

受船行降水作用的内河航道岸坡护面设计：一种概率化无限边坡分析

梁双双

贵州大学土木工程学院, 贵州 550025, 中国

摘要：为使德国内河航道沿岸堤岸免受船行降水所致的局部滑坡破坏，工程上主要采用岸坡护面加以防护。大段堤岸的设计往往只依据数量有限的现场与室内试验，因而在土体力学与水力特性方面存在不确定性。现行设计标准以偏于保守的设计假定和经验知识来处理这些不确定性。本文借助一维随机场与经改进以计入船行降水的无限边坡模型，考察沿垂向非均质的地基特性对所需护面层厚度的影响。在无限边坡假定的适用范围内，研究了内摩擦角与水力传导系数空间变异的影响，并与确定性基准算例相比较。结果表明，确定性设计所获得的安全水准强烈依赖于特征值的选取，其中水力传导系数尤其决定设计的可靠度。某些情形下，水力传导系数取 5% 分位值并不能给出偏安全的所需护面层厚度估计。就有效内摩擦角而言，对透水性较好的土体，取 5% 分位值可能高估所需护面层厚度；对透水性较差的土体，5% 分位值则与随机场分析结果相当。对于有效内摩擦角与水力传导系数同时随机的组合，所考察的各基准算例似乎均能保证工程安全，但对应的可靠度水平并不相同。据此，本文就场地勘察以及水力传导系数与有效内摩擦角特征值的选取提出了建议。

关键词：边坡稳定；船行降水；护面设计；非均质地基特性；随机场

On the Design of Bank Revetments at Inland Waterways Subjected to Ship-Induced Water Level Drawdown: A Probabilistic Infinite Slope Analysis

ShuangShuang Liang

School of Civil Engineering, Guizhou University, Guizhou 550025, China

Abstract: To protect embankments along German inland waterways against local slope sliding failure caused by ship-induced water level drawdown, they are mainly secured by bank revetments. Often, large embankment sections are designed on the basis of a limited number of field and laboratory tests. Thus, uncertainties arise with regard to the mechanical and hydraulic ground properties. Current design standards account for these uncertainties by conservative design assumptions and empirical knowledge. This paper investigates the effects of vertically non-homogeneous ground properties on the required armour layer thickness using 1D random fields and an infinite slope model, which was modified to account for ship-induced drawdowns. Within the limitations of the infinite slope assumptions, the effects of a spatially variable friction angle and hydraulic conductivity are investigated and compared to deterministic benchmark cases. The investigations show that the level of safety obtained with the deterministic design depends strongly on the choice of the characteristic values. Particularly, the hydraulic conductivity determines the reliability of the design. In



some cases, the 5 % quantile of the hydraulic conductivity does not yield a conservative estimate of the required armour layer thickness. In the case of the effective friction angle, the 5 % quantile may overestimate the required armour layer thickness for permeable soils. For less permeable soils, the 5 % quantile meets the solution of the random field analyses. For the combination of random effective friction angle and random hydraulic conductivity, all investigated benchmark studies seem to ensure engineering safety, but on different reliability levels. Based on these findings, recommendations regarding site exploration and choice of characteristic values of hydraulic conductivity and effective friction angle are provided.

Keywords: Slope stability; Ship-induced drawdown; Revetment design; Non-homogeneous ground properties; Random fields

一、引言

为保证航行安全与便利并保护毗邻地带，内河航道的斜坡式岸坡通常设有岸坡防护。由散抛或灌浆护面块石铺设于反滤层之上构成的护面，是德国内河航道最常见的岸坡防护型式。为防止边坡受冲蚀，水力设计确定抵御波浪与水流所需的最小护面块石粒径；岩土设计则评估为保证堤岸在船行降水作用下稳定所需的护面层厚度[1-2]。本文研究的是所需护面层厚度，并聚焦于以船行荷载控制设计的运河。

当船舶在断面受限的航道中航行时，会引发一系列波浪与水流（见图 1）。本文讨论的是一次波系的船行降水。降水源于船体对过水断面的压缩，使流速增大，从而使船侧水位降低[3]。就护面层厚度设计而言，船行降水起决定作用[2]。若水位下降的速度快于堤岸土体孔隙水压力为达到新的静水平衡而调整的速度，就可能产生超孔隙水压力[4]。超孔隙水压力使有效应力减小，从而降低土体抗剪强度，可能导致沿地基中某一破坏面的局部边坡滑动或土体液化。护面的附加质量则可提高堤岸抵抗滑动破坏与液化的能力。

