

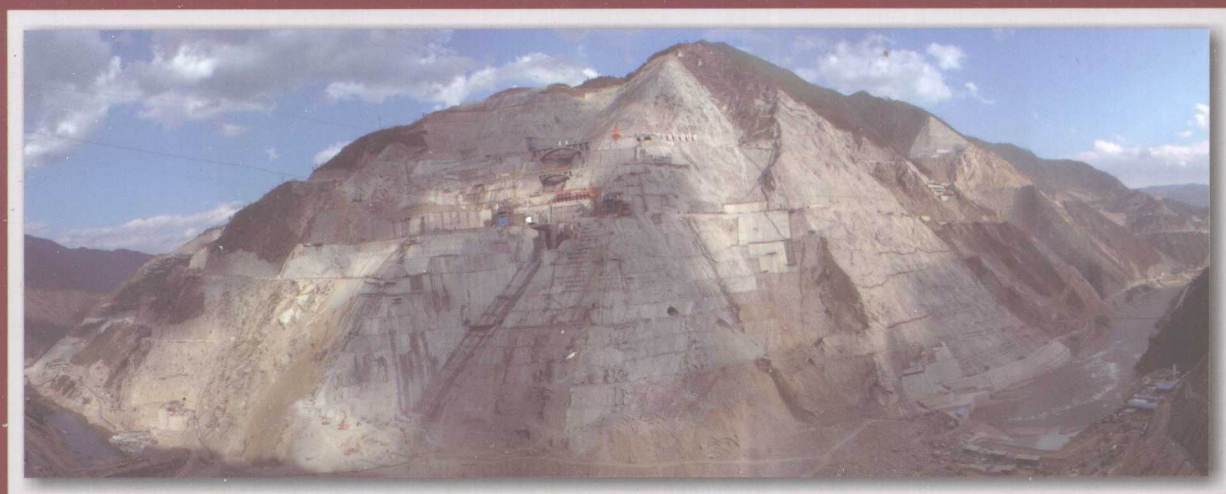


联合应对—西部的机遇与挑战

第三届全国岩土与工程学术大会论文集

The 3rd Conference of Geo-Engineering, China

黄润秋 许 强 主编



四川出版集团·四川科学技术出版社

第三届全国岩土与工程 学术大会论文集

主 编 黄润秋 许 强

编 委	宋玉环	伍法权	徐 前	张建民
	张建红	方祖烈	刘 彤	彭建兵
	施 斌	陈剑平	李天斌	唐 川
	赵其华	巨能攀	李渝生	裴向军
	王运生	任光明	吴礼舟	郑 光

四 川 出 版 集 团
四川科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

第三届全国岩土与工程学术大会论文集/黄润秋,许强主编.
—成都:四川科学技术出版社,2009.6
ISBN 978-7-5364-6850-4

I.第... II.①黄...②许... III.岩土工程—学术会议—文集 IV.TU4-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第086355号

第三届全国岩土与工程学术大会论文集

主 编 黄润秋 许 强
责任编辑 任维丽
封面设计 黄 莎
版式设计 曹京龄
责任校对 郑 光
责任出版 邓一羽
出版发行 四川出版集团·四川科学技术出版社
成都市三洞桥路12号 邮政编码610031
成品尺寸 297mm×210mm
印张48.75 字数1400千 插页2
印 刷 成都市海翔印务有限公司
版 次 2009年6月成都第一版
印 次 2009年6月成都第一次印刷
定 价 198.00元
ISBN 978-7-5364-6850-4

■ 版权所有·翻印必究 ■

■ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

■ 如需购本书,请与本社邮购组联系。

地址/成都市三洞桥路12号 电话/(028)87734035
邮政编码/610031 网址:www.sckjs.com

前 言

上世纪 80 年代,尤其是 90 年代以来,我国经济建设进入了一个高速发展时期,以西部地区大型水电工程建设为主体的“西电东送”工程,以“南水北调”为代表的跨流域调水工程,以“青藏铁路”建设为代表的极端环境下铁路建设和“国家高速铁路网建设工程”,“国家高速公路网建设工程”、以及以缩小城乡差距为目的的“小城镇建设工程”等相继实施,为我国岩土与工程理论的提升与技术的进步提供了很多机遇,同时也向岩土与工程的同行们提出了严峻挑战。2008 年 5 月 12 日四川汶川发生了里氏 8.0 级特大地震,这是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最广、救灾难度最大的一次地震。汶川地震使大量建筑物和基础设施遭受严重损坏,并诱发了数以万计的次生地质灾害,灾后恢复重建任务异常繁重,向我国岩土与工程界同行提出了更为严峻的挑战。

