

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1041

轻质固化盐渍土三维力学特性研究

杨爱武^{1,2}, 杨少朋², 郎瑞卿², 陈子荷²

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

摘 要: 通过固化技术对盐渍土进行改良, 使其成为优良的路基填料对于工程建设和保护环境等具有重要意义。以轻质固化盐渍土为研究对象, 利用真三轴仪开展室内试验研究, 分析了中主应力比、含盐量和围压对其应力-应变关系、破坏强度及抗剪强度指标的影响, 揭示了轻质固化盐渍土强度破坏模式, 并建立了强度指标计算方法。试验结果表明: 应力-应变曲线斜率会随着中主应力比及围压的增大而增大, 含盐量对其影响较小; 含盐量对破坏应力的影响显著, 当含盐量为 4% 时, 破坏应力达到最大; 不同条件下, 轻质固化盐渍土会产生侧胀、锥形、斜裂、对角线的强度破坏形式; 通过分析计算, 建立了考虑中主应力比及含盐量等因素的轻质固化盐渍土破坏强度及抗剪强度指标的预测公式; 通过对比表明 Mohr-Coulomb 强度准则描述轻质固化盐渍土强度偏于保守, 容易低估土体的实际强度。研究成果可为工程实践提供参考。

关 键 词: 轻质固化盐渍土; 中主应力比; 含盐量; 破坏强度; 抗剪强度指标

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 03-0593-08

Three-dimensional mechanical properties of light solidified saline soil

YANG Ai-wu^{1,2}, YANG Shao-peng², LANG Rui-qing², CHEN Zi-he²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Urban Construction University, Tianjin 300384, China)

Abstract: It is of great significance for engineering construction and environmental protection to improve saline soil by curing technology to make it an excellent roadbed filler. In this paper, taking light solidified saline soil as the research object, laboratory tests were carried out by using true triaxial apparatus. The effects of the ratio of intermediate principal stress, salt content and confining pressure on the stress-strain relationship, failure strength and shear strength index were analyzed. The strength failure mode of light solidified saline soil was revealed and the calculation method of strength index was established. The test results showed that the slope of the stress-strain curve increases with the increase in the ratio of the intermediate principal stress and the confining pressure, but the salt content has little effect on it. The salt content has a significant effect on the failure stress. When the salt content is at 4%, the failure stress reaches the maximum. Under different conditions, the light solidified saline soil could produce different strength failure modes of lateral expansion, taper, oblique crack, and diagonal. Through analysis and calculation, the prediction formula of failure strength and shear strength index of light solidified saline soil considering the ratio of intermediate principal stress and salt content was established. The comparison showed that the Mohr-Coulomb strength criterion is conservative in describing the strength of light solidified saline soil and it tends to underestimate the actual strength of the soil. The research results can provide references for engineering practice.

Keywords: light solidified saline soil; intermediate principal stress ratio; salt content; breaking strength; shear strength index

1 引 言

盐渍土是指含有可溶性盐大于 0.3% 的土壤, 主要分布在我国沿海地区及淮海平原等地, 具有盐胀

溶陷和腐蚀性等特点^[1-4], 如不妥善处理, 极易造成路基裂缝、溶陷、坍塌等严重破坏现象。因此, 国内外许多专家与学者对改良盐渍土进行了大量的研究。

收稿日期: 2020-07-20

修回日期: 2020-12-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51978440); 天津市科技计划项目 (No.19JCZDJC39700, No.2016CJ01); 天津市自然科学基金项目 (No.19JCQNJC06900)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51978440), Tianjin Science and Technology Plan Project(19JCZDJC39700, 2016CJ01) and Tianjin Natural Science Foundation Project(19JCQNJC06900).

第一作者简介: 杨爱武, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事软黏土力学特性及土体微观结构方面的研究。E-mail: tulilab@163.com
通讯作者: 郎瑞卿, 男, 1991 年生, 博士, 讲师, 主要从事地基处理等工作。E-mail: tcuqrq@163.com

Sauer 等^[5]探究了石灰改良盐渍土在不同冻融次数下的动力变形特点。Bell^[6]提出用石灰和水泥来提高盐渍土的物理力学特性,并利用室内研究试验进行验证,总结出了养护龄期与土体强度之间的关系曲线。Locat 等^[7]提出用石灰对盐渍土进行改良,以便于提高其物理力学特性指标,并对改良后的特性指标与规律进行了系统全面地总结与评价。朱燕等^[8]利用新型亲水性丙烯酸酯共聚乳液(ZM)对盐渍土进行改良,认为 ZM 可以在较大程度上提高盐渍土的无侧限抗压强度和剪切强度。方秋阳等^[9]研究表明冻融循环会降低固化盐渍土的强度,并且使固化盐渍土由应变软化型转变为应变硬化型。柴寿喜等^[10]研究认为含盐量增大会降低石灰固化盐渍土的无侧限抗压强度和抗剪强度。王沛等^[11]通过三轴压缩试验研究了滨海盐渍固化土的偏应力-应变关系,认为掺入固化剂后的固化盐渍土抗变形能力提高。姜宇波等^[12]研究分析了 4 种因素对纤维加筋盐渍土抗压性能的影响程度大小依次为含水率、干密度、质量加筋率和加筋长度。吕擎峰等^[13]通过核磁共振技术,探讨了固化盐渍土的强度来源。

以上大多是关于盐渍土的一般改良技术及常规

力学特性的研究,通过固化技术将盐渍土改良成为工程特性较好的路基填料,近年来已经在许多工程中得到了应用,但对其三维力学特性的研究相对较少,在一定程度上阻碍了其发展。因此,本文开展此方面的研究,且考虑中主应力比、含盐量及围压等因素的影响,对于实际工程具有非常重要的指导意义。

