

JTG

中华人民共和国行业推荐性标准

JTG/T 2231-01—2020

公路桥梁抗震设计规范

Specifications for Seismic Design of Highway Bridges

2020-6-2 发布

2020-9-1 实施

中华人民共和国交通运输部发布

中华人民共和国行业推荐性标准

公路桥梁抗震设计规范

Specifications for Seismic Design of Highway Bridges

JTG/T 2231-01—2020

主编单位：招商局重庆交通科研设计院有限公司

批准部门：中华人民共和国交通运输部

实施日期：2020年9月1日

前 言

根据《交通运输部办公厅关于下达 2014 年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》(厅公路字〔2014〕87 号)的要求,由招商局重庆交通科研设计院有限公司承担《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)的修订工作。

本规范是在《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)基础上经局部修订以及增补和细化了部分内容制定的,经批准颁发后以《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)颁布实施。

编写组在广泛调研和征求意见的基础上,针对 08 细则实施过程中发现的问题和不足,同时尽可能吸收近年来国内外成熟的桥梁抗震设计成果,以与现行公路工程技术标准规范相协调为原则,对 08 细则进行了修订。主要修订内容如下:

- (1) 增加了桥梁结构抗震体系的内容,细化了抗震概念设计的内容;
- (2) 对桩基础验算和承载能力调整系数进行了修订;
- (3) 对设计加速度反应谱进行了修订,取消了谱比函数的概念;
- (4) 对动水压力部分进行了修订;
- (5) 扩大了线弹性分析方法的适用范围;
- (6) 修订了规则桥梁抗震计算方法;
- (7) 修改了墩柱塑性铰区域抗剪计算公式;
- (8) 修订了 E2 地震作用下弹性计算方法的地震位移修正系数;
- (9) 增补了构件延性系数计算方法;
- (10) 修订了能力保护构件计算方法;
- (11) 修改了墩梁搭接长度计算公式;
- (12) 增补和细化了减隔震桥梁抗震设计的内容;
- (13) 对部分章节的条文编排和叙述进行了优化调整;
- (14) 引入了“抗震构造措施等级”的新概念。

本规范共包括 11 章和 4 个附录,主要章节保持了 08 细则的架构,只做了局部调整和增删。删去了 08 细则的附录 A,08 细则的附录 B、C、D 分别调整为附录 A、B、C,新编写了附录 D,对构件延性系数的计算方法做出了规定。

第 1 章总则,对规范的编制目的、适用范围和抗震设防总体原则进行了规定;第 2 章术语和符号;第 3 章基本规定,对桥梁抗震设防分类、设防标准和设防目标以及抗震

设计的基本要求进行了规定；第4章场地、地基和基础，对场地划分、地基液化和地基承载力进行了规定；第5章地震作用，对地震加速度反应谱、功率谱和时程以及地震土压力和水压力等进行了规定；第6章抗震分析，对常规桥梁的建模和抗震分析方法进行了规定；第7章强度与变形验算，对常规桥梁的强度与变形验算进行了规定；第8章延性构造细节设计，对延性构件和节点的构造细节设计进行了规定；第9章特殊桥梁抗震设计，对斜拉桥、悬索桥、单跨跨径150米以上的梁桥和拱桥的抗震设计进行了规定；第10章桥梁减隔震设计，对减隔震桥梁的抗震设计进行了规定；第11章抗震措施，对桥梁各级抗震措施的具体内容进行了规定。附录A对圆形和矩形截面屈服曲率和极限曲率计算方法进行了规定；附录B对功率谱法的实施细则进行了规定；附录C对黏性填土的地震土压力计算方法进行了规定；附录D对构件延性系数的计算方法做出了规定。

本规范由唐光武负责修订第1章，兰海燕、胡建新负责修订第2章，唐光武、李建中负责修订第3章，郑罡、唐光武、陶夏新负责修订第4章，陶夏新、林家浩、刘海明负责修订第5章，李建中、张晓东、刘怀林、唐光武负责修订第6章、第7章，王克海、郑万山、庄卫林、苏慈负责修订第8章，唐光武、刘怀林负责修订第9章，唐光武、高文军、李建中、兰海燕负责修订第10章，郑万山、高文军、庄卫林、苏慈、胡建新负责修订第11章。附录A由李建中负责修订，附录B由林家浩负责修订，附录C由陶夏新负责修订，附录D由张晓东负责起草。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规范日常管理组，联系人：唐光武（地址：重庆市南岸区学府大道33号招商局重庆交通科研设计院有限公司，邮编：400067；电话和传真：023-62653430, 023-62653511；电子邮箱：tanguangwu@cmhk.com），以便修订时研用。

主编单位：招商局重庆交通科研设计院有限公司

参编单位：同济大学

中国地震局工程力学研究所

交通运输部公路科学研究院

重庆交通大学

大连理工大学

保利长大工程有限公司

四川省公路规划勘察设计研究院有限公司

主 编：唐光武

主要参编人员：李建中 陶夏新 郑万山 张晓东 林家浩 郑罡 王克海 刘怀林 兰海
燕 刘海明 庄卫林 苏慈

主 审：沈永林

参与审查人员：黄福伟 袁洪 李春风 李健 秦大航 乔森 鲍卫刚 韩彬 刘硕 梁立
农 罗吉智 史方华 韩大章 陈阵 吉林 李龙安 詹建辉 钟明全 彭
元诚 杨斌 刘海青 谢旭 向中富 朱东生 赵灿辉 徐宏光 张建东
杨庆山 李正良 巫祖烈

参加人员：高文军 胡建新

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	3
2.1	术语	3
2.2	符号	6
3	基本要求	9
3.1	桥梁抗震设防分类和设防标准	9
3.2	地震作用的基本要求	12
3.3	抗震设计方法分类及流程图	13
3.4	桥梁结构抗震体系	14
3.5	抗震概念设计	19
3.6	作用效应组合	21
4	场地、地基和基础	22
4.1	场地	22
4.2	地基的液化	26
4.3	地基承载力	32
4.4	桩基础	33
5	地震作用	35
5.1	一般规定	35
5.2	设计加速度反应谱	36
5.3	设计地震动时程	40
5.4	设计地震动功率谱	41
5.5	地震主动土压力和动水压力	41
6	抗震分析	45
6.1	一般规定	45
6.2	建模原则	51
6.3	反应谱法	56
6.4	时程分析方法	58
6.5	功率谱法	58
6.6	规则桥梁计算	59
6.7	能力保护构件计算	65
6.8	桥台	70
7	强度与变形验算	71
7.1	一般规定	71
7.2	D类桥梁、圬工拱桥、重力式桥墩和桥台强度验算	71
7.3	B类、C类桥梁抗震强度验算	73
7.4	B类、C类桥梁墩柱的变形验算	76
7.5	B类、C类桥梁支座验算	81
8	延性构造细节设计	83
8.1	一般规定	83
8.2	墩柱构造细节设计	83
8.3	节点构造细节设计	88
9	特殊桥梁抗震设计	91

9.1	一般规定	91
9.2	抗震概念设计	92
9.3	建模与分析原则	93
9.4	性能要求与抗震验算	97
9.5	抗震措施	99
10	桥梁减隔震设计	100
10.1	一般规定	100
10.2	减隔震装置	101
10.3	减隔震桥梁建模原则与分析方法	103
10.4	性能要求与抗震验算	112
11	抗震措施	114
11.1	一般规定	114
11.2	一级抗震措施	114
11.3	二级抗震措施	117
11.4	三级抗震措施	118
11.5	四级抗震措施	120
附录 A	圆形和矩形截面屈服曲率和极限曲率计算	121
附录 B	功率谱法的实施原则	123
附录 C	黏性填土的地震土压力计算公式	125
附录 D	桥梁墩柱位移延性系数计算方法	127
	本规范用词说明	129

1 总则

1.0.1 为规范和指导公路桥梁抗震设计，减轻公路桥梁的地震破坏，更好地发挥公路交通网在抗震救灾中的作用，制定本规范。

条文说明

我国处于世界两大地震带即环太平洋地震带和亚欧地震带之间，是一个强震多发国家。我国地震的特点是发生频率高、强度大、分布范围广、伤亡大、灾害严重。几乎所有的省市、自治区都发生过六级以上的破坏性地震。强烈地震造成了人员伤亡和极大的经济损失，使建设成果毁于一旦，引发长期的社会、政治和经济问题，并带来难以慰藉的感情创伤。公路桥梁是生命线系统工程中的重要组成部分。在抗震救灾中，公路交通运输网是抢救人民生命财产和尽快恢复生产、重建家园、减轻次生灾害的重要环节。

《公路桥梁抗震设计细则》（JTG/T B02-01—2008）（简称“08 细则”）发布实施以来，设计人员在使用过程中，发现了一些问题或不方便之处，提出了一些修改建议。在此期间，国内外公路桥梁抗震技术有了新的发展。为此，在广泛调研基础上，对 08 细则进行了修订，制定了本规范，主要对使用过程中发现的问题或不方便之处进行了修订，同时，消化吸收了一些桥梁抗震设计成熟新技术，以反映当前的桥梁抗震设计和研究水平。

1.0.2 本规范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。斜拉桥、悬索桥、单跨跨径超过 150m 的梁桥和拱桥，除满足本规范要求外，还应进行专门研究。

条文说明

自 20 世纪 90 年代以来，我国桥梁建设发展非常快，修建了大量单跨跨径超过 150m 的特大跨径桥梁，以及混凝土斜拉桥和悬索桥等特殊桥梁，因此，有必要将本规范的适用范围扩大到这些特殊桥梁。但由于特殊桥梁一般规模都很大，结构复杂，涉及的因素很多，每一座桥可能又有其自身的独特性，规范很难对特殊桥梁的抗震设计给出全面完整的规定，只能对普遍适用的共性要求做出规定。因此，本规范规定，特殊桥梁的抗震设计，应在满足本规范要求的基础上，根据桥梁的自身特点，进行专门研究和设计。目前美国、日本和欧洲等国家对特殊桥梁的抗震设计也是要求专门研究的。

