

衡重式挡土墙稳定性的系统可靠性分析

李 磊

河南省郑许高速公路有限公司, 河南 新郑

收稿日期: 2025年6月29日; 录用日期: 2025年7月19日; 发布日期: 2025年7月30日

摘 要

考虑岩土体参数的随机性和失稳模式间的逻辑关系, 建立了衡重式挡土墙稳定性的系统可靠分析方法, 并进行了实例分析。研究表明, 衡重式挡墙是由墙身、填料、地基组成的一个结构系统, 其稳定性受到多种因素的影响, 存在多种失效模式; 挡墙滑移、倾覆、地基承载力不足和墙身剪切等四种模式构成混联系统, 其中抗滑稳定性与抗倾覆稳定性是不相容关系, 并与地基承载力稳定性和抗剪稳定性构成串联系统; 衡重式挡土墙任一单一失效模式下的可靠度并不能等同于其结构系统的可靠度, 对比各单一失效模式的可靠度值, 可找出衡重式挡墙结构系统的最薄弱环节。

关键词

衡重式挡土墙, 稳定性, 可靠度, 系统可靠性

System Reliability Analysis of the Stability of the Balance Weight Retaining Wall

Lei Li

Henan Zhengxu Expressway Co., Ltd., Xinzheng Henan

Received: Jun. 29th, 2025; accepted: Jul. 19th, 2025; published: Jul. 30th, 2025

Abstract

Based on the logical relation between the random and unstable modes of rock and soil parameters, the system reliability analysis method for the stability of the constant weight retaining wall is established, and an example analysis is carried out. The results show that the study of balance weight retaining wall is composed of a wall body, filler, foundation consisting of a structure system, its stability is affected by many factors, the existence of multiple failure modes; retaining wall sliding, overturning and foundation bearing capacity is insufficient and wall shear four mode hybrid system, the anti sliding stability and anti overturning stability is incompatible, and the bearing capacity of

stability and shear stability series system; balance weight retaining wall of any single failure mode reliability and can not be equated with the structure system reliability, compared to the single invalid mode of reliability value, can find the balance weight retaining wall structure system of the weakest link.

Keywords

The Balance Weight Retaining Wall, Stability, Reliability, System Reliability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于岩土材料的变异性、试验方法的局限性等因素影响[1]-[3], 岩土工程设计时的许多参数、模型存在很多随机性, 使得单一安全系数无法反映工程结构的真实安全性。因此, 许多学者开展了边坡与支挡结构的可靠性研究。如, 彭振斌[4]开展了边坡稳定性分析可靠性分析, 罗晓辉[5]基于可靠性理论分析了土钉结构的设计要求, 苏永华[6]研究了松软围岩隧道结构稳定的可靠性估计方法。在山区公路建设中, 路基建设时需要用到大量的挡土墙, 考虑到取材与成本等因素, 目前大多采用重力式挡墙。肖尊群、蔡阳等[7][8]人也开展重力式挡土墙的可靠性分析。作为重力式挡土墙的一种, 衡重式挡土墙因能利用衡重台上部填土的重力, 使墙体重心后移以抵抗土体侧压力, 使基底应力趋于均衡, 增加墙体稳定性, 在高等级公路建设中得到大量应用[9], 这种挡土墙是一个由上墙、衡重台、下墙、填料以及地基组成的土工构筑物, 其稳定性受很多因素影响, 存在滑移失稳、倾覆失稳等多种失效模式, 设计时通常需要一一验算[10]。然后现有研究[11]表明, 支挡结构的各失效模式之间可能相互影响, 单一模式的高可靠度并不代表整个结构体系的高可靠性, 还需从系统的角度对其可靠性进行分析。为此, 本文在分析衡重式挡土墙各失效模式极限状态方程的基础上, 基于系统可靠性理论, 讨论了各失稳模式之间的关系, 建立了衡重式挡土墙的结构系统可靠性计算模型, 并进行了实例分析, 为支挡结构的可靠性分析提供了参考。

2. 结构体系的可靠度

结构体系一般是由多个结构单元构成, 并能完成一定功能关系的组合体。对于某一结构单元, 其影响因素一般有多, 通常可分为结构抗力 R 和荷载效应 S 两类, 则其功能函数可表达为:

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1)$$

当 $Z > 0$ 时, 工程结构可靠; 当 $Z = 0$ 时, 工程结构处于极限状态; 当 $Z < 0$ 时, 工程结构失效。

结构可靠性分析主要是计算 $Z = R - S > 0$ 的概率 P_r (可靠度) 或 $Z = R - S < 0$ 出现的概率 P_f 。目前求解结构可靠度的方法有很多种, 如蒙特卡罗、一次二阶矩法、最大熵法、函数优化法等。

根据单元间的逻辑关系, 结构体系一般可简化为三种模型:

(1) 串联系统。任意一个单元失效, 结构体系即失效, 结构体系的可靠度为:

$$P_s = \prod_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中: P_i 表示第 i 个单元的可靠度。

$$Z = P_u - S = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma B'N_\gamma - \frac{G + E_y}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) = 0 \quad (6)$$

式中：\$P_u\$ 为地基承载力极限值；\$c\$ 为地基粘聚力(kPa)；\$q\$ 为基础两侧土的超载(kPa)；\$B'\$ 为有效宽度，\$B' = B - 2e\$；\$N_c\$、\$N_q\$、\$N_\gamma\$ 为承载力因数；可由下式(7)~(9)确定[12]；\$e\$ 为作用在基底的合力偏心距(m)，可按式(10)计算。

$$N_q = \frac{e \left(\frac{3}{2}\pi - \varphi \right) \tan \varphi}{2 \cos^2 \left(45^\circ + \varphi/2 \right)} \quad (7)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi \quad (8)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{k_{pr}}{\cos^2 \varphi} - 1 \right) \tan \varphi \quad (9)$$

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum M_y - \sum M_0}{\sum N} \quad (10)$$

(4) 墙身抗剪稳定性要求不发生墙身剪切破坏，而墙身剪切破坏一般发生在图 2 所示的 AB 和 AC 两个截面。

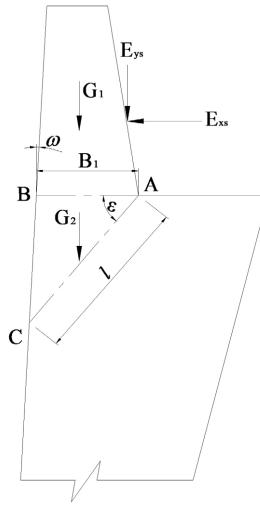


Figure 2. Shear strength calculation of wall body

图 2. 墙身抗剪强度验算

AB 截面(水平截面)和 AC 截面(斜截面)两截面抗剪切的极限状态可分别用式(11)和式(12)表示：

$$Z = \tau_{\text{lim}} - \tau_{AB} = \tau_{\text{lim}} - \frac{E_{xs}}{B_1} = 0 \quad (11)$$

$$Z = \tau_{\text{lim}} - \left[\cos^2 \varepsilon \frac{E_{xs}}{B_1} (1 - \tan \alpha' \tan \varepsilon) + \frac{E_{ys} + G_1}{B_1} \tan \varepsilon (1 - \tan \alpha' \tan \varepsilon) + \frac{1}{2} \gamma_h B_1 \tan^2 \varepsilon \right] = 0 \quad (12)$$

式中，\$\tau_{\text{lim}}\$ 为墙身圬工的抗剪强度(kPa)；\$\tau_{AB}\$ 为 AB 截面上的剪应力(kPa)；\$E_{xs}\$ 为上墙背土压力的水平分量(kN)，\$B_1\$ 为 AB 截面的宽度(m)；\$E_{ys}\$ 为上墙土压力的竖直分力(kN)；\$G_1\$ 为上墙圬工重力(kN)；\$G_2\$ 为 \$\triangle ABC\$ 部分的圬工重力(kN)；\$\gamma_h\$ 为圬工的容重(kN/m\$^3\$)；\$l\$ 为剪断面的长度(m)，其他符号意义同上。

衡重式挡土墙的系统可靠性

衡重式挡土墙有四种失效模式，然后构形成一个混联系统。其中挡土墙倾覆失稳与滑动失稳这两种失效模式是不相容的，不可能同时发生；然后再与地基承载力不足和剪应力破坏两者失效模式构成串联系统。即只要其中有一种失效模式发生，挡土墙就会失稳。逻辑关系图如图 3 所示。因此，衡重式挡土墙稳定性的可靠度为：

$$P = \min(P_1, P_2) \cdot P_3 \cdot P_4 \quad (13)$$

式中： P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 分别为挡墙抗滑、抗倾覆、地基承载力和墙身抗剪稳定性的可靠度。

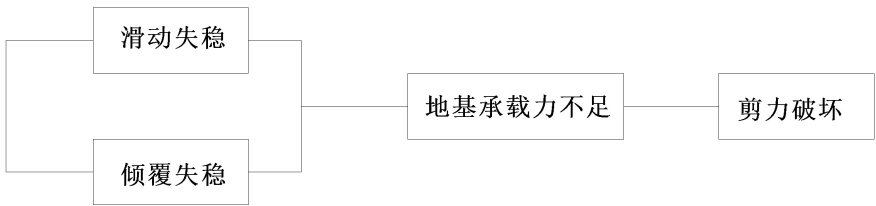


Figure 3. The logical relationship between the failure modes of the balanced weight retaining wall
图 3. 衡重式挡土墙各失效模式的逻辑关系

