

DOI: 10.11779/CJGE20221068

不同初始状态下黄土的平面应变卸载力学特性

张玉^{1,2}, 赵阳¹, 刘科继¹, 叶晨¹, 刘瑾^{1,2}, 丁潇¹, 张猛¹, 屈永龙¹

(1. 西安工业大学建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安工业大学西安市军民两用土木工程测试技术与毁损分析重点实验室, 陕西 西安 710021)

摘要: 针对于黄土工程中的平面应变卸载问题, 利用平面应变改造后的真三轴仪, 开展了不同初始状态(原状、重塑和饱和)黄土在不同固结围压和含水率条件下的平面应变卸载试验, 揭示了不同初始状态黄土的应力-应变演化关系、中主应力特性和强度特性。研究结果表明, 不同初始状态黄土的应力-应变曲线在低含水率和低围压条件下呈现理想塑性, 随着固结围压和含水率增大, 从弱硬化型向强硬化型转变; 黄土的不同初始状态对应力-应变关系演化特性影响较大, 原状黄土曲线最高, 重塑黄土次之, 饱和黄土最低; 固结围压越大、含水率越低, 初始切线斜率越大, 应力应变曲线越高, 土的强度发挥越快。原状和饱和黄土的中主应力和中主应力参数均先减小后增大, 衰减幅度大, 增长幅度小, 中主应力参数的增长幅度要大于中主应力; 重塑黄土的中主应力和中主应力参数则先减小后基本保持稳定。平面应变卸载条件下不同初始状态黄土的黏聚力和内摩擦角均随含水率增大近似呈现线性减小; 不同初始状态对土黏聚力的影响要明显大于内摩擦角。原状黄土在低围压和低含水率条件下沿着剪切带形成明显的侧向滑移破坏, 其余条件下均发生膨胀破坏。

关键词: 原状黄土; 重塑黄土; 饱和黄土; 平面应变试验; 侧向卸载

中图分类号: TU444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)01-0162-12

作者简介: 张玉(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事黄土力学与工程方面的研究工作。E-mail: 153673438@qq.com。

Mechanical characteristics of plane strain unloading conditions with different initial states

ZHANG Yu^{1,2}, ZHAO Yang¹, LIU Keji¹, YE Sheng¹, LIU Jin^{1,2}, DING Xiao¹, ZHANG Meng¹, QU Yonglong¹

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Civil Engineering Testing and Destruction Analysis on Military-Civil Dual Use Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: For the plane strain unloading issues in loess engineering, the lateral unloading plain strain tests on the loess with various initial states (intact, remolded and saturated) under different confining pressures and water contents are carried out by using the modified true triaxial apparatus. The stress-strain evolution, intermediate principal stress characteristics and strength characteristics of the loess with different initial states under unloading stress path are revealed. The study shows that the stress-strain relationship curves of the loess with different initial states exhibit ideal plasticity under low water content and low confining pressure, and change from weak one to strong one with the increase of confining pressures and water contents. The different initial states of the loess have great influences on the evolution characteristics of stress-strain relationship. The stress-strain curves of the intact loess are the highest, followed by those of the remolded loess and saturated loess. The higher the confining pressure and the lower water content, the greater the slope of the initial tangent, the higher the stress-strain curve and the greater the soil strength. The intermediate principal stress and the intermediate principal stress coefficient of the intact and saturated loesses first decrease and then increase, with a large attenuation range and a small growth range. The growth range of the intermediate principal stress coefficient is greater than that of the intermediate principal stress. The intermediate principal stress and the intermediate principal stress coefficient of the remolded loess first decrease and then remain stable. Under the plane strain unloading, the cohesion and internal friction angle of the loess with different initial states decrease approximately linearly with the increase of water contents. The influences of different initial states on soil cohesion are significantly greater than those of internal friction angle. The intact loess forms obvious lateral slip failure along the shear band under low confining pressures and low water contents, and the lateral dilatancy failure occurs under other conditions.

Key words: intact loess; remolded loess; saturated loess; plane strain test; lateral unloading

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007257); 陕西省科技计划项目(2022JQ-443); 陕西省教育厅自然科学研究专项项目(22JK0416)

收稿日期: 2022-08-28

0 引言

黄土工程中的挡墙、大坝、路基和基坑顶部堆载等问题都可类似归结为平面应变加载问题, 基坑开挖、隧道开挖和高边坡的切坡等问题又可类似归结为平面应变卸载问题。边坡工程、基坑工程、隧道工程等面对的是原状土, 高填方工程、路基工程等均为重塑土, 地下水位以下工程问题主要面对饱和土。由此可见, 不同工程问题中土的应力路径(加、卸载)不尽相同, 初始状态(原状、重塑、饱和)也不同, 若忽视了应力路径改变和初始状态对土力学特性的影响, 将会直接影响到工程设计与施工的安全性和经济性。目前, 针对于黄土平面应变问题多进行理论推导^[1-3]和数值模拟^[4], 已开展的试验研究也大多集中于加载应力路径^[5-6], 以揭示加载强度、变形特性为主, 部分成果揭示了加载过程中平面应变方向上主应力变化和中主应力参数变化规律。加、卸载应力路径的差异也会导致土的强度、变形演化规律的不同^[7-8]。同时, 开展的平面应变卸载试验大多针对于软土和砂土^[9-10], 受限于平面应变仪的发展和黄土的初始结构强度, 导致黄土的平面应变卸载试验成果较少, 已有成果以卸载强度、变形特性为主^[11-13]。平面应变卸载剪切过程中, 既要实现侧向的卸载, 又要保证平面应变应变方向的应变条件, 还要能采集到卸载剪切过程中的中主应力大小, 同时还要使得黄土最终能达到破坏状态, 这些条件共同决定了平面应变卸载成果的匮乏, 尤其是卸载剪切过程中的中主应力和中主应力参数如何变化, 更是鲜见报道, 尚未得到规律性的认识。综上所述, 针对于不同初始状态黄土开展系统的平面应变卸载试验研究, 揭示平面应变卸载应力路径条件下原状、重塑和饱和黄土的应力-应变关系曲线差异, 中主应力及中主应力参数变化规律差异, 强度特性差异及破坏形式差异对于深化平面应变卸载条件下不同初始状态黄土的力学行为研究具有重要意义。

基于平面应变提升改造后的真三轴仪, 通过限定平面应变方向变形来近似模拟平面应变状态。针对于原状、重塑和饱和黄土开展了不同固结围压和不同含水率条件下的平面应变卸载试验, 揭示了平面应变卸载条件下不同初始状态黄土的应力-应变演化规律及其差异性, 探讨了原状、重塑和饱和黄土在平面应变卸载剪切过程中的中主应力和中主应力参数演化规律, 揭示了不同初始状态黄土的强度特性及破坏形式, 研究结果可深化黄土的平面应变力学特性认识, 为平面应变卸载类工程提供试验基础和理论依据。

1 试验土样及方案

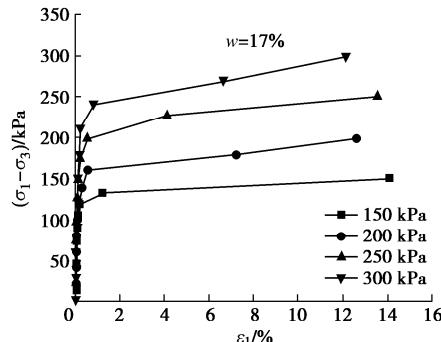
试验土样取自西安市白鹿原某陡坎, 陡坎高度6~8 m, 按照土工试验方法标准, 从陡坎底部, 人工向内挖掘1 m左右, 清掉浮土后采取20~30 cm见方的原状块体。土样呈黄褐色, 局部肉眼可见钙质结核, 为Q₃黄土。土样的基本物理性质指标为: 干密度为1.46 g/cm³, 天然含水率为15.6%, 液限为32.8%, 塑限为21.6%, 塑性指数为11.2, 相对质量密度为2.7。

