

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.02.006

渣土改良为流动化回填土的应用

朱伟¹, 赵笛², 范惜辉², 吴思麟², 吴勇²

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对城市管网基槽开挖产生大量渣土难以处理、基槽回填缺乏良质回填土的问题, 提出了将渣土改良为流动化回填土原位使用的技术并进行了示范工程应用。通过室内测量流动性和强度得出: 流动性随着用水量增加显著增加, 强度随着固化材料掺量和养护龄期增加而增加。水固比和灰砂比可以作为流动化回填土配比指标参数, 当水固比为 0.63、灰砂比为 0.15 时, 流动化回填土流动值为 242 mm, 且具备早强性能, 1 d 强度可达 98 kPa, 28 d 强度可达 390 kPa, 满足流动化回填土设计要求。在东莞茅洲河治理管网埋设工程中将渣土改良成流动化回填土后成功浇筑回填管网并实测了应用效果, 使用室内试验得到的配方, 现场工程施工得到顺利开展。现场开挖渣土经过使用上述配比进行拌和浇筑后, 流动值在 188~218 mm 之间, 28 d 强度在 324~362 kPa 之间, 完全满足管网回填土要求。

关键词: 渣土; 资源化; 流动化回填土; 管网回填; 固化; 早强

中图分类号: TU521 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)02-0134-06

Research on application of residue soil-based flowable fill

ZHU Wei¹, ZHAO Di², FAN Xihui², WU Silin², WU Yong²

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the problems that a large amount of slag sludge is difficult to be treated in the excavation of urban pipe network and the backfilling of the basement is lacking in good quality backfilling, the technology of improving the slag sludge to the flowable fill for in-situ use is studied and applied in a demonstration project. Measurements of the fluidity and the strength by indoor experiments indicates that the fluidity increases significantly with the increase of water consumption, and the strength increases with the increase of the amount of solidified material and the age of curing. The water-solid ratio and the lime-sand ratio can be used as the ratio index parameters of the fluidized backfill. When the water-solid ratio is 0.63 and the lime-sand ratio is 0.15, the flowable fill has a fluidity value of 242 mm, and it has the early-strength performance, which can reach 98 kPa in one day and 390 kPa in 28 days, meeting the design of fluidized backfill. This paper discusses the application and effect of this technology in engineering in combination with the pipe network embedding project in the management of Maozhou River in Dongguan. Through the on-site construction and the follow-up inspection, it shows that the slag excavated on site is mixed with the above ratio, the flow value is between 188-218 mm, and the strength at 28 d is between 324-362 kPa, fully meeting the requirements of pipe network backfill.

Key words: residue soil; utilization; flowable fill; pipeline backfill; solidification; early strength

随着水环境治理工程如火如荼地展开, 各城市雨污分流及污水管网相关工程产生大量渣土。渣土外运不但引起城市交通问题而且需要大面积受纳场地堆放, 在城市建成区难以保证。另一方面管道回填时需要良好的填方材料, 且管道回填时施工操作空间狭小, 传统回填材料(土质填料、级配砂石填料等)与结构物界面存在死角, 导致碾压夯实质量难以保证, 常常诱发工程病害^[1-2]。对于一些城市道路路面塌陷等险情, 传统回填技术难以满足快速施工条件和良好回填质量要求^[3]。

流动化回填土(controlled low-strength material, CLSM)是一种具有流动性、可浇筑施工, 通过添加固化材

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB057803)

作者简介: 朱伟(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事盾构隧道、环境岩土的研究。E-mail: zhuweiteam.hhu@gmail.com

引用本文: 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 Xihui, et al. Research on application of residue soil-based flowable fill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 134-139.

