

国外岩体土力学方面研究工作概况*

一、岩体力学

(一) 国外概况

岩体力学是一门比土力学更年轻的,研究岩体工程地质条件和物理、力学特性及其变化规律的学科。1950年以后国际上才正式承认岩体力学是力学的一门分支学科。

50年代由于采矿、水电、建筑、交通等事业迅速发展,工程中的岩体力学问题越来越被人们重视,许多国家陆续建立了专门研究机构,如法国多科工艺学院的固体力学试验室,奥地利萨尔兹堡的以L·米勒为领导的地质力学研究中心,意大利的ISMES研究室,葡萄牙里斯本的建筑研究试验室,苏联乌克兰的矿业研究所,美国农垦局和矿务局的岩石力学试验室,挪威土工研究所,英国土力学会下的岩石力学工作组,以及瑞典和日本等国均设有类似的研究机构。

此外,还成立了不少国际性的学会组织。1958年在莱比锡举行了较大规模的国际岩石力学会议(以后每年均召开一次)。在同年举行的国际大坝会议上,也提出了许多岩体力学的课题。其后,以奥地利“地质与建筑工程”杂志为中心组成了国际岩体力学学会,1963年召开了国际规模的会议,它是今天的国际岩石力学协会(ISRM)的前身。从此,岩体力学国际会议接连在各地召开。1963年在美国圣达摩尼卡召开地壳应力状态会议,1964年在美国哥仑比亚大学召开弱层处理的岩石力学国际会议等。至今美国已召开了十余届岩石力学会议。由葡萄牙的Rocha发起组织国际岩石力学学会而代替了米勒的组织,1966年在葡萄牙里斯本召开了第一届国际岩体力学大会,第二届于1970年在南斯拉夫贝尔格莱德召开,每次参加的国家都有数十个,发表了数百篇论文。奥地利、日本、加拿大、美国等都成立了有关的学术协会组织,出版了专门性的刊物。

岩体力学的课题涉及面很广,研究途径和方法也各异,看法不尽相同,现大致归纳如下:

1. 工程地质调查分析方法 其中有野外观察法。采用此法的以挪威土工研究所的L·布杰拉门等为代表,自1951年开始边坡稳定研究,调查了约250个已发生及将要发生的岩崩和50个基岩滑坡,认为有效的方法是对所有影响岩坡稳定性的物理作用现象作精细的研究,主要问题是如何估算边坡破坏所需要的时间,他们认为用数学运算无法获解。此外还有工程地质预测法,节理测量——稳定的影响因素分析法,工程地质类比法等,这些方法用于边坡稳定评价较多。

2. 室内试验分析方法 此法以法国的A·梅义耳和M·范忍等人为代表,其分析途径

* 中国科学院湖北岩体土力学研究所供稿。题目系编者所加。

有：（1）岩石可变性的室内试验测量。岩石可变性即指岩石在天然条件下的物理化学性质变化或抗风化的能力。其主要观点为岩石的可变性是其矿物成分及裂隙度的函数，通过室内实验分析来编制岩石可变性的等级，对实地岩层划出可变岩区或不可变岩区，作为岩体稳定评价的依据。（2）岩石变形与渐裂的室内研究。法国多科工艺学院试验室曾采用三轴仪进行岩石性质的研究，指出了塑性变形及渐裂区。他们预言，在此研究基础上，可以预测一定岩石即将断裂或出现可塑变形的条件。他们认为，在野外对岩石做抗剪强度试验是很困难的，造价高，不易实现，而且得到的结果也不能作为计算的基础。

3. 地质力学及现场实测方法 这种方法近年来发展很快，自1951年至1962年在奥地利曾举行十三次岩石力学讨论会，参加者由最初的20人增到350人。提出的论文主要为岩体现场大规模试验，对结果的解析及应用，从地质观点讨论岩体的基本构造及属性等。这一学派称为奥地利学派，其主要观点和研究方法同法国的J. 塔洛布尔不尽相同。虽然在试验方法上都强调现场举行，但前者认为岩石变形是由于层理构造存在的结果，后者则认为岩石变形是由于预应力超过弹性限度所发生的现象。

4. 数学力学分析计算方法 倾向于此法的学者，基本观点是将岩体视为具有某种弹塑性或一定流变性能连续体。最近一些年来也有人试图考虑岩体的各向异性及裂隙的影响等，对岩体加以数学力学方法处理。研究工程附近的应力分布规律，从而评定其稳定程度。

当然各种途径和方法也不是截然分开的。一般地说，各方法均采取了自已以外的方法做为补助，看来综合的途径越来越为人们重视和应用。各方法的运用也具有一定条件的限制，目前尚在不断完善中。

1970年9月在南斯拉夫召开的第二届岩体力学国际大会上，共宣读了279篇论文，主要的内容有：岩体的内性质、岩体的变形、岩体的强度、地下工程、岩体特性、岩体特性的改造等八个方面。这些内容可归纳为四个方面：（1）岩体特性的研究，考虑岩体的多裂隙和各向异性等特点，着重从物性上说明岩体的特性；（2）试验方法的标准化；（3）岩体力学在工程中的应用；（4）实测报告。

近年来，欧美各国在现场测试技术及近似数值计算方法方面有许多进展。比如在地下测定岩体深部的应力状态方面，采用了电测、电磁波等方法，在探明岩体扰动区时采用了弹性波、红外线等方法，在进行力学性能试验时采用了大面积高加荷能力的设备以及变形、位移的遥测技术，在工程防护结构上，锚杆、喷射混凝土技术得到了迅速的发展，在分析计算中出现了有限单元法等。

