

取代真空联合堆载预压膜上砂保护垫层的 流态固化土研究

武亚军¹, 张海强¹, 占嘉城¹, 骆嘉成²

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 浙江省第十一地质大队, 浙江 温州 325006)

摘要: 真空联合堆载预压地基处理工程中需要砂保护垫层, 许多地区砂源紧张, 因此开展研究利用淤泥质渣土配制流态固化土用于替代预压膜上砂保护垫层. 通过进行大量的无侧限抗压强度和流动度等实验, 探究淤泥质渣土含水率、固化剂掺量和外加剂等因素对配制流态固化土流动度和无侧限抗压强度的影响. 结果表明: 提高土体含水率或添加外加剂均可有效改善流动度, 其中外加剂改善效果更显著; 固化剂掺量是影响无侧限抗压强度的最主要因素, 添加外加剂会降低无侧限抗压强度; 对于含水率120%~140%的土体, 不需要外加剂, 固化剂掺量为土体质量的5%~7%时配制的流态固化土可以替代砂保护垫层; 对于含水率80%~100%的土体, 在5%~7%固化剂掺量下需添加一定的外加剂.

关键词: 流态固化土; 响应面法; 淤泥质渣土; 减水剂; 流动度; 砂保护垫层

中图分类号: TU 44 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)10-1494-10

Study on Replacement of Fluidized Solidified Soil with Sand Protective Cushion on Vacuum Combined Surcharge Preloading Membranes

WU Ya-jun¹, ZHANG Hai-qiang¹, ZHAN Jia-cheng¹, LUO Jia-cheng²

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. The 11th Geology Team of Zhejiang Province, Wenzhou 325006, China. Corresponding author: WU Ya-jun, E-mail: wyjldz@shu.edu.cn)

Abstract: The sand protective cushion is required in vacuum combined surcharge preloading foundation treatment project and the sand source is abnormally tight in many areas. The research on using mucky fluidized solidified soil to replace protective cushion on vacuum combined surcharge preloading membranes is carried out. Numerous tests on unconfined compressive strength test and fluidity test are conducted to investigate the effects of parameters such as water content, solidifying agent dosage, and admixture dosing on the fluidity and strength of the preparation of fluidized solidified soil. The results show that increasing the water content of mucky residue or adding admixture can effectively improve the fluidity, and the admixture is more significant. The amount of solidifying agent is the most crucial factor to influence the strength, and increasing the admixture will reduce the strength. In addition, for the mucky residue with the water content of 120%~140%, there is no need for admixture. When the amount of solidifying agent is 5%~7% of the mass of the mucky residue, it can replace the sand cushion; for the mucky residue with the water content of 80%~100%, adding certain admixture based on 5%~7% solidifying agent can also meet the requirements of the protective cushion.

Key words: fluidized solidified soil; response surface methodology; mucky residue; water reducer; fluidity; sand protective cushion

在城市地基基础施工和地下空间开发建设过程中会产生大量的工程渣土,据统计我国渣土年产生量约为 20 亿 t^[1]。渣土成分复杂,在废弃泥土、泥浆中往往伴有少量散落的砂浆、混凝土碎块等建筑废弃物,难以直接利用^[2];另外,渣土在运输、堆放处置中也会对周边环境造成严重的影响和破坏^[3]。目前渣土最主要的处治方式是填埋,但是这种方式存在占用大量土地、污染周边环境、填埋场运营不规范、安全隐患大等一系列问题^[4-5]。而且随着渣土量的逐年增加,许多渣土填埋场地也出现了饱和,无法继续填埋^[1]。因此,如何对渣土进行安全、环保的资源化处理尤为重要。

为实现渣土的资源化利用,众多学者针对渣土的开发利用开展了一系列的研究工作,如做工程内部消纳处理^[6],制备可再生材料^[7-8],对渣土作改性处理^[9]。然而,我国渣土成分复杂,区域差异大,渣土资源化存在依赖高性能添加剂、处理成本高、技术复杂等弊端,在实际工程中难以大规模使用^[10]。

真空联合堆载预压法因其施工工艺简单、造价便宜、处理效果好等优势在地基处理领域受到广泛的关注^[11]。但是该工艺中密封膜的砂保护垫层人工铺设成本高、砂源稀缺紧张等问题^[12-13],严重影响着真空联合堆载预压法的推广使用。

近些年来,流态固化土作为新型土工材料受到了广泛关注^[14-15]。流态固化土是一种兼具流动度和强度的材料,在配制完成后具有流动性,可在狭隘空间自行密实,经过一段时间的养护,该材料会达到一定的强度。其优势在于土体可以就地取材,固化剂可以使用工业废弃物,而且能够大幅度减少人工使用量。在配制流态固化土时,首先需要解决如何改善固化土的流动性。Li 等^[16]、Xu 等^[17]研究减水剂、絮凝剂对土体流动度的作用效果,结果表明,减水剂和氯化铁、壳聚糖等絮凝剂可通过降低静电斥力等作用提高土体流动度。基于上述流动度的改善研究,综合考虑配制同时满足流动度和强度要求的流态固化土。朱伟等^[15]、朱瑜星等^[18]通过室内实验研究渣土流动度和强度的变化规律,研究发现,水固质量比和灰砂质量比是配制流态固化土的重要指标参数,当水固质量比为 0.5~0.63、灰砂质量比为 0.15 时,配制的流态固化土能够满足设计要求;另外,该配比也成功应用于现场管网回填工程施工中。Wu 等^[19]研究使用配制流态固化土用于浇筑人工岛,选取无侧限抗压强度和流动度作为主要质量指

标,通过调整土体含水率和水泥掺量来满足无侧限抗压强度和流动度要求,并成功将流态固化土应用于浇筑工程中。综上所述,配制流态固化土的主要材料有固化剂、适量水以及外加剂,然而综合考量以上多因素对强度和流动度的影响研究很少,大多仅考虑单一因素影响或考虑对无侧限抗压强度或流动度某一指标的影响;另外,研究配制流态固化土的原材料大多是北方的砂土或粉土,而对于细颗粒土的研究和推广很少,尤其是温州的淤泥质渣土,具有无侧限抗压强度低、流动性差和黏粒含量高等不良性质,开展流态固化土资源化利用的难度较大^[6],因此能否将工程渣土成功制配为流态固化土,是一个值得研究的问题。

