

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201912058

# 初始固结应力对平面应变黄土剪切破坏特性影响

李宝平<sup>1</sup>, 杨倩<sup>1</sup>, 张玉<sup>1,2</sup>, 平高权<sup>1</sup>, 王智<sup>3</sup>

(1. 西安工业大学建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安理工大学陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对黄土工程中大量存在的平面应变问题, 在均压固结条件下研究的较多, 但与土实际的应力状态不符, 利用平面应变改造后的真三轴仪, 模拟土体的实际应力状态, 通过原状黄土在不同初始固结应力比、含水率和围压条件下的竖向加载平面应变试验, 揭示不同初始固结应力比、含水率和围压对原状黄土强度特性影响及破坏时中主应力变化规律。研究表明: 偏压固结原状黄土的强度随着初始固结应力比的增大而增大, 且明显大于均压固结; 抗剪强度及破坏时  $p, q$  随着初始固结应力比的减小或含水率的增大而减小; 土体原生结构损伤程度随着初始固结应力比的增大而增大使得黏聚力减小; 当次生结构形成土颗粒间挤密使得内摩擦角增大; 破坏时刻的中主应力随初始固结应力比增大而增大; 破坏时刻的中主应力系数范围在 0.15 ~ 0.45 之间; 平面应变条件下原状黄土破坏时的固结围压及含水率对中主应力系数的影响较明显。研究结果对进一步完善原状黄土的平面应变试验研究, 进而解决平面应变条件下的黄土工程建设问题, 提供试验依据和理论基础。

**关键词:** 平面应变试验; 初始固结应力; 原状黄土; 剪切破坏; 中主应力

**中图分类号:** TU411.7; TU444

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2020)05-0092-08

## Effect of initial solidification stress on shear failure characteristics of loess under the plane strain condition

LI Baoping<sup>1</sup>, YANG Qian<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1,2</sup>, PING Gaoquan<sup>1</sup>, WANG Zhi<sup>3</sup>

(1. Civil of Architectural Engineering College, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** In view of the large number of plane strain problems in loess engineering, more studies have been carried out under the condition of isotropic consolidation, but it is not consistent with the actual stress state of the soil. The true tri-axial apparatus after plane strain modification is used to simulate the actual stress state of the soil. Through the initial loading plane strain tests under different initial consolidation stress ratios, moisture content and confining pressure of the original loess, different initial consolidations are revealed. The influence of initial consolidation stress ratio, water content and confining pressure on the strength characteristics of intact loess is discussed and the change law of intermediate principal stresses during failure are summarized. The results show that the strength of intact loess under anisotropic consolidation increases

收稿日期: 2019-12-24; 修订日期: 2020-02-26

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(11802218); 陕西省科技计划项目资助(2019JQ-432; 2019JQ-835); 陕西省黄土力学与工程重点实验室项目资助(LME201801); 陕西省教育厅专项科研计划项目资助(20JK0670); 西安工业大学校长基金项目资助(XAGDXJJ18018)

**第一作者:** 李宝平(1971-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事岩土与地下工程等教学和科研工作。E-mail: 459485782@qq.com

**通讯作者:** 张玉(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事黄土力学研究。E-mail: 153673438@qq.com

with the increasing initial consolidation stress ratio, and is significantly greater than that of equalized consolidation. The strength of intact loess increases with the increasing initial consolidation stress ratio, and is significantly greater than the isotropic consolidation. The shear strength and the  $p$  and  $q$  at failure decrease with the initial consolidation stress ratio. The decrease of water content increases, and the degree of damage to the primary structure of the soil increases with the increasing initial consolidation stress ratio, which reduces the cohesion. When the secondary structure forms the compaction of soil particles, the internal friction angle increases. The intermediate principal stress at the time of failure increases with the increasing initial consolidation stress ratio. The intermediate principal stress coefficient at the time of failure ranges from 0.15 to 0.45. The effect of consolidation confining pressure and water content of the intact loess under the plane strain conditions on the intermediate principal stress coefficient is obvious. The research results will further improve the plane strain test research of intact loess, and can solve the problem of loess engineering construction under the plane strain conditions, and also provide test basis and theoretical basis.

**Keywords:** plane strain test; initial consolidation stress; intact loess; shear failure; intermediate principal stress

