

文章编号:2095-1922(2024)01-0001-09

doi:10.11717/j.issn:2095-1922.2024.01.01

# 内置工字型 CFRP 型材高强圆钢管高强混凝土 轴压短柱组合效应分析

李帼昌,西志远,李 晓

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究内置工字型 CFRP 型材的高强圆钢管高强混凝土短柱在轴心压力作用下三种材料的组合效应。方法 采用有限元分析软件 ABAQUS 对其进行数值模拟,通过相关试验验证模型的准确性,并对典型构件的破坏形态、受力全过程曲线进行分析,揭示构件各组成部分之间的相互作用和工作机理,评估 CFRP 配置率、钢材屈服强度、混凝土抗压强度、约束效应系数对组合效应的影响。结果 在 高强圆钢管 高强混凝土柱中内置 CFRP 型材,对构件的延性及安全裕度有显著提高,并改善了 高强圆钢管对高强混凝土的约束,提高了构件的组合效应。结论 CFRP 配置率控制在 5.9%~8.4%,约束效应系数在 1.2~1.4,钢材屈服强度不大于 770 MPa 时,构件中三种材料组合效应最佳。

**关键词** 轴压短柱;高强圆钢管高强混凝土;CFRP 型材;约束机理;组合效应

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

**引用格式:**李帼昌,西志远,李晓.内置工字型 CFRP 型材高强圆钢管高强混凝土轴压短柱组合效应分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):1-9. (LI Guochang, XI Zhiyuan, LI Xiao. Analysis of combined effect of high strength circular steel tube and high strength concrete short columns under axial compression with I-shaped CFRP profiles[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(1):1-9.)

## Analysis of Combined Effect of High Strength Circular Steel Tube and High Strength Concrete Short Columns under Axial Compression with I-Shaped CFRP Profiles

LI Guochang, XI Zhiyuan, LI Xiao

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

**Abstract:** In order to research the combined effect of three materials on the high-strength concrete filled high-strength circular steel tube short columns with I-shaped CFRP profiles under axial compression. The finite element analysis software ABAQUS is used to conduct numerical simulation, verify the accuracy of the model through relevant tests, and analyze the failure form and

收稿日期:2023-01-06

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。

stress curve of typical components, reveal the interaction and working mechanism between components of the component, and evaluate the effect of CFRP configuration ratio, steel yield strength, concrete compressive strength, and confinement effect coefficient on combined effect. The CFRP profiles embedded in the high-strength circular steel tube and high-strength concrete column can significantly improve the ductility and safety margin of the members, improve the confinement of the steel tube to the concrete, and improve the combined effect of the members. If the CFRP configuration ratio is controlled at 5.9% ~ 8.4%, the confinement effect coefficient is between 1.2 ~ 1.4, and the steel yield strength is not greater than 770 MPa, then the combined effect of the three materials is the best.

**Key words:** axially compressed stub column; high strength circular steel tube high strength concrete; CFRP profiles; confinement mechanism; combined effect

钢管混凝土柱 (Concrete-Filled Steel Tubular, CFST) 具有强度高、自重轻、抗震性能好等优点<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着建筑结构逐渐向大跨度、超高层发展,高强材料在钢管混凝土柱中的应用越来越普遍<sup>[3-4]</sup>。

J. Y. Liew、韦建刚等<sup>[5-9]</sup>对高强圆钢管高强混凝土短柱在轴心压力作用下的破坏模态、荷载-位移曲线和极限承载力进行了研究,讨论了现行规范对高强圆钢管高强混凝土短柱的适用性,并对规范中规定的承载力计算公式进行了修正。为推广高强钢管高强混凝土结构向更轻质、更高强、更高性能方向发展,李幅昌团队<sup>[10-12]</sup>结合纤维增强树脂复合材料 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 轻质、高强等特点,提出将工字型 CFRP 型材内置于钢管混凝土柱中,该组合柱的设计充分发挥了混凝土、钢管、CFRP 型材三者的材料性能,达到了相互增强的效果<sup>[13]</sup>。目前,该团队主要对内置工字型 CFRP 型材的方钢管混凝土柱进行深入研究<sup>[14-16]</sup>。以往学者对高强圆钢管高强混凝土短柱的研究主要针对其极限承载力方面,而对其组合效应的研究还比较欠缺,为了深入分析高强圆钢管、高强混凝土、CFRP 型材三者的最佳匹配准则,有必要对内置工字型 CFRP 型材的高强圆钢管高强混凝土轴压短柱的组合效应进行研究。基于此,笔者基于有限元分析软件 ABAQUS 建立的理论模型,分析了内置 CFRP 型材对高强圆钢管高强混凝土短柱延性、安全裕度、

