

文章编号: 1000-5013(2008)02-0276-04

加筋土挡墙的优化设计

涂 帆¹, 常方强²

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 对于加筋土挡墙, 以筋材总长度最小为控制目标, 不发生任何模式的破坏为约束条件, 建立非线性约束规划的优化设计数学模型. 利用 Matlab 语言优化工具箱里的功能函数求解该模型, 对一个加筋土挡墙进行优化设计. 对于两种筋材型号的优化方案, 采用强度较高的筋材方案能节省筋材用量的 14%. 实例的优化设计表明, 加筋土挡墙外部稳定(挡墙抗倾和抗滑)的安全系数远高于设计值, 起控制作用的是挡墙内部稳定(筋材抗拉和抗拔)问题.

关键词: 加筋土挡墙; 优化设计; Matlab 语言; 非线性约束规划

中图分类号: U 417.1+ 15.02

文献标识码: A

加筋土挡墙的组成部分包括墙面、基础、筋材和墙内填土^[1], 不同类型的加筋土挡墙的构造和机理有所不同. 一种类型的加筋土挡墙是筋材与面板联系在一起, 通过筋材与填料之间的摩擦力, 使面板、筋材和填料形成稳定且柔性的复合支挡结构. 这一形式挡墙的筋材呈条带状. 另一种类型的加筋土挡墙, 也称为满铺式加筋土挡墙, 筋材不与面板联系在一起, 筋材与填土自身达到平衡稳定状态, 面板只是起到覆盖和保护筋材的效果. 这一形式挡墙的筋材呈片状, 如土工布和土工格栅. 加筋土挡墙具有抗震性能好、结构稳定、对地基承载力要求不高、能适应不均匀沉降、造价低等优点, 受到越来越广泛的重视. 加筋土挡墙的造价主要取决于筋材的总长度, 总长度越小, 筋材的费用越少, 同时, 填土和碾压的工程量也越小. 结构的优化设计大都应用于结构工程, 文[2-3]对桁架和门式钢架结构的优化设计取得了较好的效果, 王继宗等^[4]也对高性能混凝土配合比进行优化设计, 但加筋土挡墙的优化设计则较少见. 本文建立了在保证加筋土挡墙安全条件下优化设计的数学模型, 利用 Matlab 语言优化工具箱里的功能函数求解该模型, 达到优化设计的目的.

1 数学模型

加筋土挡墙的破坏模式有筋材断裂和拔出、挡墙倾覆和滑移、地基承载力不足等, 其中任何一个破坏的发生, 都会造成挡墙破坏^[5]. 设计加筋土挡墙, 就是为了保证挡墙在每个破坏模式下的安全系数均大于规范要求.

1.1 优化目标

加筋土挡墙的优化目标是筋材的总长最小. 为施工方便起见, 筋材在竖直和水平方向往往等间距铺设. 如果每层的加筋长度相等, 则优化目标函数为 $L_{tot} = HL/s_x s_y$. 其中, L_{tot} 为每延米挡墙的筋材总长; H 为挡墙高度; L 为挡墙面板后筋材长度, $L = L_1 + L_2$, L_1 为面板后滑动面以内的筋材长度. 对于采用土工格栅或加筋带的刚性筋墙和采用土工织物的柔性筋墙, 墙内填土的潜在滑动面如图 1(a), (b), L_2 为筋材有效长度; s_x, s_y 为筋材横向和竖向间距. 若采用满铺式加筋挡墙, $s_x = 1$ m. 目标函数中, H 为定值, 是给定的挡墙高度, s_x, s_y 和 L 为变量. 在满足约束条件的前提下, 3 个变量按不同的数值组合, 筋材总长度 L_{tot} 最小, 即为所求的最优解.

收稿日期: 2007-03-07

作者简介: 涂 帆(1950-), 女, 教授, 主要从事岩土工程的研究. E-mail: ftu@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0710019)

1.2 约束条件

优化设计的约束条件就是保证挡墙不发生破坏,对于地基条件较好的加筋土挡墙,主要考虑以下 4 个约束条件.

1.2.1 筋材抗拉约束函数 保证筋材不被拉断,其约束函数为 $\frac{T_a}{K_a \gamma_r Z_i s_x s_y} \geq K_1$. 其中, T_a 为筋材设计容许抗拉强度; K_a 为朗金土压力系数, $k_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$; γ_r 为加筋范围内压实填土的重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$); z_i 为第 i 层筋材距墙顶的垂直距离 (m); K_1 为筋材抗拉安全系数.

