

中国工程建设标准化协会标准

桥梁抗震韧性评价标准

Seismic resilience assessment standard for bridges

T/CECS XXXX-202X

主编单位：同济大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：

前　　言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2022 年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》(建标协字〔2022〕40 号)的要求, 编制组经过深入调查研究, 认真总结国内外科研成果和工程实践经验, 并在广泛征求意见的基础上, 编制了本标准。

本标准共分为 8 章, 主要技术内容包括: 1. 总则; 2. 术语和符号; 3. 基本规定; 4. 桥梁地震损伤状态; 5. 桥梁功能恢复模型; 6. 桥梁震后即时功能与等效关闭时间; 7. 桥梁震后名义修复费用; 8. 桥梁抗震韧性等级评价。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利或软件著作权。本标准的发布机构不承担识别这些专利或软件著作权的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会抗震专业委员会归口管理, 由同济大学负责具体技术内容的解释。本标准在使用过程中如有需要修改或补充之处, 请将有关资料和建议寄送解释单位(地址: 上海市四平路 1239 号同济大学桥梁馆 409 室, 邮政编码: 200092), 以供修订时参考。

主编单位: 暂略

参编单位: 暂略

主要起草人: 暂略

主要审查人: 暂略

目 次

1	总 则	1
2	术语和符号	2
2.1	术 语	2
2.2	符 号	4
3	基本规定	6
3.1	韧性评价指标	6
3.2	评价的方法和流程	7
3.3	韧性评价应用	9
4	桥梁地震损伤状态	11
4.1	一般要求	11
4.2	地震反应分析	11
4.3	地震损伤状态判定	13
5	桥梁功能恢复模型	18
5.1	一般要求	18
5.2	构件功能恢复模型	18
5.3	桥梁功能恢复模型	23
6	桥梁震后即时功能与等效关闭时间	24
6.1	一般要求	24
6.2	桥梁功能恢复曲线的计算	24
6.3	桥梁震后即时功能与等效关闭时间的计算	26
7	桥梁震后名义修复费用	28
7.1	一般要求	28
7.2	桥梁震后名义修复费用的计算	28
8	桥梁抗震韧性等级评价	33
	本标准用词说明	37
	引用标准名录	38
	附：条文说明	39

Contents

1	General provisions.....	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	4
3	Basic requirements	6
3.1	Resilience assessment indicators.....	6
3.2	Resilience assessment methods and process	7
3.3	Applicability of resilience assessment.....	9
4	Bridge seismic damage state.....	11
4.1	Basic requirements.....	11
4.2	Seismic response analysis	11
4.3	Seismic damage state determination	13
5	Bridge restoration models.....	18
5.1	Basic requirements.....	18
5.2	Component restoration models	18
5.3	Bridge restoration models	23
6	Bridge post-earthquake instant functionality and equivalent downtime	24
6.1	Basic requirements.....	24
6.2	Calculation of bridge functionality recovery curve	24
6.3	Calculation of bridge post-earthquake instant functionality and equivalent downtime.....	26
7	Bridge post-earthquake nominal repair cost	28
7.1	Basic requirements.....	28
7.2	Calculation of bridge post-earthquake nominal repair cost ..	28
8	Grading of bridge seismic resilience	33
	Explanation of wording in this standard	37
	List of quoted standards.....	38
	Addition: Explanation of provisions	39

1 总 则

1.0.1 为贯彻落实国家防灾减灾救灾与韧性城市建设战略，规范和指导桥梁抗震韧性评价工作，提升桥梁的地震安全性和震后功能快速恢复能力，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于跨径不超过 150m 的新建或既有公路和城市梁式桥的抗震韧性评价。拱桥、斜拉桥、悬索桥和跨径超过 150m 的梁式桥，可参照本标准的评价流程进行专门研究。

1.0.3 桥梁抗震韧性应从震后功能损失、震后恢复时间和震后修复费用三个方面进行综合评价。

1.0.4 桥梁抗震韧性评价，除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 E1 地震水平 earthquake level E1

工程场地重现期较短的地震水平，重现期取值与桥梁设防类别有关。

2.1.2 E2 地震水平 earthquake level E2

工程场地重现期较长的地震水平，重现期取值与桥梁设防类别有关。

2.1.3 构件功能恢复模型 component restoration model

表征某一类构件在给定损伤状态下桥梁震后功能损失与恢复过程的模型，与地震水平无关。

2.1.4 桥梁功能恢复模型 bridge restoration model

表征多类构件在给定联合损伤状态下桥梁震后功能损失与恢复过程的模型，与地震水平无关。

2.1.5 桥梁功能恢复曲线 bridge functionality recovery curve

表征给定地震水平下桥梁震后功能损失与恢复过程的曲线。

2.1.6 桥梁震后即时功能 bridge post-earthquake instant functionality

地震结束后桥梁的剩余通行功能。

2.1.7 桥梁等效关闭时间 bridge equivalent downtime

以震前正常状态下桥梁单日通行功能为基准，地震结束至桥梁修复完成期间，桥梁通行功能总损失所折算的桥梁完全关闭的天数。

2.1.8 桥梁震后名义修复费用 bridge post-earthquake nominal repair cost

桥梁抗震韧性评价中，表征震后全桥修复费用与同期全桥新建费用的比值。

2.1.9 主梁名义修复费率 girder nominal repair cost ratio

桥梁抗震韧性评价中，表征所有主梁在给定损伤状态下复位费用与同期全桥新建费用的比值。

2.1.10 除主梁外构件名义修复费率 component nominal repair cost ratio

桥梁抗震韧性评价中，表征除主梁外构件在给定损伤状态下修复费用与同期该构件的新建费用的比值。

2.1.11 构件修复措施影响系数 influence coefficient of component repair measure

桥梁抗震韧性评价中，表征不同修复措施对构件修复费用的定量影响。

2.1.12 桥梁抗震韧性概率性评价方法 probabilistic bridge seismic resilience assessment method

构件损伤状态基于足够数量地震动的时程反应结果，获得概率性的判定结果，并据此计算桥梁功能恢复曲线和抗震韧性评价指标的方法。

2.1.13 桥梁抗震韧性确定性评价方法 deterministic bridge seismic resilience assessment method

构件损伤状态基于 7 条地震动的时程反应均值判定，并据此计算桥梁功能恢复曲线和抗震韧性评价指标的方法。

2.1.14 桥梁抗震韧性分项指标 bridge seismic resilience sub-indicator

桥梁抗震韧性评价中，表征桥梁震后通行功能、恢复时间、修复费用的标准化指标。

2.1.15 桥梁抗震韧性综合指标 bridge seismic resilience comprehensive indicator

综合考虑桥梁震后通行功能、恢复时间、修复费用贡献的抗震韧性评价指标。

2.2 符 号

- \hat{Q}_1 —— 桥梁震后即时功能，即地震结束瞬时的桥梁通行功能；
- $Q(t_0|IM)$ —— 给定地震水平 IM 下桥梁抗震韧性曲线在地震结束时刻 t_0 的功能
- T_d —— 桥梁等效关闭时间；
- $Q(t|IM)$ —— 给定地震水平 IM 下的桥梁抗震韧性曲线；
- t_0 —— 地震结束时刻；
- t_h —— 所有构件修复完成使桥梁功能恢复到震前水平的时刻，根据桥梁抗震恢复曲线确定；
- C_R —— 桥梁震后名义修复费用；
- $C_{RG,DSi}$ —— 主梁名义修复费率；
- λ_{DSi} —— 主梁损伤占比；
- η_{DSi} —— 主梁修复措施影响系数；
- $C_{RN,k}$ —— 除主梁外构件建造成本占比；
- $\alpha_{k,DSi}$ —— 除主梁外构件名义修复费率；
- $\eta_{k,DSi}$ —— 除主梁外构件修复措施影响系数；
- $\lambda_{k,DSi}$ —— 除主梁外构件损伤占比；
- R_Q —— 桥梁功能韧性分项指标；
- R_T —— 时间韧性分项指标；
- R_C —— 费用韧性分项指标；
- R_w —— 桥梁加权综合韧性评价指标；
- λ_Q —— 功能韧性分项指标贡献系数；

- λ_T —— 时间韧性分项指标贡献系数;
 λ_C —— 费用韧性分项指标贡献系数;
 s —— 调平钢板与支座边缘的震前间距;
 D —— 支座宽度;
 Σt —— 为橡胶层总厚度;
 $P_{f,DS_i}(IM)$ —— 单类构件地震损伤概率;
 IM —— 地震动强度指标;
 PGA —— 地震动峰值加速度;
 DS_i —— 单类构件处于第 i 个损伤状态 ($i=1, 2, \dots, 5$);
 $n(IM)$ —— 地震水平 IM 下处于损伤状态 DS_i 的工况数;
 N —— 总计算工况数;
 $P_{f,DS_{ij\dots k}}(IM)$ —— 多类构件联合损伤状态概率;
 $DS_{ij\dots k}$ —— 多类构件分别处于第 i, j, \dots, k 个损伤状态的联合地震损伤状态 ($i, j, \dots, k = 1, 2, \dots, 5$);
 $n_{ij\dots k}(IM)$ —— 地震水平 IM 下处于 $DS_{ij\dots k}$ 联合损伤状态的工况数;
 Q_1 —— 震后通行功能;
 Δt_0 —— 震后决策时间;
 Δt_r —— 构件修复时间;
 Q_2 —— 构件修复期间通行功能;
 $Q_{DS_i}(t)$ —— 仅有单类构件损伤的桥梁功能恢复模型;
 $Q_{DS_{ij\dots k}}(t)$ —— 多类构件分别处于不同损伤状态时的桥梁功能恢复模型。

3 基本规定

3.1 韧性评价指标

3.1.1 桥梁抗震韧性评价应先确定 3 个基本指标:

1 桥梁震后即时功能 \hat{Q}_1 , 见图 3.1.1, 按式 (6.3.1) 计算。

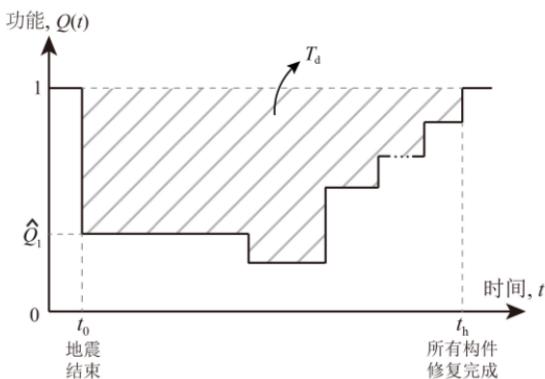


图 3.1.1 给定地震水平下的桥梁功能恢复曲线图示

2 桥梁等效关闭时间 T_d , 应根据桥梁功能恢复曲线 (图 3.1.1 阴影部分), 按式 (6.3.2) 计算。

3 桥梁震后名义修复费用 C_R , 应按式 (7.2.1) 计算。

3.1.2 应根据 \hat{Q}_1 、 T_d 和 C_R , 分别按式 (8.0.1)、式 (8.0.2) 和式 (8.0.3), 计算桥梁功能韧性分项指标 R_Q 、时间韧性分项指标 R_T 和费用韧性分项指标 R_C , 并按 8.0.1、8.0.2 和 8.0.3 条进行功能、时间

