

现代土力学的基本问题

沈珠江

(南京水利科学研究所, 南京 210024)



沈珠江, 男, 1933 年生, 1953 年毕业于华东水利学院(今河海大学), 1960 年在前苏联莫斯科建筑工程学院获副博士学位, 1995 年当选为中国科学院院士。早年从事土体极限分析研究, 近年从事土的本构模型及土石坝和地基的数值模拟研究, 参加了黄河小浪底和长江三峡深水围堰等十几座高土石坝的分析。发表专著《计算土力学》及论文 100 余篇。

摘要 现代土力学可望在今后 30 年内建成基本框架, 其主要内容将包括新一代的本构模型及一个变形理论和两个破坏理论。本文介绍了作者对这些问题的今后研究重点及发展方向的一些看法。

关键词 土力学, 本构模型, 变形理论, 破坏理论

1 前 言

从 1963 年 Roscoe 发表著名的剑桥模型开始, 土力学的研究脱离了古典理论中线弹性多孔介质和刚塑性介质的框框, 开始正视土体的非线性变形特性。但是, 回顾一下 30 年来走过的道路可以发现, 到现在为止提出的土体本构模型实际上都是针对结构破坏以后的扰动土和砂土的, 无法反映实际土体的许多特性。在这 30 年中, 人们的研究重点仍是饱和土和干土, 即两相土。三相非饱和土研究的进展缓慢, 只是最近几年才出现加速发展的趋势, 1995 年 9 月在巴黎召开的第一届国际非饱和土会议就是这一趋势的标志。另外, 有关土体逐渐破损问题和砂土液化问题虽然已研究多年, 但始终没有获得重大进展。我们相信, 随着本构模型研究的深入, 在这两个问题的研究上也会有所突破。下面将就以上 4 个问题的研究重点和发展方向进行一些探讨。

2 本构模型

已经提出的非线性和弹塑性模型都以刚塑性体的水平线为渐近线, 如 Duncan 的双曲线模型^[1], 或终极线, 如剑桥模型^[2](图 1)。虽然有不少模型可以反映应变软化曲线^[3], 但它们仍只能描述无结构性的超固结土。我们认为, 应变软化可以分为三类: (1) 减压软化, (2) 剪胀软化, (3) 损伤软化^[4]。第(1)类和第(2)类软化分别出现于超固结粘土和密实砂土中(图 2), 只有第(3)类才与原状土结构强度丧失有关。

回顾土体弹塑性模型研究的历史不难发现, 这类模型除了对体积塑性应变作了修正以外, 基本上借用了金属塑性理论的概念。金属的塑性变形是晶体之间的滑移引起的, 搬到土力学中, 就认为土体的塑性变形是颗粒之间的滑移引起的。颗粒滑移可以引起剪胀和剪缩, 因此, 与金属材料相比, 就多了一个体应变。但是, 大量细观研究资料表明, 土体变形过程中除滑移外, 还伴随着颗粒(包括团粒)的破碎与转动^[5,6]。这就说明, 为了更好模拟土体的真实变形特性, 人们应当从传

本文于 1998 - 05 - 25 收到。

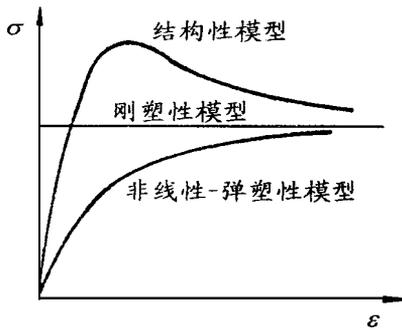


图1 三种应力应变曲线

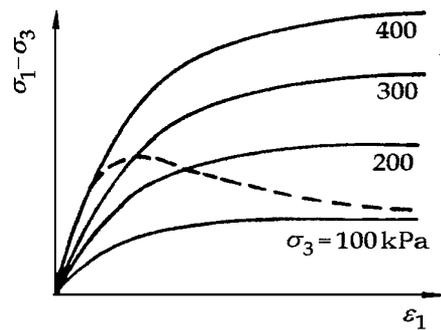


图2 减压软化

统的弹塑性模型转向结构性模型。新一代的结构性模型可以用下列图式来定义

应力 → 结构改变 → 应变

传统的模型研究方式是先做假设(例如屈服面与正交法则),在此假设基础上直接推导出宏观应力应变关系。结构性模型的研究思路是遵循实际的变形过程:土体受到宏观应力以后其细观结构发生一定的改变,这一改变在宏观上表现为发生一定的应变。在这里,人们的最终目的仍是建立宏观的应力应变关系,但细观结构的研究是必须经过的一座桥梁。

