

土动力学情况简介

中国科学院力学研究所 钱寿易

一、概 况

土动力学 (Soil dynamics) 是土力学的一个分支。它研究动力作用 (包括爆炸、地震和动力机械基础振动三个大方面) 如何影响周围的土质、对邻近的结构物产生什么样的效应以及如何设计这种结构物来抵抗这种效应等。广义的说, 它牵涉到土体中应力和变形随时间快速变化的问题。

土动力学是1939年从德国开始发展起来的。当时研究的对象只是动力机械基础中的一些振动问题, 用波的传播速度来测定现场的土的性质, 进行设计。以后, 随着工业的飞跃发展, 动力机械和军用侦察装置日益加大, 爆炸规模逐步升级, 公路和机场路面载荷不断增加, 导弹和飞行器发射台大量建立, 以及和平利用原子能的新应用, 地震给人类造成严重的危害, 等等, 这些都对土动力学的研究提出越来越广泛和迫切的要求, 促进了这门分支学科迅速发展。

土是一种散粒体。它含有矿物颗粒组成的骨架和周围的孔隙。这些孔隙又被某些流体所填充 (一般是空气或水或者二者都有)。正因为土是散粒体, 又是多相、非均匀、各向异性的, 这就必然使土具有复杂的应力—应变性质, 例如非线性、不可逆、有时效、大变形、对应力级和应力历史具有敏感性等特点。除此之外, 土动力学还具有另外二种复杂性:

1. 载荷持续时间较短, 又常常是重复的、快速变化的。每一级应力循环造成能量明显的消失。

2. 土体中的惯性力如何考虑。

这二种特性, 使土动力学和土静力学有着本质上的区别。

土动力学主要包括三大部分: 1. 爆炸作用下的土动力学问题。2. 地震作用下的土动力学问题。3. 动力机械基础振动作用下的土动力学问题。从动力载荷的性质看, 则可以分为两个方面: 1. 振荡和重复载荷: 小振幅的多次应力循环作用所产生的应变、应变率和加速度都是较小的, 其中弹性波是主要的。在大量的重复作用下, 土体有可能产生破坏。2. 瞬间载荷: 一个单一的脉冲 (达到应力峰值的上升时间可以小到1个毫秒) 以很高的应变率传入土中产生塑性波或冲击波, 导致土体的破坏。

上述的三大部分, 其理论分析方法虽有共同之处, 但在应力级的大小和产生的应变上则有重要的差别。在核爆作用下, 土中产生的应力波, 所引起的应变 (在考虑防护的范围内), 可以大于 10^{-2} 时/时; 而在一个合理设计的动力机械基础下, 土的应变约为 10^{-5} 时/时或者更小的量级。地震引起的应变则介于这二者之间。在这些不同应变量的范围内, 土的性

质是很不相同的，它具有不同的应力—应变变化规律。本文将对爆炸作用下的土动力学问题作一重点介绍。

二、国外对爆炸作用下土动力学研究的情况

爆炸作用下的土动力学问题是和防护工程紧密相关的，其次是有关核爆炸的和平利用，包括：水利工程（开挖港口、疏浚河道，筑坝修堤、防洪堵口、开挖水库、截流改道、融化冰川等），动力（用来储热、发电、供暖的地下“锅炉”），采矿（剥离复盖层、露天采矿、地下开挖、冶炼贫矿和油藏），气象学（改变气候），化学工业（人工合成氨、硝酸、氮肥）等方面提出的有关课题。

