

文章编号:1001-4179(2013)20-0057-04

不同骨料水泥砂浆混凝土的干缩变形对比研究

石 妍,董 芸,张 亮,李 响

(长江科学院 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心,湖北 武汉 430010)

摘要:近年来,混凝土及材料界逐渐意识到,骨料特性不同,混凝土收缩行为有较大差别。针对水电工程常用的4种人工骨料,开展了水泥净浆、砂浆及混凝土的干缩变形试验。结果表明:其他条件一定时,不同品种骨料的砂浆与混凝土试件干缩率大小顺序为:砂岩最大,玄武岩和花岗岩次之,且两者相近,灰岩最小。另外,在相同干燥条件下,混凝土与砂浆的干缩均有良好的线性关系,骨料品种仅影响拟合公式的系数。而且不同品种混凝土的收缩行为是骨料原岩形成过程、孔隙结构、长期吸水性以及颗粒特性等多种因素影响的结果。工程选择骨料料源时,应针对不同品种骨料对混凝土收缩行为的影响,开展大坝裂缝的提前预防。

关键词:骨料品种;混凝土;砂浆;净浆;干缩变形;水电工程

中图法分类号:TV544 文献标志码:A

置于不饱和空气中的混凝土因失水分散而引起的体积变形,称为干燥收缩变形。传统观念认为混凝土的收缩来自于胶凝材料,骨料的影响仅是简单的“限制作用”,骨料含量越大,混凝土干缩越小。然而,混凝土材料和工程界近来逐渐意识到,骨料特性不同,混凝土的收缩行为有相当大的差异^[1-3],且骨料的影响机制相当复杂,这方面的研究一直未受到充分重视。水工混凝土的收缩行为是影响水电工程质量和耐久性的关键因素之一,密切关系到大坝的安全与服役寿命。一旦工程的骨料品种选择不当,或事先未能深入了解所用骨料的特性,将可能使工程的建设陷入被动局面,不仅增加巨额成本,甚至可能引发大坝开裂等问题。

受附近料源的限制,水工混凝土中人工骨料的品种是多样的,如沙沱、观音岩、枸皮滩等水电工程采用的是最常用的灰岩骨料,三峡水电工程采用的是花岗岩骨料,溪洛渡、金安桥等水电工程采用玄武岩骨料,而锦屏水电站采用砂岩粗骨料和大理岩细骨料组合。本文基于不同品种的人工骨料,即花岗岩、玄武岩、砂岩和灰岩,进行水泥净浆、砂浆及混凝土的干缩变形试验,分析骨料品种对干缩的影响,混凝土与净浆、砂浆干缩的相关性,以及骨料对混凝土干缩行为的影响机

理。研究结果有利于水工混凝土配合比的科学设计、骨料料场的合理选择以及大坝防裂抗裂措施的提前预防。

1 试验原材料及方法

1.1 原材料

试验采用峨胜42.5中热硅酸盐水泥、宣威I级粉煤灰、博特JM-II减水剂及山西黄河引气剂,4种人工骨料分别为花岗岩、玄武岩、砂岩和灰岩,均取自水电工程现场。骨料品质检测结果见表1和表2。

表1 细骨料品质检测结果

细骨料品种	表观密度/ (kg·m ⁻³)	饱和面干 吸水率/%	细度 模数	石粉/ %
花岗岩	2640	1.0	2.7	12.0
玄武岩	2910	0.91	2.6	14.0
砂岩	2690	1.60	3.0	12.8
灰岩	2710	0.84	2.9	13.1
DL/T5144-2001人工砂	≥2500	≤2.5	2.4~2.8	6~18

试验结果表明,4种细骨料均属于中砂(细度模数在3.0~2.3之间),除砂岩与灰岩砂细度模数稍大于规范值外,人工砂和粗骨料的其他性能指标均满足

收稿日期:2013-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51109015,51139001);国家科技支撑计划(2011BAE27800)

