



## 沉管混凝土收缩及湿胀变形研究

李惠明<sup>1</sup>, 邓春林<sup>2</sup>, 方长远<sup>3</sup>, 李汉渤<sup>3</sup>

(1. 中交第四航务工程局有限公司, 广东广州 510230;

2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东广州 510230; 3. 中交四航局第二工程有限公司, 广东广州 510300)

**摘要:** 为分析沉管裂缝的成因及改进措施, 研究了沉管主体混凝土的干燥收缩和后浇带混凝土的限制膨胀性能, 并在试件收缩90 d后进行泡水试验, 得到混凝土在水中的湿胀变形情况。通过对混凝土收缩及膨胀的研究得出: 骨料种类、掺合料掺量、胶凝材料用量等参数对混凝土收缩量有较大影响; 混凝土泡水7 d后膨胀量为150~250  $\mu\text{e}$ , 泡水后混凝土在干缩室内二次干缩28 d的收缩量为150~200  $\mu\text{e}$ , 混凝土泡水膨胀量和二次收缩量与是否掺膨胀剂基本无关。

**关键词:** 沉管; 混凝土; 收缩; 膨胀

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0024-005

### Shrinkage and bulking of concrete for immersed tunnel

LI Hui-ming<sup>1</sup>, DENG Chun-lin<sup>2</sup>, FANG Chang-yuan<sup>3</sup>, LI Han-bo<sup>3</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Co, Ltd, Guangzhou 510230, China;

2. Engineering Technology Research Co., Ltd. of the Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

3. The Second Engineering Company of the Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** The shrinkage and expansion of concrete are conducted for analyzing the cracks of the immersed tube. The aggregate species, admixture dosage and amount of cementing materials have great impacts on concrete shrinkage. The expansion of concrete is 150~250  $\mu\text{e}$  after immersed in water for 7 days, and the dry shrinkage of 150~200  $\mu\text{e}$  are measured after being pulled out from water and stored in dry the shrinkage room for 28 days. The amount of expansion and secondary dry shrinkage of the concrete relate little to the expansive agent.

**Key words:** immersed tunnel; concrete; shrinkage; bulking

近年来, 国内建设了许多跨海跨江隧道, 大量采用沉管隧道结构形式。国内某沉管隧道在干坞内预制施工, 为减小和避免混凝土收缩及不均匀沉降引起开裂, 采取设置后浇带分期浇筑的方式, 管段沿纵向分为5个节段, 每个节段长约16 m, 两节段之间设1.5 m的后浇带, 后浇带采用膨胀混凝土。根据规范要求<sup>[1]</sup>, 后浇带混凝土14 d水中限制膨胀量应大于250  $\mu\text{e}$ 。由于工艺的限制, 沉管节段主体分2层浇筑, 顶板一般比底板晚1~2个月浇筑。沉管混凝土从首节段开始浇筑至整个管节浇筑完成大约需要4~6个月, 浇筑完成后

2~3个月才能舾装沉放, 从首节段开始浇筑至舾装需6~9个月。总体来讲, 沉管施工工艺复杂, 从浇筑至舾装需要经历较长时间的暴露干燥。

沉管浇筑后在长期干燥过程中产生的收缩及早期水化热导致的残余温度应力的共同作用是沉管裂缝产生和扩展的重要原因, 之前的研究主要针对早期水化热导致的温度裂缝, 沉管混凝土长时间干燥导致的收缩裂缝却研究较少。本文从混凝土在不同湿度环境的收缩及膨胀方面研究了沉管裂缝的成因及改进措施。具体研究了沉管主体C40混凝土(简称主体混凝土)及后浇带C45膨

收稿日期: 2012-12-28

作者简介: 李惠明(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事土木工程施工技术管理。

胀混凝土(简称后浇带混凝土)的干缩及湿胀变形,研究了降低不利体积变形、提高有利变形的措施,对沉管结构裂缝的控制有一定的指导意义。

## 1 试验方法及过程

沉管主体混凝土采用表1中1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>配合比,参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》<sup>[2]</sup>成型100 mm×100 mm×515 mm的混凝土试件,

