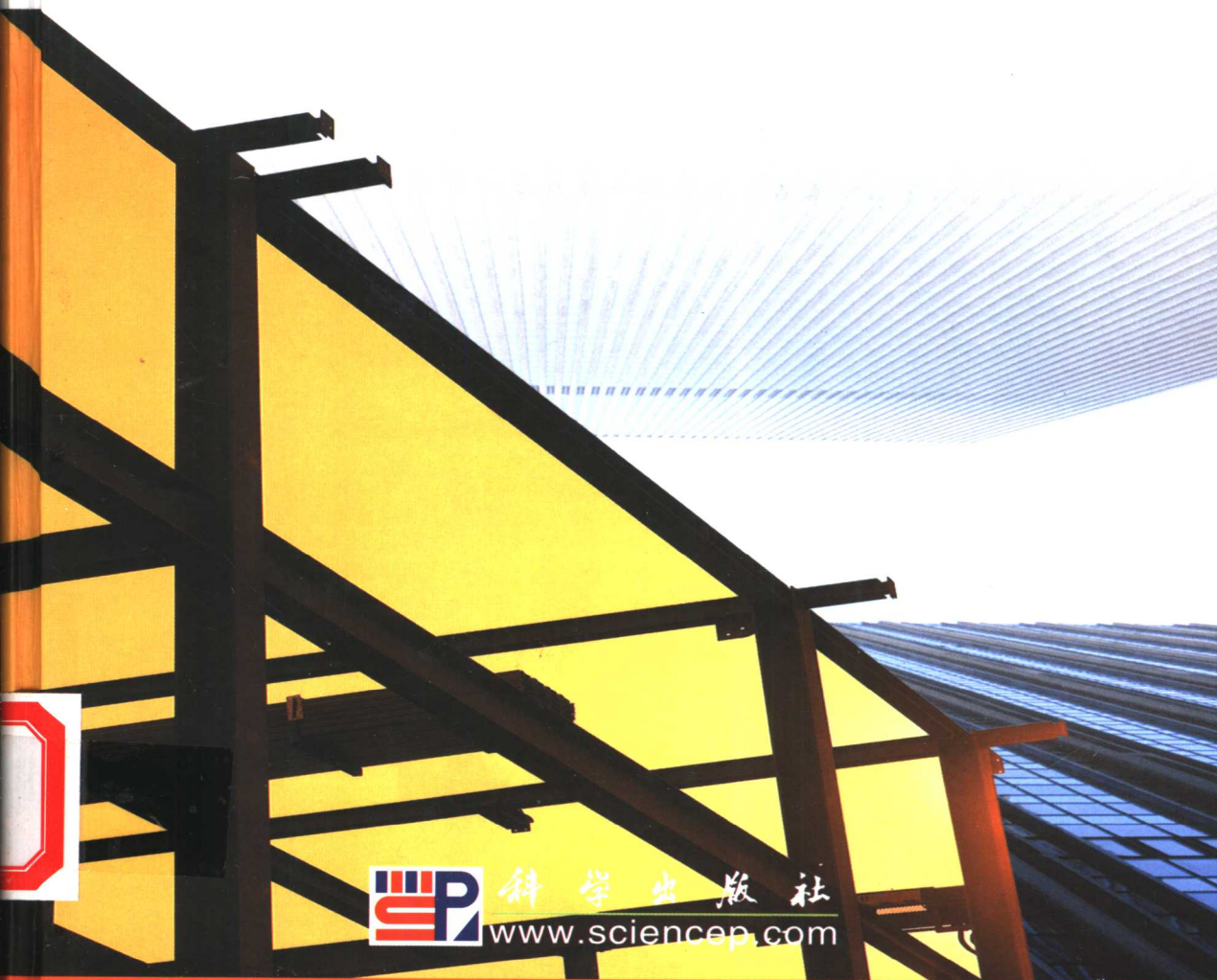


赵均海 著

强度理论及其 工程应用



科学出版社

www.sciencep.com

强度理论及其工程应用

赵均海 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了统一强度理论及其在工程中的应用,主要包括:统一强度理论及其各种表达形式、结构的弹塑性极限荷载、钢管混凝土中核心混凝土抗压强度的计算公式、古建筑结构的受力特点及古建筑木结构的计算模型。

本书内容较丰富,可供土建、水利、机械类专业和工程力学专业的教师、研究生、本科生和工程科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

强度理论及其工程应用/赵均海著. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-011358-6

I. 强... II. 赵... III. 强度理论-应用-建筑工程 IV. TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 031395 号

责任编辑:童安齐/ 责任校对:相连海

责任印制:刘士平/ 封面设计:张 放

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2003年5月第一版 开本:B5(720×1000)

2003年5月第一次印刷 印张:8

印数:1—2 000

字数:150 000

定价:20.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(杨中))