作者简介:石妍,女,高级工程师,博士,主要从事水工建筑材料研究。E-mail:shiyanyan@mail.crsri.cn

DL/T5144-2001《水工混凝土施工规范》的相应技术要求。

表 2 粗骨料(5~20mm)品质检测结果

粗骨料品种	表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和面干 吸水率/%	压碎 指标
花岗岩	2660	0.58	9.6
玄武岩	2930	0.35	4.1
砂岩	2700	0.85	8.1
灰岩	2720	0.32	7.3
DL/T5144-2001 碎石	≥ 2550	≤ 2.5	≤ 16

1.2 试验方法

骨料的品质检测按照 SL 352-2006《水工混凝土试验规程》的相关规定进行。

固定混凝土的水灰比为 0.4,粉煤灰掺量 35%,砂率 32%,单位用水量 120 kg/m^3 ,减水剂与引气剂的掺量分别为 0.7% 和 0.01%。保持混凝土配合比不变,拌和时不加入骨料,并调节外加剂掺量,控制浆体扩展度在 130 mm 左右,以成型砂浆及净浆试件。

砂浆及净浆试件尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$,试件成型后,放入标准养护室中(温度 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、 $\text{RH} \geq 95\%$)养护 24 h 后拆模,然后在水中养护 48 h 后取出,用湿布擦去表面水分和钉头上的污垢,并测定试件长度作为初始读数,最后将试件放入干燥室(温度为 $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 、 RH 为 $60\% \pm 5\%$)中,分别测定 3,7,14,28,60,90 d 的试件长度,试件的干缩龄期以测定基准长度后算起。混凝土试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 515 \text{ mm}$,试件成型后,送入标准养护室,48 h 后拆模,随后送至干燥室进行测长,此长度为试件的基准长度,干缩龄期同砂浆试件。

2 试验结果

定期测试水泥净浆、砂浆及混凝土试件长度,并按(1)式计算干缩率

$$S_t = \frac{(L_0 - L_t) \times 10^6}{L} \quad (1)$$

式中, S_t 为试件 t 天龄期干缩率, 10^{-6} ; L_0 为初始测量读数, mm; L_t 为 t 天龄期的测量读数, mm; L 为试件有效长度, mm。

水泥净浆及砂浆试件干缩率试验结果见表 3,其中,编号 A5 为净浆试件。混凝土试件干缩率试验结果见表 4。

3 结果分析和讨论

3.1 骨料品种对干缩变形影响

水泥净浆、砂浆及混凝土试件干缩率曲线见图 1

~2。由图可知,配合比及其他原材料一定时,不同品种骨料的水泥砂浆与混凝土试件干缩率大小顺序为:砂岩最大,玄武岩和花岗岩次之,且干缩率相近,灰岩最小。至 90 d 龄期,混凝土试件干缩率为 $216 \times 10^{-6} \sim 419 \times 10^{-6}$,砂浆试件干缩率为 $698 \times 10^{-6} \sim 1021 \times 10^{-6}$,而净浆试件的干缩率达 2016×10^{-6} ,显著大于砂浆与混凝土。砂岩骨料试件的干缩率最大,且 90 d 龄期时收缩的趋势并未停止,这对大体积水工混凝土而言是一个危险的开裂信号。

表 3 水泥净浆及砂浆试件干缩率试验结果 (10^{-6})

编号	骨料品种	龄期/d					
		3	7	14	28	60	90
A1	花岗岩	109	216	378	524	781	817
A2	玄武岩	168	280	428	589	803	866
A3	灰岩	100	209	320	424	656	698
A4	砂岩	196	341	528	690	926	1021
A5	-	393	785	1222	1636	1909	2016

表 4 混凝土试件干缩率试验结果 (10^{-6})

编号	骨料品种	龄期/d					
		3	7	14	28	60	90
B1	花岗岩	59	128	180	236	267	280
B2	玄武岩	67	151	199	248	284	301
B3	灰岩	42	79	124	163	198	216
B4	砂岩	113	206	278	374	401	419

