

文章编号: 1002-0268 (2000) S1-0032-05

岩土工程极限状态设计的探讨

石名磊¹, 战高峰², 邓学钧¹

(1. 东南大学, 江苏 南京 210096; 2. 吉林建筑工程学院, 吉林 长春 130021)

摘要: 根据极限状态法的基本原理, 综述了该方法的概念及应用于岩土工程的特点。特别对岩土工程中, 不同的极限状态、分项修正系数、参数的取值以及荷载模式进行了讨论。并就应用中的一些具体问题做了分析。本文的内容可在今后岩土工程极限状态设计时参考。

关键词: 极限状态设计; 分项修正系数; 荷载模式

中图分类号: TU45

文献标识码: A

Analysis of Limit State Approach in Geotechnical Engineering

SHI Ming-lei¹, ZHAN Gao-feng², DENG Xue-jun¹

(1. Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China;

2. Jilin Institute of Architecture and Civil Engineering, Jilin Changchun 130021, China)

Abstract: The principle and the application of the Limit State Approach used in Geotechnical Engineering were discussed in this paper. The limit states of different types, the determination of partial factors and characteristic soil properties, together with the three load cases were emphasized. This documentation gives guidance for the Limit State Approach design for Geotechnical Engineering in future.

Key words: Limit State Approach; Partial factors; Load cases

极限状态设计可以认为是一种基于分项修正系数, 考虑结构可靠性的概率分析设计法。该方法应用于现代土木工程始于 20 世纪 40 年代, 以尔然尼钦(前苏联, 1947)和弗罗依詹特(美国, 1942)为代表。1971 年, 国际结构安全度联合委员会(JCSS)宣布成立, 并着手编制《结构统一标准规范的国际体系》。第一卷于 1976 年巴黎 JCSS 会议上通过, 卷中推荐采用半经验半概率法。我国在 1983 年完成了依据概率论及数理统计的极限状态设计原则《建筑结构设计统一标准》(GBJ68-84), 作为建筑结构其它设计规范应遵循的共同准则。在结构工程设计中, 极限状态已取得实质性的进展, 达到了实用阶段。

岩土工程比之于结构工程, 岩土材料比之于人工材料(钢筋、钢筋混凝土等)具有更复杂的不确定性。自 A. Cassgrande(美国, 1956)论述基础工程中的计算风险问题开始, 历经 40 余年, 尽管难度较大, 进展缓慢, 但 Eurocode7(欧洲, 1995)等规范的相关

内容中, 系统采用了岩土工程极限状态设计。我国自 1980 年以来, 尤其是近 10 年, 岩土工程的极限状态设计与可靠性分析的研究取得长足进步。《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89)、《建筑桩基技术规范》(JGJ94-94)等均采用或部分采用了这一方法。但由于岩土工程、岩土材料及岩土设计分析方法的复杂性, 极限状态应用存在一些问题, 值得进一步的商榷。

1 岩土工程极限状态设计综述

从根本上说, “极限状态设计”(Limit State Design)意味着在设计过程中, 由极限状态控制设计, 即设计的注意力集中在结构可能的极限状态上, 以防止其发生。采用极限状态设计, 分析计算的对象处于一种特殊的临界状态, 也是设计者期望永远不要发生的那种情况。而“容许状态设计”(Working State Design)则是基于保证结构的工作状态良好。“极限状

态 (Limit State) 是指结构任一状态已发生了错误, 这种错误可以是灾难性的破坏, 也可能仅仅是结构的某种功能的丧失或不便, 也可能介于两者之间。极限状态进一步可分为两大类^[1]: 临界极限状态 (ULS-Ultimate Limit State) 和功能极限状态 (SLS-Serviceability Limit State)。临界极限状态是要求现行规范, 在采用这一极限状态进行设计时, 以一定的概率, 确保结构整体或局部不发生灾难性破坏; 功能极限状态则是要求保证结构的整体或局部的使用功能和美学效果不至丧失。前者的含义不用赘述, 后者的结构使用功能的丧失, 则主要是地基及结构自身的沉降变形所至。例如桥台的沉降, 造成桥梁结构使用功能的丧失。

