

文章编号: 1005-0523(2021)05-0016-07



SRPE 套管约束混凝土单轴受压应力-应变本构关系模型

涂序纪¹, 高剑平^{1,2}, 涂帆¹, 曹忠民^{1,2}, 刘洪³

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学土木工程国家级实验教学示范中心, 江西 南昌 330013; 3. 安源管道实业股份有限公司, 江西 萍乡 337000)

摘要:为研究钢骨架聚乙烯塑料复合管(SRPE)约束混凝土单轴受压应力-应变本构关系模型,将SRPE管对核心混凝土的约束作用等效为外包HDPE管和内嵌钢丝网骨架中纬线钢丝各自对核心混凝土约束作用的线性叠加,借鉴经典的Mander模型研究思路,计算出SRPE管对核心混凝土的有效侧向约束应力,通过修正模型中约束混凝土强度提高系数 k 值,提出SRPE套管混凝土极限压应力与应变的计算方法,并建立相应的应力-应变关系模型。结果表明:模型计算结果与试验结果较为接近,表明本文所推导的本构关系模型具有一定精度。

关键词:钢骨架聚乙烯塑料复合管;约束混凝土;单轴受压;本构关系模型

中图分类号:TU599

文献标志码:A

本文引用格式:涂序纪,高剑平,涂帆,等. SRPE 套管约束混凝土单轴受压应力-应变本构关系模型[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(5):16-22.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20211026.013

A Stress-Strain Constitutive Model for SRPE Casing Confined Concrete Under Uniaxial Compression

Tu Xuji¹, Gao Jianping^{1,2}, Tu Fan¹, Cao Zhongmin^{1,2}, Liu Hong³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Civil Engineering Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Anyuan Pipelines Industrial Co., Ltd., Pingxiang 337000, China)

Abstract: In order to research the stress-strain constitutive relationship model of concrete confined by steel-frame polyethylene plastic composite pipe (SRPE) under uniaxial compression, the restraint effect of the SRPE pipe on the core concrete is equivalent to the linear superposition of the restraint effect of the outer HDPE pipe and the embedded steel mesh skeleton mid-latitude wire on the core concrete. By referring to the research idea of the classic Mander model, the effective lateral constraint stress of SRPE pipe on core concrete was calculated, and the calculation method for the ultimate compressive stress and strain of SRPE casing concrete is proposed by modifying the strength of confined concrete in the model to increase the coefficient k value, and the corresponding stress-strain relationship model is established. The results show that the calculated results of the model are relatively close to the experimental results, indicating that the proposed constitutive relationship model has a certain accuracy.

Key words: steel framed polyethylene plastic composite pipe; confined concrete; uniaxial compression; constitutive relationship model

收稿日期: 2021-06-05

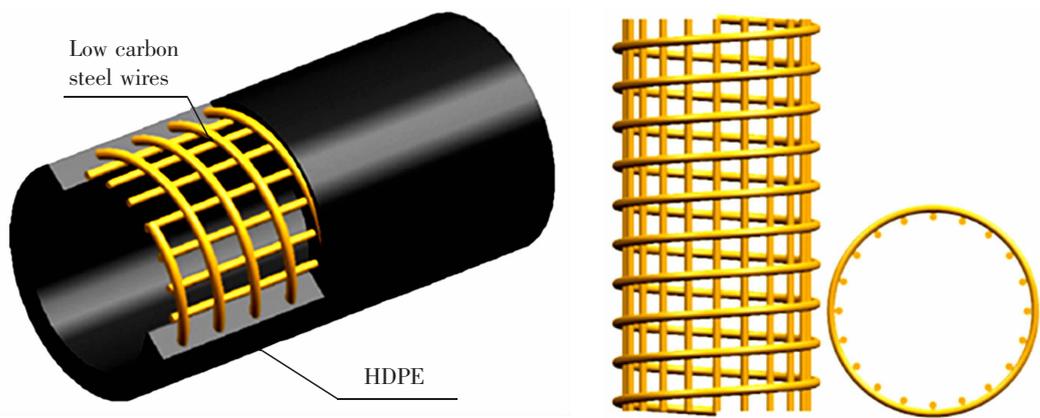
基金项目: 国家自然科学基金项目(51368019)

Citation format: TU X J, GAO J P, TU F, et al. A stress-strain constitutive model for SRPE casing confined concrete under uniaxial compression[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(5): 16-22.