4. 算例分析

某高等级公路大部分路段的路基都采用衡重式挡土墙进行支挡。为了了解这种支挡方式的可靠性。选取墙高为 10 m 的挡土墙进行分析，其截面尺寸如图 4 所示，挡墙基础埋深 1.2 m，填土面水平(即 $\beta = 0$)，上墙背倾角 $\alpha = 19^\circ$ ，下墙背倾角 $\alpha' = 14^\circ$ ，基底倾斜水平(即 $\alpha_0 = 0$)。

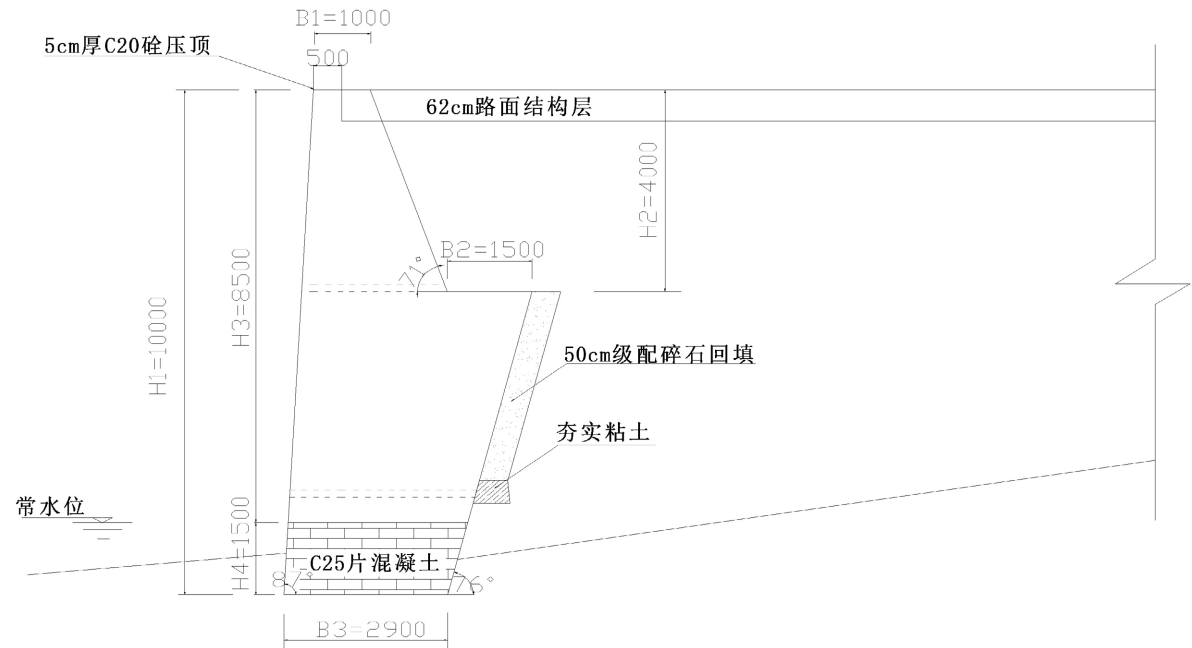


Figure 4. Schematic diagram of longitudinal section of balanced weight retaining wall
图 4. 衡重式挡土墙纵断面示意图

取填料粘聚力 c 和内摩擦角 φ 为随机变量，其均值和方差，见表 1；其他参数变异性较小，作常量处

理，其值为： $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ 、 $q = 10 \text{ kN/m}^2$ 、 $\delta = 20^\circ$ 、 $[\sigma] = 0.19 \text{ MPa}$ 、 $\gamma_s = 22 \text{ kN/m}^3$ 、 $\mu = 0.5$ 。

Table 1. Statistical values of random variables

表 1. 随机变量的统计值

序号	随机变量	均值	方差
1	粘聚力 $c/(\text{kPa})$	5	0.5
2	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	30	4

以抗滑稳定性的可靠度计算为例进行说明。该挡墙基底水平， $|\delta| > |\alpha|$ ，抗滑稳定性计算的极限状态方程为：

$$Z = g(F_R, F_S) = F_R - F_S = \mu(G + E_y) - E_x = 0$$

这一方程的可靠度可根据 Rosenblueth 法求解[12]：有 2 个状态变量，则有 4 个取值点，所有可能组合有 4 个。在 4 个组合下，可根据状态方程得到 4 个状态函数值 Z 为：

$$g_1 = g(\mu_c + \sigma_c, \mu_\varphi + \sigma_\varphi) = g(5.5, 34) = 228.320$$

$$g_2 = g(\mu_c + \sigma_c, \mu_\varphi - \sigma_\varphi) = g(5.5, 26) = 134.955$$

$$g_3 = g(\mu_c - \sigma_c, \mu_\varphi + \sigma_\varphi) = g(4.5, 34) = 228.320$$

$$g_4 = g(\mu_c - \sigma_c, \mu_\varphi - \sigma_\varphi) = g(4.5, 26) = 134.955$$

