

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201808002



# 双圆夹层钢管混凝土的 组合弹性模量理论

熊平<sup>1,2</sup>, 王升<sup>1,2,3</sup>, 文桃<sup>1,2</sup>

- (1. 长江师范学院 土木建筑工程学院, 重庆 涪陵 408100;  
2. 长江师范学院 建筑物全生命周期健康检测与灾害防治工程研究中心, 重庆 涪陵 408100;  
3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 采用厚壁圆筒空间轴对称弹性力学方法,考虑钢管与混凝土受力后的变形协调关系,建立夹层钢管混凝土的组合弹性模量计算模型;然后,计算分析和讨论含钢率、混凝土强度等级、泊松比等对夹层钢管混凝土组合模量的影响,并得到夹层钢管混凝土等组合模量曲线。研究表明:夹层钢管混凝土组合模量随着总含钢率的增加不断增大,当总含钢率不变时,与内外含钢率无关;随着钢管和混凝土的泊松比、混凝土强度等级以及混凝土和钢管弹性模量的增大,组合模量不断增大;夹层钢管混凝土与普通钢管混凝土对混凝土的紧箍效应基本相同。

**关键词:** 组合弹性模量; 钢管混凝土; 夹层钢管混凝土; 双圆夹层; 厚壁圆筒

**中图分类号:** TU 398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)01-0048-08

## Theoretical Study on Composite Elastic Modulus of Concrete Filled Double Skin Tubes

XIONG Ping<sup>1,2</sup>, WANG Sheng<sup>1,2,3</sup>, WEN Tao<sup>1,2</sup>

- (1. School of Civil and Architectural Engineering, Yangtze Normal University, Fuling 408100, China;  
2. Engineering Research Center for Health Monitoring in Building Life Cycle and Disaster Prevention,  
Yangtze Normal University, Fuling 408100, China;  
3. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Adopting the spatial axisymmetric elastic mechanics method of thick-walled cylinder, and considering the deformation coordination relationship between steel tube and concrete, the calculation model of composite elastic modulus of concrete filled double skin tubes is established. The influences of steel ratio, concrete strength grade and Poisson's ratio on the composite elastic modulus of concrete filled double skin tubes are discussed. The equal composite modulus curve of the concrete filled double skin tubes is obtained. It's shown that the composite modulus of concrete filled double skin tubes increases with the increase of the total steel ratio. When the total steel ratio is constant, the composite modulus of concrete filled double skin tubes is independent of the inside and outside steel ratio. The composite modulus increases with the increase of the Poisson's ratio

**收稿日期:** 2018-08-01

**通信作者:** 王升(1989-),男,讲师,博士研究生,主要从事地质灾害预测预警及控制方法的研究. E-mail:137189258@qq.com.

**基金项目:** 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1712304, KJ1601217); 国家重点研发计划项目(2016YFC0801604, 2016YFC0801607); 长江师范学院校级科研基金资助项目(2016XJQN13)

and the elastic modulus of the steel pipe and concrete, the concrete strength grade. The confinement effect of the concrete filled double skin tubes is similar to the effect of the ordinary concrete-filled steel tube.

**Keywords:** composite elastic modulus; concrete filled steel tubes; concrete filled double skin tubes; double skin; thick-walled cylinder

钢管混凝土是在钢管中填充混凝土而得到的,由于其具有节省材料、施工进度快、抗震性能好等优点,已经被广泛应用于实际工程中<sup>[1]</sup>,钢管混凝土组合构件也得到了大量的研究<sup>[2-5]</sup>.研究者对普通钢管混凝土长、短柱的轴压,偏压及抗震性能进行了研究,发现由于钢管与混凝土之间的约束作用,钢管混凝土的承载力及变形性能明显优于其他传统的结构构件,并且能够克服高强混凝土脆性大的缺点<sup>[6-8]</sup>.钢管混凝土构件多用作轴压和小偏压构件,在大偏压作用下,混凝土三向受压的优越性得不到体现<sup>[9-11]</sup>.当钢管混凝土构件的长细比或荷载偏心率较大时,其承载力将由截面的抗弯刚度进行控制,而截面靠近形心部位的材料并不能提供太多的抗弯刚度,因此,可以去掉这一部分材料.于是,出现了一种双圆夹层钢管混凝土的截面形式<sup>[12-14]</sup>.双圆夹层钢管混凝土(以下简称夹层钢管混凝土)组合弹性模量对研究轴压刚度和抗弯刚度是不可或缺的一个参数,因此,对夹层钢管混凝土合弹性模量的研究很重要.本文采用厚壁圆筒空间轴对称弹性力学方法,考虑钢管与混凝土受力后的变形协调关系,建立夹层钢管混凝土合弹性模量的计算模型,并计算分析和讨论含钢率、混凝土强度等级、泊松比等对夹层钢管混凝土的组合模量的影响.

