膨胀剂和混合料贮存期对预拌补偿收缩混凝土抗压性能影响试验分析

马芹永[1,2]，刘　杰[2]

（1. 安徽理工大学矿山地下工程教育部工程研究中心，安徽淮南　232001；
2. 安徽理工大学土木建筑学院，安徽淮南　232001）

摘要：针对地下工程混凝土配比不准确、拌料粉尘大、抗裂防渗性差等问题，提出预拌补偿收缩混凝土技术。制备 4 种含水率的干拌混合料，分别贮存 3，7，10，15，20，30 d 后，掺加 5 种不同掺量膨胀剂预拌补偿收缩混凝土试块，进行抗压强度试验。试验结果表明，预拌补偿收缩混凝土抗压强度随膨胀剂掺量的增加呈先提高后降低的变化趋势，膨胀剂掺量为 6%时抗压性能较好；干拌混合料贮存期愈长，预拌补偿收缩混凝土抗压强度愈低，混凝土劣化加剧；对不同膨胀剂掺量混凝土抗压强度与混合料贮存期关系及抗压强度损失率分析可知，预拌补偿收缩混凝土优于普通混凝土，若抗压强度损失率控制在 5%以内，砂子含水率为 0.5%的混合料合理贮存期为 15 d，砂子含水率为 1.0%的混合料合理贮存期只有 7 d.

关键词：地下工程；混凝土；干拌混合料；膨胀剂；贮存期；含水率
中图分类号：TU528.52　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-2850(2016)14-1447-07

Effects of different expansive agent and storage period on compressive properties of ready-mixed shrinkage-compensating concrete

MA Qinyong[1,2], LIU Jie[2]

(1. *Research Center of Mine Underground Engineering*, *Ministry of Education*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan*, *Anhui*　232001, *China*;
2. *School of Civil Engineering and Architecture*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan*, *Anhui*　232001, *China*)

Abstract: To deal with the concrete problems in underground engineering, such as inaccuracy mix proportion, large dust concentration, poor impermeability and anti-cracking performance, ready-mixed shrinkage-compensating concrete is proposed. The compressive strength tests of concrete specimens with five expansive agent dosages are conducted. Dry-mixed materials in four aggregate moisture contents have been stored for 3, 7, 10, 15, 20, 30 d before concrete specimen preparation. The results of compression test show that the compressive strength of ready-mixed shrinkage-compensating concrete first increases and then decreases with expansive agent dosage increasing. And excellent compressive strength presents at expansive agent dosage of 6%. Moreover, long storage period leads to low compressive strength of ready-mixed shrinkage-compensating concrete and great concrete deterioration. According to the relationship between compressive strength and storage period and the relationship between compressive strength loss rate and storage period, the mechanical properties of ready-mixed shrinkage-compensating concrete are better than ordinary concrete. If the compressive strength loss rate is within 5%, the reasonable storage period for dry-mixed materials with sand moisture content of 0.5% is

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（20133415130001）
作者简介：马芹永（1964—），男，教授，主要研究方向：新型混凝土材料. E-mail: qymaah@126.com

15 d, while the reasonable storage period with sand moisture content of 1.0% is only 7 d.
Key words: underground engineering; concrete; dry-mixed material; expansive agent; storage period; moisture content

0 引言

在地下工程中，混凝土施工常采取现场拌料，易产生混凝土原材料配比不准确、拌料粉尘大、抗裂防渗性差等问题[1]，为此提出预拌补偿收缩混凝土技术。预拌补偿收缩混凝土技术是石子、砂子和水泥在不加水的情况下预先按配合比设计拌合均匀，制成干拌混合料密封贮存，使用时加入水、膨胀剂的混凝土技术。

近十年来，在混凝土中掺入膨胀剂制成补偿收缩混凝土在工程中被应用，2009 年《补偿收缩混凝土应用技术规程》[2]发布，表明补偿收缩混凝土的研究日益成熟。赵顺增等[3]研究表明，高性能膨胀剂（high performance calcium sulpho aluminate, HCSA）具有膨胀性能高、膨胀速率快等特点，掺入后混凝土膨胀与强度发展协调性较好。蔺喜强等[4]研究了掺加硫铝酸钙类膨胀剂的 C80 混凝土力学性能的变化，结果表明，高强度混凝土中加入膨胀剂将明显降低混凝土的早期抗压强度，而对 28 d 抗压强度影响微弱，且高强度混凝土在加入膨胀剂后，孔隙状况改善，微观结构更加密实。黄伟[5]通过向喷射钢纤维混凝土中掺加 CSA 膨胀剂，研究得到当膨胀剂掺量为 8%时，钢纤维有效发挥约束作用，提高了混凝土压拉强度。

而国内外采用干拌混合料制作混凝土的研究较少，BALLOU 等[6]介绍了在北美地区一种运用干拌混合料进行湿喷的喷射混凝土新方法——干拌混合料湿喷法，并阐述了此方法所具备的优势、应用范围以及所需的设备，未对该种混凝土的性能进行研究。韩兴腾[7]研究了采用干拌混合料的喷射混凝土力学性能，分析了此种混凝土抗压强度、抗拉强度、抗折强度与干拌混合料砂子含水率、贮存时间之间的关系，并对干拌混合料的合理贮存期进行了探讨，发现砂子含水率为 0.5%的干拌混合料贮存 28 d 时，混凝土强度降低不超过 7%. 这里针对不同含水率、不同掺量膨胀剂的干拌混合料分别贮存不同时间预拌补偿收缩混凝土试块进行抗压强度试验，分析膨胀剂和混合料贮存期对预拌补偿收缩混凝土抗压性能影响，得出合适的膨胀剂掺量和合理贮存期。

1 预拌补偿收缩混凝土试验设计

1.1 试验原材料与混凝土配合比

试验原材料包括水泥、粗骨料、细骨料、水、膨胀剂。水泥采用 PO 42.5 普通硅酸盐水泥，粗骨料为粒径 5～10 mm 的碎石，细骨料采用淮河中砂，水为普通自来水。膨胀剂采用 HCSA 高性能膨胀剂，主要成分为硫铝酸钙和氧化钙，具有膨胀性能高、稳定性好、安全可靠等特点。

根据 JGJ/T 178—2009《补偿收缩混凝土应用技术规程》[2]和 GB 50086—2015《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》[8]，砂率取 45%，水胶比为 0.48，配合比为水泥∶水∶砂子∶石子=1.00∶0.48∶1.79∶2.19.

1.2 干拌混合料制备与混凝土试块制作

1.2.1 干拌混合料的制备与贮存

按照配合比分别称量水泥、砂子和石子，置于搅拌器中，搅拌均匀，砂子含水率分别为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%，干拌混合料贮存期分别为 0，3，7，10，15，20，30 d，膨胀剂掺量取代胶凝材料用量的 0、4%、6%、8%、10%. 最后放入贮存袋，密封贮存。干拌混合料如图 1 所示。



图 1 干拌混合料

Fig. 1 Dry-mixed materials

1.2.2 混凝土试块制作及测试

干拌混合料贮存至规定时间后，将混合料、膨胀剂及水依次加入强制式搅拌机中搅拌，搅拌完成后装入边长 150 mm 的立方体试模中，并置于振动台上连续振动 90 s，抹平，24 h 后拆模，混凝土试块如图 2 所示。标准养护 28 d，使用 TYE-2000 型压力试验机测试立方体抗压强度，如图 3 所示。



图 2 混凝土试块

Fig. 2 Concrete specimens

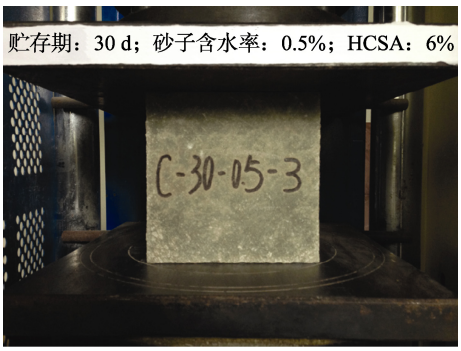


图 3 抗压强度测试

Fig. 3 Test of compressive strength

2 试验结果

5 种膨胀剂掺量、4 种砂子含水率和 6 种贮存期的干拌混合料制备的混凝土、预拌补偿收缩混凝土的抗压强度试验结果如表 1 所示。

表 1 混凝土立方体抗压强度

Tab. 1 Cube concrete compressive strength

混合料砂子含水率/%	干拌混合料贮存期/d	不同膨胀剂掺量的抗压强度/MPa				
		0	4%	6%	8%	10%
0	0	46.1	47.7	48.8	46.5	40.0
0.5	3	45.3	46.9	48.0	45.7	39.9
	7	44.0	46.4	48.4	44.4	40.7
	10	43.8	45.9	46.9	45.4	39.3
	15	43.5	45.9	46.5	44.0	39.0
	20	43.6	45.6	47.0	46.6	39.6
	30	43.0	44.7	46.3	43.1	38.3
1.0	3	44.7	46.0	47.7	47.0	39.5
	7	43.6	44.9	46.5	41.6	38.9
	10	43.1	45.8	46.3	42.6	36.8
	15	42.9	44.6	47.0	44.1	37.7
	20	41.9	42.6	44.7	42.8	37.9
	30	40.3	39.6	43.9	41.6	35.7
1.5	3	42.4	43.1	46.0	42.3	39.3
	7	39.4	42.9	44.4	43.0	37.3
	10	38.5	41.9	43.8	42.9	35.9
	15	37.1	40.2	42.0	40.3	34.3
	20	36.2	37.9	41.3	40.7	33.8
	30	35.5	38.5	40.4	40.6	32.1
2.0	3	42.5	42.7	45.6	40.6	38.4
	7	37.9	40.9	43.4	42.8	34.7
	10	37.1	41.7	42.8	41.1	34.0
	15	35.3	40.1	41.4	40.9	32.7
	20	34.3	35.6	38.9	40.5	31.9
	30	32.6	35.5	37.2	38.3	30.7

3 膨胀剂对混凝土抗压强度影响试验分析

预拌补偿收缩混凝土的抗压强度随膨胀剂掺量的变化曲线如图 4 所示。

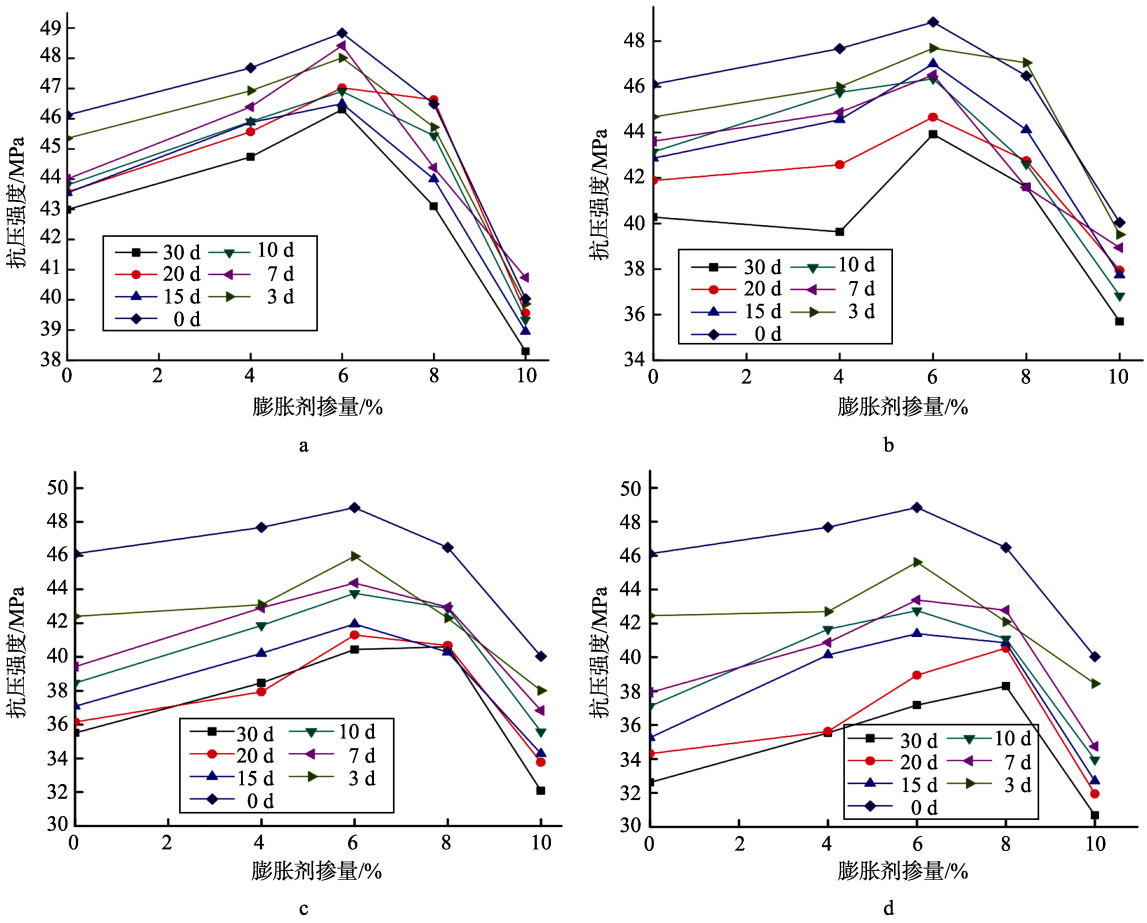


图 4 混凝土试块抗压强度与膨胀剂掺量的关系

Fig. 4 Relationship between compressive strength for concrete and dosages of expansive agents

a—砂子含水率 0.5%；b—砂子含水率 1.0%；c—砂子含水率 1.5%；d—砂子含水率 2.0%

a-Sand moisture content of 0.5%; b-Sand moisture content of 1.0%; c-Sand moisture content of 1.5%; d-Sand moisture content of 2.0%

由图 4 可以看出，当膨胀剂掺量在 0、4%、6%时，随着膨胀剂掺量的增加，抗压强度逐渐增大；当膨胀剂掺量在 6%、8%、10%时，随着膨胀剂掺量的增加，抗压强度逐渐减小，且膨胀剂掺量为 10%时的抗压强度低于未掺膨胀剂普通混凝土的抗压强度。以砂子含水率为 1.0%、贮存期为 7 d 的干拌混合料为例，与未掺膨胀剂混凝土抗压强度相比，膨胀剂掺量为 4%、6%时混凝土抗压强度分别提高了 3.0%、6.7%，膨胀剂掺量为 8%、10%时混凝土抗压强度分别降低了 4.6%、10.8%. 因此，随着膨胀剂掺量的增加，抗压强度呈现出先增大后降低的变化趋势，当膨胀剂掺量为 6%时，预拌补偿收缩混凝土抗压强度较高。

4 贮存期对预拌补偿收缩混凝土抗压强度影响试验分析

预拌料混凝土和预拌补偿收缩混凝土抗压强度与贮存期的关系如图 5a 和图 5b 所示，分别反映了混合料 4 种砂子含水率情况下，预拌料混凝土和膨胀剂掺量为 6%的预拌补偿收缩混凝土的抗压强度随干拌混合料贮存期的变化规律。

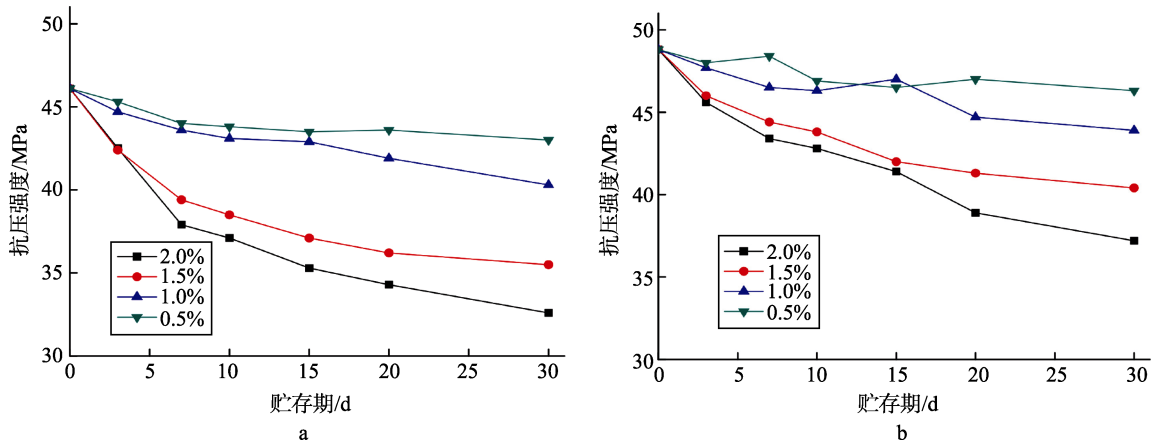


图 5 混凝土试件抗压强度与贮存期的关系

Fig. 5 Relationship between compressive strength of the specimen and the storage period

a—预拌料混凝土；b—预拌补偿收缩混凝土（膨胀剂掺量 6%）

a-Ready-mixed concrete; b-Ready-mixed shrinkage-compensating concrete (expansive agent dosage of 6%)