测试混凝土3 d、7 d、14 d、28 d、56 d、90 d收缩量。其中2<sup>#</sup>配合比用花岗岩和石灰岩骨料分别成型收缩试件,其余配合比均只用花岗岩骨料成型混凝土试件。试件在温度(20±2)℃,湿度(60±5)%的干缩室内放置90 d后,移入水池中浸泡,测定浸泡0~7 d试件的体积变形;浸泡7 d后取出试件重新放入干缩室内,测定混凝土从水中取出后0~28 d内的二次收缩量。混凝土配合比及性

表1 混凝土配合比及性能

序号	编号	胶材用量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	矿粉/ (kg·m <sup>-3</sup> )	膨胀剂/ (kg·m <sup>-3</sup> )	坍落度/ mm	28 d强度/ MPa
1 <sup>#</sup>	C100	400	0.40	100%	0	0		200	60.5
2 <sup>#</sup>	C65F20K15	400	0.40	65%	20%	15%		210	63.5
3 <sup>#</sup>	C58F20K22	420	0.38	58%	20%	22%		210	62.6
4 <sup>#</sup>	C50F20K30	420	0.38	50%	20%	30%		190	63.2
5 <sup>#</sup>	XCF2P	420	0.38	72%	18%		10%	210	60.0
6 <sup>#</sup>	XCF3P	420	0.38	71%	18%		11%	205	56.4
7 <sup>#</sup>	XCF4P	420	0.38	72%	18%		10%	210	57.4

能见表1。

沉管后浇带混凝土强度等级为C45,参照《混凝土膨胀剂》<sup>[3]</sup>附录B测定掺膨胀剂混凝土限制膨胀和收缩试验方法,成型100 mm×100 mm×300 mm试件,试件中心埋置一根 $\phi$ 10 mm的钢筋,测定后浇带混凝土的限制膨胀及收缩性能。试件在水中养护14 d;之后放入干缩室测定14~90 d的收缩量;90 d后将试件放入水池浸泡,并测定试件浸泡0~7 d的膨胀量;浸泡7 d后取出试件重新放入干缩室内,测定混凝土从水中取出后0~28 d内的二次收缩量。

## 2 结果与分析

### 2.1 主体混凝土收缩及湿胀变形

本节研究了骨料类型,掺合料掺量对主体混凝土收缩量的影响,并测定了混凝土干燥90 d后泡水的湿胀变形,及湿胀后0~28 d二次收缩量。

#### 2.1.1 主体混凝土收缩量

1) 骨料对混凝土收缩量的影响。

骨料种类对混凝土收缩量的影响见图1。90 d时,花岗岩骨料混凝土的收缩量比石灰岩骨料混凝土大100  $\mu\text{e}$ 左右。骨料品种对混凝土收缩量的影

响较大,一般来说各种骨料拌制混凝土的收缩量从小到大的顺序是:石英岩、石灰岩、花岗岩、玄武岩、砾石、砂岩<sup>[4]</sup>。沉管属于超长大体体积构件,后期混凝土裂缝主要由收缩主导,在原材料其它性能均满足要求时,宜尽量选用收缩量小的骨料。

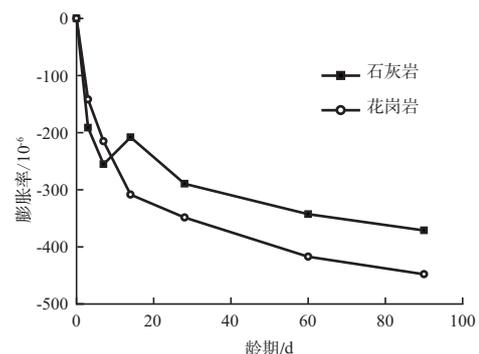


图1 骨料种类对混凝土收缩量的影响

2) 矿物掺合料对混凝土收缩量的影响。

矿物掺合料掺量对混凝土收缩量的影响见图2。由图中数据可知,强度等级为C40的混凝土,不掺矿物掺合料的C100配合比0~60 d收缩量较小,90 d收缩量与C65F20K15配合比基本相当。据资料显示<sup>[5-8]</sup>,随着矿物掺合料掺量的增大,混凝土的收缩量逐渐增大。图2数据可知,0~30 d混凝土的收