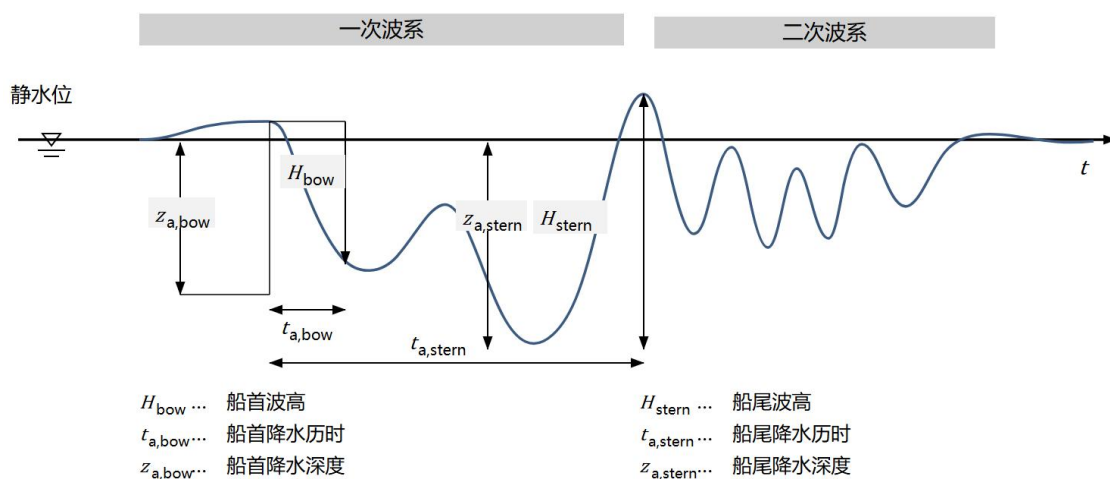


Figure 1 Schematic Illustration of Ship-Induced Drawdown Heights at Bow and Stern and Corresponding Drawdown Times over Time

图 1 船首 ($z_{a,bow}$) 与船尾 ($z_{a,stern}$) 船行降水深度及相应降水历时 ($t_{a,bow}$ 、 $t_{a,stern}$) 随时间 t 变化的示意图。

与任何岩土设计一样，护面设计中特征值（如水力传导系数 k 与内摩擦角 ϕ' ）的选取受多种不确定性影响[5]：地基的空间变异性、勘察方法带来的误差与不确定性、所用换算模型，以及样本数量有限造成的统计不确定性。目前，德国内河航道的堤岸稳定分析所用特征值并未显式计入土体条件的空间变异[2]。然而可以设想，

透水与弱透水区域的位置及其“成层”情况,与空间变异的抗剪强度相组合,可能对堤岸稳定产生很强的影响。因此,现行设计流程所得方案在安全性、经济性与生态性方面未必总是最优。

为研究土体空间变异对边坡稳定的影响,Griffiths 等提出了一种结合无限边坡模型与随机场理论的简化概率分析方法[6]。此后,多位学者把无限边坡分析与随机场结合,用以研究降雨入渗条件下具有空间变异土体的边坡稳定性[7-8]。Zhou 等将其推广至非饱和边坡分析。Cai 等则提出了抗剪强度参数空间变异条件下边坡稳定可靠度分析的解析解。

本文研究垂向非均质土层剖面对所需护面层厚度的影响。为此,对无限边坡模型加以改进,使之计入船行降水、由此产生的超孔隙水压力以及护面层。在无限边坡假定的适用范围内,借助一维随机场考察内摩擦角与水力传导系数空间变异的影响。引入空间变异的土体参数,可显式计入空间变异性,从而评估现行设计方法所获得的安全水准。在涵盖局部变异与空间变异的参数研究中,将确定性基准解与概率化随机场分析结果相比较。

本文的结构如下:首先介绍无限边坡模型,并简要涉及孔隙水压力的确定、随机场的生成以及分析所用的参数组合;随后就护面块石层所需厚度给出随机场分析结果,并与确定性基准解相比较;第四部分给出边坡破坏概率,亦即现行安全水准;第五部分讨论方法与结论;最后就场地勘察、特征值选取给出建议,并展望后续研究。

二、基本公式与方法

(一) 无限边坡模型的设计方程

一维无限边坡模型是最古老、最简单的边坡稳定分析模型之一,它把边坡视为沿坡向上下无限延伸。在任一竖向断面条件相同、破坏面平行于坡面的假定下,该模型以解析方式评价单个竖向“土柱”的极限平衡。本文所列一维无限边坡模型方程沿用 Zhou 等的表述,并加以改进以计入降水所致超孔隙水压力与稳定堤岸的护面层。

假定剪应力 $\tau(v, y)$ 与抗剪强度 $\bar{\tau}(v, y)$ 在沿坡向任一给定深度 y 处为常量,其中 v 表示计算中所含的随机变量。土体参数的空间变异按一维随机过程建模。对无限边坡而言,任一平面的破坏判据是该面上的 $\tau(v, y)$ 超过 $\bar{\tau}(v, y)$ 。按可靠度工程常用记法,破坏判据以极限状态函数 g 表示如下:

$$g(v, y) = \bar{\tau}(v, y) - \tau(v, y) \quad (y \in [0, y^*]) \quad (1)$$

式中, y^* 为所考虑土层的厚度。

剪应力 τ 由有效竖向覆盖应力 σ'_v 引起,后者源自土体与孔隙水的自重。计入坡角 α 后可写为:

$$\tau(v, y) = \sigma'_v(y) \sin \alpha \cos \alpha \quad (2)$$

式中,无护面时的 σ'_v 由式 (3) 确定,有护面时由式 (4) 确定:

$$\sigma'_v(y) = \gamma' y \quad (3)$$

$$\sigma'_v(y) = \gamma' y + [(\gamma_r - \gamma_w) \cdot (1 - n_r)] \cdot \left(\frac{dD}{\cos \alpha} \right) \quad (4)$$

