

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.02.027

# (超)细水泥在压滤作用下的浆液性能研究

黄立维<sup>1,2</sup>, 王克祥<sup>3</sup>, 黄纪村<sup>3</sup>, 邢占清<sup>1,2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 北京中水科工程集团有限公司, 北京 100040;  
3. 中国三峡建设管理有限公司, 北京 100038;)

**摘要:** (超)细水泥浆液在高灌浆压力作用下的流动性能和强度指标是灌浆设计中水灰比、浆液级配、屏浆时间等施工参数选择的重要依据,也是评价灌后被灌体力学性能、耐久性等灌浆效果的重要因素。目前主要通过室内成模进行流动性能和抗压强度测试的方法进行相应研究,忽略了灌浆压力、排水条件、地质条件等因素的影响,不能真实反映灌浆过程中浆液在不同灌浆压力作用下流动性能和抗压强度。文章进行了室内压滤灌浆试验,得到了不同水灰比(超)细水泥浆液经过不同压力和时间压滤作用后的马氏漏斗粘度和结石体 28 d 抗压强度,并通过构建硬化浆体的结构模型,建立了(超)细水泥抗压强度的计算模型,计算了不同水灰比在不同压滤强度下的 28 d 抗压强度,可为灌浆工程(超)细水泥浆液配比优选、灌浆参数确定和灌浆效果评价提供依据。

**关键词:** (超)细水泥;压滤效应;压滤强度

中图分类号: TV432

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)02—0155—06

## Slurry Performance of Ultra Fine Cement Under Pressure Filtration

HUANG Liwei<sup>1,2</sup>, WANG Kexiang<sup>3</sup>, HUANG Jicun<sup>3</sup>, XING Zhanqing<sup>1,2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Beijing IWHR Corporation, Beijing 100040, China;

3. China Three Gorges Projects Development Co., Ltd., Beijing 100038, China)

**Abstract:** The flow performance and strength index of ultra fine cement slurry under high grouting pressure is an important basis for the selection of construction parameters such as water cement ratio, slurry gradation and grouting screen time in grouting design, and also an important factor for evaluating the grouting effect such as mechanical properties and durability of the grouted body after grouting. At present, the corresponding research is mainly carried out through the indoor molding method for the flow performance and compressive strength test, which ignore the influence of grouting pressure, drainage conditions, geological conditions and other factors, therefore it can not truly reflect the flow performance and compressive strength of the slurry under different grouting pressure in the grouting process. In this paper, the indoor pressure filtration grouting test was carried out, and the Mahalanobis funnel viscosity and 28 d compressive strength of stone body of different water cement ratio ultra fine cement slurry after different pressure and time pressure filtration were obtained. Through the construction of the structure model of hardened slurry, the calculation model of ultra fine cement compressive strength was established, and the 28d pressure resistance of different water cement ratio under different pressure filtration strength was calculated. This research can provide the basis for optimizing the proportion of ultra-fine cement slurry and determining the grouting parameters and evaluating the grouting effect.

**Keywords:** ultra cement slurry; pressure filtration property; influence on strength of pressure filtration

收稿日期:2020-10-27

修稿日期:2020-11-21

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研项目(BHT/0772);中国水科院基本科研专项(EM0145C092018;EM0145B462016)

作者简介:黄立维(1982—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事地基处理灌浆材料及灌浆工艺研究和应用等方面的工作。

E-mail: huanglw@iwhr.com

灌浆作为一种比较成熟的施工技术,在各工程领域中均得到了广泛的应用。灌浆材料的流动性能和结石体抗压强度是灌浆设计中浆液水灰比、浆液级配、屏浆时间等施工参数选择的重要依据,也是评价灌后被灌体力学性能、耐久性等灌浆效果的重要因素。灌浆材料按材料性质可分为化学灌浆材料,如:丙凝、环氧树脂、丙烯酸盐等,和颗粒型灌浆材料,如:水泥、黏土、水泥黏土等。化学浆材多为溶液性材料,具有黏度低,凝结时间易精确控制,不受颗粒尺寸影响等优点,但化学浆材或多或少都存在一定的毒性,易引起环境污染,其耐久性也未明确肯定,费用昂贵。水泥浆液是最为常用的颗粒型灌浆材料,有强度高、耐久性好、无毒无味,来源方便、价格低廉等优点,得到了广泛应用,但普硅水泥粒径较大,最大粒径可达  $90\ \mu\text{m}$  以上,不能有效灌入细微孔(裂)隙中,难以满足某些工程的灌注要求。更细颗粒的(超)细水泥得到了发展应用,其是以普通水泥或水泥熟料为原材料,用专有粉磨设备制备的、粒径小于一定尺寸的细水泥,通常把最大粒径  $< 32\ \mu\text{m}$ 、平均粒径  $6\ \mu\text{m} \sim 8\ \mu\text{m}$  的水泥定义为细水泥,把最大粒径小于  $12\ \mu\text{m}$ 、平均粒径  $3\ \mu\text{m} \sim 6\ \mu\text{m}$  的水泥定义为超细水泥<sup>[1]</sup>。