SRPE 管(steel wire reinforced thermoplastics(PE) composite pipe, SRPE) 全称为钢骨架聚乙烯塑料复合管,是以经过涂塑处理的高强度钢丝网骨架为增强相,内外层 HDPE 管为树脂基体,采用专用热熔胶,通过挤压成型形成了新型复合管材(图 1)。由于采用了三维立体式嵌入,保证了内层钢丝网骨架与外层 HDPE 管良好的黏结性能,同时 SRPE 管具有类似于钢管的低线温度膨胀系数和抗蠕变等特点,保证了 SRPE 管跟混凝土能够共同受力,共同工作。与其他套管混凝土柱^[1-7]以及在腐蚀条件下^[8-9]相比,SRPE 管抗腐蚀性强、耐久性好,能彻底隔离核心混凝土与外界各种侵蚀性介质的接触,从而大幅度提高混凝土的耐久性。约束混凝土本构关系能够反映约束混凝土的受力变形规律及内部工作机理,是约束混凝土研究中最重要基础科学问题之一。

目前已经建立了各类套管约束情况下的混凝土本构关系模型,Kent^[10]于 1971 年提出了适用于矩形箍筋和方形箍筋约束混凝土的应力-应变模型;1982 年,Park 等^[11]在 Kent-Park 模型的基础上通过引入矩形箍筋约束混凝土强度提高系数 k ,得到了

Park 模型(也称修正 Kent-Park 模型);Mander^[12]在 1988 年根据 William-Wanke 五参数强度准则计算箍筋约束混凝土峰值应变,并采用 Popovis 骨架曲线表达式,提出了适用不同截面形式和不同配箍形式的箍筋约束混凝土应力-应变模型;Saafi^[13]建立了刻槽 PVC-FRP 管混凝土应力-应变模型;Yu 等^[14]提出 PVC-FRP 管约束混凝土的应力-应变关系计算模型;刘明学和钱稼茹^[15]提出了 FRP 约束圆柱混凝土受压应力-应变关系模型;史庆轩等^[16]从核心混凝土所受侧向约束应力出发,分析了侧向约束应力的约束机理,并结合箍筋约束混凝土和钢管约束混凝土轴压试验数据,建立了约束混凝土统一的实用本构关系模型。但由于 SRPE 管的材料组成构造和力学特性明显不同于钢管、FRP 管、FRP-PVC 管、PE 管等,会导致不同的约束增强效果,已有约束混凝土本构模型不一定适用。本文深入分析 SRPE 管对核心混凝土的约束作用及相应约束机制,结合试验数据^[17],修正已有约束混凝土本构关系模型,建立有明确力学含义、合理有效的 SRPE 套管混凝土柱核心混凝土单轴受压本构关系模型。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图 1 SRPE 管结构示意图

Fig.1 Diagram of SRPE tube structure

1 SRPE管约束混凝土应力-应变本构关系模型研究

考虑到SRPE管对核心混凝土的约束作用应等于外包HDPE管和内嵌钢丝网骨架中纬线钢丝对核心混凝土约束作用的线性叠加,本文延续Mander模型的研究思路,计算出SRPE管对核心混凝土的有效侧向约束应力 f'_l ,进而求得约束混凝土强度提高系数 k ,通过修正Mander模型关键参数建立单轴受压状态下SRPE套管约束混凝土应力-应变本构关系模型。

