

文章编号:1007-9629(2023)09-0970-10

重复推出下钢管再生混凝土黏结-滑移性能 影响因素

孙 冰^{1,2,3}, 张 杰¹, 陈 卫^{1,2,3,*}, 曾 晟¹, 张志恒¹

(1. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 中国核工业建设集团
公司高性能混凝土重点实验室, 湖南 衡阳 421001; 3. 南华大学 高性能特种
混凝土湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘要:为研究钢管再生混凝土(RACFST)在原生混凝土强度等级、锈蚀率和膨胀剂掺量影响下的黏结-滑移性能,开展了重复推出试验,分析了荷载-滑移曲线、耗能能力、应变分布和各因素对 RACFST 峰值荷载的影响,并建立了黏结强度计算模型.结果表明:混凝土奇数次推出时的耗能能力和钢管表面应变分布大于偶数次推出时;峰值荷载随着原生混凝土强度的提高而增大,随着锈蚀率和膨胀剂掺量的提高分别呈先增大后减小、先减小后增大趋势;基于 Rational 函数和 Expdec1 函数建立的黏结强度计算模型具有较高可靠性.

关键词:钢管再生混凝土;重复推出;黏结-滑移;峰值荷载

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.09.004

Influencing Factors on Bond-Slip Performance of Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tubes under Repeated Push-out

SUN Bing^{1,2,3}, ZHANG Jie¹, CHEN Wei^{1,2,3,*}, ZENG Sheng¹, ZHANG Zhiheng¹

(1. College of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. China Nuclear Construction Key Laboratory of High Performance Concrete, University of South China, Hengyang 421001, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Performance Concrete, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to investigate the bond-slip performance of recycled aggregate concrete filled steel tubes (RACFST) in terms of the parent concrete strength grade, corrosion rate and expansion agent, the repeated push-out test of RACFST was carried out. The load-slip curve, energy consumption capacity, strain distribution and the influence of above three factors on the peak load of RACFST were studied. A computational model for bond strength was developed. The results show that the energy consumption capacity and strain distribution of odd times of the push-out test are greater than those of even times. The peak load increases with the strength of the parent concrete. With the increase of corrosion rate and expander content, the peak load increases first and then decreases, and decreases first and then increases. The bond strength calculation models based on the Rational and Expdec1 functions are highly reliable.

Key words: recycled aggregate concrete filled steel tube (RACFST); repeated push-out; bond-slip; peak load

收稿日期:2022-10-31; 修订日期:2022-12-04

基金项目:南华大学博士科研启动基金资助项目(Y00043-13)

第一作者:孙 冰(1979—),女,河南平顶山人,南华大学教授,硕士生导师,博士. E-mail:sunbingnh@126.com

通讯作者:陈 卫(1991—),男,湖南衡阳人,南华大学讲师,硕士生导师,博士. E-mail:chenwei@usc.edu.cn

中国从“碳达峰”到“碳中和”的过渡期将面临时间短、任务重等巨大挑战。建筑行业碳排放量为全国碳排放总量的50%以上,使用再生骨料能够有效减少建筑业碳排放,更好地保护环境。但再生骨料的力学性能和耐久性能等均比普通混凝土差,严重影响其大规模推广^[1]。钢管再生混凝土(RACFST)承载力高、刚度好、性能稳定^[2],利用钢管对再生混凝土形成三向受压约束,能够有效弥补再生骨料的缺陷^[3],扩大其使用范围。

RACFST界面的黏结-滑移是钢管和再生混凝土共同工作的基础。目前,国内外学者对RACFST界面的研究主要集中在钢管类型^[4]、尺寸^[5]、截面形式^[6]、混凝土类型^[4]、强度等级^[7]、再生骨料取代率^[5]和高温^[8]对黏结-滑移性能影响等方面。而在实际工程中,RACFST界面黏结性能的稳定发挥受自身材料特性、环境的双重限制。就组成材料而言,再生骨料较天然骨料具有更强的收缩率,RACFST界面更易发生脱黏现象,添加一定量的膨胀剂可以通过调节收缩来减缓再生混凝土与钢管的分离趋势,对防止界面脱黏,控制并改善黏结-滑移性能具有重要意义;此外,分类回收不同原生强度混凝土对组合结构黏结-滑移性能的影响有待探索。对工作环境来说,长期服役于桥梁、海上平台等高氯离子腐蚀性环境中的钢管会不可避免地发生锈蚀。一方面锈蚀后RACFST黏结-滑移性能

的研究还有待开展;另一方面研究服役于严苛环境中的RACFST,可拓宽再生混凝土的应用范围,为减少天然骨料的开采,避免自然资源枯竭提供新的思路,有助于实现保护环境和资源有效利用,走上可持续发展的道路。

鉴于此,本文设计了不同原生混凝土强度等级、膨胀剂掺量及高氯离子腐蚀条件下9组RACFST试件的重复推出试验,进行了黏结机理及相关影响参数分析,并建立了相应变量下的黏结强度计算式,以期RACFST黏结-滑移性能的评估提供相关依据。

1 试验

1.1 原材料

胶凝材料采用42.5级硅酸盐水泥;再生粗骨料为自制的原生强度等级为C30、C40和C50的混凝土经破碎、清洗、分级和筛分后所得到的0~20 mm连续级配再生骨料;天然粗骨料采用0~20 mm连续级配的碎石;细骨料采用细度模数2.4,含水率(质量分数,文中涉及的含量、水胶比等均为质量分数或质量比)1.15%的连续级配中砂;膨胀剂选用UEA-H型膨胀剂;钢管为Q235直缝焊接钢管,外径140 mm、壁厚4.5 mm、高410 mm,屈服强度235 MPa、弹性模量210 MPa、泊松比0.25。粗骨料物理性能指标见表1、级配曲线如图1所示。

表1 粗骨料物理性能指标

Table 1 Physical properties of coarse aggregates

Test index	Natural coarse aggregate	Recycled coarse aggregate		
		C30	C40	C50
Packing density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 441	1 188	1 163	1 181
Apparent density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 052	2 510	2 569	2 436
Water absorption(by mass)/%	0.86	5.06	4.08	3.52
Crushing index/%	6.12	14.91	14.45	15.35
Clay content(by mass)/%	—	0.42	0.61	0.46
Attached mortar content(by mass)/%	—	43.28	30.90	23.83