美帝出于其侵略和掠夺的野心，拼命在原子弹爆炸对目标物的破坏方面作工作。40年代中后期，美国麻省理工学院（1944年）、哈佛大学（1948年）开始了土动力性质的研究，主要研究一个单一的瞬间载荷的加载率对土的抗剪强度的影响。以后逐步转向土的应力—应变曲线，使试验结果可以用来了解爆炸引起的地层运动问题。50年代后期，麻省理工学院土力学实验室是进行核爆炸下土动力学方面的主要研究基地，到1970年为止共提出27篇研究报告。试验的规模从轴向应力的量级不到1公斤/平方厘米，最后达到约700公斤/平方厘米。美国依利诺埃大学也于60年代初期开始进行这方面的研究。他们侧重在加载率和爆炸压力级对土的抗剪强度、应力应变曲线、主应力比和残余应变的关系上，并对常载荷下土的蠕变性质也进行了探讨。目的是探索爆炸作用通过周围土体施加在结构物上的载荷（方向、大小和作用时间）。通过残余应变的实验和分析，认为爆炸作用在土层中产生的残余应变对结构物的设计大有影响。其他如加利福尼亚大学的劳伦斯辐射实验室（Lawrence Radiation Laboratory），新墨西哥大学的E. H. Wang 土木工程研究所等等，都进行了土动力性质方面的研究。这些单位都是和美国原子能委员会挂钩的。

在美国政府部门方面，主要的研究单位有：陆军部工程兵水道试验站（U. S. Army Engineer Waterway Experiment Station），其特点为爆炸坑的形成机制和对周围介质的作用；空军武器实验室（Air Force Weapons Laboratory），其特点为波的传播、防护结构物的设计；海军土木工程实验室（U. S. Navy Civil Engineering Laboratory），其特点为地下结构物上的载荷，着重在土中的起拱作用；以及矿务局（U.S. Bureau of Mines）等。陆军部工程兵水道试验站是美国研究核爆炸作用下土动力学问题的中心之一，1945年以后就开展这方面的工作。从爆炸对目标物的作用开始，到结构物的防护设计，后来又扩展到导弹发射基地、雷达跟踪塔和飞行器发射台等的基础设计的研究。除在爆炸现场进行大量的原型试验研究外，他们的土动力学实验室中，在单一脉冲或爆炸型载荷方面的主要设备有大型气动加载器（作用于一个土柱上的脉冲载荷可达到约25,000公斤），爆炸模拟器（在4呎直径土样表面上施加均匀脉冲载荷到土内结构物上，可以控制上升、停留和下降时间），一维动力压缩仪，动力应变控制三轴剪力仪等。在振动方面则有高频振动台（40到10,000赫，最大垂直正弦力约25公斤），低频振动台（0到40赫，垂直正弦力可达到约1700公斤），可移动的水力振动台（2到500赫，垂直正弦力约25,000公斤）。这些振动试验设备主要是用来找出在周围压力5公斤/平方厘米以内土的共振频率，以便计算弹性模量、剪切模量和阻尼特性。

私人开设的研究单位从事这方面工作的，近年来有明显的增加。其中主要的有斯坦福特

研究所 (Stanford Research Institute), 研究土中应力波的传播; 兰德公司 (RAND Corporation) 研究防护结构和爆炸坑; 谢能和威尔逊公司 (Shannon & Wilson), 研究土的动力性质和地层运动; 圣地亚公司 (Sandia Corporation), 研究爆炸坑和量测技术; 密特里公司 (Mitre Corporation), 研究波的传播; 以及联合研究服务公司 (United Research Services Corporation), 研究土的动力性质的测定技术和设备等等。

由于土动力学牵涉到的应用面很广, 这方面的发展登载在许多刊物资料上。在美国除了 AD 报告及其他政府和学校的专题报告外, 还有: 《应用力学月刊》、《应用物理月刊》、《地球物理研究月刊》、《地球物理》、《地下核爆炸 (Nuclear Geoplosics)》、《美国材料试验学会期刊 (ASTM)》、《土工 (Geotechnique)》、《公路研究 (Highway Research Board)》、《美国土木工程师学会 (ASCE) 期刊》, 以及许多有关专题论文集等。