建立结构性模型,可能要经历以下几个步骤:

1) 确定能代表结构性的指标

初步考虑可能有以下8个:平均孔隙率、孔隙分布的标准差,组构张量的主轴方向及其椭圆度,定向张量的主轴方向及其椭圆度和平均胶结力及其分布的标准差^[6]。

2) 建立一组联系应力与结构改变的规律

为此可能先要确立一些基本原理,初步考虑有以下几点^[4]:

最小孔隙率原理——土体一般在一定的围压下工作,受到力学扰动后其孔隙率将减小,并向最小孔隙率趋近,这是最小势能原理的反映。

稳定孔隙率原理——土粒之间的胶结力受到破坏时,其孔隙率将逐步向扰动土所特有的稳定孔隙率靠近。

孔隙匀化原理——或称大孔隙优先改变原理,即大孔隙改变多,小孔隙改变少,孔隙分布趋向均匀化。

接触面偏向原理——接触张量的主方向随着偏应力的增大逐步偏向大主应力方向,其椭圆度随之增大。

颗粒定向原理——定向张量的主方向趋向与大主应力垂直的方向,但当出现剪切带时,颗粒定向角将趋向与剪切带平行。

颗粒破损原理——颗粒间的胶结随粒间作用力的增大而逐渐破损,后者与平均压应力和主剪应力成正比,而且最薄弱的胶结首先破损。

3) 建立一组联系结构改变与应变的规律

初步考虑有以下3个规律:

硬化规律——孔隙比减小及孔隙分布均匀化引起等向硬化,而接触张量的偏转则导致不等向硬化。

流动规律——塑性应变方向既决定于应力总量的方向,也决定于应力增量的方向,前者因颗粒之间的滑移而产生,后者则因颗粒的滚动而产生。

剪胀规律——剪切引起的体积变化由普遍的剪缩和临时的剪胀两部分组成,前者受最小孔隙率原理支配,是不可逆的,后者受接触面偏向原理支配,随偏应力的增大而增大,且是可逆的,即荷载反向时变为剪缩。

4) 根据以上规律建立带有待定系数的应力应变关系式,并通过拟合试验曲线的办法确定这些系数。

由此可见,以上建立结构性模型的思路并不要求从细观上对每一颗粒的运动进行追踪,而只要通过细观研究得出定性正确的规律性,定量的关系仍通过宏观研究确定。

根据现有的认识水平,未来的结构性模型可能有以下三种类型。

2.1 散粒体模型

这类模型只适用于颗粒之间无胶结的砂土,但它将摆脱传统的屈服面和塑性势,按前面的原则从细观结构变化出发建立相应的应力应变关系。最近,作者为分析砂土液化问题建议了这样一个模型,可以考虑应力路线转折和主应力轴旋转等复杂的加荷条件^[7]。

2.2 复合体模型

把变形过程中的土体看作由原状土和扰动土(损伤土)组成的复合材料,两者共同承担外加应力(图3)

$$\sigma = (1 - \omega) \sigma_i + \omega \sigma_d = [(1 - \omega) E_i + \omega E_d] \varepsilon \quad (1)$$

为荷载分担比,可称为损伤比。此模型亦可称为双弹簧模型(图3)。右边的弹簧由一排不同模量 E 的弹簧和不同胶结强度 q 的胶结杆的串连体组成,左边的弹簧可以是非线性的或弹簧与滑片串连的弹塑性体^[8,9]。受荷时薄弱的胶结杆先破损,随着胶结杆的不断破损,逐步增大,土体由原状土逐步向损伤土转变。

