

不同含盐量的石灰粉煤灰固化石油污染土 抗剪性能试验研究

郝中华,牛皖豫,安培磊*,闫少敏

天津市交通科学研究院,天津 300300

摘要:为研究石油污染土的剪切特性,以不同含盐量的固化石油污染滨海盐渍土为研究对象,对石灰、粉煤灰稳定碎石固化石油污染土进行力学强度性能试验与微观分析。研究表明:随含盐量的增大,石灰粉煤灰固化石油污染土(简称污染土)的黏聚力和内摩擦角均先增大后减小;含盐量相同,污染土的黏聚力和内摩擦角随石灰、粉煤灰质量分数的增大而先增大后减小,随石油质量分数的增大而减小;含盐量为1%,石油、粉煤灰、石灰质量分数分别为4%、20%、10%时,污染土的黏聚力和内摩擦角最大;污染土的应力-应变曲线在不同石灰、粉煤灰、石油质量分数下均先增大后减小并趋于稳定;不同含盐量下,污染土的微观结构特征和宏观土样抗剪强度参数的变化规律一致。

关键词:石油污染土;石灰粉煤灰固化土;滨海盐渍土;抗剪强度;微观结构

中图分类号:U416.1;X131.3

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)02-0033-09

引用格式:郝中华,牛皖豫,安培磊,等.不同含盐量的石灰粉煤灰固化石油污染土抗剪性能试验研究[J].山东交通学院学报,2024,32(2):33-41.

HAO Zhonghua, NIU Wanyu, AN Peilei, et al. Experimental research on shear strength performance of lime-fly ash solidified petroleum-contaminated soil with different salt contents[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(2): 33-41.

0 引言

随世界各国工业技术的迅速发展,石油及其制品广泛应用在国民经济的各领域中。在石油生产、运输、加工及使用中,因不正确检修和不规范操作等引发的事故易造成石油泄露,石油以不同方式进入土体并对周围环境造成较大破坏和影响。土颗粒间的石油严重影响土体的物理力学性质,研究石油污染土的综合治理及利用具有重要的现实意义。

席人双^[1]通过直剪试验研究低塑性土的力学性能,发现盐渍土的抗剪强度随含盐量的增大而增大,相同荷载作用下,土样的孔隙比减小并发生渗透固结现象。张飞等^[2]、陈炜韬等^[3]通过试验确定不同含盐量对硫酸盐渍土抗剪强度的影响规律,发现随含盐量的增大,试样的抗剪强度包络线均为直线型,试样的黏聚力先减小后增大再减小,内摩擦角的变化较小。吕前辉等^[4]以冻融次数、含盐量、改性聚乙烯醇质量分数、石灰质量分数、养护龄期及干密度为影响因素,研究石油污染土的力学性能,认为随含盐量的增大,固体颗粒间的滑动摩擦逐渐增大,内摩擦角逐渐减小;含盐量饱和后盐结晶析出,试样结构遭到盐颗粒及相态变化的破坏,咬合摩擦力减小,内摩擦角逐渐减小,土样的黏聚力和内摩擦角随含盐量的增大而

收稿日期:2023-04-20

第一作者简介:郝中华(1991—),男,山西大同人,工学硕士,主要研究方向为路基路面结构应力应变分析,E-mail:290413525@qq.com。

***通信作者简介:**安培磊(1996—),男,山西朔州人,工学硕士,主要研究方向为公路桥梁、隧道检测技术、BIM二次开发及装配式技术研究等,E-mail:1418969476@qq.com。

逐渐减小。朱学坤等^[5]采用正交试验设计方法进行剪切试验,推导硫酸盐渍土的抗剪强度随含盐量、含水率和初始干密度3个影响因素的变化规律。在石油污染区域的土体修复处理中,采用固化处理比传统的治理方法造价低,技术应用范围较广,修复见效快,污染物不易迁移^[6-9]。李敏等^[10-11]通过无侧限抗压试验研究滨海新区石油污染盐渍土,认为石灰-粉煤灰联合固化污染土后,污染土的抗压强度增幅明显。何中江等^[12-13]通过室内模拟干湿循环条件和冻融循环条件,通过无侧限抗压试验指标研究固化石油污染土的力学特性。何小红^[14]以水泥作为柴油污染土的固化材料,借助击实试验、压缩性测试试验和无侧限抗压试验研究固化柴油污染土的力学特性。已有研究多集中于盐渍土的变形、冻胀、水动力学等领域^[15-18],对不同含盐量下的固化石油污染土的研究较少。