爆炸作用下的土动力学问题, 以爆炸中心的位置区分, 可分为三种类型: 空中爆炸、地下爆炸和地面接触爆炸。

1. 空中爆炸

当空中爆炸波扫过地面时, 它在地面上每一点产生应力波, 主要是垂直向下传播的。土体中的运动可用土柱 (侧向变形受阻) 中的一维波的传播理论来分析。由于土在加载或卸载过程中所表现的滞后性 (Hysteresis) 和粘滞性 (Viscosity) 以及其他吸收特性引起了应力波随着深度衰减的现象, 这就严重地影响到土体内的运动量 (包括质点的位移、速度和加速度) 和垂直应力峰值的变化。此外, 由于应力—应变曲线在强爆作用下表现出明显的非线性, 土的压缩模量随应力级的大小而变化。因此, 波速也是随着变化的。

国外对土在这种载荷作用下的应力—应变曲线的形状、波型、波的衰减以及有效压缩模量的取得, 进行了大量的实验研究和理论分析工作。目的是要解决两个问题: 1. 垂直应力峰值随深度的衰减规律, 它和土的能量吸收特性的定量关系; 2. 如何根据土性来预估地层运动的情况。这些都是为防护结构设计提供必要的理论依据和土性参数的。应该指出, 在理论分析计算中, 如何选用符合实际而又简化的力学模型是一个重要的课题。通过空中爆炸波扫过地面的二维问题解的结果说明, 一维理论对估算垂直运动是可取的, 关键仍然是如何选用现场土性参数的问题。这些二维问题的解也为估算水平运动分量提供了线索, 并对表面波的重要性获得了一些了解。美国对空中爆炸的研究, 主要是为大型的、重要的地下防护结构的设计提供必要的资料。

2. 地下爆炸 (爆炸在地下进行, 不产生爆炸坑)

这方面的问题主要是有关岩层中矿藏和资源的开采, 例如: 石油、贫铜矿、天然气、煤、盐等, 它们同土动力学的关系较小, 故不详述。

3. 地面接触爆炸 (包括低空爆炸形成爆炸坑)

美国十分重视这方面的研究。目的是, 对作战时必须保护的地下结构物和基础, 例如军事作战指挥部、导弹发射基地、重要仓库以及交通运输枢纽等的设计提出载荷参数和估计地层运动量。在一个单一的巨大脉冲作用下, 可以产生三种应力波: 直接由于地面接触爆炸形成的爆炸坑; 在土中引起的应力波; 空中爆炸直接施加在地表面而引起的应力波以及空中爆炸波传到土中而引起的应力波。国外把研究的重点放在超地震区 (Superseismic region)。

空中超压从几十到几百公斤/平方厘米。在这个区内的各点，空中爆炸在土中引起的应力波比土中的地震波先行到达。如果地下结构物很坚实，压力峰值传递又很快，就可以假定，主要的运动方向是垂直的，而作为一维问题来考虑。对更接近于爆炸中心的区域，超压大于几百公斤/平方厘米，就受到爆炸坑的直接破坏作用，一般不考虑什么防护设施。这方面公开发表的资料很少。

4. 几个主要的研究课题

爆炸作用下的土动力学问题，主要可以分为下列几个研究内容。

(1) 爆炸作用下土的性质

防护结构设计最主要的指标之一，是土的动力压缩性 (dynamic compressibility)，用压缩模量来代表。实验室中则用有侧限的一维压缩仪来进行试验，但如何正确的测定和估计合理的压缩指标则尚未成熟。对现场上的动力压缩性虽然已有多种方法可以测定，但测得的结果差别很大。这是迫切需要解决的问题。国外在这方面研究的课题有，土的应力—应变曲线和压缩模量侧向约束程度的关系；压缩模量和轴向应力、周围应力、应变率和土的原始饱和度的关系；重复载荷下的轴向应力—应变特性包括能量的消失和残余应变随着应力循环次数变化的关系，以及压缩模量的正确测定和校核方法等等。

