

袁霄, 左双英, 吴道勇, 等. 贵阳红黏土轴向加卸载变形特性及损伤机理分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(7): 249-261. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.019

YUAN Xiao, ZUO Shuangying, WU Daoyong, et al. Deformation characteristics and damage mechanism of Guiyang red clay under axial cyclic loading and unloading [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(7): 249-261. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.019

贵阳红黏土轴向加卸载变形特性及损伤机理分析

袁霄¹, 左双英^{1,2}, 吴道勇², 张清²

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州贵阳 550025)

摘要:【目的】为研究轴向加卸载对贵阳红黏土变形特性的影响,【方法】设计了轴向不同循环应力比、不同循环次数条件下的土样加卸载试验,辅以低场核磁共振技术以及SEM电镜扫描测试,探讨循环加卸载全过程土样宏观变形和孔隙结构的演化规律,揭示土样损伤机理。【结果】研究表明:循环加卸载使得贵阳红黏土内部结构经历着从压密到劣化的过程,随着循环次数和应力比的增大,应力-应变曲线由应变硬化型逐渐转变为应变软化型。经过多次加卸载后,试样孔隙分布 T_2 谱图曲线由“山峰型”向“丘陵型”发展,孔径范围与峰值频谱呈减小趋势,大、中孔隙数量逐渐减少,小、微孔隙逐渐增多,粒团之间以面接触变为线、点接触。基于循环过程中卸载模量和塑性应变的变化定义损伤系数,随着循环次数和应力比的增加,损伤呈上升趋势,与孔隙变化规律一致。【结论】研究结果可为施工期红黏土路基压实及稳定性评价提供理论指导。

关键词: 贵阳红黏土; 轴向加卸载; 核磁共振技术; 损伤; 孔隙结构; 变形

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.019

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)07-0249-13



Deformation characteristics and damage mechanism of Guiyang red clay under axial cyclic loading and unloading

YUAN Xiao¹, ZUO Shuangying^{1,2}, WU Daoyong², ZHANG Qing²

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, Guizhou, China;

2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, Guizhou, China)

Abstract: [Objective] In order to study the effect of axial loading and unloading on the deformation properties of Guiyang red clay, [Methods] the loading and unloading tests of soil samples under different axial stress ratios and cyclic numbers were designed, supplemented by low-field nuclear magnetic resonance technology and SEM electron microscope scanning. The evolution laws of macro-deformation and inner pore structure of soil samples during the whole cycle loading-unloading process were discussed to reveal the damage mechanism of soil samples. [Results] The result show that the internal structure of Guiyang

收稿日期: 2024-10-08; 修回日期: 2024-12-28; 录用日期: 2025-01-09; 网络出版日期: 2025-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(42167025); 贵州省科学技术基金项目(黔科合基础-ZK[2022]重点018)

作者简介: 袁霄(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质工程方面研究工作. E-mail: 1748730038@qq.com

通信作者: 左双英(1977—), 女, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事地质工程方面的教学和科研工作. E-mail: syzuo@gzu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

red clay underwent a process from compaction to deterioration due to cyclic loading and unloading. With the increase of cycle number and stress ratio, the stress-strain curve of Guiyang red clay gradually changed from strain hardening type to strain softening type. The T_2 spectrum curve of pore distribution was developing from “mountain peak type” to “hilly type”, and the pore size range and peak spectrum of the sample were gradually decreasing. The number of large-medium pores gradually decreased, while the number of small-micro pores gradually increased. The clay particles around the pores were mostly in the form of closely cemented mineral particles, and the surface contact between the particles was changed into the form of line and point contact. The damage coefficient was defined by the change of unloading modulus and plastic deformation, indicating that the more the number of cycles and stress ratio, the more serious the damage of the soil sample, which was consistent with the law of pore change. [Conclusion] The result can provide theoretical guidance for the compaction and stability evaluation of red clay subgrade during construction period.

Keywords: Guiyang red clay; axial loading and unloading; nuclear magnetic resonance technology; damage; pore structure; deformation

0 引言

红黏土是一种黄色或棕红色的特殊结构性黏土,由碳酸盐岩经过风化、侵蚀、搬运、沉积、红土化等作用后形成的水、固、气三相结合体,广泛分布于我国贵州、云南、广西等省区,在四川、重庆、湖北、湖南、江西等部分区域也有零散分布^[1-2]。近年来,国内外学者对红黏土成因、物理力学性质、地球化学特征、结构特性、水理性质以及强度和变形特征等进行了基础研究,普遍认为红黏土物理性质较差,但力学性质较好^[3-5],在做好截排水情况下,是一种比较好的路基填筑材料。

路基压实是一个轴向反复加卸载的过程,为研究循环荷载作用下土体力学性质的变化特征,大量学者对不同循环条件下土体变形特性进行研究。廖化荣^[6]、刘晓红等^[7]分别对原状红黏土进行三轴循环荷载试验,发现在循环荷载作用下,原状红黏土塑性变形会逐渐累积,随着应力水平的提高土样变形分为弹性变形、塑性变形到完全破坏三个阶段。倪静等^[8]通过试验研究发现黏土破坏过程中应力作用水平比加载频率更重要。CUI等^[9]研究认为加卸载应力路径条件下土体的体积变化与施加应力是否大于膨胀压力有关,从而造成机械效应和物理化学效应之间的转变。CAI等^[10]对饱和重塑黏土进行变围压与恒定围压单向循环三轴试验,认为采用变围压条件更能正确评估交通荷载作用下路基的变形情况。MEI等^[11]开展了应力控制循环三轴试验,研究应力或应变幅值对累积应变的影响规律,试验结果表明随着应力或应变幅值的增大,累积应变速率逐渐变大。部分研究者提出了CSR(循环应力)或DSR(重复应力与剪切强度的比值)的概念表达其影响^[12-13],结果表明,相同振动次条件下的累积应变速率随着CSR或DSR的增大而

增大。CHEN等^[14]发现,随着初始静态偏应力的增大,相同振动次数条件下的累积应变越大。PANG等^[15]针对黏土材料开展动三轴试验发现,黏土的累积流动方向在循环加载过程中并非保持不变,随着振动次数的增加,累积体应变增加。WANG等^[16]通过对比常规、循环三轴试验条件下的应力应变情况,发现循环试验条件下试样峰值强度更大,长期强度大致相同,应变软化系数更大,并且随着围压的升高,应变软化系数逐渐降低。可见,关于黏性土循环加卸载力学特性的研究成果较多,但其应用背景和测试方案各不相同,针对红黏土路基压实轴向反复加卸载力学过程方面的研究则不多见。

红黏土结构的改变是土体宏观力学性质变化的内在原因,外部荷载条件下,土体内部颗粒通过相互错动、位移来承担外界荷载,从而导致孔隙的大小、形状产生变化。近年来核磁共振与扫描电镜成为土体微观结构变化探究的主要手段,部分学者研究发现红黏土内部孔隙形状多为圆状,部分大孔径孔隙相对更为修长,不同干密度条件下重塑红黏土颗粒分布差异较大,较大干密度试样中孔隙分布更均匀^[17-18]。探究不同地质环境与外部荷载条件下土体微观结构的变化规律对于实际工程更具有参考价值,XU等^[19]分析了渗透试验下黄土的细-微观结构变化行为,验证了宏观力学作用下土体孔隙结构的演化规律。吴云涛等^[20]利用核磁共振对侧向卸载与轴向加载应力路径条件下土体内部孔隙变化进行研究,发现同一应力路径条件下,围压越小,试验后土体中小孔隙含量越少而大孔隙含量越多;相同围压条件下,侧向卸载应力路径试验后土体内部大孔隙含量更多,小孔隙含量更少。WANG等^[21]探讨了碱污染红黏土的孔隙分布以及颗粒之间的胶结特性,揭示了微观结构对土体强度的影响。WAN等^[22]探讨分析了冻土冻融过程中孔隙

水含量和孔径分布特征曲线的变化规律, 揭示了土体孔隙对冻土强度的影响。WANG 等^[23]对外力作用下岩土材料核磁共振 T_2 谱图进行分析, 阐明了岩土材料强度劣化的细观损伤行为, 土颗粒间通过改变接触形式与孔隙尺度特征来控制土体强度与变形^[24-25]。以上研究成果促进了人们对荷载作用下土体细观结构的认识, 通过分析红黏土结构变化, 可以为建立宏-细观等效关系提供了思路, 因此对特殊应力路径下土体细观进行研究是必要的。