本文从道路工程角度出发,以实现石油污染土在路基填筑中的二次利用为导向,兼顾绿色发展要求,以石灰、粉煤灰为固化材料,针对滨海地区石油污染现状,设定含盐量为0~8%,通过三轴剪切试验评价石灰粉煤灰固化石油污染盐渍土(简称污染土)的力学强度变化规律,从宏观与微观角度分析含盐量、石油质量分数、石灰和粉煤灰的质量分数等影响因素与土样抗剪强度间的关系,为石油污染土在路基填筑中的二次利用提供理论依据。

1 材料与方 法

选取固化材料需充分考虑石油组分的复杂特征。石油是有机污染介质,黏性大、密度小,油膜对环境变化较为敏感,石油渗入土中后改变土颗粒间的黏结力,土体的不稳定性增大,易发生二次迁移并引发二次污染^[19-21]。从绿色安全和经济效益方面考虑,选择石灰和粉煤灰作为固化材料。

1.1 试验材料

盐渍土取自天津滨海新区,基本物理化学性质如表1所示。

表1 滨海盐渍土的基本物理化学性质

含盐量/%	初始含水率/%	稠度指标			粒径分布/%				
		塑限/%	液限/%	塑性指数	<0.005 mm	0.005~0.01 mm	>0.01~0.05 mm	>0.05~0.075 mm	>0.075 mm
2.94	2.8	17.58	29.68	12.11	29.88	17.60	36.65	6.18	9.69

试验所用石油取自天津滨海新区大港某油田,深棕色,半流体状,特殊气味,密度为0.858 g/cm³。试验所用石灰固化材料取自天津蓟县,主要成分SiO₂、CaO、MgO、SO₃的质量分数分别为1.08%、95.36%、0.68%、0.01%,热失重为0.6%。粉煤灰取自天津杨柳青电厂,主要由煤灰和炉渣组成,主要成分SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、P₂O₅、TiO₂的质量分数分别为52.58%、30.32%、8.73%、2.33%、0.73%、0.84%、1.52%,平均比表面积为0.812 m²/g。

在固化污染土中,设计石灰的质量分数分别为8%、10%、12%,粉煤灰的质量分数分别为10%、20%、30%,石油的质量分数分别为0.4%、8%、12%,氯盐的质量分数分别为0.1%、3%、5%、8%,进行试验试样制备。

1.2 试验方法

采用剪切仪YS-1SZ-B1进行剪切试验。通过膜具将套好橡胶皮套的试样放在压力室的底座上,用橡皮筋固定好;将压力室与底座固定好,固定时注意压力室罩和底座间的隔水圈不能偏离腰轨;将底座升高,应力传感器的示数开始增大时停止底座升高;打开注水阀,向压力室内部注入水,压力室内部注满水后关闭顶部阀门;打开围压阀,在围压传感器中输入目标围压,启动围压开关,施加围压到目标围压;将竖向位移、应力都调零后开始剪切试验;以0.1 mm/min的速度剪切试样,直到形变15 mm终止剪切;试验结束后,把底座降至最低点,打开排水阀,将水排出压力室,取出破坏后的试样拍照。试验指定围压分别设为100、200、300、400 kPa,重复上述试验步骤。

通过制样膜具制作不同含盐量的最优固化试样,试样高50 mm,直径50 mm,制作完成后放入养护箱

内恒温恒湿养护 28 d。将养护完成的试样等分为 3 部分,在每部分试样的内部用切土刀切取 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的试样,依次放入工作盘中喷金。将喷金后的试样放在显微镜 TM4000 下观察土样内部结构,分析颗粒的大小、形状及分布方式。

2 结果与分析

2.1 不同含盐量下污染土试样的抗剪强度

2.1.1 石灰质量分数不同

石油、粉煤灰的质量分数分别为 4%、20%,石灰的质量分数 w_1 分别为 8%、10%、12% 时,不同含盐量下污染土试样的黏聚力和内摩擦角如表 2 所示。

表 2 含盐量不同时不同石灰质量分数下污染土试样的黏聚力和内摩擦角

含盐量/%	黏聚力/kPa			内摩擦角/(°)		
	$w_1 = 8\%$	$w_1 = 10\%$	$w_1 = 12\%$	$w_1 = 8\%$	$w_1 = 10\%$	$w_1 = 12\%$
0	422	500	475	32	46	39
1	500	591	550	35	49	42
3	420	475	447	32	42	38
5	300	335	326	29	39	35
8	258	292	258	27	29	28

