复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 37 卷 第 5 期 5 月 2020 年
Vol. 37 No. 5 May 2020

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20191030.001

钢管混凝土缺陷对徐变性能的影响

郝兆峰[1]，张戎令*[1,2]，王起才[1]，祁强[3]，庄立普[4]，黄国栋[1]

（1. 兰州交通大学 土木工程学院，兰州 730070；2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室，兰州 730070；
3. 平凉职业技术学院 建筑工程系，平凉 744000；4. 中铁 21 局集团有限公司，兰州 730070）

摘 要：为了研究钢管混凝土缺陷试件的徐变性能，进行了 7 组徐变试验研究，得到了钢管混凝土缺陷试件补强前后徐变度随持荷时间的变化曲线。研究结果表明：相较于无缺陷钢管混凝土，存在缺陷的钢管混凝土徐变度均有不同程度增大，其中，脱黏缺陷钢管混凝土试件的徐变度增量远大于空洞缺陷试件；脱黏缺陷削弱了钢管与混凝土之间的界面黏结，致使钢管与混凝土的应力重分布作用减弱，协同变形能力下降；空洞缺陷处混凝土由于发生应力集中而加剧了裂缝的产生和扩张，混凝土因此而发生错位滑移，增大了钢管混凝土的附加变形；注浆补强后，钢管混凝土的徐变变形减小，但相较于无缺陷钢管混凝土，缺陷补强钢管混凝土的徐变性能仍存在一定程度的折减。

关键词：钢管混凝土；徐变；脱黏；空洞；缺陷；注浆补强

中图分类号：TU398 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3851(2020)05-1191-09

Effect of concrete filled steel tube defect on creep property

HAO Zhaofeng[1], ZHANG Rongling*[1,2], WANG Qicai[1], QI Qiang[3], ZHUANG Lipu[4], HUANG Guodong[1]

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Road and Bridge Engineering Disaster Prevention Technology, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Department of Architectural Engineering, Pingliang Vocational and Technical College, Pingliang 744000, China; 4. China Railway 21 Bureau Group Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to study the creep performance of concrete filled steel tube defect specimens, 7 groups of creep tests were carried out, and the curves of creep degree with load holding time before and after strengthening were obtained. The results show that compared with the non-defective concrete-filled steel tube, the creep degree of the defective concrete-filled steel tube increases to different degrees, among them, the creep increment of the specimens with debonding defects is much larger than that with cavity defects. The debonding defect weakens the interface bonding between steel tube and concrete, which weakens the stress redistribution effect of steel tube and concrete, and reduces the cooperative deformation capacity. The stress concentration of concrete at the cavity defect intensifies the generation and expansion of cracks, which leads to the dislocation slip of concrete and increases the additional deformation of concrete-filled steel tube. After grouting, the creep deformation of concrete-filled steel tube decreases. However, compared with concrete-filled steel tube without defects, the creep behavior of reinforced concrete filled steel tube is still reduced to some extent.

Keywords: concrete filled steel tube; creep; debonding; cavity; defect; grouting reinforcement

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而形成钢管及其核心混凝土能共同承受外荷载作用的结构构

收稿日期：2019-06-14; **录用日期**：2019-10-16；**网络出版时间**：2019-10-30 10:17:16
网络出版地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191030.001
基金项目：青年人才托举工程；飞天学者特聘计划；长江学者和创新团队发展计划滚动支持 (IRT_15R29)；国家自然科学基金 (51768033)；甘肃省高校协同创新科技团队支持计划 (2017C-08)
通信作者：张戎令，博士，教授，硕士生导师，研究方向为干寒地区材料耐久性与结构全寿命关键技术及应用 Email: mogzrlggg@163.com

引用格式：郝兆峰，张戎令，王起才，等. 钢管混凝土缺陷对徐变性能的影响 [J]. 复合材料学报，2020，37(5)：1191-1199.
HAO Zhaofeng, ZHANG Rongling, WANG Qicai, et al. Effect of concrete filled steel tube defect on creep property[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(5): 1191-1199(in Chinese).

件。钢管和混凝土两种材料在受力过程中产生的协同互补作用使钢管混凝土具有承载能力高、塑性韧性好、施工方便及耐火性好等一系列优点，被广泛应用于单层、多层、大跨及桥梁结构中[1-2]。在长期荷载作用下钢管混凝土产生的徐变会引起结构变形、内力重分布等突出问题，徐变问题是基于全寿命周期钢管混凝土结构设计原理的核心问题之一，是工程界所关注的热点问题[3-4]。

目前，国内外学者已对钢管混凝土徐变性能进行了较为深入的研究，张戎令等[5-9]研究了膨胀剂掺量、应力比、含钢率及钢管侧限对钢管混凝土徐变性能的影响；Geng 等[10]进行了长期荷载作用下钢管再生混凝土柱徐变试验的研究并给出了徐变计算方法；Luo 等[11]对钢管混凝土圆拱进行了长期结构性能分析和稳定性评价，结果表明，核心混凝土的徐变和收缩对钢管混凝土的结构变形及内力有显著影响；Ma 等[12]通过试验研究了高强钢管混凝土的徐变特性，提出了考虑高强核心混凝土三轴应力和自收缩状态的徐变模型。已有研究主要建立在核心混凝土密实地填充在钢管中且与钢管之间产生较好黏结应力的基础上，然而，由于核心混凝土被外围钢管所包覆，施工过程中核心混凝土的浇筑质量难以控制，钢管混凝土难免会产生脱黏、空洞等内部缺陷，存在缺陷的构件将直接影响到工程结构的安全和寿命[13-14]，为了弥补核心混凝土缺陷产生的不利影响，工程中常采用注浆补强的处理方式来恢复钢管混凝土的力学性能[15]。目前关于长期荷载作用下存在缺陷的钢管混凝土徐变性能的研究较少，有关这一方面的研究需要进一步深入和完善。