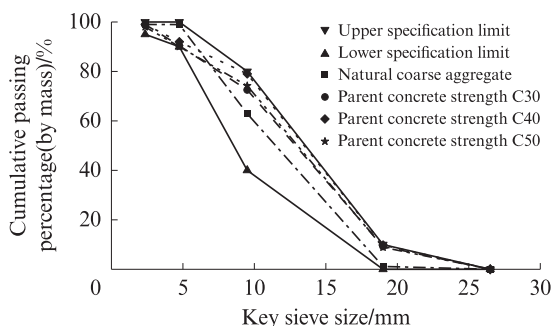


图1 粗骨料级配曲线

Fig. 1 Grading curves of coarse aggregates

1.2 试验设计

(1) 试件制作

图2为试件几何尺寸。混凝土进行浇筑之前先对钢管进行预加工,混凝土浇筑至豁口处停止(预留40 mm空隙),以便进行推出试验;待浇筑完成后,使用塑料薄膜进行封口,严格模拟钢管内密闭环境。

常用的膨胀剂有UEA型膨胀剂、HCSA型膨胀剂和氧化镁膨胀剂^[9]。其中HCSA型膨胀剂为硫铝酸钙和氧化钙双膨胀源,自由膨胀率较大;氧化镁膨胀

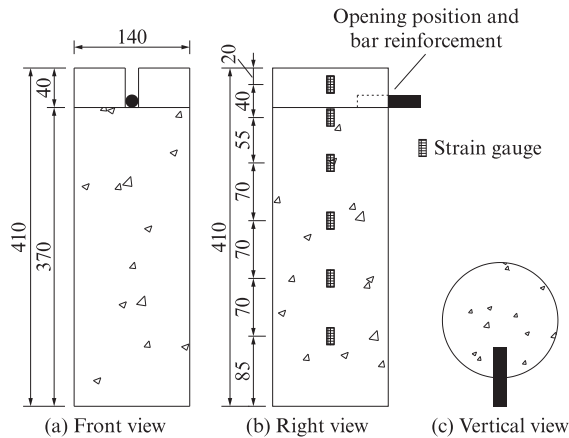


图 2 试件几何尺寸
Fig. 2 Geometric size of specimen(size: mm)

表 2 试件参数
Table 2 Parameters of specimens

Specimen No.	Cement consumption/(kg·m ⁻³)	Parent concrete strength grade	w(UEA-H)/%	ρ/%
RACFST-1	372.73	C30	0	0
RACFST-2	372.73	C40	0	0
RACFST-3	372.73	C40	0	5
RACFST-4	372.73	C40	0	10
RACFST-5	372.73	C40	0	15
RACFST-6	372.73	C50	0	0
RACFST-7	357.82	C50	4	0
RACFST-8	342.91	C50	8	0
RACFST-9	328.00	C50	12	0

(2) 钢管锈蚀试验

由于钢管在自然界中的锈蚀是一种长期而缓慢的过程,实验室常采用电解池对其加速锈蚀.根据法拉第电解第一定律,钢管名义锈蚀率(ρ,%)的计算式为^[11]:

$$\rho = \frac{tMiD}{zFm} \times 100\% \quad (2)$$

式中: t 为通电时间, s; M 为 Fe 的摩尔质量, 56 g/mol; i 为锈蚀电流密度, A/cm²; D 为锈蚀区域内的钢管表面积, cm²; z 为铁离子电荷数, $z=2$; F 为法拉第常数, 96 500 C/mol; m 为钢管未锈蚀前的质量, g.

将浇筑好的锈蚀试件先密封养护 7 d,再置于 5% 的 NaCl 溶液中浸泡 7 d,使 NaCl 溶液充分渗入黏结界面,称重后进行加速锈蚀试验,其示意图见图 3.锈蚀完成后再次称重,计算得到钢管的实际锈蚀率分别为 0%、6.85%、9.59%、13.70%,与名义锈蚀率偏差较小.

(3) 推出试验方案

使用 WAW-EY1000C 电液伺服万能试验机加载.在加载端使用 1 个直径略小于钢管内径、厚度为 40 mm 的钢垫块进行推出试验,加载速率为

剂易造成混凝土体积安定性不良;UEA 型膨胀剂为硫铝酸钙单膨胀源.综合考虑膨胀性与钢管力学性能的协同性,本试验选用 UEA-H 型膨胀剂,采用内掺法形式掺入,其掺量(δ,%)计算式为:

$$\delta = \frac{E}{C + E} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E 为膨胀剂用量, g; C 为水泥用量, g.

以黏结强度最大为原则,将再生粗骨料取代率取为 50%^[10].以混凝土强度等级 C30 且各材料质量比为 $m(\text{水泥}):m(\text{水}):m(\text{砂}):m(\text{碎石}):m(\text{再生骨料})=372.73:205.00:637.79:592.24:592.24$,来制作 RACFST 试件.试件参数见表 2.

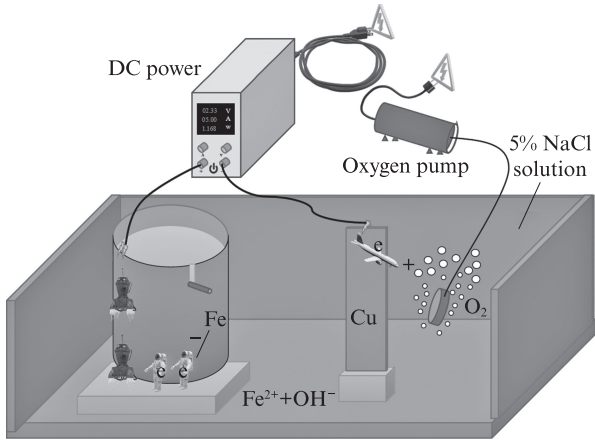


图 3 钢管加速锈蚀试验示意图
Fig. 3 Schematic diagram of accelerated corrosion test for steel tube

0.002 mm/s;当自由端位移达到 35 mm 或残余荷载下降趋于稳定时,首次推出结束;将试件倒置,按上述方案再次推出,每个试件反复推出 4 次,得到重复加载曲线.通过架设于加载端(混凝土受力端)上压板、自由端(钢管受力端)外伸钢筋棒处的位移计测量两端滑移.重复推出方法示意图如图 4 所示.

