

地下工程风险评估准则分析与研究

姚宣德^{1,2}, 王梦恕¹

(1. 北京交通大学隧道及地下试验研究中心, 北京 100044; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100032)

[摘要] 结合地下工程的特点,建设性地提出了地下工程风险评估准则,其成果成功地应用于北京市城市地下道路系统规划设计的研究中。

[关键词] 地下工程;风险评估;准则

[中图分类号] TU470 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)07-0086-06

1 前言

由于在地下工程施工过程中不可避免地会对地层产生扰动,从而使得地下工程周边的地层产生不同程度的地层移动与变形。这种地层移动与变形必然对地下工程结构施工及周边建构筑物,例如城市道路、桥梁、地下管线和地面建构筑物等的安全性和稳定性产生不利的影响。如何确定这种不利影响的程度,就必须进行风险评估。风险评估的目的就在于科学合理地评估风险可能发生的概率及其可能造成的损失,其基础就是风险评估准则,如果没有科学合理的风险评估准则,风险评估也就没有了基准。因此,科学合理地确定风险评估准则是至关重要的。

2 制定风险评估接受准则的基本原则

在制定风险接受准则方面,因国家和行业的不同,风险接受准则也有所不同。但多数情况下,都遵循以下两个基本原则。

1) 最低合理可行原则——ALARP (as low as reasonably practical),其含义是:任何工业活动都具有风险,不可能通过预防措施来彻底消除风险,因此,必须在系统的风险水平和成本之间做出平衡,即在不同的风险水平采取不同的风险决策,且风险等级的划分和风险对策的制定应尽可能合理可行,风

险成本尽可能低。

如图 1 所示,图中“ALARP 区”表示“可容忍区”,图中数值是工业行业普遍应用的风险限值(年死亡概率)^[1]。由于 ALARP 原则广泛适用于个人、社会及环境风险接受准则,所以在风险管理中得到了广泛应用^[2]。但对处在 ALARP 区域的风险,目前还缺少有效实用的成本—效益分析方法^[3]。

2) 最低合理可实现原则——ALARA (as low as reasonably achievable) (见图 1),其含义与 ALARP 原则基本相同,所不同之处就是在确定风险对策所对应的措施时,其所采取的措施必须是可实现的。

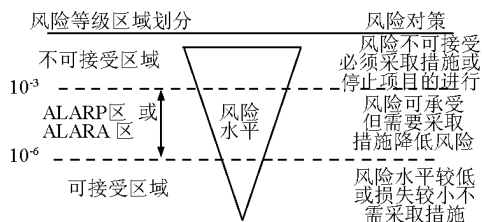


图 1 ALARP/ALARA 原则和风险对策

Fig. 1 ALARP / ALARA principle and risk response

3 地下工程风险评估准则

根据地下工程的风险特点,其风险评估准则主

[收稿日期] 2009-05-22;修回日期 2009-05-25

[作者简介] 姚宣德(1964-),男,山东蓬莱市人,北京市水利规划设计研究院高级工程师,博士,研究方向为桥梁、隧道、地下工程及道路工程;E-mail:yaoxuande@sohu.com

要包含以下两部分的内容。

1) 风险体的技术评估准则:主要是指风险体本身的各种技术标准及可靠度等。其主要依据是国际、国内和各地方的各种行业标准、技术规范和技术要求等。这是因为这些行业标准和规范的制定是根据本国或国际的实际情况,是建立在科学的、较深入的理论分析与研究和对大量工程实践数据统计分析的基础上的技术标准。虽然在某些领域还有许多不足,但从总体情况来看,在风险评估的过程中,采用本国的技术准则、规范和标准能够满足风险评估的技术要求,也较为符合本国的实际情况,科学合理且切实可行。

2) 风险接受准则:主要是指划分各类各级风险等级的基准值,也是风险管理和风险控制的基准。它表示在规定的时间内或系统的某一行为阶段内可接受的风险水平。它反映了社会、公众或个人等主体对风险的接受程度。风险接受准则可以直接为风险评价、风险应对与决策提供依据,即将风险的可接受程度通过定性或定量的方式来表示^[4]。

