

DOI:10.13205/j.hjgc.202310012

全昭熹,陈湘生,陈锋,等. 基于生命周期评价方法的隧道施工渣土利用减碳效果分析[J]. 环境工程,2023,41(10):91-98,162.

基于生命周期评价方法的隧道施工渣土 利用减碳效果分析

全昭熹¹ 陈湘生^{1,2,3} 陈锋⁴ 高望⁴ 韩文龙^{1*}

(1. 深圳大学 土木与交通工程学院,广东 深圳 518060; 2. 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室,广东 深圳 518060;
3. 深圳市地铁地下车站绿色高效智能建造重点实验室,广东 深圳 518060; 4. 佛山市建盈发展有限公司,广东 佛山 528313)

摘要:渣土利用已成为盾构绿色施工的关键措施之一,为进一步量化隧道盾构渣土资源化利用的碳减排潜力,通过构建隧道盾构渣土经改良后进行路基填筑的全过程碳排放估算方法,利用季华路西延线过顺德水道隧道工程实际工程数据,对比分析了渣土再利用与常规堆填处理的碳排放差异,并对渣土利用全过程碳排放进行了敏感性分析。结果表明:渣土利用碳排放主要发生在渣土改良运输阶段,常规堆填处理主要应用于产生阶段;顺德水道过江隧道工程的总排渣量约为 65029 m³,其中可用于进行渣土改良的排渣量为 53162 m³,若全部进行堆填处理,则全生命周期的 CO₂ 排放量约为 1.84×10⁶ kg CO₂eq,占用 11058 m² 的填埋场地;经 3%石灰+3%脱硫石膏改良后的渣土 CBR 值可达到 141.4,回弹模量为 198.8 MPa,全过程产生的 CO₂ 比渣土常规处理产生的 CO₂ 增加了 8.89×10⁵ kg CO₂eq;经 3%电石渣+6%粉煤灰改良后的渣土 CBR 值可达到 89.06,回弹模量为 158.9 MPa,全过程产生的 CO₂ 比渣土常规处理产生的 CO₂ 减少了 6.44×10⁵ kg CO₂eq。

关键词:盾构隧道;渣土利用;生命周期评价;碳减排

ANALYSIS OF CARBON REDUCTION EFFECT OF TUNNEL CONSTRUCTION MUCK SOIL UTILIZATION BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT

QUAN Zhaoxi¹, CHEN Xiangsheng^{1,2,3}, CHEN Feng⁴, GAO Wang⁴, HAN Wenlong^{1*}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities (MOE), Shenzhen 518060, China;
3. Shenzhen Key Laboratory of Green, Efficient and Intelligent Construction of Underground Metro Station, Shenzhen 518060, China;
4. Foshan Jianying Development Co., Ltd., Foshan 528313, China)

Abstract: The utilization of muck soil has become one of the key tasks in green shield construction. In order to further quantify the carbon emission reduction potential of the resource utilization of the muck soil from tunnel shield construction, the carbon emission estimation method for the whole process of subgrade filling with improved muck soil from tunnel shield construction was established. Based on the actual engineering data of the Shunde Waterway Tunnel Project of the West Extension Line of Jihua Road, the difference in carbon emissions between the utilization of muck soil and conventional landfill treatment was analyzed. In addition, the sensitivity analysis of carbon emissions in the whole process of residue utilization was also carried out. The results showed that: carbon emissions from the utilization of muck soil mainly occur in the muck soil improvement and transportation stage, while those of the conventional landfill treatment mainly occur in the generation stage;

收稿日期:2023-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51938008)

第一作者:全昭熹(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向为地下工程数字化碳减排。2200471005@email.szu.edu.cn

*通信作者:韩文龙(1991-),男,博士,主要研究方向为隧道与地下工程、韧性城市。hanwl0417@126.com

the total discharge of muck soil from the Project is about 65029 m³, of which 53162 m³ can be used for muck soil improvement. If totally landfilled, the CO₂ emission during the whole life cycle is about 1.84×10⁶ kg CO₂eq, occupying 11058 m² of landfill site; the CBR of muck soil improved by 3% lime+3% desulfurized gypsum can reach 141.4, and the rebound modulus is 198.8 MPa. The CO₂ produced in the whole process is 8.89×10⁵ kg CO₂eq more than that produced by conventional treatment of muck soil; the CBR of muck soil improved by 3% carbide slag+6% fly ash can reach 89.06, and the rebound modulus is 158.9 MPa. The CO₂ produced in the whole process is 6.44×10⁵ kg CO₂eq less than that produced by conventional treatment of muck soil.

Keywords: shield tunnel; muck soil utilization; life cycle assessment; carbon emission reduction

0 引言

在全球温室气体排放量中建设领域占32%^[1]。目前全国在建的盾构隧道产生的渣土总量已突破2.25亿m³^[2],处理渣土过程中发生的碳排放不容小觑。我国尚未出台对隧道盾构渣土合理有效的管理方案与政策,最主要的处置方式为混合填埋^[3],会造成生态环境破坏、土地资源浪费^[4]和引发地质灾害等问题^[5],同时在运输和填埋过程中产生大量的碳排放^[6]。