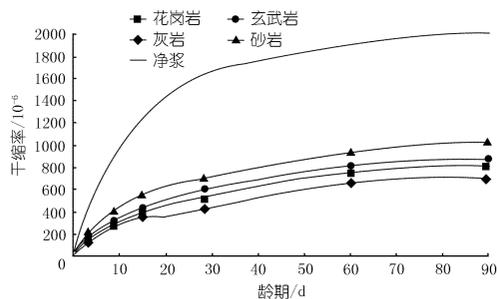


图 1 净浆及砂浆试件干缩率曲线

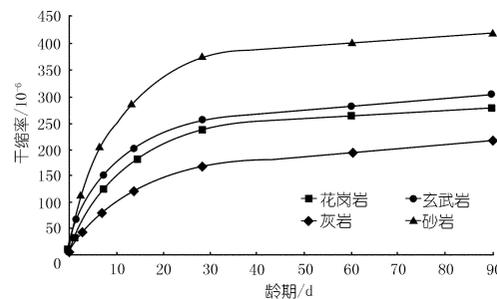


图 2 混凝土试件干缩率曲线

骨料对试件干缩变形的“限制作用”明显,且不同骨料的自身性能差异易导致混凝土及砂浆干缩率的不同。资料表明^[4],天然骨料本身一般不收缩,但有些骨料收缩率可达 900×10^{-6} ,并与用不收缩骨料配制

的混凝土收缩率具有相同的数量级。且能收缩的骨料主要是一些辉绿岩与玄武岩,也有一些沉积岩,如硬砂岩和泥岩。而花岗岩、石灰岩和石英岩则基本不具有收缩性。T. W. Reichard 的资料也表明^[5],在普通骨料范围内配合比一定的混凝土收缩变化相当大,最大的是砂岩混凝土,最小的是石英岩混凝土,收缩率差值最大达 800×10^{-6} 。

同时,试件早期干缩增长速率较快,28 d 龄期之后增长明显放缓。分析原因,早龄期主要是物理作用,可以用“毛细管张力理论”解释。试件从水中或潮湿环境中取出,毛细孔内充满水,转移至干燥室,水就开始蒸发,毛细孔内凹液面的形成及其曲率半径的减小使固相产生压缩弹性变形,从而表现出宏观收缩。28 d 龄期之后,其主导因素可能是 C-S-H 凝胶等水化产物的化学作用,同时可能还与“凝胶表面能”以及“吸附-解析”等因素有关^[6-8]。

3.2 混凝土与净浆、砂浆干缩变形的相关性

不同品种骨料的水泥砂浆与混凝土干缩率相关性曲线见图 3。可见,在其他原材料、配合比及干燥条件一定时,混凝土与砂浆试件的干缩均有着良好的线性关系,相关系数 r 在 0.97~0.98 之间。且骨料品种不同,拟合公式的系数稍有差异,斜率最大的是砂岩骨料,说明随着砂浆干缩率的发展,砂岩骨料混凝土的干缩增长速率最快,其次是玄武岩、花岗岩及灰岩。

关于水泥净浆与混凝土收缩率的关系,G. PICKETT 的资料显示^[9],配合比一定时,混凝土的收缩率 S_c 与水泥净浆的收缩率 S_p 的比值取决于混凝土中骨料的体积含量 α ,即: $S_c = S_p(1 - \alpha)^n$, n 为经验值,但 G. PICKETT 未考虑骨料品种引起的差异。根据计算,本试验混凝土的骨料体积含量 α 均为 0.733,上式转换为: $S_c = S_p \times 0.267^n$,其中, S_c 与 S_p 均已知,因此,可得到采用不同品种骨料时的 n 值,结果见表 5。不同品种骨料的水泥净浆与混凝土干缩关系曲线见图 4。

表 5 不同骨料水泥净浆与混凝土干缩相关性拟合结果

骨料品种	拟合公式	相关系数
花岗岩	$S_c = S_p \times (1 - \alpha)^{1.5}$	0.99
玄武岩	$S_c = S_p \times (1 - \alpha)^{1.4}$	0.98
灰岩	$S_c = S_p \times (1 - \alpha)^{1.7}$	0.99
砂岩	$S_c = S_p \times (1 - \alpha)^{1.2}$	0.98

可见,当骨料体积含量 α 及 n 值确定时,不同骨料品种的混凝土与净浆试件干缩均有着良好的线性关系,相关系数为 0.98~0.99,直线斜率最大的仍是砂岩骨料试件,说明水泥净浆干缩一致时,砂岩骨料混凝土的干缩最大,且增长速率最快,其次是玄武岩、花岗

