

轻砂内养护剂的协同膨胀效应 对微膨胀混凝土变形性能的影响

刘家彬¹,张明亮¹,秦鸿根^{2†}

(1. 东南大学土木工程学院,江苏南京,211189;

2. 东南大学江苏省土木工程材料重点实验室,江苏南京,211189)

摘要:为了减少地铁装配式地下车站叠合式墙板现浇混凝土结构的裂缝产生,采用膨胀剂与内养护剂复掺技术,设计了基准组、单掺膨胀剂、复掺膨胀剂和轻砂内养护剂或SAP的4组C40混凝土,通过混凝土限制膨胀率、自收缩和干燥收缩等变形性能以及大平板抗裂试验,研究了轻砂内养护剂的协同膨胀效应对微膨胀混凝土变形性能的影响.结果表明:轻砂内养护剂具有强度高、吸水率大、密度大、能均匀分布于混凝土中的特点,掺轻砂内养护剂的补偿收缩混凝土14 d限制膨胀率比不掺内养护剂组增大72%,60 d的自收缩变形仍处于膨胀状态且膨胀率达 153×10^{-6} ,抗裂性显著提高,且综合性能明显优于SAP内养护剂.本文提出内养护剂对膨胀混凝土具有协同膨胀效应.

关键词:轻砂内养护剂;协同膨胀效应;混凝土;变形性能;抗裂性

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

Effect of Synergistic Expansion of Light Sand Internal Curing Agent on Deformation Performance of Micro-expansion Concrete

LIU Jiabin¹, ZHANG Mingliang¹, QIN Honggen^{2†}

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. Main Laboratory of Civil Engineering Materials of Jiangsu Province, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to reduce the occurrence of cracks in the cast-in-situ concrete structure of the laminated wall panel in the subway assembly underground station, the expansion agent and the internal curing agent compound technology were adopted. Four groups of C40 concrete with benchmark group, single-mixed expansion agent, combined expansion agent, and light sand internal curing agent or SAP were designed. Through the concrete limited expansion rate, auto-shrinkage and drying shrinkage and other deformation properties and large slab crack resistance test, the influence of the cooperative expansion effect of light sand internal curing agent on the deformation performance of micro-expansion concrete was studied. The results show that the light sand internal curing agent has the characteristics of high strength, high water absorption, high density, and can be evenly distributed in the concrete. The 14 day limited expansion rate of the shrinkage-compensating concrete mixed with light sand internal curing

* 收稿日期:2021-03-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB655102), National Key Basic R&D Program (973) Project (2015CB655102)

作者简介:刘家彬(1966—),男,江苏南京人,东南大学副教授,工学博士

† 通信联系人, E-mail: dndxlb@126.com

agent is increased by 72% compared with the group without the internal curing agent. The 60 day self-shrinkage is still in the expanded state, the expansion rate is 153×10^{-6} , the crack resistance is significantly improved, and the overall performance is significantly better than that of the SAP internal curing agent. The synergistic expansion effect of internal curing agents on expansive concrete is proposed for the first time.

Key words: light sand internal curing agent; co-expansion effect; concrete; deformation performance; crack resistance

混凝土裂缝严重影响结构工程的质量和耐久性,裂缝的产生主要是由于混凝土凝结硬化过程中收缩变形。随着膨胀剂的引入,通过补偿收缩混凝土可有效减少或避免裂缝产生,利用掺膨胀剂混凝土的早期膨胀补偿中后期的收缩,而混凝土收缩应力主要发生在后期,此时的膨胀剂难以消除收缩开裂问题^[1-2]。膨胀剂的水化反应需要大量水分,早期水分不足会导致膨胀反应无法持续进行。内养护技术可有效解决这一问题并取得了较好的效果。秦鸿根等^[3]通过试验研究发现,当高吸水树脂(Super Absorbent Polymer, SAP)掺入量为胶凝材料的0.2%~0.3%时,可明显改善混凝土的抗塑性裂缝性能,从而有效提高混凝土的耐久性。何锐等^[4]的研究表明,当SAP掺量为胶凝材料的0.2%时,混凝土各项力学性能达到峰值,此时的复合材料最为致密,强度最高。朱长华等^[5]基于西北大风干旱环境研究发现SAP内养护可减小混凝土的塑性收缩和干缩落差,提高混凝土的抗裂性。