2 试样制备及试验方案

2.1 试验材料及试样制备

试验选用天津滨海新区海积软土作为骨架,其基本物性指标如表 1 所示。由于天津滨海盐渍土属于氯盐渍土,含盐量在 1%~5%之间,因此试验制备 NaCl 含量为 0%、2%、4%、6%、8%的盐渍土。经室内试验测定,取回的滨海新区海积软土的含盐量为 2.2%,为了保证试验效果,用蒸馏水洗盐多次,直至土的电导率小于 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$,成为素土^[14]。将素土烘干、磨碎、过 0.25 mm 筛,称取一定质量的素土,依次按上述比例称取 NaCl 晶体(占素土质量的比例),分别搅拌均匀后,在室温条件下密封放置 7 d 待用。

表 1 海积软土基本物性指标
Table 1 Basic physical properties of marine soft soil

孔隙比 e	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	相对密度 G_s	饱和度 $S_r/\%$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩系数 a_v/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa
1.287	46.9	1.76	2.74	100	43.4	25.9	17.5	1.20	2.88	2.605

试验所用固化剂为自主研发^[15](专利申请号:201710219155.8),主要由固化剂主剂(普通硅酸盐水泥)、固化剂辅剂 A(石灰)和辅剂 B(粉煤灰)及发泡剂 C 按一定比例混合而成。因发泡剂在混合料中发生化学反应,使得盐渍土内部产生均匀细密的气泡,从而盐渍土的密度降低,故称为轻质固化盐渍土。按照正交试验确定的最佳配比方案制样,具体制备方案如表 2 所示。

表 2 轻质固化盐渍土的制备方案
Table 2 Preparation of light solidified saline soil

固化材料	含量/%
水	55.0
固化剂主剂	7.0
固化剂辅剂 A	8.0
固化剂辅剂 B	16.0
发泡剂 C	0.5

注:水的质量按配制好的盐渍土总质量百分比添加;固化剂主剂质量按配制好的盐渍土和水的总质量百分比添加;固化剂辅剂 A、B 及发泡剂 C 的质量按配制好的盐渍土质量百分比添加。

试样制备:按照制备方案,称取定量的盐渍土、固化剂主剂、辅剂 A 和 B、发泡剂 C,将其混合,搅拌均匀,再加定量的蒸馏水,继续搅拌均匀,最后将混合样装入事先均匀涂抹凡士林的特制长方体模具(75 mm×75 mm×165 mm)中,并将模具上下部用不透水膜密封,养护在密闭的恒温恒湿箱中 28 d 后(由于混合料在搅拌均匀时,水化反应已放出大量热量,后续放出的热量较少,恒温恒湿箱可自动调节温湿度,可使恒温恒湿箱内温度和湿度由波动状态调整至恒温恒湿状态,即试样在恒温恒湿状态下养护),便可进行试验。

2.2 试验方案

试验仪器为真三轴仪,考虑施工现状,围压选用 0、20、40、60 kPa,中主应力比 b 取为 0、0.25、0.50、0.75、1.00,含盐量为 0%、2%、4%、6%、8%的轻质固化盐渍土,采用不固结不排水剪切方式。试验过程中首先使土样处于三相初始应力状态,然后保持小主应力 σ_3 不变,同时增大主应力 σ_1 和中

主应力 σ_2 ，并保持 $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) = b$ 不变，直到试验结束。具体试验方案如表3所示，共计100组试验。

表3 真三轴试验方案

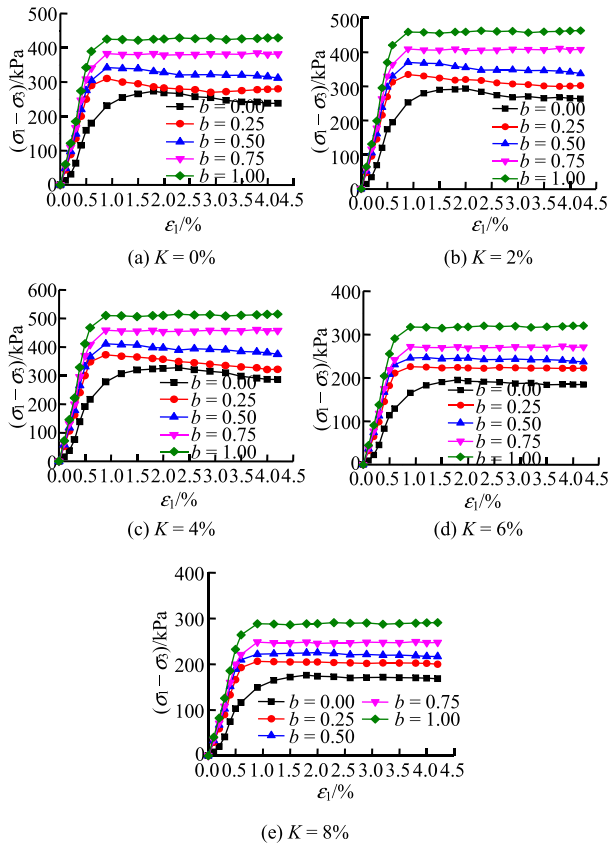
Table 3 Test scheme of true triaxial test

