

文章编号: 1000-4750(2011)11-0072-06

# 高渗透孔隙水压对混凝土力学性能的影响试验研究

\*李宗利<sup>1</sup>, 杜守来<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西, 杨凌 712100; 2. 四川省攀枝花市水利水电设计院, 四川, 攀枝花 617000)

**摘 要:** 模拟高坝混凝土工作环境, 将混凝土标准试件浸没于高压水体中, 在混凝土内造成高渗透孔隙水压, 研究高孔隙水压作用后混凝土产生的强度、弹性模量, 含水量和声速等宏观指标的变化。试验中具体开展了混凝土试块外不同水压(孔隙水压)、不同时间、不同混凝土等级、不同最大骨料粒径 4 个因素的影响研究。试验采用正交试验设计法进行设计, 关于高渗透孔隙水压对混凝土抗压强度、含水量变化和声速的影响研究共进行了 28 组试验, 而抗拉强度试验进行了 9 组。研究表明, 随着渗透孔隙水压的增加, 混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量逐渐降低, 其损失率逐渐增大。其中外界水压(孔隙水压)、粒径和混凝土强度等级对混凝土抗压强度损失有显著的影响。在同一孔隙水压作用下, 粒径越大、混凝土等级越小, 其损失率越大。混凝土含水量随着外界水压(孔隙水压)的增加而增加, 并与孔隙水压的作用时间和混凝土等级有关, 时间越长、强度等级越低, 含水量越大。混凝土波速随着外界水压(孔隙水压)的增加, 波速呈现波动性变化。

**关键词:** 混凝土; 试验; 力学性能; 孔隙水压; 渗透

中图分类号: TV139.1 文献标志码: A

## EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE DUE TO HIGH SEEPAGE PORE WATER PRESSURE

\*LI Zong-li<sup>1</sup>, DU Shou-lai<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering of Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Panzhihua Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Panzhihua, Sichuan 617000, China)

**Abstract:** In order to simulate work environment of high dam concrete and effects on the mechanical properties of concrete due to high seepage pore water pressure, standard concrete samples are immersed into a high water pressure container and high hydraulic gradient is produced in testing samples. The concrete mechanics and physical properties studied in the paper are included strength, young's modulus, water content and wave velocity. The effects due to different water pressure in the container (concrete pore water pressure), time, concrete grade and aggregate maximal grain size are considered in experiments. Experimental scheme is designed by an orthogonal experiment design method, thusly, 28 groups of experiments for the studying effect of compressive strength, water content and wave velocity, 9 groups for tensile strength are obtained. The study shows that the lost rates of concrete compressive and tensile strength, young's modulus are gradually increased with the increase of pore water pressure. The significance test shows that pore water pressure, grain size and concrete grade are significance to compressive strength. Under same pore water pressure, the lost rates are increased with increase of

收稿日期: 2010-03-05; 修改日期: 2010-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779057)

作者简介: \*李宗利(1967—), 男, 陕西凤翔人, 教授, 博士, 主要从事水工结构与岩土工程稳定理论教学与研究(E-mail: zongli01@tom.com);

杜守来(1980—), 男, 山东菏泽人, 硕士, 主要从事水工结构工程设计研究(E-mail: dsl4283@163.com).

grain size and reduction of concrete strength. The water content relates with pore water pressure, and concrete grade. The water content of sample is increased with increase of time and reduction of concrete strength. The wave velocity of concrete sample shows a fluctuation character with increase of pore water pressure.

