

高石粉人工砂原级配混凝土干缩性能试验研究

李兴贵<sup>1</sup>,章恒全<sup>2</sup>,陈晓月<sup>3</sup>

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.河海大学国际工商学院,江苏 南京 210098;  
3.无锡市犊山防洪工程管理处,江苏 无锡 214063)

摘要 结合水电站建设工程,对高石粉人工砂原级配大尺寸试件混凝土干缩性能进行了试验研究,探讨了人工砂中石粉含量、骨料级配、试件尺寸等对混凝土干缩性能的影响以及相关性分析,其结果对工程建设具有参考价值.

关键词 高石粉人工砂 原级配混凝土 干缩性能

中图分类号 :TU502 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2002)04-0037-04

人工骨料系指天然岩石经机械加工的产品,其中粒径小于 5 mm、大于 0.16 mm 的细颗粒称为人工砂,小于 0.16 mm 的微细颗粒称为石粉.我国《水工混凝土施工规范》(SDJ207—82)中规定,常态混凝土人工砂中的石粉含量应控制在 6%~12%.而实际工程中,人工砂生产系统制造的人工砂中石粉含量远高于这一控制标准,约为 18%±2%,有的甚至达到 24%左右.一般认为,人工砂中适量的石粉含量能起到填充料的作用,且对于提高混凝土强度有利,同时还能改善混凝土的和易性和抗渗性能.而过高的石粉含量会引起混凝土收缩增大.近年来,国内在高石粉人工砂混凝土性能及应用方面开展了一些研究<sup>[1]</sup>,但是,局限于原级配湿筛小试件,至于采用原级配(三级配, $D_M=80\text{ mm}$ )大尺寸试件进行高石粉人工砂混凝土性能试验研究,尚未见文献报道.

本文结合水电站建设工程,进行了高石粉人工砂原级配大尺寸试件混凝土干缩性能试验研究.为探讨高石粉人工砂对混凝土干缩性能的影响和原级配大试件与相应湿筛小试件干缩率测值间的相关性,试验研究采用了系列尺寸试件,并进行尺寸效应的分析.

1 试验设计

1.1 试验用原材料

1.1.1 水泥

三德牌 525 普通硅酸盐水泥,其化学成分和物理力学性能见表 1、表 2.

表 1 水泥的化学成分

Table 1 Chemical composition of cement %

| 成分 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | 烧失量  |
|----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------|
| 含量 | 22.31            | 6.21                           | 3.71                           | 59.71 | 2.97 | 2.69            | 0.82 |

表 2 水泥的物理力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of cement

| 凝结时间/min |     | 抗压强度/MPa |      | 抗折强度/MPa |      | 安定性   |
|----------|-----|----------|------|----------|------|-------|
| 初凝       | 终凝  | 3 d      | 28 d | 3 d      | 28 d | (沸煮法) |
| 340      | 435 | 26.8     | 59.4 | 5.2      | 7.7  | 合格    |

1.1.2 粉煤灰

试验用粉煤灰由厦门嵩能粉煤灰有限公司提供,其化学成分见表 3.粉煤灰的掺量为水泥用量的 20%.

表 3 粉煤灰的化学成分  
Table 3 Chemical composition of fly ash

| 成分 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | SO <sub>3</sub> | 烧失量  |
|----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|------|
| 含量 | 56.92            | 23.44                          | 8.67                           | 3.64 | 1.28 | 0.42            | 2.06 |

1.1.3 骨料

细骨料为人工砂,根据研究需要设计了 3 种石粉含量的人工砂,平均石粉含量分别为 16%,12%,3%,细度模数分别为 2.7,2.9,3.2. 相应的级配曲线绘于图 1.

粗骨料为天然岩石经机械破碎后制成的粒径为 5 ~ 80 mm 的碎石颗粒,分为大、中、小 3 级. 本项试验研究所用粗骨料级配比例分别为：

- 三级配,  $D_M = 80\text{ mm}$ ,小石:中石:大石 = 20:30:50；
- 二级配,  $D_M = 40\text{ mm}$ ,小石:中石 = 40:60；
- 一级配,  $D_M = 30\text{ mm}$ ,由三级配经湿筛后得到.

1.1.4 外加剂

采用佳宏有机精细化工厂生产的 BD—V 型混凝土缓凝减水剂,掺量为胶凝材料总量的 0.6% .

