

粗骨料体积分数对模袋混凝土干燥收缩的影响研究

焦润豪, 车方驰, 王泽伟, 刘宏达, 娄宗科

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 粗骨料体积分数是模袋混凝土配合比设计的关键指标。开展了粗骨料体积分数在 0.30~0.36 的范围内对模袋混凝土扩展度、抗压强度和干燥收缩的影响研究, 以期为模袋混凝土衬砌渠道的抗裂性设计提供参考。结果表明: 在相同水胶比条件下随着粗骨料体积分数的增大, 模袋混凝土的扩展度总体呈现波动上升再平稳的趋势, 而低水胶比会使得扩展度更大; 在相同水胶比下, 随着粗骨料体积分数的增大, 模袋混凝土的 28 d 抗压强度总体呈先减小后增大的趋势, 而水胶比的降低会显著增大 28 d 抗压强度; 随着粗骨料体积分数的增大, 模袋混凝土的 28 d 干燥收缩率呈先减小后增加的趋势, 在粗骨料体积分数为 0.32 时有最小值, 而粗骨料体积分数分别为 0.30、0.34、0.36 时所对应的前 7 d 干燥收缩率均可达 28 d 总干燥收缩率的 50% 以上, 说明模袋混凝土的干燥收缩在早期增长较快。

关键词: 模袋混凝土; 干燥收缩; 粗骨料体积分数; 抗裂性设计; 抗压强度

中图分类号: TV431

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0176-06

Effect of volume fraction of coarse aggregate on drying shrinkage of mold bag concrete

JIAO Runhao, CHE Fangchi, WANG Zewei, LIU Hongda, LOU Zongke

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The volume fraction of coarse aggregate is a key index for the mix ratio design of mold bag concrete. In order to provide some reference for the crack resistance design of mold bag concrete lined channels, the influence of coarse aggregate on the slump flow, compressive strength and drying shrinkage of mold bag concrete is studied when the volume fraction of the aggregate falls in the range of 0.30–0.36. The results show that under the the same water–binder ratio, the overall slump flow of mold bag concrete rises with fluctuations and then stabilizes with the increase of the volume fraction of the coarse aggregate, and the lower the water–binder ratio the larger the slump flow. Under the same water–binder ratio, the volume fraction of coarse aggregate decreases first and then increases the 28 d compressive strength of mold bag concrete, whereas the decrease of water–binder ratio significantly increases the 28 d compressive strength. With the increase of the volume fraction of coarse aggregate, the 28 d drying shrinkage rate of mold bag concrete decreases first and then increases, and the minimum value is reached when the volume fraction is 0.32. The corresponding drying shrinkage rate of the first 7 days can reach more than 50% of the total drying shrinkage rate of 28 d when the volume fraction of coarse aggregate is 0.30, 0.34 and 0.36, indicating that the drying shrinkage of the mold bag concrete increases rapidly at the early stage.

Key words: mold bag concrete; drying shrinkage; volume fraction of coarse aggregate; crack resistance design; compressive strength

1 研究背景

模袋混凝土技术是指将大流动性且无需振捣即

可充满模型的混凝土灌注进土工模袋中的一种新技术, 模袋混凝土硬化后具有一定的强度和耐久性^[1], 可用于渠道衬砌和防渗等^[2]。通过向混凝土

收稿日期: 2021-11-09; 修回日期: 2022-04-21

基金项目: 陕西省大学生创新训练项目(S202010712479)

作者简介: 焦润豪(2000-), 男, 河北安国人, 本科生, 研究方向为水工结构材料。

通讯作者: 娄宗科(1962-), 陕西凤翔人, 硕士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为水工结构材料。

中添加粉煤灰、矿渣和减水剂可以得到具有良好工作性的模袋混凝土,但由于粗骨料用量较少,泵送施工和自密实对流动性要求比较高,用水量比较大,因此干燥后存在较大的收缩。出现在混凝土内部的干燥收缩会影响结构的耐久性^[3]。丁小平等^[4]认为,由于自干燥现象产生的自收缩,在有外部约束的情况下会有开裂的风险。