和费用分项韧性评级。

3.1.3 应根据 R_Q 、 R_T 和 R_C ，按式（8.0.4）计算加权综合韧性指标 R_w ，并按 8.0.4 条进行桥梁抗震韧性评级。

3.2 评价的方法和流程

3.2.1 桥梁抗震韧性应针对现行桥梁抗震设计规范规定的 E1、E2 两个设防地震水准，采用相应的地震动参数进行评价。

3.2.2 桥梁抗震韧性评价流程见图 3.2.2，对于未发生实际地震的桥梁，应按以下步骤进行；实际地震后，可根据桥梁现场勘察结果，从地震损伤状态判定模块开始执行。

1 结构参数及地震动时程确定：确定有限元模型所需的桥梁各构件设计参数，包括但不限于结构尺寸、截面配筋和材料特性；确定符合工程场地特性的地震动时程，作为地震输入。

2 地震损伤状态判定：对于未发生实际地震的桥梁，基于有限元模型，采用非线性时程分析方法计算桥梁易损构件的地震反应；根据易损构件的多级损伤状态定义，采用确定性或概率性方法判定构件损伤状态；实际地震后，可根据桥梁现场勘察结果，按确定性方法判定各构件损伤状态。

3 桥梁功能恢复模型构建：根据易损构件损伤状态，确定构件修复方案（表 5.2.1），进而确定构件震后功能恢复模型（表 5.3.1），并考虑多类构件修复次序，建立桥梁功能恢复模型。

4 桥梁震后即时功能和等效关闭时间计算：基于桥梁功能恢复模型，按桥梁地震损伤状态判断的确定性或概率性方法，计算桥梁震后即时功能和等效关闭时间。

5 桥梁震后名义修复费用计算：确定各类易损构件在不同损伤状态下的名义修复费率（表 7.2.2）和修复措施影响系数（表 7.2.3），并按第 7 章的规定计算桥梁震后名义修复费用。

6 桥梁抗震韧性等级评价：根据震后即时功能、等效关闭时间和名义修复费用的计算结果，确定功能、时间、费用韧性分项指标及加权综合韧性指标，评定桥梁抗震韧性等级。

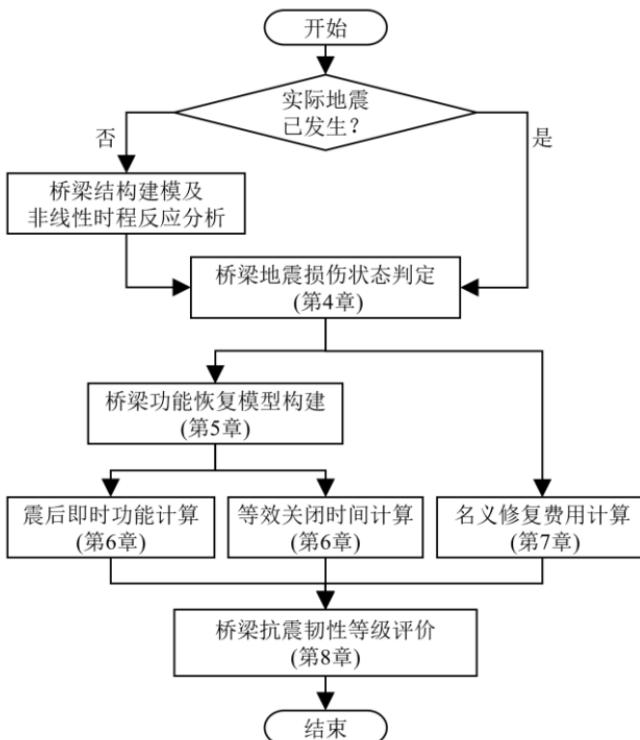


图 3.2.2 桥梁抗震韧性评价流程

3.3 韧性评价应用

3.3.1 根据桥梁加权综合韧性评价指标 R_w ，将桥梁抗震韧性分为四个等级，从高到低分别为一级（高韧性）、二级（韧性）、三

级（低韧性）、四级（无韧性）， R_w 值越小，代表韧性越高。

3.3.2 桥梁抗震韧性等级要求，应根据桥梁在交通网络中的重要性、可替代性及相关规划目标综合确定。

3.3.3 对于拟建桥梁，其抗震韧性等级不应低于规定的韧性等级要求。

3.3.4 对于既有桥梁，当其抗震韧性等级低于规定的韧性等级要求时，应进行抗震韧性提升改造。

3.3.5 实际地震后，可根据桥梁现场勘察结果判定各构件损伤状态，确定震后即时功能，支撑桥梁震后通行和修复决策。

4 桥梁地震损伤状态

4.1 一般要求

4.1.1 震前，应针对现行桥梁抗震设计规范规定的 E1、E2 地震水平，分别进行桥梁非线性地震反应分析，并判定易损构件损伤状态；实际震后，可根据桥梁现场勘察结果判定各构件损伤状态。

4.1.2 梁式桥的主要地震易损构件包括支座、墩柱、桥台、桩基础、伸缩缝和挡块。

4.1.3 支座、墩柱、桥台、桩基础和挡块的损伤状态分为五级：无明显损伤（DS₁）、轻微损伤（DS₂）、中等损伤（DS₃）、严重损伤（DS₄）和完全损伤（DS₅）；伸缩缝的损伤状态分为两级：无明显损伤和损坏需更换。

4.1.4 桥梁的地震损伤状态判定宜采用概率性方法，也可采用确定性方法。

4.1.5 采用概率性方法时，当设防地震下有两类及以上构件损伤时，应进行多类构件联合地震损伤状态的判定。

4.1.6 既有桥梁的地震损伤状态判定，应考虑桥梁性能劣化的影响。

4.2 地震反应分析

4.2.1 应建立非线性有限元模型，采用非线性时程分析方法，

计算桥梁各类易损构件的地震反应。

4.2.2 桥梁结构的非线性有限元模型应能正确反映桥梁各易损构件的非线性力学行为，一般情况下应满足一下要求：

1 计算模型中梁体和墩柱通常可采用空间杆系单元模拟，单元质量可采用集中质量代表。墩柱和梁体的单元划分应反映结构的实际动力特性。

2 混凝土结构的阻尼比可取为 0.05；进行非线性时程分析时，可采用瑞利阻尼。

3 对于延性体系桥梁，墩柱应采用能反映其弹塑性行为的单元；对于减隔震体系桥梁，墩柱可采用弹性单元。

4 支座应采用能反映其非线性力学行为的单元。

5 桥台应采用能反映其弹塑性行为的单元。

6 挡块应采用能反映其弹塑性行为的单元。

7 主梁与主梁、主梁与桥台以及主梁与挡块之间的相互作用应采用能反映其碰撞效应的单元。

8 对于多联梁式桥，计算模型应考虑相邻结构的影响，一般情况下应取计算模型左、右各一联桥梁结构作为边界条件。

4.2.3 采用概率性方法判定损伤状态时，宜根据桥梁设计地震加速度反应谱，选取均值与之匹配的不少于 80 条实际地震记录作为地震输入，进行地震反应分析。

4.2.4 采用确定性方法判定损伤状态时，应根据桥梁设计地震加速度反应谱，选取或拟合与之匹配的不少于 7 条地震加速度时程作为地震动输入，进行地震反应分析，结果取平均值。

4.2.5 采用时程分析法计算支座和墩柱的残余位移时，输入的地震动加速度时程应在选取或拟合的时程之后，补充一段不少于 60 秒的零加速度时段；残余位移应取零加速度时段结束时刻的反应。

4.3 地震损伤状态判定

4.3.1 根据桥梁各类构件的地震反应结果，按表 4.3.1 判定损伤状态。

表 4.3.1 桥梁易损构件地震损伤状态定义

构件	工程需求参数 ^①	损伤状态量化指标的限值				
		DS ₁ (无明显损伤)	DS ₂ (轻微损伤)	DS ₃ (中等损伤)	DS ₄ (严重损伤)	DS ₅ (完全损伤)
板式橡胶支座 (含主梁)	残余位移 ^②	0	(0, s)	(s , $s+D/4$)	($s+D/4$, $s+D/2$)	$>s+D/2$
	峰值位移状态有效承压面积减小量	0	(0, 12.5%)	(12.5%, 25%)	(25%, 50%)	>50%
摩擦滑动支座 (含主梁)	残余位移 ^②	0	(0, s)	(s , $s+D/4$)	($s+D/4$, $s+D/2$)	$>s+D/2$
	峰值位移状态有效承压面积减小量	0	(0, 12.5%)	(12.5%, 25%)	(25%, 50%)	>50%
橡胶类隔震支座 ^③ (含主梁)	最大位移	(0, $1.75 \cdot \Sigma t$)	($1.75 \cdot \Sigma t$, $2.5 \cdot \Sigma t$)	($2.5 \cdot \Sigma t$, $3.0 \cdot \Sigma t$)	($3.0 \cdot \Sigma t$, $3.5 \cdot \Sigma t$)	$>3.5 \cdot \Sigma t$
	残余位移	0	(0, $0.5 \cdot \Sigma t$)	($0.5 \cdot \Sigma t$, $1.0 \cdot \Sigma t$)	($1.0 \cdot \Sigma t$, $2.0 \cdot \Sigma t$)	$>2.0 \cdot \Sigma t$
	峰值位移状态有效承压面积减小量	0	(0, 12.5%)	(12.5%, 25%)	(25%, 50%)	>50%
固定支座 (含主梁)	峰值位移状态有效承压面积减小量	0	(0, 12.5%)	(12.5%, 25%)	(25%, 50%)	>50%
墩柱	最大漂移率	[0, 1.9%]	(1.9%, 3.0%)	(3.0%, 4.3%)	(4.3%, 5.6%)	>5.6%
	残余漂移率	[0, 0.1%]	(0.1%, 0.2%)	(0.2%, 0.3%)	(0.3%, 0.7%)	>0.7%

桩基础	承台最大水平位移 (mm)	(0, 20]	(20, 35]	(35, 50]	(50, 70]	>70
	承台残余水平位移 (mm)	0	(0, 14]	(14, 25]	(25, 40]	>40
	承台残余转角 (rad)	0	(0, 0.004]	(0.004, 0.007]	(0.007, 0.01]	>0.01
桥台	搭板沉降量 (mm)	(0, 8.13]	(8.13, 16.26]	(16.26, 32.26]	(32.26, 64.47]	>64.47
挡块	挡块顶部最大位移 (mm)	(0, 4]	(4, 17.6]	(17.6, 63.2]	(63.2, 105.3]	>105.3
伸缩缝 ^④	容许位移 Δ	(0, Δ]	—	—	—	> Δ

