

全级配混凝土基本力学特性试验研究

杨成球, 吴 政

⑧
29-32.6°

(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)

TV431
TV41

摘要:进行掺引气剂与减水剂的全级配混凝土及相应湿筛混凝土抗压强度、压缩弹性模量、抗拉强度、拉伸变形模量、极限拉伸值、弯曲特性以及抗磨损性能等基本力学特性试验, 得出了全级配与湿筛混凝土的各种力学指标, 建立了全级配与湿筛混凝土性能之相关关系。

关键词:全级配混凝土; 湿筛混凝土; 力学特性; 减水剂; 引气剂

中图分类号:TV33

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2000)03-0029-04

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完全不相同, 因此两者之间的力学特性及其本构关系差别是很大的。国内外有关研究人员对此进行了大量的试验研究, 并取得了宝贵的研究成果。但因试验研究的条件存在一定的差异且各自单独试验数据有限, 为此, 在承担“八五”攻关子题“全级配混凝土力学特性研究”中, 本课题组成员与协作单位的有关人员共同研究, 决定统一有关试验标准(试验尺寸、加荷速率等), 统一混凝土原材料及配合比, 在全级配混凝土基本力学特性试验方面, 按照有关标准先后两次进行了较大规模的试验研究工作, 且两次试验结果重复性较好, 现将试验成果分述如下。

1 试验简况

1.1 原材料及配合比

第一次试验采用峨眉 525 号硅酸盐大坝水泥, 28 d 抗压强度为 57.0 MPa。粉煤灰采用攀枝花市河门口火电厂磨细灰, 细度为 (0.045 mm) 22.4%, 70℃ 蒸养比 168%, 需水量比 100%。

骨料采用正长岩和玄武岩人工粗、细骨料, 正长岩与玄武岩人工砂细度模数分别为 2.78 和 2.90。粗骨料级配为小石:中石:大石:特大石为 0.20:0.20:0.25:0.35。外加剂采用吉林开山屯木钙和四川邛崃引气剂。

本次试验项目包括全级配混凝土不同龄期的抗压强度、劈拉强度、受压弹性模量以及微观和亚微观孔隙检测等, 同时还按常规方法进行了相应湿筛混

凝土有关特性的研究。

第二次试验在第一次试验研究成果的基础上, 对全级配与湿筛混凝土单轴抗压强度等有关内容进行了复验, 同时还进行了全级配与湿筛混凝土轴向拉伸、抗弯、抗磨损以及不同振捣频率对混凝土抗压强度的影响等方面的试验研究。

第二次试验采用的是攀枝花 525 号硅酸盐大坝水泥, 28 d 抗压强度为 56.6 MPa。粉煤灰采用攀枝花河门口火电厂电收尘灰, 细度为 (0.045 mm) 17%, 70℃ 蒸养比 172%, 需水量比 96%。粗、细骨料采用新鲜正长岩人工骨料, 人工砂细度模数为 2.82, 粗骨料级配同前。

外加剂采用吉林开山屯木钙、山西万荣县生产的 AE-B 引气剂、淮北矿务局 NF 高效减水剂和四川米易糖钙。混凝土配合比见表 1。

1.2 拉伸试验

全级配混凝土轴向拉伸试验采用 45 cm × 45 cm × 135 cm 的试件, 试件两端各埋 16 根 $\varnothing 25$ mm 预埋件(长 15 cm 和 21 cm 各 8 根, 4 排布置, 每排 4 根), 在中心部位 4 根预埋件上, 用 $\varnothing 6.5$ mm 的钢筋绑扎, 结长 17 cm, 总长 36 cm。试验时采用 M16 螺杆将试件预埋件与刚性极大的拉环端板(不变形)固接, 试件中间有 63 cm 范围属无筋素混凝土试验区, 其端部拉力能较为均匀地传递到试件中央。全级配混凝土轴向拉伸试验采用自制的竖向拉伸、弯曲试验装置, 用拉力传感器测力(精度 1/1000), 在试验装置上方设一转动球铰, 该试验装置受力方式单一且与小试件的受力方式完全相同。采用千分表(测距

基金项目:“八五”攻关项目(85-208-01-03-07)