**Key words:** concrete; experiment; mechanics property; pore water pressure; seepage

随着我国水利水电工程建设规模的日益扩大,大坝的高度不断攀升,坝高已达到 300m 以上,这类混凝土高坝的局部将承受较高的水头。由于施工或服役期荷载作用,混凝土内部不可避免存在微观孔隙和断续裂纹。从细观层次讲混凝土属于一种孔隙材料,当混凝土外表面施加压力水时,自然地由混凝土表面到内部产生一定的水力梯度,形成渗流场。压力水在微裂纹内运动,给裂纹的表面施加面力荷载,产生了劈裂力,相当于楔体的“楔入”<sup>[1]</sup>作用,加速了混凝土微裂纹的扩展和贯通。随着微裂纹面积的增大,外界水通过表面裂纹渗入到混凝土内部的阻力减小,加速了水的进入及裂纹的进一步扩展,裂纹的扩展又引起渗透系数的增大,水的入渗加快,对混凝土来说,形成恶性循环<sup>[2]</sup>。同时,由于混凝土中水的存在,一定程度上还会降低混凝土裂纹的表面能<sup>[3-4]</sup>。这种恶性循环必然造成混凝土的力学性能恶化。

自由水对混凝土力学性能的影响研究国内外许多学者开展了不少工作,已有试验研究表明<sup>[5-8]</sup>,随着混凝土内部湿度的增加,混凝土的抗拉和抗压强度都将降低,即饱和混凝土强度要比干燥混凝土强度低。不同含水量的混凝土强度又与加载率有关<sup>[9-10]</sup>。文献[11-13]中侧重研究湿态或饱和混凝土的抗拉力学性能,对混凝土的受压性能没有进行探讨。文献[14]通过试验研究了水荷载直接作用于混凝土三轴试件外部,研究水对混凝土多轴强度的影响,揭示了水下混凝土的多轴静态力学性能,并基于混凝土内部孔隙水压力和外部水荷载的相互作用机理,对试验结果进行了初步解释,但却未能充分考虑水在混凝土内部的渗流时间因素。文献[1,15]通过理论分析,研究孔隙水压对湿态混凝土强度的影响,与干燥态的混凝土相比,湿态混凝土的抗压强度降低。

本文结合高坝混凝土在水中工作的环境,通过对混凝土标准试块外围施加高压水,形成渗透作用,重点研究不同外界水压、不同作用时间、不同最大骨料粒径对 C15 和 C20 等级混凝土的力学特性影响,以揭示高渗透孔隙水在混凝土内渗透过程对

混凝土强度的影响规律,为高坝环境局部混凝土的承载力分析提供理论基础。

## 1 试验设计与方法

### 1.1 试验设计

考虑到混凝土强度影响因素较多,高渗透孔隙水压带来的强度变化量与其它因素存在交互效应,因此试验中除考虑外界水压因素外,还考虑了混凝土本身强度等级、最大骨料粒径,以及水压作用的时间 4 个因素。试验设计采用了正交试验设计法,以减少试验的组数,同时采用正交试验极差和方差分析法检验各因素的显著性。由此,抗压强度、弹性模量、含水量以及声速试验中外界水压分别取 0.5MPa、1.0MPa、1.3MPa、1.5MPa、1.8MPa、2.0MPa、2.5MPa 七个因素水平,外界水压作用时间分别取 24h、36h、48h、72h 四个因素水平,混凝土骨料最大粒径取 40mm、60mm 两个因素水平,混凝土等级分别取 C15 和 C20 两个级别,按照正交试验设计法拟定试验组数为 28 组。抗拉强度试验中外界水压分别取 0.5MPa、1.0MPa、1.5MPa 三个因素水平,时间分别取 24h、48h 两个因素水平,骨料粒径和混凝土等级与抗压强度试验相同,按照正交试验设计法拟定试验组数为 9 组。

### 1.2 试验方法

为了模拟高坝环境下混凝土在渗透孔隙水压作用下损伤破坏,又限于室内试验条件,混凝土试件采用 150mm×150mm×150mm 标准立方体试件,并严格按照《水工混凝土试验规程》<sup>[16]</sup>进行试件的浇筑、养护及强度测定等参数的测试。试验设备如图 1 示。该装置由 3 部分组成:第 1 部分是加压设施;第 2 部分是恒压水罐;第 3 部分是管路系统。通过压力气瓶出口自平衡式减压表维持压力罐中气体压力,从而产生恒定的水压。

