

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.010

# 基于变形与碳排放协调的模块式加筋土挡墙优化设计

张 飞<sup>1,2</sup>, 朱玉明<sup>1,2,3</sup>, 孙逸飞<sup>4</sup>, 费建波<sup>5</sup>, 高玉峰<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; 2. 河海大学土木与交通学院;

3. 上海申通地铁建设集团有限公司; 4. 太原理工大学土木工程学院; 5. 深圳大学土木与交通工程学院)

**摘要:**为解决土压力理论设计模块式加筋土挡墙较为保守,无法同时兼顾侧向变形与碳排放这两个重要指标的问题,将考虑了模块、筋材与填土复杂相互作用的加筋土挡墙侧向变形解析方法与全生命周期评价方法相结合,借助多目标优化技术,提出了可协调侧向变形与碳排放量的模块式加筋土挡墙优化设计方法。实际工程案例验证结果表明:该优化设计方法可实现快速计算,便于实际应用;优化加筋长度和间距可以在碳排放量相同的情况下减小挡墙的侧向变形量;最优的筋材铺设长度随墙高增加而增大,当墙高低于 5 m 时,建议筋材长度取 0.6 倍墙高,反之建议筋材长度取 0.7 倍墙高。  
**关键词:**土工合成材料;加筋土;挡墙;变形;碳排放;优化设计

## Optimization design of geosynthetic-reinforced soil segmental walls considering deformation and carbon emission coordination

Zhang Fei<sup>1,2</sup>, Zhu Yuming<sup>1,2,3</sup>, Sun Yifei<sup>4</sup>, Fei Jianbo<sup>5</sup>, Gao Yufeng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University;

3. Shanghai Shentong Metro Construction Group Co., Ltd.;

4. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology;

5. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University)

**Abstract:** To address the limitations of earth pressure theory-based design for geosynthetic-reinforced soil (GRS) segmental walls, which is often relatively conservative and unable to simultaneously optimize lateral deformation and carbon emissions, an analytical method for predicting lateral deformation of GRS segmental walls with a life cycle assessment (LCA) framework was proposed. The analytical method considered the complex interactions among facing blocks, geosynthetic reinforcements, and backfill soil. By using multi-objective optimization techniques, an optimized design methodology for GRS segmental walls was developed to achieve a balanced trade-off between lateral deformation and carbon emissions. Validation using practical engineering case demonstrates that the optimized design methodology enables rapid calculation and is suitable for practical application. Lateral deformation can be reduced while maintaining equivalent carbon emissions by optimizing reinforcement length and spacing. The optimal reinforcement length increases with wall height: For walls lower than 5 m, a reinforcement length equal to 0.6 times the wall height is recommended, whereas for taller walls, a length of 0.7 times the wall height is advised.

**Key words:** geosynthetics; reinforced soil; retaining wall; deformation; carbon emission; optimal design

加筋土挡墙广泛应用于公路、铁路、机场和港口等关键基础设施中,其中模块式加筋土挡墙尤为受到工程师们的青睐<sup>[1]</sup>。加筋土技术发展初期各国主流规范大都采用基于土压力理论的设计方法,该方法忽略了面板的作用,保守地预测筋材加筋力而造成设计安全冗余<sup>[2]</sup>。目前加筋土挡墙设计理念逐渐由“安全设计”向“性能设计”转变,工作状态的筋材加筋力和侧向变形成为重要的设计指标。Allen 等<sup>[2-3]</sup>给出了工作状态筋材加筋力预测方法,相较于传统规范设计方法<sup>[4]</sup>可以显著减小设计安全冗余;Christopher<sup>[5]</sup>将原型挡墙监测数据与数值分析结果相结合,得到  $L/H$  ( $L$  为筋材长度,  $H$  为墙高) 与墙面变形系数  $\delta_r$  的关系,并进一步通过考虑筋材刚度影响实现了对最大墙面侧向变形的经验评估;Jewell 等<sup>[6]</sup>通过建立应力场和速度场之间的平衡关系,从而获得加筋土挡墙侧向变形的解析方法;Wu 等<sup>[7]</sup>在此基础上进一步考虑了模块式面板的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52322808, 42577567, W2512032)

作者简介: 张飞 (1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事边坡工程研究。E-mail: feizhang@hhu.edu.cn

通信作者: 高玉峰 (1966—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: yfgao66@163.com

影响;Zhang 等<sup>[8]</sup>提出了考虑模块式面板、筋材和填土之间复杂相互作用的加筋土挡墙侧向变形分析方法,实现了对模块式加筋土挡墙变形性能的准确预测。相较于筋材加筋力,墙面侧向变形在实际工程中能被更简单直接地观察和测量,因此基于墙面侧向变形的的设计方法更符合性能设计的发展目标。