为了充分交流我国岩土与工程领域所取得的成就,共同面对西部的机遇与挑战,全面推动岩土与工程领域的科技进步,继前两届全国岩土与工程学术大会之后,中国地质学会工程地质专业委员会、中国岩石力学与工程学会、中国建筑学会工程勘察分会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会共同协商,决定于 2009 年 6 月 11 日~18 日在成都联合召开“第三届全国岩土与工程学术大会”,将会议的主题定为:联合应对——西部的机遇与挑战,并委托成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室具体承办此次学术大会。

第三届全国岩土与工程学术大会自 2008 年 1 月发出 1 号通知后,得到了全国岩土与工程界各位同行的积极响应,共收到论文 300 余篇。对于这 300 余篇论文,组委会与《岩石力学与工程学报》编辑部共同组织专家评审,选出部分论文载入《岩石力学与工程学报》正刊和增刊;其余论文再次组织专家评审,从中筛选出 159 篇汇编成集,交由四川科学技术出版社正式出版。由此形成了本论文集。

在本论文集的编辑与出版过程中,得到了会议主办单位中国地质学会工程地

质专业委员会、中国岩石力学与工程学会、中国建筑学会工程勘察分会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会以及承办单位成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室的大力支持与帮助。尤其是地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室的多位同志,在百忙中抽出时间,为论文的征集、汇总、评审、筛选、编辑、出版等工作付出了辛勤的劳动和汗水。在此,一并表示衷心感谢!

编 者

2009 年 5 月 11 日

目 录

第一篇 地基与基础

分级加载条件下上海淤泥质粘土的循环蠕变效应.....	3
南水北调中线膨胀土结构特性及其工程意义.....	9
地基情况对重力式桩基托梁挡土墙应力和变形的影响研究	12
青藏直流联网线路与并行道路的冻土工程比较及主要成果	18
基于高志理论计算人工冻土帷幕厚度	24
考虑桩土接触面滑移单桩沉降分析	29
冻融循环作用下细粒土抗剪强度特性的方差分析研究	34
湘浏盆地红层软岩工程特性研究	39
桩靴压入对固定平台基础扰动的数值模拟	46
国道 214 线多年冻土地区公路路基典型纵向裂缝监测和模拟研究	50
老采空区建筑地基稳定性评价的数值模拟研究	54
基坑工程等级可拓评价及评价指标权重的确定	58
含水量对结构性土力学性状的影响	62
地铁车站换乘段施工工法比选及数值模拟	67
我国黄土湿陷性研究的回顾与展望	73
渗流作用下吹填土沉降的时效特征研究	80
西安市三环路系统钢筋混凝土钻孔灌注桩试桩试验研究	84
带承台螺旋挤土桩竖向承载试验研究	89
深基坑开挖引起中间立柱竖向位移估算分析	93
基于引力场的堆载对基坑侧压力影响分析与初步实践	98
带伴侣的桩极限承载力初探.....	103
基于网络层次分析法(ANP)的基坑工程风险分析	107
北京某地下污水管道工程杂填土地基加固处理质量综合检测.....	112
半回填建筑地基承载力的探讨.....	117
混沌理论与支持向量机相结合的侧移预测模型.....	119
带褥垫层的桩土复合地基共同作用机理有限元分析.....	123

第二篇 地质灾害与工程风险

第三篇 边坡工程

特大型水利水电工程若干岩石力学问题讨论·····	301
用岩块抗剪强度估算抗压与抗拉强度的方法·····	311
岩腔内泥岩压裂风化特性研究·····	316
公伯峡面板堆石坝流变变形分析·····	320
坡前水位骤变情况下边坡浸润线的求解·····	323
露采边坡下大巷矿压显现规律及其支护对策研究·····	328
基于极限平衡理论的坝肩抗滑稳定性研究·····	333
地下水位抬升对自嵌式加筋土挡墙的影响·····	337
贯通性节理岩体的 J_v 研究 ·····	341
桩锚与土钉墙联合支护锚杆深部平面滑动失稳分析·····	344
雅砻江官地水电站料场人工开挖高边坡的失稳模式研究·····	348
陡倾顺层斜坡倾倒变形破坏的数值模拟研究·····	352
高陡软岩进水口边坡开挖响应及稳定性分析·····	356
裂隙水作用下岩体边坡结构可靠性分析·····	360
金沙江虎跳峡河段斜坡演变的内外动力耦合作用模式探讨·····	364
雅泸高速冰碛物室内试验及典型边坡稳定性研究·····	370
可移动块体的快速搜索·····	374
三峡工程坝区岩体三维不稳定岩石块体研究·····	376
三峡库区巫峡中段新生代以来地应力场迁移·····	382
滇藏铁路金沙江大桥高边坡稳定性数值模拟研究·····	386
基于强度折减技术的边坡稳定性及其影响因素分析·····	393
对 ACADS 边坡稳定分析考核题的探讨 ·····	398
黄土区某挡土墙改建前后失效概率对比·····	405
交通荷载下土坡响应测试与分析·····	410
锦屏一级水电站右岸普斯罗沟工程边坡稳定性及三维数值模拟分析·····	414
陕北某电厂 III 区边坡变形机制分析 ·····	420
非贯通性节理岩体高边坡稳定性分析及应用·····	424
西藏某矿山露采高边坡变形破坏模式及稳定性评价·····	430

