

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.04.004

预测全级配大坝混凝土弹性模量的三相模型

郑 丹^{1 2 3} 李文伟¹

(1. 中国长江三峡工程开发总公司 湖北 宜昌 433002 ;
2. 清华大学水利水电工程系 北京 100084 ; 3. 重庆交通大学河海学院 重庆 400074)

摘要 :在分析传统混凝土两相复合材料弹性模量计算模型不足的基础上 ,考虑混凝土中界面过渡区的影响 ,分析界面过渡区的体积与骨料体积分数、骨料颗粒级配和界面过渡区厚度之间的关系 ,建立预测混凝土弹性模量的三相复合材料模型 ,并在此基础上计算全级配混凝土与湿筛混凝土的弹性模量 ,并与已有试验结果进行比较 ,吻合良好。分析全级配与湿筛混凝土弹性模量比值与骨料及水泥基体弹性模量比值的关系 ,给出了随龄期变化时两者弹性模量比值的变化规律。

关键词 水工混凝土 ;全级配 ;湿筛 ;弹性模量

中图分类号 :TV698.1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)04-0014-04

Three-phase model for predicting elastic modulus of full-grade dam concrete//ZHENG Dan^{1,2,3}, LI Wen-wei¹(1. China Three Gorges Project Corporation, Yichang 443002, China ; 2. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China ; 3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract :Based on the shortcomings of the existing traditional two-phase model of elastic modulus for two-phase composites , and considering the influence of the interface transition zone (ITZ) in concrete , the relationships between volume percent of ITZ and aggregate and the thickness of ITZ and aggregate grading are analyzed. A three-phase model for predicting the elastic modulus is established. The elastic modulus of full-grade and wet sieving concrete were calculated with this model , and the results are in good agreement with existing experimental results. The relationship between the ratio of a full-grade concrete elastic modulus and a wet sieving concrete elastic modulus and the ratio of the aggregate elastic modulus and cement matrix elastic modulus were studied. The change law of the elastic modulus ratio is given when the age of concrete changes.

Key words :hydraulic concrete ; full grade ; wet sieving ; elastic modulus

混凝土的弹性模量是大坝等混凝土结构设计的重要参数 ,对大坝的变形、位移及温控措施等影响重大。由于水工混凝土通常采用最大骨料粒径为 80 mm 或 150 mm 的三、四级配混凝土 ,为保证混凝土试验结果的准确性 ,试件尺寸必须不小于最大骨料粒径的 3 倍^[1] ,一般用于测量全级配混凝土弹性模量的试件尺寸为 450 mm × 450 mm × 900 mm 或 $\varnothing$ 450 mm × 900 mm。由于大体积试件试验操作困难 ,通常采用湿筛法剔除拌合物中粒径超过 40 mm 的大骨料成型试件进行试验 ,并以此结果进行混凝土配合比设计和质量评定。由于全级配混凝土与其湿筛混凝土的胶材与骨料用量以及实际配合比不相同 ,两者之间的力学特性差异较大。因此有必要研究全级配与湿筛混凝土弹性模量差异的物理机理 ,

分析两者之间的关系 ,并结合全级配和湿筛混凝土的试验结果 ,为高坝混凝土结构设计和安全性评价提供参考。

1 现有研究成果回顾

1991 ~ 2000 年间 ,我国结合二滩拱坝对大体积全级配混凝土的特性进行了重点研究 ,杨成球等^[2] 得出了全级配与湿筛混凝土各种力学指标的对比关系 :单轴压缩下 ,全级配混凝土的受压弹性模量较湿筛混凝土的大 ,早龄期由于混凝土中粗骨料的骨架作用大 ,两者的差值更大 ,对于 28 d ,180 d 和 365 d 龄期 ,两者的比值分别为 1.22 ,1.07 和 1.02 ,抗拉弹性模量比值与之接近。李光伟等^[3] 对溪洛渡拱坝全级配混凝土进行试验 ,结果表明 ,大多数试件的全级配

基金项目 :国家自然科学基金(50779028) ;中国博士后科学基金(20080440979)
作者简介 :郑丹(1979—) ,男 ,重庆人 ,副教授 ,博士 ,从事混凝土材料性能研究。 E-mail :zheng_dan@ctgpc.com.cn

混凝土弹性模量高于湿筛混凝土的弹性模量,其比值和上述值接近。王怀亮^[4]统计了已有文献资料发现,四级配、三级配混凝土与湿筛混凝土的弹性模量的比值平均分别约为 1.12 和 1.09。

