

长细比对内置工字形 CFRP 型材的圆钢管 混凝土构件力学性能影响

李帼昌,王友东

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究长细比对内置工字形 CFRP 型材高强圆钢管高强混凝土轴压构件力学性能的影响,为该类型柱设工程设计提供依据。方法 采用 ABAQUS 有限元软件对组合柱进行有限元模拟,分析不同长细比下钢材强度、混凝土强度等参数对组合柱力学性能的影响。结果 组合柱发生弹性和弹塑性失稳破坏的界限长细比为 66.67,经验证理论公式的预测值与模拟值平均误差为 3.01%。对于弹性失稳破坏的构件,与钢材强度相比,混凝土强度对构件的极限承载能力影响较大,且钢材屈服强度对钢管内力分配占比的影响较小。在组合构件中,高强混凝土所承担的荷载比例最低可达到普通强度混凝土所承担荷载的 1.2 倍。结论 发生弹性失稳破坏的构件可以通过提高混凝土强度达到提高构件承载力的目的;与普通强度混凝土相比,在组合柱中采用高强混凝土和高强钢管,可以使组合柱具有更好的组合效应;工字形 CFRP 对于组合柱极限承载力的提升主要体现在发生弹塑性失稳破坏的构件。

关键词 CFRP 型材;高强圆钢管高强混凝土柱;界限长细比;弹性失稳破坏;弹塑性失稳破坏

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

引用格式:李帼昌,王友东.长细比对内置工字形 CFRP 型材的圆钢管混凝土构件力学性能影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):769-777.(LI Guochang,WANG Youdong.The analysis of slenderness effect on mechanical performance of concrete-filled circle steel tube column with inner I-shaped CFRP profile [J].Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(5):769-777.)

The Analysis of Slenderness Effect on Mechanical Performance of Concrete-Filled Circle Steel Tube Column with Inner I-Shaped CFRP Profile

LI Guochang, WANG Youdong

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The effect of slenderness ratio on the mechanical properties of high-strength circle steel

收稿日期:2023-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51938009)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士研究生导师,主要从事钢结构、组合结构等方面研究。

tube high-strength concrete axial compression members with inner I-shaped CFRP profiles was studied, which provided a basis for the design of this type of column. Methods The finite element simulation of the composite column was carried out by using ABAQUS finite element software, and the influence of steel strength, concrete strength and other parameters on the mechanical properties of the composite column under different slenderness ratios was analyzed. Results The slenderness ratio of the limit of elastic and elastoplastic instability failure of the composite column is 66.67, and the average error between the predicted value and the simulated value of the verified theoretical formula is 3.01%. Compared with the steel strength, the concrete strength has a greater impact on the ultimate bearing capacity of the components, and the steel yield strength has less influence on the proportion of the internal force distribution of the steel pipe. In the composite components, the load proportion borne by high-strength concrete can reach at least 1.2 times that of ordinary strength concrete. Conclusion The purpose of improving the bearing capacity of components with elastic instability failure can be achieved by increasing the concrete strength. Compared with ordinary strength concrete, the use of high-strength concrete and high-strength steel pipe in the composite column can make the composite column have a better combination effect. The improvement of the ultimate bearing capacity of the I-shaped CFRP for the composite column is mainly reflected in the components with elastic-plastic instability failure.

Key words: I-shaped CFRP; CCFST column; boundary slenderness ratio; elastic instability destruction; elastoplastic instability failure

钢管混凝土具有承载力高、延性好等优点,被广泛应用于工程中。但是普通的钢管混凝土柱需要更大的横截面积来承受更高的轴向荷载,这样不仅增加了材料的消耗,同时也限制了空间的使用。与普通强度钢管混凝土柱相比,高强钢管高强混凝土柱在消耗较少材料的同时提高了组合柱的承载能力,所以高强材料不仅满足高层及大跨结构的发展趋势,同时也增加了空间的使用效率。M. X. Xiong 等^[1]对高强钢管超高强混凝土柱的组合性能进行了研究,并提出了扩展 Eurocode4 设计方法的建议。G. C. Li^[2]等对高强方钢管高强混凝土进行了试验,提出并确定了高强材料之间的匹配关系。然而方钢管混凝土柱中,由于钢管过早的发生局部屈曲,钢管的约束作用无法达到预期。圆钢管混凝土可以提供很好的约束效果,正是因为这种约束效应增加了圆钢管混凝土柱的强度^[3]。韦建刚等^[4]以长径比为参数对高强圆钢管超高强混凝土柱进行轴压试验,并结合有限元计算数据对圆钢管混凝土轴压柱的承载力稳定系数进行了修正。S. Thai 等^[5]

