

MgO 混凝土自生体积变形影响因素分析

陈霞^{1,2}, 杨华全^{1,2}, 张建峰^{1,2}, 严建军^{1,2}

(1. 长江水利委员会 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 自生体积变形是 MgO 混凝土在工程应用中最重要的性能之一。系统研究了 MgO 膨胀剂品种和掺量、水泥品种、骨料种类、粉煤灰掺量等原材料以及水胶比对龄期长达 1 400 d 的 MgO 混凝土自生体积变形性能的影响。结果表明: 掺入 4% ~ 6%、活性反应时间为 50 ~ 200 s 的 MgO 膨胀剂后, 混凝土的自生体积变形经过 2 a 左右逐渐趋于稳定, 无倒缩或不收敛现象; 水泥中 MgO 含量并不能真实反映产生有效膨胀的方镁石含量; 骨料长期吸水率与 MgO 混凝土的自生体积变形存在着良好的对应关系, 骨料吸水率越高, 其 MgO 混凝土自生体积膨胀变形越小。

关键词: MgO 膨胀剂; 混凝土; 原材料; 自生体积变形

中图法分类号: TV431 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.17.018

MgO 混凝土筑坝技术是由我国工程科研人员首创的新型技术。1982 年建成的吉林白山大坝首先采用了高含量 MgO(4.28% ~ 4.38%) 水泥混凝土^[1], 混凝土在温降阶段产生了自生体积膨胀, 抵消了大坝的温度收缩, 从而抑制了大坝裂缝形成。经过 30 多年的试验研究和工程应用, 学者们在 MgO 膨胀剂的制备、水化作用机理、砂浆与混凝土性能、工程应用、长龄期观测等方面取得了丰硕的成果^[2-6], MgO 混凝土也已经在多个水电工程中得到成功应用(见表 1)。显而易见, 使用 MgO 混凝土的工程多为中、小型工程, 且应用范围主要集中在贵州和广东等气候温和地区, 而目前我国水电开发建设重心已经转移至西南的江河源头地区, 其水文、气候、地质等环境条件与上述工程所在地区相差较大, 更为重要的是, 受技术、经济条件制约, 这些区域的工程原材料品质波动较大, 这些都会显著影响 MgO 混凝土的性能与应用效果。

笔者基于 MgO 混凝土技术的国家“十二五”科技支撑计划项目研究成果, 总结了龄期长达 1 400 d 的 MgO 混凝土自生体积变形观测结果, 并分析了其影响因素, 主要包括 MgO 膨胀剂自身的品种和掺量、水泥

类型、骨料品种、粉煤灰掺量、水胶比等, 以期 MgO 混凝土筑坝技术更大范围的推广应用提供技术支持。

表 1 应用 MgO 混凝土技术的典型水电工程

地区	工程名称	坝高/m	MgO 掺量/%	说明
贵州	三江拱坝	71.5	5.0	取消温控措施
贵州	沙老河拱坝	62.4	4.5 ~ 5.5	取消设置横缝
贵州	鱼箭河拱坝	81.0	5.0 ~ 5.5	设置 4 条诱导缝
贵州	马漕河拱坝	81.0	6.0	设置 4 条诱导缝
贵州	索风营重力坝	115.8	5.0	坝基约束区
广东	青溪重力坝	52.0	5.0	第一座采用 MgO 混凝土的重力坝
广东	长潭拱坝	53.5	5.5 ~ 5.75	炎热夏季不间断连续施工

1 原材料与试验配合比

1.1 原材料

(1) 胶凝材料。选用华新昭通中热硅酸盐水泥(华新中热)、永保中热硅酸盐水泥(永保中热)、永保普通硅酸盐水泥(永保普通)与嘉华低热硅酸盐水泥(嘉华低热)一共 4 种 MgO 含量不同的水泥进行水泥品种影响的性能试验, 其他试验均采用华新中热水泥。水泥的化学成分见表 2, 其他各项检测指标均满足相应技术规范要求。粉煤灰由宣威电厂生产, 其品质指

标满足 DL/T 5055 - 2007《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》中 F 类 I 级灰的相关技术要求。MgO 膨胀剂由江苏博特新材料有限公司生产,活性反应时间分别为 50,100,200 s。

表 2 水泥的化学成分									%
水泥名称	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	f · CaO	R ₂ O	SO ₃	loss
华新中热	21.7	5.0	4.1	62.1	4.8	-	0.4	0.8	0.2
永保中热	20.3	5.2	5.9	62.5	1.4	0.5	0.5	-	0.4
嘉华低热	-	-	-	-	1.2	-	0.5	2.8	0.9
永保普通	20.1	4.5	5.8	58.1	3.5	-	0.6	1.9	4.3

