

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.016



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



青海细粒硫酸盐渍土变形特性及理想弹塑性模型

张新森^a, 张文^{a,b,c}, 张宁^a, 王龙轩^a, 杨苗^a

(青海大学 a. 土木水利学院; b. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室; c. 青海省压缩空气储能重点实验室, 西宁 810016)

摘要: 青海、新疆等地区有大量硫酸盐渍土, 其特殊的变形特性会导致公路、铁路及建筑物出现开裂和不均匀沉降等问题。以西宁地区典型硫酸盐渍土为例, 通过分析其变形特征, 探讨含盐量与围压对初始模量和屈服应力的影响, 并据此建立理想弹塑性模型。首先, 对硫酸盐渍土进行液塑限及易溶盐测定, 4个典型地区的盐渍土主要为粉质黏土和黏土, 易溶盐成分包含硫酸盐与少量氯盐。选取典型原状盐渍土, 经人工洗盐, 配置6种不同硫酸钠质量比的土样。在4种围压、6种含盐量条件下开展固结不排水三轴试验, 发现该盐渍土应力-应变关系均具有较明显理想弹塑性特征: 屈服前可见较明显线性段, 屈服后强化和软化不明显。相同围压下, 初始弹性模量、屈服应力及抗剪强度均随含盐量的增加逐渐减小; 在相同含盐量的情况下, 初始弹性模量与屈服应力随围压的增大而增大。基于试验现象, 将理想弹塑性模型中的初始模量和屈服点视为变量, 经编程分析和参数优化, 发现初始模量与屈服点应变都可近似表达为围压和含盐量的一次函数式, 据此建立适用于硫酸盐渍土的理想弹塑性模型。

关键词: 盐渍土; 硫酸盐; 微观结构; 变形特性; 弹塑性模型

中图分类号: TU448 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-08

Deformation characteristics and its elastic-perfectly plastic model of fine-grained sulfate salted soil in Qinghai

ZHANG Xinmiao^a, ZHANG Wen^{a,b,c}, ZHANG Ning^a, WANG Longxuan^a, YANG Miao^a

(a. School of Civil Engineering and Water Resources; b. Qinghai Key Laboratory of Building Energy-saving Materials and Engineering Safety; c. Qinghai Key Laboratory of Compressed Air Energy Storage, Qinghai University, Xining 810016, P. R. China)

Abstract: In Qinghai and Xinjiang, sulfate-rich saline soils with distinct deformation behaviors have been identified as critical geotechnical hazards responsible for infrastructure deterioration, including pavement cracking and differential settlements in transportation networks and structural systems. By conducting a systematic investigation of representative sulfate-rich saline soils from the Xining area, this investigation systematically analyzes their deformation mechanisms, quantifies the coupled effects of salt content and

收稿日期: 2024-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(51468055、42302331); 青海省科技厅项目(2024-ZJ-973)

作者简介: 张新森(2001-), 男, 主要从事盐渍土力学性质研究, E-mail: zxm13231621861@163.com。

张宁(通信作者), 男, 博士, E-mail: n_zhang_qh@163.com。

Received: 2024-08-29

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51468055, 42302331); Qinghai Province Science and Technology Department Project (No. 2024-ZJ-973)

Author brief: ZHANG Xinmiao (2001-), main research interest: mechanical of saline soil, E-mail: zxm13231621861@163.com.

ZHANG Ning (corresponding author), PhD, E-mail: n_zhang_qh@163.com.

confining pressure on initial modulus and yield stress characteristics, culminating in the formulation of an advanced elastoplastic constitutive model with dual-parameter dependency. Firstly, liquid and plastic limit tests and soluble salt analysis were conducted on sulfate-affected soils from four typical regions. The soils primarily consisted of silty clay and clay. The soluble salt composition was dominated by sulfates with minor amounts of chlorides. Typical original saline soil samples were selected and subjected to artificial salt washing, preparing six soil samples with different mass ratios of sodium sulfate. Secondly, consolidation undrained triaxial tests were conducted under four confining pressures and six salt contents, revealing that the stress-strain relationship of the saline soil exhibits a distinct ideal elastoplastic characteristic: a clear linear segment is visible before yielding, with no significant hardening or softening after yielding. Under the same confining pressure, the initial elastic modulus, yield stress, and shear strength all gradually decrease with increasing salt content; at the same salt content, the initial elastic modulus and yield stress increase with increasing confining pressure. Finally, based on the test phenomena, the constant initial modulus and yield point in the elastic-perfectly plastic model are considered as functional expressions. By programming analysis and parameter optimization, it was found that both the initial modulus and yield strain can be approximately expressed as linear functions of confining pressure and salt content. Thereby, a simple ideal elastoplastic model for sulfate saline soil can be established.

