

文章编号: 1001-4888(2017)03-0385-12

有压水环境中的混凝土动态抗压性能试验研究^{*}

王乾峰^{1,2}, 刘云贺¹, 彭刚²

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西西安 710048; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002)

摘要: 对有压水环境中的混凝土进行了不同应变速率下的动态压缩试验研究, 获得了水压为 0~10MPa 时的混凝土含水量特征以及不同应变速率下的应力应变曲线。试验结果表明: 应变速率不高于 $10^{-3}/\text{s}$ 时, 混凝土的应力应变曲线与干燥混凝土的相似, 受力状态如同单轴加载; 在应变速率为 $10^{-2}/\text{s}$ 时, 其应力应变曲线的后半支随水压力增加而提高, 与三轴受力状态类似, 水压力对混凝土形成了围压效应。混凝土的强度及其动态增强因子随应变速率呈非线性增加趋势, 水压力越高则增长速度越快。强度压力增强因子随水压力的变化趋势在不同应变速率下存在差异。在慢速加载时, 强度压力增强因子变化幅度为 10%, 而快速加载时, 其随水压力提高而增加, 且显著高于慢速加载时的情况。在深入研究混凝土强度动态增强因子和压力增强因子的基础上, 构建了有压水环境中混凝土的经验本构模型。该模型考虑了水压力和应变速率共同作用对混凝土强度的影响, 与试验数据吻合较好。结合混凝土的含水量特征, 进一步分析了不同应变速率下孔隙水对其力学性能影响的作用机理, 分析表明含水量不同导致了粘滞应力和超孔隙水压力的差异, 从而引起混凝土强度的非线性增长。

关键词: 混凝土; 水压力; 应力应变曲线; 动态性能; 本构关系

中图分类号: TU528.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-099

0 引言

混凝土是在水工结构和近海结构物中广泛应用的材料, 水环境作用将使混凝土处于饱和或半饱和状态, 从而影响混凝土的力学性能^[1]。在深水区域的结构表层部分将形成与水压力相等的孔隙水压力^[2], 同时还有水压力作用于结构表面。因此, 混凝土的饱和与力学加载^[3-5]都在大气环境中的试验结果用于有压水环境中结构的计算值得商榷。李宗利等^[6]考虑到高压水渗透和孔隙水压力对混凝土的影响, 采用高水压力饱和混凝土, 但试验最终还是在大气环境中进行的。

从已有文献看, 混凝土饱和与加载都在水压力条件下的力学试验较少。Haynes 等^[7]开展了水深为 6100m (等效于 61MPa) 的混凝土静态单轴压缩试验, 与湿气养护条件下的强度相比, 降低了 10%。Bjerkeli 等^[8]对混凝土在 400m 和 800m 水压力下开展的静态压缩试验表明, 水压力作用对混凝土强度和弹性模量没有显著影响。Clayton^[9]验证了 Haynes^[7]和 Bjerkeli^[8]的试验结果, 还进行了水泥基材的试验, 结果表明, 在 60MPa 水压力下不降低水泥基材的强度; 但在高于混凝土强度的水压力下, 围压效应导致水泥基材与骨料结合面之间产生裂缝, 从而降低了混凝土复合材料的强度。李庆斌等^[10]让干燥混凝土处于有压水环境中, 强度发生了降低。除了静态荷载作用外, 混凝土结构还可能受到地震荷载的作用。Chen 等^[11]进行了水环境中混凝土的动态力学试验, 试件在水压力稳定后开始施加力学荷载, 对

^{*} 收稿日期: 2016-05-22; 修回日期: 2016-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279092); 水利部公益性行业科研专项(201501034-03)资助

通讯作者: 刘云贺(1968—), 男, 教授, 博士生导师。主要从事水工结构抗震研究。Email: liuyunhe1968@163.com

混凝土渗流时间因素考虑不足^[12]。彭刚等^[13]也对水压力环境中饱和的试件进行了动态力学试验,混凝土饱和时间为 6 小时后再进行力学加载。刘博文等^[14]开展了孔隙水循环作用后混凝土的动态力学加载试验,梁辉等^[15]分析了孔隙水循环作用后混凝土的损伤特性。以上研究着重关注混凝土强度的变化规律,缺乏对于能反映混凝土力学特性的全应力应变曲线的系统研究,仅在文献[15]中作了部分展示,水压力和应变速率对应力应变曲线影响的研究不充分。另外,有压水环境中的混凝土动态荷载试验研究^[11,13,14]表明,混凝土强度随应变速率呈非线性关系,采用线性关系模型已不能很好地反映混凝土强度的非线性特性^[14],需要构建新的关系模型以描述混凝土强度的这种变化规律。

含水量是影响混凝土静动态力学性能的重要因素^[16-19],文献[19,20]较为详细地分析了大气环境下饱和混凝土的含水量对静动态力学性能的影响。然而,文献[7-15]只考虑了水压力因素对混凝土力学性能的影响,没有测量混凝土在水压力环境下的含水量,缺乏基于含水量特征对有压水环境中混凝土动态力学性能影响的作用机理分析。

综合以上分析,对于有压水环境中的混凝土全应力应变曲线、强度经验模型以及孔隙水对动态力学性能影响的作用机理等方面研究还不够充分。为此,本文开展了混凝土的饱和与力学加载都在有压水环境中的试验,获得了混凝土的含水量以及应力应变曲线,分析了水环境中混凝土的受力状态,并建立了考虑应变速率和水压力共同作用对混凝土强度影响的经验本构模型,进一步结合混凝土的含水量特征分析了不同应变速率下孔隙水对其力学性能影响的作用机理。

1 试验

1.1 试样制备

本试验中混凝土试件尺寸为 $\phi 150 \times 300 \text{ mm}$,采用普通硅酸盐水泥 P. O 42.5,其水泥性能符合普通硅酸盐水泥标准^[21]。细骨料是天然河砂,其细度模数为 1.8;粗骨料是粒径 5~30mm 的连续级配天然河卵石;拌合水为饮用自来水。水灰比为 0.5,其质量配合比为水:水泥:砂:石子=0.50:1.00:1.75:3.24。新拌混凝土的平均坍落度为 30~50mm。

混凝土采用普通强制搅拌机拌合,之后拌合物被浇筑到一个深 400mm 池子中,并在自然条件下养护。90 天后,使用混凝土取芯机钻取试样,之后将试件存放于室内环境条件下。混凝土试件的直径为 150mm,长度约为 400mm。在试验之前,将试件的两端切除,留下的长度约为 305mm,再使用磨平机将试件两端磨平,直到剩余 300mm,并保证试件的两个端面平整和平行。在试验时,混凝土试件的龄期超过了 1200 天。试件的龄期很长,保证了试件强度的稳定,可以忽略龄期因素对混凝土强度的影响。



