

- 2015年科技攻关项目“地铁荷载作用下隧道周围粉性土的变形影响因素研究”成果(项目编号:152102310204)
- 博士科研启动基金项目“地铁荷载作用下隧道周围粉性土的流变效应研究”成果

地铁荷载下 粉性土的变形特性

闫春岭 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

■ 2015 年科技攻关项目“地铁荷载作用下隧道周围粉性土的变形影响因素研究”成果(项目编号:152102310204)

■ 博士科研启动基金项目“地铁荷载作用下隧道周围粉性土的流变效应研究”成果

地铁荷载下粉性土的变形特性

闫春岭 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地铁荷载下粉性土的变形特性/闫春岭著. —武汉:武汉大学出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-307-17815-1

I. 地… II. 闫… III. 地铁隧道—土质隧道—变形—研究
IV. U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 095004 号

责任编辑:宋建平

责任校对:王小倩

装帧设计:张希玉

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:10.75 字数:176 千字

版次:2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-17815-1 定价:68.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

近年来,随着地铁运输系统的迅猛发展,工程环境问题也越发明显,特别是地铁运行荷载造成的软土地基长期沉降问题引起了工程技术人员的高度关注,如何有效、合理地控制和减小沉降量成为各地区地铁建设中亟待解决的一大技术难题。目前,上海规划中的地铁和轻轨(800 余千米)有很大部分是埋设在粉性土层中的,然而,地铁荷载对隧道周围粉性土累积塑性应变起主要作用的因素,以及这些因素间的相互作用对变形的影响研究得不多。

本书以上海地区隧道周围②₃层粉性土为研究对象,通过室内 GDS 循环三轴试验、扫描电镜试验及压汞测试试验,结合正交试验与方差分析、均匀设计与偏回归系数法、模糊正交试验、隶属灰熵关联度分析、改进的 BP 神经网络、ANFIS 自适应模糊推理系统、有限元分析及时间序列理论,对地铁荷载下粉性土的变形特性进行了较为深入的研究,最终得出了一些有价值的结论和成果。

著者在撰写本书过程中,得到了唐益群教授的精心指导和帮助,在此谨向唐益群教授表示崇高的敬意和衷心的感谢。同时感谢课题组的兄弟姐妹给予的指导和帮助。

本书只是著者研究工作迈出的第一步,其中很多问题仍然需要进一步的研究和探索,著者期待本书的出版能起到抛砖引玉的作用。由于著者自身的才疏学浅,书中难免存在不当之处,恳请各位读者批评指正。

著 者

2016 年 1 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.2.1 地铁荷载下土体的动力响应理论研究	(2)
1.2.2 地铁荷载下土体动力特性的试验研究	(6)
1.2.3 地铁荷载下土体的微观结构研究	(11)
1.2.4 地铁隧道长期沉陷的研究	(13)
1.3 本书研究的内容与创新	(15)
2 地铁荷载下隧道周围土体变形的机理及累积应变模型研究	(18)
2.1 动荷载作用下土体变形机理分析	(18)
2.2 土体循环累积塑性应变模型研究	(20)
2.2.1 弹塑性本构模型	(21)
2.2.2 经验模型	(23)
2.3 本章小结	(27)
3 地铁荷载下隧道周围粉性土的动力特性	(28)
3.1 引言	(28)
3.2 室内 GDS 试验设计	(29)
3.2.1 试验仪器简介	(29)
3.2.2 试验土样	(31)
3.2.3 试验准备工作	(31)
3.3 粉性土变形特性	(32)
3.3.1 基于正交试验及方差分析的粉性土累积应变特性	(32)
3.3.2 基于均匀设计试验及回归分析的粉性土累积 应变特性	(41)
3.4 粉性土孔隙水压力发展规律	(48)