# 1 夹层钢管混凝土理论模型

## 1.1 厚壁圆筒空间轴对称弹性力学问题基本方程

对于空间轴对称的弹性力学问题,在小变形情况下,取其对称轴  $z$  轴建立柱坐标系.由经典弹性力学可知,其径向和轴向的平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{z,r}}{\partial r} \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + f_r &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{r,z}}{\partial r} \frac{\tau_{r,z}}{r} + f_z &= 0. \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式(1)中: $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{z,r}$ 为柱坐标系下的应力分量; $f_r, f_z$ 分别为径向和轴向的体积力.

在柱坐标系下,其几何方程为

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \epsilon_r = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad r_{r,z} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}. \tag{2}$$

式(2)中: $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$ 为柱坐标系下的应力分量; $w$ 和 $u$ 分别为轴向位移和径向位移.

将几何方程(2)带入平衡方程(1),可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{E}{2(1+\nu)} \left( \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{\partial \delta}{\partial r} + \nabla^2 u - \frac{u}{r^2} \right) + f_r &= 0, \\ \frac{E}{2(1+\nu)} \left( \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{\partial \delta}{\partial r} + \nabla^2 w \right) + f_r &= 0. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式(3)中: $\delta = \epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z$ ;  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ;  $\nu, E$ 分别为泊松比、杨氏模量,  $E = 2(1+\nu)/G$ , 其中,  $G$ 为剪切模量.

考虑到对称性,在柱坐标系下,应力、应变和位移都只是  $r$  和  $z$  的函数.对于厚壁圆筒(径厚比  $\lambda = r_{\text{out}}/\text{壁厚}$ ),将圆形管件大致分为 3 类:薄壁管件( $\lambda > 20$ )、中厚壁管件( $10 < \lambda < 20$ )、厚壁管件( $\lambda < 10$ )<sup>[15]</sup>,两端和内外壁分别受均布压力作用,其应力和应变分量关于  $z$  的偏导函数应为 0,即轴向独立.引入位移函数<sup>[16-17]</sup>,即  $\xi(r, z) = A_1 z^3 + A_2 z r^2 + A_3 z \ln r$ . 则有

$$\left. \begin{aligned} u &= -\frac{1}{2G} \left( 2A_2 r + \frac{A_3}{r} \right), \\ w &= \frac{1}{G} [3(1-2\nu)A_1 z + 4(1-\nu)A_2 z]. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

将分量带入几何方程可得应变分量,再将应变分量带入物理方程就可得到应力分量.在轴压和内外压作用下,厚壁圆筒力学模型,如图 1 所示.图 1 中: $P_1$  为内压; $P_2$  为内压; $R_i$  为内半径; $R_o$  为外半径厚壁; $q$  为轴向荷载.圆筒的力学模型的边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{c,r} \Big|_{r=R_i} &= P_1, \\ \sigma_{c,r} \Big|_{r=R_o} &= P_2, \\ \sigma_z &= q. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

根据  $A_1, A_2, A_3$  的值,进而求得厚壁圆筒在轴压和内外压作用下的位移和应力,即

$$\left. \begin{aligned} u &= -\frac{r}{E} \left[ \varpi q - (1-\nu) \frac{P_2 r_2^2 - P_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - (1+\nu) \frac{r_2^2 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{P_2 - P_1}{r^2} \right], \\ w &= \frac{z}{E} \left[ q - 2\nu \frac{P_2 r_2^2 - P_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right]. \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{P_2 r_2^2 - P_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_2^2 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{P_2 - P_1}{r^2}, \\ \sigma_z &= q, \\ \sigma_\theta &= \frac{P_2 r_2^2 - P_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_2^2 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{P_2 - P_1}{r^2}. \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

当轴向荷载为 0( $q=0$ ),即为圆环或圆筒受均布压力计算模型,此时,式(7)可以简化为拉梅公式,这与经典的弹性力学理论结果是一致<sup>[18]</sup>.