试验所用原状试样由现场取回土块直接切削而成, 重塑土样将原状土块碾碎后, 分层压实; 饱和土样将制成的原状样放入饱和器, 真空反压饱和。试验土样尺寸均为7 cm×7 cm×14 cm的长方体, 高为14 cm。试验基于平面应变改造后的真三轴仪完成, 竖向和侧向均压固结完成后, 控制竖向荷载不变, 小主应力方向通过卸载程序控制液压缸内活塞反转, 将液压囊内水分吸出至液压缸内, 实现逐级卸载, 每级卸载量为固结围压的1/10, 当轴向应变达到15%或者侧向小主应力卸载至0 kPa时, 试验结束。依据采集到的各方向应变来计算体变。试验完成了3个含水率(24%, 21%, 17%)原状黄土、重塑黄土及饱和原状黄土在4个固结围压(150, 200, 250, 300 kPa)作用下的平面应变侧向卸载排水试验。试样土样采集制备、试验设备和试验方法可参考文献[8, 12], 为确保测量精度和试验数据的准确性, 在试验之前, 先对应力和应变传感器进行校正, 使得校正值与外部输入标准量相一致, 完成校准后再开始试验。

2 不同初始状态黄土的平面应变卸载应力-应变演化关系分析

2.1 原状黄土平面应变卸载应力-应变曲线分析

依据原状黄土平面应变侧向卸载试验结果, 整理不同条件下大、小的主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)与竖向应变 ε_1 的关系曲线分别如图1, 2所示。



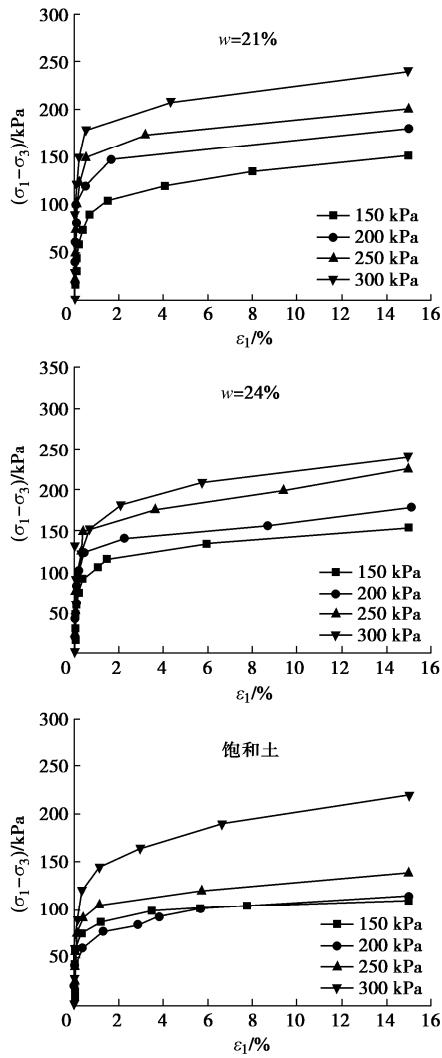


图 1 原状黄土不同固结围压时的应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of intact loess under different confining pressures

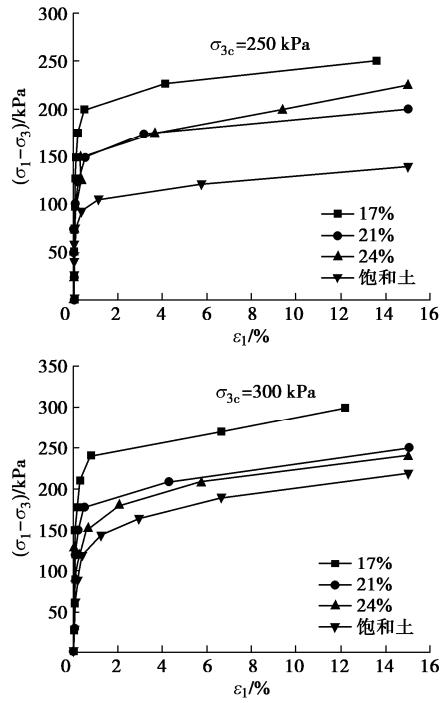
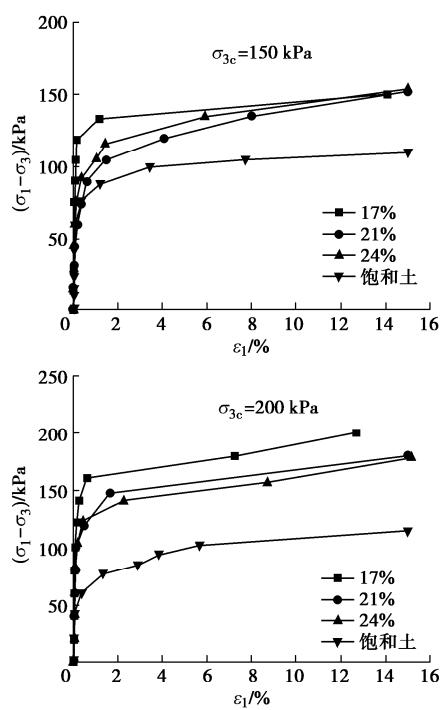


图 2 原状黄土不同含水率时的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of intact loess under different water contents

分析图 1,2 可知, 不同含水率和固结围压条件下, 平面应变卸载条件下的主应力差随着竖向应变的发展呈非线性增长, 在固结围压较小和含水率较低时呈理想塑性, 随着含水率和固结围压的增大, 逐步向弱硬化型和强硬化型过渡, 可用双曲线描述。剪切初始阶段, 各条件下的应力-应变曲线切线斜率较大, 土的强度发挥较快, 在竖向应变达到 $0.5\% \sim 2\%$ 时, 曲线发生转折, 斜率逐渐转小, 趋于稳定。固结围压越大、含水率越低, 曲线的初始斜率越大, 土的强度发挥越快, 曲线斜率产生转折对应的竖向应变就越小, 也表明土体越容易在较小的应变条件下发生破坏。固结围压大小和含水率改变均会对平面应变卸载条件的应力-应变演化关系产生影响, 固结围压越大、含水率越低, 同等竖向应变条件下, 土能承受更大的外部荷载, 应力-应变曲线越高。黄土是典型的结构性土, 原状黄土具有一定的初始结构强度, 可以抵抗部分荷载而不产生变形, 故宏观上表现为, 剪切初始阶段主应力差增长较快, 变形发展较小; 当外部荷载大于结构强度之后, 在较小的应力增量条件下, 土体产生破坏, 变形迅速发展。这与平面应变加载时的应力-应变演化关系不尽相同, 加载时的应力应变曲线斜率逐步发生变化, 属于渐进式塑性破坏^[6]; 卸载时当侧向应力减小到一定阈值范围, 在很小的应力增量下, 曲线斜率发生转折, 轴向应变迅速发展。这也表明了, 在实际的卸载工程中, 土体往往在较小的变形下达到主动土压力而破坏, 往往难于预防, 需要引起注意。