3.4.1	振动频率的影响	(50)
3.4.2	动应力幅值的影响	(52)
3.4.3	固结比的影响	(53)
3.4.4	粉性土体孔隙水压力的模糊正交试验分析	(54)
3.4.5	粉性土体孔隙水压力的隶属度灰关联熵分析	(56)
3.5	本章小结	(59)
4	地铁荷载下粉性土累积塑性应变及孔隙水压力模型的预测	(61)
4.1	地铁荷载下粉性土累积塑性应变的 ANFIS 模型	(62)
4.1.1	ANFIS 简介	(62)
4.1.2	ANFIS 原理及结构	(62)
4.1.3	累积塑性应变的 ANFIS 推理方法的建立	(64)
4.2	地铁荷载下粉性土孔隙水压力的 BP 模型	(74)
4.2.1	BP 神经网络简介	(74)
4.2.2	BP 神经网络理论	(75)
4.2.3	BP 神经网络的不足及改进方法	(77)
4.2.4	BP 神经网络应用实例	(77)
4.2.5	改进的 BP 神经网络应用实例	(81)
4.3	本章小结	(83)
5	地铁荷载下粉性土地基累积沉降分析	(85)
5.1	引言	(85)
5.2	地铁荷载下粉性土累积应变与累积孔隙水压力计算模型的建立	(86)
5.2.1	循环累积塑性应变计算模型	(86)
5.2.2	累积孔隙水压力计算模型	(87)
5.3	地铁荷载下粉性土的长期沉降	(88)
5.3.1	有限元模型的建立	(88)
5.3.2	模型模拟结果	(89)
5.3.3	土层长期沉降计算方法	(91)
5.3.4	土层长期沉降计算结果	(91)
5.4	地铁荷载引起的地基长期附加沉降机理分析	(92)
5.5	本章小结	(93)

6 地铁荷载下粉性土微观结构研究	(94)
6.1 引言	(94)
6.2 扫描电子显微镜试验	(95)
6.2.1 试验仪器简介	(95)
6.2.2 试验方案	(95)
6.2.3 试样制备及试验步骤	(96)
6.2.4 观测结果的定性分析	(97)
6.2.5 SEM 电镜扫描的定量研究	(101)
6.3 压汞试验	(106)
6.3.1 试验仪器简介	(106)
6.3.2 基本原理	(108)
6.3.3 压汞试验参数	(109)
6.3.4 试验结果定量统计	(110)
6.3.5 粉性土孔隙结构的分形特征	(116)
6.4 本章小结	(121)
7 地铁荷载下隧道地基长期沉降的时间序列分析	(123)
7.1 引言	(123)
7.2 时间序列分析模型	(124)
7.2.1 时间序列分析原理及模型	(124)
7.2.2 时间序列模型的统计特性	(125)
7.2.3 模型的适用性检验	(126)
7.2.4 时间序列建模的一般步骤	(127)
7.3 工程实例	(128)
7.3.1 监测数据	(128)
7.3.2 时间序列分析	(129)
7.4 时间序列的动态神经网络模型	(133)
7.5 本章小结	(137)
8 结论与展望	(138)
8.1 结论	(138)
8.2 展望	(140)
参考文献	(141)
后记	(160)

1 绪 论

1.1 概 述

1863 年 1 月 10 日英国伦敦建成世界上第一条地铁并开始通车,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。目前,我国有很多城市都在大力兴建地铁,还有十几座城市正在申请拟建地铁,因此,地铁将有广阔的发展前景。

随着地铁运输系统迅猛发展,其引发的工程环境问题也越发明显。以上海地铁隧道为例,地铁 1 号线某区段隧道轴向沉降量已超过 25 cm,造成地铁隧道出现管片破裂、渗水、漏泥等现象,严重影响了地铁的正常运营。与此同时,地铁列车运营引起的振动也越来越被人们关注,在国际上,振动已被列为七大环境公害之一。

目前,科研人员对隧道周围的饱和软黏土研究颇多,并取得了相应的成果,但对地铁振动诱发的粉性土动力响应问题的研究不多。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。粉性土为砂性土和黏性土之间的一种过渡类型,其性质既不同于砂性土,又有别于黏性土。随着城市化进程的推进,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黏土和粉性土中。目前,规划中的地铁和轻轨很大部分埋设在粉性土地层中;天津地铁 2 号线某车站场地土质为粉质黏土、粉土和粉砂,局部有淤泥质粉质黏土;杭州地铁试验段秋涛路车站位于钱塘江河口相冲海积堆积的粉性土及砂性土地区;南京地铁 1 号线穿越古河道漫滩的含

水土层,该土层主要为可塑状态的粉质黏土,局部为软、流塑状态的黏土及粉土等。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(如地震、机器振动等)时,其强度会突然降低,易发生液化,甚至产生流砂问题。因此,为了解决隧道周围粉性土变形特性的时间效应而引起的一系列工程环境地质问题,系统、深入地开展长期循环荷载作用下粉性土动力响应、变形特性及微观结构变化的研究十分必要。