Keywords: saline soil; sulfate; microstructure; deformation characteristics; elastic-plastic model

青海、新疆等高寒干旱地区集中分布了大量硫酸盐渍土,常伴有盐胀、溶陷、腐蚀等工程病害^[1-3]。盐渍土的变形特性是引发公路、铁路及建筑物出现开裂、不均匀沉降等问题的重要原因之一,给工程建设带来极大困难^[4]。

常见盐渍土有氯盐渍土和硫酸盐渍土,性质不尽相同,例如,周凤玺等^[5]研究发现氯盐与硫酸盐的固结蠕变效应不尽相同。王海涛等^[6]研究发现,在一定冻融循环次数后,氯盐渍土与硫酸盐渍土的黏聚力与内摩擦角均有减小,但氯盐渍土抗剪强度降低幅度较大。关于含盐量对盐渍土物理力学性质的影响研究已有大量文献资料。Qiu等^[7]研究了盐渍土孔隙特征与含盐量、冻融次数有密切关系。Wang等^[8]开展了温度和含盐量值对硫酸盐渍土的盐胀位移影响的试验,结果表明,含盐量对盐胀位移有直接促进作用。Zhou等^[9]考虑土体冰晶和盐晶的形成与溶解,探究了不同冻融循环条件及不同含盐量对硫酸盐渍土膨胀变形的影响。Gao等^[10]系统地研究了不同含盐量条件下动荷载作用下盐渍土的动剪切性能,发现抗剪强度与刚度随含盐量增加呈非线性关系。Lv等^[11]用碱激发地质聚合物固化盐渍土,并对不同含盐量的盐渍土开展无侧限抗压强度试验。何野^[12]开展了三轴不固结不排水试验,分析不同试验条件下硫酸盐渍土的抗剪强度特性与强度劣化机理。

在硫酸盐渍土变形特性方面,工程应用的核心问题是如何量化表征盐含量对应力应变关系的影响,即找出能够精确描述硫酸盐渍土变形特性的模型。谢柏涵等^[13]建立了三轴压缩状态盐渍土的损伤

模型,能够描述冻融前后盐渍土应力应变规律。李积锋等^[14]通过室内三轴试验研究发现,含盐量对盐渍土抗剪强度参数的影响存在阈值,即含盐量对抗剪强度的影响具有分段性。还有很多学者开展了关于盐胀特性的研究,张莎莎等^[15-16]研究了不同条件下硫酸盐渍土的盐胀特性,并进行非线性回归分析,建立盐渍土的盐胀公式,并提出了土的滞回度的概念,通过理论计算得出各种条件下土体滞回度模型。赵天宇^[17]对比了理想情况下硫酸盐渍土的变形量与实测变形量,优化了盐渍土变形量的计算关系式。然而,关于硫酸盐渍土强度变形特性的定量研究较少,含盐量、围压共同作用所导致的初始弹性模量及屈服强度的衰减程度的定量化关系尚不明确。

笔者以青海地区盐渍土为研究对象,人工制备不同 Na_2SO_4 含量的重塑盐渍土试样,通过三轴固结不排水试验及电镜扫描试验,探究不同含盐量及围压下细粒硫酸盐渍土的应力-应变曲线变化规律,并给出细粒硫酸盐渍土变形特性分析模型。

1 研究区概况

研究区位于青海省西宁市的盐渍土分布区,如图1所示。平均海拔约2 295 m,年平均蒸发量(1 363.6 mm)远高于年平均降水量(380 mm)。

西宁附近4个典型盐渍土区域概况如表1所示。对取样土进行级配分析。结合筛分法和密度计法分别处理粒径大于0.075 mm和小于0.075 mm的颗粒。结果如表2所示。计算得到4个采样点不均匀系数 C_u 分别为13.5、13.5、9.0和8.5,曲

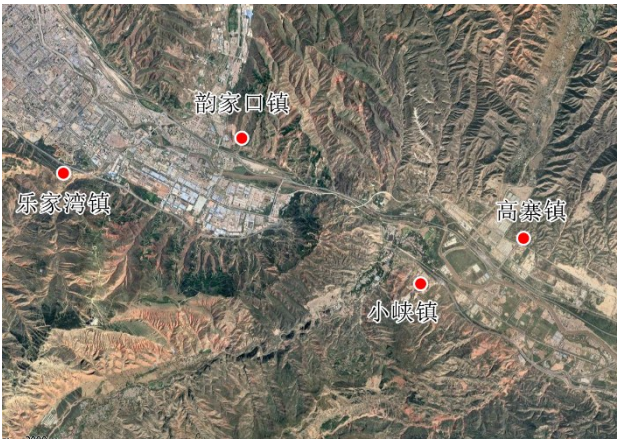


图 1 四个取样点地理位置

Fig. 1 Location of the four sampling points

表 1 采样点地理位置

Table 1 Geographic location of sampling points			
地点	地理位置	经纬度	海拔/m
采样点 1	乐家湾镇	101°52′40″E 36°36′36″N	约 2 295
采样点 2	小峡镇	101°52′48″E 36°34′35″N	
采样点 3	韵家口镇	101°56′35″E 36°32′8″N	
采样点 4	高寨镇	101°53′54″E 36°30′27″N	

