

废冶金渣胶结料处治高含水率海相黏土试验研究

赵翔¹, 陈冠一^{1,2}, 杨和平¹ 编译

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.广东鸿高建设集团有限公司)

摘要:近年来,新加坡必须在填海陆域采用海相黏土作填料修建道路,筑路前如何经济有效地改善高含水率软黏土的工程性质成为挑战,用水泥处治需耗费大量水泥而不经济。为此,开展采用废冶金渣胶结料代替波特兰水泥改善海相软黏土的潜在用途研究,通过系列对比试验,分析并评价了胶结料及水泥处治的海相黏土不排水抗剪强度。结果表明:对初始含水率较高的海相软黏土,采用同剂量的废冶金渣胶结料及水泥进行处治,两者达到相同的无侧限抗压强度时,胶结料处治的养护时间可缩短约20%而同养护14、28 d的不排水抗剪强度可提高20%~50%,且废冶金渣胶结料处治土后期增强性能好。微结构研究也表明。废冶金渣胶结料处治土粒间形成的锁结基体有利于提高其抗剪强度。

关键词:海相黏土;废冶金渣;抗剪强度;地基处理

1 前言

围海造陆是人类利用海洋空间最古老的方法之

一。从19世纪开始,围海造陆就成了新加坡拓展土地的主要方法。20世纪70年代以来,新加坡拓展的新土地已超过100 km²,近来还计划到2030年再填造100 km²的土地。围海造陆一般分3个阶段进行:首

发生时间缩短,且随着温度逐渐降低时间越来越短,导致出现顶破破坏的时间缩短,聚合物分子链断裂,主要因为土工布内部聚合物分子链受低温影响活动性降低,活动区域缩小,称这个区域为负温因子应变。

从顶破试验结果可以看出:当含水率增加时,应力应变曲线会出现两个峰值强度,并且含水率越高第一个峰值强度越明显,原因在于不仅仅要克服土工布聚合物分子链之间的连接强度,还要克服冰体分子之间的连接强度,由于冰体分子之间接触更加紧密,所以首先打破冰体分子之间的连接,出现第一个峰值强度,此时聚合物分子链还未启动,虽然应变增加,但应力随之下降,之后土工布开始承担外力,总顶破强力又逐渐上升,达到聚合物分子链的峰值强度直至破坏。

4 结论

(1)建立了不同含水率与温度条件下的短纤针刺土工布顶破强力预测方程,可以为实际工程提供参考。

(2)短纤针刺土工布顶破强力损失量随着温度降低呈现出逐渐增加的趋势,土工布含水率越高,顶破强力损失量越大,温度越低,顶破强力增量越大。

(3)短纤针刺土工布顶破变形主要分为3个阶段:弹性变形、塑性变形、破坏阶段。负温环境下顶破试验双峰强度的出现主要在于外力不仅要克服土工布聚合物分子链之间的连接强度,还要克服冰体分子之间的连接强度。

参考文献:

- [1] 曹国福,徐兵,王茂胜,等.圈围工程中高强有纺土工布加筋垫层变形试验研究[J].岩土力学,2014(S1).
- [2] 张思云,张艳,靳向煜.土工膜和非织造土工布单向与双向拉伸机理对比试验研究[J].东华大学学报(自然科学版),2014(2).
- [3] 刘路路,李哲,刘晓燕.基于不同含水率负温环境下短纤针刺土工布拉伸性能研究[J].公路工程,2017(3).
- [4] 储才元,严灏景.非织造布力学各向异性与顶破强力的模拟计算[J].中国纺织大学学报,1995(4).
- [5] 张天阳,丁辛.机织物顶破过程的有限元分析[J].东华大学学报(自然科学版),2012(6).
- [6] 朱静,杜赵群,于伟东.织物刺破与顶破测试方法对比研究[J].东华大学学报(自然科学版),2013(6).
- [7] 焦亚男,祁小芬,吴宁,等.亚麻/聚丙烯复合材料的制备及拉伸、顶破性能[J].天津工业大学学报,2014(5).
- [8] JTGE50-2006 公路工程土工合成材料试验规程[S].

