

文章编号:1007-9629(2023)10-1096-08

压力养护钢管混凝土的力学性能和微观结构

王开强^{1,2}, 孙 庆^{1,2}, 董耀武^{1,2,*}, 林 琦^{1,2}, 杨 辉^{1,2}

(1. 中建三局集团有限公司, 湖北 武汉 430070; 2. 中国建筑先进技术研究院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 利用自制加压装置对不同强度等级和尺寸规格的 10 个钢管混凝土试件进行压力养护, 研究了养护压力和持续时间对试件轴压强度、应变和破坏特征的影响, 分析了水化产物发育、孔结构和微裂纹结构的发展情况。结果表明: 压力养护促使体系更加致密, 能够抑制微裂纹形成和发展; 水化产物结晶发育良好, 可填充孔隙结构, 提高混凝土自身强度; 当压力传导至钢管时使其产生环向拉伸应变, 核心混凝土终凝后, 钢管收缩对其产生预压应力, 两者协同增强, 从而提高了试件的轴向承载力。

关键词: 压力养护; 钢管混凝土; 力学性能; 微观结构

中图分类号: TU398^{+.9}

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.10.007

Mechanical Properties and Microstructure of Concrete Filled Steel Tube Hardening under Pressure Curing

WANG Kaiqiang^{1,2}, SUN Qing^{1,2}, DONG Yaowu^{1,2,*}, LIN Qi^{1,2}, YANG Hui^{1,2}

(1. China Construction Third Bureau Group Co., Ltd., Wuhan 430070, China; 2. China Construction Institute of Advanced Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: 10 concrete filled steel tube (CFST) specimens with different strength grades and sizes were cured under pressure by self-designed hydraulic device. The effects of curing pressure and its duration on uniaxial compressive strength, stress-strain variation and failure characteristic of CFST specimens were studied. Microscopic test methods were used to study the development and formation of pore structure and hydration products. The results show that the particles in the mixture are squeezed close to each other under pressure curing, and the formation and development of microcracks are inhibited, which lead to the higher compactness of core concrete. Moreover, the crystallization process of hydration products are promoted, and the pore structure can be fully filled by the hydration products, which improves the strength of core concrete. In addition, the pressure causes the circumferential tensile strain of steel tube, which provides pre-compressive stress on core concrete after final setting time. Therefore, the uniaxial compressive properties of the CFST are improved.

Key words: pressure curing; concrete filled steel tube (CFST); mechanical property; microstructure

水泥水化早期阶段的养护是水化产物微观结构形成的关键, 决定混凝土力学性能的发展^[1-2]。不同的养护制度对水泥水化进程、微观结构形成及强度发展的影响具有显著差异, 但普遍存在“高温、高压、潮湿环境可以促进水化”的规律^[3-6]。目前学者们多关注于温度制度对水泥水化进程和混凝土强度发展的影

响^[7-9], 而对压力养护制度的研究较少。

压力养护工艺可追溯至 20 世纪 70 年代, 前苏联利用加压和热养护使混凝土快速凝结硬化, 提高了模具使用周转率^[10]。中国针对铁路配重坠砣、路面砖及离心成型管桩等混凝土制品采用压力成型工艺, 所用的混凝土多为干硬性, 且成型压力小、持续时间

收稿日期: 2022-12-08; 修订日期: 2023-03-01

基金项目: 中建股份科技研发课题 (CSCEC-2021-Z-16)

第一作者: 王开强 (1979—), 男, 甘肃兰州人, 中建三局集团有限公司正高级工程师, 博士。E-mail: 814291652@qq.com

通讯作者: 董耀武 (1989—), 男, 山西万荣人, 中建三局集团有限公司工程师, 硕士。E-mail: dyw5639827@hotmail.com

短^[11-12].另外,在蒸压养护中所采用的加压通常是提高所处环境的气相压强,增加的压强通常小于1 MPa,压力对拌和物内部的影响有限^[1].

为实现流态化混凝土拌和物能够在更高压力下养护的目的,本文采用两段式钢管,利用钢管约束混凝土拌和物,通过自制加压装置直接对钢管内的混凝土施加压力,并维持此压力来养护混凝土至终凝硬化.研究压力养护条件下混凝土内部的物料分布、微观结构、水化进程和强度发展,测试钢管混凝土(CFST)试件的轴压力学性能,探索压力养护工艺对CFST材料和性能的影响机理.

1 试验

1.1 原材料及配合比

采用C70SF钢纤维混凝土和C70混凝土制备钢管混凝土试件.表1为2种混凝土的配合比和表观密度.其中,水泥(C)为华新水泥股份有限公司产P·O 42.5普通硅酸盐水泥;矿粉(K)为武汉武新新型建材有限公司产S95级矿粉;硅灰(Si)为四川朗天资源综合利用有限责任公司产微硅粉,SiO₂含量(质量分数,文中涉及的含量、含固量等除特别注明外均为质量分数)大于等于93%;砂(S)为湖北孝感产水洗机制砂,细度模数为2.6;石(G)为湖北咸宁产5~25 mm连续级配玄武岩青石;外加剂(PCE)为武汉优城科技有限公司提供的UC-300聚羧酸高性能减水剂,含固量为25%;钢纤维(SF)为镀铜钢纤维,长度为12~14 mm,抗拉强度大于等于2 800 MPa;拌和水(W)为自来水.

