



T/CECS G

---

中国工程建设标准化协会标准  
Standard of China Association for Engineering Construction  
Standardization

公路桥梁抗震韧性评价标准  
Evaluation Standard for Resilience Assessment of Highway Bridges  
(征求意见稿)

---

中国工程建设标准化协会标准

# 公路桥梁抗震韧性评价标准

Evaluation Standard for Resilience Assessment of Highway Bridges

(征求意见稿)

xxx 出版社有限公司

北 京

## 前 言

为贯彻落实国家防灾减灾救灾方针与韧性交通建设战略部署，提升公路桥梁抗震韧性水平，科学评价桥梁在地震作用下的性能表现，有效减轻地震灾害风险，保障人民生命财产安全和路网畅通，特制定本标准。

编写组通过文献查询、现场调研、专家咨询及问卷调查等方式，充分吸收近年来国内外桥梁抗震韧性研究的最新成果，经反复论证和修改，形成本标准征求意见稿。

本标准共 9 章，主要内容包括：1 总则；2 术语和符号；3 基本规定；4 公路桥梁结构损伤状态判定；5 公路桥梁功能损失评估；6 公路桥梁修复费用评估；7 公路桥梁修复时间计算；8 公路桥梁社会影响分析；9 公路桥梁韧性等级评价。

本标准基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会负责归管理，由哈尔滨工业大学负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：[shc@rioh.cn](mailto:shc@rioh.cn)）。

**主 编 单 位：** 哈尔滨工业大学

**参 编 单 位：**

**主 编：**

**主要参编人员：**

**主 审：**

**参与审查人员：**

**参 加 人 员：**

# 目次

前 言 .....	I
1 总则 .....	1
2 术语和符号 .....	3
2.1 术语.....	3
2.2 符号.....	3
3 基本规定 .....	5
3.1 一般规定.....	5
3.2 评价原则.....	6
3.3 评价内容.....	6
3.4 评价工作流程.....	6
4 公路桥梁损伤状态判定.....	8
4.1 一般规定.....	8
4.2 损伤状态分级与判定.....	9
5 公路桥梁功能损失评估.....	15
5.1 一般规定.....	15
5.2 桥梁功能损失评估计算.....	15
6 公路桥梁修复费用评估.....	17
6.1 一般规定.....	17
6.2 桥梁修复费用计算.....	17
6.3 桥梁修复费用评价指标.....	19
7 公路桥梁修复时间计算.....	20
7.1 一般规定.....	20
7.2 计算方法.....	21
8 公路桥梁社会影响评估.....	23
8.1 一般规定.....	23
8.2 社会影响评估方法.....	23
8.3 社会影响评估指标.....	24
9 公路桥梁韧性等级评价.....	26

9.1 一般规定.....	26
9.2 桥梁综合抗震韧性等级.....	26
<b>附录 A 常用桥型易损性数据库.....</b>	<b>28</b>
A.1 梁式桥易损性参数.....	28
A.2 拱桥易损性参数.....	28

# 1 总则

**1.0.1** 为贯彻落实国家防灾减灾救灾方针及韧性交通建设战略部署，提升公路桥梁抗震韧性水平，规范公路桥梁抗震韧性评价方法，科学评价桥梁在地震作用下的性能表现，制定本标准。

## 条文说明

我国位于环太平洋地震带和欧亚地震带交汇区域，是全球地震活动最频繁、灾害最严重的国家之一。公路桥梁作为交通运输生命线系统的关键节点，在地震灾害中往往成为制约应急救援和灾后恢复的瓶颈。根据汶川地震、玉树地震、芦山地震等重大地震灾害的震害调查，桥梁损毁导致的交通中断严重影响了救灾物资运输、伤员转移和灾后重建工作。本标准立足于我国地震灾害特点和公路桥梁工程实践，旨在通过量化评价桥梁在地震作用下的功能损失程度、经济恢复成本、时间恢复效率及社会影响范围，为桥梁抗震设计优化、既有桥梁加固改造及应急管理决策提供科学依据，确保在地震灾害下公路网络具备足够的连通性和快速恢复能力，最大限度保障人民生命财产安全和经济社会平稳运行。

**1.0.2** 本标准适用于单跨跨径不超过 150m 的圬工或混凝土拱桥、下部结构为混凝土结构的梁桥（新建桥梁、改扩建桥梁和既有桥梁）的抗震韧性评价。斜拉桥、悬索桥和单跨跨径超过 150m 的梁式桥和拱桥的抗震韧性评价可参照本标准执行。

## 条文说明

本标准的评价方法和参数取值主要基于国内大量常规桥梁的震害调查和研究成果，这些桥梁以跨径 150m 以下的梁桥和拱桥为主。现行《公路桥梁抗震设计规范》（JTGT 2231-01—2020）的适用范围为单跨跨径不超过 150m 的圬工或混凝土拱桥、下部结构为混凝土结构的梁桥，本标准与之保持协调。大跨径斜拉桥、悬索桥及特殊结构桥梁具有复杂动力特性，其震后性能评估和恢复策略需结合专业研究成果，故仅作为参照执行。

**1.0.3** 本标准基于地震后桥梁功能损失、修复费用、修复时间和社会影响四个维度构建抗震韧性评价体系，通过量化指标综合评价抗震韧性水平。

## 条文说明

四个评价维度的选择是参考美国 FEMA 开发的 HAZUS-MH 地震损失评估模型及中国《城市工程系统抗震韧性评价导则》（RISN-TG041-2022）的相关研究成果，同时结合公路

桥梁特点确定的。功能损失主要反映桥梁在震后通行能力的降低程度，是韧性评价的基础指标；修复费用指震后恢复至震前功能状态所需的经济投入；修复时间指从震后到完全恢复功能所需的时间，表征系统恢复速度；社会影响反映桥梁失效对区域交通网络、应急救援、经济活动等产生的连锁效应。

**1.0.4** 本标准与《公路桥梁抗震设计规范》（JTGT 2231-01—2020）、《公路桥梁技术状况评定标准》（JTG/TH21-2011）等相关标准配套使用。当本标准与国家现行强制性标准有冲突时，应以强制性标准为准。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 公路桥梁抗震韧性 seismic resilience of bridge

