

人工骨料全级配大坝混凝土的拉压力学性能

邓宗才¹, 李庆斌², 傅华³

(1.北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022; 2.清华大学 水利水电工程系, 北京 100084;

3.葛洲坝水利水电集团公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要:用大尺寸试件试验研究了全级配大坝混凝土在单轴拉伸与压缩荷载下的力学性能,并研究了龄期对混凝土性能的影响,给出了单轴拉伸和压缩的应力-应变全曲线及相对拉应力与相对裂缝宽度曲线。试验发现,龄期增加,混凝土的强度、弹性模量及断裂能提高,龄期对极限应变和最大裂缝宽度的影响不明显。双曲线方程可以用于表述混凝土强度、弹性模量及断裂能等力学参数与龄期的关系。

关键词:单轴荷载;裂缝;大坝混凝土;应力-变形全曲线;断裂;龄期;大尺寸试件

中图分类号:TV431 **文献标识码:**A

大坝混凝土力学性能指标一般采用湿筛混凝土标准试件测定,湿筛混凝土明显改变了大坝混凝土的配合比,因此,试验测定的力学指标不能真实反映全级配混凝土的性能。国外学者用狗腰形试件或用带切口试件的拉伸试验测定混凝土的抗拉强度及断裂性能^[1-5],该方法的不足是试件不是从其随机弱面先发生破坏,而是从人为设计的弱面破坏,故所测得的数据不是混凝土实际力学指标,也不能反映混凝土真实抗拉断裂性能。目前已有学者对全级配混凝土的弯拉强度及抗压强度进行了研究^[6,7],但全级配混凝土直接拉伸全曲线的研究未见报道。

本文针对三峡工程的实际,用大尺寸试件研究了人工骨料全级配混凝土的拉、压力学性能,试件龄期7~180d,首次成功地实现了对无切口的等截面棱柱体大尺寸试件的直接拉伸试验,测得了直接拉伸力学指标及软化曲线。试验结果对于大坝结构非线性分析和弄清楚试件尺寸效应、骨料性能、龄期及骨料粒径等因素对混凝土力学性能的影响提供了数据。

1 试件及试验方法

水泥为42.5三峡牌硅酸盐水泥,配合比列于表1,减水剂JGB的浓度为10%,DH9的浓度为1%。

表1 混凝土配合比(单位: kg/m³)

水	水泥	粉煤灰	人工砂	人工石子/mm				减水剂	
				5~20	20~40	40~80	80~150	JGB	DH9
87	131	44	585	328	328	492	492	10.5	1.23

模具用厚度为20mm的钢板加工而成。拉伸与压缩试件的尺寸分别为450mm×450mm×900mm和450mm×450mm×450mm。用跌落式搅拌机搅拌混凝土,插入式振捣棒振捣,56h拆模。拉伸试件在浇注后约64h用圆盘切石机切割试件的两个端部,两端各切掉75mm。试件切割后放在室内并盖上草袋,人工定期洒水养护。用磨石机磨光端部。试件的一端先用建筑胶粘结在钢板上,待胶基本固化后,再将试件的另一端粘在钢板

收稿日期: 2003-10-08

作者简介: 邓宗才(1961-),男,陕西扶风人,教授,博士,研究方向为混凝土结构。

上,并放置在实验机上。

拉伸试验采用 INSTRON8506材料试验机,最大荷载为3000kN。按恒位移控制加载,速率为 $2\mu/\text{min}$ 。4个变形引伸仪分别安置在试件四周。数据采集及加载控制均采用计算机进行。采用承载力为10000kN的LOG材料试验机进行大尺寸试件的单轴压缩试验,先预压最大载荷的25%~30%,然后按恒位移 $200\mu/\text{s}$ 控制加载速度。拉伸与压缩试验方法见文献[10]。

2 全级配混凝土单轴拉伸和压缩试验结果

2.1 试件破坏形态 72%的拉伸试件破坏截面靠近试件的中部,在最薄弱的截面首先发生起裂破坏。早龄期时脱粘起裂破坏首先发生在粗骨料与砂浆的界面。28%试件的破坏弱面在离粘结钢板130~250mm的截面。

龄期短时,在断口面上,多数骨料沿界面脱离粘结,只有很少的小粒径骨料被拉断,断口呈现高低起伏,很不平整。当龄期达60~90d时,断口有部分大骨料被拉断,断口较为平整。这是由于混凝土中粗骨料与砂浆间界面粘结力明显增强造成的,这种破坏形态在短龄期混凝土中很难发现。龄期增大,粗骨料被拉断的面积增大,表明界面强度增大。

