

# 再生粗骨料混合砂混凝土配合比的设计与基本力学性能试验研究

王治锋

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

**摘要:**随着城镇改造规模的增大,原建筑物和构筑物拆除产生了大量的废弃混凝土。而废弃混凝土中含有大量的可再次利用的砂石骨料,如果能将它们合理地回收利用,生产出再生粗骨料混合砂混凝土用到新的建筑物上,不仅能降低工程成本,节省天然资源,缓解骨料供求矛盾,还能减轻废弃混凝土对环境的污染,使其成为可持续发展战略的一个重要组成部分。此次研究的再生混凝土中的粗骨料均为再生粗骨料(占比为 100%),混合砂由天然细砂和再生砂按照 6:4 的配比混合而成。阐述了对再生粗骨料混合砂混凝土配合比的设计与基本力学性能试验进行的研究。

**关键词:**再生粗骨料;混合砂;混凝土;配合比;力学性能;试验

**中图分类号:**[TU997];TU755;TU5

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2023)02-0028-07

## Research on the Mix Proportion Design and Basic Mechanical Properties Test of Recycled Coarse Aggregates and Mixed Sand Concrete

WANG Zhifeng

(Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu Sichuan, 610066)

**Abstract:** With the increase of urban reconstruction scale, the demolition of original buildings and structures produces a large amount of waste concrete that contains a large amount of reusable sand and gravel aggregates. If it can be reasonably recycled to produce recycled coarse aggregate mixed sand concrete for new buildings, not only can it reduce the engineering cost, save natural resources, alleviate the contradiction between supply and demand of aggregates, but also it can reduce the pollution of waste concrete to environment, making it an important part of the sustainable development strategy. The coarse aggregate in the recycled concrete studied is recycled (accounting for 100%), and the mixed sand is made of natural fine sand and recycled sand in a ratio of 6:4. The paper presents the research on the mix proportion design and basic mechanical properties test of recycled coarse aggregates and mixed sand concrete.

**Key words:** recycled coarse aggregate; mixed sand; concrete; mix proportion; mechanical properties; test

### 1 概述

根据相关统计,我国目前建筑材料中混凝土的使用量非常巨大,而混凝土原材料中的 70% 甚至更高是由骨料组成的<sup>[1]</sup>。随着建筑行业和城市现代化的步伐不断发展,不仅对天然骨料的需求量增大,而且因旧建筑物的不断拆解产生了大量的废弃混凝土,从而导致环境问题加剧<sup>[2]</sup>。为了有效解决这个痛点,开展再生粗骨料混合砂混凝土再生利用技术的研究具有十分重要的意义,符合现代社会可持续发展的理念。阐述了对再生粗骨料混合砂混凝土(天然细砂和

再生砂比例为 6:4)配合比的设计以及基本力学性能展开的试验研究。

### 2 再生粗骨料与试验所需原材料的研究

#### 2.1 再生粗骨料的制备及特征

##### 2.1.1 再生粗骨料的制备

试验选取浐水宝塔大桥改扩建工程中原桥梁的预制小箱梁作为再生粗骨料的原生混凝土,经人工剔除钢筋并通过颚式破碎机二次破碎,选出粒径为 0~31.5 mm 的颗粒。试验采用的再生粗骨料生产方式见图 1。

