

运用碎轮胎回填的挡土墙的生命周期评估研究

廖向阳

湖南省交通规划勘察设计院有限公司

摘要: 这项生命周期评估研究比较了两种建造挡土结构的方法的环境影响。一种是传统方法,涉及用沙子回填挡土墙;另一种是替代方法,涉及用碎轮胎回填挡土墙。该研究考虑了所用建筑材料的提取和生产、装载、运输和安装等因素,对每种施工方法的累积能源需求、温室气体排放和环境破坏进行了评估。结果表明,使用切碎的轮胎作为挡土墙回填可以显著减少七个影响类别,其中包括全球变暖潜能值、酸化潜能值、人类健康标准空中机动、水生富营养化潜能值、臭氧消耗潜能值和烟雾潜能值。在所有检查的影响类别中,替代方法比传统方法提供更大的环境效益。因此,该研究认为使用切碎的轮胎作为挡土结构的可持续替代品非常有效。

关键词: 挡土墙; 生命周期评估; 碎轮胎

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.10.057

据估计全球每年废弃约1350万吨轮胎。根据橡胶制造商协会的报告,2015年美国产生了2.428亿条废旧轮胎;欧洲每年废弃约320万吨轮胎;2013年,葡萄牙废弃了约84000吨轮胎;阿尔及利亚每年就废弃约25919吨轮胎。这些废弃轮胎大多被存储、填埋或非法倾倒。存储的废弃轮胎在垃圾填埋场占据了大量空间,并为蚊子和啮齿动物提供了滋生场所。此外轮胎起火对环境破坏极大,一旦着火很容易失控并演变成难以控制的危机,清理起来也十分昂贵。因此开发回收或再利用这些废弃轮胎的方法至关重要^[1]。

调查了废旧轮胎的回收利用及其在多种应用中对环境保护的贡献,主要关注点集中在使用部分使用过的轮胎橡胶颗粒来改性沥青以及作为人造草皮填充物。结果表明,废旧轮胎回收对能源需求、铁矿石消耗、全球变暖潜能值、酸化、富营养化、烟雾形成和呼吸效应方面具有更大的影响降低作用。

在土木工程应用中重复使用废旧轮胎也有助于保护环境,尤其是将其作为天然骨料(如沙子、砾石等)的替代品。2015年,美国各种土木工程使用了约274,920吨废旧轮胎,其中包括公路路堤填充、挡土墙回填料、化粪池排水材料和减振铁路线。此外,废旧轮胎还用于游乐场铺面、汽车零部件制造、与沥青路面混合以及农业和园艺应用、土方改良。

在岩土工程中,可持续性相关的应用重点关注使用回收的环保材料作为替代建筑材料。其中包括轮胎衍生

产品如碎轮胎、碎屑和轮胎包。轮胎包已广泛应用于软土地面道路的轻质路基替代品,并且美国和英国都已成功地建造了轮胎道路基础。在过去的二十年中,碎轮胎已被用于各种土木工程应用,包括路基和路堤填充、挡土墙和桥台回填,以及路基绝缘以限制霜冻渗透和侧向排水。切碎轮胎也已被应用于挡土墙或桥台,例如缅因州的梅里会议桥、宾夕法尼亚州的石灰石润桥、缅因大学的实验室测试以及加利福尼亚州的两种现场应用等^[2]。

使用切碎轮胎作为路堤中的轻质填充材料或用于挡土墙回填具有更耐用的优点。然而,完全使用轮胎碎片建造的填充物存在地下水污染的可能性,在华盛顿和科罗拉多州已经观察到这种情况。针对切碎轮胎样品,许多研究人员进行了各种实验室浸出测试以评估其可能对环境产生的潜在影响。实验室浸出测试表明,与美国环境保护署的毒性表征浸出程序和提取程序标准相比,切碎轮胎样品中的金属和有机成分含量远低,并且轮胎碎片几乎不可能成为对环境有害的材料^[3]。此外,对以轮胎碎片为填充材料的现场试验路堤进行的研究表明,轮胎碎片对环境和地下水质量的影响微不足道。然而,在恶劣条件下,由于轮胎碎片中的金属增强材料暴露在外,可能会发生金属浸出。

