

文章编号: 1007-2993(2024)05-0605-06

# NB01 固化剂固化建筑渣土路基填料的 适宜性试验研究

许大鹏<sup>1</sup> 朱剑锋<sup>2</sup> 汪正清<sup>2,3</sup>

(1. 明阳(宁波)环保科技有限公司, 浙江宁波 315021; 2. 浙江科技大学土木与建筑工程学院, 浙江杭州 310023; 3. 杭州路达公路工程有限公司, 浙江杭州 310024)

**【摘要】** 建筑渣土堆集占用了大量的土地资源, 并造成一定程度的环境污染。采用新型固化剂 NB01 对宁波典型建筑渣土进行固化处理, 通过开展无侧限抗压强度试验、路用性能试验、X 射线衍射试验和电镜扫描试验, 探究 NB01 固化建筑渣土路基填料的固化效果, 揭示 NB01 固化建筑渣土的作用机理。结果表明: 固化渣土无侧限抗压强度( $q_u$ )随着养护龄期和掺量的增加而增长, 采用 10% 掺量 NB01 型固化剂加固宁波建筑渣土, 养护 28 d 后  $q_u$  可达到 1396 kPa, 固化土的水稳系数达 0.96, CBR 值达到 25.80% 以上, 满足路基填料性能要求。NB01 型固化剂水化反应生成 C-A-H 和 C-S-H 凝胶增强了土颗粒之间的胶结性, 并且填充了孔隙, 提高了固化建筑渣土的力学性能。研究成果可为建筑渣土的资源再生利用提供参考。

**【关键词】** 建筑渣土; 无侧限抗压强度; 水稳性; 加州承载比; 微观机理

**【中图分类号】** TU411

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.016

## Suitability of NB01 Curing Agent to Solidify Construction Waste Soil as Roadbed Filler

Xu Dapeng<sup>1</sup> Zhu Jianfeng<sup>2</sup> Wang Zhengqing<sup>2,3</sup>

(1. Mingyang (Ningbo) Environmental Protection Technology Co., Ltd., Ningbo 315021, Zhejiang, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 3. Hangzhou Luda Highway Engineering General Company, Hangzhou 310024, Zhejiang, China)

**【Abstract】** The accumulation of construction waste soil has occupied a large amount of land resources and result in environmental pollution. A new curing agent, NB01, was adopted to solidify typical construction waste soil in Ningbo. Through conducting a series of macro-micro laboratory tests such as unconfined compressive strength test, road performance test, X-ray diffraction test, and electron microscopy scanning test, the solidification effect of NB01 solidified construction waste soil roadbed filler was investigated, and the mechanism of NB01 solidified construction waste soil was further revealed. The test results show that the unconfined compression strength,  $q_u$ , of solidified muck increases with the increase of curing age and content. After 28-day curing,  $q_u$  of the solidified muck can reach 1396 kPa, the water stability coefficient of the solidified soil approaches to 0.96, and the CBR value is larger than 25.80%, which meets the performance requirements of subgrade filler. The hydration reaction of NB01 can produce C-A-H and C-S-H gel, which enhance the cementation between soil particles and fill the pores and further promote the mechanical properties of solidified construction waste soil. The study could provide guidance for the recycling and utilization of construction waste resources.

**【Key words】** construction waste soil; unconfined compressive strength; water stability; CBR; microscopic mechanism

### 0 引言

我国东南沿海城市建设规模不断增大, 建设过程中会产生大量的建筑渣土, 其随意堆放, 严重浪费

土地资源, 造成环境污染<sup>[1-2]</sup>。以宁波市为例, 2021 年宁波中心城区的建筑渣土达到了 3551 万  $m^3$ , 宁波地区建筑渣土主要来源于建筑施工、地铁建设及管

基金项目: 浙江省公益项目(LGG22E090002); 浙江省水利防灾减灾重点实验室开放基金(FZJZSYS21007)

作者简介: 许大鹏, 男, 1990 年生, 汉族, 江苏连云港人, 大学本科, 助理工程师。研究方向: 软土地基处理。E-mail: 295499172@qq.com

通讯作者: 朱剑锋, 男, 1982 年生, 汉族, 河南漯河人, 博士, 教授。研究方向: 软土加固机制及固化土微观结构研究。E-mail: zhujianfeng0811@163.com

