

特区建工技术

SEZ CONSTRUCTION TECHNOLOGY



NO.03

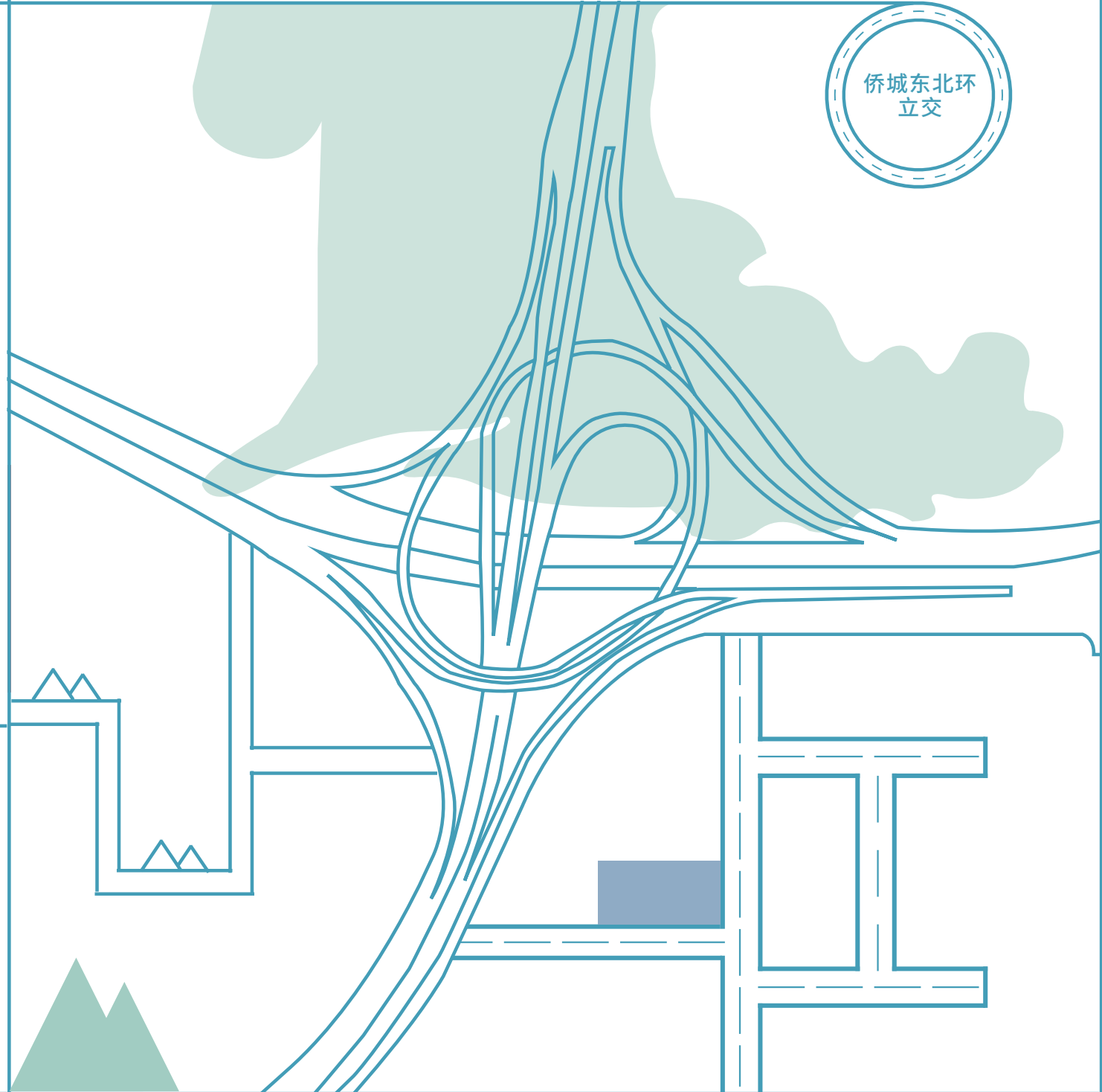
VOL.12 2021年10月号

特区建工技术

主办：深圳市特区建工集团有限公司
承办：深圳市天健（集团）股份有限公司
协办：深圳市建安（集团）股份有限公司 深圳市建设（集团）有限公司 深圳市路桥建设集团有限公司
深圳市特区建工土工集团有限公司 深圳市综合交通设计研究院有限公司

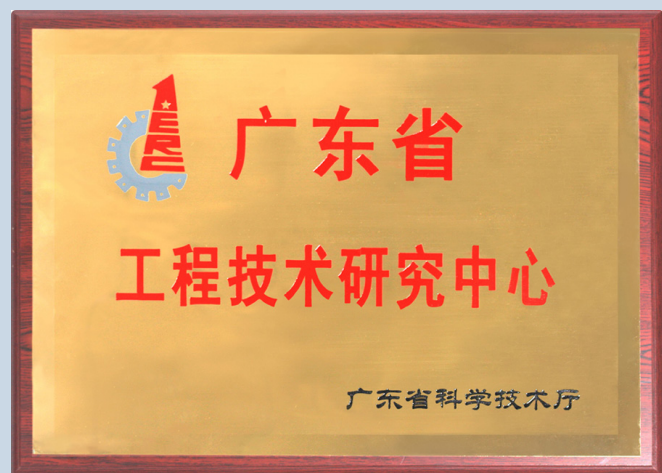
二〇二一年第三期

二〇二一年十月

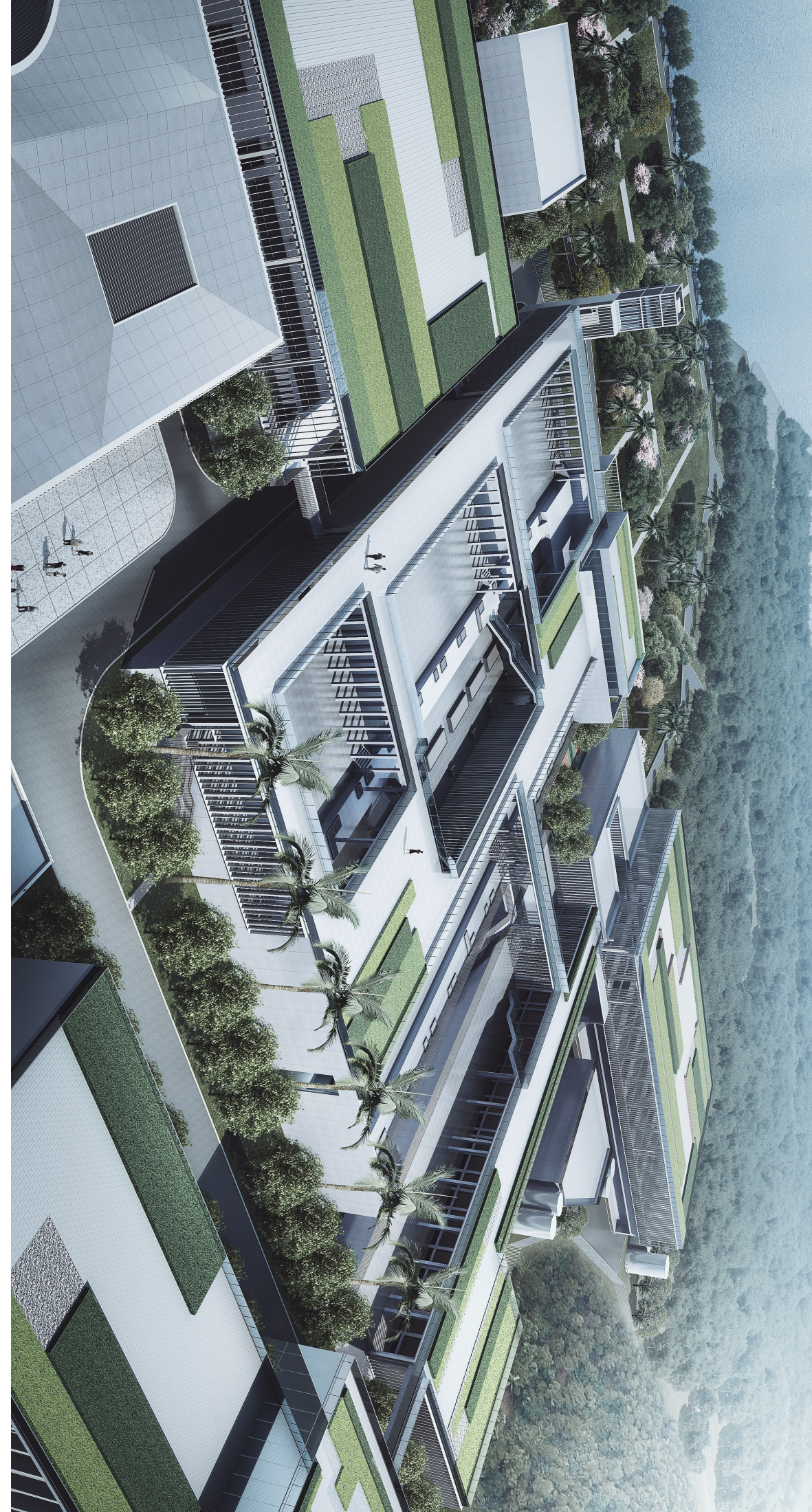


主办：深圳市特区建工集团有限公司
承办：深圳市天健（集团）股份有限公司
协办：深圳市建安（集团）股份有限公司 深圳市建设（集团）有限公司
深圳市路桥建设集团有限公司 深圳市特区建工土工集团有限公司
深圳市综合交通设计研究院有限公司
地址：深圳市福田区红荔西路7019号天健商务大厦16楼
电话：0755-82565321 邮编：518034

特区建工集团所属建安集团、综交院、市政总公司、粤通公司等4家企业被广东省科学技术厅认定为广东省工程技术研究中心。广东省建筑固废智能管控系统及综合利用工程技术研究中心、广东省城市交通隧道与地下结构勘察设计工程技术研究中心、广东省市政工程数字建造及智慧施工标准化（深圳市政总公司）工程技术研究中心、广东省道路基础设施多维高效检测与全周期运维工程技术研究中心4家省级工程技术中心，将在集团持续加大科研资源的投入，加快引进和培育高层次创新人才的保驾护航下，确保科研项目顺利实施，促进科研成果产业化，助力科教兴市和科技强省。



特区建工集团旗下市政总公司产业工人在“广东省第二届职业技能大赛暨乡村振兴职业技能大赛”获砌筑项目金牌。特区建工学院将继续牢记“建设城市、服务城市”使命，主动担当，积极作为，进一步扩大产业工人培训规模，强化师资力量，做好教材开发与创新工作，完善管理架构和管理团队，努力为推动我市产业工人建设、建筑业高质量发展作出应有贡献。



目次

应用研究

装配式空心桥墩内壁锯齿形槽口连接抗震性能试验研究..... 李 嘉 盛 宴 刘铁军 3

城市交通

城市轨道交通接驳常规公交服务评价体系研究..... 谭英嘉 朱一洲 李少龙 12

基于轴辐式路网的公交设计优化研究..... 谭英嘉 朱一洲 利敏怡 19

工程实践

一种新型智能地埋式垃圾分类收集站在深圳市罗湖“二线插花地”棚改项目中的应用 汪 洋 王 进 邓江辉 28

建废利用

多因素对工程渣土免烧砖性能影响研究..... 冯志远 35

废浆澄清液对混凝土性能的影响..... 彭孟啟 40

废浆固渣引入量对混凝土性能的影响..... 彭孟啟 45

深圳市建设工程渣土排放限额指标研究..... 冯志远 51

工程弃土源头减量化案例研究..... 黄 桐 56

余泥渣土资源化综合利用研究探讨..... 冯志远 64

简 讯

混凝土质检机器人助力智慧建造..... 39

C130! 最强混凝土诞生! 44

公路养护技术有哪些发展趋势? 郑健龙院士是这样研判的..... 69

国之重器! 这项国家重大科技基础设施可模拟超9度强地震 71

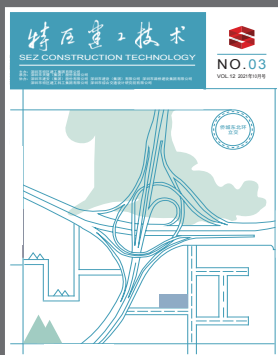
住全国首个AAA级装配式近零能耗游泳馆诞生 72

“大湾区兄弟”掘进珠江, 中国动车将在百米海底飞驰! 74

【中发[2021]36号】中共中央

国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见..... 75

征稿启事..... 18



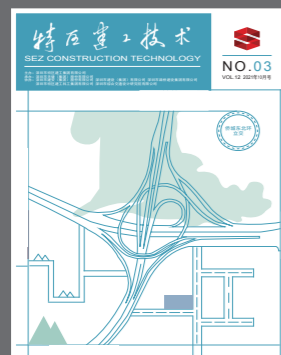
2021年10月出版 VOL.12
2021年 第3期 第12卷

(内部资料 业内交流)

《特区建工技术》杂志编辑委员会

主 任: 韩德宏
副 主 任: 宋 扬 何云武 王培先 林婵波 方东红 尹剑辉 张心亮 李 锋
臧 翀 江 建 陈 强 陈惠劼 袁立群 张明哨 王 超 刘铁军
刘进跃 黄 海 洪绍友 韩良君 谢勇利
编 委: 陈 俭 揭选松 邹爱华 彭晓钢 于 芳 杨建平 郑志刚 张 平
周保生 龙桂华 范璐璐 黄小芳 汪 洋 张建同 牛双健 徐 东
主 编: 江 建
副 主 编: 刘铁军 于 芳 武 亚 陈志龙 庞 聪 刘晓华 刘艾轩
主 办: 深圳市特区建工集团有限公司
编辑出版: 《特区建工技术》编辑部
地 址: 广东省深圳市福田区红荔西路7019号天健商务大厦1609
邮政编码: 518034
电 话: 0755-82565321
排 版: 深圳市新鸿兆文化传播有限公司
印 刷: 深圳市长江印刷公司
登记证号: (粤B) L018010008

- 3 Experimental Study on Seismic Performance of Connection of Prefabricated Hollow Pier
Li Jia Sheng Yan Liu Tiejun
- 12 Research on Evaluation Index System of Urban Rail Transit and Bus Feeder Service
Tan Yingjia Zhu Yizhou Li Shaolong
- 19 Optimal Design for Hub and Spoke Bus Transit Network
Tan Yingjia Zhu Yizhou Li Minyi
- 28 Design and application of a new type of intelligent buried garbage sorting collection station in Shenzhen Luohu shed renovation project
Wang Yang Wang Jin Deng Jianghui
- 35 The effect of multiple factors on the performance of non-sintered brick by engineering sediment
Feng Zhiyuan
- 40 Effect of the Waste Pulp Clarified Liquid on Concrete Performance
Peng Mengqi
- 45 Effect of Solid Waste Introduction on Concrete Performance
Peng Mengqi
- 51 Engineering Waste Soil Emission Limits Index Research in Shenzhen
Feng Zhiyuan
- 56 Case study of the excavated soil's source reduction
Huang Tong
- 64 Researching and Discussing of Comprehensive Utilization on Residual Mud and Soil
Feng Zhiyuan



SEZ Construction
Technology
Vol.12,No.3
Oct.2021

Editorial Board of SEZ Construction Technology

Director: HAN Dehong

Vice Director: SONG Yang HE Yunwu WANG Peixian LIN Chanbo FANG Donghong
YIN Jianhui ZHANG Xinliang LI Feng ZANG Chong JIANG Jian
CHEN Qiang CHEN Huijie YUAN Liqun ZHANG Mingshao WANG Chao
LIU Tiejun LIU Jinyue HUANG Hai HONG Shaoyou HAN Liangjun XIE Yongli

Members: CHEN Jian JIE Xuansong ZOU Aihua PENG Xiaogang YU Fang
YANG Jianping ZHENG Zhigang ZHANG Ping ZHOU Baosheng
LONG Guihua FAN Lulu HUANG Xiaofang WANG Yang ZHANG Jiantong
NIU Shuangjian XU Dong

Chief Editor: JIANG Jian

Editor: LIU Tiejun YU Fang WU Ya CHEN Zhilong PANG Cong LIU Xiaohua
LIU Yixuan

Edited and published by: Shenzhen SEZ Construction Group Co., Ltd.

Sponsored by: SEZ Construction Technology Editorial Department

Address: Room 1609, Tianjian business building, No.7019, Hongli Road, Futian District, Shenzhen City, Guangdong Province

Postcode: 518034

Tel: 0755-82565321

Printed by: Shenzhen Xinhongzhao Culture Spreading Co. Ltd

应用研究

装配式空心桥墩内壁锯齿形槽口连接抗震性能试验研究

李嘉¹, 盛宴¹, 刘铁军²

(1. 深圳市天健坪山建设工程有限公司, 深圳 518118;
2. 深圳市天健(集团)股份有限公司, 深圳 518034)

[摘要] 为了解装配式空心墩内壁锯齿形槽口连接的抗震性能, 改该连接方式的不足, 通过两组总计4个试件(现浇组2个, 预制拼装组2个)开展低周反复对比试验, 深入研究了该连接方式预制空心桥墩的恢复力模型、抗震性能和破坏机制。结果表明, 内壁锯齿形槽口连接方式的桥墩破坏模式显著不同于现浇桥墩, 现浇桥墩的破坏表现为明显的弯曲破坏, 裂缝较为均匀地分布于墩底往上一定高度范围的桥墩两侧面, 破坏时墩底出现一明显的矩形压溃区, 而新型连接的预制桥墩破坏极限状态下的墩身裂缝相对较少, 墩底与承台结合面出现脱空, 墩底截面出现三角形压溃区; 相较于现浇桥墩, 该连接方式的耗能能力和延性均有所提高, 尤其是初始阶段的耗能表现明显优于现浇桥墩, 位移延性系数提高了25.1%, 在反复荷载持续作用下, 两者的刚度退化趋势基本一致; 采用新型连接的预制装配式桥墩, 其承载力比现浇桥墩降低了约20%, 自复位性能也逊色于现浇桥墩。

[关键词] 预制桥墩; 抗震性能; 低周反复试验; 滞回曲线; 骨架曲线

Experimental Study on Seismic Performance of Connection of Prefabricated Hollow Pier

Li Jia¹, Sheng Yan¹, Liu Tiejun²

(1. Shenzhen Tegen Pingshan Construction Co., Ltd., Shenzhen, 518118; 2. Shenzhen Tegen Group Co., Ltd., Shenzhen, 518034)

Abstract: In order to improve the deficiency and explore the seismic performance of the new connection method between the cap and precast hollow pier with the serrate groove on the inner surface, four test specimens (two cast-in-situ, two precast) were made to conduct the repeated low-cycle loading tests, so as to research the resilience model, seismic performance and failure mechanism of precast hollow pier using this new connection method in depth. The results indicate that the failure mode of the hollow pier with the new connection method is significantly different from the cast-in-situ pier, the damage of the cast-in-situ pier is manifested by obvious bending failure, and the cracks are more evenly distributed on the two sides of the pier with a certain height range from the bottom of the piers, an obvious rectangular crush zone appears at the bottom of the pier. However, there are relatively few cracks in the pier body under the failure limit state of the newly connected precast piers, the joint surface of the pier bottom and the cap appears to be void, and the cross section of the pier bottom appears a triangular crush zone. Compared with cast-in-situ piers, the energy dissipation capacity and ductility of the new connection method precast hollow pier have been improved, especially in the initial stage, the energy dissipation performance is significantly better than that of the cast-in-situ piers, and the displacement ductility coefficient has increased by 25.1%. Under the continuous action of repeated loads, the rigidity degradation trends is basically the same. The precast piers with new connection method have a bearing capacity of about 20% lower than that of the cast-in-place piers, and the re-centring performance is also inferior to that of the cast-in-place piers.

Keywords: precast pier; seismic performance; cycle loading test; hysteretic curve; skeleton curve

0 引言

预制拼装法具有施工效率高、对环境友好、质量可靠等优点，已成为桥梁工程上部结构施工的主流手段^[1]。下部结构虽早在1955年美国新奥尔良Pontchartrain桥首次采用预制施工^[2]，但至今下部结构仍然以现场浇筑为主，发展相对缓慢。国内桥梁下部结构采用预制拼装技术，大多集中在2000年之后的一些大型跨海桥梁工程中，主要位于非震区或低烈度区^[3~6]，并以现浇湿接缝连接方式居多。

预制拼装法在桥梁下部结构施工中之所以推进较为缓慢，主要原因在于桥墩除了支撑桥梁上部结构外，还承担了来自地震、冲击等作用下的强大侧向荷载，而时至今日对预制桥墩的抗震性能认识并不充分^[7~8]，仅有的几种连接方式预制桥墩抗震性能却相差迥异，尚缺乏足够深入的研究成果和工程验证，工程技术人员难以清晰、系统了解强大剪切作用下的预制桥墩力学性能。

良好的抗震性能是预制桥墩大面积推广应用的前提，已成为学术和工程界的普遍共识。为此，采用不同连接方式的预制桥墩在地震下的承载能力、破坏模式、延性、耗能能力等性能研究和提升办法成为该领域的研究热点。众多学者基于试验和数值分析手段，从不同角度探讨了套筒灌浆连接、波纹管灌浆连接、插槽式连接、承插式连接、现浇湿接缝和预应力筋连接等预制桥墩主要连接方式的耗能能力、构造要求、破坏机理等^[9~13]。对于以预应力筋连接为主的“非等同现浇”桥墩，为了提升其抗

震耗能能力，研究者^[14~16]吸收了其他连接方式的优点，提出了混合式连接方式，以期获得良好抗震性能和自复位能力的连接方式。综合既有预制装配式桥墩的研究成果和工程应用，每一种连接方式具有其优势，也存在不足之处。如灌浆套筒连接方式，连接性能好，现场湿作业少，但浆液普遍难以灌满影响了其使用。因此，探索连接性能好，现场湿作业量低，施工辅助措施少的预制桥墩与承台连接方式，是目前推广预制装配法在桥梁下部结构中应用的主要研究方向之一。

基于上述背景，研究提出了如图1所示的锯齿形槽口新型连接构造，这种新型连接方式具有如下优点：（1）墩柱安装时，容许一定的调整误差，施工要求精度相较于套筒灌浆连接和波纹管灌浆等连接方式低，方便施工；（2）墩柱就位后，无需额外的持续吊装装置或支撑措施辅助墩身承受自重或提高稳定性；（3）墩柱内壁槽口的数量、形状、尺寸及布置方式，和内部后浇混凝土的强度及高度（h）等参数均可以人为事先调整，以达到良好的连接性能；（4）通过调整后浇混凝土参数，借以人为事先调控地震作用下墩柱的塑性区域分布。

为了解承台与装配式空心墩内壁锯齿形槽口新型连接方式的抗震性能，为其优化改进及推广应用奠定基础，分现浇（XJ）和预制（YZ）两个试验组，共计制作了4个大比例桥墩、承台模型，开展低周反复试验，对比研究该新型连接下的桥墩抗震性能。

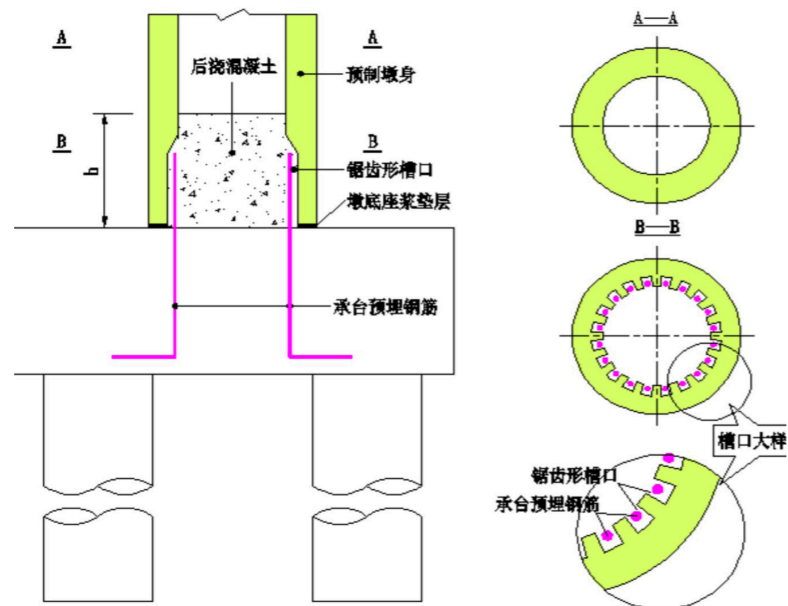


图1 承台与预制空心墩内壁锯齿形槽口新型连接构造图

1 试验方案

1.1 试件设计

试验试件归为预制组（YZ，对应承台与装配式空心墩内壁锯齿形槽口新型连接方式）和现浇组（XJ，对应传统的现浇桥墩），为尽量降低施工质量、测试条件对试验影响，每组制作两个完全相同的试件，编号分别为YZ-1、YZ-2（预制组）和XJ-1、XJ-2（现浇组）。

预制组的空心圆柱墩和承台分开预制，养护28天后，在试验台上首先通过地脚螺栓固定承台，之后将底部内壁设置锯齿形槽口（图2a）的预制空心墩吊装就位，每个齿形槽口分别对准一根伸出承台顶面的预埋钢筋（图2b），之后浇筑空心墩内部一定高度h（图1）范围内的后浇混凝土（C40），养

护到位后再开展试验。本组两个空心墩底部的锯齿形槽口设置如下：从墩底截面往上750mm范围，内壁设置锯齿槽构造，绕圆心沿内壁均匀分布12个，单个锯齿槽对应圆心角30°，其中凹槽部分20°，锯齿部分10°，凹槽深度50mm。

现浇组承台、圆柱空心墩的尺寸及材料与预制组一致。不同之处在于，现浇组试件的承台混凝土浇筑完成后，预埋伸出墩身钢筋，之后就立模板浇筑墩身混凝土，桥墩与承台完全连接一起，且空心墩内壁不设锯齿形槽口（图2c、d）。

两组试件承台尺寸均为1900×1330×500（mm），墩柱外径600mm，壁厚100mm，柱高2530mm，相关信息见表1。

表1 试验试件信息一览表

试验组别	编号	墩高 (mm)	柱壁厚 (mm)	是否设置锯齿槽	锯齿槽高×深 (mm)	砼	墩柱竖筋
预制组 (YZ)	YZ-1	2530	100	是	750×50	C40	Φ12
	YZ-2	2530	100	是	750×50	C40	Φ12
现浇组 (XJ)	XJ-1	2530	100	否	—	C40	Φ12
	XJ-2	2530	100	否	—	C40	Φ12



(a) 装配式空心墩内部锯齿槽



(b) 槽口对应预埋钢筋



(c) 现浇式墩台浇筑



(d) 现浇墩台浇筑成型

图2 试件制作

承台、墩柱及柱内后浇混凝土均采用C40，承台钢筋为14（HRB400），墩柱竖向纵筋采用12（HRB400），箍筋采用8（HPB300），螺旋布置。

1.2 材料性能

(1) 混凝土

承台及墩柱混凝土均采用C40商品混凝土，水灰比0.42，砂率0.31，细集料为粗砂，碎石最大粒径为31.5mm，坍落度为180mm。柱内后浇混凝土采用自拌C40混凝土，其砂率与碎石最大粒径和上述混凝土相同，添加了1%高效减水剂，水灰比0.3，坍落度140mm。与试件在同条件下养护的混凝土立方体试块（尺寸为：150×150×150mm），其立方体实测极限抗压强度（ f_{cu} ）和弹性模量（ E_c ），平

均值如表2。

表2 混凝土实测参数表

材料	弹性模量 E_c (MPa)	极限抗压强度 f_{cu} (MPa)
承台及墩柱C40混凝土	3.30×10^4	40.4
柱内后浇C40混凝土	3.31×10^4	42.1

(2) 钢筋

采用标准拉伸试验确定钢筋的材料性能参数。每种钢筋，各取三组300mm长筋段进行标准拉伸试验。测得钢材屈服强度 f_y 、极限抗拉强度 f_u 、弹性模量 E_s 和伸长率等参数 δ ，其平均值如表3。

表3 钢筋实测参数表

钢筋种类	弹性模量 E_s (MPa)	屈服强度 f_y (MPa)	极限抗拉强度 f_u (MPa)	伸长率 δ (%)
Φ14	2.0×10^5	432.3	622.1	16%
Φ12	2.0×10^5	453.5	632.7	17%
Φ8	2.0×10^5	287.4	440.4	13%

1.3 加载制度

试验加载装置如图3所示，由水平作动系统、竖向力加载系统以及固定系统等几个部分组成。为模拟桥墩实际受力和约束条件，同时避免反复加载过程中拉坏竖向千斤顶，在墩顶设置一块20mm厚钢

盖板，其上嵌固一聚四氟乙烯滑板橡胶支座，千斤顶底面加装一固定钢板和不锈钢板，不锈钢板压制在滑板支座上，试验过程竖向千斤顶不发生水平位移，并始终保持300kN的恒定竖向压力（轴压比为0.1）。

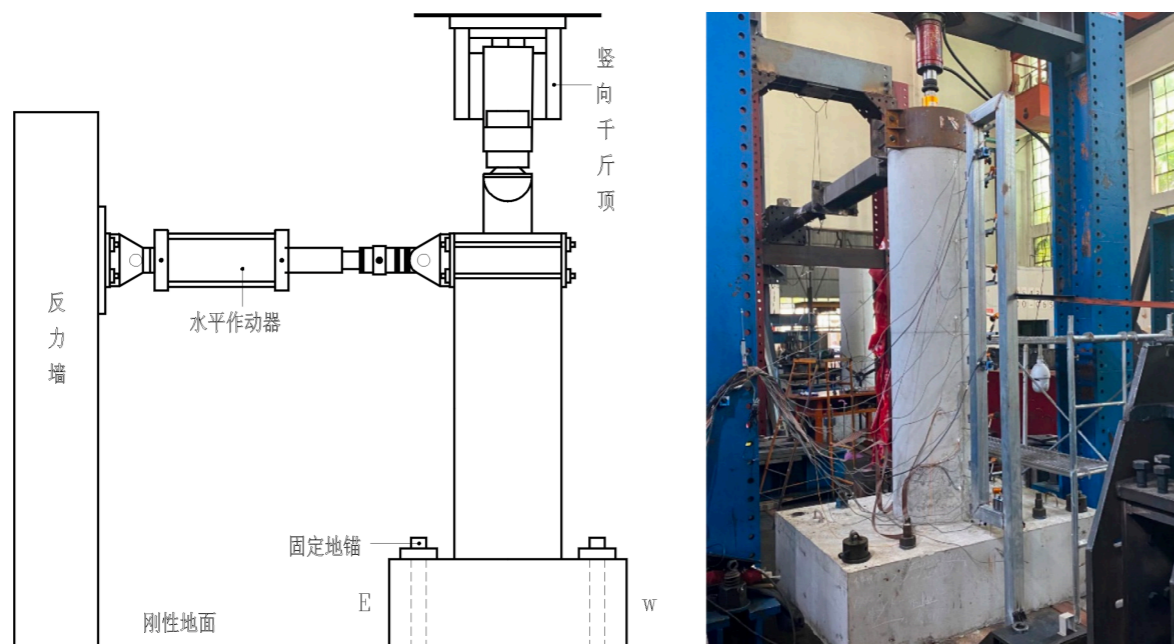


图3 加载装置示意图

试验采用力和位移混合加载控制，并按等幅和变幅混合的加载方式。在试验开始前进行预加载，当加载及测量装置运行正常后进行正式试验。在试件屈服前，按力控制加载，以每级12kN的幅值递增，直到试件进入屈服。之后采取位移控制加载，

首级位移幅值为±13.5mm，之后以4.5mm逐渐递增，当位移幅值达到±90mm后，按9mm逐级递增，直到试件破坏。无论力还是位移控制加载，每级载荷均进行3次循环，试验加载制度如图4。

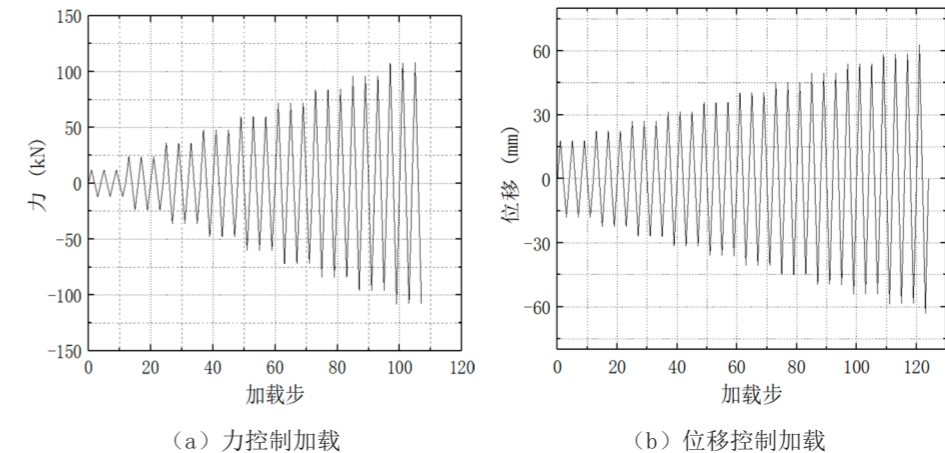


图4 加载制度图

2 试验现象

2.1 现浇组 (XJ)

现浇组的两个试件首条裂缝出现于第3级（32kN）加载，该裂缝距承台上表面0.51m处，之后随着反复荷载持续增加，裂缝条数和程度加剧。当加载至第10级（位移控制13.5mm）时，墩底与承台连接面出现裂缝，此时墩身裂缝主要分布于墩底往上1.2m的高度范围，裂缝分布较为均匀（图5a），间距约为10cm。

加载至第16级（位移控制40.5mm）后，新增裂

缝基本停止，既有裂缝持续发展，桥墩底部裂缝大多沿墩身圆周形成闭环，且桥墩与承台连接处部分裂缝沿墩身高度方向蔓延发展形成多条竖向裂缝，该区域表层混凝土开始局部脱落。随着水平位移荷载继续增加，墩柱和承台连接截面处两侧混凝土逐渐脱落，最终在第21级（位移控制63mm）时，侧柱脚区域混凝土被压溃，形成长168×125×60mm的压溃区（图5b），墩身内部钢筋严重弯折，箍筋外鼓。



(a) 现浇墩身裂缝分布

(b) 墩底局部压溃

图5 现浇式空心墩破坏图

现浇组的两个试件首条裂缝出现于第3级

（32kN）加载，该裂缝距承台上表面0.51m处，之

后随着反复荷载持续增加,裂缝条数和程度加剧。当加载至第10级(位移控制13.5mm)时,墩底与承台连接面出现裂缝,此时墩身裂缝主要分布于墩底往上1.2m的高度范围,裂缝分布较为均匀(图5a),间距约为10cm。

加载至第16级(位移控制40.5mm)后,新增裂缝基本停止,既有裂缝持续发展,桥墩底部裂缝大多沿墩身圆周形成闭环,且桥墩与承台连接处部分裂缝沿墩身高度方向蔓延发展形成多条竖向裂缝,该区域表层混凝土开始局部脱落。随着水平位移荷载继续增加,墩柱和承台连接截面处两侧混凝土逐渐脱落,最终在第21级(位移控制63mm)时,侧柱脚区域混凝土被压溃,形成一长168×125×60mm的压溃区(图5b),墩身内部钢筋严重弯折,箍筋外鼓。

2.2 预制组(YZ)