2.2 重塑黄土平面应变卸载应力-应变曲线分析

整理重塑黄土在不同含水率和固结围压条件下的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - ε_1 关系曲线分别如图3, 4所示。

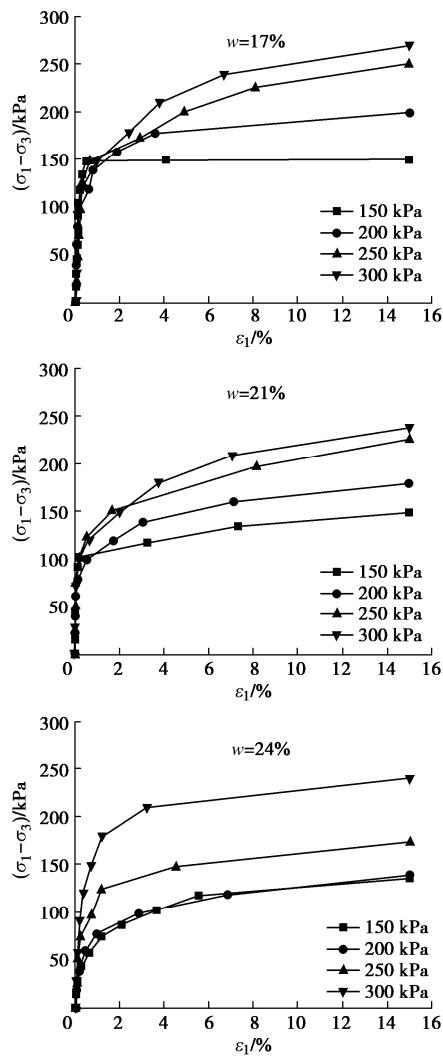


图3 重塑黄土不同固结围压时的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of remolded loess under different confining pressures

综合分析图3, 4可知, 重塑黄土的平面应变卸载曲线呈非线性变化, 除在低含水率和低围压条件下($w=17\%$, $\sigma_{3c}=150$, 200 kPa)呈现理想塑性外, 其余条件下均为硬化型, 且随着固结围压和含水率增大, 从弱硬化型向强硬化型转变, 均可用双曲线描述。剪切初始阶段, 初始切线斜率越大, 土的强度快速发挥, 当竖向应变达到 $0.5\% \sim 4\%$ 时, 斜率发生转折后逐步趋于稳定; 固结围压越大、含水率低, 初始切线模量越大, 应力应变曲线越高, 土的强度发挥越快; 随着固结围压和含水率的增大, 应力应变曲线斜率发生转折所对应的竖向应变越大。固结围压和含水率均会对重塑黄土的应力应变曲线产生影响, 在固结围压较大时($\sigma_{3c}=300$ kPa), 含水率影响较弱。

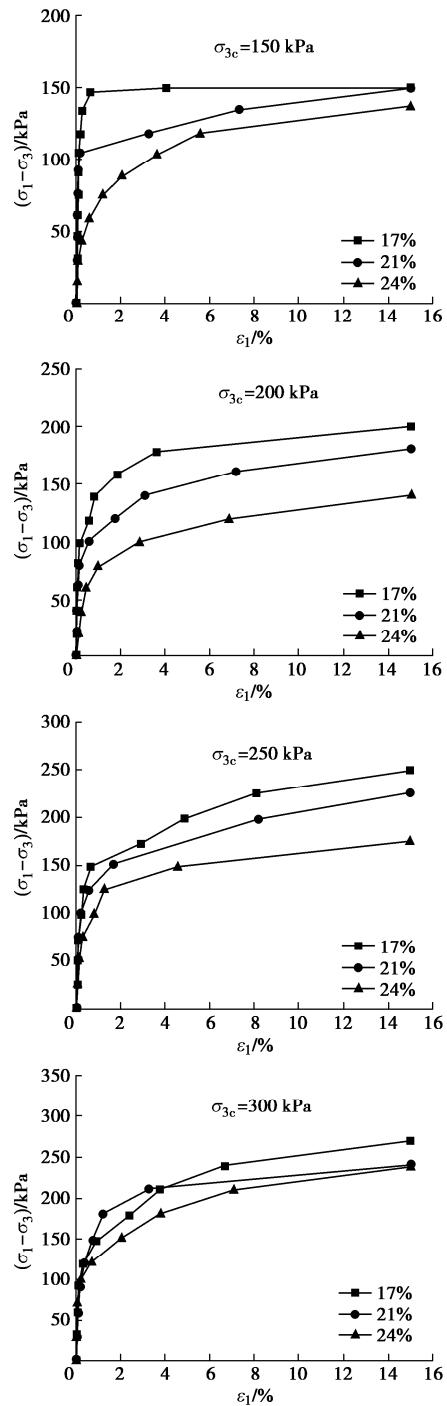


图4 重塑黄土不同含水率时的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of remolded loess under different water contents

原状黄土经重塑后, 破坏了原生结构, 土颗粒重新排列、组合, 形成了较为稳定的新结构, 使得土样更加均匀, 削弱了原有的结构强度, 故宏观上表现为应力-应变曲线初始切线斜率减小, 发生转折时对应的竖向应变增大, 土的强度逐步发挥。

2.3 饱和黄土平面应变卸载应力-应变曲线分析

饱和黄土的平面应变卸载应力-应变曲线如图5所示。

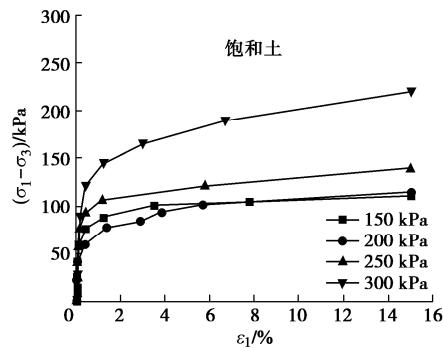


图 5 饱和黄土应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of saturated loess

从图 5 可以看出, 饱和黄土的应力-应变曲线呈硬化型, 随着固结围压增大, 从弱硬化型向强硬化型转变, 固结围压越大, 侧向约束越强, 土的强度越大, 土体呈渐进塑性破坏。

3 不同初始状态下黄土的应力应变曲线对比分析

整理不同初始状态黄土在同一含水率不同固结围压条件下的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - ε_1 关系曲线如图 6 所示。

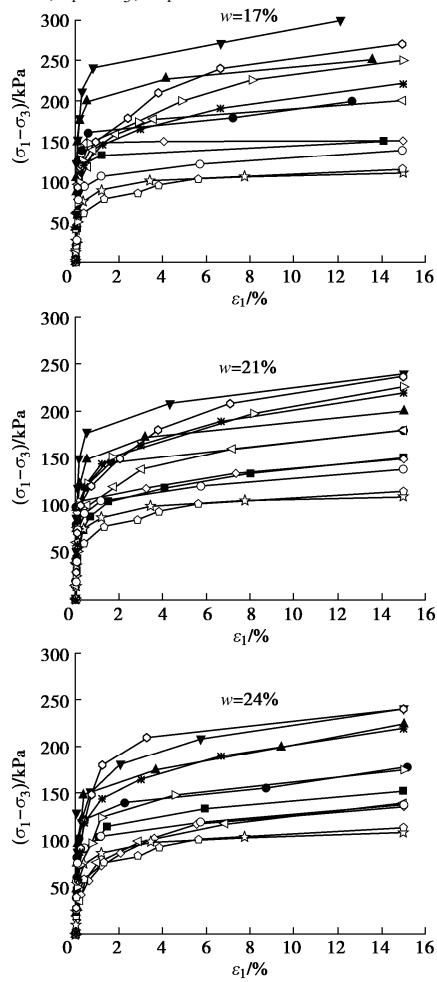


图 6 不同初始状态黄土应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of loess at different initial states

