

文章编号: 1000-7598-(2007) 09-1969-05

重力式挡土墙的截面优化设计研究

陈栋梁^{1,2}, 党进谦²

(1. 陕西理工学院 土木工程与建筑系, 陕西 汉中 723001; 2. 西北农林科技大学 水建学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以重力式挡土墙的截面面积为目标函数, 以满足挡墙稳定条件和地基承载力条件为约束, 将挡土墙最优截面尺寸的选取问题转化为一个带约束的非线性最优化问题, 用乘子法求解, 编制了相应的计算程序。基于该计算程序选取不同参数进行计算比较, 分析了不同参数取值对最优截面面积的影响。通过一个工程实例的应用, 验证了其优化成果是可观的。

关键词: 重力式挡土墙; 优化设计; 乘子法

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

Study on optimum cross-section of gravity retaining wall

CHEN Dong-liang^{1,2}, DANG Jin-qian²

(1. Shaanxi University of Technology, Department of Civil Engineering and Architecture, Hanzhong 723001, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: Taking the cross-sectional area of a gravity retaining wall as the objective function, and regarding the stability of gravity retaining wall and the bearing capacity of groundwork as restraint conditions, and then the problem of best cross-section selection of gravity retaining wall can be transformed to a question to solve a nonlinear optimal design under some specific restrictions; and then to solve it by the PHR method. Base on the theory interpreted above, a corresponding program is compiled to solve the question; and the relationship between soil parameters and the optimum cross-sectional area is analyzed. At last, an example is given; it is shown that the optimum design is better than the original one.

Key words: gravity retaining wall; optimum design; PHR method

1 引言

在道路、桥梁、水利工程中, 挡土墙被大量地应用于支承路堤、堤坝填土或山坡填土。挡土墙的形式有很多, 重力式挡土墙以其结构简单、取材方便、施工容易、造价低廉等优点而被广泛应用。目前, 重力式挡土墙的设计多采用查表法或直接套用定型的设计图集; 或凭经验初步拟定截面尺寸, 再验算其稳定性, 同时根据结果不断调整截面尺寸, 直到满足要求。这些方法要么不够经济合理, 要么对设计人员的经验要求较高, 局限性大, 效率较低。本文以挡土墙截面面积为目标函数, 以满足挡土墙稳定性和地基承载力等为约束条件, 利用乘子法求解这个带约束非线性优化问题^[1], 并编写了相应的计算程序, 可以方便地得出优化结果, 依此选取合

理的截面尺寸, 满足了经济、安全的要求, 且无需设计人员具有较多的工程设计经验。

2 优化设计

本文仅考虑填方挡土墙的优化设计, 选择工程中常用的俯斜式和直立式两种墙型, 采用库仑土压力理论计算, 墙背填土为无黏性土 ($c=0$)。如果是黏性填土, 则按照土体抗剪强度相等的原则, 将土体黏聚力和内摩擦角换算为等效内摩擦角。在主动土压力计算时首先要判断墙后填土是否存在第 2 破裂面, 据此按照《挡土墙土压力计算手册》^[2]选用不同的土压力计算公式。

2.1 设计变量

设计变量共 4 个, 如图 1 所示。 x_1 为墙顶宽度与拟选墙高 H_0 之比, 取值范围为 0.08~0.25; x_2 为

收稿日期: 2005-09-19

修改稿收到日期: 2006-03-15

作者简介: 陈栋梁, 男, 1980 年生, 硕士, 主要从事岩土工程理论计算与试验方面的研究。E-mail: cd11124@sohu.com

论文联系人: 党进谦, 男, 1964 年生, 硕士, 教授, 主要从事岩土工程理论计算与试验方面的研究。E-mail: dangjinqian@163.com

挡墙墙面坡比, 取值范围为 $0.0 \sim 0.5$; x_3 为挡墙墙背坡比, 取值范围为 $0.0 \sim 0.5$; x_4 为挡墙墙底坡比, 取值范围为 $0.0 \sim 0.2$ 。由这 4 个变量取值的不同组合, 就构成了不同形式、不同尺寸的挡墙截面^[3]。设计者对以上某个参数取值有要求时, 可将其事先给定, 则程序可在余下的参数中进行优选计算。比如: 要求墙面直立时, 则可以设置挡墙墙面坡比为 0.0。