缩量随着掺合料掺量的增大逐渐增大,但是90 d时,混凝土收缩量主要受混凝土中胶凝材料总用量影响。胶凝材料用量为 $400 \text{ kg/m}^3$ 的1#、2#配合比90 d收缩量基本相当,约为 $420 \mu\epsilon$ ;胶凝材料用量为 $420 \text{ kg/m}^3$ 的3#、4#配合比90 d收缩量基本相当,约为 $470 \mu\epsilon$ 。总之,0~30 d内,掺合料掺量增大会增大混凝土的收缩量,但90 d时混凝土收缩量受胶凝材料总量的影响较大。

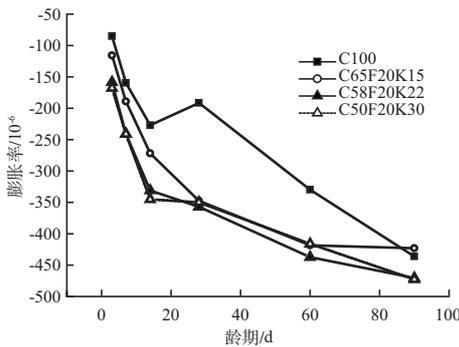


图2 矿物掺合料对混凝土收缩量的影响

### 2.1.2 主体混凝土湿胀变形

图3是混凝土在干缩室收缩90 d后泡水养护7 d的体积变形测试结果。由图中数据可知,混凝土浸泡1 d膨胀量达到 $150 \mu\epsilon$ ,浸泡7 d的膨胀量约为 $200 \sim 250 \mu\epsilon$ ,混凝土湿润过程的体积膨胀(简称湿胀)变形明显要比干燥过程的体积收缩快。这主要原因是<sup>[9]</sup>: 1)干燥过程混凝土内部的水分主要是通过扩散作用进行传输,而在湿润过程中,混凝土表面与液态水直接接触,在表面毛细吸力的作用下,水分很快进入混凝土内部; 2)墨水瓶效应,在混凝土的孔隙网络中存在墨水瓶孔,墨水瓶孔的存在使得与小孔连接的大孔内的水分不易向外扩散而容易被填充。

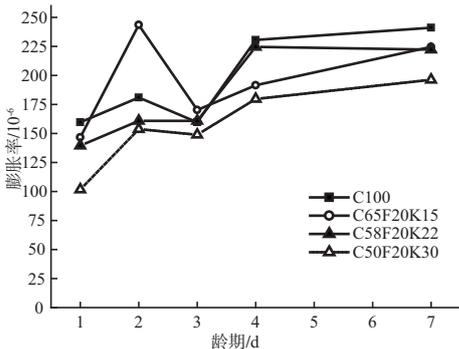


图3 主体混凝土水中湿胀变形

### 2.1.3 主体混凝土二次收缩量

图4是沉管混凝土泡水7 d后再次干燥时的收缩变形。混凝土二次干燥28 d的收缩量为 $150 \sim 200 \mu\epsilon$ ,图2中混凝土最初28 d的收缩量达到将近 $350 \mu\epsilon$ ,泡水后28 d二次收缩量比混凝土最初28 d收缩量大的主要原因是:最初28 d内,混凝土的收缩包含了化学收缩和干燥收缩,而泡水膨胀后,混凝土的化学收缩已基本完成,产生的收缩主要是干燥收缩。