试验用试件每组 6 块平行试件,在相同养护条件——标准养护室养护,养护至规定龄期后,取出 3 个试件后立即浸没于恒压罐的水内,并通过特制的恒定加压设备施加水压。平行的另 3 个试件仍放在标准养护室养护。待达到试验规定的时间后把试

件从恒压罐中取出，擦净表面明水，立即测定其强度。同时，把另3块试件从养护室中取出，测定其强度，并与恒压罐中的试件作比较。抗拉强度按《水工混凝土试验规程》推荐的劈裂法测定，弹性模量在抗压和抗拉过程中由压力机自动测试并计算(该方法并不符合规程规定的弹性模量测试方法，本文的测试值仅为规程规定测试方法的近似值)。

试验中，试件在压力水中浸入前后采用混凝土超声波仪测定其声速、含水量的变化。超声波测试中，试件浇筑方向侧相对面均匀布置5个测点，每个测点测量3次，按规程<sup>[16]</sup>处理数据。

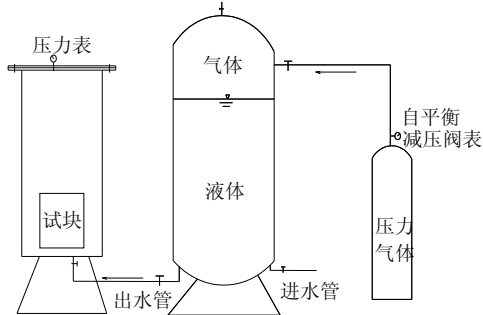


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment equipment

1.3 试验用原材料及混凝土基本特性

混凝土等级按照混凝土配合比设计规范进行试拌调整进行配合比设计。并进行了不同等级、不同最大粒径的相对渗透系数测定。试验用水泥为冀东水泥厂生产的盾石牌 32.5R 普通硅酸盐水泥，砂

石料采用渭河的砂及粗骨料，砂的细度模数为 2.43。不同等级的混凝土配合比及渗透特性见表 1。

表 1 试验用混凝土配合比及渗透特性

Table 1 Mix proportion of concrete and its seepage property

混凝土等级	水灰比	砂率	水/(kg/m <sup>3</sup> )	水泥/(kg/m <sup>3</sup> )	砂/(kg/m <sup>3</sup> )
C15	0.65	33	150	231	667
	0.65	33	150	231	667
C20	0.55	31	150	273	615.4
	0.55	31	150	273	615.4

混凝土等级	小石/(kg/m <sup>3</sup> )	中石/(kg/m <sup>3</sup> )	大石/(kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>max</sub> /mm	渗透系数/(×10 <sup>-5</sup> cm/h)
C15	677.5	677.5	—	40	4.37
	406.5	406.5	542	60	4.44
C20	684.9	684.9	—	40	1.04
	410.9	410.9	547.9	60	1.98

2 试验结果分析

2.1 抗压强度及抗压弹性模量

标准养护条件下的混凝土抗压强度和弹性模量与经过孔隙水压作用后混凝土抗压强度和弹性模量试验结果见表 2。损失率定义为试件在浸入压力水前后强度或弹性模量差值与加压前值的比。由于条件限制，混凝土内部的孔隙水压很难测定，以外围水压间接反映混凝土内部的孔隙水压。另外，试验中所使用的压力机弹性模量测定部分传感器未标定，得到的混凝土弹性模量绝对值与真实值之间存在差异，但不影响其规律性研究。