岩及灰岩。

因此,试验研究及实际工程中,可由水泥净浆或砂浆的收缩近似估计混凝土的收缩。

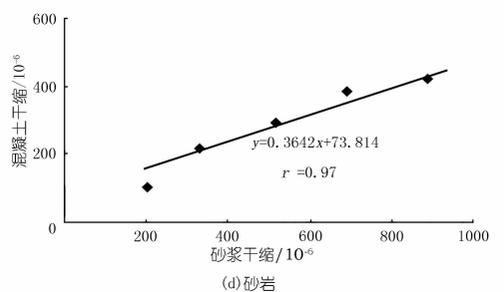
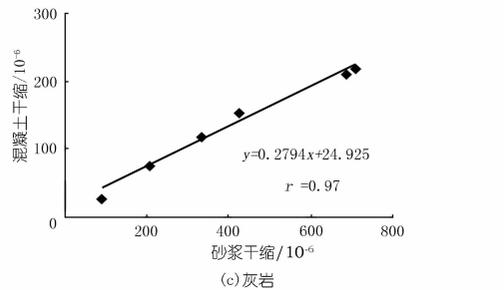
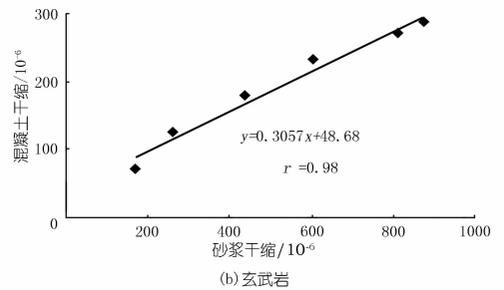
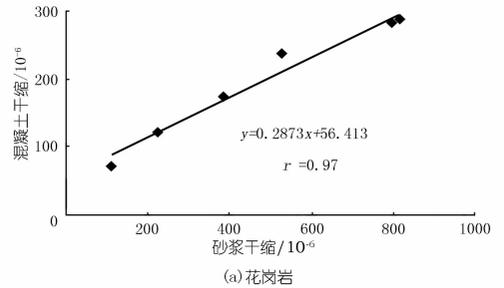


图 3 不同品种骨料的水泥砂浆与混凝土干缩相关性曲线

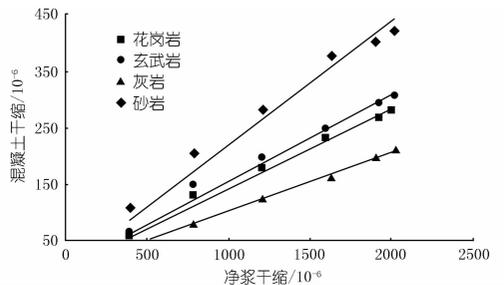


图 4 不同品种骨料的水泥净浆与混凝土干缩关系曲线

3.3 影响机理分析

分析而言,不同骨料的水泥砂浆混凝土干缩变形

的不同,源于骨料自身性能的差异。且骨料不单单是通过力学特性来“限制”混凝土收缩的,玄武岩密度大、强度高、可压缩性小,但其混凝土的收缩变形却大于石灰岩混凝土,G. E. Troxell 与 T. W. Reichard 早在 20 世纪 50 年代也发现了这个现象^[10]。因此,混凝土的收缩行为是多种骨料特性综合影响的结果。

首先分析试验所用不同骨料原岩的形成过程。玄武岩属基性岩浆岩,火山爆发岩浆喷出地表骤冷而形成的硅酸盐岩石,是地壳的主要组成部分之一。花岗岩属于深层的侵入岩;灰岩属于典型的沉积岩;砂岩为石英砂岩,也是沉积岩,由原生物碎屑组成;而玄武岩是喷出型岩浆岩。不同品种骨料原岩的形成过程不同,骨料的孔隙结构及吸水特性也不同。较大的孔隙对骨料后期的吸水不会产生明显的影响,而细小的毛细孔隙的吸水则是一个长期的过程。如果骨料内部存在较多的细小毛细孔隙,其吸水率就会较大且吸水过程漫长,骨料的吸水会使砂浆不断失去水分,从而增大混凝土的自收缩及干缩。本试验采用的玄武岩是喷出型岩浆岩,内部恰恰具有较多的闭口小气孔。因此,初步可推断是骨料内部孔结构所致的长期吸水特性影响了混凝土的收缩行为。

