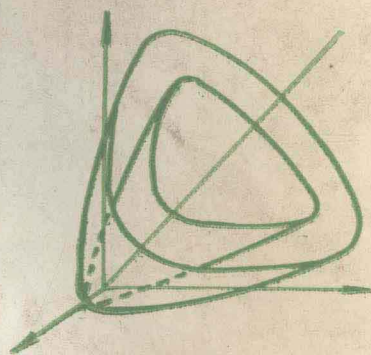


学术讨论会论文集
烟台, 1987年10月

约束与 普通混凝土

强度理论及应用



约束与普通混凝土 强度理论及应用

学术讨论会论文集

1987年10月26日—30日 烟台

中国建筑学会建筑结构委员会混凝土结构学组
清华大学土木工程系

联合举办

前 言

混凝土结构是我国工程建设中应用最广泛的一种结构，不仅大量用于一般工业与民用建筑和大型水利工程，还正在用于核电站安全壳和海上采油平台等特殊工程结构中。唐山地震以后，约束混凝土（套箍混凝土）的研究和应用受到普遍重视。丰富多采的工程实践，提出了许多涉及混凝土强度理论的问题。

为促进约束混凝土与普通混凝土强度理论的学术研究及其工程应用，根据中国建筑学会结构委员会的计划，结构委员会混凝土结构学组与清华大学土木工程系决定联合主办“约束混凝土与普通混凝土强度理论及应用”学术讨论会，由混凝土结构学组的蔡绍怀、于庆荣、蒋大骅和清华大学土木工程系的沈聚敏、陈肇元、过镇海组成会议筹备组，由中国建筑科学研究院建筑结构研究所的尉尚民任筹备组秘书。

今年三月初，征文通知发出后，得到各方面的积极响应，在不到两个月的时间内共收到108篇论文摘要或全文。经筹备组在京部分成员蔡绍怀、沈聚敏、过镇海初选出其中87篇，通知作者写出全文，列入会议文集。现收入本文集的实为66篇，其余各篇或因篇幅过长，或因未按时寄到而未能收入。

为了活跃学术思想，达到学术交流的目的，会议筹备组对入选的论文，只从选题、篇幅和格式等方面作了审查，对论文的内容和观点，则完全尊重作者的本意，未作任何干预。

这次会议论文的数量和探讨的范围，已超出我们预先的设想。我们深信，这次学术讨论会将混凝土强度理论及其应用起到有力的促进作用。我们谨向出席会议的代表和论文作者表示衷心的感谢。

这次会议在烟台市召开，由天津大学土木工程系负责会务工作，由中国建筑科学研究院建筑结构研究所负责会议文集的出版工作。我们对他们的努力和贡献表示诚挚的感谢。

约束混凝土和普通混凝土强度理论及应用学术讨论会筹备组

1987年10月

会议筹备组成员

中国建筑学会结构委员会

清华大学土木系

混凝土结构学组：

蔡绍怀 高级工程师

沈聚敏 教授

于庆荣 教授

陈肇元 教授

蒋大骅 教授

过镇海 教授

秘书：尉尚民工程师

(中国建筑科学研究院结构所)

中国建筑学会混凝土结构委员会 清华大学土木系

1981年10月

目 录

(一)

钢管混凝土弹塑性理论分析	李传铭	(1)
钢管混凝土构件压弯剪强度的试验研究	姜维山 周小真 安建利	(12)
方格网套箍高强混凝土的性能与强度试验研究	顾维平 蔡绍怀 冯文林	(22)
高强材料约束混凝土柱强度、变形的试验研究	张祖光 戴自强 陆继赞 储彭年	(30)
约束钢筋混凝土压弯构件延性和它的滞回特征	袁锦根	(38)
快速加载作用下组合短柱承载力的试验研究	胡 昌 杨章甫	(48)
掺钢纤维管混凝土轴压组合短柱的静承载力	胡 昌	(57)
钢管混凝土短柱轴压强度的塑性解	蒋大骅	(64)
套箍混凝土的局部承压强度	尉尚民 蔡绍怀 焦占拴 何 琼	(72)
约束混凝土应力—应变全曲线的试验研究	邢秋顺 翁义军 沈聚敏	(81)
方箍约束钢筋混凝土偏压柱受力性能的研究	张保善 霍 达	(88)
约束混凝土在地下工程中的应用	高伯扬 高晓军	(96)
箍筋约束高强混凝土应力—应变全曲线的试验研究	叶列平 叶燕华	(105)

(二)