黄土在中国西北分布广泛,其独特的大孔隙、结构性、水敏性等特点<sup>[1]</sup>,所引发的湿陷性、震陷性等均对实际工程有一定影响。深大基坑、边坡、路堤以及土石坝等工程均可近似归为平面应变问题,解决这类工程问题对推进“一带一路”的工程建设和地下空间开发工程具有实践意义。目前,对原状黄土强度的研究主要以直剪试验或常规三轴试验为主<sup>[2-3]</sup>,与工程中土的实际受力状态不相符,且应力路径和初始应力状态的改变均会影响土的强度、变形特性。孙书勤等<sup>[4]</sup>研究表明土的破坏应变随着固结围压的增大而减小,土体强度增强;邓国华等<sup>[5]</sup>、于清高等<sup>[6]</sup>研究了真三轴条件下黄土的结构性变化规律;杨利国等<sup>[7]</sup>揭示了中主应力对土强度的增强作用;施维成等<sup>[8]</sup>研究指出,平面应变条件下土的抗剪强度高于常规三轴状态结果;赵敏等<sup>[9]</sup>对重塑黄土进行了均压固结条件下的平面应变竖向加载试验研究分析;张玉等<sup>[10-11]</sup>等对原状黄土进行了均压固结条件下的平面应变竖向加载试验,揭示了原状黄土的平面应变剪切强度及破坏特性。还有一些研究成果也是基于均压固结平面应变试验得到<sup>[12-14]</sup>。然而在实际工程中,土体单元所受上覆土体自重荷载随着土层深度的增大而增大,土单元处于偏压固结应力状态。不同初始应力状态、不同应力路径均会对土的强度产生一定程度影响<sup>[15-16]</sup>,但偏压固结条件下的平面应变试验研究开展的较少<sup>[17-18]</sup>,以至于对平面应变偏压固结条件下黄土强度、变形特性的认识还不够深刻。因此,有必要在不同初始应力状态条件下,开展偏压固结的平面应变试验,揭示平面应变特定应力路径条件下黄土的强

度、变形特性。本文通过平面应变改造后的真三轴进行偏压固结条件下平面应变试验研究,揭示原状黄土的剪切强度特性、破坏时的中主应力和中主应力系数的变化规律,研究结果可进一步完善原状黄土的平面应变试验研究,为黄土地区的工程建设提供试验依据和理论基础。

1 试验方案

按照《土工试验规范标准》<sup>[20]</sup>要求的方法,取自西安市月登阁村的原状黄土,其基本物性指标如表 1 所示。

表 1 黄土物理性质指标  
Table 1 Physical parameters of intact loess

| 天然含水率 $w/\%$ | 天然干密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$ | 比重 $G_s$ | 初始孔隙比 $e_0$ | 塑限 $W_p/\%$ | 液限 $W_L/\%$ | 塑性指数 $I_p$ | 饱和含水率 $w_p/\%$ |
|--------------|--------------------------------|----------|-------------|-------------|-------------|------------|----------------|
| 22.50        | 1.28                           | 2.71     | 1.082       | 16.50       | 29.70       | 13.20      | 36.50          |

为保证原状土的稳定性和原状土样制样器进行制样。通过滴定法和自然风干法<sup>[17]</sup>,分别制备含水率为 13%、17%、21%、24% 的原状黄土试样,并将试样放置保湿缸中 24 h 以上,保证试样中的水分扩散均匀。

试验仪器采用经过平面应变改造后的西安理工大学真三轴仪<sup>[19]</sup>。采用黏性土的静止土压力系数  $K_0 = 0.5 \sim 0.7$  时,则初始固结应力比  $K_c = 1.5 \sim 2.0$ <sup>[21]</sup>:

$$K_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \tag{1}$$

式中: $\sigma_1, \sigma_3$ ——最大和最小主应力。

取初始固结应力比  $K_c = 1.0, 1.5, 2.0$ ,并在原状

黄土试样施加中小主应力均为 50, 100, 200, 300 kPa 的围压条件下进行均压固结 ( $K_c = 1.0$ ) 和偏压固结<sup>[22]</sup> ( $K_c = 1.5, 2.0$ ) 排水试验。固结完成后, 维持最小主应力及其垂直的另一侧面形变不变, 进行竖向加载试验。加载方式为应变控制, 加载速率为 0.05 mm/min, 当竖向应变达到 12% 视为试验结束<sup>[19]</sup>。

## 2 平面应变偏压固结剪切变形特性分析

图 1 为不同初始固结应力条件下原状黄土的主应力差 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 与竖向应变  $\varepsilon_1$  关系曲线, 图 2 为不同初始固结应力比平面应变试验的广义剪应力  $q$  与剪应变  $\varepsilon_s$  关系曲线, 其中:

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

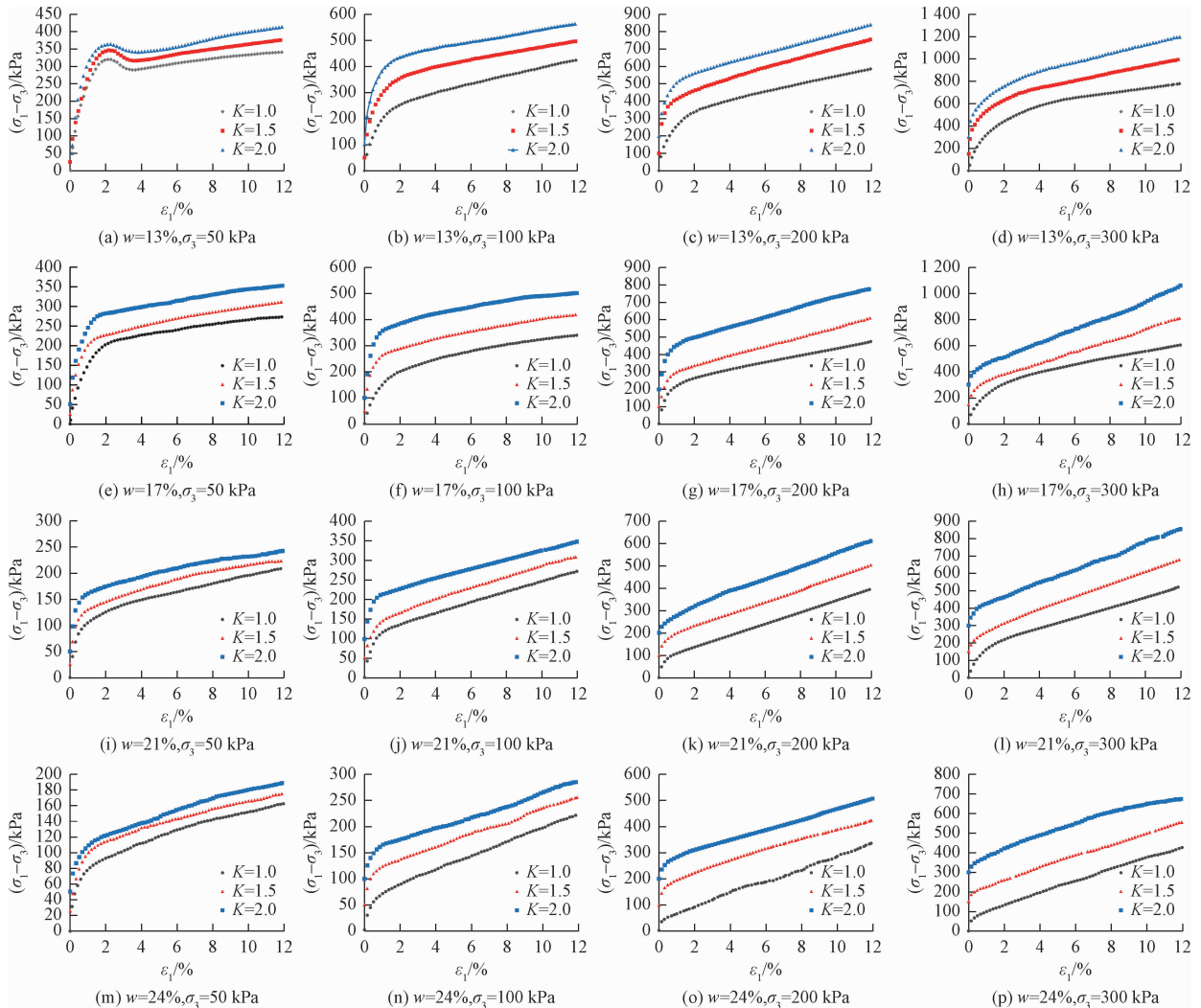


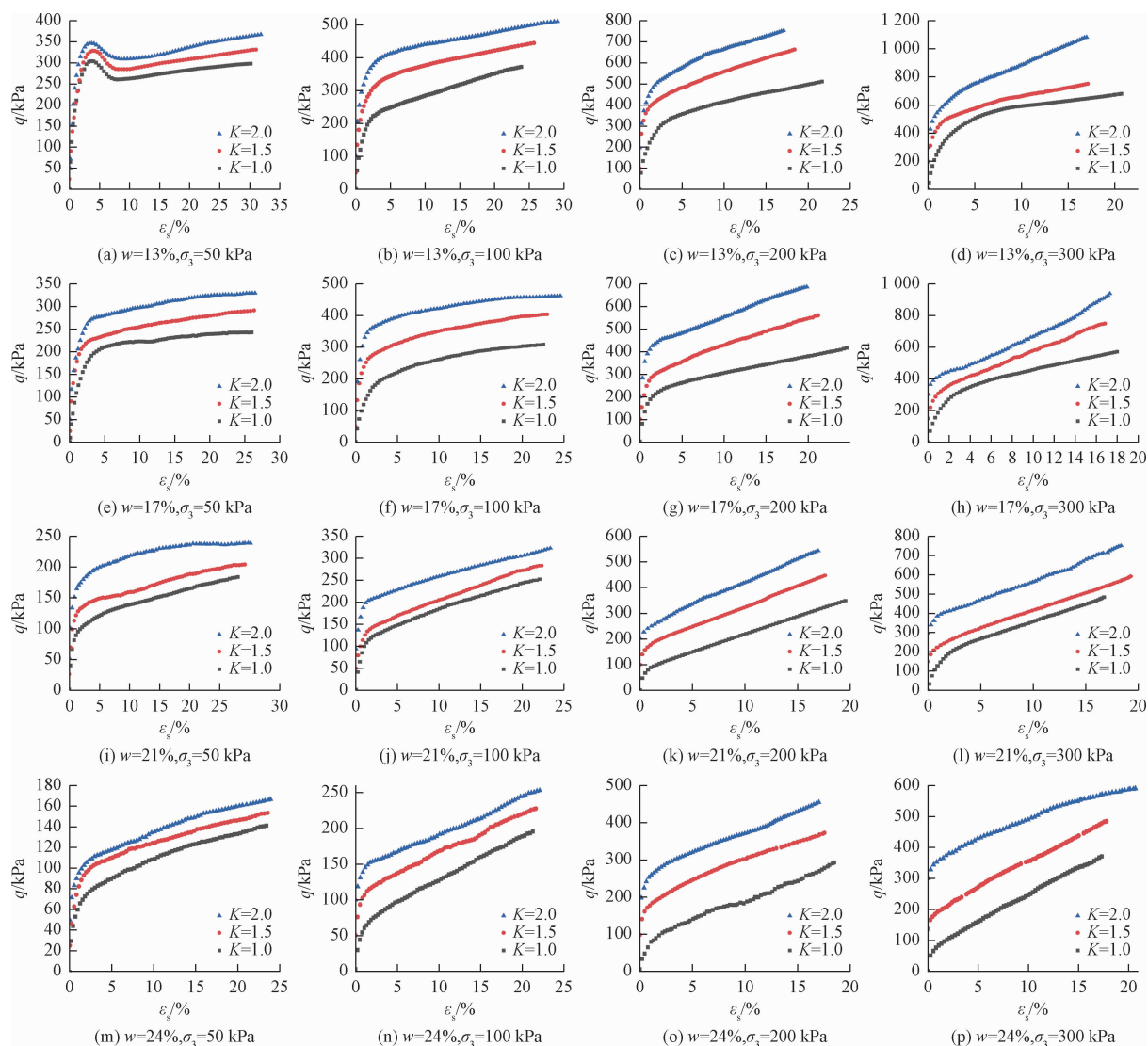
图 1 不同初始固结应力条件下原状黄土的  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$  关系

Fig. 1  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$  curves of intact loess under different initial consolidation stress ratios

由图 1、图 2 可知, 当含水率及围压一定时, 土体强度随初始固结应力比  $K_c$  的增大而增大, 表现出土的压硬性特征。当含水率为 13%、围压为 50 kPa 时应力应变曲线为应变软化型, 说明在低围压和低含水率的条件下黄土的原生结构较强, 当竖向荷载超过原生结构强度, 则试样发生破坏且为脆性破坏。