1.2 夹层钢管混凝土弹性力学模型

对于夹层钢管混凝土,无论是内外钢管还是夹层混凝土都是圆筒,作为一般情况的力学模型,都可以看作轴压和内外压共同作用的厚壁圆筒.对外层钢管可以看成是轴压和内压共同作用的厚壁圆筒,混凝土部分就是轴压和内外压共同作用的厚壁圆筒,内管是由轴压和外压作用的厚壁圆筒.夹层钢管混凝土圆柱隔离体分解,如图 2 所示.图 2 中: $D$  为圆管直径; $t$  为圆管壁厚;下标 o,m,i 分别表示外管、夹层管和内管.

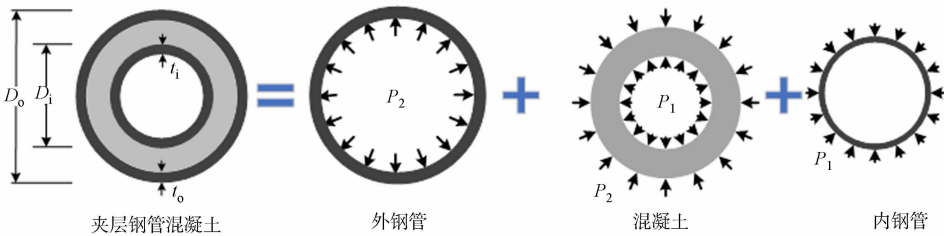


图 2 夹层钢管混凝土圆柱隔离体  
Fig. 2 Cylindrical free body of concrete filled double skin tubes

在小变形条件下,设夹层钢管混凝土端面分布的应力场使混凝土和钢管产生相同的纵向应变,即

$$\epsilon_{o,z} = \epsilon_{m,z} = \epsilon_{i,z} = \epsilon_z. \tag{8}$$

式(8)中: $\epsilon_{o,z}, \epsilon_{m,z}, \epsilon_{i,z}$  分别表示外管、夹层管和内管的轴向应变.

在普通钢管混凝土端部,根据圣文南原理,得到应力边界条件为

$$\sigma_{o,r} \Big|_{r=D_o/2} = 0, \quad \sigma_{i,r} \Big|_{r=D_i/2-t_i} = 0, \quad \sigma_{o,z} A_o + \sigma_{m,z} A_c + \sigma_{i,z} A_i = N. \tag{9}$$

式(9)中: $A_o, A_c, A_i$  分别为外钢管面积、夹层混凝土面积和内钢管面积.

设外管内壁、内管外壁和混凝土之间结合完好,则界面的连续条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{o,r} \Big|_{r=D_o/(2-t_o)} &= \sigma_{m,r} \Big|_{r=D_o/(2-t_o)}, & \sigma_{i,r} \Big|_{r=D_i/2} &= \sigma_{m,r} \Big|_{r=D_i/2}, \\ u_o(r) \Big|_{r=D_o/(2-t_o)} &= u_m(r) \Big|_{r=D_o/(2-t_o)}, \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

$$u_o(r) \mid_{r=D_i/2} = u_m(r) \mid_{r=D_i/2}.$$

(11)

将式(6),(7)带入式(8)~(11)中,就可得到 9 个方程,进而得到可以夹层钢管混凝土所对应的 9 个未知数. 夹层钢管混凝土共有内管、夹层管和 外管 3 个厚壁圆管,每个厚壁圆管只有 3 个未知量. 将每层求得的未知量,带入式(6),(7)中,即可得到相应管层的位移和应力场. 轴压作用下的钢管混凝土的位移、应力和应变场到此均已求得. 钢管混凝土其组合模量为

$$\tilde{E} = N/S\epsilon_z.$$

(12)

式(12)中: $\tilde{E}, N, S$  分别为组合模量、轴向荷载和夹层钢管混凝土的总面积.

## 2 讨论及验证

钢材的弹性模量通常为 206 GPa,泊松比为 0.32,混凝土的弹性模量参考国家标准 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[19]</sup>,混凝土的剪切变形模量  $G_c$  按照相应的弹性模量值的 40%采用,混凝土泊松比为 0.2. 混凝土的弹性模量,如表 1 所示. 表 1 中: $E_c$  为混凝土的弹性模量.