廊施工,建筑渣土组成复杂,利用率低,目前针对建筑渣土采取的处置方式主要为陆地堆置、海洋倾倒和围垦造地等,而用于建材制造、绿化种植、地基回填等绿色资源化利用量仅占生产量的18%左右<sup>[3-7]</sup>。

近年来,不断有学者采用化学加固法对建筑渣土进行资源化处理,通过加入水泥、石灰等固化剂或利用粉煤灰、矿渣等工业废渣类固化剂,与渣土产生物理化学反应,提高渣土颗粒间的连结度,改善渣土基本性能,以满足实际工程需要<sup>[8-11]</sup>。郑晓光等<sup>[12]</sup>提出应用固化剂针对5种工程渣土进行固化处理,固化后渣土可以满足不同等级道路底基层、路基的性能要求;陈永辉等<sup>[13]</sup>利用高炉矿渣微粉和水泥对高含水率碱渣土进行固化,并用模糊评价法确定最优配合比;郭沁颖等<sup>[14]</sup>在石灰基础上掺入碱渣、脱硫石膏等工业废渣,研究石灰-碱渣、石灰-脱硫石膏改良盾构渣土的力学性能及其浸水稳定性与耐久性,发现固化后渣土可以作为良好路基填筑材料;骆嘉成等<sup>[15]</sup>采用固结-固化复合技术对渣土进行现场试验,得到双层地基的整体承载力可以达到80~170 kPa。

综上,现有针对建筑渣土固化处理与资源化再生利用的研究已有相关报道,但针对东南沿海地区建筑渣土固化处理为道路路基填料的适宜性及作用机理等方面的研究较为欠缺,因此,利用自主研发的NB01型固化剂对建筑渣土进行固化处理,通过开展无侧限抗压强度(UCS)试验、水稳(WS)试验和加州承载比(CBR)试验探讨NB01固化剂掺量、有机质含量等对建筑渣土固化效果影响规律,验证NB01固化建筑渣土路基填料的适用性,最后通过X射线衍射试验(XRD)和电镜扫描(SEM)等微观试验解释NB01型固化剂加固建筑渣土的作用机理,以期为实现东南沿海地区建筑渣土的资源化利用提供依据。

## 1 试验设计

### 1.1 原材料特性分析

本试验所选用建筑渣土取自宁波地区某一施工现场,依据《公路土工试验规程》(JTJ 3430—2020)<sup>[16]</sup>对建筑渣土(见图1(a))基本物理指标进行相关土工试验,包括密度、含水率、液塑限、有机质含量等。

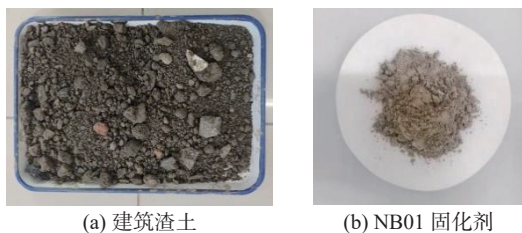


图1 试验材料

其主要物理指标见表1。其中 $\rho$ 为试验用土的天然密度, $w$ 为其天然含水量, $w_L$ 和 $w_p$ 分别为其液限和塑限, $W_u$ 为淤泥有机质含量。

表1 试验土样物理指标

土体	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w/\%$	$w_p/\%$	$w_L/\%$	$I_p$	$I_L$	$W_u/\%$
建筑渣土	1.75	24.35	21.13	38.66	17.53	0.184	0.883

如图1(b)所示,本试验采用NB01固化剂主要原材料为硅酸盐水泥、工业废渣(矿渣、废石膏、硅灰等),按一定配比配制而成。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试样制备与养护

本试验采用振捣法对试验用土进行单元体试样制备,其中单元体密度设定为渣土的天然密度(1.75 g/cm<sup>3</sup>),含水量为1.25倍液限( $w=48.33\%$ ),称取相应质量的天然土和水,混合后搅拌均匀,再掺入设定掺量的NB01型固化剂并搅拌均匀,然后等分四层放入三瓣模(80 mm×39.1 mm)中进行振捣,每层振捣100下左右,待土样表面均匀无气泡后,进行刮毛,最后一层振捣完毕后将单元体两端抹平,静置24 h后进行拆样,用保鲜膜裹紧后将单元体放置于恒温恒湿养护箱(温度为20℃±1℃,湿度为95%±1%)内养护至设定龄期。

