

717329

桥梁抗震设计

胡人礼 编

5511

4783/j

成都科技大学图书馆
610065



中国铁道出版社

桥梁抗震设计

胡人礼 编

中国铁道出版社

1984年·北京

内 容 简 介

本书共分三章。第一章介绍地震对桥梁的影响。第二章介绍桥梁的抗震计算。叙述了地基对桥梁结构振动的影响，对有关公式作了比较详细的推导；为了便于阅读，还对结构振动的基本概念作了介绍。另外，列有计算例题。第三章介绍了桥梁抗震措施。

本书可供桥梁设计人员和高等院校有关专业学生参考。

桥梁抗震设计

胡人礼 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 施以仁

封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{2}$ 印张：14 字数：317 千

1984年1月第1版 1984年1月第1次印刷

印数：0001—6,000册 定价：1.70元

前 言

我国幅员辽阔，又位于多地震地区，在这样的辽阔土地上进行铁路建设，如何正确地做好铁路桥梁抗震设计，是广大桥梁设计人员所关心的问题。本书是根据国内外有关资料和个人工作、学习中的心得与体会写成的，以供初搞桥梁抗震设计的同志参考。

全书共分三章。第一章介绍地震的发生和地震对桥梁的危害。第二章介绍桥梁的抗震计算，其中包括计算荷载的组合、有关要求以及地震力的计算。书中对当前普遍采用的地震力计算的静力法和反应谱理论中的公式作了推导。为了便于阅读，在推导这些公式之前，还对结构振动的基本概念作了介绍。另外，还列有计算例题。本书在介绍结构地震力的计算方法时，将它与目前为广大桥梁设计人员所熟悉的桥梁基础计算方法（即通常简称的 m 法）结合起来。这样考虑地基对桥梁结构振动的影响，不仅可以既方便又比较恰当地计算出地震力，而且使桥梁抗震计算方法与非地震区桥梁设计方法统一起来。这样的方法，对于广大设计人员是比较容易理解和接受的。第三章介绍了桥梁抗震措施。它是从合理地确定桥位、选择桥式，以及采取适当的构造措施来做好桥梁抗震设计。好的桥梁抗震设计不只是要求对梁部结构、墩台以及基础的强度和稳定进行合理的计算，而且还要求做好第三章内所述各方面的设计工作，所以该章是设计人员应予注意的重要部分。最后，书的末尾附有有关的附录。铁路桥梁的范围非常广，有许多抗震问题还有待进一步研究改进，使之得到较好的解决，如地震时梁式桥纵横向整体振动计算，拱桥、框架桥、斜拉桥振动计算等方面，本书未作介绍。

由于编者理论水平有限，实践经验又不够，书中一定会存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

编 者

1981年7月

目 录

第一章 概述	1
第一节 地震	1
一、地震的类型和发生的原因	1
二、地震的震级和烈度	4
三、基本烈度和设计烈度	6
第二节 地震对桥梁的影响	7
一、地震对桥梁的危害	7
二、场地条件对桥梁抗震的影响	8
三、桥梁的震害现象	13
第二章 抗震计算	17
第一节 抗震计算的原则	17
一、计算荷载和荷载的组合	17
二、与计算有关的要求	20
第二节 结构振动计算的基本概念	22
一、单质点系统的无阻尼自由振动	22
二、单质点系统的无阻尼强迫振动	29
三、单质点系统的阻尼自由振动	33
四、单质点系统的阻尼强迫振动	37
五、多质点系统无阻尼自由振动的方程、 自振圆频率和振型	40
六、固有振型的正交性	77
第三节 地震力计算理论	79
桥梁对地震的响应的计算	79