事实上,风险评估的过程就是综合运用风险评估主体自身的技术标准和规范,确定或预测其可靠程度,并在此基础上确定风险可能发生的概率,进而根据风险接受准则来评价风险和确定风险对策的过程。

3.1 风险接受准则的分类

在制定风险接受准则时,除了考虑人员伤亡、经济损失等可量化的指标外,还需考虑难以货币化的因素,如潜在的环境损失、污染、人员健康或社会公众影响等方面的因素。因此,根据国内外的研究资料和工程风险后果的基本分类,基本上可以将风险接受准则分为3个大类^[5]。

1) 安全风险(safety risk)接受准则:其中包括个人安全风险接受准则和社会安全风险接受准则;

2) 经济损失(EC, economical consequences)风险接受准则;

3) 环境影响(EE, effects on the environment)风险接受准则。

3.2 个人安全风险接受准则

个人安全风险(IR, individual risk)是指在某一特定位置长期生活的未采取任何防护措施的人员遭受特定危害的频率,此特定危害通常指死亡。它具有高度的主观性,取决于个人的偏好,即个人安全风险具有自愿性特征,根据人们从事活动的特性和该

活动是否由人所控制,可将其分为自愿的个人安全风险和非自愿的个人安全风险。同时,个人安全风险接受准则主要取决于决策者的个人偏好^[5]。

个人安全风险是以人员伤亡数和其可能发生的概率为考核的指标,最早是由荷兰住房、规划和环境部制定^[5]的个人安全风险的评估及接受准则,其定义为在确定的工作场所内,由于某种风险事故导致未采取任何保护措施人员出现死亡的概率,其数学模型的表达式为:

$$IR = P_f \cdot P_{d/f} \quad (1)$$

式(1)中, P_f 为风险事故发生的概率; $P_{d/f}$ 为事故发生后,可能发生人员死亡的概率; IR 为在未采取任何防护措施的情况下,人员死亡数为某一定值时风险事故可能发生的概率。

除上式定义外,还有其他4种定义方式:a. 寿命期望损失;b. 年死亡概率;c. 单位时间内工作伤亡率;d. 单位工作伤亡率。此外,也有些国家和行业是以AFR值(average failure risk,平均失效风险),AIR值(average individual risk,平均个人风险)和AI值(aggregated indicator,集合指数)等为指标,来制定个人安全风险的接受准则^[6]。目前,国际上制定和建立的个人安全风险接受准则主要有如下几个^[6]。

1) 荷兰制定了主要用于确定建筑安装与道路运输(公路和机场)中个人安全风险的接受准则,并绘制了风险等高线图(见图2)。

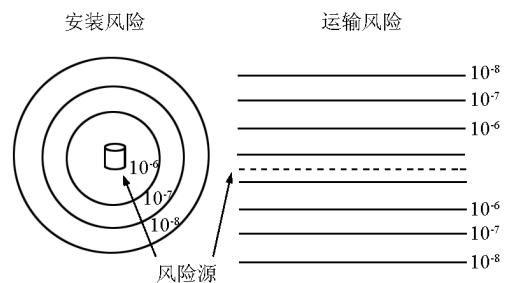


图2 荷兰安装和运输个人安全风险接受准则
Fig.2 Personal security risk acceptance criteria of installation and transportation of Netherlands

其风险接受准则为:

$$IR < 10^{-6} \text{ (每年)} \quad (2)$$

即若每年个人安全风险IR值小于 10^{-6} ,则风险接受准则满足ALARA原则。

2) 荷兰水务技术咨询协会给出了一些自愿活动的风险接受准则TWA^[6](见图3),其风险接受准

则为:

$$IR < \beta \cdot 10^{-4} \quad (\text{每年}) \quad (3)$$

式(3)中, β 为风险承担者自愿程度系数(见表1)。

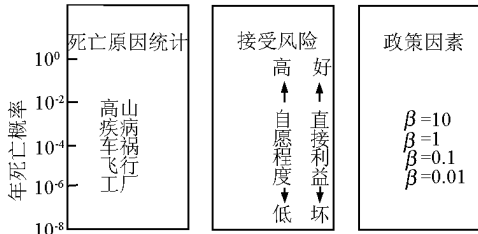


图3 荷兰水务协会不同活动的个人风险准则

Fig. 3 Personal risk acceptance criteria of various activities of Netherlands Water Association

