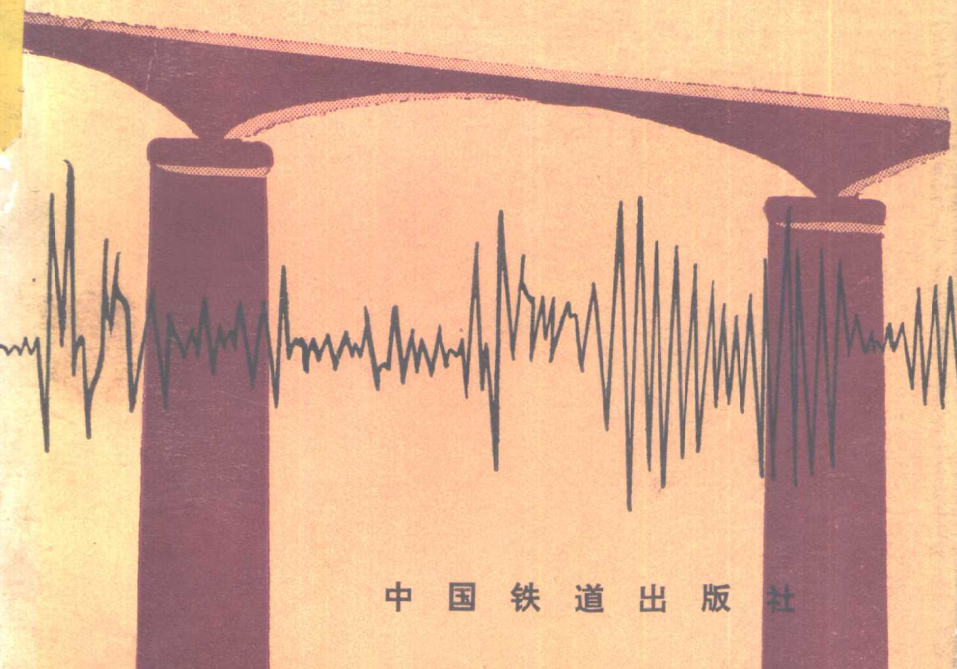


QIAODUN KANGZHEN JISUAN

桥墩抗震计算

朱 晞



中国铁道出版社

桥墩抗震计算

朱 晦

中 国 铁 道 出 版 社

1982年·北京

内 容 提 要

根据桥梁抗震设计的需要,作者在桥墩的动力分析方面的大量研究工作的基础上,编写了此书。内容包括桥墩动力分析弹性系统振动规律;多自由度系统设计反应谱计算地震荷载的原理和方法;重力式桥墩的转移矩阵法,抗震计算简化公式,软土地基沉井基础特有一些问题引入转移矩阵法;为适应各种复杂结构抗震计算的矩阵位移法。本书可供有关工程技术人员、科学研究人员和大专院校师生参考应用。

本书经中国科学院工程力学研究所朱藏审核校。

桥 墩 抗 震 计 算

朱 晔

中国铁道出版社出版

责任编辑 施以仁

封面设计 翟 达

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: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张: 13.375 字数: 294 千

1982年2月第1版1982年2月第1次印刷

印数: 0001—3,400册 定价: 1.40元

前 言

1977年5月试行的《铁路工程抗震设计规范》规定了桥墩地震荷载计算采用反应谱理论。它标志着我国桥墩抗震计算进入了动力分析的新阶段。当前世界各国抗震规范总的发展趋势是动力分析逐步代替静力分析。反应谱理论在计算地震荷载时考虑了结构物的动力特性和地面运动的特性,是目前比较切实可行,处于定型状态的一种动力设计方法。

1974年根据编制《铁路工程抗震设计规范》的任务,作者有机会对于铁路桥墩的自振特性及其在地震波作用下的振动规律做了一些研究工作。后来又在对有代表性的铁路重力式桥墩进行大量计算的基础上,研究提出了计算重力式桥墩第一自振频率及计算地震荷载下墩身弯矩和剪力的简化公式。现在这套计算公式已纳入《铁路工程抗震设计规范》。从1977年以后又应铁道部大桥工程局勘测设计处的要求,开始了软土地基沉井基础上各类桥墩抗震计算方法的研究。在他们的协助和配合下,算出了一批数据,初步摸索了一些规律。

