

文章编号:1671-8879(2020)02-0030-08

高原复杂气候环境对混凝土气孔结构与力学性能的影响

陈华鑫¹, 王 铜¹, 何 锐^{1,2}, ZHANG Jian-song², 房建宏³, 白永厚⁴

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 普渡大学 建筑工程管理技术学院, 印第安纳 西拉法叶 IN 47907; 3. 青海省交通科学研究院, 青海 西宁 810008; 4. 中交二公局第四工程有限公司, 河南 洛阳 471013)

摘 要:为探究高原复杂气候环境对混凝土气孔结构与力学性能的影响,分别以高原地区和平原地区成型养护的引气混凝土为研究对象,对混凝土试块进行切割以及表面处理,利用硬化混凝土气孔分析仪,对不同成型养护环境下混凝土的气孔特征参数进行分析,并对不同成型养护环境下混凝土的 28 d 抗压强度进行测试,研究不同环境对混凝土气孔结构以及 28 d 抗压强度的影响;通过对比分析得出高原地区低压、干燥、低温的气候环境下,混凝土含气量、气孔平均孔径、孔径分布、气孔间距系数以及 28 d 抗压强度的变化规律,建立混凝土内部气孔结构与混凝土抗压强度之间的关联,揭示高原复杂环境下混凝土气孔结构劣化以及力学性能下降的原因。研究结果表明:与常压标准养护的混凝土相比,低压标准养护的硬化混凝土含气量降低了 5%~22%,平均孔径减小了 2%~5%,气孔间距系数增加了 4%~11%,强度增加了 5%~10%;与低气压标准养护的混凝土相比,高原养护环境下硬化混凝土含气量增加了 20%~30%,平均孔径增大了 8%~12%,气孔间距系数降低了 15%~20%,强度下降了 15%~36%。高原地区干燥、低温环境会影响水泥水化反应,导致混凝土结构疏松,气孔结构劣化,同时低温环境下混凝土内部产生冻胀应力,对其结构造成破坏,并导致后期强度下降。掺入引气剂会使混凝土内气孔变多,混凝土强度降低,但高原环境下引入气泡可有效缓冲冻胀应力,减少混凝土内部结构的破坏以及强度的损失。

关键词:道路工程;混凝土;低气压;干燥;低温;气孔结构;抗压强度

中图分类号:U416.216 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.02.004

Effect of complex climatic environment on pore structure and mechanical properties of concrete

CHEN Hua-xin¹, WANG Tong¹, HE Rui^{1,2}, ZHANG Jian-song²,
FANG Jian-hong³, BAI Yong-hou⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;
2. School of Construction Management Technology, Purdue University, West Lafayette IN 47907, Indiana, USA;
3. Qinghai Academy of Transportation Sciences, Xining 810008, Qinghai, China; 4. CCCC-SHEC Fourth Highway Engineering CO., LTD., Luoyang 471013, Henan, China)

收稿日期:2019-10-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0309903);陕西省重点研发计划项目(2018SF-403,2018SF-380);

陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-559);青海省基础研究计划项目(2017-ZJ-715);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102318401,300102318402,300102218502)

作者简介:陈华鑫(1973-),男,安徽太湖人,教授,博士研究生导师,E-mail:hxchen@chd.edu.cn。

Abstract: In order to study the influence of the plateau environment on concrete pore structure and mechanical properties, the air-entrained concrete formed and cured in the plateau and plain regions was taken as the research object. Concrete formed and cured under different environments was used to analyze the porosity characteristic parameters of concrete, using a hardened concrete porosity analyzer after some cutting and surface treatments, and the 28 d compressive strength of concrete under different forming and curing environments was tested. The effects of different environments on concrete pore structure and mechanical properties were discussed. The influences of low-pressure, dry and low-temperature environment on air content, average pore size, pore size distribution, pore spacing factor and 28 d compressive strength were obtained through comparative analysis. The relationship between the concrete pore structure and the compressive strength was established, and the reason for the deterioration of concrete pore structure and mechanical properties under the plateau environment was revealed. The results show that compared with the concrete cured at normal pressure, the air content of the hardened concrete cured under low-pressure standard reduced by 5% to 22%, the average pore size reduced by 2% to 5%, the spacing factor increased by 4% to 11%, and the strength increased by 5% to 10%. Compared with concrete cured under low air pressure, the air content of hardened concrete cured under plateau environment increased by 20% to 30%, the average pore diameter increased by 8% to 12%, and the spacing factor decreased by 15 to 20%, and the strength reduced by up to 36%. The dry and low-temperature environment in the plateau area will affect the progress of the cement hydration reaction. The internal concrete structure will be loose and the porosity structure is deteriorated. At the same time, the frost heaving stress generated inside the concrete under low-temperature environment lead to the damage to its structure and the decline of strength in the later period. Adding air-entraining agent will increase the porosity in the concrete and reduce the strength, but the introduction of air bubbles in the plateau environment can effectively buffer the frost heave stress, and reduce the damage of the internal structure of the concrete and the loss of strength. 7 tabs, 6 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; concrete; low air pressure; dry; low temperature; pore structure; compressive strength