建立了包含 3100 多个采用高强材料的钢管混凝土试验数据库,研究了高强材料对钢管混凝土柱力学性能的影响,并与现有规范相比较,总结出各国规范对于采用高强材料和大长细比柱子的限制。Z. B. Wang 等^[6]通过试验对圆钢管混凝土柱展开了研究,并且进行回归分析以提出简化模型来预测组合柱的抗压强度、抗压刚度和对应于延性的压缩应变,对承载力的稳定系数进行校准。

FRP 由于具有轻质高强、可塑性好、耐腐蚀性好等优点,被大量应用于 FRP-钢-混凝土组合柱中。T. Yu 等^[7]对 FRP 约束圆钢管混凝土的组合柱进行试验,结果表明 FRP 能有效地延缓甚至阻止悬臂 CFT 柱端部向外的局部屈曲,从而显著改善组合柱在恒定轴向压力和循环侧向荷载作用下的结构性能。J. W. Park 等^[8]通过轴向压缩试验研究了 CFRP 包裹的圆钢管混凝土柱的峰值荷载和延性性能,并提出了 FRP 增强 CFT 柱的轴向受压承载力设计公式。

钢管混凝土压弯构件的破坏通常是由于压弯作用下钢管的局部屈曲或混凝土被压碎所导

致的。内置工字形 CFRP 型材的钢管混凝土柱是李幅昌团队经过研究提出的一种新型组合结构^[9]。将 CFRP 型材作为一个承重单元置于组合柱中,通过与钢管的共同约束,可以有效提高混凝土的延性。在提升构件承载能力、减轻自重的同时,降低了钢材的消耗。

在实际工程中的钢管混凝土柱常作为受压构件且长细比较大,容易发生失稳破坏。为了更好地了解长细比对此类构件力学性能的影响,笔者通过 ABAQUS 有限元软件模拟分析不同长细比下各参数对构件力学性能的影响,为该类型柱在实际工程中的设计提供依据。

1 有限元模型建立

1.1 模型参数

笔者以长细比作为变量对 8 个组合柱进行

模拟。截面形式如图 1 所示,圆钢管采用 Q770 高强钢材,采用轴心抗压强度为 100 MPa 的高强混凝土,组合柱直径为 183 mm,CFRP 型材尺寸见图 1。模型参数见表 1。

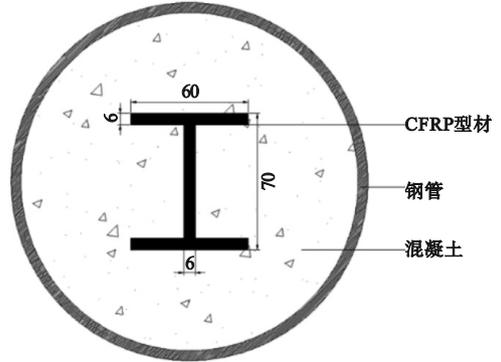


图 1 截面形式

Fig. 1 Cross-sectional form

表 1 模型参数

Table 1 Main parameters of models

试件编号	$D \times t \times L/\text{mm}$	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	λ	N_u/kN
AC-1	183 × 5 × 1 220	770	100	26.67	4 525.89
AC-2	183 × 5 × 1 830	770	100	40.00	4 218.39
AC-3	183 × 5 × 2 440	770	100	53.33	3 518.18
AC-4	183 × 5 × 3 050	770	100	66.67	2 825.33
AC-5	183 × 5 × 3 416	770	100	74.67	2 670.43
AC-6	183 × 5 × 3 470	770	100	75.85	2 543.29
AC-7	183 × 5 × 3 500	770	100	76.50	2 471.12
AC-8	183 × 5 × 3 660	770	100	80.00	2 230.04

注: D 为钢管直径; t 为钢管壁厚; L 为试件长度; f_y 为钢管屈服强度; f_{cu} 为混凝土抗压强度; λ 为试件长细比; N_u 为试件承载力。

端板、核心混凝土与圆钢管采用实体单元 (C3D8R), CFRP 采用连续壳单元 (SC8R)。CFRP 型材建模采用三层不同方向的纤维。端板与钢管采用“绑定”接触,端板与填充混凝土采用“硬”接触。对于钢管-混凝土接触,使用“硬”接触模型模拟纵向接触,使用库仑摩擦模型结合 0.6 的摩擦系数模拟切向接触行为^[10-12]。有限元模型如图 2 所示。