围压 σ_3 /kPa	b	含盐量 K /%
0/20/40/60	0/0.25/0.50/0.75/1.00	0/2/4/6/8

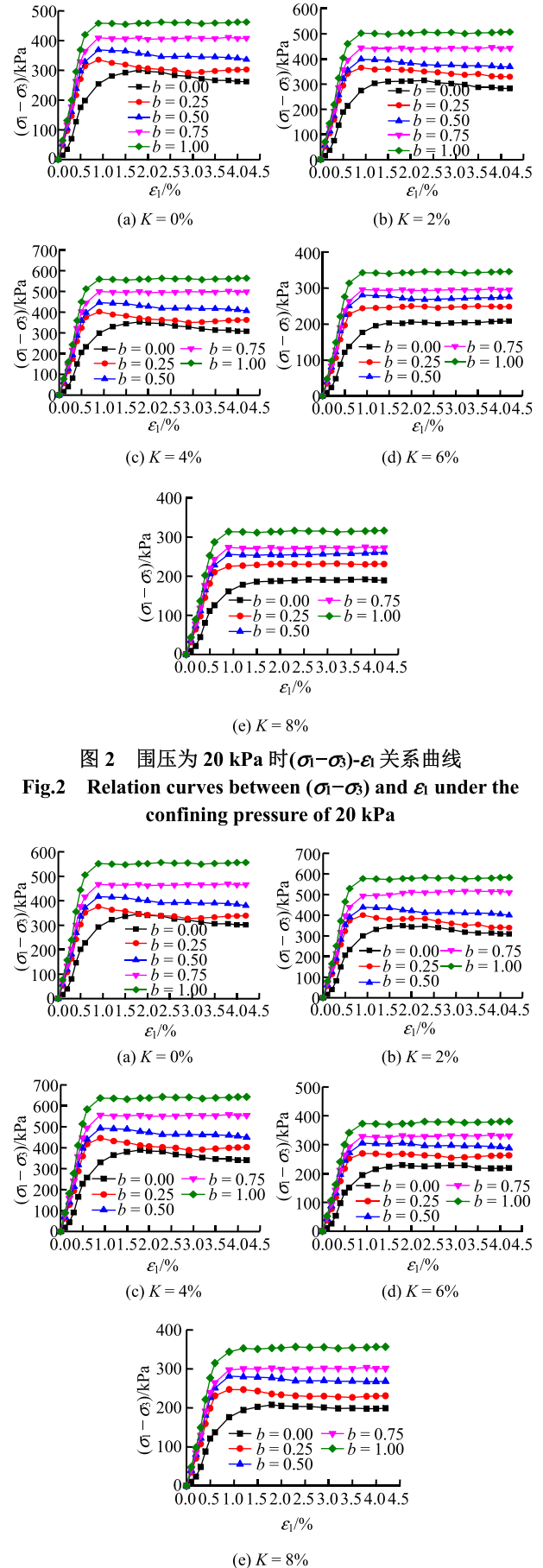
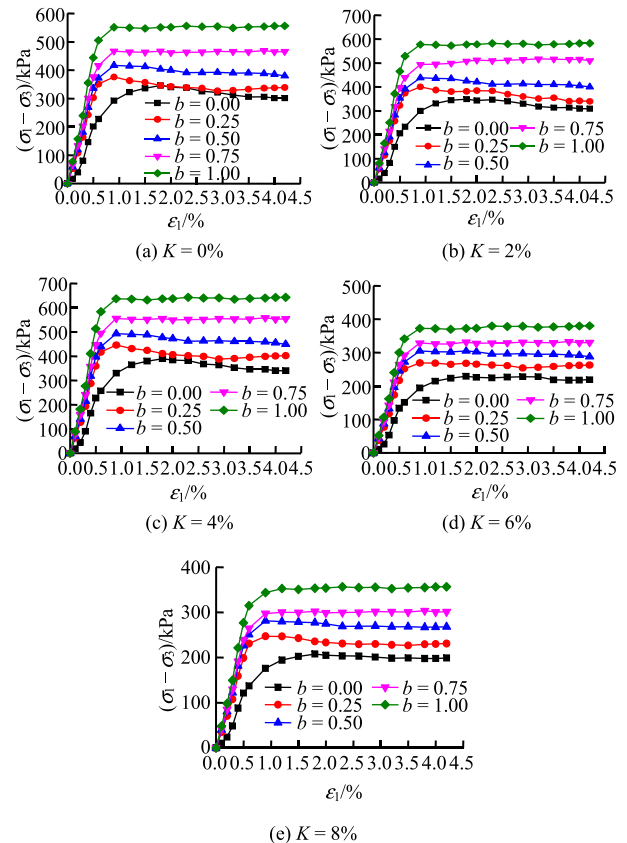
3 试验结果与分析

3.1 应力-应变关系

图1~4为不同围压、含盐量 K 、中主应力比 b 作用下轻质固化盐渍土应力-应变曲线。其中， ε_1 为轴向应变。

图1 围压为0 kPa时 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - ε_1 关系曲线Fig.1 Relation curves between $(\sigma_1 - \sigma_3)$ and ε_1 under the confining pressure of 0 kPa

分析图1~4可以看出，同一围压与含盐量下，轻质固化盐渍土的应力-应变曲线斜率会随着中主应力比 b 的增大而逐渐增大。原因是土体受到3个方向大小不同的应力，中主应力则相当于土样侧向约束力，该约束力会随着中主应力比的增大而增加，使土体具备更强抵抗变形的能力，从而土体的破坏应变减小，脆性增加，抗剪强度增大，表现为应力-应变关系曲线的斜率增大。

图2 围压为20 kPa时 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - ε_1 关系曲线Fig.2 Relation curves between $(\sigma_1 - \sigma_3)$ and ε_1 under the confining pressure of 20 kPa图3 围压为40 kPa时 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - ε_1 关系曲线Fig.3 Relation curves between $(\sigma_1 - \sigma_3)$ and ε_1 under the confining pressure of 40 kPa