温室气体排放导致的全球变暖问题已经严重威胁人类安全,建设领域作为全球温室气体排放的主要“贡献者”<sup>[9]</sup>,加速行业转型已迫在眉睫。如何在确保结构性能的情况下实现加筋土挡墙的低碳化设计具有极为重要的意义,其中合理的量化建设活动产生的碳排放量是推动行业低碳化转型的关键一步。全生命周期评价方法是量化碳排放的常用方法,随着行业转型的深入,岩土工程中的碳排放问题越来越受到研究人员的关注<sup>[10-13]</sup>。可回收钢材可显著降低工程建设对环境的影响,而隐含能源(embodied energy, EE)可用作评价支挡结构对环境影响的指标。为了确定对环境影响最大的因素,Zastrow 等<sup>[14]</sup>利用全生命周期评价方法对 30 个挡墙设计方法进行参数研究,发现随着墙高的增加,环境影响呈指数型增加;Pons 等<sup>[15]</sup>利用全生命周期评价方法比较了墙高低于 6 m 的不同类型挡墙,用以辅助设计人员根据墙高选择最佳挡墙类型;Rafalko 等<sup>[16]</sup>利用全生命周期评价方法分析了加筋土挡墙对环境的影响;Phillips 等<sup>[17]</sup>在 SEEAM 模型<sup>[18]</sup>的基础上考虑了经济要素的影响;Damians 等<sup>[19]</sup>利用全生命周期评价方法分析墙高变化对环境的影响,将其与传统重力式挡墙和悬臂式挡墙进行比较,从可持续发展的角度全面分析了加筋土挡墙的优势。当前针对加筋土挡墙低碳优化设计方面的研究仅仅是在传统规范设计基础上进行优化,一方面优化方案并不能有效减小传统设计存在的安全冗余,另一方面忽视了面板对加筋土挡墙稳定的贡献。结合挡墙侧向变形和全生命周期碳排放的优化设计才能真正实现可持续发展目标,突破传统设计方法中环境效益与结构性能难以兼顾的局限性。

本文将考虑模块、筋材、填土之间复杂相互作用的模块式加筋土挡墙侧向变形预测方法与全生命周期评价方法相结合,提出模块式加筋土挡墙低碳目标优化设计方法,并通过某实际模块式加筋土挡墙设计优化对该方法进行验证。

## 1 研究方法

### 1.1 模块式加筋土挡墙侧向变形分析方法

当前已有的侧向变形分析方法可分为经验方法、解析方法和数值方法 3 类。经验方法适用性及准确性较差;数值方法虽然可以实现较为准确的预测,但其复杂的建模过程和本构模型选择使得该方法难以大量推广;解析方法具有机理清晰、计算高效等优势,但需要引入合理的假设<sup>[20]</sup>。因此,本文采用解析方法,并做如下假设<sup>[8]</sup>:①加筋区填土采用无黏性土;②潜在滑动面为直线模式;③模块与加筋体之间的相互作用采用库仑土压力理论计算;④忽略加筋土挡墙水平滑移和填土压实对侧向变形的影响;⑤假设加筋土挡墙坐落在刚性地基上;⑥模块式加筋土挡墙工作状态下满足运动协调假设。

#### 1.1.1 受力分析与平衡方程

针对某个潜在的滑动面开展受力分析,如图 1 所示( $B_i$  为模块面板宽度; $h_i$  为第  $i$  层筋材到墙顶的距离; $H_i$  为楔形体高度)。由于考虑了模块与加筋体之间的相互作用,因而需要单独隔离加筋体进行受力分析。模块部分受力包括:模块自重  $W_i$ ,作用在滑出点位置处模块上的竖向力  $R_i$ ,模块受到的土压力为  $P_i$ ,其中模块自重和土压力的竖向分量可由竖向力  $R_i$  平衡,土压力的水平分量则可由模块-筋材连接力平衡,土压力大小采用库仑土压力理论计算<sup>[21]</sup>。考虑到模块面板与填土相互作用的实际情况<sup>[22]</sup>,受力分析过程中对土压力作用方向进行了调整,即土压力  $P_i$  与水平方向的夹角为模块-填土界面摩擦角  $\delta_{sb}$ 。加筋体部分的受力包括:加筋体自重  $W_s$ ,模块所受墙后土压力的反作用力  $P_i$ ,沿潜在滑动面的剪力  $R_s$ ,垂直潜在滑动面的正应力  $N_s$ ,当前计算的工作状态加筋力  $D_i$ ,已计算出的稳定所需加筋力  $T_j(j=1,2,\dots,i-1)$  以及第  $i+1$  个模块与筋材相互作用产生的剪力  $S_i$ 。需要注意的是,工作状态加筋力  $D_i$  与模块-筋材相互作用产生的剪力  $S_i$  之和等于第  $i$  层筋材稳定所需加筋力  $T_i$ ,各层筋材稳定所需加筋力  $T_i$  之和等于楔形体稳定所需加筋合力  $T_0$ 。沿水平方向和竖直方向建立力的平衡方程:

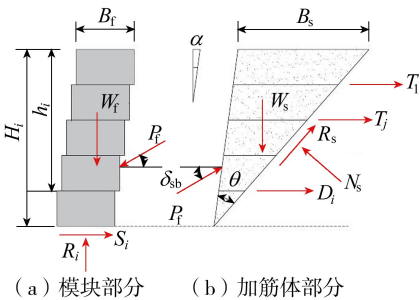


图 1 模块式加筋土挡墙力学分析模型  
Fig. 1 Mechanical analysis model of a GRS segmental wall

$$R_c T_g + P_f \cos \delta_{sb} + R_s \sin(\alpha + \theta) = N_s \cos(\alpha + \theta) \quad (1)$$

$$R_s \cos(\alpha + \theta) + P_f \sin \delta_{sb} + N_s \sin(\alpha + \theta) = W_s \quad (2)$$