混凝土抗拉强度的理论分析	常生福	(113)
混凝土应力—应变全曲线的新模式及应用	杨顺生	(120)
混凝土在拉压二向受力下的强度试验研究	蒋林华 谢年祥 林毓梅	(126)
描述混凝土本构关系的endochronic理论	邸小坛	(132)
平面应变状态下混凝土强度研究的试验装置	宋玉普 靳国礼 沈吉纳	(139)
混凝土抗拉强度的尺寸效应与石子粒径效应	宣国良 谢年祥	(145)
二轴三轴应力下混凝土强度的试验研究	曲俊义 王传志 张秀琴	(152)
二轴受压混凝土强度和变形的试验研究	郑汝玫 王传志 张秀琴	(160)
混凝土真三轴加载设备的研制	过镇海 王汝琦 张达成等	(170)
混凝土抗剪强度和剪切变形的研究	张 琦 过镇海	(179)
高强混凝土应力应变全曲线的试验研究	许锦峰 庄崖屏 石裕翔	(187)
混凝土本构模型的研究	刘西拉 籍孝广	(196)
混凝土的裂缝及破坏形态	刘西拉 籍孝广 杨雪松	(204)
混凝土局部承压强度理论的台锥—套箍模型	蔡绍怀 尉尚民	(210)
粘聚裂缝模型及其在混凝土开裂研究中的应用	徐道远 俞建荣	(217)
三参数强度理论	余永遐	(228)
轴对称三轴压力下混凝土的强度、变形和破坏	苗若愚	(237)
一种混凝土四参数强度准则的研究	尹双增	(244)

混凝土张开型裂缝断裂过程的数值分析方法.....	王文安 (249)
不同混凝土强度理论在有限元分析中的应用.....	江见鲸 殷小清 (257)
水灰比对砂浆断裂能影响的研究.....	周家聪 于晓中 (264)
混凝土三向应力破坏的椭圆抛物面准则.....	钱在滋 张自坚 (272)

(三)

混凝土边角局压强度分析.....	李 田 (283)
预应力混凝土弯剪扭构件复合强度分析计算.....	蒋季丰 董 明 (289)
混凝土压弯构件复合强度的试验研究.....	徐有邻 (300)
部份预应力环形截面压弯构件的滞回性能.....	张惠英 钱稼茹 朱金铨 (310)
钢筋混凝土连续梁抗剪强度的研究.....	赵光仪 吴佩刚 (319)
钢筋混凝土构件抗剪机理的探讨.....	谢育良 丁大钧 (327)
钢筋混凝土受弯构件的广义强度探讨.....	霍 达 王志忠 张保善 (335)
钢筋混凝土框架梁端的抗震强度.....	朱志达 (343)
受纯扭钢筋混凝土矩形截面梁破坏机理的探讨.....	洪敦枢 (351)
钢筋混凝土简支深梁抗剪强度的塑性分析.....	龚绍熙 刘立新 (357)
简支钢筋混凝土短梁和受力性能和抗弯强度.....	龚绍熙 曹定秀 (367)
钢筋混凝土框架短柱的粘结开裂破坏强度.....	李 力 陈家夔 (377)
在高轴压和循环剪力作用下钢筋混凝土框架短柱的抗剪强度.....	张先进 陈家夔 (385)
钢筋混凝土约束梁抗剪机理探讨.....	黄 真 吴智眉 (397)
钢筋混凝土压弯及抗弯构件的抗剪强度.....	王 炜 (403)
钢筋混凝土梁斜截面抗裂计算.....	黄相才 井卫星 (411)
钢筋混凝土无箍板斜曲截面抗剪强度试验研究.....	黄相才 (423)
钢筋混凝土框架柱的抗剪强度.....	牛绍仁 李立仁 (431)
钢筋混凝土梁的局部抗拉强度.....	王祖华 李阳明 张纪贵 (438)

(四)

钢筋混凝土结构振动周期的全过程研究.....	吴世英 刘振昌 (447)
内层钢板——钢筋混凝土复合井壁.....	煤科院建井所钻井井壁组 (455)
钢衬钢筋混凝土矩形孔口结构承载性能研究.....	刘之汉 赵 瑜 (464)
钢筋混凝土杆系结构的极限分析.....	冯世平 沈聚敏 (471)
钢筋混凝土圆、环形板式基础极限承载力探讨.....	郑作樵 (480)
混凝土铰在桥梁工程中的应用.....	任拜渔 (492)
地面板考虑裂缝的有限元分析.....	庄家华 申屠龙美 蒋大骅 (499)
四桩承台的抗裂度.....	庄冠民 蒋大骅 (507)
冷拔低碳钢丝混凝土双向板的试验研究.....	易伟建 (514)
钢筋混凝土无梁楼盖抗冲切问题的研究.....	王悦新 曹培椿 (522)
对外包钢板混凝土圆拱形结构几个问题的讨论.....	冯文林 (530)
抗震设计中钢筋混凝土柱矩形约束箍筋.....	邹银生 刘伯贤 (538)

