

在役公路桥梁抗震性能排查与评估
技术规范

Technical Specifications for Seismic Performance Investigation and Evaluation of In-service Highway Bridges

2025 - 09 - 12 发布

2025 - 11 - 11 实施

目 次

前言 II

引言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本规定 2

5 桥梁抗震性能排查 5

 5.1 一般规定 5

 5.2 防落梁评估内容 5

 5.3 强度延性评估内容 9

 5.4 排查结果筛选与排序 11

6 桥梁抗震性能评估 12

 6.1 一般规定 12

 6.2 建模与分析原则 13

 6.3 地震作用 13

 6.4 分析方法 14

 6.5 结构性能劣化分析 15

 6.6 桥墩抗震性能评估 18

 6.7 基础抗震性能评估 22

 6.8 关键装置抗震性能评估 23

附录 A（规范性） 公路桥梁抗震性能评估检查防落梁评估细则 25

附录 B（规范性） 公路桥梁抗震性能评估检查强度延性评估细则..... 27

附录 C（资料性） 条文说明 28

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由宁夏回族自治区交通运输厅提出、归口并组织实施。

本文件起草单位：宁夏大学、宁夏公路管理中心、宁夏交投高速公路管理有限公司、宁夏交建交通科技研究院有限公司、河北工业大学、宁夏公路勘察设计院有限公司、中交公路规划设计院有限公司、宁夏公路管理中心银川分中心、宁夏公路管理中心中卫分中心、宁夏中铁建宁东路桥投资发展有限公司。

本文件主要起草人：惠迎新、丁小平、王晓东、倪静哲、董炜、王东升、张宏伟、丁玉录、吕佳乐、程月、王婧、王勇峰、张晓星、李刚、蒙军、黄建云、杨耀生、任克峰、刘红强、马成、侯永刚、陈飞、王万辉、张举、柏辉、柴继昶、马熙伦、贾斌、李瑞杰、李正武、马杨、罗廷赤。

引 言

公路桥梁是公路网的关键节点工程，若在地震中遭受严重破坏，将会导致抗震救灾工作整体进展缓慢甚至陷入瘫痪，进而造成惨重的社会经济损失和人员伤亡。根据“2023年交通运输行业发展统计公报”，我国目前已建成使用的公路桥梁约107.93万座，服役较长年限的旧桥占有较大比例。在役公路桥梁在外界环境作用及荷载作用下产生损伤，随着材料性能的劣化，构件性能逐渐衰退，桥梁结构具有较高的地震易损性。2009年5月1日施行的《中华人民共和国防震减灾法》，对于防震减灾工作，实行预防为主、防御与救助相结合的方针，对我国的防震减灾工作提出了更为明确的要求和相应的具体规定。近年来国内外桥梁抗震性能评价、加固的实践和震害经验表明，对在役公路桥梁进行抗震性能评价，并对不满足评价要求的桥梁采取适当的抗震对策，是减轻地震灾害的重要途径。因此，针对在役公路桥梁抗震性能开展系统有效的评估具有迫切性和必要性。

为确保生命线工程中公路桥梁的抗震安全，以及震后桥梁满足预期的抗震性能要求，JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》规定：公路桥涵应进行抗震防灾减灾设计，地震作用应符合现行JTG B02《公路工程抗震规范》和JTG/T B02-01《公路桥梁抗震设计细则》的规定。JTG B02—2013《公路工程抗震规范》和JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》主要适用于公路新建桥梁的抗震设计；JTG/T 2231-02-2021《公路桥梁抗震性能评价细则》规范了在役公路桥梁抗震性能评估及为抗震加固服务，较少涉及抗震排查内容。对于桥梁抗震性能，在役桥梁区别于新建桥梁，主要包括：①在役公路桥梁随服役期增加，其结构构件性能衰退、耐久性降低，部分桥龄较大的桥梁已接近设计使用年限，抗震性能可能很难满足要求，但其预服役年限很短，在后续服役期内发生设防地震可能性较小，对该类桥梁进行抗震加固不经济、不合理，故应在抗震评估中考虑桥梁预服役期；②在役公路桥梁存在材料性能劣化问题，导致结构承载能力、耐久性的衰退，对其抗震性能有较大影响，需通过合理方法进行检测并在抗震评估中适当考虑；③我国公路桥梁建设已由建设期转向建养并重期，在役桥梁保有量远远大于新建桥梁数量，由于在役桥梁抗震性能排查与评估相关规范较少，导致评价过程中良莠不齐，技术指标要求不统一，评价流程不统一，缺乏标准化的流程与方法保障在役桥梁抗震安全性。本规范立足于我国在役桥梁实际情况，在广泛吸收、消化国内外桥梁抗震排查和评价成熟技术基础上，进一步借鉴美国AASHTO规范、Caltrans准则及公路桥梁震害与修复经验，形成在役公路桥梁抗震性能排查与评估技术规范，作为开展重要交通生命线的桥梁抗震安全排查、评估及指导加固的依据。

本规范涵盖在役桥梁抗震排查与评估方法、排查范围、评估参数、评估指标、实施流程等多方面内容，可准确、科学合理地评价桥梁结构的抗震性能，为在役公路桥梁抗震性能排查、评估及加固提供依据。

本文件共6章，3篇附录，主要包括：1 范围、2 规范性引用文件、3 术语和定义、4 基本规定、5 桥梁抗震性能排查、6 桥梁抗震性能评估，附录A 公路桥梁抗震性能评估检查防落梁评估表、附录B 公路桥梁抗震性能评估检查强度延性评估表、附录C 条文说明。

在役公路桥梁抗震性能排查与评估 技术规范

1 范围

本文件适用于基本地震动峰值加速度不大于0.4g地区，对应地震烈度IX度区，单跨跨径不超过150m的在役公路混凝土梁式桥的抗震性能评估，铁路和市政桥梁可供参考。采用减隔震设计的桥梁，可参照本规范给出的抗震性能排查与评估原则进行评价，不再进行延性构造细节设计排查和延性性能评估。

本文件规定了在役公路桥梁抗震性能排查与评估技术规范的适用范围、术语和定义、在役桥梁抗震排查与评估方法、排查范围、评估参数、评估指标、实施流程等多方面内容，为宁夏地区在役公路桥梁抗震性能排查、评估及加固提供依据。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB18306 中国地震动参数区划图
- GB50010 混凝土结构设计规范
- JTG/T 2231—01 公路桥梁抗震设计规范
- JTG/T 2231—02 公路桥梁抗震性能评价细则
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG B02 公路工程抗震规范
- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准
- JTG/T J21 公路桥梁承载能力检测评定规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

抗震性能排查 seismic performance screening

主要是依据历史地震桥梁震害经验，采用定性方法为主联合少量简单计算方法，快速获得桥梁的抗震能力及薄弱环节的估计，目的是为确定抗震性能评估及加固的优先级服务。

3.2

抗震性能评估 aseismic performance evaluation

通过检查在役桥梁的设计、施工质量、运营维护记录和现状，按规定的抗震设防要求，综合考虑结构构造、构件力学指标、变形等因素，对其在相应设防水准地震作用下的构件和体系抗震性能及安全性进行的评估。

3.3

抗震设防地震动参数 ground motion parameter for aseismic fortification

按国家规定的权限批准作为给定区域或场地抗震设防依据的地震动参数。

3.4

地震危险性 seismic hazard

在未来给定时间内（一般采用50年或100年），给定区域或场地内地震动参数超过给定值的概率。

3.5

基本地震动 basic ground motion

相应于50年超越概率10%（相当于地震重现期为475年）Ⅱ类场地的地震动。

3.6

振型贡献率 mode mass ratio

振型质量与振型参与系数平方的乘积为常数，这个常数与体系总质量的比为振型贡献率。

3.7

E1 地震作用 earthquake action E1

地震重现期较短的地震作用。

3.8

E2 地震作用 earthquake action E2

地震重现期较长的地震作用。

4 基本规定

4.1 抗震设防地震动参数应采用 GB18306 地震动参数，对同期已完成专门地震安全性评价的桥址，应采用批准的地震动参数值。

4.2 根据在役公路桥梁结构的重要性，应按表 1 将桥梁分为 A 类、B 类、C 类、D 类四个抗震设防类别。

表1 桥梁抗震设防类别

桥梁抗震设防类别	桥梁特征
A类	单跨跨径超过150m的特大桥
B类	单跨跨径不超过150m的高速公路、一级公路上的桥梁，单跨跨径不超过150m的二级公路上的特大桥、大桥
C类	二级公路上的中桥、小桥，单跨跨径不超过150m的三、四级公路上的特大桥、大桥
D类	三、四级公路上的中桥、小桥

4.3 各抗震设防类别在役桥梁的抗震设防目标应符合表 2 的规定。

表2 各设防类别桥梁的抗震设防目标

桥梁抗震设防类别	设防目标	
	E1地震作用	E2地震作用
A类	一般不受损坏或不需修复可继续使用	可发生局部轻微损伤，不需修复或经简单修复可继续使用
B类	一般不受损坏或不需修复可继续使用	应保证不致倒塌或产生严重结构损伤，经临时加固后可供维持应急交通使用
C类	一般不受损坏或不需修复可继续使用	应保证不致倒塌或产生严重结构损伤，经临时加固后可供维持应急交通使用
D类	一般不受损坏或不需修复可继续使用	-

4.4 各类桥梁的抗震重要性系数 C_i ，按表 3 确定。

表3 地震动水平与 C_i 的对应关系

桥梁抗震设防类别	E1地震作用	E2地震作用
A类	1.0	1.7
B类	0.43 (0.5)	1.3 (1.7)
C类	0.34	1.0
D类	0.23	-
注：高速公路和一级公路上的大桥、特大桥，其抗震重要性系数取B类括号内的值。		

- 4.5 在役公路桥梁抗震性能评估应在综合考虑结构重要性、地震危险性水平和地震地质灾害等基础上分为桥梁抗震性能排查和桥梁抗震性能评估两部分内容。
- 4.6 桥梁抗震性能排查以桥梁结构的防落梁评估和强度延性评估为主，通过定量计算准确、快速的筛选出抗震性能不符合要求的桥梁。
- 4.7 桥梁抗震性能评估以考虑桥梁结构形式、构件实际材料强度、截面尺寸等细部参数的抗震计算分析、构件强度和变形检算为主。
- 4.8 应对符合下列情况的在役桥梁进行抗震排查和性能评估：
- a) 服役时间较长，材料性能劣化显著，抗震性能可能潜在降低的桥梁；
 - b) 未采用现行 JTG/T 2231-01、GB 18306 等相关规范、标准设计的桥梁；
 - c) 遭遇重大自然灾害或意外事件，桥梁结构构件出现损伤，抗震性能可能潜在降低的桥梁；
 - d) 功能属性发生变化的桥梁，如路线重新规划引起的城市桥梁转变公路桥梁、低等级道路转变高等级道路桥梁等；
 - e) 行业单位拟实施整体改造、加固或性能提升的桥梁。
- 4.9 属于下列情况的桥梁可不需要进行抗震排查和性能评估：
- a) 临时性桥梁；
 - b) 已经封闭且不跨越仍在服役的公路、铁路和水运线路的桥梁；
 - c) 经技术状况、承载能力、经济等进行常规鉴定属于危桥且已列为改建或重建计划的桥梁；
 - d) 依现行 JTG/T 2231-01、GB18306 等相关规范、标准设计，且未发生损伤的桥梁。
- 4.10 桥梁的抗震性能排查与评估可采用图 1 的流程进行：
- a) 确定需要排查的线路和桥梁的范围，筛选需要开展抗震性能排查与评估的桥梁；

- b) 收集桥梁的基本概况、勘察设计资料、施工和竣工验收的相关原始资料、施工质量和维护状况等，维护状况包括运营以来历次维修和改造资料、灾害事故报告、检查测试报告等；
- c) 调查桥梁现状与原始资料相符合的程度，查找相关的结构构件缺陷，并根据评价需要进行现场调查；
- d) 开展在役桥梁的抗震性能排查工作，主要包括防落梁评估和强度延性评估；
- e) 根据抗震性能排查结果，确定需要进行抗震性能评估的桥梁，并根据抗震设防分类、抗震性能目标和地震危险性水平进行在役桥梁各关键构件强度、变形的检算；
- f) 根据在役公路桥梁抗震性能排查和评估结果，进行抗震加固（防落梁加固、细部构件加固等），并编制抗震性能排查与评估报告。

