文章编号：1000-8608(2021)05-0522-09

公路工程湿软黄土路基施工能耗和碳排放评估

薛志佳[1]，李良辰[1]，晏长根*[1]，蒋　超[2]，王雅馨[2]，熊　琦[1]，罗　江[1]

（1.长安大学 公路学院，陕西 西安　710064；
2.甘肃路桥公路投资有限公司，甘肃 兰州　730030）

摘要：公路工程湿软黄土路基施工会消耗大量的能源，并释放大量的二氧化碳等温室气体，对环境造成一定影响.正确评估各公路工程湿软黄土路基施工方案所产生的能耗和碳排放，对节能减排具有重要意义.基于此，从原材料的获取到施工项目的完成，采用相应的能源和碳排放评估模型，结合国内外的清单数据及规范定额，评估安临公路工程中3种湿软黄土路基施工方法(水泥搅拌桩、预应力混凝土管桩、EPS轻质路堤)的能耗和碳排放.对比分析之后，进一步阐明3种湿软黄土路基施工方法的优缺点.

关键词：公路工程；清单数据；能耗；碳排放计算

中图分类号：U419.4　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.7511/dllgxb202105011

0　引　言

近年来，我国公路工程建设有了长足的发展.截至2020年底，全国公路总里程达到501.25×10^4 km，较上年增加16.60×10^4 km.公路工程建设推动了经济发展，便利了人们的生活.但是，公路工程建设过程中会造成能源的消耗，并产生二氧化碳等温室气体，对环境产生一定影响[1].2020年12月25日，国家生态环境部审议通过《碳排放权交易管理办法(试行)》[2]，促进绿色低碳发展，推动温室气体减排，规范全国碳排放权交易.由此可见，正确评估公路工程建设所产生的能耗和碳排放符合我国环境的可持续发展战略，对规范碳排放权具有重要意义.

国内外学者针对碳排放评估展开了相应的研究，IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)在《2006 IPCC国家温室气体清单指南》[3]中提供了较为完善的碳排放计算方法；沈镭等[4]对水泥生产过程碳排放因子测算与评估进行研究，提出了较为准确的水泥生产碳排放因子；Hammond等[5-6]提出了能耗与碳排放清单；Shillaber等[7-8]以路易斯安那州堤防建设为例，评估深层土体混合、预制垂直排水、桩支撑的钢筋混凝土T墙3种方法的能耗和碳排放；郭春等[9]通过研究隧道建设碳排放计算方法，给出碳排放计算的预测模型；李寿伟[10]分析了沥青路面施工能耗与碳排放的重要环节和影响因素，建立了沥青路面施工能耗与碳排放标准；O′Born等[11]通过能耗和碳排放评估模型，对挪威当地道路工程施工方案的碳排放进行了案例研究；Cooling等[12]采用深层土壤混合法对路堤进行加固并量化其能耗和碳排放；彭波等[13]针对我国多条在建公路开展碳排放检测，建立能耗和碳排放计算公式；Zhang等[14]基于道路交通碳排放的测量方法，总结了影响道路交通碳排放的主要因素，并进行减排研究；Jiang等[15]对西澳大利亚州的公路网使用生命周期评估方法，量化了公路工程使用、维护和修复阶段的碳排放.

目前关于碳排放的定量评估方法包括欧洲基础承包商联合会-深基础研究所的岩土碳计算器(EFFC-DFI)及简化能耗和碳排放评估模型(SEEAM)等[16].定量评估方法主要针对可持续

收稿日期：2021-03-22；　**修回日期：**2021-07-28.
基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目(41902280)；大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(LP1922).
作者简介：薛志佳(1990-)，男，博士，讲师，硕士生导师，E-mail：xuegeneral@126.com；晏长根*(1975-)，男，博士，教授，博士生导师，E-mail：yanchanggen@163.com.

性进行单一考虑，例如：生命周期成本、能源消耗和二氧化碳排放等. 虽然这些方法本身并不能提供有关项目可持续性的完整信息，但它们非常适合直接说明不同方案导致的特定影响（如二氧化碳排放）的增加或减少.

甘肃省安临公路湿软黄土路基拟采用水泥搅拌桩、预应力混凝土管桩以及EPS轻质路堤3种施工方案. 因此，有必要从能耗和碳排放角度针对以上路基施工方案展开评估分析. 考虑材料生产、运输机械、施工机械的能耗及碳排放[7]，量化初始能源、运营能源、循环能源和拆除能源4个类别的消耗量[17]. 本文采用简化能耗和碳排放评估模型（SEEAM），它具有模型简单、计算简便的优点[7-8]. 将着重分析能耗和碳排放等影响因素，量化评估安临公路水泥搅拌桩、预应力混凝土管桩、EPS轻质路堤3种路基施工方案产生的能耗及碳排放，并为安临公路湿软黄土路基施工方案选择提供相应建议.

