

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1840

# 欠压密饱和黄土基本物理力学性质研究

康 佐<sup>1</sup>, 亢佳伟<sup>2</sup>, 邓国华<sup>2,3</sup>

(1. 西安市轨道交通集团有限公司, 陕西 西安 710018; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;  
3. 西安黄土地下工程技术咨询有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘 要:** 黄土浸水可形成两类工程性质差异较大的压密饱和黄土或欠压密饱和黄土。通过对西安地区 22 个黄土场地的试验和统计数据, 分析了两类饱和黄土性质的差异, 系统地研究了欠压密饱和黄土的基本物理力学性质, 揭示了其具有饱水软弱性和失水大变形的根本原因, 归纳得到了西安地区欠压密饱和黄土的物理力学特征指标, 为科学研究和工程实践中严格区分两类饱和黄土、分类制定技术措施提供了依据。研究表明: 欠压密饱和黄土是黄土浸水过程中未被充分压密、大孔隙结构仍然存在的土, 在 Q<sub>3</sub> 和 Q<sub>2</sub> 上部地层中均有揭露, 其具有大孔隙比、高含水率、中高灵敏度、中高压缩性、低承载力和强度等特征, 一般处于软塑或流塑状态, 其与湿陷性黄土、古土壤和压密饱和黄土邻近分布, 形成了软硬不均的地层组合特征。

**关 键 词:** 饱和黄土; 欠压密特性; 物性状态; 力学特性

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 11-3117-11

## Study on basic physical and mechanical properties of uncompacted saturated loess

KANG Zuo<sup>1</sup>, KANG Jia-wei<sup>2</sup>, DENG Guo-hua<sup>2,3</sup>

(1. Xi'an Rail Transit Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. Xi'an Loess Underground Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** Immersion of loess can form compacted saturated loess or uncompacted saturated loess, and their engineering properties are significantly different. Based on the tests and data statistics of 22 loess sites in the Xi'an area, this paper systematically studied the basic physical and mechanical properties of the uncompacted saturated loess for the first time, revealed the fundamental reasons for its water-saturated weak property and large deformation due to water loss, and summarized the physical and mechanical characteristics of the uncompacted saturated loess in Xi'an area. The above research results can provide a basis for scientific research and engineering practice to strictly distinguish two types of saturated loess and formulate technical measures by classification. It is concluded that: uncompacted saturated loess is a kind of soil in which collapsible loess is not fully compacted, and macropore structure still exists in the immersion process. It is exposed in Q<sub>3</sub> loess or the upper part of Q<sub>2</sub> loess. It has a large void ratio, high water content, medium and high sensitivity, medium and high compressibility, low bearing capacity and strength, and is generally in soft plastic or flow plastic state. It is distributed adjacent to the compacted saturated loess, collapsible loess, and paleosol, forming a combination of soft and hard strata.

**Keywords:** saturated loess; uncompacted state; physical state; mechanical properties

## 1 引 言

饱和黄土是饱和度大于 80%, 湿陷性已退化了  
的黄土, 依据其受水浸湿后的应力历史可分为两类:  
未压密饱和黄土和已压密饱和黄土<sup>[1]</sup>。天然黄土又  
可称“大孔土”, 正是因为大孔隙的存在, 使其表

现出了湿陷性、结构性、水敏性等有别于其他土的  
性质<sup>[2-3]</sup>。捷尼索夫<sup>[4]</sup>最早将黄土的低密度和其在干  
旱条件下堆积压密过程相联系, 提出了欠压密理论,  
将其在长期水力作用下复杂的物理化学作用笼统地  
归纳为欠压密状态, 决定其性质的核心因素是地层  
沉积或改造过程中土层所具有的压密状态, 即土的

收稿日期: 2022-11-24

录用日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52178355)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52178355).

第一作者简介: 康佐, 男, 1978 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事黄土力学与地铁工程研究工作。E-mail: akhebi@163.com

通讯作者: 邓国华, 男, 1979 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事黄土力学与黄土工程的研究工作。E-mail: gh\_deng@163.com



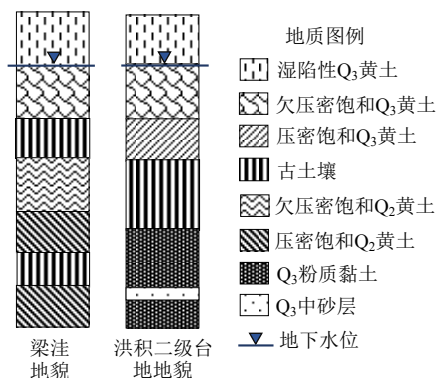


图 3 两类地貌单元典型地层剖面示意图  
Fig.3 Typical stratigraphic profiles of two types of geomorphic units

### 3 物理性质特征

土体的物理性质特征主要取决于其密实程度、含水状态、颗粒组成和稠度状态。主要选择孔隙比  $e$ 、含水率  $w$ 、饱和度  $S_r$  和液性指数  $I_L$  4 个指标对欠压密饱和和黄土的物理性质进行详细分析。

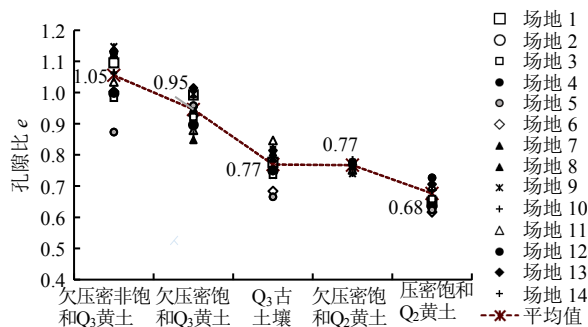
#### 3.1 孔隙比

孔隙比  $e$  通过描述土中孔隙体积总量和土颗粒体积的比值, 表征了土体在长期水力共同作用下所具有的欠压密状态。通过区分梁洼和洪积台地两类地貌单元, 以地层自浅至深的揭露顺序作为横坐标轴, 各场地处的物理性质指标统计值作为纵坐标轴, 汇总对比, 如图 4(a)、4(b)所示; 通过区分  $Q_3$  和  $Q_2$  两个沉积年代, 将同一场地内两类饱和黄土的物性指标对比分析, 如图 4(c)、4(d)所示。