公路桥梁在地震作用后，维持或恢复原有功能的能力。

#### 2.1.2 损伤状态判定 damage state determination

表征构件在确定灾害强度下所处破坏水平。

#### 2.1.3 桥梁功能 function of bridge

桥梁为交通流提供通行空间，实现通行需求的基本属性。

#### 2.1.4 桥梁功能损失 function of bridge

桥梁为交通流提供通行空间，实现通行需求的基本属性。

#### 2.1.5 桥梁功能恢复 function recovery

地震造成桥梁交通流通行能力下降，主要表现为通行空间缩减与通行速度标准降低。

#### 2.1.6 桥梁修复费用 repair cost of bridge

桥梁恢复其功能所需要的直接费用。

#### 2.1.7 桥梁修复时间 repair time of bridge

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

#### 2.1.8 桥梁韧性等级 level of seismic resilience

综合考虑桥梁功能损失、修复费用和修复时间三项指标的等级，得到桥梁的抗震韧性等级。

### 2.2 符号

#### 2.2.1 损伤状态相关符号

$L_r$ ——主梁搭接长度损失比

$\mu_d$ ——位移延性比

$\gamma$ ——支座剪切变形

$\phi$ ——塑性铰

$\mu_d$ ——桥墩位移延性比

$d$ ——支座相对位移

$\Delta$ ——桥台位移量损伤指标

$v_z$ ——通行速度折减系数

$p_z$ ——第  $z$  联的残余承载力系数

### 2.2.2 修复相关符号

$R_k$ ——编号为  $k$  的桥梁的整体修复费用

$\eta_{i,j}$ ——第  $i$  类构件处于第  $j$  级损伤状态时的修复费用系数。

$L_{i,j,k}$ ——第  $k$  座桥梁的第  $i$  类构件处于第  $j$  级损伤状态的修复费用取值

$C_T$ ——桥梁按照现行定额计算得到的建造成本

$R_T$ ——桥梁修复费用。

### 2.2.3 韧性等级评价相关符号

$F$ ——功能损失指标

$K$ ——修复费用指标

$T$ ——修复时间指标。

## 3 基本规定

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 公路桥梁抗震韧性评价应根据桥梁所处工程阶段,分为设计阶段评价和运营期评价两种类型。两种评价类型均应遵循本标准规定的基本方法,但在评价目标、基础数据和实施流程上应有所区分。

#### 条文说明

设计阶段评价与运营期评价是桥梁全寿命周期韧性管理的两个关键环节。两种评价类型的核心区别在于:设计阶段评价基于理想化条件预测未来性能,运营期评价基于现状条件评估实际性能。两种评价类型共同构成“预防-评估-提升”的闭环管理机制,是落实韧性交通建设的重要技术手段。

**3.1.2** 设计阶段韧性评价应符合下列规定:

1 设计阶段韧性评价应预测拟建桥梁在设定地震水准下的韧性等级,为抗震设计方案优化、韧性措施比选和全寿命周期成本分析提供依据。

2 基础数据应以设计图纸、计算书和规范规定的标准材料参数为依据,不考虑材料老化、损伤累积等时变因素。

#### 条文说明

设计阶段韧性评价是桥梁全寿命周期韧性管理的源头环节,属于前瞻性、理论性评价,旨在通过设计阶段的韧性优化实现“预防优于修复”的建设理念。该评价宜与桥梁抗震设计同步开展,在方案设计、初步设计和施工图设计阶段进行多轮评价,重点考虑多遇地震、设防地震和罕遇地震三个水准下的韧性表现,尤其关注罕遇地震下桥梁功能保持能力。

**3.1.3** 运营期韧性评价应符合以下规定:

1 运营期韧性评价应评估既有桥梁在当前服役状态下的实际韧性等级,识别韧性薄弱环节,为震前预防性加固、震后应急响应及修复决策提供依据。

2 基础数据应优先依据桥梁最近一次技术状况评定结果、定期检测数据、特殊检测报告和健康监测数据,充分考虑材料劣化、已有损伤、地基变化等时变因素。

#### 条文说明

运营期韧性评价是桥梁全寿命周期韧性管理的关键环节,属于现状性、实证性评价,反

映桥梁在实际服役条件下的真实性能。评价数据应严格依据《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21-2011)和《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2011)等相关规定获取,充分纳入混凝土碳化、钢筋锈蚀、支座老化等时变因素的修正系数。

## 3.2 评价原则

### 3.2.1 公路桥梁抗震韧性评价应遵循以下基本原则:

- 1 应从桥梁结构系统角度进行评价,兼顾构件与整体、局部与全局的关系。
- 2 评价方法应简明实用,所需数据应易于获取,评价过程应可重复。
- 3 应根据桥梁重要性、功能需求和修复条件实行差异化评价,重要桥梁应采用更严格的评价标准。

#### 条文说明

桥梁是有机整体,单一构件的损伤可能引发连锁反应,应评价系统层面的性能。评价方法应具备可操作性,确保标准在工程实践中得以落实。参考《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)第3.1节关于抗震设防类别的规定,应对不同重要性的桥梁采用不同评价标准。

## 3.3 评价内容

3.3.1 公路桥梁韧性评价内容应包括损伤状态评估、功能损失评估、修复费用评估、修复时间评估、社会影响评估、韧性等级评价六项基本内容。

3.3.2 公路桥梁结构损伤状态评估、功能损失评估、修复费用评估、修复时间评估和社会影响评估应基于本标准规定的方法进行,其结果应综合用于韧性等级评价。

#### 条文说明

功能损失反映系统性能状态,修复费用体现经济代价,修复时间表征恢复速度,社会影响揭示系统重要性。其评价结果应通过第9章规定的综合方法形成量化韧性指标,避免单一维度评价的局限性,确保评价结论的科学性和工程适用性。