当  $K_c$  值一定时, 围压的增大导致原生结构破坏, 次生结构形成, 曲线形态由软化型转变为硬化型。土体颗粒的压密程度随着  $K_c$  值的增大而增大, 土体强度增大, 压硬性特性表现明显。

当围压一定时, 含水率的增大对黄土原生结构的损伤作用显著。相同  $K_c$  值的曲线随含水率升高而降低, 且曲线的拐点处可见含水率越大对应的剪应变  $\varepsilon_s$  值越小, 表明含水率越大原状黄土的抗剪强度越低。

图2 不同初始固结应力比条件下原状黄土  $q - \varepsilon_s$  关系Fig. 2  $q - \varepsilon_s$  curves of intact loess under different initial consolidation stress ratios

### 3 平面应变偏压固结剪切强度及破坏分析

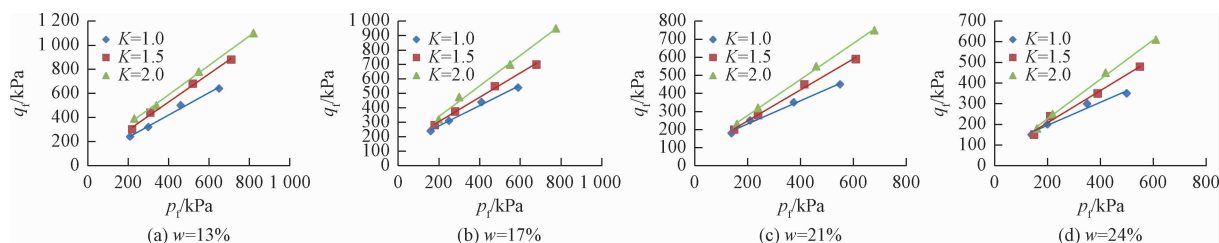
当竖向应变达到 12% 时为破坏应变, 取破坏时的平均主应力  $p_f$ 、广义剪应力  $q_f$  以及中主应力  $\sigma_{2f}$ 、中主应力系数  $b_f$ , 分析原状黄土在等压及偏压固结条件下的强度及破坏特性。