1.0.3 根据公路桥梁的重要性和修复（抢修）的难易程度，桥梁抗震设防分为 A 类、

B类、C类和D类四个抗震设防类别，分别对应不同的抗震设防标准和设防目标。

条文说明

本规范从我国目前的具体情况出发，考虑到公路桥梁的重要性和在抗震救灾中的作用，本着确保重点和节约投资的原则，对不同桥梁要求不同的抗震安全度。具体来讲，将公路桥梁分为A、B、C、D四个抗震设防类别，并按抗震设防类别确定不同的设防标准和设防目标。

1.0.4 公路桥梁必须进行抗震设计，抗震设防烈度大于IX度地区的桥梁和有特殊要求的桥梁，其抗震设计应作专门研究。

1.0.5 对桥梁工程场地已做过专门地震安全性评价的桥梁，应采用按相关要求评审通过的抗震设防烈度。对桥梁工程场地未做地震安全性评价的桥梁，抗震设防烈度应采用现行《中国地震动参数区划图》（GB 18306）中桥梁所在地区的基本地震动峰值加速度对应的地震烈度。

条文说明

场地基本地震动峰值加速度对应的地震烈度详见本规范的表3.2.2。桥梁工程场地地震安全性评价的要求，见本规范第4章和第5章的相关规定。现行《中国地震动参数区划图》（GB 18306）中规定的最高烈度为IX度，但是，抗震设防烈度大于IX度的情况，在地震安全性评价的结果中是可能出现的。

1.0.6 公路桥梁的抗震设计，除应符合本规范的要求外，尚应符合国家和行业现行其他有关标准规范的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 抗震设防烈度 seismic fortification intensity

作为一个地区抗震设防依据的地震烈度，一般情况下取 50 年内超越概率 10%（重现期为 475 年）的地震烈度，依据现行《中国地震动参数区划图》（GB 18306）或专门的地震安全性评价工作确定。

2.1.2 抗震设防标准 seismic fortification criterion

衡量抗震设防要求高低的尺度，由抗震设防烈度或设计地震动参数及桥梁抗震设防类别确定。

2.1.3 抗震设防水准 seismic design level

为达到各类桥梁抗震设防目标而确定的设计地震动超越概率或重现期。

2.1.4 地震作用 earthquake action

作用在结构上的地震动，包括水平地震作用和竖向地震作用。

2.1.5 E1 地震作用 earthquake action E1

工程场地重现期较短的地震作用，在第一阶段抗震设计中采用。

2.1.6 E2 地震作用 earthquake action E2

工程场地重现期较长的地震作用，在第二阶段抗震设计中采用。

2.1.7 地震作用效应 seismic effect

由地震作用引起的桥梁结构内力与变形等效应的总称。

2.1.8 基本地震动峰值加速度 basic peak ground acceleration

重现期 475 年的 II 类场地地震动峰值加速度。

2.1.9 特征周期 characteristic period

设计加速度反应谱曲线下降段起始点对应的周期，取决于地震环境和场地类别。

2.1.10 设定地震 scenario earthquake

根据桥梁工程场地地震危险性概率估计、区域地震动衰减关系确定的与设防地震动协调一致的地震，用一对震级和距离的组合来表达。

2.1.11 多点非一致激励 multi-support excitation

为反映地震动场的空间变异性和空间相关性，表达地震中各个桥墩（台、塔）受到的地震作用的差异，抗震分析中采用的各个桥墩（台、塔）处不完全相同的地震动输入。

2.1.12 液化 liquefaction

地表饱和土层在地震中孔隙水压急剧上升，一时难以消散，有效应力减小，导致土体抗剪强度大幅降低的现象。多发生在饱和粉细砂中，常表现出喷水、冒砂以及构筑物沉陷、倾倒等现象。

2.1.13 侧向滑移 lateral spreading

液化导致的大范围地表土层的侧向滑动，往往引起桥墩、桥台的倾斜失稳和地表开裂。

2.1.14 抗震概念设计 seismic concept design

根据地震灾害和工程经验等归纳的基本设计原则和设计思想，进行桥梁结构总体布置、确定细部构造的过程。

2.1.15 弹性抗震设计 elastic seismic design

不允许桥梁结构发生塑性变形，用构件的强度作为衡量结构性能的指标，只需校核构件的强度是否满足要求。

2.1.16 延性抗震设计 ductility seismic design

允许桥梁结构发生塑性变形，不仅用构件的强度作为衡量结构性能的指标，同时要校核构件的变形能力是否满足要求。

2.1.17 延性构件 ductile member

抗震设计中有意设计的通过局部塑性变形来耗散地震能量、能够承受 E2 地震作用

下多个循环的弹塑性变形而强度没有显著退化的结构构件。

2. 1. 18 能力保护设计 capacity protection design

为保证延性抗震设计桥梁在 E2 地震作用下,可能出现塑性铰的桥墩的非塑性铰区、基础、盖梁和上部结构等构件不发生塑性变形和剪切破坏,同时桥墩的塑性铰区也不发生剪切破坏,对上述部位、构件进行的加强设计。

2. 1. 19 能力保护构件 capacity protected member

采用能力保护设计方法设计的构件。

2. 1. 20 减隔震设计 seismic isolation design

在桥梁上部结构和下部结构之间或下部结构与基础之间设置减隔震系统,以增大原结构体系阻尼和(或)周期,降低结构的地震反应和(或)减小输入到上部结构的能量,达到预期的防震要求。

2. 1. 21 抗震措施 seismic measure

地震作用计算和抗力计算以外的抗震设计内容,包括抗震构造措施。抗震措施等级根据桥梁抗震设防分类和抗震设防烈度确定。

2. 1. 22 抗震构造措施 details of seismic measures

根据震害经验归纳总结的对结构和非结构各部分必须采取的各种细部要求,一般不需地震作用计算和抗力计算。

2. 1. 23 限位装置 restrainer

为限制桥梁梁体与桥墩或桥台间的相对位移而设计的构造装置。

2. 1. 24 常规桥梁 ordinary bridge

包括单跨跨径不超过 150m 的圬工或混凝土拱桥、下部结构为混凝土结构的梁桥。

2. 1. 25 特殊桥梁 special bridge

包括斜拉桥、悬索桥、单跨跨径超过 150m 的梁桥和拱桥。

2.2 符号

2.2.1 作用和作用效应

- A —— 水平向基本地震动峰值加速度；
- E_{ea} —— 地震主动土压力；
- E_{ktp} —— 顺桥向作用于固定支座顶面或横桥向作用于上部结构质心处的水平地震力；
- E_{kti} —— 顺桥向作用于活动支座顶面处的水平地震力；
- E_{hau} —— 作用于台身质心处的水平地震力；
- E_{max} —— 固定支座容许承受的最大水平力；
- E_{hzh} —— 地震作用效应、永久作用效应和均匀温度作用效应组合后板式橡胶支座或固定盆式支座的水平力设计值；
- M_{sp} —— 上部结构的质量或一联上部结构的总质量；
- M_{cp} —— 盖梁质量；
- M_p —— 墩身质量；
- G_{au} —— 基础顶面以上台身重力；
- S_{max} —— 设计加速度反应谱最大值。

2.2.2 计算系数

- C_i —— 抗震重要性系数；
- C_s —— 场地系数；
- C_d —— 阻尼调整系数；
- C_e —— 液化抵抗系数；
- α —— 土层液化影响折减系数；
- K —— 地基抗震容许承载力调整系数；
- K_A —— 非地震条件下作用于台背的主动土压力系数；
- K_a —— 地震主动土压力系数；
- η_p —— 墩身质量换算系数；
- η_{cp} —— 盖梁质量换算系数。

2.2.3 几何特征

- d_0 —— 液化土特征深度；
- d_b —— 基础埋置深度；
- d_u —— 上覆非液化土层厚度；
- d_w —— 地下水位深度；
- d_s —— 纵向钢筋的直径；
- I_{eff} —— 有效截面抗弯惯性矩；
- s —— 箍筋的间距；
- Σt —— 板式橡胶支座橡胶层总厚度；
- θ —— 斜交角；
- φ —— 曲线梁的中心角。

2.2.4 材料指标

- E_c —— 桥墩的弹性模量；
- G_d —— 板式橡胶支座动剪切模量；
- f_{a0} —— 地基承载力基本容许值；
- $[f_{aE}]$ —— 调整后的地基抗震承载力容许值；
- $[f_a]$ —— 深宽修正后的地基承载力容许值；
- γ —— 土的重力密度；
- μ_d —— 支座动摩阻系数。

2.2.5 延性设计参数

- f_{kh} —— 箍筋抗拉强度标准值；
- f_{yh} —— 箍筋抗拉强度设计值；
- f_{ck} —— 混凝土抗压强度标准值；
- f_{cd} —— 混凝土抗压强度设计值；
- K_{ds} —— 延性安全系数；
- L_p —— 等效的塑性铰长度；
- M_y —— 等效屈服弯矩；

Δ_u	——	桥墩容许位移；
θ_u	——	塑性铰区域的最大容许转角；
ϕ^0	——	桥墩正截面极限弯矩超强系数；
ϕ_y	——	等效屈服曲率；
ϕ_u	——	极限曲率；
ρ_t	——	纵向配筋率；
ε_{su}^R	——	约束钢筋的折减极限应变；
ε_{lu}	——	纵筋的折减极限应变；
η_k	——	轴压比；
μ_{Δ}	——	墩柱构件位移延性系数。

