

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.037

寒冷地区结构物用C40砂岩碎石混凝土耐久性能研究

岳志才¹,陈阳¹,王起龙¹,黄维蓉^{2*},孙志远¹,徐伟¹

(1.中交一公局第三工程有限公司,北京市 101100;2.重庆交通大学,重庆市 400074)

摘要:为达到就地取材、节约工程造价的目的,采用青海大通县砂岩碎石作为混凝土粗集料配制寒冷地区C40桥梁结构混凝土,研究砂岩碎石混凝土的耐久性能。结果表明:砂岩碎石C40混凝土和玄武岩碎石C40混凝土很密实,抗渗等级均超过P30,能满足工程项目对抗渗性的要求;砂岩碎石混凝土电通量均小于1 200 C,满足混凝土结构设计寿命100年的指标要求;砂岩碎石混凝土28 d碳化深度不明显,拥有良好的抗碳化性能;砂岩碎石混凝土抗硫酸盐侵蚀性能评价等级大于KS120;且满足Ⅱ类环境中混凝土抗冻性能的要求,该砂岩碎石可用于配制寒冷地区结构物用C40混凝土。

关键词:砂岩碎石混凝土;抗渗透性能;抗碳化性能;抗硫酸盐侵蚀性能;抗冻性能

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

0 引言

改革开放以来,中国经济飞速发展,交通等基础设施建设正如火如荼地进行,在建设过程中,能源和建筑材料减少的问题也日益凸显,如何合理利用当地现有资源同时保证工程质量成为当前众多专家学者研究的主要课题之一^[1-8]。公路建设尤其是公路桥梁的建设有大量的混凝土结构,而砂石骨料是混凝土的主要组成材料,占混凝土体积的70%~80%,据估算,中国目前每年应用于建筑上的砂石骨料为70多亿吨^[9-11]。由于高速公路外运砂石骨料成本较高,就地取材可大大降低施工成本,同时减少对环境的破坏。砂岩作为一种天然岩石,是由岩石经长期的自然条件如风化剥蚀、酸碱腐蚀等作用,逐渐分解为碎屑,成岩条件的不同导致砂岩的性能也各有差异,因此砂岩种类较多,不同岩性的砂岩表现出来的性质尤其是强度也千差万别^[12],因此有必要分别对不同地区砂岩碎石混凝土进行研究。耐久性是混凝土在内外因素长期综合作用下抵抗实际不利影响使混凝土在设计年限内保持其原有的使用性能的能力。

影响混凝土耐久性的主要因素有物理因素和化学因素,物理因素主要包括表面撞击磨耗、恶劣环境高低温的影响、混凝土孔隙内某些中性盐的结晶等;化学作用主要包括混凝土的碳化作用、钢筋锈蚀、硫酸盐腐蚀等引起的混凝土损伤破坏^[13-14]。设计出耐久良好的混凝土,保障混凝土使用寿命,具有巨大的工程意义和经济意义。对于青海地区,大部分环境属于Ⅱ类环境,环境作用等级为C级,并且青海省平均海拔3 000 m以上,昼夜温差大,冬季时间长,对混凝土的耐久性尤其是抗冻性和抗腐蚀性等性能要求更高,研究砂岩碎石在混凝土中的应用尤其是研究砂岩碎石混凝土的耐久性具有重要意义。

1 试验材料与配合比

1.1 原材料

水泥采用普通硅酸盐水泥(P.O 42.5),其主要物理力学指标如表1所示;粗骨料采用砂岩碎石和玄武岩碎石进行对比研究,其中,砂岩母岩强度为142.1 MPa,吸水率为0.21,且不具有碱硅酸盐活性,两种碎石其他技术指标如表2所示;试验采用细度模数为2.80的天

收稿日期:2022-11-28

基金项目:青海省交通运输厅科技项目(编号:QHJT2019-0674);材料工程重庆市研究生联合培养基地基金资助项目(编号:202003)