表1 风险承担者自愿程度系数表

Table 1 The coefficient of the degree volunteers assume risk

风险承担者自愿程度系数分类			
自愿的	很大程度可自控的	有可能自控的	非自愿的
$\beta = 10$	$\beta = 1$	$\beta = 0.1$	$\beta = 0.01$

3) 德国考虑活动中人员的自身控制风险能力, 针对4种不同的活动形式(自愿、很大程度可自控、有可能自控、非自愿)制定了与TWA标准大致相同的风险接受准则 Bohnenblust^[6]。两者的对比如图4和表1所示。

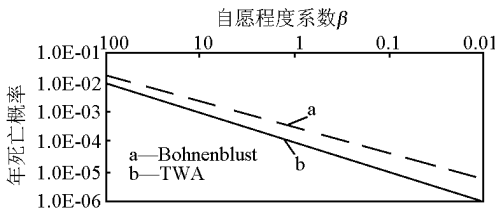


图4 Bohnenblust 和 TWA 个人风险准则对比

Fig. 4 Contrast between Bohnenblust and TWA for personal risk criteria

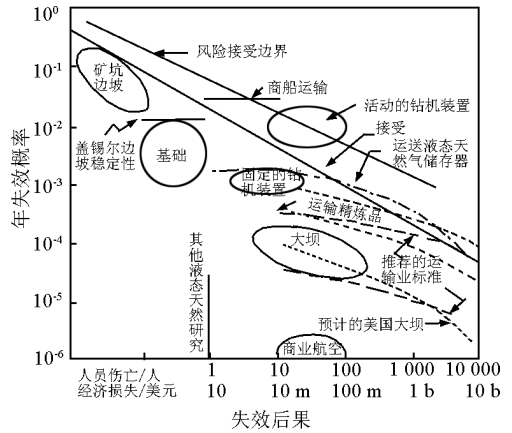
4) 英国的 HSE (Health and Safety Executive) 根据参与活动人员的不同, 制定了个人风险接受准则 IR_{HSE} ^[3]。

$$IR_{HSE} \leq 10^{-6} \quad (4)$$

其中根据参与活动的人员不同确定了具体的准则, 如群众 $IR_{HSE} \leq 10^{-5}$, 工人 $IR_{HSE} \leq 10^{-3}$ 。

5) 美国给出了不同行业的风险接受准则, 它是将个人安全风险接受准则和经济风险接受准则统一起来, 以人员伤亡和经济损失两项指标对应工程的

年失效率来讨论风险的接受准则^[6](见图5)。



注: 图中 m 为 million (百万), b 为 billion (十亿)

图5 美国不同行业风险接受准则分区图

Fig. 5 District plan of risks acceptance criteria of different industries in United States

3.3 社会风险接受准则

社会风险 (SR, society risk) 用于表示某项事故发生后, 特定人群遭受伤害的概率和伤害之间的相互关系。个人安全风险主要表示特定地点个人的伤亡概率, 而社会风险主要描述区域内许多人遭受灾害事故的伤亡状况, 两者的对比如图6所示。社会风险接受准则的确定方法有 ALARP 法、风险矩阵法、F—N 曲线、潜在人员伤亡值 (PLL, the potential loss of life) 和社会效益优化法等。

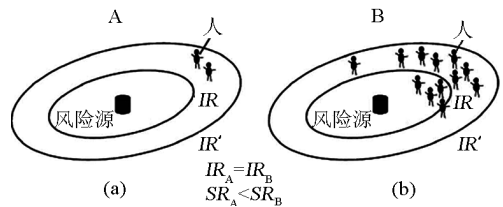


图6 社会风险和个人风险对比

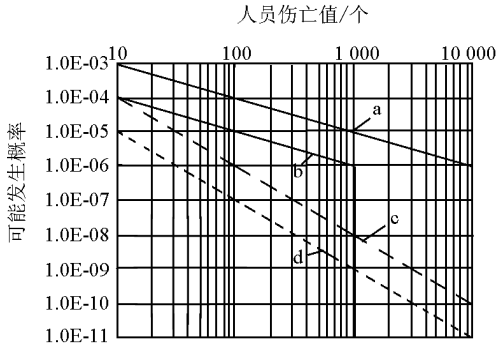
Fig. 6 Contrast for social risks and personal risks