表 2 抗压强度及抗压弹性模量试验结果

Table 2 Experimental results of compressive strength and its young modulus

组号	外界水压/MPa	时间/h	D <sub>max</sub> /mm	混凝土等级	抗压强度			弹性模量		
					加压前/MPa	加压后/MPa	损失率/(%)	加压前/(×10 <sup>3</sup> MPa)	加压后/(×10 <sup>3</sup> MPa)	损失率/(%)
1	0.5	24	40	C15	12.60	12.10	4.0	19.82	19.13	3.5
2	0.5	36	60	C20	27.20	26.10	4.0	42.5	40.33	5.1
3	0.5	48	40	C20	25.30	24.70	2.4	33.45	32.36	3.3
4	0.5	72	60	C15	13.80	12.80	7.2	33.01	31.23	5.4
5	1	24	60	C20	25.80	23.90	7.4	42.91	40.39	5.9
6	1	36	40	C15	15.90	14.40	9.4	40.88	37.1	9.2
7	1	48	60	C15	13.40	11.50	14.2	29.91	25.16	15.9
8	1	72	40	C20	27.40	26.20	4.4	32.62	30.97	5.1
9	1.3	24	40	C20	25.20	24.20	4.0	34.76	32.64	6.1
10	1.3	36	60	C15	13.80	11.60	15.9	25.32	21.19	16.3
11	1.3	48	40	C15	14.95	13.10	12.4	29.91	26.42	11.7
12	1.3	72	60	C20	24.30	22.20	8.6	36.38	34.04	6.4
13	1.5	24	60	C15	15.40	13.40	13.0	33.68	29.6	12.1
14	1.5	36	40	C20	29.00	27.30	5.9	38.45	35.39	8.0
15	1.5	48	60	C20	24.30	21.60	11.1	35.51	31.42	11.5
16	1.5	72	40	C15	17.50	15.00	14.3	24.08	20.52	14.8
17	1.8	24	40	C15	19.40	16.10	17.0	40.81	34.5	15.5

(续表)

组号	外界水压/MPa	时间/h	D <sub>max</sub> /mm	混凝土等级	抗压强度			弹性模量		
					加压前/MPa	加压后/MPa	损失率/(%)	加压前/(×10 <sup>3</sup> MPa)	加压后/(×10 <sup>3</sup> MPa)	损失率/(%)
18	1.8	36	60	C20	23.60	21.90	7.2	34.04	31	8.9
19	1.8	48	40	C20	25.90	24.10	6.9	26.08	23.81	8.7
20	1.8	72	60	C15	13.80	11.10	19.6	25.32	20.68	18.3
21	2	24	60	C20	22.60	17.70	21.7	36.61	29.93	18.2
22	2	36	40	C15	20.90	16.20	22.5	37.19	30.06	19.2
23	2	48	60	C15	17.10	12.80	25.1	29.81	23.2	22.2
24	2	72	40	C20	21.80	19.20	11.9	31.8	29.2	8.2
25	2.5	24	40	C20	22.30	18.40	17.5	41.57	34.28	17.5
26	2.5	36	60	C15	13.80	9.30	32.6	43.49	28.4	34.7
27	2.5	48	40	C15	20.90	15.30	26.8	40.13	30.06	25.1
28	2.5	72	60	C20	26.20	19.40	26.0	46.06	33.21	27.9

从表 2 直观地可以看出,不管是抗压强度还是抗压弹性模量,经历了一定时间的压力水作用后,也就是说在混凝土内部的孔隙水压作用后,其值均出现不同程度的下降,产生了损伤。应用正交试验数据的极差和方差分析<sup>[16]</sup>对试验结果进一步分析可以得到,高渗透孔隙水压对混凝土抗压强度和抗压弹性模量影响的因素顺序为:外界水压-粒径-混凝土等级-时间,而且外界水压的影响极为显著。忽略时间因素后,其他 3 个因素对混凝土抗压强度和抗压弹性模量的损失规律见图 2 和图 3。

从图 2 和图 3 可以看出,随着外界水压,即孔隙水压力的增加,混凝土抗压强度和弹性模量的损失率也逐渐增大,近似成直线关系(图 2 和图 3 中个别试验数据偏差较大),最大损失率分别为 32.6%和 34.7%,均出现在外界水压为 2.5MPa 试验中。对于相同等级的混凝土和孔隙水压而言,骨料最大粒径越大,其损失率就越大,这说明骨料粒径越大,在骨料的下部形成的裂隙就越多,其渗透性就越大,这点与混凝土的细观分析结论吻合<sup>[17]</sup>;相同骨料最大粒径的孔隙水压前提下,混凝土强度等级越小,其损伤值越大。

