

郭进军, 张世伟, 程林. 养护条件和膨胀剂掺入方式对混凝土抗裂性能影响试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(6): 172-178.

GUO Jinjun, ZHANG Shiwei, CHENG Lin. Experimental study on influences of curing condition and expansive agent mixing modes on anti-cracking performance of concrete[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(6): 172-178.

养护条件和膨胀剂掺入方式对混凝土抗裂性能影响试验研究

郭进军¹, 张世伟¹, 程林²

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450012;

2. 河南省石漫滩水库管理局, 河南 舞钢 462500)

摘要: 为探明养护条件、膨胀剂掺入方式和聚丙烯纤维对二级配补偿收缩混凝土抗裂性能的影响, 开展了在上述三种因素条件下二级配补偿收缩混凝土抗压强度、劈拉强度、限制膨胀率及自由膨胀率试验。研究表明: (1) 采用等比例取代法制备的补偿收缩混凝土各龄期抗压强度较等量取代法提高了约 7%~11%, 劈拉强度提高了约 9%~11%。水养条件下, 3~14 d 龄期内等比例取代法混凝土限制膨胀率降低了约 10%, 自由膨胀率降低了约 42%~57%; (2) 随着养护湿度的提高, 补偿收缩混凝土膨胀性能相应提升, 水养条件相比湿养条件 14 d 限制膨胀率提高了 62.5%, 自由膨胀率提高 111.8%, 相比自养条件限制膨胀率提高了 333.3%, 硫铝酸钙类膨胀剂对养护湿度的敏感性相对更大; (3) 等比例取代法混凝土抗裂性能较等量取代法提高了约 7%~9%。研究结果可为实际工程应用提供参考依据。

关键词: 补偿收缩混凝土; 养护条件; 掺入方式; 聚丙烯纤维; 抗裂性能

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.06.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TV431

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)06-0172-07



Experimental study on influences of curing condition and expansive agent mixing modes on anti-cracking performance of concrete

GUO Jinjun¹, ZHANG Shiwei¹, CHENG Lin²

(1. School of Water Conservancy Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450012, Henan, China;

2. Shimantan Reservoir Administration of Henan Province, Wugang 462500, Henan, China)

Abstract: In order to ascertain the influences from curing condition, mixing mode of expansive agent and polypropylene fiber on the anti-cracking performance of secondary aggregate grading shrinkage-compensating concrete, the experiments on the compressive strength, the splitting tensile strength, the limited expansion rate and free expansion rate of the concrete are carried out under the conditions with the three factors mentioned above. The study result shows that (1) the compressive strengths of the shrinkage-compensating concrete prepared with the equal proportion replacement method at its all the ages are enhanced by about 7%~11% with the increase of the splitting tensile strength of about 9%~11% if compared with that prepared by the equal amount re-

收稿日期: 2019-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879244, 51679221)

作者简介: 郭进军(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事水工新材料及结构性能研究。E-mail: guojinjun@zzu.edu.cn

placement method, while the limited expansion rate of the concrete prepared with the equal proportion replacement method is decreased by about 10% with the decrease of the free expansion rate of about 42%~57% within the ages of 3~14 d under water curing condition; (2) the expansion performance of the shrinkage-compensating concrete is to be correspondingly increased along with the increase of the curing humidity, while the 14 d limited expansion rate is increased by 62.5% with the increase of the free expansion rate of 111.8% under the water curing condition if compared with that under the humid curing condition and the limited expansion rate is increased by 333.3% if compared with that under the natural curing condition. Moreover, Calcium sulphoaluminate expansive agent is relatively more sensitive to the curing humidity; (3) the anti-cracking performance of the concrete prepared with the equal proportion replacement method is increased by about 7%~9% if compared with that prepared with the equal amount replacement method. The study result can provide a referential basis for the actual engineering application.

