

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.028

# 地基承载力分析的安全判据及标准研究

陈波<sup>1</sup>, 田育林<sup>1</sup>, 张岳<sup>1</sup>, 黎康平<sup>2</sup>

(1. 陕西水务发展供水集团有限公司, 陕西 西安 700018;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 基于概率理论的可靠度设计方法通过引入可靠度指标与分项系数, 为构建更科学的安全评价体系提供了一种可行路径。参考水利工程规范将地基允许可靠度指标 $\beta_a$ 标定为3.7, 分别采用承载力安全系数法与强度折减安全系数法进行可靠度反演分析。结果表明, 两种方案对应的安全系数允许值分别为2.3和1.35, 其标定值分别契合我国《建筑地基基础设计规范》与边坡稳定分析的传统安全要求, 印证了目标可靠度指标设定的合理性。同时, 研究确定了土体凝聚力和内摩擦系数的分项系数标定值, 分别为 $\gamma_c = 1.269$ 与 $\gamma_\varphi = 1.361$ , 该结果与国内外主要规范中的推荐值接近, 验证了目标可靠度指标设定的合理性。

**关键词:** 地基承载力评估; 安全系数; 可靠度分析方法; 分项系数; 相对安全率指标

中图分类号: TU470.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0192-08

## Safety Evaluation Criteria and Standards for Analysis of Foundation Bearing Capacity

CHEN Bo<sup>1</sup>, TIAN Yulin<sup>1</sup>, ZHANG Yue<sup>1</sup>, LI Kangping<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Water Development Water Supply Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 700018, China;

2. PowerChina Northwest Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710100, China)

**Abstract:** Reliability based design methods founded on probability theory provide a feasible approach to constructing a more scientific safety evaluation system by introducing reliability indices and partial factors. With reference to hydraulic engineering standards, the allowable reliability index  $\beta_a$  for foundations is calibrated to 3.7. Reliability inverse analysis is conducted using the bearing capacity safety factor method and the strength reduction safety factor method. The results indicate that the allowable safety factors for the two approaches are 2.3 and 1.35, respectively. These calibrated values align with the traditional safety requirements of China's "Code for Design of Building Foundations" and slope stability analysis, confirming the reasonableness of the target reliability index setting. Meanwhile, the study determines the calibrated partial factors for soil cohesion and internal friction coefficient as  $\gamma_c = 1.269$  and  $\gamma_\varphi = 1.361$ , respectively. These results are consistent with the recommended values in major national and international standards, validating the reasonableness of the target reliability index setting.

**Keywords:** foundation bearing capacity assessment; safety factor; reliability analysis methods; partial factors; relative safety ratio indicator

地基承载力分析早期研究集中于发展确定性分析模型以求解地基极限荷载, 经 Prandtl 等<sup>[1]</sup>、Terzaghi 等<sup>[2]</sup>、Vesic 等<sup>[3]</sup>学者深入研究使确定性方法日

趋成熟。然而, 确定性方法无法量化岩土参数固有的空间变异性与不确定性对安全性的影响。近年来, 随着随机场理论与高效算法的进步, 该领域研究

呈现出从均质假设向空间变异性分析、从解析计算向数值模拟深化的趋势。如 Chwala<sup>[4]</sup> 等结合极限分析上限定理与随机场理论,提出了基于折线随机破坏机理的地基承载力评价方法,王乃欣等<sup>[5]</sup> 将机器学习与有限元极限分析(FELA)相结合,提出了地基抗震承载力可靠度计算方法,通过构建多层感知机(MLP)模型嵌入蒙特卡洛模拟框架,实现了地震工况下地基安全性的高效、定量评估。同时众多学者重点研究了如何建立可靠度指标与工程界熟悉的安全系数之间的联系,以统一两者间的安全判据。在重力坝与土石坝抗滑稳定分析方面,陈祖煜院士团队运用了相对安全率的概念,围绕强度参数及分项系数的合理确定方法展开了系统研究,进而提出了以可靠度为基础的设计准则<sup>[6-7]</sup>。在此基础上,李典庆等<sup>[8]</sup> 进一步提出了广义可靠指标相对安全率,并将其运用于挡土墙的安全评估中。随后,周强等<sup>[9]</sup> 将该广义可靠指标相对安全率拓展至地基承载力分析及考虑土体空间变异性的边坡稳定设计准则研究中,丰富了相关工程场景的安全判据体系。

上述研究为地基可靠度设计奠定了坚实基础,然而,在如何将水利工程中相对成熟的目标可靠度指标标定体系,系统性地应用于地基承载力分析,并明确与之对应的安全系数与分项系数的普适性标定准则方面,仍有待深入探讨。本文旨在借助典型算例,论证地基容许可靠度指标取值的合理性,并依据论证结果,明确安全系数与分项系数的标定准则。在此基础上,将基于相对安全率深入研究地基稳定性分析与可靠度分析之间的等价条件,并通过工程案例评价方法的可行性,以期为地基工程的概率极限状态设计提供更科学的依据。

