

超限游离氧化钙混凝土的体积安定性试验

曾家民¹, 曾琦芳², 林煌斌^{3,4}

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021;

3. 同济大学 应用力学研究所, 上海 200092;

4. 集美大学 工程技术学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 通过试验条件诱发游离氧化钙(f-CaO)发生反应,以检验混凝土的体积安定.试验结果表明:f-CaO 超限是可能引起混凝土体积安定性的影响因素;对芯样进行严格的湿热工艺处理后,芯样线变化率和抗压强度均在允许的范围内,该工程项目不用拆除可继续施工;经过持续 13 a 的观测,未发现由于 f-CaO 安定性引起的工程质量异常.

关键词: 游离氧化钙;混凝土;体积安定性;结构损伤;材料试验;膨胀应力

中图分类号: TU 984.14

文献标志码: A

水泥体积安定性是指水泥在凝结硬化过程中体积变化的均匀性,即水泥硬化后内部不再产生大的体积变化^[1].安定性不良会使混凝土结构产生膨胀性裂缝,引起结构损伤,而损伤持续累积会影响到结构整体安全^[2-3].水泥体积安定性是水泥最主要的技术指标.造成水泥体积安定性不合格,主要有以下 3 点原因:水泥中游离 f-CaO 过多、游离 f-MgO 过多,以及 SO₃ 过多.在水泥标准中,f-MgO 和 SO₃ 的质量分数不超过 5%和 3.5%,因此,对出厂水泥的安定性检验主要针对 f-CaO.混凝土体积安定性不合格的破坏性可在混凝土浇筑后 1~3 d 表现,也可在 28 d 强度检验中发现异常,最危险的情况是在正常使用条件下,隐藏多年待反应条件适合才爆发,按常规方法检验混凝土强度,较难发现问题.混凝土体积安定性检测一般采用以下 3 种方法:1) 膨胀应力法^[4-6];2) 定量分析法;3) 沸煮法.沸煮法的检测结果比较直观、可靠^[7-8].本文结合某工业厂房鉴定项目,分析超限 f-CaO 水泥体积安定性的试验方法.

1 结构安定性试验方案

1.1 工程概况

以福建泉州某现浇混凝土框架结构的六层厂房和七层宿舍楼为工程案例.当时因赶工程进度,在进场水泥复检结果未明确前,将水泥用于厂房第五层梁板和五层柱,以及宿舍楼第六层柱和七层梁板.工程所用原材料为 P.O 42.5R 水泥、河砂(细度模数 2.6,泥质量分数为 3.2%)、碎石(花岗岩,粒径 20~40 mm).混凝土强度等级为 C20,水泥、河砂、碎石、水的体积质量比分别为 318,668,1 230,185 kg·m⁻³,水灰比(W/C)为 0.58,坍落度为 60 mm.

施工后发现使用的水泥安定性不合格,因此采用沸煮法进行混凝土安定性检验.但对其膨胀性能,特别是对混凝土的破坏能力未能充分反应,需要结合强度检测等其他方法对比.

1.2 混凝土体积安定性试验取样

对使用水泥体积安定性有问题的混凝土结构随机取芯制样.为减小对混凝土结构损伤,芯块直径

收稿日期: 2013-10-22

通信作者: 曾家民(1948-),男,教授,主要从事工程材料与质量鉴定的研究. E-mail:zjmin@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2011J01320);中央高校基本科研业务费专项资金,国务院侨办科研基金资助项目(11QZR15);国家公益性行业科研专项(201111020-2)

取 75 mm,每区钻取 2 组,芯块两端面锯平粗磨后分别作常态检验和沸煮非常态检验,分别进行体积变化对比和强度对比. 取样部位和所在轴线,如表 1 所示.

