

肋板式锚杆挡土墙构件强度可靠性与岩土参数随机性影响分析

李 谦, 刘 泽, 冯兆仑, 潘 迅, 王禹横

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年9月13日; 录用日期: 2026年10月4日; 发布日期: 2026年10月16日

摘 要

肋板式锚杆挡土墙的受力状态受墙后岩土参数影响显著, 而实际岩土参数具有一定随机性。本文以普通肋板式锚杆挡土墙为研究对象, 将土体重度、黏聚力和内摩擦角作为基本随机变量, 建立主动土压力向面板、肋柱及锚杆连续传递的可靠度计算模型, 并基于JC验算点法分析面板受弯、肋柱受弯、锚杆杆体受拉和锚固段抗拔4种失效模式的可靠水平及岩土参数变异性的影响。研究表明: 基准工况下, 肋柱受弯可靠指标为3.62, 是挡墙的控制失效模式; 面板受弯可靠指标为4.27, 锚杆杆体受拉和锚固段抗拔可靠指标均大于7, 具有较高的安全储备。内摩擦角对各失效模式可靠度的影响最大, 黏聚力次之, 土体重度相对较小。岩土参数离散程度增大会显著降低体系可靠度, 且肋柱受弯始终为控制失效模式; 当黏聚力变异系数不超过14%时, 体系控制可靠指标可维持在3.2以上; 对比不同墙高可知, 岩土参数敏感度与挡墙高度呈正相关, 控制失效指标也随墙高增加从肋柱变为面板。研究结果可为肋板式锚杆挡土墙的可靠度评价与设计提供依据。

关键词

锚杆挡土墙, 可靠度, 极限状态, JC验算点法, 岩土参数

Analysis of the Influence of Geotechnical Parameter Randomness on the Strength Reliability of Rib-Plate Anchor-Retaining Wall Components

Qian Li, Ze Liu, Zhaolun Feng, Xun Pan, Yuheng Wang

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: September 13, 2026; accepted: October 4, 2026; published: October 16, 2026

文章引用: 李谦, 刘泽, 冯兆仑, 潘迅, 王禹横. 肋板式锚杆挡土墙构件强度可靠性与岩土参数随机性影响分析[J]. 土木工程, 2026, 15(10): 16-27. DOI: 10.12677/hjce.2026.1510234

Abstract

The mechanical response of ribbed anchored retaining walls is strongly affected by geotechnical parameters behind the wall, which exhibit inherent randomness. In this study, a conventional ribbed anchored retaining wall is investigated. Soil unit weight, cohesion, and internal friction angle are treated as basic random variables, and a reliability model is established to represent the continuous transfer of active earth pressure to the facing panel, rib column, and anchors. The JC checking-point method is employed to evaluate the reliability of four failure modes, namely facing-panel bending, rib-column bending, anchor-tendon tension, and anchorage pullout, as well as the influence of geotechnical parameter variability. Results show that under the baseline condition, the reliability index of rib-column bending is 3.62, making it the governing failure mode; the index for facing-panel bending is 4.27, while those for anchor-tendon tension and anchorage pullout exceed 7, indicating substantial safety reserves. The reliability of all failure modes is most sensitive to the internal friction angle, followed by cohesion and soil unit weight. Increasing parameter variability markedly reduces system reliability, with rib-column bending remaining the governing mode. When the coefficient of variation of cohesion does not exceed 14%, the governing reliability index remains above 3.2. By comparing different wall heights, it can be observed that the sensitivity of geotechnical parameters is positively correlated with the height of the retaining wall; likewise, the control failure index also varies from the rib columns to the panel as the wall height changes. The results provide a basis for reliability assessment and design of ribbed anchored retaining walls.

Keywords

Anchored Retaining Wall, Reliability, Limit State, JC Checking-Point Method, Geotechnical Parameters

Copyright © 2026 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

肋板式锚杆挡土墙由挡土板、肋柱和锚杆等构件组成,墙后土压力经挡土板传递至肋柱,再由肋柱传递至各排锚杆,最终依靠锚固段与稳定岩土体之间的作用维持结构稳定[1]。实际工程中,土体重度、黏聚力和内摩擦角受地层形成条件、取样试验及施工扰动等因素影响,具有一定离散性。岩土参数变化不仅影响主动土压力,还会沿挡墙传力路径改变面板、肋柱及锚杆的作用效应。已有研究表明,随土体参数变异程度增大,锚固边坡可靠指标总体呈降低趋势,其中不同参数对可靠度的影响程度存在差异[2][3]。因此,仅采用确定性参数进行承载力验算,难以反映岩土参数离散性引起的结构安全水平变化,有必要在挡墙实际传力过程基础上开展可靠度分析。

