

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.01.033

# 超贫碾压混凝土力学及抗冻性影响因素分析

张正亚<sup>1</sup>, 严勇<sup>2</sup>

(1. 郑州工商学院 建筑工程学院, 河南 郑州 451400;  
2. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450016)

**摘要:** 为了扩大碾压混凝土的应用, 采用正交试验的方法, 研究水胶比、砂率及粉煤灰掺量这三个因素的变化对二级配碾压混凝土力学性能及抗冻性能的影响。试验结果表明: 在使用普通减水剂及粉煤灰低掺量的情况下, 砂率是影响超贫碾压混凝土工作性的主要因素; 水胶比是影响超贫碾压混凝土强度及抗冻耐久性的主要因素。这为以后对碾压混凝土的进一步应用研究提供了支持。

**关键词:** 碾压混凝土; 力学性能; 抗冻性; 正交试验

中图分类号: TU528.04

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)01-0171-04

## Analysis of the Freeze-Thaw Durability of Extra-Lean Roller Cementitious Material

ZHANG Zhengya<sup>1</sup>, YAN Yong<sup>2</sup>

(1. College of Architecture Engineering, Zhengzhou Technology and Business University, Zhengzhou, Henan 451400, China;  
2. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China)

**Abstract:** The extra-lean roller compacted concrete has the advantages of low dosage of cement, low absolute heat rise, simple operation technology and other characteristics, so it is widely used among dam engineering all over the world. In order to expand the application of roller compacted concrete, this paper mainly studies the effect of mechanical property and freeze-thaw durability of secondary extra-lean roller compacted concrete. In the case of different water binder ratio, sand ratio and the dosage of fly was studied by orthogonal experiments. The results show that when use ordinary water reducing agent and under the condition of low dosage of fly ash, the sand ratio is the dominant factor; water binder ratio is the dominant factor of the compressive strength and the freeze-thaw durability of the extra-lean roller compacted concrete. This study could provide support for the application and further research of roller compacted concrete.

**Keywords:** roller compacted concrete; mechanical property; frost-resistance; orthogonal experiment

在大体积混凝土发展的初期, 混凝土中的胶凝材料用量为  $220 \text{ kg/m}^3$ , 1940 年田纳西流域上建成的稀华塞坝以  $168 \text{ kg/m}^3$  的水泥用量取得了重大突破, 1954 年美国松平及 1959 年日本田子仓坝把胶凝材料的用量降低到  $140 \text{ kg/m}^3$ <sup>[1]</sup>。后来美国吸收土石坝的工艺, 产生了分层碾压的碾压混凝土<sup>[2]</sup>。碾压混凝土的出现, 使得胶凝材料用量大幅降低。超贫碾压混凝土中胶凝材料用量仅为  $120 \text{ kg/m}^3 \sim 130 \text{ kg/m}^3$ , 其中掺合料占胶凝材料总质量的 25% ~ 30%, 由于碾压混凝土中胶凝材料用量少, 需要通过加大用水量使拌合物满足施工要求, 其水胶比一般为  $0.7 \sim 1.2$ <sup>[3]</sup>, 因此, 超贫碾压混凝土也称为贫配

合比碾压混凝土。

已有研究表明<sup>[4-6]</sup>, 水灰比、砂率和粉煤灰对二级配超贫胶凝材料抗冻耐久性有影响。本文采用正交试验的方法, 针对这三个关键因素, 选取不同的参数来研究其对超贫碾压混凝土力学性能及抗冻耐久性的影响情况, 为超贫碾压在工程中的应用提供试验数据和指导依据。

## 1 试验安排

### 1.1 原材料

试验采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥以及郑州热电厂干排粉煤灰, 郑州市饮用水作为混

凝土拌和用水。采用 5 mm ~ 20 mm 和 20 mm ~ 40 mm 两种骨料级配碎石做粗骨料,细度模数为 2.8 的河砂做细骨料。

### 1.2 试验仪器

本试验中抗压强度及抗冻性能测试的试验方法均按《水工碾压混凝土试验规程》<sup>[7]</sup> (DL/T5433 - 2009) 进行。抗压强度测试采用 SHT 4605 型电液伺服万能试验机进行测试。抗冻性试验采用 CDR - 2 型混凝土快速冻融试验机,弹性模量测试采用 DT - 8W 型动弹仪。

