

循环荷载作用下软粘土重塑样的累积变形特性

王洪云¹, 迟浩然², 侯伟¹, 黄贝贝², 薛志超¹, 蒋红光^{2*}

¹山东高速集团有限公司, 山东 济南

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

Email: *hongguang_jiang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2020年9月1日; 录用日期: 2020年9月16日; 发布日期: 2020年9月23日

摘要

针对循环荷载下软粘土地基的长期累积变形问题, 通过室内动三轴试验对不同固结压力下土体的累积变形特性进行了研究, 并根据动三轴试验结果, 对已有累积应变计算模型进行了改进。结果表明: 在固结压力相同的情况下, 动应力比越大, 土体的累积应变发展越迅速; 在动应力比相近的情况下, 不同固结压力累积应变曲线较为接近; 改进后的计算模型可以明确地反映土体类型和物理状态、土的应力状态、循环振次对累积应变的影响, 合理地计算循环荷载作用下的累积变形。

关键词

循环荷载, 软粘土, 累积变形, 动三轴试验, 指数模型

Cumulative Deformation Characteristics of Soft Clay Remolded Samples under Cyclic Loading

Hongyun Wang¹, Haoran Chi², Wei Hou¹, Beibei Huang², Zhichao Xue¹, Hongguang Jiang^{2*}

¹Shandong Hi-Speed Group, Jinan Shandong

²School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Email: *hongguang_jiang@sdu.edu.cn

Received: Sep. 1st, 2020; accepted: Sep. 16th, 2020; published: Sep. 23rd, 2020

*通讯作者。

文章引用: 王洪云, 迟浩然, 侯伟, 黄贝贝, 薛志超, 蒋红光. 循环荷载作用下软粘土重塑样的累积变形特性[J]. 土木工程, 2020, 9(9): 942-949. DOI: 10.12677/hjce.2020.99098

Abstract

Aimed to predict the cumulative deformation of soft clay foundation under cyclic traffic load, the cumulative deformation characteristics of soil under different consolidation pressures were studied by dynamic triaxial tests. Existing cumulative strain calculation model was improved according to the test results. The results show that under the same consolidation pressure, the greater the dynamic stress ratio is, the more rapid the accumulation strain development is. When the dynamic stress ratio is similar, the cumulative strain curves of different consolidation pressures are close. The improved model can clearly reflect the influence of soil type and physical state, soil stress state and cyclic vibration times on cumulative strain, and reasonably calculate the cumulative deformation under cyclic load.

Keywords

Cyclic Load, Soft Clay, Accumulated Deformation, Dynamic Triaxial Test, Exponential Model

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国东南沿海一带分布着广泛的软弱土层,随着城市交通的发展,大量的高速公路、城市地铁以及高速铁路修建在这些软弱土层之上。交通荷载所引起地基累积变形越来越受到人们的关注。尤其是对于时速高达 300~350 km/h 的高速铁路,对线路的平顺性提出了十分严格的控制标准,要求工后沉降不得超过 15 mm [1]。然而,交通荷载引起的路基沉降在国内外均有观测实例。日本 Ariake 粘土路基 6 年内沉降达到 130~200 cm [2]; Saga 机场道路由于交通荷载作用产生的附加沉降达到了 15 cm [3]; 上海地铁一号线建成未通车的 2 年多时间内基本没有产生沉降,但通车后 8 个月内沉降竟达到 30~60 mm, 4 年内基本达到了 140 mm [4]。因而,合理预测循环荷载作用下地基土体的长期累积变形是如今亟需研究和解决的问题。