1.2 试件及加压装置

两段式CFST试件示意图如图1所示.由图1可见,钢管由行程段钢管和试验段钢管这两段Q355钢管焊接而成,其中试验段钢管一端闭合,另一端连接行程段钢管,行程段钢管直径较小,目的是能够在较小的顶推力下达到更高的养护压强.自制加压装置示意图见图2.该加压装置由液压千斤顶、反力架、托架、张拉螺杆和顶推活塞杆等构成,其中液压千斤顶的最大顶撑力为200 t,可自动锁闭.

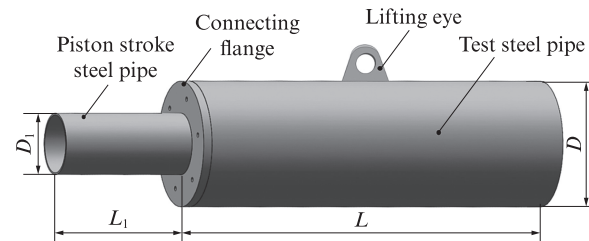


图1 两段式CFST试件

Fig. 1 CFST specimen welded together in two sections

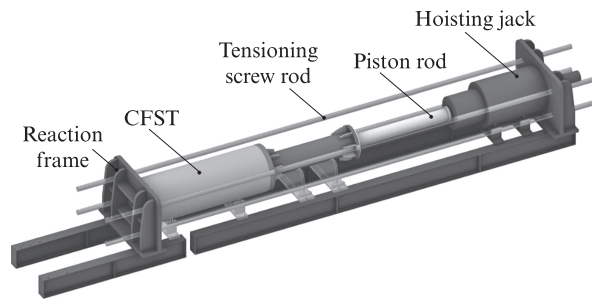


图2 自制加压装置

Fig. 2 Self-designed hydraulic device

CFST试件制作步骤如下:(1)通过行程段钢管开口向钢管内浇筑混凝土,待浇筑至距开口50 mm处停止,放置可活动的密封垫片进行封口;(2)将钢管混凝土试件整体卧式放入自制加压装置中,顶推活塞杆一端伸入行程段钢管内接触密封垫片,一端接触液压千斤顶,进行压力养护;(3)压力养护结束后,取出灌注混凝土的两段式钢管混凝土试件,用盘锯将试验段和行程段切割分离,并将试验段断面打磨平整,即制备得到轴压试验用CFST试件.

1.3 试验方案

试验方案如表2所示.由表2可见:(1)当采用C70SF钢纤维混凝土填充钢管时,压力 F 设置为0(仅用震动棒振捣密实成型)、29、45、63 t,折合压强 P 为0、16、26、36 MPa,压力养护持续时间 t 设置为24 h;随着施加压力的增加,试验段钢管的壁厚 T 适当增加,以防止钢管因压力而出现屈服.(2)当采用C70混凝土填充钢管时,压力 F 统一设置为45 t,折合压强 P 为26 MPa,压力养护持续时间 t 设置为4、8、24 h.

表1 2种混凝土的配合比和表观密度
Table 1 Mix proportions and apparent density of two kinds of concretes

Type of concrete	Mix proportion/(kg·m ⁻³)								Apparent density/(kg·m ⁻³)
	W	C	K	Si	SF	S	G	PCE	
C70SF	140.0	500.0	100.0	50.0	10.0	635.0	950.0	12.2	2 396.5
C70	140.0	480.0	100.0	25.0	0	660.0	980.0	9.4	2 394.4

表 2 试验方案
Table 2 Experiment scheme

Specimen No.	Type of concrete	D_1/mm	T_1/mm	L_1/mm	D/mm	T/mm	L/mm	P/MPa	F/t	t/h
D2A10	C70SF	159.0	4.5	350.0	273.0	8.0	1 000.0	0	0	0
D2B10						12.0		0	0	0
D2C10						16.0		0	0	0
S2A10						8.0		16	29	24
S2B10						12.0		26	45	24
S2C10						16.0		36	63	24
D3B8	C70	159.0	4.5	350.0	325.0	12.0	1 000.0	0	0	0
S3B8T04								26	45	4
S3B8T08								26	45	8
S3B8T24								26	45	24

Note: T_1 —Wall thickness of piston stroke steel pipe.

1.4 测试方法

浇筑两段式钢管的同时,取部分混凝土制作边长为 150 mm 的立方体试块,同条件下养护至规定龄期.对行程段钢管中的核心混凝土和立方体试块进行钻芯取样,均制备成尺寸为 $\phi 70.7 \times 70.7$ mm 的试件,依据 JGJ/T 384—2016《钻芯法检测混凝土强度技术规程》进行抗压强度检测.