SAP作为混凝土内养护剂已进行了大量的研究和工程应用,但SAP作为内养护剂仍存在不足。主要表现为吸水后的SAP密度不到混凝土的50%,混凝土成型时易上浮,导致分布不均;SAP释水速度快,水分易挥发,释水后在混凝土内部形成细孔,对混凝土强度有负面影响。为此,笔者课题组研制出一种高吸水轻砂内养护剂,具有强度高、密度大、吸水率大等特点;轻砂具有一定的直径,可填充混凝土水化过程中的孔隙,提高混凝土致密性^[6]。虽然现有一定的试验研究,但工程应用较少。本文结合无锡地铁车站叠合式墙板现浇微膨胀抗裂混凝土设计与施工,通过掺SAP与轻砂内养护剂的补偿收缩混凝土的对比试验,包括限制膨胀、自收缩、干燥收缩、平板开裂等试验研究,探究了轻砂内养护剂对补偿收缩混凝土的协同膨胀作用。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

采用江苏鹤林水泥有限公司产P·O42.5级水泥,密度为 $3\ 050\text{ kg/m}^3$,比表面积为 $385\text{ m}^2/\text{kg}$,28 d抗压强度为55.9 MPa;粉煤灰为华能国际电力股份有限公司(南京)生产的F类Ⅱ级粉煤灰,密度为 $2\ 250\text{ kg/m}^3$,45 μm 筛余率为17.8%,需水量比95%,烧失量7.2%;矿粉为南京梅宝新型建材有限公司生产的S95级矿粉,密度为 $2\ 940\text{ kg/m}^3$,比表面积为 $408\text{ m}^2/\text{kg}$,28 d活性指数102%,烧失量0.3%。胶凝材料的化学成分见表1。

表1 胶凝材料的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Cementitious material

胶凝材料	%								
	w_{CaO}	w_{SiO_2}	$w_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$w_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	w_{MgO}	w_{SO_3}	$w_{\text{K}_2\text{O}}$	$w_{\text{Na}_2\text{O}}$	w_{SiO_2}
水泥	62.6	21.35	4.67	3.31	1.11	2.25	0.54	0.21	3.26
粉煤灰	4.77	54.9	26.9	6.49	1.31	1.16	1.05	0.88	3.10
矿渣粉	37.04	32.9	15.36	1.57	10.52	2.54	0.69	0.40	0.30

细骨料采用江西赣江Ⅱ区中砂,细度模数为2.60,级配合格,表观密度 $2\ 630\text{ kg/m}^3$,堆积密度 $1\ 510\text{ kg/m}^3$,空隙率44%,含泥量0.5%,泥块含量0.2%;粗骨料采用石灰岩碎石,大小石子按6:4配成5~31.5 mm连续级配碎石,表观密度 $2\ 740\text{ kg/m}^3$,堆积密度 $1\ 500\text{ kg/m}^3$,空隙率45%,含泥量1.0%,泥块含量0.2%。

外加剂由江苏博特公司生产,其中减水剂为PCA-10型聚羧酸高效减水剂,含固量20%,掺量为1%,减水率为25%;膨胀剂为HME-V型混凝土高效膨胀剂,密度为 $2\ 650\text{ kg/m}^3$,细度1.18 mm,筛余率为0.15%,掺量为8%。

轻砂内养护剂采用江苏智晟生产的固体轻砂,粒径1~4 mm,表观密度为1 650 kg/m³,筒压强度8.5 MPa,1 h吸水率为35%;SAP内养护剂采用市售的超强吸水树脂,粒径为30~300 μm,1 h吸水率为28 g/g(每1 g树脂吸收28 g水),吸盐水率15 g/g(每1 g树脂吸收15 g盐溶液)。

1.2 试验方案

为配制抗裂性能好的地铁叠合式墙板用C40补偿收缩混凝土,采用水胶比、砂率优化技术、高性能减水剂、优质掺合料复掺技术、膨胀剂与内养护剂协同膨胀减缩技术,并依据相关标准设计了4组C40混凝土试验配合比,列于表2中。

表2 地铁C40补偿收缩混凝土的试验配合比

组别	水泥	矿渣粉	粉煤灰	膨胀剂	内养护剂	砂	石	水	减水剂
DQ-1	297	63	63	0	0	741	1 067	160	4.23
DQ-2	297	46	46	34	0	741	1 067	160	4.23
DQ-3	297	46	46	34	0.63	741	1 067	175	4.23
DQ-4	297	46	46	34	50	661	1 067	180	4.23