作者简介:杨成球(1941—),男,教授级高级工程师,从事建筑材料研究。

表1 混凝土配合比

试件 编号	配合比 (胶材:砂:石:水)	材料用量/(kg·m ⁻³)			木钙掺量 /%	NF掺量 /%	AE-B掺量 /%	陷度 /cm	含气量 /%
		水	水泥	粉煤灰					
E25	1:1.88:6.50:0.42	105	175.0	75.0	0.20	—	0.45	3.3	3.9
E26	1:2.07:6.97:0.45	105	163.3	70.0	0.20	—	0.50	5.5	4.3
E27	1:2.31:7.38:0.49	107	152.9	65.5	0.20	—	0.55	3.9	4.3
E28	1:2.57:7.76:0.53	109	144.0	61.7	0.20	—	0.55	4.4	4.8
E46	1:2.24:7.16:0.49	112	160.0	68.6	0.20	—	—	4.2	1.4
E30	1:2.24:7.54:0.45	105	163.3	70.0	0.20	—	0.50	5.4	3.7
E31	1:2.50:7.98:0.49	107	152.9	65.5	0.20	—	0.55	5.0	3.1
E32	1:2.78:8.39:0.53	109	144.0	61.7	0.20	—	0.57	4.5	3.3
E33	1:3.09:8.85:0.57	110	135.1	57.9	0.20	—	0.65	5.1	3.5
E51	1:3.37:9.60:0.57	98	120.3	51.6	0.10	0.5	0.25	4.3	4.2
E52	1:2.97:8.76:0.515	96	130.5	55.9	0.10	0.5	0.25	5.2	3.9
E53	1:2.65:8.39:0.47	94	140.0	60.0	0.10	0.5	0.25	4.5	3.7
E54	1:3.24:9.22:0.57	104	127.7	54.7	—	—	0.45	3.5	1.7
E55	1:2.54:8.06:0.47	100	148.9	63.8	—	—	0.45	3.5	1.8

注:编号 E25~E46 为第一批混凝土试验配合比,其中 E30~E33 为玄武岩混凝土,其余为正长岩混凝土;编号 E51~E55 为第二批混凝土试验配合比,采用正长岩骨料,E54,E55 还掺用了 0.2% 的糖钙。

45 cm),电阻应变片(测距为 4 mm×80 mm)及位移传感器量(测距 45 cm)测变形。

2 成果分析

2.1 抗压、抗拉强度

a. 单掺木钙的全级配混凝土(E46)28 d 及 182 d 龄期的抗压强度与湿筛混凝土同龄期的抗压强度比值分别为 0.88 和 0.81,这与文献[1]中的有关结果相近,但是联合掺木钙与引气剂的混凝土则例外,其全级配大试件混凝土的抗压强度反而比小试件湿筛混凝土的高(早龄期),其比值随着试验龄期的增加而减少。从试验结果可知,联合掺用木钙与引气剂,大试件混凝土的抗压强度与单掺木钙的大试件基本相同,但湿筛小试件的抗压强度较前者低得多。分析其原因是全级配混凝土中 40 mm 以上的粗骨料占混凝土总体积的 40% 左右,因此全级配混凝土的实际含气量(剔除 40 mm 以上的粗骨料后的试验结果)减少 40%;其次是全级配混凝土采用高频插入式振捣器振实,其消泡效果(特别是消除对混凝土强度影响较大的粗气泡)优于标准振动台振实的混凝土,这一点可从表 2 得到验证;再次是全级配混凝土中粗骨料的骨架作用大于湿筛混凝土,尤其在短龄期(7 d)时,因其水泥砂浆的弹性模量较低,试件受力时便于应力重分配,故其大小试件的抗压强度比值更大。在此必须指出:①掺引气剂全级配混凝土大试件的抗压强度一般较小试件高,而两者的劈拉强度比值则相反(其大小试件劈拉强度比值在 0.77~0.96 之间,大多数在 0.80~0.95 之间),这是因为在同样原材料及配合比的前提下,对于贫水工混凝土来说,胶凝材料用量是影响混凝土抗拉强度的主要因素,尽管全级配混凝土中含气量较湿筛混凝土小,但因湿筛混凝土提高了其胶凝材料的相对用量,因而其劈