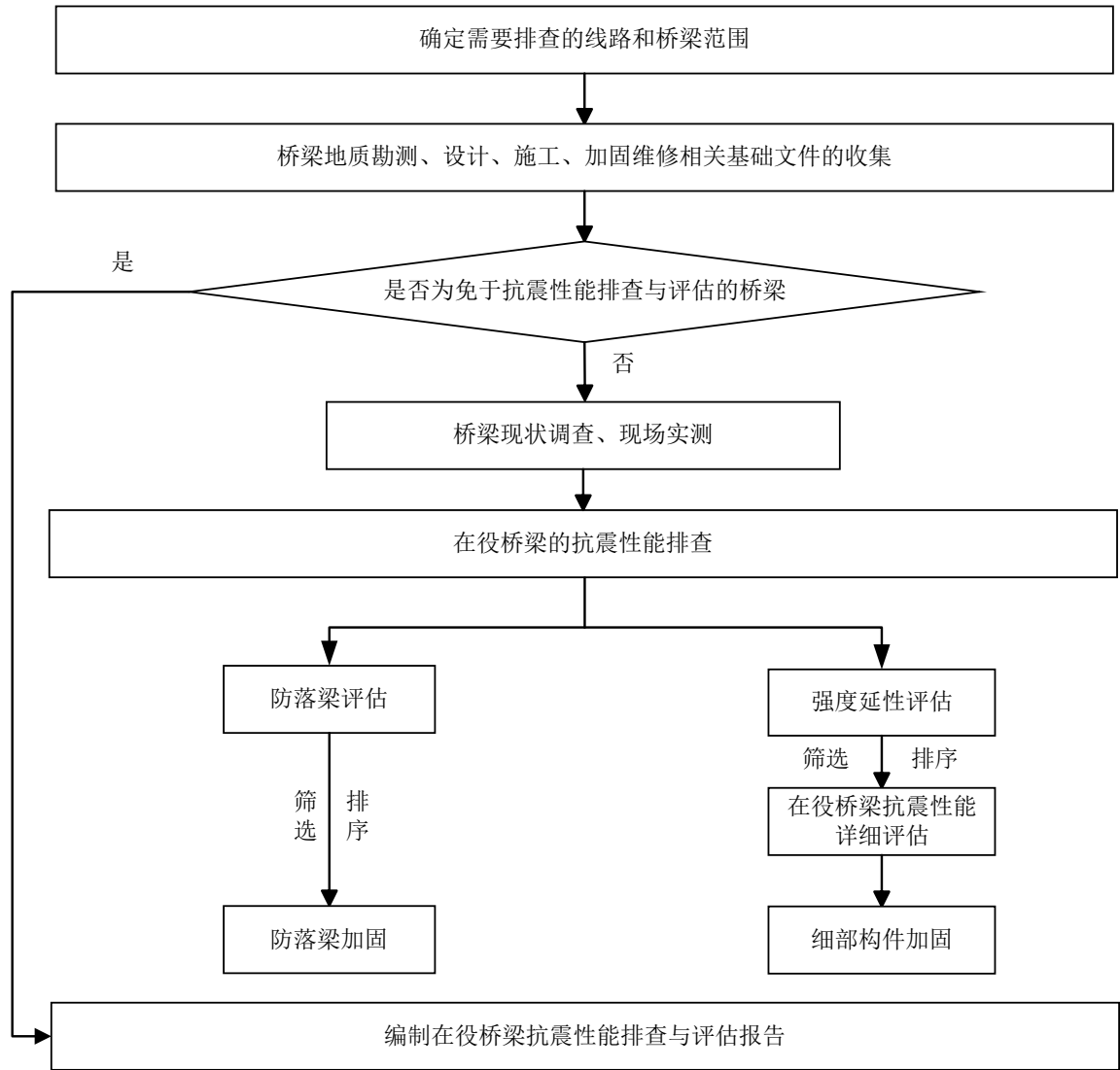


图1 在役公路桥梁抗震性能排查与评估基本流程图

4.11 公路桥梁抗震性能排查报告应包括以下内容：

- a) 线路情况及桥梁排查范围；
- b) 桥梁基本信息调查与技术标准；
- c) 桥梁抗震性能排查（防落梁评估、强度延性评估）；
- d) 桥梁排查结果与分析筛选；

- e) 结论及建议。
- 4.12 公路桥梁抗震性能评估报告应包括以下内容：
- a) 工程概况；
 - b) 桥梁地震动参数；
 - c) 有限元建模及结构动力特性分析；
 - d) 桥梁结构地震响应分析；
 - e) 桥梁结构抗震性能验算；
 - f) 结论及建议。
- 4.13 对抗震性能不符合要求的桥梁，可根据其不符合要求的程度、部位对结构整体抗震性能影响的大小，以及有关的抗震缺陷等实际情况，结合使用要求、路线规划和加固难易等因素的分析，提出相应的维修、加固、改变用途或更新等抗震减灾对策。

5 桥梁抗震性能排查

5.1 一般规定

- 5.1.1 在役桥梁抗震性能排查分为防落梁评估和强度延性评估。防落梁评估主要针对桥址环境、桥梁结构特点及桥梁抗震构造措施进行评估；强度延性评估主要针对桥址环境、桥梁结构特点及桥墩延性构造细节进行评估。
- 5.1.2 通过公路桥梁抗震性能防落梁评估和强度延性评估检查表（见附录 A、附录 B），根据评估结果和桥梁重要性程度，采用层次分析法进行筛选与排序，确定需要进行加固和抗震性能详细评估的桥梁。
- 5.1.3 在役公路桥梁抗震性能排查中各计算参数宜以实测取值；无法进行实测时，可按相关标准取值。

5.2 防落梁评估内容

- 5.2.1 防落梁评估检查表主要包括桥址环境、结构系统、防落梁措施细节三部分内容。根据各评估子项的配分和权重得到不同评估内容的评分，并统计求和即为所排查桥梁的综合得分，评分越高代表安全性越高。
- 5.2.2 对防落梁评估中的桥址环境各项指标进行评价时，具体评价指标包括近断层桥梁、桥梁工程场地类别、相邻桥墩间地表土质变化、地基土液化可能性等内容。
- 5.2.3 对于桥梁结构是否考虑近断层地震动，应按表 4 进行判别。

表4 近场地震及远场地震判别表

断层分类	判别依据	权重
近场地震	断层距不大于10km	0
远场地震	断层距大于10km	1.0

- 5.2.4 桥梁工程场地类别，根据土层平均剪切波速和场地覆盖土层厚度可划分为四类，其中I类分为I₀、I₁两个亚类，计算权重应按表 5 确定。

表5 桥梁工程场地类别划分表

岩石的剪切波速或 土层平均剪切波速 (m/s)	场地类别				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
$v_s > 800$	0	-	-	-	-
$800 \geq v_s > 500$	-	0	-	-	-
$500 \geq v_s > 250$	-	<5	≥ 5	-	-
$250 \geq v_s > 150$	-	<3	3~50	>50	-
$v_s \leq 150$	-	<3	3~15	>15, ≤ 80	>80
权重	1.0	1.0	0.67	0.33	0

注：表中数据为场地覆盖土层厚度（m）， v_s 表示岩石的剪切波速。

5.2.5 对于相邻桥墩间地表土质变化程度，应按大、中、小、无四个等级进行评价，对应权重分别为0、0.33、0.67、1.0。

5.2.6 地基土液化等级，根据不同判别深度的液化指数可划分为四个类别，计算权重应按表6确定。

表6 地基土液化等级

液化等级	判别深度为15m时的液化指数	判别深度为20m时的液化指数	权重
无	0	0	1.0
轻微	$0 < I_{LE} \leq 5$	$0 < I_{LE} \leq 6$	0.67
中等	$5 < I_{LE} \leq 15$	$6 < I_{LE} \leq 18$	0.33
严重	$I_{LE} > 15$	$I_{LE} > 18$	0

注： I_{LE} 表示液化指数。

5.2.7 对防落梁评估中的结构系统各项指标进行评价时，具体评价指标包括相邻振动单元结构系统差异性、挂梁设置、斜桥（弯桥）情况、基础裸露程度等内容。

5.2.8 评价相邻两振动单元结构系统差异性，对于简支梁桥，相邻两振动单元的周期比 α 应按式（1）计算；对于连续梁桥，相邻两振动单元的周期比 β 应按式（2）计算：

$$\alpha = \frac{T_{L1}}{T_{L2}} = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\beta = \frac{T_{L1}}{T_{L2}} = \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{G_1}{G_2}\right)^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots(2)$$

式中：

- α —简支梁桥相邻两振动单元的周期比；
 - L_1 、 L_2 —相邻两振动单元跨度， $L_1 > L_2$ ；
 - H_1 、 H_2 —对应于 L_1 与 L_2 的桥墩高度；
 - β —连续梁桥相邻两振动单元的周期比；
 - C_1 、 C_2 —相邻两振动单元一联的长度， $C_1 > C_2$ ；
 - G_1 、 G_2 —对应于联长 C_1 与 C_2 的桥墩高度3次方总和开3次方。
- 相邻两振动单元的周期比临界值及计算权重应按表7确定。

表7 周期比临界值分类

量化等级	周期比临界值	权重
无	$\alpha \text{ or } \beta < 1.1$	1.0
小	$1.1 \leq \alpha \text{ or } \beta < 1.25$	0.67
中	$1.25 \leq \alpha \text{ or } \beta < 1.5$	0.33
大	$\alpha \text{ or } \beta \geq 1.5$	0

5.2.9 对桥梁挂梁设置情况进行评价时，如有挂梁，计算权重取 0；如无挂梁，计算权重取 1.0。

5.2.10 对梁端与桥墩或桥台的夹角 θ° 进行评价时，计算权重应按下式计算：

$$w = 1 - \theta^\circ / 90^\circ \leq 1.0 \cdots \cdots \cdots (3)$$

式中：
 w —计算权重；
 θ° —桥墩或桥台支承连接线与垂直行车方向的夹角。

5.2.11 对曲线桥曲率半径进行评价时，计算权重应按下式确定：

$$w = 1 - \varphi / 180^\circ \cdots \cdots \cdots (4)$$

式中：
 φ —曲线梁的中心角。

5.2.12 对桥梁基础裸露程度进行评价时，计算权重应按表 8 确定。

表8 基础裸露情况量化表

量化等级	桩基础	沉箱基础/扩大基础	权重
严重	$L_f \leq 50\%$	$L_f \leq 30\%$	0
较严重	$50\% < L_f < 90\%$	$30\% < L_f < 75\%$	0.33
轻微	$90\% \leq L_f < 100\%$	$75\% \leq L_f \leq 90\%$	0.67
无裸露	$L_f = 100\%$	$90\% < L_f \leq 100\%$	1.0

注： L_f 表示基础入土剩余长度所占原设计长度百分比。

5.2.13 对防落梁评估中的防落梁措施细节各项指标进行评价时，具体评价指标包括支座状况、墩梁支承长度、防落梁措施、梁端防撞措施等内容。

5.2.14 对于支座技术状况，应检查桥梁支座是否完好，按 JTG/T H21 第 5 章的有关规定确定其评定等级 1~5，不同评定等级对应的计算权重应按表 9 确定。

表9 公路桥梁跨越类型分类

评定等级	评价	权重
1类	完好	1.0
2类		
3类	较好	0.67
4类	不良	0.33
5类	极差	0

5.2.15 对墩梁支承长度进行评价时，计算权重应按下式计算：

当 $a > a_e$ 时， $w = 1 - \frac{a - a_e}{a/2} \leq 1.0$(5)

当 $a \leq a_e$ 时， $w = 1.0$(6)

式中：

a_e —实际支承长度；

a —防落梁长度规范规定值。依据《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01）的规定，简支梁桥和连续梁桥 a 值按下式计算：

1) 直桥最小支承宽度计算公式：

$a \geq 50 + 0.1L + 0.8H + 0.5L_k$(7)

2) 斜桥最小支承宽度计算公式（取式（7）与式（8）计算结果最大值为规定值）：

$a \geq 50L_\theta [\sin\theta - \sin(\theta - \alpha_E)]$(8)

式中：

L 、 L_θ —一联上部结构总长度（m）；

H —支承一联上部结构桥墩的平均高度（m），桥台的高度取值为0；

L_k —一联上部结构的最大单孔跨径（m）；

θ —斜交角（°）；

α_E —极限脱落转角（°），一般取5°。

3) 弯桥最小支承宽度计算公式（取式（7）与式（10）计算结果最大值为规定值）：

$\frac{115}{\varphi} \cdot \frac{1 - \cos \varphi}{1 + \cos \varphi} > \frac{b}{L}$(9)

$a \geq \delta_E \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi/2)} + 30$(10)

$\delta_E = 0.5\varphi + 70$(11)

式中：

δ_E —上部结构端部向外侧的移动量（cm）；

L —一联上部结构中心弧线长度（m）；

φ —曲线梁的中心角（°）。

当实际有效防落梁长度 a_e 不足 $a/2$ 时，权重取0；当实际有效防落梁长度 a_e 大于规范规定防落梁长度 a 时，即防落梁长度满足规范要求的情况下，即落梁的可能性很低，此时权重取1.0。

5.2.16 对防落梁措施进行评价时，应检查纵桥向和横桥向有无防落梁设施，计算权重应按表 10 确定。

表10 防落梁措施评价表

序号	指标	权重
1	纵横桥向均无防落梁设施	0
2	仅纵桥向无防落梁设施	0.25
3	仅横桥向无防落梁设施	0.50
4	纵横桥向均有防落梁设施	1.0
注：（1）当上部结构支承在独柱墩上且不设置盖梁时，仅纵向设防落梁设施，权重降至0.25； （2）防落梁设施功能不良时，权重减小0.25； （3）当 $a_e \geq 1.2a$ ，纵桥向视为具有防落梁设施且功能完好。		