2.2.6 其他参数

g	——	重力加速度；
v_s	——	土层剪切波速；
N_1	——	土层实际标准贯入锤击数；
N_{cr}	——	土层液化判别标准贯入锤击数临界值；
T	——	结构自振周期；
T_g	——	场地特征周期；
T_1	——	结构自振基本周期；
ξ	——	结构阻尼比；
ω_1	——	结构自振基本圆频率；
ξ_{eff}	——	减隔震桥梁或减隔震装置的等效阻尼比。

3 基本要求

3.1 桥梁抗震设防分类和设防标准

3.1.1 桥梁抗震设防类别应按表 3.1.1 确定。对抗震救灾以及在经济、国防上具有重要意义的桥梁或破坏后修复（抢修）困难的桥梁，应提高抗震设防类别。

表 3.1.1 桥梁抗震设防分类

桥梁抗震设防类别	适用范围
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

条文说明

为确保重点和节约投资，将公路桥梁分为 A 类、B 类、C 类和 D 类四个抗震设防类别，A 类抗震设防要求和类别最高，B 类、C 类和 D 类抗震设防类别依次降低。

3.1.2 A 类、B 类和 C 类桥梁应采用两水准抗震设防，D 类桥梁可采用一水准抗震设防，在 E1 和 E2 地震作用下，桥梁抗震设防目标应符合表 3.1.2 的要求。

表 3.1.2 桥梁抗震设防目标

桥梁抗震 设防类别	设防目标			
	E1 地震作用		E2 地震作用	
	震后使用要求	损伤状态	震后使用要求	损伤状态
A 类	可正常使用	结构总体反应在弹性范围，基本无损伤	不需修复或经简单修复可正常使用	可发生局部轻微损伤
B 类	可正常使用	结构总体反应在弹性范围，基本无损伤	经临时加固后可供维持应急交通使用	不致倒塌或产生严重结构损伤
C 类	可正常使用	结构总体反应在弹性范围，基本无损伤	经临时加固后可供维持应急交通使用	不致倒塌或产生严重结构损伤
D 类	可正常使用	结构总体反应在弹性范围，基本无损伤	—	—

注：B 类、C 类中的斜拉桥和悬索桥以及采用减隔震设计的桥梁，其抗震设防目标应按 A 类桥梁要求执行。

条文说明

E1 地震作用下，要求各类桥梁在弹性范围工作，结构强度和刚度基本保持不变。
E2 地震作用下，A 类桥梁局部可发生开裂，裂缝宽度也可超过容许值，但混凝土保护层

应保持完好，因地震过程的持续时间比较短，地震后，在结构自重作用下，地震过程中开展的裂缝一般可以闭合，不影响使用，结构整体反应还在弹性范围。B类、C类桥梁在E2地震作用下要求不倒塌，且结构强度不能出现大幅度降低，对钢筋混凝土桥梁墩柱，其抗弯承载能力降低幅度不应超过20%。

在E2地震作用下，斜拉桥和悬索桥如允许桥塔进入塑性，将产生较大变形，从而使结构受力体系发生大的变化，例如，可能出现部分斜拉索或吊杆不受力的情况，甚至导致桥梁垮塌等严重后果。采用减隔震设计的桥梁，主要通过减隔震装置耗散地震能量，就能够有效降低结构的地震响应，使桥梁墩柱不进入塑性状态，此外，如允许桥梁墩柱进入塑性状态形成塑性铰，将导致结构的耗能体系混乱，还可能导致过大的结构位移和计算分析上的困难。因此规定，B类、C类中的斜拉桥和悬索桥以及采用减隔震设计的桥梁抗震设防目标应按A类桥梁要求执行。

3.1.3 桥梁的抗震措施等级和抗震重要性系数，应符合下列要求：

1 在不同抗震设防烈度下的桥梁抗震措施等级应按表 3.1.3-1 确定。

表 3.1.3-1 桥梁抗震措施等级

桥梁类别	抗震设防烈度					
	VI	VII		VIII		IX
	0.05g	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g	0.4g
A类	二级	三级	四级	四级	更高，专门研究	
B类	二级	三级	三级	四级	四级	四级
C类	一级	二级	二级	三级	三级	四级
D类	一级	二级	二级	三级	三级	四级

注：g为重力加速度，各等级抗震措施的具体规定见本规范第11章。

2 桥梁抗震重要性系数 C_i ，应按表 3.1.3-2 确定。

表 3.1.3-2 桥梁抗震重要性系数 C_i

桥梁类别	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B类大桥、特大桥，其抗震重要性系数取B类括号内的值。

条文说明

08 细则在编制过程中对桥梁抗震设防分类、设防标准和设防目标开展了专题研究，成果归纳为上述条款。汶川地震后，在交通运输部组织下，对桥梁震害进行了详细调查和分析，对震害机理开展了详细研究，进一步对桥梁抗震设防分类、设防目标和设防标准进行了深入研究。研究成果表明，08 细则的桥梁抗震设防分类、设防目标和设防标准是合适的。因此，本次修订对相关条款的具体内容未做改变，只对相关条款的顺序进行了梳理。同时，对抗震措施选用，引进了抗震措施等级的概念，使表达更为清晰，避免混淆。

与 3.1.2 条规定的抗震设防目标相协调，各类桥梁的抗震重要性系数对应的重现期列于表 3-1。严格地讲，抗震重要性系数 1.0 对应重现期 475 年是准确的，其余的对应关系是近似的。

表 3-1 抗震重要性系数和重现期对照表

抗震重要性系数	1.7	1.3	1.0	0.5	0.43	0.34	0.23
重现期(年)	2000	1000	475	100	75	50	25

本规范采用两水准设防，两阶段设计；D 类桥梁，因规模小、路线等级低，一般采用一水准设防，一阶段设计。对 A 类桥梁、B 类和 C 类中的斜拉桥和悬索桥以及采用减隔震设计的桥梁，第一阶段和第二阶段抗震设计均采用弹性抗震设计，但 E1 地震作用下的抗震计算应采用全截面刚度，E2 地震作用下的抗震计算可采用开裂截面刚度。对其他 B 类、C 类桥梁，第一阶段的抗震设计，即对应 E1 地震作用的抗震设计，采用弹性抗震设计，保证桥梁结构在 E1 地震作用下处于弹性状态。第二阶段的抗震设计，即对应 E2 地震作用的抗震设计，采用延性抗震设计，并引入能力保护设计原则。确保在 E2 地震作用下结构具有足够的延性变形能力，即结构的延性变形能力应大于延性变形需求并有适当的安全储备，通过能力保护设计，确保塑性铰只在选定的位置出现，并且不出现剪切破坏等破坏模式。

08 细则采用烈度表达抗震措施等级，易与抗震设防烈度混淆、产生歧义，为表述更清晰，本次修订直接采用四个级表达抗震措施等级，08 细则中 VI 度区的抗震措施称为一级，VII 度区的为二级，VIII 度区的为三级，IX 度区的为四级。各等级抗震措施的具体规定详见本规范第 11 章。

3.1.4 立体交叉的跨线桥梁的抗震设防标准应不低于其跨越的下线工程的抗震设防标准。

条文说明

立体交叉的跨线桥梁一旦遭受地震破坏，不仅会影响到上线交通，还会影响到下线交通，因此，应按上、下两线中较高的抗震设防标准来进行抗震设计。如果跨越其他通道或构筑物（如铁路），也应按本条要求执行。

3.2 地震作用的基本要求

3.2.1 公路桥梁抗震设计的地震作用，应采用桥梁所在地区的基本地震动峰值加速度和反应谱特征周期，按场地条件和本规范第 3.1.3 条第 2 款规定的抗震重要性系数调整确定。

条文说明

对未做专门的地震安全性评价的桥梁工程场地，地震作用只能根据现行《中国地震动参数区划图》（GB 18306）的附录 C 确定，但《中国地震动参数区划图》中只给出了 II 类场地的基本地震动峰值加速度和特征周期，其他类别场地需根据 II 类场地的参数进行调整，详见本规范第 5.2.2 条和第 5.2.3 条。本规范引入抗震重要性系数，对不同设防类别的桥梁，赋予不同的抗震重要性系数来调整地震作用，表达抗震设防水准的差别。做过专门的地震安全性评价的桥梁工程场地，地震作用可根据评审通过的地震安全性评价结果确定。

3.2.2 公路桥梁抗震设防烈度与现行《中国地震动参数区划图》（GB 18306）基本地震动峰值加速度的对应关系，应按表 3.2.2 的规定确定。

表 3.2.2 抗震设防烈度和基本地震动峰值加速度 A 对照表

抗震设防烈度	VI	VII	VIII	IX
A	0.05g	0.10 (0.15) g	0.20 (0.30) g	0.40g

条文说明

表 3.2.2 是根据现行《中国地震动参数区划图》（GB 18306）的表 G.1 确定的。区划图的表 G.1 中，A 是用 II 类场地的地震动峰值加速度 5 个范围表达的，本规范 A 值直接采用《中国地震动参数区划图》上 II 类场地的基本地震动峰值加速度分区值，与区划图标准的表 F.1 是一致的，具体取值可在区划图标准的附录 C 中查取，因此表 3.2.2 的对应关系也采用基本地震动峰值加速度分区值表达。此外，区划图上没有 $\geq 0.75g$ 的区，因此表 3.2.2 只保留 4 个抗震设防烈度。根据定义，烈度表达的是一般场地上地震动强烈程度的平均特征，即与 II 类场地对应。其他场地类别的地震动峰值加速度是依相

