

815885

5(3)81

5/2013

土力学 的流变原理

〔苏〕C. C. 维亚洛夫 著



科学出版社

5(3)81

—

5/2013

土力学的流变原理

〔苏〕C. C. 维亚洛夫 著

杜余培 译

郭见扬 校

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书介绍了土中应力、应变状态的形成,以及应力、应变随时间变化的基本规律,研究了土的变形机制、流变特性(蠕变、松弛和长期强度等)和加荷时土性状的其他特点,在研究变形的物理实质的基础上详细分析了蠕变的各种表现,并提出了描述变形的综合性方程,还举例说明了资料整理方法和公式应用方法。

本书可供地质和岩土力学专业的科技工作者参考。

С. С. Виллов

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ

Издательство «Вышшая школа», 1978

土力学的流变原理

[苏] С. С. 维里亚夫 著

杜余培 译

郭见扬 校

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年5月第一版 开本: 787×1092 1/32

1987年5月第一次印刷 印张: 16

印数: 0001—2,600 字数: 365,000

统一书号: 13031·3514

本社书号: 4271·13—14

定价: 3.75 元

序 言

土的流变学是土力学的一个分支,研究土中应力、应变状态的形成和随时间的变化。作者在书名中采用“流变原理”一词,赋予该词更为广泛的含义:把“流变学”看作一门科学,一方面研究物体应力、应变状态的形成和变化;另一方面研究弹性和塑性理论传统概念范围以外的物体性状的特点。根据科学院院士 Л. И. Седов 的《连续介质力学》(Механика сплошной среды, 1970)的观点,可以说流变学的任务是建立描述非理想介质性状的新模型,而土正是这种介质。

大家知道,土力学是研究并预测土在外力或质量力作用下的性状。为了解决这些课题,一方面要研究土的物理特性,该特性反映了地质形成条件,另一方面要应用连续介质力学的数学手段。但是,与连续介质力学所研究物体是连续体这点不同,土力学把土看作是具有孔隙的分散介质,它具有不可逆的体积变化,也就是可以压密。

现代土力学是以下列基本原理为基础的:

(1) 压力和体积(即孔隙)变化之间以及剪应力和形状变化之间成正比例关系;

(2) 土随时间的压密(固结)是由于水沿土中孔隙运动的结果,并且这个运动服从于渗透定律;

(3) 属于分散介质的土,不仅具有颗粒间的粘聚力,而且具有内摩擦力,这些特性决定了土的抗破坏强度。

上述原理在土力学的发展中起着极其重要的作用。有了这些原理才有可能建立土的线性变形理论、渗透固结理论和

极限平衡理论，并在这些理论的基础上通过大量丰富的数学手段解决广泛的工程课题。

与此同时，这些原理在一定程度上将土的特性理想化。实际上，土的性状在加荷时是十分复杂的，例如粘土变形的时间效应，如蠕变、松弛和荷载长期作用下强度的降低等。换句话说，粘土能够随时间的增长而改变本身的应力、应变状态。

土的另一个特点是应力和应变关系的非线性，尤其是随时间而变化的变形。此外，还应该考虑到土的这种基本特性，即它的内摩擦力不仅在极限状态时出现，而且在极限状态之前亦出现，从而对变形发展的特点产生影响。正如以后将要讨论的，土变形的这种特点是由于它的抗压和抗拉强度不同所形成的，导致了诸如剪应力引起体积变形（剪胀）及均围压力引起剪切变形等等这样一些畸变现象。

因此，荷载作用下土的实际性状与理想的概念有重大区别。虽然在很多情况下土特性的理想化对实际计算是可行的，但若忽视土的上述特点，则会导致计算结果与现场情况严重不符；有许多这样的实例：长期蠕变的结果会导致结构物的变形；计算中采用的瞬时强度而不是长期强度会导致边坡和挡土墙破坏；由于没有考虑非线性，会导致沉降的计算值与实际值有很大差别。

考虑了土的变形特点，就有可能较精确地研究土的实际特性，从而可使理论预测接近于土的实际情况。

因此，对荷载作用下土的性状特点的研究和使之系统化是必要的。1972年出版了结构标准和规范(СНП II-A. 10—71)《建筑物结构和地基。设计的主要原理》(Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования)之后，这一点就更明确了。规范要求：“结构及地基的计算方案和基本前提在必要情况下应考虑到材料和土的物理