Keywords: shrinkage-compensating concrete; curing condition; mixing mode; polypropylene fiber; anti-cracking performance

0 引言

混凝土硬化过程中,胶凝材料的水化反应、水分散失及环境温度变化等因素,会引起体积收缩^[1],约束混凝土的拉应力超过混凝土抗拉强度后,将导致混凝土开裂,降低结构的适用性与耐久性。掺入膨胀剂形成补偿收缩混凝土可以有效地抵消混凝土内部拉应力,从而提高混凝土的抗裂性能^[2-3]。工程上常用的膨胀剂主要分为三类:硫铝酸钙类、氧化钙类和氧化镁类膨胀剂^[4],其中应用最为广泛的是硫铝酸钙类膨胀剂,其与混凝土中硫酸钙和氢氧化钙反应生成钙矾石晶体($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$),引起混凝土体积膨胀^[5]。在钢筋或其他变形约束条件下,补偿收缩混凝土内部会产生0.2~0.7 MPa的预压应力,以抵消或部分抵消混凝土因收缩产生的拉应力,从而提高结构的抗裂性能。补偿收缩混凝土开裂与否取决于自身产生的预压应力与混凝土抗拉强度之和是否大于收缩拉应力,因此补偿收缩混凝土抗裂性能取决于膨胀性能和强度两个因素。

目前,国内外学者围绕外部因素对补偿收缩混凝土膨胀性能影响的研究多集中在水胶比、膨胀剂掺量、矿物掺合料、养护温度等^[6-12]方面。苗苗等^[9]研究表明,适当提高养护温度和粉煤灰掺量能提高补偿收缩混凝土的膨胀性能,但粉煤灰的掺加对混凝土早期强度具有抑制作用;冯竟竟等^[10]认为高水胶比补偿收缩混凝土由于混凝土内部孔隙大,大量的钙矾石晶体填充孔隙,并不能产生有效膨胀;李彪等^[11]研究表明,HCSA膨胀剂在6%~12%掺量范围内,随着膨胀剂掺量的增大,混凝土的膨胀性能越好,但

28 d的抗压强度有所降低。赵顺增等^[12]研究了不同养护湿度条件下水泥浆的自由膨胀率,发现水养条件下补偿收缩水泥浆具有较好的变形性能。以上研究多为在标准养护等理想环境下开展的试验研究,而实际水利工程施工过程中,补偿收缩混凝土开裂现象时有发生。尤其是二级配混凝土孔隙率较高,实际施工因素,如养护条件、膨胀剂掺入方式及外掺纤维等工艺对膨胀剂的效能会产生较大影响。因此,紧密结合工程需求和施工环境,通过试验研究二级配补偿收缩混凝土的抗裂性能具有重要的工程意义。

本文采用硫铝酸钙膨胀剂制备二级配补偿收缩混凝土,通过试验研究了养护条件、膨胀剂掺入方式和掺加聚丙烯纤维对二级配补偿收缩混凝土抗裂性能的影响。

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

试验采用42.5级普通硅酸盐水泥;二级配石灰岩碎石,其中5~20 mm粒径掺量40%、20~40 mm粒径掺量60%,表观密度 $2\ 760\ \text{kg}/\text{m}^3$;细度模数2.80的普通河砂,表观密度 $2\ 640\ \text{kg}/\text{m}^3$;普通自来水。选用F类I级粉煤灰,设计掺量20%;SP-G I型膨胀剂,掺量 $30\ \text{kg}/\text{m}^3$;SN-2高效减水剂,掺量2.2%;根据文献[13]给出的最优聚丙烯纤维掺量,选择聚丙烯纤维体积率为1%。各种掺合料的物理性能指标分别如表1—表3所列。

表1 粉煤灰物理性能指标

项 目	细度 /%	需水量 比/%	烧失量 /%	三氧化 硫/%	密度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	含水量 /%	碱含量 /%
检测值	5.8	92	3.54	1.89	2.10	0.2	1.5

表2 膨胀剂物理性能指标

项 目	细 度		凝结时间/min		限制膨胀率/%		抗压强度/MPa	
	比表面积/ m^2/kg	1.18 mm 筛余率/%	初 凝	终 凝	水中 7 d	空气中 21 d	7 d	28 d
检测值	—	0	144	199	0.054	0.038	32.8	46.5

表 3 减水剂物理性能指标

项 目	减水率 /%	泌水率比 /%	凝结时间差 /min		抗压强度比		pH 值	碱含量 /%	氯离子含量 /%
			初 凝	终 凝	7 d	28 d			
检测值	19	40	95	—	130	123	7.03	1.23	0.046

