循环次数的变化曲线.从图中可以看出,重塑饱和砾质黏性土累积应变与循环次数呈现出非线性的递增规律,围压的增大对其达到稳定趋势时的加载次数存在一定的影响.相同循环加载次数下不同围压,围压越大累积孔压也越大,同样随着围压的增大累积孔压的幅值也会逐渐减小。

图 2(b)为不同动应力比下的累积塑性应变与循环次数关系曲线.从图中可以看出累积塑性应变与动应力比的规律同围压的规律基本一致,在 $r =$

0.4 时累积应变更难趋向稳定,说明土体可能达到破坏丧失承载力。

图 2(c)为不同振动频率的累积应变与循环次数的关系曲线.从图中可以看出当激振频率不同,累积应变会随着激振频率的增大而显著减小。

综合比较 2(a)、(b)、(c)可以得出动应力比与围压对累积应变的增长最为显著,在最后趋于稳定的情况下,围压与动应力比对累积应变的影响大约是激振频率的两倍。饱和砾质黏土循环三轴试验饱和砾质黏土的模量弱化曲线如图 3 所示。

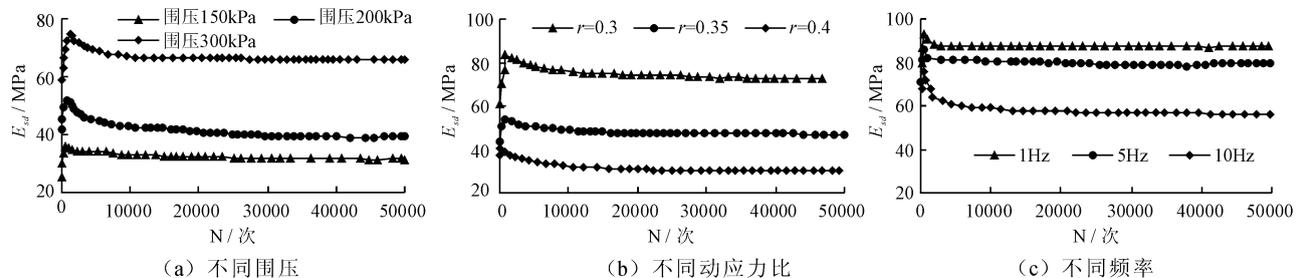


图 3 饱和砾质黏土模量与循环次数的关系

图 3(a)为不同围压下的饱和砾质黏土模量与循环次数的关系曲线.从图中看出围压增长的情况下土体的模量会有显著地变化,同一个围压下模量整体上呈现出随循环次数的增长而减小的趋势,起减小的幅度较小。

图 3(b)为不同动应力比下的饱和砾质黏土割线模量与循环次数的变化曲线.从图中可以看出动应变越大模量的衰减幅值就越大.模量的弱化最终也会达到一个稳定趋势。

图 3(c)为不同激振频率下土体割线模量与循环次数的关系曲线.不同的激振频率模量弱化的表

现形式与围压和动应力比不同,频率越大模量弱化的幅值越小,表明同样的循环次数振动下,频率越大土体吸收的能量越少.激振频率越大土体的初始模量越大。

3 循环荷载作用下土体的累积塑性应变引起沉降的计算方法

刘明等^[9-10]、李进军^[11]等、黄茂松等^[12]、姚明^[13]通过大量的室内试验结果统计,结合临界状态理论,提出了第一次塑性累积应变与相对片对偏应力水平的拟合经验公式,他们考虑了土体的侧向压