（二）国外研究动向

根据近年来国际上的岩体力学研究动向来看，确有不少进展，但仍然存在很多问题没有得到解决。许多国家目前正加强以下几方面的工作：

1. 改进分析方法，深入研究物理、力学性质 在计算分析方面，有限单元法的出现给岩体力学的发展以重大的推动作用，它使一部分复杂的岩体力学问题较容易从分析上得到解决。但这种计算方法的采用，又使岩体力学的工作面临这样一个急迫的局面，即如何更准确地测定围岩中的不同地质界面或不同物性区域的空间位置，以及如何更准确地确定围岩中各不同岩体的综合物理、力学性质（包括应力—应变关系及破坏规律，强度特性等）。这就是说，掌握围岩深部地质变化的现场定位技术，以及更科学、更精确地研究岩体的物性方面已经成为十分迫切的问题了。

2. 探求现场试验与室内试验的关系 在现场进行岩体力学试验往往是最可靠的方法,但由于劳力、经费及工期的关系,这种方法不是所有现场都能采用的。如果能把简单的室内试验结果充分应用到现场上,代替现场原地试验,那将是非常理想的。不少国家把大量的现场试验资料与室内试验资料进行对比,还把岩石和岩体的特性通过模型试验方法并结合地质调查方法综合起来进行研究,试图找出它们之间的相互关系。

3. 现场的调查与原型观测 对已兴建的工程进行大量的收集资料,总结其规律性,制订出一些标准,从而指导施工实践,这是很有意义的工作。同时通过一些原型观测以不断提高对岩体力学性质的认识,如洞室开挖后的应力分布状态观测及变形观测等,许多国家都采用了不少先进的观测设备。

国际上当前的主攻方向,就基本研究课题而言,是在考虑岩体具有弹性、粘性、非均匀性、各向异性等性质,并且是节理裂隙所切割的复合体这样的特点下,研究岩体在不同受力条件下的破坏规律。并力图建立一定的数学表达式。在分析方法上,是在考虑裂隙存在,非弹性以及时间因素等情况下,探索用有限单元法解答一些实际课题。在试验技术上,继续以现场实测为主,着重致力于岩体深部的探测技术,如较深钻孔中应力测定方法等。在实验室技术方面,值得注意的是模拟裂隙岩体的破坏规律及应力分布的模拟试验技术等。

(三) 岩体动力学方面的一些情况

随着爆炸试验,地震研究,矿山、水利、国防工程等工作的日益发展,对岩体在爆炸、振动、冲击等各种动荷载作用下的变形特性、强度特性、破坏规律、应力波传播和衰减规律、开挖和结构支护等理论的研究日益受到广泛的重视,并开始形成一门新的学科分支——岩体动力学。

十多年来,世界各国对岩体动力学进行了很多研究工作,历届岩体力学讨论会上都有不少这方面的论文。1968年还举行了波的传播和地球物质动力特性的国际性讨论会。1971年美国第十二届岩石力学讨论会上,就宣读了岩石动力特性、应力波和(应力)场、破裂机理、岩石破碎及开挖和结构支护等方面的47篇论文。

影响岩体动力性质的因素很多,除了荷载性质外,地质因素的影响极大。若考虑强应力波的传播,除了空间衰减外,还要考虑结晶间位错所引起的材料的不可逆变形。所以应力波传播中有一粘滞系数,它是使应力波衰减的一个重要因素。岩体中存在着大量的节理和裂隙,它们大大地影响了岩体的强度和变形特性,所以在考虑岩体的动力强度和变形时,不仅要测定完整岩样的强度和应力—应变关系,更重要的是测定裂隙体的强度和变形性质。

如何对这种非均质、非线性、各向异性的多裂隙体进行计算,这是个很重要的问题。近年来,有限单元数值算法对解决岩体力学中遇到的许多问题,诸如考虑岩体中的断层、裂隙材料非线性和几何非线性等情况下的应力波传播的分析、计算等,给予了许多方便。近年来我国有关单位亦尝试用此法进行爆炸时地层中应力场的计算。此外,这种方法的离散化处理,对处理具有实际意义的边界条件提供了可能。但由于大多数的数值解包含单元很多,所以必须借助于电子计算机来计算。

研究岩体动力学,需要对爆炸、冲击、振动等有关各种力学参数(应力、应变等)和运动参数(位移、速度、加速度等)进行测量。用地震法和超声波法来作野外岩体动力试验是大家熟知的。室内研究方面,近年来发展了动力三轴或准动力三轴试验。当然更多的是用爆炸平面波试验和其他冲击试验。有关地震波在岩体中的传播规律,更是地震观测、地震预报

及防震工程研究的必要依据。

由于强烈应力波在岩体介质中传播的研究的需要,岩体在各种动应力作用下的物理力学特性(岩石状态方程)的研究已引起人们的重视。岩石的从超高压(几百万巴以上)、高压,直到低压(10万巴以下)的能量—压力—体积状态方程,对于爆炸时应力波的传播、衰减规律、爆炸空腔或爆炸坑的计算,爆炸效应试验的测试工作和重要的防护建筑物的设计工作,都是必不可少的。