目前,国内外学者主要围绕挡土墙整体稳定可靠度、锚固边坡及锚杆体系可靠度、可靠度计算方法与安全判据等方面开展了研究。在挡土墙整体稳定可靠度方面,针对传统安全系数难以反映参数随机性的问题,汤彬彬等[4]建立了重力式挡土墙抗滑和抗倾覆可靠指标优化模型,实现了设计参数与可靠指标的协调分析;贾良等[5]针对非线性功能函数可靠度计算效率较低的问题,引入三阶矩法分析抗滑和抗倾覆失效模式,结果表明该方法在保证计算精度的同时能够提高计算效率。刘云龙等[6]考虑孔隙水作用下主动、被动破坏并存的情况,将孔隙水压力引入极限分析可靠度模型,发现挡土墙失效概率随孔隙水压

力系数增大而增加；王成洋等[7]针对单一失效模式所得支护力范围存在局限的问题，建立主动坍塌与被动挤出多失效模式可靠度模型，结果表明考虑多失效模式后得到的支护力范围更为合理。宋鑫华等[8]进一步考虑非线性土压力及第二破裂面的影响，建立非线性极限状态函数，其计算得到的可靠指标较线性分析结果偏小，更趋于安全；陈辉等[9]则将随机场模拟与随机极限分析相结合，研究土体强度参数三维空间变异对挡墙系统可靠度的影响，发现不同随机场工况下失效概率衰减曲线存在明显的交汇区间。在锚固边坡及锚杆挡墙方面，朱彦鹏等[3]基于改进一次二阶矩法建立锚定板挡土墙系统可靠度模型，指出安全系数相近并不意味着可靠指标相近，且填土内摩擦角对可靠度影响最为显著；李忠等[2]研究了黏聚力、内摩擦角和重度变异性对锚杆加固边坡可靠指标的影响，同样发现内摩擦角影响较大而重度影响较小。针对复杂作用及锚杆自身不确定性，董建华等[10]将随机地震作用引入框架预应力锚杆支护边坡可靠度分析，王上上等[11]则从锚固界面参数变异及锚杆性能衰减出发分析其对边坡失稳概率的影响。针对锚杆挡土墙内部多构件、多失效模式问题，唐仁华等[1]建立了肋柱-锚杆串并联可靠度模型，考虑单根锚杆多种失效模式及多根锚杆组合效应；唐仁华、历永杰[12]进一步提出锚杆全概率设计方法，并指出锚固段长度对应的目标可靠指标明显低于钢筋横截面积对应值。在可靠度计算方法方面，宋云连等[13]基于蒙特卡罗法开发了挡土墙可靠度及参数敏感性计算程序；李斌等[14]采用子集模拟方法，在降低计算消耗的同时保持了较好的计算精度；林鑫等[15]提出顺序组件系统可靠度敏感性分析方法，使系统可靠度和参数敏感性能够同步求解；曾鹏等[16]采用拟牛顿近似二阶法，以较低计算量获得了接近经典二阶法的系统失稳概率计算精度。与此同时，张蕾等[17]采用 Copula 函数描述抗剪强度参数相关结构，发现不同相关模型会导致系统失效概率出现较大差异；陈祖煜等[18][19]、李典庆等[20]从相对安全率及广义可靠指标角度建立确定性安全系数与可靠度指标之间的联系，骆佐龙等[21]进一步通过可靠度逆分析确定公路挡土墙稳定安全系数。上述研究从参数随机性、多失效模式、空间变异性、参数相关性及安全判据等方面完善了挡土墙可靠度分析理论，但针对肋板式锚杆挡土墙，已有研究仍主要集中于挡墙整体稳定或锚杆体系可靠度，对岩土参数随机性沿“主动土压力-面板-肋柱-锚杆”传力路径的逐级传播考虑不足，面板、肋柱与锚杆等构件在统一随机输入下的可靠水平及控制失效模式尚缺乏系统比较。

基于此，本文以普通肋板式锚杆挡土墙为研究对象，将墙后土体重度 γ 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 作为基本随机变量，在确定性受力计算基础上建立主动土压力向面板、肋柱及各排锚杆连续传递的可靠度计算模型；分别建立面板受弯、肋柱受弯、锚杆杆体受拉和锚固段抗拔 4 类极限状态函数，采用 JC 验算点法计算各失效模式的可靠指标、失效概率及随机变量方向系数。结合锚杆挡土墙算例，分析岩土参数及其变异程度对各构件可靠度的影响，确定挡墙控制失效模式及主要影响参数，为肋板式锚杆挡土墙在确定性验算基础上的概率化安全评价提供参考。

2. 可靠度理论

2.1. 极限状态与可靠指标

可靠度分析采用功能函数描述结构的承载状态。设基本随机变量为 X ，结构功能函数可表示为：

$$g(X) = R(X) - S(X) \quad (1)$$

式中， $R(X)$ 为结构抗力； $S(X)$ 为作用效应。当 $g(X) > 0$ 、 $g(X) = 0$ 和 $g(X) < 0$ 时，分别表示可靠状态、极限状态和失效状态。为便于比较不同失效模式的安全水平，采用可靠指标 β 进行评价，其与失效概率 P_f 的关系为：

