

二滩拱坝原级配混凝土徐变试验研究

李承木

30-33

(国家电力公司成都勘测设计研究院科学研究所, 四川成都 610071)

TV41
TV431

摘要:对二滩水电站大坝不同岩性的全级配混凝土徐变进行了试验研究,并与湿筛混凝土徐变进行比较。试验结果表明,原级配混凝土大试件的徐变较湿筛混凝土小试件的徐变低30%左右;原级配和湿筛二级配混凝土的徐变比与相应的灰浆率成正比;正长岩骨料的混凝土徐变大于玄武岩骨料的混凝土徐变,并提出由小试件徐变折算原级配大体积混凝土徐变的方法。

关键词:混凝土;原级配;湿筛法;灰浆率;徐变特性

中图分类号:TV41

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2000)01-0030-04

研究大体积混凝土的徐变特性,是为了获得从应变观测中确定应力计算所必须的徐变资料,由于试件尺寸的限制,徐变试验通常都采用湿筛法,剔除40mm以上的骨料,采用 $\varnothing 20\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 的徐变试件做试验。湿筛后的混凝土不同于原级配混凝土,最主要的区别是湿筛后混凝土的灰浆率比原级配的大。为了探索原级配大体积混凝土大试件徐变与湿筛后二级配混凝土小试件徐变之间的关系,进行了原级配混凝土的徐变试验,试件尺寸 $\varnothing 45\text{ cm} \times 90\text{ cm}$,并与湿筛后的混凝土小试件的徐变试验结果进行比较,从而得出由小试件徐变折算成原级配大体积混凝土徐变的方法。

1 试验原材料及工况设计

1.1 混凝土原材料

水泥:四川省渡口水泥厂生产的525号硅酸盐大坝水泥,其化学成分和矿物组成见表1。粉煤灰:四川省渡口河门口电厂粉煤灰,化学成分见表1。骨料:采用正长岩、玄武岩及白云岩经机械加工而成的人工砂石骨料。外加剂:采用吉林省开山屯化学纤维厂生产的木质磺酸钙(木钙)减水剂。

1.2 混凝土试件成型、密封和养护

正长岩和玄武岩两种混凝土大小试件徐变试验的加荷龄期为28d和180d,试件的成型密封,是用

2mm和1mm的橡胶皮加工成外径为 $\varnothing 45\text{ cm} \times 90\text{ cm}$ (大试件)和 $\varnothing 20\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ (小试件)的圆柱桶形状,置于大小徐变试模内。在大试件中心位置预埋两支DI-25型电阻式应变计,采用ZX-50型电阻式高频振捣器振捣密实。试件成型后2d拆模,并立即用橡皮和白铁皮盖将试件端部密封好,小试件内埋一支DI-25型电阻式应变计,湿筛剔除超过40mm粒径的大骨料,在振动台上振捣密实,成型2d后脱模,也立即用橡胶盖将试件密封好,然后将大小试件置于恒温恒湿的徐变室内养护至试验加荷龄期。

1.3 试验加荷应力与加荷设备

正长岩和玄武岩混凝土大小徐变试件,两个试验龄期的加荷应力及相对应力百分数分别列于表2。大试件徐变试验在150t自动液压稳压徐变仪上进行,小试件徐变在32t弹簧式徐变仪上进行,试验室内温度为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,相对湿度控制在85%以上。

1.4 试验方法与试验结果处理

混凝土徐变试验方法及试验结果处理按SD105-82《水工混凝土试验规程》进行。

2 试验成果及分析

2.1 原级配混凝土的应力与应变关系

利用徐变试件在200t油压机上进行了原级配

表1 水泥化学成分和矿物组成

材 料	化学成分/%							矿物成分/%				
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	fCaO	IgL	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
渡口525号硅酸盐大坝水泥	22.15	5.72	5.28	64.29	1.01	0.73	0.48	—	47.58	27.76	4.33	17.39
渡口粉煤灰	54.04	6.32	23.01	2.49	5.25	1.80	—	1.91				