式中:  $R_c$  为筋材覆盖率,采用土工格栅等需要连续性铺设的材料时,  $R_c = 100\%$ ;  $\alpha$  为墙面与竖直方向的夹角,即墙面倾角,考虑到直线滑动模式假设适用于墙面接近直立的加筋土挡墙,因此  $\alpha$  取值小于  $20^\circ$ ;  $\theta$  为潜在滑动面与墙面之间的夹角。

结合莫尔-库仑强度准则可以获得工作状态加筋力  $D_i$  的表达式:

$$D_i = \frac{(W_s - P_f \sin \delta_{sb}) [\cos(\alpha + \theta) - \tan \varphi \sin(\alpha + \theta)]}{R_c [\sin(\alpha + \theta) + \tan \varphi \cos(\alpha + \theta)]} - \frac{P_f \cos \delta_{sb}}{R_c} - \sum_{j=1}^{i-1} T_j - \zeta_i T_i \quad (3)$$

式中:  $\zeta_i$  为模块与第  $i$  层筋材之间的相互作用系数,取值范围为  $-1 \sim 1$ ;  $\varphi$  为折减后的填土内摩擦角,  $\tan \varphi = (\tan \varphi_{ps} / R_{FS})$ ,其中  $\varphi_{ps}$  为填土的峰值内摩擦角,  $R_{FS}$  为反映工作状态填土强度的折减系数,根据 Zhang 等<sup>[8]</sup>提供的预测方法进行确定。

### 1.1.2 筋材前后端拔出阻力

工作状态下筋材拔出阻力呈现非线性特点, Morsy 等<sup>[23]</sup>通过一系列创新性的大型拔出试验,细致地调查了不同筋材与填土之间的相互作用,得到了大量数据,并基于试验数据,提出了整合多个影响筋材拔出特性因素的经验公式<sup>[24]</sup>:

$$T_{po(e)-i} = \left( \frac{J}{R_{fp} R_c} \right) \left[ \frac{(u_{g-i}(0) + b - \sqrt{u_{g-i}^2(0) + b^2}) \left( \frac{c}{1000L} \right)}{e^{cx/L}} \right] \quad (4)$$

其中

$$b = 3000 \left( \frac{\sigma'_v}{P_a} \right)^{2.5} \left( \frac{J}{C_i S_r P_a} \right)^{-0.55} \quad c = 8.5 \left( \frac{\sigma'_v}{P_a} \right)^{0.33} \left( \frac{J}{C_i S_r P_a} \right)^{-0.18}$$

式中:  $T_{po(e)-i}$  为第  $i$  层筋材后端抗拔阻力;  $x$  为筋材上某点到墙面距离;  $J$  为筋材刚度;  $R_{fp}$  为筋材抗拔折减系数,取值为 1.5;  $u_{g-i}(0)$  为第  $i$  层筋材在其端部发生的变形;  $b, c$  为经验参数;  $\sigma'_v$  为有效土上覆荷载;  $P_a$  为标准大气压,取值为 101.4 kPa;  $C_i$  为第  $i$  层筋土界面系数,等于  $\tan \delta_{sg} / \tan \varphi$ ;  $\delta_{sg}$  为筋材与填土之间的摩擦角;  $S_r$  为加筋间距参考值,取值为 1 m。上述参数大都可以通过试验或查阅文献直接获得,而  $u_{g-i}(0)$  则需要预先进行假设,其取值上限可保守地设置为墙高的 5%。工作状态加筋力分布需要进行修正才能获得最终的结果,如图 2 所示。

### 1.1.3 运动协调假设

TOPDOWN 过程是一种由上至下逐层计算加筋力的方法<sup>[25]</sup>,在原始 TOPDOWN 方法基础上引入运动协调假定,实现对上下层筋材间相互影响的耦合。Klar 等<sup>[26]</sup>最早提出运动协调假定,认为模块式加筋土挡墙在工作状态下筋材不会与模块发生脱离,意味着每层筋材端部位置的筋材-填土相对变形始终等于对应位置的模块间变形。筋土相对变形可采用 Morsy 等<sup>[24]</sup>提出的经验公式计算。对于接近于直立的模块式加筋土挡墙,模块-模块界面的变形为:

$$d_{t-i} = \sum_{k=i}^n \frac{S_k}{K_S} + \sum_{k=i}^n \frac{M_k}{K_M} (k - i + 1) S_v \quad (5)$$

式中:  $d_{t-i}$  为第  $i$  层筋材位置处模块-模块界面变形,该变形由模块间的平动和转动两部分组成;  $K_S, K_M$  分别为模块-模块界面的平动刚度和转动刚度;  $S_k, M_k$  分别为第  $k$  层筋材与模块相互作用产生的剪力和弯矩;  $S_v$  为加筋间距;  $n$  为筋材层数。

## 1.2 模块式加筋土挡墙全生命周期碳排放计算方法

全生命周期评价涉及多种可用的方法,包括过程分析法、投入产出法、混合分析法。加筋土挡墙作为一种工程产品,实现精细化的碳排放评估必须考虑所有可能的工序,因此本文采用过程分析法构建模块式加筋土挡墙的全生命周期碳排放核算模型。