表 1 混凝土的弹性模量

Tab. 1 Elastic modulus of concrete

参数	混凝土强度等级						
	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80
$E_c/\text{GPa}$	25.5	30.0	32.5	34.5	36.0	37.0	38.0

关于夹层钢管混凝土轴压模量,国内外所有设计规范或文献推荐了换算模量,其计算式为

$$\bar{E} = \frac{E_s A_i + E_c A_c + E_s A_o}{A_i + A_c + A_o}.$$

(13)

式(13)中: $A_i, A_o$  分别为内、外钢管面积; $A_c$  为混凝土的面积; $E_s$  为钢管弹性模量. 单纯把钢管和混凝土的刚度叠加,没有考虑钢管和核心混凝土之间的相互作用,夹层钢管混凝土轴压模量(含钢率为 0.1),如表 2 所示.

表 2 夹层钢管混凝土的弹性模量(含钢率为 0.1)

Tab. 2 Elastic modulus of concrete filled double skin tube (steel ratio 0.1)

参数	混凝土强度等级						
	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80
组合模量( $\tilde{E}$ )	41 415.8	45 360.7	47 551.2	49 303.1	50 616.8	51 492.4	52 368.0
换算模量( $\bar{E}$ )	37 916.7	41 666.7	43 750.0	45 416.7	46 666.7	47 500.0	48 333.3
相对误差/%	9.2	8.9	8.7	8.6	8.5	8.4	8.3

众所周知,钢管混凝土构件轴心受压时,钢管和混凝土共同工作,一般情况下混凝土受到钢管的约束,处于 3 向受压应力状态,弹性模量应比单向受压时高. 因此,夹层钢管混凝土的弹性模量略高于夹层钢管混凝土的换算模量,也说明文中提出的计算模型的正确性.

为进一步验证计算模型的正确性,又通过文献中实验数据对计算模型进行验证. 试验夹层钢管混凝土的具体参数,如表 3 所示.

表 3 夹层钢管混凝土设计参数

Tab. 3 Design parameters of concrete filled double skin tube

来源	试件编号	$D_o/\text{mm}$	$t_o/\text{mm}$	$D_i/\text{mm}$	$t_i/\text{mm}$	混凝土强度等级
文献[20-22]	CC-DS-N	165	3.54	60	2.85	C50
文献[23]	SFDSTZ165	165	3.00	40	3.00	C30

试件 CC-DS-N 和 SFDSTZ165 的荷载与应变关系,如图 3,4 所示. 由图 3,4 可知:文中采用厚壁圆筒弹性理论计算结果与试验结果吻合较好. 需要指出的是,文中计算的应力应变场为线弹性阶段. 因此,与试验曲线相比可知,在加载初期的弹性阶段,计算值与试验值完全吻合;在试验后期至破坏阶段,材料由于本身缺陷等因素发生局部破坏进入非线性,计算值与试验值的曲线发生偏离. 由图 3 可知:文中的计算结果不仅轴向荷载应变关系吻合较好,环向试验数据吻合也较好,说明计算模型是正确的.

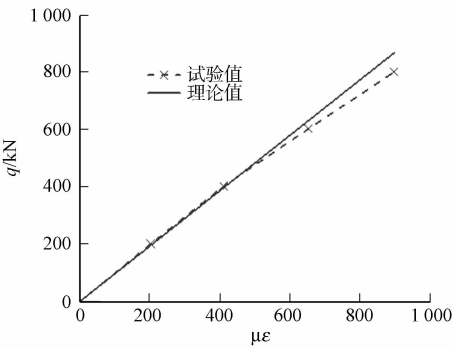


图 3 CC-DS-N 轴向荷载与轴向应变关系  
Fig. 3 Relationship between axial load and axial strain of CC-DS-N

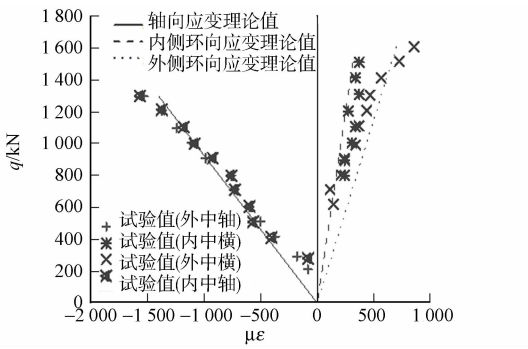


图 4 SFDSTZ165 荷载与应变关系  
Fig. 4 Relationship between load and strain relationship of SFDSTZ165