承载力提高系数的影响,提出了高强圆钢管、高强混凝土、工字型 CFRP 型材三种材料的强度匹配建议,为工程设计提供参考。

1 精细化分析模型建立

1.1 建模过程

内置工字型 CFRP 型材的高强圆钢管高强混凝土柱模型如图 1 所示。

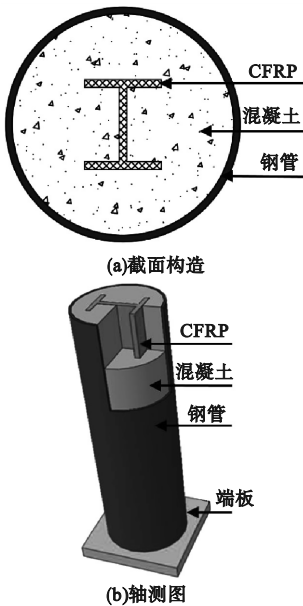


图 1 内置工字型 CFRP 型材的高强圆钢管高强混凝土柱

Fig. 1 High strength circular steel tube high strength concrete column with built-in I-shaped CFRP profiles

其中钢管和混凝土采用八节点三维实体单元 (C3D8R) 建模,钢管与混凝土的界面采用面面接触,其中法向为硬接触,切向接触采

用库伦摩擦,摩擦系数取 0.6<sup>[17]</sup>。文献[13]研究表明,加载后 CFRP 型材与混凝土之间没有相对滑移,因此 CFRP 与混凝土界面定义为绑定约束。采用刘威在韩林海教授提出考虑约束效应系数的本构关系基础上修正简化的混凝土应力-应变关系<sup>[18]</sup>,钢材本构关系采用韩林海教授简化的高强双线性模型<sup>[19]</sup>。基于 ABAQUS 二次开发的子程序 USDFLD,应用 Tsai-Wu 失效准则来判别工字型 CFRP 型材的单层材料失效。

1.2 模型验证

验证模型的试件参数见表 1。目前高强圆钢管高强混凝土轴压短柱的试验研究较

多,但内置型材的高强圆钢管高强混凝土短柱的试验研究在文献中鲜有报道。为了建立精确的有限元模型,笔者根据表 1 的试验数据,分别验证图 2 中两种模型的可靠性,进而间接完成对构件有限元模型的验证。从图 2 可以看出,试验结果与模拟结果吻合较好,说明建模准确。从表 1 可以得出,试件 CC6-C-8 模拟峰值载荷与试验峰值载荷差值最小,为 0.8%;CC6-A-8 模拟峰值载荷与试验峰值载荷相差最大,为 3.0%。两个峰值载荷相差均小于 5.0%,故笔者建模方法准确,可用于后文参数分析。

表 1 试件参数  
Table 1 Parameters of test piece

试件 编号	$D(B) \times t \times L /$ mm	$H \times B_{cf} \times t_w \times t_f /$ mm	$f_c' /$ MPa	$f_y /$ MPa	$N_E /$ kN	$N_{FE} /$ kN	误差/ %	数据 来源
CC6-A-8	122 × 4.54 × 366	—	77	576	2 100	2 036	3.0	文献[20]
CC6-C-8	238 × 4.54 × 714	—	77	507	5 578	5 621	0.8	文献[20]
CC8-C-8	222 × 6.47 × 666	—	77	843	7 304	7 157	2.0	文献[20]
CC8-D-8	337 × 6.47 × 1011	—	85.1	823	13 776	13 921	1.1	文献[20]
SC2-2	150 × 5 × 450	70 × 60 × 6 × 6	82	780.8	4 308	4 210	2.3	文献[21]
SC3-2	150 × 5 × 454	70 × 60 × 6 × 6	82	811.1	4 343	4 304	0.9	文献[21]

注; $D$ 为钢管直径; $B$ 为钢管宽度; $t$ 为钢管壁厚; $L$ 为钢管高度; $H$ 为 CFRP 型材高度; $B_{cf}$ 为 CFRP 型材翼缘宽度; $t_w$ 为 CFRP 型材腹板厚度; $t_f$ 为 CFRP 型材翼缘厚度; $f_c'$ 为混凝土圆柱体抗压强度; $f_y$ 为钢材屈服强度; $N_E$ 为构件极限承载力试验值; $N_{FE}$ 为构件极限承载力模拟值。

