

ICS 91.120.25

P 15

# 团体标准

T/SSC XXX-20XX

## 隧道抗震韧性评价标准

Evaluation criteria for seismic toughness of tunnels

征求意见稿

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国地震学会 发布

# 目次

前言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和符号.....	1
3.1 术语和定义.....	1
3.2 符号.....	2
4 要求.....	4
4.1 评价的主要内容.....	4
4.2 评价的原则和方法.....	5
4.3 评价的结论.....	5
5 隧道结构易损性数据库.....	6
5.1 选取易损性指标.....	6
5.2 隧道结构易损性指标.....	8
6 隧道损伤状态判定.....	11
6.1 一般要求.....	11
6.2 隧道结构时程分析.....	11
6.3 工程需求参数矩阵建立.....	11
6.4 隧道损伤状态分析.....	12
6.5 隧道损伤状态现场监测数据分析.....	13
7 修复费用计算.....	14
7.1 一般要求.....	14
7.2 修复费用定义.....	14
7.3 修复费用计算方法.....	15
7.4 隧道修复费用评价指标.....	16
8 修复时间计算.....	17

8.1 一般要求.....	17
8.2 修复时间定义.....	17
8.3 修复时间计算方法.....	17
9 隧道抗震韧性等级评价.....	19
9.1 基于韧性三角概念结构韧性评价方法.....	19
9.2 修复费用评级.....	23
9.3 修复时间评级.....	24
9.4 隧道抗震韧性等级.....	24
附录 A 隧道抗震韧性评级流程.....	25
附录 B 弹塑性时程分析的方法及模型.....	27
附录 C 隧道结构易损性数据库.....	30
附录 D 隧道损伤状态判定方法.....	31
附录 E 隧道抗震韧性等级评价流程.....	33

# 前言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中山大学提出。

本文件由中国地震学会归口。

本文件起草单位：

中山大学

石家庄铁道大学

山东大学

深圳大学

中铁第四勘察设计院集团有限公司

青岛国信发展（集团）有限公司

本文件主要起草人：

郭成超、高阳、隋传毅、王剑宏、许红彬、孙文昊、倪健

# 隧道抗震韧性评价标准

## 1 范围

隧道抗震韧性评价标准是对新建和既有隧道进行抗震韧性评级的依据,对于提高隧道工程的科学设计、安全运营、防灾减灾和安全建养水平具有重要意义。

## 2 规范性引用文件

GB50010-2010 混凝土结构设计规范

GB/T 51336-2018 地下结构抗震设计标准

GB/T 38591-2020 建筑抗震韧性评价标准

GB/T 17742-2020 中国地震烈度表

GB50909-2014 城市轨道交通结构抗震设计规范

JTG 3370.1-2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程

JTGT 2232-2019 公路隧道抗震设计规范

CJJT 289-2018 城市轨道交通隧道结构养护技术标准

## 3 术语和符号

### 3.1 术语和定义

地震动参数 seismic ground motion parameters

表征地震动的参数,包括地震动峰值加速度、峰值速度、反应谱及持续时间等。

地震动参数区划 seismic ground motion parameter zonation

以地震动参数为指标，将国土划分为不同抗震设防要求的区。

隧道抗震韧性 seismic resilience of tunnels

隧道在设定水准地震作用后，维持与恢复原有隧道功能的能力。

工程需求参数 engineering demand parameter

隧道抗震韧性评价所需的表征隧道抗震性能的参数，包括变形、应力和裂缝等参数。

隧道修复费用 restoration cost of tunnel

隧道恢复其综合功能所需要的直接费用。

隧道修复时间 repair time of tunnel

在修复工作所需材料、人员、设备齐全的条件下，隧道恢复其基本功能所需要的时间。

收敛变形 convergent deformation

隧道开挖完或初支后，由于隧道的开挖，使岩体应力改变，隧道周边会发生收敛，收敛指两侧向中间位移，有正值和负值。

塑性损伤 plastic damage

完整的描述材料的非线性破坏过程，表征整个变形过程中塑性应变的累积结果。

开裂 cracks

开裂指的是在隧道衬砌的接缝或裂缝处，两板体产生相对竖向位移的现象。

### 3.2 符号

$R_a$ ——混凝土抗压极限强度；

$R_w$ ——混凝土弯曲极限抗压强度；

$R_t$ ——混凝土抗拉极限强度；

$c$ ——开裂；

SDEG——混凝土刚度下降率；

K——隧道修复费用指标；

T——隧道修复费用指标；

## 4 要求

### 4.1 评价的主要内容

隧道抗震韧性评价应包括下列内容：

- (1) 集成评价对象的有效隧道信息，应包括隧道结构的设计参数、支护参数等；
- (2) 建立评价对象的结构模型，对于既有隧道，宜进行振动测试，依据测试结果进行模型修正，并应进行在设定水准地震作用下的弹塑性时程分析；
- (3) 应由弹塑性时程分析结果中提取工程需求参数；
- (4) 应根据工程需求参数，结合易损性数据库，确定评价对象隧道结构二次衬砌的损伤状态；
- (5) 应根据评价对象隧道结构的损伤状态，计算其在设定水准地震作用下的修复费用、修复时间和修复程度；
- (6) 应根据评价对象在设定水准地震作用下的修复费用、修复时间和修复程度指标，综合评价其抗震韧性等级。

隧道抗震韧性评价流程图如图 4.1 所示

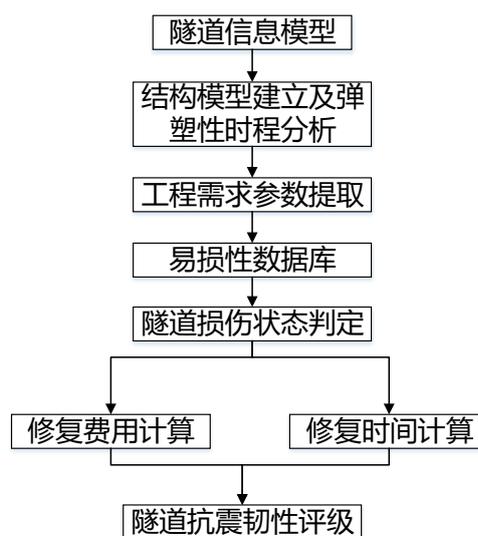


图 4.1 隧道抗震韧性评价流程图

## 4.2 评价的原则和方法

隧道抗震韧性评价应以结构弹塑性时程分析和隧道易损性数据库为基础。建立隧道结构模型时，应符合工程的实际情况，材料强度应取极限强度值。隧道抗震韧性评价应采用设定水准地震作用下结构弹塑性时程分析所得出的工程需求参数作为依据。承担隧道抗震韧性评价工作的单位，应具备进行隧道结构弹塑性时程分析和概率分析的能力。

## 4.3 评价的结论

隧道抗震韧性评价的结论应采用级数进行表达，由一至三表示，抗震韧性等级逐级提高。隧道抗震韧性评价的结论应采用专用标牌在隧道物显要位置标示，标牌内容除应含有隧道工程抗震性能的基本信息外，尚应包括韧性等级、采用标准、评价单位、评价时间。

## 5 隧道结构易损性数据库

### 5.1 选取易损性指标

地震易损性是指不同震级地震作用下隧道结构发生不同级别破坏状态的概率,通过概率指标定量反映了隧道结构的抗震性能,宏观描述了地震强度与隧道结构破坏程度之间的关系。选取易损性指标会涉及到诸多不确定性问题,需要考虑多方面的不确定性来源,为此,引入可拓云模型。