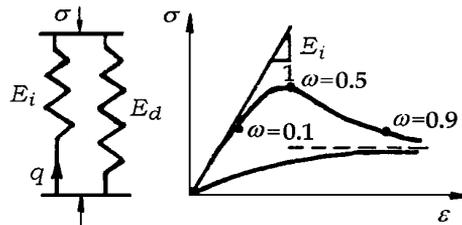


图3 双弹簧模型

2.3 砌块体模型

先把原状土看成类似块石或砖块砌成的不均匀材料,由强度大的块体和强度低的粘合面组成。刚开始受力时,在剪切面附近的薄弱处可能出现微裂缝,如象砖墙因不均匀沉降而裂缝一样。但是随着应力的加大,块体也逐渐破碎,最后碎成小团粒或颗粒后,就可能形成没有裂缝的连续的剪切带。在高围压作用下,块体在剪切以前就大都破碎,试样已趋向均匀,微裂缝的出现和剪切带形成的可能性就减少。按照上述概念,原状粘土可以看作粒径不断变小的砂粒的集合体,但颗粒之间有吸力相互联系着。因此,土体的塑性变形可以分为两部分,一部分类似于砂土因颗粒之间滑移而引起,可以用弹塑性模型描述;另一部分则来源于吸力和胶结力的丧失而引起的颗粒破损^[10]。

3 非饱和土固结理论

近年来,非饱和固结理论的研究取得较大的进展.杨代泉把饱和土的 Biot 固结理论推广到非饱和土,得出了以 3 个位移分量、1 个孔隙水压力和 1 个孔隙气压力为变量的固结方程式^[11].陈正汉则借用三相介质的混合物理理论推导了类似的方程式^[12].国外的一些学者也在做类似的工作.今后,有关这一理论的研究,这里着重讨论以下两点:

3.1 混合物理理论在土力学中的实用价值

早在饱和土固结理论的研究中,Zienkiwicz 就指出过,比 Biot 固结理论较迟发展起来的混合物理论,应用于多孔介质的变形分析时并没有提供新的东西^[13].其实,Biot 固结理论和混合物理论的差别可以用下式来表达

$$\begin{array}{ll} \text{Biot 固结理论:} & \text{固体骨架} = \text{土体} - \text{孔隙流体} \\ \text{混合物理论:} & \text{土体} = \text{固体骨架} + \text{孔隙流体} \end{array}$$

Biot 理论首先考察土体整体运动,然后再考察孔隙流体的运动,固体骨架的运动则是派生出来的.事实上,独立于土体以外的固体骨架是不存在的.混合物理论把固体骨架和孔隙流体分别加以考察,对认识问题有一定好处,但对解决实际问题,就未必有多大意义.

3.2 合理的本构模型是非饱和土固结理论成功的关键

建立非饱和土固结理论并不是为了追求数学上的完美,而是要解决实际工程问题.如果到今天,还象古典土力学那样把土骨架当作线弹性体,虽然能推导出一整套公式来,但是这样的理论既不能解释膨胀土的湿胀性,又不能解释黄土的湿陷性,没有多大意义.因此,我们认为,只有先建立起能符合非饱和土主要特性的本构模型,继续发展这一理论才有意义.这正是当前国际上研究的动向^[14].当然为了具体应用这一理论,除此以外还有许多事情要做.例如,大气降水和蒸发过程中地面水、气压力的边界条件就是一个很难确定的问题,水份入渗过程中湿润锋推进的数值模拟精度也是一个较难解决的问题.

4 逐渐破坏理论

有关应变软化材料逐渐破坏问题的研究,亦已有 30 年的历史,但是进展不大.早期的研究集中在减压软化问题,例如超固结土坡的长期稳定性^[15].但是,这类问题的‘逐渐’主要指逐渐吸水而引起的有效应力降低,用刚塑性模型也能分析,因此不是严格意义上的逐渐破坏问题.撇开这一点,可以说到目前为止有关逐渐破坏的主要研究内容限于剪胀软化引起的剪切带形成问题.但是我们认为,结构性粘土的损伤软化在理论上更具典型,实际工程中也最常遇到,因而更具重要意义.