先在规划回填区修建围堰,接着向围堰内吹填礁砂或回填土等填筑材料,陆域形成后再做地基处理使之符合建筑用地标准。过去填海造陆主要采用砂砾做填筑材料,近年来因粒状填料的缺乏,海底疏浚的软土或海相黏土也被用作造陆填料(Chu 和 Guo, 2016)。利用软土或泥浆填海造陆可减少航道维护疏浚处理时产生软土或泥浆对环境的影响,但回填场区必须做好软基处理方可支持将来的建筑活动。所谓软基处理就是将承载力较小且压缩性较大的地基土加固到满足承受工程荷载和所需抗剪强度的要求。工程实践中处理软基的方法有多种,早年常用的主要有加筋土法、排水固结法、强夯法、真空预压法等,但这些方法较费时费力且成本较高,故近年用添加剂固结软土的化学加固法越来越受欢迎。以往水泥是应用较广的添加剂,能显著改善原位软土的剪切强度和压缩性(Chew 等 2004; Chu 等 2005; Han 和 Thakur, 2013),但处治高含水率软土需要大量水泥,用于工程加固过于昂贵,所以许多工程通过加入一些外掺剂来提高固化水平,如掺入工业废料电石渣和铁尾矿渣等,既能减少水泥用量,又可解决工业废料的处理,且还能提高固化土的力学性质。鉴于此,该文研究找寻更经济合理的水泥替代品,并一道解决工业废料的再生利用问题。用水泥或其他胶结料处治软基,对处治后填料的力学要求是无侧限抗压强度大于等于 200 kPa,与堆载预压法处理要求相当,环保要求则是避免将任何其他可浸出的污染物带到地上。

另一种考虑是探索能否在软基处置阶段(即泥浆状态时)而不是在填海造陆之后再进行处理,以避免土质改善过程中双重处治带来的时间与成本耗费。为此,制备了含水率 100%~200%可与泥浆相比原用于填海造地的软黏土样。此外,选择在泥浆状态下处治软土的另一原因是为有效地改善泥浆状土,胶结料必须与软黏土充分混合,而泥浆土含水率越高则需更多的胶结料来处治。该研究的目的是确定水泥和胶结料所需的最佳配合比而使不同初始含水率的软黏土均能达到预期的无侧限抗压强度。

该文提出采用废冶金渣胶结料替代水泥处治高含水率海相黏土的潜在用途,还研究各胶结料剂量对改善不同含水率软黏土的效果。对比分析相同条件下采用废冶金渣胶结料处治及用水泥处治的海相黏土其不排水抗剪强度的增加差异,并用扫描电子显微镜(SEM)对废冶金渣胶结料处治海相黏土的微结构进行分析,以确定满足设计要求的废冶金渣胶结料适宜掺量。

2 原材料

研究使用的海相软黏土采集于新加坡一个填海工程工地。这些软黏土最初从附近海底被疏浚,然后拟作填料用泵抽入填海造陆基坑,其基本性质及指标见表 1。X 射线能量色散谱测试结果表明:该海相黏土含有高含量的碳酸钙和二氧化硅以及一些氧化铝。

表 1 新加坡原位海相软黏土的性质

性能指标	单位	指标值	性能指标	单位	指标值
液限	%	88	液性指数		1.08
塑限	%	36	初始空隙率	%	1.90
塑性指数		52	密度	t/m ³	1.55
含水率	%	92	比重		2.65

研究中使用的废冶金渣胶结料从中国南京理工大学获取,是一种粉末状聚合物改性的硅酸盐基化学品。其主要成分为含有硅、铝、钙和一些有机物的废冶金渣,表 2 为其详细化学组成。将它用于地基处治比用水泥更环保,因其 pH 值相对较低,为 8~10,而水泥的 pH 值达 12~13;且其化学需氧量较低,仅为 50 mg/L,水泥则需 90 mg/L。研究中所用普通硅酸盐水泥由奥尔堡·波特兰·马来西亚公司提供,主要用于对比试验。

