

引用本文:沙 蒙,李 祥,刘紫洋,等. 方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土黏结滑移本构模型[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(1): 38-48.

SHA Meng, LI Xiang, LIU Ziyang, et al. Bond-slip constitutive model of recycled coarse aggregate concrete with limestone manufactured sand in square steel tubes[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 38-48.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08025

# 方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土黏结滑移 本构模型

沙 蒙<sup>1,2</sup>, 李 祥<sup>1,2</sup>, 刘紫洋<sup>3</sup>, 管民生<sup>1,2</sup>

(1. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳 518060; 3. 深圳市机场(集团)有限公司, 广东 深圳 518128)

**摘要:**通过 16 根方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土试件推出试验,研究了机制砂再生粗骨料混凝土强度等级、石粉含量以及钢管宽厚对方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土黏结性能的影响,结合试件自由端滑移曲线分析了黏结滑移发展过程与内在机理。对比了方钢管卵石机制砂再生粗骨料混凝土平均黏结强度,采用方钢管卵石机制砂再生粗骨料混凝土黏结滑移本构模型拟合得到了石灰石机制砂试件黏结滑移曲线,并与试验结果进行了对比验证。由于试件的黏结滑移性能受测点位置影响,通过引入位置函数,提出了能反映局部黏结滑移规律的黏结滑移本构模型。结果表明:方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土黏结滑移经历了胶结、滑移、摩阻力、后滑移 4 个阶段,且具有更高黏结强度;对比本构模型得到的计算值与试验值并分析其误差发现,采用方钢管卵石机制砂再生粗骨料混凝土黏结滑移本构模型拟合的黏结强度及滑移值与试验值相对误差均小于 5%,且标准差小于 0.05,证明该本构模型具有较好适用性。

**关键词:**方钢管;石灰石机制砂;再生粗骨料混凝土;位置函数;黏结滑移本构模型

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)01-0038-11

## Bond-slip constitutive model of recycled coarse aggregate concrete with limestone manufactured sand in square steel tubes

SHA Meng<sup>1,2</sup>, LI Xiang<sup>1,2</sup>, LIU Ziyang<sup>3</sup>, GUAN Minsheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;  
2. Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 3. Shenzhen Airport (Group) Co., Ltd., Shenzhen 518128, Guangdong, China)

**Abstract:** The push-out tests on 16 limestone manufactured sand recycled coarse aggregate concrete (MSRAC)-filled square steel tube specimens were conducted, and the influences of strength grade of MSRAC, stone powder content, and width-to-thickness ratio of steel tube on the bond-slip behavior between limestone MSRAC and square steel tube were investigated. Based on the free end slip curve of the specimen, the development process and internal mechanism of the

收稿日期: 2021-08-11

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(52090082)

作者简介: 沙 蒙(1998-), 男, 工学硕士研究生, E-mail: shameng2020@email.szu.edu.cn.

通信作者: 管民生(1979-), 男, 工学博士, 研究员, E-mail: msguan@szu.edu.cn.

bond-slip behavior were analyzed. The average bond strength was compared with that of pebble MSRAC-filled square steel tube. The bond-slip constitutive model of pebble MSRAC in square steel tube was employed to simulate the bond-slip curve of the limestone MSRAC in square steel tube and verified with the test results. The bond-slip behavior of the specimen was affected by the position of the measured point. By introducing the position function, a bond-slip constitutive model which can reflect the local bond slip law was proposed. The results show that limestone MSRAC-filled square steel tube has experienced four stages during the testing, including cementation, slipping, frictional resistance, and after-slipping, respectively, and it has higher bond strength comparing with that of pebble MSRAC. Comparing the calculated values with the test values obtained from the constitutive model and analyzing its error, it is found that the relative error between the bond strength and slip value fitted by the bond-slip constitutive model of pebble MSRAC in square steel tube and the test values is less than 5%, and the standard deviation is less than 0.05, which proves that the constitutive model has good applicability.

**Key words:** square steel tube; limestone manufactured sand; recycled coarse aggregate concrete; position function; bond-slip constitutive model

## 0 引言

以建筑垃圾中废弃混凝土破碎加工成的再生粗骨料和石料破碎筛分成的细骨料替代普通混凝土中天然粗细骨料配制机制砂再生粗骨料混凝土,可实现建筑垃圾的再生利用,达到变废为宝的目的,同时缓解河砂资源日益枯竭的困境,满足绿色环保及可持续发展要求。石灰石和卵石是制备机制砂的常用原料,两者均属于自然岩石中常见的矿物,虽然在中国范围内具有丰富的储量,但是过度开采必然会导致生态环境的破坏,进而引发一系列环境问题<sup>[1-2]</sup>,这与实现建筑行业可持续发展的理念不符。水泥工业生产中产生的废渣成分以石灰石为主<sup>[3]</sup>,利用该废石为原料生产机制砂可在很大程度上避免开采机制砂原料所引发的环境问题,同时解决水泥生产线产生的废石再利用问题。由此可知,石灰石机制砂再生粗骨料混凝土具有重要应用前景。

为拓展石灰石机制砂再生粗骨料混凝土在结构工程中的应用,本文基于钢管混凝土组合结构的性能优势,将石灰石机制砂再生粗骨料混凝土灌注于方钢管中,使二者有效结合,形成新型组合结构。对于钢管混凝土,国内外研究表明<sup>[4-5]</sup>,这种组合结构具有承载力高、刚度大、耐久性好以及抗震性能强等优点<sup>[6-12]</sup>。基于上述研究可知,采用该组合结构形式能够充分发挥石灰石机制砂再生粗骨料混凝土和方钢管的力学性能。具体而言,一方面外部方钢管能对内部石灰石机制砂再生粗骨料混凝土提供多向受压的约束作用,提高混凝土的强度和刚度<sup>[13]</sup>;另