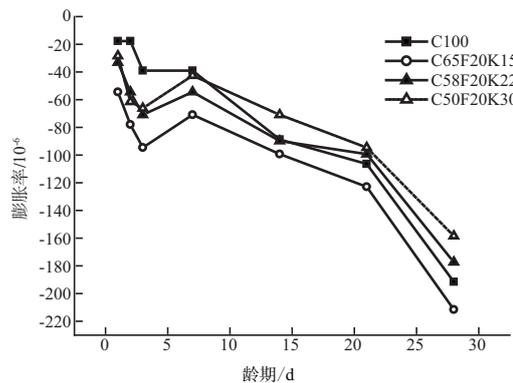


图4 主体混凝土二次收缩量

### 2.1.4 分析与讨论

混凝土试件成型后,0~90 d置于干缩室内,91~97 d置于水中,98~125 d也是置于干缩室内。主体混凝土整个125 d的体积变形见图5。

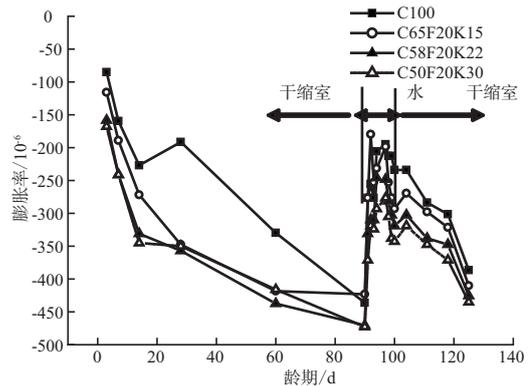


图5 主体混凝土全过程体积变形

从图5可知,掺合料总量达到40%以上的混凝土,14 d的收缩量已达到 $300 \mu\epsilon$ 左右,沉管底板浇筑后,短时间内快速完成大部分收缩,后期变形较小,顶板浇筑时底板已完成的收缩量就是顶板与底板的收缩差,这种相对变形会导致顶板受到很大的纵向约束应力,浇筑界面以上的区域非常容易产生竖向裂缝。沉管在干坞内存放的时间越

长, 混凝土的收缩量会继续增大, 沉管裂缝可能会扩张或增多。

混凝土干缩90 d后, 泡水7 d膨胀达到200 ~ 250  $\mu\epsilon$ 。在分层浇筑的混凝土结构, 在浇筑顶层混凝土前, 可以考虑通过泡水使底层混凝土膨胀, 底层混凝土的二次干缩可以抵消部分顶层混凝土的收缩量, 从而减少底层与顶层混凝土的收缩差, 减小混凝土开裂的风险。同时, 沉管起浮后混凝土泡水膨胀可以使部分细微裂缝自愈, 较大裂缝虽不能完全胶合, 但可逐渐自愈, 渗水量逐渐减小<sup>[10]</sup>。总之, 应尽量缩短分层浇筑时间间隔, 特别要加强底层混凝土养护, 缩小底层混凝土与顶层混凝土的收缩差; 沉管预制结束后, 应尽快舾装沉放, 减少收缩裂缝的产生。

### 2.2 后浇带混凝土收缩及湿胀变形

后浇带采用膨胀混凝土, 进行了不同养护条件下混凝土膨胀量的研究, 并选取了3种膨胀剂进行膨胀效果对比试验。

#### 2.2.1 养护方法的对比

国家标准<sup>[3]</sup>中限制膨胀试件前14 d是在水中养护, 但实际工程中, 一般无法泡水养护, 养护条件对混凝土膨胀量的影响见图6。由图中可以看出, 泡水养护14 d混凝土膨胀量达到260  $\mu\epsilon$ ; 而混凝土标准养护(温度20  $\text{^\circ C} \pm 2 \text{^\circ C}$ , 湿度95%) 14 d膨胀量仅为180  $\mu\epsilon$ ; 试件成型后, 立即放入干缩室, 14 d时混凝土不仅不会产生膨胀, 反而产生了350  $\mu\epsilon$ 收缩。由此可见, 养护对膨胀混凝土至关重要, 沉管后浇带应要加强养护, 必要时可设置自动喷淋养护系统, 并将养护时间延长至28 d左右。