应 II 类场地的值调整得到的，表达的是同一烈度下场地条件对地震动的影响，并不对应另外的抗震设防烈度。

3.2.3 对桥梁工程场地进行专门的地震安全性评价时，除应符合现行《工程场地地震安全性评价》（GB 17741）的规定外，确定抗震设防标准及地震作用时还应满足本规范的相关规定。

条文说明

桥梁工程场地专门的地震安全性评价，要确定抗震设防烈度，以及对应各类桥梁抗震设防标准的设计地震动参数，即对应 E1 和 E2 地震作用的设计地震动参数，各类桥梁 E1 和 E2 地震作用的重现期可按本规范表 3-1 确定。此外，是否需要考虑竖向地震作用以及地震动空间变化等也应参照本规范的要求执行，详见本规范第 5 章的有关规定。

3.3 抗震设计方法分类及流程图

3.3.1 根据桥梁抗震设防分类及抗震设防烈度，桥梁抗震设计方法可分为以下 3 类：

1 1 类，应进行 E1 地震作用和 E2 地震作用下的抗震分析和抗震验算，并应满足本章第 3.4 节桥梁结构抗震体系的要求以及相关构造和抗震措施的要求。

2 2 类，应进行 E1 地震作用下的抗震分析和抗震验算，并应满足相关构造和抗震措施的要求。

3 3 类，应满足相关构造和抗震措施的要求，可不进行抗震分析和抗震验算。

条文说明

为确保桥梁结构的抗震安全性，同时尽可能减小计算工作量，本规范对各抗震设防类别的桥梁、各抗震设防烈度的桥梁规定了相应的抗震设计要求和抗震设计内容。总的原则是要求抗震设防类别高的桥梁、抗震设防烈度高的桥梁做更精细的抗震设计。根据抗震设计要求和抗震设计内容的不同，本规范将抗震设计方法分为 3 类。

3.3.2 桥梁抗震设计方法应按表 3.3.2 选用。

表 3.3.2 桥梁抗震设计方法选用

桥梁类别	抗震设防烈度					
	VI	VII		VIII		IX
	0.05g	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g	0.4g
A 类	1 类	1 类	1 类	1 类	1 类	1 类
B 类	3 类	1 类	1 类	1 类	1 类	1 类
C 类	3 类	1 类	1 类	1 类	1 类	1 类
D 类	3 类	2 类	2 类	2 类	2 类	2 类

注：圬工拱桥、重力式桥墩和桥台的抗震设计方法可选2类。

条文说明

参照现行国内外相关桥梁抗震设计规范，本规范规定，对Ⅵ度区的B类、C类、D类桥梁，可只需满足相关构造和抗震措施要求，不需进行抗震分析；对Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度区的D类桥梁，可只进行E1地震作用下的抗震计算和验算，并满足相关构造和抗震措施要求；圬工拱桥、重力式桥墩和桥台一般为混凝土结构，结构尺寸大，基本无延性，不能考虑延性抗震设计，因此规定可只进行E1地震作用下的抗震设计，本条沿用了89规范和08细则的规定，现有经验表明，照此设计的桥梁在实际地震中表现良好；对其他桥梁，则应进行E1地震作用和E2地震作用下的抗震计算和验算，并满足相关构造和抗震措施要求。

3.3.3 桥梁抗震设计可采用图3.3.3的抗震设计流程进行。

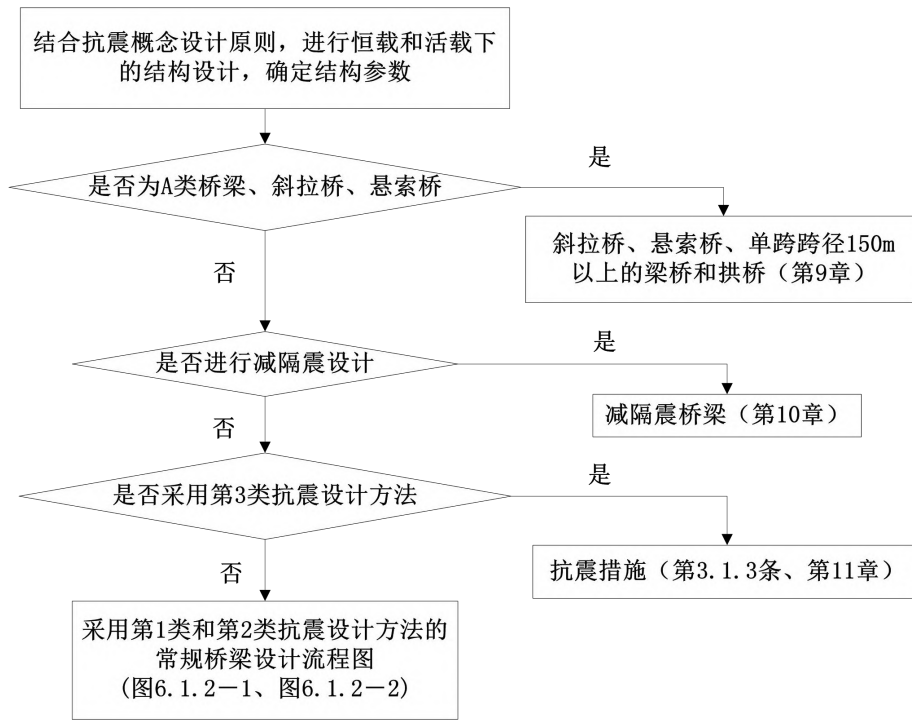


图 3.3.3 抗震设计总流程图

3.4 桥梁结构抗震体系

3.4.1 桥梁结构抗震体系应符合下列规定：

- 1 有可靠和稳定的传力途径。
- 2 有明确、可靠的位移约束，能有效地控制结构地震位移，防止落梁。

3 有明确、合理、可靠的能量耗散部位。

4 应具有避免因部分结构构件的破坏而导致结构倒塌的能力。

条文说明

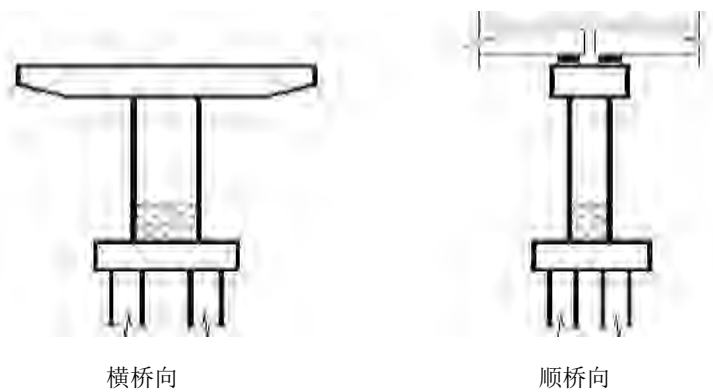
桥梁结构抗震体系，是指用于承担地震作用的各种桥梁结构体系的总称，主要功能为承担水平向和竖向地震作用。

本条是在归纳总结历次地震震害教训基础上给出的规定，目的是避免地震作用下桥梁结构出现整体破坏和倒塌，保证交通生命线不至中断。

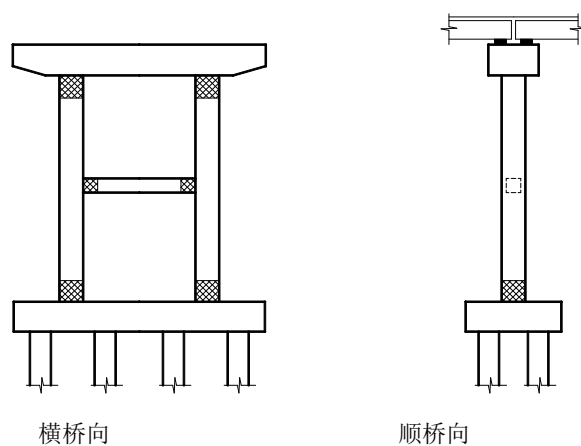
3.4.2 对 B 类和 C 类梁桥，可采用以下两种抗震体系：

1 类型 I，地震作用下，桥梁的弹塑性变形、耗能部位位于桥墩，典型单柱墩和双柱墩的耗能部位即潜在塑性铰区域如图 3.4.2 所示。

2 类型 II，地震作用下，桥梁的耗能部位位于桥梁上、下部连接构件，包括减隔震支座和耗能装置。



(a) 连续梁、简支梁桥单柱墩



(b) 连续梁、简支梁桥双柱墩

图 3.4.2 连续梁、简支梁桥单柱墩和双柱墩的耗能部位（潜在塑性铰区域）示意图

（图中：■ 代表潜在塑性铰区域）

条文说明

对钢筋混凝土桥梁，目前国内外采用的结构抗震体系主要有两类。一类是按延性抗震设计的桥梁，地震作用下利用桥梁墩柱发生塑性变形，延长结构周期，耗散地震能量。对这类结构，允许发生塑性变形的耗能部位一般应选择在易于检查和修复的构件上。图 3.4.2 给出了简支梁桥单柱墩和双柱墩的适宜耗能部位示意图，对有系梁双柱墩，在墩柱和系梁的节点部位也可能发生塑性变形，一般宜考虑塑性变形发生在系梁上。另一类为按减隔震设计的桥梁，地震作用下，利用桥梁上、下部结构的连接构件（支座、耗能装置）发生塑性变形或增大阻尼，延长结构周期，耗散地震能量，从而减小结构地震反应。据此，本规范将桥梁结构抗震体系分为两类。