式 (3) 与式 (4) 中包含土体浮重度 γ' 、护面块石饱和重度 γ_r 、水的重度 γ_w 、护面块石层孔隙率 n_r 以及护面块石层厚度 dD 。

抗剪强度 $\bar{\tau}(v, y)$ 以 Mohr-Coulomb 准则描述,其中含作用于土骨架的有效法向应力 σ'_n 、有效内摩擦角 ϕ' 与有效黏聚力 c' , 即:

$$\bar{\tau}(v, y) = \sigma'_n(y) \tan \phi'(y) + c' \quad (5)$$

船舶通过时, σ'_n 因超孔隙水压力 Δp 而减小。

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = \frac{n_s}{K'} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (11)$$

多孔介质与流体的密度 ρ_m 是固相 ρ_s 、水 ρ_w 、气 ρ_g 以及饱和度 S （孔隙空间被水充填的百分比）的混合密度。 S 越低，水—气混合物含气越多，因而混合物的可压缩性越强。

$$\rho_m = n_s(S\rho_w + (1 - S)\rho_g) + (1 - n_s)\rho_s \quad (12)$$

孔隙流体的压缩性（ K' 的倒数）表示如下：

$$\frac{1}{K'} = \frac{S}{K_w} + \frac{1-S}{p_g + p_a} \quad (13)$$

式中， K_w 为水的体积模量， p_g 为气压， p_a 为大气压。由于假定封闭气相与周围水相处于平衡，故 $p_g = \bar{p}_w$ ，其中 $\bar{p}_w$ 为沿深度的静水孔隙水压力平均值。

初始条件假定为位移场为零、孔隙水压力为静水压力。边界条件方面，土柱底部规定位移为零、流量为零；土柱顶部则规定由降水引起的压力以及总面力为零。初始条件与边界条件的详细信息见附录。

本文采用一维渗流—变形有限元模型评估降水所致超孔隙水压力沿深度的分布。诚然，均质边坡中快速降水引起的渗流至少是二维问题；不过如 Ewers 等所示——他们把不同压缩性土体中超孔隙水压力的发展在一维有限元土柱模型与二维有限元边坡模型中作了对比——一维计算可对二维边坡问题给出可接受的近似。

（三）随机场的生成

ϕ' 与 k 的空间变异以两个相互独立的随机场建模。生成随机场的方法众多，如协方差矩阵分解（CMD）法、滑动平均（MA）法、旋转带（TBM）法、快速傅里叶变换（FFT）法以及局部平均细分（LAS）法。

本文仅限于平稳随机场，即两点间的协方差仅取决于其距离。随机场由 CMD 法结合 Cholesky 分解生成。首先生成标准正态分布，其中标准值的空间变化通过带波动尺度 $\theta_{k,\phi'}$ 的相关函数计入：

$$\rho(\Delta y | \theta) = \exp\left(\frac{-2|\Delta y|}{\theta}\right) \quad (14)$$

简言之， $\theta_{k,\phi'}$ 描述了数值在空间上相关的最大距离，即该范围内的数值彼此相关，但相关性随距离增大而减弱。波动尺度的数学定义可参见文献。

随后，依据所建模变量的均值 μ 与变异系数（cov），将标准正态随机场变换为符合目标概率分布特征的相应随机场。标准正态随机场是构建非高斯随机场的基础，其各点之间的空间相关性通过自相关函数予以描述，而实际工程中介质的物理力学参数往往呈现出明显的非高斯性，因此需要通过等概率变换将标准正态场映射到目标分布空间。具体变换过程中，每个空间位置上的标准正态变量均按照累积分布函数等价的准则进行转换，从而完整保留原随机场的空间相关结构，同时确保目标变量在各点上的边缘分布与实测统计特征一致。

本研究假定所涉及的主要随机变量服从对数正态分布，该分布因具有非负支撑集的天然优势，能够确保变量始终满足物理意义上的界限约束，即有效内摩擦角 $\phi' > 0^\circ$ 与渗透系数 $k > 0 \text{ m/s}$ 。这一特性对于岩土工程参数的合理表征尤为重要，因为正态分布假设在均值较小或变异系数较大的情况下，不可避免会产生负值样本，进而导致物理上不可行的计算结果与后续分析的失真。相比之下，对数正态分布不仅在数值上规避了这一问题，而且其偏态特征也更贴合实际参数分布的右偏统计规律，即在均值附近集中大量样本的同时存在少量高值尾部数据。

对数正态分布因其数学形式高度简洁、参数物理意义明确、与高斯分布的转换关系简易，一直是岩土工程空间变异性分析与可靠度研究中的常用选择。其统计参数可由对应高斯分布的均值和对数标准差经过简单的非线性指数变换直接导出，无需引入额外的复杂假设或数值迭代，便于数值实现及后续参数敏感性分析。此外，对数正态分布在多种地质材料和工程条件下的适用性已得到大量实验与现场数据的验证，进一步增强了本研究