第四篇 隧道与桥梁

隧道施工地质超前预报体系探讨·····	439
---------------------	-----

大跨度连拱隧道支护结构地震稳定性分析·····	443
锦屏辅助洞开挖过程中高地应力破坏机理初探·····	448
三峡深埋长隧道地质超前预报及影响分析·····	453
造山带深埋隧道岩爆灾害预测途径的思考·····	457
龙溪隧道施工地质条件分析及施工对策·····	463
固结灌浆对隧洞围岩稳定的影响·····	467
襄渝二线马鞍山隧道地质预报及围岩变形分析·····	472
徐家梁子隧道工程地质条件综合分析·····	476
动压巷道围岩裂隙发育模型试验研究·····	481
锦屏二级水电站辅助洞西端岩溶发育特征研究·····	485
浅埋隧道出口塌方机理分析·····	493
隧道施工涌水岩体温度法预报主要问题探讨·····	499
模糊理论在隧道施工阶段围岩等级划分中的应用·····	503
深部岩体爆破损伤及控制研究·····	508
泥那都隧道混凝土受硫酸盐腐蚀分析及其防治措施·····	513
凝灰岩巷道变形失稳机理及处置对策研究·····	517
低地应力区地下洞室围岩稳定性评价解析法·····	522
基于 ANSYS 的隧洞环锚预应力混凝土衬砌计算研究 ·····	526
锦屏 I 级电站厂房区褶皱与洞室开挖卸荷分析·····	531
基于三维数值模拟的立交隧道监控量测研究·····	535
用拱模型方法评价巷道上方场地的稳定性·····	539

第五篇 水文地质与环境地质

高水压下构造破碎带突水“渗流转换”理论与试验研究 ·····	545
热流固耦合问题有限元方法研究及应用·····	550
金属离子污染土土工性质的实验研究·····	556
有机污染物在 GCL 三层衬垫中的扩散运移计算 ·····	561
振动导致黄河口海床电性变化研究·····	565
黄河三角洲沉积物固结过程长期观测研究·····	570
红壤吸附特性研究·····	577
基于 MODFLOW 渗流分析的景观湖防渗方案优化研究 ·····	580
垃圾渗滤液污染地下扩散现场监测研究·····	584
环形电极间距对海床界面电阻率探针测量结果影响研究·····	592
黏性沉积物抗侵蚀性研究综述·····	597
成都地区土壤源热泵发展与应用综述·····	603

第六篇 岩土与工程新技术新方法

预制桩分布式光纤检测系统研究·····	609
基于岩土强度变异性的重复荷载下土体塑性累积变形计算方法研究·····	614
粉土固化剂研制的试验研究·····	618
探地雷达在隧道地质灾害探测中的应用·····	622
JDD-100 型城市地质调查多功能钻机的研究·····	627
基于 GIS 与 Voronoi 多边形思想的岩体类型分布图的编制·····	631
黄土弹塑性损伤本构模型·····	634
井壁稳定的实钻资料反演研究·····	640
废弃矿井地下空间储气技术分析·····	644
结构面强度参数预测方法新探索·····	648
一种新型的结构面起伏形态测量工具—接触打孔器的研制·····	651
简单层状地质体三维建模初步研究·····	654
结构面质量分级体系及力学参数研究·····	659
基于区间理论的隧道施工过程非概率风险评估方法·····	664
岩石、混凝土损伤协同特征研究·····	670
基于结构面分布分维数的岩体质量评价方法研究·····	674
隧道施工掌子面前方溶洞声波反射法探测模型试验研究·····	678
双剪理论研究(1)——泼冷水·····	681

第七篇 汶川地震与工程抗震

甘肃陇南武都灾后重建地质安全与资源保障程度评估·····	685
某在建水库大坝震后安全评价分析·····	690
汶川地震山体崩塌破坏特征的分析与启示·····	696
浅论汶川大地震对建筑工程破坏的因素及防治措施·····	700
向家坝水电站进水口岩质高边坡随 5.12 汶川大地震响应的监测分析·····	702
地震作用下边坡安全系数时程计算方法·····	707
中国西北某区活动断裂特征初步研究·····	712
氦测试技术在秦岭造山带隐伏断裂活动性研究中的应用·····	716
基于声发射监测的岩石破裂孕震模式实验研究·····	720
准饱和土特性对地震波的传播影响分析·····	725
预应力锚杆地震反应分析·····	729