1.1 有效侧向约束应力

Mander模型中对有效侧向约束应力 f'_l 计算公式为

$$f'_l = k_e f_l \tag{1}$$

式中: f_l 为SRPE管对核心混凝土的侧向约束力; k_e 为有效约束系数, $k_e = A_e / A_{cc}$, A_e 为箍筋对核心混凝土的有效约束面积, A_{cc} 为截面箍筋形心包围的核心混凝土面积减去核心混凝土内纵筋面积。

$$A_e = A_c (1 - \rho_{cc}) \tag{2}$$

式中: A_c 为截面箍筋形心包围的核心混凝土面积; ρ_{cc} 为核心混凝土纵筋配筋率。

根据式(1)可知,想要求得SRPE管对核心混凝土的有效侧向约束力必须先求得有效约束系数和SRPE管对核心混凝土的侧向约束力。由于SRPE管对核心混凝土的约束作用应等于外包HDPE管和纬线钢丝对核心混凝土约束作用效果的线性叠加。本文将分别计算HDPE管和纬线钢丝对核心混凝土的有效侧向约束应力。

1.1.1 HDPE管对核心混凝土的有效侧向约束应力 f'_{lh}

本文计算HDPE管对核心混凝土的有效侧向约束应力 f'_{lh} 时,忽略内嵌钢丝网骨架对核心混凝土的约束作用。HDPE管对核心混凝土的约束作用来自核心混凝土受压膨胀时HDPE管所产生的环向受拉应力。由于核心混凝土受到是连续均匀的侧向约束应力,HDPE管对核心混凝土的有效约束系数 K_{ch} 应等于1,即其有效侧向约束应力 f'_{lh} 等于核心混凝土受压时HDPE管中产生的环向拉应力 f_{lh} 。HDPE管和核心混凝土的相互作用如图2所示。

由于SRPE管中钢丝网骨架占据了一部分体积,会对沿HDPE管壁方向的环向拉应力作用区域产生影响,本文引入HDPE管环向拉应力折减系数

α ,以考虑钢丝网骨架体积对HDPE管环向拉应力的影响,计算公式如下

$$\alpha = \frac{V_p - V_{spe} - V_{s1} - V_{s2}}{V_{spe}} \tag{3}$$

式中: V_p 为每米SRPE管中的HDPE管体积; V_{spe} 为每米SRPE管体积, $V_{spe} = \frac{1000\pi(D_m^2 - D_i^2)}{4}$; V_{s1} 为每米SRPE管中的纬线钢丝体积; $V_{s1} = \frac{1000\pi}{s} \left(D_t + \frac{D_m - D_i}{2} + d_1 \right) \times \frac{\pi d_1^2}{4}$; V_{s2} 为每米SRPE管中经线钢丝体积; $V_{s2} = \frac{1000n\pi d_2^2}{4}$, n 为纬线钢筋根数; D_m 为SRPE管外径; D_i 为SRPE管内径; d_1 为纬线钢丝直径; d_2 为经线钢丝直径; s 为纬线钢丝中心距。

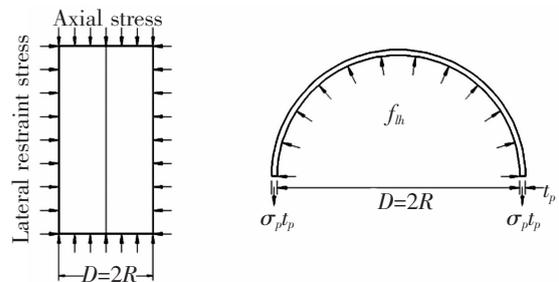


图2 HDPE管与核心混凝土相互作用
Fig.2 Interaction between HDPE pipe and core concrete

根据静力平衡条件积分可以求得 f_{lh} 的数学表达式,计算过程如下

$$\int_0^\pi f_{lh} R d\theta \sin\theta = f_{lh} R \int_0^\pi \sin\theta = f_{lh} 2R = 2\alpha \sigma_p t_p \tag{4}$$

整理得到HDPE管对核心混凝土的侧向约束应力 f_{lh} 计算公式为

$$f_{lh} = \frac{2\alpha \sigma_p t_p}{2R} = \frac{2\alpha \sigma_p t_p}{D} \tag{5}$$