钢管混凝土弹塑性理论分析

李传铭

〔提要〕 本文在有关参考文献的基础上,运用弹塑性理论,对钢管混凝土的力学性能进行了探讨,并结合大量实际试验资料,分析了钢管混凝土的受力状态、加载路线以及钢管应力与含钢率的关系。运用Mises屈服条件,并考虑到单向纵压屈服及单向环拉屈服的边界条件,给出了钢管混凝土轴压短柱在钢管纵压和环拉作用共同存在时的承载力计算公式,它比较全面地反映了各种不同含钢率的钢管混凝土轴压短柱的受力状态及内部应力情况,公式简明扼要,能够满足具体工程设计需要。

一、前 言

钢管混凝土是将混凝土注入钢管内,并震捣密实,使两种材料能够共同工作的一种组合结构材料。

钢管混凝土的试验研究以及在工程中的应用,已有近百年的历史。许多国家做了大量的工作,有的还建成了以钢管混凝土为构件的工业厂房、民用建筑及地铁车站等。

我国从60年代以来,许多单位对钢管混凝土也进行了广泛地试验研究,并应用到地铁、冶金、造船、电力等工程中。

1987年我院设计的大型石油化工容器制造车间,就采用了钢管混凝土结构。本文对钢管混凝土的力学性能进行了探讨,提出了钢管混凝土轴压短柱承载力的计算方法,并已经应用到设计中。

二、钢管混凝土的受力状态

钢管混凝土由钢管和核心混凝土复合而成。在受力过程中,相互制约,共同工作,和单一的匀质材料有很大区别。钢管混凝土在钢管和核心混凝土同时受压的情况下,其受力状态,以钢管为标志,可分为弹性工作阶段、弹塑性工作阶段及塑流工作阶段。

1. 弹性工作阶段: 在受荷初期,核心混凝土处于低应力状态,泊桑比 V_h 约为0.2,小于钢材的泊桑比 $V_s=0.283$,因此钢管与核心混凝土之间不会发生挤压,二者共同承受纵向压力。随着荷载的增加,纵向应变不断加大,核心混凝土中原有的微细裂缝不断发展,其泊桑比继续增长,赶上和超过了钢材的泊桑比。在钢管的约束下,核心混凝土处于三向受压状态,钢管处于纵压及环拉(略去径向受压)双向受力状态。(蔡绍怀, 1984; 钟善桐, 1984)

2. 弹塑性工作阶段：荷载继续增加，钢管纵向应力 σ_L 及环向应力 σ_n 不断增大，钢管应力达到屈服。在荷载不断增加的过程中，核心混凝土受到越来越大的钢管环向应力 σ_n 的约束，延缓了核心混凝土中微细裂缝的发展，从而提高了核心混凝土的抗压强度和变形能力。（蔡绍怀，1984）

3. 流塑工作阶段：荷载继续增加，钢管混凝土的应变发展加剧，钢管纵压应力 σ_L 继续减小，环拉应力 σ_n 继续加大。此时核心混凝土受到较高的侧压应力 σ_r ，混凝土中的裂缝急剧发展，导致混凝土破坏，因而钢管混凝土丧失其承载能力。（蔡绍怀，1984）

三、钢管的屈服

钢管混凝土中的钢管可认为是理想的弹塑性材料，其屈服条件，一般考虑以下两种情况：

1. Tresca屈服条件：认为当最大剪应力 τ_{max} 获得某一极限值时，材料即进入塑性状态。

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} [(\sigma_N)_{max} - (\sigma_N)_{min}] = \frac{1}{2} \sigma_s \quad (1)$$

2. Mises屈服条件：认为当正八面体上剪应力 τ_8 获得某一极限值时，材料即进入塑性状态。

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

以上两个屈服条件的几何表示是垂直于 $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$ 平面的正六角柱体面和外接于六角柱体的圆柱面。

当 $\sigma_3 = 0$ 时，屈服面在 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 平面上的轨迹是一个六角形和外接六角形的椭圆。如图1所示。