大尺寸试件受压破坏后发现,粗骨料的破坏较少,粗骨料分布的均匀程度对抗压强度、变形及破坏形态影响很大。粗骨料多的一侧先发生破坏,四周4个应变仪的读数有时明显不同。

2.2 全级配混凝土单轴拉伸和压缩试验结果 混凝土单轴拉伸与压缩应力变形全曲线如图1、图2所示,拉伸与压缩试验结果列于表2、表3。

表2 大坝混凝土单轴拉伸试验结果

龄期 /d	抗拉强度 f_t/MPa	抗拉弹模 E_t/GPa	峰值应变($\times 10^{-6}$)	最大裂缝宽度 w_t/mm	断裂能 $G_F/(\text{N/m})$	特征长度 L_{ch}/mm	注
11	0.804	22.0	67.00	1.193	273.233	9299	
15	1.044	28.9	63.10	1.289	369.463	9806	
16	1.180	31.1	53.33	1.680	445.738	9958	
20	1.033	27.9	66.02	1.328	381.399	9972	
28	1.463	26.9	56.96				仅有上升 段
46	1.310	35.0	55.54	1.199	422.878	8625	
50	1.570	32.0	48.60	1.465	457.423	5938	
55	1.508	37.0	50.91	1.355	448.401	7513	
110	1.908	40.0	56.64	1.390	497.220	5463	
180	2.050	50.0	62.01				仅有上升 段

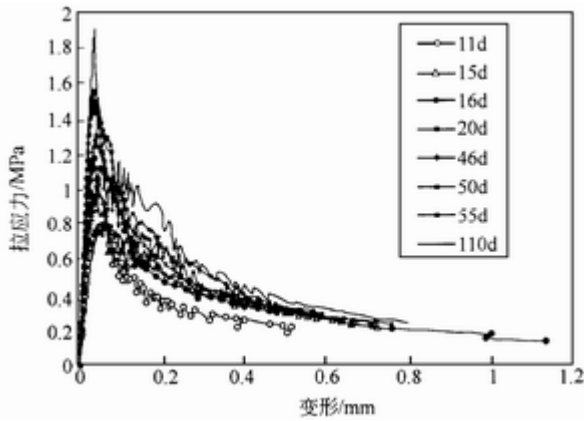


图 1 大坝混凝土单轴拉伸应力-变形全曲线

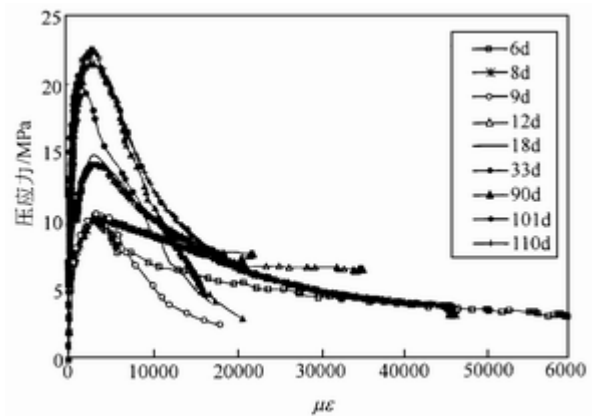


图 2 大坝混凝土单轴压缩应力-应变全曲线

表 3 大坝混凝土单轴压缩试验结果

龄期 /d	抗压强度 f_c /MPa	抗压弹模 E_c /GPa	峰值应变 ($\times 10^{-6}$)	龄期 /d	抗压强度 f_c /MPa	抗压弹模 E_c /GPa	峰值应变 ($\times 10^{-6}$)
6	10.28	8.75	3320	33	19.24	24.60	2350
8	10.10	17.80	3738	90	21.82	33.10	2465
9	10.54	18.70	3510	90	21.46	28.80	2984
12	14.92	20.00	2821	101	21.97	31.70	2980
12	14.09	20.10	3191	110	22.44	29.60	3276
18	14.74	24.30	3221	180	24.90	27.90	2880

3 龄期对大坝混凝土拉压性能的影响

3.1 龄期对抗拉性能的影响

3.1.1 抗拉强度 经过统计分析知，抗拉强度与龄期的关系符合下面的双曲线方程

$$f_t^{DC}(T) = \frac{T}{0.443T + 9.3829}, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.989 \quad (1)$$

