



$$E_0 = \frac{P_0 + \Sigma E_0}{\sigma_0}$$

$$E = (F_0)_{max}$$

$$\Delta = \det [H(F)]$$

土工的若干新理论 研究与应用

何广沛 著

水利电力出版社

土工的若干新理论 研究与应用

何广讷 著

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书将能量分析原理、模糊数学及突变理论应用于土工问题的研究之中,提出了若干土工问题的新理论研究方法,结合大量的工程实例,揭示了这些新理论的实用性,为土工问题的研究开创了新途径。

土工的若干新理论研究与应用

何 广 讷 著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 9.625印张 253千字

1994年12月第一版 1994年10月北京第一次印刷

印数 0001—2490册

ISBN 7-120-02018-8/TV·746

定价 25.00 元

前 言

近30年来,由于数学、力学、自控学以及量测技术、计算技术等迅速发展,同时也因生产建设诸如高层建筑、高土石坝、高速公路、海洋工程、抗震工程以及热核工程等需解决的一系列土工问题的要求,促使土工理论——土力学的研究有了很大的进展和开拓,并结合其他学科的发展形成了某些新兴的土力学分支,例如土塑性力学、土动力学、海洋土力学与统计土力学等。目前许多土力学的问题已不仅仅是土力学工作者研究的范畴,同时也是数学、力学、化学、热学、地质学、自控学、抗震学等工作者很感兴趣的问题。这就促使土力学加速地发展。

在分析土工建筑和地基的地震液化势及其稳定性时,一般多采用应力法,近似考虑水平剪切地震波的作用。虽然水平振动为主要的地震动,对土体的影响也比较大,但竖向振动、扭动和摆动等也不能忽略。地震动实为一复杂的振动。分析中若只考虑水平剪切振动则不全面。加以应力法的应力为矢量,既要知其大小,亦要知其作用方向和作用面,这给分析复杂振动问题带来相当的困难。其实不论是地震或其他原因引起的振动,都可以认为是由振源振动的能量激起的,并以振动波的形式向四周传播。土体经受的地震荷载取决于传至土体振动能量的大小和土的动力特性。因此,为克服应力法所存在的问题,便于工程应用,本书将作用于土体的振动耗损比能,代以振动应力作为衡量振动荷载的量度。相应地建立了土动力学中的能量分析原理。

鉴于土的性质复杂、土工中某些研究的问题如土坡稳定、地基和土工建筑的地震液化势以及影响研究问题的某些因素的参数等都是非确定性的对象,无明确的内涵和外延,具有中间过渡的模糊性质。对于这类问题,除考虑其随机性采用概率分析外,如

何进一步针对其模糊性，将新兴的模糊数学逐步引入土力学问题已引起人们相当地注意。

土力学的理论问题主要基于微积分的数学方法进行求解。这种方法在解决光滑的、连续不断的渐变现象，诸如地基的变形和固结、土堤坝的渗流等问题都非常成功。可以认为经典的微积分是连续变化现象的数学模型。然而，不连续的飞跃，如地震液化、地基与土堤坝的突然失稳等现象，都包含着突然变化的瞬时过程，即所谓“突变”。这种突变将系统的状态空间转变为不可微分的空间。因此对突变现象的描述和解决，传统的微积分方法就显得无能为力了。因而将近20年来建立、发展起来的为描述、解决突变现象的数学理论分支——“突变理论”引入土力学中，以解决土工中一些具有不连续突变现象问题是很有意义的。

著者主要基于多年来在上述3方面的研究撰写本书。书中涉及问题的深度和广度都有限，尤其是土工问题的突变理论分析。书中仅将有关的突变理论部分和著者在这方面的探索作一简单地介绍，作为引玉之砖，藉以引起同行们的兴趣和研究。

书中“土动力学中的能量分析原理”及“模糊数学在土工中的应用”，均属国家自然科学基金资助项目的部分研究内容。著者对多年来给予鼓励和资助的国家自然科学基金委员会表示衷心的感谢。曹亚林博士、李万明博士、朱范宇、郭莹、张业民、肖专文、李凤华、于洪治、杨斌等硕士以及杨九宏副教授都先后参加了著者主持的研究工作，本书引用了这些研究的成果以及合写论文的内容，亦在此向他们表示深切的感谢。