Arenzana 等<sup>[2]</sup>、Tax 等<sup>[3]</sup>、Shondeep 等<sup>[4]</sup>和王玲等<sup>[5]</sup>对(超)细水泥颗粒细化后的流变性、稳定性、凝结时间、浆体硬化强度、弹性模量和变形系数及强度等物理力学性能也进行了大量的研究;Noske<sup>[6]</sup>、Borchardt<sup>[7]</sup>、Pantazopoulos 等<sup>[8]</sup>和于秀文等<sup>[9]</sup>、马志登等<sup>[10]</sup>研究了(超)细水泥在国内外大坝的帷幕灌浆、油井封堵、路面裂缝的修补、地下工程、矿山等工程的应用情况,均取得了良好的防渗加固效果。这些研究主要直接通过室内浆材试验的方法测试(超)细水泥浆液在标准养护条件下的流动性能和抗压强度,而在实际灌浆过程中,当(超)细水泥浆液在扩散路径上停止流动时,或者浆液悬浮颗粒粒径大于受灌体的孔隙时,在灌浆压力的作用下(超)细浆液会发生析水,即为压滤效应,压滤效应贯穿了整个灌浆过程,在已有研究中均没有涉及到(超)细水泥浆液在灌浆过程中的压滤机理和其影响因素,也没有考虑灌浆过程中浆液凝聚体中水分和孔隙结构在高灌浆压力下的变化规律。本文拟通过研究不同压滤条件下(超)细水泥浆液的流动性能的变化规律和结石强度增长特性以及相应硬化结石体的结构模型,构建(超)细水泥浆液的压滤作用计算模

型,试验和计算分析水泥浆液在高灌浆压力作用下的浆液流动性和抗压强度,为灌浆工程(超)细水泥浆液配比优选、灌浆参数确定和定量评价灌浆效果提供依据。

## 1 浆液压滤室内试验

(1) 材料。本文选取的灌浆原材料,包括某品牌的普通硅酸盐水泥 P. O52.5 和某厂家直接在水泥厂用超细粉磨设备生产的灌浆专用超细水泥,将 0.5:1.0 的普通硅酸盐水泥浆液通过长科院研制的 GSM 型湿磨机研磨 2min 后制成湿磨细水泥,然后添加 3%~5% 的高效减水剂 UNF-5 高速搅拌形成各种水灰比的(超)细水泥浆液,均为典型的宾汉姆型流体特性。

湿磨细水泥和干磨超细水泥的颗粒细度采用激光粒度分析仪测试(分散剂选用无水乙醇),结果如表 1 所示。

表 1 (超)细水泥颗粒粒度及强度性能指标

材料种类	平均粒径 $D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{85}$ 颗粒 粒径/ $\mu\text{m}$	标准强度 ( $R_{28}$ )/MPa
湿磨细水泥	9	21	48.6
干磨超细水泥	5	11	57.8

(2) 试验装置及方法。利用直径为 30 cm、高度为 25 cm 的钢管加工制作成加压仓,钢管的一端设置钢丝网和高强透水闭浆布模拟浆液在压力作用下的排水固结情况,管内预先置入成型试模,再倒入拌制好的浆液,另一端采用高弹材料分隔加水和浆液进行灌浆过程的压滤效应试验。装置和压滤使用过程示意图见图 1。

