

钢管再生大骨料自密实混凝土构件受弯性能试验研究

王建超, 何文涛, 李明香

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 为研究钢管再生大骨料自密实混凝土构件的受弯性能, 以再生骨料强度、再生骨料粒径、含钢率为参数, 设计制作了 8 根受弯构件, 并对其进行了试验研究. 研究表明: 再生大骨料强度和粒径对钢管再生大骨料自密实混凝土构件受弯承载力影响较小; 含钢率对钢管再生大骨料自密实混凝土构件受弯承载力影响显著, 当含钢率提高 20.3% 时, 极限抗弯承载力提高了 13.15%; 当含钢率提高 56.1% 时, 极限抗弯承载力提高了 31.21%; 就钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件而言, 本文给出的极限抗弯承载力计算公式与试验值吻合度良好, 可以用于该种构件的设计.

关键词: 再生大骨料; 自密实混凝土; 钢管混凝土; 受弯性能

中图分类号: TU392.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)05-0643-09

Experimental study on flexural behavior of steel tube recycled large aggregate self-compacting concrete members

WANG Jianchao, HE Wentao, LI Mingxiang

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

Abstract: In order to study the flexural performance of steel tube recycled large aggregate self-compacting concrete, 8 flexural specimens were designed and manufactured based on the parameters of recycled concrete strength, recycled aggregate particle size, and steel content, and the experimental study was conducted. Studies show that the strength and particle size of recycled large aggregates have little effect on the flexural bearing capacity of steel pipe recycled large aggregate self-compacting concrete; the steel content has a significant effect on the flexural bearing capacity of steel pipe recycled large-aggregate self-compacting concrete. When the steel content increases by 20.3%, the ultimate flexural bearing capacity increases by 13.15%; when the steel content increases by 56.1%, the ultimate flexural bearing capacity increases by 31.21%. For steel tube recycled large aggregate self-compacting concrete pure flexural members, the calculation formula of ultimate flexural capacity given in this paper is in good agreement with the experimental value, and can be used for the design of this kind of member.

Key words: recycled large aggregate; self-compacting concrete; concrete-filled steel tube; bending performance

目前, 废弃混凝土仍是建筑垃圾中占比最大、最难处理的一类. 因此, 再生混凝土受到了大量学者的高度重视并开展了广泛研究^[1-4]. 由于再生混凝土生产过程繁琐, 需要耗费大量能源且对设备损耗较大, 使再生骨料的生产成本居高不下. 为解决再生混凝土在推广应用过程中存在的上述问题, 因而提出一种方法——将骨料粒径变大, 减少骨料破碎过程中产生的能耗和环境污染, 形成再生大骨料混凝土.

文献[5]将节段型废弃混凝土试块与普通混凝土混合后形成再生组合混凝土, 并给出了组合强

度和峰值应变的计算方法. 文献[6]对钢筋再生块体混凝土短柱的轴压性能进行了研究, 研究表明: 钢筋再生块体混凝土短柱的轴压承载力与废旧混凝土的强度及取代率有关, 并在此基础上给出了钢筋再生块体混凝土短柱轴压承载力的计算方法. 文献[7-8]对钢筋再生块体混凝土梁的抗弯及抗剪性能进行了研究, 结果表明: (1) 钢筋再生块体混凝土梁的初始刚度仅与受拉钢筋的直径有关, 而其他参数对其影响较小; (2) 钢筋再生块体混凝土梁与钢筋普通混凝土梁的抗弯承载力相近但前者开裂弯矩却偏低; (3) 无腹筋时, 钢筋再生块体混

凝土梁的开裂荷载和抗剪承载力低于钢筋普通混凝土梁;有腹筋时,二者相当.文献[9]研究了薄壁圆钢管再生块体混凝土柱的受剪性能.结果发现:随着废旧混凝土取代率增大,钢管再生块体混凝土柱的受剪承载力逐渐降低,且利用中厚壁钢管混凝土柱公式计算得到的抗剪承载力总体上小于试验值,因此文献中提出了新的计算公式.文献[10]探究了再生粗骨料取代率对不锈钢管再生混凝土构件受弯性能的影响,结果表明:不锈钢管再生混凝土构件的极限抗弯承载力随着再生粗骨料取代率的增大而出现了降低的趋势.文献[11]探究了再生粗骨料取代率对再生粗骨料混凝土梁的破坏形态特征和极限抗弯承载力的影响,研究结果表明:再生粗骨料混凝土梁的破坏形态与普通混凝土梁相似;与普通混凝土梁相比,再生粗骨料混凝土梁极限抗弯承载力平均降低 12.91%.文献[12]研究了再生混凝土强度对再生混凝土组合梁承载力的影响,结果表明:再生混凝土组合梁的承载力随再生混凝土强度等级的提高而提高.文献[13]研究了再生骨料填充不锈钢管梁时再生骨料替代率对其弯曲行为的影响,通过规范中的 6 个计算公式评估了再生骨料填充不锈钢管梁的弯矩承载力.文献[14]分析了自密实混凝土的内部抗冻性,研究结果表明:自密实混凝土抵抗寒冷的性能要优越于普通混凝土.文献[15]研究了粗骨料对自密实混凝土性能的影响,研究结果表明:随着粗骨料最大尺寸的增加,自密实混凝土流动性逐渐降低;粗骨料为未破碎砾石的自密实混凝土与粗骨料为破碎砾石的自密实混凝土相比,前者的流动性好、粘聚力高、空隙较易通过;粗骨料为破碎石灰石的自密实混凝土与粗骨料为破碎砾石的自密实混凝土相比,前者的强度和弹性模量更高;而粗骨料为破碎砾石的自密实混凝土与粗骨料为未破碎砾石的自密实混凝土相比,前者的强度和弹性模量同样更高.

