

轴压荷载下钢管混凝土损伤状态超声波检测

陈 猛, 陈希卓, 陈耕野, 赵俊植

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 对3种壁厚的薄壁圆钢管高强混凝土短柱进行轴压试验,在加载过程中对柱中截面进行超声波检测,得到不同轴压荷载下的波形图,对波形图进行快速傅里叶变换,得到超声波通过钢管混凝土的频谱图.分别利用波形图、不同荷载作用下的波形最大幅值图和频谱图分析钢管内混凝土的损伤演变过程.试验结果表明:轴压荷载作用下钢管内混凝土的损伤呈3段式变化,分别为初期裂缝的扩展、套箍作用下的逐步密实和混凝土破坏.钢管外壁的应变分析发现其变化过程与超声波检测的波形和频谱分析的损伤过程一致.超声波技术可准确检测轴压荷载作用下钢管内混凝土的损伤状态.

关 键 词: 超声波;薄壁钢管;高强混凝土;波形图;频谱;损伤状态

中图分类号: TU 398 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)10-1458-05

Ultrasonic Wave Testing on Damage Condition of Concrete Filled Steel Tube Under Axial Loading

CHEN Meng, CHEN Xi-zhuo, CHEN Geng-ye, ZHAO Jun-zhi

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: CHEN Meng, E-mail: cmwhut@163.com)

Abstract: Axial compression tests were conducted on high-strength concrete-filled thin-walled steel tubular short columns with three kinds of wall thickness combined with ultrasonic testing on the middle cross section of the column. The waveforms under different axial loads were analyzed through fast Fourier transform to obtain the frequency spectrum when ultrasonic waves passing through the concrete-filled steel tube. The damage process of concrete in the steel tube can be reflected by the waveform, the maximum amplitude and the frequency spectrum of the waveforms under different loads. The experiment results showed that the damage process of concrete under axial loading takes on a three-stage characteristic, which can be divided into the extension of initial cracks, the compaction due to the hooping effect and the failure of the concrete. The strain changing on the outer wall of the steel tube agrees with the damage process reflected by waveform and spectrum analysis. The ultrasonic testing method can be applied to accurately measure the damage condition of concrete in the steel tube under axial loading.

Key words: ultrasonic wave; thin-walled steel tube; high strength concrete; waveform; frequency spectrum; damage condition

轴压荷载作用下钢管混凝土柱的核心混凝土处于3向受压状态,混凝土的强度、韧性等力学性能有较大提高.采用薄壁钢管可有效降低钢材用量、简化焊接工艺,从而减少工程量、降低造价,具有广泛的应用前景,可用于高层民用住宅、大跨度

拱桥及隧道支护工程.

国内外学者对薄壁钢管混凝土的力学性质进行了一些研究,王志滨等^[1]分析了内置圆形截面空钢管对薄壁方钢管力学性能的影响. Liew等^[2]研究了圆套圆复式实心钢管高强混凝土的力学性

收稿日期: 2018-01-09

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540304, 20170540303); 硅酸盐建筑材料国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金资助项目(SYSJJ2017-08); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N170104023); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LR2015024).

作者简介: 陈 猛(1981-),男,辽宁铁岭人,东北大学讲师,博士; 陈耕野(1955-),男,湖北广济人,东北大学教授.

能. Dundu^[3]研究了钢管的长度、直径、强度及混凝土强度对局部受压的圆形截面钢管混凝土柱的影响. Ding 等^[4]研究了不同的钢管壁厚和受力面宽度对方形和圆形截面钢管混凝土柱的影响. Zhou 等^[5]进行了高强钢管混凝土短柱的轴压性能研究. Yang 等^[6]进行了薄壁方形和圆形截面钢管混凝土柱的局部受压试验.

超声波检测技术可较为准确地反映钢管内混凝土浇筑的密实情况^[7-10],在轴压荷载作用下钢管内核心混凝土的损伤累积必然引起密实度变化,因此可利用超声波技术检测荷载作用下钢管混凝土的损伤状态. 结合波形图和频谱图分析不同壁厚的薄壁钢管与混凝土协同工作的过程及核心混凝土的损伤状态. 通过波形图最大幅值随轴压荷载的变化曲线,揭示核心混凝土的损伤演变过程.

