

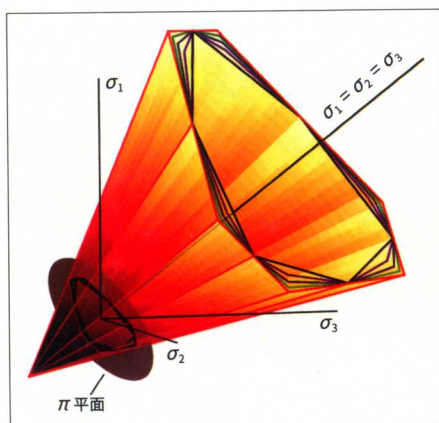


“岩土力学三部曲” 第一部

SOIL MECHANICS:
NEW CONCEPT AND NEW THEORY

土力学新论

俞茂宏◎著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助项目

“岩土力学三部曲”第一部

土力学新论

俞茂宏 著



 ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土力学新论 / 俞茂宏著. —杭州: 浙江大学出版社, 2020.1
ISBN 978-7-308-19681-9

I. ①土... II. ①俞... III. ①土力学 IV. ①TU43

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第249317号

土力学新论

俞茂宏 著

责任编辑 伍秀芳 (wxftw@zju.edu.cn) 冯其华
责任校对 林汉枫
封面设计 雷建军
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州荻雪文化创意有限公司
印 刷 浙江海虹彩色印务有限公司
开 本 710mm×1000mm 1/16
印 张 33
字 数 650 千
版 次 2020 年 1 月第 1 版 2020 年 1 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-19681-9
定 价 188.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社市场运营中心联系方式 (0571)88925591; [Http://zjdxcb.tmall.com](http://zjdxcb.tmall.com)

“岩土力学三部曲”总序

俞茂宏教授的双剪强度理论和统一强度理论是世界创新的基础技术理论研究成果，具有重要的理论和实践意义，这是他长期锲而不舍辛勤劳动的结果，来之不易。2000年，我和时任中国岩石力学与工程学会理事长的王思敬院士一起为《国际岩石力学与矿业科学学报》撰写的《中国岩石力学与工程的发展和现状》论文中，就将双剪强度理论和统一强度理论作为中国岩石力学的三大理论成果之一，并指出：“俞教授多年来的潜心研究使得统一强度理论不断完善，统一强度理论已在水电站地下工程和岩土地基等工程中得到了较好的应用。”2006年，双剪统一强度理论作为新的条目被写入《中国水利百科全书》(第二版，卷2)和《水利大事年表》(第二版，卷3)以及《中国学术大典：水利学》等学术著作。2008年，同济大学举行的孙钧基金讲座上，中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士在报告中指出：“单剪理论的进一步发展为双剪强度理论，而双剪强度理论的进一步发展为统一强度理论。单剪、双剪强度理论以及介于二者之间的其他破坏准则都是统一强度理论的特例或线性逼近。因此可以说，统一强度理论在强度理论的发展史上具有突出的贡献。”双剪统一强度理论已为国内外学者广泛认同，并应用于岩土力学的很多领域，获得了一系列新的研究成果，推动了岩土力学的发展。

现在，俞茂宏教授将他近年来新的研究成果总结成系统的“岩土力学三部曲”，即《土力学新论》、《岩石力学新论》和《混凝土力学新论》。这是俞教授多年积累的又一重要贡献，其中也包括了国内外学者应用统一

强度理论于岩土力学得出的很多结果，内容很丰富。我十分高兴能有幸为之作序，希望这个“三部曲”能够在推动世界一流学科的建设中作出积极贡献。

孙钧*

2017年12月5日于上海

* 编者注：孙钧，中国科学院院士、同济大学教授，曾任国际岩石力学学会副主席、中国岩石力学与工程学会理事长、中国土木工程学会副理事长。

前言

1925年，太沙基撰写的世界上第一本土力学著作在奥地利问世。1937年，中国土力学之父黄文熙从美国回到正在抗日的中国，并在西迁到重庆的国立中央大学开设了中国第一门土力学课程。现在，土力学已经成为世界土木、水利、道路、矿山以及岩土工程等专业的必修课程。土力学的内容很多，其中应用最多、最基础的是德国学者在1900年提出的莫尔-库伦强度理论，它的数学表达式为：

$$\sigma_1 - \alpha\sigma_3 = \sigma_t$$

式中， σ_t 为材料的拉伸强度， $\alpha = \sigma_t / \sigma_c$ 为材料的拉压强度比。

很显然，作用在土体上的一般有 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 三个主应力，而莫尔-库伦强度理论只考虑了最大和最小两个主应力而没有考虑中间主应力 σ_2 的影响。为此，世界各国学者提出了几十种考虑 σ_2 的强度准则，但它们的数学表达式几乎都是非线性的，较难在土力学的三大工程实际问题的解析中得到应用。传统土力学仍然是“没有考虑中间主应力”的土力学。