料形成适宜强度的新型回填材料^[4]。它一般由水、水泥、粉煤灰、粗骨料、细骨料组成,针对实际需求也可掺入添加剂。矿渣、采石场粉尘、池塘底泥、高塑性黏土、建筑垃圾等固体废弃物作为骨料配制成流动化回填土均有应用,但主要为室内配比设计,验证其资源化利用的可行性^[5-12]。因此,将管道开挖产生的渣土,就地进行流动化处理后进行管道回填,是同时解决渣土处理、填方材料购买和回填施工三方面问题的解决方案。但是在实际应用过程中不免存在以下问题:用渣土配制流动化土的配比规律是怎样的? 试验配比是否能够应用于现场施工? 工程施工完成后,质量怎样评价? 研究这些问题对于这种工艺推广实施具有重要意义。用开挖渣土配制流动化回填土虽然在日本、美国有较多应用^[13-16],但在国内仍然处于室内试验阶段^[17-18],对于这些问题还欠缺调查及研究,仅仅实验室尺度的研究无法解决这些问题。

笔者结合东莞茅洲河治理中管网埋设工程,采用现场开挖渣土进行流动化回填土的配制,在确定配方的前提下首次开展了使用渣土浇筑回填管网的示范工程,并对后续效果进行了监测,分析了实际应用过程中存在的问题,以期为该领域研究和施工应用提供参考和借鉴。

1 工程概况

深圳茅洲河水环境综合整治工程项目的管网建设工程,管网采用DN400 塑钢管,埋深2.7~3.0 m,支护采用IV型拉森钢板桩,如图1所示。管网铺设普遍处于建筑密集的市区,大型施工设备不易进场进行作业。基槽开挖并放入管道后使用普通回填土(石粉渣)进行回填,由于空间狭小难以进行碾压施工,虽然采用了浸水密实施工但回填土密实度不足,后续钢板桩拔桩后管道周边产生了较大沉降。同时基槽开挖产生的强风化花岗岩、淤泥质黏土等渣土需要大量外运,但难以找到合适的处理场地。这两方面因素对工程实施产生了重要影响。

为了解决上述问题,提出了将现场开挖渣土原位配制成流动化回填土进行管道基槽回填的方法。利用流动化回填土自流平、自密实特性解决传统回填土碾压不密实的问题,同时避免了渣土外运,既能控制过大的地基变形,又实现了“土方平衡”。在项目实际施工过程中,由于需要快速施工,管道回填完成后需要尽快拔除钢板桩。结合工程实际,考虑采用了早强型流动化回填土进行施工。在将流动化回填土浇筑至回填区域时,流动值是流动化回填土最重要指标之一,一般流动值为200~300 mm时具有良好的填充性^[15-16],可达到良好填充效果。考虑需要快速恢复路面交通,设定流动化回填土1 d无侧限抗压强度达到100 kPa,而考虑后续维护可能需要开挖,28 d无侧限抗压强度设定为300 kPa^[18]。

2 试验方法与结果

2.1 试验材料

渣土取自东莞茅洲河流域治理管道基槽开挖土,渣土的物理性质指标按照土工标准联合 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪进行测定。测得含水率为16.69%,密度为1.98 g/cm³,液限为31.4%,塑限为21.8%。颗粒级配如图2所示。固化材料为快硬硫铝酸盐水泥42.5级。减水剂为聚羧酸高性能减水剂,水为日常所用洁净自来水。

2.2 试验方案

为明确现场所需早强型流动化回填土施工配比,设计了12组不同配比早强型流动化回填土回填材料,见表1。其中减水剂掺量以水泥质量百分比计算,由于采用水泥为硫铝酸盐水泥,在建议掺量的基础上,扩大掺量范围进行试验,确定掺量为0.4%时流行性效果最好。硫铝酸盐水泥和水用量分别通过水固比(水与固体材料,包括渣土、硫铝酸盐水泥干质量比)和灰砂比(硫铝酸盐水泥与渣土干质量比)2个参数计算得到。

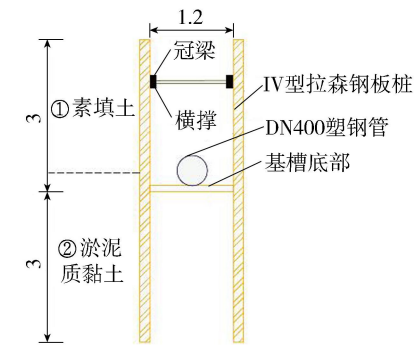


图1 基槽断面(单位:m)