为了得出长期荷载作用下注浆补强前后钢管混凝土缺陷试件的徐变变化规律，本文进行了无缺陷、缺陷 (中心空洞缺陷、边缘空洞缺陷、环向贯通脱黏缺陷) 和缺陷补强共三种工况的钢管混凝土徐变试验，定量分析了钢管混凝土在不同工况下的徐变性能，研究结果可为实际工程中缺陷及缺陷补强钢管混凝土的徐变性能计算提供参考和借鉴。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计了 7 组，每组 3 根，共 21 根钢管混凝土试件，主要考察参数为缺陷类型及缺陷是否注浆补强。7 组钢管混凝土试件分别为：无缺陷试件，组号为 P；缺陷率 (空洞体积与核心混凝土体积比) 为 6.6% 的中心空洞试件，组号为 C；缺陷率为 6.6% 的边缘空洞试件，组号为 E；环向贯通脱黏试件，组号为 D；中心空洞补强试件，组号为 RC；边缘空洞补强试件，组号为 RE；环向脱黏补强试件，组号为 RD。

试验所用钢管材质为 Q215，弹性模量为 210 GPa，钢管外直径为 140 mm，高度为 350 mm，壁厚为 3 mm，钢管径厚比为 46.7，满足 GB 50936—2014 标准[16]的限值要求。配制混凝土所用水泥为祁连山水泥厂生产的 P.O42.5 低碱硅酸盐水泥，水泥性能指标见表 1 所示。细骨料为宏建集团砂场生产的天然砂，细度模数为 2.9。粗骨料为甘肃建投七建商砼有限公司生产的中心破碎玄武岩，5~20 mm 连续级配。采用北京建筑工程研究院生产的 AN4000 聚羧酸减水剂和 UEA-H 型膨胀剂，膨胀剂的具体性能参数如表 2 所示。混凝土设计强度为 C50，混凝土配合比如表 3 所示，钢管混凝土试件主要参数见表 4 所示。

采用自制沙袋制作核心混凝土空洞缺陷，沙袋半径为 36 mm，高度为 80 mm，沙袋体积占无缺陷试件核心混凝土体积的 6.6%，沙袋横截面面积占钢管混凝土横截面积的 26%，沙袋高度占钢管混凝土高度的 23%。采用厚度为 1 mm 的塑料薄板制作钢管混凝土环向贯通脱黏缺陷。

浇筑钢管混凝土的同时，预留 3 组边长为 100 mm 的同期试块，分别进行标准养护、密封养护、密封与侧限养护，每组 9 个试块，根据 GB/T 50081—2002[17]进行相关试验，各龄期强度试验结果如表 5 所示。

为了便于加载及监测徐变变形，试件上下底板均应焊接厚度为 5 mm(面积为 200 mm×200 mm) 的钢板，浇筑混凝土前先将下底板焊死，放置标准养护室前焊接上顶板。制作钢管混凝土空洞缺陷试件时，首先将圆柱形沙袋固定到钢管中心位置和边缘位置，沙袋的 1/2 截面与钢管的 1/2 截面控制为同一平面，然后在钢管中密实地浇筑混凝土，密封养护三天后将沙子从预留导管中排出，即得到空洞缺陷试件。制作钢管混凝土脱黏试件时，首先使剪裁好的塑料薄板两边涂抹脱模油后紧贴钢管内壁，然后在钢管中密实地浇筑混凝土，浇筑完成后将钢管混凝土竖直放置 24 h，之后抽出塑料薄板，即得到钢管混凝土脱黏试件。钢管混凝土缺陷试件制作完成后，置于标准养护室内养护 28 天。不同缺陷类型的钢管混凝土示意图如图 1 所示，浇筑过程中钢管混凝土典型照片如图 2 所示。

钢管混凝土缺陷试件浇筑 5 d 后，采用水泥净浆 (净浆成分与混凝土一致) 进行补强。对于制作完成的空洞缺陷试件，注浆时，首先在注浆补强管上

表 1 P.O42.5 水泥性能指标

Table 1 Performance indexes of P.O42.5 cement

Specific surface area/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	Stability/mm	Chloride ion content/%	Alkali content/%	Ignition loss/%	Sulfur trioxide content/%	Initial setting time/min	Final setting time/min	Compressive strength/MPa	
								3 d	28 d
326	2	0.012	0.43	1.52	2.44	185	325	21.7	48.6

表 2 膨胀剂性能参数

Table 2 Performance parameters of expansion agent

Magnesium oxide content/%	Total amount of alkali/%	Chloride ion content/%	Specific surface area/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	Initial setting time/min	Final setting time/min	Limited expansion rate/%		Compressive strength/MPa	
						7 d(Water)	21 d (Air)	3 d	7 d
3.38	0.58	0.009	316	174	259	0.036	–0.019	22.2	40.3

表 3 混凝土配比

Table 3 Mix ratio of concrete

$kg \cdot m^{-3}$

Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Expansive agent	Water reducing agent
180	465	764	1 056	37.2	5.58

表 4 钢管混凝土试件主要参数

Table 4 Main parameters of concrete-filled steel tube specimens

Group	Steel pipe diameter/mm	Steel pipe height/mm	Steel tube thickness/mm	Slenderness ratio	Defect rate/%	Debonding thickness/mm	Ultimate capacity/kN
P	140	350	3	10	0	0	880
C	140	350	3	10	6.6	0	783
E	140	350	3	10	6.6	0	598
D	140	350	3	10	0	1	710
RC	140	350	3	10	0	0	811
RE	140	350	3	10	0	0	797
RD	140	350	3	10	0	0	863