《土力学新论》是“岩土力学三部曲”的第一部。它与传统土力学的差别只是两个字母，即中间主应力 σ_2 和反映中间主应力影响程度的参数 b 。传统土力学的理论公式和工程应用中都没有这两个字母，而本书各章中则包含了这两个字母。虽然多了两个字母，但是这两个字母的加入是线性的，方程也很简单，因此读者在阅读本书的时候不会有数学上的困难。

这两个字母的加入虽然在数学上并不复杂，但是却来之不易，经历了

近百年的漫长过程。传统土力学的土体强度理论是 1900 年德国学者提出的莫尔-库仑强度理论，而本书中的土体强度理论是中国学者于 1991 年提出的统一强度理论，两者时间上相差 91 年。不仅如此，从 20 世纪初到 90 年代提出一个能够适用于不同材料的统一强度理论一直被认为是不可可能的。德国哥廷根大学教授沃依特(1901)和美国斯坦福大学教授铁木森科(1953)以及《中国大百科全书》(1985)都认为“统一强度理论是不可能的”。这就是“沃依特-铁木森科难题”。因此，破解“沃依特-铁木森科难题”在理论和工程应用上都具有重大的意义。

“沃依特-铁木森科难题”的破解也可归纳为两个字母。我们从下面三个公式中可以看出它们的发展过程。

(1)双剪屈服准则(俞茂宏, 1961)

$$F = \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_s, \text{ 当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ 时}$$

$$F' = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \sigma_3 = \sigma_s, \text{ 当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ 时}$$

(2)广义双剪强度理论(俞茂宏, 1984—1985)

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t, \text{ 当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ 时}$$

$$F' = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_s, \text{ 当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ 时}$$

广义双剪强度理论这个公式最早发表于 1984 年在丹麦哥本哈根举行的第 16 届国际理论和应用力学大会。会后俞茂宏又应邀在德国斯图加特大学作了详细报告。斯图加特大学是著名学者莫尔曾经工作过的地方，我们讨论很热烈。国际理论和应用力学大会是四年一度的力学“奥林匹克”，有上千人参加，但只出版一本大会特邀报告论文集。俞茂宏的这篇广义双剪强度理论论文发表于 1985 年《中国科学》第 11 期的英文版和第

12 期的中文版。

(3) 统一强度理论(俞茂宏, 1991)

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t, \text{ 当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \text{ 时}$$

$$F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_t, \text{ 当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \text{ 时}$$

笔者参加了 1991 年在日本京都三年一度举行的国际材料力学性能大会, 会后俞茂宏又应邀在名古屋工业大学作了详细讲解。这篇统一强度理论的论文发表于同年出版的大会论文集第三卷。

从上面三个公式可以看出, 虽然它们推导的开始不同, 但得出的结果都十分相似, 相互之间只相差一个字母。它们之间似乎存在着一种联系, 一个规律, 使我们不知不觉地逐步接近统一强度理论这个重要结果。这个规律就是笔者于 1961 年提出的双剪强度理论的思想。它们不是直接从主应力来研究强度理论, 而是把主应力转换为主剪应力。但是, 三个主剪应力之间存在着一个关系, 即最大主剪应力等于另外两个主剪应力之和。因此, 三个主剪应力只有两个独立量。这就是最早的双剪强度理论的思想。在本书第 5 章的章前彩色图中, 我们对两个双剪单元体力学模型和两个数学建模方程作了阐述。

1991 年以后, 统一强度理论得到了国内外很多学者的关心与支持, 并将其逐步推广应用于很多领域, 包括土力学的条形基础承载力、土压力理论和边坡稳定性三大实际问题。本书也包含了他们的一些研究成果, 特此表示衷心的感谢!

本书对这些新的研究成果进行了比较全面和系统的阐述。书的内容较多, 书中有不妥之处, 敬请各位读者批评指正。

俞茂宏

2019年6月5日于西安交通大学兴庆宫校园

主要符号表

正应力

$$\sigma_1$$

最大主应力

$$\sigma_2$$

中间主应力(中主应力)

$$\sigma_3$$

最小主应力

$$\sigma_{ij}$$

应力张量

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

平均应力

$$\sigma_8 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

八面体正应力

$$\sigma_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$$

十二面体或正交八面体正应力

$$\sigma_{12} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

十二面体或正交八面体正应力

$$\sigma_{23} = \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)$$

十二面体或正交八面体正应力

$$S_1 = \frac{1}{3}(2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3)$$

大主应力偏量(拉偏应力)

$$S_2 = \frac{1}{3}(2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)$$

中主应力偏量(中偏应力、拉或压偏应力)

$$S_3 = \frac{1}{3}(2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2)$$

小主应力偏量(压偏应力)

$$S_{ij}$$

偏应力张量

$$\mu_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

Lode 应力状态参数

u

孔隙水压力

σ'