## 3.4 评价工作流程

3.4.1 公路桥梁抗震韧性评价工作流程应符合流程图3.4-1的规定。

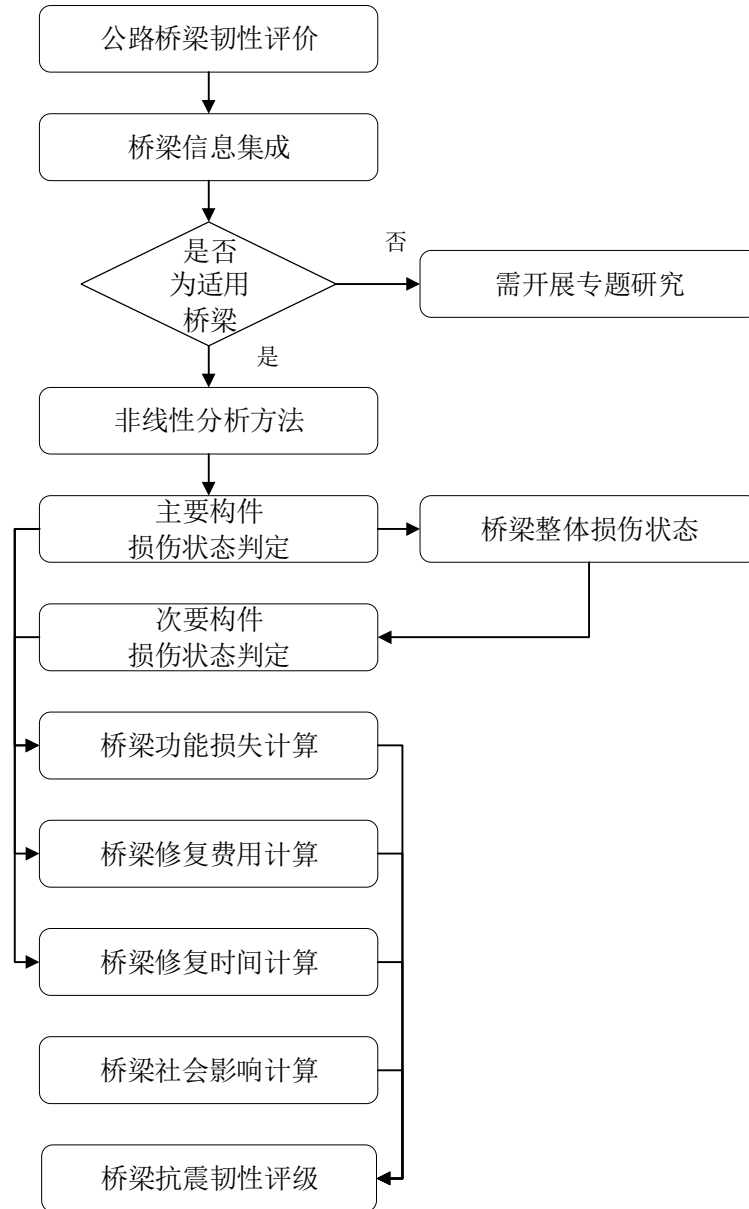


图 3.4-1 韧性评价流程

## 4 公路桥梁损伤状态判定

### 4.1 一般规定

4.1.1 公路桥梁结构损伤状态评估应包含主要构件、次要构件和桥梁整体损伤状态三个层级。

#### 条文说明

损伤状态评估采用三个层级体系，确保评价结果既反映局部损伤细节，又体现系统整体性能。该体系与《公路桥梁技术状况评定标准》（JTG/TH21-2011）中的构件评估层次相协调，符合结构系统设计理念。

4.1.2 公路桥梁需要判定损伤状态的主要构件分类应符合以下规定：

- 1 梁式桥主要构件包括主梁、桥墩、支座、桥台。
- 2 拱桥主要构件除梁式桥构件外，还应包括拱肋、立柱。

#### 条文说明

主要构件分类依据《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01—2020）确定，覆盖了桥梁在地震作用下的关键受力构件，是损伤评估的核心对象。

4.1.3 公路桥梁次要构件可规定为不直接影响桥梁结构安全的附属设施，按照其使用功能可划分为桥面铺装、排水防水系统、栏杆、伸缩缝等。

4.1.4 公路桥梁结构损伤状态评估应符合下列规定：

- 1 主要构件应根据损伤指标判定其损伤状态。
- 2 桥梁整体损伤状态应通过各主要构件损伤状态按最不利原则确定。
- 3 次要构件损伤状态宜与桥梁整体损伤状态协调一致。

#### 条文说明

次要构件与整体损伤状态的协调关系源于《公路桥梁抗震设计规范》（JTGT 2231-01—2020）中能力保护设计理念，在实际地震中，抗震设计确保主要构件先于次要构件失效，次要构件损伤往往由主体结构变形引起，因此两者损伤状态基本一致。

4.1.5 应根据桥梁类型和重要性选择适当的分析方法，对于常见桥梁和一般重要性桥梁，可直接使用附录 A 的易损性数据库。对于特殊结构桥梁或重要桥梁，应采用非线性时程分析方法。

## 条文说明

损伤状态评估是韧性评价的基础，其准确度直接影响后续评价结果的可靠性。分析方法的选择应遵循“简单适用、经济合理”原则，对大型、重要或复杂桥梁宜采用详细非线性分析。

**4.1.6** 采用非线性时程分析方法时，设计阶段评价应基于设计参数，运营期评价应基于实测数据的修正模型，宜结合健康监测数据验证。桥址区地质条件（如软土、断层影响）应纳入环境因素考量。

## 4.2 损伤状态分级与判定

**4.2.1** 公路桥梁结构整体损伤状态应分为 5 级，分级标准如下：

- 1 基本完好（1 级）：构件基本无损伤，功能正常。
- 2 轻微破坏（2 级）：桥台、墩柱、桥面出现轻微裂纹或剥落（损坏只需表面修补）。
- 3 中等破坏（3 级）：桥台、墩柱、桥面出现中度开裂（剪切裂缝）、剥落（梁柱结构基本完好）或中等程度的沉降。
- 4 严重破坏（4 级）：桥台、立柱、桥面出现严重开裂，偏移和沉降（梁柱结构不再安全）。
- 5 毁坏（5 级）：桥台、墩柱出现倾斜、倒塌，桥面出现大面积坍塌。

## 条文说明

损伤状态 5 级分级体系与国际通用标准接轨，同时结合中国汶川、芦山等地震震害调查数据校准，各级标准对应明确的修复策略和功能恢复条件，为后续韧性评价提供基础。

**4.2.2** 桥梁构件损伤状态宜分为 5 级，包括：

- 1 基本完好（1 级）：不发生任何损伤。
- 2 轻微破坏（2 级）：仅发生影响外观的轻微损伤。
- 3 中等破坏（3 级）：发生经简单修补后可恢复原有功能的一般损伤。
- 4 严重破坏（4 级）：发生经常规修复手段后可恢复至原有功能的较严重损伤。
- 5 毁坏（5 级）：发生影响构件承载能力、需要进行替换的严重损伤。

