

Y 型钢管混凝土配比优化试验研究

Experimental Study on Optimization of Concrete Ratio of Y-Shaped Steel Pipe

焦立颖^{1,2}, 宋少民¹, 马永胜³, 张全贵²

(1. 北京建筑大学 建筑结构与环境修复功能材料北京市重点实验室, 北京 100044; 2. 水泥混凝土节能利废技术北京市重点实验室, 北京 100096; 3. 北京建筑材料工业情报技术研究所, 北京 100005)

摘要: 随着钢结构日益增多, 钢管混凝土结构因管内混凝土收缩引起的脱空一直是工程界的难题, 本研究依托北京市昌平区大型商业建筑 Y 型钢管柱, 通过优选原材料品种、掺加高性能膨胀剂和优质矿物掺合料、使用缓凝型减水剂对钢管混凝土配合比进行了优化研究, 得到了钢管混凝土的配合比一系列优化研究数据。结果表明: 当膨胀剂掺量为 8% 时, 混凝土的工作性能优异, 满足钢管混凝土浇筑施工要求; 密闭状态下混凝土的自由膨胀率和限制膨胀率在 7 d 最大, 14 d 趋于稳定, 混凝土的膨胀值可抵抗混凝土的收缩, 钢管混凝土综合性能最优。当膨胀率掺量为 8% 时, 钢管混凝土的管壁与核心混凝土贴合密实, 未产生脱空。优化后的配合比可用于实际工程。

关键词: 钢管混凝土; 配合比; 膨胀剂; 限制收缩; 应变

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 01-0039-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.008

JIAO Liying^{1,2}, SONG Shaomin¹, MA Yongsheng³, ZHANG Quanguai²

(1. Beijing Key Laboratory of Building Structure and Environmental Remediation Functional Materials, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Key Laboratory of Cement Concrete Energy Saving and Waste Recycling Technology, Beijing 100096, China; 3. Beijing Institute of Building Materials Industry Information Technology, Beijing 100005, China)

Abstract: With the increasing number of steel structures, the problem of voids caused by the shrinkage of concrete inside the steel tube concrete structure has always been a challenge in the engineering field. This study relies on the Y-shaped steel tube columns of large commercial buildings in Changping District, Beijing, and optimizes the mix proportion of steel tube concrete by selecting raw material varieties, adding high-performance expansion agents and high-quality mineral admixtures, and using retarding water reducers. A series of optimization data for the mix proportion of steel tube concrete have been obtained. The results show that when the dosage of expansion agent is 8%, the workability of concrete is excellent and meets the requirements of steel tube concrete pouring construction; The free expansion rate and restricted expansion rate of concrete in a closed state reach their maximum at 7 days and tend to stabilize at 14 days. The expansion value of concrete can resist the shrinkage of concrete, and the comprehensive performance of steel tube concrete is optimal. When the expansion rate is 8%, the wall of the steel tube concrete is

作者简介: 焦立颖 (1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 混凝土研发。

通信作者: 宋少民 (1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 高性能混凝土尾矿砂石。

收稿日期: 2023-04-17

材料科学

tightly adhered to the core concrete, no void occurred. The optimized mix ratio can be used in practical engineering.

Key words: concrete filled steel tube; mix proportion; expander; restricted contraction; strain

0 引言

钢管混凝土结构由于混凝土受到钢管壁的紧箍作用,强度和韧性可大幅度提高^[1]。钢管中填充了混凝土,可提高结构的稳定性并具有较好的力学性能,且施工便利,节约用钢量,钢管混凝土的综合性价比优于以上两种材料单独使用^[2]。由于钢管和混凝土组合结构具有承载能力高、塑性和韧性好、经济性好、施工方便、耐火性能好等一系列优越性能^[3],已被广泛地应用于各个工程建设领域。