本文以温州淤泥质渣土为对象,通过大量的流动度、无侧限抗压强度等室内实验,以流动度、无侧限抗压强度为指标,利用响应面法综合考虑固化剂掺量(该掺量为占渣土总质量的百分比)、外加剂掺量(该掺量为占渣土总质量的百分比)、土体含水率(该值为质量分数)等多因素的交互影响,并结合扫描电镜实验研究添加固化剂、外加剂对土体的调质机理,探究温州渣土制配流态固化土替代真空联合堆载预压膜上砂保护垫层的可行性,以期为渣土资源化利用提供一条可行途径。

1 渣土基本特性及实验方案

1.1 渣土基本特性

渣土试样取自温州市龙湾区某工地地下室基坑,外观呈灰色、流塑状,如图 1 所示,是温州地区典型的淤泥,基本物理性质见表 1。本实验所用固化剂由浙江省第十一地质大队提供,固化剂配方及化学成分参见文献[20]。

1.2 实验方案

1.2.1 外加剂

用外加剂为某种混凝土高效减水剂,主要功能是在保持混凝土坍落度的同时,能够大幅减少拌合用水量^[21]。

1.2.2 流动度实验

流动度实验用于测定淤泥质渣土流动度,定量反映渣土的流动性能。由于淤泥质渣土黏粒含量高,达到所需流动要求要有较高的含水率,而常规测量流动度的坍落度法更适用于低含水率淤泥,难以精确地评价高含水率土^[17]。因此本研究选取日本建设省 JHS A313—1992 规范的流动

度法^[22],实验装置如图 1b 所示,具体实验步骤详见文献[14].

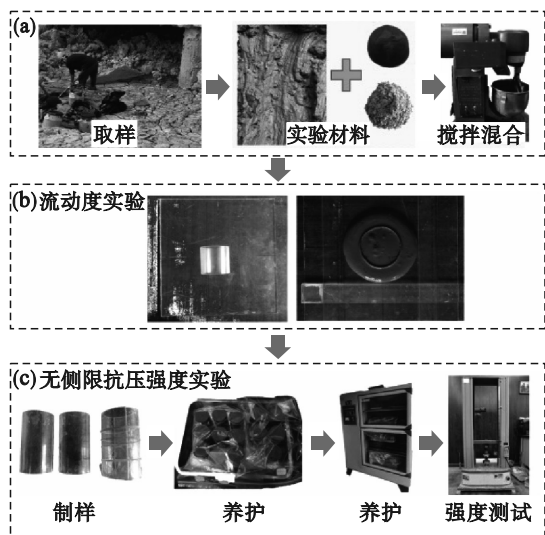


图 1 实验流程图

Fig. 1 Flow diagram of experiment

表 1 淤泥质渣土基本物理性质

含水率	液限	塑限	塑性	密度	有机质质量分数
%	%	%	指数	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	%
64.3	42.5	20.9	21.6	1.62	3.2

日本建设省 JHS A313—1992 规范提出流动度需达到 $(18\pm 2)\text{cm}$,因此研究配制流态固化土流动度至少应大于 16cm ^[18].考虑实验测量设备的精度限制,当流动度小于 8cm 时,采用实验规范 8cm 圆筒难以准确测得实际流动度,而且该数值范围内的流动度也不能用于指导实际工程.因此,为保证数据的完整性,对于流动度小于 8cm 的数据,均取最小值 8cm .

1.2.3 无侧限抗压强度实验

流态固化土的强度采用无侧限抗压强度表征,考虑到处理后的渣土呈流塑状态,实验模具采用自制的内径为 39.1mm ,高为 80mm 的有机玻璃模具,其制样和养护过程详见图 1c.实验样品为 3 个平行样,设计养护龄期分别为 3,7,14,28 d.

1.2.4 扫描电镜实验

土体的微观结构是影响土体工程性质的重要因素,土体微观结构的变化能够反映土体受外界影响引起的变化.因此,开展扫描电镜实验研究添加固化剂、外加剂以及不同养护龄期对土体微观结构的影响,从微观角度探究固化剂、外加剂引起土体流动度和无侧限抗压强度变化的作

用机理.实验设备为 IT800 扫描电镜,样品在冷冻干燥后使用高真空离子溅射镀膜仪 (EM ACE-600) 作喷金处理.

1.3 分析方法

目前在探究配制流态固化土的影响因素时主要采用单因素实验法或正交实验法分析,该分析方法虽然能够考虑单因素以及多因素的影响,但是不能探明多因素之间的交互影响作用.响应面法则能够充分考虑系统误差、各因素之间的交互作用对实验结果的影响,弥补了上述实验方法的不足^[23-24].该方法凭借多变量交互分析以及分析预测结果精确等优势在化工、生物合成、建筑等领域应用广泛,如 Kong 等^[25]应用响应面法研究发现氧化镁和脱硫石膏、脱硫石膏和钢渣对无侧限抗压强度的影响存在交互作用;Wang 等^[26]使用响应面法研究比土体养护 28 d 的无侧限抗压强度实验值和预测值,表明所建立的预测模型具有较高的准确性. Jin 等^[27]利用响应面法中方差分析和因子水平趋势分析确定配制固化剂的最佳配比.

为探明含水率、固化剂掺量以及外加剂掺量等多个因素对淤泥质渣土配制流态固化土的影响,本文分别以淤泥质渣土的流动度以及无侧限抗压强度为响应值,使用响应面优化软件 (Design Expert 13.0),设计多因素三水平响应面优化实验方案,通过对以上多配比的交互影响分析,综合研究多重因素影响下流态固化土的制配工艺.

2 淤泥质流态固化土流动特性

2.1 流动性

流动性是配制流态固化土的重要指标,流动度越大,对应流动性越好.淤泥质渣土的含水率约为 64.3% ,流动性极差,因此需要通过提高含水率、添加外加剂等方式提高流动度.另外,为探讨提高含水率以及添加外加剂两种不同方式对配制流态固化土的影响,对于没有添加外加剂,仅提高含水率的土体命名为无添加淤泥质渣土;经外加剂调质的土体命名为外加剂调质淤泥质渣土.