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

式中， Φ 为标准正态分布函数。 β 越大，相应失效概率越小。本文通过极限状态函数反映岩土参数随机性

对构件作用效应及可靠水平的影响。

2.2. JC 验算点法

锚杆挡土墙的作用效应需经主动土压力、荷载传递及结构内力计算获得，其功能函数具有一定非线性。为减小均值点线性化对计算结果的影响，本文采用 JC 验算点法在极限状态面附近迭代确定设计验算点。

对于相互独立的正态随机变量，对功能函数在第 k 次验算点进行一阶 Taylor 展开，可得可靠指标：

$$\beta^{(k)} = \frac{g(X^{(k)}) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X^{(k)}} (\mu_i - x_i^{(k)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X^{(k)}} \sigma_i \right]^2}} \quad (3)$$

第 i 个基本随机变量的方向系数为：

$$\alpha_i^{(k)} = \frac{\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X^{(k)}} \sigma_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left[\left. \frac{\partial g}{\partial X_j} \right|_{X^{(k)}} \sigma_j \right]^2}} \quad (4)$$

根据可靠指标及方向系数，下一次验算点为：

$$x_i^{(k+1)} = \mu_i - \beta^{(k)} \alpha_i^{(k)} \sigma_i \quad (5)$$

不断更新验算点并重新计算功能函数及其梯度，直至可靠指标和验算点满足收敛要求。收敛后的 β 即为相应极限状态的可靠指标。方向系数 $|\alpha_i|$ 可反映各随机变量对可靠度的相对影响程度；当功能函数难以获得显式偏导时，采用中心有限差分计算梯度。

3. 肋板式锚杆挡土墙计算模型

3.1. 计算模型及基本假定

肋板式锚杆挡土墙的剖面图如图 1 所示。墙后侧向土压力首先作用于挡土板，挡土板将荷载传递至肋柱，肋柱再通过各排锚杆将荷载传递至潜在滑动面以外的稳定地层。为突出岩土参数随机性对结构作用效应的影响，并使可靠度模型与常规设计计算相衔接，作如下基本假定：墙背竖直，墙后填土表面水平；按单根肋柱的水平分担宽度建立平面计算模型；挡土板、肋柱截面、配筋、锚杆几何尺寸及材料强度采用设计值；暂不考虑地震、地下水及随机变量相关性。

3.2. 墙后主动土压力

本文采用黏性土朗肯主动土压力模型。考虑墙后填土黏聚力引起的张拉裂缝，距墙顶深度 z 处的主动土压力强度为：

$$p_a(z) = \gamma z K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (6)$$

式中， γ 为土体重度， kN/m^3 ； c 为土体黏聚力， kPa ； K_a 为朗肯主动土压力系数，其计算式为：

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (7)$$

当计算得到的主动土压力小于 0 时取 0，相应张拉裂缝深度为：

$$z_0 = \frac{2c}{\gamma\sqrt{K_a}} \quad (8)$$

当 $z < z_0$ 时土压力取 0，单位长度挡墙的主动土压力合力由有效压力区积分得到。

对于任意一组随机变量 $X = [\gamma, c, \phi]^T$ ，均重新计算 K_a 、 z_0 及主动土压力分布，并将其作为面板和肋柱 - 锚杆体系的荷载输入，以反映岩土参数随机性沿结构传力路径的影响。