良好的限制条件和养护条件是制备补偿收缩混凝土的两个关键因素,有利于混凝土变形性能的改善和抗裂性能的提高.本文设计(DQ-1)为基准混凝土,其水胶比为0.38、砂率为41%;(DQ-2)是在(DQ-1)的基础上内掺8% HME-IV混凝土高效膨胀剂(分别取代4%的掺和料)的膨胀混凝土;(DQ-3)和(DQ-4)是在膨胀混凝土(DQ-2)的基础上再掺两种不同的内养护剂制备成的膨胀内养护混凝土,其中SAP内养护剂掺量为胶凝材料的0.15%,轻砂内养护剂50 kg/m³(等体积取代细骨料).以上4组混凝土皆为C40混凝土。

1.3 试验方法

限制膨胀率试验参照《混凝土膨胀剂》(GB/T 23439—2017)和《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119—2013)进行,将制备出的混合料筛除大于5 mm的碎石,采用其砂浆制备限制膨胀率试件,试件尺寸为40 mm×40 mm×160 mm.混凝土自收缩试验、干燥收缩试验和大平板开裂试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)进行。

2 试验结果与分析

2.1 内养护剂对补偿收缩混凝土限制膨胀率的影响

限制膨胀率直接反映了补偿收缩混凝土膨胀量的大小,是衡量膨胀剂补偿收缩作用、抗裂防渗作用大小的关键指标^[7].混凝土限制膨胀率的影响因素主要包括膨胀剂掺量、水胶比、养护温度、湿度、强度等级、胶凝材料、限制条件等,其中胶凝材料的研究主要集中在外掺粉煤灰、矿渣粉的量以及比例等因素^[8-9].本文主要研究内养护剂的协同膨胀效应对混凝土限制膨胀率的影响.按表1的配合比制备混凝土限制膨胀试件,拆模后前14 d放置水中养护,14 d后取出试件放于(20±2) °C、RH(60±5)%的恒温恒湿室养护.测试不同龄期混凝土的变形性能,试验结果列于图1中。

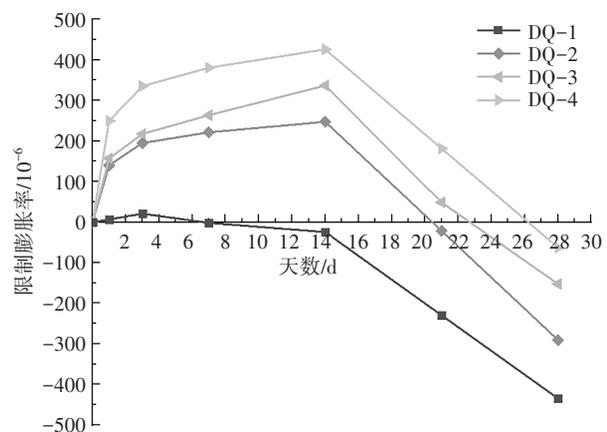


图1 补偿收缩混凝土限制膨胀率随时间变化曲线

Fig. 1 Curve of limited expansion rate of shrinkage-compensating concrete with time

图1的试验结果表明:

1)未掺膨胀剂的混凝土(DQ-1)早期变形不明显,7~14 d开始持续缓慢收缩变形,表现为混凝土的自收缩,14~28 d位于空气中的试件收缩变形显著增大并持续发展,28 d限制收缩率达435×10⁻⁶。

2)掺膨胀剂的DQ-2、DQ-3、DQ-4这3组在1~14 d表现为持续增长的膨胀变形;14 d限制膨胀率达到200×10⁻⁶以上,限制了后期的收缩;其中掺内养护剂的膨胀混凝土第21 d仍处于膨胀状态,明显减小了混凝土28 d的收缩变形。

3)掺内养护剂的补偿收缩混凝土变形性能明显优于单掺膨胀剂的混凝土,其中掺SAP内养护剂的DQ-3组变形值明显高于单掺膨胀剂的DQ-2组,21 d后DQ-3仍具有微膨胀变形,28 d其限制收缩率为

152×10^{-6} , 是单掺膨胀剂的混凝土收缩变形的 52%; 掺轻砂内养护剂的 DQ-4 组早期膨胀作用更明显, 其最大膨胀率可达 426×10^{-6} , 高出单掺膨胀剂混凝土膨胀变形的 72%, 28 d 收缩变形显著减小, 仅为单掺膨胀剂混凝土收缩率的 22%。

