

基于密级配理论的低塑性混凝土力学与收缩性能研究

银翼

新疆水发瑶池项目管理有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18940

[摘要] 本文针对大流动性混凝土易收缩开裂、匀质性差的问题,提出采用低塑性混凝土作为解决方案。通过Bolomey密级配理论优化骨料级配,设计了低塑性混凝土(M组),并与常规泵送混凝土(B组)进行对比试验。研究测试了两种混凝土的抗压强度、静力受压弹性模量及分层收缩应变性能。结果表明:在相同水胶比(0.32)下,低塑性混凝土7d和28d抗压强度分别为27.3MPa和39.5MPa,高于泵送混凝土;其28d弹性模量达32.5GPa,较泵送混凝土提高20.4%,且数据离散性更小。分层收缩试验显示,低塑性混凝土28d上层收缩值为337.72 $\mu\epsilon$,较泵送混凝土降低25.6%,层间收缩差异减小43.7%。研究表明,基于密级配理论的低塑性混凝土具有更优的力学性能、更高的刚度与体积稳定性,能有效抑制收缩开裂,提升结构均匀性与耐久性,适用于水利工程等对性能要求较高的场合。

[关键词] 密集配; 低塑性; 匀质性; 分层收缩应变

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research on the Mechanical and Shrinkage Properties of Low Plasticity Concrete Based on the Theory of Dense Gradation

Yi Yin

Xinjiang Shuifa Yaochi Project Management Co., Ltd.

[Abstract] This paper addresses the issues of shrinkage cracking and poor homogeneity in high-fluidity concrete, proposing the use of low-plasticity concrete as a solution. By optimizing the aggregate gradation using the Bolomey dense gradation theory, a low-plasticity concrete (Group M) was designed and compared with conventional pumping concrete (Group B) in a comparative test. The compressive strength, static compressive elastic modulus, and stratified shrinkage strain performance of the two types of concrete were tested. The results showed that, at the same water-binder ratio (0.32), the 7-day and 28-day compressive strengths of low-plasticity concrete were 27.3 MPa and 39.5 MPa, respectively, which were higher than those of pumping concrete. Its 28-day elastic modulus reached 32.5 GPa, an increase of 20.4% compared to pumping concrete, and the data showed less dispersion. The stratified shrinkage test revealed that the 28-day upper layer shrinkage value of low-plasticity concrete was 337.72 $\mu\epsilon$, a decrease of 25.6% compared to pumping concrete, and the difference in shrinkage between layers was reduced by 43.7%. The study indicated that low-plasticity concrete based on the dense gradation theory possesses superior mechanical properties, higher stiffness, and volume stability, effectively inhibiting shrinkage cracking and enhancing structural uniformity and durability. It is suitable for applications with high performance requirements, such as hydraulic engineering.

[Key words] Dense Distribution; Low Plasticity; Homogeneity; Stratified Shrinkage Strain

前言

随着工业的发展,大流动性混凝土^[1]凭借其优异的和易性在工程应用中越来越多,其提升了施工现场的泵送效率与浇筑便捷性,降低了施工成本,却也伴随着增加的收缩开裂风险的挑战。更为严重的是,混凝土的匀质性受损会导致各部位收缩不均^[2],加剧收缩裂缝的形成,降低混凝土强度,对结构承载能力

及安全性能构成威胁,且振捣后产生的浮浆层在硬化后强度不足,进一步削弱了混凝土的整体性能。针对上述问题,运用低塑性混凝土是一个有效解决方法。低塑性混凝土指坍落度不超过40mm的混凝土。该混凝土以其材料组成的稳定性和较低的用水量及胶凝材料含量^[3]而著称,这种配比有效减少了混凝土在硬化过程中因水分蒸发引起的收缩和裂缝问题。在搅拌与浇筑阶