综上所述, 国内外学者对红黏土的基本物理力学特性的研究已取得一定的成果, 而对特殊应力路径条件下红黏土的力学特性及内部结构变化的研究还需进一步加强, 尤其是特殊应力路径下的土样变形及损伤演化规律基本处于雏形状态。研究红黏土在循环加卸载作用下变形特性, 采用核磁共振技术、电镜扫描确定土样试验前后孔隙演化规律、粒团黏结等微观结构的变化, 分析损伤系数变化规律, 可进一步指导红黏土路基填筑工程实践。

1 试验材料与方案

1.1 基本概况

试验土样取自贵州大学资源与环境工程学院物探试验场地, 由三叠系安顺组白云岩风化而成, 取样过程中先将表面受雨水冲刷、植物根系发育严重的散土清除, 挖掘至新鲜土层, 距地面深度约 2~3 m 处开挖出台阶状, 取出块状土样并用保鲜膜包裹后带回室内处理, 土样呈棕黄、棕红色, 可塑-硬塑状态, 取样现场如图 1 所示。

1.1.1 基本物理力学试验

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019), 对取回土样进行天然含水率、密度、液塑限与比重测试, 试验结果如表 1 所列。

表 1 基本物理性质参数表

Table 1 Basic physical properties parameter table

含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho_0/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比重 G_s	塑限 $\omega_p/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑性指数 I_p	孔隙比 e
32.78	1.932	2.656	20.8	79.35	58.55	0.88

1.1.2 最大干密度与最优含水率试验

将土样烘干机机械碾碎后过 0.2 mm 筛, 配置为不同含水条件后进行击实试验, 分 5 层击实, 每层 25 击, 测试击实后土样的湿密度与含水率, 并计算出对应干密度, 将其绘制在 $\rho_d-\omega$ 曲线上, 如图 2 所示, 试样最大干密度为 1.385 g/cm^3 , 其对应的最优



图 1 取样现场照片

Fig. 1 Sampling site

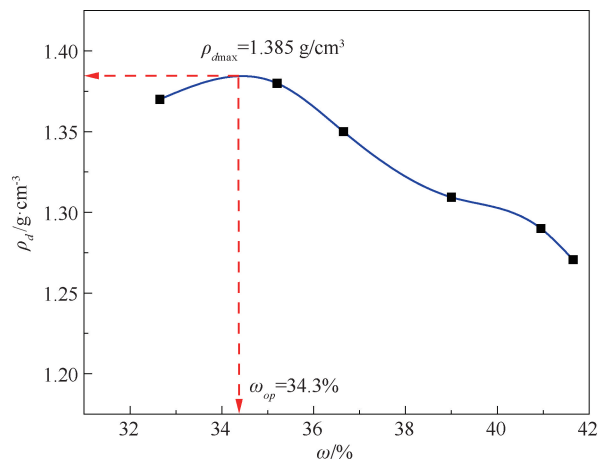


图 2 贵阳红黏土击实试验曲线

Fig. 2 Compaction test curve of Guiyang red clay

含水率为 34.3%, 因此制备最优含水率、最大干密度的重塑土试样用于后续的试验中。

1.2 轴向循环加卸载压缩试验

参考相关文献, 采用一定循环应力比(一次加卸载过程中应力峰值与峰值强度的比值)^[8,26], 对贵阳红黏土在不同循环次数条件下进行轴向加卸载三轴压缩试验, 分析土体变形特性、加卸载模量、破坏形态等变化特征。试验方案如表 2 所列, 主要针对含水率为 34.3%、干密度为 1.385 g/cm^3 的重塑红黏土样, 在围压为 50 kPa 条件下, 进行常规三轴试验; 在围压为 50 kPa、100 kPa 和 200 kPa 条件下, 进行轴向加卸载循环 3 次、5 次、7 次的三轴压缩试验, 并比较不同试验条件下的力学特性。

图3是SLB-1型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪,该仪器可提供的20 kN的轴向力和1.99 MPa的围压,控制方式有两种:等应变控制(0.002~4 mm/min)和等应力控制(0~20 kN)。

1.3 核磁共振试验

采用MesoMR12-060H-I型核磁共振成像分析仪,对力学试验前与循环加卸载1次、3次、5次、7次后的试样进行核磁共振测试,试样处理装置与试验设

备如图4所示。核磁共振是指原子核中的氢在恒定外加静磁场中吸收特定频率 f 的电磁波,发生能级跃迁并改变能量状态,使得核自旋系统达到新的平衡状态,这一过程中会产生纵向弛豫分量 T_1 和横向弛豫分量 T_2 ,一般使用 T_2 来分析孔隙流体的性质^[27]。对于均匀磁场中的试样, T_2 可以近似地表示为

$$\frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{T_{2S}} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right)_{\text{pore}} = \rho_2 \frac{F_S}{r} \quad (1)$$

表2 轴向加卸载三轴压缩试验方案

Table 2 Axial loading and unloading triaxial compression test scheme

试样编号	应力路径	干密度 $\rho_d/g \cdot \text{cm}^{-3}$	围压/kPa	循环次数	循环应力比
1	常规	1.385	50	常规破坏	—
2	轴向加卸载	1.385	50	3、5、7	0.7、0.85、0.95
3			100	5	0.7
4			200	7	0.7

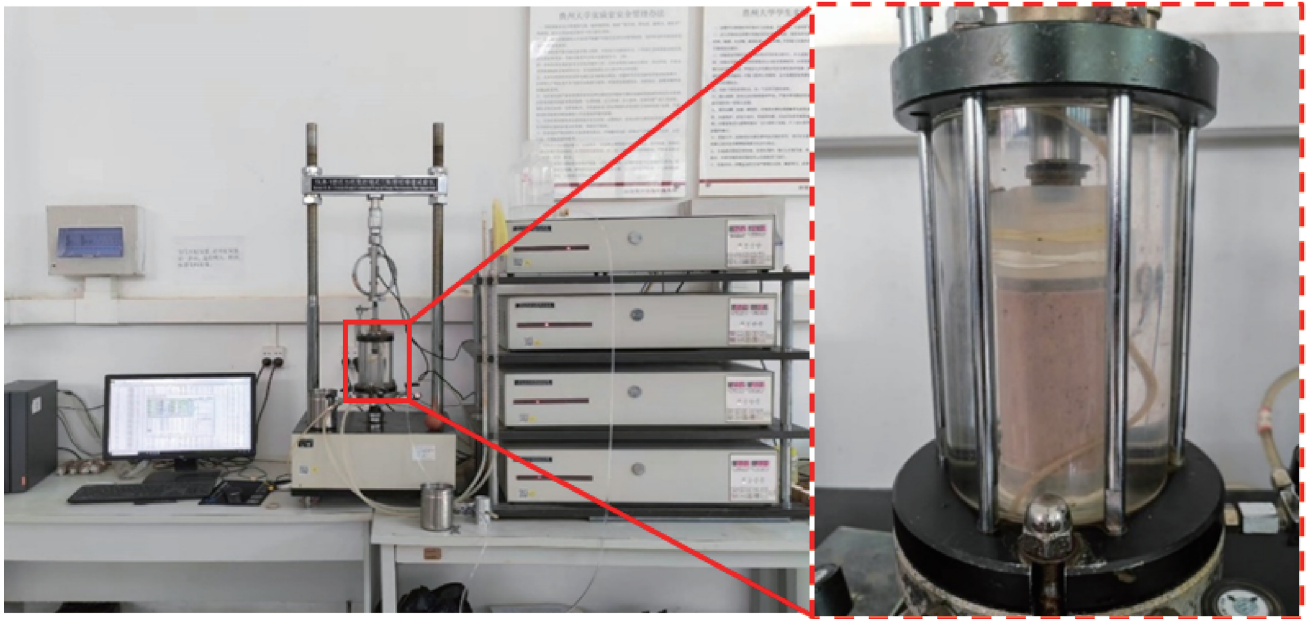


图3 SLB-1型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪

Fig. 3 SLB-1 stress-strain controlled triaxial shear permeability tester



(a) 饱和器中试样

(b) 饱和装置

(c) 核磁共振仪器

图4 试验装置及设备

Fig. 4 Test device and equipment

式中, ρ_2 为横向弛豫率, T_{2s} 为表面弛豫时间, $(S/V)_{pore}$ 为孔隙比表面积; F_s 为孔隙形状因子, 当 $F_s = 1, 2, 3$ 时, 表示岩土材料孔隙形状, 分别代表平面、柱形孔与球形孔。考虑孔隙为球形, 即 $F_s = 3$ 。