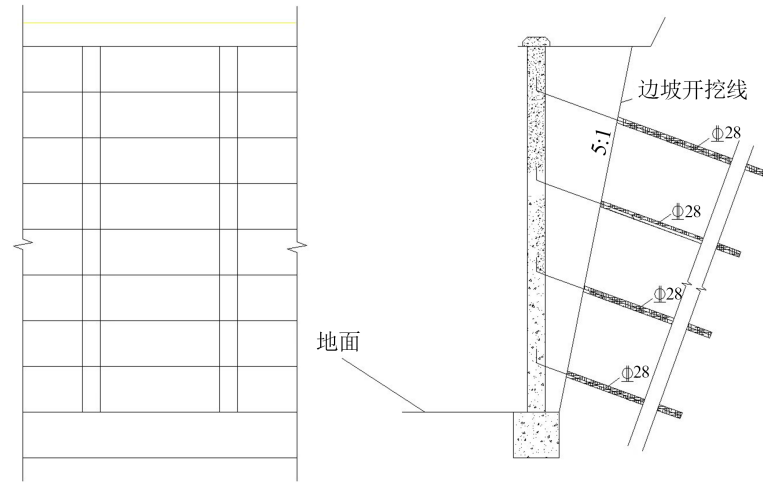


Figure 1. Calculation model of anchored retaining wall
图 1. 锚杆挡土墙计算模型

3.3. 面板内力

挡土板沿水平方向支承于相邻肋柱上，肋柱水平间距为 3 m。取单位高度的水平板条为计算对象，按简支梁计算其跨中弯矩。深度 z 处，面板承受的水平线荷载为：

$$q_p(z) = p_a(z) \times 1 = p_a(z) \quad (9)$$

对应简支板的跨中正弯矩为：

$$M_p(z) = \frac{q_p(z)s_h^2}{8} = \frac{p_a(z)s_h^2}{8} \quad (10)$$

主动土压力强度随深度增大而提高，因此面板最大弯矩出现在墙底位置。面板厚度取 300 mm，按钢筋混凝土受弯构件验算其正截面抗弯承载力。

3.4. 肋柱内力与锚杆拉力

肋柱承受由面板传来的土压力及肋柱直接承受的土压力，单根肋柱的分担宽度等于肋柱间距 s_h ，因此深度 z 处肋柱承受的水平线荷载为：

$$q_r(z) = p_a(z)s_h \quad (11)$$

肋柱为底部固定、顶部自由的竖直梁，沿墙高在 1 m、3 m、5 m、7 m 处设置 4 道锚杆，每道锚杆提供弹性支承。采用梁单元刚度法建立肋柱 - 锚杆体系的整体平衡方程：

$$Ku = P \quad (12)$$

式中： K 为体系总体刚度矩阵，由肋柱梁单元刚度矩阵与锚杆法向刚度矩阵组装而成； u 为节点位移向量； P 为等效节点荷载向量，由分布土压力按单元长度转化得到。

求解方程得到节点位移后，可进一步得到肋柱沿墙高的弯矩分布 $M_r(z)$ 、剪力分布 $V_r(z)$ ，以及各排锚杆的墙面法向反力 N_i 。锚杆与墙面法向夹角为 20° ，则第 i 排锚杆的轴向拉力为：

$$T_i = \frac{N_i}{\cos \alpha} \quad (13)$$

取肋柱全高范围内弯矩绝对值的最大值为肋柱受弯控制作用效应 $M_{r,\max}$ ；取各排锚杆轴向拉力的最大值为锚杆抗拉与抗拔的控制作用效应 $T_{\max}$ 。

4. 肋板式锚杆挡土墙可靠度分析理论及算例

4.1. 随机变量及极限状态函数

墙后岩土参数的随机性通过主动土压力传递至结构构件，最终影响各承载功能的安全水平。本文选取墙后土体重度、黏聚力和内摩擦角作为基本随机变量，即：

$$X = [\gamma \quad c \quad \varphi]^T \quad (14)$$

假定三个随机变量服从相互独立的正态分布，构件几何尺寸、材料强度及锚固参数均按设计值取为确定量，因此所得可靠指标为条件可靠指标，主要反映岩土参数离散性对挡墙承载性能的影响。

针对普通肋板式锚杆挡土墙的主要承载失效模式，建立面板受弯、肋柱受弯、锚杆杆体受拉和锚固段抗拔四类极限状态函数：

$$g(X) = R - S(X) \quad (15)$$

式中， R 为构件抗力(定值)， $S(X)$ 为随岩土参数变化的作用效应。

四种极限状态函数如表 1 所示。

Table 1. Limit state functions

表 1. 极限状态函数

状态函数	公式	备注
面板受弯	$g_p(X) = M_{R,p} - M_{p,\max}(X)$	$M_{R,p}$ 为单位高度面板抗弯承载力； $M_{p,\max}(X)$ 为面板最大弯矩
肋柱受弯	$g_M(X) = M_{R,M} - M_{\max}(X)$	$M_{R,M}$ 为肋柱抗弯承载力； $M_{\max}(X)$ 为肋柱最大弯矩
锚杆受拉	$g_S(X) = T_{R,S} - T_{\max}(X)$	$T_{R,S}$ 为锚杆杆体抗拉承载力； $T_{\max}(X)$ 为各排锚杆的最大轴向拉力
锚固段抗拔	$g_B(X) = T_{R,B} - T_{\max}(X)$	$T_{R,B}$ 为锚固段极限抗拔承载力

为识别不同承载极限状态中的最不利环节，定义各失效模式可靠指标的最小值为控制可靠指标 β_{con} ，用于表征控制失效模式。

$$\beta_{con} = \min(\beta_p, \beta_M, \beta_S, \beta_B) \quad (16)$$

式中， β_p 为面板可靠指标； β_M 为肋柱可靠指标； β_S 为锚杆可靠指标； β_B 为锚固段可靠指标。

将控制可靠指标与目标可靠指标 β_T 对比，即可判断挡墙是否满足规定的安全水平；若不满足，可根据控制失效模式的参数敏感性结果，针对性调整构件设计或控制岩土参数变异性。