## 条文说明

构件损伤分级强调功能恢复特性，源于 ATC-40 性能评估方法，结合《公路桥梁技术状

况评定标准》(JTG/T H21-2011)的损伤描述方式。1-2级对应外观修复,3级对应局部加固,4级对应整体加固,5级对应构件更换,各级标准直接关联修复成本和时间,是量化韧性评价的基础。

#### 4.2.3 减隔震桥梁在建模时应考虑其设置的减隔震措施。

##### 条文说明

减隔震装置改变了结构动力特性和损伤模式,根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)第10章规定,建模时必须准确模拟其非线性特性,包括橡胶支座的剪切变形、摩擦摆的滑动特性、阻尼器的耗能特性等,否则将导致损伤评估结果严重失真。

4.2.4 对主梁损伤状态进行判定时,应采用纵向边跨主梁搭接长度损失比 $L_r$ 作为损伤状态指标, $L_r$ 应按式4.2.1计算。搭接长度损失比 $L_r$ 应从非线性时程分析结果中提取。

$$L_r = \frac{l}{l_0} \quad (4.2.1)$$

式中: $l$ ——搭接长度损失包络值;

$l_0$ ——设计原始搭接长度。

##### 条文说明

搭接长度损失比是防止落梁的关键指标,直接关系到桥梁功能的保持。该指标计算简单且物理意义明确,来源于《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)关于梁端最小搭接长度的规定,经汶川地震震害验证具有良好的工程适用性。

4.2.5 主梁落梁的损伤状态等级应根据损伤指标计算结果按表4.2-1确定。

表 4.2-1 基于搭接长度损失比的主梁落梁损伤状态标准

损伤状态等级	判别标准
1级	$L_r < 0.2$
2级	$0.2 \leq L_r < 0.35$
3级	$0.35 \leq L_r < 0.5$
4级	$0.5 \leq L_r < 0.65$
5级	$L_r \geq 0.65$

##### 条文说明

《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)规定上部结构梁端至墩、台帽或盖

梁边缘应有一定的距离，为防止主梁落梁，使用搭接长度损失比考虑纵向边跨主梁的落梁损伤。

**4.2.6** 对桥墩损伤状态进行判定时，应采用位移延性比  $\mu_d$  作为损伤状态指标。

桥墩位移延性比  $\mu_d$  可根据《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01-2020）计算。

**条文说明**

位移延性比是衡量墩柱塑性变形能力的核心指标，由极限位移与屈服位移之比确定。该指标源于结构抗震理论，被《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01—2020）采用，能够有效反映墩柱在地震作用下的损伤程度，与实际震害调查结果具有良好相关性。

**4.2.7** 桥墩的损伤状态等级应根据损伤指标计算结果按表 4.2-2 确定。

表 4.2-2 基于位移延性比的梁式桥墩柱损伤状态判别标准

损伤状态等级	判别标准
1 级	$\mu_d \leq \mu_{cy1}$
2 级	$\mu_{cy1} < \mu_d \leq \mu_{cy}$
3 级	$\mu_{cy} < \mu_d \leq \mu_{cy2}(\mu_{cy4})$
4 级	$\mu_{cy2}(\mu_{cy4}) < \mu_d \leq \mu_{max}$
5 级	$\mu_{max} \leq \mu_d$

**4.2.8** 对支座损伤状态进行判定时，应根据支座类型采用剪切应变  $\gamma$  或支座位移  $d$  作为损伤状态指标。剪切应变  $\gamma$  或支座位移  $d$  应从弹塑性时程分析结果中提取。

**条文说明**

支座是桥梁的薄弱环节，不同类型支座损伤机理不同。板式橡胶支座主要表现为剪切变形，球型滑动支座主要表现为相对位移，这些指标能直接反映支座性能退化程度。指标提取方法参考《公路桥梁抗震性能评价细则》（JTG/T 2231-02—2021），并结合实验室试验结果验证。

**4.2.9** 板式橡胶支座的损伤状态等级应根据损伤指标计算结果按表 4.2-3 确定。

表 4.2-3 基于剪切应变的板式橡胶支座损伤状态标准

损伤状态等级	判别标准
1 级	$\gamma \leq \gamma_{g1} = 100\%$
2 级	$\gamma_{g1} = 100\% < \gamma \leq \gamma_{g2} = 150\%$

3 级	$\gamma_{g3} = 150\% < \gamma \leq \gamma_{g4} = 200\%$
4 级	$\gamma_{g3} = 200\% < \gamma \leq \gamma_{g4} = 250\%$
5 级	$\gamma > \gamma_{g4} = 250\%$

### 条文说明

板式橡胶支座剪切应变分级标准基于 FEMA P-58 中支座性能评估方法和国内震害调查数据确定。1 级对应正常使用状态；2 级表明出现轻微老化；3 级已需考虑更换；4 级表明功能严重受损；5 级表示支座已失效，必须立即更换。标准值参考了《公路桥梁板式橡胶支座》（JT/T 4-2019）中关于支座最大剪切变形的规定。

**4.2.10** 球型滑动钢支座的损伤状态等级应根据损伤指标计算结果按表 4.2-4 确定。

表 4.2-4 基于相对位移的滑动支座损伤状态标准

损伤状态等级	判别标准
1 级	$d < d_{sli}$
2 级	$d_{sli} < d \leq d_{sec}$
3 级	$d_{sec} < d \leq d_{ser}$
4 级	$d_{ser} < d \leq d_{com}$
5 级	$d_{com} < d$