本书探讨的内容属土工学科中较新的理论范畴，著者对这些方面又了解得比较肤浅，水平有限，其中错误与不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

何广讷

1993年3月于大连

总 述

当今的世界正处于科技大发展的浪潮上，是科技迅猛发展的时代。我们若能把握住时机，迎上去，就能将我国建设成先进的科技大国，造福于人类。如果仍同以往那样延误了大好时机，那在科技方面我们又将远远落后而被动、贫穷。让我们把握住这宝贵的时机，努力奋进、迎头赶上。

近几十年来由于数学、物理、化学、力学、自控学、量测技术以及计算技术等的迅速发展，同时又迫于生产建设的需要，诸如高层建筑、高土石坝、高速铁路、公路与桥梁以及海洋工程、抗震工程、热核工程和地下工程等进一步的要求，提出了一系列需待解决的新土工问题，促使土工工程在理论上与实践上都有了很大的进展和开拓。在建造技术上已向高、难方面迈进，如高层与超高层建筑物的兴建、水利工程高坝的修筑，以及海洋平台和人工岛、地下交通隧道与商店等这些于特殊环境中建造的建筑等。在地基方面目前可以这样认为对于任何不良的场地都能采取有效的措施，形成可供修建重型、复杂建筑物的地基，不论是桩、管基础、深基础和地基处理，其方法、工艺与材料均发展很快，各类方法应用的范围不断地延伸与拓宽，又相应地建立了一些新的有效的地基处理途径与方法。在土工理论的领域中亦获得了一系列的发展与深化。例如，将塑性理论引入土力学中发展了塑性土力学；振动理论的引进又构成了土动力学；结合海洋的特殊环境与海洋土的特点建立了海洋土力学；考虑研究问题的随机性引进概率与统计理论，逐渐形成概率或统计土力学。另外，还建立有热土力学；环境土力学等。这些新兴的土力学分支多结合一、二门其他学科发展起来，具有边缘学科性质。目前许多土工理论问题已不再是土力学工作者独一研究的范畴。同时也是数学、物理、

力学、地震学、地质学、热学、自控学等工作者颇感兴趣的研究领域。这就促使土工理论加速发展。这儿仅就著者研究的土动力学中的能量分析原理与应用、模糊数学在土工中的应用以及土工问题突变理论分析的探索等3方面总述如下。

振动荷载下土中振动孔隙水压力的产生与发展直接影响土体的动力特性，也是以有效应力法分析土体强度和变形特性的基本因素。因而它是长期以来土动力学研究的中心课题。我国地处环太平洋地震带和喜马拉雅—地中海地震带影响的地震多发地区，这一课题的研究无疑对我国的能源、交通、建筑工程地基和土工建筑的设计与建造具有十分重要的意义。

关于土振动孔隙水压力的产生与发展以及土的液化势，国内外学者都进行了大量有益的研究工作。60年代Seed和Lee发表了应用振动三轴试验成果定量地分析饱和砂土地震液化的论著，并根据振动三轴试验研究的成果建立了振动孔隙水压力比与振动周数比之间的正弦表达式；1975年Martin等人提出了振动孔隙水压力发展的模型，以明确的物理意义阐述了振动孔隙水压力的发展规律；Ishi Hara 等人亦于1975年提出孔隙水压力发展的有效应力路径模型；其后一段时间，Finn等人基于试验研究认为在一般的情况下，振动孔隙水压力与振次之间的关系可以表达为以应变作为参变量的曲线簇，并采用内时方法引入一个内时破损参数，将曲线簇表示为一个单一的函数。此时振动孔隙水压力的大小即为这破损参数的某种函数关系。在我国这方面的研究同样获得许多可喜的成果，诸如汪闻韶早在1962年就对土振动孔隙水压力的发展进行了研究和探讨，提出了振动孔隙水压力的产生、扩散和消散的论述；徐志英、沈珠江改进了西特等人提出的振动孔隙水压力发展的模式；以及谢定义等人提出的孔隙水压力瞬态极限平衡模型等。

振动孔隙水压力发展的试验研究多基于一定的振动应力幅下，测定振动孔压比与振次比的关系，属应力分析法的范畴。由于应力分析法的动态模拟比较困难，因此，目前分析地震荷载下土体