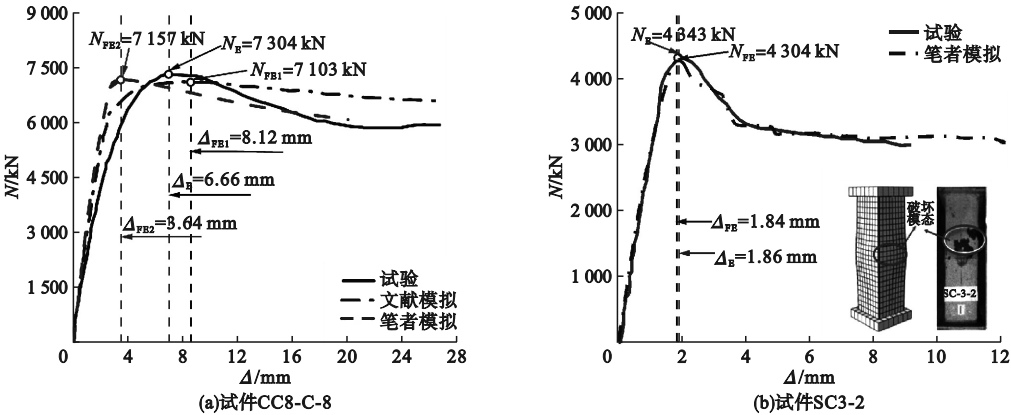


图 2 模型验证  
Fig. 2 Model validation

2 典型构件分析

2.1 受力全过程分析

图 3 为典型构件荷载-位移曲线。图 4 为各特征点工字型 CFRP 型材破坏形态,图

中浅色区域为纤维失效区域(破坏),深色区域为纤维正常工作区域。图 5 为钢管与混凝土跨中截面接触应力曲线,根据其受力特点将构件全过程曲线分为五个阶段。

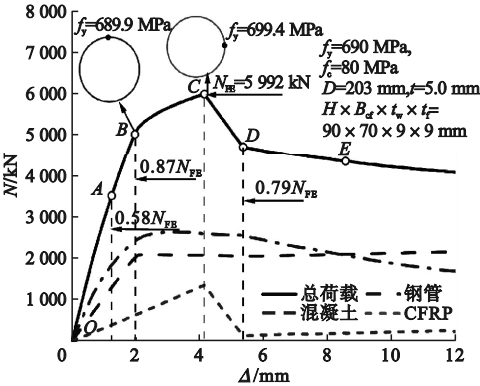


图3 典型构件荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-deflection curves of typical components

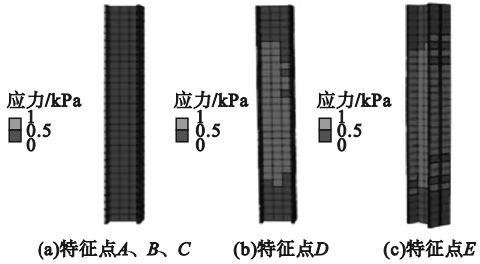


图4 CFRP破坏形态

Fig. 4 Failure mode of CFRP

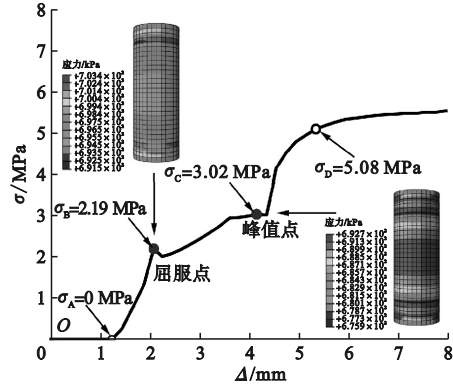


图5 钢管与混凝土接触应力

Fig. 5 Contact stress between steel tube and concrete

(1)弹性阶段(OA段)。此阶段构件各组成部分分担荷载-位移曲线均为线性状态,各材料均处于弹性阶段。因该阶段钢管与混凝土之间无相互作用产生,故工字型CFRP 型材、混凝土以及外钢管三者均独立承担荷载。

(2)弹塑性阶段(AB段)。根据构件屈服点的定义,构件中某一材料部分或全部率先到达材料屈服点或破坏点时所对应构件荷

载-位移( $N-\Delta$ )曲线上的点,称为构件的屈服点<sup>[22]</sup>(见图3)。在B点时钢材达到屈服应力开始屈服,故定义B点为构件屈服点。如图5所示,钢管与混凝土在此阶段开始有接触应力产生,此时钢管并未屈服,但二者接触应力迅速增加,说明此阶段混凝土已经发生塑性变形,钢管开始对混凝土产生约束效应。因钢管未屈服故认为此阶段钢管对混凝土表现为“弹性约束”特征<sup>[23]</sup>。

(3)塑性强化阶段(BC段)。C点为构件承载力极值点,此阶段荷载-位移曲线及混凝土分担荷载-位移曲线趋于平缓,主要原因在于CFRP 型材有效地延缓了混凝土中剪切斜裂缝的产生和发展,从而使钢管对混凝土的约束效应得以充分发挥,使其侧向压力增大,改善了其三向受压状态。且此阶段钢管与混凝土接触应力较平缓,主要原因在于此时钢管已经屈服,钢管对混凝土表现为“塑性约束”特征。

(4)下降阶段(CD段)。如图4所示,在特征点D点时,CFRP 在腹板处已发生脆性断裂,对混凝土约束效应也有所降低,故CFRP 断裂不仅使其分担荷载急剧下降,混凝土分担荷载也有所下降,导致构件承载力急剧下降至极限承载力的79%。