##### 2.1.2 再生粗骨料的特征

收稿日期:2022-12-12

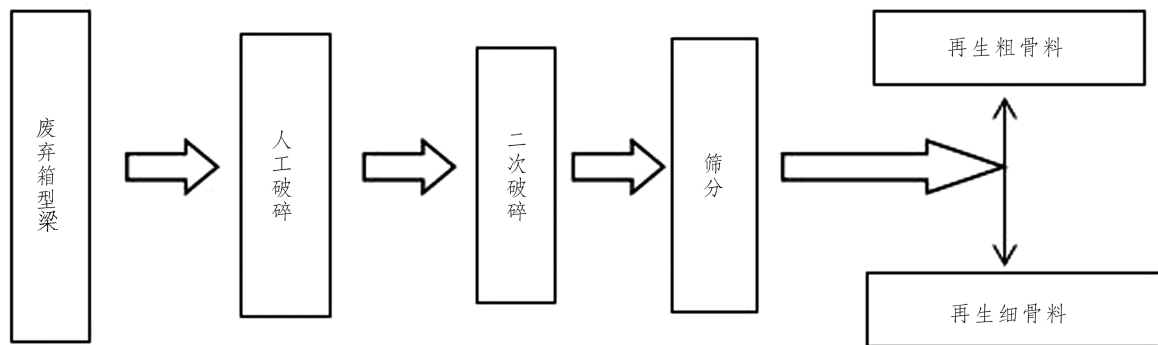


图1 试验采用的再生粗骨料生产方式示意图

鉴于再生粗骨料与天然骨料的制作方法不尽相同,而且再生粗骨料与天然骨料相比其组成成分相当复杂,包含相当多数量的硬化水泥砂浆,且其砂浆体中水泥石本身孔隙比较大,在其制备破碎过程中,水泥石内部往往会产生大量的微裂缝<sup>[3]</sup>。因此,再生粗骨料具有不同于天然骨料的特性。综合相关文献得知,再生粗骨料主要具有以下几点特性:

(1)采用人工破碎方式制备出的再生粗骨料棱角较多,表面粗糙,且再生粗骨料具有一定的孔隙率;

(2)再生粗骨料的表观密度小于天然骨料。研究表明:再生粗骨料的表观密度与其粒径有关;

(3)再生粗骨料的吸水率较天然骨料大,且其吸水速率亦比天然骨料快。再生粗骨料的吸水性与其粒径有关:粒径越小,其吸水性越大,吸水速率亦越快;再生粗骨料的吸水性还与其表观密度有关,随表观密度的减小而增加;

(4)再生粗骨料的强度比天然骨料低。一方面是由于再生粗骨料表面粘附着大量的水泥砂浆,而水泥砂浆的强度较低,从而降低了再生粗

骨料的强度;另一方面是由于混凝土在使用了一定年限后,由于风化或腐蚀等不良环境的影响,使得再生粗骨料的强度较天然骨料的强度低<sup>[4]</sup>。再生粗骨料的强度可用岩石立方体强度和压碎指标两种方法表示。采用岩石立方体强度表示时,一般再生粗骨料的最低强度不宜低于 30 MPa。再生粗骨料的压碎指标可参照相关规范对天然骨料压碎指标的要求。强度太低的再生粗骨料不宜用来配制混凝土,而只能用作道路工程垫层和素混凝土垫层<sup>[5]</sup>。

## 2.2 试验所需原材料的材性试验

### 2.2.1 再生粗骨料的材性试验

试验所用的再生粗骨料系利用废弃混凝土制备,将浣水宝塔大桥废弃的小箱梁构件(混凝土强度等级为 C40 左右)经人工初步拆分、剔除钢筋后,通过颚式破碎机进行破碎并按照不同粒径的筛网进行筛分,最后得到本次试验用的再生粗细骨料。再生细骨料由人工筛分为 5 mm 以下的粒径,再生粗骨料由人工筛分为 5~10 mm,10~16 mm,16~20 mm,20~31.5 mm 四个粒径,再生粗骨料按表 1 中的比例配成连续级配。按上述级配配好的粗骨料进行筛分,所得到的筛分结果见表 2。

表1 再生粗骨料配比表

级配 粒径/mm	原材料粒径/mm			
	5~10	10~16	16~20	20~31.5
5~16	1	1		
5~20	3	3	4	
5~31.5	2.25	2.25	3	2.5

根据《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52-2006<sup>[6]</sup>中关于粗骨料的质量要求可

以得出这三种连续级配的级配曲线,再生粗骨料级配曲线见图 2。

表 2 再生粗骨料筛分试验结果表

公称粒径 /mm	累计筛余 /%							
	方孔筛筛孔边长 /mm							
	2.5	4.75	9.5	16	19	26.5	31.5	40
5~16	99.3	99.3	68.4	1				
5~20	99.3	98.8	73.5		0.5			
5~31.5	99	98.8	89.3	56.6	30		3	

图 2 再生粗骨料级配曲线图

由图 2 可以看到符合粗骨料质量要求级配曲线的粒径有 5~20 mm 和 5~31.5 mm。考虑到在破碎筛分过程中不同粒径的再生粗骨料量有多有少,此次试验最终采用的是粒径为 5~20 mm 的级配再生粗骨料。