按照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2011)^[14], 确定试验的混凝土配合比。混凝土设计强度等级为 C25, 由水胶比与 28 d 强度相关性曲线, 确定二级配补偿收缩混凝土水胶比 0.47。设计四类混凝土试件, 分别是普通混凝土(OC)、膨胀剂等量取代法补偿收缩混凝土(EC1)、膨胀剂等比例取代法补偿收缩混凝土(EC2)和等量取代法补偿收缩纤维混凝土(EFC1), 配合比如表 4 所列。

表 4 混凝土配合比

组 别	水胶比	水泥 /%	粉煤灰 /%	膨胀剂 /%	砂 /%	减水剂 /%	纤维 /%
OC	0.47	80	20	0	37	2.2	0
EC1	0.47	70	20	10	37	2.2	0
EC2	0.47	72	18	10	37	2.2	0
EFC1	0.47	70	20	10	37	2.2	1

1.2 试件制备和试验方法

混凝土抗压强度、劈拉强度试件采用标准立方体试件 150 mm×150 mm×150 mm, 试件养护 24±2 h 后脱模, 放入温度 20 ℃、相对湿度 95% 的标准养护箱中养护, 在不同养护龄期下依据《水工混凝土试验规程》(SL352-2006)^[15]进行试验。

混凝土限制膨胀率试验按照《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119-2013)^[16], 限制膨胀率测试采用 100 mm×100 mm×400 mm 试件, 带限位器的棱柱体试模浇筑, 试件养护 24±2 h 后脱模。自由膨胀率测试依据《水工混凝土试验规程》(SL352-2006)^[15]混凝土干缩(湿胀)试验方法, 采用 100 mm×100 mm×515 mm 的棱柱体, 试件养护 24±2 h 后脱模。设计 3 种养护条件: (1) 20 ℃水中养护 14 d, 之后转室温自然养护, 模拟设计工况(以下简称水养); (2) 温度 20 ℃, 湿度 95% 下养护 14 d, 然后室温自然养护, 模拟喷水覆盖塑料薄膜养护(以下简称湿养); (3) 温度 20 ℃, 湿度 65% 的室温中自然养护整个龄期, 模拟不规范的工程养护环境(以下简称自养)。

2 试验结果与分析

2.1 膨胀剂掺入方式对混凝土强度的影响

四类混凝土 7 d、28 d 和 60 d 抗压强度随龄期变化曲线如图 1 所示。相同水胶比下掺入 10% 膨胀剂的

补偿收缩混凝土抗压强度低于普通混凝土, 以 28 d 龄期为例, 等比例取代法抗压强度较普通混凝土降低 9.2%, 等量取代法则降低了 16.5%。膨胀剂水化产物不具有胶凝特性, 膨胀剂代替了部分胶凝材料, 相当于增大有效水胶比, 因此补偿收缩混凝土抗压强度低于普通混凝土^[17]。等比例取代法比等量取代法在各龄期抗压强度分别提高了 11.2%、8.8% 和 7.4%, 两者增长速率基本相同。在相同的水胶比和胶凝材料用量的情况下, 等量取代法粉煤灰掺量高于等比例取代法, 水泥掺量低于等比例取代法, 作为掺合料的粉煤灰在水泥水化过程中反应滞后, 因此等量取代法水泥水化生成的胶凝性产物较少, 其抗压强度较低。聚丙烯纤维的掺入提高了补偿收缩混凝土的抗压强度, 掺聚丙烯纤维的补偿收缩混凝土较不掺各龄期抗压强度分别提高了 7.5%、8.8% 和 3.4%。聚丙烯纤维的掺入为补偿收缩混凝土的内部提供了一定的约束, 膨胀剂水化生成的钙矾石(Aft)填充混凝土内部孔隙, 改善了混凝土的内部孔隙结构, 使混凝土更加的密实, 提高了混凝土的抗压强度。

