

·学科进展与展望·

工程材料强度理论研究的几次重大进展

俞茂宏* 吉嶺充俊*† 范文*

(* 西安交通大学建筑工程与力学学院,西安 710049;† 日本东京大学)

[摘要] 20世纪,工程强度理论的研究有三次重大突破。第一次是将20世纪初的单剪强度理论推进为八面体剪切强度理论(或三剪强度理论);第二次是从八面体剪切强度理论推进为双剪强度理论,这三者分别形成了外凸理论的下限、居中和上限;第三次是将适用于某一类材料的各种单一强度理论推进为可以适用于多种材料的统一强度理论。本文对三次重大突破进行了简明的阐述。

[关键词] 单剪强度理论,八面体剪切强度理论、双剪强度理论、统一强度理论

1 概述

材料强度是保证各种工程结构安全使用的一个最重要的基本条件。一般我们对材料强度的认识是材料在单向拉伸或单向压缩时的强度。例如金属材料强度一般指的是它们在单向拉伸时的强度。混凝土和岩石的强度一般指的是它们在单向压缩时的强度。它们都是材料的一维强度,可以在实验中直接得出。但是在工程结构中的材料大多数是在二维或三维应力的作用下(统称为复杂应力)。这时的材料强度确定就是一个十分复杂和困难的问题。它是一个二维或三维问题。

它的复杂性首先是二向和三向加载设备研制的困难和价格的昂贵。其次是要求至少一组以上的精密加工的试件才能得出材料在某些复杂应力组合下的一些强度曲线或曲面,材料一维强度只是这些曲线或曲面中的一个点。第三,由于二维和三维应力组合的无穷性,因此,即使有了复杂应力试验设备,也不可能对材料在各种应力组合下的强度都进行试验,因此需要强度理论来预计和分析材料在不同应力组合下的强度。

由于强度理论研究的这些特点,因此,强度理论研究虽然十分重要,但是它的进展却十分缓慢。

强度理论的理论研究和实验研究两者是相互联

系的,但国际上有一种共识,即希望强度理论的理论研究和实验研究保持相对的独立性。

工程材料强度理论的研究具有十分多样性的特点。文献[1][2]对强度理论进行了较全面的总结。

2 复杂应力试验装置的研制

复杂应力试验装置的研制可以追溯到19世纪末和20世纪初的德国,其代表是Foppl和von Karman,后者为我国杰出科学家钱学森先生的导师,他所做的岩石三轴试验方法一直沿用至今。但是这种三轴试验所产生的应力组合在三维应力空间是一个特殊的平面,并不能产生三个方向的应力都能独立控制的三轴应力。为了区分这二种三轴试验,人们往往把前者称为围压三轴试验,或假三轴试验;后者称为真三轴试验。但至今为止,还没有一种能产生三维应力并能够任意组合的试验机。

真三轴试验机一般随试验对象不同而不同。20世纪60年代开始,世界各国进行了大量的研究。土的复杂应力试验主要在英国剑桥大学、日本京都大学、德国的卡尔斯鲁厄大学等。岩石的真三轴试验的代表是日本东京大学的茂木清夫(Mogi, K)教授和美国的一些大学。

混凝土的真三轴试验有法国、美国、英国和德国,这主要是因为核电站混凝土压力容器和核电站

国家自然科学基金资助项目。

本文于2002年9月2日收到。

安全壳结构强度研究的推动。金属材料的真三轴试验机尚未产生。

我国真三轴试验开始于改革开放后的80年代,岩石真三轴试验机的代表是中国科学院岩土力学研究所的岩石高压真三轴试验机^[3]和总参三所顾金才院士研究组的拉压真三轴试验机^[4]。同济大学进行了土的真三轴试验机研制。大连理工大学以及清华大学进行了大量混凝土真三轴试验。文献^[1,5]总结了国内外大量的真三轴试验结果。