(四) 几点意见

在毛主席无产阶级革命路线的指引下,我国的岩体力学科研队伍不断成长壮大,在为无产阶级政治服务和社会主义建设服务的过程中,岩体力学科研工作有了较大的发展,取得了一定的成绩。我国是一个多山的国家。采矿、水利、交通等工农业建设和国防建设,在多数情况下要以山地的岩石体为背景和依据,而工程建设施工和运转过程往往在一定程度上破坏或扰动了这些山地(体)原有的自然稳定结构,引起自然条件的变化(例如温度、湿度、空气、地下水运动规律的变化,地表水的升降,人类的活动等),对这些变化,如果处理不当,往往在施工建设期或生产运转期给工程本身带来不同程度(有时是十分严重)的危害。另外,如果对这种岩质山地的原有稳定结构的性质和规律认识不清,出于过度的安全考虑,为了防止周围岩体出现不稳定而在建设时采用很保守的规范,进行不必要的大量山体开挖或设置昂贵的支护结构,则将大大提高工程造价,拖延工期,使国家建设工作蒙受一定的政治和经济损失。上述两种极端情况的发生,在很大程度上都是由于山地建设中对具体工程地质条件认识不足及岩体力学研究不深入而造成的恶果。

我国宏伟的基本建设和生产建设,不但为岩体力学的研究工作提出了大量急待解决的课题,并且为这些课题的解决提供了最好的实践基础。当前在工程实践中出现的急待解决的岩体力学工程课题有:大型地下洞室的稳定问题,大型露天矿的高边坡稳定问题,矿山地下开采的采场顶板管理、巷道、竖井、矿柱稳定问题,开采对地表的影晌,大型桥础的承载力问题,大坝基础稳定问题,天然溶洞的稳定问题等。这些重大的工程问题,只有掌握了岩体的工程地质条件和物理、力学特性,并解决一些共同的理论问题,才能对工程建设提出既经济合理,又安全可靠的原则,才能更好地贯彻多、快、好、省地建设社会主义的总路线。

岩体力学研究的对象是一种较复杂的地质介质。经验表明,对于一个重要的工程课题,采取综合研究是一种较为可靠的方法,即首先必须充分考虑到岩体的形成历史,岩体的变质及岩体的结构性质,在进行地质工作中要运用地质力学的观点和方法,不仅调查已存在的地质现象,而且应找出引起这些现象的力源性质,特别应重视的是目前存在于岩体中的力,并测定其应力状态。采用近代最新的科学技术来进行地质勘测,摸清地质现象,在此基础上考虑其代表性而进行一定数量的大型力学试验,测定各项岩体力学性质指标(包括流变特性和强度特性等)。为了更深入更全面地了解岩体的力学性质或应力分布,还要进行一些实验室试验研究,然后对整个岩体作出正确的简化的力学假定。特别应注意研究该岩体是应按连续介质力学还是非连续介质力学,是应按各向异性体力学还是按各向同性体力学来进行分析计算。最后还应进行必要的长期观测,以检验研究工作中得到的认识是否正确。这样才是符合客观实际的切实可行的研究途径。

根据国内外当前岩体力学发展的现状来看,各种工程课题难以得到有效的解决,其基本原因是对岩体的基本物理力学性质认识不清。因此,必须对以下理论性较强的基本课题加强

系统的研究, 加快积累有关的试验研究资料, 并力求用数学解析形式来进行表达。这些课题是:

1. 岩体的基本力学性质与物性方程 (特别是流变性质、断裂、强度特性)。
2. 岩体流变力学 (亦称山体流变力学)。即多层组合, 并为裂隙和软弱夹层所切割的, 具有弹性、塑性、流变等等性质的复合体的变形破坏规律及强度特性, 以及其综合力学模型和数学表示式。组合岩体工程的长期稳定性和瞬时破坏, 其极限平衡方程式和数值计算方法。

为了搞好这些基本课题的研究, 需要注意下面几个方面的工作。

1. 加强现场测试技术及测试方法的研究

(1) 大力加强了解岩体深部状况的探测技术和测试方法工作。例如, (i) 钻孔综合利用技术的发展, 钻孔应力测定, 钻孔弹性模量测定, 钻孔电视的应用, 裂隙水活动规律以及其他钻孔物探试验等。(ii) 掌握近距离物探定位技术, 为探明岩体深部软弱结构面(带)或空洞的位置做出定量的判断。

(2) 发展可靠的岩体内应力的测定技术, 当前应从方法的合理性及测定技术的可靠性方面加强研究, 并注意发展地下深部测量技术。

(3) 现场力学试验方法的提高。大力改进现有设备, 逐步做到高效能, 轻便化, 试体综合利用, 位移和变形的遥测化, 发展现场三轴试验等, 特别注意试体的合理尺寸与相应地质岩体单元的代表性关系的研究, 试验方法的统一等。

(4) 加强原型观测工作。研究有关原型观测的合理方案和方法。要切实建立一批稳定可靠便于遥测的位移变形和应力变化的观测设备。

2. 建立必要的室内实验研究

目前室内试验在多数情况下还不能代替野外试验。但有些试验在野外很难实现, 如长期安定试验 (物理化学性), 高静化力破坏试验, 流变试验 (部分也可在野外进行), 岩组分析和从微观方面研究岩石的内部结构在长期高水头作用下产生的变化, 以及对多介层裂隙体的应力分析、破坏规律等模拟试验, 这些工作都必须在室内进行。我国目前这些工作几乎还处于空白状态, 而这些工作的开展对于理论研究具有重要的意义, 另一方面对野外试验成果的分析亦有很大的作用, 所以必须给予重视。

3. 积极开展理论研究工作并发展较新的计算方法

在探索建立岩体力学的基础理论方面, 要从岩体力学特性的一些基础研究着手, 在现场实测的规律性资料及实验室系统研究的基础上, 着重对岩体的变形及强度特性逐步建立一些假说以至理论 (如破坏规律、强度特性、物性方程等), 只有在这项工作逐步取得成效时, 才能保证岩体力学的各种应用课题, 得到比较切实的解决。