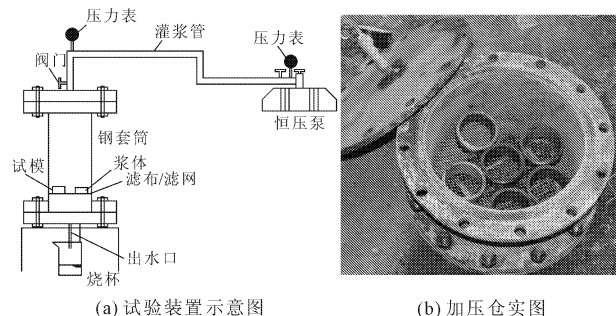


图 1 试验装置示意图和加压仓实图

将浇筑好的试模放入试验装置中,密封后进行不同压力、不同时间的压滤试验,结束后进行流动性测试和标准养护 28 d 后进行抗压强度测试。(超)细水泥浆液的配合比及其基本参数如表 2 所示。

表 2 (超)细水泥浆液的配合比及其基本参数

浆液	浆液 配比	析水率 /%	漏斗黏度 /s	比重	强度 $R_{28}$ /MPa
细水泥 浆液	3.0:1.0	64.5	33.2	1.18	10.6
	2.0:1.0	51.5	34.5	1.24	12.6
	1.0:1.0	23.0	41.3	1.48	20.8
	0.7:1.0	17.0	47.5	1.63	41.8
超细水 泥浆液	3.0:1.0	64.0	33.1	1.18	10.9
	2.0:1.0	51.5	34.5	1.24	13.7
	1.0:1.0	24.0	41.2	1.48	22.6
	0.7:1.0	13.0	47.5	1.63	35.6

表 3 不同压力、不同时间(超)细水泥浆液马氏漏斗黏度表

压力 /MPa	水泥 类型	水灰 比	不同时间(min)黏度 /s						
			5	10	20	30	60	90	120
0.1	细水泥	3.0:1.0	27.2	28.6	32.4	38.9	49.8	59.7	85.6
		2.0:1.0	27.5	32.1	41.5	59.8	79.5	96.4	129.4
		1.0:1.0	30.8	41.9	57.9	84.9	102.6	156.8	189.7
		0.7:1.0	35.6	43.5	68.9	112.5	156.7	205.4	滴流
	超细水泥	3.0:1.0	29.4	32.4	45.8	55.9	79.8	102.8	138.7
		2.0:1.0	33.8	45.2	61.4	81.1	116.8	165.9	204.4
		1.0:1.0	38.9	49.8	84.5	106.8	159.4	206.8	滴流
		0.7:1.0	41.4	68.7	98.4	136.8	198.7	>235.0	滴流
0.2	细水泥	3.0:1.0	35.4	49.8	65.4	98.4	123.4	168.4	240.6
		2.0:1.0	41.5	65.4	81.5	101.4	134.2	179.8	234.0
		1.0:1.0	46.5	74.8	95.4	152.4	189.4	238.4	>220.0
		0.7:1.0	51.4	78.9	101.5	154.4	208.4	>234.0	滴流
	超细水泥	3.0:1.0	38.4	75.4	102.4	168.4	204.5	248.5	>200.0
		2.0:1.0	49.8	80.4	118.4	184.7	251.4	>200.0	滴流
		1.0:1.0	52.4	89.7	132.4	189.8	234.5	滴流	滴流
		0.7:1.0	68.4	94.5	136.8	234.5	滴流	滴流	不流
0.5	细水泥	3.0:1.0	49.8	85.7	134.5	192.4	249.8	滴流	不流
		2.0:1.0	59.4	94.5	158.7	231.2	>200.0	滴流	不流
		1.0:1.0	68.9	102.5	168.4	236.4	滴流	滴流	不流
		0.7:1.0	89.4	156.8	248.7	滴流	滴流	不流	不流
	超细水泥	3.0:1.0	59.4	98.7	168.4	235.4	>200.0	滴流	不流
		2.0:1.0	75.4	154.8	235.4	>200.0	滴流	滴流	不流
		1.0:1.0	89.7	168.9	247.1	滴流	滴流	不流	不流
		0.7:1.0	102.5	215.4	>200.0	滴流	滴流	不流	不流

注:大于某时间表示浆液在此之前能流出漏斗,之后不能正常流出;滴流表示浆液有不成线状的间断流出;不流表示浆液没有从漏斗流出。

表 3 还显示了(超)细水泥浆液在不同压力不同时间的压滤作用下,其马氏漏斗黏度(时间)随着压力增加和压滤时间变长也将逐步增大,浆液的流动性逐步变差,说明在压滤作用下,浆液中的自由水以及部分孔隙水逐步析水。且在高灌浆压力或长压