拉强度反而比全级配混凝土高;②全级配混凝土中 40 mm 以上粗骨料占粗骨料总重的 60%,故其相对粗骨料总表面积较湿筛混凝土粗骨料的总表面积小,因而全级配混凝土中粗骨料与砂浆的总粘结力反而减小,致使其劈拉强度减低;③全级配混凝土因诸如泌水等原因引起的界面裂纹较湿筛混凝土多,而这些原生界面裂纹对劈拉强度的影响大大超过了对抗压强度的影响。综上所述,全级配混凝土大试件的劈拉强度会较相应湿筛混凝土小试件低。文献[2]中的有关结论也证实了这一点。

b. 糖钙与 AE-B 引气剂联合掺用较木钙、NF、AE-B 三者联合掺用时,其胶材用量增加 6% 左右,而各龄期的抗压强度、抗拉强度增加 10%~20%,这说明糖钙与 AE-B 引气剂联合掺用时效果最佳。由于糖钙有一定的缓凝作用,因此可降低工程成本。

c. 当混凝土中含气量大于 3% 时,全级配混凝土试件的抗压强度较湿筛混凝土小试件的抗压强度高,且两者比值随混凝土龄期的增长而减小。当试验龄期为 182 d 时,两者比值接近 1.0。当混凝土中含气量较小时(E54 及 E55)则全级配混凝土大试件的抗压强度较湿筛混凝土小试件的抗压强度小。

2.2 受压弹性模量

混凝土受压弹性模量随着试验龄期的增加而增加,但其增长速率较混凝土强度随龄期的增长速率低。这是因为在混凝土中,粗骨料的强度远远大于各龄期混凝土的强度。混凝土抗压强度的增长率与水泥砂浆抗压强度的增长率基本上是同步的,而混凝土弹性模量增长率取决于水泥砂浆的弹性模量增长率和粗骨料自身不变的弹性模量,故混凝土弹性模量随龄期的增长率小于其强度的增长率。

2.3 拉伸及弯曲

2.3.1 轴向拉伸与劈拉试验

图 1 和图 2 分别绘出了全级配与湿筛缓凝不同

龄期典型应力-应变曲线,从开始加荷到极限荷载的60%~70%,其应力-应变曲线呈直线关系,这一阶段称准弹性阶段.从图2可看出,全级配混凝土182 d龄期的拉伸变形模量较湿筛混凝土的大5%左右,而极限拉伸值小35%左右.

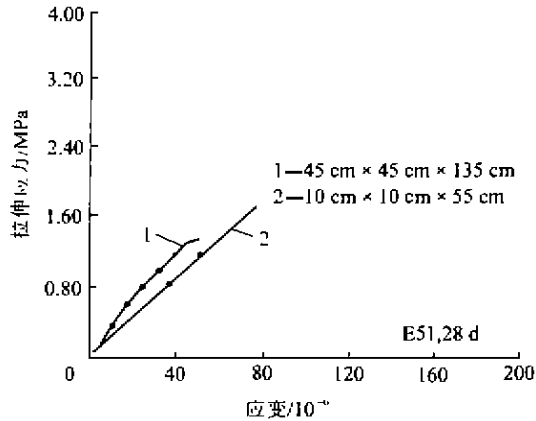


图1 E51,28d 典型拉伸应力-应变曲线

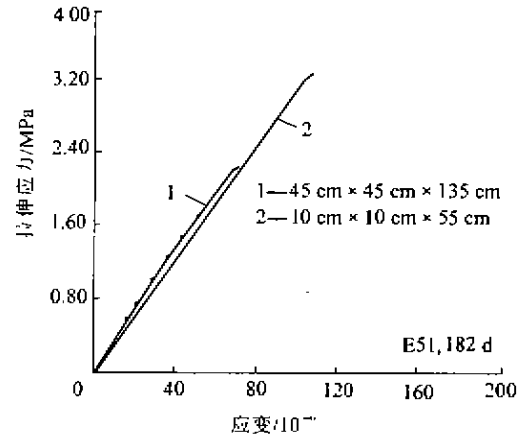


图2 E51,182d 典型拉伸应力-应变曲线

当混凝土的含气量大于3%时(E51,E52和E53),湿筛混凝土的劈拉强度较轴拉强度低,而全级配混凝土的劈拉强度则较轴拉强度高.在试验过程中还发现,劈拉试件的断裂面均有不少粗骨料被劈拉开;而轴向拉伸试件的断裂面,在小试件上有少量的粗骨料被拉断,在大试件上除有个别的小粒径骨料被拉断外未发现被拉断的大骨料.这是因为在进行劈拉试验时,只在中间受力面上的拉应力作用下不可能将整个粗骨料拔出,同时在劈拉面上的粗骨料还受周围混凝土的约束.对于轴向拉伸试验,情况则不同了,只要粗骨料本身沿轴向的总拉力大于其表面粘结力在轴向的投影值,则粗骨料就会被拔出.在混凝土成型浇筑完毕后,其泌水在上升过程中被粗骨料所阻,故有部分泌水聚集在粗骨料下方,以致混凝土硬化后形成孔隙、界面裂纹影响粗骨料与水泥浆的粘结,故在混凝土轴向拉伸试验时未发现有粗骨料被拉断的现象.当骨料越粗时,在劈拉受力面

上的抗力就越大,故相对来说全级配混凝土的劈拉强度要大一些.