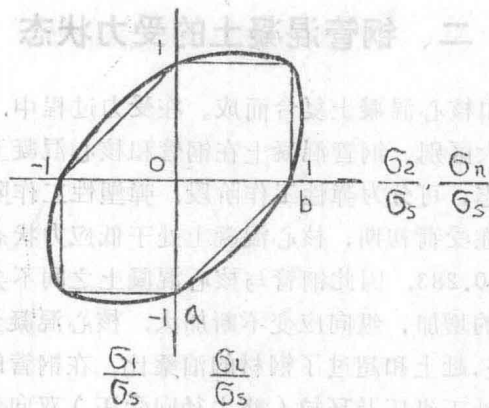


图1 平面应力状态塑性屈服条件图

图中六角形表示最大剪应力屈服条件（Tresca）。椭圆形表示正八面体剪应力屈服

服条件 (Mises)。

对于钢管混凝土的钢管来说, Tresca屈服条件为

$$\sigma_L + \sigma_n = \sigma_s \quad (3)$$

即图 1 中的 ab 直线段。Mises 屈服条件为

$$\sigma_L^2 + \sigma_L \sigma_n + \sigma_n^2 = \sigma_s^2 \quad (4)$$

即图 1 中的 ab 弧线段。

式 (3)、(4) 中 σ_L 为钢管的纵向屈服应力, σ_n 为钢管的环向屈服应力, σ_s 为钢材的屈服极限。

四、钢管混凝土试件在钢管和核心混凝土同时受压情况下的加载路线

1. 根据日本九州大学 (崎野健治等 1985) 及苏州水泥制品研究所和上海第九设计院试验资料 (1979) 归纳于图 2 中。

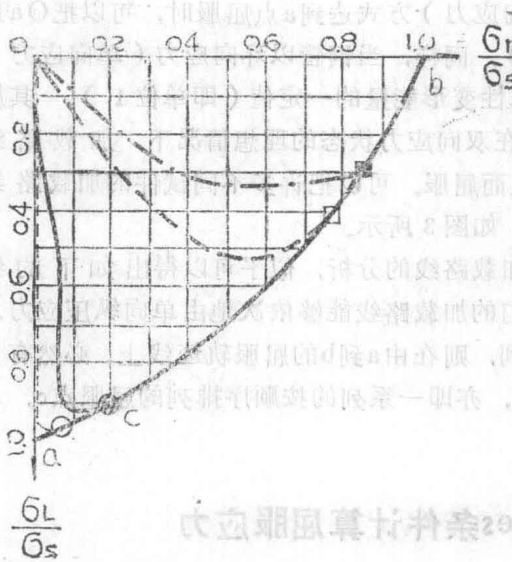


图2 钢管混凝土试件实测加载路线

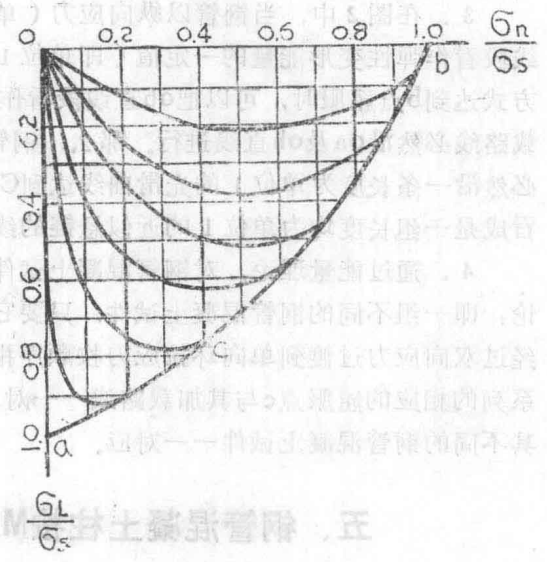


图3 钢管混凝土试件理想加载路线

图 2 中, ●引自《钢管混凝土基本力学性能》(1979), ○、□和■引自《钢管混凝土短柱的轴向承载力》(崎野健治等, 1985)。从图 2 可以看出钢管混凝土的受力及应力状态。钢管混凝土试件, 由 O 点加载至 a 点, 钢管以纵向应力 (单向应力) 方式达到 a 点而屈服。一般情况下, 钢管混凝土试件, 由 O 点加载沿一条曲线至 C 点, 钢管以纵压及环拉的双向应力方式达到 C 点而屈服。由推论可知, 在特定情况下, 钢管混凝土试件, 由 O 点加载至 b 点, 钢管以环向应力 (单向应力) 方式达到 b 点而屈服。

2. 由能量理论可知, 在加载过程中, 当变形能达到某一极限值时, 材料即将进入

塑性状态。现用 W 、 W_s 、 W_v 分别代表弹性总能量、弹性形变能量及弹性体积变形能量。在弹性区域内，

$$W = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2V(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]$$

$$W_v = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2$$

$$W_s = W - W_v$$

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

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \xi W_s \quad (5)$$

式中 E ——材料弹性模量；

ν ——材料泊桑比；

ξ ——常数。

将式(5)与式(2)比较，可以看出：当 W_s 达到一定值时，材料即开始屈服，进入塑性状态。对于钢管混凝土试件，在受力过程中，弹性变形能量达到一定值时，认为钢管即开始屈服，进入塑性状态。

3. 在图2中，当钢管以纵向应力（单向应力）方式达到a点屈服时，可以把Oa直线段看作弹性变形能量的一定值（即单位1），同样，当钢管以环向应力（单向应力）方式达到b点屈服时，可以把ob直线段看作弹性变形能量的一定值（即单位1），其加载路线必然沿oa及ob直线进行。那么，钢管在双向应力状态的理想情况下，加载路线必然沿一条长度为单位1的光滑曲线达到C点而屈服。可以把许多不同试件的加载路线看成是一组长度均为单位1的近似悬链的线，如图3所示。