0 引言

随着“一带一路”倡议向亚欧大陆的逐步推进,复杂气候环境地区交通基础设施建设越来越引起人们的关注。中国青藏高原地区平均海拔在 4 000 m 以上,太阳辐射强烈、低温低压、低空气湿度是该地区典型的气候特征。根据中国气象局统计,冬季拉萨的最低平均气温只有 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温也只有不到 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$,几乎每天要经历正负温交替;拉萨年均气压在 65.25 kPa 以下,比平原地区低 30% 以上;冬天最低相对湿度不到 10%。混凝土的结构与性能除了与其原材料、配合比、施工工艺有关之外,成型及养护时所处的环境对其也有很大的影响^[1-2]。高原气候环境对混凝土施工及其服役性能的影响复杂,导致混凝土的劣化速度远高于内地^[3]。因此,研究高原复杂环境对混凝土

的影响具有重要的工程意义。

国内外学者开展了大量关于环境对混凝土影响的研究,Wang 等认为温度是影响混凝土强度发展的主导因素,早期处于低温环境下混凝土的结构与性能都会遭到损坏^[4-5]。胡玉兵等通过将负温养护与正常温度养护下的混凝土进行对比,揭示了负温环境对混凝土抗压强度、动弹性模量的影响,以及在负温环境下混凝土强度和渗透性能随着时间的增长规律^[6-7]。Nassif 等通过刚度损伤测试(SDT),研究了在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下养护混凝土的刚度损失以及裂纹扩展,发现低温状态会导致混凝土刚度减少约 20%,且结构中出现微裂纹^[8]。舒志坚等研究了早期不同温度环境下混凝土各项性能变化规律,结果表明,早期混凝土处于低温环境下会导致后期混凝土力学性能和耐久性的降低^[9-10]。

环境湿度的变化也会引起混凝土微观结构与宏观性能的变化^[11-12]。李曙光等将混凝土试件置于干燥环境下,在不同试验龄期测试试件的力学性能、抗冻性能和抗氯离子渗透性变化,分析得出,干燥环境下混凝土内部会产生初始缺陷,导致混凝土内部有害孔、微裂纹增加^[13]。张国辉等根据混凝土气孔结构与养护湿度间的内在规律,分析了混凝土养护湿度与力学性能以及抗氯离子渗透性间的相互关系^[14-15]。罗明勇等研究发现,干燥环境下水泥基材料的孔径分布有明显变化,干燥环境会影响混凝土界面过渡区的宽度,并且会使界面过渡区的水化产物疏松、孔隙率增加,最终导致混凝土宏观力学性能的劣化^[16-17]。

关于气压对混凝土影响的研究相对较少。李雪峰等研究了不同气压环境下,引气混凝土的含气量以及气泡稳定性的差异,发现环境气压的降低会显著降低引气剂的引气作用和引入气泡的稳定性,导致混凝土含气量经时损失与气孔间距系数变大^[18-20]。马新飞研究指出,气压的降低会导致混凝土表面水分蒸发加快,引起混凝土内部水分的迁移,这种迁移会导致水泥水化不完全以及混凝土气孔分布的变化^[21]。

综上可知,复杂环境气候对混凝土的影响已逐步引起研究人员的关注,但是现阶段国内外研究环境对混凝土影响的试验设备以及方法大多是模拟单一环境因素,采用单一、片面的指标分析,并不能真实反映混凝土在多种复杂环境共同作用下的工作状态。青藏高原地区环境复杂,气候相比于平原地区差异很大,因此,需要综合考虑该地区气候条件,设计多种环境因素共同作用下的试验方法进行深入且系统的研究。

本文以高原气候环境下成型养护的引气混凝土为研究对象,并与平原地区成型养护的引气混凝土进行对比,研究不同环境下混凝土气孔结构与力学性能的变化,分析高原地区低压、干燥、低温等环境因素对混凝土的气孔结构以及力学性能的影响规律,揭示混凝土气孔结构劣化以及力学性能下降的原因,为高原地区混凝土材料优化气孔结构、减少强度损失以及提高使用寿命提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 原材料