率系数 C_c 分别为 1.19、3.13、0.69 和 1.88。由表 2 可知,1 号采样点土样属于级配良好的非均粒土;2 号和 3 号采样点土样级配不连续;4 号采样点土样级配良好。

表 2 颗粒分析结果

Table 2 Particle analysis results				
级配情况/mm	采样点 1/%	采样点 2/%	采样点 3/%	采样点 4/%
[0.25, 0.075)	12.8	18.9	14.4	11.8
[0.075, 0.005)	66.9	61.1	58.0	74.6
≤ 0.005	20.3	20.0	27.6	13.6

对取样土做易溶盐含量检测。将取得的土块碾碎、风干、过 2 mm 筛,采用滴定法测定易溶盐含量,得到土中主要离子含量,如表 3 所示。由表 3 可见,4 个不同采样点的土样中硫酸根离子含量远高于其他阴离子含量。根据《盐渍土地区建筑技术规范》(GB/T 50942—2014)^[18] 判定 4 处采样点土均为硫酸盐渍土。

采样点 3 处土含盐量较高、级配不良且细粒组含量最高。选择采样点 3 处土作为西宁地区典型细粒土并展开强度变形特性研究。此处土样最大干密度、最优含水率、液限和塑限如表 4 所示,主要为粉质黏土。

表 3 采样点盐渍土中主要离子含量

Table 3 Main ion in saline soil of sampling point				
离子	采样点 1/ (mg/kg)	采样点 2/ (mg/kg)	采样点 3/ (mg/kg)	采样点 4/ (mg/kg)
SO_4^{2-}	1 658	877.3	2 853.2	6 087.7
Cl^-	138.5	74.5	245.4	99.26
HCO_3^-	648.5	439.6	632.7	595.9
Na^+	461	244.4	440.6	576.2
K^+	10.47	19.38	19.27	42.83
Ca^{2+}	457.5	193.7	899.4	2 047.1
Mg^{2+}	63.6	82.96	141.69	152.18

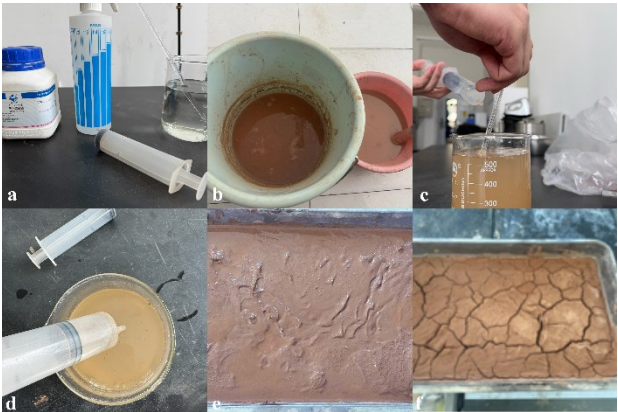
表 4 土样物理指标

Table 4 Physical properties of soil sample			
最大干密度/(g/cm ³)	最优含水率/%	液限/%	塑限/%
1.82	17.5	29.41	14.88

2 试验步骤

2.1 制备样本

将所取土样烘干,并筛取 0.075 mm 以下细粒组。将筛好的土样分别放置于塑料桶内,每桶放置干燥土样 600 g,加入定量蒸馏水,充分搅拌,并记录加水量,加水量选择为 5~10 L。静置 24 h 使土样充分沉淀,取上层水 2 mL 加入氯化钡盐酸溶液 1 mL,观察是否产生白色沉淀,用以检验澄清溶液中是否有硫酸根离子(SO_4^{2-}),从而鉴定土样中易溶盐是否洗净。最后将土样取出置于烘箱中,调节烘箱温度为 105 ℃,烘 8 h,直至土样完全烘干,并再次进行易溶盐含量测定实验。整体流程如图 2 所示。



注:a.试验所需药品;b.静置沉淀;c.滴定氯化钡盐酸溶液;d.抽出澄清的水;e.取出洗净后土样;f.烘干土样。

图 2 洗盐试验过程

Fig.2 Process of salt washing test

洗盐前后易溶盐含量见表 5。经洗盐,易溶盐总含量降低了 94%,该洗盐后土样将被用于人工配置不同硫酸钠含量的盐渍土。

表 5 洗盐试验前后易溶盐含量表
Table 5 Content of soluble salt before and after salt washing test