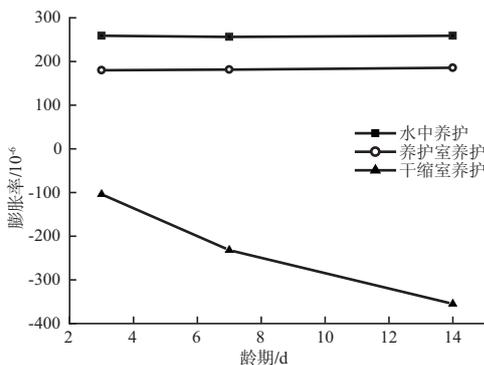


图6 养护条件对混凝土膨胀量的影响

#### 2.2.2 不同膨胀剂对比

后浇带混凝土试配过程中, 选择了3种常用膨胀剂进行对比试验, 结果见图7所示。由图可知, XCF2P和XCF3P混凝土14 d膨胀量满足要求, 而XCF4P膨胀剂不满足要求。膨胀剂产生足够的膨胀是达到使用效果的重要因素, 使用膨胀混凝土应注意以下问题: 1) 选择合格的膨胀剂; 2) 加强膨胀剂的检测及混凝土膨胀量的检测; 3) 膨胀剂应干燥储存, 防止失效。

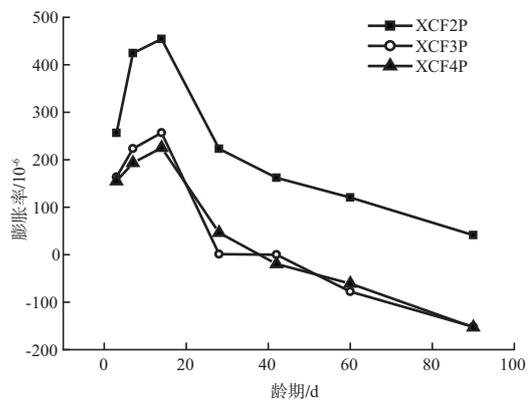


图7 不同膨胀剂的膨胀量

#### 2.2.3 后浇带混凝土湿胀变形

图8是后浇带混凝土在干缩室内养护至90 d后泡水的体积变形, 由图可知, 后浇带混凝土在水中浸泡7 d会产生约150 ~ 200  $\mu\epsilon$ 的膨胀, 泡水过程中混凝土的体积膨胀与膨胀剂的类型关系不大, 笔者认为泡水后膨胀并非膨胀剂的作用, 主要是混凝土的湿胀变形。混凝土膨胀量的绝对值150 ~ 200  $\mu\epsilon$ 比图3中主体混凝土的在水中自由膨胀200 ~ 250  $\mu\epsilon$ 小, 这主要是限制膨胀试件所受的限制应力限制了部分混凝土的膨胀。

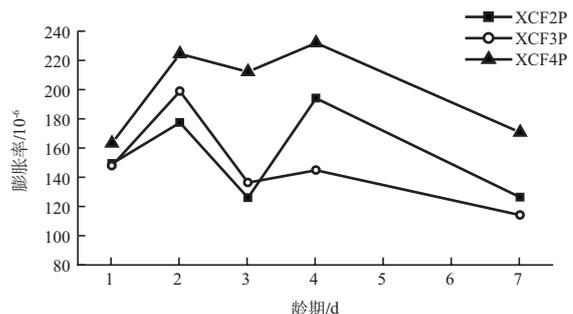


图8 后浇带混凝土90 d后泡水膨胀量

### 2.2.4 后浇带混凝土泡水后二次收缩量

图9是后浇带混凝土泡水7 d后重新放入干缩室的二次收缩量, 由图可知, 28 d时产生约150  $\mu\epsilon$  的收缩, 这与图4中主体混凝土产生约150~200  $\mu\epsilon$  基本相当, 笔者认为, 收缩主要受混凝土的湿度主导。