目前,对于循环荷载作用下土体累积变形特性的研究主要有两个方面,一是基于室内动三轴试验,研究不同的影响因素对土体累积变形特性的影响,如土体的类型和物理状态、循环振次、应力状态、加载频率和加载波形等(Seed, 1968 [5]; Mitchell, 1977 [6]; Monismith, 1975 [7]; Yasuhara, 1992 [8]; Gidel, 2001 [9]; 蔡英, 1996 [10]; 王建华, 1996 [11]; 黄茂松, 2006 [12]; 陈云敏, 2006 [13])。二是通过一定的理论研究,提出能够反映土体应力-应变关系的本构模型,如修正的静力模型、套叠屈服面模型以及边界面模型。这些理论模型一定程度上可以描述循环荷载作用下土单元体的累积变形规律,但往往只对某些特定的受荷状态比较适用,而且计算复杂,离工程实用还有一定的距离。另外一种准理论本构是基于室内外试验的实测数据提出的经验公式,描述了累积变形与应力、振次的关系。Monismith 等在室内试验的基础上提出了便于实际应用的指数模型; Li 和 Selig (1996) [14]引入静强度参数并间接考虑了土体类型及物理状态等,从理论上分析了轨道交通荷载作用下软土沉降; Chai 和 Miura (2002)则进一步考虑了初始静偏应力的影响。Gidel 等(2001)通过对碎石填料进行室内动三轴试验,认为低应力水平下的累积变形最终将趋于定值,提出了变形稳定发展的计算模型; Abdelkrim 等(2003, 2006) [15] [16]考虑了残余应力和水平向应变对累积变形的影响,对 Gidel 的计算模型进行了改进。

本文在室内动三轴试验的基础上,分析了萧山软粘土在各固结压力下的变形特性,通过对试验数据

进行合理的分析,在已有的指数型经验公式的基础上进行了改进,提出了考虑循环应力、循环振次、固结压力、及土体静强度等影响因素的累积应变计算模型。

2. 室内动三轴试验

2.1. 试验土样及制备

试验试样为软粘土,基本物性参数如表 1 所示[17]。将原状样风干碾碎,过 0.1 mm 筛后作为配置重塑样的原料土。动三轴试验中,试样高 80 mm,直径 39.1 mm。重塑样根据原状样的初始干密度,称取相应质量的烘干土,采用干捣法分两层捣实到相应高度,层与层之间用刮刀刨毛,以保证各层之间接触良好。试样放入密闭容器内抽真空,然后通入无气水饱和 24 h 以上。

Table 1. Statistical geotechnical properties of soft clay

表 1. 软粘土物理力学指标

容重 kN/m^3	含水率%	比重	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	粘聚力 C_{cu}/kPa	内摩擦角 ϕ_{cu}
16.14	62.3	2.734	33.0	26.5	15.5	12.6°

2.2. 试样加载及结果分析

试样固结 24 h 后,在不排水条件下采用应力控制方式施加不同幅值的循环荷载,采用正弦波进行加载,频率为 1 Hz,如图 1 所示。重塑样固结压力分别为 25、80、160、300 kPa,每级固结压力下分别采用不同的动应力比进行轴向循环加载,试验仪器为 HX-100 气压伺服式多功能动三轴仪,轴向累积应变与振次的关系曲线如图 2 所示。

- 1) 在同一级固结压力下,动应力比越大,土体的累积应变发展越迅速;
- 2) 对于不同固结压力下的累积应变曲线,均存在一个转折点,应变转折点大致落在一条直线上(如图 2 中的虚线),陈颖平(2008) [17]将该点应变值定义为破坏应变 ε_{ip} ,相应的振次定义为破坏振次 N_f ;
- 3) 对于不同固结压力,相近动应力比情况下的累积应变曲线较为接近,表明固结应力水平对变形规律影响不大;
- 4) 土体处于破坏应变线以下时,累积变形发展较为缓慢,尤其是各级固结压力下动应力比最小时,土体要经历一段相当缓慢的应变累积阶段,即所谓的安定状态。下文将对这些累积应变稳定发展的阶段进行分析。