前 言

强度理论及其工程应用是极其复杂而应用非常广泛的课题,它的研究涉及力学、土木、机械、航空等许多学科。以此作为研究内容,不仅有重要的理论意义,而且有更大的工程应用价值。本书采用一种全新的能考虑中间主应力影响及拉压性能不同的影响,适用于不同材料的统一强度理论,进而对钢管混凝土性能、结构的弹塑性极限荷载、古建筑结构性能等问题进行了深入的研究,从理论分析、试验研究、数值模拟等方面出发,得到了一些有参考价值的结论。本书的主要内容为:(1)系统地介绍了统一强度理论及其各种表达形式,并给出了相应的物理意义,说明了现有的强度理论或屈服准则是统一强度理论的特例。(2)从统一强度理论出发,推导出钢管混凝土中核心混凝土抗压强度的计算公式,制作了不同的钢管混凝土试件,对其进行了不同含钢率的抗压试验,得出了轴心受压和偏心受压构件的极限荷载,并与有关文献结果进行了对比。从试验及计算结果分析知,采用统一强度理论的计算式求得的理论结果与本书试验值及有关文献资料结果对比误差较小,说明统一强度理论对于钢管混凝土的计算有非常好的适用性,能充分利用材料的潜力,为钢管混凝土的优化设计提供了可靠的理论依据。(3)对古建筑结构性能进行了研究,得出了一些有应用价值的结论,即对古建筑结构的受力特点及结构特性进行分析,建立了古建筑木结构的计算模型。将统一强度理论用于有限元分析,就杆系单元及块体单元的有限元实施中的有关问题进行了研究,给出了统一强度理论的弹塑性矩阵和统一弹塑性本构模型中的奇异点处理方法。采用统一强度理论编制了弹塑性有限元程序,对西安东门城墙、城楼进行了静、动力分析。(4)采用统一强度理论和统一滑移线场理论对厚壁圆筒进行了弹塑性极限分析,以及对薄圆环进行了弹塑性极限分析。采用双剪统一屈服准则对固支圆板和矩形板进行了弹塑性极限分析,求得了各种问题的统一极限解,对于解决压力容器、高压管道和炮筒、圆板、矩形板等的合理设计和减轻重量方面有重要意义。

本书的部分内容得到国家自然科学基金和陕西省自然科学基金资助。

虽然作者尽了最大努力,书中难免仍有不当之处,衷心盼望读者给予指正,提出宝贵的意见。

本书的研究工作得到了顾强教授、俞茂宏教授的关心和帮助,在此表示深深的感谢。

主要符号

E	弹性模量
$F(\sigma_{ij})$	强度理论函数
$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$	主应力空间强度理论函数
$F(I_1, I_2, I_3)$	应力张量不变量强度理论函数
f_b	强度极限
f_t	拉伸强度极限
f_c	压缩强度极限
f_{bc}	双轴等压强度比极限
G	切变模量
$G(\xi, \rho, \varphi)$	柱坐标广义强度理论函数
$g(\rho, \varphi)$	π 平面形状函数
$I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$	应力张量第一不变量
$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1$	应力张量第二不变量
$I_3 = \sigma_{ij} = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$	应力张量第三不变量
$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij}s_{ij} = \frac{2}{3} (\tau_{13}^2 + \tau_{12}^2 + \tau_{23}^2) = 2\tau_m^2 = \frac{1}{2} \tau_8^2$	
$= \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$	应力偏张量第二不变量
$J_3 = \frac{1}{3} s_{ij}s_{jk}s_{ki} = s_{ij} = s_1s_2s_3$	
$= \frac{1}{27} (\tau_{13} + \tau_{12})(\tau_{21} + \tau_{23})(\tau_{31} + \tau_{32})$	应力偏张量第三不变量
K	体积模量
$K = \frac{\rho_t}{\rho_c} = \frac{r_t}{r_c}$	π 平面上的拉伸强度、压缩强度矢长比
r_c	π 平面上的压缩强度矢长
r_t	π 平面上的拉伸强度矢长
r_{c0}	π_0 平面上的压缩强度矢长
r_{t0}	π_0 平面上的拉伸强度矢长
$r = \sqrt{2J_2} = 2\tau_m$	应力柱坐标矢长
$s_1 = \sigma_1 - \sigma_m$	最大偏应力
$s_2 = \sigma_2 - \sigma_m$	中间偏应力

$$s_3 = \sigma_3 - \sigma_m$$

$$(s_i) = \begin{pmatrix} s_1 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\sigma_1 - \sigma_m) & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_2 - \sigma_m) & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_3 - \sigma_m) \end{pmatrix}$$

$$(s_{ij}) = \begin{pmatrix} (\sigma_x - \sigma_m) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\sigma_y - \sigma_m) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\sigma_z - \sigma_m) \end{pmatrix}$$

$$T_\tau = \tau_{13} + \tau_{12}$$

$$T'_\tau = \tau_{13} + \tau_{23}$$

$$\alpha = f_t / f_c$$

$$\bar{\alpha} = f_c / f_{bc}$$

$$\beta = \frac{\bar{\alpha} + 2\alpha - 3\bar{\alpha}\alpha}{\bar{\alpha}(1 + \alpha)}$$

