



地铁荷载下粉性土动力特性研究进展

闫春岭¹, 唐益群^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:近年来中国各大城市为解决城市交通问题而大力兴建地铁工程,由此引发的工程环境问题也越发明显。本文对国内外地铁荷载作用下土体的动力响应理论、地铁荷载下粉性土动力特性试验以及地铁隧道长期沉降等研究进行评述,分析和总结了地铁循环荷载作用下粉性土研究中存在的问题,并提出了今后研究的发展趋势。

关键词:地铁荷载;土动力试验;粉性土;循环荷载

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)02-0200-06

Advances in Researches on Dynamic Properties of Silty Soil under Subway Loading

YAN Chun-ling¹, TANG Yi-qun^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In recent years, many subway-tunnel engineering have been built in big cities of China for solving traffic crowd problem, but also met some engineering environment problems in building. In this paper, the researches on dynamic response theory of soil and test of dynamic properties of silty soil under subway loading, as well as long-term settlement of subway-tunnel in home and abroad are introduced in detail. The current problems in research of silty soil under cyclic loading from subway are analyzed and summarized. The development trend of the research in future are pointed out also.

Key words: Subway loading; Soil dynamic test; Silty soil; Cyclic loading

0 引言

1863年1月10日英国伦敦建成世界上第一条地下铁路,标志着城市地下轨道交通方式的诞生。一百多年以后地铁已经成为一种普遍的城市现代化交通工具并遍及全球^[1]。为解决城市发展带来的交通拥挤问题,目前我国有很多城市都在大力兴建地铁,可以预见未来中国地铁的修建将会出现快速发展前景^[2]。

随着地铁运输系统发展迅猛,引发的工程环境问题也越发明显,其中以地铁运行诱发的振动对环境的影响尤为显著。以上海地铁隧道为例,地铁一号线某区段隧道轴线沉降量已超过25 cm,造成地铁隧道管片破裂、渗水、漏泥等现象,严重影响了地铁的正常运营。在国际上,振动已被列为七大环境公害之一^[3-5]。

目前,科研人员对隧道周围的饱和软粘土研究

收稿日期:2010-04-27

基金项目:国家自然科学基金(40872178);上海市重点学科建设项目(B308)

作者简介:闫春岭(1975-),男(汉族),河北滦南人,博士,讲师,主要从事工程地质与土木工程方面的研究与教学。

颇多,并取得了相应的成果,但对于地铁振动诱发的粉性土动力响应问题却显得薄弱。而粉性土在世界各地广泛分布,海岸区约有80%的表面沉积物为粉土沉积。城市轨道交通设计深度大多位于或穿越粉性土层,例如上海地区浅层土为第四纪松散沉积层,工程实践中遇到的主要问题大都发生在饱和软粘土和粉性土中,目前规划中的地铁和轻轨很大部分埋设在粉性土地层中^[6]。在其它一些城市如天津、杭州、南京等城市的地铁修建中也遇到了粉性土。粉性土为砂性土和粘性土之间的一种过渡类型,其性质既不同于砂性土,又有别于粘性土^[7]。一般粉性土在静荷载作用下压缩性较小,其压密过程也较快。对于饱和的粉、细砂和砂质粉土,在遭受振动作用时(如地震,机器振动等),其强度会突然的降低,易发生液化,甚至发生流砂问题^[8]。

本文通过分析国内外地铁荷载下粉性土动力特性研究现状,分析和总结粉性土动力学研究中存在的主要问题,并对其未来发展的一些方向 and 有待进一步研究的问题进行探讨。

1 地铁荷载下土体的动力响应理论研究

自20世纪20年代开始,以Timoshenko关于车轮效应的报告作为开端,人们开始关注轨道动力荷载问题的研究^[9]。英国的Inglis C E根据机车车辆的质量,将列车荷载简化为移动的周期力和移动的惯性力来研究,得到轨道动力的近似理论解;Kermy采用拟静力方法计算了Winkler梁模型的动力响应,由于考虑时间作用上的连续性影响,所得的结果只在荷载移动速度等于波的传播速度时才有效^[10]。