基于上述原因,本书结合国家自然科学基金项目,以上海地区地铁10号线国权路站附近的第②₃层粉性土为研究对象,通过现场取样、室内循环三轴试验、微观电镜扫描试验、压汞试验、有限元分析、改进的BP神经网络、ANFIS自适应推理系统及时间序列理论,对地铁行车荷载下上海地区隧道周围粉性土的变形特性进行详细的分析与研究,以期为工程实际中控制地铁轴向变形,指导地铁工程的设计、施工以及地铁沉降量的预测评价和防治,并为最终建立城市环境地质灾害预警防治体系提供理论依据和具有实际应用价值的参考依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 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。英国的Inglis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。

20世纪70年代,为防止和整治钢轨接头区病害,英国德而比铁道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。早期从事地铁列车振

动工作研究的 Jenkins 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。随后,Kurzweil 给出了振级与距离有关的简单预测公式;Peter 等又通过给定不同列车、轨道、隧道及建筑物类型的修正参数,来预测不同的地点由于地铁列车运营而引起的环境振动影响;Dawn 等通过对现场监测,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。

进入 20 世纪 80 年代,学者们借助计算机及现场测试进一步深入研究土体的动力响应,并取得了相应的成果。美国学者 Chang 等对以往的轨道模型做了总结,并针对轨道的活载反应和永久变形问题提出了 GEO-TRACK 计算模型;Rucker 采用二维有限元法,讨论了地铁运营时隧道不同深度动应力幅值的简单变化规律;Melke 和 Voberg 发展了一种分析技术,即现场的定量预测方法,并建立了对应的数学模型,给出了一套理论计算预测振动响应的复变函数关系式;日本学者古田胜指出了地铁运营引发振动主要应研究振源的轨道振动、隧道振动及振动在土中的传播,并提出了针对轨道的构造和通过切断振动传播线路的两种减振措施;基于结构动力学理论,Wang 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;潘昌实等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示地铁荷载,即

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) + A_3 \sin(\omega_3 t) \quad (1.1)$$

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

1991 年,日本学者 Hanazato 等在动态弹性有限元法基础上引入了一种新的数值解法,并分析了轨道交通引起的地面振动。

张玉娥等在现场测试的基础上,利用频谱分析方法,得出了由于地铁列车振动而引起的轨道振动加速度的数学表达式,根据车辆系统振动简化模型,建立了模拟轮系的运动方程,从而推导出地铁列车振动荷载。

李军世等通过引入波传导单元和完全的能量传递边界及波动的可叠加性,采用有限元法分析了铁路路基在列车荷载作用下的动力反应,得出了竖向加速度随车速的提高而加速增长,随车辆振动频率的升高呈线性增长的结论。

梁波等从引起车辆振动的几何不平顺条件入手,用一与不平顺管理标

准相应的激振力来模拟列车竖向振动荷载,得到一个随时间变化的周期荷载表达式。

Dong、刘维宁等采用由列车模型、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,得出了离开地铁隧道中心线一定距离的地表范围内,存在一个振动放大区,在此范围以内的地面建筑如果其自振周期落于这一频带,则会受到过往地铁车辆振动的显著影响。

谢世波、Cai、Fenander 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,建立了轮轨间的运动方程,采用傅里叶变换得出了弹簧下部质量振动引起的动荷载均方差。

谢伟平、Thambiratnam 等、Mohammadi 等基于有限元理论分析了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。

罗雁云等根据随机振动基本理论,引入轨道不平顺谱,建立了轮轨相互作用模型。以半车体为研究对象,建立了车体振动运动方程,应用线性叠加方程,得出了弹簧上部质量振动引起的动荷载均方差。

Sankar 等、Thompson、Sheng 等和 Sato 等利用现场试验分析了地面上列车荷载作用下产生的地面振动。

张楠等通过对北京地铁八王坟车辆段平台及平台上建筑物的有限元计算和分析,求得了建筑物上各点在地铁列车振动荷载下的位移反应时程,并得出了在不同列车运行速度、不同建筑物结构参数、同一建筑物不同楼层之间以及距地铁轴线不同距离的建筑物之间地铁荷载产生的振动振级的变化关系。

张璞通过上海地铁某区间隧道进行现场测试并给出了数学表达式,对上海轨道交通明珠线二期工程、南浦大桥站至浦东南路站地铁区间近距离交叠隧道进行了列车振动作用下的有限元动力响应分析,对隧道结构的受力性状进行了评价。