表 2 所用胶结料的详细化学成分

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
CaO	39.2	Na ₂ O	1.1
SiO ₂	16.9	K ₂ O	0.6
SO ₃	14.0	TiO ₂	0.5
Al ₂ O ₃	8.1	SrO	0.2
MgO	3.8	烧失量	14.1
Fe ₂ O ₃	1.2		

3 样品制备和测试方法

3.1 两种样品

按美国材料与试验协会 2017 年提出的试验方法(D1632-17)制备了土-胶结料和土-水泥两种样品,所有样品均按所需含水率和添加剂量制备。用于填海造陆的淤泥质土含水率的范围为 100%~200%。制备时先将所需水加入海相黏土样并彻底搅拌,即可得

含水率 100%、150%、200% 的黏土浆料;后将设定剂量的胶结料或水泥掺入到土中并充分搅拌混合。研究中胶结料或水泥与土的重量比均为 10%、20%、30%。

接着将混合土装入高 100 mm、直径 50 mm 的 PVC 筒内,此时要注意先去除尘封气泡和空隙,后用

橡胶盖头密封筒的两端并用保鲜膜包裹,以防水分流失并减少胶结料与外界接触。将样品放入 20 ℃ 和湿度高于 90% 的养护室中,分别养护 7、14 和 28 d。表 3 为此次研究开展不同分析试验所用胶结料以及水泥的含量及其养护时间。

表 3 各分析试验中使用的胶结料及水泥含量和养护期

试验类型	黏土初始含水率/%	养护时间/d	胶结料含量/%	水泥含量/%
无侧限压缩	100、150、200	7	0、10、20、30	10、20、30
	100、150、200	14	0、10、20、30	10、20、30
	100、150、200	28	0、10、20、30	10、20、30
电镜扫描		28	0、5、10	—

3.2 试验方法

按美国材料与试验协会 D2166-06 的无侧限抗压强度试验方法,分别对胶结料处治海相黏土样品养护 7、14 和 28 d 后测试无侧限抗压强度。试样直径、高分别为 38、76 mm,施测时竖直位移速率固定为 1 mm/min,直至试样破坏。

为研究胶结料处治海洋黏土的界面形态,用东京电子 JSM-7600F 超高分辨热场发射扫描电子显微镜,检测未经处治及胶结料处治海相黏土表面形态和微观结构,并完成对 5% 和 10% 胶结料含量土样的对比分析,以获得极少胶结料含量能使土样微观结构产生的差异。为尽量减少扰动土样的微观结构,做扫描电镜分析之前先用冷冻干燥法干燥土样,后用银电胶将样品置于铝制存根上,再从中切开用环氧树脂剥离,并涂上一层碳后进行溅射喷涂金膜处理。给每个测试样品拍摄一组放大数倍的图片,供分析处治后土样基质概貌并方便观察土粒子间行为。

4 试验结果分析

4.1 无侧限抗压强度

图 1 为不同养护期处治土无侧限抗压强度与其初始含水率间的关系。图 2 为初始含水率为 100%、150% 和 200% 时处治土经不同养护期后的无侧限抗压强度。

由图 1、2 可知:胶结料处治土无侧限抗压强度随养护期的增长而增大。养护 7 d,其无侧限抗压强度与水泥处治黏土的相当。然而养护 14、28 d,其无侧限抗压强度远大于相同养护期给定初始含水率水泥处治黏土的无侧限抗压强度。胶结料处治海相黏土养护 14、