(5)平台阶段(DE段)。在此阶段CFRP 发生脆性破坏已退出工作,但钢材与混凝土仍具有稳定的残余强度,所以随着纵向位移的增加,荷载缓慢下降。

2.2 约束机理分析

为研究高强圆钢管与普通圆钢管对高强混凝土约束机理的差异,对含钢率、混凝土强度相同,但钢材屈服强度不同的两个构件进行对比分析。图6为普通圆钢管高强混凝土构件与高强圆钢管高强混凝土构件跨中截面处钢管与混凝土接触应力对比图。从图中可以看出,对于普通圆钢管高强混凝土构件,普通钢管与高强混凝土之间的接触应力出现在钢管屈服之后,表明普通钢管与高强混凝土



产生接触应力时,普通钢管对高强混凝土表现为“弹塑性约束”特征。而对于高强圆钢管高强混凝土构件,高强钢管与高强混凝土之间的接触应力出现在钢管屈服之前,表明高强混凝土率先处于“弹性约束”,当高强钢管屈服之后高强混凝土才处于“塑性约束”。在构件达到峰值荷载时,高强圆钢管高强混凝土构件中钢管与混凝土之间的接触应力与普通圆钢管高强混凝土柱相比提高了 73.6%,混凝土最大纵向应力提高了 31.6%,故与普通钢管相比,高强钢管对高强混凝土的约束效果更加显著。

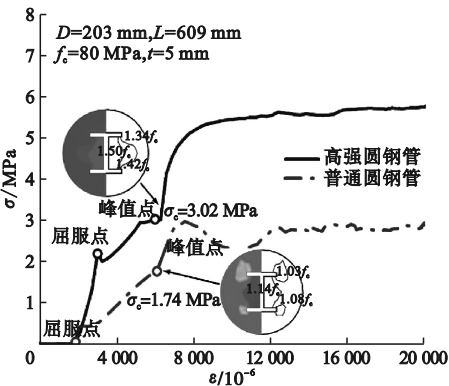


图 6 接触应力 - 纵向应变曲线

强混凝土柱组合效应的影响,将 CFRP 体积占构件总体积的比值定义为 CFRP 配置率,记为  $\rho$ ,并设计了 20 个不同参数的有限元模型。材料强度取值: $f_y = 460$  MPa、 $f_c = 70 \sim 100$  MPa,CFRP 配置率为  $0 \sim 11.4\%$ 。

图 7 为 CFRP 配置率与  $I_s$  关系曲线。从图中可以看出,当 CFRP 配置率从 0 增长到 2.8% 时,  $I_s$  最高仅提高了 0.21%;当 CFRP 配置率从 2.8% 增长到 11.4% 时,  $I_s$  最低分别提高了 3.56%、2.42%、2.04%。表明  $I_s$  提高率呈现先缓慢增长、然后迅速提高、最终趋于平缓的趋势。故为充分发挥高强圆钢管、高强混凝土、CFRP 三者的组合效应,建议将 CFRP 配置率应控制在 5.9% ~ 8.4%。

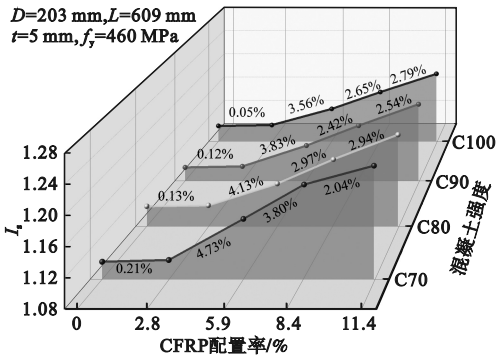


图 7 CFRP 配置率与  $I_s$  关系曲线

### 3 内置工字型 CFRP 型材对高强圆钢管高强混凝土构件的影响

为了更直观地描述构件的组合效应,引入承载力提高系数  $I_s$  来评估三种材料的组合效应<sup>[7]</sup>:

$$I_s = \frac{N_u}{f_c A_c + f_y A_s + f_{cf} A_{cf}} \quad (1)$$

式中:  $N_u$  为构件极限承载力;  $f_c$  为混凝土抗压强度;  $f_y$  为钢材屈服强度;  $f_{cf}$  为工字型 CFRP 抗压强度;  $A_c$ 、 $A_s$ 、 $A_{cf}$  分别为混凝土、钢材、工字型 CFRP 截面面积。

#### 3.1 内置工字型 CFRP 型材对高强圆钢管高强混凝土组合效应及延性的影响

为研究内置 CFRP 型材对高强圆钢管高

Fig. 7 Relationship curves between CFRP configuration ratio and  $I_s$

$\Delta_u/\Delta_y$  为构件极限荷载与屈服荷载的位移比,可用于确定轴压构件的延性;  $N_y/N_u$  为构件屈服与破坏之间的安全裕度<sup>[23]</sup>。图 8 为 CFRP 配置率与延性、安全裕度关系曲线。从图中可以看出,与未配置 CFRP 型材的构件相比,CFRP 配置率为 2.8% 的构件位移比提高了 35.8%,表明内置 CFRP 可提高构件延性;但 CFRP 配置率从 2.8% 增加到 11.4%,构件位移比仅提高了 6.8%,故为提高构件延性不应一味增大 CFRP 配置率。而  $N_y/N_u$  随 CFRP 配置率的增加依次降低了 11.0%、1.2%、5%、5.3%,表明 CFRP 配置率的增加可提高构件的安全裕度。综上所述,内置 CFRP 型材可提高构件性能。