图 1 加载设备

Fig. 1 Test setup

1.2 试验设备

试验采用三峡大学的 10MN 大型多功能液压伺服静动力三轴仪,对混凝土试件进行水饱和与力学加载。利用围压桶使混凝土水饱和,其最大围压和最大孔隙水压力值为 30MPa,通过加载框架系统对混凝土试件进行力学加载,竖向最大动、静力负荷分别为 5000kN 和 10000kN。为了对试件的变形进行有效测量,围压桶内安装了由三峡大学自行设计的高压水环境内试件变形测量装置^[15]。试验加载设备见图 1。通过电脑系统可以独立控制围压桶的水压力和轴向的加载速率,可以保证整个加载水压力稳定,变化幅度小于 0.01MPa,轴向控制的应变速率恒定,其范围为 $10^{-5} \sim 10^{-2} / \text{s}$ 。

1.3 试验方案

本文在有压水环境中对混凝土进行静动态压缩试验,应变速率分别为 $10^{-5} / \text{s}$ 、 $10^{-4} / \text{s}$ 、 $10^{-3} / \text{s}$ 和 $10^{-2} / \text{s}$,水压力分别为 0MPa、2MPa、5MPa 和 10MPa。试验分为两组,一组混凝土试件在大气自然环境下进行力学试验(Tested in Atmospheric Environment,

TAE),另一组混凝土试件在有压水环境下进行水饱和与力学试验(Saturated and Tested under Water Pressure,STWP)。每种工况都测试3个试件,取均值作为代表值。

对于STWP组而言,混凝土试件分别在2MPa、5MPa和10MPa的有压水环境中饱和6小时,然后保持相同水压环境不变,直接进行轴向加载力学试验。为与TAE组的结果对比分析,还进行了一组0MPa水环境下的力学试验。加载前将干燥混凝土在1MPa的有压水环境中饱和6小时,然后将水压力降至0MPa保持2小时,混凝土内部的孔隙水压力消散后再进行轴向加载。混凝土在2MPa水压力条件下饱和过程中,经历4小时后推送到围压桶内的水的体积显著减小,且随后2小时基本稳定,可以认为完全饱和。由于水压力越高渗透速度越快^[22],混凝土达到完全饱和的时间也将缩短,因此在5MPa和10MPa水压力下,混凝土饱和6小时可以完全饱和。但在1MPa水压力下保持6小时,推送到围压桶的水的体积仍呈增加趋势,混凝土饱和不够充分。在0MPa水压力下保持2小时,可认为混凝土的孔隙压力达到平衡。

混凝土试件饱和之后,开始缓慢预施加20kN的轴向荷载,同步检查数据采集系统并确认其工作状态完好。然后,以预定的轴向应变加载速率($10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$)进行力学加载直至试件破坏。整个轴向加载过程中,通过水压力控制系统保持围压桶的预定水压力稳定不变。对TAE组而言,直接在大气压环境下对试件进行加载,应变速率与STWP组相对应。

1.4 混凝土含水量特征

本文试验中,围压桶在水压力作用下必定发生一定的变形,以及长时间保持水压力的过程中存在一定的渗漏量,通过水压力控制系统推送到围压桶的水的体积会包含该部分。为了确定混凝土吸入水的体积,将与混凝土体积相等的铁块放入围压桶内,在水压力升高到一定值后保持至少3小时,得到水压力升高过程中设备变形所需要的水用量,以及水压力保持过程中设备的渗漏量。根据以上数据,对试件饱和6小时推送到围压桶内的总水量进行修正,得到试件的含水量。另外,为了得到同批次试件在大气环境下的完全饱和含水量,将试件完全浸入水槽中240小时,此时混凝土的质量恒定,可以认为混凝土完全饱和,其含水量用 w_s^{ac} 表示。

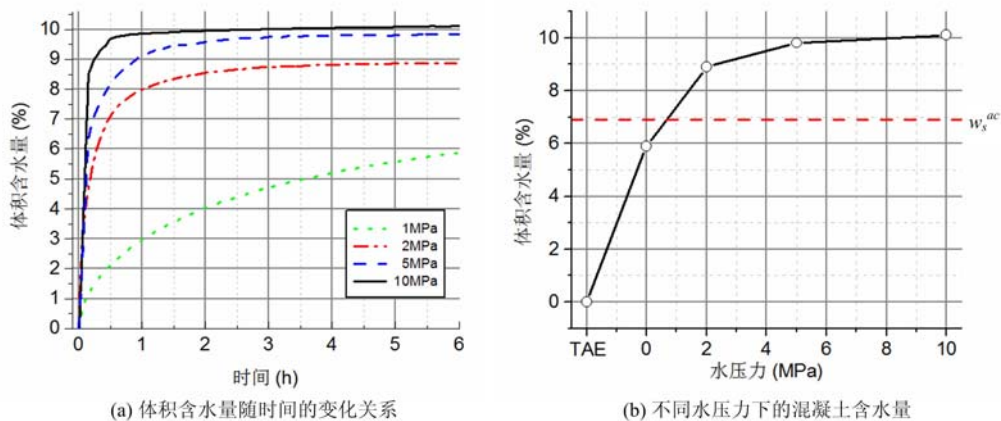


图2 混凝土的体积含水量

Fig. 2 Volumetric water content of concrete

本文采用体积含水量表示混凝土的含水量特征,其值为混凝土吸入水的体积与其表观体积的比值。混凝土在1MPa、2MPa、5MPa、10MPa水压力饱和6小时过程中的体积含水量随时间变化的过程如图2(a)所示,它们最终的体积含水量以及大气压力下完全饱和混凝土的体积含水量见图2(b),其中 $w_s^{ac}=6.9\%$ 。

从图2(a)可以发现,混凝土试件在2MPa、5MPa和10MPa水压力下经过6小时含水量达到稳定,其体积含水量分别为8.9%、9.8%和10.1%。根据达西定律和渗流力学原理^[22],此时渗流速度几乎为0,混凝土内外没有压力差,其内部的孔隙水压与外部的水压力相同,形成了中性孔隙水压力。但是在1MPa水压力下混凝土浸泡6小时,其体积含水量仅有5.9%,低于大气压力下饱和混凝土的含水量。

降低水压力后,混凝土还可以吸水。由于混凝土外部的水压力为 0MPa,其吸入量可以忽略不计。

从图 2(b)可以发现,混凝土的含水量随水压力提高而增加。水压力不超过 5MPa 时,混凝土的含水量增加迅速,而水压力超过 5MPa 后,其含水量增加缓慢。其原因可能是随混凝土含水量增加,其孔隙内的气体被压缩,气体压力增加限制了水向混凝土内部的渗透。同时,还可以发现有压水环境下 (2MPa、5MPa 和 10MPa),混凝土的含水量高于 w_s^{ac} ,而本研究中采用 1MPa 水压下饱和 6 小时再降低水压力到 0MPa 水压力的试件,其含水量低于 w_s^{ac} ,混凝土饱和不够充分。