1) 1967年 Farmer 利用概率论的观点建议了一条各种风险事故所允许发生的限制曲线, 即著名的 F—N 曲线。国际上社会风险接受准则一般都采用 F—N 曲线标准^[6](见图7):

$$1 - F_N(x) = P(x < N) = \int_x^{\infty} f_N(x) dx \quad (5)$$

式(5)中, $F_N(x)$ 为年伤亡概率分布函数; $f_N(x)$ 为年伤亡概率密度函数; $P(x < N)$ 为小于允许伤亡人数的可能发生概率; N 为某项工程允许年人员伤亡值(人数); x 为某项工程可能年人员伤亡值(人

数)。如果 $x > N$, 表示工程可能发生风险的人员伤亡数已超过允许范围, 此类风险不允许发生, 则此项工程是不允许进行的。



a—英国;b—香港;c—丹麦;d—荷兰

图7 国际上社会风险接受准则 $F-N$ 曲线标准

Fig.7 Standard of $F-N$ curves of international accepted social risk

2) 潜在人员伤亡 PLL 可以利用 $F_N(x)$ 的数学期望来表示。

$$E(N) = \int_0^{\infty} x \cdot f_N(x) dx \quad (6)$$

其风险接受准则为

$$1 - F_N(x) < \frac{C}{x^n} \quad (7)$$

式(7)中, n 为风险极限曲线的斜率; C 为风险极限曲线位置常数(见表2)。

表2 国际上社会风险接受准则 $F-N$ 曲线取值表

Table 2 Criteria values of international accepted social risk of $F-N$ curves

国家	n	C	风险特点
英国	1	0.01	风险不确定
香港	1	0.001	风险不确定
荷兰	2	0.001	风险被拒绝
丹麦	2	0.01	风险被拒绝

3) 英国 CIRA (construction industry and research association) 在 1977 年规定建筑物以年计的社会风险允许指数 C_s 见表3所示。

表3 英国 CIRA 社会风险允许指数

Table 3 Britain CIRA social risk index

建筑类型	大坝人群聚居处	办公室商业、工业区	桥梁	近海结构
C_s	0.005	0.05	0.5	5

1993 年, Fell 在英国 CIRA 规定的建筑物以年计的社会风险允许指数的基础上, 提出了各种行业

允许风险的确定方法:

$$P_r = \frac{C_s \times 10^{-4}}{N_r} \times \frac{1}{2} \quad (8)$$

式(8)中, P_r 为年允许社会风险可能发生的概率; C_s 为允许风险社会指数; N_r 为人员伤亡数。

3.4 经济风险接受准则

目前, 国内外各个行业还没有统一的经济风险接受准则, 仅有少数国家和行业有此方面的考核指标, 例如, 美国将个人安全风险接受准则和经济风险接受准则统一起来的经济风险接受准则(见图5)。国内高风险行业如煤炭行业有万元产值人员伤亡率等控制指标, 但这些控制指标均没有上升到风险接受准则的高度, 也没有统一的标准可用。

3.5 环境风险接受准则

环境风险 (ER, environmental risk) 与社会风险和个人安全风险不同。由于各种工程活动都是暴露在一定的环境中, 因此, 各种活动都有可能对环境造成影响。目前, 国内外还没有较为科学合理和完善的环境风险接受准则。