1　能耗与碳排放计算方法

当前主要的材料生产方法来源于不可再生资源的开采、燃料燃烧和排放，会对环境造成不利影响. 因为所有路基施工过程都消耗能源，所以在短期内最大限度地减少能源使用和二氧化碳排放是减少不可再生资源消耗和推进可持续发展的有效方法. 因此，将能耗和碳排放作为主控参量进行计算[8]. 基于全过程的生命周期分析（LCA）确定所有环境影响比较复杂，因此通过简化的LCA来确定整个湿软黄土路基施工生命周期中能源消耗的影响. 通过将分析限定于特定的影响因素（能耗或碳排放）来简化分析，便于模型计算.

在进行能耗和碳排放计算时，首先，应确定能耗和碳排放计算边界条件；其次，调研国内外的清单数据、规范定额，确定能耗系数和碳排放因子，计算各分项消耗量；最后，将各部分叠加得到总的能耗和碳排放.

值得注意的是，与能耗和二氧化碳活动的全生命周期相比，使用碳排放因子来简化模型计算，使SEEAM分析增加了一定程度的不确定性. 这种不确定性主要是因为碳排放因子代表了材料生产、运输、现场作业等行业的平均能耗和二氧化碳排放. 因此，合理地选取碳排放因子对计算结果十分重要.

1.1　确定边界条件

现场施工和工程材料使用会产生相应的建筑垃圾，但是本文用于湿软黄土路基施工的水泥搅拌桩，在施工时将水泥、砂等材料拌合土用打桩机械钻进成桩，产生的废料可忽略不计. 因此，不考虑废料的产生与运输. 当建成公路满足技术性能要求时，短期内将不需要额外的维护或改善. 因此，仅考虑施工完成之前的能耗和碳排放.

不考虑施工过程中所采用的设备和车辆制造所产生的能耗和碳排放. 假设水泥搅拌桩处理湿软黄土路基施工所需的机械设备（打桩机、平地机、拌合机、压路机、重型卡车）的总质量为500 t，这些设备全部由钢材制成，则制造500 t设备会产生1 150.5 t二氧化碳，假设设备在生命周期内完成20个项目，则每个项目产生的碳排放为57.525 t，约占总碳排放的0.15%，因此，不考虑设备和车辆制造产生的能耗和碳排放.

根据Inui等[18]的研究，湿软黄土路基生命周期能源使用有以下几个阶段：原材料的提取、材料的加工制造、运输、现场作业. 这些阶段可以应用于黄土路基工程的简化LCA分析. Cole等[17]通过研究发现大多数路基和基础类型工程的生命周期都不包括运营和维护、拆除以及废物的处理，并证实了其可行性. 因此，湿软黄土路基的能耗和碳排放采用SEEAM评估是合理的. 考虑到湿软黄土路基运营和维护、拆除以及废物处理的能源消耗很少，在计算时不考虑这部分的能源消耗，意味着生命周期能源消耗主要归因于材料生产、运输以及现场作业.

综上所述，本文主要考虑材料生产及运输进场、现场作业的能耗和碳排放等. 其流程如图1所示.

1.2　能耗计算

Shillaber等[8]提出SEEAM分析包括路基工程施工的4个主要阶段：材料生产、运输到现场、现场作业、场外废物运输. 这4个阶段涉及3种类型的计算：材料生产、运输、现场运营（与燃料相关的能耗和碳排放），且这3种类型的计算相互独立，不考虑温度等外界环境因素的影响.

将每种材料消耗的数量乘以施工中涉及的n种材料的能耗系数，叠加得到输入材料的总能耗

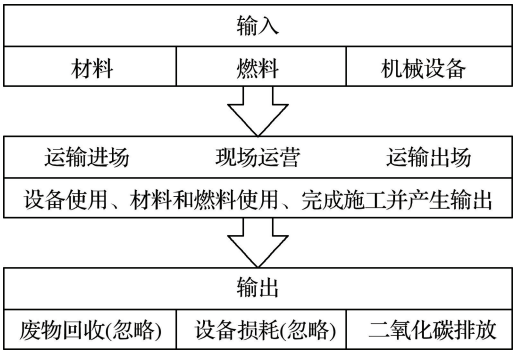

图 1 能耗及碳排放流程图

Fig. 1 Flow chart of energy consumption and carbon emissions

E_m[18-21]：

$$E_m=\sum_{i=1}^{n}(Q_i\times e_{m,i})$$

式中：Q 为每种材料消耗的数量；e_m 为单位材料生产中的能耗系数.

材料的进场运输，本例主要采用重型卡车运输，主要考虑卡车运输所消耗的燃料，叠加得到运输的总能耗 E_t：

$$E_t=\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{D_j}{F_j}\times N_j\times e_{t,j}\right)$$

式中：D 为材料从供应地到现场的运输距离；F 为燃油经济性，重型卡车的平均燃油经济性数据参考文献[22]；N 为运输单程数量；m 为重型卡车数量；e_t 为运输车辆的能耗系数.