段,低塑性混凝土能够确保骨料在水泥浆体中均匀分布,抑制了骨料的聚集与离析现象,提升了混凝土的整体质量。

综上所述,为了保障工程质量及低塑性混凝土在水利工程中的广泛应用,本研究探讨了泵送混凝土与低塑混凝土在物理性能上的差异,通过混凝土立方体抗压强度试验、混凝土静力抗压弹性模量试验、混凝土分层收缩应变等试验,对比分析两者性能上的差异。

1 材料与方法

1.1 试验所用原材料

试验水泥为阜康天山水泥厂生产的P·HSR42.5水泥,符合《抗硫酸盐硅酸盐水泥》(GB/T748-2023)强度等级技术要求。粉煤灰为阜康市联众新型建材厂生产的II级灰,符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T1596-2017)中II级粉煤灰技术要求。减水剂、引气剂均为新疆五家渠格辉科技有限公司生产的产品,满足其规范指标。粗骨料(5-20mm,20-40mm)为乌鲁木齐中沐砂场生产天然料,细骨料为阜康市中沐砂场天然砂,细度模数2.8,级配良好,属于II区中砂。

1.2 密集配理论

试验采用的Bolomey模型^[4],是常用的二级配曲线拟合方法,以实现骨料级配的优化。该理论认为,当骨料的颗粒级配能够达到使空隙率最小、堆积密度最大时,所配制的混凝土能获得最优性能。通过合理搭配不同粒径的骨料,让小颗粒骨料填充大颗粒骨料之间的空隙,中等颗粒再填充剩余部分空隙,以此类推,从而实现骨料堆积的最大密实度。根据粗细骨料颗粒级配试验结果,套用Bolomey模型规划求解得出最优配比为砂:小石:中石=43.33%:28.19%:28.48%。该比例混合料测得堆积密度为1890kg/m³,根据堆积密度及骨料饱和面干表观密度得出该混合料的空隙率为27.5%。

1.3 试验配合比

试验配合比首先依照SL/T352-2020《水工混凝土试验规程》^[5]进行了泵送混凝土的设计,如表1-1所示,后续采用密级配理论进行了低塑性混凝土的设计,如表1-2所示。

表1-1泵送混凝土配合比设计

编号	水胶比	水泥(kg/m ³)	粉煤灰掺量(%)	砂率(%)	坍落度(mm)	含气量(%)	抗压强度(MPa)		引气剂(%)	减水剂(%)
							7d	28d		
B1	0.28	420	20	36	170	3.8	41.8	55.7	0.015	1.5
B2	0.31	366		38	210	3.9	29.4	40.7		
B3	0.34	326		39	230	5.7	23.0	33.5		

表1-2低塑性混凝土配合比设计

编号	水胶比	水泥(kg/m ³)	粉煤灰掺量(%)	砂率(%)	坍落度(mm)	含气量(%)	抗压强度(MPa)		引气剂(%)	减水剂(%)		
							7d	28d				
M1	0.27	355	20	/	40	3.6	34.2	49.8	0.05	0.9		
M2	0.30	339			50	3.4	29.8	43.9			0.04	0.7
M3	0.35	314			140	4.5	23.2	34.3			0.04	0.6

根据上述抗压强度结果,结合工程部位混凝土所需强度C30的条件下,最终设计配合比情况如表1-3所示。

表1-3混凝土配合比设计

编号	水胶比	含气量(%)	坍落度(mm)	砂率(%)	每立方米混凝土各项材料用量(kg)				
					水泥	粉煤灰	砂子	小石	中石
M	0.32	4.1	210	38	342	85	647	631	421
B	0.32	5.0	90	44	329	82	819	533	538

1.4 试验方法

抗压强度参照SL/T352-2020《水工混凝土试验规程》所规定的试验方法进行。静力受压弹性模量试验参考GB/T50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》采用应变片测量。成型脱膜后送入相对温度为20℃±2℃,相对湿度为60%±5%的空间养护。测试时将规格合适的应变片竖向贴在混凝土两侧表面,应变片中心位置15cm,试验过程中使用万能材料试验机与静态信号测试分析系统进行数据采集。干缩应变试验参考GB/T50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》采用应变片测量,试件规格为自制300*150*300mm的棱柱体。24h时试件脱膜,表面处理后将应变片横向贴在试件表面由上至下为5cm、15cm、25cm的相对位置标注为上、中、下送入规范要求的养护空间进行后续为期28d的监测。