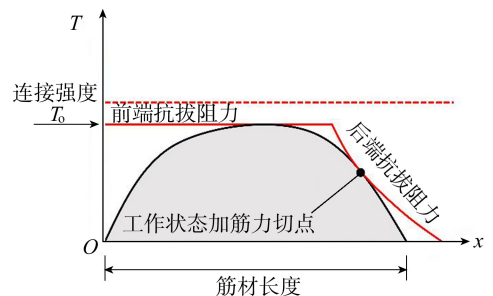


图 2 加筋力分布与前后端抗拔阻力

Fig. 2 Relationship between reinforcement force distribution and front/rear pullout capacity

1.2.1 研究目标与范围

在确定适合的研究方法之后,需要选择合理的研究目标和研究范围。合理选择研究目标的原因:①全生命周期环境评价涉及产品从原材料获取到废弃物处理的全过程,其复杂性和数据量非常大,选择合适的研究目标可以明确评价的方向和范围,避免在评价过程中迷失方向或偏离主题;②选择合适的研究目标可以确保评价过程中数据采集和分析的准确性和完整性,从而得出更加可靠的评价结果;③明确的研究目标有助于在评价结果之间进行比较和分析,为后续的决策和改进提供依据。模块式加筋土挡墙多用于道路或者铁路工程中,属于线性结构,其建设材料的消耗量随着其长度的增加而增加。因此,本文的功能单位为满足最终建造高度的每延米模块式加筋土挡墙,后文中所有碳排放量均以该功能单位为基础。

完整的全生命周期评价涉及的阶段包括:原材料获取、建材加工制造、交通运输、建设施工、运营维护以及拆除、回收、再利用。原材料获取与加工阶段隐含碳排放量在全生命周期中占据主导地位<sup>[10]</sup>,其次是交通运输和建设施工,结合岩土工程的特殊性<sup>[10]</sup>,本文在进行碳排放计算时仅考虑原材料获取、建材加工制造、交通运输和建设施工4个阶段的排放,合理忽略了运营维护和回收再利用阶段<sup>[10]</sup>。

1.2.2 全生命周期清单分析

全生命周期清单分析包括搜集与工艺过程相关的能源和材料输入参数,主要作用是估算制造产品所消耗的资源量以及量化产品生产对环境的直接影响。结合本文研究对象,搜集的数据必须能满足计算单位宽度模块式加筋土挡墙在其全生命周期内碳排放量的要求。隐含碳因子指单位产品从原材料获取、生产加工到运输流通等全生命周期过程中直接或间接排放的二氧化碳总量,相关研究<sup>[10-11]</sup>表明采用该指标会获得更加可靠的评价结果,因此本文采用文献<sup>[27]</sup>的隐含碳因子数据(表1)进行计算。

1.2.3 全生命周期碳排放量化

原材料获取与生产加工阶段包含材料从获取到生产制造过程中产生的隐含碳。本文的分析对象为模块式加筋土挡墙,该结构建设过程中可能涉及以下建筑材料的使用:混凝土、水泥砂浆、钢材、回填土、碎石、土工格栅等。每种材料的隐含碳排放按总用量乘以各自指标对应的因子数值进行计算。

交通运输过程中隐含碳的排放主要来源于建设材料和机械设备往返施工现场的环节,需要考虑运输距离和不同运输载具的能源消耗情况,为保守起见,所有运载工具现场往返各一趟被认为是一次有效运输。一般来说,生产一个产品的设备磨损损耗非常低,计算过程中可以忽略不计。因此,建设施工过程中的隐含碳排放来自现场运行的机械设备,其评估方法为消耗的燃料量或电量与其对应因子的乘积。交通运输与建设阶段的隐含碳排放计算公式可参考Zhu等<sup>[10]</sup>的研究。

1.3 模块式加筋土挡墙低碳目标优化设计方法

帕累托前沿代表了在多目标空间中最优的权衡选择解,具体表示:帕累托前沿上的解具有非支配性、权衡取舍、最优性,即这些解是在多个目标函数下不被其他解支配的、达到最佳平衡的最优解。图3展示了可行决策空间和可行目标空间之间的映射关系,清晰地反映了设计变量如何映射到目标变量,从而获得帕累托最优解。基于MATLAB平台使用NSGA-II算法<sup>[28-29]</sup>实现对帕累托前沿的搜索。

帕累托前沿上的膝点是多目标优化问题中一个尤为关键的解,它位于帕累托前沿面的突出部分,直观上表现为最“凹”的点。在膝点的邻域附近,任何一维目标值的微小变化都会导致其他维目标的大幅波动,这反映了膝点在一定程度上优于帕累托前沿面上的其他解。

多目标优化步骤如下:①初始化阶段,包括输入模

表 1 隐含碳因子数据

Table 1 Embodied carbon emission factor data

| 材料名  | 隐含碳因子/(kgCO <sub>2</sub> e/t) |
|------|-------------------------------|
| 混凝土  | 135                           |
| 水泥砂浆 | 735                           |
| 钢材   | 2 137.13                      |
| 回填土  | 2.60                          |
| 碎石   | 2.18                          |
| 土工格栅 | 3 050                         |