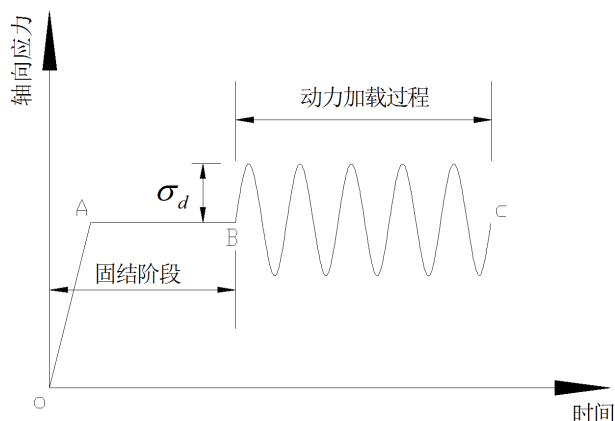


Figure 1. Sinusoidal loading

图 1. 正弦荷载

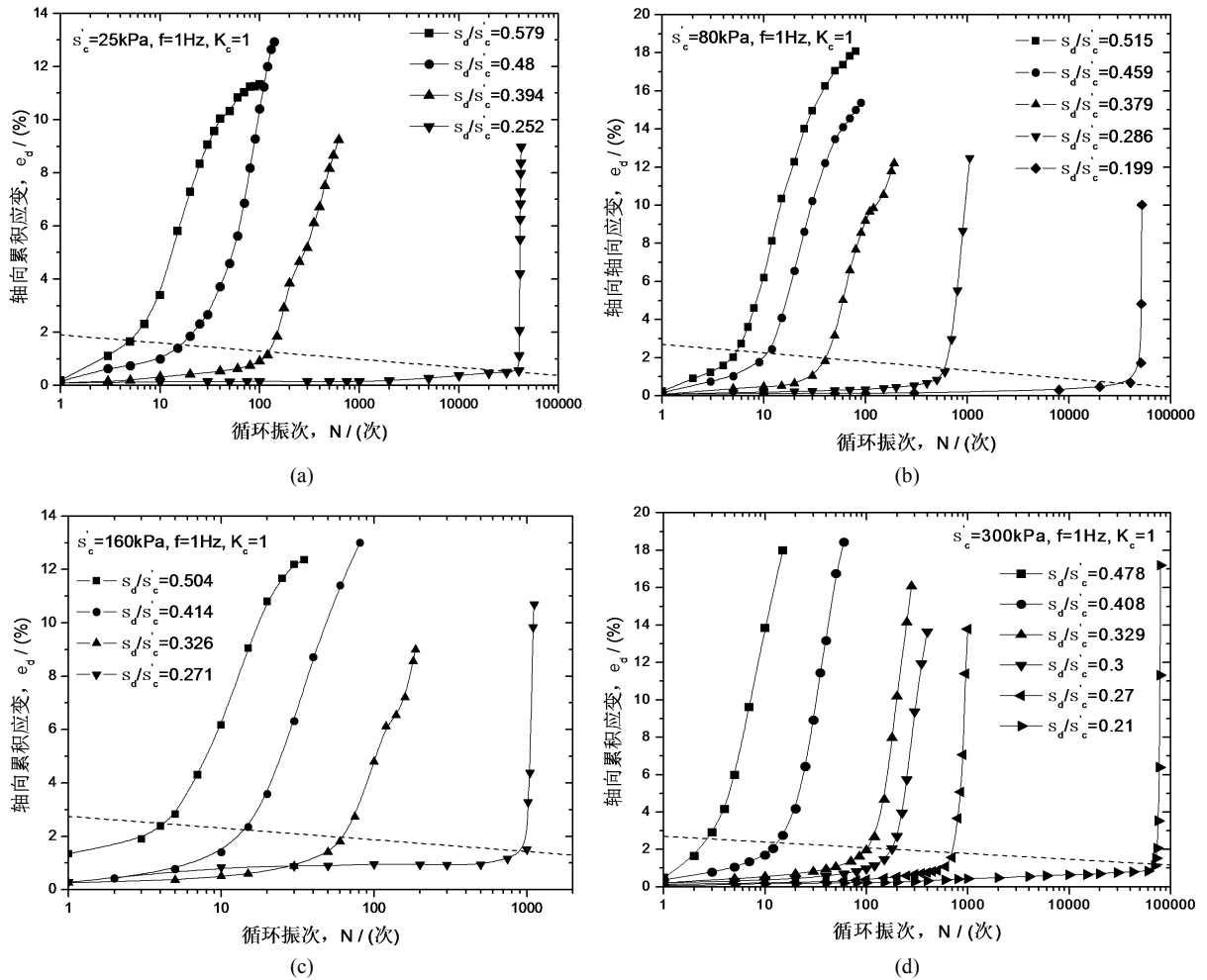


Figure 2. Accumulative strain curves of soft clays under cyclic loading
图 2. 不同固结压力下累积应变曲线