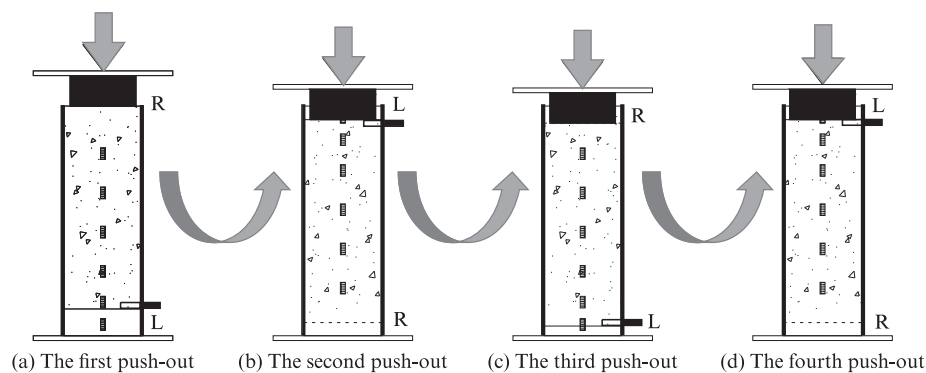


图4 重复推出方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of repeated push-out method

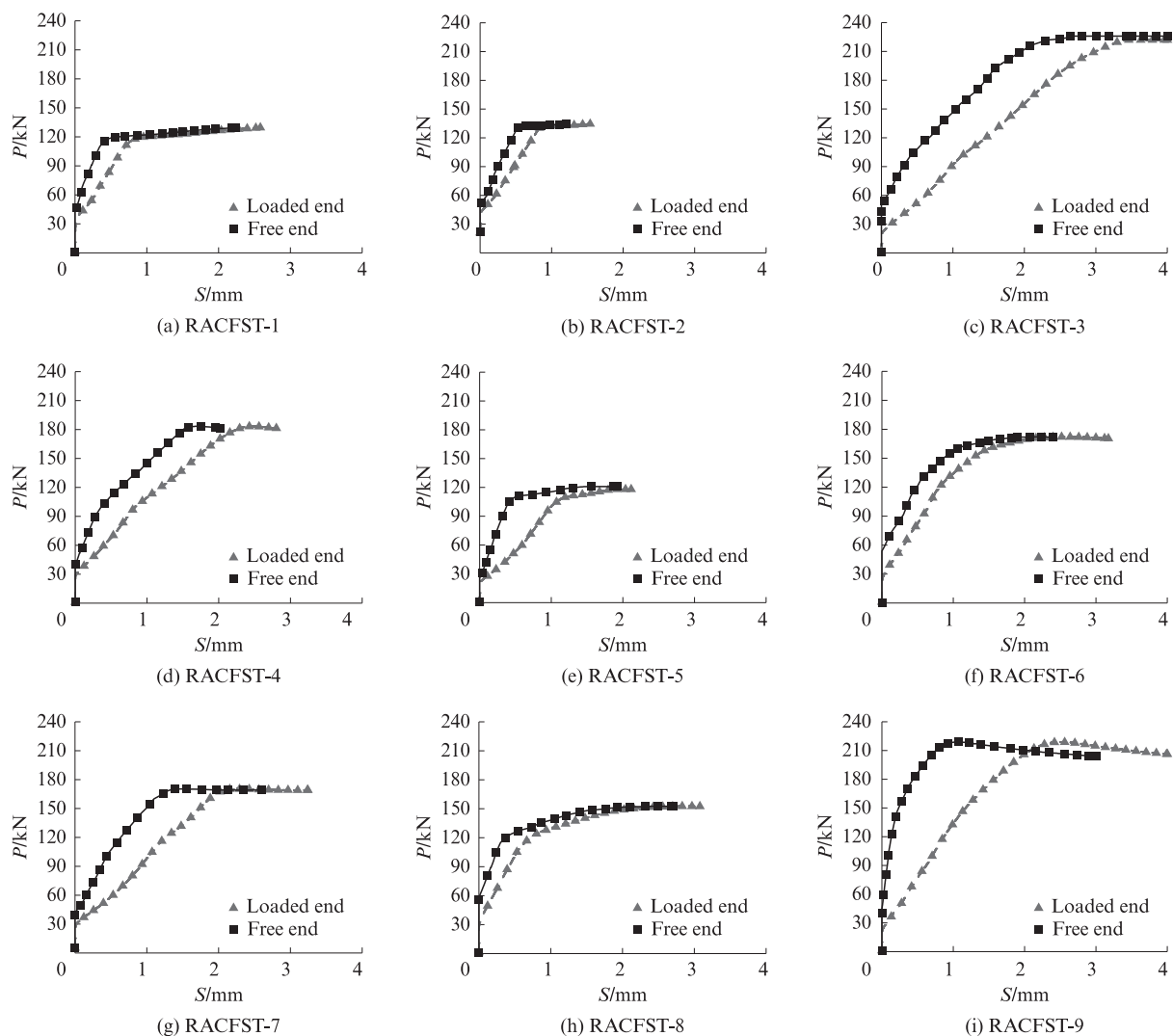
2 结果及分析

2.1 试验现象

需要说明的是:由于首次推出时加载端与自由端的起滑存在时间差,其荷载-滑移(P - S)曲线列出

了两端曲线;而重复推出时加载端与自由端的 P - S 保持一致,故仅列出了加载端曲线;另外,试件 RACFST-3 和 RACFST-7 因仪器故障未能测出重复推出曲线.

试件首次推出和重复推出的 P - S 曲线如图5、6

图5 试件首次推出的 P - S 曲线Fig. 5 P - S curves at the first push-out of specimens

所示.由图5可见:首次推出试验加载初期,再生混凝土两端均未发生滑动;当荷载增大到峰值荷载的30%左右时,加载端先出现滑移,继而自由端也发生滑动;随后两端荷载随着滑移的发展先后达到峰值并保持稳定.由图6可见:重复推出过程中,第2、3、4

次推出时自由端与加载端同时滑动,且仅第3次推出与首次推出加载端曲线相似;第2、4次荷载达到峰值点并出现下降段后才趋于稳定.重复推出结束后,黏结界面有混凝土碎屑产生,钢管未出现压溃或屈服现象.