挪威 NORSOK (the competitive standing of the Norwegian offshore sector) 采用 $F-N$ 曲线提出了环境风险接受准则:

$$1 - F_T(x) = P(x < T) = \int_x^{\infty} f_T(x) dx \quad (9)$$

$$1 - F_T(x) < \frac{0.05}{x} \quad (10)$$

式(9)中, $F_T(x)$ 为环境系统恢复的概率分布函数; $f_T(x)$ 为环境系统恢复的概率密度函数; $P(x < T)$ 为环境系统恢复所需年数小于允许年数的可能发生概率; T 为环境系统恢复允许所需年数; x 为环境系统恢复所需年数。

如果 $x > T$, 表示工程可能发生风险对环境系统的影响已超过允许的范围, 此类风险是不允许发生的, 则此项工程是不允许进行的。

通过对风险接受准则的研究认为, 尽管上述风险接受准则均是量化的风险评估准则, 但在实际风险评估和风险决策、风险控制过程中, 仍存在无法使用的困难, 例如: 由于统计数据量不足, 很难对某一事件可能发生的概率进行测算。且对于不同的行业和不同的工程项目, 工程风险的种类及其可能发生的概率不同, 风险评估准则和计算方法、计算模型也就不同。

另外, 风险量化往往受到资料收集不完善或技术上无法精确估算的限制, 其量化的数据存在着一

定的不确定性,因此,以相对风险来表示是一种可行的方法,风险矩阵即是其中一例。风险矩阵采用相对的方法,决定风险的两大变量(可能性与后果),既以风险可能产生的后果和发生风险的可能性联合,最终来确定风险的等级和接受准则(见表4)^[6]。

表4 风险矩阵表
Table 4 Risk matrix

可能性分级	后果分级			
	I	II	III	IV
A	L	L	L	L
B	L	L	L	M
C	L	L	M	M
D	L	M	M	H
E	L	M	H	H

表中I为轻微后果,指轻微的人员伤害、轻微的职业病及轻微的系统破坏;II为一般后果,指人员伤害、严重的职业病、系统被破坏;III为严重后果,指系统受到严重破坏、有人死亡;IV为灾难性后果,指系统功能的完全丧失、多人死亡。表中的可能性可以根据事故发生的概率大小进行定性分级表示,如可表示为:A. 基本不会发生;B. 很少发生;C. 有时会发生;D. 时常发生;E. 频繁发生。表中H表示高风险;M为中等风险;L为低风险。

3.6 地下工程施工风险评估准则

目前,我国有关隧道及地下工程的风险评估准则方面的研究,非常缺乏基础资料。在我国的公路隧道设计规范(JTG D70—2004)中,规定了风险事故等级的划分标准(见表5)。

表5 我国公路隧道设计规范
中事故概率等级划分

Table 5 Accident probability of classification of highway tunnels in the Chinese design specifications

风险可能发生的概率(P)	风险等级
$P > 55\%$	A
$18\% \leq P \leq 55\%$	B
$5\% < P < 18\%$	C
$P \leq 5\%$	D

结合上述国内外的研究经验和研究成果,拟定地下工程的风险评估评价准则如下:

1) 风险大小等级:根据风险的概率分布,将风险发生的可能性按风险很大、较大、一般、较小和很小5个等级加以划分,分别对应于A、B、C、D、E级,并予以赋值(见表6)。

表6 城市隧道及地下工程系统风险等级划分

Table 6 Risk degrees of urban underground works and tunnel

风险描述	风险等级	风险可能发生的概率(P)	安全风险系数(K_s)
很小	A	$P < 1\%$	1
较小	B	$1\% \leq P \leq 5\%$	2
一般	C	$5\% < P < 18\%$	3
较大	D	$18\% \leq P \leq 55\%$	4
很大	E	$P > 55\%$	5

2) 风险影响程度:根据风险发生可能产生的经济损失,将风险影响程度划分为I~V 5个等级(见表7)。

表7 城市隧道及地下工程
系统风险影响程度划分

Table 7 Risk effect degrees of urban underground works and tunnel

风险影响描述	风险影响程度等级	财产损失C/万元	财产损失系数(K_e)
很小	I	$C < 10$	1
较小	II	$10 \leq C \leq 100$	2
一般	III	$100 < C < 500$	3
较大	IV	$500 \leq C \leq 1\,000$	4
很大	V	$C > 1\,000$	5