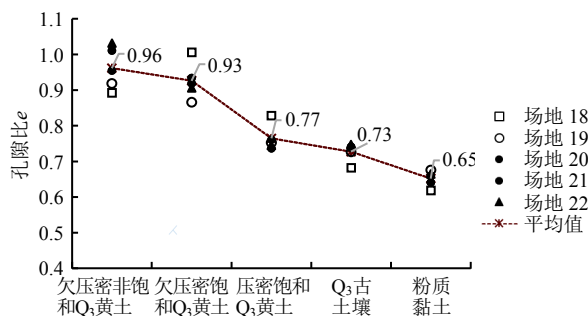
由图 4(a)、4(b)可知, 不同地貌单元中, 随着土体埋深的增加, 土层的孔隙比逐渐减小, 这符合土的沉积规律, 即随着沉积年代和上覆压力增加, 土体的孔隙比呈减小趋势, 即逐步趋于压密稳定。同一沉积年代、邻近层序位置处的饱和黄土, 其孔隙比数值存在着明显差异, 该指标差异在  $Q_3$  地层中显得尤为突出。非饱和  $Q_3$  黄土孔隙比在  $0.9 \sim 1.2$  之间, 欠压密饱和  $Q_3$  黄土孔隙比在  $0.88 \sim 1.10$  之间, 在长期浸水饱和作用下, 孔隙比平均降低了 0.1, 说明非饱和黄土在浸水过程中, 虽然可能因上覆压力未达到湿陷起始压力, 未经历湿陷压密作用, 但原非饱和黄土的结构强度在增湿过程中发生软化, 产生了一定程度的压缩变形。

由图 4(c)、4(d)可以得到, 在长期的水力共同作用下, 欠压密饱和  $Q_3$  黄土孔隙比集中在  $0.88 \sim 1.10$  之间, 压密饱和  $Q_3$  黄土孔隙比在  $0.75 \sim 0.82$  之间; 欠压密饱和  $Q_2$  黄土孔隙比在  $0.73 \sim 0.78$  之

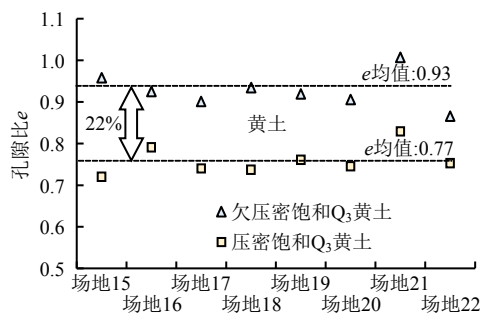
间, 压密饱和  $Q_2$  黄土孔隙比在  $0.62 \sim 0.70$  之间。相较于压密饱和  $Q_3$  黄土, 欠压密饱和  $Q_3$  黄土的孔隙比平均增量 0.16, 相较于压密饱和  $Q_2$  黄土, 欠压密饱和  $Q_2$  黄土的孔隙比平均增量为 0.09。上述孔隙比差异正是由于黄土的浸水方式和上覆压力不同造成的。当地层从下而上浸水时, 对应于某一深度处的土体, 其上覆压力主要由处于地下水位以上的湿陷



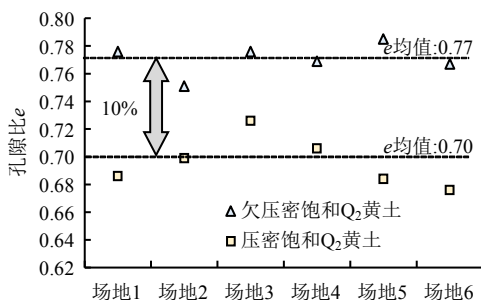
(a) 梁洼地貌典型地层指标



(b) 洪积台地地貌典型地层指标



(c) 欠压密与压密饱和  $Q_3$  黄土孔隙比对比



(d) 欠压密与压密饱和  $Q_2$  黄土孔隙比对比

图 4 欠压密饱和黄土地层孔隙比特征指标对比  
Fig.4 Comparison of void ratio of uncompacted saturated loess strata

性黄土和地下水位以下的饱和黄土共同引起;当地层从上而下浸水时,对应深度位置处土体的上覆压力均由其饱和自重压力引起。湿陷性黄土在较小压力条件下浸水饱和过程中,未能引起其大孔隙结构发生彻底压密破坏;在长期饱和状态下,其大孔隙结构得以保存,从而形成了欠压密饱和黄土。

这种欠压密特征,不仅在  $Q_3$  黄土地层中可以存在,在  $Q_3$  古土壤层紧下方的  $Q_2$  黄土地层也有所表现,这与沉积过程中其上方分布有一定厚度且成壤化作用强的晚更新统  $Q_3$  黄土和古土壤层所形成的“拱效应”下的承载特征密切相关。实际上,浅层非饱和  $Q_2$  黄土也可表现出湿陷性<sup>[25-26]</sup>,这一规律已经被很多工程验证,表明其虽然沉积年代久远,埋深较深,上覆压力较大,但仍可表现出欠压密特征。

### 3.2 含水率

含水率  $w$  指标反映了土体内土、水质量的比例。两类饱和黄土压密状态的差异,决定了土体内部赋水空间的大小。

由图 5(a)、5(b)可知,欠压密饱和黄土较邻近层序位置处的压密饱和黄土、古土壤层相比,均具有较高的含水比例。欠压密饱和  $Q_3$  黄土含水率在 29%~32%之间,较邻近层序位置处的压密饱和  $Q_3$  黄土相比,平均增量为 8.2%;欠压密饱和  $Q_2$  黄土的含水率在 26%~28%之间,较邻近层序位置处的压密饱和  $Q_2$  黄土相比,平均增量为 3.3%。由图 5(c)、5(d)可以得到,同一场地内两类饱和  $Q_3$  黄土的含水率差值在 3.2%~5.4%范围内,两类饱和  $Q_2$  黄土的含水率差值在 1.6%~3.8%范围内,这一物性特征是由于欠压密饱和黄土内部存在未被彻底破坏的大孔隙