本书共分六章。第一章是地震力与结构的自振特性。作为桥墩动力分析的基础,本章着重介绍了单自由度弹性系统振动规律和用设计反应谱计算地震力方法的知识。考虑到初次接触抗震分析者的方便,本章开始时还介绍了一些与抗震计算有关的地震常识。第二章是多自由度系统桥墩的抗震计算,介绍了多自由度系统用单自由度设计反应谱计算地震荷载的原理和方法,以及计算多自由度系统振型和频率的幂法(即Stodola法)。希望读者读了第一、二两章后即能用手算的方法进行一些不太复杂的桥墩的抗震计算。在抗震计算中,数字电子计算机是一种强有力的工具,第三章介绍了适用于重力式桥墩的转移矩阵法及其计算机程序。第四章是重力式桥墩抗震计算的简化公式,介绍我们为《规范》所作这套简化公式的原理和方法。第五章着重介绍将软土地基沉井基础特有的一些问题引入转移矩阵法及其计算机程序。考虑到DJS-6机和

DJS-21机是国产数字电子计算机中应用较多的两种机型，分别在第三章中介绍了DJS-21机ALGOL语言的程序，第五章中介绍了DJS-6机ALGOL语言的程序。使用DJS-21机的读者不难参考第五章的内容和程序将软土地基沉井基础的考虑引入DJS-21机中。第六章介绍矩阵位移法及其计算机程序。它能适应各种复杂结构的抗震计算。为便于读者熟悉计算方法和程序的使用，书中举出了一些典型的实例和计算结果，并提出了一些看法和意见，供研究和参考。

本书的写作和书中的一些研究工作是在兰州铁道学院和大桥工程局勘测设计处领导的鼓励和支持下进行的。工作中还得到铁道部第一勘测设计院、铁道部科学研究院等单位的大力协助。本书中所介绍的三个计算机程序和重力式桥墩简化计算方法的研究工作是作者和兰州铁道学院吴鸿庆副教授共同完成的。大桥工程局勘测设计处除提供了很多有益的意见外，张廷俊同志还在数据准备、整理计算资料方面参加了实际工作。

地震是一个复杂的自然现象。桥梁抗震分析在理论上和实践上还有许多研究工作要做。我们的工作只是一个初步的探索，对所提出的计算模型尚需作大量桥墩的动力试验与震害分析加以检验，目前还很不完善。本书希望能起到抛砖引玉的作用。

限于作者的水平和能力，书中缺点和错误在所难免，希望得到读者的批评和指正。

本书经中国科学院工程力学研究所朱葳同志审阅，提出了许多宝贵意见。特此致谢。

作 者

目 录

第一章 地震力与结构的自振特性	1
1.1 地震概述.....	1
1.2 静力法.....	11
1.3 单自由度系统的振动.....	16
1.4 用设计反应谱计算地震力的方法.....	36
1.5 用能量法计算自振频率.....	55
第二章 多自由度系统桥墩的抗震计算	74
2.1 应用设计反应谱计算多自由度系统的地震力.....	74
2.2 计算自振频率和振型的幂法(Stodola法).....	88
2.3 桥墩地震计算实例.....	109
2.4 计算结果的讨论.....	137
第三章 转移矩阵法及计算机程序	143
3.1 计算桥墩自振特性的转移矩阵法.....	144
3.2 用转移矩阵法计算桥墩自振特性并用设计反应谱计算地震荷载下内力的源程序.....	161
3.3 一些计算结果.....	178
第四章 桥墩抗震计算的简化公式	184
4.1 桥墩自振频率的近似计算.....	184
4.2 地震荷载下桥墩内力简化计算公式.....	197
4.3 算例.....	214
4.4 讨论.....	216
第五章 软土地基中沉井基础桥墩的抗震计算	242
5.1 计算模型和计算方法.....	243
5.2 沉井基础的振动.....	250

