

盾构渣土固化技术研发及工程应用

朱晓东,薛丹璇

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司,天津市 300072)

摘 要:以地铁盾构渣土为研究对象,采用材料研选、单掺试验和正交试验的手段,开展固化剂配伍调控,获得固化剂配方,通过微观分析和室内试验,对固化机理和固化性能进行深入分析,在实际工程中应用固化盾构渣土,效果良好。研究表明:固化剂的掺入会大幅改良盾构渣土的工程特性,使盾构渣土聚集成团块大颗粒,形成整体化结构,有效提升工程性质;通过分别添加固化剂和水泥的盾构渣土对照实验发现,固化剂固化渣土的土体力学性能、干缩特性和抗冻融性能均明显优于水泥固化土。研究成果有利于推动盾构渣土绿色治理,打通在道路工程中的应用途径。

关键词:盾构渣土;固化剂;固化机理;力学性能;工程应用

中图分类号: U414

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)11-0029-05

0 引 言

随着城市地下空间开发的快速推进,盾构法作为一种高效、安全、机械化程度较高的施工方式,在轨道交通、市政公路、城市综合管廊等工程建设领域得到了广泛应用。相关统计表明,我国每年产生的盾构渣土超过上亿立方米,关于盾构渣土无害化处理一直是一个巨大的难题^[1-2]。高含水率、高孔隙率、低渗透性、可压缩性大和强度低的特点^[3],导致盾构渣土无法直接应用于工程,传统的堆存填埋等处置方式,会带来环境污染和资源浪费^[4-6],甚至带来次生灾害^[7-8]。

传统的水泥等固化材料固化效果差,且水泥烧制时带来资源浪费和环境污染问题,与双碳战略背道而驰。固废材料、纳米材料、高分子材料等新型材料制作的新型固化剂成为了研究热点。LI 等^[9]利用焚烧污泥灰和石灰研制新型黏结剂,研究表明新型黏结剂可替代水泥作为黏结剂,具有成本低、环境足迹小和强度提升效果好的优势。SUN 等^[10]通过对比硫酸铝盐水泥、硅酸铝盐水泥、膨润土、硅酸锂、石灰组成的 4 组配方,研究发现硫酸铝盐水泥是污泥处理中的一种早期强度高,性能优良的胶凝剂。K. J. Osinubi 等^[11]通过微生物诱导方解石沉淀法研究赤

红壤与垃圾渗滤液的相互作用,经过处理的土壤可用于水力屏障材料。Xin Kang 等^[12]采用生物聚合物黄原胶、壳聚糖和合成聚合物聚乙烯氧化物、聚丙烯酰胺作为新型黏结剂改良高岭石,通过研究改良后高岭石微观结构、物理性能和化学性能,结果表明电荷中和和阳离子交换过程是控制聚合物改良土壤颗粒间力和微观结构发育的主要机制。CHEN 等^[13]利用城市固体废物焚烧底灰与黏结剂固化污泥,对比波特兰水泥、石灰、添加剂等黏结剂固化效果,研究发现水泥与石膏复合黏结剂对提高固化淤泥强度和浸出液潜力效果最佳。LIN 等^[14]通过对比钙基膨润土,粉煤灰、高岭石等材料,研究固化后污泥无侧限抗压强度和浸出液,表明钙基膨润土水化效果和污染物固化效果优于粉煤灰和高岭石。R.A.Nugent 等^[15]通过对比临界剪切应力研究瓜尔胶和黄原胶对高岭石黏土抗侵蚀性,表明瓜尔胶作为固化剂时因生物高聚物链和黏土颗粒之间的氢键作用,使其临界剪切应力增加 9 倍。

国内外现有的固化剂大多针对淤泥污泥土,盾构渣土由于施工过程中加入过多的添加剂,导致其工程性质复杂,远低于一般的工程渣土,基于此,本文通过单掺试验、正交试验等手段自主研发高聚物改性固化剂,通过无侧限抗压强度和干燥收缩等路用性能试验验证了固化盾构渣土作为筑路材料的可行性,并将固化渣土应用于实际工程,效果良好,为固化盾构渣土路用提供了技术参考和科学依据。