只有了解再生粗骨料的基本材性,才能更好地做出其配合比设计。以下是再生粗骨料各种材

性试验的过程以及取得的结果。再生粗骨料的基本物理性能指标见表 3。

鉴于再生粗骨料的吸水率与配合比设计时的附加含水量有直接的联系,故此次试验对吸水率做了比较细致的研究,其试验过程及取得的结果见表 4 和图 3。粗骨料 1 h 吸水试验结果见表 4,再生粗骨料吸水率曲线见图 3。

表 3 再生粗骨料的基本物理性能指标表

级配粒径 /mm	表观密度 /kg·m <sup>-3</sup>	堆积密度 /kg·m <sup>-3</sup>	紧密堆积密度 /kg·m <sup>-3</sup>	松散孔隙率 /%	含水率 /%	压碎指标 /%	含泥量 /%
5~20	2 620	1 452	1 511	45	2.3	11.4	0.42

表 4 粗骨料 1 h 吸水试验结果表

项目	时间 /min							
	5	10	15	20	30	40	50	60
级配粒径 /mm 5~20	3.45	3.57	3.57	3.7	3.71	3.74	3.76	3.78

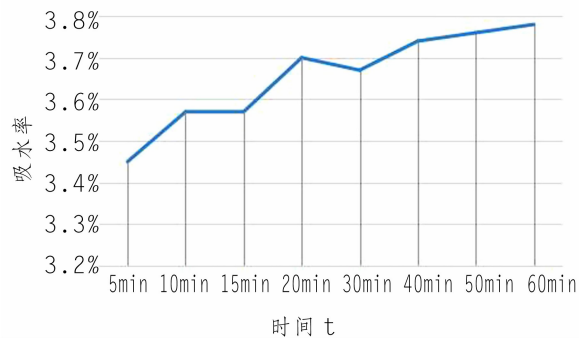


图 3 再生粗骨料吸水率曲线图

2.2.2 混合砂

本次试验所用的混合砂是由购买好的天然

砂经过筛分成的细砂以及由泔水宝塔大桥废弃的小箱梁构件破碎后粒径小于 5 mm 的再生砂按照 6 : 4 的配比混合而成的,即混合砂由 60% 的天然细砂和 40% 的再生砂混合而成。以下是混合砂的基本材性试验过程以及取得的结果(表 5)。混合砂筛分试验结果见表 5。

在确定混合砂配比时进行了天然细砂 : 再生砂为 5 : 5、2 : 8、8 : 2 以及 4 : 6 和 6 : 4 的配比试验,最后得出的试验数据只有天然细砂 : 再生砂为 6 : 4 的符合中砂的级配,其细度模数为 2.75。

表5 混合砂筛分试验结果表

项目	筛网孔径 /mm						筛底
	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	
粒径占比 /%	2.22	19.8	37.12	53.32	73.8	96.11	100

根据《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52—2006 中关于砂的质量要求可以得出混合砂的连续级配曲线,混合砂级配曲线见图4。

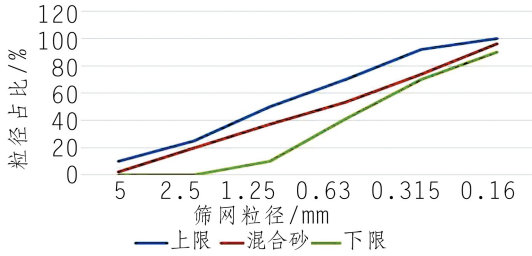


图4 混合砂级配曲线图

只有了解混合砂的基本材性,才能更好地做出其配合比设计。以下是混合砂各种材性试验的过程以及取得的结果(表6),混合砂基本物理性能指标见表6。

表6 混合砂基本物理性能指标表

表观密度 /kg·m <sup>-3</sup>	堆积密度 /kg·m <sup>-3</sup>	紧密堆积密度 /kg·m <sup>-3</sup>	含水率 /%	含泥量 /%	吸水率 /%	细度模数
2 610	1 528	1 623	1.8	1.44	1.56	2.75