#### 5.1.1 可拓云

可拓云模型是一种即能反映客观事物的随机性和模糊性,又能实现评价指标与评价等级间的确定和不确定关系的统一定量描述的模型。其定义如下:假设某研究对象评价指标有  $n$  个( $i=1, 2, \dots, n$ ),评价等级有  $m$  个( $j=1, 2, \dots, m$ ),评价指标  $i$  对应第  $j$  等级的云模型可由云滴数  $N$  和数字特征( $E_x, E_n, H_e$ )来产生,  $E_x$  代表各等级期望值,表示隶属云的分布中心,是最能代表对应等级界限概念的样本点;熵  $E_n$  是对概念的不确定性描述,不但能描述安全等级评价过程中采集样本数据的随机性,而且还能描述等级界限的模糊性;超熵  $H_e$  是对熵的不确定性的量度,一方面反映了安全等级样本数据的离散度,另一方面体现了安全等级评价中各指标的随机性和模糊性之间的联系度。

可拓理论是一种解决矛盾问题的形式化理论方法,其基本物元模型为  $R=(N, C, V)$ 。将要评价的海底隧道安全性能记作  $N$ ,其各指标记为  $C$ ,各指标量值记为  $V$ ,结合云理论处理不确定性问题的随机性和模性,用正态云( $E_x, E_n, H_e$ )代替特征值  $V$ ,假设  $N$  有  $n$  个评价指标, $R$  为  $n$  维物元,将各项指标分为  $m$  个安全等级( $j=1, 2, \dots, m$ ),则可拓云模型表达形式如下:

$$\mathbf{R}_j = (\mathbf{N}, \mathbf{C}_i, \mathbf{V}_j) = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & (\alpha_{j1}, \beta_{j1}) \\ & c_2 & (\alpha_{j2}, \beta_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (\alpha_{jn}, \beta_{jn}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & (E_{x_{j1}}, E_{n_{j1}}, H_{e_{j1}}) \\ & c_2 & (E_{x_{j2}}, E_{n_{j2}}, H_{e_{j2}}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (E_{x_{jn}}, E_{n_{jn}}, H_{e_{jn}}) \end{bmatrix}$$

其中,  $R_j$  为在  $j$  等级内,与评估对象  $N$  相对应的评估指标及其标准量值范围形成的经典

域,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为各等级的区间值,  $(Ex_{ji}, En_{ji}, He)$  表示区间  $v_{ji}$  对应的云参数, 令  $He=0.1$ , 且有

$$Ex_{ji} = (\alpha_{ji} + \beta_{ji}) / 2$$

$$En_{ji} = (\alpha_{ji} - \beta_{ji}) / 6$$

### 5.1.2 权重确定

#### (1) 层次分析法

层次分析法是常用的主观分析法, 将与目标有关的元素按级分为目标层、准则层、方案层的方式构建指标体系, 然后逐层计算权重的方法。首先构建成对比较矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix}$$

$a_{ij}=w_i/w_j$  表示两个变量相时目标重要性的比, 再求出矩阵 A 的特征值和特征向量, 特征值为权重, 并对判断矩阵进行一致性检验, 来检验权重的有效性, 最后通过加权和方法, 由下至上逐层计算各方案对总目标的最终权重, 如下式所示。

$$w_m = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{j=k}^m a_k)^{-1}$$

$$w_{k-1} = a_k w_k$$

权重越大对目标的作用也越大, 一般适合于具有分层描述指标体系, 且难于定量描述的目标决策问题。

#### (2) 熵权法

熵权法是一种非常实用的客观的权重计算方法。用每列数据所提供的信息量的大小来测算权重, 熵值越小, 所提供的信息量越大, 相应的权重也就越高。反之熵值越大, 则说明信息量小, 相应的权重越小。计算过程如下:

对数据进行标准化处理

$$\text{正指标: } c'_{ij} = \frac{\max(c_j) - c_{ij}}{\max(c_j) - \min(c_j)}$$

$$\text{逆指标: } c'_{ij} = \frac{c_{ij} - \min(c_j)}{\max(c_j) - \min(c_j)}$$

计算各指标的熵值

$$H_i = -\lambda \sum_{j=1}^n (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (i=1, 2, \dots, m, \quad j=1, 2, \dots, n)$$

计算各个指标的熵值

$$D_i = 1 - H_i$$

计算权重

$$W_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^m D_i} \quad i=1, 2, \dots, m$$

### 5.1.3 模型建立

i) 确定指标及分级。

ii) 确定权重 W

选用主客观结合的方法确定各指标的权重, 依次计算各指标权重, 经集成、归一化处理, 得到以上各指标的权重。

iii) 建立关联度

建立指标取值  $x$  与各等级之间的关联度, 将各项评价指标作为云滴, 生成服从正态分布  $N(En, He^2)$  的方差  $En'$ , 用下式计算出指标值  $x$  与该正态可拓云之间的关联度  $k$ 。

$$k = \exp \left[ -\frac{(x - Ex)^2}{2(En')^2} \right]$$

iv) 评价矩阵

利用程序多次重复上述过程, 然后取其中位数, 即可得到各项结构安全评价指标的最终隶属度  $K$ ,  $K$  表示为

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nm} \end{bmatrix}$$

其中,  $k_{ij}$  为评估等级  $j$  中  $i$  指标的隶属度,  $m$  为等级数量。

计算评价结果隶属度  $B=W*K$ , 其中,  $W$  为指标权重, 根据最大隶属度规则, 评价对象等级  $i$  最终取  $B$  中  $b_i$  的最大值所属等级。由此得到隧道结构易损性指标。

## 5.2 隧道结构易损性指标

### 5.2.1 隧道收敛变形

地震作用组合下的变形验算应符合规定: 地震作用组合的效应 (如变形、位移等) 设计值要小于等于设计对变形、位移等规定的相应限值; 抗震性能要求较高时, 宜进行结构整体变形性能验算, 其相应参数和计算模型要适应弹塑性阶段计算要求, 钻爆法隧道 (或类圆形

隧道)二衬结构的最大收敛值作为指标, 界限值如表 5.1 所示。

表 5.1 隧道收敛变形评定标准

收敛变形	$3.0\% <$	$3.0\% \leq < 5.0\%$	$5.0\% \leq < 10.0\%$	$10.0\% \leq < 15.0\%$	$> 15.0\%$
描述	完好	轻微	中等	严重	危险
级别	1	2	3	4	5

### 5.2.2 隧道结构应力

混凝土抗拉能力差、脆性强, 在荷载作用下容易出现混凝土开裂、剥落, 甚至坍塌现象。

在试验中常用混凝土极限强度值判定混凝土是否发生损坏, 如表 5.2 所示; 在数值模拟中常

用混凝土刚度下降率 (SDEG) 表征混凝土开裂造成的刚度下降, 如表 5.3 所示。

表 5.2 混凝土极限强度值 (MPa)

强度种类	混凝土强度等级							
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
抗压强度 $R_a$	12.0	15.5	19.0	22.5	26.3	29.5	33.6	36.5
弯曲抗压强度 $R_w$	15.0	19.4	23.6	28.1	32.9	36.9	42	45.6
抗拉强度 $R_t$	1.4	1.7	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	3.1

表 5.3 混凝土刚度下降率 (SDEG)