国内外学者对钢管混凝土结构进行了多方面的研究,但对钢管内核心混凝土的研究相对较少。Morino 等^[4]对钢管内核心混凝土的收缩和徐变进行了试验研究,提出了直径为 1.2 m 内的钢管核心混凝土收缩应变的计算公式;胡曙光等^[5]较为系统地研究了钢管混凝土材料的组成、结构与性能的关系,阐明了混凝土强度性能、膨胀性能与工作性能的相互关系和作用机理,提出了核心混凝土掺加 8%~10% 膨胀能大、膨胀期长的膨胀剂,使核心混凝土产生一定的体积膨胀,避免钢管与混凝土的脱空;阎培渝等^[6]在“中国尊”C70 钢管混凝土中,加入了 0.38 kg/m³ 的 SAP (高分子吸水树脂,吸水率为 30%) 来降低钢管混凝土的内干燥,减小混凝土的自收缩,降低钢管混凝土脱空的风险。

基于此,结合 C50 钢管混凝土施工开展配合比优化试验研究,采用正交试验方法,对不同掺量的膨胀混凝土配合比进行自由膨胀率和限制膨胀率试验,并模拟实际工程温度变化,采用变化的温度进行混凝土限制膨胀率试验,设计出了满足工程要求的 C50 微膨胀钢管混凝土配合比。

1 工程概况及要求

以昌平区综合性商业金融服务项目为例,一层外沿为钢管混凝土,钢管混凝土呈 Y 字型,最大高度 17.20 m,根部梁高 3.70 m,边跨底板加厚。管内灌注 C50 自密实微膨胀混凝土。钢管直径为 2.50 m,横截面如图 1 所示,Y 型钢管构造示意图如图 2 所示。

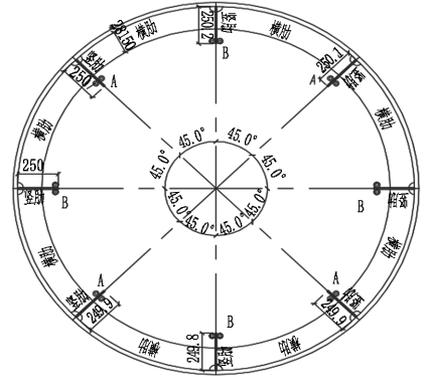


图 1 钢管横断面构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross-sectional structure of steel pipe

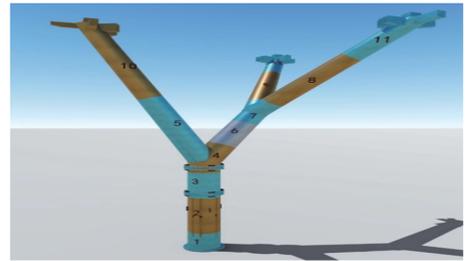


图 2 Y 型钢管构造示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Y-shaped steel pipe structure

钢管膨胀混凝土性能设计要求:工作性能指标要求见表 1;28 d 立方体抗压强度 ≥ 50 MPa;密闭环境下混凝土自由膨胀率控制在 $2 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$ 之间,其稳定收敛期小于 60 d。

表 1 钢管混凝土工作性能要求

Table 1 Performance requirements for steel reinforced concrete

坍落度/cm	扩展度/cm		U 形箱 填充高度 /cm	凝结时间/h	
	入泵	3 h		初凝	终凝
22~26	≥ 18	50~65	≥ 30 无障碍	12~18	14~20

2 C50 钢管混凝土配合比设计

根据工程结构特点,采用高膨胀能膨胀剂、高性能聚羧酸减水剂和大掺量粉煤灰的配制技术,即利用膨胀剂使混凝土产生较高的膨胀率,利用缓凝高效减水剂和较高掺量的粉煤灰降低混凝土水化热,减少钢管混凝土冷缩值^[7]。根据工程设计要求的工程性能和力学性能,采用正交试验确定配合比,然后掺加不同掺量的膨胀剂进行混凝土膨胀性能试验,确定满足工程需要的膨胀混凝土配合比。