的振动孔隙水压力发展和液化势时，一般多近似考虑水平剪切振动波的作用。虽然地震的主要振动为水平剪切振动，其对结构的作用也比较大。但近几十年来的地震研究表明体波在地层中传播时经过折射与反射形成了各种波的综合。又据地震观测获知，世界上已发生的地震多属浅源地震，对于浅源地震来说，大部分的震害区都受面波（瑞利波与乐夫波）的强烈影响。此时土体的振动绝非单纯的水平剪切振动，而是还具有垂直振动、摇摆振动和扭转振动等综合的复杂振动。因而，分析时只考虑水平剪切振动自然就不够全面，应适当地考虑其他的振动影响。而应力分析法由于应力为矢量，分析问题中不仅要考虑应力的方向，还需注意所分析的应力截面。众所周知，同一受力单元由于考虑的截面不同，则其上的应力状态就不相同。因此，要确定一点的应力状态就必须明确该点作用应力的方向及相应的应力截面，致使应力法在分析复杂的振动问题相当困难。这就促使人们探求新的分析途径与方法。鉴于一切振动都可以认为是由振动能量激起的，例如地震振动就是由震源释放出的强大能量，以振动波的形式向四周传播激起的震动，故可以从振动能量的观点分析振动问题。关于能量分析方法，已在结构力学、材料力学等力学分支中给人们留下了较鲜明的印象。尤其能量为标量、体积量，具有迭加特性，因此便于分析复杂的振动。随着土动力学研究的深入与发展，一些专家学者逐渐发现土中的振动孔隙水压力与振动能量之间具有密切的直接关系，加以能量分析可采用迭加原理，与应力分析法相比具有很大的方便。因而建议以能量作为反映土振动孔隙水压力发展的一个综合表达量。

Nemat等人基于大量的试验分析于1979年提出了饱和土中振动孔隙水压力的发展主要与干砂的振动体变效应密切相关，而土的体变又是由于砂粒之间的相互运动和重新排列的结果，故土振动孔隙水压力的发展与土粒相互运动、重新排列过程中所耗损的能量有关。1982年Davis等人研究了地震释放能量及其传播、耗散等问题，并结合大量地震实测资料的分析，提出了砂土地震液

化势的能量判别法。

著者多年来对土动力学的能量分析原理与方法进行了较系统、深入地研究。自1981年提出以能量分析的新途径评价砂土的液化势以来，又相继建立了土振动孔隙水压力发展的能量本构关系；考虑孔隙水压力具有消散情况的有效耗损能量的概念及其相应的模式；分析了偏应力振动和球应力振动对孔隙水压力发展的效应及其耦合作用；探讨了土的有效应力应变、阻尼的能量模式；建立了分析地基、土体动态稳定性和位移的能量法等。这些内容将在土动力学中的能量分析原理与应用部分中进行阐述。

土工实践中人们常常会遇到一些模棱两可的现象或问题，难以确定，只好凭已有的经验硬性的决断。例如某勘测土样由粒径分析等方法测定为粉土，而按塑性指数等判别却又为粉质粘土。实际上，该土既表现出粉土的性质，亦呈现出粉质粘土的特性，只是在某些方面粉土性质表现较强，但在另一些方面又反映了较强的粉质粘土特性。再如基于某些影响液化的因素及其相应的判别式，评价某场地的地震液化为中等等级，而由另一些判别式又确定为轻微液化。这类“亦此亦彼”的模糊现象不仅土工中有，在其他的领域里甚至人们的生活中也大量存在。地震烈度的确定、工程质量的评价，以及人们的经验、生活中区分青年、中年和老年等都属于这类模糊事物或现象。这是由于评定这类事物的标准或事物本身定义没有明确的“内涵”与“外延”，亦即没有明确的“边界”，构成了模糊不定性。

客观世界极为复杂，它不但包含有大量确定性的事物，同时还具有大量的随机不确定性事物与模糊不确定性事物。模糊与精确是互相对立的范畴，人们往往要求获取精确性，力求精确避免模糊。经典数学的一大特点即精确性，人们可以应用经典数学所取得的成就，将力学、热力学、电磁学等的基本规律表达为相应的微分方程式，通过电子计算机求出极为精确的解答。但是对于上述的模糊事物与现象，经典数学——传统的微分方程就显得无能为力了。一个模糊的信息，计算机是不能接受的，即使是仅仅

