

中国地震学会团体标准

《隧道抗震韧性评价标准》编制说明

一、编制的必要性

目前，隧道结构的抗震设计遵循“多水平设防，两阶段设计”的抗震设计理念，并按照“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震总体设防目标，但并没有将隧道的抗震韧性纳入其抗震设计要求。为了规范我国隧道抗震设计，提升技术水平，保障隧道工程质量，同时满足隧道抗震韧性评价要求，亟需建立一套科学的隧道抗震韧性评价标准，以推动隧道的抗震韧性评价在隧道设计中的运用，提升隧道抗震韧性水平。

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。

二、国内外概况

目前，国内外韧性评价理论与设计方法方面取得一定进展，相继提出了抗震韧性的概念并进行了深入研究。要求也由“地震安全”提升到了“地震韧性”的层面。

国外韧性抗震评价多集中于建筑抗震评价领域，美国联邦应急管理署、美国韧性委员会分别提出了 FEMA-P58、USRC Building Rating System 评价标准，国际奥雅纳工程咨询公司提出了 REDi Rating System 评价标准；美国联邦应急署颁布的 FEMA-P58 中给出了包括人员伤亡、修复费用和修复时间等性能指标的概率分布，实现对单体建筑的评价；奥雅纳工程咨询公司牵头建立一套 3 个等级（白金级、金级、银级）、4 个维度（组织韧性、建筑韧性、环境韧性、损失评估）和 65 个指标的建筑抗震韧性指数评估体系；美国韧性委员会从

人员伤亡、修复费用和修复时间 3 个指标评价建筑韧性，并根据评价结果认证相应等级。

国内现有抗震规范与标准也多针对建筑物及构筑物，对于隧道的抗震韧性评价缺乏相应规范和标准。相关规范和标准有：《公路隧道抗震设计规范（TJG 2232-2019）》、《建筑抗震韧性评价标准（GB/T 38591-2020）》、《建（构）筑物与应急设施地震安全韧性建设指南（DB11/T 1891-2021）》、《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范（GB50652-2011）》、《地下结构抗震设计标准（GB/T 51336-2018）》等。中国建筑抗震韧性评价标准建立了包括人员伤亡、修复费用和修复时间 3 个评价指标及三星、二星和一星 3 个评价等级的评价体系。

目前国内外隧道韧性评价理论与设计方法方面缺乏系统研究，国内外抗震韧性评价多集中于建筑及构筑物抗震韧性评价领域，而对于隧道的抗震韧性评价却缺乏相应规范和标准。

三、编制主要过程（包括但不限于以下内容）

1. 任务来源

国家重点研发计划交通基础设施重点专项项目

“2021YFB2600800 海底隧道建造与韧性增强关键技术”

2. 起草单位和主要起草人

序号	姓名	单位	职称	联系方式	编制角色
1	郭成超	中山大学	教授	13523718415	负责人
2	高阳	石家庄铁道大学	教授	13673180180	
3	隋传毅	石家庄铁道大学	讲师	15532153681	
4	王剑宏	山东大学	教授	18963070912	
5	许红彬	深圳大学	副研究员	15833113800	
6	孙文昊	中铁第四勘察设计院集团有限公司	正高级工程师	13114396903	
7	倪健	青岛国信发展(集团)有限责任公司	高级工程师	18660202220	

3. 主要工作过程

(1) 调研阶段

文献资料调研：收集和研究与隧道抗震韧性相关的文献资料，了解国内外相关标准、规范和研究成果。

实地调查：对已建成的隧道进行实地调查，了解其抗震设计、施工和运营情况。

专家访谈：与相关领域的专家进行访谈，获取他们对隧道抗震韧性标准的看法和建议。

调研方法论：确定调研的方法论，包括采用的技术手段、数据收集方式和分析方法。

数据收集：收集隧道结构、地质条件、地震活动等方面的数据，为后续分析和评估提供支持。

(2) 立项阶段

确定立项目的：为了规范我国隧道抗震设计，提升技术水平，保障隧道工程质量，同时满足隧道抗震韧性评价要求，亟需建立一套科学的隧道抗震韧性评价标准，以推动隧道的抗震韧性评价在隧道设计中的运用，提升隧道抗震韧性水平。

立项申请：向中国地震学会办公室提交《隧道抗震韧性评价标准》立项申请书。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。