注:kgCO<sub>2</sub>e 代表千克二氧化碳当量。

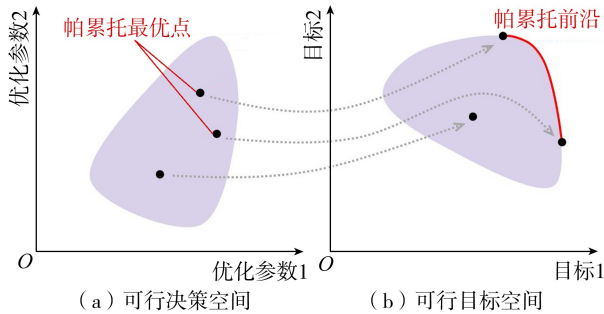


图3 目标优化中帕累托前沿示意图

Fig.3 Illustration of a Pareto frontier in objective optimization

块式加筋土挡墙相关设计参数,设定种群规模、遗传代数、交叉和变异概率等参数,并随机生成初始种群;②对初始种群中的每个个体进行评估,计算其目标函数值,并进入核心的非支配排序阶段,通过比较个体间的优劣关系,将种群划分为不同的非支配层级;③计算每个个体的拥挤度距离,以维持种群的多样性,基于非支配等级和拥挤度信息,执行选择操作,挑选出用于遗传操作的父代个体,通过交叉和变异操作生成新的子代种群,然后新生成的子代种群与父代种群合并,形成临时种群,并再次进行非支配排序和拥挤度计算;④根据排序结果和拥挤度信息,从临时种群中挑选出最优个体,组成下一代种群,检查是否满足终止条件,若达到预设的遗传代数,则输出帕累托最优解集和膝点解,否则算法继续迭代,重复上述②~④流程,直至满足终止条件。

## 2 案例验证

### 2.1 设计案例及参数确定

Salem 等<sup>[30]</sup>基于 AASHTO 指南<sup>[4]</sup>设计并建造了高度  $H=4.4\text{ m}$  的模块式加筋土挡墙。该挡墙面板采用尺寸为  $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.4\text{ m}$  的混凝土砌块,砌块与砌块之间设置有剪切键提高模块抗剪能力;筋材采用坦萨公司 HDPE 单向土工格栅,平均刚度  $J=238\text{ kN/m}$ ;填筑材料采用砂土,土体容重  $\gamma=19\text{ kN/m}^3$ ,峰值内摩擦角  $\varphi_{ps}=47^\circ$ ;模块与填土、筋材与填土之间的相互作用系数取值为 0.45;筋材共铺设 7 层;墙面倾角  $\alpha=0^\circ$ 。

模块式加筋土挡墙侧向变形会随着筋材蠕变不断发生变化,因此单一的筋材值无法满足设计需求。通过对比发现,Salem 等<sup>[30]</sup>采用的 HDPE 单向土工格栅荷载-应变曲线与 Bathurst 等<sup>[31]</sup>测试的 HDPE 筋材特性相近,因此采用 Bathurst 等<sup>[31-32]</sup>提供的数据和筋材蠕变模型进行后续的优化设计。模块式加筋土挡墙的侧向变形采用拟合的经验公式,想要获得侧向变形结果还需要确定工作状态下填土内摩擦角  $\varphi_{ws}$ ,采用 Zhang 等<sup>[8]</sup>提出的经验公式计算。

### 2.2 低碳目标优化设计

确定筋材长度  $L$  和加筋间距  $S_v$  是模块式加筋土挡墙设计需要考虑的关键因素,因而在多目标优化设计中将其作为待优化参数。 $L$  视为连续变化的参数,其取值范围为  $0.5H\sim 1.1H$ ;  $S_v$  视为离散变化参数,考虑待优化案例的模块高度为  $0.2\text{ m}$ ,而  $S_v$  超过  $0.8\text{ m}$  可能会导致面板局部失稳<sup>[33]</sup>,因而其取值分别设为  $0.2$ 、 $0.4$ 、 $0.6$ 、 $0.8\text{ m}$ 。开展多目标优化计算中其他关键参数取值如下:种群数取为 200,最大迭代次数取为 100,交叉概率取为 0.9,变异概率取为 0.5。基于侧向变形和碳排放联合的模块式加筋土挡墙的优化问题如下。

找到:设计参数  $d=\{L, S_v\}$   
约束: $0.5H\leq L\leq 1.1H$   
 $S_v=\{0.2\text{ m}, 0.4\text{ m}, 0.6\text{ m}, 0.8\text{ m}\}$   
累计侧向变形最大值  $d_{a,\max}\leq 3.5\%H$   
目标:最小化累计侧向变形最大值  
最小化隐含碳排放

$d_{a,\max}$  的约束条件采用 Bathurst 等<sup>[34]</sup>通过对比实测数据与多本规范建议值后给出的推荐指标。图 4 给出了膝点解对应隐含碳随优化代数的变化曲线。由图 4 可知,当优化代数在 100 左右时,膝点解达到稳定状态,此时可认为结果收敛。图 5 给出了基于 NSGA-II 算法直接搜索到的 108 个点所形成的帕累托前沿、膝点和不同帕累托最优解对应的鲁棒性(对优化参数进行随机扰动,以其目标函数标准差之和作为鲁棒性评价指标)。由图 5 可知,帕累托最优解主要出现在侧向变形较小的情况下,随着侧向变形不断增加,帕累托最优解的数量会逐渐减少且对应数据的鲁