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

$$\beta' = \frac{\sqrt{2}(1 - \alpha)}{1 + 2\alpha}$$

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

$$\mu_\tau = \frac{\tau_{12}}{\tau_{13}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{s_1 - s_2}{s_1 - s_3}$$

$$\mu'_\tau = \frac{\tau_{23}}{\tau_{13}} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{s_2 - s_3}{s_1 - s_3}$$

$$\nu$$

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

$$\sigma_1$$

$$\sigma_2$$

$$\sigma_3$$

$$\sigma_s$$

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

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

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

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

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

最小偏应力

主应力偏张量

应力偏张量

双剪应力函数

双剪应力函数

材料拉压强度比

材料双向等压强度比

正应力影响系数

正应力影响系数($\bar{\alpha}=1$)

σ_8 影响系数

洛德应力状态参数

双剪应力状态参数

双剪应力状态参数

泊松比

应力柱坐标主轴

最大主应力(大主应力)

中间主应力(中主应力)

最小主应力(小主应力)

屈服极限

十二面体或正交八面体正应力

十二面体或正交八面体正应力

十二面体或正交八面体正应力

等倾八面体正应力

平均应力, 平均正应力

$$(\sigma_i) = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad \text{主应力张量}$$

$$(\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad \text{应力张量}$$

$$\tau_8 = \sqrt{\frac{2}{3} J_2} = \sqrt{\frac{1}{3} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad \text{等倾八面体切应力}$$

$$\tau_{13} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad \text{十二面体或正交八面体切应力, 最大主切应力}$$

$$\tau_{12} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{十二面体或正交八面体切应力, 中间或最小主切应力}$$

$$\tau_{23} = \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_3) \quad \text{十二面体或正交八面体切应力, 中间或最小主切应力}$$

$$\tau_m = \frac{1}{2} \sqrt{2J_2}$$

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

$$= \sqrt{\frac{1}{3} (\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{13}^2)}$$

均方根切应力

τ_s

剪切屈服极限

τ_b

剪切强度极限

φ

应力角

$$\cos \varphi = \frac{T_\tau}{\sqrt{6} \tau_m} = \frac{\tau_{13} + \tau_{12}}{\sqrt{6} \tau_m} = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{2\sqrt{6} \tau_m}$$

应力状态角方向余弦

目 录

前言

主要符号

第 1 章 绪论	1
1-1 背景及国内外研究现状	1
1-1-1 强度理论在钢管混凝土结构中的应用	2
1-1-2 古建筑的结构分析	3
1-1-3 强度理论在结构弹塑性极限分析中的应用	5
1-2 本书研究内容及取得的成果	6
参考文献.....	7
第 2 章 统一强度理论	15
2-1 引言	15
2-2 统一强度理论的力学模型	16
2-3 统一强度理论	18
2-4 统一强度理论的其他形式	21
2-5 统一强度理论的特例	22
2-6 统一强度理论的 π 平面极限线	24
2-6-1 b 变化时的统一强度理论极限面	25
2-6-2 α 变化时的统一强度理论极限面	27
2-7 统一强度理论的主应力空间极限面	28
2-8 平面应力状态下的统一强度理论极限线	29
2-9 σ - τ 应力状态下的统一强度理论极限线	30
2-10 统一强度理论的意义	30
2-11 结论	31
参考文献	32
第 3 章 统一强度理论在钢管混凝土中的应用	34
3-1 引言	34
3-2 统一强度理论	35
3-2-1 双剪统一强度理论	35
3-2-2 三参数统一强度理论	36
3-3 试验及结果分析	37
3-3-1 试验原理	37

3-3-2	试件制作	38
3-3-3	试验	38
3-3-4	试验结果分析	41
3-3-5	有关学者的计算公式及其比较	44
3-4	结论	45
	参考文献	45
第4章	统一强度理论在古建筑结构分析中的应用	50
4-1	引言	50
4-2	结构特点及理论建模	51
4-2-1	结构联结形式	51
4-2-2	木结构单元形式	56
4-2-3	城墙计算的简化模型	60
4-3	有限元分析	60
4-3-1	有限元实施	60
4-3-2	弹塑性有限元动力分析的计算框图及参数选择	65
4-4	西安东门城墙城楼的弹塑性有限元静、动力分析	67
4-4-1	西安东门城墙城楼简介	67
4-4-2	西安东门城墙的弹塑性静力分析	69
4-4-3	西安东门城墙的弹塑性动力分析	73
4-4-4	西安东门城楼静力分析	76
4-4-5	西安东门城楼的动力分析	77
4-4-6	小结	81
4-5	结论	82
	参考文献	83
第5章	统一强度理论在结构弹塑性极限分析中的应用	87
5-1	引言	87
5-2	厚壁圆筒及厚壁球壳的弹塑性极限分析	87
5-2-1	厚壁圆筒弹塑性极限分析	87
5-2-2	厚壁球壳的极限荷载	90
5-2-3	统一滑移线场理论解	91
5-2-4	小结	93
5-3	薄圆环弹塑性极限分析	93
5-3-1	薄圆环弹塑性极限分析	93
5-3-2	小结	95
5-4	固支圆板弹塑性极限分析	96
5-4-1	固支圆板的基本方程	96