20世纪70年代,为防止和整治钢轨接头区病害,英国Derby铁路研究中心对轮轨相互作用力进行了大量的理论与试验研究,以轨道不平顺作为激励源并将机车车辆和轨道的相互关系引入模型中;Wang T L建立了21自由度的车辆空间振动分析模型,主要是对转向架自由度提出了新的观点^[11];潘昌实等^[12-13]采用能反映地铁荷载振动周期特点的,类似激振形式的函数来表达地铁荷载,即

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t + A_3 \sin \omega_3 t$$

式中 $F(t)$ 为地铁振动荷载; A_0 为车轮静载; A_1 为对应某一频率的振动荷载幅值(当列车速度 V 已知,量测钢轨基本振动波长 L_i 及相应振幅 a_i ,即可求 ω_i ,相应振动荷载幅值)。

Dong^[14],刘维宁^[15]等采用由列车模型、轨道模型及轮轨间的耦合关系组成的列车—轨道系统动力分析模型;罗雁云^[16],Cai^[17],Fenander^[18]等根据随机振动基本理论,引入轨道不平顺谱,建立起轮轨相互作用模型,通过假设轮轨间为线性接触刚度,建立轮轨间运动方程,采用Fourier变化得出弹簧下质量振动引起的动荷载均方差;Thambiratnam等^[19]、Mohammadi等^[20]、谢伟平等^[21]基于有限元理论分析地铁运行引起的土的波动特性,对地铁荷载进行简化,得到地铁运行时的位移色度图及加速度衰减曲线;聂志红等^[22]基于层状梁和粘弹性半空间体理论建立轨道路基耦合动力分析模型,通过移动坐标和Fourier变换得到移动谐振点荷载作用下轨道路基稳态响应在波数域内的解;曹艳梅等^[23]根据车辆动力学、轨道动力学及地基土振动Green函数,建立了列车—轨道—地基土相互作用理论分析模型。

目前,地铁振动理论研究无疑取得了一些成果。但存在一定的不足,因为地铁振动荷载作为一种特殊的荷载,既不同于静荷载,也不同于地震作用,而是长时间往复施加的循环荷载,一直是较复杂的问题^[24]。为了计算方便,一般对地铁—轨道相互作用进行较多的简化,在参数选取时,通常将地铁周围土体假设为具有连续质量的弹性体,没有充分考虑到三维土层本身波动特性的影响,所以计算结果与实际有一定的差别,对于地铁振动下土体的计算理论和方法的研究还处于初级阶段。

2 地铁荷载下粉性土动力特性的试验研究

地铁行车荷载是一种特殊的长时间往复施加的循环荷载,由于荷载形式的特殊性以及工程实际中出现的广泛性,循环荷载作用下土体的动力特性研究具有较高的理论意义及实用价值,从上个世纪60年代以来,众多国内外学者都对该领域进行了探索和研究,并取得了较多有价值的研究成果^[25-26]。循环荷载作用下土体的动力特性研究主要集中于室内循环三轴试验、计算机数值模拟等方法,综合考虑荷载循环应力比、循环次数、振动频率、土体超固结比、循环加载排水状况等因素的影响,获取土体累积塑性变形、残余孔隙水压力等方面的变化规律。

2.1 地铁荷载作用下粉性土动力特性的现场测试

早期从事地铁列车振动工作研究的Jenkins^[27]曾指出,随着列车速度的提高,轨道的不平顺或轮子的缺陷(imperfections)是产生列车振动的主要因

素。随之, Dawn 等^[28]通过对现场监测, 对地铁荷载引起的地面振动传播规律及对周边影响进行了探讨。潘昌实等^[29]通过在北京地铁区间隧道中进行的现场试验, 获得了衬砌若干控制点以及附近一座地面风亭两个控制点的动态反应, 并对其进行了频谱分析, 分析结果表明对于若干测点的实测和计算加速度值符合良好并且给出了一些动态反应的预测数值。近年来, Sankar 等^[30]、Thompson^[31]、Sheng 等^[32]、和 Sato 等^[33]利用现场试验分析地面上列车荷载作用下产生的地面振动。Fan 等^[34]、Flener 等^[35]分析了在列车振动荷载下轨道系统的动力响应, 并对地基上部结构的响应进行研究。