5.3 液化体对桥墩振动的影响	254
5.4 沉井基础桥墩的频率和振型及用设计反应谱计 算地震荷载下内力的源程序	256
5.5 一些计算成果和分析	280
第六章 矩阵位移法及计算机程序	292
6.1 计算自振频率、振型函数和地震荷载下位移和 内力的矩阵位移法	292
6.2 用矩阵位移法计算桥墩自振特性并用设计反应 谱计算地震荷载下内力和位移的源程序	319
6.3 不同方法计算结果的比较	355
6.4 刚架式桥墩与基础共同工作的抗震分析	359
6.5 一些需要研究的问题	374
附录 I 轴向力对弯曲振动的影响	392
附录 II 梁的横截面尺寸对振动频率的影响	413

第一章 地震力与结构的自振特性

1.1 地震概述

为了桥墩的抗震计算，我们需要了解一些有关地震的常识。

中国是世界上有地震记载最早的国家。在我国，地震的史料可以追溯到公元前1831年（据《竹书纪年》记载：“夏帝发七年泰山震”），距今已有三千八百多年了。虽然人类从很远的古代就注意到地震这个自然灾害，但是由于地震现象的复杂性，人类在认识自然规律的基础上，系统地开展工程抗震的研究，对结构物进行抗震设防，只是到上世纪末才开始的事情，至今不过八十多年的历史。强烈地震给人类造成的严重危害促进了世界多地震国家对防震抗震工作的重视，随着近代科学技术的进步，工程抗震的研究近年来有了很大的发展。结构抗震计算也从静力分析发展到动力分析，研究日趋深入，逐步接近地震的实际状况，对人类抗御地震这个自然灾害作出了贡献。但是从研究的成果来看，工程抗震中还有许多问题仍然处于探索阶段，桥梁的抗震计算也是一个还没有很好解决的理论和实践问题。

我们所在的地球是一个近似的圆球，其平均半径约为6371公里。地球内部构造常可归纳为地壳、地幔、地核三个部分（见图1—1）。地球表层的地壳是由厚薄不匀的岩石构成的，在海洋底下的地壳最薄。一般不到10公里，大陆部分地壳较厚，在高山地区地壳最厚，我国在青藏高原测得70公里左右的厚度。地壳的平均厚度约33公里。

地壳以下是地幔，地幔上部也有一层岩石(可以用 橄 榄岩作代表)，比较坚硬，据推测构成地幔的物质具有粘弹性。地幔之下是地核，地核外层表现出液体的性质，内部可能存在一个半径约为 1,000 公里的固体内核。

人们已经观测到最深的震源约 700 多公里，可见震源发生在地壳中和地幔的上部。但是绝大多数的地震震源多分布在地下深度为 5 ~

20 公里的范围内。根据震源深度可将地震分为如下三类：

浅源地震 深度小于 70 公里，释放能量约占地震总能量 85%。

中源地震 深度为 70~300 公里，释放能量约占地震总能量 12%。

深源地震 深度超过 300 公里，释放能量约占地震总能量 3 %。

地球自转产生的能及地球内部蕴藏的放射能、重力能等驱使地壳运动，使地壳不同的部位受到了挤压、拉伸、扭转等力的作用，在构造脆弱处容易破裂。这种由地质构造作用产生的地震，叫做构造地震。世界上的地震 90% 以上属于构造地震，是地震的主要成因。除此之外，从成因方面说还有火山地震、陷落地震(包括矿山塌陷)、水库地震、爆炸激发地震……等等，虽其种类繁多，但数量少，规模也小。