注：活动支座纵、横向损伤相对位移示意如图 4.2-1。

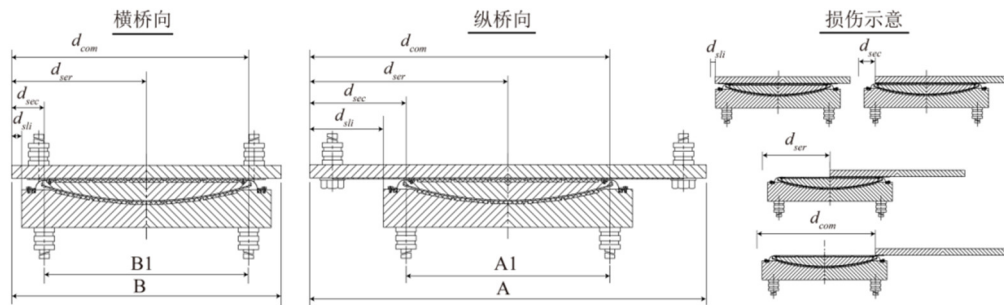


图 4.2-1 支座损伤时的相对位移示意

**4.2.11** 对拱桥拱肋损伤状态进行判定时，应采用塑性铰  $\phi$  作为损伤状态指标。

拱桥拱肋塑性铰应从非线性时程分析结果中提取。

### 条文说明

拱肋塑性铰是拱桥特有的损伤指标，源于拱结构的力学特性。拱桥在地震作用下，塑性铰通常从拱脚开始发展，向拱顶延伸。该指标能准确反映拱桥的损伤进程和剩余承载能力。

**4.2.12** 拱肋损伤状态等级应根据损伤指标计算结果按表 4.2-5 确定。

#### 4.2-5 基于塑性铰状态的拱肋损伤状态标准

损伤状态等级	判别标准
1 级	$\phi \leq NO$
2 级	$NO < \phi \leq IO$
3 级	$IO < \phi \leq LS$
4 级	$LS < \phi \leq CP$
5 级	$\mu_\phi > CP$

注：塑性铰力—位移关系见图 4.2.2，以曲线各性能点作为界限损伤指标，划分拱桥拱肋在地震下的不同破坏等级。

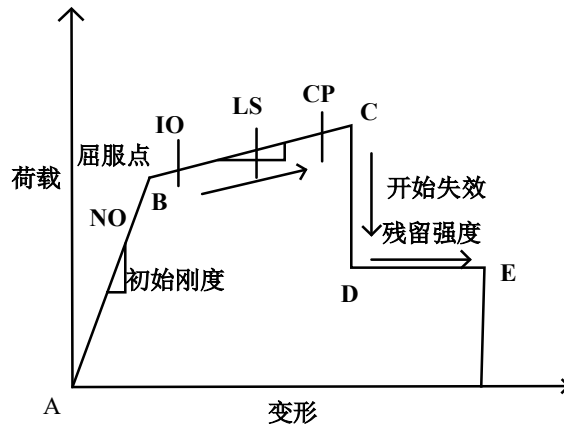


图 4.2.2 截面塑性铰力—位移曲线

#### 条文说明

拱肋塑性铰损伤分级标准基于拱结构受力特性和实际震害调查确定。该标准参考了拱桥破坏模式试验研究结果和《公路拱桥设计规范》(JTG D62-2004)中的相关要求。

**4.2.13** 对立柱损伤状态进行判定时，应采用位移延性比作为损伤状态指标。拱桥立柱位移延性比应从非线性时程分析结果中提取。

#### 条文说明

拱桥立柱位移延性比判定方法与梁式桥墩柱一致，源于结构抗震基本理论，但阈值参数根据拱桥立柱受力特点适当调整。由于立柱与拱肋、盖梁连接，其受力状态复杂，位移延性比计算应考虑轴向力影响。

**4.2.14** 拱桥立柱损伤状态等级应根据损伤指标计算结果按表 4.2-6 确定。

表 4.2-6 基于位移延性比的立柱损伤状态标准

损伤等级	判定标准
1 级	$\mu_d \leq \mu_{cy1}$
2 级	$\mu_{cy1} < \mu_d \leq \mu_{cy}$

3 级	$\mu_{cy} < \mu_d \leq \mu_{cy2}(\mu_{cy4})$
4 级	$\mu_{cy2}(\mu_{cy4}) < \mu_d \leq \mu_{max}$
5 级	$\mu_{max} \leq \mu_d$

**4.2.15** 桥台的损伤状态应根据位移量  $\Delta$  损伤指标计算结果按表 4.2-7 确定。

表 4.2-7 基于位移量的桥台损伤状态标准

损伤等级	判定标准
1 级	$\Delta < 25\text{mm}$
2 级	$25\text{mm} < \Delta < 50\text{mm}$
3 级	$50\text{mm} < \Delta < 100\text{mm}$
4 级	$100\text{mm} < \Delta < 150\text{mm}$
5 级	$150\text{mm} < \Delta$

**条文说明**

桥台位移量分级标准依据《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG D63-2007）关于基础位移控制要求和震害调查数据确定。位移限值考虑了桥台类型和地基条件的影响，对软土地基上的桥台应适当降低阈值。

## 5 公路桥梁功能损失评估

### 5.1 一般规定

5.1.1 桥梁震后功能损失应主要考虑承载力折减、通行速度折减两个因素。

5.1.2 承载力折减依据主要构件损伤判定。

5.1.3 通行速度折减应由桥梁整体损伤状态判定。

5.1.4 对于多联桥，应根据功能损失最大的一联进行评定。

### 5.2 桥梁功能损失评估计算

5.2.1 震后公路桥梁通行功能损失按式 5.2.1 计算：

$$F = 1 - v_z \times \min_{z=1:N} p_z \quad (5.2.1)$$

式中， $v_z$ ——通行速度折减系数，震后允许的最大通行速度，依据整体损伤等级确定；

$p_z$ ——第  $z$  联的震后残余承载力，根据构件损伤状态确定。

#### 条文说明

本条规定了通行功能损失的计算框架。震后桥梁功能损失量化需综合反映结构安全裕度（承载力）和运营效率（通行速度），通行功能损失应主要考虑承载能力折减和通行速度折减两个因素。考虑了速度折减影响和全桥最不利联的承载力折减。乘积形式体现承载力与速度的耦合关系（如承载力不足时需进一步降速）。承载力折减由构件损伤状态判定，通行速度折减由整体损伤等级确定。

5.2.2 震后公路桥梁残存通行能力据该通道相关的主要结构构件损伤状态进行判定，采用折减系数的方法进行计算。第  $z$  联的残余承载能力按式 5.2.2 计算：

$$p_z = \min_{i=1:m} (1 - r_{z,j}) \quad (5.2.2)$$

式中： $p_z$ ——第  $z$  联的残余承载力系数；

$m$ ——第  $z$  联的主要结构构件数量；

$r_{z,j}$ ——第  $z$  联中第  $i$  类构件承载力折减系数，同类构件按损伤状态最严重进行评估，承载力折减系数按表 5.2-1 取值。

表 5.2-1 桥梁震后残存承载能力折减系数

结构构件	损伤状态对应的承载力折减系数				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
桥墩	--	0.1	0.3	0.95	1
主梁	--	--	0.3	0.95	1
支座	--	--	0.2	0.95	1
立柱	--	--	0.2	0.95	1
主拱肋	--	--	0.3	0.8	1
基础	--	--	0.3	0.95	1
桥台	--	--	0.3	0.90	1