土的压缩性决定了离爆炸中心一定距离处地层运动量的大小。这个运动量的大小和地下结构物本身的柔顺性 (flexibility)，又决定了周围土体起拱作用 (arching action) 的程度。这些综合作用和结构物上的动载荷有着密切的关系。土的动力抗剪强度就是用来估计土体中起拱作用的大小的。同时对估算结构物基础的承载能力也极有用处。在实验室中用动力三轴剪力仪来测定这个土性参数。使用的垂直轴向动应力高达几百公斤/平方厘米，周围应力达到约70公斤/平方厘米。在现场则用载荷试验来测定。这方面的研究内容包括周围应力、应变率和土的原始饱和度对土动力抗剪强度的影响，剪切破坏准则和机理，加载卸载过程中土的强度变化等。

(2) 波的传播

国外对一维波的传播问题的解包括，一个方向的平面波、球面对称波和柱状对称波；二维波的传播包括薄片内波的传播及沿着轴向变化、侧向对称于该轴情况下的传播等。对三维波的传播问题，因太复杂，目前的计算技术尚无法得出结果。有关波的传播方面的研究课题有：应力—应变曲线的形状和波型的关系；土的非线性、滞后性、粘滞性等非线性性质对波的传播、能量消失、应力峰值和质点速度变化等的影响；以及其他土性（原始饱和度、隙比、固结压力、颗粒排列和水膜厚度等）对波速的影响等。室内试验通常用长土柱法进行，边界条件则有常径向应力和径向应变为零二种。现场波速的测定则用弱应力波（地震波）来进行。因为土是一种强非线性的材料，这种测定方法就不能适用于较大应力变化的情况。在波的传播问题上，国外对砂土与饱和砂土中的波速以及这些速度和土的一维压缩性的关系了解得比较清楚，对粘性土特别是部分饱和的粘性土的情况则知道很少。下一步着眼点放在两个问题上：

- a. 通过试验来建立剪切波速和土的隙比、有效应力的关系（特别是部分饱和土）。
- b. 研究土的动力抗剪强度和压缩波速的关系。

有关波的传播计算，如果地层复杂并包括多种明显的层次和任何的载荷条件，都倾向于采用有限单元法 (Finite Element Method) 进行数字运算。此法和一般常用的有限差分

法 (Finite Difference method) 的主要区别在于如何写出节点的运动方程上。对分布比较均匀的节点格式, 差分法仍被广泛采用。

(3) 地层运动

地层运动的性质和运动量的估计, 也是一个重要的研究课题。它是爆炸效应具体表现的方式之一, 又直接影响到地下结构物的安全。地层运动包括土的质点位移、速度、加速度等。一般都只考虑它们的峰值, 其次才是这些量和时间的变化关系。要估算这些量就需要研究应力波的传播和衰减的特性。其中以其深度最大的质点加速度的估计最为困难。这个量和波阵面上的特性有关, 而这个特性又被应力—应变关系的细节和土的不均匀性所控制。

地层运动量的性质和大小, 决定于爆炸能量的大小、震源(爆炸、地震或其他)性质、土质(特别是它的饱和度、非弹性和密度)、波速和有无能量消失等因素。能量的消失即使是微小的, 也可以大量影响理论计算的结果。

地层运动的分析计算有两个内容: a. 自由场的运动和应力场, b. 结构物的存在如何影响自由场的地层运动。现在, 国际上采用了三种计算方法:

a. 对任何土层分布、任何土的应力—应变特性, 运用现代计算技术和高速数字计算机进行大量的运算, 得出地层运动量。然后, 将计算结果和现场实测资料相比较。此法的缺点是, 如计算结果和现场实测结果相符合, 则是偶然的; 如不符合, 就不知道错在哪里。同时, 选用一系列能具有实际代表性的土性参数是比较困难的事。

b. 选用土性参数的一个变化范围。用每一个土性参数进行计算得出地层运动量。这需要选用尽可能较准确的土性参数, 再用简化的形式来获得计算结果而和实测值比较。对每一个土性参数的影响需要分别进行认真研究和检验, 以建立必要的信心。

c. 运用较简单的理论概念(包括量纲分析), 作出简单的计算公式。尽量用现场实测数据来做参考和进行调节。此法为设计工程师所欢迎, 而且所有计算公式是比较简单的和一致的。常用的计算公式通常是根据一维弹性波传播理论进行简化, 再稍加改进来接近实际情况。