作者简介:岳志才,男,高级工程师.E-mail:369046638@qq.com

*通信作者:黄维蓉,女,教授.E-mail:hwr228@163.com

然中砂作为细骨料;减水剂掺量为1.0%,使用减水率30%的聚羧酸高性能减水剂;水是饮用自来水。

表1 水泥的物理指标

密度/ (g·cm ⁻³)	安定性	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间/ min		抗压强度/ MPa		抗折强度/ MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
			3.2	合格	362	148	294	24.2

表2 粗集料技术指标

碎石类型	粒径/ mm	压碎值/ %	针片状/ %	表观密度/ (kg·m ⁻³)	含泥量/ %
	9.5~19	13.0	11.4	2 655	0.3
玄武岩碎石	4.75~9.5	—	3.9	2 849	0.5
	9.5~19	15.8	6.0	2 884	0.4

1.2 配合比

本文利用砂岩碎石配制C40混凝土,研究砂岩碎石在中等强度桥梁结构混凝土中应用的可行性,该混凝土用于青海加西公路项目结构物,混凝土结构物设计使用寿命100年,工程所在地属于寒冷地区,为Ⅱ类冻融环境,环境作用等级为C级,环境及其作用等级简写为Ⅱ-C。根据《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)的规定,在Ⅱ-C环境下,混凝土设计使用寿命为100年时,混凝土设计强度等级至少应达到C45。本文研究的C40混凝土在设计时抗压强度应按C45混凝土进行设计计算,以保证混凝土具有足够的耐久性和承载能力。

以同水胶比玄武岩碎石(加西公路混凝土用粗集料)混凝土作为对照组,用SY-TRS表示砂岩碎石和天然砂配制的混凝土,用SY-JZS表示砂岩碎石和机制砂配制的混凝土,用XWY-TRS表示玄武岩和天然砂配制的混凝土,用单位立方米材料用量来表示混凝土配合比,设计的配合比如表3所示。

表3 C40混凝土配合比

试件 编号	水胶比	材料用量/(kg·m ⁻³)					坍落度/ mm	28 d强 度/MPa
		水泥	水	砂	粗集 料	减水 剂		
SY-TRS	0.4	416	165	809	1 030	4.16	205	58.3
SY-JZS	0.4	420	170	805	1 025	4.62	205	55.9
XWY-TRS	0.4	416	166	809	1 029	4.16	205	57.2

1.3 试验方法

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009),采用全自动抗渗仪测试混凝土渗水高度,从而评价其抗水渗透性;运用电通量法测定混凝土中氯离子电通量,从而评价混凝土抗氯离子的渗透能力;采用混凝土碳化试验箱进行碳化试验,通过碳化深度评价其抗碳化性能;采用万能试验机对经过全自动混凝土抗硫酸盐干湿循环90次和120次的试件进行抗压强度测定,并计算抗压强度耐蚀系数,从而评价其抗硫酸盐侵蚀性能;采用慢冻法进行试验,分别冻融250次、300次、350次后测试其质量损失和冻融循环后抗压强度,以评价砂岩碎石混凝土的抗冻性。

2 试验结果及分析

2.1 砂岩碎石混凝土抗水渗透性

在混凝土标准养护室中养护28 d后对3种配合比成型的混凝土试件做抗水渗透试验,先用逐级加压法测试抗渗等级,通过渗水高度的对比来评价3种不同材料的混凝土抗渗性能,试验结果见表4。

表4 抗水渗透性试验结果

试件编号	实测抗渗 等级	项目要求抗 渗等级	平均渗水高度/ mm
SY-TRS	>P30	>P12	7
SY-JZS	>P30	>P12	14
XWY-TRS	>P30	>P12	11

由表4可知:无论是SY-TRS、SY-JZS还是XWY-TRS,其抗渗等级均已超过P30,满足规范和设计文件的要求;渗水高度SY-TRS<XWY-TRS<SY-JZS;抗渗性能SY-TRS>XWY-TRS>SY-JZS。

对于养护良好的混凝土来说,硬化水泥浆体的渗透性不是影响混凝土渗透的主要原因^[15],研究发现砂岩碎石和玄武岩碎石的吸水率都很低,界面过渡区作为混凝土最薄弱区域,抗渗性主要受到界面过渡区结构的影响。本文研究的3组混凝土水胶比、水泥、减水剂相同,工作性能一致,在对比时最大可能消除了这些因素的影响,集料特性成为影响界面过渡区进而影响混凝土抗渗性的主要因素,由文献

可知,集料大小影响着微观结构下集料周围的水胶比,集料粒径越大,其周围的水胶比越大^[16]。试验所用最大粒径同为20 mm的玄武岩碎石平均粒径大于砂岩碎石平均粒径,一部分水在大粒径集料周围聚集使XWY-TRS集料周围的水胶比大于SY-TRS,导致形成的界面过渡区空隙率相对偏大,结构相对疏松;对于粗集料同为砂岩碎石的SY-TRS和SY-JZS,SY-JZS渗水高度最大,这是由于SY-JZS表观密度最小,空隙率相对较大导致的。SY-JZS空隙率相对较大可能是因为砂岩硬度大,砂岩破碎成的机制砂多棱角,与砂岩碎石的填充不如天然砂密实,形成的混凝土空隙率相对较大,使SY-JZS渗透大于SY-TRS,由于SY-TRS水泥石结构和界面过渡区较为密实,而SY-JZS和XWY-TRS有部分孔洞和微裂缝的存在,某些连通的孔洞形成通道,水在压力作用下渗入混凝土中。

混凝土抗渗性试验中3种不同材料的混凝土试件密实,抗渗性能良好,表明砂岩碎石在混凝土中的应用可以配制出抗渗性能良好的混凝土,满足实际工程对抗渗性能的要求。

2.2 砂岩碎石混凝土抗氯离子渗透性

氯离子通过混凝土的孔隙进入混凝土内部,当其达到一定浓度时会引起混凝土内部钢筋和金属预埋件的锈蚀,导致承载力降低,存在安全风险,同时氯离子渗透还会造成混凝土的开裂、剥落等^[17-19]。氯离子在混凝土中移动的方法有多种,包括渗透、扩散、吸附、毛细作用等。在多种迁移方式中,扩散、渗透和毛细作用是最主要的3种迁移方式。本文采用电通量法测定混凝土中氯离子电通量,从而评价混凝土抗氯离子的渗透能力。分别在养护达到28 d和56 d时取出3种材料成型的混凝土试件进行抗氯离子渗透试验,试验结果如表5所示。

表5 氯离子渗透试验结果

试验编号	持续时间/h	28 d 试验结果					56 d 试验结果				
		电压值/V	平均温度/°C	通过的总电通量/C	换算成95 mm的总电通量/C	平均电通量/C	电压值/V	平均温度/°C	通过的总电通量/C	换算成95 mm的总电通量/C	平均电通量/C
SY-TRS	6	60.5	21.8	1 132	1 022		60.4	22.5	878	793	
	6	60.2	21.5	1 131	1 021	1 024	60.3	22.0	845	763	775
	6	60.9	22.7	1 140	1 029		60.7	22.3	852	769	
SY-JZS	6	60.6	22.6	1 490	1 345		60.3	22.2	1 258	1 135	
	6	60.5	22.4	1 483	1 338	1 340	60.5	21.8	1 256	1 134	1 134
	6	60.8	22.3	1 481	1 337		60.8	22.5	1 254	1 132	
XWY-TRS	6	60.2	21.1	1 353	1 221		60.7	21.5	1 176	1 061	
	6	60.6	22.5	1 342	1 211	1 214	60.9	21.4	1 204	1 087	1 072
	6	60.1	21.5	1 342	1 211		60.5	22.6	1 183	1 068	

由表5可知:

(1) 3种配合比的混凝土28 d、56 d电通量均为SY-JZS>XWY-TRS>SY-TRS。抗氯离子渗透性能均为SY-TRS>XWY-TRS>SY-JZS。

(2) 随着龄期的增加电通量有所降低,即氯离子渗透能力降低,并且SY-TRS降低最多。出现这种现象的原因是水泥的水化反应是长期反应的过程,在28 d时,还没有得到完全、充分的反应,部分区域比较薄弱,水泥石中的毛细管、混凝土中的孔径、孔的连通性较为明显等,氯离子电通量偏大;当达到56 d龄期,继续进行了一段时间的水化反应,薄弱区域部分由此得到增强,部分毛细管扭曲或者被水化产

物阻断,孔隙被水化产物进一步压缩或填充,混凝土内部结构微裂缝等缩小,混凝土抗氯离子渗透能力得到增强;另外SY-TRS混凝土表观密度大,空隙率小,水泥进一步反应的水化产物一部分形成稳定的结构,另一部分对孔隙进行填充,使得混凝土结构致密,氯离子不易侵入,故SY-TRS电通量下降最大。

有研究表明:普通混凝土的抗氯离子渗透性能与混凝土抗渗性能存在一定的正相关趋势^[20]。综合3种不同材料混凝土的电通量,抗氯离子渗透能力SY-TRS>XWY-TRS>SY-JZS,由于集料粒径影响到混凝土界面过渡区的结构,平均粒径较大的XWY-TRS相比SY-TRS界面过渡区有微孔洞和裂

缝产生,抗渗透性相对较差,导致氯离子渗入相对容易;另外,砂岩碎石的粒形相对规则,与天然砂形成的混凝土结构致密,空隙率较小,增加了抗氯离子渗透能力;砂岩机制砂比天然砂粗且多棱角,形成的砂岩碎石和砂岩机制砂混凝土外观密度小,空隙率相对较大,结构较疏松。

根据《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB 10005—2010)的评价指标对混凝土抗氯离子渗透性进行评价,如表6所示。

表6 混凝土电通量评价指标(56 d电通量)

混凝土强度等级	不同设计使用年限的电通量/C		
	100年	60年	30年
<C30	<1 500	<2 000	<2 500
C30~C45	<1 200	<1 500	<2 000
≥C50	<1 000	<1 200	<1 500

综合电通量试验结果和表6分析得:SY-TRS、XWY-TRS和SY-JZS的56 d电通量均小于1 200 C,满足100年的年限要求,这表明砂岩碎石配制的砂岩碎石混凝土具有良好的抗氯离子渗透能力。

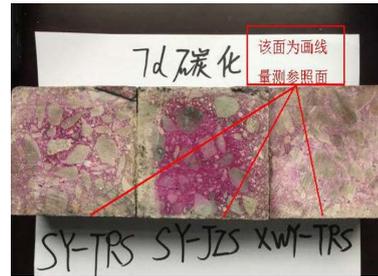
2.3 砂岩碎石混凝土抗碳化性

混凝土的抗碳化能力作为混凝土耐久性的重要指标,在评定外部环境条件尤其是空气对混凝土的作用时具有关键性的意义。混凝土的过度碳化会对混凝土的耐久性和力学强度产生较大损伤;混凝土碳化是化学作用的结果,将导致水泥石中的水化产物分解等^[21]。试验采用立方体试块,测试分为3 d、7 d、14 d、28 d共4个龄期,每个配合比为4组,每组3个试块。分别在3 d、7 d、14 d、28 d从试验设备中取出待测试件在未密封面喷上酚酞溶液,在30 s后用钢直尺进行测量,如图1所示,测量结果如表7所示。

由表7可知:SY-TRS、SY-JZS和XWY-TRS在试验3 d、7 d和14 d均未碳化,在试验进行到28 d时,SY-TRS仍无碳化,SY-JZS和XWY-TRS出现轻微的碳化,且碳化深度SY-JZS较大。这是因为受集料对混凝土结构的影响,通过对混凝土界面过渡区和水泥石结构的观察,SY-TRS结构最为致密,SY-JZS相对SY-TRS和XWY-TRS较为疏松,在结构致密程度上SY-TRS>XWY-TRS>SY-JZS;本文减水剂中适当加入了一定量的引气成分,引入空气产生了一些均匀微小不连通的气泡,混凝土的孔隙结构得



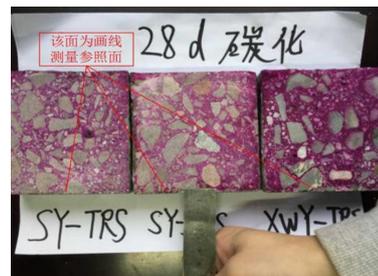
(a) 3 d



(b) 7 d



(c) 14 d



(d) 28 d

图1 碳化深度测量

表7 混凝土碳化深度测定结果

试件编号	不同龄期(d)的碳化深度/mm			
	3	7	14	28
SY-TRS	0	0	0	0
SY-JZS	0	0	0	2
XWY-TRS	0	0	0	1

到一定程度的优化,一些连通的通道被微小气泡隔断,阻止了CO₂的进入,从而在试验进行到28 d时只出现很小的碳化或者没有碳化的现象。

《混凝土耐久性检验评定标准》(JGJ/T 193—2009)规定混凝土碳化性能等级划分指标如表8所示。

表8 混凝土碳化性能等级划分

等级	碳化深度 d/mm
T-I	$d \geq 30$
T-II	$20 \leq d < 30$
T-III	$10 \leq d < 20$
T-IV	$0.1 \leq d < 10$
T-V	$d < 0.1$

将表7中碳化深度结果与表8碳化性能等级划分标准相对比可以发现:SY-TRS、SY-JZS和XWY-TRS都具有很好的抗碳化性能,并且抗碳化能力 $\text{SY-TRS} > \text{XWY-TRS} > \text{SY-JZS}$;按照表8混凝土碳化性能的等级划分,SY-TRS抗碳化性能评价等级为T-V,SY-JZS和XWY-TRS抗碳化性能评价等级为T-IV,这表明砂岩碎石可以配制出抗碳化性能良好的普通混凝土来满足工程的需要。

2.4 砂岩碎石混凝土抗硫酸盐侵蚀性

针对硫酸盐,以 SO_4^{2-} 计,当硫酸盐浓度较高时,容易与作为水泥石结构主要组分之一的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,导致水泥浆体的分解,引起混凝土的体积膨胀和开裂;混凝土空隙中结晶盐的存在也是混凝土产生膨胀的原因之一;硫酸盐从已破坏的混凝土位置持续掺入,引起混凝土更大程度的破坏,如此循环往复,导致混凝土强度渐渐丧失^[22]。依照设计文件和混凝土耐久性评价指标的要求,设计年限为100年时,抗硫酸盐侵蚀等级不低于KS120,本研究以KS120为临界等级,选用尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的立方体试块,每个配合比选择8组试件,每组3个,其中90次和120次干湿循环各两组,同龄期标准养护试件各两组,试验结果见图2。

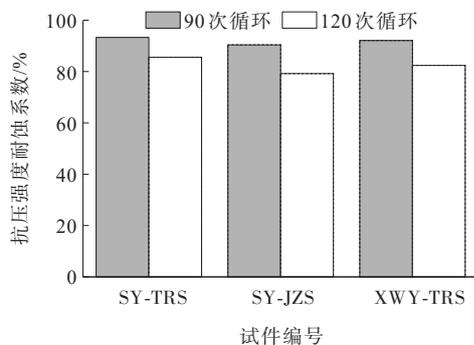


图2 抗硫酸盐腐蚀试验结果

由图2可知:在相同条件下,随着抗硫酸盐侵蚀循环次数的增加,混凝土耐蚀系数都有所下降,其中90次循环和120次循环时SY-TRS的抗压强度耐蚀系数最大,SY-JZS的抗压强度耐蚀系数最小,并且3组混凝土耐蚀系数均超过75%,满足设计使用年限100年的要求,抗硫酸盐侵蚀评价等级大于KS120,在达到120次循环次数时,SY-JZS耐蚀系数下降最多,混凝土劣化明显,SY-TRS和XWY-TRS都有不同程度的下降,整体上抗硫酸盐侵蚀性能 $\text{SY-TRS} > \text{XWY-TRS} > \text{SY-JZS}$ 。这是因为天然砂混凝土较砂岩机制砂混凝土更加密实,这些从水泥石和界面过渡区的微观形貌可以看出,在宏观上表现为天然砂混凝土具有更好的抗渗透性能,进入混凝土内部的 SO_4^{2-} 一般以水等液体作为载体,良好的抗渗性能使 SO_4^{2-} 不易进入混凝土内部与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应;另外,SY-JZS耐蚀系数下降迅速是因为在 SO_4^{2-} 反复多次作用下,混凝土表面浆体脱落、剥离,一部分渗透通道被打开,研究发现SY-JZS的水泥石结构密实性相对较差,微小孔洞和裂缝等比SY-TRS和XWY-TRS多,受集料级配、粒径和粒形等的影响,在试验过程中SY-JZS首先出现劣化,硫酸盐溶液缓慢进入混凝土内部发生化学反应,生成盐的结晶使体积膨胀,混凝土内部出现应力,当应力大于混凝土抗拉强度,混凝土出现裂缝,在接下来的过程中迅速劣化。

综合以上研究分析,砂岩碎石混凝土具有良好的抗硫酸盐侵蚀性能,天然砂混凝土抗硫酸盐侵蚀性能优于砂岩机制砂混凝土,砂岩碎石和天然砂混凝土优于玄武岩碎石和天然砂混凝土,并且3种不同材料的混凝土抗硫酸盐侵蚀性能均可以满足设计使用100年的年限要求,但SY-JZS抗硫酸盐侵蚀性能相对于SY-TRS和XWY-TRS较差。

2.5 砂岩碎石混凝土抗冻性

混凝土的抗冻性是指混凝土在水饱和状态下经受多次冻融循环作用,能保持外观完整性的能力^[23]。混凝土的冻融实际上是在饱和状态时,混凝土中的自由水在一定温度条件下结冰与融化的过程,水结冰会使体积膨胀约9%,结了冰的水趋向于把未冰冻水推向其他空间流动,形成静水压力^[24],体积膨胀产生的应力和静水压力导致混凝土内部产生裂缝,在

冻融循环作用下,裂缝逐渐扩展,当应力值大于混凝土抗拉强度,混凝土结构将发生破坏,使耐久性能降低。本文在冻融试验循环 250 次、300 次、350 次后取出混凝土试件,将试件表面擦拭干净后称取重量,然后对冻融后试块做抗压强度试验,同时从养护室中取出相同龄期的试件进行抗压强度试验,计算质量损失率和强度损失率,试验结果见图 3、4。

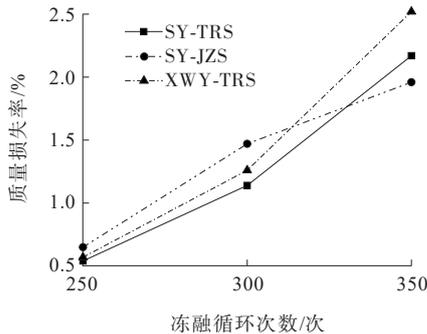


图 3 质量损失率

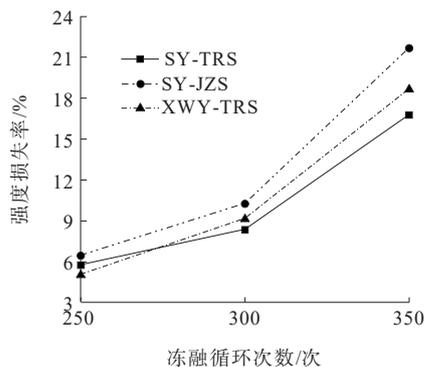


图 4 强度损失率

由图 3、4 可知:在冻融试验进行到 250 次循环时,试件性能下降明显,质量损失率 $SY-JZS > SY-TRS = XWY-TRS$,强度损失率 $SY-JZS > SY-TRS > XWY-TRS$,随着循环次数的增加,质量损失率和强度损失率逐渐增大,但是在 300 次循环到 350 次循环的过程中,SY-JZS 质量损失率增加相对较小,强度损失率增加最大;图像中每段直线的斜率表示质量损失的快慢,从图中可以看出:在循环 300 次以后,SY-JZS 的质量损失率增大较小,XWY-TRS 比 SY-TRS 质量损失率大且损失更快,3 种不同材料混凝土强度损失率的变化趋势基本一致,但强度损失速率 $SY-JZS > XWY-TRS > SY-TRS$,在冻融循环达到 350 次时,质量损失率均未超过 5%,强度损失率均未超过 25%。

综上所述,该砂岩碎石制备出的混凝土满足设计文件和规范对 II 类环境中混凝土抗冻性的要求,且抗冻性能 $SY-TRS > XWY-TRS > SY-JZS$,分析原因,一方面是因为未达到饱和状态的混凝土不易因为冰冻发生破坏,3 种不同材料的混凝土都具有良好的抗渗性能,一般条件下不易达到饱和状态,不易产生冰冻破坏,通过抗渗试验和前文对 3 组混凝土水泥石结构的观察发现,SY-TRS 的抗渗性最好且水泥石结构最致密,XWY-TRS 次之,外部水不易侵入,使混凝土不易达到饱和状态,从而 SY-TRS 抗冻性最好,SY-JZS 相对较差;配合比设计过程中在减水剂中适量添加的一部分引气成分,引入了一些封闭的气泡,在一定程度上优化了混凝土中的孔结构,封闭气泡为被推挤的未冰冻水提供了空间,缓解了水在水泥石中的迁移产生的静水压力,优化了 3 种不同材料混凝土的抗冻性能;冻融循环在 300 次到 350 次过程中 SY-JZS 质量损失率增大缓慢,是因为反复的冻融循环使混凝土结构产生了一定的破坏,试验仪器中的溶液渗入试件中,混凝土内部含水量增加,混凝土质量增加,从而使质量损失率增大变慢。利用该砂岩可以配制出满足抗冻性能的 C40 混凝土,但 SY-JZS 抗冻性能相对较差。

3 结论

(1) 砂岩碎石 C40 混凝土和玄武岩碎石 C40 混凝土很密实,抗渗等级很高,且均已超过 P30,完全满足工程项目对抗渗等级的要求;对比 3 种不同骨料的混凝土渗水高度,可以发现砂岩碎石与天然砂配制的混凝土抗渗水能力更好。

(2) 对比 3 种不同材料混凝土的 56 d 抗氯离子渗透试验的电通量,砂岩碎石与机制砂配制的混凝土电通量高于玄武岩碎石与天然砂配制的混凝土约 5.8%,砂岩碎石与天然砂配制的混凝土电通量比玄武岩碎石与天然砂配制的混凝土低 27.7%;3 组混凝土电通量均小于 1 200 C,满足设计使用年限 100 年的指标要求,且砂岩碎石与天然砂配制的混凝土抗氯离子渗透能力最好。

(3) 3 种不同骨料混凝土 28 d 碳化深度均不明显,都具有良好的抗碳化性能,其中砂岩碎石与机制砂配制的混凝土的碳化深度最大,为 2 mm,砂岩碎石

与天然砂配制的混凝土抗碳化性能评价等级为T-V,砂岩碎石与机制砂配制的混凝土和玄武岩碎石与天然砂配制的混凝土评价等级都为T-IV。

(4) 3种不同骨料混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能评价等级均大于KS120,满足工程设计使用年限100年的要求,且砂岩碎石与天然砂配制的混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能最好。