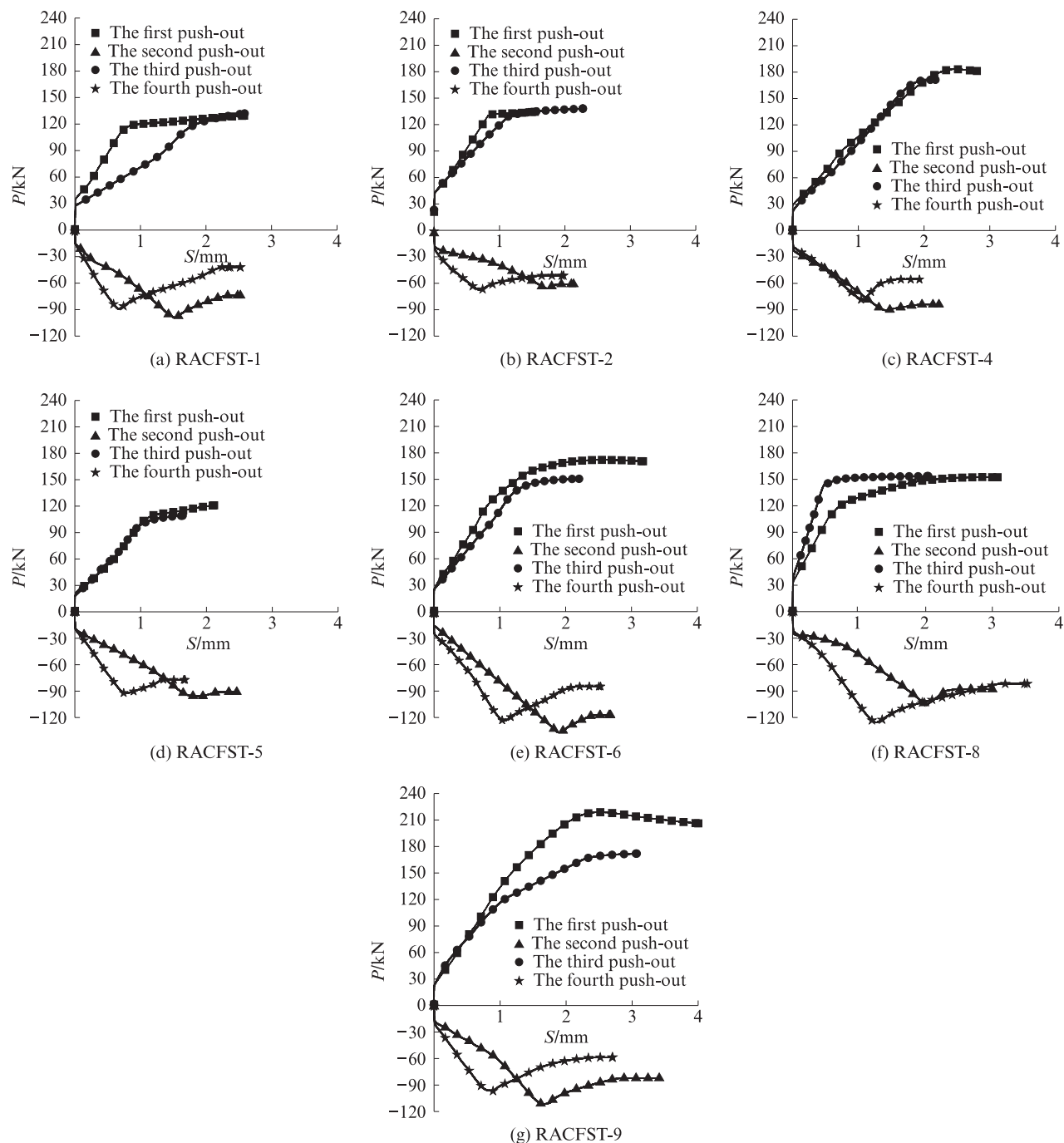


图6 试件重复推出的 P - S 曲线
Fig. 6 P - S curves at repeated push-out of specimens

2.2 荷载-滑移曲线分析

钢管再生混凝土界面黏结力由化学胶结力、机械咬合力和摩擦力组成.钢管与混凝土界面黏结性能的演变即上述3组作用力交替发挥作用的过

程.为便于描述荷载-滑移过程,将滑移与3组作用力相对应:当化学胶结力消失、机械咬合力发挥作用时界面产生微观滑移;当机械咬合力失效、摩擦力发挥作用时界面产生宏观滑移.微观滑移量是

与钢管表面粗糙程度(一般为 10^{-2} 量级)有关的物理量。

2.2.1 首次推出全过程分析

首次推出曲线分析如图7所示。图7(a)为首次推出的黏结-滑移机理,其中的①、②和③分别代表化学胶结力、机械咬合力和摩擦力, S 、 S_0 和 S_1 分别代

表无滑移、微观滑移和宏观滑移。图7(b)为首次推出荷载-滑移曲线模型,模型被分为5个阶段——无滑移段(OA 、 OA')、加载端微观滑移段(AB)、自由端微观滑移段($A'B'$)、加载端与自由端宏观滑移段(BC 、 $B'C'$)和滑移稳定段(CD 、 $C'D'$)。首次推出全过程分析如下:

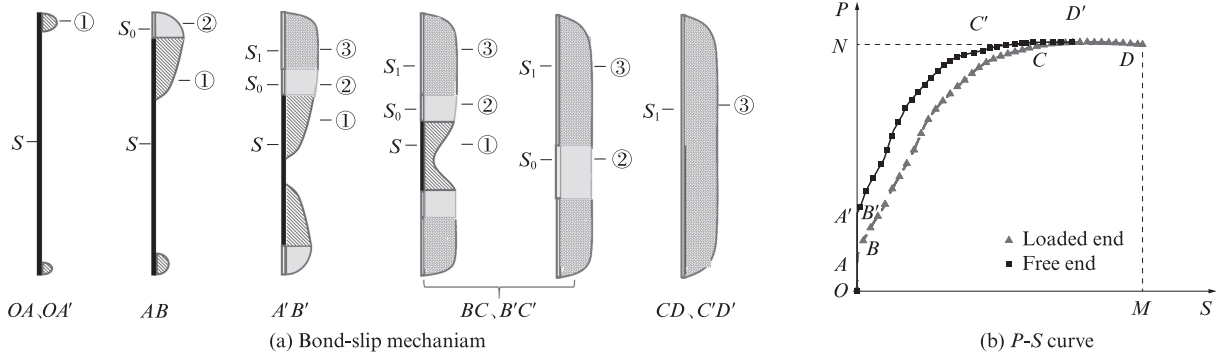


图7 首次推出曲线分析
Fig. 7 Analysis of the first push-out

(1)无滑移段(OA 、 OA') 首次推出试验初期荷载较小,加载端和自由端均无滑移产生,界面处于弹性阶段;从混凝土传递到钢管的黏结力全部由加载端、部分自由端的水泥凝胶体与钢管表面黏结形成的化学胶结力提供。化学胶结力在较小的荷载下即失效且无法恢复,主要受水胶比影响。

(2)加载端微观滑移段(AB) 荷载略微增大后,加载端出现微观滑移,化学胶结力下移于无滑移处,扩散长度增加;自由端化学胶结力略有增大但未发生微观滑移。微观滑移对应的机械咬合力在水泥凝胶体与钢管黏结失效时发挥作用,到楔入钢管的混凝土突刺被剪断时失效。微观滑移仅在局部微小范围内存在。

(3)自由端微观滑移段($A'B'$) 随后自由端也出现微观滑移,该端的机械咬合力已叠加到黏结力中,此时加载端滑移量较大,出现了宏观滑移,摩擦力发挥作用。至此,化学胶结力、机械咬合力和摩擦力全部加入到黏结力当中。

(4)加载端与自由端宏观滑移段(BC 、 $B'C'$) 随着荷载的继续增大,自由端也出现宏观滑移,随后化学胶结力、机械咬合力依次在试件中下部相遇,并随着滑移量的增大逐渐被摩擦力取代。宏观滑移发生处混凝土被钢管表面锯齿状突刺剪断、压碎并作为碎屑填充,具体表现为机械咬合力失效,摩擦力发挥作用。

(5)滑移稳定段(CD 、 $C'D'$) 加载端和自由端滑移量同步,界面完全贯通,黏结力在黏结界面仅由摩擦力提供而发展稳定。摩擦力的大小与摩擦系数、

环向压力有关。试件全长范围内机械咬合力失效使钢管内表面被混凝土碎屑填充,摩擦系数稳定;受压混凝土横向泊松效应引发钢管环箍约束产生的摩擦力与外荷载达到平衡,摩擦力稳定发展。

2.2.2 重复推出全过程分析

图8为重复推出特征曲线。这里仅对重复推出与首次推出全过程中的不同之处进行分析。由图8可见:(1)重复推出过程中第1次推出即首次推出;第2~4次推出过程中,水泥凝胶体与钢管已脱黏,化学胶结力永久性丧失,无滑移段需要克服微弱的机械咬合力使试件起滑,随后机械咬合力被摩擦力取代并与外荷载达到平衡。(2)界面摩擦系数随着推出次数的增加而减小,导致推出过程中所能达到的极限黏结应力也依次降低。(3)与奇数次推出不同的是,偶数次推出在达到峰值荷载并出现下降段后滑移才稳定。这是由于偶数次推出为反向推出,反向“楔入效应”导致混凝土从直径较小端推向较大端,钢管对混凝土约束弱,机械咬合力大于摩擦力。

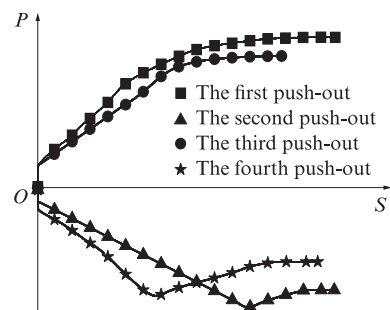


图8 重复推出特征曲线
Fig. 8 Analysis of repeated push-out

2.3 参数分析

2.3.1 耗能能力

推出过程中试件耗能能力是界面能量损失的直接体现. 采用耗能因子(η)对耗能能力进行定量描述, 计算表达式为^[12]:

$$\eta = \frac{S_{\text{OADM}}}{S_{\text{ONDM}}} \quad (3)$$

式中: S_{OADM} 为图7(b)中 P - S 曲线上 OADM 包围的面积; S_{ONDM} 为矩形 ONDM 包围的面积.

表3为重复推出时加载端耗能能力计算结果. 由表3可知:总体上,奇数次推出时试件的平均耗能

能力大于偶数次推出;除个别试件外,大多数试件首次推出时的耗能能力大于第2~4次推出;第2次推出时耗散能力最差. 试件在首次推出过程中,3种作用力均参与了推出,且界面原始损伤小,耗能能力最强;随着推出次数的增加,界面损伤加剧,耗能效率降低;奇数次推出具有明显的“楔入效应”,钢管对混凝土的约束使各组分作用力相对较大,耗能能力高于偶数次. 有趣的是,第4次推出时耗能因子平均值较第2次推出增大5.13%. 分析发现,第2次推出时平均滑移较第4次推出增大了0.224 mm,能量有较长的耗散距离,说明钢管混凝土长度越长,可滑移距离越充分,越有利于界面能量的耗散.