### 1.3 正交试验

正交试验设计,就是利用一套现成的规格化的正交表来安排多因素试验,并对试验结果进行统计分析,找出较优(或最优)方案的一种科学方法<sup>[8-12]</sup>。

正交表是利用“均衡分散性”与“整齐可比性”这

两条正交性原理形成的,从大量的试验点中挑选出一定具有代表性的试验点,有规律地排列成现成的表格,供试验选用;在试验后,通过计算,正确分析试验结果。

通过正交试验设计,计算分析砂率、水灰比、粉煤灰用量三个配合比参数的变化对其抗压强度、抗冻耐久性影响的显著性,从而获得超贫胶凝材料良好性能的最佳配合比。

试验时,选用  $L_9(3^4)$  正交试验表安排试验,正交试验因素见表 1。安排 9 次试验<sup>[13-15]</sup>,混凝土配合比、28 d 抗压强度及 90 d 抗压强度试验结果如表 2 所示。

表 1 正交试验因素表

因素 A(水灰比)	因素 B(砂率)	因素 C(粉煤灰)
0.6,0.8,1.0	0.3,0.4,0.5	0.15,0.30,0.45

表 2 混凝土配合比及抗压强度试验结果

组号	正交组合	用水量 /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	水灰比	砂率 /%	粉煤灰 /%	减水剂 /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	拌合物 VC 值/s	28 d 抗压强度 /MPa	90 d 抗压强度 /MPa
FJ1	$A_1B_1C_1$	100	0.6	30	15	0.26	8.3	6.4	8.2
FJ2	$A_1B_2C_2$	100	0.6	40	30	0.27	8.0	11.3	14.1
FJ3	$A_1B_3C_3$	100	0.6	50	45	0.27	3.5	6.1	10.0
FJ4	$A_2B_1C_2$	100	0.8	30	30	0.21	7.0	5.3	6.4
FJ5	$A_2B_2C_3$	100	0.8	40	45	0.22	6.5	3.9	7.4
FJ6	$A_2B_3C_1$	100	0.8	50	15	0.21	3.8	6.7	9.6
FJ7	$A_3B_1C_3$	100	1.0	30	45	0.36	5.5	9.7	16.7
FJ8	$A_3B_2C_1$	100	1.0	40	15	0.34	7.3	21.1	27.2
FJ9	$A_3B_3C_2$	100	1.0	50	30	0.35	7.3	14.7	18.1

以上 9 组冻融试件,在养护室内标准养护 28 d。在进行抗冻性试验之前,先将试件放在水中浸泡四天,然后取出擦干水分,称取初始质量,并测出初始自振频率;然后将试件装入配套试件盒,注入淡水,使水面浸没试件 2 cm 左右,开始进行冻融试验。试

验时试件中心温度控制在  $-17.5^\circ\text{C} \sim 8^\circ\text{C}$ ,设定一个冻融循环时间为 3 h,在冻融试验过程中试块均处于饱水状态。各组试块指标变化情况见表 3,试件的破坏形态见图 1 和图 2。



图 1 冻融破坏形态(1)

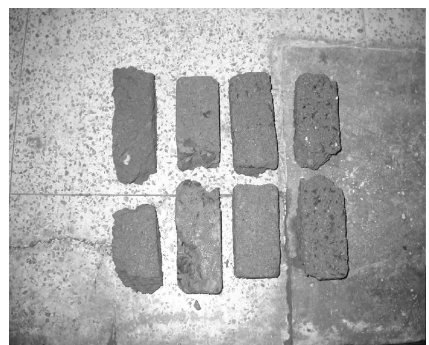


图 2 冻融破坏形态(2)

表 3 冻融试验结果

项目	不同冻融次数相对动弹性模量/%								不同冻融次数质量损失/%							
	5	15	20	25	30	35	40		5	15	20	25	30	35	40	
1	37.70	19.67	19.38	19.21	19.18	17.95	16.93		0.00	0.03	0.97	2.18	3.11	5.17	6.56	
2	64.55	52.81	46.82	35.74	21.15	20.31	20.11		0.00	0.02	0.51	0.74	0.99	1.59	2.91	
3	23.98	23.98	21.30	21.21	21.15	20.15	19.94		0.09	1.55	3.18	4.26	5.20	6.48	8.68	
4	19.61	21.49	21.39	20.74	19.66	—	—		0.11	1.13	2.84	9.63	14.14	—	—	
5	19.89	21.93	21.49	12.83	—	—	—		1.02	2.01	4.28	6.07	—	—	—	
6	54.15	24.78	24.50	24.38	24.29	23.62	23.44		0.26	0.62	1.08	2.31	2.94	3.67	5.01	
7	11.24	12.74	12.55	12.48	12.41	—	—		0.51	0.00	0.26	0.31	0.37	—	—	
8	78.51	62.59	58.33	44.37	35.80	30.53	17.50		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	
9	89.01	73.10	63.22	55.18	42.07	35.71	20.39		0.00	0.00	0.00	0.02	0.16	0.44	0.92	