表 5 混凝土抗压强度

Table 5 Concrete compressive strength

Curing mode	Standard curing			Seal curing			Sealing and side limit curing		
Age/d	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Compressive strength f_{CU}/MPa	48.15	50.29	54.5	49.95	52.56	55.74	47.62	54.36	56.91

端口 (注浆补强管上端口高出钢管混凝土上表面 20 mm) 处插入一支长颈漏斗，漏斗导管紧贴注浆补强管内壁 (漏斗导管外径小于注浆补强管内壁)，保证空洞内空气可顺注浆补强管排出，然后将水泥净浆缓慢地从漏斗自上而下注入空洞内部，待水泥净浆从注浆补强管口溢出后停止注浆，观察 5 min，若管口处水泥净浆下陷则再次注浆，重复上述步骤直至浆体不再下陷，注浆后通过核对，若注入水泥净浆体积与空洞体积相一致，表明注浆过程中排气效果良好，空洞被密实填充，补浆完成后置于养护室内养护至 28 d。对于制作完成的脱黏缺陷试件，将水泥净浆从钢管下方预留孔洞处自下而上注入，待水泥净浆从试件上部脱黏缝隙处溢出后停止注浆，观察 5 min 后，若脱黏缝隙处水泥净浆下陷则再次注浆，重复上述步骤直至浆体不再下陷，注浆完成后焊死钢管下端预留孔洞，置于养护室内养护至 28 d。

试验过程中需考虑用于制作缺陷沙袋出现上浮情况，因此浇筑过程中需要注意，浇筑混凝土时需用力将连接沙袋的注浆补强管压住，避免沙袋上浮，混凝土浇筑完成后，在钢管混凝土上表面和注浆补强管两侧，与其平齐各放置一根厚度为 20 mm 的长方体木块，然后在两根木块上放置混凝土试块，以