盾构渣土资源化利用能够变废为宝、减少环境污染和节约土地资源,但我国的资源化利用率不足1%^[7]。姚清松等^[8]开展了基坑渣土制备渣土免烧砖的配比试验,发现在采用较优材料配比时,制得免烧砖软化系数>0.8,且7,28d抗压强度均满足MU10等级要求;Zhou等^[9]探究了隧道盾构砂土做壁后注浆再利用的可行性,并通过配合比的调整达到优化砂浆性能的目的;刘慧刚等^[10]研究了粉细砂地层产生的废弃砂土在盾构同步注浆材料中再利用的适用性,发现废弃砂土可直接代替原配比中的砂进行砂浆制备;Xu等^[11]研究了盾构黏质粉土做壁后注浆中砂的替代物,通过调整配合比改善其性能以满足注浆要求,提出了黏性粉土再利用方案;朱瑜星等^[12]研究了地铁盾构渣土改良为流动化土用作城市管廊回填材料,并对流动化土性质进行了评价;张亚洲等^[13]进行了渣土泥水分离后的再利用研究,将废弃黏土配置泥浆、废弃砾砂用作混凝土骨料、废弃粉细砂做壁后注浆材料,能够实现全线路废弃土再利用;赵丽君等^[14]研究了采用石灰、水泥及石灰联合水泥材料将工程渣土改良后做路基填筑,表明掺入一定量的改良剂均会使渣土的CBR值、无侧限抗压强度增加。

目前关于渣土资源化利用的研究主要集中于工艺技术水平提升上,鲜有学者聚焦于渣土资源化利用对碳减排的正负效应影响。基于此,本研究将渣土资源化利用与碳减排相结合,构建了隧道盾构渣土经

改良后进行路基填筑的全过程碳排放估算方法,并以佛山季华路西延线过江隧道工程为例,分析了减碳效果及对环境的影响,并对全过程碳排放进行敏感性分析。研究结果对量化渣土资源化处理减碳效果及盾构渣土资源化技术推广有重要现实意义。

1 盾构隧道渣土碳排放评价与计量方法

1.1 全生命周期碳排放评价方法

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是将产品从原材料开采到最终处理处置全过程所消耗的资源以及产生的污染物排放对环境造成的潜在影响进行量化的系统性分析方法^[15]。LCA研究主要分为4个阶段:目标和范围的确定、数据采集与清单分析、选取环境影响指标和定量分析、结果解释与讨论^[16]。本研究采用简易的LCA评价方法,探究碳排放量对环境造成的潜在影响。

碳排放因子是指每一种能源燃烧或使用过程中单位能源所产生的碳排放量^[17]。根据IPCC的假定,可以认为每一种能源的碳排放系数是不变的,所以只要知道排放因子,再使用公式“碳排放量=活动数据×排放因子”即可直接计算得出碳排放量。

本研究选取二氧化碳排放当量(CO₂eq)作为环境影响评价指标,以隧道盾构渣土为研究对象,构建隧道盾构渣土从产生到处理处置全过程的生命周期碳排放评价方法,并对隧道盾构渣土绿色处理后用于路基填筑的减碳效果进行定量分析。通过比较常规路基填筑全过程产生的碳排量与隧道盾构渣土绿色处理后用于路基填筑产生的碳排量来进行渣土利用减碳效果的分析。

1.2 碳排放计量系统边界

常规路基填筑的系统边界是从路基填筑用土的挖采到最终的路基压实整个过程的碳排放,包括借土土源挖采、土方运输、路基填土、路基压实4个阶段,如图1所示。

隧道盾构渣土处理处置的系统边界是从渣土产

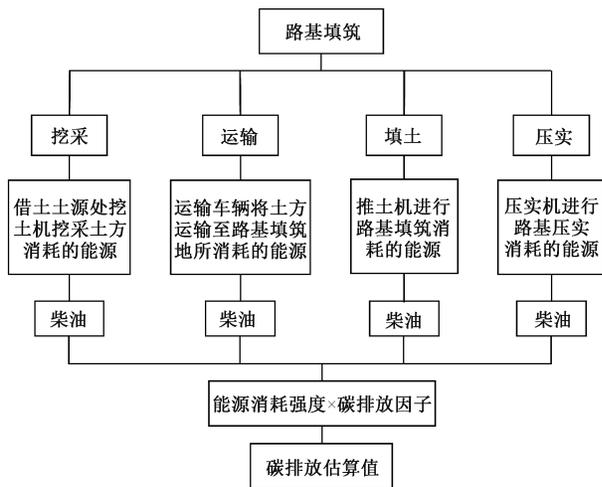


图 1 路基填筑碳排放计量的系统边界

Figure 1 System boundary of carbon emission calculation of subgrade filling

生至最终填埋整个过程的碳排放,包括渣土产生、现场管理、运输、填埋 4 个阶段,如图 2 所示。

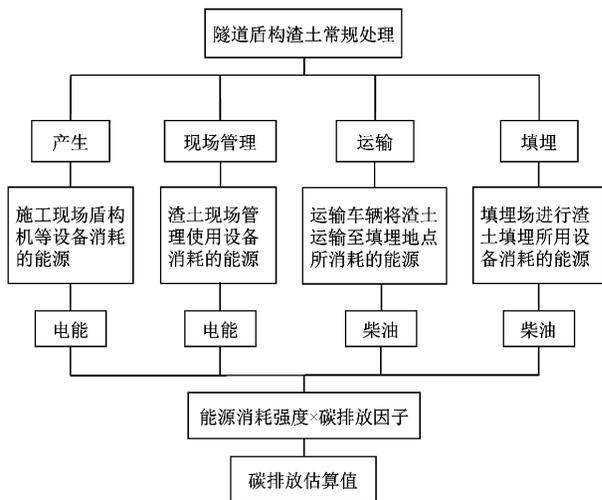


图 2 隧道盾构渣土常规处理碳排放计量的系统边界

Figure 2 System boundary of carbon emission calculation for conventional treatment of tunnel shield muck soil