二、计算水平地震力的静力法	80
三、计算水平地震力的反应谱理论	84
四、桥梁墩台计算图式	128
五、重力式桥墩自振频率和地震力作用下 内力的近似计算	137
六、竖直地震力的计算	146
七、梁支座部件、支座与梁和支座与墩台 的联结螺栓的水平地震力之计算	148
八、地震时动水压力的计算	149
九、地震时土压力计算	152
第四节 计算例题	188
第三章 抗震措施	267
第一节 桥位确定、桥式选择和桥梁布置的一般 要求	267
第二节 桥梁构造上的要求和措施	270
一、一般原则	270
二、具体措施	271
第三节 基础设计中应考虑的地基问题	279
一、在地震区饱和砂土上修建桥梁时，应 注意土的液化问题	279
二、在地震区饱和软弱粘性土层上修建桥 梁时，应注意土的滑动和变形	286
三、其它	286
附 录	
附录一 中国地震烈度表	289
附录二 等截面悬臂杆的刚度系数表（用于 等截面桥墩台）	293
附录三 棱柱形杆（等截面）由于杆顶单位水平	

	力或力矩作用引起的水平位移和转角, 以及当杆顶产生单位水平位移时杆顶需要施加的水平力	298
附录四	变截面墩身任一点处有单位水平力或力矩作用时, 该点及其它任一点处水平位移和转角的近似计算方法之一 (用于求柔度系数)	299
附录五	变截面墩身任一点处有单位水平力或力矩作用时, 该点及其它任一点处的水平位移和转角的近似计算方法之二 (用于求柔度系数)	306
附录六	变截面墩身任一点处有单位水平力或力矩作用时, 该点及其它任一点处水平位移和转角的近似计算方法之三 (用于求柔度系数)	316
附录七	矩阵代数简介	333
附录八	地震力作用下桥梁基础的计算	343
附录九	地震区桥梁基础计算的有限单元法	374
附录十	有关日本国有铁路《抗震设计指针》(1979年7月版) 中桩基础和沉井基础土抗力计算的简介	401
附录十一	日本公路桥梁抗震设计中砂类土液化判断及地基竖向承载力和水平抗力(地基系数)的折减简介	409
附录十二	随机振动简介	412

第一章 概 述

第一节 地 震

一、地震的类型和发生的原因

我国是一个幅员辽阔的多地震国家。当我们进行铁路建设时，铁路经常无法避免通过地震区，因而需要解决铁路设计如何考虑抗震的问题。特别对于铁路桥梁，考虑抗震则尤为重要。因为桥梁是铁路的一个重要组成部分，而且是铁路抗震中的薄弱环节。解放以来，随着国家建设的发展，我国地震工程工作者和广大铁路桥梁设计人员对桥梁结构的抗震问题进行了大量研究，取得了不少成绩，但是由于情况比较复杂，有许多问题还有待进一步研究和解决。为了研究地震对桥梁的影响，下面对地震的类型和发生的原因作一简单的介绍。

所谓地震就是通常所说的地动。根据产生地动的原因不同，地震可以划分为三大类^①。（1）由于火山爆发，地球内部岩浆猛烈冲出地面，引起地面振动，称为火山地震。

（2）由于某种原因，突然使地表或地下岩层发生大规模塌坍或陷落，引起地面振动，称为陷落地震或冲击地震，譬如石灰岩发育的岩溶地区由于大型溶洞突然崩坍引起的地震就属于这一类型。又如地下古老矿区由于开挖后时间过久，周围岩石失去支托引起崩坍，形成地震，这种地震也属于陷落地震。（3）由于地壳长期变动，使之产生应变和应力，积

^① 除了这三大类地震之外，还有人类活动引起的地震，如水库建成蓄水后产生的地震，深井注水，地下核爆炸引起的地震等。

累大量的应变能，一旦应变过大，应力超过某一较弱岩层的强度极限，该处岩层便突然破裂或错动，原来积累的巨大应变能就急剧地释放出来，引起周围岩、土振动，其中有一部分能量以地震波^②（或称弹性波）的形式向四周传播。当这种地震波传到地面时，地面便产生地震。这种地震称为构造地震。前两种地震的影响范围和破坏程度比较小，修建铁路时易于绕行躲过这些地区。后一种地震涉及的范围和危害性都比较大。我国发生的地震大多属于构造地震，大规模的铁路建设往往难以免受这种地震的影响。这类地震是铁路设计人员最为关心的，它是我们工程设计中通常所说的地震，也是本书所要讨论的内容。