从图 6 可以看出, 黄土的原状、重塑和饱和不同初始状态对平面应变卸载剪切过程中应力-应变曲线影响较大, 同等条件下, 原状黄土应力应变曲线最高, 重塑黄土次之, 饱和黄土最低。原状黄土曲线的初始斜率最大, 重塑黄土居中, 饱和黄土最小, 也说明了原状黄土在卸载剪切过程中的强度发挥最快, 越容易在较小的应变下产生破坏; 原状黄土经受扰动或浸水饱和后, 原生结构遭到破坏, 大孔隙塌落, 水份的浸入又在颗粒间起到了润滑作用, 降低了黏聚和摩擦强度, 形成了新的结构, 原生结构性强度被大大削弱, 抵抗变形的能力也减弱, 剪切过程中的强度逐步发挥。随着含水率的增大, 原状黄土和重塑黄土的应力-应变曲线越接近, 由于初始状态不同导致的强度差异逐渐减弱。饱和黄土颗粒间的水膜最厚, 大大降低了双电层作用和收缩膜张力, 又使得颗粒间胶结物质溶解, 咬合摩擦力减弱, 大孔隙坍塌, 故宏观上表现为应力-应变曲线最低, 强度最小。因而, 在实际工程中, 为了避免因水分浸入导致土体饱和而产生灾害时, 应及时将渗入土中的水分排出, 避免土体长时间处于饱和状态, 导致强度迅速衰减, 故在黄土工程中, 地表防入渗、截水与土体内部导水和排水尤为重要, 可避免工程灾害的发生。

4 不同初始状态下的中主应力及中主应力参数演化规律研究

平面应变条件下土的强度大于常规三轴条件下的根本原因就在于平面应变剪切过程中, 平面应变方向上的主应力大于小主应力, 使得约束增强, 提升了土承受荷载的能力。平面应变卸载剪切过程中的中主应力发挥程度也决定了对土强度提升作用的大小, 中主应力参数的演化规律则反映了卸载剪切过程中的三向主应力状态和应力路径的影响。目前对于不同初始应力土体在平面应变卸载条件下的中主应力和中主应力参数的演化规律研究还处于起步阶段, 故通过试验手段揭示其演化特性可深化平面应变卸载条件下土力学特性的认识。

4.1 原状黄土中主应力及中主应力参数演化规律研究

(1) 中主应力演化规律分析

依据原状黄土平面应变卸载试验数据, 整理中主应力 σ_2 的随竖向应变 ε_1 变化的关系曲线, 如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 平面应变卸载条件下, 在固结完成时, 平面应变方向上的主应力与固结应力相等, 剪切开始后, 小主应力 σ_3 开始减小, 中主应力随着竖向变形的发展先快速减小, 当竖向应变在 0.5%~2%

时, 曲线发生转折, 中主应力开始增大, 直至破坏, 但曲线转折后斜率较小, 数值增长幅度较小。固结围压越大, 卸载剪切过程中的中主应力越大, 剪切开始阶段曲线斜率越小, 中主应力衰减越慢, 曲线发生转折所对应的竖向应变越大, 但后期中主应力增长越快; 含水率越大, 剪切初始阶段曲线斜率越大, 中主应力衰减较快, 曲线发生转折的应变越小, 后期中主应力增长幅度也越小, 规律性较弱。