一方面,石灰石机制砂再生粗骨料混凝土对外部方钢管提供支撑作用,可有效避免外部钢管在受压时过早屈曲而发生失稳。在方钢管机制砂再生粗骨料混凝土这一新型组合结构中,钢管与混凝土两者之所以能够共同承担荷载,是因为两者接触的界面存在黏结作用<sup>[14-15]</sup>,可以进行应力传递。目前关于钢管混凝土的黏结滑移性能已取得了一定成果,但由于石灰石机制砂棱角数量及粗糙程度均比天然砂大,且携带了一定量的石粉,这些因素会很大程度上影响钢管混凝土的黏结性能。此外,对于方钢管石灰石机制砂混凝土这一具有重要应用前景的新型结构而言,还缺乏针对性研究,已有黏结滑移本构模型及参数影响规律对该新型结构的适用性仍待验证。

本文设计制作了16根长黏结方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土推出试件以研究其黏结性能,分析其黏结强度受方钢管宽厚比、混凝土强度及机制砂石粉含量的影响规律。同时,基于前人提出的方钢管卵石机制砂再生粗骨料混凝土的黏结滑移本构模型,推导出了方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土的黏结滑移本构关系,并验证了其对于本文长黏结试件的有效性。在此基础上进一步提出了考虑位置关系的局部黏结应力-滑移本构关系,该本构模型能更全面真实反映黏结性能的规律和黏结滑移的机理,同时可为该新型结构的工程应用提供参考。

## 1 黏结强度

### 1.1 平均黏结强度

已有研究成果表明,钢管混凝土界面的局部黏

结强度会沿钢管的纵向长度方向发生变化,随分布位置变化,黏结强度有所不同。钢管混凝土构件某一部位置黏结强度不能代表构件界面的整体黏结性能,不能直接用于工程计算。为解决该问题,Morishita 等<sup>[16-17]</sup>首次提出并定义了平均黏结强度 $\bar{\tau}$ ,假定钢管混凝土试件的黏结强度在长度范围内为常数。本文采用的方钢管再生粗骨料混凝土界面的平均黏结强度 $\bar{\tau}$ 计算公式为

$$\bar{\tau} = \frac{P}{4BL} \tag{1}$$

式中: $P$ 为作用于核心区混凝土上的轴向荷载; $B$ 为方钢管内边长; $L$ 为界面黏结长度。

1.2 极限黏结强度

Virdi 等<sup>[18]</sup>最先提出并定义了极限黏结强度。将推出试验中黏结破坏荷载(荷载-滑移曲线中的极限黏结荷载) $P_u$ 所对应的剪应力定义为极限黏结强度 $\tau_u$ ,由此定义圆钢管混凝土和方钢管混凝土对应的极限黏结强度计算公式。鉴于推出试件为方钢管样式,本文采用该公式中的方钢管试件部分进行计算,具体计算公式为

$$\tau_u = \frac{P_u}{4BL} \tag{2}$$

由式(1)确定的平均黏结强度 $\bar{\tau}$ 与式(2)确定的极限黏结强度 $\tau_u$ 计算形式是相同的,只是选取计算黏结强度的位置不一样,因此在下文计算与分析中采用统一的计算形式。

2 黏结性能试验

2.1 试验概况

陈宗平等<sup>[15]</sup>将废弃混凝土破碎再加工为再生粗骨料,设计 25 根钢管再生混凝土短柱试件进行推出试验,研究发现再生混凝土强度等级对于黏结强度的影响显著。此外,王小倩<sup>[19]</sup>以钢管的径厚比以及核心混凝土强度为主要因素进一步探究了这两者对钢管与再生混凝土之间黏结强度的影响。杨海峰等<sup>[20-22]</sup>对含石粉的再生混凝土的力学性能进行了研究,研究结果表明机制砂中含有一定量的石粉对再生混凝土强度提高起促进作用。

本文根据正交试验设计原理设计制作了 16 根方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土推出试件,试验以混凝土强度等级 $f_{cu}$ 、方钢管宽厚比 $B/t$ 、机制砂中石粉含量为研究变量,以黏结滑移强度与滑移值为观测对象。试验采用 MTS 300 t 压力试验机进行加载,试件一端为自由端,另一端为加载端,

在加载端设置方形钢垫块便于推出核心混凝土。在方钢管壁上开小口并引出钢棒,架设位移计测量推出试验过程中钢棒的位移,得到方钢管与核心混凝土之间的相对滑移,位移计及测点布置如图 1 所示。采用应变片测量应力状态,应变片布置方式如图 2 所示。推出试件设计参数详见表 1,其中试件名称 L30-10-3.75 表示该试件为方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土试件,核心混凝土强度等级为 C30,石粉含量为 10%,方钢管壁厚为 3.75 mm,其余试件命名方式以此类推。

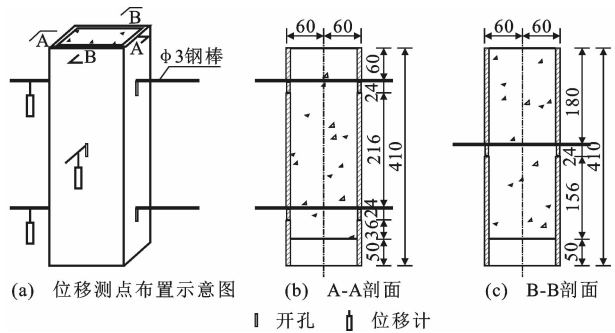


图 1 位移计及测点布置(单位:mm)

Fig. 1 Layout of displacement meters and measuring points (unit:mm)

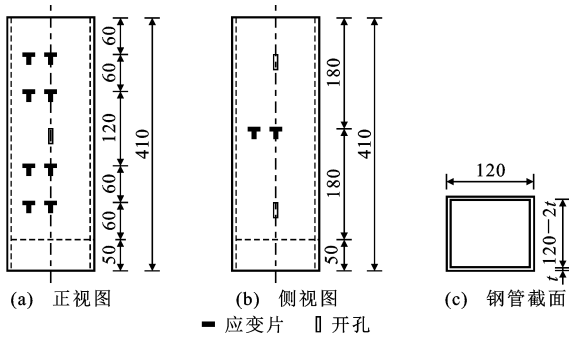


图 2 应变片布置(单位:mm)

Fig. 2 Layout of strain gauges (unit:mm)