编号	试验前全盐量/(mg/kg)	试验后全盐量/(mg/kg)
D1	12 970	680
D2	15 930	770
D3	11 960	700

为了得到不同含盐量的试样,对洗盐后的土样进行如下操作:

1)对土样进行碾碎处理,过 2 mm 筛网将大块土颗粒以及石块去除,并在烘干箱中进行烘干;

2)按硫酸钠与干土的质量比称取一定量的硫酸钠粉末与土样均匀搅拌,统一配置含水率为 18.0%,并在常温下密封保存 12 h,使盐分与土样、水分充分混合;硫酸盐在土中的存在形式对土体强度影响较大,通过计算^[19]得到大部分以硫酸根的形式存在,仅有少量以 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的形式存在。

3)制备三轴标准土柱:直径 39.1 mm,高为 80 mm,称取试样的初始质量。

2.2 三轴剪切试验

采用三轴仪,对制备的土样(不再次饱和)进行不同含盐量条件下的固结不排水剪切试验,该试验中的应变速率应控制在 0.003%~0.012% 范围内,剪切速率为 0.009 6 mm/min,室温下进行试验。

3 试验数据和分析

3.1 三轴试验结果和分析

控制含水率、温度相同,考虑 6 种硫酸钠质量比(0.5%、1.0%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%),在 4 种围压(100、200、300、400 kPa)条件下分别开展固结不排水剪切试验,得到应力-应变曲线如图 3 所示,主要特征如下:

1)所有应力-应变曲线形态总体上较为相似;初始阶段线性较为明显,土体达到屈服后,软化和硬化特质不明显,基本符合理想弹塑性模型;试验后期,偏应力、体积应变将趋于稳定不变。

2)硫酸钠含量对土体屈服强度有明显的劣化效应,屈服强度随含盐量的增加逐渐减小,且屈服点也略有提前,例如,在图 3 中,含盐量为 3.0% 与含盐量为 0.5% 的峰值偏应力相比降低了 281.7 kPa。

在图 3 中能够较为明显地观察到,一般含盐量较低的土样会提前到达偏应力峰值,如图 3 中(b),当围压为 200 kPa 时,含盐量 0.5% 的峰值强度出现在轴向应变为 7.3% 处;而含盐量为 1.0% 的峰值强度出现在轴向应变 8.3% 处。这是因为土颗粒在

剪切时土骨架之间接触面积增大,黏土颗粒絮凝程度降低,颗粒之间产生微细缝,最终导致土体发生塑性破坏。

硫酸钠含量对强度的降低作用可从抗剪强度参数直接反映。依据图 3 中数据,计算黏聚力与内摩擦角,如表 6 所示。随着硫酸钠含量的增加,盐渍土抗剪强度逐渐降低,抗剪强度参数 c 与 φ 值均呈线性降低。黏聚力降低的原因是,随含盐量的增加,可溶性盐在土体颗粒中结晶,增加了土体体积,使得颗粒间孔隙增大,土体结构受到破坏变得松散,黏聚力与内摩擦角显著降低,抗剪强度降低。

3.2 扫描电镜分析

取青海细粒盐渍土天然土样与洗盐后的土样,对其进行的细观结构研究,得到典型电子显微镜图像如图 4 所示。根据电镜扫描(SEM)特征,图 5 概括了青海细粒盐渍土细观结构的两种形式。

根据电镜扫描结果,细粒盐渍土微观土体结构以片组结构为主,结构特征与含节理裂隙的岩石特征相似。天然土样与洗盐后土样相比,天然土样在长期的昼夜更替过程中,土颗粒的孔隙率显著增大,部分盐以钙矾石等矿物形式存在;在外力作用下晶体与土颗粒之间更易发生相对滑动,黏聚力与内摩擦角均减小,与试验所得结论相符。

4 细粒盐渍土变形特性简化模型

4.1 模型建立

由图 3 可知,尽管含盐量与围压都会影响轴向应变-偏应力关系曲线,但每条曲线基本呈理想弹塑性关系,前半段基本为线弹性;后半段基本水平,无明显强化和软化特征。因此,不妨按理想弹塑性模型,将应力-应变关系表示为初始模量 E_i 和屈服应力 σ_s 的函数,见式(1)。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \begin{cases} E_i \epsilon_1 & (E_i \epsilon_1 < \sigma_s) \\ \sigma_s & (E_i \epsilon_1 \geq \sigma_s) \end{cases} \quad (1)$$