总的来说, 由于受到测试条件、测试仪器以及费用的限制, 目前只能对地铁荷载下的路基进行振动位移、速度和加速度测试, 而且现有的大部分研究仅限于地铁荷载引起的地面振动对周围环境的测试, 即道床内部一定深度范围, 没能对土体内部的动应力进行测试。

2.2 地铁荷载作用下粉性土动力特性的室内试验

模拟地铁循环荷载一般采用动三轴仪^[36-37], 因其结构简单、操作方便而被广泛采用。Seed 等^[38]进行饱和软土的动强度试验, 注意到在一定压力固结稳定的试件经动荷载作用后产生附加变形, 并指出在动应力频率和持续时间不变的情况下, 该附加变形由固结压力大小、动应力大小以及循环次数等三个因素决定。后来 Castro^[39]、Gaskin^[40]、Kazuya 等^[41]、熊建国等^[42]也相继了这项工作的研究。

黄锋等^[43]通过一系列不排水条件下的循环三轴试验, 对南海海洋粉质土的动力特性进行了研究, 研究结果表明, 排水过程对正常固结的粉质土有强化作用; 唐益群等^[44]通过对南京地铁三山街站隧道周围粉质粘土进行应力控制的循环三轴试验, 考虑了土体固结状态、固结比、轴向循环压力的大小及频率对动应变的影响, 研究了粉质粘土的临界动应力

比和动应变随振动次数、加载频率和围压及固结状态而变化的规律; 曾长女等^[45]采用多功能静动液压剪切仪进行了室内动力循环试验, 研究了饱和重塑粉质土孔压变化规律; 关彦斌等^[46]基于室内应力控制式动三轴试验, 并考虑动应力、含水率两个因素的变化, 研究了压实粉土的累积塑性变形、回弹模量及临界动应力的变化规律; 肖军华等^[47]通过室内动三轴试验, 研究不同密实度、不同含水率粉土路基在不同动应力水平下的循环累积塑性变形规律。

上述试验研究对地铁振动荷载的模拟, 大多局限于对称正弦循环荷载, 与实际荷载的脉冲特性有差别, 并且研究的重点也基本局限于动应力大小和循环次数对变形的影响。目前为止, 对于考虑循环荷载的脉冲特性合理地模拟地铁振动荷载作用下粉性土的动力特性研究很少, 尤其是缺乏考虑复杂应力状态和应力路径对粉性土中动应力、动应变发展过程的影响研究, 然而这一点恰恰是地铁振动下粉性土永久变形的理论研究与试验相结合的关键。

3 地铁隧道长期沉陷的研究

近年来, 地铁隧道在运营过程中的沉降现象日益引起人们的重视, 隧道不均匀沉降会使隧道产生弯曲变形, 导致隧道接缝张开, 从而进一步加剧管片渗漏。这将导致地铁维护费用大为增加, 从运营上分析, 隧道沉降会影响轨道的平整性、乘坐的舒适性和行车的安全性。

图1为上海市地铁一号线隧道沉降实测曲线。从图中可以看出, 自1995年4月正式建成投入运营以来, 经过长期的变形监测发现, 隧道在长期运营中不均匀沉降相当大, 许多隧道段的沉降一直在发展, 而且没有收敛的趋势^[48-50]。至2001年底, 人民广场站—新闸路站之间隧道最大累计沉降量超过200 mm, 到2006年底该数据已经接近300 mm; 黄陂南路—人民广场站之间隧道差异沉降量近100 mm。