注:

- ^① 包含多个工程需求参数的构件, 其损伤状态按其中损伤等级最高的确定;
- ^② 板式橡胶支座、摩擦滑动支座残余位移限值的计算变量 s 、 D 分别为调平钢板与支座边缘的震前间距、支座宽度, 详见条文说明; 支座峰值位移超过 $s+D$ 归为 DS₅, 而 DS₁~DS₄除了满足残余位移限值外还需满足峰值位移不超过 $s+D$;
- ^③ 橡胶类隔震支座最大位移、残余位移限值的计算变量 Σt 为橡胶层总厚度;
- ^④ 伸缩缝在地震中损伤后通常会换新, 故仅设置两级状态: 无明显损伤、损坏需更换。

4.3.2 两类构件的联合地震损伤状态记为 DS_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, 5$), 代表构件 1 处于第 i 个损伤状态且构件 2 处于第 j 个损伤状态。同理, m ($m>2$) 类构件的联合地震损伤状态标记为 $DS_{ij\dots k}$ ($i, j, \dots, k=1, 2, \dots, 5$)。

4.3.3 桥梁地震损伤概率计算方法

1 给定地震水平 IM 下, 单类构件地震损伤概率 $P_{f,DS_i}(IM)$, 应按式 (4.3.3-1) 计算:

$$P_{f,DS_i}(IM) = \frac{n_i(IM)}{N} \quad (4.3.3-1)$$

式中, IM —— 地震动强度指标, 可取地震动峰值加速度 (PGA);
 DS_i —— 单类构件处于第 i 个损伤状态 ($i=1, 2, \dots, 5$);
 $n_i(IM)$ —— 地震水平 IM 下处于损伤状态 DS_i 的工况数;
 N —— 总计算工况数。

2 给定地震水平 IM 下, 多类构件联合损伤状态概率, 应按式 (4.3.3-2) 计算:

$$P_{f,DS_{ij\dots k}}(IM) = \frac{n_{ij\dots k}(IM)}{N} \quad (4.3.3-2)$$

式中, IM —— 地震动强度指标, 可取地震动峰值加

- 速度 (PGA);
- $\text{DS}_{ij\dots k}$ —— 多类构件分别处于第 i, j, \dots, k 个损伤状态的联合地震损伤状态 ($i, j, \dots, k = 1, 2, \dots, 5$);
- $n_{ij\dots k}(IM)$ —— 地震水平 IM 下处于 $\text{DS}_{ij\dots k}$ 联合损伤状态的工况数;
- N —— 总工况数。

5 桥梁功能恢复模型

5.1 一般要求

5.1.1 桥梁功能恢复模型应在构件功能恢复模型的基础上，考虑多构件修复次序进行构建。各类损伤构件的修复遵循以下次序：基础、桥墩、桥台、支座（主梁）、伸缩缝、挡块；同类构件宜同步修复。

5.1.2 桥梁震后功能损失应以桥梁的正常使用功能为基准，根据桥梁各类构件的损伤状态进行评估。

5.1.3 桥梁功能恢复模型应以震前正常使用状态为功能恢复目标。

5.2 构件功能恢复模型

5.2.1 构件功能恢复模型如图 5.2.1 所示，图中各参数定义见表 5.2.1，各参数与构件损伤状态相关。

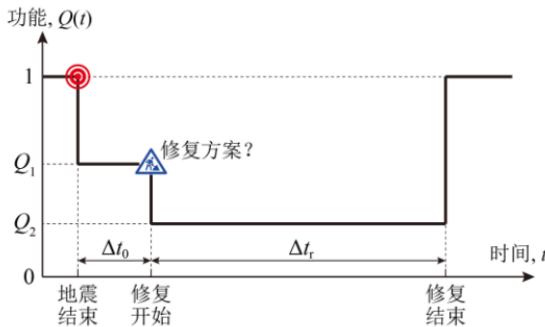


图 5.2.1 构件功能恢复模型

表 5.2.1 构件功能恢复模型的参数定义

参数	符号	物理意义
震后通行功能	Q_1	某一类构件损伤后桥梁的通行能力。
震后决策时间	Δt_0	包含震后桥梁检测评估、修复方案制定、以及人员、材料和装备准备所需要的总时间。
构件修复方案	—	根据构件损伤状态制定的修复方案。
构件修复时间	Δt_r	通过修复使构件恢复原本性能及功能所需的时间。
构件修复期间通行功能	Q_2	构件修复期间采用交通管制措施后的桥梁通行能力。

5.2.2 构件功能恢复模型的关键参数，满足以下假定条件下，参考表 5.2.2 确定。

表 5.2.2 各类构件不同损伤状态下的功能恢复模型关键参数

构件	关键参数	损伤状态				
		DS ₁	DS ₂	DS ₃	DS ₄	DS ₅
板式支座 (含主梁)	Q_1	0.99	0.91	0.68	0.41	0
	Q_2	0.95	0.79	0.55	0.34	0
	Δt_0 (天)	1	3	6	13	22
	Δt_r (天)	0	12	12	12	75
摩擦滑动支座 (含主梁)	Q_1	0.98	0.92	0.71	0.41	0
	Q_2	0.96	0.79	0.58	0.33	0
	Δt_0 (天)	1	3	6	13	22
	Δt_r (天)	0	12	12	12	75
橡胶类隔震支座 (含主梁)	Q_1	0.94	0.90	0.66	0.34	0
	Q_2	0.94	0.74	0.51	0.30	0
	Δt_0 (天)	1	3	6	13	22
	Δt_r (天)	0	12	12	12	75
固定支座 (含主梁)	Q_1	0.97	0.91	0.70	0.36	0
	Q_2	0.98	0.82	0.55	0.30	0
	Δt_0 (天)	1	3	6	13	22
	Δt_r (天)	0	12	12	12	75
墩柱	Q_1	0.93	0.78	0.55	0.28	0
	Q_2	0.89	0.72	0.47	0.23	0
	Δt_0 (天)	1	3	6	13	22
	Δt_r (天)	0	17	32	65	142
桩基础	Q_1	0.96	0.81	0.60	0.28	0
	Q_2	0.95	0.74	0.49	0.24	0
	Δt_0 (天)	1	3	6	13	22
	Δt_r (天)	0	20	40	81	163
桥台	Q_1	0.96	0.89	0.70	0.43	0
	Q_2	0.94	0.80	0.62	0.36	0

	Δt_0 (天)	1	3	6	13	22
	Δt_r (天)	0	11	26	51	108
挡块	Q_1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Q_2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Δt_0 (天)	1	3	6	13	22
	Δt_r (天)	0	5	11	11	11
伸缩缝 ^①	Q_1	0.97	—	—	—	0.72
	Q_2	0.95	—	—	—	0.55
	Δt_0 (天)	1	—	—	—	3
	Δt_r (天)	0	—	—	—	6

注: ^①伸缩缝在地震中损伤后通常会换新, 故仅设置两级状态: 无明显损伤、损坏需更换。

5.2.3 构件的常规修复方案见表 5.2.3; 采用其他修复方案时, 应根据实际情况对表 5.2.2 给出的修复时间 (Δt_r) 和修复期间桥梁功能 (Q_2) 进行调整。

表 5.2.3 各类构件常规修复方案

构件	DS ₁ (无明显损伤)	DS ₂ (轻微损伤)	DS ₃ (中等损伤)	DS ₄ (严重损伤)	DS ₅ (完全损伤)
主梁 ^①	无需修复	主梁纠偏	主梁纠偏	主梁纠偏	重建
板式支座	无需修复	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座
摩擦滑动支座	无需修复	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座
橡胶类隔震支座	无需修复	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座
固定支座	无需修复	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座	主梁复位后更换支座
墩柱	正常养护 (微修)	封闭、灌缝等混凝土 缺陷修复 (小修)	粘碳布、钢板等加固 措施 (中修)	植筋、喷射混凝土、钢护 筒等加固措施 (大修)	重建
桩基础	无需修复	注浆修复	钢护筒等加固	加桩托换	重建
桥台	无需修复	封闭、灌缝等混凝 土缺陷修复及路面 加铺接顺	粘碳布、钢板等加固 措施及路面加铺接顺	植筋、喷射混凝土、钢护 筒等加固及路面加铺接顺	重建
挡块	无需修复	封闭、灌缝、粘碳 布等进行裂缝处置	植筋、重建挡块	植筋、重建挡块	植筋、重建挡块
伸缩缝 ^②	无需修复	—	—	—	更换伸缩缝

注: ^①一般情况下, 主梁的损伤状态按支座的损伤状态确定; 当地震导致主梁出现明显结构性损伤时, 应结合实际损伤情况单独评估主梁修复或重建方案;

^②伸缩缝在地震中损伤后通常会换新, 故仅设置两级状态: 无明显损伤、损坏需更换。

5.3 桥梁功能恢复模型

5.3.1 对于仅有单类构件损伤的桥梁, 构件功能恢复模型即为桥梁功能恢复模型, 记为 $Q_{DS_i}(t)$, 其中 $DS_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 代表这类构件的损伤状态。

5.3.2 对于有多类 (m 类, $m \geq 2$) 构件损伤的桥梁, 桥梁功能恢复模型应考虑多类构件修复次序, 按图 5.3.2 所示方法确定, 记为 $Q_{DS_{j...k}}(t)$ 。

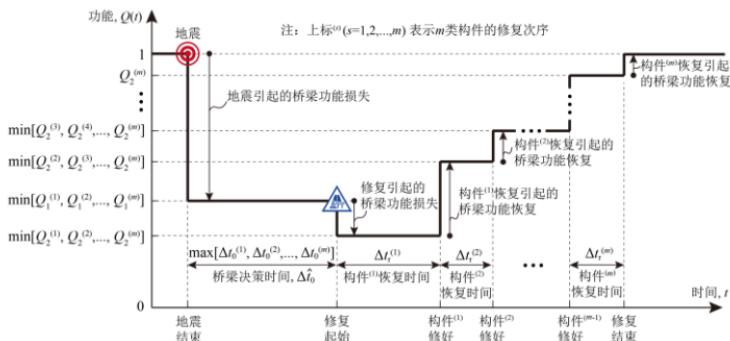


图 5.3.2 多类构件损伤时桥梁功能恢复模型建立

6 桥梁震后即时功能与等效关闭时间

6.1 一般要求

6.1.1 震前, 应针对现行桥梁抗震设计规范规定的 E1、E2 地震水平, 分别计算桥梁的震后即时功能和等效关闭时间。实际地震后, 可根据桥梁现场勘察结果计算桥梁的震后即时功能和等效关闭时间。