现场作业主要包括水泥搅拌桩、预应力混凝土管桩的施工，本例主要考虑 PH-5D 型打桩机、柴油锤打桩机的燃油消耗 E_s：

$$E_s=\sum_{k=1}^{f}(P_k\times L_k\times B\times T_k\times e_{s,k})$$

式中：P 为发动机最大额定功率；L 为发动机负载系数；B 为有效燃油消耗率，柴油和汽油发动机一般推荐值分别为 0.275 L/(kW · h)和0.445 L/(kW · h)[23]；f 为施工机械数量；T 为机械在现场的总运行时间；e_s 为施工机械的能耗系数.

湿软黄土路基施工总的能耗 E 由材料生产、运输和现场作业 3 部分组成：

$$E=E_m+E_t+E_s$$

1.3 碳排放计算

本文评估水泥搅拌桩、预应力混凝土管桩、EPS 轻质路堤 3 种湿软黄土路基施工方案的能耗和碳排放，材料生产和运输、施工机械产生的碳排放计算公式如下[9].

材料生产的碳排放 C_m 根据 Inui 等[18]提出的计算方法，将每种材料的碳排放因子乘消耗量并相加：

$$C_m=\sum_{i=1}^{n}(c_{m,i}\times Q_i)$$

其中 $c_{m,i}$ 为材料 i 的碳排放因子.

运输产生的碳排放 C_t 根据 Soga 等[21]提出的计算方法，并考虑车辆型号、运输距离、运输行程数以及燃油经济性等指标：

$$C_t=\sum_{j=1}^{m}(c_{t,j}\times v_{t,j}\times t_{t,j})$$

式中：$c_{t,j}$ 为车辆 j 所用燃料的碳排放因子；$v_{t,j}$ 为车辆 j 单位时间的燃油消耗；$t_{t,j}$ 为车辆 j 的工作时间.

现场作业产生的碳排放 C_s 根据 Shillaber 等[23]提出的计算方法，考虑施工机械型号、输出功率、单位时间燃油消耗量以及运行时间等指标：

$$C_s=\sum_{k=1}^{f}(c_{s,k}\times v_{s,k}\times t_{s,k})$$

式中：$c_{s,k}$ 为机械 k 所用燃料的碳排放因子；$v_{s,k}$ 为机械 k 单位时间的燃油消耗；$t_{s,k}$ 为机械 k 的工作时间.

总碳排放为

$$C=C_m+C_t+C_s$$

2 公路建设碳排放计算案例

2.1 工程背景

安临公路途经湿软饱和黄土路段，该段路线整体工程地质条件较复杂，为封闭洼地，排水条件差，地下水位高，湿软饱和黄土分布广，厚度大、含水量高，多呈软塑，承载力低、压缩性高，力学性质差，具有路基填筑后面临工后过量沉降、横向高填路堤稳定性不足以及不均匀沉降等主要工程地质问题，需要对该段湿软黄土路基加固处理以满足设计要求.

2.2 实例计算

2.2.1 水泥搅拌桩施工 水泥搅拌桩具有适用范围广、加固深度大以及施工时间短等优点，是处理软弱地基非常有效的方法. 施工时，应先清除表土，然后进行水泥搅拌桩施工. 除土完成后进行场地的平整工作，然后确定水泥搅拌桩的准确位置；

调试钻机并对准桩位；制作浆液并严格控制水灰比；最后喷浆钻进并提升搅拌达到设计标高以上 30 cm，重复上述过程进行下根桩的施工. 水泥搅拌桩加固的地基，其承载力应达到 250 kPa 以上，桩施工完成后应进行桩身质量及承载力检验，检验合格后，在其上铺设 30 cm 厚砂砾垫层，砂砾垫层顶部再铺设 30 cm 厚 5%灰土垫层，然后再回填素土，用压路机压实平整. 水泥搅拌桩处理湿软黄土路基的横断面布置如图 2 所示.

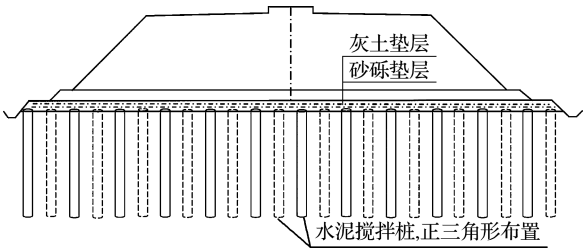

图 2　水泥搅拌桩布置

Fig. 2　Layout of cement mixing piles

(1)能耗计算

方案设计中拟采用 41 700 余根孔口半径 0.25 m 的水泥搅拌桩，根据现场湿软黄土厚度，采用设计长度 15 m 的桩进行加固，桩间距 1.5 m，采用正三角形布置，浆液的水灰比严格控制为 0.55. 铺设砂砾垫层和灰土垫层的材料来自较近的沙场及取土场，通过重型卡车运输到现场. 由于水泥搅拌桩施工最大限度地利用了原状土，通过打桩机械将水泥浆液与湿软饱和黄土拌和成桩而不需要外加砂石等材料，因此仅消耗 2 322 t 砂以及 1 863 t 土来铺设垫层.

