

基于多因素的钢管混凝土界面黏结性能分析与 强度预测模型评价

赵轩^{1,2}, 杨晨^{2*}, 胡朝晖^{1,2}, 李贤², 聂影¹, 刘俊^{3,4}, 廖栩², 刘西光³

(1. 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆 400013; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院,

江苏 徐州 221116; 3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055;

4. 西安建筑科大工程技术有限公司, 西安 710055)

摘要: 为研究混凝土骨料粒径、钢管径厚比、长径比、钢管内壁粗糙程度与疲劳荷载对钢管混凝土 (concrete-filled steel tube, CFST) 界面黏结性能的影响, 共设计了9个试件进行推出试验, 通过荷载-滑移曲线以及推出试验过程中钢管外表面纵向应变与环向应变的分布情况, 分析了CFST界面黏结强度与黏结刚度, 研究表明: 试件的荷载-滑移曲线均呈现出自由端的位移滞后于加载端的位移的现象, 且随着加载的进行, 自由端的位移增量逐渐与加载端的位移增量同步; CFST柱的黏结性能随钢管径厚比的增大而减小、随钢管内壁粗糙程度的降低而减小、随长径比的增大而减小; 细骨料混凝土与疲劳作用均会降低CFST柱的黏结性能; 钢管外表面纵向应变随距加载端距离的增大而增大, 且黏结破坏后, 荷载在钢管上呈现不均匀传递的现象; 文中对现有的CFST黏结强度模型与试验数据进行了整理, 并分析其吻合度, 随后基于统计分析, 以混凝土强度、CFST柱径厚比、长径比为参数, 回归拟合出一个新的黏结强度计算公式, 该公式计算结果与实际数据吻合较好。

关键词: 钢管混凝土; 推出试验; 界面性能; 黏结滑移; 黏结强度模型

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)11-0075-13

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240522001

Analysis of Interfacial Bond Behavior and Strength Prediction Model Evaluation of Concrete-Filled Steel Tube Based on Multiple Factors

ZHAO Xuan^{1,2}, YANG Chen^{2*}, HU Zhaohui^{1,2}, LI Xian², NIE Ying¹,
LIU Jun^{3,4}, LIAO Xu², LIU Xiguang³

(1. MCC CCID Engineering Technology Co., Ltd., Chongqing 400013, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Civil Engineering,

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. Xi'an University of

Architecture and Technology Engineering Co., Ltd., Xi'an 710055, China)

*Corresponding author: yangc1127@163.com

Abstract: In order to study the effects of concrete aggregate size, steel tube diameter-to-thickness ratio, length-to-diameter ratio, roughness of steel tube inner wall and fatigue load on the interface bonding properties of concrete-filled steel tube (CFST), 9 specimens were designed and push-out tests were carried out. The interface bonding strength and

收稿日期: 2024-05-22

作者简介:

赵轩 (1979—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事工程结构设计与分析方面的研究。Email: Xuan.Zhao@cisdi.com.cn。

通信作者:

杨晨 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail: yangc1127@163.com。

bond stiffness were analyzed by load-slip curve and the distribution of longitudinal and circumferential strains on the outer surface of steel tube during the push-out test. The results show that the displacement of the free end lags behind that of the loading end, and the displacement increment of the free end gradually synchronises with that of the loading end during the loading process. The bonding properties of CFST columns decrease with the increase of the diameter-to-thickness ratio of steel tube and length-diameter ratio, and with the decrease of the inner roughness of steel tube. Fine aggregate concrete will reduce the bond performance, and fatigue will significantly reduce the bond performance of CFST columns. The longitudinal strain of the outer surface of the steel tube increases with the increase of the distance from the loading end, and the load is not uniformly transferred on the steel tube as the bonding is destroyed. The existing CFST bond strength model and test data were sorted out and analyzed. Based on the method of statistical analysis, a bond strength calculation model was fitted with the concrete strength, diameter-to-thickness ratio and length-to-diameter ratio as parameters, which is in good agreement with the actual data.

Keywords: concrete-filled steel tube; push-out test; interfacial performance; bond-slip; bond strength model

钢管混凝土 (concrete-filled steel tube, CFST) 因其承载力高、抗震性能优良、施工便捷等优点,已在高层建筑、工业厂房及大跨度桥梁结构中获得广泛应用^[1]。CFST 优越的力学性能源于钢与混凝土间良好的组合效应,其普遍的荷载传递路线是外部荷载先传递至钢管上,再通过内部混凝土与钢管壁的黏结作用传递到核心混凝土中,经过一定的变形协调后,由钢管和混凝土同时承担荷载,因此钢管与混凝土之间的黏结作用不仅会直接影响到 CFST 结构的协同作用,还会直接影响到 CFST 结构的受力性能。然而,CFST 结构在长期服役过程中受疲劳荷载作用时,混凝土与钢管会产生脱粘现象,这给结构安全埋下了一定隐患^[2]。

鉴于此,国内外众多学者对 CFST 界面的黏结性能进行了研究,薛立红等^[3-4]对 CFST 进行了推出试验,考虑了界面黏结长度、混凝土强度以及养护条件对界面黏结强度的影响,基于试验结果回归得到了界面黏结强度的经验公式。许开成等^[5-7]设计了一系列 CFST 的推出试验,从损伤力学的角度定义了界面损伤变量,通过回归分析得到了含损伤变量的黏结-滑移本构关系。罗佩云等^[8]采用正交试验法研究了直缝 CFST 的界面黏结机理,提出了考虑 CFST 强度、长细比及径厚比的黏结强度公式。陈宗平等^[9]、LYU 等^[10]、张春尧^[11]、LYU 等^[12]、武斌等^[13]对不同混凝土材料填充的钢管柱黏结性能开展了系列研究,并提出了相应的黏结强度计算公式。然而,以往的黏结强度计算公式大多受限于各自的试验数据,尚未形成统一的计算公式,因此有必要对以往国内外相关试验数据进行收集,拟合出一个新的 CFST 黏结强度统一计算公式;此外,目前的研究多以全新构件为对象开展试验,而少有学者研究经疲劳作用后 CFST 构件的界面黏结性能,对此方面展开研究后可为后续对钢-混凝土界面疲劳性能研究奠定基础。

本文开展了 9 个 CFST 柱的推出试验,在考虑混凝土骨料粒径、钢管径厚比、长径比、钢管内壁粗糙程度等因素对 CFST 界面黏结性能的影响外,还考虑了疲劳荷

载对 CFST 界面黏结性能造成的损伤退化,通过试件加载端及自由端的荷载-滑移曲线以及钢管外表面纵向应变和环向应变,分析了钢-混凝土界面的黏结强度与黏结刚度,并结合国内外相关试验数据回归拟合出了 CFST 柱的界面黏结强度计算模型。

1 试验设计

1.1 试件设计

在试验过程中,主要考虑了混凝土骨料粒径、钢管的径厚比、长径比及钢管内壁的粗糙程度对 CFST 柱黏结性能的影响,具体试件参数如表 1 所示,表 1 中试件编号含义为:第一部分 N 和 F 分别代表不经疲劳和经过轴向疲劳,其后的数字代表钢管壁厚;第二部分数字代表钢管长径比;第三部分为 CFST 的变量,C40 表示核心混凝土使用强度等级为 40 MPa 的普通混凝土,50% 和 100% 分别表示钢管内壁进行 50% 长度的打磨和 100% 长度的打磨,F3-4-5 中的 5 表示试件经过 5 万次疲劳。此外,还对试件 F3-4-5 开展了高周疲劳试验,试验频率为 5 Hz、循环次数为 5 万次、幅值荷载为 $0.2N_u \sim 0.5N_u$,以模拟重型工业厂房中天车移动对竖向构件产生的疲劳作用,其中 $0.2N_u$ 为竖向承重构件承担的恒载, $0.5N_u$ 为天车满载经过竖向承重构件时承担的荷载。各个试件的主要试验参数如表 1 所示。其中黏结强度按照公式 $\tau = P_u / (\pi d L_c)$ 计算,式中 d 为钢管的内径, L_c 为 CFST 柱的有效黏结长度。

试验试件均选用 Q355 直缝焊接钢管,为确保核心混凝土可从钢管内推出,每个试件底部均预留 50 mm 空腔段(不浇筑混凝土);同时在钢管外壁焊接加劲肋,以防止在推出过程中钢管发生局部失稳。如图 1 所示,核心混凝土采用 C40 强度等级的普通混凝土,浇筑时按《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[14]要求,预留 3 个标准立方体混凝土试块,并在室温下养护 28 d,实测混凝土抗压强度与钢材力学性能如表 2 和表 3 所示。