1.2.2 挡墙抗倾约束函数 保证加筋土挡墙不发生倾覆破坏,其约束函数为 $\frac{\gamma_r H L^2 / 2}{E_a (H - Z_0) / 3} \geq K_q$. 其中, E_a 为主动土压力, $E_a = \gamma_b H^2 K_a / 2 - 2c \sqrt{K_a H + 2c^2 / \gamma_b}$, 而 K_a 为主动土压力系数, $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi / 2)$. γ_b , φ 和 c 分别为墙后土的重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)、内摩擦角 ($^\circ$) 和内聚力 (kPa), Z_0 为土压力零点到墙顶距离 (m), $Z_0 = \frac{2c}{\sqrt{K_a} \gamma_b}$, K_q 为抗倾安全系数.

1.2.3 筋材抗拔约束函数 保证筋材不被拔出,其约束函数为 $\frac{2L_2bf}{K_a s_y} \geq K_b$. 其中, b 为筋材宽度 (m), 若为满铺式挡墙, $b = 1 \text{ m}$, f 为筋材与填料之间的摩擦系数, K_b 为筋材抗拔安全系数.

1.2.4 挡墙抗滑约束函数 保证加筋土挡墙不发生滑移破坏,其约束函数为 $\frac{H L \gamma_r \mu + c L}{E_a} \geq K_h$. 其中, μ 为加筋土挡墙与地基土的摩擦系数, K_h 为抗滑安全系数.

1.2.5 挡墙的侧向变形约束 保证挡墙不因发生过大的侧向变形而导致破坏,侧向变形也应是一个约束条件,但目前尚未具备这方面的公式和指标. 规范中采用的方法是,将筋材的断裂强力除以一个综合值得到设计容许抗拉强度,筋材在此强度下的延伸率能够达到控制挡墙侧向变形的要求.

2 非线性约束规划

2.1 基本原理

加筋土挡墙的优化目标函数及部分约束条件为非线性,因此其优化设计的数学模型也应该是非线性的约束规划. 最一般的非线性约束规划可表达^[6]: 目标函数为 $\min_x f(x)$, 约束函数为 $G(x) \leq 0$. 其中, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为向量, $G(x) = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x)]^T$ 为函数向量, $G(x)$ 可以为等式或不等式约束. $f(x)$ 为变量函数,其最优解应满足 Kuhn-Tucker 条件,即

$$\begin{cases} \nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x^*) = 0, \\ \lambda_i \nabla g_i(x^*) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ \lambda_i \geq 0. \end{cases}$$

上式中,第 1 行描述目标函数和约束条件在解 x^* 处的梯度之和为零,用拉格朗日乘子 λ 平衡目标函数和约束梯度间的差异.

对于非线性的目标函数和约束函数,可以采用序列二次规划法 (SQP) 求解. 在计算机快捷运算速度的支持下,用一系列二次规划逐步逼近原非线性规划问题, SQP 法是目前求解非线性约束问题的最有效方法. SQP 法的实现通常由以下 3 个部分组成^[6].

(1) 更新 Lagrange 函数的 Hessian 矩阵. 在每一次迭代中,通过 Broyden, Fletcher, Goldfarb 和 Shanno 方法 (简称 BFGS 方法) 计算 Hessian 矩阵经 BFGS 更新为

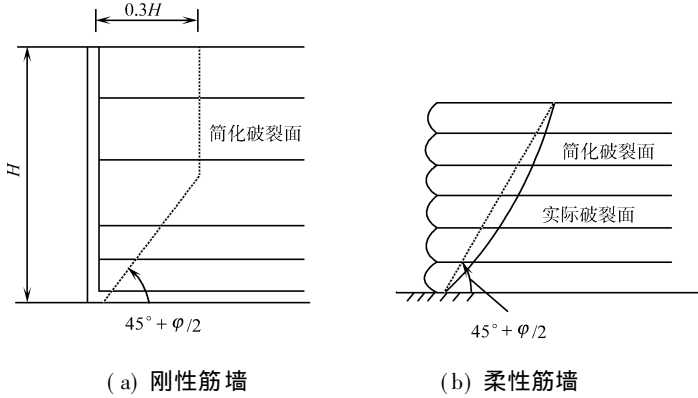


图 1 两类加筋土挡墙的破裂面

Fig. 1 Two types of rupture surface of reinforced retaining wall

$$H_{k+1} = H_k + q_k q_k^T / q_k^T S_k - H_k^T H_k / S_k^T H_k S_k,$$
$$S_k = x_{k+1} - x_k,$$

$$q_k = -\nabla f(x_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x_{k+1}) - [\nabla f(x_k) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x_k)].$$

(2) 二次规划问题求解. SQP 方法的每一次主迭代都要求解 1 个二次规划(QP)问题. 目标函数为 $\min \frac{1}{2}x^T Hx + x^T x$, 其约束方程: 当 $i = 2, \dots, m_e$ 时, $A_i x = b_i$; 而当 $i = m_e + 1, \dots, m$ 时, $A_i x \leq b_i$.