地震作用下，桥梁结构的耗能部位应在抗震设计时预先确定，应对结构的变形能力进行校核，同时应确保结构的其他部位不能比耗能部位更薄弱。

一般来讲，桥梁结构形式越规则，刚度和强度分布越均匀，其抗震性能越好。因此，桥梁不同墩柱的高差尽量不要太大，斜桥的斜交程度和曲线桥的曲线程度也宜尽量减小。

3.4.3 对采用抗震体系类型 I 的桥梁，抗震设计时，墩柱、系梁应作为延性构件设计，桥梁基础、盖梁、支座、梁体和节点宜作为能力保护构件，墩柱的抗剪强度应按能力保护原则设计。

条文说明

美国 1971 年发生的圣费尔南多地震是桥梁抗震设计理念和设计方法发展的转折点，人们在震害调查和研究基础上认识到了结构延性能力对结构抗震的重要性。经过数十年的研究发展，目前国内外桥梁抗震设计规范都采用延性抗震设计方法取代了以前单纯依靠强度的抗震设计方法。20 世纪 70 年代，新西兰学者 Park 等提出了结构抗震设计方法中的一个重要原则——能力保护设计原则，并最早在新西兰的混凝土结构设计规范（NZS3101，1982）中得到应用。随后这个设计原则逐渐被世界各国的桥梁抗震设计规范所采用。

能力保护设计原则的基本思想，和电路设计中采用保险丝的原理是一样的。即在结构设计中，使结构体系中的延性构件和能力保护构件形成强度等级差异，确保结构损伤只发生在延性构件预先选择的部位上，同时确保结构不发生脆性破坏模式。一般来讲，基于能力保护设计原则的结构设计过程如下：

- (1) 选择合理的结构布局；

(2) 选择地震作用下结构预期出现弯曲塑性铰的合理位置,保证结构能形成一个适当的塑性耗能机制,通过强度和延性设计,确保塑性铰区域截面的延性能力;

(3) 确立适当的强度等级,确保预期出现弯曲塑性铰的构件不发生脆性破坏模式(如剪切破坏、粘结破坏等),并确保脆性构件和不宜用于耗能的构件(能力保护构件)处于弹性反应范围。

具体到梁桥,按能力保护设计原则设计,应考虑以下几方面:

(1) 潜在塑性铰的位置一般选择在墩柱上,墩柱按延性构件设计,可以发生弹塑性变形,耗散地震能量;

(2) 墩柱的设计剪力值按能力保护设计原则进行计算,应为与墩柱的极限弯矩(考虑超强系数)所对应的剪力。在计算剪力设计值时,应考虑所有塑性铰位置以确定最大的设计剪力;

(3) 盖梁、节点及基础按能力保护构件设计,其设计弯矩、设计剪力和设计轴力应为与墩柱的极限弯矩(考虑超强系数)所对应的弯矩、剪力和轴力。在计算盖梁、节点及基础的设计弯矩、设计剪力和设计轴力时,应考虑所有塑性铰位置以确定最大的设计弯矩、设计剪力和设计轴力。

3.4.4 对采用板式橡胶支座的桥梁,在E2地震作用下,如支座抗滑性能不满足本规范第7.5节的要求,可选择以下措施之一:

1 采用其他类型支座,根据选择的支座类型确定抗震体系类型并按本规范相关规定进行抗震设计。

2 通过专项设计设置梁体限位装置,根据是否允许支座产生相对滑动确定抗震体系类型。

1) 在确保支座不产生相对滑动的条件下,由限位装置和支座共同传递水平地震力,可按抗震体系类型I进行抗震设计。

2) 如允许支座和梁底产生相对滑动,在确保支座和墩(台)顶不产生相对滑动以及不发生落梁破坏的条件下,应按抗震体系类型II进行抗震设计。抗震分析应采用非线性时程分析方法,考虑支座的滑动效应、限位装置的非线性特性的影响。

条文说明

我国中小跨径桥梁广泛采用板式橡胶支座,梁体直接搁置在支座上,支座与梁底和墩(台)顶无螺栓连接。汶川地震震害表明,这种支座布置形式,在地震作用下梁底与支座顶面容易产生相对滑动,导致较大的梁体位移,甚至出现落梁破坏。对于板式橡胶支座在E2地震作用下,其抗滑性能不能满足要求的情况下,可采用其他类型支座或梁体位移约束装置。

对于更换支座类型的方案，更换采用的支座类型不同，桥梁的抗震体系也可能不同。如选用减隔震支座，则按抗震体系类型Ⅱ进行抗震设计，满足本规范第 10 章减隔震设计的要求。

对采用梁体限位装置的方案，需要同时满足正常使用要求（即不影响正常使用）和抗震要求，不同类型限位装置的特性也可能不同，计算分析也相对复杂，由于目前这方面的设计经验还不够多，因此规定通过专项设计设置梁体限位装置，即根据实际情况开展一定研究的基础上进行设计。

如允许支座和梁底产生相对滑动，可有效降低桥梁墩柱承受的水平地震力，实际上是一种减隔震体系，因此规定按抗震体系类型Ⅱ进行抗震设计，即桥梁墩柱、基础等的设计满足减隔震设计的要求，不允许桥梁墩柱形成塑性铰，以避免耗能体系的混乱。支座的滑动效应、限位装置的非线性特性对地震响应的影响较大，因此抗震分析时需要考虑。

3.4.5 地震作用下，连续梁桥固定支座水平抗震能力不满足本规范的要求时，可通过计算设置连接梁体和墩柱间的剪力键，由剪力键承受支座所受水平地震力，或按本规范第 10 章的要求进行减隔震设计。

条文说明

纵向地震作用下，多跨连续梁桥的固定支座一般要承受较大的水平地震力，可能出现支座不能满足抗震验算要求的情况，对于这种情况，如固定墩及固定墩基础具有足够的抗震能力，能满足相关的抗震性能要求，可以通过计算设置剪力键，由剪力键承受支座所受水平地震力。

3.4.6 一般情况下，多跨桥梁的桥台不宜作为抵抗梁体地震惯性力的构件，桥台处宜采用活动支座，桥台上的横向抗震挡块宜设计为在 E2 地震作用下可以损伤。如需要利用桥台承担部分梁体地震惯性力，则应进行专门研究和设计。

条文说明

顺桥向，对于连续梁桥或多跨简支梁桥，我国一般都在桥台处设置纵向活动支座。因此，顺桥向地震作用下，梁体纵向地震惯性力主要由桥墩承受。横桥向，如在桥台处设置横向抗震挡块，横桥向地震作用下，梁体地震惯性力按墩、台水平刚度分配，由于桥台刚度大，将承受较大的横向地震惯性力。因此桥台上的横向挡块宜设计为在 E2 地震作用下可以破坏，以减小桥台所受横向地震力。对于单跨简支梁桥，通常在桥台处采用板式橡胶支座，使两侧桥台共同承担水平地震力。

3.4.7 当B类和C类梁桥抗震体系不能满足本规范第3.4.2条对结构抗震体系的要求时,应进行专门研究,结构在地震作用下的性能必须满足本规范表3.1.2的要求。

3.5 抗震概念设计

3.5.1 根据工程场地条件,应按本规范第4章的相关要求,选择合适的桥位。在场地地质条件不连续、地震时地基可能产生较大相对位移的地段,不宜修建拱桥。在液化场地或软弱土层场地,桥梁基础应穿过液化土层或软土层。

条文说明

震害经验表明,拱桥对地基的相对位移很敏感,地震时如地基产生较大相对位移,可能导致桥梁整体垮塌,因此,在这种地段,不宜选择修建拱桥。在液化场地或软弱土层场地,为避免地震时因地基失效而导致桥梁倾斜或垮塌,桥梁基础应穿过液化土层或软土层。

3.5.2 桥梁应尽量采用对称的结构形式和均匀的布置方案。

条文说明

采用对称的结构形式和均匀的布置方案,使桥梁结构刚度和质量对称和均衡分布,有利于桥梁结构各部分共同承担水平地震力。

3.5.3 梁式桥一联内桥墩的刚度比宜满足下列要求:

1 任意两桥墩的水平向抗推刚度比

1) 桥面等宽

$$\frac{k_i^e}{k_j^e} \geq 0.5 \quad (3.5.3-1)$$

2) 桥面变宽

$$2 \geq \frac{k_i^e m_j}{k_j^e m_i} \geq 0.5 \quad (3.5.3-2)$$

2 相邻桥墩的水平向抗推刚度比

1) 桥面等宽

$$\frac{k_i^e}{k_j^e} \geq 0.75 \quad (3.5.3-3)$$

2) 桥面变宽

$$1.33 \geq \frac{k_i^e m_j}{k_j^e m_i} \geq 0.75 \quad (3.5.3-4)$$

式中： k_i^e 、 k_j^e ——分别为第*i*和第*j*桥墩考虑支座刚度后计算出的组合刚度（含顺桥向和横桥向）， $k_j^e \geq k_i^e$ ；

m_i 、 m_j ——分别为第*i*和第*j*桥墩墩顶考虑墩身换算质量和盖梁换算质量的等效梁体质量。

条文说明

刚度和质量均衡分布是桥梁抗震设计理念中最重要的一条。对于上部结构连续的桥梁，各桥墩高度宜尽可能相近。对于相邻桥墩高度相差较大导致刚度相差较大的情况，水平地震力在各墩间的分配一般不理想，刚度大的墩将承受较大的水平地震力，同时，刚度小的墩将会有较大的墩顶位移，从而使上部结构产生偏转并导致墩柱承受扭矩，因此将严重影响结构的整体抗震能力。美国在上世纪90年代，通过对实际桥梁震害的调查和分析研究，认识到了刚度和质量均衡分布的重要性，并开展了系统研究，相关研究成果写进了CALTRANS桥梁抗震设计规范和AASHTO桥梁抗震设计规范。本条直接引用了CALTRANS（2013版）桥梁抗震设计规范的相关条款。