作者简介:李承木(1939—),男,教授级高级工程师,从事水工建筑材料科学及MgO混凝土筑坝技术研究。

表2 徐变试验的加荷应力

配合比	加荷龄期 28 d				加荷龄期 180 d			
	15 cm 立方体 抗压强度 /MPa	$\sigma_{\text{大}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{小}}/\text{MPa}$	相对应力 /%	15 cm 立方体 抗压强度 /MPa	$\sigma_{\text{大}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{小}}/\text{MPa}$	相对应力 /%
I (正长岩)	19.0	4.46	5.18	36.0	35.3	4.71	5.52	21.0
II (玄武岩)	14.4	3.42	3.92	36.0	27.1	3.61	4.24	21.0

注: $\sigma_{\text{大}}$ 为大试件的加荷应力; $\sigma_{\text{小}}$ 为小试件的加荷应力。

混凝土的应力与应变试验, 试验结果绘于图 1。从图 1 可以看出, 试验点都落在直线上, 这表明原级配混凝土的轴向应变与加荷应力呈很好的线性关系。

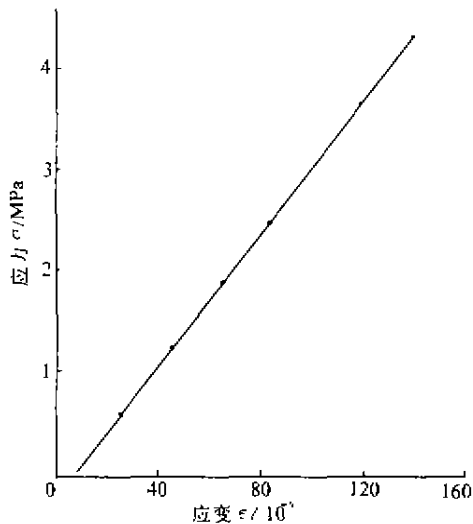


图1 原级配混凝土的应力与应变关系

2.2 原级配混凝土的弹性模量

原级配和湿筛混凝土的弹性模量列于表 3。从表 3 可以看出, 原级配混凝土的弹性模量高于湿筛混凝土的弹性模量(约 2% ~ 6%)。与水利水电科学研究所做试验结果(高 3% ~ 9%)和美国胡佛坝原级配混凝土的弹性模量试验(高 5% ~ 9%)结果较接近。由于湿筛后的混凝土骨料减少、灰浆增多, 变形增大、弹性模量减小。原级配混凝土骨料多, 粒径大, 含浆量少, 因此大试件内部的变形减小, 其弹性模量相应稍有提高也是必然的。

表3 混凝土的弹性模量

试件 尺寸	正长岩混凝土弹性模量				玄武岩混凝土弹性模量		
	28 d	180 d	317 d	456 d	28 d	180 d	317 d
Φ45 cm × 90 cm	20.63	29.63	32.26	34.15	19.61	31.91	35.29
Φ20 cm × 60 cm	20.21	28.24	30.69	32.38	18.83	30.60	34.19

2.3 混凝土的徐变度

在单位应力作用下的徐变变形称为徐变度。正长岩和玄武岩混凝土大、小试件的实测徐变度见表 4 及图 2 和图 3。从图表可以看出, 原级配混凝土的徐变比湿筛混凝土的徐变小, 两者徐变之比为 0.66 ~ 0.70。

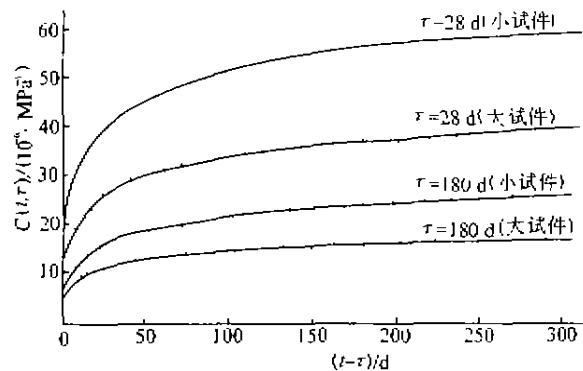


图2 正长岩混凝土徐变度曲线

根据表 4 所列的实测徐变值进行整理计算, 得出混凝土加荷龄期为 28 d 和 180 d 的徐变计算公式如下。

正长岩混凝土大小试件的徐变拟合公式:

表4 大小试件混凝土徐变度试验值

持荷 时间 /d	正长岩混凝土大、小试件						玄武岩混凝土大、小试件					
	加荷龄期 28 d			加荷龄期 180 d			加荷龄期 28 d			加荷龄期 180 d		
	$C_{\text{大}}$	$C_{\text{小}}$	$C_{\text{大}}/C_{\text{小}}$	$C_{\text{大}}$	$C_{\text{小}}$	$C_{\text{大}}/C_{\text{小}}$	$C_{\text{大}}$	$C_{\text{小}}$	$C_{\text{大}}/C_{\text{小}}$	$C_{\text{大}}$	$C_{\text{小}}$	$C_{\text{大}}/C_{\text{小}}$
3	14.6	23.3	0.63	5.9	8.4	0.70	19.8	29.7	0.67	6.4	10.0	0.64
7	19.3	29.8	0.65	7.8	11.3	0.69	25.6	37.6	0.68	8.6	13.1	0.66
14	23.2	35.5	0.65	9.5	13.8	0.69	30.6	44.2	0.69	10.2	15.6	0.65
30	27.4	41.7	0.66	11.4	16.7	0.68	36.1	51.7	0.70	12.2	18.3	0.67
60	31.2	47.2	0.66	13.1	19.4	0.68	41.2	58.2	0.71	13.9	20.7	0.67
90	33.4	50.4	0.66	14.1	21.3	0.66	43.9	62.0	0.71	14.8	22.1	0.67
120	35.0	52.6	0.67	14.8	22.4	0.66	46.0	64.7	0.71	15.4	23.0	0.67
180	37.2	55.8	0.67	15.7	24.2	0.65	48.9	68.3	0.72	16.2	24.4	0.66
250	38.8	58.3	0.67	16.5	25.4	0.65	51.0	71.2	0.72	17.0	25.4	0.67
平均			0.66			0.67			0.70			0.66

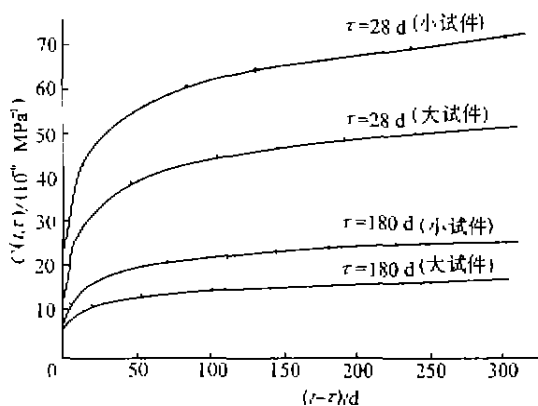


图3 玄武岩混凝土徐变度曲线

$$C_{\kappa}(t, 28) = 50.22 \times 10^{-6} [1 - e^{-0.254(t-\tau)^{0.324}}] \quad (1)$$

$$C_{\text{小}}(t, 28) = 75.33 \times 10^{-6} [1 - e^{-0.274(t-\tau)^{0.310}}] \quad (2)$$

$$C_{\kappa}(t, 180) = 21.06 \times 10^{-6} [1 - e^{-0.231(t-\tau)^{0.346}}] \quad (3)$$

$$C_{\text{小}}(t, 180) = 32.67 \times 10^{-6} [1 - e^{-0.206(t-\tau)^{0.362}}] \quad (4)$$

玄武岩混凝土大小试件的徐变拟合公式:

$$C_{\kappa}(t, 28) = 66.02 \times 10^{-6} [1 - e^{-0.262(t-\tau)^{0.318}}] \quad (5)$$

$$C_{\text{小}}(t, 28) = 92.21 \times 10^{-6} [1 - e^{-0.291(t-\tau)^{0.298}}] \quad (6)$$

$$C_{\kappa}(t, 180) = 21.87 \times 10^{-6} [1 - e^{-0.260(t-\tau)^{0.324}}] \quad (7)$$

$$C_{\text{小}}(t, 180) = 32.94 \times 10^{-6} [1 - e^{-0.272(t-\tau)^{0.311}}] \quad (8)$$

式中: $(t-\tau)$ 为加荷持续时间, d; $C(t, \tau)$ 为徐变度, $10^{-6}/\text{MPa}$; 加荷龄期 $\tau = 28 \text{ d}, 180 \text{ d}$; 下标“大”“小”分别表示大小徐变试件。