(4) 土和结构物的相互作用

这方面的研究目的有二: a. 设计结构物来承受施加的载荷; b. 估算结构物的运动量, 以便作为如何设计隔离系统的先决条件。

要解决这两个问题, 必须充分研究土和结构物的相互作用。载荷的大小、分布作用时间, 以及结构物的运动量, 都和土的性质以及结构物的性质、形状和变形密切相关。如果在瞬间载荷的作用下基础下沉, 结构物就将向下移动, 这就会使结构物的上部土体产生正拱作用, 从而导致作用在结构物上的载荷小于爆炸的表面垂压力。设计这样的结构物是较为经济的。但是, 假如结构物下沉量过大, 则它的基础下的土体不仅产生全部或部分的剪切破坏而失去承载能力, 而且还可能会伤害结构物内的人和设备。因此这里存在着一个下沉量最佳值的问题。土的压缩性和抗剪强度, 对土体内起拱作用的程度有重大的影响。

为了估计可能造成的损害和提出减小损害的措施, 了解结构物和周围土体的加速度峰值和质点速度峰值是最重要的。国外对一般非刚性地下结构物绝对运动量的估计, 就是假定它等于周围土自由场的运动量, 也就是忽略掉土和结构物之间的相对运动量。但对于刚性结构物来说, 这种相对运动量就不能忽略了。

有人提出, 要研究土和结构物的相互作用以及结构物的动力性能等问题, 需要进行较大规模的模型试验。这就需要大型爆炸模拟器。模型律对如何进行试验可以指供一些指导准则, 但运用模型律将模型试验结果引用到原型条件时则应十分小心。

5. 存在的问题

国外在研究工作中,还存在着不少问题需要解决。现只举出三项比较重要的分述如下:

(1) 爆炸作用下,土的应力—应变关系特性非常重要。接着,就是如何选用合适的力学模型来进行理论分析和计算。这些模型要反映出应力—应变曲线中的主要特点和土性的其他主要影响因素。其中,时间效应,都认为要给予充分的注意。在应力—应变关系曲线的初始阶段,由于上升时间太快,无法精确测出。而这部分曲线又正是估算压缩模量的重要依据。另外,在实验室内遇到的两个大困难是:a. 压缩仪筒壁摩擦力如何消除;b. 如何估算初置载荷(Seating load)在压缩中引起的应变变量。

(2) 计算和试验中如何考虑土的惯性力。目前,要精确估计惯性力还不可能。而这惯性力又很大地影响了应力峰值的衰减、结构物和周围土体的自振频率以及实验室内强度指标的测定等等。

(3) 量测技术问题,包括应力、应变、速度、加速度等的量测问题。压电晶体和薄膜式应变仪传感器的相互配合是经常用的仪器。试验指出,如何使量测仪器能精确地反应量的变化、体积小、不引起共振、输出值与输入量成线性关系等都还存在问题。仪器和土的阻抗匹配及仪器的埋置方法也严重影响测得的数据。此外,动力压缩模量的现场测定和实验室内土样中孔隙水压力的测定也都是迫切需要解决的问题。

三、地震作用下的土动力学问题

对结构物如何准确估算地震的效应,这是多年来各国一直关心的问题。地震作用必须通过土岩到达结构物,因此,就受到地层性质的影响。土动力学主要就是研究这个问题的。1964年在美国阿拉斯加的恩柯兰奇(Anchorage)发生的地震,使许多结构物遭到严重破坏,同年在日本新潟(Niigata)的地震,使无数房屋下陷和倾斜,人民生命财产遭受到巨大损失。已经查明,这些破坏主要是由于地震时地基土承载能力的丧失所引起。这是过去许多强烈地震所造成严重危害的主要根源之一。