预制桥墩与承台采用内壁锯齿形槽口新型连接方式后,结构破坏模式发生显著改变。首先出现



(a) 内壁锯齿形槽口新型连接方式墩身裂缝分布



(b) 柱脚压溃

图6 现浇式空心墩破坏图

3 试验结果对比分析

3.1 滞回曲线与耗能能力

传统现浇桥墩(现浇组XJ)与内壁锯齿形槽口新型连接方式(预制组YZ)桥墩试验得到的滞回曲线如图7。对比可知,两类桥墩在弹性阶段荷载一位移基本呈线性关系,但进入塑性阶段后,传统现浇桥墩和新型连接桥墩荷载位移关系显著不同。传统现浇桥墩的滞回曲线呈梭形,而新型连接方式空心墩滞回曲线为反S形。新型连接的预制装配式桥墩滞回曲线之所发生明显变化,其原因是空心墩试件进入弹塑性阶段后,墩底现浇混凝土内部的预埋钢筋开始发挥主要作用,这部分钢筋受到循环荷载

裂缝的位置不在墩身,而是发生在预制桥墩与承台的结合面,开裂荷载提高至第4级(48kN)。而且,在加载至在第13级荷载(位移控制27mm)前,预制墩身未出现任何裂缝,该级荷载下墩身才开始出现首条裂缝,该裂缝出现在距离承台顶部0.76m处。随着加载持续,新增裂缝分布于距离承台顶部0.76m之上,但墩身裂缝相对较少,除了既有裂缝持续增长。加载至第16级(位移控制40.5mm)时,墩身首条裂缝的下部区域才逐渐开裂。

在第19级(位移控制45mm)荷载之后,无论是裂缝程度还是裂缝数量,墩身开裂基本停止发展,此时,墩柱与承台结合面逐渐被拉起。随着位移荷载的不断增大,墩底最大脱空在25级(位移控制81mm)时达到20mm,在28级(位移控制99mm)时达到27mm。实测表明,该组试件在第25级(位移控制81mm)荷载时,荷载一位移曲线开始下降。破坏时,墩底形成一底长172mm,高92mm的三角压溃区(图6b)。

作用逐渐进入屈服和强化,并影响桥墩的滞回性能。受到后浇混凝土内部钢筋的影响,新型连接方式下的预制桥墩,同一级循环荷载下的3次推拉测试反馈,试件承载力随反复次数增加而缓慢降低,但同一级荷载下的不同次数回来测试得到的滞回曲线面积却大致相同,表明对于新型连接方式,在完全失去承载力之前,后浇混凝土及其内部钢筋可以起到较好的耗能效果。当后浇混凝土内部的全部钢筋进入屈服阶段后,预制组试件的滞回性能逐渐降低,此时继续加大循环荷载,受到后浇混凝土内部钢筋强化影响,试件承载力却有所上升,但耗能能力相比之前已劣化,持续加载直至构件完全失效。

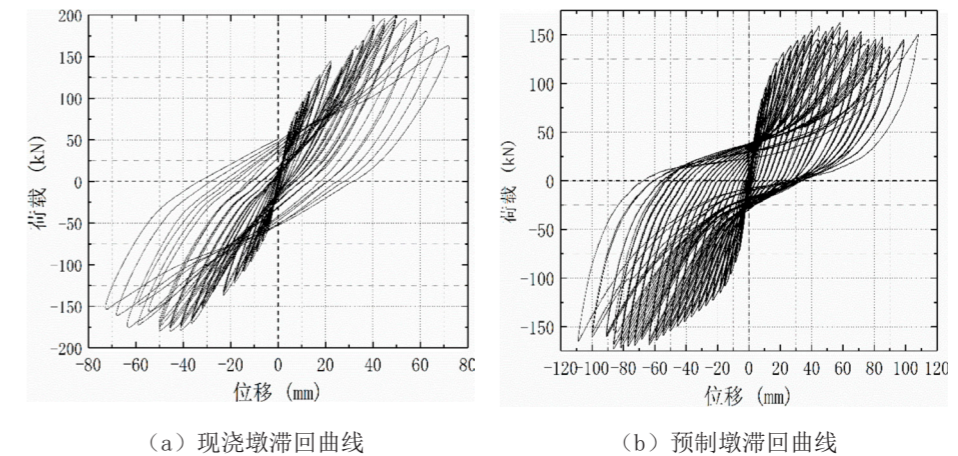


图7 试件滞回曲线

根据滞回曲线得到桥墩的等效粘滞阻尼系数 h_e 如图8。由图可见,传统现浇桥墩的初始等效粘滞阻尼系数 h_e 为0.41,新型连接方式桥墩的初始等效粘滞阻尼系数 h_e 为0.51,显然采用内壁锯齿形槽口新型连接方式后,桥墩的初始耗能能力得到提升。但无论是传统现浇桥墩抑或新型连接预制桥墩,二者的等效粘滞阻尼系数皆随加载幅值增大而下降。并且在加载的初期,等效粘滞阻尼系数 h_e 下降迅速,表明初期裂缝是桥墩耗能的主要贡献,当加载位移幅值大于20mm后,等效粘滞阻尼系数 h_e 下降速率逐渐减小,说明后期裂缝对桥墩耗能贡献有限。

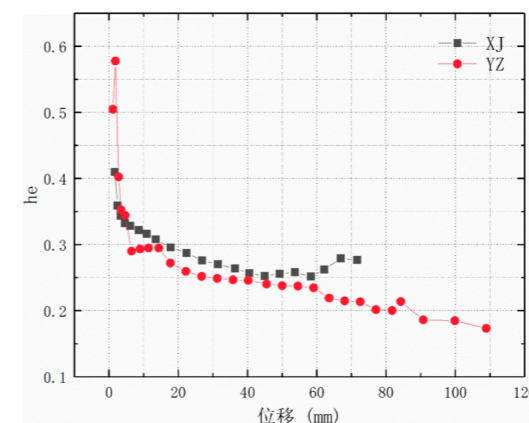


图8 等效粘滞阻尼系数

试验还表明。在初始阶段,无论是传统现浇式还是新型连接的空心墩,其初始粘滞阻尼系数都达到较高的水平,前几级荷载下皆在0.35以上,尤其是新型连接方式的空心墩,前三级荷载的等效粘滞阻尼系数均处于0.4以上,最大可达0.58。新型连接方式的预制空心墩其最大等效粘滞阻尼系数比之现浇空心墩提高了41.5%,说明新型连接方式的

预制装配式墩的初期耗能能力比现浇式空心墩高得多,可以较大程度上推迟墩身开裂,提高了墩身开裂荷载和持荷幅值。

当位移控制的加载幅值达到15mm时,传统现浇桥墩和新型连接的预制空心墩,两者等效粘滞阻尼系数皆下降到了0.3以下,并且出现预制组桥墩的等效粘滞阻尼系数低于传统现浇桥墩,虽然二者相差仅为0.05,但新型连接的预制空心墩等效粘滞阻尼系数在初始阶段的下降速率大于传统现浇桥墩,直至破坏状态,新型连接方式桥墩的等效粘滞阻尼系数比传统现浇桥墩低约19%。

受后浇混凝土及其内部钢筋的影响,相较传统现浇桥墩,新型连接的预制装配式桥墩破坏时的墩顶位移更大,表现出较好的延性,而且后续可持荷过程比传统现浇桥墩更具优势,虽然其破坏状态时的等效粘滞阻尼系数略低于传统现浇桥墩,但仍然维持在0.2以上,说明仍保持较好的后期耗能能力。

3.2 骨架曲线与延性系数

测试得到传统现浇和新型连接预制空心墩的骨架曲线如图9,根据骨架曲线可以得到试件屈服点、峰之点和极限点等主要参数。其中,现浇空心墩基于割线刚度,即以75%极限强度处的割线刚度对应的等效弹性系统位移,作为结构的屈服位移;新型连接空心墩基于初始屈服,以骨架曲线斜率明显减小处点对应的位移作为结构的屈服位移(表4)。

从表4可知,两组试件的屈服位移接近,但极限位移相差较大,新型连接方式相较于现浇桥墩的极限位移提高了18mm(26.7%)。同时,位移延性

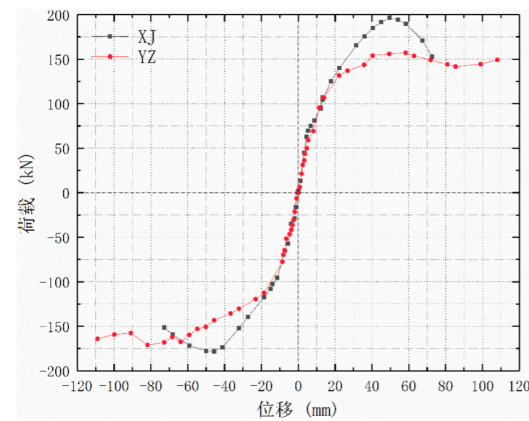


图9 骨架曲线

系数由2.55增加到3.19,提高了25.1%。说明新型

表4 桥墩骨架曲线主要参数

试件编号	屈服荷载 P_y (kN)	屈服位移 Δ_y (mm)	极限荷载 P_u (kN)	极限位移 Δ_u (mm)	位移延性系数 μ_{Δ}
现浇组 (XJ)	147	26.5	171	67.5	2.55
预制组 (YZ)	137.01	26.8	141.71	85.5	3.19

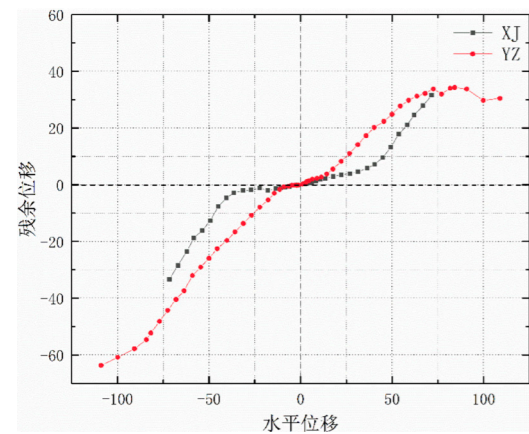


图10 残余变形图

加载初期,两类桥墩在各幅荷载下的残余变形都比较低,当荷载处于-10~10kN区间时,现浇桥墩和新型连接的预制空心墩最大残余变形皆未超过2.5mm,桥墩处于弹性阶段。当加载至17mm时,虽然两类桥墩的残余变形依然相差不大,但是残余变形改变趋势已突显,尤其是新型连接的预制空心墩,该级荷载下的残余变形增速明显。持续增加荷载后,新型连接方式桥墩的残余变形开始呈线性增加,在位移控制幅40mm时,其残余变形就已超过20mm,而对应的现浇桥墩残余变形仅为7.1mm。在加载幅44mm时,现浇桥墩的残余变形开始迅速增加,达到极限破坏状态时,最大残余变形

连接方式有效提高了结构延性,增强地震荷载作用下桥墩的抗倒塌能力。

虽然新型连接方式提高了桥墩延性,但降低结构承载能力。采用新型连接方式的桥墩,屈服荷载和极限荷载分别为137.01kN和157.06kN,比传统现浇桥墩降低了6.8%和20%。可见,采用内壁锯齿形槽口新型连接方式的预制装配式桥墩,延性提高的同时降低了桥墩承载力。

3.3 残余变形

两类桥墩的残余变形如图10所示,可以看出无论是现浇式还是新型连接方式,其残余变形均随着加载幅增加而渐大,但进入塑性阶段的载荷幅及残余变形明显不同。

为27.9mm,此时对应的新型连接桥墩加载位移幅为54.5mm。说明虽然新型连接的预制装配式桥墩,初期残余变形较大,但是后期残余变形的增速略小于现浇桥墩。

此外,由残余变形曲线可见,新型连接的装配式桥墩,推拉反复桥墩两侧的残余变形略有差异。其原因是受后浇混凝土及其内部钢筋施工质量的影响,由于预制桥墩安装时,预埋伸出承台的钢筋要求一一对应深入到锯齿形槽口内,受施工误差的影响,伸入到槽口内的各根钢筋可能存在保护层不一致的问题,由此导致桥墩不同侧面的钢筋力臂存在差异,该影响在桥墩接近极限状态时制约其力学性能。因此,锯齿形槽口连接的预制装配式桥墩,施工时需要确保预埋钢筋定位准确,并适当提高后浇混凝土的施工和易性,保证各锯齿形槽口混凝土浇筑饱满。

4 结论

通过上述研究,可得出如下结论:

(1) 采用空心墩内壁锯齿形槽口连接的预制装配式桥墩,地震荷载作用下,其破坏模式和墩身开裂形态显著不同于现浇桥墩。在反复荷载作用下,新型装配式桥墩的墩身裂缝分布较少,首条裂缝出现于后浇混凝土对应的墩身截面附近,之后裂缝向上依次出现,桥墩进入塑性阶段的后期,后浇

混凝土对应的墩身才开始产生裂缝,破坏时墩底与承台界面出现脱空,墩底出现一三角形压溃区;现浇桥墩首条裂缝虽然距离墩底截面一定高度,但很快裂缝沿首条裂缝上下一定范围内均匀出现,裂间距较为平均,破坏时墩底出现明显的矩形压溃区,墩身钢筋屈服,箍筋外鼓;

(2) 装配式空心墩内壁锯齿形槽口连接的预制空心墩最大等效粘滞阻尼系数比现浇桥墩增加了41.5%,早期耗能能力优于现浇空心墩,并提高了墩身开裂荷载,极限状态下的墩身位移显著大于现浇桥墩。但相较于现浇桥墩,随着反复荷载持续增加,新型连接桥墩的等效粘滞阻尼系数下降速率更快,这与预制墩底同承台结合面的张开趋势直接关联;

(3) 内壁锯齿形槽口新型连接方式可提高空心墩的耗能能力,也增加了桥墩延性,相较于现浇桥墩,内壁锯齿形槽口新型连接方式的预制装配式桥墩极限位移提高了26.7%,位移延性系数提高了25.1%,增强了地震荷载作用下桥墩的抗倒塌能力;

(4) 装配式空心墩内壁锯齿形槽口连接桥墩的刚度退化性能与现浇桥墩几乎一致,表明预制桥墩与承台顶面出现脱空劣化了桥墩耗能能力,但该连接形式的桥墩不会因此在地震作用下而突然破坏,后续结构仍然能较为充分地发挥较好的耗能和延性特征;

(5) 相较于现浇桥墩,内壁锯齿形槽口新型连接预制装配式桥墩的极限承载能力降低了约20%,且一旦墩底截面与承台脱空,反复荷载下的桥墩残余变形明显大于现浇桥墩,虽然后者进入塑性阶段后的残余变形增加速度快于新型连接的预制桥墩,但仍可见内壁锯齿形槽口新型连接预制装配式桥墩在地震荷载作用下的出自复位性能逊色于现浇桥墩。

参考文献

- [1] 王景全,王震,高玉峰,等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展:新材料、新理念、新应用[J]. 工程力学, 2019, 36(03): 1-23.
- [2] 张子颀,邓开来,徐腾飞. 预制装配式混凝土桥梁结构2019

- 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(05): 183-191.
- [3] 王志刚,孙贵清,余顺新,等. 公路桥梁装配式桥墩工业化快速建造技术[J]. 公路, 2021, 66(06): 145-150.
- [4] 王震,王景全. 预应力节段预制拼装桥墩抗震性能研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(06): 88-97.
- [5] 黄云青,赵建锋. 不同连接方式对预制拼装桥墩抗震性能的影响[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(06): 38-43.
- [6] 吴刚,冯德成,徐照,等. 装配式混凝土结构体系研究进展[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(04): 41-51+77.
- [7] 包龙生,张远宝,桑中伟,等. 波纹管连接装配式桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 242-249.
- [8] 吴平平,周小伍,汪志甜,等. 插槽结构装配式桥墩足尺模型拟静力试验研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(03): 76-80.
- [9] 韩艳,董嘉雯,王龙龙,等. 承插式装配式桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(05): 63-70.
- [10] 葛继平,夏樟华,江恒. 灌浆波纹管装配式桥墩双向拟静力试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 221-230+266.
- [11] M Tazarv, MS Saiidi. UHPC-filled Duct Connections for Accelerated Bridge Construction of RC Columns in High Seismic Zones[J]. Engineering Structures, 2015(99): 413-422.
- [12] Ameli M J, Parks J E, Brown D N, et al. Seismic Evaluation of Grouted Splice Sleeve Connections for Reinforced Precast Concrete Column-to-Cap Beam Joints in Accelerated Bridge Construction[J]. PCI Journal, 2015, 60(2): 80-103.
- [13] 徐艳,曾增,葛继平,等. 承插式预制拼装桥墩的最小合理承插深度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 1706-1711.
- [14] Wang J C, Ou Y C, Chang K C, et al. Large-Scale Seismic Tests of Tall Concrete Bridge Columns with Precast Segmental Construction[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(12): 1449-1465.
- [15] 葛继平, 王志强. 干接缝节段拼装桥墩振动台试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 122-128.

城市交通

城市轨道交通接驳常规公交服务评价体系研究

谭英嘉, 朱一洲, 李少龙
(深圳市综合交通设计研究院有限公司, 深圳 518003)

[摘要] 建设和提高城市轨道交通和常规公交两者之间的快速接驳换乘, 实现一体化公共交通是城市公共交通优先发展战略中不可或缺的部分。为有效评价常规公交和轨道交通接驳服务水平的高低, 及时发现接驳系统中存在的短板, 从设施、线网、运营和票价四个一体化方面选取了具有代表性的9个评价指标构建了多层次结构的接驳服务评价指标体系, 给出了各层次指标权重的计算方法, 并就深圳市轨道和公交接驳系统进行了实例分析验证。研究完善了公共交通接驳服务中指标体系构建和评价方法, 有助于为公交行业主管部门制定相关改进服务策略及措施提供依据。

[关键词] 城市轨道交通; 常规公交; 接驳服务; 评价体系

Research on Evaluation Index System of Urban Rail Transit and Bus Feeder Service

Tan Yingjia, Zhu Yizhou, Li Shaolong
(Shenzhen Transportation Design & Research Institute Co., Ltd, Shenzhen, 518003)

Abstract: It is an indispensable part of the priority development strategy of urban public transport to improve the transfer between urban rail transit and bus. In order to effectively evaluate the service level of bus and rail transit, timely discover the shortcomings existing in the transit system, nine representative evaluation indexes are selected from the four integration aspects of facilities, network, operation and ticket price. Then, a multi-level structure evaluation index system of feeder service is constructed and the calculation method of index weight of each level is also given. Finally, this paper analyzes the rail transit and bus connection system in Shenzhen. The research has improved the index system construction and evaluation method in the public transport feeder service, which is helpful for the public transport authority to formulate relevant service improvement strategies and measures.

Keywords: urban rail transit; bus; feeder transport service; evaluation system

0 引言

随着城市化和机动化进程的不断加速, 城市交通拥堵、污染、能源紧缺等问题日益凸显, 已严重影响了城市发展和人民群众生活水平的提高。交通出行引发的一系列问题已经成为各大城市的难点和热点问题。在出行问题应对上, 各大城市都提倡发展公共交通来应对。城市公共交通客流运输以常规

公交和轨道为主, 以深圳市为例, 2018年常规公交和轨道客运量在整个公共交通客流中占比就达到了90%^[1]。建设和提高城市常规公交和轨道交通系统之间的快速接驳换乘, 实现一体化公共交通, 就成了当前提高城市公共交通服务水平的迫切需求, 也是公共交通优先发展战略的内在要求^[2]。

国内各大城市轨道交通成网运营时间较短, 成

网后轨道交通与常规公交的接驳和匹配研究仍处于规划研究阶段, 相关经验不足, 尚未形成一套全面、科学、完善的服务评价体系。因此, 研究构建科学、合理的城市轨道交通接驳常规公交服务评价指标体系, 及时发现接驳服务中存在的短板, 进而有针对性地采取措施来提高接驳服务水平就显得尤为重要。当前针对公交和轨道交通接驳服务评价已开展了系列研究, 指标选取主要从基础设施^[3]、经济收益^[4]、乘客客流^[5]、方式衔接效率^[6]、运营协调^[7]、以及信息服务^[6,8]等角度选择。在计算评价指标权重时, 层次分析法由于其能将定性分析和定量分析进行综合集成, 适用于较为复杂、模糊且难完全定量分析的问题等优势被多数学者选择^[9-10]。从现有研究来看, 常规公交与轨道交通接驳服务评价研究多采用多准则决策分析, 在评价指标选取方面, 存在系统要素的基本特征考虑不足, 选取的评价指标还不够全面等问题。笔者旨在综合考量轨道交通接驳常规公交服务, 建立能客观反映城市轨道交通和常规公交服务一体化发展的评价指标体系, 并提出与之相适应的、便于操作的评价分析方法, 引导促进城市交通一体化发展, 提升公共交通整体竞争力, 使公共交通成为市民可信赖的出行选择。

1 评价指标体系

1.1 评价原则

城市轨道交通和常规公交换乘衔接系统是一个多指标、多层次的综合体系, 评价体系应能全面反映两者换乘服务一体化的基本要求, 应遵循以下原则:

(1) 科学性。评价指标的选择必须在科学理论研究的基础上进行, 具有一定的理论依据。

(2) 系统性。指标体系要能全面准确地反映常规公交和轨道交通换乘衔接的各个主要部分与关键影响因素, 并尽可能地考虑到实际使用者。

(3) 独立性。由于常规公交和轨道交通换乘衔接衡量的复杂性及评价需要, 应保证指标的相互独立性, 指标与指标间无内在的机制联系。

(4) 可比性。指标应易采集统计, 具有统一的计算口径、计算方法和量纲, 能为各大城市常规公交和轨道交通接驳服务提供横、纵向对比分析。

1.2 评价指标

按照城市常规公交与轨道交通接驳服务一体化的评价目标和评价原则, 从设施一体化、线网一体化、运营一体化和票价一体化四个方面选取了具有代表性的9个评价指标, 构建多层次结构的城市常规公交与轨道交通接驳服务评价指标体系, 如图1所示。

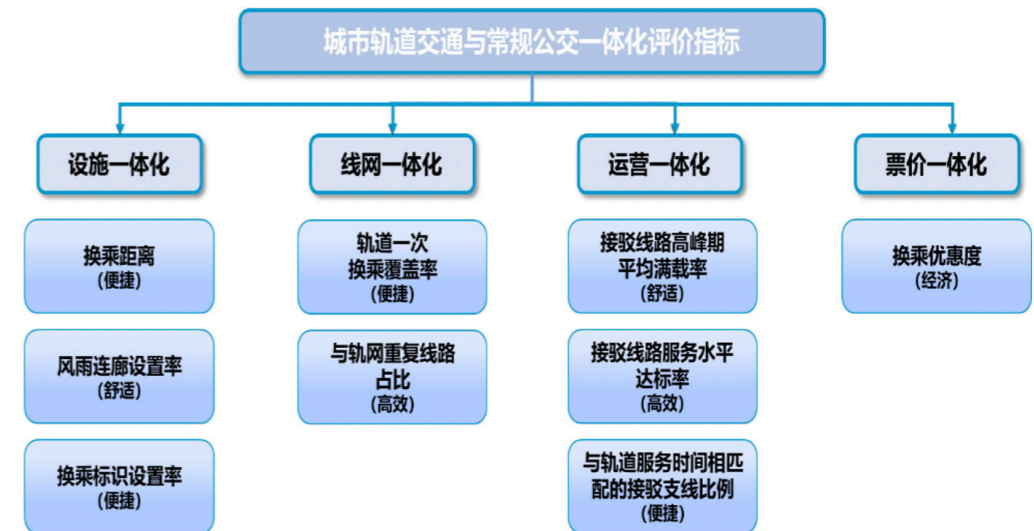


图1 城市常规公交与轨道交通服务一体化评价指标体系

(1) 换乘距离。指所有轨道站点出入口距最近轨道接驳公交停靠站的平均步行距离, 其中轨道接驳公交停靠站指轨道站点出入口300m范围内的停靠站。换乘距离反映了常规公交与轨道交通换乘的便捷性和空间衔接紧密度。

(2) 风雨连廊设置率。指与轨道出入口设置有风雨连廊连接的轨道接驳公交停靠站数, 占片区轨道接驳公交停靠站总数的比例。其可作为衡量“轨道+公交”换乘接驳舒适性的指标。



图2 连接轨道公交的风雨连廊

(3) 换乘标识设置率。指(50%*轨道站点出入口导向接驳公交站的换乘标识设置率)+(50%*接驳公交站导向轨道站点出入口的换乘标识设置率)，其中轨道导向接驳公交站的换乘标识设置率：(设置有连续轨道导向接驳公交站箭头标识指引的接驳公交站数)/片区接驳公交站总数；接驳公交站导向轨道的换乘标识设置率：(设置有连续接驳公交站导向轨道箭头标识指引的接驳公交站数)/片区接驳公交站总数。轨道交通与常规公交换乘标识设置是衡量接驳便利性的重要指标。

(4) 轨道公交一次换乘覆盖率。指所有轨道接驳公交线路途径站点500m覆盖全市建成区比例，其中，轨道接驳公交线路指经停轨道站点出入口300m范围内公交停靠站的公交线路。轨道一次换乘覆盖率主要衡量“轨道+公交”线网的服务区域和可达程度。

(5) 与轨网重复线路占比。指有半数以上的公交站点在轨道站点500m范围内服务的常规公交线路数量，占城市常规公交线路总数比例，其中常规公交线路不包括高峰线、高快巴、夜班线、假日线等特定时段服务线路。对公交与轨道交通的竞争度进行定量分析，有利于推动客流资源的合理分配，弱化轨道公交的相互竞争。

(6) 轨道接驳线路高峰期平均满载率。指轨道接驳公交线路高峰期沿线路主客流方向驶离接驳公交停靠站时车内平均满载率，其与接驳公交线路的发车间隔、车型、线路配置密切相关，是衡量轨道换乘公交舒适性的一项重要指标。

(7) 轨道接驳线路服务水平达标率。指高峰

期发车间隔不高于10分钟且平峰期不高于20分钟的接驳公交线路数占接驳线路总数的比例。

(8) 与轨道服务时间匹配的接驳公交支线占比。指与轨道首末班服务时间相匹配的轨道接驳公交支线数占接驳线路总数的比例。与轨道首末班时间匹配指常规公交线路首班发车时间不晚于轨道交通首班发车时间且末班发车时间不早于轨道交通末班发车时间。换乘服务时间的匹配反映常规公交与轨道交通时间衔接便捷性。

(9) 换乘优惠度。指常规公交与轨道交通换乘的优惠额度。票价作为公共交通一体化体系的一个至关重要环节，相应的调整是常规公交与轨道交通客流量分配的重要手段。

1.3 评价指标分级标准

参照“畅通工程”、创建“公交都市”指标评价体系，将城市公交指标由好到差分为五个等级如表1所示。各指标分级标准制定主要参考“相关标准规范推荐值、国内外公交发达城市指标值和相关规划中远期发展目标值等”，适用于深圳及同类型大城市，能为轨道集中发展阶段的大城市提供参考借鉴，部分指标可根据各城市实际发展做适当修正调整。

其中，处于等级五的指标，是近中期需重点突破改善类指标；处于等级四的指标，是近中期需优化改善类指标；处于等级三的指标，是近中期需继续提升类指标；处于等级一、等级二的指标，满足相关规范标准或相关规划目标值，是需要不断保持和加强类指标。

表1 评价指标分级参考标准表

指标体系	单位	相关规范及经验推荐值	各指标分级标准				
			等级一	等级二	等级三	等级四	等级五
换乘距离	m	50-100米内	≤50	(50, 100]	(100, 200]	(200, 300]	>300
风雨连廊设置率	%	100%	≥90	[80, 90)	[70, 80)	[60, 70)	<60
换乘标识设置率	%	100%	≥90	[80, 90)	[70, 80)	[60, 70)	<60
轨道一次换乘覆盖率	%	90%	≥90	[80, 90)	[70, 80)	[60, 70)	<60
与轨网重复线路占比	%	--	≤5	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	>20
轨道接驳线路高峰期平均满载率	%	--	≤40%	(40, 50]	(50, 60]	(60, 80]	>80
轨道接驳公交线路服务水平达标率	min	80%	≥80	[60, 80)	[40, 60)	[20, 40)	<20
与轨道服务时间相匹配的接驳支线占比	%	--	≥80	[60, 80)	[40, 60)	[20, 40)	<20
换乘优惠度	元/次	--	≥1元或免费	[0.6, 1)	[0.3, 0.6)	(0, 0.3)	无优惠

2 评价方法

2.1 评价方法选择

城市轨道交通与常规公交一体化模型具有多层次、多目标的特点，各部分之间也存在很大的关联和影响，需要进行多层次、交叉性的对比和讨论，得出综合性的定量评价结果。目前适用于复杂问题评价的方法主要有模糊综合评价法、数据包络分析法、神经网络评价法、层次分析法等^[11]。

层次分析法由于能够有效的将定性分析和定量分析进行综合集成，具有可置换性、互容性、对称性等较优性质，适用于各种类型的复杂综合评价系统，是目前确定指标权重的一种较为常见方法。其主要步骤如下：

(1) 建立递阶层次结构模型

在深入分析实际问题的基础上，构造一个有条理、有层次的结构模型。

(2) 构造各个层次的判断矩阵

某一层次内所有指标的重要性不完全相同，一般采用数字1~9及其倒数的标度方法，其判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 定义方法具体见表2。

(3) 层次单排序及其一致性检验

• 计算一致性指标： $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$;

• 查找平均随机一致性指标RI的值，如表3所示；

• 计算一致性比率。

当判断矩阵的一致性比率 $CR=CI/RI < 0.10$ 时，

认为当前判断矩阵有满意的一致性；否则，需要调整判断矩阵，直到具有满意的一致性。

(4) 层次总排序

最后得出各层次元素对目标的权重排序，对层次总排序进行一致性检验，计算各层次元素对总目标的权重，对最终的方案进行排序。

表2 判断矩阵标度定义

标度 (a_{ij} 取值)	含义 (重要性等级)
1	表示两个因素相比，具有相同重要性
3	表示两个因素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	相似元 <i>i</i> 与 <i>j</i> 比较后判断 a_{ij} ，而 <i>j</i> 与 <i>i</i> 比较得 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

表3 平均随机一致性指标RI的值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2.2 指标权重确定

根据城市轨道交通与常规公交一体化评价指标体系结构，将其划分为三个层次，用A, B, C来表示。指标体系的总目标为城市常规公交与轨道交通

接驳服务水平，准则层包括设施一体化、线网一体化、运营一体化、票价一体化四个方面，指标层则有9个指标，如表4所示。

表4 轨道交通与常规公交一体化评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标
城市轨道交通与常规公交一体化评价指标体系(A)	设施一体化 (B ₁)	换乘距离 (C ₁₁)
		风雨连廊设置率 (C ₁₂)
		换乘标识设置率 (C ₁₃)
	线网一体化 (B ₂)	轨道一次换乘覆盖率 (C ₂₁)
		与轨网重复线路占比 (C ₂₂)
	运营一体化 (B ₃)	轨道接驳线路高峰期平均满载率 (C ₃₁)
		轨道接驳公交线路服务水平达标率 (C ₃₂)
		与轨道服务时间相匹配的接驳公交支线比例 (C ₃₃)
	票价一体化 (B ₄)	换乘优惠度 (C ₄₁)

目标层指标A对准则层的判断矩阵如表5:

表5 目标层判断矩阵

目标层A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
设施一体化B ₁	1	2	2	3
线网一体化B ₂	1/2	1	1/2	2
运营一体化B ₃	1/2	2	1	2
票价一体化B ₄	1/3	1/2	1/2	1

可求得特征向量W=(0.42, 0.19, 0.27, 0.12), 即设施一体化、线网一体化、运营一体化、票价一体化的相对权重值分别为0.42, 0.19, 0.27, 0.12。一致性检验结果为: λ_{max}=4.07, CI=0.023, RI=0.025<0.10。满足一致性要求。

同理可进行其他指标层的计算及检验。B1准则层权重计算结果为0.56, 0.14, 0.30。B2层权重计算结果为0.33, 0.67。B3层权重计算结果为0.17, 0.44, 0.39。B4层为一阶矩阵, 权重为1.00。各指标层检验均满足一致性要求。

综上可得到准则层层次单排序, 如表6所示。

在此基础上, 进行层次总排序, 可得出各指标在总目标下的重要性, 如表7所示。

表6 层次单排序表

一级指标	计算权重	一致性检验结果	二级指标	计算权重	一致性检验结果
B ₁	0.42	0.025<0.1	C ₁₁	0.54	0.0047<0.1
			C ₁₂	0.16	
			C ₁₃	0.30	
B ₂	0.19	0.025<0.1	C ₂₁	0.67	RI=0
			C ₂₂	0.33	
			C ₃₁	0.17	
B ₃	0.27	0.0133<0.1	C ₃₂	0.44	0.0133<0.1
			C ₃₃	0.39	
B ₄	0.12		C ₄₁	1.00	RI=0

表7 层次总排序表

准则层	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	权重
指标层	0.42	0.19	0.27	0.12	
C ₁₁	0.54	—	—	—	0.2268
C ₁₂	0.16	—	—	—	0.0672
C ₁₃	0.30	—	—	—	0.1260
C ₂₁	—	0.67	—	—	0.1273
C ₂₂	—	0.33	—	—	0.0627
C ₃₁	—	—	0.17	—	0.0459
C ₃₂	—	—	0.44	—	0.1188
C ₃₃	—	—	0.39	—	0.1053
C ₄₁	—	—	—	1.00	0.1200

2.3 综合评价得分

综合评价步骤:

- (1) 确定指标值和等级。
- (2) 建立与评价指标等级相对应的指标分级得分表, 如表8所示, 将指标值换算为相应的分值 (V_i)。

表8 指标分级得分表

指标分级	一	二	三	四	五
指标得分	100	[80, 100)	[70, 80)	[60, 70)	[0, 60)

- (3) 根据层次分析法确定的指标权重分配结果 (W_i), 对各指标得分进行加权求和, 得到综合评价总得分, 综合评价总分满分为100分。

综合评价总得分为:

$$U = \sum V_i W_i$$

式中: U——综合评价系统总得分;

V_i——各指标i的得分;

W_i——各指标i的权重。

- (4) 根据综合评价总得分确定常规公交与轨道交通接驳服务水平。

表9 常规公交与轨道交通接驳服务水平分级表

综合评价得分	90-100	80-89	70-79	60-69	<60
综合评价等级	优秀 (等级一)	良好 (等级二)	中等 (等级三)	及格 (等级四)	差 (等级五)

3 实例分析

为验证建立指标及评价方法的有效性和实用性, 对深圳市2015年和2016年的轨道交通接驳公交服务进行实例分析评价。2015年深圳市运营轨道交通5条线路, 分别是轨道1-5号线, 线路总长度为

177公里。2016年深圳市轨道三期7、9、11号线建成运营, 轨道交通线路增加至8条, 线路总长度增加至285公里, 共设站167个。深圳市轨道网络运营规模进一步扩大, 线网运营长度、投放运力、配套设施及轨道客流等都发生了跨越式增长。



图3 深圳市2016年轨道交通运营线路分

根据构建的综合评价模型, 分析深圳市两年各个指标的情况, 对常规公交与轨道交通接驳服务水平进行综合评价, 评价结果如表10所示。2015年深圳市常规公交与轨道交通接驳服务水平综合评价得分为70.15分, 2016年综合评价得分为71.66分, 较上年度提高1.51分, 各项指标除与轨道网重复线路占比得分下降明显, 其它指标或保持不变或略有增长。

根据评价结果分析可知, 轨道7、9、11号线开通后, 深圳市轨道一次换乘覆盖率、轨道接驳线路高峰期平均满载率均有较大提高, 同时轨道接驳公交线路服务水平达标率也有一定提高。但总体上, 深圳市常规公交与轨道交通接驳服务水平仍有较大提升空间, 亟需进一步完善接驳设施建设、优化接驳网络布局, 弱化轨道公交的竞争性, 强化轨道公交的接驳性, 完善接驳线网运营, 并加强换乘优惠, 鼓励市民换乘出行。

表10 评价指标值

一级	二级	综合权重	指标得分		综合得分	
			2015	2016	2015	2016
B1	C11	0.2268	96.80	96.00	70.15	72.66
	C12	0.0672	2.00	8.50		
	C13	0.1260	66.80	66.00		
B2	C21	0.1273	79.40	84.20	70.15	72.66
	C22	0.0627	79.00	68.00		
B3	C31	0.0459	66.00	77.00	70.15	72.66
	C32	0.1188	79.72	87.50		
	C33	0.1053	35.00	35.00		
B4	C41	0.1200	70.00	70.00		

4 结语

已有的一些发达国家的公共交通发展经验表明,优化常规公交与轨道交通的接驳服务,建立一体化、高效率的服务接驳体系,是提升轨道交通乃至整个公共交通系统的运营效率与服务水平的有效途径。研究分析了城市轨道接驳公交服务评价指标的选取原则和分级标准,重点介绍了各评价指标,并基于层次分析法确定了城市轨道和公交接驳服务评价体系的各指标权重。研究在理论研究方面能进一步完善轨道交通和常规公交接驳服务评价指标体系构建与评价方法,在实践方面能指导城市公交行业主管部门通过定量分析,及时发现接驳服务中存在的不足,有针对性的改善服务,促进常规公交和轨道交通服务一体化,持续提升整个公共交通的吸引力与竞争力。

参考文献

- [1] 深圳市公共交通运输管理局. 2018年度深圳市公共交通发展报告[R]. 深圳, 2019.
- [2] 林国鑫, 陈旭梅. 城市轨道交通与常规公交系统协调评价探

- 讨[J]. 交通运输系统工程与信息. 2006(03): 89-92.
- [3] 莫海波. 城市轨道交通与常规公交一体化协调研究[D]. 北京交通大学, 2007.
- [4] 崔艳萍, 刘莲花. 公共交通接驳换乘系统评价指标体系的构建[J]. 都市快轨交通. 2008, 21(06): 11-13.
- [5] 招晓菊, 唐志强. 城市轨道交通与常规公交协调换乘评价指标体系的研究[J]. 交通标准化. 2010(19): 23-26.
- [6] 魏华. 轨道交通与常规公交衔接优化关键问题研究[D]. 长安大学, 2014.
- [7] 郝成, 殷勇. 基于D-S证据理论的城市轨道交通与常规公交协调综合评价[J]. 综合运输. 2019, 41(05): 57-62.
- [8] 王志刚, 王庆, 宋庆祥. 城市轨道交通与常规公交换乘评价模型[J]. 电脑知识与技术. 2020, 16(12): 249-251.
- [9] 金富达. 城市轨道交通换乘系统评价体系与方法研究[D]. 北京交通大学, 2013.
- [10] 纪雪艳. 城市轨道交通换乘站综合评价指标体系研究[J]. 铁道建筑技术. 2011(05): 38-42.
- [11] 何宁, 潘向阳. 城市快速轨道交通规划的决策分析研究[J]. 中国公路学报. 1999: 73-81.