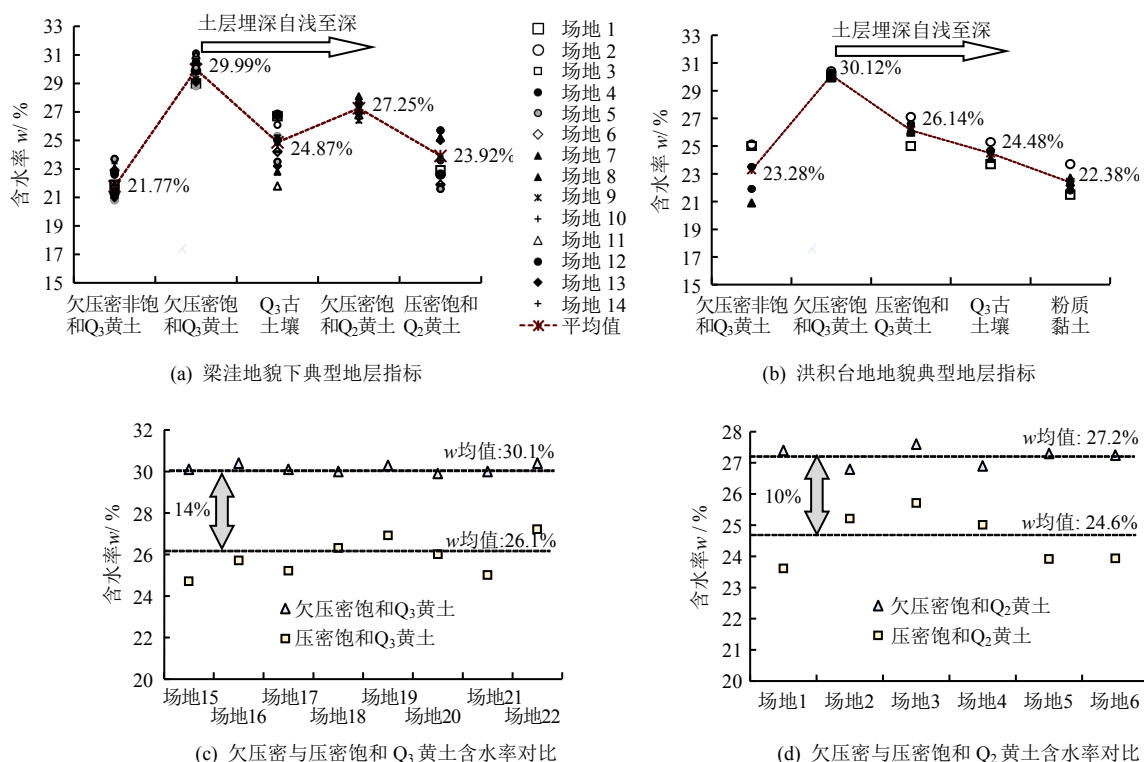


图 5 欠压密饱和黄土地层含水率特征指标对比

Fig.5 Comparison of water content of uncompacted saturated loess strata

结构,具有相对充分的赋水空间。

### 3.3 饱和度

饱和度  $S_r$  指标主要反映了土中水充满孔隙的程度。位于地下水位以下黄土的饱和度均处于 80% 以上,属于饱和黄土的范畴。较压密饱和  $Q_3$  黄土相比,欠压密饱和  $Q_3$  黄土的饱和度有所降低,多处于 85%~95%范围,其主要原因是其多处于地下水位变化带和毛细水作用范围内,水头压力低,土体内

部孔隙含水比例受年水位变幅、蒸发及外部环境因素影响较大,饱和度处于相对较低的水平;压密饱和  $Q_3$  黄土多处于欠压密饱和  $Q_3$  黄土以下,受外部环境的影响较小,具有较高的饱和度。两类饱和  $Q_2$  黄土具有相近的饱和度,均多处于 90%以上,见图 6。

### 3.4 液性指数

液性指数  $I_L$  主要反映了土体抵抗外力变形或破坏的能力,见图 7。

液性指数是区分两类饱和黄土的重要评价指标。在地层自浅至深揭露过程中, 欠压密饱和  $Q_3$  黄土的液性指数处于  $0.8 \sim 1.2$  之间, 均值接近 1.0, 均呈软塑或流塑状态; 欠压密饱和  $Q_2$  黄土的液性指数在  $0.65 \sim 0.80$  之间, 多呈软塑状态。欠压密饱和黄土液性指数明显高于邻近层序位置处的其他土

层, 表现出易变形破坏的软弱特征。同时, 由于  $Q_3$  黄土孔隙比更大, 含水率更高, 其软弱性质更加明显, 这与工程风险出现的土层是完全一致的<sup>[15-16]</sup>。

较同一场地、同一沉积年代下的压密饱和和黄土相比, 欠压密饱和黄土液性指数指标普遍存在  $0.3 \sim 0.4$  左右的增量, 这一指标差异反映出欠压密饱和和