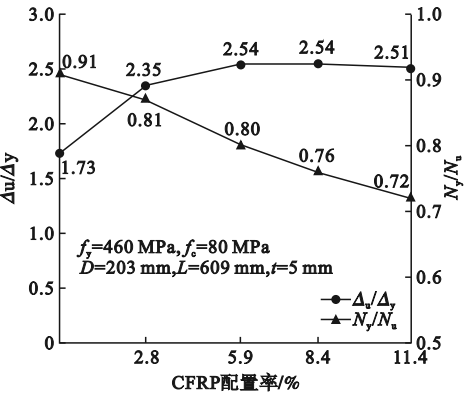


图8 CFRP配置率与延性、安全裕度关系曲线

Fig. 8 Relationships between CFRP configuration ratio and ductility and safety margin

3.2 内置CFRP型材对高强混凝土轴向应力分布的影响

图9为高强圆钢管高强混凝土柱和内置CFRP型材的高强圆钢管高强混凝土柱跨中截面纵向应力图。从图中可以看出,在A点时,对于无型材的构件,混凝土中截面纵向应力分布均匀,为 $1.02f_c$ ,而对于内置CFRP型材的构件,在CFRP腹板处的混凝土处于强约束区,其纵向应力与其他区域相比提高了2.2%,但由于在A点时两构件承载力接近,而内置CFRP的构件中CFRP也承担了荷载,故在A点时内置CFRP型材的构件混凝土

土纵向应力低于无型材的构件。在B点时,两构件纵向应力相比于A点分别提升了15.8%、5.95%。在C点时,两构件混凝土纵向应力差异加大,无型材的构件混凝土最大纵向应力为 $1.19f_c$ ,内置CFRP的构件混凝土最大纵向应力为 $1.25f_c$ ,与无型材的构件相比强度提高了5.0%,说明内置CFRP起到了调整混凝土应力的作用,使混凝土的约束效果更好,充分发挥了混凝土的性能,进而提高了构件的极限承载力。

4 参数分析

4.1 约束效应系数

为研究约束效应系数 $\theta$  ( $\theta = f_y A_s / f_c A_c$ )对构件组合效应的影响,设计了38个不同参数的有限元模型。材料强度取值: $f_y$ 取值460~690 MPa,  $f_c$ 取值70~90 MPa, CFRP配置率取值2.8%~11.4%,  $\theta$ 取值0.6~2.0。参数 $I_s$ 反映了构件各组成部分之间的组合效应。从图10可以看出,  $I_s$ 值均大于1.0,表明高强圆钢管、CFRP型材与高强混凝土之间实现了“1+1>3”的组合效应。这种组合效应得益于高强圆钢管与CFRP型材对高强混凝土的约束作用,以及高强混凝土对延缓高强圆钢管局部屈曲的贡献。分析图10发现,当CFRP配置率一定时,  $I_s$ 随着约束效应系数的提高整体呈现先增大后减小的趋势,且内置CFRP型材后,约束效应系数在1.2~1.4时,  $I_s$ 提高效果最为显著,三种材料组合效应最佳。

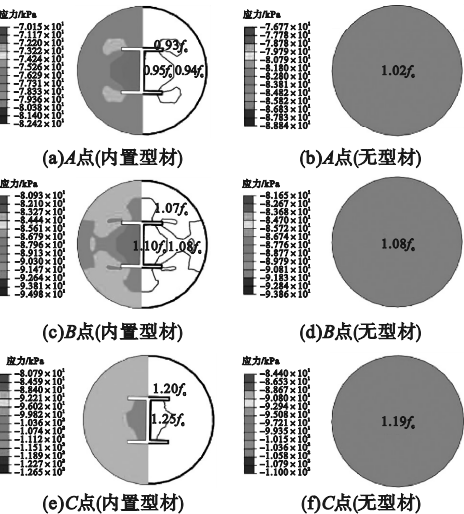
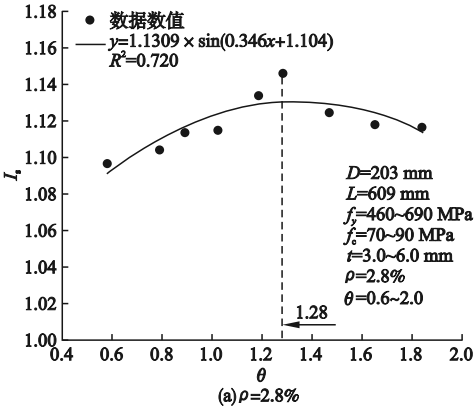