征稿启事

本刊为深圳市特区建工集团有限公司主办,深圳市天健(集团)股份有限公司、深圳市路桥建设集团有限公司、深圳市建安(集团)股份有限公司、深圳市综合交通设计研究院有限公司承办的内部技术类期刊。旨在促进学科理论和实践的发展、促进行业内学术交流、加速科研成果向现实生产力转化。现长期征集建筑设计、建筑施工、建筑工业化、城市综合管养、专业开发、建筑科技产业培育等方面的稿件,欢迎广大技术人员及专家踊跃投稿。

本刊各栏目均欢迎投稿,来稿优先采取电子邮件投稿,请将文稿发送至投稿邮箱。如有不明事项,请通过电话联系。

投稿邮箱: tqjgjs@163.com

联系人: 刘艾轩(0799-82565321,18025402121)

城市交通

基于轴辐式路网的公交设计优化研究

谭英嘉, 朱一洲, 利敏怡
(深圳市综合交通设计研究院有限公司, 深圳 518003)

【摘要】 为有效降低公交出行者的出行成本和公交企业的运营成本,使用轴辐式路网模型对公交路网线路设计进行优化,提出了以乘客出行总成本和企业运营总成本最小为目标的整数非线性规划模型,并使用分支定界算法进行求解。算例结果表明分支定界算法能有效求解公交线网设计的最优线路及频率。在最优线路确定的基础上,探究了乘客OD总量对最优发车频率的影响,单个站点OD量对经过该站点线路频率的影响,站点通行流量对服务频率的影响。结果表明,不同线路发车频率对出行OD总量的敏感度不一样,不同位置站点OD量对经过该站点的线路频率影响也不一样。本文数学规划模型可同步设计轴辐式路网最优线路及发车频率,通过算例验证了基于整数非线性规划模型的公交线网设计的可行性。

【关键词】 轴辐式路网; 公交线网设计; 整数非线性规划; 分支定界算法

Optimal Design for Hub and Spoke Bus Transit Network

Tan Yingjia, Zhu Yizhou, Li Minyi
(Shenzhen Transportation Design & Research Institute Co.,Ltd., Shenzhen, 518003)

Abstract: To reduce the travel cost of bus travelers and the operating cost of bus companies, the Hub-and-Spoke bus transit route network model is used to optimize the design of bus routes. An integer nonlinear programming model is proposed with the objective of minimizing the total cost of travelers and bus companies. To solve this problem, the branch and bound algorithm is used. The results of the example show that the branch and bound algorithm can effectively solve the model. On the basis of determining the optimal route, this paper explores the relationship between the total OD demand size and the optimal frequency, the relationship between the OD demand size of a single station and the route frequency of the station, the relationship between the passage flow of a station and the service frequency. The results show that the sensitivity of different route frequencies to the OD demand size is different. OD demand size of stations at different locations has different influences on route frequency and service frequency of stations. The frequency of routes and stations on the main axis is more sensitive to the OD size. The mathematical programming model in this paper can be used to synchronously design the optimal route and frequency of Hub-and-Spoke bus transit route network, and the feasibility of bus transit route network design based on integer nonlinear programming model is verified.

Keywords: hub-and-spoke network; bus transit network design; integer nonlinear programming; branch and bound algorithm

0 引言

随着城市的发展,大型商业区、居住区的逐步形成,使得城市道路网中各个区域的出行流量变得很不均衡,产生了系列出行量很大的起讫点和出行较少的需求点。在提供公交服务时,出行OD量较

大的需求点,对路网影响明显,需要优先满足,出行OD量小的需求点,由于人数较少,不宜投入过多的公共资源。传统的“点对点”式线路运输,在满足区域需求的同时,存在一定程度的重复、车载客率低等不合理的运输,因此,需求不均衡的公路路

网结构宜由全连通式运输网络转变为轴辐式路网结构。轴辐式路网相对于传统的全连通式网络,有着减少运输线路、提高线路满载率、便于网络流控制管理、减少总投资费用等优点^[1]。在出行量不均衡的网络中,应针对出行量不同的起讫点进行划分,设定公交服务路线时,尽可能通过大需求量的出行点,形成轴辐式结构的公交服务网络,系列出行需求大的起讫点构成轴辐式路网中的主轴,而周边出行需求较少的起讫点则成为路网中辐射的支点。在轴辐式路网的基础上,针对公交路网调度进行优化设计,既可以满足各起讫点的出行需求,也可以为大需求起讫点提供更优的服务,提高公交满载率,同时避免在运营过程中投入过多资源,更有效的利用公共资源。

现阶段关于轴辐式路网开展的研究多为物流网络上的服务优化,结合轴辐式路网的特点,优化配送中心的位置及配送路线, Li Dongjiu等人^[2]研究了轴辐式路网下以运输总成本最小为目标的药品冷链物流运输模式, Yan Xiong等人^[3]以救援点对于应急物资的满足度为目标,构建了基于轴辐式网络的最佳救援模型。也有学者对轴辐式运输网络进行拓展,研究“点对点”和“轴辐式”混合模式下的运输形式, C S Sung等^[4]探讨了允许部分节点有直接相连线路的混合模式下的轴辐式物流网络运输模式, 黄纯辉等^[5]将轴辐式网络分为主网和子网,允许由非枢纽站构成的子网之间有直接相连路线和转运线路。在直通式和轴辐式物流运输的比较中, 刘苗苗和韩晓龙^[6]针对危险品运输线路设计, 得出了轴辐式网络设计比直通式更节省运输成本的结论。在公交网络中, 魏素豪等^[7]人假设公交线路存在“异质性”, 枢纽覆盖区域的客流在枢纽站点集中换乘, 进行了多枢纽的轴辐式公交网络优化研究。综上可知, 轴辐式网络在物流运输优化中已经得到了广泛应用, 而其关于公交线网设计优化的相关应用研究则比较少。

公交线网设计问题主要涉及发车线路及发车频率的确定, 一直以来是公交服务优化的研究热点之一。目前流行的做法是建立相应网络的优化模型并设计相应的启发式算法求解, 例如B. Barabino^[8]使用贪婪算法求解公交网络的最优路线, 使用随机搜索算法确定线路的发车频率。Steven Chien^[9]等基于地理条件、容量、预算的限制构建了一个包含用户及运营商成本的目标函数, 并设计了遗传算法

求解。Agrawal J^[10]等考虑到遗传算法对大型、复杂问题的局限性, 设计并行遗传算法求解公交线网设计问题。然而, 启发式算法通常只能求得问题的“次优解”, 而分支定界算法作为求解最优化问题的一类重要方法, 能够在保重精度的前提下, 减少计算量并求得问题的最优解^[11], 其主要思想为通过对每一分支上函数值的上界或下界进行估算, 并与当前已知最优值进行比较, 可以删减掉无最优解的分支, 减少计算量。路径选择模型^[12-14]、车辆调度模型^[15-17]等都可以采用分支定界算法进行求解。基于上述分析, 城市公交路网中存在着出行点OD量不均衡现象, 结合轴辐式路网特点, 本文研究采用轴辐式路网模型对公交线网进行优化, 并基于分支定界算法求解最优线路及发车频率。

1 模型与算法

1.1 假设与模型

城市轴辐式公交网络有一条线路主干, 在干路上有若干个站点, 且每个站点可辐射连接支点, 各支点之间无直接连通线路, 路网结构示意图如图一所示, 站点 $n+1$ 至站点 $2n$ 为路网中的干线, 站点 1 至 n 、站点 $2n+1$ 至 $3n$ 为支线站点, 与干线点连接构成支路。

为使研究能够反映真实情况, 给出如下的假设:

- 1) 路网共有 $3n$ 个站点, $3n-1$ 条路段。
- 2) 两点之间若一个方向设置公交线路, 则相反方向设置相同条件的反向线路(即同一线路的上行、下行两个方向)。
- 3) 假定公交车辆在线路经过的每个站点皆不停。
- 4) 各区段运输特性, 包括区段长度、车辆行驶速度、车辆在站点的停靠时间、O-D需求量、公交车容量等均为已知量, 不考虑场站建设运营费用。
- 5) 乘客只在主轴上站点换乘。
- 6) 假设愿意通过换乘完成出行的乘客至多只换乘1次。

在选择公交出行时, 乘客关注的是出行时间, 其主要包含乘客到达站点时间、站点候车时间、车内乘车时间、换乘时间、离开站点到达目的地时间, 其中, 到达站点时间和离开站点到达目的地时间与乘客个人相关, 由乘客个人决定; 候车时间、车内乘车时间和换乘时间则与线路及发车频率密切

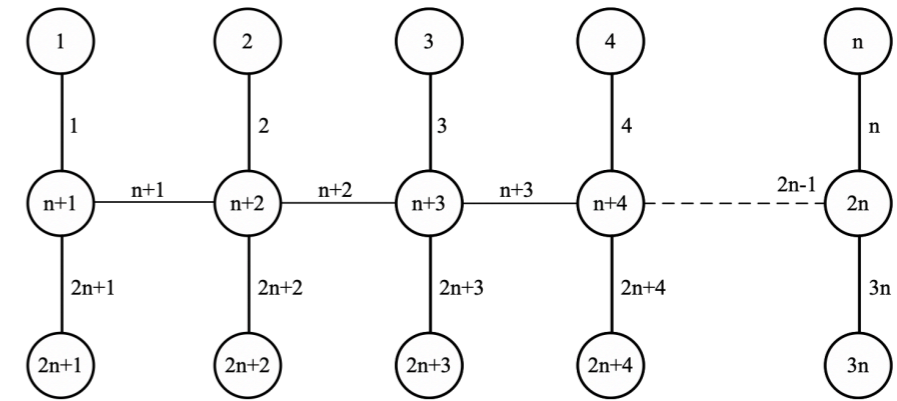


图1 轴辐式路网结构

相关。在线路运营过程中, 从乘客的角度出发, 希望出行时间尽量短, 从运营企业的角度出发, 则希望运营成本尽量少。基于两种思路综合考虑, 本文以乘客出行时间成本和企业运营成本之和最小为目标, 以线路发车频率为决策变量, 以车辆容量限制、断面流量限制及发车频率满足非负整数限制等为约束条件, 构建如下非线性整数规划模型:

$$\begin{aligned} \text{Min } C_T &= C_W + C_R + C_I + C_O + C_F \\ \text{s. t. } h_{ij} &= h_{ji} \\ h_l &\leq \frac{K}{\text{Max}(Q_l^1, Q_l^2)} \quad l \leq 3n \\ \frac{K}{h_{ij}} &\geq q_{ij} \quad i < j \leq 3n \\ \frac{K}{h_{ij}} &\geq q_{ji} \quad j < i \leq 3n \\ Q_{\min}^k &\leq Q_{ij}^k \leq Q_{\max}^k \quad j \leq 3n, i \leq 3n \\ f_{ij} &= \frac{1}{h_{ij}} \quad f_{ij} \in \mathbb{Z}, \forall i, j \\ f_{ij} &\leq \bar{f}_{ij} \quad \forall i, j \end{aligned} \quad (1)$$

其中, C_T 为系统加权总成本; C_W 为乘客的候车成本; C_R 为乘客在中间站转乘候车时间成本; C_I 为乘客总的车内时间成本; C_O 为车辆总运营成本; C_F 为车辆总运营成本; h_{ij} 为起点 i 到讫点 j 的线路的发车时距(h); K 为每辆车载客容量(人/veh); h_l 为经过路段 l 的上行或下行方向线路的服务频率之和; Q_l^1, Q_l^2 分别为经过路段 l 的上行、下行方向总乘客需求量(人/h); q_{ij} 为经过从起点 i 到讫点 j 的乘客出行需求量(人/h); Q_{ij}^k 表示区段 ij 的断面流量; f_{ij} 为连接起点 i 到讫点 j 的线路的服务频率(veh/h), 是模型的决策变量; \bar{f}_{ij} 为从起点 i 到讫点 j 之间线路的服务频率的上限。

1.2 目标函数

模型目标函数的总成本包含乘客的时间价值成本与企业运营成本。其中, 乘客成本包括等车成本、换乘成本和车内时间成本, 运营成本主要是人工、燃油、折旧等成本, 具体的各项成本如下:

1) 乘客的候车成本 C_W

公交线路规划需要考虑所有愿意使用公交出行的乘客的特征, 这里将乘客分为愿意换乘与不愿换乘者两类, 将乘客候车成本也细分到对应的两种人群成本, 愿意换乘的乘客平均等车时间少于不愿换乘的乘客等车时间。平均候车时间是候车时间因子和车头时距的乘积, 乘客平均候车时间因子, 一般假设乘客到站服从均匀分布, 取候车时间因子为0.5。平均车头时距是服务发车频率的倒数。

$$C_W = \sigma_W^R \sum_{i=1}^{3n} \sum_{j=1}^{3n} r_{ij} q_{ij} T_{Wij}^R + \sigma_W^{NR} \sum_{i=1}^{3n} \sum_{j=1}^{3n} (1-r_{ij}) q_{ij} T_{Wij}^{NR} \quad (2)$$

其中 q_{ij} 为起点 i 到终点 j 的OD量, $\sigma_W^R, \sigma_W^{NR}$ 分别为愿意换乘和不愿意换乘乘客的单位等车时间价值, r_{ij} 为起点 i 到终点 j 的换乘乘客比例。

2) 乘客在中间站转乘候车时间成本

$$C_R = \beta \sum_{i=1}^{3n} \sum_{j=1}^{3n} r_{ij} q_{ij} T_{Rij} \quad (3)$$

其中, β 表示单位转车成本, r_{ij} 表示愿意换乘的乘客比例, T_{Rij} 为第 i 站至第 j 站的平均换乘时间。换乘成本等于换乘需求量、平均换乘时间和用户时间价值的乘积。对于需要换乘的乘客, 一次换乘的候车时间即从出发站点到换乘站点的候车时间。对于两次换乘出行者的候车时间则为起点站到第一个换乘站点的候车时间。

3) 乘客的车内时间成本 C_I

车内时间成本等于路段上运行时间加上站点逗

留时间的和与出行需求、时间价值的乘积：

$$C_1 = \eta \sum_{i=1}^{3n} \sum_{j=1}^{3n} q_{ij} T_{ij} \quad (4)$$

其中 η 表示乘客的车内时间成本， T_{ij} 为车辆运行于站点*i*至站点*j*的平均车内时间，是车辆运行时间 $T_v = l_{ij}/v_{ij}$ （ l_{ij} 为车辆从起点*i*到终点*j*的行驶距离， v_{ij} 表示于站点*i*至站点*j*线路上的公交车运行速度）与车辆站点停靠时间的和。

4) 车辆运行成本 C_o 。

运营者常以单位车公里成本为计量单位计算车辆运行成本，是所有发车线路行驶时间与对应线路的车辆发车频率和车辆单位小时运营成本的乘积。

$$C_o = \zeta \sum_{i=1}^{3n} \sum_{j=1}^{3n} \frac{l_{ij}}{h_{ij}} \quad (5)$$

其中， ζ 为每车公里成本， l_{ij} 为车辆从起点*i*到终点*j*的行驶距离。

5) 车队折旧成本 C_F 。

$$C_F = \theta \sum_{i=1}^{3n} \sum_{j=1}^{3n} \frac{l_{ij}}{v_{ij} h_{ij}}$$

其中 θ 为车辆折旧成本（元/（辆·h））， v_{ij} 表示于站点*i*至站点*j*某线路上的公交车运行速度。

综上所述公交运营成本与乘客出行成本之和可得目标函数为：

$$\text{Min } C_T = C_W + C_R + C_1 + C_o + C_F \quad (7)$$

1.3 约束条件

1) 上下行发车间距相等约束

设置公交线路的两个城市来回方向的公交车的发车间隔相同，即：

$$h_{ij} = h_{ji} \quad (8)$$

式中为起始站点*i*到终点站点*j*的发车时间间隔。

2) 发车间隔需满足基本运输要求

发车间隔需满足基本运输要求，能够满足最大可能运走需要通过公交出行的乘客。即为经过路段的上行或下行线路的服务频率的总和与车辆的容量的积，应大于经过路段的上行和下行总的需求量：

$$h_l \leq \frac{K}{\text{Max}(Q_l^1, Q_l^2)}, \forall l \quad (9)$$

其中， K 为每部车承载容量（人/车）； Q_l^1 ， Q_l^2 分别为路段*l*上行、下行方向乘客需求量（人/小时），计算公式如下。 h_l 为路段*l*上的公交车发车平均间距。

3) 断面流量限制

经过某两个站点间区段的各公交线路断面流量需在一定范围内。

$$Q_{\min}^k \leq Q_{ij}^k \leq Q_{\max}^k \quad i \leq 3n, j \leq 3n \quad (10)$$

其中， Q_{ij}^k 表示区段*ij*的断面流量。

4) 发车频率非负整数限制条件

发车频率是单位时间内通过路线上固定一点（站点）的车辆数，等于发车间隔的倒数，其值必大于等于零，且小于等于某个正整数 \bar{f}_{ij} 。

$$f_{ij} = \frac{1}{h_{ij}} \leq \bar{f}_{ij} \quad f_{ij} \in Z, \forall i, j \quad (11)$$

1.4 分支定界算法

分支定界方法从本质上讲是一类分而治之方法。本文模型中决策变量个数较少，采用分支定界法求解整数非线性规划问题是可行的选择。

给定一个最小化目标的整数非线性规划优化问题*I*，它保存一些子问题 I_i 的集合*S*，使得：

子问题 I_i 的可行解集的并等于原问题*I*的可行解集。初始时，*S*仅包含问题*I*。然后，对问题*I*进行一个分解运算，称为分支，得到一组互不相交的子问题 I_i 。可用一棵判定树来刻画这个过程，树上的每一个节点都对应一个子问题。对每一个子问题 I_i ，当我们得到它的最优值 $Z_{opt}(I_i)$ 的一个下界 $Z_*(I_i)$ 以后，如果 $Z_*(I_i)$ 比已经得到的最好值要大，那么就没有必要对 I_i 进行分支运算了，这是因为原问题*I*的最优解不可能在子问题 I_i 的可行解集中。此时，我们除掉 I_i ，从而减少需要考虑和求解的子问题的数目，然后回溯到分支所对应的父辈节点（分支）。否则我们还需要对 I_i 再进行分支运算，得到若干子子问题。实施深度优先搜索或广度优先搜索，逐步减小上界和增大下界，保存和更新当前已得到的最优解的信息，最终找到可行的最优整数解。

分支定界算法如下：

Active set $S := \{I\}$

Upper bound $U := \infty$

Current best solution $s := \Phi$

While $S \neq \Phi$ do

Chose an instance $I_i \in S$ as a branch sub problem

$S := S \setminus \{I_i\}$

Decompose I_i into sub instances $I_{i1}, I_{i2}, \dots, I_{ik}$

Compute the lower bounds $Z_*(I_i)$ for $j=1, 2, \dots, k$

For $j=1, 2, \dots, k$ do

If $Z_*(I_i) \geq U$ then kill I_i

Else if I_{ij} is a feasible solution to I then $U := Z_*(I_i)$ and $S := I_{ij}$

Else $S := S \cup \{I_{ij}\}$

End for

End while

Return S

2 数值算例

为了说明本文方法的有效性，采用算例进行验证。如图2所示的一个简单轴辐式公交网络，该网络由12个公交站点，11条公交区段组成。网络中的公交区段长度如图所示，公交车行驶速率均为40km/h，公交车服务于起讫点之间所有站点。各个站点间乘客起讫需求量列于表1中。愿意通过换乘到达目的地的乘客比例0.2。乘客车内时间价值1.67（元/人*分钟）不愿换乘的乘客车外时间价值2（元/人*分钟）愿意换乘乘客的车外时间价值2.5（元/人*分钟）。车辆容量40（人/车）；每

次停靠站时间为80s。客车运行成本主要包括燃油消耗、通行费、人工工资等，其中燃油成本为1.93（元/车*公里），加上车胎耗损费、人员费用、企业运转办公费用等，折合的单位运营总成本为30（元/车*公里），车辆折旧费用为20（元/车*小时）。基于以上数据的本文模型可以同步确定最优的公交线路与最优的运营方案。

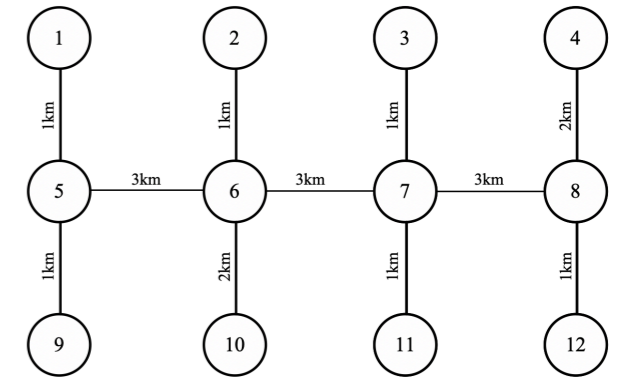


图2 算例路网

表1 乘客OD出行量

站点	OD客流（人次）											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	14	15	2	2	8	11	4	3	10	7	12
2	3	0	10	11	0	18	15	9	18	13	5	13
3	13	2	0	19	16	10	14	17	19	15	9	15
4	6	14	11	0	2	7	7	5	1	14	17	2
5	19	19	3	0	0	7	16	5	19	3	11	18
6	3	9	17	3	9	0	19	6	15	10	6	17
7	19	15	16	6	4	5	0	9	8	7	15	20
8	16	4	19	3	3	2	9	0	3	4	11	9
9	18	1	5	1	19	1	6	6	0	9	4	5
10	18	1	14	16	15	19	4	5	16	0	12	14
11	2	16	19	3	17	10	4	4	13	6	0	9
12	12	6	3	9	8	18	13	3	17	13	12	0

1) 模型计算结果

采用lingo10建模求解，最优线路及发车频率计算结果如表2所示，各成本计算结果如表3所示。根据模型计算得到的发车频率是否为零作为任意两个站点间是否设置公交线路的依据。本算例单向总

计需布设28条线路，最低总成本为65822.52元/h。

公交站点服务频率如表4所示，站点服务频率等于经过该站点的所有线路的发车频率之和。位于路网干线上的4个站点由于经过线路多，且承担换乘站点，其服务频率明显大于支点站，优化结果线

表2 最优发车频率

站点	频率 (车/h)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	2	2	1	0	0	0	0	3	2	1	2
2	2	0	2	2	0	0	0	0	2	2	2	2
3	2	2	0	3	0	0	0	0	2	2	4	2
4	1	2	3	0	0	0	0	0	1	2	2	2
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	3	2	2	1	0	0	0	0	0	2	2	2
10	2	2	2	2	0	0	0	0	2	0	2	2
11	1	2	4	2	0	0	0	0	2	2	0	2
12	2	2	2	2	0	0	0	0	2	2	2	0

表3 模型成本最优解

变量	单位	最优值
C_w	元/h	19621.44
C_R	元/h	1661.912
C_l	元/h	22579.17
C_0	元/h	21600
C_F	元/h	360
C_T	元/h	720

路安排能够在满足干线上和支线上乘客公交出行需求外,还尽可能的节省总费用成本,既优化乘客出行体验,也减少运营公司开支。

2) 模型敏感性分析

为研究乘客出行OD总流量对模型各输出参数的

表4 公交站点线路服务频率

公交站点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
服务频率	13	14	17	13	24	39	42	25	14	14	15	14

图7和图8为其它站点OD出行量不变的情况下,位于支线上公交站点1的OD出行与吸引流量变化对各成本影响情况。由图可知,随着站点1的OD总量

影响,将OD放缩倍数设定为0.5倍、1.5倍、2倍。OD倍数和系统各项成本之间的关系如图3、图4所示,可见随着OD的增加,系统总成本 C_T 、用户总成本 C_U 和运营总成本 C_S 均随之增加,平均OD量每增大0.5倍,总成本增加2.12万元,用户成本增长幅度随倍数增大而减小,运营成本也呈现于用户成本一致的变化趋势。乘客候车成本和换乘成本呈现相同的增加趋势,但其增长幅度随着OD量增加快速减小。其中用户总成本等于乘客车内成本、候车成本和换乘成本三者之和,运营总成本为运营成本与折旧成本之和。部分线路发车频率随OD总量的变化情况如图5所示,线路发车频率 $f_{1,9}$ 、 $f_{1,10}$ 、 $f_{2,11}$ 、 $f_{2,12}$ 呈现出来的变化不尽相同,总体为增加趋势, $f_{1,9}$ 随OD总量增大快速增加。图6为车辆总车公里数随OD量的变化情况,当倍数由1.5增大至2倍时,车公里增长幅度最小,为17.8%。

增加,系统的各项成本均缓慢增加,平均每增加0.5倍,总成本增加0.44万元,用户总成本增加0.33万元,当倍数由1增至1.5倍数,运营总成本

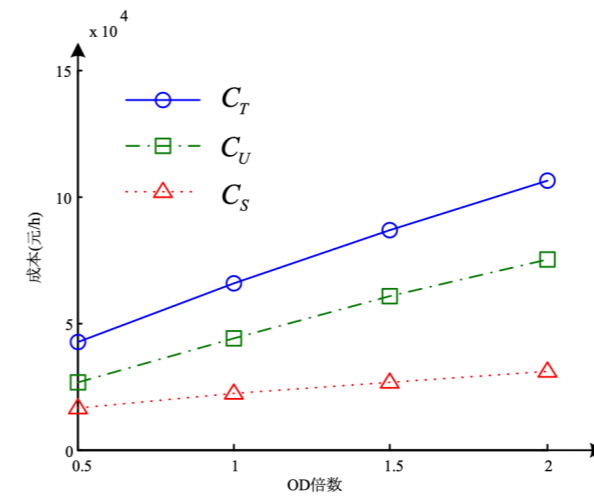


图3 OD总流量与系统成本

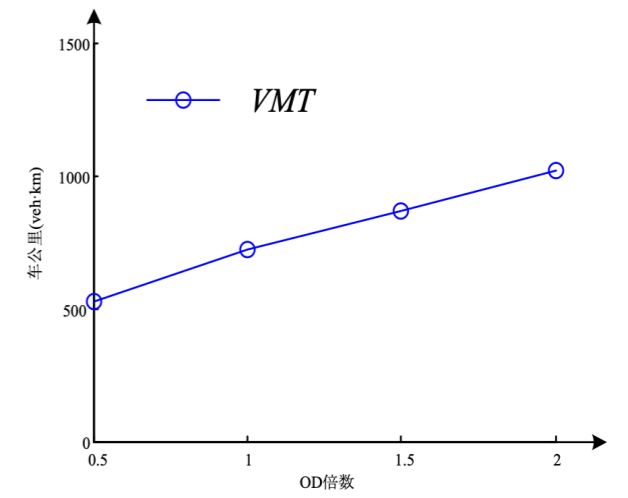


图6 OD总流量与车公里

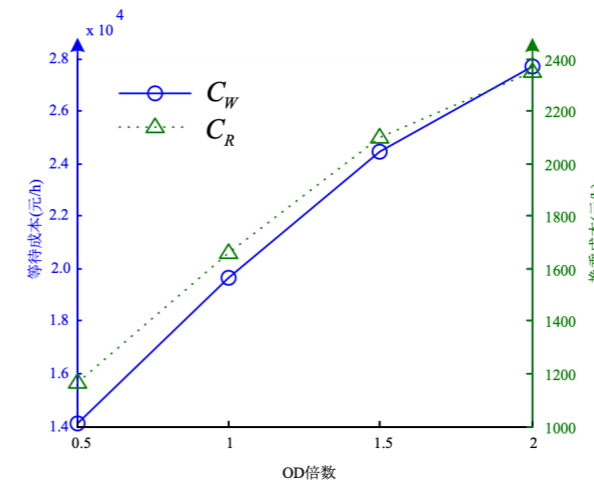


图4 OD总流量与候车成本及换乘成本

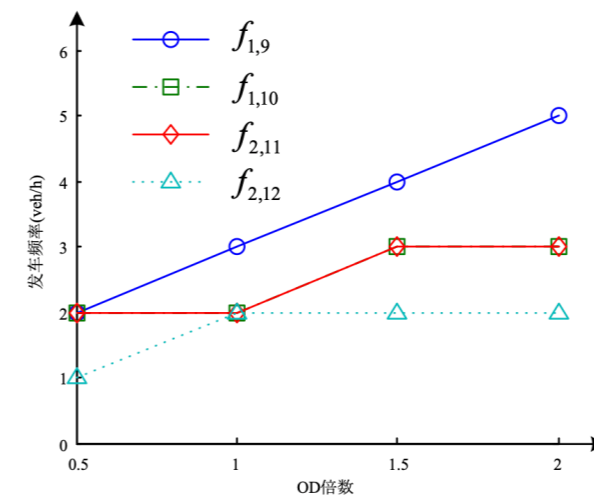


图5 OD总流量与线路频率

增长幅度最大,为8%。而等候成本和换乘成本增长速度中间有减缓变化,当由1增至1.5倍数时,等候成本和换乘成本增长幅度最小,分别为1.46%和

3.4%。图9为支线上公交站点1的OD总流量对部分发车线路的影响,随着OD量的增大,该站点发出线路频率增大,而其余站点线路不受影响。

位于干线上公交站点5的OD总量变化对系统各成本的影响情况如图10所示,与站点1类似,系统各成本也随OD量增加而增加,OD量每增大0.5倍,总成本平均增加0.27万元,增长幅度为4%,用户总成本平均增加0.23万元,增长幅度为5%,运营总成本平均增加0.04万元,增长幅度为1.9%,当倍数由0.5增加至1时,线路基本稳定,运营总成本不产生变化。图11为乘客候车成本与换乘成本随站点5OD量变化情况。值得注意的是,随着OD量的增加,候车成本与换乘成本增速呈现减小的趋势。这是由于站点5位于干线上,经过线路多,OD量的增大导致受到影响的线路较多,多数线路发车频率增大导致乘客的候车与换乘成本减小了。图12为站点5的出行OD流量对经过该站点部分线路的发车频率的影响。各线路发车频率总体也呈现增加趋势,和与站点1的情况比较,可以发现相同的线路受站点5不尽相同,支线上站点对由此站点发车线路影响程度大。综上所述,随着站点OD量的增大,对用户候车成本和换乘成本影响不同,对经过该站点的线路受到的影响也是不尽相同的,与站点所处的位置有关。

表6为部分站点服务频率与通过该站点流量的变化情况。当各站点的流量增量保持不变时,支线上公交站点1、9与干线上站点5、7服务频率随通行流量变化都呈增加趋势,但其增长速度变化各不相同,其平均增速基本一致。