Fig.1 Sectional views of foundation groove(units:m)

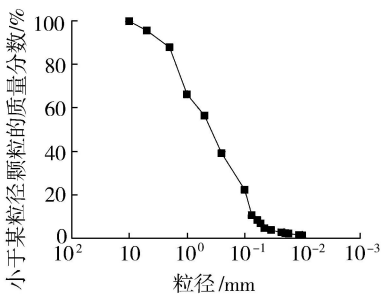


图2 渣土颗粒级配曲线

Fig.2 Particle distribution curve of residue soil

2.3 试验方法

室内试验中早强型流动化回填土制备采用 B10 小型电动搅拌机进行拌和,将渣土、固化材料倒入搅拌机中干拌 1 min 后,将聚羧酸减水剂与水混合后加入其中,再次湿拌 1.5 min 后制得拌和物。流动性测量参考日本道路公团《引气砂浆和引气灰浆的试验方法》^[19],采用流动值作为流动性指标。试验装置为厚壁圆筒,内径 8 cm,高度 8 cm,壁厚 1 cm,材料为有机玻璃,如图 3 所示。装样完成后将有机玻璃圆筒垂直向上轻轻提起,30 s 后,用钢尺测量拌合物摊开后最大直径和最小直径,取二者平均值为流动值。为保证试验可靠性,每组需进行 2~3 次平行试验,以平均值作为最终流动值。

强度试验所用仪器为南京土壤仪器厂生产的 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪,模具成型试样尺寸为直径 39.1 mm、高 80 mm 圆柱试样。为减小试验误差,每组试样测 3 个平行样。

2.4 试验结果

由图 4 可以看出,流动化回填材料流动值随着水固比增大而增大。在相同灰砂比条件下,用水量越多,流动性越大,用水量增加导致土颗粒间黏结力减小,从而流动性增大。当水固比为 0.60 时,流动性基本满足要求。水固比一定时,随着灰砂比增加,流动性有一定增加,随着灰砂比增大,水泥用量增大,相应地增加了减水剂的用量,造成流动性增加。

考虑到现场实际应用过程中需要操作时间,测量了 0.5 h 后拌和物流动性,如图 5 所示。整体流动性变化趋势基本不变,但是流动值均有较大降低,当水固比为 0.63,灰砂比为 0.20 时,流动值降低约 53.5 mm。由于硫铝酸盐水泥水化反应速度较快,导致促进流动性的自由水迅速较少,流动值降低较多。因此,当运输距离较远或者需要泵送时,要考虑流动性经时损失。针对这一问题,可以通过提高设计流动值或者加入一定量缓凝剂进行控制。当流动性为 200~300 mm 时,流动性能满足自流平、自密实要求,因此水固比为 0.63、灰砂比为 0.15~0.20 时,满足流动性设计。

表 1 流动化回填土设计配比

Table 1 Design ratios of soil-based flowable backfill

编号	灰砂比	水固比	配合比/(kg·m ⁻³)			
			硫铝酸盐水泥	渣土	水	减水剂
1	0.10	0.54	106.3	1062.6	631.2	0.4
2	0.10	0.57	104.2	1042.3	653.5	0.4
3	0.10	0.60	102.3	1022.7	675.0	0.4
4	0.10	0.63	100.4	1003.9	695.7	0.4
5	0.15	0.54	152.5	1016.4	631.2	0.6
6	0.15	0.57	149.5	997.0	653.5	0.6
7	0.15	0.60	146.7	978.3	675.0	0.6
8	0.15	0.63	144.0	960.3	695.7	0.6
9	0.20	0.54	194.8	974.0	631.2	0.8
10	0.20	0.57	191.1	955.4	653.5	0.8
11	0.20	0.60	187.5	937.5	675.0	0.8
12	0.20	0.63	184.0	920.2	695.7	0.7