2.3.2 弯曲强度与弹性模量

全级配混凝土弯曲抗压弹性模量较轴向抗压弹性模量低10%左右,究其原因可能是模壁效应所致.因为试件表面层砂浆较内部多,而砂浆的弹性模量较混凝土低.同时在弯曲试验时,表层受内层混凝土的约束较轴向受力时小,故变形较大,因此弯曲弹性模量较低.从试验结果可知,全级配混凝土抗弯强度高于轴向抗压强度62%,而湿筛混凝土的相应值平均高57%,两值很接近.

2.4 振动频率对混凝土含气量和抗压强度的影响

试验进行了高频(11000次/min的振捣棒)和低频(2850次/min的振动台)对混凝土含气量及抗压强度影响的试验工作.试验结果列入表2.从表2中可以看出,高频振捣器能明显消除混凝土中的气泡,由于混凝土含气量较低,故混凝土的抗压强度提高了.

表2 不同振动频率对混凝土含气量及抗压强度的影响

试件编号	含气量/%		抗压强度/MPa		劈拉强度/MPa	
	振动台	振捣棒	振动台	振捣棒	振动台	振捣棒
E30			19.0	21.3	1.57	1.74
E32			17.7	20.2	1.43	1.55
E51	3.7	0.8	39.6	44.8		
E53	3.9	1.2	50.3	52.8		

注:E30,E32为全级配混凝土,试件为边长45cm立方体,试验龄期为28d;E51,E53为湿筛混凝土,试件为边长20cm立方体,试验龄期为182d.

2.5 混凝土抗磨损试验

在进行全级配混凝土与湿筛混凝土的抗磨损试验时,由于磨损机的容量有限,故在试验时分别将全级配混凝土试件(边长45cm的立方体)和湿筛混凝土试件(边长20cm的立方体)锯成边长10cm的立方体试件,同时为了避免模壁效应表面砂浆较多而影响试验结果,均采用距表面5cm左右内部芯样试件.试验是在圆盘磨石机(转速1000r/min)上进行,为了加速磨损,采用42号金刚砂作为研磨剂.混凝土试验龄期为182d,试验结果列入表3.从表3中可以看出,全级配混凝土的抗磨损性能优于湿筛混凝土,且与混凝土的耐磨损的规律一样,即混凝土的强度愈高,其抗磨损性能愈好.

表3 混凝土抗磨损试验结果

试件编号	抗压强度/MPa		相对抗磨损强度/(h·(kg·m ²) ⁻¹)	
	全级配	湿筛	全级配	湿筛
E51	41.2	39.6	1.70	1.58
E53	52.0	50.3	1.85	1.61

2.6 压汞测孔试验

采用压汞测孔技术对全级配与湿筛混凝土(E26,E28及E46)中的水泥砂浆进行了微观孔隙检

测试试验,试验龄期为 182d,结果列入表 4。从表 4 中可看出,湿筛混凝土的微细孔隙半径大于全级配混凝土的孔隙半径。同时全级配混凝土的总微观孔隙体积及孔隙数量均大于湿筛混凝土,这说明采用高频振捣器可以消除混凝土中的大气泡。根据压汞测孔的资料: $dv/d(\log r) \sim \log r$ 图中的分析(v 为孔隙体积, r 为孔隙半径),还可看出,孔隙直径约小于 $400\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$) 时,全级配混凝土的孔隙频数明显多于湿筛混凝土,反之,当孔隙直径大于 $400\text{\AA}$ 时,全级配混凝土的孔隙频数明显低于湿筛混凝土的孔隙频数,说明两组全级配混凝土的微细气泡孔径均较湿筛混凝土的微细气泡孔径小,这与表 5 中平均孔隙半径相符,如果再考虑混凝土中粗骨料所占的体积比例,则可认为全级配混凝土的微细孔隙数量及孔径均较湿筛混凝土中相应值小。故掺木钙与引气剂的全级配混凝土在 182 d 龄期前抗压强度值反而会较湿筛混凝土抗压强度高。