4) 从限制膨胀率看, 掺内养护剂为膨胀剂的水化提供了一定量的水分, 促使膨胀剂的水化反应充分进行。由于轻砂内养护剂密度大, 在混凝土拌合物中分布均匀, 凝结硬化过程中与反应物充分接触并缓慢释放水分, 促使膨胀剂能更好发挥膨胀效能。因此, 掺高强大吸水的轻砂内养护剂的混凝土补偿收缩效果优于掺 SAP 内养护剂组。

2.2 内养护剂对补偿收缩混凝土自收缩的影响

Davis^[10]对自收缩的明确定义为: 没有外界因素影响的情况下, 因混凝土内部本身的物理化学变化引起的自身体积变形。日本混凝土协会(JCI)指出混凝土初凝后水泥水化引起胶凝材料宏观体积的减小。自收缩是混凝土与外界无湿度交换, 且非温度及外部应力引起的体积变形^[11]。

本试验采用 $\phi 100 \times 400$ 塑料模具、内附薄膜隔离层, 每组 3 块, 按表 2 的配合比制备混凝土试件并置于 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的恒温室中, 测试混凝土自收缩变形随时间变化规律, 试验结果列于图 2 中。

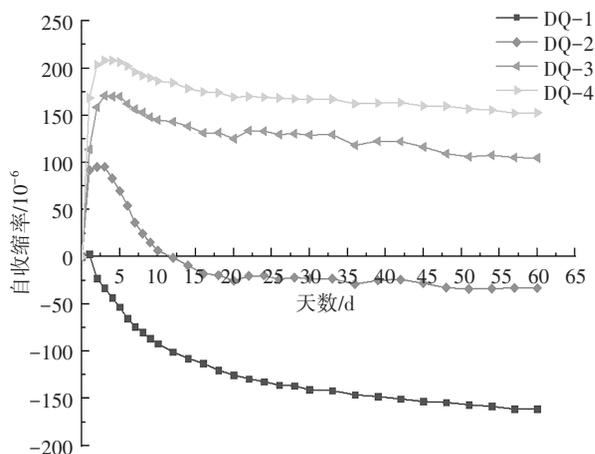


图2 补偿收缩混凝土自收缩率随时间变化曲线

Fig.2 Curve of autogenous shrinkage of shrinkage-compensating concrete with time

试验结果表明:

1) 由图 2 中的曲线可以看出, 不掺膨胀剂的基准混凝土(DQ-1)自收缩率最大, 且产生收缩的时间也最早; 掺膨胀剂混凝土(DQ-2)的自收缩变形性能明显改善, 试件的早期膨胀变形明显, 其 3 d 出现最大膨胀变形为 95×10^{-6} , 60 d 自收缩率比不掺膨胀剂

的对比组降低了 76.5%。

2) 由图 2 中 DQ-2、DQ-3、DQ-4 曲线可知, 试件的早期膨胀变形明显, 并在 3 d 达到最大值, 分别为 95×10^{-6} 、 159×10^{-6} 、 203×10^{-6} ; 随后 DQ-2 膨胀变形迅速回落, 14 d 即呈现收缩变形状态; 而掺内养护剂的混凝土 DQ-3、DQ-4 两组 60 d 依旧维持在较大膨胀变形状态且回落幅度缓慢。以 3 d 的变形为基准, DQ-2 组 60 d 自收缩率为 142%, DQ-3、DQ-4 两组 60 d 自收缩率后分别为 34%、25%。这是由于内养护剂的缓慢释水有效促进了膨胀剂和胶凝材料的水化和混凝土的膨胀, 充分发挥了内养护剂的协同膨胀效应。

3) 在自收缩条件下, 掺 SAP 内养护剂微膨胀剂混凝土(DQ-3)的最大膨胀率是不掺内养护剂的 1.67 倍, 掺 SAP 的混凝土 60 d 自收缩变形为 $+105 \times 10^{-6}$ (膨胀); 掺轻砂内养护剂的膨胀混凝土(DQ-4)最大膨胀率是不掺内养护剂的 2.14 倍, 其 60 d 自收缩变形为 $+153 \times 10^{-6}$ (膨胀), 比掺 SAP 混凝土的自收缩减小 45.7%。不难发现, 掺轻砂内养护剂比 SAP 内养护剂更有利于膨胀效应的发挥, 进一步减小了混凝土的自收缩变形。

