

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.05.007

陈昌礼, 赵振华, 李维维, 等. 长龄期外掺氧化镁混凝土自生体积变形分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(5): 54-59. (CHEN Chang-li, ZHAO Zhen-hua, LI Wei-wei, et al. Analysis of autogenic volume deformation of MgO concrete at long age[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(5): 54-59.)

长龄期外掺氧化镁混凝土自生体积变形分析

陈昌礼¹, 赵振华¹, 李维维¹, 李良川²

(1. 贵州师范大学 材料与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为进一步促进外掺 MgO 混凝土的研究与应用,分析了是否使用湿筛方法筛除粒径大于 40 mm 粗骨料对龄期长达 1 400 d 的标准尺寸和非标准尺寸的外掺 MgO 混凝土自生体积变形的影响。结果表明,在相同 MgO 掺量下,不管龄期长短,湿筛后混凝土试件的自生体积变形均大于未湿筛的混凝土,且湿筛后非标准尺寸混凝土试件的自生体积变形增量小于标准尺寸试件(标准尺寸试件增大 15×10^{-6} 左右,非标准尺寸试件增大 12×10^{-6} 左右);不管试件尺寸标准与否,湿筛与未湿筛混凝土试件的自生体积变形差值相对稳定,随龄期的波动不大,尤其是 3 年以上龄期的波动更小。

关键词: MgO 混凝土; 自生体积变形; 试件尺寸; 湿筛; 长龄期

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)05-0054-06

迄今为止,外掺氧化镁(MgO)混凝土筑坝技术已应用于我国 50 多个水利水电工程^[1]。工程实践表明,外掺 MgO 混凝土呈现良好的延迟微膨胀性能,但实际膨胀量未达到设计所需的膨胀量^[2-3]。大量试验研究表明,外掺 MgO 混凝土的膨胀量,除受 MgO 掺量影响外,还同混合材料的种类与掺量、环境温度等诸多因素有关^[1]。因此,在 MgO 应用于实际工程之前,一定要在室内进行外掺 MgO 混凝土的自生体积变形试验。

室内进行混凝土的自生体积变形试验时,按照规范^[4-5]要求,先将混凝土拌合物中粒径大于 40 mm 的骨料筛除(以下简称“湿筛”),然后将筛除大骨料后的混凝土分 3 层装于直径 20 mm,高度 500~600 mm 用镀锌板或橡胶板制作的试件桶内,同时在试件中心位置埋入供量测混凝土自生体积变形数值使用的电阻应变计,在混凝土振捣密实后立即密封试件桶,然后按照规定频率测试混凝土的自生体积变形 1 年。朱伯芳^[6]院士指出,现场混凝土含有大骨料,水泥用量和 MgO 含量相对较少,而室内试件经过湿筛,剔除了大骨料,单位体积混凝土内 MgO 含量较高,因此实际工程的自生体积变形将小于室内试验值。但湿筛与否究竟对混凝土的自生体积变形存在多大影响,尤其是对龄期 1 年以上的混凝土的自生体积变形存在多大影响,至今未见相关报道。为此,本文研究了是否使用湿筛方法筛除粒径大于 40 mm 骨料对龄期长达 1 400 d 的外掺 MgO 混凝土自生体积变形的影响,旨在促进外掺 MgO 混凝土的深入研究和推广应用。

1 试验条件

1.1 原材料

(1)水泥。试验采用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥,比表面积为 $319 \text{ m}^2/\text{kg}$,标准稠度用水量为 26.2 %,安定性合格,主要化学成分见表 1。

收稿日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51269003,50969002);贵州省“125”重大科技专项(黔教合重大专项字[2012]004号)

作者简介: 陈昌礼(1966—),男,贵州正安人,教授,主要从事水工材料的研究与教学。E-mail: ccl@gznu.edu.cn

表 1 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥的主要化学成分 (质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of ordinary Portland cement (mass percentage)										%
批 次	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	f-CaO	I.L
第 1 批	58.76	22.03	6.17	3.67	1.38	2.01	0.23	0.45	0.09	4.23
第 2 批	59.91	20.25	6.23	3.74	2.47	2.69	0.22	0.39	0.11	3.90