由表 2 可知:污染土的黏聚力和内摩擦角随含盐量的增大先小幅增大后减小;含盐量为 1%,石灰质量分数为 10% 时,污染土试样的黏聚力和内摩擦角最大。

污染土含盐量为 0~1% 时,孔隙水中溶解的离子浓度随含盐量的增大而增大,颗粒吸附的结合水减少,颗粒间的相互运动阻力增大,即摩擦力较大;随含盐量的继续增大,土颗粒间的溶液饱和,盐不能完全溶解而结晶,土颗粒间的结晶起骨架作用,这部分结晶盐成为土样固态的一部分,对土颗粒起胶结作用,增大土样的黏聚力和内摩擦角。含盐量为 1%~8% 时,土颗粒间发生盐胀作用,土颗粒间的黏结作用减弱,黏聚力减小,固化土的抗剪强度随含盐量的增大而减小。随含盐量的持续增大,盐胀作用更严重,土样表面产生细小裂纹,土的密实度降低^[22-23]。

2.1.2 粉煤灰质量分数不同

石油、石灰的质量分数分别为 4%、10%,粉煤灰的质量分数 w_2 分别为 10%、20%、30% 时,不同含盐量下污染土试样的黏聚力和内摩擦角如表 3 所示。

表 3 含盐量不同时不同粉煤灰质量分数下污染土试样的黏聚力和内摩擦角

含盐量/%	黏聚力/kPa			内摩擦角/(°)		
	$w_2 = 10\%$	$w_2 = 20\%$	$w_2 = 30\%$	$w_2 = 10\%$	$w_2 = 20\%$	$w_2 = 30\%$
0	272	500	316	42	46	43
1	300	591	372	48	49	47
3	250	488	280	37	43	41
5	241	330	255	30	39	37
8	228	271	202	23	29	33

由表 3 可知:污染土试样的抗剪强度随含盐量的增大而先增大后减小。在粉煤灰作用下,含盐量对污染土试样的影响规律与石灰固化污染土试样一致;含盐量为 1% 的污染土的黏聚力和内摩擦角均最大;粉煤灰质量分数为 20% 时,污染土的黏聚力和内摩擦角均比粉煤灰质量分数为 10%、30% 的污染土试样

大。因此,含盐量为1%时,粉煤灰的质量分数为20%的污染土试样的性能较好。

粉煤灰的质量分数为10%时,含盐量对试样抗剪强度的变化影响不大,主要原因为随含盐量的增大,结晶的盐很难填充土颗粒间的孔隙,不能充分起到骨架的作用,土样的抗剪强度受粉煤灰影响较大;粉煤灰的质量分数为10%~20%,盐渍土中的氯离子有助于激发粉煤灰的活化速度,增强固化效果,且粉煤灰与土样中水分相互作用,生成大量难溶的硅酸盐胶体,附着于土样颗粒表面,增强土样的结构强度,试样抗剪强度增大;粉煤灰的质量分数为20%~30%,过量的粉煤灰难以和石灰充分反应,土样内部的孔隙率增大,密实度减小,大量的火山灰产物积累在粉煤灰表面,试样抗剪强度减小。

2.1.3 石油质量分数不同

石灰、粉煤灰的质量分数分别为10%、20%,石油的质量分数 w_3 分别为4%、8%、12%,不同含盐量下污染土试样的黏聚力和内摩擦角如表4所示。

表4 含盐量不同时不同石油质量分数下污染土试样的黏聚力和内摩擦角

含盐量/%	黏聚力/kPa			内摩擦角/(°)		
	$w_3=4%$	$w_3=8%$	$w_3=12%$	$w_3=4%$	$w_3=8%$	$w_3=12%$
0	500	422	395	47	38	37
1	591	483	418	49	44	38
3	480	448	370	43	40	36
5	325	300	252	39	36	32
8	272	200	201	30	26	27

由表4可知:随含盐量的增大,污染土试样的黏聚力和内摩擦角均先小幅增大后稳定减小;含盐量为1%时,污染土的黏聚力和内摩擦角最大;含盐量为1%,石油的质量分数分别为4%、8%、12%时,污染土的黏聚力比含盐量为0时分别增大18.2%、14.4%、5.8%。石油的质量分数为4%时,污染土的抗剪强度增幅最大。

石油的质量分数较小时,土颗粒表面未完全被油膜覆盖,土中含盐自由水对试样的抗剪强度起主导作用,试样中少量的石油起一定润滑作用,低含盐量状态下土样缝隙内的水膜相对较薄,对土样的黏聚力影响也较小;随石油质量分数的增大,污染土试样内部的油水比增大,土颗粒间的空隙中有相对较多的石油,石油的黏滞性发挥作用,同时含盐量相对较高使土样水膜变厚,土样的黏聚力和内摩擦角均增大;随石油质量分数的继续增大,土样孔隙被石油完全充满甚至出现溢油现象,弱化了土颗粒间的结合力,土颗粒间的相对滑动更容易,含盐量大的土样发生盐胀作用,土样的黏聚力和内摩擦角均减小。