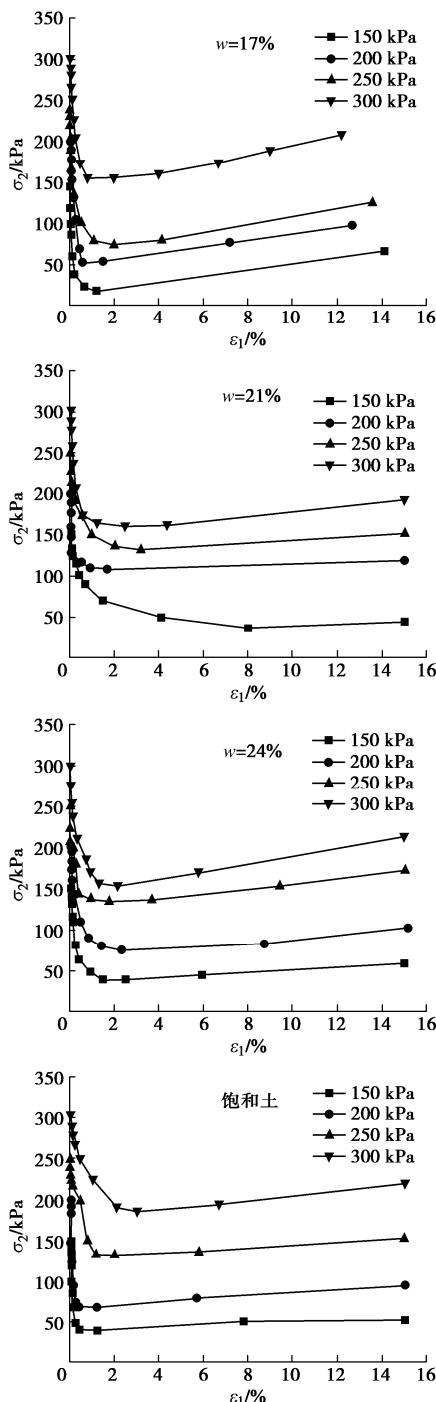


图 7 原状黄土 σ_2 - ε_1 曲线

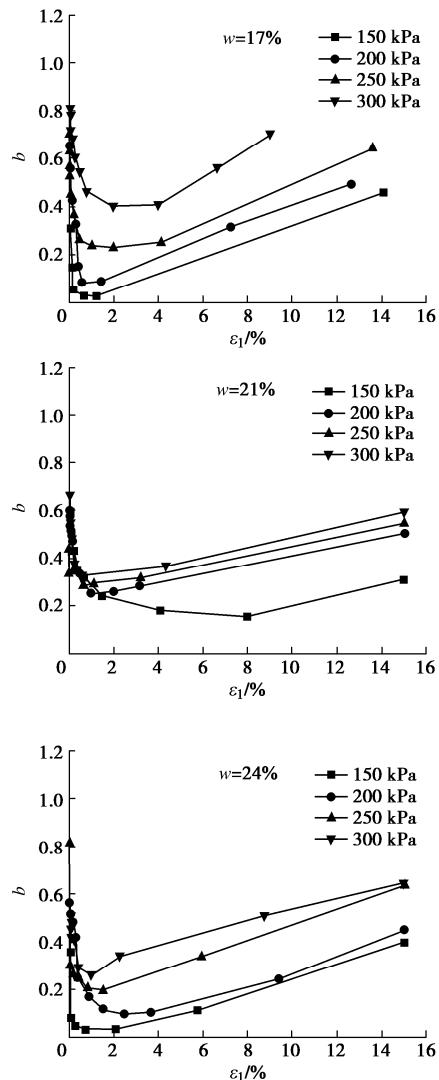
Fig. 7 σ_2 - ε_1 curves of intact loess

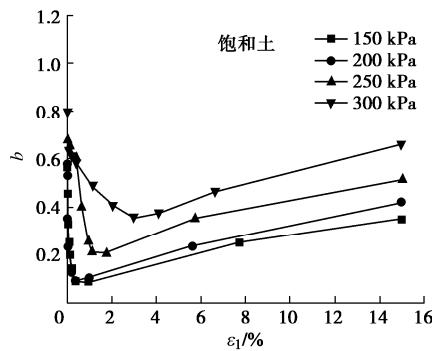
固结围压越大, 土的压硬性越明显, 提供的侧向

约束也越大, 卸载初始阶段的荷载大部分由土体自身承担, 在一定的竖向变形下, 中主应力随着变形发展逐步减小; 固结围压较小时, 侧向卸载后, 由于约束较弱, 竖向压缩后, 土体向 σ_3 方向侧向挤出, 导致了 σ_2 方向的应力松弛, 故在较小的变形条件下中主应力快速减小, 当曲线发生转折后, 在较小的应力增量下, 轴向变形迅速发展, 固结围压越小, 竖向压缩和 σ_3 方向侧向挤出越明显, 同时由于 σ_2 方向的刚性约束, 导致土样对 σ_2 方向产生了一定程度的挤压, 致使中主应力增大, 但 σ_3 方向为应力松弛面, 土的侧向变形在该方向发展较快, 对 σ_2 方向挤压有限, 故中主应力增长较慢。同理, 含水率大, 卸载剪切过程中土样对 σ_2 方向的挤压越弱, 故宏观上表现为剪切初始阶段中主应力衰减较快, 转折后, 增长幅度也越小。固结围压和含水率的变化均对原状黄土平面应变卸载过程中的中主应力产生影响, 由于原状黄土原生结构性的影响导致了含水率条件下的规律性较弱。

(2) 中主应力参数演化规律影响分析

整理原状黄土卸载条件下的中主应力参数 b 随竖向应变 ε_1 的演化关系曲线如图 8 所示。



图 8 原状黄土 b - ε_1 曲线Fig. 8 b - ε_1 curves of intact loess

从图 8 可知, 原状黄土在平面应变卸载剪切过程中的中主应力参数随着竖向应变先减小后增大, 与中主应力演化规律类似, 但曲线发生转折后的中主应力参数增大幅度比中主应力明显。固结围压越大、含水率越大, 卸载剪切过程中及破坏时的中主应力参数也越大, 中主应力发挥程度高, 但含水率影响规律性较弱。整个剪切过程中的中主应力参数始终大于零, 说明卸载过程中的平面应变方向上的主应力始终为中主应力, 土体始终处于平面应变状态。由于卸载剪切初始阶段, σ_2 和 σ_3 同时减小, 故中主应力参数衰减较快, 曲线发生转折后, σ_3 持续减小的同时 σ_2 开始增大, 故宏观上表现为中主应力参数快速增长, 直至破坏。

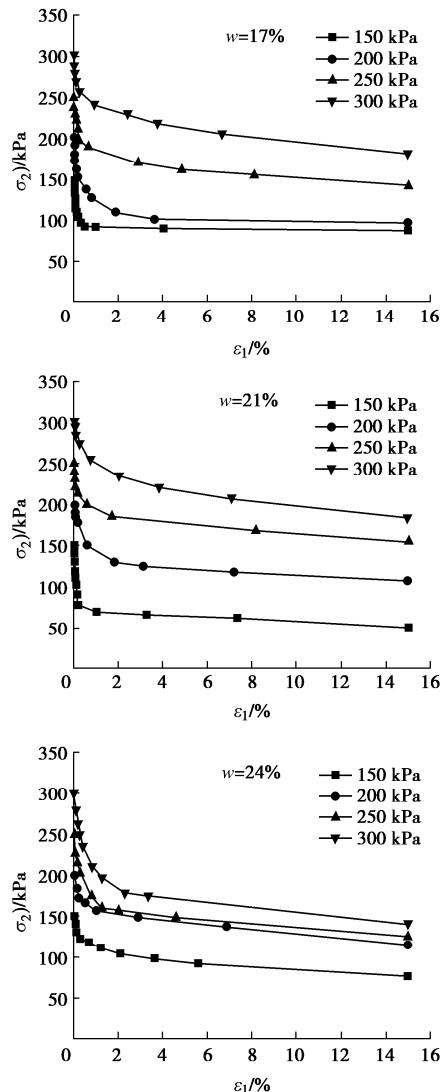
4.2 重塑黄土中主应力及中主应力参数演化规律研究

(1) 重塑黄土中主应力演化规律分析

依据重塑黄土平面应变卸载试验数据, 整理中主应力 σ_2 的随竖向应变 ε_1 变化的关系曲线, 如图 9 所示。

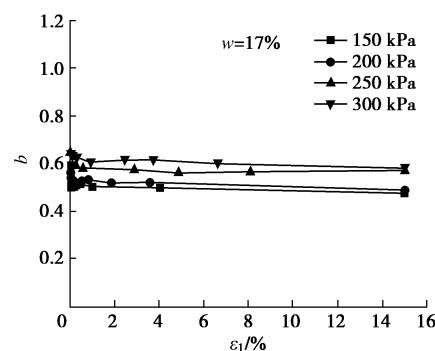
从图 9 可以看出, 重塑黄土平面应变卸载剪切过程中的中主应力随着竖向应变的发展呈非线性减小, 卸载剪切初始阶段, 中主应力衰减较快, 曲线初始斜率较大, 随着竖向应变发展, 斜率逐渐减小, 当竖向应变达到 0.5%~2% 时, 曲线斜率发生转折后趋于稳定, 中主应力随着竖向应变发展衰减较小, 直至破坏。固结围压越大, 卸载过程中的中主应力越大, 曲线转折后的斜率越大, 中主应力衰减越大, 低固结围压 ($\sigma_{3c}=150 \text{ kPa}$) 时, 曲线转折后的中主应力略有减小。含水率对重塑黄土平面应变卸载剪切过程中的中主应力演化规律受固结围压控制, 但整体规律性较弱, 呈现出固结围压较小时, 含水率越大, 初始阶段的中主应力衰减越慢, 随着固结围压增大, 大含水率曲线的初始斜率越大, 衰减越快; 随着固结围压增大, 17% 和 21% 含水率条件下的中主应力演化曲线差异越小, 说明在较大围压下, 含水率对中主应力的影响较弱。

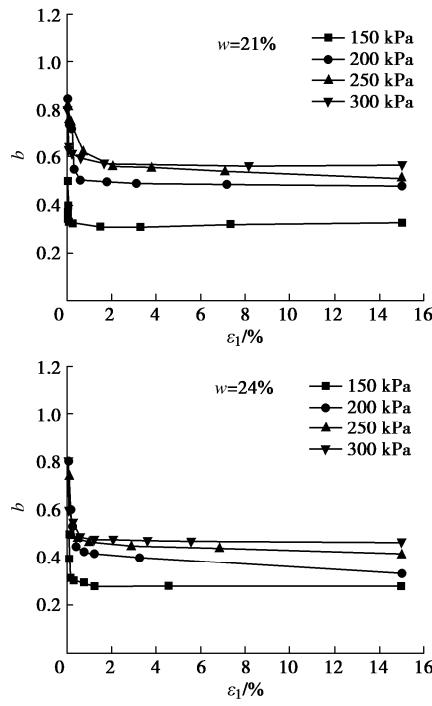
重塑土样内部较为均匀, 消除了原生结构性的影响, 在外部荷载作用下, 土体内部受力均匀, 侧向卸载竖向压缩后, 变形往 σ_3 弱约束方向发展, 导致 σ_2 方向应力松弛, 表现为中主应力持续减小。