5.2.17 对梁端防撞措施进行评价时，有梁端防撞措施，计算权重取 1.0；无梁端防撞措施，计算权重取 0。

5.2.18 若受评桥梁具有上述未考虑的异常现象，如桥墩存在倾斜现象、桥墩工作状况较差、梁端与盖梁或帽梁边缘混凝土有异常状况等，可依据实际状况酌情给予适当权重。

5.2.19 对最小支承宽度不满足规范要求的桥梁，可通过桥墩盖梁拓宽等延长支承面方式进行抗震加固；对纵、横向限位装置不满足规范要求的桥梁，可采用挡块、螺栓连接或钢夹板连接等防止落梁的措施进行抗震加固。

5.2.20 防落梁评估检查表分数低于或等于 40 分的桥梁，表明其抗震性能极差，发生落梁的可能性很大；分数介于 40 分至 70 分的桥梁，表明其抗震能力较差，有落梁的可能性；分数大于或等于 70 分的桥梁，表明其抗震性能较好，发生落梁的可能性极小，不进行筛选和排序。

5.3 强度延性评估内容

5.3.1 强度延性评估检查表主要包括桥址环境、结构系统、延性构造细节三部分内容。根据各评估子项的配分和权重得到不同评估内容的评分，并统计求和即为所排查桥梁的综合得分，评分越高代表安全性越高。

5.3.2 对强度延性评估中的桥址环境各项指标进行评价时，具体评价指标包括近断层桥梁、桥梁工程场地类别、地基土液化可能性等内容，应分别按表 4、表 5 和表 6 确定。

5.3.3 对强度延性评估中的结构系统各项指标进行评价时，具体评价指标包括梁端与桥墩或桥台夹角、桥墩高宽比、振动单元中桥墩高差比、桥墩静不定度、基础裸露程度等内容。

5.3.4 对梁端与桥墩或桥台的夹角 θ° 进行评价时，应按式（3）计算。

5.3.5 对桥墩高宽比 R 进行评价时，计算权重应按下式确定：

$$\text{当 } R \leq 2.5 \text{ 时, } w = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{当 } 2.5 < R < 5 \text{ 时, } w = 1 - \frac{5-R}{2.5} \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{当 } R \geq 5 \text{ 时, } w = 1.0 \dots\dots\dots (14)$$

式中：

R —桥墩高宽比。

5.3.6 对震动单元中桥墩高差比进行评价时，计算权重应按下式确定：

$$\text{当 } r \geq 1.5 \text{ 时, } w = 0 \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{当 } 1.0 \leq r < 1.5 \text{ 时, } w = 1 - (-2 + 2r) \dots\dots\dots (16)$$

式中：

r —桥墩高差比。

5.3.7 桥墩静不定度，应按两向均静定、一向具静不定和两向均静不定三个等级进行评价，计算权重分别为 0、0.5、1.0。

5.3.8 对基础裸露程度进行评价时，应按严重、较严重、轻微和无裸露四个等级，根据表 8 进行判别。

5.3.9 对强度延性评估中的延性构造细节各项指标进行评价时，具体评价指标包括塑性铰区域箍筋细部、最小体积配箍率、纵向钢筋配筋率、纵向钢筋锚固及搭接长度、塑性铰区纵筋搭接情况、桥墩与基础劣化程度等内容。

5.3.10 对塑性铰区域箍筋细部进行评价，对抗震设防烈度为Ⅶ度及Ⅶ度以上地区的桥梁，墩柱潜在塑性铰区域加密箍筋的配置应符合以下要求。

- a) 加密区的长度不应小于等效塑性铰长度 L_p 或弯曲方向截面尺寸的 1.5 倍或墩柱上弯矩超过最大弯矩 75%的范围；当墩柱的高度与横截面短边宽度之比小于 2.5 时，箍筋加密区的长度应取

墩柱全高。对于桩基直径与桥墩直径相同的桩柱式桥墩，箍筋加密区应延伸至桩位处最大冲刷线以下 3 倍桩径处。

- b) 加密区箍筋沿墩高纵向最大间距不应大于 10cm 或 $6d_s$ 或 $b/4$ ；其中 d_s 为墩柱纵向钢筋的直径， b 为墩柱横截面的短边宽度。
- c) 箍筋的直径不应小于 10mm。
- d) 螺旋式箍筋接头应采用对接，矩形箍筋端部应有 135°弯钩，弯钩伸入核心混凝土内的长度应大于 6 倍箍筋直径，且不小于 10cm。
- e) 加密区箍筋肢距不宜大于 25cm；截面宽度内采用拉结筋时，其至少一端采用 135°弯钩，弯钩伸入核心混凝土内的长度应大于 6 倍箍筋直径，且不小于 10cm。
- f) 塑性铰加密区域配置的箍筋应延续到盖梁和承台内，延伸到盖梁和承台的距离应按施工允许的最大距离确定。

5.3.11 对最小体积配箍率进行评价时，对于基本地震动峰值加速度等于及大于 0.1g 的地区，圆形、矩形墩柱潜在塑性铰区域内加密箍筋的最小体积配箍率 $\rho_{s,min}$ ，应按式 (17)、式 (18) 确定。对于基本地震动峰值加速度等于及大于 0.4g 的地区，圆形、矩形墩柱潜在塑性铰区域内加密箍筋的最小体积配箍率 $\rho_{s,min}$ 应比基本地震动峰值加速度等于及大于 0.1g 的地区适当增加，以提高其延性能力。此外，墩柱潜在塑性铰区域以外的箍筋体积配箍率不应小于塑性铰区域加密箍筋体积配箍率的 50%。

圆形截面：

$$\rho_{s,min} = [0.14\eta_k + 5.84(\eta_k - 0.1)(\rho_t - 0.01) + 0.028] \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \geq 0.004 \dots\dots\dots (17)$$

矩形截面：

$$\rho_{s,min} = [0.1\eta_k + 4.17(\eta_k - 0.1)(\rho_t - 0.01) + 0.02] \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \geq 0.004 \dots\dots\dots (18)$$

式中：

$\rho_{s,min}$ —对于矩形截面为截面计算方向配箍率，对于圆形截面为截面螺旋箍筋的体积配箍率；

η_k —轴压比，为结构的最不利组合轴向压力与柱的全截面面积和混凝土轴心抗压强度设计值乘积之比值；

ρ_t —纵向配筋率；

f_{ck} —混凝土抗压强度标准值 (MPa)；

f_{yh} —箍筋抗拉强度设计值 (MPa)。

5.3.12 纵向钢筋配筋率，应按 JTG/T 2231-01 的抗震规定进行评价。

5.3.13 纵筋锚固及搭接长度，应按 JTG/T 2231-01 的抗震规定进行评价：

- a) 墩柱纵向钢筋宜延伸至盖梁顶面与承台底面；
- b) 墩柱纵向钢筋的锚固和搭接长度应在 JTG 3362 要求的基础上增加 $10d_s$ ， d_s 为纵向钢筋的直径；
- c) 塑性铰区外纵向钢筋连接时，区段内连接受力钢筋的截面面积占总截面面积的百分数应满足 JTG 3362 的要求，相邻两根纵向钢筋的连接处至少应错开 60cm 以上；
- d) 桥墩伸入盖梁和承台的束筋应增加锚固长度，对于由 2 根钢筋组成的束筋应增加 20% 的锚固长度，对于由 3 根钢筋组成的束筋应增加 50% 的锚固长度，4 根及 4 根以上钢筋组成的束筋不能在延性构件中使用。

5.3.14 对塑性铰区纵筋搭接情况进行评价，有搭接情况时，计算权重取 0；无搭接情况时，计算权重取 1.0。

5.3.15 桥墩与基础劣化程度，应按 JTG/TH21 第 9 章的有关规定确定其评定等级 1~5，不同评定等级对应的计算权重应按表 11 确定。

表11 公路桥梁跨越类型分类

评定等级	评价	权重
1类	轻微	1.0
2类		
3类	一般	0.67
4类	差	0.33
5类	严重	0

5.3.16 若受评桥梁具有上述未考虑的异常现象,比如支承强度不足或支承存在损坏状况、桥墩垂直度、跨度差距大等不良现象,可根据桥梁现状进行综合研判其对强度延性发展的影响程度,给予适当的权重。

5.3.17 强度延性评估检查表分数低于或等于 40 分的桥梁,表明其抗震性能极差,应尽快进行抗震性能详细评估;分数介于 40 分至 70 分的桥梁,表明其抗震性能较差,应进行抗震性能详细评估进一步确认;分数大于或等于 70 分的桥梁,表明其抗震性能较好,不进行筛选和排序。

5.4 排查结果筛选与排序

5.4.1 筛选与排序主要考虑桥梁抗震设防类别、地震危险性水平、预服役期类别与跨线桥情况 4 个重要因素对桥梁优先级别的影响,并赋予不同的权重值。

5.4.2 桥梁抗震设防类别应按表 12 进行分类和权重赋值:

表12 桥梁抗震设防分类

指标	桥梁抗震设防类别	适用范围	权重
I _{sslb1}	A类	单跨跨径超过150m的特大桥	0
I _{sslb2}	B类	单跨跨径不超过 150m 的高速公路、一级公路上的桥梁 单跨跨径不超过150m的二级公路上的特大桥、大桥	0.3
I _{sslb3}	C类	二级公路上的中桥、小桥 单跨跨径不超过150m的三、四级公路上的特大桥、大桥	0.6
I _{sslb4}	D类	三、四级公路上的中桥、小桥	1.0

5.4.3 地震危险性水平应按表 13 进行分类和权重赋值:

表13 地震危险性水平与地震动峰值加速度关系

指标	地震危险性水平	设计基本地震加速度 (A)	权重
I _{wxsp1}	I	A≤0.05g	1.0
I _{wxsp2}	II	0.05g<A≤0.15g	0.6
I _{wxsp3}	III	0.15g<A≤0.3g	0.3
I _{wxsp4}	IV	A>0.3g	0

5.4.4 预服役期类别应按表 14 进行分类和权重赋值:

表14 公路桥梁预服役期分类

指标	预服役期类别	剩余使用年限百分比	权重
I_{fylb1}	ESL1（短期）	10%~25%	1.0
I_{fylb2}	ESL2（中期）	25%~60%	0.6
I_{fylb3}	ESL3（中长期）	60%~80%	0.3
I_{fylb4}	ESL4（长期）	≥80%	0

5.4.5 公路桥梁跨越类型应按表 15 进行分类和权重赋值：

表15 公路桥梁跨越类型分类

指标	跨越类型	权重
I_{kylx1}	高速公路、铁路	0
I_{kylx2}	一级公路	0.2
I_{kylx3}	二级公路	0.5
I_{kylx4}	三、四级公路	0.7
I_{kylx5}	非道路	1.0

5.4.6 综合考虑桥梁重要性等影响因素，对已完成防落梁初步评估的桥梁进行筛选，并依据评估结果 R_{pc} 进行排序，确定桥梁进行防落梁加固的优先顺序。

$$R_{pc} = I_{pc} \times 50 + I_{ssl b} \times 15 + I_{wxsp} \times 15 + I_{fylb} \times 10 + I_{kylx} \times 10 \cdots \cdots (19)$$

$$0 \leq I_{pc} = \frac{S_{pc}}{S_{pc \max}} \leq 1.0 \cdots \cdots (20)$$

式中：

S_{pc} —参与筛选和排序桥梁的防落梁初评分数；
 $S_{pc \max}$ —参与筛选和排序桥梁的防落梁初评最高分数。

5.4.7 综合考虑桥梁重要性等影响因素，对已完成强度延性初步评估的桥梁进行筛选，并依据评估结果 R_{pd} 进行排序，确定桥梁进行抗震性能详细评估的优先顺序。

$$R_{pd} = I_{pd} \times 50 + I_{ssl b} \times 15 + I_{wxsp} \times 15 + I_{fylb} \times 10 + I_{kylx} \times 10 \cdots \cdots (21)$$

$$0 \leq I_{pd} = \frac{S_{pd}}{S_{pd \max}} \leq 1.0 \cdots \cdots (22)$$

式中：

S_{pd} —表示参与筛选和排序桥梁的强度延性初评分数；
 $S_{pd \max}$ —表示参与筛选和排序桥梁的强度延性初评最高分。

6 桥梁抗震性能评估

6.1 一般规定

6.1.1 在抗震性能排查的基础上，筛选出抗震性能不良的桥梁进行优先级排序，针对地震易损性高的桥梁结构宜进行详细的抗震性能评估，以确定其抗震薄弱环节和后续的加固改造决策。

6.1.2 桥梁抗震性能评估应在桥梁抗震性能排查基础上，详细计算主要包括结构、构件的承载力评估和变形能力评估。

6.1.3 抗震性能评估需验算 E1 地震下的强度需求和 E2 地震下的变形需求。

- a) E1 地震作用下, 结构在弹性范围内工作, 基本不损伤, 可采用弹性反应谱分析或线性时程分析。
 - b) E2 地震作用下, 墩柱可发生损伤, 产生弹塑性变形, 耗散地震能量, 但墩柱的塑性铰区域原则应具有一定的塑性转动能力, 可采用非线性时程分析。
- 6.1.4 液化场地应该考虑其可能对桥梁抗震性能的影响:
- a) 桥址场地有潜在液化侧向扩展且距常水位水迹线 100m 范围内, 应评价液化后土体滑移与开裂的风险;
 - b) 当场地发生液化, 并产生明显侧向滑移时, 应评价液化侧向滑移对基础、桥台、桥墩抗震能力的影响。