1.4 电镜扫描试验

对常规三轴加载与轴向加卸载试验前后试样进行电镜扫描试验, 对比不同应力路径下试样破坏细观结构图像的变化规律, 依此探究循环加卸载试验对土体内部结构的影响。

2 宏观力学试验结果分析

2.1 孔压、应变、应力-时间变化分析

在循环应力比 0.7、围压为 50 kPa、循环 5 次条件下试样的孔压、应变、应力-时间曲线如图 5 所示。随着时间增加, 应力-时间曲线呈明显的循环变化, 加载时间较短而卸载时间较长, 当最后一次卸载完成后加载至试样破坏, 随着循环次数的增加, 最后阶段应变软化特性表现越明显, 因此认为贵阳地区饱和重塑红黏土应力-应变特性受循环荷载影响。如图 5 所示, 在每一次循环加卸载周期中, 加载使试样应变增大, 卸载产生一定回弹, 变形量随循环回次及时间的增加形成阶梯状累积, 到最后阶段持续增大到破坏。试样内部的孔隙压力呈现出与应变相反的变化规律, 加载阶段轴向变形增大而内部孔隙体积减小, 孔压升高; 卸载阶段, 回弹变形使得试样内部孔隙增大, 孔压降低。在最后一次加载过程中, 轴向应力达到试样临界值时, 孔

压先达到一个峰值状态, 随后急速降低, 说明试样内部孔隙之间逐渐贯通, 产生塑性变形接近破坏, 此时对应的轴向应变在 20% 左右, 即使偏应力不变或缓慢降低, 试样受有效应力仍快速增大, 从而导致其轴向应变仍不断上升直至破坏。这一过程中卸载后的轴向变形增量、孔压变化与贵阳红黏土剪切破坏阶段密切相关。

2.2 应力-应变曲线分析

图 6(a) 为围压为 50 kPa、应力比为 0.8 条件下不同循环次数贵阳红黏土三轴加卸载应力-应变曲线, 随着循环次数的增加, 应力-应变曲线由应变硬化型逐渐转变为应变软化型, 且循环次数越多, 软化现象越明显。试样在循环 3 次、5 次、7 次后应力应变曲线峰值应力分别为 230 kPa、236 kPa、253 kPa, 对应的峰值应变为 10%、12%、10%, 峰值强度呈现出随循环次数增加而缓慢增大的趋势, 且循环次数越多增量越大。如图 6(b) 所示, 试样在围压 50 kPa、100 kPa、200 kPa 条件下峰值应力分别为 220 kPa、321 kPa、409 kPa, 即随着围压的增加其峰值强度逐渐增加, 轴向变形逐渐减小。图 6(c) 为试样在围压 50 kPa、循环应力比分别为 0.70、0.85、0.95、循环 5 次条件下的应力-应变曲线, 随着循环应力比的增大, 峰值强度和对应的轴向应变也增大, 在 0.95 应力比条件下应力应变曲线为应变软化型。以上分析得出, 循环荷载作用下贵阳地区重塑红黏土峰值应力会变大, 再经历循环加卸载作用后, 应力-应变曲线由应变硬化型逐渐转变为应变软化型, 可以认为循环加卸载次数、应力比条件使得重塑红黏土的固结压力增

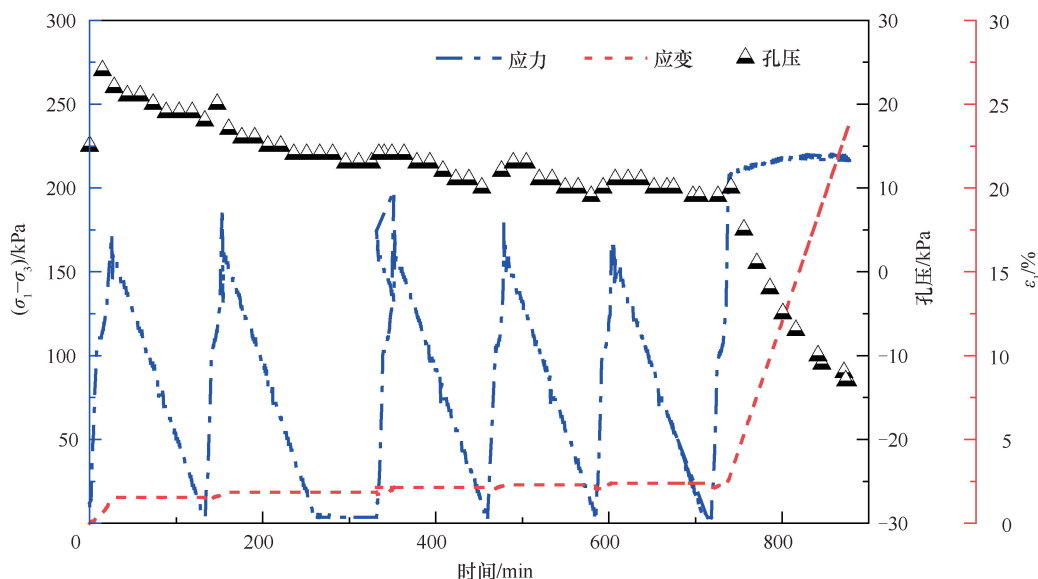


图 5 孔压-应力-应变-时间关系曲线(循环次数 5, 应力比 0.7, 围压 50 kPa)

Fig. 5 Pore pressure-stress-strain-time curve (cycle number 5, stress ratio 0.7, confining pressure 50 kPa)