水泥为西藏高争建材有限公司生产的P•O42.5水泥,各项性能指标如表 1 所示。

表 1 水泥基本性能

Tab. 1 Basic properties of cement

性能指标	初凝/ min	终凝/ min	安定性/ mm	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				3 d	28 d	3 d	28 d
规范值	≥45	≤600	≤5.0	≥3.5	≥6.5	≥17.0	≥42.5
实测值	152	240	1.3	4.3	8.1	21.6	47.8

砂子采用拉泽隧道轧石场生产的河砂,细度模数 2.71,属于中砂,含泥量(质量分数,下同)1.4%,砂的筛分结果见表 2。

表 2 砂筛分结果

Tab. 2 Sand screening results

筛孔尺寸/mm	筛余量/g	累计筛余/%
9.5	0.0	0.0
4.75	18.9	3.8
2.36	60.3	15.8
1.18	89.1	33.7
0.6	50.1	43.7
0.3	145.4	72.8
0.15	111.0	95.0
<0.15	17.9	98.5

碎石采用拉泽隧道轧石场生产的 5~20 mm 连续级配的石灰岩碎石,含泥量为 0.5%,碎石的级配见表 3。拌和水为饮用水;减水剂采用天津宏耐科技有限公司生产的 HN-1 聚羧酸盐高性能减水剂,固含量为 30%;引气剂采用天津宏耐科技有限公司生产的粉末状皂基引气剂,属于非离子性表面活性剂,固含量为 4%。

表 3 碎石级配

Tab. 3 Gravel gradations

级配	不同筛孔尺寸(mm)下的通过率/%					
	2.36	4.75	9.5	16.0	19.0	26.5
碎石	100.0	100.0	78.3	3.1	0.0	0.0

1.2 混凝土配合比

混凝土配合的水灰比为 0.4,水泥、砂、碎石、水的用量分别为 410、726.8、1 090.2、164.1 kg/m³,减水剂掺量(质量分数)为 1%,其中试件 S 为不掺引气剂的基准组混凝土,试件 S1~S4 通过改变引气剂掺量(0.2%~0.8%)来控制混凝土含气量,见表 4。

表 4 混凝土引气剂掺量

Tab. 4 Air entraining agent contents of concrete %

试件编号	S	S1	S2	S3	S4
引气剂掺量	0	0.2	0.4	0.6	0.8

1.3 试验方案

为了研究复杂气候环境对其性能的影响,在 4 种环境下对混凝土进行成型与养护。4 种环境分别为:①拉萨标准室内养护(温度 20℃±2℃,相对湿度

95%,大气压 65.3 kPa),记为 LB;②拉萨地区室外养护(温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 10%,大气压 65.3 kPa),记为 LW;③西安地区标准室内养护(温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 95%,大气压 103.2 kPa),记为 XB;④西安地区室外养护(温度 $8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 30%,大气压 103.2 kPa),记为 XW。试样在拉萨达孜和陕西西安分别制备,试样的制备和成型方法相同,试件浇筑成型 24 h 后脱模,然后,分别放入不同的养护环境下养护 28 d 后,进行气孔结构与力学性能的测试,通过对比分析,研究复杂气候环境对其气孔结构与力学性能的影响。通过 LB 与 LW 对比,研究干燥、低温气候对混凝土性能与结构的影响;LB 与 LW 对比,研究低气压对混凝土结构与性能的影响;XW 与 LW 对比,研究低气压、干燥和低温环境共同作用对混凝土结构与性能的影响。

1.4 测试方法

按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2017)中混凝土强度检测方法成型长、宽、高均为 100 mm 的正方体试件,在上述 4 种环境下养护至 28 d 后进行抗压强度的测试。新拌混凝土的初始含气量测试根据《普通混凝土拌合物性能试验方法》(GB/T 50080—2016),将搅拌均匀的新拌混凝土放入 SANYO 直读式精密混凝土含气量测定仪进行测定。硬化混凝土气孔分析采用 CABR-457 型硬化混凝土气孔分析仪进行测试,测试设备如图 1 所示。

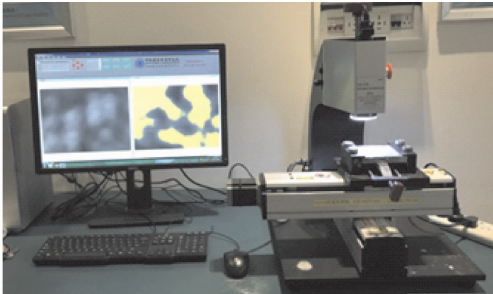


图 1 CABR-457 型硬化混凝土气孔分析仪

Fig.1 CABR-457 hardened concrete pore analyzer

制样时首先将养护至 28 d 的正方体试块切割成 10~20 mm 厚的试件,为了真实反映试块内气泡真实的形态,切割时方向应选择纵向切割,且应该包含混凝土试块的顶部与底部。切割完成后对试件进行研磨、抛光与清洁处理,以确保试件表面的平整度,然后用黑色墨水对试件表面进行染色。待试件干燥后将白色纳米碳酸钙颗粒抹在试件表面以填充气孔,增强孔与孔壁的对比度。最后用刀片刮除试件表面多余颗粒,干燥后即可放在试验台下进行气

