

不同模量的全级配混凝土静动态特性试验研究

周继凯¹, 吴胜兴¹, 赵丽红¹, 陈厚群²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要:全级配混凝土不同模量的特性长期未引起人们的重视. 在以混凝土抗拉应力为控制的高拱坝设计中, 按不同模量弹性理论进行分析是必要的. 在高地震烈度区修建高拱坝, 对坝体拉应力的控制更为严格, 抗震安全是亟待解决的技术难题. 为此, 采用液压伺服系统对全级配混凝土试件的静动态拉伸、压缩弹性模量和泊松比进行了三分点静动态弯拉试验. 试验结果表明, 静动态压拉弹性模量比分别达到 0.89、0.87, 动态压拉弹性模量比静态压拉弹性模量分别增长 5.4%、8.5%, 静动态压拉泊松比分别达到 0.88、0.68, 动态抗弯强度比静态抗弯强度增加 21.7%.

关键词:全级配混凝土; 不同模量; 静动态特性

中图分类号: TV431 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2005)01-0094-05

各向同性体的经典弹性理论假定材料压拉弹性模量相等, 这对大部分金属材料来说, 是成立的. 然而, 有不少材料, 如陶瓷、树脂、塑料、复合材料、石墨、合金钢、混凝土等, 表现出拉、压不同的弹性性质, 即材料随主应力状态表现出不同的力学性质. 其中混凝土的压拉弹性模量差异十分显著. 试验表明, 普通混凝土的不同模量系数(受压弹性模量 E^- 与受拉弹性模量 E^+ 之比)大于 1, 并且变化范围相当大(1.07 ~ 1.82), 铝磷酸盐普通混凝土不同模量系数高达 2.5^[1]. 显然, 用经典弹性理论分析这类材料所构成的结构会产生很大误差. 文献[2]用不同模量有限元分析了重力坝坝体应力和变形, 认为: 带有裂缝的坝体存在受拉区域; 不同和相同模量的计算结果会有明显差别, 差别大小与不同模量系数有很大关系. 但文献[2]未采用实测全级配混凝土的不同模量系数.

我国关于不同模量弹性理论的研究主要集中于计算方法和工程应用探讨等方面^[3~7], 而试验研究几乎为空白. 在拱坝设计中, 应力控制是设计的主要内容之一. 在设计工况中, 拱坝坝体内存在拉应力区域^[8]. 坝体混凝土材料压拉不同模量将影响拱坝设计中应力控制标准的确定. 研究表明, 混凝土动态压拉弹性模量要比静态压拉弹性模量大^[9].

笔者取小湾拱坝设计所采用的大坝混凝土的原材料和配比, 采用电液伺服动态加载系统并按简支梁三分点加荷法对全级配混凝土梁进行了不同模量弹性理论静动态特性试验研究^[10, 11].

1 不同模量弹性理论基础

不同模量弹性理论是建立在经典弹性理论基础上的. 取受拉弹性模量 E^+ 和泊松比 ν^+ , 受压弹性模量 E^- 和泊松比 ν^- . 在经典弹性理论中, 弹性模量 $E = E^- = E^+$, 泊松比 $\nu = \nu^- = \nu^+$. 在不同模量弹性理论中, 弹性模量和泊松比的选取是根据主应力状态来确定的. 具有不同弹性模量的材料, 其压、拉时的应力应变关系可用两条直线来表示, 如图 1 所示.

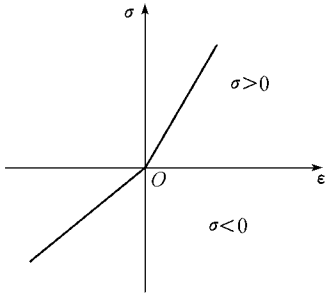


图 1 不同模量材料的双直线本构模型
Fig.1 Bilinear constitutive model for materials of different moduli

如果某点主应力 $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 > 0$, $\sigma_3 > 0$, 则取 E^+ 和 ν^+ ; 如果某点主应力 $\sigma_1 < 0$, $\sigma_2 < 0$, $\sigma_3 < 0$, 则取 E^- 和

ν^- ; 其余情况按一定规则同时取 E^+,ν^+,E^- 和 ν^- . 前两者称为第一类点或区域,可用经典弹性理论进行分析; 其余情况称为第二类点或区域,其弹性模量和泊松比是主应力的函数,属非线性弹性力学问题^[9].