表7 初步配合比设计表

水 /kg·m <sup>-3</sup>	砂率	水泥 /kg·m <sup>-3</sup>	粗骨料 /kg·m <sup>-3</sup>			细骨料 /kg·m <sup>-3</sup>			附加水 /kg·m <sup>-3</sup>	减水剂 /kg·m <sup>-3</sup>	
			总量	5~10	10~16	16~20	总量	天然细砂			再生砂
210	0.4	350	1 046	314	314	418	697	418	279	18.832	—
210	0.38	420	1 044	313	313	418	640	384	256	18.125	—
178.5	0.35	446	1 164	349	349	466	628	377	251	18.704	1.785
165	0.3	560	1 171	351	351	469	502	301	201	18.139	5.21

表8 试配配合比设计表

水 /kg·m <sup>-3</sup>	水泥 /kg·m <sup>-3</sup>	粗骨料 /kg·m <sup>-3</sup>			细骨料 /kg·m <sup>-3</sup>			附加水 /kg·m <sup>-3</sup>	减水剂 /kg·m <sup>-3</sup>	
		总量	5~10	10~16	16~20	总量	天然细砂			再生砂
3.15	5.25	17.2	5.16	5.16	6.88	11.47	6.88	4.59	0.206	—
3.15	6.3	17.34	5.2	5.2	6.94	10.63	6.38	4.25	0.208	—
2.68	6.7	17.49	5.25	5.25	6.99	9.42	5.65	3.77	0.21	0.089
2.47	8.4	17.6	5.28	5.28	7.04	7.55	4.53	3.02	0.211	0.26

表9 新拌混凝土工作性能表

水灰比	工作性能		
	流动性(坍落度) /mm	粘聚性	保水性
0.6	113	良好	良好
0.5	110	良好	良好
0.4	105	一般	良好
0.3	100	一般	良好

### 2.2.3 减水剂

试验采用了型号为FN型高效减水剂,其外观为液体,呈黄褐色。水灰比为0.4时掺量为胶凝材料的0.4%,水灰比为0.3时掺量为胶凝材料的0.95%。

## 3 再生粗骨料混合砂混凝土配合比的设计与研究

### 3.1 再生粗骨料混合砂混凝土试配

本次试验参照《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55—2011<sup>[7]</sup>对再生粗骨料混合砂混凝土进行了初步配合比设计。经过计算,最终得到的4组初步配合比设计情况见表7。

由计算出来的配合比按照一定比例计算出的试配配合比的设计情况见表8。

按照配比试拌、测定坍落度、养护后得到了新的试验结果。新拌混凝土工作性能见表9。

由表 9 可知:根据表 8 配制的再生粗骨料混合砂混凝土其工作性能满足设计要求。

(1)根据表 8 配制的再生粗骨料混合砂混凝土均符合混凝土的坍落度设计要求。

(2)根据表 8 配制的再生粗骨料混合砂混凝土水灰比为 0.3 与 0.4 时的粘聚性一般,并且水灰比为 0.3 时的工作性能差,其余表现良好,没有

产生泌水现象。

### 3.2 再生粗骨料混合砂混凝土试块成型

根据试配结果测定其工作性能。由试配结果可知:水灰比为 0.3 与 0.4 时的粘聚性一般且水灰比为 0.3 时的工作性差,因此需要通过调整相关参数以改变新拌混凝土的工作性能,改正后的再生粗骨料混合砂混凝土的配合比见表 10。

表 10 最终配合比设计表

水 /kg·m <sup>-3</sup>	砂率	水泥 /kg·m <sup>-3</sup>	粗骨料 /kg·m <sup>-3</sup>			细骨料 /kg·m <sup>-3</sup>		附加水 /kg·m <sup>-3</sup>	减水剂 /kg·m <sup>-3</sup>		
			总量	5~10	10~16	16~20	总量			天然细砂	再生砂
210	0.4	350	1 046	314	314	418	697	418	279	18.832	—
210	0.38	420	1 044	313	313	418	640	384	256	18.125	—
178.5	0.36	446.25	1 117	335	335	447	628	377	251	18.704	1.785
165	0.36	550	1 083	325	325	433	609	365	244	18.139	5.225

对试配出来的混凝土测其坍落度,待其符合规定后即可正式浇筑。试块成型参考《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55—2011。根据每个水灰比浇筑 12 块立方体试块与 6 块棱柱体试块。对于立方体抗压试块标准养护 3 d、7 d、28 d 后分别测定其试件属性;劈裂抗拉试块、轴心抗压试块标准养护 28 d 后测定其试块属性。