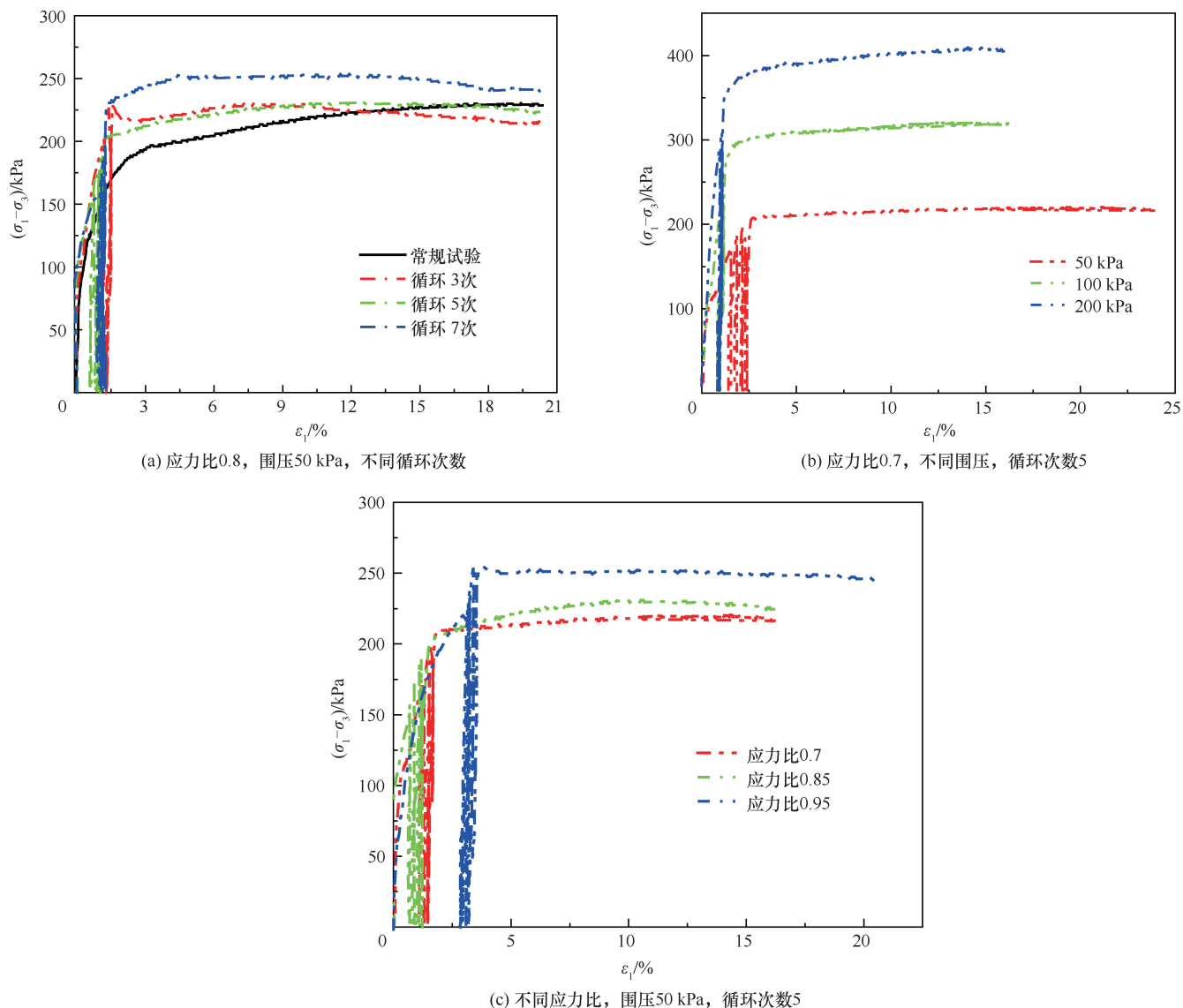


图6 应力-应变关系曲线

Fig. 6 Stress-strain relationship curve

大,由正常固结状态逐渐过渡到超固结状态,而由先期固结压力形成的超固结状态可能是“加剧”土的损伤软化行为的原因^[28]。

2.3 加卸载条件下试样变形分析

在循环加卸载过程中,试样受循环荷载作用产生一定的弹塑性变形,并形成大小不同的滞回环,即每次循环的加载曲线与上一次循环的卸载曲线所形成的闭合圈,滞回环面积越大,表示试样的弹性应变能释放得越多,能量损耗也就越大^[29]。图7为不同条件下滞回环局部放大图,可以看出,随着循环次数的增加,滞回环的面积有明显减小趋势,说明试样整体在不断地压缩与回弹过程中,内部颗粒、粒团之间产生相对滑移、错动,内部结构不断调整,此时循环荷载对其形成压实作用,循环后试样应力-应变曲线出现

的陡增现象即反映了红黏土的压硬性,但试样内部仍存在能量损失,内部产生微小裂缝而造成损伤。以图7(c)为例,当试样偏应力卸载至102 kPa时试样出现回弹,第1次至第7次卸载快速回弹应变为:0.125%、0.113%、0.100%、0.0875%、0.0875%、0.025%、0.0125%,表现出“平台状”。对比图6中(a)(b)(c)三图,随着应力比的增加,试样的轴向应变越来越大,“平台”状回弹变形逐渐减小。对比图7中(a)(d),发现随着围压的增大,试样的加载曲线也呈现相似的变形规律。由以上分析可知,应力-应变曲线表现出“平台状”,这意味着当偏应力卸载至此时,试样出现了一个大幅度的回弹变形,该阶段与围压无关,随着循环次数和应力比的增大,回弹应变逐渐减小,甚至消失。

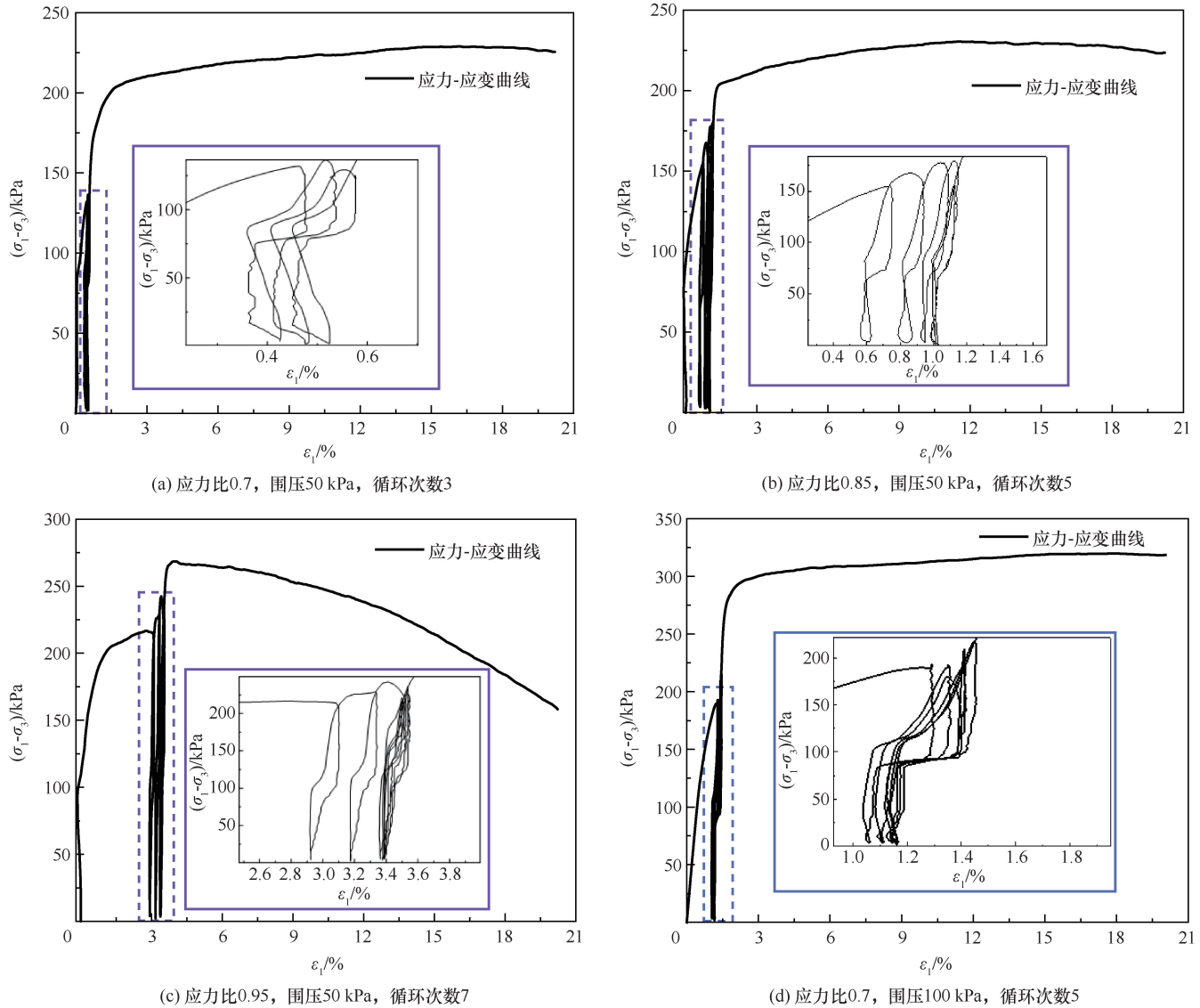


图7 不同条件下滞回环分析

Fig. 7 Hysteresis loop analysis under different conditions

3 微观试验结果分析

3.1 孔隙结构特征分析

3.1.1 孔隙率及 T_2 谱图分布

围压为 50 kPa、应力比 0.85 条件下不同加卸载循环次数土样孔隙结构变化如图 8 所示。随着加卸载的进行,在完成第一次循环后试样的孔隙率发生小幅度的上升,由 43.35% 上升至 43.70%,循环次数继续增加,在 1~5 次循环过程中,孔隙率逐渐降低,由 43.70% 降低至 42.09%,再经历两次循环作用后,孔隙率有大幅度上升至 42.10%,如图 8(a) 所示。不同加卸载循环次数试验条件下土样孔隙分布 T_2 谱特征如图 8(b) 所示,试样小孔主要分布在横向弛豫时间 T_2 为 0.1~4.0 ms 范围内,大孔主要

分布在横向弛豫时间 T_2 为 30~170 ms 范围内。在初始即循环 0 次试样条件下,试样孔径分布范围较广,其中大孔相对较多,在第 1 次循环后,试样的大、小孔径范围均减小,出现孔径集中现象,且小孔的峰频频谱与峰频 T_2 值同时增大,而随着循环次数的继续增加,试样的小孔范围与峰频 T_2 基本无变化,峰值频谱在循环至 3 次时出现峰值,之后随着循环次数的增加而逐渐降低;试样的大孔随着循环次数的增加,试样的孔径范围、峰值频谱以及峰频 T_2 均呈降低趋势。随着荷载循环次数的增加,试样的孔径范围与峰值频谱均在逐渐减小,试样的 T_2 谱图曲线由“山峰型”向“丘陵型”发展,说明试样孔隙的孔径大小在不断调整,最后较平均地分布在某一范围内。