(3) 试验成果。选取了不同水灰比的(超)细水泥浆液进行了不同压力和不同时间的流动性测试(采用马氏漏斗,测试浆液的流动时间),试验结果如表 3 所示。

表 3 显示了水灰比对(超)细水泥浆液漏斗黏度的影响,当浆液水灰比减小(3.0:1.0 变化到0.7:1.0)时,马氏漏斗黏度(时间)逐步升高,变化相对较快,说明浆液的流动性越来越差。超细水泥和细水泥均有类似的规律,且细水泥在相同水灰比时,比超细水泥的马氏漏斗黏度小,流动性相对较好。

滤时间时,浆液中的水分析出速度也将加快,马氏漏斗黏度也快速增加,浆液的流动性快速变差,直至浆液出现滴流、不流现象,完全丧失流动性。超细水泥和细水泥均有类似的规律,超细水泥的马氏漏斗黏度受压滤作用的影响相对较大。

同时选取了不同水灰比的(超)细水泥浆液进行了不同压力 and 不同时间抗压强度测试(受试样限制,仅选取有限的压力和时间进行试验),试验结果如图 2、图 3 所示。

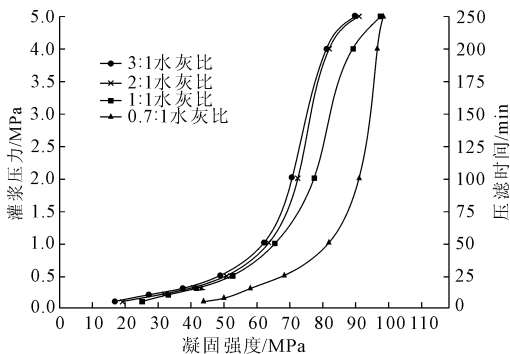


图 2 细水泥压滤试验的抗压强度

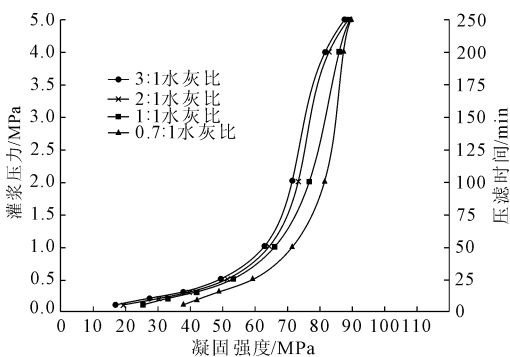


图 3 超细水泥压滤试验的抗压强度

从图 2、图 3 中可以看出,不同水灰比的(超)细水泥浆液在经过灌浆压力和长时间的压滤作用后,(超)细水泥结石体 28 d 强度均有不同程度的增长,而且表现出压滤时间越长,灌浆压力越大,其结石体 28 d 强度越高的规律,远远超过了常规压力和标准养护下的 28 d 抗压强度,而且随着压滤压力的增大和时间的延长,在高压滤作用下,不同水灰比的结石体 28 d 强度数值相差并不大,主要原因在于结石体强度主要与结石体的孔隙率(包含其中的水分)有关,经高压滤作用后浆液剩下的含水率大致相同,即使是 3:1 高水灰比(超)细水泥浆液也能经高压滤作用后达到很高的结石体强度。超细水泥和细水泥均有类似的规律,细水泥受压滤作用后抗压强度增加幅度相对更大。

## 2 浆液压滤计算强度

(1) (超)细水泥结石体结构模型。水化后(超)细水泥结石体可以看作固-液-气三相多孔体系,主要由水化凝聚体、空隙中含有的水分和空气组成,可建立(超)细水泥结石体孔结构模型如图 4 所示<sup>[11]</sup>。

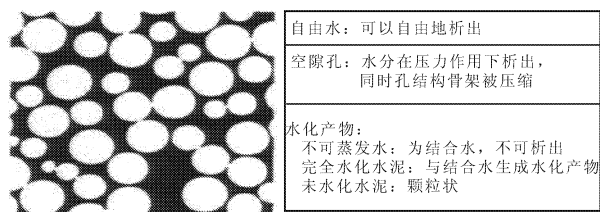


图 4 (超)细水泥硬化浆体的结构模型

在水化反应过程中,空隙中的空气将大部分排出,可以忽略不计。空隙中的水分可以分为:自由水、蒸发水和不可蒸发水。其中,自由水在灌浆压力和重力作用下将很快析出同时伴随着浆液中颗粒的沉淀。蒸发水主要是空隙中留存的水分,在灌浆压力作用下将随时间逐步析出,同时其占据的空间将被压缩。不可蒸发水可能的最大值是(超)细水泥颗粒质量的固定值,与(超)细水泥颗粒的细度、水化程度等有关。