在新的分析方法方面, 有限单元法在很大程度上克服了古典弹塑性理论在应用上的局限性。但现有的运用大多限于线性弹性平面问题范围内。今后应着重发展那些能考虑岩体的非线性性质、裂隙性、流变性以及空间问题等方面要求的计算程序。并探索其他的新方法。

4. 广泛进行调查研究和加强长期观测工作, 组织全面性大协作

在岩体中进行工程建设及开展岩体力学科研工作的周期很长 (数年至数十年)。为了加速完成实践——认识——实践这一认识过程的每一次循环, 还应加强广泛的调查研究工作。只有从大量的正反两方面的实践经验中深入细致地进行分析研究, 才能不断提高我们对事物的认识。与此同时, 对重要的和有代表性的工程, 布置一些专门性的长期观测工作, 在

某些重要的方面积累丰富的足量资料，也十分重要。这项工作没有得到应有的重视，今后应该大大加强，否则我们的认识水平就很难提高。

目前比较着重对一些个别重点工程开展系统的研究工作，这是完全必要的。但对许多中小型工程，由于数量多，施工周期短，进行大量的测试工作往往为条件所不许可。如果能加强全国性的大协作，将各有关单位组织起来，在现有研究工作的基础上就一些工程中比较普遍，比较迫切的问题共同进行调查研究，认真总结广大工农兵和科技设计人员的宝贵经验，编制一些切实可行的规范手册，以供有关工程建设部门和设计部门参考，那将是非常有益的。与此同时，应努力为中小型工程研制一些岩体力学的简易快速测试设备。

二、土 力 学

土力学是现代力学的一个分支。国外土力学的大量研究开始于1925年前后。在工程建筑中，土被广泛地作为各种建筑物的地基、环境和材料。土力学就是研究这些情况下土的物理、力学性质的一门学科。

土包括砂土、粘土、礫石等，是各种岩石风化后的产物，它的性质是复杂而变化多端的。土不是连续固体，而是由许多单独的固体颗粒——土粒组成。土粒之间的联结强度远小于土粒本身的强度，甚至没有联结。土粒间具有孔隙，在大多数建筑工程条件下，孔隙中充满了水和空气。孔隙的存在构成了土的特殊性，使土具有一般连续固体所没有的力学特性，即土的特殊的压缩性、抗剪性、渗透性。对土的压缩、抗剪、渗透特性的研究是土力学中最基础的研究。

土力学的问题大致可分为两类：1. 强度和稳定性问题。主要研究土体中的局部剪切及整体破坏情况，包括土压力，承载力以及边坡稳定等课题。2. 变形问题。主要研究土的应力—应变关系，包括土中应力、沉降计算等课题。

随着近代科学技术的发展，土力学的研究内容日益深广，除了上述基本内容外，有关土的动力特性、物理化学特性以及流变特性等都成为土力学的重要内容。

土力学是一门不成熟的学科。尽管在十八世纪末叶就开始了这方面的研究，但是作为一门独立的学科出现，只有将近五十年的历史。与某些学科突飞猛进的发展相比，土力学近年来的进展应该说是微小的。虽然在测试仪器和计算技术方面有一些进展，但在基本理论方面没有重大的突破。

目前国际上这方面的学术活动还是比较活跃的。国际土力学与基础工程会议每四年召开一次，各大洲的区域性土力学会议三至五年召开一次，很多国家经常召开土力学方面的专业会议，如日本每年召开一次，苏联每年召开3—5次有关的专题讨论会，在美国、英国、日本还定期或不定期举办学术讲座，进行交流。

以下对几个主要课题简述国外研究情况。

(一) 压缩和压密

目前有关砂土压缩特性的研究，不象过去那样仅研究其孔隙的减少，而是研究非常高的压力下（如500公斤/厘米²。一般认为100磅/吋² = 7.03公斤/厘米²是高压的下限）颗粒本身的破碎，提出如压缩屈伏应力这样的概念。这方面的研究已受到普遍的重视。

在粘土压密特性方面，不饱和粘土的压缩特性，卸载过程中的膨胀特性，超压密特性，

各向异性土的压密特性等是当前的研究动向,发展趋势是进一步弄清次时间效应的实质。

在这方面的研究中,出现了不少新的学术思想,如认为压缩、压密与剪切之间有密切的联系,将压密作为剪切破坏过程中的限界状态是今后的方向;还有人针对特殊土建立专门的固结理论,如对高压缩性泥炭提出大变形的有限应变理论。在压密研究中采用物理化学的分析方法,是大有前途的,因近代物理,化学有不少定量的结果,运用这种分析方法更能定量地说明问题。

(二) 抗剪强度

关于砂的应力应变关系,是通过三轴与直剪试验研究应力过程与密度的关系、应力与破坏面形状的关系;从土的微观结构出发,研究土的抗剪强度和膨胀性;运用非线性理论,研究砂土的应力应变关系;砂土液化的研究等等。

有人在砂土的应力应变和强度研究过程中,运用平面应变试验设备,将所得之结果与三轴试验结果相比,找到二者之间差异的规律。

在不饱和土抗剪强度的研究方面,主要是提出有效应力原理能否成立的问题,并指出目前无法精确地测量剪切压缩过程中的孔隙水压力、孔隙气压力和体积变形,因而在研究过程中仍然只能运用总应力概念。