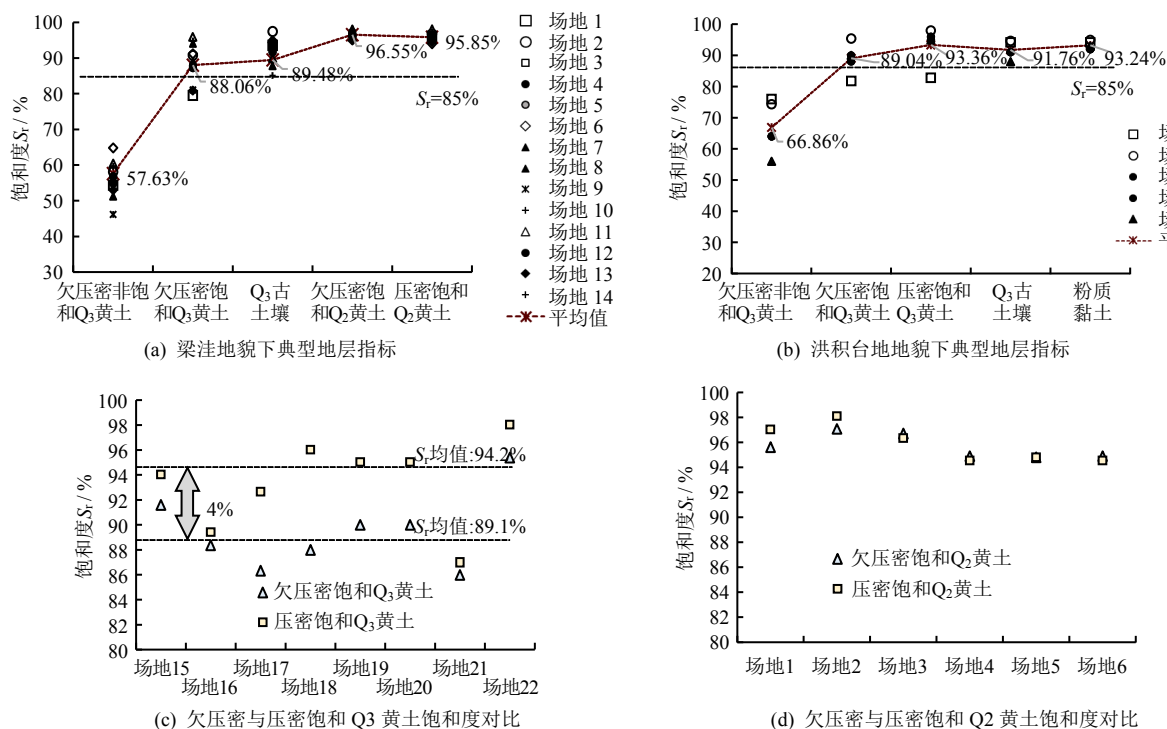


图 6 欠压密饱和黄土地层饱和度特征指标对比

Fig.6 Comparison of saturation degree of uncompacted saturated loess strata

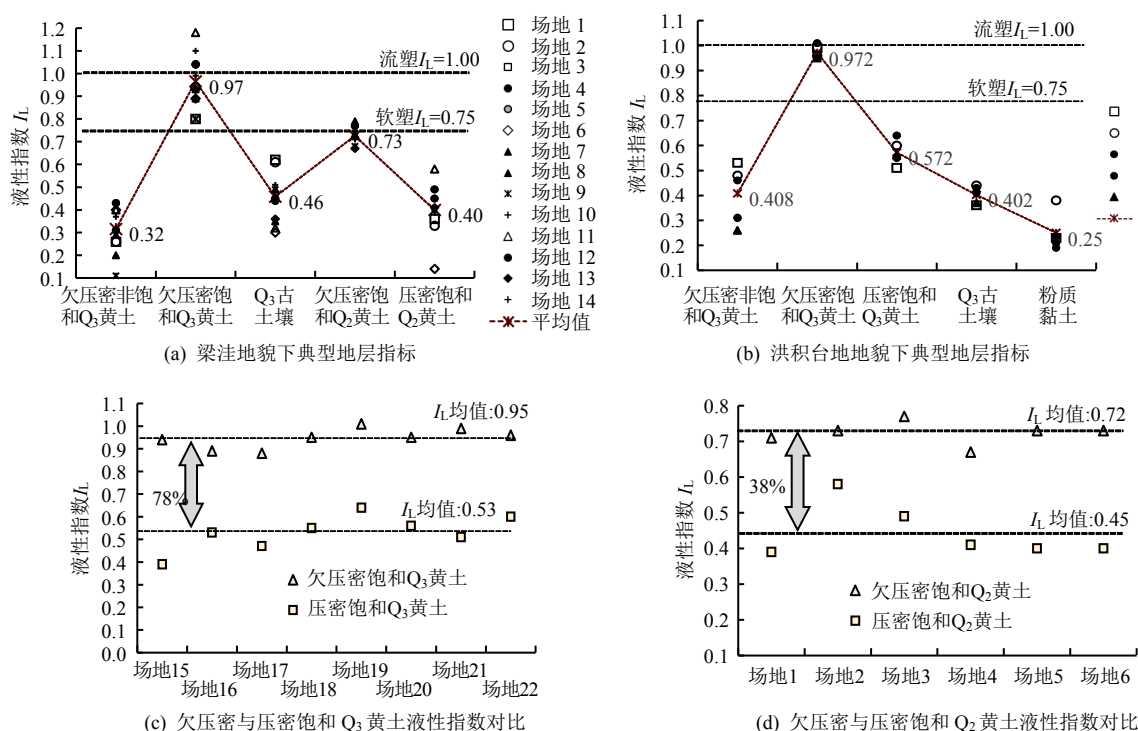


图 7 欠压密饱和黄土地层液性指数特征指标对比

Fig.7 Comparison of liquidity index of uncompacted saturated loess formation

土内存在较高比例的结合水和自由水处于电场引力作用范围以外, 呈现流动状态, 使得土体由可塑状态向软塑或流塑状态演变。

综上所述, 在地表水体或地下水位逐步抬升的影响下, 原具备欠压密特征的湿陷性黄土在增湿饱和、长期浸水过程中产生了一定比例的压密变形, 但其内部仍存在未被彻底压密的孔隙结构, 形成欠压密饱和黄土; 该大孔隙结构为水分提供了相对充分的赋存空间, 具有高含水率的特征; 同时存在较高比例的结合水和自由水, 呈现软塑或流塑状态。较同一沉积年代下的压密饱和黄土相比, 欠压密饱和黄土的孔隙比相差 0.1~0.2, 含水率相差 3%~6%, 液性指数相差 0.3~0.4。这是两类饱和黄土物性方面最重要的区别, 决定了其工程性质的巨大差异。工程实践过程中, 可以通过孔隙比  $e$  和液性指数  $I_L$  来综合判别和区分这两类土。

欠压密饱和  $Q_3$  黄土在梁洼地貌和洪积台地地貌中均有所分布, 而欠压密饱和  $Q_2$  黄土主要分布在梁洼地貌上。欠压密饱和  $Q_3$  黄土主要分布在地下水位变化带和毛细水作用范围内, 受年水位变幅、蒸发及外部环境因素影响较大, 不同场地间物性指标有一定的差异。欠压密饱和  $Q_2$  黄土主要分布在  $Q_3$  古土壤层(稳定钙质结核板以下)和压密饱和  $Q_2$  黄土或粉质黏土之间, 形成了软硬不均的地层组合特征, 以软弱层的形式分布于两层相对质密稳定的土层之间, 工程风险较大。与此同时, 欠压密饱和  $Q_3$  黄土较欠压密饱和  $Q_2$  黄土相比, 具有更大的孔隙比、更高的含水率, 表现出更为软弱的性质。

## 4 力学性质

土体力学性质主要包括变形参数、强度参数和触探及标准贯入试验指标几类。主要选择选择灵敏度、超固结比、压缩系数、标贯击数、静力触探曲线测试成果进行详细分析。

### 4.1 灵敏度 $S_t$ 特征指标

灵敏度  $S_t$  指标反映了土体结构性对强度的影响。

欠压密饱和  $Q_3$  黄土的灵敏度在 4.0~4.5 之间(见表 1), 欠压密饱和  $Q_2$  黄土的灵敏度在 3~4 之间(见表 2), 均属于中或高灵敏度土层。依据太原地区的资料, 饱和黄土灵敏度可达 6.1~12.5, 该高灵敏度特征主要是在长期浸水饱和状态下, 黄土中可溶盐含量降低, 架空结构受到破坏, 部分微晶和黏粒溶于水, 使得其土颗粒点间的联结强度大幅度降低<sup>[27]</sup>。一经扰动, 土体强度将发生明显衰减, 其压密变形可继续发展, 进而引发工程变形风险。

表 1 欠压密饱和  $Q_3$  黄土灵敏度测试结果  
Table 1 Sensitivity test results for uncompacted saturated  $Q_3$  loess

| 场地编号  | 深度/m | 原状土无侧限<br>抗压强度/kPa | 重塑土无侧限<br>抗压强度/kPa | 灵敏度 $S_t$ |
|-------|------|--------------------|--------------------|-----------|
| 场地 6  | —    | 12.6               | 3.1                | 4.1       |
| 场地 14 | —    | 10.6               | 2.5                | 4.2       |
|       | 4.5  | 15.3               | 3.2                | 4.8       |
|       | 4.8  | 19.1               | 4.9                | 3.9       |
| 场地 13 | 5.5  | 22.0               | 5.4                | 4.1       |
|       | 6.0  | 15.6               | 3.5                | 4.5       |
|       | 6.2  | 24.6               | 5.8                | 4.3       |

表 2 欠压密饱和  $Q_2$  黄土灵敏度测试结果  
Table 2 Sensitivity test results for uncompacted saturated  $Q_2$  loess

| 场地<br>编号 | 不排水抗剪强度/kPa |         | 灵敏度 $S_t$ |     |
|----------|-------------|---------|-----------|-----|
|          | 原状土范围值      | 重塑土范围值  | 范围值       | 平均值 |
| 场地 6     | —           | —       | 3.1~3.5   | 3.3 |
| 场地 14    | 12.3~18.7   | 3.1~5.5 | 3.5~4.0   | 3.8 |