1 试验概况

1.1 材料及试验

试验采用壁厚分别为 1.8、2.0 和 3.0 mm 的直缝焊接圆钢管,编号分别为 SC-1.8、SC-2.0 和 SC-3.0,长度均为 700 mm,钢管外径为 219 mm,钢材的牌号为 Q235,弹性模量为 206 GPa. 混凝土采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥;粗骨料选用粒径 5~25 mm 的碎石,级配连续;细骨料采用中粗砂,细度模数为 2.56;聚羧酸高效减水剂减水率为 38%,用量为 5.5 kg/m³;混凝土的立方体抗压强度为 67.3 MPa,配合比为:水泥 569 kg,石子 1 100 kg,砂 645 kg,水 136 kg.

1.2 测试装置

试验在 5MN 压力机上进行,加载方法采用单调分级加载,在钢管外壁中间和端部的纵向和环向粘贴应变片. 超声波检测采用 U5200 非金属超声检测仪,声波检测频带宽度为 3~450 kHz,试件加载及超声波检测装置如图 1 所示.

超声波检测仪的平面换能器由支架固定在钢管的中部,为了使平面换能器与钢管紧密接触,在二者之间设置有机玻璃耦合块,耦合块与钢管的接触面为曲面,曲率半径与钢管半径相同,如图 2 所示.

1.3 试验步骤

试验具体步骤如下:

- 1) 吊装试件,调试对中后连接应变测试线;
- 2) 利用支架将耦合块与平面换能器固定在钢管表面,连接数字声波仪;

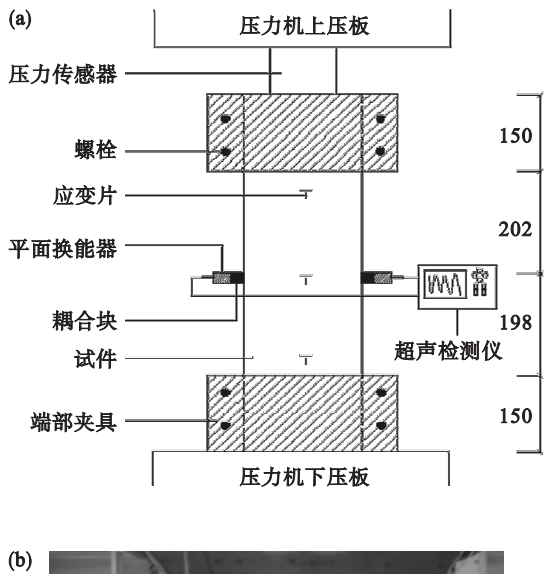


图 1 试件加载及超声波检测装置
Fig. 1 Loading and ultrasonic testing devices
(a)—加载示意图(mm); (b)—加载装置.

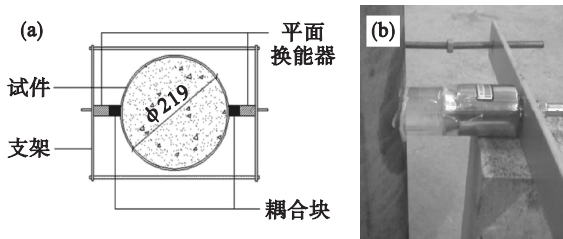


图 2 超声波检测夹具装置(mm)
Fig. 2 Ultrasonic testing fixture device
(a)—夹具装置; (b)—曲面耦合块.

3) 对试件进行预加载,密实试件各部位的缝隙,检查测试仪器是否正常工作,然后卸载;

4) 分级单调加载,起初以 4 kN/s 的加载速度进行加载,当加载到 70% 极限荷载左右时,降低加载速度,以 2 kN/s 的加载速度进行缓慢

加载;

5) 从加载开始,每间隔 200 kN 进行超声波测试,并观察试件变形及损伤情况.

2 结果与讨论

2.1 波形分析

对超声波检测数据进行处理,获得超声波通过钢管混凝土试件时的波形图,2.0 mm 壁厚的钢管混凝土波形如图 3 所示.