在礫质土方面,主要研究抗剪强度和颗粒形状的关系,在实用上的目的是为了找到颗粒形状与孔隙比或相对密度、内摩擦角的关系。但由于颗粒形状有圆的、稜角的、细长的、扁平的等等,因而,关键在于定量地提出表现形状的指数。有人提出总稜角度平均值的概念,但有争议。

有关粘土强度的研究,除了传统的方法外,主要从流变学的观点来考虑。运用建立力学模型的理论和遗传理论来描述土的应力—应变—时间关系,运用流动理论来描述土的应力—应变速率关系,目前尚属于试验研究阶段。有机粘性土的残余强度,有人进行了详细的研究,并设计了相应的仪器。

在抗剪强度方面,带有共同性的问题是,研究中主应力给予强度、变形、破坏面形状的影响,但目前的研究结果很不一致。认为考虑强度的各向异性是个重要问题,尤其在稳定分析方面。目前已设计了研究各向异性强度的现场测试设备。很多人认为,在强度问题中引入剪胀性的概念,具有重要意义。

(三) 土中应力和下沉变形

这方面主要研究土的应力—应变关系。土的应力应变关系是复杂的,过去从最简单的模型出发,把土作为小变形的理想均质线性弹性体。目前提出在小变形的情况下,应将土作为非线性弹性介质来研究。

将土作为非线性弹性介质,其弹性模量随着应力状态而变化,但用怎样的函数来表示,是问题的关键。

在这方面的研究中,关于土各向异性的考虑,以及地基中孔隙水压力的假定,也是重要的问题。

(四) 土压边坡稳定

有关挡土结构土压力理论的研究,目前有以下几方面的内容。1. 在库仑—朗金理论的

基础上提出一些补充的计算方法,如考虑各向异性及地震等条件的库仑公式等等。2.根据墙的移动和变形来计算挡土墙压力,有人从弹性理论出发,研究由于挡墙变形引起的土压重分布,也有人从非线性平面应变问题这一假定出发,研究墙后填土的应力—应变关系。

3.研究墙的变位过程中,作用在挡土墙上的土压性状与墙后填土的抗剪强度之间的对应关系,以及土的剪胀性对土压分布的支配作用,从近代塑性理论出发来研究土压特性。

目前的一种趋向是从墙的移动和变位来研究挡墙土压,把挡土墙作为典型的平面应变课题,运用有限单元法来求解线性和非线性问题,可得到较好的结果。也有人提出在土压研究中考虑剪胀性具有重大的意义。

有关边坡稳定的研究,有如下方面内容:

1.有关滑坡的调查 对各种边坡稳定情况进行调查,包括天然边坡和人工填土,通过破坏试验,现场实测,野外调查等手段来掌握滑坡的某些规律。如有人在过压密粘土中进行深开挖时的现场稳定实验,提出对既存滑动面的情况,采用残余强度进行边坡设计,对没有滑动面的情况,采用峰值设计,认为这样将是比较安全的。有人在填土中设置倾斜仪、水压机、下沉仪进行测定,发现在有机质的粉砂质粘土中,孔隙水压力的消散比计算的结果要迅速,下沉在短时间里停止。对流动粘土、过压密粘土、残留土的滑坡以及暴雨对边坡稳定的影响等,均有人进行调查。

2.软弱地基上的填土 有人对有机质粘土和火山灰质粘土上的填土的稳定性进行研究,指出现场测试结果往往与理论不一致,并认为可通过下沉测定、倾斜仪、移动桩等预告滑坡。

3.开挖时边坡的应力—应变关系 通过模型试验主要是离心力模拟试验来观察边坡的破坏过程,运用数学模型来分析边坡的应力—应变关系。关于稳定分析时抗剪强度的选择,有人建议用无侧限试验的粘结力,有人建议用残余强度。

4.边坡崩塌的预报 有人建议应用第二次的蠕动曲线推算大致的崩塌时期,进一步在第三次蠕动曲线的范围内,对选定的崩塌时期作出比较正确的预报。

(五) 渗 透

在渗透研究方面,除了研究土中水的流动规律外,还要研究土中空气的流动。

由于土层中存在湍流流动,达西定律已不适用,需要研究代替达西定律的新的渗透理论。有人提出,渗透系数受流体及土层状态的支配,应作为动水梯度的函数。

近年来国外采用气压掘进机施工法,为此必须确定气压压力和空气消耗量,于是研究地基中空气的流动。空气流动情况受地层的构成和分布以及地下结构物的影响,有人运用电模拟实验进行室内研究。

目前国际上的研究动向有如下几方面。

1.从连续介质力学出发来研究土力学,必须假定土的力学模型,以达到力学数学上的近似,改进现有的模型和理论;考虑弹—塑—粘复合体的课题,也就是用流变学的原理,研究土的应力—应变和时间的关系,使之对应于土中发生的真实情况。这是今后的方向。电子计算机的广泛应用,提供了研究的条件。

2.从微观的概念出发,研究土粒间物理化学相互作用,从而说明粘性土的力学特性。例如,有人对纯粘土进行简单的定量研究,在这些研究的基础上,可以在物理、化学条件变化时,预告工程性质(宏观力学性质)的变化,其中离子交换对工程性质的影响较大。也有

人研究粘土在剪切压缩时土颗粒的定向排列问题，以此说明土的工程性质，但对此项研究的意义有争论。有人运用化学动力学中的绝对反应速度理论，来研究粘土的蠕变和抗剪强度，这方面的研究受到国际上的重视。