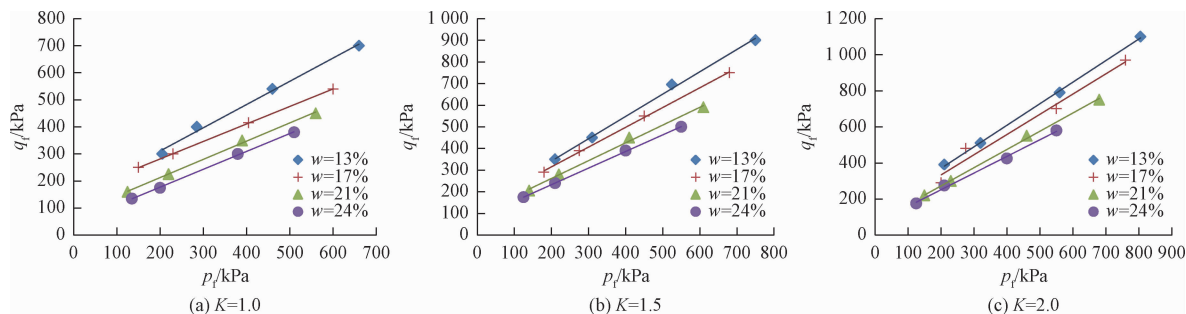
#### 3.1 原状黄土的强度特性分析

图 3、图 4 分别为不同初始固结应力比与不同含水率条件下  $p-q$  平面的强度破坏线, 其中:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

分析图 3、图 4 可知, 原状黄土的抗剪强度及破坏

图3 不同初始固结应力比条件下  $p-q$  平面内强度破坏线Fig. 3 Strength failure line on  $p-q$  plane under different initial consolidation stress ratios

图4 不同含水率条件下  $p$ - $q$  平面内强度破坏线Fig. 4 Strength failure line on  $p$ - $q$  plane under different moisture content

时的  $p, q$  随初始固结应力比  $K_e$  的减小而减小、含水率的增大而减小,且不同固结条件下原状黄土试样在  $p$ - $q$  平面的强度破坏线近似线性关系。

### 3.2 黄土强度参数变化规律分析

根据试验数据绘制不同初始固结应力比条件下原状黄土黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  与含水率关系曲线、不同含水率的原状黄土黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  与初始固结应力比关系曲线,如图5、图6所示。

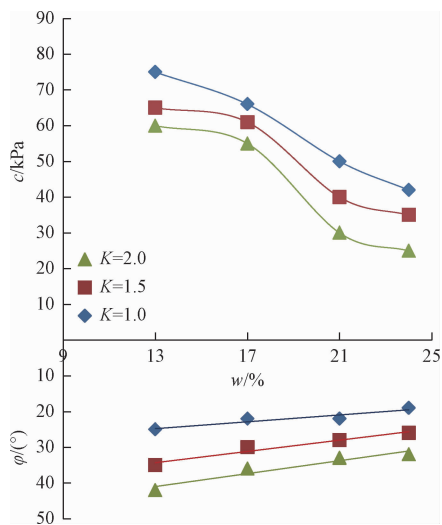


图5 不同初始固结应力比条件下原状黄土黏聚力、内摩擦角与含水率的关系

Fig. 5  $c$  and  $\varphi$  changes with  $w$  under different initial consolidation stress ratios

由图5可知,不同  $K_e$  值条件下的黏聚力  $c$  随含水率升高而降低,内摩擦角  $\varphi$  随含水率的增大而线性减小。当含水率从17%升高至21%的过程中,黏聚力迅速降低,呈现出较快的衰减趋势,表明原状黄土的含水率高于17%时强度衰减明显。当含水率大于21%时,黏聚力随  $K_e$  值增大而衰减速度减小,主要因为随着  $K_e$  值增大,黄土原生结构在固结时遭受明显破坏,致使黏聚力减小,土颗粒间的胶结物随含水率升高不断

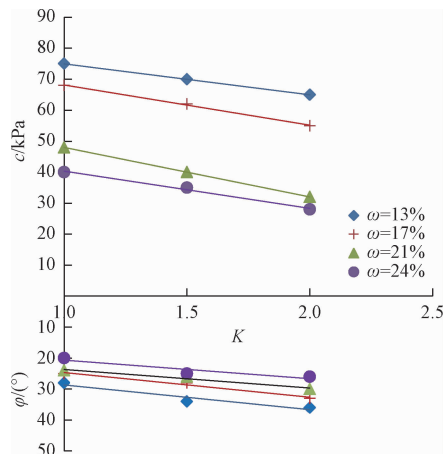


图6 不同含水率的原状黄土黏聚力、内摩擦角与初始固结应力比关系

Fig. 6  $c$  and  $\varphi$  changes with  $K$  under different moisture content

溶解,胶结黏聚作用逐渐消失。此外,当含水率超过塑限后,土颗粒间弱结合水膜逐步贯通,且贯通程度随含水率不断升高加大,黄土固结完成后黏聚力趋于稳定,因此含水率的再次增大对黏聚力的削弱效果不再明显。