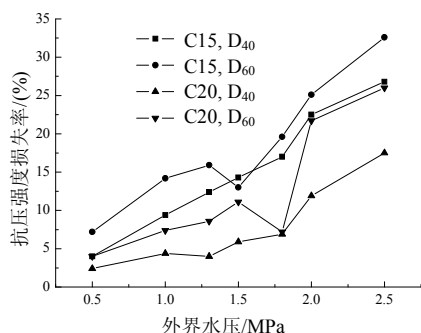


图 2 高渗透孔隙水压对混凝土抗压强度损失率

Fig.2 The damage laws of compressive strength under high seepage pore pressure

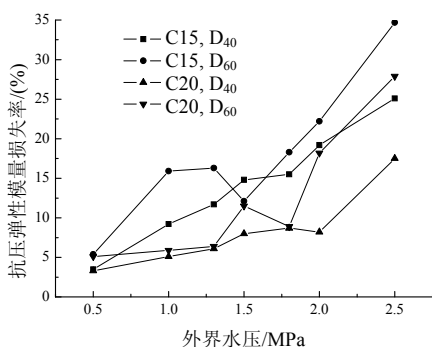


图 3 高渗透孔隙水压对混凝土抗压弹性模量损失率

Fig.3 The damage laws of compressive elastic modulus under high seepage pore pressure

## 2.2 抗拉强度及抗拉弹性模量

抗拉强度及抗拉弹性模量试验结果见表 3。从表 3 可以看出,混凝土试件经历了一定时间的渗透水压作用后,其抗拉强度和抗拉弹性模量出现不同程度的损失。最大抗拉强度相对损失率为 28.7%,出现在外界水压为 1MPa、作用时间 72h、混凝土等级 C20、最大骨料粒径 40mm 情况;最大抗拉弹性模量相对损失率为 29.6%,出现在外界水压为 1.5MPa、作用时间 72h、混凝土等级 C15、最大骨料粒径 60mm 情况。在相同混凝土等级和最大骨料粒径的前提下,外界水压越大,相对损失值越大。但在相同外界水压的前提下,对抗拉强度和抗拉弹性模量损失值大于对抗压强度的损失程度。

同样,应用正交试验数据的极差和方差分析对表 3 试验结果进一步处理可以得到,高渗透孔隙水压对混凝土抗拉强度和抗拉弹性模量影响的因素顺序为:外界水压-粒径-时间-混凝土等级,而且外界水压的影响极为显著。时间因素影响的显著性稍大于混凝土等级,这与抗压强度试验结果稍不同。

表3 抗拉强度及抗拉弹性模量试验结果

Table 3 Experimental results of tensile strength and its young's modulus

组号	外界水压/MPa	时间/h	D <sub>max</sub> /mm	混凝土等级	抗拉强度			弹性模量		
					加压前/MPa	加压后/MPa	损失率/(%)	加压前/(×10 <sup>3</sup> MPa)	加压后/(×10 <sup>3</sup> MPa)	损失率/(%)
1	0.5	24	40	C15	1.63	1.36	16.6	3.87	3.35	13.4
2	0.5	48	60	C20	1.67	1.36	18.6	3.29	2.83	14.0
3	0.5	72	40	C20	1.72	1.51	12.2	7.14	6.2	13.2
4	1	24	60	C20	1.72	1.35	21.5	5.29	4.36	17.6
5	1	48	40	C15	1.45	1.15	20.7	5.88	4.17	29.1
6	1	72	40	C20	1.64	1.17	28.7	4.17	3.41	18.2
7	1.5	24	40	C20	2.10	1.65	21.4	5.86	4.34	25.9
8	1.5	48	40	C20	1.78	1.40	21.3	6.18	4.57	26.1
9	1.5	72	60	C15	1.42	1.06	25.4	3.89	2.74	29.6