SDEG(刚度下降率)	0	$0 < \leq 0.3$	$0.3 < \leq 0.74$	$0.74 < < 1$	1
描述	完好	轻微	中等	严重	危险
级别	1	2	3	4	5

### 5.2.3 开裂

衬砌开裂是指衬砌表面出现裂纹、裂缝或贯通衬砌全部厚度的裂纹的总称, 是衬砌变形的结果。衬砌开裂包括张裂、压溃和错台 3 种: (1) 张裂是弯曲受拉和偏心受拉引起的裂损; (2) 压溃是弯曲或偏心受压引起的衬砌裂损; (3) 错台是由剪切力引起的裂缝, 裂缝宽度在表面至深处大致相同。隧道开裂评定标准如表 5.4 所示。

表 5.4 隧道开裂评定标准

开裂错台 (mm)	$c \leq 5$	$5 < c \leq 10$	$10 < c \leq 15$	$15 < c \leq 20$	$c > 20$
描述	完好	轻微	中等	严重	危险
级别	1	2	3	4	5

## 6 隧道损伤状态判定

### 6.1 一般要求

隧道损伤状态判定应根据隧道易损性数据库和工程需求参数确定隧道的损伤状态。隧道易损性数据采用随工程需求参数变化的概率分布表征,工程需求参数矩阵应根据弹塑性时程分析结果,采用联合对数正态分布函数。

### 6.2 隧道结构时程分析

#### 6.2.1 有限元模型建立

根据隧道设计资料和勘察地质资料,选取围岩物理力学参数、衬砌支护参数,建立三维有限元模型。

#### 6.2.2 地震参数获取

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)(2016年修订版),对工程场地地震动参数进行选取。所选取地震波的数量,以及持时、幅值和频谱等参数应符合相关规范要求。

#### 6.2.3 有限元模型计算

采用弹塑性时程分析法进行地震响应分析,详见附录B弹塑性时程分析的模型及方法。

### 6.3 工程需求参数矩阵建立

#### 6.3.1 原始工程需求参数矩阵

提取工程需求参数并统计分布特征,集成工程需求参数矩阵,详见附录D隧道损伤状态判定方法。

#### 6.3.2 工程需求参数矩阵扩充

统计工程需求参数分布特征，随机生成具有相同联合分布的工程需求参数矩阵，详见附录 D 隧道损伤状态判定方法。

## 6.4 隧道损伤状态分析

### 6.4.1 蒙特卡洛算法

蒙特卡罗法也称统计模拟法、统计试验法，是把概率现象作为研究对象的数值模拟方法。是按抽样调查法求取统计值来推定未知特性量的计算方法。蒙特卡罗是摩纳哥的著名赌城，该法为表明其随机抽样的本质而命名。故适用于对离散系统进行计算仿真试验。在计算仿真中，通过构造一个和系统性能相近似的概率模型，并在数字计算机上进行随机试验，可以模拟系统的随机特性。

通过中心极限定理，可以了解到伴随着随机变量数量的逐渐增加，这些变量的和逐渐呈现出正态分布特征，不管单个随机变量  $X_k$ ，（ $k=1, 2, 3, \dots, n, \dots$ ）服从什么分布，当  $X_k$  很大时，它们的和服从正态分布。

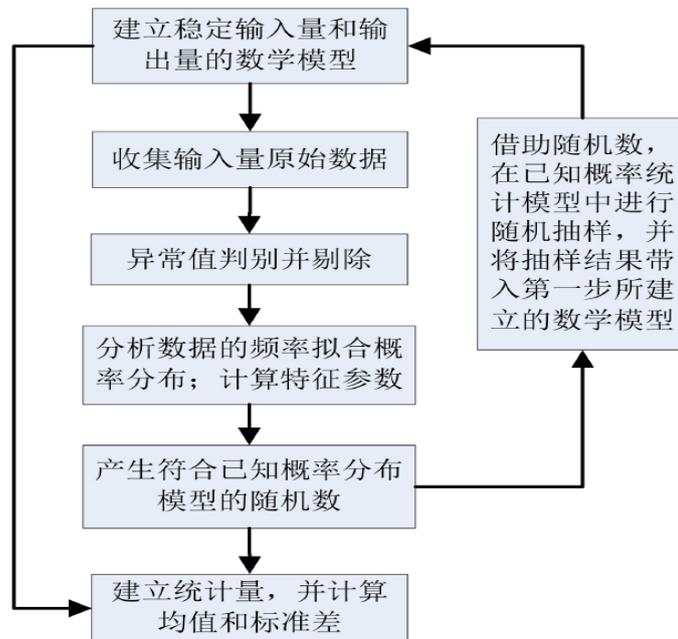


图 6.1 蒙特卡洛算法流程

借助中心极限定理、大数定律，描述蒙特卡罗模拟方法的计算方法为：

假定函数  $Y=F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$

运用这种方法的条件是，在已经确定了变量  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  的分布函数，以随机抽样的方式为每一组自变量  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ，赋值为  $(X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}, \dots, X_{ni})$ 。

根据因变量  $Y$  与已知的随机变量  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  之间的函数关系，计算出函数  $Y$  的值  $Y_i$

$$Y_i=F(X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}, \dots, X_{ni})$$

按照同样的方法，对上述随机抽样过程重复多次 ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )，能获得因变量  $Y$  函数值  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ ，这些数值符合正态分布的特征。

#### 6.4.2 隧道损伤状态计算

基于蒙特卡洛方法结合易损性数据库进行多次隧道损伤状态判定，采用对数正态分布模型拟合各项可修复性指标，并采用具有 84% 保证率的拟合值作为抗震韧性评价的依据，确定隧道抗震韧性等级，最终形成隧道抗震韧性评价标准。

#### 6.5 隧道损伤状态现场监测数据分析

根据隧道施工或运营中布设的收敛监测设备、轴力监测设备和裂缝位移监测设备等监测系统获得历史或者某一时间段的数据，将数据和隧道结构的易损性指标进行对比分析，用隧道现场监测数据对隧道的损伤状态进行分析。

## 7 修复费用计算

### 7.1 一般要求

介绍说明隧道修复成本计算总体要求，例如修复成本主要组成、是否采用现行定额、该计入及不该计入修复费用的特殊支出款额情况。材料类成本用料依照工程项目具体要求或参考公路工程预算定额规定计算。

#### 7.1.1 材料成本

(1) 围岩加固成本计算：针对围岩变形的常见修复材料及修复工艺费用说明，例如注浆加固法中常见各类高聚物注浆材料的市场价成本、锚固法中锚杆市场价成本。

(2) 衬砌修复成本计算：针对衬砌破坏的常见修复材料及修复工艺费用说明，例如注浆加固中各类高聚物材料成本、粘贴碳纤维布、钢片等材料成本、常规修复中的混凝土、砂浆、石料成本、更换套拱、钢筋支护成本等。常规修复使用的工程材料单位成本按照现行公路工程预算定额规定计算。

(3) 防渗堵水成本计算：针对隧道防渗堵水的常见修复材料及修复工艺费用说明，例如如注浆加固中各类高聚物材料成本。

#### 7.1.2 非材料成本

主要包括场地清理、受损部位拆除、置换及修复过程中产生的机械费、电费、运输费、人工费（工时费）等。隧道修复成本合计方法将隧道修复全程产生的材料类费用及非材料类费用求和。