4. 通过能量理论，对钢管混凝土试件加载路线的分析，似乎可以得出如下的结论：即一组不同的钢管混凝土试件，只要它们的加载路线能够依次地由单向纵压应力，经过双向应力过渡到单向环拉应力按顺序排列，则在由a到b的屈服轨迹线上，必然有一系列的相应的屈服点c与其加载路线一一对应，亦即一系列的按顺序排列的屈服点c，与其不同的钢管混凝土试件一一对应。

五、钢管混凝土柱按Mises条件计算屈服应力

1. 由试验测得的钢管混凝土试件钢管表面纵向应变 ϵ_L 和横向应变 ϵ_n ，计算出钢管的纵向屈服应力 σ_L 及环向屈服应力 σ_n 。

(1). 假定钢管是理想的弹塑性材料；纵向应力 σ_L 和环向应力 σ_n 沿钢管壁厚方向是均匀分布的；所测得的钢管纵向和横向应变是钢管表面的，其相应的径向应力 $\sigma_r = 0$ （但径向应变 $\epsilon_r \neq 0$ ）；以及钢管进入塑性状态后，材料单元体的体积大小不再改变。

(2). 钢管壁厚方向的径向应变 ϵ_r 。钢材进入塑性状态前，由广义虎克定律可得：

$$\epsilon_r = -\frac{\nu}{1-\nu} (\epsilon_L + \epsilon_n)$$

(3). 弹性阶段钢管的纵向应力 σ_L 及环向应力 σ_n ，由广义虎克定律可得：

$$\sigma_L = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_L + \nu\epsilon_n) \quad (7)$$

$$\sigma_n = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_n + \nu\epsilon_L) \quad (8)$$

(4) 塑性阶段的纵向应变 ϵ_L^p 、环向应变 ϵ_n^p 及径向应变 ϵ_r^p ,

$$\epsilon_L^p = \epsilon_L - \epsilon_L^*, \quad \epsilon_n^p = \epsilon_n - \epsilon_n^* \quad (9)$$

式中 ϵ_L 及 ϵ_n 为总应变, ϵ_L^* 及 ϵ_n^* 为弹性应变(见图4)。

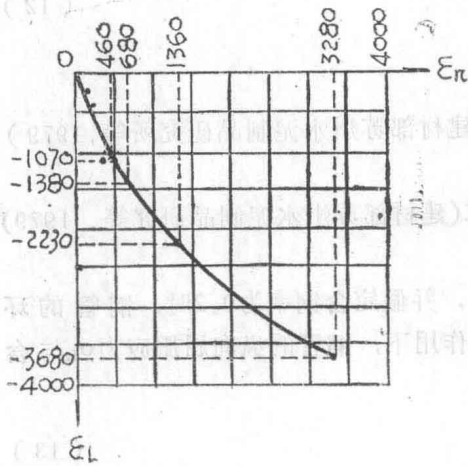


图4 纵向应变 ϵ_L 与环向应变的 ϵ_n 关系

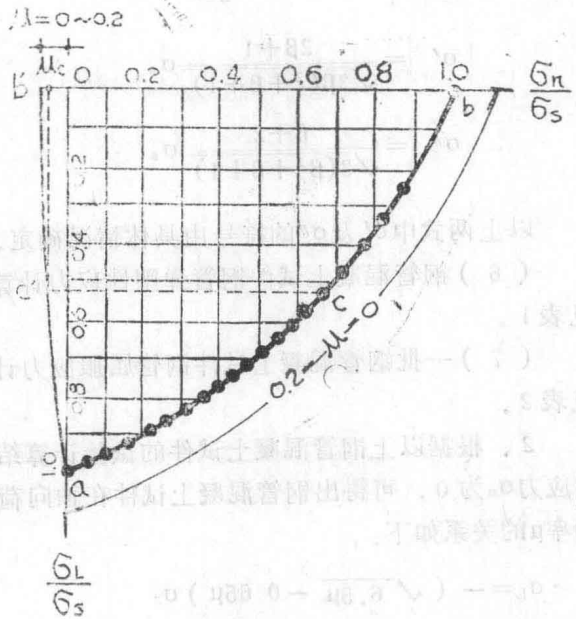


图5 含钢率与屈服点的关系

图4中*号表示弹性阶段最后一个理想的应变点。

$$\text{此时 } \epsilon_r^p = -(\epsilon_L^p + \epsilon_n^p) \quad (10)$$

(5) 塑性阶段钢管的纵向应力 σ_L 及环向应力 σ_n 。

根据塑性形变理论的物理方程:

$$\frac{\sigma_n - \sigma_r}{\sigma_L - \sigma_r} = \frac{\epsilon_n^p - \epsilon_r^p}{\epsilon_L^p - \epsilon_r^p}$$

$$\text{当 } \sigma_r = 0 \text{ 时, 则 } \frac{\sigma_n}{\sigma_L} = \frac{\epsilon_n^p - \epsilon_r^p}{\epsilon_L^p - \epsilon_r^p}$$

$$\text{令 } \frac{\epsilon_n^p}{\epsilon_L^p} = \beta, \text{ 则 } \frac{\sigma_n}{\sigma_L} = \frac{2\beta + 1}{\beta + 2}$$