缩系数、土体应力历史等因素的影响。本文在此基础上进一步考虑不同围压、动应力比、激振频率等因素下对砾质黏土的进行拟合。

循环荷载作用下累积塑性应变计算拟合经验公式可表示为:

$$\varepsilon_1 = aD^{*m} \quad (2)$$

式中: a 和 m 为试验参数; D^* 为相对偏应力水平; ε_1 为第一次循环应变。

$$D^* = (D_p - D_s) / (D_{max} - D_s) \quad (3)$$

式中: D_s 为静偏应力水平; D_p 为峰值偏应力水平; D_{max} 为可能达到的最大偏应力水平; $D_{max} = 1$ 。

表 2 相对偏应力水平表

$\sigma_{3c} /$ kPa	$q_s /$ kPa	$q_{ult} /$ kPa	$\eta_d /$ kPa	激振频 率/Hz	D^*
150	64.29	153.0506	0.4	1	0.766105
200	85.72	204.0675	0.4	1	0.723294
300	128.58	306.1013	0.4	1	0.732307
200	85.72	204.0675	0.3	1	0.603308
200	85.72	204.0675	0.35	1	0.734278
200	85.72	204.0675	0.4	1	0.824690
200	85.72	204.0675	0.4	1	0.760472
200	85.72	204.0675	0.4	5	0.760472
200	85.72	204.0675	0.4	10	0.760472

图 4 为饱和砾质黏性土相对偏应力水平和第一次循环塑性应变关系曲线。考虑激振频率、不同围压等因素,可以较好的拟合得到指数型形式的拟合公式,其参数为 a 和 m 拟合得到 $a = 0.00836$; $m = 2.8822$ 。循环荷载作用下累积孔压计算模型与累积应变类似,累积孔压与循环次数之间的关系的关系表示如下所示:

$$\frac{u}{p_c} = aN^\beta \quad (4)$$

$$\alpha = \zeta D^{*n} \quad (5)$$

式中: α 为第一次循环应变; D^* 为相对偏应力水平。

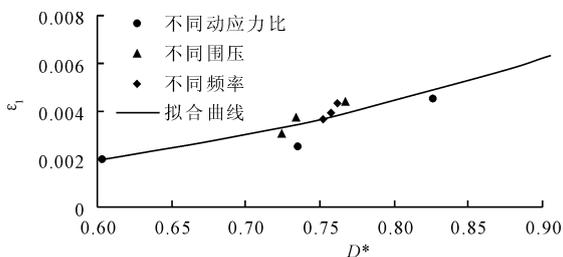


图 4 相对偏应力水平与第一次累积应变

图 5 为饱和砾质黏性土相对偏应力水平和第一次循环孔压关系曲线。在振动频率、不同围压、动应力比等因素下用指数模型进行拟合得到 ξ 和 n 。拟合得到:

$$\xi = 4.168; n = 5.593$$

从图 4、图 5 中可以看出激振频率的试验点位于拟合曲线上能增大拟合的参数值,而不同的围压试验点位于拟合曲线以下,不同的动应力比能够比较好的吻合拟合曲线。

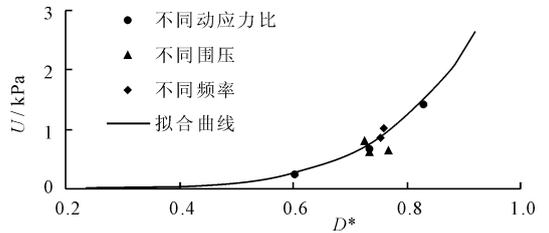


图 5 相对偏应力水平与第一次累积孔压

4 结 论

通过室内模型试验,研究交通荷载作用下土体的动力特性,主要考虑了 3 种不同的影响因素,包括不同的动应力比,不同围压下,以及不同激振频率。得到不同因素影响下土体的累积塑性应变,累积孔压,模量弱化的变化规律。并考虑以上 3 种因素对应变和孔压公式进行拟合,通过数据结果分析得到以下结论:

(1) 不同围压下,不同动应力比的累积孔压与累积塑性应变呈现出相似的规律。在相同循环次数情况下围压和动应力比越大重塑饱和砾质黏土的累积孔压与累积应变越大。循环次数越大累积孔压与塑性应变也会长大,前 1 000 次的数值增长极为显著,最终累积孔压与塑性应变的增长趋势逐渐变缓并最终达到稳定。