收稿日期: 2024-07-17

作者简介:朱晓东(1964—),男,硕士,教授级高级工程师,从事市政道路桥梁设计研究工作。

1 渣土理化特性分析

盾构渣土土样取自于南京地铁 11 号线某地铁站,现场取样照片如图 1 所示。



图 1 现场土样照片

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[6],原状渣土的自然含水率通过烘干法测定,渣土有机质含量通过高温煅烧法测定,渣土最佳含水率和最大干密度通过轻击实试验测定。此外,结合微观试验(XRD、XRF、SEM 等)分析了渣土的相变及微观结构特性。具体的分析测试结果如下。

1.1 渣土物理特性

表 1 给出了渣土基本物理特性,经分析确定,该渣土所属类别为粉土质砂,天然含水率为 26.12%,有机质含量较少,为 0.46%,最优含水率及最大干密度分别为 16%和 2.0 g/cm³,这些基本的物理特性参数可以为后续固化土试验制备提供基础。

表 1 盾构渣土基本物理特性

渣土类别	天然含水率 / %	有机质含量 / %	最优含水率 / %	最大干密度 / (g·cm ⁻³)
粉土质砂	26.12	0.46	16	2.0

1.2 化学成分分析

通过对盾构渣土进行 XRF 测试,得出 63.61%的渣土化学成分主要是二氧化硅(SiO₂),其次是三氧化二铝(Al₂O₃)和氧化钙(CaO),分别占 12.76%和 9.97%。

1.3 矿物成分分析

基于 XRD 分析了盾构渣土的矿物成分,如图 2 所示,由图可知原状渣土中的石英(SiO₂)衍射峰最强,其次是 Al₂O₃,分析结果与 XRF 测试结果一致。此外,由渣土矿物成分分析结果可知,渣土自身也具有参与火山灰反应并增效固化强度的潜能。

1.4 微观形貌分析

采用扫描电镜(SEM)分析了渣土的微观形貌,放大倍数分别为 1 000,2 000,5 000 和 10 000,测试结果如图 3 所示。由图可知,土颗粒多为片状结果,且

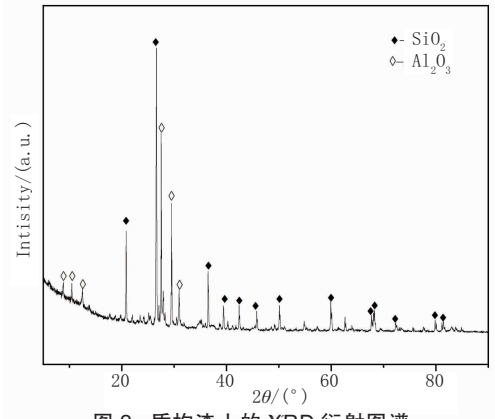


图 2 盾构渣土的 XRD 衍射图谱
微观结构多呈松散分布。

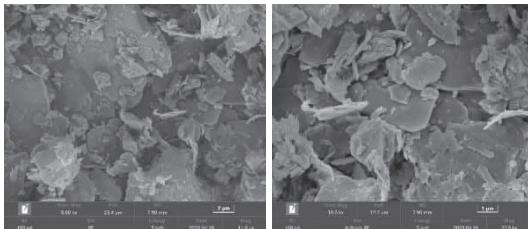
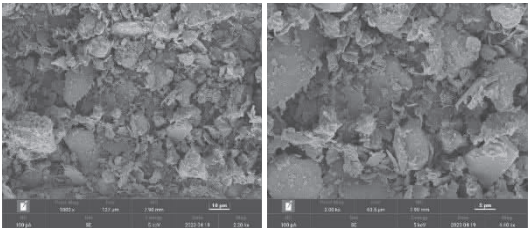


图 3 盾构渣土的微观形貌

2 固化剂配伍调控研究

2.1 固化材料研选

基于盾构渣土的物理化学特性,根据固化路线和固化机理,结合原材料的供应运输和价格,以及工业废物的利用,选择硅酸盐水泥、粉煤灰、添加剂 1、添加剂 2、聚丙烯酸钠作为固化剂的组成成分。

2.2 试样制备与测试方法

以水泥和粉煤灰含量 2%~10%(以干土质量计)进行试验,添加剂 1、添加剂 2、聚丙烯酸钠作为调节剂掺量 1%~5%(以干土质量计)进行单掺试验,单掺配比方案如表 2 所列,以 7 d 固化渣土强度为控制指标,进而确定最优的固化材料配伍。

在单掺试验的基础上,为实现新型固化剂掺量小,强度高的固化效果,需要对固化剂进行组合调整,采用正交试验的方式,水泥掺量、粉煤灰掺量、添加剂 1 掺量、添加剂 2 掺量、聚丙烯酸钠掺量五个因素,各因素均为 5 个水平,因素水平(各组分掺量)如表 3 所列。