非线性、塑性和流变特性。”本书也阐述了这些问题。

为了使大学生更好地掌握本书内容，除了以上提到的问题外，本书还阐述了连续介质力学的一般问题，包括土力学的某些已知原理。作者力图将这些原理和在流变学及土力学领域中的最新研究成就（包括非线性变形理论）有机地结合起来。这些最新研究成就对于在本学科领域具有较高造诣的读者可能同样是有裨益的。书中所述内容按照由浅到深的复杂程度和新颖程度分章。

书中采用“流变原理”一词，仅仅是想强调流变学问题对土力学的一般原理有重大意义。

在阐述经典土力学的基本原理时，作者参考了公认的 Н. А. Цытович 撰写的《土力学》(Механика грунтов, 1963, 1973)，而在研究土的物理特性问题方面，则参考了 Е. М. Сергеев 等人合写的名著《土质学》(Грунтоведение, 1971)。

本书的内容可以分成三个部分。第一部分包括第一章到第四章，研究流变学的基本概念和定义、土的物理特性问题、应力和应变理论，同时还阐述弹性、塑性和粘滞性这些基本流变特性。

第二部分包括第五章到第十章，专门研究土中发生的固有流变过程，如蠕变、长期强度，并考虑到变形的非线性特点。在这种情况下，除现象学的理论外，还阐述了变形和长期破坏的新的动力学(物理的)理论。

第三部分包括第十一章到第十二章，阐述了土变形的综合理论，还研究了土的抗拉和抗压强度的差别，并提出了考虑三个应力张量不变量对形变和体变产生相互影响的综合性流变状态方程。

第十三章在上述理论的基础上提出了解决某些土力学课题的实例。

作者以十分满意的心情指出, 由他领导的地基科学研究所冻土力学实验室的同事和工作人员 Ю. К. Зарецкий, С. Э. Городецкий, Н. К. Пекарская, Р. В. Максимьяк 等人对所研究课题合作得很有成效。作者谨向本书的审评者技术科学博士 Г. А. Гензель, 地质矿物科学博士 Р. С. Зиянгиров 教授, 莫斯科大学土质学和工程地质教研室主任、苏联科学院通讯院士 Е. М. Сергеев 教授表示感谢, 感谢他们对本书手稿提出了宝贵建议和意见。Т. П. Вялов 和 М. Э. Слепак 帮助了本书付印出版, 作者亦表谢意。

目 录

序言	v
第一章 土的流变特性	1
§1.1 土的变形特点	1
§1.2 流变学的基本概念和定义	4
§1.3 土的流变学研究	11
§1.4 工程变形实例	19
第二章 土的结构和结构连结	28
§2.1 土的成分和构成	28
§2.2 土的组分	30
§2.3 土中固体颗粒和液体组分之间的相互作用	33
§2.4 土中固体颗粒之间的相互作用力	36
§2.5 土中颗粒之间的连接	41
§2.6 土的结构	44
§2.7 土的构造	46
§2.8 土的各向异性	52
第三章 应力和变形	56
§3.1 点的应力和应变	56
§3.2 形变和体变	62
§3.3 应力、应变和应变速度张量	66
§3.4 应力张量的不变量	72
§3.5 应变张量的不变量	79
§3.6 塑性理论的基本方程	85
§3.7 关于变形理论	90

第 四 章 弹性、塑性和粘滞性	97
§4.1 弹性和塑性	97
§4.2 极限应力状态	101
§4.3 非线性变形	108
§4.4 粘滞性	117
§4.5 非线性粘滞和宾格姆流动	125
§4.6 后效和松弛	130
§4.7 土的弹塑-粘滞特性	137
§4.8 热动力学问题	140
第 五 章 土的蠕变	147
§5.1 蠕变规律	147
§5.2 应力、变形和时间之间的关系	152
§5.3 蠕变方程	156
§5.4 流动方程	163
§5.5 试验资料	172
§5.6 土变形规律的统一性	186
第 六 章 试验资料的处理方法	196
§6.1 土的蠕变试验	196
§6.2 经验公式的选择	198
§6.3 公式选择的实例	204
§6.4 计算结果的比较	214
§6.5 试验曲线的处理	218
第 七 章 蠕变理论	226
§7.1 线性粘弹性变形理论	226
§7.2 土的力学模型	234
§7.3 遗传蠕变理论	241
§7.4 遗传蠕变积分方程的核	247
§7.5 蠕变的技术理论	253
§7.6 分子流动理论	264
第 八 章 土的固结理论	274