阿姆巴尔楚米扬^[1]在不同模量理论及其应用中提出了一个限制性的假设

$$\nu^-/E^- = \nu^+/E^+$$

(1)

若等式不成立,则其弹性矩阵及刚度矩阵均为非对称矩阵,会给求解带来一定困难.

2 试验方案

2.1 混凝土原材料

采用红塔滇西水泥公司的 42.5 级中热硅酸盐水泥、宣威电厂分选的 I 级粉煤灰、小湾拱坝所用的花岗岩人工砂石骨料. 骨料组成为黑云花岗片麻岩和角闪斜长片麻岩的混合人工砂石,二者的比例为 7.5:2.5. 骨料级配:大石(80~40 mm)用量:中石(40~20 mm)用量:小石(20~5 mm)用量=4:3:3. 混凝土配合比如表 1 所示.

表 1 全级配混凝土配合比

Table 1 Mixing proportion of fully-graded concrete

设计强度等级	级配	水灰比	用水量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水泥用量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粉煤灰用量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	减水剂 ZB-1A 比例/%	引气剂 AEA 比例/%	坍落度/ cm	含气量/ %	砂率/ %	混凝土密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
C35	3	0.42	104	173.3	74.3	0.70	0.14	6.4	4.49	30	2450

2.2 混凝土试件成型和养护

全级配混凝土,用 250 L 自由落体拌和机拌和,搅拌时间 3 min. 试件,用电阻式高频振捣器振捣密实. 试件成型 2 d 后拆模,并立即用塑料薄膜将试件覆盖,洒水养护 1 周后再密封好,置于室内养护至试验开始. 试件浇筑时间为 2003 年 11 月. 本次试验时间为 2004 年 6 月. 养护温度为 10~20℃,全级配混凝土为三级配混凝土,试件尺寸为 300 mm×300 mm×1 100 mm,共浇制了 7 个试件.

2.3 试验设备

采用了河海大学结构试验室研置的一套电液伺服动态加载系统,见图 2. 该系统包含最大加载能力分别为 1 000 kN,500 kN,250 kN 的作动器各一个,每个作动器的最大行程为 500 mm,试验频率为 0.01~10 Hz. 控制系统可按正弦波、方波、三角波及任意随机波对作动器进行控制,既可用位移进行控制,也可用力进行控制,能进行各类空间结构或构件的伪静力试验和拟动力试验. 该系统具有 56 个实时数据采集通道,可自动进行数据采集和数据分析处理.



图 2 电液伺服系统

2.4 加载与数据采集

材料压拉弹性模量,可采用简支梁三点加荷法来确定. 试验中,弹性模量是按梁纯弯曲区边缘纤维的应变和对应的应力进行计算的. 在全级配混凝土试件不同模量弹性理论静动态特性试验中,纯弯区粘贴了 39 个应变片,如图 3 所示.

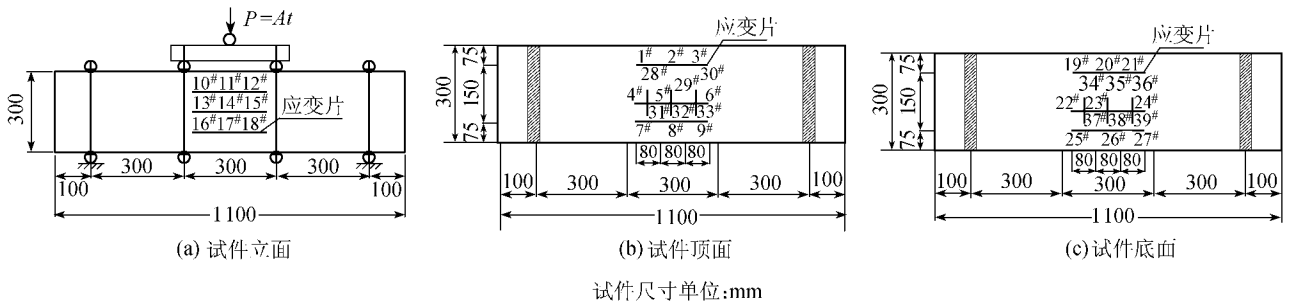


图 3 加载方式与应变片粘贴位置

Fig.3 Loading method and location of gauges

数据由计算机自动采集,采集频率,动态加载时为400点/s,静态加载时为40点/s.依据规范^[12],静态加载速率为250 N/s,动态加载方式为冲击加载.小湾拱坝满库基频约为1 Hz,设计试件在加载0.25 s时破坏,冲击加载速率为600 kN/s.