孔结构的测量,试件处理前后对比如图 2 所示。

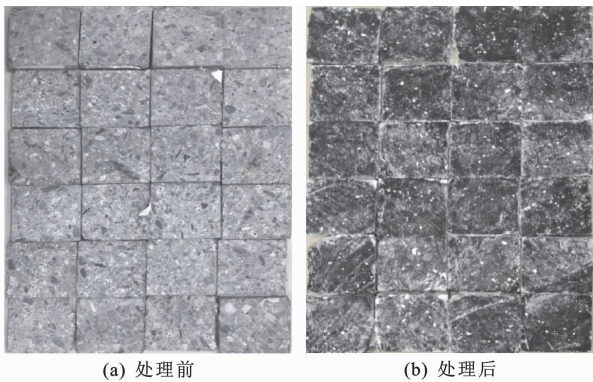


图 2 试件处理前后对比

Fig.2 Comparisons of test pieces before and after processing

2 结果与讨论

2.1 不同环境下混凝土的气孔结构

2.1.1 混凝土含气量变化

表 5 为拉萨地区新拌混凝土的初始含气量以及室内外环境下的硬化混凝土含气量变化;表 6 为西安地区新拌混凝土的初始含气量以及室内外环境下的硬化混凝土含气量变化。由表 5、表 6,结合表 4 可以看出:混凝土含气量随着引气剂掺量的增加而增加,在不同环境下,每增加 0.1% 的引气剂,新拌混凝土的含气量增加 2%~3%,硬化混凝土含气量增加 1%~2%。不同环境下新拌混凝土在硬化过程中都存在气泡的损失,造成硬化混凝土含气量的下降。使用相同配合比的新拌混凝土,在不同环境下的初始含气量相差很大,拉萨与西安地区最大相差达 20%;常压环境下新拌混凝土的初始含气量要明显高于低气压环境,这是因为与西安相比,拉萨地区的大气压只有西安地区的 64%,气压越低,溶液-气泡界面张力越大^[22],溶液-气泡界面张力的增大会使混凝土中气泡稳定性变差,且更容易损失,因此,低气压环境下的新拌混凝土含气量较低。

表 5 拉萨地区混凝土含气量

Tab.5 Air contents of concrete in Lhasa %

编号	初始含气量	LB 养护	LW 养护
S	1.8	1.2	1.5
S1	3.3	2.0	2.9
S2	5.2	3.9	4.5
S3	7.2	4.5	6.5
S4	8.5	6.5	7.1

通过表 5、表 6 还可以看出:在不同环境下的硬化混凝土含气量从小到大依次为 LB、XB、XW、LW;LW 比 LB、XW 比 XB、LW 比 XW、XB 比 LB

表 6 西安地区混凝土含气量
Tab. 6 Air contents of concrete in Xi'an %

编号	初始含气量	XB 养护	XW 养护
S	2.5	1.4	1.4
S1	3.9	2.2	2.7
S2	6.3	4.0	4.3
S3	8.6	5.5	6.0
S4	9.5	8.1	8.3

的含气量分别增加了 20%~30%、7%~20%、6%~10%、5%~22%。与常压标准养护环境下的混凝土相比,常压、干燥、低温环境下硬化混凝土含气量增加;低气压标准养护环境下硬化混凝土含气量降低;低气压、干燥以及低温环境共同作用下硬化混凝土含气量增加。高原复杂环境下,影响硬化混凝土含气量的主要因素是干燥、低温气候。室外较低的温度下混凝土水化速度变慢,在早期混凝土的硬化过程中,水泥未完全水化,会在混凝土内部形成大量的孔,随着时间的增加,混凝土内部孔的数量会增加。室外较低的空气湿度会导致混凝土内水分向外部发生迁移,降低水泥的水化程度,使混凝土中气孔的数量增加,硬化混凝土含气量增加。低气压环境下,气泡稳定性变差,硬化过程中气泡损失增多,硬化混凝土含气量降低。

2.1.2 硬化混凝土孔径变化

为研究不同环境下硬化混凝土的孔径变化,对其平均孔径以及孔径分布进行分析,结果如表 7、图 3 和图 4 所示。

表 7 不同环境下硬化混凝土气孔平均孔径
Tab. 7 Average pore diameter of hardened concrete in different environments μm