式中： $f_t^{DC}(T)$ 为龄期T天时的抗拉强度，单位为Mpa；T是龄期，单位为d；上角标DC代表人工骨料大坝混凝土。

混凝土不同龄期的抗拉强度的试验结果见图3。由图3可见，式(1)的双曲线方程描述混凝土抗拉强度随龄期的增长规律。

3.1.2 抗拉弹性模量 抗拉弹模是曲线上升段中应力为最大应力的5%~50%区间曲线的斜率。混凝土抗拉弹性模量与龄期的关系如图4所示，且符合下面的双曲线方程

$$E_t^{DC}(T) = \frac{T}{0.0191T + 0.3806}, R^2 = 0.974 \quad (2)$$

式中： $E_t^{DC}(T)$ 为龄期T天时弹性模量。

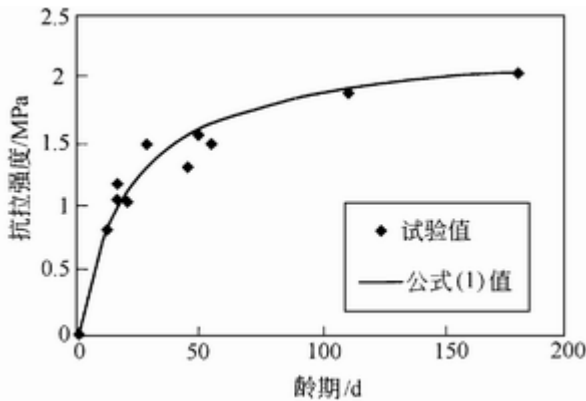


图3 抗拉强度与龄期的关系曲线

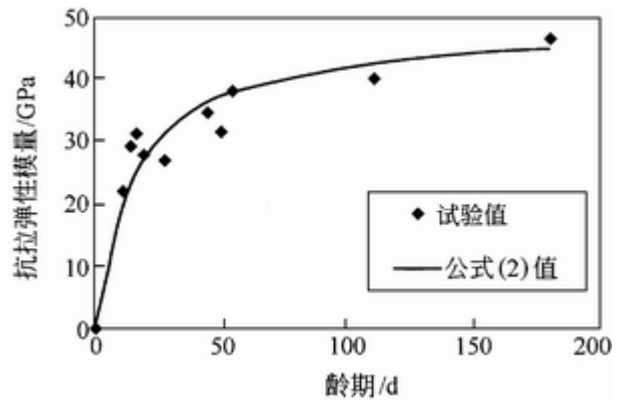


图4 抗拉弹性模量与龄期的关系曲线

由图4可见，龄期增加，弹性模量增加。

3.1.3 峰值应变及裂缝扩展宽度曲线 由表2可见，龄期对混凝土抗拉峰值应变的影响规律不明显。混凝土在拉伸过程中的总变形量 为

$$= e + e_0 + w \tag{3}$$

式中： w 是裂缝扩展宽度； e 及 e_0 分别为变形曲线上的断裂区以外的弹性变形及剩余变形， $\delta_e = \frac{\sigma_p}{E_t} l$ ，

$e_0 = \sigma_p - e$ ，其中 σ_p 为峰值应力， e_p 为峰值应力对应的变形， E_t 为弹性模量， l 为试件长度。

裂缝扩展宽度 w 与试件长度无关，在最大荷载值以前无宏观裂缝。由式(3)得裂缝扩展宽度为

$$w = \dots \tag{4}$$

用式(4)可求得裂缝扩展宽度。相对拉应力-裂缝宽度试验曲线见图5。用回归方法得到的相对拉应力-裂缝宽度的经验公式为

$$\sigma = f'_t(T) \left\{ 1 - \varphi \exp \left[- \left(\frac{\lambda}{w/w_f} \right)^n \right] \right\} \tag{5}$$

式中： w_f 为最大裂缝宽度； λ 、 n 及 φ 为材料参数，受龄期及混凝土组份的影响， $\lambda = 0.098$ ， $n = 0.67$ ， $\varphi = 1.2$ ，用最小二乘法求得理论值与试验值的相关系数 $R^2 = 0.94$ ，可见理论值与试验值吻合良好。