函数的均值和方差为：

$$\mu_z = \frac{1}{2^n} \sum_{j=1}^{2^n} Z_j = \frac{1}{4} \times (228.320 + 134.955 + 228.320 + 134.955) = 181.64$$

$$\sigma_z^2 = \sum_{j=1}^{2^n} P_j Z_j^2 - \mu_z^2 = 2178.348$$

则标准差 $\sigma_z = 46.673$ 。

设 $Z = g(c, \psi)$ 服从正态分布，可靠度指标 β 为：

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{181.64}{46.673} = 3.9$$

抗滑稳定性的失效概率：

$$P_f = \Phi(-\beta) = 3.088 \times 10^{-5}$$

抗滑稳定性的可靠度： $P_1 = 1 - P_f \approx 1$ 。

Table 2. Reliability index calculation table for each failure mode

表 2. 各失效模式的可靠性指标计算表

失效模式		可靠性指标
抗滑移稳定性 P_1		3.9
抗倾覆稳定性 P_2		4.8
地基承载力稳定性 P_3		1.2
抗剪切稳定性 P_4	水平面剪切	5.5
	斜截面剪切	34.8

同理,可计算其他失效模式的可靠性指标,计算结果见表2。

根据可靠性指标计算结果,斜截面剪切稳定性的可靠性指标足够大,可靠度接近于1。所以抗剪切稳定性只需考虑水平面的剪切稳定性。则衡重式挡土墙稳定性的可靠度为:

$$P = \min(P_1, P_2) \cdot P_3 \cdot P_4 = \min\left[\left(1 - 3.088 \times 10^{-5}\right), \left(1 - 1.053 \times 10^{-6}\right)\right] \times \left(1 - 7.128 \times 10^{-2}\right) \times \left(1 - 3.398 \times 10^{-8}\right) = 0.9287$$

该挡土墙的系统可靠度为 $0.9287 > 0.9$, 故该系统是安全可靠的。单一失效模式中,地基承载力不足的失效概率最大,是整个系统的薄弱环节。要想提高系统的可靠度,应该从提高地基承载力的稳定性着手。而地基承载力不足,主要与基底压力和偏心距过大有关,可以通过扩大基础,或者是换填地基土的方法提高其承载力。

5. 结论

本文基于系统可靠性理论,在分析衡重式挡土墙可能存在的失效模式和对应的极限状态方程基础上,研究各失效模式间的逻辑关系,并利用 Rosenblueth 方法建立可靠度计算模型,求得可靠性指标,进而得出结构系统的失效概率和可靠度,最后再结合具体实例进行分析。主要结论有:

1) 衡重式挡土墙的4种失效模式即:滑移破坏、倾覆破坏、地基承载力不足和剪切破坏,四者构成混联系统,抗滑稳定性与抗倾覆稳定性是不相容关系,并与地基承载力稳定性和抗剪稳定性构成串联系统。

2) 衡重式挡土墙任一单一失效模式下的可靠度并不能等同于其结构系统的可靠度。进行衡重式挡土墙可靠性分析时应对应结构系统的可靠度进行分析,不能只是计算进行单一模式下的可靠度。

3) 对比各单一失效模式的可靠度值,可找出结构系统的最薄弱环节。提高结构系统可靠度的关键在于提高最薄弱环节的可靠度。

参考文献

- [1] 李清富, 健磊, 金朝, 等. 工程结构可靠性原理[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999: 1-5.
- [2] 金碧辉. 系统可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [3] 曾声奎. 系统可靠性分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [4] 彭振斌, 李俊, 彭文祥. 基于 Bishop 条分法的边坡可靠度应用研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(2): 668-672.
- [5] 罗晓辉, 李再光, 何立红. 基于可靠性分析的基坑土钉支护稳定性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 480-484.
- [6] 苏永华, 蒋德松, 赵明华. 松软围岩隧道结构稳定可靠性估计[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(2): 10-13.
- [7] 肖尊群, 刘宝琛, 乔世范, 等. 重力式挡土墙结构模糊随机可靠性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(4): 1522-1527.
- [8] 蔡阳, 罗书学, 刘昌清. 重力式挡土墙结构稳定性的可靠度分析[J]. 四川建筑, 2005(4): 86-87.
- [9] 陈忠达. 公路挡土墙设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [10] 刘泽, 杨果林, 申超, 等. 加筋土结构挡墙系统的可靠性分析[J]. 中南大学学报. 2012, 43(3): 1160-1165.
- [11] 赵明阶. 土质学和土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [12] 罗文强, 龚珏. Rosenblueth 方法在斜坡稳定性概率评价中的应用[J]. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(2): 232-235.