注:R₂O 为当量碱含量,R₂O = Na₂O + 0.658K₂O

(2) 骨料。细骨料为溪洛渡玄武岩人工砂,各项指标均满足 DL/T 5144 - 2001《水工混凝土施工规范》技术要求。为了研究不同骨料对 MgO 混凝土性能的影响,同时选取人工闪长岩、灰岩以及天然花岗岩进行试验,还开展了粗骨料长龄期饱和面干吸水率试验,试验结果见表 3。从试验结果可知,天然花岗岩骨料的吸水率最高(0.94%),其次为玄武岩(0.51%)和闪长岩(0.47%),灰岩粗骨料的吸水率最小(0.28%)。随着龄期增长,粗骨料饱和面干吸水率的增长幅度从大至小依次为:天然花岗岩,玄武岩,闪长岩,灰岩。从骨料的长期吸水率增长趋势看,1 ~ 28 d 之间吸水率增长显著,之后仅呈小幅增加趋势,建议把 28 d 作为骨料的饱和面干吸水率试验龄期,以更真实反映骨料的吸水特性,有助于准确分析长龄期混凝土的变形规律。

表 3 粗骨料长龄期饱和面干吸水率					%
骨料种类	1d	28d	90d	180d	
玄武岩	0.29	0.44	0.48	0.51	
闪长岩	0.31	0.42	0.44	0.47	
灰岩	0.22	0.24	0.26	0.28	
天然花岗岩	0.60	0.88	0.93	0.94	

1.2 试验配合比

混凝土的配合比及拌和物性能见表 4,控制混凝土拌和物坍落度在 30 ~ 50 mm 之间、含气量为 3.0% ~ 5.0%,掺入 MgO 膨胀剂后,可通过增加减水剂掺量来保持混凝土坍落度在控制范围内。

2 试验结果与讨论

2.1 MgO 膨胀剂品种与掺量影响

掺入不同掺量、不同活性反应时间的 MgO 膨胀剂后,混凝土的自生体积变形试验结果见图 1。显而易见,掺入 MgO 后,混凝土自生体积变形从收缩转为微膨胀,且 MgO 掺量越高,混凝土自生体积膨胀变形越大;从膨胀趋势看,掺 MgO 膨胀剂混凝土的自生体积变形经过 2 a 龄期发展,均趋于稳定,未出现倒缩或不

收敛情况。这一试验结果与在白山大坝观测到的 80% 膨胀量发生在 20 ~ 1 000 d 龄期之内结果一致^[1],即早期膨胀较小,后期膨胀趋于稳定。

表 4 混凝土配合比和拌和物性能

编号	MgO/ %	水胶 比	粉煤灰 掺量/%	混凝土材料用量/(kg · m ⁻³)						ZB-1A/GYQ/ 含气量/ 坍落度/			
				水	水泥	粉煤灰	MgO	砂	石	%	%	%	mm
1	0	0.41	35	124	197	106	/	694	1427	2.12	0.02	4.1	30
2	4	0.41	35	124	189	106	7.9	695	1427	2.12	0.03	3.0	30
3	5	0.41	35	124	187	106	9.8	695	1427	2.12	0.03	4.3	30
4	6	0.41	35	124	185	106	11.8	695	1427	2.12	0.03	4.0	32
5	4	0.41	35	124	189	106	7.86	736	1384	2.12	0.03	3.0	27
6	4	0.45	35	123	171	96	7.11	727	1427	1.91	0.03	4.0	45
7	4	0.49	35	122	155	87	6.47	736	1445	1.74	0.03	3.3	35
8	4	0.53	35	120	141	79	5.89	723	1487	1.58	0.03	3.5	40
9	4	0.41	0	130	304	0	12.7	738	1387	2.22	0.03	4.7	35
10	4	0.41	20	128	240	62.4	9.99	734	1380	2.19	0.03	4.4	43
11	4	0.41	35	124	189	106	7.86	736	1384	2.12	0.03	3.0	30

选择活性反应时间为 100 s 的 MgO,MgO 掺量从 4% 增加至 6% 时,1 135 d 龄期时混凝土的自生体积膨胀从 23.8×10^{-6} 增加至 76.5×10^{-6} ,与基准混凝土相比,分别增加了 74×10^{-6} 和 127×10^{-6} 。MgO 活性反应时间越长,混凝土的后期膨胀率增长幅度越大、最终膨胀率越高。掺量为 6% 时,掺入反应时间为 50 s 和 100 s 的 MgO,在 1 000 d 龄期时,混凝土的自生体积膨胀变形分别为 18.4×10^{-6} 和 76.5×10^{-6} 。