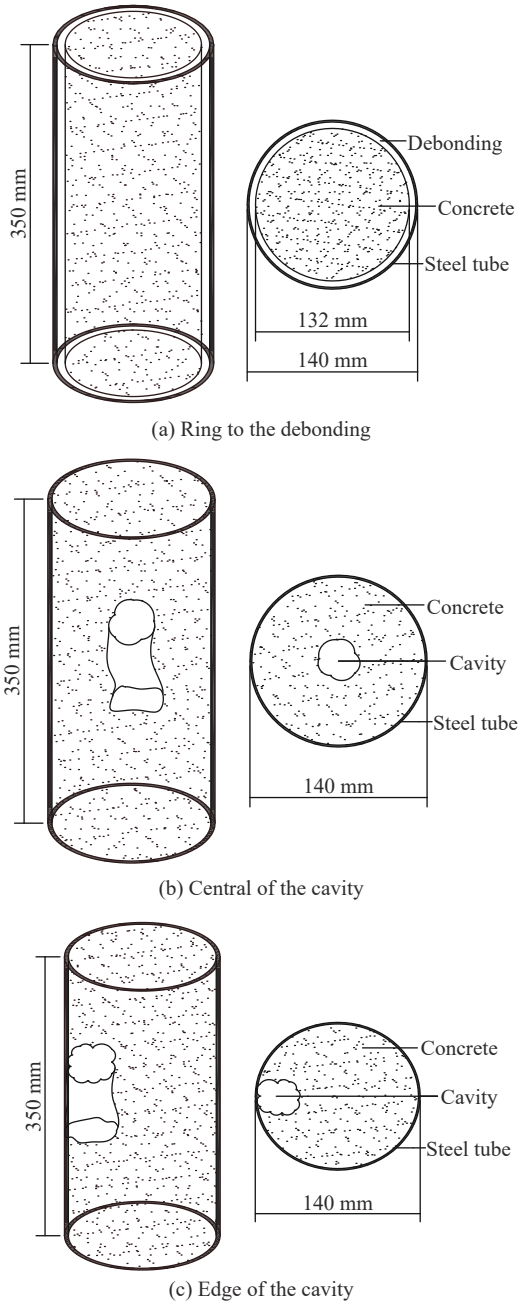

图 1　钢管混凝土缺陷示意图

Fig. 1　Defect diagram of concrete filled steel tube

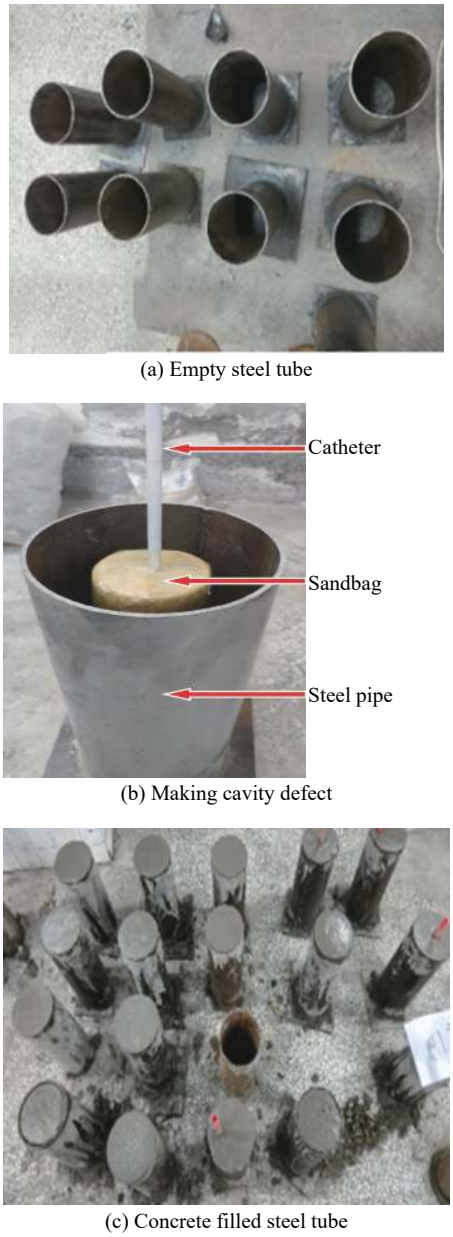

图 2　浇筑过程中钢管混凝土典型照片

Fig. 2　Typical photos of concrete-filled steel tube during pouring

压住注浆补强管，防止沙袋上浮，待混凝土终凝后可取下木块与混凝土试块。

1.2　试验方法

根据 GB/T 50082—2009[18] 进行钢管混凝土徐变试验。不同工况钢管混凝土养护 28 d 后，统一采用天津市华通实验仪器厂生产的 SSX-XB50 型弹簧式三杆徐变加载仪加载，钢管和混凝土同时受荷，施加的长期荷载为 235 kN(荷载强度小于钢管混凝土极限承载力的 40%)，试验环境温度为 (20±1)℃，相对湿度为 (60±5)%。钢管混凝土试件的徐变变形由对称布置在试件两侧的千分表 (带磁力表座，标距为 350 mm) 和弦式应变计 (标距为 129 mm) 共同测量，二者相互校核以保证数据的准确性，千分表采用人工读数，弦式应变计通过接入 JMZX-3001 综合测试仪进行数据采集。试验前对空钢管进行预压，以确保测量设备工作正常。应变计和千分表布置位置如图 3 所示，试验过程典型照片如图 4 所示。

加载时，先用粉笔标定出钢管混凝土上下承压板、徐变仪下承压板及压力传感器下底板的质心，然后依次将三根试件放置于徐变仪上，通过对正质

心进行几何对中，最后依次拧紧三个钢拉杆上的螺母，并通过压力传感器控制荷载达到设定值。同时，确保千分表与应变计的变化值相等，从而使试件处于轴心受压状态。混凝土的收缩徐变会导致钢管混凝土试件不断变形，使施加到钢管混凝土上的荷载不断变化，为了保持荷载值的恒定，当荷载变化值大于 2% 时通过拧紧拉杆上的螺母对试件进行荷载补加。

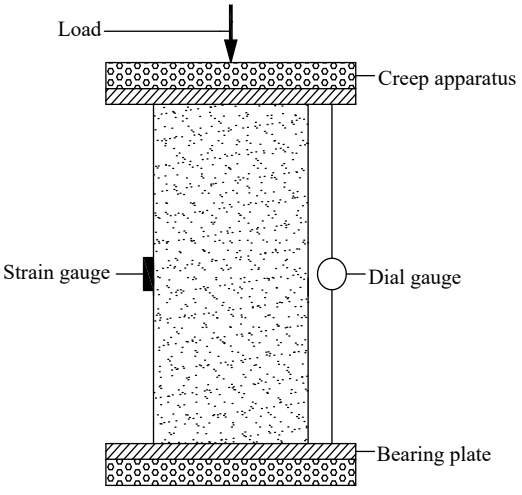

图 3 应变计和千分表布置

Fig. 3 Arrangement of strain gauge and dial gauge

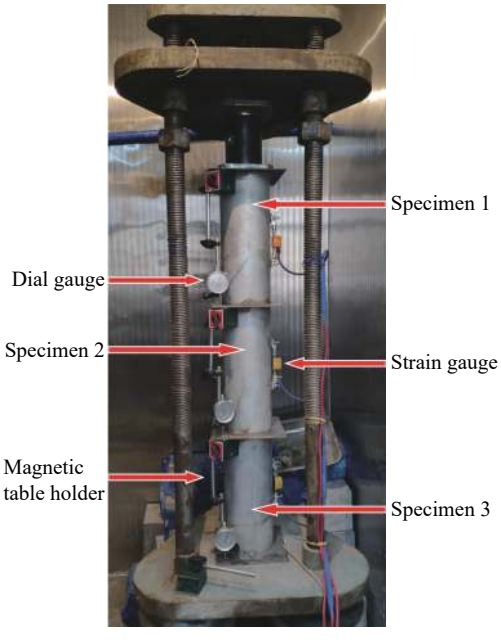

图 4 钢管混凝土试件加载过程典型照片

Fig. 4 Typical photos during loading of concrete filled steel tube specimen

由于钢管混凝土结构中核心混凝土处于密封保水的环境中，水分相对流失较少甚至没有流失[19]，且混凝土中掺入的膨胀剂具有补偿收缩作用[20]，因此核心混凝土收缩变形很小，基本可以忽略不计[21]。故计算徐变度时不考虑核心混凝土收缩的影响，徐变度计算如下：

$$C_t = \frac{1}{\delta}\left(\frac{\Delta L_t - \Delta L_0}{L_b} - \varepsilon_t\right) \tag{1}$$

式中：C_t为加载t时间后的混凝土徐变度 (MPa^{-1})；δ为徐变应力 (MPa)；ΔL_t为加载 t 时间后的总变形值 (mm)；ΔL_0为加载时测得的初始变形值 (mm)；L_b为测量标距 (mm)； ε_t为同龄期的收缩值 (mm·m^{-1})。