3 试验结果

对全级配混凝土试件分静、动态两组进行了抗弯试验,得出了其弹性模量、泊松比和弯拉强度.

3.1 静动态弹性模量

在静动态加载试验中,加载方向向上,试件顶面受拉、底面受压.根据受拉和受压面实测的应力应变关系,分别计算了全级配混凝土静动态压拉弹性模量(表2),其应力应变关系如图4、图5所示.

表2 全级配混凝土静动态拉压弹性模量

Table 2 Tension and compression elastic moduli of fully-graded concrete specimens in static and dynamic stages

试件编号	加载方式	受拉弹性模量	受压弹性模量
		E^+/GPa	E^-/GPa
11023	静态	34.07	31.32
11025		35.67	31.73
11031		33.65	31.02
11036		35.36	29.95
11055	动态	37.29	32.73
11056		38.36	32.90
11073		37.28	32.39

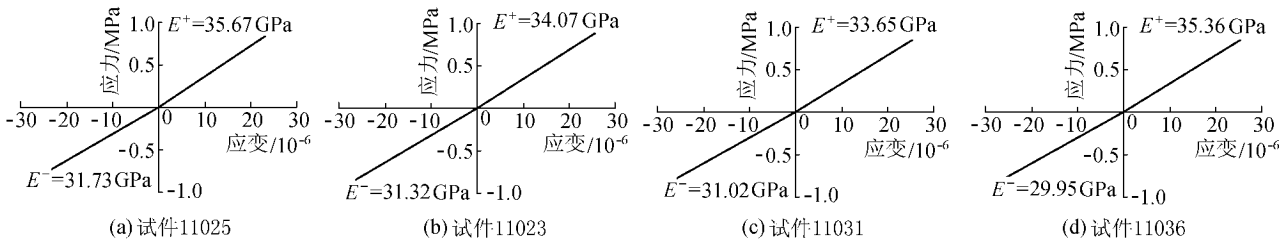


图4 试件静态弹性阶段应力应变关系

Fig.4 Stress-strain relation of the specimens in static-elastic stages

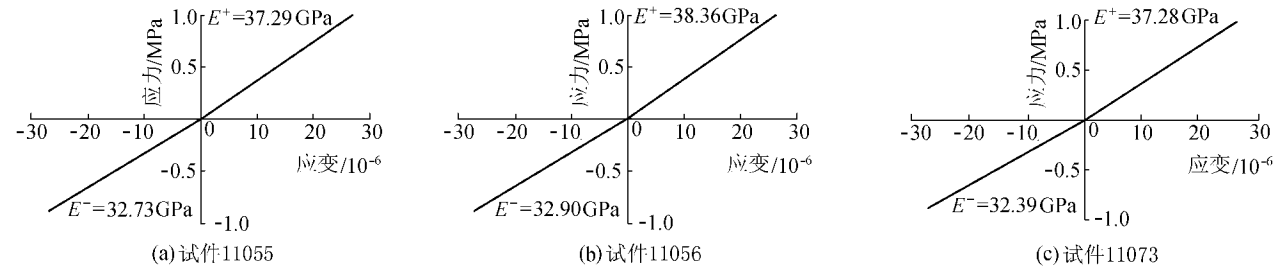


图5 试件动态弹性阶段应力应变关系

Fig.5 Stress-strain relation of the specimens in dynamic-elastic stages

由表2和图4、图5可知:

a. 受拉与受压状态弹性模量存在较大差异.静态受拉弹性模量平均值为34.69 GPa,静态受压弹性模量平均值为31.01 GPa,动态受拉弹性模量平均值为37.64 GPa,动态受压弹性模量平均值为32.67 GPa,静动态压拉弹性模量比分别为0.89、0.87.通常认为常规混凝土受压弹性模量大于受拉弹性模量,对于混凝土构件承受弯拉作用有利,因为相同形变下,混凝土按不同模量理论确定的受拉应力比按压拉相同模量理论情况的受拉应力小.本次试验得出的受拉弹性模量均大于受压弹性模量,显然,不考虑这种弹性模量的差异,不利于对高拱坝拉应力和受拉区范围的控制.