有效应力

剪应力

$$\tau_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

$$\tau_{12} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$$

$$\tau_{23} = \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3)$$

$$\tau_m = \sqrt{\frac{\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{13}^2}{3}} = \sqrt{\frac{1}{12}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}$$

均方根剪应力

$$\tau_8 = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

八面体剪应力

$$\mu_{\tau} = \frac{\tau_{12}}{\tau_{13}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

双剪应力状态参数

$$\mu'_{\tau} = \frac{\tau_{23}}{\tau_{13}} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

双剪应力状态参数

应力不变量

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1$$

$$I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$$

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

应力偏量第二不变量

$$J_3 = S_1 S_2 S_3 = \frac{1}{27} [(\tau_{12} + \tau_{13})(\tau_{12} + \tau_{23})(\tau_{23} + \tau_{13})]$$

应力偏量第三不变量

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1$$

应力柱坐标主轴、静水应力轴矢长

$$r = \sqrt{2J_2}$$

应力柱坐标 π 平面应力矢与主应力

θ

投影轴的夹角，简称应力状态角

$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}J_3}{2\sqrt{J_2^3}}$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 = \sqrt{3}\sigma_m = \sqrt{3}\sigma_8 = \sqrt{3}p$$

$$r = \sqrt{2J_2} = 2\tau_m = \sqrt{3}\tau_8 = \sqrt{\frac{2}{3}}q$$

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}$$

$$qr = \sqrt{\frac{1}{3}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}$$

材料性能参数

σ_s 拉伸屈服极限

τ_s 剪切屈服极限

σ_t 拉伸强度极限

σ_c 压缩强度极限

σ_{ccc}

三向等压强度极限

$$\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c}, \quad m = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$$

材料拉压强度比

$$\beta = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}$$

材料参数

r_t

π 平面上的拉伸强度矢长

r_c

π 平面上的压缩强度矢长

$$K = \frac{1+2\alpha}{2+\alpha} = \frac{r_t}{r_c}$$

π 平面上的拉压强度比

C_0

材料黏结力参数

φ_0

材料摩擦角参数

$$\sigma_t = \frac{2C_0 \cos \varphi_0}{1 + \sin \varphi_0}, \quad \sigma_c = \frac{2C_0 \cos \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0}$$

ν

泊松比

E

弹性模量

b

中间应力影响因数

m

中间主应力参数

屈服函数和强度理论函数

$f(\sigma_{ij})$

应力屈服函数

$f(\varepsilon_{ij})$

应变屈服函数

$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$

主应力屈服函数

$f(I_1, J_2, J_3)$

张量不变量屈服函数

$g(r, \theta)$

π 平面形状函数

$\Phi(\sigma_{ij})$

帽子模型函数

目 录

1 绪 论	3
1.1 概 述.....	3
1.2 土力学的发展简介.....	8
1.3 土力学课程与土木专业和工程实验的关系.....	12
1.4 土力学课程的特点.....	13
1.5 传统土力学的理论矛盾.....	13
1.6 传统土力学与工程实践的矛盾.....	15
1.6.1 平面应变试验与轴对称三轴试验结果对比.....	17
1.6.2 土体强度指标摩擦角 φ (真三轴试验结果).....	19
1.6.3 抗剪强度指标 C	21
1.6.4 土体峰值强度 σ_1^0	22
1.6.5 结构分析结果讨论.....	23
1.6.6 轴对称三轴试验方法的讨论.....	24
1.7 土力学的改革和发展需要有新的理论基础.....	27
1.8 新土力学的应用.....	28
参考文献.....	29
阅读参考资料.....	31
2 单元体 应力状态	37
2.1 概 述.....	37
2.2 空间应力状态.....	38

2.3	从主应力状态求斜截面应力	40
2.3.1	从主应力空间应力状态($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)求斜截面应力	41
2.3.2	主剪应力 τ_{12} 、 τ_{23} 和 τ_{13}	41
2.3.3	八面体应力(σ_8, τ_8)	42
2.4	六面体、八面体和十二面体及相应面上的应力	43
2.4.1	单剪单元体	43
2.4.2	双剪单元体	43
2.4.3	十二面体主剪应力单元体	45
2.4.4	等倾单元体	45
2.5	莫尔应力圆	46
2.6	应力路径、双剪应力路径	47
2.7	应力状态类型、双剪应力状态参数	48
2.8	主应力空间	50
2.9	静水应力轴空间柱坐标	53
	参考文献	56
	阅读参考资料	57
3	土体中的应力计算	63
3.1	概述	63
3.2	土中的有效应力	65
3.3	自重应力	66
3.4	基底压力	67
3.4.1	中心荷载作用	68
3.4.2	偏心荷载作用	68
3.5	地基附加应力	69
3.5.1	竖向集中力下的地基附加应力	70
3.5.2	分布荷载下地基附加应力	72
3.5.3	空间问题的应力计算	73
3.6	平面应变问题的附加应力	74
3.6.1	线荷载	74
3.6.2	均布条形荷载	75