(2) (超)细水泥浆液的固结强度。(超)细水泥由于细度较常规水泥小,活性较强,其浆液流动性比水泥浆液差,多采用 0.7:1.0 及以上的水灰比进行灌注以满足浆液流动性的要求。在灌注过程开始后,随着浆液扩散半径的增加,灌浆压力将沿着扩散路径逐步减小。相应的,(超)细水泥浆液的扩散速度降低,除与地层接触部分存在少量的析水可认为浆液的水灰比没有发生大的变化,但当扩散速度降到某一临界值时,或者浆液扩散到某一开度较小以至于(超)细水泥颗粒不能通过时,(超)细水泥颗粒将在重力和流动阻力的作用下开始沉淀,同时颗粒团聚在一起,在水化的同时产生固结析水,水泥凝聚体颗粒之间的骨架被不断压缩,导致颗粒间的孔隙水被逐步排出,直至达到稳定的过程。根据符平等的研究,经过灌浆压力和一段压滤时间作用后,空隙孔所析出的水总量为<sup>[12]</sup>:

$$q = \frac{\pi r^4}{8\eta} J t N \quad (1)$$

其中: $q$  为空隙内析出的水量; $r$  为空隙孔的半径,在固结排水过程中将逐步变小; $J$  为空隙孔中的压力梯度; $\eta$  为水的黏滞系数。 $t$  为压滤时间; $N$  为计算断面上的空隙孔的数量。

根据 Power 的研究成果,可认为(超)细水泥与普通硅酸盐水泥一样,其结石体的 28 d 抗压强度  $R$  与结石体的胶空比  $X$  存在如下的公式:

$$R = R_0 X^n \quad (2)$$

$$X = \frac{\text{凝胶体体积}}{\text{凝胶体体积} + \text{孔隙孔体积}} \quad (3)$$

式中: $R_0$  为孔隙率为 0 时(即  $X = 1$ ) 的结石强度; $X$  为胶空比; $n$  为试验常数,与(超)细水泥种类以及试验条件有关,波动于 2.6 ~ 3.0 之间。

(3) 结石强度计算。根据(超)细水泥浆液的固结、排水机理和强度理论,编制了(超)细水泥结石体的抗压强度计算程序,结合浆液常规抗压强度数值,对上述试验中的浆液压滤效应进行了模拟计算,获得了不同水灰比浆液在不同灌浆压力和不同压滤时间作用下,其结石体 28 d 抗压强度的结果,与试验结果对比如图 5—图 8 所示。