组建标准项目组：组建隧道抗震韧性标准制定的项目组，包括项目负责人、专家顾问、技术人员等，详见起草单位和主要起草人章节。

制定标准项目计划：制定详细的项目计划，包括项目的时间安排节点、各单位工作任务内容分配和定期视频会议。


确定调研范围：明确隧道抗震韧性标准制定的范围，包括适用对象、内容要求、标准制定的层次等。

预调研：进行初步的文献调研和实地调查，了解相关领域的最新进展和现状，为后续调研工作做准备。

立项会议：召开立项会议，对项目的立项背景、目的、计划等进行详细讨论，明确各方责任和工作重点。

项目启动：正式启动隧道抗震韧性标准制定项目，开始实施调研和研究工作。

立项组织会议：



中山大学
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

课题二：海底隧道结构劣化与韧性增强设计方法

隧道抗震韧性评价标准

郭成超

中山大学
2023年10月

2023/10/31 15:13:59



(3) 起草阶段

制定起草计划：确定起草阶段的时间安排、工作任务分配和起草流程，确保标准的顺利制定。

召开起草组会议：组建起草组，召开会议讨论标准的起草方向、结构和内容，明确起草工作的目标和重点。

制定标准结构：确定隧道抗震韧性标准的结构框架，包括标准的章节设置、内容要求和各章节之间的逻辑关系。

撰写标准内容：根据起草计划和标准结构，起草组成员分别负责撰写各个章节的内容，确保标准的全面性和准确性。

起草组织会议：



 **中山大学**
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

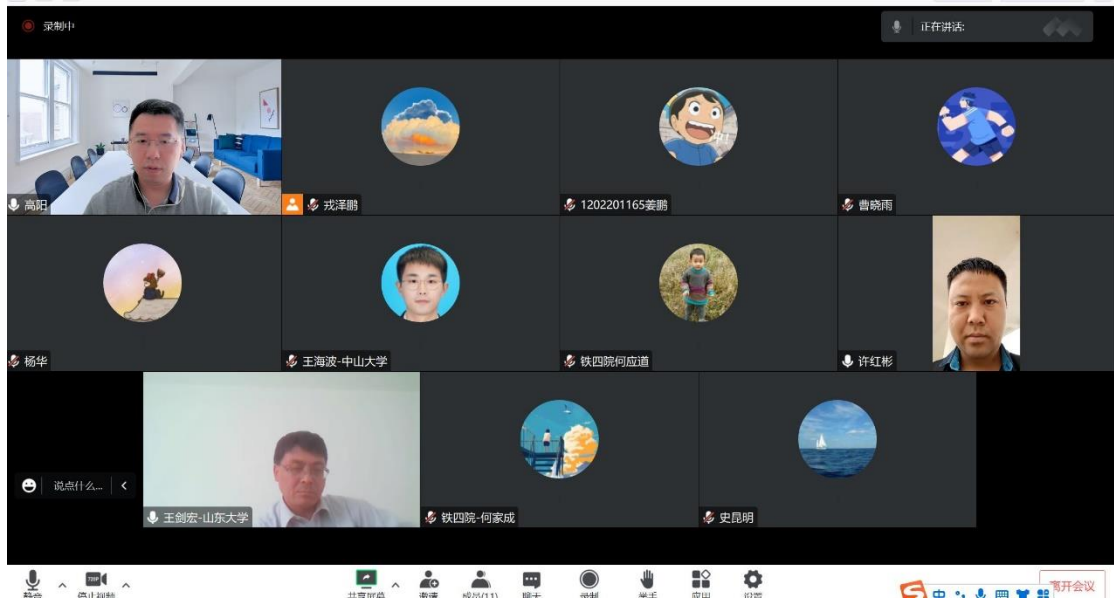
课题二：海底隧道结构劣化与韧性增强设计方法

隧道抗震韧性评价标准

郭成超

中山大学
2023年12月

1



(4) 内部讨论与修改阶段

召开内部讨论会议: 组织起草组成员和相关专家参加内部讨论会议，就标准的各个方面展开讨论。

审阅标准内容: 起草组成员和专家对标准的各个章节内容进行仔细审阅，确保内容准确、完整、符合规范。