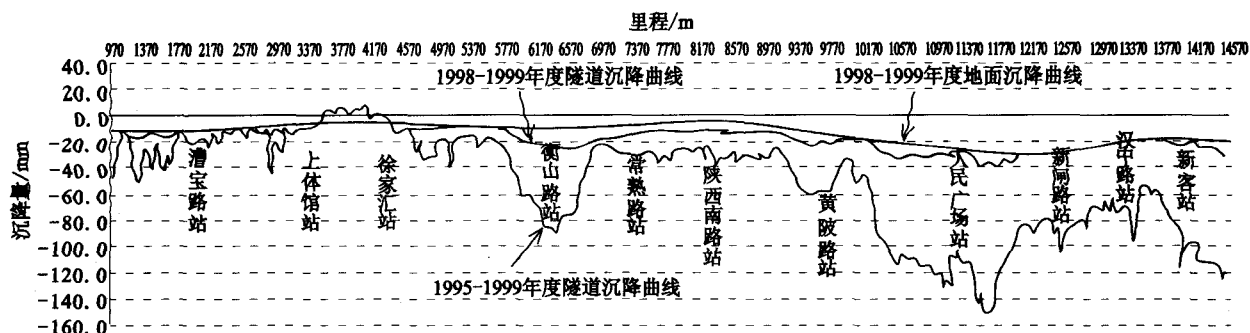


图1 上海地铁一号线累计沉降量曲线^[49]

Fig. 1 Accumulated tunnel subsidence on No. 1 subway line of Shanghai.

对于地铁隧道运营后的长期沉降,除了施工期扰动土体的次固结变形外,尚有多种因素会引起隧道的纵向不均匀变形。2001年,上海市建设技术发展基金会和上海市房屋土地资源管理局下达的重点科研项目《上海市地铁一、二号线地下空间开发与地质环境相互作用研究》^[48],通过大量科研成果和监测资料的综合利用与系统分析,对地铁隧道变形的规律、影响因素进行了分析,经初步的研究表明,已运营地铁隧道沉降的影响因素主要包括以下几个方面:

(1) 地铁列车长期振动荷载作用下软化导致沉降。地铁隧道在建成投入运营后,将承受间歇周期性循环荷载的作用,除了隧道结构固有振动周期应远离荷载振动周期,以免引起隧道的共振之外,尚需考虑地铁列车振动引起的隧道不均匀沉降问题,对上海地铁一号线的长期观测表明列车振动引起的隧道沉降值是不容忽视的,量值上可以达到相当大的程度,在某些地段甚至是最主要的沉降影响因素^[49]。

(2) 隧道下卧层土体的不均匀沉降。由土的地质分布特点而言,隧道沿线的下卧层土体特性及分层是不均匀的,各种不同性质的下卧土层所发生的扰动、回弹量、沉降速率和总沉降时间,有不同程度的差异,这将导致隧道的不均匀沉降。文献^[50]验证了下卧层土体不均匀沉降对隧道的影响。

(3) 动力荷载作用下粉土的超静孔隙水压力的变化。孔隙水压力在动荷载作用下的发展规律是土体变形和强度变化的重要因素,也是分析土体沉降问题的关键。

(4) 隧道邻近建筑施工活动的影响。文献^[51]监测和分析了深基坑施工对邻近地铁隧道的影响,最大侧移量约10 mm,已超过隧道侧移报警值。

(5) 隧道上方增加地面荷载。隧道上方地表加卸载是导致隧道纵向不均匀沉降的重要因素之一,为此上海地铁保护技术标准做出了建筑垂直荷载、降水等施工因素引起的地铁隧道外壁附加荷载不得大于20 kPa的规定。