3.5.4 多联梁式桥相邻联的基本周期比宜满足以下要求：

$$\frac{T_i}{T_j} \geq 0.7 \quad (3.5.4)$$

式中： T_i 、 T_j ——分别为第*i*联和第*j*联的基本周期（含顺桥向和横桥向）， $T_i \leq T_j$ 。

条文说明

梁式桥相邻联周期相差较大时，在地震作用下会产生相邻联的非同向振动，从而导致伸缩缝处相邻梁体间产生较大的相对位移或产生伸缩缝碰撞。为减小相邻联的非同向振动，美国CALTRANS桥梁抗震设计规范和AASHTO桥梁抗震设计规范给出了相关规定。本条直接引用了CALTRANS（2013版）桥梁抗震设计规范的相关条款。

3.5.5 梁式桥一联内各桥墩刚度相差较大或相邻联基本周期相差较大时，宜采用以下方法调整一联内各墩刚度比和相邻联周期比：

1 顺桥向各桥墩刚度相差较大时，宜在各墩顶设置合理剪切刚度的橡胶支座，来调整各墩的等效刚度。

2 改变墩柱尺寸或构造形式。

条文说明

为保证桥梁刚度和质量的均衡分布，设计时应优先考虑等跨径、等墩高、等桥面宽度的结构形式。如受条件限制不能均衡布置，也可通过调整墩柱截面尺寸和支座等方法来改善桥梁刚度和质量的分布。调整支座参数是最简单易行的办法，效果也很显著。采用橡胶支座时，由墩和支座构成的串联体系的水平刚度 k_t 为：

$$k_t = \frac{k_z k_p}{k_z + k_p} \quad (3-1)$$

式中： k_p ——桥墩的水平刚度；

k_z ——橡胶支座的剪切刚度。

由上式可以看出，调整支座的刚度，可使各墩位处的刚度更为均衡。由于水平地震力是根据各墩串联体系的水平刚度按比例进行分配的，因此，通过调整支座刚度，可有效调整水平地震力在各墩间的分配。

3.5.6 梁式桥的矮墩不宜设置固定支座，宜设置活动支座或板式橡胶支座。

3.5.7 双柱墩或多柱墩在横桥向地震作用下，盖梁的抗震设计应考虑盖梁可能会出现正负弯矩交替作用的情况。

3.6 作用效应组合

3.6.1 公路桥梁抗震设计应考虑以下作用效应：

- 1 永久作用，包括结构重力（恒载）、预应力、土压力、水压力。
- 2 地震作用，包括地震动的作用和地震土压力、动水压力等。
- 3 在进行支座等墩梁连接构件抗震验算时，还应计入 50% 的均匀温度作用效应。

条文说明

由于地震发生概率很小，持续时间也很短，参考美国、日本和欧洲桥梁抗震设计规范的处理方法，本规范未考虑与活载的组合。

3.6.2 作用效应组合应包括本规范第 3.6.1 条的各种作用效应的最不利组合。作用效应的组合系数应取 1.0，当有特殊规定时，组合系数应按相关规定取值。

条文说明

作用效应的组合系数一般应取 1.0，当有特殊规定时，组合系数按相关的具体规定取值。

4 场地、地基和基础

4.1 场地

4.1.1 桥位选择应在工程地质勘察和专项工程地质、水文地质调查的基础上,按地质构造的活动性、边坡稳定性和场地的地质条件等进行综合评价,应查明对公路桥梁抗震有利、一般、不利和危险的地段,宜充分利用对抗震有利地段。

条文说明

抗震有利地段一般系指建设场地及其邻近无晚近期活动性断裂,地质构造相对稳定,同时地基为比较完整的岩体、坚硬土或开阔平坦密实的中硬土等。

抗震不利地段一般系指软弱黏性土层、液化土层和地层严重不均匀的地段;地形陡峭、孤突、岩土松散、破碎的地段;地下水位埋藏较浅、地表排水条件不良的地段。严重不均匀地层系指岩性、土质、层厚、界面等在水平方向变化很大的地层。

抗震危险地段一般系指地震时可能发生滑坡、崩塌的地段;地震时可能塌陷的地段、溶洞等岩溶地段和已采空的矿穴地段,河床内基岩具有倾向河槽的构造软弱面被深切河槽所切割的地段,发震断裂、地震时可能坍塌而中断交通的各种地段。

抗震一般地段系指:除抗震有利、不利和危险地段以外的其他地段。

4.1.2 场地岩土工程勘察,应根据实际需要划分对桥梁抗震有利、一般、不利和危险的地段,提供场地类别和岩土地震稳定性(含滑坡、崩塌、液化和震陷特性)评价。对需要采用时程分析法计算的桥梁,尚应根据设计要求提供土层剖面、场地覆盖层厚度和抗震计算必须的动力参数。

条文说明

本条规定参考《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)第4.1.9条制定,对岩土工程勘察包括地震安全性评价的工作内容作出规定。

4.1.3 在抗震不利地段布设桥位时,宜对地基采取适当抗震加固措施。在软弱黏性土层、液化土层和严重不均匀地层上,不宜修建大跨径超静定桥梁和其他对地基不均匀变形敏感的桥梁。

4.1.4 公路桥梁宜绕避抗震危险地段,当C类桥梁中的大桥和特大桥、B类桥梁、A类桥梁必须通过抗震危险地段时,应在工程场地地震安全性评价的基础上研究制定相应的对策。

4.1.5 对地震时可能因发生滑坡、崩塌而造成堰塞湖的地段，应估计其淹没和溃决的影响范围，合理确定路线的高程，选定桥位。当可能因发生滑坡、崩塌而改变河流流向、影响岸坡和桥梁墩台以及路基的安全时，应采取应对措施。

4.1.6 桥梁工程场地土层剪切波速应按下列要求确定：

1 A类和B类桥梁，可通过现场实测确定。现场实测时钻孔数量应满足如下要求：中桥不少于1个、大桥不少于2个、特大桥宜适当增加。

2 C类和D类桥梁，当无实测剪切波速时，可根据岩土名称和性状按表4.1.6划分土的类型，并结合当地的经验，在表4.1.6的范围内估计各土层的剪切波速。

表 4.1.6 土的类型划分和剪切波速范围

土的类型	岩土名称和性状	土层剪切波速 v_s 范围 (m/s)
岩石	坚硬、较硬且完整的岩石	$v_s > 800$
坚硬土或软质岩石	破碎和较破碎的或软和较软的岩石，密实的碎石土	$800 \geq v_s > 500$
中硬土	中密、稍密的碎石土，密实、中密的砾、粗（中）砂， $f_{a0} > 150$ 的黏性土和粉土，坚硬黄土	$500 \geq v_s > 250$
中软土	稍密的砾、粗（中）砂，除松散外的细、粉砂， $f_{a0} \leq 150$ 的黏性土和粉土， $f_{a0} > 130$ 的填土，可塑黄土	$250 \geq v_s > 150$
软弱土	淤泥和淤泥质土，松散的砂，新近沉积的黏性土和粉土， $f_{a0} \leq 130$ 的填土，流塑黄土	$v_s \leq 150$

注： f_{a0} 为荷载试验等方法得到的地基承载力基本容许值（kPa）。

条文说明

一般情况下，A类桥梁工程场地土层剪切波速的现场实测工作，属于其工程场地地震安全性评价的工作内容之一。

4.1.7 工程场地覆盖层厚度应按下列要求确定：

1 一般情况下，应按地面至剪切波速大于 500m/s 且其下卧各层岩土剪切波速均不小于 500m/s 的土层顶面的距离确定。

2 地面 5m 以下存在剪切波速大于相邻上层土剪切波速 2.5 倍的土层，且其下卧各层岩土剪切波速均不小于 400m/s 时，可按地面至该土层顶面的距离确定。

3 剪切波速大于 500m/s 的孤石、透镜体，应视同周围土层。

4 土层中的火山岩硬夹层，应视为刚体，其厚度应从覆盖土层中扣除。

条文说明

本条规定参考《建筑抗震设计规范》（GB50011—2010）的有关规定，作了少量修订。

4.1.8 土层平均剪切波速应按下式计算：

$$v_{se} = d_0 / t \quad (4.1.8-1)$$

$$t = \sum_{i=1}^n (d_i / v_{si}) \quad (4.1.8-2)$$

式中： v_{se} ——土层平均剪切波速（m/s）；

d_0 ——计算深度（m），取覆盖层厚度和 20m 二者的较小值；

t ——剪切波在地面至计算深度之间的传播时间（s）；

d_i ——计算深度范围内第 i 土层的厚度（m）；

v_{si} ——计算深度范围内第 i 土层的剪切波速（m/s）；

n ——计算深度范围内土层的分层数。

4.1.9 桥梁工程场地类别，应根据土层平均剪切波速和场地覆盖土层厚度，按表 4.1.9 的规定划分为四类，其中 I 类分为 I_0 、 I_1 两个亚类。

表 4.1.9 桥梁工程场地类别划分

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			
$500 \geq v_{se} > 250$		<5	≥ 5		
$250 \geq v_{se} > 150$		<3	3~50	>50	
$v_{se} \leq 150$		<3	3~15	>15, ≤ 80	>80

注：表中数据为场地覆盖土层厚度（m）， v_s 为岩石的剪切波速。

条文说明

本条规定参考《建筑抗震设计规范》（GB50011—2010）的有关规定，作了文字修订。将该标准中“等效剪切波速”改为平均剪切波速，含义相同，物理意义更明确。

4.1.10 桥梁工程场地范围内有发震断裂时，应对断裂的工程影响进行评价。

1 当符合下列条件之一时，可不考虑发震断裂错动对桥梁的影响：

- 1) 抗震设防烈度小于Ⅷ度。
- 2) 非全新世活动断裂。
- 3) 抗震设防烈度为Ⅷ度和Ⅸ度时，前第四纪基岩隐伏断裂的土层覆盖厚度分别大于 60m 和 90m。