式中: σ_p 为HDPE管所受环向拉应力; t_p 为HDPE管壁厚; D 为核心混凝土圆截面直径。

根据式(1)可得HDPE管对核心混凝土的有效侧向约束应力 f'_{lh}

$$f'_{lh} = k_{ch} f_{lh} = \frac{2\alpha \sigma_p t_p}{D} \tag{6}$$

1.1.2 纬线钢丝对核心混凝土的有效侧向约束应力 f'_{ls}

本文计算纬线钢丝对核心混凝土的有效侧向约束应力 f'_{ls} 时,忽略HDPE管对核心混凝土的约束

作用。SRPE 管中钢丝网骨架是由纬线钢丝按螺旋角 $\theta(0.4^\circ\sim 2.3^\circ)$ 螺旋缠绕经线钢丝而成,由于螺旋角 θ 过小,计算时 $\cos\theta$ 可以忽略。本文在 Mander 模型中对圆形箍筋有效侧向约束应力的计算方法基础上求解纬线钢丝对核心混凝土的有效侧向约束应力 f'_{ls} 。

纬线钢丝与核心混凝土的相互作用如图 3 所示。根据静力平衡条件可求得纬线钢丝对核心混凝土的侧向约束应力 f_{ls}

$$2\sigma_s A_s = f_{ls} D_s \quad (7)$$

整理可得侧向约束应力 f_{ls} 计算表达式

$$f_{ls} = \frac{2\sigma_s A_s}{D_s} \quad (8)$$

式中: σ_s 为钢丝网骨架中纬线钢丝所受环向拉应力; A_s 为单根纬线钢丝圆截面面积。

本文延续 Mander 模型计算有效约束系数原理,对纬线钢丝约束混凝土有效约束系数进行计算。假定纬线钢丝约束混凝土时在相邻纬线间距中部也会产生一个起角为 45° 抛物线形状的无约束混凝土区域,且抛物线顶点距截面边缘的距离为 $1/4 s'$ 。SRPE 套管圆截面示意图如图 4 所示。此时纬线钢丝形心包围圆的直径 $d_s = D + \frac{1}{2} t_p$ 。相邻纬线钢丝形心间距 $s' = s - d_1$ 。有效约束混凝土区域截面最小宽度 $d_s - \frac{1}{2} s'$ 为

$$d_s - \frac{1}{2} s' = D + \frac{1}{2} (t_p - s + d) \quad (9)$$

由于本次试验的 SRPE 套管混凝土柱构件的壁厚 t_p 均大于相邻纬线钢丝中心距 s ,根据式(9)可知,SRPE 管约束混凝土中的有效约束混凝土区域截面最小宽度 $d_s - \frac{1}{2} s'$ 恒大于核心混凝土直径 D ,这

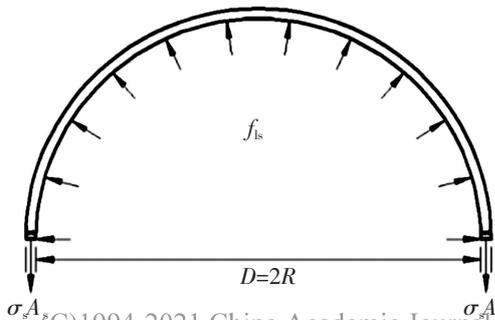


图 3 纬线钢丝与核心混凝土相互作用

Fig.3 Interaction between weft wire and core concrete

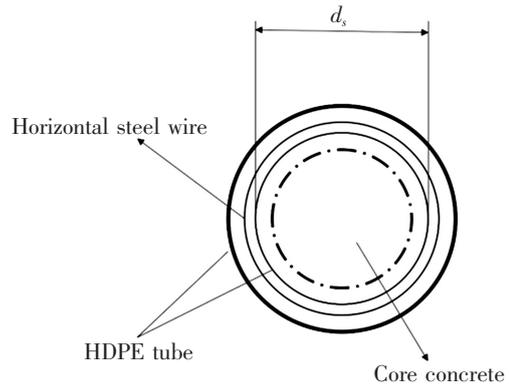


图 4 SRPE 管圆截面

Fig.4 Circular section of SRPE pipe

表明:核心混凝土全截面都处于纬线钢丝约束混凝土的有效约束混凝土区域内。纬线钢丝通过 HDPE 管约束核心混凝土时,由于纬线钢丝排列间距的过于密集,纬线钢丝对 HDPE 管产生了不均匀的约束效果,而对核心混凝土施加的是连续均匀的有效约束。根据式(1)有限约束系数的计算公式可知,纬线钢丝对核心混凝土的有效约束系数等于 1。结合式(1)可得纬线钢丝对核心混凝土的有效侧向约束应力 f'_{ls} 计算公式为