由图6可知,当含水率一定时,黏聚力随着  $K_e$  值的减小而线性增大。这是由于土体原生结构破坏程度随着初始固结应力比  $K_e$  值的增大而增大,黏聚力降低。而当含水率相同时,原状黄土的内摩擦角  $\varphi$  随着  $K_e$  值的增大而线性增大。由于原生结构随着竖向固结应力的增大而发生破坏,改变了土体颗粒间联结特征,颗粒间挤密,土体颗粒间摩擦力增大,则内摩擦角增大。

### 3.3 破坏时中主应力分析

图7、图8分别为不同  $K_e$  值条件下破坏时的中主应力  $\sigma_{2f}$  与固结围压、含水率的关系曲线。

从图7可以看出,  $\sigma_{2f}$  均随着围压升高而增大。当含水率一定,在围压较小 ( $\sigma_{3e} \leq 100$  kPa) 时土体原生

结构较强,且  $K_e$  值增大对原生结构影响较小,故在剪切试验过程中不同  $K_e$  值条件下试样表现出的强度较为接近;而在围压较大 ( $\sigma_{3c} \geq 200$  kPa) 时  $K_e$  值的增

大使土体压密,土体的压缩程度增大,压硬特性显著,破坏时强度升高,则  $\sigma_{2f}$  随着  $K_e$  值增大表现出明显的升高趋势。

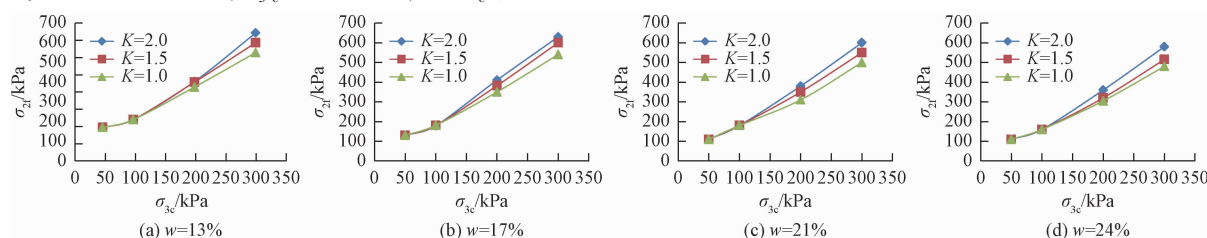


图7 不同初始固结应力比条件下破坏时  $\sigma_{2f} - \sigma_{3c}$  关系

Fig. 7 Change law between  $\sigma_{2f}$  and  $\sigma_{3c}$  under different initial consolidation stress ratios

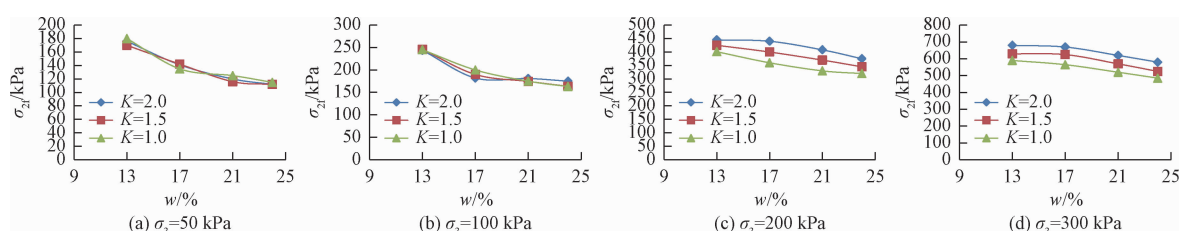


图8 不同初始固结应力比条件下破坏时  $\sigma_{2f} - w$  关系

Fig. 8 Change law between  $\sigma_{2f}$  and  $w$  under different initial consolidation stress ratios

由图8可看出,在相同围压、不同  $K_e$  值条件下  $\sigma_{2f} - w$  曲线均随着含水率增加而降低,且当围压较低时,不同  $K_e$  值的  $\sigma_{2f} - w$  曲线较为一致;而当围压较高时,随着  $K_e$  值增大  $\sigma_{2f} - w$  曲线升高趋势明显。

### 3.4 破坏时中主应力系数分析

图9、图10为不同  $K_e$  值条件下破坏时中主应力系数  $b_f$  与固结围压、含水率的关系曲线。

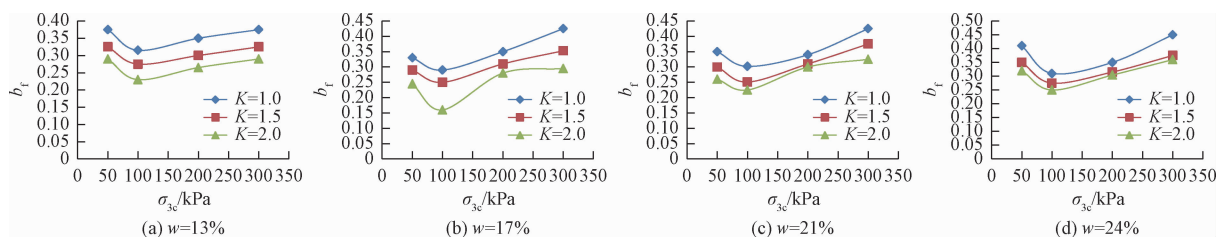


图9 不同初始固结应力比条件下破坏时中主应力系数与固结围压关系

Fig. 9 Change law between  $b$  and  $\sigma_{3c}$  under different initial consolidation stress ratios