大家知道,静力条件下的变形方程属椭圆型,其系数矩阵是正定的,可用有限元法求解,而破坏区的控制方程则属双曲型,宜用特征线法求解.在逐渐破坏过程中,破坏区的锋面逐渐向前推进,但分界线的位置事先是不知道的.对于这样混合型微分方程,在求解上遇到了巨大的困难.目前只有简单的一维问题,已求得相应的理论解^[16].有关二维问题的数值求解,已经尝试过许多途径.这些方法中很多都用了复杂的技巧,如必须采用多结点的三角形单元,单元的一边还要与可能的剪切面平行等.尽管如此,计算结果还往往不稳定,例如剪切带厚度和承载力曲线与单元划分的粗细有关(单元敏感性).近年来应用梯度塑性理论求解这一问题方面取得一定进展^[17],但仍属于初步的探索.

我们认为,计算技巧需要研究,但更重要的是建立符合实际软化机理的本构模型.应当指出,目前研究都未跳出弹塑性模型的框框,根本还无人考虑前面提到过的结构性模型.最近,笔者针对减压软化和剪胀软化,建议了一个广义孔隙压力模型^[18].这一模型认为,软化可用内压力的积累来描述,而且内压力的增大必然导致体积增大,因而不需要剪胀的概念,这样就不必象 Drucker - Prager 模型那样用正交法则来计算剪胀.应用这一模型可以比较方便地分析逐渐破坏和剪切带形成过程,今后当然还需要计算技巧上的改进.

总之,有关土体和其它软化材料的逐渐破坏问题,目前尚处于百花齐放和学院式的研究阶段,希望不久的将来能够有所突破,找到简单实用的理论和分析途径.

5 液化破坏理论

松软土体受到力学扰动时体积收缩.如果土体是饱和的,且内部的孔隙水无法排出,就引起内压升高.当内压升高到等于围压,土体就完全失去强度,达到液化状态.液化理论的关键问题是确定塑性体积收缩量 p_v , 根据 p_v 与内压上升引起的膨胀抵消的原则,可以由下式确定内压上升量 p

$$v = p_v - p/K = 0 \quad (2)$$

K 是土的回弹体积模量.

目前,有关液化问题的研究有两种途径.其一是半经验性的,即用经验曲线拟合室内试验所得的孔隙压力上升曲线.试验曲线因试验条件而异,难于符合千差万别的现场情况.因此,这种研究的局限性是不言而喻的,也显然不属于本文所讨论的理论范畴.另一种途径是基于运动硬化的弹塑性理论或各种各样的变种,如边界面理论和内时理论.有关这方面的研究也已有 20 多年的历史,提出的模型不下几十种,但没有一个能完满解释土体的体积收缩特性.

我们认为,对于液化破坏这样复杂荷载下的土体变形过程,采用传统的弹塑性理论已无法描述.譬如屈服面,无数试验结果表明,体积收缩不但在加荷时发生,在卸荷和中性变载时亦发生,因此屈服面作为弹性区和塑性区的分界面已失去意义.又如试验资料也表明,塑性应变方向既决定于应力总量,也决定于应力增量,因而流动法则也不再起作用.而随着主应力轴的偏转不断发生体积收缩的试验结果更表明,传统的建立在主应力空间上的屈服面理论已无多大意义.

为了更好地描述实际的土体变形特性,对经典弹塑性理论已提出了许多修正方案.笔者也为此作出过一些努力.例如,提出了多重屈服面、似弹性应变等概念^[19].这些研究工作既发展了弹塑性理论,但也把它改得面目全非,而且经常出现这样的情况,新的理论能够解释某些试验结果,但面对一种新的试验结果又无能为力了.我们最近提出一个新模型就是试图在这一方面打开新的局面^[7].

此外,有关液化问题的研究不宜只把目标集中在砂性土上.砂土液化已经成为一个专门名词,但我们认为,软粘土和其它大孔隙土同样可能液化.目前对软粘土液化问题研究不够的原因除认识上的偏差外,还存在粘土中孔隙压力量测困难的实际问题,因此今后要着重研究有关的量测技术.砂土液化与粘土液化的研究之间必定能相互促进.例如砂土的流滑显然与快粘土(灵敏粘土)的破坏有共同之处,都是细观结构突然失稳造成的.