早期的弹性模量计算模型中将混凝土看成由骨料和水泥砂浆组成的两相复合材料,骨料和砂浆本身是线弹性材料。由于骨料在混凝土中是随机分布的,通过假设不同的骨料与砂浆分布规律,可以得到不同的弹性模量计算模型,如图 1 所示^[5]。

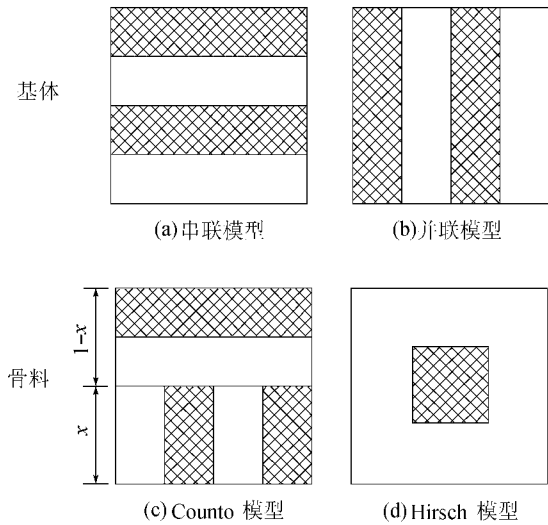


图 1 混凝土弹性模量的两相模型

图 1 中 x 和 $1 - x$ 分别表示并联项和串并联项的比例。串联模型的计算公式为

$$E_c = E_a f_a + E_m f_m \tag{1}$$

式中: E_c 为复合材料的弹性模量; E_a 为骨料的弹性模量; E_m 为夹杂的弹性模量; f_a 、 f_m 分别为骨料和夹杂的体积分数。

并联模型的计算公式为

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_a f_a} + \frac{1}{E_m f_m} \tag{2}$$

Counto 模型的计算公式为

$$\frac{1}{E_c} = \frac{x}{f_a E_a + f_m E_m} + (1 - x) \left(\frac{f_m}{E_m} + \frac{f_a}{E_a} \right) \tag{3}$$

Hirsch 模型的计算公式为

$$E_c = \frac{1}{\frac{1 - \sqrt{f_a}}{E_m} + \frac{1}{E_a - E_m + E_m / \sqrt{f_a}}} \tag{4}$$

对于混凝土来说,串联模型和并联模型分别对应弹性模量的上、下限,而 Counto 模型和 Hirsch 模型与实际混凝土弹性模量之间的误差较小。虽然两相复合材料模型的计算较简单,但研究表明,当骨料体积分数较大或骨料与砂浆弹性模量相差较大时,模型所得到的结果误差较大。Topcu 等^[5]的研究表明,当骨料和水泥砂浆的弹性模量比值超过 3 时,计算

误差达 30%。Li 等^[6]的研究表明,当骨料体积分数为 80% 时,计算误差达 40%。因此,为准确地预测混凝土的弹性模量,有必要分析混凝土的细观结构,找出两相模型的弊端,提出更为适合的计算模型。

2 混凝土弹性模量的三相模型

近年来,利用扫描电子显微镜(SEM)等设备对混凝土材料微观结构的研究表明,在贴近骨料表面存在着一层界面过渡区(interface transition zone, ITZ),界面过渡区的孔隙率较大,弹性模量小于水泥砂浆,对在应力作用下混凝土的许多性能起着至关重要的影响^[7]。忽略界面过渡区的两相复合材料模型并不能反映混凝土的真实特性,因此混凝土材料实际上应看成由骨料、水泥砂浆和界面过渡区所组成的三相复合材料^[8-9]。

本文假设:①混凝土宏观上各向同性;②骨料为球形;③界面过渡区的厚度均匀且与骨料粒径无关,可以建立如图 2(a)所示的三相复合材料模型。为计算其弹性模量,将骨料和界面过渡区等效为有效介质,将该模型分解为如图 2(b)和图 2(c)叠加。