2.1.1 无添加淤泥质渣土流动度变化

不同含水率渣土的流动度变化如图 2 所示.可以看出,未经固化剂处理的渣土流动度随含水率提高呈线性变化,且作用效果明显,每提高 1% 含水率,对应流动度增大约 0.84cm .对于经固化

剂处理后的渣土,每提高1%含水率,对应流动度增大约0.4 cm,提升量相较未处理的渣土约减少一半;另外,流动度随着含水率的提高而逐渐增大,这主要是因为过多的水会减小土颗粒之间的黏结力,进而提高流动度^[15].当含水率超过90%,

流动度随含水率呈线性变化,存在临界含水率作为流动度随含水率增长的转折点,该含水率约为2倍土样的液限,这一结论与黄英豪等^[28]的结论相符.随着固化剂掺量增加,流动度随含水率提高对应增加量逐渐减小.

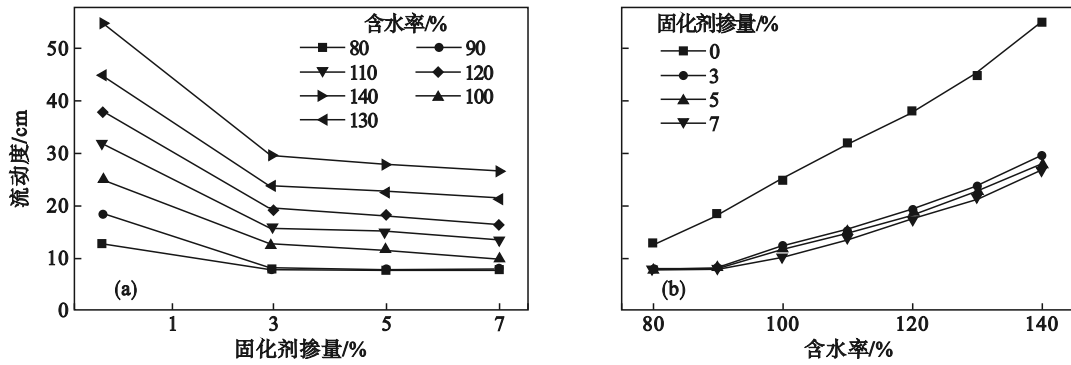


图2 无添加淤泥质渣土流动度变化曲线

Fig. 2 Variation curves of fluidity of non-admixture mucky residue

(a)—固化剂掺量对流动度的影响曲线; (b)—含水率对流动度的影响曲线.

结合流动度随固化剂掺量变化曲线,如图2a所示,考虑含水率90%以上的土体的流动度发现,固化剂导致流动度降低量约占原样渣土流动度的52%~60%,固化剂掺量越多,对应降低量越大,但是随着含水率越高,高固化剂掺量对流动度降低量逐渐减小,少量固化剂对流动度的降低效果随含水率更加明显,主要原因是固化剂对于淤泥质渣土黏滞性的影响主要发生在固化剂低掺量状态下^[18,28].

2.1.2 外加剂调质淤泥质渣土流动度变化

当添加外加剂后,需考虑含水率、固化剂掺量以及外加剂掺量三因素对流动度的综合影响,

传统的绘图难以直观评价综合影响,因此将采用三因素三水平响应面优化实验,响应面曲线如图3所示,求得回归方程为

$$X = 12.08 + 5.46A - 0.6624B + 7.92C + AB + 3.18AC - 0.4514BC + 4.2A^2 - 0.9B^2 + 3.09C^2. \quad (1)$$

式中: X 为流动度,cm; A 为含水率,%; B 为固化剂掺量,%; C 为外加剂掺量,%.根据实验结果,该曲线显著性检验值 $P < 0.01\%$,相关系数 $R^2 = 0.97$,调整相关系数 $R_a^2 = 0.94$,这意味着该模型关系显著,且94%的数据可用该模拟方程分析解释^[25].根据拟合结果可以看出,3个因素对流动性的影响大小顺序依次为:外加剂掺量>含水率>固化剂掺量.

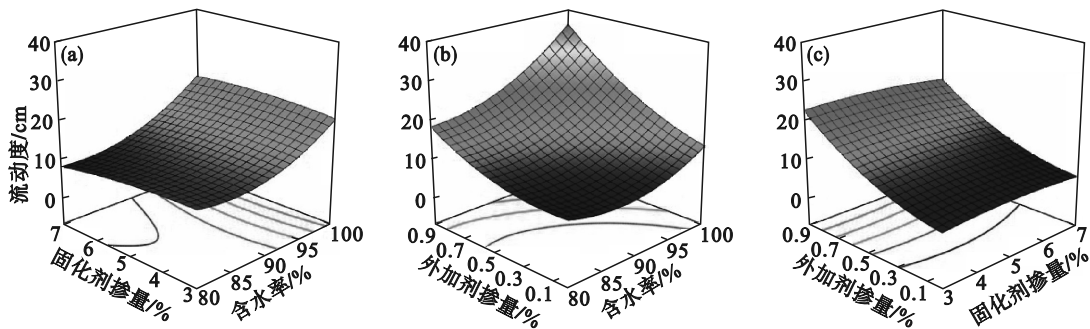


图3 外加剂调质淤泥质渣土流动度变化曲线

Fig. 3 Fluidity variation curves of mucky residue conditioned with admixture

(a)—固化剂掺量与含水率对流动度的影响曲线; (b)—含水率与外加剂掺量对流动度的影响曲线; (c)—固化剂掺量与外加剂掺量对流动度的影响曲线.

通过调整含水率与外加剂掺量均可有效改善流动度,如图3b所示,随着外加剂掺量的增多,

增幅效果愈加明显,这是由于外加剂的静电斥力以及空间位阻作用效果,减水剂分子吸附在固化

剂颗粒表面,使得固化剂颗粒分散开,同时释放部分游离水,进而显著改善流动性^[21, 29].当土体含水率在80%时,外加剂添加至0.9%,流动度可提升约1.6倍;当含水率为100%时,对应提升约为2.2倍,含水率对土体流动性的改善效果可在外加剂作用下得以加强.另外,考虑固化剂以及外加剂的影响效果,如图3c所示,固化剂的固化效果随外加剂掺量增加逐渐降低,当外加剂掺量超0.5%时,可弥补固化剂降低效果.