§8.1	体积蠕变	274
§8.2	土的渗透固结	279
§8.3	土的主固结和次固结	284
第 九 章	土的长期强度	291
§9.1	蠕变和长期强度	291
§9.2	试验资料	295
§9.3	土的抗剪强度的降低	306
§9.4	土的“峰值”和残余抗剪强度	309
§9.5	长期破坏准则	314
§9.6	长期强度方程	319
§9.7	试验数据处理方法	323
§9.8	加荷状态的影响	336
§9.9	土长期强度的试验方法	341
第 十 章	土的强度和蠕变的动力学理论	347
§10.1	作为热作用过程的土的变形	347
§10.2	变形过程中土的微结构的变化	351
§10.3	长期强度的动力性质	361
§10.4	长期强度参数的物理意义	369
§10.5	变化荷载的计算	373
§10.6	土蠕变的动力性质	380
§10.7	变形方程	385
§10.8	试验资料的处理	390
第十一章	粘性土的变形理论	395
§11.1	在复杂应力状态下土的变形特点	395
§11.2	综合性流变状态方程	400
§11.3	平均法向应力的影响	403
§11.4	考虑平均法向应力影响的土的蠕变方程	412
§11.5	考虑平均法向应力影响的土的塑粘流动方程	422
§11.6	考虑平均法向应力影响下土的变形动力方程	426
§11.7	考虑平均法向应力影响的土的长期强度方程	432

第十二章 复杂应力状态下土的某些变形特点	436
§12.1 剪胀	436
§12.2 应力状态形式的影响	445
§12.3 加载条件的影响	451
第十三章 非线性蠕变课题实例	456
§13.1 土变形的综合方程	456
§13.2 轴对称课题	458
§13.3 考虑非线性关系的沉陷计算近似方法	462
§13.4 集中力对地基的作用	468
§13.5 地基沉陷的确定和土的反压力	478
§13.6 实验资料	491
参考文献	499
后记	501

第一章 土的流变特性

§1.1 土的变形特点

应力和应变之间的非线性关系 在均围压力作用下,土不可逆地改变自己的体积,而在剪应力的作用下,矿物颗粒和它们的团粒相互变化,从而导致形状的变化。

一般情况下,体积和剪切变形与荷载的关系是非线性的(图 1.1)。剪切变形随着应力的增加不断增长;而体积变形增量的幅度却随着荷载的增加而减小,变形本身趋向于某个极限;在这个极限下,出现土的极限压密。

实际的和近似的沉降曲线 大家知道,基础沉降和荷载之间的实际关系可用一条曲线表示,在该曲线上可以标出两个特征点:第一个点相应于临界荷载 $p_{кр}$,在该荷载下土的压密阶段结束,剪切阶段开始;第二个特征点相应于极限荷载 p_{np} ,在该荷载下极限状态区已充分发展,地基的承载能力消失。

现有的地基计算方法假定在荷载达到 $p_{кр}$ 值之前(更精确地说是达到计算强度值 R),土可以看作是线性变形介质,对此可用虎克定律。而在荷载达到 p_{np} 值时,土的状态用极限平衡理论研究,可用莫尔-库仑(Мор-Кулон)极限应力状态定律。

因此“沉降-荷载”的实际曲线(图 1.2)用折线 obc 近似表示,从而导出下列假设:在达到极限状态之间,我们研究的不是整个曲线 oab ,而仅仅是被 $p_{кр}$ 值所限制的那个单独区

段 oa 。

实际上,土在充分发挥其承载能力之前,在 $p_{kp} \leq p \leq p_{np}$ 荷载范围仍能发挥作用。这个范围现在一般不予研究,其实这不仅是没有根据,而且也不合逻辑。在实际工作中,极限状态的计算是从限制沉陷值即后者不超过给定极限 $S \leq S_{np}$ 而进行的,但这个极限值在任何程度上都与 p_{kp} 值无关,该极限值是用建筑物的容许变形来确定的。而产生沉陷 S_{np} 的荷载既可以小于也可以大于 p_{kp} 。这样就得到一个奇怪的结论,即我们根据变形来进行计算,但同时又用荷载值来限制它(在达到该荷载值之前,荷载和沉陷之间为线性关系)。很明显,考虑了土的荷载和沉陷之间关系的非线性特点,就有可能在所有的应力范围计算沉陷。