对试验段钢管进行切割,将混凝土断面打磨平整,在同条件下养护至 56 d,采用 30 000 kN 电液伺服压力试验机进行轴压试验,加载速率为 0.5 mm/min,至试件破坏后停止加载.

在试验段钢管外表面上部(1-1)、中部(2-2)和下部(3-3)布置应变片和位移传感器,如图 3 所示.监测数据处理需要考虑到试件各方向变形不均匀及试验结果的离散性,每个截面上均以应力为基准,对 4 个方向的测点应变数据取平均值,获得该截面的平均应力-应变曲线;荷载-位移曲线同理,取 4 个方向的位移平均值.

将行程段钢管混凝土断面处的 20 mm $\times$ 20 mm 砂浆碎片,与作为对比样品的同条件养护试块的砂浆碎片,放入无水乙醇中密闭保存 24 h 以终止水化;随后在 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 24 h 后制得微观试样,采用日本电子 JSM-IT300 型扫描电子显微镜(SEM)进行微观结构表征.

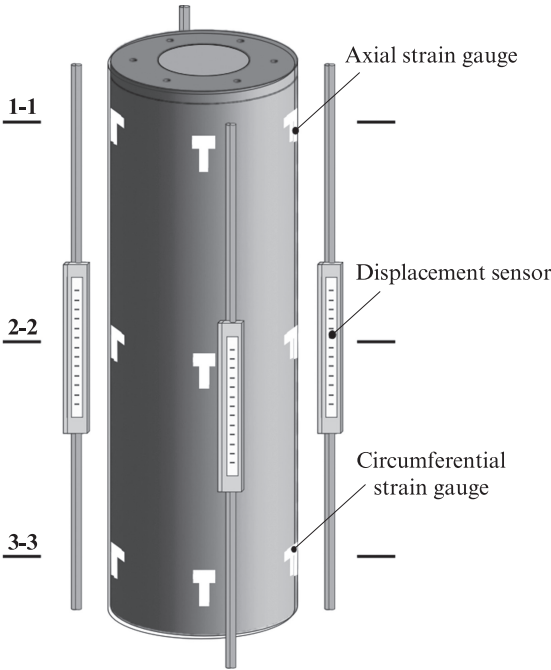


图 3 试验段钢管的应变片和位移传感器布置
Fig. 3 Strain gauge and displacement sensor arrangement of test steel pipe

2 结果与讨论

2.1 物理性能

2.1.1 核心混凝土的工作性能和力学性能

表 3 为核心混凝土的工作性能和力学性能.图 4 为核心混凝土的抗压强度和表观密度变化.

表 3 核心混凝土的工作性能和力学性能
Table 3 Workability and mechanical property of core concrete

Type of concrete	Slump/mm	Slump-flow/mm	Emptying time/s	Air content(by volume)/%	Initial setting time/min	Final setting time/min	Cubic compressive strength/MPa	Compressive strength of cylinder core/MPa
C70SF	240	635	18.9	4.8	660	1 020	68.8	72.6
C70	250	660	14.6	4.2	360	600	63.7	68.2