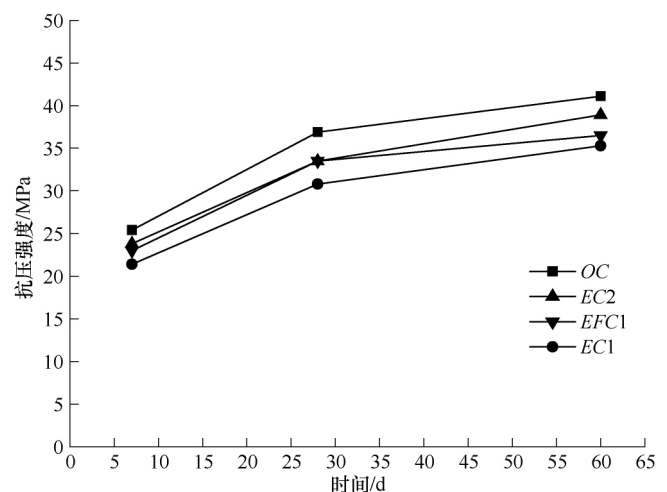


图 1 不同混凝土不同龄期抗压强度

四类混凝土 7 d、28 d 和 60 d 劈拉强度随龄期变化曲线如图 2 所示。相比普通混凝土, 等比例取代法和等量取代法 7 d 的劈拉强度分别提高了 15.5% 和 3.9%, 28 d 时等比例取代法提高了 4.8%, 等量取代法降低了 4.8%, 60 d 时等比例取代法与等量取代法分别降低了 4.7% 和 12.8%。等比例取代法劈拉强度高于等量取代法 9.3%~11.2%, 7~60 d 两者劈拉强

度增长速率接近且低于普通混凝土。掺入一定比例的膨胀剂可以提高混凝土早期的劈拉强度,同时减缓了混凝土后期劈拉强度增长速率,使得普通混凝土 60 d 劈拉强度高于补偿收缩混凝土。7 d 时普通混凝土抗压强度高于补偿收缩混凝土,而劈拉强度却低于补偿收缩混凝土。主要原因为:补偿收缩混凝土水化反应生成的钙矾石晶体可以与水泥水化生成的硅酸钙凝胶相互交织、搭接,形成致密的网络状骨架提高了补偿收缩混凝土的抗拉强度^[18]。纤维的掺入能较大幅度的提高混凝土早期的劈拉强度,掺纤维的补偿收缩混凝土较不掺 7 d 的抗拉强度提高了 37.3%,60 d 抗拉强度小于补偿收缩混凝土。这是因为聚丙烯纤维的掺入一方面提高了混凝土的连续性,减小混凝土受外部荷载时骨料与水泥间的应力集中,延缓了裂缝开裂^[19],另一方面膨胀剂水化产物钙矾石可以填充钢纤维与混凝土之间的空隙,增大了钢纤维与混凝土之间的粘结力。

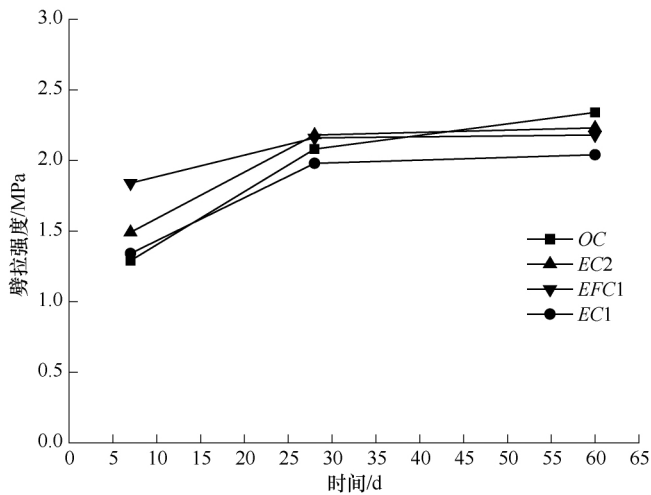


图2 不同混凝土各龄期劈拉强度

2.2 养护条件对限制膨胀率的影响

混凝土限制膨胀率随龄期变化曲线如图3所示,图中 NC 表示湿养,WC 水养,SC 表示自养。

图3中曲线总体呈现先增大后减小最后趋于平稳的趋势,水养条件下等量代法 3~14 d 限制膨胀率比等比例取代法提高约 10%,14~90 d 提高约 20%~50%。水养条件下补偿收缩混凝土具有较高的限制膨胀率及限制膨胀率的增长速率,相比湿养条件,水养条件在 3 d、7 d 和 14 d 限制膨胀率分别增长了 200.0%、90.9%和 62.5%,相比自养条件分别增长了 500.0%、162.5%和 333.3%。相比自养条件,湿养条件在 3 d、7d 和 14 d 限制膨胀率分别增长了 100.0%、37.5%和 166.7%。试验结果表明:养护湿