### 7.2 修复费用定义

修复费用的计算内容是震后隧道在修复过程中所产生的所有直接相关费用，由材料费和非材料费两大部分组成。其中材料费包括：常规修复中的混凝土、砂浆、石料成本、更换套

拱、钢筋支护成本等，注浆加固中各类高聚物材料成本、粘贴碳纤维布、钢片等材料成本。

非材料费包括：受损部位拆除、清理、置换及修复过程中产生的电费、运输费、机械费、人工费（工时费）。

### 7.3 修复费用计算方法

修复费用的计算思路是根据各部件单元的损伤情况计算该部件单元的修复费用，并将隧道内部的所有部件单元修复费用进行统合，得到隧道整体修复费用，采用修复费用与建造成本的比值修复费用比作为修复费用的评价指标。其计算流程如图 7.1 所示：

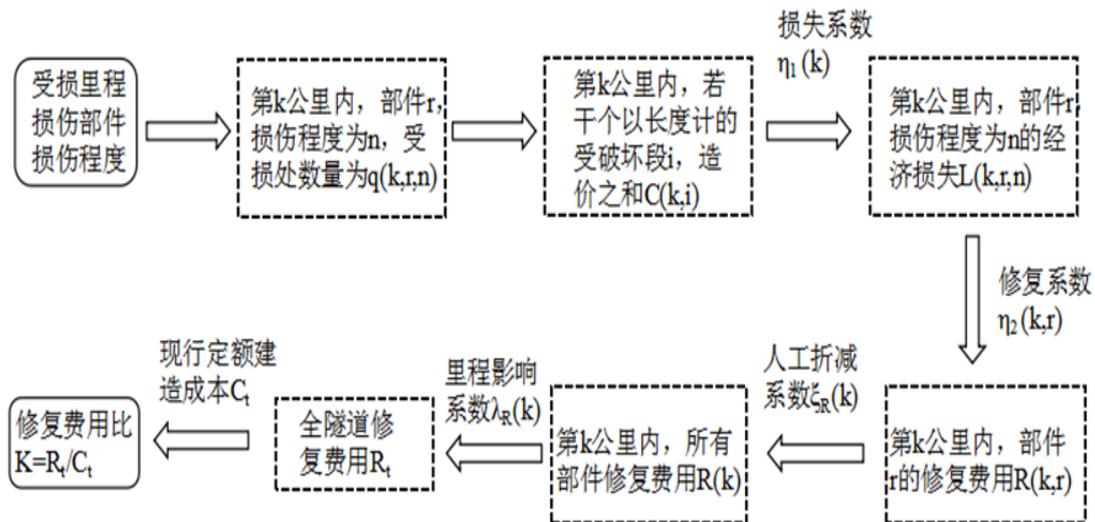


图 7.1 修复费用计算流程

将各相关系数定义如下：

(1) 损失系数  $\eta_1(k)$ ：修复过程中的临时支护、部件的修复或更换造成的材料费与非两项费用之和与该连续受损段建造成本的比值。损失系数  $\eta_1(k)$  由造价  $C(k, i)$ 、经济损失  $L(k, r, n)$  反推得。

(2) 修复系数  $\eta_2(k, r)$ ：考虑场地清理、部位拆除更换、用电及机械设备等非材料费后，修复费用与经济损失的比值。

(3) 人工折减系数  $\xi_R(k)$ ：由于专门修复某一类型部件损伤会导致工人的熟练程度增加，应考虑修复工作量增加后对人力成本的折减效应，因此定义小于等于 1 的折减系数  $\xi_R(k)$  对修复费用进行修正。

(4) 里程影响系数  $\lambda_R(k)$ ：待修复部件所处的隧道里程位置会影响运输成本、通风照明设施成本和人力成本。因此，定义大于等于 1 的楼层位置影响系数  $\lambda_R(k)$  对不同里程深度的修复费用进行修正。

隧道整体修复费用采用下式进行计算：

$$R_t = \sum [\xi_R(k) \sum (C(k, i) \eta_1(k) \eta_2(k, r) \xi_R(k) \lambda_R(k))]$$

隧道所有受损段建造费用采用下式进行计算：

$$C_t = \sum C(k, i)$$

#### 7.4 隧道修复费用评价指标

拟设计采用修复成本与隧道建造成本的比值  $K$  作为修复成本评价指标， $K=R_t/C_t$ 。其中建造成本  $C_t$  金额，须依据自隧道建成投用年以来历史通货膨胀率换算成现今价值。划分不同的  $k$  值区即可将隧道修复韧性评级。

## 8 修复时间计算

### 8.1 一般要求

隧道修复时间应计人所有震损部件完成建筑功能性恢复所需的修复时间。隧道修复时间不宜计人建筑震损评估、修复方案制定、修复材料采购、施工设备租赁等各项开工前准备工作所耗费的时间。

### 8.2 修复时间定义

计算隧道修复时间时应考虑隧道及其附属设施的主要修复工作在里程和进出口的先后次序，并应符合下列要求：

(1) 隧道的主要修复工作应包括结构部件修复、围护部件修复、隔断部件修复及附属部件修复、管线修复、通风照明（电力）、通信设备修复。

(2) 不同的修复工作可同时展开。

(3) 隧道震损的修复时间应按照主要修复工作的先后次序，取主要修复工作的最长时间组合作为隧道修复时间的评价指标。

### 8.3 修复时间计算方法

各主要修复工作的修复时间应按下列原则和方法进行计算：

(1) 不同损伤状态下的部件，实现功能性恢复目标所需时间应以单个工人完成此项工作的修复工时表达。

(2) 同里程内同类型震损部件的修复工时应根据其数量，考虑规模效应和效率提升所产生的积极影响，并应考虑里程距离对修复时间的影响，按下式计算：

$$T(i, k) = \sum T(i, j, k) \times n(i, j, k) \times \xi_{\tau}(i) \lambda_{\tau}(k)$$

式中:

$T(i, k)$  ——第  $k$  公里第  $i$  类部件的修复工时总和, 单位为人天(人·d);

$T(i, j, k)$  ——第  $k$  公里处于损伤状态  $j$  的第  $i$  类部件的修复工时, 单位为人天(人·d);

$n(i, j, k)$  ——第  $k$  公里处于损伤状态  $j$  的第  $i$  类部件数量;

$\xi_{\tau}(i)$  ——考虑第  $i$  类震损部件修复工程量的修复工时折减系数;

## 9 隧道抗震韧性等级评价

### 9.1 基于韧性三角概念结构韧性评价方法

基于易损性数据库进行多次隧道损伤状态判定，确定地震灾害作用下的结构损伤，构建不同损伤状态的恢复函数，结合修复指标（修复时间、修复费用等），得到隧道结构性能函数曲线，基于韧性三角形理论，确定隧道抗震韧性等级。