2.3 内养护剂对补偿收缩混凝土干燥收缩的影响

研究表明, 干燥收缩是引起高性能混凝土开裂的重要原因之一。混凝土干燥收缩与水泥浆体内孔隙有关, 在干燥条件下, 水的蒸发速度可能超过混凝土向外泌水迁移的速度, 此时, 表层毛细孔中的水面降低, 随着蒸发的继续, 水分的失去从表层逐渐向混凝土内部不断发展, 毛细孔与凝胶孔中的吸附水相继失去。这些微细孔内水分的失去将在孔中产生毛细管负压, 并促使气液弯月面的形成, 从而对孔壁产生拉应力, 造成水泥浆体收缩^[12]。

按表 2 的配合比制备混凝土试件, 标养 3 d 后置于 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, RH(60 \pm 5)% 的恒温恒湿环境中进行干燥收缩试验, 试验结果列于图 3 中。

在水胶比对干燥收缩影响的研究中, 刘家彬等^[13]通过试验分析随着水胶比的降低, 干燥收缩率减小, 自收缩率增大。Baroghel-Bouny 等^[14]指出当水胶比由 0.45 降低至 0.30 时, 自收缩可增加 1 倍左右。

由图 3 可以看出:

1) 在干燥条件下, 各组自由变形的混凝土试件 7 d 前由于混凝土内部相对湿度较大, 干燥收缩率相差不大; 7 d 后在干燥环境条件下, 随着水分蒸发, 不掺膨胀剂的混凝土(DQ-1)组出现了较大的收缩, 56 d 干燥收缩率达到了 233×10^{-6} , 掺膨胀剂混凝土(DQ-2)的干燥收缩率有所减小。

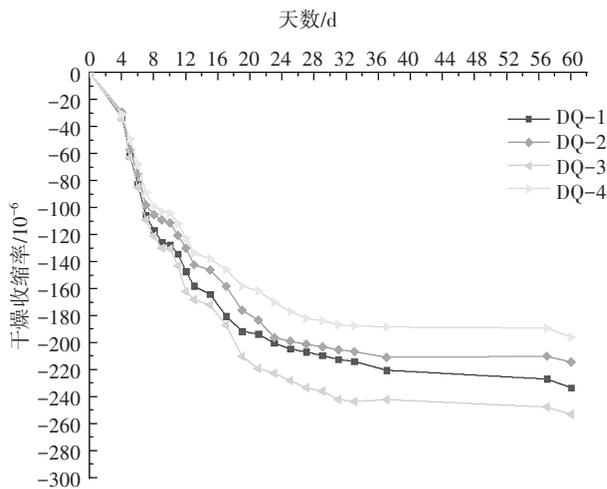


图3 补偿收缩混凝土干燥收缩率随时间变化曲线

Fig.3 Time-dependent drying shrinkage curve of shrinkage-compensating concrete

2) 掺入轻砂内养护剂的微膨胀混凝土(DQ-4)的干燥收缩率明显减少,一方面由于大吸水轻砂内养护剂缓慢释水,保持混凝土内部湿度,促进膨胀剂和胶凝材料的水化;另一方面由于轻砂密度大,可均匀地分布在混凝土中,且高强度轻砂还可起到限制收缩作用。

3) 在干燥和自由变形条件下,掺SAP内养护剂微膨胀混凝土(DQ-3)7 d后的干燥收缩率明显持续增大,其原因是SAP饱和状态下呈球形水珠,质轻易上浮,分布不均,水分蒸发速度较快,释水后形成微孔隙,导致后期干燥收缩率增大。

2.4 内养护剂对补偿收缩混凝土抗裂性能的影响

本研究采用大平板开裂试验,制作内边尺寸为400 mm×600 mm×100 mm的平面薄板型试件,裂缝诱导器顶端混凝土厚度为22 mm,模具四边与底板通过螺栓固定.混凝土试件浇筑后置于RH为(60±5)%、温度为(30±2)℃、风速为6 m/s的环境中加速开裂试验,24 h出现明显开裂,继续在室温环境下放置6 d,发现裂缝数量和宽度仍持续增长.采用混凝土裂缝检测仪进行测量,依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)进行计算,结果列于表3中。

试验结果表明,在标准规定的条件下,试验的各组混凝土均出现开裂现象.未掺膨胀剂的基准混凝土(DQ-1)开裂最为严重,最大裂缝宽度和总开裂面积均最大;与DQ-1相比,单掺膨胀剂的微膨胀混凝土(DQ-2)尽管裂缝总长度有所增加,但最大裂缝宽明显减小,总开裂面积减少20%。