1.2 材料本构关系

高强钢管采用双线性模型,泊松比为 0.3,在该模型中,屈服强度后的曲线斜率简

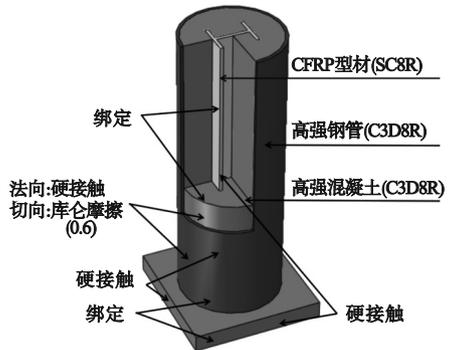


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

化为 $0.01 E_s$ ^[13]。高强混凝土的本构关系采用在考虑约束效应系数的本构关系基础上修正

简化的应力 - 应变关系^[14]。CFRP 使用 ABAQUS 中的三层复合材料铺层模拟,包括顶部和底部厚度为 0.5 mm 的碳纤维织物和厚度为 5 mm 的单向碳纤维铺层,各层均视为均质、线弹性的正交各向异性材料^[15]。采用基于 ABAQUS 的二次开发子程序 USDFLD,使用 Tsai-Wu 失效强度准则判断 CFRP 的失效。

1.3 模型验证

笔者对文献[16-17]中的试件进行模拟,结果见表2,试件 ACC-1、AS-1 荷载 - 位移曲线如图3所示。从表2和图3可以得出,极限承载力模拟结果和试验结果最大误差

为 6.3%,平均误差小于 5%,表明试验结果与模拟结果吻合良好,验证了有限元模拟方法的正确性。

表2 模型验证结果

Table 2 Finite element model validation

试件编号	N_{uc}/kN	N_{uf}/kN	N_{uc}/N_{uf}	误差/%
ACC-1	3 601	3 485	1.03	3.2
ACC-2	3 471	3 385	1.02	3.3
ACC-3	3 431	3 216	1.06	6.3
AS-1	2 669	2 614	1.02	2.1
AS-3	2 245	2 241	1.00	0.1
AS-5	2 176	2 098	1.04	3.6

注: N_{uc} 为试验峰值荷载; N_{uf} 为模拟峰值荷载。

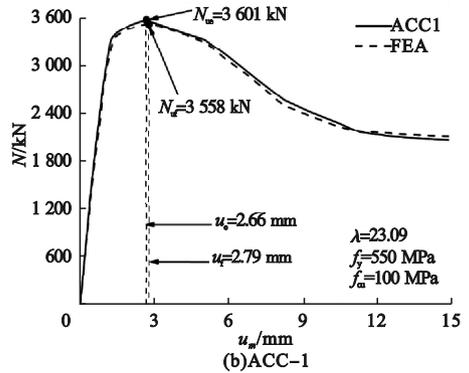
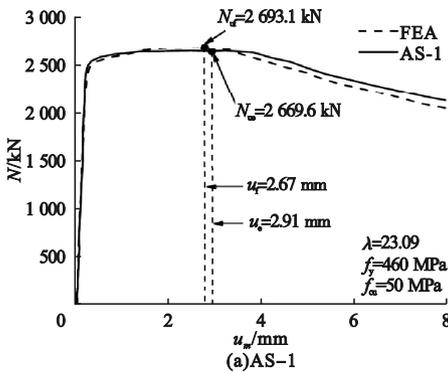


图3 荷载 - 位移曲线

Fig. 3 Load-span deflection curves

2 结果与分析

2.1 受力过程分析

典型构件 AC-2 的荷载 - 跨中挠度曲线如图4所示。

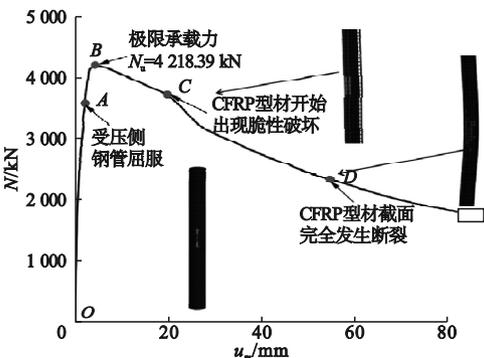


图4 试件 AC-2 荷载 - 跨中挠度曲线

Fig. 4 Load-span deflection curve of specimen AC-2 在曲线中定义4个特征点:A点为钢管

屈服点, B 点为构件达到峰值荷载, C 点为 CFRP 开始破坏, D 点为 CFRP 横截面断裂。曲线分为三个阶段:

(1) 弹性阶段(OA 段): 在 A 点受压侧钢管达到屈服应力。加载初期, 构件处于弹性工作状态, 此阶段构件全截面受压, 曲线呈线性增长, 构件的侧向变形发展较小。