2.2 不同含盐量的污染土试样的应力-应变

2.2.1 石灰质量分数不同

石油的质量分数为4%,粉煤灰的质量分数为20%,石灰的质量分数 w_1 分别为8%、10%、12%,围压为200 kPa时,不同含盐量下污染土试样的应力-应变($\sigma-\varepsilon$)曲线如图1所示。

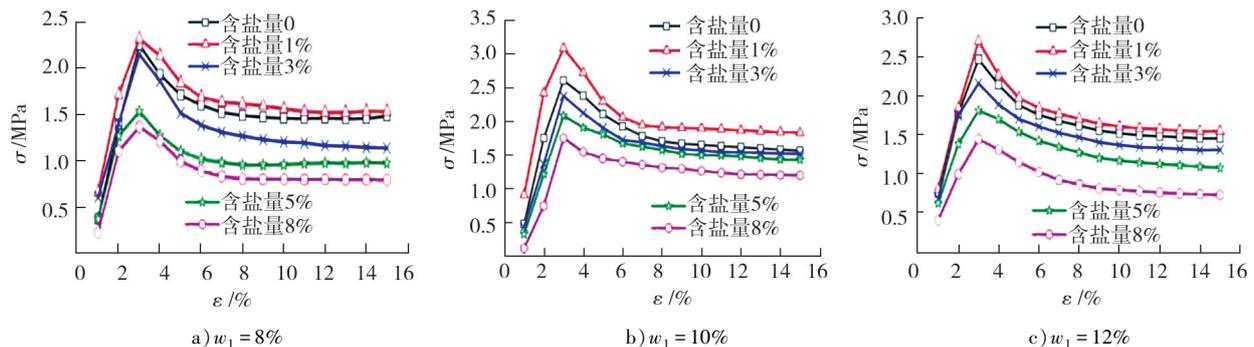


图1 含盐量不同时不同石灰质量分数下污染土试样的应力-应变曲线

由图1可知:污染土试样的应力均随应变的增大先快速增大到峰值后缓慢减小并趋于稳定,土样的破坏模式为应变软化型,说明土样具有一定脆性。随时间延长,离子交换、重结晶、碳化及火山灰反应增大了土样颗粒与固化材料间的胶结力,土样更密实,整体强度增大,曲线呈应变软化型的山峰状。随含盐量的增大,盐胀作用逐渐严重,试样的破坏应力减小,应力-应变曲线变化变得平缓,试样的脆性减弱。

含盐量相同时,随石灰质量分数的增大,试样的抗剪强度增大10%~33%,最大主应力差约为773 kPa。含盐量为0、1%、3%试样的抗剪强度明显大于含盐量为5%、8%的试样。含盐量增大,土样颗粒间的滑动摩擦变大,内摩擦角逐渐减小;当含盐量饱和时,盐分结晶析出,试样出现细小裂缝,土样结构破坏,试样的抗剪强度随含盐量的增大而逐渐减小。

2.2.2 粉煤灰质量分数不同

石油的质量分数为4%,石灰的质量分数为10%,粉煤灰的质量分数 w_2 分别为10%、20%、30%,围压为200 kPa时,不同含盐量下污染土试样的应力-应变曲线如图2所示。