## 1 地基承载力分析方法

### 1.1 地基承载力的安全系数方法

地基承载力的安全性评估,传统上主要依赖于确定性安全系数法,或通过对土体强度参数进行折减来求解安全储备。现有方法主要包括两类:

(1) 承载力安全系数法:其核心是计算地基极限承载力 $q_f$ 与实际荷载 $q$ 的比值,如式(1)所示。 $q_f$ 的计算通常采用 Vesic 公式<sup>[3]</sup> 等经典理论,本文采用 Vesic 公式。

$$F = \frac{q_f}{q} \quad (1)$$

(2) 强度折减安全系数法:将地基视作坡度为

零的特殊边坡,通过式(2)、式(3)折减强度参数 $c$ 、 $\varphi$ ,并迭代求解使体系达到临界状态的安全系数 $F$ 。

$$c_e = c/F \quad (2)$$

$$\varphi_e = \frac{\tan\varphi}{F} \quad (3)$$

$$F = \frac{q_{f,e}}{q} \quad (4)$$

式中: $c$ 为黏聚力; $\varphi$ 为内摩擦角;下标 $e$ 表示依据强度指标经过折减处理后计算得到的对应数值。

### 1.2 地基承载力的可靠度分析方法

可靠度理论通过引入可靠度指标 $\beta$ ,将不确定性量化纳入安全评估。其核心是建立极限状态函数(式(5)),并通过一次二阶矩法(FORM)求解可靠度指标 $\beta$ 。

$$G = F(x_1, x_2, \dots, x_i) - 1 \quad (5)$$

式中: $x_i$ 在本项研究中指代的是 $c$ 、 $\varphi$ ,即为强度参数。

通过下式可以定义可靠度的指标:

$$\beta = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F} \quad (6)$$

式中: $\beta$ 为可靠度指标; $\mu_F$ 为安全系数平均值; $\sigma_F$ 为安全系数标准差,该指标几何上表征了标准正态空间中从原点到极限状态面的最短距离,可靠度指标 $\beta$ 等于图1中的 $OC$ 的长度。

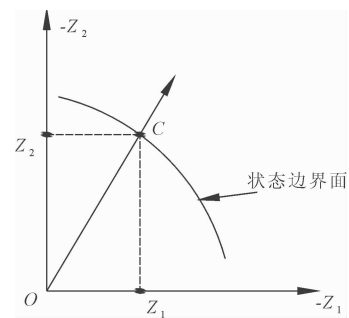


图1 平面坐标下可靠度指标及验算点的示意图

需要注意的是,运用一阶二次矩法来计算可靠度指标时一般需要引用标准的无量纲参数 $z_i$ :

$$z_i = \frac{x_i - \mu_{x,i}}{\sigma_{x,i}} \quad (7)$$

运用 Taylor 级数,在 $C$ 点处对功能函数进行展开操作。为了使功能函数具备线性化的特征,进而满足特定分析的需求,在处理过程中,仅保留了功能函数展开式中的常数项与一次项。之后对功能函数在展开点处的均值以及标准差进行计算,再依据式(8)来求解可靠度指标 $\beta$ 。

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = - \frac{\sum_{i=1}^n z_i^* \left. \frac{\partial g}{\partial z_i} \right|_{z^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n z_i^* \left( \left. \frac{\partial g}{\partial z_i} \right|_{z^*} \right)^2}} \quad (8)$$

### 1.3 地基承载力的可靠度指标允许值及变异系数选择

表 1 里,中国水利工程规范<sup>[10]</sup>对不同安全等级的结构明确了相应的可靠度指标允许值,渐进式失效破坏归属于第一类,而第二类为非渐进式失效破坏,其引发的后果将很难开展补救或修复工作。水利工程结构的失效破坏状况按照第二类破坏的情况加以处理。

表 1 中国水工统一标准结构设计可靠度指标

安全等级	I 级	II 级	III 级
一类破坏	3.7	3.2	2.7
二类破坏	4.2	3.7	3.2

在水利工程领域中,地基失事所造成的后果严重性,通常低于大坝等关键主体结构失效所引发的风险水平。鉴于此,将地基所被允许的可靠度指标  $\beta_a$  设定为 3.7。在结构可靠度分析中,明确强度参数的变异系数是至关重要的基础工作。

表 2 汇总了部分研究人员对于黏聚力  $c$  以及内摩擦角  $\varphi$  的变异系数取值。

表 2 地基土强度参数变异系数

变异系数	小浪底工程	高大钊 <sup>[11]</sup>	Chowhury <sup>[12]</sup>	Duncan <sup>[13]</sup>	Ort <sup>[14]</sup>
$V_c$ (for $c$ )	0.18 ~ 0.25	0.16 ~ 0.47	0.14 ~ 0.25	0.10 ~ 0.35	0.20 ~ 0.40
$V_\varphi$ (for $\varphi$ )	0.06 ~ 0.13	0.12 ~ 0.37	0.07 ~ 0.10	0.02 ~ 0.13	0.05 ~ 0.15