本研究旨在综合分析两种建造挡土结构的方法——传统的用沙子回填挡土墙和替代的用碎轮胎回填挡土墙的能耗、碳足迹和环境损害,并确定最可持续的方法。文献表明碎轮胎可成功用作挡土结构的替代建筑材料,需要遵循可持续性原则,比较和评估设计和施工方案的能源效率、温室气体排放和环境破坏^[4]。

道路桥梁及建筑业提供就业机会,占全球经济总绩效的7%,但同时也导致大量能源消耗、固体废物产生、全球温室气体排放、外部和内部污染以及重大环境破坏和资源枯竭。例如,2004年美国建筑业消耗了122吨水泥和1240吨建筑砂石,这些材料的使用与大量能源消耗和废物产生相关,可能是对环境产生负面影响的主要原因。为了克服当今资源枯竭日益关注的问题并解决环境问题,可以应用生命周期评估来提高建筑业的可持续性^[5]。

本研究旨在鼓励道路、建筑行业的可持续发展,通过计算涉及用沙子回填挡土墙的传统方法和涉及用碎轮胎回填挡土墙的替代方法的可持续性组成部分(例如能

源消耗、温室气体排放和环境损害)。本研究包括以下环境影响类别:

全球变暖潜能值(GWP)以千克二氧化碳等价物表示。二氧化碳和甲烷等温室气体会导致气候变化。

酸化电位(AP)以千克二氧化硫等价物表示。酸雨可以转化为排放到大气中的酸和化合物,会对生态系统造成区域破坏。

人类健康标准空中机动或“潜在毒性”(急性人体毒性:PM2.5),以千克PM2.5等价物表示。小粉尘颗粒会导致呼吸道疾病。

水中的富营养化潜力以千克氮当量表示,由氮和磷导致生态系统中养分积累,促进藻类生长,最终对生态系统造成伤害。

平流层臭氧消耗潜能值以千克氟氯化碳-11当量表示,与排放的氟氯碳化合物、氢氟碳化合物和哈龙有关,会导致平流层内保护臭氧层减少。

光化学臭氧产生潜能值或“烟雾潜能值”以千克O₃等价物表示,挥发性有机化合物与一氧化二氮反应形成烟雾,具有对人类健康和生态系统有害的影响。

一、挡土结构的表征

两个挡土墙的设计(岩土工程和结构设计)取自Cecich等人的一项研究,该挡土墙系统设计用于芝加哥地区,为拟议的道路提供足够的水平表面^[6]。需要注意的是,两道挡土墙满足了外部稳定性要求(倾覆和滑动),以碎轮胎为回填材料的挡土墙被认为比以沙子为回填材料的挡土墙更稳定(见表1、2)。

表1 Cecich等人用沙子和切碎轮胎作为回填材料的挡土墙的安全系数比较^[6]

施工方法	安全系数	
	抗滑动	抗倾覆
挡土墙回填沙子	4.15	2.10
用碎轮胎回填挡土墙	>20	>20

表2 Cecich等人用沙子与切碎轮胎作为回填材料的开挖和材料要求的比较^[6]

项目	沙	碎轮胎	减少百分比
开挖(m ³)	303	189	37.6
混凝土体积(m ³)	30.7	25	18.6
增强体积(cm ³)	373,055	128,812	65.4

该比较基于Egloffstein等人提出的平衡因素,包括累积能源需求、全球变暖潜能值(GWP)、酸化潜能值(AP)、人类健康标准空气污染物、水生富营养化潜能值、臭氧消耗潜能值和光化学烟雾潜能值等。CED是使用本研究使用的建筑材料数据库中混凝土和钢筋等原材料的能源数据计算的,单位为MJ/kg、MJ/m³等。建筑机械和运输车辆(以燃料形式)消耗的能源量以及使用