图9 混凝土中截面各特征点纵向应力云图

Fig. 9 Longitudinal stress plots of each characteristic point in the middle section of concrete



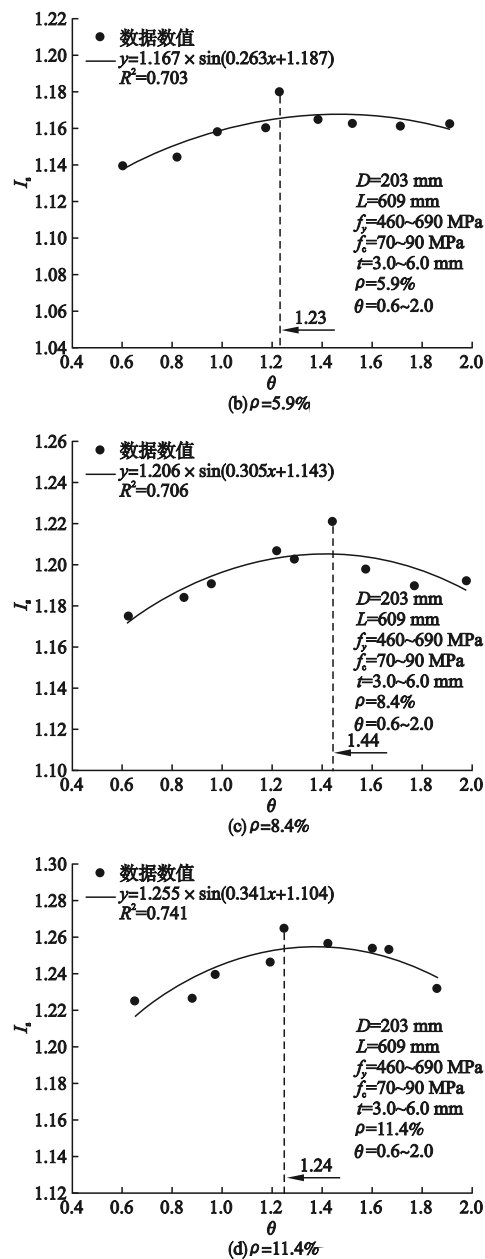


图 10  $I_s$  与约束效应系数  $\theta$  关系曲线

Fig. 10  $I_s$  and confinement effect coefficient  $\theta$  relation curve

4.2 复合参数分析

为研究钢材强度、混凝土强度、径厚比 ( $D/t$ ) 对组合效应的影响, 设计了 48 个不同参数的模型, 约束效应系数取 4 个等级 ( $\theta$  取 0.8、1.0、1.2、1.4)。根据文献 [24] 对构件截面类型的定义:  $D/t \leq 0.09 E_s/f_y$  为紧实型截面,  $0.09 E_s/f_y < D/t \leq 0.19 E_s/f_y$  为非紧实型截面,  $0.19 E_s/f_y < D/t \leq 0.31 E_s/f_y$  为

薄壁型截面, 将构件截面分为三种类型。

复合参数对构件承载力提高系数的影响如图 11 所示。从图中可以看出, 约束效应系数相同时, 对于内置工字型 CFRP 型材的高强圆钢管高强混凝土柱, 当构件截面类型为薄壁型时承载力提高系数比紧实型截面最高可