2 结果与分析

2.1 混凝土抗压试验

在养护临期到达7d和28d时,取出试块测试其抗压强度,结果如表2-1所示。

表2-1混凝土抗压试验结果

序号	7d				28d			
	单值		均值		单值		均值	
B	25.9	26.7	25.7	26.1	35.8	35.3	38.7	37.5
M	27.2	27.4	27.3	27.3	39.7	39.6	39.2	39.5

由表2-1可知,密集配混凝土7d时的抗压强度为27.3Mpa,28d时的抗压强度为39.5Mpa,泵送混凝土7d时的抗压强度为26.1Mpa,28d时的抗压强度为37.5Mpa。可以发现,密集配混凝土7d时的抗压强度比泵送混凝土高1.2Mpa,28d时高2Mpa,这是由于密集配通过精心设计的骨料级配,使粗、细骨料达到最紧密堆积状态,骨料间的空隙最小化,减少了填充空隙所需的胶凝材料浆体量,骨料骨架更加稳定,承载能力更强,同时水化后形成了更致密的结构,内部孔隙和缺陷减少,微观结构更加均匀。

2.2 混凝土弹性模量试验

混凝土静力受压弹性模量试验是评价混凝土在静力荷载作用下弹性变形能力的关键试验,直接关系到混凝土结构的变形计算、刚度设计及抗裂性能评估。本次试验依据GB/T50081-2019《混凝土物理力学试验方法标准》中静力受压弹性模量试验进行,试验结果见表2-2。

表2-2混凝土静力受压弹性模量试验结果(Gpa)

序号	7d				28d			
	单值			均值	单值			均值
B	20.0	21.5	21.2	20.9	26.5	27.3	27.2	27.0
M	25.4	24.9	25.0	25.1	32.5	32.3	32.7	32.5

根据表2-2可知, 泵送混凝土7d时静力受压弹性模量为20.9Gpa比低塑混凝土(25.1Gpa)小4.2Gpa, 28d时为27.0Gpa比低塑混凝土(32.5)小5.5Gpa。首先对于密集配混凝土静力受压弹性模量高于泵送混凝土来说, 这是因为密集配混凝土通过优化骨料级配, 减少了浆体用量, 使粗骨料形成更紧密的骨架结构。骨料弹性模量通常高于水泥浆体, 这种紧密堆积直接提升了混凝土整体刚度。