我国地震主要活动区的分布大致如下：

东北地区 主要在辽宁南部和部分山区。

华北地区 主要在河北平原、山东中部到渤海地区、汾渭河谷、山西东北。

东南地区 主要在福建、广东的沿海地区、台湾及其附近的海域。

西南地区 主要在四川西部、云南中部和西部以及西藏东南部。

② 地震波是很复杂的，它包括：①在地球体内由震源向各个方向传播的压缩波或称纵波，质点的振动方向与波的前进方向一致；②由震源向各方向传播的剪切波或称横波，质点的振动方向与波的前进方向相垂直；③由于上述地球体内所传播的纵波和横波经各地层分界的界面多次反射到达地面后形成只限于沿地表传播的次生波或称面波。面波又有两种，其中位于顺波前进方向的铅直面内成椭圆形振动的波，称为瑞利波（*Rayleigh wave*）。位于与该面垂直的方向上振动的波，称为乐甫波（*Love wave*）。由于纵波传播的速度最快（约每秒5~6公里），最先到达观测仪上，故又称P波（这里的P为*Primary*之意，即初波之意），其振动的破坏力较小。横波传播速度（约每秒3~4公里）次于纵波，故又称S波（其S为*Secondary*之意，即次波），其振动的破坏力较大。面波传播的速度最慢（约每秒3公里），但它对地面的破坏力最大，自地面向下破坏力则迅速减弱。

西北地区 主要在甘肃河西走廊、宁夏、天山南北麓。

地下发生震动的地方，称为震源。震源正对着的地面，称为震中。震中至震源的距离，叫做震源深度。地面上任何一个地方到震中的距离叫做震中距。

地震发生时，由于地震波传播的特性，往往地面先发生垂直地面方向的上下竖直振动，接着发生水平方向的左右振动。通常地震开始时强度比较弱，接着强度增大。对于桥梁来说，竖直方向地面振动的危害性比较小，因为这种振动对桥梁的影响相当于增大桥梁的竖直荷重，一般来说，桥梁（梁部结构和墩台）和支承它的地基强度都具有较大的安全储备，能够抵抗这种竖直振动荷重的作用，所以通常可以不考虑它，然而，在强烈地震区，有时还是需要考虑它。譬如，我国《铁路工程抗震设计规范》（1977年）^③规定：验算建筑物的抗震强度和稳定性时，一般只需考虑水平地震荷载。位于设计烈度（其意义见下节所述）为9度地区的悬臂结构和预应力混凝土刚构桥等，应考虑竖向地震荷载的作用。验算时，按水平与竖向地震荷载同时作用的最不利情况考虑^④。但是，水平方向地面振动对桥梁来说危害性较大，在桥梁设计中必须详加考虑，除了计算水平地震力对桥梁的作用外，还要从桥梁的构造上采取有效的抗震措施。

③ 我国建国以来，所编制与铁路桥梁有关的抗震设计规范有：

1. 地震区建筑设计规范（草案稿），1964年11月。
2. 京津地区道路建筑物抗震设计暂行规定（修订稿），1968年7月。
3. 铁路工程抗震设计规范（试行），1977年5月。
4. 京津地区铁路桥梁抗震鉴定标准，1978年。

④ 我国《工业与民用建筑抗震设计规范》（TJ11-78）规定：设计烈度为8度及9度时，悬臂结构、长跨结构及烟囱等柔性建筑物，应按水平地震荷载与竖向地震荷载同时作用的最不利情况进行检算。另外，有的文献指出，在震中较近的地区，结构除考虑水平地震力外，还应考虑竖向地震力的作用。