技术讨论与研讨: 就标准中涉及的技术问题展开深入讨论和研究，确保标准的科学性和实用性。

提出修改建议: 起草组成员和专家根据审阅过程中发现的问题和改进建议，提出相应的修改意见。

讨论修改意见: 就各方提出的修改意见进行讨论，分析其合理性和可行性，确定是否需要进行修改。

修改标准内容: 根据讨论和意见反馈，对标准的内容进行修改和调整，确保标准的准确性和完整性。

协调意见分歧: 如在讨论过程中出现意见分歧，需要进行协调和沟通，寻求达成共识的方式和方法。

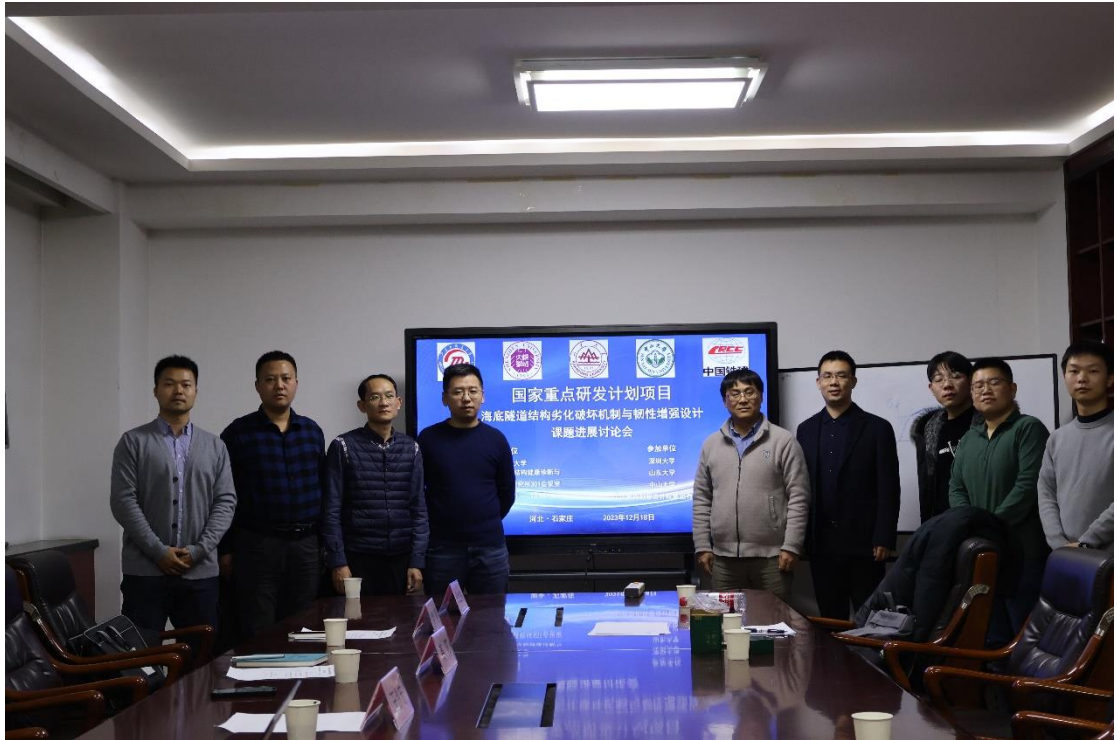
整合修改意见: 汇总各方提出的修改意见，对标准内容进行整合，形成统一的修改版本。

内部审查与确认：完成修改后的标准内容进行内部审查，确保修改符合要求，最终确认修改版本。

文本定稿：根据内部讨论和修改的结果，最终确定标准文本的定稿版本，为后续审查和批准做准备。

内部讨论会议：





(5) 公开征求意见与修改

公开征求意见：向中国地震学会提出申请备案，备案后由中山大学向相关单位及专家发征求意见函，学会办公室同期在学会官网和团体标准信息平台发布征求意见公告。

(6) 专家会议评审与标准完善阶段

四、条文说明

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。标准以数值模拟仿真或者现场实测数据为依据，开展韧性评价工作。

2 规范性引用文件

3 术语和符号

4 要求

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。具体参照 GB50010-2010 《混凝土结构设计规范》确定。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。我国不同地区的设防地震烈度和设计基本加速度应按 GB/T 17742-2020 《中国地震烈度表》确定。

5 隧道结构易损性数据库

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。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模型。