2 徐变试验结果与分析

2.1 缺陷对钢管混凝土徐变度的影响

表 6 为钢管混凝土缺陷试件补强前后徐变度对比。可知，不同缺陷类型的钢管混凝土徐变度差异较大；补强前后钢管混凝土徐变度差异较大。图 5 为无缺陷、缺陷率为 6.6% 的中心空洞缺陷、缺陷率为 6.6% 的边缘空洞缺陷及环向贯通脱黏缺陷钢管混凝土试件在长期荷载作用下徐变度随持荷时间的变化曲线。可知，在整个加载过程中，无缺陷和缺陷钢管混凝土试件早期变形发展较快，持荷 107 d 后变形发展趋缓；加载初期，脱黏缺陷钢管混凝土试件的曲线斜率明显大于无缺陷钢管混凝土试件与和空洞缺陷试件的曲线斜率，表明加载初期脱黏钢管混凝土试件已经产生较大徐变；加载 257 d 时，无缺陷钢管混凝土试件的徐变度为 25.53×10^{-6} MPa^{-1}，中心空洞缺陷钢管混凝土试件的徐变度为 30.54×10^{-6} MPa^{-1}，边缘空洞缺陷钢管混凝土试件的徐变度为 27.08×10^{-6} MPa^{-1}，脱黏缺陷钢管混凝土试件的徐变度为 37.77×10^{-6} MPa^{-1}，表明缺陷钢管混凝土试件的徐变度大于无缺陷钢管混凝土试件的徐变度，缺陷对钢管混凝土的徐变性能产生不利影响；加载 257 d 时，边缘空洞缺陷钢管混凝土试件的徐变度为无缺陷钢管混凝土试件的 106.1%，中心空洞缺陷钢管混凝土试件的徐变度为无缺陷钢管混凝土试件的 119.6%，脱黏缺陷钢管混凝土试件的徐变度为无缺陷钢管混凝土试件的 147.9%，表明不同类型的缺陷对钢管混凝土徐变性能的影响不同，其中脱黏缺陷对钢管混凝土试件徐变的影响较大，边缘空洞缺陷对钢管混凝土试件徐变的影响较小，中心空洞缺陷对钢管混凝土试件的徐变性能影响介于脱黏缺陷与边缘空洞缺陷之间。

造成上述现象的主要原因是：钢管混凝土轴心受压时，核心混凝土所承受的侧压力是被动的，在

表 6　钢管混凝土缺陷试件补强前后徐变度

Table 6　Creep of concrete filled steel tube defect specimens before and after reinforcement　　10^{-6} MPa^{-1}

Loading time/d	P	C	E	D	RC	RE	RD
0	0	0	0	0	0	0	0
1	7.53	9.00	8.19	13.28	8.28	7.78	11.42
3	10.09	12.07	10.98	18.55	11.10	10.43	16.52
5	11.05	13.22	12.03	19.87	12.16	11.43	16.80
7	12.01	14.37	13.07	18.96	13.22	12.42	16.31
9	12.98	15.52	14.12	20.99	14.28	13.41	18.05
11	13.22	15.81	14.86	21.38	14.55	14.12	18.39
13	14.18	16.96	15.43	22.93	15.60	14.66	18.27
15	14.42	17.24	15.69	22.26	15.86	14.91	19.98
17	15.14	18.11	16.47	23.37	16.66	15.65	20.58
19	15.21	18.19	16.55	23.49	16.73	15.72	20.20
21	16.29	19.54	17.73	23.96	17.98	16.84	20.61
23	16.24	19.43	17.68	23.89	17.88	16.80	20.55
25	16.59	19.84	18.05	24.39	18.25	16.43	20.98
27	16.82	20.12	18.30	24.73	18.51	17.39	21.27
29	16.82	20.12	18.30	24.73	18.51	17.39	21.27
32	17.35	20.75	18.88	25.51	19.09	17.94	23.27
36	18.05	21.58	19.64	25.89	19.85	18.66	22.27
40	18.48	22.10	20.11	27.17	20.33	19.10	23.37
44	18.98	22.70	20.66	27.92	20.88	19.63	24.01
48	19.93	23.84	20.84	28.36	21.12	19.80	24.39
52	19.61	23.45	21.34	28.83	21.57	19.42	24.79
60	19.94	23.85	21.70	28.87	21.94	20.62	24.83
68	20.24	24.20	22.02	29.76	22.26	20.92	25.59
77	20.92	25.00	22.75	30.74	23.00	21.61	26.44
87	21.37	25.55	23.24	31.41	23.00	21.89	26.47
107	21.97	26.39	23.98	32.73	23.89	22.57	28.02
137	23.08	27.77	24.41	34.39	24.94	23.73	28.84
167	23.91	28.83	25.61	35.06	25.83	24.02	29.23
197	24.60	29.14	25.78	36.23	26.20	25.06	30.09
227	24.50	29.33	26.72	37.19	26.81	24.99	31.66
257	25.53	30.54	27.08	37.77	27.32	25.99	32.26

Notes: P is no defect component; C is the left cavity component; E is the edge cavity component; D is the ring penetration and debonding component; RC is the left cavity reinforcement component; RE is the edge cavity reinforcement component; RD is the debonding reinforcing component.