图 5 试验曲线均呈下降趋势，表明随着贮存期的延长，预拌补偿收缩混凝土和预拌料混凝土抗压强度均不断降低。干拌混合料贮存期为 7 d 时，在含水率为 0.5%、1.0%、1.5%和 2.0%条件下，预拌补偿收缩混凝土抗压强度分别为 48.4，46.5，44.4，43.4 MPa；而干拌混合料贮存期为 30 d 时，在砂子含水率为 0.5%、1.0%、1.5%和 2.0%条件下，预拌补偿收缩混凝土抗压强度分别为 46.3，43.9，40.4，37.2 MPa. 这是由于混合料中砂子含有少量水，在与水泥混合贮存的时间内，水泥将发生预水化反应生成预水化产物，造成水泥劣化，导致混凝土的强度降低。

为分析贮存期对预拌补偿收缩混土抗压强度的影响，观察贮存期不同天混凝土抗压强度与现拌混凝土抗压强度的比值，抗压强度损失率计算表达式如式（1）所示。

$$\eta_{cc}=\frac{f_{cc,0}-f_{cc,t}}{f_{cc,0}}\times 100, \tag{1}$$

其中，η_{cc} 为贮存 t 时抗压强度损失率（%）；t 为混合料贮存期 d；$f_{cc,0}$ 为现拌混凝土抗压强度（MPa）；$f_{cc,t}$ 为贮存 t 时混凝土抗压强度（MPa）。

膨胀剂掺量为 6%的预拌补偿收缩混凝土和预拌料混凝土抗压强度损失率与贮存期之间的变化关系如图 6 所示。

由图 6 可以看出，随着贮存期延长，预拌补偿收缩混凝土与预拌料混凝土的抗压强度损失率逐渐增大，预拌补偿收缩混凝土的抗压强度损失率低于普通混凝土，这是由于膨胀剂与水反应生成的钙矾石晶体细小，较好地填充孔隙，膨胀剂在此发挥了密实混凝土的特性。

当膨胀剂掺量为 6%，干拌混合料贮存期为 10 d，砂子含水率为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%时，预拌补偿收缩混凝土的强度损失率分别为 3.9%、5.1%、12.3%、10.2%；干拌混合料贮存期为 15 d，砂子含水率为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%时，预拌补偿收缩混凝土的强度损失率分别为 4.7%、3.7%、13.9%、15.2%；当贮存期为 30 d，混合料砂子含水率为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%时，预拌补偿收缩混凝土的强度损失率分别为 5.1%、10.0%、17.2%、23.8%. 若抗压强度损失率控制在 5%以内，砂子含水率为 0.5%的干拌混合料合理贮存期为 15 d，砂子含水率为 1.0%的干拌混合料合理贮存期只有 7 d. 因此，虽然预拌补偿收缩混凝土有诸多优点，但其抗压强度随着贮存期的延长而降低，其损失过大将导致混凝土不满足施工要求。

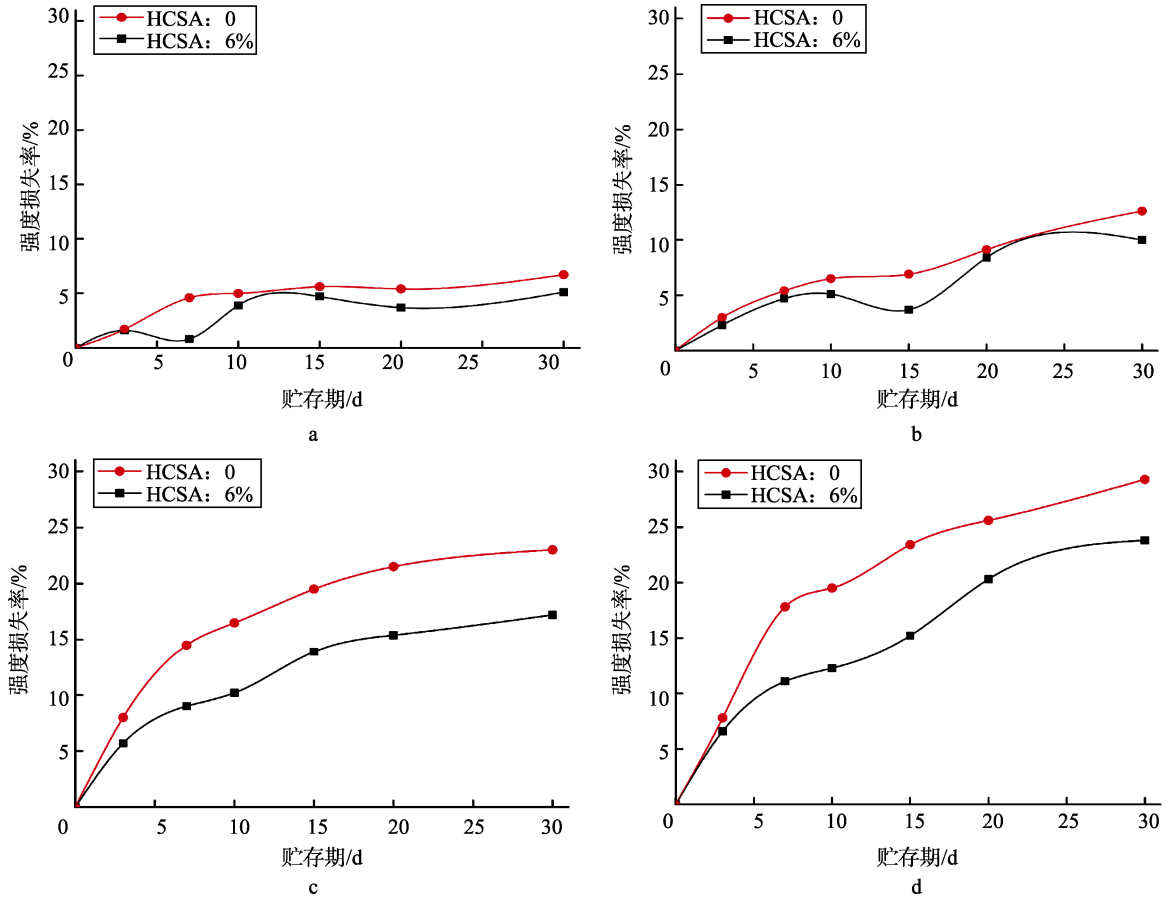


图 6　混凝土试件抗压强度损失率与贮存期的关系

Fig. 6　Relationship between compressive strength loss rate and the storage period

a—砂子含水率 0.5%；b—砂子含水率 1.0%；c—砂子含水率 1.5%；d—砂子含水率 2.0%

a-Sand moisture content of 0.5%; b-Sand moisture content of 1.0%; c- Sand moisture content of 1.5%; d-Sand moisture content of 2.0%

5　砂子含水率对预拌补偿收缩混凝土抗压强度影响试验分析

由上述分析可知，当膨胀剂掺量为6%时，预拌补偿收缩混凝土强度较高，因此固定膨胀剂掺量为 6%，研究预拌补偿收缩混凝土抗压强度随砂子含水率的变化规律，两者的关系曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出，所有曲线均呈下降趋势，说明预拌补偿收缩混凝土的抗压强度都随砂子含水率的增大而降低，且含水率在 1.0%～1.5%时曲线斜率较大。预拌补偿收缩混凝土抗压强度在砂子含水率 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%情况下，干拌混合料贮存期为 3 d 时，预拌补偿收缩混凝土抗压强度比现场拌料混凝土分别降低了 1.6%、2.3%、5.7%、6.6%；干拌混合料贮存期为 30 d 时，预拌补偿收缩混凝土抗压强度比现场拌料混凝土分别降低了 5.1%、10.0%、17.2%、23.8%. 这表明，在一定贮存期情况下，混合料中砂子含水率超过 1.0%，干拌混合料中水泥的劣化程度进一步加深。