(2) 弹塑性阶段(AB 段): 随着荷载的增加, 钢管与混凝土之间产生接触应力, 构件进入弹塑性阶段。在 B 点构件达到极限承载力。混凝土与钢管产生相互作用力, 由于 CFRP 型材和钢材的共同约束, 受压侧混凝土受到的最大压应力超过其抗压强度。

(3) 下降段(BD 段): C 点处工字形 CFRP 型材开始发生脆性破坏, 构件承载力呈现骤降趋势。在 D 点处工字形 CFRP 型

材完全发生断裂。

2.2 长细比对荷载 - 位移关系曲线的影响

不同长细比下试件荷载 - 挠度曲线如图 5 所示。由图可知,组合构件的承载能力和初始刚度随着长细比的增大均不同程度地降低,长细比每增大 13,组合柱承载力的分别降低了 7.93%、15.57%、19.69% 和 21.07%。达到峰值荷载后,跨中挠度迅速增加,挠度为 1.52 ~ 35.58 mm。

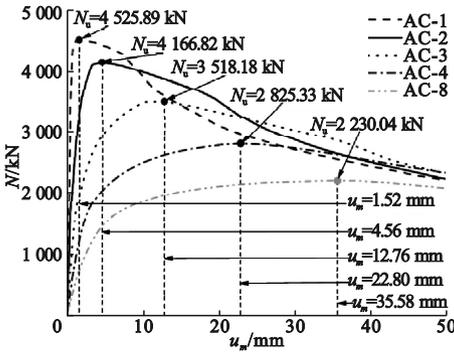


图 5 长细比对荷载 - 挠度曲线的影响

Fig. 5 Effect of slenderness ratios on load-deflection curves

3 界限长细比分析验证

3.1 界限长细比分析

内置工字形 CFRP 型材的高圆钢管高强混凝土柱发生失稳破坏时,当长细比较小,钢管受压侧屈服,受拉侧钢管未达到屈服应力,混凝土受压侧应力值达到其抗压强度,此时构件发生弹塑性失稳破坏。随着长细比的增大,当构件达到极限承载力时,钢管未发生屈服,此时构件为弹性失稳破坏。因此存在一

个界限长细比划分构件的弹塑性失稳破坏和弹性失稳破坏。

以长细比为变量的荷载 - 纵向应变曲线如图 6 所示。长细比取值为 26.67 ~ 83.06。分析表明,当长细比 $\lambda = 66.67$ 时,钢管在极限状态下的纵向应变达到 0.003 737;当 $\lambda \geq 66.67$ 时,构件在弹性阶段达到极限承载力。

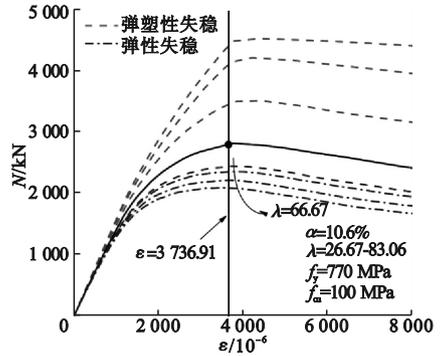
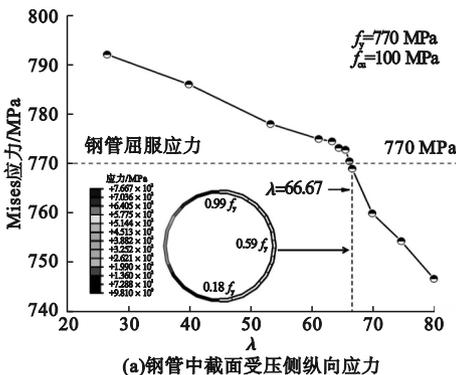


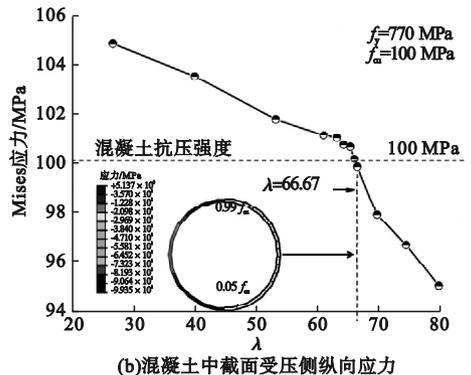
图 6 荷载 - 纵向应变曲线

Fig. 6 The load-longitudinal strain curves

长细比影响下钢管中截面 Mises 应力及混凝土中截面应力如图 7 所示。从图中可以看出,当构件达到极限承载力时,随着长细比的增大,混凝土受压侧最大应力逐渐较小。当长细比为 66.67 时,混凝土受压侧最大应力值未达到极限强度,并且钢管受压侧最大应力未达到屈服应力,构件发生弹性失稳破坏;相比于发生弹塑性失稳破坏的构件,材料强度没有得到充分发挥。故针对于笔者所设计的组合柱,发生弹塑性失稳破坏和弹性失稳破坏界限长细比为 66.67。