1.2 试验方案

根据试验研究<sup>①</sup>结果,人工砂中石粉含量 16% 左右时具有优良的力学性能,因此,干缩试验研究中取最大石粉含量为 16% . 考虑到 SDJ207—82 中允许的最高石粉控制含量和常规细骨料中粉末含量,本项试验研究中同时选择了石粉含量分别为 12% 和 3% 的人工砂,以便于进行混凝土干缩性能的比较. 试件尺寸依据试件最小尺寸不小于 3 倍最大骨料粒径的原则,按标准干缩试件同比例放大. 综合骨料最大粒径、石粉含量以及骨料级配和试验可比性,拟定了表 4 所示的 7 个试验方案.

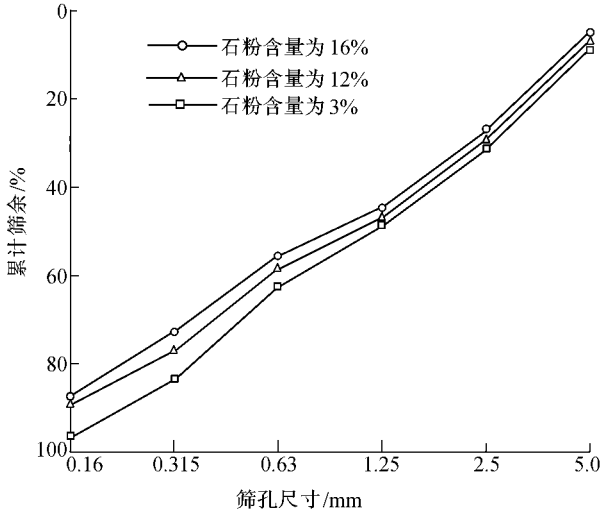


图 1 不同石粉含量人工砂的筛分曲线

Fig.1 Particle size distribution curves for artificial sands with different amounts of rock powder

表 4 混凝土干缩试验方案  
Table 4 Schemes for dry-shrinkage tests of concrete

| 方案 | 编 号     | 石粉含量/% | 骨料最大粒径/mm | 级配  | 试件尺寸                       |
|----|---------|--------|-----------|-----|----------------------------|
| 1  | GS55163 | 16     | 80        | 三级配 | 250 mm × 250 mm × 1 000 mm |
| 2  | GS55123 | 12     | 80        | 三级配 | 250 mm × 250 mm × 1 000 mm |
| 3  | GS55161 | 16     | 30        | 一级配 | 100 mm × 100 mm × 400 mm   |
| 4  | GS55121 | 12     | 30        | 一级配 | 100 mm × 100 mm × 400 mm   |
| 5  | GS55162 | 16     | 40        | 二级配 | 150 mm × 150 mm × 600 mm   |
| 6  | GS55122 | 12     | 40        | 二级配 | 150 mm × 150 mm × 600 mm   |
| 7  | GS55032 | 03     | 40        | 二级配 | 150 mm × 150 mm × 600 mm   |

注:(a)编号栏中 GS 表示干缩,55 表示水灰比为 0.55,16(12 或 03)表示石粉含量百分数,3(2 或 1)表示级配(下同).

(b)方案 3、4 采用的是由三级配经湿筛后得到的一级配混凝土,方案 7 采用的是常规用砂.

1.3 试验方法

试验依据《水工混凝土试验规程》(SD105—82)进行.

大尺寸试件直接在标准干缩室成型,所有试件均同时置于室温 20℃ ± 2℃、相对湿度为 60% ± 5% 的自动控制标准干缩室内.

1.4 混凝土配合比

混凝土干缩试验配合比及各材料实际用量列于表 5.

① 章恒全,等. 棉花滩水电站高石粉人工砂混凝土试验研究报告. 南京: 河海大学,1999.