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糊性，用正态云 (Ex, En, He) 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：

$$\mathbf{R}_j = (N, C_i, V_j) = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & (\alpha_{j1}, \beta_{j1}) \\ & c_2 & (\alpha_{j2}, \beta_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (\alpha_{jn}, \beta_{jn}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & (Ex_{j1}, En_{j1}, He) \\ & c_2 & (Ex_{j2}, En_{j2}, He) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (Ex_{jn}, En_{jn}, He) \end{bmatrix}$$

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， α 、 β 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

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

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

参考 JTGT 2232-2019 《公路隧道抗震设计规范》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。

隧道收敛变形评定标准

收敛变形	3.0‰<	3.0‰<≤5.0‰	5.0‰<≤10.0‰	10.0‰<≤15.0‰	>15.0‰
描述	完好	轻微	中等	严重	危险
级别	1	2	3	4	5

参考 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》。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；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。

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

混凝土刚度下降率（SDEG）

SDEG(刚度下降率)	0	0<≤0.3	0.3<≤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

参考 CJJT 289-2018 《城市轨道交通隧道结构养护技术标准》。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

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

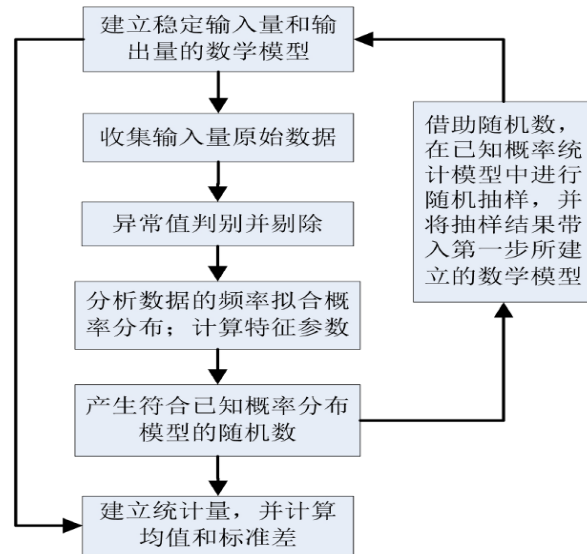
隧道损伤状态判定应根据隧道易损性数据库和工程需求参数确定隧道的损伤状态。隧道易损性数据采用随工程需求参数变化的概率分布表征，工程需求参数矩阵应根据弹塑性时程分析结果，采用联合对数正态分布函数。

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。

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。

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。

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。



蒙特卡洛算法流程

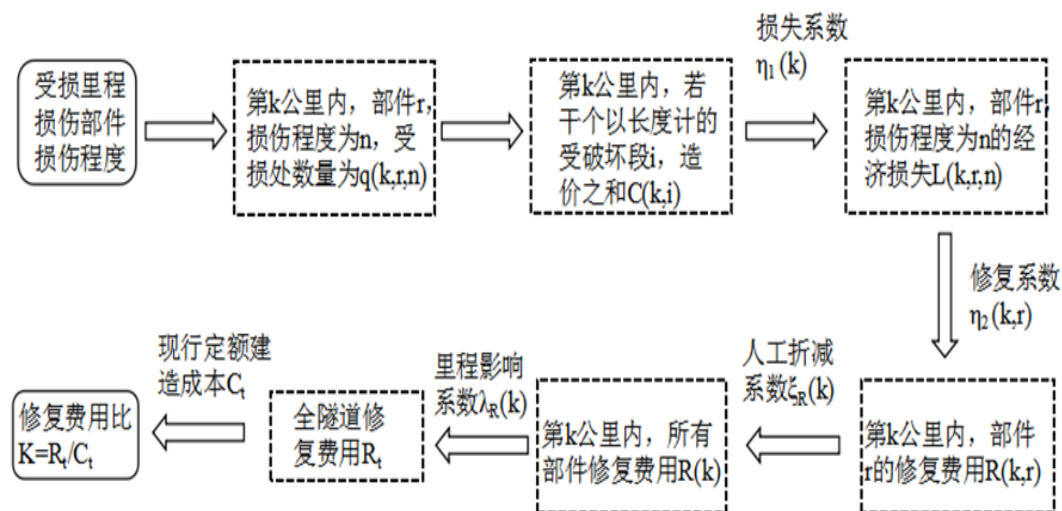
基于蒙特卡洛方法结合易损性数据库进行多次隧道损伤状态判定，采用对数正态分布模型拟合各项可修复性指标，并采用具有 84% 保证率的拟合值作为抗震韧性评价的依据，确定隧道抗震韧性等级，最终形成隧道抗震韧性评价标准。