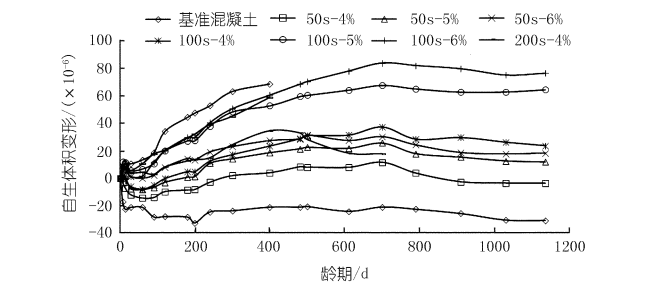


图 1 MgO 品种与掺量对 MgO 混凝土自生体积变形的影响

2.2 水泥品种影响

采用 4 种 MgO 含量不同的水泥拌制的混凝土进行试验,自生体积变形试验结果见图 2。可以看出,不同品种水泥制备的 MgO 混凝土的自生体积变形均呈先缩后胀趋势,经过 2 a 左右水化龄期,混凝土自生体积膨胀变形也趋于稳定。1 000 d 水化龄期时混凝土的自生体积膨胀变形介于 8×10^{-6} ~ 33×10^{-6} 之间。

从 1 400 d 观测龄期试验结果看,不同品种水泥拌制的混凝土的自生体积变形从高到低依次为:普通水泥,中热水泥,低热水泥(20℃);对比表 2 中各水泥的 MgO 含量可知,水泥中 MgO 含量与混凝土自生体积膨胀变形之间并不呈正比,即根据化学法检测出来的水

泥熟料中 MgO 含量并不是产生有效膨胀方镁石含量的真实体现,应该寻求其他能准确表征水泥熟料中方镁石含量的方法。

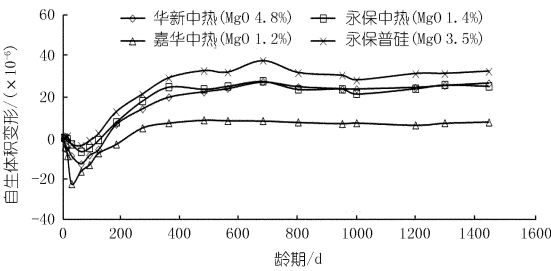


图2 水泥品种与 MgO 混凝土自生体积变形之间的关系

2.3 骨料品种影响

选用活性反应时间为 100 s 的 MgO 膨胀剂,成型二级配混凝土,在混凝土配合比设计中分别选用玄武岩人工骨料、闪长岩人工骨料、灰岩人工骨料与天然花岗岩骨料 4 种粗骨料,细骨料均采用玄武岩人工砂,然后进行混凝土自生体积变形测定试验,试验结果见图 3。

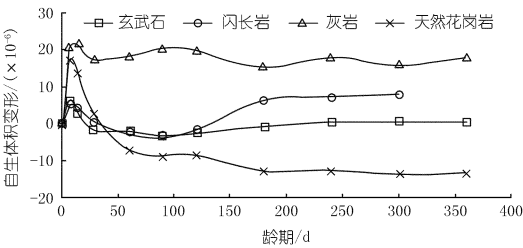


图3 骨料品种对 MgO 混凝土自生体积变形性能的影响

由图 3 可知,在观测龄期内各混凝土的自生体积变形从高到低依次为:灰岩混凝土,闪长岩混凝土,玄武岩混凝土,天然花岗岩混凝土。比较图 3 和表 3 粗骨料长期吸水特性规律可知,不同骨料制备的混凝土其自生体积变形发展趋势与粗骨料长期吸水特性存在较好的对应关系,即长期吸水率越低的骨料制备的混凝土的自生体积膨胀越大。

2.4 水胶比与粉煤灰掺量影响

不同水胶比和粉煤灰掺量的 MgO 混凝土自生体积变形试验结果见图 4 和图 5。

从试验结果可以看出,随着龄期增长,不同水胶比 MgO 混凝土之间的自生体积变形差值缩小;经过 2 a 龄期发展,混凝土的自生体积变形膨胀趋于稳定。水胶比从 0.41 增加至 0.53 时,1 000 d 龄期时掺 4% MgO 的混凝土自生体积膨胀变形差值仅为 9×10^{-6} 。

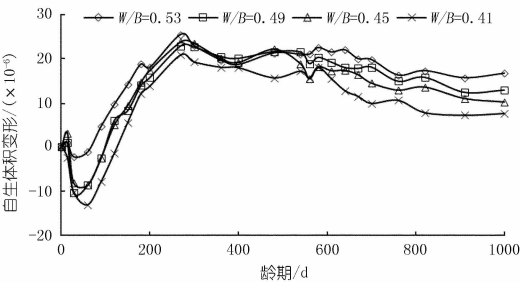


图4 不同水胶比 MgO 混凝土的自生体积变形

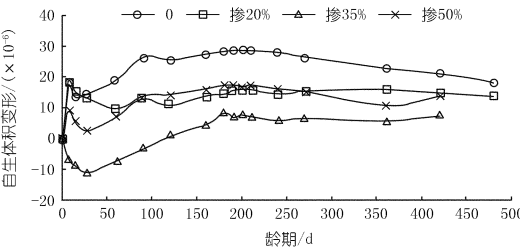


图5 不同粉煤灰掺量 MgO 混凝土的自生体积变形
相同水胶比时,随着粉煤灰掺量增加,MgO 混凝土自生体积膨胀变形减小;随着龄期增长,不同粉煤灰掺量的 MgO 混凝土之间的自生体积膨胀变形差值亦减小。