二、地震的震级和烈度

表示地震强度的方法有两种，一种是地震的震级，另一种是地震的烈度。地震的震级通常以符号 M 表示^⑤，它表示地震本身的大小，它由地震释放出的能量多少来确定。释放出的能量越多，震级就越大。通常，震级是根据仪器记录到的地震波判断所释放的能量来确定，也可根据地震后发生的反应情况来推断。但是地震所释放出的能量中有很大部分在地下震源及其附近处，消耗于地层摩擦和错动所产生的热能和势能，而人们所能测得的，仅仅是地震波传到地面的能量，所以一般所说的震级是根据这后一部分能量来确定的。为了减小各种引起测定中差异的种种影响，往往取不同距离和不同方位上地震台的数字的平均值。震级 M 与地震所释放的能量 E （尔格）（这里系指地震波传到地面的能量）的关系如下：

$$\lg E = 11.8 + 1.5M$$

一级地震的能量相当于 2×10^{13} 尔格，震级每增加一级，能量增大30倍左右。地震震级与能量的关系可参见表1—1所列。

地震往往按震级的大小进行分类，如表1—2所示。

地震的烈度是表示地震对地面和建筑物影响的强弱程度^⑥。但是一个地区受地震影响的强弱程度，除了与地震本身的大小（震级）有关外，还与震源的深度，该地区距震中

^⑤ 关于地震震级 M 的定义，C.F.Richter（李希特）于1935年在美国南加利福尼亚附近地震时提出 $M = \lg A$ ，这里 A 是用周期为0.8秒、阻尼系数为0.8、放大倍数为2800的标准地震仪，在距震中100公里所测得的水平最大振幅（以微米计， $1\mu\text{m} = 10^{-4}\text{cm}$ ）。B.Gutenberg（古登堡）于1939年也作了定义。我国李善邦也有建议。

^⑥ 也有的以加速度（伽或Gal）来表示地震对地面和建筑物的影响程度。
 $1\text{Gal} = 10^{-8}\text{m/s}^2 = 1\text{cm/s}^2$ 。

的远近，以及地基好坏有关。震源愈浅，距震中距离愈近，地基愈坏，地震的烈度就愈高；反之，地震烈度就愈低。震中处的烈度称为震中烈度（震中基本烈度）。我国地震烈度分为12度^⑦。

地震震级与能量的关系 表 1—1

地震震级 (M)	1	2	3	4	5
能 量 (尔格)	2.0×10^{13}	6.3×10^{14}	2.0×10^{16}	6.3×10^{17}	2.0×10^{19}
地震震级 (M)	6	7	8	8.5	
能 量 (尔格)	6.3×10^{20}	2.0×10^{22}	6.3×10^{24}	3.55×10^{24}	

注：尔格为能量单位，1尔格 = 10^{-7} 焦耳 (J)。

地震按震级的分类 表 1—2

类 别	震 级 (M)	类 别	震 级 (M)
大地震	$M \geq 7$	微小地震	$3 > M \geq 1$
中地震	$7 > M \geq 5$	极微小地震	$1 > M$
小地震	$5 > M \geq 3$		

一般来说，浅源地震（震源深度在60公里以内的地震）^⑧情况下震中烈度（通常以符号I表示）与震级（ M ）之间存在下列公式和表1—3所示关系：

$$M = 0.58 I + 1.5$$

⑦ 目前国际上对地震烈度普遍划分为12度，除我国外还有美国等国家，但也有的国家划分为8度，如日本采用零至七度的8度制，还有划分为10度者，如欧洲某些国家。据文献介绍，日本烈度划分与中国烈度划分大致对照如表1—4。

⑧ 震源深度在60~300公里，叫中源地震；300公里以上叫深源地震。

震中烈度与震级的关系

表 1—3

震 级 (<i>M</i>)	2	3	4	5	6	7	8	> 8
震中烈度 (<i>I</i>)	1~2	3	4~5	6~7	7~8	9~11	11	12

注：*M*值为5~6的地震，为中震，如果其震源浅，则会造成灾害；*M*值为7~8的地震，为大地震，能造成很大的灾害；*M*值大于8的地震，为特大地震，会造成极大的灾害。