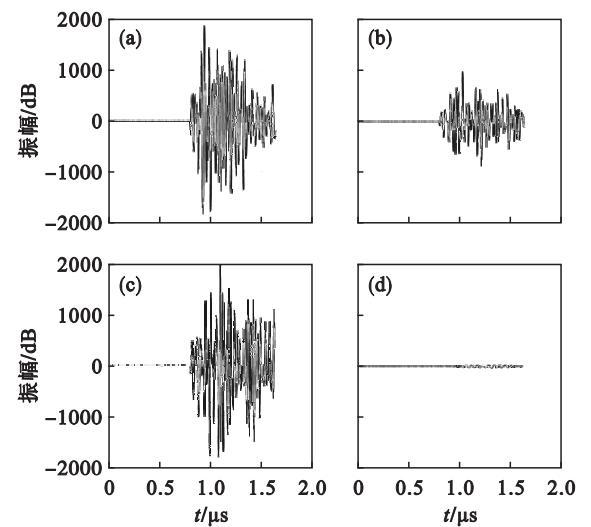


图 3 轴压下钢管混凝土试件超声波波形图

Fig. 3 Ultrasonic waveform of concrete filled steel tube under axial load

(a)—0; (b)—800 kN; (c)—1 000 kN; (d)—2 400 kN.

由图 3a 可知,SC - 2.0 在未加载状态下的波形较为紧凑,最大振幅出现在 0.9 ~ 1.3 s 之间,大小在 1 900 dB 左右(SC - 1.8 和 SC - 3.0 在未加载时最大振幅分别为 1 700 和 1 900 dB). 由图 3b 可知,轴压荷载为 800 kN 时,最大振幅降低到 1 000 dB 左右,振幅的衰减幅度较大,波动较为明显(SC - 1.8 和 SC - 3.0 最大振幅分别在 1 000 和 800 kN 时降为 750 和 1 000 dB). 由图 3c 可知,加载到 1 000 kN 时,最大振幅有了较大提高,达到 2 000 dB 左右,最大振幅出现在 1.0 ~ 1.4 s 之间,波形较 800 kN 时更加紧密(SC - 1.8 和 SC - 3.0 最大振幅分别在 1 200 和 1 000 kN 时增大到 800 和 1 400 dB). 由图 3d 可知,在加载到 2 400 kN 时,波形图发生较大变化,最大振幅降低到 50 dB 左右,波形畸变明显(SC - 1.8 和 SC - 3.0 最大振幅分别在 1 900 和 2 800 kN 时降为 500 和 600 dB).

2.2 荷载对波形图最大幅值的影响

提取不同荷载作用下不同构件波形图的最大

振幅,得到波形图最大幅值随轴压荷载变化的曲线,如图 4 所示.

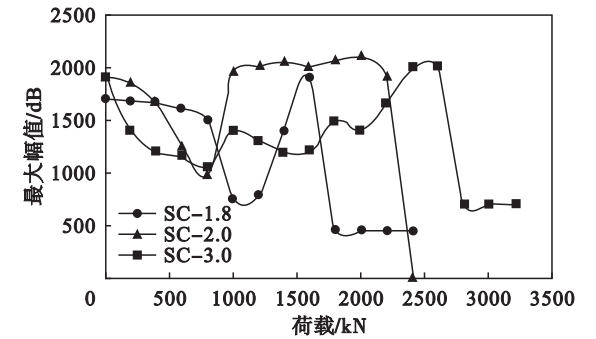


图 4 荷载对最大幅值的影响

Fig. 4 Effect of loads on the maximum amplitude

由图 4 可知,在轴压荷载作用下,SC - 1.8 在 0 ~ 400 kN 轴压荷载作用下的最大幅值平稳发展;在 400 ~ 1 000 kN 加载过程中,最大幅值不断降低,表明混凝土的裂隙产生并不断发展;在荷载达到 1 200 kN 后,最大幅值开始提升,表明钢管开始参与工作;在 1 200 ~ 1 600 kN 加载过程中最大振幅增长较快,即套箍作用明显增大;在荷载达到 1 800 kN 时,波形图最大幅值的峰值下降明显,钢管混凝土试件破坏. SC - 2.0 在 0 ~ 800 kN 加载过程中,最大幅值不断降低,表明混凝土的裂隙产生并不断发展;在荷载达到 800 kN 后,最大幅值显著提升,表明钢管开始参与工作;在 1 000 ~ 2 000 kN 加载过程中最大振幅呈现小幅波动并有增大趋势,钢管套箍作用下混凝土逐渐被挤密;在荷载达到 2 400 kN 时,波形图最大幅值的峰值下降明显,钢管混凝土试件破坏. SC - 3.0 在 0 ~ 800 kN 加载过程中,最大幅值不断降低,表明混凝土的裂隙产生并不断发展;在荷载达到 800 kN 后,最大幅值出现提升,表明钢管开始参与工作;在 1 000 ~ 2 600 kN 加载过程中最大振幅呈现波动并有增大趋势,体现出在钢管套箍作用下混凝土损伤和挤密的交替过程;在荷载达到 2 800 kN 时,波形图最大幅值的峰值下降明显,钢管混凝土试件破坏.