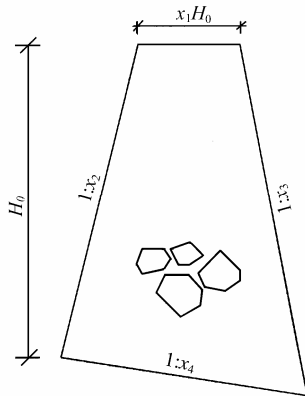


图 1 挡土墙截面图示

Fig.1 The cross-section of the gravity retaining wall

2.2 目标函数

目标函数定义为挡土墙截面面积 $V(x)$, 则

$$V(x) = \frac{1}{2}(x_2 + 2x_1 + x_3)H_0^2 + \frac{1}{2}H_0^2(x_1 + x_2 + x_3)^2 x_4 / (1 - x_3 x_4) \quad (1)$$

式中: H_0 为拟选墙高。

2.3 约束条件

涉及重力式挡土墙的稳定验算, 根据《水工挡土墙设计》^[4]所述, 提出以下约束条件:

(1) 墙底抗滑移约束条件

$$[K_c] - K_c \leq 0, \quad (2)$$

$$K_c = \frac{[G \cos \alpha_0 + E \sin(\alpha + \delta + \alpha_0)]}{E \cos(\alpha + \delta + \alpha_0) - G \sin \alpha_0} f \quad (3)$$

式中: $[K_c]$ 为容许抗滑稳定安全系数; K_c 为计算抗滑稳定安全系数; f 为挡土墙底面与地基土之间的摩擦系数; $G = V(x)\gamma$ 为挡土墙自重; E 为主动土压力; α 为墙背倾角, $\alpha = \arctan(x_3)$; δ 为墙后填土与墙背之间的摩擦角; α_0 为墙底倾角, $\alpha_0 = \arctan(x_4)$ 。

(2) 抗倾覆约束条件

$$[K_0] - K_0 \leq 0 \quad (4)$$

式中: K_0 为抗倾覆稳定安全系数, $K_0 = \frac{\sum M_y}{\sum M_0}$; $[K_0]$

为容许抗倾覆稳定安全系数; $\sum M_y$ 为作用于墙身各力对墙前趾的稳定力矩; $\sum M_0$ 为作用于墙身各力对墙前趾的倾覆力矩。

(3) 基底偏心距约束条件

$$e - 0.25B \leq 0 \quad (5)$$

其中:
$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum M_2}{\sum G} \quad (6)$$

式中: e 为偏心距; B 为挡土墙基底宽度; $\sum G$ 为作用于挡土墙的全部竖向荷载之和; $\sum M_2$ 为各力对前趾端点力矩。

(4) 挡土墙地基应力约束条件

$$P_{\max} \leq 1.2[R], P \leq [R] \quad (7)$$

式中: $P_{\max}$ 为基底最大压力; P 为基底平均压力; $[R]$ 为地基容许承载力。

(5) 变量非负约束条件

$$-x_i \leq 0, i=1,2,3,4 \quad (8)$$

2.4 优化计算方法及程序框图

上述问题为一个带约束非线性规划问题, 可用下列形式来表示:

- (1) 求解 x_1, x_2, x_3, x_4 ;
- (2) 使 $V(x)$ = 极小值;
- (3) 约束条件: $g_j(X_j) \leq 0, j=1, 2, 3, \dots, 8$ 。

此问题中, 变量数 $n=4$, 约束数 $m=8$, 用乘子法将该问题转化为无约束问题后进行求解。具体步骤如下。

(1) 用乘子法将问题转化为无约束极值问题:

$$\psi(x, \lambda, r) = V(x) + \frac{1}{r} \sum_{j=1}^p M_j(x, \lambda, r) \quad (9)$$