打桩机、压路机等的燃油消耗，水泥、砂等材料进场运输的燃油消耗参考《公路工程机械台班费用定额》[24]. 燃油消耗量统计见表 1.

(2)碳排放计算

碳排放计算按照先前介绍的计算方法，通过排放系数法计算材料生产、运输和现场作业的碳排放，材料的消耗量、运输和施工机械的燃油消耗量来自于现场的数据以及《公路工程预算定额》[25]等，各种材料的碳排放因子来自《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》等数据库以及国内相关文献[26-27]. 其中水泥的碳排放因子参考文献[4]，砂的碳排放因子参考文献[28]，碳排放数据见表 2.

表 1　水泥搅拌桩施工燃油消耗量统计表

Tab. 1　Statistical table of fuel consumption for cement mixing pile construction

类别	台班燃油消耗定额/kg	台班数	燃油消耗量/t
PH-5D 打桩机	65.37	2 950	192.84
10 t 自卸汽车	55.32	285	15.77
15 t 自卸汽车	67.89	298	20.23
平地机(150 kW)	98.27	44	4.32
灰土拌和机	84.86	24	2.04
振动压路机(15 t)	73.60	112	8.24
洒水车(4 000 L)	36.00	156	5.62
洒水车(8 000 L)	47.20	146	6.89
合计			255.95

注：每台班以 8 h 计.

表 2　水泥搅拌桩施工碳排放数据

Tab. 2　Carbon emission data of cement mixing pile construction

类别	碳排放因子	输入量/t	二氧化碳排放量/t
水泥	0.702[4]	51 040.80	35 830.64
砂	0.004[28]	2 322.00	9.29
水	0.001[6]	28 072.44	28.07
土	0.023[6]	1 863.00	42.85
柴油	4.37[27]	255.90	1 118.28
合计			37 029.13

图 3 给出了水泥搅拌桩处理湿软黄土路基中各类材料与能源的碳排放占比，其中水泥占总碳排放的 96.76%，柴油占比为 3.02%. 砂土及水等材料对水泥搅拌桩施工碳排放的影响较小，仅占比 0.22%. 因此，在保证施工质量前提下，减少水

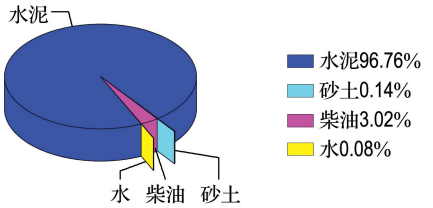

图 3　水泥搅拌桩施工各类材料与能源的碳排放占比

Fig. 3　Percentage of carbon emissions from various materials and energy in cement mixing pile construction

泥搅拌桩施工的水泥用量是减少碳排放的有效方法.

2.2.2 预应力混凝土管桩施工 预应力混凝土管桩在工厂制作完成,运输到现场堆放在沉桩位置附近;之后进行现场"三通一平",试桩并选择合理的施工方法和吊装机具;准备就绪后,安装打桩设备,预应力混凝土管桩提升就位后进行打桩作业.待打桩完成后,需检验桩的完整性和成桩质量.桩施工完成后,桩头高出地面的部分应小心保护,严禁施工机械碰撞或将桩头作为拉锚点,送桩遗留的孔洞应立即回填或做好覆盖.截桩头宜采用锯桩器截割,严禁采用大锤横向敲击截桩或强行扳位截桩.完成后设置土工格栅以增强路基稳定性,然后在上部铺设砂砾垫层,压实平整完成施工.预应力混凝土管桩处理湿软黄土路基的横断面布置如图4所示.