5.2.3 震后公路桥梁残存通行速度应该根据桥梁整体损伤状态进行评估， $v_z$  可由表 5.2-2 查。

表 5.2-2 桥梁震后残存通行速度折减系数

整体损伤等级	速度状态	折减系数
1 级	限速 120/h	1
2 级	限速 80/h	0.66
3 级	限速 60/h	0.5
4 级	限速 20/h	0.16
5 级	封闭交通	0

## 6 公路桥梁修复费用评估

### 6.1 一般规定

6.1.1 桥梁修复费用应按不同类型、不同损伤状态震损桥梁的综合性恢复进行评价，由对震损部位进行修复、拆除和置换所产生的各项直接费用组成，包含人工费、材料费、机械费等。

#### 条文说明

桥梁修复费用是以受损构件本身的维修、拆除和置换等直接工程费用为主，包括人工、材料、机械使用费以及与修复作业直接相关的其他支出。这样定义的目的是形成一个结构层面、可在不同桥梁间对比的费用指标，为韧性评价中的费用分项指标提供统一的计算基础，避免因纳入大量与构件修复无关的费用而干扰对结构震害程度的判断。

6.1.2 桥梁修复费用计算时不考虑桥梁抗震韧性能力提升所产生的额外费用。

#### 条文说明

桥梁修复费用只反映“恢复到震前正常使用水平”所需的基本投入，不包含震后为应急保通采取的临时加固、搭建便桥、交通组织优化等额外费用，也不包含在修复过程中顺带实施的加固、改造等投资。

6.1.3 桥梁结构构件的单价应采用现行定额。

#### 条文说明

单价采用现行定额旨在保证费用评估的时效性和公平性，可避免因价格波动或主观报价导致的偏差。

6.1.4 桥梁修复费用应为各个构件修复费用累加之和。

### 6.2 桥梁修复费用计算

6.2.1 评价对象中处于损伤状态  $j$  的第  $i$  类主要结构构件的经济损失应按式 6.2.1 计算

$$L_{i,j,k} = \eta_{(i,j)} \times C_{(i,j)} \quad (6.2.1)$$

式中： $L_{(i,j)}$ ——处于  $j$  类损失下的第  $i$  类构件对应的经济损失；

$i, j$ ——分别代表结构构件或附属设施的种类和损伤状态，损伤状态的判定标准见第 4 章；

$C_{(i,j)}$ ——处于损伤状态  $j$  的第  $i$  类构件的造价之和，采用现行定额计算；

$\eta_{(i,j)}$ ——第  $i$  类结构构件、附属设施处于损伤状态  $j$  时的损失系数，其取值见表。

表 6.2-1 不同损伤状态下结构构件的损失系数

结构构件	损伤状态等级对应的损失系数				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
桥墩	--	0.10	0.20	0.50	1
主梁	--	--	0.20	0.60	1
支座	--	--	--	0.60	1
立柱	--	--	0.20	0.60	1
主拱肋	--	--	0.25	0.75	1
基础	--	0.10	0.35	0.75	1
桥台	--	0.10	0.20	0.50	1

表 6.2-2 不同损伤状态下次要构件的损失系数

次要构件	损伤状态等级对应的损失系数				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
桥面铺装、排水防水系统、栏杆、伸缩缝和灯光照明装置	--	--	--	--	1

**6.2.3** 所有构件的修复费用总和应考虑同类构件的修复工程量对修复费用的影响进行折减，并按式 6.2.2 计算：

$$R_T = \sum_{i=1}^m \left[ \sum_{j=0}^n \eta_{i,j} \times L_{(i,j)} \right] \quad (6.2.2)$$

式中： $R_T$ ——所有构件的修复费用总和；

$m$ ——结构构件和附属设施的类别数量；

$\eta_{2(i,j)}$ ——第  $i$  类结构构件、附属设施处于损伤状态  $j$  时的折减系数，其取值见表。

表 6.2-3 结构构件修复费用的工程量折减系数

结构构件类别	计算单位	损伤构件数量		
		≤3	4-9	>10
桥墩/桩基/立柱	米	1.0	插值	0.85
		<100	101-500	>500
主梁	个	1.00	插值	0.90
		<20	20-400	>400
拱肋	米	1.00	插值	0.80
		<6	7-19	>20
排水防水系统/栏杆/灯光照明装置/支座/伸缩缝	个	1.00	插值	0.60

### 6.3 桥梁修复费用评价指标

6.3.1 应采用桥梁修复费用与建造成本比值  $K$  作桥梁修复费用评价指标，按式 6.3.1 计算：

$$K = \frac{R_T}{C_T} \quad (6.3.1)$$

式中： $K$ ——桥修复费用评价指标；

$C_T$ ——桥梁按照现行定额计算得到的建造成本。

6.3.2 桥梁的建造成本应为建造目标桥梁所需的总费用，并应根据现行定额，按式计算：

$$C_T = \sum_{i=1}^m C_i \quad (6.3.2)$$

式中： $C_i$ ——按桥址地区现行定额计算的第  $i$  类构件的建造成本。

## 7 公路桥梁修复时间计算

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 公路桥梁修复时间评估不区分桥梁类型,仅给出不同损伤状态下的修复时间。

#### 条文说明

本条规定修复时间的评估不区分桥梁具体类型,避免因桥型复杂多样导致评估体系过于庞杂和难以应用。

**7.1.2** 桥梁修复时间不宜计入桥梁震损评估、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。

#### 条文说明

震损评估、方案设计与审批、资金筹措、材料设备采购运输、施工队伍组织等前期工作,其持续时间受管理效率、市场条件、地理距离、行政程序等外部因素影响巨大,不确定性强,难以标准化。为聚焦于桥梁结构自身恢复的“工程韧性”并保证评估结果的可比性,本标准的修复时间计算不包含上述内容。

**7.1.3** 计算公路桥梁修复时间时应考虑公路桥梁及其附属设施的主要修复工作的先后次序,并应符合下列要求:

- 1 桥梁的主要修复工作应包括主要构件和次要构件修复;
- 2 不同的修复工作可同时展开;