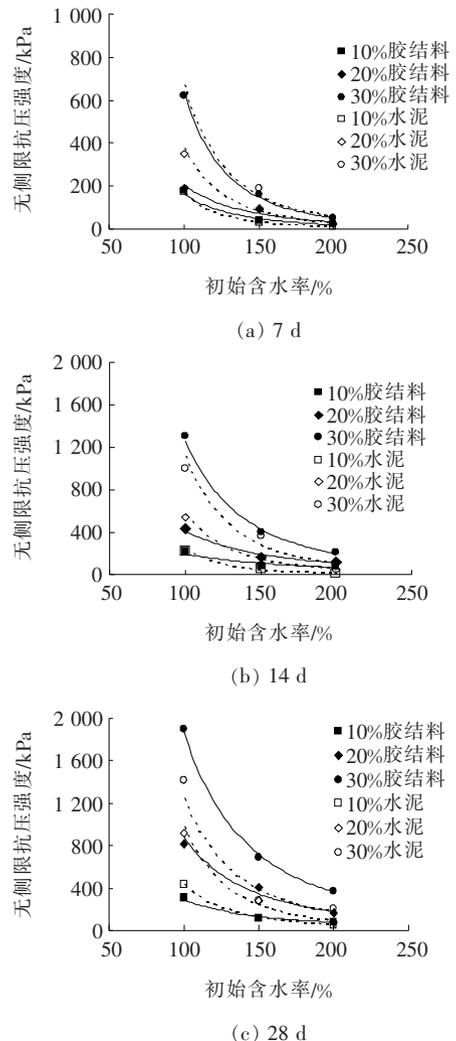
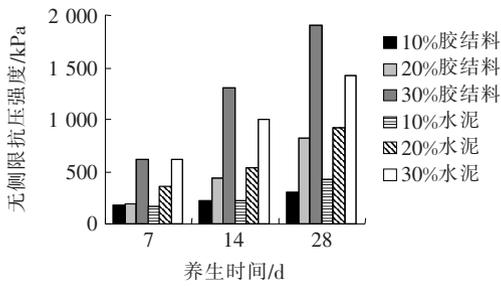
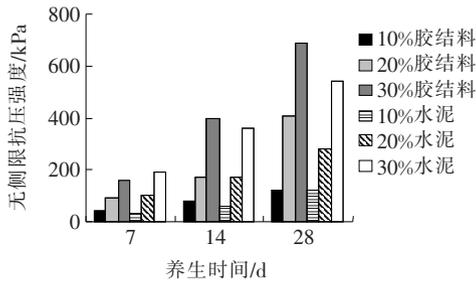


图 1 不同养护期处治土无侧限抗压强度

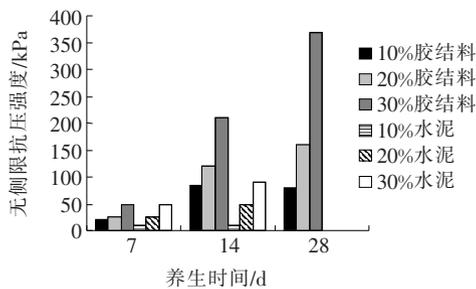
28 d 的无侧限抗压强度为水泥处治黏土无侧限抗压强度的 1.2~1.5 倍。达到相同无侧限抗压强度,胶结料处治海洋黏土的养护时间比水泥处治海洋黏土的可缩短约 20%。



(a) 初始含水率 100%



(b) 初始含水率 150%



(c) 初始含水率 200%

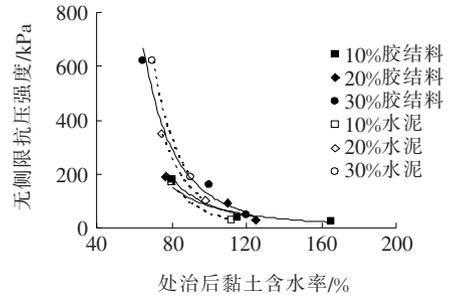
图2 不同初始含水率的处治土无侧限抗压强度

由图2可知:当采用废冶金渣胶结料时,为满足200 kPa无侧限抗压强度要求,对处治泥浆或200%初始含水率的土,胶结料的比率为30%需养护14 d,或取胶结料比率为20%,则养护期要28 d;如采用水泥处治则水泥的比率要30%且需养护28 d。若限制土样初始含水率为150%,此时废冶金渣胶结料处治的最佳配合比是胶结料占20%且最佳养护期为28 d。