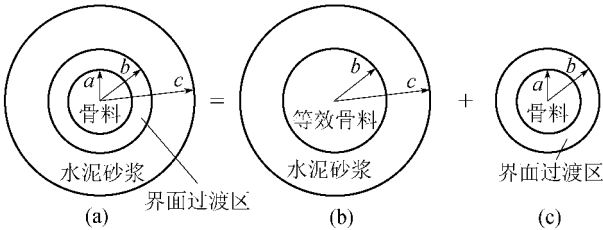


图 2 混凝土弹性模量的三相模型

如图 2 所示, a 代表骨料的半径, $b - a$ 代表界面过渡区的厚度, $c - b$ 代表水泥砂浆层厚度。应用 Eshelby 夹杂理论和弹性力学理论,根据图 2 中界面上的应力应变协调条件,可以求得图 2(b)中三相球面模型的有效体积弹性模量 K_{a0} 为^[10]:

$$K_{a0} = K_1 + \frac{\left(\frac{b}{c}\right)^3 (K_e - K_1)}{1 + \left[1 - \left(\frac{b}{c}\right)^3\right] \frac{K_e - K_1}{K_1 + \frac{4}{3} G_1}} \tag{5}$$

式中: K_1 为水泥砂浆的有效体积模量; K_e 为图 2(c)中等效骨料的有效体积模量; G_1 为水泥砂浆的有效剪切模量。

采用同样的方法,即可得到图 2(a)所示的三相混凝土复合材料的弹性模量。由式(5)可以看出,混凝土的弹性模量不仅取决于骨料、界面过渡区和水泥砂浆的弹性模量、剪切模量,同时也与骨料大小、界面过渡区和等效混凝土介质的厚度密切相关。根据均化分布的假设,可以把骨料、界面过渡区的厚度和等效混凝土介质厚度的比值表示为体积分数的

1/3 次方 ,即

$$\frac{a^3}{c^3} = f_a \quad \frac{b^3}{c^3} = f_a + f_b \quad (6)$$

式中 f_b 为界面过渡区的体积分数。 f_a 可以由混凝土拌合物中各成分的含量得到。

由于球形骨料随机分布于混凝土中 ,水工混凝土中骨料粒径的概率密度分布函数一般可以表示为

$$\rho(D) = \frac{nD_{\max}^n}{(k^n - 1)D^{n+1}} \quad (7)$$

式中 : D 为骨料直径 ; $D_{\max}$ 为混凝土中的最大骨料直径 ; $k = D_{\max}/D_{\min}$ 其中 $D_{\min}$ 为混凝土中的最小骨料直径。 $n = 3$ 和 $n = 2.5$ 分别表示等体积和 Fuller 级配骨料。水工混凝土中一般要求 0.16 mm 的筛余比率为 86% ~ 90% ,因此可取 $D_{\min} = 0.15$ mm。根据骨料概率密度分布函数 ,即可计算出混凝土内所有骨料的表面积 S_a 和体积 V_a 。同时 ,现有研究表明 ,界面过渡区的厚度与水灰比和水泥特性等因素密切相关 ,但和骨料粒径无关 ,可以认为混凝土内不同大小骨料周围的界面过渡区厚度相同^[8]。由于界面过渡区厚度很小 ,可假设相邻骨料间的界面过渡区不重叠 ,因此界面过渡区的体积也可以由骨料面积与界面过渡区厚度的乘积表示 :

$$V_b = S_a(b - a) = \frac{3\pi(b - a)D_{\max}^2}{1 + k + k^2} \quad (8)$$

因此 ,通过积分计算求得混凝土内所有骨料的表面积和体积后 ,可将界面过渡区的体积分数 f_b 表示为

$$f_b = \frac{\pi(b - a)(k - 1)}{D_{\max} \ln k} f_a \quad (9)$$

将式(9)和式(6)代入式(5)中即可求得如图 1 所示的混凝土的弹性模量。混凝土细观力学研究表明 ,界面过渡区的厚度一般在 30 ~ 50 μ m 之间 ,其弹性模量大约为水泥砂浆的 50% ~ 70% ,本文计算中取界面过渡区厚度 $b - a$ 为 40 μ m ,弹性模量为水泥砂浆的 60%。

3 模型与试验验证

Vilardell 等^[11]进行了不同龄期的水泥砂浆、湿筛混凝土和全级配混凝土的弹性模量试验 ,试验中全级配和湿筛混凝土的骨料体积分数分别为

表 2 全级配与湿筛混凝土弹性模量模型计算结果与试验结果比较

龄期/ d	湿筛混凝土				全级配混凝土				全级配混凝土 II			
	两相模型		三相模型		两相模型		三相模型		两相模型		三相模型	
	弹性模量/ GPa	误差/ %	弹性模量/ GPa	误差/ %	弹性模量/ GPa	误差/ %	弹性模量/ GPa	误差/ %	弹性模量/ GPa	误差/ %	弹性模量/ GPa	误差/ %
7	29.6	19.3	26.8	8.1	33.8	- 12.3	31.4	- 3.5	30.2	0.3	29.6	2.4
28	33.1	- 4.1	31.1	- 9.8	36.9	1.1	35.5	5.1	38.2	- 2.4	37.4	- 0.4
90	36.4	3.5	35.8	2.0	39.6	8.6	38.9	9.5	39.1	8.3	38.9	9.5
180	38.2	2.6	37.6	1.0	41.0	2.9	40.7	3.7	40.3	4.7	39.5	6.7