少一个字，一个标点它都会回答“语法错误”，拒不接受推出机外，更不用说求解模糊性的事物了。客观世界实际上存在一个不相容的原理，复杂性与精确性往往不相容，一个系统的复杂性愈大，其精确性即愈低。收音机的灵敏度愈高其选择性就愈差。因此，分析一些复杂的事物就不应片面地追求精确性，相反，应考虑其模糊性，要善于综合与处理相应的模糊信息，从而产生了模糊数学。它巧妙地运用隶属函数作为桥梁将不确定性在形式上转化为确定性，将模糊性加以数量化，以便利用传统的数学方法进行分析处理。因此，模糊数学是精确的经典数学与充满模糊性的现实世界之间所架起的一座桥梁。1965年美国加利福尼亚大学教授Zadeh第一次提出了模糊集的概念，从此开创了一个新的数学分支——模糊数学。目前模糊数学本身及其应用均有了惊人的发展。

综上所述，可以认识到模糊数学所研究的范围，是具有中间过渡，无明确边界的模糊问题。不论是自然科学问题、工程技术问题、社会问题、乃至生活中的问题，只要具有模糊中介过渡性，即可基于模糊数学的观点、方法进行研究。土工中有许多这类具有模糊性的问题。近些年来我国的岩土工程界应用模糊数学方法研究一些具有模糊性的不确定性问题，已有了良好的开端，进展较快。不论是在工程地质、岩体力学、土力学与地基以及勘探等方面都有了一定的应用。其内容包括数据处理、数学模型的建立、稳定性评价、危险性预测与预报以及工程方案的选择等。书中仅将著者及其同行在这方面的研究与应用作一介绍。

自然界中各种形态、结构的千变万化基本上可以概括为两种不同的变化现象。一种是光滑、连续的变化现象，如地球绕太阳连续地旋转、水在土层中连续地渗流、气温的连续变化等，这种光滑、连续的渐变现象、在数学上可以很成功的运用微积分的方法解决。经典微积分是光滑、连续变化现象的数学模型。但这类有规律、性态很好的变化现象，相对来说为数较少。相反，世界上却充满了另一种不连续的突然变化现象和不可预测的事件，例

如岩石突然断裂，水成冰或汽，地震的爆发，市场的崩溃等，不胜枚举。这些突然变化的现象所具有的共同特点，都是由事物的一种性态突然地跳跃到根本不同的另一种性态的不连续变化，都包含着突然变化的瞬时过程。这种不连续性可以体现在时间上，如波的破碎、细胞的分裂或桥梁的倒塌，也可以体现在空间上，如物体的界面或两种生物组织之间的界面等。它们都是将系统的状态（或行为）空间变为不可微分，因此对突变现象的描述和求解，传统的微积分方法也就无能为力了。长期以来数学家们对能否用确定性数学模型、随机性数学模型以及模糊性数学模型来定量地描述客观事物的突变现象进行了反复的研究，所获得结果都是否定的。

1972年法国数学家Rene' Thom出版了《结构稳定性和形态发生学》一书。该书被认为是突变理论的第一本专著，它用拓扑学、奇点和稳定性的数学理论，研究自然界和社会现象中的各种形态、结构的非连续性突变。系统地阐述了突变理论，奠定了突变理论的基础。突变理论当即引起了广泛的注意。70年代初突变理论迅速地发展。其后却因浮夸的宣传而成为时髦的、广告式的理论，引起了激烈的争论。使人们对突变理论颇感疑惑。关于这个问题著者作一简单地说明。

突变理论自70年代初正式问世以来，曾受到时高时低、冷热不一的对待。其主要分歧不在于数学理论和它在物理科学中的应用，而是其能否和怎样在生物科学与社会科学中的应用。一种新理论的诞生总不是那么完美无缺，存在某些不足之处，需要不断地补充、深化和发展。另外，它的名称亦是引起强烈异议的重要原因之一，英语“突变”一词Catastrophe，它不仅意味着突然的变化，更意味着灾难。从而引起了一些混淆，吸引了一些不该有的注意力，喜好猎奇的新闻界有意无意地失真夸大地宣扬，什么“科学界已有逃避灾变的办法”，于是突变理论一时红得发紫，而加以宣传的又多是不够完善、有争议的应用于社会科学与生物科学中的例子，因而引起激烈的批评。其中有某些大数学家的