结构的极限状态和工作状态是完全不同的。工作性能是可以测定的, 并已积累了大量的资料, 有效促进了对岩土工程对象的认识水平。通过对实测资料的反演分析, 可以有效地预测类似 (新设计) 结构的工作性能。在深基坑等岩土工程的传统设计中, 这一方法取得了良好的效果。而结构极限状态的性能测定一般难以有计划地实施, 除了破坏性试验, 实际工程中极少能见到其结构达到极限状态 (这也是设计者期待和追求的目标之一)。因此, 极限状态无助于对设计对象的工作机制进一步理解和认识。事实上, 极少数的岩土工程的破坏实例, 一般也多是某种环境因素或其组合的结果, 这是难以预见的。因此, 系统考虑可能发生的各种情况, 以使极限状态设计能最有效地防止结构破坏发生是至关重要的。但与此同时, 充分利用结构工作状态测试的资料也具有重要意义。

许多基于极限状态的设计规范片面注重临界极限状态, 忽视功能极限状态。事实上, 直到目前这仍然是一个十分常见的错误。笔者认为, 这与功能状态的控制模式的数学化困难不无关系, 尚需做进一步的研究。例如在规范 BS8002 (British Standard Code on Earth Retaining Structures, 英国, 1984) 中, 支挡结构的设计采用了功能极限状态控制。但由于挡墙的变形计算很困难且计算结果不可靠, 规范的解决方法是在类似于临界极限状态的极限平衡中, 对墙后填土强度折减约 20% 以作间接的控制, 见图 1。在图 1 中, 折减系数 M 可称为“转移系数” (Mobilisation Factor), 是用于减少土的应变, 以达到控制挡墙变形的目的。很显然, 转移系数 M 并不是用来描述土体材料强度的不确定性^[2]。对于具体的岩土工程对象, 是采用临界极限状态还是功能极限状态不是一个简单的问题, 这很

大程度上取决于对这类状态的划分和理解。例如当以桩基变形控制基础设计 (一般情况), 显然要求采用功能极限状态。但由于桩承载力取值不当, 或没有考虑到桩侧的负摩阻力, 出现险情而进行基础托换加固, 显然这已超过了一般维修的范畴, 该基础处于极限临界状态。

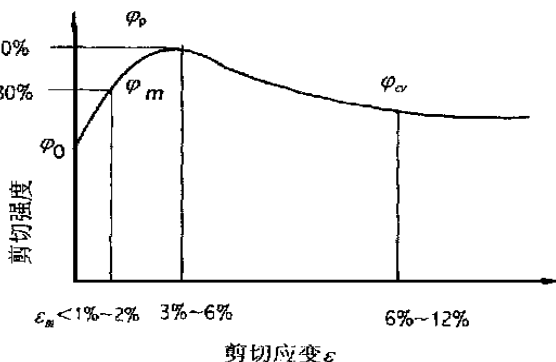


图 1 BS8002 中转移系数的概念

2 极限状态设计中的分项修正系数^[1~3]

传统设计方法中, 一般采用 Krey (1926) 提出的整体安全系数 F (Lumped Factor/Global Factor) 的概念。从理论上讲, $F > 0$ 时, 结构处于良好状态。但实际应用时并非如此, $F > 0$ 时, 结构仍可能破坏, 而 F 值的大小也无法定量结构安全储备的可靠程度。正因如此, 伴随着概率可靠性设计的发展, 依据 Taylor (1948) 的思想, Brinch Hansen (1953 and 1956) 提出了分项修正系数^[1] (Partial Factor)。分项修正系数取值与岩土工程可靠性水平相关, 具有概念明确、相对完善、成系统性等特征。目前, 基于极限状态法的设计规范中, 分项修正系数主要考虑了如下方面的作用^[2]。

(1) 参数的不确定性

对于绝大多数的设计者, 分项修正系数的 (部分) 功能就是用于考虑参数的不确定性。

(2) 转移系数的概念

BS8002 中功能极限状态设计, 采用了转移系数的概念, 在其它许多规范的临界极限状态的分析计算中, 均有相似的做法。在这里“转移”的概念, 包含了与土的应变发展而相应变化; 以及间接控制结构变形 (位移) 的两重意义。