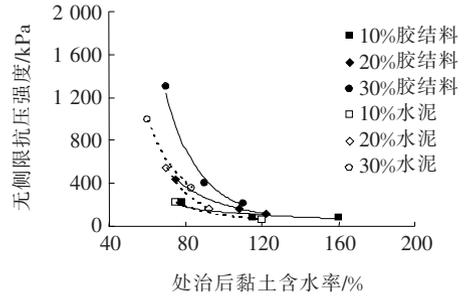
图3为处治后黏土不同养护期的无侧限抗压强度与含水率的关系。由图3可知:废冶金渣胶结料与水泥一样能有效降低处治土的含水率;对处治相同的含水率黏土,胶结料含量越多其无侧限抗压强度就越大。对同一含水率的黏土,经废冶金渣胶结料处治养护14 d或28 d,其无侧限抗压强度比水泥处治的要大。这表明与水泥处治相比,废冶金渣胶结料处治土的后期增强性能更好。

4.2 界面的形态

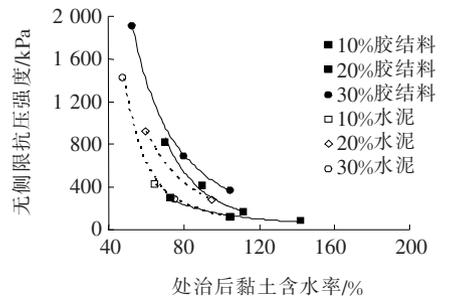
图4、5为测试样品电镜扫描显微图片。图4为未经处治海相黏土扫描电镜对照图片。图5则为养护



(a) 7 d



(b) 14 d



(c) 28 d

图3 处治后黏土的无侧限抗压强度随含水率的变化

7、14、28 d胶结料处治黏土各自的电镜扫描片。未处治样(图4)显示呈絮凝状的高度自由网络中存在颗粒或晶体状的黏土团块,孔隙中充满了水。

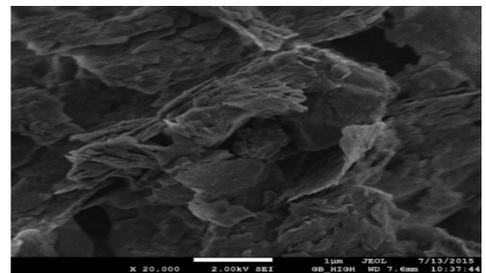


图4 未处治海相黏土扫描电镜对照图片

由扫描电镜分析可确认胶结料的胶凝产物随着时间的增长而增多(Horpibulsuk等,2015;Hoy等,2016)。相比图4,图5显示胶结料处治的海相黏土已获得一个比纯海相黏土更紧凑的锁结基体,显著地减小了土粒间的孔隙空间。这种微结构的形成可能是因胶结料