2 混凝土全应力应变曲线特性

通过试验得到了不同应变速率 ($10^{-5}/\text{s}$ 、 $10^{-4}/\text{s}$ 、 $10^{-3}/\text{s}$ 和 $10^{-2}/\text{s}$) 下在不同加载环境 (TAE 组和 STWP 组的 0MPa、2MPa、5MPa 和 10MPa) 的全应力应变曲线。为了研究水压力对混凝土力学性能的影响,图 3 给出了相同应变速率下包含不同水压力 (0MPa、2MPa、5MPa 和 10MPa) 饱和混凝土 (STWP 组) 和干燥混凝土 (TAE 组) 的应力应变曲线组合,图中以强度为中间值的曲线作为代表性应力应变曲线。

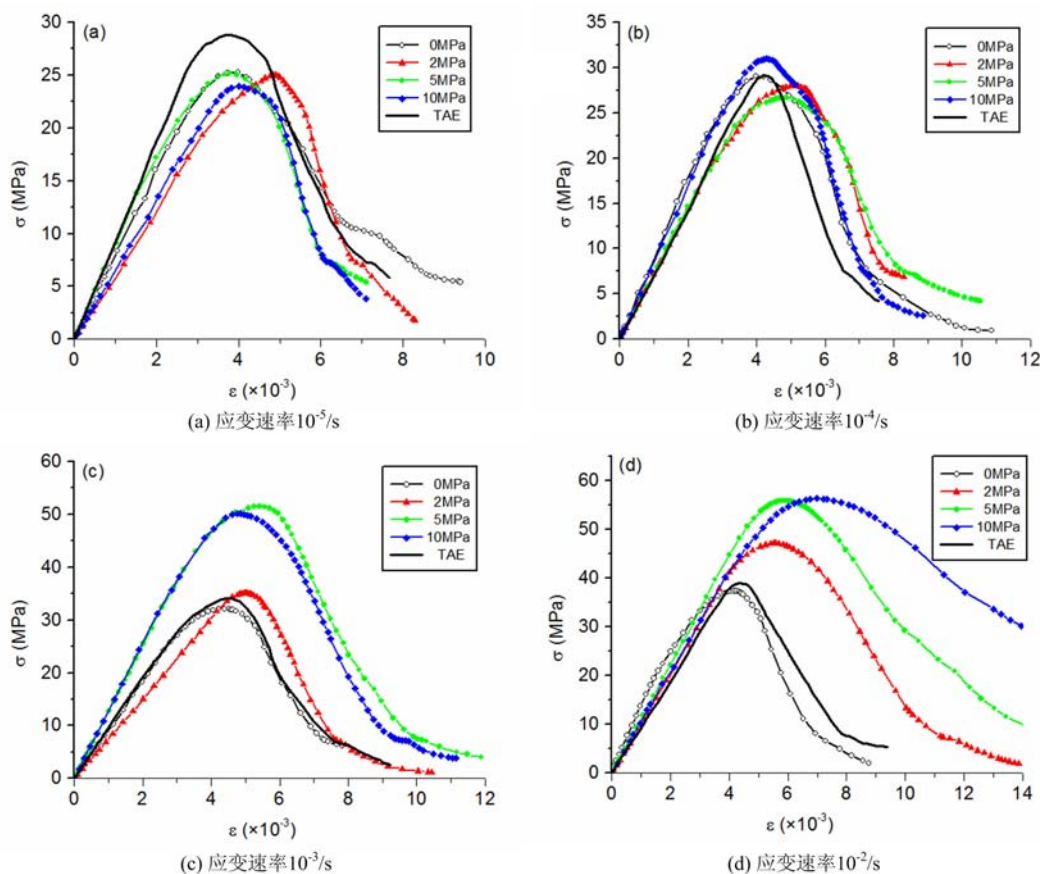


图 3 不同应变速率下 TAE 和 STWP 组应力应变曲线组合

Fig. 3 Stress-strain curves combination of TAE and STWP group under different strain rate

从图 3(a) 和 (b) 中可以发现,应变速率 $10^{-5}/\text{s}$ 和 $10^{-4}/\text{s}$ 时,STWP 组混凝土在不同水压力 (0MPa、2MPa、5MPa 和 10MPa) 下的曲线变化趋势基本相同,而且与 TAE 组的混凝土曲线形状相似,没有表现出强度随静水压力增加的特点,这表明水环境中的混凝土受力状态与单轴相似。其主要原因是混凝土完全饱和后,内部孔隙水压力与外部水围压相等,两者对试件的作用相互抵消。应变速率 $10^{-5}/\text{s}$ 被视为准静态,可以忽略混凝土骨架率效应和水的 Stefan 效应引起的粘滞应力对力学性能的影响^[5],应力应变曲线反映了混凝土骨料的材料性能。在图 3(a) 中,STWP 组的应力应变曲线低于 TAE 组的应力应变曲线,其主要原因是混凝土在饱和过程中,水压力作用损伤了混凝土的微观孔隙结构,弱化了混凝土基体材料的强度^[6]。但是在应变速率 $10^{-4}/\text{s}$ 时,STWP 组的应力应变曲线在强度前与 TAE 组的

应力应变曲线一致,而且曲线的后半支还略高于 TAE 组的曲线。相比于应变速率 $10^{-5}/\text{s}$ 的情况,应力应变曲线在应变速率 $10^{-4}/\text{s}$ 时所反映的力学性能整体上提高了,见图 3(b)。这主要是因为提高应变速率,水引起的粘滞应力增加了混凝土的应力。

在应变速率 $10^{-3}/\text{s}$ 时 STWP 组应力应变曲线的形状与干燥混凝土(TAE)很相似,但是 5MPa 和 10MPa 的应力应变曲线显著高于 TAE 组混凝土的曲线,而且它们的曲线几乎相同。应变速率 $10^{-2}/\text{s}$ 时 STWP 组的应力应变曲线随水压力的增加显著改变,曲线的变化趋势与 Zeng 等^[23]和 Sfer 等^[24]对密封试件进行三轴试验所得到的曲线很相似,只是增长速度没有被密封试件那么明显。

从图 3 可以看出,在应变速率 $10^{-5}/\text{s}$ 、 $10^{-4}/\text{s}$ 和 $10^{-3}/\text{s}$ 时,STWP 组的混凝土曲线与 TAE 组混凝土曲线的形状十分相似,只是曲线所反映的混凝土强度值随应变速率的增加而提高了。在应变速率 $10^{-2}/\text{s}$ 时,STWP 组混凝土的曲线后半支随水压力增加逐步提高,表现出水对试件的围压效应。在该应变速率下,试件到达峰值应变的时间不到 1 秒且整个试验的时间不到 2 秒,水没有充足时间填满整个试件的裂缝,水压力就会产生围压效应使混凝土的应力增加,围压效应随水压力从 2MPa 到 10MPa 呈逐渐增加趋势。应变速率不高于 $10^{-3}/\text{s}$ 时,试件的加载时间较长,水有充足的时间填充裂缝,水压力对各个裂缝面与试件表面的作用相互抵消,不表现出围压效应。