(a) 钢管中截面受压侧纵向应力



(b) 混凝土中截面受压侧纵向应力

图 7 长细比对应力的影响

Fig. 7 The effect of the slenderness ratio on stress

3.2 界限长细比模型验证

文献[13]中提出的圆钢管混凝土轴压构件发生弹性失稳界限长细比的计算式为

$$\lambda_p = 1743 / \sqrt{f_y} \quad (3)$$

式中: λ_p 为界限长细比; f_y 为钢管屈服强度。

表3 界限长细比验证

Table 3 The length of the boundary is verified

编号	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	λ_{PF}	λ_P	误差/%
1	550	60	76.50	74.32	2.93
2	550	80	75.41	74.32	1.47
3	460	100	83.06	81.26	2.22
4	550	100	76.28	74.32	2.64
5	690	100	68.85	66.35	3.77
6	890	100	62.29	59.32	5.02

注: λ_{PF} 为模拟所得界限长细比; λ_P 为公式计算值。

将试件 AC-2 参数代入式(1)中得到弹性失稳界限比为 62.81,与笔者计算得出的界限长细比相差 5%。对表 3 中 6 个不同参数下组合柱的界限长细比模拟值与公式计算值进行对比,得到平均误差值为 3.01%。经验证,式(3)适用于笔者所设计组合柱发生弹塑性失稳破坏和弹性失稳破坏的界限长细比的计算。

4 长细比对力学性能的影响

4.1 长细比对接触应力的影响

图 8 为 $\lambda = 26.67$ (发生弹塑性失稳破坏)和 $\lambda = 80$ (发生弹性失稳破坏)构件的接触应力-跨中挠度曲线。由图可知,在弹性阶段,钢管与核心混凝土之间没有相互作用,

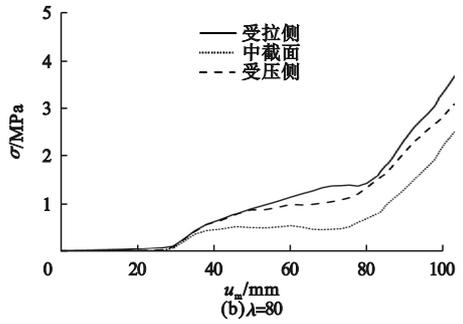


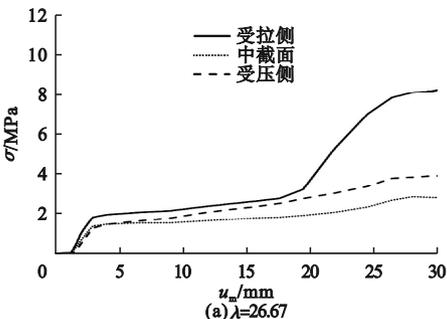
图 8 长细比对接触应力的影响

Fig. 8 Effect of slenderness ratio on contact stress
构件在轴向压力的作用下侧向挠度逐渐增加,导致钢管的横向变形缩小,混凝土受到外钢管的约束作用逐渐增大。对于发生弹性失稳破坏的构件,在达到峰值荷载后,钢管与混凝土接触应力出现大幅增长。

4.2 不同长细比下的参数分析

4.2.1 各参数对荷载-挠度曲线的影响

钢管屈服强度 f_y 和混凝土强度 f_{cu} 对组合柱荷载-挠度的影响曲线如图 9 所示。从图 9(a)可以看出,高强钢管的应用提高了钢管混凝土柱的承载能力。当 $\lambda = 40$ 时,钢材屈服强度从 550 MPa 增大到 890 MPa,构件极限承载力提高了 29.67%;当 $\lambda = 53.33$ 时,相同的增长幅度下,钢材的屈服强度对构件承载力的提升幅度略有下降,但也达到了 19.32%;当 $\lambda = 80$ 时,提升幅度仅为 3.19%。分析表明,随着长细比的增大,钢材屈服强度对构件极限承载力的提高幅度呈下降趋势。长细比较大的构件由于发生弹性失稳破坏,当达到极限荷载时钢管的应力小于屈服应力,高强钢管不能充分发挥其材料性能,导致对构件峰值承载能力的提高并不明显。从图 9(b)可以看出,对于采用高强混凝土的组合柱,随着长细比的增大,混凝土强度从 80 MPa 增加到 110 MPa,极限承载力的提高幅度有所下降但并不明显。因此,对于发生弹性失稳破坏的构件,通过提高混凝土强度来提高组合柱极限承载力的效果最好。发生弹塑性失稳破坏的构件,可以通过提高钢管屈服强度达到提高组合柱极限承载力的目的。