3 各参数对组合模量的影响

3.1 内外含钢率对组合模量的影响

夹层钢管混凝土与传统的钢管混凝土类似,定义其含钢率 $\alpha=A_s/A_c$ ,其中, $A_s$  为内外钢管的总面积,通常取值为 0.04~0.20.对于夹层钢管混凝土,又有两个独立含钢率内侧含钢率 $\alpha_i=A_i/A_c$ 和外侧含钢率 $\alpha_o=A_o/A_c$ .保持总含钢率为 0.10 不变,对内外含钢率依次变化,得到组合模量与含钢率的关系,如图 5 所示.

由图 5 可知:在总钢率不变的情况下,夹层钢管混凝土合模量与内外侧钢率的变化无关;在总含钢率为 0.10 时,组合模量都在内外含钢率相等时的组合模量附近上下波动,波动幅度在-0.05%~0.30%,变化可以忽略不计,因此,夹层钢管混凝土合模量与钢管的位置基本无关.

3.2 总含钢率对组合模量的影响

对于总含钢率为 0.04~0.20(内外含钢率相同),C20~C80 的混凝土经数值计算,夹层钢管混凝土的组合模量,如表 4 所示.

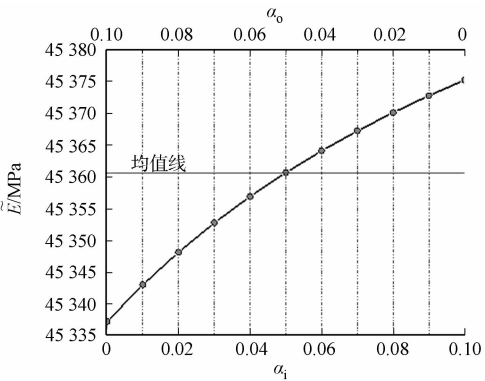


图 5 组合模量与内外侧含钢率的关系  
Fig. 5 Relationship between combined modulus and ratio of inside and outside steel

表 4 夹层钢管混凝土组合模量

参数	总含钢率								
	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
$\tilde{E}(C20)$	31 686.9	35 060.2	38 299.8	41 415.8	44 416.6	47 309.1	50 099.8	52 794.2	55 397.6
$\tilde{E}(C30)$	35 847.1	39 146.2	42 314.1	45 360.7	48 294.1	51 121.3	53 848.6	56 481.5	59 025.3
$\tilde{E}(C40)$	38 157.7	41 415.4	44 543.3	47 551.2	50 447.1	53 237.9	55 930.0	58 528.8	61 039.4
$\tilde{E}(C50)$	40 006.0	43 230.4	46 326.2	49 303.1	52 168.9	54 930.7	57 594.6	60 166.1	62 650.2
$\tilde{E}(C60)$	41 392.2	44 591.5	47 663.2	50 616.8	53 460.1	56 200.0	58 842.8	61 393.8	63 858.0
$\tilde{E}(C70)$	42 316.2	45 498.8	48 554.4	51 492.4	54 320.7	57 046.1	59 674.8	62 212.1	64 663.1
$\tilde{E}(C80)$	43 240.2	46 406.0	49 445.5	52 368.0	55 181.2	57 892.1	60 506.6	63 030.3	65 468.0

夹层钢管混凝土组合模量 $\tilde{E}$ 是介于混凝土弹性模量 $E_c$ 和钢管弹性模量 $E_s$ 之间,即 $E_c<\tilde{E}<E_s$ ,表明钢管对组合材料的总体弹性模量的增强作用.由表 4 可知:随着总含钢率的增大,夹层钢管混凝土的组合模量也逐渐增大;随着混凝土强度的提升,组合模量也增大.

为了进一步研究混凝土强度等级与总含钢率对夹层钢管混凝土合模量的影响,文中进行大量的数值计算,得到夹层钢管混凝土的等组合模量曲线,如图 6 所示.由图 6 可知:A(总含钢率 0.169,混凝土强度等级 C50),B(总含钢率 0.153,混凝土强度等级 C70)两点的组合模量相等,即总含钢率为 0.169,混凝土强度等级为 C50 与总含钢率为 0.153,混凝土强度等级为 C70 的夹层钢管混凝土的组合模量相

当;从左下角到右上角组合模量逐步增大,即随着混凝土强度等级和总含钢率的增加,夹层钢管混凝土的组合模量不断增大.