基于试验结果(见图 3)可知, E_i 和 σ_s 都不是定值,均与围压和含盐量相关,因此假设

$$E_i = E_i(\sigma_3, r_{\text{salt}}) \quad (2)$$

$$\sigma_s = \sigma_s(\sigma_3, r_{\text{salt}}) \quad (3)$$

式中: σ_3 为围压, kPa, r_{salt} 为硫酸钠与土颗粒的质量比。

通过测试 E_i 与 σ_s 不同形式的表达式,可以确定该盐渍土的应力-应变关系的最优模型。为了应用方便,模型应当参数较少,且能表征不同含盐量和围压下的应力-应变关系。

具体测试和标定操作使用 MATLAB 完成,基本思路如下:

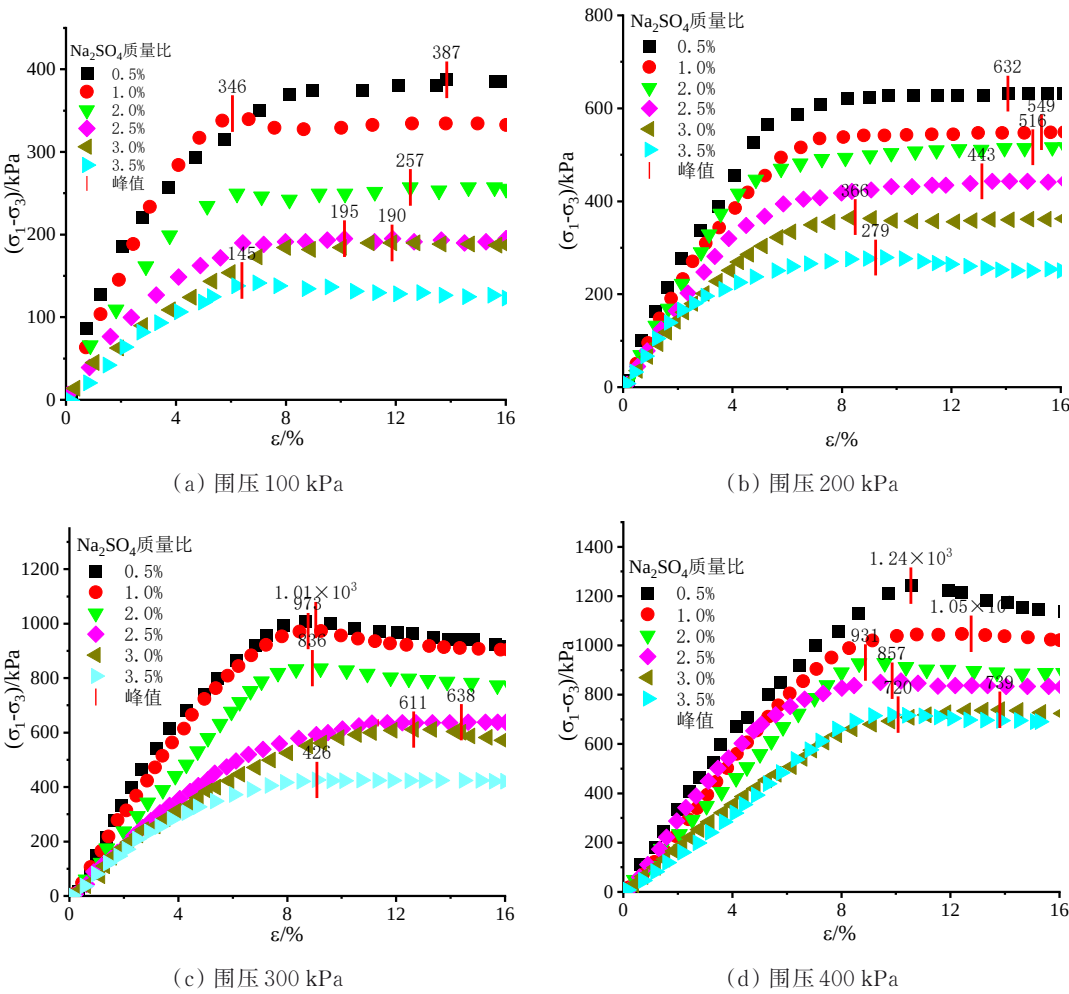


图 3 不同含盐量细粒硫酸盐渍土的应力应变规律曲线

Fig. 3 Stress strain curve of fine-grained sulfate soil with different salt contents

表 6 不同含盐量下土体黏聚力和内摩擦角变化

Table 6 Soil cohesion and internal friction angle changes under different salt content

含盐量/%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
0.5	12.46	36.31
1.0	9.13	35.70
2.0	2.89	33.46
2.5	1.82	33.06
3.0	1.31	31.52
3.5	0.82	31.21