表 4 砂浆压汞测孔结构的特性参数

试件 编号	总孔隙体积 /($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	总孔隙比表面 积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔隙 半径/ $\text{\AA}$	毛细孔占总空 隙百分数/%
E26(全)	0.1054	29.07	73	49.21
E26(湿)	0.0933	24.54	76	42.58
E28(全)	0.1132	29.46	77	52.93
E28(湿)	0.1035	24.42	89	50.33
E46(全)	0.1998	32.66	67	54.33
E46(湿)	0.0914	27.06	68	46.42

2.7 硬化混凝土气泡测定

采用 JQH-II 型混凝土气孔分析显微镜对 E26, E28 和 E46 三组全级配与湿筛混凝土进行了亚微观气泡孔径测定,结果列入表 5。从表中可看出全级配混凝土的气泡平均孔径低于湿筛混凝土,其含量变化规律也与混凝土拌和物实测值基本相符,因此掺木钙、引气剂全级配混凝土的抗压强度高于湿筛混凝土。但是,由于单掺木钙的湿筛混凝土(E46)其本身含气量很小,对抗压强度影响不大,故其抗压强度较全级配混凝土高。

表 5 硬化混凝土气泡参数测定结果

试件 编号	测试次 数/次	气泡数 /个	弦长读 数/mm	导线全 长/mm	平均气泡 半径/mm	含气量 /%
E26(全)	52	185	56.41	4900	0.23	1.20
E26(湿)	34	407	156.71	3400	0.29	4.60
E28(全)	52	409	138.55	5200	0.25	2.70
E28(湿)	30	544	196.49	3000	0.27	6.50
E46(全)	30	38	7.44	3000	0.15	0.25
E46(湿)	33	100	33.00	3000	0.32	1.27

3 全级配与湿筛混凝土力学特性相关关系

3.1 单轴压缩有关特性及相关关系

a. 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,其两者的差值更大。对于 28 d, 182 d, 365 d 龄期,两者的比值分别为 1.22, 1.07 和 1.02。

b. 全级配与湿筛混凝土立方体抗压强度的比值,对于 28 d, 182 d, 365 d 分别为 1.13, 1.02 和 1.04。

c. 全级配与湿筛混凝土圆柱体抗压强度的比值,182 d 龄期抗压强度的比值,对于 182 d 和 365 d 为 0.78 和 0.76。

d. 全级配圆柱体与立方体 182 d 龄期抗压强度比值平均为 0.63;湿筛混凝土相应的比值为 0.80。

造成全级配与湿筛混凝土立方体与圆柱体试件抗压强度差别较大的原因有以下三个方面:①全级配混凝土的受压弹性模量较湿筛混凝土的大,且粗骨料的骨架作用大,因而其测定值也高;②全级配混凝土圆柱体试件较湿筛混凝土高 3 倍,且全级配混凝土最大骨料粒径较湿筛混凝土约大 4 倍,因此在混凝土成型后其泌水上升过程中易被粗骨料所阻,故这种原生界面裂纹对圆柱体抗压强度(裂纹面近似垂直受力方向)的影响较对立方体抗压强度(裂纹面近似平行受力方向)大所致;也许是由于全级配混凝土圆柱体试件表面积大,其上表面平整度对试验结果也可能带来一定的不利影响。

3.2 拉伸与弯曲相关关系

a. 全级配与湿筛混凝土的拉伸变形模量比值,对于 28 d 和 182 d 龄期分别为 1.27 和 1.03,与压缩弹性模量相应的比值相接近。

b. 全级配与湿筛混凝土的劈拉强度比值,在 28 d 和 182 d 的比值分别为 0.95 和 0.89。

c. 全级配与湿筛混凝土的轴向抗拉强度,在 28 d 和 182 d 的比值分别为 0.73 和 0.68。

d. 全级配与湿筛混凝土的极限拉伸值的比值在 28 d 和 182 d 龄期均为 0.65。

e. 全级配与湿筛混凝土 182 d 龄期时,其抗弯强度的比值为 0.60。

4 结 语

a. 在混凝土中联合掺用减水剂和引气剂不但减少了胶材用量,而且大大改善了混凝土的和易性,这是保证人工骨料混凝土浇筑质量的重要措施之一。采用高频振捣器振实混凝土,可明显消除混凝土中的较大气泡含量,提高混凝土的抗压强度等力学特性。

b. 对硬化混凝土孔隙频数压汞测孔与气泡孔隙测定结果表明,采用高频振捣器振实后的全级配混凝土,其微观孔隙的直径较湿筛混凝土的小,且与混凝土中的实测含气量及强度试验结果相吻合。

(下转第 60 页)

6 违法处罚规则

《河川法》第7章对违反本法的行为作出了处罚规定.根据规定,视情节的不同,最多可以处以一年以下的徒刑和最多为50万日元以下的罚款.同时还规定除了对违法的行为者进行处罚外,还要对其法人(或法人代表人、使用人)处以同样的刑罚和罚款.