编号	LB	LW	XB	XW
S	220	254	230	239
S1	214	230	218	224
S2	201	219	208	214
S3	192	200	192	196
S4	180	203	182	190

由表 7 可知,处于相同养护环境下,硬化混凝土的平均孔径随着引气剂掺量的增加而降低,引气剂掺量每增加 0.1%,混凝土的平均孔径降低 5%~10%。这是因为引气剂使混凝土在搅拌过程中引入的不规则大气泡分散成均匀分布、稳定而封闭的微小气泡,气泡的直径在 20~200 μm 之间^[23],这些微小气泡的引入可以降低硬化混凝土的平均孔径。引气剂的掺量越大,硬化混凝土平均孔径下降越多。

由表 7 还可以看出,不同环境下,采用相同配比

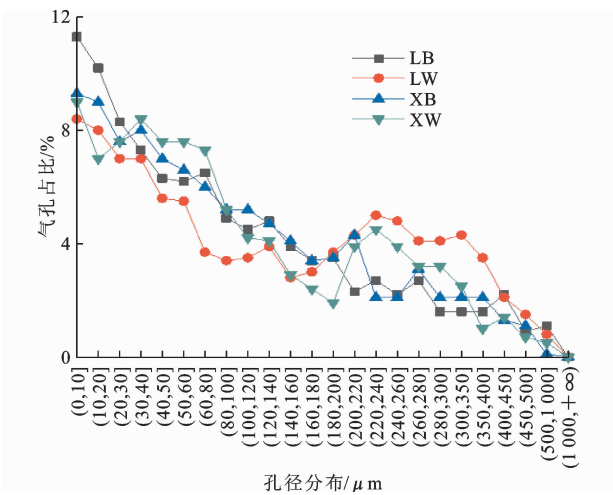


图 3 硬化混凝土孔径分布曲线(S2)

Fig. 3 Curves of pore-size distributions in hardened concrete(S2)

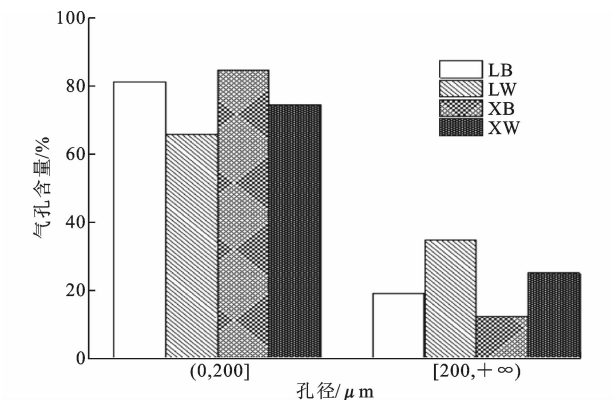


图 4 孔所占比例

Fig. 4 Proportions of pore

的硬化混凝土平均孔径从小到大依次为 LB、XB、XW、LW。LB 比 LW、XB 比 XW、XW 比 LW、LB 比 XB 混凝土的平均孔径分别下降了 8%~12%、3%~5%、2%~6%、2%~5%。与常压标准养护环境下相比,常压、干燥、低温环境下混凝土平均孔径增加,低气压标准养护环境下则减小,低气压、干燥、低温环境下增加,可以看出造成平均孔径变化的主要原因是干燥、低温环境。硬化混凝土中的孔隙一般分为凝胶孔、毛细孔和气泡,凝胶孔孔径在 10 nm 以下,毛细孔孔径在 0.01~10 μm 之间,气泡的孔径一般在 20~200 μm 之间^[24]。由图 3 和图 4 可以看出:不同环境下硬化混凝土孔径大都分布在 0~200 μm 在这个范围内,但是不同环境下, LB 混凝土大于 200 μm 孔的含量为 18.9%, LW 比 LB 增加了 15.7%; XB 混凝土大于 200 μm 孔的含量为 12.1%, XW 比 XB 增加了 12.7%。与室内相比,室外环境的温度、湿度都更低。室外干燥、低温的环境会使混凝土孔径变大。一方面,低温会降低混凝土

的水化速度,造成混凝土内部水化不完全,水化产物减少。水化产物减少会导致混凝土中的大孔增多,平均孔径变大。另一方面,由于室外环境下空气的湿度较低,混凝土内部与外部环境形成湿度差,使混凝土内部的自由水分向环境中转移,混凝土内部自由水变少,混凝土的水化速度降低、水化产物减少,使大孔增多、平均孔径变大;低气压环境下的平均孔径要小于常压环境,低气压环境下,溶液-气泡界面张力变大,与小孔径气泡相比,大孔径气泡更不稳定,容易损失,大孔径气泡含量变低,其平均孔径变小。拉萨地区室内室外温差、湿度差均比西安地区大,所以 LW 环境下的混凝土中大孔增多,且平均孔径最大。