3 桥梁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桥梁修复时间的评价指标。

#### 条文说明

本条确立了修复时间计算应基于施工逻辑和关键路径的基本原则。主要构件(如墩柱、主梁、基础)的修复通常决定结构的稳定与安全,是修复工作的核心与前提;次要构件(如支座、伸缩缝)的修复保障桥梁正常使用功能。评估需涵盖所有必要工作。在符合施工安全和工艺逻辑的前提下,允许不同部位、不同性质的作业并行施工,以缩短总工期。例如,在修复上部结构的同时,可对未受损的桥面系进行清理准备。

## 7.2 计算方法

7.2.1 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。

7.2.2 桥梁内不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。

7.2.3 桥梁所需的修复时间应按如下方法进行计算:

$$T = \sum_{j=1}^n (T(i) * T(i, j)) * N(i, j) * \xi T(i) \quad (7.3.1-1)$$

式中:  $T$ ——桥梁修复工时总和,单位为人·天(人·d);

$T(i, j)$ ——桥梁处于损伤状态  $j$  的第  $i$  类部件的修复工时,单位为人×天,

按表 7.2-1 确定桥梁不同构件不同损伤状态下的修复工时;

$N(i, j)$ ——桥梁处于损伤状态  $j$  的第  $i$  类部件数量;

$\xi T(i)$ ——考虑第  $i$  类震损部件修复工程量的修复工时折减系数,按表 7.2-

2 确定结构构件修复费用的工程量折减系数。

表 7.2-1 桥梁不同构件不同损伤状态下的修复工时

修复工时 (人*天)	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
主梁	--	3.8	5.6	10.3	21.5
桥墩	--	2.6	6.2	9.4	27.8
支座	--	--	--	1.2	1.2
拱肋	--	0	6	3.3	5.7
立柱	--	2.5	4.6	5.8	7.6
基础	--	2.6	6.2	9.4	27.8
桥台	--	3.0	7.2	10.8	30.2
桥面铺装、排水防水系统、栏杆、伸缩缝和灯光照明装置	--	--	--	--	15

表 7.2-2 结构构件修复费用的工程量折减系数

结构构件类别	计算单位	损伤构件数量		
		≤3	4-9	>10
桥墩/桩基/立柱	米	1.0	插值	0.8
		<100	101-500	>500
主梁	个	1.00	插值	0.8
		<20	20-400	>400
拱肋	米	1.00	插值	0.8
		<6	7-19	>20
排水防水系统/栏杆/灯光照明装置/支	个	<6	7-19	>20

座/伸缩缝		1.00	插值	0.6
-------	--	------	----	-----

## 8 公路桥梁社会影响评估

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 公路桥梁社会影响评估应作为抗震韧性评价的重要组成部分，用于量化桥梁震损对区域交通网络、应急救援、社会经济活动等产生的连锁影响，为桥梁韧性等级评价提供依据。

**8.1.2** 社会影响评估应基于桥梁在路网中的位置、交通功能和区域重要性，结合震后交通流变化、应急救援需求和经济活动影响等因素进行综合分析。

**8.1.3** 社会影响评估应与功能损失评估、修复费用评估和修复时间评估结果协同分析，避免单一维度评价的局限性。

#### 条文说明：

社会影响是桥梁抗震韧性评价的关键维度，反映了桥梁在区域交通系统中的战略地位。与传统抗震设计仅关注结构安全不同，社会影响评估关注桥梁震损对区域经济社会运行的连锁影响，是实现“韧性交通”理念的核心内容。评估应基于实际震害数据和交通网络模型，避免主观臆断。社会影响评估结果应与功能损失、修复费用、修复时间等指标共同构成韧性等级评价的基础，为桥梁抗震设计优化、震前预防性加固和震后应急响应提供决策支持。

### 8.2 社会影响评估方法

**8.2.1** 社会影响评估应基于以下步骤进行：

- 1 确定评估区域和关键设施范围。
- 2 收集震前交通流数据、路网结构数据和关键设施分布数据。
- 3 基于震后桥梁功能状态，建立交通网络模型。
- 4 模拟震后交通流变化，计算社会影响指标。

#### 条文说明：

社会影响评估应采用定量分析方法，避免主观判断。评估区域的确定应基于桥梁在路网中的重要性，重要桥梁应扩大评估范围。关键设施的选取应结合区域功能和应急需求，重点考虑对生命安全和基本生活保障有重大影响的设施。交通网络模型应基于实际交通数据建立，确保模拟结果的可靠性。交通流模拟应考虑震后实际情况，如应急疏散需求增加、交通管制等因素，使评估结果更加贴近实际。

**8.2.2** 评估区域应包括桥梁震损影响的直接区域（半径 10km）和间接区域（半径 20km），关键设施应包括：

- 1 医疗机构（医院、急救中心）。
- 2 消防设施（消防站、消防指挥中心）。
- 3 应急物资储备点。
- 4 交通枢纽（火车站、机场、客运站）。
- 5 重要产业园区和商业中心。

**8.2.3** 交通网络模型应基于 GIS 技术建立，包含：

- 1 路网拓扑结构。
- 2 交通流分配模型。
- 3 交通流速度-密度关系。
- 4 关键设施可达性计算模型。

### **8.3 社会影响评估指标**

**8.3.1** 公路桥梁社会影响评估应包括以下指标：

- 1 交通量转移比例：桥梁震损后，交通量向替代路线转移的比例。
- 2 绕行距离增加率：震后交通绕行距离与震前正常距离的比值。
- 3 关键设施可达性降低率：震后关键设施（如医院、消防站、应急物资储备点）的可达性降低比例。
- 4 应急救援时效影响：震后应急救援到达时间延长的比例。

**条文说明：**

社会影响评估指标应基于客观数据，避免主观判断。交通量转移比例反映桥梁震损对路网交通流的扰动程度；绕行距离增加率体现震后交通效率的下降；关键设施可达性降低率衡量桥梁震损对应急服务的冲击；应急救援时效影响直接反映桥梁震损对生命救援的制约。指标计算应基于实际交通数据和震后评估，确保评估结果的客观性和可靠性。

**8.3.2** 交通量转移比例计算公式如下：

$$TTR = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{Q_{\text{total}}} \times 100\% \quad (8.3.2-1)$$