渣土改良用于路基填筑的系统边界可在常规路基填筑与隧道盾构渣土处理处置的基础上,考虑增加将隧道盾构渣土从施工场地运输至路基填筑处的碳排放、固化剂原材料生产及运输过程的碳排放、改良渣土制备过程产生的碳排放,以及相应减少路基填筑过程中借土土源挖采、土方运输阶段的碳排放,渣土处理过程中渣土运输、渣土填埋阶段的碳排放。

2 盾构渣土处理与利用碳排放计算模型

2.1 常规路基填筑碳排量计算

常规路基填筑的碳排放计算可分为借土土源挖

采、土方运输、路基填土、路基压实 4 个阶段。

1) 借土土源挖采阶段。

借土土源挖采过程中机械能耗产生的 CO₂ 排放主要为挖土机的油耗。在借土土源挖采前,需计算所需挖采的土体体积,即天然状态下的土体体积,通过土体的最后可松性系数以及路基填筑所需的回填压实后土体体积,可得到天然状态下的土体体积。借土土源挖采过程中由于机械能耗产生的碳排放计算方法如式(1)所示。

$$CeD = \frac{V_{earth}}{K'_s} \times \frac{E_{grab}}{W_{grab}} \times E_d \quad (1)$$

式中:CeD 为借土土源挖采过程中 CO₂ 的总排放量,kg CO₂eq;V_{earth} 为路基填筑所需的回填压实后土体体积,m³;K'_s 为土体的最后可松性系数;E_{grab} 为挖土机的单位能耗,kg/h;W_{grab} 为挖土机的单位工作效率,m³/h;E_d 为每消耗单位柴油产生的 CO₂ 排放因子,kg CO₂eq/kg,涉及的 CO₂ 排放因子见表 1。

表 1 CO₂ 碳排放因子汇总

Table 1 Summary of CO₂ emission factors

类型	CO ₂ 排放因子
汽油/(kg CO ₂ eq/kg)	2.925
柴油/(kg CO ₂ eq/kg)	3.096
煤油/(kg CO ₂ eq/kg)	3.033
电力/[kg CO ₂ eq/(kW·h)]	0.804
重型柴油货车运输(30 t)/[kg CO ₂ eq/(t·km)]	0.078

注:汽油、柴油、煤油以及重型柴油货车运输(30 t)的数据来源于 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》,电力数据来源于《中国区域电网基准线排放因子》。

2) 土方运输阶段。

土方运输阶段主要是运送车辆柴油消耗产生的 CO₂ 排放。在运输过程中,土体状态为开挖后的松散状态,可根据土体的最初可松性系数以及天然状态下的土体体积,得到土体开挖后的松散体积。由于土方运输为单程运输,即从借土土源处运输至路基填筑处,故在运输过程中,需要考虑运输车辆从路基填筑处空载返回借土土源处对碳排放的影响,所以实际运输距离 D_{trans} = 单程运输距离 × F_y。根据已有研究,空载时的环境负荷是满载时的 0.67 倍,即空载返回系数 F_y = 1.67^[18]。因此,土方运输过程中由于运输车辆油耗产生的碳排放计算方法如式(2)所示。

$$CeT_e = \frac{K_s}{K'_s} \times V_{earth} \times \rho_e \times D_{e-trans} \times F_y \times E_{trans} \quad (2)$$

式中:CeT_e 为土方运输阶段中 CO₂ 的总排放量,kg CO₂eq;K_s 为土体的最初可松性系数;ρ_e 为土体比重,

t/m^3 ; $D_{e-trans}$ 为土体从借土土源处至路基填筑处的运输距离, km; E_{trans} 为运输车辆单位里程运输 1 t 土体的 CO_2 排放因子, $kg CO_2 eq/(km \cdot t)$ 。

3) 路基填土阶段。

路基填土阶段的 CO_2 排放主要来源于机械能耗, 本研究仅涉及推土机的油耗。填埋土体体积为松散状态下的土体体积, 填埋过程中产生的碳排放计算方法如式(3)所示。

$$CeE = \frac{K_s}{K'_s} \times V_{earth} \times \frac{E_{landfill}}{W_{landfill}} \times E_d \quad (3)$$

式中: CeE 为路基填土过程中 CO_2 的总排放量, $kg CO_2 eq$; $E_{landfill}$ 为推土机的单位能耗, kg/h ; $W_{landfill}$ 为推土机的单位工作效率, m^3/h 。

4) 路基压实阶段。

路基压实阶段的 CO_2 排放主要来源于压实机械能耗, 计算方法如式(4)所示。

$$CeC = \frac{S}{W_{compact}} \times \frac{h_0}{h} \times n \times E_{compact} \times E_d \quad (4)$$

式中: CeC 为路基压实过程中 CO_2 的总排放量, $kg CO_2 eq$; S 为路基填筑占地面积, m^2 ; $W_{compact}$ 为压实机工作效率, m^2/h ; h_0 为路基填筑总厚度, m ; h 为路基填筑每层铺土压实后的厚度, m ; n 为每层压实遍数; $E_{compact}$ 为压实机的单位能耗, kg/h 。

2.2 隧道盾构渣土常规处理碳排量计算

隧道盾构渣土常规处理的碳排放计算可分为渣土产生、现场管理、运输、填埋 4 个阶段。

1) 产生阶段。

隧道盾构过程中由于盾构机械电耗产生的 CO_2 排放计算方法如式(5)所示。

$$CeS = \sum_{i=1}^s W_{shield} \times t_i \times E_e \quad (5)$$

式中: CeS 为隧道盾构过程中 CO_2 的总排放量, $kg CO_2 eq$; s 为盾构的区段总数; W_{shield} 为盾构机的功率, kW ; t_i 为盾构区段 i 内盾构机所需的工作时长, h ; E_e 为国家电网数据库中电力的排放因子, $kg CO_2 eq/(kW \cdot h)$ 。