表 1 试件设计及主要试验结果

Table 1 Specimen design and main test results

试件编号	t/mm	L/mm	L_0/mm	D/mm	L/D	D/t	混凝土类型	ξ	P_u/kN	S_u/mm	τ_u/MPa	P_r/kN	S_r/mm	τ_r/MPa
N3-4-C40	3.0	640	52.8	159	4	53	普通 C40	1.029	269.38	4.04	0.954 4	227.80	14.77	0.807 1
N3-4-CGM	3.0	640	55.0	159	4	53	CGM	1.029	237.16	9.06	0.843 4	226.54	14.56	0.805 7
N4.5-4-C40	4.5	640	51.0	159	4	35.3	普通 C40	1.591	333.79	2.28	1.202 6	256.39	9.70	0.923 7
N3-6-C40	3.0	960	54.6	159	6	53	普通 C40	1.029	341.69	4.36	0.785 1	292.00	13.31	0.671 0
N3-8-C40	3.0	1280	56.3	159	8	53	普通 C40	1.029	397.26	5.64	0.675 4	339.58	15.59	0.665 2
N3-4-50%	3.0	640	50.0	159	4	53	普通 C40	1.029	150.62	1.14	0.531 1	177.28	5.15	0.625 1
N3-4-100%	3.0	640	50.0	159	4	53	普通 C40	1.029	90.50	1.10	0.319 1	145.06	6.00	0.511 5
N3-4.81-C40	3.0	640	55.6	133	4.81	44.3	普通 C40	1.245	204.74	2.64	0.878 1	164.00	8.23	0.703 4
F3-4-5	3.0	640	52.0	159	4	53	普通 C40	1.029	196.17	2.37	0.696 1	176.70	10.67	0.627 0

注： t 为钢管壁厚； L 为钢管长度，未除去底部空腔段； L_0 为底部空腔段实测高度； D 为钢管外径； L/D 为试件长径比； D/t 为试件径厚比；混凝土类型中，普通混凝土 C40 采用骨料粒径为 10~16 mm 的细石混凝土，CGM（高强无收缩灌浆料），无粗骨料； ξ 为 CFST 柱的约束系数； P_u 为试件极限推出荷载， S_u 为其对应的滑移值； P_r 为试件的残余荷载， S_r 为其对应的滑移值； τ_u 为极限黏结强度； τ_r 为残余黏结强度。

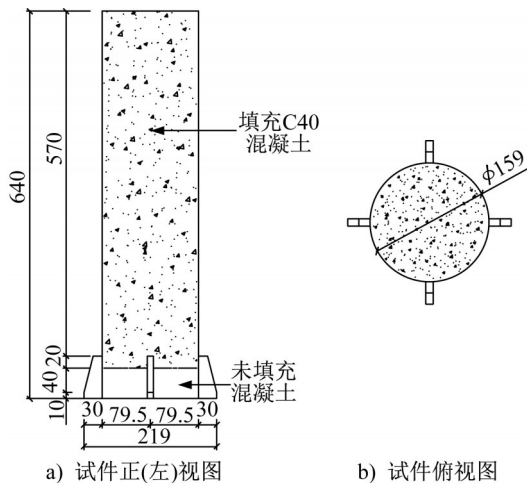


图 1 试件示意(单位: mm)
Fig. 1 Schematic of specimen (unit: mm)

表 2 混凝土抗压强度

Table 2 Compressive strength of concrete

混凝土类型	f_{cu}/MPa
C40 普通混凝土	37.0
C40 灌浆料	38.0
C40 膨胀混凝土	36.4

注： f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度。

1.2 试验加载与量测方案

CFST 柱的疲劳试验在 MTS 1 000 kN 电液伺服作动器上进行，加载前，在试件预留的 50 mm 空腔段内塞入直径略小于钢管内径的圆钢垫块，以确保轴向疲劳加载

表 3 钢材力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel

D/mm	t/mm	f_y/MPa	f_u/MPa
133	3.0	392.39	521.96
	3.0	357.13	448.14
159	4.5	290.29	377.92

注： f_y 为钢材屈服强度； f_u 为钢材极限抗拉强度。

时钢管与混凝土同步受力变形，疲劳加载采用力控制制度，按试件设计应力幅施加 5 Hz 的正弦疲劳荷载。在开展 CFST 柱的推出试验时，先将试件几何居中放置在制作好的钢墩上，在试件的加载端放置一块直径略小于钢管内径的圆钢垫块，以避免加载过程中发生偏心受压，且荷载仅作用于核心混凝土上，试验加载装置如图 2 所示。推出试验的预加载采用力控制制度，先将荷载加至 5 kN，持荷 1 min，再卸载至 3 kN，反复上述操作 3 次，以确保加载头、圆钢垫块、混凝土三者间充分压实、没有空隙。正式加载时采用位移控制制度，加载速率控制为 $0.01 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，缓慢加载至核心混凝土黏结作用完全丧失后，其被推出钢管外。

试验前在钢管外壁间隔 120° 布置了三列应变测点 (L1、L2、L3)，其中 L2 列为获取推出试验过程中钢管外壁的应变变化，加密布置了应变片。试验共布置 5 个位移计，如图 3 所示，其中位移计 D1 和 D2 用来测量校准加载端的竖向位移，位移计 D3 和 D4 用来监测推出过程中钢管底部是否发生了局部屈曲，位移计 D5 用来测量核心混凝土自由端的滑移。

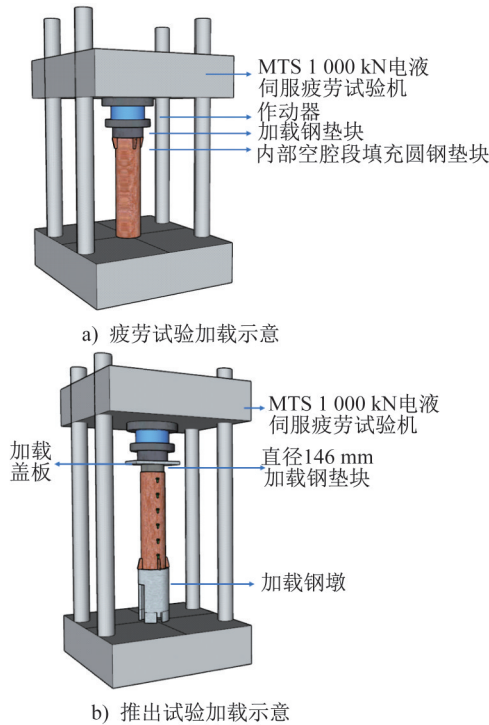


图2 试验加载示意

Fig. 2 Schematic of test loading

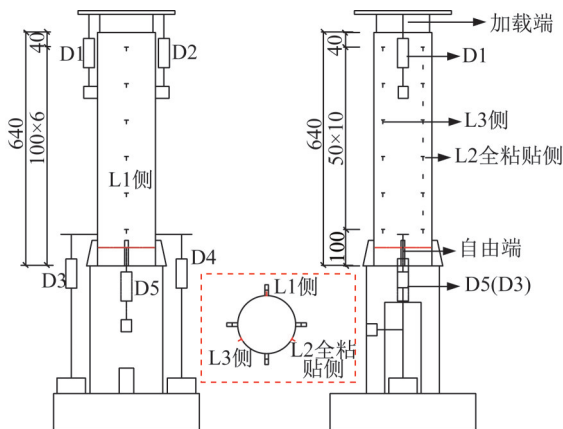


图3 推出试验测点布置示意(单位:mm)

Fig. 3 Schematic of measuring point arrangement for push-out test (unit: mm)

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

加载初期,钢管与核心混凝土之间未发生相对滑移,无明显现象;随着荷载的逐渐增加,试件加载端的钢管与混凝土界面出现微小滑移,化学胶结力逐渐丧失,同时伴随“吱-吱”的声音;当加载端位移继续增大时,加载端钢管-混凝土界面周围混凝土出现细小裂缝,此时位移计D5开始有示数,但滞后于加载端位移;当荷载达到峰值时,CFST界面发生错动,自由端和加载端的位移增量基本一致,但化学胶结力完全丧失,荷载主要由摩擦力承担。

试验结束后钢-混凝土界面均未发生鼓曲,加载端与钢管壁接触的混凝土有压碎现象但并未出现大范围的压溃现象,试件的典型破坏形态如图4所示。



图4 试件的典型破坏形态

Fig. 4 Typical failure modes of specimens

2.2 荷载-滑移曲线

将试验测得各试件的荷载和位移进行均值处理,并绘制9个试件加载端和自由端的荷载-滑移曲线($P-S$ 曲线),如图5a)~i)所示,其中试件N3-4-50%加载时由于底部自由端位移计D5出现故障,导致自由端的位移未测得,故其只有加载端的荷载-位移曲线。图5中,加载端和自由端的荷载-滑移曲线均按对应端部为试件编号添加后缀L和F。