表3 C40补偿收缩混凝土塑性开裂试验结果

Tab.3 Results of plastic cracking test of C40 Shrinkage compensating concrete

组别	裂缝总长度/mm	最大裂缝宽/mm	总裂缝数目/条	总开裂面积/(mm ² ·m ⁻²)	变化率/%
DQ-1	260	0.36	6	711	100
DQ-2	280	0.29	4	568	-20
DQ-3	300	0.25	2	443	-38
DQ-4	110	0.22	6	215	-70

复掺内养护剂的补偿收缩混凝土抗裂性明显改善,其中掺轻砂内养护剂的微膨胀混凝土(DQ-4)抗裂效果最好,裂缝总长度和最大裂缝宽均明显减小,总开裂面积减少了70%.而掺SAP的微膨胀混凝土(DQ-3),总开裂面积减少了38%,虽然比DQ-4组差,但明显好于不掺内养护剂的DQ-2组.由此可见,掺轻砂内养护剂可有效提高微膨胀混凝土的抗裂性能。

2.5 补偿收缩混凝土工作性能与力学性能

按表2的配合比拌制补偿收缩混凝土,测试其拌合物工作性能和硬化混凝土的力学性能,试验结果列于表4中。

表4 C40补偿收缩混凝土的工作性能与力学性能

Tab.4 Workability and mechanical properties of C40 Shrinkage compensating concrete

组别	抗压强度/MPa		劈裂抗拉强度(28 d)/MPa	坍落度/mm	扩展度/mm
	7 d	28 d			
DQ-1	39.6	48.0	3.06	205	640
DQ-2	39.8	50.7	3.61	220	485
DQ-3	43.7	49.1	3.34	255	625
DQ-4	42.9	52.3	3.32	222	625

1) 工作性能.设计并经调整后,表4中的4组混凝土拌合物均满足设计和施工要求.掺入膨胀剂的混凝土(DQ-2)保水性和粘聚性进一步改善.同时掺入SAP内养护剂和轻砂内养护剂的补偿收缩混凝土工作性能有所改善,在不降低粘聚性、保水性的同时,坍落度和扩展度有明显增大,可较好满足施工要求。

2) 力学性能.由表4可以看出,掺入SAP和轻砂内养护剂的补偿收缩混凝土力学性能均明显高于未掺膨胀剂的基准混凝土(DQ-1).与单掺膨胀剂的补偿收缩混凝土(DQ-2)相比,掺SAP内养护剂的膨胀

混凝土(DQ-3) 7 d抗压强度提高9.8%,28 d抗压强度相差不大;而掺轻砂内养护剂的微膨胀混凝土(DQ-4) 7 d强度提高了7.8%,28 d抗压强度提高了3.2%。

掺膨胀剂混凝土(DQ-2)的劈裂抗拉强度最高,复掺内养护剂的膨胀混凝土次之,但比基准组(DQ-1)有明显增大,由此可见,掺适量的膨胀剂和内养护剂有利于密实混凝土结构,提高混凝土劈裂抗拉强度。

3 内养护的协同膨胀效应分析

膨胀剂与水反应使混凝土早期产生体积膨胀。膨胀与强度是矛盾的统一,一定的膨胀可以密实混凝土结构,提高其强度和抗渗性,而且在限制条件下,早期膨胀可补偿混凝土的后期收缩,但过大的膨胀会降低混凝土强度,而过高的早期强度会抑制混凝土的膨胀。研究表明,膨胀剂掺量一定时,对混凝土工作性能和力学性能影响不大或略有提高^[15]。在约束变形条件下,在混凝土内部可产生0.2~0.7 MPa的预压应力,该应力与混凝土抗拉强度之和是否大于收缩拉应力决定了膨胀混凝土的抗裂性^[16]。本文采用氧化钙类膨胀剂,在水化过程中氧化钙水化变成氢氧化钙晶体使得混凝土产生体积膨胀。水硬化过程中,氢氧化钙晶体穿透周围物质向外生长而具有一定的结晶压力和吸水肿胀变形,在约束条件下转变为水泥石的自压应力而使水泥石结构具有较好的抗拉变形能力。水化后期,硬化后的浆体中包裹着竖条状的晶体,晶体和水泥凝胶体材料之间的填充、包裹作用使得整个体系的胶凝具有良好的密实性^[17]。试验结果表明,掺入适量膨胀剂不仅有利于混凝土密实性和力学性能的提高,还能改善混凝土的变形性能和抗裂性。