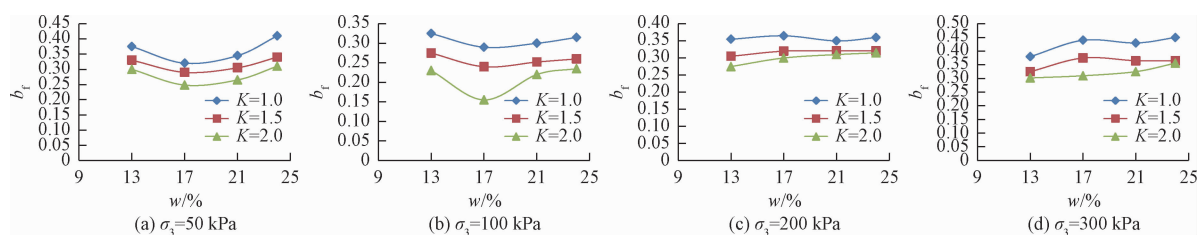


图10 不同初始固结应力比条件下破坏时中主应力系数与含水率关系

Fig. 10 Change law between  $b$  and  $w$  under different initial consolidation stress ratios

由图9可知,当含水率一定时,  $b_f - \sigma_{3c}$  曲线随  $K_e$  值降低而升高,且存在较明显的差异性;当围压较小

( $\sigma_{3c} \leq 100$  kPa) 时,  $b_f$  值随围压升高而减小,而当围压较大 ( $\sigma_{3c} \geq 200$  kPa) 时,  $b_f$  值逐渐增大,且随围压的增

大而增大。

由图 10 可知,相同围压条件下的  $b_f$ - $\sigma_{3c}$  曲线亦随  $K_c$  值增大而降低。此外,当围压一定时,不同含水率条件下的  $b_f$  值也不尽相同。当围压较小 ( $\sigma_{3c} \leq 100$  kPa) 时,以含水率  $w = 17\%$  为界限,  $b_f$  值随含水率的增大先降低再增大;而当围压较大 ( $\sigma_{3c} \geq 200$  kPa) 时,  $b_f$  值随含水率增大而增大。

由图 9、图 10 的变化规律可知,平面应变条件下原状黄土破坏时的中主应力系数  $b = 0.15 \sim 0.45$ ; 平面应变条件下围压及含水率对原状黄土破坏时中主应力系数受的影响较为明显。

## 4 结论

(1) 平面应变条件下,偏压固结原状黄土的强度随着初始固结应力比的增大而增大,且显著高于均压固结;土体强度随着含水率的降低或围压的增大而增大。应力应变曲线形态随含水率及围压的升高由应变软化向弱硬化再向强硬化型转变。含水率的增大对黄土原生结构损伤明显,削弱了原状黄土抵抗变形的能力;围压升高使土体呈现出压硬性特征,提高土体强度。

(2) 平面应变条件下,原状黄土的抗剪强度以及破坏时  $p, q$  随着初始固结应力比的减小或含水率的增大而减小。

(3) 不同含水率及初始固结应力比条件下黄土平面应变强度破坏线均近似呈线性关系。黏聚力随初始固结应力比增大而线性衰减,随含水率升高而降低,含水率超过 17% 时衰减明显,均压固结时衰减较平缓。内摩擦角随含水率增大表现出线性减小,随初始固结应力比升高线性增大。

(4) 破坏时的中主应力随固结围压的增大而增大,随含水率的增大而减小,随着初始固结应力比升高而增大。破坏时的中主应力系数  $b$  的范围在 0.15 ~ 0.45 之间。