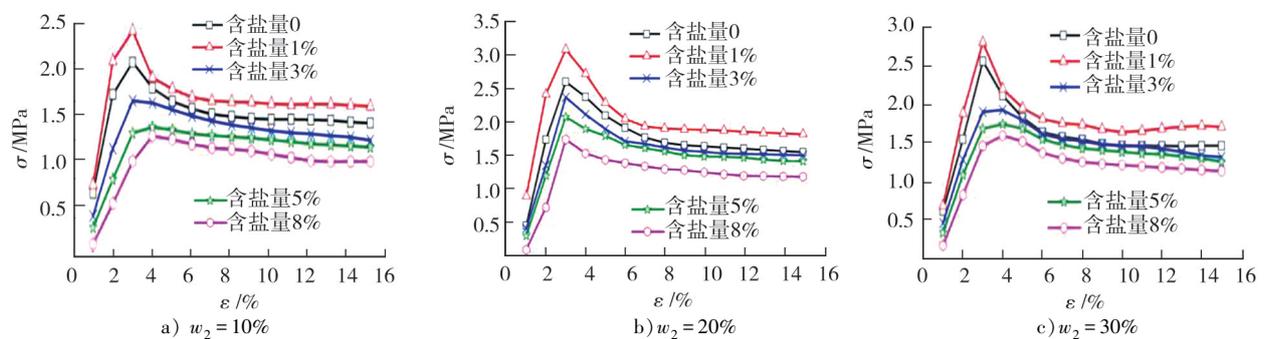


图2 含盐量不同时不同粉煤灰质量分数下污染土试样的应力-应变曲线

由图2可知:污染土试样的应力-应变曲线均随应变的增大先快速增大到峰值后减小并趋于稳定。含盐量较小时,污染土试样的破坏模式为应变软化型,说明粉煤灰的固化使试样具有一定脆性;含盐量较大时,应力过峰值后曲线变得较平缓;最大应力随含盐量的增大而减小。一般污染土试样的破坏应变为3%~4%,试验土样在破坏后应力持续下降,应力的降幅随应变的增大而变得缓慢,并逐渐趋于稳定。

含盐量为0~3%时,粉煤灰的质量分数由10%增至20%,试样的抗剪强度增大30%~106%,最大主应力差约为690 kPa。随粉煤灰质量分数的增大,活性 SiO_2 、 Al_2O_3 、油水混合物和石灰水化生成氢氧化钙、水化硅酸钙和水化铝酸钙,在土样内部生成网状骨架结构,在粉煤灰的固化下适当的含盐量能提高石油污染土试样的抗剪强度。

2.2.3 不同石油质量分数下污染土试样的应力-应变分布

石灰的质量分数为10%,粉煤灰的质量分数为20%,石油的质量分数 w_3 分别为4%、8%、12%,围压为200 kPa时,不同含盐量下污染土试样的应力-应变曲线如图3所示。

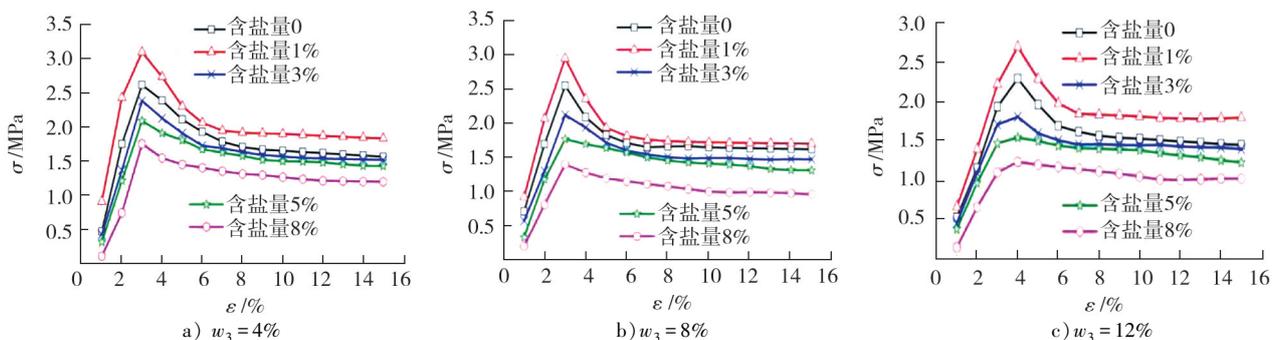


图3 含盐量不同时不同石油质量分数下污染土试样的应力-应变曲线

由图3可知:石油质量分数和含盐量较小时,污染土试样的应力-应变曲线均为先快速增大到峰值后

缓慢减小,土样的破坏模式为应变软化型,说明污染土试样具有一定脆性。随石油质量分数及含盐量的增大,峰值点变得不明显,污染土试样石油的质量分数为12%、含盐量为8%时,主应力应变呈硬化型,试样的破坏形式变为塑性破坏。石油质量分数和含盐量较高的土样应寻求更合适的固化材料配比。

2.3 不同含盐量下污染土试样的破坏形态分析

含盐量 w_4 分别为 0%、1%、3%、5%、8%,石油、石灰、粉煤灰的质量分数分别为 4%、10%、20%,围压为 200 kPa 时试样的破坏形态如图 4 所示。由图 4 可知:含盐量较小时,多数试样呈人字形脆性破坏,试样的抗剪强度较大,孔隙水中溶解的离子浓度变高,颗粒吸附的结合水变少,颗粒间的相互运动阻力变大,摩擦力较大。随含盐量的增大,试样的盐胀作用更严重,试样的破坏剪切面周围产生许多微小裂纹。含盐量为 8% 时,试样的破坏未产生主剪切面,多数为不规则斜裂缝并伴随微小裂缝。