表 2 固化剂单掺试验配比方案

材料	掺量 1	掺量 2	掺量 3	掺量 4	掺量 5
水泥	2	4	6	8	10
粉煤灰	2	4	6	8	10
添加剂 1	1	2	3	4	5
添加剂 2	1	2	3	4	5
聚丙烯酸钠	1	1.5	2	2.5	3

表 3 正交设计因素水平表 单位: %

水平	因素				
	水泥	粉煤灰	添加剂 1	添加剂 2	聚丙烯酸钠
1	2	2	1	1	1
2	4	4	2	2	1.5
3	6	6	3	3	2
4	8	8	4	4	2.5
5	10	10	5	5	3

2.3 固化剂配方研发

固化剂单掺试验按表 2 的配比方案,每组配制 3 个试样,共 75 个试样,取 3 个试样的无侧限抗压强度平均值作为计算值,共分 25 组进行试验,实验结果如图 4 所示:(1)无侧限抗压强度随着聚丙烯酸钠掺量的先增大后减小,上升到峰值点后随着聚丙烯酸钠增加而降低,且速度较快;(2)随着粉煤灰掺量的增加,曲线上升到峰值点后固化土无侧限抗压强度随着粉煤灰增加而降低,降低速率较平缓;(3)添加剂 1 掺量增加,曲线上升到峰值点,随着添加剂 1 增加而降低,固化土无侧限抗压强度下降幅度比粉煤灰大;(4)随着添加剂 2 掺量增加,固化土无侧限抗压强度增加,到达峰值点后,继续提高添加剂 2 的掺量,固化土强度降低,添加剂 2 是盾构渣土固化剂理想材料,效果优于硅酸盐水泥、粉煤灰和添加剂 1;(5)无侧限抗压强度随硅酸盐水泥掺量增加呈线性增加,需要说明的是硅酸盐水泥掺量由 2% 提高到 10%,固化土无侧限抗压强度仅提高 100 kPa,不足 15%,硅酸盐水泥掺量增加对强度提高不明显。

图 5 给出了表 3 正交试验数据图,固化土体 7 d 无侧限抗压强度在第 25 组中达到了 2 714.4 kPa 的最高值,其中水泥掺量 8%,粉煤灰掺量 10%,添加剂 1 掺量 4%,添加剂 2 掺量 2%和聚丙烯酸钠掺量 1.5%。通过极差分析,本次试验中 5 个因素对固化土体 7 d 无侧限抗压强度影响顺序为硅酸盐水泥掺量>粉煤灰掺量>添加剂 1 掺量>添加剂 2 掺量>聚丙烯酸钠掺量。综合以上试验结果分析,最后选择

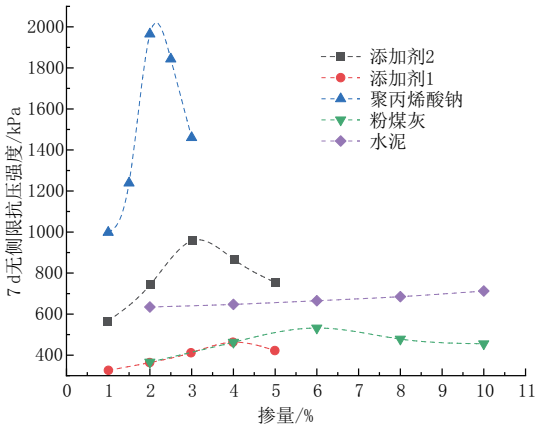


图 4 各组分掺量对强度的影响

的复合固化剂(CCA)配方组合为硅酸盐水泥:粉煤灰:添加剂 1:添加剂 2:聚丙烯酸钠=35:35:15:9:6。

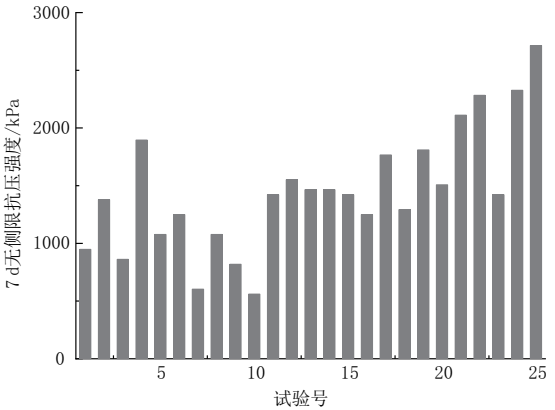


图 5 正交试验组试验结果

2.4 固化机理分析

固化土体早期强度来源于高聚物的固化作用,固化土体长期强度主要来源于各类无机物的系列水化反应,固化剂中的碱性成分,促进水化反应产生更多的胶凝水化物,共同提高固化土体强度。