并由Mises屈服条件式(4)可得: (崎野健治等, 1985)

$$\sigma_L = \frac{\beta + 2}{\sqrt{3(\beta^2 + \beta + 1)}} \sigma_s \quad (10)$$

$$\sigma_n = \frac{2\beta + 1}{\sqrt{3(\beta^2 + \beta + 1)}} \sigma_s \quad (11)$$

在任何情况下, 以上两公式可归纳为:

$$\text{由 } \left| \frac{\varepsilon_{p'}}{\varepsilon_{p''}} \right| < 1, \quad \frac{\varepsilon_{p'}}{\varepsilon_{p''}} = \beta$$

$$\left| \sigma' \right| = \frac{2\beta + 1}{\sqrt{3\beta(\beta^2 + \beta + 1)}} \sigma_s \quad (11)$$

$$\left| \sigma'' \right| = \frac{\beta + 2}{\sqrt{3(\beta^2 + \beta + 1)}} \sigma_s \quad (12)$$

以上两式中 σ' 及 σ'' 的符号由具体情况确定。

(6) 钢管混凝土试件钢管弹塑性应力计算(建材部苏州水泥制品研究所等, 1979) 见表1。

(7) 一批钢管混凝土试件钢管屈服应力计算(建材部苏州水泥制品研究等, 1979) 见表2。

2、根据以上钢管混凝土试件的试验计算结果, 并假定含钢率为0.2时, 钢管的环向应力 σ_n 为0, 可得出钢管混凝土试件在轴向荷载作用下, 钢管的纵向屈服应力 σ_L 与含钢率 μ 的关系如下:

$$\sigma_L = -(\sqrt{6.5\mu} - 0.65\mu) \sigma_s \quad (13)$$

由式(4)可得钢管的环向屈服应力:

$$\sigma_n = 0.5 \left[\sqrt{4 - 3 \left(\frac{\sigma_L}{\sigma_s} \right)^2} + \frac{\sigma_L}{\sigma_s} \right] \sigma_s \quad (14)$$

式(13)是由方程:

$$\left[\left(10 \frac{\sigma_L}{\sigma_s} \right) + 6.5\mu \right]^2 + \left[(1 - 5\mu) + 64 \right]^2 = 65^2 \quad (15)$$

得出的。详见图5。图中曲线 ab' 是以 oa 及 ob' 为座标, 由式(15)求得的弧线的一部分。 ob' 为含钢率 μ 轴, 由任意一个含钢率 μ^c 值处作垂线交 ab' 弧线与 C' , 再由 C' 作水平线交屈服轨迹线 ab 于 c , c 点即为含钢率为 μ^c 的钢管混凝土试件在纵向荷载作用下钢管的屈服点。此时, 相应的 σ_L^c 即为钢管纵向屈服应力, σ_n^c 即为钢管环向屈服应力。

将用式(13)对表2中所列各试件进行计算, 求得的屈服应力 σ_L 与 σ_s 的比值, 再用式(14)求得的屈服应力 σ_n 与 σ_s 的比值亦列于表2中。

表 1 钢管混凝土试件钢管弹塑性应力计算表

钢管混凝土试件钢管弹塑性应力计算表		表 1							
序号	项 目	测 试 、 计 算 过 程							
1	试 件	φ210×2.5×840mm钢管混凝土柱							
2	R	336kg/cm ²							
3	σ _s	2420kg/cm ²							
4	E	2.1×10 ⁶ kg/cm ²							
5	V	0.283							
6	μ	0.048							
7	外加纵向荷载(吨)	60	75	90	105	120	135	150	165
8	实测纵向应变ε _L	-340	-450	-610	-810	-1070	-1380	-2230	-3680
9	实测环向应变ε _n	170	220	255	310	420	680	1360	3280
10	弹性: E/(1-V ²)	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28		
11	" ε _L +Vε _n	-292	-388	-538	-722	-951	-1178		
12	" ε _n +Vε _L	73	92	82	80	116	288		
13	" σ _L =(10)×(11)	-666	-885	-1227	-1646	-2168	-2706		
14	" σ _n =(10)×(12)	166	210	187	182	264	657		
15	检验 σ _i				弹性区←	2311	3087	→塑性区	
16	弹性 ε _L [*]					-1070			
17	" ε _n [*]					460			
18	塑性 β						-0.710	-0.776	-0.926
19	屈服 σ _L						-2023	-1882	-1233
20	" σ _n						659	849	1555

注：检验σ_i是根据Mises屈服条件进行的。

$$\mu = \frac{Ag}{A} \approx \frac{2t}{r}$$

式中Ag为钢管截面积，A为全面积，t为钢管厚度，r为钢管外半径。

H.K.Sen通过对钢管混凝土试件中钢管的纵向和环向变形的实测，并假定钢管完全符合弹塑性的Mises屈服条件，求出了极限承载时（不管钢管壁厚）钢管的纵压应力σ_L=0.75 s及环拉应力σ_n=0.38 s。（富井政英等，1975）。这相当于图5中所表示的含钢率为0.1时钢管的屈服应力。