6.2 建模与分析原则

6.2.1 应基于详细调查分析的资料和数据, 依据结构材料的实测强度、截面尺寸以及配筋等数据, 考虑耐久性问题, 建立可靠的桥梁结构分析模型, 采用适当的静力和动力分析方法分析构件、结构承载力和变形性能, 以此作为结构抗震性能评估的依据。

6.2.2 桥梁结构动力计算模型应能正确反应桥梁上部结构、下部结构、支座和地基的刚度、质量分布及阻尼特性, 从而保证在 E1 和 E2 地震作用下引起的惯性力和主要结构反应控制振型能得到反映。一般情况下桥梁结构的动力计算模型应满足下列要求:

- a) 计算模型中的梁体和墩柱可采用空间杆系单元(含纤维梁柱单元)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代表结构的实际刚度和质量分布;
 - b) 支座应采用支座连接单元, 必要时考虑支座滑移的影响;
 - c) 桥梁桩基础可采用基于 m 法的 Winkler 地基梁弹性模型模拟, 或可采用考虑非线性动力 p-y 曲线法模型模拟桩-土相互作用;
 - d) 桥梁结构整体进行非线性时程分析时, 考虑土-结构相互作用后应选取合适的瑞利阻尼参数;
 - e) 桥梁非线性时程分析应考虑相邻结构和边界条件的影响, 涉及场地液化时宜首先进行场地液化有效应力分析, 为桩-土相互作用建模提供适当参数。
- 6.2.3 桥址存在不连续地质特性或地形特征可能造成各桥墩的地震动参数显著不同, 以及桥梁一联总长超过 600m 时, 宜采用非一致激励(即多支承激励)方式, 考虑地震动的空间变化, 对桥梁抗震性能进行评价。

6.3 地震作用

6.3.1 在役公路桥梁地震作用应考虑其预服役期(剩余使用年限), 对地震作用进行折减, 预服役期的地震重现期和超越概率应按下列公式计算:

$$P = 1 - e^{-\frac{t}{t(J)}} = 1 - e^{-\frac{T_0}{t(I)}} \dots\dots\dots (23)$$

$$\frac{t}{t(J)} = \frac{T_0}{t(I)} \dots\dots\dots (24)$$

式中:

- t —预服役期;
- T_0 —设计基准期;
- $t(J)$ —预服役期对应的地震重现期;
- $t(I)$ —设计基准期对应的地震重现期;
- P —超越概率。

6.3.2 设计加速度反应谱应按照 JTG/T 2231-01 中的相关规定确定, 同时考虑在役桥梁预服役期地震

动折减。

6.3.3 考虑在役桥梁预服役期地震动折减的抗震重要性系数 C_i 可按下列公式计算。

$$C_i = \frac{1}{4} \left(\frac{A_1}{50} + \frac{A_2}{100} + \frac{A_3}{200} + \frac{A_4}{400} \right) \cdots \cdots (25)$$

$$\lg A_1 = 3.508 - 2.273 \times [-\ln(1 - P_{50})]^{\frac{1}{9.739}} \cdots \cdots (26)$$

$$\lg A_2 = 3.508 - 1.972 \times [-\ln(1 - P_{50})]^{\frac{1}{8.3339}} \cdots \cdots (27)$$

$$\lg A_3 = 3.508 - 1.671 \times [-\ln(1 - P_{50})]^{\frac{1}{6.8713}} \cdots \cdots (28)$$

$$\lg A_4 = 3.508 - 1.370 \times [-\ln(1 - P_{50})]^{\frac{1}{5.4028}} \cdots \cdots (29)$$

式中：

C_i —抗震重要性系数；

A_i —地震动峰值加速度调整参数；

P_{50} —设计基准期50年对应的超越概率，由预服役期对应的重现期和超越概率转换得到。

6.3.4 采用时程分析法时，应同时输入两个或三个方向分量的一组地震动时程计算地震作用效应，并按下述原则确定：

- 已作地震安全性评价的桥址，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；
- 未作地震安全性评价的桥址，可根据本规范规定的加速度反应谱，合成与其匹配的加速度时程；也可选用与设定地震震级、距离和场地条件相近的实际地震动加速度记录，并通过时域方法调整，使其反应谱与本规范加速度反应谱协调；
- 对于时程分析的最终结果，当采用3组加速度时程计算时，应取3组计算结果的最大值；当采用7组加速度时程计算时，可取7组结果的平均值用于结构抗震性能的评价。

6.3.5 对于直线桥可分别考虑顺桥向和横桥向的地震作用；对于曲线桥可分别沿相邻两桥墩连线方向和垂直于连线水平方向进行多方向地震输入，以确定最不利地震作用水平输入方向。

6.3.6 位于Ⅷ度以上场地的拱式结构、长悬臂桥梁结构和大跨度结构，以及竖向地震作用效应很重要时，应同时考虑顺桥向、横桥向和竖向的地震作用。

6.3.7 若能确定桥址离活动断层的距离超过50km，可只考虑水平向地震作用；对位于发震断层两侧10km以内的近断层桥梁结构，应进行场地地震安全性评价和桥梁抗震性能评价专题研究，并考虑近断层效应的影响，计算时采用的地震动参数应计入近场特性影响。

6.3.8 采用反应谱分析方法计算桥梁结构在对应水准地震作用下的响应，当同时考虑三个正交方向（顺桥向X、横桥向Y和竖向Z）的地震作用时，可分别单独计算X向地震作用在计算方向产生的最大效应 E_X 、Y向地震作用在计算方向产生的最大效应 E_Y 与Z向地震作用在计算方向产生的最大效应 E_Z ，计算方向总的最大地震作用效应E按下式求取：

$$E = \sqrt{E_X^2 + E_Y^2 + E_Z^2} \cdots \cdots (30)$$

6.3.9 当桥梁动力分析采用多振型反应谱分析法时，所考虑的振型阶数不得少于跨数的三倍，且纵桥向、横桥向及竖向各自的累计振型贡献率均应大于90%，方向组合宜采用SRSS法，振型组合宜采用CQC法。

6.4 分析方法

6.4.1 桥梁结构、构件的抗震性能宜采用反应谱分析法、静力弹塑性分析法或动力非线性分析法进行计算。

6.4.2 抗震性能详细评估时，宜采用能力需求比法（C/D），若抗震能力与地震需求的比值大于 1，则说明结构抗震性能较好、偏于安全；若抗震能力与地震需求的比值小于 1，则说明结构抗震性能较差、偏于不安全状态。

6.5 结构性能劣化分析

6.5.1 抗震性能评估时，应基于详细调查分析的资料和数据，归纳和总结钢筋混凝土结构构件、材料性能劣化后的承载能力修正，考虑结构劣化对在役公路桥梁抗震性能的影响。

6.5.2 在役公路桥梁在进行结构抗震性能评估时，应根据桥梁试验检测结果，采用引入检算系数 Z_1 、承载能力恶化系数 ξ_e 、混凝土截面折减系数 ξ_c 、钢筋截面折减系数 ξ_s 的方法进行修正计算。

6.5.3 在役公路桥梁抗震性能评估时，桥墩抗剪强度、抗弯强度应考虑结构性能劣化按下列公式进行计算。

$$D \leq C(f, \xi_c a_c, \xi_s a_s) Z_1 (1 - \xi_e) \cdots \cdots \cdots (31)$$

- 式中：
- D —地震作用下构件的需求值；
 - $C(\cdot)$ —构件具备的承载能力；
 - f —材料强度值，剪力采用设计值，弯矩采用标准值；
 - a_c —构件混凝土几何参数值；
 - a_s —构件钢筋几何参数值；
 - ξ_c —混凝土截面折减系数；
 - ξ_s —钢筋截面折减系数；
 - ξ_e —承载能力恶化系数；
 - Z_1 —承载能力检算系数。

6.5.4 综合考虑桥梁结构或构件表观缺损状况、材质强度和桥梁结构自振频率等的检测评定结果，按下列规定确定承载能力检算系数 Z_1 ：

- a) 按式（32）计算确定结构或构件承载能力检算系数评定标度 D_b 。

$$D_b = \sum \alpha_j D_{bj} \cdots \cdots \cdots (32)$$

- 式中：
- α_j —某项检测指标的权重值，按表 16 的规定取值；
 - D_{bj} —结构或构件某项检测指标的评定标度，按JTG/T J21第4.2.2条、表5.3.5和表5.9.2有关规定取值。

表16 承载能力检算系数检测指标权重值

名称	缺损状况	材质强度	自振频率
权重 α_j	0.4	0.3	0.3

- b) 根据结构或构件承载能力检算系数评定标度，宜按表 17 确定桥梁承载能力检算系数 Z_1 值，特殊情况下可采用专家调查法确定。

表17 桥梁承载能力检算系数 Z_1

承载能力检算系数 评定标度 D_b	受弯	轴心受压	轴心受拉	偏心受压	偏心受拉
1	1.15	1.20	1.05	1.15	1.15
2	1.10	1.15	1.00	1.10	1.10
3	1.00	1.05	0.95	1.00	1.00
4	0.90	0.95	0.85	0.90	0.90
5	0.80	0.85	0.75	0.80	0.80

注：检算系数 Z_1 可按承载能力检算系数评定标度值 D_b 线性内插。

6.5.5 承载能力恶化系数 ξ_e 应按下列规定确定：

- a) 按式（33）计算确定构件恶化状况评定标度 E_b 。

$$E_b = \sum \beta_j E_{bj} \quad (33)$$

式中：

β_j —某项检测指标的权重值，按表 18 的规定取值；

E_{bj} —结构或构件某项检测指标的评定标度，按JTG/T J21第4、5章的有关规定取值。

表18 构件恶化状况系数检测指标权重值

序号	检测指标名称	权重 β_j
1	缺损状况	0.32
2	钢筋锈蚀电位	0.11
3	混凝土电阻率	0.05
4	混凝土碳化状况	0.20
5	钢筋保护层厚度	0.12
6	氯离子含量	0.15
7	混凝土强度	0.05

- b) 根据恶化状况评定标度 E_b 及桥梁所处的环境条件，按表 19 确定承载能力恶化系数 ξ_e 。

表19 承载能力恶化系数 ξ_e

恶化状况评定 标度 E_b	环境条件			
	干燥 不冻 无侵蚀性介质	干、湿交替 不冻 无侵蚀性介质	干、湿交替 冻 无侵蚀性介质	干、湿交替 冻 有侵蚀性介质
1	0.00	0.02	0.05	0.06
2	0.02	0.04	0.07	0.08
3	0.05	0.07	0.10	0.12
4	0.10	0.12	0.14	0.18
5	0.15	0.17	0.20	0.25

注：恶化系数 ξ_e 可按结构或构件恶化状况评定标度值 E_b 线性内插。

6.5.6 混凝土截面折减系数 ξ_c 应按下列规定确定：

- a) 依据材料风化、碳化、物理与化学损伤三项检测指标的评定标度，按式（34）计算确定结构或构件截面损伤的综合评定标度 R_b 。

$$R_b = \sum \gamma_j R_{bj} \cdots \cdots \cdots (34)$$

式中：

- γ_j —某项检测指标的权重值，按表 20 的规定取值；
 R_{bj} —某项检测指标的评定标度，按表 21、表 22、表 23 的规定确定；
b) 根据截面损伤的综合评定标度，按表 24 确定截面折减系数 ξ_c 。

表20 材料风化、碳化及物理与化学损伤权重值

序号	检测指标名称	权重 γ_j
1	材料风化	0.10
2	混凝土碳化	0.35
3	物理与化学损伤	0.55

表21 材料风化评定标度

评定标度	材料风化状况	性状描述
1	微风化	手搓构件表面，无砂粒滚动摩擦的感觉，手掌上粘有构件材料粉末，无砂粒；构件表面直观较光洁
2	弱风化	手搓构件表面，有砂粒滚动摩擦的感觉，手掌上附着物大多为构件材料粉末，砂粒较少；构件表面砂粒附着不明显或略显粗糙
3	中度风化	手搓构件表面，有较强的砂粒滚动摩擦的感觉或粗糙感，手掌上附着物大多为砂粒，粉末较少；构件表面明显可见砂粒附着或明显粗糙
4	较强风化	手搓构件表面，有强烈的砂粒滚动摩擦的感觉或粗糙感，手掌上附着物基本为砂粒，粉末很少；构件表面可见大量砂粒附着或有轻微剥落
5	严重风化	构件表面可见大量砂粒附着，且构件部分表层剥离或混凝土已露粗骨料

表22 物理与化学损伤评定标度

评定标度	性状描述
1	构件表面较好，局部表面有轻微剥落
2	构件表面剥落面积在5%以内；或损伤最大深度与截面损伤发生部位构件最小尺寸之比小于0.02
3	构件表面剥落面积在5%~10%以内；或损伤最大深度与截面损伤发生部位构件最小尺寸之比小于0.04
4	构件表面剥落面积在10%~15%以内；或损伤最大深度与截面损伤发生部位构件最小尺寸之比小于0.10
5	构件表面剥落面积在15%~20%以内；或损伤最大深度和截面损伤发生部位构件最小尺寸之比大于0.10