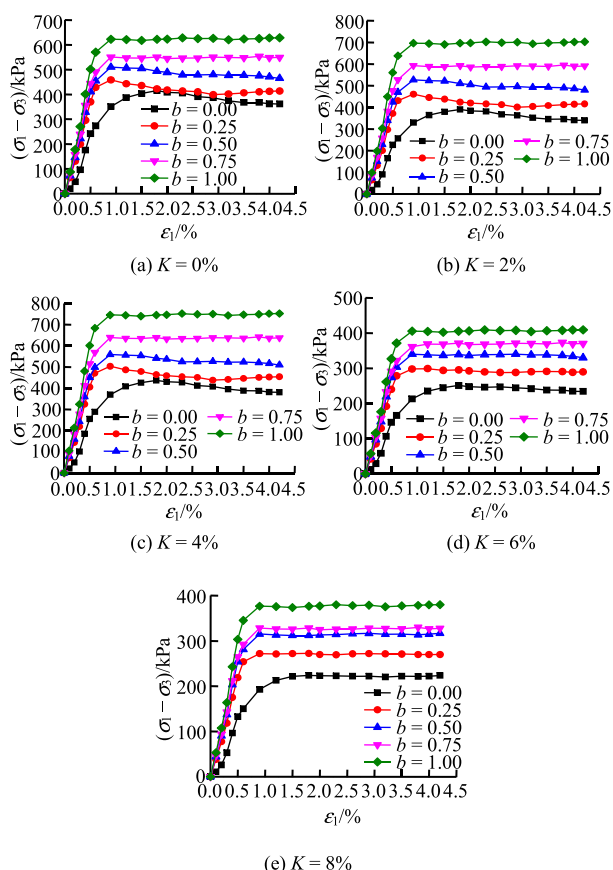


图4 围压为 60 kPa 时 $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_1$ 关系曲线

Fig.4 Relation curves between $(\sigma_1-\sigma_3)$ and ε_1 under the confining pressure of 60 kPa

同一围压与中主应力比下, 轻质固化盐渍土的应力-应变曲线斜率会随着围压的不断增大而逐渐增大, 当围压为 20 kPa 时, 土体的平均破坏应变为 1.1%, 围压为 40、60 kPa 时, 破坏应变增长幅度不大, 都在 0.5% 左右。

轻质固化盐渍土含盐量为 2%、4% 时, 其破坏应力值相比于不含盐的轻质固化盐渍土分别增长了 9.54%、20.32%; 在含盐量为 6%、8% 时, 其破坏应力值相比于不含盐的轻质固化盐渍土分别降低了 28.39%、35.38%。说明含盐量为 4% 时, 轻质固化盐渍土的破坏应力达到最大, 分析原因: 当土体含盐量达到一定程度后, 其强度会因为盐析出结晶, 形成大颗粒, 致使土体内部出现微小裂纹, 破坏了土体结构, 从而降低了土体强度^[16-17]。

3.2 轻质固化盐渍土的破坏方式

通过对 4 种围压 (0、20、40、60 kPa)、5 种 b 值 (0、0.25、0.50、0.75、1.00) 和 5 种含盐量 (0%、2%、4%、6%、8%) 试验条件下破坏方式的观察表明, 轻质固化盐渍土的破坏方式整体上可归纳为 4 类, 即侧胀破坏、锥形破坏、斜裂破坏和对角线破坏, 如图 5 所示。