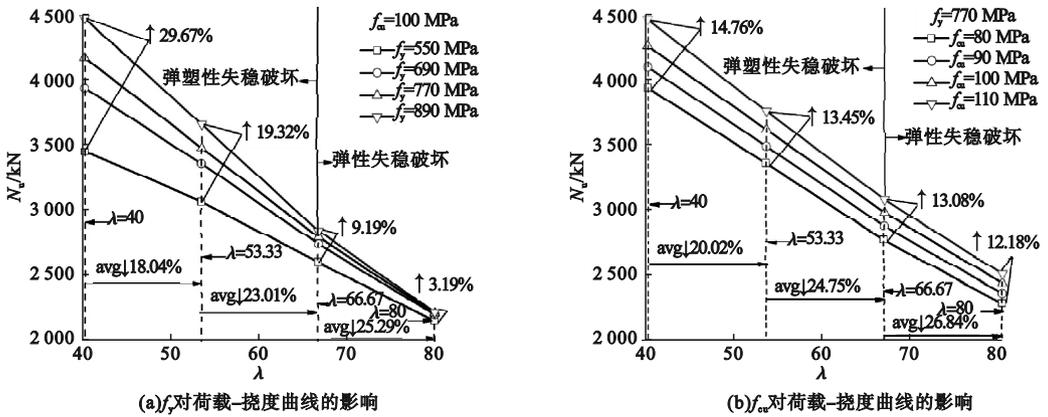


图9 不同参数对组合柱荷载-挠度曲线的影响

Fig. 9 The influence of each parameter on load-deflection curves

4.2.2 延性系数

较好的延性是钢管混凝土组合柱的优点,笔者通过延性系数 DI 对构件受力过程中的延性变化进行分析:

$$DI = \frac{u_{0.85max}}{u_{max}} \quad (3)$$

式中: u_{max} 、 $u_{0.85max}$ 分别为构件达到峰值荷载时所对应的中截面挠度值及承载力下降到 $0.85 N_u$ 时所对应的中截面挠度值。

长细比对构件延性系数的影响如图 10 所示。从图中可以看出, $\lambda = 40$ 时,钢管屈服强度从 550 MPa 增加到 770 MPa,构件的延性系数增加了 1.64。随着钢材屈服强度的提高,组合柱在峰值荷载后的挠度增长较大,并且变形的发展速度加快,延性系数也随之提高。因此使用高强钢管使得钢管混凝土组合柱的延性得到了良好的提升。

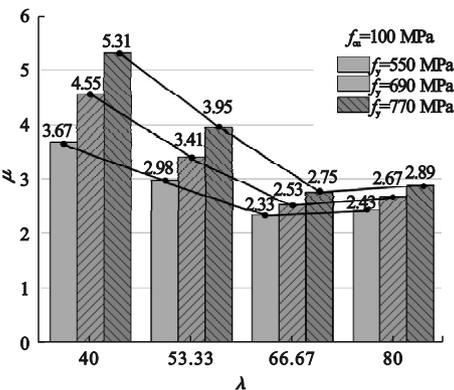


图10 长细比对延性系数的影响

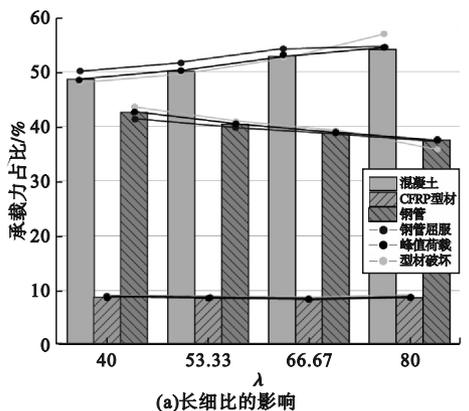
Fig. 10 Effect of slenderness ratio on ductility

随着长细比的增大, $f_y = 770$ MPa 时,构件的延性系数下降了 2.56,在超过界限长细比后增加了 0.14。因为发生弹性失稳破坏的构件在峰值荷载后的挠度发展较快,而发生弹塑性失稳破坏的构件在弹性阶段钢管与混凝土之间并无约束作用。