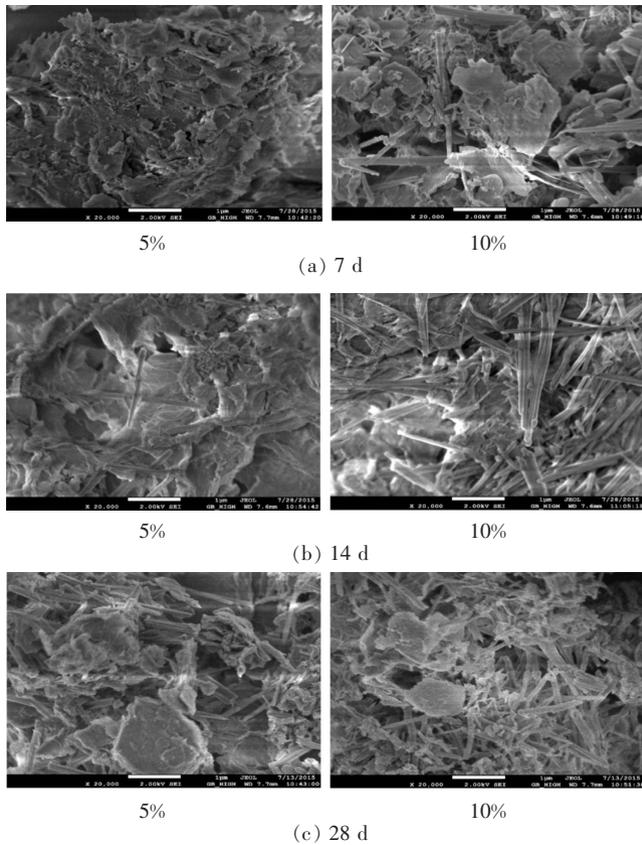


图5 胶结料处治黏土养护不同时期电镜扫描图片
(5%、10%为废冶金渣胶结料掺量)

颗粒的填充,也可能是由胶结料水合产物(如水合硅酸钙)将土粒黏在一起所致。土中反应形成的填充空隙和物理化学键黏合导致了土颗粒间黏合及连锁力增大。纯海相黏土与胶结料处治的海相黏土这些微结构的差异可解释胶结料处治海相黏土的强度为何会大于纯海相黏土的强度。

图5显示:按5%、10%掺配的废冶金渣胶结料处治海相黏土分别养护7、14和28 d的电镜扫描图片,可观察到其构造的变化:开始为大致光滑的球面到形成杆状结构并逐渐增多。表明较大胶结料比率处治土的构造和微结构随时间或龄期会产生更强烈的反应。随养护期增长,土颗粒内部会生成地聚产品(Fernandez-Jime和Palomo,2009)。这种化学反应能形成水合硅酸钙和水合铝酸钙,类似波特兰水泥的水化反应(Cristelo等,2012)。由二氧化硅和氧化铝间反应得到的化学产物形成密集的胶结基质将海相黏土粒结合在一起[见图5(b)、(c)],因而废冶金渣胶结料处治海相黏土的无侧限抗压强度随养护期增长而增大(图1、2)。

5 结论

(1) 废冶金渣胶结料能有效处治高含水率黏土。养护14、28 d,胶结料处治的海相黏土比用同剂量水泥处治的无侧限抗压强度提高了20%~50%。

(2) 除了能废物利用并有好的经济效益外,废冶金渣胶结料比水泥还具两大优势:后期增强性能好;pH值较小且化学需氧量较低。

(3) 无侧限压缩测试结果表明:用掺量20%、养护28 d的废冶金渣胶结料处治初始含水率200%的泥浆,其无侧限抗压强度可达200 kPa满足设计要求。用水泥处治并要达到相同的效果,其掺量需更多,表明用废冶金渣处治黏土土能节省大量成本。

(4) 胶结料处治黏土的微结构表明:处治土的土粒间形成的锁结基体,有助于增大胶结料处治土的抗剪强度。

参考文献:

- [1] Kok Pang Lam, Hai lei Kou, Bin Xie, et al. Use of a Waste-Based Binder for High Water Content Soil Treatment [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(8).
- [2] ASTM D2166-06 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil[S].
- [3] ASTM D1632-17 Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory[S].
- [4] Chew, S. H., A. H. M. Kamruzzaman, F. H. Lee. Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays[J]. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2004, 130(7): 696-706.
- [5] Chu, J., M. H. Goi, and T. T. Lim. Consolidation of Cement Treated Sewage Sludge Using Vertical Drains [J]. *Can. Geotech. J.*, 2005, 42(2): 528-540.
- [6] Chu, J., and W. Guo. Land Reclamation Using Clay Slurry or in Deep Water: Challenges and Solutions [J]. *Jpn. Geotech. Soc. Spec. Publ.* 2016, 51(2): 1790-1793.
- [7] Han, J., and J. K. Thakur. Use of Geosynthetics to Stabilize Recycled Aggregates in Roadway Construction[R]. In *ICSDEC 2012: Developing the Frontier of Sustainable Design, Engineering, and Construction*, 2013: 473-480.
- [8] Hoy, M., S. Horpibulsuk, A. Arulrajah. Strength Development of Recycled Asphalt Pavement - Fly Ash Geopolymer as a Road Construction Material[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2016, 117: 209-219.