(2) 不同的激振频率下重塑饱和砾质黏土的累积孔压与累积应变呈现出与上面不同的规律,随着激振次数的增加累积孔压与累积应变呈现出减少的规律。

(3) 模量弱化幅值会呈现出相反的规律,围压与动应力比越大模量弱化幅值越大,激振频率越大模量的弱化程度越小。

(4) 本文在前人基础上进一步考虑不同围压,动应力比,激振频率等因素下对砾质黏土第一次循环塑性应变以及第一次累积孔压与相对偏应力水平之间关系拟合的影响。激振频率的试验点位于拟合

曲线上能增大拟合的参数值,而不同的围压试验点位于拟合曲线以下,不同的动应力比能够比较好的吻合拟合曲线。通过考虑3种因素同样能较好的拟合曲线,能更进一步符合土层的实际应力状态。

参考文献:

- [1] 李进军. 交通荷载作用下饱和软黏土长期沉降分析[D]. 上海:同济大学,2005.
- [2] 魏星,黄茂松. 交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J]. 岩土力学,2009,30(11):3342-3346.
- [3] 郭世博. 交通移动荷载下软土地基变形特性试验研究及长期沉降预测[D]. 上海:同济大学.
- [4] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, Transportation Research Board, Washington D C, 1975.
- [5] Li D, Selig E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering. 1996,122(12):1006-1013.
- [6] Chai J C, Miura N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechni-

cal and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907-916.

- [7] Sugiyama M, Hyodo M, Yamamoto Y. Undrained cyclic shear behavior of normally consolidated clay subjected to initial static shear stress[J]. Soils and Foundations, 1994, 34(4):1-11.
- [8] 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.
- [9] 刘明,黄茂松,柳艳华. 车振荷载引起的软土越江隧道长期沉降[J]. 岩土工程学报,2009,31(11):1703-1709.
- [10] 刘明. 饱和软黏土动力本构模型研究与地铁隧道长期振陷分析[D]. 上海:同济大学,2006.
- [11] 李进军,黄茂松,王育德. 交通荷载作用下软土路基累积塑性变形分析方法[J]. 中国公路学报,2006,19(1):1-5.
- [12] 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.
- [13] 姚兆明. 饱和软土循环累积变形与交通荷载引起的长期沉降[D]. 上海:同济大学,2011.

(上接第219页)

- [3] Ghandeharion A, Indraratna B, Rujikiatkamjirn C. Analysis of soil disturbance associated with mandrel-driven prefabricated vertical drains using an elliptical cavity expansion theory[J]. International Journal of Geomechanics, 2010, 10(2):53-64.
- [4] 周健,邓益兵,叶建忠,等. 砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报,2009,31(4):501-507.
- [5] 韩文君,刘松玉,章定文. 荷载作用下土体气压劈裂效果试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(7):1951-1956.
- [6] Guo Y, Hu J P, Zhang LY. Finite-element analysis of multi-body contacts for pile driving using a hydraulic pile hammer[J]. Journal of mechanical engineering science, 2011,225(5):1153-1161.
- [7] Zhang M, Tao Mingjiang. A parametric study on factors affecting ground vibrations during pile driving through finite element

simulations[C]//The conference of geotechnical risk assessment and management,2011,138(224):931-938.

- [8] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss, Geotechnique,1988,38(3):301-320.
- [9] 李月健,陈云敏. 粘性土地基中群桩施工产生土体内的位移场[J]. 建筑结构学报,2001,22(3):88-91.
- [10] 李月健,陈云敏. 粘性土中打桩引起的应力场及其对土体强度的影响[J]. 铁道学报,2001,23(4):88-93.
- [11] 朱宁,施建勇,陈海丰. 一种半无限土体中圆孔扩张的分析方法[J]. 岩土力学,2006,27(2):257-260+267.
- [12] 罗战友,夏建中,龚晓南,等. 压桩过程中静压桩挤土位移的动态模拟和实测对比研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1709-1714.
- [13] 李镜培,李雨浓,张述涛. 成层地基中静压单桩挤土效应试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(6):824-829.