

文章编号:1673-2049(2008)04-0078-05

外方内圆中空夹层钢管混凝土 轴压短柱的极限承载力

张常光^{1,2}, 赵均海³, 魏雪英³, 贾 萍⁴

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与
工程系, 上海 200092; 3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061;
4. 新疆建筑设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:在厚壁圆筒统一强度理论解的基础上,根据外方内圆中空夹层钢管混凝土的特点,通过引入混凝土强度折减系数和等效约束折减系数,将外方内圆中空夹层钢管混凝土等效为外圆内圆中空夹层钢管混凝土,推导了外方内圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限承载力公式,并将该公式的计算结果与文献试验结果进行了比较。结果表明:该理论公式是正确可行的,该结果为外方内圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限承载力分析提供了理论依据,对工程设计有一定的参考价值。

关键词:中空夹层钢管混凝土;统一强度理论;等效约束;极限承载力

中图分类号:TU312

文献标志码:A

Ultimate Bearing Capacity of CHS Inner and SHS Outer Concrete-filled Double Skin Tubes Stub Columns

ZHANG Chang-guang^{1,2}, ZHAO Jun-hai³, WEI Xue-ying³, JIA Ping⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 4. Xinjiang Architectural Design and Research Group, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Based on unified strength theory solution of thickness cylinder, according to the characteristics and equivalent restriction reduction factor of concrete, circle hollow section (CHS) inner and square hollow section (SHS) outer concrete-filled double skin tubes were equivalent to CHS inner and CHS outer concrete-filled double skin tubes through introducing concrete strength reduction factor. Ultimate bearing capacity formulae were deduced and the comparisons between the calculation results and experiment results were carried out. The results show that the theory formulae are correct and viable. The results offer the theoretical foundation to the research of CHS inner and SHS outer concrete-filled double skin tubes stub columns and provide references for the engineering design.

Key words: concrete-filled double skin tubes; unified strength theory; equivalent restriction; ultimate bearing capacity

收稿日期:2008-07-09

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040710001);陕西省自然科学基金研究计划项目(2005E204)

作者简介:张常光(1982-),男,山东菏泽人,工学博士研究生,E-mail:zcg1016@163.com。

0 引言

根据钢管混凝土的特点,钢管混凝土最适宜做轴心受压和小偏心受压构件。但随着钢管混凝土的不断发展和应用,当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控制,而靠近截面形心部位的材料并不能提供太多的抗弯刚度^[1],因此可以去掉这一部分材料,于是出现了中空夹层钢管混凝土。与实心钢管混凝土相比^[2],中空夹层钢管混凝土具有截面开展、抗弯刚度大、自重轻和防火性能好等特点,具有很好的工程应用前景。对于一些大中型旅馆、体育馆等承载能力要求高和构件高大的建筑,采用中空夹层钢管混凝土结构柱可以增加有效空间、改善建筑功能、使主体结构轻型化。尤其是对于高大的桥墩,稳定要求的外径很大,强度却早已有太多的富余,为了节省材料,常采用中空夹层钢管混凝土柱。近10年来,各国学者对中空夹层钢管混凝土开展了一些研究工作,如文献[2]~[7]中研究了外圆内圆中空夹层(简称圆中空夹层)钢管混凝土轴压短柱的力学性能,文献[3]、[8]中研究了外方内圆、外方内方中空夹层(简称方中空夹层)钢管混凝土轴压短柱的力学性能等。与圆中空夹层钢管混凝土相比,方中空夹层钢管混凝土具有节点构造简单、连接方便、抗弯性能好等优点。笔者在厚壁圆筒统一强度理论解的基础上,引入混凝土强度折减系数^[9]和等效约束折减系数^[10],将方中空夹层钢管混凝土等效为圆中空夹层钢管混凝土,进而推导出方中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限承载力公式,并分析了参数对极限承载力的影响。

1 统一强度理论

1991年俞茂宏在双剪强度理论的基础上,建立了一种全新的考虑中间主应力 σ_2 影响的统一强度理论。该理论用一个统一的力学模型,能十分灵活地适用于各种不同特性的材料,其数学表达式为^[11]

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

$$F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_c, \quad \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (2)$$

式中: σ_t 、 σ_c 、 τ_s 分别为材料的拉伸、压缩和剪切极限强度; α 为材料的拉压比, $\alpha = \sigma_t/\sigma_c$,对于韧性金属材料, α 一般为0.77~1.00,对于脆性金属材料, α 为0.33~0.77,对于岩土类材料, α 一般小于0.5; b 为在统一强度理论中引进的一个反映中间主剪应力以

及相应面上的正应力对材料破坏影响程度的材料强度参数, $0 \leq b \leq 1$, $b = [(1+\alpha)\tau_s - \sigma_t]/(\sigma_t - \tau_s)$; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、二、三主应力。

2 极限承载力分析

2.1 钢管和核心混凝土的相互作用

内外钢管和核心混凝土之间存在着相互作用,由于这种作用的不确定性,使核心混凝土的工作性能进一步复杂化。文献[4]、[5]中对圆中空夹层钢管混凝土进行了试验及理论分析后认为:①在加荷初期,混凝土与内钢管之间就存在压力,这种压力延缓了内钢管的屈曲;②随着荷载的增加,这种压力不断降低,直至可以忽略不计;③在外钢管屈服之前,外钢管对混凝土的约束可以忽略不计;④在外钢管屈服后,外钢管对混凝土的约束显著增强,直到整个试件达到最大承载力。

2.2 混凝土强度折减系数

在方钢管混凝土中,方钢管对内部混凝土的约束没有圆钢管对内部混凝土的约束强,并且方钢管的约束很不均匀,角部的混凝土受到的约束强且较均匀,边部中间管壁的混凝土受到的约束弱且很不均匀。当方钢管达到极限强度时,角部钢管发生塑性变形,钢管边的中间管壁发生局部屈曲,混凝土被压碎。目前的研究表明,方钢管对内部混凝土的约束可分为有效约束区和非有效约束区,有效约束区和非有效约束区的界限为抛物线。有效约束区混凝土的极限抗压强度高于非有效约束区混凝土的,而非有效约束区混凝土的极限抗压强度高于非约束混凝土的,并且非有效约束区混凝土受到的侧向约束不均匀。因为考虑方钢管对混凝土的约束有一定困难,所以对方形截面钢管混凝土的研究很多都是建立在试验的基础上。本文中核心混凝土不做有效约束区和非有效约束区的划分,而统一采用混凝土强度折减系数 γ_u ,将方钢管对核心混凝土的不均匀约束等效为处于有效约束和非有效约束之间的均匀约束,其值为

$$\gamma_u = 1.67 D_c^{-0.112} \quad (3)$$

式中: D_c 为等效圆钢管混凝土钢管的内径。求解混凝土强度折减系数的过程中同时也考虑了尺寸效应的影响。

2.3 等效约束折减系数

本文中采用文献[10]的等效约束折减系数 ξ ,将方钢管对混凝土的等效均匀约束等效为圆钢管对混凝土的均匀约束,其值为

$$\xi = 66.474v^2 - 0.9919v + 0.41618 \quad (4)$$

式中: v 为方钢管的厚边比, $v = t/B$, t 为方钢管的壁厚, B 为方钢管的外边长。

等效约束折减系数 ξ 的物理意义为方钢管一条边上受约束的计算长度比例。这样, 等效圆钢管混凝土的内压力 p_1 为

$$p_1 = p/\xi \quad (5)$$

式中: p 为方钢管对核心混凝土的等效均匀内压力, 它反映了方钢管混凝土的破坏是由于角部钢管塑性屈服和钢管边的中间管壁局部屈曲引起的。

2.4 公式推导

圆中空夹层钢管混凝土和方中空夹层钢管混凝土常见的截面形式如图 1 所示。

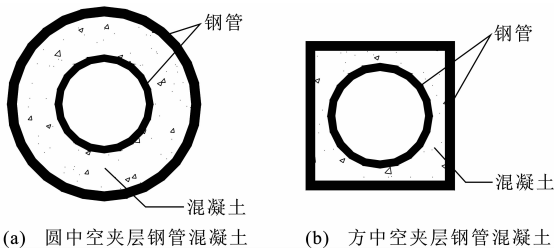


图 1 中空夹层钢管混凝土截面形式

Fig. 1 Section Shapes of Concrete-filled Double Skin Steel Tubes

由文献[3]可知: 方中空夹层钢管混凝土外部的破坏形态和实心方钢管混凝土的基本相同, 故等效约束折减系数 ξ 同样适用于把方中空夹层钢管混凝土等效为圆中空夹层钢管混凝土。

将方中空夹层钢管混凝土的外钢管和混凝土分别按面积相等转化为圆中空夹层钢管混凝土的外钢管和混凝土, 则有

$$\left. \begin{aligned} B^2 &= \pi(r_o + t_o)^2 \\ (B - 2t)^2 &= \pi r_o^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: r_o 、 t_o 分别为等效圆中空夹层钢管混凝土外钢管的内半径和壁厚。

本文中的等效圆中空夹层钢管混凝土的外钢管采用统一强度理论屈服准则, 根据这一屈服准则, 等效外圆钢管的塑性极限荷载为^[12]

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{\sigma_{so}}{1-\alpha} \left[\left(\frac{r_o}{r_o + t_o} \right)^{\frac{2(1+b)(a-1)}{2+2b-2a}} - 1 \right] = \\ &= \frac{\sigma_{so}}{1-\alpha} \left[\left(1 + \frac{\alpha_n}{2} \right)^{\frac{2(1+b)(1-a)}{2+2b-2a}} - 1 \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中: σ_{so} 为方中空夹层钢管混凝土外钢管的屈服强度。

定义 α_n 为等效圆中空夹层钢管混凝土的名义含钢率, 即

$$\alpha_n = \frac{A_{so}}{A_{ce}} = \frac{\pi(2r_o)t_o}{\pi r_o^2} = 2 \frac{t_o}{r_o} \quad (8)$$

式中: A_{so} 、 A_{ce} 分别为等效圆中空夹层钢管混凝土外圆钢管的面积和外圆钢管所包围的空隙面积。

根据文献[3]、[9], 定义 f_{scy} 为中空夹层钢管混凝土外钢管和核心混凝土的组合强度, 即

$$f_{scy} = \gamma_u \sigma_{cp} + \sigma_{zso} A_{so}/A_{ce} = \gamma_u \sigma_{cp} + \alpha_n \sigma_{zso} \quad (9)$$

式中: σ_{cp} 、 σ_{zso} 分别为核心混凝土的纵向抗压强度和等效外圆钢管的纵向抗压强度。

假设由于内钢管对混凝土的支撑作用, 中空夹层钢管混凝土中核心混凝土所受到的约束作用与具有相同外钢管的实心钢管混凝土所受到的约束作用相同。核心混凝土的非线性屈服方程为^[13]

$$\sigma_{cp} = f_c [1 + k(p)] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} k(p) &= 1.5 \sqrt{p/f_c} + 2p/f_c = \\ &= 1.5 \sqrt{p_1 \xi / f_c} + 2p_1 \xi / f_c \end{aligned} \quad (11)$$

式中: f_c 为混凝土的单轴抗压强度。

由塑性力学的厚壁圆筒理论^[14]得

$$\sigma_{zso} = \frac{p r_o^2}{(r_o + t_o)^2 - r_o^2} = \frac{4p}{4\alpha_n + \alpha_n^2} = \frac{4p_1 \xi}{4 + \alpha_n^2} \quad (12)$$

将式(11)代入式(10), 再由式(8)~(10)整理得

$$f_{scy} = \gamma_u (f_c + 1.5 \sqrt{p_1 \xi f_c} + 2p_1 \xi) + \frac{4p_1 \xi}{4 + \alpha_n} \quad (13)$$

因此, 方中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限承载力为

$$\begin{aligned} N_u &= N_{oscu} + N_{isu} = [(B^2 - 2t)^2 - \pi(r_i + \\ &+ t_i)^2] [\gamma_u (f_c + 1.5 \sqrt{p_1 \xi f_c} + \\ &+ 2p_1 \xi) + \frac{4p_1 \xi}{4 + \alpha_n}] + 2\pi r_i t_i \sigma_{si} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: N_{oscu} 为外钢管和核心混凝土的极限承载力; N_{isu} 为内钢管的极限承载力; r_i 、 t_i 、 σ_{si} 分别为内钢管的内半径、壁厚和屈服强度。

3 极限承载力的验证和影响因素分析

3.1 极限承载力的验证

由于大多数低强度钢材具有明显的屈服点, 并且拉压相同^[15-16]。在应用统一强度理论时, 取材料拉压比 $\alpha = 1$, 统一强度理论退化为统一屈服准则。此时取不同的 b 值, 统一屈服准则就变为具体的现有已知的屈服准则或现在还没有定义的新屈服准则。将式(7)中的 α 取为 1, 则等效外圆钢管的塑性极限荷载为

$$p_1 = 2\sigma_{so} \frac{1+b}{2+b} \ln(1 + \frac{\alpha_n}{2}) \quad (15)$$

取文献[3]中的试验数据,用式(14)和式(15)来计算方中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限承载力,比较结果见表 1。

从表1可以看出,用本文计算方法所得理论值

与试验实测值比较吻合,验证了该理论公式的正确性,并且 N_u 随 b 的增大而增大。这说明考虑参数 b ,即中间主应力 σ_2 的影响,可以更加充分地发挥材料的强度潜能,更客观地认识材料的自承载能力。

表 1 计算结果与试验结果比较

Tab. 1 Comparisons Between Calculating Results and Test Results

试件编号	不同 b 值时的承载力计算值 N_u /kN						文献[3]的承载力 试验值 N_t /kN	$N_u \cdot N_t^{-1}$
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0		
SCC2	937.3	968.0	993.3	1 014.4	1 032.4	1 047.9	1 054	0.89~0.99
							1 060	0.88~0.99
SCC3	891.7	917.8	939.2	957.2	972.4	985.6	990	0.90~1.00
							1 000	0.89~0.99
SCC4	759.0	776.4	790.7	802.7	812.9	821.7	870	0.87~0.94
							996	0.76~0.83
SCC5	1 626.9	1 667.8	1 701.4	1 729.4	1 753.2	1 773.7	1 725	0.94~1.03
							1 710	0.95~1.04
SCC6	2 476.0	2 533.8	2 581.2	2 620.8	2 654.4	2 683.3	2 580	0.96~1.04
							2 460	1.01~1.09
SCC7	3 390.3	3 459.7	3 516.5	3 563.8	3 604.0	3 638.6	3 240	1.05~1.12
							3 413	1.00~1.06

3.2 影响因素分析

对于高强钢材,材料拉压比 α 不再等于 1。图 2、3 分别给出了试件 SCC2、SCC7 在 $\sigma_{so}=420$ MPa、 $f_c=30$ MPa 的情况下, f_{scy}/f_c 随 α 、 b 的变化情况。

的增大而增大;在 b 一定时, f_{scy}/f_c 随着 α 的增大而增大,这说明对于高强钢材,考虑 α 对 f_{scy}/f_c 的影响是有必要的。

从图 2、3 还可以看出,试件 SCC2 的 f_{scy}/f_c 明显高于试件 SCC7 的,这主要是由试件的尺寸效应造成的,即试件 SCC2 的等效约束折减系数 ξ 明显大于试件 SCC7 的。

4 结 语

(1)基于厚壁圆筒统一强度理论解,推导了外方内圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限承载力公式。该公式既可以计算外包材料为拉压同性的低强度钢材,又可以计算外包材料为具有拉压异性的高强度钢材,并且考虑了中间主应力 σ_2 的影响,可以更加充分地发挥材料的强度潜能,更客观地认识材料的自承载能力。

(2)通过本文计算结果与文献试验结果的比较,验证了该理论公式的正确性,并说明引入混凝土强度折减系数 γ_u 和等效约束折减系数 ξ 将外方内圆中空夹层钢管混凝土转化为外圆内圆中空夹层钢管混凝土,这种计算方法是可行的。

(3)外钢管的拉压比 α 和反映中间主剪应力以及相应面上的正应力对材料破坏影响程度的材料强度参数 b 对外钢管和核心混凝土的组合强度 f_{scy} 影响显著。 f_{scy} 随着 α 、 b 的增大而增大,所以当外钢管

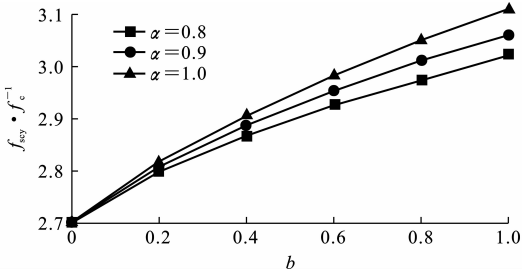


图 2 试件 SCC2 的 f_{scy}/f_c 与 α 、 b 之间的关系
Fig. 2 Relations Between f_{scy}/f_c and α , b of Specimen SCC2

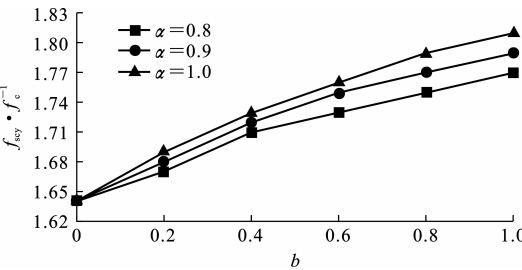


图 3 试件 SCC7 的 f_{scy}/f_c 与 α 、 b 之间的关系
Fig. 3 Relations Between f_{scy}/f_c and α , b of Specimen SCC7

从图 2、3 可以看出:在 α 一定时, f_{scy}/f_c 随着 b

为高强度钢材时,考虑 α 的影响是必要的。

参考文献:

References:

- [1] 黄 宏. 方中空夹层钢管砼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.
HUANG Hong. Analysis on the Behavior of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes (SHS Outer and SHS Inner) Subjected to Axial Compression [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2003, 20(2): 19-21.
- [2] 赵均海, 郭红香, 魏雪英. 圆中空夹层钢管混凝土柱承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 50-54.
ZHAO Jun-hai, GUO Hong-xiang, WEI Xue-ying. Research on Bearing Capacity of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes Column[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 50-54.
- [3] 陶 忠, 于 清. 新型组合结构柱——试验、理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 73-128.
TAO Zhong, YU Qing. New Combined Structural Columns — Test, Theory and Method [M]. Beijing: Science Press, 2006: 73-128.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 李恋恋, 赵均海. 圆中空夹层钢管混凝土柱的承载力分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(增2): 59-62.
LI Lian-lian, ZHAO Jun-hai. Analysis of Bearing of Concrete Filled Double Skin (CHS Inner and CHS Outer) [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(S2): 59-62.
- [7] UENAKA K, KITO H, SONODA K, et al. Experimental Study on Concrete Filled Double Tubular Steel Columns Under Axial Loading [J]. Advances in Steel Structures, 2003, 2: 877-882.
- [8] ZHAO X L, GRZEBIETA R. Strength and Ductility of Concrete Filled Double Skin (SHS Inner and SHS Outer) Tubes [J]. Thin-walled Structure, 2002, 40(2): 199-213.
- [9] SAKINA K, NAKAHARA H, MORINO S, et al. Behavior of Centrally Loaded Concrete Filled Steel Tube Short Columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 13(2): 180-188.
- [10] 李小伟, 赵均海, 朱铁栋, 等. 方钢管混凝土轴压短柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 77-81.
LI Xiao-wei, ZHAO Jun-hai, ZHU Tie-dong, et al. Mechanics Behavior of Axially Loaded Short Columns with Concrete-filled Square Steel Tube [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 77-81.
- [11] 俞茂宏. 混凝土强度理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
YU Mao-hong. Concrete Strength Theory and Its Application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [12] 赵均海. 强度理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
ZHAO Jun-hai. Strength Theory and Its Engineering Application [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [13] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
CAI Shao-huai. Modern Concrete-filled Steel Tube Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [14] 王 仁, 熊祝华, 黄文彬. 塑性力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
WANG Ren, XIONG Zhu-hua, HUANG Wen-bin. The Basis of Plastic Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [15] 韩 冰, 王元丰. 圆钢管混凝土轴心受压构件徐变分析的比较[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 83-86.
HAN Bing, WANG Yuan-feng. Creep Analysis Comparison of Circular Axially Compressed Concrete-filled Steel Tubular Members [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 83-86.
- [16] 丁发兴, 余志武, 蒋丽忠. 圆钢管混凝土轴压中长柱的承载力[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 65-70.
DING Fa-xing, YU Zhi-wu, JIANG Li-zhong. Bearing Capacity of Middle Long Concrete-filled Circular Steel Tubular Columns Under Axial Compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 65-70.