表23 混凝土碳化评定标度

评定标度	混凝土碳化深度平均值/实测保护层厚度平均值 K_c
1	<0.5

表23 混凝土碳化评定标度（续）

评定标度	混凝土碳化深度平均值/实测保护层厚度平均值 K_c
2	[0.5, 1.0)
3	[1.0, 1.5)
4	[1.5, 2.0)
5	≥ 2.0

表24 截面折减系数 ξ_c

截面损伤综合评定标度	截面折减系数 ξ_c
$1 \leq R < 2$	(0.98, 1.00]
$2 \leq R < 3$	(0.93, 0.98]
$3 \leq R < 4$	(0.85, 0.93]
$4 \leq R \leq 5$	≤ 0.85

6.5.7 发生锈蚀的钢筋截面折减系数 ξ_s 应按表 25 确定。

表25 钢筋截面折减系数 ξ_s

评定标度	性状描述	截面折减系数 ξ_s
1	沿钢筋出现裂缝，宽度小于限值	(0.98, 1.00]
2	沿钢筋出现裂缝，宽度大于限值，或钢筋锈蚀引起混凝土发生层离	(0.95, 0.98]
3	钢筋锈蚀引起混凝土剥落，钢筋外露，表面有膨胀薄锈层或坑蚀	(0.90, 0.95]
4	钢筋锈蚀引起混凝土剥落，钢筋外露、表面膨胀性锈层显著，钢筋断面损失在10%以内	(0.80, 0.90]
5	钢筋锈蚀引起混凝土剥落，钢筋外露、出现锈蚀剥落，钢筋断面损失在10%以上	≤ 0.80

6.6 桥墩抗震性能评估

6.6.1 对桥墩抗震性能进行评价时，具体评价指标包括桥墩的剪力、弯矩、纵向钢筋锚固长度、纵向钢筋搭接长度、箍筋约束作用、延性变形能力。

6.6.2 桥墩剪力的能力需求比 λ_{cv} 应按图 2 所示流程进行计算：

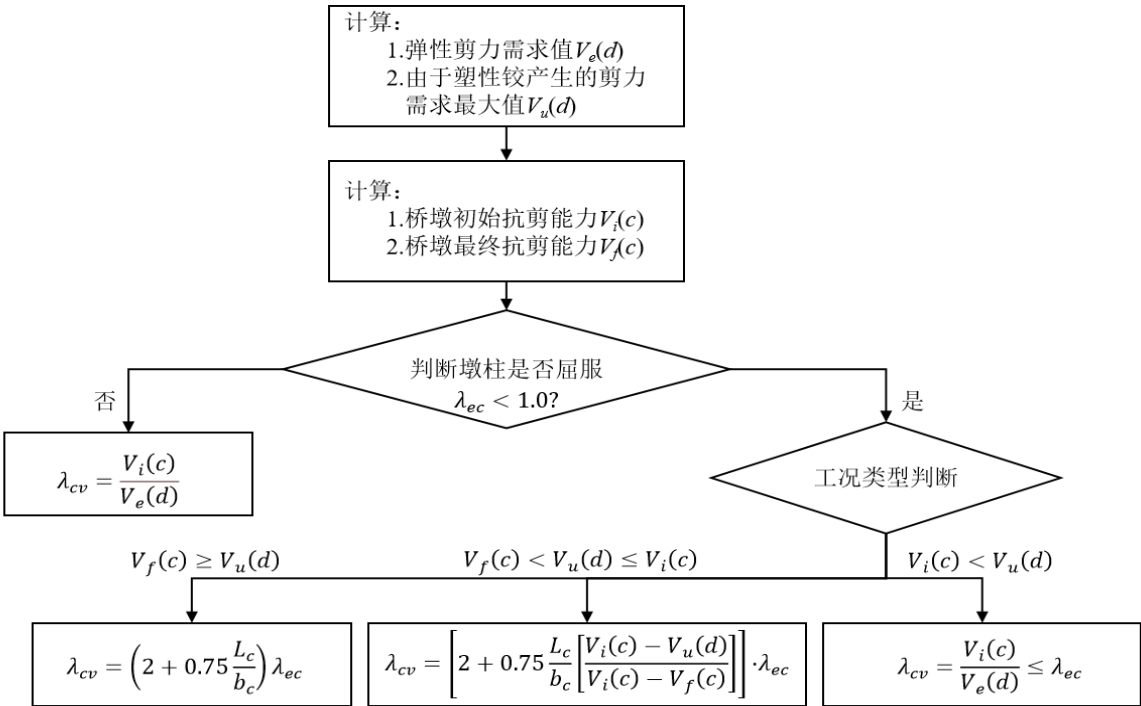


图2 桥墩剪力能力需求比 λ_{cv} 的计算流程图

其中:

$V_e(d)$ —弹性剪力需求最大值,即桥墩未发生屈服时的剪力最大值,可取地震作用下桥墩弹性状态最大剪力值得 1.25 倍进行计算;

$V_u(d)$ —由塑性铰产生的剪力需求最大值;

$V_i(c)$ —桥墩未发生屈服时的初始抗剪能力;

$V_f(c)$ —桥墩发生屈服后的最终抗剪能力,当轴向应力 $\delta \geq 0.1f'_c$ 时,假定抗剪应力为 $0.052\sqrt{10f'_c}$ MPa,反之为 0;

L_c —桥墩高度 (m);

b_c —剪切方向桥墩宽度。

6.6.3 桥墩弯矩的能力需求比 λ_{ec} 应按照如下步骤计算:

- 1) 首先建立桥梁动力空间计算模型,计算桥墩在地震荷载作用与恒载作用组合下的弹性弯矩需求值;
- 2) 然后计算桥墩截面的极限弯矩,可由桥墩的 $M-\varphi$ 曲线获得;
- 3) 最后根据不同组合工况下计算得到的能力值和需求值,计算相应的桥墩弯矩 C/D 比。

6.6.4 在评估时,如果桥墩潜在塑性铰区域内纵向钢筋存在搭接,则桥墩的抗弯强度将会降低。因此,需根据桥墩纵向钢筋的实际搭接状况对墩柱的抗弯能力进行适当折减,折减系数 ξ 按下列公式进行计算。

$$\xi = l_{\text{lap}} \cdot \frac{\sqrt{f'_{ce}}}{0.4} \cdot d_s \cdot f_{ye} \dots\dots\dots (35)$$

式中:

ξ —表示抗弯能力折减系数,当取值大于 1.0 时,按 1.0 进行计算;

l_{lap} —表示塑性铰区域纵向钢筋搭接长度 (mm);

d_s —表示纵筋直径 (mm);

f'_{ce} —表示纵向钢筋搭接区域混凝土抗压强度,若无实测资料,可取混凝土抗压强度标准值 (MPa);

f_{ye} —表示搭接区域内纵向钢筋的屈服强度，若无实测资料，可取钢筋屈服强度的标准值（MPa）。
6.6.5 桥墩纵向钢筋锚固长度的能力需求比 λ_{ca} 应按图 3 所示流程进行计算：

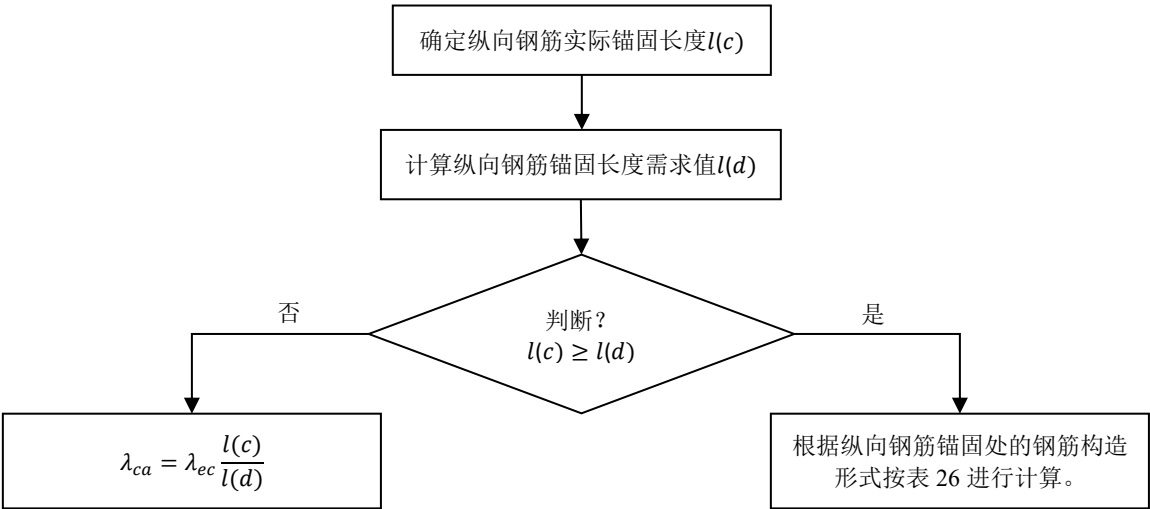


图3 桥墩纵向钢筋锚固长度 λ_{ca} 评估流程图

表26 桥墩纵筋锚固长度 λ_{ca} 计算表

纵筋锚固位置	锚固处钢筋构造形式	基础顶部有无弯曲钢筋	纵筋锚固长度能力需求比
盖梁	/	/	$\lambda_{ca} = 1.0$
基础	直筋	无	$\lambda_{ca} = \lambda_{ef}$
基础	90度背向中线	无	$\lambda_{ca} = 1.3\lambda_{ef}$
基础	90度背向中线	无	$\lambda_{ca} = 2.0\lambda_{ef}$
基础	直筋	有	$\lambda_{ca} = 1.5\lambda_{ef}$
基础	90度	有	$\lambda_{ca} = 1.0$

6.6.6 纵向钢筋搭接长度的能力需求比 λ_{cs} 应按图 4 所示流程进行计算。

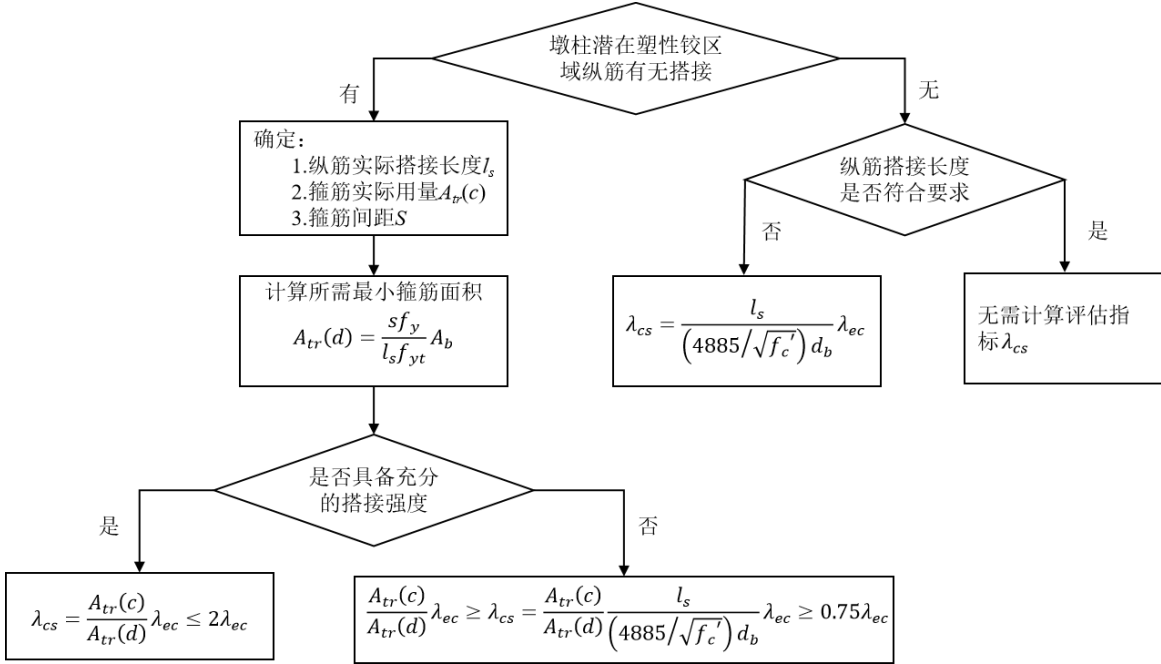


图4 桥墩纵向钢筋搭接长度λ_{cs}评估流程图

其中：

l_s —纵向实际搭接长度；

s —箍筋间距（mm）；

$A_{tr}(c)$ —箍筋实际用量，其值与搭接钢筋净距 d_0 有关，当 $d_0 \geq 4d_b$ 时， $A_{tr}(c)$ 取箍筋的横截面积；当 $d_0 \leq 4d_b$ 时， $A_{tr}(c)$ 取潜在劈裂裂缝处箍筋横截面积与搭接钢筋数量的比值；

$A_{tr}(d)$ —最小箍筋面积；

f_y —纵向钢筋的屈服应力（kPa）；

f_{yt} —箍筋的屈服应力（kPa）；

A_b —搭接钢筋的面积；

f'_c —混凝土的抗压强度（kPa）；

d_b —纵向钢筋名义直径（mm）；

λ_{ec} —桥墩弯矩的能力需求比。

6.6.7 当桥墩高宽比 $H/B > 3.0$ 时，应对墩柱 1/4 高度以外的搭接进行评估；当高宽比 $H/B \leq 3.0$ 时，应对墩柱全高进行评估。当以下 3 个条件同时满足时，即认为具备充分的搭接长度：