## 4 再生粗骨料混合砂混凝土基本力学性能的试验研究

### 4.1 再生粗骨料混合砂混凝土的立方体抗压性能试验及分析

浇筑之后的混凝土试块在标准养护条件下(温度 20℃±2℃,相对湿度大于 95%或在水中)<sup>[8]</sup>养护到一定的龄期后按照混凝土立方体抗压强度试验方法<sup>[9]</sup>进行加压试验。标准立方体抗压强度见表 11。

表 11 标准立方体抗压强度表

水灰比	3 d 强度 /MPa	7 d 强度 /MPa	28 d 强度 /MPa
0.3	35.32	40.83	63.75
0.4	32.24	34.47	39.11
0.5	27.07	38.63	38.25
0.6	21.72	29.78	35.64

混凝土立方体抗压强度的变化趋势见图 5。

#### 结论及分析:

(1)除了水灰比为 0.5 的再生粗骨料混合砂混凝土的抗压强度随着时间的增长而增高,水灰比为 0.5 的再生粗骨料混合砂混凝土的 7 d 抗压强度与 28 d 抗压强度相差无几。说明水灰比为

0.5 的再生粗骨料混合砂混凝土强度 7 d 时将要达到 28 d 的抗压强度。

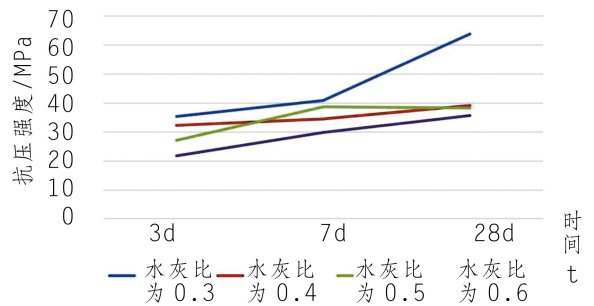


图 5 混凝土立方体抗压强度变化趋势图

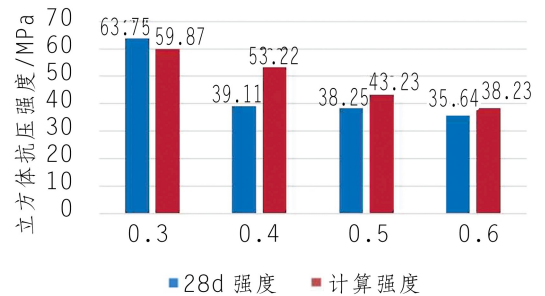


图 6 混凝土 28 d 立方体抗压强度与计算强度对比图

(2)普通混凝土抗压强度的发展大致与其龄期的对数呈正比例关系。而此次试验中的混凝土立方体抗压强度不符合该发展规律。

(3)混凝土 28 d 立方体抗压强度与计算强度对比情况见图 6。由图 6 可知:水灰比为 0.3 的再生粗骨料混合砂混凝土 28 d 抗压强度达到了设计抗压强度。再生粗骨料混合砂混凝土水灰比为 0.5 与 0.6 的 28 d 抗压强度可以达到设计强

度的93%及88%。

#### 4.2 再生粗骨料混合砂混凝土的劈裂抗拉性能试验及分析

对混凝土浇筑之后的试块在标准养护条件下(温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度大于95%或在水中)养护到一定的龄期后按照混凝土劈裂抗拉强度试验方法进行了加压试验。劈裂抗拉强度见表12,混凝土28d劈裂抗拉强度变化趋势见图7。混凝土28d劈裂抗拉强度与计算强度对比情况见图8。