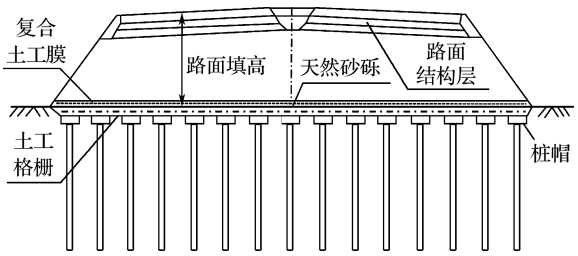

图4 预应力混凝土管桩布置

Fig. 4 Layout of prestressed concrete pipe piles

(1)能耗计算

安临公路湿软黄土路基地段如采用预应力混凝土管桩进行处理,需要27 100余根桩,采用先张法设计的预应力混凝土管桩外径为40 cm,壁厚为95 mm,按桩间距2 m梅花形布置,桩帽采用C30混凝土并与管桩连接,桩尖采用Q235钢做成锥形,桩制作完成后上部铺设50 cm天然砂砾,砂砾取自就近的砂厂,通过重型卡车运输到现场.使用土工格栅增强路基承载能力,减小沉降,上部再铺设一层高密度聚乙烯复合土工膜.将消耗151 026 t C30混凝土,6 772.32 t钢材,67.56 t高密度聚乙烯材料.预应力混凝土管桩在陕西西安的工厂生产,由重型卡车运输至甘肃安临公路现场,其他材料从就近的产地运输至现场.运输及机械设备的燃油消耗量统计见表3.

(2)碳排放计算

预应力混凝土管桩的碳排放同样考虑材料生产、运输和现场作业3个部分.其中钢材的碳排放因子参考文献[29],高密度聚乙烯的碳排放因子参考文献[30],其余材料的碳排放因子选取同前.碳排放数据见表4.

表3 预应力混凝土管桩施工燃油消耗量统计表

Tab. 3 Statistical table of fuel consumption for prestressed concrete pipe pile construction

类别	台班燃油消耗定额/kg	台班数	燃油消耗量/t
平地机	98.27	44	4.32
压路机(25 t)	123.84	165	20.43
装载机(ZL50)	137.60	750	103.20
吊装机	110.08	700	77.06
柴油锤打桩机(D80)	172.00	175	30.10
25 t自卸汽车	103.20	5 420	559.34
15 t自卸汽车	67.89	812	55.13
洒水车(4 000 L)	36.00	105	3.78
洒水车(8 000 L)	47.20	125	5.90
合计			859.26

表4 预应力混凝土管桩施工碳排放数据

Tab. 4 Carbon emission data of prestressed concrete pipe pile construction

类别	碳排放因子	输入量/t	二氧化碳排放量/t
水泥	0.702[4]	28 987.72	20 349.38
钢材	2.301[29]	6 772.32	15 583.11
高密度聚乙烯	2.85[30]	67.56	192.55
柴油	4.37[27]	859.26	3 754.97
细砂	0.004[28]	32 176.36	128.71
砂石	0.005[6]	81 841.34	409.21
水	0.001[6]	11 015.33	11.02
合计			40 428.95

图5给出了预应力混凝土管桩处理湿软黄土路基中各类材料与能源的碳排放占比,其中水泥占预应力混凝土管桩施工总碳排放的50.33%,钢材占比38.54%,柴油占比9.29%.砂土、高密度聚乙烯、水等材料的碳排放占比较小,对预应力混凝土管桩施工的影响微弱.预应力混凝土管桩从工厂运输到施工现场距离较远,需要安排较多的机械台班完成运输,对柴油的消耗量较大,在方案优化时,可以考虑就近的材料供应厂家.

2.2.3 EPS轻质路堤施工 安临公路湿软黄土

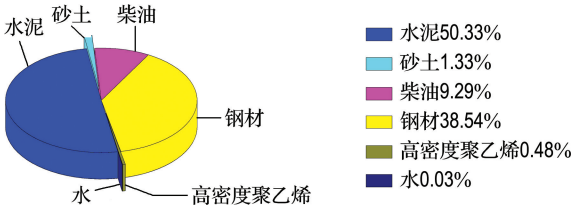

图 5　预应力混凝土管桩施工各类材料与能源的碳排放占比

Fig. 5　Percentage of carbon emissions from various materials and energy in prestressed concrete pipe pile construction

路基地基承载力很低，为大幅减轻路堤重量，减小路基的不均匀沉降，采用土工泡沫塑料(EPS)进行填筑也是一种有效的处理方法. 在施工时，首先进行场地的平整、压实，然后自下而上回填 100 cm厚素土、10 cm 厚水泥稳定碎石、10 cm 厚砂砾垫层；压实完成后进行 EPS 包边土施工且包边土的水平宽度不应小于 1 m；然后于每层包边土横向设置一道塑料盲材，纵向做通长塑料盲材，确保将横向排水通道连通，盲材外包一层无纺透水土工布，以防堵塞；接着现浇 10 cm 厚钢筋混凝土板，在其上铺设 EPS 轻质塑料泡沫板，块体之间采用双面爪形联结件联结牢固；铺筑完成后在最顶面现浇 15 cm 厚钢筋混凝土板并向填土部分延伸 2 m，调整块体铺设的平整度，使 EPS 块体形成一个良好的整体[31]. EPS 轻质路堤横断面如图 6 所示.