3 混凝土强度分析

本研究中,STWP 组混凝土处于水环境中,试样在加载时受到水压力和轴向荷载的共同作用。通过对应力应变曲线的分析表明,在慢速加载时,水压力不起围压作用,而且 Butler^[25]认为在密封的水压力环境中,试件形成中性孔隙水压力,试件的破坏由外荷载导致。因此,本研究中混凝土强度为轴向最大荷载与试件截面积的比值,结果见表 1。

表 1 混凝土强度平均值(MPa)
Tab. 1 Average strength of concrete (MPa)

应变速率(/s)	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
TAE	28.88	31.29	36.09	38.73
STWP	0MPa	25.80	27.64	29.66
	2MPa	24.99	30.72	36.71
	5MPa	23.16	30.00	47.56
	10MPa	23.61	29.56	44.22

为了表述应变速率和水压力对混凝土强度(或弹性模量)的影响,引入了动态增强因子(Dynamic Increase Factor,DIF)和压力增强因子(Pressure Increase Factor,PIF)^[23]。混凝土强度(或弹性模量)的动态增强因子(DIF)定义为混凝土强度(或弹性模量)在各个应变速率下的值与其在应变速率为 $10^{-5}/\text{s}$ 时的比值,且动态增强因子(DIF)在各自的水压条件下计算。混凝土强度(或弹性模量)的压力增强因子(PIF)定义为混凝土强度(或弹性模量)在各个水压力下的值与其在 0MPa 水压力时的比值,且压力增强因子(PIF)在各自的应变速率下计算。

3.1 应变速率对强度的影响

混凝土的 TAE 组和 STWP 组在四种水压力(0MPa、2MPa、5MPa 和 10MPa)下,强度及其动态增强因子(DIF)随应变速率的关系见图 4。

应变速率为 $10^{-5}/\text{s}$ 时,STWP 组混凝土在不同水压力下的强度变化幅度很小。从图 4 中可以发现,混凝土强度及其动态增强因子(DIF)的变化趋势大致相同,两者都随应变速率呈非线性增长。水压力越大,强度动态增强因子的增长速度越快,但是水压力 5MPa 和 10MPa 时的强度动态增强因子几乎相同。

在 0MPa 水压力下,强度动态增强因子(DIF)表现为线性增长趋势,与 TAE 组混凝土的增长趋势一致。在应变速率为 $10^{-2}/\text{s}$ 时,0MPa 水压力下的强度动态增强因子约 1.4。在 2MPa、5MPa 和

10MPa 水压力下,混凝土的强度动态增强因子随水压力增大而显著增加。在 10MPa 水压力下的强度动态增强因子达到 2.4。

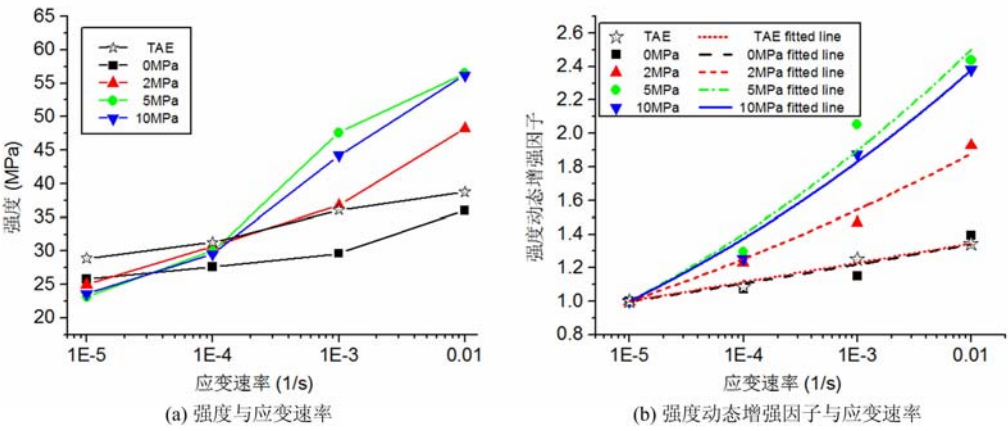


图 4 强度和强度动态增强因子与应变速率的关系

Fig.4 Strength and the DIF of strength with strain rate

已有的研究表明,干燥或是湿态混凝土的强度与应变速率之间呈线性关系并可采用式(1)表示^[5],本研究中,STWP 组混凝土呈显著的非线性增长关系,对式(1)修正得到式(2),以描述强度动态增强因子(DIF)与应变速率的非线性关系。

$$DIF(\sigma_d) = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + k \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right) \tag{1}$$

$$DIF(\sigma_d) = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} = \left[1 + k \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^3 \tag{2}$$

式中, σ_d 为动态荷载下的强度; σ_s 为准静态强度; $\dot{\epsilon}_d$ 为动态应变速率(试验中 $\dot{\epsilon}_d = 10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$); $\dot{\epsilon}_s$ 为准静态应变速率($\dot{\epsilon}_s = 10^{-5}/s$); k 为参数。对四种水压力下的试验数据进行拟合,得到的参数 k 及其相关系数见表 2。

表 2 不同水压力下的参数 k 值

Tab.2 Parameter k under different water pressures

加载条件	TAE	水压力(MPa)			
		0	2	5	10
公式	(1)	(2)	(2)	(2)	(2)
k	0.1149	0.0342	0.0779	0.1190	0.1115
R^2	0.9808	0.9815	0.9815	0.9703	0.9857

3.2 水压力对强度的影响

在四种应变速率下,STWP 组的混凝土强度及其压力增强因子(PIF)随水压力的变化见图 5。

从图 5(a)可以发现,应变速率为 $10^{-5}/s$ 时,强度随水压力增加略微下降,但是在应变速率为 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$ 时,强度随水压力提高而增长,应变速率越高其增加的幅度越明显。当水压力超过某一个值时,强度不再增加。在应变速率为 $10^{-4}/s$ 时,水压力大于 2MPa 时强度不再增加,而应变速率为 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$ 时水压力超过 5MPa 后强度不再增加。