(3) 计算模型的修正

这类分项修正系数主要用于对计算模型不够完善、不够准确以及其应用对象的变化等产生的不确定因素的修正。例如地基承载力的计算, 地基土层剖面

变化、地下水位变化等带来计算结果的不确定性。而在边坡稳定分析中，计算模型自身的不够完善，同样产生不确定性。

(4) 荷载与抗力的修正。

在美国的一些规范中，采用荷载和抗力的分项修正设计 (LRFD-Load and Resistance Factor Design)，这与直接对土体的强度进行修正有所不同。例如地基承载力的确定，桩基设计等。在材料强度性质与结构抗力之间的关系不够明确时，LRFD 应用是相当敏感的。在岩土工程中，往往对抗力的分项修正有类似于对结构计算模型修正的功能，有时在某种程度上，对材料强度控制，类似于转移系数，间接控制结构的变形。

规范 Eurocode 7 中的临界极限状态的分项修正系数的应用可以简单定义为

$$f_f D \leq R / f_m \quad (1)$$

式 (1) 成立表示设计达到了要求，其中 D 为初始荷载 (不稳定作用力)， R 为初始抗力 (稳定作用力)， f_f 为初始荷载的提高系数， f_m 为初始抗力的折减系数，在 Eurocode 7 中的取值见表 1。

永久和临时条件下临界极限状态的分项修正系数

表 1

荷载模式	对各种作用的修正 f_f		对地基土强度指标的修正 f_m				
			$\tan\phi$	c'	c_u	Q_u	
	永久	可变					
	不利	有利					
模式 A	1.00	0.95	1.50	1.1	1.3	1.2	1.2
模式 B	1.35	1.00	1.50	1.0	1.0	1.0	1.0
模式 C	1.00	1.00	1.30	1.25	1.6	1.4	1.4

依据上述的原则，针对具体的工程对象，可有相应的特殊规定，例如 BS8006 (Code of Practice for Strengthened/ Reinforced Soil and Other Fill 英国, 1994) 对加筋土支挡结构提出了一套分项修正系数^[3]，对荷载的分项修正见表 2。对于土体强度的分项修正，BS8006 中根据加筋土结构对填土性质的特殊要求，规定一般不考虑填土粘聚力，而 $\tan\phi$ 的分项修正系数 $f_m = 1.0$ 。

加筋土的荷载分项修正系数 表 2

荷载分项修正系数 f_f	荷载模式		
	A	B	C
加筋土体的重量 W		1.5	1.0
墙背土压力 E	1.5	1.5	1.0

表 1 和表 2 中关于荷载模式的具体概念，将在后面的荷载组合中介绍。

3 极限状态设计中参数取值分析

3.1 土参数取值分析

在极限状态法中的土参数确定十分重要，一般有 3 个步骤。(1) 计算参数的平均值 x_m ；(2) 计算参数的标准值 x_k ；(3) 确定参数的设计值 x_d 。参数数学期望值的计算是十分熟悉的，此处不赘述。参数标准值 (Characteristic Value) x_k 是一个十分重要的概念，也是规范 Eurocode 7 中土的参数取值的基础^[2]。通过统计计算分析，很多的文献提出了如下的表达式

$$x_k = x_m \left(1 - \frac{V_x}{2}\right) \quad (2)$$

式中， V_x 是参数的变异系数，一般土的变异系数见表 3。参数设计值则是根据标准值及参数分项修正系数得到

$$x_d = \frac{x_k}{f_m} \quad (3)$$

土主要指标的变异系数的分布及取值 表 3

土的性质指标	变异系数分布范围	推荐值
密度 ρ	0.01 ~ 0.10	0
内摩擦角 ϕ	0.05 ~ 0.15	0.1
粘聚力 c	0.3 ~ 0.5	0.4
压缩模量 E_s	0.2 ~ 0.7	0.4