### 1.4 分项系数的标定

由于在地基稳定分析中,土体材料的抗剪强度参数的准确概率分布难以获得,使得可靠度直接分析方法难以直接用于边坡稳定的实际工程设计中<sup>[15]</sup>,当可靠度指标满足规范允许值  $\beta_a$  时,可定义分项系数为:

$$\gamma_c = \frac{c_k}{c^*} \quad (9)$$

$$\gamma_\varphi = \frac{\varphi_k}{\varphi^*} \quad (10)$$

式中: $c_k, \varphi_k$  分别代表黏聚力与内摩擦角的标准值,而  $c^*, \varphi^*$  则对应强度指标黏聚力和内摩擦角的设计验算点值。

### 1.5 地基承载性能安全评价标准体系

本文选择可靠度指标  $\beta = 3.7$  的算例作为典型算例。在此算例中,可靠度指标  $\beta$  等于允许可靠指标(3.7),则此算例中求解出的安全系数即为允许安全系数。

本文以图 2 所展示的算例开展分析工作。地基的基础性参数包含:基础宽度  $B$  设定为 10 m,埋深  $D$  取值为 1.5 m,上层土体重度  $\gamma_1$  为 9 kN/m<sup>3</sup>,基础埋深范围里土体重度  $\gamma_2$  为 19 kN/m<sup>3</sup>,黏聚力平均值为 20 kPa,内摩擦角平均值为 0.46,所承受的作用荷载  $q$  是 600 kN/m<sup>2</sup>。强度系数皆采用设计值,一般取 0.2 分位点的设计值<sup>[10]</sup>。则强度参数可定义如下:

$$x_k = \mu_k - 0.842\sigma_k \quad (11)$$

式中: $x_k$  用于表示土体的强度指标黏聚力  $c$  以及内摩擦角  $\varphi$  的标准值; $\mu_k$  和  $\sigma_k$  分别用来表示这些强度指标的平均值以及标准差。

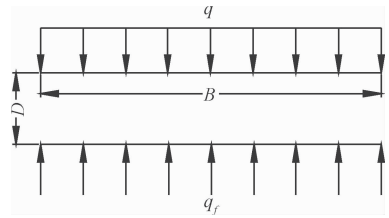


图 2 地基承载力分析模型

基于式(1)一式(4),使用一次二阶矩法进一步计算可靠度指标和安全系数,最终结果汇总于表 3、表 4。

表 3 地基安全系数与可靠度指标相关数据

含义	强度参数设计值		安全系数	安全系数均值	安全系数标准差
	内摩擦角	黏聚力			
序列	1	2	3	4	5
物理量	$\varphi : \varphi_e$	$c : c_e$	$F$	$\mu_F$	$\sigma_F$
单位	—	kPa	—	—	—
方案 1 (计算式)	0.422(10)	16.632(9)	2.30(1)	3.15(1)	0.31(6)
方案 2 (计算式)	0.310(10)	12.230(9)	1.35(4)	1.50(4)	0.14(6)

说明:表格里下标符号  $e$  代表对应参数经过安全系数强度折减处理后得到的数值,此情况对应方案 2;未作标注的则对应方案 1。

经分析可得,两种定义下的可靠度指标一致性较高,然而安全系数却差别较大。这是因为使用传统的承载力安全系数定义,计算极限承载力相应的强度参数是标准值而非经安全系数折减后的标准值,其允许安全系数必然大于强度折减法的允许安

全系数;但这两种方法却获得了相同的可靠度指标,这是因为两种定义方式实际上对应着相同的极限状态方程,在概率统计意义上具有等效性,因此得到了相同的可靠指标和设计验算点。即使安全系数的界定模式有异,实际上也并不会影响分项系数的大小。

表4 地基分项系数与可靠度指标相关数据

含义	可靠度指标	验算点值		强度指标分项系数	
		内摩擦角	黏聚力	内摩擦角	黏聚力
序列	6	7	8	9	10
物理量	$\beta$	$\varphi^*$	$c^*$	$\gamma_\varphi$	$\gamma_c$
单位	—	—	kPa	—	—
计算式	式(8)	式(7)	式(7)	式(10)	式(9)
方案1	3.69	0.297	15.974	1.361	1.269
方案2	3.69	0.297	15.974	1.361	1.269

## 2 地基安全判据的对比

### 2.1 安全系数判据

不同国家对于地基及边坡工程中所采用的安全系数标准存在一定差异,本文归纳并对比了部分国家的相应规范值,如表5和表6所示。

表5 国内外的地基规范中安全系数的容许值

规范	安全系数容许值	解释
建筑地基基础设计规范(GB50007—2011) <sup>[16]</sup>	2~3	
美国陆军工程师兵团—工程师手册 <sup>[17]</sup>	2~4	公、铁路桥地基取4