微膨胀混凝土补偿收缩性能的发挥取决于养护和限制条件。中高强混凝土水胶比低、结构致密,混凝土内部的水分不能满足膨胀剂的完全水化,且自收缩率随水胶比的减小而增大,即使充分地外养护,水分也难以进入混凝土内部,所以对低水胶比的中高强膨胀混凝土,采用内养护技术是十分必要的。内养护是在混凝土拌合过程中掺入高吸水轻砂或超强吸水树脂作为内养护剂,具有稳定混凝土内部水分平衡的作用。高美蓉等^[18]指出内养护可以提高混凝土内部的含湿量,从而有效地减少混凝土自收缩,提高混凝土的抗裂性。内养护技术可减小以钙矾石

为膨胀源混凝土的水化不充分导致反应延迟的风险。

试验结果表明,内养护膨胀混凝土明显提高混凝土的膨胀率,减小混凝土的自收缩率,有效改善了混凝土的抗裂性能。因此,掺内养护剂对膨胀混凝土具有良好的协同膨胀效应。高吸水轻砂内养护剂湿表观密度在2 000 kg/m³左右,吸水率大于30%,与混凝土中砂浆密度相近,可均匀地分布于混凝土中,能充分发挥其内养护作用,克服SAP内养护剂存在的质轻、分布不均、释水后产生内部孔隙等问题,保证了混凝土的致密性,试验结果表明强度较基准组有所提高。轻砂内养护剂在养护过程中缓慢释水,减小了水分过度外泌蒸发,延长了膨胀剂在膨胀反应过程中吸水反应的时间,促进了膨胀剂和胶凝材料的水化,增大了限制膨胀率,减小了自收缩,可有效补偿混凝土后期的收缩变形,从而提高混凝土抗裂性能。

4 结论

采用水胶比和砂率优化技术、高性能减水剂和优质掺合料复掺技术、膨胀剂与内养护剂协同膨胀减缩技术,配制了地铁叠合式墙板用C40补偿收缩混凝土,经研究具有良好的工作性、力学性能和变形性能。得出如下结论:

1)内养护剂对膨胀混凝土具有良好的协同膨胀作用。掺轻砂内养护剂的C40补偿收缩混凝土水中14 d限制膨胀率比基准组大 451×10^{-6} ,比仅掺膨胀剂组大 179×10^{-6} 。先水养14 d取出再放于恒温室14 d,其限制干缩率是基准组的14.6%,是仅掺膨胀剂组的21.6%,明显优于掺SAP内养护剂组。

2)内养护剂对膨胀混凝土具有明显的减小自收缩作用。掺轻砂养护剂的微膨胀混凝土的膨胀率最大,60 d仍处于膨胀状态且膨胀率为 153×10^{-6} ,明显优于不掺内养护剂或掺SAP的微膨胀混凝土。

3)不同配比的混凝土早期干燥收缩率变化差异不大,但7 d后出现明显的不同。掺轻砂内养护剂的微膨胀混凝土后期干燥收缩率明显减小,优于不掺膨胀剂、单掺膨胀剂或复掺SAP与膨胀剂的混凝土,其抗塑性开裂性能也有明显改善。

参考文献

- [1] 高培伟,卢小琳,唐明述. 膨胀剂对混凝土变形性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报,2006,38(2):251-255.