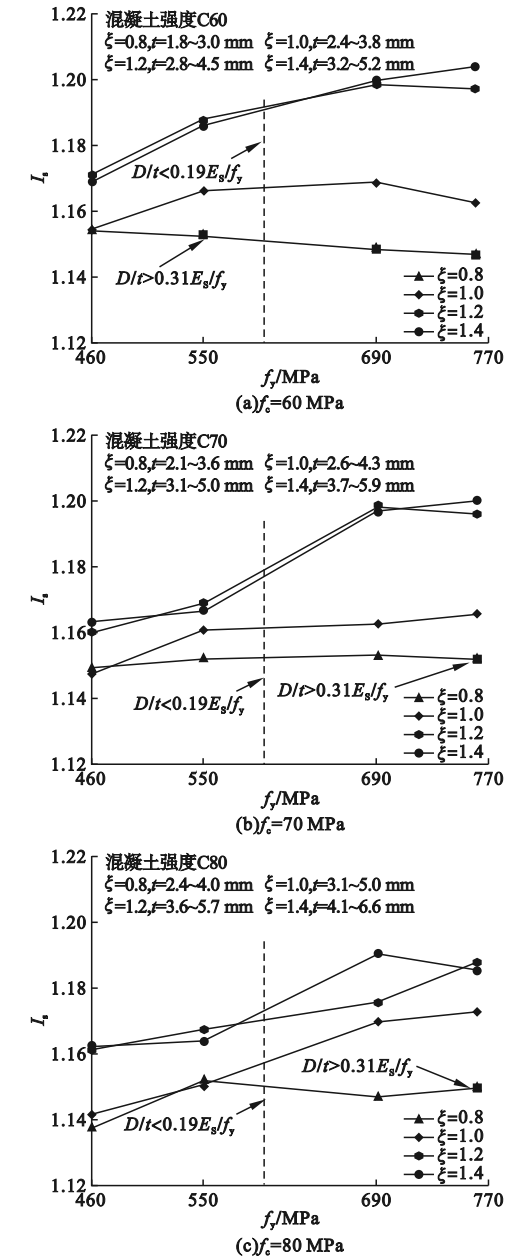


图 11 复合参数对构件承载力提高系数的影响

Fig. 11 Effect of composite parameters on the coefficient of bearing capacity improvement of members

承载力提高系数开始下降。承载力提高系数不仅与构件截面类型有关,还与约束效应系数相关,当约束效应系数为0.8~1.0时,钢材选用高强钢且截面类型为薄壁型,对构件承载力提高系数提高程度相对较小,最高仅为2.6%。所以为充分发挥三种材料的组合效应,提高构件承载力提高系数,当约束效应系数为1.2~1.4时,建议选用屈服强度更高且截面类型为薄壁型的钢管。

通过对屈服强度为460 MPa的钢管与770 MPa的钢管进行比较,可以解释为何约束效应系数相同时,截面类型为薄壁型的构件约束效果强于紧实型的构件。在保持约束效应系数不变的情况下,管壁较厚的Q460 MPa钢管与较薄的Q770 MPa钢管相比,较早地进入屈服阶段,使混凝土更早处于“塑性约束”状态,进而相对降低了对混凝土的约束,表现为组合效应的降低。而高强度薄壁钢管因其屈服强度高,可以在相同的约束效应系数下对混凝土提供更有有效的约束,从而导致构件承载力提高系数的提高,组合效应的提升。所以在钢管混凝土中使用高强钢的优势至少体现在两个方面:①钢管的强度越高,约束效果越好,构件组合效应越好;②从其约束机理可知,对于高强圆钢管,当构件截面类型为薄壁型时可增强对混凝土的约束。

4.3 材料强度匹配分析

为研究钢管与混凝土强度等级之间的匹配问题,将混凝土强度等级为C40~C120与钢管屈服强度为460~890 MPa的构件进行参数分析,结果如图12所示。从图中可以看出,对于高强混凝土( $f_c \geq 60$  MPa),匹配高强钢管时,随钢管屈服强度的提升承载力提高系数最高可达4.2%;而对于 $f_c = 40$  MPa的普通混凝土,当采用高强钢约束时,承载力提高系数反而降低了0.09%。并且对于混凝土抗压强度为80~120 MPa的构件,当钢管屈服强度从770 MPa增加到890 MPa时,承载力提高系数最高仅提升了0.9%,且对于

混凝土抗压强度为60 MPa的构件,钢管屈服强度从770 MPa增加到890 MPa时,承载力提高系数反而降低了1.7%。综上所述,对于高强混凝土,应用高强钢材会进一步提高承载力提高系数,而对普通混凝土采用高强钢约束,反而会降低构件承载力提高系数。并且对于高强混凝土,进一步提高钢材屈服强度,承载力提高系数的提升也会趋于不明显。故给出钢材与混凝土的匹配建议:从组合效应角度来说,为充分发挥高强圆钢管的强度,对于高强混凝土,所用钢材屈服强度不宜大于770 MPa。

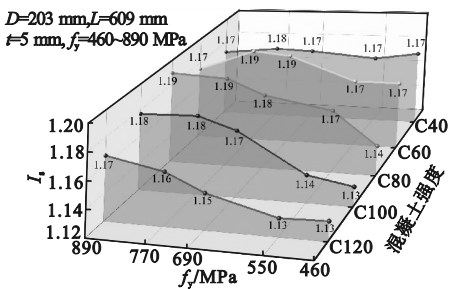


图12 钢材屈服强度对 $I_s$ 的影响  
Fig. 12 Effect of steel yield strength on  $I_s$

5 结 论

- (1) 在 高 强 圆 钢 管 高 强 混 凝 土 柱 中 内 置 CFRP 型 材,可 提 高 构 件 性 能,改 善 高 强 圆 钢 管 对 混 凝 土 的 约 束,提 高 构 件 的 组 合 效 应。
- (2) 为 充 分 发 挥 高 强 圆 钢 管、高 强 混 凝 土、CFRP 型 材 三 者 的 组 合 效 应,建 议 将 CFRP 配 置 率 设 置 为 5.9%~8.4%,约 束 效 应 系 数 控 制 在 1.2~1.4;且 当 径 厚 比  $D/t$  满 足 文 献[24]中 要 求 时,从 组 合 效 应 角 度 建 议 将 构 件 截 面 类 型 设 计 为 薄 壁 型。
- (3) 对 于 内 置 工 字 型 CFRP 型 材 的 高 强 圆 钢 管 高 强 混 凝 土 构 件,为 充 分 发 挥 高 强 钢 材 的 强 度,增 大 组 合 效 应,建 议 所 用 钢 材 屈 服 强 度 不 宜 大 于 770 MPa。

参考文献

[1] 韩林海,牟廷敏,王法承,等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J].