波形图最大幅值与荷载曲线大致呈现 3 阶段变化过程:第一阶段最大幅值降低,钢管混凝土裂缝产生并发展;第二阶段钢管参与工作,最大幅值上升,套箍作用遏制裂缝发展,混凝土在钢管套箍作用下逐步密实;第三阶段钢管发生屈曲,最大幅值迅速下降,裂缝迅速扩展,试件破坏.

2.3 频谱分析

利用 Matlab 软件对波形图进行快速傅里叶变换,得到超声波通过轴压荷载下钢管混凝土截

面的频谱图,如图 5 ~ 图 7 所示.

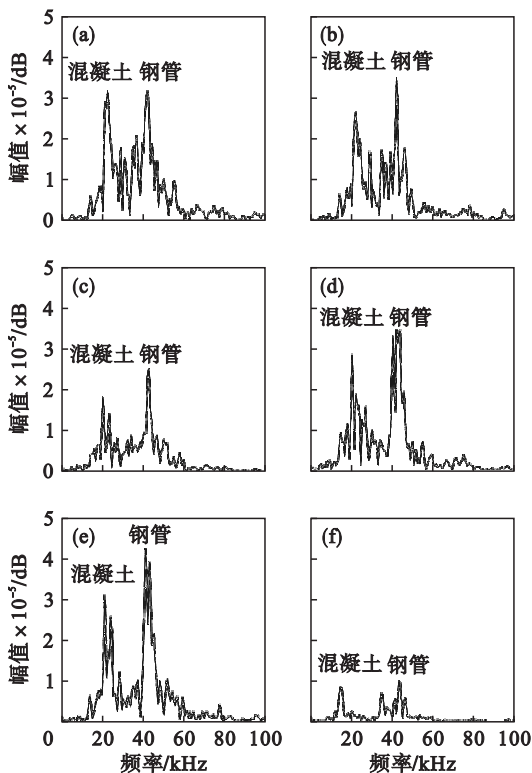


图 5 轴压荷载下 SC - 1.8 截面超声波频谱图
Fig. 5 Ultrasonic frequency spectrum of SC-1.8 under axial load

(a)—0; (b)—800 kN; (c)—1 000 kN;
(d)—1 200 kN; (e)—1 400 kN; (f)—1 800 kN.

不同壁厚构件的频谱图均出现双峰脉冲,对应的主频分别在 20 kHz 和 40 kHz 附近. 超声波在钢管混凝土柱横截面内传播有两种主要路径:一种是直线穿过钢管外壁和核心混凝土;另一种是在钢管外壁内传播. 由于超声波在混凝土内波长较长,频率较低,在钢材内传播的波长较短,频率较高,因此第一个峰值代表超声波在混凝土内传播的情况;第二个峰值代表超声波在钢管内传播的情况,可用混凝土主频对应的峰值表征混凝土的损伤状态. 由图 5 ~ 图 7 可知:SC - 2.0 在未加载时的频谱图第一主频的峰值为 4.1×10^5 dB (SC - 1.8 和 SC - 3.0 在未加载时主频峰值分别为 3.2×10^5 和 5.2×10^5 dB), 800 kN 荷载时频谱图的峰值降低到 1.2×10^5 dB (SC - 1.8 和 SC - 3.0 主频峰值分别在 1 000 和 800 kN 时降为 1.8×10^5 和 2.8×10^5 dB), 在 0 ~ 800 kN (SC - 1.8 和 SC - 3.0 分别在 0 ~ 1 000 和 0 ~ 800 kN) 的加载过程中,频谱图幅值与横坐标轴围成的面积逐渐减小,表明声波能量降低,能量耗散增加.