3 从单剪强度理论的下限到双剪强度理论的上限

金属单剪强度理论创立于1864年,岩石单剪强度理论创立于1900年,前者为后者的特例。金属的三剪强度理论完成于1904—1913,土体的三剪强度理论完成于1928—1952。从单剪强度理论到三剪强度理论,这是20世纪材料强度理论的第一次重大突破。前者只考虑了三个主应力中的二个;后者把三个大小不等的主应力作平均处理,对岩土类材料不符合,因此在20世纪70到80年代提出了大量的修正的三剪强度理论,数量有几十种之多。沈珠江院士对此进行了总结,并称之为三剪理论^[6]。它们都是介于外凸理论上下限之间的各种曲线形式准则。它们的平面极限线如图1所示。

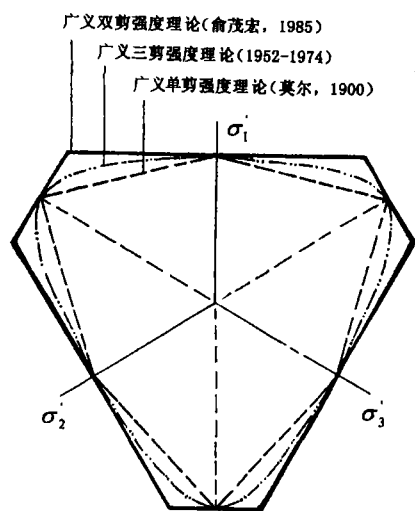


图1 强度理论的发展

单剪强度理论是所有外凸理论的下限,但上限是否存在?如果存在,它又是什么理论?这些问题在20世纪80年代前并没有明确的认识,更有人在理论上予以解决。这些都需要在理论概念上和数学建模方法上进行创新。强度理论的第二次重大突

破是双剪强度理论的建立,金属双剪强度理论建立于1961年^[1,2],岩土材料双剪理论创立于1985年^[7],前者为后者的特例。它们形成了外凸理论的上限。从1900年的下限到1985年的上限,前后长达85年,突破以往强度理论的立方体应力模型和正八面体模型以及一个方程的数学建模方法的框架,是解决这个85年没有解决的难题的关键。俞茂宏在工程强度理论研究中首次提出多剪切力学模型和二个方程的数学建模方法,导致了双剪强度理论的产生,但从1961年的金属双剪强度理论到1985年的岩土材料双剪强度理论,长达25年。今天,在中国已经有21种材料力学教材和15种以上的塑性力学和工程力学教材把双剪强度理论作为中国原始创新性的理论写入教科书,形成新的一节。双剪强度理论在教学中不到一节课中就可以为学生所接受。反过去看,可以感觉到从单剪强度理论的下限到双剪强度理论的上限这个进展是缓慢的,研究效率似乎是低的。沈珠江、江见鲸、张学言、赵德文等教授将双剪强度理论引入理论土力学^[8]、混凝土结构非线性有限元分析^[9]、岩土塑性力学^[10]和金属压力加工原理等研究。

图1为单剪,三剪和双剪强度理论在平面的极限线,三者的极限线的形状和大小都不同。二次突破使极限线的范围不断扩大;数学表达式从线性到非线性再到分段线性,反映了从简到繁,又从繁到简的发展。

4 从单一强度理论到统一强度理论

以往的工程强度理论都只适用于某一类特定的材料。建立一种能适用于多种材料的统一强度理论始终是力学家和工程师的一种理想。德国著名科学家Voigt曾经在20世纪初认为这是不可能的。20世纪40年代前苏联科学院院士提出的联合强度理论曾经在社会主义阵营各国认为是强度理论的最高成就。但它只是在二种已有强度理论中提供一种选择的方法,1985年的中国大百科全书力学卷中已予以指出^[11]。中国大百科全书同时也认为要建立一种能适用于多种材料的统一强度理论是不可能的^[11]。同年,俞茂宏也认为是不可能的^[7]。统一强度理论的研究是工程强度理论研究的另一难题。

在国家自然科学基金的支持下,全新的统一强度理论于1991年被提出^[12],此后又作了系统的论述^[13]。统一强度理论认为:当作用于单元体上的两个主剪应力以及相应的正应力函数到达某一极限值

时,材料发生破坏。它考虑了所有的应力分量和材料拉伸强度与压缩强度的差别。

统一强度理论具有统一的理论模型和统一的数学表达式,适用于金属、岩石、土、混凝土、聚合物等多种材料。单剪强度理论、双剪强度理论和它们之间的各种准则都可以由统一强度理论退化得出。