所选分布形式的合理性与可信度。图 3 就无限边坡示意性地给出了随机场参数及相应的计算模型。

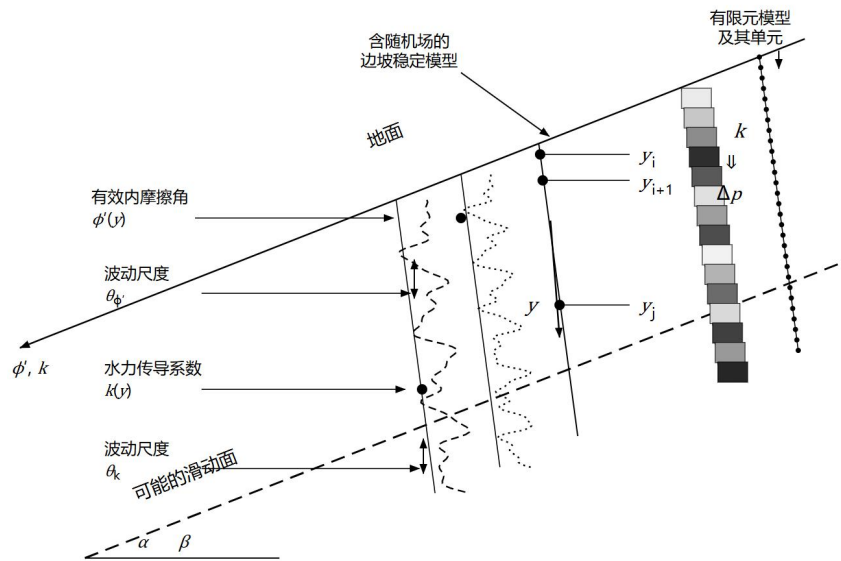


Figure 3 Schematic Diagram of the Random Field Method Applied to an Infinite Slope

图 3 应用于无限边坡的随机场方法示意图。生成 k 与 ϕ' 的随机场；把 k 映射到有限元模型以确定超孔隙水压力 Δp ，再经线性插值回赋给无限边坡模型。

(四) 随机场条件下的护面设计

快速降水的结果是极限状态函数 g (见式 (1)) 在某一深度达到最小值 $g_{\min}$ ，该深度亦称临界深度 d_{crit} 。若 $g_{\min} < 0$ ，则可能发生局部边坡滑动破坏。承载能力取决于层厚与护面块石重量的护面，因能提高有效应力而可防止此类破坏。所需护面层厚度 d_D 由 $g_{\min}$ 处的无限边坡方程导出：

$$d_D \geq \frac{g_{\min}(v)}{(\sin \beta - \tan \phi' \cos \beta) \cdot [(\gamma_r - \gamma_w) \cdot (1 - n_r)]} \quad (15)$$

采用随机场方法进行稳定分析时，运行 50 000 次蒙特卡洛 (MC) 模拟以获得可能结果的分布范围。每次模拟生成一个目标均值与标准差相同、但一维土柱内土性空间分布不同的随机场。在“边坡中任一平面破坏即造成局部破坏”的假定下，每次模拟后记录 $g_{\min}$ 并按下式判别：

$$I = \begin{cases} \text{稳定 (0), } & g_{\min}(v) \geq 0 \\ \text{失稳 (1), } & g_{\min}(v) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中 I 为指示函数。边坡破坏概率 p_f 由破坏次数与模拟总次数 N 之比给出。

$$p_f = P[I = 1] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \quad (17)$$

回顾式 (2) 与式 (4) 可知，铺设护面块石会增大竖向覆盖荷载，从而同时增大应力与强度。然而，剪应力 τ 随覆盖荷载成比例增大，抗剪强度 $\bar{\tau}$ 却因 $\sigma' n$ 乘以 $\tan \phi'$ 而非比例增大 (见式 (5))。由此产生的应力与强度之差，使初始平衡之后仍需增加护面块石。因此，所需护面块石层厚度须通过迭代分析求得。

以一个设计算例为例：首次计算在无护面条件下进行，所需护面层厚度的初次估计可由式 (15) 求得。但如上所述，采用这一新算得的护面层厚度后可能出现 $g_{\min} < 0$ ，因为式 (15) 只计入了初次计算时的荷载状况 ($g_{\min}$)。因此需要追加计算，以判断当前假定的护面层厚度是否足以保证局部边坡稳定。若计算表明尚需更

多护面块石才能满足平衡,则须用每一步所定的护面层厚度对式 (15) 进行第三次、第四次乃至更多次计算,直至验证 $g_{\min} \geq 0$ 。

完整的计算流程见图 4。首先生成含 500 个分层的随机场;依其坐标把空间变异的材料特性映射到含 1000 个单元的有限元模型,以确定由此产生的超孔隙水压力。有限元模型的时间离散取 0.05 倍降水历时 t_a 。随后把超孔隙水压力经线性插值赋给边坡稳定模型。所需护面层厚度即由边坡稳定模型的计算导出,其输入为材料强度与超孔隙水压力。之所以采用超孔隙水压力模型与边坡稳定模型分列的两步法,是为了提高计算效率:超孔隙水压力模型所需的分辨率显著高于稳定分析。随后进行 50 000 次蒙特卡洛模拟以确定所需护面层厚度。每次模拟依据概率密度函数、按相同的统计量 (μ 、 cov 、 θ) 为地基特性重新生成随机场。每完成一次内层迭代循环,即增大护面层厚度,直至 $g_{\min} \geq 0$ 。