注:I.L 表示烧失量,以下同。

(2) 骨料。试验使用的骨料为贵州某水电站工地的灰岩人工砂和碎石。人工砂的细度模数为 2.43, 属中砂, 颗粒级配属于第Ⅱ区, 级配良好; 粗骨料由工地加工成小石(5~20 mm)、中石(20~40 mm)、大石(40~80 mm)3 级。骨料质量满足《水工混凝土施工规范(DL/T 5144—2001)》的要求。

(3) MgO。试验所用的 MgO 为辽宁海城东方滑镁公司生产的轻烧 MgO, 活性指数为 219 s, 细度为 26.8 % (0.045 mm 筛的筛余), 密度为 3.394 g/cm³, 其主要化学成分为: MgO (质量分数 90.15%), SiO₂ (2.04%), Al₂O₃ (0.37%), Fe₂O₃ (0.46%), CaO (1.30%), SO₃ (0.10%), 烧失量为 5.46%。

(4) 外加剂。使用奈系高效减水剂, 其品质符合现行标准要求。

1.2 混凝土配合比

试验用混凝土配合比见表 2。其中, MgO 的外掺量按占水泥用量的百分数计, 混凝土坍落度控制在 70~90 mm 的范围。

表 2 试验用混凝土配合比
Tab. 2 Mix proportion of concrete for tests

配合比编号	水胶比	混凝土的原材料用量 / (kg · m ⁻³)							
		水	水泥	砂子	小石	中石	大石	MgO	外加剂
AB40-0-0.45	0.45	132	293.3	683	398	531	398	0	2.05
AB40-5-0.45	0.45	132	293.3	683	398	531	398	14.67	2.05
AB400-0-0.50	0.50	132	264.0	718	400	532	400	0	0.53
AB400-5-0.50	0.50	132	264.0	718	400	532	400	13.20	0.53

注: AB40, AB400 使用的外加剂分别为 FDN, GTS103; AB40-0-0.45 表示“编号-MgO 外掺量-水灰比”, 以此类推, 以下同。

1.3 试件尺寸及成型

为便于研究是否使用湿筛方法筛除混凝土拌合物中粒径大于 40 mm 的大骨料对混凝土自生体积变形的影响, 本试验设计了两种尺寸的混凝土试件: 一种是标准尺寸, 即现行《水工混凝土试验规程》规定的试件尺寸, 直径 200 mm, 高 500 mm, 记为 AB40 组试件; 另一种为非标准尺寸, 直径 250 mm, 高 500 mm, 记为 AB400 组试件。成型混凝土试件时, 均按照试验规程, 分 3 层装入混凝土拌合物, 并在混凝土中预埋 DI-25 型电阻应变计(应变计垂直固定在用镀锌板制作的试件桶中心位置), 同时将混凝土振捣密实。然后, 将试件密封后放置于温度为(20±2)℃的环境中养护, 并按照试验规程规定的时间、频率量测应变计的电阻及电阻比, 再按照规程规定的方法将这些电阻及电阻比换算为试件的自生体积变形。

2 试验结果及其分析

2.1 对标准和非标准尺寸试件自生体积变形的影响

以标准尺寸(Φ200×500 mm)的 AB40 混凝土试件的自生体积变形为例, 是否使用湿筛方法成型的混凝土试件的长期自生体积变形及其典型龄期的测值分别见图 1 和表 3。

以非标准尺寸(Φ250×500 mm)的 AB400 混凝土试件的自生体积变形为例, 是否使用湿筛方法成型的混凝土试件的长期自生体积变形及其典型龄期的测值分别见图 2 和表 4。