5-4-2 固支圆板的极限荷载	98
5-4-3 小结	101
5-5 矩形板的弹塑性极限荷载分析	101
5-5-1 矩形板的基本方程	101
5-5-2 正方形简支板极限荷载	102
5-5-3 矩形简支板极限荷载	104
5-5-4 混凝土矩形板极限荷载	105
5-5-5 小结	108
5-6 结论	108
参考文献	109
第 6 章 结语	111

第1章 绪 论

1-1 背景及国内外研究现状

强度理论及其工程应用是极其复杂而应用非常广泛的课题,涉及力学、土木、机械、航空等许多学科。本书以此作为研究内容,不仅有重要的理论意义,而且有重大的工程价值。

强度理论研究的对象是微小单元体在空间应力 $\sigma_i(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 作用下的屈服和破坏规律及其相应的计算准则。它涉及力学、材料科学、固体物理和工程应用等很多领域。强度理论的研究最早是从 1638 年 G. Galileo 的名著《两种新科学》开始的。G. Galileo 之后有很多新理论和新模型出现^[1~4],如 20 世纪初的歪形能理论,30 年代的八面体切应力理论和广义八面体切应力理论,40 年代的联合强度理论,50 年代的屈服面公设和分段线性屈服面,60 年代的剑桥帽子模型,70 年代的角隅模型和真三轴试验,80 年代的各种本构模型以及多参数准则等。这些理论都从各自不同的假设和力学模型出发,推导得出不同的数学表达式,一般只能适用于某一类特定的材料。如 Tresca 最大切应力屈服准则只适用于剪切屈服极限 τ_s 为拉伸屈服极限 σ_s 的一半的材料,Mises 屈服准则(第四强度理论)只适用于 $\tau_s = 0.577\sigma_s$ 的材料,双剪应力屈服准则^[5]和 Haythorthwaite 于 1961 年提出的最大偏应力屈服准则只适用于 $\tau_s = 0.677\sigma_s$ 的材料,以上三个屈服准则都只适用于拉压强度相等的金属类材料。Mohr-Coulomb 强度理论只适用于剪切强度极限 τ_0 与拉伸强度极限 f_t 和压缩强度极限 f_c 的关系为 $\tau_0 = f_t f_c / (f_c + f_t)$ 的材料,双剪强度理论只适用于 $\tau_0 = 2f_t f_c / (2f_c + f_t)$ 的材料;Drucker-Prager 准则与岩土类材料的实验结果不符合。因此,可以说以上这些理论都是一种只能适用于某一类材料的单一强度理论。

从 19 世纪末以来世界各国学者都在寻求建立一种统一的强度理论,并为此进行了大量研究。但是 100 多年来并没有得到解决。在 19 世纪末 20 世纪初,德国很多大学的著名科学家如慕尼黑工业大学的 J. Bauschinger(1833~1892)、斯图加特大学和德累斯顿大学的 O. Mohr(1835~1918)、卡尔斯鲁厄大学的 A. Foppl(1854~1924)以及格廷根大学的 W. Voigt(1850~1919)、L. Prandtl(1875~1953)和 von Karman(1881~1963)都进行了很多研究。Voigt 得出结论认为:“强度理论问题是非常复杂的。要想提供一个单独的理论应用到所有结构材料是不可能的。”苏联科学院院士弗里德曼和达维坚科夫于 20 世纪 40 年代提出了一种企图应用于各种材料的联合强度理论,但也未获成功^[1]。到 50 年代,著名力学家铁木辛科在他

的《材料力学史》^[1]中,再次重述了 Voigt 的结论:“强度问题是一个非常复杂的问题,要提出一种能很好地适用于各种结构材料的理论是不可能的。”^[1]统一强度理论成为各国学者多年研究而没有解决的难题。到 20 世纪 80 年代,我国学者俞茂宏在《中国科学》杂志发表的文章中也曾认为:“似乎还不可能用单一的理论或准则去说明各种不同材料在复杂应力状态下的破坏和滑移现象。”^[5,6]文献[7]也认为:“想建立一种统一的、适用于各种工程材料和各种不同的应力状态的强度理论是不可能的。”显然,建立统一强度理论将是一个困难而又具有吸引力的研究课题。