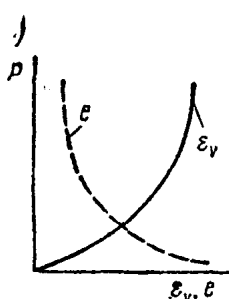


图 1.1 土的应力和应变关系

(a) 体应变; (b) 剪应变

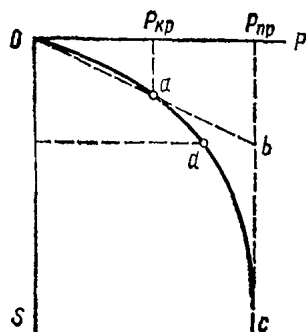


图 1.2 实际的和近似的沉陷曲线

用折线(图 1.2)近似地描述了“沉陷-荷载”的实际曲线后,我们似乎就划清了土的工作条件。对于 oa 区段取虎克模型,其特性用变形指标来反映。在这种情况下,如内摩擦力这种基本的特性被忽视,则毫无疑问摩擦阻力既出现在极限状态中,也出现在极限状态之前。用小于极限状态的剪切荷载

在一般的剪切仪上进行简单的剪切试验，便可很容易地证明这一点。如果这个试验是在不同的法向应力下进行，即可得出随着法向应力的增加，剪应变将减小，这当中就显示出了摩擦阻力的作用。

对于极限状态的 bc 区段，现在是取莫尔-库仑模型，其特性用强度指标表示，并且考虑了摩擦阻力。这些指标与用来评价极限状态之前土性状的变形指标一点也没有关系。实际上，土的强度和变形特性之间是有关联的，因为两者都来自于土颗粒间同样的相互作用力。如果研究极限状态之前的阶段时，确定了应力场和变形场，则当研究极限状态时，就不能仅考虑应力，不能把课题仅归结为求取极限荷载 p_{np} ，不研究变形。因为在很多情况下，不仅要求确定极限荷载，而且要求确定因前者而引起的变形。譬如，对于有明显流变特性的土（塑性粘土，冻土），极限荷载并未使土失去平衡或迅速破坏，而仅仅是引起不衰减蠕变，这时就应研究变形。

土的流变学问题之一是研究土的这种统一的模型，借助于它可描述在全部荷载范围包括极限荷载在内的变形过程，以及在这种模型中考虑极限状态之前和极限状态时的摩擦阻力，并且该模型反映了强度和变形指标之间存在着联系。在研究土的这种模型时还需要考虑时间因素，因为在土的变形过程中出现了颗粒（被水膜包围）的粘滞阻力。

土的抗压强度和抗拉强度的差别 考虑土的摩擦阻力等于考虑其抗压强度和抗拉强度之差别。

实际上，莫尔-库仑极限状态方程的参数（粘聚力和内摩擦角）是拉伸和压缩破坏应力圆切线的参数，可用来确定内摩擦角的切线的倾角，是由于土的抗压强度和抗拉强度存在差值而形成的。

下面可以指出，类似的推论对于极限状态之前也是正确

的。用相同的荷载值压缩和拉伸，土的压缩变形将比拉伸变形小，因而压缩时的变形模量将比拉伸变形模量大。但是这种情况一般不予考虑，这时在计算中只采用压缩变形模量。

不仅在极限状态，而且在极限状态前（或者，与计算内摩擦阻力一样），计算压缩和拉伸变形的差异等同于在状态方程中引进剪变形与均围压力的关系以及体积变形与剪应力的关系。

换句话说，在状态方程中需要考虑所有应力张量和应变张量不变量的相互影响。土变形的这些特点，同样应该在土的综合模型中得到反映；关于这方面，已在上面讲过。

§1.2 流变学的基本概念和定义

流变过程 物体的流变特性表现在蠕变、松弛和长期荷载作用下强度的降低等方面。

土的蠕变是指随时间而发展的变形过程，甚至在恒定荷载下也是这样。变形随时间发展是很多物质——从胶体聚合物到金属，从悬浮体到岩石所固有的性质。原则上讲，所有实际物体都具有蠕变特性，但是否显示，则与观察变形的时间长短有关，并且依赖于荷载和温度。譬如，观察到液体流动可以在很短的时间（分、秒），而对于冰则需几小时或几昼夜，对高温下的土和金属需要数昼夜或数月，对玻璃需要上百年，对于组成地壳的岩石，其流动特性只有在地质时期内才体现出来。