7 修复费用计算

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。

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）。



修复费用计算流程

8 修复时间计算

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。

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：

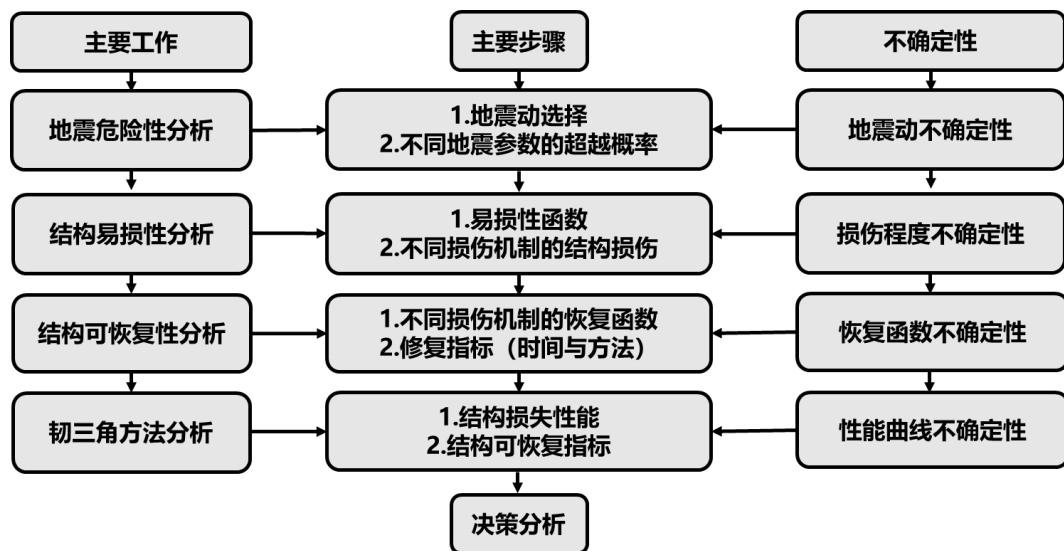
(1) 隧道的主要修复工作应包括结构部件修复、围护部件修复、隔断部件修复及附属部件修复、管线修复、通风照明（电力）、通信设备修复。

(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建筑修复时间的评价指标。

9 隧道抗震韧性等级

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。



分析流程

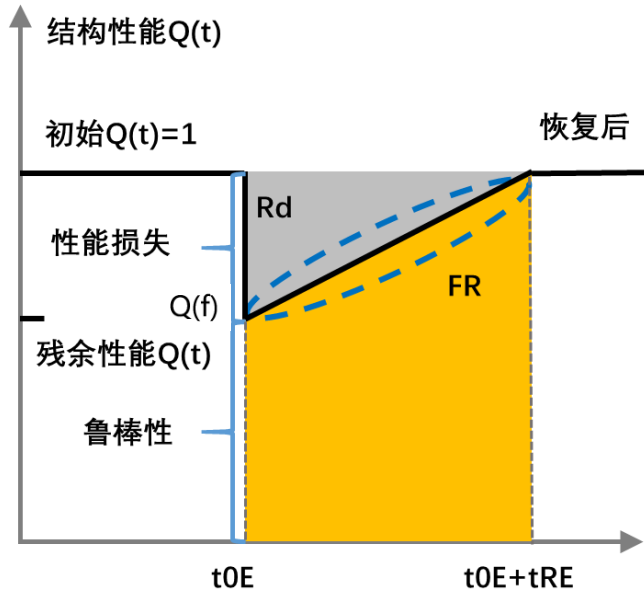
基于隧道结构易损性分析及不同状态修复函数，可推导出给定地震动强度指标下隧道结构功能函数 $Q(t)$ 计算公式：

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

$Q_a(ds_i|t)$: 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。



隧道结构韧性曲线示例

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）， Rf （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； R_d 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。

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	$0.585 < Re \leq 0.875$	c
IV	$0.500 < Re \leq 0.585$	d
V	$Re \leq 0.500$	e

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。

五、其他需要说明的问题

标准编制工作组

2024 年 4 月 25 日