(3) 一维搜索和目标函数计算. 一维搜索时, 注意 SQP 算法的初始化, 如果从 SQP 方法得到的当前计算点不合适, 可通过求解线性规划问题得到初始值, 详见文[7].

2.2 函数的选择

加筋土挡墙的优化设计可以通过 Matlab 6.5 优化工具箱实现, 该工具箱提供了一个 CONSTR 函数. 使用 SQP 算法, 可以方便地实现非线性目标函数和约束函数下的优化问题. 其完整格式如下表示: $[X, \text{OPTIONS}, \text{LAMBDA}, \text{HESS}] = \text{CONSTR}(' \text{FUN}', X_0, \text{OPTIONS}, \text{VLB}, \text{VUB}, ' \text{GRADFUN}', P_1, P_2, \dots)$. 式中, 'FUN' 为定义目标函数的 m 文件, X_0 为初始解向量, OPTIONS 为设置可选参数的值, 而不采用缺省值; VLB 和 VUB 分别为解向量的上下界, 即解向量必须满足 $\text{VLB} \leq X \leq \text{VUB}$. 'GRADFUN' 为使用由函数 grad 计算的梯度信息, 函数 grad 在 m 文件 grad.m 中定义, P_1, P_2, \dots 为传递附加的参数. X 为返回的最优解. OPTIONS 为返回在计算中使用的一些参数, LAMBDA 为返回的拉格朗日乘子, HESS 为返回最后一次迭代的 HESSIAN 矩阵值 HESS.

3 工程算例

某山坡地建变电站, 为了扩大变电站前的空地范围并建设绿化带, 建造加筋土挡墙. 山坡地为粉质粘土, 挡墙高 6 m, 采用规格为 120(方案 1) 或 150(方案 2) 的裂膜丝机织土工布作为加筋材料, 挡墙面板为预制钢筋混凝土板. 对此加筋土挡墙进行优化设计. 设计参数: 山坡土内聚力 c 为 16 kPa, 内摩擦角 φ 为 22° , 重度 γ_b 为 $18.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 填土压实重度 γ_r 为 $19.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 挡墙与地基的摩擦系数 μ 为 0.35, 土工布与填土的摩擦系数 f 为 0.30, 土工布设计容许抗拉强度 T_a 为 $40 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 或 $50 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$. 规格 120 和 150 的裂膜丝机织土工布径向断裂强度为 $120 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $150 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$.

考虑加筋材料蠕变, 铺设时机械、化学剂和生物破坏因素的影响, 取断裂强度的 1/3 作为设计容许抗拉强度^[1]. 为了防止施工中机械对筋材的损伤, 筋材的纵向间距不宜过小; 间距过大, 也不利于稳定. 通常取 3~4 层碾压后的厚度(每层厚度约 0.2 m) 作为筋材的纵向间距.

为了施工方便和节约造价, 采用等纵向间距的布筋方式, 墙体内的上半部和下半部采用不同的筋材长度. 对于方案 1, s_y 为 0.6 m, L 为 4.6 m(上半部) 和 2.6 m(下半部); 而对于方案 2, s_y 为 0.8 m, L 为 4.8 m(上半部) 和 2.8 m(下半部). 两个方案的剖面如图 2 所示.