影响混凝土干燥收缩的因素较多,原料配比等的改变可能起主要作用^[5]。一般来说,骨料可以提供足够的约束来减少水泥浆体的收缩^[3],材料孔隙分布与孔结构的变化等也会影响混凝土的收缩性能^[6]。韩宇栋等^[7]发现粗骨料对干燥收缩的约束程度较为明显,在一定范围内干燥收缩会出现随粗骨料体积分数的增大而减小的现象。王欣^[8]发现在一定龄期内,砂率与干燥收缩率之间呈现出较好的线性关系。付立彬等^[9]研究表明,试件收缩前期会出现膨胀阶段,增加砂率可以减少收缩值。Zhu等^[10]认为收缩主要受包裹层厚度和粗骨料约束的影响,在一定范围内,随着粗骨料体积的减小,砂浆包裹层厚度增加,混凝土的收缩明显增大。周敏等^[11]研究发现养护制度也会对混凝土干缩产生影响,28 d内标准养护时间越短,测得的混凝土干燥收缩程度越大。段承刚等^[12]则发现,改变掺合料的掺和方法,对减小干燥收缩有一定帮助。Choi^[13]认为混凝土的干缩受其内部相对湿度减小和弹性模量的影响,即与内部相对湿度的减小量成正比,与混凝土中硬化构件(包括粗骨料)的弹性模量成反比。Gao等^[14]认为粗骨料对砂浆相的干燥收缩会产生抑制作用。

相关研究已表明,粗骨料的体积分数对混凝土的干燥收缩值影响较大^[7],并且混凝土干燥收缩以早期收缩为主^[15-19];同时,有研究指出,目前关于模袋混凝土抗裂性能的研究仍较少^[20]。鉴于此,本文主要研究了模袋混凝土的粗骨料体积分数与干燥收缩之间的关系,分析了模袋混凝土干燥收缩随龄期的变化规律,以期对模袋混凝土的抗裂性设计提供参考。

2 材料与方法

2.1 试验原材料

混凝土用砂取自于陕西省渭河砂场,其属于中砂,经测量,表观密度为 2.63 g/cm^3 ;粗骨料为渭河中的卵石,过筛后粒径为 $5\sim 30\text{ mm}$,表观密度为 2.65 g/cm^3 ;粉煤灰采用陕西省大唐卢县电厂生产

的Ⅱ级粉煤灰,密度为 2.30 g/cm^3 ;矿渣采用河南省巩义市龙泽净水材料公司S95级矿渣,密度为 2.89 g/cm^3 ;水泥采用陕西省冀东水泥厂生产的“盾石”牌P.042.5水泥,表观密度为 3.10 g/cm^3 ;减水剂和引气剂分别选用北京华石纳固公司生产的HSNG-T型聚羧酸减水剂和天津市北辰方正试剂厂生产的十二烷基硫酸钠。

2.2 试验方法

按照相关规范^[21-23]的要求测量混凝土的坍落扩展度,制成试块经养护后,分别测量7、28 d龄期的抗压强度以及28 d龄期的干燥收缩程度,干燥收缩率按照规范要求的计算方法进行计算。混凝土的干燥收缩采用SRFM-860M型非接触式全自动混凝土收缩膨胀仪进行测量,测量方法是将试块拆模后固定到仪器的装置底部,启动仪器,每隔32 min记录1次数据,再计算得出混凝土试块28 d内的干燥收缩率。

2.3 试验设计

以混凝土试样扩展度和28 d的抗压强度为指标,研究了粗骨料体积分数和水胶比的影响。之后固定水胶比为0.40,测量计算28 d内不同粗骨料体积分数的模袋混凝土干燥收缩率随时间的变化情况。在单位体积水质量不变的情况下,采用绝对体积法设计了15组配合比,见表1,表1中B-0.30、B-0.32、B-0.34和B-0.36 4组试样用于干燥收缩试验。在15组试样中设3种水胶比,分别为0.35、0.40和0.45,设5种粗骨料体积分数,分别为0.28、0.30、0.32、0.34、0.36,减水剂掺量均为0.5%,试验因素水平见表2。另外,采用粉煤灰与矿渣复掺的方法,该方法不仅可以改善混凝土拌和物的性能,而且能够提高混凝土的早期强度,达到优势互补、节约资源的综合效果^[24]。为了使混凝土得到优良的工作性能和抗压强度,在各组混凝土试样的配合比设计中,控制粉煤灰的掺量为30%、矿渣的掺量为20%不变^[25]。