3. 考虑温度和热对土壤工程性质的影响是一个新动向。温度对土壤的体积变化、孔隙水压力效应、压缩性、抗剪强度、弹性模量、蠕变和应力松弛、膨胀性等均有一定的影响。大多数的试验结果表明，温度升高，强度降低，弹性模量及弹性常数（力学模型中的弹性常数）亦降低。试验又提出了如下的事实，对于饱和土壤，由于温度变化引起的体积变化和孔隙压力变化是值得注意的，例如，几种粘土的实验结果表明，每华氏1度的温度变化，使孔隙压力变化约为初始有效应力的0.75—1.0%。在排水条件下对土壤结构升温时体积降低的原因亦有一些研究。另外，温度对二次压缩速度的影响，温度的变化引起边坡蠕变量的增加，地基的膨胀、收缩等热弹性问题亦值得注意，这些研究可能提供进行热处理加固土壤的途径。

4. 有限单元法目前在土力学研究中被广泛采用。应用有限单元法，更便于去解非均质非线性领域的一些课题，计算结果与实验结果比较符合。

5. 应力分析的概率—统计法。用概率论的方法来确定土中的应力分布和土的强度以及固结的过程，目前在很多人的研究中被利用。

从国外研究情况来看，目前土力学的研究是活跃的，但还是极不成熟的。由于土是非常复杂的材料，现有的理论在分析土的行为时，均具有很大的局限性，它不能给予我们肯定的知识，仅提供一些假说。因此，在运用现有土力学理论来解决工程问题时，往往由于缺乏把握而采用较大的安全系数。尽管如此，每年还要发生数起大事故。我国幅员广阔，土的种类繁多。随着社会主义建设事业的飞跃发展，基本建设规模愈来愈大，技术及质量要求愈来愈高，提出了许多复杂的土力学问题，为了多快好省地进行工程建设，进一步开展土力学的研究工作，将是十分重要的。

三、土 动 力 学

由于近代工业的发展，提出了大型工业设备基础及厂房的设计，高土坝或边坡在地震、爆炸或其他动力作用下的稳定性的研究等，土动力学日益为人们所重视。

土动力学是30年代在德国、苏联发展起来的，它的兴起主要是为了解决动力机器基础以及用波速法在野外测量土壤性质而提出来的。第二次世界大战以后，美国为了解决核爆炸引起的地面运动、弹坑和防护工程的设计等问题，也开始发展土动力学。1940年在日本和阿拉斯加发生的地震，由于土体的破坏，生命财产遭受了很大的损失，这就更加引起世界各国对土动力学研究的重视。

我国在毛主席亲自制订的“**备战、备荒、为人民**”伟大战略方针指引下，工农业建设、国防建设都蓬勃发展，解决土动力学问题也成为迫切的任务。

影响土的变形或强度的因素很多，如土的密度、颗粒特性、胶结特性、含水程度、应力状态、加荷途径、加荷速率及重复次数等。土体的破坏在很多情况下是振动所引起的，但这个问题比较复杂，还没有得到完满的科学解释。土体的应力和应变的关系同变形量、变形速度、载荷及变形时间有关。变形数十微米和数十毫米，土的性质就不一样。在机器基础下土的动应变约 10^{-5} 吋/吋数量级。由强烈应力波作用引起的地面动应变则可能超过 10^{-2} 吋/吋。至于爆炸源附近的动应变，那就更大了。地震引起的应变则介于这两者之间，这取决于地震

的烈度。所以一般研究机器基础振动、地震工程及强烈应力波所引起的地面运动，考虑它们所涉及的土动力特性及测试方法是不完全相同的。

对于软弱地基来说，在进行基础与构造物的设计时，必须进行地基振动特性的调查。普通在根据长时微振测定以外，还应用波速法测定剪切波速度分布，然后在理论上推断。一般低频机器（200—250周/分，例如活塞式压缩机）引起的长波危害大，主要是由于与结构物共振引起。如水轮机引起的短波的影响不大。锻锤引起的塑性垂直沉陷会造成危害。减少波的危害性在于把振动振幅降低到安全值。

大多数工程设施是建筑在土壤上，而地震的运动则是通过土体传送到结构的。对地震的一些实测表明，很多工程结构的破坏都是由于土丧失了承载能力和由于滑坡所造成。由于土的非线性，因此对于同级的地震来说，不同土壤的地面运动的大小是不一样的；同时微弱地震时观测得到的土的性质不能扩大到强震的情况。在大多数情况下，由地震引起的剪切波的垂直向下传播，可根据一维非线性理论来分析当地土壤条件的影响。同时也可用线性粘弹性理论来解决这类问题。

强烈爆炸引起的效应包括爆炸坑的形成与防护建筑物的设计，这方面的文献公开发表的不多。空中爆炸的强烈冲击波使地面产生垂直地往下传播的应力波。在处理实际问题时，可看作是一个受侧向约束的土柱内的波的传播问题。为了弄清质点速度随时间的变化和随地面位移的变化，以及弄清不同深度质点的最大速度或最大应力等，必须深入研究应力波的衰减规律。岩土介质中爆炸引起的地面运动，目前已采用计算机来计算爆炸源附近的应力场和位移场，以及地面的隆起及爆炸坑处土壤的向外抛出等。这些计算把爆炸坑壁处的应力和运动作为初始条件。

过去对基础振动、地震、爆炸等作了不少的观测，但理论上还是依靠弹性理论。如考虑机器基础振动时，是将基础看成是一个质量块，这个质量块在周期力的作用下，按弹性半无限体理论来处理，这是一个古典的土动力学问题。由于土是非线性介质，把土作为弹性介质来处理是不符合实际情况的，这样就在理论上给解决基础振动、边坡稳定、土体与结构物的相互影响等问题带来了困难。有限单元法的出现为解决非线性的土动力的计算问题开辟了良好的前景。