2.1.3 气孔间距系数变化

不同环境下成型的硬化混凝土的含气量与气孔间距系数关系见图 5。

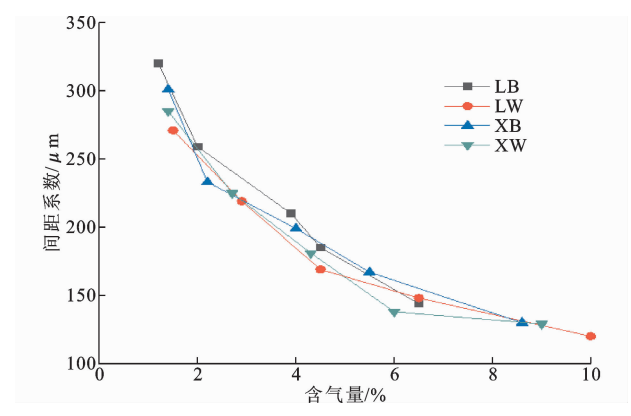


图 5 含气量与气孔间距系数关系

Fig. 5 Relationships between air contents and spacing factors

从图 5 可以看出:处于相同养护环境下的硬化混凝土的含气量越大,气孔间距系数也就越小;不同环境下硬化混凝土的气孔间距系数从小到大依次为 LW、XW、XB、LB;LW 比 LB、XW 比 XB、LW 比 XW、XB 比 LB 的间距系数分别减小了 15%~20%、4%~8%、6%~11%、4%~11%。与常压标准养护环境下硬化混凝土相比,常压、干燥、低温环境下,低气压、干燥、低温环境下气孔间距系数均减小,而低气压标准养护环境下则增大,这与第 2.1.1 节中含气量的变化趋势相反。造成不同环境下气孔间距系数差异的主要原因是硬化混凝土含气量的变化,硬化混凝土中气孔间距系数随着含气量的增加而减少。

2.2 混凝土的抗压强度

为研究养护环境对混凝土抗压强度的影响,对不同养护环境下的混凝土 28 d 强度进行测试,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,混凝土的 28 d 抗压

强度均随着引气剂掺量的增加而减少。引气剂掺量增加,混凝土内气泡变多,含气量增加,混凝土内部结构疏松、致密性降低,导致其 28 d 抗压强度降低。混凝土 28 d 抗压强度从大到小依次为 LB、XB、XB、XW;LB 比 LW、XW 比 XB、LW 比 XW、XB 比 LB 的混凝土 28 d 强度分别下降了 15%~36%、3%~5%、5%~15%、5%~10%。与常压标准养护环境下相比,常压、干燥、低温环境下和低气压、干燥、低温环境下混凝土的强度均下降,低气压标准养护环境下混凝土强度有所提升。造成其强度差异的原因:一方面是不同的环境下混凝土含气量的增加会使混凝土强度降低;另一方面温度与湿度变化也会对混凝土强度造成影响,低温和干燥环境都会影响混凝土的水化程度,且干燥环境会使混凝土干缩,产生微裂纹,使其后期强度降低。LB 环境下混凝土 28 d 强度最高原因是:一方面,低气压环境下气泡损失较多,含气量较小;另一方面,室内标准养护环境下,温度、湿度适宜,水化反应充分,使其 28 d 强度较高。LW 环境下 28 d 抗压强度下降幅度明显大于其他环境下的混凝土,最多下降了 36%。LW 环境下,室外的温度在 -15℃~10℃ 之间,而混凝土材料内部孔隙结构中水的冰点只有 -5℃~-3℃,当温度低于 -10℃ 时,水泥水化反应和混凝土强度增加均停止^[24]。长时间处于负温状态下,混凝土内部水化速度缓慢甚至停止,内部自由水结冰造成其体积膨胀,形成很高的膨胀应力,但此时混凝土的水化程度低,内部尚未形成完整的结构,抗压强度较低,无法承受水结冰造成的巨大膨胀应力,会对混凝土结构造成不可恢复的结构破坏,导致后期 28 d 抗压强度显著下降。