- a) 搭接长度 $l_s > 4885\sqrt{f'_c}$ ；
- b) 箍筋用量 $A_{tr}(c) > A_{tr}(d)$ ；
- c) 箍筋间距 $s > 150mm$ 。

6.6.8 桥墩箍筋约束作用的能力需求比 λ_{cc} 应按下列公式进行计算：

$$\lambda_{cc} = \mu \lambda_{ec} \cdots \cdots \cdots (36)$$

$$\mu = 2 + 4 \left(\frac{X_1 + X_2}{2} \right) X_3 \cdots \cdots \cdots (37)$$

其中：

$$X_1 = \frac{\rho(c)}{\rho(d) \left(0.5 + \frac{1.25P_c}{f'_c A_g} \right)} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$X_2 = \min \left\{ \frac{6d_b}{s}, \frac{0.2b_{min}}{s} \right\} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (39)$$

式中:

X_3 —箍筋锚固有效系数, 当箍筋充分锚固时取 1.0, 反之采用延性系数 $\mu = 4 - 4X_3$ 并与式 (36) 迭代计算;

$\rho(c)$ —实际体积配箍率;

$\rho(d)$ —所需体积配箍率;

P_c —桥墩的轴向压力;

f'_c —混凝土抗压强度标准值;

A_g —桥墩的毛截面面积;

d_b —纵向钢筋的直径;

b_{min} —桥墩截面的最小宽度;

s —箍筋间距。

6.6.9 评估桥墩(柱)的延性变形能力需求比 λ_{cr} , 应按下列公式计算潜在塑性铰区域沿顺桥向和横桥向的塑性转动能力。对于高宽比小于 2.5 的矮墩, 可不检算桥墩的变形。

$$\lambda_{cr} = \frac{\theta_u}{\theta_p} \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中:

θ_p —潜在塑性铰区域的地震塑形转角;

θ_u —塑性铰区域的最大容许转角。

$$\theta_u = L_p(\phi_u - \phi_y)/K \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中:

ϕ_u —截面极限破坏状态的曲率;

ϕ_y —截面等效屈服曲率;

K —延性安全系数, 取 2.0;

L_p —等效塑性铰长度 (cm), 可取以下两式计算结果的较小值。

$$L_p = 0.08H + 0.22f_{yk}d_s \geq 0.44f_{yk}d_s \quad \dots\dots\dots (42)$$

$$L_p = \frac{2}{3}b \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中:

H —悬臂墩的高度或塑性铰截面到反弯点的距离 (cm);

f_{yk} —纵向钢筋抗拉强度实测值或标准值 (MPa);

d_s —纵向钢筋的直径 (cm);

b —矩形截面的短边尺寸或圆形截面直径 (cm)。

6.6.10 对桥墩抗弯强度不满足规范要求的桥梁, 可通过增大混凝土截面、外包钢套附加钢筋、复合钢管套等墩柱外包方式进行抗震加固; 对桥墩抗剪或延性不满足规范要求的桥梁, 可通过纤维复合材料壳套、体外预应力钢绞线、喷射纤维钢筋混凝土覆层等方式进行抗震加固。

6.7 基础抗震性能评估

6.7.1 对基础抗震性能进行评价时, 具体评价指标包括基础的内力和转动。

6.7.2 基础剪力、弯矩的能力需求比 λ_{ef} 应按照如下步骤计算:

- 1) 建立桥梁动力计算模型，计算基础在地震作用与恒载作用组合下的剪力、弯矩需求值；
 - 2) 计算基础截面的极限弯矩，可由基础的 M-φ 曲线获得；
 - 3) 根据不同组合工况下计算的能力值和需求值，计算相应的基础剪力、弯矩能力需求比。
- 6.7.3 基础所具有的转动能力与其破坏类型密切相关。对于基础的不同形式和不同破坏类型，其转动能力需求比 λ_{fr} 应按下列公式进行计算：

$$\lambda_{fr} = \mu \lambda_{ef} \dots\dots\dots (44)$$

式中：
 μ —表示基础的延性指标，可根据基础类型和基础的破坏形式由表 27 确定。

表27 基础延性指标取值表

基础形式	基础的破坏类型	基础延性指标（μ）
桩基础	弯曲钢筋屈服	4
	桩身弯曲破坏	4
	桩身剪切破坏	1
	桩体被拔出	2
	混凝土剪切破坏或受拉破坏	1
	桩体超载（受拉破坏或受压破坏）	3
扩大基础	弯曲钢筋屈服	4
	地基丧失承载力	4
	混凝土剪切破坏或受拉破坏	1

6.8 关键装置抗震性能评估

- 6.8.1 对支座、伸缩缝等关键装置的抗震性能进行评价时，具体评价指标包括支座、伸缩缝的内力和位移。
- 6.8.2 支座和伸缩缝位移的能力需求比 λ_{bd} 应按下列公式进行计算：

$$\lambda_{bd} = \frac{D(c)}{D(d)} \dots\dots\dots (45)$$

式中：
 $D(c)$ —表示支座或伸缩缝的实际支承宽度；
 $D(d)$ —表示我国桥梁抗震设计规范规定的最小支承宽度， $D(d) = A \geq 50 + 0.1L + 0.8H + 0.5L_k$ ，
其中L为一联上部结构总长度（m）；H为支承一联上部结构的桥墩平均高度（m），桥台的高度取 0； L_k 是一联上部结构的最大单孔跨径（m）。

$$\lambda_{bd} = \frac{\Delta_s(c) - \Delta_i(d)}{\Delta_{max}(d)} \dots\dots\dots (46)$$

式中：
 $\Delta_s(c)$ —表示支座或伸缩缝的有效位移能力，其值可取为实际支承宽度；
 $\Delta_i(d)$ —表示由温度等环境作用引起的最大位移量；
 $\Delta_{max}(d)$ —表示地震作用下通过有限元模拟所得最大位移量。

当支座及伸缩缝处未设置限位装置时，则需通过式（45）与式（46）同时计算 λ_{bd} ，取二者最小值；
当支座及伸缩缝处设有限位装置时，可仅按式（45）进行计算。

6.8.3 支座和伸缩缝内力的能力需求比 λ_{bf} 应按下列公式进行计算:

$$\lambda_{bf} = \frac{V(c)}{V(d)} \dots\dots\dots (47)$$

式中:

$V(c)$ —表示构件的极限抗剪强度。考虑到材料劣化对桥梁抗震性能的影响,依据 JTG/T H21 对支座的极限抗剪强度进行适当折减。当评定标度为 4 或 5 时,乘以折减系数 0.85;当评定标度为 3 时,乘以折减系数 0.90;当评定标度为 2 时,乘以折减系数 0.95;

$V(d)$ —表示地震荷载作用下构件的剪力需求值。

6.8.4 对于板式橡胶支座鉴于其可定期进行更换,不考虑材料性能劣化的影响,应按 JTG/T 2231-01 进行支座厚度和抗滑稳定性的验算,如考虑支座滑移,应验算支承位移。

附录 A
(规范性)

公路桥梁抗震性能评估检查防落梁评估细则

表 A.1 给出了公路桥梁抗震性能评估检查的防落梁评估细则

表 A.1 公路桥梁抗震性能评估检查防落梁评估表

桥梁名称:		结构形式:	路线编号:	道路等级:	地震动参数:	评估日期:		
编号		项 目	配分	评 估 内 容			权重	评分
A11	桥址环境	是否为近断层桥梁	8	<input type="checkbox"/> 是(0) <input type="checkbox"/> 否(1.0)				
A12		场地类别	4	<input type="checkbox"/> IV(0) <input type="checkbox"/> III(0.33) <input type="checkbox"/> II(0.67) <input type="checkbox"/> I(1.0)				
A13		相邻桥墩间地表土质变化	2	<input type="checkbox"/> 大(0) <input type="checkbox"/> 中(0.33) <input type="checkbox"/> 小(0.67) <input type="checkbox"/> 无(1.0)				
A14		液化可能性	6	<input type="checkbox"/> 严重(0) <input type="checkbox"/> 中等(0.33) <input type="checkbox"/> 轻微(0.67) <input type="checkbox"/> 无(1.0)				
B11	结构系统	相邻两震动单元结构系统差异性	7	<input type="checkbox"/> 大(0) <input type="checkbox"/> 中(0.33) <input type="checkbox"/> 小(0.67) <input type="checkbox"/> 无(1.0)				
B12		有无挂梁	2	<input type="checkbox"/> 有(0) <input type="checkbox"/> 无(1.0)				
B13		梁端与桥墩或桥台的夹角 θ°	4	$w=1-\theta^\circ/90^\circ\leq 1.0$				
B14		曲线桥	4	$w=1-\phi/180^\circ$ ϕ -曲线梁的中心角				
B15		基础裸露程度	14	<input type="checkbox"/> 严重(0) <input type="checkbox"/> 较严重(0.33) <input type="checkbox"/> 轻微(0.67) <input type="checkbox"/> 无裸露(1.0)				
C11	防落梁措施细节	支承状况	5	<input type="checkbox"/> 极差(0) <input type="checkbox"/> 不良(0.33) <input type="checkbox"/> 较好(0.67) <input type="checkbox"/> 完好(1.0)				
C12		支承长度	22	当 $a>a_e$ 时, $w = 1 - \frac{a-a_e}{a/2} \leq 1.0$;当 $a \leq a_e$ 时, $w = 1.0$ 注: a_e - 实际支承长度; a —按 JTG/T 2231-01 第 11.2 条计算。				
C13		防落梁措施	14	<input type="checkbox"/> 纵横桥向均无防震设施(0) <input type="checkbox"/> 仅纵桥向无防震设施(0.25) <input type="checkbox"/> 仅横桥向无防震设施(0.50) <input type="checkbox"/> 纵横桥向均有防震设施(1.0) 注: (1) 防落梁设施功能不良时, 权重减小 0.25; (2) 当 $a_e \geq 1.2a$, 纵桥向视为具有防落梁设施且功能完好。				
C14		梁端防撞措施	5	<input type="checkbox"/> 无(0) <input type="checkbox"/> 有(1.0)				

表A.1 公路桥梁抗震性能评估检查防落梁评估表（续）

编号	项 目		配分	评 估 内 容	权重	评分
C15		其他异常现象	3	支承强度与损坏状况、桥墩垂直度、跨度差异大、钢筋锈胀等现象		
总计			100			
注：（1）评估内容中 w 为计算权重；（2）评分越高表示安全性越高。						

附录 B

(规范性)

公路桥梁抗震性能评估检查强度延性评估细则

表 B.1 给出了公路桥梁抗震性能评估检查的强度延性评估细则

表 B.1 公路桥梁抗震性能评估检查强度延性评估表

桥梁名称:		结构形式:	路线编号:	道路等级:	地震动参数:	评估日期:		
编号	项 目		配分	评 估 内 容			权重	评分
A21	桥址环境	是否为近断层桥梁	8	<input type="checkbox"/> 是(0) <input type="checkbox"/> 否(1.0)				
A22		场地类别	4	<input type="checkbox"/> IV(0) <input type="checkbox"/> III(0.33) <input type="checkbox"/> II(0.67) <input type="checkbox"/> I(1.0)				
A23		液化可能性	8	<input type="checkbox"/> 严重(0) <input type="checkbox"/> 中等(0.33) <input type="checkbox"/> 轻微(0.67) <input type="checkbox"/> 无(1.0)				
B21	结构系统	梁端与桥墩或桥台的夹角 θ°	3	$w=1-\theta^{\circ}/90^{\circ}\leq 1.0$				
B22		桥墩高宽比R	6	当 $R\leq 2.5$, $w=0$; 当 $2.5<R<5$, $w=1-(5-R)/2.5$; 当 $R\geq 5$ 时, $w=1.0$ (纵横向取最不利效应)				
B23		震动单元中桥墩高差比	4	当 $r\geq 1.5$, $w=0$; 当 $1.0\leq r < 1.5$, $w=1-(-2+2r)$				
B24		桥墩静不定度	4	<input type="checkbox"/> 两向均静定(0) <input type="checkbox"/> 一向具静不定(0.5) <input type="checkbox"/> 两向均静不定(1.0)				
B25		基础裸露程度	14	<input type="checkbox"/> 严重(0) <input type="checkbox"/> 较严重(0.33) <input type="checkbox"/> 轻微(0.67) <input type="checkbox"/> 无裸露(1.0)				
C21	延性构造细节	塑性铰区域箍筋细部	8	<input type="checkbox"/> 不符合抗震规定(0) <input type="checkbox"/> 部分符合抗震规定(0.5) <input type="checkbox"/> 符合抗震规定(1.0)				
C22		最小体积含箍率	11	<input type="checkbox"/> 不符合抗震规定(0) <input type="checkbox"/> 符合抗震规定(1.0)				
C23		纵向钢筋配筋率	11	<input type="checkbox"/> 不符合抗震规定(0) <input type="checkbox"/> 符合抗震规定(1.0)				
C24		纵向钢筋锚固及搭接长度	4	<input type="checkbox"/> 不符合抗震规定(0) <input type="checkbox"/> 符合抗震规定(1.0)				
C25		塑性铰区域纵筋有无搭接	7	<input type="checkbox"/> 有(0) <input type="checkbox"/> 无(1.0)				
C26		桥墩与基础劣化程度	5	<input type="checkbox"/> 严重(0) <input type="checkbox"/> 差(0.33) <input type="checkbox"/> 一般(0.67) <input type="checkbox"/> 轻微(1.0)				
C27		支承状况与其他异常现象	3	支承强度与损坏状况、桥墩垂直度、跨度差异大、钢筋锈胀等现象				
总计			100					
注：（1）评估内容中w为计算权重；（2）评分越高表示安全性越高。								