2.3混凝土分层收缩应变试验

对此次试验的混凝土进行为期28d的收缩应变监测, 结果如表2-3、表2-4, 图2-1、图2-2所示。

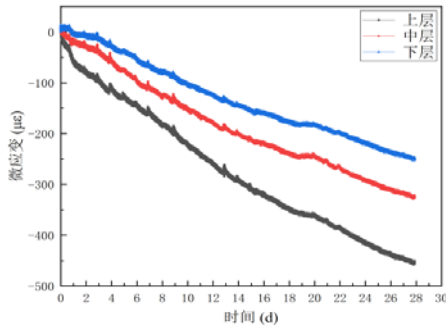


图2-1泵送混凝土收缩应变监测

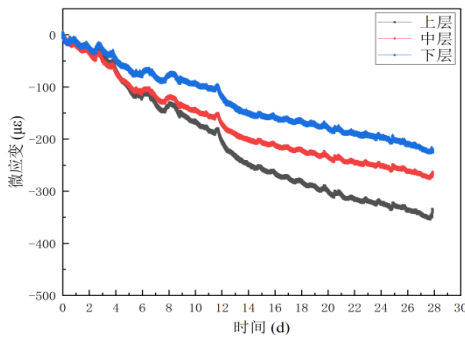


图2-2密集配混凝土收缩应变监测

由表2-3、2-4可知, M组在28d时混凝土上层部位收缩应变为337.72 $\mu\epsilon$, 下层部位收缩应变为222.20 $\mu\epsilon$, 相差115.52 $\mu\epsilon$; B组在28d时混凝土上层部位收缩应变为-454.16 $\mu\epsilon$, 下层部位收缩应变为-249.24 $\mu\epsilon$, 相差204.92 $\mu\epsilon$ 。可以得出在干燥, 失水环境下, M组混凝土收缩变化较B组混凝土明显变小, 收缩最大的上层部位减少了116.44 $\mu\epsilon$, 同时上层与下层之间的收缩应变减少了89.40 $\mu\epsilon$ 。这是因为密集配混凝土水泥浆体占比少, 而骨料作为稳定骨架, 能有效抑制收缩变形, 因此上层绝对收缩值本就较低。其次密集配工作性主要依靠颗粒级配实现, 不易出

现严重泌水和离析, 上下层的水灰比、浆体分布相对均匀, 干燥收缩的差异性自然减小。密实的骨料骨架在内部形成了更强的约束网络, 不仅限制了整体收缩, 也使得上层混凝土的收缩更均匀地传递至下层, 减少了因变形不协调而产生的层间差。

表2-3 28d分层收缩应变监测数值($\mu\epsilon$)

序号	上层	中层	下层
M	-337.72	-262.72	-222.20
B	-454.16	-324.69	-249.24

表2-4 28d混凝土收缩应变差值($\mu\epsilon$)

对比位置	M	B
上层与中层	75.00	129.47
中层与下层	40.52	75.45
上层与下层	115.52	204.92

3 结论

本研究通过对比基于Bolomey密级配理论设计的低塑性混凝土(M组)与常规泵送混凝土(B组)的物理性能, 得出以下结论:

在采用密级配理论优化设计的低塑性混凝土, 在保证工作性的前提下, 综合力学性能与体积稳定性显著优于传统泵送混凝土。在相同水胶比(0.32)下, 其7d和28d抗压强度分别提高约4.6%和5.3%; 同时, 28d静力受压弹性模量达到32.5GPa, 较泵送混凝土(27.0Gpa)高出20.4%, 且数据离散性更小, 表明其具有更高的刚度和结构均质性。最为关键的是, 密级配混凝土展现出优异的抗收缩开裂能力。其28d上层绝对收缩值(337.72 $\mu\epsilon$)较泵送混凝土降低25.6%, 且上、下层收缩应变差值从204.92 $\mu\epsilon$ 大幅减小至115.52 $\mu\epsilon$, 降幅达43.7%。论证了通过优化骨料级配、形成紧密骨架, 有效抑制了浆体收缩, 并大幅改善了因泌水离析导致的层间不均匀性, 从而从本质上降低了结构因内外约束不均而产生收缩裂缝的风险的可行性。因此, 在水利等对耐久性有严苛要求的工程中, 推广应用基于密级配理论的低塑性混凝土, 是提升结构整体性、安全性和长期服役性能的有效技术途径。

[参考文献]

[1]马彪.大流动性混凝土均匀性控制与抗裂技术研究[D].东南大学,2017.
 [2]陈笑彭.混凝土早龄期收缩变形特性研究[D].武汉:长江科学院,2016
 [3]廉慧珍.砂石质量是影响混凝土质量的关键[J].混凝土世界,2010,(08):28-32.
 [4]许建云,李桂华,赵法新.混凝土全级配颗粒曲线应用研究[J].低温建筑技术,2024,46(07):80-83
 [5]中华人民共和国水利部.水工混凝土试验规范:SL352-2020[S].北京:中国水利水电出版社,2020.

作者简介:

银翼(1987--),男,汉族,山东人,本科,中级职称,研究方向:水工材料。