### 4.2 超固结比 OCR 特征指标

超固结比 OCR 指标, 主要通过室内单向固结试验测试得到的  $e-\lg p$  曲线的曲率突变点和上覆有效自重压力的相对关系计算得到。

据图 8 所给出的超固结比指标统计结果, 可以得到, 两类饱和黄土的超固结比 OCR 值均大于 1, 其中, 欠压密饱和  $Q_3$  黄土的超固结比处于 1.3~1.4 范围内, 欠压密饱和  $Q_2$  黄土的超固结比处于 1.1~1.3 范围内。依据现有固结理论, 两个沉积年代下的欠压密饱和黄土的先期固结压力  $P_c$  均大于土层现有自重压力  $P_0$ , 即处于超固结状态。但这一试验结果并不能完全真实的反映黄土的应力历史, 仅是其结构强度的一种反映<sup>[3, 27-28]</sup>这与以往的认识是一致的。

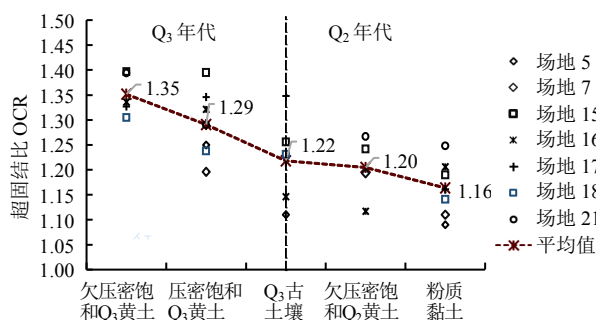


图 8 欠压密饱和黄土超固结比特征指标随深度变化规律  
Fig.8 Variation of overconsolidation ratio of uncompacted saturated loess with depth

### 4.3 压缩系数特征指标

压缩系数是现阶段计算地基变形、评价土体承载力时应用最为广泛的指标, 反映了土体在一定荷载作用下的压缩变形特征。

由图 9 可知, 欠压密饱和  $Q_3$  黄土的压缩系数  $\alpha_{1-2}$  均处于 0.40~0.65 之间, 属于中或高压压缩性土; 欠压密饱和  $Q_2$  黄土压缩系数  $\alpha_{1-2}$  在 0.3~0.35 之间, 属中压缩性土。同一场地位置处, 欠压密饱和  $Q_3$  黄土压缩系数  $\alpha_{1-2}$  较压密饱和  $Q_3$  黄土相比, 存在 0.2~0.3 左右的增量; 欠压密饱和  $Q_2$  黄土较压密饱和  $Q_2$  黄土相比, 具有 0.05~0.10 左右的增量。中或高压压缩性是欠压密饱和黄土的典型特征, 其主要由

于黄土在浸水过程中, 湿陷变形未彻底发生, 原湿陷性转化成了高压压缩性<sup>[27, 29-31]</sup>。

#### 4.4 标贯击数特征指标

标准贯入试验主要反映了土体的承载特征。

由图 10 可知, 欠压密饱和  $Q_3$  黄土的标贯击数多处于 4~5 击; 欠压密饱和  $Q_2$  黄土的标贯击数处于 6~8 击。两类饱和  $Q_3$  黄土的标贯击数相差 2~4 击; 两类饱和  $Q_2$  黄土的标贯击数相差 4~10 击。欠

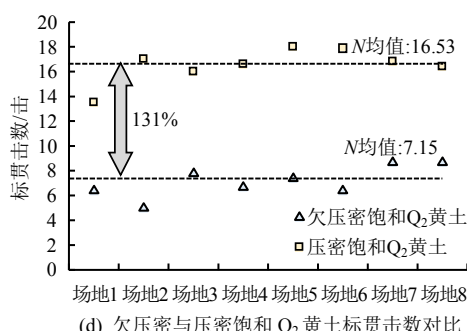
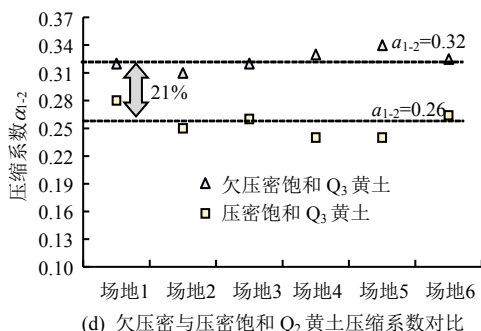
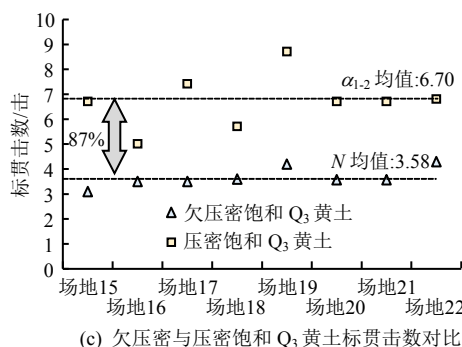
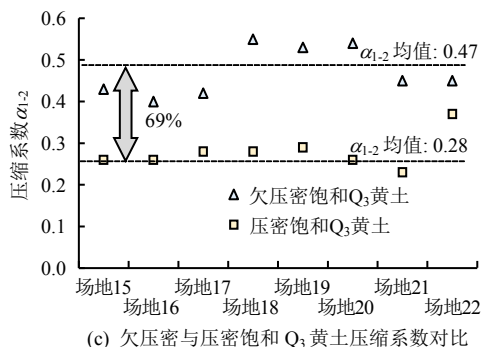
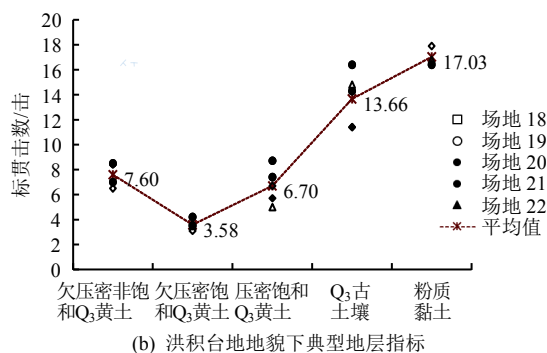
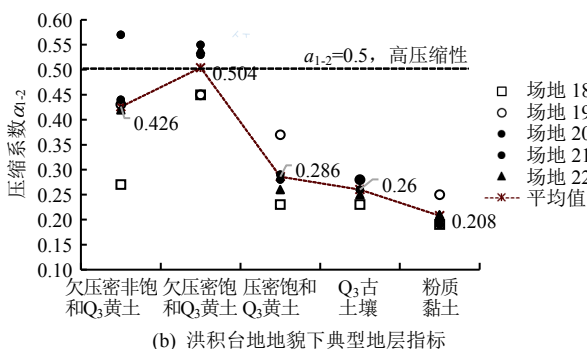
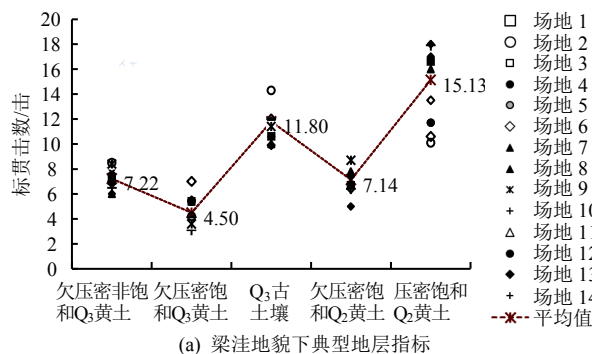
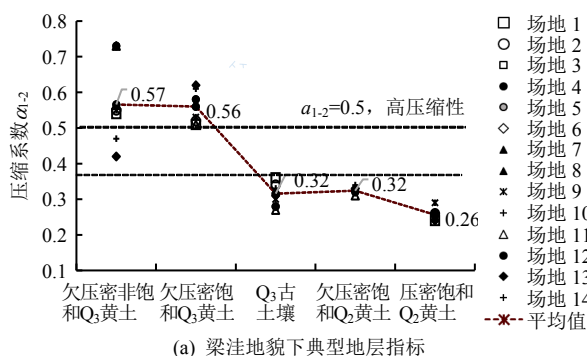