2 当不能满足上述第 1 款条件时，宜采取下列措施：

1) A 类桥梁宜避开主断裂，抗震设防烈度为Ⅷ度和Ⅸ度地区，其避开主断裂的距离即桥墩边缘至主断裂带外缘的距离分别不宜小于 300m 和 500m。

2) A 类以下桥梁宜采用跨径较小、便于修复的结构。

3) 当桥位无法避开发震断裂时，宜将全部墩台布置在断层的同一盘（最好是下盘）上；当不能将全部墩台布置在断层的同一盘时，宜进行专项研究。

条文说明

对构造物附近范围发震断裂的工程影响进行评价，是地震安全性评价的内容，对于本规范没有要求进行工程场地地震安全性评价的桥梁工程，可以结合场地工程地质勘察的评价，按本条规定采取措施。在此处，发震断裂的工程影响主要是指发震断裂引起的地表破裂对工程结构的影响。对这种瞬时间产生的地表错动还没有经济、有效的工程构造措施，主要靠避让来减轻危险性。国外有报道称，某些具有坚固基础的建筑物曾成功地抵抗住或转移了数英寸的地表破裂，结构物未发生破坏（Youd, 1989），指出优质配筋的筏式基础和内部拉接坚固的基础效果最好，可供设计者参考。

(1) 实际发震断裂引起的地表破裂与地震烈度没有直接的关系，而是与地震的震级有一定的相关性。从目前积累的资料看，6 级以下的地震引起地表破裂的仅有一例，所以本条所提的“抗震设防烈度小于Ⅷ度”，实质是指地震的震级小于 6 级。设计人员很难判断工程所面临的未来地震震级，地震烈度可以直接从地震区划图上查到。本条的提法，便于设计人员使用。

(2) 在活动断层调查中取得断层物质（断层泥、糜棱岩）及上覆沉积物样本，可以根据已有的一些方法（C14、热释光等）测试断层最新活动年代。显然，活动断层和

发震断裂,尤其是发生6级以上地震的断裂,并不完全一样,从中鉴别需要专门的工作。为了便于设计人员使用,根据我国的资料和研究成果,此处排除了全新世以前活动断裂上发生6级以上地震的可能性,对于一般的公路工程大体上是可行的。

(3) 覆盖土层的变形可以“吸收”部分下伏基岩的错动量,是指土层地表的错动会小于下伏基岩顶面错动的事实。显然,这种“吸收”的程度与土层的工程性质和厚度有关。各场地土层的结构和土质条件往往会不同,有的差别很大,目前规范中不能一一规定,只能就平均情况大体上规定一个厚度。如上所述,此处提到的地震烈度Ⅷ度和Ⅸ度实质上是指震级6.0和6.7,基岩顶面的错动量随地震震级的增加会有增大,数值大约在1m至若干米,土层厚度到底多大才能使地表的错动量减小到对工程结构没有显著影响,是一个正在研究中的问题。数值60m和90m,是根据最近一次大型离心机模拟试验的结果归纳的,也得到一些数值计算结果的支持。

避开主断裂距离为桥墩边缘至主断裂边缘分别为300m和500m,主要的依据是国内外地震断裂破裂宽度的资料,取值有一定的保守程度。在受各种客观条件限制,难以避开数百米时,美国加州桥梁抗震设计规范的相关规定可供参考,了解风险的程度。美国加州规范的规定如下:“一般而言,场地的避让距离应由负责场地勘察的岩土工程师与主管建筑和规划的专业人员协商确定。有足够的地质资料可以准确地确定活断裂迹线的地区,且地形并不复杂时,避让距离可规定为50英尺(约16m)。复杂的断裂带要求较大的避让距离。倾滑的断层,通常会在较宽且不规则的断裂带内产生多处破裂,上盘边缘受到的影响大、下盘边缘的扰动小,避让距离在下盘边缘可稍小,上盘边缘则应较大。某些断裂带包含如挤压脊和凹陷之类的局部构造,不能揭露清晰的断裂面或剪切破碎带,应由有资质的工程师和地质师专门研究,如能保证基础能抗御可能的地面变形,可修建不重要的结构。”

当不能将全部墩台布置在断层的同一盘时,表明桥梁无法回避跨越发震断裂;但目前国内外尚无成熟的跨越发震断裂的工程措施,因此,这种情况下宜进行专项研究,以提出针对性的跨越发震断裂措施。

4.2 地基的液化

4.2.1 抗震设防烈度为Ⅶ度及以上地区,存在饱和砂土或饱和粉土(不含黄土)的地基,应进行液化判别;存在液化土层的地基,应根据桥梁的抗震设防类别、地基的液化等级,结合具体情况采取相应的抗液化措施。

条文说明

本条规定主要依据液化场地的震害调查结果。许多资料表明在Ⅶ度以下地区即Ⅵ度区液化对公路桥梁造成的震害是比较轻的,因此本条规定Ⅶ度以下地区即Ⅵ度区的公路桥梁可不考虑液化影响。

4.2.2 存在饱和砂土或饱和粉土(不含黄土)的地基,下列条件均不符合时,可初步判别为可能液化或应考虑液化影响:

1 土层地质年代为第四纪晚更新世(Q_3)及其以前时,Ⅶ度、Ⅷ度地区可判为不液化。

2 粉土的黏粒(粒径小于0.005mm的颗粒)含量百分率,Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度分别不小于10、13和16时,可判为不液化土。

3 天然地基的桥梁,当上覆非液化土层厚度和地下水位深度符合下列条件之一时,可不考虑液化影响:

$$d_u > d_0 + d_b - 2 \quad (4.2.2-1)$$

$$d_w > d_0 + d_b - 3 \quad (4.2.2-2)$$

$$d_u + d_w > 1.5d_0 + 2d_b - 4.5 \quad (4.2.2-3)$$

式中: d_w ——地下水位深度(m),宜按设计基准期内年平均最高水位采用,也可按

近期内年最高水位采用;

d_u ——上覆非液化土层厚度(m),计算时宜将淤泥和淤泥质土层扣除;

d_b ——基础埋置深度(m),不超过2m时应采用2m;

d_0 ——液化土特征深度(m),可按表4.2.2采用。

表 4.2.2 液化土特征深度(m)

饱和土类别	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
粉土	6	7	8
砂土	7	8	9

条文说明

用于液化判别的黏粒含量系采用六偏磷酸钠作分散剂测定,采用其他方法时应按有

关规定换算。

本次修订对条文的表述进行了调整。08 细则的条文表述着重于初步判别为不液化或可不考虑液化影响的情景，但从上下文看，该初步判别后，并不需要做进一步判别；相反，当初步判别为可能液化或应考虑液化影响时，下文条款要求做进一步判别。因此，为使得上下文表述一致，在条文表述上调整为强调初步判别为可能液化或应考虑液化影响的情景。

4.2.3 当初步判别认为需进一步进行液化判别时，应采用标准贯入试验判别法判别地面下 15m 深度范围内土的液化；当采用桩基或埋深大于 5m 的基础时，尚应判别 15~20m 范围内土的液化。当饱和土标准贯入锤击数（未经杆长修正）小于液化判别标准贯入锤击数临界值 N_{cr} 时，应判为液化土。当有成熟经验时，也可采用其他判别方法。

1 在地面下 15m 深度范围内，液化判别标准贯入锤击数临界值可按下式计算：

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3/\rho_c} \quad (d_s \leq 15) \quad (4.2.3-1)$$

2 在地面下 15~20m 范围内，液化判别标准贯入锤击数临界值可按下式计算：

$$N_{cr} = N_0 (2.4 - 0.1d_w) \sqrt{3/\rho_c} \quad (15 < d_s \leq 20) \quad (4.2.3-2)$$

式中： N_{cr} ——液化判别标准贯入锤击数临界值；

N_0 ——液化判别标准贯入锤击数基准值，应按表 4.2.3 采用；

d_s ——饱和土标准贯入点深度（m）；

ρ_c ——黏粒含量百分率（%），当小于 3 或为砂土时，应采用 3。

表 4.2.3 标准贯入锤击数基准值 N_0

区划图上的特征周期（s）	VII度	VIII度	IX度
0.35	6（8）	10（13）	16
0.40、0.45	8（10）	12（15）	18

注：1 特征周期根据场地位置在《中国地震动参数区划图》（GB 18306）上查取。

2 括号内数值用于设计基本地震动加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区。

4.2.4 对存在液化土层的地基，应探明各液化土层的深度和厚度，按下式计算每个钻孔的液化指数，并按表 4.2.4 综合划分地基的液化等级。

$$I_{IE} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_i}{N_{cri}} \right) d_i W_i \quad (4.2.4)$$

式中： I_{IE} —— 液化指数；

n —— 在判别深度范围内每一个钻孔标准贯入试验点的总数；

N_i 、 N_{cri} —— 分别为 i 点标准贯入锤击数的实测值和临界值，当实测值大于临界值时应取临界值的数值；

d_i —— i 点所代表的土层厚度（m），可采用与该标准贯入试验点相邻的上、下两标准贯入试验点深度差的一半，但上界不高于地下水位深度，下界不深于液化深度；

W_i —— i 土层单位土层厚度的层位影响权函数值（ m^{-1} ），若判别深度为 15m，当该层中点深度不大于 5m 时应采用 10，等于 15m 时应采用零值，5~15m 时应按线性内插法取值；若判别深度为 20m，当该层中点深度不大于 5m 时应采用 10，等于 20m 时应采用零值，5~20m 时应按线性内插法取值。