2.2 自由端荷载-滑移曲线

在试件的加载端、自由端及中部位置分别设置位移计测量各测点钢管与内部核心混凝土的相对滑移值 $S$ ,在推出试件顶部设置力传感器测量荷载 $P$ ,如图 3 所示。根据测量结果,选用自由端测点处荷载-滑移曲线进行后续分析与对比,将表 1 中 4 组试件得到的自由端荷载-滑移曲线进行整理,如图 4 所示。由图 4 可知,各试件自由端荷载-滑移曲线表现出 4 个发展阶段。加载初期由于荷载较小,试件未发生滑移,荷载-滑移曲线近似为一竖直线;当荷载增大至一定程度时,试件开始发生滑移,此时随荷载增大滑移值增加幅度较小;当荷载增大至极限荷载

表 1 试件设计参数  
Table 1 Design parameters of specimens

组别	试件编号	方钢管几何尺寸			混凝土强度等级	水灰比	石粉含量/%	锚固长度/mm
		宽度 $B/\text{mm}$	壁厚 $t/\text{mm}$	宽厚比 $B/t$				
1	L30-5-3	120	3.00	40.00	C30	0.48	5	360
	L30-10-3.75		3.75	32.00			10	
	L30-15-4.5		4.50	26.67			15	
	L30-20-5		5.00	24.00			20	
2	L40-5-3.75	120	3.75	32.00	C40	0.39	5	360
	L40-10-3		3.00	40.00			10	
	L40-15-5		5.00	24.00			15	
	L40-20-4.5		4.50	26.67			20	
3	L50-5-4.5	120	4.50	26.67	C50	0.33	5	360
	L50-10-5		5.00	24.00			10	
	L50-15-3		3.00	40.00			15	
	L50-20-3.75		3.75	32.00			20	
4	L55-5-5	120	5.00	24.00	C55	0.27	5	360
	L55-10-4.5		4.50	26.67			10	
	L55-15-3.75		3.75	32.00			15	
	L55-20-3		3.00	40.00			20	

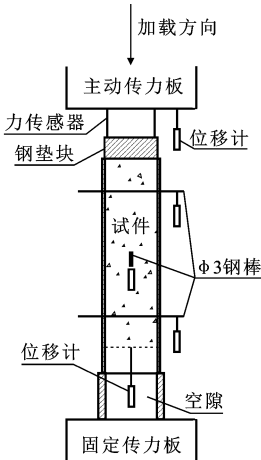


图 3 推出试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of push-out test

后,随滑移值增加,荷载-滑移曲线出现明显的非线性下降段;此后随试件滑移值进一步增加,荷载不再出现明显上升或下降变化,荷载-滑移曲线近似为一水平线。自由端荷载-滑移曲线发展趋势内在机理为:

- (1)胶结阶段。加载阶段早期,由于试件钢管与混凝土间存在化学胶结力,未发生滑移。
- (2)滑移阶段。当荷载增大到 45%~55% 极限荷载时,试件开始发生滑移,此时化学胶结力开始发生破坏,界面上的机械咬合力开始发生作用。随荷载进一步增大,此阶段机械咬合力与化学胶结力共同发生作用,当荷载增大到极限荷载时,试件的化学胶结力与机械咬合力的合力达到最大值。

- (3)摩阻力阶段。荷载达到极限荷载后,试件内部的化学胶结力与机械咬合力迅速失效,曲线呈现明显的非线性下降,主要由界面的滑动摩擦阻力和少量残存的机械咬合力共同承担外荷载,下降段幅度取决于界面摩阻力的大小,界面摩阻力越大,下降幅度越小。
- (4)后滑移阶段。随滑移值进一步增加,荷载不再明显上升或下降,外荷载由摩阻力承担,此时荷载-滑移曲线近似为水平线。

2.3 机制砂原料种类对试件黏结强度的影响

张坤<sup>[23]</sup>通过对 6 组钢管高强机制砂混凝土试件进行推出试验,发现机制砂原料种类对于试件的界面黏结强度影响较大。为进一步研究机制砂原料来源种类对方钢管卵石机制砂再生混凝土黏结强度的影响规律,本文利用前人研究得到的方钢管卵石机制砂再生粗骨料混凝土平均黏结强度试验数据<sup>[24-25]</sup>与方钢管石灰石机制砂再生混凝土试件的平均黏结强度  $\tau_0$  进行对比,试验结果对比情况如表 2 所示。

由表 2 对比结果可知,当试件的混凝土强度等级、石粉含量、宽厚比等因素确定时,相较于卵石机制砂,采用石灰石机制砂的方钢管再生混凝土试件具有更高的黏结强度,平均增大约 5.2%,其中 P/L50-5-4.5 增幅最小,为 1.2%,P/L50-15-3 增幅最大,为 13.7%。分析原因为:一方面是利用石灰石生产的机制砂相较卵石生产的机制砂含有更小粒径