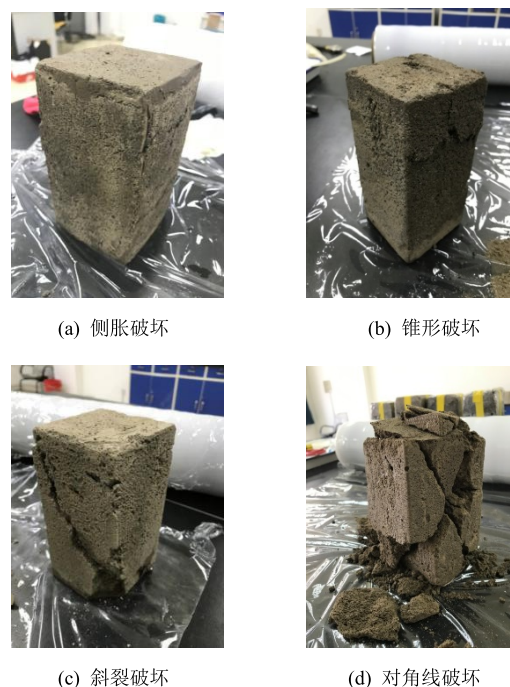


图5 土体破坏方式

Fig.5 Failure modes of soil

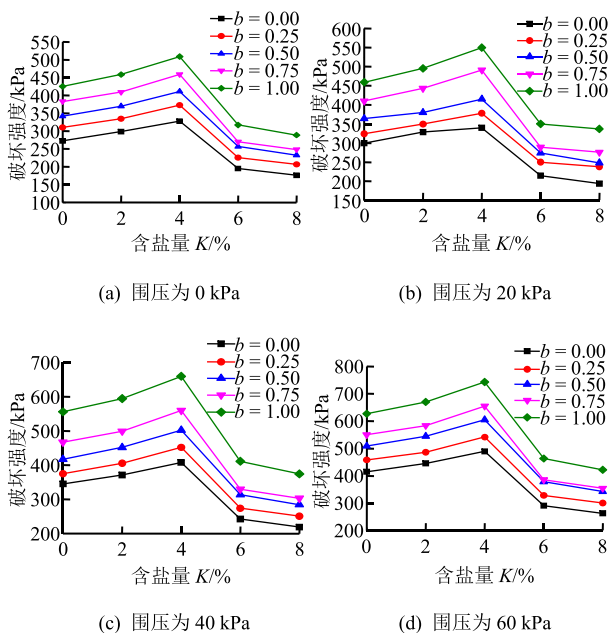
研究表明, 上述 4 种土体破坏方式与中主应力比及含盐量有紧密关系。轻质固化盐渍土在含盐量 $K=8\%$ 、 $b=0$ 时, 其主要破坏方式为侧胀破坏。主要原因是土体盐分含量较高时, 轻质固化盐渍土结构的胶结、吸力作用都较小, 土体骨架容易受到破坏, 因此会有侧胀破坏现象的发生。在含盐量较低、 $b=0$ 的试验条件下, 试样破坏方式则表现为锥形破坏, 因为当 $b=0$ 时, 小主应力作用面相比于中主应力作用面更易被挤出, 从而发生锥形破坏。当 $b>0$ 、含盐率 = 2% 时, 轻质固化盐渍土结构强度较大, 试样更容易形成斜裂破坏形式。当含盐量为 4%、 $b>0$ 时, 轻质固化盐渍土结构强度更大, 破坏面也随之发展, 最终呈现出对角线破坏形式, 因为在试样出现斜裂破坏后, 大主应力的增加或者小主应力的减小都会导致试样发生对角线破坏。

4 三维力学特性分析

4.1 不同含盐量 K 下的破坏强度特性

破坏强度是指应力-应变曲线峰值点的偏应力值。对于应变软化型的试样, 取曲线峰值点的偏应力值为破坏强度; 对于应变硬化型的试样, 则取轴向应变 0.9% 所对应的偏应力值。通过试验得到轻质固化盐渍土破坏强度 σ_a 与含盐量 K 的关系曲线, 如图 6 所示。

对图 6 分析可知, 在不同围压与中主应力比条件下, 轻质固化盐渍土的破坏强度随含盐量 K 的增

图6 破坏强度与含盐量 K 关系曲线Fig.6 Relationship between failure strength and salt content K

加, 均呈现出先缓慢上升后下降的趋势。因此选择围压为 0 kPa 的破坏强度变化曲线来进行分析, 发现可用下式来描述 σ_a 与含盐量 K 之间的关系, 即

$$\sigma_a = A + BK + CK^2 + DK^3 + EK^4 \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 、 E 均为计算参数值。具体参数如表 4 所示。

表4 方程中参数值

Table 4 Parameter values in the equation

b	A	B	C	D	E	R^2
0	269.854 2	-69.896 4	70.977 5	-17.071 3	1.138 1	0.998 0
0.25	307.286 1	-87.674 8	84.436 1	-19.942 8	1.319 7	0.997 8
0.50	338.560 2	-90.012 5	88.074 7	-20.834 1	1.377 5	0.997 6
0.75	379.189 8	-118.621 0	110.992 9	-26.041 4	1.720 1	0.998 0
1.00	420.908 4	-112.358 0	109.375 8	-25.870 6	1.711 3	0.997 6

分析表 4 数据, 可以看出参数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 均与 b 值呈线性关系, 为简化分析, 可用下式来描述参数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 与 b 值的关系, 即

$$T = Hb + I \quad (2)$$

式中: H 、 I 均为计算参数值; T 代表参数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 。具体参数值如表 5 所示。

将式 (2) 及表 5 参数代入式 (1), 并对围压为 20 kPa 时的破坏强度变化曲线进行验证, 试验结果与计算结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 计算值与试验结果差距不大,

表5 参数值

Table 5 Parameter values

参数	H	I	R^2
A	149.60	268.30	0.997 5
B	-46.34	-72.53	0.994 5
C	41.34	72.10	0.992 3
D	-9.48	-17.21	0.997 6
E	0.62	1.14	0.992 7

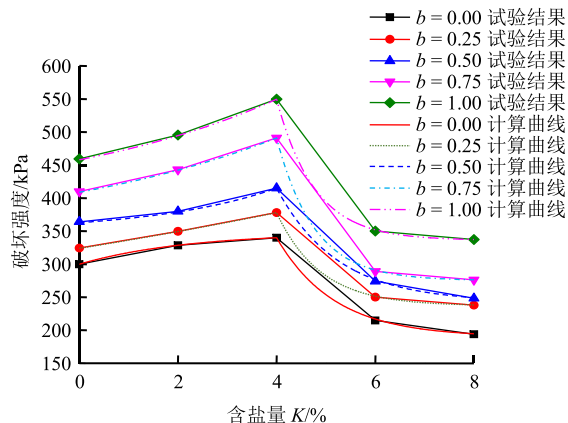


图7 破坏强度变化曲线验证效果图

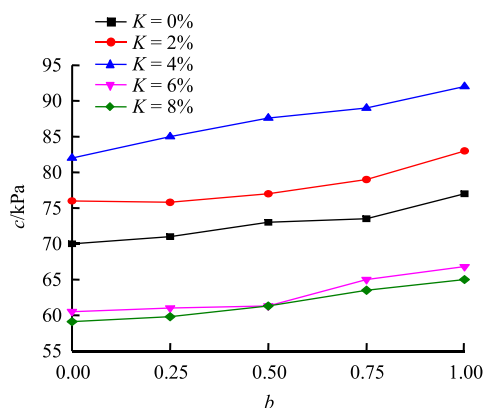
Fig.7 Verification of the variation of failure strength curves

各条计算曲线相关系数 R^2 都在 0.9 以上, 说明本文给出的预测公式基本能描述轻质固化盐渍土破坏强度与含盐量 K 及中主应力比 b 之间的变化关系。

4.2 三维抗剪强度指标

通过 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线, 可以得出不同含盐量、中主应力比 b 及围压下轻质固化盐渍土的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 值变化曲线。为便于分析, 本文将 4 种围压下的摩尔圆包络线拟合成一条直线, 如图 8、9 所示。