2.1 基础配合比用原材料

胶凝材料采用 P·O 42.5 水泥, 其主要指标见表 2; 粉煤灰采用 I 级粉煤灰, 性能指标见表 3, 颗粒形貌如图 3 所示; 细骨料选用河砂, II 区中砂, 其物理性能及级配见表 4、图 4; 粗骨料采用石灰岩碎石, 5~10 mm、10~20 mm 粒径按 4:6 比例混合, 性能指标见表 5; 外加剂选聚羧酸系高性能减水剂, 性能指标见表 6。

表 2 水泥主要性能指标

Table 2 Main performance indicators of cement

标准稠度 用水量 /%	凝结时间 /min		比表面积/ (m ² /g)	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
	初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
28	165	255	375	5.8	8.5	26.9	59.9

表 3 粉煤灰主要性能指标

Table 3 Main performance indicators of fly ash

密度 /(g/cm ³)	活性指数 /%	需水量比 /%	烧失量 /%
2.30	375	90	2.9

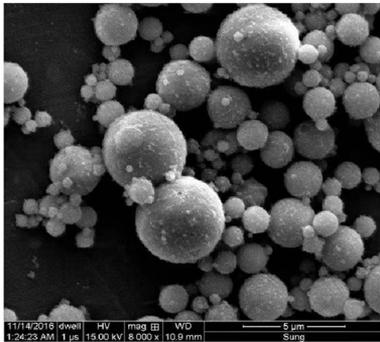


图 3 粉煤灰微观结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of microstructure of fly ash

表 4 砂主要性能指标

Table 4 Main performance indicators of river sand

含泥量 /%	泥块含量 /%	细度模数	表观密度 /(kg/m ³)	堆积密度 /(kg/m ³)
2.1	0.5	2.8	2 670	1 500

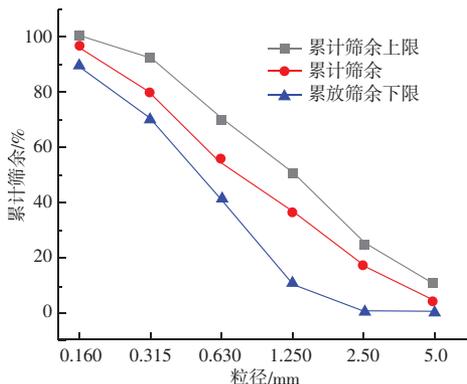


图 4 河砂级配

Fig. 4 River sand gradation

表 5 粗骨料指标

Table 5 Physical properties index of coarse aggregate

压碎指标 /%	针片状含量 /%	含泥量 /%	表观密度 /(kg/m ³)	吸水率 /%	空隙率 /%
5.5	5	0.1	2 700	1.0	32

表 6 聚羧酸系高性能减水剂(缓释型)性能指标

Table 6 Performance indicators of polycarboxylate high-performance water reducer (slow-release type)

减水率 /%	含固量 /%	凝结时间 差/min	1 h 经时变 化量/mm	收缩率比 /%	泌水率比 /%	抗压强度比/%	
						7 d	28 d
28	20	180	15	107	26	158	151

2.2 基础配合比的优化设计

基础配合比采用正交试验设计, 试验因素根据配合比设计经验选用 4 因素 3 水平, 即 L₉(3⁴)。正交因素水平见表 7。以 28 d 抗压强度确定最优因素水平组合, 确定基础配合比。

表 7 正交因素水平表

Table 7 Orthogonal factor level table

水平	试验因素			
	A 水胶比	B 粉煤灰掺量/%	C 砂率/%	D 外加剂掺量/%
1	0.30	25	40	1.7
2	0.32	30	44	2.0
3	0.34	35	48	2.3

根据以上试验因素, 最终确定的配合比见表 8, 试验结果见表 9。

表 8 基础配合比及试验结果

Table 8 Basic mix proportion and test results/(kg/m³)

水	水泥	砂	石	粉煤灰	减水剂
160	365	780	1130	155	11.0

表 9 试验结果

Table 9 Test results

坍落度、扩展度/mm 出机	U 形箱填 充高/cm	T ₅₀ /s	含气量 /%	28 d 抗压 强度/MPa
260/660	230/610	10	2.3	66.3