3.1.4 最大裂缝宽度 将应力为零时的裂缝宽度定义为最大裂缝宽度，其结果列于表2中。龄期对最大裂缝宽度的影响不明显。

3.1.5 断裂能 断裂能 G_F 是形成单位面积裂缝所消耗的能量，为荷载-裂缝宽度曲线下的面积与试件横截面面积的比值，即

$$G_F = \int_0^{w_f} \sigma(w)dw \quad (6)$$

断裂能试验值列于表2，且绘于图6。由图6可见，龄期增加，断裂能增加。断裂能与龄期的关系为

$$G_F^{DC}(T) = \frac{T}{0.002T + 0.1}, R^2 = 0.991 \quad (7)$$

式中： $G_F^{DC}(T)$ 为龄期T天时的断裂能，单位为N/m。

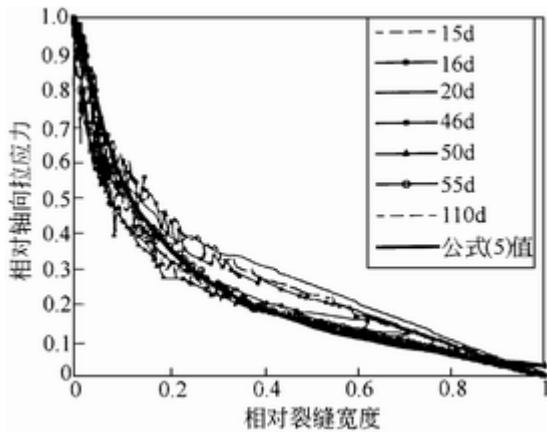


图5 大坝混凝土相对拉应力与裂缝宽度曲线

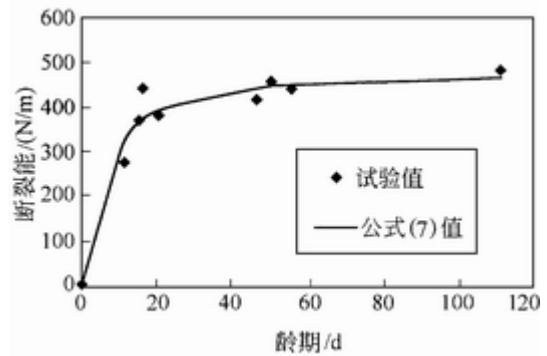


图6 断裂能与龄期的关系曲线

3.1.6 特征长度 通常用Hillerborg^[9]提出的特征长度 L_{ch} 来表示混凝土的脆性断裂性能，且

$$L_{ch} = \frac{E_t G_F}{(f_t')^2} \quad (8)$$

式中： L_{ch} 、 E_t 的单位分别是mm和GPa， G_F 、 f_t' 的单位分别是N/m和MPa。

L_{ch} 愈小，材料愈脆。特征长度试验值列于表2。龄期增加，特征长度减小，即混凝土逐渐变脆。

3.2 龄期对抗压性能的影响

3.2.1 应力-应变全曲线方程 混凝土单轴压缩相对应力-应变全曲线如图7所示。各龄期混凝土试件的上升段较接近，龄期长，曲线较陡。但是，下降段差异较大。上升、下降两段曲线分别采用不同的方程式表示。

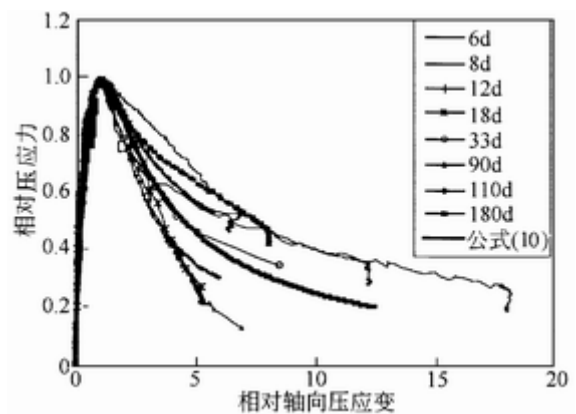


图7 大坝混凝土单轴受压相对应力应变全曲线

各龄期试件的上升段可表示为

$$\frac{\sigma_c}{f'_c} = 2.3 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf}} - 1.5 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf}} \right)^2 + 0.2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf}} \right)^3, \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf}} \leq 1.0 \quad (9)$$

式中： σ_c 、 ε_c 为应力应变曲线上任意点的应力及应变； ε_{cf} 是与最大应力对应的应变值。

各龄期下降段可表示为

$$\frac{\sigma_c}{f'_c} = \frac{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf}}}{\rho \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf}} - 1 \right)^2 + \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf}}} \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf}} \geq 1.0 \quad (10)$$