图 9 欠压密饱和黄土地层压缩系数特征指标对比  
Fig.9 Comparison of compression coefficient of uncompacted saturated loess strata

图 10 欠压密饱和黄土地层标贯击数对比  
Fig.10 Comparison of blows in SPT of uncompaction saturated loess strata

压密饱和黄土表现出明显的低承载特征。

#### 4.5 静力触探特征指标

静力触探试验主要反映了土体静力触探探头阻力和侧壁摩阻力,是求取各土层工程性质指标,确定桩基参数的重要手段。

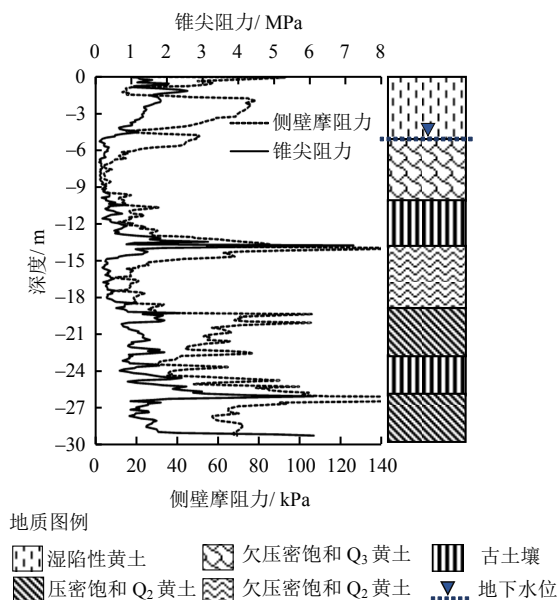
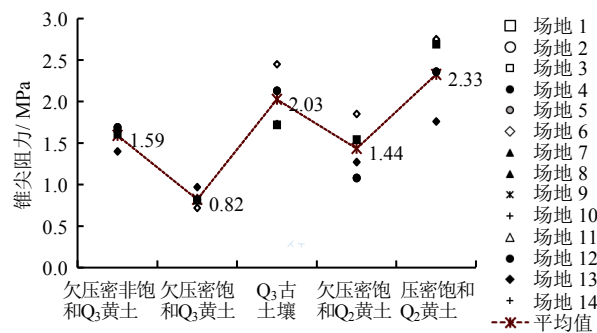
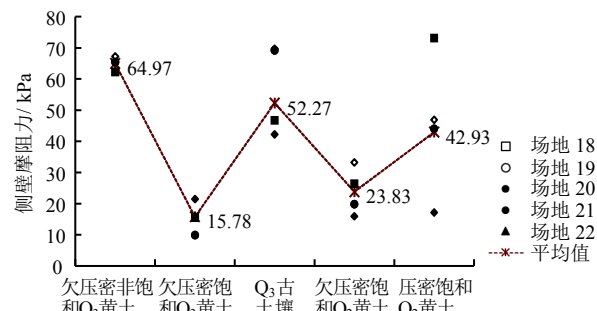


图 11 欠压密饱和黄土地层典型静力触探试验测试曲线  
Fig.11 Typical test curves of static cone penetration test for uncompacted saturated loess stratum

在地层自浅至深揭露过程中,欠压密饱和黄土范围试验测试锥尖阻力 $q_c$ 和侧壁摩阻力 $f_s$ 显著低于压密饱和黄土、粉质黏土、古土壤层,表现出较低的承载能力和侧壁摩阻力。依据静力触探测试曲线性态特征,可以得到,欠压密饱和黄土对应层序范围内,锥尖阻力 $q_c$ 和侧壁摩阻力 $f_s$ 测试曲线分布连续,无间断,较同一钻孔内其余土层相比,具有相对清晰的分层界限,据此可实现对欠压密饱和黄土层有效划分的目的。为进一步分析静力触探特征指标数值规律,汇总对比不同场地位置处的指标测试成果如图 12 所示。



(a) 梁洼地貌下锥尖阻力指标



(b) 梁洼地貌下侧壁摩阻力指标

图 12 欠压密饱和黄土地层静力触探试验特征指标对比  
Fig.12 Comparison of characteristic indexes of static cone penetration test in uncompacted saturated loess strata

欠压密饱和  $Q_3$  黄土的锥尖阻力 $q_c$ 处于 0.79~1.10 MPa 范围内,侧壁摩阻力 $f_s$ 处于 8.5~21.3 kPa 范围内;欠压密饱和  $Q_2$  黄土的锥尖阻力 $q_c$ 处于 1.17~2.12 MPa 范围内,侧壁摩阻力 $f_s$ 处于 12.0~31.4 kPa 范围内,呈现出低承载力、低摩阻强度的力学特征。

## 5 欠压密饱和黄土物理力学性质汇总

上文重点分析了欠压密饱和黄土的一些代表性指标,本文同时分析了其余试验指标,不在此进行展开论述。现区分  $Q_3$  和  $Q_2$  两个沉积年代,对两类饱和黄土的物理力学性质指标汇总如表 3、4 所示。可作为后续欠压密饱和黄土地区工程建设和性质研究的基础条件。

表 3 欠压密饱和黄土物理力学特征指标汇总表

Table 3 Summary of physical and mechanical properties of uncompacted saturated loess

| 土名             | 含水率 $w$   | 天然密度 $\rho$               | 干密度 $\rho_d$              | 饱和度 $S_r$ | 孔隙比 $e$   | 液限 $w_L$  | 塑限 $w_p$  | 塑性指数      | 液性指数      | 压缩系数           | 压缩模量       |
|----------------|-----------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|------------|
|                | / %       | / (g · cm <sup>-3</sup> ) | / (g · cm <sup>-3</sup> ) | / %       |           | / %       | / %       | $I_p$     | $I_L$     | $\alpha_{1-2}$ | $E_{s1-2}$ |
| 欠压密饱和 $Q_3$ 黄土 | 29.0~33.0 | 1.75~1.86                 | 1.33~1.42                 | 80.8~94.8 | 0.87~1.10 | 29.0~31.7 | 17.5~18.7 | 11.5~12.1 | 0.80~1.20 | 0.43~0.75      | 3.3~5.4    |
| 压密饱和 $Q_3$ 黄土  | 25.0~27.1 | 1.86~1.97                 | 1.49~1.57                 | 83.1~98.2 | 0.74~0.83 | 31.1~32.2 | 18.8~19.4 | 12.2~12.8 | 0.51~0.64 | 0.23~0.37      | 4.7~8.2    |
| 欠压密饱和 $Q_2$ 黄土 | 26.0~28.  | 1.90~1.95                 | 1.48~1.54                 | 94.8~97.0 | 0.73~0.78 | 30.1~31.2 | 18.2~18.8 | 12.0~12.4 | 0.73~0.77 | 0.31~0.40      | 4.6~5.7    |
| 压密饱和 $Q_2$ 黄土  | 21.6~25.7 | 1.95~2.05                 | 1.57~1.68                 | 94.7~97.2 | 0.62~0.73 | 30.1~32.8 | 13.0~19.8 | 12.0~19.5 | 0.14~0.58 | 0.24~0.29      | 5.3~8.8    |