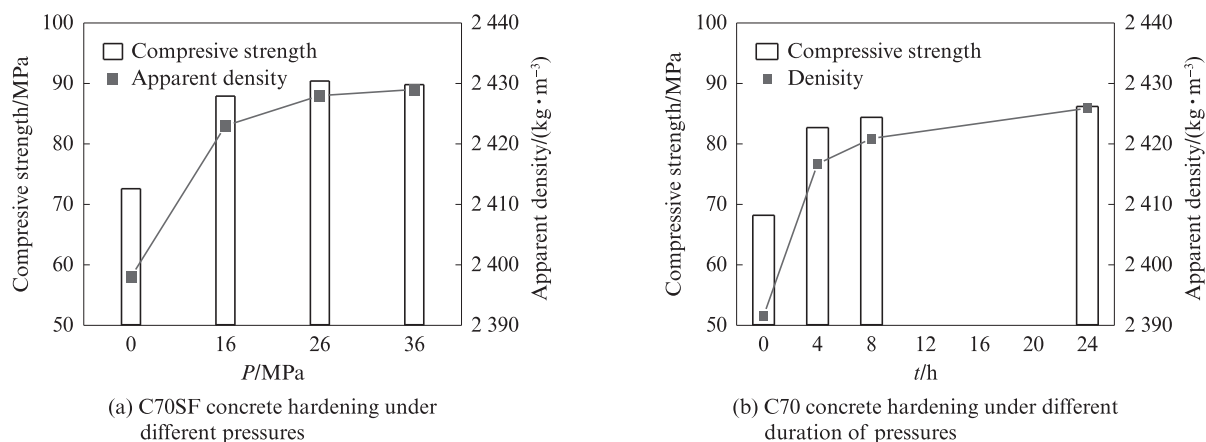


图4 核心混凝土的抗压强度和表观密度变化

Fig. 4 Changes in compressive strength and apparent density of core concrete

结合表3和图4可知,2种新拌混凝土均满足大流态工作性,特别是C70SF钢纤维混凝土由于掺有钢纤维,微硅粉用量大且聚羧酸减水剂掺量高,导致混凝土拌和物黏度增大、倒置坍落度桶的排空时间延长、凝结时间延长.核心混凝土的抗压强度和表观密度受配合比、养护压力和压力持续时间等因素的综合影响,总体呈现下述规律:(1)压力养护下,2种核心混凝土的表观密度均有所增加,增幅为25~30 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;(2)相较未加压的C70SF钢纤维混凝土芯样对照组,随着养护压力的提高,加压C70SF钢纤维混凝土芯样抗压强度的增幅为21.1%~24.5%;但最大养护压力(36 MPa)与最小养护压力(16 MPa)下的2组C70SF钢纤维混凝土芯样抗压强度增幅接近,仅相差1.9 MPa,表明过高的养护压力对核心混凝土强度的提升效果并不显著.(3)相较未加压的C70混凝土芯样对照组,随着压力养护时间的延长,加压C70混凝土的表观密度和抗压强度均有所增加;与压力养护时间为4 h的C70混凝土相比,压力养护时间为24 h的C70混凝土强度仅提高3.5 MPa,

表明混凝土流态阶段时的加压养护可以显著提高混凝土密实度,但初凝后的持续加压对混凝土密实度的改善效果有所降低.

2.1.2 CFST试件的轴压性能

表4为10个CFST试件单轴压缩时的特征参数.图5对比了试验段钢管外径 $D=273.0$ mm的6个CFST试件的荷载-位移曲线.结合表4和图5可知:(1)CFST试件受压时,荷载-位移曲线呈现弹性段、弹塑性段和塑性段3个阶段;(2)弹性段时CFST试件的荷载-位移曲线近似线性关系,且随着钢管壁厚的增加,曲线斜率显著增加,表明CFST试件整体刚度增加;而相同壁厚的压力养护试件(S2A10、S2B10和S2C10)的刚度较振捣成型对照组试件(D2A10、D2B10和D2C10)提升幅度为13%~23%.(3)进入弹塑性段时CFST试件的轴压刚度降低,直至到达极限荷载,相同壁厚的压力养护组试件的极限承载力较对照组提升20%以上.(4)随着钢管壁厚的减小,压力养护对CFST试件极限承载力的提升幅度基本一致.(5)随着压力养护时间的延长,特别是混凝土

表4 CFST试件单轴压缩时的特征参数

Table 4 Characteristic parameters of CFST specimens under uniaxial compression

Specimen No.	Peak load/kN	Peak compressive strength/MPa	Range of load capacity improvement/%	Stiffness/($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	Stiffness increase rate/%
D2A10	6 497	111.0	—	1 743.1	—
D2B10	6 863	117.2	—	1 940.6	—
D2C10	7 548	128.9	—	2 330.2	—
S2A10	7 806	133.4	20.2	1 974.9	13.3
S2B10	8 397	143.5	22.4	2 382.8	22.8
S2C10	9 146	156.2	21.2	2 787.3	19.6
D3B8	9 326	118.0	—	—	—
S3B8T04	10 928	131.7	17.2	—	—
S3B8T08	11 508	138.7	23.4	—	—
S3B8T24	11 442	137.9	22.7	—	—

土终凝后的持续加压对CFST试件承载力提升效果有限。

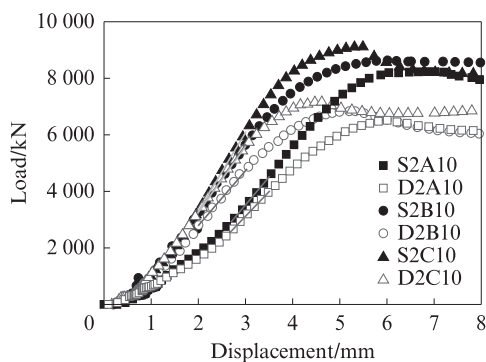


图5 CFST试件的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of CFST specimens

图6为试件S2A10和D2A10在3-3截面处的荷载-应变曲线。由图6可见：S2A10试件的环向和轴向曲线拐点处的应变值稍小，表明钢管中残存的应力导致钢材更早进入屈服状态；但由于钢管增强了对核心混凝土的约束作用，提升了核心混凝土强度，使试件的极限承载力显著增加。