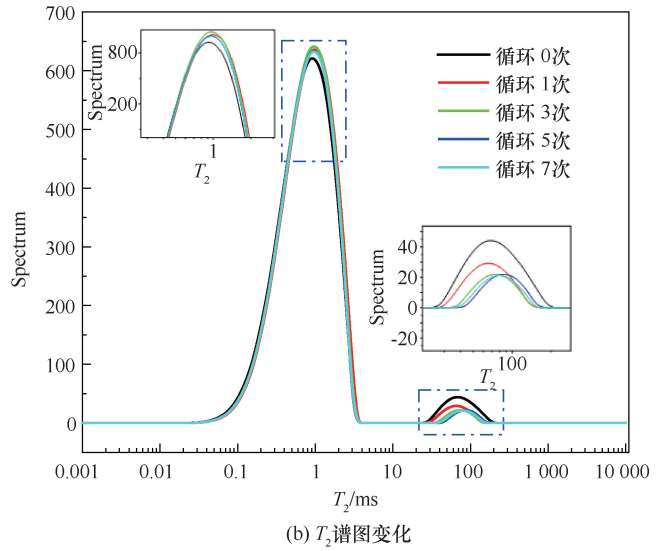
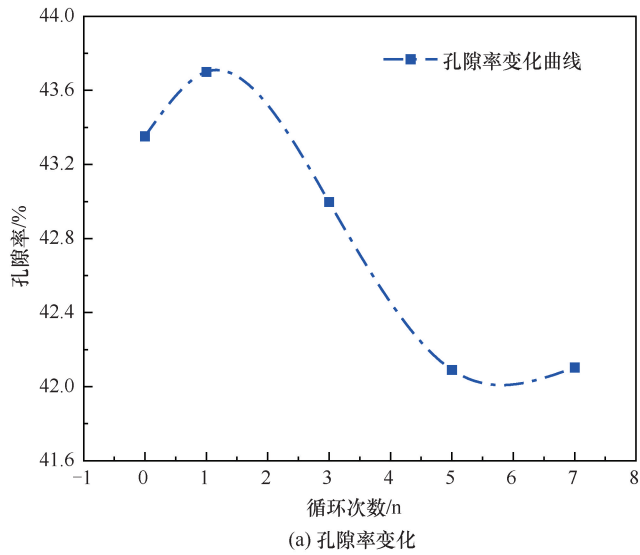


图8 不同循环次数试验后土样孔隙结构变化

Fig. 8 Changes of pore structure of soil samples after different cycles of tests

3.1.2 孔隙结构演化规律分析

国际上定义孔径尺度以 $0.05 \mu\text{m}$ 、 $0.02 \mu\text{m}$ 为界限, 将孔隙划分为大孔隙、中孔隙和微孔隙。不同的学者对不同结构性土给出的孔隙划分标准略有差异^[30-32], 本节根据廖义玲等^[1]提出的碳酸盐岩红土的孔隙划分方法, 将土孔隙分为四类: 微孔(孔隙半径 $R \leq 0.037 \mu\text{m}$)、小孔(孔隙半径 $0.037 \mu\text{m} < R \leq 0.37 \mu\text{m}$)、中孔(孔隙半径 $0.37 \mu\text{m} \leq R < 3.7 \mu\text{m}$)以及大孔(孔隙半径 $R \geq 3.7 \mu\text{m}$), 以此为划分标准, 得到贵阳红黏土孔隙尺度分布变化。

根据不同循环次数加卸载作用后的核磁共振试验谱图, 结合式(1), 取表面弛豫率为 $3 \mu\text{m/s}$, 以试样的初始孔径分布平均值为基准, 将 T_2 谱图进行换算, 可得土样经历 0 次、1 次、3 次、5 次、7 次加卸载循环直至破坏全过程中孔径分布演化规律, 如图 9 所示。可以看出, 红黏土孔径大小分布在 $0 \sim 0.037 \mu\text{m}$ 范围内的微孔隙数量最多, 分布在 $R \geq 3.7 \mu\text{m}$ 范围内的大孔隙数量最少。且随着循环次数的增加, 红黏土中的中孔隙($0.37 \sim 3.7 \mu\text{m}$)和大孔隙($R \geq 3.7 \mu\text{m}$)数量逐渐减少, 小孔隙($0.037 \sim 0.37 \mu\text{m}$)数量逐渐增加。说明在循环荷载的作用下贵阳红黏土内部的孔隙整体向小尺度孔隙过渡。

3.2 电镜扫描结果分析

红黏土原状土微观结构松散, 存在较多的不规则小孔隙和裂缝, 其微观颗粒主要以絮状粒团的形式存在, 各粒团间通过镶嵌、重叠等形式组合在一起形成整体结构[见图10(a)]; 常规三轴试验破坏后试样内部存在较多微小裂缝, 试样破坏后内部颗粒、粒团间

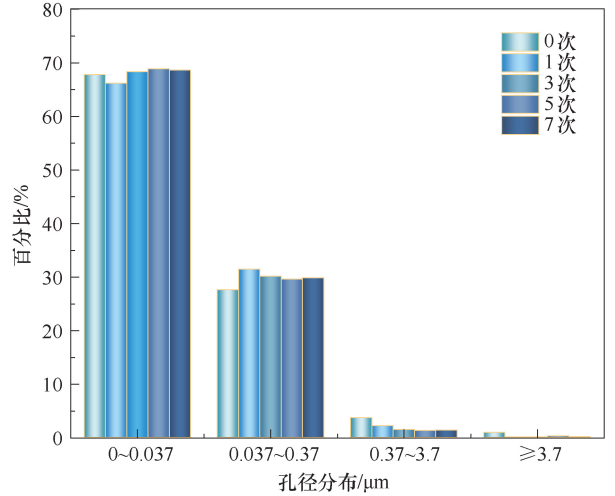


图9 土样循环加卸载全过程孔径分布演化过程

Fig. 9 Evolution process of pore size distribution in the whole process of cyclic shear of soil samples

以重叠、胶结等形式更加密实地联系在一起, 而粒团间的连接并不密实, 而是存在一些微小裂缝, 这些裂缝向着优势方向延伸, 在存在孔隙的地方, 裂缝会延伸至孔隙并与之形成连接[见图 10(b)]。

对围压 50 kPa 、应力比 0.85 条件下循环 3 次、7 次后破坏试样进行 SEM 扫描电镜试验。试样整体结构表现较为松散, 孔隙呈球状, 在外力作用下试样发展出一条主裂隙, 向孔隙发育良好方向延伸, 两侧伴有部分微裂隙, 裂隙、孔隙周围黏土矿物以球状、立方体状粒团的形式胶结在一起[见图 11(a)]; 在经历 7 次循环破坏后试样的孔隙数量明显减少, 且多出现在主裂隙周围通过微裂隙与主裂隙形成连接, 孔

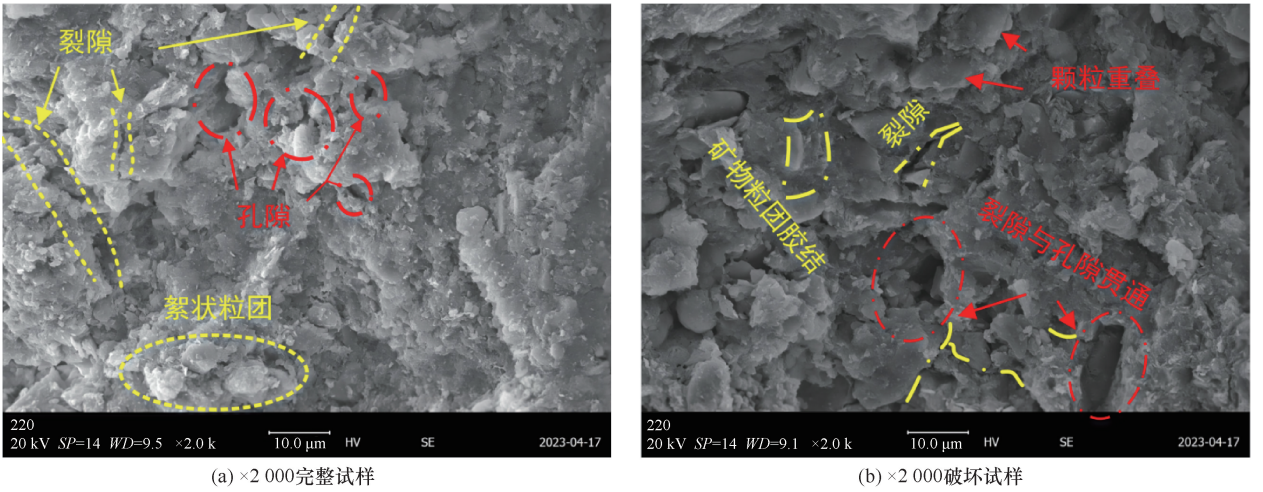


图 10 土样常规三轴试验前后 SEM 电镜扫描图像

Fig. 10 SEM scanning images of soil samples before and after conventional triaxial test