3 结 论

通过开展 MgO 膨胀剂品种和掺量、水泥、骨料品种、粉煤灰掺量等原材料及水胶比对混凝土自生体积变形性能的影响试验研究,得到以下几方面结论:掺入 4% ~ 6%、活性反应时间为 50 ~ 200 s 的 MgO 膨胀剂,混凝土的自生体积膨胀变形经过 2 a 左右趋于稳定,无倒缩或不收敛现象;根据化学滴定法检测得到的水泥中 MgO 含量并不是能产生有效膨胀的方镁石含量的真实体现,应该寻求其他有效方法来确定水泥熟料中方镁石含量;骨料的长期吸水特性与其配置的混凝土自生体积变形之间呈现良好的对应关系,即长期饱和面干吸水率越高,混凝土的自生体积膨胀变形越小,并建议以 28d 龄期作为骨料吸水特性的试验龄期。

参考文献:

[1] 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):12-15.
[2] 李承木,袁明道.MgO 微膨胀混凝土筑坝技术应用综述[J].水利水电科技进展,2003,(6):1-13.
[3] Chen Xia,Yang Huaquan,Zhou Shihua,et al. Sensitive evaluation on early cracking tendency of concrete with inclusion of light-burnt MgO[J].Wuhan University of Technology - Mater. Sci. Ed.,2011,26(5):1018-1022.
[4] 陈昌礼,李承木.氧化镁混凝土的研究与应用[J].混凝土,2006,(5):45-47.

[5] 崔鑫,邓敏. 氧化镁制备方法、活性与水化测定方法综述[J]. 硅酸盐通报,2008,27(1):136-141.
人民长江,2011,42(4):88-91.
(编辑:胡旭东)

[6] 陈霞,杨华全,李家正. 外掺氧化镁混凝土的变形特性研究[J].

Analysis of influential factors on autogenous volume deformation of MgO concrete

CHEN Xia^{1,2}, YANG Huaquan^{1,2}, ZHANG Jianfeng^{1,2}, YAN Jianjun^{1,2}

(1. 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)

Abstract: The autogenous volume deformation is one of the most important performances of MgO concrete. The influences of MgO expansion agent types and amount, cement types, aggregates types as well as the fly ash amount on autogenous volume deformation of MgO concrete with 1400d curing age were systematically investigated. The research results indicated that the autogenous volume deformation tended to stable in approximately 2 years without retraction when 4% to 6% of MgO with reactivity time ranging from 50s to 200s was doped. The MgO content in cement concrete cannot accurately reflect the periclase content that generates effective expansion. The autogenous volume deformation and long-term water absorption of aggregates are correlated well, namely the autogenous volume decreased with the increase of water absorption of aggregates.

Key words: MgO expansion agent; concrete; raw materials; autogenous volume deformation

(上接第 66 页)

Analysis of tunnel excavation stability based on complex random fracture network model

YAO Chi¹, NIU Jiangrui¹, ZHANG Qian², YANG Zhigang¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Construction and Design Department, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, Wuhan 430010, China)

Abstract: For studying the adaptability of improved Rigid Block Spring Method in stability analysis of complex fracture rock, we conduct sample verification for a tunnel project. Firstly based on the geologic data of the fracture rock mass, the Monte-Carlo method is employed to generate random discrete fracture network and the block search method is adopted to obtain the block information. The improved Rigid Block Spring Method is used to analyze displacements and failure modes of surrounding rocks under excavation unloading, and to assess the effects of the supporting plan. The results indicate that the improved Rigid Block Spring Method could simulate the slipping failure caused by unfavorable fracture combination and accurately capture the progressive failure process of the side wall, which are in accordance with engineering practices.

Key words: fracture network; excavation; stability of surrounding rock; Rigid Block Spring Method

· 简 讯 ·

敬告广大读作者谨防诈骗

各位读作者：
编辑部通过作者反馈获悉，近期有不法分子打着快速发表论文的幌子，利用假邮箱、假网站对投稿作者进行诈骗，收取所谓发表费。本刊编辑部特此声明，本刊唯一投稿渠道为官方网站 www.rmcjzz.com，再未授权其他任何形式的投稿渠道，请广大投稿作者注意，谨防诈骗！

《人民长江》编辑部