将加荷持续时间 $(t-\tau)$ 代入式(1)~(8), 计算结果与实测值比较, 各龄期的相对误差均小于 5%, 表明曲线拟合得较好。

将正长岩和玄武岩混凝土大、小试件徐变度之间的关系进行回归分析, 得出任意加荷龄期的徐变度的计算公式为

$$\text{正长岩: } C_{\kappa} = 0.661C_{\text{小}} + 0.02 \quad (9)$$

$$\text{玄武岩: } C_{\kappa} = 0.730C_{\text{小}} - 1.35 \quad (10)$$

上述两式计算组数 $n = 18$, 相关系数达 0.999, 远大于置信度 1% 的临界相关系数(0.590); 计算结

果与试验值比较, 相对误差在 5% 以内, 说明计算曲线与试验曲线吻合得较好(见图 4)。

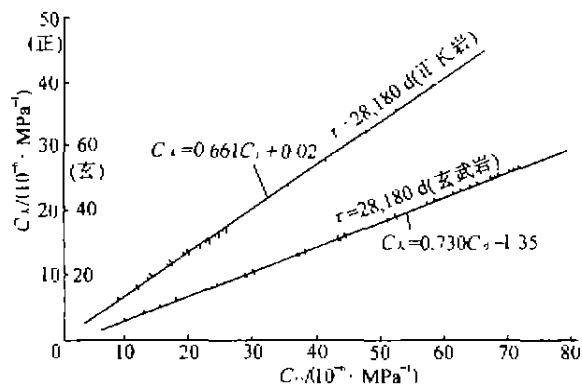


图4 原级配与湿筛混凝土的徐变关系

混凝土徐变主要来自水泥浆体, 骨料对混凝土徐变只起约束作用, 不同岩石的骨料对其约束差别较大。若在混凝土强度相同的情况下进行比较, 正长岩骨料的混凝土徐变比玄武岩骨料混凝土徐变大 30%^①。由于正长岩骨料的弹性模量(40~60 GPa)比玄武岩(85~110 GPa)弹性模量低, 而骨料的弹性模量越低, 对混凝土徐变的约束影响就越小, 因而正长岩骨料的混凝土徐变就比玄武岩混凝土的徐变大。这符合混凝土的徐变随着骨料变形模量的增加而减小的规律^[1]。众所周知, 徐变的大小取决于混凝土中水泥浆体的多少, 单位体积内的水泥浆愈多, 则徐变愈大。混凝土单位体积内水泥浆体所占的比例称为灰浆率, 以百分数表示。

由国内外试验结果可知, 在水灰比相同, 原材料性质也相同的情况下, 单位应力的徐变和灰浆率成正比, 即徐变呈现出随着灰浆率成正比增加的规律。

2.4 原级配混凝土徐变的折算

本试验的目的是研究全级配混凝土的徐变特性, 并探索利用常规小试件的徐变试验结果来折算原级配混凝土的徐变。通过对两种原级配混凝土大试件与湿筛后的混凝土小试件的徐变对比试验, 得出大小试件徐变比为 0.66~0.70, 相应的灰浆率比为 0.65~0.66, 两者很接近, 因此大小试件的徐变比与相应的灰浆率比符合正比关系这一前人已作出的结论, 即:

$$\frac{C_o}{C_T} = \beta \frac{\eta_o}{\eta_T} \quad (11)$$

式中: C_o, η_o 为原级配混凝土的徐变度和灰浆率; C_T, η_T 为湿筛混凝土的徐变度和灰浆率; β 为比例系数。

本试验的比例系数 β 值: 正长岩为 1.02~1.03,

①能源部成都勘测设计研究院科学研究所, 二滩水电站大坝混凝土徐变试验研究, 1989, 9。

玄武岩为 1.00~1.06。

2.5 应力松弛系数

混凝土结构在荷载作用下,如果保持变形为常量,由于徐变的作用,则结构物内部应力将随时间逐渐减小,这种现象称为应力松弛,通常将任意时刻的应力与初始应力之比叫做应力松弛系数。若用弹塑性徐变理论计算松弛系数,则需要各加荷龄期的弹性变形和—簇徐变曲线。本试验只有两个加荷龄期,松弛系数只能按经验公式计算。经过分析比较,采用 J. J. Brooks 和 A. M. Neville 所提出的经验公式计算松弛系数,即:

$$K_P(t, \tau) = e^{-(0.090+0.686\varphi)} \quad (12)$$

式中: $K_P(t, \tau)$ 为任意龄期的松弛系数; φ 为徐变系数。

将式(12)求出的应力松弛系数列于表 5,由表 5 可以看出,两种配合比混凝土的应力松弛系数均随着持荷时间的增加而降低,符合松弛系数的一般规律,即龄期愈大,徐变愈小,应力松弛则小,因而松弛系数就越大。松弛曲线的方向始终向下。