2.1.3 CFST试件的破坏特征

图7为CFST试件的破坏特征。由图7可见：随着轴向压力的逐渐增大，在试验段钢管上部1-1截面处率先出现鼓胀变形现象，该处钢管在极限荷载

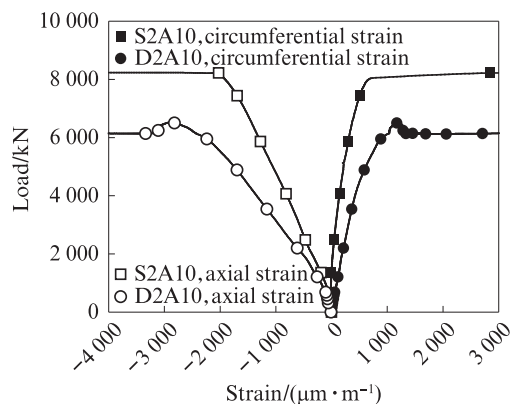


图6 试件S2A10和D2A10在3-3截面处的荷载-应变曲线

Fig. 6 Load-strain curves at sections 3-3 of specimen S2A10 and D2A10

出现前就已进入屈服状态；当荷载到达极限时，钢管呈现两端小、中间大的整体鼓胀变形状，并逐渐产生斜向45°的变形纹路，这是混凝土受压产生剪切滑移的典型破坏特征，表明钢管内部的混凝土已经完全破坏；继续加载后，钢管变形继续增大，压力下降到一定程度时维持稳定，此时钢管整体出现明显鼓胀屈服变形。由此可见，虽然压力养护的核心混凝土具有更高的表观密度和抗压强度，CFST试件的极限承载力有一定提升，但其变形破坏特征并无显著差别。

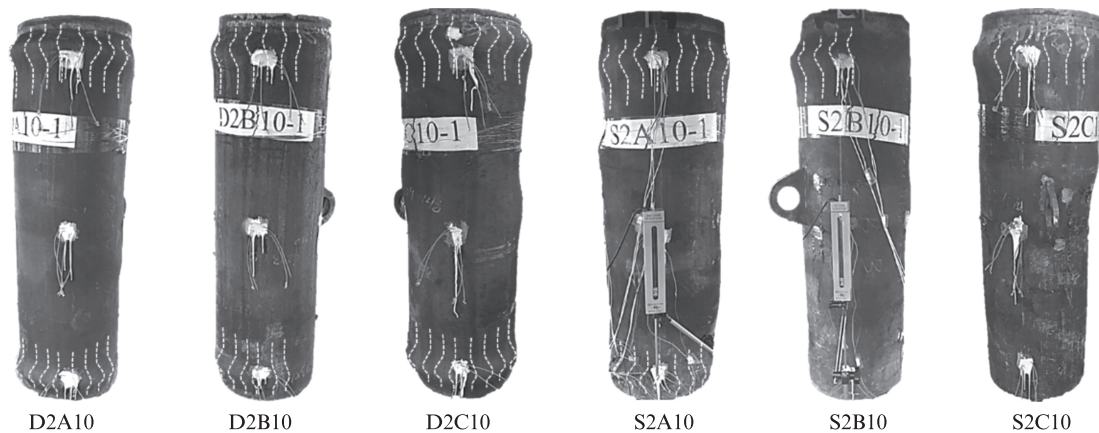


图7 CFST试件的破坏特征

Fig. 7 Damage characteristics of CFST specimens

2.2 压力下的钢-砼协同效应

2.2.1 压力下的混凝土拌和物

图8为混凝土拌和物的固-液-气三相体系。由图8可见，混凝土拌和物在搅拌过程中混入空气，部分尺度的气泡可以稳定存在，而胶凝材料颗粒分散于液相中，浆体通常呈现出非牛顿流体剪切变稀的流变特性。通过高频率振动使混凝土拌和物呈现低黏度的液化状态，使内部气泡自由上浮排出，较大颗粒依靠重力

作用紧密堆积。图9为振动成型的混凝土立方体试块断面的孔隙分布。由图9可见，混凝土拌和物即使被充分振动，其内部仍然存在大量宏观气泡无法自由排出，硬化后在内部形成尺度不一的孔洞，经Image J软件分析可知，该处断面的宏观孔隙率为4.70%。