表 3 AB40 混凝土典型龄期自生体积变形测值

Tab. 3 Mearsured values of autogenic volume change of AB40 concrete at typical age						10 ⁻⁶
典型龄期 /d	28	60	90	180	270	360
AB40-0-0.45 的变形值(湿筛成Ⅱ级配)①	-27.85	-37.35	-42.53	-51.54	-58.55	-66.55
AB40-5-0.45 的变形值(未湿筛)②	-16.67	-24.24	-25.23	-32.67	-38.83	-38.47
AB40-5-0.45 的变形值(湿筛成Ⅱ级配)③	-5.36	-13.04	-13.31	-13.54	-16.43	-22.83
湿筛后参与不掺 MgO 的变形差④(=③-①)	22.49	24.31	29.22	38.00	42.12	43.72
掺 5%MgO 后湿筛与未湿筛的变形差⑤(=③-②)	11.31	11.20	11.92	19.13	22.40	15.64
典型龄期 /d	540	720	900	1 080	1 260	1 440
AB40-0-0.45 的变形值(湿筛成Ⅱ级配)①	-64.67	-63.43	-66.11	-68.12	-69.89	-68.59
AB40-5-0.45 的变形值(未湿筛)②	-37.42	-39.14	-37.79	-41.83	-42.99	-41.65
AB40-5-0.45 变形值(湿筛成Ⅱ级配)③	-22.19	-21.65	-21.23	-26.17	-28.78	-26.56
湿筛后参与不掺 MgO 的变形差④(=③-①)	42.48	41.78	44.88	41.95	41.11	42.03
掺 5%MgO 后湿筛与未湿筛的变形差⑤(=③-②)	15.23	17.49	16.56	15.66	14.21	15.09

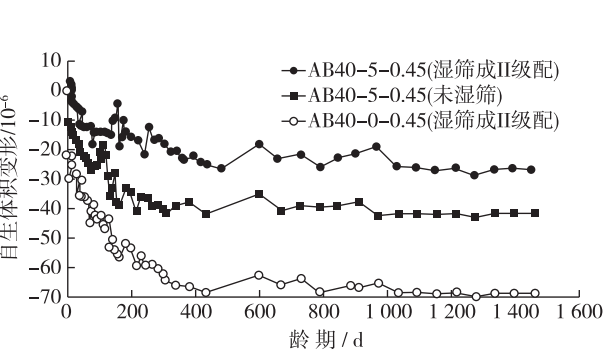


图 1 AB40 混凝土的长龄期自生体积变形过程曲线
Fig. 1 Autogenic volume change curves of AB40 concrete through long age

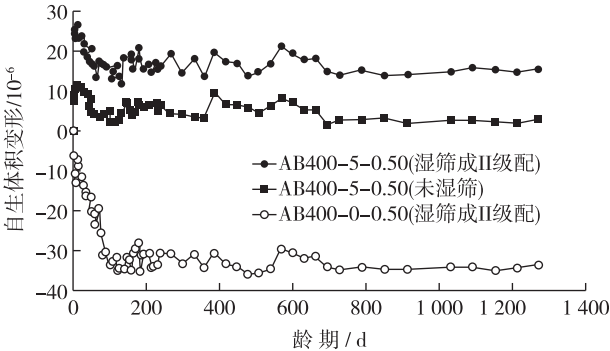


图 2 AB400 混凝土长龄期自生体积变形过程曲线
Fig. 2 Autogenic volume change curves of AB400 concrete through long age

表 4 AB400 混凝土典型龄期的自生体积变形测值

Tab. 4 Mearsured values of autogenic volume change of AB400 concrete at typical age						10 ⁻⁶
典型龄期 /d	28	60	90	180	270	360
AB400-0-0.50 的变形值(湿筛成Ⅱ级配)①	-13.54	-20.53	-30.32	-28.00	-30.53	-34.00
AB400-5-0.50 的变形值(未湿筛)②	9.58	5.02	4.86	5.85	4.56	3.18
AB400-5-0.50 变形值(湿筛成Ⅱ级配)③	21.6	16.36	16.11	20.44	19.55	13.60
湿筛后参与不掺 MgO 的变形差④(=③-①)	35.14	36.89	46.43	48.44	50.08	47.60
掺 5%MgO 后湿筛与未湿筛的变形差⑤(=③-②)	12.02	11.34	11.25	14.59	14.99	10.42
典型龄期 /d	540	720	900	1 080	1 260	
AB400-0-0.50 的变形值(湿筛成Ⅱ级配)①	-34.43	-34.69	-34.46	-33.99	-33.38	
AB400-5-0.50 的变形值(未湿筛)②	6.02	2.69	2.01	2.74	2.99	
AB400-5-0.50 变形值(湿筛成Ⅱ级配)③	16.76	14.05	14.22	15.71	15.32	
湿筛后参与不掺 MgO 的变形差④(=③-①)	51.19	48.74	48.68	49.70	48.70	
掺 5%MgO 后湿筛与未湿筛的变形差⑤(=③-②)	10.74	11.36	12.21	12.97	12.33	