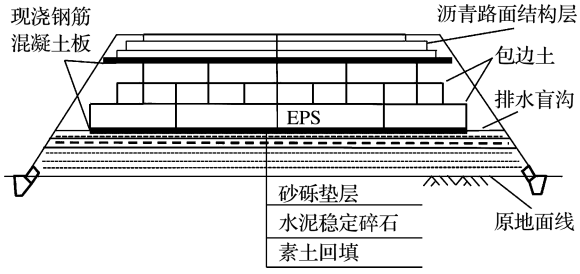

图 6　EPS 轻质路堤横断面图

Fig. 6　Cross-sectional view of EPS lightweight embankment

(1)能耗计算

安临公路湿软黄土路基长 1 815 m，如全部采用 EPS 轻质路堤处理，需要在原地面线往上依次采用 100 cm 厚素土，回填消耗素土10 219.2 t，其上铺设 10 cm 水泥稳定碎石 2 452.6 t，然后铺设 10 cm 厚砂砾垫层 1 645.3 t；浇筑 15 cm 厚 C30 钢筋混凝土板，其上采用 600 cm×120 cm×63 cm 规格的 EPS 块体填充，消耗 2 722 块土工泡沫塑料，在 EPS 泡沫板顶部再现浇一层 C30 钢筋混凝土板，共需 5 709 t 混凝土以及 10 648 t 钢材；此外，还需铺设 320 t 包边土等. 相关燃油的消耗量统计见表 5.

表 5　EPS 轻质路堤施工燃油消耗量统计表

Tab. 5　Statistical table of fuel consumption for EPS lightweight embankment construction

类别	台班燃油消耗定额/kg	台班数	燃油消耗量/t
平地机	98.27	44	4.32
压路机	125.00	575	71.88
装载机(ZL50)	137.60	1 150	158.24
25 t 自卸汽车	103.20	1 048	108.15
15 t 自卸汽车	67.89	1 900	128.99
洒水车(8 000 L)	47.20	75	3.54
合计			475.12

(2)碳排放计算

聚苯乙烯的碳排放因子参考文献[6]，其他材料碳排放因子的选取同前，碳排放数据见表 6.

表 6　EPS 轻质路堤施工碳排放数据

Tab. 6　Carbon emission data of EPS lightweight embankment construction

类别	碳排放因子	输入量/t	二氧化碳排放量/t
水泥	0.702[4]	1 115.04	782.76
钢材	2.301[29]	10 648.00	24 501.05
砂石	0.005[6]	3 352.90	16.76
细砂	0.004[28]	1 237.69	4.95
素土	0.023[6]	10 219.20	235.04
水	0.001[6]	423.70	0.42
柴油	4.37[27]	475.12	2 076.27
聚苯乙烯	2.71[6]	128.93	349.40
高密度聚乙烯	2.85[30]	271.63	774.15
合计			28 740.80

图 7 给出了 EPS 轻质路堤施工各类材料与能源的碳排放占比，其中钢材的碳排放占比最大，达到 85.25%，柴油占比 7.22%，水泥和高密度聚乙烯占比分别为 2.72%、2.69%，砂土、聚苯乙烯等材料的碳排放占比不大. EPS 轻质泡沫塑料板质量轻，但是体积较大，在运输时要考虑运输机械

的容积，因此需要较多的机械台班来运输 EPS 板，消耗的柴油量较大.

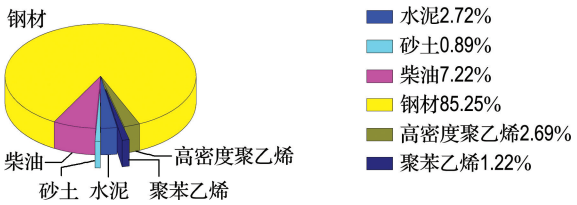

图 7 EPS 轻质路堤施工各类材料与能源的碳排放占比

Fig. 7 Percentage of carbon emissions from various materials and energy in EPS lightweight embankment construction

3 结 论

(1)水泥搅拌桩处理甘肃省安临公路湿软黄土路基的机械化程度高，对复杂的工程地质情况适用性好，并且能够最大限度地利用原状土的力学性能. 采用水泥搅拌桩处理该段湿软黄土路基共排放 37 029.13 t 二氧化碳，且水泥、砂等原材料可就近选取，极大地便利了施工.

(2)预应力混凝土管桩处理该段湿软黄土路基具有单桩承载力高的优点，但管桩从陕西西安工厂制作，完成后运输到现场，对运输及堆放要求极高，且消耗大量燃油. 预应力混凝土管桩方法共排放 40 428.95 t 二氧化碳，排放量在 3 种方法中最高.

(3)EPS 轻质路堤采用轻质土工泡沫塑料填充，施工简便快捷. 该方法共排放 28 740.80 t 二氧化碳，排放量在 3 种方法中最少，但 EPS 块材体积大，增加了运输往返次数. 此外，EPS 在长期荷载作用下的性能研究较为缺乏，需要丰富的理论研究和先进的施工技术来指导实践.