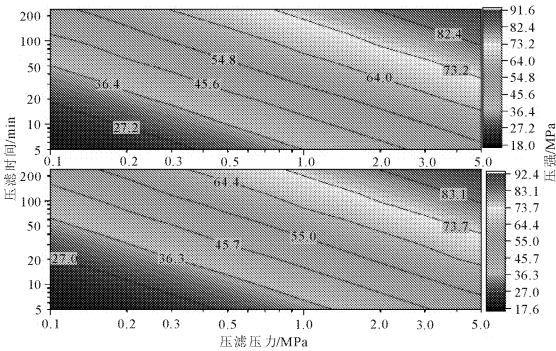


图 5 (超)细水泥浆液 3.0:1.0(上图)和 2.0:1.0(下图)计算强度

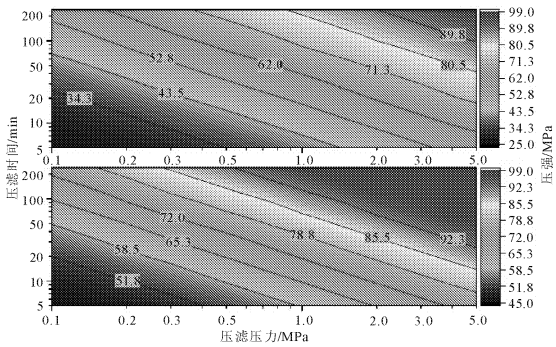


图 6 (超)细水泥浆液 1.0:1.0(上图)和 0.7:1.0(下图)计算强度

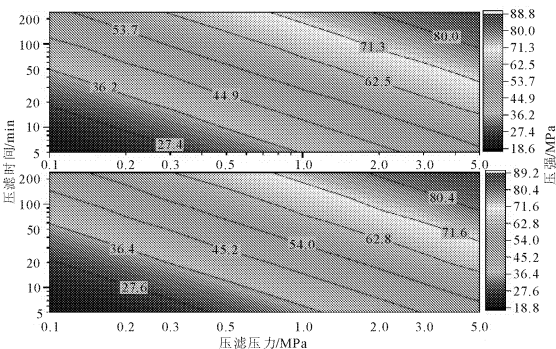


图 7 (超)细水泥浆液 3.0:1.0(上图)和 2.0:1.0(下图)计算强度

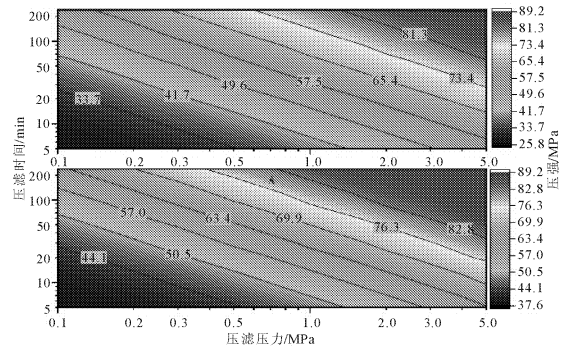


图 8 (超)细水泥浆液 1.0:1.0(上图)和 0.7:1.0(下图)计算强度

根据公式(1)可以得出,(超)细水泥浆液的强度  $R$  与灌浆压力  $P$  的大小和时间  $t$  的乘积有关,因此可以得出以下的函数关系:

$$R = f(P \cdot t) = f(C) \quad (4)$$

式中: $P \cdot t$  为压滤强度  $C$ ,则(超)细水泥浆体的强度与压滤强度  $C$  的关系如图 9 所示。

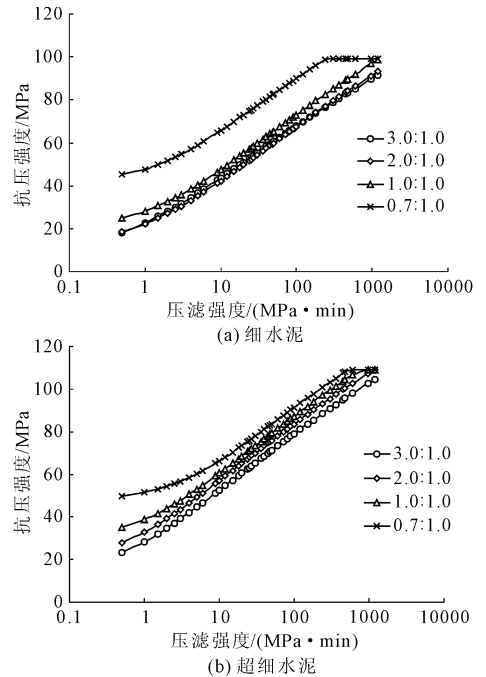


图 9 不同水灰比浆液的计算抗压强度与压滤强度关系

通过对图 5—图 9 分析,可以得出以下结论:

(1) 不同水灰比(超)细水泥浆液的计算强度的变化趋势基本一致,同试验强度的数值差别不大(最大误差 < 10%),说明通过本文建立的(超)细水泥结石体计算模型所计算出的 28 d 强度基本能反映浆液的抗压强度,采用上述的计算模型和方法能近似对压滤试验的浆液抗压强度进行计算分析。试验强度的数值存在一定的不规则性和离散程度更

大,主要原因是浆液的抗压强度室内测试本身由于试样制作、养护、测试等原因存在固有偏差,根据相关规程规范规定,同一批试样抗压强度误差不得超过 15%。

(2) 在双对数图中,不同水灰比(超)细水泥浆液的计算强度曲线近似平行直线,直线表明如果压滤压力对数和压滤时间对数变化幅度相同,那么(超)细水泥结石体的计算强度的变化幅度也相同,曲线平行说明对应不同的计算强度变化阶段,压滤压力对数和压滤时间对数所对应的变化幅度比例都保持不变。