6.1.2 桥梁的震后即时功能和等效关闭时间应根据桥梁抗震韧性曲线计算。

6.1.3 桥梁功能恢复曲线的计算, 根据损伤状态的判定方法, 采用概率性或确定性方法。

6.2 桥梁功能恢复曲线的计算

6.2.1 采用概率性方法判定损伤状态时, 对于给定地震水平 IM 下仅有单类构件损伤的桥梁, 其功能恢复曲线 $Q(t|IM)$, 应按式 (6.2.1) 计算:

$$Q(t|IM) = \sum_{i=1}^5 P_{f, DS_i}(IM) \cdot Q_{DS_i}(t) \quad (6.2.1)$$

式中, IM —— 地震动强度指标, 可取地震动峰值加速度 (PGA);

- $P_{f, DS_i}(IM)$ —— 给定地震水平 IM 下, 该类构件处于状态 $DS_i (i=1,2,\dots,5)$ 的概率, 按式 (4.3.3-1) 计算;
- $Q_{DS_i}(t)$ —— 仅有单类构件损伤的桥梁功能恢复模型, 按 5.3.1 条确定。

6.2.2 采用概率性方法判定损伤状态时, 对于给定地震水平 IM 下有多类构件损伤的桥梁, 其抗震韧性曲线 $Q(t|IM)$, 应按式 (6.2.3) 计算:

$$Q(t|IM) = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \cdots \sum_{k=1}^5 P_{f, DS_{i,j,\dots,k}}(IM) \cdot Q_{DS_{i,j,\dots,k}}(t) \quad (6.2.3)$$

- 式中, IM —— 地震动强度指标, 可取地震动峰值加速度 (PGA);
- $P_{f, DS_{i,j,\dots,k}}(IM)$ —— 给定地震水平 IM 下多类构件分别处于状态 $DS_i, DS_j, \dots, DS_k (i, j, \dots, k = 1, 2, \dots, 5)$ 的概率, 按式 (4.3.3-2) 计算;
- $Q_{DS_{i,j,\dots,k}}(t)$ —— 多类构件分别处于状态 $DS_i, DS_j, \dots, DS_k (i, j, \dots, k = 1, 2, \dots, 5)$ 时的桥梁功能恢复模型, 按 5.3.2 条确定。

6.2.3 采用确定性方法判定损伤状态时, 桥梁功能恢复模型 (5.3 节) 即为桥梁功能恢复曲线。

6.3 桥梁震后即时功能与等效关闭时间的计算

6.3.1 桥梁震后即时功能 \hat{Q}_1 ，为图 3.1.1 所示桥梁功能恢复曲线上地震结束时刻的桥梁通行功能，应按式（6.3.1）确定：

$$\hat{Q}_1 = Q(t_0 | IM) \quad (6.3.1)$$

式中，
 t_0 —— 地震结束时刻；
 IM —— 地震动强度指标，可采用地震动峰值加速度（PGA）；
 $Q(t_0 | IM)$ —— 给定地震水平 IM 下桥梁抗震韧性曲线在地震结束时刻的功能。

6.3.2 桥梁震后等效关闭时间 T_d ，为图 3.1.1 所示功能损失阴影部分折算的时间，应按式（6.3.2）计算：

$$T_d = \int_{t_0}^{t_h} (1 - Q(t | IM)) dt \quad (6.3.2)$$

式中，
 t_0 —— 地震结束时刻；
 t_h —— 所有构件修复完成使桥梁功能恢复到震前水平的时刻，根据桥梁抗震恢复曲线确定，如图 3.1.1 所示；
 $Q(t | IM)$ —— 给定地震水平 IM 下的桥梁抗震韧性

曲线； IM 可取地震动峰值加速度 (PGA)；

7 桥梁震后名义修复费用

7.1 一般要求

7.1.1 桥梁震后修复费用包含各类地震受损构件进行维修、拆除和更换等所产生的各项直接费用。

7.1.2 桥梁震后修复费用不含桥梁震后应急和抗震韧性提升所产生的额外费用。

7.1.3 桥梁抗震韧性评估中，桥梁震后修复费用采用名义修复费用指标 C_R 表征。

7.1.4 桥梁震后名义修复费用计算时，构件损伤状态判定宜采用确定性方法；当构件损伤状态判定采用概率性方法时，宜基于概率最大的多构件联合损伤状态，进行桥梁震后名义费用的计算。

7.1.5 桥梁震后名义修复费用基于表 5.2.3 的构件期望修复方案计算，采用其他修复方案时，应根据实际情况进行调整。

7.1.6 同类构件采用同时修复的原则计算费用，否则应根据实际情况进行调整。

7.2 桥梁震后名义修复费用的计算

7.2.1 桥梁震后名义修复费用 C_R ，应按式（7.2.1）计算：

$$C_R = \underbrace{\sum_{i=1}^5 \lambda_{DS_i} \eta_{DS_i} C_{RG,DS_i}}_{\text{主梁修复费用}} + \underbrace{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^5 \lambda_{k,DS_i} \eta_{k,DS_i} \alpha_{k,DS_i} C_{RN,k}}_{\text{主梁以外构件修复费用}} \quad (7.2.1)$$

- 式中， C_{RG,DS_i} —— 主梁名义修复费率，表示所有主梁在损伤状态 DS_i 下的修复费用与同期全桥新建费用的比值；
 λ_{DS_i} —— 主梁损伤占比，表示损伤状态处于 DS_i 的主梁跨数占比；
 η_{DS_i} —— 主梁修复措施影响系数，根据主梁类型（混凝土梁、钢/钢混组合梁）、是否预留主梁纠偏构造措施而确定的影响系数。其中，以有预留主梁纠偏构造措施的混凝土梁为基准， η_{DS_i} 取 1；
 $C_{RN,k}$ —— 除主梁外构件建造成本占比，表示第 k 类构件新建费用与全桥新建费用的比值；
 α_{k,DS_i} —— 除主梁外构件名义修复费率，表示第 k 类构件在损伤状态 DS_i 下修复费用与同期新建费用的比值；
 η_{k,DS_i} —— 除主梁外构件修复措施影响系数，表示第 k 类构件应不同损伤状态 DS_i 、不同修复措施导致的费用差异，其中墩柱、基础根据有/无承台、陆地/水中的影响因素分类确定，桥台根据是/否临水的因素确定，挡块通常均采用桥面

往下悬挂的修复方法，但受其损伤状态影响，支座仅考虑自身更换费用而修复措施影响系数在主梁修复费用计算中考虑，伸缩缝的修复往往在桥面作业，不考虑修复措施影响系数（取1）；

$\lambda_{k,DSi}$ —— 除主梁外构件损伤占比，表示第 k 类构件处于损伤状态 DS_i 的数量与该类构件总数的比值。

- 7.2.2** 主梁损伤状态按支撑其的支座损伤状态确定。
- 7.2.3** 桥梁各类构件名义修复费率，可参考表 7.2.2 确定。
- 7.2.4** 桥梁各类构件的修复措施影响系数，可参考表 7.2.3 确定。
- 7.2.5** 构件损伤占比宜按确定性构件损伤状态判定方法确定。
当采用概率性方法时，以概率最大的多构件联合损伤状态确定。
- 7.2.6** 除主梁外构件建造成本占比可按桥梁所在地建造定额确定。

表 7.2.2 桥梁各类构件在不同损伤状态下的名义修复费率

构件	主梁名义修复费率 C_{RG,DS_i} 或除主梁外构件名义修复费率 a_{k,DS_i}				
	DS ₁ (无明显损伤)	DS ₂ (轻微损伤)	DS ₃ (中等损伤)	DS ₄ (严重损伤)	DS ₅ (完全损伤)
主梁	0	0.15	0.15	0.15	1.05
板式支座	0	1.52	1.52	1.52	1.52
摩擦滑动支座	0	1.50	1.50	1.50	1.50
橡胶类隔震支座	0	1.69	1.69	1.69	1.69
固定支座	0	1.54	1.54	1.54	1.54
墩柱	0.04	0.13	0.32	0.68	1.47
桩基础	0	0.20	0.47	1.42	1.83
桥台	0	0.12	0.33	0.58	1.60
挡块	0	0.66	2.72	2.72	2.72
伸缩缝 ^①	0		1.51		

注: ^①伸缩缝在地震中损伤后通常会换新, 故仅设置两级状态: 无明显损伤、损坏需更换。

表 7.2.3 桥梁各类构件在不同损伤状态下的修复措施影响系数

构件	修复措施影响要素	主梁或除主梁外构件的修复措施影响系数 η_{DSi} 或 $\eta_{k,DSi}$				
		DS ₁ (无明显损伤)	DS ₂ (轻微损伤)	DS ₃ (中等损伤)	DS ₄ (严重损伤)	DS ₅ (完全损伤)
主梁	有预留主梁纠偏构造措施的混凝土梁	1	1	1	1	1
	无预留主梁纠偏构造措施的混凝土梁	1	1.87	1.87	1.87	1.44
	有预留主梁纠偏构造措施的钢/钢混组合梁	1	0.95	0.95	0.95	1
	无预留主梁纠偏构造措施的钢/钢混组合梁	1	1.66	1.66	1.66	1.35
墩柱	有承台陆地	1	1	1	1	1
	无承台陆地	1.04	1.04	1.04	1.05	1.08
	有承台水中	1.26	1.66	1.67	1.68	1.74
	无承台水中	1.39	1.79	1.80	1.83	1.87
桩基础	有承台陆地	1	1	1	1	1
	无承台陆地	1	0.95	0.95	1.13	1.03
	有承台水中	1	1.55	1.59	1.71	1.67
	无承台水中	1	1.56	1.49	1.71	1.72
桥台	陆地	1	1	1	1	1
	临水	1	1.24	1.36	1.37	1.39
挡块	—	1	1.17	1.38	1.38	1.38

注：表中修复措施影响系数为 1.0 表示以该修复措施影响要素为基准，或该要素对构件修复费用无影响。

8 桥梁抗震韧性等级评价

8.0.1 桥梁抗震韧性的功能分项评价按如下进行：

1 应根据功能分项指标 R_Q ，按表 8.0.1 分级。

表 8.0.1 桥梁抗震韧性功能分项分级

功能分项等级	震后即时功能 \hat{Q}_1	功能分项指标 R_Q
一级（高韧性）	$0.9 \leq \hat{Q}_1 < 1$	$1 \leq R_Q < 2$
二级（中韧性）	$0.6 \leq \hat{Q}_1 < 0.9$	$2 \leq R_Q < 3$
三级（低韧性）	$0.25 \leq \hat{Q}_1 < 0.6$	$3 \leq R_Q < 4$
四级（无韧性）	$\hat{Q}_1 < 0.25$	$R_Q = 4$