2) 现场管理阶段。

现场管理阶段主要对隧道盾构渣土进行渣浆分离及脱水预处理, CO_2 排放来源主要来源于机械设备的电耗, 计算方法如式(6)所示。

$$CeA = K_s \times V_{mud} \times \rho_m \times E_{administration} \times E_e \quad (6)$$

式中: CeA 为现场管理阶段中 CO_2 的总排放量,

$kg CO_2 eq$; V_{mud} 为隧道盾构过程中产生的渣土总量, m^3 ; ρ_m 为渣土比重, t/m^3 ; $E_{administration}$ 为机械设备处理 1 t 渣土的耗电量, $kW \cdot h$ 。

3) 运输阶段。

隧道盾构渣土的运输阶段分为短距离运输和长距离运输。短距离运输是指在施工场地内将盾构得到的渣土从隧道中通过机械设备运输至地上的临时受纳场的过程, 其主要能耗为机械设备的电力消耗; 长距离运输是指将隧道盾构渣土从施工场地运输至最终处置点的过程, 其主要能耗为运送车辆的柴油消耗。因此, 将隧道盾构渣土运输阶段的 CO_2 排放分为短距离运输和长距离运输 2 个部分进行计算。

隧道盾构渣土短距离运输过程中 CO_2 排放的计算方法如式(7)所示。

$$CeT_s = W_{s-trans} \times t_{s-trans} \times E_e \quad (7)$$

式中: CeT_s 为隧道盾构渣土短距离运输阶段中 CO_2 的总排放量, $kg CO_2 eq$; $W_{s-trans}$ 为施工场地内机械运输渣土的功率, kW ; $t_{s-trans}$ 为机械的工作时长, h 。

隧道盾构渣土长距离运输过程中由于运输车辆油耗产生的 CO_2 排放计算方法如式(8)所示。

$$CeT_l = K_s \times V_{mud} \times \rho_m \times D_{l-trans} \times F_y \times E_{trans} \quad (8)$$

式中: CeT_l 为隧道盾构渣土长距离运输阶段中 CO_2 的总排放量, $kg CO_2 eq$; $D_{l-trans}$ 为隧道盾构渣土从施工现场至最终处置点的运输距离, km 。

基于式(7)、(8)可得出隧道盾构渣土运输阶段总的 CO_2 排放, 即短距离运输和长距离运输过程中机械和车辆能耗产生的 CO_2 排放之和, 计算方法如式(9)所示。

$$CeT_m = CeT_s + CeT_l \quad (9)$$

4) 填埋阶段。

隧道盾构渣土在填埋场填埋过程中的 CO_2 排放主要来源于推土机的油耗, 计算方法如式(10)所示。

$$CeF = K_s \times \frac{V_{mud}}{W_{landfill}} \times E_{landfill} \times E_d \quad (10)$$

式中: CeF 为隧道盾构渣土填埋过程中 CO_2 的总排放量, $kg CO_2 eq$ 。

2.3 渣土改良用于路基填筑碳排量计算

通过对隧道盾构渣土进行物理化学特性研究, 对不同来源的渣土进行基本性质检测, 结合文献研究固化剂组成对渣土改良的影响, 选取合适的固化剂原材料及配合比, 进行改良渣土配合比设计, 最终获得满足路基填筑要求的改良渣土, 实现工程废弃渣土减量

化、资源化的发展。

改良渣土用于路基填筑不仅可以实现工程废弃渣土可持续发展,而且对碳减排有着十分积极的作用。在路基填筑过程中,可以减少借土土源挖采、土方运输阶段的碳排放;在渣土处理过程中,可以减少渣土运输、渣土填埋阶段的碳排放。改良渣土用于路基填筑相应地也增加了将隧道盾构渣土从施工场地运输至路基填埋处的碳排放、固化剂原材料生产及运输过程的碳排放以及改良渣土制备过程产生的碳排放。

1) 渣土改良运输阶段。

渣土改良运输阶段是指将隧道盾构渣土从隧道盾构的施工场地运输至路基填筑处的过程,CO₂ 排放计算方法如式(11)所示。

$$CeT_r = K_s \times V_{r-mud} \times \rho_m \times D_{r-trans} \times F_y \times E_{trans} \quad (11)$$

式中:CeT_r 为渣土改良运输阶段 CO₂ 的总排放量,kg CO₂eq;V_{r-mud} 为进行改良的渣土总量,m³;D_{r-trans} 为隧道盾构渣土从施工现场至路基填筑处的运输距离,km。

2) 固化剂原材料生产及运输阶段。

固化剂原材料生产及运输阶段的 CO₂ 排放是指各类固化剂从原材料开采、加工到运输至渣土改良生产处,整个过程中因资源、能源消耗和污染物排放所产生的直接或间接 CO₂ 排放,计算方法如式(12)所示。

$$CeM = \sum_{i=1}^a U_i \times (1 + \varphi_i) \times E_i + \sum_{i=1}^a U_i \times D_{i-trans} \times F_y \times E_{c-trans} \quad (12)$$