观察图 5(b)可以发现,在应变速率为 $10^{-5}/s$ 和 $10^{-4}/s$ 时,强度压力增强因子(PIF)变化幅度为 10%。应变速率为 $10^{-5}/s$ 时,强度压力增强因子略微下降,其最小值为 0.9,而应变速率为 $10^{-4}/s$ 时,强度压力增强因子略微上升,其最大值为 1.1。但是在应变速率为 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$ 时,强度压力增强因子随水压力提高显著增加,总体上应变速率为 $10^{-3}/s$ 时的强度压力增强因子略低于应变速率 $10^{-2}/s$ 的情况,在 10MPa 水压力时它们的值分别为 1.49 和 1.56。强度的压力增强因子与水压力的关系可以用式(3)表示。

$$PIF = \frac{\sigma_c}{\sigma_0} = 1 + r \cdot \arctan(s \cdot P) \tag{3}$$

式中, σ_c 为给定水压力下的混凝土强度; σ_0 为水压力为 0MPa 时的混凝土强度; P 为水压力; r 和 s 为参数。基于试验数据采用式(3)拟合得到参数 r 和 s 的结果见表 3。

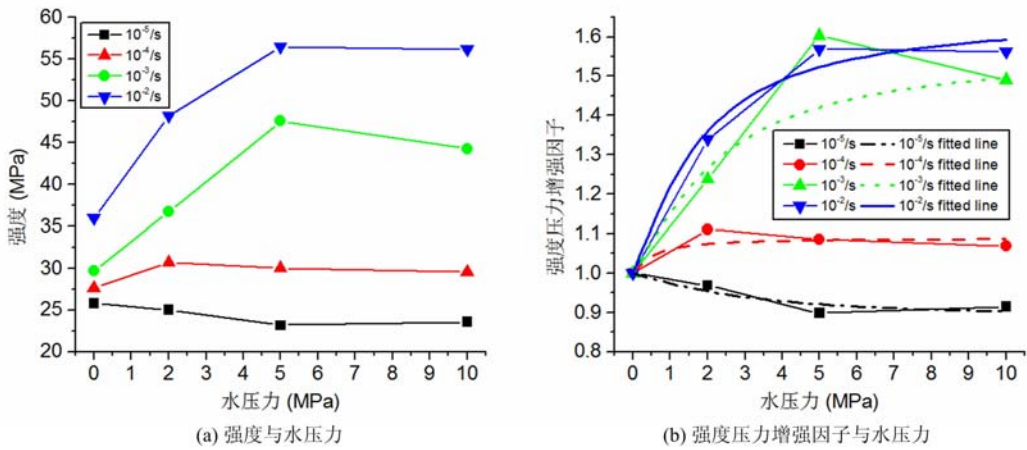


图5 强度和强度压力增强因子与水压力的关系

Fig. 5 Strength and the PIF of strength with water pressure

表3 不同应变速率下的参数 r 和 s 值

Tab. 3 Parameters r and s under different strain rates

应变速率(/s)	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
r	-0.0754	0.0574	0.3679	0.4246
s	0.3574	1.8182	0.4401	0.5663
R^2	0.8655	0.8530	0.8436	0.9835

3.3 本构模型

为了描述应变速率和水压力对混凝土共同作用的影响,将建立 STWP 组混凝土的经验本构模型。通过分析,本构模型的构建可以利用以上分析得到的强度动态增强因子(DIF)和压力增强因子(PIF)计算公式。

观察图 5 发现,只需以 0MPa 水压力下的混凝土静态强度为基础,乘以 PIF 就可以得到水压力环境下混凝土的经验本构模型。因此,首先利用 DIF 公式(2)计算得出 0MPa 水压力时混凝土的强度,再利用 PIF 公式(3)就可以求得不同应变速率 and 不同水压力下的混凝土强度值。表达式为

$$\sigma_c = \sigma_{0,s} \cdot DIF \cdot PIF \tag{4}$$

式中, $\sigma_{0,s}$ 为 0MPa 水压力下混凝土在应变速率 $10^{-5}/s$ 时的强度, DIF 由公式(2)采用 0MPa 水压力的参数计算, PIF 采用公式(3)计算。计算结果见图 6。

3.4 机理分析

通过对图 3~图 5 的分析,结果表明水压力 and 应变速率显著地影响混凝土的强度。从图 5 可以发现,在慢速加载($10^{-5}/s$ 和 $10^{-4}/s$)和快速加载($10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$)时,水压力对混凝土强度的影响有显著差异。

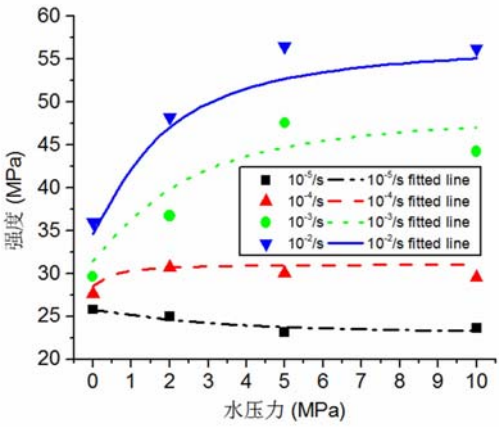


图6 本构模型预测曲线与试验值对比

Fig. 6 Contrast between test value and model curves

在应变速率为 $10^{-5}/\text{s}$ 时,不考虑混凝土骨架的率效应和水引起的粘滞应力,而且混凝土到达峰值应力时水可以渗透到裂缝中,其内部的孔隙水压力与外部水压力对混凝土的力学效应抵消,因此该应变速率下得到的强度反映了混凝土骨架的力学性能。从图 3(a)可以发现,STWP 组混凝土应力应变曲线形状与干燥混凝土(TAE)基本一致,但是 STWP 组混凝土强度低于 TAE 组混凝土的强度。闫东明^[5]对混凝土的抗压试验和 Wu 等^[19]对梁的弯曲试验也表明干燥试件在大气环境下的水中饱和后,尽管水的存在提高了混凝土的率敏感性,但是其强度仍低于干燥混凝土的值。然而,Bjerkeli 等^[8]和 Clayton^[9]对水养护好的试件置于水压力环境下分别为 56 天和 6 天的时间,使其内部形成稳定的孔隙水压力,之后再再进行静态力学加载,结果表明水压力不高于 8MPa 时混凝土的强度不受水压力的影响。Chen 等^[11]的试验也表明在相同水压力环境下,水养护混凝土的强度高于干燥混凝土的强度。在水环境下,养护方式影响混凝土强度,其原因主要是水向混凝土内部渗透过程中损伤微观孔隙结构和弱化基体强度的程度不同。对于水养护混凝土已经处于大气压力下的饱和状态,在水压力条件下只需渗透少量的水,其含水量就能稳定。水在渗透过程中对混凝土基体的损伤较小,而且水养护也有利于提高混凝土的强度,但是水向干燥混凝土内部渗透的更多,会显著地损伤混凝土基体,降低其强度。在文献[6]中,先用水压力使混凝土饱和,之后再卸载水压力并进行后续的力学试验,对混凝土施加水压力和卸载水压力的过程造成了混凝土的双重损伤,导致其强度和弹性模量降低。