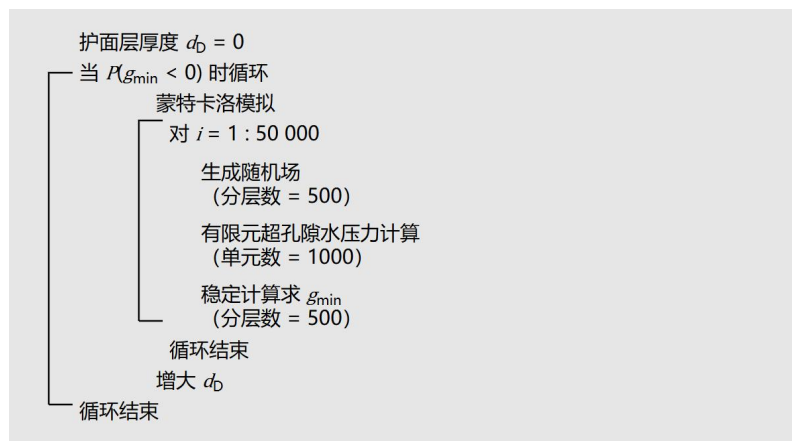


Figure 4 Calculation Procedure to Determine the Layer Thickness with a Random Field

图 4 采用随机场确定护面层厚度的计算流程。

上述反复增大护面层厚度的迭代过程,对基准分析与概率分析同样必要。由于第三部分(一)至(三)着重比较基准分析与概率分析,故给出第一次迭代后的结果。另一项不属本文内容的简要研究表明,第一次迭代的结果足以支撑此种比较。只有在第四部分,才使用给出施工所需护面层厚度的迭代分析来评价 pf 。

(五) 参数组合

土类与降水组合依据德国现行设计标准选取。为便于说明,考察一种透水砂(SW)与一种粉质砂(SU)。粉质砂的水力传导系数比砂小一个量级,而两种土类的内摩擦角取值范围相同;此外粉质砂的有效重度 γ' 较小。变异系数依据文献给出的参数范围确定。弹性特性(即无侧限刚度模量 ES 与 K')假定为常量,因而与空间变异参数无关。本文研究中取 $S = 85\%$ 、 $ES = 30 \text{ MPa}$ 、 $ns = 0.45$ 作为偏保守的估计。

所选降水是就船舶通过标准矩形梯形航道断面而言的最不利假定,且不区分船首与船尾降水。在文献所列荷载组合中,依据一项小型参数研究选取最不利者。把荷载组合与土类相组合,得到表 1 汇总的四个代表性算例。

Table 1 Combinations of Loads and Soil Types with Their Physical Properties

表 1 荷载与土类的组合及其物理特性。

土类	平均有效内 摩擦角 ϕ'	cov	平均水力传导 系数 k	cov	有效重度 γ'	降水历 时 t_a	降水深 度 z_a
----	----------------------	-----	------------------	-----	-------------------	----------------	----------------

—	°	—	m/s	—	kN/m ³	s	m
级配良好砂 (SW1)	35.0	0.01~ 0.04	5.5×10^{-5}	0.05~ 0.50	11.5	4.5	0.63
级配良好砂 (SW2)	35.0	0.01~ 0.04	5.5×10^{-5}	0.05~ 0.50	11.5	27.6	0.83
粉质砂 (SU1)	35.0	0.01~ 0.04	5.5×10^{-6}	0.05~ 0.50	9.5	4.5	0.63
粉质砂 (SU2)	35.0	0.01~ 0.04	5.5×10^{-6}	0.05~ 0.50	9.5	27.6	0.83

模型变量 k 与 ϕ' 的定义如下：随机场的目标均值为常量，而特性相对均值的变化幅度由 cov 控制。对确定性基准解，由于文献并未就特征值的选取给出具体指引，故考虑 ϕ' 与 k 的一个取值区间。下限取分布的 5% 分位值，与局部破坏机制情形下的特征值一致；确定性基准解的上限取均值，这对存在空间平均效应的破坏机制而言是偏乐观的假定。图 5 以两个标准差不同的分布说明了这一做法。此后，计入空间变异的结果记为“rf”，相应的基准结果则以“bm”表示。