2.3 钢管混凝土膨胀性能试验

钢管混凝土膨胀性能试验包括基本性能试验、密闭状态下膨胀性能试验、变温状态下的膨胀性能试验。

选用低碱 CSA-II 型低碱高性能膨胀剂, 膨胀源主要为 CaO 和无水硫铝酸钙, 水中 7 d 限制膨胀率为 5.0×10^{-6} , 膨胀剂的化学组分及性能指标满足要求。

2.3.1 钢管混凝土基本性能试验

采用 6%、8%、10% 三个膨胀剂掺量进行膨胀混凝土的工作性能及力学性能对比试验, 相关文献 [8] 表明, 混凝土含气量小于 2.5%, 有利于混凝土

材料科学

的密实。试拌结果见表 10。结果显示, 各组拌合物的含气量均小于 2.5%, 相关文献 [7] 表明, 混凝土含气量小于 2.5%, 有利于钢管混凝土密实。6%、8% 膨胀剂掺量的混凝土 28 d 抗压强度略有提高, 因为膨胀性水化产物填充了混凝土内部的孔隙, 增加了混凝土的密实性; 膨胀剂 10% 掺量的混凝土抗压强度有所下降, 幅度不大, 膨胀性水化产物使混凝土内部疏松, 降低了内部结构的密实性, 混凝土强度降低^[9]。尤其是密闭状态下, 10% 掺量的膨胀剂没有外部水分供应, 胶凝材料水化不完全, 强度降低明显。

表 10 掺膨胀剂混凝土性能试验结果

Table 10 Performance test results of concrete mixed with expansion agent

编号	膨胀剂掺量/%	坍落度/扩展度/mm		U 形箱填充高度/mm
		出机	3 h	
1	0	260/650	230/580	10
2	6	265/630	240/600	10
3	8	255/640	230/550	20
4	10	260/650	210/530	20

T ₅₀ /s	初凝时间/h	含气量/%	抗压强度/MPa	
			28 d	绝湿 28 d
5	16.5	1.8	66.3	65.2
6	16.1	2.0	68.2	66.3
8	15.5	1.6	67.4	66.1
10	15.2	1.5	64.1	60.1

2.3.2 密闭状态下混凝土膨胀性能试验

针对密闭状态下膨胀性能试验, 核心混凝土在钢管内是密闭状态, 与外界基本没有水分交换。因此对膨胀混凝土进行密闭状态下的自由膨胀率和限制膨胀率试验, 如图 5 和图 6 所示。自由膨胀率试验方法参考 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的接触法。混凝土拌合物成型后, 立即用塑料薄膜覆盖, 1 d 后脱模, 先用石蜡封面, 然后用塑料薄膜包裹缠绕, 每个试件固定在底座上并预埋金属测头, 安装千分表后进行



图 5 自由膨胀率试验



图 6 限制膨胀率试验

Fig. 5 Free expansion rate test

Fig. 6 Limiting expansion rate test

测量, 试验温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。限制膨胀率试验方法参照 GB/T 23439—2017《混凝土膨胀剂》中的试验方法进行。混凝土拌合物成型后立即用塑料薄膜覆盖, 1 d 后脱模, 测量初长。测试完毕后, 放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的试验室待测。