表3 重复推出时加载端耗能能力计算结果

Table 3 Calculation results of energy consumption capacity at the loaded end during repeated push-out

Specimen No.	The first push-out	The second push-out	The third push-out	The fourth push-out
RACFST-1	0.842 38	0.681 82	0.654 43	0.662 77
RACFST-2	0.789 35	0.659 28	0.805 29	0.776 97
RACFST-3	0.812 85	—	—	—
RACFST-4	0.685 20	0.729 93	0.622 56	0.673 12
RACFST-5	0.711 08	0.693 59	0.693 47	0.771 30
RACFST-6	0.807 88	0.658 53	0.729 07	0.704 93
RACFST-7	0.734 01	—	—	—
RACFST-8	0.844 45	0.632 64	0.893 52	0.691 87
RACFST-9	0.773 78	0.673 65	0.739 78	0.704 30
Average	0.777 90	0.675 63	0.734 02	0.712 18

2.3.2 重复推出黏结应变分布

以典型试件RACFST-6为代表,分析重复推出时荷载上升段的黏结应变 ϵ 分布,结果见图9(图中 P_0 为峰值荷载). 由图9可见:重复推出过程中钢管表面的应变沿高度方向呈直线分布,越靠近自由端应变越大;同一方向上随着推出次数的增加,钢管表面各处的应变逐渐降低,但降幅较小;当从不同方向上推出时应变大小差别较大,相同位置处奇数次推出时应变远大于偶数次. 这是由于黏结力通过混凝土沿黏结界面传递给钢管,应力不断向自由端累加,越靠近自由端,转移到钢管上的力越大,导致黏结应变呈直线增长;同一方向随着推出次数的增加,界面摩擦系数减小,黏结极限应力降低,钢管表面黏结应变下降;不同方向推出时,黏结应变变化主要受钢管制造时的宏观偏差影响,奇数次推出时,混凝土由直径较大端推向直径较小端,钢管对混凝土的约束效应强,相比偶数次推出,混凝土由直径较小端推向较大端时所需的推出荷载较大,传递到钢管表面的应变也更大.

2.4 各因素对峰值荷载的影响

将试件首次推出时的峰值荷载受各因素的影响

进行分析,结果如图10所示.

2.4.1 原生混凝土强度的影响

为研究原生混凝土强度对试件峰值荷载的影响,选取试件RACFST-1、RACFST-2和RACFST-6进行分析. 由图10(a)可见:随着原生混凝土强度的提高,峰值荷载不断提高;当原生混凝土强度从C30提高到C40、C50时,试件峰值荷载分别提高8.33%、30.77%. 这是因为钢管与再生粗骨料之间存在钢管-新砂浆-旧砂浆-骨料多个界面过渡区;界面滑移时,存在新、旧砂浆2种界面过渡区失效的可能,同等条件下裂纹更倾向于在强度较低、易产生应力集中的旧砂浆界面萌生;原生强度越高的旧砂浆质量较好、附着量少,界面黏结性能越好,裂隙越不容易开展;此外,原生混凝土强度越高的粗骨料吸水率越小,水泥水化更加充分,界面的黏结也更为紧密.

2.4.2 锈蚀率的影响

为研究锈蚀率对试件峰值荷载的影响,选取RACFST-2~RACFST-5进行分析. 由图10(b)可见:试件的峰值荷载随着锈蚀率的提高先增大后减小;当锈蚀程度较轻(锈蚀率为5%)时, Fe^{2+} 与 OH^-