为了深入了解动荷作用下土体的破坏机理，必须在室内外开展大量的实验和研究工作。在野外工作方面，如基础振动、地震及爆炸的实地观测。目前观测设备已有很大的发展。土应力计已发展到能测量0—5000磅/吋²的应力，大致可分三种形式：（1）线架式应力计。

（2）压电式应力计。（3）膜片式应力计。振动发生器是在野外使用波速法（用这方法可测出应力波传播速度和衰减规律等）的必要设备，它可分为低频（30周/秒以下，机械式的）和低频（30—10000周/秒，电磁式的）两种。另一种波速法是用爆炸做震源的地球物理勘探法。

为了科学地研究土的动力特性（应力—应变关系、阻尼、动力强度和频率变化等），要开展一些室内土动力试验。例如把圆柱形试件固定在振动板上，并施加恒定振幅的纵向振动或扭转振动，测得自由端振幅随频率的变化，按不同高度试件得出纵向或扭转谐振频率，可推算出土的动力特性参数。我国有关研究所利用动力三轴试验，能较好地解决土的动力特性问题。试验结果表明，土是有阻尼的，所以连较弱的应力波通过土传播都是衰减的，强烈的应力波传播时衰减现象更为突出。粘性土的动弹性模量因受力状态不同而有很大的变化。静压力愈大，动弹性模量增加，在同一静荷作用下，动应力加大时动弹性模量降低。

为了解决强振动荷载下土的动变形及动强度问题，可利用摆锤式冲压、落梁式冲压及可

控液压式来产生瞬间荷载，并进行瞬间三轴试验。

当应力波经过饱和土层时，土结构和水压力产生相互影响。纵波（压缩波）是依靠压缩土结构和孔隙水传播的，横波（剪切波）则主要依靠土结构的粘聚力和摩擦力而传播。纵波速度比横波速度大，在纵波刚到时，特别是刚要离开时，可以产生很大的孔隙水压力梯度。这个水压力梯度跟应力波的共同作用，可以引起土结构的破坏和液化，使地面突然沉陷。

关于砂土液化问题，日本做的工作比较多。他们利用三轴试验机对饱和砂试样施加反复的动荷载，找出了液化的主要因素是轴差应力 σ_{29} ，侧压力 σ_3 ，反复的次数 N ，砂的孔隙比 e ，建立了砂土液化条件的函数 $f(\sigma_{29}, \sigma_3, N, e) = 0$ 。将此式改为 $N = f_n(\xi)$ ，就可利用 N 值以决定砂土是否液化。我国水研院也做了不少有关砂土液化的工作。

振动使土体破坏，在某些情况下是必须避免的，但有些情况下则可利用它为工程服务。如可利用土体受振动的效应使松散土层加固，地下爆炸成形和振动打桩等。在管柱振动打桩方面我国已有辉煌成就，并受到国际上的重视。

四、土的力学性质的微观研究

（一）主要研究内容

随着工程实践和科学研究的发展，人们对于土壤的物理、力学性质的认识也逐步深入。作为地质介质的土壤，具有不同于一般连续固体的特殊的物理、力学性质，如弹性、塑性、粘性、触变性、各向异性，以及在含水量及其他物理、化学因素变化时可能引起的物理、力学性质的显著变化等。由于问题的复杂性，单纯用宏观的方法进行研究，就使人们认识事物的眼界受到了限制。

近代对粘土的研究，指出粘土是一种复杂的分散体系，它的固体颗粒主要由具有高度亲水性的粘土矿物组成。固体颗粒之间，固体颗粒与分散介质之间，由于分子力、静电力、氢键力等的作用，在一定的物理、化学条件和一定的外力作用下，形成一定的内部结构。粘土的种种复杂的物理、力学特性，正是由这种粘土内部结构决定的。因此，在对粘性土的物理、力学性质进行宏观研究的同时，有必要进行微观的科学研究工作。主要研究内容大致可分三个方面：

1. 粘性土内部（微观）结构及其与宏观物理、力学性质的关系 通过近代测试技术直接观察或判定各种粘性土中的粘土矿物颗粒、其他固体颗粒、胶结物、束缚水等物质相互之间排列及联结的形式，运用近代物理学、矿物学、物理化学、胶体化学等学科的知识，阐明土壤微观结构力学的本质，并研究在各种形式的外力作用下，这种内部结构变化的特性，从而说明粘性土应变、流变和破坏等过程的规律。

2. 物理、化学因素对粘土内部结构及宏观物理、力学性质的影响 粘性土的内部结构的形式与特性，及其宏观物理、力学性质，均与物理、化学状态密切相关。天然粘性土内部结构的形式与特性，取决于生成时期及以后时期的物理、化学条件及外力作用的历史。人类进行的工程活动可能引起物理、化学条件的变化，如离子交换、电解质的溶滤、PH值的变化等。因此应当研究物理、化学状态变化对粘性土（包括岩石软弱夹层）内部结构及宏观物理、力学性质的影响，从而为评价建筑物长期稳定性及制订相应的工程处理措施提供一定的根据。

3. 粘性土力学性质（流变参数）的统计理论 查明粘性土内部结构与宏观力学性质的

内在联系,在各宏观量作为微观量的统计平均值的基础上,对各种给定的土壤提出合理的计算模型,进行统计理论的研究工作,为近代土力学的理论从定性到定量提供一个良好的基础。