3.7	均布圆形荷载下的应力	79
3.8	非均质和各向异性地基中的附加应力	81
3.8.1	双层地基	81
3.8.2	变形模量随深度增大的地基	82
3.8.3	各向异性地基	83
3.9	土体弹塑性应力分析简介	84
	参考文献	85
	阅读参考资料	85
4	土体强度的基本特性	89
4.1	概 述	89
4.2	拉压异性(SD 效应)	92
4.3	自重应力	92
4.4	双剪强度的法向应力效应	94
4.5	静水应力效应	95
4.5.1	剪应力-静水应力关系	95
4.5.2	双剪应力-静水应力关系	95
4.6	中间主应力效应	96
4.7	应力角效应(应力偏张量第三不变量效应)	97
4.8	土体破坏极限面的外凸性及其内外边界	101
	参考文献	108
	阅读参考资料	111
5	土体统一强度理论	115
5.1	概 述	115
5.2	沃依特-铁木森科难题	116
5.3	统一强度理论的力学模型	117
5.4	土体统一强度理论的数学建模	118
5.5	统一强度理论参数的实验确定	119
5.6	统一强度理论的数学表达式	120
5.7	统一强度理论的其他表达式	120

5.7.1	统一强度理论的黏聚力 C 和摩擦角 φ 表达式	121
5.7.2	以压应力为正时的统一强度理论表达式	121
5.8	统一强度理论的特例	122
5.9	统一强度理论的偏平面极限面	123
5.9.1	b 变化时的统一强度理论极限面	124
5.9.2	α 变化时的统一强度理论极限面	127
5.10	平面应力状态下的统一强度理论极限线	129
5.11	统一强度理论的极限面	131
5.12	Kolupave-Altenbach 的统一强度理论图示	133
5.13	统一强度理论的外推和内延: 非凸强度理论	134
5.14	统一强度理论等效应力	136
5.14.1	拉压同性材料的等效应力	137
5.14.2	拉压异性材料的等效应力	137
5.14.3	统一屈服准则的等效应力	138
5.14.4	统一强度理论的等效应力	138
5.15	统一强度理论与实验结果的对比	139
5.16	统一强度理论的应用	141
5.17	统一强度理论的意义	141
5.18	本章小结	143
	参考文献	143
	阅读参考资料	145
6	统一强度孔隙水压力方程	149
6.1	概述	149
6.2	有效应力的原理	151
6.3	孔隙水压力方程	152
6.3.1	Skempton 孔隙水压力方程(1954)	153
6.3.2	Henkel 孔隙水压力方程(1960, 1965)	153
6.3.3	曾国熙孔隙水压力方程(1964, 1979)	153
6.3.4	双剪孔隙水压力方程(1990)	154
6.4	统一强度孔隙水压力方程	154

6.5	增量应力状态的分解	157
6.6	统一强度孔隙水压力方程的应用	161
6.7	统一强度孔隙水压力方程分析	165
6.8	临界孔隙水压力	167
	参考文献	167
	阅读参考资料	169
7	饱和土和非饱和土有效应力统一强度理论	173
7.1	概 述	173
7.2	有效应力胡克定律和广义胡克定律	176
7.3	单剪、三剪和双剪有效应力强度理论	177
7.3.1	单剪有效应力强度理论	177
7.3.2	八面体剪切有效应力强度理论	177
7.3.3	双剪有效应力强度理论	178
7.4	有效应力统一强度理论	178
7.4.1	有效应力统一强度理论的力学模型	178
7.4.2	有效应力统一强度理论的数学建模方程	179
7.4.3	有效应力统一强度理论参数的实验确定	180
7.4.4	有效应力统一强度理论的数学表达式	180
7.5	有效应力统一强度理论的空间极限面和极限线	182
7.6	考虑和不考虑孔隙水压力的土体强度极限面比较	183
7.7	有效应力统一强度理论对非饱和土的推广	184
7.8	本章小结	185
	参考文献	186
	阅读参考资料	187
8	统一强度理论帽盖模型	191
8.1	概 述	191
8.2	三轴平面极限面(Rendulic 图)	193
8.3	单剪帽盖模型	195
8.4	八面体剪应力帽盖模型	197