式中:CeM 为固化剂原材料生产阶段 CO₂ 的总排放

量,kg CO₂eq;a 为固化剂类型;U_i 为第 i 种固化剂消耗量,kg;φ_i 为第 i 种固化剂损耗率;E_i 为第 i 种固化剂生产阶段的 CO₂ 排放因子,kg CO₂eq/单位固化剂数量;D_{i-trans} 为第 i 种固化剂从生产厂运输至制备改良渣土处的运输距离,km;E_{c-trans} 为运输车辆单位里程运输 1 t 固化剂的 CO₂ 排放因子,kg CO₂eq/(km·t)。

3) 改良渣土制备阶段。

改良渣土制备阶段的 CO₂ 排放主要是制备过程中机械能源消耗和污染物排放所产生的 CO₂ 排放,计算方法如式(13)所示。

$$CeP = \frac{K_s \times V_{r-mud} \times R_r}{W_{preparation}} \times E_{preparation} \times E_e \quad (13)$$

式中:CeP 为改良渣土制备阶段 CO₂ 的总排放量,kg CO₂eq;R_r 为改良渣土生成率;W_{preparation} 为制备机械单位工作效率,m³/h;E_{preparation} 为制备机械的单位能耗,kW。

故渣土改良处理过程的 CO₂ 排放计算方法如式(14)所示。

$$CeI = CeT_r + CeM + CeP - (CeD + CeT_e + CeT_l + CeF) \quad (14)$$

式中:CeI 为渣土改良处理过程 CO₂ 的总排放量,kg CO₂eq。若 CeI>0,则渣土改良处理与常规处理相比,碳排放量增加;若 CeI<0,则渣土改良处理与常规处理相比,碳排放量减少。

3 实例分析

3.1 工程概况

顺德水道过江隧道工程是佛山市季华路西延线项目的控制性工程,隧道西接樵金路,东接季华路,全长 2655 m,其中盾构段 1472 m,隧道整体线路如图 3 所示。



图 3 季华路西延线顺德水道隧道线路

Figure 3 Route map of Shunde Waterway Tunnel of West Extension Line of Jihua Road

本工程穿越顺德水道,故采用泥水盾构法施工,隧道外径 15 m,为佛山地区首座超大直径盾构隧道。隧道段主要穿越地层为 Q4 系与 E2 系土层,隧道洞

身主要位于粉细砂、圆砾、卵石地层等,隧道沿线地层分布如图 4 所示。

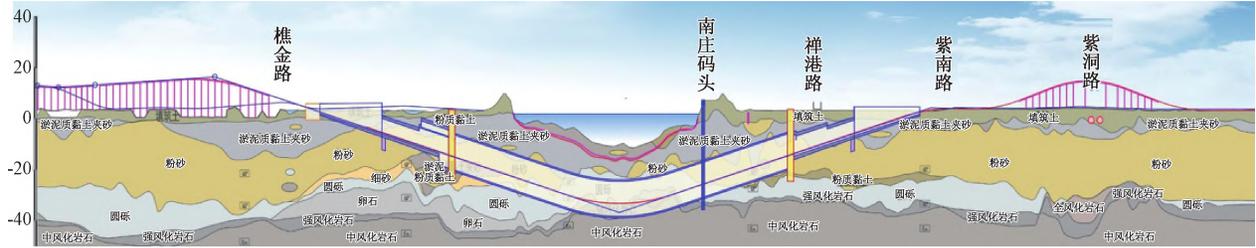


图 4 隧道沿线地层分布

Figure 4 Stratigraphic distribution map along the tunnel

3.2 隧道盾构渣土改良方法

该工程从淤泥质黏土夹砂地层始发,依次穿过粉砂、细砂、圆砾、卵石地层,再经过对岸粉砂地层后到达淤泥质黏土夹砂地层。由于淤泥质黏土夹砂地层含水量较大,无法击实,而对其进行脱水改良处理所需的经济成本过高,故本工程仅考虑通过固化剂将粉砂、细砂、圆砾及卵石地层进行渣土改良处理后,用于路基填筑。

通过对废弃渣土进行物理化学特性试验,进而对脱硫石膏、碱渣、水泥、石灰等固化剂改良材料进行配比初选,最终选择 2 组有代表性的固化改良剂进行对比。第 1 组:3%石灰+3%脱硫石膏;第 2 组:3%电石渣+6%粉煤灰。在击实试验、CBR 试验、回弹模量试验等路用性能评价中,2 组均满足路用性能要求,其中第 1 组的各项指标明显高于第 2 组,但第 1 组固化剂材料需工厂生产得到,而第 2 组固化剂材料均为工业废弃物,使用第 2 组作为改良剂更符合可持续发展

的需求。因此使用第 1 组固化剂进行渣土改良将会得到强度更高的路基填土,使用第 2 组将更加有利于节约能源、保护生态环境以及减少碳排放。在进行渣土改良时,控制改良渣土强度为 0.8~1.5 MPa,改良成本为 80~100 元/m³。

3.3 隧道盾构渣土改良利用碳排放量计算结果

基于本研究构建的隧道盾构渣土碳排放估算方法,以顺德水道过江隧道工程为例,估算其可用作渣土改良的粉砂、细砂等地层的隧道盾构渣土常规处理的全生命周期碳排放量,以及相同体积的土体进行常规路基填筑的全生命周期碳排放量,进而得出对隧道盾构渣土做改良处理后进行路基填筑的全生命周期碳排放量。隧道盾构渣土的总排渣量为 65029 m³,其中可用作渣土改良的粉砂、细砂、圆砾及卵石地层产生的排渣量为 53162 m³,占比 82%。故渣土改良处理用于路基填筑的计算仅考虑可用来改良作路基填筑的渣土占地量。各阶段碳排放数据见表 2。