表3 全级配混凝土静动态拉压泊松比

Table 3 Tension and compression Poisson ratios of fully-graded concrete specimens in static and dynamic states

试件编号	加载方式	受拉泊松比 ν^+	受压泊松比 ν^-
11023	静态	0.05	0.14
11025		0.06	0.13
11031		0.23	0.21
11036		0.40	0.17
11055	动态	0.08	0.08
11056		0.08	0.06
11073		0.28	0.16

b. 动态压拉弹性模量比静态压拉弹性模量分别增长5.4%和8.5%.

3.2 静动态弯拉泊松比

由于研究对象为全级配混凝土弯拉试件,为了避免粗骨料的影响,采用了顶底面应变片的平均值.混凝土泊松比与其所处应力应变状态有关,泊松比会随应力应变状态的变化而发生很大的变化.泊松比计算时取压拉应变为 30×10^{-6} 的状态.试验结果见表3.

由表 3 可知：

a. 试验结果离散性较大，受拉泊松比的离散性比受压泊松比的离散性大，而试验结果平均值接近常规混凝土试验结果(0.20 ~ 0.17)。

b. 静态加载时，受拉泊松比平均值为 0.185，受压泊松比平均值为 0.163。动态加载时，受拉泊松比平均值为 0.147，受压泊松比平均值为 0.100。动态加载与静态加载相比，动态受拉泊松比减少了 21.1%，动态受压泊松比减少了 38.7%。这仅是笔者试验的结果。

表 4 全级配混凝土静态抗弯强度

Table 4 Flexural strength of fully-graded concrete specimens in static and dynamic states

试件编号	加载方式	抗弯强度/MPa
11023	静态	3.62
11025		3.65
11031		3.05
11036		3.47
11055	动态	4.16
11056		4.66
11073		3.79

c. 静态加载时，受压泊松比与受拉泊松比之比(ν^-/ν^+)达到 0.88 (ν^+/E^+)(ν^-/E^-)= 1.01，满足式(1)条件。动态加载时，受压泊松比与受拉泊松比之比(ν^-/ν^+)达到 0.68 (ν^+/E^+)(ν^-/E^-)= 1.28，不满足式(1)条件。

3.3 静态弯拉强度

全级配混凝土试件抗弯强度，根据实测破坏荷载按弹性体进行计算，结果见表 4。表中数据已扣除试件自重的影响。

静态试验平均应变速率约为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ，动态试验平均应变速率为 $1.2 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。试验结果表明，全级配混凝土弯拉试件动态抗弯强度比静态抗弯强度增加了 21.7%。

按不同模量理论梁的纯弯曲计算公式^[1]进行计算，则破坏阶段梁边缘受拉、受压应力如表 5 所示。

由表 5 可知，梁的拉应力被低估了。这对于以拉应力为主要控制因素的高拱坝设计来说，影响是可观的。

4 结 语

试验表明，全级配混凝土静态弹性模量和泊松比，受拉和受压状态下存在一定差异。(a)静态不同模量系数(E^-/E^+)分别达到 0.89、0.87。(b)动态压拉弹性模量比静态压拉弹性模量分别增长 5.4%、8.5%。(c)静态受压泊松比与受拉泊松比之比(ν^-/ν^+)达到 0.88、0.68。(d)动态压拉泊松比比静态压拉泊松比分别减少了 38.7%、21.1%。(e)采用相同模量理论计算可能会导致混凝土结构中拉应力被低估。因此，在以混凝土抗拉应力为控制的高拱坝设计中，按不同模量弹性理论进行分析是必要的，作为理论计算的基础参数试验也应引起足够的重视。

表 5 按不同模量理论计算的破坏阶段全级配混凝土梁边缘受拉、受压应力

Table 5 Tension and compression stresses at fully-graded concrete beam edge for the rupture stage based on the different modulus elasticity theory

加载方式	不同模量弯拉应力/MPa	$\delta_t/\%$	不同模量弯压应力/MPa	$\delta_c/\%$
静态	3.54	2.6	3.36	-2.6
动态	4.35	3.6	4.06	-3.3

注： δ_t 、 δ_c 分别为不同模量弯拉、弯压应力与相同模量弯拉、弯压应力相比提高的比例。

参考文献：

[1] 阿姆巴尔楚米扬 C A. 不同模量弹性理论[M]. 邬瑞锋，张允真译. 北京：中国铁道出版社，1986. 62—85.