### 2.3 含水量变化

混凝土是一种多孔介质, 当其置于压力水中, 必然产生试件内外压力差, 形成渗流场。在高孔隙水压作用下极易产生水力劈裂破坏, 致使微裂纹或孔隙扩展, 被水充满, 所以含水量的变化一定程度反映了高孔隙水的水力劈裂破坏程度。对于抗压强度测试的 28 组试件在浸入压力水前后进行质量称重, 其差值与加压前试件的质量比随外界水压的变化规律见图 4。

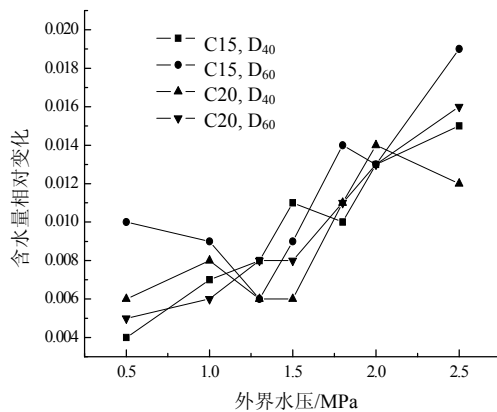


图4 高渗透孔隙水压作用下混凝土含水量相对变化规律  
Fig.4 The relative change laws of water content under high seepage pore pressure

从图 4 可以看出, 含水量的相对变化规律基本与强度变化规律吻合。含水量相对值随外界水压增大总体趋势是增大的, 在外界水压为 2.5MPa 时, 相对含水量增大最多。但对于 C20、最大骨料粒径为 40mm 的这组试验结果却较 2.0MPa 时减小, 分析其原因是混凝土试块的浇筑密实度不同造成的。

### 2.4 混凝土声速变化

混凝土内部的微裂隙和孔隙的变化, 以及是否被水填充均会引起声速的变化, 故采用混凝土超声波仪测定混凝土在高孔隙水压作用前后声速的变化规律。同样, 对于抗压强度测试的 28 组试件

在浸入压力水前后进行超声波测试, 声速变化相对于未加压前的相对变化值见图 5。从图 5 可以看出, 随着孔隙水压的增大, 混凝土的声速表现出波动性。对于 C15 混凝土来说, 随外界水压增大波速增大, 1.3MPa 时反而下降; 而最大骨料粒径为 60mm 的试件, 在外界水压为 2.5MPa 时, 波速出现较大幅度减小, 说明水力劈裂破坏较为严重。对于 C20 混凝土在开始波速是下降的, 当外界水压增大到 1.0MPa, 则出现波速增大, 说明此时内部的一部分孔隙被水填充。这种波动性变化主要随混凝土孔隙被水填充, 裂隙的扩展呈波动性。因为混凝土中的孔隙被水所填充, 波速增大, 但随着孔隙水压的增加, 混凝土中的裂纹逐渐扩展, 孔隙率的增大, 其波速反而出现下降。通过混凝土试件施加孔隙水压前后的含水量和声速的变化规律进一步反映了高孔隙水压作用对混凝土强度的损伤过程。

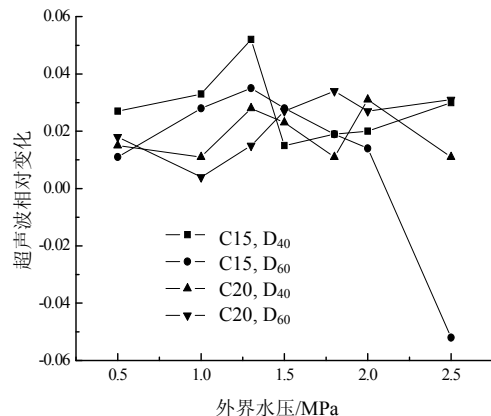


图5 高渗透孔隙水压作用下混凝土波速相对变化规律  
Fig.5 The relative change laws of concrete wave velocity under high seepage pore pressure