的建筑材料(混凝土和钢筋)的数量计算六个环境影响类别。

在这个研究中,对建筑材料的挖掘、运输和安装进行了LCA分析,并做出了以下几个假设:

- (1) 建筑工地离材料供应商比较近。
- (2) 挖掘出来的土方被认为送往垃圾填埋场。
- (3) 假设建筑材料(如混凝土和结构钢)是通过卡车运输至距离建筑工地30公里的地点。
- (4) 沙子仅被卡车运输(未进行挖掘),运输距离30公里;CED包括运输和安装所需的能源消耗。
- (5) 废旧轮胎被切碎成橡胶颗粒(10毫米大小),并作为建筑材料使用;

轮胎处理(CED)的过程包括预处理(切碎)、运输和安装所需的能源消耗。假设使用的轮胎切割机可以以每小时高于1.5吨的速度将汽车和卡车轮胎切碎成10毫米的颗粒。需要注意的是,切碎后的轮胎是均匀分级的材料,其级配相当于通常用作回填材料的砂质或砾石土方。在粉碎之后,假定卡车从切碎设施(离市政府固体废物垃圾填埋场太近)将碎轮胎运往距离10公里的施工现场。

做出这些假设是由于缺乏足够的数据来进行生命周期评估研究(例如,材料的运输距离,生产设备的能源使用,建筑机械和运输建筑材料的车辆)。此外选择对两个挡土结构的运输距离使用相同的值(假设替代结构将采取与传统结构相同的位置),因为距离不会改变基于结构钢筋混凝土、回填和挖掘数量减少的主要结论。使用不同的能源数据或长距离运输材料不会改变结果。

切碎轮胎的解决方案需要25m³混凝土和1.01吨钢筋。此外带有碎轮胎的挡土结构需要大约189m³要切碎、运输和安装的废旧轮胎。事实证明,所有这些都消耗了更少的能源,与传统解决方案相比,传统解决方案涉及30m米的生产、运输和安装,大约2.92吨钢筋和303m³沙子。详情见表3。在这个过程中,混凝土、钢筋和沙子的运输对传统方法的CED做出了很大贡献,而在替代方法中,除了混凝土和钢筋之外,废轮胎的破碎也是一个重要贡献者。提供了有关这两种方法的CED值的更多详细信息。替代解决方案的CED比传统施工方法的CED低约1.63倍。

假设废旧轮胎的能源消耗为每立方米5.4MJ,189m³废旧轮胎的总CED值为1020.6GJ。传统解决方案中GWP较高是由于建筑机械和运输建筑材料消耗更多的混凝土、钢筋和燃料,导致CED和CO₂排放量较高。从表4可以看出,传统方法和替代方法的CED分别为231.4GJ和141.9GJ。GWP中混凝土所占比重高是由于熟料生产过程

表3 传统挡土结构所有组成部分的累计能源需求 (CED)

挡土墙回填沙子	数据 [单位]	质量 [单位]	数据[单位]	CED [MJ]
总长度	30m			
平均高度	3.3			
生产标准混凝土 C20/25	25m ³	2.4t/m ³	1183.3MJ/t	70999.8
将混凝土从混凝土厂运输到施工现场	30km	60t	2.5MJ/tkm	4500
生产混凝土钢筋	1.0t		23,900MJ/t	24162.9
将结构钢运输到施工现场	30km	1.0t	2.5MJ/tkm	75.8
生产悬臂挡土墙 (挖掘机、轮式装载机、混凝土泵等)	25m ³		15MJ/m ³	375
反铲土挖土303m ³	189m ³		7.6MJ/m ³	1436.4
将挖掘出的土方运往垃圾填埋场	10km	394t	2.5MJ/tkm	9850
沙运607吨, 运输距离30公里	115t	77h	90kW/h	24948
推土机插入砂, 层厚 0.30 m	10km	115t	2.5MJ/tkm	2875
压路机压砂, 层厚 0.30 m	189m ³		8.9MJ/m ³	1697.2