- 土木工程学报,2020,53(5):1-24.  
(HAN Linhai, MU Tingmin, WANG Facheng, et al. Design theory of CFST(concrete-filled steel tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering [J]. China civil engineering journal,2020,53(5):1-24.)
- [2] XIAMUXI A, HASEGAWA A. A study on axial compressive behaviors of reinforced concrete filled tubular steel columns [J]. Journal of constructional steel research,2012,76:144-154.
- [3] ZHONG Y K, SUN Y, TAN K H. Testing, modelling and design of high strength concrete-filled high strength steel tube (HCFHST) stub columns under combined compression and bending [J]. Engineering structures, 2021, 241:112334.
- [4] ZHOU S, SUN Q, WU X. Impact of D/t ratio on circular concrete-filled high-strength steel tubular stub columns under axial compression [J]. Thin-walled structures,2018,132:461-474.
- [5] LIEW J Y, XIONG M X, XIONG D X. Design of concrete filled tubular beam-columns with high strength steel and concrete [J]. Structures,2016,8:213-226.
- [6] 韦建刚, 罗霞, 欧智菁, 等. 圆高强钢管超高性能混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(11):16-28.  
(WEI Jiangang, LUO Xia, OU Zhijing, et al. Experimental study on axial compressive behavior of circular UHPC filled high-strength steel tube short columns [J]. Journal of building structures,2020,41(11):16-28.)
- [7] 王彦博, 宋辞, 赵星源, 等. 高强圆钢管混凝土短柱轴压承载力试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(11):221-234.  
(WANG Yanbo, SONG Ci, ZHAO Xingyuan, et al. Experimental study on behavior of circular concrete-filled high strength steel tubular stub columns under compression [J]. Journal of building structures,2022,43(11):221-234.)
- [8] SU M N, CAI Y C, CHEN X R. Behaviour of concrete-filled cold-formed high strength steel circular stub columns [J]. Thin-walled structures,2020,157:107078.
- [9] WEI J G, LUO X, LAI Z C. Experimental behavior and design of high-strength circular concrete-filled steel tube short columns [J]. Journal of structural engineering, 2020, 146(1):1-6.
- [10] WAAL L, FERNANDO D, NGUYEN V T. FRP strengthening of 60 year old pre-stressed concrete bridge deck units [J]. Engineering structures,2017,143:346-357.
- [11] KARIMIA M, NARMASHIRI K, SHAHRAKI M. Structural behaviors of deficient steel CHS short columns strengthened using CFRP [J]. Journal of constructional steel research,2017,138:555-564.
- [12] RAGHEB W F. Elastic local buckling of steel I-sections strengthened with bonded FRP strips [J]. Journal of constructional steel research, 2015,107:81-93.
- [13] LI G C, ZHAN Z C, YANG Z J. Behavior of concrete-filled square steel tubular stub columns stiffened with encased I-section CFRP profile under biaxial bending [J]. Journal of constructional steel research,2020,169(2):106065.
- [14] LI G C, ZHANG R R, YANG Z J. Finite element analysis on mechanical performance of middle long CFST column with Inner I-shaped CFRP profile under axial loading [J]. Structures,2017,9:63-69.
- [15] LI G C, SUN X, YANG Z J. Structural performance of concrete-filled square steel tubular columns encased with I-shaped CFRP under eccentric compression [J]. Engineering structures,2021,248(3):113254.
- [16] LI G C, YANG Y, YANG Z J. 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 structures,2021,275:114504.
- [17] AL-ANI Y R. Finite element study to address the axial capacity of the circular concrete-filled steel tubular stub columns [J]. Thin-walled structures,2018,126:2-15.
- [18] 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.)
- [19] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2016.  
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. Beijing: Science Press,2016.)
- [20] SAKINO K, NAKAHARA H, MORINO S. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns [J]. Journal of structural engineering,2004,130(2):180-188.
- [21] 杨宇. 内置工字型 CFRP 的高强方钢管高强混凝土轴压短柱受力性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2019.  
(YANG Yu. Research on mechanical behavior of high strength concrete-filled high strength square steel tube stub columns with inner I-shaped CFRP under axial load [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2019.)
- [22] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学,2017,34(3):36-46.  
(FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures [J]. Engineering mechanics,2017,34(3):36-46.)
- [23] TU C L, SHI Y J, LIU D. Behavior and general design method of concrete-filled high-strength steel tube (CFHST) columns [J]. Engineering structures,2021,243:112506.
- [24] American Institute of Steel Construction. Specification for structural steel buildings [S]. Chicago:[s. n.],2016.  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)