第 1 章　绪　论

1.1　研究背景及意义

1.1.1　研究背景

软土是软弱黏性土的简称，是第四纪地质时代后期形成的海相、泻湖相、三角洲相、溺谷相和湖泊相的黏性土沉积物或河流冲积物，有的属于新近淤积物。软土一般是指在静水和缓慢流水环境中沉积、以黏粒为主并伴有微生物作用的近代沉积物，呈软塑到流塑状态。其外观以灰色为主的细土粒，如淤泥和淤泥质土、泥炭土、沼泽土以及其他高压缩性饱和黏性土、粉土等。其中，淤泥和淤泥质土是软土的主要类型，普遍具有含水量高、压缩性大、强度低、渗透性差、灵敏度高以及流变性显著等特点。

软土地基有极大的危害性，如果不处理或者处理不当，就会造成地基失稳，使得构造物沉降过大或产生不均匀沉降。而深厚层软土更是软土中的一种极端情况，加拿大、美国北部（芝加哥和波士顿）、北欧诸国（除丹麦外）、墨西哥城、新加坡、泰国曼谷、英国伦敦、世界主要河流（如尼罗河、密西西比河、荷兰鹿特丹附近的莱茵河、德国汉堡附近的易北河、伊拉克的幼发拉底河和底格里斯河、加尔各答的恒河）的三角洲都沉积有深厚的软土（Brand，1991）。我国软土分布也十分广泛，在滨河平原、河口三角洲、湖盆地周围、山间谷地均有分布，沿海地带，根据地理位置，从北至南软土地区主要有渤海湾、津塘地

区（如秦皇岛、天津和塘沽）、连云港、长江三角洲地区（如南京、上海、杭州、宁波）、温州、福州、厦门、珠江三角洲区域（如广州、深圳和湛江）等城市，内地则有武汉和昆明等城市。我国深厚软土主要分布在东南沿海地区，厚度最大可达 20 m 左右，在该类地基上修筑岩土工程体，对于承载能力、长期荷载稳定性、不均匀及工后沉降等因素的考虑将是一个更大的挑战。在荷载作用下，软黏土本身的地基承载力低，且地基沉降变形量大，不均匀沉降变形量也越大，而且沉降稳定的历时普遍比较长。在比较厚的软黏土层上，结构物基础的沉降往往需要几年甚至几十年。软黏土地基是在工程建设中遇到最多的需要处理的软弱地基，它们广泛分布在我国沿海以及内地河流两岸和湖泊地区。例如，天津、连云港、上海、杭州、宁波、温州、福州、厦门、珠海等沿海地区，以及武汉、南京、马鞍山和昆明等内陆地区。

在软土地基上施工可能发生的问题有：

1．沉降问题

主要有开挖基坑，基坑周边地面产生附加沉降而坑底回弹隆起；出现大量的整体或差异沉降，使建筑物功能受到影响；由于荷载偏心或软土层厚薄不均、分布不一引起沉降不均匀；相邻建筑物太近或相邻建筑物荷载差异过大造成建筑物倾斜；欠固结土或大面积填土产生负摩擦力引起附加沉降。

2．承载力及稳定性问题

主要包括开挖土坡发生滑动；在天然边坡坡脚开挖引起滑坡；开挖基坑底面发生塑性隆起；支撑系统土压力增加；在建筑物附近开挖，造成建筑物倾斜甚至失稳破坏；地基承载力

不足造成失稳；土堤、土坝、堆场地基的滑动；挡土结构物土压力增加；孔隙水压力增加造成地面隆起。

3．降水问题

主要是深层抽汲地下水引起大面积区域性地面沉降，浅层降水引起附近建筑物沉降和开裂。

4．其他问题

基坑渗水、管涌或流砂等；交通荷载引起振陷，打桩施工引起震动、挤土等造成建筑物破坏。

我国经济发达城市大多位于沿海以及长江流域一带软土地区，随着这些城市基础设施建设的快速发展，都会遇到诸如轨道交通、机场、码头、高速公路、高层建筑深基坑、市政工程等大量的软土地基工程问题。地基变形和稳定是软土地基处理要解决好的两个主要问题，而了解和掌握软土的工程特性是研究、解决这两大问题的基础。由于在成因类型、物质构成等方面有所不同，软土工程特性具有区域性特点。对各类地区性土的工程性状开展深入系统的研究是岩土工程的热点，具有重要的理论意义和工程实用价值。