注： \hat{Q}_1 应按式（6.3.1）计算。

2 功能分项指标 R_Q ，应按式（8.0.1）计算，反映桥梁震后通行能力， R_Q 越小，功能韧性越高。

$$R_Q = \begin{cases} 1 + \frac{1 - \hat{Q}_1}{0.1} & \text{当 } 0.9 \leq \hat{Q}_1 < 1 \\ 2 + \frac{0.9 - \hat{Q}_1}{0.3} & \text{当 } 0.6 \leq \hat{Q}_1 < 0.9 \\ 3 + \frac{0.6 - \hat{Q}_1}{0.35} & \text{当 } 0.25 \leq \hat{Q}_1 < 0.6 \\ 4 & \text{当 } \hat{Q}_1 < 0.25 \end{cases} \quad (8.0.1)$$

8.0.2 桥梁抗震韧性的时间分项评价按如下进行：

1 应根据时间分项指标 R_T ，按表 8.0.2 分级。

表 8.0.2 桥梁抗震韧性时间分项分级

时间分项等级	等效关闭时间 T_d (天)	时间分项指标 R_T
一级 (高韧性)	$0 \leq T_d \leq 1$	$1 \leq R_T < 2$
二级 (中韧性)	$1 \leq T_d < 30$	$2 \leq R_T < 3$
三级 (低韧性)	$30 \leq T_d < 90$	$3 \leq R_T < 4$
四级 (无韧性)	$T_d \geq 90$	$R_T = 4$

注： T_d 应按式 (6.3.2) 计算。

2 时间分项指标 R_T ，应按式 (8.0.2) 计算，反映桥梁震后等效关闭时间， R_T 越小，时间韧性越高。

$$R_T = \begin{cases} 1 + T_d & \text{当 } 0 \leq T_d < 1 \\ 2 + \frac{T_d - 1}{29} & \text{当 } 1 \leq T_d < 30 \\ 3 + \frac{T_d - 30}{60} & \text{当 } 30 \leq T_d < 90 \\ 4 & \text{当 } T_d \geq 90 \end{cases} \quad (8.0.2)$$

8.0.3 桥梁抗震韧性的费用分项评价按如下进行：

1 应根据费用分项指标 R_C ，按表 8.0.3 分级。

表 8.0.3 桥梁费用分项韧性分级

费用分项等级	名义修复费用 C_R	费用分项指标 R_C
--------	--------------	--------------

一级（高韧性）	$0 \leq C_R < 0.5\%$	$1 \leq R_C < 2$
二级（中韧性）	$0.5\% \leq C_R < 20\%$	$2 \leq R_C < 3$
三级（低韧性）	$20\% \leq C_R < 50\%$	$3 \leq R_C < 4$
四级（无韧性）	$C_R \geq 50\%$	$R_C = 4$

注: C_R 应按式 (7.2.1) 计算。

- 2 费用分项指标 R_C , 应按式 (8.0.3) 计算, 反映桥梁震后直接经济损失, R_C 越小, 费用韧性越高。

$$R_C = \begin{cases} 1 + \frac{C_R}{0.5\%} & \text{当 } 0 \leq C_R < 0.5\% \\ 2 + \frac{C_R - 0.5\%}{19.5\%} & \text{当 } 0.5\% \leq C_R < 20\% \\ 3 + \frac{C_R - 20\%}{30\%} & \text{当 } 20\% \leq C_R < 50\% \\ 4 & \text{当 } C_R \geq 50\% \end{cases} \quad (8.0.3)$$

8.0.4 桥梁的抗震韧性等级评价, 应按如下进行:

- 1 应根据桥梁抗震韧性的功能、时间、费用分项指标, 按式 (8.0.4) 计算加权综合韧性指标 R_w 。

$$R_w = \lambda_Q R_Q + \lambda_T R_T + \lambda_C R_C \quad (8.0.4)$$

式中, λ_Q —— 功能韧性分项指标贡献系数, 宜取 0.5;
 λ_T —— 时间韧性分项指标贡献系数, 宜取 0.3;
 λ_C —— 费用韧性分项指标贡献系数, 宜取 0.2。

2 桥梁抗震韧性等级，应根据加权综合韧性指标 R_w ，按表 8.0.4 分级。

表 8.0.4 桥梁抗震韧性分级

功能韧性等级	加权综合韧性指标 R_w
一级（高韧性）	$1 \leq R_w < 2$
二级（中韧性）	$2 \leq R_w < 3$
三级（低韧性）	$3 \leq R_w < 4$
四级（无韧性）	$R_w = 4$

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166-2011

《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231-01-2020

《建筑抗震韧性评价标准》GB/T 38591-2020

中国工程建设标准化协会标准

桥梁抗震韧性评价标准

Seismic resilience evaluation standard for bridges

T/CECS XXXX-2025

条文说明

1 总 则

1.0.1 本条阐明了制定本标准的目的。一方面，本标准服务于国家防灾减灾救灾和韧性城市建设的总体战略要求，通过规范桥梁抗震韧性评价的基本原则、指标体系和技术方法，促使桥梁工程从传统“抗倒塌”安全目标逐步向“功能保障及快速恢复”的韧性目标转变。另一方面，本标准旨在从抗震韧性量化的维度为交通生命线工程中桥梁的规划建设、现状评估、加固改造和运行管理提供技术依据，提升桥梁在地震作用下的抵御能力和震后功能恢复能力，为构建安全韧性城市和综合交通体系提供理论和技术支撑。

1.0.2 本条规定了本标准的适用范围。当前公路和城市桥梁中，大量工程属于跨径不超过 150 m 的梁式桥，其结构体系相对规则、受力特征较为清晰，已有抗震设计与震害研究成果较为丰富，是开展抗震韧性评价方法体系统一和推广应用的重点对象。因此，本标准将此类梁式桥作为主要适用对象，便于工程实践中直接采用，且不考虑地震诱发的地质灾害场景。对于拱桥、斜拉桥、悬索桥和跨径超过 150m 的梁式桥，由于其动力特性、破坏模式和震后恢复机制可能存在显著差异，难以完全采用统一的参数取值和模型假定，但仍可参考本标准的总体评价思路和流程，在此基础上结合特定的功能恢复模型等，开展专门研究，以确保评价结果的合理性。

1.0.3 本条规定了桥梁抗震韧性评价的基本维度。韧性本质上体现为桥梁在地震作用下功能保持和震后恢复的综合能力，既包括地震造成的直接经济损失，也包括恢复过程中的间接经济损失。震后功能损失程度反映桥梁通行能力和服务水平受损的严重性，

是评价结构性能退化和对交通系统影响的核心指标；等效关闭时间的物理意义在于，将震后桥梁决策和修复全过程的功能损失（即抗震韧性曲线以上的面积）等效为桥梁完全关闭（即功能为 0）的时间，是量化修复期间间接经济损失的重要指标；修复费用则反映了桥梁震损导致的直接经济损失。通过这三个方面的综合评价，可形成对桥梁抗震韧性的多维刻画，避免仅以单一维度表征韧性水平的片面性。

1.0.4 本条明确了桥梁抗震韧性评价在国家和行业标准体系中的地位与衔接关系。本标准为开展桥梁抗震韧性评价的专门技术依据，并不替代现行设计标准的强制性或推荐性要求。实际评价工作中，抗震设防参数均应优先满足国家现行有关标准的规定，在此基础上依照本标准的韧性评价方法开展工作，以保证评价结论在安全性、合规性和可比性方面与既有规范体系保持一致，形成完整统一的技术依据。

3 一般规范

3.1 评价评价指标

3.1.1 本条明确了桥梁抗震韧性评价所依托的三个基本物理量，为后续功能、时间和费用韧性分项指标提供基础。震后即时功能表征了地震一结束桥梁的剩余通行功能，是通行决策的起点；等效关闭时间将整个恢复期的功能损失折算为等效完全封闭时长，反映对交通运行持续影响的强弱，一定程度上表征间接经济损失；名义修复费用通过按经验估计的震后修复费用与同期新建费用的比值，量化结构层面的直接经济损失水平。三者分别从功能、时间和费用三个维度刻画地震后桥梁状态，是构建后续韧性指标体系的物理基础。

3.1.2 本条从指标体系角度明确了桥梁抗震韧性评价由三个分项指标构成。三个韧性分项指标均通过规范化与无量纲化处理，使其数值可在不同桥梁和不同地震情景之间进行横向对比，便于后续进行分级判定和综合指标构建。

3.1.3 通过引入加权综合韧性指标 R_W ，将功能、时间和费用三个分项指标统一为综合性单一量化指标，有利于不同桥梁方案、不同地震等级下的直观对比，避免仅依据各分项指标导致评价结论分散、不易决策的问题。

3.2 评价的方法和流程

3.2.1 本条规定了桥梁抗震韧性评价所采用的地震水准，应与

现行桥梁抗震设计规范中 E1、E2 两级设防要求保持一致，以保证评价结果与设计阶段的性能目标具有可比性。E1 水准通常对应基本设防地震，主要关注桥梁在重现期较短的地震作用下功能保持和震后可快速恢复的能力；E2 水准通常对应罕遇地震，侧重考察在极端地震情景下的承载安全与通行功能维持能力。基于这两个水准分别开展韧性评价，可全面反映桥梁在不同地震强度下的功能损失、恢复过程和修复费用，为桥梁全寿命周期的抗震设计、加固决策和风险管理提供技术支撑。

3.2.2 本条对桥梁抗震韧性评价的总体流程和主要步骤作出规定，评价工作应形成从地震作用输入、结构反应分析、损伤判定到韧性评价的完整链条。通过该流程可保证评价过程逻辑清晰、数据可追溯，便于工程实践应用与结果复核。

3.3 韧性评价应用

3.3.1 本条规定了采用加权综合韧性指标 R_W 对桥梁抗震韧性进行分级，是前述功能、时间和费用三个分项指标综合量化后的指标。通过将连续的 R_W 数值划分为四个等级，可在保证区分度的前提下，便于设计、养护和管理部门理解和使用：一级、二级可视为满足或优于目标韧性要求的桥梁，三级提示韧性水平偏低、需纳入重点监测或中长期改造计划，四级则表明在设定地震情景下基本缺乏可接受的韧性，需要优先采取加固或重建等措施。规定“数值越小、等级越高”的单调关系，与前文各分项指标取值方向保持一致，便于不同桥梁方案在不同地震水平下开展比较。

3.3.2 新建桥梁宜以目标韧性等级为约束进行设计，当评估结果不达标时，需及时调整设计参数、结构体系和构造措施等，使桥梁在震后功能保持和恢复方面达到预期水平，避免“只满足性能目标而韧性不足”的情况，从源头上提高新建桥梁的抗震韧性。

3.3.3 本条规定了既有桥梁韧性评价结果与加固改造决策的衔接。通过将韧性等级与“是否需要改造”直接挂钩，可将有限的改造资源优先配置给韧性不足、对交通影响较大的桥梁，实现韧性导向的分级治理，逐步提升存量桥梁体系的整体抗震韧性水平。