地震所产生的振动反映在大幅度频率的变化和振幅的不规则摆动上。但究竟对结构物造成破坏的最主要的因素是什么,迄今还有争论。

地震作用下的土动力学问题,主要可分为下列几个方面:

1. 土的性质对地震引起的地层运动的影响

各种实测资料证明,土的性质对地震引起的地层运动的影响是很显著的。例如,埋藏了厚于40米软粘土的墨西哥城中心,感到的地震远远大于地表层含有密实的砾石或岩石的市郊区。美国、日本多年来在各个地震活动区设置了强震仪站,来获得更多的实测数据,以利于分析土质的影响。与此同时,研究单位进行了大量的室内模型试验,从事探讨振动作用下的土性以及土性对地层运动的影响。近年来,有一种趋向是注意到振动效应和由此而产生的剪切应变对土中孔隙水压力和土的体积变化的问题,把试验重点放在渗透性较弱土的不排水剪切上。

2. 地层运动对结构物的破坏准则和指数

这是一个从1935年以来一直未能得到解决的问题。美国矿务局早期提出加速度为1.0g是

一个较合适的破坏指数。但在1962年重新估价,认为结构物遭受到的一定的破坏程度,决定于结构物附近的地层质点速度。核爆炸的多次试验对破坏准则又提出了结构物表面的速度峰值是一个较好的指数。一般说来,频率和周期并不被认为是关键的因素。同样,位移和振幅虽是地层运动的函数,但也沒有当作是合适的标准。对破坏来说,地震作用的持续时间可能是一个重要的因素。它和传递的距离及波速有关,但这方面的论证是远远不够的。应该说,加速度、速度、振幅、频率和作用时间是非常复杂地相互综合交错在一起的地层运动的函数。把一个因素孤立开来进行分析是有问题的。通过计算机技术的发展,加速度可化为三个分量(二个水平分量和一个垂直分量),速度从加速度一时间积分而来,位移再从速度一时间积分而来。用四向对数座标就可以用时间表出加速度,速度,位移和频率的量。这个基于结构物的响应谱(Response spectra)的方法在各国正在受到重视,但尚无足够的资料来评价这种方法的适用性。

3. 振动液化问题

当一种含水砂性土受到重复的剪应力时,颗粒间就会产生相互的自由滑动而趋向压实。如果这是饱和的砂土,矿物骨架又是松散的,压实就成为不可能。这是孔隙水压力增加,使得颗粒间的有效应力降低,甚至于降低到零。这种现象称为液化(Liquefaction)。这是在实验室和天然的地震中都已觉察到的现象。液化促使土坡滑动和地基承载力丧失,最终导致结构物下陷破坏。一种预估液化可能性的方法是,从实验室中测定促使液化需要的剪应力,并用一维理论计算地震时这个地区可能产生的剪应力的大小。经过二者的比较作出判断。这两个步骤都含有不可靠的因素。故目前这种方法只能提供建立液化将要产生或不可能产生的极限条件。国外资料说明,用以上的方法有时估算的结果与实际情况相符合,有时就不符合。另外,产生液化的关键因素和机理还大大需要进一步探索。有人初步证明,液化同砂土的容量、周围压力、振动次数及振幅是有关系的。液化问题对重要结构物的选址设置和地基处理具有十分重大的影响,国外对此仍在大量继续进行研究。

4. 土和结构物的相互作用

局部的土质条件除了影响地层运动外,也可以影响结构物对这些运动的响应方式。问题的实质是分析一种多自由度的结构物置于一种地基上的相互作用。这种地基具有对摇摆(rocking)和水平移动的某种顺服性(compliance)。在美国,这种复杂系统间的响应问题已用数字或模拟计算机来进行分析。一般说来,多层楼房的柔顺性要比地基的柔顺性大。在这种情况下,土-结构物的相互作用是不重要的。但对埋入土中很深的封闭结构物来说,在地震时,介于土和结构物之间的水平动应力就产生了结构物的平移和摇摆,从而影响到结构物壁面的设计应力。国外正在研究这个问题。一般是在大型的振动台上进行试验。除此之外,一个目前受到大量重视的研究课题是,如何设计房屋或其他结构物,以承受在地基基础中沿着断层产生的位移的影响。在饱和砂土中的桩基的地震稳定性也是一个较关心的研究课题。