表 5 混凝土的松弛系数

配合比 (t-τ)/d	正长岩混凝土			
	$C(t, 28)$ /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	$K_P(t, 28)$	$C(t, 180)$ /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	$K_P(t, 180)$
3	14.6	0.743	5.9	0.811
7	19.3	0.696	7.8	0.780
14	23.2	0.658	9.5	0.754
30	27.4	0.620	11.4	0.725
60	31.2	0.588	13.1	0.700
90	33.4	0.570	14.1	0.636
120	35.0	0.557	14.8	0.667
180	37.2	0.540	15.7	0.664
250	38.8	0.528	16.5	0.653

配合比 (t-τ)/d	玄武岩混凝土			
	$C(t, 28)$ /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	$K_P(t, 28)$	$C(t, 180)$ /(10 ⁻⁶ ·MPa ⁻¹)	$K_P(t, 180)$
3	19.8	0.700	6.4	0.795
7	25.6	0.648	8.6	0.757
14	30.6	0.606	10.2	0.731
30	36.1	0.562	12.2	0.700
60	41.2	0.525	13.9	0.674
90	43.9	0.506	14.8	0.661
120	46.0	0.492	15.4	0.653
180	48.9	0.473	16.2	0.641
250	51.0	0.460	17.0	0.630

3 结 语

a. 室内常规混凝土徐变试验,因受试件尺寸限制,通常须采用湿筛法剔除粒径大于 40mm 的骨料,因而灰浆率增高,徐变相应增大,这种影响是不能忽视的。

b. 原级配混凝土的弹性模量比湿筛去掉大于

40mm 粒径混凝土的弹性模量约高 2%~6%,这是因为湿筛后,灰浆率增大,从而变形能力增强的结果。

c. 在强度相同的条件下,正长岩骨料的混凝土徐变大于玄武岩骨料的混凝土徐变。这符合混凝土的徐变随着骨料的弹性模量的增加而减小的规律。

d. 原级配大试件混凝土的徐变较湿筛混凝土小试件的徐变一般低 30% 左右。

e. 原级配和湿筛二级配混凝土的徐变比满足与相应的灰浆率成正比的关系,其比例系数近似为 1.0,因此原级配大体积混凝土的徐变可根据湿筛二级配混凝土小试件徐变进行折算而得。

参考文献:

[1] 惠荣炎,黄国兴,易冰若.混凝土的徐变[M].北京:中国铁道出版社,1988.

(收稿日期:1999-03-17 编辑:熊水斌)

(上接第 29 页)

参考文献:

- [1] Calantarients J A. Improvements in and connected with building and other works and appurtenances to resist the action of earthquake and the like [R]. Paper No. 325371, Engineering Library, Stanford University, California, 1909.
- [2] 山下興家. 建築物耐震装置 [R]. 特許 No. 63867 號, 1924 (大正 13 年).
- [3] 鬼頭健三郎. 建築物耐震装置 [R]. 特許 No. 61135 號, 1924 (大正 13 年).
- [4] Martel R R. The effects of earthquakes on buildings with a flexible first story [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1929, 19(3): 53~60
- [5] Green N B. Flexible first story construction for earthquake resistance [J]. Transactions, American Society of Civil Engineers, 1935, 100: 182~190
- [6] 真島健三郎. 耐震家屋構造 [R]. 特許 No. 108167 號, 1934 (昭和 9 年).
- [7] 鷹部屋福平. 制振性耐震構造法 [J]. 建築雑誌, 636 號, 1938 (昭和 13 年).
- [8] 小堀鐸二, 南井良一郎. 制振系の解析 (制限構造に関する研究 1) [A]. 建築學會論文報告集, 66 號, 1960 (昭和 35 年).
- [9] 王优龙, 魏珪, 李康祺等. 隔震技术的研究与应用 [M]. 北京: 地震出版社, 1991.
- [10] 武田寿一. 建築物隔震防震与控振 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [11] 吴章珠. 结构隔震的研究与应用综述 [J]. 华南地震, 1991, 11(4): 34~48
- [12] 唐家祥. 建筑结构基础隔震 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.

(收稿日期: 1998-09-22 编辑: 熊水斌)