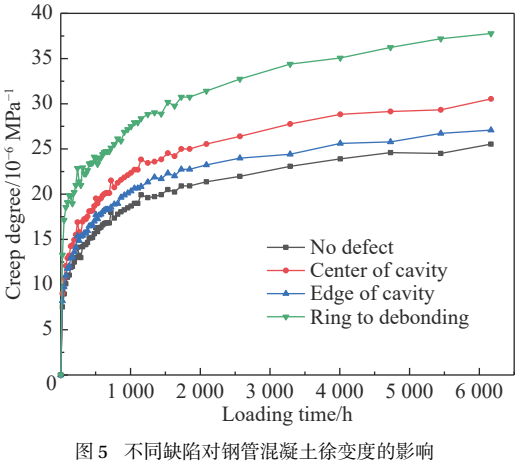

图 5　不同缺陷对钢管混凝土徐变度的影响

Fig. 5　Influence of different defects on creep degree of concrete-filled steel tube

受压过程中，随着核心混凝土纵向变形的增加，其横向变形系数 μ_c 会不断增大，当核心混凝土的横向变形系数 μ_c 超过钢材的泊松比 μ_s 时，钢管和混凝土之间将产生相互作用力，此时混凝土处于三向受压的应力状态[1]，由于脱黏缺陷钢管混凝土试件中核心混凝土与钢管之间具有环向贯通的缝隙，且钢管混凝土试件所承受荷载较小，难以使核心混凝土产生较大的横向变形系数，脱黏缺陷钢管混凝土试件在持荷过程中，钢管对核心混凝土产生的套箍作用较小，钢管与核心混凝土之间的内力重分布现象不明显，作用于钢管及核心混凝土上的荷载几乎不发生变化，二者无法高效地发挥协调变形能力，因此，脱黏缺陷钢管混凝土的徐变度较大。

空洞缺陷钢管混凝土试件中，核心混凝土全部

或大部分与钢管紧贴，核心混凝土与钢管产生的应力重分布现象不容忽视。加载过程中，徐变引起混凝土轴向距离缩短，导致钢管与混凝土黏结界面处产生轴向应力，轴向应力在钢管与核心混凝土之间不断发生重分布，钢管承担的荷载增大，核心混凝土承担的荷载减少，二者协调变形，因此，空洞缺陷钢管混凝土试件的徐变度均小于脱黏缺陷试件。微裂缝理论[3]认为，在多相混凝土组成材料的界面上，受荷前微裂缝已经存在，在正常应力范围内，裂缝界面通过摩擦传递荷载，微裂缝仅稍微增加小部分徐变。但当核心混凝土产生空洞缺陷时，存在空洞的混凝土横截面受力面积改变，空洞附近的混凝土因发生应力集中现象而加剧微裂缝的产生和扩展，与此同时，扩展的微裂缝缺少混凝土侧向限制，导致空洞缺陷处混凝土发生错位滑移，加大了核心混凝土的附加变形量。当空洞产生于核心混凝土边缘时，空洞周围的混凝土表面积减少，混凝土裂缝的产生和扩展程度降低，且钢管对裂缝的侧向约束效果优于混凝土，因此，边缘空洞缺陷钢管混凝土试件的徐变度小于中心空洞缺陷钢管混凝土试件。

2.2 补强对钢管混凝土缺陷试件徐变度的影响

图 6 为无缺陷钢管混凝土试件和中心空洞缺陷、边缘空洞缺陷、环向脱黏缺陷钢管混凝土试件补强后徐变度随持荷时间的变化曲线。图 7 为补强前后钢管混凝土徐变度对比曲线。由图 6可知，加载 257 d 后，无缺陷钢管混凝土试件的徐变度为 25.53×10^{-6} MPa^{-1}，中心缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度为 27.32×10^{-6} MPa^{-1}，边缘缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度为 25.99×10^{-6} MPa^{-1}，脱黏缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度为 32.26×10^{-6} MPa^{-1}，表明钢管混凝土缺陷补强试件的徐变度大于无缺陷钢管混凝土试件，缺陷补强钢管混凝土试件的徐变性能仍弱于无缺陷钢管混凝土试件，补强后的脱黏缺陷钢管混凝土试件徐变度最大，边缘空洞缺陷补强钢管混凝土试件徐变度最小，中心空洞缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度介于脱黏缺陷和边缘空洞缺陷补强钢管混凝土试件之间。由图 7 可知，加载 257 d 后，边缘缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度为无缺陷钢管混凝土试