表 3 欠压密饱和黄土物理力学特征指标汇总表 (续表)

Table 3 Summary of physical and mechanical properties of uncompacted saturated loess (continued)

| 土名                     | 快剪               |                      | 饱和快剪             |                      | 固结快剪             |                      | 三轴试验 UU          |                      | 三轴试验 CU          |                      |                   |                       |
|------------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
|                        | 黏聚力              | 内摩擦角                 | 黏聚力              | 内摩擦角                 | 黏聚力              | 内摩擦角                 | 黏聚力              | 内摩擦角                 | 黏聚力              | 内摩擦角                 | 黏聚力               | 内摩擦角                  |
|                        | $c / \text{kPa}$ | $\varphi / (^\circ)$ | $c / \text{kPa}$ | $\varphi / (^\circ)$ | $c / \text{kPa}$ | $\varphi / (^\circ)$ | $c / \text{kPa}$ | $\varphi / (^\circ)$ | $c / \text{kPa}$ | $\varphi / (^\circ)$ | $c' / \text{kPa}$ | $\varphi' / (^\circ)$ |
| 欠压密饱和Q <sub>3</sub> 黄土 | 19.0~20.0        | 18.0~20.0            | 9.0~10.0         | 16.0~19.0            | 21.0~24.0        | 21.0~22.0            | 24~33            | 4.0~8.0              | 30~35            | 17.0~25.0            | 22~27             | 26.0~29.0             |
| 压密饱和Q <sub>3</sub> 黄土  | 25.0~38.0        | 18.0~21.0            | —                | —                    | 28.0~46.0        | 19.2~23.7            | 27~48            | 10.0~18.0            | 30~38            | 27.0~30.0            | 30~35             | 27.0~30.0             |
| 欠压密饱和Q <sub>2</sub> 黄土 | 20.4~22.5        | 19.7~23.0            | 19.3~23.9        | 16.0~18.0            | 21.4~21.9        | 20.0~21.0            | 32~35            | 5.0~8.0              | 40~42            | 20.0~21.0            | 28~30             | 27.0~30.0             |
| 压密饱和Q <sub>2</sub> 黄土  | 24.0~43.0        | 18.5~23.8            | 22.0~42.0        | 23.8~25.2            | 24.0~47.0        | 20.9~25.4            | 29~62            | 9.9~20.0             | 43~70            | 20.5~24.2            | 25~50             | 24.5~29.8             |

表 4 欠压密饱和黄土原位试验测试指标汇总表

Table 4 Summary of test indexes of uncompacted saturated loess in situ test

| 试验项目                    | 标贯试验      | 变形模量        | 双桥静力触探试验   | 高压固结试验      |             |          |
|-------------------------|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|----------|
| 测试指标                    | 标贯实测击数/ 击 | / MPa       | 比贯入阻力/ MPa | 回弹指数 $C_e$  | 压缩指数 $C_c$  | 超固结比 OCR |
| 欠压密饱和 Q <sub>3</sub> 黄土 | 3.0~4.0   | 6.70~14.80  | 0.79~1.13  | 0.009~0.016 | 0.181~0.461 | 1.3~1.4  |
| 压密饱和 Q <sub>3</sub> 黄土  | 5.0~8.7   | 8.90~18.90  | 1.08~1.95  | 0.014~0.019 | 0.234~0.241 | 1.2~1.4  |
| 欠压密饱和 Q <sub>2</sub> 黄土 | 4.0~8.0   | 10.20~13.43 | 1.10~2.12  | 0.008~0.012 | 0.173~0.311 | 1.1~1.2  |
| 压密饱和 Q <sub>2</sub> 黄土  | 10.1~17.9 | 13.80~23.00 | 1.76~2.69  | 0.016~0.013 | 0.137~0.176 | 1.0~1.3  |

欠压密饱和黄土具有大孔隙比、高含水率、软塑或流塑状态和中或高灵敏度、中或高压缩性、低承载力和低强度的物性特征,显著区别于压密饱和黄土,总体表现为饱水软弱性,同时这种物性基础也决定了其在失水过程中将产生较大的变形。本文仅针对西安地区欠压密饱和黄土物理力学指标和地层赋存规律进行了重点讨论,实际上在黄土地区这层土广泛分布,只是大家的称呼不一,其物理力学指标必然有所差异,但其软弱性质和变化规律基本一致。在工程实践中,必须引起高度重视,明确区分两类饱和黄土,分类制定合理的技术措施,确保工程建设安全。

## 6 结 论

黄土浸水后,可形成两类饱和黄土,即压密饱和黄土和欠压密饱和黄土,两类饱和黄土性质差异较大。通过对西安地区 22 个黄土场地的试验和数据统计,探讨分析了两类饱和黄土性质的差异,系统研究了欠压密饱和黄土的基本物理力学性质,揭示了其具有饱水软弱性的根本原因,归纳得到了两类饱和黄土的物理力学指标范围值,为科学研究和工程实践中严格区分两类饱和黄土、分类制定技术措施提供了依据。主要结论如下:

(1) 欠压密饱和黄土是黄土浸水过程中未被充分压密、大孔隙结构仍然存在的土。相比与压密饱和黄土,其具有大孔隙比、高含水率的物性特征,一般处于软塑或流塑状态。工程上可以用孔隙比  $e$  和液性指数  $I_L$  两个指标来重点评价区分两类饱和

黄土。

(2) 欠压密饱和黄土具有中或高灵敏度、中或高压缩性、低承载力和强度等特征,整体表现为饱水软弱性,显著区别于压密饱和黄土。

(3) 提出了西安地区兴庆湖周边欠压密饱和黄土的物理力学指标范围值。

## 参 考 文 献

- [1] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
Editorial Committee of the Geological Engineering Handbook. Engineering geology handbook[M]. 5th ed. Beijing: China Construction Industry Press, 2018.
- [2] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.  
XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13.
- [3] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 1997.  
LIU Zu-dian. Loess mechanics and engineering[M]. Shaanxi: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.
- [4] 捷尼索夫 Н Я. 黄土与黄土状亚黏土的建筑性质[M]. 北京: 地质出版社, 1956.  
Денисов Н Я. Architectural properties of loess and loess-like sub clay[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1956.