1-1-1 强度理论在钢管混凝土结构中的应用

钢管混凝土是将普通混凝土填入薄壁钢管内而形成的组合材料,它具有普通混凝土无法比拟的许多优点。由于混凝土成型容易,可以人为地组织不同的配合比,添加不同的外加剂而获得人们需要的综合性能,以满足不同的工程要求,因此钢管混凝土结构在土木工程中应用非常广泛。钢管混凝土克服了混凝土的一些缺点,它比混凝土有更好的优越性。最显著的是它改善了核心混凝土的受力状态,提高了构件的塑性、韧性和承载能力。钢管混凝土结构按截面形式不同,分为方钢管混凝土、圆钢管混凝土和多边形钢管混凝土等。根据钢管作用的差异,钢管混凝土柱可分为两种形式:一是组成钢管混凝土的钢管和混凝土在受荷初期即共同受力的混凝土柱;二是外加荷载仅作用在核心混凝土上,钢管只起对核心混凝土的约束作用,即钢管约束混凝土柱。

钢管混凝土利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用,即钢管对混凝土的约束作用使混凝土处于复杂应力状态之下,从而使混凝土的强度得以提高,塑性和韧性性能大为改善。同时,由于混凝土的存在可以避免或延缓钢管发生局部屈曲,可以保证钢管强度的充分发挥;另外,在钢管混凝土结构的施工过程中,钢管还可以作为浇筑核心混凝土的模板。与钢筋混凝土结构相比,采用钢管混凝土结构可节省模板费用,加快施工速度。钢管混凝土不仅可以弥补钢管和混凝土两种材料各自的缺点,而且能充分发挥两者的优点,这正是钢管混凝土组合结构的优势所在。

钢管混凝土是在劲性钢筋混凝土及螺旋配筋混凝土的基础上演变和发展起来的。最早将钢管混凝土用于工程的是英国的 Severn,他于 1879 年将钢管混凝土用于铁路桥的桥墩,在钢管内填充混凝土以防止锈蚀并承受压力,随后,钢管混凝土又被用于单层、多层工业厂房的结构柱。在早期的应用中,一般不考虑由于组成钢管混凝土的钢管及其核心混凝土间相互作用对承载力的提高。早期钢管混凝土采用的钢管往往是热轧管,钢管的壁厚一般均较大^[8~16],而且由于钢管内混凝土浇筑工艺未得到很好解决,因而经济效果不明显,从而使钢管混凝土的推广应用受到一定影响。对钢管混凝土力学性能进行较为深入的研究,以及这类结构被大范围推

广泛应用主要是在 20 世纪 60 年代以后。

近年来,钢管混凝土在土木工程中应用非常广泛,建造了大量的建筑物、构筑物 and 桥梁等工程。国外学者对钢管混凝土进行了大量的研究^[8~32],取得了许多研究成果。研究的范围有方钢管混凝土、圆钢管混凝土和矩形钢管混凝土结构,核心混凝土为素混凝土,或在核心混凝土中配置钢筋或型钢。美国以研究方钢管混凝土和圆钢管混凝土为主,核心混凝土为素混凝土。日本 1923 年关西大地震后,发现钢管混凝土结构在该次地震中的破坏并不明显,故在以后的建筑尤其是多高层建筑中,钢管混凝土得到大量的应用,特别是 1995 年阪神地震后,钢管混凝土更显示了优越的抗震性能,钢管混凝土的研究进一步成为热门课题。日本主要研究方钢管混凝土、圆钢管混凝土和矩形钢管混凝土结构,核心混凝土为素混凝土或配筋混凝土。澳大利亚和加拿大等国学者对薄壁钢管混凝土结构进行了系统深入的研究。我国学者主要集中研究在钢管中浇灌素混凝土的内填型方钢管混凝土、圆钢管混凝土和矩形钢管混凝土结构。特别是进入 20 世纪 80 年代后,我国在这一领域的研究工作进一步深入,工程应用进一步推广,特别是近十几年来取得了令人瞩目的成就^[33~99]。目前,钢-混凝土组合结构已被列入国家科技成果重点推广项目,为进一步在实际工程中推广应用钢管混凝土结构创造了有利的条件。

对于钢管混凝土构件的研究存在各种不同的方法。其区别在于如何估算钢管和核心混凝土之间相互约束而产生的“效应”。这种“效应”的存在构成了钢管混凝土构件的固有特性,从而导致其力学性能的复杂性。研究人员从不同的角度对上述问题进行了研究,由于对钢管和混凝土之间约束效应理解不同,因而估算的准确程度也会有所不同,所获得的计算方法和计算结果也会有所出入。总结国内外学者的研究成果,钢管混凝土轴心受压时临界力的计算方法可归纳为如下几种:应用欧拉公式确定承载力,认为构件的临界力是钢管和混凝土的欧拉临界力之和^[10,42];根据实验结果回归计算公式^[34];数值解法^[27,33,37],包括有限单元法和纤维模型法^[22~25,37]。对于压弯构件,承载力的计算公式归纳为,采用最大荷载理论^[21];增大偏心率法^[42];经验系数法^[34]和数值解法^[19,22,33,37]等。这些结果给出的计算公式,为工程设计提供了重要依据。但这些公式大多都是从试验拟合出的,理论上没有得到较好的解释,且计算公式和方法都比较冗繁,不便应用。