(6) 其它方面。如隧道所处地层的水位变化以及隧道与工作井、车站连接处差异沉降等^[52]。

由以上分析可知,列车激励、下卧层土质情况、超静孔隙水压力的变化是隧道纵向不均匀沉降的主要影响因素^[53]。初步分析推断,在隧道运营后之所以很快出现较大的不均匀沉降,主要是由于具有粘弹塑性的粉性土对地铁列车激励十分敏感,在不均

匀的地质条件下长期运营使振陷过大,导致环缝张开而渗流。当隧道的外层材料因纵向变形而损毁后,地铁列车的运行并未停止,在持续不断的激励下,将导致更大的纵向变形出现,加剧隧道的不均匀沉降。因此可将地铁列车的运行视为动荷载对土体—隧道体系的激励,这种激励作用是产生不均匀沉降的源头。

4 需进一步研究的课题

通过上述对国内外研究现状的总结和分析,可知地铁振动荷载下土体理论模型的研究和动力特性的试验研究都取得了很大的发展。由于地铁列车运行是一个长时间往复施加的循环荷载,是一种较复杂的问题,因此现有理论分析与研究水平不能完全解决所有的问题。为此,提出以下几项关于地铁荷载下粉性土动力特性方面尚需进一步研究的课题:

(1) 建立合理的地铁隧道—土体的动力耦合的系统分析模型,要充分研究土体的附加应力的因素,如速度、土的非线性特征、轨道不平顺等,其研究理论不仅仅局限于弹、塑及粘性理论,同时也要借助非线性理论学科(分形理论、混沌理论等)进行研究。建立能充分考虑地铁隧道—土体系统的动力、耦合模型,从而揭示地铁荷载下土体动应力、动位移、加速度等的分布特征及规律。

(2) 深入开展地铁振动下粉性土动应力现场测试,研究粉性土体内部的附加动应力分布特性及变化规律。利用统计学理论对测试数据进行分析,为今后研究粉性土体长期累积附加沉降(振动沉陷)研究打下坚实的基础,并借助数值软件模拟非线性或动态问题,为地铁长期运营造成的隧道不均匀沉降提供科学依据和理论支持。

(3) 针对地铁荷载下引起粉性土体内部主应力轴连续偏转特性、荷载脉冲特征,深入开展粉性土的动力特性试验。可利用离心模型设计试验平台,与室内三轴试验、空心圆柱试验、振动剪切试验进行对比分析,考虑复杂应力状态及应力路径对粉性土的变形特性的影响,建立地铁长期振动荷载下动力本构模型,这对实际工程具有重要的指导意义。

(4) 在长期循环荷载作用下,土体的变形和位移主要由土体内部结构变化(如结构单元体之间的相对位移和错动等)所引起的,结构单元体在土体变形过程中处于一种动态平衡,在不同时空上,土体微观结构具有各自独特的变化特征。因此对地铁振动下粉性土的微观结构研究显得非常重要,从微观角

度解释粉性土的变形破坏机理,并建立微观和宏观的平台,也将是需要进一步研究的课题。

[参考文献]