由图 7 可知, 未添加膨胀剂的混凝土表现出了收缩, 随着龄期的增加, 收缩加大, 主要为混凝土的自收缩。掺加膨胀剂的混凝土出现了良好的膨胀性能, 随着膨胀剂掺量增加, 混凝土自由膨胀率显著增大, 主要发生在 7 d 内, 14 d 达到了最大值。因为膨胀剂水化主要集中在混凝土硬化早期, 此时混凝土中水分较多, 膨胀组分水化较充分, 膨胀性能发挥良好。到了 14 d 以后, 随龄期的增加, 混凝土自由膨胀率有所减小, 主要因为混凝土中膨胀组分基本水化完成, 膨胀稳定, 但混凝土毛细孔中的水分被胶材水化消耗, 其内部湿度下降, 自收缩加大。到了 28 d 以后, 胶材水化渐渐完成, 收缩变形稳定, 因此总的自由膨胀变形也趋于稳定^[10]。10% 掺量的膨胀混凝土自由膨胀率大, 8% 掺量可以满足工程设计要求; 混凝土限制膨胀规律与自由膨胀的规律接近, 掺 8% 膨胀剂 28 d 龄期的混凝土限制膨胀率为自由膨胀率的 76%, 掺 10% 膨胀剂 28 d 龄期的混凝土限制膨胀率为自由膨胀率的 82%。综合各试验结果, 混凝土膨胀剂掺量为 8% 最佳。

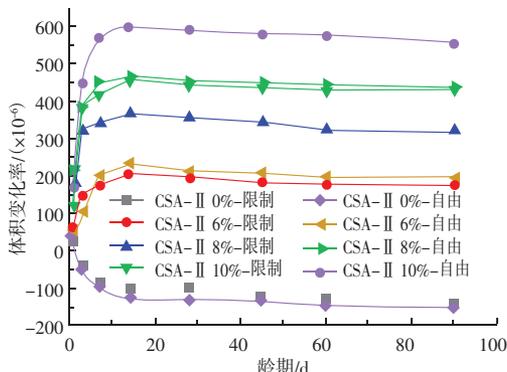


图 7 不能掺膨胀剂混凝土体积变化率
Fig. 7 Volume change rate of concrete with different dosage of expansion agent

2.3.3 变温状态下混凝土膨胀性能试验

针对变温状态下混凝土膨胀性能试验, 考虑到钢管混凝土属于大体积混凝土, 水化热引起的混凝土绝热温升大, 内部温度高, 而标准试验温度下的混凝土膨胀性能试验与工程实际温度不匹配, 因此,

有必要模拟钢管混凝土内部实际温度历程进行变温状态下混凝土膨胀性能的试验。用 Ansys 有限元分析软件,对截面最大 $2.5\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的一截钢管进行温度场分析,得到 8% 膨胀剂掺量混凝土中心点的温度曲线。由图 8 可知,混凝土在第 3 d 温度达到了峰值 $53.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,随后,温度开始缓慢下降;第 14 d 后温度稳定。用变温温度曲线进行钢管混凝土的限制膨胀率试验,将图 8 的温度曲线输入变温养护箱的温度控制程序,限制膨胀率试验方法参照 GB 23439—2017《混凝土膨胀剂》中的试验方法进行。试验用的混凝土配合比为基础配合比与膨胀剂掺量为 8%、10% 的配合比。混凝土拌合物成型后(混凝土成型温度为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$),立即用塑料薄膜覆盖,1 d 后脱模,先用石蜡封面,然后用塑料薄膜包裹缠绕,测量初长,然后放入变温养护箱中待测。