式中： ρ 是材料参数，决定着曲线的形状， ρ 愈小，曲线愈平缓，大坝混凝土的平均值为0.35。

理论曲线与试验曲线的比较见图7所示，从图7可以看出，下降段的形状与龄期的关系不明显。

3.2.2 抗压强度 抗压强度与龄期的关系符合下面的双曲线方程

$$f_c^{DC}(T) = \frac{T}{0.0418T + 0.3902}, R^2 = 0.989 \quad (11)$$

式中： $f_c^{DC}(T)$ 为龄期T天时的抗压强度。

抗压强度试验值及式(11)的理论值同绘于图8中，由图8可见，二者比较吻合。

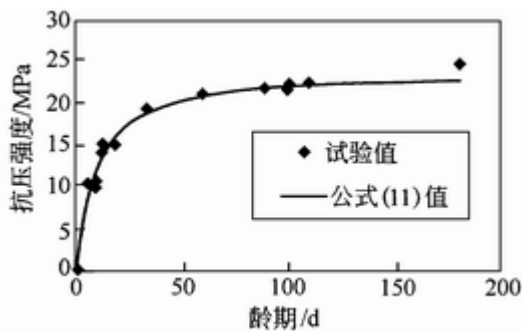


图 8 抗压强度与龄期的关系曲线

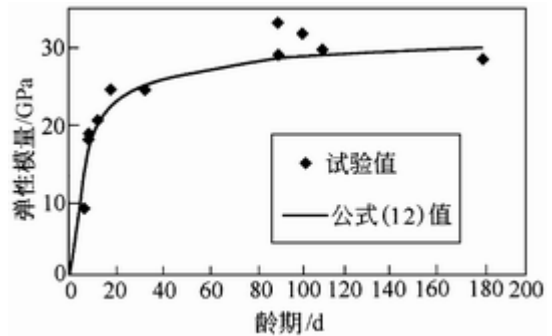


图 9 抗压弹性模量与龄期的关系曲线

3.2.3 抗压弹性模量 抗压弹性模量是曲线上升段中应力为最大应力的5%~40%区间曲线的斜率。试验结果列于表3。抗压弹性模量与龄期的关系为

$$E_c^{DC}(T) = \frac{T}{0.0298T + 0.278}, R^2 = 0.988 \quad (12)$$

式中： $E_c^{DC}(T)$ 是龄期为T天时的抗压弹性模量。

抗压弹性模量试验值及理论值同绘于图9，由图9可见，二者比较吻合。

4 结论

本文成功实现了对大尺寸全级配大坝混凝土试件的轴心拉伸与压缩试验,通过单轴拉伸试验得到了全级配大坝混凝土的直接拉伸应力变形全曲线和压缩应力应变全曲线,建立了应力变形全曲线方程。应力裂缝扩展方程对研究全级配混凝土变形、裂缝间黏结力十分有用。试验表明,龄期增加,混凝土强度、弹性模量及断裂能增加,双曲线方程能较好地反映这些力学指标与龄期的关系,但龄期对极限应变及最大裂缝宽度的影响规律不明显。

致谢: 本文试验得到了清华大学水利水电工程系张文翠和张富德同志的大力支持。

参考文献:

- [1] Evans R H, Marathe M S. Micro-cracking and stress-strain curve for concrete in direct tension[J]. Materials and Structures, 1968, 1(1): 61-64.
- [2] Phillips D, Zheng B. Direct tension tests on notched and unnotched plain concrete specimens[J]. Mag. of Concrete Research, 1993, 145(162): 25-32.
- [3] Rajesh C. Tank and Nicholas J. Rate constant functions for strength development of concrete[J]. ACI Materials J., 1991, 88(1): 74-83.
- [4] Reinhardt H W, et al. Tensile tests and failure analysis of concrete[J]. Engrg. Div. ASCE, 1986, 112(11): 2462-2477.
- [5] Van Mier J G M, van Vliet M R A. uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69: 235-247.
- [6] 朱尔玉, 戴会超, 董德禄. 全级配混凝土在不连续点处的应力和应变关系[J]. 水利学报, 2004, (4): 105-108.
- [7] 朱尔玉, 戴会超, 董德禄. 全级配混凝土在破坏时的应力和应变关系[J]. 水利学报, 2004, (5): 89-93.
- [8] Vilardell J, et al. Estimation of the modulus of elasticity for dam concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 88(1): 93-101.
- [9] Hillerborg A, et al. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-782.
- [10] 邓宗才. 全级配大坝混凝土力学性能[D]. 北京: 清华大学, 2002.

Tensile and compressive behaviors of full grade concrete made of crushed coarse aggregate

DENG Zong-cai¹, LI Qing-bin², FU Hua³

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. China Gezhouba Construction Group Co. Ltd for Water Resources and Hydropower, Yichang 443000, China)

Abstract: The behaviors of full grade concrete specimens made of crushed coarse aggregate are studied by uniaxial tension-compression test. The influence of curing age is taken into account. The relationship between

stress and strain under the action of uniaxial tension (or compression) is obtained and the expression of relationship between tensile stress and crack width is suggested. It is found that the strength, elastic modulus and fracture energy increase with the increase of specimen age in hyperbolic curve forms, and ultimate strain and maximum crack width is independent of the curing age.

Key words: full grade concrete; crushed coarse aggregate; uniaxial tension-compression test; relationship between stress and strain; crack; age