图 9 重塑黄土 σ_2 - ε_1 曲线Fig. 9 σ_2 - ε_1 curves of remolded loess

(2) 重塑黄土中主应力参数演化规律分析

整理重塑黄土卸载条件下的中主应力参数 b 随竖向应变 ε_1 的演化关系曲线如图 10 所示。



图 10 重塑黄土 b - ε_1 曲线Fig. 10 b - ε_1 curves of remolded loess

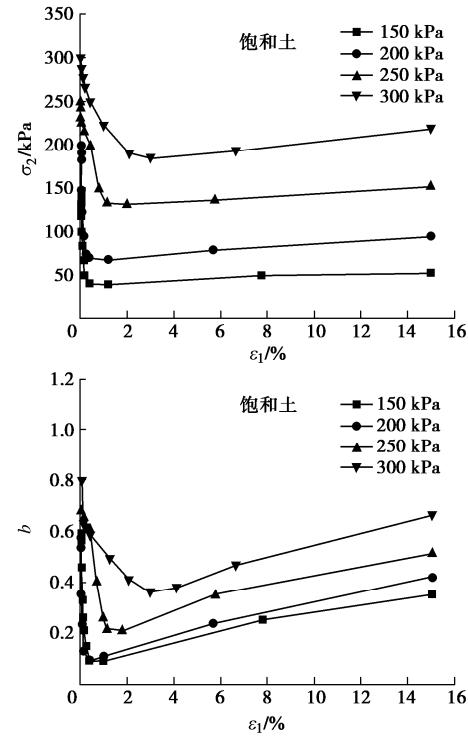
从图 10 可以看出, 中主应力参数随竖向应变呈非线性减小, 发展演化规律与中主应力类似, 曲线初始斜率较大, 中主应力参数衰减很快, 在竖向应变为 0.5%~1% 时, 曲线发生转折, 随后斜率趋于零, 中主应力参数基本不再变化, 直至破坏。说明重塑土样在卸载过程中, 初始阶段中主应力衰减速度大于侧向卸荷作用, 表现为中主应力参数迅速减小; 当竖向应变为 0.5%~1% 后, 中主应力和小主应力衰减速度相当, 故中主应力参数变化很小。固结围压越大, 中主应力参数越大, 含水率越小, 中主应力参数越大。含水率较小时, 土的初始结构强度较大, 卸载剪切过程中的固结围压对中主应力参数较小, 随着含水率增大至 21% 时, 高固结围压破坏了土的结构性, 使得土体被压密, 低固结围压还不足以破坏土的结构, 故而表现为固结围压对中主应力参数的影响较大; 当含水率继续增大至 24% 时, 各固结围压下均会破坏土的结构而被压密, 故而表现为固结围压对中主应力参数有影响但小于 21% 含水率条件。

4.3 饱和黄土中主应力及中主应力参数演化规律研究

整理饱和黄土卸载条件下的 σ_2 - ε_1 关系曲线和 b - ε_1 关系曲线分别如图 11 所示。

分析图 11 可知, 由于饱和土样由原状土样真空反压饱和制成, 故其中主应力和中主应力参数演化规律与原状土类似, 但由于土样充分饱和后, 使得原状土样的部分大孔隙塌落, 水分的浸入也导致了颗粒间的黏聚和摩擦特性产生变化, 原生结构性减弱, 故宏观

上表现为与原状试样规律相似, 但中主应力和中主应力参数在剪切初始阶段的衰减相较于原状样慢, 后期增长幅度也较小。

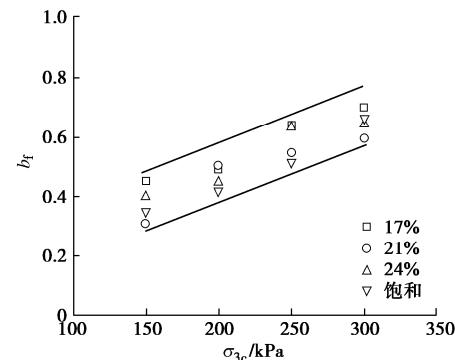
图 11 饱和黄土 σ_2 - ε_1 和 b - ε_1 曲线Fig. 11 σ_2 - ε_1 and b - ε_1 curves of saturated loess

综合分析图 7~11 可知, 土的初始状态对平面应变卸载条件下的中主应力和中主应力参数均会产生较大影响, 原状样和重塑样的演化规律不尽相同, 也表明了卸载剪切过程中的中主应力发挥程度的差异和三向主应力状态的差异。

5 不同初始状态下破坏时的中主应力参数分析

5.1 原状黄土破坏中主应力参数分析

整理各条件下原状黄土破坏时的中主应力参数随固结围压和含水率变化曲线如图 12 所示。



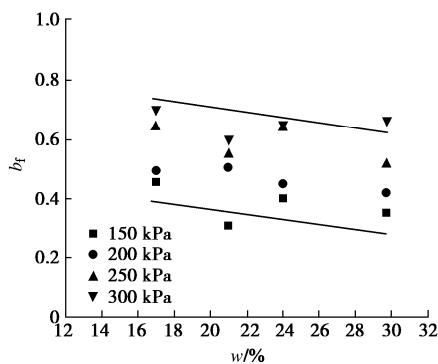


图 12 原状黄土破坏中主应力参数随 σ_{3c} 和 w 变化曲线

Fig. 12 b_f - σ_{3c} and b_f - w curves of intact loess at failure

从图 12 可以看出, 平面应变卸载条件下, 原状黄土破坏时的中主应力参数随着固结围压的增大而增大, 规律性较好; 随着含水率的增大, 有减小的趋势, 但规律性较弱。固结围压对破坏时中主应力的影响要大于含水率。

5.2 重塑黄土破坏中主应力参数分析

整理重塑黄土平面应变卸载破坏时的中主应力参数随固结围压和含水率变化规律, 如图 13 所示。

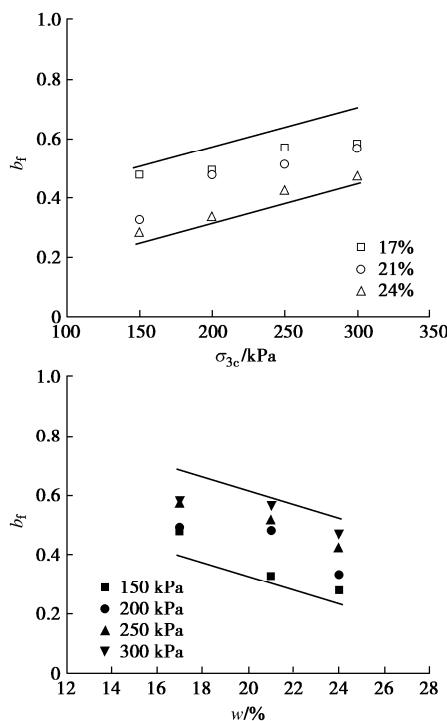


图 13 重塑黄土破坏中主应力参数随随 σ_{3c} 和 w 变化曲线

Fig. 13 b_f - σ_{3c} and b_f - w curves of remolded loess at failure

从图 13 可以看出, 重塑黄土卸载破坏时的中主应力参数随着固结围压增大而增大, 随着含水率的增大而降低, 规律性较好。综合分析图 12, 13 可知, 平面应变卸载条件下破坏时的中主应力参数随固结围压增大而增大, 随含水率增大而降低, 原状黄土含水率影响较弱, 重塑黄土规律性较好。分析其原因为, 原状