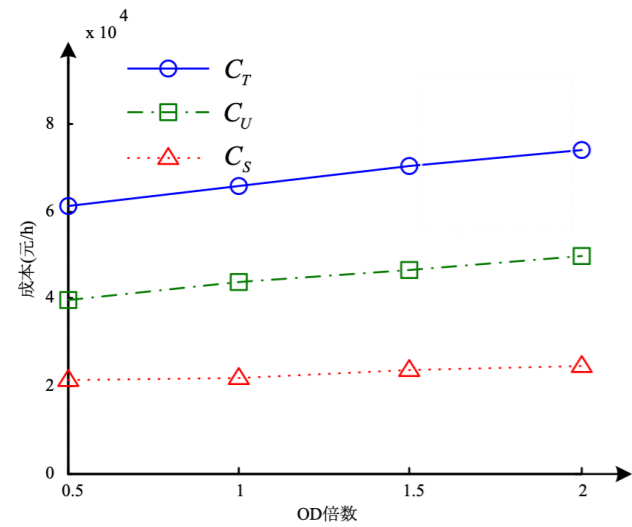


图7 站点10D流量与系统成本

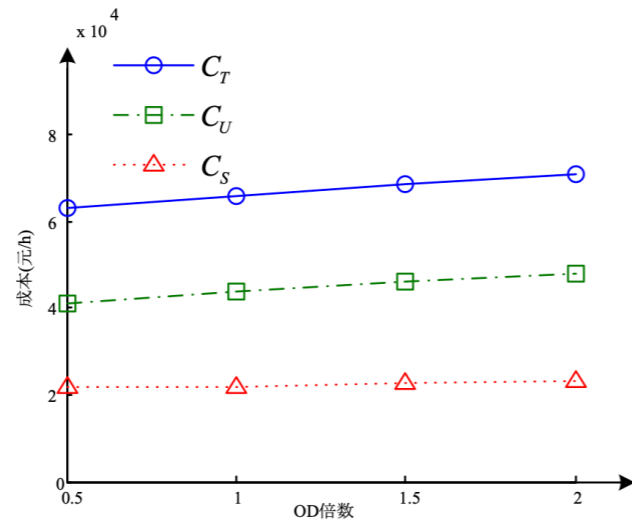


图10 站点50D流量与系统成本

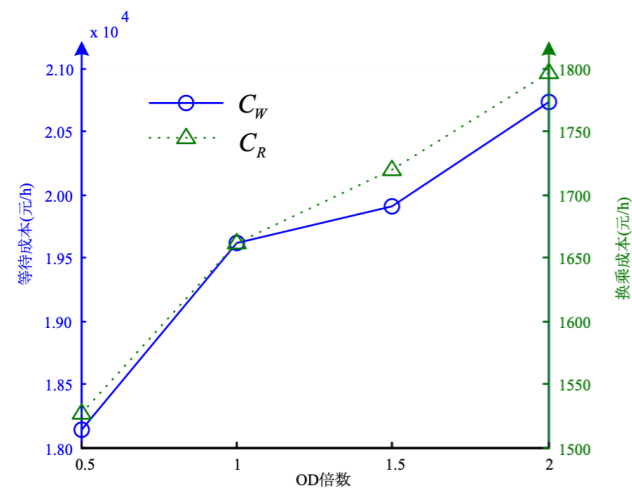


图8 站点10D流量与候车成本及换乘成本

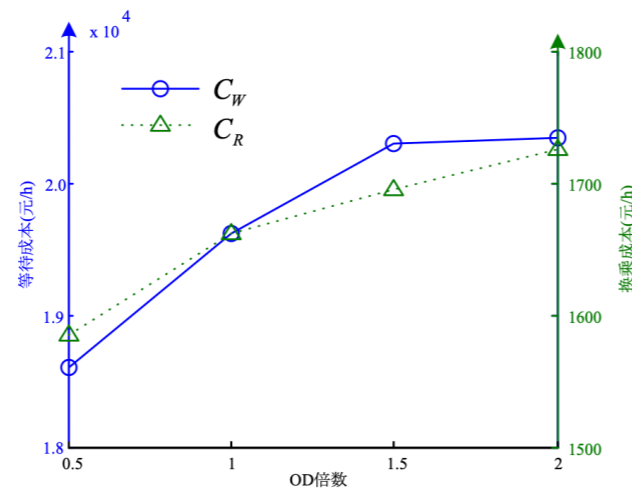


图11 站点50D流量与候车成本及换乘成本

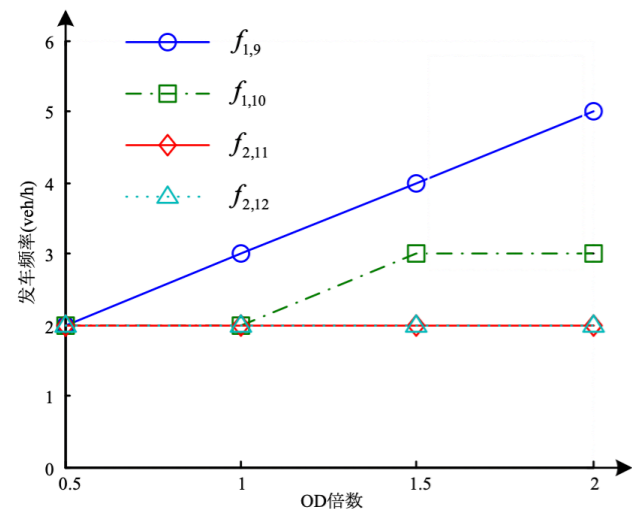


图9 站点10D流量与线路频率

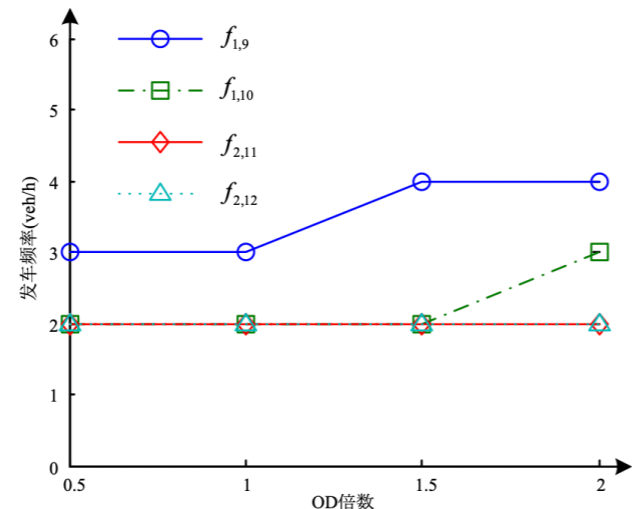


图12 站点50D流量与线路频率

表6 站点服务频率与通行流量

站点	OD通行流量 (人次)	65	129	193	258
支线站点	站点1线路服务频率 (车/h)	11	13	18	20
	站点9 OD通行流量 (人次)	66	132	198	264
	站点9线路服务频率 (车/h)	10	14	17	21
干线站点	站点5 OD通行流量 (人次)	166	332	498	664
	站点5线路服务频率 (车/h)	19	24	31	36
	站点7 OD通行流量 (人次)	244	488	732	976
	站点7线路服务频率 (车/h)	30	42	50	58

3 结论

本文应用轴辐式网络模型对公交运营网络进行优化, 建立以乘客和运营企业成本最小为目标, 以对称发车、最大发车间距、断面流量、车辆容量等为限制条件, 以公交线路上的发车频率为基本决策变量的最优公交线路设计模型。研究结论如下:

- 1) 求解本文数学规划模型可实现同步设计最优公交线路与最优发车班次。
- 2) 本文模型特别适用于为各需求量不平衡的公交站点网络设计合理的车辆运营调度安排, 可以直接为线路设计、运营调度工作提供决策依据。
- 3) 轴辐式路网中, 不同站点OD量对系统成本的影响不一样, 对经过该站点的线路影响程度不一样, 与站点位置有关。
- 4) 分支定界方法可以有效用于本文的整数非线性规划模型求解。

参考文献

[1] 赵晋, 霍佳震. 轴辐式服务网络规划研究综述[J]. 上海管理科学. 2010, 32(09): 89-92.
 [2] Dongjiu L, Hao L, Qingnian Z, Jiali W. Transport Hub-and-spoke Network Optimization Model Construction of Pharmaceuticals Cold-chain Logistics[C]. IEEE, 2012.
 [3] Xiong Y, Zheng L, Wang J. Scheduling model for the satisfaction of emergency material on hub-and-spoke network[C]. IEEE, 2015.
 [4] C S Sung, H W Jin. Dual-based approach for a hub network design problem under non-restrictive

policy[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 132(1): 88-105.

[5] 黄纯辉, 张庆年, 徐亚. 基于混合轴辐式的运输网络决策模型[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版). 2013, 37(05): 974-978.
 [6] 刘苗苗, 韩晓龙. 危险品运输道路轴辐式网络设计[J]. 中国安全科学学报. 2015(02): 117-122.
 [7] 魏素豪, 宗刚. 基于线路“异质性”假设的轴辐式公共交通网络优化研究[J]. 运筹与管理. 2017, 26(10): 42-48.
 [8] Barabino B. Transit Bus Route Network Design: a model and its application in a real network[M]. Urban Transport XV, 2009.
 [9] Chien S, Yang Z, Edwin. Genetic Algorithm Approach for Transit Route Planning and Design[J]. Journal of Transportation Engineering. 2001, 3(127): 200-207.
 [10] Agrawal J, Mathew T V. Transit Route Network Design Using Parallel Genetic Algorithm[J]. Journal of Computing in Civil Engineering. 2004, 18(3): 248-256.
 [11] 李一明, 李毅, 周明天. 分支定界算法的分布并行化研究[J]. 计算机应用. 2006, 26(3): 723-726.
 [12] Goerigk M, Grün B, Heßler P. Branch and bound algorithms for the bus evacuation problem[J]. Computers & Operations Research. 2013, 40(12): 3010-3020.
 [13] Kumar Y, Jain S. School bus routing based on branch and bound approach[C]. IEEE, 2015.
 [14] Ma J, Yang Y, Guan W, et al. Large-Scale Demand Driven Design of a Customized Bus Network: A Methodological Framework and Beijing Case Study[J]. Journal of Advanced Transportation. 2017, 2017: 1-14.
 [15] Mesquita M, Paiais A, Respício A. Branching approaches for integrated vehicle and crew scheduling[J]. Public Transport. 2009, 1(1): 21-37.
 [16] 林秀娟, 陈峰. 可重用资源约束调度问题的分支定界算法研究[J]. 工业工程与管理. 2013, 18(06): 40-46.
 [17] 王天宇, 韩印, 夏晓梅. 基于自行车共享系统静态再平衡问题的分支定界算法[J]. 物流科技. 2018, 41(11): 73-77

一种新型智能地埋式垃圾分类收集站在深圳市罗湖“二线插花地”棚改项目中的应用

汪 洋,王 进,邓江辉
(深圳市天健棚改投资发展有限公司, 深圳 518019)

【摘 要】 针对传统垃圾桶在收集垃圾过程中垃圾外散、装满无人收等造成二次污染的问题,以及传统垃圾转运站异味外泄,噪音污染等问题,本项目设计采用了一种新型智能地埋式垃圾分类及转运收集站,它主要包括景观投料箱、外框总成、升降机构、自动抽水系统、智能物联模块系统等。该装置配备监控管理智能系统,建立物联共享网络,不仅减轻环卫工人负担,提高工作效率,也可充分利用地下封闭空间,防鼠防臭防扒拾,更好地保护投放点及垃圾转运站的环境^[1]。本文以深圳市罗湖“二线插花地”棚改项目为例,阐述这种新型智能地埋式垃圾分类收集站在该项目中的设计应用,以期为类似工程项目提供借鉴。

【关键词】 垃圾分类;地埋式垃圾转运站;环境友好

Design and application of a new type of intelligent buried garbage sorting collection station in Shenzhen Luohu shed renovation project

Wang Yang, Wang Jin, Deng Jianghui
(Shenzhen Tagen penggai Investment Development Co., Ltd., Shenzhen, 518019)

Abstract: Aiming at the problems of secondary pollution caused by traditional trash cans and garbage being scattered and filled with no one in the process of garbage collection, as well as the problems of odor leakage and noise pollution in traditional garbage transfer stations, this project design adopts a new type of intelligence. Buried garbage classification and transfer collection station, which mainly includes landscape feeding box, outer frame assembly, lifting mechanism, automatic pumping system, intelligent IoT module system, etc. The device is equipped with a monitoring and management intelligent system and an Internet of Things sharing network is established. It not only reduces the burden on sanitation workers and improves work efficiency, but also makes full use of the underground enclosed space. Environment^[1]. This article takes Shenzhen Luohu "second-line flower arrangement" shed renovation project as an example to illustrate the design and application of this new type of intelligent buried garbage sorting and collection station in this project, in order to provide a reference for similar projects.

Keywords: garbage classification; buried garbage transfer station; environmentally friendly

0 前言

随着我国城市化进程加快,“垃圾围城”的现行日益严重。据中国城市环境卫生协会的数据显示,目前我国人均生活垃圾年产生量达440Kg,中

国每年使用塑料快餐盒达40亿双,并且在不断增加,其中生活垃圾中约有30%是可以回收利用的,去掉能回收的,不易降解的物质,垃圾数量能减少50%以上,因此生活垃圾收集、清理、分类日益为

人们所重视^[2]。

本文针对传统垃圾转运站等环卫设施的环境影响大、精细监管难、作业强度高的问题,积极探索将环卫设施“关入地下消毒柜”,向地下要空间,这一地埋式垃圾站在视觉上与传统垃圾站完全不同,且极大地减少臭味和噪音等二次污染,让垃圾站实现更友好地为居民服务,从而进一步改善社区环境。

1 政策背景

2020年7月深圳市已出台《深圳市生活垃圾分类管理条例》^[3],规定从2020年9月1号起开始实行。垃圾分类正式进入强制垃圾分类时代。开始实行政府推动、全民参与、制度约束、习惯养成、系统推进、循序渐进的管理原则。并从法律层面分别对个人、单位、收运企业及物业公司等规定了相应责任范围及处罚措施。

2 项目背景

深圳市罗湖“二线插花地”棚户区改造项目施工建设包含木棉岭和布心片区,各地块容积率高,居住人口密集,根据测算,木棉岭片区居住人口约4万人,布心片区居住人口约3万人,人口密度相对较大。

按居住人口测算木棉岭片区每日产生生活垃圾约40吨,布心片区每日产生生活垃圾约为30吨,每日产生垃圾量巨大。

3 升级建设必要性分析

在垃圾收储及垃圾分类、垃圾转运过程中不可避免的会产生对社区景观环境、空气质量、噪音等问题。在疫情之下,垃圾投放点、转运站都成为了防疫重点。

3.1 垃圾投放点升级必要性分析

传统的垃圾投放点主要存在的问题如下:一是垃圾投放点垃圾易裸露,异味严重,严重影响社区形象;二是普遍存在着垃圾高峰投放时收纳容量不足,高峰期垃圾桶在满溢时得不到及时的清理;三是垃圾投放点占地面较大,传统的垃圾收集方式大量的垃圾桶占用了居民的公共活动空间,是居民较反感的厌恶性设施,垃圾洒落、臭气、污水等紧邻问题,不可避免垃圾收集选址较困难。

本次垃圾投放点的升级是通过利用架空层室内外高差合理暗藏大容量分类垃圾收集桶,在地面人体舒适高度仅设外漏的投放口。垃圾在投放点将密闭储存,密闭空间内设置自动灭虫、消杀功能,投放口设置自动感应开盖、垃圾满溢自动报告等智

能化功能。同时投放点与主体建筑统一设计与原有建筑物融为一体。升级改造的方案不仅将原本脏、乱、臭等垃圾投放点问题进行了有效地消除,将环境的负面影响降到了最低,同时社区的宜居形象得到进一步的提升。通过智能化技术的运用,不仅减少了垃圾投放时二次污染,同时也大大提高了环卫工人的劳动效率,减少了他们的劳动强度。

3.2 垃圾中转站的升级必要性

传统的垃圾中转站“邻避问题”较为严重,站内空气虽然经过净化处理,但因投放压缩等工作在开放空间中进行,臭味难以控制。作业时,智能化程度难度低,噪音较大,消杀工作也需要人工进行。

本次升级方案通过采用智能地埋式垃圾站设计,将智能压缩储存箱体置于地下空间,地面只露出一个投料口,通过设置两层喷淋除臭系统,有效抑制垃圾倾倒,压缩过程中的异味。同时自动翻桶设备的静音设计,有效地控制了噪音。智能地埋式垃圾转运站是为利用地下封闭空间进行垃圾的压缩、收储,能最大限度减少垃圾在转运过程中的噪音、臭气、和污水等二次污染,同时可以明显控制蚊蝇、老鼠等四害,大大减少了对周边居民的生活影响。因站内智能化程度提高,大大提升了站点的转运效率,实现了环境效益及社会效益的共赢。本项目升级后的垃圾中转站与传统垃圾中转站对比分析如表1。

4 升级建设目标

4.1 示范社区

助力深圳建设中国特色社会主义先行示范区中的民生幸福标杆社区。打造出“垃圾分类、地藏收储”的示范社区,实现垃圾绿色收集、源头分类、地下收储、密闭消杀的理念,引领社区垃圾分类、收储新时尚。

4.2 智慧体系

建立社区垃圾分类智慧化管理体系,融入“智慧社区”管理大平台,实现垃圾分类投放、收运的全过程监管。

4.3 创新科技

采用先进的智能“地埋式”垃圾收集设备、智能分类回收箱、电动密闭驳桶车等环保装备,科技创新助力垃圾分类。

5 社区垃圾分类及垃圾中转站升级方案

5.1 木棉岭及布心片区分类垃圾点位布置原则

分类垃圾投放点在各个楼栋的架空层侧边布

表1 升级后的垃圾中转站与传统垃圾中转站对比分析表

项目	传统垃圾中转站	地埋式垃圾转运站
1 占地面积	200-300m ²	60-80m ² (不建房17-21m ²)
2 噪音	噪音大	无
3 污染	异味、污水、蚊虫	无
4 主要功能	垃圾存储	垃圾存放、压缩、除臭、消毒
5 垃圾清运次数	每天清运多次	每1天或2天清运一次
6 垃圾存储量	不压缩或简单压缩、存储量小	自动存储、存储量相当于不压缩的三倍以上
7 使用是寿命	7-8年	10年以上
8 除臭	无	生物、物理除臭、杀菌
9 安全隐患	火灾、二次污染、疫情	无

置，方便住户投放垃圾；分类垃圾暂存点尽量布置在各个地块的道路边角处；分类垃圾转运站在现有

垃圾转运站的基础上进行升级改造，该项目的2个片区具体布置分别如图1、图2所示。



图1 木棉岭分类垃圾点位设置



图2 布心片区分类垃圾点位设置

5.2 垃圾投放点设计详图

本文以布心04地块为例，分别绘制了垃圾分

类收集点平面位置图及垃圾收集点剖面示意图，具体如图3、图4所示。

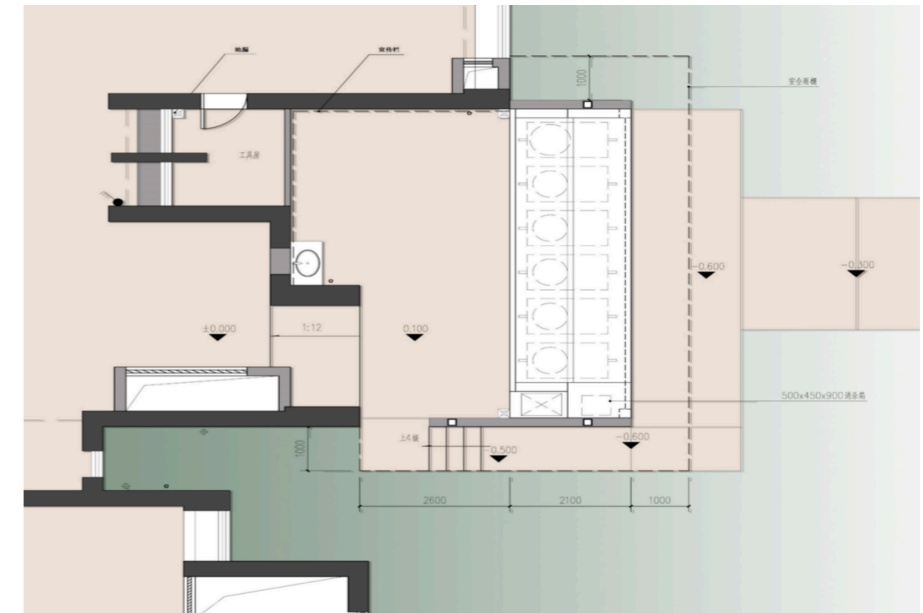


图3 B04栋垃圾分类收集点平面位置图

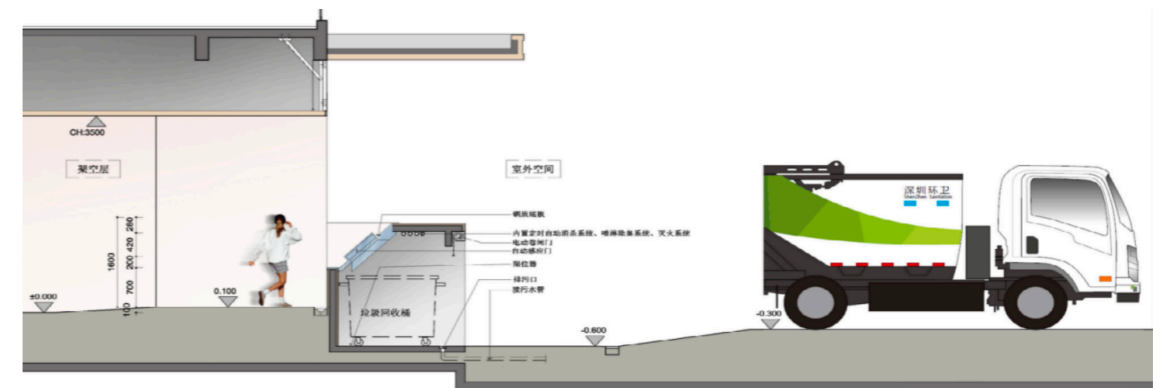


图4 垃圾收集点剖面图

5.3 垃圾投放点效果图

升级后的垃圾投放点架空层区域采用筒装设计，整体风格也与架空层设计保持一致，筒装范围包括地面、墙面、天花吊顶以及雨棚以及监控设备，垃圾投放点效果图如图5所示。

5.4 垃圾分类收运规划

垃圾分类按照分类投放、分类收集、分类清运、分类处理原则，具体收运规划如图6所示。

5.5 智慧管理平台

智慧管理平台实现了垃圾收运全流程掌控，一个中枢，多个场站，多个点位，移动在线监管。参考示意如图7所示。

5.6 垃圾转运站升级方案

在原址上分别对两个片区的垃圾转运站进行升级建设。向地下拓展四米的空间，增加地埋式垃圾站设备，不改变原有建筑结构布置，将垃圾的存储及压缩全部在地下进行，彻底消除垃圾站的“邻避问题”。智能地埋式垃圾转运站效果如图8所示。

5.6.1 工作流程

通过密闭驳桶车将垃圾投放点的标准垃圾桶转运至垃圾转运站→垃圾转运站的地面翻料器自动翻桶、抖桶→压缩箱自动或手动压缩→通过控制器操作平台的升降→需要转运时安排勾臂车进场→顶层平台升起拉出压缩箱→更换空压缩箱放回地埋平台，工作流程图如图9—图12所示。



图5 垃圾投放点效果图

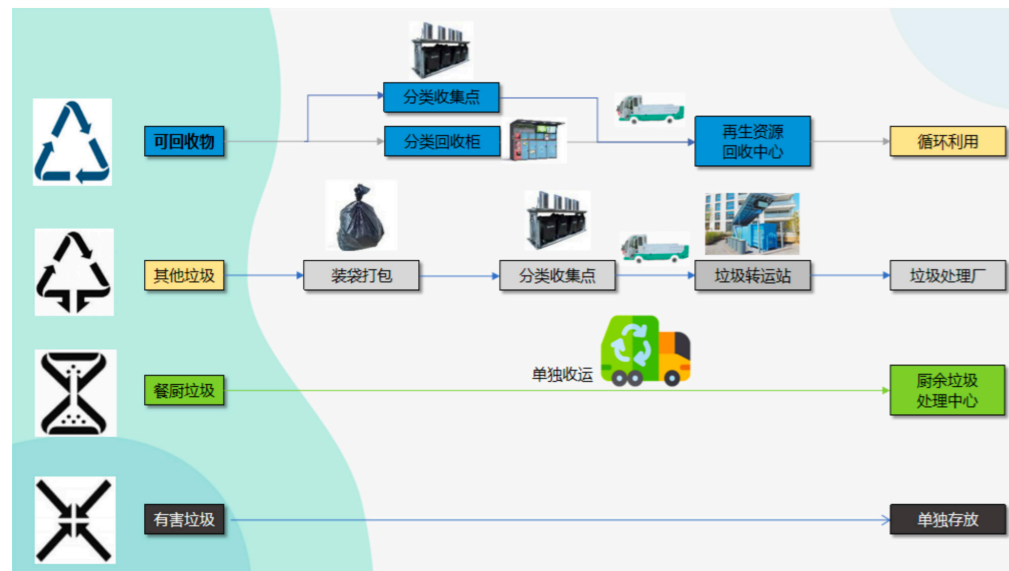


图6 垃圾分类收运规划图



图7 智慧管理平台参考示意图



图8 智能地埋式垃圾转运站效果图

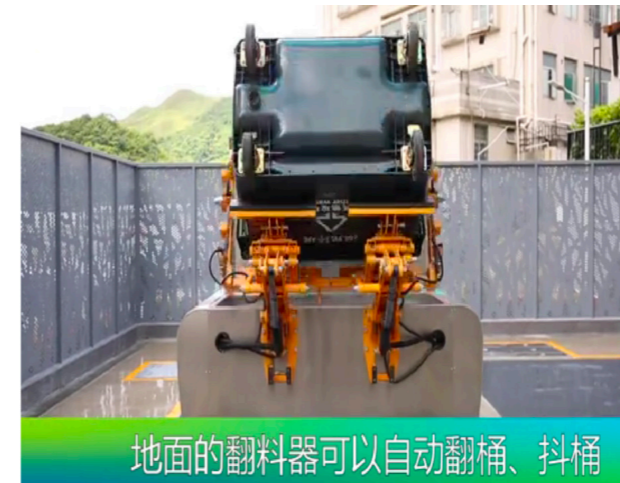


图9 地面翻料器自动翻桶、抖桶

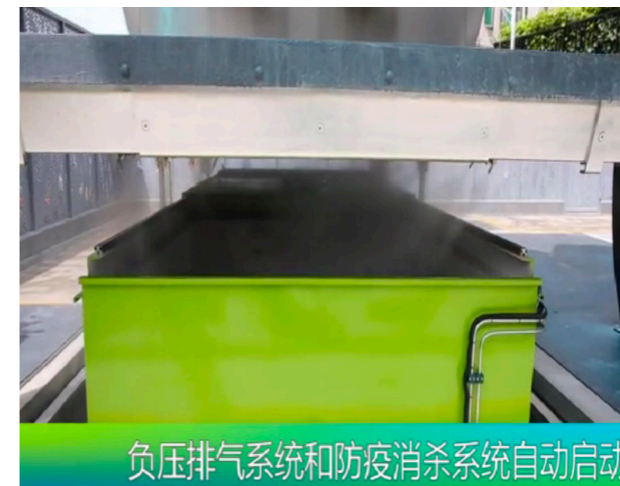


图10 通过控制器操作平台的升降



图11 顶层平台升起，勾臂车拉出压缩箱



图12 更换空压缩箱放回地埋平台

4. 压缩箱升起时植物精油喷淋除臭系统、负压排气系统和防疫消杀系统自动启动，抑制臭味和病菌散播，在地下时也可设置定时喷淋；

5. 自动灭火系统24小时监控温度，避免火灾；

6. 垃圾渗滤液收集存储在压缩箱底部清理时接入专用管道，按照当地市政要求，达标排放；

7. 云平台通过物联管理系统监控垃圾容量；

8. 压缩箱原地更换，减少拖行距离，集约用地，转运完成后降下顶层平台；

9. 场内设有噪声，灰尘和温度传感器，场内噪声控制在70db以内，不扰民；

10. 周围设有花草，围墙，雨棚，将垃圾站变为一处景观。

5.6.3 主要功能模块

设备功能模块包括自动翻桶、综合除臭、灭火系统、排水系统、物联系统等。周边环境监测主要包

5.6.2 关键控制点及创新点

1. 倾倒垃圾时，翻料口的抑尘除臭系统自动启动，翻料器同时适配660L和240L标准垃圾桶；

2. 一套压缩箱压缩收集约17立方米的垃圾，一套可满足一万人一天的生活垃圾收集需求；

3. 平台升降时伴随警示提示音，保证作业安全行；

括硫化氢、氨气、PM2.5、噪音监测及场地监控等。

6 便捷性、安全性、经济性分析

6.1 便捷性分析

垃圾分类投放点的智慧体系对垃圾投放点状态实时监控，形成收运路线，方便环卫人员收运垃圾，提高工作效率。转运站和垃圾投放点的智慧体系对垃圾状态实时监控，方便管理人员对工作流程的监管。

6.2 安全性分析

设备电气安全：电控系统均有过载保护装置、漏电保护装置、电气防雷及设备防雷接地，杜绝设

备过载与漏电风险，保证设备及人员用电安全。

机械安全：安全销装置、液压防爆装置、设备设计有紧急制动、急停按钮等安全结构，保证操作及检修人员操作安全。

6.3 经济性分析

木棉岭片区M01地块垃圾转运站、布心片区B02地块垃圾转运站配置共计6台智能地埋式垃圾转运站设备与移动压缩箱设备，木棉岭片区、布心片区各地块配置23套6工位垃圾分类投放点设备和18套4工位垃圾分类投放点设备，概算金额为2941.48万元，具体详见表2、表3。

表2 社区垃圾分类投放升级投资估算

类别	名称	参数	单位	数量	单价(万)	小计(万元)
地埋设备	智能地埋式垃圾桶	四桶位	套	18	23.7	426.6
	智能地埋式垃圾桶	六桶位	套	23	26.7	614.1
合计						人民币1040.7万元

表3 垃圾转运站升级投资估算

类别	名称	参数	单位	数量	单价(万)	小计(万元)
地埋设备	智能地埋式垃圾转运站	单工位	套	6	286.88	1721.26
	移动压缩箱	15立方	套	6	29.92	179.52
合计						人民币1900.78万元

升级建设的垃圾站虽然是公益性项目，不能产生直接的经济效益，但从环境改造、资源开发利用的角度看，潜藏着各种间接的经济效益，项目在提高区域环境和人居环境的同时，也提升了周边区域的土地价值。

7 结束语

本文以深圳市罗湖“二线插花地”棚户区改造项目的垃圾分类系统升级建设的必要性、便捷性、安全性、经济性等方面进行了较为详细的研究，体现了“以人文本、宜居宜业”的设计理念，方案将地埋式转运站和垃圾分类投放点处的垃圾密闭存储处理，并通过智能化技术手段运用，升级建设成为示范性，消除垃圾分类投放点、转运站的脏、乱、

臭等问题，将环境的负面影响降到最低，减少了邻避效应。为打造深圳市罗湖“二线插花地”棚户区改造项目的示范性增添亮点，升级后的建设方案符合建设资源节约型、环境友好型社会的发展方向^[4]。

参考文献

- [1] 滕炫龙, 徐敏, 陈安健. 一种新型智能地埋式垃圾分类收集站的设计[J]. 装备制造技术, 2019(6):33-36.
- [2] 姜子孟. (2018). 我国垃圾分类现状及对策探究. 中国市场, 000(013), 79-80.
- [3] 《深圳市生活垃圾分类管理条例》.
- [4] 田文富. 建设资源节约型、环境友好型社会的问题与对策思考[J]. 学习论坛, 2007(07):64-66.

建废利用

多因素对工程渣土免烧砖性能影响研究

冯志远

(深圳市特区建工集团有限公司, 深圳 518034)

[摘要] 基于不同含砂率，掺入不同类型、不同掺量的固化剂和水泥制作工程渣土免烧砖，进行抗压强度、软化系数（包含淡水和海水）的影响研究。试验表明，影响抗压强度的因素为：水泥掺量（B）>含砂率（A）>固化剂掺量（C）；影响软化系数的主要因素是固化剂，水泥掺量和含砂率影响较小。采用含砂率25%工程渣土，掺15%~18% P·O42.5水泥，2.0%高分子聚合物系固化剂，生产的工程渣土免烧砖性能较好。

[关键词] 工程渣土；建筑垃圾；免烧砖；软化系数

The effect of multiple factors on the performance of non-sintered brick by engineering sediment

Feng Zhiyuan

(Shenzhen Sez construction Group Co.,Ltd., Shenzhen, 518034)

Abstract: The effects of engineering sediment with different sand content, and added different types and content of curing agent and cement, on the compressive strength, softening coefficient (in fresh water and sea water) of non-sintered brick. The results show that the factors influencing the compressive strength are as follows: cement content (B) > sand content (A) > curing agent content (C). The main factor affecting the softening coefficient is curing agent, and the influence of cement content and sand content have little effect. When use engineering sediment with 25% of sand content, mixed with cement P·O42.5 15%~18% and 2.0% polymer curing agent, the properties of engineering sediment non-sintered bricks are better.