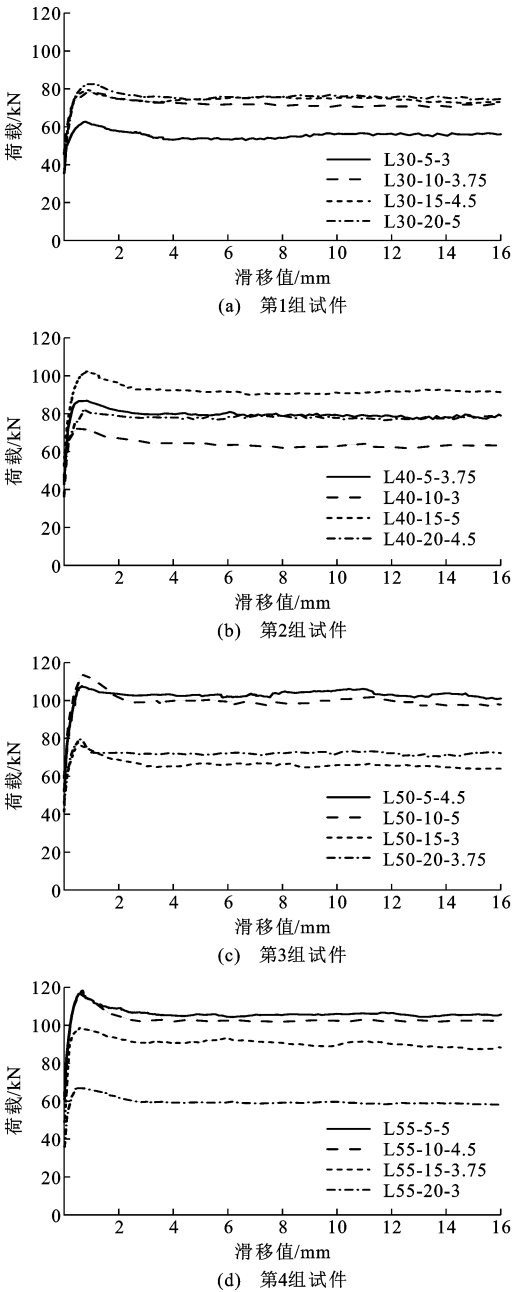


图 4 推出试验自由端 P-S 曲线

Fig. 4 P-S curves of push-out test free end

的石粉,拌合时能更充分发挥微集料填充作用,可有效填充混凝土内部空隙,进而减少混凝土养护中发生的干缩效应;另一方面,石灰石机制砂相较于卵石机制砂具有更多棱角,因此石灰石机制砂混凝土与方钢管间具有更强机械咬合作用,从而提高了黏结强度。

3 黏结滑移本构模型适用性

3.1 方钢管卵石机制砂再生粗骨料混凝土黏结滑移本构模型

管民生等<sup>[25]</sup>对方钢管卵石机制砂再生粗骨料

表 2 平均黏结强度对比

Table 2 Comparison of average bond strength

试件组编号	平均黏结强度 $\tau_u$ /MPa	
	试件 P	试件 L
P/L30-5-3	0.358	0.382
P/L30-10-3.75	0.463	0.482
P/L30-15-4.5	0.491	0.499
P/L30-20-5	0.491	0.523
P/L40-5-3.75	0.510	0.536
P/L40-10-3	0.502	0.441
P/L40-15-5	0.628	0.646
P/L40-20-4.5	0.510	0.516
P/L50-5-4.5	0.661	0.673
P/L50-10-5	0.672	0.719
P/L50-15-3	0.416	0.473
P/L50-20-3.75	0.462	0.490
P/L55-5-5	0.711	0.747
P/L55-10-4.5	0.712	0.728
P/L55-15-3.75	0.578	0.609
P/L55-20-3	0.372	0.412

注:试件组编号中 P/L 代表由该编号试件组由 P 和 L 两个试件组成,L 为本文推出试验的方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土试件,P 为前人研究的方钢管卵石机制砂再生粗骨料混凝土试件。

混凝土试件进行推出试验以探究其黏结滑移性能,并利用式(1)、(2)将试验得到的  $P$ - $S$  曲线换算为  $\bar{\tau}$ - $S$  曲线,定义了与黏结强度及滑移值相关的 6 个特征值(初始黏结强度  $\tau_s$ 、极限黏结强度  $\tau_u$ 、残余黏结强度  $\tau_r$ 、控制点滑移值  $S_{su}$ 、极限状态滑移值  $S_u$ 、残余滑移值  $S_r$ )与 4 个特征点,建立了方钢管机制砂再生粗骨料混凝土本构模型,如图 5 所示,具体数学表达式为

OA 段: $S=0$

AB 段: $\bar{\tau}=\tau_s+\frac{S}{aS+b}$

BC 段: $\bar{\tau}=\frac{S}{cS+d}$

CD 段: $\bar{\tau}=\tau_r$

$0<\bar{\tau}\leq\tau_s$

$0<S\leq S_u$

$S_u<S\leq S_r$

$S>S_r$

$\left. \vphantom{\begin{matrix} OA \\ AB \\ BC \\ CD \end{matrix}} \right\}$

(3)

其中

$a=\frac{S_u-2S_{su}}{(\tau_u-\tau_s)(S_u-\tau_s)}$

$b=\frac{S_uS_{su}}{(\tau_u-\tau_s)(S_u-\tau_s)}$

$c=\frac{S_u\tau_r-S_r\tau_u}{\tau_u\tau_r(S_u-S_r)}$

$d=\frac{S_uS_r(\tau_u-\tau_r)}{\tau_u\tau_r(S_u-S_r)}$

该黏结滑移本构模型用 4 个特征点  $A(0,\tau_s)$ 、 $A'[(S_{su},0.5(\tau_s+\tau_u))]$ 、 $B(S_u,\tau_u)$ 、 $C(S_r,\tau_r)$  将模型划分为 4 段,各段曲线均可用数学表达式描述。其中  $OA$  段采用直线描述,表明此阶段试件并未发生

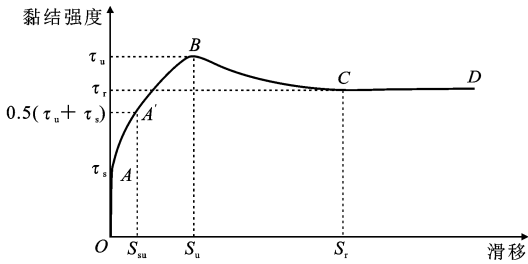


图 5 四段式非线性黏结滑移本构模型

Fig. 5 Four-stage nonlinear bond-slip constitutive model

滑移;上升段 AB 利用双曲线描述,表明试件开始发生滑移,试件的黏结强度随滑移进行不断提高。下降段 BC 采用双曲线描述,表明试件黏结强度逐渐降低;CD 段使用水平直线描述,表明该阶段黏结强度趋于稳定,随试验进行黏结强度基本不发生变化。

### 3.2 本构模型适用性验证

上述黏结滑移本构模型已被证明了在方钢管卵石机制砂再生混凝土黏结滑移试验中的有效性<sup>[25]</sup>,研究者利用该本构模型对比分析了特征滑移值的试验值与拟合值,证明了该模型的合理性。