4.2. 可靠度计算过程

可靠度分析采用统一随机输入下的连续传力计算。对任一组 X ，首先计算主动土压力；随后将土压

力转化为肋柱荷载，求得 $M_{\max}$ 及各排锚杆拉力 T ；最后将作用效应代入相应功能函数。JC 法每次迭代均调用完整受力计算过程，并通过中心有限差分获得功能函数梯度，直至验算点收敛，最后输出可靠指标。

4.3. 工程算例

以某 8 m 高路堑肋板式锚杆挡土墙为例，墙后填土宽度 3 m，肋柱水平间距 3 m，底部为固定端，墙顶自由，沿墙高布置 4 排锚杆。肋柱采用 C30 混凝土现浇矩形截面，面板为钢筋混凝土预制板；锚杆杆体采用 HRB400 级钢筋，锚固段锚入稳定岩层。挡墙具体参数如表 2 所示。

Table 2. Parameters of retaining wall

表 2. 挡墙参数

参数	符号	数值
墙高	H	8 m
肋柱间距	s_h	3 m
面板厚度	h_p	300 mm
肋柱截面	$b \times h$	500 mm $\times$ 600 mm
肋柱配筋	A_s	1964 mm ²
面板配筋	-	1340 mm ²
混凝土强度	-	C30
锚杆直径	d	28 mm
锚固体直径	D	130 mm
锚固长度	L_a	8 m
锚杆倾角	α	20°
截面粘结强度	q_{sr}	1.8 MPa

岩土参数统计特征结合工程勘察资料选取，三个随机变量均按正态分布考虑，统计参数如表 3 所示。

Table 3. Statistical parameters of basic random variables

表 3. 基本随机变量统计参数

随机变量	分布类型	均值	标准差	变异系数
土体重度 γ	正态分布	18.90 kN/m ³	1.00 kN/m ³	5.3%
黏聚力 c	正态分布	20.00 kPa	2.00 kPa	10.0%
内摩擦角 φ	正态分布	16.00°	1.36°	8.5%

在随机变量均值条件下进行确定性计算。计算结果见表 4。

Table 4. Active earth pressure results at mean parameter values

表 4. 均值参数下主动土压力计算结果

计算指标	数值
主动土压力系数 K_a	0.5678
张裂深度 z_0	2.81 m
墙底主动土压力 $p_a(H)$	55.72 kPa
主动土压力合力 E_a	144.62 kN/m
单根肋柱侧向荷载合力 $E_a s_h$	433.87 kN

4.4. 数值模拟验证

为验证肋板式锚杆挡土墙受力模型的合理性, 采用有限元方法对基准工况进行数值模拟分析。数值模型按照工程参数建立, 考虑挡土板、肋柱、锚杆及墙后填土之间的相互作用。土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 混凝土及钢筋构件采用弹塑性模型, 锚杆采用桁架单元模拟。模型底部约束竖向及水平位移, 两侧限制水平位移, 顶部为自由边界。见图 2。

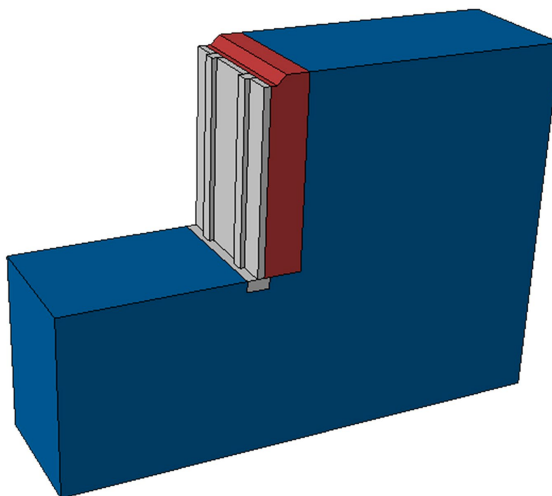


Figure 2. Model schematic diagram
图 2. 模型示意图

图 3 为挡墙模拟所得云图, 其中: 图(a)为挡墙整体位移云图。由图可见, 挡墙在墙后土压力作用下整体向外侧发生变形, 位移主要集中于墙体上部及中上部区域, 结构变形沿墙高呈连续变化趋势, 符合锚杆挡土墙在侧向土压力作用下的基本受力规律。图(b)为肋柱应力云图。由图可见, 肋柱应力沿墙高分布不均, 在锚杆连接部位及肋柱下部区域应力较为集中, 表明肋柱是挡墙体系中的主要受力构件。结合本文理论分析结果可知, 肋柱最大弯矩为控制作用效应, 且基准工况下肋柱受弯为体系控制失效模式。图(c)为锚杆应力云图。由图可见, 各排锚杆均承担一定拉应力, 表明肋柱所受荷载能够有效传递至锚杆体系。结合理论计算中各排锚杆轴向拉力的求解结果, 可以认为数值模拟与理论模型在锚杆受力规律方面具有一致性。