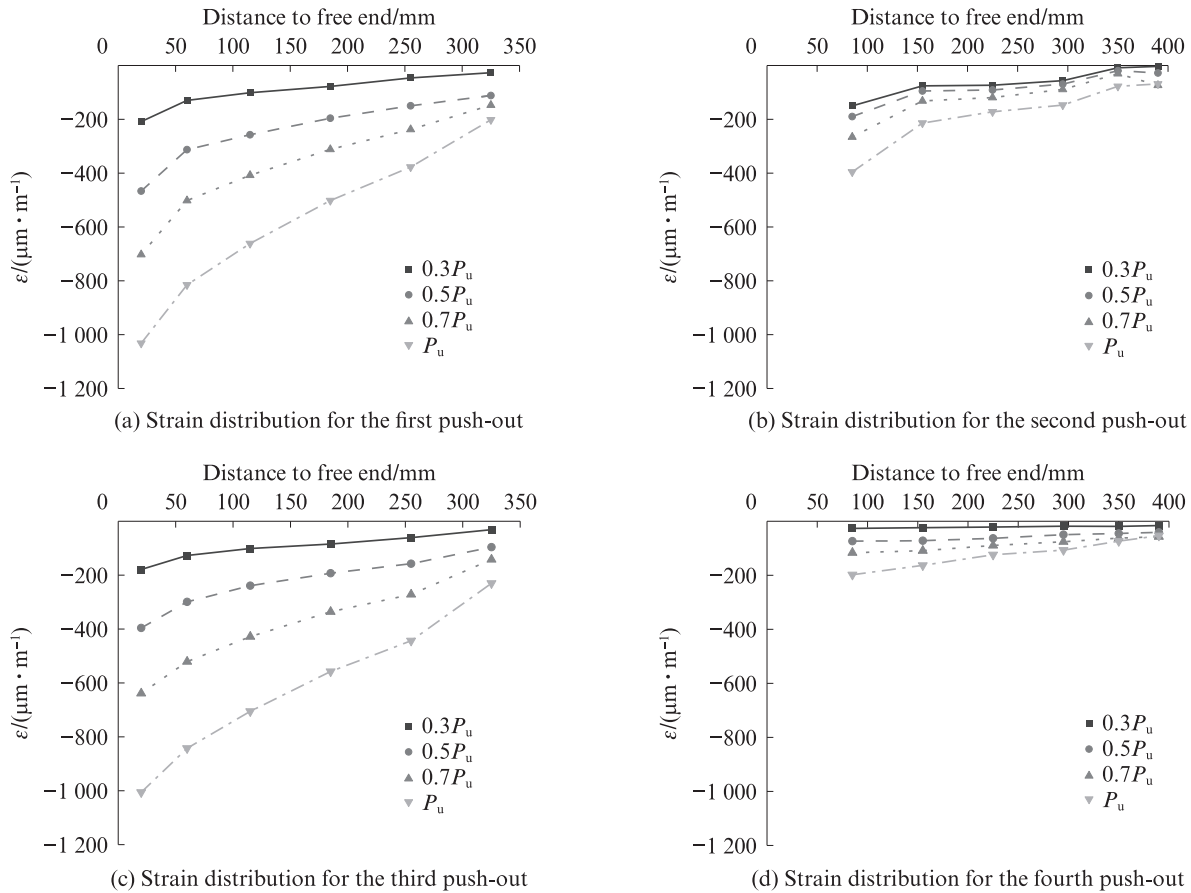


图9 荷载上升段黏结应变分布

Fig. 9 Bonding strain distribution of load rising section

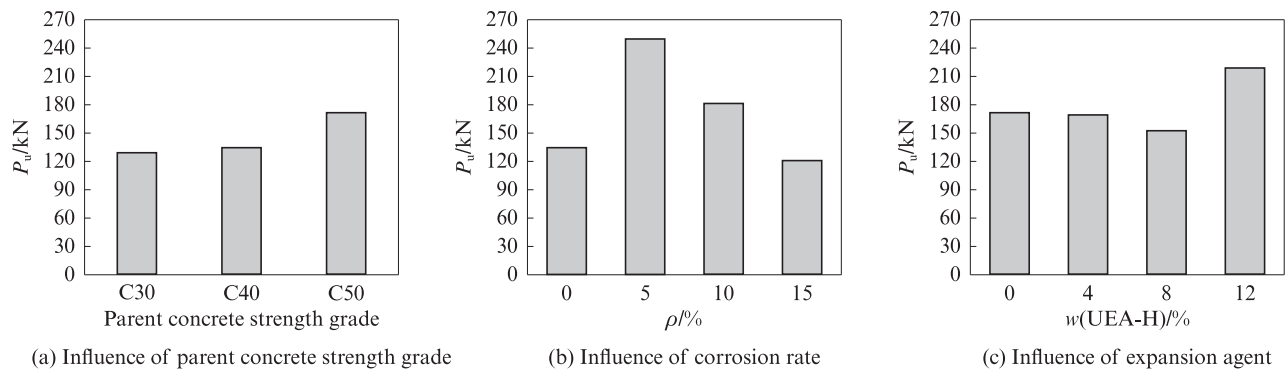


图10 各因素对峰值荷载的影响

Fig. 10 Influence of each factor on peak load

结合并经氧化形成轻度锈蚀产物 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, 使黏结界面更加致密, 锈蚀液也起到养护作用, 使水化更加充分, 黏结力大幅上升; 随着锈蚀程度的加深 (锈蚀率为 10% 或 15%), 试件两端的氯离子不断向中部扩散, 界面前期生成的轻度锈蚀产物的较大孔隙加速了氯离子渗入, 生成了更多的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, 它们富集在一起, 形成了疏松多孔的重度锈蚀, 导致局部界面黏结几乎完全失效, 钢管有效黏结长度缩短; 同时, 锈蚀变相减小了钢管厚度, 使其环箍效应减弱, 对核心混凝土约束降低, 黏结力呈现下降趋势。

2.4.3 膨胀剂掺量的影响

为研究膨胀剂掺量对试件峰值荷载的影响, 选取试件 RACFST-6~RACFST-9 进行分析。由图 10(c) 可见: 随着膨胀剂掺量的增加, 试件的峰值荷载先减小后增大; 当膨胀剂掺量较小 (4% 或 8%) 时, 膨胀产物主要用来填充再生粗骨料孔隙, 同时内掺法导致参与水化的水泥减少, 直接造成膨胀剂掺量为 4% 和 8% 试件的峰值荷载小于膨胀剂掺量为 0% 的试件; 当膨胀剂掺量达到 12% 时, 再生粗骨料的孔隙和裂纹得到填充, 膨胀产物参与到粗-细骨料、细骨料-钢

管界面之间,改善了界面结构,也使混凝土整体发生膨胀,钢管“紧箍效应”得以展现,其峰值荷载较膨胀剂掺量为0%的试件提高28.24%。

3 黏结强度计算模型

RACFST的黏结强度计算式^[13]为:

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi d l_a} \quad (4)$$

式中: τ_u 为黏结强度,MPa; d 为钢管内径,mm; l_a 为钢管有效长度,mm。

本文采用 Rational 函数对锈蚀率系列试件(RACFST-2~RACFST-5)拟合,采用 Expdec1 函数分别对原生混凝土强度系列试件(RACFST-1、

RACFST-2 和 RACFST-6)、膨胀剂掺量系列试件(RACFST-6~RACFST-9)进行拟合。将本文中的 RACFST 界面黏结强度计算值、实测值与文献[14-15]进行对比分析,以检验模型的可靠性,结果见表4。由表4可知:各试件的决定系数(R^2)均大于0.910,拟合优度高^[16];3个公式所拟合的 RACFST 界面黏结强度计算值在0.68~1.57 MPa之间,大于GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》规定的界面黏结强度0.225 MPa的要求;3个公式所拟合的 RACFST 界面黏结强度计算值与实测值的比值在0.85~1.08之间,预测结果精度高;模型能够较好地对比文献[14-15]的黏结强度值进行预测。

表4 黏结强度计算模型及其可靠性验证

Table 4 Calculation model of bond strength and its reliability verification

Specimen No.	Calculation model of bond strength	R^2	Data result of this paper			Data result of Ref. [14-15]		
			$\tau_{u,c}$	$\tau_{u,t}$	$\tau_{u,c}/\tau_{u,t}$	$\tau_{u,c}$	$\tau_{u,t}$	$\tau_{u,c}/\tau_{u,t}$
RACFST-1	$\tau_u = 1.766 \times 10^{-5} \times e^a + 0.843, a = f_{cy}/5.162$	1.000	0.85	0.85	1.00			
RACFST-2			0.94	0.88	1.07	0.94	0.93	1.01
RACFST-3			1.57	1.64	0.96	0.94	1.00	0.94
RACFST-4	$\tau_u = (1.059 - 14.114 \times \rho + 112.939 \times \rho^2)^{-1}$	0.928	1.29	1.19	1.08	0.94	1.14	0.82
RACFST-5			0.68	0.79	0.85	0.94	1.24	0.76
RACFST-6			1.08	1.13	0.96	1.08	1.03	1.05
RACFST-7			1.08	1.11	0.97	1.08	1.19	0.91
RACFST-8	$\tau_u = 1.080 + 7.417 \times 10^{-13} \times e^{\frac{\delta}{0.005}}$	0.911	1.08	1.00	1.08	1.08	0.92	1.17
RACFST-9			1.44	1.44	1.00	1.08	1.18	0.92

Note: $\tau_{u,c}$ is the value calculated by the fitting formula; $\tau_{u,t}$ is the measured value; f_{cy} is the parent concrete strength; the data of corrosion rate specimens were obtained from YG 6-9 in ref.[14], and the data of expansion agent specimens were obtained from A1-D1 in ref.[15].