5. 边坡稳定性

现在有两种方法来估计地震时天然土坡和土坝可能产生的永久位移。一是假定土是刚一

塑体, 在一个明确的破坏面上, 产生屈服破坏。每一个加速度脉冲不能穿过破坏面而只产生永久变形的增量。这种方法只需要简单的计算。另一种方法是采用应力途径 (stress path) 的概念。用二维有限单元法 (包括考虑土的非线性应力—应变关系) 来估算地震时的动应力; 然后, 结合土样处于这种动应力下而产生的应变来估计永久变形值。这个方法有一个优点是, 可以同时考虑到是否有饱和砂土液化的可能性。以上两种方法虽然是很粗糙的, 但在实际问题中可以用来估算是否到达临界位移而造成危害的可能性。

四、动力机械基础振动作用下的土动力学问题

重型往复式和离心式机械及撞击式机械如锻锤等的基础, 它们产生的振动对邻近结构物可能造成危害。最突出的就是引起共振和振幅过大等现象。因此, 这些机械的基础的振动对周围土质和结构物所起的作用和影响, 一直是各国多年来研究的内容, 并取得了一定的进展。但是, 随着工业规模的日益扩大, 这方面的问题变得越来越广泛和严重, 对研究的要求就越来越迫切。其他如雷达侦察网、飞行器发射台、人造卫星跟踪站等振动基础的设计和选址问题是近年来新增加的内容。

下面是有关这方面的土动力学的几个主要问题。

1. 振动物体在连续介质上的力学理论

从一个受到周期力作用着的刚性物放在一个弹性半空间介质上的经典分析, 经过物体与弹性介质之间接触应力的分布研究, 到近期发展的频率范围扩大的理论探讨, 证明了理论分析和现场试验结果基本上是符合的。这种理论分析的结果可以通过一个等效集总系统 (equivalent lumped system) 化成实用的形式。

如果一个振动物体放在一个有限厚度的弹性层上面, 情况就要复杂得多, 因为那个弹性层的共振频率就会反映到解法中。目前只有少数得出数字结果的例子, 而且理论还未得到充分的验证, 如何应用到工程实践尚未解决。

1969年, 在美国发表了一个振动物体放在一个半空间粘弹体和放在一个粘弹体土层上的解, 但尚未找到实用的方式。此外, 一个物体部分埋设在一个连续介质的表面之中, 也是需要解决的问题。其他尚未解决的问题, 包括振动物体周围的应力场和位移场的计算, 以及和邻近物体相互作用的问题。有限单元法对解决这些问题似乎是一个方向, 国外正在研究中。

2. 土性的测定

20世纪30年代, 日本第一次试用共振土柱法 (resonant column), 此法对小应变土的模量和阻尼的测定是有用的。这种试验是在各种频率下使一个土柱振动直至产生共振为止。在这共振条件下, 用理论表达式可以计算土的性质, 包括弹性模量、剪切模量和泊桑比等。在现场, 可用一个振荡器在土表面上发出的表面波, 来进行土的剪切模量的测定。现场和实验室测定的模量在许多例子中是符合的。但至今尚无满意的方法来测定现场的阻尼特性。当土中剪切应变变量大于 10^{-6} 时/时时, 就可能观测到非线性的性质。因此, 在分析机器基础运动时所需要的模量, 一定要根据在基础下紧接的土质区域内所产生的平均应变峰值来进行选择。已经查明, 砂性土的模量, 多少和频率无关, 故很慢的周期载荷已经成功地用来测定动载下的模量。对粘性土来说, 尚需要更多的试验来探讨模量与频率之间的关系, 其原因主要是由于