7 河川审议会

《河川法》第5章规定在建设省内设置河川审议会、审议会的任务,除了对河川法权限内的一些问题进行调研与审查外,还接受建设大臣的咨质,并审查有关河川方面的一些重要事项.审议会具有向有关行政机构陈述意见的权利.

审议会由30名左右委员组成,从富有学识及经验的专家和地方公共团体的首长中选出并经建设大臣任命,每届任期2年,会长从委员中选出,审议会下设有分会.

为了对特定河川的有关问题进行审查,必要时还可设置特别委员会(委员另任命)进行审议.

各都道府县可设置相应的河川审议会,其任务是接受都道府县首长的咨质,审查二级河川的重大事项.

8 《河川法实施令》与《河川法实施细则》

《河川法实施令》将《河川法》规定的内容加以细化,对绝大多数条款作了具体解释与规定,使得对执法有一个统一的标准可以遵循,因而它具有可操作性.

《河川法实施细则》则主要涉及三部分内容,一部分是对必须提出申请的行为作了具体规定,并对申请书的式样、内容要求、所需份数作出规定;第二部分是对必须进行通报的一些事项作了详细规定(这里所指的通报是指将事项刊登在建设大臣公报或都道府县的公报上或告示牌上);第三部分为附表和附录,包括记录、申请书、裁决书、证件、布告牌等式样,申请手续,损害赔偿手续等事项的具体规定.

9 与中国河川管理体制的比较

我国目前尚无一部河道管理方面的国家法律,由于河道管理涉及水利水电、航运、农业、环境等各个部门,目前的管理体制尚停留在各业务部门分割管理的方式.就水利部门而言,目前我国对大江大河(七大流域)实行由水利部下属的流域管理机构(水利委员会或流域管理局)行使管理权的模式,这种模式类似于日本对一级河川的管理,但水利部长并不

明确作为直接的“河川管理者”,而且在管理的范围及职权方面也与日本《河川法》规定有所差别.在管理经费及这些大江大河上的大型工程建设费用方面几乎全部由国家财政拨款承担,这也与日本规定的地方政府应负担部分管理经费有着本质的不同.根据几十年来的这种管理体制运行情况来看,笔者认为这种管理体制基本可行,但由于当前各部门各司其职,流域机构还难以与其他政府部门及地方进行统一协调,不能充分行使“河川管理者”应有的“职”与“权”,加之没有一个国家的权威性法律、法规加以支撑,使执法面临重重困难.对一些中小河流的管理由于不是像日本那样实施地方行政首长负责制,因此存在的实际问题可能会更多.

10 结 语

河川管理系统不可能遵循一个统一的模式,各国应根据本国国情制定相应的法律或法规.我国正在日益重视与强化法治管理,因此尽早制定一部适合我国国情的具有中国特色的河川管理法很有必要.在制定河川管理法时,日本在强化“河川管理者”的法权,尊重河川使用者的利益,实施必要的赔偿制度,对违法行为进行处罚(尤其是除行为者外,法人或其代理人也应受到同等的处罚),地方财政共同负担河川管理及工程费用等方面的一些做法与经验可以参考与借鉴.相信有一部统一的河川管理法必将对合理的河川管理与综合利用,防灾减灾和维护人民生命财产的安全提供一个强有力的法律保障.

(收稿日期:1999-08-31 编辑:熊水斌)

(上接第32页)

c. 由于粗骨料骨架作用大,全级配混凝土的受压弹性模量、抗压强度均较湿筛混凝土的相应值大,在182d龄期时,两者的比值接近1.0.

d. 由于混凝土的拉伸性能除与水胶比有关外,还取决于混凝土的胶材用量,因而全级配与湿筛混凝土的轴向抗拉强度与极限拉伸值在182d龄期的比值分别为0.68和0.65.同龄期两者抗弯强度的比值为0.60.

e. 全级配混凝土的抗磨性能优于湿筛混凝土.

参考文献:

- [1] 杨成球,李光伟,周友耕.二滩水电站全级配混凝土性能试验[J].水电站设计,1988(4):35~44.
- [2] 内维尔 A.M.混凝土性能[M].北京:中国建筑出版社,1983.

(收稿日期:1999-01-18 编辑:张志琴)