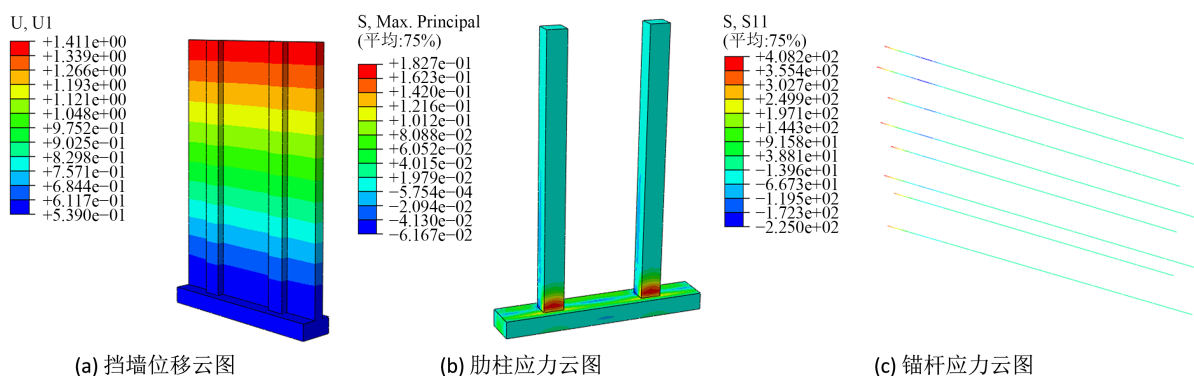


Figure 3. Simulation cloud image of retaining wall
图 3. 挡墙模拟云图

由表 5 可知, 数值模拟结果与理论计算结果总体较为接近, 肋柱最大弯矩及锚杆轴力的变化规律基本一致。两种方法所得结果存在一定差异, 但误差较小, 是由于数值模拟中考虑了结构与土体之间的整体相互作用。总体而言, 两种方法能够反映相同的受力特征, 验证了本文建立的主动土压力向面板、肋柱及锚杆连续传递计算模型的合理性。

Table 5. Comparison of theoretical calculations and numerical simulation results for key mechanical response
表 5. 关键受力指标理论计算与数值模拟结果对比

类型	理论	模拟	误差
肋柱最大弯矩	218 kN·m	239.2 kN·m	9.72%
锚杆最大拉力	221.7 kN	246.3 kN	11.09%

4.5. 基准工况可靠度分析

以表 3 所列均值作为初始验算点, 对四种极限状态分别执行 JC 迭代。每次迭代均重新计算主动土压力、肋柱内力和锚杆轴向拉力, 并通过中心有限差分计算功能函数梯度, 直至验算点收敛。最终计算结果包括各失效模式可靠指标、失效概率及方向系数, 见表 6。

Table 6. Reliability results under the baseline condition
表 6. 基准工况可靠度计算结果

失效模式	可靠指标	失效概率	α_γ	α_c	α_ϕ
面板受弯	4.27	$9.8 \times 10e-6$	-0.315	0.482	0.817
肋柱受弯	3.62	$1.46 \times 10e-4$	-0.389	0.597	0.705
锚杆杆体受拉	7.18	$3.4 \times 10e-13$	-0.286	0.654	0.699
锚固段抗拔	12.35	$<10e-15$	-0.279	0.661	0.695

由计算结果可知: 基准条件下肋柱受弯可靠指标最低, 为 3.62, 是控制失效模式, 具有一定安全裕度; 面板受弯可靠指标为 4.27, 安全储备充足; 锚杆杆体与锚固段的可靠指标均大于 7, 锚固段因长度达 8 m, 抗拔承载力远大于作用效应, 可靠度储备极高。

从方向系数绝对值来看, 四种失效模式均表现出 $|\alpha_\phi| > |\alpha_c| > |\alpha_\gamma|$ 的规律, 说明内摩擦角对可靠度的影响最大, 黏聚力次之, 土体重度的影响相对较小。其中, 面板受弯状态下, 内摩擦角的控制作用最为明显; 对于肋柱受弯、锚杆杆体受拉和锚固段抗拔, 内摩擦角与黏聚力的方向系数较为接近, 表明二者均为影响结构可靠水平的主要岩土参数。方向系数的符号进一步表明, 土体重度增大将增大主动土压力并降低结构可靠度, 而黏聚力和内摩擦角增大能够降低主动土压力、提高结构可靠度, 与挡墙受力规律一致。