3. 累积应变预测模型

3.1. 已有模型分析

交通荷载作用下土体一般处于较低的动应力水平下，且随着土层深度的增加，动应力比越来越小，土体发生破坏的可能性较小，因而选取土体破坏前的累积应变关系曲线进行分析，并将其反映在双对数坐标体系中，如图 3 所示。

在双对数坐标体系中，轴向累积应变与循环振次反映出较好的线性关系，可以用直线方程加以描述：

$$\lg \varepsilon^p = a + b \cdot \lg N \quad (1)$$

$$\text{即 } \varepsilon^p = A \cdot N^b \quad (2)$$

式中， ε^p 为累积塑性应变， N 为循环荷载作用次数， b 为直线的斜率， a 为相应的截距，式(2)即为 Monismith (1975)提出的指数式模型，也是目前应用最为广泛的累积变形经验公式。Monismith 认为， A 、 b 为两个依赖于土体类型、土的特性和应力状态的参数，可以通过室内试验加以确定。但由于参数包含的物理意义较多，对于不同的土体类型取值离散性很大，这限制了该模型的使用范围。

Li 和 Selig (1996)通过室内试验对 Monismith 的模型进行了改进，引入土体静强度参数，提出：

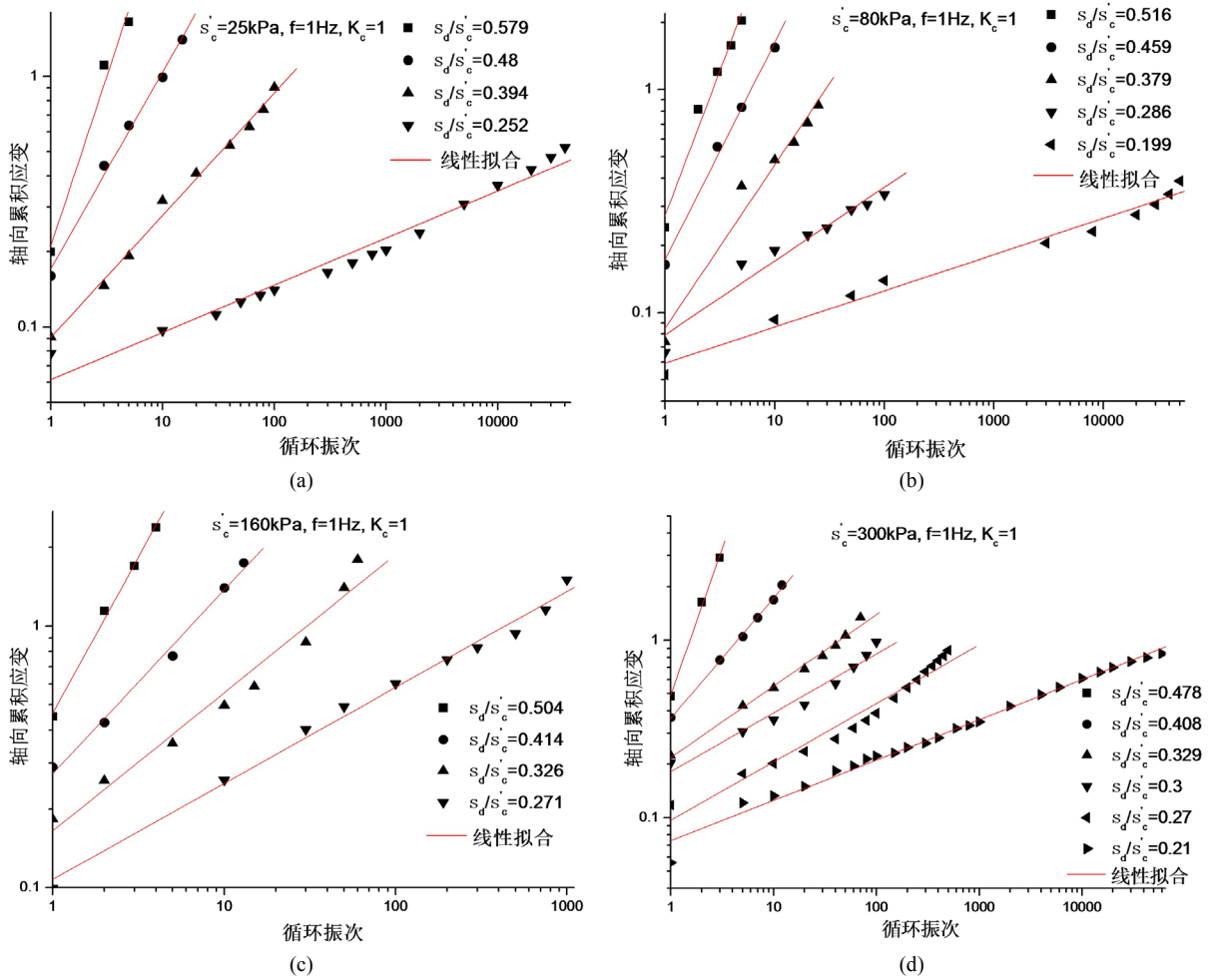


Figure 3. The cumulative strain curve in a logarithmic coordinate system
 图 3. 双对数坐标体系下累积应变曲线

$$\varepsilon^p = a \cdot \left(\frac{q_d}{q_f} \right)^m N^b \quad (3)$$

式中， q_d 为动偏应力， q_f 为土体静强度， a ， b ， m 为待定参数。Li 等通过分析前人文献中提到的 22 种土体累积变形研究资料认为，参数 b 是独立于土体应力偏量水平和土体物理状态的参数，并反算得出了 22 种土体参数 a ， b ， m 的变化范围，指出， m 通常的取值范围在 1.0~4.2 之间，系数 a 的取值范围在 0.3~3.5 之间，而与此对应的 Monismith 模型中 A 的取值范围则在 0.0005~6.3 之间，解决了 Monismith 指数模型参数取值范围大的问题，如表 2 所示。