1 000 kN 荷载的频谱图的峰值大幅度升高为 2.9×10^5 dB (SC - 1.8 和 SC - 3.0 主频峰值分别在 1 200 和 1 000 kN 时增大到 2.7×10^5 和 3.8×10^5 dB),幅值与横坐标轴围成的面积也大幅提高.2 400 kN 荷载的频谱图峰值降为 9×10^3 dB (SC - 1.8 和 SC - 3.0 主频峰值分别在 1 800 和 2 800 kN 时降为 1.0×10^5 和 1.7×10^5 dB).

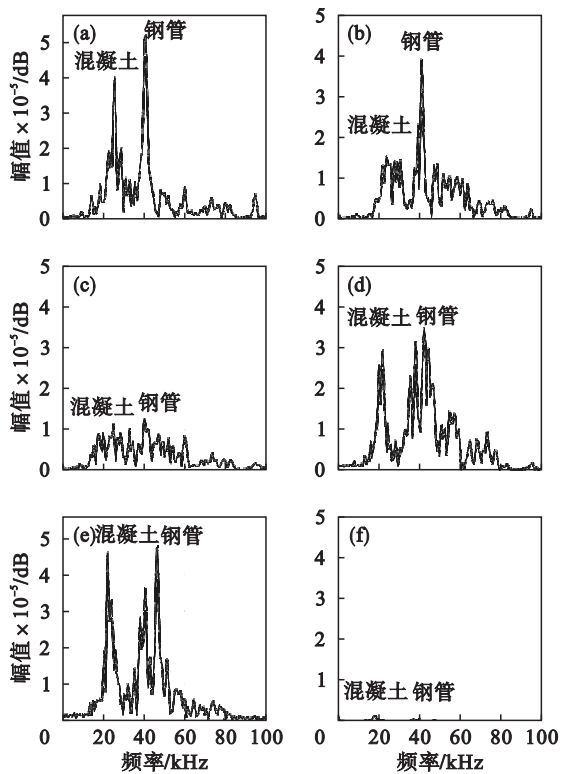


图 6 轴压荷载下 SC - 2.0 截面超声波频谱图
Fig. 6 Ultrasonic frequency spectrum of SC-2.0 under axial load

(a)—0; (b)—600 kN; (c)—800 kN;
(d)—1 000 kN; (e)—1 200 kN; (f)—2 400 kN.

2.4 钢管应变分析

根据试验得到 1.8,2.0 和 3.0 mm 壁厚钢管中部的荷载 - 应变曲线,如图 8 所示. 可见在荷载作用初期,钢管中部纵向应变和环向应变均随轴压荷载呈线性增大,试件处于弹性工作状态. 当荷载分别达到 1 202,1 000,1 099 kN 时,钢管中部的环向变形迅速增加,钢管的荷载 - 环向应变曲线出现非线性增长,钢管对核心混凝土产生约束并发挥“套箍”作用. 当荷载分别达到 1 937,2 477,2 882 kN 时,外部钢管发生屈曲,核心混凝土被压碎,试件丧失承载能力. 钢管应变的分析结果与波形分析和频谱分析的结论基本一致.