地震发源的地方称为震源，震源位于地下一定深度处。震源在地面上的投影点称为震中。震源至震中的距离称为震源深度。震中至观测点的距离称为震中距离。以上名称示于

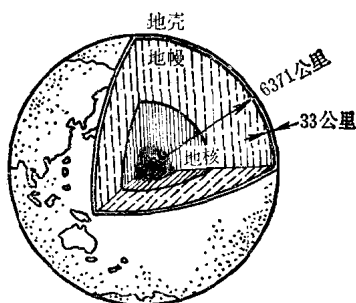


图 1—1 地球内部的构造

图 1—2。震中附近振动最大，破坏最重，叫做极震区，在地图上把破坏程度相似各点连接起来的曲线叫等震线。



图 1—2

地震发生时，震源处的岩石破裂，并产生巨大的剩余变形，地震的能量便从震源释放出来，其中小部分的能量引起振动，以波的形式传到地球表面各处，这就是地震波。

我们研究作用于无限均质各向同性弹性介质中一个小单元体的动力平衡，应用牛顿第二定律可以推导出如下的运动方程

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + G \nabla^2 u \quad (1-1a)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} + G \nabla^2 v \quad (1-1b)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial z} + G \nabla^2 w \quad (1-1c)$$

式中 $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ ，称为介质的体积应变，

$$G = \frac{E}{2(1+\gamma)},$$

$$\lambda = \frac{\gamma E}{(1+\gamma)(1-2\gamma)},$$

E ——介质的弹性模量；

γ ——介质的泊松(Poisson)比；

ρ ——介质的密度；

∇^2 ——表示直角坐标的拉普拉斯(Laplace)算子，为

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}。$$

运动方程(1-1)的通解可由如下所述的两部分解叠加组成：

第一个解可以这样获得：分别就(1-1)式中三个方程对 x 、 y 和 z 微分后，再叠加起来，得

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial t^2} = (\lambda + 2G) \nabla^2 \bar{\varepsilon}$$

整理成波动方程的形式

$$\frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial t^2} = v_p^2 \nabla^2 \bar{\varepsilon} \quad (1-2)$$

其中

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (1-3)$$

这个解描述了纵波的传播。 v_p 即纵波传播的速度。

纵波，或称P波，它通过物质的质点以疏密相间的方式传播，其振动方向与波的传播方向一致，这时物质的密度要发生变化，故又称疏密波或压缩波(图1-3)。声音在空气中的传播即是一种纵波。

第二个解是将式(1-1b)对 x 微分，并将式(1-1c)对 y 微分，然后两式相减，消去 $\bar{\varepsilon}$ 后，得

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = G \nabla^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

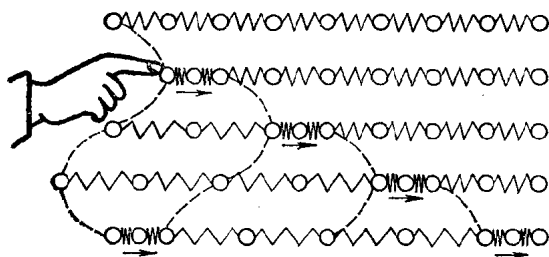


图 1-3 纵波

令绕 x 轴的转动 用 $\overline{\omega}_x$ 表示, 转动与位移间有如下关系式

$$2\overline{\omega}_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}$$

代入前一式, 并整理成波动方程的形式, 得

$$\frac{\partial^2 \overline{\omega}_x}{\partial t^2} = v_z^2 \nabla^2 \overline{\omega}_x, \quad (1-4)$$

式中

$$v_z = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1-5)$$

这个解描述了各向均匀弹性介质中横波的传播。 v_z 即横波传播的速度。

类似地, 若记

$$2\overline{\omega}_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x},$$

$$2\overline{\omega}_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

则可得

$$\frac{\partial^2 \overline{\omega}_y}{\partial t^2} = v_z^2 \nabla^2 \overline{\omega}_y,$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\omega}_z}{\partial t^2} = v_s^2 \nabla^2 \bar{\omega}_z$$

引入

$$\vec{\Omega} = (\bar{\omega}_x, \bar{\omega}_y, \bar{\omega}_z)$$

则以上三式可归结为

$$\frac{\partial^2 \vec{\Omega}}{\partial t^2} = v_s^2 \nabla^2 \vec{\Omega}$$

直接验算后易知

$$\frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\omega}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\omega}_z}{\partial z} = 0$$