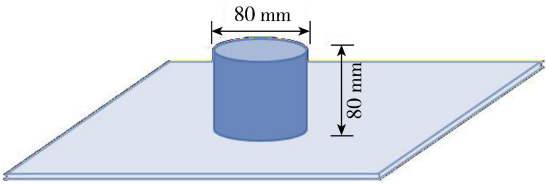


图 3 流动性测量装置

Fig.3 Fluidity measuring device

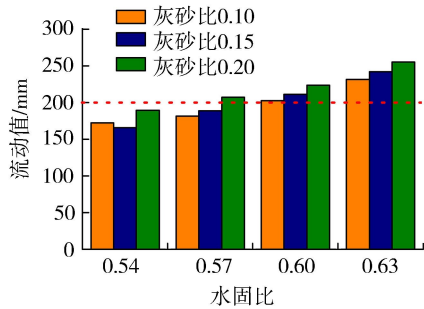


图 4 不同配比下的流动性

Fig.4 Fluidity under different mix ratios

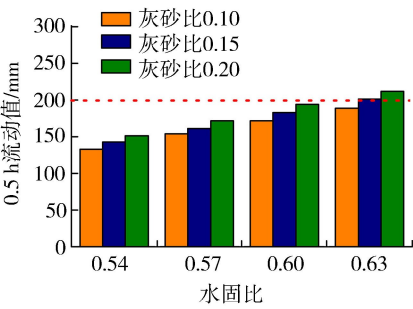


图 5 不同配比下 0.5 h 时的流动性

Fig.5 Fluidity at 0.5h under different mix ratios

随着水泥水化反应进行,流动化回填材料逐渐硬化,产生强度。图 6 和图 7 为养护 1 d 和养护 28 d 无侧限抗压强度与配比参数之间的关系。当水固比一定时,随着灰砂比增大,强度显著增加。养护 1 d 时,无侧限抗压强度为 63~171 kPa,养护 28 d 时,无侧限抗压强度为 193~705 kPa。水固比对于强度有一定影响,主要是增加了自由水含量,导致强度较低。强度增长决定性因素是水泥用量和养护时间,也就是取决于水泥水化作用。灰砂比可以作为一个控制强度的有效参数。当水固比为 0.54~0.63、灰砂比为 0.15 时,1 d 和 28 d 无侧限抗压强度均满足要求。

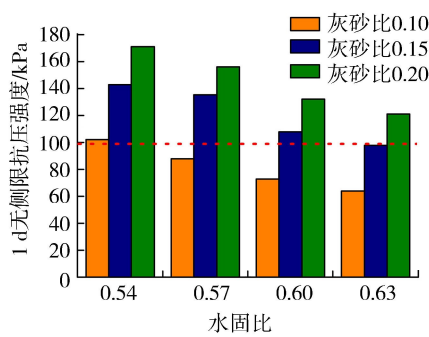


图 6 不同水固比下 1 d 强度变化
Fig. 6 One-day strength change at different water-solid ratios

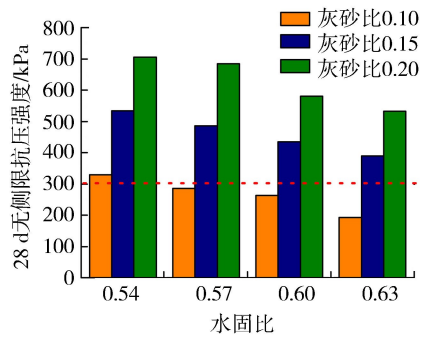


图 7 不同水固比下 28 d 强度变化
Fig. 7 28-day strength change at different water-solid ratios