严肃讨论，也包括一些不很负责任的人士的无端非难，甚至喻为“皇帝的新衣”。一直到80年代，这种争议才趋于缓和，逐渐平息，突变理论方获得较为公允的评价。不少学者将突变理论应用于各种不同的领域中，取得了丰硕的成果。其中英国 Warwick 大学数学研究所所长，皇家学会会员 Zeeman 教授等人从理论到实际应用方面的大力改进与完善，遂使突变理论成为数学中最年轻的分支之一。从突变理论的争论中清楚地认识到任何一种理论都有它一定的适用条件和范围，若视为能包治百病的灵丹妙药、臻于完美，任意夸大，反而限制了它的发展。对任何事物始终应持认真、负责、严肃、科学的态度。

国内对突变理论的研究及其应用还未引起足够地重视。土工领域中就更少见涉及这一范畴，有成效的应用事例真是凤毛麟角。然而土工领域中突变的现象和事物却有不少，建筑物地基的突然失稳、土坝与岸堤的突然坍滑、地基土体的地震液化等皆属突变理论研究的范畴。书中简要地介绍了有关的突变理论的基本知识和基于突变理论探索的两个土工问题，作为抛砖引玉，以引起更多同行的兴趣和研究。

书中所阐述的“土动力学中的能量分析原理与应用”、“模糊数学在土工中的应用”以及“土工问题突变理论分析的探索”，可以认为都是目前在土工中逐渐发展起来的新领域。而“土工问题突变理论分析的探索”更属刚起步的阶段。正如初生的婴儿那样，它们既具有强大的生命力，将迅速地成长、壮实，能克服某些难点，解决一些实际问题，但亦具有幼弱、不全，有许多需要修正、充实和发展之处，有待人们去充实、去深化和发展。

目 录

出版说明

前 言

总 述

第一篇 土动力学中的能量分析原理与应用

第一章 概述	1
一、地基和土体的振动	1
二、土体的振动与能量	2
三、土动力学中能量分析途径的建立及发展	3
第二章 土的振动能量	5
一、土的振动耗损能量	5
二、土耗损能量的测估	8
第三章 土的振动耗损比能与振动孔隙水压力	12
一、土振动孔隙水压力发生和发展的机理	12
二、砂土振动孔隙水压力与耗损比能的关系	14
三、振动荷载的形式与砂土振动孔隙水压力的发展	22
第四章 排水条件下饱和砂土振动性态的能量关系	29
一、孔隙水压力的消散与土的有效耗损能量	29
二、有效耗损能的计算	31
三、土有效动应力应变与耗损能量的关系	32
四、砂土的阻尼比	35
第五章 判别砂土液化势的能量法	39
一、砂土地基地震累积耗损的比能	40
二、判别砂土地基液化势的能量模式	41
三、地震能量强度函数与临界抗液化强度函数	42
四、能量法判别地基地震液化势可靠性的探讨	50
五、判别砂土液化势的简便能量法	52
第六章 海底地基的振动孔隙水压力及动力稳定性的 能量分析法	58

一、概述	58
二、海洋建筑随机振动下地基的统一等效荷载	59
三、实例分析	68
四、海洋建筑物地基整体动力稳定性分析	76
第七章 粉土动态问题的能量分析法	79
一、粉土振动孔隙水压力发展规律的能量模式	79
二、判别场地粉土地震液化势的能量法	84
三、海堤地基粉土液化势的判别	100
第八章 常体积振动单剪仪与球激能振动仪	103
一、常体积振动单剪仪	103
二、球激能振动三轴仪	117

第二篇 模糊数学在土工中的应用

第九章 概述	125
一、确定性现象与非确定性现象	125
二、非确定性现象的随机性与模糊性	126
三、模糊数学在岩土工程中应用的概况	128
第十章 模糊集合与隶属函数	131
第十一章 模糊聚类分析及其应用	136
一、模糊关系及模糊聚类	136
二、模糊模式识别与软划分	140
三、砂土场地地震液化势的模糊聚类分析	149
第十二章 模糊综合评判及其应用	160
一、综合评判	160
二、模糊变换	161
三、模糊综合评判	164
四、模糊综合评判细粒土类	167
五、堤坝下软土夹层地基塑流失稳的模糊综合评判方法	175
六、场地粉土地震液化势的模糊综合评判	178
第十三章 模糊概率分析	188
一、随机现象及其概率	188
二、模糊随机现象的概率	205
三、海堤稳定性的模糊概率分析	208