3.3 混凝土和钢管弹性模量对组合模量的影响

依据表 3,对总含钢率 0.04~0.20,C20~C80 的混凝土计算其组合模量与混凝土弹性模量的比值,以及组合模量与钢管弹性模量的比值,结果如表 5,6 所示.表 5,6 中: $n1$  为组合模量与混凝土的弹性模量之比; $n2$  为组合模量与钢管的弹性模量之比.

由表 5,6 可知: $\hat{E}=(1.138\sim2.172)E_c$ , $\hat{E}=(0.154\sim0.318)E_s$ ,该结果与普通钢管混凝土计算结果基本一致,从组合模量与混凝土性模量的比值来看,由于内外钢管的紧箍作用,使得混凝土的抗压刚度明显增大,最少提高 13.8%,也说明夹层钢管混凝土与普通钢管混凝土对混凝土的紧箍效应基本相同.文献中普通钢管混凝土的计算结果,如表 7 所示.

表 5 组合模量与混凝土的弹性模量之比

Tab. 5 Comparison between composite elastic modulus and concrete elastic modulus

参数	总含钢率								
	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
$n1(C20)$	1.243	1.375	1.502	1.624	1.742	1.855	1.965	2.070	2.172
$n1(C30)$	1.195	1.305	1.410	1.512	1.610	1.704	1.795	1.883	1.968
$n1(C40)$	1.174	1.274	1.371	1.463	1.552	1.638	1.721	1.801	1.878
$n1(C50)$	1.160	1.253	1.343	1.429	1.512	1.592	1.669	1.744	1.816
$n1(C60)$	1.150	1.239	1.324	1.406	1.485	1.561	1.635	1.705	1.774
$n1(C70)$	1.144	1.230	1.312	1.392	1.468	1.542	1.613	1.681	1.748
$n1(C80)$	1.138	1.221	1.301	1.378	1.452	1.523	1.592	1.659	1.723

表 6 组合模量与钢管的弹性模量之比

Tab. 6 Comparison between composite elastic modulus and steel elastic modulus

参数	总含钢率								
	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
$n2(C20)$	0.154	0.170	0.186	0.201	0.216	0.230	0.243	0.256	0.269
$n2(C30)$	0.174	0.190	0.205	0.220	0.234	0.248	0.261	0.274	0.287
$n2(C40)$	0.185	0.201	0.216	0.231	0.245	0.258	0.272	0.284	0.296
$n2(C50)$	0.194	0.210	0.225	0.239	0.253	0.267	0.280	0.292	0.304
$n2(C60)$	0.201	0.216	0.231	0.246	0.260	0.273	0.286	0.298	0.310
$n2(C70)$	0.205	0.221	0.236	0.250	0.264	0.277	0.290	0.302	0.314
$n2(C80)$	0.210	0.225	0.240	0.254	0.268	0.281	0.294	0.306	0.318

表 7 文献中普通钢管混凝土的计算结果

Tab. 7 Calculation results of ordinary steel tube concrete in references

来源	与混凝土弹性模量之比	与钢管弹性模量之比	含钢率范围
文献[24]	$\hat{E}=(1.103\sim2.292)E_c$	$\hat{E}=(0.161\sim0.434)E_s$	0.04~0.20
文献[25]	$\hat{E}=(1.301\sim2.400)E_c$	$\hat{E}=(0.201\sim0.382)E_s$	0.05~0.20
文献[26]	$\hat{E}=(1.170\sim1.978)E_c$	$\hat{E}=(0.179\sim0.320)E_s$	0.04~0.20
文献[27]	$\hat{E}=(1.225\sim2.198)E_c$	$\hat{E}=(0.179\sim0.320)E_s$	0.04~0.20

3.4 钢管和混凝土的泊松比对组合模量的影响

当夹层混凝土为 C40,总含钢率为 0.10(内外含钢率相同)时,由文中理论模型计算夹层钢管混凝土的组合模量随混凝土和钢管泊松比( $\nu_s$ )变化的关系曲线,以及普通钢管混凝土的组合模量随混凝土泊松比( $\nu_c$ )变化的曲线<sup>[28]</sup>,如图 7 所示.