[2] 刘相斌，赵国藩. 用不同模量有限元分析坝体应力和变形[J]. 力学与实践，2001，23(4)：39—42.

[3] 高潮. 用拉压不同模量理论分析弯曲板[J]. 计算力学学报，1998，15(4)：448—455.

[4] 高潮. 拉压不同模量材料弯曲板的有限元分析[J]. 大连水产学院学报，1998，13(3)：43—49.

[5] 叶志明，陈彤，姚文娟. 不同模量弹性问题理论及有限元法研究进展[J]. 力学与实践，2004，26(2)：9—14.

[6] 倪国荣，禹奇才. 不同模量弹性理论在岩石工程中的应用[J]. 长沙铁道学院学报，1990，8(4)：98—105.

[7] 欧阳华江. 不同模量弹性理论及其应用[J]. 强度与环境，1990(3)：34—38.

[8] 董福品，朱伯芳，沈之良，等. 国内外高拱坝应力分析概况[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2003，1(4)：292—299.

[9] 张允真，王志锋. 不同拉压模量弹性力学问题的有限元法[J]. 计算结构力学及其应用，1989，1(1)：236—245.

[10] WU Sheng-xing，ZHOU Ji-kai，SHEN De-jian，et al. Flexural-tensile testing of fully-graded concrete in static and dynamic states for high arch dam[A]. In：Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering[C]. London：Taylor & Francis Group Plc，2004. 961—968.

[11] ZHOU Ji-kai，WU Sheng-xing，ZHAN Chen-hui，et al. Experimental study on fully-graded concrete aseismatic strength under different

initial static loading[A]. In : Proceedings of the Third International Conference on Earthquake Engineering[C]. Beijing :Intellectual Property Publishing House & China Water Power Press ,2004. 339—344.

[12] DL/T 5150—2001 水工混凝土试验规程[S].

Experimental study on fully-graded concrete in static and dynamic states based on the different modulus elasticity theory

ZHOU Ji-kai¹, WU Sheng-xing¹, ZHAO Li-hong¹, CHEN Hou-qun²

(1. College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;

2. Institute of Water Resources & Hydropower Research of China , Beijing 100044 , China)

Abstract :The characteristics of fully-graded concrete of different moduli have not been paid much attentions to over a long period of time. The tensile stress of concrete is normally the key factor in the high arch dam design , so the analysis based on the different modulus elasticity theory is necessary. Especially , if a high arch dam to be constructed is located in a region of high seismic intensity , the earthquake resistance to ensure the dam safety is the most important technical problem to be solved , therefore , the requirement for tensile stress control of the dam body is very high. In the present study , static and dynamic flexural-tensile tests were performed on fully-graded concrete by use of the third point flexural loading method and the electro-hydraulic servo system for the study of the variation of the tension and compression elastic moduli and the Poisson ratios of the concrete in dynamic and static states. The results show that the ratios of compression and tension elastic moduli are 0.89 and 0.87 respectively in static and dynamic states , that the compression and tension elastic moduli in the dynamic state increase by 5.4% and 8.5% as compared with those in the static state , that the compression and tension Poisson ratios reach 0.88 and 0.68 respectively in static and dynamic states , and that the flexural strength of the concrete in the dynamic state is 21.7% greater than that in the static state.

Key words :fully-graded concrete ; different moduli ; static and dynamic characteristics

欢迎订阅《水利水电科技进展》

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊

全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊

(邮发代号 28 - 244 ,CN32 - 1439/TV ,ISSN1006 - 7647 ,双月刊)

《水利水电科技进展》主要刊登与水利、水电、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文 ,辟有专家论坛、学术研究、工程应用、工程管理、专题综述、国外水利、科技简讯等栏目 ,适合与水科学、水工程、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读。

《水利水电科技进展》由邮局发行 ,邮发代号 :28 - 244 ,2005 年全年每份订价 30.00 元.读者亦可直接向编辑部订阅.欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单.编辑部地址 :210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部.联系电话 025—83786335 ,E-mail :jz @ hhu. edu. cn ,http ://k kb. hhu. edu. cn. 汇款时务请注明“订水利水电科技进展”。