2.2 扫描电镜实验

在流动度实验完成后,选取部分配比调质土样使用扫描电子显微镜观察土体添加固化剂、外加剂前后的微观结构变化,其中土样1为淤泥质渣土原样,土体90%含水率加5%固化剂的土样为土样2和土样3为土体90%含水率的土体加5%固化剂基础上分别添加0.5%外加剂和0.9%外加剂.扫描图像如图4所示.

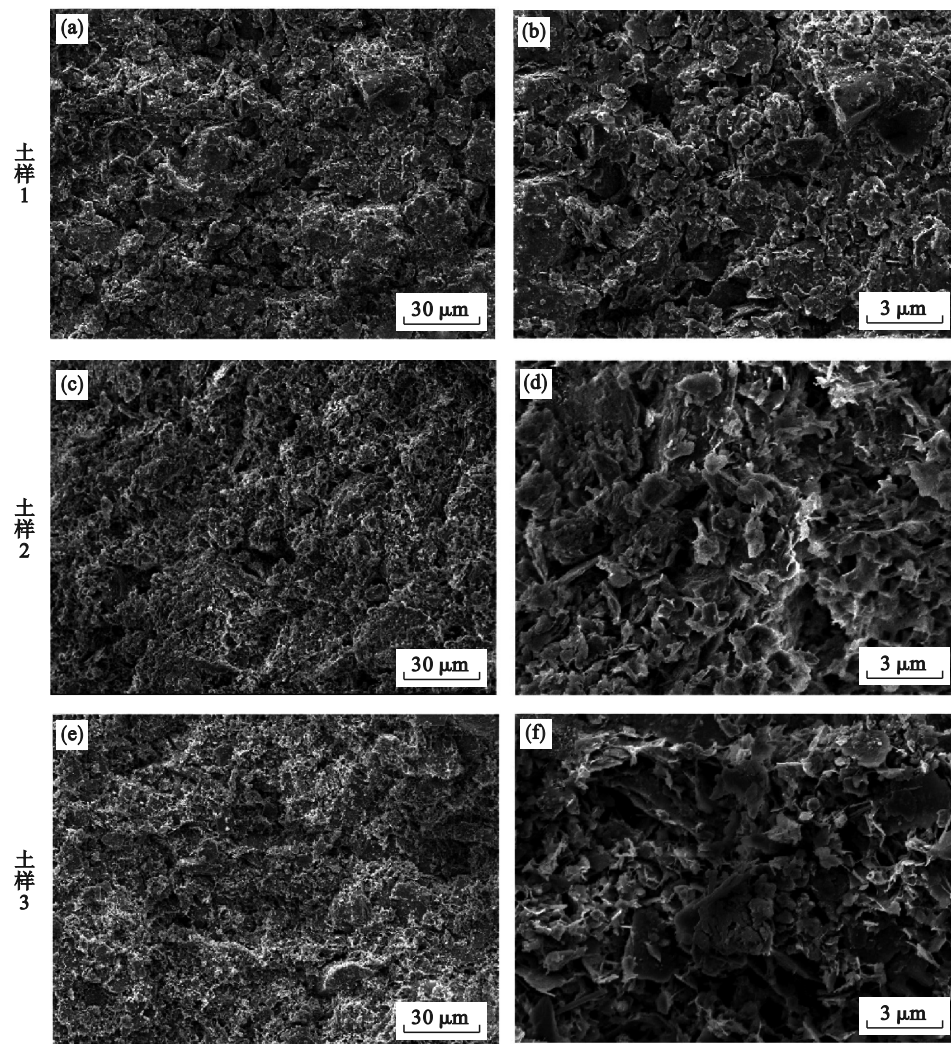


图4 淤泥质渣土经固化剂、外加剂处理前后的扫描电镜照片

Fig. 4 Scanning electron micrographs of the mucky residue before and after treatment with solidifying agent and admixture

如图4a和图4b所示,原样土体颗粒主要以片状结构为主,结构较为松散,孔隙明显,且大孔隙较多,该结构是温州地区典型的淤泥质渣土特性^[30].在加入固化剂后,土体孔隙明显减少,结构更加致密,如图4c和图4d,这是由于固化剂与土体发生水化反应生成的凝胶体填充了土体颗粒孔隙,并胶结、包裹土颗粒表面,形成一系列的结

合体,颗粒间联结更加紧密,宏观表现为土体流动度大幅降低.在添加固化剂的基础上继续添加少量外加剂,土体微观结构变化如图4e和图4f所示,此时土体微观结构丰富,出现了部分针状结构,而且与添加固化剂水化反应生成的凝胶体形成点面连接,结构间相互搭接,使得土体结构均匀,宏观上表现为土体流动度明显提升.

3 淤泥质流态固化土无侧限抗压强度特性

3.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度随养护龄期、含水率、固化剂掺量以及外加剂掺量的变化曲线如图 5 和图 6 所示.

3.1.1 无添加淤泥质渣土无侧限抗压强度变化

对于无添加淤泥质渣土无侧限抗压强度,需要考虑含水率、固化剂掺量以及养护龄期三因素的综合影响,因此采用三因素三水平响应面优化

实验,响应面曲线如图 5 所示.回归方程为

$$Y=205.71-125.08A+147.41B+57.28D-95AB-30.61AD+10.15BD. \quad (2)$$

式中:Y为无侧限抗压强度,kPa;D为养护龄期,d. $P<0.01\%$, $R^2=0.92$, $R_A^2=0.87$.根据实验结果,固化剂掺量对无侧限抗压强度影响最大,其次是含水率,最小的是养护龄期.