3.3.4 不同桥梁的韧性目标等级并非“一刀切”，而应由管理部门结合桥梁在路网中的功能地位、绕行条件、服务对象以及区域防灾规划等因素综合确定。通过差异化设定目标韧性等级，可实现对关键节点“从严要求”、一般桥梁“合理保障”，使韧性投入与交通网络的重要性相匹配。

3.3.5 本条强调了实际地震现场勘察与本标准韧性评价框架的衔接与使用。通过勘察结果判定构件损伤状态，估计桥梁震后即时功能水平，为是否封闭、限行或保持通行提供依据；在此基础上制定修复方案并计算名义修复费用，可为抢险加固、资金安排和后续韧性提升提供量化支撑，使震后应急决策与事前韧性评价形成闭环。

4 桥梁地震损伤状态

4.1 一般要求

4.1.1 本条将韧性评价与现行桥梁抗震设计规范中的两级设防地震水准相衔接，保证评价所用地震水准与设计目标一致，便于将评价结果反馈到设计与加固决策中。

4.1.2 2008 年汶川地震以来的多次桥梁震害现象表明，我国梁式桥的易损构件主要包括支座、墩柱、桥台、桩基础、伸缩缝和挡块。

4.1.3 对于支座、墩柱、桥台、桩基础和挡块，五级损伤状态划分便于与现有大量文献中的易损性分析结果和本标准的功能恢复模型相衔接；对于伸缩缝，此类构件在功能上多呈现“可继续使用”与“需更换”两种状态，采用两级划分更符合实际维护与决策需求，同时简化工程应用。

4.1.4 本条允许在工程实践中根据设计资料条件和评价目标灵活选用确定性或概率性判定方法。确定性方法适用于已有明确分析结果或实际地震情景，可直接给出单一损伤状态，便于快速决策；概率性方法则能更好地反映地震动的不确定性。通过兼容两种方法，有利于在不同设计资料条件下开展损伤判定。

地震损伤状态判定的不确定性主要来源于地震动强度、持时及其频谱特性。对于已开展工程场地地震安全性评价的桥梁，其设计反应谱和地震动输入参数在场地效应、区域构造背景等方面已得到专门分析，不确定性相对较小，采用确定性方法基本可代表设防地震情景下的损伤状态，便于与现行设计规范衔接。对于

尚缺乏工程场地地震安全性评价的桥梁，地震动特性的认知不确定性较大，此时宜采用概率性方法，通过多组地震动样本反映地震动的不确定性，以损伤概率的形式给出更缜密的判定结果。

4.1.5 在概率性分析框架下，应从系统角度对多类易损构件的联合损伤进行判定，而非仅逐构件孤立判断。通过进行多类构件联合损伤状态判定，可更真实地反映桥梁在设防地震下的整体受损情形，为后续的功能恢复、关闭时间和修复费用计算提供符合系统行为的基础。

4.1.6 既有桥梁在长期服役过程中会发生材料强度退化、钢筋锈蚀、裂缝发展、基础冲刷等性能劣化现象，如仍按原设计状态判定地震损伤，很可能导致对实际受损程度的低估。将性能劣化纳入判定过程，可通过调整材料参数和边界条件等方式实现，从而提高损伤判定的真实性，为后续韧性评价和改造决策提供更可靠的依据。

4.2 地震反应分析

4.2.1 本条明确了应基于非线性有限元进行非线性时程反应分析，因为韧性评价需要准确反映桥梁在地震作用下的非线性行为，仅依靠线性分析难以支撑后续损伤判定和抗震韧性分析。要求建模原则与现行抗震设计规范保持一致，一方面利用成熟建模经验和参数取值方法，尽可能保证分析结果的可靠性，另一方面便于将韧性评价结果与设计阶段的性能目标进行对照分析。

4.2.3 确定性分析中使用不少于 7 条与设计反应谱匹配的地震动

记录，并采用平均反应值，是为了在计算工作量可控的前提下，减小单条记录偶然性对损伤判定的影响，使分析结果更具代表性。以设计反应谱为约束选取或拟合地震动，可保证地震输入与规范设防水准一致，从而使判定出的损伤状态与设计目标相协调，便于工程上直接采用。

4.2.4 概率性分析中提出采用数量较多（不少于 80 条）的实际地震记录，并使其平均反应谱与设计谱匹配，目的是充分考虑地震动记录间的变异性，得到稳定可靠的多构件联合损伤概率结果。

4.2.5 补充零值段的目的是确保结构在地震动激励停止后充分衰减至静止状态，避免因时程截断导致残余位移计算失真。编制团队研究表明，添加的 60 秒零值段时长通常可使常规梁式桥得到稳定的残余位移，但仍建议通过位移时程反应结果检验 60 秒零值段的可靠性，必要时延长零值段时长。

4.3 地震损伤状态判定

4.3.1 本标准中各类构件损伤状态的量化阈值，是根据损伤状态物理定性描述（表 4-1），并结合国内外现有文献所确定的。

对于支座，梁式桥的支座类型主要分为：①普通板式支座，②摩擦滑动支座（四氟滑板支座、摩擦摆支座），③橡胶类隔震支座（高阻尼橡胶支座、铅芯橡胶支座），以及④固定支座（固定型球钢支座、盆式支座）。需要说明的是，地震下主梁从落座到落梁的动力过程非常复杂，现有的通用有限元分析软件很难有效区分

落座或落梁状态，不确定性很高，另外历史震害中落座和落梁往往相伴发生，且常出现碰撞导致的梁体破坏，通常需要更换支座并重建主梁，因此本文以落座作为支座的完全损伤状态(DS₅)，偏保守地认为此时桥梁丧失通行功能。为体现我国梁式桥支座的特点，板式支座和摩擦滑动支座的损伤状态定义中考虑了支座滑动面与调平钢板（或不锈钢板）的相对位移，且以更能表征支座震后功能的残余位移和有效承压面积减小量的双指标（以先达到者为准）量化损伤状态，突破了传统桥梁抗震分析中仅以支座峰值位移（震后难以确定）作为损伤指标的局限；需要说明的是，编制团队以往研究表明，板式支座和摩擦滑动支座的残余位移超过 $s+D/2$ 时（ s 为调平钢板与支座边缘的震前间距， D 为支座宽度，见表 4-1），峰值位移通常已超过 $s+D$ ，即已落座，故对于这两类支座，本标准以其残余位移超过 $s+D/2$ 或峰值位移超过 $s+D$ 作为完全损伤状态的判别依据。橡胶类隔震支座同时考虑支座最大位移、残余位移、以及有效承压面积减小量，三者先达到者为准。固定支座考虑了限位盆环破坏后的残余位移和有效承压面积减小量。

对于墩柱，我国梁式桥普遍采用钢筋混凝土墩柱。以震后韧性评估为出发点，以墩柱震后表象定义多级损伤状态。相对应地，采用峰值漂移率和残余漂移率双指标（以先达到者为准）量化这些损伤状态。

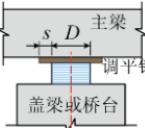
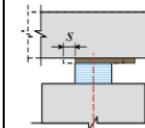
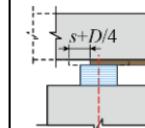
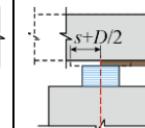
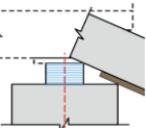
对于基础形式，桩柱式基础和群桩基础是我国梁式桥的两种主要形式。编制团队以往研究表明，桩柱式基础的损伤可采用墩柱漂移率表征，因此，本标准主要关注抗震行为更复杂的群桩基础。与墩柱类似，以群桩基础震后表象定义多级损伤状态。相对应地，以承台峰值水平位移、残余水平位移、残余转角的三指标（以先到达者为准）量化损伤状态。

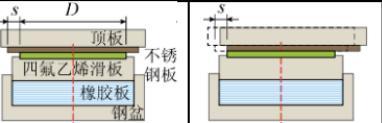
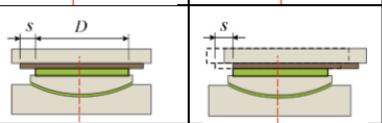
对于桥台，我国梁式桥主要采用座式桥台，这类桥台在抗震

设计中通常不作为抵抗地震力的构件，故对其多级损伤状态的研究较少。鉴于此，本文根据有限的桥台历史震害资料，以台身和锥坡的表观损伤定义多级损伤状态，并从震后桥梁通行功能评估的角度出发，采用台后搭板沉降量作为相应的性能指标，分为搭接型、铰接型两类。

对于挡块，我国梁式桥普遍采用钢筋混凝土挡块，以挡块顶部位移量化其多级损伤状态。

表 4-1 面向韧性评估的梁式桥各构件多级损伤状态定义及表象描述

构件	损伤等级与状态描述				
	DS ₁ (无明显损伤)	DS ₂ (轻微损伤)	DS ₃ (中等损伤)	DS ₄ (严重损伤)	DS ₅ (完全损伤)
板式支座	支座与梁底基本无滑动现象发生。	支座与梁底发生滑动,但残余位移未超出梁底调平钢板,梁体仍有可靠支撑。	支座小部分滑出梁底调平钢板,残余位移未超过支座直径或边长的 1/4。	支座大部分滑出梁底调平钢板,残余位移不超过支座直径或边长的 1/2,梁体可靠支撑范围较小。	支座完全滑出梁底调平钢板,梁体落座,落梁风险很大。
					
摩擦滑动支座	支座基本无残余位移。	支座残余位移很小,四氟乙烯滑板未滑出上顶板下不锈钢板范围。	四氟乙烯滑板小部分滑出上顶板范围,残余位移未超过四氟乙烯滑板直径或边长的 1/4。	支座大部分滑出梁底不锈钢板,残余位移不超过支座直径或边长的 1/2,梁体可靠支撑范围较小。	支座完全滑出不锈钢板,梁体落座,落梁风险很大。

类型 1: 滑动盆式 橡胶支座					
类型 2: 滑动球钢 支座					
橡胶类 隔震支座	最大位移不超过 最大允许位移， 且无残余剪切变 形。	最大位移不超过 最大允许位移， 出现较小的残余 变形。	残余位移较大或 橡胶层出现明显 损伤。	残余位移很大或 橡胶层损伤严 重，竖向承载能 力损失显著。	橡胶层破坏，竖向 承载能力丧失，或 残余位移过大导致 落座，落梁风险很 大。
固定 支座	固定支座限位盆 环完好，支座功 能正常。	固定支座限位盆 环破坏，但无明 显滑动。	支座有明显滑 动。	支座有严重滑动 或部分脱空。	梁体落座，落梁 风险很大。
墩柱	出现细小弯曲裂 缝，观察不到其 它损伤。	混凝土小范围剥 落或轻微剪切斜 裂缝。	保护层混凝土剥 落范围较大，裂 缝数量显著增多 且深度较深。	箍筋裸露，且纵 筋清晰可见。	纵筋屈曲破坏或 拉断或核心混凝 土压溃，墩柱破 坏。
桩基础	很难观察到桩顶 裂缝，基础处于	桩顶混凝土细小 弯曲裂缝。	桩顶混凝土小范 围剥落，裂缝数	外排桩桩顶混凝 土大范围剥落，箍 筋	桩顶核心混凝 土压溃，桩基础破 坏。