## 3 结论

(1) 随着渗透孔隙水压的增加, 混凝土抗压强度、抗拉强度和弹性模量逐渐降低, 其损失率逐渐

增加。其中外界水压(孔隙水压)、粒径和混凝土强度等级对混凝土强度的损失有显著的影响。在相同混凝土等级和最大骨料粒径的前提下,外界水压越大,损失率越大。但在相同外界水压的前提下,对抗拉强度影响要大于对抗压强度的影响程度。

(2) 混凝土含水量随着外界水压(孔隙水压)的增加而增加,并与孔隙水压的作用时间和混凝土等级有关,时间越长、强度等级越低,含水量越大。

(3) 混凝土波速随着外界水压(孔隙水压)的增加,呈现出波动性变化规律,反映了孔隙的填充、扩展特性。

### 参考文献:

- [1] 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, 179.  
Wang Hailong, Li Qingbin. Effect of pore water on the compressive strength of wet concrete [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 141—144, 179. (in Chinese)
- [2] Oshita H, Tanabe T. Water migration phenomenon in concrete in post peak region [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(6): 573—581.
- [3] Wittmann F H. Interaction of hardened cement paste and water [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1973, 56: 409—415.
- [4] 徐世烺,王建敏. 静水压作用下混凝土的双 K 断裂参数的试验测定[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 792—798.  
Xu Shilang, Wang Jianmin. Experimental determination of double-K fracture parameters of concrete under water pressure [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 792—798. (in Chinese)
- [5] 闫东明,林皋. 不同初始静态荷载下混凝土动态抗压特性试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 360—364.  
Yan Dongming, Lin Gao. Study on dynamic compressive properties of concrete with different loading paths [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 360—364. (in Chinese)
- [6] Ross C A, Jerome D M, Tedesco J W. Moisture and strain rate effects on concrete strength [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(3): 293—300.
- [7] Kaplan S A. Factors affecting the relationship between rate of loading and measured compressive strength of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1980, 32(111): 79—88.
- [8] Imran I, Pantazopoulou S J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(6): 589—601.
- [9] Reinhardt H W, Rossi P, Van Mier J G M. Joint investigation of concrete at high rates of loading [J]. Materials and Structures, 1990, 23: 213—216.
- [10] Ross C A, Jerome D M, Tedesco J W. Moisture and strain rate effects on concrete strength [J]. ACI Material Journal, 1996, 93(3): 293—300.
- [11] Yaman I O, Hearn N, Aktan H M. Active and non-active porosity in concrete part I: Experimental evidence [J]. Materials and Structure, 2002, 35(3): 102—109.
- [12] Yaman I O, Hearn N, Aktan H M. Active and non-active porosity in concrete part II: Evaluation of existing models [J]. Materials and Structure, 2002, 35(3): 110—116.
- [13] Rossi P, Van Mier J G M, Boulay C. The dynamic behaviour of concrete: Influence of free water [J]. Materials and Structures, 1992, 25: 509—514.
- [14] 李庆斌,陈樟福生,孙满义,吕培印. 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, Cheng Zhangfusheng, Sun Manyi, Lu Peiyin. Effect of water loading on strength of concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 786—791. (in Chinese)
- [15] 王海龙,李庆斌. 湿态混凝土抗压强度与本构关系的细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1531—1536.  
Wang Hailong, Li Qingbin. Mesomechanics analysis of compressive strength and constitutive equation of wet concrete [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1531—1536. (in Chinese)
- [16] DL/T 5150-2001, 水工混凝土试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
DL/T 5150-2001, Test code for hydraulic concrete [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. (in Chinese)
- [17] 库马·梅塔, 保罗 J M 蒙特罗. 混凝土微观结构、性能和材料[M]. 覃维祖, 等译. 北京: 中国电力出版社, 2008.  
Kumar Mehta P, Monteiro Paulo J M. Concrete microstructure properties and materials [M]. Translated by Qin Weizu, etc. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese)