

FRP-混凝土-钢双壁空心管轴压短柱力学性能分析

王娟, 赵均海, 李楠, 朱倩

(长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:应用薄壁圆筒的双剪统一强度理论极限解,考虑材料中间主应力的影响和内圆钢管的薄壁效应,提出了FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱轴压承载力计算公式。借助非线性有限元分析软件 ANSYS,建立了组合柱在轴心压力作用下的非线性有限元计算模型,得到了各构件极限承载力及应力-应变关系全过程曲线,并将有限元结果与理论公式计算结果、文献试验结果进行对比验证,吻合较好;在此基础上讨论了荷载对构件纵向应力分布的影响以及钢管厚径比、混凝土强度等对构件承载力的影响规律。

关键词:薄壁圆筒;双剪统一强度理论;非线性有限元;FRP-混凝土-钢双壁空心管;力学性能

中图分类号:TU 398.9

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)05-0633-07

FRP-混凝土-钢双壁空心管(简称双壁空心管)由内层钢管、外层纤维增强复合材料(FRP)和两者间的夹层混凝土组成,是滕锦光教授^[1-2]在中空夹层钢管混凝土的启发下提出的一种新型的组构件,截面形式见图1所示。它不仅具有中空夹层钢管混凝土承载力高、自重轻的优点,还具有轻质、高强度和抗腐蚀能力强等自身的特点。作为一种新型的组结构柱,国内外对双壁空心管柱的研究近些年才开始,且研究非常有限,仅有文献[3]对双壁空心管柱进行了抗弯性能研究;文献[4]对双壁空心管柱进行了抗震性能试验;文献[5]对双壁空心管长柱进行了轴压试验;文献[6]和文献[7]进行了短柱轴压试验。其中不仅对轴压短柱极限承载力的试验研究有限,其理论研究也大部分是把内层钢管看作是厚壁圆筒来分析(而实际上大部分钢管应为薄壁钢管)。因此,本文采用双剪统一强度理论,利用薄壁圆筒的统一极限解,考虑材料中间主应力的影响和内圆钢管的薄壁效应,给出了双壁空心管短柱承载力计算公式;同时,由于受到试验条件和规模的限制,试验研究存在一定的局限性,为了进一步深入了解其受压性能及约束机理,本文采用非线性有限元分析软件 ANSYS 对双壁空心管短柱的轴压力学性能进行了数值模拟,得出了与文献[6]和文献[7]中试验吻合良好的结论,为工程上广泛使用这种结构提供了理论依据。

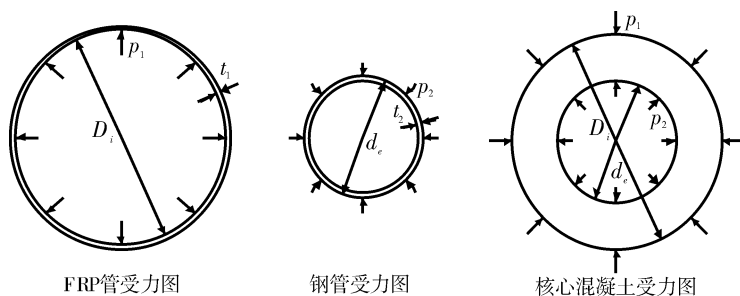


图1 双壁空心管短柱的受力图

Fig. 1 Load schematic diagram of double-skin tubular short columns

1 轴压短柱承载力计算

1.1 双剪统一强度理论

双剪统一强度理论是一种考虑了 σ_2 影响的适用于各种不同特性材料的新理论,它的数学表达式为^[8]:

收稿日期:2013-04-02 修改稿日期:2013-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41202191);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110205130001);陕西省自然科学基金资助项目(2011JM7002);中国博士后科学基金资助项目(2012M520079)

作者简介:王娟(1987-),女,陕西延安人,博士生,主要从事组合结构基本理论及其应用研究工作。

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

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

其中:

$$\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c}, \quad b = \frac{(1+\alpha)\tau_s - \sigma_t}{\sigma_t - \tau_s}$$

式中: α 为材料的拉压比; b 为反映中间切应力及相应面上正应力对材料破坏影响程度的参数, $0 \leq b \leq 1$; σ_t 、 σ_c 、 τ_s 分别为材料的拉伸、压缩及剪切极限强度。

1.2 基本假定

(1) 由于在核心加载及全截面加载时均不考虑 FRP 管对构件轴压承载力的贡献, 因而可设 FRP 管处于径向受压和环向受拉的二向应力状态^[9]。

(2) 在实际应用中, 双壁空心管柱中钢管的径厚比 d_e/t_2 一般均大于 20, 因此将其视为薄壁圆筒进行承载力分析更为合理。

(3) 内层钢管主要承担轴压作用, 侧向抗压应力比较小, 因而在承载力计算中可仍用其屈服强度 σ_s 。

1.3 极限承载力

设 σ_{rf} 和 σ_{rs} 分别为外层 FRP 管和内层钢管对核心混凝土所提供的侧向压力, 则其总侧向压力 σ_{rc} 为:

$$\sigma_{rc} = \sigma_{rf} - \sigma_{rs} \quad (2)$$

利用材料力学知识可得:

$$\sigma_{rf} = \frac{2t_1\sigma_{\theta f}}{D_i} \quad (3)$$

$$\sigma_{rs} = \frac{2t_2P_2}{d_e - t_2} \quad (4)$$

式中: t_1 、 D_i 分别为 FRP 套管的壁厚和内径; $\sigma_{\theta f}$ 为 FRP 管所受环向拉应力; t_2 、 d_e 分别为内层钢管壁厚和外径; P_2 为薄壁钢管外压力极限荷载。

根据文献[10], 可得:

$$P_2 = \frac{2t_2(1+b)\sigma_s}{(1+b+2\alpha) \times \frac{d_e}{2} + 2t_2\alpha b} \quad (5)$$

将式(3)、式(4)和式(5)代入式(2), 得:

$$\sigma_{rc} = \frac{2t_1\sigma_{\theta f}}{D_i} - \frac{8t_2^2(1+b)\sigma_s}{(d_e - t_2)(1+b+2\alpha)d_e + 4t_2\alpha b} \quad (6)$$

核心混凝土处于三向受压应力状态, 套箍作用使其抗压强度提高, 由文献[11]中双剪统一强度理论的应用可知:

$$f_c' = f_c + k\sigma_{rc} \quad (7)$$

式中: f_c 为混凝土单轴抗压强度; f_c' 为提高后的混凝土抗压强度; $k = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$, 其中 φ 为混凝土内摩擦角; 对于钢管混凝土经常取 $k=1.5 \sim 3.0$, 具体值可由试验确定。

将式(6)代入式(7), 得:

$$f_c' = f_c + k \left[\frac{2t_1\sigma_{\theta f}}{D_i} - \frac{8t_2^2(1+b)\sigma_s}{(d_e - t_2)(1+b+2\alpha)d_e + 4t_2\alpha b} \right] \quad (8)$$

由分析知, 双壁空心管短柱轴压承载力 N 为:

$$\begin{aligned} N &= f_c' A_c + \sigma_s A_s \\ &= \left\{ f_c + k \left[\frac{2t_1\sigma_{\theta f}}{D_i} - \frac{8t_2^2(1+b)\sigma_s}{(d_e - t_2)(1+b+2\alpha)d_e + 4t_2\alpha b} \right] \right\} \times \frac{\pi}{4} (D_i^2 - d_e^2) + \sigma_s \pi t_2 (d_e - t_2) \end{aligned} \quad (9)$$

1.4 极限承载力验证

取 $\alpha = 1.0$, $b = 1.0$ 及 $k = 2.26^{[12]}$ 对文献[6]和文献[7]中部分构件的参数代入式(9)进行计算, 将结果与文献试验结果对比, 见表 1 所示. 可以看出: 试验值与公式计算值之比的平均值为 1.040 8, 吻合较好. 说明本文将内钢管看成薄壁圆筒、运用统一强度理论所推导的双壁空心管短柱的极限承载力计算公式具有很好的精确度.

表 1 双壁空心管短柱有限元模型尺寸与 ANSYS 计算结果比较

Tab. 1 The finite element model size of double-skin tubular short columns and comparisons of results

组号	试件编号	f_c/MPa	t_1/mm	t_2/mm	D_i/mm	d_e/mm	σ_f/MPa	σ_s/MPa	N_{exp}/kN	N_u/kN	$N_{\text{ansys}}/\text{kN}$	$N_{\text{exp}} \times N_u^{-1}$	$N_{\text{exp}} \times N_{\text{ansys}}^{-1}$
1	SC21	32.49	2.28	2.67	190	140	213	313	981.29	917.72	1 085.67	1.069 3	0.903 9
	SC22	32.49	2.28	2.5	190	114	213	363	1 216.11	1 087.81	1 226.00	1.117 9	0.991 9
2	SC31	29.25	2.67	2.67	190	140	1 314	313	1 489.29	1 807.61	1 684.20	0.823 9	0.884 3
	SC32	29.84	2.67	2.67	190	140	1 314	313	1 844.37	1 815.26	1 817.54	1.016 0	1.014 8
3	SC41	27.73	3.19	2.67	190	140	1 006	313	1 745.88	1 695.66	1 835.48	1.029 6	0.951 2
	SC42	32.49	3.19	2.67	190	140	1 006	313	1 801.60	1 757.34	2 024.79	1.030 3	0.889 8
4	DS2A	39.64	0.34	3.2	152.5	76.1	1 825.5	352.67	1 044.20	973.87	1 091.66	1.072 2	0.956 5
	DS2B	39.64	0.34	3.2	152.5	76.1	1 825.5	352.67	1 024.80	973.87	1 091.66	1.052 3	0.938 8
	DS3A	39.64	0.51	3.2	152.5	76.1	1 825.5	352.67	1 214.00	1 100.04	1 110.65	1.103 6	1.093 1
	DS3B	39.64	0.51	3.2	152.5	76.1	1 825.5	352.67	1 201.90	1 100.04	1 110.65	1.092 6	1.082 2

附注: 第 1、2、3 组试验结果来源于文献[7]; 第 4 组试验结果来源于文献[6]. N_{exp} 为实测组合柱极限承载力; N_u 为公式(9)计算所得的极限承载力; N_{ansys} 为有限元计算所得的极限承载力.

2 材料的本构关系和破坏准则

2.1 核心混凝土的本构关系和破坏准则

双壁空心管柱中核心混凝土在 FRP 套管与钢管的约束作用下处于三向受压的状态, 经过查阅众多文献并进行对比, 核心混凝土的本构关系采用 Lam and Teng 应力-应变模型, 此模型基于对已有模型的总结分析和汇总的应变数据库, 经许多学者证明其不仅简单而且准确^[13]. 模型表达式如下:

当 $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_t$, $\sigma = E_c \epsilon - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 f'_{\omega}} \epsilon^2$ (10a)

当 $\epsilon_t \leq \epsilon \leq \epsilon_{\alpha}$, $\sigma = f'_{\omega} + E_2 \epsilon$ (10b)

式中: $\epsilon_t = \frac{2 f'_{\omega}}{E_c - E_2}$; $E_2 = \frac{f'_{\alpha} - f'_{\omega}}{\epsilon_{\alpha}}$ (简化后为 $E_2 = \frac{2 f_l}{\epsilon_{\alpha}}$); $f_l = \frac{2 f_{gt} t_g}{d}$; $\frac{\epsilon_{\alpha}}{\epsilon_{\omega}} = 1.75 + 22 \times \left(\frac{f_l}{f_{\omega}} \right)$

. 其中, E_c 为无约束混凝土的弹性模量; E_2 为第二段直线段的斜率; f_{gt} 和 t_g 分别为 FRP 套管环向抗拉强度和截面厚度; d 为核心混凝土的直径; f_l 为横向约束应力; ϵ_{α} 为核心混凝土的峰值应力对应的轴向应变; E_g 为套管环向弹性模量; f'_{ω} 为无约束混凝土抗压强度.

核心混凝土的破坏准则采用 Willam-Warnke 五参数模型定义.

2.2 钢管的本构关系与屈服准则

假设钢管为各向同性的材料, 其应力-应变关系曲线由弹性阶段、弹塑性阶段、塑流阶段、强化阶段和二次塑流五个阶段构成, 数学表达式为:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_e \\ -A \epsilon^2 + B \epsilon + C & \epsilon_e < \epsilon \leq \epsilon_{e1} \\ f_y & \epsilon_{e1} < \epsilon \leq \epsilon_{e2} \\ f_y \left(1 + 0.6 \frac{\epsilon - \epsilon_{e2}}{\epsilon_{e3} - \epsilon_{e2}} \right) & \epsilon_{e2} < \epsilon \leq \epsilon_{e3} \\ 1.6 f_y & \epsilon > \epsilon_{e3} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $A = \frac{0.2 f_y}{(\epsilon_{e1} - \epsilon_e)^2}$; $B = 2 A \epsilon_{e1}$; $C = 0.8 f_y + A (\epsilon_e)^2 - B \epsilon_e$; $\epsilon_e = 0.8 f_y / E_s$; $\epsilon_{e1} = 1.5 \epsilon_e$; ϵ_{e2}

$= 10\epsilon_e$; $\epsilon_{e3} = 100\epsilon_e$; E_s 、 f_y 和 f_u 分别为钢管的弹性模量、屈服强度和极限强度。

对于没有明显屈服平台的高强钢材,其应力-应变关系可简化为双折线,其数学表达式为:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon & \sigma \leq f_y \\ 0.01 E_s \epsilon & \sigma > f_y \end{cases} \quad (12)$$

2.3 FRP 套管的本构关系与破坏准则

本文对试件所用 FRP 套管,忽略其轴向所受压力,而只考虑其环向受拉作用,经文献[9]中分析证明这种假设所得结果与试验结果极为接近。由于 FRP 材料近似为弹性体,无屈服强度,因而认为当其所受环向拉力达到极限抗拉强度时,FRP 套管断裂。

3 有限元模型

3.1 单元类型、实常数与材料属性

本文根据文献[6]和文献[7]中相关试件实际尺寸来模拟组合柱的各个部分。核心混凝土单元采用 SOLID65 实体单元模拟;钢管单元采用 SOLID45 单元模拟;FRP 套管采用 SHELL41 膜单元进行模拟,通过设置仅拉选项,实现单元仅环向受拉的情况。另外,设置 MASH200 辅助单元划分面网格。

SOLID65 单元中采用默认实常数;SOLID45 和 SHELL41 单元均不需要设置实常数。

核心混凝土和钢管的材料弹性模量与泊松比均按照材性试验所测取值,其中钢管的弹性模量和泊松比分别为 $E_s = 206\ 000$ 、 $\mu_s = 0.3$;采用 Willam-Warnke 五参数模型定义核心混凝土破坏准则计算时,关闭混凝土的压碎功能^[14],来避免由于个别单元的压碎而造成单元自由度发散阻止计算进行的困难。核心混凝土的本构模型采用多线性等强硬化模型;钢管的本构模型采用多线性随动强化模型;对于 FRP 套管,只定义其弹性模量与泊松比。

3.2 建立有限元模型

建模采用分离式模型,对 FRP 套管、核心混凝土和钢管分别分配单元类型及材料属性。

由于双壁空心管短柱构件的分析结果与是否考虑摩擦关系的差别并不明显^[9, 14-15],同时考虑到 FRP 材料对混凝土的环向约束作用很强,本文假设 FRP 套管与核心混凝土、钢管三者间完全粘结,不产生滑移现象。不同单元之间界面用 GLUE 命令粘接。

进行网格划分时,先划分面网格,然后将其拖拽成体网格并分别赋予相应实体单元属性,同时保证不同类型单元粘结面上的单元节点一一对应。经过多次试算对比,本文选择了合适的单元大小来使求解精确且节省时间;该组合柱实体模型的单元总数为 7 200,其中核心混凝土单元有 3 600 个,钢管单元有 1 200 个,FRP 套管单元有 2 400 个。

ANSYS 有限元模型网格划分见图 2 所示:

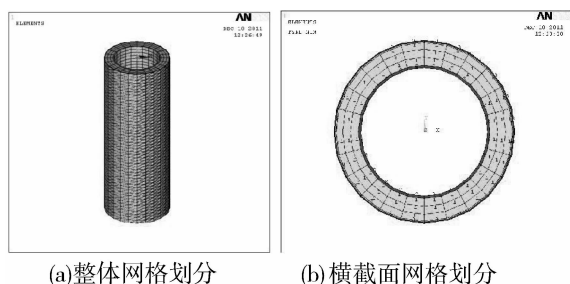


图 2 有限元模型网格划分图

Fig. 2 Meshing results of finite element model

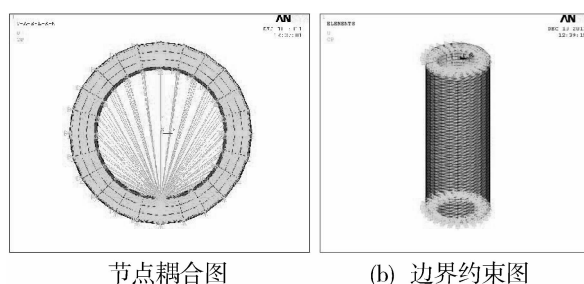


图 3 节点耦合与边界约束图

Fig. 3 Node coupling and boundary constraint

3.3 模型边界约束及加载

在有限元模型中,对试件底部端面的节点施加全部约束;对顶部端面的节点施加 X 和 Y 向的约束,并将 Z 向位移进行耦合来保证柱顶面所有节点 Z 向位移一致,见图 3(a);由于位移加载可使计算易于收敛,因而本文在耦合节点处施加位移荷载,见图 3(b)所示。

当计算结果达到以下任意一种情况时,认为试件破坏:(1)FRP 套管环向拉应力达到极限拉应力;(2)钢管 Von Mises 等效应力值达到极限强度;(3)在计算过程中,迭代次数超过 50 次不收敛,将加载步长折半,重复折半超过 1 000 次仍不收敛。本次计算中未出现第三种情况。

4 数值算例分析

4.1 算例模型

基于以上分析,参照文献[6]和文献[7]中试验构件的几何尺寸和材料参数,本文对 11 组双壁空心管短柱分别进行了轴压非线性有限元模拟分析,见表 1 所示。

4.2 求解与结果后处理

在非线性有限元分析中,求解控制选择静态大位移,荷载子步设为 450 步,记录每一个荷载子步所得计算结果,收敛精度设为 5%。

4.3 极限承载力

本文利用 ANSYS9.0 进行非线性有限元计算所得的双壁空心管短柱极限承载力与文献试验结果的比较见表 1 所列。表中试验值与有限元计算值的比值 $N_{\text{exp}}/N_{\text{ansys}}$ 在 0.884 3~1.093 1 之间,平均值为 0.978 3,均方差为 0.071 6。可见有限元模拟结果与相应文献试验结果吻合较好。

4.4 构件应力-应变曲线

利用 ANSYS9.0 对文献[6]和文献[7]中相应试件进行非线性有限元计算,得到双壁空心管短柱的应力-应变(σ - ϵ)关系曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,由于 FRP 套管的约束作用,钢管核心混凝土短柱的轴压强度得到明显提高,整个应力-应变过程分为三个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段。

4.5 构件应力云图

以构件 SC21 为例,列出通过有限元模拟所得组合柱到达极限荷载时的变形分布图,核心混凝土、钢管的纵向应力云图以及 FRP 套管的环向应力云图,如图 5 所示。通过修改 ANSYS 软件后处理中缩放因子可明显的看出:试件破坏时,中间向外凸出,变形较大;Z 向位移随离构件顶部端面距离的增大而变小;从图 5(f)中可看出 FRP 套管的中部所受环向拉力最大,并向两端递减;从图 5(d)可看出靠近套管周围的混凝土部分比中心部分的应力大;同时由图 5(g)可以看出,在极限状态时,钢管受力比较均匀,都已经达到屈服强度,有的甚至已经破坏,例如构件 SC31 和 SC32,与文献[7]中试验现象吻合。结论可归纳为:(1)对于大部分组合柱构件,当 FRP 套管中部环向拉力达到极限抗拉强度时,套管断裂,随后外层核心混凝土先被压碎破坏,钢管无明显破坏;(2)构件 SC31、SC32、SC41 以及 SC42 中,FRP 套管环向拉力达到极限抗拉强度而被拉断的同时,钢管压曲破坏;(3)达到承载力极限状态时,钢管靠近端部的地方应力最大,接下来是中部,端部最小;(4)约束混凝土的应力均大大超过了其单轴强度,表明了双壁空心管短柱在 FRP 套管和内置钢管的双层约束下,混凝土抗压强度得到较大提高,和试验结果吻合良好。

从图 5 可以看出,本文 ANSYS 有限元数值模拟所选取单元类型,钢管以及受约束核心混凝土的本构关系及破坏准则,加载方案等均比较可信,能够较好地反映此类构件的承载力。

4.6 钢管厚径比和混凝土强度对构件力学性能的影响

为了分析钢管厚径比 t_2/d_e 对构件力学性能的影响,在保证其他条件均与构件 SC22 完全相同的情况下,改变钢管厚径比($t_2=2.67\text{mm}$, $d_e=140\text{mm}$; $t_2=2.5\text{mm}$, $d_e=114\text{mm}$; $t_2=8.16\text{mm}$, $d_e=140\text{mm}$)对双壁空心管短柱进行有限元数值模拟,对比了其应力-应变曲线,如图 6 所示;得出钢管厚径比对极限承载力的影响,如图 8(a)所示。由图可以看出,在其他条件相同的情况下,双壁空心管短柱的轴压承载

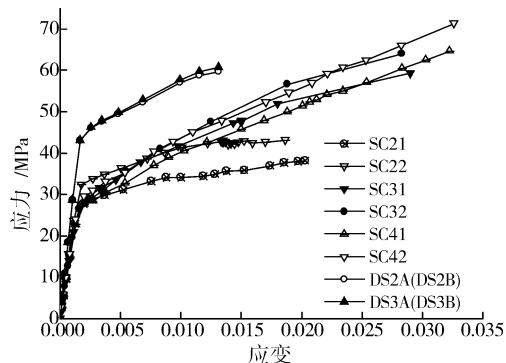


图 4 有限元模拟的双壁空心管短柱 σ - ϵ 曲线

Fig. 4 The stress-strain curves of the double-skin tubular short columns by simulation

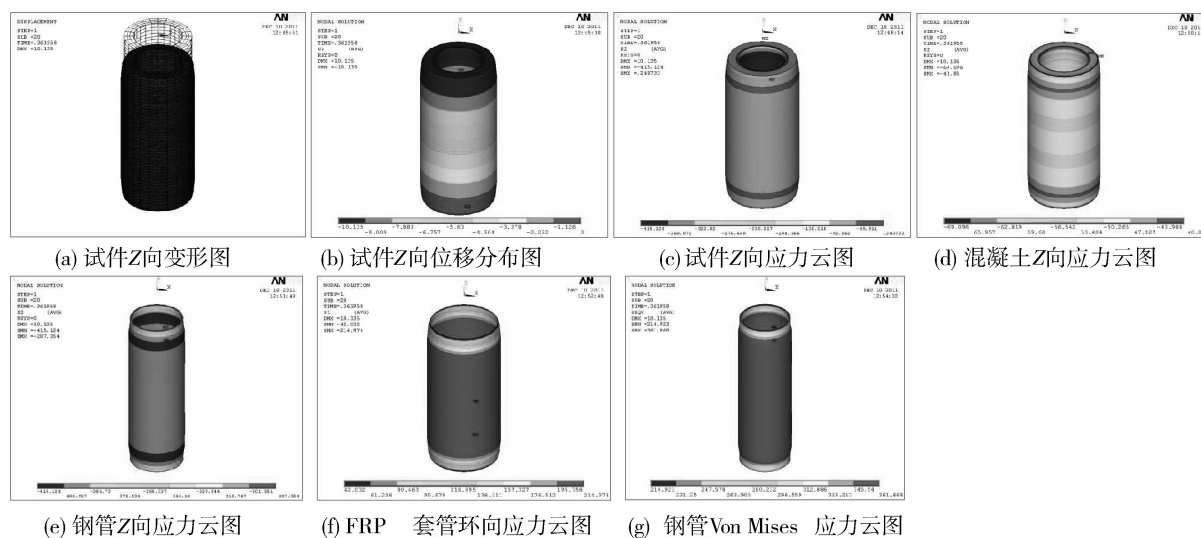


图5 双壁空心管短柱位移变形与应力云图

Fig. 5 The deformation distribution and stress nephogram of double-skin tubular short column

力随着钢管厚径比的增大而增大; t_2/d_e 为 0.019 1 的构件强化阶段不明显.

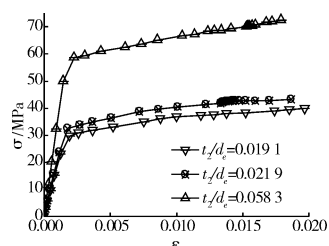
图6 不同钢管厚径比时短柱的 σ - ϵ 曲线

Fig. 6 The stress-strain curves of short columns with different thickness to diameter ratio of steel pipe

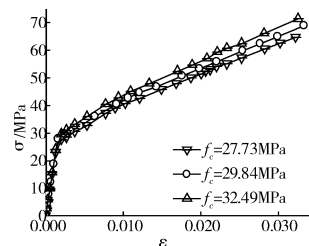
图7 不同混凝土强度时短柱的 σ - ϵ 曲线

Fig. 7 The stress-strain curves of short columns with different concrete strength

同时对不同混凝土强度 f_c 的构件(其他参数均与第三组构件相同)进行了有限元模拟结果比较,应力-应变关系如图 7 所示;混凝土强度对极限承载力的影响,如图 8(b)所示. 由图可以看出在一定范围内提高混凝土强度可使构件承载力提高.

5 结 语

本文采用双剪统一强度理论,利用薄壁圆筒的统一极限解,给出了双壁空心管短柱承载力计算公式;同时运用 ANSYS 软件对双壁空心管短柱的应力-应变关系曲线及应力场进行了模拟分析.

(1)考虑材料中间主应力的影响和内圆钢管的薄壁效应,提出了双壁空心管短柱轴压承载力计算公式,与试验数据进行对比,吻合较好.(2)选取合适的单元类型、材料本构关系和破坏准则、网格划分和边界条件,建立了双壁空心管短柱有限元模型.(3)有限元计算所得的构件极限承载力及应力-应变关系曲线与试验结果吻合良好,表明本次模拟所建立有限元模型基本正确,可为此类构件的分析提供参考.(4)分析双壁空心管短柱在极限荷载时各部分的变形分布图及应力云图,可知:构件中部变形较大;钢管受力较为均匀且超过屈服强度,最高应力出现在钢管中部;靠近外部 FRP 套管部分混凝土的应力较大,表明外部混凝土将会最先破坏;通过 FRP 套

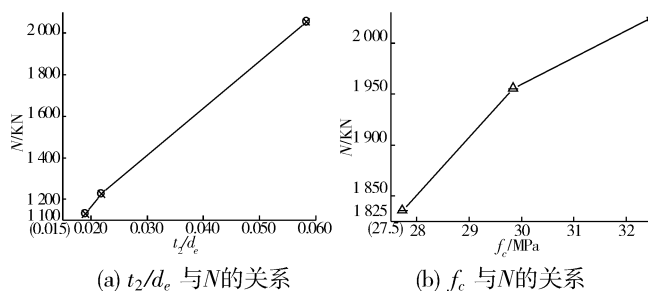


图8 钢管厚径比、混凝土强度与双壁空心管短柱极限承载力的关系

Fig. 8 Relations between t_2/d_e , f_c and N

管和钢管对混凝土的约束,可以明显提高混凝土的强度。(5)通过分析钢管厚径比、混凝土强度对双壁空心管短柱力学性能的影响可知,构件承载力随着钢管厚径比、混凝土强度的变化而变化,钢管厚径比、混凝土强度越高,试件承载力也越高。

参考文献 References

- [1] TENG J G, YU T, WONG Y L. Behaviour of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns[C]. The 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Adelaide, Australia; 2004.
- [2] TENG J G, YU T, WONG Y L, et al. Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: concept and behavior[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21 (4): 845-854.
- [3] YU T, WONG Y L, TENG J G, et al. Flexural behavior of hybrid FRP-concrete-steel double skin tubular members[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(5): 443-452.
- [4] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管柱抗震性能试验[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 29-36.
QIAN Jia-ru, LIU Ming-xue. Test of seismic behavior of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3): 29-36.
- [5] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管长柱轴心受压试验[J]. 混凝土, 2006(9): 31-34.
QIAN Jia-ru, LIU Ming-xue. Experiment of FRP-concrete-steel double-skin tubular long columns under axial compressive load[J]. Concrete, 2006(9): 31-34.
- [6] YU T. Structural behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2006.
- [7] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱轴心抗压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 104-113.
QIAN Jia-ru, LIU Ming-xue. Experimental investigation of FRP-concrete-steel double-skin tubular stubs under axial compressive loading[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 104-113.
- [8] YU Mao-hong. Unified Strength and Its Applications[M]. Berlin: Springer Press, 2004.
- [9] 王娟,赵均海,朱倩,等. FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱的轴压承载力[J]. 工业建筑, 2011, 41(11): 130-133.
WANG Juan, ZHAO Jun-hai, ZHU Qian, et al. Axial bearing capacity of FRP-concrete-steel double-skin tubular short columns[J]. Industrial Construction, 2011, 41(11): 130-133.
- [10] 赵均海,孟晓健,刘建军,等. 圆中空夹层钢管混凝土短柱的承载力[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(1): 70-74.
ZHAO Jun-hai, MENG Xiao-jian, LIU Jian-jun, et al. Bearing capacity of concrete-filled double-skin steel-tube stub column[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 70-74.
- [11] 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. Unified Strength Theory and Its Engineering Application[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [12] 于峰,牛荻涛. 基于双剪统一强度理论的FRP约束混凝土的承载力[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(12): 186-189.
YU Feng, NIU Di-tao. Bearing capacity of FRP-confined concrete based on twin shear unified strength theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(12): 186-189.
- [13] 滕锦光,陈建飞, S. T. 史密斯,等. FRP加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
TENG Jin-guang, CHEN Jian-fei, SMITH S T, et al. FRP Strengthened RC Structures[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.
- [14] 李围,叶裕明,刘春山,等. ANSYS土木工程应用实例[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
LI Wei, YE Yu-ming, LIU Chun-shan, et al. Application Cases of ANSYS Civil Engineering [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [15] 胡波. FRP约束混凝土柱的受压性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
HU Bo. Research on compressive behavior of FRP-confined concrete columns[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.

(下转第 646 页)

SHI Zhou, ZHAO Ren-da. Effects of bridge damage on its free-vibration characteristics[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(5): 117-123.

Research on natural frequency characteristics of damaged simply supported beam

SHANG Xin^{1,2}, XU Yue¹, REN Geng-feng¹

(1. Research Center of Highway Large Structure Engineering on Safety, Ministry of Education, P. R. C., Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xi'an Highway Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Taking damaged reinforced concrete beam as the research object, and based on Euler-Bernoulli beam and structure dynamics theory and by means of dynamic finite element analysis, the natural frequencies are obtained through calculations in various kinds of damage states. With the concept of damage factor, frequency change rate, frequency change rate oscillation amplitude, frequency change rate mid-value and the ratio of frequency change rate, the paper researches the natural frequency, frequency change rate and the ratio of frequency change rate characteristics of the simply supported beam. The results show that the sensitivities of the damaged beam about natural frequency and frequency change rate relate to damage degree and damage location, and that the sensitivities of the damaged beam about the ratio of frequency change rate relates to damage location only, and that the effect of damage degree on the natural frequency is greater than that of damage location, and that the frequency change rate of the beam is not a monotonic variation with the increase of modes order.

Key words: *simply supported beam; natural frequency; frequency change rate; the ratio of frequency change rate*

Biography: SHANG Xin, Candidate for Ph. D., Xi'an 710064, P. R. China, Tel: 0086-15829261859, E-mail: 413615633@qq.com

(上接第 639 页)

Analysis of mechanics properties on FRP-concrete-steel double-skin tubular short columns

WANG Juan, ZHAO Jun-hai, LI Nan, ZHU Qian

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Using the twin shear unified limit solutions of thin-walled cylinder, the formula of axial bearing capacity for FRP-concrete-steel double-skin tubular short columns was presented by considering the influence of intermediate principal stress and the internal thin-walled steel tube effect. Nonlinear element analysis models of composite columns under axial load were developed by using ANSYS program. Then, the ultimate bearing capacities and the stress-strain relationship curves for members were carried out. The finite element results agree well with the calculated results obtained in the paper and test results from the references. Based on the results achieved influences of loads on the stress distribution and the thickness to diameter ratio for steel tube and the concrete strength on bearing capacities for members were studied.

Key words: *thin-walled cylinder; the twin shear unified strength theory; nonlinear finite element analysis; FRP-concrete-steel double-skin tubular; mechanics properties*

Biography: WANG Juan, Candidate for Ph. D., Xi'an 710061, P. R. China, Tel: 0086-13991332762, E-mail: wangjuanchd@126.com