$$f'_{ls} = k_{es} f_{ls} = \frac{2\sigma_s A_s}{D_s} \quad (10)$$

综上所述,SRPE 管对核心混凝土的有效侧向约束应力 f'_l 即等于 HDPE 管和钢丝网骨架各自对核心混凝土有效侧向约束应力的线性叠加,计算公式如下

$$f'_l = f'_{lh} + f'_{ls} = k_{eh} f_{lh} + k_{es} f_{ls} = \frac{2\alpha\sigma_s t_p}{D} + \frac{2\sigma_s A_s}{D_s} \quad (11)$$

1.2 强度提高系数

约束混凝土的强度提高系数表征了约束混凝土中有效侧向约束应力对核心混凝土强度提高的程度。Mander 模型中峰值应力 f_{cc} 与强度提高系数 k 的关系式为

$$f_{cc} = k f'_{co} \quad (12)$$

式中: f'_{co} 为无约束混凝土抗压强度。强度提高系数 k 是求解约束混凝土峰值应力的关键。Mander 模型中给出了约束混凝土强度提高系数 k 与约束混凝土所受两个水平方向有效侧向约束应力 f'_{l1} 和 f'_{l2} ($f'_{l1} < f'_{l2} \leq 0.3f'_{co}$) 的三轴曲线关系图(图 5)。通过 x 轴和 y 轴两个坐标轴上有效侧向约束应力的比值即可确定约束混凝土强度提高系数 k 。

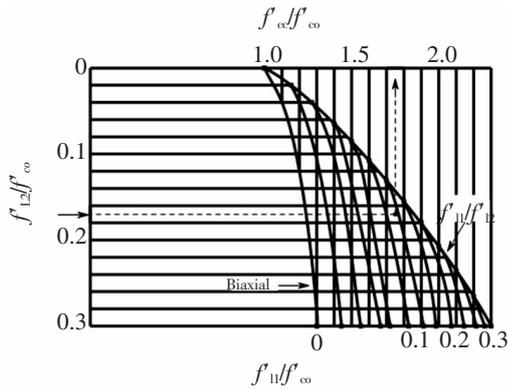


图5 有效侧向约束应力与无约束混凝土强度关系
Fig.5 Relationship between effective lateral restraint stress and strength of unconfined concrete

当 $f'_{l1} < f'_{l2} \leq 0.3f'_{co}$ 时,约束混凝土强度提高系数上限 k_h 为

$$k_h = 1.3 + 5.55 \frac{f'_{l1}}{f'_{co}} - 7.5 \left(\frac{f'_{l1}}{f'_{co}} \right)^2 \quad (13)$$

当 $f'_{l1} = f'_{l2}$ 时,约束混凝土强度提高系数下限 k_l 为

$$k_l = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_{l1}}{f'_{co}} - 2 \frac{f'_{l1}}{f'_{co}}} \quad (14)$$

约束混凝土强度提高系数 k 为

$$k = k_l + (k_h - k_l) \sqrt{\frac{\frac{f'_{l2}}{f'_{co}} - \frac{f'_{l1}}{f'_{co}}}{0.3 - \frac{f'_{l1}}{f'_{co}}}} \quad (15)$$

上文求得了 SRPE 管对核心混凝土的有效侧向约束应力 f'_l ,同时对 SRPE 管约束混凝土约束作用机制的研究表明;SRPE 管对核心混凝土的约束作用等同于 HDPE 管和纬线钢丝各自对核心混凝土约束作用的线性叠加。其中,HDPE 管给核心混凝土提供了四周连续均匀的有效侧向约束应力;而纬线钢丝借助 HDPE 管的传递作用也给核心混凝土施加了有效均匀的约束作用。