表6 国内外的边坡规范中安全系数的取值标准对比

规范	安全系数容许值	解释
水利水电工程边坡设计规范(SL 386—2007) <sup>[10]</sup>	1.3~1.25, 1.25~1.2, 1.2~1.15, 1.15~1.1	对应一至四级边坡
加拿大地基手册 <sup>[18]</sup>	1.3~1.5	采纳 Terzaghi 及 Peck 的建议值
香港边坡工程手册 <sup>[19]</sup>	1.2~1.4	无

通过对表5与表6中各国家对于地基与边坡工程规定的安全系数展开对比分析,能够得出如下结论:①传统方法所得安全系数为2.3,同现在中国及美国现行相关规范中所允许的数值处于较为相近的水平。当下,仅有中国和美国仍在运用承载力系数法开展地基承载力分析工作,而分项系数法已在相当大程度上取代了该传统方法的应用。②根据工程失效可能造成的危害性等级,安全系数的取值应在规范建议范围内调整。对于破坏后影响巨大的地基工程,安全系数宜定为容许区间的最大值。故经强

度折减法得到安全系数1.35与国内外主要规范中的相应容许值具有较好的一致性。

### 2.2 分项系数判据

由上述算例可知,对应目标可靠度指标3.7,本文特定算例的分项系数分别为 $\gamma_c = 1.269$ ,  $\gamma_\varphi = 1.361$ 。美国规范<sup>[20]</sup>同时涵盖了定值法与分项系数法这两种方法;欧洲规范<sup>[21]</sup>则明确规定采用分项系数设计法;日本规范<sup>[22]</sup>明确了在地基强度计算过程中,土体内摩擦角和黏聚力对应的强度分项系数的取值标准。不同规范里,关于土体内摩擦角、黏聚力的强度分项系数 $\gamma_\varphi$ 、 $\gamma_c$ 的取值规定,详见表7。由此能够看出,针对这一特殊情形,倘若依旧采用强度指标的变异系数( $V_c = 0.2$ ,  $V_f = 0.1$ ),那么标定结果会和丹麦以及欧洲规范较为相近。

表7 国际地基设计标准中材料分项系数值

分项系数类型		欧洲	美国	丹麦	日本
强度指标	$\gamma_c$	1.60	—	1.8	1.0
	$\gamma_\varphi$	1.25	—	1.3	1.0
荷载	静荷载	1.0	1.0	1.0	1.0
	动荷载	1.3	1.0	1.3	1.0

## 3 普适性验证

### 3.1 基本原理

图2所示算例(目标可靠度指标 $\beta_a = 3.7$ )中,当填土内摩擦角的变异系数设定为0.1,黏聚力的变异系数设定为0.2时,可得到分项系数的“理论”校准值,其中 $\gamma_c$ 为1.269,  $\gamma_\varphi$ 为1.361。在方案1和方案2中,能够将对应的安全系数的计算结果2.3以及1.35,分别确定为地基的允许值 $F_a$ 。倘若对这个特定案例所涉及的输入参数做出合理改变,设定基础的宽度调整范围是8~12 m,求取安全系数值以及可靠度指标,具体数值可参见表8的第1列以及第7列,基于上述结果,分项系数折减后的强度指标安全系数值 $F_p$ 即满足式(12)成立的数值:

$$F\left(\frac{c}{F_p \gamma_c}, \frac{\varphi}{F_p \gamma_\varphi}\right) - 1 = 0 \quad (12)$$

当地基的宽度不等于10 m时,计算得到的可靠度指标会偏离标准值3.7;与此同时,方案1与方案2得出的安全系数计算结果也将分别偏离标准值2.3与1.35。可见变更基础尺寸,可靠度指标和安全系数值往往难以统一,这种差异使得确立统一的风险管控准则面临挑战。基于此背景,陈祖煜等<sup>[6-7]</sup>研究

人员在过往针对土石坝与重力坝抗滑稳定分析方法以及对应判定标准的研究工作中,提出了“相对安全率”概念。对于特定的安全系数  $F$ ,其相对安全率  $\eta_F$  的定义是:

$$\eta_F = \frac{F_a}{F} \quad (13)$$

式中: $F_a$  为预设安全系数。

除此之外,为满足式(12),定义相对安全率  $\eta_p$  如下式:

$$F\left(\frac{c}{\eta_p \gamma_c}, \frac{\varphi}{\eta_p \gamma_\varphi}\right) - 1 = 0 \quad (14)$$