3 结果与分析

试验测得的各组模袋混凝土试样的扩展度和28 d龄期的抗压强度见表3,3、7、14和28 d龄期各组模袋混凝土试样的干燥收缩率见表4。

3.1 粗骨料体积分数对模袋混凝土扩展度和抗压强度的影响

水胶比分别为0.45、0.40和0.35时,模袋混凝土的扩展度随粗骨料体积分数的变化情况见图1。

表 1 混凝土试块设计配合比

试块编号	水胶比	粗骨料体积分数	配合比 / (kg · m ⁻³)						
			水	水泥	粉煤灰	矿渣	砂	粗骨料	减水剂
A-0.28	0.45	0.28	160	178	107	71	1030	742	1.8
A-0.30		0.30	160	178	107	71	977	795	1.8
A-0.32		0.32	160	178	107	71	925	848	1.8
A-0.34		0.34	160	178	107	71	872	901	1.8
A-0.36		0.36	160	178	107	71	820	954	1.8
B-0.28	0.40	0.28	160	200	120	80	988	742	2.0
B-0.30		0.30	160	200	120	80	935	795	2.0
B-0.32		0.32	160	200	120	80	883	848	2.0
B-0.34		0.34	160	200	120	80	830	901	2.0
B-0.36		0.36	160	200	120	80	778	954	2.0
C-0.28	0.35	0.28	160	229	137	91	934	742	2.3
C-0.30		0.30	160	229	137	91	881	795	2.3
C-0.32		0.32	160	229	137	91	828	848	2.3
C-0.34		0.34	160	229	137	91	776	901	2.3
C-0.36		0.36	160	229	137	91	723	954	2.3

表 2 试验因素水平

水平	因素	
	粗骨料体积分数	水胶比
1	0.28	0.45
2	0.30	0.40
3	0.32	0.35
4	0.34	
5	0.36	

表 3 各组模袋混凝土的扩展度和 28 d 龄期抗压强度

试样编号	粗骨料体积分数	水胶比	28 d 抗压强度/MPa	扩展度/mm
A-0.28	0.28	0.45	38.99	200
A-0.30	0.30	0.45	36.16	200
A-0.32	0.32	0.45	35.49	550
A-0.34	0.34	0.45	38.54	500
A-0.36	0.36	0.45	36.01	440
B-0.28	0.28	0.40	45.92	200
B-0.30	0.30	0.40	46.68	300
B-0.32	0.32	0.40	40.32	625
B-0.34	0.34	0.40	47.80	605
B-0.36	0.36	0.40	43.30	630
C-0.28	0.28	0.35	51.66	200
C-0.30	0.30	0.35	45.09	455
C-0.32	0.32	0.35	48.18	200
C-0.34	0.34	0.35	54.49	625
C-0.36	0.36	0.35	54.90	360

表 4 各组模袋混凝土试样不同龄期的干燥收缩率

试样编号	粗骨料体积分数	不同龄期的干燥收缩率/10 ⁻⁶			
		3 d	7 d	14 d	28 d
B-0.30	0.30	200	387	507	727
B-0.32	0.32	62	157	260	420
B-0.34	0.34	175	305	410	555
B-0.36	0.36	222	365	450	665

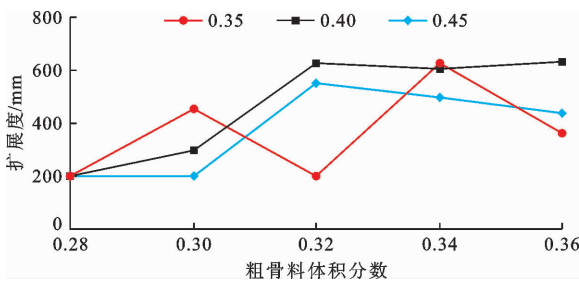


图 1 不同水胶比条件下模袋混凝土的扩展度随粗骨料体积分数的变化情况

由表 3 和图 1 可以看出,在相同水胶比条件下随着粗骨料体积分数的增大,模袋混凝土的扩展度总体呈波动上升再基本平稳的趋势,而低水胶比会使得扩展度更大;粗骨料体积分数为 0.32 ~ 0.34 时,混凝土的扩展度较高,粗骨料体积分数或砂率取过高或者过低值均不利于扩展度的提高。曹振声等^[26]研究认为随着砂率的增加,骨料比表面积增大,骨料的净浆膜厚度变薄,使得混凝土的流动性降低。混凝土内的粗骨料体积分数在一定范围减小