江西地震岩土工程地质研究与防灾展望..... 732

小净距公路隧道抗震注浆加固范围研究..... 738

第八篇 岩土工程教育与规范建设

年轻岩土工程师的成长..... 745

研究生教育中讨论式课堂教学手段的应用和体会..... 749

项目教学法在岩土工程教学中的应用..... 753

地方新建本科院校土力学课程教学改革初探..... 756

《公路工程抗震设计规范》修订的几点建议 759

岩土工程中的知识产权保护问题..... 765

第一篇

地基与基础

分级加载条件下上海淤泥质黏土的循环蠕变效应

唐益群^{1,2} 刘 莎² 杨 坪^{1,2} 王建秀^{1,2}

1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海, 200092;

2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海, 200092

摘要:本文以上海第④层原状淤泥质黏土为研究对象,通过室内循环三轴试验,采用分级加载模式,研究土体循环蠕变、孔压随循环应力比及荷载振动次数的增大而变化的规律,发现分级循环荷载作用下存在稳定应力比及破坏应力比两个临界值,并将黏土蠕变分为衰减稳定、快速增长、瞬时破坏三个阶段;循环蠕变由累积塑性应变与可逆弹性应变两部分组成,当应力水平小于破坏应力比时,可逆弹性应变与循环应力比之间存在唯一线性关系;在相同应力水平下,土体循环蠕变特性受荷载振动频率的影响。

关键词:淤泥质黏土 循环蠕变 孔隙水压力 分级加载

1 前言

土体的黏滞性决定了土体蠕变效应的产生。黏土的蠕变特性对于土体固结、边坡稳定及地基承载力等有着重大影响。尤其是受到交通或波浪荷载等长期循环荷载的作用时,影响更为显著。Miura等^[1]通过实测发现 Saga 机场道路由于交通荷载作用产生的附加沉降达到了 15cm 左右。上海地铁隧道在某区段轴线沉降量已超过 20cm,严重影响地铁的正常运营,而且还引起地表一些老房屋的开裂^[2]。因此,对长期循环荷载作用下黏土的循环蠕变特性进行研究,具有重要的工程意义。

20 世纪 60 年代初以来,许多学者对黏土的循环荷载效应进行了探索和研究。Seed、Chan C K^[3]研究了交通往复荷载作用下低路堤的变形特性。Anderson 等^[4]应北海重力式石油平台建设的需要,对波浪荷载下 Drammen 黏土特性进行了系统广泛的研究。Hyodo M、Yasuhara K^[5]考虑孔压消散固结对土体形变的影响,分析了交通荷载作用下饱和软土地基的孔隙水压力及残余变形。周健、屠洪权等^[6]提出了动力荷载作用下饱和软黏土残余变形的计算模式。蒋军、陈龙珠^[7]也对长期循环荷载作用下黏土的一维沉降进行了相关研究。以上研究绝大部分集中于长期循环荷载作用下残余应变的预测,而对于土体循环蠕变的本质特点及变化规律的研究则很少见。为准确而有效地解决地铁行车荷载作用产生的相关工程地质灾害问题,有必要对地铁行车荷载作用下黏土的蠕变特性进行试验研究。

本文以上海第④层淤泥质黏土为研究对象,通过室内不排水循环三轴试验,采用分级施加循环荷

载的模式,研究了土体循环蠕变、孔隙水压力随循环应力比及荷载振动次数的增长而变化的规律。

2 试验仪器及土料

试验仪器采用英国进口多功能动态循环三轴试验系统 GDS (Global Digital Systems)。该系统主要由三轴压力室、围压控制源、反压控制源、数据采集器、计算机等组成,试验过程受计算机系统实时监控,并自动实现数据的采集及处理。

试验土样取自上海地铁 2 号线静安寺站附近第④层淤泥质黏土,埋深 13.5m。该土层为 Q_4^2 的滨海-浅海相沉积,厚约 10 m,含云母及贝壳碎屑,夹薄层粉性土。该层属天然含水量高、孔隙比大、高压缩性、低强度的软黏性土层,具中高灵敏度。土层的部分物理力学参数见表 1。

表 1 土层的部分物理性质

土层	含水量 (%)	重度 (KN/m ³)	液限 (%)	塑限 (%)
④	50.2	16.6	43.4	23.2

3 试验控制参数及步骤

本次试验对上海第④层淤泥质黏土土样分级施加正弦波形的循环荷载。张曦等^[8]通过对上海地铁的现场监测,得到列车经过时隧道周围第④层淤泥质黏土产生的土体响应频率有高频区段[2.4Hz~2.6Hz]和低频区段[0.4Hz~0.6Hz]。因此试验中采用振动频率 0.5Hz 及 2.5Hz 进行对比分析,控制参数见表 2。