其中:

$$M_j(x, \lambda, r) = \left[\max \left(0, \frac{r}{2} \lambda_j + g_j(x) \right) \right]^2 - \left(\frac{r}{2} \lambda_j \right)^2 \quad (10)$$

式中: λ 为乘子; r 为罚系数; p 为约束数。给定初值 $\lambda^1=0, r^1=10, x^1=1$, 令 $k=1$ 。

(2) 用单纯形法求出 $\psi(x, \lambda, r)$ 的极小点 $\bar{x}$ 。

(3) 乘子迭代: $\lambda_j^{k+1} = \max \left[0, \lambda_j^k + \frac{2}{r^k} g_j(\bar{x}) \right]$ 。

(4) 收敛准则: 计算 $|\lambda^{k+1} - \lambda^k|$, 若 $|\lambda^{k+1} - \lambda^k| \leq \varepsilon$,

则结束计算,输出结果 $x^* = \bar{x}$ 。其中 ε 为给定的小值。

(5) 罚系数更新, $r^{k+1} = \max(r^k / c_k, \bar{r})$, 令 $k=k+1$, 返回第2步, 继续计算, 直到结束。其中 c_k 为大于1的常数, 这里取 $c_k = 10$, $\bar{r}$ 为事先给定的下限, 为避免病态问题, 当 $r^k < \bar{r}$ 后不再减小。

该方法的程序计算框图如图2所示^[1]。

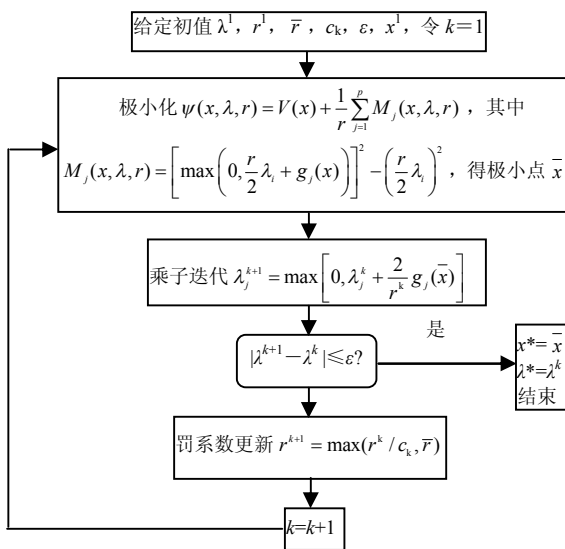


图2 优化计算方法流程图

Fig.2 Flow chart of optimum design

2.5 计算程序

根据上述优化方法和计算流程, 本文用 VB 编制了计算程序, 界面如图3所示。

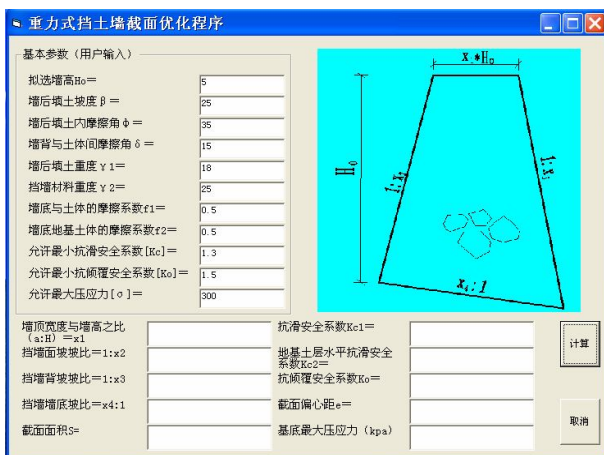


图3 优化程序界面

Fig.3 The interface of program

2.6 优化结果分析

选定不同参数计算, 经比较发现, 在对各参数均无特定要求时, 优化所得结果的变量 x_3 (墙背坡

比) 均为0; 验证了重力式挡土墙的直立、俯斜两种形式中, 在无特别要求情况下, 直立式墙型材料用量较俯斜式要少。

设计变量 x 为连续变量, 得出的某些结果在施工中难以实现。因此, 设计时应以程序所求出的最优截面面积为基础, 将给出的截面尺寸适当调整, 即可达到施工要求, 且满足安全和经济条件。