由图5a)~i)可知:试件自由端的滑移均滞后于加载端的滑移,除去钢管内壁经过特殊处理的两个试件(N3-4-50%、N3-4-100%),其余试件加载端荷载-滑移曲线大致可简化为四段,如图6所示。

(1) 线性上升段($o\sim a$ 段)。该阶段的推出荷载主要由化学胶结力和机械咬合力承担,此时自由端的滑移明显滞后于加载端的滑移。

(2) 非线性上升段($a\sim b$ 段)。该阶段的推出荷载由化学胶结力、机械咬合力和摩擦力共同承担,靠近加载端的核心混凝土与钢管壁的化学胶结力逐渐消失,同时由摩擦力和机械咬合力替代,故荷载上升速度逐渐变缓,自由端的滑移增量逐渐接近加载端的滑移增量,当化学胶结力、机械咬合力、摩擦力的合力最大时即达到推出荷载的峰值。

(3) 下降段($b\sim c$ 段)。该阶段试件的化学胶结力继续丧失,机械咬合力下降,荷载-滑移曲线呈现下降趋势,并且趋于平缓,此时自由端滑移增量基本和加载端滑移增量同步。

(4) 水平段或缓慢上升段($c\sim d$ 段或 $c\sim e$ 段)。该阶段试件的化学胶结力完全丧失,推出荷载由机械咬合力和摩擦力共同承担,荷载-滑移曲线逐渐趋于水平,但个别钢管因制造公差内径略小,导致核心混凝土的机械咬

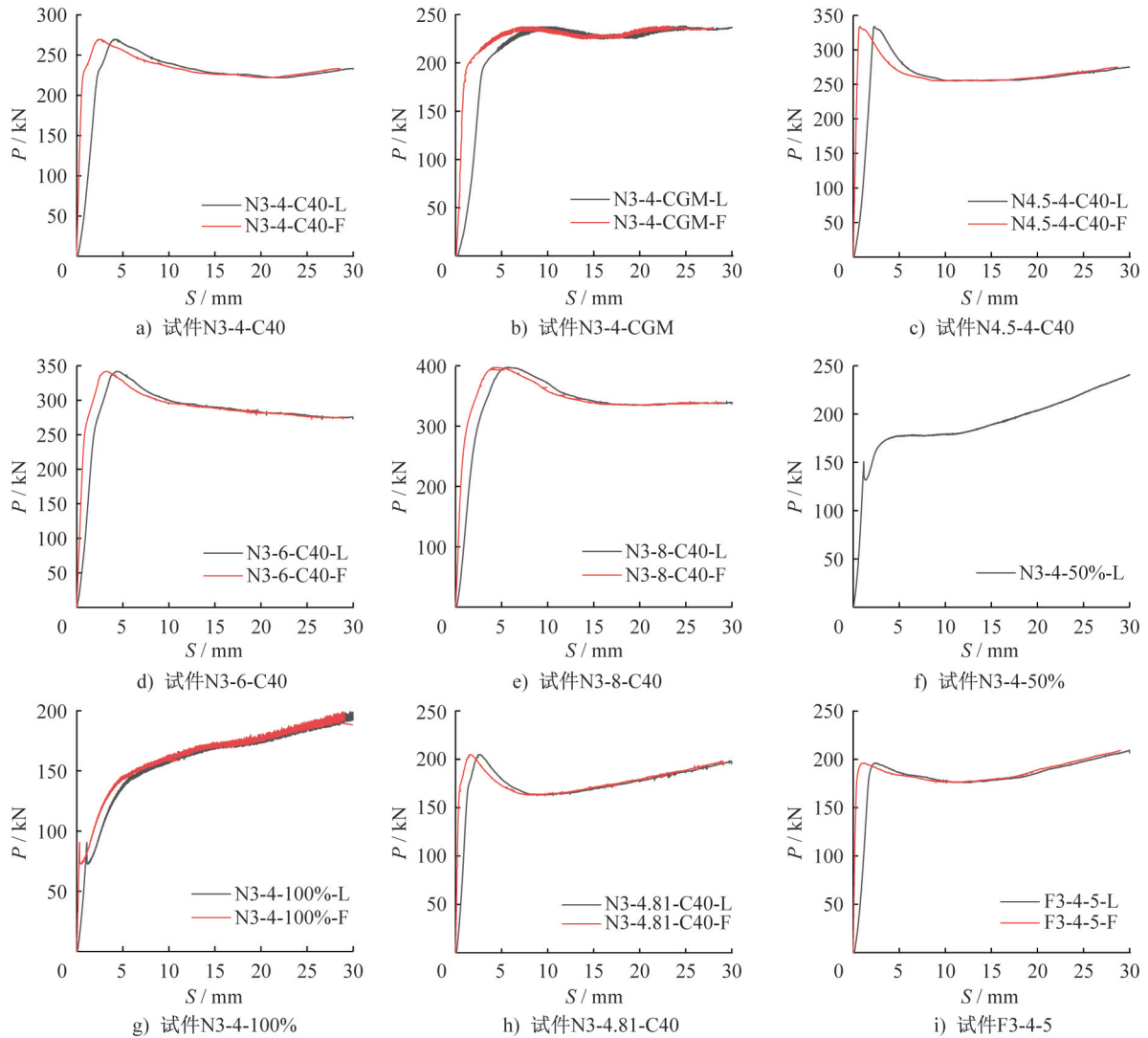


图 5 加载端及自由端荷载-滑移曲线

Fig. 5 Load-slip curves of loading ends and free ends

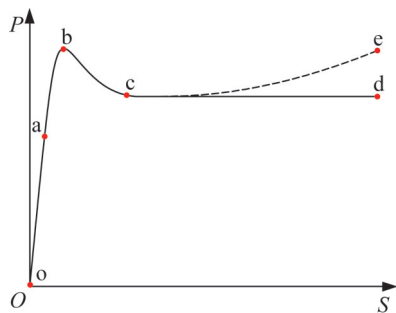


图 6 简化为四段的荷载-滑移曲线

Fig. 6 Simplified four-segment load-slip curves

合力增强,荷载-滑移曲线缓慢上升,此阶段自由端滑移增量与加载端滑移增量完全同步。

2.3 影响黏结性能因素分析

2.3.1 混凝土骨料粒径

试件 N3-4-C40 和 N3-4-CGM 的荷载-滑移曲线和黏

结力-滑移曲线如图 7 所示,其中试件 N3-4-CGM 使用了强度等级为 40 MPa 的无收缩灌浆料浇筑,用来模拟细骨料混凝土。

由图 7 可知:采用细骨料混凝土会使试件的黏结性能略微降低,具体表现为:荷载-滑移曲线无明显下降段,其极限黏结力相较于试件 N3-4-C40 降低了 11.96%,且对应滑移量达到了 9.06 mm,此时的黏结力主要由机械咬合力与摩擦力承担,而采用细骨料混凝土的试件摩擦力较小,导致荷载-滑移曲线呈锯齿状。由图 5b)可知:当细骨料混凝土加载端开始发生滑移时,位移计 D5 便出现了示数,意味着细骨料混凝土与钢管内壁之间的化学胶结力丧失得更为迅速。

2.3.2 CFST 径厚比

通过改变试件 N3-4-C40、N4.5-4-C40 及 N3-4.81-C40,钢管的厚度和直径,研究钢管径厚比对 CFST 柱黏结性能的影响,如图 8 所示。