(5) 砂岩碎石制备出的混凝土满足设计文件和规范对Ⅱ类环境中混凝土抗冻性的要求,但砂岩—机制砂混凝土的抗冻性能相对较差。

参考文献:

- [1] 张子琴,杨华全,董云.骨料品种对水工混凝土变形特性的影响[J].混凝土,2018(6):84-88.
- [2] 孙江涛,吴定略,曹亮宏,等.混合砂高强高性能混凝土性能研究[J].混凝土,2019(9):146-149.
- [3] 苏杰,董芸,杨华全.骨料品种对混凝土界面结构及性能的影响[J].混凝土,2019(1):97-100.
- [4] 杨海成,叶小林,盛余飞,等.C55砂岩机制砂混凝土在肯尼亚蒙内铁路工程中的应用[J].新型建筑材料,2018,45(7):55-59.
- [5] 杨涛.广西砂岩沥青混凝土路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [6] 袁广学,陈黎,王林均,等.废弃混凝土和砖块混合物用作柔性路面材料的弹性模量预测[J].中外公路,2022,42(1):199-205.
- [7] 钱健,周琳,杨建冬,等.不同纤维改性石灰土的力学特性研究[J].中外公路,2022,42(5):203-208.
- [8] 彭冲.纳米偏高岭土对混凝土耐久性能的影响[J].中外公路,2022,42(3):242-247.
- [9] 王爱国,朱愿愿,徐海燕,等.混凝土用煤矸石骨料的研究进展[J].硅酸盐通报,2019,38(7):2076-2086.
- [10] 刘均利.混凝土桥梁耐久性评估与预测[D].长沙:湖南大学,2014.
- [11] 李崇智,祁艳军,何光明,等.机制砂石骨料与减水剂适应性的试验研究[J].建筑材料学报,2008,11(6):642-646.
- [12] 闫红光.硬质砂岩在四川广巴高速公路路面基层及底基层中的应用研究[D].西安:长安大学,2008.
- [13] 徐国良,王彩辉.结构混凝土耐久性影响因素的研究进展与探讨[J].材料导报,2013,27(11):111-117.
- [14] ABED M, NEMES R. Long-term durability of self-compacting high-performance concrete produced with waste materials[J]. Construction and Building Materials, 2019,212:350-361.
- [15] (美)P·库马尔·梅塔,(美)保罗·J·M·蒙蒂罗,著.混凝土微观结构、性能和材料[M].欧阳东,译.北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [16] 朱琳.扫描电子显微镜及其在材料科学中的应用[J].吉林化工学院学报,2007,24(2):81-84,92.
- [17] 王云.高抗氯离子侵蚀海砂混凝土的制备及性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.
- [18] DE MEDEIROS-JUNIOR R A, DE LIMA M G, DE MEDEIROS M H F. Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport[J]. Environment, Development and Sustainability, 2015, 17(5):1103-1119.
- [19] TITI H H, TABATABAI H. Effect of coarse aggregate type on chloride ion penetration in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162:871-880.
- [20] 于蕾.水泥混凝土的微观性能[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [21] LI G F, SHEN X D. A Study of the deterioration law and mechanism of aeolian-sand powder concrete in the coupling environments of freeze-thaw and carbonization[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2019, 127(8):551-563.
- [22] 杨全兵,杨钱荣.硫酸钠盐结晶对混凝土破坏的影响[J].硅酸盐学报,2007,35(7):877-880,885.
- [23] 陈虎.矿物复掺C60机制砂混凝土耐久性能研究[J].中外公路,2015,35(4):300-303.
- [24] 高国华,黄卫东,李传海.纳米SiO₂增强骨料裹浆对混凝土抗冻性能的改善[J].建筑材料学报,2021,24(1):45-53.