参考文献：

[1] 彭斯震，何霄嘉，张九天，等. 中国适应气候变化政策现状、问题和建议 [J]. 中国人口·资源与环境，2015，**25**(9)：1-7.
PENG Sizhen，HE Xiaojia，ZHANG Jiutian，*et al*. Current status，problems and recommendations on climate change adaptation policies in China [J]. **China Population Resources and Environment**，2015，**25**(9)：1-7. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国生态环境部. 碳排放权交易管理办法(试行) [Z/OL]. (2020-12-31). http：// www.gov. cn/zhengce/zhengceku/2021-01/06/content _5577360. htm.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Measures for the Administration of Carbon Emission Trading (for Trial Implementation) [Z/OL]. (2020-12-31). http://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/2021-01/06/content_5577360. htm. (in Chinese)

[3] 蔡博峰，朱松丽，于胜民，等.《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读 [J]. 环境工程，2019，**37**(8)：1-11.
CAI Bofeng，ZHU Songli，YU Shengmin，*et al*. The interpretation of 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory [J]. **Environmental Engineering**，2019，**37**(8)：1-11. (in Chinese)

[4] 沈 镭，赵建安，王礼茂，等. 中国水泥生产过程碳排放因子测算与评估 [J]. 科学通报，2016，**61**(26)：2926-2938.
SHEN Lei，ZHAO Jian′an，WANG Limao，*et al*. Calculation and evaluation on carbon emission factor of cement production in China [J]. **Chinese Science Bulletin**，2016，**61**(26)：2926-2938. (in Chinese)

[5] HAMMOND G，JONES C. **Embodied Carbon：The Inventory of Carbon and Energy (ICE)** [M]. Berkshire：Building Services Research and Information Association (BSRIA)，2011.

[6] HAMMOND G，JONES C. Inventory of carbon and energy (ICE) Version 2. 0 [DB]. Bath：Sustainable Energy Research Team (SERT)，University of Bath，2011.

[7] SHILLABER C M，MITCHELL J K，DOVE J E. Energy and carbon assessment of ground improvement works Ⅰ：Definitions and background [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**，2016，**142**(3)：04015083.

[8] SHILLABER C M，MITCHELL J K，DOVE J E. Energy and carbon assessment of ground improvement works Ⅱ：Working model and example [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**，2016，**142**(3)：04015084.

[9] 郭 春，徐建峰，张佳鹏. 隧道建设碳排放计算方法及预测模型 [J]. 隧道建设，2020，**40**(8)：1140-1146.
GUO Chun，XU Jianfeng，ZHANG Jiapeng.

Calculation methods and prediction models of carbon emission of tunnel construction [J]. **Tunnel Construction**, 2020, **40**(8): 1140-1146. (in Chinese)

[10] 李寿伟. 沥青路面施工耗能与碳排放的研究 [J]. 公路工程, 2015, **40**(2): 257-259, 305.
LI Shouwei. Research on energy consumption and carbon emission of asphalt pavement [J]. **Highway Engineering**, 2015, **40**(2): 257-259, 305. (in Chinese)

[11] O'BORN R, BRATTEBØ H, IVERSEN O M K, *et al*. Quantifying energy demand and greenhouse gas emissions of road infrastructure projects: An LCA case study of the Oslo fjord crossing in Norway [J]. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, 2016, **16**(3): 445-466.

[12] COOLING T, BOECKMANN A, FILZ G, *et al*. Deep mixing design for raising levee section, LPV 111 New Orleans, LA [J]. **Geotechnical Special Publication**, 2012(228): 672-681.

[13] 彭　波, 何　娟, 蔡春丽, 等. 沥青面层施工碳排放量化评价方法及其应用 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, **46**(11): 102-109.
PENG Bo, HE Juan, CAI Chunli, *et al*. Quantitative evaluation method of carbon emission in asphalt surface construction and its application [J]. **Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)**, 2018, **46**(11): 102-109. (in Chinese)

[14] ZHANG Linling, LONG Ruyin, CHEN Hong, *et al*. A review of China's road traffic carbon emissions [J]. **Journal of Cleaner Production**, 2019, **207**: 569-581.

[15] JIANG Rui, WU Chengke, SONG Yongze, *et al*. Estimating carbon emissions from road use, maintenance and rehabilitation through a hybrid life cycle assessment approach — A case study [J]. **Journal of Cleaner Production**, 2020, **277**: 123276.

[16] SHILLABER C M, MITCHELL J K, DOVE J E, *et al*. Framework to account for uncertainty in energy and carbon assessment of ground improvement works [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2017, **143**(5): 04016122.

[17] COLE R J, KERNAN P C. Life-cycle energy use in office buildings [J]. **Building and Environment**, 1996, **31**(4): 307-317.

[18] INUI T, CHAU C, SOGA K, *et al*. Embodied energy and gas emission of retaining wall structures [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, **137**(10): 958-967.