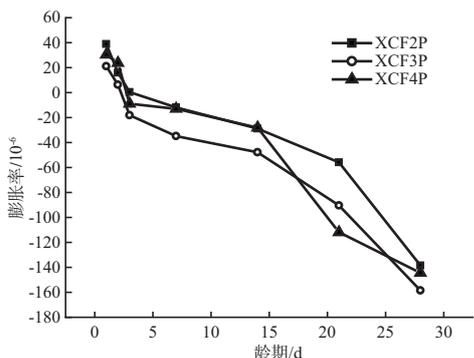


图9 后浇带混凝土二次收缩量

### 2.2.5 分析与讨论

后浇带混凝土试件成型0~125 d全过程的体积变形见图10所示。由图可知, 后浇带混凝土早期的膨胀量与膨胀剂的品质直接相关, 后浇带混凝土在干缩室内发生明显收缩, 至90 d时, 后浇带混凝土收缩量达到350~400  $\mu\epsilon$ , 收缩量与主体混凝土基本相当。后浇带混凝土泡水后也会发生湿胀变形, 限制膨胀量达到150~200  $\mu\epsilon$ , 有利于后浇带混凝土裂缝的愈合。

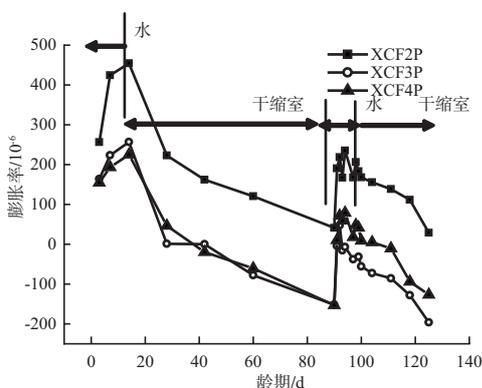


图10 后浇带混凝土全过程的体积变形

### 3 结论

1) 石灰石骨料混凝土长期收缩量比花岗岩骨料混凝土小; 矿物掺合料会增大混凝土0~30 d的收缩量, 但混凝土90 d的收缩量主要受胶凝材料总量影响。

2) 混凝土收缩90 d后泡水的膨胀量及泡水后的二次收缩量与是否掺膨胀剂基本无关; 混凝土泡水7 d后膨胀量为150~250  $\mu\epsilon$ , 泡水后混凝土在干缩室内二次干缩28 d的收缩量为150~200  $\mu\epsilon$ 。

3) 缩短底层和顶层混凝土浇筑时间间隔, 并加强混凝土养护, 减少底层与顶层混凝土的收缩差, 对分层浇筑的沉管或其它分层浇筑的混凝土结构的裂缝控制至关重要。

### 参考文献:

- [1] GB 50119—2003 混凝土外加剂应用技术规范[S].
- [2] GBT 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S].
- [3] GB 23439—2009 混凝土膨胀剂[S].
- [4] 惠荣炎, 黄国兴, 易冰若. 混凝土的徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- [5] 李家和, 欧进萍, 孙文博. 掺合料对高性能混凝土早期自收缩的影响[J]. 混凝土, 2002 (5): 9-10,14.
- [6] 闫广天. 掺合料对混凝土体积稳定性的影响[J]. 铁道大学学报: 自然科学版[J]. 2012, 25(1): 89-93.
- [7] 高小建, 巴恒静. 加掺合料高性能混凝土早龄期收缩特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(12): 1 615-1 618.
- [8] Lim S N, Wee T H. Autogenous shrinkage of ground granulated blast furnace slag concrete[J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(5): 587-593.
- [9] 高原, 张君, 孙伟. 干湿循环下混凝土湿度与变形的测量[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52(2): 144-149.
- [10] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

(本文编辑 郭雪珍)