- [1] 董霜,朱元清. 地铁振动环境及对建筑影响的研究概况[J]. 噪声与振动控制, 2003, (2): 1-4.
- [2] 李仁杰. 地铁振动对隧道周围加固软黏土动力特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.
- [3] 闫维明, 张祎, 任琨, 等. 地铁运营诱发振动实测及传播规律[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 149-154.
- [4] Forrest J A. Ground vibration generated by trains in underground tunnels[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(1): 706-736.
- [5] 张曦. 地铁振动对隧道周围软黏土微结构影响及动力特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [6] 唐益群, 张曦, 王建秀, 等. 粉性土中土压平衡盾构施工的扰动影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(8): 1031-1035.
- [7] 冯秀丽, 叶银灿, 马艳霞, 等. 动荷载作用下海底粉土的孔压响应及其动强度[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(3): 429-433.
- [8] 曾长女. 黏粒含量对粉土地液化后变形影响的试验研究[J]. 西北地震学报, 2008, 30(2): 139-144.
- [9] 黄耿彩. 受扰动地铁隧道土体在列车周期性振动荷载下位移规律的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [10] 田薇. 车辆动载作用下轨道结构和隧道结构的动力分析[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [11] Wang T L. Impact and Fatigue in Open-deck Steel Truss and Ballasted Prestressed Concrete Railway Bridges[D]. Chicago, Illinois: Illinois Institute of Technology, 1984.
- [12] 潘昌实, Pande G N. 黄土隧道列车动荷载响应有限元初步数定分析研究[J]. 土木工程学报, 1984, 17(4): 18-28.
- [13] Melke J. Noise and vibration from underground railway lines: Proposals for a prediction procedure[J]. Journal of Sound and Vibration, 1988, 120(2): 391-406.
- [14] Dong R G, Sankar S, Dukkpati R V. A finite - element model of railway track and its application to the wheel flat problem[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 1994, 208(1): 61-72.
- [15] 刘维宁, 夏禾, 郭文军. 地铁列车振动的环境响应[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊): 586-593.
- [16] 谢世波, 罗雁云. 提速列车轮轨附加动荷载分析[J]. 上海铁道大学学报(自然科学版), 1997, 18(1): 42-47.
- [17] Cai Z, Raymond G P. Use of a generalized beam spring element to analyze natural vibration of rail track and its application[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1994, 36(9): 863-876.
- [18] Fenander A. A fractional derivative railpad model included in a railway track model[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 212(5): 889-903.
- [19] 谢伟平, 孙洪刚. 地铁运行时引起的土的波动分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1180-1184.
- [20] Thambiratnam D, Zhuge Y. Dynamic analysis of beams on an elastic foundation subjected to moving loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 198(2): 149-169.
- [21] Mohammadi M, Karabalis D L. Dynamic 3-D soil railway track interaction by BEM-FEM[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1995, 24(9): 1177-1193.
- [22] 聂志红, 刘宝琛, 李亮. 移动荷载作用下轨道路基动力响应分析[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 15-19.
- [23] 曹艳梅, 夏禾, 陈建国. 运行列车引起地面振动的理论模型及振动特性分析[J]. 振动工程学报, 2009, 22(6): 589-596.
- [24] 孙锐, 袁晓铭, 李雨润, 等. 循环荷载下液化对土层水平往返变形的研究[J]. 西北地震学报, 2009, 31(1): 8-14.
- [25] 刘雪珠, 陈国兴. 轨道交通荷载下路基土的动力学行为研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(2): 248-255.
- [26] 汤连生, 廖化荣, 刘增贤. 路基土动荷载下力学行为研究进展[J]. 地质科技情报, 2006, 25(2): 103-110.
- [27] Jenkins H H, Stephenson J E, Clayton G A, et al.. The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces[J]. Railway Engineering, 1974, 3(1): 2-16.
- [28] Dawn T M, Stanworth C G. Ground vibrations caused by passing Trains[J]. Journal of Sound and Vibrations, 1979, 66(3): 355-362.
- [29] 潘昌实, 谢正光. 地铁区间隧道列车振动测试与分析[J]. 土木工程学报, 1990, 23(2): 21-28.
- [30] Sankar S, Afonso M. Design and testing of lateral seat suspension for off-road[J]. Journal of Terramechanics, 1993, 30(5): 371-393.
- [31] Thompson D J. Developments of the indirect method for measuring the high frequency dynamic stiffness of resilient elements[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 213(1): 169-188.
- [32] Sheng X, Jones C J C, Petyt M. Ground vibration generated by a load moving along a railway track[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 228(1): 129-156.
- [33] Sato Y, Miwa M. Measurement and analysis of track irregularity on super-high speed train Trips[J]. Heavy Vehicle Systems-International Journal of Vehicle Design, 2000, 7(1): 22-33.
- [34] Fan Y T, Wu W F. Dynamic analysis and ride quality evaluation of railway vehicles-Numerical simulation and field test verification[J]. Journal of Mechanics, 2006, 22(1): 1-11.
- [35] Flener E B, Karoumi R. Dynamic testing of a soil-steel composite railway bridge[J]. Engineering Structures, 2009, 31(12): 2803-2811.
- [36] 王平, 王兰民, 刘红玫, 等. 动三轴试验机轴向摩擦解决的研究[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 46-48.
- [37] 王国波, 杨林德. 上海软土自由场地的三维地震响应分析[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 326-331.
- [38] Seed H B, Chan C. K. Effect of duration of stress application on soil deformation under repeated loading[A]//Proceedings 5th international Congress on Soil Mechanics and Founda-