原状盾构渣土团聚体以面接触、线接触、点接触形式生成,接触较为松散,在外力下容易发生错位移动,导致其工程性质差;添加单一聚丙烯酸钠的固化土土颗粒松散,孔隙多且大孔隙更多,通过外力压缩该固化土体,固化土体在压力作用下主要是小颗粒团聚集在一起,形成一定的强度;当固化剂中有聚丙烯酸钠、硅酸盐水泥、粉煤灰、添加剂 1 时,相比于仅有聚丙烯酸钠的固化土体其结构更加紧密,土颗粒聚集成团,形成团状颗粒;加入含有添加剂 2 的复合固化剂后,进一步反应生成钙矾石,聚集成团块大颗粒,形成整体化结构,固化渣土工程性质得到有效提升。

3 固化渣土固化特性研究

盾构固化渣土作为道路填筑材料,需要较高的

强度以满足交通荷载的需求。无侧限抗压强度是评价固化土力学特性的一个重要指标,通过无侧限抗压强度试验,观察盾构渣土在掺加固化剂后的无侧限抗压强度,分析固化剂对试件力学性能影响。固化盾构渣土道路填筑完成后,随着时间推移基层中所含水分逐渐减少、基层收缩。过大的收缩不仅会损害力学性能、产生收缩裂缝,在车辆荷载下基层中的裂缝将反射到面层影响道路的使用,干缩是影响路用性能的主要因素。

3.1 抗压强度

如图6所示,通过水泥和复合固化剂固化土的无侧限抗压强度实验发现:相同掺量的前提下,使用固化剂作为养护剂的土体无侧限抗压强度明显比水泥固化土作为更高;且随着固化剂掺量的提高,两种土的无侧限抗压强度也随之提高,两者的增长幅度大致相同。

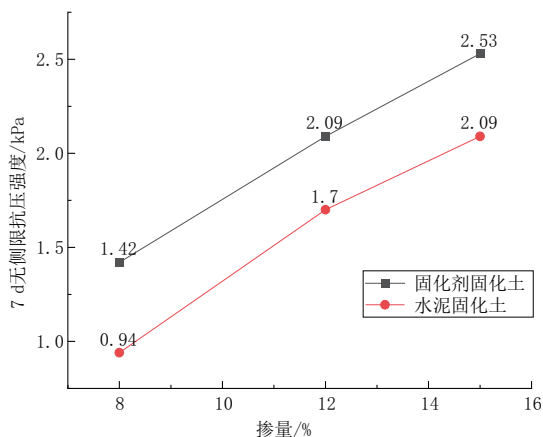


图6 掺量对固化渣土强度变化的影响

3.2 干缩特性

固化盾构渣土基层铺筑完成后,随着时间推移基层中所含水分逐渐减少、基层收缩。过大的收缩不仅会损害基层材料力学性能、产生收缩裂缝,在车辆荷载下基层中的裂缝将反射到面层影响道路的使用。图7所示为干缩试验及土样。



图7 干缩土样及试验

如图8所示,各土体的应变-时间曲线的变化趋势基本一致,在干缩试验前期土体的干缩应变随着时间的延续而持续增加,而干缩应变达到峰值时,

干缩应变随着时间的延续而逐渐减小,最终稳定于某一水平。8%、12%、15%的水泥土干缩应变分别稳定于1.41、1.32、1.18;8%、12%、15%的固化土干缩应变分别稳定于1.32、1.22、1.08。通过分析可知,在不同固化剂掺量条件下,固化剂掺量高的土体干缩应变越小,而同一固化剂掺量下,固化土的干缩应变均小于水泥土。随着时间的推移,失水率、干缩系数均呈下降趋势并最终趋近于零。