渣土无侧限抗压强度来源于固化剂的固化作用,随着固化剂掺量增加,无侧限抗压强度成倍增加.具体来看,以 7 d 养护龄期为例,如图 5a 所示,当土体含水率一定时,无侧限抗压强度随

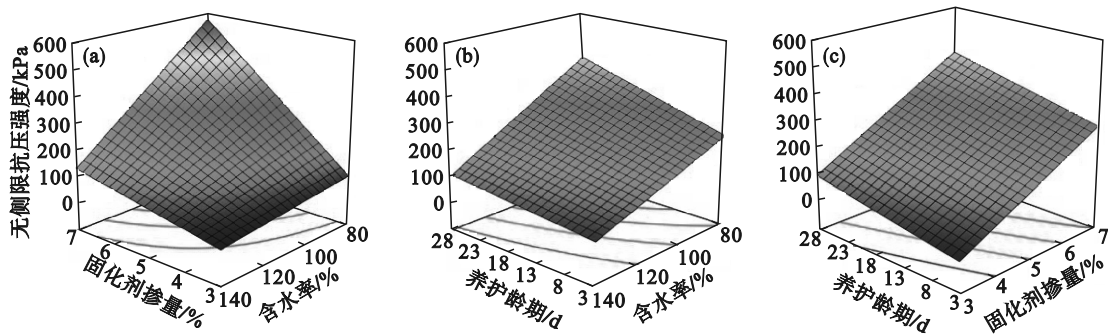


图 5 无添加淤泥质渣土无侧限抗压强度变化曲线

Fig. 5 Strength variation curves of non-admixture mucky residue

- (a)—固化剂掺量与含水率对无侧限抗压强度的影响;
- (b)—含水率与养护龄期对无侧限抗压强度的影响;
- (c)—固化剂掺量与养护龄期对无侧限抗压强度的影响.

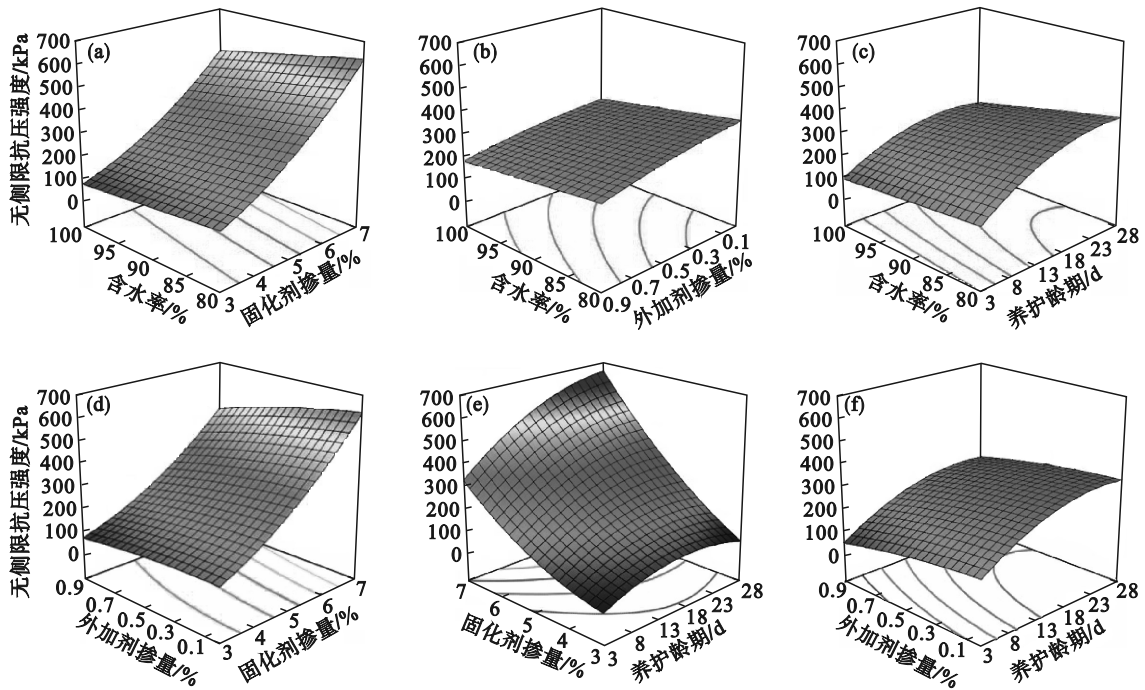


图 6 外加剂调质淤泥质渣土无侧限抗压强度变化曲线

Fig. 6 Strength variation curves of WR-conditioned mucky residue

- (a)—固化剂掺量与含水率对无侧限抗压强度的影响;
- (b)—含水率与外加剂掺量对无侧限抗压强度的影响;
- (c)—含水率与养护龄期对无侧限抗压强度的影响;
- (d)—固化剂掺量与外加剂掺量对无侧限抗压强度的影响;
- (e)—固化剂掺量与养护龄期对无侧限抗压强度的影响;
- (f)—外加剂掺量与养护龄期对无侧限抗压强度的影响.

固化剂掺量近似线性增加,土体含水率 80% 对应增长约 505 kPa,增长约 6.7 倍;含水率 100% 增长 315 kPa,增长约 6.8 倍;含水率为 140% 时,增长 161 kPa,约 5.9 倍,含水率越高,对应无侧限抗压强度越小,固化剂固化效果减弱.土体无侧限抗压强度也随着含水率增加发生明显下降,且土体含水率越高,无侧限抗压强度随固化剂掺量增加降低幅度更大,这是由于高含水率渣土中多余的水会限制固化剂的固化作用,固化剂掺量越多,影响越严重^[31].

3.1.2 外加剂调质淤泥质渣土无侧限抗压强度变化

当添加外加剂时,需要考虑含水率、固化剂掺量、养护龄期以及外加剂掺量四因素的影响,采用四因素三水平响应面优化实验,响应面曲线如图 6 所示,回归方程为

$$Y = 279.02 - 43.76A + 229.5B - 47.87C + 93.08D - 17AB + 8.53AC - 19.21AD - 24.71BC + 68.95BD + 2.3CD - 0.204A^2 + 54.8B^2 - 13.78C^2 - 68.05D^2. \quad (3)$$

根据实验结果, $P < 0.01$, $R^2 = 0.99$, $R_A^2 = 0.99$, 固化剂掺量仍为最大的影响因素,其次是养护龄期,接着是外加剂掺量,含水率.