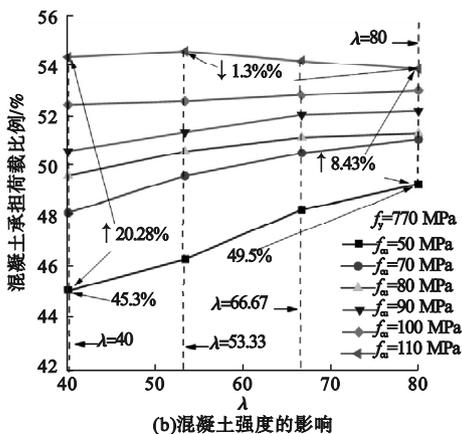
4.3 各参数对分担荷载的影响

不同参数对组合柱各部分承载力占比的影响如图 11 所示。由图 11(a)可知,在其他参数不变的前提下,峰值荷载处钢管所承担的荷载随着长细比的增大而逐渐减小,CFRP 型材承载能力保持稳定,混凝土所承担的荷载有所提高。由图 11(b)可知,对于高强混凝土,随着 f_{cu} 的增大,混凝土所承担荷载占比增大。 $f_{cu} = 110$ MPa 时,随着长细比的增加,混凝土所承担承载占比下降了 1.3%,即钢管所承担的比例略有提高,说明混凝土强度的增加可以延缓钢管的局部屈曲。对于 $f_{cu} = 50$ MPa 的普通强度混凝土,随着长细比的增大,其所承担的荷载占比约为 45.3% ~ 49.5%,进一步说明与普通混凝土相比,高强混凝土能与高强钢管更好的匹配。由图 11(c)可知,钢管所承担的荷载比例随着钢材屈服强度的增大而增大,随着长细比的增大而减小。当 $\lambda = 80$ 时,由于发生了弹性失稳破坏,随着钢管屈服强度由 460 MPa 增大到 890 MPa,钢管所承担荷载的比例仅增加 1.6%。所以仅通过提高钢管屈服强度来增

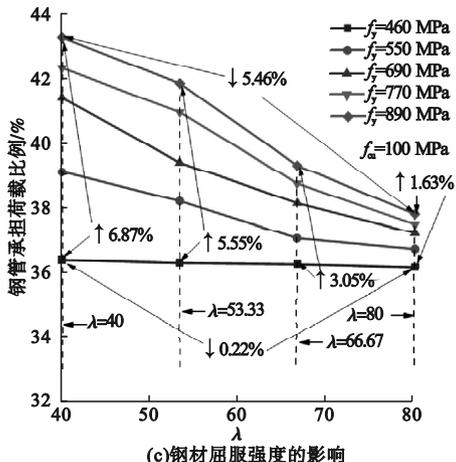
大钢管的承担荷载比例的效果不明显。



(a)长细比的影响



(b)混凝土强度的影响



(c)钢材屈服强度的影响

图 11 不同参数对组合柱各部分承担荷载的影响

Fig. 11 The effect of the combine parameters on the proportion of the bearing capacity of each component

4.4 CFRP 对构件力学性能的影响

CFRP 型材对组合柱承载力影响如图 12 所示。从图中可以看出,工字形 CFRP 型材对于发生弹塑性失稳破坏组合柱的极限承载力平均提高幅度在 5%;对于超过界限长细

比的组合柱,承载力的提高呈不规律变化,平均提高幅度在 2.57%。由此表明,工字形 CFRP 型材对于发生弹塑性失稳破坏的组合柱承载力提升更显著。

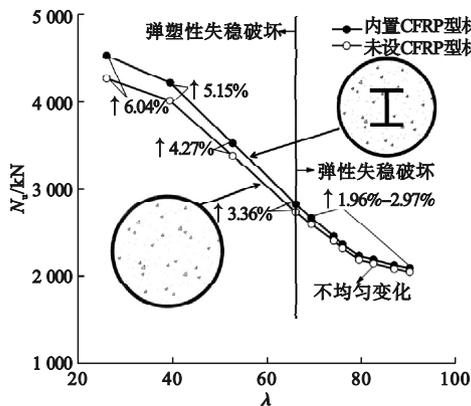


图 12 CFRP 型材对组合柱承载力影响

Fig. 12 The influence of CFRP profile on bearing capacity of combination columns

CFRP 型材对组合柱承载力提高率的影响如图 13 所示。从图中可以看出,对于采用高强钢材的钢管混凝土组合柱,随着钢材强度的增大,承载力也随之增大。CFRP 型材加强了对核心混凝土的约束,使其对承载力的提升效果更好。高强混凝土体现出与之相反的趋势,随着混凝土强度的提高,CFRP 对组合柱承载能力的提高程度逐渐减小。

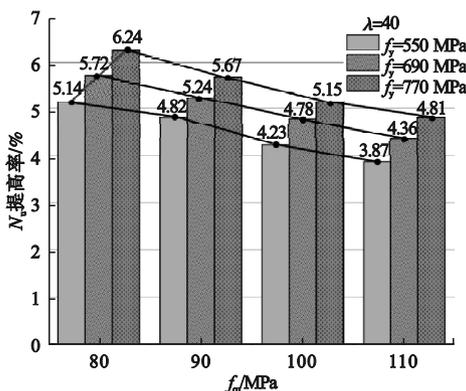


图 13 CFRP 型材对组合柱承载力提高率的影响

Fig. 13 The influence of CFRP profile on the increase rate of combined column Nu increase rate