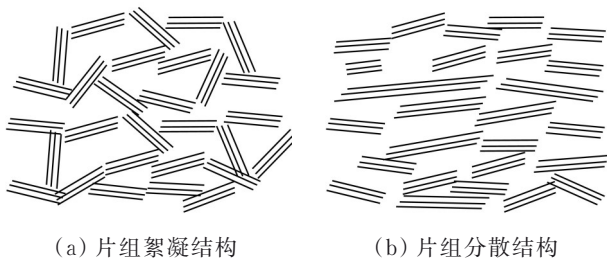
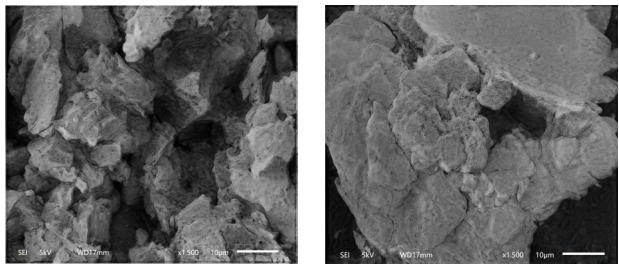


图 5 青海细粒盐渍土的两 种结构形式

Fig. 5 Two structural forms of fine-grained saline soils in Qinghai



(a) 天然土样

(b) 洗盐后土样

图 4 电子显微镜扫描结果

Fig. 4 Electron microscope scan results

- 1)整合不同含盐量、围压、应变下的数据,得到基本条件矩阵 X 和偏应力实测值向量 y ;
- 2)按式(2)、式(3)定义 E_i 和 σ_i 函数表达式,如线性、抛物线等;
- 3)选择一种函数表达式,给定参数 $pars$,代入式(1),计算预测值向量 y^* ;
- 4)搜索合适的 $pars$,使得 y^* 与 y 误差平方和最小。此步使用`fminsearch`函数完成,得到模型误差平方和最优模型参数。

5)对比不同模型的误差平方和,确定最优模型和最优参数。

经反复试算,发现如下式(4)、式(5)参数较少,且效果较好。

$$E_i = a_0 + a_1 r_{\text{salt}} + a_2 \sigma_3 \quad (4)$$

$$\sigma_s = E_i(b_0 + b_1 r_{\text{salt}} + b_2 \sigma_3) \quad (5)$$

进一步由式(1)、式(4)、式(5)得到推荐的模型。

分析式可知,式(4)假定初始模量为含盐量和围压的线性表达式;而式(5)假定屈服点的应变为含盐量和围压的线性表达式。具体参数见表7。

表7 模型参数

Table 7 Model parameters

$a_0/(\text{MPa})$	$a_1/(\text{MPa})$	a_2	$b_0/10^{-3}$	$b_1/10^{-3}$	b_2/MPa^{-1}
115.03	-2 393	122	1.61	9.4	0.016

模型共6个参数,其中参数 a_0 、 a_1 和 a_2 描述初始模量,分别对应初始模量的常数项、含盐量一次项和围压一次项;参数 b_0 、 b_1 和 b_2 描述屈服点的应变,分别对应屈服应变的常数项含盐量一次项和围压

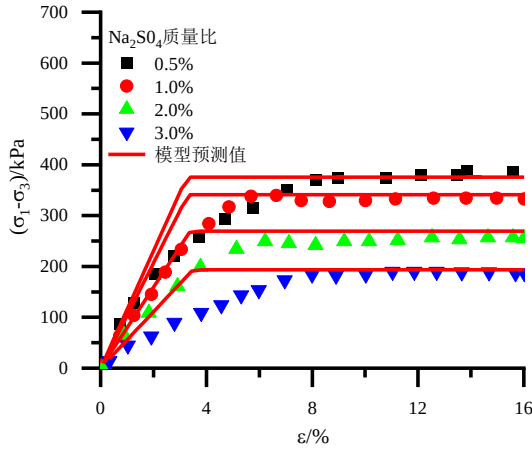
一次项。

模型标定可由两种方法进行。方法1(以物理意义标定):试验测定不同围压和含盐量下的应力应变曲线,利用初始模量得到 a_0 、 a_1 和 a_2 ,利用屈服点应变得到 b_0 、 b_1 和 b_2 。方法2(以最小二乘法标定):搜索合适的参数,让模型预测和实际试验结果误差平方和最小。两种方法都可适用。但考虑到初始模量和屈服点应力的获得存在一定人为因素,采用第2种方法,使用MATLAB中fminsearch函数求解最优参数。