Keywords: engineering sediment; construction waste; non-sintered brick; softening coefficient

0 引言

近年来我国城市发展很快，拆除大量既有建筑，开挖地下空间，产生了大量的建筑垃圾。按CJJ/T 134-2019《建筑垃圾处理技术标准》，建筑垃圾分为五大类，拆除垃圾、工程渣土、工程泥浆、工程垃圾、装修垃圾。根据中国建筑垃圾管理与资源化工作委员会副主任陈家陇教授统计，住房和城乡建设部在全国开展建筑垃圾治理试点工作的35个城市（区），2018年建筑垃圾的产生量为13.15亿t、2019年产生量为13.69亿t，以此推算全国建筑垃圾2020年产生量已超过35亿t。

据深圳市住房和建设局测算，2017-2020年深圳市建筑垃圾产生总量约3.97亿m³。年均产生量约9920万m³，其中政府投资项目工程渣土约6450万m³，社会投资项目工程渣土约2700万m³，拆除垃圾约770万m³。单是工程渣土一项，仅统计到的建设项目，深圳市每年产生量就达到了9150万m³。这一数量是很惊人的，如果做成边长为0.5米×0.5米的立柱，它的长度可以从地球延伸到月球^[1]。

城市的飞速发展带来巨量的工程渣土，目前处置方式主要是空地堆填。深圳市2015年12月20日发生了“光明滑坡事件”，充分暴露了这种处置方

式不但占用宝贵的土地资源，还带来极大的安全隐患。按照无废城市建设理念，固体废弃物应实现无害化、资源化处置。工程渣土必须改变堆填处置现状，走向资源化利用的道路。

水亮亮^[2]等针对南京南部新城市政基础设施建设过程中工程渣土产生量巨大、特性差异大、强度低及外运成本高等特点，结合新城内道路工程建设对筑路填料的巨大需求，提出了工程渣土厂拌固化改良后用于道路工程的成套技术方案。基于前期调研、室内试验、试验段实施及检测等方法，结果表明：利用工程渣土制备的固化渣土混合料是一种性能良好的筑路材料，所铺筑路基水稳定性及整体性良好，固化渣土在道路工程中资源化利用技术方案可行。

周永祥等^[3]研究了工程渣土中加入水泥或固化剂作为胶凝材料，按照混凝土的生产工艺加工成流态固化土，测试7d、28d、56d无侧限抗压强度，结果显示有三种固化剂固化土强度明显高于掺水泥成型的固化土强度，性能指标满足工程施工要求。

本研究将工程渣土，采用水泥和固化剂作为胶凝材料，通过特定的设备拌和、压制、自然养护，

表1 水泥主要能指标

水泥种类	比表面积/m ² /kg	标准稠度用水量/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
P·042.5	356	25.9	145	230	4.8	8.5	30.2	50.3
P·052.5	392	25.2	140	215	6.8	10.9	36.5	60.8

1.1.3 固化剂

现有的固化剂大体分为四大类：石灰水泥类固化剂、矿渣硅酸盐类固化剂、高聚物类固化剂、电离子溶液类固化剂。本试验选用两种固化剂做对比，分别是：泉州某公司高聚物型固化剂、深圳某高校研制的水泥基固化剂。

1.1.4 水

成型机对混合料干湿度要求较高，太湿会导致粘模、瘫软不易成型，太干时会散掉，且后期水泥难以充分水化反应。混合料须为干硬性混合料。经试验，混合料维勃稠度约为45s~65s时，效果较好。因此本实验只控制物料干湿度，不分析水灰比。试验用水为市政自来水。

1.2 试验设备及成型工艺

搅拌采用行星式碾轮搅拌机。该搅拌机搅拌

加工成免烧标准实心砖，按相关标准测试3d、28d抗压强度以及软化系数，探索适宜的胶凝材料种类及掺量。

1 试验

1.1 试验原材料

1.1.1 工程渣土

工程渣土成分各地区差异很大，本试验工程渣土为南方地区典型工程渣土，取自深圳建科院未来大厦项目基坑两米深土层，主要成分为红色黏性土，含砂率（公称粒径0.63mm~5.00mm的颗粒）49%，基本无人类活动杂质。

采用螺旋洗砂机将工程渣土进行泥砂分离，泥浆通过板框式压滤机滤水，得到的泥饼中，含有少量0.6mm以下细砂颗粒；再通过回添分离出来的水洗砂配成不同含砂率的工程渣土作为试验原料样品。

1.1.2 水泥

试验选用采用罗浮山P·042.5、P·052.5两个型号水泥做试配，经检测安定性合格，性能指标见表1。

时，可以将土颗粒碾碎；同时与搅拌叶片配合将注水后粘结成团的物料搅散拌匀。

成型采用泉州某公司成型机，静压式液压固化成型机，型号300T-1×6，实际作用力约为额定的80%，即240T。制备标准尺寸砖（240mm×115mm×53mm）时一次成型6块，作用在横截面（横截面为条形面：240mm×53mm）的压强约是180MPa，成型后放置在实验室内，4小时、24小时后表面分别洒水养护一次。实验室温度25℃±3℃、相对湿度（50±15）%。

1.3 试验方法

抗压强度、软化系数及浸泡海水软化系数均参照GBT 4111-2013《混凝土砌块和砖试验方法》进行。软化系数及浸泡海水软化系数除按标准规定测试浸泡4d数据外；再分别测试浸泡28d数据进行对

比分析。海水取自深圳市红树林公园海岸，经检测氯离子浓度1.12%。

2 试验

2.1 初选试配

2.1.1 固化剂试配对比

固化剂按厂家给出的掺量建议进行试配，对比分析产品性能，从而确定较优固化剂。G1-泉州某公司高聚物型固化剂、G2-深圳某高校研制的水泥基固化剂。

表2 固化剂试配对比试验结果

固化剂编号	3d抗压强度/MPa	对比试件强度/MPa	浸泡试件强度/MPa	4d浸泡软化系数
G1	7.8	12.1	8.6	0.71
G2	13.5	18.1	9.8	0.54

从实验结果来看，G2固化剂试件整体强度较高，主要原因是该固化剂成分是水泥石，掺量较大，相当于大幅提高了水泥掺量。但其软化性能较差，因此选用G1固化剂做进一步试验研究。

2.1.2 水泥试配对比

采用人工筛分、配置成含砂率25%的工程渣土100kg、G1固化剂2.0kg，对罗浮山P·042.5、P·052.5两种水泥采用12%、15%、18%三种不同掺量进行试配对比，对比3d抗压强度，试验结果见表3。

表3 水泥试配对比3d抗压强度（MPa）

编号	第1组样品（P·042.5）	第2组样品（P·052.5）
S1	5.9	6.1
S2	7.8	7.9
S3	8.5	8.8

综合三个配合比试验结果数据来看，P·052.5水泥样品强度略高，但同配合比下两组样品整体相差并不明显。市场上P·052.5水泥价格高于P·042.5水泥，从节省成本考虑，建议采用P·042.5水泥生产。

2.2 正交试验

2.2.1 试验设计及结果

实验采用罗浮山P·042.5水泥，泉州某公司高聚物型固化剂，工程渣土采用人工筛选、配置成20%、25%、30%三种含砂率。本软化系数试验方法，从成型28d后样品中选3组试件，每组10个。第1组放入淡水中浸泡，第2组放入海水中浸泡，第3

组为对比试件，人工筛分、配置成含砂率25%的工程渣土100kg、罗浮山P·042.5水泥15kg，对两种固化剂试配对比，其中G1固化剂2.0kg（按照推荐掺量为工程渣土的2%）、G2固化剂15kg（推荐掺量与水泥掺量相等）。测试3d（自然养护）抗压强度、对比试件（自然养护7d）抗压强度、4d浸泡试件（自然养护3d之后再浸泡25℃的水中4d）抗压强度，试验结果见表2。

组为对比试件，放置于实验室内。4d后每组测试5个试件抗压强度，结果取算术平均值，计算4d淡水环境软化系数、4d海水环境软化系数；28d后测试剩下5个试件抗压强度，结果取算术平均值，计算28d淡水环境软化系数、28d海水环境软化系数。

正交试验因素水平见表4，正交试验设计及测试结果见表5。

表4 正交试验因素水平

水平	因素		
	含砂率/%（A）	水泥掺量/%（B）	固化剂掺量/%（C）
1	20	12	1.6
2	25	15	2.0
3	30	18	2.4

2.2.2 数据分析

试验结果极差分析见表6。

由表6可以看出，在试验掺量范围内，试件抗压强度随着含砂率（A）、水泥掺量（B）、固化剂掺量（C）的提高而增大，影响因素主次顺序为：水泥掺量（B）>含砂率（A）>固化剂掺量（C），工程渣土免烧砖作为水泥制品，强度主要来自水泥水化反应形成的凝胶，将渣土中的砂颗粒与微小泥粉颗粒包裹起来，形成致密的固化结构，随着水泥掺量的增加，形成的固化结构增多，抗压强度提高。

影响4d软化系数的因素主次顺序为：固化剂掺量（C）>含砂率（A）>水泥掺量（B），影响28d

表5 正交试验设计及测试结果

编号	含砂率/%	水泥掺量/%	固化剂掺量/%	3d抗压强度/MPa	28d抗压强度/MPa	4d软化系数(淡水)	4d软化系数(海水)	28d软化系数(淡水)	28d软化系数(海水)
Z1	1	1	1	5.8	13.5	0.61	0.66	0.81	0.86
Z2	1	2	2	7.8	15.9	0.71	0.76	0.85	0.91
Z3	1	3	3	8.1	18.8	0.77	0.81	0.95	1.02
Z4	2	1	3	6.0	13.8	0.76	0.82	0.91	0.95
Z5	2	2	1	7.8	16.3	0.66	0.73	0.83	0.89
Z6	2	3	2	8.5	20.2	0.74	0.80	0.85	0.91
Z7	3	1	2	6.2	14.9	0.72	0.78	0.83	0.88
Z8	3	2	3	8.1	19.3	0.79	0.84	0.98	1.12
Z9	3	3	1	8.8	21.5	0.71	0.77	0.86	0.93

表6 正交试验极差分析

项目	3d抗压强度			28d抗压强度			4d软化系数(淡水)			4d软化系数(海水)			28d软化系数(淡水)			28d软化系数(海水)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K1	7.2	6.0	17.1	16.1	14.1	17.1	0.70	0.70	0.66	0.74	0.75	0.72	0.87	0.85	0.83	0.93	0.90	0.89
K2	7.4	7.9	17.0	16.8	17.2	17.0	0.72	0.72	0.72	0.78	0.78	0.78	0.86	0.89	0.84	0.92	0.97	0.90
K3	7.7	8.5	17.3	18.6	20.2	17.3	0.74	0.74	0.77	0.8	0.79	0.82	0.89	0.89	0.95	0.98	0.95	1.03
R	0.47	2.47	0.30	2.50	6.10	0.30	0.04	0.04	0.11	0.05	0.04	0.1	0.03	0.04	0.11	0.06	0.08	0.14

软化系数的因素主次顺序变为：固化剂掺量（C）>水泥掺量（B）>含砂率（A）。固化剂可以降低渣土颗粒间的排斥力，破坏颗粒吸附水膜，提高颗粒间的吸附力，减少渣土颗粒间隙含水量，有利于水泥水化后将渣土颗粒充分包裹形成致密结构。

2.3 长期浸泡抗压强度测试

正交试验编号Z2的样品，成型28d后另外选3组试件，第1组放入淡水中浸泡，第2组放入海水中浸泡，第3组为对比试件放置在实验室。180d、360d后分别测试抗压强度，并计算对应软化系数。

表7 长久浸泡测试结果

龄期	对比试件抗压强度/MPa	淡水环境试件抗压强度/MPa	软化系数1(淡水)	海水环境试件抗压强度/MPa	软化系数2(海水)
4d	16.2	11.5	0.71	12.3	0.76
28d	17.7	15.0	0.85	16.1	0.91
180d	23.4	20.4	0.87	25.3	1.08
360d	27.4	24.1	0.88	30.4	1.11

本次测试结果与前述正交实验中4d、28d软化系数试验数据一起列于表7。

由表7可知，三种环境下试件抗压强度随着龄期均有所增长，浸泡在海水中的试件强度增长最多。因为海水中有较高浓度的氯化钠、氯化镁等氯化物，这是电离子溶液类土壤固化剂的重要组成成分。试件浸泡时，氯化物起到了固化剂作用，破坏了渣土颗粒附水膜，降低颗粒间隙水，起到了提高试件强度的作用。

3 小结

（1）水泥掺量对抗压强度的影响最大；固化剂掺量对软化系数影响较大；宜采用含砂率25%的工程渣土，掺入15%~18%P·042.5水泥、2%高分子聚合物类固化剂生产工程渣土免烧砖；

（2）浸泡4d后试件抗压强度下降较大，软化系数不足0.80；持续浸泡到28天，强度会有所回升，软化系数达到0.8以上；随着浸泡时间抗压强度持续增长，尤其是在海水中强度增长更大；工程渣土免烧砖适用于海边、低洼潮湿环境；

（3）本实验采用专用设备，行星式碾轮搅拌

机和静压式液压成型机，试件制备过程与实际生产一致，具有指导生产的实际意义。

参考文献

- [1] 冯志远, 罗霄, 黄启林. 余泥渣土资源化综合利用研究探讨[J]. 广东建材, 2018(2): 69-71.
- [2] 水亮亮, 任奇, 吴立报等. 工程渣土厂拌固化技术及其在道路工程中的应用研究[J]. 第二十六届华东六省一市土木建筑工程技术交流会议论文集, 2020年9月: 724-726.
- [3] 周永祥, 王继忠. 预拌固化土的原理及工程应用前景[J]. 新型建筑材料, 2019.10:117-120.

简 讯

混凝土质检机器人助力智慧建造

在首届工程建造微创新技术大赛总决赛上，《基于AI的智能质量监控平台及混凝土质量检测机器人的研究与应用》项目荣获特等奖。

据悉，该获奖项目的应用产物包括：隧道混凝土质量特种检测机器人、空气耦合雷达、智能监控系统等三项关键技术。不仅极大地提高了雷达的检测水平，还改善了传统人工作业检测模式，并填补了混凝土衬砌雷达检测行业的无人化、智能化空白，为整个行业带来革命性转变。

该混凝土质检机器人不仅能在一般的作业环境下工作，还能够在水中作业，也能够通过设备开启高空作业。通过内置智能化定位系统、高清视频采集系统等，在检测人员的远程操控下，检测机器人可根据既定测线匀速前行，精准到达指定位置对混凝土浇筑质量进行“体检”。此外，通过红外感知系统，检测机器人可自动感知、规避障碍物，提高检测效率。

如何实现检测数据实时传输？无线空气耦合雷达为检测机器人装上了“智慧大脑”。不同于人工手持雷达，无线空气耦合雷达可搭载于检测机器人，进行混凝土质量检测时，能彻底摆脱电缆线束缚，实现高精度快速检测，扩大检测信号接收范围，提升数据接收灵敏度和实时数据处理能力，并通过远程通信及GPS定位功能，实时将检测数据传输至后台监测系统。

此外，与检测机器人想配套的混凝土质量智能监控系统，基于BIM技术，建立隧道可视化模型，实景还原检测现场。当检测机器人进入检测位置时，检测数据通过5G信号实时传回监控系统，系统则自动进行AI智能分析和大数据病害智能识别，分析判别衬砌质量问题，快速形成“体检报告”，并及时发送至相关人员进行整改优化，进而全面提高隧道初支、衬砌施工质量。

废浆澄清液对混凝土性能的影响

彭孟啟

(深圳市特区建工集团有限公司, 深圳 518034)

【摘要】 本文以废浆澄清液作为混凝土拌合用水,研究了废浆澄清液对混凝土工作性能和强度的影响。结果表明:利用混凝土废浆澄清液作为拌合水有利于改善混凝土的1h坍损,而对初始坍落度和初始扩展度的影响都很小;对混凝土的抗压强度几乎无影响,28d抗压强度甚至还能提高1~3MPa。

【关键词】 混凝土;废浆澄清液;工作性;强度

Effect of the Waste Pulp Clarified Liquid on Concrete Performance

Peng Mengqi

(Shenzhen Sez construction Group Co.,Ltd., Shenzhen, 518034)

Abstract: In this paper,a waste pulp clarified liquid was used as the concrete admixture,and the influence on the workability and strength of concrete is studied.The results showed that concrete mixing water fortified with waste pulp clarified liquid will be beneficial to control 1-hour concrete slump loss effectively.However,it has little effect on initial slump loss and initial expansion and almost no effect on compressive strength of concrete,even improving the compressive strength of concrete by 1-3 MPa.

Keywords: concrete; waste pulp clarified liquid; workability; strength

0 前言

如何实现搅拌站废浆的零排放是试验搅拌站绿色生产急需解决的问题。搅拌站废浆是清洗搅拌楼搅拌主机、混凝土搅拌车鼓内以及分离混凝土剩料,经砂石分离机分离出砂、石后的剩余产物。废浆由固渣(固体颗粒)和澄清液组成,固渣主要为部分未水化的胶凝材料、水化产物和少量石粉、泥等固体颗粒;废浆澄清液为废浆静置一段时间的上层清液,其pH值呈碱性,另外还含有混凝土的一些可溶解的无机盐、外加剂离子等^[1]。目前国内对搅拌站废浆仍主要采用外弃的方式处理,给环境带来严重的污染。

国内外学者对搅拌站废水进行了一些研究。刘伟^[2]在对搅拌站废水掺入4种水泥(南华P·II

42.5、骏马P·II 42.5、南华P·0 42.5、华宏P·0 42.5)后得到的结论为回收水对水泥标准稠度用水量、凝结时间与安定性有一定影响,但各测试值都在水泥标准要求的范围内,回收水对水泥的抗折强度及抗压强度影响不大;白延平等^[3]研究了水泥废浆澄清液取代自来水会增大水泥胶砂的流动度,且不会导致水泥胶砂抗压强度明显降低。Franco Sandrolini^[4]等人对中低强度混凝土和易性的研究得到掺搅拌站废水的混凝土坍落度和扩展度比自来水配制的混凝土要小;掺搅拌站废水的混凝土拌合物初始坍落度与自来水配制的差异很小,而且随着搅拌站废水中的pH值增加,混凝土坍落度越小。

论文研究了不同放置时间的废浆澄清液和废浆

澄清液对不同强度等级的预拌混凝土初始坍落度、1h坍损、扩展度、1h后扩展度及抗压强度的影响。

1 原材料及试验方法

2.1 原材料

(1)水泥:光大P·042.5R水泥,3d龄期的抗折强度为5.7MPa,抗压强度为28.5MPa;28d龄期的抗折强度为7.7MPa,抗压强度为48.5MPa;其他技术性能指标符合现行规范要求。

(2)细骨料:惠州产中砂,细度模数为2.5,含泥量为0.9%,其他技术性能指标符合现行规范要求。

(3)粗骨料:5~31.5mm,含泥量0.2%,针片状含量为3.8%;其他技术性能指标符合现行规范要求。

(4)粉煤灰:电厂灰,细度为20.5%,含水率0.8%;其他技术性能指标符合现行规范要求。

(5)矿粉:密度为2.89g/cm³,流动度比为100%,28d活性指数为104%;其他技术性能指标符

表1 不同强度等级混凝土的基准配合比(kg/m³)

强度等级	用水量	水泥	粉煤灰	矿粉	砂	1-3石	外加剂
C25	174	175	75	60	772	1067	6.21
C30	170	200	70	65	785	1042	7.10
C35	170	225	65	75	760	1049	8.03
C50	158	320	50	110	657	1072	12.00

表2 澄清液与清水对比试验结果

强度等级	用水种类	初始坍落度(mm)	1h坍落度(mm)	1h坍损(mm)	初始扩展度(mm)	1h扩展度(mm)	抗压强度(MPa)		
							3d	7d	28d
C30	清水	170	150	20	450	340	19.5	29.1	36.8
C30	60d澄清	165	165	0	450	355	20.8	29.9	38.5
C30	1d澄清	170	160	10	490	345	19.5	27.8	36.5
C35	清水	200	150	50	405	200	21.6	31.4	45.4
C35	废浆澄清液	190	210	0	410	340	22.2	31.6	47.3
C50	清水	210	205	5	505	515	37.2	47.2	57.6
C50	废浆澄清液	225	225	0	570	510	38.5	48.1	60.3

注:扩展度取200mm,即无扩展度。

60d澄清液为废浆静置存放60d后的上层澄清液;1d澄清液为废浆静置存放1d后的上层澄清液。C35、C50的废浆澄清液均为废浆静置存放1d后的上层澄清液。

3.2 不同存放时间的澄清液对C30混凝土性能的影响

不同存放时间的废浆澄清液对C30混凝土初始

坍落度和1h坍损的影响与清水的对比试验结果如图1。由图1可知,不同存放时间的废浆澄清液作为拌

合现行规范要求。
(6)外加剂:深圳市SL-D缓凝高效减水剂(水剂,含固量30%±1.5%,减少率≥14%,氯离子含量≤1%);其他技术性能指标符合现行规范要求。

2.2 试验方案

采用单因素试验探讨废浆澄清液对不同强度等级的预拌混凝土初始坍落度、1h坍损、扩展度、1h后扩展度及抗压强度的影响。各个强度等级混凝土的基础配合比如表1。混凝土拌合物性能试验和力学性能试验分别按照国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080-2002)和《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002)进行。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

试验结果如表2。

合用水代替清水对C30混凝土的初始坍落度和1h坍损影响较小，基本可以忽略。

(2) 不同存放时间的废浆澄清液对C30混凝土的初始扩展度和1h后的扩展度影响与清水的对比试验结果如图2。新拌混凝土放置一定时间其扩展度均有一定损失。由图2可知，不同存放时间的废浆

澄清液作为拌合用水代替清水对C30混凝土的初始扩展度和1h后的扩展度影响较小。

(3) 不同存放时间的废浆澄清液对C30混凝土强度的影响与清水的对比试验结果如图3。由图3可知，用废浆澄清液代替清水做拌合用水对混凝土强度的影响很小。

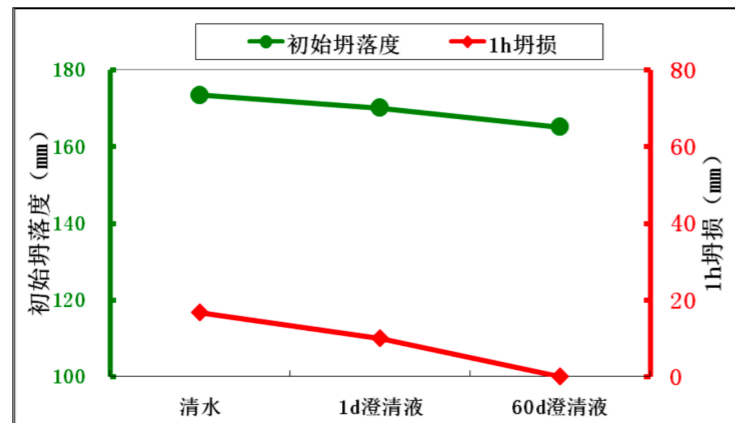


图1 不同存放时间的废浆澄清液对C30混凝土的初始坍落度和1h坍损影响

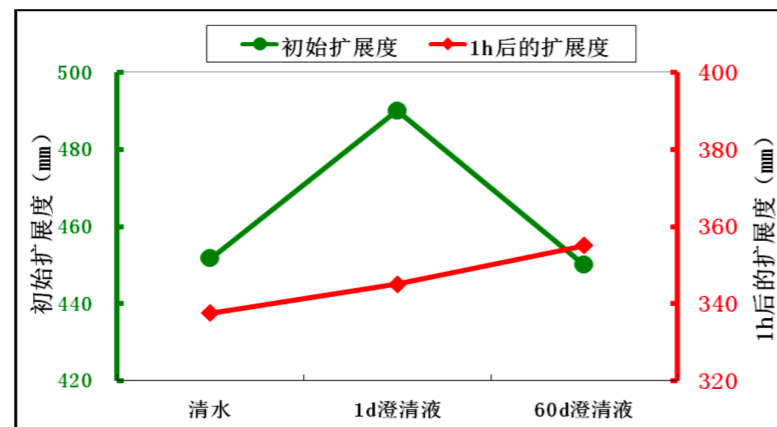


图2 不同存放时间的废浆澄清液对C30混凝土的初始扩展度和1h后的扩展度影响

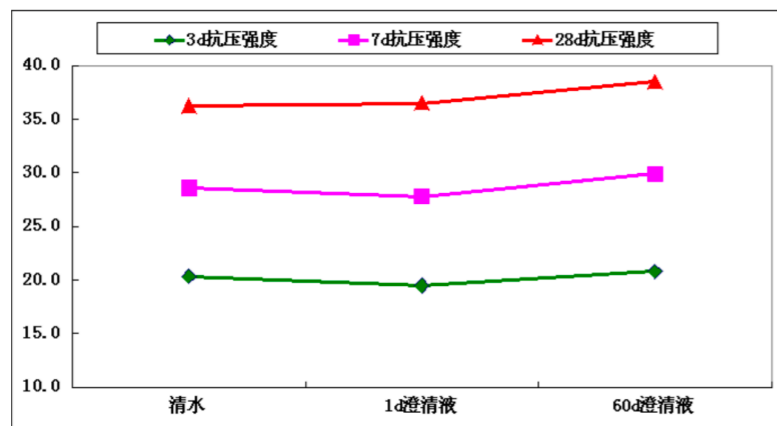


图3 不同存放时间的废浆澄清液对C30混凝土的强度影响

3.3 废浆澄清液对不同强度等级混凝土性能的影响

(1) 废浆澄清液对不同强度等级混凝土工作性能的影响

废浆澄清液对不同强度等级混凝土工作性能的影响试验结果见图4。由图4可知，废浆澄清液对于C30、C35、C50混凝土的初始坍落度和1h坍损有一定改善。

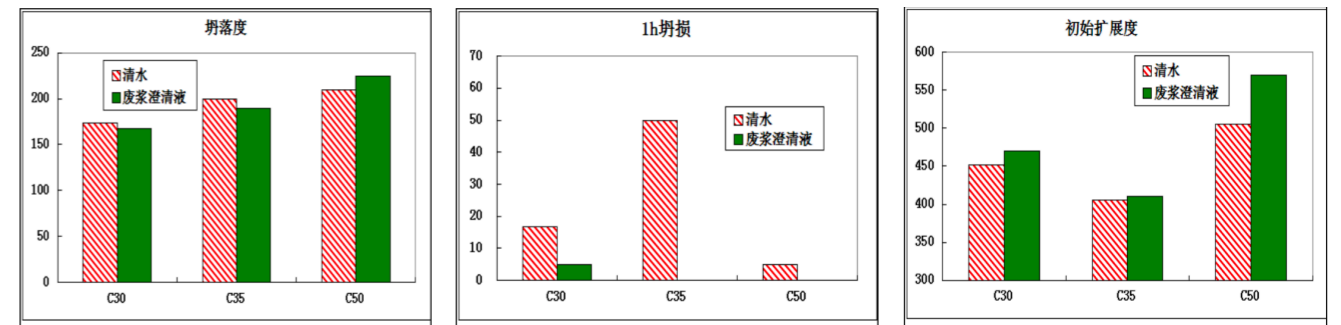
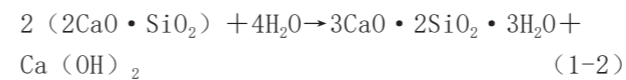
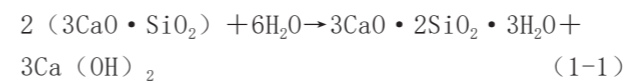


图4 废浆澄清液对不同强度等级混凝土工作性能的影响

硅酸盐水泥熟料主要矿物为C₃S和C₂S，其水化反应式如(1-1)和(1-2)。以废浆澄清液作为拌合用水，而废浆澄清液实质上为含有OH⁻离子的碱性溶液，根据化学反应平衡法可知，OH⁻离子会在一定程度上减缓(1-1)和(1-2)反应^[5]，使得参与化学反应而由自由水转化成结合水的量相对减少，即混凝土中游离水减少的相对较小，而表现为坍损减小。



(2) 废浆澄清液对不同强度等级混凝土力学性能的影响

废浆澄清液对不同强度等级混凝土抗压强度的影响试验结果见图5。由图5可知，废浆澄清液对C30、C35、C50混凝土的3d、7d、28d抗压强度的影响都很小，废浆澄清液对28d抗压强度有一定的提高。这可能是由于废浆澄清液为水泥水化反应提供了一个碱环境，使得水泥水化热的第二个放热峰提前出现，相对加快了水泥水化^[5]，同时较高的碱性环境有助于掺合料后期二次水化反应进行^[6~7]，而表现为混凝土的后期强度(28d抗压强度)有一定的提高。

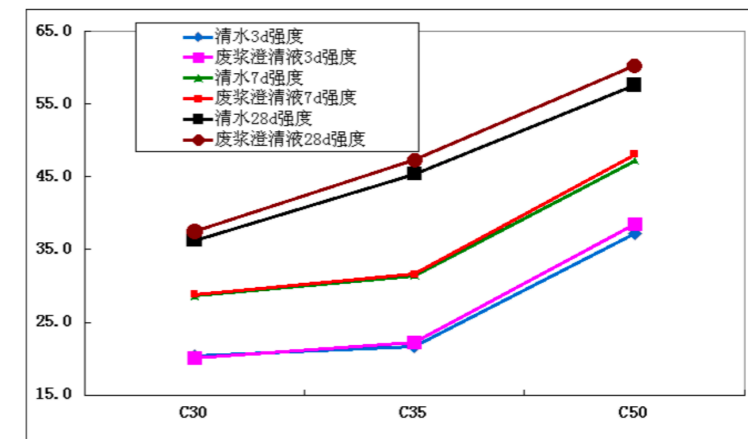


图5 废浆澄清液对不同强度等级混凝土力学性能的影响

3.4 综合分析对比

不考虑强度等级对所做试验的各个指标加权平均后再取平均值得到如下表3试验结果。由表3可

知，混凝土拌合用水以清水和废浆澄清液对混凝土的工作性能和力学性能的影响都较小。

表3 综合对比分析

	初始坍落度 (mm)	1h坍落度 (mm)	初始扩展度 (mm)	1h扩展度 (mm)	1h坍损 (mm)	抗压强度 (MPa)		
						3d	7d	28d
清水	190	174	462	351	16	25.7	34.8	44.8
废浆澄清液	194	199	483	400	5	27.0	36.2	48.4

4 总结

(1) 废浆澄清液对混凝土的抗压强度几乎无影响, 甚至还能提高1~3MPa的28d抗压强度。

(2) 废浆澄清液有利于改善混凝土的1h坍损, 而对初始坍落度和初始扩展度的影响都很小; 即废浆中的澄清液对混凝土的工作性无影响, 甚至能减小1h坍损。

(3) 根据实际试验及一些文献的报告表明, 废浆用作拌合用水易导致混凝土工作性变差, 上述试验结果排除了澄清液的影响, 则可认为废浆中的固渣才是导致混凝土工作性变差的主要原因。

参考文献

[1] 杨松林, 王光伟, 曹达纯. 搅拌站废浆回收利用正交试验研究与应用[J]. 商品混凝土, 2014 (10): 28-30

[2] 刘伟. 混凝土搅拌站回收水对水泥凝结硬化性能的影响[J]. 中国科技信息, 2008 (13): 83-83

[3] 白延平, 孙锦, 丁华柱. 废水泥浆对水泥胶砂性能的影响[J]. 粉煤灰, 2012, 24(1): 19-21

[4] Sandrolini F, Franzoni E. Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants[J]. Cement and concrete research, 2001, 31(3): 485-489

[5] 小林一辅. 混凝土实用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010:28-33

[6] 马保国, 王迎斌, 罗忠涛等. 碱性环境下粉煤灰活性的温度效应研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2009, (5): 1005-8249

[7] 何廷树, 李小玲, 王福川等. 搅拌站废水对不同掺合料配制的C80高强混凝土强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(2): 384-388

简 讯

C130! 最强混凝土诞生!

随着超高层、大跨度、异形结构建筑发展, 对于混凝土的强度、耐久性、可靠性提出了更高的要求。当混凝土强度超过了花岗岩, 将给这个世界带来怎样的改变?

在广州新世界增城发展中心项目, 破解了一次世界级技术难题, 实现了行业内首次在实体工程建设中, 泵送应用最先进、强度最高的C130超高强机制砂混凝土。本次泵送超过了220米, 抗压强度达149.5MPa, 强度超过花岗岩, 一举打破行业最高混凝土强度记录。

本次泵送成功的C130超高强混凝土, 是指采用边长为150mm的立方体标准试模成型混凝土试件, 在标准规定条件下养护56天(温度20±2℃、相对湿度在95%以上), 用标准试验方法抗压强度达149.5MPa的混凝土。

而且, 本次泵送的C130超强混凝土有一个革命性意义, 即用人工制造的机制砂代替日益枯竭的天然砂, 完美契合环境保护和可持续发展理念。机制砂以普遍、易得的岩石为原材料, 经过破碎加工, 筛分打磨而成, 生产过程中采用先进工艺, 减少粉尘排放和水资源使用。机制砂取代天然砂, 使得C130的配合比研究难度大大增加, 研究小组采用胶凝材料活性粉末匹配优化、砂石紧密堆积一体化设计、复合型高性能外加剂制备等一系列工艺, 通过不断优化配合比, 终于制备出适用于超高层泵送的C130高强度高性能机制砂混凝土。

来源: 中建八局

建废利用

废浆固渣引入量对混凝土性能的影响

彭孟啟

(深圳市特区建工集团有限公司, 深圳 518034)

【摘 要】 固渣是混凝土生产过程中, 清洗生产设备和运输设备产生废水经砂石分离机分离出骨料后经沉降形成固体废弃物。用固渣等质量替代基准配合比中的粉煤灰, 通过单因素试验和综合分析法, 比较不同固渣替代量对混凝土性能的影响。结果表明: 随着混凝土强度等级的提高, 固渣替代量对混凝土工作性的影响逐渐减小。综合考虑混凝土的工作性和抗压强度, 对于C25、C30、C35、C50四个强度等级的混凝土, 其固渣使用量宜控制在4kg/m³内。

【关键词】 混凝土; 固渣; 粉煤灰

Effect of Solid Waste Introduction on Concrete Performance

Peng Mengqi

(Shenzhen Sez construction Group Co.,Ltd., Shenzhen, 518034)

Abstract: Solid waste recovered from the concrete industry is separated from wastewater produced by clean production equipment and transportation equipment by sand and stone separators. Solid waste is used to replace the reference proportion of fly ash, and the performance of concrete with different solid waste replacement rates is compared by single factor test and comprehensive analysis method. The results show that with the increase of concrete strength, the effect of the solid waste replacement rate on the workability of concrete is gradually reduced. Considering the workability and compressive strength of concrete, for concrete of C25, C30, C35 and C50, the amount of solid waste used should be controlled within 4kg / m³.