通过以上的研究成果可以发现,目前为提高再生混凝土在实际工程中的应用,其主要做法是将尺寸较大的废弃混凝土块体直接放入模板中与新搅拌的混凝土直接进行浇筑,形成再生块体混凝土.优点是减小了破碎难度,缺点是再生块体在模板中位置不容易固定,对于偏心受力构件容易造成材料受力不均匀.正是由于上述原因,本文提出一种新的再生骨料利用方法.首先将粒径为 60~120 mm 的再生骨料分层放入钢管中,然后

在上下层骨料之间浇筑自密实混凝土,进而形成钢管再生大骨料自密实混凝土.优点是既可以减少再生骨料制备过程中的资源浪费,又可以通过钢管的约束作用提高核心区再生大骨料自密实混凝土的强度,且自密实混凝土填充的过程中无需振捣,加快了施工进度.由于该种结构的受弯性能尚未有人开展研究,为此本文设计了 8 根钢管再生大骨料自密实混凝土构件,目的是研究再生大骨料粒径、再生大骨料强度、含钢率这三种参数对其受弯承载力的影响规律,通过比较分析,探索出适用于钢管再生大骨料自密实混凝土构件的受弯承载力计算方法.

1 试验概况

1.1 材料制备

(1) 钢管采用 Q235 钢材,实测厚度 t 、屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 、弹性模量 E 和泊松比 μ 的实测值见表 1.

表 1 钢材参数

Tab. 1 Steel parameters

$t_{\text{设计}}/\text{mm}$	$t_{\text{实}}/\text{mm}$	f_y/MPa	f_u/MPa	E/MPa	μ
4	3.7	337	492	195 833	0.27
5	4.4	313	462	202 589	0.28
6	5.6	293	427	185 190	0.27

(2) 再生大骨料来源于原设计强度为 C30、C40、C50 的实验室废弃构件,龄期在 0.5~1 a 之间,废弃混凝土立方体抗压强度分别为 30.4 MPa、47.1 MPa、53.1 MPa,机械加人工破碎,并筛分成 60 ± 5 mm、 90 ± 5 mm、 120 ± 5 mm 三个粒径范围,如图 1 所示.



图 1 再生大骨料块体(60 ± 5 mm)

Fig. 1 Maintenance of the specimens

(3) 自密实混凝土(SCC)采用普通硅酸盐水泥(P.O 42.5),一级粉煤灰,二级中区砂,粒径 5~10 mm 碎石,聚羧酸系高性能减水剂(液体,掺量为胶凝材料质量的 2%),具体配合比及同条件养护立方体试块强度见表 2.

表 2 自密实混凝土配合比及立方体试块抗压强度

Tab. 2 Mixture ratio of self-compacting concrete and compressive strength of cube test block

强度等级	水泥/kg·m ⁻³	粉煤灰/kg·m ⁻³	水/kg·m ⁻³	石子/kg·m ⁻³	砂/kg·m ⁻³	减水剂/%	SCC 实测 强度/MPa
C30	305	184	224	864	762	2	37.2

1.2 构件设计与制作

设计制作 8 根受弯构件, 总长度 L 为 1 400 mm, 计算长度 L_0 为 1 200 mm, 外径 $D=200$ mm. 设计参数有再生骨料粒径、再生骨料强度、含钢率 α (钢管与核心混凝土横截面面积比值). 表 3 为构件设计分组.

钢管采用直焊缝圆钢管, 并在上下焊接两块尺寸为 240 mm×240 mm×20 mm 的同材料钢板. 浇筑前先将空钢管对准焊接下盖板, 为防止再生大骨料吸水率过高, 将其放入水中浸泡 24 h, 并在“饱和面干”状态下使用. 先将自密实混凝土倒入钢管底部约 20 mm, 然后放入 1 层再生大骨料, 再浇筑自密实混凝土, 反复操作, 直至最终填充至自密实混凝土高出钢管表面, 构件浇筑过程见图 2. 薄膜覆盖养护 28 d 后将构件上表面打磨平整, 焊接上盖板.

构件内部填入再生大骨料以自然堆满为准, 称量每个构件中填入的再生大骨料的质量与浇筑后钢管中混合混凝土的总质量, 将两者之比定义为再生大骨料混入量: 60±5 mm 粒径的再生大骨料在构件中的混入量为 33.89%, 粒径为 90±5 mm 的混入量为 28.89%, 粒径为 120±5 mm 混入量为 23.89%. 浇筑后的构件见图 3.