附录 C

(资料性)

条文说明

C.1 4.5 在役公路桥梁抗震性能评估是一项十分复杂的工作，特别是对某一地区或某条线路的桥梁均进行复杂的抗震性能评估时，其工作量极为庞大。为高效、科学、合理的完成评估工作，应尽可能以简便快捷且可操作性强的排查方式在大量桥梁中快速识别出地震易损性高的桥梁结构，从而确定最需要进行细化评价的桥梁，结合优先级评价可直接服务于地震易发区在役桥梁抗震加固决策。

C.2 4.6 桥梁抗震性能排查是在考虑抗震设防水准、地质灾害的基础上，主要强调桥梁的技术状况（如结构形式、运营管理情况、使用现状、外观施工质量等）、抗震措施、构造细节、延性性能等的评价，目的在于快速、简便且保守地筛选出抗震性能不良的桥梁，加以排序后指导优先进行抗震性能评估以及后续的加固改造决策。

C.3 4.7 桥梁抗震性能评估应配合现场实际调查和检测、结构抗震需求、能力分析计算等综合评价桥梁的抗震性能，应依据结构形式、构件的实际材料强度、截面尺寸与构件细部构造等数据，采用适宜的结构分析方法，分析桥梁结构整体的抗震性能，计算构件的抗震能力。

C.4 4.10 条明确规定了在役公路桥梁抗震性能排查和评估的主要内容和步骤：

- a) 桥梁建设概况一般包括桥梁设计和建造阶段的相关资料，说明桥梁所在线路等级，结构形式，跨径组成，材料强度与特性，设计采用的规范、标准，场地地质条件，建成年代，地震危险性水平等设计建造情况；
- b) 桥梁使用状况与现状调查一般需说明桥梁运营中的使用、维修、养护情况，材料强度实测，场地地质补充勘察情况，桥梁关键构件（或部位）的现场情况，地基基础现场情况等；
- c) 一般需说明桥梁在路网中的地位、抗震救灾作用、对经济与国防安全的影响等，给出地震水准及相应的桥梁抗震性能目标，并与原设计的设防标准进行对比说明；
- d) 桥梁抗震排查一般以桥梁结构的防落梁评估和强度延性评估为主，采用定性方法为主联合少量简单计算方法，快速获得桥梁的抗震能力及薄弱环节估计，筛选出抗震构造不符合要求和易损性高的桥梁。其中防落梁评估包含桥墩和节点构造、墩梁支撑长度、防落梁装置、限位措施、防撞措施、支座类型、抗震不利地段的基础构造措施等评估，强度延性评估包括桥墩和桩基的强度、延性构造细节等评估；
- e) 抗震性能评估以桥梁结构各构件的评估为出发点，以结构和构件的抗震计算分析、构件强度和变形检算为主，根据设定的不同地震动水平下桥梁的抗震性能目标，对其承载力、变形等进行分析，明确抗震性能薄弱部位，为桥梁抗震加固设计和抗震措施的处置提供依据。

C.5 5.1.2 通过填写防落梁评估、强度延性评估检查表，依据桥梁实际情况计算得到各项目评分，统计各桥梁总分。对比分数高低判断桥梁抗震性能，结合桥梁重要性等指标，即可进行筛选排序得到需要开展抗震性能评估和加固工作的桥梁。层次分析法（也叫 AHP 法）是一种定性分析与定量分析相结合的决策方法，具有层次性和系统性的特点，是 20 世纪 70 年代初期由美国杰出运筹学专家 T.L.Saaty 最早提出的。现广泛应用于各类学科复杂决策问题的权重计算，其基本原理是将复杂的决策问题分解成若干层次，通过对同一层次中各个影响指标两两重要性的相互比较和判断，从而构造判断矩阵，再通过计算判断矩阵得到各指标的权重值。

C.6 5.2.1 防落梁评估检查表共有 14 个项目指标，项次从 A11 编至 A14、B11 编至 B15、C11 编至 C15。

其中又区分为桥址环境、结构系统、防落梁措施细节三大项，分别考虑 4、5 和 5 个指标的影响。通过对各影响指标影响程度的临界值进行界定，以使不同评估人员在评估时能够具有一致的客观标准，不因个人主观导致评估结果产生较大差异。各影响指标不同影响程度的权值采用我国台湾公路桥梁抗震能力评估及补强准则之研究的成果。

C.7 5.2.3 桥梁若位于近断层或跨断层处，倘若此断层错动发生地震时，桥梁结构所受到的地震荷载和产生的位移将会很大，这势必会增加落梁的机率。但实际上桥梁结构所受到的地震威胁直接来自于该断层的几率并不是很大，而一般来自于较远域的地震，因此其所占比重并不大。

C.8 5.2.4 桥梁结构因地震荷载产生的破坏大小，与桥址的场地类别密不可分，场地越软，中长周期加速度反应谱值就会越大，地震时引起的位移也将越大，这无疑增加了落梁的可能性。目前国内外规范和标准对于场地类别的划分有着不同的定义，JTG/T 2231-01 是依据土层平均剪切波速和场地覆盖土层厚度，将工程场地类别划分为 5 类。

C.9 5.2.5 桥梁产生落梁震害的位移通常与相邻两振动单元的周期有关，周期相差越大，即使两相邻振动单元的桥墩高度相近，也会因震动不同步而增加落梁的机率。

C.10 5.2.6 地震时如果地基土层发生液化，当情况比较严重时，将会导致由基础承载能力不足引发的基础沉陷、平移或者倾斜，进而造成落梁震害的发生；当情况不严重时，基础承载能力虽然足够，但基础与土层之间的相互作用将被削弱，柱顶位移仍会增大，从而增加了落梁的可能性。液化指数 (I_{LE}) 可根据 JTG/T 2231-01 中的理论公式进行计算，也可在桥梁工程地质勘察报告相关章节关于地基土液化情况介绍中进行查取。但实际工程中面临地基土液化指数较大的情况时，一般都会进行加固或换填处理，此时地基土液化等级将根据重新计算得到的液化指数作适当调整。

C.11 5.2.8 桥梁墩顶产生的相对位移往往与两个相邻振动单元有关。若两振动单元的周期相近，则地震时产生的震动较为同步，相对位移不大，不易发生落梁震害；若相邻两振动单元因桥墩高度等因素不同，致使震动周期存在较大差异时，将会导致由两振动单元的反应不同步而引起的梁端与墩顶相对位移加大，从而增加了落梁的可能性。

C.12 5.2.9 上个世纪 70 年代初期，因为当时采用设计荷载偏低，挂梁结构的兴起，我国建造了一批带有挂梁的桥梁结构。这些桥梁伸缩缝往往不设置于墩顶，而设置在挂梁处，随着桥梁服役年限的增加其本身的病害不仅明显，尤其是在地震作用下，挂梁处不仅会产生竖向震动变形，而且还会产生旋转角，与伸缩缝设置在墩顶的情况相比将会更加复杂，增加了落梁的可能性。

C.13 5.2.10 桥梁正交时此夹角为 0，若夹角不为 0，则称为非正交桥梁，其活动支承配置的方向仍沿主梁的方向，因此地震时桥墩或桥台会同时承受两向地震力，产生两向的位移而增加落梁的可能性。JTG/T 2231-01 对斜桥的支承长度计算结果随斜交角的增加而增大，而 JTG/TB02-01 以前的规范均未考虑这一点。

C.14 5.2.11 近几年来，伴随着交运业的快速发展，曲线梁桥在交通路网中的应用比例因其优美的线形和功能致使其需求逐年上升。一方面，曲线梁桥能较好的解决地形和线路的问题；另一方面，在特殊地段，曲线梁桥能大大缩短线路长度，避免不良地质地段，降低成本，提升综合效益。曲线梁桥虽然有许多优点，但由于曲率半径的存在，弯扭耦合现象严重，空间受力特点复杂。地震作用下会出现面内弯曲变形与轴向变形的耦合，竖向挠曲变形与扭转变形的耦合及与截面畸变耦合等。与大半径的曲线梁桥相比，曲线半径越小，其动力响应则越复杂，落梁的可能性越大。

C.15 5.2.12 我国西北地区由于地理环境条件的限制，桥梁结构不得不跨越山谷沟壑，而跨越山谷沟壑的桥梁基础普遍存在河水冲刷导致的裸露现象。桥梁基础一旦裸露桥墩的强度将会降低，地震时造成的位移也将会增加从而容易引发落梁震害。当基础裸露较为严重时，桥墩塑性铰位置可能不会产生于墩顶，而在桩顶产生塑性铰并导致桩基抗震能力不足、桩体边界条件改变，进而导致基础承载能力不足而产生平移、倾斜等现象，极大的提高了落梁的机率。

C.16 5.2.14 支座是传力路径中的关键连接构件，桥梁结构的支座状况以构件目前服役情况为依据。当支座状况不良时，支座将难以发挥应有的功能，例如原为固定支座，其现状可能已经与活动支座相近，无疑会增加落梁的可能性。桥台和桥墩上的支座系统常见震害有：支座系统的倾覆、滑落、螺栓剪坏或松动、支座垫石破坏等。

C.17 5.2.15 梁式桥最为严重的震害便是落梁，而足够的防落梁长度则是避免落梁最有效的办法。

C.18 5.2.16 防落梁措施是防止落梁震害发生的第二道防线，如设置抗震拉杆、抗震挡块、钢限位装置等。

C.19 5.2.17 梁式桥中最严重的震害就是落梁，在 1970 年通海地震、1975 年海城地震、2008 年汶川地震中，多数桥台胸墙被撞坏，严重者导致落梁。为避免因碰撞导致相邻主梁或桥台胸墙发生严重损伤，应在相邻主梁或主梁与桥台胸墙间设置橡胶垫或其他弹性衬垫，但加装的橡胶垫或其他弹性衬垫不应限制梁体在正常使用时的自由伸缩。

C.20 5.3.1 本评估检查表共有 15 个项目指标，项次从 A21 编至 A23、B21 编至 B25、C21 编至 C27。其中又区分为桥址环境、结构系统、延性构造细节三大项，分别考虑 3、5 和 7 个指标的影响。通过对各影响指标影响程度的临界值进行界定，以使不同评估人员在评估时能够具有一致的客观标准，不因个人主观导致评估结果产生较大差异。各影响指标不同影响程度的权值采用我国台湾公路桥梁耐震能力评估及补强准则之研究的成果。

C.21 5.3.2 地震时如果发生地基土液化，可能导致基面下降，影响桥墩与桩基的内力，进而造成桥墩屈服或破坏的位置发生改变，例如塑性铰不产生于墩底，而在桩顶形成塑性铰并发生屈服，或在桩基某一断面产生剪切破坏，因而影响结构的抗震性能。从以往抗震规范来看，JTJ 004-89 开始已经考虑了土层液化的影响，因此按 JTJ 004-89 或按其之后颁布的抗震规范设计的桥梁结构，该项权重取为 1.0。

C.22 5.3.5 当桥墩高度除以沿地震剪力方向宽度值介于 2.5 和 5.0 之间时，桥梁一般较易发生弯剪破坏，此时采用内插计算求其权重，纵桥向和横桥向均须计算，取两者之间的最大值。

C.23 5.3.6 同一震动单元中，不同桥墩高差引起刚度的差异，矮墩刚度大，将承受较大的地震力，其内力分布应以动力分析为主。但以往大都采用拟静力分析，可能低估了矮墩承受的地震力，导致矮墩最先遭受破坏。

C.24 5.3.7 对于钢筋混凝土桥梁，若结构采用延性抗震体系，地震作用下利用桥梁墩柱产生塑性变形，从而延长结构的周期，以耗散地震能量。一般单柱式桥墩塑性铰位置多产生于墩底，双柱式桥墩或多柱式框架桥墩其塑性铰位置可能产生于墩底也可能产生于墩顶，延性较单柱式桥墩要好；壁式桥墩如与主梁刚接，其静不定度提高，延性能力较好。

C.25 5.3.8 桥梁基础裸露会改变内力的分配，塑性铰未必于墩底产生，而可能在桩顶产生塑性铰并导致桩基抗震能力不足，甚至在桩身产生剪切破坏。当基础裸露状况比较严重时，地震荷载作用下可能导致基础承载能力不足而产生平移、倾斜等现象，均会降低桥梁的抗震能力。

C. 26 5.3.12 纵向钢筋含量不足会导致延性需求的增加，不利于抗震；但纵向钢筋含量如果过高不仅会影响施工质量，还会影响延性。因此，在对桥墩进行抗震性能强度延性评估时，纵向钢筋应考虑在内。目前世界各国抗震规范对桥墩纵向钢筋含量的规定各有不同，根据我国桥梁结构的具体情况，我国规范对桥墩纵向钢筋配筋率规定为不宜小于 0.006，且不应超过 0.04。此外，墩柱纵向钢筋之间的距离不应超过 20cm。