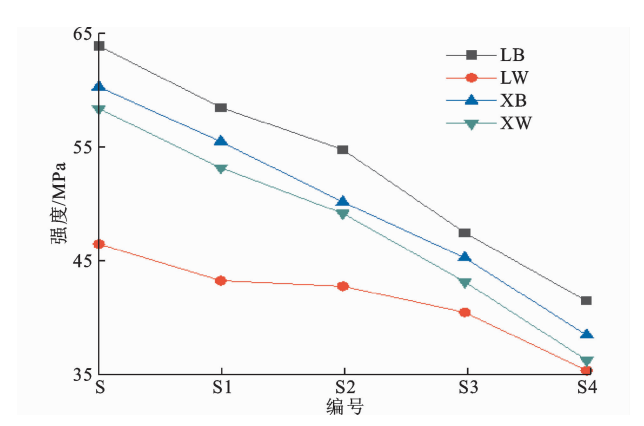


图 6 不同环境下的混凝土 28 d 抗压强度

Fig. 6 28 d compressive strength of concrete in different environments

在 LB、XB、XW 环境下,养护成型的硬化混凝

土含气量每增加 1%, 28 d 抗压强度则下降 3%~4%; 在 LW 环境下养护成型的硬化混凝土含气量每增加 1%, 28 d 抗压强度下降 1%~2%, 其下降幅度明显小于其他环境下的混凝土。这是因为 LW 环境下引气剂的掺入会在混凝土内部引入大量的气泡, 这些气泡的引入可以在混凝土中自由水发生冻胀时提供一定的缓冲, 有效减少了冻胀应力的影响, 阻止混凝土内部结构的破坏。具有优良抗冻耐久性的气孔间距系数应保持在 240 μm 左右^[25], 而 LW 环境下的气孔间距系数在 120~270 μm 之间。因此, 引气剂的掺入可以减少混凝土早期在低温环境下的冻伤, 降低其 28 d 抗压强度的损失。

3 结 语

(1) 在 4 种成型和养护环境下, 混凝土含气量均随着引气剂掺量的增加而增加, 引气剂掺量每增加 0.1%, 硬化混凝土含气量增加 1%~2%。低气压环境下和干燥、低温环境下硬化混凝土含气量分别降低 10%~30% 和 20%~40%。硬化混凝土的平均孔径随着引气剂掺量的增加而降低, 引气剂掺量每增加 0.1%, 混凝土的平均孔径降低 5%~10%; 低气压环境下混凝土中孔径大于 200 μm 的孔含量减少, 孔径小于 200 μm 的孔含量增高, 平均孔径降低 5%; 干燥、低温环境下混凝土中孔径大于 200 μm 的孔含量增高, 孔径小于 200 μm 的孔含量降低, 平均孔径最多增加 10%。

(2) 干燥、低温环境对混凝土气孔结构与力学性能的影响程度大于低气压环境。高原复杂气候地区造成混凝土气孔结构与力学性能劣化的主要因素是其干燥、低温的环境。

(3) 混凝土在早期长时间处于低温环境中, 使其在最终凝结硬化之前受到多次反复冻融, 对混凝土结构造成不可恢复的结构破坏, 导致混凝土 28 d 抗压强度显著下降。掺入引气剂可以有效缓冲冻胀应力, 减少混凝土内部结构破坏以及强度损失。

(4) 本文对高原复杂环境下的混凝土气孔结构以及力学性能进行了研究, 但缺少混凝土耐久性变化的研究; 同时在机理研究方面, 也应增加气压引起的溶液-气泡界面张力变化对气泡稳定性及孔径影响的量化分析, 下阶段将从这几个方面开展研究。

参考文献:

References:

- [1] 冉 晋. 复杂环境条件下混凝土耐久性变化规律及寿命预测[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- RAN Jin. Change of concrete durability and life prediction under complex environmental conditions[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [2] KOVLER K, ROUSSEL N. Properties of fresh and hardened concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(7): 775-792.
- [3] 葛 昕. 高原气候条件对混凝土性能及开裂机制影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- GE Xin. Study on the influence of plateau climatic conditions on concrete performance and cracking mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [4] WANG Z, ZENG Q, WANG L, et al. Characterizing frost damages of concrete with flatbed scanner[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 872-883.
- [5] 张子明, 周红军, 赵吉坤. 温度对混凝土强度的影响 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 674-679.
- ZHANG Zi-ming, ZHOU Hong-jun, ZHAO Ji-kun. Effect of temperature on concrete strength[J]. Journal of Hohai University: Natural Science Edition, 2004, 32(6): 674-679.
- [6] 胡玉兵, 苗广营, 熊 羽. 负温环境下混凝土力学性能及水化特征研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 975-980.
- HU Yu-bing, MIAO Guang-ying, XIONG Yu. Study on mechanical properties and hydration characteristics of concrete under negative temperature environment [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6): 975-980.
- [7] 张瑞稳, 王起才, 张戎令, 等. -3 $^{\circ}\text{C}$ 养护条件下不同龄期引气混凝土强度及渗透性试验规律研究[J]. 混凝土, 2017(7): 22-25.
- ZHANG Rui-wen, WANG Qi-cai, ZHANG Rong-ling, et al. Study on the test law of strength and permeability of air-entrained concrete at different ages under -3 $^{\circ}\text{C}$ curing conditions[J]. Concrete, 2017(7): 22-25.
- [8] NASSIF A Y, PETROU M F. Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 161-167.
- [9] 舒志坚. 养护条件对混凝土早期性能的影响[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2007.
- SHU Zhi-jian. Effect of curing conditions on early performance of concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2007.
- [10] 张 凯, 王起才, 王庆石, 等. 含气量对低温养护下混