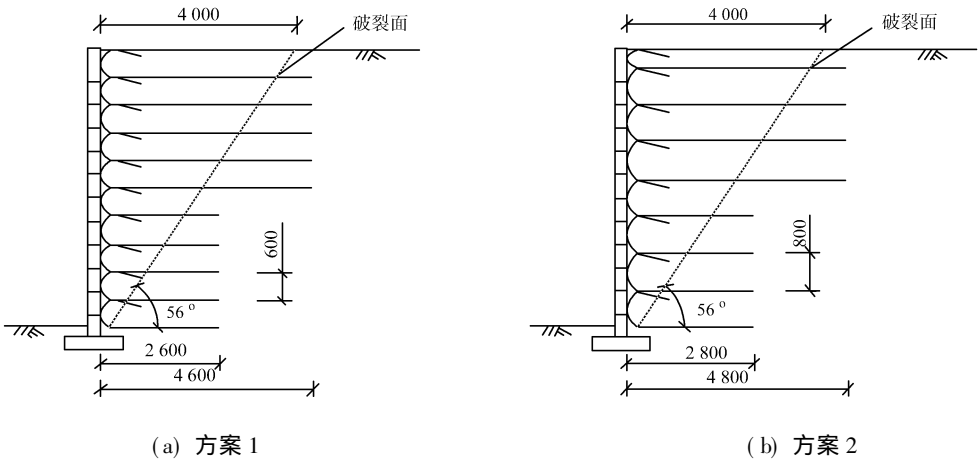


图 2 土工布布置图(单位: mm)

Fig.2 Layout plans of geotextile (unit:mm)

分别计算该挡墙 2 个方案各破坏模式的安全系数, 结果如表 1 所示. 由表 1 可以看出, 设计均满足要求, 加筋土挡墙外部稳定(挡墙的抗倾和抗滑) 的安全系数远高于设计值, 起控制作用的是挡墙内部稳定(筋材的抗拉和抗拔) . 土工布的裁减长度等于 L 加上包裹长度(包裹土层的厚度+ 1. 2 m) . 因此, 优化后每延米挡墙的土工布总长度, 方案(1) : $5 \times (4. 6+ 0. 6+ 1. 2) + 5 \times (2. 6+ 0. 6+ 1. 2) = 54$ m; 而方案(2) : $4 \times (4. 8+ 0. 8+ 1. 2) + 4 \times (2. 8+ 0. 8+ 1. 2) = 46. 4$ m, 后者相对节省了 14% 的筋材.

表 1 破坏模式的安全系数

| Tab. 1 Safety factors of failure modes | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|
| 项目 | K_l | K_b | K_q | K_h |
| 方案 1 计算值 | 1. 24 | 1. 32 | 59 | 3. 0 |
| 方案 2 计算值 | 1. 55 | 1. 32 | 63 | 3. 2 |
| 设计值 | 1. 20 | 1. 30 | 1. 6 | 1. 5 |

4 结束语

对于加筋土挡墙, 以筋材总长度最小为控制目标, 不发生破坏为约束条件的优化设计数学模型的建立与使用, 能够达到优化设计的目的. 实际工程中, 可根据优化结果, 综合考虑各方面因素, 达到最优效果. Matlab 程序语言简单易懂、功能强大, 其优化工具箱里的函数对于优化设计具有很好的使用价值和应用前景.

参考文献:

[1] 中国标准出版社第一编辑室. 土工合成材料标准汇编[M] . 北京: 中国标准出版社, 2000.
[2] 林 琳, 张云波. 基于 M ATLAB 的桁架结构优化设计[J] . 低温建筑技术, 2003(1) : 34- 36.
[3] 陈 跃, 高轩能. 门式刚架优化设计方法研究[J] . 南昌大学学报: 工科版, 2003, 25(2) : 78- 81.
[4] 王继宗, 梁晓颖, 梁宾桥, 等. 基于 M atlab 语言的高性能混凝土配合比优化设计[J] . 工业建筑, 2005, 35(1) : 1- 4.
[5] 常方强, 涂 帆. 加筋土挡墙的可靠性分析[J] . 工业建筑, 2005, 35(1) : 53- 55.
[6] 李 涛, 贺勇军, 刘志俭, 等. Matlab 工具箱应用指南——应用数学篇[M] . 北京: 电子工业出版社, 2000.
[7] 薛履中. 工程最优化技术[M] . 天津: 天津大学出版社, 1989: 146- 210.

Optimal Design of Reinforced Retaining Wall

TU Fan¹, CHANG Fang-qiang²

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. College of Environmental Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266110, China)

Abstract: An mathematical model of nonlinear constrain programming by taking the length of geotextile as an objective function and taking no destruction as the constrain condition, is established for the optimal design of reinforced retaining wall. The function in Matlab toolbox of optimization is used to solve the model. The optimal design for a reinforced retaining wall is conducted. The comparison between two optimal designs with two types of geotextile respectively, shows: the volume of the geotextile with higher strength is 14% less than the one with ordinary strength; and the safety factor of external stability of reinforced retaining wall is much higher than the design value, so the control condition is its internal stability.

Keywords: reinforced retaining wall; optimal design; Mat lab language; nonlinear constrain programming

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)