表 5  混凝土干缩试验配合比及材料用量

Table 5  Materials and their mix proportion for dry-shrinkage tests of concrete

| 编 号     | 级 配 | 配合比<br>(水泥:砂:石:水) | 材料实际用量/(kg·m <sup>-3</sup> ) |     |     |        |         |         |     | 实测坍落度值<br>/mm |    |
|---------|-----|-------------------|------------------------------|-----|-----|--------|---------|---------|-----|---------------|----|
|         |     |                   | 水泥                           | 粉煤灰 | 砂   | 石子/mm  |         |         | 水   |               |    |
|         |     |                   |                              |     |     | 5 ~ 20 | 20 ~ 40 | 40 ~ 80 |     |               |    |
| GS55163 | 三级配 | 1:2.46:7.00:0.55  | 175                          | 44  | 539 | 307    | 460     | 766     | 120 | 1.3           | 85 |
| GS55123 | 三级配 | 1:2.46:7.00:0.55  | 175                          | 44  | 539 | 307    | 460     | 766     | 120 | 1.3           | 85 |
| GS55162 | 二级配 | 1:2.40:4.00:0.55  | 237                          | 59  | 710 | 474    | 710     |         | 163 | 1.8           | 85 |
| GS55122 | 二级配 | 1:2.40:4.00:0.55  | 237                          | 59  | 710 | 474    | 710     |         | 163 | 1.8           | 75 |
| GS55032 | 二级配 | 1:2.40:4.00:0.55  | 237                          | 59  | 710 | 474    | 710     |         | 163 | 1.8           | 90 |

## 2  试验结果与分析

石粉含量分别为 16% ,12% 和 3% 的人工砂混凝土,其不同龄期干缩试验结果汇总于表 6.

表 6  混凝土干缩试验结果

Table 6  Results of dry-shrinkage tests for concrete

| 方案 | 编 号     | 干缩率 $\epsilon$ ( $\times 10^{-6}$ ) |       |       |       |       |       |       | 级配  |
|----|---------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
|    |         | 3 d                                 | 7 d   | 14 d  | 28 d  | 45 d  | 60 d  | 90 d  |     |
| 1  | GS55163 | 21.3                                | 42.0  | 70.4  | 102.8 | 125.6 | 149.6 | 190.1 | 三级配 |
| 2  | GS55123 | 15.6                                | 37.7  | 58.4  | 94.6  | 123.8 | 148.9 | 186.6 | 三级配 |
| 3  | GS55161 | 59.7                                | 107.1 | 159.0 | 257.7 | 389.4 | 419.7 | 476.6 | 一级配 |
| 4  | GS55121 | 54.9                                | 90.3  | 129.8 | 230.2 | 335.5 | 353.5 | 411.3 | 一级配 |
| 5  | GS55162 | 50.9                                | 73.0  | 94.5  | 136.9 | 185.4 | 221.2 | 295.4 | 二级配 |
| 6  | GS55122 | 49.7                                | 64.7  | 92.9  | 124.7 | 183.5 | 216.4 | 274.6 | 二级配 |
| 7  | GS55032 | 36.6                                | 52.7  | 82.7  | 124.4 | 173.2 | 210.4 | 261.9 | 二级配 |

由表 6 所示的混凝土干缩率试验结果可以看出,相同骨料级配下,用石粉含量 16% 的人工砂拌制的混凝土,其干缩率比石粉含量 12% 时人工砂拌制的混凝土均有所增大,增加的幅度随骨料级配的增大而减小.以 90 d 龄期而言,一级配增大了 16% ,二级配增大了 8% ,三级配增大了 2% .从表 6 方案 5,6,7 中还可以看出,与常规细骨料(石粉含量 3%)相比,石粉含量 16% 和 12% 时的混凝土干缩率分别增大 12.8% 和 4.8% .其中,石粉含量 12% 以下时,干缩率增大缓慢,石粉含量大于 12% 时,干缩率迅速增大.干缩率随石粉含量增加而增大,这是由于石粉中小于 0.08 mm 的极细颗粒随石粉含量的增大而增加,这种极细颗粒在混凝土拌和物中起到增加水泥浆含量的作用.混凝土的干缩正是来源于水泥浆的干缩.显然,单位体积水泥浆多,导致干缩率增大.

以骨料级配的影响程度分析,在相同的石粉含量下,三级配与二级配相比,混凝土干缩率前者明显小于后者.就 90 d 龄期而言,石粉含量 16% 时三级配混凝土干缩率比二级配的减少了 55% (见表 6 方案 1 和 5) ;石粉含量 12% 时三级配混凝土干缩率比二级配的减少了 47% (见表 6 方案 2 和 6) .而三级配粗骨料含量为 64% ,二级配粗骨料含量为 50% ,这充分说明粗骨料含量对混凝土干缩具有显著影响,骨料的最大粒径越大,骨料用量越多,对减小干缩率越有利.

如果把三级配试件混凝土与经过湿筛的一级配小试件混凝土的干缩率作一比较,从表 7 中可以看出,大试件的干缩率比相应湿筛小试件的显著减小,平均约为湿筛小试件的 38.5% (石粉含量 16%) 和 42.9% (石粉含量 12%) .混凝土的干缩是由表及里逐步扩展的,但扩展速率缓慢.有资料<sup>[2]</sup>表明,1 个月的干燥深度达到 75 mm,而 10 年也不过仅有 600 mm. 因此,干缩率随试件尺寸的增大而减小.