时,包裹粗骨料的砂浆层厚度增加,从而增大了润滑作用,同时降低了颗粒之间的摩擦和碰撞,使得混凝土的扩展度得以提高。另一方面,当粗骨料体积分数过小时,由于砂子的比表面积较大,使骨料的总表面积增大,又会导致包裹骨料的浆体层变薄,润滑度下降,并且砂子的吸水量也增大,最终会造成扩展度的降低^[27]。在工程应用中应结合实际需要调整混凝土的扩展度。

粗骨料体积分数分别为0.28、0.30、0.32、0.34和0.36时,模袋混凝土的扩展度随水胶比的变化情况见图2。

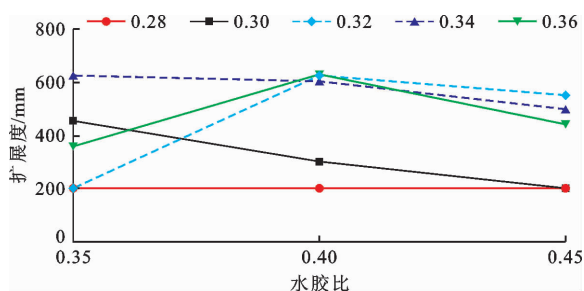


图2 不同粗骨料体积分数条件下模袋混凝土的扩展度随水胶比的变化情况

由图2可以看出,在不同粗骨料体积分数的情况下,随着水胶比的变化,模袋混凝土的扩展度的变化趋势是不同的。在较低的粗骨料体积分数的情况下,扩展度随水胶比的变化不大;而在较高的粗骨料体积分数的情况下,混凝土的扩展度随水胶比的变化呈现出先增后减的趋势,但减小的幅度不大。石建军等^[28]研究发现,在一定的条件下,随着水胶比的增加,混凝土的扩展度先增大后减小,水胶比对自密实混凝土的扩展度影响存在饱和点。水泥含量较高时,随着水胶比的增加,水泥粒子间相对距离增大,导致较大的拌合物塑性扩展^[29]。

水胶比分别为0.45、0.40和0.35时,模袋混凝土28 d龄期的抗压强度随粗骨料体积分数的变化情况见图3。

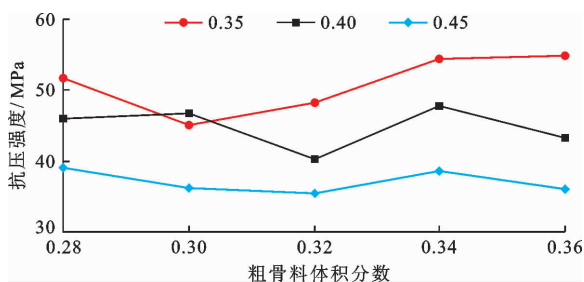


图3 不同水胶比条件下模袋混凝土28 d龄期的抗压强度随粗骨料体积分数的变化情况

由表3和图3可以看出,在相同水胶比下,随着粗骨料体积分数的增大,28 d龄期模袋混凝土的抗压强度总体呈先减小后增大的趋势,而水胶比的减小会显著增大其抗压强度。对于B组混凝土(水胶比为0.40),只有在粗骨料体积分数为0.32时抗压强度较低,抗压强度值为40 MPa,比同组抗压强度最高值减小约15%。总体而言,试验中粗骨料体积分数对模袋混凝土的抗压强度影响不大,可能是因为在本次试验中粗骨料体积小,粉煤灰用量大。同时也可以看到,对于C组混凝土(水胶比为0.35),当粗骨料体积分数从0.30增加到0.36时,28 d龄期的抗压强度有小幅增长,这是因为粗骨料的间距减小,密实度增大,粗骨料的架构作用增强^[30]。