图10为试件S2A10的切割断面及其二值化图像。由图10可见，压力养护的混凝土试件断面骨料分布均匀，宏观观测几乎无明显的气孔或孔洞，经

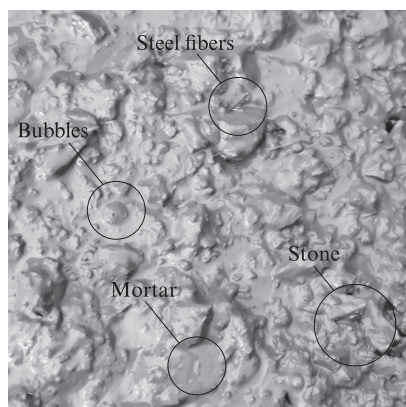


图8 混凝土拌和物的固-液-气三相体系

Fig. 8 Solid-liquid-gas dispersion system of concrete mixture

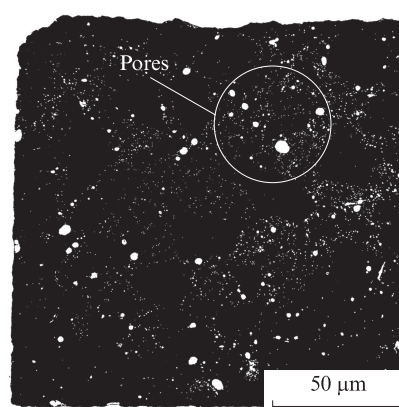
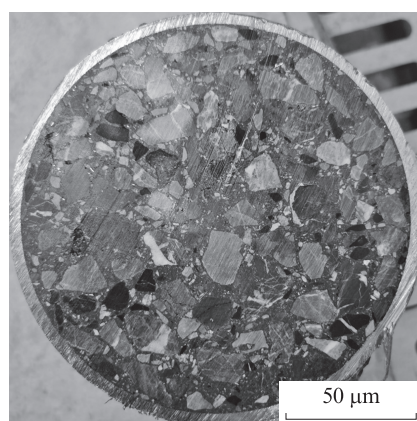


图9 振动成型的混凝土立方体试块断面的孔隙分布

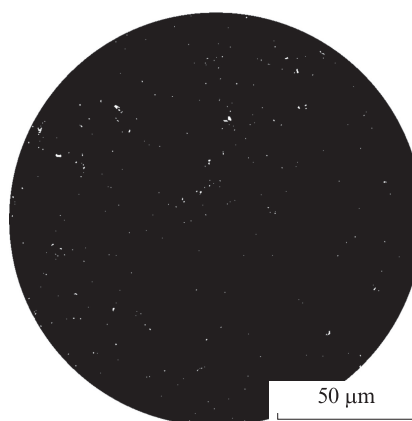
Fig. 9 Pore distribution in the cross-section of concrete cube specimens formed by vibration

Image J软件分析可知,该处断面的宏观孔隙率为0.35%,与振捣成型的试件断面相比,改善效果显著.这表明,在外部压力增加过程中,混凝土拌和物中的

颗粒之间相互错动挤压、重新组合排布,气泡通过颗粒间隙排出,拌和物体积被显著压缩,从而达到紧密堆积的效果.



(a) Cutting section



(b) Binarization image

图10 试件S2A10的切割断面及其二值化图像

Fig. 10 Cutting section of specimen S2A10 and its binarization image

2.2.2 压力下的水泥早期水化的微观结构

有研究认为,养护条件可以促使C-S-H凝胶的类型发生变化,从而影响混凝土的微观力学性能和形貌结构^[4].

图11为同条件养护和压力养护试件的断面微观形貌.由图11可见:(1)同条件养护试件的断面存在较多微孔隙,且有较多贯穿孔结构和界面过渡区的微裂纹;同条件养护下水化产物多为聚合度较低的絮状或颗粒状,少量水化产物交叉生长于孔洞、微裂纹和界面过渡区(ITZ)中.(2)压力养护试件的断面上的水化产物多为纤维状的AFt和无定形状凝胶状的C-S-H,形貌更粗壮和丰富,晶体的生长发育更粗大,相互交联更紧密,遍布界面过渡区.这表明,压力养护下水化产物密集填充到孔结构、微裂纹和界面过渡区中,使得水泥石微观结构更为致密,微米级的

孔洞数量少,抑制了微裂纹的发展.

2.2.3 钢管-核心混凝土的协同增强机理

压力养护在增强核心混凝土自身密实度的同时,势必会对外围约束的钢管产生影响.以试件S2A10为例,研究了压力养护时钢管的环向应变变化情况,结果见图12.由图12可见:混凝土拌和物将压力传导至约束钢管上,导致钢管各部位均产生环向膨胀,其中试验段钢管上部1-1处和中部2-2处的环向应变较为接近,且均略大于底部3-3处,这是压力在混凝土内部传导衰减,且钢板封底的约束作用所导致的;在压力保持阶段,环向应变值随着时间的延长而缓慢减小,表明混凝土拌和物内颗粒持续挤压重组,体积逐渐收缩,加之混凝土水硬化过程中的温度收缩和自收缩,导致约束钢管的环向应变有所减小.钢管恢复原状的趋势会对核心混凝土产生