Keywords: concrete, solid waste, fly ash

0 前言

预拌混凝土绿色生产是指以节能、降耗、减排为目标, 以技术和管理为手段, 实现混凝土生产全过程的“四节一环保”基本要求的综合活动。如何实现“三废”零排放是预拌混凝土绿色生产急需解决的问题^[1]。而预拌混凝土生产过程排放量最大的废浆——清洗混凝土运输车、泵车、搅拌机而产生的废水^[2], 能否实现零排放显得尤为重要。

近年来, 国内外许多学者及企业都在开展废浆回收利用的研究^[3~6]。湖北中建亚东混凝土有限公司的何正斌等^[7]以浓度3.5%的废水来作为混凝土拌合用水, 通过改变废水的掺量来研究不同掺量对

中低强度混凝土工作性能和强度的影响, 结果表明废水浓度3.5%时, 对于中低强度混凝土, 废水最大掺量不宜超过50%; 而对于超过C50等级的混凝土, 废水最大掺量不宜超过30%。华润混凝土(惠州)有限公司的赖志标等^[8], 采用正交试验研究了废水对不同强度等级混凝土性能的影响, 指出废水对新拌低标号混凝土工作性能的影响程度要大于高标号混凝土, 高标号混凝土的坍损增大幅度要大于低标号混凝土。但其所使用的废浆浓度都较低(小于10%), 这将严重制约废浆的再利用; 搅拌站如果出现退料, 废浆浓度会出现急剧增大, 废浆浓度甚至超过40%。

本论文研究了废浆固渣引入量对不同强度等级的预拌混凝土初始坍落度、1h坍损、扩展度及抗压强度的影响,优化废浆回收利用方案,在不影响混凝土性能的前提下,实现废浆利用率最大化。

2 原材料及试验方法

2.1 原材料

(1) 水泥: 光大P•042.5R水泥, 3d龄期的抗折强度为5.7MPa, 抗压强度为28.5MPa; 28d龄期的抗折强度为7.7MPa, 抗压强度为48.5MPa; 其他技术性能指标符合现行规范要求。

(2) 细骨料: 惠州产河砂(中砂), 细度模数为2.5, 含泥量为0.9%, 其他技术性能指标符合现行规范要求。

(3) 粗骨料: 5~31.5mm, 含泥量0.2%, 针片状含量为3.8%; 其他技术性能指标符合现行规范要求。

(4) 矿物掺合料: 电厂灰, 细度为20.5%, 含

水率0.8%; 其他技术性能指标符合现行规范要求。

(5) 矿粉: 密度为2.89g/cm³, 流动度比为100%, 28d活性指数为104%; 其他技术性能指标符合现行规范要求。

(6) 外加剂: 深圳市SL-D萘系缓凝高效减水剂(水剂, 含固量30%±1.5%, 减少率≥14%, 氯离子含量≤1%); 其他技术性能指标符合现行规范要求。

2.2 试验方案

采用单因素试验探讨分析废浆引入不同质量固渣对不同强度等级混凝土性能的影响。试验废浆中的固渣按等质量替代基础配合比中的粉煤灰。具体试验方案以C30混凝土为例(如表1)。不同强度等级混凝土的基础配合比如表2所示。混凝土拌合物性能试验和力学性能试验分别按照国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080-2002)和《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002)进行。

表1 固渣引入量试验方案(kg/m³)

固渣引入量	水	水泥	粉煤灰	矿粉	砂	1-3石	外加剂
0	170	200	70	65	785	1042	7.1
2	170	200	68	65	785	1042	7.1
4	170	200	66	65	785	1042	7.1
6	170	200	64	65	785	1042	7.1
8	170	200	62	65	785	1042	7.1

表2 不同强度等级混凝土的基准配合比(kg/m³)

强度等级	水	水泥	粉煤灰	矿粉	砂	1-3石	外加剂
C25	174	175	75	60	772	1067	6.21
C30	170	200	70	65	785	1042	7.10
C35	170	225	65	75	760	1049	8.03
C50	158	320	50	110	657	1072	12.00

3 试验结果与分析

试验结果如表3。

3.1 固渣含量对不同强度等级混凝土工作性能的影响

(1) 固渣含量对不同强度等级混凝土初始坍落度的影响

固渣含量对不同强度等级混凝土初始坍落度的影响见图1。由图1可知,对于C25和C30混凝土,其初始坍落度随着废浆固渣引入量的增大而减小,

但减小的幅度较小,在30mm内,但是对于C25在废浆固渣引入量大于6kg/m³时,出现了初始坍落度骤降;对于C35和C50混凝土,其初始坍落度随着废浆固渣引入量的增大而先增大后减小,出现一个最大值,C35和C50混凝土初始坍落度的最大值分别出现在固渣引入量为2kg/m³和5kg/m³处,但变化的幅度也较小,在30mm内。

从图1还可看出,强度等级越低,初始坍落度

表3 不同强度等级混凝土的试验结果

强度等级	固渣引入量(kg/m ³)	1h坍损(mm)	初始坍落度(mm)	初始扩展度(mm)	抗压强度(MPa)		
					3d	7d	28d
C25	0	45	170	450	16.1	23.8	35.1
C25	2	25	165	380	13.9	22.4	34.6
C25	4	45	130	200	11.2	19.8	35.6
C25	5	90	165	200	13.7	21.5	34.5
C25	6	70	170	350	14.4	20.7	34.3
C25	7	20	100	200	14.9	20.5	33.8
C30	0	35	195	460	17.7	25.5	35.6
C30	2	55	185	430	16.0	21.3	35.7
C30	4	45	175	385	16.2	23.0	34.8
C30	6	65	175	390	17.0	24.2	34
C30	8	70	165	380	16.3	21.3	31.2
C35	0	50	200	405	21.6	31.4	45.4
C35	2	20	220	495	21.9	34.9	47.7
C35	4	25	215	450	20.9	29.7	44
C35	5	20	160	340	20.7	29.0	44.3
C35	6	80	190	325	18.9	27.4	43.4
C35	7	75	190	330	19.9	28.9	44.2
C50	0	5	210	505	37.2	47.2	57.6
C50	2	0	215	550	39.2	47.4	60.7
C50	4	20	200	470	38.9	48.0	60.8
C50	5	50	230	525	37.0	47.6	63.4
C50	6	5	215	530	37.5	46.0	60.3
C50	7	50	220	500	36.4	46.9	58.1

随固渣含量变化而变化的趋势越大。强度等级越低的混凝土其胶材用量越少,在废浆固渣引入量一定的情况下,废浆固渣引入量占胶材的比重越大,而导致初始坍落度随固渣含量变化而变化的趋势越大。

(2) 固渣含量对不同强度等级混凝土1h坍损的影响

由图2可知,废浆固渣引入量对不同强度等级混凝土的坍落度影响不一样。对于C25混凝土,其1h坍损随着废浆固渣引入量的增大先增大后减小,并在废浆固渣引入量为5kg/m³时出现坍损最大值,如图2(a);综合考虑固渣对初始坍落度的影响,

建议对于C25混凝土废浆固渣引入量应控制在4kg/m³内。对于C30混凝土,其1h坍损随废浆固渣引入量的增大而增大,如图2(b);综合考虑固渣对初始坍落度的影响,建议对于C30混凝土废浆固渣引入量应控制在4kg/m³内。对于C35和C50混凝土,其1h坍损随着废浆固渣引入量的增大而先增大,并在废浆固渣引入量大于5kg/m³后趋于平缓,如图2(c)、(d);综合考虑固渣对初始坍落度的影响,对于C35和C50混凝土废浆固渣引入量应控制在4kg/m³内。

综上所述,综合考虑废浆固渣引入量对混凝

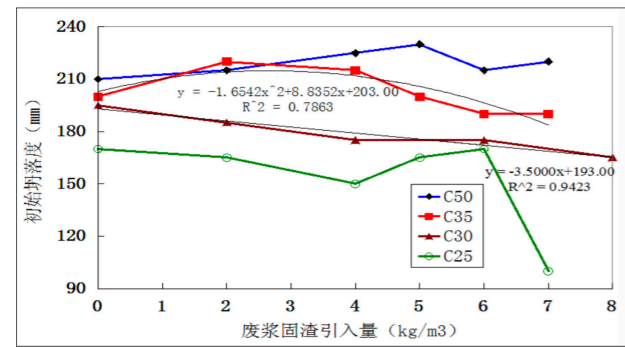


图1 废浆固渣引入量对不同强度等级混凝土初始坍落度的影响

土的初始坍落度和1h坍损的影响，对于C25、C30、

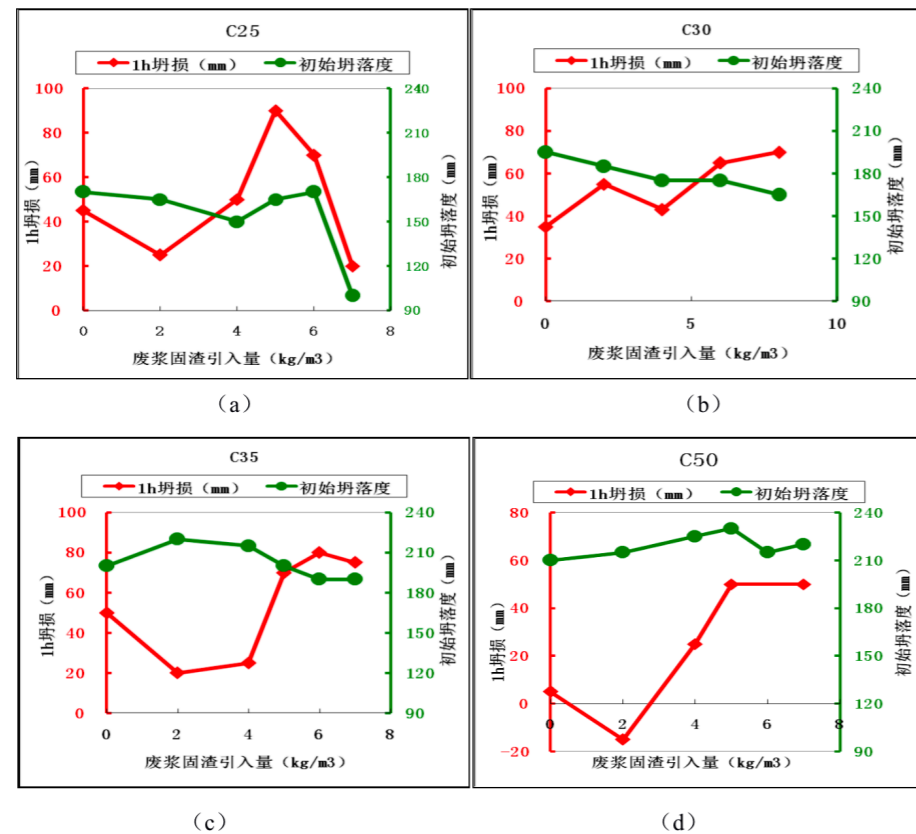


图2 废浆固渣引入量对不同强度等级混凝土1h坍损的影响

3.3 综合分析

不考虑强度等级，对不同强度等级混凝土所做试验的各个指标加权平均后再取平均值，试验结果如图4~9。

(1) 工作性能

废浆固渣引入量对混凝土的初始坍落度、1h坍损和初始扩展度影响呈现出不同的变化规律，具体表现为：随着废浆固渣引入量的增大，混凝土的

C35、C50四个标号的混凝土其废浆固渣引入量应控制在4kg/m³内。

3.2 固渣含量对不同强度等级混凝土力学性能的影响

固渣含量对不同强度等级混凝土力学性能的影响见图3。由图3可知，对于C25混凝土废浆固渣的引入使混凝土的强度有所降低，如图3(a)，因此对于C25混凝土需要考虑废浆固渣引入对强度的影响；对于C30混凝土和C35混凝土废浆固渣的引入使混凝土的强度有一定影响，但整体来看强度降低的幅度都比较小，如图3(b)、(c)；而对于C50混凝土，废浆固渣的引入对其强度的影响很小，几乎可以忽略，如图3(d)。

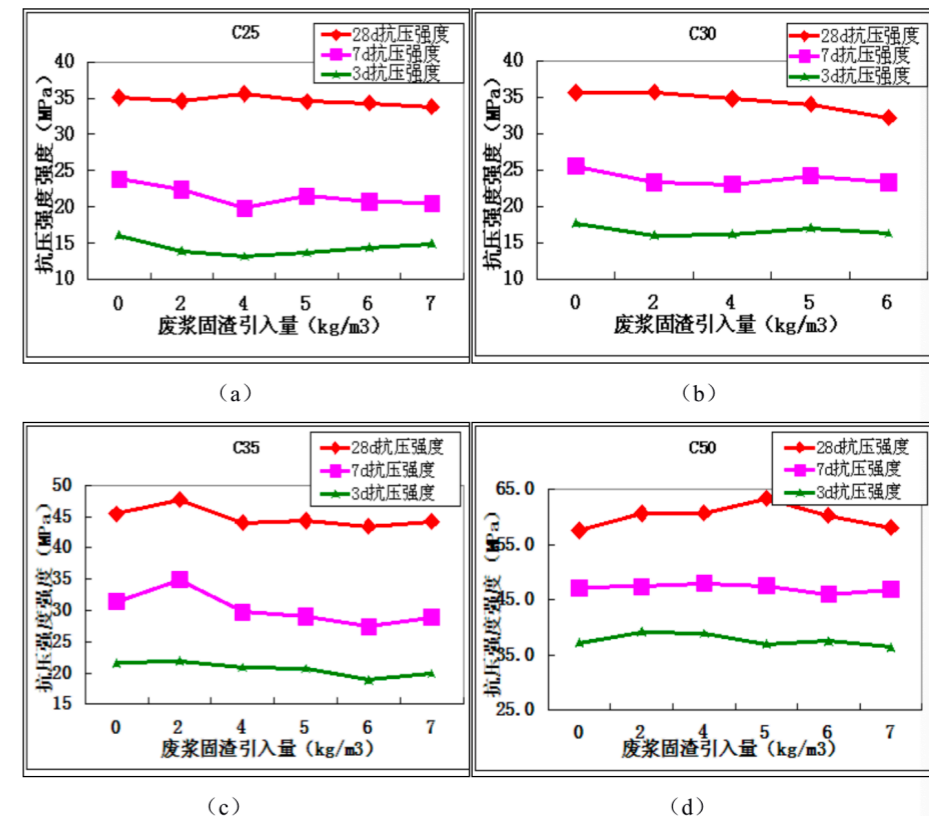


图3 废浆固渣引入量对不同强度等级混凝土力学性能的影响

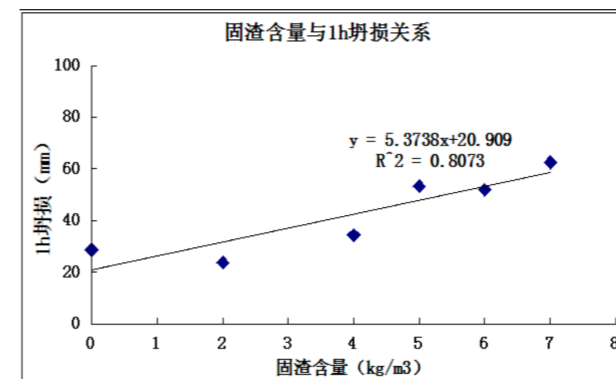


图4 固渣含量与1h坍损的关系

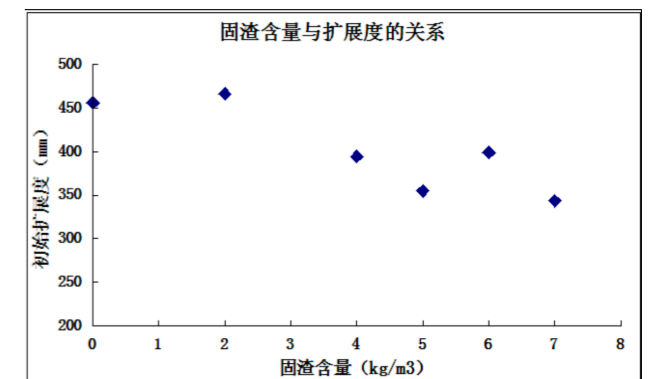


图6 固渣含量与初始扩展度的关系

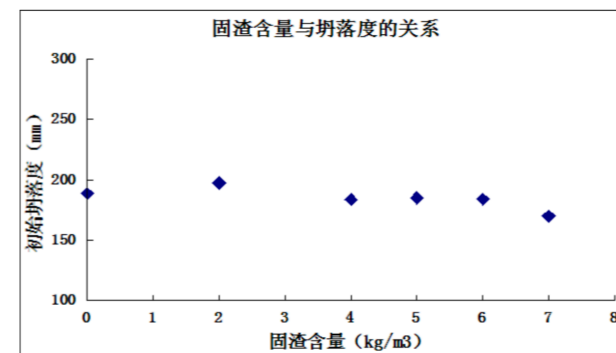


图5 固渣含量与初始坍落度的关系

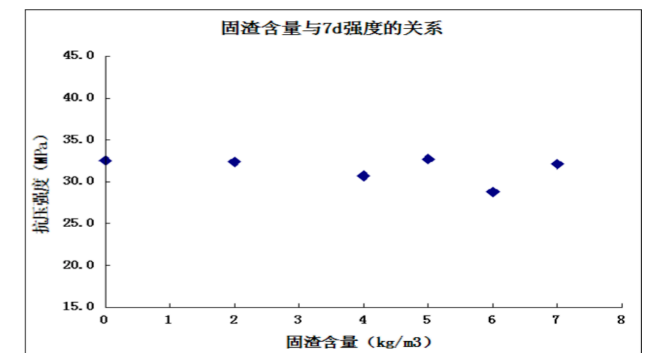


图7 固渣含量与3d强度的关系

1h坍损逐渐增大，并呈现出较好的线性关系，如图4；混凝土的初始坍落度随废浆固渣引入量的增大变化不大，如图5；混凝土的初始扩展度随着废浆固渣引入量的增大变小，特别是在固渣含量大于2kg/m³时，混凝土的初始扩展度急剧减小，如图6。

(2) 力学性能

由图7~9可知，废浆固渣引入量对混凝土的力学性能有一定的影响，但影响都较小。

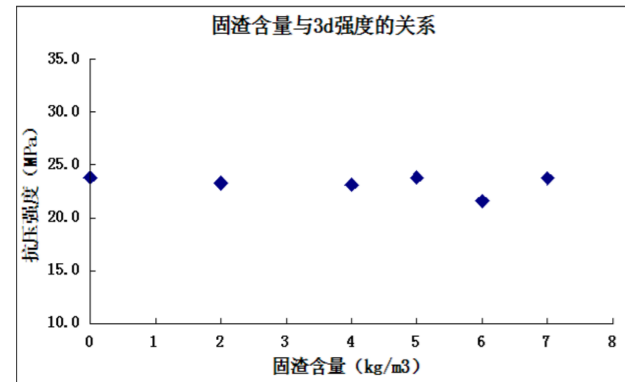


图8 固渣含量与7d强度的关系

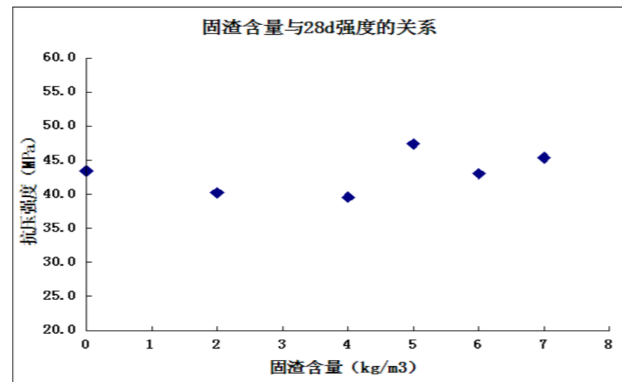


图9 固渣含量与28d强度的关系

(3) 综合分析对比

不考虑强度等级对所做试验的各个指标加权平均后再取平均值得到如下表4试验结果。由表4可

知，在固渣引入量不大于4kg/m³的情况下，对混凝土的工作性和抗压强度的影响都较小。

表4 综合对比分析

固渣含量 (kg/m³)	初始坍落度 (mm)	1h坍损 (mm)	初始扩展度 (mm)	抗压强度 (MPa)		
				3d	7d	28d
0	194	34	455	23.2	32.0	43.4
2	196	25	464	22.8	31.8	44.7
4	186	35	399	21.3	30.5	43.6
6	188	55	399	22.0	29.6	43.0

4 结论

(1) 混凝土强度等级越高，一定的废浆固渣引入量对混凝土的工作性影响越小。

(2) 对于C25、C30、C35三个强度等级的混凝土，废浆固渣的引入使混凝土的28d抗压强度有一定的降低，对于C50混凝土，废浆固渣的引入使得其28d抗压强度有一定的提高。C25混凝土在废浆固渣引入量为7kg/m³时，其强度下降1.3MPa；C30混凝土在废浆固渣引入量为8kg/m³时，其强度下降3.4MPa；C35混凝土在废浆固渣引入量为6kg/m³时，其强度下降2MPa；C50混凝土在废浆固渣引入量为5kg/m³时，其强度提高5.8MPa。

(3) 综合考虑废浆固渣引入量对混凝土的工作性能和抗压强度的影响，对于C25、C30、C35、C50四个强度等级的混凝土其废浆固渣引入量宜控制在4kg/m³内。

参考文献

[1] 李夏伟. 如何实现混凝土生产废水零排放[J]. 广东建材, 2003, (4):20-21

[2] 李锋. 商品混凝土搅拌站废水回收利用[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(3):203-204

[3] 欧阳孟学, 李永鹏, 张凯峰等. 利用搅拌站生产废水制备C20-C40混凝土的试验研究[J]. 混凝土, 2013, (11):124-125

[4] 何廷树, 李小玲, 王福川等. 搅拌站废水对不同掺合料配制的C80高强混凝土强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(2):384-388

[5] 曾光, 张玉平, 汤天明等. 搅拌站生产废水在混凝土中的应用研究[J]. 建筑设计管理, 2009, (3):61-63

[6] 刘海明. 搅拌站混凝土浆水的回收与利用[J]. 城市建设理论论研究: 电子版, 2014.

[7] 何正斌, 孙皖红, 王韶辉等. 搅拌站废水对混凝土性能影响研究[J]. 广东建材, 2012, 28(12):24-26

[8] 赖志标, 高强, 郑立达. 利用搅拌站废水生产混凝土的研究[J]. 混凝土世界, 2012, (12):90-92

建废利用

深圳市建设工程渣土排放限额指标研究

冯志远

(深圳市特区建工集团有限公司, 深圳 518034)

[摘要] 深圳市每年会产生大量的工程渣土，如果处理不当，将会严重影响城市公共安全，破坏城市生态环境。深圳市现有工程渣土处置仍以外运为主，源头减量和资源化利用措施缺乏可量化指标。本文从源头减量和资源化利用同步考虑，以深圳市已有或在建工程为案例，研究制定建筑工程、市政管网及综合管廊工程、道路工程以及地铁工程等不同类型建设工程渣土排放限额指标，在限制产生的同时鼓励使用资源化利用产品，为解决深圳等特大城市“渣土围城”困境提供思路。

[关键词] 工程渣土；排放限额；资源化利用

Engineering Waste Soil Emission Limits Index Research in Shenzhen

Feng Zhiyuan

(Shenzhen Sez construction Group Co.,Ltd., Shenzhen, 518034)

Abstract: A large amount of engineering waste soil is produced in Shenzhen every year.It will seriously affect urban public safety and destroy urban ecological environment if mishandled.Soil outward transport is still a mainly disposal method due to lacking of quantifiable indicators in current disposal ways, including source reduction and resource utilization.This article,taking existing projects or projects under construction in Shenzhen as an example,is to establish a soil emission limits index to different construction projects based on the source reduction and resource utilization, such as construction project, municipal pipe network, utility tunnel project, road engineering and subway engineering.It provides an idea for solution of wastes surrounding cities such as Shenzhen,which encourages the use of resource utilization products while limiting the generation of engineering waste soil.

Keywords: engineering waste soil; emission limits; resource utilization

0 前言

据调研，2017-2020年深圳市建筑废弃物产生量达到3.97亿立方米，年均产生量约9920万立方米，其中工程渣土约9150万立方米，占比超过92%，而目前深圳市建筑废弃物主要通过海陆外运、围填海、综合利用、工程回填、受纳场填埋等渠道进行处置，年均可处置约9430万立方米，其中通过海陆外运约7800万立方米^[1]。仅从上述数据来看，深圳市建筑废弃物基本可实现排放和处置的平衡，但外运处置量占比超过80%，异地处置依赖度

很高，一旦周边城市收紧深圳市土方外运渠道，则工程渣土处置缺口将急剧扩大，过去“先排放、后处置”的思路已不可持续。

近年来，深圳市在城市规划设计和建设工程中，通过政策引导鼓励充分开发利用城市地下空间，而忽略了建筑废弃物处置消纳的问题。虽然“源头减量”概念偶尔在文件中提出，但最终可落地实施的相关政策却屈指可数，没有采取抬升规划设计标高、减少地下空间开挖等措施减少排放量，也没有提出延长建筑寿命、促进施工减排的具体措

施，源头减量政策基本沦为空谈。

大量渣土导致深圳各大建筑废弃物受纳场超负荷运行，带来极大安全隐患。2015年12月20日深圳光明新区渣土受纳场特大滑坡事故已给社会警示，工程渣土亟需从源头减量、综合利用等处置措施着手，化被动为主动，在积极扩大资源化利用产品使用规模的同时，从产生源头出发，研究制定各类建设工程渣土排放限额指标^[2]，促进工程渣土减量排放。

1 建设工程渣土排放限额指标

建设工程主要包括建筑工程、市政管线及综合管廊工程、道路工程、轨道交通工程、园林工程及水利工程等。对于轨道交通工程，其选线方案通常与城市规划、工程地质、水文地质条件等相协调，线路方案一旦确定，区间隧道对应的工程渣土产生量将相对固定，无法通过后续技术手段进行减量，

因此对于隧道挖掘产生的工程渣土不加以限制，主要针对车站建设产生的工程渣土提出限额要求。园林工程及水利工程产生的建筑废弃物类型主要为拆除废弃物以及施工废弃物，工程渣土量极少，本次研究不涉及。

2 建筑工程渣土排放限额

建筑工程渣土排放限额标准可按公式(1)确定。

$$\frac{W_{zt}-T_{ht}-Y_{zs}}{\sum_{i=1}^n s_i \cdot h_i} < r_{jz} \cdot \Phi \quad (1)$$

式中： W_{zt} ——土方外运量（ m^3 ），为运出本工程场地红线范围的土（石）方量，不包括场地平整阶段产生的土（石）方；

T_{ht} ——土方回填量（ m^3 ），为从本工程场地红线范围外运入场地红线范围内的土（石）方量。对于建筑基坑工程，回填区域为地下室外墙边界线到支护结构边界线中间区域，如图1所示；

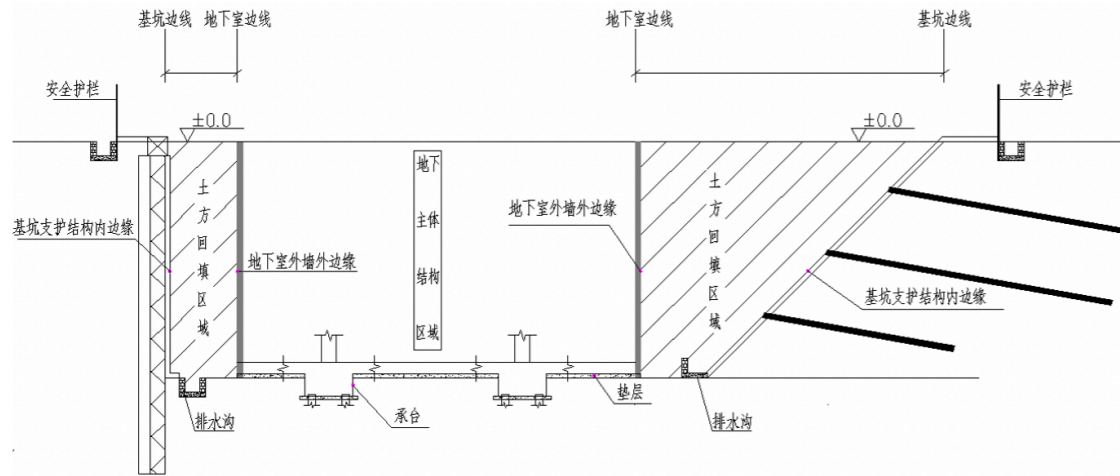


图1 建筑工程基坑设计排放及回填区域示意图

Y_{zs} ——建筑废弃物综合利用产品使用量（ m^3 ）；

n ——建筑地下室建议层数，按表1取值，如果低于该建议值，按实际值计算；如果超过该建议值，按建议层数计算；

s_i ——建筑工程地下室第*i*层建筑面积（ m^2 ）；

h_i ——建筑工程地下室第*i*层平均层高（ m ），按表2.1取值，如果实际地下室开发总深度大于建议层数乘以平均层高，按平均层高取值，如果实际地下室开发总深度小于建议层数乘以平均层高，按实际层高取值；

r_{jz} ——建筑基坑工程渣土排放指标控制率，按表1取值。

Φ ——建筑基坑工程渣土排放指标修正系数，

按表2计算。

如建筑为城市综合体，应按建筑各类型地面建筑面积的权重占比确定建筑地下室建议层数、建筑地下室平均层高以及建筑工程渣土排放指标控制率。

通过统计深圳市近三年已建、在建的1182个项目，分类得出近年来现状不同建筑类型的平均建筑地下室层数和地下室层高，并结合促进建筑废弃物减量排放原则，制定出建筑工程建筑地下室建议层数*n*和平均层高*h*两个参数值。

关于建筑工程地下室建议层数*n*，如果按照平均层数建设，是能够满足使用需求的。在此基础上按照此建议层数建设，能够满足排放限额标准。如需增加层数，就必须通过增加综合利用产品使用或

者回填量才能满足排放要求，实现“多数工程通过优化设计方案能满足排放限额，少数多排、粗犷建设的工程无法满足限额”的目的；

关于建筑工程渣土排放指标控制率 r_{jz} ，筛选了115个工程项目的基坑、景观、建筑、主体结构图

纸，分析计算实际工程的回填折算土方量，综合利用产品使用量预测，结合建筑地下室层数和平均层高，由此计算得出两者的比值，再结合深圳市现行建筑废弃物减排要求，从而制定出每类建筑工程渣土排放指标控制率。

表1 建筑工程地下室平均标准层数、高度及工程渣土排放指标控制率

建筑类型	建筑地下室建议层数 <i>n</i> [层]	建筑地下室平均层高 <i>h</i> [米]	建筑工程渣土排放指标控制率 r_{jz}
二类居住建筑	2	3.9	0.94
商业建筑	4	4.5	0.94
商务建筑	3	3.9	0.94
医院建筑	3	4.5	0.94
酒店建筑	3	4.2	0.94
工业建筑	2	4.5	0.94
行政建筑	2	4.0	0.96
文化建筑	2	4.2	0.96
科研建筑	2	4.0	0.96
中小学建筑	1	4.2	0.85
大学教学楼建筑	1	4.2	0.85
大学宿舍建筑	1	4.0	0.85

表2 建筑工程渣土排放指标修正系数表

建筑类型	工程渣土排放指标修正系数 Φ		
	100米≤建筑高度<200米	200米≤建筑高度<300米	300米≤建筑高度
商业建筑	1.05	1.1	1.2
商务建筑	1.05	1.1	1.2
酒店建筑	1.05	1.1	1.2

备注：表中没有包括的建筑 $\Phi=1.0$

3 市政管网及综合管廊工程渣土排放限额

市政管网工程渣土主要是由各类管网工程项目包括各类管线沟、排水沟、检查井等采用沟槽开挖产生。市政管网尺寸是基于使用功能、经济、技术等各方面要求确定，通常无法更改，因此市政管网的排放限额应该从尽可能增加使用综合利用产品和渣土回填角度着手。对于排水沟、检查井、电缆沟、管道基础垫层和管槽基底硬化、管槽回填以及砌筑排水沟等部位100%可以使用建筑废弃物综合利用产品或工程渣土^[3]。但考虑到实际工程多样，地质条件和周边环境不一，因此市政管网工程渣土排

放指标可以按公式(2)确定。

$$\frac{Y_{zs}+T_{ht}}{W_{zt}-V} > 0.95 \quad (2)$$

式中： W_{zt} ——土方外运量（ m^3 ），为运出本工程场地红线范围的土（石）方量（不包括场地平整阶段产生的土（石）方），设计开挖区域如图2所示；

V ——市政管网体积（ m^3 ）；

Y_{zs} ——建筑废弃物综合利用产品使用量（ m^3 ）。

对于市政管网工程，包括回填、垫层等部位所使用的综合利用产品；

T_{ht} ——回填土方量（ m^3 ），为从本工程场地红

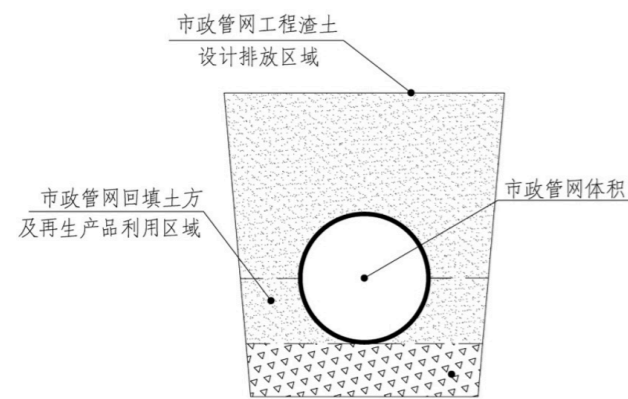


图2 市政管网设计开挖区域示意图

线范围外运入场地红线范围内的土(石)方量。

4 道路工程渣土排放限额

道路工程建设前场地平整阶段涉及的现场条件复杂多样,不同道路所处的地形地貌及地质条件都不相同,因此场地平整产生的土(石)方难以统一限额控制,应通过道路工程的路线和标高优化进行减排设计。

建筑废弃物综合利用产品在道路上可应用于路

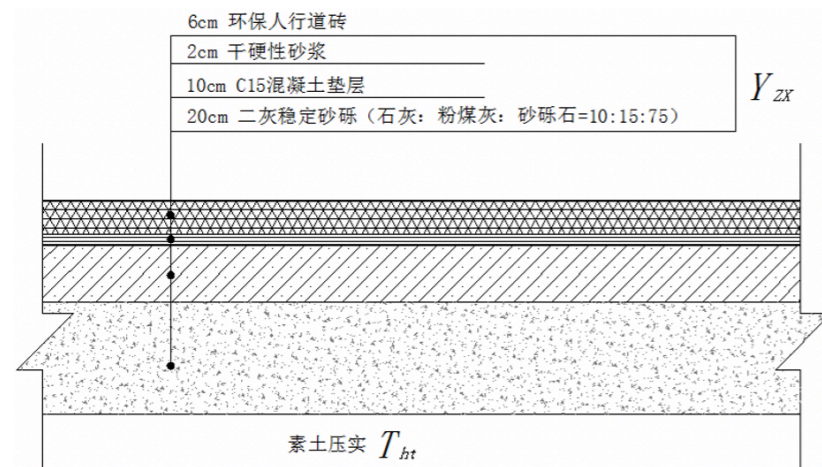


图3 机动车道路面结构示意图

5 地铁车站工程渣土排放限额

地铁车站开挖实质上类似于建筑工程的基坑开挖,因此,可参照建筑基坑进行排放控制。以深圳市某地铁车站为例,其基坑设计出土量为199229m³,基坑回填量为23707m³,除去地面综合利用产品利用,地下室综合利用产品使用量约14479m³,即 $(T_{ht}+Y_{zs})/W_{zt}=0.192$,取整后统一为0.20。

地铁车站工程渣土排放指标可以按公式(4)确定。

$$\frac{T_{ht}+Y_{zs}}{W_{zt}} > 0.2 \quad (4)$$

面碎石基层和路基垫层填筑,产品包括再生骨料混凝土、再生骨料水泥砂浆、再生骨料注浆材料^[4],以机动车道路面结构图(图3)为例,素土回填、稳定砂砾层和水泥粉煤灰稳定碎石层可以用综合利用产品代替,其比例大于80%。而人行道路(图4)的碎石基层和垫层同样可用再生材料替代,其代替比例亦大于80%。因此市政道路工程渣土排放指标可以按公式(3)确定。

$$\frac{Y_{zs}+T_{ht}}{W_{zt}} > 0.80 \quad (3)$$

式中: W_{zt} ——土方外运量(m³),运出本工程场地红线范围的土(石)方量,不包括场地平整阶段产生的土(石)方;

Y_{zs} ——建筑废弃物综合利用产品使用量(m³),对于道路工程,包括道路垫层、回填等部位所使用的资源化利用产品;

T_{ht} ——回填土方量(m³),为从本工程场地红线范围外运入场地红线范围内的土(石)方量。

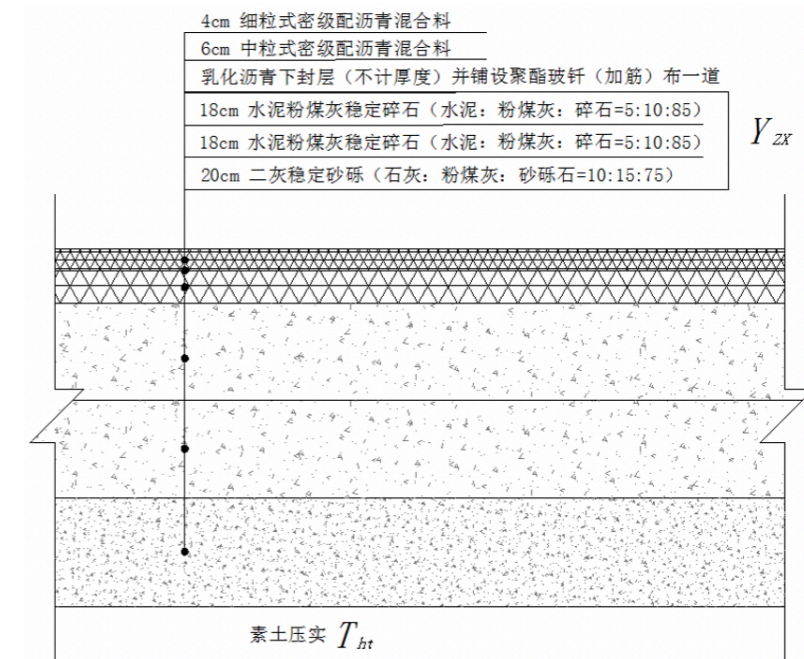


图4 人行道路面结构示意图

纳场建设和道路维护的投入,解决未来建筑用天然砂石资源短缺问题,减少受纳场建设和运营对周边的环境破坏,提升城市生态环境,同时进一步提高深圳地区建筑废弃物减排精细化管理能力,为建设资源节约型和环境友好型城市提供技术支持。关于制定城市建设工程渣土排放限额指标,本文主要提出以下几条建议:

(1) 建设工程渣土排放限额指标的制定应从限制源头产生着手,尽可能的考虑资源化利用产品的充分利用,在保证工程项目建设不受太大影响的前提下,逐步推进深圳市建筑废弃物减排与综合利用工作;

(2) 排放限额指标应在规划设计阶段提出排放限额具体要求,要求设计单位在规划设计时尽可能的优化设计方案,减少土(石)方排放;

(3) 目前“充分开发城市地下空间”仍为主导政策,民众对建筑废弃物减排与综合利用的背景及意义尚未充分认识和普遍接受。制定限额指标宜遵循“前期适当宽松、后期逐步收紧”的策略,以利于政策顺利实施。

参考文献

- [1] 深圳市住房和建设局.《深圳市住房和建设局关于印发进一步加强我市建筑废弃物处置工作若干措施的通知》编制说明(深建废管(2018)2号).
- [2] 《深圳市建设工程建筑废弃物排放限额标准》SJG62-2019.
- [3] 《深圳市建设工程建筑废弃物减排与综合利用技术标准》SJG63-2019.
- [4] 冯志远, 罗霄, 黄启林. 余泥渣土资源化综合利用研究探讨[J]. 广东建材, 2018(2): 69-71.