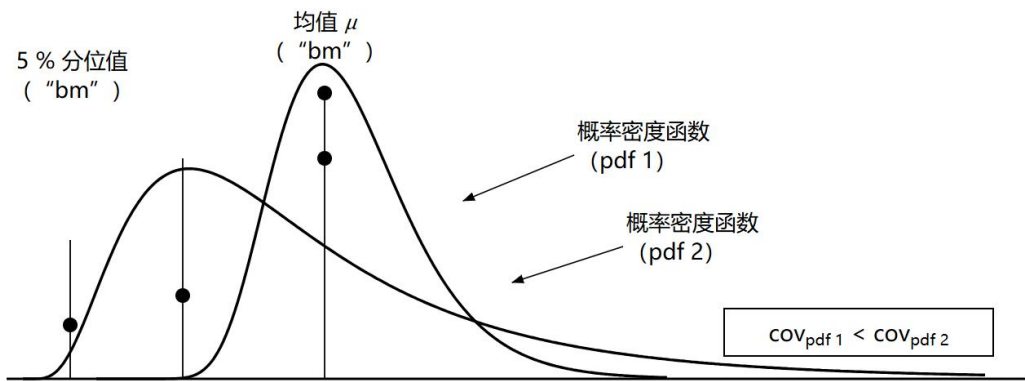


Figure 5 Parameter Definition to Compare the Random Field Analyses to the Benchmark Solution

图 5 随机场分析与基准解比较时的参数定义。黑圆点所示 5% 分位值与均值分别为基准解的下限与上限。

三、结果

(一) 非均质内摩擦角的影响

首先，为考察非均质 ϕ' 的影响，把 k 固定为其均值，而令 $cov\phi'$ 与 $\theta\phi'$ 变化。可以看出，无论确定性“bm”解还是概率“rf”解，所需护面层厚度都是 $cov\phi'$ 的函数。结果表明，随着 $cov\phi'$ 增大，确定性 5% “bm” 结果所需护面块石多于或等于“rf”结果，而确定性均值“bm”计算所需护面块石则更少。 $\theta\phi'$ 增大对所需护面层厚度影响不大。不过，对透水性较差的土体， $\theta\phi'$ 较小时 5% 基准解并不偏于安全。就 $\theta\phi'$ 而言，近地表处低 ϕ' 与低 k 的组合对堤岸稳定至关重要：近地表处超孔隙水压力升高，而土体的上覆荷载与抗剪强度仍然很低，从而导致更大的护面层厚度。

此外还可看出，SW 各算例所需层厚由较小 ta 与中等 za 的组合控制，而 SU 各算例的层厚则由较大 ta 与较大 za 的组合控制。这一现象可由达到准稳态所需的时间来解释——准稳态是指超孔隙水压力的时间变化远小于空间变化。水力传导系数较小的土体达到准稳态所需时间更长，而透水土体则更快达到准稳态。其结果

是：对弱透水材料， ta 较大时超孔隙水压力与护面层厚度更大；而对透水材料， za/ta 比值较大时超孔隙水压力更大，所需护面层厚度也更大。

就护面设计而言，砂性材料的结果表明，取 ϕ' 的 5% 分位值作为特征值可能高估所需护面层厚度；相反，对弱透水土体，结果表明取 ϕ' 的 5% 分位值作为特征值虽非严格偏安全，但可保证工程安全。此外，分析表明 k 与降水参数的组合对设计的影响强于 ϕ' 的变异性。

（二）非均质水力传导系数的影响

本节在 ϕ' 恒定、 $covk$ 与 θk 变化的条件下考察非均质 k 的影响。 k 方差增大对护面层厚度的影响并不显著；“rf”工况中 $covk$ 增大所要求的层厚与 5% “bm” 结果相当。与之相对， θk 较小时所得层厚略小于 5% “bm” 解。较薄的“成层”会降低最大超孔隙水压力，从而减小所需护面层厚度。当 $\theta k \rightarrow 0$ 时， k 趋于调和平均值，它略小于概率密度函数的算术平均值，但大于 5% “bm” 值。水力传导系数的调和平均值 k_{eff} 由 n 个随机场分层 L_i 与其水力传导系数 k_{si} 之比的总和相对总层厚确定，见式 (18)。当 $\theta k \rightarrow \infty$ 时，“rf” 结果趋近 5% “bm”。比较所考虑的两种降水可知，上述现象在降水深度较大而流速较低的情形（SW2、SU2）中比在降水深度较小而流速较高的情形（SW1、SU1）中更为显著。

$$k_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{L_i}{k_{si}}}{\sum_{i=1}^N \frac{L_i}{k_{si}}} \quad (18)$$

就护面设计而言，结果表明 k 的空间变异对所需护面层厚度有显著影响，尤其是透水性较好的土体对不同 θk 下 k 的波动表现出值得注意的敏感性。 k 的 5% 分位值未必如通常所设想的那样偏于安全：在全部四个设计算例中，“rf” 所得护面层厚度仅仅达到 5% “bm” 解所定的层厚。此外，结果还意味着透水性最差的区域在任何情况下都控制着设计；尤其当这些区域厚度超过约 0.25 m 时，它们将起到隔水作用，超孔隙水压力将升高至 5% “bm” 解的水平，因而需要更多护面块石。

（三）非均质内摩擦角与水力传导系数的共同影响

最后，在假定 ϕ' 与 k 不相关的条件下，考察非均质内摩擦角与水力传导系数的组合。为简便起见， $cov\phi'$ 与 $covk$ 同步变化，这与工程实际未必完全一致；不过我们认为，当总体上可获得的信息较少时，不确定性乃至 k 与 ϕ' 的变异性都会同时增大。