在可靠度分析框架下,结构可靠指标  $\beta$  需满足大于预设允许值  $\beta_a$  的要求。

$$\beta \geq \beta_a \quad (15)$$

可靠度等效安全率示意图如图3所示。由图3可知,当失效概率分布函数  $F(x) < 1$  时,其对应的概率密度曲线与  $x$  轴围成的左侧阴影区域面积反映了结构失效风险,该面积值需严格控制在允许阈值以下。在构建与 Vesic 公式定义的相对安全率  $\eta_F$  相对应的失效裕度评估指标时,若直接采用  $\eta_R = \beta/\beta_a$  的简化表达式存在理论局限性,因为  $\beta$  仅与  $1 - \Phi(\beta)$  存在明确的物理对应关系,而无法全面反映结构抗力的随机特性。

由图3可知,假设通过原始样本数据求出可靠度指标  $\beta >$  允许值  $\beta_a$ ,关联的概率分布区域面积不足  $1 - \Phi(\beta_a)$ 。现对原始样本进行平移变换:令新样本  $F' = F - \Delta F$ ,相当于将图3中纵轴向右平移  $\Delta F$ 。通过调整  $\Delta F$  使新坐标系下  $F' = 1$  左侧阴影区域 ( $a + b$ ) 面积恰好等于  $1 - \Phi(\beta_a)$  (一级建筑物对应  $10^{-5}$ )。具体推导过程如下:

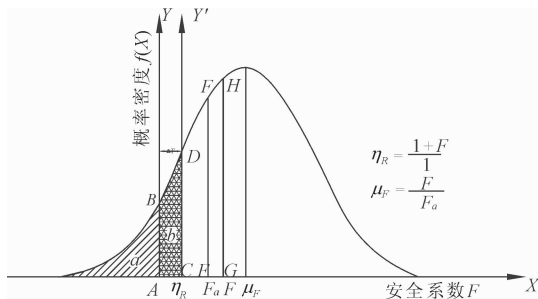


图3 可靠度等效安全率示意图

新安全系数样本的均值变为  $\mu_F - \Delta F$ ,标准差不变,其可靠指标表达式为:

$$\beta' = \frac{\mu_F - 1 - \Delta F}{\sigma_F} = \beta - \frac{\Delta F}{\sigma_F} \quad (16)$$

根据设计要求  $\beta' = \beta_a$ ,可得:

$$\Delta F = (\beta - \beta')\sigma_F = (\beta - \beta_a)\sigma_F \quad (17)$$

在确定性分析与可靠度分析的临界状态下,分别有:

$$\begin{cases} F - F_a = 0 \\ \Delta F = 0 \end{cases} \quad (18)$$

将式(16)、式(17)代入式(18)并整理:

$$\begin{cases} \eta_F - 1 = 0 \\ (\beta - \beta_a)\sigma_F + 1 - 1 = 0 \end{cases} \quad (19)$$

最终得到可靠度分析领域的等效安全率表达式:

$$\eta_R = (\beta - \beta_a)\sigma_F + 1 \quad (20)$$

在对重力坝基础抗滑安全及土石坝坡体稳定标准校核时,可观察到依据某主导设计工况所得容许安全值,能够在各类荷载条件下均分别满足:

$$\eta_R \approx \eta_F \quad (21)$$

$$\eta_R \approx \eta_p \quad (22)$$

接下来,以图2地基算例为研究对象,针对不同基础宽度分别计算得到相对安全率  $\eta_F$ 、 $\eta_p$  和  $\eta_R$ ,结果见表8的第4、5、6列,此外,其线性拟合情况见图4。从图4能够看出,该曲线的斜率接近1,拟合系数也接近1,这一情况表明,在任何情况下都满足式(21)、式(22)所表示的等式条件。由此可见,各分项系数的理论设定值与安全系数许用范围,在应用中均表现出较好的符合度。

### 3.2 参数普适性验证

由于方案1中  $\eta_R$  和  $\eta_F$  的拟合情况较差,参数普适性验证中仅展示方案2的相关结果。在参数设定范围:①基础埋深范围内土体容重  $\gamma_2$  由  $17 \text{ kN/m}^3$  增加到  $21.5 \text{ kN/m}^3$ ,增量为  $0.5 \text{ kN/m}^3$ 。②填土内摩擦角  $\varphi$  从  $0.385$  变化到  $0.610$ ,增量为  $0.025$ 。③黏聚力  $c$  由  $15 \text{ kPa}$  增加到  $24 \text{ kPa}$ ,增量为  $1.0 \text{ kPa}$ 。在参数设定范围内, $\eta_p$ 、 $\eta_F$  及  $\eta_R$  的回归曲线关系见图5。从研究所得结果来看,运用分项系数法所算出的相对安全率,与可靠度法的计算结果在相关性和可对比性方面依旧表现良好。因此,可基于可靠度分析方法,并遵循统一的风险安全准则,来确定地基强度参数的分项系数取值及其对应的地基可靠度指标。