表 2 隧道盾构渣土改良用于路基填筑各阶段碳排放数据

Table 2 Carbon emission data for various stages of tunnel shield soil improvement for subgrade filling

过程	阶段	总碳排放量/ (10 ⁴ kg CO ₂ eq)		每立方米渣土碳排放量/(kg CO ₂ eq/m ³)		阶段属性
		第 1 组	第 2 组	渣土运输单位里程的碳排放量/[kg CO ₂ eq/(m ³ ·km)]		
				第 1 组	第 2 组	
常规路基填筑	借土土源挖采阶段	3.03	3.03	0.57	0.57	-
	土方运输阶段	58.4	58.4	8.86	8.86	-
	路基填土阶段	5.68	5.68	0.86	0.86	-
	路基压实阶段	11.8	11.8	2.13	2.13	-
隧道盾构渣土常规处理	产生阶段	95.9	95.9	18.04	18.04	-
	现场管理阶段	13.5	13.5	2.05	2.05	-
	运输阶段(短距离)	8.98	8.98	0.04	0.04	-
	运输阶段(长距离)	58.4	58.4	0.23	0.23	-
改良渣土作路基填筑	填埋阶段	6.80	6.80	1.03	1.03	-
	渣土改良运输阶段	58.4	58.4	8.86	8.86	+
	固化剂原材料生产及运输阶段	156	2.57	29.32	0.48	+
	改良渣土制备阶段	1.23	1.23	0.19	0.19	+

注:“+”为仅改良处理涉及阶段;“-”为仅常规处理涉及阶段;“-”表示改良处理与常规处理均涉及阶段。

由表 2 可知:第 1 组改良剂生产阶段产生的碳排放量远高于第 2 组,主要原因是石灰和脱硫石膏在生产过程中会产生大量碳排放,但电石渣和粉煤灰作为工业废弃物,并不存在生产阶段,只需考虑运输过程中产生的碳排放。通过表中数据最终得到 2 组改良剂作用下的碳排放情况:使用 3%石灰+3%脱硫石膏进行路基填筑产生的 CO₂ 比渣土常规处理产生的 CO₂ 增加 8.89×10⁵ kg CO₂eq;使用 3%电石渣+6%粉煤灰减少 6.44×10⁵ kg CO₂eq。

3.4 隧道盾构渣土改良利用综合效果分析

1) 隧道盾构渣土填埋占地量和路基填筑占地量。

根据本研究构建的隧道盾构渣土填埋占地量估算方法以及该过江隧道渣土产生量,考虑最后可松性系数,可得当填埋深度为 5 m 时,渣土填埋占地面积为 11058 m²,当填埋深度为 10 m 时,渣土填埋占地面积为 5529 m²。渣土填埋造成了土地资源的严重浪费,阻碍了城市的发展进程。对渣土进行改良后用于路基填筑不仅可以缓解堆填场的压力,而且对节省路基填料也有正向影响。当路基填筑深度为 1 m 时,改良渣土的路基填筑面积为 55288 m²。

在渣土进行运输及处理阶段时,考虑最初可松性系数,可以得到运输及处理过程中渣土松散体积为 65921 m³,渣土改良处理的总成本为 527 万~659 万元。

2) 减碳效果分析。

使用 3%电石渣+6%粉煤灰进行渣土处理路基填筑产生的碳排放比常规处理产生的减少 6.44×10⁵ kg CO₂eq,即每立方米地铁盾构渣土减少的 CO₂ 排放量为 12.11 kg。

3) 环境影响分析。

在我国,随着城市轨道交通和地下工程的迅速发展,渣土数量每年以 16.2% 的速度增长^[19]。其中大部分的渣土最终以填埋的方式进行处理,这不仅占用了稀缺的城市土地资源,而且对周围水域、城市环境以及居民生活有着较大的风险^[20]。对渣土进行改良后用于路基填筑可以很好地实现渣土的资源化利用,减少因堆填导致的环境污染问题。

3.5 参数敏感性分析

对渣土改良用于路基填筑的碳排放结果进行敏感性分析是研究当不确定因素变化时,各个不确定性源对渣土利用全过程碳排放的影响程度,有利于在全生命周期对渣土利用的减排进行把控。

敏感性分析计算方法如式(15)所示。

$$S = \frac{\Delta A/A}{\Delta F/F} \quad (15)$$

式中: $\Delta F/F$ 为不确定性因素 F 的变化率,%; $\Delta A/A$ 为不确定性因素 F 发生 ΔF 变化时,评价指标 A 的相应变化率,%; S 为敏感度系数,表征渣土利用碳排放在不同评价指标 A 下随着不确定性因素 F 的变化程度。 $S>0$,表示评价指标与不确定性因素同方向变化; $S<0$,表示评价指标与不确定性因素反方向变化。 $|S|$ 越大,表明评价指标 A 对于不确定性因素 F 越敏感;反之,则不敏感。

分析各阶段的参数影响特性,整理出对改良渣土用于路基填筑的碳排放有影响的评价指标,对各影响因素分别上升或下降 10%、20% (变化率为 0 时对应该阶段原碳排放量 kg CO₂eq) 的 2 组不同改良剂情况分别讨论,得到的敏感性分析结果如表 3、4 所示。