- GAO P W, LU X L, TANG M S. Effects of different expansive agents on mass concrete deformation property[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 38(2): 251-255. (In Chinese)
- [2] 胡翱翔,梁兴文,李东阳,等. 超高性能混凝土配合比设计及其受拉性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(3): 39-46.
- HU A X, LIANG X W, LI D Y, *et al.* Mix design method and uniaxial tensile characteristics of ultra-high performance concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(3): 39-46. (In Chinese)
- [3] 秦鸿根,高美蓉,庞超明,等. SAP内养护剂改善膨胀混凝土性能及其机理研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 394-399.
- QIN H G, GAO M R, PANG C M, *et al.* Research on performance improvement of expansive concrete with internal curing agent SAP and its action mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3): 394-399. (In Chinese)
- [4] 何锐,谈亚文,薛成,等. 以高吸水性树脂为混凝土内养护剂的研究进展[J]. 中国科技论文, 2019, 14(4): 464-470.
- HE R, TAN Y W, XUE C, *et al.* Research progress of superabsorbent polymers as internal curing agent in concrete[J]. China Science Paper, 2019, 14(4): 464-470. (In Chinese)
- [5] 朱长华,李享涛,王保江,等. 内养护补偿收缩混凝土的抗裂性能[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 1033-1037.
- ZHU C H, LI X T, WANG B J, *et al.* Crack resistance of internal curing shrinkage-compensating concrete [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 1033-1037. (In Chinese)
- [6] 张明亮,刘家彬,庞超明,等. 掺轻砂内养护剂的微膨胀混凝土性能研究[J]. 土木工程, 2020, 9(12): 1337-1344.
- ZHANG M L, LIU J B, PANG C M, *et al.* Research on properties of micro-expansive concrete mixed with light sand internal curing agent [J]. Civil Engineering, 2020, 9(12): 1337-1344. (In Chinese)
- [7] 吕慧君,邓朝飞,李江华. 浅析掺膨胀剂混凝土限制膨胀率的影响因素[J]. 混凝土, 2010(10): 31-33.
- LÜ H J, DENG C F, LI J H. Analysis of influencing factors on the restrained-expansion rate of concrete with expansion agent [J]. Concrete, 2010(10): 31-33. (In Chinese)
- [8] 吴志明. 新型膨胀剂在混凝土中限制膨胀率的影响因素研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2017: 2-10.
- WU Z M. Research on the influencing factors of the new expansive agent in the concrete to limit the expansion rate [D]. Beijing: Beijing University of Architecture and Architecture, 2017: 2-10. (In Chinese)
- [9] 王林,秦昊,吴志明. 胶凝材料的组成对混凝土膨胀剂限制膨胀率的影响[J]. 施工技术, 2018, 47(S1): 1371-1374.
- WANG L, QIN H, WU Z M. Influence of cementitious material composition on the limiting expansion rate of concrete expander [J]. Construction Technology, 2018, 47(S1): 1371-1374. (In Chinese)
- [10] DAVIS H E. Autogenous volume change of concrete [C]//Proceeding of the 43rd Annual American Society for Testing Materials. Atlantic City: ASTM, 1940: 1103-1110.
- [11] TAZAWA E. JCI technical committee report on autogenous shrink-age of concrete [C]//Proceedings of the International Workshop. London: Technical committee on Autogenous Shrinkage of Concrete. London: E & FN, 1998: 3-63.
- [12] 周永元,朱耀台,钱晓倩. 混凝土干缩的物理力学机制描述[J]. 施工技术, 2005, 34(S2): 21-23.
- ZHOU Y Y, ZHU Y T, QIAN X Q. Description of the mechanics of drying shrinkage of concrete [J]. Construction Technology, 2005, 34(S2): 21-23. (In Chinese)
- [13] 刘家彬,秦鸿根,郭飞,等. 配合比参数对C50箱梁混凝土收缩性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(1): 71-77.
- LIU J B, QIN H G, GUO F, *et al.* The influence of the mix ratio parameters on the shrinkage properties of C50 box girder concrete [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1): 71-77. (In Chinese)
- [14] BAROGHEL-BOUNY V, MOUNANGA P, KHELIDJ A, *et al.* Autogenous deformations of cement pastes: part II W/C effects, micro-macro correlations, and threshold values [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(1): 123-136.
- [15] 刘加平,张守治,田倩,等. 氧化镁复合膨胀剂对高性能混凝土变形特性的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(S2): 150-154.
- LLU J P, ZHANG S Z, TIAN Q, *et al.* Effects of magnesium oxide complex expansion agent on the deformation characteristics of high-performance concrete [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(S2): 150-154. (In Chinese)
- [16] 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 J J, ZHANG S W, CHENG L. Experimental study on the effect of curing conditions and expansion agent mixing method on the anti-cracking performance of concrete [J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2020, 51(6): 172-178. (In Chinese)
- [17] 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.* Study on the effect of CSA expansion agent on the performance of C80 high performance concrete and its expansion mechanism [J]. Concrete, 2013(2): 91-94. (In Chinese)
- [18] 高美蓉,秦鸿根,庞超明. 高性能混凝土内养护技术的研究现状[J]. 混凝土与水泥制品, 2009(3): 9-13.
- GAO M R, QIN H G, PANG C M. Research status of high performance concrete internal curing technology [J]. Concrete and Cement Products, 2009(3): 9-13. (In Chinese)