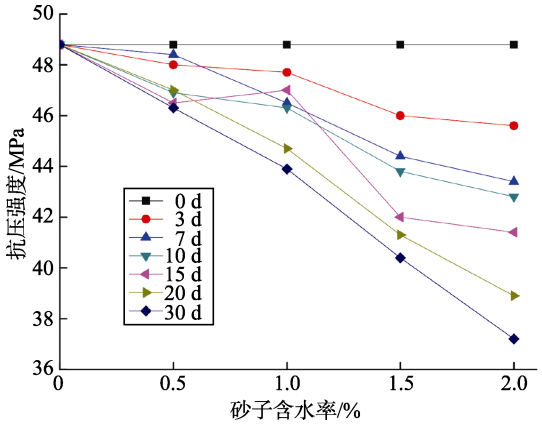


图 7　混凝土试件抗压强度与砂子含水率的关系

Fig. 7　Relationship between compressive strength of the specimen and sand moisture content

由此可知，在预拌补偿收缩混凝土工程应用时，混合料中砂子含水率宜控制在0.5%左右。

6 结论

1）随着膨胀剂掺量增加，预拌补偿收缩混凝土抗压强度先增加后降低，当膨胀剂掺量为6%时混凝土的抗压强度较大，对于砂子含水率为1.0%，贮存期分别为3，7，30 d的抗压强度较未掺膨胀剂时分别提高6.7%、6.7%、9.0%. 膨胀剂掺量为6%左右的预拌补偿收缩混凝土性能较好。

2）干拌混合料贮存期相同时，随着混合料砂子含水率增大，预拌补偿收缩混凝土劣化加剧；干拌混合料砂子含水率为0.5%，预拌补偿收缩混凝土抗压强度降低较少。

3）在干拌混合料中含水率和混合料贮存期一定的条件下，通过对预拌补偿收缩混凝土与预拌料混凝土强度损失率对比分析，预拌补偿收缩混凝土的强度损失率低于预拌料混凝土，掺入适当掺量膨胀剂，能密实预拌料混凝土内部多孔隙的结构，减少强度损失。

4）若抗压强度损失率控制在5%以内，砂子含水率为0.5%的干拌混合料合理贮存期为15 d，砂子含水率为1.0%的干拌混合料合理贮存期只有7 d.

[参考文献] (References)

[1] 刘杰. 预拌补偿收缩混凝土压拉力学性能及其微观结构试验研究[D]. 淮南：安徽理工大学，2015.
LIU J. Experimental research on compressive and tensile properties and microstructure of ready-mixed shrinkage-compensating concrete[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国住房与城乡建设部. JGJ/T 178—2009 补偿收缩混凝土应用技术规程[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ/T 178—2009 Technical specification for application of shrinkage-compensating concrete[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese)

[3] 赵顺增，刘立，武旭南，等. HCSA高性能混凝土膨胀剂及其应用[J]. 膨胀剂与膨胀混凝土，2012（4）：7-11.
ZHAO S Z, LIU L, WU X N, et al. A new high performance expansive agents-HCSA and its application[J]. Expansive Agents and Expansive Concrete, 2012(4): 7-11. (in Chinese)

[4] 蔺喜强，王栋民，陈雷，等. CSA膨胀剂对C80高性能混凝土性能影响及膨胀机理研究[J]. 混凝土，2013（2）：91-94.
LIN X Q, WANG D M, CHEN L, et al. Research on performance and expansion mechanism of the C80 high performance with CSA expansive agent[J]. Concrete, 2013(2): 91-94. (in Chinese)

[5] 黄伟. 矿井补偿收缩钢纤维混凝土性能试验研究与工程应用[D]. 淮南：安徽理工大学，2011.
HUANG W. Experimental study and application of shrinkage-compensating steel fiber reinforced shotcrete in mine[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

[6] BALLOU M, LUKKARILA M. The advantages of using pre-blended dry materials for wet-mix shotcrete in north America[C]//10th International Conference on Shotcrete for Underground Support. Whistler, British Columbia, Canada: ASCE, 2006: 361-367.

[7] 韩兴腾. 喷射混凝土干拌成品混合料的力学性能试验研究[D]. 淮南：安徽理工大学，2009.
HAN X T. Experimental research on the mechanical properties of dry-mixed materials for shotcrete[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50086—2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S]. 北京：中国计划出版社，2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 50086—2015 Technical code for engineering of ground anchorages and shotcrete support[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)