在应变速率 $10^{-4}/\text{s}$ 时,STWP 组混凝土应力应变曲线与干燥混凝土(TAE)的基本一致,见图 3(b)。相比于应变速率 $10^{-5}/\text{s}$ 时的情况,STWP 组混凝土的强度有所提高。图 5(b)也表明应变速率 $10^{-4}/\text{s}$ 时,在水压力环境中混凝土强度提高约 10%。其主要原因是提高应变速率后,混凝土中的孔隙水在裂缝中运动引起了粘滞应力,使混凝土强度提高。

观察图 5(b)可以发现,在快速加载($10^{-3}/\text{s}$ 和 $10^{-2}/\text{s}$)时,混凝土的强度增长速度显著高于慢速加载的情况,这主要由两个因素导致:其中一个因素是粘滞应力,它随含水量的提高而增加。从图 2(b)所得到的混凝土含水量可知,水压力越高,含水量越大,在混凝土内部所引起的粘滞应力将越显著;另一个因素是快速加载时更容易导致超孔隙水压力,它与土在强夯作用下孔隙水不能及时排出引起超孔隙水压力的情况^[26]类似。由于本研究中使用干燥混凝土试件,其孔隙中存在气体,在一定的水压力下,孔隙则不能完全被水所填充。慢速加载时,孔隙水受到混凝土骨架挤压后,孔隙水有充足的时间流动,孔隙中夹杂的空气将释放因水压缩而产生的孔隙水压力,从而不引起超孔隙水压力;在快速加载时,孔隙水在混凝土骨架的挤压作用下则很容易产生超孔隙水压力,通常孔隙水含量越高所能引起的超孔隙水压力也越强。由于混凝土的含水量随水压力的增加而提高,因此在快速加载时混凝土的强度随水压力提高而增长。在水压力从 5MPa 增加到 10MPa 时,混凝土强度几乎没有变化,这与混凝土的含水量几乎相同有密切关系,而且从图 4(b)可以发现 5MPa 和 10MPa 时的强度及其动态因子几乎相同。从图 3(c)的应力应变曲线中可以看出,5MPa 和 10MPa 的应力应变曲线基本相同,这与含水量相等密切相关;同时也可发现它们显著高于 0MPa 和 2MPa 的曲线,这表明混凝土内部产生了显著的超孔隙水压力。总之,含水量越高,孔隙水受挤压后的流动空间越小,更易引起超孔隙水压力。

在动态荷载作用下,粘滞应力和超孔隙水压力引起了混凝土宏观力学性能的变化。由于水压力的不同导致了含水量的差异,使得混凝土强度随应变速率呈非线性增长,这是与大气压力下完全饱和混凝土的强度呈线性增加的显著区别。另外,从图 4(b)中可以发现,0MPa 的混凝土强度动态增强因子与干燥混凝土(TAE)的基本一致,没有表现出孔隙水能提高混凝土率敏感性的性能^[5, 19],主要原因是混凝土没有完全饱和,其含水量低于大气压力下混凝土完全饱和时的含水量,引起的粘滞应力偏低。以上分析表明含水量是影响混凝土动态力学性能的重要因素。

国内外对有压水环境条件下的混凝土动态力学试验相当有限。刘博文等^[14]对循环孔隙水作用后的混凝土动态试验研究表明,随应变速率的提高,混凝土强度增长幅度显著加快,表现出强度随应变速率呈非线性增加的趋势,与文本试验结果的变化趋势一致。文献[14]中的混凝土在 1~3MPa 水压力条件下循环 10 次和 50 次后最终保持 3MPa 水压力进行力学加载,在应变速率 $10^{-2}/\text{s}$ 时其强度比静态加载时分别提高了 58.6% 和 52.7%,低于本文 2MPa 所提高的 92.8%,但显著高于大气环境下饱和混凝土

土抗压强度提高幅度值(30%)^[5]。Chen等^[11]进行的水环境下混凝土动态压缩试验,总体上混凝土在慢速加载时强度略有降低,而快速加载时强度随水压力的提高呈增加趋势;在8MPa水压力下,应变速率 $10^{-5}/s$ 时的混凝土强度降低20%,在应变速率 $10^{-2}/s$ 时的混凝土强度提高75%,略高于本文的57%。这可能与混凝土的孔隙结构有关,文献[11]中混凝土在8MPa水压力下的含水量高于本文10MPa时的值。然而文献[11]中在所有加载速率下,都出现了在2MPa水压力时强度显著降低的现象,这可能与水饱和方式有关,文[11]在水压力稳定后就开始加载。由于水压持续时间较短,在2MPa水压力下混凝土不能充分饱和,没有形成中性孔隙水压力,而在8MPa时,随着水压力提高,其饱和时间显著缩短,这可以从图2(a)中看出。在低水压力下混凝土的孔隙水填充孔隙越不充分,孔隙水压力与外围的水压力梯度越大,这将使混凝土开裂后,水压力对裂缝形成劈裂作用导致混凝土强度的降低^[11],而混凝土饱和和充分时这种劈裂效应将会消失,不影响混凝土的强度。Bjerkeli等^[8]对混凝土经历56天水压力饱和后的力学试验研究没有发现水压力作用影响混凝土强度的现象。

4 混凝土弹性模量的分析

弹性模量 E 取应力应变曲线上0到45%强度的割线。弹性模量及其动态增强因子(DIF)随应变速率的关系见图7,在四种应变速率下,STWP组混凝土的弹性模量及其压力增强因子(PIF)随水压力的变化见图8。

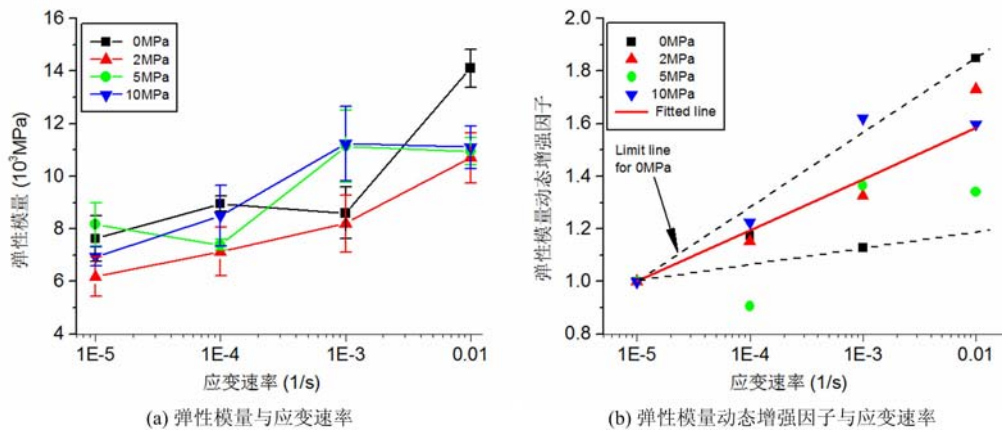


图7 弹性模量和弹性模量动态增强因子(DIF)随应变速率的关系

Fig. 7 Elastic modulus and the DIF of elastic modulus with strain rate

从图7(a)可见,弹性模量随应变速率提高大致呈线性增长,弹性模量动态强度因子主要集中在0MPa饱和混凝土的数据范围之内。应变速率越高,弹性模量动态强度因子的离散性越大。根据试验数据建立的弹性模量动态强度因子(DIF)与应变速率的关系见式(5)。

$$DIF(E_d) = \frac{E_d}{E_s} = 1 + 0.1948 \cdot \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right) \quad (5)$$