#### 1.2.2 无侧限抗压试验

现以7 d龄期的固化土无侧限抗压强度( $q_{u,7}$ )评价NB01固化建筑渣土的作用效果,采用TKA-TIS-IS型全自动应力路径三轴仪对固化土进行无侧限抗压试验。设置加载速率为1 mm/min,在应力曲线出现峰值后继续加压一段时间停止试验,保存并记录试验数据,若加压过程中一直未出现峰值,则取应变为15%时所对应应力值,并停止试验。若同一组数据应力峰值相差超过20%,则重新制样并压样。

#### 1.2.3 路用性能试验

(1)水稳试验:水稳性是材料在浸水作用下抵抗水分侵蚀而保持其强度的能力。路基填料易受到雨水和其他水文地质条件的影响,需要考察其水稳性,定义水稳系数 $K$ 为<sup>[17-18]</sup>:

$$K = q_{uw,T}/q_{u,T} \quad (1)$$

式中: $q_{uw,T}$ 为养护至设定龄期 $T$ (7 d, 14 d和28 d)前一天并浸水24 h后测得的固化土的无侧限抗压强度, kPa; $q_{u,T}$ 为养护至设计龄期 $T$ 后固化土的无侧限抗压强度, kPa。

(2)CBR试验:参照《公路土工实验规程》(JTJ

3430—2020)中加州承载比(CBR)试验,首先按照标准击实试验方法测定建筑渣土的最优含水率和最大干密度,再按最优含水率( $w_{opt}=18.5\%$ )进行备样,通过使用电动击实仪进行重型击实试验,制备完成三组标准直径 152 mm,高度 120 mm 的 CBR 试块,养护 28 d 龄期后,进行浸水膨胀试验,测定膨胀率和吸水量,并利用数显式 CBR 承载比试验仪开展 CBR 试验,测定 CBR 值。

1.2.4 微观试验

(1)XRD 试验:使用 KYOWAGLAS-XAH-12 型 X 衍射仪进行 XRD 试验。试验时首先将固化后的试样放入烘箱(60℃ 恒温)中烘干 24 h,再利用研磨杵进行碾碎并过 200 目筛;然后取试样粉末放入仪器中进行衍射分析。进行 XRD 试验时设置管压为 40 kV,电流 40 mA,测试角度为 5°~80°,扫描速度为 2°/min<sup>[19]</sup>。

(2)SEM 试验:采用 ZEISS Sigma 300 型扫描电子显微镜对养护至设计龄期后的烘干(60℃)土样进行微观结构分析,放入仪器中进行抽真空处理,观察固化渣土的微观表征结构并进行记录分析。

2 试验结果及分析

2.1 无侧限抗压强度试验结果分析

2.1.1 NB01 型固化剂掺量影响

分别加入质量分数( $w_c$ )为 4%, 6%, 8%, 10% 的 NB01 型固化剂对建筑渣土进行固化,养护 7 d, 14 d, 28 d 龄期后,得出固化渣土的  $q_u$  的变化趋势(见图 2)。

① 由图 2 可知,随着  $w_c$  的增加,NB01 固化渣土  $q_u$  不断提高,当  $w_c=10\%$  时,7d, 14 d, 28 d 龄期的  $q_u$  均可达到 1 MPa 以上,较  $w_c=4\%$  时  $q_{u,7}$ ,  $q_{u,14}$ ,  $q_{u,28}$  分别提高了 297.2%, 222.7%, 220.2%。

②随着养护龄期的增加,固化渣土  $q_u$  逐渐提高,当  $w_c=4\%$  时,  $q_{u,7}$  仅为 252 kPa,  $q_{u,28}$  达到了 436 kPa,当  $w_c=10\%$  时,  $q_{u,7}$  为 1001 kPa,  $q_{u,28}$  高达 1396 kPa。

作为对比,现加入相同质量分数( $w_c=4\%$ , 6%, 8%, 10%)的 42.5#水泥对建筑渣土进行固化,养护 7 d 龄期后进行 UCS 试验,与图 2 相应 NB01 固化渣土结果进行对比(见图 3)。

① 随着  $w_c$  的增加,水泥固化土和 NB01 固化土试样的  $q_{u,7}$  均逐渐增大;当  $w_c$  从 4% 提高到 10%,水泥固化土和 NB01 固化土的  $q_{u,7}$  的增长幅度分别达到了 290.9% 和 297.2%。

② 相同掺量条件下,42.5#水泥固化后  $q_{u,7}$  低于 NB01 固化后  $q_{u,7}$ 。且随着  $w_c$  的提高,NB01 和水泥

固化的  $q_{u,7}$  的差距越来越大,尤其是当  $w_c$  超过 8% 后,NB01 固化土的  $q_{u,7}$  约为水泥固化土的 2 倍。

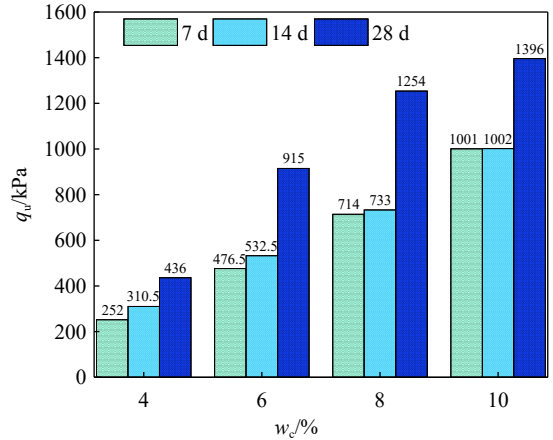


图 2  $w_c$  对建筑渣土  $q_u$  的影响

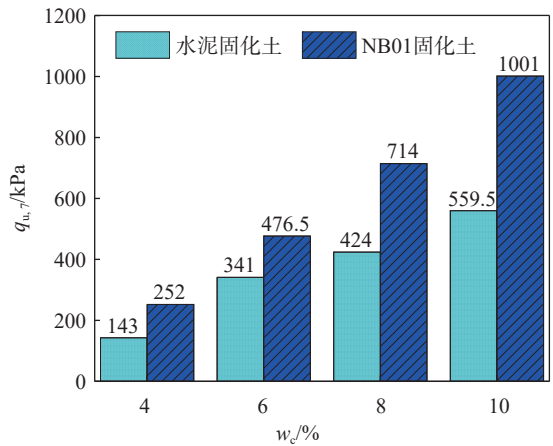


图 3 相同  $w_c$  下水泥固化土和 NB01 固化土的  $q_{u,7}$

2.1.2 有机质掺量影响

现维持 NB01 固化剂掺量  $w_c=6\%$  的不变,变化建筑渣土腐殖酸掺量  $W_u=2\%$ , 4%, 6%, 8%, 10%, 养护龄期设定为 7 d, 结果见图 4。

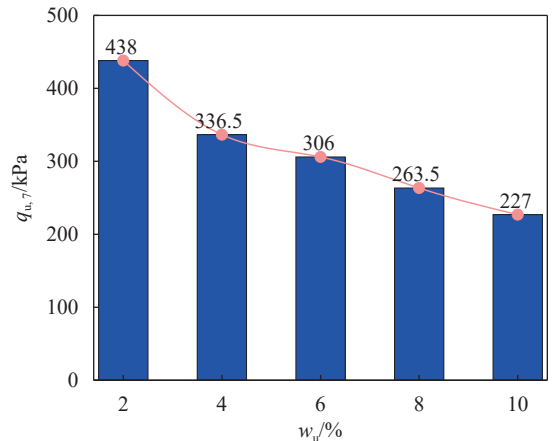


图 4  $W_u$  对  $q_{u,7}$  的影响

对比图 2 和图 4 可知,  $W_u$  对 NB01 固化渣土抑

制效果显著,且 $q_{u,7}$ 随着 $W_u$ 的不断提高而逐渐降低,相较于未掺加腐殖酸, $W_u=2\%$ 时, $q_{u,7}$ 降低了8.79%; $W_u=10\%$ 时, $q_{u,7}$ 降低了72.02%。说明有机质抑制了NB01固化剂发生水化反应,减少了固化产物生成。

## 2.2 路用性能试验结果分析

### 2.2.1 水稳试验

掺入6%NB01固化剂进行制样,分别养护7 d,14 d,28 d龄期后开展水稳性试验,浸水24 h后试样表面见图5,并与未浸水试验结果进行对比(见图6)。

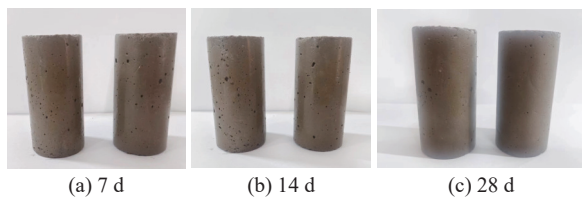


图5 浸水24 h后试样

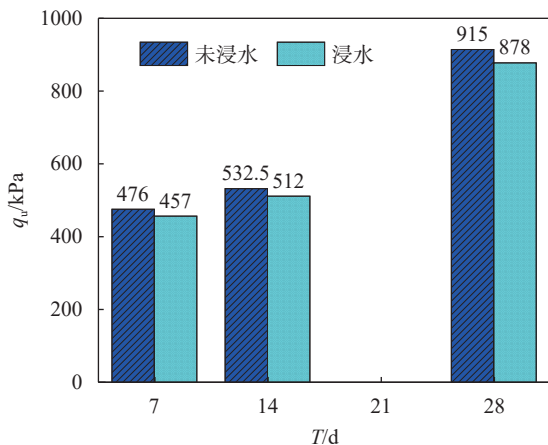


图6 水稳试验结果对比

对比浸水24 h和未浸水后的 $q_u$ 发现:浸水24 h后 $q_u$ 略有降低,但降低幅度较小,说明固化土试样耐水性强,结构稳定,且7 d,14 d,28 d龄期水稳系数 $K$ 分别分别为高达0.960,0.961,0.949,水稳系数基本保持不变,满足实际道路路基填料要求<sup>[16-17]</sup>。

### 2.2.2 CBR 试验

按最优含水率进行渣土料制备,掺入6%NB01型固化剂,分别对固化土样试块重型击实30,50,98次,养护到规定龄期 $T$ (28 d)后进行CBR试验(见图7),结果见表2。

由表2可知:

① 击实30,50,98次后固化渣土的浸水膨胀率分别仅为0.67%,0.35%,0.3%,说明固化后胶凝产物填充土体孔隙,使渣土颗粒胶结性能强,形成稳定致密的土体结构,使渣土膨胀效果明显降低。

② 吸水量也随着击实次数的增加而减小,当击实次数达到98次后,试样吸水量仅为5.7 g,说明固化后建筑渣土的孔隙率低,表观孔隙少,整体性强,水分难以进入固化土中。

③ 固化建筑渣土28 d龄期后的CBR值范围达到25.80%~42.24%,根据《公路土工实验规程》(JTG 3430—2020)中路基填料CBR值大于8%的要求,NB01固化渣土的承载比远超过规范要求。



图7 CBR 试验图片

表2 CBR 试验结果

击实次数	湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	膨胀率/%	吸水量/g	CBR值/%
30	1.973	1.665	0.67	112.7	25.80
50	2.075	1.751	0.35	24.5	34.26
98	2.128	1.796	0.30	5.7	42.24

综上,结合水稳试验结果,NB01固化剂固化渣土完全达到路基填料的要求。

## 2.3 微观试验结果分析

分别对含水率为1.25倍液限( $w=48.33\%$ )的建筑渣土和加入10%掺量NB01型固化剂的固化渣土进行制样,养护28 d龄期后,选取典型试样进行XRD和SEM试验,得到如下结果。

### 2.3.1 XRD 试验

图8(a)和图8(b)分别为建筑渣土和NB01固化渣土的XRD图谱。

由图可知:

① 建筑渣土的主要矿物成分为石英、高岭石、钠长石、伊利石等矿物,其成分多为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等氧化物,且固化渣土石英衍射峰相较于未固化建筑渣土明显降低,说明部分 $\text{SiO}_2$ 参与反应生产水化硅酸钙产物(C-S-H)。

② 固化渣土中测得少量钙矾石、方解石等水化产物,方解石为碳酸盐晶体,钙矾石为水泥水化产物C-A-H(水化铝酸钙)和硫酸根离子结合而成,呈针棒状<sup>[19-20]</sup>。

③ 由于NB01型固化剂反应所生成的C-S-H

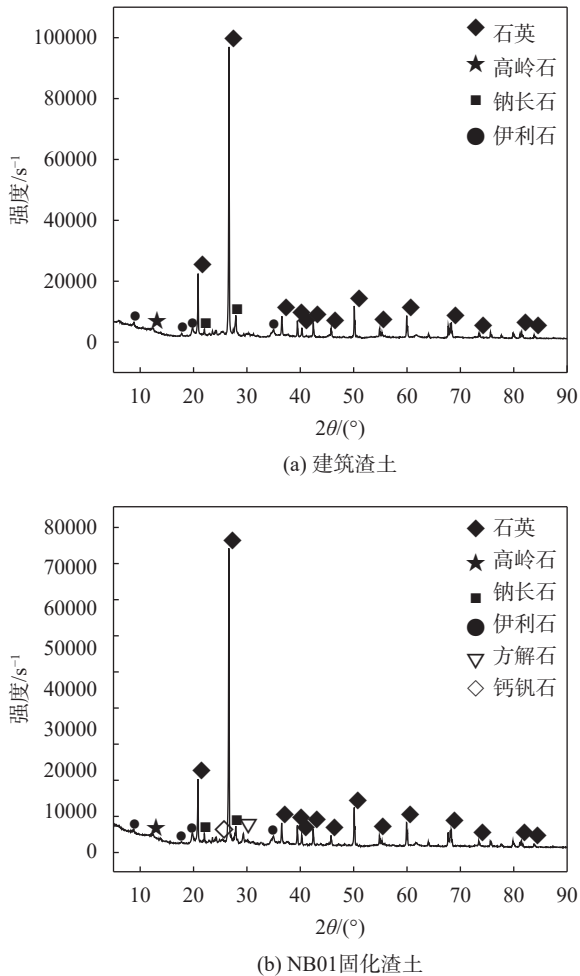


图8 建筑渣土和NB01固化渣土的XRD图谱

和C-A-H凝胶,呈不定型非晶态,从XRD图谱中无法进一步识别,但固化渣土中检测的方解石、钙钒石等矿物成分可侧面印证固化反应所生成的C-S-H和C-A-H<sup>[21-22]</sup>。

因此,NB01型固化剂与建筑渣土反应生成的C-A-H凝胶和C-S-H凝胶可以提高胶结作用,填充土体孔隙,是固化渣土整体强度提高的来源。

### 2.3.2 SEM 试验

图9(a)和图9(b)分别为建筑渣土和NB01固化渣土的SEM试验结果。

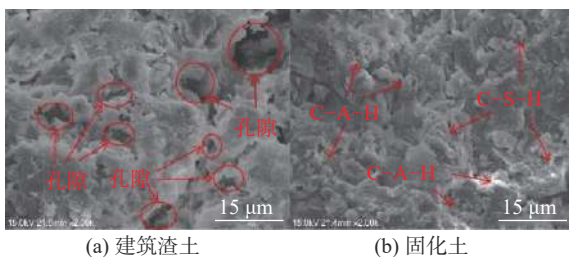


图9 建筑渣土和固化土SEM图

①由图9(a)可知,建筑渣土内部孔隙较多,整体结构松散,土体颗粒之间接触不明显,导致建筑渣土

强度较低,路用性能差。

②由图9(b)可知,固化后建筑渣土的土颗粒孔隙明显减少,整体结构较为均匀密实,结合XRD试验结果可知:NB01固化反应生成的水化产物C-A-H凝胶和C-S-H凝胶可以填充建筑渣土孔隙,更好地胶结土颗粒,提高颗粒之间的黏结力,形成密实的整体,从而提高试样的强度,改善其路用性能。

## 3 结论

本文分别以宁波建筑渣土和NB01为固化对象和固化剂,针对固化土的无侧限抗压强度、路用性能以及微观机理,进行了系统性的试验研究和理论分析,主要结论如下:

(1)随着 $w_c$ 的增加,固化土的 $q_u$ 逐渐提高,当 $w_c=10\%$ 时,不同龄期的 $q_u$ 均可达到MPa级别;与42.5#水泥相比,相同 $w_c$ 条件下,NB01固化剂固化后强度达到42.5#水泥固化土的2倍以上,固化效果更显著。

(2)NB01固化剂可以显著改善建筑渣土的路用性能,固化后渣土水稳系数可以达到0.96,远高于路用要求,且固化后渣土的CBR值到25.80%以上,远超过规范所要求的8%,满足路基填料的性能要求。

(3)XRD试验、SEM试验结果表明:NB01固化剂水化反应生成的C-A-H和C-S-H凝胶填充土体孔隙,显著提高了土颗粒之间的黏结性,形成更加密实均匀的整体,进而改善了渣土的力学性能和路用性能。

## 参考文献

- [1] 张丽,李志强,李斯文,等.土壤固化剂在建筑渣土中的应用[J].建材世界,2023,44(2):34-36,43.
- [2] 李琴,孙可伟,蒋卓吟.固化剂固化建筑渣土试验研究[J].硅酸盐通报,2012,31(5):1247-1251.
- [3] 宁波市第三次全国国土调查领导小组办公室宁波市自然资源和规划局宁波市统计局.宁波市第三次全国国土调查主要数据公报[N].宁波日报,2021-12-10(005).
- [4] 李庆冰,宋冰泉,王毓晋,等.宁波市建筑工程渣土和废弃泥浆应用现状[J].广东土木与建筑,2022,29(5):40-43.
- [5] 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.
- [6] 徐石林,贺万亮.建筑渣土资源化利用分析——以宁波市为例[J].中国资源综合利用,2022,40(8):99-101.
- [7] 陈蕊,杨凯,肖为,等.工程渣土的资源化处理处置分析[J].环境工程,2020,38(3):22-26.
- [8] 郭小雨,陈枝东,裴立宅,等.改性矿渣水泥-渣土免烧

- 砖的制备与性能表征 [J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(5): 75-79.
- [9] 王元战, 孙春鹏, 王 轩, 等. 掺入粉煤灰软黏土的复合碱渣土力学特性探究 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(2): 206-214.
- [10] 杨 涛, 李幸孺, 刘帅磊, 等. 固化渣土材料力学性能试验与微观机理研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2024, 20(3): 848-856, 867.
- [11] 许 福, 蒋川梓, 张书经, 等. 碱激发矿渣固化土压平衡盾构渣土的试验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(3): 849-859.
- [12] 郑晓光, 水亮亮, 任 奇. 工程渣土在道路工程中的资源化利用与性能分析 [J]. *上海公路*, 2020(4): 65-67, 150.
- [13] 陈永辉, 陈明玉, 张婉璐, 等. 矿渣-水泥固化碱渣土的工程特性 [J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(4): 582-585, 597.
- [14] 郭沁颖, 李白云, 丁建文, 等. 工业废渣改良泥水盾构渣土的路用性能试验研究 [J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20221222.0927.002.html>.
- [15] 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(S2): 3483-3492.
- [16] JTG 3430—2020 公路土工试验规程 [S].
- [17] 徐日庆, 朱坤垵, 黄 伟, 等. 淤泥质土固化及路用性能试验研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(3): 167-174.
- [18] 尹明军. BTS 土壤固化剂改良路面水稳层研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [19] 朱剑锋, 汪正清, 陶燕丽, 等. 电石渣-草木灰复合固化剂固化废弃软土微观特性研究 [J]. *土木工程学报*, 2023, 56(10): 180-189.
- [20] 杨 浩, 朱剑锋, 陶燕丽. 3 种因素影响下固化废弃淤泥的微观特性研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(4): 91-99.
- [21] 王旭影, 乔京生, 赵建业, 等. 电石渣激发钢渣-矿渣固化淤泥质土的试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(2): 733-739.
- [22] 何 俊, 王小琦, 石小康, 等. 碱渣-矿渣固化淤泥的无侧限抗压强度与微观特征 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(2): 376-386.

收稿日期: 2023-09-04