黄土具有原生的初始结构性, 坚向裂隙发育、大孔隙、钙质结核分布不均匀, 均会导致土的强度和变形差异及卸载剪切过程中的主应力状态, 经重塑后的土体消除了原生结构的影响, 土样内部更加均匀, 减弱了应力集中, 使得土样受力更加均匀, 更能揭示规律性, 故表现为重塑土样的规律性更好。原状黄土平面应变卸载破坏时的中主应力参数介于 0.31~0.67, 重塑黄土破坏时的中主应力参数介于 0.28~0.58, 各条件下的中主应力变化幅度较大, 且整体数值要大于平面应变加载条件。

6 不同初始状态下平面应变卸载强度特性分析

依据不同初始状态黄土在不同含水率条件下的卸载强度包线, 可得到强度参数黏聚力和内摩擦角随含水率变化曲线, 分别如图 14 所示, 黏聚力和内摩擦角随初始状态变化规律分别如图 15 所示。

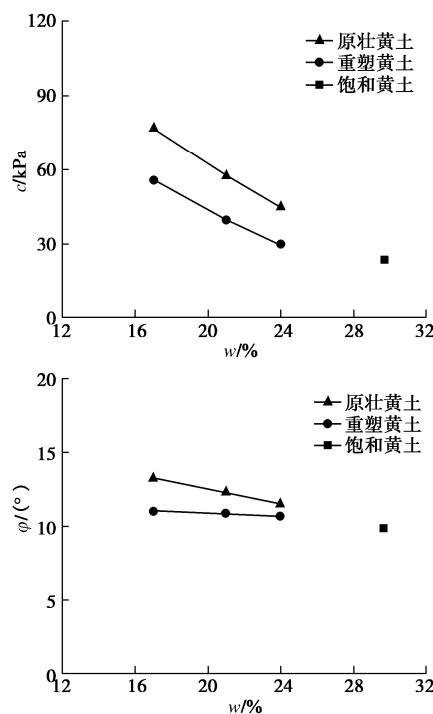


图 14 强度参数随含水率变化规律

Fig. 14 Change laws of strength parameters with water content

从图 14 可以看出, 平面应变卸载条件下不同初始状态黄土的黏聚力和内摩擦角均随含水率近似呈现线性减小, 黏聚力衰减较快, 原状黄土的内摩擦角变化较小, 略有衰减; 重塑黄土的内摩擦角基本不变化。水分的浸入对土强度的影响主要受黏聚强度控制, 摩擦强度影响较小。

分析图 15 可知, 平面应变卸载条件下, 黏聚力和内摩擦角随着初始状态的改变近似呈线性减小; 不同

初始状态对土黏聚力的影响要明显大于内摩擦角, 且含水率越低, 影响越大。原状、重塑和饱和不同初始状态对土的强度参数影响较大, 原状土强度参数最大, 经扰动重塑后的强度次之, 饱和状态下的强度最小, 这与黄土是典型的结构性土密切相关, 原状黄土具有天然的结构性和结构强度, 可抵抗一定的外部荷载, 但其大孔隙结构也导致了具有水敏性, 在其外部环境发生改变时, 其结构重组和大孔隙塌落均会破坏其原有结构, 使得强度弱化, 这也表明, 在实际工程中, 黄土在受到外部扰动和浸水作用后, 土的强度明显减弱, 易导致灾害发生。

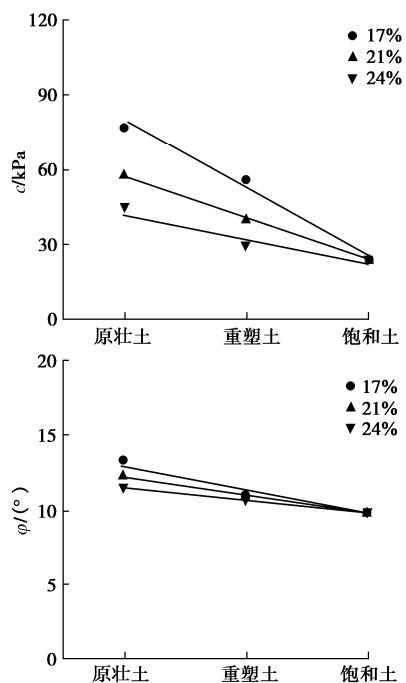


图 15 强度参数随初始状态变化规律

Fig. 15 Change laws between strength parameters with initial state

7 平面应变卸载条件下不同初始状态黄土的破坏形式

不同初始状态黄土的破坏形式是其强度、变形特性的宏观表现形式, 对于反映灾害可能发生的形势及孕灾-灾变内在机理具有重要作用。整理平面应变卸载条件下原状黄土、重塑黄土和饱和黄土的破坏形式分别如图 16~18 所示。

综合分析图 16~18 可知, 平面应变卸载条件下原状黄土的破坏形式均为侧胀破坏, 但在低围压和低含水率条件下卸载剪切过程中竖向裂隙松弛、扩展, 在产生侧胀破坏的同时, 土样表面有明显的裂隙产生。由于原状黄土具有天然结构性, 竖向裂隙和大孔隙分布, 当含水率较低和固结围压较小时, 对原状黄土原

生结构的影响较弱, 卸载作用使得竖向裂隙松弛, 在外部作用下荷载下, 应力往竖向裂隙处集中, 使得裂隙扩展, 侧向变形增大, 导致破坏; 随着含水率和固结围压的增大, 原生结构中的大孔隙塌落, 竖向裂隙在围压约束下闭合, 在卸载过程中, 土体内部应力更加均匀, 变形往侧向卸载方向不断发展, 最终呈现为侧胀破坏。原状黄土经重塑后, 消除了原生结构中部分大孔隙和竖向裂隙的影响, 土样更为均匀, 在卸载作用下, 产生竖向压缩的同时, 土样变形往约束较弱的侧向卸载方向不断发展, 最终侧胀破坏。饱和土样由原状样真空反压饱和而成, 故保留了部分原状样的原生结构, 但水分的充分浸入加之固结围压的约束, 使得土样的压硬性明显, 在侧向卸载作用下, 原生竖向裂隙扩展、延伸, 但不控制饱和土样的破坏形式, 饱和黄土的破坏形式仍然以侧胀破坏为主。

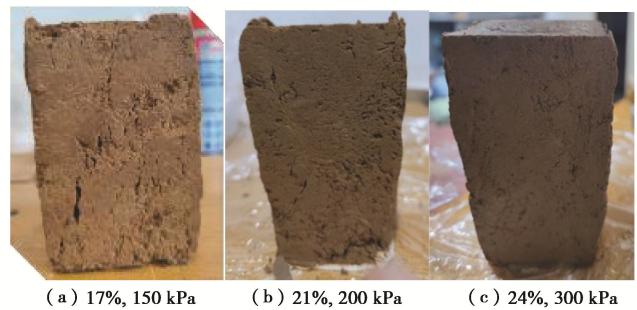


图 16 原状黄土破坏方式

Fig. 16 Failure modes of intact loess

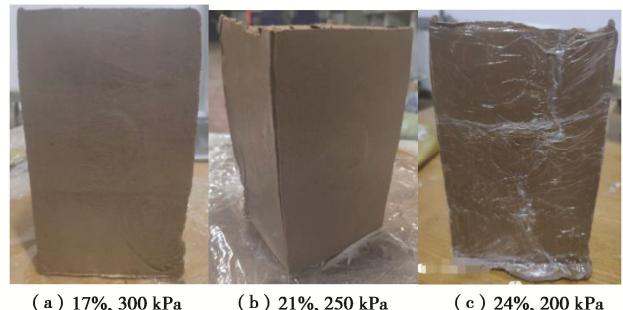


图 17 重塑黄土破坏方式

Fig. 17 Failure modes of remolded loess



图 18 饱和黄土破坏方式

Fig. 18 Failure modes of saturated loess

8 结 论

(1)平面应变卸载条件下不同初始状态黄土的应力-应变曲线在低含水率和低围压条件下呈现理想塑性,其余条件下均为硬化型,且随着固结围压和含水率增大,从弱硬化型向强硬化型转变,均可用双曲线描述。