表 1—4

日 本 烈 度		中 国 烈 度	日 本 烈 度		中 国 烈 度
0	无感觉地震	1	IV、V	中震、强震	7
I	微震	2	V	强震	8
II	轻震	3	VI	烈震	9
II、III	轻震、弱震	4	VI	烈震	10
III	弱震	5	VII	激震	11
IV	中震	6	VII	激震	12

三、基本烈度和设计烈度

一个地区在今后一定时期内，一般场地条件下可能发生的最大地震烈度称为该地区地震的基本烈度，亦称地震地区烈度。桥梁在抗震设计时实际采用的地震烈度称为设计烈度。一般来说，设计烈度采用桥梁所在地区的基本烈度。在政治、经济、国防上有特殊要求的桥梁，或技术特别复杂，修复特别困难的桥梁，其设计烈度可考虑比基本烈度提高（通常提高一度），但应按规定的批准权限报请批准。因为设计烈度提高后会增加造价，并给设计带来一定的困难。

第二节 地震对桥梁的影响

一、地震对桥梁的危害

桥梁是建造在地面上用来承受荷载以跨越河流、道路或铁路的建筑物。当地震波到达地面时，地面被激起强烈的振动，从而使桥梁墩台基础和墩台身以及梁部结构产生强迫振动，这就称为桥梁对地震的反应。桥梁产生的这种强迫振动除了与地面振动的规律有关外，还与墩、台和梁部结构本身固有的动力特征有关，也就是与桥梁的结构型式（包括墩、台、梁部和基础）、质量分布、材料性能有关。在同一地点，不同结构型式、不同质量分布以及不同材料的桥梁往往经历同一次地震后的破坏程度是不一样的，甚至相差很大。因为这些条件不同，地震使桥梁承受的地震荷载（或称地震力）大小不同。另外，结构简单（包括平面和立面），地震时的振动也就比较单纯，不易出现应力集中现象。材料的延性（塑性变形）可以使地震荷载大大降低。结构自重轻、重心低，可以减小地震荷载的作用。加强各个部件间的联结，可以提高桥梁的整体性，从而增大其抗震能力。

近一些年来，研究证明同一类桥梁所处地基的好坏不同，其桥梁对地震的反应也不一样，因而建桥场地的选择是设计人员在地震区设计桥梁时应该特别重视的问题。当地基较好时，可以经受较大的地震荷载作用，反之，容易遭受破坏，譬如产生不均匀的沉陷等。

地震荷载作用时，桥梁结构可能产生过大的应力和变形，以致损坏。为了使桥梁结构能够抵抗地震的动力作用，必须计算由于地震使桥梁产生的地震荷载，检算其强度和变形。另外，还要在构造上采取适当的抗震措施，以解决计算

中所考虑不到的问题。

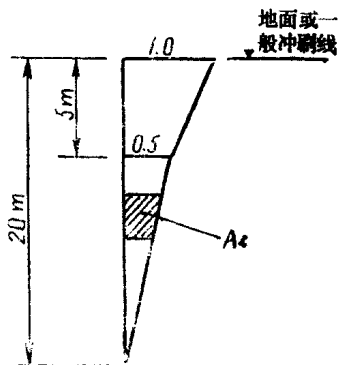
二、场地条件对桥梁抗震的影响

建桥场地处较广范围的①地面以下10~20米深度内的土层称为场地土。前面已提到，它的好坏对地震时桥梁产生的反应具有较大的影响。目前我国将场地土分为三类②：I类是指稳定岩石（包括未经风化的和风化的岩石），II类是指除I类和III类场地土之外的一般稳定土，III类是指流塑、软塑的粘性土、松散饱和的砂土（不包括粗砂、砾砂）、杂填土等。根据研究，如果建桥场地属于I类场地土或属于开阔平坦、坚实均匀的II类场地土，对于桥梁抗震比较有利，而属于III类的场地土、条状突出的山脊、高耸孤立的山丘、非岩质的陡坡、河岸和边坡边缘、地基持力层在平面分布上软硬不均（如古河道、断层破碎带、暗埋沟谷等）、非发震断裂与发震断裂带交汇的地段，均对桥梁抗震不利。属于发震断裂带及地震时可能发生滑坡、山崩、地陷等的地段，对于桥梁抗震是很危险的。桥梁的场地选择应考虑这些情况③。