表 1 取样部位和所在轴线
Tab. 1 Sampling location and axis

试块部位	混凝土设计强度	取样日期	试块编号及轴线位置					
			CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6
厂房的 五层梁板	C20	2000. 03. 15	A-B	B-C	A-B	B-C	A-B	B-C
			2-3	2-3	5-6	5-6	9-10	9-10
厂房的 五层柱	C20	2000. 03. 21	B-1	B-3	B-5	B-7	B-9	B-11
			CZ1	CZ2	CZ3	CZ4	CZ5	CZ6
宿舍楼的 六层柱	C20	2000. 03. 16	SZ1	SZ2	SZ3	SZ4	SZ5	SZ6
			B-2	B-3	B-5	B-6	B-8	B-9
宿舍楼的 七层梁板	C20	2000. 03. 20	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6
			A-B	A-C	A-B	B-C	A-B	B-C
围墙地梁	C20	2000. 03. 17	DL1	DL2	DL3	DL4	—	—
			N-1	N-2	N-3	N-4	—	—

1.3 混凝土体积安定性试验

1) 取各区钻取的一组试块,在其端面画出十字中心线后用千分表测其长度 L_0 ,再进行蒸煮. 2) 试块置于大锅,浸水淹没超 50 mm,加温速度小于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,待水煮沸后持续 3 h;之后让其降温,降温速度应小于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,以免降温速度过快导致混凝土试块产生内应力;试块温度降到室温后擦干,用千分表测其长度 L_1 ,并计算 ΔL . 3) 测定同区经热处理和未经热处理的混凝土试块强度,比较其差异. 4) 对安定性超标,批号为 052 的存量水泥抽样,检测 SO_3 和 MgO 的质量分数,并复检该水泥的物理力学性能. 5) 采用其他合格水泥制成 $40\text{ mm}\times40\text{ mm}\times160\text{ mm}$ 的胶砂试块,进行同条件试验以作比较.

1.4 混凝土结构取芯后修复法

混凝土结构经取芯后的孔洞必须认真修复,芯孔清理干净后,用膨胀混凝土填塞,打击成型,养护龄期不少于 14 d. 膨胀混凝土中 P. O 42. 5R 普通硅酸盐水泥、水泥膨胀剂 UEA、中砂、碎石(粒径 5~10 mm)的体积质量比分别为 1. 00,0. 12,1. 50,2. 00 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 加水量以手捏成团,无明显水滴为宜.

2 试验结果与分析

对安定性超标的水泥抽样,测定其主要化学成分 MgO 和 SO_3 的质量分数,如表 2 所示. 表 2 中: η_0 为标准值; η_1 为水泥厂的检验结果; η_2 为华侨大学化工学院的试验结果. 水泥物理力学性能复检结果,如表 3 所示.

表 2 MgO 和 SO_3 的质量分数

Tab. 2 Mass fraction of MgO and SO_3

化学成分	$\eta_0/\%$	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
MgO	≤ 5	2. 96	2. 13
SO_3	$\leq 3. 5$	1. 63	1. 71

表 3 中: f_r 为抗折强度; f_c 为抗压强度; t_0 , t_e 分别为初凝、终凝时间;细度 F 为水泥试样筛余百分数,采用负压筛法测定; ΔL 为线变化(雷氏膨胀值),用于表征水泥安定性,

采用雷氏法测定. 从表 2,3 可知:复检结果与水泥生产厂检验结果无大差异, MgO 和 SO_3 的质量分数均符合标准要求,可以排除 MgO 和 SO_3 的影响.

表 3 水泥物理力学性能复检试验

Tab. 3 Inspection test of cement physical and mechanical properties

参数	$F/\%$	t_0/min	t_e/min	$\Delta L/\text{mm}$	$f_{r,3\text{ d}}/\text{MPa}$	$f_{c,3\text{ d}}/\text{MPa}$	$f_{r,28\text{ d}}/\text{MPa}$	$f_{c,28\text{ d}}/\text{MPa}$
标准要求	$<10. 0$	≥ 45	≤ 600	≤ 5	4. 0	21. 0	6. 5	42. 5
试验结果	4. 8	130	230	3	5. 8	28. 4	7. 3	44. 9

混凝土芯样和 P. O 42. 5R 水泥制成的胶砂试块经同等条件湿热处理后,其线变化、线变化率和抗压强度分别如表 4,5 所示. 表 4,5 中: L_0 为初始长度; L_1 为湿热处理后长度; ΔL 为线变化; η 为线变化率; d 为混凝土芯样直径; F 为破坏荷载; f_r 为抗折强度; f_c 为抗压强度;水泥试块的尺寸(长 \times 宽 \times 高)

为 160 mm×40 mm×40 mm,测线变化时需标养 3 d.