3.2 粗骨料体积分数对模袋混凝土干燥收缩率的影响

龄期分别为3、7、14和28 d时,模袋混凝土的干燥收缩率随粗骨料体积分数的变化情况见图4。

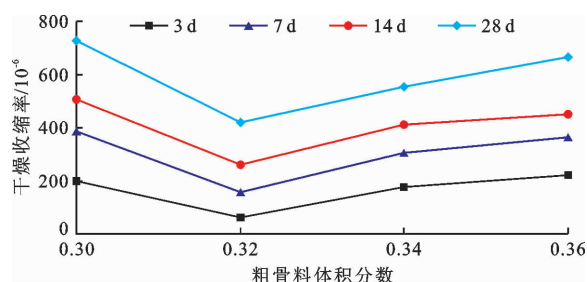


图4 不同龄期模袋混凝土的干燥收缩率随粗骨料体积分数的变化情况

由表4和图4可以看出,当粗骨料体积分数从0.30增加到0.32时,各龄期模袋混凝土的干燥收缩率明显减小,而从0.32再增加时,干燥收缩率则明显增大。据Pittman等^[31]的研究成果,当粗、细骨料体积比为1:1左右且含水率适当的条件下,混凝土28 d龄期的干燥收缩最低。有研究表明,3-参数颗粒填充(压实)模型预测细骨料在骨料总体积的比例约为0.5时,即达到最大堆积密度^[32]。另一方面,提高湿堆积密度可以减小毛细孔体积,从而减小干燥收缩^[33]。可能是由于粗、细骨料比例的变化,达到了湿堆积密度的最大值,使得含水量减少与水泥浆总量减小,进而达到混凝土干燥收缩的最小值。粗骨料体积分数在一定范围内时,混凝土干燥收缩的发展是从其内部相对湿度的下降后开始的,因此会有中长期的干燥收缩发展,此时粗骨料含量的增大会约束混凝土干燥收缩的发展^[7]。

3.3 龄期对模袋混凝土干燥收缩的影响

试验测得的B-0.30、B-0.32、B-0.34、B-0.36

4 组试样在 28 d 龄期内的干燥收缩率见图 5。

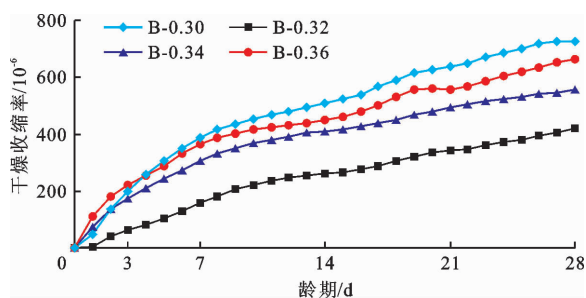


图 5 B-0.30、B-0.32、B-0.34、B-0.36 4 组试样在 28 d 龄期内的干燥收缩率变化

从图 5 可见,模袋混凝土的干燥收缩率随龄期基本呈现出两个阶段的发展特征:第 1 阶段为快速增长期,在前 7 d 左右模袋混凝土基本表现出收缩快速增长的现象,即模袋混凝土早期的干燥收缩发展比较集中;第 2 阶段为平缓增长期,在 7~28 d 期间,模袋混凝土的收缩速率逐渐减小,干燥收缩率随时间平稳增大并伴有阶段性的小幅波动。另外,在模袋混凝土试样浇筑早期,其还呈现出先经过短暂的膨胀后再进入收缩变形发展的特征,4 组试样的最大膨胀值均不超过 90×10^{-6} ,最长的膨胀历时不超过 1 d;最小膨胀值约为 30×10^{-6} ,最短的膨胀时间不超过 8 h。由于水泥与水发生剧烈的反应,早期混凝土内部的水分处于过饱和状态,导致产物的体积超过了反应物的体积,因此早期混凝土处于膨胀状态^[34]。在 4 组试样中,B-0.30 组模袋混凝土收缩相对较快,随时间的增长与其他 3 组干燥收缩率的差值逐渐增大,7 d 时该组的干燥收缩率已接近 400×10^{-6} ,占到了该组 28 d 总干燥收缩率的约 53%,其 28 d 干燥收缩率达到了 727×10^{-6} ,比 B-0.32 组高约 73%。B-0.32 组模袋混凝土收缩相对较慢,干燥收缩率较小,第 1 阶段快速增长期不明显,前 7 d 的干燥收缩率不超过 157×10^{-6} ,占该组 28 d 总干燥收缩率的约 37%,其 28 d 干燥收缩率在 4 组试样中最小,为 420×10^{-6} 。B-0.34 组模袋混凝土的 7 d 干燥收缩率约为 305×10^{-6} ,占该组 28 d 总干燥收缩率的近 55%,其 28 d 干燥收缩率达 555×10^{-6} 。B-0.36 组模袋混凝土的 7 d 干燥收缩率约为 365×10^{-6} ,占该组 28 d 总干燥收缩率的约 55%,其 28 d 干燥收缩率为 665×10^{-6} 。干燥收缩在早期发展较快主要是因为早期失去的水分为毛细孔内水,这些水分的损失相对于后期的吸附水和层间水克服的阻力较小^[35]。模袋混凝土干燥收缩受到多种因素的影响,工程中应考虑实际情况,减小模袋混凝土干燥收缩对结构的影响。