从风险可能发生的概率和影响程度综合考虑,根据以上对风险可能发生概率的大小和影响程度的划分,将风险可能发生概率大小的风险赋值与风险影响程度相对应的风险赋值相乘,得到风险值(R_f),并以此来确定风险的等级,再根据 R_f 大小将风险划分为5个等级(见表8,表9),以形成以下风险评估接受准则。

$$R_f = K_s \times K_e \quad (11)$$

式(11)中, R_f 为风险值; K_s 为风险可能发生概率大小的安全风险系数($K_s = 1, 2, 3, 4, 5$); K_e 为风险可能产生的影响对应的财产损失系数($K_e = 1, 2, 3, 4, 5$)。

表8 风险等级划分

Table 8 Risk degrees

风险等级	风险值(R_f)
1	1~4
2	5~8
3	9~12
4	13~16
5	17~25

表9 风险值(R_r)计算表Table 9 Calculation table of risk value (R_r)

风险影响		风险描述		很小	较小	一般	较大	很大
财产损失		风险分级		A	B	C	D	E
及对应分级		可能发生概率 P		$P < 1\%$	$1\% \leq P \leq 5\%$	$5\% < P < 18\%$	$18\% \leq P \leq 55\%$	$P > 55\%$
财产损失 C /万元	影响描述	影响分级	K_e	$K_s = 1$	$K_s = 2$	$K_s = 3$	$K_s = 4$	$K_s = 5$
$C < 10$	很小	I	1	1	2	3	4	5
$10 \leq C \leq 100$	较小	II	2	2	4	6	8	10
$100 < C < 500$	一般	III	3	3	6	9	12	15
$500 \leq C \leq 1\ 000$	较大	IV	4	4	8	12	16	20
$C > 1\ 000$	很大	V	5	5	10	15	20	25

3.7 风险对策

1级为风险很小——风险可忽略。风险发生的可能性很小,或者风险发生后造成的损失很小,可以忽略风险的影响。

2级为风险较小——风险可允许。风险发生的可能性较小,或者发生后造成的损失较小,工程项目本身就可以承受这部分风险损失,不影响工程项目建设的可行性,但需引起注意,必须采取常规管理措施进行风险管理。

3级为一般风险——风险可接受。风险发生的可能性不大,发生后造成的损失也不大,一般不影响工程项目建设的可行性,但需引起重视,需采取一定的措施进行风险监控。

4级为风险较大——风险部分可接受。风险发生的可能性较大,发生后造成的损失也较大,但造成的损失是项目可以承受的,但必须采取必要的控制措施和确保一定数量的风险投入,风险方可接受。

5级为风险很大——风险不可接受。风险发生的可能性大,发生后造成的损失大,需决策者进行严格的风险管理和决策,采取积极有效的措施进行风险的控制、规避或转移。否则,将可能使工程项目由可行转变为不可行,工程建设无法实施。

4 结语

综合分析研究了国内外的各种风险评估准则,结合我国地下工程的建设特点,将地下工程建设风险可能发生的概率和风险损失的大小有机地结合在一起,建设性地提出了地下工程风险评估准则,并且将这一研究成果成功地应用于《北京市城市地下道路系统规划设计研究》中的风险评估过程,取得了较好的效果。

参考文献

- [1] 罗云,樊运晓,马晓春,等. 风险分析与安全评价[M]. 北京:化学工业出版社,2004
- [2] Schofield S. Offshore QRA and the ALARP principle [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 61(1):31-37
- [3] 高建民,杨建安. 技术风险评估研究[J]. 科技进步与对策, 2001,(2):129-131
- [4] Ohtsubo H, Sumi Y. Committee report on risk assessment[A]. Proceedings of the 14th International Ship and Offshore Structures Congress[C]. Nagasaki, 2000
- [5] Bittelberghs P H. Risk analysis and safety policy developments in the Netherlands [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 71(1-3): 59-84
- [6] 胡群芳,黄宏伟. 隧道及地下工程风险接受准则计算模型研究[A]. 全国安全风险会议[C]. 北京, 2005

(下转 96 页)