结合前文提到工程中对于流动性和强度指标要求,并结合经济性因素,当水固比为 0.63,灰砂比为 0.15 时,满足要求。

图 8 是水固比为 0.63 时拌合物随着养护时间增加时无侧限抗压强度增长情况。试样在 2 h 时即获得一定强度,当灰砂比为 0.15 时,强度可达 24 kPa,强度在前 7 d 增长非常迅速,在 7 d 之后增长速率放缓,但是仍有提升,最终 28 d 强度达到 390 kPa,满足要求。

流动化回填土作为一种填土材料,当流动化回填土固化后呈压缩破坏时,破坏应变 ε_f 是衡量其变形特性的一个重要指标。破坏应变大,材料韧性较好,反之破坏变形小则材料常为脆性破坏。由图 9 可见,破坏应变均在 1% ~ 3% 之间。图 9 给出了全部试样破坏应变和无侧限抗压强度之间的关系 $\varepsilon_f = 6.643 q_u^{-0.274}$,可以看到随着抗压强度增大破坏应变逐渐减小,随着水化不断进行,流动化回填土变形程度会越来越小,这说明固化土抵抗变形性质越来越好,符合 $\varepsilon_f = a q_u^b$ (其中 a 、 b 为试验参数)^[20] 拟合规律。

由试验结果可知,流动性随着水固比增加而增加,强度随着灰砂比和养护时间增加而增加。由此可以得出,流动性主要受用水量控制,而强度主要受水泥水化作用影响。水固比和灰砂比可以作为流动化回填土配比指标参数。

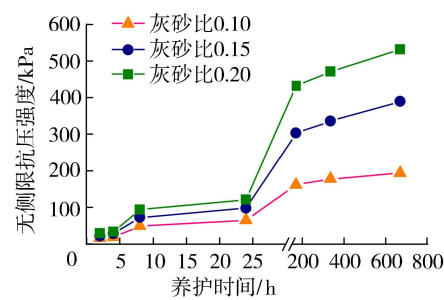


图 8 不同灰砂比下强度随养护龄期的变化
Fig. 8 Strength of different cement sand ratio changes with the age of curing

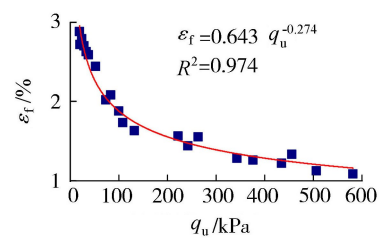


图 9 强度与破坏应变的关系
Fig. 9 Relationship between strength and failure strain

3 现场施工及检测

为进一步探究早强型流动化回填土技术是否可行,是否可以使用现有混凝土拌和设备进行施工并得到室内试验和现场施工质量差异,在东莞茅洲河治理工程塘厦镇管网埋设工程中进行了现场试验。试验段长度为 4 m,回填量约为 20 m³。设计浇筑时流动度为 200 mm,3 d 强度为 150 kPa,28 d 强度为 300 kPa,根据室内试验结果配比取水固比为 0.63、灰砂比为 0.15。现场试验结果见表 2。

表 2 现场试验结果
Table 2 Field test results

取样点 编号	流动值/ mm	0.5 h 流动值/ mm	无侧限抗压强度/kPa			现场 CBR/%		
			3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
1	218	183	152	283	358	18.77	39.74	52.44
2	195	158	168	265	335	14.32	36.30	43.22
3	223	182	146	263	341	17.61	44.24	53.52
4	203	173	138	276	362	15.93	42.21	55.69
5	188	152	159	241	324	14.65	40.23	48.63

由表2可以看出,现场拌和流动化回填土流动值有一定波动,是由于现场拌和不均匀产生的。相比室内拌和物流动值折减约15%,0.5 h后现场拌和物流动值降低约20%。对比28 d强度可以看到,相对于室内试验,强度有一定折减,大约折减21%,但是强度仍能满足要求。因此,在实际设计中要考虑流动性和强度折减。由前言所述,在管道回填过程中,一般采用压实度进行质量评价,但是压实度对于流动化回填土不适用,在现场同时进行了加州承载比(CBR)试验^[21],测得7 d CBR 值约为40%,28 d 约为50%,而当 CBR 值为30%~60%时,可以作为一个较好的基础材料^[6]。早强型流动化回填土在7 d 时就可以满足要求。由图10 可以看到,无侧限抗压强度和 CBR 值呈现良好线性关系,这与文献[15]结果近似。同时,无侧限抗压强度与灰砂比存在着相关关系,是否可以建立 CBR 值与灰砂比、龄期的关系后面值得更进一步研究。