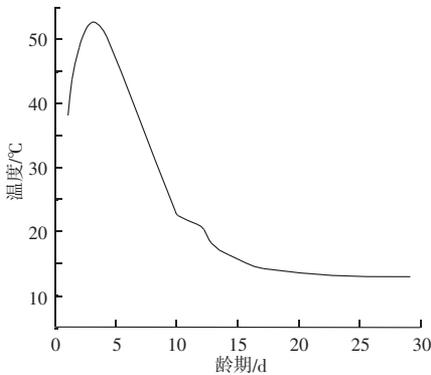


图 8 混凝土中心点温度变化曲线

Fig. 8 Temperature variation curve of concrete center point

如图 9 所示,随着温度的变化,混凝土“热胀冷缩”现象明显。不掺加膨胀剂混凝土在 5 d 后开始收缩,且随着混凝土温度下降,收缩不断增加。混凝土中掺加膨胀剂后,在变温条件下,膨胀剂水化快,较高的温度促进了膨胀剂集中水化,在第 3 d 达到了最大的膨胀率。随着温度的降低,混凝土膨胀能被冷缩消耗;到 28 d 时,还处于膨胀状态,有效地补偿了降温时期混凝土的冷缩,效果明显。10% 掺量膨胀剂混凝土早期膨胀性能优于 8% 掺量的膨胀混凝土,但中后期的补偿收缩效果差,可能是由于绝湿养护下,膨胀剂掺量大的混凝土在水化早期消耗了更多的水分,到了中后期,外界水分供应不足,自收缩加大^[11]。8% 掺量的膨胀剂混凝土膨胀效果最优。

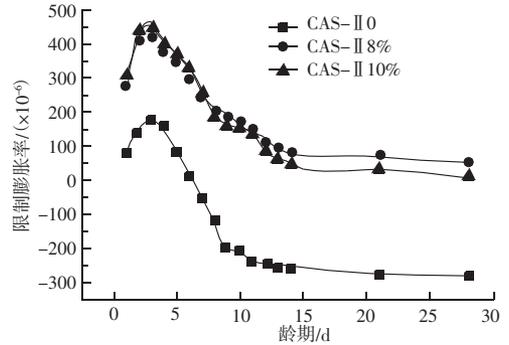


图 9 各龄期的混凝土的变形值

Fig. 9 Deformation values of concrete at different ages

3 钢管混凝土构件试验及分析

为了模拟实际工程钢管混凝土变形,以不掺加膨胀剂的基础混凝土与 8% 膨胀剂掺量的膨胀混凝土在钢管构件内产生的应变情况进行试验分析^[12]。

核心混凝土的应变通过内埋 JMZX-215 应变计测量,在混凝土内部的中心位置并排布置 2 个横向应变计(1 个备用),用 JMZX-3001 型综合智能读数测试仪对混凝土的应变进行观测,前 7 d 每天采集 4 次数据,以后每天采集 1 次,持续观测 28 d。灌注完成后,用塑料薄膜覆盖,在钢管外壁中部的环向和纵向,布置 4 个规格为 $3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的应变片,如图 10 所示。采用 DH3816 静态应变数据采集箱对钢管的应变进行采集。

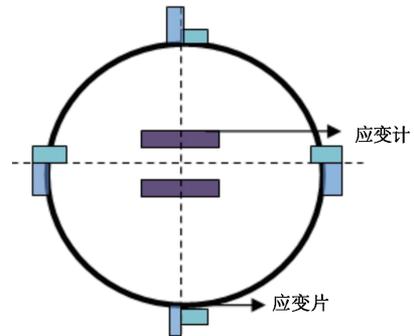


图 10 应变测量装置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of strain measurement device

图 11、12 结果表明:8% 膨胀剂的混凝土横向应变与普通混凝土有很大的差异,未掺加膨胀剂的混凝土由于水化热的作用,7 d 前表现出了膨胀,随后开始收缩;而掺加 8% 膨胀剂的混凝土 3 d 膨胀能最高,14 d 后趋于稳定后仍然有一定的膨胀应变,膨胀能发挥很好。未掺膨胀剂的混凝土钢管壁由于水

材料科学

化热的作用,开始产生了拉应变,7 d后消失。在钢管混凝土的环向及纵向应变试验结果中,由于膨胀混凝土的膨胀挤压作用,钢管外壁环向及纵向均产生拉应变,混凝土与核心混凝土之间产生了“套箍”现象^[13-14]。因此,膨胀剂掺加8%时,钢管混凝土构件内部拉应力发挥良好,混凝土与钢管壁贴合密实,混凝土的各项性能最优,可用于工程实际施工。