2.2 湿筛后标准与非标准尺寸混凝土试件掺 MgO 引起的自生体积变形

从表 3 和 4 可见,不管是标准试件,还是非标准试件,掺 MgO 混凝土试件的自生体积变形值减去对应的

未掺 MgO 混凝土试件的自生体积变形值的差值均为正值,该值体现了混凝土因掺入 MgO 而引起的自生体积膨胀量。图 3 绘制了湿筛后标准尺寸和非标准尺寸的 MgO 混凝土试件的自生体积膨胀变形过程线。

2.3 试验结果分析

2.3.1 掺与不掺 MgO 的混凝土自生体积变形情况

从图 1 的标准试件、图 2 的非标准试件所反映的结果看,不掺 MgO 的混凝土的自生体积变形均呈收缩状态,但图 1 后期的趋于稳定的收缩量比图 2 大。图 1、图 2 分别使用的是第 1 批、第 2 批 P.O 42.5 水泥,对

应的 MgO 含量的平均检测结果为 1.38% 和 2.47%。袁美栖等^[7-8]指出,水泥自身所含的、低于 1.8%~2.0% 的 MgO 固溶在熟料的矿物相中,不会使水泥硬化浆体产生膨胀,而当 MgO 含量较多时,就会形成水化缓慢的方镁石晶体,在水泥浆体硬化后生成 $Mg(OH)_2$,造成水泥硬化浆体的体积膨胀。所以,图 1 所用水泥的 MgO 含量比图 2 少,造成了图 1 的不掺 MgO 混凝土的自生体积收缩变形比图 2 多。也正是这样的原因,造成相同的 MgO 外掺量引起的混凝土膨胀量补偿收缩量后的宏观效果不同,即图 1 呈现收缩状态,图 2 呈现膨胀状态。并且,从图 3 看出,不管是标准试件,还是非标准试件,掺 MgO 与对应的不掺 MgO 混凝土试件的自生体积变形的差值为正增量,并随龄期的增长呈微膨胀状态。即虽然图 1、图 2 中掺 MgO 混凝土自生体积变形的宏观效果不同,但外掺 MgO 混凝土的微膨胀特性仍然客观存在,不会因试件尺寸的改变而改变。

从图 3 还看出,虽然都外掺 5% 的 MgO,但非标准试件因掺 MgO 引起的混凝土自生体积膨胀量比标准试件增大约 $8 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$ 。这主要由二者水灰比的差异造成。AB40 和 AB400 组试件的水灰比分别为 0.45 和 0.50。李维维等^[9]指出,掺 MgO 混凝土的自生体积膨胀量随水灰比的增大而增大。

另外,从图 1~3 中可见,外掺 MgO 混凝土的初期膨胀反应明显,与以往的延迟性微膨胀存在差异^[1,3,6]。这是由于早期恒温室的温控效果不理想所致。试件成型时正值暑期,气温高达 (28~34)℃ 左右,而当时扩建的、用于存放试件的恒温室的隔热性差,造成温控效果不理想。李红彦^[10]指出,MgO 混凝土的自生体积膨胀量随环境温度的增高而增大。后期将试件转到原温控效果好的恒温室后,自生体积变形的波幅明显变小。

2.3.2 湿筛与未湿筛的 MgO 混凝土自生体积变形比较 分析图 1 和表 3、图 2 和表 4 可知,无论是标准尺寸试件,还是非标准尺寸试件,在相同 MgO 掺量、相同水灰比情况下,使用湿筛方法成型的混凝土试件的长龄期自生体积变形,均大于未湿筛混凝土的长龄期自生体积变形,且湿筛和未湿筛的掺 MgO 混凝土的自生体积变形均大于未掺 MgO 的混凝土,这与是否湿筛对混凝土短龄期自生体积变形的影响结果一致^[11-12]。对于标准尺寸试件的混凝土自生体积变形,在 1 年龄期内和 1 年以上龄期,湿筛比未湿筛分别增大约 $11.2 \times 10^{-6} \sim 22.4 \times 10^{-6}$ (平均增加 15.27×10^{-6}) 和 $14.21 \times 10^{-6} \sim 17.49 \times 10^{-6}$ (平均增加 15.71×10^{-6});对于非标准尺寸试件的混凝土自生体积变形,在 1 年龄期内和 1 年以上龄期,湿筛比未湿筛分别增大约 $10.42 \times 10^{-6} \sim 14.99 \times 10^{-6}$ (平均增加 12.44×10^{-6}) 和 $10.74 \times 10^{-6} \sim 12.97 \times 10^{-6}$ (平均增加 11.92×10^{-6})。总体而言,在相同 MgO 掺量下,不管是在 1 年龄期内,还是 1 年以上龄期,湿筛后非标准尺寸混凝土试件的自生体积变形增量小于标准尺寸试件;不管是标准尺寸还是非标准尺寸试件,湿筛与未湿筛混凝土试件的自生体积变形差值相对稳定,随龄期的波动不大,尤其是 3 年以上龄期的波动更小。