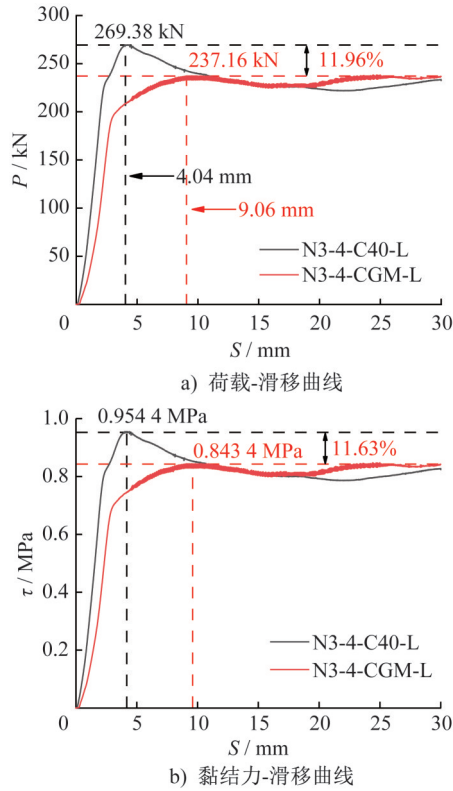


图7 混凝土骨料粒径对黏结性能的影响

Fig. 7 Influence of aggregate particle size on bonding properties

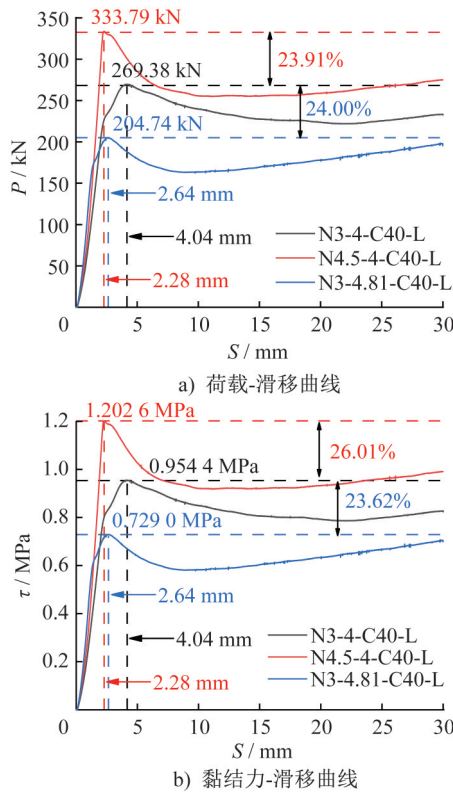


图8 CFST 径厚比对黏结性能的影响

Fig. 8 Influence of CFST diameter-to-thickness ratio on bonding properties

由图可知：试件 N4.5-4-C40 的黏结强度达到了 1.202 6 MPa，提高了 26.01%，但通过保持钢管壁厚不变、减小钢管直径，使钢管径厚比减小，进而导致黏结强度降低 23.62%。造成该现象的原因可能是：减小钢管直径的同时，试件长径比增加且约束系数改变，在多因素共同作用下造成黏结强度随之下降低；此外，随着 CFST 柱约束系数的提高，荷载-滑移曲线的非线性上升段逐渐缩短，内部混凝土与钢管内壁的挤压作用增大了界面的法向力，从而达到了增大摩擦力的效果，抵消了因化学胶结力丧失导致的黏结刚度减弱。CFST 径厚比减小 33% 使极限黏结强度增大 26.01%，二者呈现明显的反比关系，这与刘永健等^[15]的研究结果一致。

2.3.3 CFST 长径比

通过改变试件 N3-4-C40、N3-6-CST 柱的长径比，以研究长径比对其黏结性能的影响，如图 9 所示。

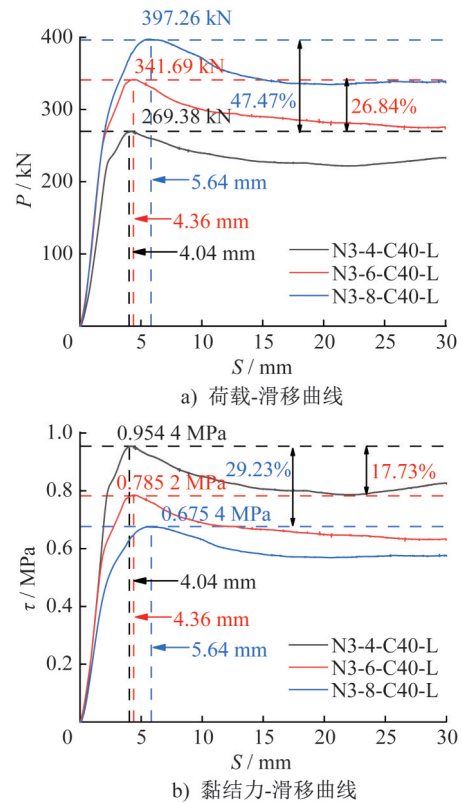


图9 CFST 长径比对黏结性能的影响

Fig. 9 Influence of CFST length-to-diameter ratio on bonding properties

由图 9 可知：CFST 的推出荷载随着试件长径比的增加而增加，但长径比的增加会显著降低其黏结性能，相较于长径比为 4 的试件，长径比为 6 的试件的黏结强度降低 17.73%，而长径比为 8 的试件的黏结强度降低 29.23%，其降低幅度逐渐减小，可以预测当长径比增加到一个特定值后黏结强度将保持恒定；长径比增大使试件黏结强度增

加,进而导致化学胶结力丧失过程更长、丧失程度更大,因此当试件出现极限黏结力时的滑移更大,其滑移值分别达到了4.36 mm、5.64 mm,且非线性上升段的斜率逐渐减小,表明黏结刚度降低;CFST黏结强度随长径比的增加而减小,这与陈宗平等^[9]、刘永健等^[15]的研究结果一致。

2.3.4 钢管内壁粗糙程度

通过对试件N3-4-50%、N3-4-100%钢管内壁分别进行半长度打磨与全长度打磨,对比钢管内壁粗糙程度对黏结性能的影响,如图10所示。

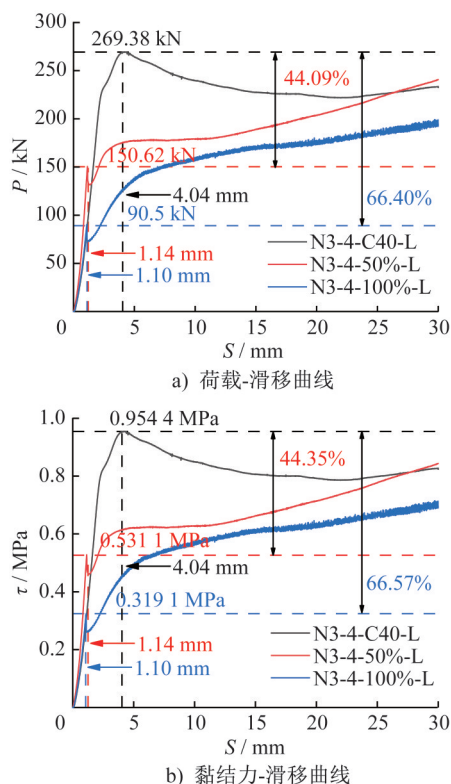


图10 钢管内壁粗糙程度对黏结性能的影响

Fig. 10 Influence of inner wall roughness of steel pipe on bonding properties

由图10可知:钢管内壁粗糙程度降低会显著降低CFST柱的黏结性能。相较于未打磨试件,半打磨试件与全打磨试件的黏结强度分别降低了44.35%、66.57%。达到极限黏结强度时,试件的荷载-滑移曲线均出现推出荷载下降,具体原因在于:钢管内壁粗糙程度降低使机械咬合力与摩擦力减弱,而当化学胶结力、机械咬合力、摩擦力三者合力达到最大的瞬间,摩擦力由静摩擦转变为动摩擦,进而导致荷载降低。这与许开成等^[16]的研究结论相符。

2.3.5 疲劳作用

通过对试件N3-4-C40和疲劳试件F3-4-5施加5万次高周疲劳荷载,来研究疲劳作用对界面黏结性能的影响,

其中疲劳荷载的最小值为 $0.2N_u$,最大值为 $0.5N_u$,如图11所示。

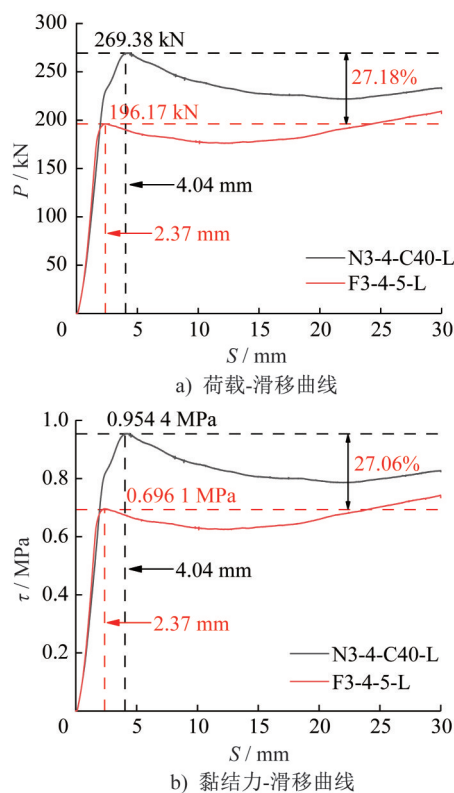


图11 疲劳作用对黏结性能的影响

Fig. 11 Influence of fatigue action on bonding properties

由图11可知:疲劳作用对CFST柱的黏结性能有显著影响,与未经疲劳的试件相比,疲劳试件的黏结强度均显著降低,且下降了27.06%;在CFST柱反复受压时,钢管与核心混凝土因泊松比不同,会在界面法线方向产生变形差,进而破坏界面的化学胶结力和机械咬合力,最终导致推出试验中黏结强度降低。