图 2 构件制作

Fig. 2 Specimen production



图 3 构件加工完成后图片

Fig. 3 Picture after the test piece is processed

表 3 构件参数

Tab. 3 Test piece parameters

编号	D×L/mm	$t_{\text{设计}}/\text{mm}$	$t_{\text{实}}/\text{mm}$	SCC 强度 /MPa	RBA 强度 /MPa	粒径 /mm	含钢率 $\alpha/\%$	弯曲承载力/kN·m		
								试验值	计算值	误差/%
W1	200×1 400	5	4.4	37.2	—	—	9.42	77.92	78.10	0.23
W2	200×1 400	4	3.7	37.2	41.5	90±5	7.83	69.30	71.85	3.68
W3	200×1 400	5	4.4	37.2	41.5	90±5	9.42	78.41	78.67	0.33
W4	200×1 400	6	5.6	37.2	41.5	90±5	12.22	90.93	92.45	1.67
W5	200×1 400	5	4.4	37.2	41.5	60±5	9.42	81.58	78.71	−3.51
W6	200×1 400	5	4.4	37.2	41.5	120±5	9.42	78.31	78.60	0.38
W7	200×1 400	5	4.4	37.2	29.6	90±5	9.42	77.62	76.99	−0.81
W8	200×1 400	5	4.4	37.2	52.6	90±5	9.42	81.08	79.95	1.39

1.3 再生大骨料自密实混凝土组合强度验证

为研究再生大骨料与自密实混凝土混合后的强度与再生大骨料强度、自密实混凝土强度以及两者掺入量之间的关系, 将不同强度的再生大骨料和自密实混凝土混合后浇筑成 5 组 150 mm×

150 mm×150 mm 的立方体试块, 每组 3 块, 标准养护 28 d 后在 2 000 kN 压力机上进行抗压强度测试, 具体分组及抗压强度见表 4. 表中再生大骨料掺入量为再生大骨料质量与混合混凝土总质量之比.

表 4 立方体试块分组
Tab. 4 Test loading device

分组	SCC 强度 /MPa	RBA 强度 /MPa	粒径 /mm	RBA 混入 量/%	抗压强度 实测/MPa	抗压强度 计算/MPa	误差差/%
1	37.2	41.5	60±5	33.89	40.4	38.89	—3.73
2	37.2	41.5	90±5	28.89	39.5	38.76	—1.87
3	37.2	41.5	120±5	23.89	37.5	38.59	2.91
4	37.2	29.6	90±5	28.89	33.5	34.19	2.05
5	37.2	52.6	90±5	28.89	41.9	42.44	1.29

吴波^[5]通过对再生混合构件的研究,提出废弃混凝土与新拌混凝土的组合强度可采用公式(1)进行计算,该公式利用废弃混凝土的掺入量 η 将废弃混凝土强度和新拌混凝土强度结合起来,构成组合强度公式,即

$$f_{cu,com} = \left(\frac{f_{cu,old}}{f_{cu,new}} \right)^{0.86\eta} \times f_{cu,new} \times (1-\eta) + \left(\frac{f_{cu,new}}{f_{cu,old}} \right)^{1.1\eta} \times f_{cu,old} \times \eta \quad (1)$$

式中: $f_{cu,com}$ 为再生大骨料自密实混凝土的立方体抗压强度(MPa); $f_{cu,new}$ 、 $f_{cu,old}$ 分别为自密实混凝土和再生大骨料的立方体抗压强度(MPa)。

为了验证公式(1)是否适用于再生大骨料与自密实混凝土的组合强度,将表4中有关数值带入公式(1)计算,并将组合抗压强度计算值与表4中抗压强度实测值进行比较,比较结果列于表4。从表4可以看出,组合强度的实测值和计算值误差较小,因此可以采用公式(1)对再生大骨料自密实混凝土的抗压强度进行计算。

1.4 加载装置与测点布置

加载设备为1 000 kN 液压千斤顶,施加的荷载由分配梁传递到构件三分点处。8根构件的纯弯段长均为400 mm。由于构件的横截面为圆形,为使构件的加载结构与简支结构一样,本试验设置了2对加载支座,每对由1个滚动铰支座和1个固定铰支座组成,分别放在支座和加载点处。试验加载装置如图4所示。

荷载数值由力传感器测得,每个构件均布置4对应变片和5个量程为150 mm的位移计。其中,在构件跨中位置沿钢管上下左右表面的最高点处各粘贴1对横纵应变片;在构件纯弯段部分布置3个位移计,分别位于三分点和跨中处,考虑到加载支座的变形,在两个加载支座处各布置一个位移计。图5为构件测量装置布置示意图,其中,1~4表示纵向应变片,1'~4'表示横向应变片。所有试验数据均由电脑每隔一秒自动采集。



(a) 三分点加载装置



(b) 滚动铰支座



(c) 固定铰支座

图4 试验加载装置

Fig. 4 The load bearing

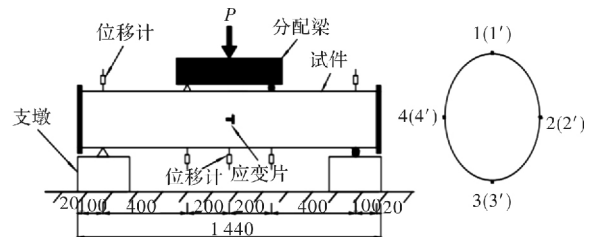


图5 构件测量装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test piece measuring device

荷载由1 000 kN 传感器量测,每个构件均布置4对应变片和5个量程为150 mm的位移计。其中,在构件跨中位置沿钢管上下左右表面的最高

点处各粘贴1对横纵应变片;在构件纯弯段部分布置3个位移计,分别位于三分点和跨中处,考虑到加载支座的变形,在两个加载支座处各布置一个位移计,构件测量装置布置示意图见图5、其中,1~4表示纵向应变片,1'~4'表示横向应变片。加载装置图见图6。