不同水灰比的(超)细水泥浆液结石体的计算强度与压滤压力和压滤时间表现出正相关的关系,在不同的压滤作用下,其强度均有不同程度的提高,而且随着压滤作用强度的提高(即较高的压力和较长的时间),其计算强度也相应的提高,但提高的速度越来越低,最终在经过高灌浆压力和长时间压滤作用后,各水灰比的浆液结石体均达到了很高的计算强度,而且计算强度的数值相差不大。

(3) 在压滤强度对数图中,不同水灰比浆液结石体的计算强度与压滤强度对数表现为线性关系,说明压滤强度对数变化时,结石体的计算强度也相应的等比例变化。由于压滤强度是灌浆压力和作用时间的乘积,说明增大灌浆压力对数和延长压滤时间对数均可以提高相同的结石体的计算强度,而且其作用一样,因此在实际灌浆过程中,灌浆压力对数和时间对数的效果是一样的。在计算模型的构建过程中,假设了空隙孔的半径随着空隙水的排水同比例、均匀的变小,实际上当计算强度较高时(即空隙孔的半径较小时),空隙孔的半径变化表现出更强烈的非线性和变化幅度越来越小,造成计算过程存在一定的误差,因此在计算模型中假定了计算抗压强度不会一直增长,而将接近  $R_0$ ,同时也表明当压滤强度很大时,对浆液结石体的计算强度影响也将越来越小。

(4) 室内压滤试验和理论计算的 28 d 强度变化规律都表明,经过压滤作用后,不同水灰比(超)细水泥浆液的 28 d 抗压强度都远远超过其常规室内试验和标准养护条件下的抗压强度,而且在较高的压滤强度作用的 28 d 抗压强度差别不大,说明经过较高压滤强度作用后,即使较高的水灰比浆液也能达到很高的 28 d 抗压强度,而与浆液水灰比关系不大,因此在实际灌浆过程中,采用较稀的水灰比灌注也能取得较高的浆液结石体强度。但值得注意的

是,在实际灌浆过程中,虽然灌浆压力有可能达到 5 MPa 以上,在浆液扩散过程中却不可能存在  $10^6$  以上的压力梯度和良好的排水条件,因此在浆液扩散过程中,不会出现(超)细水泥浆液在高压力梯度下的快速排水、凝结的现象,其结石体强度也会小于其压滤试验的抗压强度,而高于其常规试验的抗压强度,其具体数值可以通过计算浆液扩散过程中的压力分布和排水过程分析获得。

### 3 结 论

(1) 在不同压力不同时间的压滤作用下,(超)细水泥浆液马氏漏斗粘度(时间)随着压力增加和压滤时间延长也将逐步增大,浆液的流动性逐步变差。

(2) 不同水灰比的(超)细水泥浆液在经过灌浆压力和长时间的压滤作用后,结石体 28 d 强度均有不同程度的增长,而且表现出压滤时间越长,灌浆压力越大,其结石体 28 d 强度越高的规律,远远超过了常规压力和标准养护下的 28 d 抗压强度。在高压滤作用下,随着压滤压力的增大和时间的延长不同水灰比的结石体 28 d 强度数值相差不大。因此较大的水灰比浆液也能达到较高的 28 d 抗压强度。

(3) 不同水灰比(超)细水泥浆液的 28 d 抗压强度与浆液所承受的压滤强度对数大致成线性比例关系,增大灌浆压力和延长压滤时间均可以提高结石体抗压强度,且两者对抗压强度的提高效果一样。

(4) 在实际灌浆过程中,不会存在类似试验模拟条件下高的压力梯度和良好的排水条件,(超)细水泥浆液结石体 28 d 抗压强度将小于压滤试验的抗压强度,而高于其常规试验的抗压强度。

#### 参考文献:

- [1] 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范:DL/T 5148—2012[S]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [2] Arenzana L, Krizek R J, Pepper S F. Injection of dilute microfine cements suspensions into fine sands[J]. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1989(2):1331-1334.
- [3] Tax M, Kuhling G, Schulze B, et al. Improving microfine cements suspensions with regard to chemical resistance and groutability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 11(2):88-96.
- [4] Shondeep L Sarkar. Microstructural development in an ultrafine cement-Part II [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(1):125-128.