室内试验步骤如下:(1)土样切制及安装:将土样制成直径 38mm、高 80 mm 的试样,小心安装在三

轴压力室内,避免试样扰动,密封容器开始试验;(2)反压饱和:采用 Sacton 模块进行反压饱和时间 120min,然后进行 Skempton B 值检测,在 B-Value 达到 0.98 以上认为试样达饱和;(3) K_0 固结:为最大限度地模拟现场条件,采用 Advanced Triaxial Test 模块使试样在 K_0 条件下进行固结, K_0 系数取值 0.7。固结

时间约 24h,轴向应变 $\leq 0.05\%/h$ 认为固结完成;(4)循环三轴试验:输入已经确定的控制参数,分级施加正弦波形循环荷载,初始循环应力幅值 q_{cyc} 为 10kPa,逐级增加荷载幅值 5kPa,每级荷载振动次数为 2000 次,直到土样破坏。分级加荷过程如图 1 示。

表 2 试验控制参数表

试样编号	载入波形	轴压 kPa	围压 kPa	反压 kPa	荷载基准值 kPa	分级应力幅 kPa	振动频率 Hz
A	正弦波	235	195	100	265	5	0.5
B	正弦波	235	195	100	265	5	2.5

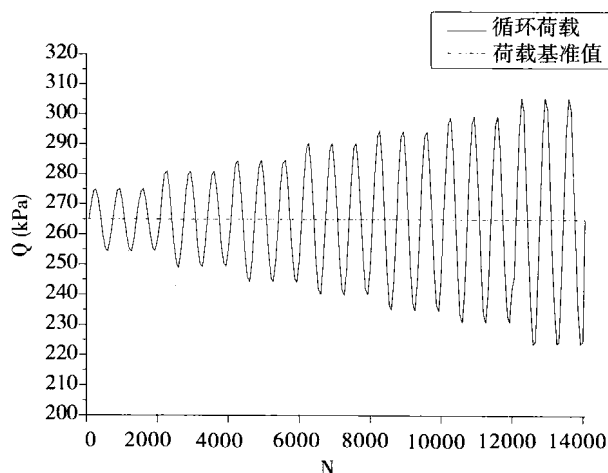


图 1 分级正弦波形循环荷载

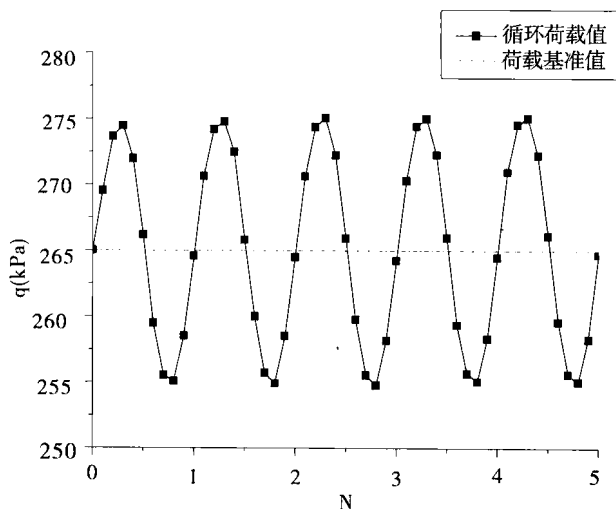


图 2 应力幅值为 10kPa 的循环荷载

3 试验结果及分析

3.1 循环蠕变的构成

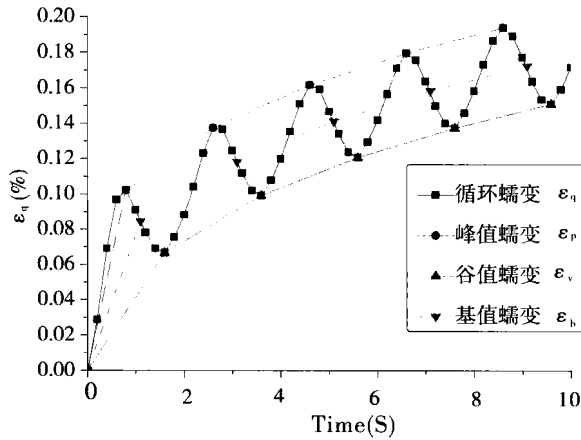
本次试验结果发现,各级循环荷载作用下第④层淤泥质黏土土体循环蠕变的变化特征具有相似性。这里以荷载频率 0.5Hz、循环应力幅值 10kPa、振动次数 2 000 次的阶段为例进行分析。该阶段循