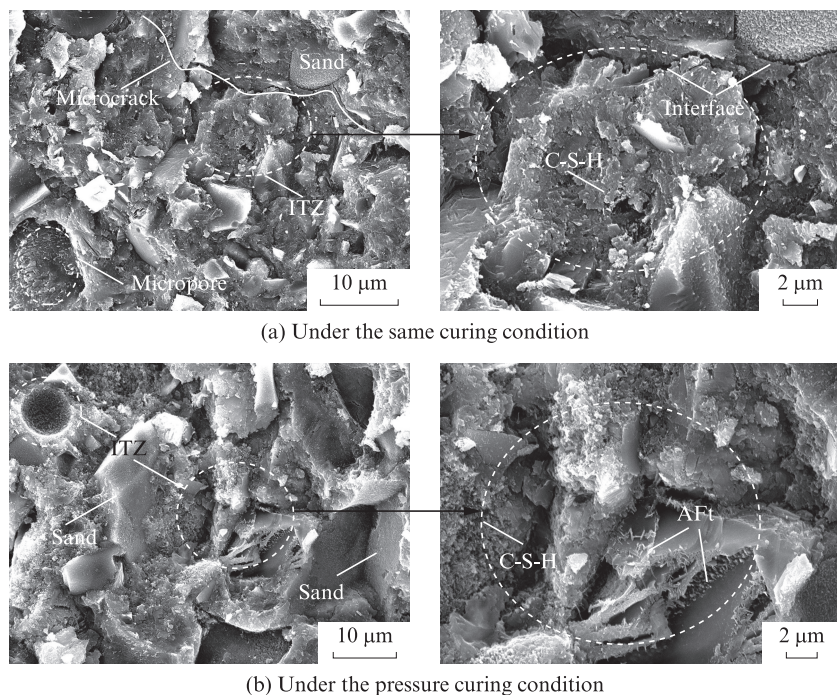


图 11 同条件养护和压力养护试件的断面微观形貌

Fig. 11 Section microstructures of specimens under the same curing condition and pressure curing condition

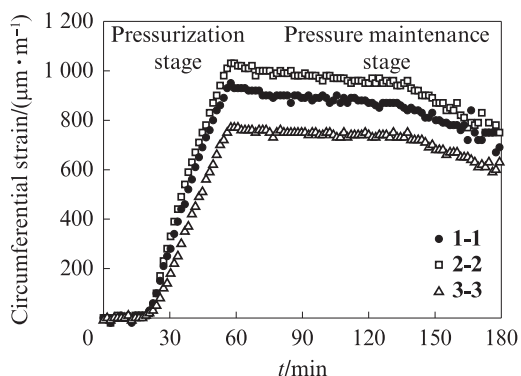


图 12 压力养护时钢管的环向应变

Fig. 12 Circumferential strain of steel pipe during pressure curing

“环箍”作用,从而给核心混凝土提供向内的预压应力。

对于振捣成型试件,由于核心混凝土硬化时的自然收缩,使其与钢管产生“剥离”趋势;在受压时钢管变形会进一步增加两者的“剥离”趋势,其核心混凝土总体处于单向受压状态^[13-15]。图 13 显示了 CFST 试件的初始应力状态。由图 13 可见,CFST 试件在轴向压缩时,外围约束钢管在轴向和环向上均处于拉伸应力的状态,具有收缩压实核心混凝土的趋势,因此在受压初期需先克服钢管内的轴向拉应力;核心混凝土在受压初期即处于三向受压的应力状态,混凝土横向变形须先克服外围约束钢管的预加环向压应力,加之核心混凝土自身密实度和强度的提升,钢管和核心混凝土

土产生协同互补、共同受力的效果,使得试件整体承载力显著提高。

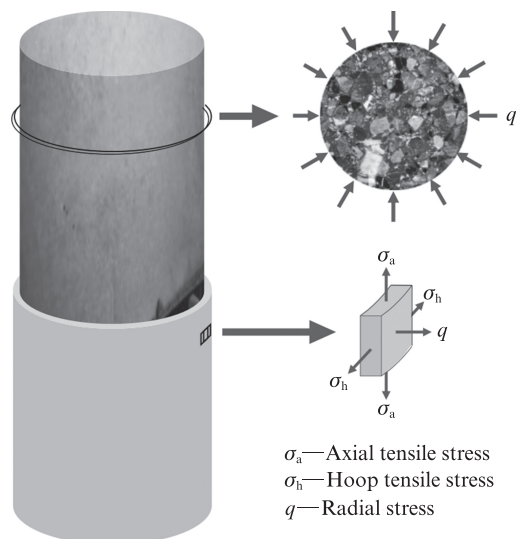


图 13 CFST 试件的初始应力状态

Fig. 13 Initial stress state of CFST specimen

3 结论

(1)在混凝土凝结硬化阶段采用压力养护,可以改善混凝土自身的微观结构和力学性能。压力养护后水化产物结晶良好、形貌多样化,能够充分填充孔隙和界面过渡区;混凝土断面处的宏观孔隙率由 4.70% 降至 0.35%。

(2)过高的养护压力和初凝后的持续加压,对继

续提高核心混凝土强度的效果有限.当养护压力由16 MPa增加到36 MPa时,C70SF钢筋纤维混凝土芯样强度仅提高1.9 MPa;当压力养护持续时间由4 h增加到24 h时,C70混凝土芯样强度仅提高3.5 MPa.

(3)压力传导至外围钢管上,使钢管发生环向拉伸变形.随着压力养护结束和核心混凝土的自身收缩,钢管收缩趋势给核心混凝土施加环向预压应力,同时由于混凝土自身强度的提高,使得钢管混凝土试件的极限承载力提高20%以上,压力养护对试件的破坏特征无显著影响.