5 结论

(1)笔者提出的内置工字形 CFRP 型材

的高强圆钢管高强混凝土轴压构件发生弹性和弹塑性失稳破坏的界限长细比为 66.67。经验证理论公式的预测值与模拟值平均误差为 3.01%，适用于此类型组合柱界限长细比的计算。

(2) 高强钢管的应用使组合柱获得了更好的延性。对于发生弹性失稳破坏的构件，仅通过提高钢管屈服强度来增加组合柱的极限承载力效果并不理想，建议发生弹性失稳破坏的组合柱可以通过提高混凝土强度来达到提高构件承载力的目的；发生弹塑性失稳破坏的构件通过提高钢管屈服强度对承载力提升效果更好。

(3) 当构件达到极限荷载时，高强混凝土所承担荷载随着混凝土强度增大而增大，与普通强度混凝土相比，高强混凝土与高强钢管的组合效应更好。CFRP 型材对极限承载力的提升主要体现在发生弹塑性失稳破坏的构件。

参考文献

- [1] XIONG M X, XIONG D X, LIEW R J. Behaviour of steel tubular members infilled with ultra high strength concrete [J]. Journal of constructional steel research, 2017, 138: 168 - 183.
- [2] LI Guochang, CHEN Bowen, YANG Zhijian, et al. Experimental and numerical behavior of eccentrically loaded square concrete-filled steel tubular long columns made of high-strength steel and concrete [J]. Thin-walled structures, 2021, 159: 1072899
- [3] YANG Y F, HAN L H. Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) stub columns under eccentric partial compression [J]. Thin-walled structures, 2011, 49(2): 379 - 395.
- [4] 韦建刚, 罗霞, 谢志涛. 圆高强钢管超高性能混凝土轴压柱稳定性试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增刊 1): 200 - 206.
(WEI Jiangan, LUO Xia, XIE Zhitao. Stability of ultra-high performance concrete filled high-strength steel tube columns subjected to axial load [J]. Journal of building structures, 2019, 40(S1): 200 - 206.)
- [5] THAI S, THAI H T, UY B. Concrete-filled steel tubular columns; test database, design and calibration [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 157: 161 - 181.
- [6] WANG Z B, TAO Z, HAN L H, et al. Strength, stiffness and ductility of concrete-filled steel columns under axial compression [J]. Engineering structures, 2017, 135: 209 - 221.
- [7] YU T, HU Y M, TENG J G. Cyclic lateral

response of FRP-confined circular concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 124: 12 - 22.

- [8] PARK J W, HONG Y K, HONG G S, et al. Design formulas of concrete filled circular steel tubes reinforced by carbon fiber reinforced plastic sheets [J]. Procedia engineering, 2011, 14: 2916 - 2922.
- [9] LI G C, YANG Y, YANG Z J, et al. Mechanical behavior of high-strength concrete filled high-strength steel tubular stub columns stiffened with encased I-shaped CFRP profile under axial compression [J]. Composite structure, 2012, 275: 114504.
- [10] 王玉钊, 傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(WANG Yuzhuo, FU Chuanguo. ABAQUS structural engineering analysis and case study [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.)
- [11] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
(WANG Xucheng, SHAO Min. Basic principle and numerical method of finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.)
- [12] TAO Z, WANG Z, YU Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 89: 121 - 131.
- [13] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究 [D]. 福州: 福州大学, 2005.
(LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.)
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2016.)
- [15] ABDEL-RAHMAN N, SIVAKUMARAN K S. Material properties models for analysis of cold-formed steel members [J]. Journal of structural engineering, 1997, 123(9): 1135 - 1143.
- [16] 李润泽. 内置工字形 CFRP 型材的高强方钢管高强混凝土轴压中长柱受力性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.
(LI Runze. Research on mechanical behavior of high strength concrete-filled high strength square steel tube middle-long columns with inner I-shaped CFRP under axial load [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021.)
- [17] 李岷昌, 朱振华, 孙行, 等. 内置工字形 CFRP 型材的方钢管混凝土轴压长柱受力性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增刊 1): 226 - 232.
(LI Guochang, ZHU Zhenhua, SUN Xing, et al. Experimental research on concrete-filled square steel tubular slender columns with inner I-shaped CFRP under axial compression [J]. Journal of building structures, 2017, 38(S1): 226 - 232.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)