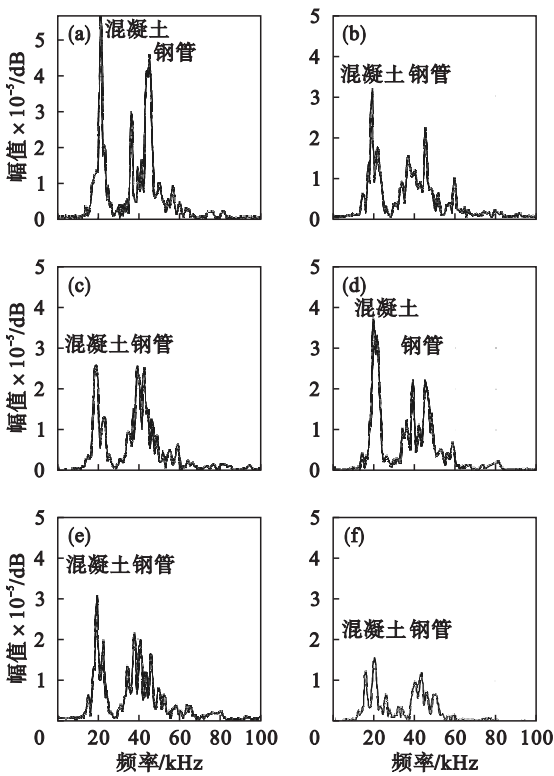


图 7 轴压荷载下 SC-3.0 截面超声波频谱图
Fig. 7 Ultrasonic frequency spectrum of SC-3.0 under axial load

(a)—0; (b)—600 kN; (c)—800 kN;
(d)—1 000 kN; (e)—1 200 kN; (f)—2 800 kN.

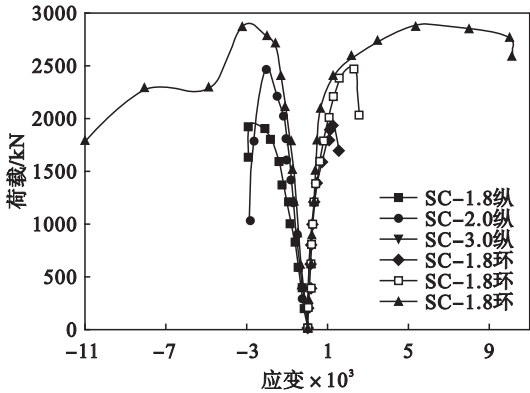


图 8 荷载-应变曲线
Fig. 8 Load-strain curves

3 结 论

1) 超声波可有效检测轴压荷载下钢管内混凝土的挤密程度,波形图和频谱图可以直观反映钢管的套箍作用、混凝土开裂破坏等。

2) 薄壁钢管高强混凝土短柱在轴压荷载作用下,核心混凝土的损伤状态呈三段式变化,分别为初期裂缝的扩展、钢管套箍作用下的逐步密实和混凝土破坏阶段。

3) 在混凝土破坏过程中,裂缝发展,反射面增加,超声波能量耗散增加,波形图最大振幅逐渐降低。

参考文献:

[1] 王志滨,张万安,池思源,等. 复式薄壁方钢管混凝土构件受弯性能研究[J]. 建筑结构学报,2017,38(7):78-84.
(Wang Zhi-bin, Zhang Wan-an, Chi Si-yuan, et al. Flexural behavior of composite concrete-filled square thin-walled steel tubular specimens[J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(7):78-84.)

[2] Liew J Y R, Xiong D X. Ultra-high strength concrete filled composite columns for multi-story building construction[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15 (9): 1487-1503.

[3] Dundu M. Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns[J]. *Thin-Walled Structures*, 2012, 56:62-70.

[4] Ding F, Liu J, Liu X, et al. Mechanical behavior of circular and square concrete filled steel tube stub columns under local compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 94: 155-166.

[5] Zhou X J, Mou T M, Tang H Y, et al. Experimental study on ultrahigh strength concrete filled steel tube short columns under axial load [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 2017(6):1-9.

[6] Yang Y F, Han L H. Concrete filled steel tube (CFST) columns subjected to concentrically partial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2012, 50:147-156.

[7] Nevbahar S, Osman U. Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 141(6):13-23.

[8] Beutel R, Reinhardt H W, Grosse C, et al. Comparative performance tests and validation of NDT methods for concrete testing [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2008, 27(1):59-65.

[9] 陈志华,李黎明,李树海,等. 矩形钢管混凝土柱的超声波检测试验及计算公式研究[J]. 建筑结构, 2005, 35(9): 34-38.
(Chen Zhi-hua, Li Li-ming, Li Shu-hai, et al. Supersonic flaw detecting test and theoretical study on concrete-filled rectangular and square steel tube [J]. *Journal of Building Structure*, 2005, 35(9):34-38.)

[10] 林维正,秦效启,陈之毅,等. 方形钢管混凝土超声波检测技术[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(2):190-194.
(Lin Wei-zheng, Qin Xiao-qi, Chen Zhi-yi, et al. Ultrasonic testing for square steel-pipe concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2003, 6(2):190-194.)