均值“bm”计算低估了所需护面层厚度；相反，与不同 $\theta k, \phi'$ 与 $covk, \phi'$ 取值下的“rf”分析相比，5% “bm” 算例高估了所需护面层厚度。随着 $covk, \phi'$ 增大，“rf”与“bm”之间的差距随之扩大。因此， ϕ' 与 k 的特征值应视为 $covk, \phi'$ 的函数。

值得注意的是，随着 $\theta k, \phi'$ 增大，SW 与 SU 各算例表现出不同的性状：两个 SW 算例中，所需护面层厚度先上升直至达到最大值，而 SU 算例则未随 $\theta k, \phi'$ 增大表现出明显影响。这一性状或可由透水土体中超孔隙水压力剖面变异性更大来解释（见第三部分（四））。可以认为，水力传导系数越小，空间变异对超孔隙水压力的影响越弱。

依据这四个算例，可确定设计中需要留意的最不利相关长度。算例表明，取值落在临界深度范围内的相关长度对所需护面层厚度影响最大。SU 各算例的 d_{crit} 在 0.20~0.50 m 之间，而 SW 各算例的 d_{crit} 较大，为 0.40~0.60 m。在 SW 各算例中，当 $\theta k, \phi'$ 小于 d_{crit} 时，5% “bm” 解给出的护面层厚度显著大于概率方法；相反，在 SU 各算例中，当 $\theta k, \phi'$ 大于 d_{crit} 时，概率法所定的所需护面层厚度略有减小。不过分析表明，对 ϕ' 与 k 的组合而言，所考察的各基准算例均能保证工程安全，只是安全水准各不相同。

（四）非均质 ϕ' 与 k 对堤岸稳定性影响的小结

计入垂向非均质的 ϕ' 与 k 会引出两种相互竞争的机制： ϕ' 较大的区域提高堤岸稳定性，因而所需护

面块石较少；而 k 较小则导致更大的超孔隙水压力，从而要求更厚的护面块石层。给出砂与粉质砂在最有利与最不利模拟下，应力、强度、超孔隙水压力与极限状态沿深度的剖面及相应的随机场。自然地， k 取值较低时会出现更大的超孔隙水压力。最不利情形的特征是近地表处 k 较低（且 ϕ' 较低）；反之，近地表处 k 较高则使该区域的超孔隙水压力较小。

再次考察式 (15) 可知，所需护面层厚度由 $g_{\min}$ 决定。特别地，当 k 较低且厚度大于 0.25 m 的岩土单元位于近地表处时，可能出现很大的超孔隙水压力。超孔隙水压力使有效抗剪强度降低，而在近地表土体上覆重量较小的情况下，这只能靠更大的 ϕ' 来补偿。因此在 ϕ' 较大的区域，最大超孔隙水压力更有可能被材料强度所抵偿。据此，护面设计中的地基勘察及后续稳定分析应特别关注 k 与 ϕ' 的变异性，尤其是近地表处。

四、边坡破坏概率

护面的设计或评估可以某一特定可靠度为目标。护面的可靠度是降水、坡度、土体参数与护面层厚度的函数。由于降水、几何与土体参数通常依据可获得的现场信息确定，故选取算例 SW2 与 SU2 的代表性参数组，考察可靠度随护面层厚度的变化。每个算例考察以下组合： $\theta_{k,\phi'} = 0.50$ m 与 $\theta_{k,\phi'} = 1.00$ m； $\text{cov}_{k,\phi'} = 0.20/0.02$ 与 $\text{cov}_{k,\phi'} = 0.40/0.04$ 。

破坏概率 pf 在达到某一阈值之后随层厚增大而相当迅速地下降。 $\text{cov}_{k,\phi'}$ 越大， pf 越大；而 $\theta_{k,\phi'}$ 对 pf 的影响并不显著，不过这可能是因为所考察的 $\theta_{k,\phi'}$ 均小于 d_{crit} 。 $\text{cov}_{k,\phi'}$ 较大时，两种 $\theta_{k,\phi'}$ 所得 pf 相互吻合。

所得破坏概率凸显出：在用无限边坡模型进行护面设计时，迭代分析（见第二部分（四））或使用概率图表十分重要。以 SU2 为例，一次迭代后所得层厚（见第三部分（三））对应 $\text{cov}_{k,\phi'} = 0.20/0.02$ 时 $pf = 80\%$ ，对应 $\text{cov}_{k,\phi'} = 0.40/0.04$ 时 $pf = 40\%$ 。由于 $\text{cov}_{k,\phi'} = 0.20/0.02$ 的概率曲线在关注区间内梯度更陡，所需迭代步长应小于 $\text{cov}_{k,\phi'}$ 较大者。

按 JCSS，对破坏后果较轻而安全措施代价高昂的承载能力极限状态，目标可靠度 $\beta = 3.1$ ($pf = 1 \times 10^{-3}$) 可以接受。以 5% “bm” 值经多次迭代逐步增大层厚所定的护面层厚度，对应 $pf \approx 0.00\% \sim 1.14\%$ ，因而未达到该目标可靠度。在所研究的算例中，确定性分析的偏差随土体变异性增大而增大，且透水土体的偏差大于弱透水土体。若现行安全水准可以接受，则应就极限状态条件与目标可靠度的选取展开讨论；否则，就必须修订现行的特征值选取方法。