2.4 应变分析

2.4.1 钢管纵向应变

将荷载按极限推出荷载等分为10份,选取各级荷载下钢管外壁的纵向应变数据,以分析钢管外壁应变沿纵向的分布规律,其中横坐标 x 定义为各测点距加载端的距离,如图12a)~i)所示。

由图12可知:在开展推出试验的过程中,钢管外壁表面纵向应变基本为负值,表明推出荷载由核心混凝土通过界面的黏结作用将荷载传递给钢管共同承担,导致钢管在轴向发生了压缩;随着与加载端的距离增大,黏结长度越长,沿黏结长度通过黏结作用传递的荷载越多,进而使得钢管在自由端的轴向压缩量更大。随着推出荷载的不断增大,钢管外壁表面的纵向应变均呈现增大的趋势;在加载初期,加载端的纵向应变与自由端的纵向应变

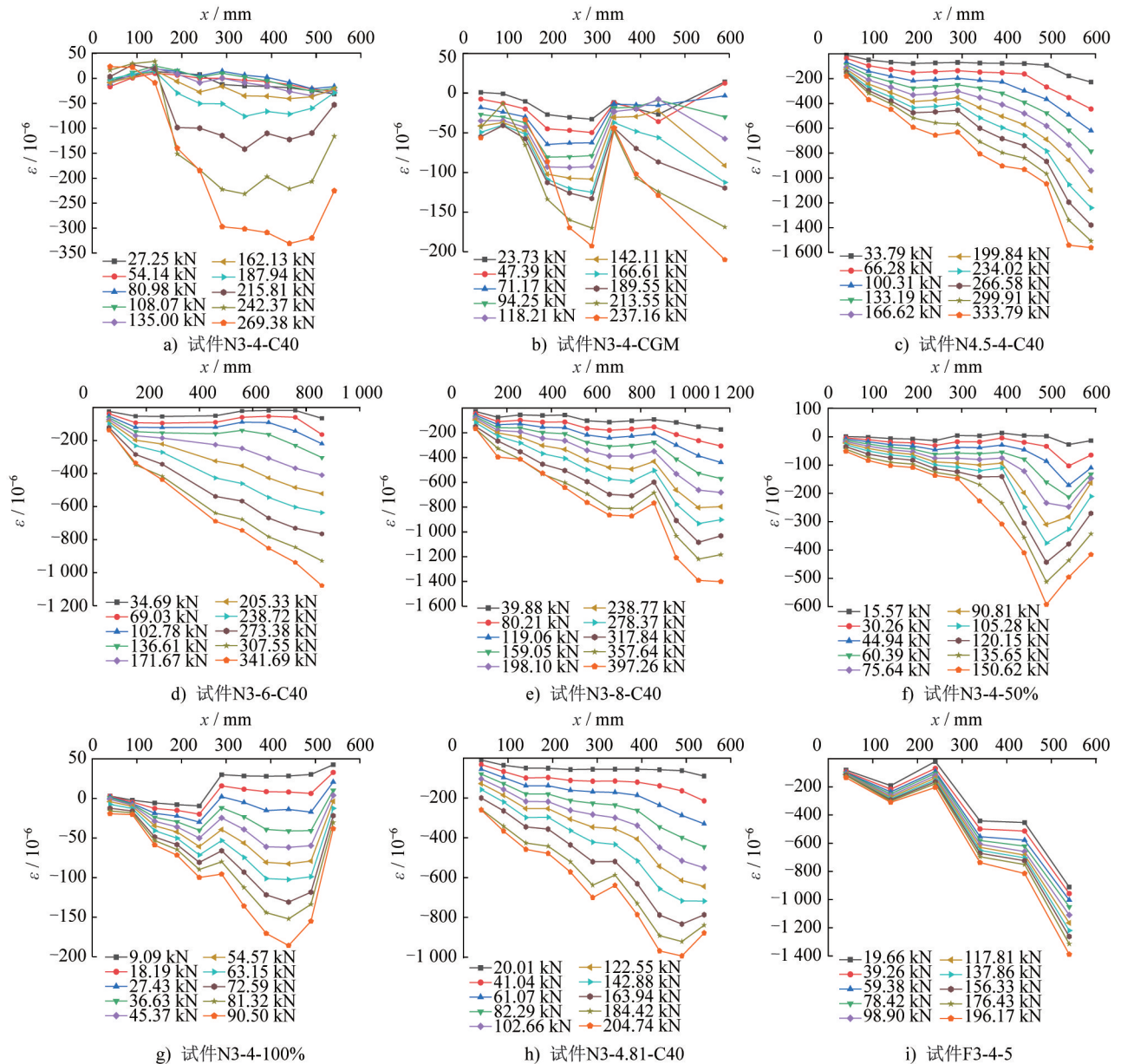


图12 钢管表面纵向应变分布

Fig. 12 Longitudinal strain distribution of steel pipe surface

相差不大,表明荷载通过黏结作用在核心混凝土与钢管间均匀传递;但达到峰值荷载时,加载端的纵向应变已远小于自由端的纵向应变,这表明钢管与核心混凝土间的黏结作用已失效,进而导致荷载在钢管上传递不均。

试件 N3-4-C40、N4.5-4-C40、N3-6-C40 的应变均分布在 $0 \sim -1600 \mu\epsilon$ 之间,钢管外表面均未屈服;试件 N3-4-CGM 的应变相较于其他试件的应变,出现部分纵向应变为正值的情况,且该应变并非随与加载端的距离增大而呈增大趋势,这表明使用细骨料混凝土的试件不能很好地将荷载传递至钢管,该类试件的黏结性能较差;试件 N3-4-50% 与 N3-4-100% 在打磨区域的纵向应变数值均十分接近,这表明随着钢管内壁粗糙程度降低,混凝土与钢管间的协同作用减弱,荷载无法有效传递至钢管

上共同承担;其中试件 N3-4-100% 在加载前期出现部分纵向应变为正值的情况,但其数值均低于 $50 \mu\epsilon$,这一现象可能由数据采集仪的误差导致,同时,由于钢管内表面光滑,荷载无法通过黏结作用有效传递至钢管,难以与混凝土共同承担,故其整体应变数值很小,均未超过 $-200 \mu\epsilon$;试件 F3-4-5 经 5 万次高周疲劳处理后,在推出试验开始前已经积累部分初始应变,加载过程中,应变随荷载的增大呈逐渐增大的趋势,但相较于未经疲劳处理的试件,其应变增加幅度较小。