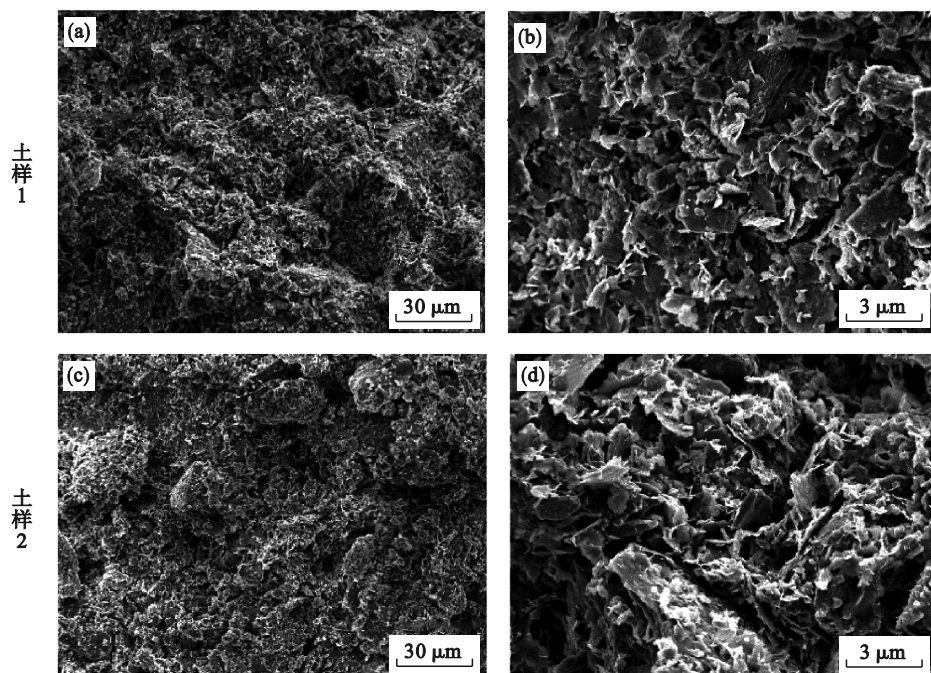
当外加剂掺量不变时,研究固化剂掺量、含水率以及养护龄期对无侧限抗压强度的影响,如图 6a、图 6c 和图 6e 所示.以 7 d 养护龄期为例,如图 6a 所示,当土体含水率一定时,土体无侧限抗压强度随固化剂掺量不再是线性变化,含水率 80% 对应增加了约 422 kPa,增长约 9.4 倍,含水率

100% 对应增加了约 260 kPa,增长约 7.9 倍,变化规律与上述无添加状态基本一致,但是无侧限抗压强度增长率明显增大.随着含水率提高,土体无侧限抗压强度降低显著.养护龄期和固化剂的作用如图 6e 所示,土体无侧限抗压强度随固化剂掺量增长以及养护龄期的变化不再是线性分布,此时无侧限抗压强度随养护龄期增长缓慢,这是由于外加剂的存在,限制了固化剂的水化作用.

当外加剂掺量增加时,土体无侧限抗压强度逐渐减小,这是由于土体对外加剂的吸附阻碍了固化剂与土体的水化反应,进而导致土体无侧限抗压强度降低.外加剂与含水率、固化剂掺量以及养护龄期对无侧限抗压强度的交互影响如图 6b、图 6d 和图 6f 所示.具体来看,外加剂与含水率对无侧限抗压强度的影响如图 6b 所示,当外加剂掺量从 0.1% 增加至 0.9% 时,土体无侧限抗压强度降低,而随着含水率提高,土体强度降低越加明显.固化剂与外加剂的交互影响如图 6d 所示,外加剂会降低固化剂作用效果,且随着外加剂掺量增多,土体强度降低愈加明显.

3.2 扫描电镜实验

在测完养护 7 d 的土体无侧限抗压强度后,选取部分配比开展扫描电镜实验,研究添加外加剂、固化剂的土体在养护 7 d 后的微观结构变化,实验土样均为养护 7 d 的样品,其中土样 1 为 90% 含水率土体添加 5% 固化剂的样品,土样 2 和土样 3 为 90% 含水率土体添加 5% 固化剂后分别添加 0.5% 外加剂和 0.9% 外加剂.扫描图像如图 7 所示.



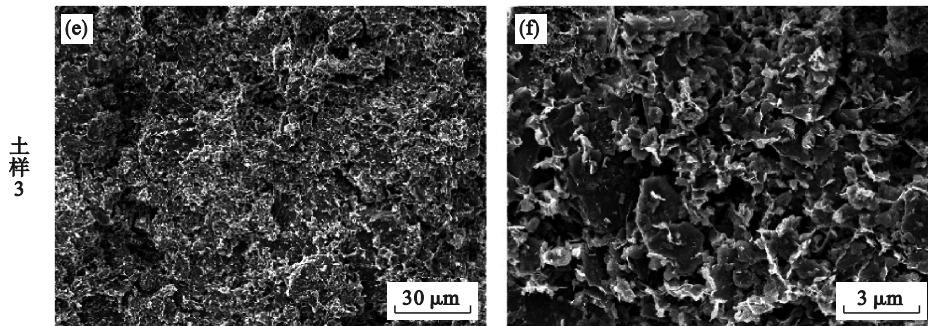


图7 固化剂、外加剂调质淤泥质渣土养护 7 d 的扫描电镜照片

Fig. 7 Scanning electron micrograph of the solidifying agent and admixture conditioned mucky residue curing for 7 days

如图 7a 和图 7b, 土体经养护 7 d 后, 添加固化剂的土体结构更加致密, 生成更多的凝胶体, 宏观上表现为土体无侧限抗压强度显著提高; 对于加入少量外加剂的土体, 如图 7c 和图 7d, 此时土体结构丰富, 既有凝胶体, 也存在针状结构, 但是相较于土样 1, 孔隙明显增多, 宏观表现为土体无侧限抗压强度降低; 随着外加剂的继续增多, 如图 7e 和图 7f, 胶凝体减少, 针状结构和孔隙明显增多, 土体结构较为分散, 宏观表现为土体无侧限抗压强度大幅度降低^[32].