	弹性阶段。		量增多。	可见, 中排桩桩顶混凝土小范围剥落。	坏。
桥台	台身出现细小水平裂缝, 观察不到其他损伤; 锥坡完好, 填土无塌陷	台身保护层混凝土轻微剥落; 锥坡铺砌面产生局部隆起或凹陷与开裂, 砌缝处的砂浆出现脱落, 或有局部铺砌面发生下滑, 坡脚开始产生破坏。	台身保护层混凝土剥落范围较广, 但未见钢筋外露; 锥坡铺砌面出现大面积隆起、凹陷、开裂, 砌缝砂浆出现脱落。	台身保护层混凝土大面积剥落, 钢筋外露; 锥坡的铺砌面出现孔洞与破损等, 坡顶高程有明显下降。	台身钢筋断裂或核心混凝土压溃; 锥坡严重损伤, 填土发生大范围塌陷。
挡块	挡块内侧面和盖梁交角附近出现细小微裂缝, 基本处于线弹性工作状态。	初始裂缝连成一线, 并继续向斜下方发展, 形成主裂缝, 部分钢筋开始屈服。	主裂缝贯通, 宽度不断增加, 混凝土开始剥落, 新的主裂缝形成并发展。	多条主裂缝贯通, 裂缝宽度非常大, 钢筋外露紧缩, 混凝土大范围剥落。	挡块严重移位, 钢筋断裂; 挡块甚至完全脱落。
伸缩缝	伸缩缝位移未超过容许值。	伸缩缝纵向位移或横向错动超过容许值。	—	—	—

4.3.2~4.3.4 对于多构件联合损伤状态判定，确定性和概率性方法的计算结果主要区别在于，确定性方法只得到一个联合损伤状态（相当于概率为 1.0），而概率性方法的结果是多个可能得联合损伤状态且分别具有一定的概率（所有概率的和为 1.0）。图 4-1 以某两类构件在某给定地震动水平下的联合损伤状态计算为例，给出了两类构件的确定性、概率性联合损伤状态判定结果。

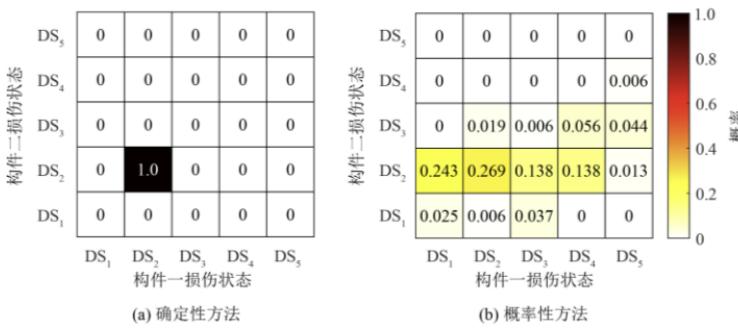


图 4-1 两类构件联合损伤状态判定的确定性和概率性方法

5 桥梁功能恢复模型

5.1 一般要求

5.1.1 本条明确了构件功能恢复模型的定义，通过在“仅有这一类构件损伤”的前提下刻画通行能力随时间的损失与恢复机制，可以把复杂的桥梁多构件恢复问题拆分为若干标准化子问题，便于建立、标定和复用。

5.1.2 本条明确了构件功能恢复模型的地位，是构建桥梁功能恢复模型的基本单元；提出“先下部后上部、先结构后非结构、同类构件同步”的多类构件修复次序原则，一方面符合施工可行性要求，避免在基础未恢复时进行上部修复；另一方面有利于统一不同工程对修复逻辑的假定，使由此得到的功能恢复曲线具有可比性。

5.1.3 功能损失评估必须有明确基准，即震前的正常使用功能。以此作为参照，可以将不同地震情景、不同损伤组合下的通行能力统一表示为“相对损失”，便于进行不同桥梁方案、不同地震水平之间的比较。需要说明的是，地震诱发强烈地质灾害导致无法恢复震前使用功能的情况不在本标准适用范围内。

5.1.4 本条规定功能恢复的目标是“恢复至震前正常使用状态”，而不计入可能出现的“修复后反而优于震前”的情形，主要是出于规范计算的统一性和保守性考虑。一方面，可避免不同工程因改造幅度不同导致“恢复目标”不一致，使韧性指标失去可比性；另一方面，从风险控制角度，先保证在设定时间内恢复至原有功能是最低要求，后续功能提升可在加固中单独考虑。

5.2 构件功能恢复模型

5.2.1~5.2.4 构件功能恢复模型首次引入“修复引起的通行功能损失”的理念，全面考虑地震作用和修复方案对桥梁通行功能和恢复过程的影响。采用专家意见调研和研判的方法，面向全国各地 124 位桥梁设计、科研、施工、检测、养护、加固领域的专家，征询并确定各类易损构件不同损伤状态下的功能恢复模型关键参数（震后功能 Q_1 、决策时间 Δt_0 、修复方案、修复期间功能 Q_2 和修复时间 Δt_1 ）。图 5-1 给出了 124 位专家的地域和职称分布。

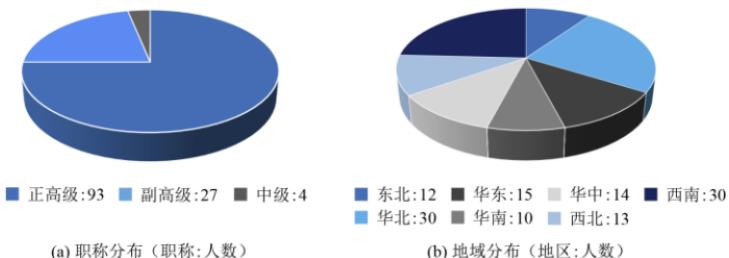


图 5-1 124 位调研专家的地域和职称分布

5.3 桥梁功能恢复模型

5.3.1 在只有一类构件受损的情形下，可不再额外建立桥梁恢复模型，而是直接用该类构件的功能恢复模型代表桥梁功能随时间的损失与恢复过程。这样做的意义在于：一是减少建模工作量，便于工程应用；二是保证构件层与桥梁层恢复描述的一致性，从

而使韧性评价结果更简洁、可追溯性强。

5.3.2 当多类构件同时受损时，桥梁功能恢复不再由单一构件控制，而是受多类构件依次修复过程的影响，因此必须在模型中显式考虑修复次序。通过按条文图 5.3.2 给出的统一方法构建桥梁功能恢复模型，一方面可以更真实地反映实际修复过程中的“瓶颈构件”和关键路径，另一方面也使不同工况在面对多构件损伤情形时采用相同的修复次序原则（先下部后上部、先结构后非结构、同类构件同步），保证韧性评价结果具有可比性。

6 桥梁震后即时功能与等效关闭时间

6.1 一般要求

6.1.2 本条规定了用抗震韧性曲线作为计算震后即时功能和等效关闭时间的基础, 是因为韧性曲线本质上刻画了桥梁功能随时间从受损到恢复的全过程。在同一条曲线上, 震后即时功能对应地震结束时的功能水平, 等效关闭时间则通过对功能损失在时间维度上的积分或折算得到。以韧性曲线为统一基础, 可以保证不同指标之间在物理意义和数据来源上的一致性, 避免各指标各算一套、难以对比的问题。

6.1.3 实际地震后, 可根据桥梁现场勘察结果判定各构件损伤状态, 按确定性方法计算桥梁震后功能恢复曲线。

6.2 桥梁功能恢复曲线的计算

6.2.1 对于确定性分析, 给定地震水准和损伤判定只对应唯一的损伤情形, 因此桥梁在该情形下的功能恢复模型即可视为抗震韧性曲线, 无需再做概率加权。这一做法使计算过程简单清晰, 便于在设计阶段或单一情景分析中快速获得桥梁功能随时间演化的结果。

6.2.1~6.2.2 对于概率性分析, 抗震韧性曲线应由各损伤等级的功能恢复模型按其发生概率加权得到。 $Q(t \mid IM)$ 实质上是给定地震水平下桥梁功能随时间变化的“期望曲线”, 同时反映了该类构件可能处于不同损伤等级的不确定性, 比仅采用唯一确定性损伤情形更能代表整体韧性水平。地震动强度指标推荐采用地震动峰值加

速度（PGA）的理由主要是与现行桥梁抗震设计规范相衔接。

6.3 桥梁震后即时功能与等效关闭时间的计算

6.3.2 将桥梁在震后整个恢复期内的功能损失折算为一个“等效完全关闭”的时间 T_d ，如图 6-1 所示，其工程意义在于：无论桥梁是短时间完全封闭，还是长时间以低功能运行，均可通过同一指标量化为相当于完全封闭了多少时间。这样，管理部门在进行交通组织、绕行线路安排、应急物资调度以及经济损失评估时，可直接把 T_d 作为路网中断程度的核心输入，用于比较不同桥梁、不同修复方案和不同地震情景对交通系统的影响强弱，为制定抢险优先级和恢复目标提供直观、可操作的时间尺度。

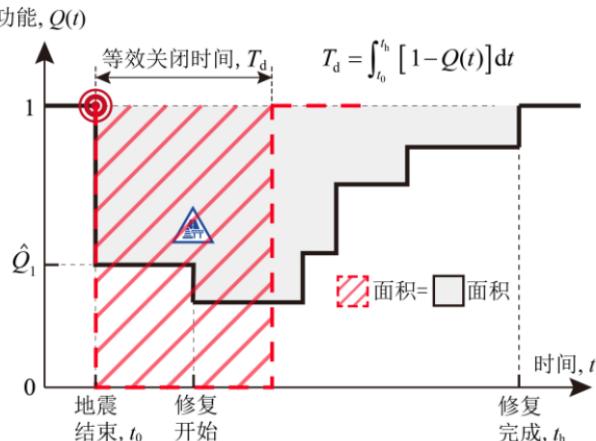


图 6-1 等效关闭时间定义

7 桥梁震后名义修复费用

7.1 一般要求

7.1.1 桥梁震后名义修复费用的基本内涵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。

7.1.2 名义修复费用只反映“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。

7.1.3 本条推荐在费用计算中采用确定性损伤判定，是为了在给定地震情景下明确对应的修复方案和工程量，避免概率性描述导致“期望费用”与具体工程决策混淆。但是，对于采用概率性损伤判定的情况，推荐将概率最大的损伤状态当作“确定性”损伤状态，以简化费用计算。通过基于代表性地震反应或现场勘察结果给出清晰的损伤等级，可以直接对应到相应修复措施和单价，便于形成可执行的修复费用清单，同时也便于与实际结算和造价管理体系衔接。