为验证该黏结滑移本构模型能否适用于方钢管石灰石机制砂再生混凝土,本文以第 3.1 节中的黏结滑移本构模型为基础,使用 SPSS 软件统计回归分析了模型中 6 个特征值关于混凝土强度值  $f_{cu}$ 、石粉含量  $S_p$  和宽厚比  $B/t$  三个变量的数学关系式,由此确定适用于方钢管石灰石机制砂再生混凝土的黏结滑移本构关系,具体形式如式(4)、(5)所示。利用该式可推导不同试件的特征点理论值。

$$\left. \begin{aligned} \tau_s &= 0.435\ 37 + 0.002\ 43f_{cu} + 0.002\ 42S_p - \\ &\quad 0.007\ 52B/t \\ \tau_u &= 0.784\ 81 + 0.006\ 35f_{cu} - 0.007\ 17S_p - \\ &\quad 0.014\ 71B/t \\ \tau_r &= 0.756\ 87 + 0.005\ 33f_{cu} - 0.006\ 34S_p - \\ &\quad 0.014\ 29B/t \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{su} &= 0.312\ 28 - 0.001\ 37f_{cu} + 0.002\ 75S_p - \\ &\quad 0.004\ 96B/t \\ S_u &= 1.666\ 15 - 0.012\ 59f_{cu} - 0.008\ 7S_p - \\ &\quad 0.010\ 78B/t \\ S_r &= 2.360\ 61 - 0.014\ 82f_{cu} - 0.006\ 19S_p + \\ &\quad 0.043\ 77B/t \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

进一步对特征点的理论值和由推出试验得到的试验值进行对比。为更好观察各特征点的理论值与试验值偏差,将各试件的特征点试验与理论数据以坐标点形式绘制于坐标轴并设置参考线(理论值等于试验值)以对比观测误差分布情况,如图 6、7 所

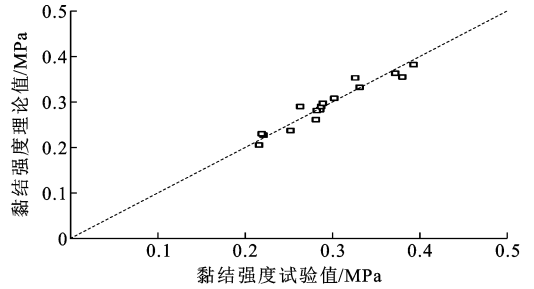
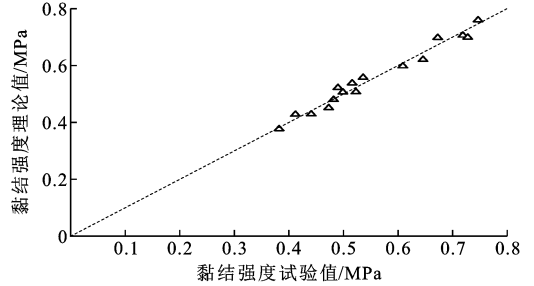
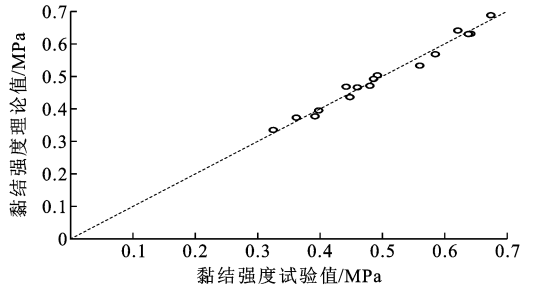
(a) 初始黏结强度  $\tau_s$ (b) 极限黏结强度  $\tau_u$ (c) 残余黏结强度  $\tau_r$ 

图 6 黏结强度理论值与试验值对比

Fig. 6 Comparison of theoretical and experimental values of bond strength

示。观察可知 6 个特征点的理论值与试验值间误差较小,各坐标点较好分布于参考线两侧合理误差范围内,参考线可较好地拟合试验值与理论值的分布情况,该结果表明此本构关系的拟合程度较高。为进一步定量说明各试件的试验值与理论值误差大小与分布特征,统计各试件特征点的理论值与试验数据并将统计分析结果列于表 3、4 中。

由表 3、4 可知,黏结强度与滑移值的试验值与理论值相对误差均小于 5%,且标准差与离散系数小于 0.05,误差在合理范围内,比值的平均值均在 1.0 左右,其中控制点滑移值的误差稍大,但仍满足要求,该特征值误差波动偏大的原因为试件在真实试验中发生滑移时测量会有小幅波动,因此会导致试验值小幅偏大,从而导致误差结果偏大。上述误差分析结果表明由式(4)、(5)所确定的黏结滑移本构关系能够较好地拟合本文中推出试验所采用试件的黏结滑移性能,该本构关系确定的黏结强度与滑移的理论值和由推出试验得到的试验值间误差在合理

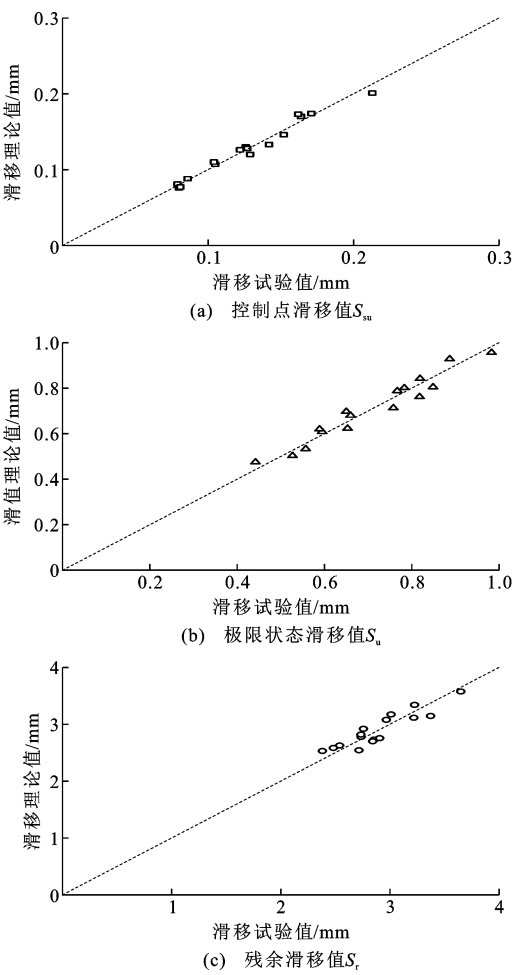


图 7 滑移理论值与试验值对比

Fig. 7 Comparison of theoretical and experimental values of slip

表 3 黏结强度试验值与理论值对比结果

Table 3 Comparison result of theoretical and experimental values of bond strength