55.0%和 40.5% ,最大骨料粒径分别为 120 mm 和 40 mm ,骨料组成如表 1 所示。

表 1 全级配和湿筛混凝土弹性模量试验结果^[11]

龄期/d	弹性模量/GPa		
	水泥砂浆	湿筛混凝土	全级配混凝土
7	19.6	24.8	30.3
28	23.8	34.5	37.3
90	28.2	35.1	43.0
180	30.7	37.2	42.2

将水泥砂浆作为基体 ,粒径为 5 ~ 40 mm 的骨料作为夹杂 ,分别采用两相模型和三相模型计算了湿筛混凝土的弹性模量。同理将水泥砂浆作为基体 ,粒径为 5 ~ 120 mm 的骨料作为夹杂 ,分别采用两相模型和三相模型计算了全级配混凝土的弹性模量 ,计算和试验结果对比如表 2 所示。另外 ,为比较全级配和湿筛混凝土弹性模量的差异 ,将湿筛混凝土作为基体 ,粒径为 40 ~ 120 mm 的骨料作为夹杂 ,计算了全级配混凝土的弹性模量 ,结果见表 Ⅱ (用全级配混凝土 II 表示)。

试验结果表明 ,当用水泥砂浆作为基体时 ,两相模型的计算结果误差较大 ,而三相模型的误差较小。这是由于三相模型考虑了混凝土中界面过渡区的影响 ,更能反映混凝土的真实性能。当采用湿筛混凝土作为基体的计算方法时 ,两相模型和三相模型的误差均较小。这是因为当将湿筛混凝土作为基体 ,夹杂的粒径均为 40 mm 以上 ,与界面过渡区的尺寸 40 μ m 相比相差近 1 000 倍 ,这时界面过渡区对全级配混凝土弹性模量的影响可以忽略。

由上述分析还可以看出 ,随着骨料最大粒径的增大 ,混凝土的有效弹性模量也增大。这主要是因为随着粗骨料的增多 ,其体积分数增大 ,同时骨料的总表面积减小 ,界面过渡区的体积分数也随之减小 ,混凝土复合材料的弹性模量更接近于骨料。

4 全级配与湿筛混凝土弹性模量比值的讨论

根据上述分析可知 ,将湿筛混凝土作为基体 ,粒径大于 40 mm 的骨料作为夹杂 ,采用两相复合材料模型可以较为准确地预测全级配混凝土的弹性模量。因此 ,本文采用两相 Counto 模型进行计算。对于一般的水工四级配混凝土 ,基体的 $f_m = 0.74$,骨料

粒径在 40 ~ 150 mm 之间的 $f_a = 0.26$;对三级配混凝土而言 ,基体的 $f_m = 0.82$,骨料粒径在 40 ~ 80 mm 之间的 $f_a = 0.18^{[4]}$ 。由式 (3) 即可求出全级配和湿筛混凝土弹性模量比值 E_c/E_m 与骨料和湿筛混凝土弹性模量比值 E_a/E_m 的关系 ,如图 3 所示。

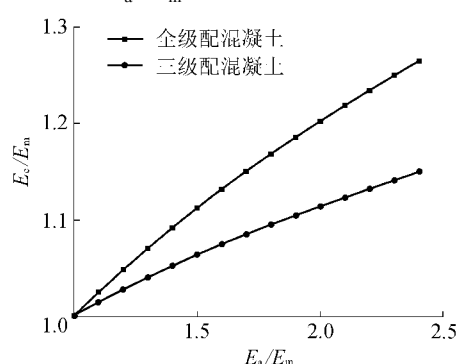


图 3 全级配和湿筛混凝土弹性模量比值与骨料和湿筛混凝土弹性模量比值关系

由图 3 可知 :全级配混凝土的弹性模量高于三级配混凝土 ; E_c/E_m 随着骨料弹性模量的增加而增加。由于现有水工混凝土的 E_a/E_m 比值一般在 1.5 ~ 2.5 之间 ,因此 E_c/E_m 大约在 1.1 ~ 1.2 之间 ,三级配与湿筛混凝土弹性模量比值在 1.05 ~ 1.15 之间。同时由于随着龄期的逐渐增加 ,水泥砂浆在硬化的过程中弹性模量逐渐增大 ,骨料与砂浆的弹性模量差异逐渐减小 ,使得全级配混凝土和湿筛混凝土的弹性模量比值逐渐变小。