式中： $Q_i$ ——第  $i$  条替代路线上的交通量（量/日）；

$Q_{\text{total}}$ ——震后总交通量。

**条文说明：**

交通量转移比例反映桥梁震损后路网交通流的重新分布程度,是衡量区域交通系统适应能力的指标。数据应基于《公路工程技术标准》(JTGB01-2014)规定的交通量调查方法获取,设计阶段可采用交通规划模型预测,运营期评价宜结合收费站数据、浮动车数据或视频监控数据。

**8.3.3 绕行距离增加率计算公式如下：**

$$ADR = \frac{D_a - D_b}{D_b} \times 100\% \quad (8.3.3-1)$$

式中： $D_a$ ——震后绕行举例（千米）；

$D_b$ ——震前正常举例（千米）。

**条文说明：**

绕行距离增加率量化了桥梁震损导致的交通效率下降程度,直接影响出行时间和运输成本。距离数据应通过GIS路网分析获取,考虑实际可行的替代路线。该指标源于《公路路线设计规范》(JTGD20-2017)中关于路线效率评价方法,结合震后交通调查经验确定阈值。对于货运车辆,应单独计算重型车辆绕行距离增加率,因其对经济影响更为敏感。

**8.3.4 关键设施可达性降低率计算公式如下：**

$$DAR = \frac{A_b - A_a}{A_b} \times 100\% \quad (8.3.4-1)$$

式中： $A_a$ ——震后关键设施可达性（分钟）；

$A_b$ ——震前关键设施可达性（分钟）。

**条文说明：**

关键设施可达性降低率评估桥梁震损对基本公共服务的影响程度,是社会影响评估的核心指标。关键设施应包括的医院、消防站、应急指挥中心等,可达性计算应采用最短时间路径算法。数据来源包括导航软件实时数据、交通管理部门历史数据或专业交通模型。

**8.3.5 应急救援时效影响计算公式如下：**

$$ERT = \frac{T_a - T_b}{T_b} \times 100\% \quad (8.3.5-1)$$

式中： $T_a$ ——震后应急救援到达时间（分钟）；

$T_b$ ——震前应急救援到达时间（分钟）。

**条文说明：**

应急救援时效影响直接反映桥梁震损对生命救援的关键制约，是社会影响评估中优先级最高的指标。到达时间应基于实际救援响应要求确定，通过交通仿真软件结合实际路网和交通流数据计算。该指标源于“黄金 72 小时”救援理念，结合汶川地震救援经验校准。

**8.3.6 社会影响综合指数计算公式如下：**

$$S = 0.15 \times TTR + 0.15 \times ADR + 0.30 \times DAR + 0.40 \times ERT \quad (8.3.6-1)$$

**条文说明：**

社会影响综合指数 S 采用加权平均法确定。应急救援时效影响(ERT)权重最高(40%)，体现生命救援的优先性；关键设施可达性降低率 (DAR) 权重次之 (30%)，反映基本公共服务的重要性；交通量转移比例 (TTR) 和绕行距离增加率 (ADR) 各占 15%，表征一般交通影响。设计阶段评价可直接采用本公式，运营期评价宜结合历史交通数据修正权重系数，山区或特殊区域桥梁应适当提高 ERT 权重至 0.45-0.50。

## 9 公路桥梁韧性等级评价

### 9.1 一般规定

**9.1.1** 桥梁抗震韧性评价的结论为桥梁抗震韧性等级，抗震韧性等级分为一到三级，抗震韧性水平随等级逐级提高。

**9.1.2** 桥梁抗震韧性评价应根据桥梁在设定水准地震作用下的功能损失、修复费用、修复时间和社会影响四个指标，评价其抗震韧性等级。

### 9.2 桥梁综合抗震韧性等级

**9.2.1** 每个指标依次按照表 9.2-1~9.2-4 表进行等级评定。

表 9.2-1 功能损失指标的等级

等级	地震水准	功能损失指标 $F$
三级	罕遇地震	$F \leq 10\%$
二级	罕遇地震	$10\% < F \leq 50\%$
一级	设防地震	$F > 50\%$

表 9.2-2 修复费用指标的等级

等级	地震水准	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	$K > 10\%$

表 9.2-2 修复时间指标的等级

等级	地震水准	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	$T > 30d$

表 9.2-4 社会影响指标的等级

等级	地震水准	社会影响指标 $S$
三级	罕遇地震	$S \leq 15\%$
二级	罕遇地震	$15\% < S \leq 25\%$
一级	设防地震	$S > 25\%$

**9.2.2** 桥梁的综合抗震韧性等级应综合考虑桥梁功能损失、修复费用、修复时间和社会影响四项指标的等级进行评价，取四项评价指标的最低等级作为该桥梁的抗震韧性等级。

**条文说明**

桥梁抗震韧性等级采用等级制，基于修复费用、修复时间、通行功能损失三个指标综合评价，并以三项指标中的最低等级确定最终韧性等级。等级划分旨在引导设计、管养单位优先提升桥梁的快速恢复能力，要求桥梁在地震下能快速恢复功能。

## 附录 A 常用桥型易损性数据库

### A.1 梁式桥易损性参数

A.1.1 连续梁桥易损性参数见表 A.1.1。

表 A.1.1 连续梁桥易损性参数

损伤状态	中位值	对数标准差
轻微破坏	0.31	0.53
中等破坏	0.48	0.50
严重破坏	0.65	0.56
完全损毁	0.75	0.53

A.1.2 简支梁桥易损性参数见表 A.1.2。

表 A.1.2 简支梁桥易损性参数

损伤状态	中位值	对数标准差
轻微破坏	0.4155	0.493
中等破坏	0.4973	0.91
严重破坏	0.9025	0.4006
完全损毁	1.176	0.3517

### A.2 拱桥易损性参数

A.2.1 钢筋混凝土拱桥易损性参数见表 A.2.1。

表 A.2.1 钢筋混凝土拱桥易损性参数

损伤状态	中位值	对数标准差
轻微破坏	0.2088	0.4842
中等破坏	0.3709	0.4842
严重破坏	0.8909	0.4842
完全损毁	3.1654	0.4842

A.2.2 圯工拱桥易损性参数见表 A.2.2。

表 A.2.2 圯工拱桥易损性参数

损伤状态	中位值	对数标准差
轻微破坏	0.4068	1
中等破坏	0.6086	1
严重破坏	0.8986	1
完全损毁	2.1066	1