五、讨论

本文研究说明了内摩擦角与水力传导系数空间变异对护面设计的影响。所用方法不适合与德国现行标准直接比较，因为基于 Biot 方法的有限元模型所定超孔隙水压力，不同于按文献所定解析近似算得的超孔隙水压力。不过，参数研究表明模型对超孔隙水压力剖面高度敏感，这再次凸显出准确描述孔隙水压力发展的方法的重要性。

此外，本文研究未计入坡脚支承，而坡脚支承会因激发附加的支承剪应力而显著减小所需护面层厚度。就本研究的目的而言，这一简化是可以接受的：坡脚支承不应改变所观察到的机制，但这确实使本文所得层厚偏大。一般可以认为，设置坡脚支承可使所需护面层厚度减小 0.60~0.90 m。

分析中未计入不同土体参数之间的相关性。就所研究的参数而言，其相关性略呈负相关： ϕ' 较小的区域

更可能对应较高的 k ，反之亦然。此时负相关将趋于削弱最有利与最不利情形。然而，若同时考虑基质刚度 K_s 的相关性，则可能出现影响所需护面层厚度的竞争机制： ϕ' 与 k 的相关性主要控制抗力，而 K_s 、 k 与材料孔隙率 n 的相关性则影响超孔隙水压力的发展。因此仍需更多研究。

尽管存在上述局限，结果仍表明确定性（或半概率）设计方法所获得的安全水准强烈依赖于特征值的选取；而特征值的选取又不仅是绝对值的函数，还取决于相应地基特性的方差与波动尺度。就 ϕ' 而言，对透水土体，5% 分位值可能高估所需护面层厚度，取下三分位与偏保守均值之间的数值或许更为合适；相反，对弱透水土体，取 ϕ' 的 5% 分位值作为特征值可保证工程安全。就 k 而言，当 $\theta k > d_{crit}$ 时，5% 分位值可能导致略偏不安全的设计。对 ϕ' 与 k 的组合，若假定参数互不相关，则 5% 分位值可能高估、均值可能低估所需护面层厚度。视 $covk, \phi'$ 与 $\theta k, \phi'$ 而定，“rf”分析所需护面块石比 5% “bm”解少 10~30 cm。

此外，文献指出，单位面积重量要求最高的 ϕ' 与 k 组合决定护面尺寸；但设计中只考虑厚度大于 1 m 的岩土单元，随后在稳定分析中假定边坡为均质。然而本文结果表明，位于近地表、厚度大于 0.25 m 的弱透水区域控制着超孔隙水压力与所需护面层厚度。因此，尤其在近地表区域，厚度小于 1.0 m 的土层单元也应纳入设计考虑。

六、结论

研究表明，确定性设计方法所获得的安全水准强烈依赖于特征值的选取，其中水力传导系数特征值的选取尤其决定设计的可靠度。特征值的最佳估计是 ϕ' 、 k 、 $covk, \phi'$ 与 $\theta k, \phi'$ 的函数；本文识别出了一个“最不利”的 $\theta k, \phi'$ 。

据此，护面设计中的地基勘察及后续稳定分析应特别关注 k 与 ϕ' 的变异性，尤其是近地表处。为获得可靠的设计， k 的特征值宜取所勘察参数范围的下端；而 ϕ' 的特征值可视土类在 5% 分位值与偏保守均值之间选取。由于最不利相关长度在临界深度范围内最为关键，建议特征值的选取应以零深度至临界深度之间透水性最差的区域为依据。

现行概率设计规范中的目标可靠度与现行设计安全水准之间的可比性仍有待进一步研究。此外，研究还应考虑土体参数之间的相关性以及弹性土体特性的空间变异。最后须强调，若要开展完全概率化的护面设计，还必须进一步研究荷载的概率分布。

参考文献

- [1] Köhler H J. Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 1989(66).
- [2] 王坤, 孙檀坚, 杨倩. 参数变异对坝体变形影响的随机有限元敏感性分析. 水利科学与寒区工程, 2024(5): 13-19.
- [3] Phoon K K, Prakoso W A, Wang Y, et al. Uncertainty representation of geotechnical design parameters//Reliability of Geotechnical Structures in ISO2394. London: CRC Press, 2016: 49-87.
- [4] Griffiths D V, Huang J, Fenton G A. Probabilistic infinite slope analysis. Computers and Geotechnics, 2011, 38(4): 577-584.
- [5] 李剑平, 蒋水华, 黄发明, 等. 考虑渗透系数空间变异性的降雨作用下边坡大变形破坏特征. 应用基础与工程科学学报, 2024(1): 72-84.
- [6] Santoso A M, Phoon K K, Quek S T. Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides. Computers &

Structures, 2011, 89(11-12): 893-900.

- [7] 朱德胜, 夏磊, 柯力俊, 等. 考虑土体参数空间变异性的地震作用下无限长边坡可靠度研究. 工程科学与技术, 2025, 57(3): 106-114. DOI: 10.12454/j.jsuese.202400017.
- [8] 陈琼, 崔德山, 张扬景皓, 等. 一种新型环剪仪的研制及其应用. 地质科技通报, 2025(1): 205-215.