注:图中“—”表示试件断裂。

## 2 试验分析

### 2.1 强度比较

根据表 2 的试验结果,现将超贫碾压混凝土 28 d、90 d 的抗压强度进行比较,它们之间的关系见图 3,试件破坏形态见图 4 和图 5。

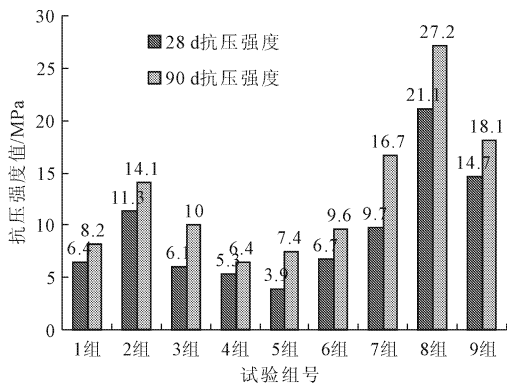


图 3 28 d 与 90 d 的抗压强度比较



图 4 抗压破坏形态(7组)

由图 3 可以看出:以上 9 组试块的早期强度普遍较低,而后期强度则有不同程度的提高,其中,第 5 组后期强度提高最多,达到了 89%。

掺入粉煤灰后早期强度低主要有以下三个方面的原因:一是掺入的粉煤灰取代了部分水泥,使得参

与早期水化的水泥的量减少,生成的固相物质降低;二是随着水泥水化反应的进行,会在粉煤灰颗粒表面形成一层薄膜( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  及 C—S—H),粉煤灰要发挥活性必须要突破这层膜,而这个突破的过程是缓慢的;三是粉煤灰还稀释了一部分水泥颗粒,致使水泥的水化不够充分,因此早期强度就不高。



图 5 抗压破坏形态(8组)

但到后期粉煤灰中的活性成份就会与水泥水化生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生二次水化反应,生成 C—S—H 和 C—A—H、水化硫铝酸钙,强化了混凝土界面过渡区,从而提高了混凝土的后期强度。由此可见,对于粉煤灰在低掺量下所配置的超贫碾压混凝土,当水灰比为 0.8,砂率为 0.4,粉煤灰掺量为 0.45 时,对于后期强度的提高最为有利。

### 2.2 极差分析

为了进一步说明水灰比、砂率和粉煤灰用量三因素对超贫碾压混凝土性能影响的显著性,下面根据正交理论再对试验结果进行极差分析,分析结果见表 4。

根据表 4 极差分析结果,可以判断:影响超贫碾压混凝土 VC 值因素的主次顺序为  $B \rightarrow C \rightarrow A$ ,即砂率  $\rightarrow$  粉煤灰  $\rightarrow$  水胶比;影响超贫碾压混凝土 28 d 和

90 d 抗压强度及冻融循环次数因素的主次顺序均为  $A \rightarrow B \rightarrow C$ , 即水胶比  $\rightarrow$  砂率  $\rightarrow$  粉煤灰。

表 4 极差分析表

因素	冻融次数	VC 值/s	28 d 抗压强度/MPa	90 d 抗压强度/MPa
A	41	2.8	29.6	38.6
B	25	7.2	14.9	17.4
C	17	6.8	14.5	10.9

### 2.2.1 VC 值影响因素分析

对于超贫碾压混凝土,在胶浆用量不大的情况下,砂率是影响混凝土拌合物工作性的主导因素,砂率越大,骨料的比表面积越大,包裹骨料所需的水泥浆量也就越多,则起润滑作用的水泥浆量就减少,混凝土拌合物会变得干稠,VC 值就会增加。

### 2.2.2 强度影响因素分析

影响超贫碾压混凝土 28 d、90 d 抗压强度的最主要因素为 A(水胶比)。拌合物中水胶比的大小,影响着硬化后的混凝土的密实度,水胶比越大,空隙就会越多,孔隙越多就会减少混凝土抵抗荷载的有效使用面积,进而会影响到混凝土的强度及抗冻耐久性能。