表 8 多种地基宽度工况下的稳定计算

方法	确定性模型				分项系数法		可靠度分析法	
物理量	$F$	$\sigma_F$	$\mu_F$	$\eta_F$	$\eta_P$	$\eta_R$	$\beta$	
序列	1	2	3	4	5	6	7	
计算式	式(1)	式(6)	式(6)	式(13)	式(14)	式(15)	式(8)	
方案 1 地基 宽度 /m	8	1.99	0.53	2.73	0.865	0.889	0.909	3.28
	9	2.14	0.55	2.94	0.932	0.945	0.947	3.49
	10	2.30	0.58	3.15	0.999	1.001	0.999	3.69
	11	2.45	0.61	3.36	1.065	1.058	1.061	3.86
	12	2.60	0.64	3.57	1.132	1.114	1.132	4.03
方案 2 地基 宽度 /m	8	1.29	0.13	1.42	0.946	0.894	0.892	3.28
	9	1.33	0.13	1.46	0.974	0.948	0.948	3.50
	10	1.35	0.14	1.50	1.002	1.001	0.999	3.69
	11	1.40	0.14	1.54	1.029	1.051	1.050	3.87
	12	1.43	0.14	1.58	1.055	1.099	1.098	4.03

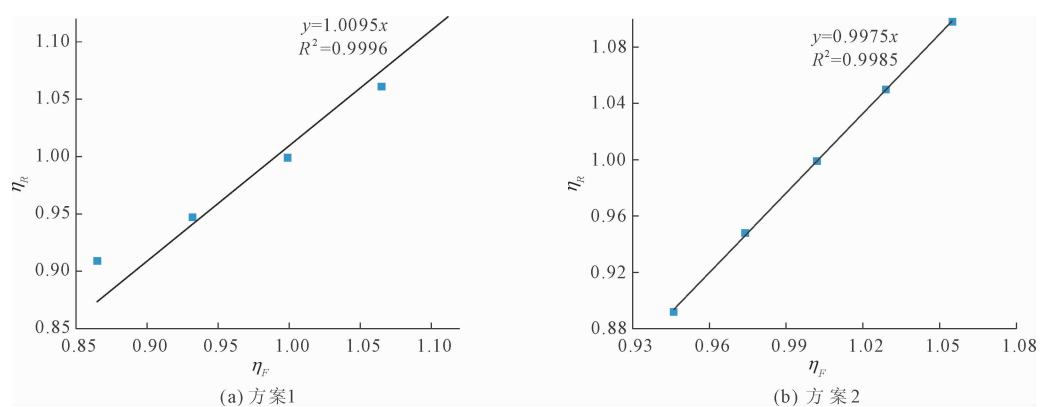


图 4 不同地基宽度下方案 1、方案 2 相对安全率的线性回归图

## 4 工程应用

以路堤为例开展计算分析,路堤断面如图 6 所示,具体结构和土体参数见表 9 所示。

### (1) 基于确定性模型的验算分析

方案 1:对路堤开展稳定分析时,其强度指标设计值选为 0.2 分位值,并运用方案 1 所涉及的承载力安全系数法,依据式(1)展开计算,得出安全系数数值为 2.40,取边坡稳定允许安全系数  $F_a$  为 2.3,经综合评估,可明确判定该路堤处于稳定状态,满足稳定性相关要求。通过式(13)得出,此路堤对应的安全系数相对安全率  $\eta_F$  为 1.04。

方案 2(边坡强度折减法),对式(5)采用牛顿迭代法求解,最终获取的安全系数值是 1.87,选取的稳定允许安全系数  $F_a$  值是 1.35,根据以上依据进行判断,能够清晰地确定该路堤同样具备稳定的特性,通过式(14)得出其安全系数相对安全率  $\eta_F$  达到 1.38,主要计算过程见表 10。

表 9 地基结构与土体参数表

参数	数值
顶面宽度 $B_1/m$	10
底面宽度 $B_2/m$	34
高度 $H/m$	7
路堤土容重 $\gamma_0/(kN \cdot m^{-3})$	18.5
地基土容重 $\gamma_1/(kN \cdot m^{-3})$	16.0
黏聚力 $c/kPa$	8.7
内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	10
地基宽度 $B_3/m$	22

### (2) 运用相对安全率法开展验算分析

本文采用 Excel 规划求解器实现一次二阶矩法计算可靠度指标,其核心是通过迭代寻找设计验算点(最可能失效点),具体迭代流程如下:首先确定随机变量  $c, \varphi$  的概率特征,其均值已明确,变异系数为 0.2、0.1;根据式(7)将其转换为标准正态空间的变量  $u_c, u_\varphi$ ;将设计验算点初始设置在均值点即  $c^{(0)} = \mu_c, \varphi^{(0)} = \mu_\varphi$ ,开始迭代;本文设置极限状态方程式(9)  $|G| < 10^{-7}$  为迭代收敛条件,通过迭代求得可