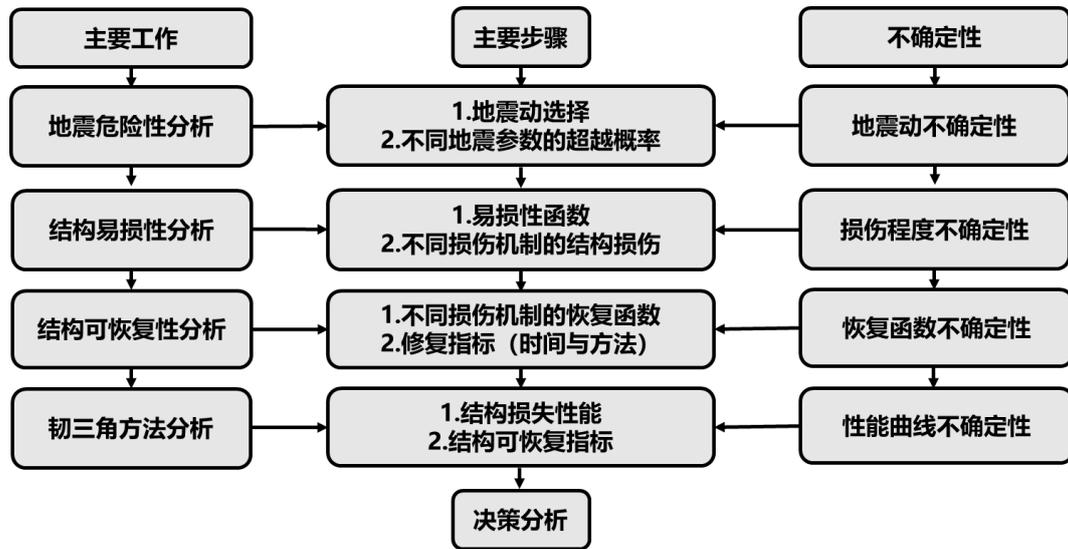


图 9.1 分析流程

#### 9.1.1 隧道结构易损性分析

隧道地震易损性可通过地震易损性曲线描述，即在某一给定地震动强度（Intensity Measures, IM）下，结构损伤指标（Damage States, DM）超过某一损伤状态的超越概率。

$$P(LS_i|IM = x) = P(DM > dm_i|IM = x) = 1 - P(DM < dm_i|IM = x)$$

损伤状态 $LS_i$ 由 DM 量化并表示为 $dm_i$ ，上述公式为计算当  $IM=x$  时 DM 超过 $dm_i$ 的概率。

以代表 IM 的地震动参数（PGA, PGV 或 PGD 等）为 X 轴，超越概率 P 为 Y 轴，拟合后得到易损性曲线，进行易损性分析。

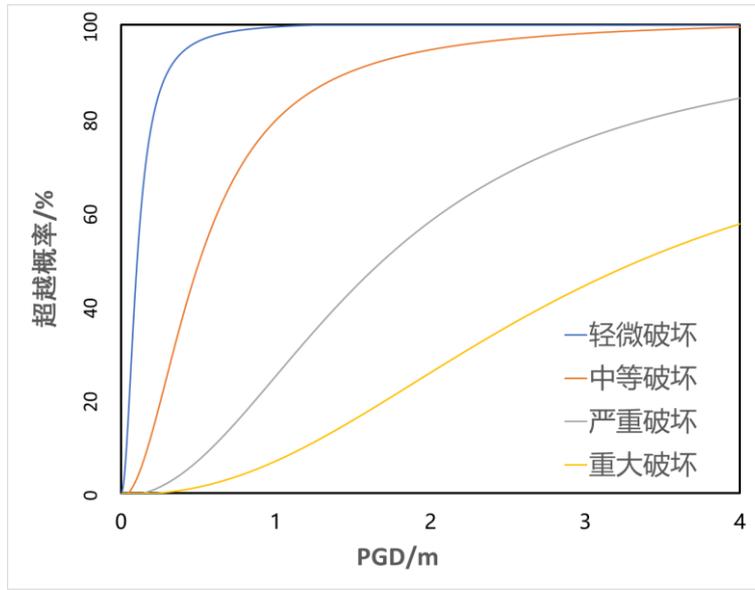


图 9.2 易损性曲线示例 (PGD)

基于建立的隧道地震易损性曲线,可以获得隧道在不同地震强度下超越不同破坏状态的概率:

$$P_{1j}(= \text{无破坏}) = 1 - P_j(ds \geq \text{轻微破坏})$$

$$P_{1j}(ds \geq \text{轻微破坏}) = P_j(ds \geq \text{轻微破坏}) - P_j(ds \geq \text{中等破坏})$$

$$P_{2j}(ds \geq \text{中等破坏}) = P_j(ds \geq \text{中等破坏}) - P_j(ds \geq \text{严重破坏})$$

$$P_{3j}(ds \geq \text{严重破坏}) = P_j(ds \geq \text{严重破坏}) - P_j(ds \geq \text{重大破坏})$$

$$P_{4j}(ds = \text{重大破坏}) = P_j(ds \geq \text{重大破坏})$$

LS0、LS1、LS2、LS3、LS4 分别为正常使用、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和重大破坏损伤状态。

### 9.1.2 隧道韧性修复函数

抗震韧性评估需建立合理的韧性恢复模型,性能恢复函数形式一旦确定,即可对隧道抗震韧性进行定量评价。性能恢复函数需考虑多种因素的影响,与损伤情况、修复费用、修复时间等因素密切相关。目前,经典的性能恢复模型曲线包括线性函数 (Bruneau, 2007)、三角函数 (Bocchini, 2012) 和指数函数 (Cimellaro 等, 2010; Dong 等, 2015) 形式。

1) 三角函数:  $Q(t) = a/2\{1 + \cos\left[\frac{\pi b(t-t_{0E})}{T_{RE}}\right]\}$

2) 线性函数:  $Q(t) = a\left(\frac{t-t_{0E}}{T_{RE}}\right) + b$

3) 指数函数:  $Q(t) = a \exp\left[-\frac{b(t-t_{0E})}{T_{RE}}\right]$

其中,  $Q(t)$  为随时间变化的功能函数 (100%表示功能完好, 0%表示功能完全丧失),  $a$  和  $b$  为使用曲线拟合到可用数据源计算的常量值,  $t_{0E}$  为地震发生时刻,  $t_{0E}+t_{RE}$  为修复完成时刻,  $t_{0E}$  至  $t_{0E}+t_{RE}$  时刻之间功能函数的变化即为性能恢复函数曲线。

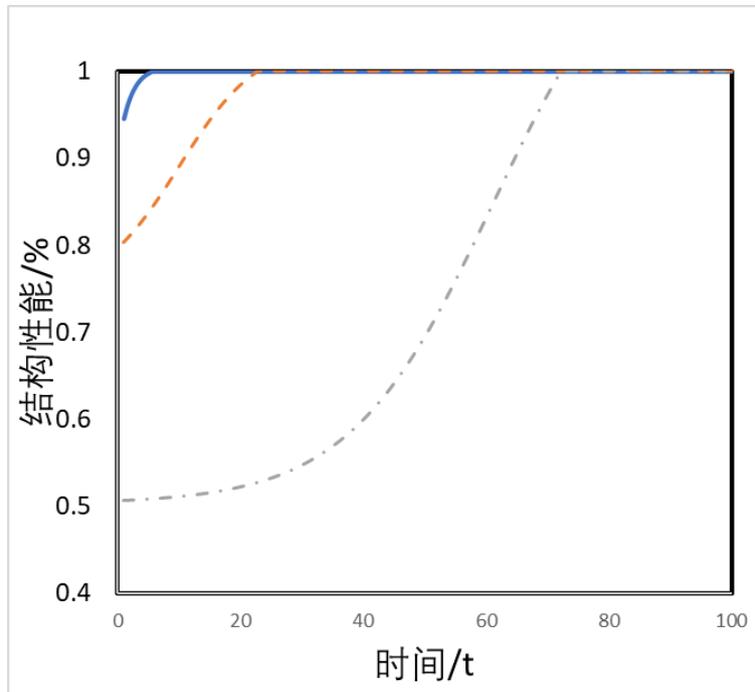


图 9.3 隧道韧性修复曲线示例

### 9.1.3 隧道结构整体韧性曲线

基于隧道结构易损性分析及不同状态修复函数,可推导出给定地震动强度指标下隧道结构功能函数  $Q(t)$  计算公式:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^4 Q_d(ds_i|t)P_f(ds \geq ds_i|IM)$$