C. 27 5.3.14 桥墩钢筋理想的施工方式为纵向钢筋埋入基础并作 90 度弯钩，再将主筋向上延伸至墩顶。但为了考虑施工的便捷性，主筋配置往往采用搭接的方式，即将主筋延伸出墩底适当长度后截断，再于此处搭接后向上延伸。此方法将使搭接处钢筋数量加倍，导致钢筋不易屈服或屈服范围较小，无法发展出预期的延性，从而降低了桥墩的延性抗震能力。因此，不应再塑性较区进行纵筋的搭接。

C. 28 5.3.15 桥墩和基础随着桥梁服役年限的增加、复杂环境的作用等，可能已存在劣化现象，如混凝土可能存在损伤、钢筋存在锈蚀现象等，这就预示着其强度已经有所折减，对强度和延性产生了一定的影响。桥墩和基础的劣化情况可通过最近的桥梁检测资料获取或进行桥梁外业现状调查。

C. 29 5.4.1 大量既有公路桥梁经防落梁初步评估和强度延性初步评估后，则需要依据桥梁重要性级别进行分级排序，确定防落梁加固和抗震性能评估桥梁的优先顺序，以使整个评估工作能够高效、有序的开展。各因素不同影响程度的权重值由宁夏地区桥梁抗震设计人员及科研专家综合研判确定。

C. 30 5.4.2 依据震后桥梁在抗震救灾中所起的作用、在国防公路网中的地位及损坏后对区域经济造成的影响程度等因素，定性的将桥梁分为重要性桥梁和一般桥梁。本方法为了能够方便的对不同桥梁的重要程度进行分级量化，采用 JTG/T 2231-01 依据跨径和桥梁所属道路等级划分的 A、B、C 和 D 四类桥梁，从定性上说大跨度、大规模的桥梁、所属道路等级高的桥梁、破坏后修复困难的桥梁往往在路网中承担着重要交通功能，属于重要性桥梁。

C. 31 5.4.3 美国《公路结构物抗震加固改造手册》规定桥梁场地的地震危险性水平是根据桥梁场地岩层表面的震动强度以及覆盖土层的放大作用进行确定的，其研究成果能够达到量化的目的且较为直观。但其不能直接应用于我国抗震设计，王克海、张劲泉等参考美国《公路结构物抗震加固改造手册》建立了与我国规范相适应的地震危险性水平与设计基本地震加速度值（A）的关系，将场地地震危险性水平分为四级。

C. 32 5.4.4 在役公路桥梁一般都有了一定的使用年限，按照在役公路桥梁剩余使用年限百分比，可以对其预服役期类别进行分类；桥梁在使用过程中，其结构构件性能会不断衰退，耐久性不断降低，尤其是某些桥龄较大的桥梁已经快接近了设计使用年限，这些桥梁的抗震性能可能很难满足要求，但其预服役年限很短，在以后的服役期内发生设防地震的可能性极小，对这些桥梁进行抗震加固设计，显得十分不经济、不合理，所以应在公路桥梁抗震性能排查中考虑预服役年限这一影响因素。桥梁的预期使用年限取决于桥龄、结构条件、设计时采用的规范及目前和未来的交通车流量等多种因素的影响，所以估计桥梁的预期使用年限是不精确科学的。然而，为了确定既有公路桥梁的设防标准，便于进行桥梁的抗震性能评估，在一个较大的范围内估计桥梁的预期使用年限是合理的、可行的。鉴于目前我国对于桥梁预期使用年限的研究成果较少的现状，本方法借鉴美国相关标准及规范对于预期使用年限的分类标准和方式，并结合宁夏地区既有公路桥梁的实际服役情况，对桥梁的预期服役类别进行了分类。对于在使用年限内进行过加固和改造的桥梁结构应根据实际情况对其预期使用年限进行适当调整。

C. 33 5.4.5 跨线桥梁若在地震中遭受破坏，不仅会影响自身的结构安全，还会对下线桥梁或道路的运

营带来一定的威胁。因此,在桥梁抗震性能评估过程中不仅要考虑桥梁是否为跨线桥,同时也需要考虑桥梁跨越线路的等级,不同等级公路车流量也存在差异。

C.34 6.1.1 在役公路桥梁抗震性能排查是从宏观角度出发,以桥梁整体结构的抗震性能评估为主,初步筛选出抗震性能不足的桥梁;而抗震性能评估则是从微观角度出发,以桥梁结构各构件的评估为出发点,通过建立有限元空间动力计算模型进行各构件详细的抗震性能评估。在役公路桥梁抗震性能评估目的在于对抗震排查筛选出来的抗震性能不满足要求的桥梁各细部构件进行详细的分析和计算,确定其抗震性能状况,明确抗震性能薄弱部位所在,为将来桥梁的抗震加固设计和抗震措施的处置提供依据。

C.35 6.1.2 结构承载力评估主要对应于小震作用下(即 50 年超越概率 40%地震作用)的受力构件以及中震作用下(即 50 年超越概率 10%地震作用)的能力保护构件,该类结构、构件均应满足无损伤或轻微损伤的要求。变形性能评估主要对应于大震作用(即 50 年超越概率 2.0%~5.0%地震作用),允许结构发生损伤,但不倒塌。

C.36 6.1.3 桥梁抗震性能评价的目的是为后期的加固服务,而加固后的桥梁则希望满足现行规范的抗震设防目标,由此确定了桥梁抗震性能评估考虑的地震作用大小(E1 和 E2 地震作用)和可采用的基本分析方法:弹性反应谱法和时程分析法(含线性和非线性)。

C.37 6.2.3 当桥梁所处场地特征变化较大,并且结构地震响应对场地变化敏感时,宜考虑地震动空间变化的影响,采用非一致激励(即多支承激励)方式进行分析,非一致激励包括波传播效应、矢相干效应和不同墩基础的场地差异。

C.38 6.3.1 在役桥梁结构由于已经服役了一段时间,结构的后续服役期通常小于设计基准期。若仍采用抗震设计规范中的地震作用,结构抗震分析的结果则会过于保守,并且不合理。所以应该根据后续使用期的缩短,对地震作用进行折减。为确定桥梁结构后续服役期的地震作用,采用等超越概率原理,原则是取现役结构在后续服役期内地震作用的超越概率等于结构在设计使用年限内的地震作用的超越概率。由此可计算得到不同的后续服役期桥梁结构的地震重现期和超越概率,进一步计算得到地震烈度和加速度峰值,结合桥梁抗震设计规范确定用于在役桥梁结构的加速度反应谱,供地震危险性分析和人工合成地震动所用。

根据假设得到地震的发生概率服从均匀的泊松分布,可以得到 T_0 年内发生 0 次烈度大于*i*地震的概率为:

$$P(I, T_0, 0) = \frac{[v(I)T_0]^0 e^{-v(I)T_0}}{0!} = e^{-v(I)T_0} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

I—设计基准期内的地震事件;

$v(I)$ —地震年平均发生率。

所以 T_0 年内发生地震烈度大于*i*的概率:

$$P(I, T_0) = 1 - e^{-v(I)T_0} \dots\dots\dots (C.2)$$

当得到预服役期为*t*时,地震烈度大于*j*的概率为:

$$P(J, t) = 1 - e^{-v(J)t} \dots\dots\dots (C.3)$$

按照等超越概率的原则,令公式(C.2)等于公式(C.3),可得:

$$1 - e^{-v(I)T_0} = 1 - e^{-v(J)t} \dots\dots\dots (C.4)$$

将地震的年平均发生率 $v(I)$ 、 $v(J)$ 替换为地震重现期 $t(I)$ 、 $t(J)$,可得:

$$P = 1 - e^{-\frac{t}{\tau(t)}} = 1 - e^{-\frac{T_0}{\tau(t)}} \dots\dots\dots (C.5)$$

即：

$$\frac{t/}{\tau(t)} = \frac{T_0}{\tau(t)} \dots\dots\dots (C.6)$$

- C. 39 6.4.2 构件能力需求比法（C/D 法）即是通过计算得出地震荷载作用下每个构件的地震需求值（力和位移）与其具备的抗震能力（抗力和转动能力），然后再通过比较确定其是否满足抗震性能的要求。该方法具有较高的准确性和可靠性，应用范围广泛，评估实例众多。
- C. 40 6.5.1 伴随着在役公路桥梁服役年限的增加，钢筋混凝土结构也将不断遭受复杂环境作用、车辆超载、行车荷载作用以及外荷载作用等，从而使结构产生了不同程度的损伤。我国西北内陆地区丘陵沟壑林立，具有大温差和高湿度的环境气候特点。为适应复杂地形条件，公路桥梁通常会跨越沟壑、山谷、河流等，冬季为保障行车安全，往往还会向积雪较为严重的路段抛洒除冰盐，导致融化的雪水携带大量氯离子通过中央分隔带、泄水孔以及伸缩缝进入桥梁下部结构，使桥梁上部结构和下部结构同时遭受氯离子侵蚀和冻融循环的双重作用。同时，混凝土的冻融循环又会加速氯离子的侵蚀，使钢筋和混凝土的材料性能不断劣化，钢筋混凝土材料一旦劣化，将会导致混凝土抗压强度降低、混凝土保护层开裂甚至剥落、钢筋屈服强度和极限应变下降、有效截面面积减小、延伸率下降、钢筋和混凝土粘结-滑移效应降低等，最终导致结构材料力学性能下降，整体承载能力不足，抗震性能劣化。桥梁抗震性能评估需考虑结构材料的实际状况，对于在役公路桥梁随着服役年限的增加，混凝土、钢筋等材料在复杂环境条件下长期暴露将会受到各种介质的腐蚀，材料也会存在不同程度的劣化。而材料一旦劣化后，其物理力学性能（主要有抗力、耐久性、强度）将会不断下降，导致桥梁承载能力降低。此时若仍用材料的标准强度进行抗震性能验算，其评估结果显然已脱离实际情况。
- C. 41 6.5.2 以基于概率理论的极限状态设计方法为基础，采用引入分项检算系数修正极限状态设计表达式的方法，对在役公路桥梁抗震性能进行评估。分项检算系数主要包括：反映桥梁总体技术状况的检算系数 Z_1 ；考虑结构有效截面折减的截面折减系数 ξ_c 、 ξ_s ；考虑结构耐久性影响因素的承载能力恶化系数 ξ_e 。主要依据在役公路桥梁的材料组成特点，引入不同的分项检算系数修正极限状态设计表达式。
- C. 42 6.5.5 b) 对在役公路桥梁，为考虑一定服役年限后桥梁结构质量状况进一步衰退恶化产生的不利影响，通过承载能力恶化系数 ξ_e 来反映这一不利影响可能造成的结构承载能力降低。引入承载能力恶化系数是为了当结构质量状况进一步衰退至某一阶段时，承载能力评定结果仍能维持在一定的可靠度水平之上。承载能力恶化系数主要考虑了结构或构件的缺损状况、钢筋锈蚀电位、钢筋保护层厚度以及混凝土强度、电阻率、氯离子含量和碳化状况等影响因素，通过专家调查方式确定各因素的影响权重，并综合考虑环境的干湿、温度及侵蚀介质等条件加以确定。
- C. 43 6.5.6 对在役公路桥梁，由于材料风化、碳化、物理与化学损伤(如混凝土剥落、疏松、掉棱、缺角、墩柱由于冲蚀引起的剥落缩径等)引起的结构或构件有效截面损失，以及混凝土碳化造成钢筋失去碱性混凝土环境保护而发生锈蚀,对结构构件截面承载能力会产生影响。在抗震性能评估时，可用混凝土截面折减系数计入这一影响。
- C. 44 6.5.7 对在役公路桥梁，由于钢筋锈蚀剥落造成的钢筋有效面积损伤，对结构构件截面承载能力会产生影响。在抗震性能评估时，可用钢筋截面折减系数计入这一影响。
- C. 45 6.6.2 当桥墩的抗剪能力小于剪力需求时将可能发生桥墩的剪切破坏，剪切破坏属于脆性破坏，

应高度关注。

C. 46 6.6.4 如果桥墩纵向钢筋的锚固长度不足，则墩柱的弯曲强度也会骤然降低。纵向钢筋的实际锚固长度 $l(c)$ 可由桥梁竣工图纸获得；纵向钢筋锚固长度需求值 $l(d)$ 可根据 JTG/T 2231-01 第 8.2.6 条的相关规定和 GB50010 第 8.3 条的相关规定同时计算，取二者较大值。

C. 47 6.6.6 桥墩纵向钢筋若在墩柱潜在塑性铰区域内进行搭接，将影响墩柱的延性和弯曲能力。

C. 48 6.6.7 为避免桥墩在地震荷载作用下由于潜在塑性铰区域内箍筋配置不足而导致的纵向钢筋屈曲和混凝土被压溃，进而引起桥墩弯曲能力的迅速衰减，应对桥墩箍筋的约束作用进行评估。

C. 49 6.6.8 为了评价在对应设防水准地震作用下，梁式桥、高架桥梁墩柱是否具有足够的变形能力而不发生倒塌，应评价墩柱位移能力或塑性铰区域塑性转动变形的能力。对于高宽比小于 2.5 的矮墩，主要破坏模式为剪切破坏，因此可不评价其变形能力而评价其抗弯和抗剪强度。