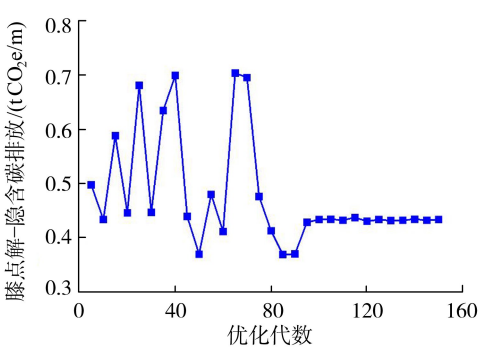


图 4 膝点解对应隐含碳随优化代数的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of embodied carbon corresponding to knee point solution over optimization generations

棒性也逐渐变差。在获得帕累托前沿之后,工程技术人员可以根据实际经验或者特定的设计目标选择最佳的设计方案。

表 2 中优化方案 1 代表变形最小的非支配设计,但其对应的  $L$  最大、 $S_v$  最小,说明该方案适用于对变形要求较高的工程场景;优化方案 2 代表隐含碳排放最小的设计,能够在满足最大变形约束的前提下实现对环境影响的最小化;优化方案 3 代表了膝点结果,体现了 2 个互相冲突目标之间的最佳权衡。对比优化方案 3 和 Salem 等<sup>[30]</sup> 原型墙设计方案可以发现,在隐含碳排放没有增加的情况下,适当地减小  $S_v$  可以实现墙面侧向变形的进一步减小,由此说明优化方案 3 代表的折中设计方案相比规范设计更为合理。

表 2 多目标优化设计方案

| 设计方案     |                  | 设计参数         |                | 优化目标                         |                                           |
|----------|------------------|--------------|----------------|------------------------------|-------------------------------------------|
|          |                  | $L/\text{m}$ | $S_v/\text{m}$ | $d_{a,\text{max}}/\text{mm}$ | 隐含碳排放/( $\text{tCO}_2\text{e}/\text{m}$ ) |
| 文献[30]方案 | 基于 AASHTO 设计     | 3.2          | 0.6            | 30.0                         | 0.43                                      |
| 优化方案 1   | 帕累托前沿上变形最小的设计    | 4.8          | 0.2            | 5.3                          | 0.71                                      |
| 优化方案 2   | 帕累托前沿上隐含碳排放最小的设计 | 2.2          | 0.8            | 144.1                        | 0.37                                      |
| 优化方案 3   | 帕累托前沿上最折中的设计     | 2.7          | 0.4            | 25.9                         | 0.43                                      |

挡墙高度的变化会导致模块式加筋土挡墙设计方案发生变化,一般挡墙高度降低会导致挡墙稳定性增加,而规范<sup>[4]</sup>一般没有考虑墙高变化的影响,而是建议筋材长度设置为墙高的 0.7 倍。为了研究挡墙高度的影响,分别选择 3.4、4.4、5.4 m 高度进行比较分析,其余设计参数不变。由图 6 和表 3 可知,随着挡墙高度的增加,最大侧向变形和隐含碳排放均增加,符合实际情况。帕累托最优解多出现在侧向变形较小的情况下,随着侧向变形的增大,帕累托最优解数量不断减少,其对应的鲁棒性也不断降低。此外,挡墙高度越低,其帕累托最优解鲁棒性越好,说明模块式加筋土挡墙的累计侧向变形最大值易受到挡墙高度的影响,且高度越高,累计侧向变形最大值对筋材长度的变化越敏感。筋材设计长度会随着挡墙高度的变化而变化,假定 0.7 倍墙高进行设计可能会产生保守的结果,从而造成不必要的环境负担。因此,对于高度小于 5 m 的模块式加筋土挡墙,建议筋材长度按照 0.6H 设置;对于高度大于 5 m 的模块式加筋土挡墙,建议筋材长度按照 0.7H 设置。

3 结 语

可协调侧向变形与碳排放量的模块式加筋土挡墙优化设计方法可实现快速计算,便于实际应用。从设计角度考虑,筋材长度和加筋间距是重要的优化变量,选择合适的数值可以在碳排放总量不变的前提下实现结构性能的提升。挡墙高度对模块式加筋土挡墙的结构性能和环境效益均有较大影响,最优的筋材铺设长度应考虑墙高的因素,对于墙高小于 5 m 的挡墙,筋材长度宜取 0.6H,而对于墙高大于 5 m 的挡墙,筋材长度宜取 0.7H。