7.1.4 本条规定费用计算应以统一的构件修复方案表为依据，目的是将损伤等级与标准化修复措施建立一一对应关系，从而形成可直接套用的费用计算规则，减少主观性和工程间差异。当实

际工程中因技术条件、施工组织或管理要求采用与表 5.2.3 不同的修复方案时，应相应调整工程量和单价，并在评价或报告中加以说明，以保持费用指标的透明性和可追溯性。

7.1.5 本条提出同类构件“同时修复”的计算原则，是为了在韧性评价中采用统一、简化的假定：默认同类构件一次性组织施工，可共用施工准备和机械投入，从而用单一的工程量与单价反映费用水平。实际工程中若因交通组织、资金安排等原因必须分期修复，同类构件会产生重复进场、临时设施等额外成本，应在费用计算中进行修正，以更真实地反映修复策略对经济损失的影响。

7.2 桥梁震后名义修复费用的计算

7.2.1 该方法将费用分为两类：主梁修复费用计算和除主梁以外各构件的修复费用。之所以作此区分，是因为工程实践中主梁复位费用多按桥梁造价比例估算，与主梁（或关联的支座）损伤状态相关性相对较弱（如残余位移一旦超过某个较小的阈值即需纠偏，且费用相当）；相较之下，其他构件的修复费用与其多级损伤状态具有更强对应关系。为尽可能减小市场波动、临时资源稀缺、夜间施工溢价、通货膨胀等多种经济社会因素的复杂影响，桥梁震后修复费用采用名义修复费用与同期名义新建成本的比例表征。

对于除主梁外构件建造成本占比 $C_{RN,k}$ ，即第 k 类构件新建费用与全桥新建费用的比值，在没有相关数据的情况下，可参考下表调整确定。

表 7-1 某典型公路梁式桥各类构件建造成本占比

桥型	构件	建造成本占比
	钢管桩	24.4%
	桥墩	2.9%
	盖梁	4.6%
	桥台	7.4%
3×30m 简支桥面	主梁	45.6%
连续小箱梁桥， 桥宽 21m	伸缩装置	1.0%
	普通板式橡胶支座	3.0%
	台后搭板	2.6%
	桥面系（铺装、护栏）	8.5%
	合计	100%

7.2.3~7.2.4 构件名义修复费率和修复措施影响系数通过对“中交”系统以及全国各地省级公路和城市桥梁设计、施工、加固、养护等领域的 10 家单位调研确定。

8 桥梁抗震韧性等级评价

8.0.1 本标准适用对象为公路和城市梁式桥, 从抗震设防分类上主要属于《公路桥梁抗震设计规范 JTG/T 2231-01—2020》(简称《公路规范》)规定的 B 类或 C 类桥梁, 或者《城市桥梁抗震设计规范 CJJ 166-2011》(简称《城市规范》)和上海市《桥梁抗震设计标准 DG/TJ 08-2440-2023》(简称《上海地标》)规定的乙类或丙类桥梁。三本规范均采用两水准设计思想, 规定了受力构件(上、下部结构和连接传力构件)的性能状态和震后使用要求。E1 地震下均要求构件保持弹性, 震后可正常使用。E2 地震下, 《公路规范》要求 B 类或 C 类桥梁不致倒塌, 经临时加固后可供维持应急交通使用; 《城市规范》要求乙类桥梁有限损伤, 经抢修可恢复使用, 永久性修复后恢复正常运营功能, 要求丙类桥梁不产生严重的结构损伤, 经临时加固, 可供紧急救援车辆使用; 而《上海地标》要求乙类桥梁不超过“中小损伤”(即, 以墩柱为例, 从保护层混凝土开始剥落到大范围剥落, 基本对应本研究中构件损伤指标 DS_2 到 DS_3), 要求丙类桥梁不超过“中等损伤”(即保护层混凝土严重剥落以致钢筋可见, 基本对应本研究中构件损伤指标 DS_4)。此外, 三本规范均要求 A 类或甲类桥梁在震后不需修复或经简单修复可继续使用。鉴于此, 将表征桥梁震后功能的指标 \hat{Q}_1 及其对应的功能韧性分项指标 R_Q 划分为 4 个等级(表 8-1):

(1) 一级为“高韧性”, 构件性能指标为受力构件与伸缩缝均基本无损伤(DS_1), 不低于规范对 A 类或甲类桥梁的设防目标; 需指出, 现行桥梁抗震设计规范尚未对伸缩缝等影响通行功能的非受力构件提出明确的性能要求, 而面向韧性的桥梁抗震设计应

充分考虑这类构件的性能要求。

(2) 二级为“韧性”，受力构件损伤状态为 DS_2 或 DS_3 且伸缩缝为 DS_1 或 DS_2 (伸缩缝可能损伤)，基本对标 E2 地震下《上海地标》乙类桥梁“中小损伤”和《城市规范》乙类桥梁“有限损伤”的性能要求。

(3) 三级为“低韧性”，受力构件损伤状态主要为 DS_4 且伸缩缝为 DS_2 ，基本对应 E2 地震下《上海地标》丙类桥梁“中等损伤”性能要求，略高于《城市规范》丙类桥梁“不产生严重结构损伤”和《公路规范》C 类桥梁“不致倒塌”的要求。

(4) 四级为“无韧性”，任意一个受力构件完全损伤 (DS_5) 且伸缩缝损伤 (DS_2)，桥梁可能接近倒塌，基本需重建，对应规范中丁类或 D 类桥梁。

基于以上四级功能韧性分项指标及其对应的构件性能指标，结合构件功能恢复模型，通过对多组公路和城市梁式桥的抗震韧性分析测算，确定了表 8-1 中各等级的 \hat{Q}_1 阈值。

表 8-1 \hat{Q}_1 的分级及其对应的功能韧性分项指标与构件性能指标

分级	震后即时功能 \hat{Q}_1	韧性分项指标 R_Q	对应桥梁性能指标
一级（高韧性）	$0.9 \leq \hat{Q}_1 < 1$	$1 \leq R_Q < 2$	受力构件 DS_1 且伸缩缝 DS_1
二级（韧性）	$0.6 \leq \hat{Q}_1 < 0.9$	$2 \leq R_Q < 3$	受力构件 DS_2 或 DS_3 且伸缩缝 DS_1 或 DS_2
三级（低韧性）	$0.25 \leq \hat{Q}_1 < 0.6$	$3 \leq R_Q < 4$	受力构件 DS_4 且伸缩缝 DS_2
四级（无韧性）	$\hat{Q}_1 < 0.25$	$R_Q = 4$	受力构件 DS_5 且伸缩缝 DS_2

8.0.2 T_d 及其对应的时间韧性分项指标 R_T 也划分为四级（表 8-2），各级亦阈值通过与现行抗震设计规范的对标和典型桥梁的抗震韧性分析测算而确定。其中，一级（高韧性）的阈值（1 天）对应现行桥梁抗震设计规范里规定的 A 类或甲类桥梁 E2 地震下“无需修复或经简单修复后可正常使用”的震后使用要求。对于二级（韧性），测算发现，受力构件中小损伤状态下（ DS_2 或 DS_3 ） T_d 的范围约为 14~30 天，因此确定了以 30 天作为 T_d 二级的阈值。同理，三级（低韧性）的阈值（90 天）亦经过测算确定，即多个受力构件同时达到严重损伤（ DS_4 ）状态下， T_d 一般也不超过 90 天，而超过 90 天的情况下，受力构件通常会完全损伤（ DS_5 ），此时列为四级。

表 8-2 T_d 的分级及其对应的时间韧性分项指标与构件性能指标

分级	等效关闭时间 T_d (天)	韧性分项指标 R_T	对应桥梁性能指标
一级（高韧性）	$0 \leq T_d \leq 1$	$1 \leq R_T < 2$	受力构件 DS_1 且伸缩缝 DS_1
二级（韧性）	$1 \leq T_d < 30$	$2 \leq R_T < 3$	受力构件 DS_2 或 DS_3 且伸缩缝 DS_1 或 DS_2
三级（低韧性）	$30 \leq T_d < 90$	$3 \leq R_T < 4$	受力构件 DS_4 且伸缩缝 DS_2
四级（无韧性）	$T_d \geq 90$	$R_T = 4$	受力构件 DS_5 且伸缩缝 DS_2

8.0.3 C_R 及其对应的韧性分项指标 R_C 亦通过测算确定（表 8-3）。当受力构件和伸缩缝均未损伤时（ DS_1 ）， C_R 一般不超过 0.5%，故作为 C_R 一级（高韧性）的阈值。当受力构件有限损伤（ DS_2 或 DS_3 ）时， C_R 一般不超过 20%，故作为二级（韧性）的阈值。当受力构件严重损伤（ DS_4 ）且伸缩缝损伤（ DS_2 ）时， C_R 一般不超过 50%，

故作为三级（低韧性）的阈值。而当 $C_R > 50\%$ 时，受力构件往往完全损伤（DS₅）且伸缩缝损伤（DS₂），故列为四级。

表 8-3 C_R 的分级及其对应的费用韧性分项指标与构件性能指标

分级	震后修复费用 C_R	韧性分项指标 R_C	对应桥梁性能指标
一级（高韧性）	$0 \leq C_R < 0.5\%$	$1 \leq R_C < 2$	受力构件 DS ₁ 且伸缩缝 DS ₁
二级（韧性）	$0.5\% \leq C_R < 20\%$	$2 \leq R_C < 3$	受力构件 DS ₂ 或 DS ₃ 且伸缩缝 DS ₁ 或 DS ₂
三级（低韧性）	$20\% \leq C_R < 50\%$	$3 \leq R_C < 4$	受力构件 DS ₄ 且伸缩缝 DS ₂
四级（无韧性）	$C_R \geq 50\%$	$R_C = 4$	受力构件 DS ₅ 且伸缩缝 DS ₂

8.0.4 本条规定以加权综合韧性指标 R_w 作为桥梁整体抗震韧性等级划分的直接依据，将功能、时间和费用三个分项指标统一为综合性单一量化指标，有利于不同桥梁方案、不同地震等级下的直观对比，避免仅依据各分项指标导致评价结论分散、不易决策的问题。加权系数 λ_Q 、 λ_T 、 λ_C 之和为 1，反映分项韧性指标在加权综合韧性指标中的相对重要性。结合桥梁工程实际，从设计与加固的角度看，功能韧性分项指标可通过结构体系优选、冗余设计等手段控制，因此赋予较大的权重 0.5；时间韧性受组织管理、抢修资源配置等因素影响相对较大，但仍可通过震后修复预案加以改善，权重取 0.3；费用韧性不仅与结构设计有关，还受价格波动和外部经济环境影响，工程设计阶段可控性相对较弱，故权重取 0.2。上述推荐取值体现以功能保障为主、兼顾恢复效率和经济性的工程导向。