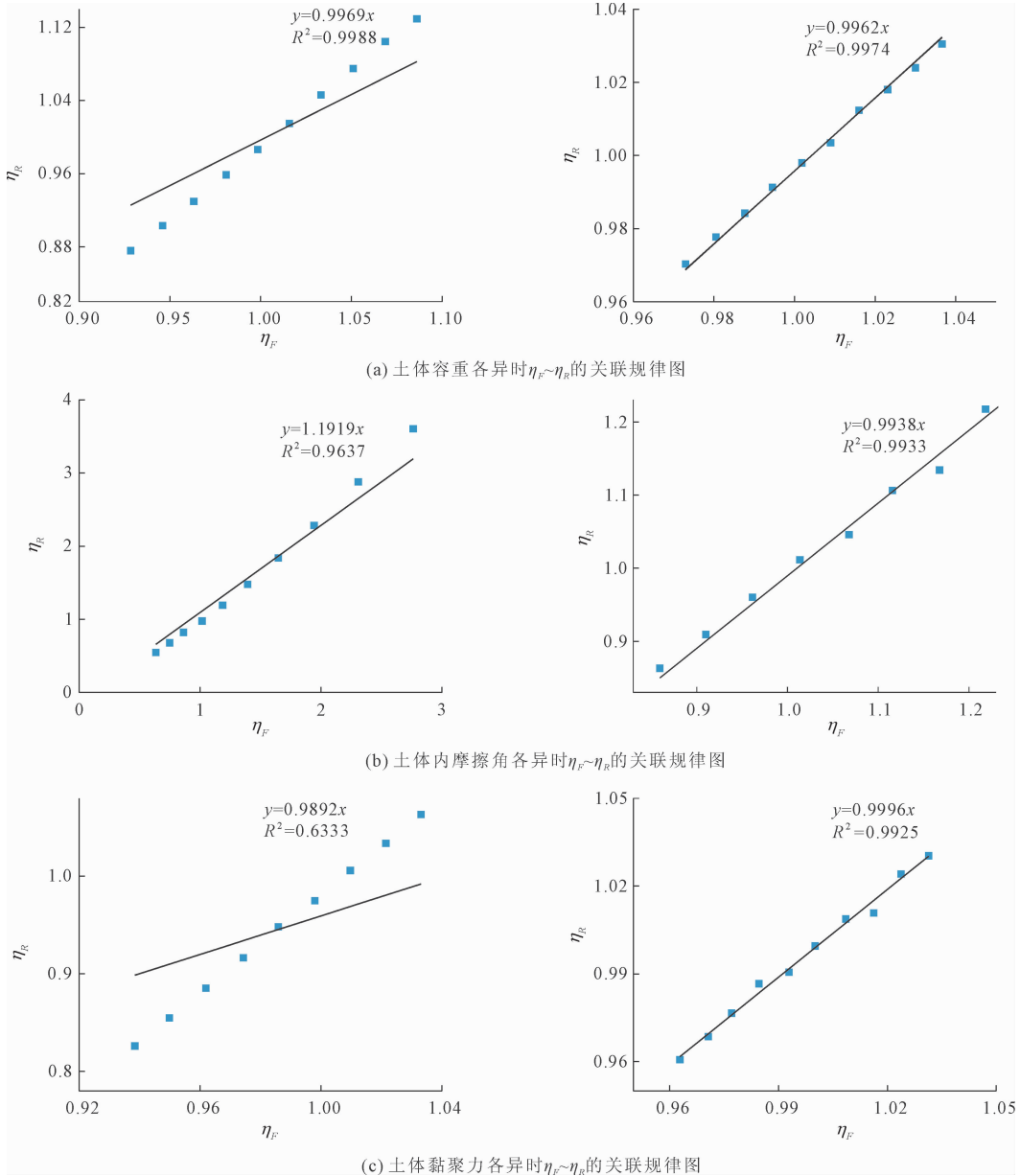


图 5 基于  $\eta_F \sim \eta_R$  关系的地基普适性研究

表 10 基于强度折减法的地基安全系数计算

迭代 步骤	物理量			收敛条件	
	假设安全系数 $F$	$c_e$	$\varphi_e$		
—	—	式(6)	式(7)	式(7)	$ q_{fe}/q - F  < 0.0001$
1	2.00	4.35	5.0	136.6	0.9449
2	1.80	4.83	5.6	152.1	0.6252
3	1.85	4.70	5.4	146.2	0.7208
...	...	...	...	...	...
$n$ (收敛)	1.87	4.65	5.4	242.2	0.00005

注:下标  $e$  表示对应参数经过安全系数强度折减处理后得到的数值。

靠度法与方案 2 (强度折减法) 的结论一致,且

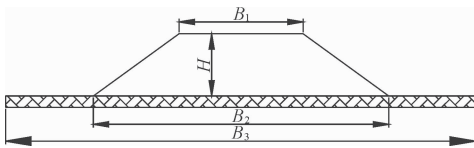


图 6 路堤断面图

靠度指标  $\beta = 5.81$ ,  $\sigma_F$  为 0.13, 应用计算公式 (16) 计算出设定可靠度的阈值  $\beta_a$  为 3.7 时的安全比率  $\eta_R$  是 1.27。从可靠度角度判定, 该路堤地基在考虑参数不确定性的情况下, 处于稳定状态。