抗折强度最大值提高率最高,说明其总体粘结阻裂效果较好。

(3) 混合纤维(UPE 和 PVA 纤维体积含量 1:

1)混凝土试样 28 d 的抗折强度分布在 6.0 MPa ~ 6.6 MPa 之间,离散性最小,抗折强度最佳掺量为 0.4%,此时抗折强度为 6.6 MPa,提高率为 24.1%;抗压强度达 49 MPa,提高率为 8%;折压比为 0.135,提升 14.4%。混合纤维由于其黏结阻裂效果有一个过渡,对抗压强度和抗折强度的提高有一定综合作用效应,而且混合纤维经济性更好,因此建议采用混合纤维,其最佳纤维含量为 0.3% ~ 0.4%。

### 参考文献:

[1] 郭 锋. 高韧性纤维混凝土框架柱抗震性能分析 [C]//第 28 届全国结构工程学术会议论文集(第 III 册),2019:36-42.

[2] 钟 波. STC 超高韧性混凝土配合比的研究与应用 [J]. 四川水力发电,2019,38(5):41-43,52.

[3] 于明鑫. 超强韧性混凝土修补研究 [C]//第十六届沈阳科学学术年会论文集(理工农医),沈阳市科学技术协会,2019:74-76.

[4] 刘 洋,欧忠文,胡志德,等. 高韧性混凝土复合材料研究与应用进展 [J]. 合成纤维,2019,48(9):43-46.

[5] 江世永,蔡 涛,李雪阳. 碳纤维复合材料筋高韧性水泥基复合材料柱拟静力试验对比研究 [J]. 工业建筑,

2018,48(9):181-186,216.

[6] 张海鹏,陈 猛,白 帅,等. 层布式混杂纤维混凝土抗压及抗拉性能试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报,2015(5):131-135.

[7] Li V C, Leung C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992,118(11):2246-2264.

[8] 徐世焱,李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用 [J]. 土木工程学报,2008(6):45-60.

[9] 江世永,陶 帅,飞 渭,等. 高韧性纤维混凝土受弯性能试验研究 [J]. 工业建筑,2018,48(6):111-118.

[10] 于明鑫,俞家欢. 超强韧性混凝土与钢筋黏结性能研究 [J]. 混凝土,2018(10):57-61.

[11] 王义超,侯梦君,余江滔,等. 聚乙烯纤维制备超高延性水泥基复合材料的试验研究 [J]. 材料导报,2018,32(20):3535-3540.

[12] 董新心. 长大隧道高抗弯韧性混凝土铺装应用研究 [J]. 公路,2019,64(12):67-71.

[13] 李银波. 基于正交试验的高韧性纤维混凝土受弯性能研究 [J]. 新型工业化,2019,9(11):125-128.

[14] 陈 倩. 聚丙烯纤维和粗骨料对超高性能混凝土抗拉强度的影响研究 [J]. 水利与建筑工程学报,2019(6):113-116.

[15] 张玉武. UHMWPE 纤维混凝土静动态力学性能研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学,2014.

(上接第 160 页)

[5] 王 玲,张洪涛,姚 燕,等. 超细复合水泥及其混凝土性能的研究 [J]. 建筑材料学报,2002,5(2):103-107.

[6] Noske P. 超细水泥灌浆在岩土工程中的应用 [C]//岩石与混凝土灌浆译文集,1995:48-52.

[7] Borchardt P. 有效灌入法——一种新的灌浆工艺——使用超细水泥和聚氨酯进行补充灌浆的实例 [C]//岩石与混凝土灌浆译文集,1995:93-100.

[8] Pantazopoulos L A, Markou I N, Christodoulou D N, et al. Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements [J]. Cemnet & Concrete Composites, 2012,34(5):593-603.

[9] 于秀文,李承先. 沙砾岩中的超细水泥灌浆试验 [J]. 水利发电,2001(7):34-36.

[10] 马志登,陈建有,郑雄伟,等. 超细水泥帷幕灌浆在某水库除险加固中的应用 [J]. 施工技术,2012,41:351-353.

[11] 管学茂,胡曙光,丁庆军,等. 超细高性能灌浆水泥的性能及其微观结构研究 [J]. 水泥,2003(6):10-13.

[12] 符 平,杨晓东. 灌浆水泥浆液结石强度计算方法研究 [C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会第十一次全国学术技术研讨会暨 2011 年全国水利水电地基与基础工程学术研讨会. 北京:中国水利水电出版社,2011:25-30.