工程弃土源头减量化案例研究

黄 桐

(深圳市建安(集团)股份有限公司, 深圳 518040)

【摘 要】 随着我国城市化的快速推进, 日益增长的城市垃圾逐渐成为一个棘手的问题。本文对约占城市垃圾40%以上的工程弃土进行源头减量的技术可行性、政策可行性和经济可行性进行了研究后, 通过对深圳某体育场馆工程弃土源头减量项目进行分析, 发现此类项目不仅可以降低弃土成本, 还可以节约土地资源和减轻交通压力, 采用工程弃土源头减量比传统填埋方式在泥沙分离设备租赁费、装载设备费、安装费、土地租金、人工工资、水单费、添加剂七个方面共多支出1246万元, 不过在总费用支出方面减少了8904万元的支出, 降幅比达到74%; 外运渣土数量减少了30万m³, 降幅达50%, 使得工程项目周边交通运输压力大为缓解, 同时也节约了约6万平米用来堆放工程弃土的土地资源。

【关键词】 工程弃土; 源头减量; 降低成本; 节约土地

Case study of the excavated soil's source reduction

Huang Tong

(Shenzhen Jianan group Co., Ltd., Shenzhen, 518040)

Abstract: With the rapid improvement of China's urbanization, the ever-increasing huge amount of urban waste has increasingly become a thorny issue. After studying the technical feasibility, policy feasibility and economic feasibility of the source reduction of excavated soil which accounts for more than 35% of the total urban waste in China, this paper analyzes the resource utilization project of excavated soil in a stadium of Shen zhen. It was found that the source reduction project of excavated soil can not only reduce the cost of landfill, but also save land resources and reduce traffic pressure. There is 12.46 million yuan being spent on seven aspects of sediment separation equipment rental fees, loading equipment fees, installation fees, land rent, labor salary, water bills, and additives which do not exist in traditional landfill method compared with new method above. However, nearly 74% of the traditional landfill's total expenditure, 89.04 million yuan, was reduced. The volume of outward transported excavated soil was reduced by 300,000 m³, a decrease of 50%, which greatly eased the transportation pressure around the project. At the same time, it also avoided about 60,000 square meters of land resources for stacking those soil.

Keywords: excavated soil, reduction, cost reduction, save land

0 引言

从部落文明发展到城市文明后, 伴随着人口聚居产生的巨量垃圾问题就始终困扰着人类, 并从方方面面影响着城市的发展与演变。在古代特洛伊城, 由于无处可去的垃圾只能就地掩埋, 导致整个城市每100年会上升1.5米(垃圾总量约140万吨)^[1]。古罗马的垃圾处理办法是利用城郊一连串敞开的大坑, 将各种废弃物都弃置在那里。使得整个罗马城臭气

熏天, 经常因此爆发瘟疫^[2]。在中国商代, 出现了地下污水排放系统, 而且制定了法律来对应对垃圾问题。据《韩非子·内储说》记载:“殷之法, 弃灰于道者断其手”^[3]。但是这种地下排污方式却只能是饮鸩止渴, 甚至会给后世带来更大的问题。以唐长安城为例, 居民在坊内挖掘了大量的渗井处理垃圾。最后导致“京都地大人众, 加之岁久, 壅底垫隘, 秽恶聚而不泄, 则水多咸苦”^[4]。”因为垃圾污

染了地下水源, 伴随着周边生态环境的恶化, 使得一代历史名城最终没落, 唐代也因此成为我国最后一个在长安城建都的朝代。城市垃圾问题处理的好坏, 会直接影响一个城市的兴衰。

为调查城市垃圾的主要成分及相应的数量, 于淼^[5]对中国天津一处龄期达15~20年占地达20000平方米的垃圾填埋场进行了调查, 发现按干重量计依次排名为建筑废弃物55.27%, 腐殖物38.24%、塑料4.75%、其他1.74%。美国环境保护局(United States Environmental Protection Agency, USEPA) 2017年对美国城市垃圾进行了统计, 发现美国2017年共产生垃圾8.37亿吨, 其中建筑废弃物占比约有68%^[6]。为了研究城市垃圾填埋场的具体成分, 印度污染控制中心(Central Pollution Control Board, CPCB)对孟买的城市垃圾进行了分析, 发现按重量计依次是建筑废弃物44%、腐殖物40%、纸张和纤维13.6%、其他(玻璃、金属、贝壳等)2.4%^[7]。英国环境、食物、乡村事务署(Department for environment food rural affairs, DEFRA) 2016年对英国垃圾总量进行了统计, 发现在英国城市垃圾中按重量计依次为建筑废弃物为62%、商业及工业垃圾18%、生活垃圾12%、其他8%^[8]。可见建筑废弃物约占到了总垃圾量的40%以上。

目前我国对建筑废弃物的处理分为两类, 一是直接填埋; 二是回收再利用^[9-12]。随着城市各类建设项目的方兴未艾和土地资源越来越紧张, 单纯的填埋已无法满足日益高涨的填埋需求, 如果能将占建筑废弃物70%以上的工程弃土^[13]进行利用, 那么将极大的缓解城市垃圾围城的问题, 本文主要对工程弃土的源头减量进行研究, 并结合在深圳某大型场馆进行的工程弃土源头减量案例进行了分析, 在对整个项目进行技术、政策和经济分析后发现, 采用工程弃土源头减量有效的减少了工程弃土填埋量, 同时项目也具有可观的经济价值。希望能为我国在工程弃土的回收利用上提供一定的借鉴。

1 工程弃土研究与资源化应用现状

当前国内外对工程弃土的科学管理和利用研究比较少。Grunner探讨了斯洛伐克隧道挖掘过程中产生的工程弃土(主要为花岗石-闪长岩)完全替代从采石场开采的岩石的可能性, 并且发现如果能利用现场产生的工程弃土中的骨料生产混凝土总体建设成本最低^[14]。Thalman利用筛分和形状分析

法对瑞士十二个项目所产生的工程弃土(主要成分为火成岩、变质岩和沉积岩)样品进行了研究。他发现按重量百分比计细粉(<0.063 mm)在工程弃土中含量为8%, 0~4mm的骨料在火成岩和变质岩中平均含量为35%, 在沉积岩中的平均含量为25%。32mm以上较粗的成分占余下总量的20%。同时他发现这些筛分出来较粗的骨料外形特征扁平且细长, 与制备混凝土所要求的规则的粗、细骨料形成鲜明对比, 在对骨料进行整形后他认为利用隧道开挖出来的工程弃土中的骨料来制备高品质的混凝土是可行的^[15]。Antonaci对瑞典挖掘工程所得工程弃土制备的ESA混凝土进行了宏观力学性能方面的研究如静压徐变、动循环荷载以及冻-融循环研究, 其中在持续静压荷载作用下的徐变变形同采用天然骨料制备的混凝土并无不同, 但是在循环荷载作用下工程弃土骨料制备的混凝土的变形明显小于利用普通材料制备的混凝土了。在经过28天的冻融循环作用后, ESA混凝土的弹性模量也同普通混凝土一样未产生明显的变化。因此文章认为利用工程弃土骨料与采用天然材料制备的混凝土的长期性能相当, 可以进行大范围的推广应用^[16]。这一点却被Olbrecht在对瑞士所产生的工程弃土进行研究后给否定了, 他认为虽然处理过的隧道开挖材料与矿场所得的天然石材、碎石等看上去无异。但是在进一步确定以上结果在实践中是否实用时, 发现利用以上材料做骨料所生产的混凝土弹性模量仅是采用天然骨料的40~57%, 在较大水灰比的耦合作用情况下, 导致了一个比“传统混凝土”更大的收缩变形。为了克服以上这些问题^[17]。Voit采取洗涂骨料、往混凝土中添加掺合料(高效减水剂、聚合物分散体)以及纤维等方法, 让采用工程弃土制备的混凝土的相关断裂力学参数、强度以及耐火性等得到了提高, 从而促使工程弃土骨料的大面积推广应用成为可能^[18]。

跟国外工程弃土主要由碎石构成不同, 我国的工程弃土主要由土壤和砂组成, 处理方式也主要是填埋^[19], 回收利用的技术比较缺乏。林烽介绍了一个福建省某隧道洞渣工程弃土回收利用系统, 该系统每天可对600吨工程弃土进行泥砂分离, 但是对黏粒含量较高的工程弃土, 该系统则无法正常出工作^[20]。王建义对来自中国三个城市的十份工程弃土样本进行了分析, 发现在这十份样品中土壤占到了总数量的五分之三。他认为如果能将这些渣土经过一定的技术处理制作成烧结砖应用于工程中, 则可

以大幅度减少工程弃土对城市产生的诸多威胁^[21]。郝成伟在结合广西地区在道路施工过程中产生的渣土与粉煤灰后提出了一套新的烧结砖制备工艺。即将红砂岩在球磨罐中研磨0.5h后,按红砂岩、粉煤灰、高岭土分别为55%、40%、5%的比例进行配置,将泥料手塑成型制成砖坯,放入硅钼炉在1080℃下烧结1.5h,得到烧结砖成品,该砖表观密度为1520kg/m³、抗压强度17.25MPa^[22]。岳然勇利对工程弃土拌和金属矿渣洗料烧结砖进行了研究,发现金属矿渣洗料的配比量大,强度低,容易产生泛霜;反之,配比量小,强度高,不易产生泛霜。渣洗料的掺量在40%,试块表面无白霜,且抗压强度高于掺量在40%以上的试块^[23]。

2 工程弃土源头减量可行性研究

由上可见,国外工程弃土的成分和材料特性与我国不尽相同,而我国对工程弃土的回收利用的研究与应用也处于起步阶段,没有一套成型的符合我国国情的工程弃土回收利用的方案和经验可以参考与借鉴。Zhang在对我国32个城市地铁挖掘出的工程弃土成分进行研究和分析后,发现工程弃土内包含大量的高质量砂石^[9],与此同时,目前全世界的砂石资源也因为短缺而频频发生价格暴涨^[24-26],这些被包裹在工程弃土中的砂石如果能被提取回收则将具有很大的经济价值。因此,在项目现场将工程弃土中的砂石和泥分离出来是对工程弃土开展回收利用的第一步,也是最重要的一步。以下对工程弃土进行泥砂分离的技术可行性、政策可行性和经济可行性进行探讨。

2.1 技术可行性

目前市面上通用的泥砂分离技术源自制备机制砂的部分工艺,分为干法和湿法两种。其中干法常用的设备有振动给料机、圆筒振动筛、制砂机、粗细砂分离机、除尘系统等。其中制砂机、粗细砂分离机配备变频调速控制系统,可以根据原材料的特性调整生产模式,快速方便调整机制砂的细度模数和级配。干法泥砂分离生产线占地小、扬尘少、运行时噪音小于90分贝、所得骨料级配好,不过干法泥砂分离生产规模最大不宜超过200t/h、砂石表面观感较差、MB值较大、无法处理含水量较高的黏土^[27-28]。湿法常用的设备有振动给料机、破碎机、圆筒筛、螺旋洗砂机、浓密灌、压滤机等。湿法泥砂分离生产规模可达450t/h、可以处理各类工程弃土、产出砂石表面观感性好、MB值小,不过目前湿

法设备占地面积较干法大,普遍存在0.2mm以下细砂流失大、级配不合理。对工程弃土基于泥砂分离技术的源头减量选取干法或湿法工艺,取决于项目占地面积、项目工期、渣土数量、渣土特性等几个要素,在进行项目实施前要做充分技术论证和技术改造^[29]。

2.2 政策可行性

为落实《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》有关精神,2020年5月8日中华人民共和国住房和城乡建设部在《住房和城乡建设部关于推进建筑垃圾减量的指导意见》中提出建立健全建筑垃圾减量工作机制,加强建筑垃圾源头管控,推动工程建设生产组织模式转变,有效减少工程建设过程建筑垃圾产生和排放,不断推进工程建设可持续发展和城乡人居环境改善。意见要求到2020年年底,各地区建筑垃圾减量工作机制初步建立。2025年年底,各地区建筑垃圾减量工作机制进一步完善。所以对工程弃土的源头减量工作在政策与法律层面是得到国家大力支持的^[30]。

2.3 经济可行性

唯有当建设方与施工企业能从工程弃土源头减量中获取比直接外运填埋更高的经济效益时,这些企业才会真正采取对工程弃土进行源头减量的相应措施。随着国家对环保越来越看重,破坏环境、浪费资源的做法所付出的成本也是越来越高,工程弃土弃土费每年都是成倍数的往上增长,建设项目能否管控住成本在很大程度上跟土方开挖的管理好坏有着直接关系。针对其经济可行性的具体量化计算本文给出了具体计算公式,见式(1)。

$$C/C_0 = \frac{E+M+D-S}{E_0+M_0+D_0} \quad (1)$$

式中: C/C_0 为源头减量成本与传统填埋成本的对比; C 为工程弃土采用源头减量产生的成本; C_0 为传统的直接填埋弃土产生的成本; E 和 E_0 为两种不同方式各自的机械设备成本,包括泥砂分离设备租赁费与安装费、装载设备租赁费等; M 和 M_0 为两种不同方式各自的运营费用,包括土地租金、人工工资、水电费、添加剂等; D 和 D_0 为两种不同工程弃土处理方式的外运弃土填埋成本; S 为源头减量后销售砂石所得到的利润。

当 $C/C_0 \geq 1$ 时,意味着采用源头减量不具备经济可行性;当 $1 > C/C_0 > 0$ 时,意味着采用源头减量有降低成本的作用,可以大幅增加施工单位利润;

当 $0 > C/C_0$ 时,意味着销售砂的收入大于对工程弃土的处理成本,此时施工单位可以将合同约定的渣土处理费全部收为利润,建设方在此种情况下可以要求施工单位对在工程弃土源头减量过程中的产生的利润进行分成。

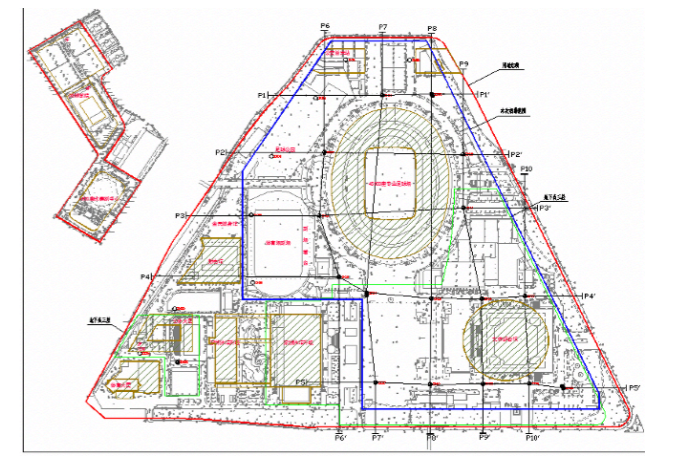
通过对技术、政策和经济三个方面探讨可以明显的发现,在目前的条件下,工程弃土源头减量成功与否的关键节点就在技术和经济上。施工单位在决定对工程弃土进行源头减量之前要充分做好技术论证和经济分析。

3 应用实例分析

3.1 工程概况



深圳某大型场馆项目位于福田区笔架山下,因场馆现状功能单一,设备设施陈旧,配套设施不足等问题需进行整体升级改造,总建筑面积约41万m²,其中地下室16.5万m²。共需挖掘工程弃土60万m²,工期时间为10个月,日出土2000m²,单日渣土外运200车次。因该项目位于繁华地段,受交通限流影响,工程弃土外运主要在夜间进行,靠渣土外运无法及时将这些渣土全部处理。施工单位在对项目区域地质和钻芯取样进行研究后发现剔除表层杂填土后,整个土层内土壤含砂量约50%以上(见图1),于是项目部决定对工程弃土进行源头减量工作。



项目地质情况及钻芯取样结果															
孔号	深度(m)	土质描述					物理力学指标					其他数据			
		层号	土名	颜色	状态	厚度(m)	含水率(%)	液性指数	塑限指数	孔隙比	干密度(kg/m³)	天然密度(kg/m³)	渗透系数(cm/s)	备注	
ZK-309	0-1.5	1	杂填土	黄褐色	松散	1.5	28.5	0.75	18.5	1.05	1.55	0.001	含少量砂		
	1.5-3.0	2	粉质黏土	黄褐色	可塑	1.5	22.5	0.65	16.5	1.05	1.55	0.001	含少量砂		
	3.0-4.5	3	粉质黏土	黄褐色	可塑	1.5	22.5	0.65	16.5	1.05	1.55	0.001	含少量砂		
	4.5-6.0	4	粉质黏土	黄褐色	可塑	1.5	22.5	0.65	16.5	1.05	1.55	0.001	含少量砂		
	6.0-7.5	5	粉质黏土	黄褐色	可塑	1.5	22.5	0.65	16.5	1.05	1.55	0.001	含少量砂		
	7.5-9.0	6	粉质黏土	黄褐色	可塑	1.5	22.5	0.65	16.5	1.05	1.55	0.001	含少量砂		
	9.0-10.5	7	粉质黏土	黄褐色	可塑	1.5	22.5	0.65	16.5	1.05	1.55	0.001	含少量砂		
	10.5-12.0	8	粉质黏土	黄褐色	可塑	1.5	22.5	0.65	16.5	1.05	1.55	0.001	含少量砂		
	12.0-13.5	9	粉质黏土	黄褐色	可塑	1.5	22.5	0.65	16.5	1.05	1.55	0.001	含少量砂		
	13.5-15.0	10	粉质黏土	黄褐色	可塑	1.5	22.5	0.65	16.5	1.05	1.55	0.001	含少量砂		

图1 项目地质情况及钻芯取样结果

3.2 技术方案及实施

目前采用干法泥砂分离技术单机最大日处理量不大于1000m³/d,要2台以上设备才能全部处理项目上日产2000m³的工程弃土,且针对我国南方粘性、湿度较大的土进行泥沙分离效果不好,而采用湿法泥砂分离技术则仅需1台设备即可,考虑到增加的人工、辅助机械和现场场地空间问题,项目

最终决定采用湿法泥砂分离技术。在对现有的湿法泥砂分离设备进行研究和试验后,发现项目现场所挖掘出来的工程弃土因含黏粒过多而无法将细砂表面的泥完全去除干净,如果想将含泥量降低到3%以下,需放弃所有0.2mm以下的细砂。如果采用目前通用的湿法泥砂分离技术,一方面损失了大量的细砂资源,另一方面因缺失0.2mm以下细砂导致级

配不合理而大幅降低所分离出的砂的应用和经济价值。经过研究发现，现有的湿法泥砂分离设备在处理黏粒含量较多、塑性指数大的工程弃土时，其中的圆筒筛对工程弃土的浸泡冲洗效果不佳、搓洗强度不足，黏粒在圆筒筛表面附着，随着圆筒筛的滚动甚至形成渣土球。一个个渣土球小的则穿过筛网掉入螺旋洗砂机，最后以黏粒的形式附着在砂的表

面；大的则从圆筒筛随着一些大块石料一起被排出。为克服以上问题，项目部通过一系列设计延长了工程弃土在圆筒筛内的浸泡与冲洗时间、提高冲洗水压、加强设备对工程弃土的搓洗力度，并最终实现了对高粘性工程弃土的泥沙分离，最终得到符合国家标准建筑用砂，具体工艺流程与应用现场分别见图2与图3。

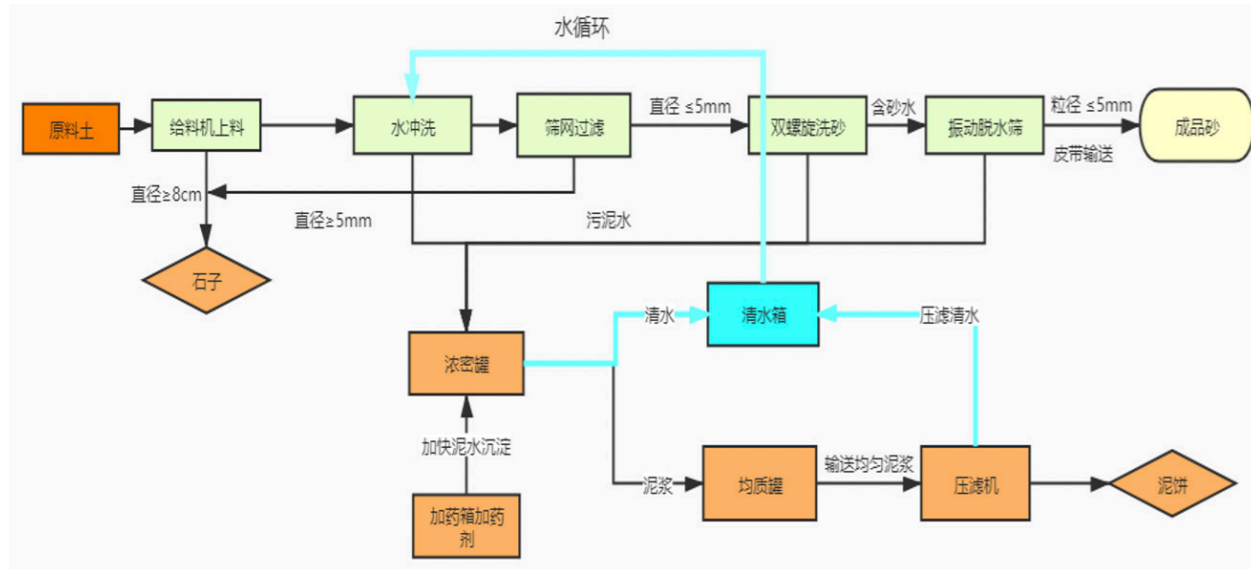


图2 湿法泥砂分离技术工艺流程

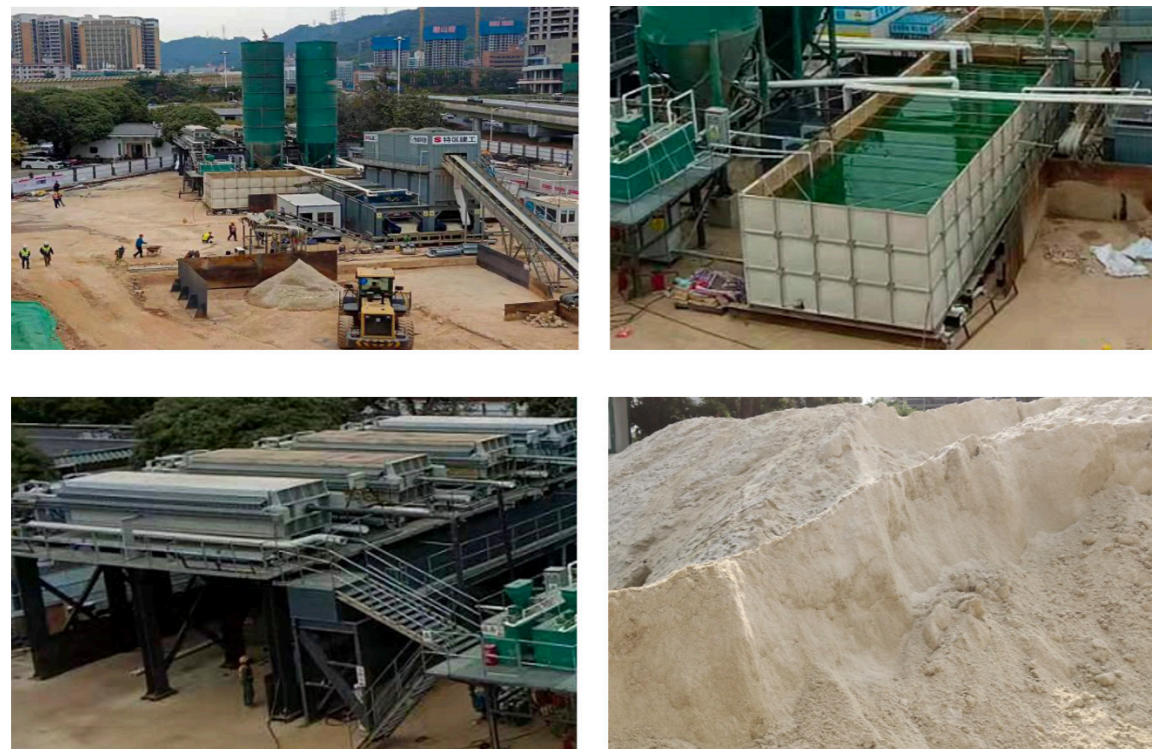


图3 湿法泥砂分离技术源头减量现场

采用湿法泥砂分离技术整体设备占地面积约350m²，所用水仅在内部循环无对外排放，日处理渣土2000m³，产砂1000m³。

3.3 再生砂技术标准分析

(1) 工程弃土再生砂材料物理性能

表1 工程弃土再生砂与天然砂的化学组成

化学成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO
工程弃土再生砂	91.5%	0.381%	5.17%	0.778%	1.37%	0.184%
天然砂	97.27%	0.229%	1.08%	0.63%	0	0.126%

本项目所产工程弃土再生砂化学成分见表1，其中工程弃土再生砂中SiO₂含量比天然砂低5.77%，Al₂O₃含量较天然砂多出4.09%，并比天然砂多出K₂O等化学物质。工程弃土再生砂表观密度为2600Kg/m³；堆积密度为1510Kg/m³；含泥量为0.8%~2.4%；细度模数2.4~2.8。所产砂级配、含泥量、细度模数等技术指标均满足JGJ-52普通用砂石质量检验标准要求，可以直接作为混凝土用细骨料。

(2) 工程弃土再生砂砂浆性能

试验用砂浆配合比按照表2进行配制。

表2 试验用配合比

品种	水	砂	水泥
工程弃土再生砂	472.5g	1350g	540g
天然砂	472.5g	0.229g	1.08g

按照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB-T2419-2016)与《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671-2020)分别测定砂浆的流动性与28天抗压抗折强度。结果(见表3)表明工程弃土再生砂流动度为225mm，天然砂流动度为240mm，工程弃土再生砂流动度较天然砂流动度低6.25%。工程弃土再生砂砂浆抗压强度为51.8MPa，抗折强度为16.3MPa，天然砂的抗压强度52.8MPa与15.4MPa。工程弃土再生砂与天然砂在同等情况下抗压抗折强度基本相似。

表3 工程弃土再生砂砂浆与天然砂砂浆的抗压、抗折强度

	流动度 (mm)	抗压强度 (MPa)	抗折强度 (MPa)
工程弃土再生砂	225	51.8	16.3
天然砂	240	52.8	15.4

3.4 成本效益分析

表4 工程弃土源头减量与传统填埋费用对比

费用分类	明细	源头减量费用(万元)	传统填埋费用(万元)
机械设备费用	泥砂分离设备租赁费	-240	0
	装载设备	-100	0
	安装费	-150	0
运营费用	土地租金	-100	0
	劳动力	-200	0
	水电费	-500	0
	添加剂	-6	0
弃土费用	弃土费	-6000	-12000
售砂收入	售砂	4200	0
合计		-3096	-12000

通过对表1所示工程弃土源头减量与传统填埋的费用按照式3-1进行计算，可以发现C/C₀=0.26，

即1>C/C₀>0，意味着本项目采用源头减量有降低成本的作用，可以大幅增加施工单位利润。可以

看到采用工程弃土源头减量比传统填埋方式在泥沙分离设备租赁费、装载设备、安装费、土地租金、劳动力、水单费、添加剂七个方面共多支出1246万元,在弃土费方面少支出6000万元,在销售砂(售价约140元/m³)上获得收入4200万元。相较于采用传统的填埋方式,采用源头减量在费用支出方面减少了8904万元的支出,降幅比达到74%;外运渣土数量减少了30万m³,约3万车次,降幅达50%,使得工程项目周边交通运输压力大为缓解,同时也避免了约6万平米用来堆放工程弃土的土地资源。

4 结论与建议

(1) 国外工程弃土在成分和材料性质上同我国相比差异较大,而我国对工程弃土的源头减量的研究与应用也刚刚起步,上述项目是在充分考虑我国国情的前提下对工程弃土源头减量的一次重要探索。

(2) 制备机制砂的泥沙分离技术并不能对工程弃土进行较好的源头减量,其中干法泥沙分离技术无法处理黏粒含量较高的工程弃土,而湿法泥沙分离技术则因含泥量过高而不得不放弃粒径为0.2mm以下的细砂。案例所给出的技术方案和工艺完美的解决了现有技术的不足,大幅提升了再生砂的品质,其含泥量、级配和细度模数都完全满足混凝土用砂石料规范标准。

(3) 对源头减量的经济可行性给出了公式,并对其进行了量化,当 $C/C_0 \leq 1$ 时施工单位采用工程弃土源头减量不会产生较传统填埋方式更多的费用,并有利于土地资源的节约、交通压力减小及碳排放减少等。

(4) 工程弃土再生砂与天然砂化学成分类似,级配、含泥量、细度模数等技术指标均满足JGJ-52《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》要求,可以直接作为混凝土用细骨料。工程弃土再生砂流动度较天然砂流动度低6.25%,在同等情况下抗压抗折强度基本接近。

(5) 深圳某场馆进行的工程弃土源头减量工作在技术、政策、经济等方面都是可行的,尤其是在克服了现有技术的诸多问题后,所带来的成本费用减少与再生产品销售收入的增加。

(6) 随着我国经济的快速发展及城镇化的稳步推进,工程弃土数量呈现快速增长的势头,我国越来越多的城市都遭遇了工程弃土的“围城问题”。因为工程弃土弃土场管理不善,2015年在我

国深圳市甚至发生了影响深远的“光明渣土滑坡事件”^[31],所以对工程弃土的管理和综合利用也显得越来越迫切。从上述案例中可以发现工程弃土源头减量可以大幅度的降低工程弃土外运的数量和提升施工单位的盈利水平,从而为工程弃土资源化项目的推进提供了可能。同时,伴随着国家对环境与资源要求的提升,将进一步增加工程弃土源头减量项目的综合效益。因此,为了加快该类项目的推广,相关管理部门可以采取以下措施:

1) 通过国家立法的方式要求建设单位、设计单位、施工单位从源头开始对工程弃土进行减量和资源化,尽量避免工程弃土的直接填埋;

2) 加大宣传力度,增进民众对工程弃土源头减量的认识,进一步提升再生产品在工程项目中使用的比例,提升回收利用的经济效益;

3) 鼓励高等院校和科研机构针对工程弃土泥沙分离后所得的泥饼进行深入研究,开发关键技术与设备,做到工程弃土能在项目现场完全回收利用,实现零排放。

参考文献

- [1]Ervan G, Garrison. History of Engineering and Technology: Artful Methods[M].Routledge.2nd Edition,1999.
- [2]F Havlíček, M Morcinek. Waste and pollution in the ancient Roman Empire[J].Journal of Landscape Ecology, 2016.
- [3]韩非著,高华平,王齐洲,张三夕注.中华经典名著全本全注全译丛书:韩非子[M].中华书局出版社,2015.
- [4]司马光著,胡三省注.资治通鉴[M].中华书局出版社,2011.
- [5]YU Miao. Application of mineralized refuse treatment technology[J]. (In Chinese) Recyclable Resources and Circular Economy,2017.
- [6]U.S.EPA. Advancing Sustainable Materials Management: 2017 Fact Sheet . Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States, November 2019.
- [7]CPCB, Status of Solid Waste Generation, Collection, Treatment and Disposal in Metrocities, Series: CUPS/46/1999 - 2000,2000.
- [8]UK, DEFRA(2019) UK Statistics on Waste. Published 7th March 2019. Retrieved from:https://assets.

- publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/784263/UK_Statistics_on_Waste_statistical_notice_March_2019_rev_FINAL.pdf. [Accessed 30/11/2019].
- [9]Zhang Ning, Duan Huabo. Characterizing the generation and environmental impacts of subway related excavated soil and rock in China[J]. Journal of Cleaner Production. 248 -119242,2020.
- [10]袁王玉,王罗春,赵由才. 建筑垃圾填埋场的环境效应[J]. 环境卫生工程,2006(01):25-28.
- [11]吕仲博,张珂,杜亮波,华怡婷. 我国建筑垃圾资源化处置现状及展望[J]. 水泥技术,2021(03):94-98.
- [12]周文娟,陈家珑,路宏波. 我国建筑垃圾资源化现状及对策[J]. 建筑技术,2009,40(08):741-744.
- [13]徐亚男. 深圳市建筑废弃物综合利用可行性研究报告[R]. 同致诚地产顾问集团,2018.
- [14]Grünner K, Durmeková T, Wagner P. Exploitation possibilities of the tunnels muck as a construction material[J]. Slovak journal of civil engineering,2003/1.
- [15]Thalman-Suter C N. Concrete aggregate production with TBM muck explained on the AlpTransit tunnel projects[J]. Utilizing Ready Mix Concr. Mortar, 1999: 131-144.
- [16]Antonaci P, Masera D. Mechanical Behavior of Structural Concrete Made with Recycled Aggregates from Tunnel Excavation[C]//Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2011, 452: 121-124.
- [17]Olbrecht H, Studer W. Use of TBM chips as concrete aggregate[J]. Materials and Structures, 1998, 31(3): 184-187.
- [18]Voit K, Murr R, Cordes T, et al. Tunnel spoil recycling for concrete production at the Brenner

Base tunnel in Austria[J]. Structural Concrete, 2020, 21(6): 2795-2809.

- [19]黄桐,寇世聪,赵玉龙,李大望,刘小勇,邢锋.日本余泥渣土管理经验与启示[J]. 环境卫生工程,2020,28(05):61-67.
- [20]林烽. 城市建筑泥浆渣土集中收纳、无害化处理及再生利用工作初探[J]. 海峡科学,2018(05):28-30.
- [21]张雪敏,王建义,梁嘉琪. 建筑渣土综合利用与二次码烧生产工艺探讨[J]. 砖瓦,2017(11):46-48.
- [22]郝成伟,吴伯麟,杨云涛,吴文辉,张静雅. 利用红砂岩和粉煤灰制备烧结砖的研究[J]. 非金属矿,2007(03):37-38+41.
- [23]岳然勇,杨德维,袁伟. 利用金属矿渣洗料和建筑渣土生产烧结砖的可行性研究[J]. 砖瓦,2013(05):7-9.
- [24]胡劲奕,张朋,赵婧. 当前我国砂石行业面临的问题及对策[J]. 中国建材,2021(01):128-130.
- [25]柯善北. 解困“砂荒”,路在何方? [J]. 中华建设,2020(06):6-7.
- [26]王琼杰. “层层加码”让砂石不堪重负[N]. 中国矿业报,2021-02-18(001).
- [27]游秋波. 干法生产加工机制砂关键技术[J]. 城市道桥与防洪,2011(05):167-169+246.
- [28]王碧桃,孔繁忠. 干法制砂工艺在水利工程中的应用[J]. 人民长江,2001(10):49-50.
- [29]胡希斌,陈让利. 铁路工程干法与湿法制砂生产工艺对比分析[J]. 工程技术研究,2020,5(17):131-132.
- [30]中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于推进建筑垃圾减量化的指导意见[J]. 再生资源与循环经济,2020,13(06):8-9.
- [31]国务院广东深圳光明新区渣土受纳场“12·20”特别重大滑坡事故调查组. 广东深圳光明新区渣土受纳场“12·20”特别重大滑坡事故调查报告[R]. 中华人民共和国国务院,2016, P3-6.

余泥渣土资源化综合利用研究探讨

冯志远

(深圳市特区建工集团有限公司, 深圳 518034)

【摘要】 随着城市化进程, 建设工程产生大量余泥渣土, 工程回填及受纳场堆填处置已难以消化, 从可持续发展的角度探讨其资源化处置, 探讨生产建材应用到建设工程当中的有效途径。最直接的资源化利用方式就是拿来烧制传统墙体、屋面材料——红砖、红瓦, 然而随着国家对环保、能耗的重视, 这种大量消耗能源烧制、污染环境的产品已经列入淘汰产品目录, 尤其在大城市地区进行烧制作业方式已经无法获批。经过试验研究, 采用非烧制、免蒸压的固化技术, 通过压制成型、自然养护的生产工艺, 将余泥渣土转化为实心砖、路面砖、以及各种砌块产品, 再将其应用到建设工程当中, 取得了良好的成效。

【关键词】 余泥渣土; 弃土围城; 循环经济; 建筑废弃物利用; 再生建材

Researching and Discussing of Comprehensive Utilization on Residual Mud and Soil

Feng Zhiyuan

(Shenzhen Sez construction Group Co.,Ltd., Shenzhen, 518034)

Abstract: As Chinese urbanization process is accelerating, traditional disposal processing of residual mud and soil in backfilling project and landfill has been difficult to reduce production and storage in construction project. Therefore, it is necessary to explore the effective way of resource utilization and recycled building materials from the viewpoint of sustainable development. To solve this problem, the most direct way is to apply sintered product to walls and roofs, such as red bricks or red ties. With the national emphasis of environmental protection and energy conservation, however, the product has been included in the elimination list because of environmental pollution and energy consumption. The government has been no longer allows sintering project, especially in large cities. After testing in field, the compression molding and natural maintenance production process via non-sintered and non-autoclaved Mud and Soil Curing Technology, which transmutes residual mud and soil into solid bricks, pavement bricks, or various type of building blocks, has been achieved good results.