- 凝土孔结构的研究[J]. 混凝土, 2015(4):49-52.
- ZHANG Kai, WANG Qi-cai, WANG Qing-shi, et al. Study on the pore structure of concrete under low temperature curing[J]. Concrete, 2015(4):49-52.
- [11] WU Z, WONG H S, BUENFELD N R. Influence of drying-induced microcracking and related size effects on mass transport properties of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 68:35-48.
- [12] 常洪雷, 金祖权, 刘健. 自干燥及水分扩散引起的高性能混凝土内部湿度演变[J]. 材料导报, 2019, 33(14):2370-2375.
- CHANG Hong-lei, JIN Zu-quan, LIU Jian. Evolution of internal humidity of high-performance concrete caused by drying and water diffusion[J]. Materials Review, 2019, 33(14):2370-2375.
- [13] 李曙光, 郝伟男, 陈改新, 等. 干燥引起的初始缺陷对混凝土宏观性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6):892-899.
- LI Shu-guang, HAO Wei-nan, CHEN Gai-xin, et al. Effect of initial defects caused by drying on macroscopic properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6):892-899.
- [14] 张国辉, 李宗利, 张林飞. 干燥条件对混凝土强度影响试验研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5):840-846.
- ZHANG Guo-hui, LI Zong-li, ZHANG Lin-fei. Experimental study on the influence of drying conditions on the strength of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5):840-846.
- [15] 延永东, 刘荣桂, 陆春华. 养护湿度对混凝土内部氯离子传输的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 38(12):148-152.
- YAN Yong-dong, LIU Rong-gui, LU Chun-hua. Effect of curing humidity on chloride ion transport in concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 38(12):148-152.
- [16] 罗明勇, 曾强, 庞晓贇, 等. 养护条件对水泥材料孔隙结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(5):597-604.
- LUO Ming-yong, ZENG Qiang, PANG Xiao-yun, et al. Effect of curing conditions on pore structure of cement-based materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(5):597-604.
- [17] 余安明, 王中和, 王树和, 等. 干燥大温差条件下混凝土界面过渡区的研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(4):485-488.
- SHE An-ming, SHUI Zhong-he, WANG Shu-he, et al. Study on the transition zone of concrete interface under dry and large temperature difference conditions[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(4):485-488.
- [18] 李雪峰, 付智. 低气压环境对混凝土含气量及气泡稳定性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(8):1076-1082.
- LI Xue-feng, FU Zhi. Effect of low pressure environment on gas content and bubble stability of concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(8):1076-1082.
- [19] 李雪峰, 付智, 罗翥, 等. 高原低气压环境对新拌混凝土含气量的影响[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2014, 44(5):1046-1051.
- LI Xue-feng, FU Zhi, LUO Zhu, et al. Effect of plateau low pressure environment on gas content of fresh concrete[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44(5):1046-1051.
- [20] HUO J, WANG Z, CHEN H, et al. Impacts of low atmospheric pressure on properties of cement concrete in plateau areas: A literature review[J]. Materials, 2019, 12(9):1384-1403.
- [21] 马新飞. 低压低湿养护对混凝土性能影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- MA Xin-fei. Study on the effect of low pressure and low humidity curing on concrete performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [22] 王余杰, 张陆陈, 骆少泽. 环境气压降低对水体表面张力系数的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 36(17):1671-1815.
- WANG Yu-jie, ZHANG Lu-chen, LUO Shao-ze. Effect of environmental pressure reduction on surface tension coefficient of water[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 36(17):1671-1815.
- [23] 何廷树. 混凝土外加剂[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2003.
- HE Ting-shu. Concrete admixtures[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003.
- [24] 李雪峰. 青藏高原地区混凝土抗冻设计及预防措施研究[D]. 南京:东南大学, 2015.
- LI Xue-feng. Research on anti-freeze design and preventive measures of concrete in Qinghai-Tibet Plateau[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [25] 陈霞, 杨华全, 周世华, 等. 混凝土冻融耐久性与气泡特征参数的研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(2):257-262.
- CHEN Xia, YANG Hua-quan, ZHOU Shi-hua, et al. Study on freeze-thaw durability and bubble characteristic parameters of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(2):257-262.