在重力式挡土墙的设计时, 往往会缺乏试验资料, 此时通常根据规范所提供的参考值选取填土内摩擦角、填土重度、墙背摩擦角、基底摩擦系数、地基承载力等数据。填土重度、基底摩擦系数对抗滑稳定的影响在计算公式中已经表现, 这里只分析填土内摩擦角和填土与墙背摩擦角的选取对最终设计断面面积的影响^[5]。

3 计算参数影响分析

填土的内摩擦角按照文献[2]中列出的填土内摩擦角参考值选取。本文选取工程中比较常见内摩擦角 (此处均指等效内摩擦角), φ 分别取 $26^\circ, 28^\circ, 30^\circ, 32^\circ, 34^\circ, 36^\circ, 38^\circ, 40^\circ$, 填土与墙体摩擦角 δ 分别取 $\varphi/3$ 和 $\varphi/2$, 其他计算参数如下: 墙高 $H_0=5$ m, 地基容许承载力 $[R]=200$ kPa, 基底摩擦系数 $f=0.5$, 墙后填土坡度分别取 $\beta=25^\circ, 20^\circ, 15^\circ$, 与不同的填土内摩擦角相应的最优截面面积 S 如表1~3所示。将以上3个表中所示的计算结果绘制在同一个坐标系下, 见图4。其中横坐标为墙后填土的内摩擦角 φ , 纵坐标为挡墙截面面积 S 。由图可知:

(1) 当填土坡度为 20° 和 15° 时, 填土内摩擦角 φ 与最优截面面积 S 基本呈直线关系, φ 由 $26^\circ \sim 40^\circ$ 每增加 1° , S 约减小 $5\% \sim 7\%$; 当填土坡度为 25° 时, φ 在 $32^\circ \sim 40^\circ$ 范围时, 每增加 1° , S 减小 $6\% \sim 7\%$; 而当 φ 在 $26^\circ \sim 32^\circ$ 范围, 每增加 1° 时, S 减小幅度由大变小, 从 φ 每增加 1° , S 减小 9% , 逐渐变化到 S 减小 7% 。可见, 在墙高和地基土体不变的情况下, 随着墙后填土内摩擦角的减小, 挡土墙所需的最优截面面积逐渐增大, φ 值越小, 面积增幅越大, 且墙后填土坡度大时, 面积增幅明显高于填土坡度较小时。

(2) 挡墙所需最优截面面积在墙背摩擦角 δ 取 $\varphi/3$ 时, 要大于取 $\varphi/2$ 时, S 相差 $5\% \sim 10\%$, 并随着 φ 值增大, S 相差的幅度变大。

表1 墙后填土坡度 $\beta=25^\circ$ 时, δ 分别取 $\varphi/3$ 和 $\varphi/2$ 时对应的 φ - δ - S 关系
Table 1 The relationship between φ , δ and S when $\beta=25^\circ$, $\delta=\varphi/3$ and $\varphi/2$

参数	$\varphi/(^{\circ})$															
	26		28		30		32		34		36		38		40	
墙背 δ°	8.7	13	9.3	14	10	15	10.7	16	11.3	17	12	18	12.7	19	13.3	20
截面积 S/m^2	14.2	13.5	12.1	11.5	10.5	9.8	9.2	8.6	8.1	7.5	7.2	6.6	6.4	5.8	5.7	5.2

表2 墙后填土坡度 $\beta=20^\circ$ 时, δ 分别取 $\varphi/3$ 和 $\varphi/2$ 时对应的 φ - δ - S 关系
Table 2 The relationship between φ , δ and S when $\beta=20^\circ$, $\delta=\varphi/3$ and $\varphi/2$