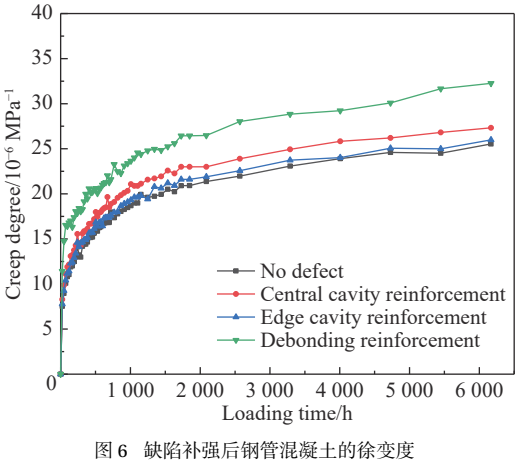

图 6 缺陷补强后钢管混凝土的徐变度

Fig. 6 Creep degree of concrete-filled steel tube after defect reinforcement

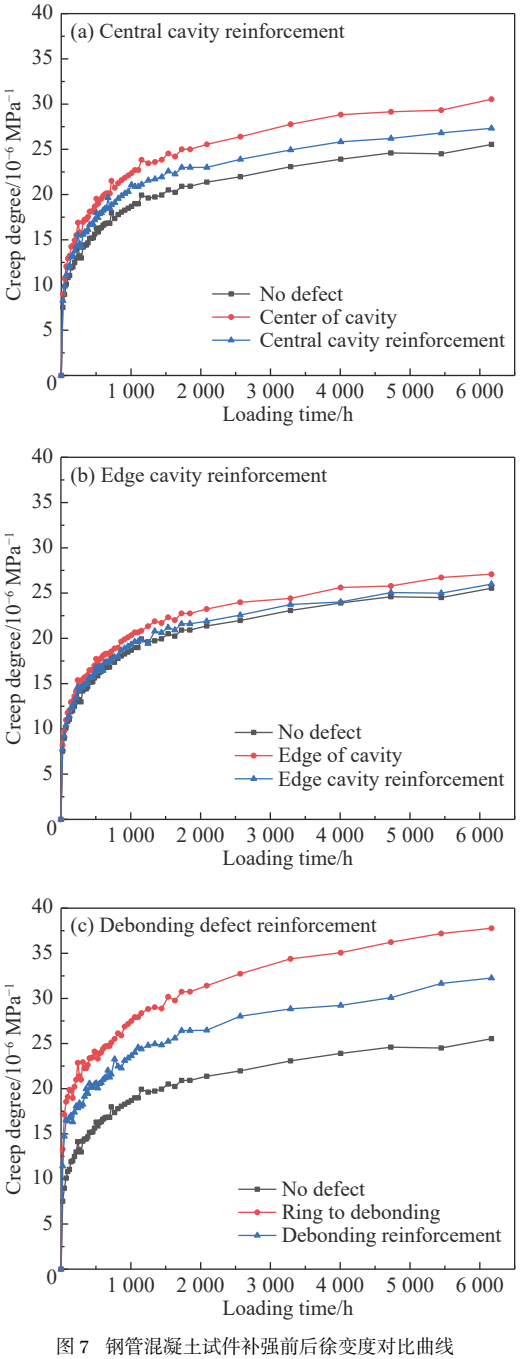

图 7 钢管混凝土试件补强前后徐变度对比曲线

Fig. 7 Comparison curves of creep degree of concrete filled steel tube specimens before and after reinforcement

件的 101.8%，中心缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度为无缺陷钢管混凝土试件的 107.0%，脱黏缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度为无缺陷钢管混凝土试件的 126.4%，表明通过注浆补强的处理方式，钢管混凝土试件的徐变度相对于补强前均有所减小，补强对钢管混凝土缺陷试件的徐变性能具有改善作用。

造成上述现象的主要原因是：补强后，水泥净浆填补了脱黏缺陷钢管混凝土试件的环向缝隙，增强了核心混凝土与钢管之间的黏结力，加载过程中，混凝土因徐变而产生的应力通过钢管与混凝土之间的界面黏结传递到钢管，钢管与混凝土协同受力，减少了钢管混凝土的徐变变形。此外，由于混凝土的泊松比大于钢管的泊松比，钢管混凝土受荷过程中，当核心混凝土的横向变形系数超过钢管的横向变形系数时，钢管对混凝土产生套箍作用，钢管的套箍作用不仅约束了核心混凝土裂缝的扩展和滑移，还进一步增强了钢管与混凝土的界面黏结，因此，补强后的脱黏缺陷钢管混凝土试件徐变度显著减小。但注浆补强后，水泥砂浆与旧混凝土难以黏结成整体，二者交接处通常会形成施工冷缝，影响混凝土与水泥净浆共同工作和协同变形的能力，削弱了应力重分布效果，因此，相对于无缺陷钢管混凝土试件，脱黏缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度仍然较大。

补强后，核心混凝土空洞被水泥净浆填补，钢管与混凝土的内力传递效果增强，钢管承担的荷载增大，钢管混凝土的协调变形能力得到改善，此外，加载过程中，原空洞处的水泥净浆对周围混凝土产生的侧向约束力抑制了其微裂缝的发生和扩展，减少了核心混凝土附加变形量，因此，空洞缺陷钢管混凝土试件补强后徐变度减少。尽管补强后空洞缺陷钢管混凝土试件的徐变性能得到提高，但补强后水泥净浆与钢管及核心混凝土之间的黏结力低于无缺陷钢管混凝土试件，因此，荷载在混凝土内部及钢管与混凝土之间的传递效果较无缺陷钢管混凝土试件仍存在一定程度折减，此外，由于空洞的形状并不规则，且水泥净浆并非等强度和等密度地替代混凝土，加载过程中可能导致核心混凝土受力不均匀，削减了钢管与混凝土协同受力作用，因此，空洞缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度仍低于无缺陷钢管混凝土试件。由于水泥净浆对温度及干湿变化极其敏感，膨胀收缩大[22-23]，注入空洞内的浆体容易产生开裂，但钢管侧限对水泥浆体开裂的抑制能力优于混凝土，因此，边缘空洞缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度小于中心空洞缺陷补强钢管混凝土试件。

3 结 论

(1) 对不同缺陷工况下钢管混凝土徐变试验研究结果表明：加载 257 d 后，边缘空洞缺陷、中心空洞缺陷、环向脱黏缺陷钢管混凝土试件的徐变度分别为无缺陷钢管混凝土试件的 106.1%、119.6%、147.9%，缺陷对钢管混凝土徐变的影响规律为：缺陷对钢管混凝土的徐变产生不利影响；不同缺陷类型对钢管混凝土徐变性能影响程度不同，脱黏缺陷对钢管混凝土徐变的影响大于空洞缺陷；空洞体积相同时，中心缺陷对钢管混凝土徐变的影响大于边缘缺陷。

(2) 加载 257 d 后，边缘空洞补强、中心空洞补强、环向脱黏补强钢管混凝土试件的徐变度分别为无缺陷钢管混凝土试件的 101.8%、107.0%、126.4%，注浆补强对钢管混凝土徐变的影响规律为：缺陷补强后，钢管混凝土的徐变度小于补强前，但缺陷补强钢管混凝土试件的徐变度仍大于无缺陷钢管混凝土试件；补强后，缺陷类型对钢管混凝土徐变性能的影响程度与补强前一致。

(3) 为满足结构设计使用寿命的要求，工程中应严格控制缺陷，对于缺陷已经形成的钢管混凝土构件，采用注浆补强的处理方式可以改善缺陷对徐变产生的不利影响。

参考文献：

[1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structural from theory to practice[M]. Beijing: Science Press, 2016(in Chinese).