钢管混凝土试件钢管屈服应力计算表

表 2

试 件 m m	含 钢 率 μ	屈 服 应 力 / σ_s		* 屈 服 应 力 / σ_s	
		σ_L / σ_s	σ_n / σ_s	σ_L / σ_s	σ_n / σ_s
φ160×2.5×960	0.063	-0.61	0.55	-0.60	0.56
φ140×2.5×840	0.071	-0.79	0.27	-0.63	0.53
φ104×2×524	0.074	-0.67	0.52	-0.65	0.51
φ140×3×840	0.086	-0.75	0.28	-0.69	0.46
φ105×2.5×530	0.095	-0.77	0.36	-0.72	0.42
φ100×2.5×600	0.100	-0.86	0.29	-0.74	0.40
φ106×3×536	0.113	-0.71	0.44	-0.78	0.35
φ100×3×600	0.120	-0.85	0.27	-0.81	0.31
φ107×3.5×542	0.131	-0.95	0.15	-0.84	0.27
φ140×5×840	0.143	-0.88	0.22	-0.87	0.23
φ140×5×840	0.143	-0.88	0.23	-0.87	0.23
φ108×4×342	0.148	-0.68	0.48	-0.88	0.21
φ108×4×540	0.148	-0.78	0.33	-0.88	0.21
φ108×4×756	0.148	-0.80	0.35	-0.88	0.21
φ108×4×972	0.148	-0.87	0.24	-0.88	0.21
φ108×4×1404	0.148	-0.91	0.16	-0.88	0.21
φ108×4×1620	0.148	-0.79	0.02	-0.88	0.21
φ107×4×542	0.150	-0.87	0.22	-0.89	0.20
φ108×4.5×548	0.167	-0.87	0.18	-0.93	0.13
φ108×5×548	0.185	-0.95	0.09	-0.98	0.05
φ100×5×840	0.200	-0.93	0.18	-1.00	0.00
φ100×5×840	0.200	-0.93	0.15	-1.00	0.00

注：表中屈服应力为实测应变计算所得。

表中*屈服应力为按式(13)、(14)计算所得。

六、核心混凝土的强度

由于钢管混凝土的钢管环向应力 σ_n 产生的紧箍作用，使得核心混凝土处在三向受压状态之下，根据国内外大量的试验研究，得出如下公式：

$$R_h = R_{h_0} + \frac{1}{2} k \mu \sigma_n \quad (16)$$

式中 R_h ——核心混凝土抗压强度；

R_{h_0} ——混凝土在无侧压时的抗压强度；

μ ——钢管混凝土的含钢率；

k ——由试验确定的侧压系数，近似地取 $k = 4$ 。

式 (16) 改写为：

$$R_h = R_{h_0} + 2\mu\sigma_n \quad (17)$$

七、钢管混凝土轴心受压短柱的极限承载力

根据钢管混凝土受力状态的分析，以钢管受力状态为标志的弹性工作阶段，钢管混凝土尚未充分发挥其承载力。而在塑流工作阶段，钢管混凝土产生了较大的变形。因之，取弹塑性工作阶段，钢管处于弹性工作阶段后期，开始进入塑性工作状态，即达到屈服时的荷载，作为钢管混凝土的极限荷载。

由前面分析得到的式 (13)、(14) 及 (17) 可写出钢管混凝土轴压短柱的极限承载力公式：

$$N = R_{h_0}A_h + 2(1-\mu)\sigma_n Ag + \sigma_L Ag \quad (18)$$

式中 A_h ——核心混凝土的截面积；

Ag ——钢管的截面积。

在图 5 中，当某一钢管混凝土轴压短柱，在纵向荷载作用下，于 a 点屈服时，其极限承载力为：

$$N^a = R_{h_0}^a A_h + \sigma_s Ag \quad (19)$$

于 b 点屈服时，其极限承载力为：

$$N^b = R_{h_0}^b A_h + 2\sigma_s Ag \quad (20)$$

将式 (18) ~ (20) 用图表示如下：

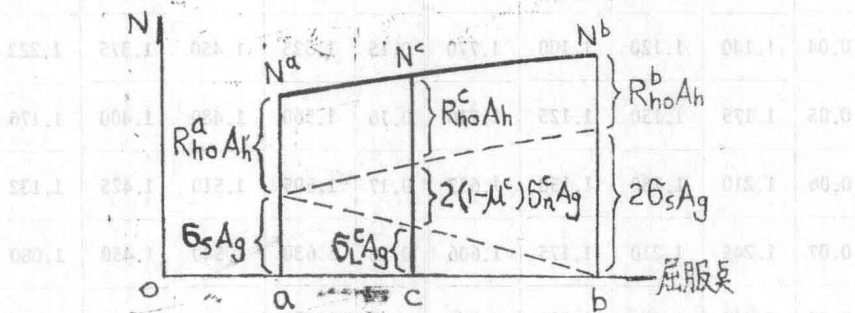


图 6 承载力与屈服点的关系

由大量试验资料 (E. I. Belenya, 1985)，并认为 R_{h_0} 与含钢率 μ 按比例由 $R_{h_0}^b$ 增至 $R_{h_0}^a$ ，则得：