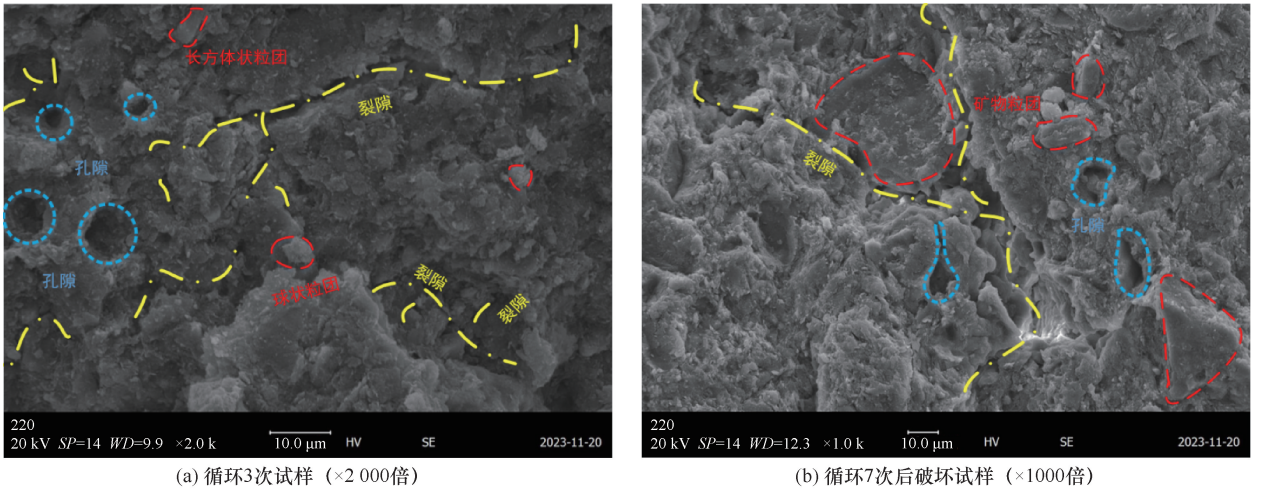


图 11 不同次数循环加卸载试验后试样电镜扫描图像

Fig. 11 Scanning electron microscope images of specimens after different times of cyclic loading and unloading tests

隙呈扁平状形态特征, 裂隙与孔隙之间基本贯通, 两条裂隙交汇形成一条较大的裂隙, 大裂隙的最大宽度达 $20\ \mu\text{m}$ [见图 11(b)]. 随着循环次数的增大, 红黏土内部孔隙的形状由球状向狭长、扁平状变化, 裂隙周围土体的密实度逐渐增大, 由前期的土颗粒位移向后期的粒团错动发展, 土体内部裂隙朝着孔隙发育良好方向延伸, 当试样形成或接近破坏过程中, 裂隙极有可能贯穿孔隙, 并使得相邻孔隙之间形成连接并发育为宽大型裂隙。

4 损伤劣化机理分析

4.1 加卸载模量变化

加卸载模量是表征循环荷载作用过程中土体强度与变形关系的重要手段之一。计算每一循环回次中加载至目标应力值的加载曲线平均斜率确定为加载模

量, 由目标应力值开始卸载至 $0\ \text{kPa}$ 的卸载曲线平均斜率确定为卸载模量^[33], 如图 12(a) 所示。加载模量越大, 表示在该循环回次中试样受同等应力条件下应变量越小, 试样强度增加; 卸载模量越大, 表示在该循环回次中试样的弹性变形量越小, 试样强度减小。图 12(b)—(d) 为围压 $50\ \text{kPa}$ 、不同应力比条件下试样的加卸载模量变化图, 在低应力比 0.7 条件下, 循环 $0\sim 4$ 次时, 加载模量随着循环次数的增加而快速增大, 说明试样强度在增大, 且在循环 $4\sim 7$ 次过程中, 试样加载模量均大于卸载模量。低应力比 0.7 条件下, 随着循环次数的增加, 试样的回弹变形量逐渐增大, 表现出压实的效果; 在高应力比 0.85 与 0.95 条件下, 随着循环次数的增加, 试样回弹变形量逐渐降低, 表明试样受劣化作用影响。

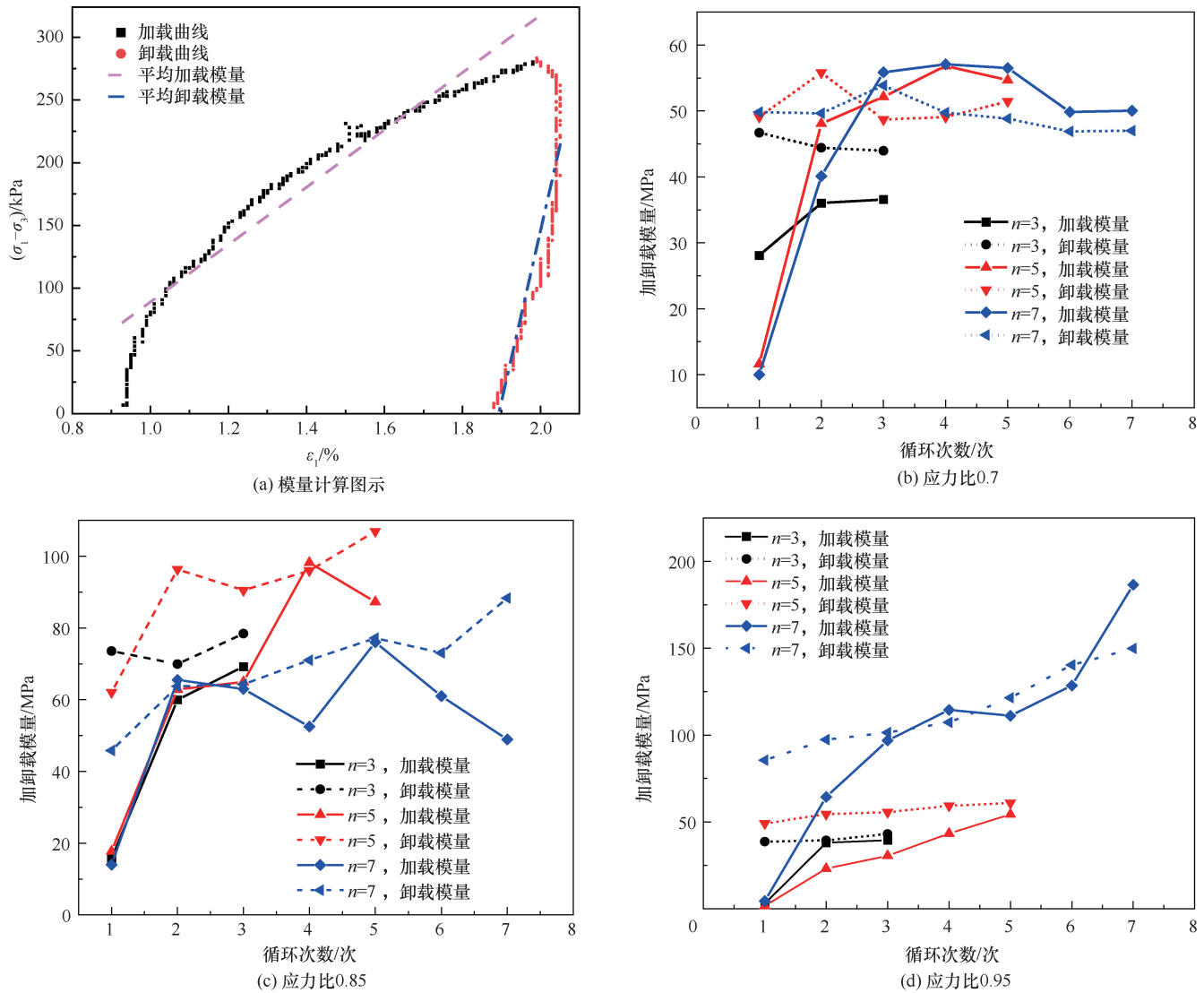


图 12 加卸载模量分析

Fig. 12 Analysis of loading and unloading modulus

4.2 循环荷载作用下损伤系数

模量变化是土体结构受损的特征表现之一^[34], LEMAITRE^[35]提出的应变等效性假说来描述弹性材料变形破坏过程中受损变化情况,如式(2)所示,谢和平等^[36]将式(2)推导为一维条件下考虑不可逆塑性变形的弹塑性材料损伤定义,公式为