环荷载如图 2 示。

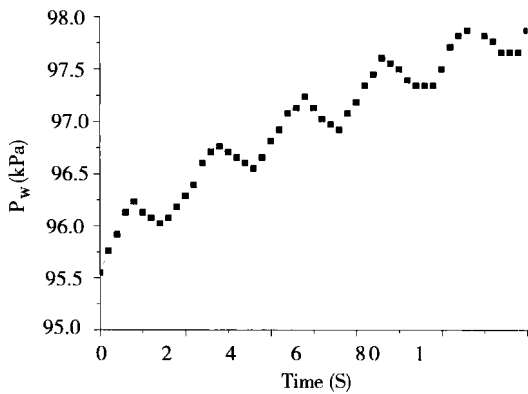
图 3 为该阶段最初 5 个循环周期内第④层淤泥质黏土土体循环蠕变、孔隙水压力与时间的关系曲线以及偏应力与偏应变的关系曲线。试验过程中每个循环采集 10 个数据点。由图 3(a)可见,循环蠕变为逐步上移的近似正弦波形曲线。取各循环的应变峰值点、应变谷值点连线分别得到峰值蠕变 ε_p 曲线、谷值蠕变 ε_v 曲线。定义应变基值点 $\varepsilon_b = (\varepsilon_p + \varepsilon_v)/2$,得到基值蠕变 ε_b 曲线。由图可见,循环蠕变是以基准蠕变为基础并在某个应变幅值范围内变化。三条曲线具有相同的发展趋势,应变均减速增长。再定义可逆弹性应变 $\varepsilon_e = (\varepsilon_p - \varepsilon_v)/2$,则 $\varepsilon_p = \varepsilon_b + \varepsilon_e$; $\varepsilon_v = \varepsilon_b - \varepsilon_e$ 。可逆弹性应变的存在反映了土体的弹性特征。而基础蠕变的增长表明每个荷载循环产生一定的累积塑性应变,且累计量有逐渐减少的趋势。基础蠕变显示了土体的塑性特征,其本质是土体的累积塑性应变。因此,可逆弹性应变和累积塑性应变共同构成了土体的循环蠕变。

图 3(b)为最初 5 个循环周期内的第④层淤泥质黏土土体孔隙水压力曲线。可见,随时间发展,孔压按正弦波形循环上升,具有和循环蠕变相同的构成及发展特点,但与应变相比,波形略显不规则。图 3(c)显示加载初期第④层淤泥质黏土土体偏应力-应变关系的滞回曲线。曲线向右推移并快速趋于密集,表明塑性应变逐渐积累但积累速率迅速衰减。

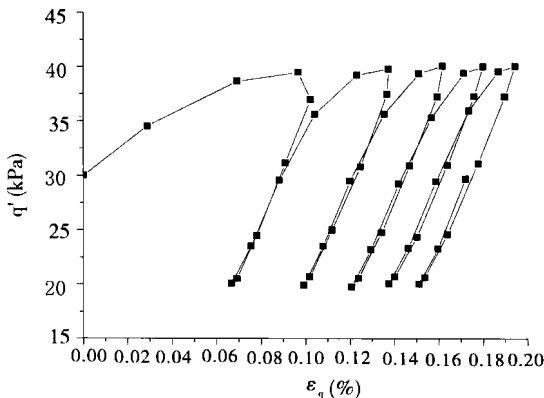
该阶段最终 5 个循环周期内第④层淤泥质黏土土体的相应特性如图 4 示。由图 4(a)可见,峰值蠕变、基值蠕变以及谷值蠕变曲线演变成三条几乎水平且相互平行的直线。基值蠕变的水平表明土体累积塑性应变增长率衰减趋于 0,累积应变达到稳定值。由峰值蠕变、基值蠕变两线平行并结合公式 $\varepsilon_e = (\varepsilon_p - \varepsilon_v)/2$ 计算可知,该阶段土体可逆弹性应变最终达到稳定值 0.023%。这表明土体循环蠕变已经稳定。图 4(b)为最终状态的孔压曲线。孔隙水