若忽略混凝土试件成型时湿筛筛除的粒径大于 40 mm 骨料所黏附灰浆量的影响,则标准尺寸的 AB40 原状三级配混凝土和湿筛后混凝土的胶骨质量比(胶凝材料/骨料)分别为 0.15 和 0.18,非标准尺寸的 AB400 原状三级配混凝土和湿筛后混凝土的胶骨质量比分别为 0.13 和 0.16,即湿筛后标准尺寸和非标准尺寸混凝土试件的胶骨质量比分别增大 20% 和 23%。而外掺 MgO 混凝土中 MgO 的外掺量是按胶凝材料总量的百分比计算,外掺 MgO 混凝土的自生体积变形随 MgO 含量的增大而增大^[3,10,13],所以使用湿筛方法成

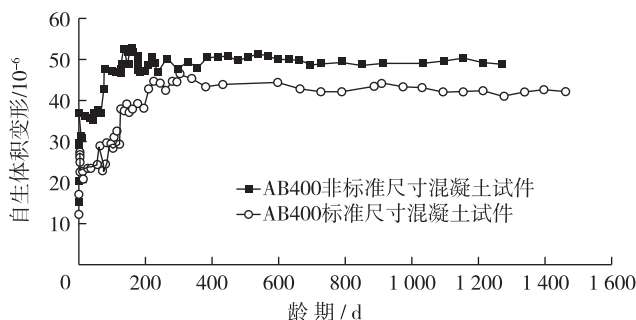


图 3 掺 MgO 引起的混凝土自生体积膨胀量随龄期的变化

Fig. 3 Curves of concrete's autogenic volume expansion with age after admixing MgO

型的 MgO 混凝土自生体积变形试件,其自生体积变形测值被人为地增大了。

3 结 语

按照现行《水工混凝土试验规程》,使用湿筛方法筛除混凝土拌和物中粒径大于 40 mm 骨料后的混凝土成型自生体积变形试件,基于本试验的试件尺寸和 1 400 d 左右的观测龄期,在相同 MgO 掺量下,无论龄期长短,也不管试件尺寸标准与否,其混凝土自生体积变形的微膨胀特性没有改变,但测值均比未湿筛的混凝土(即原级配混凝土)增大(标准尺寸试件增大 15×10^{-6} 左右,非标准尺寸试件增大 12×10^{-6} 左右),且增量随龄期的波动不大(尤其是 3 年以上龄期的波动更小)。对于采用外掺 MgO 混凝土筑坝技术的大型工程和重要工程,建议增加使用原级配混凝土制作尺寸为 $\Phi 250 \times 500$ mm 的非标准试件的自生体积变形试验,以深入了解掺 MgO 混凝土的自生体积变形,使坝体温控设计更有效、更经济。

参 考 文 献:

- [1] 李承木. 外掺氧化镁混凝土快速筑坝技术综述[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(5): 82-88. (LI Cheng-mu. Review of quick damming technology of MgO concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 82-88. (in Chinese))
- [2] 徐琼. 外掺氧化镁混凝土筑坝技术探讨[J]. 人民长江, 2008, 39(8): 52-53. (XU Qiong. Discussion on damming technology of MgO concrete[J]. Yangtze River, 2008, 39(8): 52-53. (in Chinese))
- [3] 陈昌礼, 唐成书. 氧化镁混凝土在东风拱坝基础中的应用及长期观测成果分析[J]. 水力发电学报, 2006, 25(4): 102-107. (CHEN Chang-li, TANG Cheng-shu. The application of MgO concrete in Dongfeng arch dam foundation and the analysis of long-term prototype observation results[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(4): 102-107. (in Chinese))
- [4] SL 352—2006 水工混凝土试验规程[S]. (SL 352—2006 Test code for hydraulic concrete[S]. (in Chinese))
- [5] DL/T 5150—2001 水工混凝土试验规程[S]. (DL/T 5150—2001 Test code for hydraulic concrete[S]. (in Chinese))
- [6] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术[J]. 水力发电学报, 2000(3): 1-13. (ZHU Bo-fang. On construction of dams by concrete with gentle volume expansion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000(3): 1-13. (in Chinese))
- [7] 袁美栖, 唐明述. 吉林白山大坝混凝土自生体积膨胀机理的研究[J]. 南京化工学院学报, 1984(2): 38-45. (YUAN Mei-qi, TANG Ming-shu. Research on Jilin Baishan dam concrete's autogenous volume expansion mechanism[J]. Journal of Nanjing University of Chemical Technology, 1984(2): 38-45. (in Chinese))
- [8] 陈胡星, 马先伟. 粉煤灰对氧化镁微膨胀水泥膨胀性能的影响及其机制[J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(2): 181-185. (CHEN Hu-xing, MA Xian-wei. Effects of fly ash on expansion of MgO expansive cement and its mechanism[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2010, 28(2): 181-185. (in Chinese))
- [9] 李维维, 陈昌礼, 方坤河, 等. 水灰比对外掺氧化镁混凝土自生体积变形的影响[J]. 水电能源科学, 2011, 29(10): 57-59. (LI Wei-wei, CHEN Chang-li, FANG Kun-he, et al. Influence of water cement ratio on autogenous volume deformation of concrete mixed with magnesium oxide[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(10): 57-59. (in Chinese))
- [10] 李红彦. 外掺 MgO 混凝土自生体积变形试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(9): 123-127. (LI Hong-yan. Experimental research on autogenous deformation of concrete mixed with MgO[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(9): 123-127. (in Chinese))
- [11] 方坤河, 刘小莹, 陈昌礼, 等. 骨料级配对外掺氧化镁混凝土膨胀变形性能的影响[J]. 混凝土, 2012(10): 92-93, 127. (FANG Kun-he, LIU Xiao-ying, CHEN Chang-li, et al. Influence of aggregate grading on expansibility of concrete mixed with light-burned magnesium oxide[J]. Concrete, 2012(10): 92-93, 127. (in Chinese))
- [12] 陈昌礼, 方坤河, 李维维, 等. 配合比的主要参数对外掺 MgO 混凝土自生体积变形的影响[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 252-256. (CHEN Chang-li, FANG Kun-he, LI Wei-wei, et al. Influence of mix factor on autogenic volume deformation of concrete mixed with magnesium oxide[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 252-256. (in Chinese))
- [13] 陈霞, 杨华全, 李家正. 外掺氧化镁混凝土的变形特性研究[J]. 人民长江, 2011, 42(4): 88-90, 94. (CHEN Xia, YANG Hua-quan, LI Jia-zheng. Study on deformation characteristics of concrete mixed with MgO[J]. Yangtze River, 2011, 42(4): 88-90, 94. (in Chinese))

Analysis of autogenic volume deformation of MgO concrete at long age

CHEN Chang-li¹, ZHAO Zhen-hua¹, LI Wei-wei¹, LI Liang-chuan²

(1. *School of Materials and Architecture Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China;*

2. *School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

Abstract: In order to improve studies and application of concrete with light-burned magnesium oxide (MgO concrete), the effect of aggregates with particle size larger than 40 mm on the autogenic volume deformation of both standard and non-standard size specimen of MgO concrete of the age as long as 1 400 days is analysed in this paper. The analysis results show that the autogenic volume deformation of the concrete specimen which has been wet-screened is larger than the specimen without wet-screening no matter how long the age is, and the increment of the autogenic volume deformation of the wet-screened non-standard specimen is smaller than that of the standard specimen (the increment of the standard specimen is about 15×10^{-6} while that of the non-standard specimen is about 12×10^{-6}); and the differences of the autogenic volume deformation of the specimen whether wet-screened or not are relatively stable and the fluctuating value with age is small, and is especially tiny when the age is beyond 3 years no matter the specimen's size is of the standard or not.

Key words: concrete with light-burned magnesium oxide (MgO concrete); autogenic volume deformation of concrete; concrete specimen size; wet screening; long age