- [5] LIU Z, LIU F, MA F, et al. Collapsibility, composition, and microstructure of loess in China[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2016, 53(4): 673-686.
- [6] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97.  
SHEN Zhu-jiang. Mathematical model for soil structural—core issues of soil mechanics in the 21st century[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 95-97.
- [7] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.  
XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 651-656.
- [8] 邵生俊, 王丽琴, 陶虎, 等. 黄土的构度及其与粒度、密度、湿度之间的关系[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1387-1393.  
SHAO Sheng-jun, WANG Li-qin, TAO Hu, et al. Structural index of loess and its relation with granularity, density and humidity[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(8): 1387-1393.
- [9] 蒋明镜, 孙若晗, 李涛, 等. 一个非饱和和结构性黄土三维胶结接触模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 213-216.  
JIANG Ming-jing, SUN Ruo-han, LI Tao, et al. A three-dimensional cementation contact model for unsaturated structural loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl.1): 213-216.
- [10] 张茂省, 胡炜, 孙萍萍, 等. 黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望[J]. 地球环境学报, 2016, 7(4): 323-334.  
ZHANG Mao-sheng, HU Wei, SUN Ping-ping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides[J]. **Journal of Earth Environment**, 2016, 7(4): 323-334.
- [11] 李保雄, 牛永红, 苗天德. 兰州马兰黄土的水敏感性特征[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 294-298.  
LI Bao-xiong, NIU Yong-hong, MIAO Tian-de. Water sensitivity of Malan loess in Lanzhou[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(2): 294-298.
- [12] LENG Y, PENG J, WANG S, et al. Development of water sensitivity index of loess from its mechanical properties[J]. **Engineering Geology**, 2021, 280: 105918.
- [13] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272.  
CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(2): 201-272.
- [14] 孙德安, 徐钱垒, 陈波, 等. 广吸力范围内非饱和原状黄土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1586-1592.  
SUN De-an, XU Qian-lei, CHEN Bo, et al. Mechanical behavior of unsaturated intact loess over a wide suction range[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(9): 1586-1592.
- [15] WANG J, ZHANG D, CHEN C, et al. Measurement and modelling of stress-dependent water permeability of collapsible loess in China[J]. **Engineering Geology**, 2020, 266: 105393.
- [16] ZHU C, WANG S, PENG S, et al. Surface settlement in saturated loess stratum during shield construction: numerical modeling and sensitivity analysis[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2022, 119: 104205.
- [17] 贺农农, 李攀, 邵生俊, 等. 西安地铁隧道穿越饱和软黄土地段的地表沉降监测[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 96-103.  
HE Nong-nong, LI Pan, SHAO Sheng-jun, et al. Ground settlement monitoring of Xi'an subway tunnel crossing saturated soft loess[J]. **Journal of Earth Sciences and Environment**, 2012, 34(1): 96-103.
- [18] 季伟伟, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 软塑黄土地区隧道仰拱热力响应特性现场试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 558-564.  
JI Wei-wei, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Field tests on thermal response characteristics of the tunnel invert in soft plastic loess area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(2): 558-564.
- [19] 汪新立. Q<sub>2</sub> 软塑黄土二元地层大断面隧道变形特征及现场监测分析[J]. 施工技术, 2019, 48(增刊 1): 634-638.  
WANG Xin-li. Deformation characteristics and field monitoring analysis of large section tunnel in Q<sub>2</sub> soft-plastic loess binary stratum[J]. **Construction Technology**, 2019, 48 (Suppl.1): 634-638.

- [20] 段真富, 徐洪安, 张玲. 西安地区软黄土工程地质特征和分布规律[J]. 西安地质学院学报, 1992, 14(1): 64-70.
- DUAN Zhen-fu, XU Hong-an, ZHANG Ling. Preliminary discussion on engineering geological characteristics and distribution law of soft loess in Xi'an area[J]. **Journal of Xi'an College of Geology**, 1992, 14(1): 64-70.
- [21] 郭增玉, 冯同新. 高湿度  $Q_2$  黄土的试验流变特性[J]. 地下水, 2004, 26(1): 70-73.
- GUO Zeng-yu, FENG Tong-xin. Test of rheologic characteristics of  $Q_2$  loess with high humidity[J]. **Ground Water**, 2004, 26(1): 70-73.
- [22] 张爱军, 白明洲, 许兆义, 等. 郑西客运专线铁路张茅隧道近饱和黄土体初期支护应力变形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3714-3720.
- ZHANG Ai-jun, BAI Ming-zhou, XU Zhao-yi, et al. Study of stress and deformation characteristics of Zhangmao nearly saturated loess tunnel initial support of Zhengzhou-Xi'an passenger railway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Suppl.2): 3714-3720.
- [23] 马钢, 康佐, 高虎艳, 等. 饱和软黄土城市地铁隧道安全风险分析及应对措施研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(增刊 1): 425-433.
- MA Gang, KANG Zuo, GAO Hu-yan, et al. Study on safety risk analysis and countermeasures of urban subway tunnel construction in saturated soft loess stratum[J]. **Tunnel Construction**, 2023, 43(Suppl.1): 425-433.
- [24] 中华人民共和国建设部. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范(2009 年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering (2009 Edition)[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009.
- [25] 刘厚健. 论关中塬区  $Q_2$  黄土建筑工程性能[J]. 西北地质, 1994, 15(3): 47-53.
- LIU Hou-jian. Research on engineering performance of  $Q_2$  loess building in Guanzhong plateau area[J]. **Northwestern Geology**, 1994, 15(3): 47-53.
- [26] 方祥位, 申春妮, 李春海, 等. 陕西蒲城黄土微观结构特征及定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1917-1925.
- FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, LI Chun-hai, et al. Quantitative analysis of microstructure characteristics of Pucheng of Shaanxi province[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1917-1925.
- [27] 傅世法. 论饱和黄土[J]. 工程勘察, 1982(1): 13-17.
- FU Shi-fa. Study on saturated loess[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 1982(1): 13-17.
- [28] 李作勤. 有结构强度的欠压密土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 34-45.
- LI Zuo-qin. Mechanical properties of under compacted soil with structural strength[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(1): 34-45.
- [29] 胡伟, 韩建刚, 李光范. 饱和土结构性参数演化规律及其简化模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2651-2655.
- HU Wei, HAN Jian-gang, LI Guang-fan. A simplified stress-strain relationship of saturated soil based on structure's evolution[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(9): 2651-2655.
- [30] 侯乐乐, 翁效林, 李林, 等. 考虑含水率影响的结构性黄土临界状态模型[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 737-748.
- HOU Le-le, WENG Xiao-lin, LI Lin, et al. A critical state model for structural loess considering water content[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(3): 737-748.
- [31] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间与工程学报, 1999, 19(4): 273-284.
- XIE Ding-yi. Past, present and future of loess mechanical properties and application research[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 1999, 19(4): 273-284.