图 4 不同含盐量下污染土试样的破坏形态

石灰的质量分数 w_1 分别为 8%、10%、12%,含盐量为 1%,石油、粉煤灰的质量分数分别为 4%、20%,围压为 200 kPa 的试样的破坏形态如图 5 所示。粉煤灰的质量分数 w_2 分别为 10%、20%、30%,含盐量为 1%,石油、石灰的质量分数分别为 4%、10%,围压为 200 kPa 的土样的破坏形态如图 6 所示。



图 5 不同石灰质量分数下污染土试样的破坏情况

图 6 不同粉煤灰质量分数下污染土试样的破坏形态

由图 5 可知:试样多数呈 V 字形破坏,即在主剪切破坏面破坏的同时,因剪切破坏时的连锁反应,衍生 1 条次破坏剪切面,试样的破坏过程为脆性变形。石灰对试样的抗剪强度提升较明显,原因是石灰遇水生成腐蚀玻璃体的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,释放活性 CaO 、 SiO_2 ,生成水化硅酸钙、水化硅酸铝。由图 6 可知:粉煤灰的质量分数较小时,破坏形态为中部鼓胀伴有少量裂缝;粉煤灰适量时,多数破坏形态为 V 字形,剪切破坏面较明显,试样的抗剪强度最大。试样的抗剪强度提高原因是具有一定活性的粉煤灰细颗粒通过分子间吸引和化学键发生强结合,吸附能力增强,抗剪强度增大。粉煤灰过量时,试样出现较多竖向裂缝及细小裂缝,裂缝间出现剥落、起皮现象,完整性较差,试样的抗剪强度较差,原因是过量的粉煤灰不能和石灰充分反应,土样内部的孔隙率增大,密实度减小,固化土的抗剪强度减小。

石油的质量分数 w_3 为 0%、4%、8%、12%,含盐量为 1%,石灰、粉煤灰的质量分数分别为 10%、20%,围

压为 200 kPa 的土样的破坏形态如图 7 所示。由图 7 可知:素土的破坏形态为中部鼓胀,无明显裂缝,抗变形能力极差,抗剪强度极低。石油的质量分数较小时,试样的破坏形态表现为主剪切面斜向裂缝,试样的抗剪强度较大,原因是土样的内部颗粒排布紧密,石灰粉煤灰也使试样更密实,破坏面符合库伦公式。随石油质量分数的增大,试样的薄弱面增多,破坏形态呈 V 形,主裂缝周围伴随细小裂缝,土样中的水化产物减少,混合物间的结合力较弱,土颗粒表面的油膜作用使试样的摩擦力减小,试样的剪切破坏面增多。

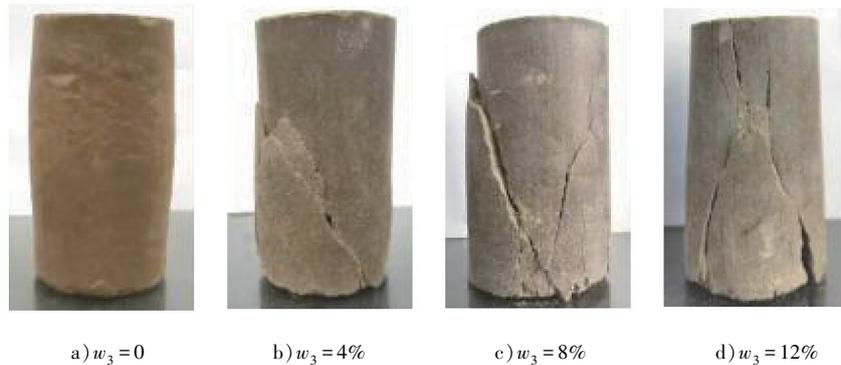


图 7 不同石油质量分数下污染土试样的破坏形态

结合试样的应力-应变曲线和破坏形态分析,污染土在固化材料最优状态时,试样的抗剪强度最大,呈脆性破坏且抗变形能力较小。固化材料超过临界状态时,试样的抗剪强度逐渐变小,抗变形能力逐渐变大;当含盐量小于临界点时,试样的破坏呈脆性破坏;含盐量大于临界点时,随含盐量的增大,试样的抗剪强度逐渐减小,抗变形能力逐渐增强,同时试样的脆性降低、塑性增强,呈弱脆性并伴随微小裂缝。