式中, E_d 为动态荷载下的弹性模量; E_s 为静态弹性模量; $\dot{\epsilon}_d$ 为动态应变速率(试验中 $\dot{\epsilon}_d = 10^{-4}/s$, $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$); $\dot{\epsilon}_s$ 为准静态应变速率($\dot{\epsilon}_s = 10^{-5}/s$)。

从图8可以发现,在各个应变速率下,混凝土弹性模量及其压力增强因子(PIF)先减小再增加,在2MPa水压力时其值最小。水压力从0MPa增加到2MPa时两者均下降,但是之后都随着水压力提高呈增长的趋势。

已有研究表明,水对混凝土的弱化和增强作用都存在^[1]。本研究对应力应变曲线的研究表明,在水压力中饱和过程对混凝土的基体造成弱化,因此会造成弹性模量的降低。但是,随着水压力的增加,多孔介质的含水量增加^[27],本文试验得到的混凝土含水量规律与文献[27]相同。Wang等^[18]建立的半饱和混凝土力学特性预测模型认为弹性模量随含水量的提高而增加,同时Liu等^[28]的试验也表明混凝土的弹性模量随含水量的增加而提高。当混凝土含水量增加时,弹性模量提高的效果大于水压力饱和对

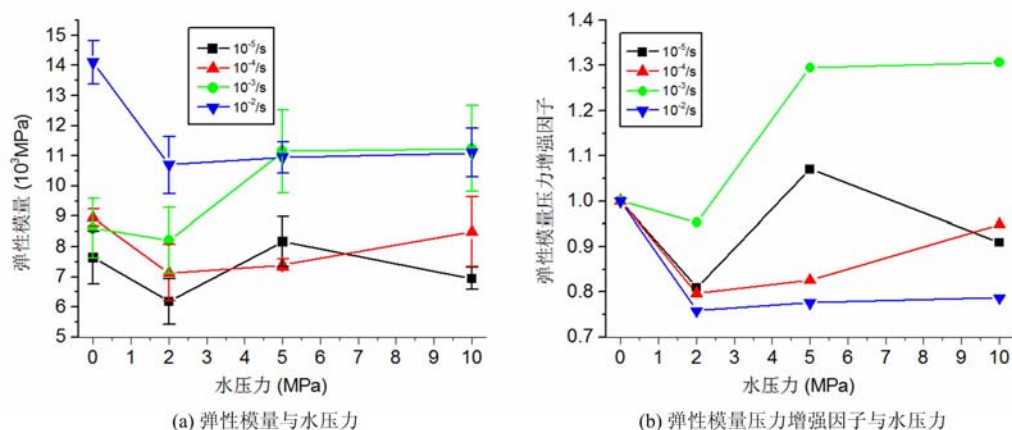


图 8 弹性模量和弹性模量压力增强因子(PIF)随水压力的关系

Fig. 8 Elastic modulus and the PIF of elastic modulus with water pressure

混凝土的弹性模量降低值时,就会出现增长的现象。

5 结论

本文对有压水环境中的混凝土进行了应变速率 $10^{-5}/\text{s}$ 、 $10^{-4}/\text{s}$ 、 $10^{-3}/\text{s}$ 和 $10^{-2}/\text{s}$ 下的动态压缩试验,并考虑水压力和应变速率共同的影响,建立了水环境中混凝土的本构模型,主要得到以下结论:

(1) 应变速率不高于 $10^{-3}/\text{s}$ 时,混凝土的应力应变曲线与干燥混凝土的曲线相似,受力状态如同单轴加载,表明水进入到了破坏混凝土的裂缝中,水对混凝土各个面(包含裂缝面)的作用抵消;但是在应变速率为 $10^{-2}/\text{s}$ 时,混凝土的应力应变曲线后半支随水压力增加而提高,与三轴受力状态类似,水压力对混凝土形成了围压效应,表明该应变速率下,水没有充足的时间进入到破坏混凝土的裂缝中。

(2) STWP 组混凝土强度及其动态增强因子随应变速率呈非线性增加趋势,增长速度随水压力提高而更加显著。混凝土强度压力增强因子(PIF)在不同应变速率下存在差异。在应变速率为 $10^{-5}/\text{s}$ 和 $10^{-4}/\text{s}$ 时,PIF 变化微弱,分别下降或上升 10%,而在应变速率为 $10^{-3}/\text{s}$ 和 $10^{-2}/\text{s}$ 时,PIF 随水压力提高显著增加,在 10MPa 时其值分别为 1.49 和 1.56。通过分析不同应变速率下孔隙水对混凝土力学性能影响的作用机理,认为含水量不同导致了粘滞应力和超孔隙水压力的差异,并引起混凝土强度的非线性增长。

(3) STWP 组混凝土弹性模量随应变速率呈线性增加。随水压力的提高,弹性模量的 PIF 在各个应变速率下先减小再增加,在 2MPa 水压力时其值最小。

(4) 在研究 STWP 组混凝土 DIF 和 PIF 关系的基础上,进一步构建了有压水环境中混凝土的经验本构模型。该模型考虑了水压力和应变速率共同作用对混凝土强度的影响,与试验数据吻合较好。

参考文献:

- [1] 李庆斌,王海龙. 水环境对混凝土力学性能的影响研究述评[J]. 中国科技论文, 2006(2):83-94 (LI Qingbin, WANG Hailong. Influence of ambient water on properties of concrete[J]. Sciencepaper Online, 2006(2):83-94 (in Chinese))
- [2] Bazant Z P, Najjar L J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete[J]. Matériaux Et Construction, 1972, 5(1):3-20.
- [3] 王海龙,李庆斌. 不同加载速率下饱和混凝土的劈拉试验研究及强度变化机理[J]. 工程力学, 2007, 24(2):105-109 (WANG Hailong, LI Qingbin. Experiments on saturated concrete under different splitting tensile rate and mechanism on strength change[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2):105-109 (in Chinese))
- [4] 王海龙,李庆斌. 孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响[J]. 工程力学, 2006, 23(10):141-144 (WANG Hailong, LI Qingbin. Effect of pore water on the compressive strength of wet concrete[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10):141-144 (in Chinese))