所以这个解表示的是只有切应变,而无体积变化的横波。

横波,或称 S 波,它通过物质的质点在垂直于传播方向振动的形式而传播(图 1—4)。横波传播时,物体的体积不变,但形状改变,即产生切变,故又称剪切波。因此,对于没有固定形状的液体,横波即无法通过。

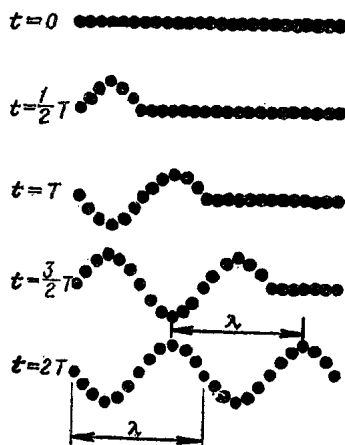


图 1—4 横波

地壳表面是弹性固体介质的一个界面,略去大气压力后,在弹性半空间中可以得到运动方程(1—1)的满足分界面上应力为零的边界条件的特解。瑞利(Rayleigh)首先研究了这种波,它相当于运动局限在半空间边界附近一个区域内的波,即表面波,称为瑞利波。瑞利波的振幅随深度的增加按指数规律迅速减小。

瑞利波传播时,质点在波的传播方向和铅垂线所确定的铅直平面内,作逆进椭圆运动,呈滚动形式,而在界面内(即水平面内)没有振动(图1—5)。

实际上构成地壳的岩石具有层理,当波体在一个弹性介质中传播遇到另一个弹性介质的分界面时将发生折射和反射现象。我们取成层半空间作为模型,则将使波的传播理论与实测波的现象比较接近。在顶层中经过多次全反射之后会形成第二种表面波,乐甫(Love)于1911年首先研究了这种波,认为它是一种水平极化的剪切波所构成的,称为乐甫波。乐甫波是在水平面内质点作垂直于波传播方向的振动,在地面上呈蛇形运动的形式前进(图1—6)。

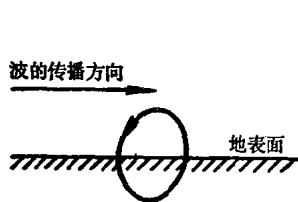


图1—5 瑞利波到达时质点振动的轨迹

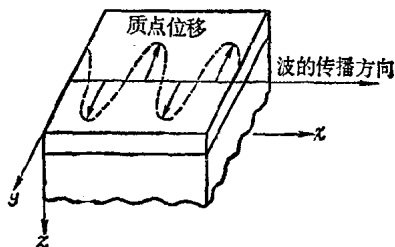


图1—6 乐甫波

综上所述,从震源发出的以弹性波形式向各个方向传播的地震波,在地球内部传播时有两种体波:纵波(P波)和横波(S波)。体波到达地表后经过折射、反射产生沿地表传播的称面波。面波是一定条件下激发的次生波。面波也有两种:

呈滚动状的瑞利波和呈蛇形运动的乐甫波。

地震发生时，在地震仪中可以记录到形似图 1—7 的地震图。最先到达的是纵波，纵波传播速度最快，表现出周期短、振幅小的特点。其次到达的是横波，其速度较纵波慢，表现出周期较长、振幅较大的特点。其后，面波即可到达，它的速度比横波慢，它与横波一样只有横振动而没有纵振动，而且振动猛烈，破坏作用很大。所以，地震时地面作复杂的不规则的空间振动。抗震分析的计算和模拟地震振动台的实验，也力求逐步实现这种复杂状态的模拟。