(a) 循环蠕变曲线



(b) 孔隙水压力曲线



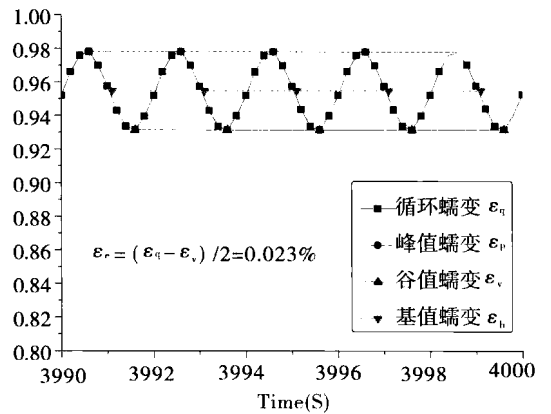
(c) 偏应力与偏应变的关系曲线

图 3 最初 5 个荷载周期内循环蠕变、孔隙水压力与时间的关系曲线及偏应力与偏应变的关系曲线

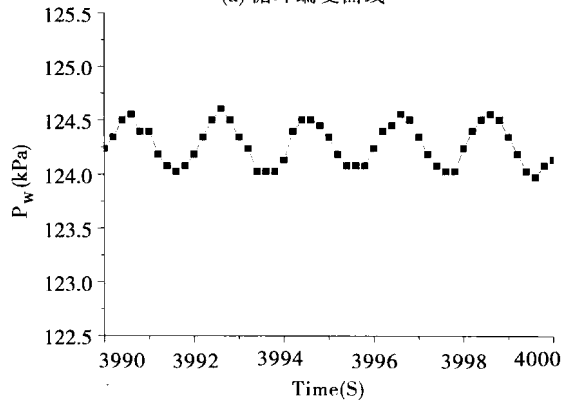
压力虽略微有点不规则,但整体亦趋于稳定。图 4 (c) 中的土体滞回曲线几乎完全重合。随着加荷时间的增长,土体越来越密实,累积塑性应变增长趋于稳定,因此,滞回曲线不再往右推移而是重叠在一起。

3.2 可逆弹性应变的变化

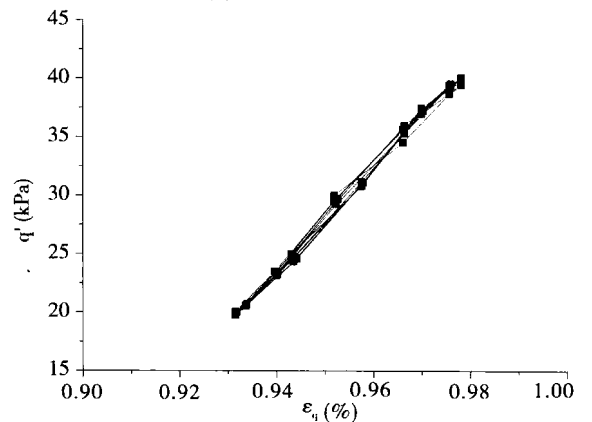
采用与 0.5Hz 初始阶段相同的分析方法,对第④层淤泥质黏土的 A、B 两试样在不同循环应力幅



(a) 循环蠕变曲线



(b) 孔隙水压力曲线



(c) 偏应力与偏应变的关系曲线

图 4 最终 5 个荷载周期内循环蠕变、孔隙水压力与时间的关系曲线及偏应力与偏应变的关系曲线

值的各级荷载作用下的可逆弹性应变进行分析计算。结果发现,土体的可逆弹性应变并不是一成不变的,它同时受到循环应力幅值以及循环荷载振动频率的影响。

图 5 是荷载频率 0.5Hz 及 2.5Hz 条件下第④层淤泥质黏土土体的可逆弹性应变与循环应力幅值的关系曲线。可看出,随着循环应力幅值的增大,可逆弹性应变也相应增长。采用分级加载的试验过程中发现,存在一个临界循环应力幅值,当幅值超过此临界值时,土样的循环蠕变会急剧增加而瞬时破坏。

相应的土体可逆应变增长速率由增长突然变为减小,曲线变化趋势出现转折。若循环应力比用公式 $CSR = \frac{q_{cyc}}{2\sigma} = \frac{3q_{cyc}}{2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}$ 定义,则可将该幅值对应的循环应力比定义为破坏应力比。图5显示,破坏应力比受震动频率的影响。0.5Hz及2.5Hz下的临界应力幅分别为35kPa、40kPa,即破坏应力比分别为0.14、0.16。即,应力水平一定时,频率越高,土体的破坏应力比也越大。