表 4 芯样湿热处理后的测试结果比较

Tab.4 Test results of core sample after heat-moisture treatment

试块部位	编号	L_0 /mm	L_1 /mm	ΔL /mm	η /%	d /mm	F /kN	p_c /MPa
厂房 五层梁板	CB1	74.18	74.18	+0.00	0	74	82	19.07
	CB2 Δ	—	—	—	—	75	130	29.44
	CB3	74.65	74.66	+0.01	+0.013	72	94	23.10
	CB4	74.42	74.42	+0.00	0	73	118	28.21
	CB5	74.17	74.17	+0.00	0	73	90	21.52
	CB6	74.84	74.85	+0.01	+0.013	74	92	21.99
厂房 五层柱	CZ1	74.81	74.82	+0.01	+0.013	73	88	21.04
	CZ2	76.40	76.39	−0.01	−0.013	73	95	22.71
	CZ3	74.26	74.27	+0.01	+0.013	74	98	22.80
	CZ4	73.98	73.97	−0.01	−0.013	73	92	21.40
	CZ5	74.27	74.27	+0.00	0	73	90	21.52
	CZ6	75.51	75.52	+0.01	+0.013	74	130	30.24
宿舍楼 六层柱	SZ1	76.29	76.30	+0.01	+0.013	73	83	19.84
	SZ2	75.80	75.80	+0.00	0	72	84	20.64
	SZ3	76.08	76.09	+0.01	+0.013	74	96	22.33
	SZ4	74.94	74.93	−0.01	−0.013	74	92	21.40
	SZ5	76.85	76.85	+0.00	0	74	94	21.87
	SZ6	75.42	75.42	+0.00	0	74	130	30.24
宿舍楼 七层梁板	SB1	76.86	76.85	−0.01	−0.013	73	80	19.13
	SB2	76.52	76.52	0.00	0	74	104	24.19
	SB3	76.98	76.98	0.00	0	74	84	19.54
	SB4	75.95	75.96	+0.01	+0.013	74	98	22.80
	SB5	75.81	75.82	+0.01	+0.013	73	86	20.56
	SB6	75.23	75.23	+0.00	0	74	101	23.49
围墙 地圈梁	DL1 Δ	—	—	—	—	72	88	21.63
	DL2	76.98	76.97	−0.00	0	72	98	23.42
	DL3 Δ	—	—	—	—	73	90	21.52
	DL4	77.05	77.06	+0.00	0	72	84	20.64

① 表中“ Δ ”表示该试件未经湿热处理

表 5 P. O 42.5R 水泥试块湿热处理后的测试结果比较

Tab.5 Test result of P. O 42.5R cement briquette after heat-moisture treatment

编号	L_0 /mm	L_1 /mm	ΔL /mm	η /%	f_r /MPa	f_c /MPa
X-1	160.88	164.57	+3.69	+2.294	0.55	12.0/11.2
X-2	160.87	164.56	+3.69	+2.294	0.60	11.6/12.0
X-3 Δ	—	—	—	—	6.00	32.0/32.8
X-4 Δ	—	—	—	—	5.80	33.6/32.0
X-5 Δ	—	—	—	—	5.60	32.0/34.4

① 表中“ Δ ”表示该试件未经湿热处理

2000 年 4 月 24 日,华侨大学土木工程检测中心水泥试验室再次复检,水泥安定性(雷氏法)为 3 mm,比 2000 年 3 月 26 日进场复检的 6 mm 小,因为 2000 年 2 月 24 日出厂后水泥已再储存 2 个月,水泥中 f-CaO 随时间趋于稳定,对水泥体积安定性的检验结果越有利.3 d 和 28 d 测得的水泥抗折强和抗压强度均符合标准.