宫全美等通过单辆列车荷载、考虑列车间隔时间的长期荷载作用,进行了地基土的动孔隙水压力室内实验,确定了南京地铁 1 号线地基土的临界动应力比和临界动应变。将两种荷载作用下的动孔隙水压力模型分为破坏型和强化型。最后通过地基中动应力计算和分析,认为在地铁列车荷载作用下,南京地基土的动孔隙水压力模型为强化型,并建立了动孔隙水压力计

算模型。

高峰等根据车辆-轮轨模型,确定了列车振动荷载,通过对地铁结构体系进行模态分析,得到体系的振型和频率,以确定合理的阻尼系数和时间积分步长。运用 Newmark 隐式时间积分法,分别研究了在上行动载、下行动载和上下交会动载 3 种情况下,区间近距离重叠隧道的动力响应,确定了在列车振动荷载作用下衬砌结构的薄弱部位及其相应的位移和应力。

周念清等以上海地铁 2 号线某区间隧道附近的饱和黏性土体为研究对象,在地铁振动荷载作用下,通过对不同位置、不同深度土体中预埋孔隙水压力计振动频率的连续监测,研究了饱和黏性土体中孔隙水压力对振动荷载的响应特征,得出了饱和黏性土中孔隙水压力增长和消散的变化规律,并利用土动力学及能量损失原理对其机理进行了分析。

Sheng 等建立了一种理论性的地面振动模型,包含准静态及动态两种荷载机制,耦合一系列车辆在无限长轨道上的运行动态,并显示在列车速度高于或低于地面振动最低波速的情况下振动频率的影响,通过对比分析三个地点的实测数据与模型分析结果发现,动态荷载产生了更高层次的振动。

Paolucci 等通过离散元的方法,分析并数值模拟了列车运行导致的地面振动,建立了二维及三维的分析模型,在轨道振动及地面峰值波速随距离的衰减等方面都进行了详细的讨论。

Degrande 等提出了一个数值模型来预测隧道地铁运营产生的振动,该模型在自由场内对隧道及土体采用不同方式拟合,限制其边界的离散,并对隧道仰拱谐载作用下两种不同类型动荷响应的数值分析结果进行了对比,其中一种为埋置在浅的砂层里的巴黎地铁隧道,另一种为埋置在深的黏土层里的伦敦地铁隧道。

Fan 等、Flener 等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了研究。

聂志红等基于层状梁和黏弹性半空间体理论建立了轨道路基耦合动力分析模型,通过移动坐标和傅里叶变换得到了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。

张曦等以上海地铁 2 号线静安寺站—江苏路站区间隧道周围饱和软黏土为研究对象,通过对隧道周围不同位置、不同深度土体中预埋土压力盒和

孔隙水压力计,进行现场连续动态监测,对地铁振动荷载作用下饱和软黏土的响应频率、土体响应应力幅值随距离地铁隧道远近以及土体响应应力幅值随深度的变化规律进行了研究,并提出了土体动力响应衰减计算公式,计算出地铁列车经过时的影响范围及动力响应值的大小,可预测地铁列车振动荷载对周围建筑物的影响情况。

Gupta 等采用有限元-边界元软件耦合建立了地铁诱发振动的预测模型,通过现场实测与模型的对比分析,认为该模型较为理想。

目前,地铁振动理论研究无疑取得了一些成果,但也存在一定的不足,因为地铁振动荷载作为一种特殊的荷载,既不同于静荷载,又不同于地震荷载,其是长时间往复施加的循环荷载,是一个比较复杂的问题。为了计算方便,一般对地铁-轨道相互作用进行简化,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测量结果有一定的差别,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。而地铁荷载下土体动力特性的现场测试,由于受到测试条件、测试仪器及费用的限制,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,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,或道床内部一定深度范围的测试,没能对土体内部的动应力进行测试。

1.2.2 地铁荷载下土体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 20 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。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,因其结构简单、操作方便而被广泛采用。

Seed 等进行了饱和软土的动强度试验,其注意到一定压力固结稳定的试样在经动荷载作用后会产生附加变形,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、动应力大小及循环次数等三个因素决定。

Luo 等对循环荷载作用下黏土的残余变形做了比较系统的研究,建立

了动应力作用 N 次后残余应变 ϵ_p 的经验公式,对土坝的振陷量进行了估算。

$$\epsilon_p = 10 \left\{ \frac{[C'_4 + S'_4(K_c - 1) + C'_5\sigma_3 + S'_5(K_c - 1)\sigma_3]^{-1}\sigma_d}{(0.1N)^{S_1}} \right\}^{C'_6 + S'_6(K_c - 1)} \quad (1.2)$$