1-1-2 古建筑的结构分析

在中国历史上几乎各个朝代曾建立过大大小小的城墙、城楼、箭楼和钟楼等。它们是华夏大地上普遍存在的一类具有特殊功能的建筑。中国古代建筑的结构多以木结构为主,最典型的是以柱和梁的榫卯结合形式构成的骨架,至今还大量保存着千年以上的许多这类古建筑。这些木结构十分珍贵。到魏、晋、南北朝时期,佛教传入我国,这个时期建筑了大量的寺、塔等佛教建筑,这些建筑多以砖混结构居

多。早在战国时代,我国的木结构中开始使用木斗拱,到唐代已大量使用,斗拱的使用在建筑上起装饰作用,在结构上有较好的力学性能。

古建筑的研究遵循历史性、艺术性和科学性的三性原则。但由于对古建筑进行科学研究难度较大,工作甚是艰巨,加之一些条件的限制,长期以来人们多从历史性和艺术性方面研究,而就科学性方面研究很少^[101~107]。

由于古建筑结构特性研究的复杂性,目前古建筑结构的专门研究较少。俞茂宏、赵均海等近年来在古建筑研究方面做了大量的工作^[108~124],对西安古城墙、西安北门箭楼、西安东门城楼城墙、西安钟楼静、动力结构特性进行了系统的理论、试验研究,取得了一些有价值的研究成果。木结构是以榫卯连接形式构成的受力骨架,榫卯接头的简化对计算结果影响很大,有的简化成刚性连接,有的简化成铰接,这些都不符合实际。结构中构件间的连接形式对结构的特性具有很大的影响,这一思想已在美国和欧洲的设计标准,如美国钢结构学会(AISC)的 AISC-ASD-LRFD 标准以及欧洲的 Eurocode-3 标准中采用。文献^[125~132]对木结构构件间的连接形式(钉、螺栓、销钉和胶等)的特点进行了大量的试验研究和有限元数值模拟,主要考虑拉、压、弯曲等情况下的单一或复合加载时的连接特性。可以看出不同的连接形式、不同的荷载条件对连接特性和结构特性都具有很大的影响。目前常规的研究方法是引入变刚度单元,来模拟不同类型结点传递弯(扭)矩的能力。Morse-Fortier^[133]研究了如何增强木结构预制构件间的连接,以确保结构安全承载。针对地板、墙和屋顶等具有板状几何特点的构件间通过板面与桁条或 T 型梁间的不同连接给出了不同的传力路径,以尽量减少多余部件,达到快速安装、安全使用、提高效率、降低成本的目的。Tin-Loi 和 Vimonsatit^[134~136]用分段全量法分析具有半刚性连接的梁-柱结构的弹塑性一次(小变形)和高次问题(大变形)^[137],进行了有限元计算。该研究中采用分段线性的屈服函数,形式虽然简单,但不尽合理^[100,138]。涉及到连接形式的研究,该研究采用改变刚度矩阵中的部分项(弯矩及其耦合项)的方法,来模拟半刚性接头的特性,进而分析梁-柱结构。其特点是在单元刚度矩阵中引入三个参数 r_1, r_2, r_3 来描述弯曲刚度折减后的杆单元刚度。通过参数的不同变化来模拟刚接、铰接以及半刚性连接。

对于采用虚拟单元和刚度折减系数方法研究半刚性体系的合理性问题,Ariaratnam 和 Xu^[139]给出了半刚性连接解的惟一性的一个补充条件。实际上是虚功原理的应用,即某一弯矩在由其产生的转角方向上始终做正功。文献^[140]从计算机实施的角度分析研究了半刚性连接的特点,可以模拟非线性的弯矩-转角($M-\theta$)曲线。Chen 及其同事对该问题进行了系统的研究^[141~144],其研究理论合理且有深度,并与工程实际有紧密的联系。如文献^[141]根据大量试验数据组成的数据库,研究了柱-梁间半刚性连接的特性,给出了处理方法,具有很强的工程针对性。文献^[144]从工程应用角度分析了平面、不加撑的具有半刚性连接的柱梁结构的特性,

并应用于工程实际。文献[145]用部分限制连接(PR Connection)概念代替半刚性连接的概念。由于半刚性连接的引入导致构件受力变化很大,产生与原来用刚性假设计算完全不同的结果。该文运用随机有限元方法,判断这些变化的程度以及对结构完整性、安全性的影响。文献[146,147]进而采用类似的方法对弹塑性体系进行了分析。文献[148]在文献[149]的基础上,针对类似工字梁、柱等薄壁构件组成的具有柔性连接(半刚性)的空间框架梁进行弹塑性有限元大变形分析。针对梁-柱间的连接,该文采用的是弹性连接单元的方式,该单元准确的讲应当是虚拟弯曲弹簧单元,是半刚性连接研究中较为常用的方法。该方法最早由 Monforton 和 Wu 于 1963 年提出^[150],其思路是在铰接结点上叠加上可以承受线性弯矩的虚拟单元,其效果是在结点上也产生了可以传递线性 $M-\theta$ 弯矩的能力,通过线性 $M-\theta$ 的关系反映半刚性连接的刚度。该方法可以容易地推广到非线性 $M-\theta$ 的关系,非线性特性主要由试验确定。后来的研究大都采用这种方法如文献[151~153]。