2.4.2 钢管环向应变

CFST 柱推出试验中,钢管约束系数会影响环向应变,以试件 N3-4-C40(约束系数 1.029)、N4.5-4-C40(约束

系数 1.591) 及 N3-4.81-C40 (约束系数 1.245) 为研究对象, 分析环向应变与钢管约束系数的关系, 其中每个试件

的环向应变均取同高度 3 个应变片的测量平均值, 如图 13 所示。

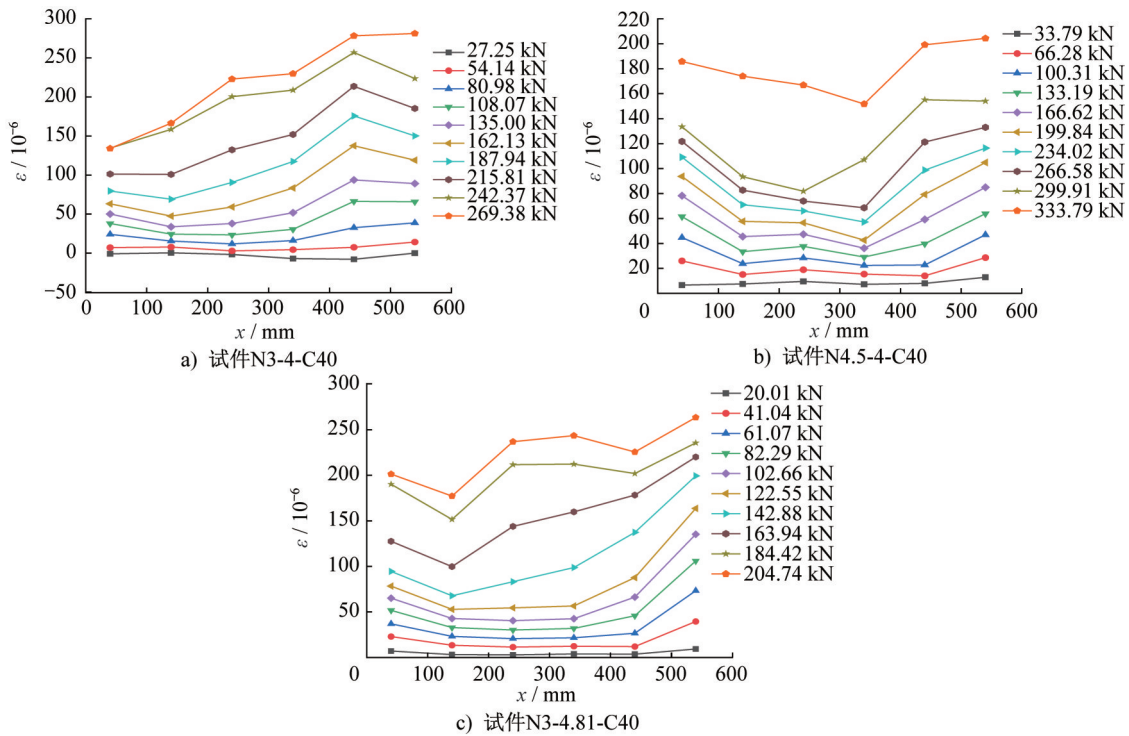


图 13 钢管表面环向应变分布

Fig. 13 Circumferential strain distribution of steel pipe surface

图 13 为部分推出试件的环向应变分布, 由图可知: 加载初期钢管表面的环向应变较小, 且沿钢管长度方向的应变数值相差不大, 整体呈现均匀分布趋势。当荷载逐渐增加时, 各测点环向应变均增大, 加载端与自由端的环向应变相较于其他测点的环向应变更大; 这是因为随着荷载增加, 加载端和自由端的混凝土发生了向下滑移, 端部进而产生裂缝, 导致内部核心混凝土横向直径增大, 最终使钢管对这两个部位的约束作用要强于对其他测点处的约束作用, 因此两端的环向应变大于中间部分的环向应变。随着钢管约束系数的增加, 达到荷载峰值的环向微应变逐渐减小, 这表明约束系数小的钢管环向变形更大。此外, 这 3 个试件的环向应变均有“突增”阶段, 约束系数为 1.029 和 1.245 的试件分别在荷载为极限推出荷载的 60% 和 70% 时发生了环向应变的“突增”, 而约束系数为 1.591 的试件在荷载为极限推出荷载的 90% 时才发生了环向应变的“突增”, 表明约束系数大的钢管在推出试验过程中其环向变形更连续。

3 CFST 黏结强度计算公式

3.1 现有的黏结强度计算公式

目前, 国内外众多学者针对 CFST 界面黏结强度开展了大量研究并取得丰富成果, 针对黏结强度公式也提出了不同计算模型; 但是纵观这些研究, 至今仍未形成

统一的计算公式。此外, 不同公式的吻合度不尽相同, 这与学者们考虑的参数差异直接相关, 现有黏结强度计算公式按参数数量可分为单因素、双因素及多因素模型。本文收集了不同学者针对 CFST 提出的黏结强度计算公式, 并对其展开分析, 如表 4 所示。

3.2 现有黏结强度计算公式吻合度分析

为验证上述黏结强度计算公式的准确性, 本文首先采用试验获得的 9 份数据, 及国内外学者以往研究的 555 份圆钢管推出试验数据^[5, 9, 12, 15, 18-19, 21, 23, 29, 32-46], 筛选时排除界面经特殊处理 (如涂油、除锈、加内置环钉等) 的数据, 最终得到 460 份有效试验数据, 用于开展现有黏结强度计算公式的吻合度分析。选取部分吻合较好的计算公式分析情况, 如图 14a)~d) 所示, 其中纵坐标为公式计算得出的黏结强度 (τ_c) 与试验得出的真实黏结强度 (τ_u) 的比值, 部分计算公式存在部分数据计算结果偏大的情况, 导致纵坐标无法统一标注, 因此对图片进行局部框选处理, 以便清晰地对比各个计算公式的吻合度。

通过对以上 12 个公式的吻合度分析, 可以得出计算黏结强度与真实黏结强度比值的平均值和标准差, 用来评价计算公式的准确性, 其计算结果如表 5 所示。

由图 14 及表 5 可知, 式 (5)、(8)、(11)、(12) 的平均值

表4 现有计算公式

Table 4 Existing calculation formula

参考文献	计算公式	公式编号
薛立红等 ^[3-4]	$\tau_u = 0.1f_{cu}^{0.4}$	(1)
康希良 ^[17]	$\tau_u = \frac{1}{\gamma}kf_i \left[-0.00028 \left(\frac{4L}{D} \right) + \frac{0.11121D}{t} + 29.09049\alpha + 0.03439\xi - 7.36037 \right]$	(2)
BRETT等 ^[18]	$\tau_u = 2.109 - 0.026D/t$	(3)
刘玉茜 ^[19]	$\tau_u = 1.4857 - 0.0217D/t$	(4)
胡波等 ^[20]	$\tau_u = 0.1k_s k_t k_e f_{cu}^{0.4}$	(5)
张晓天 ^[21]	$\tau_u = 0.05f_i (-0.0301L/D + 0.0061D/t + 35.3499\alpha + 1.0105\xi - 0.7294)$	(6)
LYU等 ^[10]	$\tau_u = 0.071 + 4900 \left(\frac{t}{D^2} \right)$	(7)
王秋维等 ^[22]	$\tau_u = 0.13 \frac{f_y t}{d} - 0.176$	(8)
罗佩云等 ^[8]	$\tau_u = 0.175f_{cu}^{-0.02} [10.07 - 0.113(D/t)]$	(9)
武斌等 ^[13]	$\tau_u = 0.77 + 0.1f_{cu}^{0.75} - 0.03D/t$	(10)
ALLOUZI等 ^[23]	$\tau_u = 1.53623 + 0.00047D + 0.10393t - 0.00071L_e - 0.00585f_{cu} - 0.00173T$	(11)
陈宗平等 ^[9]	$\tau_u = \left[0.0336 + 0.0141\delta - 0.0028 \left(\frac{L_c}{D} \right) \right] f_{cu}$	(12)

注:表中 γ 为不确定影响系数,取0.96; k 为钢管表面状况影响系数,建议取1.3; f_i 为混凝土抗拉强度; α 为含钢率; ξ 为套箍系数; k_s 为截面影响系数,取2.0; k_t 为表面粗糙程度影响系数,取1.25; k_e 为荷载偏心率影响系数,取1.0; T 为混凝土龄期; δ 为再生粗骨料取代率。

表5 计算黏结强度与真实黏结强度比值的平均值与标准差

Table 5 Mean and standard deviation of the ratio of calculated bond strength to actual bond strength

计算模型	平均值	标准差	计算模型	平均值	标准差
薛立红等 ^[3-4]	0.3771	0.2668	康希良 ^[17]	1.7578	2.2719
BRETT等 ^[18]	0.8483	0.6941	刘玉茜 ^[19]	0.4844	0.4265
胡波等 ^[20]	0.9427	0.6671	张晓天 ^[21]	0.3964	0.3208
LYU等 ^[10]	0.7951	0.4611	王秋维等 ^[22]	0.9273	0.9437
罗佩云等 ^[8]	0.6799	0.5616	武斌等 ^[13]	1.2213	0.8570
ALLOUZI等 ^[23]	1.0871	1.0231	陈宗平等 ^[9]	1.0664	0.7693

误差在10%以内,式(3)、(7)、(10)的平均值误差在30%以内,其余计算公式的误差较大,吻合情况不理想。在吻合情况较好的7个公式中,结合标准差及计算公式与本文试验数据的吻合情况,可以发现式(8)的拟合情况较好,但其标准差达到了0.9437,说明数据存在较多的偏大与偏小情况。综上所述,现有的黏结强度计算公式存在数据偏差过大的情况,且与试验数据的整体拟合效果不理想。

3.3 建议的CFST柱黏结强度计算方法

结合本文试验与国内外学者以往的研究数据,采用Origin软件选取对未经过特殊处理的CFST柱影响显著

的参数作为自变量,对黏结强度开展回归拟合分析,最终得到试件黏结强度的计算表达式,如式(13)所示。

$$\tau_u = 0.77 + 1.048f_{cu}^{0.2} - 0.034 \frac{D}{t} - 0.02 \frac{L}{D} \quad (13)$$

该式适用于混凝土设计强度等级为C20~C70、径厚比为25~75且长径比为1~8的CFST柱,其吻合度分析如图15所示,平均值为1.0821、标准差为0.3868,相较于其他计算模型,数据离散性较大的问题得到一定改善。

4 结论

(1) 开展CFST柱推出试验时,加载端率先产生位移,且自由端位移滞后于加载端,随着加载的持续进行,自由端的位移增量逐渐与加载端的位移增量同步。试验的荷载-滑移曲线可简化为四段:分别为线性上升段、非线性上升段、下降段、水平段或缓慢上升段。