式中, K_c 为固结比; σ_d 为动应力; C'_4 、 S'_4 、 C'_5 、 S'_5 、 C'_6 、 S'_6 和 S_1 均为试验参数,随着土性的不同而变化。后来 Castro、Gaskin 和 Kazuya 等也相继进行了这项研究。

Matsui 等对重塑土正常固结、超固结黏土进行了循环三轴试验,试验中保证平均主应力为常值,并精确测量了孔隙水压力,分析了影响孔隙水压力的因素;随后进行后继不排水和排水三轴试验,定性地分析了强度和刚度与等效超固结比的关系。

Yasuhara 等对饱和重塑的软黏土进行了几组循环应力控制三轴试验,结果表明循环不排水强度几乎独立于循环荷载的频率和持续时间;由于土体重塑的影响,循环强度低于静力强度;归一化的孔隙水压力 u/σ'_3 与循环剪应变有唯一的双曲线关系。

Hyde 对重塑粉质黏土进行应力控制式低频循环加载试验,结果表明孔隙水压力发展速率是循环次数、应力水平和试样应力历史的函数:

$$\frac{u}{p_c} = \frac{\alpha}{\beta + 1} (n^{\beta+1} - 1) + \alpha \quad (1.3)$$

式中, u 为孔隙水压力; p_c 为初始固结有效应力; n 为循环次数; α 为偏应力水平函数; β 为随超固结比 OCR 变化而变化的试验参数。

Azzour 研究认为,似超固结土与超固结土具有类似的性状,循环荷载所引起的似超固结土的不排水抗剪强度可由相应的超固结土的试验结果加以估算。他还分析了剪切过程中两者的应力路径,发现其同样极为相似。

Fujiwara 等较为全面地讨论了总荷载、荷载周期、荷载增量比、加荷方式、胶结程度及循环次数对黏土变形的影响,发现循环荷载作用下的固结变形量大于静荷载作用下的固结变形量,这是由循环荷载作用过程中次固结变形引起的,而次固结变形与重复荷载的大小、荷载增量比、荷载周期、有机质含量成正比。

Hyodo 等通过对高塑性海积黏土不排水三轴试验结果的整理,引入了相对循环强度和有效应力空间位置的两个应力参数,采用经验模型模拟了

软黏土循环加载产生的孔隙水压力和消散过程。

Matasovic 考虑了循环荷载作用下土体结构变化对孔隙水压力的影响,引入了衰减指数 δ 和衰减参数 t ,建立了考虑超固结比统一的孔隙水压力计算模式:

$$u_N^* = AN^{-3\delta(r_c - r_{rv})^t} + BN^{-2\delta(r_c - r_{rv})^t} + CN^{-\delta(r_c - r_{rv})^t} + D \quad (1.4)$$

式中, u_N^* 为孔隙水压力值; r_c, r_{rv} 分别为循环剪应变和循环剪应变门槛值(当 $r_c < r_{rv}$ 时,无残余孔隙水压力产生,也无残余应变); A, B, C, D 为试验拟合参数,与超固结比有关。

Yilmaz 等于 1999 年在日本东京发生 7.4 级强震的地点获取淤泥质软黏土,分别对土样实施标准三轴试验、循环三轴试验,结果发现了在与地震相当的荷载作用下土体的动强度及刚度并没有衰减,且土体的累积应变关键取决于加荷模式及荷载的应力水平。

对于土体动力特性的试验研究,国内起步相对较晚,初始研究主要集中在循环荷载作用下土体累积应变、孔隙水压力的变化规律,后来的研究较多关注于累积应变、孔隙水压力的预测模型及计算方法,而有关土体在循环荷载作用前后的强度及刚度变化则研究得很少。

刘颖等对循环荷载作用下饱和砂土的极限平衡条件和液化破坏过程给出了一个广义库仑公式。为达到工程应用的目的,建议把循环荷载作用下饱和砂土的破坏过程分为两个阶段,并把这两个阶段的起点作为饱和砂土的破坏准则。此外,根据实验给出了饱和砂土液化破坏时破坏面上循环剪应力与循环荷载次数间的一般关系。

赵小林通过对循环荷载及循环等应变幅作用下砂土孔隙水压力的试验研究,得出了饱和尾矿砂在侧向压力 700 kPa 范围内,循环荷载作用下,孔隙水压力的产生和发展规律具有良好的一致性,并随着固结比的增大,最大残余孔隙水压力降低;侧向压力在 200 kPa 和 700 kPa 范围内,测得了液化强度基本一致。