骨料的颗粒特性也是影响混凝土收缩行为的因素之一,其他条件不变时,细骨料越细(即细度模数越小)、石粉含量越高,混凝土的收缩越大。但本试验中采用的人工骨料均为机械破碎,粗骨料为二级配,4 种细骨料均属中砂、石粉含量在 12% ~ 14%,因此,本试验中骨料的颗粒特性差异不明显。

总的来说,灰岩强度适中、易于加工、骨料粒形好、其混凝土体积稳定性好,是人工骨料的首选;花岗岩也较理想;玄武岩强度高、加工时易产生针片状而导致粒形稍差,且混凝土干缩率稍大;砂岩骨料多孔吸水,拌制的混凝土干缩最大。在工程选择骨料料源时,应针对不同品种骨料对混凝土收缩行为的影响,对大坝的防裂抗裂采取提前预案。

4 结 论

针对水电工程中常用的 4 种人工骨料,进行水泥净浆、砂浆及混凝土的干缩变形试验,试验结果表明:

(1) 其他条件一定时,不同品种骨料的水泥砂浆与混凝土试件干缩率大小顺序为:砂岩最大,玄武岩与花岗岩次之,且干缩率相近,灰岩最小。至 90 d 龄期,混凝土试件干缩率为 $216 \times 10^{-6} \sim 419 \times 10^{-6}$,砂浆试件干缩率为 $698 \times 10^{-6} \sim 1\,021 \times 10^{-6}$,而净浆试件的干缩率达 $2\,016 \times 10^{-6}$ 。砂岩骨料试件收缩率最高,不利于大坝混凝土防裂抗裂。

(2) 在相同干燥条件下,混凝土与砂浆的干缩均有良好的线性关系,骨料品种仅影响拟合公式的系数。混凝土收缩率 S_c 与水泥净浆收缩率 S_p 的关系式为: $S_c = S_p \times 0.267^n$, n 值介于 1.2 与 1.7 之间。随着净浆及砂浆干缩的发展,砂岩骨料混凝土的干缩增长速率最快,其次是玄武岩、花岗岩及灰岩。

(3) 不同品种混凝土的收缩行为是骨料原岩形成过程、孔隙结构、长期吸水性以及颗粒特性等多种因素影响结果。工程选择骨料料源时,应针对不同品种骨料对混凝土收缩行为的影响,提前采取大坝防裂抗裂的预案。

参 考 文 献:

- [1] Bazant Z P, Wittmann F H. Creep and Shrinkage in Concrete Structures[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [2] 刘秉京. 混凝土技术[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [3] ACI Committee 209 (1992). Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, 209R: Manual of concrete practice, Part 1[S].
- [4] Neville AM. Properties of concrete (Fourth Edition) [M]. Prentice - Hall,1996.
- [5] Reichard T W. Creep and drying shrinkage of lightweight and normal weight concretes[J]. Nat. Bur. Stand. Monograph 74, 1964, (3).
- [6] 沈威,黄文熙,闵盘荣. 水泥工艺学[M]. 武汉:武汉工业大学出版社. 1991.
- [7] 钱晓倩,詹树林,方明晖. 减缩剂与减水剂的相容性研究[J]. 浙江大学学报:自然科学版,2005, (1):76-80.
- [8] 马保国,许永和,董荣珍,等. 硅酸盐水泥干缩特性曲线的建立与研究[J]. 武汉理工大学学报:材料科学版,2006,28(4):30-32.
- [9] Pickett G. Effect of aggregate on shrinkage of concrete and hypothesis concerning shrinkage[J]. J. Amer. Concr. Inst., 1956, (52):581-590.
- [10] Troxell G E, Raphael J M, Davis R E. Long - time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete[J], Proc. ASTM., 1958, (58):1101-1120.