4 流态固化土替代膜上砂保护垫层可行性讨论

4.1 真空联合堆载预压膜上砂保护垫层基本要求

真空联合堆载预压技术需要在密封膜上施加堆载, 为防止堆载对密封膜产生破坏, 一般堆载之前须先在膜上铺设土工布和砂垫层作为保护层. 铺设砂垫层的主要作用是保护真空预压工程中的密封膜, 确保真空预压施工不会受堆载影响. 砂保护垫层铺设厚度根据工程要求, 一般铺设 30~50 cm, 而且铺设需人工或人工半机械施工, 同样是确保堆载时真空膜不会被破坏^[11].

针对真空联合堆载预压膜上砂保护垫层铺设要求, 可以使用流态固化土替代膜上砂保护垫层. 一方面, 流态固化土中的土体原材料是当地工程渣土, 实现了渣土资源化利用, 节省用砂成本; 流态固化土自密实特性不会对密封膜产生破坏, 同时能够降低人工铺设成本. 对于制配流态固化土流动度的指标, Wu 等^[19]制配流态固化土浇筑人工岛时, 提出流动度要求为 9~12 cm; Kang 等^[33]制配流态固化土应用于回填材料, 提出流动

度应该控制在 10~15 cm; 朱伟等^[15]制配流态固化土用于回填, 浇筑流动度为 18.8~21.8 cm; 综合考虑上述流动度设置要求, 本文制配流态固化土流动度最小取 16 cm. 另一方面, 砂保护垫层经压实后, 具有一定的承载力, 承载无侧限抗压强度约为 100~150 kPa. 因此结合工程要求, 本文制配流态固化土设定 7 d 无侧限抗压强度达到 150 kPa.

4.2 流态固化土的流动特性

当仅通过提高含水率改善流动性时, 流动度随含水率增加呈线性分布, 随着固化剂的添加, 提升效果也随之降低, 每提升 1% 含水率固化土流动度能提高约 0.4 cm. 针对制配流态固化土流动度要求, 含水率在 120%~140%, 固化剂掺量为 3%~7% 时均可满足要求.

对于外加剂调质的土体, 外加剂掺量是影响流动度的最主要因素, 外加剂掺量超 0.5% 时, 基本可弥补因固化剂固化而降低的效果. 当外加剂掺量为 0.9%, 含水率在 80%~100% 时, 以及外加剂掺量为 0.5%~0.9%, 含水率为 100% 时, 均可满足流动度要求. 对比这两种改善流动度的方式, 添加外加剂作用效果明显.

4.3 流态固化土的无侧限抗压强度特性

根据实验结果可以看出, 固化剂掺量是影响强度的最主要因素, 提高含水率以及添加外加剂是降低无侧限抗压强度的主要原因, 同时也是提高流动度的重要因素. 因此, 在配制流态固化土时, 需考虑固化剂掺量、含水率以及外加剂掺量之间的交互关系. 对于无添加的淤泥质渣土, 当土体含水率为 80%~120% 时, 添加 5% 固化剂即可满足无侧限抗压强度要求; 对于 130%~140% 含水率, 需添加 7% 固化剂才能满足要求. 对于经外加剂调质的淤泥质渣土, 含水率为 80%~100% 时, 固化剂掺量为 5%~7%, 外加剂掺量为 0~0.9%

大多都能够满足无侧限抗压强度要求,仅当含水率为 100%,固化剂掺量为 5%,外加剂掺量为 0.9%时,不满足要求。

综合考虑配制流态固化土强度和流动度要求,对于无添加淤泥质渣土,土体含水率为 120%~140%,固化剂掺量为 5%~7%,满足要求。对于经外加剂调制的淤泥质渣土,当土体含水率为 80%~90%时,固化剂掺量为 5%~7%,外加剂为 0.9%可满足要求;当含水率为 90%~100%、固化剂掺量为 5%~7%、外加剂为 0.5%时,以及固化剂掺量为 7%、外加剂掺量为 0.9%时,可以满足配制要求。综上所述,添加外加剂会降低土体无侧限抗压强度,但是对于流动度的提升效果显著,因此外加剂可以运用到流态固化土的配制中。

5 结 论

1) 当仅提高含水率时,淤泥质渣土流动度呈线性增长,每提高 1% 含水率原样土流动度能提高约 0.84 cm,添加固化剂的土体流动度提高量约减小一半,减小效果随土体含水率提高逐渐减弱。

2) 当添加外加剂后,土体流动度得到显著改善;外加剂的作用机理主要是静电斥力和空间位阻,该作用使得颗粒分散开,进而提高流动性;经外加剂调质后,土体微观结构更丰富,结构间相互搭接,土体结构分布更加均匀。

3) 固化剂掺量是影响无侧限抗压强度的最主要因素,无侧限抗压强度随着固化剂掺量的增多成倍增大;添加外加剂以及提高含水率均会降低无侧限抗压强度,外加剂的存在会使得土体颗粒间距增大,微观表现为土体结构丰富,结构分散。

4) 综合考虑配制淤泥质流态固化土用于替代真空联合堆载预压膜上砂保护垫层的无侧限抗压强度和流动度要求,对于含水率 120%~140%的淤泥质渣土,仅通过添加 5%~7% 固化剂配制的流态固化土可以替代砂保护垫层;对于含水率 80%~100%的淤泥质渣土,需要在 5%~7% 固化剂的基础上添加一定的外加剂能够达到砂保护垫层的要求。

参考文献:

[1] 余松霖,柯瀚,詹良通,等.工程渣土的工程特性及矿坑填埋场的工后沉降和容量分析[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(12):2364-2376,2385.

(Yu Song-lin, Ke Han, Zhan Liang-tong, et al. Engineering properties of excavated soil and analysis of post-construction settlement and capacity for pit landfill [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(12): 2364-2376, 2385.)

[2] Zhang Y J, Wang J, Zhang L L, et al. Study on the preparation and properties of high-belite cementitious materials from shield slag and calcium carbide slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 355: 129082.

[3] Zhang J, Lu S D, Feng T G, et al. Research on reuse of silty fine sand in backfill grouting material and optimization of backfill grouting material proportions [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 130: 104751.

[4] Gao W B, Zhang H E, Ren Q, et al. A low-carbon approach to recycling engineering muck to produce non-sintering lightweight aggregates: physical properties, microstructure, reaction mechanism, and life cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 385: 135650.