表 3 第 1 组改良剂情况下敏感度系数

Table 3 Sensitivity coefficients of the modifiers group 1

阶段	各阶段过程	影响因素	变化率/%					敏感性因素
			-20	-10	0	10	20	
常规路基填筑	借土土源挖采阶段	挖土机单位工作效率	881314	885516	888877	891627	893919	0.03
	借土土源挖采阶段	挖土机单位能耗	894927	891902	888877	885852	882827	-0.03
	土方运输阶段	借土处至最终填筑点距离	1005658	947267	888877	830486	772096	-0.66
隧道盾构渣土常规处理	运输阶段	施工现场至最终处置点距离	1005658	947267	888877	830486	772096	-0.66
	填埋阶段	推土机单位工作效率	871869	881318	888877	895061	900215	0.07
	填埋阶段	推土机单位能耗	902483	895680	888877	882074	875271	-0.08
渣土改良用于路基填筑	渣土改良运输阶段	施工现场运至填筑处距离	772096	830486	888877	947267	1005658	0.66
	固化剂原材料生产阶段	第 i 种固化剂损耗率	870768	879822	888877	897932	906986	0.10
	改良渣土制备阶段	改良渣土生成率	886503	887651	888877	890103	891446	0.01
	改良渣土制备阶段	制备机械单位工作效率	891942	890239	888877	887762	886834	-0.01
	改良渣土制备阶段	制备机械单位能耗	886425	887651	888877	890103	891329	0.01

表4 第2组改良剂条件下敏感度系数

Table 4 Sensitivity coefficients of the modifiers group 2

阶段	各阶段过程	影响因素	变化率/%					敏感性因素
			-20	-10	0	10	20	
常规路基填筑	借土土源挖采阶段	挖土机单位工作效率	-651789	-647588	-644227	-641477	-639185	-0.04
	借土土源挖采阶段	挖土机单位能耗	-638177	-641202	-644227	-647252	-650277	0.05
	土方运输阶段	借土处至最终填筑点距离	-527446	-585836	-644227	-702617	-761008	0.91
隧道盾构渣土常规处理	运输阶段	施工现场至最终处置点距离	-527446	-585836	-644227	-702617	-761008	0.91
	填埋阶段	推土机单位工作效率	-661234	-651786	-644227	-638042	-632888	-0.10
	填埋阶段	推土机单位能耗	-630621	-637424	-644227	-651030	-657833	0.11
渣土改良用于路基填筑	渣土改良运输阶段	施工现场运至填筑处距离	-761008	-702617	-644227	-585836	-527446	-0.91
	固化剂原材料运输阶段	废渣产生处运至填埋处距离	-649367	-646797	-644227	-641657	-639087	-0.04
	改良渣土制备阶段	改良渣土生成率	-646600	-645453	-644227	-643001	-641657	-0.02
	改良渣土制备阶段	制备机械单位工作效率	-641162	-642865	-644227	-645341	-646270	0.02
	改良渣土制备阶段	制备机械单位能耗	-646679	-645453	-644227	-643001	-641775	-0.02

由表3可知:评价指标为正数,故 $S < 0$ 表示影响因素对减少渣土利用碳排放有正向作用;由表4可知:评价指标为负数,故 $S > 0$ 表示影响因素对减少渣土利用碳排放有正向作用。2组改良剂条件下均是渣土运输距离对碳排放影响程度最大,其中常规路基填筑过程中借土处至最终填筑点距离和隧道盾构渣土常规处理过程中的施工现场至最终处置点距离对减少碳排放有正向效益,渣土改良用于路基填筑过程中从施工现场运送至填筑处的距离对减少碳排放有负向效益。

4 结论

本研究构建了隧道盾构渣土进行改良处理后用于路基填筑的全生命周期碳排放量计算方法,在此基础上,以顺德水道过江隧道工程为例,量化分析隧道盾构渣土改良处理后的减碳效果。

1)隧道盾构渣土的总排渣量为 65029 m^3 ,可用作渣土改良的粉砂、细砂、圆砾及卵石地层产生的排渣量为 53162 m^3 ,占总渣量的82%,全部进行填埋处理,全生命周期的 CO_2 排放量约为 $1.84 \times 10^6 \text{ kg CO}_2\text{eq}$;当填埋深度为5 m时,渣土将占用 11058 m^2 的填埋场地。

2)采用3%石灰+3%脱硫石膏和3%电石渣+6%粉煤灰的方案将改良渣土强度控制在 $0.8 \sim 1.5 \text{ MPa}$,成本为 $80 \sim 100 \text{ 元/m}^3$ 。

3)改良剂为3%石灰+3%脱硫石膏时,改良处理后用于路基填筑全过程产生的 CO_2 比渣土常规处理产生的 CO_2 增加了 $8.89 \times 10^5 \text{ kg CO}_2\text{eq}$;改良剂为3%电石渣+6%粉煤灰时,全过程产生的 CO_2 比渣土常规处理产生的 CO_2 减少了 $6.44 \times 10^5 \text{ kg CO}_2\text{eq}$ 。

4)2组改良剂条件下,渣土改良用于路基填筑全

过程碳排放影响最大的均是渣土的运输距离。其中,常规路基填筑过程和隧道盾构渣土常规处理过程的渣土运输距离对碳减排有正向效益,渣土改良用于路基填筑过程的渣土运输距离对碳减排有负向效益。