$Q_d(ds_i|t)$ : 在地震后修复工作开始的时间点  $t$  时隧道在破坏状态  $ds_i$  下的性能百分比,

由对应的隧道性能修复曲线获得：

$P_f(ds \geq ds_i | IM)$ ：在给定地震动强度  $IM$  下超过某破坏状态  $ds_i$  的概率。

基于隧道结构功能/性能函数  $Q(t)$ ，得到隧道结构韧性曲线，其示例如下。

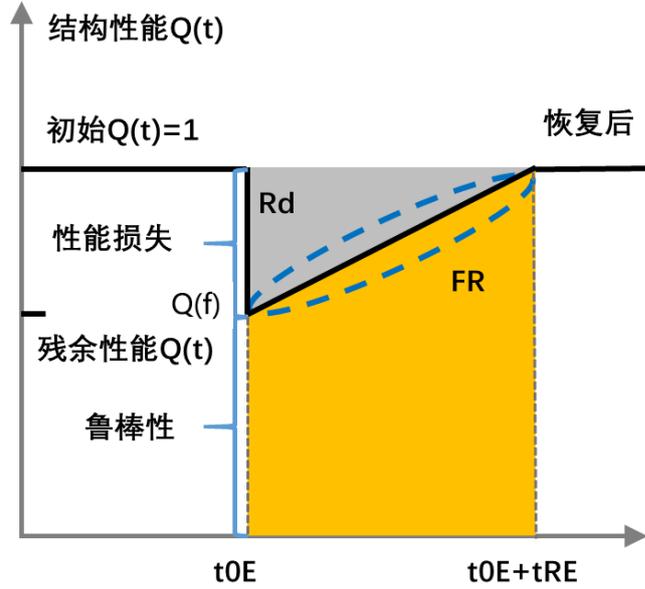


图 9.4 隧道结构韧性曲线示例

#### 9.1.4 隧道结构韧性评价

基于三角韧性理论，隧道结构韧性评价指标可分为： $R$ （快速修复性）， $R_d$ （性能损失）， $FR$ （性能恢复）， $Re$ （结构韧性指标）， $R_f$ （可修复性指标）；隧道结构韧性评价指标可以从不同破坏状态对应的隧道抗震性能功能函数  $Q(t)$  计算得到。

$$R = \frac{dQ(t)}{dt}$$

$$R_d = \int_{t_{0E}}^{t_{0E}+t_{RE}} [100 - Q(t)] dt$$

$$FR = \int_{t_{0E}}^{t_{0E}+t_{RE}} (Q(t) - Q_F) dt$$

$$Re = \frac{\int_{t_{0E}}^{t_{0E}+t_{RE}} Q(t) dt}{t_{RE}}$$

$$Rf = \frac{\int_{t_{0E}}^{t_{0E}+t_{RE}} Q(t) - Q(f) dt}{(1 - Q(f)) t_{RE}}$$

其中，FR 越大，韧性越好；Rd 越小，韧性越好。同时，根据地震灾后可恢复性指标 Re 的大小，初步定性地将隧道可恢复性性能等级划分成以下五类，分别是 I 至 V 个等级。可恢复性等级为 I 级代表隧道结构可恢复性能良好，可恢复性等级为 V 代表隧道结构可恢复性能一般。

表 9.1 隧道可恢复性性能等级

结构总体等级划分	Re=FR/F	Rd/RF（多方法比较可用）
I	Re=1	a
II	0.875 < Re < 1.00	b
III	0.585 < Re ≤ 0.875	c
IV	0.500 < Re ≤ 0.585	d
V	Re ≤ 0.500	e

## 9.2 修复费用评级

表 9.2 修复费用指标的等级

等级	地震水准	隧道修复费用指标 K
三级	罕遇地震	K ≤ 5%
二级	罕遇地震	5% < K ≤ 10%
一级	设防地震	K ≤ 10%

### 9.3 修复时间评级

表 9.3 修复时间指标的等级

等级	地震水准	隧道修复时间指标 T
三级	罕遇地震	$T \leq 7d$
二级	罕遇地震	$7d < T \leq 30d$
一级	设防地震	$T \leq 30d$

### 9.4 隧道抗震韧性等级

基于蒙特卡洛方法结合易损性数据库进行多次隧道损伤状态判定,采用对数正态分布模型拟合各项可修复性指标,并采用具有 84%保证率的拟合值作为抗震韧性评价的依据,确定隧道抗震韧性等级,最终形成隧道抗震韧性评价标准。