从图 8 和图 9 可知, c 、 φ 值随 b 变化趋势大致相同, 可用下式表达 c 、 φ 值与 b 之间的关系, 即:

图8 黏聚力 c 与中主应力比 b 的关系曲线Fig.8 Relation curves between cohesive force c and intermediate principal stress ratio b

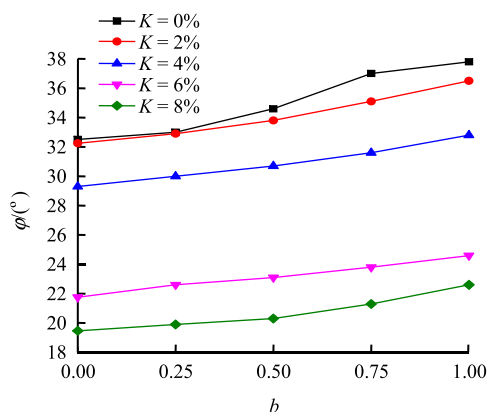


图9 内摩擦角 φ 与中主应力比 b 的关系曲线
Fig.9 Relation curves between internal friction angle φ and intermediate principal stress ratio b

$$c = M e^{-\frac{b}{N}} + J \quad (3)$$

$$\varphi = L e^{-\frac{b}{F}} + G \quad (4)$$

式中: M 、 N 、 J 、 L 、 F 、 G 均为计算参数值。具体参数取值见表 6。

对表 6 数据分析可知, 参数 M 、 N 、 J 、 L 、 F 、 G 均与 K 存在量化关系, 为简化分析, 可用下式来描述参数 M 、 N 、 J 、 L 、 F 、 G 与 K 的关系, 即:

$$Q = aK^4 + dK^3 + gK^2 + hK + m \quad (5)$$

式中: a 、 d 、 g 、 h 、 m 均为计算参数值; Q 代表参数 M 、 N 、 J 、 L 、 F 、 G 。具体参数值如表 7 所示。

表 6 参数值

Table 6 Parameter values

式 (3)					式 (4)				
$K/\%$	M	N	J	R^2	$K/\%$	L	F	G	R^2
0	2.081 2	-0.696 7	68.064 80	0.997 1	0	0.610 2	-0.552 1	18.876 7	0.997 7
2	0.328 4	-0.318 1	75.417 30	0.994 6	2	29.493 8	-11.178 2	-7.688 4	0.994 5
4	-35.522 7	3.172 1	117.656 13	0.990 1	4	2.674 3	-1.206 0	26.655 6	0.999 3
6	1.373 5	-0.560 3	58.861 40	0.993 7	6	2.525 5	-1.004 7	29.694 2	0.999 0
8	5.460 4	-1.314 1	53.459 30	0.998 3	8	10.058 5	-2.183 6	22.168 8	0.992 7

表 7 方程中参数值

Table 7 Parameter values in the equation

参数	式 (3)						参数	式 (4)					
	a	d	g	h	m	R^2		a	d	g	h	m	R^2
M	0.553	8.863	41.950	52.000	2.081	0.996 2	L	0.264	4.883	28.87	54.76	0.610	0.998 5
N	0.053	0.857	4.033	4.878	0.696	0.994 5	F	0.100	1.843	10.81	20.36	0.552	0.999 0
J	0.756	11.900	54.610	63.980	68.060	0.993 2	G	0.294	5.451	32.08	57.99	18.870	0.997 5

将式 (5) 及表 7 数据分别代入式 (3) 和式 (4), 并对不同含盐量 K 和中主应力比 b 下黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的变化曲线进行验证, 试验结果与预测曲线如图 10、11 所示。

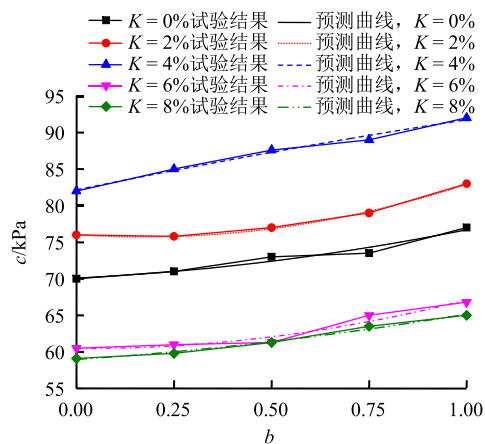


图 10 黏聚力 c 变化曲线验证效果图
Fig.10 Verification of the variation of cohesion c

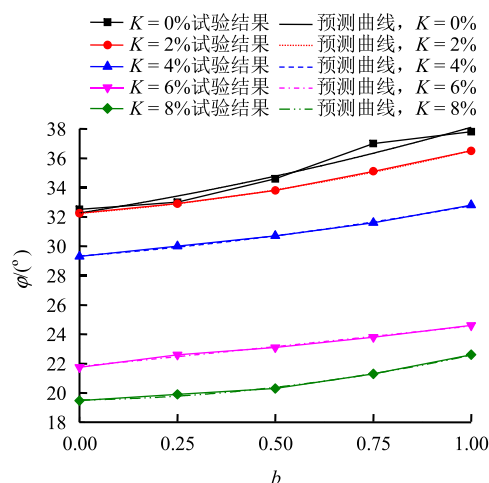


图 11 内摩擦角 φ 变化曲线验证效果图
Fig.11 Verification of the variation of internal friction angle φ