Chai 和 Miura (2002)在 Li 和 Selig 的模型基础上，提出了考虑初始静偏应力 q_s 的指数经验公式：

$$\varepsilon^p = a \cdot \left(\frac{q_d}{q_f} \right)^m \left(1 + \frac{q_s}{q_f} \right)^n N^b \quad (4)$$

目前，对于 Monismith 指数式模型的改进，往往是默认参数 b 为常数，通过各种形式的应力表达式来代替参数 A 。然而，事实上，通过对 Li 等所提文献的研究，对于不同动应力比下的累积应变曲线，参数 b 并非为常数，它随着动应力比的改变而变化。

Table 2. Value of material parameters of different soils
表 2. 不同土体的材料参数取值

模型参数	ML (低液限粉土)	MH (高液限粉土)	CL (低液限粘土)	CH (高液限粘土)
均值	0.1	0.13	0.16	0.18
<i>b</i>	范围 0.06~0.17	范围 0.08~0.19	范围 0.08~0.34	范围 0.12~0.27
组数	6	4	13	7
均值	0.64	0.84	1.1	1.2
<i>a</i>	范围 -	范围 -	范围 0.3~3.5	范围 0.82~1.5
组数	1	1	7	5
均值	1.7	2	2	2.4
<i>m</i>	范围 1.4~2.0	范围 1.3~4.2	范围 1.0~2.6	范围 1.3~3.9
组数	3	4	10	7

3.2. 累积应变指数型改进模型

累积应变的主要影响因素有土的应力状态、循环荷载振次、土的类型和土的物理状态等。其中，动偏应力是累积应变的主要应力影响因素。因而，合理的计算模型应该能够反映这些影响因素。