上述计算结果表明, 尽管基于不同定义的安全系数绝对值不同, 但通过“相对安全率”指标与可靠度理论关联后, 能得出一致的稳定性判断。同时可

$\eta_R \approx \eta_F$  (方案2),两者在数量级上相近,验证了“相对安全率”指标的有效性,为工程决策提供了统一且更科学的依据。

## 5 结论

本文通过地基承载万概率极限状态设计与确定性设计方法的关联研究,主要得出以下结论:

(1) 参考水利工程相关规范并结合地基工程风险特点,建议将地基允许可靠度指标设定为 $\beta_a = 3.7$ 。基于此,标定得到相应的承载力安全系数允许值(2.3)与强度折减法安全系数允许值(1.35),以及分项系数 $\gamma_c = 1.269$ ,  $\gamma_\varphi = 1.361$ 。所得标定值与国内外主要规范中的推荐范围基本吻合,验证了所设定目标可靠度指标的合理性。

(2) 可靠度反演分析表明,承载力安全系数法与强度折减安全系数法虽然在数值表达形式上不同,但在可靠度意义上对应于相同的极限状态方程,具有相同的目标可靠指标与设计验算点。这说明两种安全系数定义在相同的风险水平下具备概率等效性,为沟通概率设计与传统确定性设计提供了理论依据。

(3) 在不同地基宽度、土体强度参数及荷载组合下,基于“相对安全率”验证的分项系数标定结果均表现出较好的稳定性,该方法可作为统一安全判据的有效工具,为地基工程风险评估提供相对统一的决策参考。

(4) 需要指出,本研究结论主要基于典型算例得出,其在更复杂地质与荷载条件下的适用性仍有待进一步验证。此外,土体参数变异系数的合理取值需结合更充分的地区实测统计资料。后续研究可借助机器学习等方法发展更高效的可靠度分析算法,并开展考虑多失效模式耦合的体系可靠度研究,以推动地基工程风险评价体系的不断完善。

### 参考文献:

[1] Prandtl L. On the penetrating strengths (hardness) of plastic construction materials and the strength of cutting edges[J]. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1921, 1(1): 15-20.

[2] Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1944: 118-143.

[3] Vesic A S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(1): 45-73.

[4] Chwała M, Zhang W. Broken line random failure mechanism method in foundation bearing capacity assessment for spatially variable soil[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 150: 104903.

[5] 王乃欣,王玉杰,孙平. 基于机器学习的地基抗震承载力可靠度计算方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2025, 36(3): 150-155.

[6] 陈祖煜,徐佳成,孙平,等. 重力坝抗滑稳定可靠度分析(一):相对安全率方法[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 167-178.

[7] 陈祖煜,徐佳成,孙平,等. 重力坝抗滑稳定可靠度分析(二):强度指标和分项系数的合理取值研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 160-167.

[8] 李典庆,周强,曹子君. 基于广义可靠指标相对安全率的高土石坝坝坡稳定设计安全判据[J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 501-514.

[9] 周强,黎康平,段亚辉,等. 基于广义可靠指标相对安全率的地基承载力安全判据研究[J]. 岩土力学, 2020, 41: 2052-2062.

[10] SL386—2007 水利水电工程边坡设计规范[S]. 北京:水利水电出版社, 2007.

[11] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1989.

[12] Chowdhury R N. Recent developments in landslide studies: probabilistic methods, state-of-the-art report [C]// 4th International Symposium on Landslide, Toronto, 1984: 209-228.

[13] Duncan J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(4): 307-316.

[14] Orr T L L. Selection of characteristic values and partial factors in geotechnical designs to Eurocode7[J]. Computers and Geotechnics, 2000, 26(3-4): 263-279.

[15] 张宁,李旭,储昭飞,等. 土坡稳定性分析中的分项系数取值的讨论[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1695-1704.

[16] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.

[17] Engineering and Design-Bearing Capacity of Soils[S]. U. S. Army Corps of Engineers. Washington, D C. 20314-10000.

[18] Canadian Foundation Engineering Manual. 4nd ed[S]. Canadian Geotechnical Society Foundations Committee. Richmond: BiTech Publisher Ltd, 2006.

[19] Geoguide 5 Guide to slope maintenance[S]. The Hong Kong Geotechnical Engineering Office. Hong Kong: Government Publications Centre, 2003.

[20] Building code requirements for structural concrete[S]. American Certification Institute, 1992.

[21] The European standard. Eurocode 7 Geotechnical design[S]. The authority of the Standards Policy and Strategy Committee, 2004.

[22] Guides for building foundation structure design[S]. Architectural Institute of Japan, 1988.