试验值与理论值 比值	初始黏结 强度 $\tau_s$	极限黏结 强度 $\tau_u$	残余黏结 强度 $\tau_r$
平均值	1.001	1.000	1.000
标准差	0.050	0.035	0.030
离散系数	0.050	0.035	0.030

表 4 滑移试验值与理论值对比结果

Table 4 Comparison result of theoretical and experimental values of slip

试验值与理论值 比值	控制点滑移值	极限状态 滑移值	残余滑移值
平均值	1.003	1.000	1.000
标准差	0.048	0.050	0.048
离散系数	0.048	0.050	0.048

范围内,具有一定离散性,但仍处于合理范围内。由式(3)确定的黏结滑移本构模型在拟合方钢管石灰

石机制砂再生粗骨料混凝土的黏结滑移性能时也具有合理性。相关研究表明<sup>[19,23]</sup>,钢管混凝土的黏结滑移性能受到试件长度的影响,因此,本文所得计算公式及本构模型适用性验证仅对本研究成立,为进一步探究该公式及本构模型的普适性,应当开展更深入的研究。

4 考虑位置函数的黏结滑移本构模型

4.1 位置函数的引入

在各试件不同位置处设置测点,如图 3 所示。根据测量结果可得到方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土推出试验中试件不同位置处的滑移值  $S$  与荷载  $P$  的关系,以表 1 的第 4 组试件为例,各测点处的  $P$ - $S$  曲线如图 8 所示。

由图 8 可知,根据  $P$ - $S$  曲线换算后的  $\bar{\tau}$ - $S$  曲线的形状与特征点的分布规律不完全相同,并且具有先后顺序,原因在于试件的黏结滑移性能会受到测点分布位置的影响。试件不同位置的  $\bar{\tau}$ - $S$  曲线存在如下特点:

- (1)随埋置深度  $x$  增加,初始滑移强度  $\tau_s$  和极限黏结强度  $\tau_u$  增加,局部滑移值也相应增加。
- (2)沿着埋置深度  $x$  变化,随推出试验进行,各测点的黏结强度最终都会达到残余黏结强度  $\tau_r$ ,并且各测点的残余黏结强度  $\tau_r$  随埋置深度增加而少量降低,但是变化很小,相差不大。

基于上述分析可知,试件黏结强度和滑移值均受埋置深度  $x$  的控制,只选取自由端的  $\bar{\tau}$ - $S$  曲线进行分析不能准确反映各位置黏结滑移分布规律,需要通过实际测量的黏结强度  $\tau(x)$  及滑移分布  $S(x)$  得到反映沿锚固深度变化的黏结强度-滑移曲线族  $\tau=\tau(S,x)$ 。因此,本文引入与分布位置有关的滑移值函数  $F(x)$  和黏结强度函数  $G(x)$  以全面考量黏结滑移本构关系。

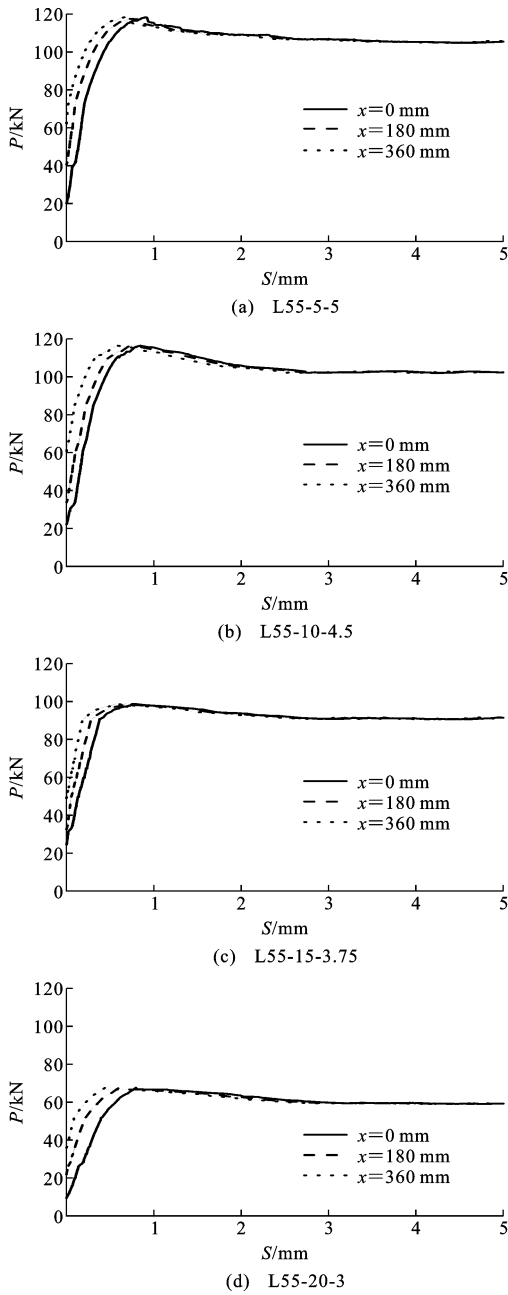
4.1.1 滑移值函数  $F(x)$

定义滑移值函数  $F(x)$  为

$$F(x)=\frac{S(x)}{S}$$
 (6)

为确定  $F(x)$  的取值范围,确定相应的参数  $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 、 $F_3(x)$  以辅助确定,即

$$\left. \begin{aligned} F_1(x) &= \frac{S_u(x)}{S_u} \\ F_2(x) &= \frac{S_{su}(x)}{S_{su}} \\ F_3(x) &= \frac{S_r(x)}{S_r} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

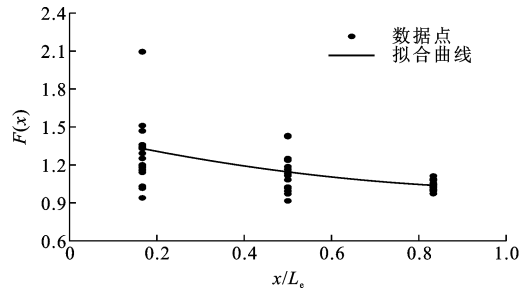
图 8 第 4 组试件  $P$ - $S$  曲线Fig. 8  $P$ - $S$  curves of specimens of group 4