SRPE 管约束混凝土两个水平方向的有效约束应力 f'_{l1} 和 f'_{l2} 是相等的,满足式(14)的条件,并结合本文求导出的 SRPE 管约束混凝土有效侧向约束应力 f'_l 公式,可以得到 SRPE 套管约束混凝土强度提高系数 k 为

$$k = k_l = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_{co}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}}} \quad (16)$$

式中 $f'_l = \frac{2\alpha\sigma_{fp}}{D} + \frac{2\sigma_s A_s}{D_s}$ 。

1.3 峰值应力

Mander 模型计算约束混凝土峰值应力时,假设

核心混凝土达到峰值应力时,横向箍筋也正好达到屈服强度。本文计算 SRPE 套管混凝土柱核心混凝土峰值应力时,同样假设核心混凝土达到峰值应力时,钢丝网骨架中纬线钢丝也正好达到屈服强度。根据图 5 中的各试件应力-应变试验曲线可知,随着试件纬线钢丝直径的增大和间距的减小,核心混凝土的峰值应力也相应提高;当应力-应变曲线进入下降段时,试件随之破坏。本文假设核心混凝土达到峰值应力时钢丝网骨架中纬线钢丝也正好达到屈服强度是合理的。但由于 SRPE 管中的纬线钢丝属于硬钢,无明显屈服点,本文选用抗拉强度作为纬线钢丝强度指标。

当核心混凝土达到峰值应力时,纬线钢丝对核心混凝土的有效约束应力 f'_{ls} 为

$$f'_{ls} = \frac{2f_s A_s}{D_s} \quad (17)$$

式中 f_s 为纬线钢丝抗拉强度。

当核心混凝土达到峰值应力时,HDPE 管对核心混凝土的有效约束应力 f'_{lh} 为

$$f'_{lh} = \frac{2\alpha f_p t_p}{D} \quad (18)$$

式中 f_p 为 HDPE 管屈服强度。

SRPE 管对核心混凝土的有效约束应力 f'_l 为

$$f'_l = f'_{ls} = f'_{lh} = \frac{2f_s A_s}{D_s} + \frac{2\alpha f_p t_p}{D} \quad (19)$$

约束混凝土强度提高系数 k

$$k = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_{co}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}}} \quad (20)$$

SRPE 管约束混凝土峰值应力 f_{cc} 计算表达式如下

$$f_{cc} = k f'_{co} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_{co}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}}} \right) \quad (21)$$

将各 SRPE 套管混凝土轴压短柱试件的峰值应力计算结果 $f_{cc,c}$ 与试验结果 $f_{cc,e}$ [17] 进行比较,如表 1

表 1 SRPE 套管混凝土轴压短柱峰值应力计算结果与试验结果对比

Tab.1 Comparison of peak stress calculation results and test results of SRPE casing concrete axially compressed short columns

Specimen	f'_{lh} /MPa	f'_{ls} /MPa	$f_{cc,c}$ /MPa	$f_{cc,e}$ /MPa	$f_{cc,e}/f_{cc,c}$
S-1.0-30	2.44	2.37	54.36	50.43	1.07
S-1.6-30	2.42	3.35	57.94	54.94	1.05
S-2.0-30	2.30	5.69	65.37	66.69	0.98
S-2.5-30	2.31	6.31	67.10	68.37	0.98

所示。试件的峰值应力计算值同试验值较为接近, $f_{cc,c}/f_{cc,e}$ 的平均值为 1.02, $f_{cc,c}/f_{cc,e}$ 的均方差为 0.04, 表明本文推导的 SRPE 管约束混凝土峰值应力计算公式具有一定的准确度。

1.4 峰值应变

Mander 模型中求解峰值应变 ϵ_{cc} 也跟约束混凝土强度提高系数 k 有关, 并有如下计算公式

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}' [1 + 5(k - 1)] \quad (22)$$