因此，把研究物质流动的科学称作流变学就不奇怪，它强调了大家所熟知的希腊语“ $\pi\alpha\nu\tau\alpha\ \rho\epsilon\iota$ ”的正确性，即“一切在流动”。

固体流动的显著例子是墨西哥古老庙墙的变形，其轮廓

精确地重复了现代地形的波浪起伏。该庙宇过去由阿西德克(Аптеки)人建造,在以后经过几个世纪,地势轮廓变化了,墙壁随之弯曲,但没有破坏。

土和岩石中的流变现象到处都可见到。泥石流、泥石流、滑坡、冰川等等,所有这些流变过程都在几小时或几昼夜,甚至上百年的时间内进行。

各种各样的构造破坏,如褶皱作用、岩层弯曲等均可用流变来解释。许多情况下,这种破坏作用是在相当长时间(上千人或上百万年)在重力作用下由岩石的缓慢流动所引起的。

但还有的流变过程经常在土、岩石与工程结构物的相互作用下发生,这种流变出现的时间并不太长,与建筑物的使用期相当。

已知很多由于地基粘土蠕变引起挡土墙的位移、斜坡和边坡稳定性的破坏导致结构物长期沉降和倾斜的现象。土的蠕变引起滑坡会给国民经济造成巨大损失。

蠕变现象及与其有关的应力的重新分布,在岩石中的各种地下结构物和坑道中可经常观察到。山岩压力的出现,隧道施工时的地表沉降,地下坑道顶板的稳定性随时间而降低,地下采矿时岩层的移动等等,均是岩石的蠕变现象。蠕变以明显的形式出现在永冻土中,同时出现在采用人工冻结所建立的冻结防护层中。

从这个不完全的叙述中可见,不考虑土的流变特性,土力学和岩石力学的基本课题不可能解决。考虑这些特性按变形极限状态计算时,应该包括确定在给定时间内(譬如,结构物使用的期限内)变形不超过允许值的极限荷载。

考虑到在非衰减蠕变过程中土的强度降低,按极限状态计算承载力可以归结为确定这样的荷载,即在该荷载下土中应力在给定时间内达到长期强度极限。

流变学的任务 狭义而言,流变学是指粘滞物质流动的科学。但是,在最近几年,对“流变学”概念有了较广义的解释。

根据弹塑性经典理论,物体的应力-应变状态完全取决于加荷大小和顺序。如果这个荷载不变,则在物体中产生的应力和应变亦不变。在实际物体中,应力-应变状态随时间而变,同时又取决于以前加载的历史。相应地,应力和应变之间的关系不是单一的,而是变化的。因为,如果这两个值之一(应力或应变)是常数,另一个将随时间变化。

研究应力-应变状态的规律及其随时间的变化是流变学的基本课题。

弹塑性经典理论研究最简单的理想物体,认为复杂应力状态下的变形规律与最简单形式荷载下的相同。对于很多实际物体,应力-应变及其速率之间的关系是非线性的,且与应力状态的形式和加载动态有关。这些问题属弹塑性理论范畴,同样也是流变学的课题。换句话说,流变学应该对下述问题作出回答:在应力、应变、时间的三维空间内,任一点的应力和应变值有多大?

最后,如果说弹塑性理论是现象学的理论,研究宏观过程,则流变学既研究宏观过程,也研究微观过程,十分重视现象的物理实质。

宏观和微观流变学 宏观流变学研究实际物体中流变过程的外部表现,即那些能借助于一般测量设备观察到的现象(如变形、应力的增长)。宏观流变学不研究物体的组成和结构特点,把物体看成是均质连续的,并且有这种或那种理想特性(如弹性、塑性、粘滞性及其组合)的介质。

物体在外力作用下的性状和物体特性之间的关系,在宏观流变学中,是建立在现象学观点的基础上的。在这种观点

• • •