统一强度理论的 π 平面极限线不仅覆盖了外凸理论的所有区域^[1,2],而且从外凸理论扩展到非凸理论。非凸理论已由统一强度理论导出,但尚未被充分研究。

统一强度理论是1961年双剪切屈服准则和1985年双剪强度理论^[7]的自然发展。它的意义不仅在于一个统一的模型和一个统一的数学表达式,而且把以前各种分散的各种经典强度理论相互联系起来,建立了它们之间的定量关系,使强度理论首次形成了系统的理论;同时统一强度理论有规律变化的极限线覆盖了域内的所有区域,可以广泛适用于多种材料;此外,由于它的线性数学表达式,可以方便地应用于结构强度理论的解析研究,进一步推动了结构强度理论的发展,并为各种结构强度的破坏准则效应研究提供一个合理的理论基础。有关结构强度理论的进展将在另文介绍。关于强度理论的发展的较详细的论述可见俞茂宏在*Applied Mechanics Reviews*上发表的1篇文章^[2]和2本专著^[1,12],关于混凝土材料强度理论和混凝土结构强度理论的研究进展可见国家自然科学基金优秀成果专著。限于篇幅,这里不再详述。

5 结论

本文小结了20世纪强度理论发展的三次重大突破,即从单剪强度理论到三剪强度理论,从三剪强度理论到双剪强度理论以及从单一强度理论到统一

强度理论。其中后二次是在国家自然科学基金的支持下取得的,并在国家自然科学基金委员会成立十周年时被选为基金资助项目优秀成果。它们对结构强度理论研究,为研究人员和工程师的合理选用破坏准则,为大学生和研究生对强度理论的深刻理解,以及强度理论发展史的研究都是有意义的^[12]。

参 考 文 献

- [1] 俞茂宏.《工程强度理论》,北京:高等教育出版社,1999.
- [2] Yu Maohong, Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th Century. *Applied Mechanics Reviews*, ASME, 2002, **55**(3):169—218.
- [3] 李小春,许东俊,刘世焯.“真三轴应力状态下拉西瓦花岗岩的强度、变形及破裂特性试验研究”.见:《中国岩石力学与工程学会第三次大会论文集》,北京:中国科学技术出版社,1994, 153—159.
- [4] 明治清,沈俊,顾金才.“拉-压真三轴仪的研制及其应用”.《防护工程》,1994,(3):1—9.
- [5] 俞茂宏著.《双剪理论及其应用》.北京:科学出版社,1998.
- [6] 沈珠江.关于破坏准则和屈服函数的总结.《岩土工程学报》,1995,17(1):1—9.
- [7] 俞茂宏,何丽南,宋凌宇.双剪强度理论及其推广.《中国科学》(A),1985,28(11):1174—1183.
- [8] 沈珠江.《理论土力学》,北京:中国水利水电出版社,2000.
- [9] 江见鲸.《钢筋混凝土结构非线性有限元分析》.西安:陕西科技出版社,1994.
- [10] 张学言.《岩土塑性力学》.北京:人民交通出版社,1993,120—128.
- [11] 中国大百科全书委员会.《中国大百科全书-力学》.北京:中国大百科全书出版社,1985.
- [12] Yu Maohong, He Lanan. A new model and theory on yield and failure of materials under complex stress state. In:《Mechanical Behavior of Materials》-VI, Eds. M. Jono and T. Inoue, Vol.3, 841—846. Pergamon Press, 1991.
- [13] 俞茂宏.《强度理论新体系》.西安:西安交通大学出版社,1992.

ADVANCES IN THE RESEARCH ON ENGINEERING STRENGTH THEORIES

Yu Maohong* Yoshimine Mitustoshi*† Fan Wen*

(* Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049; †University of Tokyo Japan)

Abstract There are three great advances in the research on engineering strength theories in the latter half of the 20th Century. These three advances are summarized in this paper. It is interesting and useful for researchers to choose an appropriate failure criterion in studying the strength of materials and structures, for engineers to correctly use it and for students to understand strength theory.

Key words Failure criterion, Single-shear strength theory, Octahedral-shear strength theory, Twin-shear strength theory, Unified strength theory