4 讨 论

模袋混凝土自身的材料组成导致了其早期易于收缩开裂的问题,而粗骨料体积分数则是模袋混凝土配合比设计的关键参数,会对其性能产生显著影响。随着模袋混凝土粗骨料体积分数从 0.30 增加到 0.32,28 d 干燥收缩率呈减小趋势,这与 Zhu 等^[10]的研究结果相似,而随着模袋混凝土粗骨料体积分数从 0.32 增加到 0.36,其 28 d 干燥收缩率呈增大的趋势,这与张金^[36]的研究结果相似。由于干缩是由水泥毛细孔周围水分的流失引发的,混凝土试件的干缩应变随着失水量的增加而增大,因此,增加单位水和水泥掺量会导致毛细含水量的增加,从而产生更大的收缩应变。模袋混凝土的干燥收缩可能与其湿堆积密度有关,有模型预测当粗骨料体积比达到约为 1:1 时,会达到最大堆积密度^[32]。通过更好地填充集料来提高湿填充密度,可以减少填充集料空隙所需的胶凝浆体体积,从而减少干燥收缩。可能是由于在粗骨料体积分数为 0.32 左右时,湿堆积密度达到了最大值,填充空隙所需的水泥浆减少,因而模袋混凝土的干燥收缩率也相应减小。

5 结 论

(1)在水胶比不变的条件下,随着粗骨料体积分数的增大,模袋混凝土的扩展度总体呈现波动上升再基本平稳的趋势,而低水胶比会使得扩展度更大;粗骨料体积分数为 0.32~0.34 时,混凝土的扩展度较高,粗骨料体积分数或砂率太大或者太小均不利于扩展度的提高。

(2)在相同的水胶比条件下,模袋混凝土 28 d 龄期的抗压强度随粗骨料体积分数的增大总体呈先减小后增大的趋势,而水胶比的降低会显著增大混凝土 28 d 龄期的抗压强度。

(3)随着粗骨料体积分数的增大,模袋混凝土 28 d 干燥收缩率表现为先减小后增大的趋势,干燥收缩率最小值所对应的粗骨料体积分数为 0.32,对应的最小值为 420×10^{-6} 。模袋混凝土的干燥收缩率在前 7 d 的增加较快,7 d 干燥收缩率最高可占 28 d 干燥收缩率的 55%,该比例随粗骨料体积分数的变化基本保持不变。28 d 干燥收缩率随粗骨料体积分数的变化量最高可达约 300×10^{-6} 。

参考文献:

- [1] 于峰,姜宗科,姚汝方,等.消泡剂和增稠剂复掺对模袋混凝土抗冻性的影响[J].复合材料学报,2021,38(3):