式中: ϵ_{co}' 为无约束混凝土峰值应变, 一般取 0.002。

将本文求得的 SRPE 管约束混凝土强度提高系数 k 代入式(22), 即可求得 SRPE 管约束混凝土峰值应变 ϵ_{cc}

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}' \left[1 + 5 \left(-2.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_i'}{f_{co}'}} - 2 \frac{f_i'}{f_{co}'} \right) \right] \quad (23)$$

式中: $f_i' = f_{ls}' = f_{lh}' = \frac{2f_s A_s}{D_s} + \frac{2\alpha f_t t_p}{D}$ 。

本文根据 SRPE 管约束混凝土峰值应变计算公式, 分别对 S-1.0-30、S-1.6-30、S-2.0-30 和 S-2.5-30 四个试件的计算峰值应变进行计算, 表 1 已经给出了四个试件相应的有效侧向约束应力, 分别代入式(22)和式(23)即可。SRPE 套管混凝土轴压短柱试件的峰值应变计算结果 $\epsilon_{cc,c}$ 与试验结果 $\epsilon_{cc,e}$ 如表 2 所示。从表中可以看出, $\epsilon_{cc,c}/\epsilon_{cc,e}$ 的平均值为 0.94, $\epsilon_{cc,c}/\epsilon_{cc,e}$ 的均方差为 0.08, 考虑到混凝土材料本身的离散性以及试验条件对应变数据的影响较大, SRPE 套管混凝土轴压短柱试件的峰值应变计算结果可以看作满足基本精度要求。

表 2 SRPE 套管混凝土轴压短柱峰值应变计算结果与试验结果对比

Tab.2 Comparison of peak strain calculation results and test results of SRPE casing concrete axially compressed short columns

Specimen	$\epsilon_{cc,c}$	$\epsilon_{cc,e}$	$\epsilon_{cc,c} / \epsilon_{cc,e}$
S-1.0-30	0.010 31	0.012 37	0.83
S-1.6-30	0.011 51	0.012 87	0.89
S-2.0-30	0.014 02	0.013 33	1.05
S-2.5-30	0.014 63	0.014 61	1.00

1.5 应力-应变本构关系模型

本文通过分析 SRPE 管对核心混凝土的有效侧向约束应力, 修正了约束混凝土强度提高系数 k 值, 得到了单轴受压状态下 SRPE 套管混凝土柱核

心混凝土单轴受压本构关系模型。

本构关系模型表达式如下

$$\sigma = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x r} \quad (24)$$

SRPE 管约束混凝土峰值应力 f_{cc} 表达式为

$$f_{cc} = f_{co}' \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_i'}{f_{co}'}} - 2 \frac{f_i'}{f_{co}'} \right) \quad (25)$$

SRPE 管约束混凝土峰值应变 ϵ_{cc} 表达式为

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}' \left[1 + 5 \left(-2.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_i'}{f_{co}'}} - 2 \frac{f_i'}{f_{co}'} \right) \right] \quad (26)$$

其中: $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}}$, $r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$, $E_c = 4730 \sqrt{f_{co}'}$, $E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\epsilon_{cc}}$, $f_i' = f_{ls}' = f_{lh}' = \frac{2f_s A_s}{D_s} + \frac{2\alpha f_t t_p}{D}$ 。

式中: f_{co}' , ϵ_{co}' 分别为无约束混凝土峰值应力和峰值应变; E_c 为无约束混凝土弹性模量; E_{sec} 为约束混凝土峰值点割线模量; α 为 HDPE 管环向应力折减系数。

2 结论

通过分析 SRPE 套管对核心混凝土的约束作用及相应约束机制, 得出以下结论:

1) HDPE 管给核心混凝土提供了四周连续均匀的有效侧向约束应力, 纬线钢丝借助 HDPE 管的传递作用也给核心混凝土施加了有效均匀的约束作用。

2) 借鉴 SRPE 套管承受液体内压力时计算环向拉应力的方法, 将 SRPE 管对核心混凝土的约束作用等效为外包 HDPE 管和内嵌钢丝网骨架中纬线钢丝对核心混凝土约束作用的线性叠加。