四、地基液化势的模糊概率分析	215
附录 A 用梯形公式近似计算 P_{S_2} 的程序 FORTRAN	229

第三篇 土工问题突变理论分析的探索

第十四章 概述	231
一、突变现象	231
二、Zeeman 突变机构	232
三、突变理论的数学基础	240
第十五章 初等突变	247
一、初等突变的种类	247
二、折叠型突变、尖点型突变以及燕尾型突变的几何形状	249
三、突变模型的基本特征	257
第十六章 土本构关系的尖点突变模式	261
一、土本构特性的一般认识	262
二、以尖点突变模型表达土的本构关系	263
三、有关参数的确定	267
四、土突变模型本构关系的初始模量	270
第十七章 尖点突变模型判别场地砂土的地震孔隙水 压力	272
一、振动孔隙水压力发展的尖点突变模式	273
二、模式验证及孔压比算例	280
参考文献	282

第一篇 土动力学中的能量 分析原理与应用

第一章 概 述

随着抗震工程的发展、海洋工程及核动力工程的兴建，对于土动力学来说，不论在土的动力特性研究和地基、土体的动态反应分析都有了较大的进展。土动力学中的能量分析原理和方法是近20年来逐渐形成的一个新的分支。

一、地基和土体的振动

地震是地面产生振动的一种物理现象。而通常所称的地震是以对工程建筑和人的生命财产造成危害的较强烈的地面振动，亦称地震动。这类地震主要是由于地质构造运动引起的构造地震。根据地震观测表明世界上所发生的地震中，浅源地震约占75%，其震源深度多集中于5~25km的范围内。中国已发生的地震绝大部分属浅源地震。对于浅源地震而言，震害区多半要遭受瑞利波和乐夫波等面波的作用，对地面形成既具有水平剪切振动，还具有竖直振动、摇摆振动以及扭转振动等综合的复杂振动。至于海上建筑物除考虑地震外，由于经常遭受风浪作用或漂浮体的撞击而形成建物的振动。因此，海底地基上的荷载，除自重外，主要为建筑物传至地基上的振动荷载。对于水深小于风浪波长一半的海底，通常还直接承受风浪作用的振动荷载（如图1.1所示），对海底地基构成了复杂的振动。目前分析地基、土体的振动液化势、振动稳定性和变形，一般都近似考虑水平剪切振动。虽然水平剪切振动是主要的振动，对结构物的影响也比较大，但毕竟考虑不甚全面，未能较好地反映客观实际，有时也可能构成较大的差距。

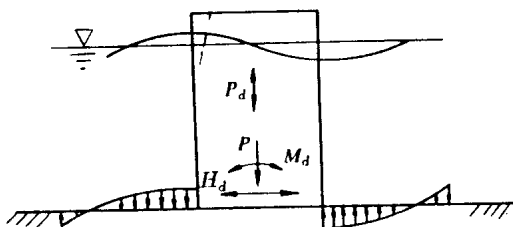


图 1.1

但以习用的应力分析法研究复杂的振动,由于应力为面力和矢量,故模拟复杂的振动状态将有一定的困难。

二、土体的振动与能量

地震、风浪或机器引起地基、土体的振动,都可以认为是由振源振动的能量所激起。例如对地震来说,构造地震的成因虽还无统一的看法,但地震由震源释放出巨大的能量则是肯定的。弹性回跳学说认为地壳运动使岩层中的应力不断积累,当积聚的应力超过岩石的强度时,岩石便在比较薄弱的地方突然断裂发生错动,然后再回跳至平衡位置。伴随这一过程即将原先储存在岩石中巨大的应变能,于震源处释放出来并以振动波的形式向四周传播形成地震。弹性回跳学说比较好地解释了浅源地震的成因。而60年代提出的板块构造学说认为,地壳和上部地幔是由许多坚固的板块组成。这些板块经受着下部地幔热对流的作用,在不断地缓慢地运动。在这种运动过程中,板块之间的某些接触面可能产生张拉、挤压或错动,同样释放出振动能量向四周传波。不论哪种学说对震源释放出巨大的能量,看法是一致的,因而世界各国即以地震时震源释放出的能量大小来衡量地震的强度,称为震级。至于其他如海底地基的振动、动力机器地基的振动等,都分别与风浪波动和机器振动等外界作用的振动能量密切相关。