由图 10 和图 11 可以看出, 本文给出的预测公式可以较好的描述轻质固化盐渍土 c 、 φ 值与不同含

盐量 K 及中主应力比 b 的变化关系。

4.3 轻质固化盐渍土 π 平面上的破坏曲线

图 12 为同一球应力下轻质固化盐渍土 π 平面上的破坏面与含盐量的关系。

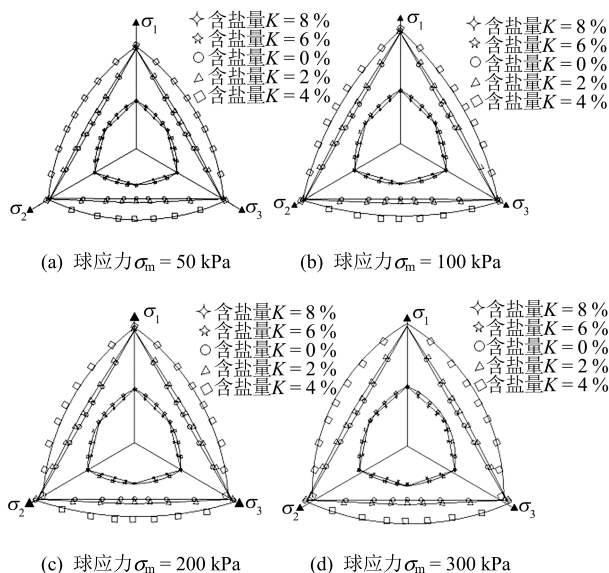


图 12 轻质固化盐渍土 π 平面上的破坏面与含盐量的关系
Fig.12 Relationships between the failure surface of light solidified saline soil on the π plane and the salt content

分析图 12 可知, 含盐量对土体 π 平面上的强度破坏面形状影响较大。当含盐量、平均球应力较小时, 轻质固化盐渍土 π 平面上的强度破坏面大体上呈梨形。当轻质固化盐渍土含盐量相同时, 土体受到的压缩作用会随平均球应力的增大而逐渐减小, 其在 π 平面上的强度破坏面比较近似于 Mohr-Coulomb 破坏准则, 破坏面不再是梨形, 而慢慢变成了轴对称六边形。当含盐量增加至 6%、8% 时, 变化情况愈加明显。当平均球应力一定时, 含盐量为 0%~4% 的轻质固化盐渍土, 其抗剪强度明显大于含盐量为 6% 和 8%。

图 13 为真三轴试验数据与 Mohr-Coulomb 强度准则 π 平面对比图。

从图 13 中可以看出, 采用 Mohr-Coulomb 强度准则描述轻质固化盐渍土强度与真三轴试验结果整体上曲线走势趋同, 但仍然存在一定差异, Mohr-Coulomb 强度准则相比真三轴试验所得出的数据偏小。主要原因是 Mohr-Coulomb 强度准则是相当于常规三轴剪切试验的结果, 没有考虑中主应力的作用, 而中主应力在一定程度上可以增加轻质固化盐渍土的强度。Mohr-Coulomb 强度准则与试验所得

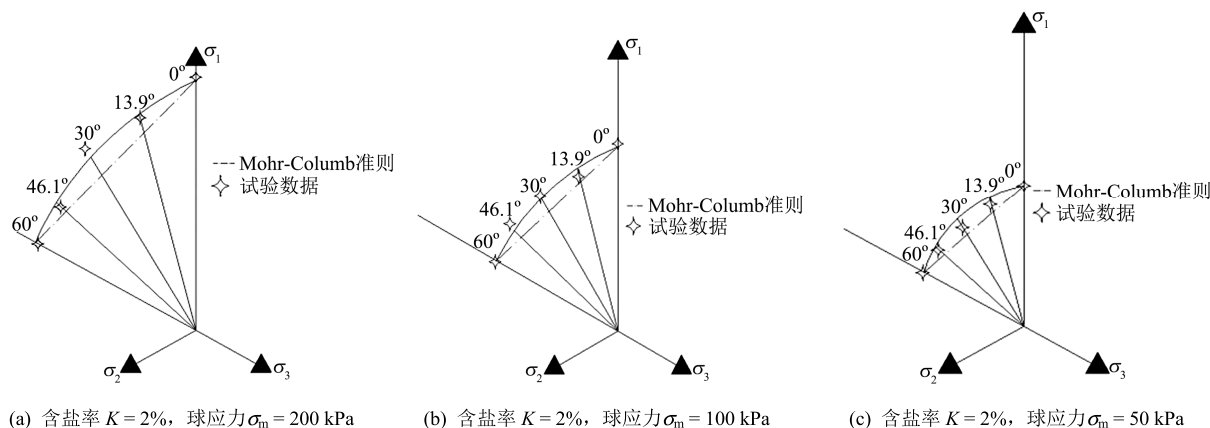


图 13 试验数据与 Mohr-Coulomb 强度准则 π 平面对比图
Fig.13 Comparison of test data with Mohr-Coulomb strength criterion π plane

出的数据存在误差, 具体误差值如表 8 所示。

表 8 试验数据与 Mohr-Coulomb 强度准则对比误差表
Table 8 Comparison error between test data and Mohr-Coulomb strength criterion

$K=2\%$, 球应力 $\sigma_m=200$ kPa		$K=2\%$, 球应力 $\sigma_m=100$ kPa		$K=2\%$, 球应力 $\sigma_m=50$ kPa	
b	误差值/%	b	误差值/%	b	误差值/%
0.00	1.2	0.00	1.6	0.00	2.2
0.25	7.1	0.25	7.4	0.25	8.0
0.50	8.2	0.50	8.8	0.50	9.2
0.75	6.3	0.75	6.8	0.75	7.4
1.00	0.8	1.00	1.3	1.00	1.6