统计计算的表达式 (2) 一般要求样本的个数 $n > 10$ ，显然实际工程中往往是难以达到的。所以，在现有资料和经验基础上的个人判断与估计，往往在土参数的取值中占有重要的地位。当先验资料 (Prior Value) 和测试样本 (Test Value) 数均充分的条件下，Bayes 理论^[4]可充分利用这两方面的信息，显示出极强的合理性和实用性。

$$x_{mB} = \frac{x_{mt} + \frac{x_{mp}}{n} \left(\frac{S_{xt}}{S_{xp}}\right)^2}{1 + \frac{1}{n} \left(\frac{S_{xt}}{S_{xp}}\right)^2} \quad S_{xB} = S_{xt} \sqrt{\frac{1}{n + \left(\frac{S_{xt}}{S_{xp}}\right)^2}}$$

$$V_{xB} = \frac{S_{xB}}{x_{mB}} \quad (4)$$

式 (4) 中， S 是变量标准差，下脚标 B 表示 Bayes 估计， t 表示试验样本的统计值，而 p 则表示先验估计值。

3.2 土工合成材料的取值分析^[5,6]

土工合成材料用于岩土工程加筋加固，被誉为岩土工程的一次革命。其最重要的指标之一是合成材料的张拉设计强度的取值，传统方法采用非持续的匀速张拉试验 (Short-term Constant Rate of Deformation Tensile

Tests), 可得到极限张拉强度 T_{ult} 。设计时, 采用一个总的修正系数进行修正, 概念不清, 取值的随意性较大。同时, T_{ult} 无法反映合成材料的张拉-应变-时间-温度的综合特征。Kabir(1984)等学者采用了持续荷载张拉试验(Long-term Sustained Load Tensile Tests), 并引入了分项修正系数, 考虑了合成材料的张拉特性的时间规律, 特别是蠕变等影响。后来 McGown 等(1982), 进一步提出了位于土体介质中合成筋带的张拉-应变-时间-温度特性试验研究问题。

合成材料持续张拉强度的设计值 LTADS (Long-term Allowable Design Strength), 美国规范(FHWA, 1997; AASHTO, 1997)考虑了分项修正系数, 可写成

$$LTADS = \frac{T_{ult-MARV}}{RF \times FS} \quad (5)$$

表达式(5)中, 采用了 $T_{ult-MARV}$ (Minimum Average Roll Value of Ultimate Tensile Strength), 其值一般较 T_{ult} 低 5%~15%。分项修正系数 RF 为合成材料的折减系数, 由蠕变分项修正系数 RF_{CR} 、耐久性分项修正系数 RF_D (> 1.1) 及施工危险分项修正系数 RF_{ID} (> 1.1) 组成, 即

$$RF = RF_{CR} \times RF_D \times RF_{ID}$$

FS 为加筋土抵抗其它未定因素的安全系数 $FS > 1.5 \sim 1.75$ (ASTM D4595 1986)。根据我国合成加筋材的张拉试验主要以非持续匀速张拉试验为主的特点, 将(5)式改写成下式

$$LTADS = \frac{T_{ult}/F_{min}}{RF \times FS} \quad (6)$$

式中, F_{min} 为等非持续匀速张拉极限强度折减系数, $F_{min} = 1.05 \sim 1.18$, 也即 $T_{ult-MARV} = T_{ult}/F_{min}$ 。采用(6)式确定合成加筋材的张拉强度设计值, 是成功运用分项修正系数的一个典型实例, 基本概念明确, 较全面地考虑了合成材料的一些主要特性, 是一种比较完善的, 目前国内应用水平可以接受的取值方法。

4 极限状态设计中荷载组合

一般结构极限状态设计中, 抗力与荷载无关, 是由材料性质及结构几何尺寸决定。但是, 岩土工程中的自重则不同, 与荷载大小相关的同时, 常与结构的抗力设计有关。为此, 以 G_k 、 Q_k 分别表示永久荷载和可变荷载, 可引入 3 种荷载模式, 即:

模式 A (Case A), 静力平衡的失稳分析, 对应荷载组合 $0.95G_k + 1.5Q_k$;

模式 B (Case B), 结构自身破坏的分析, 对应荷载组合 $1.35G_k + 1.5Q_k$;

模式 C (Case C), 地基土层的破坏分析, 对应荷载组合 $1.0G_k + 1.3Q_k$ 。

显然不同荷载模式的分项修正系数取值不同, 是为了使得 3 种情况的分析结果能具有相对一致的可靠性水平。但是实际应用中, 特别应注意具体情况具体分析, 例如一般是由荷载模式 B 控制基础结构的强度, 但也并不总是这样。现举例说明。