国内外的学者对木结构的结构特性进行了大量的研究。孔祥珍对牟尼殿主要木构件的承载力和节点榫卯进行了研究^[154],文献[155,156]对西方木构架的静力特性进行了研究,Gulkan 及 Clough 等^[157,158]对单层砌体木结构进行了系统的动力特性研究,Medearis^[159]对木结构也进行了一些研究,得出平均高度在 3m 到 12m 的木结构的一阶固有频率为 4.0~18.0Hz 左右,阻尼比为 0.052,Scawthorn^[111]对日本的木结构进行了研究,得出当木结构为一层时,固有频率为 2.5~5.0Hz,当木结构为二层时,固有频率为 2.0~4.0Hz.Sugiyama^[111]对日本木结构进行现场实测得出一阶固有频率为 7.0~11.5Hz,杉山英男^[111]对日本江户时代的农家建筑进行了水平荷载下的实验,得出了水平力作用下的滞回曲线,和一阶固有频率为 2.0Hz。俞茂宏^[108]对西安北门箭楼进行实验,得出的一阶固有频率为 1.1Hz,二阶固有频率为 2.725Hz。俞茂宏对西安钟楼结构进行研究得出一阶固有频率为 0.43Hz,二阶固有频率为 1.06Hz。翠川三郎等^[111]对日本木结构民宅的抗震性能进行了分析。久田^[111]对东京木结构民宅在关东大地震时的破坏特性进行了研究。刘恢先^[160]对唐山地震造成的建筑破坏做了分析研究。在国内,中国古代木结构的研究针对历史性和艺术性、建筑施工工艺方面等;结构力学性能方面主要是定性研究。参见文献[108]中有关论述。

1-1-3 强度理论在结构弹塑性极限分析中的应用

大部分工程结构材料的抗拉强度与抗压强度不相等,而且大都处在复杂应力状态下工作。对这类材料的结构进行弹塑性极限分析,将用到强度理论和屈服准则,目前工程中常用的有 Tresca 的单剪应力屈服准则(1864)、八面体剪应力准则(Mises,1913)和双剪应力屈服准则(俞茂宏,1961)、Mohr-Coulomb 的单剪强度理论等,它们都只能适用于某一类材料,如 Tresca 准则适用于剪切屈服极限 $\tau_s =$

0.5 σ_s , Mises 准则适应于 $\tau_s = 0.577\sigma_s$, 双剪应力屈服准则适应于 $\tau_s = 0.667\sigma_s$ 的材料。所以它们都是适用于某一类材料的单一屈服准则。文献[161~166]分别用不同的准则进行了复杂应力状态下的弹塑性极限荷载分析, 用这些单一准则将导致较大的误差。近年来, 国内外学者开始考虑拉压强度不相等对极限荷载的影响。1992 年刘协全、倪新华用 Mohr-Coulomb 的单剪强度理论求解了厚壁圆筒和厚壁球壳的极限荷载^[167]。骆志勇、李朝弟于 1994 年用俞茂宏于 1985 年提出的双剪强度理论^[168]求解了厚壁圆筒的极限荷载^[169], 同时也得出了 Mohr-Coulomb 的单剪理论解。王钟羨应用双剪强度理论也做了详细分析^[170]。冯西桥、刘信声对厚壁圆筒安全性做了分析^[171]。1995 年阮澍铭、张泽华等用 Mohr-Coulomb 强度理论得出了厚壁球壳的极限荷载^[172]。1998 年庄锦华、庞宝君等用广义双剪强度理论得出了厚壁圆筒与厚壁球壳的极限压力^[173, 174]。Mohr-Coulomb 单剪强度理论由于没有考虑中间主应力 σ_2 的影响, 与试验结果有差距, 它只适用于剪切强度极限 τ_0 与拉伸强度极限 σ_t 和压缩强度极限 σ_c 的关系为 $\tau_0 = \frac{\sigma_t \sigma_c}{\sigma_t + \sigma_c}$ 的材料。双剪强度理论(俞茂宏, 1985)虽然考虑了 σ_2 的影响, 但它也只能适用于满足关系式 $\tau_0 = \frac{2\sigma_t \sigma_c}{2\sigma_c + \sigma_t}$ 的材料。