- [5] 闫东明. 混凝土动态力学性能试验与理论研究[D]. 大连理工大学, 2006 (YAN Dongming. Experimental and theoretical study on the dynamic properties of concrete[D]. Dalian University of Technology, 2006 (in Chinese))
- [6] 李宗利, 杜守来. 高渗透孔隙水压对混凝土力学性能的影响试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(11):72—77 (LI Zongli, DU Shoulai. Experimental study on mechanical properties of concrete due to high seepage pore water pressure[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11):72—77 (in Chinese))
- [7] Haynes H H, Highberg R S. Concrete properties at ocean depths[J]. Journal of the Waterways Harbors and Coastal Engineering Division, 1976, 102(4):455—470.
- [8] Bjerkeli L, Jensen J J, Lenschow R. Strain development and static compressive strength concrete exposed to water pressure loading[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(3):310—315.
- [9] Clayton N. Effect of water pressure on concrete strength[C]. Proceedings of the Second International Conference on Concrete under Severe Conditions. Tromsø, Norway, 1998:978—987.
- [10] 李庆斌, 陈樟福生, 孙满义, 等. 真实水荷载对混凝土强度影响的试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(7):786—791 (LI Qingbin, CHEN Zhangfusheng, SUN Manyi, et al. Effect of water loading on strength of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7):786—791(in Chinese))
- [11] CHEN Zhangfusheng, HU Yu, LI Qingbin, et al. Behavior of concrete in water subjected to dynamic triaxial compression[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(3):379—389.
- [12] 杜守来, 李宗利, 金学洋. 孔隙水压对混凝土抗压强度影响的初步研究[J]. 人民长江, 2009, 40(3):54—55 (DU Shoulai, LI Zongli, JIN Xueyang. Preliminary research on influence of pore water pressure on concrete compressive strength[J]. Yangtze River, 2009, 40(3):54—55 (in Chinese))
- [13] 彭刚, 王乾峰, 梁春华. 有压孔隙水环境中的混凝土动态抗压性能研究[J]. 土木工程学报, 2015(1):11—18 (PENG Gang, WANG Qianfeng, LIANG Chunhua. Study on dynamic compressive properties of concrete under pore water pressure environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2015(1):11—18 (in Chinese))
- [14] 刘博文, 彭刚, 邹三兵, 等. 循环孔隙水作用下混凝土动态特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(5):88—94 (LIU Bowen, PENG Gang, ZOU Sanbing, et al. Experimental analysis of dynamic properties of concrete under cyclic pore water effects[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(5):88—94 (in Chinese))
- [15] 梁辉, 彭刚, 田为, 等. 循环孔隙水压下混凝土常规三轴压缩损伤破坏特性分析[J]. 实验力学, 2015, 30(6):802—809 (LIANG Hui, PENG Gang, TIAN Wei, et al. Damage property analysis of concrete subjected to conventional tri-axial compression under cyclic pore water pressure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6):802—809 (in Chinese))
- [16] 李守龙. 含水率对混凝土强度影响初步研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014 (LI Shoulong. Preliminary studies on the effect of water content and pore water pressure on the concrete strength[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014 (in Chinese))
- [17] 杨华. 基于细观力学方法的水分对混凝土力学性能影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015 (YANG Hua. Study on the effect of moisture on the mechanical performance of concrete based on mesoscopic level[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015 (in Chinese))
- [18] WANG Hailong, LI Qingbin. Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(5):1370—1379.
- [19] WU Shengxing, CHEN Xudong, ZHOU Jikai. Influence of strain rate and water content on mechanical behavior of dam concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36:448—457.
- [20] 计海力. 基于细观力学考虑孔隙及孔隙水影响的混凝土力学指标预测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012 (JI Haili. The predictions of concrete mechanic properties effect of porosity and pore water based on micromechanics [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012 (in Chinese))
- [21] GB175—2007. 通用硅酸盐水泥[S]. 2008 (GB175—2007. Common portland cement[S]. 2008 (in Chinese))
- [22] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010 (KONG Xiangyan. Advanced mechanics of fluid in porous media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010 (in Chinese))
- [23] ZENG Shajie, REN Xiaodan, LI Jie. Triaxial behavior of concrete subjected to dynamic compression[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(9):1582—1592.

- [24] Sfer D, Carol L, Gettu R, et al. Study of the behavior of concrete under triaxial compression[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(2):156–163.
- [25] Butler J. The influence of pore pressure upon concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1981, 33(114):3–17.
- [26] 李晓静, 李术才, 姚凯, 等. 黄泛区路基强夯时超孔隙水压力变化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2815–2820 (LI Xiaojing, LI Shucai, YAO Kai, et al. Test study of changing rules of excess pore water pressure during dynamic consolidation at subgrade of expressway in Yellow River flood area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9):2815–2820(in Chinese))
- [27] Giesche H. Mercury porosimetry: A general (Practical) overview [J]. Particle and Particle Systems Characterization, 2006, 23(1):9–19.
- [28] LIU Baodong, LV Wenjuan, LI Lin, et al. Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 69:133–142.

Experimental Study of Dynamic Compression Properties of Concrete Subjected to Water Pressure

WANG Qian-feng^{1,2}, LIU Yun-he¹, PENG Gang²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Dynamic compression experimental was carried out under different strain rates for concrete subjected to water pressure (0-10MPa), moisture content characteristics of concrete subjected to different water pressure and stress-strain curve under different strain rates were obtained. Experimental results show that when strain rate is not higher than $10^{-3}/s$, its stress-strain curve is similar to that of dry concrete, its stress state is similar to that of uniaxially loaded concrete. But when strain rate is $10^{-2}/s$, the post-peak stress-strain curve rises with the increase of water pressure, which is similar to stress state of tri-axially loaded concrete. Water pressure forms confining pressure effect on concrete. The strength and its dynamic increase factor of concrete nonlinearly increase with the increase of strain rate, the higher the water pressure is, the faster the growth rate. The variation of strength pressure increase factor (PIF) along with water pressure is different at different strain rate. Under slow loading condition, the amplitude variation of strength (PIF) is 10%, while under rapid loading condition, the amplitude increases with the increase of water pressure, and is significantly higher than the that in slow loading. Based on deep study of the strength dynamic increase factor and the pressure increase factor of concrete, an empirical constitutive model of concrete subjected to water pressure was constructed. In this model, the combined effect of water pressure and strain rate on concrete strength is considered, and the experimental data are in good agreement with the experimental data. Combining concrete water content characteristics, the mechanism of the effect of pore water on mechanical properties at different strain rates was further investigated. The authors consider that the difference of water content may the different viscous stress and the different excess pore water pressure, which leads to the nonlinear growth of concrete strength.

Keywords: concrete; water pressure; stress-strain curve; dynamic property; constitutive relation