结合室内动三轴试验结果，在已有的指数型模型研究基础上，通过对参数 *b*、*A* 与累积应变之间关系的分析，确定出相应的经验表达式，如图 4 所示。

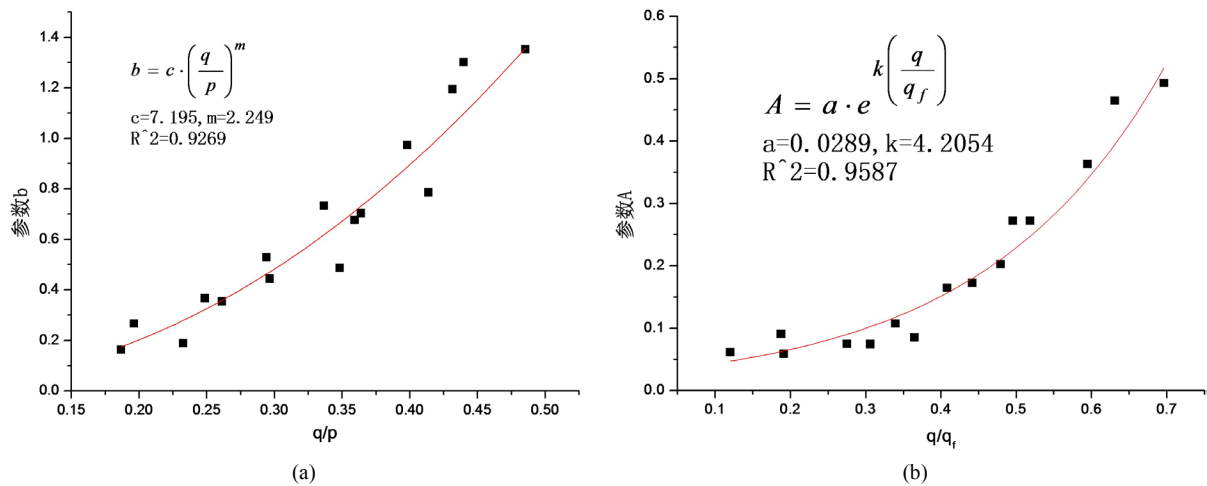


Figure 4. Expressions for parameters *b* and *A*
图 4. 参数 *b*、*A* 表达式的确定

$$b = c \cdot \left(\frac{q_d}{p} \right)^m \quad (5)$$

$$A = a \cdot e^{k \left(\frac{q_d}{q_f} \right)} \quad (6)$$

式中，*p* 为平均应力，*q_d* 为动偏应力，*q_f* 为静力破坏偏应力，可参考沈珠江(2000) [18] 提出的强度理论进行求解。

$$q_f = 2\tau_f \tag{7}$$

$$\tau_f = c_{cu} \frac{\cos \varphi_{cu}}{1 - \sin \varphi_{cu}} + \sigma_{3c} \frac{\sin \varphi_{cu}}{1 - \sin \varphi_{cu}} \tag{8}$$

式中， C_{cu} 、 φ_{cu} 为固结不排水的总应力强度指标。

因而，改进后的累积应变计算模型可表示为：

$$\varepsilon^p = A \cdot N^b = a \cdot f\left(\frac{q_d}{q_f}\right) \cdot g\left(\frac{q_d}{p}\right) = a \cdot e^{k\left(\frac{q_d}{q_f}\right)} \cdot N^c \left(\frac{q_d}{p}\right)^m \tag{9}$$

式中， a 、 k 、 c 、 m 为待定系数。选取动三轴试验中具有较长稳定发展阶段的累积应变曲线进行拟合分析，如图5所示，拟合参数如表3所示。

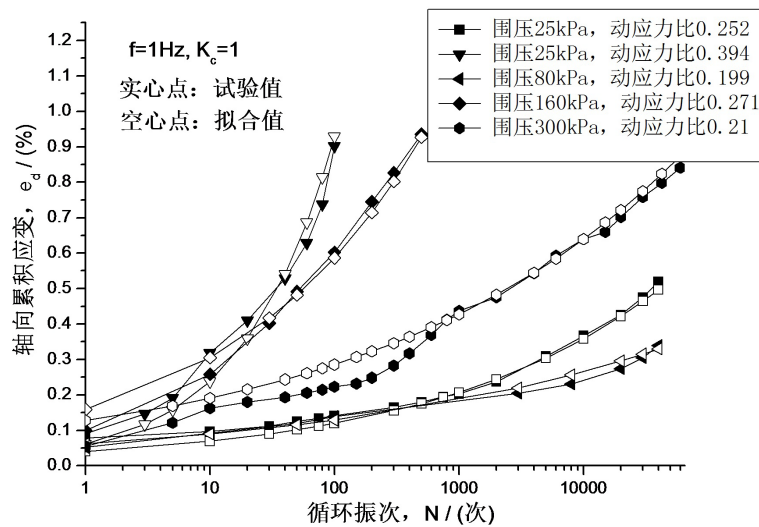


Figure 5. Cumulative strain fitting results under different confining pressures and dynamic stresses