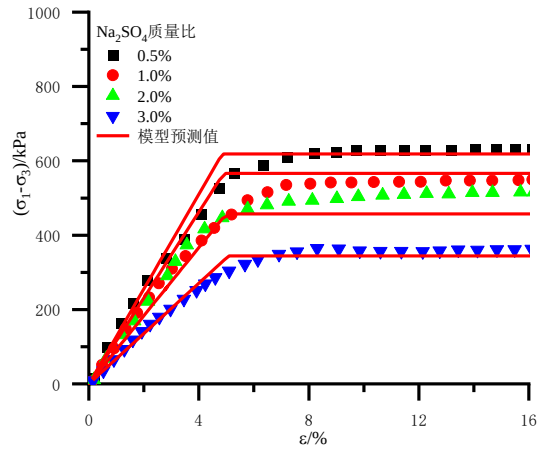
4.2 模型验证

利用模型参数计算得到不同条件下初始模量和屈服应力如表8所示。

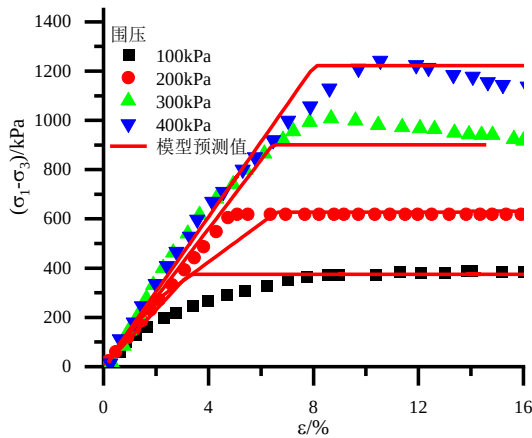
图6是模型计算与试验结果的对比图。由图6可以看出,初始模量 E_i 与含盐量成反比, σ_s 与围压、含盐量均成正比。实验曲线和模型预测曲线相关性较好,表明该模型能够在不同含盐量和围压下,较好反映细粒硫酸盐渍土偏应力和轴向应变的关系。该模型可同时考虑屈服应力和初始模量随含



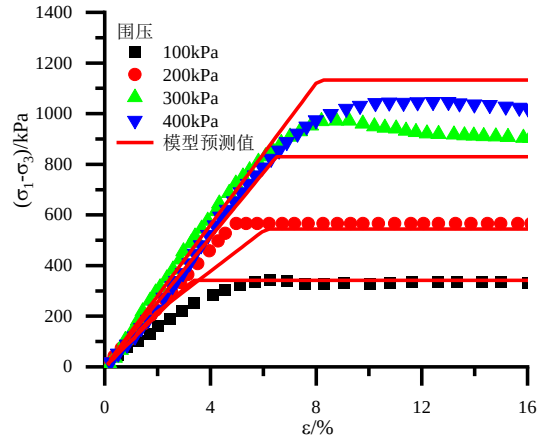
(a) 围压 100 kPa



(b) 围压 200 kPa



(c) 含盐量 0.5%



(d) 含盐量 1.0%

图6 试验数据与理论拟合结果

Fig. 6 Experimental data and theoretical fitting results

盐量和围压的变化,且参数较少,具有良好的参考价值。

表 8 初始模量和屈服应力计算结果
Table 8 Computed results of initial modulus and yield stress

$r_{\text{salt}}/\%$	σ_3/kPa	E_i/MPa	σ_s/kPa
0.5	100	115.06	374.5
	200	127.06	616.9
	300	139.06	897.6
	400	151.07	1 216.8
1.0	100	103.1	340.24
	200	115.1	563.99
	300	127.1	826.15
	400	139.1	1 126.71
2.0	100	79.17	268.38
	200	91.17	454.93
	300	103.17	679.89
	400	115.17	943.24
3.0	100	55.24	192.23
	200	67.24	341.57
	300	79.24	529.32
	400	91.24	755.46

5 结论

以青海细粒盐渍土作为研究对象,该盐渍土盐类型主要为硫酸盐和少量氯盐。通过对变形特性与理论模型研究,得到以下主要结论:

- 1)细颗粒土由于粒径较小,颗粒间通常呈现片组结构,颗粒间接触点较多,使得细颗粒土具有较高的黏聚力与内摩擦角。
- 2)初始模量 E_i 与含盐量成反比, σ_s 与围压、含盐量均成正比,破坏时偏应力随含盐量的增加而降低,整体变形规律具有理想弹塑性特征。
- 3)黏聚力呈现出与屈服应力相似的劣化特征;内摩擦角虽有降低,但变化幅度不明显。
- 4)通过将初始模量与屈服应变考虑为围压和含盐量的线性表达式,建立了一种适用于青海细粒硫酸盐渍土的理想弹塑性模型,探讨了模型参数物理意义和标定方法。

参考文献

[1] 胡兵. 冻融盐渍土蠕变特性及本构模型研究 [D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2023.
HU B. Dynamic creep characteristics and dynamic constitutive model of freezing-thawing saline soil [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2023.