Keywords: residual mud and soil; wastes surrounding cities; recycling economy; building wastes reuse; recycled building materials

0 引言

余泥渣土, 指的是建设工程当中, 产生的多余的泥土(含砂石), 主要是地基施工、地下空间开挖产生。在不少文献或文件中, 也有用弃土、余土、渣土等术语表达。余泥渣土的处置, 分为三个阶段, 同时也是三种不同的处置方式。第一阶段是在城市化刚开始时, 一般可以通过工程回填、修筑路基消纳余泥渣土; 第二阶段随着城市化的工程越

来越多, 已经难以消化这么大量的弃土, 于是开始寻找闲置地块、山地沟壑、海滩等等作为堆填受纳场地进行处置; 第三阶段随着城市化进程的飞速发展, 可开发土地资源奇缺, 为了攫取更多的空间, 人们逐渐将目光转向地下, 开始大量开发地下空间, 建设地下停车场、地下商场、地铁工程等, 由此导致余泥渣土骤增, 堆填处置已难以为继, 因此研究余泥渣土资源化处置并加以回收应用到新的建

设工程当中, 这也是解决城市可持续发展的有效途径。

深圳市2015年底发生了光明新区“12·20”重大滑坡事故, 给人民生命和财产造成了巨大损失。表面上, 这次事故是大量建设产生的工程弃土堆积失稳导致, 但实质上, 却是深圳市城市建设发展模式的系统性问题的局部显现。在地少、人多、集聚度高的城市, 采用堆填这一“逆自然”过程来处理弃土, 势必会增加滑坡事故的发生概率。因此, 亟需寻找新的弃土处置途径, 对传统的处理模式进行变革, 以减少工程弃土的产生对深圳市建设发展产生的负面影响。

根据《深圳市余泥渣土受纳场专项规划(2011—2020)》, 余泥渣土包括建筑废弃物以及工程弃土两部分, 其中建筑废弃物资源化利用深圳市已有十多家企业参与, 同时深圳市也出台了《深圳市建筑废弃物减排与利用条例》, 市场已成熟规范, 但对于工程弃土的资源化利用深圳市仍处于空白阶段。不仅深圳, 从全国范围来看, 北京、上海、广州以及天津等大城市也面临着类似的弃土围城难题, 可以说这是一个具有普遍性的全国性难题。

表1 深圳市建筑废弃物综合利用企业信息名录(发布/更新时间: 2017年5月)

序号	企业名称	处理技术	主要再生建材产品
1	深圳市绿发鹏程环保科技有限公司	移动式、固定式生产工艺	骨料、砖(砌块)、干混砂浆
2	深圳市汇利德邦环保科技有限公司	移动式、固定式生产工艺	骨料、再生砖(砌块)
3	深圳市永安环保实业有限公司	固定式生产工艺	骨料、再生砖(砌块)
4	深圳市鼎浩建材有限公司	固定式生产工艺	骨料、砂浆、加气块
5	深圳市金得益建材有限公司	固定式生产工艺	骨料、干混预拌砂浆
6	深圳市钰杰环保工程有限公司	余土泥沙分离	骨料(主要是砂)、路面砖
7	深圳申佳原环保科技有限公司	余土泥沙分离	骨料(主要是砂)、陶泥
8	深圳市华威环保建材有限公司	移动式生产工艺	骨料
9	深圳市华远环保科技有限公司	移动式生产工艺	骨料
10	深圳市绿悦环保科技有限公司	移动式生产工艺	骨料
11	深圳市为海建材有限公司	移动式生产工艺	骨料、砖、路缘石

1 余泥渣土产量及政府相关政策

据测算, 2017-2020年深圳市建筑废弃物产生总量约3.97亿方。年均产生量约9920万方, 其中政府投资项目弃土约6450万方, 社会投资项目弃土约2700万方, 拆建物料约770万方^[1]。单是弃土一项, 仅统计到的建设项目, 深圳市每年产生量就达到了9150万方。这一数量是很惊人的, 如果做成0.5米×0.5米的立柱, 它的长度刚好是从地球到月球的距离。

为了解决弃土围城难题, 近年来深圳市相继出台了一系列政策文件, 《深圳市建筑废弃物减排与利用条例》、《深圳市建筑废弃物运输和处置管理办法》、《深圳市固体废物污染防治行动计划(2016—2020年)》、《深圳市建筑废弃物综合处置工作方案》、《深圳市余泥渣土受纳场专项规划(2011—2020)》、《深圳市建筑废弃物综合利用项目激励办法》等等。力争源头减量化, 运输安全可控, 处置资源化。

2 深圳市余泥渣土资源化综合利用方式探讨

在深圳市住房和城乡建设局主导推进下, 相继出现了多家建筑废弃物综合利用工厂和企业, 经过对企业进行考察审核, 对22家企业进行了名录公示^[2]:

表1 (续)

序号	企业名称	处理技术	主要再生建材产品
12	深圳市华全混凝土有限公司	移动式生产工艺	骨料
13	深圳市亨通丰润环保科技有限公司	移动式生产工艺	骨料
14	深圳市东顺达建筑废料处理有限公司	移动式生产工艺	骨料
15	深圳市文浩环保再生有限公司	移动式生产工艺	骨料
17	深圳市土世界环保科技工程有限公司	移动式生产工艺	骨料
18	深圳市伟鹏环保实业有限公司	移动式生产工艺	骨料
19	深圳市绿志新型建材研究院有限公司	移动式生产工艺	骨料、再生砖(砌块)
20	深圳市环鹏环保科技有限公司	移动式生产工艺	骨料
21	深圳市华楠建筑废料处理有限公司	移动式生产工艺	骨料
22	深圳森态环境科技有限公司	移动式生产工艺	骨料

注：序号随机排列，与排名无关。

表中可见，大多数企业都是针对拆建物料资源化处理利用，对建设余泥渣土作为对象的还是很少。

深圳市航天新材料科技有限公司在龙岗建成了1条工程弃土综合利用中试线，采用泥沙分离处理技术，分离后砂石直接销售，泥通过脱水、免烧结成型工艺，生产实心砖、砌块、混凝土活性掺合料等。

深圳申佳原环保科技有限公司在宝安建成1个工程弃土综合利用项目，占地1.1万 m^2 ，年处理能力达30万方。采用泥沙分离处理技术，分离后砂石直接销售，泥加工为陶瓷原料。

深圳市钰杰环保工程有限公司，在龙岗建成1个工程弃土综合利用项目，占地1.5万亩，年处理能力达80万方，采用泥沙分离处理技术，分离后砂石直接销售，分离出的泥填埋处理。

深圳市在余泥渣土资源化综合利用领域是走在全国前列的，且已取得了一些领先技术成果。但是鉴于目前的整体水平都有待提高，还是需要加大投入，继续深化研究，加快行业健康发展。

3 非烧结余土制品生产

深圳市建筑科学研究院股份有限公司，于2016年建立了余泥渣土资源化利用中试实验室，购置了

泥沙螺旋分离机、滚动筛分机、压滤机、泥土搅拌机以及制砖机等一套设备，深入开展余泥渣土资源化利用的新产品研发、定型以及工艺优化等功能；制作成功多种渣土资源化产品，实心砖、路面砖、种植砌块、护坡砌块、海绵城市蓄水模块等等，并将部分产品推广应用到多项建设工程当中；同时通过总结研究经验，申请了多项相关专利。2017年在深圳市龙岗区新建成一条小型余泥渣土资源化综合利用自动化生产线，作为示范推广项目。

该生产线结合传统石矿产线、洗砂产线、制砖产线设备的特点，由深圳建科院项目团队进行相关设备改造、工艺结构调整，与设备制造企业共同研发设计而成，整条生产线在国内首创。主要工艺特点为低能耗，非烧结免蒸压，压制成型，自然养护；自动化程度高、无污水排放、低粉尘低噪音，年处理余泥渣土能力可达30万方。可生产实心砖、地面砖、空心砖、以及各种砌块。其工艺流程如下：

图2为产品示范应用的部分工程，左图为集料全部采用余泥渣土制作的种植砌块，在建筑工地砌筑的绿化围墙；右图为集料全部采用余泥渣土制作的透水路面砖铺设的员工宿舍后院小景观，背景墙为非烧结余土实心砖。

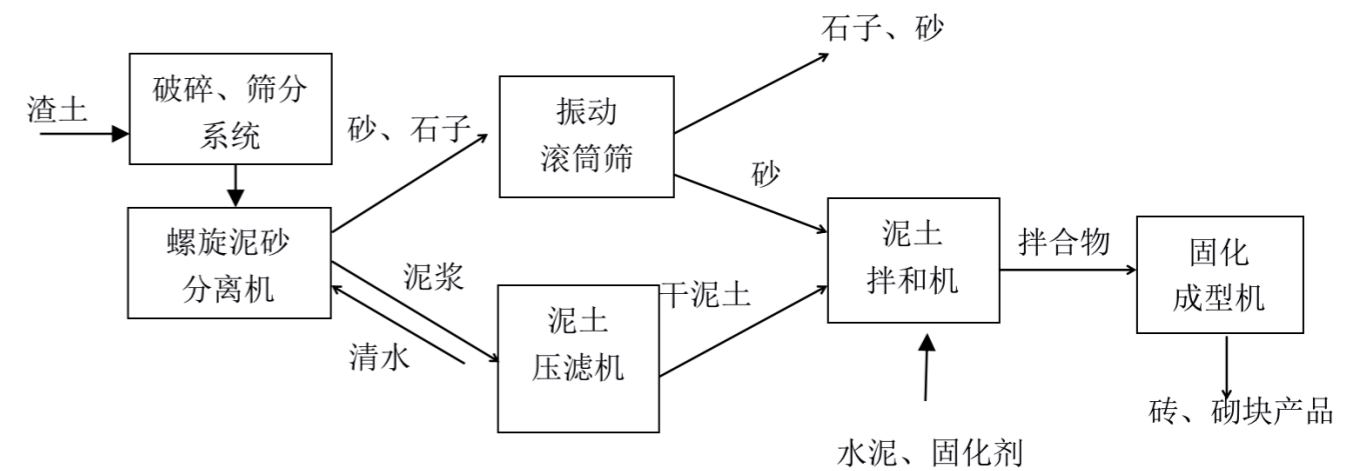


图1 生产工艺流程图



图2 部分产品展示

4 建立配套产品标准

现行砌块、砖等产品标准大多都对产品的原材料做了详细的规定，原本这些标准就是针对混凝土制品，就原材料而言并不适用于余土制品标准，但可以利用其指标要求。现行的混凝土制品标准，对原材料中的砂石、水泥等作了要求，如果用于余泥标准就需要对余泥做相应要求。

为了余土产品有标准可依，只有研究编制一套新的产品标准，突破现有标准对原材料的限制，又对产品性能指标进行合理设置。在此情况下，结合产品原材料、生产工艺、工程使用部位、以及试验数据，深圳建科院的项目团队研究编制了《非烧结余土实心砖》、《非烧结余土透水路面砖》、《非烧结余土种植砌块》、《非烧结余土轻质防雨砌块》、《非烧结余土护坡砌块》等一系列余泥渣土产品标准，形成了一套余泥渣土资源化综合利用产

品标准体系。标准体系当中，特别针对集料做了限制，要求50%以上必须来自工程建设余土。就产品性能表现，针对使用环境和部位，做出相应的参数要求，这使得余土产品生产及检测，都有相应的标准。

5 批量生产与应用

2017年底，余泥渣土资源化综合利用示范项目建设完成。批量生产非烧结余土实心砖10万块，按产品标准进行了检测，各项指标均符合标准要求。将产品进行了工程示范应用，建造了300平方米单层办公室（图3），通过建筑工人砌墙反馈以及墙体效果，都非常好，完全达到了预期要求。

而通过余土生产的非烧结余土种植砌块，在厂房内将原材料堆放区与生产区之间砌筑的隔离墙（图4），效果非常好，受到了来访参观人员的一致好评。



图3 非烧结余土实心砖工程



图4 非烧结余土种植砌块隔离墙

6 结语

建设余泥渣土的产量随着城市化进程愈来愈大，通过资源化利用，可将部分弃土转化为市场需求极大的建材产品，有效缓解弃土围城问题，创造社会效益和经济效益。但最关键的还是要从源头控制，尽可能的减少对地下空间的开发，避免过多余

泥渣土的产生。

参考文献

- [1] 深圳市住房和建设局《〈关于进一步加强我市建筑废弃物管理工作的若干措施（代拟稿）〉编制说明》；
- [2] 深圳市住房和建设局官方网站

简 讯

公路养护技术有哪些发展趋势？郑健龙院士是这样研判的

国务据统计，我国每年约有1万多公里高速公路、近20万公里普通公路需进行大中修，每年养护大中修产生的废弃料近2亿吨，且大多数养护工程造成了严重的交通拥堵，降低了公路通行效率。因而，研究公路养护技术、掌握公路养护前沿发展趋势对于推动公路养护事业高质量发展意义重大。

趋势一：在役道路性能检测与养护维修新技术开发是永恒的主题

在役道路性能检测

挑战：尽管在役道路实现了路面性能的不停车检测，但检测时行车速度慢，存在安全隐患，被正常行驶车辆撞击的事件时有发生；根据检测到的路表信息反演道路材料与结构性能参数时，存在不唯一性和不准确性；路基病害具有隐蔽性，非接触式无损检测难以穿透路面后准确感知路基的特征信息；路基使用性能对含水率与密度的变化极为敏感，而现有检测手段无法达到相应的精度要求，且难以实时感知在役道路的使用性能，不能获得全寿命周期的完整信息。

技术对策：开发路面性能高速检测技术与装备；改善传统的检测手段与装备，提高检测的客观性和准确性；研究在役道路性能实时感知技术，推广应用到路面信息感知、传输、解译等环节；改进路基病害检测技术，研发非接触式感知技术、方法与装备，使检测数据更精、更准；研发非接触式路侧信息感知技术，以达到全天候实时感知，同时服务自动驾驶的目标。

道路养护维修

挑战：道路养护施工极易造成交通拥堵，降低路网通行能力；我国北方冬季、南方雨季时间长，导致道路损坏无法及时修复，病害向深层次扩展；缺乏具有自主知识产权的养护材料、技术以及经济有效的路基病害修复手段。

技术对策：开发适用于特殊气候环境的路面养护材料与技术；开发无污染的融冰化雪材料与技术、汽车尾气降解涂料；开发适用于不同需要的预养护材料、技术与装备；开发快速养护的材料、技术与装备；开发新型路基、边坡病害修复与加固技术、沥青路面装配式修补技术等。

趋势二：公路长期性能观测与研究是全世界关注的热点

公路长期性能观测与研究是全面掌握公路基础设施性能演变科学规律，指导公路基础设施建设、养护与管理的必要手段，是实现公路基础设施建养数字化、信息化的基础性工作和全面提升公路交通基础设施设计、施工水平及使用寿命的科学依据，也是全面提高路网运输效能，降低物流运输成本，提升养护管理智能化与养护决策科学化水平的重要途径，其重要性不言而喻。

国外研究现状

以美国为代表的发达国家已经将交通基础设施的长期性能观测、数据分析作为一项长期实施的国家战略。早在1984年，美国就在其战略公路研究计划（SHRP）中启动了有关路面长期性能（LTPP）的研究。研究范围覆盖整个北美地区，域外一些国家特别是西方发达国家也参与了这项研究，取得了大量宝贵的观测资料与研究成果。研究成果还支撑了美国交通基础设施建设领域的长期安全健康运行，主导了国际相关领域标准规范的制定与发

展。

为确保路面长期性能研究顺利开展，美国建立了完备的道路长期性能观测网，观测站点达到了2581个（截至2019年12月），主要采集道路基本信息、气象交通量、路面荷载、路况数据等，数据库由美国联邦公路局下设的路面长期性能工作组统一管理。目前，数据库的用户量达到1000多家（包括科研、设计、施工单位等），数据的年均下载量约400~500太字节（TB）。

国内研究现状

“十二五”和“十三五”期间，我国曾两次立项开展路面长期性能观测研究。目前，全国共建设59个（不完全统计）路面长期性能野外观测站点，分布于16个省份。此外，还在青藏高原设置了300余个高原冻土地地区公路路基路面监测断面。总体来看，我国的道路长期性能观测网密度低，观测持续度不足，与开展路面长期性能研究的要求相差甚远。

针对上述问题，交通运输部和科技部目前正在规划组建公路长期性能野外科学观测研究站，观测站拟以交通运输部公路科学研究院的足尺试验场为主体，拟在现有野外观测站点的基础上，再建8个野外观测站点，届时野外观测站点将覆盖我国各个主要地质、气候区划，可以实时或周期性地收集气候环境、交通荷载、路面材料与结构的力学响应及服役状态等信息，为从业人员研究公路全寿命周期服役性能演化规律及衰变机理，长寿命路面设计新理论、新方法、新模型，路面结构与材料长期性能试验的新方法与新设备，打造多维度、多源数据资料的共享平台提供重要支撑。

趋势三：绿色养护技术是当今世界的发展方向

绿色养护的必要性

实现“双碳”目标的要求 2020年9月22日，习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话，提出了我国2030年前达到二氧化碳排放峰值、2060年前实现碳中和的“双碳”目标。当前，我国交通运输体系的碳排放量占全社会碳排放量的9%，而且还在以每年5%的速度增长。综合考虑交通基础设施建设、养护期间的能源消耗量以及原材料生产过程中产生的二氧化碳量，目前我国交通行业的碳排放量约在20%以上。由此可见，在“双碳”背景下，公路养护技术的发展面临重大挑战。

降低能源消耗的要求 我国公路基础设施建设、养护工程消耗的不可再生资源巨大，给生态环境造成了一时难以恢复的破坏，且养护过程中会产生大量废弃物，还有可能诱发地质灾害。而绿色养护技术的核心是减少资源消耗，并实现废弃料的资源化再生利用。提高材料利用率的要求当前，我国道路材料再生利用面临诸多问题：沥青路面铣刨料级配破坏严重，铣刨前的加热造成了沥青的二次老化；再生利用技术十分粗放，新料与旧料直接掺拌使用，导致再生混合料的品质不高；养护施工中，通常将废弃料降级使用，再生混合料的使用效率低。可见，绿色养护技术研究已成为大势所趋。

发展绿色养护的技术对策

开发新型沥青路面铣刨设备以废弃料中矿料的资源化为目标，转变铣刨设备的设计思路；改善加热技术，确保拟铣刨层的沥青混合料充分软化又不至于老化；优化铣刨工艺，改铣刨为铲扒，提高废弃料级配的完整性，特

别是粗集料的完整性；发展厂拌再生技术，最大限度提高路面维修。

开发沥青路面铣刨油石分离技术 当前，砂石资源越来越宝贵，可通过开发新型油石分离技术降低成本，实现规模化生产。利用油石分离技术能够使铣刨料中的集料实现资源化，还能确保新制备沥青混合料的品质。此外，分离出来的废沥青不再作为沥青结合料，可用于开发新的资源化用途，建议施工单位分地区建立废弃料资源化工厂，统一回收、统一加工，最大限度发挥其潜在价值。

趋势四：道路养护维修的智慧管理是数字经济的时代特色

现阶段，我国道路养护维修智慧管理主要面临以下问题：一是养护部门开展路况定期检测的目的性不强，对检测数据的挖掘与利用不充分，且建设期、养护维修与大中修期、运营期的路况数据互设信息壁垒，定期检测与道路巡检数据由政府监管部门、业主单位、检测单位等分别存储，难以对路况数据进行深入挖掘和二次开发。二是养护维修决策与管理的智能化水平不高，具体表现为养护维修决策部门掌握的路况信息不全，导致养护维修处治不及时；由于路况信息碎片化现象严重，且存在信息孤岛效应，养护部门无法构建科学、合理的道路性能预测模型与养护维修决策模型等。对此，可采取以下技术对策：

开发公路建设、运营与养护管理一体化的区块链技术

旨在实现公路全寿命周期建设、运营与养护管理信息融合的一体化。要求业主单位分别建立下辖各路段的历史数据库，借助共识机制、加密算法和智能合约，在政府监管部门、业主和各承包商之间构建联盟链，以保证数据的公开透明和不可篡改，避免数据造假，同时支持业主通过数据上链，对原材料生产、现场施工、验收检测等进行有效监管。

开发搭载于“区块链+养护管理平台”的公路养护管理系统

该系统应具备分布式存储全寿命周期的路况数据、实时进行指定路段的路况评价、根据路况演变历史预测道路性能和结构性能、进行网级和项目级养护决策和养护投资预算、实现养护施工采购与实施过程监督（含招投标和施工过程监督）等功能。

来源：中国公路

国之重器！这项国家重大科技基础设施可模拟超9度强地震

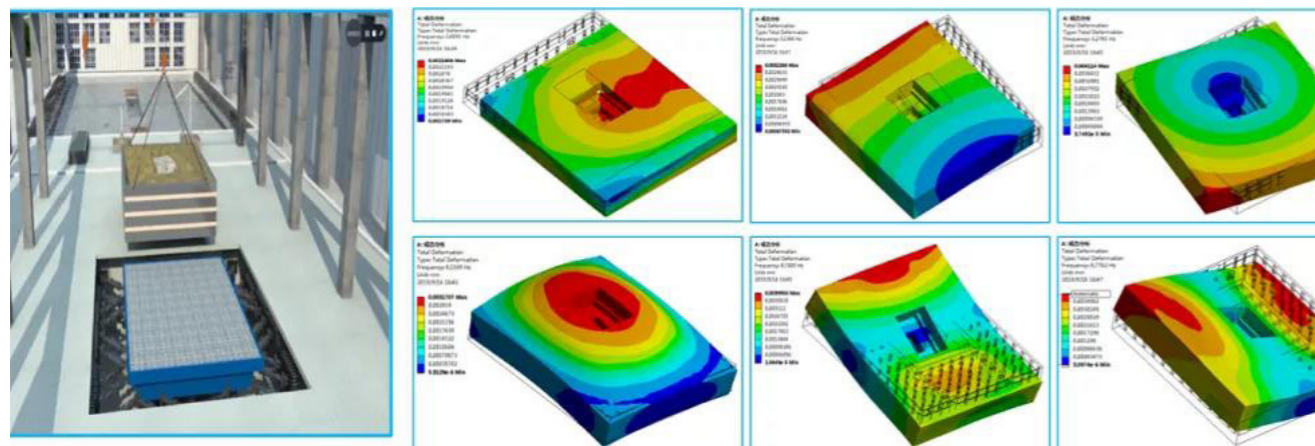
位于天津大学北洋园校区内的国家大型地震工程模拟研究设施项目大型振动台钢结构主体顺利封顶。项目建成后，可模拟烈度超过9度设防加速度的强地震。该项目是继贵州“天眼”（FAST）、广东散列中子源、上海光

源线站等之后，我国投入巨资打造的又一“国之重器”。

地震模拟振动台是研究结构地震破坏机理和破坏模式、评价结构整体抗震能力和衡量减震、隔震效果的重要手段和设施，被广泛应用于研究结构的动力特性、设备抗震性能、检验结构抗震措施等方面，同时在原子能反应堆、海洋结构工程、水工结构、桥梁工程等领域也起着重大作用。

该设施建成后，将超越日本的E-Defense成为世界上最大的三维地震模拟振动台，同时，将会对全世界开放，实行设施、数据、成果共享，大幅提升我国工程技术领域的创新能力和水平。

大型振动台是地震模拟设施的核心部分，可模拟超过9度设防加速度的强地震。实验中，可在其上建造20米



高住宅，通过仪器振动模拟大型地震实况效果，协助科研人员进行更实用的建筑结构抗震研究。振动台底部和侧面连接由42组总重达600吨的重型埋件及510根高精度栓杆组成。核心区厚17.5米，体积约4.4万立方米，振动台每年会有5至8次超过9度的抗震试验。

来源：中建八局融媒体中心

住全国首个AAA级装配式近零能耗游泳馆诞生

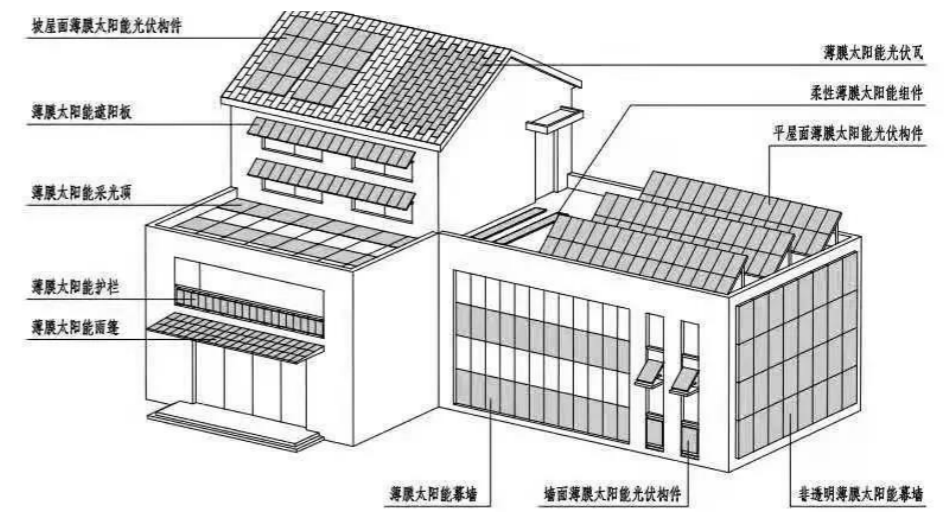
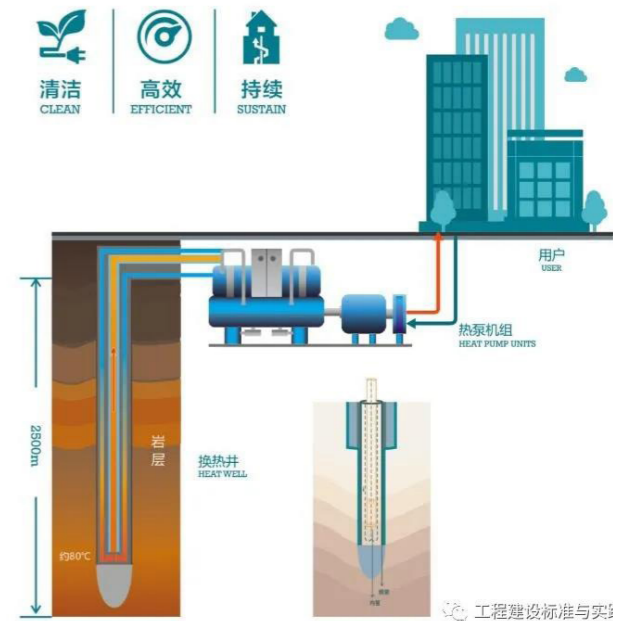
陕西省西咸新区沣西新城游泳馆项目获设计阶段“近零能耗建筑”证书，标志着全国首个AAA级装配式近零能耗游泳馆诞生。

游泳馆采用中深层地热能无干扰清洁供热、太阳能光伏建筑一体化等技术，最大限度利用可再生能源满足用能需求，解决能耗问题。据测算，游泳馆每年可节约电费约55万元，可节约标准煤约329吨，可减少二氧化碳排放约879吨。

中深层地热能无干扰清洁供热技术通过向地下2000-3000m深处钻孔取热，运用地热能梯级利用与智能控制技术，解决游泳中心42%冬季辐射供暖、80%生活热水、100%泳池池水加热三大系统热源问题，实现供暖和热水系统低碳目标。

薄膜光伏发电系统通过对游泳馆进行阴影分析，确定建筑与薄膜光伏创新融合方案，在游泳馆屋顶一体化集成贴合式高效薄膜光伏模块4200平方米，实现年发电量约63万千瓦时，比常规光伏系统发电能力提升30%以上。

游泳馆坚持“被动技术优先、主动技术优化”设计理念，巧妙利用建筑供暖系统、装配式夹芯保温复合板系



统、主动遮阳系统等技术，确保游泳馆恒温舒适。此外，通过雨水回收、中水回收、泳池水回用等，提高水资源重复利用率，实现节能节水。

冬季，结合透光斜屋面采光体系，利用阳光房集热效应储能集热，确保冬至日阳光覆盖泳池八条泳道，最大限度存储太阳能，大幅提升游泳馆室内环境舒适度。

春夏秋季，充分利用自然通风措施实现场馆换气、除湿、除热，尤其是夏季自然通风换气次数可达19次/小时以上，能够100%消除室内余热余湿及有毒氯气，也可通过电动遮阳帘防止太阳直射过强。

为确保天窗清洁，通过屋面天窗自清洁循环系统实现零水耗自清洁。

游泳馆利用互联网智能感知技术，为智慧化运行蓄力赋能。项目设置集能耗监测、智能服务、水温水质感知调控等为一体的智能化综合管理平台，集成空气监测、能源管理、水温感知、水中细菌监测等多种功能，经数据采集、大数据分析，大幅提升管理效率及服务水平。此外，场馆将实行标准化一卡通管理，实现新城内多馆通用，满足消费者入馆、储物、消费等一体多元化需求。

来源：西安报业全媒体

“大湾区兄弟”掘进珠江，中国动车将在百米海底飞驰！

醒狮涂装的“深江1号”盾构机和祥龙涂装的“大湾区号”盾构机突破赛道，开进海底，将参与我国最深海底隧道深（圳）江（门）铁路珠江口隧道工程建设。

深江铁路是全国“八纵八横”高铁主通道，沿海通道的重要组成部分，是支撑粤港澳大湾区建设的重大交通基础设施，线路正线长116公里，途经深圳、广州、东莞、中山、江门5个地市。由于线路需要跨过广州、东莞之间的珠江入海口，地质十分复杂，设计方案几经比选，最终由公铁两用大桥改为隧道下穿。

“深江1号”泥水平衡盾构机将穿越区间全长3590米，最大埋深106米，最大水压力1.06兆帕。珠江口隧道属于复合地层超高水压长距离隧道，地质条件极端复杂，环境敏感点多，周边环境水腐蚀性较为严重。盾构机在掘进中要安全穿越多条断裂破碎带、基岩凸起及软硬不均等多种复合地层，在超高水压环境下、海底换刀，对盾构机性能提出了很高的要求。完成掘进任务后，盾构机于洞内原位解体，并确保盾构机完好率，此工法属国内首创，对拆机与运输都是新的挑战。为应对超深海底的复杂情况，全长130米，总重3800吨，开挖直径13.42米的“深江1号”配置了常-带压重型复合刀盘、可伸缩主驱动、双层壳体，集成了高精度大流量环流、高效重载物料运输等一系列智能化系统，提高了盾构机的适应性，为工程的安全、高效施工提供保障。

“大湾区号”盾构机是为深江铁路珠江口隧道量身打造的超大直径盾构机，开挖直径达到13.32米，总长133米，总重约3900吨，承担了珠江口隧道9175米的施工任务，水下最大埋深115米，是我国水下隧道的最深纪录。施工中，将采用盾构法和矿山法两大主要工法，该隧道段将成为我国隧道施工中又一工法综合基地。

珠江口隧道的超高水压，在国内尚无同等条件的工程经验、盾构设备和设计标准可供参考。盾构独头掘进最长达2930米，意味着盾构机必须在超高水压的不良地质段进行磨损刀具的更换，风险和难度极大。除此之外，两



台盾构机在水下长距离掘进后要实现精准对接，犹如在茫茫大海中穿针引线，对施工的动态控制要求极为苛刻。

研发团队结合工程地质特点，针对性配备了小刀间距常压复合刀盘、可伸缩主驱动、高压压力自动补偿等创新科技，应用了国内最大承压12bar的主轴承密封技术，在质量上精益求精，严格把关，为隧道安全高效施工提供了坚强保障。

“深江1号”和“大湾区号”，将运至施工现场进行全系统组装调试，确保早日始发掘进。深江铁路建成开通后，将进一步打通沿海通道，助力打造粤港澳大湾区半小时生活圈、经济圈，辐射带动粤东粤西与珠三角区域协调发展。预计2025年，中国动车将在百米海底飞驰！

来源：国务院国有资产监督管理委员会官方澎湃号

【中发[2021]36号】中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见

近日，中共中央国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》。文件提出：研究碳减排相关税收政策。建立健全促进可再生能源规模化发展的价格机制，完善差别化电价、分时电价和

居民阶梯电价政策。严禁对高耗能、高排放、资源型行业实施电价优惠。加快推进供热计量改革和按供热量收费。加快形成具有合理约束力的碳价机制。

到2025年，单位国内生产总值二氧化碳排放比2020年下降18%；非化石能源消费比重达到20%左右；森林覆盖率达到24.1%，森林蓄积量达到180亿立方米，为实现碳达峰、碳中和奠定坚实基础。到2030年，经济社会发展全面绿色转型取得显著成效，重点耗能行业能源利用效率达到国际先进水平。单位国内生产总值能耗大幅下降；单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降65%以上；非化石能源消费比重达到25%左右，风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上；森林覆盖率达到25%左右，森林蓄积量达到190亿立方米，二氧化碳排放量达到峰值并实现稳中有降。

积极发展非化石能源。实施可再生能源替代行动，大力发展风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能等，不断提高非化石能源消费比重。坚持集中式与分布式并举，优先推动风能、太阳能就地就近开发利用。因地制宜开发水能。积极安全有序发展核电。合理利用生物质能。加快推进抽水蓄能和新型储能规模化应用。统筹推进氢能“制储输用”全链条发展。构建以新能源为主体的新型电力系统，提高电网对高比例可再生能源的消纳和调控能力。

深化能源体制改革。全面推进电力市场化改革，加快培育发展配售电环节独立市场主体，完善中长期市场、现货市场和辅助服务市场衔接机制，扩大市场化交易规模。推进电网体制改革，明确以消纳可再生能源为主的增量配电网、微电网和分布式电源的市场主体地位。加快形成以储能和调峰能力为基础支撑的新增电力装机发展机制。完善电力等能源品种价格市场化形成机制。从有利于节能的角度深化电价改革，理顺输配电价结构，全面放开竞争性环节电价。推进煤炭、油气等市场化改革，加快完善能源统一市场。

完善财税价格政策。各级财政要加大对绿色低碳产业发展、技术研发等的支持力度。完善政府绿色采购标准，加大绿色低碳产品采购力度。落实环境保护、节能节水、新能源和清洁能源车船税收优惠。研究碳减排相关税收政策。建立健全促进可再生能源规模化发展的价格机制，完善差别化电价、分时电价和居民阶梯电价政策。严禁对高耗能、高排放、资源型行业实施电价优惠。加快推进供热计量改革和按供热量收费。加快形成具有合理约束力的碳价机制。

推进市场化机制建设。依托公共资源交易平台，加快建设完善全国碳排放权交易市场，逐步扩大市场覆盖范围，丰富交易品种和交易方式，完善配额分配管理。将碳汇交易纳入全国碳排放权交易市场，建立健全能够体现碳汇价值的生态保护补偿机制。健全企业、金融机构等碳排放报告和信息披露制度。完善用能权有偿使用和交易制度，加快建设全国用能权交易市场。加强电力交易、用能权交易和碳排放权交易的统筹衔接。发展市场化节能方式，推行合同能源管理，推广节能综合服务。

来源：碳交易网