(编辑:胡旭东)

(下转第 65 页)



- 涂装专刊,2007,(2):16-20.
- [8] 彭刚阳,瞿金清.高模数硅酸钾溶液及其富锌涂料的制备[J].涂料工业,2011,8(8):27-30.
- [9] 赵力,曾燕.涂料用高模数硅酸钾溶液的制备方法[P].CN1676551,2005.
- [10] 王盼.有机酸盐改性钠水玻璃富锌涂料的制备和性能研究[D].武汉:武汉工业学院,2009.
- [11] 唐一文.碳纳米管改性的无机-有机水性富锌底漆的空蚀行为[J].武汉大学学报:理学版,2008,(1):51-54.
- [12] 段景宽,江文斌,邵双喜,等.互穿网络聚合物研究及其应用进展[J].工程塑料应用,2010,7(38):41-44.
- [13] 田桂英,马黎明.耐腐蚀复合涂料及其制备方法与应用[P].CN1403516A,2003.
- [14] 吴波,杜海琴.新型硅酸锂富锌涂料合成方法[J].山东大学学报:工学版,2004,34(2):96-98.
- [15] 李艳云,蔡晓兰,段昕辉,等.片状锌粉在有机富锌涂料中的应用研究[J].涂装与电镀,2008,(3):24-26.
- [16] 杨振波,杨忠林,郭万生,等.鳞片型醇溶性无机富锌涂料的研究及其防腐蚀性的研究[J].上海涂料,2010,(1):1-4.
- [17] 韩凤俊,周钰明,汪小舟.鳞片状锌粉防腐蚀涂料的研制[J].腐蚀与防护,2006,(3):23-25.
- [18] 杨恒,朱晓云,郭忠诚.鳞片状锌粉在水性防腐涂料中的应用研制[J].上海涂料,2004,13(2):11-15.
- [19] 刘和平.涂料助剂现状及发展趋势[J].广东化工,2007,34(171):70-73.
- [20] 蔡森,张松,黄洁,等.水性无机富锌涂料用助剂的筛选及其对涂料分散稳定性的影响[J].上海涂料,2010,48(11):4-7.
- (编辑:郑毅)

Research progress of water – borne zinc – rich inorganic coating in hydraulic engineering metal structures

LIU Lei^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}, WANG Zaiqin^{1,2}, LI Zhen^{1,2}, WANG Shanfeng³

(1. *Materials and Structure Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China*; 2. *Collaborative Innovation Center for Geo – Hazards and Eco – environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China*; 3. *The University of Tennessee, Knoxville, Knoxville TN 37996, U. S. A*)

Abstract: Aiming at the disadvantages of traditional water – borne zinc – rich inorganic coating such as low water resistance and high brittleness, it is demonstrated that the mechanical and electrochemical properties of the coatings can be improved by modification. Further, by summarizing the previous research results, we discuss modifications solutions from three aspects of film – forming substrate modification, filler modification as well as additives modification. Some unsolved problems and future research directions of water – borne zinc – rich inorganic coating are proposed.

Key words: metal structure; anticorrosion; coating; modification; water conservancy engineering

(上接第 60 页)

Dry shrinkage deformation of cement mortar and concrete containing different aggregate

SHI Yan, DONG Yun, ZHANG Liang, LI Xiang

(*Changjiang River Scientific Research Institute, Research Center of Water Engineering Safety and Disaster Prevention of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China*)

Abstract: It is noted that great difference of concrete shrinkage arises from application of various aggregate. Dry shrinkage tests for cement paste, mortar and concrete were carried out using four popular artificial aggregates. When other condition is fixed, the downward dry shrinkage order of mortar and concrete containing different aggregate is as follow: sandstone > basalt ≈ granite > limestone. Under the same moisture condition, a fine linear relation can be found between mortar shrinkage and concrete shrinkage, and the aggregate type can only exert influence on coefficient of the fitting formula. Moreover, the shrinkage behavior of concrete containing different aggregates is influenced by various factors such as original lithology of aggregate, pore structure, long – term water absorption and particle characteristics. In aggregate selection in engineering, concrete crack prevention measures should be proposed according to the different concrete shrinkage features that are influenced by different aggregates.

Key words: aggregate type; concrete; mortar; cement paste; dry shrinkage; hydropower engineering