式中:  $S_u(x)$  为试件锚固深度为  $x$  时极限黏结强度对应的滑移值;  $S_{su}(x)$  为试件锚固深度为  $x$  时控制点对应的滑移值;  $S_r(x)$  为试件锚固深度为  $x$  时残余阶段的初始滑移值。

根据试验结果, 计算出  $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 、 $F_3(x)$  并取平均值可得  $F(x)$  曲线, 如图 9 所示, 再利用回归分析法拟合  $F(x)$  的数学表达式, 如式(8)所示。

$$F(x) = 1.451\,28 - 0.787\,80 \frac{x}{L_e} + 0.351\,99 \left( \frac{x}{L_e} \right)^2 \quad (8)$$

式中:  $L_e$  为钢管试件的界面长度。

图 9 滑移值函数  $F(x)$  曲线Fig. 9 Curve of slip value function  $F(x)$ 

#### 4.1.2 黏结强度函数 $G(x)$

定义黏结强度函数  $G(x)$  为

$$G(x) = \frac{\tau(x)}{\tau} \quad (9)$$

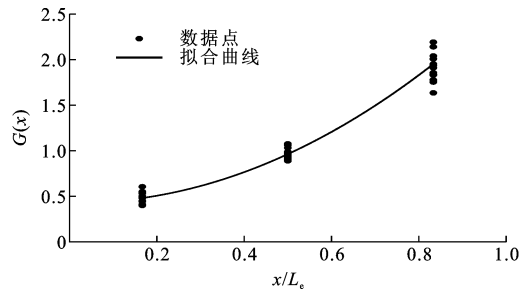
为确定函数  $G(x)$  的取值范围, 确定相应的参数  $G_1(x)$ 、 $G_2(x)$ 、 $G_3(x)$  以辅助确定, 即

$$\left. \begin{aligned} G_1(x) &= \frac{\tau_u(x)}{\tau_u} \\ G_2(x) &= \frac{\tau_s(x)}{\tau_s} \\ G_3(x) &= \frac{\tau_r(x)}{\tau_r} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中:  $\tau_u(x)$  为钢管混凝土锚固深度为  $x$  处的极限黏结强度;  $\tau_s(x)$  为钢管混凝土锚固深度为  $x$  处的初始黏结强度;  $\tau_r(x)$  为钢管混凝土锚固深度为  $x$  处的残余黏结强度。

根据试验结果, 计算出  $G_1(x)$ 、 $G_2(x)$ 、 $G_3(x)$  并取平均值可得  $G(x)$  曲线, 如图 10 所示, 再利用回归分析法拟合  $G(x)$  的数学表达式, 如式(11)所示。

$$G(x) = 0.430\,30 - 0.072\,28x + 2.277\,39x^2 \quad (11)$$

图 10 黏结强度函数  $G(x)$  曲线Fig. 10 Curve of bond strength function  $G(x)$ 

#### 4.2 考虑位置函数的黏结滑移本构模型

基于第 4.1 节确定的分布位置有关的滑移值函数  $F(x)$  与黏结强度函数  $G(x)$ , 本文提出了考虑位置函数影响的黏结滑移曲线族  $\tau = \tau(S, x)$ , 具体形式为:

$$OA \text{ 段: } S(x) = 0 \quad 0 < \tau(x) \leq \tau_s(x)$$



$$AB \text{ 段: } \tau(x) = \tau_s(x) = \frac{S(x)}{a(x)S(x) + b(x)}$$

$$0 < S(x) \leq S_u(x)$$

$$BC \text{ 段: } \tau(x) = \frac{S(x)}{c(x)S(x) + d(x)}$$

$$S_u < S(x) \leq S_r(x)$$

$$CD \text{ 段: } \tau(x) = \tau_r(x) \quad S(x) > S_r(x)$$

其中

$$a(x) = \frac{S_u(x) - 2S_{su}(x)}{[\tau_u(x) - \tau_s(x)][S_u(x) - \tau_s(x)]}$$

$$b(x) = \frac{S_u(x)S_{su}(x)}{[\tau_u(x) - \tau_s(x)][S_u(x) - \tau_s(x)]}$$

$$c(x) = \frac{S_u(x)\tau_r(x) - S_r(x)\tau_u(x)}{\tau_u(x)\tau_r(x)[S_u(x) - S_r(x)]}$$

$$d(x) = \frac{S_u(x)S_r(x)[\tau_u(x) - \tau_r(x)]}{\tau_u(x)\tau_r(x)[S_u(x) - S_r(x)]}$$

$$S_{su}(x) = F(x)S_{su} \quad \tau_s(x) = G(x)\tau_s$$

$$S_u(x) = F(x)S_u \quad \tau_u(x) = G(x)\tau_u$$

$$S_r(x) = F(x)S_r \quad \tau_r(x) = G(x)\tau_r$$

由上述算式所确定的改进模型在原黏结滑移本构模型基础上,通过引入与分布位置有关的位置函数  $F(x)$  和  $G(x)$ ,结合黏结强度和局部滑移的分布规律,建立了考虑随锚固深度变化的两个位置函数的黏结强度-滑移本构模型,该模型考虑了黏结强度及滑移值受到试件分布位置的影响,可更加真实地反映方钢管石灰石机制砂再生混凝土的黏结性能,能更好地反映推出试验中试件的局部黏结滑移规律。由于曲线族  $\tau = \tau(S, x)$  全面真实的描述比较复杂,并且观察图 9、10 可知,位置函数  $F(x)$ 、 $G(x)$  的分布离散性较大,这是由于该模型并未反映全面的锚固条件(如黏结试件长度、宽厚比、套箍系数等因素)对位置函数的影响,本文所提出的考虑位置函数影响的黏结滑移本构模型仅是统计回归分析的结果,有待于进一步试验与研究。

## 5 结 语

(1) 方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土的黏结强度要高于方钢管卵石机制砂再生粗骨料混凝土,前者平均黏结强度较卵石机制砂试件增大 5.2%,最小增幅为 1.2%,最大增幅为 13.7%。

(2) 方钢管卵石机制砂再生粗骨料混凝土黏结滑移本构模型可用于拟合方钢管石灰石机制砂再生粗骨料混凝土试件的黏结滑移性能。通过回归分析得到已有黏结滑移本构模型中 6 个特征值与本文推出试件中混凝土强度、机制砂石粉含量、方钢管宽厚