(二) 国际现状

1. 自从1923年 Assar, Hadding 用X光分析证实粘土是结晶结构之后,对了解各种土壤特性有了良好开端,使近数十年来研究土壤微观结构与宏观结构迅速发展,对明确粘性土壤的工程性质起了非常重要的作用。早在1925年与1932年, Terzaghi与 Casagrande 提出粘土矿物、颗粒之间存在吸引力,因而形成“蜂窝”结构。1926年Goldschmidt考虑粘土结构中水分子的作用。1953和1958年Lambe分别提出粘土的两种主要结构类型,即“片堆结构”和“片架结构”,前者以面接触为主,后者以点接触或线接触为主。1957年陈宗基比较详细地叙述了粘土颗粒的点、线、面接触,而且综合这些联结,可由库仑引力、非极性的范德华尔-伦敦力、阳离子、氢键所形成。同时,他还提出土结构的一个假设,并在此基础上利用微观法来探讨土的力学特性,这样就能进行土结构的应变、流变和长期强度的统计理论的研究工作。Rosenqvist已用电子显微镜证实这个结构的正确性。60年代前,几乎全部粘土性质的物理、化学理论都建立在单个粘土薄片的相互作用上。科学的发展加深了这方面的认识。1962年Aylmore和Quirk, 1962年Olsem, 1964年Brewer提出,人工粘土或天然粘土都是由粘土薄片聚集成“团块”(Peds),“碎片”(Crumbs),“群集”(Clusters)或“畴域”(Domains)而构成的,如此构型的薄片聚集体已被电子显微镜所证实:在分散条件下,形成“漩涡层状”结构;在凝聚条件下,形成“书架”(Book-houss)结构。Yong认为单个薄片理论仅适用于稀的胶体悬浮体,天然固结粘土必须采用多薄片的集体结构。L. Barden特别强调指出,要认识粘土的真实面貌,必须采用多薄片“书架”结构来代替单个粘土薄片的“片架结构”。

近几年来,土力学研究工作者除重视研究粘土微观结构外,还强调对土壤宏观结构的研究,因为土壤的宏观结构控制着粘土的大部分工程性质。粘土的有效颗粒是粘土薄片结合成的大的聚集体,这种概念已被电子显微镜与偏光显微镜所证实。1959年Rowe, 1968年Bishop, 1960年Bjerrum, 1964年Shempton, 1965年Fookes等在宏观结构研究方面进行了许多工作。1972年L. Barden研究了粘土的结构对其变形和破坏的影响,发现粘土不但存在聚集体,而且此聚集体还有水平定向的趋向。

2. 物理、化学因素对粘土内部结构及宏观物理、力学性质的影响 1961年Kazda进行了交换性离子的水化作用对土壤性质影响的研究,发现土壤颗粒的水化作用与离子的水化作用相同,二者产生的引力与斥力影响土壤全部的力学性质,例如交换量高的,水化作用小的阳离子减小膨胀压力,反之,就增大膨胀压力。Rosenqvist研究了孔隙水中电介质对蒙脱土与伊利土的力学性质的影响,如钾离子取代钠离子就会引起力学性质的重大变化,尤能影响到样品的剪切强度与灵敏度增大或减小。R. E. Olson从1964年开始直到现在,对 Ca^{++} 与 Na^+ 蒙脱土与伊利土的强度特性进行了系统的研究。1960年C. Mauyo研究了交换性阳离子对边坡稳定的影响,发现在相同的含水量下, Ca^{++} 饱和粘土岩的内摩擦角提高了七倍,粘聚力提高了两倍,在这种情况下边坡稳定系数从0.6增加到1.3。1965年Australasia, M. Arnold研究了表面离子吸引力对班脱土渗透性的影响,发现平衡颗粒之间的距离小于渗透理论的计算,颗粒之间的距离在 50\AA 范围内表面离子起到了引力作用,但在 $15-20\text{\AA}$ 范围内

就起相反的作用。D. Resendiz研究粘土—水系统中固体与液体之间的作用,并探讨出在流动中游离与吸附离子两者的一个简单模型,使许多粘土的塑性、触变性和剪切强度的特性能获得理论上的定性说明。

3. 粘性土力学性质(流变参数)的统计理论¹⁾。

(三) 开展土壤微观研究的意义

我们的研究对象——土的基本特点是复杂性和易变性。土是自然历史的产物,其组成极为复杂,具有固相、液相、气相的特性,而且很易受外界因素如温度、周围介质和建筑物的长期作用等的影响而产生复杂的变化。在我们这样一个幅员广阔、自然条件千变万化的国家里进行伟大的社会主义建设,无疑会随着工农业生产和国防建设的飞跃发展,向土力学工作者提出越来越多的复杂问题,并且要求越来越高。在这种情况下,仅有土力学的宏观研究是不够的。另一方面,科学技术的日新月异地向前发展,促使土力学必须在原有研究方法的基础上向前发展。因此,进行土壤的微观研究,是当前土力学研究中不可少的一个环节。通过微观研究,可以配合宏观研究逐步解决下列三个问题:

1. 进一步说明宏观力学现象的本质,为解决土力学的理论问题和实际问题提供参考或依据。

2. 深入研究土壤的物理、化学因素和土壤物理、力学性质的内在联系,推测物理、化学因素变化时可能引起的物理、力学性质的变化。

3. 根据土壤微观研究的结果,在某些特殊情况下,可能找到改善土壤物理、力学性质的方法。

1) 此部分将另文叙述。