中的煅烧过程增加了地质CO²的含量。钢铁主要使用两种方法制造, 碱性氧气炼钢和电弧炼钢。这两种生产方法都需要大量废钢投入。钢筋引起的CO²排放大部分来自燃料消耗以及初级钢供应链中的

和钢筋较少, 相比传统解决方案, 可以节省近18.69%的混凝土和65.47%的钢筋, 从而减少了污染排放物的产生。此外由于从废轮胎中获得的碎轮胎可以完全取代沙子, 使用碎轮胎也可以减少能源消耗和运输需求, 从而进一步降低环境影响。

表4 两种解决方案的影响类别指标

影响类别指标	单位	传统挡土结构	替代挡土结构
全球变暖潜能值	kg CO2 eq	5.93E+05	3.75E+05
酸化电位 (AP)	kg SO2 eq	7.73E+02	4.93E+02
HH 微粒	kg PM2.5 eq	1.01E+02	6.29E+01
富营养化潜力	kg N eq	6.02E+01	3.83E+01
臭氧消耗潜能值	kg FC-11 eq	9.23E-05	7.06E-05
潜在的雾霾	kg O3 eq	1.83E+04	1.17E+04
累计能源需求	MJ	231.48E+03	141.94E+03

替代解决方案对于减少AP的价值较低可能是由于使用混凝土数量相对较少, 而水泥生产会导致SO²排放。根据已发表的文献, 大多数SO²的排放来自燃料燃烧和窑炉原料加工。同样地, 替代解决方案对于减少HH颗粒物的价值较低可能是由于使用的原材料 (混凝土和钢筋) 数量较少, 以及能源消耗较低 (尤其是在运输过程中)。避免从采石场提取和运输原材料可以限制灰尘排放到空气或水中。此外柴油燃烧对人类呼吸系统造成的影响主要是由于它们对呼吸系统的影响, 会导致哮喘、支气管炎、急性肺病等疾病。关于富营养化潜力, 替代解决方案的价值较低, 可能是因为在结构生命周期内产生的固体废物量较少。

二、结论

与传统解决方案相比, 使用切碎轮胎作为挡土墙回填材料具有显著的环境优势, 该解决方案有助于减少CO²排放量。此外, 使用碎轮胎还可以降低酸化、富营养化、臭氧消耗、光化学烟雾和人类健康颗粒物对环境的影响。

切碎轮胎解决方案的优势主要源于其需要的混凝土

使用切碎轮胎作为挡土墙回填材料是一种环境友好的替代方案。切碎轮胎相比其他填充材料更加经济实惠, 可以降低施工成本。

参考文献

[1] 王丽艳, 吉文炜, 陶云翔, 唐跃, 王炳辉, 蔡晓光, 张雷. 格栅条带式加筋废旧轮胎胎面挡土墙抗震性能试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44 (04): 931-940+1000.

[2] 岳红亚, 毕玉峰, 徐润, 张常勇, 丁婷婷, 李怀峰, 刘晓威, 宋修广. 废旧轮胎在道路工程中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36 (16): 76-86.

[3] 王丽艳, 吉文炜, 陶云翔, 唐跃, 王炳辉, 刘义, 吴思麟. 直立式废旧轮胎胎面挡土墙 (无加筋/加筋) 抗震性能试验对比研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (02): 273-282+441-442.

[4] 姚宝宽, 王丽艳, 谢红梅, 巩文雪. 废旧轮胎挡土墙与传统挡土墙稳定性对比研究[J]. 地基处理, 2021, 3 (04): 283-289.

[5] 黄留新, 王丽艳, 余曜宏. 废旧轮胎挡土墙国内外应用与研究综述[J]. 科技创新与应用, 2020 (16): 31-33.

[6] 黄留新, 王丽艳, 巩文雪, 余曜宏, 周爱兆. 考虑轮胎尺寸影响的废旧轮胎挡土墙变形数值研究[J]. 地基处理, 2020, 2 (02): 164-169.

作者简介: 廖向阳, 女, 汉, 湖南宁乡, 高级工程师, 硕士研究生, 研究方向: 道路与桥梁隧道工程。