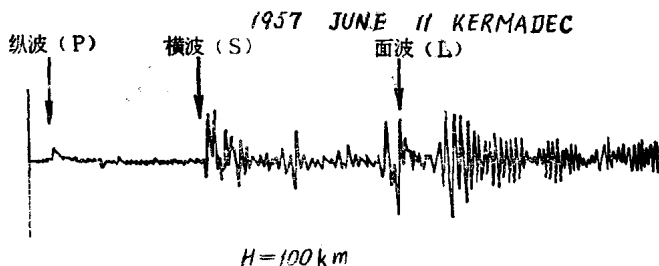


图 1—7

地震的规模用震级 M 表示。

地震的规模应当以地震时释放出来的弹性波能量 E 表示。但是直接计算一次地震所释放的弹性波能量 E 的困难较大，1935年美国地震学者李希特 (Richter) 提出震级 M 的原始定义：

$$M = \lg A \quad (1-6)$$

A 为离震源 100 公里处由标准地震仪 (即当时的伍德—安得逊地震仪，周期为 0.8 秒，阻尼系数 0.8，放大倍数为 2800 倍) 记录的以微米 (10^{-4} 厘米) 为单位的最大地动位移 (单振幅)。虽然现在已都不用这种标准地震仪，并且地震台的震中距离也不一定是 100 公里，但是可以用相应的公式换算

得到震级 M 。

震级与震源释放的弹性波能量有如下的关系式：

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \quad (1-7)$$

式中， E 的单位为尔格。

地震时释放的能量是很大的。对于一个8.6级的大地震，用（1—7）式可算出释放的能量 E 为 5×10^{24} 尔格。据推测相当于投在日本广岛的原子弹爆炸能量的数千倍。

一般地说，若震级 M 升高一级则这类地震的发生次数约减少为原来的1/10，余震面积和地表变形面积增大约10倍，地震释放能量 E 增加约30倍。

表示一次地震的强度，除了使用震级这个概念来反映地震释放能量的大小外，还使用地震烈度的概念。地震烈度表示地震时地面受到的影响和破坏程度的强弱。它不仅与本次地震的震级有关，且与震源深度、震中距离、地质地形条件等因素有关。地面上破坏程度相同各点的连线叫等震线。一次地震虽然震级只有一个，但可以从震中向外划出几个由高到低不同的烈度区域。由于地质地形条件的差异和发震断层走向的不同，等震线的形状也不相同。

评定地震烈度的标准是地震烈度表。它主要根据地震时地面建筑物受破坏的程度、地震现象和人的感觉等宏观现象来制订的。世界上多数国家都是把烈度分为十二度。只是由于各国的建筑物和地表条件不同，在划分烈度标准的具体内容上有所不同。中国科学院地球物理研究所依据我国的地震资料和城镇建筑物的特点于1956年制订的新中国地震烈度表，烈度也是分为十二度。日本中央气象台烈度表（1949年）划分烈度为八度，与我国烈度表可大致对照如表1—1。

烈度表主要是宏观描述，因此评定时容易掺入鉴定者主观成分，评定结果会有出入。从工程抗震方面来看地震烈度

日本中央气象台烈度表与我国烈度表比较 表 1—1

日 本	震 感	中 国	日 本	震 感	中 国
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	XII	激 震	11
IV	中 震	6	XII	激 震	12

是抗震设防的标准，希望烈度标准中给出抗震设计需要的定量指标。由于地震荷载是一种惯性力，采用加速度这个指标最便于与地震荷载的计算联系起来。同时一般认为地震对结构的影响主要决定于地面的最大加速度，所以常常采用加速度作为烈度的标准，并使用与重力加速度比值的地震系数的形式如下：

$$k = \frac{\alpha}{g} \quad (1-8)$$

式中， α 为地面最大加速度， g 是重力加速度。水平地震系数 k_H 的值根据中国科学院工程力学研究所的研究成果，《铁路工程抗震设计规范》（1977年5月）规定如表 1—2 所示。随着地震工程研究的深入，目前也在探讨用地面最大速

水 平 地 震 系 数 表 1—2

设计烈度（度）	7	8	9
水平地震系数 k_H	0.1	0.2	0.4

度作为设计烈度的定量指标的问题。也有试图从地震反应谱出发来给出烈度的定量指标，并试图在烈度定量指标中反映地面运动的周期特性。这是一个重要的但是至今尚未很好解决的问题。