[5] Ma M X, Tam V W Y, Le K N, et al. Challenges in current construction and demolition waste recycling: a China study [J]. *Waste Management*, 2020, 118: 610-625.

[6] 詹良通,郭淇萌,吴林波,等.城市工程渣土消纳处置及资源化利用途径探讨——以温州市为例[J].环境卫生工程,2021,29(2):1-9.
(Zhan Liang-tong, Guo Qi-meng, Wu Lin-bo, et al. Discussion on the approaches of disposal and resource utilization of the waste soils from urban construction: a case study of Wenzhou [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, 29(2): 1-9.)

[7] Zhang C, Liu X, Fu J Y, et al. Evaluating the feasibility of muck from slurry shield tunnels as a growth medium for landscaping [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2022, 72(5): 455-462.

[8] Bai J, Kang P, Zhang W B, et al. Feasibility study on using excavated soil and rock to sintering utilization [J]. *Circular Economy*, 2022, 1(1): 100007.

[9] Sukprasert S, Hoy M, Horpibulsuk S, et al. Fly ash based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2021, 22(2): 357-371.

[10] 钟翼进,何倍,任强,等.不同因素对建筑渣土泥浆流变性能的影响[J].建筑材料学报,2022,25(8):814-822.
(Zhong Yi-jin, He Bei, Ren Qiang, et al. Influence of different factors on the rheological properties of construction waste mud [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(8): 814-822.)

[11] Feng S X, Bai W W, Lei H Y, et al. Vacuum preloading combined with surcharge preloading method for consolidation of clay-slurry ground: a case study [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2024, 42(4): 348-361.

[12] Feng S X, Zhou J F. Field instrumentation and evaluation of ground treatment by combined air-booster and straight-line vacuum preloading without sand [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2022, 40(3): 267-280.

[13] Zhang D K, Fu H T, Wang J, et al. Behaviour of thick marine deposits subjected to vacuum combined with surcharge preloading [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(10): 1147-1156.

[14] Xu H Q, Shi X M, Lyv Y Y, et al. Study on the construction workability of fluidized waste soil as the backfill material for the sidewalls of foundation pits [J]. *Materials Letters*, 2023, 340: 134179.

[15] 朱伟,赵笛,范惜辉,等.渣土改良为流动化回填土的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):134-

139.
(Zhu Wei, Zhao Di, Fan Xi-hui, et al. Research on application of residue soil-based flowable fill[J].*Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49 (2): 134-139.)
- [16] Li S C, Zhang J, Li Z F, et al. Feasibility study of red mud-blast furnace slag based geopolymeric grouting material: effect of superplasticizers [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267: 120910.
- [17] Xu G Z, Qiu C C, Song M M, et al. Flocculant effects on fluidity and strength behavior of cemented dredged clay with high water content [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(8): 951-961.
- [18] 朱瑜星, 卞怡, 闵凡路, 等. 地铁盾构渣土改良为流动化土进行现场应用实验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(sup1): 245-251.
(Zhu Yu-xing, Bian Yi, Min Fan-lu, et al. Improvement of metro shield muck to controlled low-strength material [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53 (sup1): 245-251.)
- [19] Wu S L, Zhu W, Lyu Y Y, et al. Quality control indexes and curing agent values for submerged poured solidifying-silt island; case study of the artificial island of Dalian Bay, China [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 190: 664-671.
- [20] 骆嘉成, 邵吉成, 袁波, 等. 分层加固法对温州淤泥类渣土加固的现场试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40 (sup2): 3483-3492.
(Luo Jia-cheng, Shao Ji-cheng, Yuan Bo, et al. Study of field test on reinforcement of Wenzhou sludge by layered reinforcement method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(sup2): 3483-3492.)
- [21] Yang L, Yilmaz E, Li J W, et al. Effect of superplasticizer type and dosage on fluidity and strength behavior of cemented tailings backfill with different solid contents [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 290-298.
- [22] Inazumi S, Intui S, Jotisankasa A, et al. Applicability of mixed solidification material based on inorganic waste as soil stabilizer [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2020, 12: e00305.
- [23] Zhang X S, Li H B, Li S, et al. Test and microstructural analysis of a steel slag cement-based material using the response surface method [J]. *Materials*, 2022, 15(9): 3114.
- [24] Adamu M, Marouf M L, Ibrahim Y E, et al. Modeling and optimization of the mechanical properties of date fiber reinforced concrete containing silica fume using response surface methodology [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01633.
- [25] Kong X H, Zhang Z B, Liang Y P, et al. Experimental study on solidified dredged sediment with MgO and industrial waste residue [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 366: 130105.
- [26] Wang X S, Kim S, Wu Y P, et al. Study on the optimization and performance of GFC soil stabilizer based on response surface methodology in soft soil stabilization [J]. *Soils and Foundations*, 2023, 63(2): 101278.
- [27] Jin J X, Qin Z F, Yang H, et al. Designing a composite solidification agent to improve mechanical properties and sulfate resistance of construction clay-residue [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 56: 104753.
- [28] 黄英豪, 戴济群, 徐锴. 新拌固化淤泥的流动性和黏滞性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(2): 235-244.
(Huang Ying-hao, Dai Ji-qun, Xu Kai. Lowability and viscosity of freshly solidified dredged materials [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44 (2): 235-244.)
- [29] Zhu Z J, Zhang Q S, Zhang H S, et al. Effect of different superplasticizers on the mechanism, workability, and microstructure of biomass-activated grouts [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 373: 130857.
- [30] 邵吉成, 袁波, 骆嘉成, 等. 固化剂加固温州淤泥的物理力学性质研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(3): 935-944.
(Shao Ji-cheng, Yuan Bo, Luo Jia-cheng, et al. Research on the physical and mechanical properties of Wenzhou silt reinforced by solidified agent [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18 (3): 935-944.)
- [31] Ghadir P, Ranjbar N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 188: 361-371.
- [32] Liu Y, Li H, Wang K, et al. Effects of accelerator - water reducer admixture on performance of cemented paste backfill [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242: 118187.
- [33] Kang G, Cikmit A A, Tsuchida T, et al. Strength development and microstructural characteristics of soft dredged clay stabilized with basic oxygen furnace steel slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 203: 501-513.