- tions, Vol. 1[C], Paris; Dunod, 1968;341-345.
- [39] Castro G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands [J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1975, 101(6): 551-569.
- [40] Gaskin P N, Raymond G P, Addo-Abedi F Y. Repeated compressive loading fo a sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(2): 798-802.
- [41] Kazuya Y, Toyotoshi Y, Kazutoshi H. Cyclic strength and deformation of normally consolidation clay [J]. *Soils and Foundations*, 1982, 22(3):77-91.
- [42] 熊建国, 许贻燕. 分层土自振特性分析[J]. *地震工程与工程振动*, 1986, 6(4): 21-35.
- [43] 黄锋, 楼志刚. 排水条件对海洋粉质土动力特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 1997, 19(1): 22-29.
- [44] 唐益群, 黄雨, 叶为民, 等. 地铁列车荷载作用下隧道周围土体的临界动应力比和动应变分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1566-1570.
- [45] 曾长女, 刘汉龙, 丰土根, 等. 饱和粉土孔隙水压力性状试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(12): 1963-1966.
- [46] 关彦斌, 肖军华, 陈建国. 循环荷载下压实粉土的动力特性[J]. *交通运输工程学报*, 2009, 9(2): 28-31.
- [47] 肖军华, 刘建坤. 循环荷载下粉土路基土的变形性状研究[J]. *中国铁道科学*, 2010, 31(1): 1-8.
- [48] 陈春霞. 软土中已运营地铁隧道的现场动力试验与分析研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [49] 林永国, 廖少明, 刘国彬. 地铁隧道纵向变形影响因素的探讨[J]. *地下空间*, 2000, 20(4): 264-267.
- [50] 陈基炜, 詹龙喜. 上海市地铁一号线变形测量及规律分析[J]. *上海地质*, 2000, 74(2): 51-56.
- [51] 况龙川. 深基坑施工对地铁隧道的影响[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(3): 284-288.
- [52] 郑永来, 潘杰, 韩文星. 软土地铁隧道沉降分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(1): 67-73.
- [53] Fan ZY, Zhang DM, Huang HW. Safety analysis on longitudinal settlement and crack width of shield tunnel segments in operation period [A]//*International Symposium on Safety Science and Technology* [C]. Beijing: Peoples R. China Press, 2008;2249-2252.

(上接 199 页)

- [44] Nádor A, Lantos M, Tóth-Makk Á. Milankovitch — scale multi-proxy records from fluvial sediments of the last 2.6 Ma, Pannonian Basin, Hungary[J]. *Quaternary Science Review*, 2003, 22: 2157-2175.
- [45] 赵景波, 周晓红. 咸阳市近代渭河洪水演化研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(2): 103-110.
- [46] Vandenberghe J. Timescales, Climate and river development [J]. *Quaternary Science Review*, 1995, 14: 631-638.
- [47] Vandenberghe J. The relation between climate and river processes, landforms and deposits during the Quaternary [J]. *Quaternary International*, 2002, 91: 17-23.
- [48] Lewis S G, Maddy D, Scaife R G. The fluvial system response to abrupt climate change during the last stage: the Upper Pleistocene River Thames fluvial succession at Ashton Keynes, UK[J]. *Global and Planetary Change*, 2001, 28: 341-359.