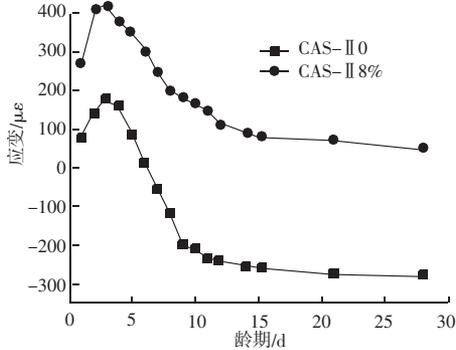


图 11 核心混凝土横向应变曲线

Fig. 11 Lateral strain curve of core concrete

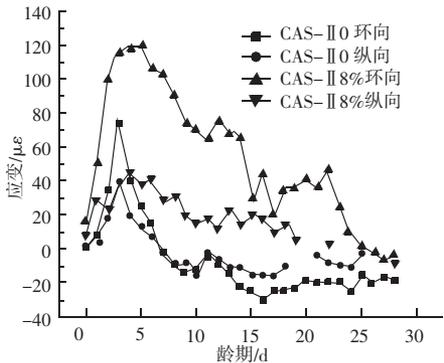


图 12 钢管环向及纵向应变曲线

Fig. 12 Steel pipe circumferential and longitudinal strain curves

4 结论

(1) 采用膨胀剂、缓凝高效减水剂和粉煤灰配制大管径钢管混凝土综合考虑了钢管混凝土的施工性能、力学性能、体积稳定性及混凝土的水化热,是可行的技术路线。

(2) 在试验室恒温条件下,掺入膨胀剂的核心混凝土膨胀变形在前7 d发展较快,14 d趋于稳定;模拟工程实际的变温条件养护下,核心混凝土的膨胀变形在前3 d达到最大值,而后慢慢收缩。但此次

变温条件下混凝土的限制膨胀率试验是在混凝土试件终凝后拆模后进行升温测量的,终凝前的部分变形未测到,需要进一步试验验证。

(3) 在钢管构件试验中,膨胀剂掺量为8%时,在混凝土的膨胀挤压作用下,钢管壁产生了环向及纵向拉应力,说明管壁与核心混凝土贴合密实,形成了“套箍”效应。

参 考 文 献

- [1] 董英宏, 陈学鹏. 不同构造对方钢管混凝土界面黏结性能的影响 [J]. 天津大学学报 (自然科学技术版), 2021 (1): 91 - 100.
- [2] 胡红松, 林康. 方钢管混凝土中钢管和混凝土抗压强度研究 [J]. 建筑结构学报 2019 (2): 161 - 168.
- [3] 程高, 张正琦. 钢管混凝土轴压短柱界面法向应力分析 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版) 2019 (7): 947 - 951.
- [4] MORINO T, MIRAN K. Strength of concrete filled steel box columns incorporating interaction buckling [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129 (5): 626 - 639.
- [5] 胡曙光, 丁庆军. 钢管混凝土 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [6] 阎培渝, 余成行. 高强自密实混凝土的减缩措施 [J]. 硅酸盐, 2015, 44 (3): 10 - 14.
- [7] 安亚强. 高性能微膨胀混凝土研究与应用 [D]. 西安: 西北农林科技大学, 2015.
- [8] 赵健业, 袁茂均, 周筱航, 等. 大跨度钢管混凝土劲性骨架拱桥施工关键技术 [J]. 铁道建筑, 2024 (8): 58 - 64.
- [9] 张少甫, 张谢东, 于建华, 等. 钢管混凝土系杆拱桥吊杆连锁破断力学性能研究 [J]. 交通科技, 2024 (4): 74 - 78.
- [10] 赵宝俊, 张之恒, 程高, 等. 钢管混凝土桁架弦杆界面传力特性分析 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版). 2023, 46 (7): 957 - 962.
- [11] 李丽莎. 不同引气剂对混凝土性能的影响研究 [J]. 交通世界, 2023 (15): 40 - 42.
- [12] 韩林海, 杨有福, 杨华, 等. 基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用 [J]. 建筑科学与工程, 2020 (2): 140 - 147.
- [13] 郭士刚. 拱桥钢管膨胀混凝土性能的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2015.
- [14] 尚作庆. 钢管自应力自密实混凝土柱力学性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.