从表 8 中可以看出, 当 b 变化时, 误差值大于 3% 的概率在 60% 以上, 其中误差值最大为 9.2%。因此采用 Mohr-Coulomb 强度准则描述土体强度时偏于保守, 容易低估土体的实际强度, 使得路基工程用料和建设成本增加, 工程经济性变差, 但从工程安全角度考虑, 该准则可以接受。

5 结 论

(1) 轻质固化盐渍土应力-应变曲线斜率会随着中主应力比及围压的增大而增大, 含盐量对其影

响较小;含盐量对破坏应力的影响显著,当含盐量为4%时,破坏应力达到最大

(2)土体破坏形式与中主应力比及含盐量有紧密关系,不同条件下,轻质固化盐渍土会产生侧胀、锥形、斜裂、对角线的强度破坏形式。

(3)根据轻质固化盐渍土破坏强度及抗剪强度指标 c 、 φ 值曲线发展特点,通过分析计算,建立了考虑中主应力比及含盐量等因素的轻质固化盐渍土破坏强度及抗剪强度指标的预测公式。

(4)含盐量对土体 π 平面上的强度破坏面形状影响较大;通过对比表明 Mohr-Columb 强度准则描述轻质固化盐渍土强度偏于保守,容易低估土体的实际强度。

参考文献

- [1] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids in porous mediums[J]. **Physics**, 1931, 1(5): 318-333.
- [2] NARASIMHAN T N. Hydraulic characterization of aquifers, reservoir rocks, and soils: a history of ideas[J]. **Water Resources Research**, 1998, 34(1): 33-46.
- [3] 卢肇钧, 杨灿文. 盐渍土工程性质的研究[J]. 铁道研究通讯, 1956, 2(3): 15-20.
LU Zhao-jun, YANG Can-wen. Study on engineering properties of saline soil[J]. **Railway Research Newsletter**, 1956, 2(3): 15-20.
- [4] 罗伟甫. 盐渍土地区公路工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980.
LUO Wei-fu. Highway engineering in saline soil area[M]. Beijing: People's Communications Press, 1980.
- [5] SAUER E K, WEIMER N F. Deformation of lime modified clay after freeze-thaw[J]. **Journal of Transportation Engineering**, 1978, 104(2): 201-212.
- [6] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and soils[J]. **Engineering Geology**, 1996, 42(4): 223-237.
- [7] LOCAT J, TREMBALY H, LEROUEIL S. Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(4): 654-669.
- [8] 朱燕, 甄祥, 余湘娟, 等. 高分子材料固化盐渍土的强度试验研究[J]. 公路, 2020, 65(5): 265-271.
ZHU Yan, ZENG Xiang, YU Xiang-juan, et al. Strength test research on polymer material solidified saline soil[J]. **Highway**, 2020, 65(5): 265-271.
- [9] 方秋阳, 柴寿喜, 李敏, 等. 冻融循环对固化盐渍土的抗压强度与变形的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 1041-1047.
FANG Qiu-yang, CHAI Shou-xi, LI Min, et al. Effect of freeze-thaw cycles on compressive strength and deformation of solidified saline soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(5): 1041-1047.
- [10] 柴寿喜, 杨宝珠, 王晓燕, 等. 含盐量对石灰固化滨海盐渍土力学强度影响试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1769-1772, 1777.
CHAI Shou-xi, YANG Bao-zhu, WANG Xiao-yan, et al. Experimental study on the influence of salt content on the mechanical strength of lime-solidified coastal saline soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1769-1772, 1777.
- [11] 王沛, 王晓燕, 柴寿喜. 滨海盐渍土的固化方法及固化土的偏应力-应变[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3939-3944.
WANG Pei, WANG Xiao-yan, CHAI Shou-xi. The solidification method of coastal saline soil and the partial stress-strain of solidified soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3939-3944.
- [12] 姜宇波, 柴寿喜, 魏丽, 等. 四种因素对纤维加筋盐渍土抗压性能的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 233-239.
JIANG Yu-bo, CHAI Shou-xi, WEI Li, et al. Effects of four factors on compressive properties of fiber reinforced saline soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.1): 233-239.
- [13] 吕擎峰, 周刚, 王生新, 等. 固化盐渍土核磁共振微观特征[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 245-249, 259.
LÜ Qing-feng, ZHOU Gang, WANG Sheng-xin, et al. Microscopic characteristics of nuclear magnetic resonance of solidified saline soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 245-249, 259.
- [14] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T50123—2019 Standard for geotechnical test methods[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [15] 杨爱武, 陈子荷, 孟晓雪, 等. 盐渍土轻质固化剂及其处理盐渍土的方法: 中国, CN107032699A[P]. 2017-08-11.
YANG Ai-wu, CHEN Zi-he, MENG Xiao-xue, et al. Sludge curing agent and its application, sludge solidified soil: China, CN107032699A[P]. 2017-08-11.
- [16] 柴寿喜, 王晓燕, 王沛, 等. 含盐量对石灰固化滨海盐渍土微结构参数的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 305-310.
CHAI Shou-xi, WANG Xiao-yan, WANG Pei, et al. Influence of salt content on microstructure parameters of coastal saline soil solidified by lime[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(2): 305-310.
- [17] 柴寿喜, 杨宝珠, 王晓燕, 等. 含盐量对石灰固化滨海盐渍土力学强度影响试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 50-53, 58.
CHAI Shou-xi, YANG Bao-zhu, WANG Xiao-yan, et al. Experimental study on the influence of salt content on the mechanical strength of lime-solidified coastal saline soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 50-53, 58.