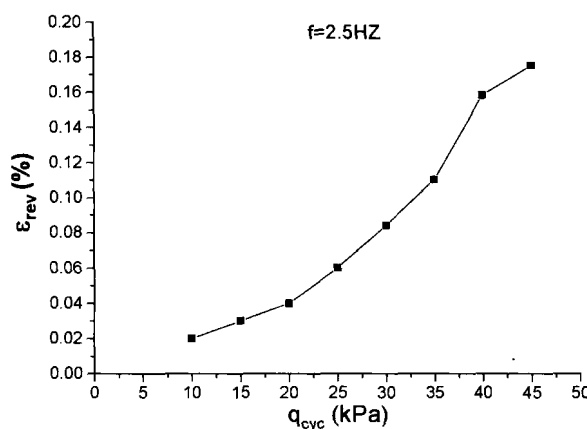
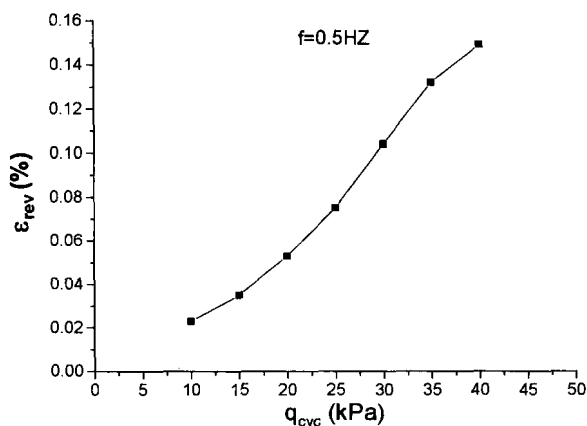


图5 可逆弹性应变与循环应力幅值的关系曲线

图6显示,当循环应力比小于破坏应力比时,可逆弹性应变与循环应力比之间存在唯一的线性关系。这与朱登峰等^[9]的观点基本一致。另由两种频率下的线性拟合关系式还可看出,荷载频率对此线性关系的影响较小。

不同循环应力比下频率与可逆弹性应变的关系曲线见图7。可看出,第④层淤泥质黏土土体的可逆弹性应变受荷载振动频率的影响。相同应力水平下,频率越低,土体产生的可逆弹性应变反而越大,且随着应力水平的增大,差距增长迅速。表现为线

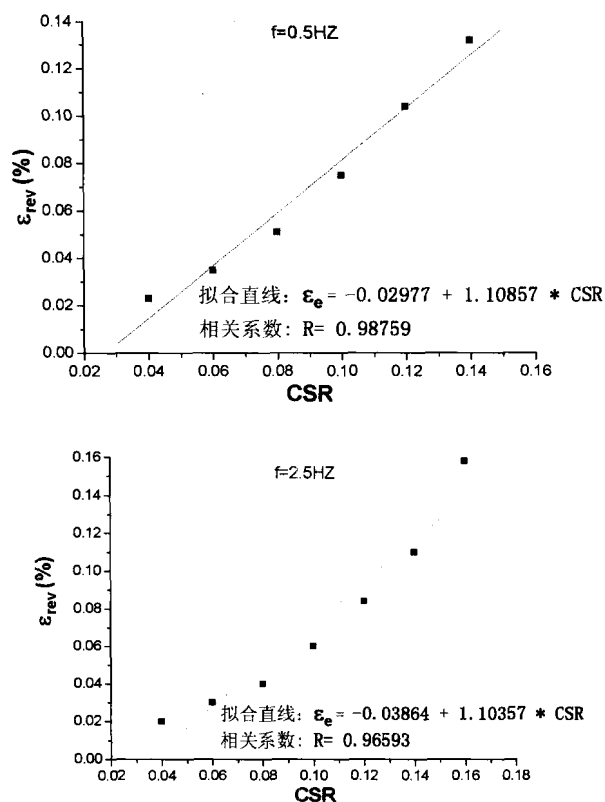


图6 可逆弹性应变与循环应力比的关系曲线

段的倾斜程度越来越大。

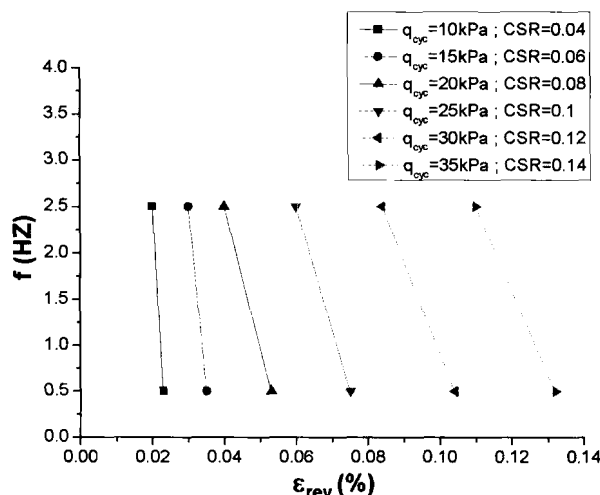


图7 不同循环应力比下频率与可逆弹性应变的关系曲线

3.3 累积塑性应变及残余孔隙水压力的发展

根据以上分析知,第④层淤泥质黏土土体孔隙水压力具有和循环蠕变类似的构成特点和发展规律。因此,根据试验结果可绘制出土体的基值蠕变、基值孔压曲线,其本质即土体的累计塑性应变、残余孔隙水压力随荷载振动次数变化而发展的规律曲