4.6. 参数变异性分析

除随机变量均值外, 参数离散程度同样会影响结构可靠水平。为考察参数总体变异性对体系可靠度的影响, 在保持均值不变的条件下, 设置 20 组变异系数组合, 其中土体重度变异系数由 3%增至 12%, 黏聚力变异系数由 8%增至 45%, 内摩擦角变异系数由 5%增至 22%, 每组工况均重新执行完整的 JC 迭代计算。典型工况的计算结果如表 7 所示。

参数变异性分析表明: 结构可靠指标随岩土参数离散程度的增大而显著降低, 低离散工况下控制可靠指标为高离散工况的 4.37 倍, 说明岩土参数的均匀性对挡墙安全水平影响显著。在全部 20 组工况中,

肋柱受弯始终为控制失效模式；面板、锚杆及锚固段的可靠指标均高于肋柱，不构成体系控制因素。说明肋柱是主要控制结构。当黏聚力变异系数小于 14%时，体系控制可靠指标能够维持在 3.2 以上，满足Ⅱ级安全等级要求；当大于 14%时，可靠指标降至 3.2 以下，需采取措施加强肋柱抗弯能力或控制填土参数离散性。

Table 7. Typical COV combinations and governing reliability indices
表 7. 典型变异系数组合及控制可靠指标

工况	COV_γ	COV_c	COV_ϕ	β_{con}	控制失效模式
低离散工况	3.0%	8.0%	5.0%	4.89	肋柱受弯
基准工况	5.3%	10.0%	8.5%	3.62	肋柱受弯
中等离散工况	7.5%	25%	13%	2.09	肋柱受弯
高离散工况	12.0%	45.0%	22.0%	1.12	肋柱受弯

为确保模型有效，采用相同的变异系数基准值，对 6 m 挡墙四种失效模式分别进行 JC 迭代计算，结果见表 8。

Table 8. Reliability results for the 6 m retaining wall under the baseline condition
表 8. 6 m 挡墙基准工况可靠度计算结果

失效模式	可靠指标	失效概率	α_γ	α_c	α_ϕ
面板受弯	5.12	1.53×10^{-7}	-0.308	0.471	0.827
肋柱受弯	7.86	1.90×10^{-15}	-0.356	0.582	0.732
锚杆杆体受拉	12.47	$<10^{-15}$	-0.274	0.649	0.710
锚固段抗拔	18.23	$<10^{-15}$	-0.268	0.657	0.705

根据数据可知，控制失效模式转变为面板受弯体系控制可靠指标，远高于Ⅱ级目标可靠指标 3.2。与 8 m 墙相比，控制可靠指标提升 41.4%。肋柱受弯可靠指标提升至 7.86；锚杆与锚固段的可靠指标均大于 12，冗余度更高。方向系数规律与 8 m 挡墙一致，内摩擦角对各失效模式可靠度影响最大，黏聚力次之，重度最小；面板受弯对内摩擦角的敏感性尤为突出。

Table 9. Typical COV combinations and governing reliability indices for 6 m retaining wall
表 9. 6 m 挡墙变异系数组合及控制可靠指标

工况	COV_γ	COV_c	COV_ϕ	β_{con}	控制失效模式
低离散工况	3.0%	8.0%	5.0%	6.74	面板受弯
基准工况	5.3%	10.0%	8.5%	5.12	面板受弯
中等离散工况	7.5%	25.0%	13.0%	2.98	面板受弯
高离散工况	12.0%	45.0%	22.0%	1.76	面板受弯

参数变异性分析表明(见表 9)：6 m 挡墙在 20 组工况中，面板受弯始终为控制失效模式；肋柱、锚杆及锚固段的可靠指标均高于面板。体系控制可靠指标随参数离散程度增大而降低，低离散工况下控制可靠指标为高离散工况的 3.83 倍；与 8 m 墙相比，6 m 墙对参数变异性的耐受程度显著提高。当黏聚力变异系数小于 28%时，体系控制可靠指标可维持在 3.2 以上，满足安全等级要求；相较于 8 m 挡墙，6 m 挡墙允许的参数离散范围更大。

综合两挡墙算例结果分析得出,控制失效模式随墙高变化,墙高较大时,肋柱受弯为控制失效模式;墙高较小时,面板受弯成为控制环节。设计时应根据墙高针对性地控制薄弱构件;挡墙对参数变异性的敏感度随墙高增大而提高,8 m 挡墙临界黏聚力变异系数约为 14%,6 m 挡墙提升至约 28%,说明偏高挡墙对岩土参数均匀性的要求更为严格;同时,两种墙高下,内摩擦角均为最敏感的岩土参数,设计与勘察阶段均应重点控制内摩擦角的取值与离散程度。

本文可靠度模型主要考虑墙后土体重度、黏聚力和内摩擦角三项岩土随机因素,结构尺寸、材料强度、锚固界面强度及施工误差均按确定值处理,因此所得可靠指标属于给定结构参数条件下的条件可靠指标,主要用于已有确定性设计基础上的概率化复核及参数影响分析。此外,为突出岩土参数离散性对结构作用效应的传递影响,本文暂假定 γ 、 c 和 φ 相互独立。实际岩土工程中,不同岩土参数之间可能存在一定相关性,尤其是黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的相关关系可能对失效概率和可靠指标产生影响,其影响程度及方向与相关系数大小和具体极限状态函数有关。后续可在现有模型基础上进一步引入随机变量相关系数矩阵,以完善挡墙可靠度评价。

5. 结论

(1) 建立了面板受弯、肋柱受弯、锚杆杆体受拉和锚固段抗拔四类极限状态函数,采用 JC 验算点法求解各失效模式的可靠指标与失效概率,通过方向系数可定量评价各岩土参数对不同失效模式的影响程度。

(2) 算例计算表明:主动土压力系数为 0.5678,张裂深度为 2.81 m,主动土压力合力为 144.62 kN/m;基准变异系数下体系控制可靠指标为 3.62,满足 II 级安全等级要求,肋柱受弯为控制失效模式,内摩擦角和黏聚力为主要影响参数,其中内摩擦角的相对影响程度最大。

(3) 参数变异性分析显示,体系可靠度随岩土参数离散程度增大而显著降低;当黏聚力变异系数不超过 14% 时,体系可维持 II 级安全水平。该方法可为锚杆挡土墙从确定性验算向概率化评价提供技术支撑。

(4) 对比不同墙高发现,挡墙对岩土参数均质性敏感度随墙高增加而增加,控制失效指标从肋柱变为面板。

参考文献

- [1] 唐仁华, 陈昌富. 锚杆挡土墙可靠度分析与计算方法[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1389-1395.
- [2] 李忠, 丁盛环, 叶帅华. 土体参数变异性对框架锚杆加固黄土边坡可靠度影响分析[J]. 兰州理工大学学报, 2021, 47(2): 127-131.
- [3] 朱彦鹏, 马孝瑞, 魏鹏云. 基于改进一次二阶矩法的可靠度理论在高填方边坡加固中的应用[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(27): 351-357.
- [4] 汤彬彬, 陈东, 赵紫红, 等. 基于可靠度指标优化模型的挡土墙稳定性分析[J]. 西部交通科技, 2022(3): 6-10, 22.
- [5] 贾良, 伦培元. 基于矩法重力式挡土墙可靠度设计方法研究[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 1-5.
- [6] 刘云龙, 张道兵, 张标, 等. 基于孔隙水效应的多失效模式下挡土墙可靠性分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(1): 1-9.
- [7] 王成洋, 张佳华, 肖超, 等. 基于响应面法的挡土墙多失效模式可靠度分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(4): 882-890.
- [8] 宋鑫华, 闫鸿浩, 徐佩洪. 基于非线性化衡重式挡土墙稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(2): 98-103.
- [9] 陈辉, 薛亚东, 张东明, 等. 三维土体强度参数空间变异下重力式挡墙系统可靠度分析[J]. 岩土力学, 2025, 46(12): 3973-3984.
- [10] 董建华, 董旭光, 朱彦鹏. 随机地震作用下框架锚杆锚固边坡稳定性可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 41-47.

-
- [11] 王上上, 陈富, 李东贤, 等. 锚杆不确定性对加固边坡失稳概率的影响[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 282-289.
 - [12] 唐仁华, 历永杰. 基于全概率法的锚杆挡墙中锚杆设计[J]. 公路交通科技, 2019, 36(12): 47-52.
 - [13] 宋云连, 付宇, 等. 基于 MATLAB 的重力式挡土墙可靠度计算程序开发及其应用[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(2): 96-101.
 - [14] 李斌, 胡学超. 基于子集模拟的铁路路基重力式挡土墙系统可靠度分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(5): 953-958.
 - [15] 林鑫, 谭晓慧, 董小乐, 等. 基于顺序组件法的系统可靠度敏感性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 98-106+201.
 - [16] 曾鹏, 陈语, 李天斌. 基于拟牛顿近似二阶法的岩土工程系统可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 726-733.
 - [17] 张蕾, 唐小松, 李典庆, 等. 基于 Copula 函数的岩土结构物系统可靠度分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 193-202.
 - [18] 陈祖煜, 黎康平, 李旭, 等. 重力式挡土墙抗滑稳定容许安全系数取值标准初探[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 1-10.
 - [19] 陈祖煜, 詹成明, 姚海林, 等. 重力式挡土墙抗滑稳定分析安全判据和标准[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2129-2137.
 - [20] 李典庆, 周强, 曹子君. 基于广义可靠指标相对安全率的岩土工程设计安全判据[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3977-3986.
 - [21] 骆佐龙, 徐航, 董峰辉. 基于可靠度逆分析理论的公路挡土墙稳定安全系数研究[J]. 结构工程师, 2020, 36(2): 65-70.