(5) 平面应变条件下固结围压、含水率均对原状黄土破坏时中主应力系数影响明显。

## 参考文献 (References):

- [1] 谢定义,邢义川. 黄土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016. [XIE D Y, XING Y C. Soil mechanics for loess soils [M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese)]
- [2] 邢鲜丽,李同录,李萍,等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 53 - 59. [XING X L, LI T L, LI P, et al. Variation regularities of loess shear strength with the moisture content [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 53 - 59. (in Chinese)]
- [3] MA L. The comparison of the loess mechanical properties under plane strain and conventional triaxial experiments [J]. Advanced Materials Research, 2014, 919/920/921: 791 - 794.
- [4] 孙书勤,裴向军,袁广,等. 饱和黄土卸载特性影响因素研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 59 - 63. [SUN S Q, PEI X J, YUAN G, et al. Influencing factors for unloading characteristics of saturated loess [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 59 - 63. (in Chinese)]
- [5] 邓国华,邵生俊. 基于真三轴试验的黄土结构性变化规律研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 679 - 684. [DENG G H, SHAO S J. Research on change structural characteristics of loess based on true triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 679 - 684. (in Chinese)]
- [6] 于清高,邵生俊,余芳涛,等. 真三轴条件下  $Q_2$  黄土的破坏模式与强度特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 66 - 70. [YU Q G, SHAO S J, SHE F T, et al. Research on failure modes and strength characteristics of  $Q_2$  loess under true triaxial condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 66 - 70. (in Chinese)]
- [7] 杨利国,骆亚生,王瑞瑞. 不同中主应力下压实黄土变形特性的真三轴试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 76 - 80. [YANG L G, LUO Y S, WANG R R. True triaxial tests on the deformation characteristics of compacted loess with different intermediate principal stress [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 76 - 80. (in Chinese)]
- [8] 施维成,朱俊高,张坤勇,等. 平面应变条件下粗粒土的变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 101 - 108. [SHI W C, ZHU J G, ZHANG K Y, et al. Experimental study of deformation characteristics of coarse-grained soil under plane strain condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 101 - 108. (in Chinese)]
- [9] 赵敏,王丽娟. 竖向加载下填筑黄土边坡土体强度特性研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(10): 106 - 110. [ZHAO M, WANG L J. Research on the strength characteristics of remolded loess for

- embankment slope under vertical loading [J]. Industrial Construction, 2015, 45(10): 106 - 110. (in Chinese)]
- [10] 张玉, 邵生俊. 平面应变条件下黄土的竖向加载变形与强度特性分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 112 - 121. [ZHANG Y, SHAO S J. An analysis of vertical loading deformation and strength characteristics of loess under plain strain condition [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(3): 112 - 121. (in Chinese)]
- [11] 张玉, 邵生俊, 何晖, 等. 原状黄土的平面应变剪切、屈服性状的试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(10): 111 - 120. [ZHANG Y, SHAO S J, HE H, et al. Experimental study on plane-strain shear and yield characteristics of intact loess [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10): 111 - 120. (in Chinese)]
- [12] 张玉, 邵生俊. 平面应变加、卸荷条件下黄土的非线性变形特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊1): 185 - 190. [ZHANG Y, SHAO S J. Non-linear deformation behaviors of loess under plane strain state of vertical loading and lateral unloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup1): 185 - 190. (in Chinese)]
- [13] 李浩东, 骆亚生, 王瑞瑞, 等. 平面应变条件下非饱和黄土强度特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(11): 73 - 76. [LI H D, LUO Y S, WANG R R, et al. An analysis of the shear strength of unsaturated loess under plane strain conditions [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(11): 73 - 76. (in Chinese)]
- [14] 唐洪祥, 张丽娟. 平面应变试验与常规三轴试验条件下含细粒土砂力学特性比较研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 223 - 227. [TANG H X, ZHANG L J. Comparative studies on mechanical characteristics of fine-grained sand with plane strain test and triaxial test [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(5): 223 - 227. (in Chinese)]
- [15] 张玉, 邵生俊, 陈菲, 等. 不同应力路径条件下原状  $Q_3$  黄土的强度特性及破坏方式试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊2): 99 - 106. [ZHANG Y, SHAO S J, CHEN F, et al. Experimental study of strength characteristics and failure modes of  $Q_3$  intact loess under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup2): 99 - 106. (in Chinese)]
- [16] 马林, 赵队家, 陈昌禄. 平面应变下结构性对黄土基坑稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 419 - 424. [MA L, ZHAO D J, CHEN C L. Study of influence of structural property on stability of foundation pit under plane strain condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup1): 419 - 424. (in Chinese)]
- [17] 王智, 李宝平, 张玉. 平面应变偏压固结条件原状黄土强度特性研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(12): 1 - 6. [WANG Z, LI B P, ZHANG Y. Research on mechanical characteristics of intact loess under plane strain and anisotropic consolidation [J]. Industrial Construction, 2017, 47(12): 1 - 6. (in Chinese)]
- [18] 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 Y, SHAO S J, LIU J, 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)]
- [19] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1172 - 1179. [SHAO S J, LUO A Z, DENG G H, et al. Development of a new true tri-axial apparatus [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1172 - 1179. (in Chinese)]
- [20] 中华人民共和国建设部. 土工试验规范标准: GT/T 50123—1999[S]. 北京: 中国建设工业出版社, 1999. [Ministry of Construction of the P. R. China. Standard for soil test method: GT/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese)]
- [21] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 465 - 466. [CHEN X Z. Soil mechanics and geotechnical engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 465 - 466. (in Chinese)]
- [22] 王智. 平面应变条件下黄土剪切破坏与屈服特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2018. [WANG Z. Study on the shear failure and yield characteristics of loess under plane strain condition [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018. (in Chinese)]