2.4 微观结构分析

土样的微观特征是决定其工程特性的本质因素,可在微观层面直观反映其力学特性的演变机制,有助于解释含盐量对土样结构的影响机理。以不同含盐量的污染土为研究对象,通过扫描电镜试验观察土颗粒的形状、大小和颗粒单元体间的排列、接触方式,以及固化产物的胶结形式、填充形态等,为宏观力学性质变化提供科学的理论依据。不同含盐量下污染土的微结构扫描电镜照片如图 8 所示。

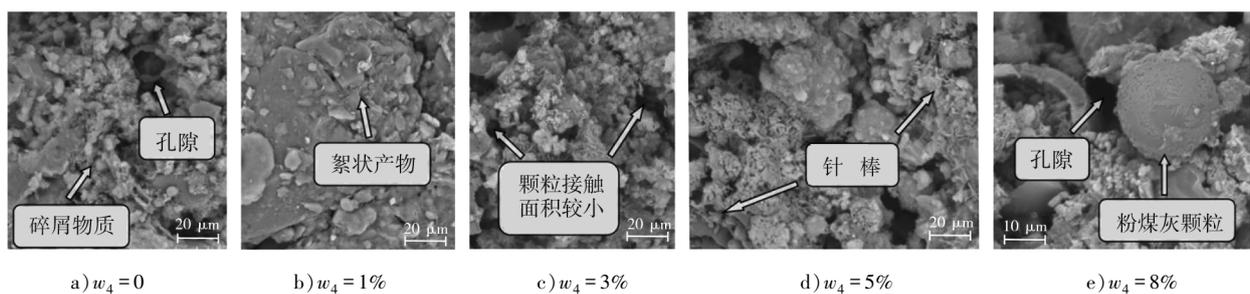


图 8 不同含盐量下污染土微结构扫描电镜照片

如图 8a) 所示,含盐量为 0 时,土样碎屑物质较多,土颗粒间存在较大空洞,颗粒的排列也较松散,大多为点点、点面接触形式,土颗粒空隙间主要为石灰、粉煤灰与石油结合生成的絮状产物,土样的力学性能主要受固化材料的影响。如图 8b) 所示,含盐量为 1% 时,土样中碎屑物质较少,氯盐结晶逐渐析出,结晶体与石油、石灰、粉煤灰反应生成的纤维及絮状物紧密联结,土样空隙较小,土颗粒排列非常紧密,形成较稳定的联结,说明含盐量为 1% 时,结晶后存在氯盐,土颗粒间溶液的离子浓度和骨架作用影响污染土的整体力学性质,土样力学性能提升。如图 8c) ~ e) 所示,含盐量不小于 3% 时,土样中大块碎屑物质增多,土样中的氯盐大量结晶析出,土颗粒间出现层理性的针棒状结构,土样盐胀作用逐渐明显,土样空隙增大,颗粒间排列松散无序,根据土样微结构直观特征,含盐量不小于 3% 时,土颗粒间的过量氯盐结晶体

呈针棒状向四周挤压放射,间接导致土样内部颗粒间的空隙变大,减弱土样的力学性质。

3 结论

1) 含盐量相同时,石油污染盐渍土在不同的石灰、粉煤灰质量分数固化下存在临界点且抗剪强度最大;污染土的抗剪强度在含盐量为0~1%时增大,含盐量为1%~8%时持续减小。

2) 含盐量小于5%时,污染土的应力-应变曲线均存在上升阶段、峰值点和下降阶段,破坏模式为应变软化型,污染土有一定脆性,抗变形能力较弱;含盐量不小于5%时,试样的脆性减弱,抗变形能力增强。含盐量较低时,多数土样加载围压后呈人字形脆性破坏,试样的抗剪强度较大。随含盐量的增大,试样的盐胀作用更严重,试样的破坏剪切面周围产生许多微小裂纹,大大降低固化土的抗剪强度。

3) 从不同含盐量下土样微观结构的照片可知,污染土微结构特征和宏观土样抗剪强度指标的变化规律一致。

参考文献:

- [1] 席人双. 含盐量对盐渍土力学特性的影响[J]. 铁道建筑, 2016(10): 86-88.
- [2] 张飞, 胡小庆, 刘亚薇, 等. 含盐量对硫酸盐渍土抗剪强度影响试验研究[J]. 铁道建筑, 2014(6): 162-164.
- [3] 陈炜韬, 王明年, 王鹰, 等. 含盐量及含水量对氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 1-5.
- [4] 吕前辉, 柴寿喜, 李敏. 多因素影响下石灰固化盐渍土抗剪性能的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 89-95.
- [5] 朱学坤, 王富强, 李央, 等. 硫酸盐渍土抗剪特性的单因素影响规律研究[J]. 湖南交通科技, 2019, 45(4): 1-6.
- [6] KARAMALIDIS A K, VOUDRIAS E A. Cement-based stabilization/solidification of oil refinery sludge: leaching behavior of alkanes and PAHs[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 148(1/2): 122-135.
- [7] BARBOSA R, LAPA N, LOPES H, et al. Stabilization/solidification of fly ashes and concrete production from bottom and circulating ashes produced in a power plant working under mono and co-combustion conditions[J]. Waste Management, 2011, 31(9/10): 2009-2019.
- [8] CUISINIER O, BORGNE T L, DENELEE D, et al. Quantification of the effects of nitrates, phosphates and chlorides on soil stabilization with lime and cement[J]. Engineering Geology, 2011, 117(3/4): 229-235.
- [9] DU Y J, JIANG N J, SHEN S L, et al. Experimental investigation of influence of acid rain on leaching and hydraulic characteristics of cement-based solidified/stabilized lead contaminated clay[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 225(10): 195-201.
- [10] 李敏, 王宸, 杜红普, 等. 石灰粉煤灰联合固化石油污染滨海盐渍土的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3578-3586.
- [11] 李敏, 杜红普, 李达. 多场耦合作用下粉煤灰对石油的吸附性能及石灰粉煤灰固化石油污染土的可行性[J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(4): 78-82.
- [12] 何中江, 柴寿喜, 李敏. 干湿循环对石灰粉煤灰固化石油污染土抗压强度的影响[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 438-444.
- [13] 何中江, 柴寿喜, 李敏. 冻融循环对二灰固化石油污染土抗压特性的影响[J]. 天津城建大学学报, 2017, 23(6): 423-427.
- [14] 何小红. 长春地区柴油污染土性质及水泥固化效果研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [15] 张恒, 黄俊光, 李伟科, 等. 电渗-氯化钙对硫酸钠盐渍土变形的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 53-60.
- [16] 侯兆领. 压实度及含水率对盐渍土冻胀规律影响试验研究[J]. 公路, 2023, 68(3): 316-320.
- [17] 祝瑜, 褚琳琳, 朱文东, 等. 滨海盐渍土土壤物化性质与水动力学性质变异[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 379-386.
- [18] 周纯秀, 崔洪海, 张中丽, 等. 改良碳酸盐渍土路基填料的力学性质[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 93-100.

- [19] 王选仓,李振霞,薛晖. 石灰粉煤灰稳定低液限粉土底基层性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2007,40(2): 88-91.
- [20] 夏琼,杨有海,耿焯. 粉煤灰与石灰、水泥改良黄土填料的试验研究[J]. 兰州交通大学学报,2008,27(3):40-43.
- [21] 张志权,石坚,张平印. 二灰黄土强度特性试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2006,32(5):126-129.
- [22] RAHMAN Z, HAMZAH U, TAHA M R, et al. Influence of oil contamination on geotechnical properties of basaltic residual soil[J]. American Journal of Applied Sciences, 2010, 7(7):954-961.
- [23] 陈炜韬,王明年,王鹰,等. 含盐量及含水量对氯盐渍土抗剪强度参数的影响[J]. 中国铁道科学,2006,27(4): 1-5.

Experimental research on shear strength performance of lime-fly ash solidified petroleum-contaminated soil with different salt contents

HAO Zhonghua, NIU Wanyu, AN Peilei*, YAN Shaomin

Tianjin Transportation Science Research Institute, Tianjin 300300, China

Abstract: To study the shear characteristics of petroleum-contaminated soil, using coastal saline soil with different salt contents as the research object, mechanical strength performance tests and microscopic analysis are conducted on stone-stabilized petroleum-contaminated soil with lime and fly ash. The research results indicate that with increasing salt content, the cohesion and internal friction angle of lime-fly ash stabilized petroleum-contaminated soil (referred to as contaminated soil) first increase and then decrease. At the same salt content, the cohesion and internal friction angle of contaminated soil first increase and then decrease with increasing mass fractions of lime and fly ash, while decreasing with increasing oil mass fraction. As the salt content is 1% with oil, fly ash, and lime mass fractions of 4%, 20%, and 10% respectively, the cohesion and internal friction angle of contaminated soil are maximized. The stress-strain curve of contaminated soil increases and then decreases and stabilizes under different lime, fly ash, and oil mass fractions. The microstructural characteristics of contaminated soil under different salt contents are consistent with the variation of macroscopic shear strength parameters.

Keywords: petroleum-contaminated soil; lime-fly ash stabilized soil; coastal saline soil; shear strength; microstructure

(责任编辑:王惠)