土中水是否能排走。这里,有效应力法的使用是特别有利的,也是研究的一个方向。在应力作用下,土的阻尼特性主要来源于矿物颗粒间产生相互滑动所引起的内摩擦效应。因此,阻尼的大小,在很大程度上决定于应变值,而与频率似乎关系不大。每一个周期载荷中,能量的吸收和消失是一个普遍感兴趣的问题。各国对此颇为重视。这个现象对震源给予周围结构物的影响起着决定性的作用。

3. 振动引起的土体沉降和滑动

振动引起土体沉降和岸坡滑动,到目前为止,是一个常遇到而又不能完善解决的难题。动态下如何进行沉降计算和边坡稳定分析,也还没有一个公认的好办法。其他相关连的问题有:振动作用下地基承载力如何估价,动载又怎样换算成为静载荷来进行设计,产生的加速度对上层建筑物的影响,等等。这些都是急待解决的。

相反地,从积极的意义上来看,对某些砂性土,振动可以产生明显的压密作用。这种振密现象已为国外许多单位所公认,并加以研究,以便用来改良砂性地基。

4. 消振和减振法

这个问题现正受到各国的重视以减小振动对邻近结构物的危害影响。现在比较常用的减小波强的有效方法是挖沟。

其他类型的动力作用如车辆、飞机在路面、路基上施加的重复载荷,打桩时在土中引起的振动,动力勘探土层产生的影响等,都存在许多问题,有待于进一步研究解决。

五、结 语

国内对爆炸作用下土动力学问题的研究力量很薄弱。研究的单位很少。一般是1965年前后开始这方面的研究工作的。迄今已相继建立了一些中、小型的试验设备。在量测技术上也进行了一些研究。另有些单位虽然也开展了一些工作,但大都是围绕工程结构物本身防护设计方面的问题,而对土的动力性质研究则很少。

在防护方面,主要是搞高空爆炸下和常规武器贯入和不贯入土中时,对土中结构物施加载荷的问题。对国外一直大量研究的土层地面接触爆炸,则没有排到研究的日程上来。

目前有关这项工作,正在从以下三个方面着手研究:

1. 假定土的几种力学模型,进行理论试算(主要是自由场内应力峰值随深度的变化),再和实测值相比较;

2. 进行土的动力性质的研究,以一维压缩性、抗剪强度和波的传播研究为主;

3. 测试技术的改进。

其中第2方面进展较缓慢,主要受到实验条件和设备、量测技术还没有过关等的影响,而这方面又恰巧是理论分析的关键所在。

存在的主要问题有:

1. 土的动力性质不清楚,不能为理论计算提供合适的力学模型和可靠的土性参数;

2. 仪器设备本身存在一定的问题;

3. 量测技术尚未过关。

由于工业规模的迅速扩大,不论在军用民用中,土动力学的飞跃发展的时期已经来到。

各国对此日益予以重视，都认为是土力学中一个崭新的、有广阔发展前途的分支学科。但是，目前总的形势是理论远远落后于生产发展的需要。有不少迫切需要解决的问题，在理论上尚无解决的途径。这和土的基本性质的复杂性及测试技术没有过关有很大关系。因此，对土性在各种动力作用下的基础研究，无疑是一个关键。

土动力学的进展和其他学科有类似之处。它需要通过理论分析、室内实验研究、现场观测和土—结构系统的模型试验等多种途径综合起来进行长期的系统的探索研究，而现场精确观测对实验室的研究又起着极为重要的作用。与此同时，为了配合生产实践近期的需要，又要求在实际工程设计中提出一系列较简单可行而又有理论依据的计算公式，以便于应用。再从中结合现场工程所表现的性能，逐步改进，以臻完善。计算公式中包含的参数可以根据过去经验作出较合理的选择。这种宝贵的实践经验对推动整个土动力学领域的发展是一个必要的先决条件。对这种经验如何获得、如何积累和总结，应给予足够的重视。