隧道的抗震韧性等级应综合考虑隧道修复费用和隧道修复时间二项指标的等级进行评价,取二项评价指标的最低等级作为该隧道的抗震韧性等级。

## 附录 A 隧道抗震韧性评级流程

### A.1 评级流程

隧道抗震韧性评级应按图 A.1 所示隧道抗震韧性评级流程确定。其中，蒙特卡洛模拟的次数不应少于 1000 次。

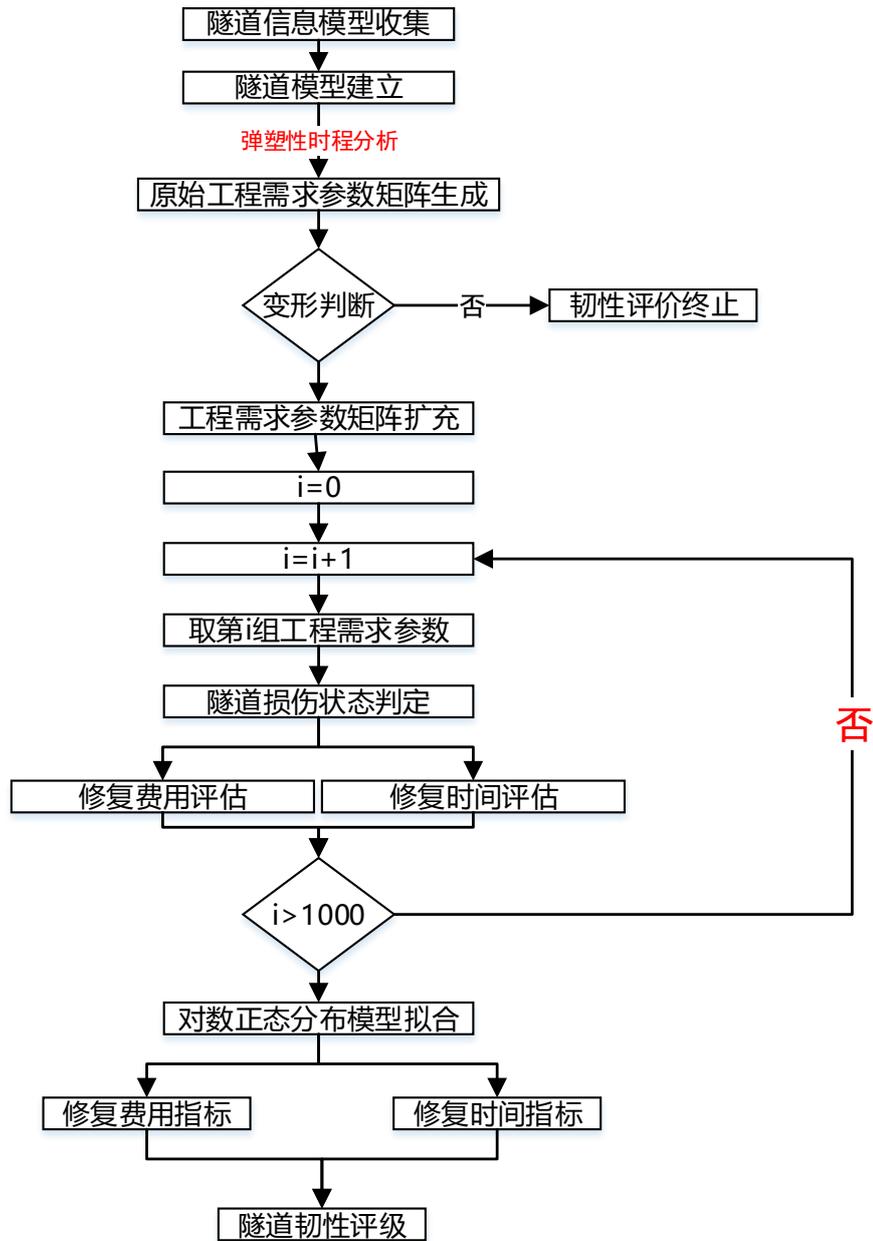


图 A.1 隧道抗震韧性评级流程

## A.2 原始工程需求参数矩阵

隧道结构的原始工程需求参数矩阵，应按附录 B 弹塑性时程分析方法确定。

## A.3 收敛变形判断

宜采用罕遇地震水准作用下弹塑性时程分析的平均值，并取最大变形平均值与收敛变形限值比较，当大于限值时，则判断隧道不可修，终止隧道抗震韧性评级；当小于或等于限值时，可进行隧道抗震韧性评级。

## A.4 工程需求参数矩阵扩充

原始工程需求参数矩阵应采用附录 D 隧道损伤状态判定方法的方法进行工程需求参数矩阵的扩充，形成扩充后工程需求参数矩阵。

## A.5 抗震韧性指标计算方法

抗震韧性指标的计算应采用蒙特卡洛方法。抗震韧性指标的计算应进行多次模拟，分别获取各项指标的集合。采用对数正态分布模型拟合各项抗震韧性指标集合，并采用具有 84% 保证率的拟合值作为建筑韧性评价的依据。

## 附录 B 弹塑性时程分析的方法及模型

### B.1 弹塑性时程分析法

弹塑性时程分析法可适用于各种地形地质条件、不同结构形式及不同施工方法的隧道抗震计算。

一般情况下，隧道具有纵向长度较大，横向结构形式及构造基本不变的特征，根据其构造特点和平面应变原理，横向抗震计算时是沿隧道纵向选取一个或多个横断面作为计算断面，一般选取隧道覆土较浅、偏压受荷、水位变化较大或岩土力学特性较差等具有代表性的横断面。

当隧道纵向穿越复杂地形、工程地质条件变化大的区域时，如洞口段或穿越大型断层破碎带、软硬岩层交界地带等，以及盾构、沉管隧道等在纵向采用接头连接的隧道结构，在地震作用下，结构纵向可能产生较为复杂的内力响应，致使结构破坏或影响其正常使用，该类隧道的纵向抗震性能需要重点考虑。

时程分析法能较好地处理介质的非均匀性、各向异性、非线性及复杂几何边界条件，可以全面考虑地震动的峰值、频谱特性和持续时间，并可以同时揭示隧道结构及周围岩土体在地震全时段的动力响应特征，因此特别适用大跨、重要、复杂及特殊隧道结构或地形、地质条件变化较大的局部区段或纵向结构形式变化较大、空间效应显著的隧道结构。

### B.2 分析模型

进行隧道抗震响应分析时，计算模型应符合结构的受力状态，应按空间问题进行三维建模求解。

地层模型的选取范围应遵循以下原则：

(1) 水平方向结构侧壁至边界的距离至少为 3 倍结构宽度。

(2) 竖直方向顶面边界宜取至地表面；隧道埋深特别大时，结构顶部至地表面的距离 3-5 倍结构竖向有效高度，并宜考虑初始地应力场的影响。

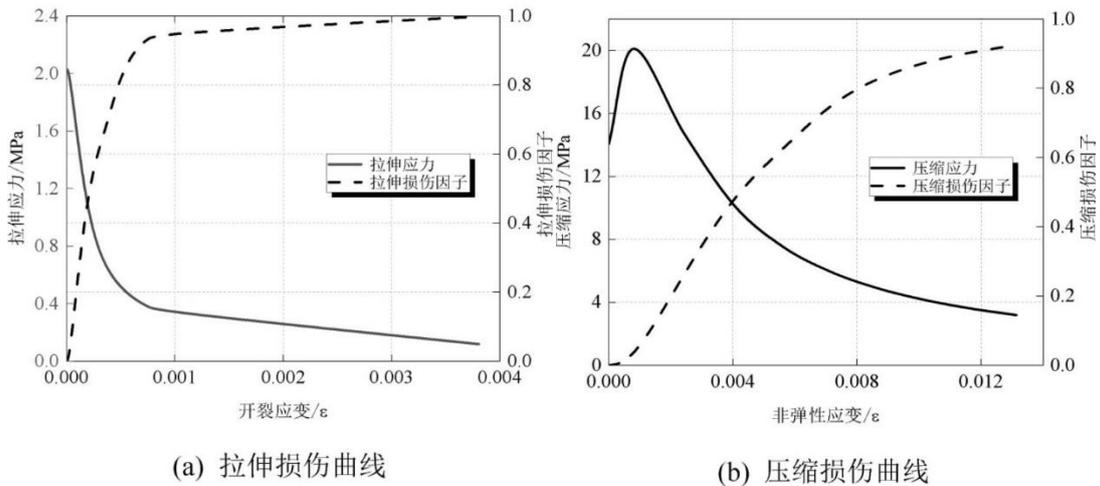
(3) 当地下结构埋深较深，结构与基岩的距离小于 3 倍地下结构整向有效高度时，计算模型底面边界宜取至基岩面。

(4) 当地下结构埋深嵌入基岩，此时计算模型底面边界需取至基岩面以下。

有限元模型的材料本构及参数取值应符合下列规定：

(1) 材料强度应按 GB50010-2010 混凝土结构设计规范进行取值。

(2) 混凝土本构模型应考虑受压刚度退化和软化行为、以及受拉开裂行为，如图 B.1 所示。



B.1 混凝土损伤曲线

### B.3 地震动输入

(1) 采用时程分析法计算时，输入地震动宜取加速度时程。

(2) 已作工程场地地震安全性评价的隧址，采用时程分析法进行结构动力分析时，设

计地震动时程应根据专门的工程场地地震安全性评价的结果确定。

(3) 未作地震安全性评价的隧址，采用广义反应位移法和时程分析法进行结构动力分析时，输入的设计地震动加速度时程可根据地震动加速度反应谱合成，也可利用地震和场地环境相近的实际地震动加速度记录经适当调整后确定。