图5. 不同围压和动应力下累积应变拟合结果

Table 3. Parameter fitting results

表3. 参数拟合结果

参数	a	k	c	m
拟合值	0.0189	6.2456	5.8117	2.1768

4. 结论

本研究通过室内动三轴试验，分析了软粘土在不同固结压力下的累积变形特性，并根据动三轴试验结果，对已有累积应变计算模型进行了改进。通过本研究，可以得出以下结论：

- 1) 通过室内动三轴试验对不同固结压力下土体的累积变形特性进行了研究，定量的体现了土体的应力状态、物理状态、循环振次对累积应变的影响；
- 2) 根据动三轴试验结果，对已有的累积应变计算模型进行了改进，改进后的计算模型可以明确地反映土体类型和物理状态、土的应力状态、循环振次对累积应变的影响，通过与有限元模型结合，可以方便地计算长期累积变形与时间的关系，便于工程应用；
- 3) 改进后的计算模型是针对软粘土提出的一个经验公式，对其它土类的适用性和准确性有待进一步

的验证。

参考文献

- [1] 新建时速 300~350 公里客运专线铁路设计暂行规定. 中华人民共和国铁道部, 2007.
- [2] Chai, J.C. and Miura, N. (2002) Traffic-Load-Induced Permanent Deformation of Road on Soft Subsoil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**, 907-916. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:11\(907\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:11(907))
- [3] Miura, N., Fujikawa, K., Sakai, A. and Hara, K. (1995) Field Measurement of Settlement in Saga Airport Highway Subjected to Traffic Load. *Tsuchi-to-Kiso*, **43-6**, 49-51.
- [4] 陈云敏, 陈仁朋, 芦森. 软土地基地铁施工及运营过程中的几个土力学问题[C]//城市地铁建设与环境岩土工程高级技术论坛. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 165-177.
- [5] Seed, H.B., McNeill, R.L. and Guenin, J. (1956) A Soils Deformation in Normal Compression and Repeated Loading Tests. HRB Bulletin 141.
- [6] Mitchell, R.J. and King, R.D. (1977) Cyclic Loading of an Ottawa Area Champlain Sea Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, **14**, 52-63. <https://doi.org/10.1139/t77-004>
- [7] Monosmith, C.L., Ogawa, N. and Freeme, C.R. (1975) Permanent Deformation Characteristics of Subsoil Due to Repeated Loading. *Transportation Research Record*, **537**, 1-17.
- [8] Yasuhara, K., Hirao, K. and Hyde, A.F. (1992) Effects of Cyclic Loading on Undrained Strength and Compressibility of Clay. *Soils and Foundations*, **32**, 100-116. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.32.100>
- [9] Gidel, G., Horny, P., Chauvin, J.J., Breyse, D. and Denis, D. (2001) A New Approach for Investigating the Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Material Using the Repeated Load Triaxial Apparatus. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **233**, 5-21.
- [10] 蔡英, 曹新文. 重复加载下路基填土的临界动应力和永久变形初探[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 1-5.
- [11] 王建华, 要明伦. 软粘土不排水循环特征的弹塑性模拟[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 11-18.
- [12] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 28(7): 891-895.
- [13] 陈云敏, 陈颖平, 黄博. 应力水平对结构性软粘土静力和动力变形特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 937-945.
- [14] Li, D. and Selig, E.T. (1996) Cumulative Plastic Deformation for Fine-Grained Subgrade Soils. *Geotechnical Engineering*, **122**, 1006-1013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:12\(1006\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:12(1006))
- [15] Abdelkrim, M., Bonnet, G. and de Buhan, P. (2003) A Computational Procedure for Predicting the Long Term Residual Settlement of a Platform Induced by Repeated Traffic Loading. *Computers and Geotechnics*, **30**, 463-476. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(03\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(03)00010-7)
- [16] Abdelkrim, M., de Buhan, P. and Bonnet, G. (2006) A General Method for Calculating the Traffic Load-Induced Residual Settlement of a Platform, Based on a Structural Analysis Approach. *Soils and Foundations*, **46**, 401-414. <https://doi.org/10.3208/sandf.46.401>
- [17] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下软黏土不排水累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 764-768.
- [18] 沈珠江. 基于有效固结应力理论的粘土土压力公式[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 353-356.