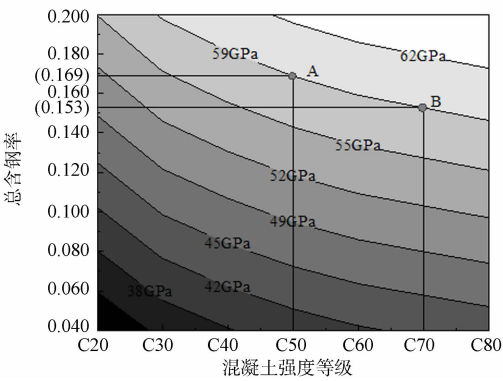


图 6 夹层钢管混凝土的等组合模量线  
Fig. 6 Equal modulus line of concrete filled double skin tube

由图 7 可知:当  $v_c < v_s$  时,普通钢管混凝土出现“负套箍力”;当  $v_c$  增加时,组合模量有所降低;当  $v_c = v_s$  时,此时普通钢管混凝土的组合模量最小,即为钢管轴压刚度与混凝土轴压刚度之和;当  $v_c > v_s$  时,此时由于套箍力的增大,组合模量随着混凝土的泊松比的增大而显著增大,钢管与混凝土的协同工作进一步加强<sup>[28]</sup>. 由于夹层混凝土内外都有钢管作用,无论钢管和混凝土的泊松比如何变化,始终存在套箍力,而套箍力随着泊松比的增大逐步增大,对夹层混凝土约束效果更好. 因此,夹层钢管混凝土的组合模量随着钢管和混凝土泊松比的增大,其组合模量不断增大,但钢管和混凝土泊松比的变化对夹层钢管混凝土没有类似“负套箍力”的现象.

4 结论

- 1) 基于厚壁圆筒弹性力学理论,得到夹层钢管混凝土应力、应变、组合模量的理论计算模型,并结合试验数据验证文中理论模型的正确性. 这一理论模型为进一步研究夹层钢管混凝土的弹塑性稳定及疲劳问题提供理论依据.
- 2) 在总含钢率不变的情况下,夹层钢管混凝土组合模量不随内外侧含钢率的变化而变化;而夹层钢管混凝土组合模量随着混凝土强度等级的提高而增大,随着总含钢率的增大而增大. 等组合模量曲线为夹层钢管混凝土的等模量替换设计提供依据.
- 3) 夹层钢管混凝土组合模量随着混凝土和钢管弹性模量的增加而不断增大. 与普通钢管混凝土进行对比,发现夹层钢管混凝土与普通钢管混凝土对混凝土的紧箍效应基本相同.
- 4) 夹层钢管混凝土组合模量随着钢管和混凝土泊松比的增大不断增大,且不会因为泊松比的变化出现“负套箍力”.

参考文献:

[1] 裴万吉,赵均海,魏雪英. 钢管混凝土的截面形式及其承载力分析[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(1):49-53. DOI:10.3321/j.issn:1673-2049.2006.01.009.

[2] 赵强. 方钢管再生混凝土界面粘结性能试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2016,37(1):115-119. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2016.01.0115.

[3] 梁扬滨,曾志兴,苏江林,等. 钢板笼约束混凝土短柱轴压承载力分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2014,35(5):576-580. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0576.

[4] 关萍,陈兰响,刘晴晴. 钢管-钢管高强混凝土偏心受压柱非线性分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2015,36(3):332-337. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.03.0332.

[5] 丁楠,罗漪,欧婷茹,等. 火灾后外包薄壁钢管加固钢筋混凝土轴压柱力学性能的数值模拟[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2017,38(2):158-163. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201702005.

[6] HU H, HUANG C, WU M, *et al.* Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect[J]. Journal of Structural Engineering, 2003(10):1322-1329. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1322).

[7] SAKINO K, NAKAHARA H, MORINO S, *et al.* Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004,130(2):180-188. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(180).

[8] FAM A, QIE F S, RIZKALLA S. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression and lateral cyclic loads [J]. Journal of Structural Engineering, 2004,130(4):631-640. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:4(631).

[9] 黄宏. 中空夹层钢管混凝土压弯构件的力学性能研究[D]. 福州:福州大学,2006.