表 4.2.4 地基的液化等级

液化等级	轻 微	中 等	严 重
判别深度为 15m 的液化指数	$0 < I_{IE} \leq 5$	$5 < I_{IE} \leq 15$	$I_{IE} > 15$
判别深度为 20m 的液化指数	$0 < I_{IE} \leq 6$	$6 < I_{IE} \leq 18$	$I_{IE} > 18$

条文说明

本条提供了一个简化的预估液化危害的方法，可对场地的喷水冒沙程度、一般浅基础工程结构物的可能损坏，做粗略的预估，以便为采取工程措施提供依据。液化等级的名称为轻微、中等、严重三级；各级的液化指数、地面喷水冒沙情况以及对结构物危害程度的描述见表 4-1，系根据我国百余个液化震害资料得出的。

表 4-1 液化等级对结构物的相应危害程度

液化等级	判别深度为 15m 的液化指数	地面喷水冒沙情况	对结构物的危害情况
轻微	$0 < I_{IE} \leq 5$	地面无喷水冒沙，或仅在洼地、河边有零星的喷水冒砂点	危害性小，一般不至引起明显的震害

中等	$5 < I_{IE} \leq 15$	喷水冒沙可能性大，从轻微到严重都有，多属中级	危害性较大，可造成不均匀沉陷和开裂，有时不均匀沉陷可能达到 200mm
严重	$I_{IE} > 15$	一般喷水冒沙都很严重，或仅在洼地，地面变形很明显	危害性大，不均匀沉陷可能大于 200mm，高重心结构物可能产生不容许的倾斜

4.2.5 抗液化措施应根据桥梁抗震设防类别及地基的液化等级按表 4.2.5 确定。

表 4.2.5 抗液化措施

桥梁分类	地基的液化等级		
	轻 微	中 等	严 重
B 类	部分消除液化沉陷，或对基础和上部结构进行处理	全部消除液化沉陷，或部分消除液化沉陷且对基础和上部结构进行处理	全部消除液化沉陷
C 类	对基础和上部结构进行处理，也可不采取措施	基础和上部结构进行处理，或更高要求的措施	全部消除液化沉陷，或部分消除液化沉陷且对基础和上部结构进行处理
D 类	可不采取措施	可不采取措施	对基础和上部结构进行处理，或其他经济的措施

注：A 类桥梁的地基抗液化措施应进行专门研究，但不应低于 B 类的相应要求。

条文说明

抗液化措施是对液化地基的综合治理。本条根据桥梁抗震设防分类和地基液化等级，提出地基的抗震液化措施要求。

4.2.6 全部消除地基液化沉陷的措施，应符合下列规定：

- 1 采用桩基时，桩端伸入液化深度以下稳定土层中的长度（不包括桩尖部分），应按计算确定。
- 2 采用深基础时，基础底面应埋入液化深度以下的稳定土层中，其深度不应小于 2m。
- 3 采用加密法（如振冲、振动加密、挤密碎石桩、强夯等）加固时，应处理至液化深度下界；且处理后复合地基的标准贯入锤击数不宜小于按本规范第 4.2.3 条确定的液化判别标准贯入锤击数临界值。
- 4 采用换土法时，应用非液化土替换全部液化土层。
- 5 采用加密法或换土法处理时，在基础边缘以外的处理宽度，应超过基础底面下处理深度的 1/2 且不小于基础宽度的 1/5。

4.2.7 部分消除地基液化沉陷的措施应符合下列规定：

1 处理深度应使处理后的地基液化指数减小，其值不宜大于 5。

2 加固后复合地基的标准贯入锤击数不宜小于按本规范第 4.2.3 条确定的液化判别标准贯入锤击数临界值。

3 基础边缘以外的处理宽度，应符合本规范第 4.2.6 条第 5 款的规定。

4.2.8 减轻液化影响的基础和上部结构处理，可综合采用下列各项措施：

- 1 选择合适的基础埋置深度。
- 2 调整基础底面积，减少基础偏心。
- 3 加强基础的整体性和刚度。
- 4 减轻荷载，增强上部结构的整体刚度和均匀对称性，避免采用对不均匀沉陷敏感的结构形式等。

条文说明

4.2.6~4.2.8 条规定了消除液化震陷和减轻液化影响的具体措施，这些措施都是在震害调查和分析判断的基础上提出来的。

对地基中的可液化土层，应查明其分布范围，分析其危害程度，根据工程实际情况，选择合理工程措施。具体工程措施很多，从本质上可以归纳为以下几方面：改变可液化土的性质，使其不具备液化条件，如采用振冲加固或挤密碎石桩加固后构成复合地基等；改善排水条件，限制地震时空隙水压力的产生和增长；置换可液化地基土；越过可液化地基土层，如采用桩基础；围封可液化地基，消除或减轻液化破坏的危害性。

条文中规定是较常用的方法。若液化土层埋深浅，工程量小，可采用挖除换土法，该方法造价低、施工快、处治彻底，不留后患。强夯法也多有采用，加密深度可达 10m 以上。

4.2.9 液化等级为中等和严重的古河道、现代河滨、海滨，当存在液化侧向扩展或流滑可能时，在距常水位线 100m 以内修建的 A 类和 B 类桥梁，应进行抗滑动验算，必要时应采取防止土体滑动措施。

条文说明

本条规定了有可能发生液化侧向扩展或流动时滑动土体的最危险范围并要求采取土体抗滑措施。

(1) 液化侧向扩展地段的宽度来自海城地震、唐山地震及日本阪神地震对液化侧扩区的大量调查。根据对阪神地震的调查，在距水线 50m 范围内，水平位移及竖向位

移均很大；在 50~150m 范围内，水平地面位移仍较显著；大于 150m 以后水平位移趋于减小，基本不构成震害。上述调查结果与我国海城、唐山地震后的调查结果基本一致：海河故道、滦运河、新滦河、陡河岸坡滑坍范围约距水线 100~150m，辽河、黄河等则可达 500m。

(2) 侧向流动土体对结构的侧向推力，根据阪神地震后对受害结构的反算结果得到：

- ①非液化上覆土层施加于结构的侧压相当于被动土压力，破坏土楔的运动方向是土楔向上滑而楔后土体向下，与被动土压力发生时的运动方向一致；
- ②液化层中的侧压相当于竖向总压的 1/3；
- ③桩基承受侧压的面积相当于垂直于流动方向的桩排的宽度。

4.3 地基承载力

4.3.1 地基抗震验算时，应采用地震作用效应与永久作用效应组合。

4.3.2 地基抗震承载力容许值应按下列式计算：

$$[f_{aE}] = K[f_a] \quad (4.3.2)$$

式中： $[f_{aE}]$ ——调整后的地基抗震承载力容许值（kPa）；

K ——地基抗震容许承载力调整系数，应按本规范表 4.3.2 取值；

$[f_a]$ ——深宽修正后的地基承载力容许值（kPa），应按现行《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363）的规定采用。

表 4.3.2 地基土抗震容许承载力调整系数

岩土名称和性状	K
岩石，密实的碎石土，密实的砾、粗（中）砂， $f_{a0} \geq 300\text{kPa}$ 的黏性土和粉土	1.5
中密、稍密的碎石土，中密和稍密的砾、粗（中）砂，密实和中密的细、粉砂， $150\text{kPa} \leq f_{a0} < 300\text{kPa}$ 的黏性土和粉土，坚硬黄土	1.3
稍密的细、粉砂， $100\text{kPa} \leq f_{a0} < 150\text{kPa}$ 的黏性土和粉土，可塑黄土	1.1
淤泥，淤泥质土，松散的砂，杂填土，新近堆积黄土及流塑黄土	1.0

注： f_{a0} ——由荷载试验等方法得到的地基承载力基本容许值（kPa）。

条文说明

由于地震作用属于偶然的瞬时荷载，地基土在短暂的瞬时荷载作用下，可以取用较高的容许承载力。世界上大多数国家的抗震规范和我国其他规范，在验算地基的抗震强度时，对于抗震容许承载力的取值，大都采用在静力设计容许承载力的基础上乘以调整系数来提高。

4.3.3 验算地基抗震承载力时，基础底面平均压应力和边缘最大压应力应符合下列各式要求：

$$p \leq [f_{aE}] \quad (4.3.3-1)$$

$$p_{\max} \leq 1.2[f_{aE}] \quad (4.3.3-2)$$

式中： p ——基础底面平均压应力（kPa）；

p_{\max} ——基础底面边缘的最大压应力（kPa）。

条文说明

本条规定参考《建筑抗震设计规范》（GB50011—2010）的有关规定制定。

4.3.4 液化土层及以上土层的地基承载力不应按本规范第4.3.2条规定调整。在验算液化土层以下地基承载力时，应计入液化土层及以上土层重力。

4.4 桩基础

4.4.1 非液化地基的桩基，进行抗震验算时，E1地震作用下，端承桩的地基抗震容许承载力调整系数可取1.5，摩擦桩的地基抗震容许承载力调整系数可根据地基土类别按本规范表4.3.2取值。E2地震作用下，单桩的抗压承载能力可提高至非抗震设计时的2倍，单桩的抗拉承载能力调整系数可根据地基土类别按本规范表4.3.2取值。

条文说明

由于E2地震重现期长，极少发生，同时地震作用属于瞬时荷载，地基在短暂的地震荷载作用下，可以直接取用其极限承载力，而不再考虑安全系数，因此单桩的抗压承载力可以提高至原来的2倍。

4.4.2 当地基内有液化土层时，液化土层的承载力（包括桩侧摩阻力）、土抗力（地基系数）、内摩擦角和黏聚力等，可根据液化抵抗系数 C_L 予以折减。折减系数 α 应按本规范表4.4.2采用。液化土层以下单桩部分的承载能力，可采用本规范第4.4.1条的规