5 结 语

笔者通过建立混凝土材料的三相复合材料模型 ,分析了全级配和湿筛混凝土弹性模量的关系 ,并讨论了骨料粒径和级配混凝土弹性模量的影响规律 ,得出以下结论 :

- a. 采用三相复合材料模型可以比较准确地预测全级配与湿筛混凝土的弹性模量 ;将湿筛混凝土作为基体 ,粒径大于 40 mm 的骨料作为基体中的夹杂 ,采用两相复合材料模型也可以较为准确地预测全级配混凝土的弹性模量。
- b. 由于全级配混凝土中骨料所占体积分数较大 ,且界面过渡区所占体积分数较小 ,因此全级配混凝土的弹性模量高于湿筛混凝土 ,两者的比值在 1.1 ~ 1.2 之间 ;三级配与湿筛混凝土弹性模量的比值在 1.05 ~ 1.15 之间。
- c. 随着龄期的逐渐增加 ,水泥砂浆在硬化的过程中弹性模量逐渐增大 ,骨料与砂浆的弹性模量差异逐渐减小 ,使得全级配混凝土和湿筛混凝土的弹性模量比值逐渐变小。

参考文献 :

- [1] DL/T5150—2001 水工混凝土试验规程 [S] .
- [2] 杨成球 ,吴政 . 全级配混凝土基本力学特性试验研究 [J] . 水利水电科技进展 ,2000 ,20(3) :29-32.
- [3] 李光伟 ,杨忠义 ,杨代六 . 高拱坝全级配大体积混凝土力学特性试验研究 [J] . 三峡大学学报 :自然科学版 ,2003 ,25(6) :500-503.
- [4] 王怀亮 . 复杂应力状态下大骨料混凝土力学特性的试验研究和分析 [D] . 大连 :大连理工大学 ,2007.
- [5] TOPCU I B ,AVCULAR N. Analysis of rubberized concrete as a composite material [J] . Cem Concr Res ,1997 ,27(8) :1135-1139.
- [6] LI Guo-qiang ,ZHAO Yi ,PANG Su-seng. Four phase sphere modeling of effective bulk modulus of concret [J] . Cem Concr Res ,1999 ,29(6) :839-845.
- [7] GARBOCZI E J ,BENTZ D P. Digital simulation of the aggregate-cement paste interfacial zone in concrete [J] . Journal of Materials Research ,1991 ,4(1) :196-201.
- [8] CHRISTENSEN R M ,LO K H. Solution for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models [J] . Journal of the Mechanics and Physics of Solids ,1979 ,27(4) :315-330.
- [9] NILSEN A U ,MONTEIRO P J M. Concrete :a three phase material [J] . Cement and Concrete Research ,1993 ,23(1) :147-151.
- [10] ZHENG Jian-jun , LI Chun-qing , ZHOU Xin-zhu. Characterization of the microstructure of interfacial transition zone in concrete [J] . ACI Materials Journal ,2005 ,102(4) ,265-271.
- [11] VILARDELL J ,AGUADO A ,AGULLO L ,et al. Estimation of the modulus of elasticity for dam concrete [J] . Cem Concr Res ,1998 ,28(1) :93-101.

(收稿日期 2008-10-17 编辑 :方宇彤)

· 简讯 ·

第 3 届地下水科学与工程学术研讨会 将在河海大学举行

第 3 届地下水科学与工程学术研讨会拟定于 2009 年 10 月 30 日至 11 月 1 日在河海大学举行。本届会议主办单位为中国水利学会地下水科学与工程专业委员会 ,中国水力发电工程学会地质及勘探专业委员会 ,江苏省水利学会 ;承办单位为河海大学。会议主题是地下水与环境。会议议题如下 :① 人类活动与地下水 ,包括区域地下水开采与地面沉降 ,水利水电工程与地下水 ,城市建设与地下水 ,地下水污染预测与防治 4 个方面 ;② 气候变化与地下水 ,包括气候变化对水资源的影响 ,气候变化与干旱区地下水补给 ,地下水对气候变化的响应 3 个方面 ;③ 地下水探测新技术 ,包括同位素测试技术 ,水文地质参数获取技术 ,其他新技术新方法 3 个方面。会议一般事务联系邮箱为 groundwater_s_e@163.com。(本刊编辑部供稿)