- 879-890.
- [2] 李和. 模袋混凝土护坡在河道交汇处工程中的应用[J]. 水利技术监督, 2017, 25(5): 133-136.
- [3] MAGHFOURI M, SHAFIGH P, ALIMOHAMMADI V, et al. Appropriate drying shrinkage prediction models for lightweight concrete containing coarse agro-waste aggregate[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 101148.
- [4] 丁小平, 张君, 韩宇栋, 等. 考虑内养护剂动态释水的混凝土自干燥计算模型[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(3): 242-247.
- [5] 缪昌文, 穆松. 混凝土技术的发展与展望[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(1): 1-11.
- [6] 王玉清, 刘潇, 刘曙光. PVA-FRCC收缩性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1289-1296.
- [7] 韩宇栋, 张君, 王家赫, 等. 基于粗骨料含量的混凝土早龄期收缩调控[J]. 混凝土, 2017(1): 56-62.
- [8] 王欣. 砂率对高强再生混凝土的力学及干燥收缩性能影响研究[J/OL]. 中国测试, (2022-04-19) [2022-06-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20211130.2133.027.html>.
- [9] 付立彬, 肖保辉, 付娟. 再生与天然骨料透水混凝土收缩性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(2): 32-35.
- [10] ZHU Wen, WEI Jiangxiong, LI Fangxian, et al. Understanding restraint effect of coarse aggregate on the drying shrinkage of self-compacting concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 458-463.
- [11] 周敏, 杨腾宇, 宋普涛, 等. 养护制度及加载龄期对C60混凝土干缩及徐变性能的影响[J]. 混凝土, 2021(6): 44-46+52.
- [12] 段承刚, 孙永涛. 复掺高性能矿物掺合料对高强机制砂混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2296-2305.
- [13] CHOI S. Internal relative humidity and drying shrinkage of hardening concrete containing lightweight and normal-weight coarse aggregates: A comparative experimental study and modeling[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 288-296.
- [14] GAO Peng, CHEN Yang, HUANG Haoliang, et al. Effect of coarse aggregate size on non-uniform stress/strain and drying-induced microcracking in concrete[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 108880.
- [15] 郭向勇, 李伟龙, 王建军. EPS轻混凝土干燥收缩性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(2): 68-72.
- [16] 张奕, 陆飞, 毛江鸿, 等. 复掺矿物掺合料对混凝土收缩徐变的影响规律及应用[J]. 混凝土, 2021(3): 90-95.
- [17] 张登祥, 蒋晓明. 大流动性高强轻集料混凝土约束收缩及抗裂性能研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(5): 190-196.
- [18] 黄维蓉, 杨玉柱, 崔通, 等. 含粗骨料超高性能混凝土收缩变形性能的研究[J]. 混凝土, 2021(8): 99-103.
- [19] 葛智, 刘相阳, 李秋义, 等. 再生细骨料自密实混凝土收缩性能研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(S1): 677-681.
- [20] 丁亚楠, 娄宗科. 模袋混凝土抗裂性能影响因素分析与评价[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 92-94+82.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 自密实混凝土应用技术规程: JGJ/T 283—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 8.
- [22] 混凝土物理力学性能试验方法标准(附条文说明): GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 12.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [24] 杨华全, 董维佳, 王仲华. 掺矿渣微粉和粉煤灰的混凝土性能试验研究[J]. 人民长江, 2001, 32(11): 30-31+55.
- [25] 谢天逸, 娄宗科, 霍轶珍, 等. 粉煤灰与矿渣复掺对渠道衬砌模袋混凝土流动性和力学性能的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 32-36.
- [26] 曹振生, 赵高锦, 何宏龙, 等. 机制砂自密实混凝土泵送性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(9): 16-20.
- [27] 史星祥, 刘远祥, 濮琦, 等. 高效减水剂和粉煤灰对自密实混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(12): 14-18.
- [28] 石建军, 凌颜, 张志恒, 等. 基于正交试验的自密实重晶石混凝土配合比设计及性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(12): 15-19.
- [29] 罗远彬, 郑愚, 周玲珠, 等. 超高聚丙烯纤维自密实混凝土的配制及其性能探讨[J]. 混凝土, 2020(12): 118-122+126.
- [30] 葛培, 黄伟, 李萌. 再生砖骨料混凝土架构模型试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(1): 10-19.
- [31] PITTMAN D W, RAGAN S A. Drying shrinkage of roller-compacted concrete for pavement applications[J]. Materials Journal, 1998, 95(1): 19-26.
- [32] GARCÍA-CORTÉS V, ESTÉVEZ D G, SAN-JOSÉ J T. Assessment of particle packing models for aggregate dosage design in limestone and EAFS aggregate-based concretes[J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 126977.
- [33] LAI M H, BINHOWIMAL S A M, GRIFFITH A M, et al. Shrinkage design model of concrete incorporating wet packing density[J]. Construction and Building Materials, 2021, 280: 122448.
- [34] 刘斯凤, 王培铭, 张林. 掺和料和聚羧酸减水剂对C30高性能混凝土0~24h收缩规律的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1): 88-92.
- [35] 吴林妹, 史才军, 张祖华, 等. 钢纤维对超高性能混凝土干燥收缩的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 58-65.
- [36] 张金. 水泥类型和砂对高性能混凝土的性能影响及开裂风险分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.