(2)剪切初始阶段,切线模量较大,土的强度快速发挥,当竖向应变达到 $0.5\% \sim 4\%$ 时,斜率发生转折后逐步趋于稳定。固结围压越大、含水率低,初始切线模量越大,应力应变曲线越高,土的强度发挥越快。

(3)原状和饱和黄土的中主应力和中主应力参数均先减小后增大,衰减幅度大,增长幅度小,中主应力参数的增长幅度要大于中主应力;重塑黄土的中主应力和中主应力参数则先减小后基本保持稳定。

(4)平面应变卸载条件下破坏时的中主应力参数随固结围压增大而增大,随含水率增大而降低,原状黄土含水率影响较弱,重塑黄土规律性较好。卸载应力路径下破坏时的中主应力参数要大于加载路径。

(5)平面应变卸载条件下不同初始状态黄土的黏聚力和内摩擦角均随含水率增大近似呈现线性减小,黏聚力衰减较快;原状黄土的内摩擦角略有减小,重塑黄土的内摩擦角基本不变化。

(6)不同初始状态对土黏聚力的影响要明显大于内摩擦角,且含水率越低,影响越大。不同初始状态对土的强度参数影响较大,原状土强度参数最大,经扰动重塑后的强度次之,饱和状态下的强度最小。

(7)原状黄土除在低围压和低含水率条件下在侧胀破坏的同时,出现了明显的裂隙,其余条件下均为侧胀破坏;重塑黄土和饱和黄土均发生侧胀破坏。

参 考 文 献:

- [1] 胡贺祥, 姚仰平, 罗 汀, 等. 基于 Lade-Duncan 准则的平面应变强度公式[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 1): 389-396. (HU Hexiang, YAO Yangping, LUO Ting, et al. Soil strength equation under plane strain condition based on Lade-Duncan criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S1): 389-396. (in Chinese))
- [2] HUANG M H, ZHAO M H. Semi-analytical solutions for two-dimensional plane strain consolidation of layered unsaturated soil[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 129: 103886.
- [3] 张 玉, 邵生俊, 赵 敏, 等. 平面应变条件下结构性黄土本构模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 485-496. (ZHANG Yu, SHAO Shengjun, ZHAO Min, et al. Experimental study on constitutive models of structural loess under plane strain conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 485-496. (in Chinese))
- [4] JIANG M J, WANG Y Q, LEI H Y, et al. DEM analyses of true triaxial and wetting tests on unsaturated structural loess[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2020, 8(6): 231-234.
- [5] 陈存礼, 贾亚军, 王俊甫, 等. 压实黄土平面应变方向的主要应力特性[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 1): 16-21. (CHEN Cunli, JIA Yajun, WANG Junfu, et al. Characteristics of principal stress of compacted loess in plane strain direction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1): 16-21. (in Chinese))
- [6] 张 玉, 范特佳, 许晨阳, 等. 平面应变条件下原状 Q₃ 黄土的结构性演化特性研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(9): 65-77. (ZHANG Yu, FAN Tejia, XU Chenyang, et al. The study on structure evolution properties of intact Q₃ loess under plane strain condition[J]. China Civil Engineering Journal: 1-13. (in Chinese))
- [7] 刘炳恒, 孔令伟, 舒荣军, 等. 湛江结构性黏土在三维应力下的力学特性与强度准则[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3090-3100. (LIU Bingheng, KONG Lingwei, SHU Rongjun, et al. Mechanical properties and strength criterion of Zhanjiang structured clay in three-dimensional stress state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(11): 3090-3100. (in Chinese))
- [8] 张 玉, 邵生俊, 刘 瑾, 等. 平面应变加、卸荷条件下考虑初始应力的原状黄土强度与变形特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 90-100. (ZHANG Yu, SHAO Shengjun, LIU Jin, et al. Experiment study on strength and deformation characteristics of intact loess considering initial stress under plane strain loading and unloading conditions[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 90-100. (in Chinese))
- [9] 彭芳乐, 谭 耕, 龙冈文夫. 平面应变加-卸载试验中砂土的黏性特征及本构模型化[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 184-192. (PENG Fangle, TAN Ke, TATSUOKA F. Viscous behaviors and constitutive modeling of sand under plane strain loading-unloading tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 184-192. (in Chinese))

- [10] 梅国雄, 陈 浩, 卢廷浩, 等. 坑侧土体卸荷的侧向应力-应变关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊1): 3108-3112. (MEI Guoxiong, CHEN Hao, LU Tinghao, et al. Research on lateral stress-strain relation on side of foundation pit with lateral unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 3108-3112. (in Chinese))
- [11] 张 玉, 何 晖, 赵 敏, 等. 平面应变条件下原状黄土侧向卸载变形与强度特性分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(5): 1233-1242, 1250. (ZHANG Yu, HE Hui, ZHAO Min, et al. Analysis of lateral unloading deformation and strength characteristics of intact loess under plain strain condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(5): 1233-1242, 1250. (in Chinese))
- [12] 李 盛, 马 莉, 王起才, 等. 高填黄土明洞卸载结构土压力模型试验和数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 636-642. (LI Sheng, MA Li, WANG Qicai, et al. Model tests and numerical simulations of earth pressure for unloading structures of high fill open cut tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 636-642. (in Chinese))
- [13] 李加贵, 陈正汉, 黄雪峰, 等. Q_3 黄土侧向卸荷时的细观结构演化及强度特性 [J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1084-1091. (LI Jiagui, CHEN Zhenghan, HUANG Xuefeng, et al. CT-triaxial shear tests on the meso-structure evolution and strength of unsaturated loess Q_3 during unloading confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1084-1091. (in Chinese))

第十一届软土地基地下工程岩土问题国际研讨会通知

第十一届软土地基地下工程岩土问题国际研讨会 (IS-Macau 2024) 将于 2024 年 6 月 14 日—17 日在中国澳门特别行政区举行。本次会议由澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室 (IoTSC)、土木与环境工程系与国际土力学与岩土工程学会 (ISSMGE) TC204 共同举办。大会主席为澳门大学周万欢教授、东南大学徐涛副教授；副主席为剑桥大学 Giulia Viggiani 教授；秘书为澳门大学管铮博士。研讨会的主题为“智慧城市隧道与地下空间建设”，具体包括：软土基本性质；本

构与数值模型；软土地基处理新技术；大数据、人工智能和机器学习在隧道和地下工程中的应用；地下基础设施韧性与可持续发展；隧道与地下施工智能监测与可视化技术；观测法在地下工程中的应用；现场案例研究。

大会组委会诚邀业界专家学者、工程技术人员、管理人员和企业代表等拨冗莅临，共襄盛会！

会议网站: <https://is-macau2024.skliotsc.um.edu.mo>

咨询邮箱: ismacau2024@um.edu.mo。

(会议组委会)