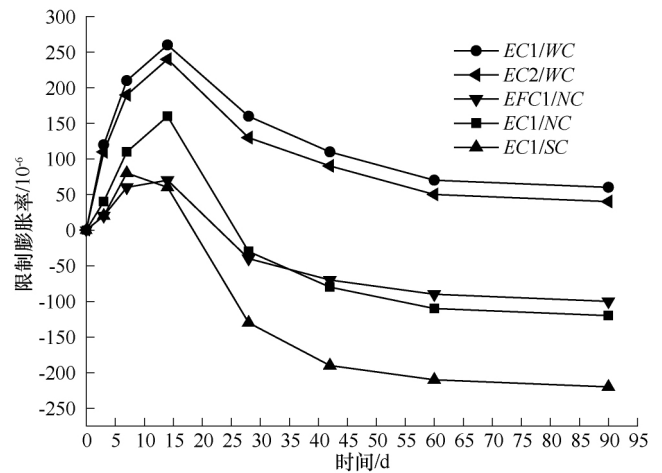


图3 混凝土不同龄期限制膨胀率

度对于硫铝酸钙类膨胀剂的膨胀性能有明显的影响,硫铝酸钙类膨胀剂水化反应生成钙矾石,一般需要结合 32 个结晶水,当混凝土中的自由水减少时,水泥的水化反应会与膨胀剂的水化反应形成竞争的关系,因此当外界水分不能及时补充补偿收缩混凝土所丧失的水分时,补偿收缩混凝土内部膨胀剂的水化反应程度就会降低,不能提供足够的膨胀源。

随着养护条件的不同,补偿收缩混凝土的后期干缩值也不相同,水养 14 d 转自养后,混凝土的干燥收缩落差值为 0.02%,湿养 14 d 转自养后,混凝土的干燥收缩落差值为 0.028%。其原因为:采用水养条件下膨胀剂的水化反应充分,水化产物钙矾石可以有效的填充混凝土内部空隙,使混凝土更加密实,降低了混凝土干缩。从 EC1/SC 这条曲线可以看出,尽管混凝土内部具有一定的自由水,但在自养条件下混凝土内部的水分仅能使混凝土前 7 d 的膨胀大于收缩值,随着后续的养护,补偿收缩混凝土的收缩值大于膨胀值,使混凝土 14 d 限制膨胀率下降,在 18 d 之后混凝土表现为收缩状态。

聚丙烯纤维的掺入限制了补偿收缩混凝土早期的膨胀。湿养条件下,掺入聚丙烯纤维的补偿收缩混凝土 14 d 限制膨胀率较不掺降低了 56.3%。纤维散乱分布在混凝土的内部,在混凝土的内部形成了网格状的“钢筋”,使得混凝土的膨胀受到纤维的限制,一部分膨胀能转化为纤维的张拉,从而降低了混凝土的限制膨胀率。同时纤维的加入抑制了混凝土后期的收缩,使得掺入纤维的补偿收缩混凝土干燥收缩落差值小于未掺纤维的补偿收缩混凝土,最终 90 d 时 EFC1/NC 组收缩值小于 EC1/NC 组。

补偿收缩混凝土的抗裂性能除了要考虑自身抗拉

强度的影响之外, 还应该考虑由于混凝土膨胀而产生的预压应力。因此预防补偿收缩混凝土开裂应满足以下条件

$$\sum \sigma \leq f_{ik} + \sigma_z \quad (1)$$

$$\sigma_z = E_s \times \rho \times \varepsilon \quad (2)$$

式中, $\sum \sigma$ 是混凝土在限制条件下各个收缩应力之和, MPa; f_{ik} 为混凝土抗拉强度标准值, MPa。 σ_z 为补偿收缩混凝土因膨胀而产生的预压应力, MPa; E_s 为钢筋的弹性模量; ρ 为配筋率; ε 为限制膨胀率。

定义补偿收缩混凝土的抗裂性能指标

$$K = f_{ik} + \sigma_z \quad (3)$$

显然 K 值越大, 补偿收缩混凝土的抗裂性能越好。

图 4 为混凝土抗裂性能指标 K 值随龄期变化的曲线。从图 4 中可以看出, 采用等比例取代法制备补偿收缩混凝土其抗裂性能指标 K 要高于等量取代法, 其抗裂性能指标 K 较等量取代法提高了约 7%~9%。结合混凝土强度及膨胀性能的试验结果, 等量取代法虽然具有较好的膨胀性能, 但其抗拉强度低于等比例取代法, 综合试验结果, 其抗裂性能低于等比例取代法。在相同水胶比和膨胀剂掺量的情况下, 采用等比例取代法制备补偿收缩混凝土较等量取代法抗裂性能提升约 7%~9%。