比间的数学关系式,并将数学计算值与试验值作对比,分析误差结果发现二者吻合度高,拟合程度好,进而验证该模型的适用性。由于试件黏结性能受到试件长度的影响较大,该结论仅适用于本文所采用黏结长度试件,若要验证该结论的普适性,尚需开展更深入的研究。

(3) 通过引入位置函数  $F(x)$ 、 $G(x)$ ,提出了考虑位置函数的黏结滑移本构模型。该改进模型考虑了黏结强度及滑移值随试件位置不同的变化,更加全面反映局部黏结滑移性能的影响规律,但是由于曲线族  $\tau = \tau(S, x)$  全面真实的描述比较复杂,本文所提出的模型仅为统计回归分析的结果,有待于进一步分析研究。

## 参考文献:

### References:

- [1] 谢开仲,刘振威,盖炳州,等.不同岩性的机制砂混凝土本构关系及力学性能[J].建筑科学与工程学报,2021,38(1):99-106.  
XIE Kaizhong, LIU Zhenwei, GAI Bingzhou, et al. Constitutive relationship and mechanical properties of manufactured sand concrete with different rocks[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(1):99-106.
- [2] 谢开仲,刘振威,朱茂金,等.不同石粉含量的机制砂混凝土高温后力学性能[J].建筑科学与工程学报,2021,38(3):80-89.  
XIE Kaizhong, LIU Zhenwei, ZHU Maojin, et al. Mechanical properties of manufactured sand concrete with different stone powder content after high temperatures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(3):80-89.
- [3] 户宁.使用石灰石废石生产机制砂的研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2019.  
HU Ning. Study on Production of Manufactured sand using limestone scrap[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [4] GUAN M S, WEI C Q, WANG Y, et al. Experimental investigation of axial loaded Circular steel tube short columns filled with manufactured sand concrete[J]. Engineering Structures, 2020, 221:111033.
- [5] 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 engi-

- neering[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5): 1-24.
- [6] 李卫宁,徐金俊,陈宗平,等. 方钢管再生混凝土粘结滑移性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012, 37(1): 68-74.
- LI Weining, XU Jinjun, CHEN Zongping, et al. Experimental research on the bond-slip behaviour of recycled aggregate concrete-filled square steel tubes[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2012, 37(1): 68-74.
- [7] 吴波,王辉,刘晓珠. 内置高强角钢的方钢管混凝土柱偏压性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(2): 16-25.
- WU Bo, WANG Hui, LIU Xiaozhu. Experiment on Eccentric compressive behaviors of square CFST columns with built-in high-strength steel angles[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(2): 16-25.
- [8] LI G C, CHEN B W, YANG Z J, 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: 107289.
- [9] AHMED M, LIANG Q Q, PATEL V I, et al. Experimental and numerical investigations of eccentrically loaded rectangular concrete-filled double steel tubular columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167: 105949.
- [10] FUJIMOTO T, MUKAI A, NISHIYAMA I, et al. Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 203-212.
- [11] AHMED M, LIANG Q Q, PATEL V I, et al. Experimental and numerical studies of square concrete-filled double steel tubular short columns under eccentric loading[J]. Engineering Structures, 2019, 197: 109419.
- [12] AHMED M, LIANG Q Q, PATEL V I, et al. Behavior of eccentrically loaded double circular steel tubular short columns filled with concrete [J]. Engineering Structures, 2019, 201: 109790.
- [13] 陈宗平,经承贵,宁璠. 螺旋筋增强方钢管混凝土柱的轴压性能及参数分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(1): 13-22, 57.
- CHEN Zongping, JING Chenggui, NING Fan. Axial compressive behavior and parametric analysis of spiral reinforcement concrete filled square steel tubular columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(1): 13-22, 57.
- [14] 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 by push-out test [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7): 148-157.
- [15] 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.
- 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.
- [16] MORISHITA Y, TOMII M. Experimental studies on bond strength between square steel tube and encased concrete core under cyclic shearing forced and constant axial force[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1982, 4: 363-370.
- [17] MORISHITA Y, TOMII M, YOSHIMURA K. Experimental studies on bond strength in concrete filled circular steel tubular columns subjected to axial loads [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1979, 1(1): 351-358.
- [18] VIRDI K S, DOWLING P J. Bond strength in concrete filled circular steel tubes[R]. London: Imperial College London, 1975.
- [19] 王小倩. 钢管与再生混凝土粘结性能试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- WANG Xiaoqian. Steel tube and recycled concrete bonding performance test research [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.
- [20] 柯晓军,叶春颖,陈世杰,等. 石粉含量及机制砂取代率对再生粗骨料混凝土流动性和抗压强度的影响[J]. 混凝土, 2020(6): 106-108, 112.
- KE Xiaojun, YE Chunying, CHEN Shijie, et al. Effect of stone powder content and machine-made sand replacement rates on fluidity and compressive strength of recycled coarse aggregate concrete [J]. Concrete, 2020(6): 106-108, 112.
- [21] 杨海峰,刘成丽,梁冬瑶,等. 含石粉机制砂再生混凝土基本力学性能研究[J]. 混凝土, 2019(8): 63-67.
- YANG Haifeng, LIU Chengli, LIANG Dongyao, et al. Study on basic mechanical properties of recycled

concrete containing stone powder[J]. Concrete, 2019 (8): 63-67.

[22] 张如林,陈玉前,刘书童,等. 机制砂石粉含量对混凝土的性能影响研究[J]. 混凝土, 2016(3): 84-85.  
ZHANG Rulin, CHEN Yuqian, LIU Shutong, et al. Influence of stone powder content on performance of machine-made sand concrete[J]. Concrete, 2016(3): 84-85.

[23] 张 坤. 钢管高强机制砂混凝土粘结性能试验研究[D]. 深圳:深圳大学, 2017.  
ZHANG Kun. Steel tube high-strength machine-made sand concrete bonding performance test research[D]. Shenzhen; Shenzhen University, 2017.

[24] GUAN M S, WANG G, WANG Y, et al. Bond behavior of square CFT using manufactured sand and recycled coarse aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121289.

[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.  
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.