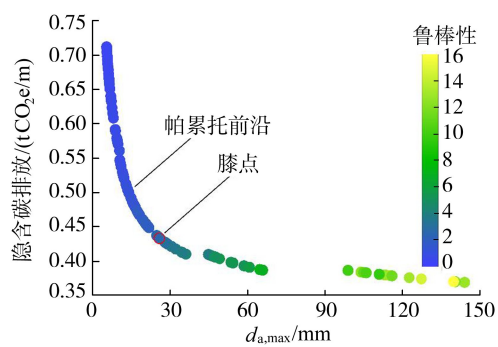


图 5 优化案例帕累托前沿  
Fig. 5 Pareto frontier for optimized case

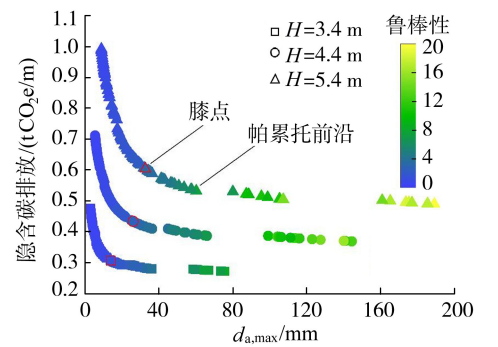


图 6 挡墙高度对帕累托前沿影响  
Fig. 6 Effect of wall height on Pareto frontier

表 3 不同高度对应最优设计方案

| Table 3 Optimal design options for different wall heights |                        |                |                              |                                           |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| $H/\text{m}$                                              | $L/\text{m}$           | $S_v/\text{m}$ | $d_{a,\text{max}}/\text{mm}$ | 隐含碳排放/( $\text{tCO}_2\text{e}/\text{m}$ ) |
| 3.4                                                       | 2.1 ( $\approx 0.6H$ ) | 0.4            | 13.9                         | 0.31                                      |
| 4.4                                                       | 2.7 ( $\approx 0.6H$ ) | 0.4            | 25.9                         | 0.43                                      |
| 5.4                                                       | 3.9 ( $\approx 0.7H$ ) | 0.4            | 32.3                         | 0.61                                      |

参考文献:

[ 1 ] 赵云斐,杨广庆,周诗广,等. 高速铁路土工格栅加筋土挡墙服役期力学行为研究[J]. 铁道学报,2020,42(6):129-138. ( Zhao Yunfei, Yang Guangqing, Zhou Shiguang, et al. Research on mechanical behaviour of high-speed railway geogrid reinforced soil retaining wall during service period[J]. Journal of the China Railway Society,2020,42(6):129-138. ( in Chinese) )

[ 2 ] Allen T M, Bathurst R J. Improved simplified method for prediction of loads in reinforced soil walls[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2015,141(11):04015049.

[ 3 ] 刘华北,王春海,汪磊. 土工合成材料加筋土挡墙运行期筋材拉力塑性力学分析方法[J]. 中国科学:技术科学,2022,52(7):1083-1095. ( Liu Huabei, Wang Chunhai, Wang Lei. Analyzing operational reinforcement loads of geosynthetic-reinforced soil retaining walls based on plasticity theory[J]. Scientia Sinica ( Technologica),2022,52(7):1083-1095. ( in Chinese) )

[ 4 ] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. Washington D. C.: American Association of State Highway and Officials,2012.

[ 5 ] Christopher B R. Deformation response and wall stiffness in relation to reinforced soil wall design[D]. West Lafayette: Purdue University,1993.

[ 6 ] Jewell R A, Milligan G W E. Deformation calculations for reinforced soil walls[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio De Janeiro:ISSMGE,1989:1257-1262.

[ 7 ] Wu J T H, Pham T Q. An analytical model for calculating lateral movement of a geosynthetic-reinforced soil ( GRS) wall with modular block facing[J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2010,4(4):527-535.

[ 8 ] Zhang Fei, Zhu Yuming, Yang Shangchuan, et al. Prediction method for lateral displacements of geosynthetic-reinforced soil walls with segmental block facings[J]. Geotextiles and Geomembranes,2025,53(1):378-393.

[ 9 ] 肖建庄,夏冰,肖绪文,等. 建筑结构隐含碳排放限值预设方法研究[J]. 中国工程科学,2023,25(2):187-197. ( Xiao Jianzhuang, Xia Bing, Xiao Xuwen, et al. Presetting method for embodied carbon emission limit of building structures[J]. Strategic Study of CAE,2023,25(2):187-197. ( in Chinese) )

[ 10 ] Zhu Yuming, Zhang Fei, Jia Shilin. Embodied energy and carbon emissions analysis of geosynthetic reinforced soil structures[J]. Journal of Cleaner Production,2022,370:133510.

[ 11 ] Abushama K, Hawkins W, Pelecanos L, et al. Embodied carbon optimisation of concrete pile foundations and comparison of the performance of different pile geometries[J]. Engineering Structures,2024,310:118109.

[ 12 ] 靳春玲,苏旻,贡力,等. 碳排放约束下的水工隧洞施工机群配置优化[J]. 河海大学学报( 自然科学版),2023,51(3):84-90. ( Jin Chunling, Su Yang, Gong Li, et al. Configuration optimization of construction machine group for hydraulic tunnel under carbon emission constraint[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences),2023,51(3):84-90. ( in Chinese) )

[ 13 ] Inui T, Chau C, Soga K, et al. Embodied energy and gas emissions of retaining wall structures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2011,137(10):958-967.

[ 14 ] Zastrow P, Molina-Moreno F, García-Segura T, et al. Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls: a parametric study[J]. Journal of Cleaner Production,2017,140:1037-1048.