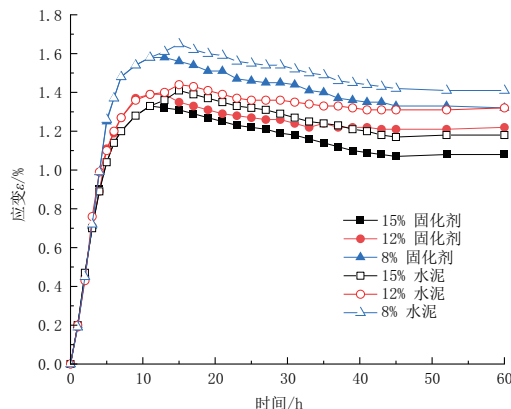


图8 固化土干缩累积应变

4 工程应用

4.1 工程概况

固化渣土就近应用于南京某城市道路工程,道路全长796 m,规划道路等级为城市支路等级,规划道路红线宽度18 m,近期实施宽度11 m。近期实施范围K0+038.808~K0+715;远期实施范围K0+715~K0+793.294。盾构渣土选取的实施范围为:K0+038.808~K0+138.808。

4.2 现场施工

本次试验路段中固化盾构渣土主要用于层位为路床及底基层,固化剂掺量分别为路床6%,路面底基层8%。如图9所示,本次试验路段采用路拌法,主要施工工艺包括盾构渣土晾晒、下承层准备、施工放样、布料、摊铺、拌和、整形、碾压和养生。需要说明的是,为满足压实度要求,在道路工程施工现场渣土堆存晾晒区,充分翻耕晾晒盾构渣土,将盾构渣土多次翻晒至最优含水率 $\pm 2\%$,这是保证固化渣土施工质量的关键所在。

4.3 现场检测

试验路段路床施工完毕后,在施工现场进行了压实度和弯沉值检测,路床压实度可达94%~96%,弯沉值为10~40(0.01 mm),路面底基层施工完成后,经检测,压实度可达96%~98%,7d无侧限抗压强度可达1.0~1.1 MPa。



图 9 固化渣土现场施工照片

5 结 论

本文以盾构渣土的物理和力学性能方法为出发点,采用材料研选、单掺试验和正交试验的手段研发改性盾构渣土的固化剂配方,并对固化土体的固化性能进行系统分析,研究了固化土体的无侧限抗压强度和干燥收缩性,并成功应用于某城市道路工程,最终得出以下结论。

(1)通过具体、系统性地研究,明确盾构渣土含有一定量的化学泡沫、膨润土、高分子聚合物,其矿物成分包括矿物以含有伊利石为主的黏土矿物和石英以及少量钠长石。

(2)相同掺量的前提下,使用固化剂作为养护剂的土体无侧限抗压强度明显比水泥固化土作为更高;且随着固化剂掺量的提高,两种土的无侧限抗压强度也随之提高,两者的增长幅度大致相同。

(3)根据配合比组成方案和击实试验结果,制备 50 mm × 50 mm × 200 mm 小梁试件进行干缩试验,可以发现,随着时间的延续,失水率、干缩量、干缩应变及干缩系数均呈下降趋势并最终趋于零。

(4)通过水泥和固化剂固化土的一系列对照试验发现,随着养护剂掺量的提高,两种土的无侧限抗压强度随之提高,但是在相同掺量的前提下,使用固化

剂作为养护剂的盾构渣土各项性能明显优于水泥固化土。

(5)工程应用结果表明,6%掺量固化渣土满足本次试验路段的路床技术指标要求,8%掺量明固化渣土满足本次试验路段的底基层技术指标要求。

参考文献:

- [1] 郭卫社,王百泉,李沿宗,等.盾构渣土无害化处理,资源化利用现状与展望[J].隧道建设(中英文),2020,40(8):12-18.
- [2] Oggeri, C., Fenoglio, T.M., Vinai, R. Tunnel spoil classification and applicability of lime addition in weak formations for muckreuse. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2014, 44, 97-107.
- [3] 张祖焱,顾琳琳,王振,等.南京盾构渣土工程特性及其微观结构[J].科学技术与工程,2022,22(34):15252-15258.
- [4] Guo W.S., Wang B.Q., Li Y.Z., et al. Status quo and prospect of harmless disposal and reclamation of shield muck in China. *Tunnel Construction*. 2020(40):1101.
- [5] Du, L., Feng, Y., Lu, W., et al. Evolutionary game analysis of stakeholders' decision-making behaviours in construction and demolition waste management. *Environ. Impact Assess.* 2020(84):106408.
- [6] Zhu, W., Qian, Y.J., Wang, L., Wei, B.; Lu, K.J.; Fang, Z.Q.; Meng, L.F. Classification, treatment, and utilization techniques of shield tunnel abandoned soil and related issues. *Tunn. Constr.* 2021(41):1-13.
- [7] Tanner S., Katra I., Argaman, E., Erodibility of waste (Loess) soils from construction sites under water and winderosional forces. *Sci. Total Environ.* 2018, 616-617, 1524.
- [8] Yin, Y.; Li, B.; Wang, W.; Zhan, L.; Xue, Q.; Gao, Y.; Zhang, N.; Chen, H.; Liu, T.; Li, A. Mechanism of the December 2015Catastrophic Landslide at the Shenzhen Landfill and Controlling Geotechnical Risks of Urbanization. *Engineering* 2016(2):230 - 249.
- [9] Li, J-s, Zhou, Y-f, Wang, Q-m, et al. Development of a Novel Binder Using Lime and Incinerated Sewage Sludge Ash to Stabilize and Solidify Contaminated Marine Sediments with High Water Content as a Fill Material[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019,31(10):.
- [10] Sun, X, Wei, Z, Qian, X, et al. Exploring Cementitious Additives for Pretreatment of High-Early-Strength Sewage Sludge from the Perspective of the Rapid Generation of Nonevaporable Water [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26 (5):878-885.
- [11] Osinubi, K J, Eberemu, A O, Ijimdiya, T S, et al. Interaction of Landfill Leachate with Compacted Lateritic Soil Treated with Bacillus coagulans Using Microbial-Induced Calcite Precipitation Approach[J]. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2020,24(1):.
- [12] Kang, X, Bate, B, Chen, R P, et al. Physicochemical and Mechanical Properties of Polymer-Amended Kaolinite and Fly Ash-Kaolinite Mixtures[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019,31(6):1-13.

(下转第 48 页)

150 m 隧道敞开段匝道拆除改造及约 140 m 暗埋段拓宽改造,同时还涉及北侧厂房的拆迁工作,实施可行性较低。

图 10 为钱塘快速路主线出入口布置图。



图 10 钱塘快速路主线出入口布置图

故经分析论证,该节点设置单侧转向匝道的可实施性较低,交叉口应继续采用地面平交形式,转向交通经由信号灯控进入钱塘快速路平行匝道,完成横向转换。该节点本次不建议改造。

6 结 语

在《杭州市综合交通专项规划(2021—2035)》中,新城路过江通道定位为一级主干路,依据新城路过江通道周边交通需求分析、线路规划、技术标准、经济效益、方案比选等方面进行论证分析,结果认为

新城路过江通道的定位是正确的、合理的。

新城路过江通道的建设可以增强交通可达性和交通设施接待能力,增强区域辐射能力,对于完善杭州市快速路网布局,促进钱塘江两岸的建设发展有重要意义。

本文立足于当下的规划条件进行方案研究,明确功能定位、技术标准、建设形式等工程总体设计要点,从定性分析和流量预测两个层次论证建设规模,并从工程总体方案、横断面布置、重要节点三个方面论述了总体设计方案,可以为其他类似工程提供借鉴和参考。

主要研究结论:

(1)鉴于航道管理及江面、江潮景观需求,过江通道宜采用隧道形式;

(2)通过现状通道调查、类比及流量需求预测分析,过江通道宜采用双向 6 车道断面形式(主线双 4+ 两侧连续紧急停车带);

(3)考虑到两岸商住区人非过江需求,慢行通道有必要设置,但置于隧道内过江实施难度较大,建议远期可通过下沙大桥城市快速化改造实现。

参考文献:

- [1] CJJ 129—2009,城市快速路设计规程[S].
- [2] CJJ 221—2015,城市地下道路工程设计规范[S].

(上接第 33 页)

- [13] Chen P, Feng, B, Lin, Y, *et al.* Solidification and Stabilization of Sewage Sludge and MSWI Bottom Ash for Beneficial Use as Construction Materials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019,31(1):.
- [14] Lin, C., Zhu, W., Han, J. Strength and Leachability of Solidified Sewage Sludge with Different Additives[J]. *Journal of Materials in*

Civil Engineering, 2013,25(11):.

- [15] Nugent R.A. Zhang G., Gambrell R.P.. In The Effects of Exopolymers on the Erosional Resistance of Cohesive Sediments[J]. *International Conference on Scour & Erosion*,2011.1935.
- [16] GB/T 50123—2019,土工试验方法标准[S].
- [17] JTG E51—2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].