[19] CHAU C, SOGA K, NICHOLSON D, *et al*. Embodied energy as an environmental impact indicator for basement wall construction [M] // REDDY K R, KHIRE M V, ALSHAWABKEH A N, eds. **Geo-Congress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation**. Reston: ASCE, 2008: 867-874.

[20] CHAU C, SOGA K, O'RIORDAN N, *et al*. Embodied energy evaluation for sections of the UK Channel Tunnel rail link [J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering**, 2012, **165**(2): 65-81.

[21] SOGA K, CHAU C, NICHOLSON D, *et al*. Embodied energy: Soil retaining geosystems [J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2011, **15**(4): 739-749.

[22] DAVIS S C, DIEGEL S W, BOUNDYR R G. Transportation energy data book: ORNL-6987 [R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2012.

[23] SHILLABER C M, MITCHELL J K, DOVE J E. Assessing environmental impacts in geotechnical construction: Insights from the fuel cycle [M] // ABU-FARSAKH M, YU X, HOYOS L R, eds. **Geo-Congress 2014: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability**. Reston: ASCE, 2014: 3516-3525.

[24] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程机械台班费用定额: JTG/T 3833—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. The Fixed Cost of Highway Engineering Machinery Shift: JTG/T 3833-2018 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2018. (in Chinese)

[25] 交通部公路工程定额站. 公路工程预算定额: JTG/TB 06-02—2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Highway Engineering Quota Station of Ministry of Communications. Highway Engineering Budget Quota: JTG/TB 06-02-2007 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2007. (in Chinese)

[26] 张　涛, 姜裕华, 黄有亮, 等. 建筑中常用的能源

与材料的碳排放因子[J]. 中国建设信息，2010(23)：58-59.
ZHANG Tao, JIANG Yuhua, HUANG Youliang, *et al*. Carbon emission factors of energy and materials commonly used in buildings [J]. **Information of China Construction**, 2010(23): 58-59. (in Chinese)

[27] LI Xin, OU Xunmin, ZHANG Xu, *et al*. Life-cycle fossil energy consumption and greenhouse gas emission intensity of dominant secondary energy pathways of China in 2010 [J]. **Energy**, 2013, **50**: 15-23.

[28] 李思堂，李惠强. 住宅建筑施工初始能耗定量计算[J]. 华中科技大学学报(城市科学版)，2005，**22**(4)：58-61.
LI Sitang, LI Huiqiang. Quantitative calculation of initial energy consumption for residential building construction [J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)**, 2005, **22**(4): 58-61. (in Chinese)

[29] 刘宏强，付建勋，刘思雨，等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. 钢铁，2016，**51**(4)：74-82.
LIU Hongqiang, FU Jianxun, LIU Siyu, *et al*. Calculation methods and application of carbon dioxide emission during steel-making process [J]. **Iron and Steel**, 2016, **51**(4): 74-82. (in Chinese)

[30] 俞海勇，曾 杰，胡晓珍，等. 基于LCA的化学建材生产碳排放量研究分析[J]. 化工新型材料，2015，**43**(2)：218-221.
YU Haiyong, ZENG Jie, HU Xiaozhen, *et al*. Research and analysis of carbon emissions from the production of chemical building materials based on LCA [J]. **New Chemical Materials**, 2015, **43**(2): 218-221. (in Chinese)

[31] 张 林，战启芳. EPS轻质填料路堤施工技术[J]. 铁道建筑，2005(5)：66-68.
ZHANG Lin, ZHAN Qifang. EPS lightweight filling embankment construction technology [J]. **Railway Engineering**, 2005(5): 66-68. (in Chinese)

Evaluation of energy consumption and carbon emissions for construction of wet and soft loess subgrade in highway engineering

XUE Zhijia[1], LI Liangchen[1], YAN Changgen[*1],
JIANG Chao[2], WANG Yaxin[2], XIONG Qi[1], LUO Jiang[1]

(1. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Gansu Luqiao Highway Investment Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: The construction of wet and soft loess subgrade in highway engineering will consume a lot of energy and release a lot of greenhouse gases such as carbon dioxide, which will have a certain impact on the environment. Correctly assessing the energy consumption and carbon emissions generated by the construction plan of the wet and soft loess subgrade of each highway project is of great significance to energy saving and emission reduction. Based on this, from the acquisition of raw materials to the completion of the construction project, using corresponding energy and carbon emission assessment models combined with domestic and foreign inventory data and normative quotas, energy consumption and carbon emissions are evaluated for three wet and soft loess subgrade construction methods in the Anlin first-class highway project, which are cement mixing piles, prestressed concrete pipe piles, EPS lightweight embankments. After comparative analysis, the advantages and disadvantages of the three wet and soft loess subgrade construction methods are further clarified.

Key words: highway engineering; inventory data; energy consumption; carbon emission calculation