[ 15 ] Pons J J, Penadés-Plà V, Yepes V, et al. Life cycle assessment of earth-retaining walls: an environmental comparison[J]. Journal of Cleaner Production,2018,192:411-420.

[ 16 ] Rafalko S D, Sankey J E, Freitag N. Sustainability measures for MSE walls and baseline environmental impact evaluations[C]//Proceedings of the Earth Retention Conference 3. Washington: ASCE,2010:486-493.

[ 17 ] Phillips E K, Shillaber C M, Mitchell J K, et al. Sustainability comparison of a geosynthetic-reinforced soil abutment and a traditionally-founded abutment: a case history[C]//Proceedings of the Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016. Phoenix: ASCE,2016:699-711.

[ 18 ] 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.

[ 19 ] Damians I P, Bathurst R J, Adroguer E G, et al. Environmental assessment of earth retaining wall structures[J]. Environmental Geotechnics,2017,4(6):415-431.

[ 20 ] 李婷,苏谦,刘宝,等. 加筋土挡墙水平位移解析计算与参数分析[J]. 中国公路学报,2019,32(5):47-56. ( Li Ting, Su Qian, Liu Bao, et al. Analytical calculation and parametric analysis of lateral displacement of reinforced soil retaining walls[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(5):47-56. ( in Chinese) )

consumption[J]. Ocean Engineering,2020,197:106802.

[76] Yu Hongchu, Fang Zhixiang, Fu Xiuju, et al. Literature review on emission control-based ship voyage optimization [J]. Transportation Research Part D:Transport and Environment,2021,93:102768.

[77] Li Zhongwei, Wang Kai, Hua Yu, et al. GA-LSTM and NSGA-Ⅲ based collaborative optimization of ship energy efficiency for low-carbon shipping[J]. Ocean Engineering,2024,312:119190.

[78] Huang Luofeng, Pena B, Liu Yuanchang, et al. Machine learning in sustainable ship design and operation: a review[J]. Ocean Engineering,2022,266:112907.

[79] Lang Xiao, Wu Da, Mao Wengang. Physics-informed machine learning models for ship speed prediction[J]. Expert Systems with Applications,2024,238:121877.

[80] El Mekkaoui S, Benabbou L, Caron S, et al. Deep learning-based ship speed prediction for intelligent maritime traffic management [J]. Journal of Marine Science and Engineering,2023,11(1):191.

[81] Li Xiaohe, Ding Kunping, Xie Xianwei, et al. Bi-objective ship speed optimization based on machine learning method and discrete optimization idea[J]. Applied Ocean Research,2024,148:104012.

(收稿日期:2025-07-29 编辑:熊水斌)

(上接第 85 页)

[21] Liu Huabei, Yang Guangqing, Hung Ching. Analyzing reinforcement loads of vertical geosynthetic-reinforced soil walls considering toe restraint[J]. International Journal of Geomechanics,2017,17(6):04016140.

[22] Leshchinsky D, Zhu Fan. Resultant force of lateral earth pressure in unstable slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2010,136(12):1655-1663.

[23] Morsy A M, Zornberg J G, Leshchinsky D, et al. Soil-reinforcement interaction: effect of reinforcement spacing and normal stress [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2019,145(12):04019115.

[24] Morsy A M, Zornberg J G. Soil-reinforcement interaction: stress regime evolution in geosynthetic-reinforced soils[J]. Geotextiles and Geomembranes,2021,49(1):323-342.

[25] Zhang Fei, Ge Bin, Leshchinsky D, et al. Effects of multitiered configuration on the internal stability of GRS walls[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2023,149(12):04023122.

[26] Klar A, Sas T. Rational approach for the analysis of segmental reinforced soil walls based on kinematic constraints[J]. Geotextiles and Geomembranes,2009,27(5):332-340.

[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[28] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.

[29] 汤岭,王海军,李致家,等. 代理模型参数率定方法在 TOPKAPI 模型中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):21-28. (Tang Ling, Wang Haijun, Li Zhijia, et al. Application of surrogate modeling parameter calibration method in TOPKAPI model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(1):21-28. (in Chinese))

[30] Salem M A, Hammad M A, Amer M I. Field monitoring and numerical modeling of 4.4 m-high mechanically stabilized earth wall [J]. Geosynthetics International,2018,25(5):545-559.

[31] Bathurst R J, Naftchali F M. Geosynthetic reinforcement stiffness for analytical and numerical modelling of reinforced soil structures[J]. Geotextiles and Geomembranes,2021,49(4):921-940.

[32] British Standards Institution. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills; BS 8006-1:2010 [S]. Milton Keynes, U. K. ;BSI,2010.

[33] 常倩倩,束一鸣,黄松,等. 加筋间距对加筋挡土墙工作性态的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(5):557-562. (Chang Qianqian, Shu Yiming, Huang Song, et al. Effect of bar spacing on performance of reinforced soil retaining walls [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2007,35(5):557-562. (in Chinese))

[34] Bathurst R J, Miyata Y, Allen T M. Facing displacements in geosynthetic reinforced soil walls [C]//Proceedings of the Earth Retention Conference 3. Bellevue. Washington D. C. ;ASCE Geo-Institute,2010:442-459.

(收稿日期:2025-07-24 编辑:刘晓艳)