表12 劈裂抗拉强度表

项目	水灰比			
	0.3	0.4	0.5	0.6
混凝土28d强度/MPa	4.64	2.87	3.3	3.02

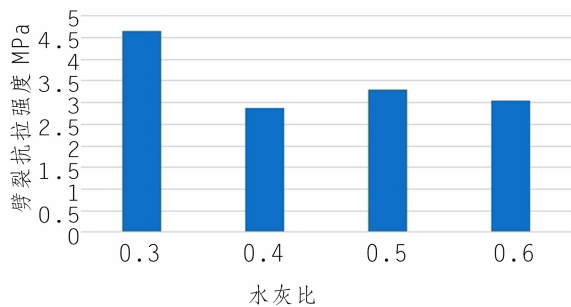


图7 混凝土28d劈裂抗拉强度变化趋势图

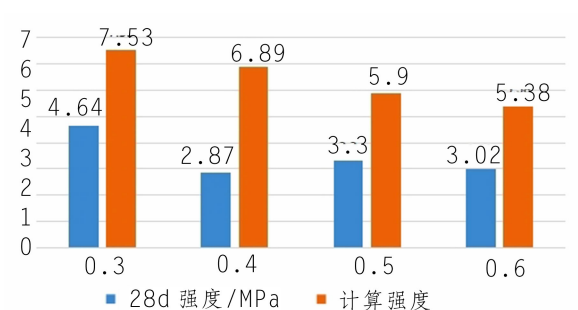


图8 混凝土28d劈裂抗拉强度与计算强度对比图

#### 结论及分析:

(1)再生粗骨料混合砂混凝土28d劈裂抗拉强度应随混凝土强度的提高而提高,这一发展规律与普通混凝土类似。但是,由图8可以清晰地看出:水灰比为0.4的劈裂抗拉强度没有水灰比为0.5和0.6的劈裂抗拉强度高。综合考虑各种情况分析出是在装模时振捣出了一些问题:由于振捣时间短,新拌混凝土中的石子还没有均匀分布在试块中,使试块底面砂浆较多,从而导致水灰比为0.4的劈裂抗拉强度较低。

(2)再生粗骨料混合砂混凝土的劈裂抗拉强

度除水灰比为0.4的外其强度均达到设计强度的56%以上。

#### 4.3 再生粗骨料混合砂混凝土的轴心抗压性能试验及分析

对混凝土浇筑之后的试块在标准养护条件下(温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度大于95%或在水中)养护到一定的龄期后按照混凝土轴心抗压强度试验方法进行了加压试验。棱柱体轴心抗压强度见表13。混凝土28d轴心抗压强度变化趋势见图9。

表13 棱柱体轴心抗压强度表

项目	水灰比			
	0.3	0.4	0.5	0.6
混凝土28d强度/MPa	61.37	41.36	35.24	31.02

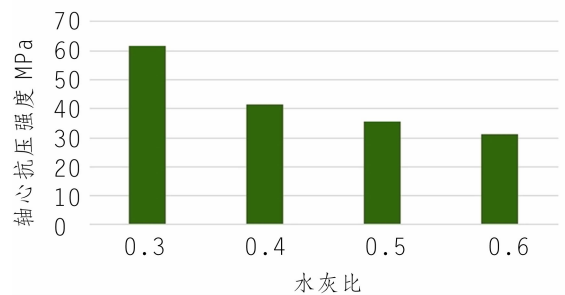


图9 混凝土28d轴心抗压强度变化趋势图

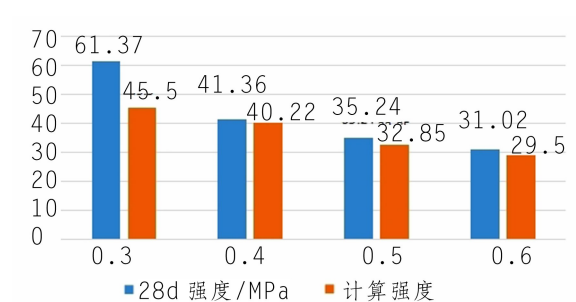


图10 混凝土28d轴心抗压强度与计算强度对比图

#### 结论及分析:

(1)混凝土28d轴心抗压强度与计算强度对比情况见图10。图10显示的试验结果表明:再生粗骨料混合砂混凝土的轴心抗压强度较普通混凝土强度差一些,且再生粗骨料混合砂混凝土的轴心抗压强度的发展趋势类似于普通混凝土。

(2)再生粗骨料混合砂混凝土所有水灰比的28d强度均高于设计强度。

#### 4.4 小结

(1)普通混凝土抗压强度的发展大致与其龄

期的对数呈正比例关系。而本次试验混凝土的立方体抗压强度不符合该发展规律。

(2)此次试验结果表明:再生粗骨料混合砂混凝土力学性能的发展规律类似于普通混凝土。

(3)此次试验结果表明:再生粗骨料混合砂混凝土的劈裂抗拉强度可以达到普通混凝土劈裂抗拉强度的 56%;再生粗骨料混合砂混凝土的轴心抗压强度均超过普通混凝土的轴心抗压强度。

### 5 结 语

通过对再生粗骨料混合砂配合比设计进行的研究以及力学性指标的测定分析,得出了以下主要结论:

(1)此次试验结果表明:再生粗骨料混合砂混凝土水灰比为 0.3 的再生粗骨料混合砂混凝土的立方体抗压强度超过了普通混凝土的抗压强度,水灰比为 0.5 与 0.6 的抗压强度可以达到普通混凝土抗压强度的 88.5%与 93.2%。虽然水灰比为 0.4 的抗压强度只能达到普通混凝土强度的 73.5%,但其还是能够满足混凝土的工作性能。

(2)普通混凝土抗压强度的发展大致与其龄期的对数呈正比例关系。而本次试验中混凝土立方体的抗压强度不符合该发展规律。对于再生粗

(上接第 27 页)

缠丝、缠丝后进行表面清洗、涂刷柔性环氧磷酸锌底漆、刮涂聚硫密封胶、涂刷白色防护氟碳面漆及防滑面层。主缆缠丝应在不干性阻蚀密封胶涂抹完毕 1 h 后进行,缠丝拉力为 2.2 kN。

### 3.3 索夹及散索套结构缝隙的涂装

索夹环缝、对接缝的密封涂装首先使用 MF—DJ2000F 非硫化不干性密封胶将其缝隙填充密实并采用密封胶条封闭,最后采用 MF—860F 聚硫防腐密封胶嵌缝进行整形使其外观光滑美观。

### 4 结 语

依次对悬索桥下部结构、索塔、主缆、猫道架设、缆索吊和钢箱梁的结构设计及施工技术进行了详细的阐述,提出了一系列的技术见解和施工经验,可为同类工程的建设提供参考。

参考文献:

骨料混合砂混凝土的立方体抗压强度随龄期之间的变化关系还需进一步进行研究确定。

(3)此次试验结果表明:再生粗骨料混合砂混凝土的力学性能的发展规律及破坏形态类似于普通混凝土。

参考文献:

- [1] 王飞. 多龄期下混合再生骨料混凝土的力学性能试验研究[D]. 华北水利水电大学,2019.
- [2] 郭琦. 再生骨料混凝土配合比设计方法与研究[D]. 华北水利水电大学,2013.
- [3] 王雪萍. 再生混凝土力学性能试验研究及其配合比优化[D]. 武汉理工大学,2008.
- [4] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [5] 张允宝. 莲易公路再生骨料混凝土应用技术试验研究[D]. 长沙理工大学,2006.
- [6] 普通混凝土砂石质量检验方法标准,JGJ52-2006[S].
- [7] 普通混凝土配合比设计规程,JGJ55-2011[S].
- [8] 刘俊华,孙勇,刘凤利,张承志. 建筑垃圾再生混合砂混凝土力学性能试验研究.[J]. 混凝土与水泥制品,2014,41(5): 94-97.
- [9] 混凝土力学性能试验方法标准,GB/T50081-2019[S].

作者简介:

王治锋(1992-),男,河南商丘人,工程师,学士,从事市政工程建设技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

- [1] 公路桥涵施工技术规范,JTG3650-2020[S].
- [2] 王滔. 双控张拉在后张预应力连续梁施工中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版),2015,5(15):290.
- [3] 金强,祝文斌. 独塔非对称自锚式悬索桥主缆施工的监控测量[J]. 安装,2020,40(1):27-30.
- [4] 罗涛. 黄山世纪广场观光悬索桥施工[J]. 施工技术,2002,31(5):26-28.
- [5] 康晋,舒思利,徐恭义. 金沙江白鹤滩水电站葫芦口大桥主桥设计[J]. 世界桥梁,2015,43(5):6-9.
- [6] 陈禹江,史文洁,王龙,等. 贵州抵母河大桥主缆架设与控制技术研究[J]. 建筑工程技术与设计,2017,149(3):161,585.

作者简介:

高 华(1985-),男,甘肃天水人,华中分公司副总工程师兼项目管理中心主任,高级工程师,从事市政工程桥梁建设技术与管理工作;

张 涛(1990-),男,河南漯河人,项目生管部主任,工程师,从事市政工程桥梁建设技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)