某烟囱^[7], 设计高度 250m, 见示意图 2。设计中, 内力的计算结果见表 4。由于采用了桩基础, 荷载模式 C 的失稳不作为设计控制。由于烟囱结构的主要不利作用是结构侧面承受的水平风荷载, 其值随烟囱高度增长而增加。但烟囱自重产生稳定力矩, 其值同样随烟囱高度增长而增加。这两种相反作用, 产生了表 4 的结果。从中可以看出, 该基桩结构的设计(强度)应按荷载模式 A 控制(并不是模式 B), 并且此时的最不利状态对应的烟囱高度低于设计高度, 计算结果为 225m, 设计布筋率为 1.5%。当采用设计高度 250m 分析计算, 对应基桩的布筋率(强度)按荷载模式 B 控制, 但由于烟囱自重增加的稳定弯距超过了风荷载的不利作用, 得到的布筋率相对反而偏低, 仅为 0.7%。类似上述的情况需要作具体分析, 这对岩土工程师是十分重要的。

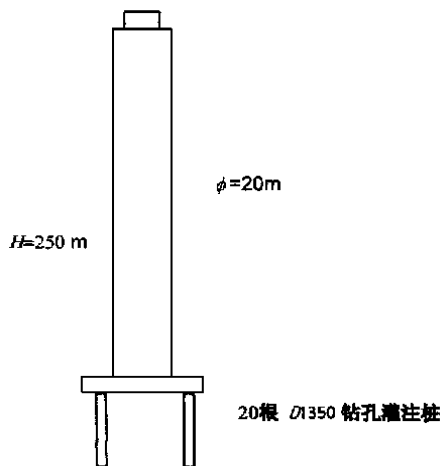


图 2 某烟囱的立面示意图
某烟囱基桩设计的分析计算结果 表 4

项 目	烟囱计算高度 225m		烟囱计算高度 250m	
	模式 A	模式 A	模式 A	模式 B
桩最大荷载 (MN)	19.1	22.3	20.1	25.2
桩最小荷载 (MN)	-6.43	-3.25	0.31	2.76
桩的弯距 (MN·m)	1.60	1.60	1.17	1.17
桩的布筋率 (%)	1.5	1.1	0.3	0.7

5 结束语

本文根据极限状态法目前在岩土工程中的应用状况,就极限状态法的基本概念和原理作了综述和分析。极限状态法作为岩土工程设计的发展方向之一,有良好的理论基础和广泛的成功应用的实例与经验,与容许状态法相比较,通过分项修正系数取代了传统单一安全系数,使得岩土结构设计的各破坏模式的可靠性水平更加协调,且建立了相对更清楚的对结构极限状态的可靠性概念。参数的取值是建立在概率统计理论的基础上,作为随机变量,较传统普通变量有了长足进步。Bayes估计将先验资料与试验资料有机结合,是今后重要工程的参数取值的有效方法。不同荷载模式的条理性清楚,对结构的控制趋于合理。

但是,极限状态法应用于岩土工程尚不成熟,存在模糊不清的地方,一般岩土工程师掌握起来相对感到困难。特别是在我国的应用时间较短,水平偏低,相应的规程规范不够完善。特别是功能极限状态控制

设计,数学模型的建立尚未达到实用的程度,还需要做大量工作。

参考文献:

- [1] A McGown, K Z Andrawes, S Pradhan, etc. Limit State Design of Geosynthetic Reinforced Soil Structures (C). Sixth International Conference on Geosynthetics, 1998; 143-179.
- [2] B Simpson. Some questions about Limit State Design in geotechnical engineering (C). Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997; 2267-2270.
- [3] T S Ingold. Aspects of Partial Factor Design of Reinforced Soil Walls. Sixth International Conference on Geosynthetics, 1998; 497-500.
- [4] H R Schneider. Definition and determination of characteristic soil properties (C). Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997; 2271-2274.
- [5] 石名磊, 邵俐, 姚代禄. 合成材料粉煤灰加筋土支挡结构设计及应用. 重庆交通学院学报, 1999, 18(3): 81-89.
- [6] 石名磊, 邓学钧, 于志淳. 加筋土挡墙在公路工程中的应用. 东南大学学报, 1999, 29(6): 119-124.
- [7] Peter Day. Limit state design—A South African perspective (C). Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997; 2275-2277.