从以上试验结果可得出:经一定的湿热工艺^[9-11]条件处理后,水泥中 f-CaO 及其他成分已充分反应.该工程芯样线变化率在±0.013%之内,小于允许变形范围,强度又未明显下降.而水泥成型养护龄期仅 3 d,经同条件湿热处理后,其线变化率明显增大,抗折和抗压强度显著降低.围墙地圈梁混凝土芯样的线变化率和抗压强度也没有发现异常,与主体结构芯样检测结果类似,由此可推断地圈梁混凝土和

检测主体的混凝土均未发现其所用的水泥体积安定性有不良行为. 虽然试验样本数有限, 未能按数理统计方法得出规律性定量结论, 但并不影响该试验结果的定性推断.

3 结论

- 1) 对所用水泥中 MgO 和 SO_3 的质量分数进行复检, 两者均符合规范要求, 排除 MgO 和 SO_3 过多对水泥体积安定性的影响, 确定 f-CaO 超限可能是引起体积安定性为主要因素. 对混凝土芯样经过严格的湿热工艺处理后, 芯样线变化率和抗压强度均在允许的范围内, 未发现混凝土质量异常. 经试验结果论证, 推定该工程不用拆除可继续施工的鉴定结论.
- 2) 该工程建成至今 13 a, 经持续观测, 未发现因水泥中 f-CaO 问题引起的工程质量异常.
- 3) 该工程案例表明: 水泥体积安定性超限的混凝土工程不一定都要拆除, 应根据其超限程度, 运用水泥混凝土材料理论, 对水泥和混凝土结构工程进行全面的检测论证.

参考文献:

[1] 侯新凯, 徐德龙, 薛博, 等. 钢渣引起水泥体积安定性问题的探讨[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(5): 588-595.

[2] 林煌斌, 王全凤. 描述结构动力卸载刚度的指标验证[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2011, 32(6): 676-679.

[3] 林煌斌, 王全凤. 高强混凝土柱变形-耗能损伤模型的参数确定[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2012, 15(5): 588-595.

[4] 张雄, 韩继红. 混凝土中 f-CaO 引起的体积安定性鉴定方法[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(3): 257-260.

[5] 张雄, 吴科如. 混凝土中游离氧化钙定量分析与膨胀应力估测[J]. 混凝土与水泥制品, 1995(3): 13-15.

[6] 牟善彬, 刘振亚, 黄小萍, 等. 高游离氧化钙水泥的显微结构与膨胀机理研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(11): 27-29.

[7] QIAN G R, SUN D D, TAY J H, et al. Hydrothermal reaction and autoclave stability of Mg bearing RO phase in steel slag[J]. British Ceramic Transactions, 2002, 101(4): 159-164.

[8] LUN Yun-xia, ZHOU Min-kai, CAI Xiao, et al. Methods for improving volume stability of steel slag as fine aggregate[J]. Journal of Wuhan University of Techonlogy: Materials Science, 2008, 23(5): 737-742.

[9] 袁润章. 胶凝材料学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006: 60-61.

[10] 唐明述. 水泥和混凝土化学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984: 21-22.

[11] 徐荣年, 徐欣磊. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 35-36.

Volume Stability Test of Over-Limit Free-CaO Concrete

ZENG Jia-min¹, ZENG Qi-fang², LIN Huang-bin^{3,4}

- (1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. College of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. Institute of Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;
4. College of Engineering and Technology, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Under the test conditions, free- CaO reaction was induced, the concrete volume stability was inspected. The experimental results show that over-limit free- CaO is the main factor causing the cement volume stability. After the strict heat-moisture treatment for core sample, both the line change rate and compressive strength were within the permitted range. Consequently, the engineering needs not to be demolished, the construction continued as usual, under observation lasting for 13 years, no abnormal structure damage due to f-CaO volume stability has been found.

Keywords: free- CaO ; concrete; volume stability; structure damage; material test; swelling stress