1.1.2 研究意义

1.1.2.1 铁路建设和发展的需要

随着我国铁路事业的发展，列车运行的速度和安全性一直在不断地提高，对线路的平稳性和可靠性的要求也随之提高。高速行驶的客运列车的目标是“高速、舒适、安全”，而在整个铁路线路结构中，路基部分往往是最基础最薄弱同时也是最不稳定的环节。路基在多次重

复荷载的作用下产生的累计永久下沉变形（残余变形）会造成轨道的不平稳，且路基的刚度特性也影响着轨面的弹性变形，因而对列车在轨道上的高速行进有至关重要的影响。况且路基的处理技术方法目前在国内并不是很成熟，多条线路工程都因为路基没有处理好而最后影响了工程质量。因此，在工程设计施工中一定要严格控制路基后期的不均匀沉降，严格保证工程质量。软土地基处理质量的好坏，会直接影响软土路基自身的基础承载力，同时也是保证铁路建成以后安全高效使用的关键。选择安全合理的软土路基处理方案，同时做好软土路基的沉降控制和处理工作，可以取得良好的经济和社会效益。

1.1.2.2 科技创新的需要

目前，国内对不同类型的软土特性及其工程措施已有研究，但对在深度和分布上差异性很大的软土及松软土还少有深入的研究。而沪通铁路为规划中连接中国上海市与江苏省南通市的国家铁路Ⅰ级干线，连接了苏中、苏北地区与上海、苏南地区，运营对象为客货为主、兼顾客运，速度目标值为 200 km/h。沿线工程软土路基及松软土路基长约 27.199 km，配套工程增（新）建线路软土路基长 6.36 km。并且沿线软土层厚薄不均，一般为 6 ~ 15 m，因此，进行沪通铁路软土地基沉降变形控制技术研究已迫在眉睫。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 土流变特性研究现状

土流变研究始于 Bingham[1]提出的材料流变理论。近几十年来，随着工程建设事业的发展，一些前辈结合工程对土的流变开展了研究。荷兰的 Geuze 和我国学者陈宗基[2]是首先开

展系统研究的，当时荷兰的 Vlaggeman 大桥、Zuiderzee 海堤以及软土地区铁路路基因流变而破坏，引起该国科学家重视，从而开始了对土流变的系统研究。之后在第三届国际土力学和基础工程会议[3]上开始有许多关于土流变问题的报告和发言，在关于土、雪和冰蠕变问题的综合性报告中指出，蠕变研究将影响土力学将来的发展，因为在土力学的所有过程中蠕变变形将直接或间接发生作用。此后，各国学者开始对土流变进行系统的研究工作，取得了大量的成果，使土流变研究成为一种新的方向。在以后的各届国际土力学和基础工程会议上，有关土流变的研究报告越来越多，1964 年在法国举行了第一届国际土流变学讨论会，在苏联举行了三届有关土流变学的讨论会，而在第七届国际土力学和基础工程会议[4]上土流变则成为综合报告的主要内容。现在许多国家如日本、荷兰、葡萄牙已将土流变学列为重要的研究方向。

在我国，从陈宗基教授开始，武汉岩土力学研究所、河海大学、南京水利科学研究院、清华大学、同济大学、浙江大学等单位在土流变方面[5]做了许多工作，并取得了一定的成果。

为了定性分析和定量了解土的流变特性，以便建立土流变本构模型及确定模型参数，就需要进行土流变试验，这可从微观和宏观两方面进行分析。前者目前仅在于“静态”方面，主要借助光学显微镜或扫描电子显微镜来观察土的微观结构，经过分析，提出土流变产生的微细观机理，确定土中导致流变的主要微细观结构形式，或得出一些具有明确物理意义的微细观参数来反映土的流变特性等。微观分析只能做定性说明，如陈宗基[5]通过对黏土的微观分析提出的片架结构理论，认为具有这种结构形式的黏土流变特征最为明显。宏观土流变试验测试则可分为现场和室内两种：现场流变试验是在工程现场测试反映土体的流变数，如地

基长期沉降、边坡位移和基坑开挖后的侧壁位移；室内流变试验是在室内三轴或固结仪上对现场所取土样按研究需要进行蠕变或应力松弛试验，在试验加载方式上可进行分别加载或分级加载。

从微观角度建立流变本构模型，认为土产生流变是由土颗粒引起，根据土微观构造的变化机理，运用连续力学理论，或借用金属晶体中的位错微观理论，结合土流变的宏观表现来建立土流变本构模型。Keedwell[6]将速率过程明显理论用于预测土的特性，该理论从物理化学角度描述土流变时内部的分子热运动。Vyalov[7]也运用该理论推导了土的非线性流动方程，其反映了抗剪强度随应力增加的有结构性非牛顿体的特征。