[10] 聂建国,秦凯,张桂标. 方钢管混凝土柱内隔板式节点的抗弯承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(1):

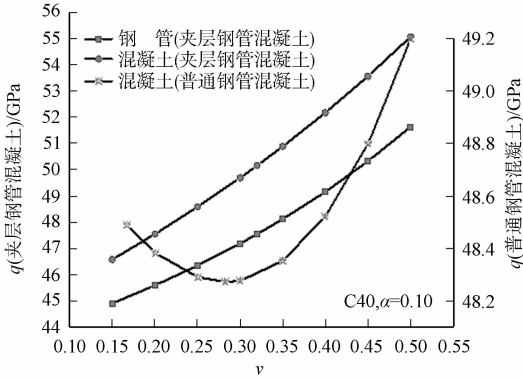


图 7 组合模量与泊松比的关系  
Fig. 7 Relationship between combined modulus and Poisson's ratio



- 42-49. DOI:10.3321/j.issn:1673-2049.2005.01.006.
- [11] 韩林海. 钢管高强混凝土压弯构件力学性能研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1997,30(5):24-30.
- [12] WEI S, MAU S T, VIPULANANDAN C, *et al.* Performance of new sandwich tube under axial loading: Experiment[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(12):1806-1814. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:12(1806).
- [13] WEI S, MAU S T, VIPULANANDAN C, *et al.* Performance of new sandwich tube under axial loading: Analysis[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(12):1815-1821. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:12(1815).
- [14] 黄宏. 方中空夹层钢管轴压力学性能的理论分析[J]. 华东交通大学学报,2003,20(2):19-21. DOI:10.3969/j.issn.1005-0523.2003.02.006.
- [15] 张恒铭, 李峰, 潘大荣. 基于三维梁理论的复合材料层合管等效抗弯刚度[J]. 复合材料学报,2016,33(8):1694-1701. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20151029.001.
- [16] 王怀忠. 轴向压力作用下空心钢管混凝土桩体空间轴对称问题解析解[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊2):763-767.
- [17] 梁亚平, 王惠珍, 任兴民. 两端均布、轴向线性分布压力作用下厚壁圆筒空间轴对称问题的解析解[J]. 中国科学(G辑:物理学 力学 天文学),2007,37(5):684-688. DOI:10.3969/j.issn.1674-7275.2007.05.014.
- [18] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京:高等教育出版社,2002:63-64.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [20] 黄宏, 陶忠, 韩林海. 圆中空夹层钢管混凝土柱轴压工作机理研究[J]. 工业建筑,2006,36(11):11-14. DOI:10.3321/j.issn:1000-8993.2006.11.003.
- [21] 黄宏, 朱彦奇, 郭晓宇, 等. 不同材料内管的圆中空夹层钢管混凝土构件轴压性能研究[J]. 建筑钢结构进展,2018,20(1):64-72. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2018.01.008.
- [22] 黄宏, 郭晓宇, 陈梦成, 等. 圆钢管混凝土轴压短柱对比试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2015,40(4):806-814. DOI:10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2015.0806.
- [23] 苏昊天, 韩风霞, 郭立伟, 等. 基于空心率变化的圆中空夹层钢管自密实混凝土短柱轴压试验研究[J]. 混凝土,2018(2):13-15. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2018.02.004.
- [24] 钟善桐. 钢管混凝土刚度的分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1999,32(3):13-18.
- [25] 康希良, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 钢管混凝土柱组合轴压刚度的理论分析[J]. 工程力学,2007,24(1):101-105. DOI:10.3969/j.issn.1000-4750.2007.01.017.
- [26] 康希良, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 钢管混凝土套箍机理及组合弹性模量的理论分析[J]. 工程力学,2007,24(11):121-125. DOI:10.3969/j.issn.1000-4750.2007.11.021.
- [27] 陈梦成, 李骐. 钢管混凝土柱组合弹性模量及轴向压力分配弹性力学分析[J]. 华东交通大学学报,2016,33(4):24-30. DOI:10.3969/j.issn.1005-0523.2016.04.004.
- [28] 康希良, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 钢管混凝土套箍机理及组合弹性模量的理论分析[J]. 工程力学,2007,24(11):121-125. DOI:10.3969/j.issn.1000-4750.2007.11.021.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)