$$D = 1 - \frac{E_i}{E_0} \quad (2)$$

$$D = 1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon} \times \frac{E_i}{E_0} \quad (3)$$

式中, D 为损伤系数; E_0 为初始弹性模量, E_i 为试样受循环荷载后的卸载模量; ε 为单次循环总应变; ε_p 为单次循环残余应变。

围压 50 kPa、考虑不同应力比和循环次数的试样

加卸载过程中损伤演化过程如图 13 所示。由于计算中主要考虑循环荷载作用下试样的损伤情况,且以每次试验中的第 1 次卸载模量记做初始模量,在考虑卸载模量变化与弹塑性应变变化耦合的条件下,试样在相同应力比、循环 3 次、5 次、7 次试验过程中,损伤系数逐渐增大。相同循环次数,随应力比的增加,损伤系数也是增大的,应力比 0.70、0.85、0.95 加卸载试验循环 7 次最终损伤系数分别为 0.897、0.965、0.979。

与前面的微观分析相对应,随着应力比增大、循环次数增多,土样的大孔隙逐渐向小孔隙转变。孔隙形状由球状向狭长、扁平状变化,粒团之间由面接触向线接触、点接触发展,裂隙朝着孔隙发育方向发展、贯通后形成宽大的贯通性裂隙,进一步验证了

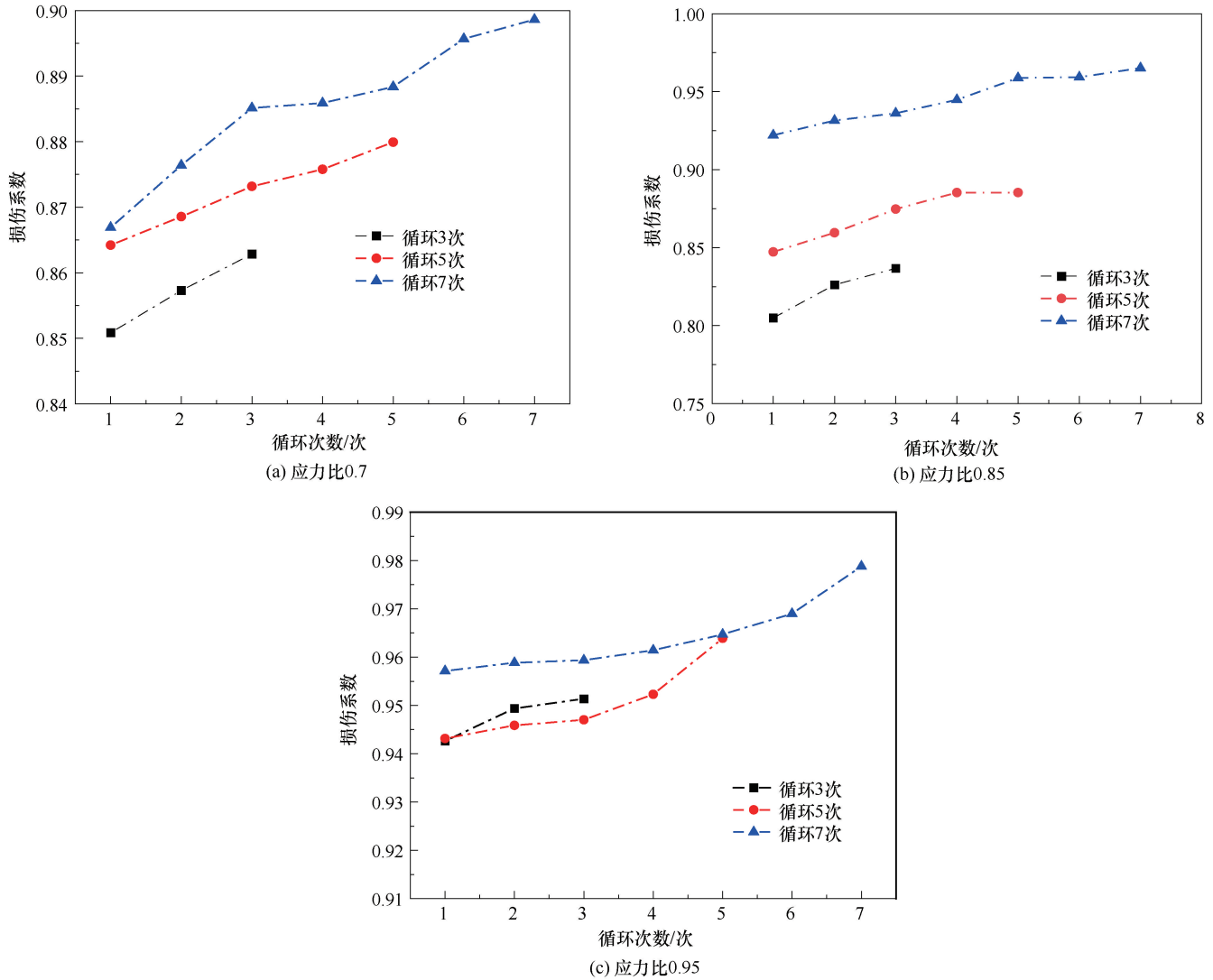


图 13 损伤系数变化

Fig. 13 Change of damage coefficient

循环试验条件加剧了土体的损伤软化。

5 结论

通过室内试验探究了轴向加卸载作用下贵阳红黏土宏观变形特征及微观损伤演化规律, 得出以下结论。

(1) 随着循环次数和应力比的增大, 贵阳红黏土应力-应变曲线由应变硬化型逐渐转变为应变软化型, 且卸荷快速回弹阶段产生的快速回弹应变逐渐减小, 甚至消失。

(2) 在循环荷载作用下, 贵阳红黏土内部的孔隙整体上向小孔隙过渡, 粒团之间由面接触向线接触、点接触发展, 土体内部出现部分裂缝。

(3) 试样的损伤软化效应随循环次数和应力比的增加而增强, 符合孔隙变化规律。

参考文献 (References):

- [1] 廖义玲, 朱立军. 贵州碳酸盐岩红土[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2024.
LIAO Y L, ZHU L J. Guizhou Carbonate Red Clay[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 2004.
- [2] 付开隆, 王天良. 黔桂铁路宜州站红粘土路用性能试验研究[J]. 路基工程, 2008(2): 100-102.
FU K L, WANG T L. Experimental study on road performance of red clay in Yizhou Station of Guizhou-Guangxi Railway [J]. Roadbed Engineering, 2008, (2): 100-102.
- [3] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 湛江强结构性黏土的物理力学性质指标及相关性分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 447-454.
ZHANG X W, KONG L W, GUO A G, et al. Physical and mechanical indexes and correlation analysis of clay with noticeable structures in Zhanjiang area [J]. Journal of Engineering Geology,