① 局部范围不能作为确定场地土的类别的依据。

② 我国过去曾将场地土分为四类。目前日本国有铁路《抗震设计指针》

（1979年7月）也将场地土分为四类：1类为岩石，2类为冲积层，3类为除1、2、4类场地土外的一般地基，4类为强度甚低的粘性土和砂类土。美国新抗震设计暂行条例（Tentative Provisions for The Development of



注图 1-1

关于场地土对桥梁抗震的影响，可在桥梁地震荷载的计算中加以考虑（譬如本书所介绍地震荷载计算中的 β 系数就考虑了这一影响）。

另外，桥梁设计时应注意场地土有无可液化土和软土，因为这样的地基对地震作用下的桥梁不利，必须采取措施。关于可液化土和软土对桥梁的影响和应对其采取的措施，将在第三章中介绍。

这里，介绍一下场地土的地表土层固有周期与桥梁自振周期的关系：

地震时，由基岩发生的剪切波（即横波）向地表土层以近于垂直地表面的方向传来。由于剪切波质点的运动方向与波的前进方向相垂直，所以它使地表土层中任一微小元体产生水平剪力变形，如图 1-1 虚线所示（图中 y 轴位于基岩顶面处，且平行地表面； x 轴垂直地表面）。以 u 表示传播速度为 v ，（以米/秒计）的剪切波由基岩向地表土层传播时所引起地表土的小元体的水平变位。由于 $\frac{\partial u}{\partial x} = \gamma$ （ γ 为剪切应变），又剪应力 $\tau = G\gamma = G\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)$ ，所以 $d\tau = G\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)dx$ ，

Seismic Regulations for Buildings, 1978, 6.) 将场地土划分为三类，对每一类的划分考虑了土层厚度的不同对地震的反应的影响。

③ 当场地土为多层土时可以深度 20 米以上的 n 个土层，粗略地按下列（见图 1-1）几何图形，采用下式来确定该场地土的类型 N ：

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n N_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i A_i}{7 \cdot 5}$$

式中 N_i 为第 i 层土的类型，对于 I、II、III 类场地土，分别为 1、2、3， A_i 为第 i 层土所对应的几何图形面积，各土层的厚度均以米计。当 $1 < N \leq 2$ 时，考虑为 II 类场地土；当 $N > 2$ 时，考虑为 III 类场地土。

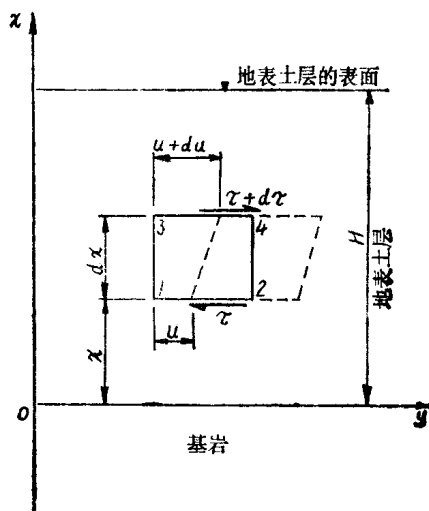


图 1-1

这里 G 为地表土层的剪切模量。倘以小元体底面的加速度近似代表该小元体的加速度，则得单位小元体的惯性力为（ ρ 为土的质量密度， t 为时间）：

$$-\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

作用于该单位小元体上的剪力为：

$$G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

根据达朗伯原理或牛顿第二定理，得该单位小元体的运动方程：

$$G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

由微分方程理论知，该偏微分方程的通解为：

$$u(x, t) = (A \cos pt + B \sin pt) \left(C \cos \frac{px}{v}, \right.$$