(2) CFST柱的黏结性能随着钢管径厚比的增大而减小,随着钢管内壁粗糙程度的降低而减小、随着长径比的增大而减小;细骨料混凝土会导致CFST柱的黏结性能降低,此外,疲劳作用会显著降低CFST柱的黏结性能。

(3) 开展推出试验过程中,钢管外表面纵向应变随着沿钢管长度方向与加载端距离的增大而增大;加载初期,加载端与自由端的纵向应变相差不大,这表明荷载在混凝土与钢管间均匀传递,随着荷载增大,钢管与混凝土间的黏结作用被破坏,导致荷载在钢管上传递不均匀。

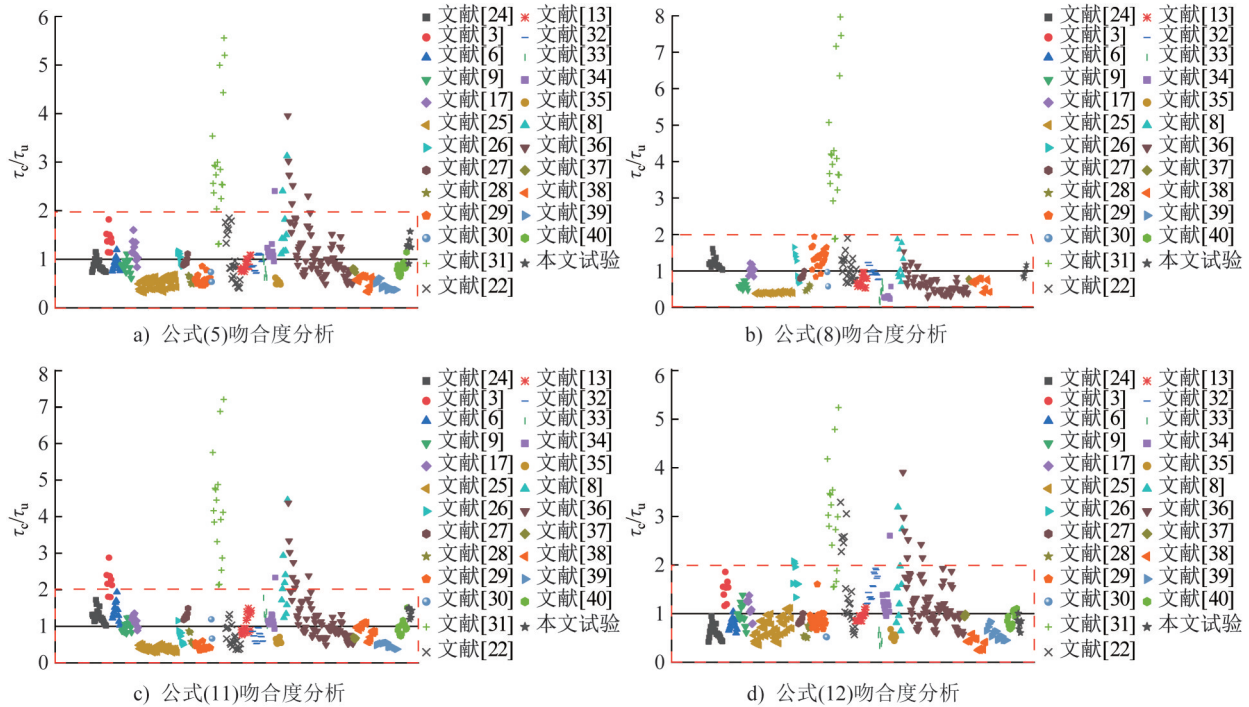


图 14 现有黏结强度计算公式吻合度分析

Fig. 14 Fit analysis of existing bond strength calculation formula

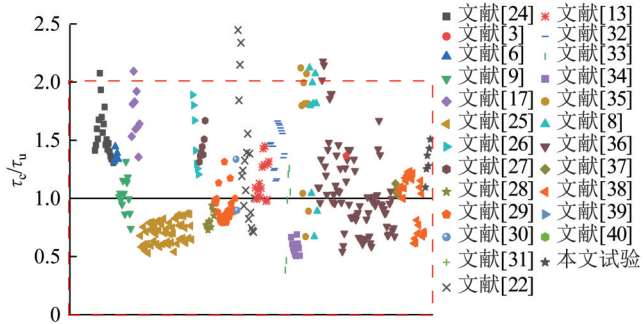


图 15 式(13)吻合度分析

Fig. 15 Fitting analysis of formula (13)

(4) 现有部分的黏结强度计算公式与实际黏结强度平均值的误差在 10% 以内,但这些公式的计算结果普遍存在偏大或偏小的现象;为此,本文基于试验数据及整理的国内外学者研究数据,拟合得出黏结强度计算表达式,改善了以往计算公式离散性大的问题,可为未经特殊处理的 CFST 柱界面黏结强度计算,以及后续开展疲劳荷载作用下的界面性能研究提供参考依据。

参考文献:

[1] ZHENG S S, LIANG Z T, DU Y Y, et al. Advancements in interfacial bonding performance of concrete-filled steel tube members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 213: 108346. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108346.
 [2] 湛越, 王罡, 郝萧斌, 等. 钢管混凝土脱粘机理及影响因素分析[J]. 钢结构(中英文), 2022, 37(7): 20-30. DOI: 10.13206/

j.gjgS21110501.
 CHEN Yue, WANG Gang, HAO Xiaobin, et al. Evaluation of the mechanism and influence parameters of the core concrete debonding in the concrete-filled steel tube[J]. Steel Construction (Chinese & English), 2022, 37(7): 20-30. DOI: 10.13206/j.gjgS21110501. (in Chinese)
 [3] 薛立红, 蔡绍怀. 钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(上)[J]. 建筑科学, 1996, 12(3): 22-28.
 XUE Lihong, CAI Shaohuai. Bond strength at the interface of concrete-filled steel tube columns[J]. Building Science, 1996, 12(3): 22-28. (in Chinese)
 [4] 薛立红, 蔡绍怀. 钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(下)[J]. 建筑科学, 1996, 12(4): 19-23.
 XUE Lihong, CAI Shaohuai. Bond strength of composite interface of concrete filled steel tubular columns (II)[J]. Building Science, 1996, 12(4): 19-23. (in Chinese)
 [5] 许开成, 陈梦成, 顾章川. 钢管混凝土界面黏结力的组成试验研究[J]. 铁道建筑, 2011, 51(11): 132-134.
 XU Kaicheng, CHEN Mengcheng, GU Zhangchuan. Experimental study on the composition of interfacial adhesive force of concrete filled steel tube [J]. Railway Engineering, 2011, 51(11): 132-134. (in Chinese)
 [6] 许开成, 陈梦成, 何小平. 长期荷载作用下 CFST 界面粘结损伤试验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(1): 127-133.
 XU Kaicheng, CHEN Mengcheng, HE Xiaoping. Experimental study of CFST interface bonding damage under sustained loading [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(1): 127-133. (in Chinese)