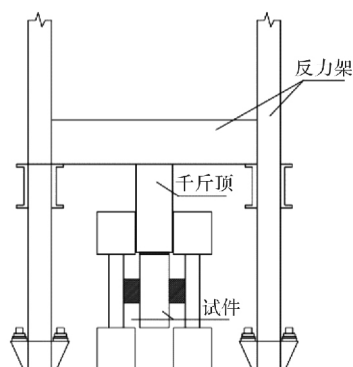


图6 加载装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of loading device

试验前先通过有限元软件对所有构件进行有限元模拟,得到构件所能承受的极限荷载。在正式加载前,为使构件和加载支座接触良好,同时确保应变片、位移计数据正常,需要先进行预加载,预加载的荷载值约为极限荷载的20%,加到预加载值后,停止继续加载,维持此荷载约2 min,然后缓慢卸载。之后对加载装置和测量装置进行检查,检查无误后开始正式加载。正式加载时,按照预计的极限荷载进行分级加载,构件加载的过程大体分为3个阶段。第一阶段为弹性阶段(小于60%的极限荷载范围内),按照极限荷载的1/8左右的荷载增加幅度进行分级加载;第二阶段为钢管屈服后(超过60%的极限荷载),每级荷载的增加量减少,按照极限荷载的1/12左右的荷载增加幅度进行分级加载;第三个阶段在构件接近破坏时,放慢加载速度,连续加载。在构件加载的前两个阶段中,每级荷载需停留2 min左右。待构件跨中挠度达到60 mm时停止加载。

2 试验结果与分析

2.1 宏观破坏形态

钢管再生大骨料自密实混凝土构件从加载到破坏的试验现象为:1、加载初期,跨中挠度随荷载的增加而增加,但增幅较慢,期间,构件会发出轻微的噼啪声响,可能是内部混凝土不密实造成的;2、加载中期,当荷载增加到极限抗弯承载力的58%时,构件会发出较大响声,从弯矩-挠度曲线可以看出,构件即将进入塑性阶段,构件挠

度明显增加,构件两端翘曲现象较为明显;3、加载后期,构件挠度急剧增大,发生明显的大变形,直到试验停止时,荷载值都没有出现明显下降,表现出良好的变形能力。

图7(a)、(b)为钢管再生大骨料自密实混凝土构件加载破坏后的变形图。由图可知,钢管自密实混凝土构件和钢管再生大骨料自密实混凝土构件破坏后的破坏形态相同,整体呈弓形形状,跨中位置挠度最大,在构件纯弯段部分的顶部受压区,多数构件钢管表面未出现鼓曲现象,只有少数构件在接近三分点位置处出现鼓曲,这是由于加载点附近存在应力集中而造成的。

为了观察构件内部混凝土的破坏情况,加载破坏后,切开构件纯弯段部分的钢管,对纯弯段部分核心混凝土的裂缝进行了分析。图7(c)为构件加载破坏后内部混凝土的破坏情况。可见,在构件纯弯段部分的混凝土受拉区均匀分布着17条裂缝,裂缝的宽度越靠近受压区越窄,试验结束时,裂缝延伸至截面的3/4高度处。在受压区,未出现混凝土压碎现象。

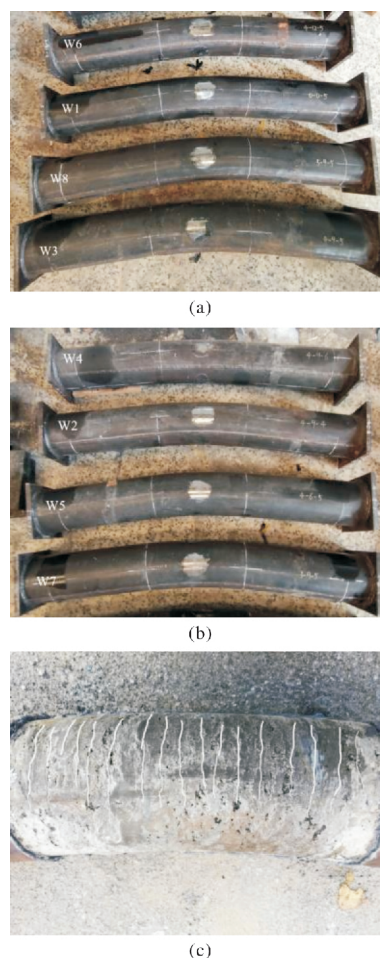


图7 构件的破坏形态

Fig. 7 Failure modes of specimens

2.2 弯矩-跨中挠度曲线

为了更加准确、方便地分析不同参数对钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件极限抗弯承载力(M_{ue})的影响,定义 SI_M 为强度系数, SI_a 、 SI_D 、 SI_R 分别定义为含钢率系数、骨料粒径系数和再生大骨料强度系数。其计算公式如下。

$$SI_M = \frac{M_{ue}}{M_{ue, \text{参考构件}}} \quad (2)$$

$$SI_a = \frac{\alpha}{\alpha_{\text{参考构件}}} \quad (3)$$

$$SI_D = \frac{D}{D_{\text{参考构件}}} \quad (4)$$

$$SI_R = \frac{f_{cu, \text{old}}}{f_{cu, \text{old, 参考构件}}} \quad (5)$$

式中,参考构件均指含钢率(α)、再生大骨料强度($f_{cu, \text{old}}$)以及再生大骨料粒径(D)各个参数下三个构件的其中之一。

(1)含钢率对弯矩-跨中挠度曲线的影响:

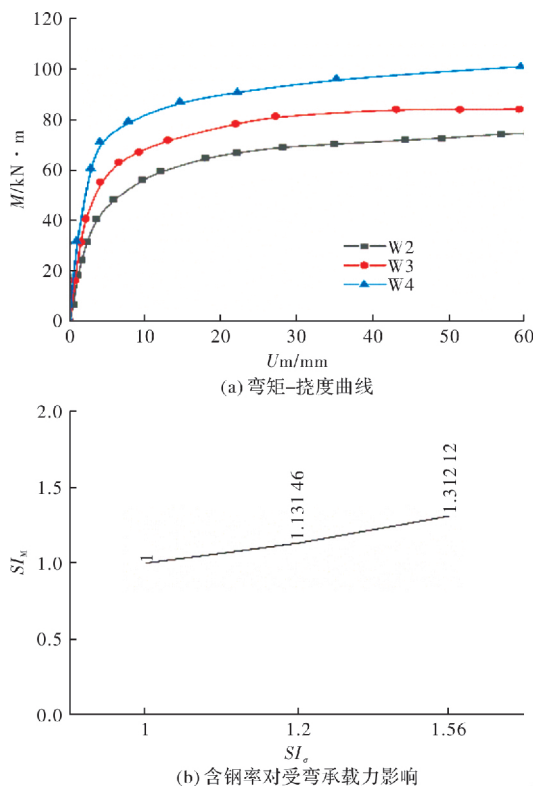


图8 含钢率对受弯性能影响

Fig. 8 Influence of steel content on bending performance

由图8(a)可知,含钢率对钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件的弯矩(M)-跨中挠度(U_m)曲线影响较大。线弹性阶段,曲线越来越陡,更加偏向纵轴,说明含钢率提高,构件的抗弯刚度也随之提高,这是因为在受拉区,主要考虑钢管承受拉应变,因此含钢率越高,钢管承受能力越强;非线性弹塑性阶段,随着含钢率提高,构件间的

抗弯承载力差距逐步明显,充分说明了含钢率和抗弯承载力是呈正相关。结合表3可知,构件W3与构件W2相比,含钢率系数 SI_a 提高了20.3%,极限抗弯承载力强度系数 SI_M 提高了13.15%;构件W4与构件W2相比,含钢率系数 SI_a 提高了56.1%,极限抗弯承载力强度系数 SI_M 提高了31.21%。随着含钢率的提高,构件的极限抗弯承载力的增长速度基本呈线性增长,且增幅较快。塑性强化阶段,直到试验结束时,构件的弯矩-跨中挠度曲线仍然保持缓慢上升的趋势,这充分说明钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件具有很好的延性。

(2)再生大骨料粒径变化对弯矩-跨中挠度曲线的影响:

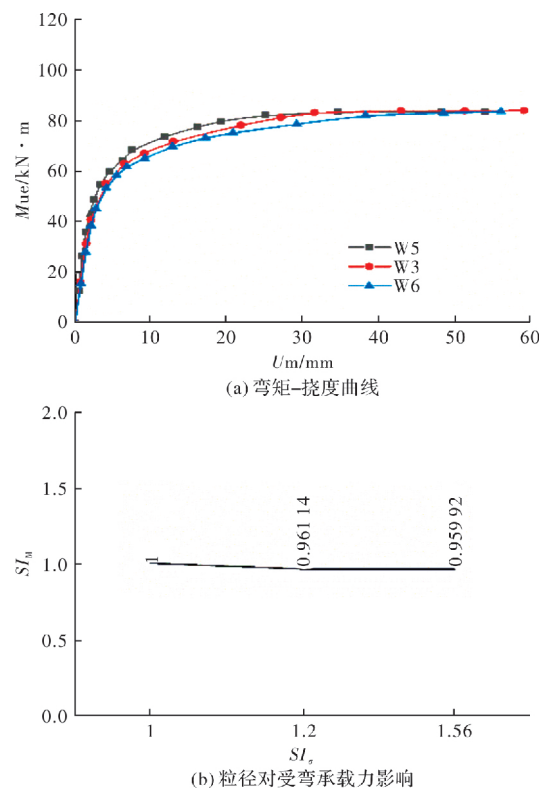


图9 再生大骨料粒径对受弯性能影响

Fig. 9 Influence of recycled large aggregate particle size on bending performance

如图9(a)所示,线弹性阶段,三条曲线几乎重叠。非线性弹塑性阶段,随着再生大骨料粒径的增加,构件的抗弯承载力在减小,结合表3可知,构件W3与构件W5相比,再生骨料粒径系数 SI_M 增加50%,极限抗弯承载力强度系数 SI_D 减低了3.89%;构件W6与构件W5相比,再生骨料粒径系数 SI_D 增加100%,极限抗弯承载力强度系数 SI_M 减低了4.01%;说明随着再生大骨料粒径(D)的增加,构件的极限抗弯承载力略有减低,

且降低幅度较小,表明再生骨料粒径对构件极限抗弯承载力的影响可以忽略。塑性强化阶段,直到试验结束时,构件的弯矩-跨中挠度曲线仍然保持缓慢上升的趋势,这充分说明钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件具有很好的延性。

(3) 再生大骨料强度变化对弯矩-跨中挠度曲线的影响:

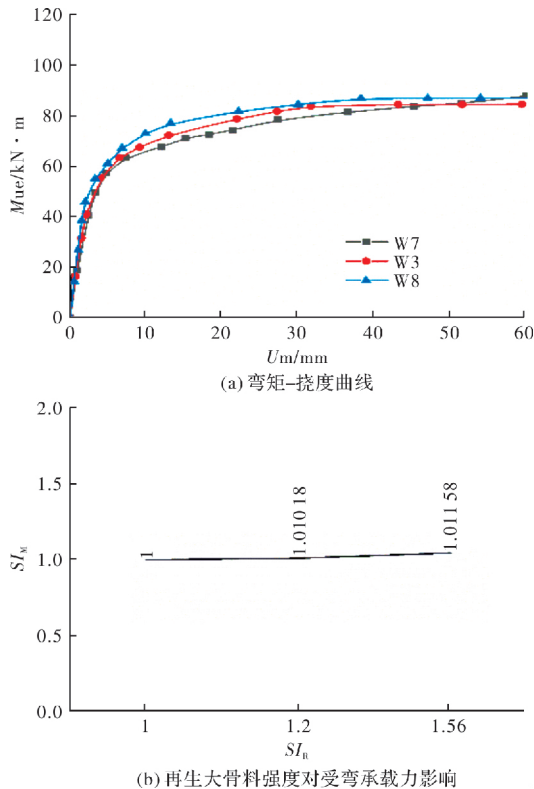


图 10 再生大骨料强度对受弯性能的影响

Fig. 10 Influence of Recycled Large Aggregate Strength on Bending Performance

如图 10(a)所示,线弹性阶段,曲线越来越陡,更加偏向纵轴,说明随着再生大骨料强度的增加,构件的抗弯刚度也随之增大,但不如钢管壁厚对构件的抗弯刚度影响大。随着再生大骨料强度的增加,构件间的抗弯承载力差距越来越大。结合表 3 可知,构件 W3 与构件 W7 相比,再生骨料强度系数 SI_R 增加 40.2%, 极限抗弯承载力强度系数 SI_M 增加了 1.02%; 构件 W8 与构件 W7 相比,再生骨料强度系数 SI_R 增加 77.7%, 极限抗弯承载力强度系数 SI_M 增加了 4.46%。说明随着再生大骨料强度($f_{cu,old}$)的增加,构件的极限抗弯承载力增加,但增长速度较慢。塑性强化阶段,直到试验结束时,构件的弯矩-跨中挠度曲线仍然保持缓慢上升的趋势,这充分说明钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件具有很好的延性。这是因为在受拉区主要考虑钢管承受拉应变,而再生

大骨料自密实混凝土因为比较早地退出工作使其对抗弯刚度的影响弱于钢管壁厚。

(4) 钢管再生大骨料自密实混凝土构件与钢管自密实混凝土构件比较:

钢管自密实混凝土构件与再生大骨料强度系列、再生大骨料粒径系列构件的弯矩(M)-跨中挠度(U_m)曲线比较见图 11, 由图 11 可见, 钢管自密实混凝土纯弯构件与钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件在弯矩(M)-跨中挠度(U_m)曲线的走势基本一致; 可见, 钢管再生大骨料自密实混凝土构件代替普通钢管自密实混凝土构件是有不错的发展前景。

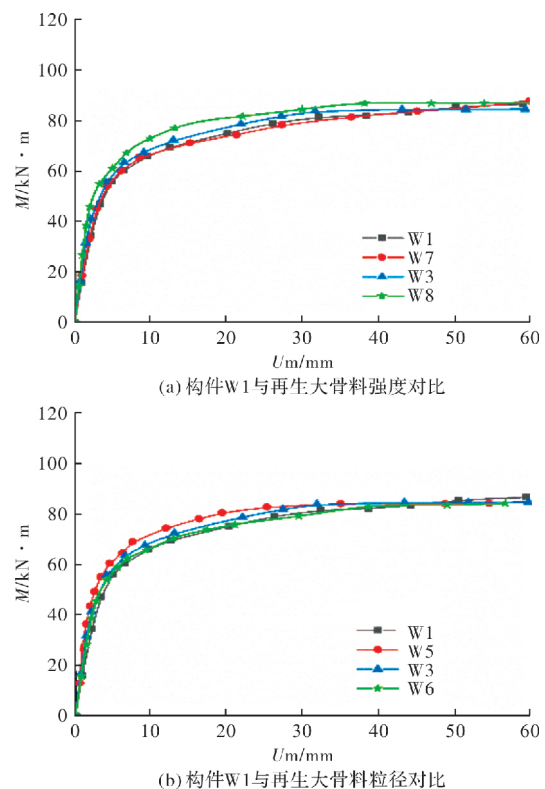
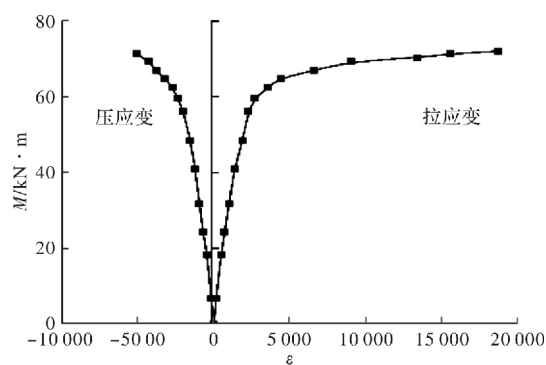


图 11 弯矩(M)-跨中挠度(u_m)曲线比较

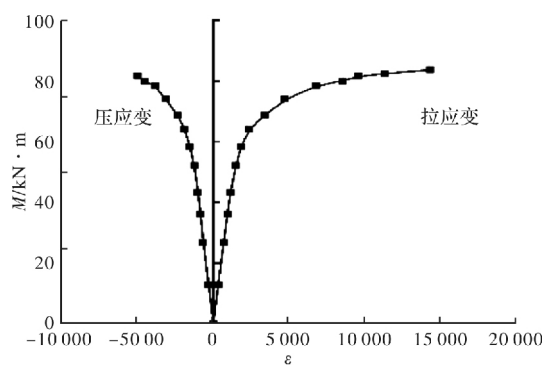
Fig. 11 Contrast of bending moment (M)-mid-span deflection (u_m) curves

2.3 弯矩(M)-纵向拉应变(ϵ)关系曲线

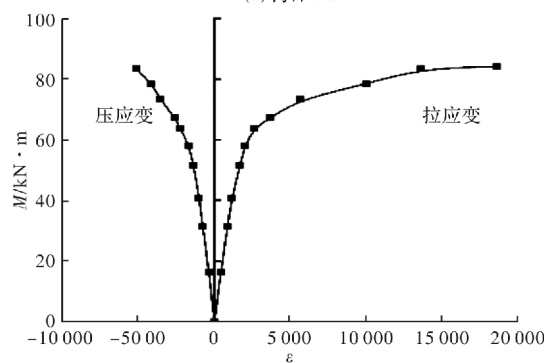
由图 12 可知,在受力过程中,钢管再生大骨料自密实混凝土构件划分成三部分:第一部分(弹性部分),加载前期,所有构件上部最大纵向压应变与下部最大纵向拉应变接近相等;第二部分(弹塑性部分),构件下部最大纵向拉应变增长速度越来越快,以至于构件的跨中弯矩增加到极限抗弯承载力 M_{ue} 时,构件下部最大纵向拉应变比构件上部最大纵向压应变多 $4\ 586 \sim 6\ 391\ \mu\epsilon$ 左右。此外,由图可见,从整体上来说所有构件的弯矩(M)-纵向应变(ϵ)曲线的形状是一致的。



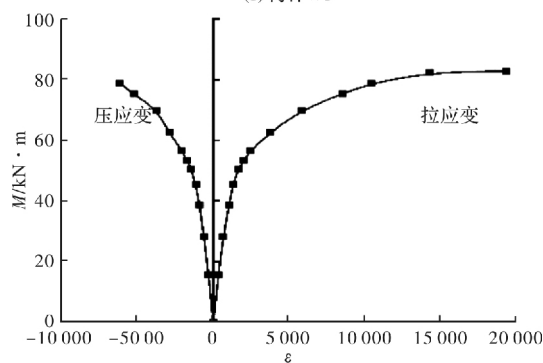
(a) 构件W2



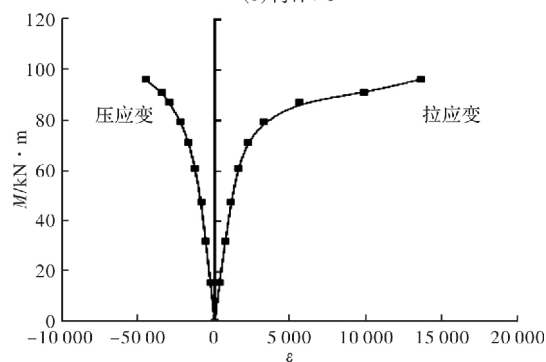
(f) 构件W5



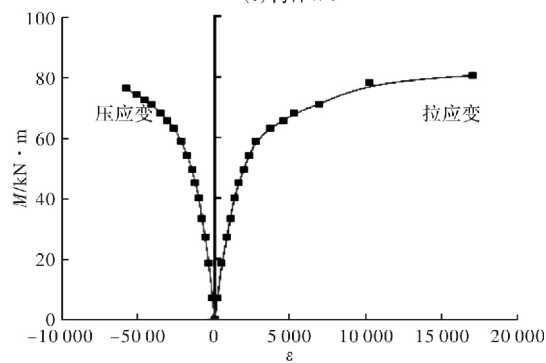
(b) 构件W3



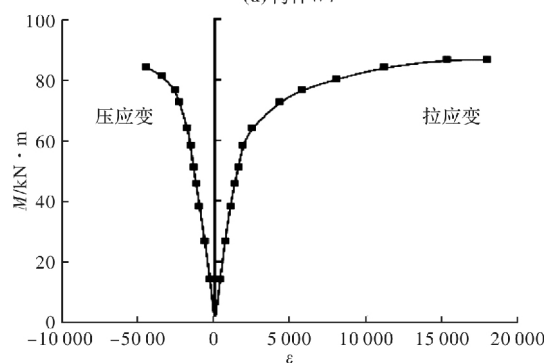
(g) 构件W6



(c) 构件W4



(d) 构件W7



(e) 构件W8

图12 弯矩(M)-纵向应变(ε)曲线

Fig. 12 Bending moment (M)-longitudinal strain (ε) curve

3 极限抗弯承载力公式的推导与验证

对于钢管再生大骨料自密实混凝土构件极限抗弯承载力的预测,目前尚无设计标准给出具体建议。为此本文参考中国的规范 GB50936(2014)^[14],钢管再生大骨料自密实混凝土构件的纯弯公式如下。

$$M_u = \gamma_m W_{scm} f_{scy} \quad (5)$$

式中: M_u 为钢管再生大骨料自密实混凝土构件的极限抗弯承载力; γ_m 为极限抗弯承载力的计算系数; W_{scm} 为构件截面抗弯模量, $W_{scm} = \pi d^3 / 32$; ξ 为约束效应系数, $\xi = A_s f_v / A_c f_c$; A_s 为钢管横截面面积; A_c 为核心混凝土截面积; f_v 为钢材的实测屈服强度; d 为钢管的外直径。

f_{scv} 为钢管混凝土构件轴压强度指标,参考文献[15]的研究成果,按下式计算。

$$f_{scv} = (1.5 + 1.02\xi) f_c \quad (6)$$

其中, f_c 为棱柱体抗压强度,参考文献[16]的研究成果,按下式计算。

$$f_c = 0.76 f_{cu,com} \quad (7)$$

由抗弯承载力试验值及公式(5),经数据拟合发现,计算系数 γ_m 与约束效应系数 ξ 存在如下关系。

$$\gamma_m = 0.565 4 \ln(\xi) + 1.349 3 \quad (8)$$

通过上面得到的钢管再生大骨料自密实混凝土受弯构件承载力计算公式,将8根钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件的实测数据代入,并将所得到的计算值与试验值列于表3。由表3可以看出,计算结果与试验值吻合度非常好。因此,本