阎澎旺讨论了往复荷载作用下的重塑软黏土的变形特性,提出了等效静荷载的概念,试图把复杂的动荷载作用变形计算问题简化为静的变形问题,从而对土体变形进行预测。

周健等在室内试验的基础上提出了动力荷载作用下软黏土孔隙水压力及残余应变的计算模式,并将计算结果与不排水、部分排水情况下观测到的孔隙水压力及残余应变进行比较,验证了该模式的适用性,最后结合工程实

例,对构筑物在长期动力荷载作用下的振陷进行了计算和分析。

黄锋等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,研究表明,排水过程对正常固结的粉质土有强化作用。

蒋军等通过一系列室内循环三轴试验,对含砂芯软黏土复合土样在不排水循环荷载作用下的性状开展了试验研究,分析了循环动应力幅值、振动次数、超固结比、加载历史及砂芯置换率等因素的影响,得出了不可逆应变随振动次数的增大而增大,随砂芯置换率的增大而减小;在不排水条件下,可逆应变随振动次数的增大而减小,直至最后稳定于某一大于零的值。

唐益群等研究了列车循环荷载作用下南京地铁三山街站隧道周围淤泥质粉质黏土的动应变发展情况,充分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,得到了土体临界动应力比和动应变随振动次数、振动频率、围压及固结状态而变化的规律;通过土体动应力-动应变关系得到了土体的动剪切模量、动抗剪强度的变化规律。

曾长女等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隙水压力变化规律。

陈云敏等通过原状、重塑软黏土样测量剪切波速的压缩试验及循环三轴试验发现了在静荷载作用下,原状土的变形随应力水平变化可分为3个阶段。以先期固结应力和结构屈服应力为分界点,而重塑土的变形与应力水平无关;在循环荷载作用下,两种土在不同固结应力下的应变-振动次数关系曲线上均存在着一个转折点,施加的动应力幅值不同,转折点应变也不相同,但该应变与相应的破坏振动次数呈线性关系。

黄茂松等对上海地区典型饱和软黏土进行了不排水循环三轴试验,分析了影响软黏土塑性累积应变的主要因素为循环荷载的作用次数、初始静偏应力及循环加载动偏应力;并基于临界状态土力学理论,引入了相对偏应力水平参数,研究了不同静、循环动应力组合应力历史影响下饱和软黏土的不排水循环累积应变特性。

杨超等结合软土地铁车站振动台模型试验对饱和软黏土进行了动三轴试验,并利用界面模型理论建立了软黏土的黏弹塑性动力本构模型。

王军等对萧山正常固结饱和软黏土进行了应力控制的循环三轴试验,研究了循环荷载作用下土体的刚度软化及应变软化情况,并推导出反映土体刚度软化规律的经验公式,得到了这一地区软黏土的破坏刚度比。其利

用推导出的反映土体软化规律的经验公式,并结合修正的 Iwan 模型对软黏土的动应力-动应变关系进行了描述。

陈国兴等以南京片状细砂为研究对象,采用 WF1 动静多功能三轴仪,研究了饱和片状细砂在循环荷载作用下静偏应力水平、循环应力水平对不排水动力特性的影响,并把振动孔隙水压力的发展与应力路径相联系,分析了循环荷载作用下不同阶段南京片状细砂所处的初始压密状态、压缩状态和膨胀状态的发生和发展过程;根据静偏应力与循环偏应力的大小,视有无偏应力反向,将南京片状细砂的破坏模式分为了循环活动性破坏和塑性应变累积破坏。

关彦斌等基于室内应力控制式动三轴试验,并考虑了动应力、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。

肖军华等通过室内动三轴试验,研究了不同密实度、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。

王常晶等利用 GDS 双向振动仪进行了不排水三轴试验,循环荷载分别被简化成单向(轴向)正弦波和双向(轴向和径向)正弦波形式。对比研究了径向振动对软黏土变形特性和循环强度的影响,给出了不同轴向循环应力幅值和不同径向循环应力比(径向应力幅值与轴向应力幅值之比)情况下的轴向应力-振动次数曲线。

姚兆明等通过上海地区粉细砂非等向固结排水循环三轴试验,考虑了粉细砂轴向累积塑性应变受初始孔隙比、有效固结压力、动应力比、动偏应力水平及初始固结压力等因素影响,建立了轴向累积塑性应变的显式模型。

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,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。截至目前,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土体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土体中动应力、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土体永久变形的理论研究与试验相结合的关键。