$$R_{h_0} = \alpha R_a \quad (21)$$

式中 R_a —混凝土轴心抗压设计强度；

$$\alpha = \begin{cases} (1+3.5\mu) & \text{—— 250号混凝土} \\ (1+3.0\mu) & \text{—— 300号混凝土} \\ (1+2.5\mu) & \text{—— 400号混凝土} \end{cases} \quad (22)$$

$$\text{并令 } \beta = 2(1-\mu) \frac{\sigma_n}{\sigma_s} + \frac{\sigma_L}{\sigma_s} \quad (23)$$

将式 (21) ~ (23) 代入式 (18) 得：

$$N = \alpha R_a A_h + \beta \sigma_s A_g \quad (24)$$

考虑安全系数 $K = 1.55 \times 1.05 = 1.63$ ，并将 σ_s 改写为 R_g ，则钢管混凝土轴压短柱的计算承载力为：

$$KN = \alpha R_a A_h + \beta R_g A_g \quad (25)$$

式中 R_g —钢材抗压设计强度；

α 、 β 列于表 3 中。

α 、 β 系数表

表 3

μ	α			β	μ	α			β
	R=250	300	400			250	300	400	
0.00	1.000	1.000	1.000	2.000	0.11	1.385	1.330	1.275	1.415
0.01	1.035	1.030	1.025	1.941	0.12	1.420	1.360	1.300	1.359
0.02	1.070	1.060	1.050	1.877	0.13	1.455	1.390	1.325	1.322
0.03	1.105	1.090	1.075	1.819	0.14	1.490	1.420	1.350	1.276
0.04	1.140	1.120	1.100	1.770	0.15	1.525	1.450	1.375	1.222
0.05	1.175	1.150	1.125	1.716	0.16	1.560	1.480	1.400	1.176
0.06	1.210	1.180	1.150	1.657	0.17	1.595	1.510	1.425	1.132
0.07	1.245	1.210	1.175	1.606	0.18	1.630	1.540	1.450	1.080
0.08	1.280	1.240	1.200	1.552	0.19	1.665	1.570	1.475	1.037
0.09	1.315	1.270	1.225	1.507	0.20	1.700	1.600	1.500	1.000
0.10	1.350	1.300	1.250	1.461					

八、结 语

本文是在有关的参考文献及大量试验资料的基础上,根据钢管和核心混凝土相互作用的机理,运用Mises屈服条件,并考虑到单向纵压屈服及单向环拉屈服的边界条件,求得了钢管混凝土轴压短柱的承载力公式,它反映了钢管混凝土轴压短柱在各种不同含钢率情况下的受力状态,满足了具体工程设计的需要。

参考文献

1. 富井政英等 (1975), 关于钢管混凝土结构研究的现状, 钢管混凝土结构译文选编(一), 苏州水泥研究所, 第8—15页。
2. 建材部苏州水泥研究所等, (1979) 钢管混凝土基本力学性能, 第9—14页。
3. 蔡绍怀、焦占柱 (1984), 钢管混凝土短柱的基本性能和强度计算, 建筑结构学报, 1984年第6期, 第13—27页。
4. 钟善桐主编 (1984), 钢管混凝土结构设计与施工(修订本), 哈尔滨建筑工程学院科研处。
5. E. I. Belenya (1985), 苏联对钢管混凝土结构的研究, 钢管混凝土结构国际会议论文编译, 第九设计研究院, 第12—14页。

—6. 崎野健治等 (1985), 钢管混凝土短柱的轴向承载力, 钢管混凝土结构国际会议论文编译, 第九设计研究院, 第37—45页。

试件编号	管径 (mm)	管壁厚度 (mm)	混凝土强度 (MPa)	屈服应力 (MPa)	抗压强度 (MPa)	轴心抗压强度 (MPa)	含钢率 (%)	破坏形态
1-1	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-2	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-3	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-4	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-5	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-6	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-7	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-8	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-9	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-10	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-11	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-12	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-13	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-14	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-15	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-16	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-17	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-18	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-19	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-20	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-21	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-22	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-23	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-24	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-25	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-26	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-27	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-28	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-29	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-30	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-31	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-32	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-33	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服
1-34	330	10	37.0	37.0	42.0	42.0	1.1	管壁屈服

... 参考文献 ... 钢管混凝土轴压短柱的承载力 ...