- 2011, 19 (4): 447-454.
- [4] 张彦召, 左双英, 季永新. 红黏土在原状及重塑状态下的力学性质试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1477-1482.
ZHANG Y Z, ZUO S Y, JI Y X. Experimental study on undisturbed and reconstituted mechanical properties of red clay[J]. According to Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13 (6): 1477-1482.
- [5] 游庆龙, 邱欣, 杨青, 等. 离子土壤固化剂固化红黏土强度特性[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 64-71.
YOU Q L, QIU X, YANG Q, et al. Strength properties of ionic soil stabilizer treated red soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 64-71.
- [6] 廖化荣. 红粘土路基循环荷载下塑性力学行为及预测模型研究[D]. 广州: 中山大学, 2004.
LIAO H R. Study on Plastic Mechanical Behavior and Prediction Model of Red Clay Subgrade under Cyclic Dynamic Load [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2004.
- [7] 刘晓红, 方薇, 杨果林. 循环荷载下原状结构红粘土累积塑性应变模型[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 56-62.
LIU X H, FANG W, YANG G L. Accumulated plastic strain models of red clay in original structure under cyclic loading [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 56-62.
- [8] 倪静, BUDDHIMA I, 耿雪玉, 等. 循环荷载水平与加载频率耦合作用下的软粘土特性研究[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 167-173.
NI J, BUDDHIMA I, GENG X Y, et al. Study on the characteristics of soft clay under the coupling of cyclic loading level and loading frequency [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31 (10) : 167-173.
- [9] CUI Y J, NGUYEN X P, TANG A M, et al. An insight into the unloading/reloading loops on the compression curve of natural stiff clays[J]. Applied Clay Science, 2013, 83/84: 343-348.
- [10] CAI Y Q, GU C, WANG J, et al. One-way cyclic triaxial behavior of saturated clay: comparison between constant and variable confining pressure [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(5): 797-809.
- [11] MEI H H, SATVATI S, LENG M. Experimental study on permanent deformation characteristics of coarse-grained soil under repeated dynamic loading[J]. Railway Engineering Science, 2021, 29(1): 94-107.
- [12] YANG J Q, CUI Z D. Influences of train speed on permanent deformation of saturated soft soil under partial drainage conditions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 133: 106120.
- [13] HUANG J. H, CHEN J, LU Y, et al. Deformation behaviors and dynamic backbone curve model of saturated soft clay under bidirectional cyclic loading [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(4): 04020016.
- [14] CHEN C, XU G F, ZHOU Z M, et al. Undrained dynamic behaviour of peaty organic soil under long-term cyclic loading, Part II: Constitutive model and simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 129: S0267726117306905.
- [15] PANG Y X, GU C, WANG J, et al. Strain evolution of saturated clays under cyclic loadings in three-dimensional stress condition[J]. Engineering Geology, 2020, 278: 105824.
- [16] WANG X, CUI J, ZHU C Q, et al. WANG X Z. Experimental study of the mechanical behavior of calcareous sand under repeated loading-unloading[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(4): 3097-3113.
- [17] 左双英, 张彦召, 赵蕊, 等. 贵阳红黏土介-微观结构分形特征研究[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(3): 122-129.
ZUO S Y, ZHANG Y Z, ZHAO R, et al. Study on fractal characteristics of meso-microstructure of red clay in Guiyang [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(3): 122-129.
- [18] 杨国生, 左双英, 莫云川, 等. 不同应力路径下贵阳红黏土固结不排水试验及微观机理研究[J]. 贵州科学, 2019, 37(3): 74-77, 92.
YANG G S, ZUO S Y, MO Y C, et al. Consolidation undrained test and microscopic mechanism of Guiyang red clay under different stress paths[J]. Guizhou Science, 2019, 37(3): 74-77, 92.
- [19] XU J, LI Y F, REN C, et al. Damage of saline intact loess after dry-wet and its interpretation based on SEM and NMR [J]. Soils and Foundations, 2020, 60(4): 911-928.
- [20] 吴云涛, 叶万军, 杨更社, 等. 考虑应力路径的土体微观孔隙及宏观变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2311-2320.
WU Y T, YE W J, YANG G S, et al. Experimental research on micro-pore and macro-deformation characteristics of soils considering stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2311-2320.
- [21] WANG Q, CHEN J, LIU J K, et al. Relationships between shear strength parameters and microstructure of alkaline-contaminated red clay[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(27): 33848-33862.
- [22] WAN X S, YANG Z J. Pore water freezing characteristic in saline soils based on pore size distribution[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 173: 103030.
- [23] WANG P, QU Z, CHARALAMPIDOU E M. Shale hydration damage captured by nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2019, 40(8): 1129-1135.
- [24] 迟明杰, 李小军, 赵成刚, 等. 应力路径对砂土变形特性影响的细观机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3081-3086, 3095.
CHI M J, LI X J, ZHAO C G, et al. Meso-scale study of effects of stress path on deformation behaviors of sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3081-3086, 3095.
- [25] 马金莲, 钟秀梅, 王谦, 等. 基于细观结构的压实黄土抗剪特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(2): 350-356.
MA J L, ZHONG X M, WANG Q, et al. Experimental study on shear characteristics of compacted loess based on micro-structure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(2): 350-356.
- [26] ZHANG Q, ZUO S Y, WU D Y. et al. Strain softening characteristics and stress-strain relationship of Guiyang carbonate

- laterite[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83(4): 121.
- [27] 杨国生, 左双英, 莫云川, 等. 基于核磁共振技术的贵阳红黏土剪切全过程孔隙演变规律研究[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(5): 1320-1330.
- YANG G S, ZUO S Y, MO Y C, et al. Nmr technology based study on pore evolution pattern of Guiyang red clay shear whole process[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(5): 1320-1330.
- [28] 胡敏云, 肖斌, 陆雨珂, 等. 重塑超固结饱和黏土蠕变试验与蠕变模型[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(S1): 6-10.
- HU M Y, XIAO B, LU Y K, et al. Creep test and creep model of remolded overconsolidated saturated clay [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45 (S1): 6-10.
- [29] 肖福坤, 申志亮, 刘刚, 等. 循环加卸载中滞回环与弹塑性应变能关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33 (9): 1791-1797.
- XIAO F K, SHEN Z L, LIU G, et al. Relationship between hysteresis loop and elastoplastic strain energy during cyclic loading and unloading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9): 1791-1797.
- [30] 张平, 房营光, 何智威, 等. 不同固结压力下重塑土微孔隙特征变化的试验与分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2012, 38 (1): 102-104.
- ZHANG P, FANG Y G, HE Z W, et al. The experiment and study on micropore characteristic change of remolded quartz soil in the consolidation process[J]. *Sichuan Building Science*, 2012, 38(1): 102-104.
- [31] 周晖, 房营光, 谷任国, 等. 珠江三角洲典型软粘土固结过程的微细观显微分析[C]//中国岩石力学与工程学会. 岩石力学与工程的创新和实践: 第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 广州: 华南理工大学, 2010: 35.
- ZHOU H, FANG Y G, GU R G, et al. Microscopic analysis of the consolidation process of typical soft clay in the Pearl River Delta [C] // Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering. *Innovation and practice of rock mechanics and engineering: Proceedings of the 11th National Symposium on Rock Mechanics and Engineering*. Guangzhou: South China University of Technology, 2010: 35.
- [32] KODIKARA J, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Changes in clay structure and behaviour due to wetting and drying[C]//VITHARANA N, COLMAN R. *Proceedings 8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics: Consolidating Knowledge*. Hobart, Tasmania, Australia: Australian Geomechanics Society, 1999: 179-185.
- [33] 裴润生, 包含, 兰恒星, 等. 循环加卸载下黑云母石英片岩的弹性模量与能量演化特征研究[J]. *工程地质学报*, 2024, 32 (1): 74-85.
- PEI R S, BAO H, LAN H X, et al. Evolution characteristics of elastic modulus and energy of biotite quartz schist under cyclic loading and unloading test [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32 (1): 74-85.
- [34] 孔令伟, 臧濛, 郭爱国. 湛江黏土动剪切模量的结构损伤效应与定量表征[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(12): 2149-2157.
- KONG L W, ZANG M, GUO A G. Structural damage effect on dynamic shear modulus of Zhanjiang clay and quantitative characterization [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(12): 2149-2157.
- [35] LEMAITRE J. How to use damage mechanics [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80(2): 233-245.
- [36] 谢和平, 鞠杨, 董毓利. 经典损伤定义中的“弹性模量法”探讨[J]. *力学与实践*, 1997, 19(2): 2-6.
- XIE H P, JU Y, DONG Y L. Discussion on “elastic modulus method” in classical damage definition [J]. *Mechanics and practice*, 1997, 19(2): 2-6.

(责任编辑 王海锋)