4 结论

(1)钢管再生混凝土(RACFST)黏结界面的荷载-滑移曲线中对微观、宏观滑移的定义,将化学胶结力、机械咬合力和摩擦力清晰地对应了各自的滑移阶段。3种作用力依次出现、失效,对黏结-滑移机理的表征具有重要意义。

(2)RACFST 黏结界面各参数受推出方向影响较大。总体上看,界面耗能能力在首次推出时最大,奇数次推出时大于偶数次推出时;同一方向上随着推出次数的增加,各点应变降幅较小;推出方向不同导致应变变化较大,奇数次推出时大于偶数次推出时。

(3)RACFST 的峰值荷载随着原生混凝土强度的提高而提高,随着锈蚀率的提高先增大后减小,最大值对应的锈蚀率为5%;随着膨胀剂掺量的增加先减小后增大,最大值对应的膨胀剂掺量为12%。

(4)RACFST 的黏结强度计算值与实测值相较

GB 50936—2014有较大安全富余。计算模型与试验值、文献值吻合较好,能够准确预测黏结强度,可为实际工程中 RACFST 的黏结-滑移性能评估提供参考。

参考文献:

- [1] XIAO J Z. Recycled aggregate concrete structures[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2018:65-98.
- [2] 肖建庄, 杨洁, 黄一杰, 等. 钢管约束再生混凝土轴压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6):92-98.
XIAO Jianzhuang, YANG Jie, HUANG Yijie, et al. Experimental study on recycled concrete confined by steel tube under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6):92-98.(in Chinese)
- [3] HUANG Y J, XIAO J Z, ZHANG C. Theoretical study on mechanical behavior of steel confined recycled aggregate concrete [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 76:100-111.
- [4] TAO Z, SONG T Y, BRIAN U, et al. Bond behavior in concrete-filled steel tubes[J]. Journal of Constructional Steel

- Research, 2016, 120:81-93.
- [5] ZHAO H, LI J Q, WANG R, et al. Study on interfacial bond behavior of recycled aggregate concrete filled stainless steel tubes (RAC-FSST)[J]. Construction and Building Materials, 2021, 313:125532.
- [6] 王秋维, 王程伟, 刘乐, 等. 钢管混凝土界面粘结性能研究现状与分析进展[J]. 建筑结构, 2021, 51(12):91-97.
WANG Qiwei, WANG Chengwei, LIU Le, et al. Research status and analysis progress of the interfacial bond performance of concrete-filled steel tubes[J]. Building Structure, 2021, 51(12): 91-97.(in Chinese)
- [7] LI J T, XU J J, CHEN Z P, et al. Mechanical research on bond-slip behaviors of recycled aggregate concrete-filled square steel tubes[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 166-169: 3233-3236.
- [8] CHEN Z P, JIA H R, LI S X. Bond behavior of recycled aggregate concrete-filled steel tube after elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2022, 325:126683.
- [9] 李华, 汪洋, 王育江, 等. 膨胀剂对混凝土早期基本徐变的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(3):256-262.
LI Hua, WANG Yang, WANG Yujiang, et al. Effect of expansive additives on basic creep of early-age concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3):256-262.(in Chinese)
- [10] 陈宗平, 徐金俊, 李卫宁, 等. 再生粗骨料含量对钢管再生混凝土粘结强度及失效性态的影响研究[J]. 工程力学, 2014, 31(6):70-78.
CHEN Zongping, XU Jinjun, LI Weining, et al. Influence of recycled coarse aggregate content on bond strength and invalidation mechanism between steel tube and recycled aggregate concrete[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 70-78.(in Chinese)
- [11] 冯琼, 乔宏霞, 朱彬荣, 等. 湿盐砂环境下钢筋混凝土加速锈蚀试验研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4):568-575.
FENG Qiong, QIAO Hongxia, ZHU Binrong, et al. Experimental study on accelerated corrosion of reinforced concrete in wet salt sand environment[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4):568-575.(in Chinese)
- [12] 徐金俊, 陈宗平, 薛建阳, 等. 圆钢管再生混凝土界面黏结失效的推出试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(7):148-157.
XU Jinjun, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Failure mechanism of interface bond behavior between circular steel tube and recycled aggregate concrete [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7):148-157.(in Chinese)
- [13] 刘云雁, 范颖芳, 李秋超. 锈蚀钢绞线与混凝土的黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1208-1215.
LIU Yunyan, FAN Yingfang, LI Qiuchao. Bonding properties between corroded steel strand and concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1208-1215.(in Chinese)
- [14] 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.
LIU Yongjian, LIU Junping, CHI Jianjun. Shear bond behaviors at interface of concrete-filled steel tube[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science), 2010, 35(1):17-23,29.(in Chinese)
- [15] ALY T, ELCHALAKANI M, THAYALAN P, et al. Incremental collapse threshold for pushout resistance of circular concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(1):11-18.
- [16] GAO Z Y, SUN W, HU Y H. Mineral cleavage nature and surface energy: Anisotropic surface broken bonds consideration [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(9):2930-2937.

(上接第969页)

- [18] YE N, CHEN Y, YANG J K, et al. Transformations of Na, Al, Si and Fe species in red mud during synthesis of one-part geopolymers[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 101: 123-130.
- [19] 王智鑫, 梅军鹏, 廖宜顺, 等. 纳米SiO₂与VAE复合改性水泥基材料的耐久性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6):687-696.
WANG Zhixin, MEI Junpeng, LIAO Yishun, et al. Durability of cement-based materials with nano SiO₂ and VAE composite modification[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6): 687-696.
- [20] YANG J X, SHE W, ZUO W Q, et al. Rational application of nano-SiO₂ in cement paste incorporated with silane: Counterbalancing and synergistic effects[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 118:351-361.
- [21] XIE M J, ZHONG Y J, LI Z, et al. Study on alkylsilane-incorporated cement composites: Hydration mechanism and mechanical properties effects [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 122:104161.