从土的微观结构出发建立的流变本构模型不仅能揭示土流变的内部机理，而且能反映流变的宏观特征。

从宏观表现建立土流变模型是目前研究得最多的，主要分为 3 种类型：理论模型、经验模型以及半理论半经验模型。

1.2.1.1 理论模型

理论模型是采用一些基本元件来代表材料的某种性质，如用“弹簧”模拟弹性、“黏壶”模拟黏滞性以及“滑块”模拟塑性，通过这些基本元件的“串联”和“并联”组合，来反映材料的黏弹塑性特性。经典的模型有：Maxwell（松弛黏弹性）模型、Kelvin（蠕变黏弹性）模型和 Bingham（黏塑性）模型，以及在这些基础上发展的 Merchant 模型、Schiffman 模型、广义 Voigt 模型、修正的 Komamura-Huang 模型、村山朔郎模型和 Lee 模型。这类流变本构方程是微分形式，通过求解微分方程得到蠕变方程和应力松弛方程。优点是概念直观、简单，

物理意义明确，能较全面反映流变介质的各种流变特性，因此应用比较广。缺点是仅描述线性流变，不能反映土的非线性，也无法描述加速蠕变。此外，理论模型大多数是在三轴应力状态下建立，而实际土体受力是复杂的三向应力状态，虽然许多学者采用类比方法将一维模型分析推广到三维，但这与实际的三维情况存在较大差异。因此，若对该类模型进行修改，则因模型的选用和参数确定而显得复杂化，限制了其应用。冯紫良[8]曾采用双层层叠流变模型（由 Bingham 模型和 Maxwell 模型相并联）对上海软土试验数据进行分析，并利用位移反分析法确定模型参数。张敏江[9]则采用西原模型对辽宁营口软土的室内流变试验进行描述，殷德顺[10]通过一个软体元件与一个弹簧元件的串联或并联，对张敏江的试验流变数据进行对比分析。

1.2.1.2 经验模型

经验模型针对不同的土以及不同条件，直接给出反映流变的函数关系，其可分为应力应变关系型和应力应变速率关系型。后者也称速率型本构关系，反映了土流变过程中的黏滞性，分为本构关系中时间显式和应变速率中时间隐式两种形式。类型主要有 3 种：① 幂函数型，多用来反映初始蠕变阶段性质；② 对数型，常用来反映加速蠕变阶段性质；③ 指数型，多用来描述等速蠕变阶段性质。与流变理论模型相比，经验模型缺乏理论指导，物理意义不太明确，通用性不强，对于不同的软土地区，经验模型也不相同。但其优点是直观明显，容易为工程人员采用接受，因此也一直是工程上研究土流变的重要方法。如 Singh-Mitchell 经验模型，建立了应变率、剪应力水平与时间的关系。Vyalov 采用两种函数分别代表应力、时间与应变的关系，通过两者组合得到流变经验模型。谢宁基于上海地区几种典型饱和软黏土的

蠕变和应力松弛试验，分析总结了其流变特性，并建立了能反映蠕变和应力松弛的非线性流变经验关系。Poh 在常荷载恒温下提出一个通用经验关系，可反映软土流变的 3 个典型阶段（主、次固结和蠕变）。Lin 在常应变率试验基础上提出了一种经验模型，可以考虑土的超固结，但不能反映应变软化。王常明[11]根据珠海、上海和营口 3 种海相软土三轴蠕变试验结果的分析，认为双曲线型更适合其应力-应变关系。

1.2.1.3 半理论半经验模型

半理论半经验模型则是将前两种模型的优点进行组合，在目前的研究中也最为常见。如詹美礼[12]在对上海软土流变试验基础上，将 Merchant 模型和殷宗泽双屈服面弹塑性模型结合提出能考虑流变特性的新模型，并对某隧道工程进行分析；但该模型参数的确定比较复杂，黏弹性和黏塑性变形状态的判别标准有很大的近似性。寥红建基于日本火山灰黏土的蠕变试验，运用剑桥模型和 Perzyna 黏塑性方程，并结合关联和不相关流动准则，提出了可以考虑剪胀性和时间效应的弹黏塑性模型。李军世[13]将 Mesri 模型和 Singh-Mithell 经验模型结合，用来描述上海淤泥质黏土的蠕变特性。陈远洪[14]将修正剑桥模型与修正的 Koumanura-Huang 模型结合建立了能考虑流变的改进模型。陈晓平[15]将 Duncan-Chang 非线性弹性模型和 Kelvin 黏弹性模型相串联得到新的蠕变-固结模型，并将其用于分析某高速公路软土地基加固工程。袁静[16]在室内试验数据基础上，将修正剑桥模型的固结屈服面和两个类似 Drucker-Prager 模型的剪切屈服面组成软土各向异性三屈服面流变模型，可考虑 K_0 固结引起的土各向异性和土体变形的发散，模拟软土的流变。张军辉[17]在对连云港海相软土三轴流变试验基础上，将广义模型和椭圆一抛物线双屈服面模型相结合，建立新的流变模型，并结合某软土路基工程进