### 2.2.3 抗冻性影响因素分析

由试验结果,可以得到影响超贫碾压混凝土抗冻耐久性的主导因素为 A(水胶比)。

从表 3 中可以看出:

(1) 本试验中各组试块的抗冻融能力较弱,试验时,以上各组试块的相对动弹性模量下降很快,在经过 5 次冻融循环后,除第 2 组、8 组、9 组三组之外,其余各组试块的相对动弹性模量都下降至 60% 以下;质量损失率也较普通混凝土偏大。试验共进行了 135 次冻融循环,在第 65 次循环结束时,除了第 8 组、9 组两组外,其余各组试块都完全冻断了。

(2) 试件破坏时,其表面水泥浆剥落严重,试件磨损特别严重,而且因为超贫碾压混凝土的水泥浆量相对较少,内部孔隙率较大,因此有些试块在经历冻融后中部发生较大的横向膨胀变形,致使随着冻融循环的进行,试件质量不但没有减少反而有所增加。但是大部分试块是断成两段而破坏的,只有第 5 组、6 组、7 组是最后完全溃散了。

(3) 水灰比过大时,对混凝土的抗冻性反而是不利的,这主要是因为水胶比影响混凝土中可冻结水的量,水胶比增大,混凝土中孔隙率增大,孔中存留的可冻结水的量增多,对抗冻不利。因此,水灰比小些对抗冻有利。

## 3 结 论

超贫碾压混凝土 VC 值影响因素的主次顺序为砂率  $\rightarrow$  粉煤灰  $\rightarrow$  水胶比;超贫碾压混凝土 28 d 和 90 d 抗压强度影响因素的主次顺序均为水胶比  $\rightarrow$  砂率  $\rightarrow$  粉煤灰;超贫碾压混凝土冻融循环次数影响因素的主次顺序为水胶比  $\rightarrow$  砂率  $\rightarrow$  粉煤灰;影响超贫碾压混凝土 28 d、90 d 抗压强度及抗冻耐久性的最主要因素仍为水胶比,而影响超贫碾压混凝土工作度的主要因素为砂率。

因此,在进行超贫碾压混凝土配合比设计时要特别注重对水灰比和砂率的选择,这两个因素的变化对超贫碾压混凝土的工作性、强度及抗冻耐久性有着较大的影响。

### 参考文献:

- [1] 张镜剑,孙明权.一种新坝型—超贫胶结材料坝[J].水利水电科技进展,2007,27(3):32-34.
- [2] 彭成山,张学菊,孙明权.超贫胶凝材料研究[J].华北水利水电学院学报,2007,28(2):26-29.
- [3] 邢振贤,张正亚,王 静,等.超贫固结砂石料碾压混凝土的合理水灰比[J].人民长江,2008,39(5):72-73.
- [4] 陆国斌,朱梦良.碾压贫混凝土基层配合比设计研究[J].公路交通技术,2007(1):1-13.
- [5] 刘数华,方坤河,曾 力.掺入粉煤灰提高碾压混凝土耐久性的试验研究[J].水泥工程,2006(6):22-24.
- [6] 吴历斌,孙振平,颜拥东,等.砂率对高性能混凝土的影响研究[J].建筑技术,2002,33(1):21-23.
- [7] 中华人民共和国国家能源局.水工碾压混凝土试验规程:DL/T5433-2009[S].北京:中国电力出版社,2009.
- [8] 施惠生.无机材料试验[M].上海:同济大学出版社,2003:126-182.
- [9] Liang R J. Probability & Statistics for Engineers[M]. Hohai University Press,1990.
- [10] Gunst J E. Mathematical Statistics[M]. Englewood Cliffs. New York,1992.
- [11] 方开泰,马长兴.正交与均匀实验设计[M].北京:科学出版社,2001:157-207.
- [12] 吴 翔,李永乐,胡天军.应用数理统计[M].北京:国防科技大学出版社,1999:235-252.
- [13] 余乃宗,刘卫东,欧阳瑞.再生细骨料对混凝土力学性能及抗冻耐久性能研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(4):117-122.
- [14] 翟 超,唐新军.水胶比和粉煤灰掺量对高性能混凝土塑性开裂的影响[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):141-144.
- [15] 李金泽,孟云芳,李 瑞,等.聚丙烯纤维再生骨料混凝土抗冻性能研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):181-185.