参考文献

- [1] 惠明珠,苏有文. 中国建筑业碳排放效率空间特征及其影响因素[J]. 环境工程,2018,36(12): 182-187.
- [2] 陈蕊,杨凯,肖为,等. 工程渣土的资源化处理处置分析[J]. 环境工程,2020,38(3): 22-26.
- [3] 陈坤阳,王家远,喻博,等. 地铁工程余泥渣土环境影响研究[J]. 环境工程,2022,40(2): 191-198.
- [4] DING Z K, ZHU M L, TAM V W Y, et al. A system dynamics-based environmental benefit assessment model of construction waste reduction management at the design and construction stages[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 676-692.
- [5] 高杨,卫童瑶,李滨,等. 深圳“12·20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析[J]. 水文地质工程地质,2019,46(1): 129-138, 147.
- [6] LI J R, LIANG J L, ZUO J, et al. Environmental impact assessment of mobile recycling of demolition waste in Shenzhen, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263:121371.
- [7] 郭卫社,王百泉,李沿宗,等. 盾构渣土无害化处理、资源化利用现状与展望[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(8): 1101-1112.
- [8] 姚清松,蔡坤坤,刘超,等. 粉质黏土地层基坑渣土免烧砖配比及力学性能研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(增刊1): 145-151.
- [9] ZHOU S H, LI X, JI C, et al. Back-fill grout experimental test for discharged soils reuse of the large-diameter size slurry shield tunnel[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 21(3): 725-733.
- [10] 刘慧刚,丁建文,吉锋,等. 南京江底盾构施工废弃砂土在同步注浆中再利用的适用性[J]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-10.

(下转第162页)

- [25] 朱磊, 张建清. 我国经济增长与区域碳排放的关系测度: 基于 *Tapio* 脱钩理论和 EKC 假说的实证分析[J]. 江汉论坛, 2017, 472(10): 12-16.
- [26] JIANG J, YE B, ZHOU N, et al. Decoupling analysis and Environmental Kuznets Curve modelling of provincial-level CO₂ emissions and economic growth in China: a case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 212: 1242-1255.
- [27] SONG Y, ZHANG M, ZHOU M. Study on the decoupling relationship between CO₂ emissions and economic development based on two-dimensional decoupling theory: a case between China and the United States[J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 230-236.
- [28] 李竞, 侯丽朋, 唐立娜. 基于环境库兹涅茨曲线的我国大气污染防治重点区域环境空气质量与经济增长关系研究[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8845-8859.
- [29] 何伟军, 孔阳, 沈菊琴. 长江经济带灰水足迹与经济增长的二维脱钩分析[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2022, 24(1): 68-74, 111.
- [30] 彭武元, 姚焯亭. 中国分行业终端能源消费 CO₂ 排放分解研究[J]. 生态经济, 2021, 37(8): 21-27.
- [31] 宋府霖, 韩传峰, 滕敏敏. 长三角地区能源消费碳排放驱动因素分析及优化策略[J]. 生态经济, 2022, 38(4): 21-28.
- [32] WANG Q, WANG S. Decoupling economic growth from carbon emissions growth in the United States: the role of research and development[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(234): 702-713.
- [33] LIU Z, GUAN D, WEI W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. Nature, 2015, 524(7565): 335-38.
- [34] 王家庭, 李艳旭, 马洪福, 等. 中国制造业劳动生产率增长动能转换: 资本驱动还是技术驱动[J]. 中国工业经济, 2019, (5): 99-117.
- [35] 张友国. 疫情对中国碳脱钩进程的潜在影响: 基于动态 CGE 模型的分析[J]. 中国软科学, 2021, 368(8): 19-29.
- [36] 曹广喜, 刘禹乔, 周洋, 等. 中国制造业发展与碳排放脱钩的空间计量研究: 四大经济区分析[J]. 科技管理研究, 2015, 35(21): 224-228.
- [37] JIN B, HAN Y. Influencing factors and decoupling analysis of carbon emissions in China's manufacturing industry [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(45): 64719-64738.
- [38] HANG Y, WANG Q, ZHOU D, et al. Factors influencing the progress in decoupling economic growth from carbon dioxide emissions in China's manufacturing industry [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 146: 77-88.
- [39] 宋晓聪, 杜帅, 沈鹏, 等. 中国制造业 CO₂ 排放与经济脱钩关系解析[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(7): 201-208.
- [40] 杜强, 张诗青, 张智慧. 建筑业碳排放与经济增长脱钩及影响因素研究: 以陕西省为例[J]. 环境工程, 2016, 34(4): 172-176.
- [41] 杜强, 冯新宇, 孙强. 市域建筑业碳排放与经济发展关系及影响因素研究: 以西安市为例[J]. 环境工程, 2017, 35(2): 174-179.

(上接第 98 页)

- [11] XU J, XIAO C, WU H N, et al. Reuse of excavated clayey silt in cement-fly ash-bentonite hybrid back-fill grouting during shield tunneling[J]. International journal of applied mechanics, 2020, 12(3). doi:10.3390/su12031017.
- [12] 朱瑜星, 卞怡, 闵凡路, 等. 地铁盾构渣土改良为流动化土进行应用试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊 1): 245-251.
- [13] 张亚洲, 夏鹏举, 魏代伟, 等. 南京纬三路过江通道泥水处理及全线路废弃土再利用技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1229-1233.
- [14] 赵丽君, 朱挺, 刘泽, 等. 绍兴市工程渣土路用性能改良研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(16): 6-8.
- [15] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 446-455.
- [16] 陈坤阳, 周鼎, 粟月欢, 等. 城市轨道交通生命周期碳排放强度与碳减排潜力研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(5): 1-7.
- [17] 罗平滢. 建筑施工碳排放因子研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [18] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影响分析研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [19] 黄桐, 寇世聪, 赵玉龙, 等. 日本余泥渣土管理经验与启示[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(5): 61-67.
- [20] 王月玲, 涂柯帆, 严婉婷, 等. 地铁渣土的资源化利用[J]. 化学工程与装备, 2022(5): 278-279.