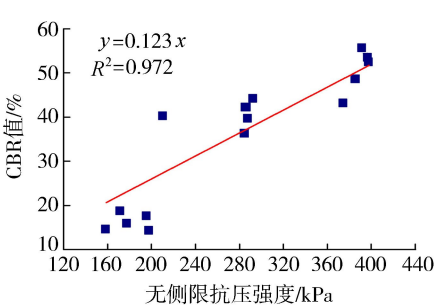


图10 无侧限抗压强度与 CBR 的关系
Fig.10 Relationship between unconfined compressive strength and CBR

4 讨 论

为更加经济、实用地确定流动化回填土配方,解决多样性渣土配制问题。根据图4~5,流动性主要受水固比影响,当灰砂比为0.15时,水固比从0.54增加到0.63时,流动值从165.5 mm增加到242 mm。流动性形成主要是添加用水量后,拌和物中自由水增多,拌合物之间黏结力减小,使得流动性增加。强度主要受灰砂比控制,随着灰砂比增加,无侧限抗压强度明显增加。从无侧限抗压强度结果看,硫铝酸盐水泥具有较为明显的早强效果,当水固比为0.63,灰砂比为0.15时,在2h时即获得一定强度,无侧限抗压强度达24 kPa,养护1 d后可达到98 kPa,28 d 强度可达390 kPa,施工性能较好。由图10 可以看出,流动化回填土 CBR 值与无侧限抗压强度之间具有较好的线性关系,因此可以根据无侧限抗压强度来预测其 CBR 值是否能够满足工程要求。

一般情况下可以选择流动值和无侧限抗压强度作为流动化回填土质量控制指标,而水固比和灰砂比可以作为流动化回填土配比参数指标,当水固比为0.63,灰砂比为0.15时,能够较好地满足回填施工性能。但是,根据室内试验和现场试验结果对比,可以发现流动性和强度存在着一定折减,流动性折减约15%,28 d 强度折减约21%。同时,针对需要进行运输等工况,0.5 h后流动值相比新拌流动化土流动值也有较大折减,折减约20%。因此,在后续工程设计中,可以参考相应折减系数进行设计。

5 结 论

- a. 在东莞茅洲河治理的管网埋设工程中使用基槽开挖产生的渣土进行了流动化土的改良和浇筑回填施工,施工质量满足管网施工要求。
- b. 现场施工控制参数为流动值和无侧限抗压强度。设计浇筑流动度为200 mm,3 d 强度为150 kPa,28 d 强度为300 kPa。检测表明,流动值在188~218 mm 之间,3 d 强度在138~168 kPa 之间,28 d 强度在324~362 kPa 之间。在现场应用中需要考虑流动性和强度折减,相同配比下,相比室内流动性折减约15%,28 d 强度折减约21%。
- c. 早强型流动化回填土流动性主要受水固比影响,水固比越大,流动性越大;灰砂比对流动性有一定影响。当水固比为0.63、灰砂比为0.15时,流动值为242 mm,且具备早强性能,1 d 强度可达98 kPa,28 d 强度可达390 kPa,满足流动化回填土设计。
- d. 早强型流动化回填土强度发展主要受灰砂比影响,灰砂比越大,早期强度和后期强度均较高。强度发展来自水泥水化作用,破坏变形在1%~3%,且破坏变形随无侧限抗压强度增大而减小。

参考文献:

[1] KANESHIRO J, NAVIN S, WENDEL L, et al. Controlled low strength material for pipeline backfill-specifications, case histories and lessons learned[J]. Pipelines, 2001,7:1-13.