6 结 论

(1) 现代土力学就是非线性土力学,它以非线性本构模型为基础,其主要内容是三个理论,即非饱和土固结理论、逐渐破坏理论和液化破坏理论.

(2) 前一阶段发展的非线性本构模型限于非线性弹性模型和弹塑性模型,今后应重点发展新一代的本构模型——结构性模型。

(3) 结构性模型应建立在对土体受力后细观结构改变的全面考察的基础上,但不必拘泥于对土颗粒运动的定量分析。

(4) 只有在结构性模型的基础上,现代土力学的三个理论的基本框架才能建立起来。

参 考 文 献

- 1 Duncan J M, Chang C Y. Non-linear analysis of stress and strain in soils. Proc. ASCE, *J SMFD*, 1970, 96(5)
- 2 Roscoe K H, Schofield A N, Thurairajah A. Yielding of clays in states wetter than critical. *Geotechnique*, 1963, 13(3)
- 3 沈珠江. 粘土的双硬化模型. *岩土力学*, 1995, 16(1): 1~8
- 4 沈珠江. 当前非饱和土力学研究中的若干问题. 区域性土的岩土工程问题学术讨论会论文集, 南京, 1996. 1~10
- 5 张梅英等. 岩土介质微观力学动态观测研究. *科学通报*, 1993, 38(10)
- 6 沈珠江. 砂土本构理论的检讨与重建. 第六届全国岩土力学数值分析及解析方法讨论会议论文集. 广州, 1998
- 7 沈珠江. 复杂荷载下砂土液化变形的结构性模型. 第5届全国土动力学学术会议论文集, 大连, 1998
- 8 沈珠江. 结构性粘土的非线性损伤力学模型. *水利水运科学研究*, 1993(3)
- 9 沈珠江. 土体变形特性的损伤力学模拟. 第5届全国岩土力学数值分析及解析方法讨论会议论文集, 肇庆, 1994. 1(1~8)
- 10 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论. *岩土工程学报*, 1996, 18(2)
- 11 杨代泉. 非饱和土广义固结理论及其数值模拟与试验研究. 南京水利科学研究院博士论文, 1990
- 12 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论——数学模型、试验研究、边值问题. 陕西机械学院博士论文, 1991
- 13 Zienkiewicz O C, Shiomi T. Dynamic behaviour of saturated porous media; the generalized Biot's formulation and its numerical solution. *Int J Num Anal Meth in Geomech*, 1984. 8(1)
- 14 沈珠江. 非饱和土力学的回顾与展望. *水利水电科技进展*, 1996(1): 1~5
- 15 Bjerrum L. Progressive failure in slope of oversolidated plastic clay and clay shales. Proc. ASCE, *J SMFD*, 1967, 93(5)
- 16 蒋明镜, 沈珠江. 考虑材料软化特性的柱孔扩张问题. *岩土工程学报*, 1995, 17(4): 10~19
- 17 李锡夔. 摩擦材料应变局部化的有限元分析. 现代力学与科技进步, 北京: 清华大学出版社, 1997, 2: 959~964
- 18 沈珠江. 应变软化材料的广义孔隙压力模型. *岩土工程学报*, 1997, 19(2): 14~21
- 19 沈珠江. 土体弹塑性应变分析中的几个基本问题. *江苏力学论文选集*, 河海大学出版社, 1994. 1~8

FOUNDAMENTAL PROBLEMS IN THE MODERN SOIL MECHANICS

SHEN Zhujiang

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract The framework of modern soil mechanics is expected to be formed within the coming 30 years. The modern soil mechanics will be mainly composed of a new kind of constitutive model, a deformation theory (Consolidation theory of unsaturated soils) and two failure theories (Theory of liquefaction failure and theory of progressive failure), from the view point of the author. In this paper some recent developments and the key topics of its further research are discussed.

Key words soil mechanics, constitutive model, deformation theory, failure theory