[2] 王立业. 盐渍黏土力学特性及其统一硬化模型研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.

WANG L Y. Research on mechanical properties and unified hardening model of saline clay [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.

[3] 王小生, 章洪庆, 薛明, 等. 盐渍土地区道路病害与防治[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(10): 1178-1182.
WANG X S, ZHANG H Q, XUE M, et al. Road disease and treatment in saline soil area [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(10): 1178-1182. (in Chinese)

[4] 岩土工程勘察安全标准: GB/T 50585—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Standard for safety of geotechnical investigation: GB/T 50585—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)

[5] 周凤玺, 杨金银, 巨文涛, 等. 粗颗粒硫酸盐渍土水盐迁移规律及变形特性研究[J]. 冰川冻土, 2024, 46(1): 199-210.
ZHOU F X, YANG J Y, JU W T, et al. Study on water and salt migration and deformation characteristics of coarse-grained sulfate saline soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(1): 199-210. (in Chinese)

[6] 王海涛, 张远芳, 成峰, 等. 冻融循环作用下盐渍土抗剪强度变化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1271-1276.
WANG H T, ZHANG Y F, CHENG F, et al. Study on the shear strength change laws of the saline soil subjected to freeze-thaw cycle [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(5): 1271-1276. (in Chinese)

[7] QIU K C, DING L, YU W B, et al. Experimental investigation of shear strength of carbonate saline soil under freeze-thaw cycles [J]. Atmosphere, 2022, 13(12): 2063.

[8] WANG F, PENG S Q, FAN L, et al. Mechanism of pore relative humidity on salt swelling characteristics in sulfate saline soil [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(6): 4963-4976.

[9] ZHOU F X, YANG J Y, JU W T, et al. Study on the hydro-thermal-salt-mechanical coupling characteristics of sulfate saline soil under freeze-thaw cycles [J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 226: 104289.

[10] GAO J L, YANG Y, BIAN X L, et al. Study on dynamic shear properties of sulfate saline soil- geotextile interface with different salt content [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 183: 108807.

[11] LV Q F, JIANG L S, MA B, et al. A study on the effect of the salt content on the solidification of sulfate saline soil solidified with an alkali-activated geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 68-74.

- [12] 何野. 冻融循环作用下硫酸盐盐渍土物理力学特性试验研究[J]. 资源信息与工程, 2024, 39(1): 96-100, 104.
HE Y. Experimental study on mechanical properties of sulfate saline soil under freeze-thaw cycle [J]. Resource Information and Engineering, 2024, 39(1): 96-100, 104. (in Chinese)
- [13] 谢柏涵, 孔元元, 张学飞, 等. 冻融循环作用下盐渍土损伤模型的建立及验证[J]. 人民长江, 2025, 56(2): 183-189, 200.
XIE B H, KONG Y Y, ZHANG X F, et al. Establishment and verification of damage model for saline soil under freeze-thaw cycle [J]. Yangtze River, 2025, 56(2): 183-189, 200. (in Chinese)
- [14] 李积锋, 谢文斌, 刘高, 等. 硫酸盐渍土抗剪强度的含盐量效应和结构效应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2023, 59(6): 812-816, 823.
LI J F, XIE W B, LIU G, et al. Salt content and structural effects on the shear strength of sulphate saline soil [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2023, 59(6): 812-816, 823. (in Chinese)
- [15] 张莎莎, 杨晓华, 王龙. 单因素对粗粒盐渍土的盐胀规律影响效果研究[C]//中国土木工程学会第十二届全国土力学及岩土工程学术大会论文摘要集. 上海, 2015: 247.
ZHANG S S, YANG X H, WANG L. Study on the effect of single factor on the salt expansion law of coarse grained saline soil [C]// The 12th National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering of the Chinese Society of Civil Engineering. Shanghai: 2015, 247. (in Chinese)
- [16] 张莎莎, 杨晓华, 谢永利, 等. 路用粗粒盐渍土盐胀特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(1): 20-25.
ZHANG S S, YANG X H, XIE Y L, et al. Salt-expansion laws of coarse-grained salty soil in road subgrade [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(1): 20-25. (in Chinese)
- [17] 赵天宇. 内陆寒旱区硫酸盐渍土盐胀特性试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
ZHAO T Y. Properties of inland sulphate saline soil in [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [18] 盐渍土地区建筑技术规范: GB/T 50942—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Technical code for building in saline soil regions: GB/T 50942—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)
- [19] FANG J H, LI X, LIU J K, et al. The crystallization and salt expansion characteristics of a silty clay [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 154: 63-73.

(编辑 XXX)