[2] 张宏,凌建明,钱劲松. 可控性低强度材料(CLSM)研究进展[J]. 华东公路, 2011(6):49-54. (ZHANG Hong, LING

- Jianming, QIAN Jinsong. Research progress on controlled low-strength materials (CLSM)[J]. East China Highway, 2011(6): 49-54. (in Chinese))
- [3] 冉晋, 张金喜, 王建刚, 等. 快硬性建筑垃圾流动化回填材料制备与性能[J]. 公路, 2016(3): 190-195. (RAN Jin, ZHANG Jinxi, WANG Jiangang, et al. Preparation and properties of rapid hardening flowable backfill material containing construction waste[J]. Highway, 2016(3):190-195. (in Chinese))
- [4] COMMITTEE A. Controlled low strength materials (CLSM)[J]. Concrete International, 1994,16(7):55-64.
- [5] YAN Y S, TANG I Y, IRENE M C. Development of controlled low-strength material derived from beneficial reuse of bottom ash and sediment for green construction[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64:201-207.
- [6] DEV K L, ROBINSON R G. Pond ash based controlled low strength flowable fills for geotechnical engineering applications[J]. International Journal of Geosynthetics & Ground Engineering, 2015, 1(32):1-13.
- [7] LEE K, KIM J. Performance evaluation of modified marine dredged soil and recycled in-situ soil as controlled low strength materials for underground pipe[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013,17(4):674-680.
- [8] PUPPALA A J, CHITTOORI B, RAAVI A. Flowability and density characteristics of controlled low-strength material using native high-plasticity clay[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015,27(1):1-11.
- [9] LE D H, NGUYEN K H. An assessment of eco-friendly controlled low-strength material[J]. Procedia Engineering, 2016, 142: 259-266.
- [10] TAN M D, KIM Y S. Engineering properties of controlled low strength material (CLSM) incorporating red mud[J]. International Journal of Geo-Engineering, 2016, 7(1):1-17.
- [11] LIM S, LEE W, CHOO H, et al. Utilization of high carbon fly ash and copper slag in electrically conductive controlled low strength material[J]. Construction and Building Materials, 2017,157:42-50.
- [12] ZHANG J, WANG J, LI X, et al. Rapid-hardening controlled low strength materials made of recycled fine aggregate from construction and demolition waste[J]. Construction and Building Materials, 2018, 173:81-89.
- [13] TATSUOKA. Cement-mixed soils in trans-tokyo bay highway project[J]. Soils & Foundations, 2010,50(6):785-804.
- [14] RAAVI A K. Design of controlled low strength material for bedding and backfilling using high plasticity clay[D]. Texas:The university of texas at Arlington, 2012.
- [15] 久野悟郎. 土の流動化処理方法[M]. 名古屋:技報堂出版,1997.
- [16] 木幡行宏. 流動化処理土の力学特性と今後の課題[J]. 土木学会論文集,2006,62(4): 618-627.
- [17] 魏建军. 建筑垃圾细料生产流动化回填材料的性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(3):96-103. (WEI Jianjun. Properties of flowable backfill materials using recycled fine aggregates of brick and concrete waste[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(3):96-103. (in Chinese))
- [18] 邹培林. 流动化处治土的强度特性试验研究[D]. 西安:长安大学, 2016.
- [19] 日本道路公团. 引气砂浆和引气灰浆的试验方法: JHS A313—1992[S]. 东京:日本道路公团,1992.
- [20] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000,22(5):549-554. (TANG Yixin, LIU Hanlong, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,22(5):549-554. (in Chinese))
- [21] 程涛, 洪宝宁, 程江涛. 云罗高速公路沿线高液限土承载比影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013,41(5):58-62. (CHENG Tao, HONG Baoning, CHENG Jiangtao. Analysis of factors influencing California bearing ratio of high-liquid limit soil along Yunluo Expressway[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013,41(5):58-62. (in Chinese))

(收稿日期:2020-03-11 编辑:刘晓艳)