参数	$\varphi/(^{\circ})$															
	26		28		30		32		34		36		38		40	
墙背 $\delta(^{\circ})$	8.7	13	9.3	14	10	15	10.7	16	11.3	17	12	18	12.7	19	13.3	20
截面积 S/m^2	11.3	10.7	10.1	9.5	9.0	8.4	8.3	7.5	7.2	6.8	6.5	6.1	5.9	5.4	5.4	4.8

表3 墙后填土坡度 $\beta=15^\circ$ 时, δ 分别取 $\varphi/3$ 和 $\varphi/2$ 时对应的 φ - δ - S 关系
Table 3 The relationship between φ , δ and S when $\beta=15^\circ$, $\delta=\varphi/3$ and $\varphi/2$

参数	$\varphi/(^{\circ})$															
	26		28		30		32		34		36		38		40	
墙背 $\delta(^{\circ})$	8.7	13	9.3	14	10	15	10.7	16	11.3	17	12	18	12.7	19	13.3	20
截面积 S/m^2	10.0	9.4	9.0	8.4	8.1	7.6	7.4	6.9	6.7	6.2	6.0	5.6	5.5	5.2	4.9	4.5

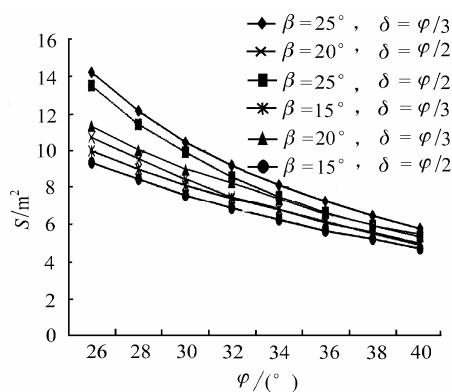


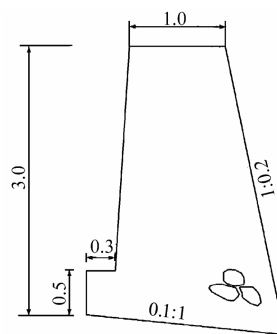
图4 φ - δ - S 关系图

Fig.4 The relationship between φ , δ and S

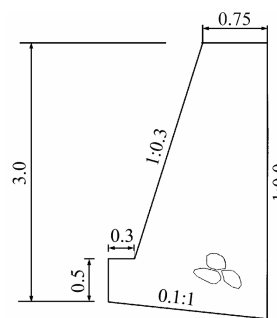
4 实例应用

在贵州某发电厂公路3 m高挡土墙(护脚)的设计中,抗滑验算安全系数为 $K_c \geq 1.3$;抗倾覆验算安全系数为 $K_0 \geq 1.6$;地基承载力的验算中,基底平均应力 $P \leq [R]$,基底最大应力 $P_{\max} \leq 1.2 [R]$ ($[R]$ 为持力层容许地基承载力);设计工况为天然状态(挡土墙自重+主动土压力);墙后填土采用透水性较强的碎石土,内摩擦角 $\varphi=30^\circ$ 。根据工程挡土墙墙背粗糙状况及填土排水条件,采用 $\delta=\varphi/3$ 。根据碎石填土的密实度、充填物状况及风化程度,确定该摩擦系数 $f=0.3$,填土天然重度 $\gamma_1=18 \text{ kN/m}^3$,浆砌石重度 $\gamma_2=23.0 \text{ kN/m}^3$,墙后填土水平,地基容许

承载力 $[R]=200 \text{ kPa}$ 。原设计截面尺寸如图5(a)所示,现按照本文程序计算结果,优化截面尺寸如图5(b)所示,两者所得稳定安全系数和截面积对比如表4所示。



(a) 优化前截面



(b) 优化后截面

图5 优化前后截面示意图(单位: m)
Fig.5 The optimum design compared with the original one (unit: m)