文给出的钢管再生大骨料自密实混凝土受弯构件承载力计算方法可行。

4 结论

本文通过对钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件承载力试验,对其力学性能进行了研究,得到主要结论如下:

(1) 钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件的抗弯承载力受含钢率影响最为显著。随着含钢率的增加,构件的极限抗弯承载力得到显著提高且增长速度均呈线性;钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件的抗弯承载力受再生大骨料强度影响较小。随着再生大骨料强度的增加,构件的极限抗弯承载力略有提高;

(2) 钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件的抗弯承载力与再生大骨料粒径呈负相关。随着再生大骨料粒径的增加,构件的抗弯承载力降低,且降幅较低;本文给出的极限抗弯承载力计算公式与试验值吻合度良好,可用于钢管再生大骨料自密实混凝土纯弯构件的设计。

参考文献 References

- [1] XIAO J Z, ZHENG S T, WANG J. Aging strength, shrinkage and creep performance of recycled concrete [J]. Journal of Building Science and Engineering, 2015, 32(1): 21-26.
- [2] NIU H C, CAO W L, DONG H Y, et al. Experimental study on axial compression performance of steel tubular high strength recycled concrete columns[J]. Journal of Architectural Structure, 2015, 36(6): 128-135.
- [3] WANG Y Y, CHEN J, GENG Y. Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns[J]. Engineering Structures, 2015, 86: 192-212.
- [4] CAO V V. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete-filled steel tubes under axial loading[J]. International Journal of Civil Engineering, 2019, 17: 1341-1351.
- [5] WU B, ZHANG S Y. Compressive behaviors of cubes and cylinders made of normal-strength demolished concrete blocks and high-strength fresh concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 342-353.
- [6] 吴波,刘伟,刘琼祥,等.再生混合钢筋混凝土短柱的轴压性能试验[J].工程抗震与加固改造,2010,32(3):81-85. WU Bo, LIU Wei, LIU Qiongxiang, et al. Axial Compression performance test of recycled mixed reinforced concrete short columns[J]. Engineering Seismic Resistant and Reinforcement, 2010, 32(3): 81-85.
- [7] 吴波,许品,刘琼祥,等.再生混合钢筋混凝土梁的受弯性能试验[J].工程抗震与加固改造,2010, 32(1): 70-74. WU Bo, XU Pin, LIU Qiongxiang et al. Bending performance test of recycled mixed reinforced concrete beams[J]. Engineering Seismic Resistant and Reinforcement, 2010, 32(1): 70-74.
- [8] 吴波,许品,刘琼祥,等.再生混合钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2011, 32(6): 99-106. WU Bo, XU Pin, LIU Qiongxiang, et al. Experimental study on shear performance of recycled mixed reinforced concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 99-106.
- [9] 吴波,许品,刘琼祥,等.薄壁钢管再生混合柱的抗剪性能试验[J].土木工程学报,2010, 43(9): 12-21. WU Bo, XU Pin, LIU Qiongxiang, et al. Shear performance test of thin-walled steel pipe recycled mixed column[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(9): 12-21.
- [10] 杨有福,马国梁.不锈钢管再生混凝土弯曲性能[J].大连理工大学学报,2013,53(4):572-578. YANG Youfu, MA Guoliang. Bending performance of recycled concrete with stainless steel pipes[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(4): 572-578.
- [11] 杨丹,陈科,王汝恒,等.再生粗骨料混凝土梁受弯性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2019,45(4):54-59. YANG Dan, CHEN Ke, WANG Ruheng, et al. Experimental research on flexural performance of recycled coarse aggregate concrete beams[J]. Sichuan Building Science Research, 2019, 45(4): 54-59.
- [12] 许伟,王继忠,常晓波,等.取代率和混凝土强度对组合梁受弯性能的影响[J].沈阳工业大学学报,2017, 39(2):198-204. XU Wei, WANG Jizhong, CHANG Xiaobo, et al. The influence of substitution rate and concrete strength on the flexural performance of composite beams[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(2): 198-204.
- [13] YANG Youfu, MA Guoliang. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube stub columns and beams. 2013, 66: 62-75.
- [14] Bertil Persson. Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3): 373-379.
- [15] Khaleel, O R, Al-Mishhadani S A, H. Abdul Razak. The effect of coarse aggregate on fresh and hardened properties of self-compacting concrete (SCC) [J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 805-813.
- [16] 杨文涛. 钢管再生大骨料自密实混凝土短柱轴压性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2020. YANG Wentao. Study on the axial compression performance of self-compacting concrete short columns with recycled large aggregate steel tube [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [17] 张晓芳.再生大骨料自密实混凝土力学性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2020. ZHANG Xiaofang. Research on the mechanical properties of recycled large aggregate self-compacting concrete [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.

(编辑 沈波)