(4) 对其他隧道，地震动参数可在 GB/T 17742-2020 中国地震烈度表上查询。

(5) 用于输入的地震动加速度时程的峰值加速度、峰值位移及加速度反应谱曲线与本规范规定的设计地震动峰值加速度、峰值位移以及本节中确定的地震动加速度反应谱曲线的误差应小于 5%。

#### B.4 地震波要求

采用时程分析法进行地震响应分析时，所选取地震波的数量，以及持时、幅值和频谱等参数应符合公路隧道抗震设计规范(JTG/T 2232-01-2019)的相关规定，且应符合下列规定：

(1) 选用的地震波数量一般不少于 3 条，可按工程场地类别和设计地震分组选用不少于两组的实际强震记录和一组由地震安全性评价提供的加速度时程曲线。

(2) 当地震波的样本数量少于 3 条时应取计算结果包络值进行抗震设计。

(3) 当地震波的数量大于 7 条时，可取平均值进行抗震设计。

(4) 合理确定地震动输入的持续时间。不论采用实际的强震记录还是人工合成的地震动时程，地震动加速度的持续时间可取岩（土）-结构相互作用体系自振周期的 5-10 倍。

附录 C 隧道结构易损性数据库

表 C.1 隧道收敛变形评定标准

收敛变形	$3.0\% <$	$3.0\% < \leq 5.0\%$	$5.0\% < \leq 10.0\%$	$10.0\% < \leq 15.0\%$	$> 15.0\%$
描述	完好	轻微	中等	严重	危险
级别	1	2	3	4	5

表 C.2 混凝土极限强度值 (MPa)

强度种类	混凝土强度等级							
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
抗压强度 $R_a$	12.0	15.5	19.0	22.5	26.3	29.5	33.6	36.5
弯曲抗压强度 $R_w$	15.0	19.4	23.6	28.1	32.9	36.9	42	45.6
抗拉强度 $R_t$	1.4	1.7	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	3.1

表 C.3 混凝土刚度下降率 (SDEG)

SDEG (刚度下降率)	0	$0 < \leq 0.3$	$0.3 < \leq 0.74$	$0.74 < < 1$	1
描述	完好	轻微	中等	严重	危险
级别	1	2	3	4	5

表 C.4 隧道开裂错台评定标准

开裂错台 (mm)	$c \leq 5$	$5 < c \leq 10$	$10 < c \leq 15$	$15 < c \leq 20$	$c > 20$
描述	完好	轻微	中等	严重	危险
级别	1	2	3	4	5

## 附录 D 隧道损伤状态判定方法

### D.1 蒙特卡洛方法

隧道损伤状态应采用蒙特卡洛方法确定，蒙特卡洛模拟流程如图 D.1 所示。

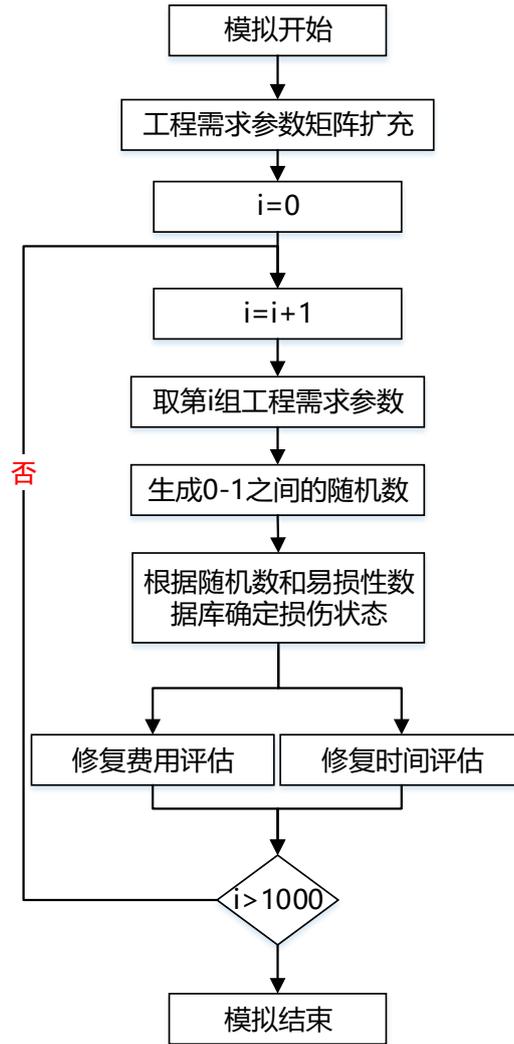


图 D.1 蒙特卡洛模拟流程图

### D.2 工程需求参数矩阵扩充方法

每次时程分析可得到一组工程需求参数，将各次时程分析的工程需求参数组装成矩阵，

每列表示一个特定的工程需求参数取值，每行表示一次时程分析的结果。

扩充后的工程需求参数与分析得到的工程需求参数应具有相同的联合分布，扩充后的工程需求参数矩阵与时程分析得到的工程需求参数矩阵应具有相同的均值与方差。

工程需求参数的分布取联合对数正态分布。对工程需求参数矩阵的值应取对数，新矩阵中参数分布应满足联合正态分布。

工程需求参数的对数分布可由下式确定：

$$Z=LU+M_Y$$

式中：

$Z$ —— $Z=[Z_1, Z_2, \dots, Z_n]^T$ ， $Z_i$  为第  $i$  个工程需求参数的取对数变量；

$L$ —— $\sum_{YY}$  矩阵 Cholesky 分解得到的下三角矩阵， $\sum_{YY}$  为取对数后的工程需求参数矩阵  $Y$  的协方差矩阵；

$U$ —— $U=[U_1, U_2, \dots, U_n]^T$ ， $U_i$  为第  $i$  个独立正态分布的变量；

$M_Y$ ——矩阵  $Y$  的均值矩阵；

独立正态分布变量的取值可由计算机的伪随机数生成。工程需求参数的分布由其取对数的分布取指数确定。利用上式计算得到一组工程需求参数的对数取值，取值后得到工程需求参数的取值，多次利用上式将计算结果组装为矩阵，即可得到扩充后的工程需求参数分布的取值。

## 附录 E 隧道抗震韧性等级评价流程

隧道的抗震韧性等级应综合考虑隧道修复费用和隧道修复时间二项指标的等级进行评价，取二项评价指标的最低等级作为该隧道的抗震韧性等级。

**表 E.1 修复费用指标的等级**

等级	地震水准	隧道修复费用指标 K
三级	罕遇地震	$K \leq 5\%$
二级	罕遇地震	$5\% < K \leq 10\%$
一级	设防地震	$K \leq 10\%$

**表 E.2 修复时间指标的等级**

等级	地震水准	隧道修复时间指标 T
三级	罕遇地震	$T \leq 7d$
二级	罕遇地震	$7d < T \leq 30d$
一级	设防地震	$T \leq 30d$

**表 E.3 综合等级**

等级	综合等级					
三级	三级	三级	二级	三级	一级	三级
二级	一级	二级	二级	二级	/	
一级	一级	一级	/		/	

## 参 考 文 献

- [1] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范
- [2] GB/T 51336-2018 地下结构抗震设计标准
- [3] GB/T 38591-2020 建筑抗震韧性评价标准
- [4] GB/T 17742-2020 中国地震烈度表
- [5] GB50909-2014 城市轨道交通结构抗震设计规范
- [6] JTGT 2232-2019 公路隧道抗震设计规范
- [7] CJJT 289-2018 城市轨道交通隧道结构养护技术标准