1-2 本书研究内容及取得的成果

本书研究内容为: ①采用考虑了中间主应力 σ_2 的影响、拉压性能不同的适用于各种材料的复杂应力状态下的双剪统一强度理论(统一强度理论)^[100]对钢管混凝土进行理论分析, 从而推导出其承载力计算公式, 并通过轴心受压和偏心受压试验结果及现有研究结果进行比较, 验证了理论计算公式的正确性, 为钢管混凝土承载力分析提供了理论依据。②对古建筑(包括木结构和砖混结构)用现代计算方法进行分析、探讨, 为古建筑的修复和保护提供一些理论依据。③采用双剪统一强度理论(俞茂宏, 1991)^[100, 175~178]和统一滑移线场理论(俞茂宏、杨松岩, 1997)^[179]对厚壁圆筒进行了弹塑性极限分析^[180~183], 采用双剪统一强度理论对薄圆环进行了弹塑性极限分析^[184], 采用双剪统一屈服准则对固支圆板进行了弹塑性极限分析^[185], 以及对矩形板进行了弹塑性极限分析^[186, 187], 得到了各种问题的统一极限解。双剪统一强度理论可以考虑拉压强度不相同以及 σ_2 的影响, 能更好地适用于各种材料的结构极限分析, 对于解决压力容器、高压管道和炮筒、圆板、矩形板等的合理设计和减轻重量方面有重要意义。

本书从理论分析、试验研究、数值模拟等方面出发, 对以上问题进行研究, 得到了一些有重要参考价值的结论:

(1) 系统地介绍了统一强度理论及其各种表达形式, 并给出了相应的物理意义, 进一步说明现有的强度理论或屈服准则是统一强度理论的特例。

(2) 从统一强度理论出发,推导出钢管混凝土核心混凝土抗压强度的计算公式,制作了不同的钢管混凝土试件,对其进行不同含钢率的抗压试验,得出了轴心受压和偏心受压情况下的极限荷载,并与有关文献结果进行了对比。从试验及计算结果分析知,用统一强度理论的计算式得到的结果与本书试验值及有关文献资料结果进行对比,误差较小,说明双剪统一强度理论对于钢管混凝土的理论计算有非常好的适用性,可以充分发挥材料的潜力,并且给出了钢管混凝土理论上的解释,为钢管混凝土的优化设计提供了可靠的理论依据。

(3) 对古建筑结构的结构特性进行了分析研究,得出了一些有应用价值的结论:①对古建筑结构的受力特点及结构特性进行分析,建立了相应的简化模型。②将统一强度理论用于有限元分析中。对杆系单元及块体单元的有限元实施中的有关问题进行了研究,给出了双剪统一强度理论的弹塑性矩阵和双剪统一弹塑性本构模型中的奇异点处理方法。③用双剪统一强度理论的弹塑性有限元程序对西安东门城墙、城楼进行了静、动力分析。

(4) 采用双剪统一强度理论和统一滑移线场理论对厚壁圆筒进行了弹塑性极限分析。采用双剪统一强度理论对薄圆环进行了弹塑性极限分析。采用双剪统一屈服准则对固支圆板和矩形板进行了弹塑性极限分析。得到了各种问题极限荷载的统一解。能考虑拉压强度不相同以及中间主应力的影响,可以更好地适用于各种材料的结构极限分析,对于解决压力容器、高压管道和炮筒、圆板、矩形板等的合理设计和减轻重量方面有重要意义。

本研究采用了国际领先水平的统一强度理论、双剪模型,进行钢管混凝土性能、结构的弹塑性极限荷载、古建筑结构性能等问题研究,研究工作既有理论分析,又有试验和数值模拟,内容先进,属该学科领域的前沿课题。所得结果在理论上有一定的创新,并且有重要的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] Timoshenko S P. History of Strength of Materials. McGraw-Hill Publishing Co., 1953
- [2] Rowlands R E. Strength(failure) theories and their experimental correlation. in Failure Mechanics of Composites. Sih G C, Skudra A M ed. Elsevier Science Publishing Company. Inc., 1985
- [3] Г С 皮萨林科, А А 列别捷夫著. 江明行译. 复杂应力状态下的材料变形与强度. 北京: 科学出版社, 1983
- [4] Chen W F. Plasticity in Reinforced Concrete. McGraw-Hill Book Company, 1982
- [5] 俞茂宏, 何丽南, 宋凌宇. 双剪应力强度理论及其推广. 中国科学, A 辑, 1985, 28(12): 1113~1120
- [6] Yu Maohong, He Linan, Song Lingyu. Twin Stress Theory and its Generalization. Scientia Sinica (Science in China), Series A, 1985, 2(11): 1174~1183
- [7] 中国大百科全书·力学. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985, 398
- [8] Kloppel V K and Goder W. An Investigation of the Load Carrying Capacity of Concrete-Filled Steel Tubes and Development of Design Formula. Der Stahlbau, 1957, 26(1): 1~10
- [9] Kloppel V K and Goder W. An Investigation of the Load Carrying Capacity of Concrete-Filled Steel