另外,分析干缩率的发展历程(干缩速率),由表 8 可知,高石粉人工砂混凝土 7 d 龄期的干缩率较常规用砂混凝土干缩率增大约 4% ,后期干缩速率缓慢,并明显小于常规用砂混凝土干缩速率,表明高石粉人工砂混凝土需要加强早期养护.

表 7 三级配混凝土与湿筛混凝土干缩率对比  
Table 7 Comparisons between dry-shrinkage ratios of three-graded concrete and wet-screened concrete

| 序号 | 编 号     | 龄期/d                 |                      |                      |
|----|---------|----------------------|----------------------|----------------------|
|    |         | 28                   | 60                   | 90                   |
| 1  | GS55163 | $\frac{102.8}{39.9}$ | $\frac{149.6}{35.6}$ | $\frac{190.1}{39.9}$ |
| 2  | GS55161 | $\frac{257.7}{100}$  | $\frac{419.7}{100}$  | $\frac{476.6}{100}$  |
| 3  | GS55123 | $\frac{94.6}{41.1}$  | $\frac{148.9}{42.1}$ | $\frac{186.6}{45.4}$ |
| 4  | GS55121 | $\frac{230.2}{100}$  | $\frac{353.5}{100}$  | $\frac{411.3}{100}$  |

注 分子为干缩率测值( $1 \times 10^{-6}$ ),分母为相对于湿筛小试件的百分率.

表 8 混凝土干缩率的发展对比  
Table 8 Comparisons of dry-shrinkage ratios for different kinds of concrete

| 序号 | 编 号     | 龄期/d                |                      |                      |                     |
|----|---------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
|    |         | 7                   | 28                   | 60                   | 90                  |
| 1  | GS55162 | $\frac{73.0}{24.7}$ | $\frac{136.9}{46.3}$ | $\frac{221.2}{74.9}$ | $\frac{295.4}{100}$ |
| 2  | GS55122 | $\frac{64.7}{23.6}$ | $\frac{124.7}{45.4}$ | $\frac{216.4}{78.8}$ | $\frac{274.6}{100}$ |
| 3  | GS55032 | $\frac{52.7}{20.1}$ | $\frac{124.4}{47.5}$ | $\frac{210.4}{80.3}$ | $\frac{261.9}{100}$ |

注 分子为干缩率测值( $1 \times 10^{-6}$ ),分母为相对于 90 d 龄期干缩率的百分率.

3 结 语

- a. 混凝土的干缩随人工砂中石粉含量的增大而有所增大,当石粉含量大于 12% 时,干缩率显著增大.
- b. 骨料含量对混凝土干缩具有显著影响,在相同的石粉含量下,骨料级配越大,骨料用量越多,干缩率越小.
- c. 混凝土的干缩与试件尺寸有关,试件尺寸大,干缩率小,说明混凝土干缩存在显著的尺寸效应.
- d. 高石粉人工砂混凝土早期干缩大于常规人工砂混凝土,应加强高石粉人工砂混凝土的早期养护.

参考文献：

[1] 谭克忠.黄丹水电站人工石粉砂限值探讨及使用总结[J].四川水力发电,1998,9(3):44~46.  
[2] 内维尔 A M 著.混凝土的性能[M].李国洋,马贞勇译.北京:中国建筑工业出版社,1983.396~398.

Experimental study on dry-shrinkage property of fully graded concrete with high powder-content artificial sand

LI Xing-gui<sup>1</sup>, ZHANG Heng-quan<sup>2</sup>, CHEN Xiao-yue<sup>3</sup>

- (1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
- 2. College of International Industry and Commerce, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
- 3. Wuxi Dushan Engineering Management Office, Wuxi 214063, China)

**Abstract** : For construction of hydropower stations, experimental studies are performed on the dry-shrinkage property of large-scale fully graded concrete specimens with high rock powder-content artificial sand. Test results indicate that the content of rock powder in artificial sand, aggregate grading, specimen dimension, etc. have significant effects on the dry-shrinkage property of concrete. Based on test results, correlation analysis of those effects is carried out. The results may provide a reference for project construction.

**Key words** : high powder-content artificial sand ; fully graded concrete ; dry-shrinkage property