行了分析。

土流变是个复杂的问题，某些特性目前认识并不是很清楚。因此，今后的研究方法应该是将微观结构和宏观力学分析相结合，从微观结构分析入手研究力学过程中土微观结构的变化，揭示和认识土流变的机理和本质，这样建立起来的土数学模型和力学模型才能更好地对土宏观力学性状进行模拟，更好地解决工程实际问题。

1.2.2 土结构性研究现状

土体结构概念最早由 Terzaghi 提出，它是指土中颗粒或土颗粒集合体以及它们之间的孔隙大小、形状、排列及联结等综合特征，表征天然土所具有的结构强度特性。绝大多数天然土都有一定的结构性，但由于成因环境不同，土结构性就存在较大差异，因此各地区土的工程特性也不同。土结构性研究的重要性正越来越受到众多学者的认同，其不仅对认识黏土特性和本构模型方面具有重要的理论意义，而且对指导工程勘察与工程实践也具有实际应用价值。正因为如此，沈珠江院士把它称为 21 世纪岩土工程学科发展的核心问题。

土结构研究历史，是从 20 世纪 20 年代以放大镜为工具开始进行研究的。Terzaghi 最早提出土的微观结构概念，认为黏土的蜂窝状结构是自然沉积过程中很常见的一种结构形态。之后 Goldschmidt 提出土具有片架排列结构，认为高灵敏黏土中的黏土颗粒是不稳定的片架排列，而低灵敏黏土有较大的密度和较稳定的排列。Casagrande 发展了 Terzaghi 的蜂窝结构，提出了蜂窝结构中“基质黏土”，和“胶结黏土”的概念；但真正对土微观结构进行系统研究的第一位学者是奥地利土壤学家 W. L. Kubiena，他在 1938 年出版了《微观土壤学》一书，首次提出“微观结构”这个概念。这些早期研究因观测设备简陋，只是对复杂土结构性的感性认识，是

从一般化学原理和土的工程性质不同表现进行间接推断，因此难以进行系统的研究。

50 年代中期至 60 年代后期，随着科学技术的发展，光电量测技术如光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射技术等也相继引入这一领域，研究者开始注意到结构要素的完整性，特别是结构单元的定向分布特征，使土的各向异性、不均匀性以及一系列特殊结构类土的特性得到不同程度的描述和解释。如陈宗基[18]将黏土中片状颗粒的接触形式分为点-面接触、边-面接触和面-面接触，并将它们之间的相互作用形象地绘成三维网格模型。Rosenqvist[19]首次应用电子显微镜对海洋土的微观结构进行了研究。Ophen 提出边-边、边-面的“絮凝集合”结构模型，其类似后来的“片堆架”或“书本架”结构。Brewer 提出土的结构或构造，指出形成复合颗粒的基本颗粒及其相应的孔隙大小、形状和排列所表现的土的物理构成。Gillott **错误!未找到引用源。**发表了用扫描电镜系统研究细粒土组构的论文。

60 年代末至 80 年代中期，土微观结构研究在定量化和工程性质方面得到较大的发展，出现了描述结构形态诸要素的方法和一些能反映结构性影响的力学模型，如 Gillott、Mitchell、Collins 和 Mcgown 提出了许多微观结构概念并分析其工程意义。微观结构定量测试技术在早期主要应用 X 光衍射仪的特点，对土中扁平黏土矿物颗粒定向排列进行定量测定。如 Brindley、Kaarsberg、Silverman 和 Bates 和 Odom 等学者对黏土矿物的定向性进行二维和三维的研究，取得一些重要成果。在瑞典歌德堡 Chalmers University of Technology 召开的首届国际土结构会议，就微观结构的观测技术和定量方法、土的宏观和微观结构、土的矿物化学过程对土结构的影响以及从微观结构角度分析土的变形与破坏机理等方面进行了交流，这在土结构研究史上具有重要意义。Tovey 首次对土结构的电子显微镜照片进行了定量分析尝试。