- [7] 许开成, 毕丽苹, 陈梦成. 钢管混凝土界面黏结应力-滑移本构关系试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊1): 407-412. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S1.062.
XU Kaicheng, BI Liping, CHEN Mengcheng. Experimental study on bond stress-slip constitutive relationship for CFST[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(Suppl.1): 407-412. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S1.062. (in Chinese)
- [8] 罗佩云, 雷永旺, 朱彬荣, 等. 直缝焊接钢管与混凝土界面黏结性能试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(3): 77-84. DOI: 10.13204/j.gyjzg20052008.
LUO Peiyun, LEI Yongwang, ZHU Binrong, et al. Experimental research on interface bond performances between lsaw steel pipes and concrete[J]. Industrial Construction, 2021, 51(3): 77-84. DOI: 10.13204/j.gyjzg20052008. (in Chinese)
- [9] 陈宗平, 徐金俊, 薛建阳, 等. 钢管再生混凝土黏结滑移推出试验及黏结强度计算[J]. 土木工程学报, 2013, 46(3): 49-58. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2013.03.016.
CHEN Zongping, XU Jinjun, XUE Jianyang, et al. Push-out test on the interface bond-slip behavior and calculation on bond strength between steel tube and recycled aggregate concrete in RACFST structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(3): 49-58. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2013.03.016. (in Chinese)
- [10] LYU W Q, HAN L H. Investigation on bond strength between recycled aggregate concrete (RAC) and steel tube in RAC-filled steel tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 155: 438-459. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.12.028.
- [11] 张春尧. 圆钢管活性粉末混凝土(RPC)界面粘结滑移性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
ZHANG Chunyao. Study on interface bonding and sliding properties of RPC with round steel tube [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] LYU J, ZHOU T H, DU Q, et al. Research on the bond behavior of preplaced aggregate concrete-filled steel tube columns[J]. Materials, 2020, 13(2): 300. DOI: 10.3390/ma13020300.
- [13] 武斌, 谭卓英, 王舜, 等. 钢管赤泥混凝土粘结滑移影响因素[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(1): 98-104. DOI: 10.7688/j.issn.1000.1646.2021.01.17.
WU Bin, TAN Zhuoying, WANG Shun, et al. Influencing factors of bond-slip of red mud concrete filled steel tubes[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43(1): 98-104. DOI: 10.7688/j.issn.1000.1646.2021.01.17. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Test Methods of Concrete Physical and Mechanical Properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [15] 刘永健, 刘君平, 池建军. 钢管混凝土界面抗剪粘结滑移力学性能试验[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(1): 17-23, 29. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2010.01.028.
LIU Yongjian, LIU Junping, CHI Jianjun. Shear bond behaviors at interface of concrete-filled steel tube[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2010, 35(1): 17-23, 29. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2010.01.028. (in Chinese)
- [16] 许开成, 黄财林, 陈梦成. 钢管内壁粗糙程度对钢管混凝土界面黏结性能的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊1): 420-424. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.s1.063.
XU Kaicheng, HUANG Cailin, CHEN Mengcheng. Research on impact of steel tube inner surface roughness on interfacial bonding behavior of CFST[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(Suppl.1): 420-424. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.s1.063. (in Chinese)
- [17] 康希良. 钢管混凝土组合作用力学性能及粘结滑移性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
KANG Xiliang. Study on compositing mechanical performance and bond-slip performance of concrete filled steel tube[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese)
- [18] BRETT C G, CENK T, JEROME F H, et al. A synopsis of studies of the monotonic and cyclic behavior of concrete-filled steel tube beam-columns: structural engineering report [R]. Urbana: University of Illinois Urbana-Champaign, 2008.
- [19] 刘玉茜. 钢管混凝土粘结滑移性能的理论分析及ANSYS程序验证[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
LIU Yuqian. Study on the basic theory of bond-slip between steel tube and concrete in CFT structures and numerical simulation by ANSYS program. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006. (in Chinese)
- [20] 胡波, 王建国. 钢管与混凝土粘结-滑移相互作用的数值模拟[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 84-91. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2009.04.014.
HU Bo, WANG Jianguo. Numerical simulation on bond-slip behavior of concrete-filled steel tubes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 84-91. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2009.04.014. (in Chinese)
- [21] 张晓天. 薄壁不锈钢管混凝土粘结滑移性能试验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2017.
ZHANG Xiaotian. Experimental Study on bonding and sliding properties of thin-walled stainless steel tube concrete [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2017. (in Chinese)
- [22] 王秋维, 刘乐, 史庆轩, 等. 钢管活性粉末混凝土界面粘结强度计算方法研究[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 41-50. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.0236.
WANG Qiuwei, LIU Le, SHI Qingxuan, et al. A calculation method of the interface bond strength of reactive powder concrete filled in steel tubes[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 41-50. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.0236. (in Chinese)
- [23] ALLOUZI R A, ALMASAEID H H, SALMAN D G, et al. Prediction of bond-slip behavior of circular/squared concrete-

- filled steel tubes[J].Buildings,2022,12(4):456.DOI:10.3390/buildings12040456.
- [24] 池建军.钢管混凝土界面抗剪粘结性能的试验研究与有限元分析[D].长沙:长沙理工大学,2004.
CHI Jianjun.Experimental Research and Finite Element Analysis of interface shear bond properties of concrete filled steel tube [D].Changsha:Changsha University of Science & Technology,2004.(in Chinese)
- [25] 管民生,王梦森,曾庆立,等.方钢管卵石机制砂再生粗骨料混凝土粘结滑移本构[J].建筑科学,2021,37(11):94-104. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2021.11.013.
GUAN Minsheng,WANG Mengsen,ZENG Qingli, et al.Bond-slip constitutive model of recycled coarse aggregate concrete with pebble-made sand in square steel tube[J].Building Science,2021,37(11):94-104.DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2021.11.013.(in Chinese)
- [26] 高春彦,原森森,王佳丽,等.钢管UHPC界面粘结滑移力学性能研究[J].建筑结构,2022,52(增刊2):1369-1374.DOI:10.19701/j.jzjg.22S2178.
GAO Chunyan,YUAN Miaomiao,WANG Jiali, et al.Study on mechanical properties of UHPC interface bonding and sliding of steel pipe[J].Building Structure,2022,52(Suppl.2):1369-1374. DOI:10.19701/j.jzjg.22S2178.(in Chinese)
- [27] 顾章川,俞先江,陈梦成,等.疲劳荷载后钢管混凝土界面黏结性能试验研究[J].铁道建筑,2013,53(9):127-130.DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2013.09.40.
GU Zhangchuan,YU Xianjiang,CHEN Mengcheng, et al. Experimental study on interfacial bonding behavior of concrete filled steel tube after fatigue load[J].Railway Engineering,2013,53(9):127-130.DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2013.09.40.(in Chinese)
- [28] 李星儿,苗吉军,曾在平,等.冻融循环作用后圆钢管混凝土界面粘结性能试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(4):114-123. DOI:10.11835/j.issn.2096-6717.2021.175.
LI Xing'er,MIAO Jijun,ZENG Zaiping, et al.Experimental study on interfacial bonding properties of circular steel tube concrete columns after freeze-thaw cycles[J].Journal of Civil and Environmental Engineering,2023,45(4):114-123.DOI:10.11835/j.issn.2096-6717.2021.175.(in Chinese)
- [29] 曹焯.高强钢管超高性能混凝土柱粘结滑移试验[D].荆州:长江大学,2023.
CAO Xuan.Bond slip test of High-strength steel tube ultra-high performance concrete column [D].Jingzhou:Yangtze University,2023.(in Chinese)
- [30] XU B, LIU Y. Shear bond performance at interface of concrete-filled steel tube after freeze-thaw cycles [J].Materials.2022,15(20):7233.DOI:10.3390/ma15207233.
- [31] WANG F C,XIE W Q,LI B,et al.Experimental study and design of bond behavior in concrete-filled steel tubes (CFST) [J].Engineering Structures,2022,268:114750. DOI:10.1016/j.engstruct.2022.114750.
- [32] 王佳丽.钢管CRC超高性能混凝土粘结滑移性能研究[D].包头:内蒙古科技大学,2021.
WANG Jiali.Research on bond-slip performance of CRC-filled steel tube[D].Baotou:Inner Mongolia University of Science & Technology,2021.(in Chinese)
- [33] 牛康.圆钢管自应力钢渣混凝土柱粘结滑移性能研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2018.
NIU Kang.Study on bond-slip behavior of self-stressing steel slag concrete columns with circular steel tubes[D].Maanshan:Anhui University of Technology,2018.(in Chinese)
- [34] 董博南.钢管再生混凝土粘结滑移性能研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
DONG Bonan.Study on bond-slip behavior of recycled concrete for steel pipe[D].Lanzhou:Lanzhou Jiatong University,2018.(in Chinese)
- [35] LIU L,HE L,CHENG Z, et al.Interface bonding behavior of concrete-filled steel tube blended with circulating fluidized bed bottom ash[J].Materials,2021,14(6):1529. DOI:10.3390/ma14061529.
- [36] LU Y Y,LIU Z Z,LI S, et al.Bond behavior of steel fibers reinforced self-stressing and self-compacting concrete filled steel tube columns[J].Construction and Building Materials,2018,158:894-909. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.085.
- [37] KE X J,SUN H Y,YANG Z.Calculation on bond strength of high-strength concrete filled steel tube[C].Proceedings of the 2015 4th international conference on sensors, measurement and intelligent materials.Amsterdam:Atlantis Press,2016.
- [38] FU Z Q,GE H B,JI B H, et al.Interface bond behaviour between circular steel tube and lightweight aggregate concrete [J].Advanced Steel Construction.2018,14(3):424-437. DOI:10.18057/IJASC.2018.14.3.7.
- [39] 丁庆军,周孝军,牟廷敏,等.钢纤维增韧微膨胀钢管混凝土界面粘结性能研究[J].功能材料.2013,44(6):809-813. DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2013.06.012.
DING Qingjun,ZHOU Xiaojun,MOU Tingmin, et al.Study on interface bonding properties of steel fiber toughened micro-expansion concrete-filled steel tube [J].Functional Materials,2013,44(6):809-813.DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2013.06.012.(in Chinese)
- [40] 黄晖,叶燕华,杜艳静,等.钢管自密实混凝土粘结滑移性能试验研究[J].混凝土.2010(4):23-27. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2010.04.008.
HUANG Hui,YE Yanhua,DU Yanjing, et al.Experimental study on bond slip performance of steel tube self-compacts concrete [J].Concrete,2010(4):23-27.DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2010.04.008.(in Chinese)