表 4 优化结果对比
Table 4 Comparison between optimum design and original one

方案	抗滑安全系数	抗倾覆安	截面面积
	K_c	全系数 K_0	S/m^2
原设计方案 (图 5 (a))	1.60	4.47	4.48
优化设计方案(图 5(b))	1.59	4.55	3.87

由表 4 中结果可看出，在选取与原设计方案相当的稳定安全系数时，优化后的挡土墙截面面积比原设计方案小，截面面积减小了约 14 %，优化后的成果还是可观的。

5 结 论

本文通过对重力式挡土墙截面优化的研究可得到以下一些结论：

(1) 对于重力式挡土墙，仰斜式的主动土压力最小，在满足一定抗滑移和抗倾覆稳定安全系数时，其截面面积最小；直立式次之，而俯斜式的主动土压力最大，其截面面积最大；故设计时应综合考虑挖、填方情况以及墙前地形情况合理选择墙型。

(2) 墙后填土的内摩擦角越大，挡土墙所需的截面面积越小。在墙高和地基土体不变的情况下，随着墙后填土内摩擦角 φ 的减小，挡土墙所需的截

面面积逐渐增大， φ 值越小，面积增幅越大，并且当墙后填土坡度较大时 ($>25^\circ$)，挡土墙所需的截面面积增幅明显高于墙后填土坡度较小时。故为使作用在挡土墙上的土压力最小，应选择抗剪强度高、性质稳定的粗颗粒材料作填料。

(3) 墙背外摩擦角 δ 越大，挡土墙所需的截面面积越小。当 δ 取 $\varphi/2$ 时，挡土墙所需截面面积与 δ 取 $\varphi/3$ 时相差 5 %~10 %，并且随着墙后填土 φ 值的增大，两者相差幅度增大。因此施工时应注意墙背附近填土的夯实质量以增大外摩擦角，减小作用于墙背的主动土压力。

参 考 文 献

[1] 朱伯芳,黎展眉,张壁城. 结构优化设计原理与应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 1984. 128—154.

[2] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005. 466—470.

[3] 孙文彬,朱军功. 基于 VB 的重力式挡土墙优化设计[J]. 基建优化, 2000, 21 (6): 45—47.

[4] 管枫年,薛广瑞,王殿印,等. 水工挡土墙设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 41—57.

[5] Askin Saribas, Fuat Erbatur. 支挡结构的最优化和敏感性[J]. 池淑兰译. 路基工程, 1998, (1): 66—76.

《建筑科学与工程学报》2008 年征订通知

《建筑科学与工程学报》是由国家新闻出版总署和国家科技部批准，国家教育部主管，长安大学与中国土木工程学会共同主办的学术性期刊。《建筑科学与工程学报》秉承科学精神，以促进学术交流，推动科技进步，提高工程建设水平为宗旨，全面反映建筑科学与工程领域最新研究成果，传播建筑设计的新理念，报道建筑科学与工程领域新理论、新技术、新材料、新工艺，介绍大型重点工程的设计与施工技术；主要刊载建筑学、结构工程、防灾减灾、地下建筑与基础工程、建筑环境与设备工程等专业及相关领域的论文，包括科研、设计、施工方面的研究成果与工程实践总结，同时也刊登建筑材料、桥隧工程、市政工程、力学等专业中与上述学科交叉的论文，并就一些热点和难点问题，开设“专家论坛”和“院士讲座”。

《建筑科学与工程学报》的主要读者对象为：建筑科学与工程领域的科研人员、工程技术人员、大专院校师生及管理决策人员。

《建筑科学与工程学报》为季刊，大 16 开本，128 页，每期定价 10.00 元（含邮寄费），全年共 40.00 元；国内外公开发行，国内邮发代号 52-140，国外邮发代号 Q4981，读者也可汇款至《建筑科学与工程学报》编辑部直接订阅。

开户行：中行西安翠华路支行

账 号：307034148598091001

账 户：长安大学杂志社

电 话：(029)82337253

地 址：西安市南二环路中段长安大学杂志社《建筑科学与工程学报》编辑部

邮 编：710064

E-mail:jzxb@chd.edu.cn