参考文献:

- [1] 张高展,葛竞成,张春晓,等.养护制度对混凝土微结构形成机理的影响进展[J].材料导报,2021,35(15):15125-15133.
ZHANG Gaozhan, GE Jingcheng, ZHANG Chunxiao, et al. Review on the microstructure formation mechanism in concrete material under different curing regimes[J]. Materials Reports, 2021, 35(15):15125-15133. (in Chinese)
- [2] 袁盼.温湿度变化对水泥石微结构形成过程的影响及改善机制[D].武汉:武汉理工大学,2016.
YUAN Pan. Influences of temperature and humidity change on microstructure formation of cement paste and its improvement mechanism [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [3] 刘永亮,孔祥明,张敬义,等.养护温度对水泥沥青砂浆强度发展的影响[J].建筑材料学报,2012,15(2):211-217,231.
LIU Yongliang, KONG Xiangming, ZHANG Jingyi, et al. Effect of curing temperature on strength development of cement asphalt mortars[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 211-217, 231. (in Chinese)
- [4] 徐翔波,于泳,金祖权,等.养护制度对超高性能混凝土微观结构和力学性能影响的研究综述[J].硅酸盐通报,2021,40(9):2856-2870.
XU Xiangbo, YU Yong, JIN Zuquan, et al. Review on effects of microstructure and mechanical properties of ultra-high performance concrete by curing regimes [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(9):2856-2870. (in Chinese)
- [5] 朱绘美,张煜雯,迁晨,等.微波养护阶段碱激发粉煤灰胶凝材料的力学性能[J].建筑材料学报,2022,25(6):558-564.
ZHU Huimei, ZHANG Yuwen, YU Chen, et al. Mechanical properties of alkali-activated fly ash cementitious materials under microwave curing stages[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6):558-564. (in Chinese)
- [6] JUSTS J, BAJARE D, SHAKHMENKO G, et al. Ultra-high performance concrete hardening under pressure[C]//The 3rd International Scientific Conference Civil Engineering. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2011:38-43.
- [7] 韩笑,冯竟竟,孙传珍,等.50℃养护下超细粉煤灰-水泥复合胶凝材料的性能研究[J].建筑材料学报,2021,24(3):473-482.
HAN Xiao, FENG Jingjing, SUN Chuazhen, et al. Research on properties of ultrafine fly ash and cement cementitious materials under curing at 50℃[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):473-482. (in Chinese)
- [8] 杨正宏,高双双,于龙,等.养护温度对陶粒内水分向水泥浆体中迁移行为的影响[J].建筑材料学报,2020,23(1):138-144.
YANG Zhenghong, GAO Shuangshuang, YU Long, et al. Effect of curing temperature on migration of water from ceramsite to cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 138-144. (in Chinese)
- [9] 陈钰婷,王中平,彭相,等.高温与碳化对铝酸盐水泥水化产物氯离子结合稳定性的影响[J].建筑材料学报,2022,25(7):715-721.
CHEN Yuting, WANG Zhongping, PENG Xiang, et al. Effect of high temperature and carbonization on chloride binding stability in calcium aluminate cement[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):715-721. (in Chinese)
- [10] 邱玉深.混凝土的加压快速养护[J].施工技术,1979(4):34-37.
QIU Yushen. Rapid curing process of concrete formed under pressure [J]. Building Technology Newsletter (Construction Technology), 1979(4):34-37. (in Chinese)
- [11] 颌旭虎,边振江,杨进勇,等.加压成型高强活性粉末混凝土配制与试验[J].机场工程,2015(3):5-11.
XIE Xuhu, BIAN Zhenjiang, YANG Jingyong, et al. Preparation and testing of high strength reactive powder concrete formed under pressure [J]. Airport Engineering, 2015(3):5-11. (in Chinese)
- [12] 严志隆.关于管桩离心成型工艺参数的确定[J].混凝土与水泥制品,2011(1):40-42.
YAN Zhilong. Determination of parameters for centrifugal cast [J]. China Concrete and Cement Products, 2011(1):40-42. (in Chinese)
- [13] 丁庆军,何真.现代混凝土胶凝浆体微结构形成机理研究进展[J].中国材料进展,2009,28(11):8-18.
DING Qingjun, HE Zhen. Advances in research on the formation mechanism of cementitious paste microstructure in current concrete [J]. Material China, 2009, 28(11):8-18. (in Chinese)
- [14] 韩林海.钢管混凝土结构—理论与实践[M].3版.北京:科学出版社,2016:115-120.
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures—Theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016:115-120. (in Chinese)
- [15] 曾志伟,黄永辉,陈碧静,等.高强钢管高强混凝土短柱轴压承载力试验研究[J].建筑结构,2022,52(18):72-77.
ZENG Zhiwei, HUANG Yonghui, CHEN Bijing, et al. Experimental study on bearing capacity of short columns with high-strength concrete-filled high strength steel tubes under axial loading[J]. Building Structure, 2022, 52(18):72-77. (in Chinese)