[2] HAN L H, LI W, BJORHOVDE R. Developments and advanced applications of concrete-filledsteel tubular (CFST) structures: Members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 100: 211-228.

[3] 王元丰. 钢管混凝土徐变理论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
WANG Yuanfeng. Concrete filled steel tube creep[M]. Beijing: Science Press, 2013(in Chinese).

[4] 胡守旺, 彭建新, 张建仁, 等. 钢管混凝土拱桥核心混凝土徐变效应可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 183-190.
HU Shouwang, PENG Jianxin, ZHANG Jianren, et al. Reliability analysis of core concrete creep effect on concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 183-190(in Chinese).

[5] 张戎令, 王起才, 马丽娜, 等. 膨胀剂掺量和含钢率对钢管混凝土徐变性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 749-756.
ZHANG Rongling, WANG Qicai, MA Lina, et al. Effects of expanding agent content and steel ratio on creep characteristics of concrete filled steel tube[J]. Journal of Building

Materials，2015，18(5)：749-756(in Chinese).

[6] 张戎令, 王起才, 马丽娜. 微膨胀和侧向约束共同作用下混凝土徐变性能和孔结构的关系[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5)：585-593.
ZHANG Rongling, WANG Qicai, MA Lina. Relations between pore structure and creep characteristics of concrete under micro-expanding and lateral restraints[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2015，43(5)：585-593(in Chinese).

[7] ZHANG R L, MA L N, WANG Q C, et al. Experimental studies on the effect of properties and micro-structure on the creep of concrete-filled steel tubes[J]. Materials，2019，12(7)：1046.

[8] 张戎令, 王起才, 马丽娜, 等. 膨胀剂掺量和应力比对钢管混凝土徐变性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7)：2416-2423.
ZHANG Rongling, WANG Qicai, MA Lina, et al. Effect of interaction between expanding agent proportion and stress ratio on creep characteristics of concrete filed steel tube[J]. Journal of Central South University(Science and Technology)，2014，45(7)：2416-2423(in Chinese).

[9] 张戎令, 王起才, 马丽娜, 等. 膨胀剂和钢管侧限对混凝土徐变应变的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(9)：2099-2105.
ZHANG Rongling, WANG Qicai, MA Lina, et al. Effect of expanding agent proportion and lateral confinement by steel tube on the creep strain of concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2017，34(9)：2099-2105(in Chinese).

[10] GENG Y, WANG Y Y, CHEN J. Time-dependent behaviour of steel tubular columns filled with recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research，2016，122：455-468.

[11] LUO K, PI Y L, GAO W, et al. Investigation into long-term behaviour and stability of concrete-filled steel tubular arches[J]. Journal of Constructional Steel Research，2015，104：127-136.

[12] MA Y S, WANG Y F. Creep of high strength concrete filled steel tube columns[J]. Thin-Walled Structures，2012，53：91-98.

[13] HAN L H, YE Y, LIAO F Y. Effects of core concrete initial imperfection on performance of eccentrically loaded CFST columns[J]. Journalof Structural Engineering，2016，142(12)：04016132.

[14] 韩浩, 廖飞宇, 林挺伟, 等. 脱黏缺陷对钢管混凝土拉弯构件性能的影响分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(3)：170-175, 90.
HAN Hao, LIAO Feiyu, LIN Tingwei, et al. Effects of concrete gap on the mechanical properties of CFST members subjected to bending and tension[J]. Industrial Construction，2018，48(3)：170-175, 90(in Chinese).

[15] 曲广龙, 李学彬, 纪明男, 等. 钢管混凝土注浆孔补强的短柱轴压试验[J]. 科技导报, 2013, 31(s2)：24-29.
QU Guanglong, LI Xuebin, JI Mingnan, et al. Axial compression test on reinforcement of the pouring hole on steel tube confined concrete[J]. Science & Technology Review，2013，31(s2)：24-29(in Chinese).

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical code for concrete filled steel tubular structures: GB 50936—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009(in Chinese).

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People' s Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009(in Chinese).

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009(in Chinese).

[19] 陈松林. 钢管混凝土收缩徐变试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.
CHEN Songlin. Experimental study on shrinkage and creep of concrete filled steel tube[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018(in Chinese).

[20] 陈志城, 阎培渝. 补偿收缩混凝土的自收缩特性[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4)：568-573.
CHEN Zhicheng, YAN Peiyu. Autogenous shrinkage of shrinkage-compensating concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2010，38(4)：568-573(in Chinese).

[21] 赵哲. 钢管混凝土收缩徐变性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
ZHAO Zhe. Study on shrinkage and creep of concrete filled steel tube[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011(in Chinese).

[22] 杜向琴, 李宗利, 韩进生, 等. 水泥净浆、砂浆和混凝土等温干燥过程对抗压强度的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5)：639-647.
DU Xiangqin, LI Zongli, HAN Jinsheng, et al. Effect of isothermal drying process of cement paste, mortar and concrete on compressive strength[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2019，47(5)：639-647(in Chinese).

[23] 吴泽弘, 魏亚. 基于CT扫描技术的水泥净浆微观结构及水化程度[J]. 复合材料学报, 2020, 37(4): 971-977.
WU Zehong, WEI Ya. Microstructure and degree of hydration of cement paste based on CT[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(4): 971-977(in Chinese).