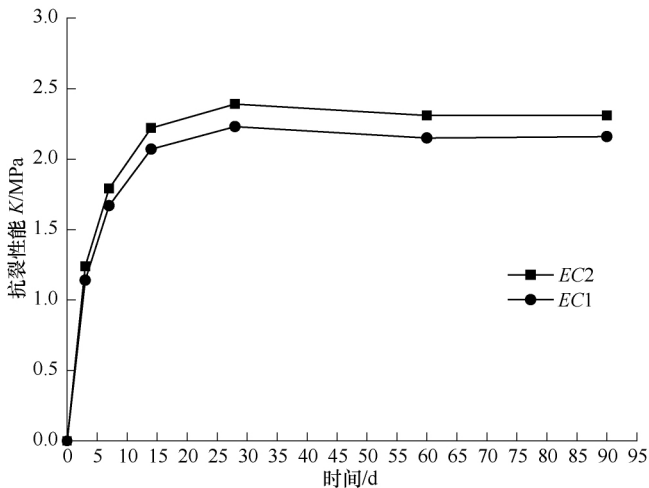


图 4 混凝土不同龄期 K 值

2.3 养护条件对自由膨胀率的影响

混凝土自由膨胀率随龄期变化曲线如图 5 所示。水养条件下, 等量取代法 3 d、7 d 及 14 d 自由膨胀率较等比例取代法分别提高了 33.3%、26.1% 及 24.1%, 湿养条件下, 分别提高了 57.1%、45.5% 及 41.6%。分析等量取代法自由膨胀率高于等比例取代

法的原因: 一是等量取代法下粉煤灰掺量较高使水泥水化反应减缓, 水泥掺量较低降低了混凝土的化学收缩, 同时膨胀剂前期水化反应更充分, 膨胀能更高; 二是等比例取代法早期强度高, 对补偿收缩混凝土膨胀产生一定的约束作用。

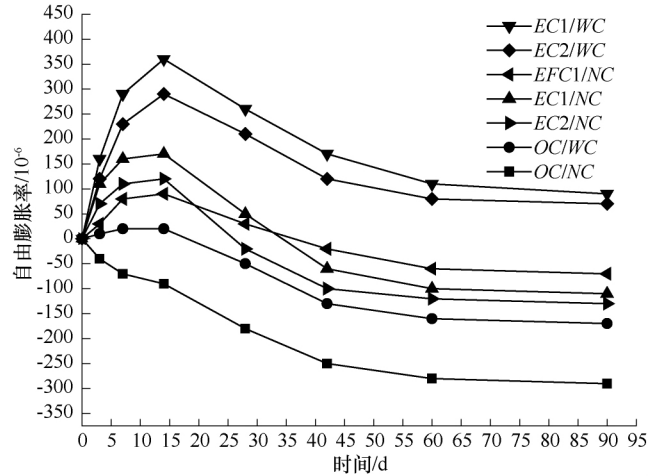


图 5 混凝土不同龄期自由膨胀率

水养条件对于补偿收缩混凝土和普通混凝土的自由膨胀率都有明显的提升, 水养条件下等量取代法补偿收缩混凝土 3 d、7 d 和 14 d 自由膨胀率较湿养条件提高了 45.5%、81.3% 和 111.8%, 等比例取代法提高了 71.4%、109.1% 和 141.7%。水养条件能够促进膨胀剂的水化反应进而促进混凝土的膨胀。普通混凝土在水养条件下早期产生了微小的膨胀, 这是由于水泥胶凝体吸水导致胶凝体粒子进一步地分离(水分子起着克服凝聚力的作用), 形成膨胀压力促进了普通混凝土体积的膨胀。养护条件对普通混凝土的收缩有明显的影 响, 普通混凝土在湿养条件下会发生体积的收缩, 1~14 d 湿养条件下普通混凝土收缩值较小, 14~42 d 时普通混凝土转入自养条件, 收缩速率加快, 42~90 d 内收缩速率减小, 收缩值趋于稳定, 水养 14 d 条件下 90 d 自由收缩值小于湿养条件, 水养条件能减少普通混凝土的收缩。

研究表明: 混凝土的干缩与混凝土中毛细孔中液体的表面张力、液体和毛细孔壁之间的接触角及毛细孔半径有关^[20]。采用水养条件的补偿收缩混凝土, 膨胀剂能够充分的水化反应生成钙矾石晶体 (AFt), 填补混凝土的孔隙, 减小了混凝土的孔隙率, 因此水养条件下补偿收缩混凝土的干缩值小于湿养条件。

与限制膨胀率变化规律相同, 补偿收缩混凝土的膨胀能有一部分用于张拉聚丙烯纤维, 使掺入纤维的

补偿收缩混凝土早期的自由膨胀率小于未掺纤维的混凝土,当湿养 14 d 转入自养条件后,掺入纤维能够降低混凝土的干缩值,从而使 $EFC1/NC$ 组 90 d 的干缩值小于 $EC1/NC$ 组。

上述试验结果表明,水养条件对普通混凝土和补偿收缩混凝土的膨胀性能都产生了一定的促进,为探究水养条件对普通混凝土和补偿收缩混凝土膨胀影响的区别,计算了水养和湿养两种不同养护条件下自由膨胀率的差值,混凝土自由膨胀率差值随龄期的变化曲线如图 6 所示。

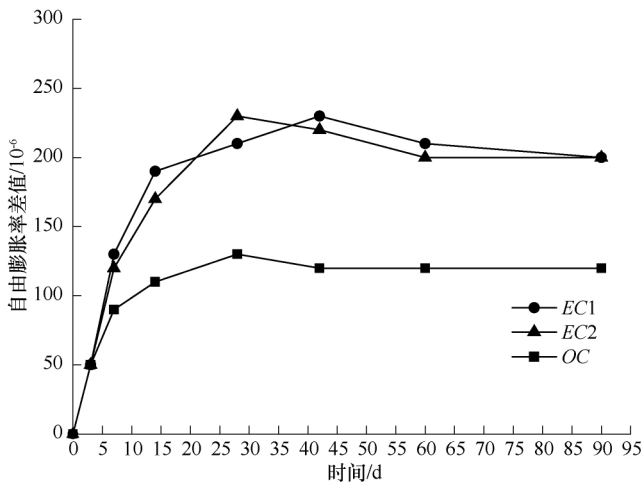


图 6 混凝土各龄期自由膨胀率差值

从图 6 可以看出,水养条件对普通混凝土和补偿收缩混凝土的影响区别产生在 3 d 龄期之后。0~3 d 时水养条件对普通混凝土及补偿收缩混凝土的影响程度无明显差别,这是由于 0~3 d 混凝土内部自由水充足,湿养条件和水养条件下膨胀剂都能够充分的进行水化反应,此时水养条件对混凝土膨胀性能促进的原因是由于水泥胶凝体吸水导致胶凝体粒子进一步地分离,形成膨胀压力,从而提高了混凝土自由膨胀率。3~14 d 时普通混凝土与补偿收缩混凝土自由膨胀率差值存在明显的差异。随着膨胀剂和水泥的进一步水化反应,湿养条件下的混凝土试块内部自由水降低,膨胀剂的水化反应与水泥水化反应竞争有限的自由水,导致湿养条件下膨胀剂不能充分的进行水化反应,由于水养条件能及时的补充混凝土中的自由水保证膨胀剂能够继续充分水化反应,此时水养条件对补偿收缩混凝土膨胀性能的提高包含两部分,既促进了膨胀剂继续水化反应又使水泥胶凝体吸水膨胀。

3 结论

(1) 掺入 10% 膨胀剂的补偿收缩混凝土抗压强度

低于同水胶比的普通混凝土,早期抗拉强度高于普通混凝土,后期抗拉强度低于普通混凝土。不同龄期下等比例取代法的混凝土抗压强度较等量取代法提高约 7%~11%,劈拉强度提高约 9%~11%。采用等比例取代法制备的补偿收缩混凝土相对等量取代法在 28 d 力学性能上的提升如同掺入体积率为 1% 的聚丙烯纤维。聚丙烯纤维的掺入能显著的提高补偿收缩混凝土抗压及抗拉强度,不同龄期下补偿收缩纤维混凝土抗压强度较不掺提高约 3.4%~8.8%,掺入纤维的补偿收缩混凝土 7 d 的劈拉强度较未掺提高了 37.3%。