3) 采用经典的 Mander 模型对 SRPE 套管约束混凝土单轴受压本构关系模型进行研究, 通过修正模型中约束混凝土强度提高系数 k 值, 提出 SRPE 套管混凝土极限压应力与应变的计算方法, 并建立相应的应力-应变关系模型。模型计算结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

[1] KURT C E. Concrete filled structural plastic column[J]. Proceedings of the America Society of Civil Engineers, 1978, 104: 55-63.
 [2] SAAFI M, TOUTANJI H A, LI Z. Behavior of concrete column confined with fiber reinforced polymer tubes [J].

- ACI Material Journal, 1999, 96(4): 500-509.
- [3] 王俊颜, 杨全兵. 聚氯乙烯塑管混凝土力学性能的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(7): 929-933.
WANG J Y, YANG Q B. Experimental research on mechanical properties of PVC-pipe concrete[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2009, 37(7): 929-933.
- [4] 于峰, 牛荻涛. PVC-CFRP管钢筋混凝土轴压短柱试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 129-136.
YU F, NIU D T. Experimental study on PVC-CFRP confined reinforced concrete short column under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 129-136.
- [5] 于峰, 牛荻涛. 轴压 PVC-FRP管混凝土中长柱试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 79-91.
YU F, NIU D T. Experimental study on PVC-FRP confined long concrete column subjected to axial Compression[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(1): 79-91.
- [6] 王俊颜, 杨全兵. 塑管混凝土力学性能的研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(2): 161-166.
WANG J Y, YANG Q B. Study of mechanical behavior of plastic tube filled with concrete[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(2): 161-166.
- [7] 王俊颜, 杨全兵. HDPE管混凝土延性和韧性的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 394-397.
WANG J Y, YANG Q B. Experimental study on ductility and toughness of HDPE-Pipe concrete[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(4): 394-397.
- [8] 陈梦成, 陈娜茹. 局部腐蚀对圆钢管混凝土柱轴向承载力的影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(3): 80-90.
CHEN M C, CHEN N R. Influence of localized corrosion on axial bearing capacity of circular steel tube concrete column[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(3): 80-90.
- [9] 陈梦成, 张凡孟, 黄宏, 罗晶. 酸雨环境下钢管混凝土柱轴压性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2015, 32(3): 86-90.
CHEN M C, ZHANG F M, HUANG H, et al. Research on axial compression performance of concrete-filled steel tubular columns under acid rain[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015, 32(3): 86-90.
- [10] KENT D C, PARK R. Flexural members with confined concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97: 1969-1990.
- [11] SCOTT H D, PARK R, PRIESTLEY M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates[J]. Journal of the America Concrete Institute, 1982, 79(1): 13-27.
- [12] MANDER J A O B. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [13] SAAFI M. Development and behavior of a new hybrid column in infrastructure systems[D]. Huntsville; University of Alabama, 2001.
- [14] YU F, NIU D T. Stress-strain model of PVC-FRP confined concrete column[J]. International Journal of physical science, 2010, 5(15): 2304-2309.
- [15] 刘明学, 钱稼茹. FRP约束圆柱混凝土受压应力-应变关系模型[J]. 土木工程学报, 2006(11): 1-6.
LIU M X, QIAN J R. Compressive stress-strain model for concrete of FRP confined cylinders[J]. China Civil Engineering Journal, 2006(11): 1-6.
- [16] 史庆轩, 戎翀, 张婷, 等. 约束混凝土实用本构关系模型[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1): 49-54.
SHI Q X, RONG C, ZHANG T, et al. A practical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Building Materials. 2017, 20(1): 49-54.
- [17] 尹昭. SRPE套管混凝土短柱轴压力学性能分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.
YIN Z. Mechanical behavior of concrete columns confined by SRPE tubes[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.



第一作者: 涂序纪(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新材料组合结构。E-mail: 2438818906@qq.com。



通信作者: 高剑平(1970—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为建筑结构抗震与减震、建筑结构加固改造、组合结构。E-mail: tmxgao@126.com。