(2) 由于纤维在混凝土内部散乱分布,形成了网格状的结构,抑制了补偿收缩混凝土的膨胀,因此掺入纤维的补偿收缩混凝土限制膨胀率和自由膨胀率都小于未掺纤维的混凝土,但纤维的掺入对混凝土后期的干缩具有良好的抑制作用。

(3) 等量取代法补偿收缩混凝土的自由膨胀率与限制膨胀率高于等比例取代法。随着养护湿度的增加,补偿收缩混凝土的限制膨胀率和自由膨胀率都有明显的提高,试验结果表明:水养 14 d 限制膨胀率和自由膨胀率较湿养条件分别提高 62.5% 和 111.8%,采用水养条件能极大的促进补偿收缩混凝土的膨胀性能。通过对比上述三种因素对补偿收缩混凝土膨胀性能的影响,发现养护湿度对混凝土膨胀性能影响最大,其次是纤维的掺入。因此在进行补偿收缩混凝土施工时应该保证混凝土养护条件,在进行补偿收缩纤维混凝土设计时应考虑纤维对补偿收缩混凝土膨胀性能的约束。

(4) 建议补偿收缩混凝土的抗裂性能指标 K 。计算结果表明,采用等比例取代法制备补偿收缩混凝土其抗裂性能较等量取代法提升约 7%~9%。建议实际工程中采用等比例取代法制备补偿收缩混凝土。

参考文献:

- [1] 曹丰泽, 阎培渝. 氧化镁膨胀剂对混凝土长期体积变化的影响[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1126-1132.
- [2] 曹先升. 补偿收缩混凝土在防渗面板裂缝控制中的应用[J]. 人民黄河, 2013, 35(12): 115-116.
- [3] 江云安, 廉慧珍. 采用膨胀剂抑制混凝土的收缩与开裂[J]. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2006(2): 11-15.
- [4] 殷新龙, 赵海涛, 仇宁, 等. 补偿收缩混凝土研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 60-65.
- [5] 曹丰泽, 阎培渝. 混凝土膨胀剂水化特性与反应产物微观形貌的研究进展[J]. 电子显微学报, 2017, 36(2): 187-193.
- [6] 苗苗. 胶凝材料组成和温度对补偿收缩混凝土变形性能的影响[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [7] YA Q G, ZONG K L, HONG B S, et al. The Impact of the fly ash

- dosage to the shrinkage-compensating concrete [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 638-640: 1683-1688.
- [8] FENG J J, MIAO M, YAN P Y. The effect of curing temperature on the properties of shrinkage-compensated binder [J]. Science China-technological Sciences, 2011, 54(7): 1715-1721.
- [9] 苗苗, 米贵东, 阎培渝, 等. 养护温度和粉煤灰对补偿收缩混凝土膨胀效能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(10): 1427-1430.
- [10] 冯竟竟, 苗苗, 阎培渝. 补偿收缩复合胶凝材料的水化与膨胀性能 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 439-445.
- [11] 李彪, 徐礼华, 谷雨珊, 等. HCSA 膨胀剂掺量对高强自密实混凝土性能影响研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(1): 90-96.
- [12] 赵顺增, 郑万廪, 刘立. 环境湿度和矿物组成对膨胀剂变形性能的影响 [J]. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2010(3): 5-8.
- [13] 杨冬鹏. 氧化镁和聚丙烯纤维对混凝土强度及干缩性能的影响 [J]. 金属矿山, 2016(6): 193-196.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ55—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [15] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程: SL 352—2006 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土外加剂应用技术规范: GB 50119—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [17] 李鹏, 苗苗, 马晓杰. 膨胀剂对补偿收缩混凝土性能影响的研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 167-173.
- [18] 刘杰, 马芹永. 预拌干料贮存期对补偿收缩混凝土抗拉强度的影响 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(15): 204-208.
- [19] 齐志强. 补偿收缩纤维混凝土强度及变形性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2017, 44(8): 137-140.
- [20] 赵顺增, 刘立, 吴勇, 等. 膨胀混凝土干燥收缩落差的研究 [J]. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2007(3): 4-9.

(责任编辑 郭利娜)