

文章编号:1674-2869(2016)05-0471-05

基于声时和声幅的盾构管片预紧力的监测方法及应用

潘 登^{1,2*}, 黄民水¹, 周 麟¹, 夏元友², 黄 凯³

1. 武汉工程大学资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 3. 中交第二公路勘察设计研究院, 湖北 武汉 430070

摘 要:为准确掌握地铁隧道施工及营运期间盾构管片间的预紧力状态,根据盾构管片及止水条、螺栓垫片在隧道衬砌结构中的实际构造,分析这些构件在管片施工过程中的受力演变过程.确定了管片间预紧力是通过预紧螺栓、压缩变形后的止水条及螺栓垫片来传递的.随着预紧力增加,在管片间传递的超声波声时会逐渐减小.然而,随着止水条压缩固结,其对超声波的衰减作用削弱,导致幅值逐步升高.设计研制了管片预紧室内模拟装置,通过试验数据建立了不同等级预紧力与超声波声时、波幅之间的对应关系.同时阐述超声波在管片间传递的机理及其影响因素.依托市政工程(武汉市轨道交通3号线工程王家湾站—宗关站区间越江隧道)的盾构管片为实际测试对象,对拼装的盾构管片间的预紧力进行了监测.经过分析测试数据结果符合管片环在预紧状态下的受力情况,最终探索出一种高效快捷的隧道管片预紧力监测方法.

关键词:预紧力;声时;声幅;盾构管片;监测

中图分类号:U25 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2016.05.012

Monitoring Method Based on Sound Transit-Time and Sonic Amplitude of Shield Segment Pre-Tightening Force and Its Application

PAN Deng^{1,2*}, HUANG Minshui¹, ZHOU Lin¹, XIA Yuanyou², HUANG Kai³

1. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. CCCC Second Highway Consultant Co. Ltd., Wuhan 430070, China

Abstract: To accurately grasp the pre-tightening force of the shield segments in subway tunnel, we analyzed the actual structure of the shield segment, water-stopper and rubber gasket in the tunnel structures, and the process of stress evolution of the above components. It was determined that the pre-tightening force in the shield segments is passed through the preloaded bolt, the compressed water-stopper and rubber gasket. The sound transit-time in the segment reduced gradually with the increase of pre-tightening force. However, the impact of ultrasonic attenuation is weakened, and the sonic amplitude improved gradually with the compression and consolidation of the water-stopper. We designed the indoor test device to simulate the segments pre-tightening force, and established the corresponding relations among the pre-tightening force, the sound transit-time and the sonic amplitude in different levels based on the test data. We also explored the ultrasonic transmission mechanism and the influencing factors of the shield segments. By taking the shield segment of the municipal engineering as a case (cross-river tunnel of Wuhan rail transit line 3 from Wangjiawan station to Zongguan station), the pre-tightening force of the assembled shield segments was monitored, which was consistent with the force situation of the pre-tightening shield segment. Finally, an efficient monitoring method of the shieldsegment pre-tightening force was proposed.

Keywords: pre-tightening force; sound transit-time; sonic amplitude; shield segment; monitoring

收稿日期:2016-03-28

作者简介:潘 登,博士研究生,实验师. E-mail:179813945@qq.com

*通讯作者

1 引言

随着城市轨道交通的迅速发展,盾构管片以其对周围地质扰动小、结构稳定、环境适应强、机械化施工等特点在轨道地质环境较复杂的区间段广泛应用,如越江隧道等^[1]. 盾构机凭借盾壳和预紧管片等衬砌结构支撑隧道围岩和土体,前端刀盘挖掘的土体由传输系统输送到地表,其前进动力来自顶在管片环上的油缸,同时注浆系统在预紧管片环和隧道间隙注入水泥浆体. 管片衬砌结构依靠数量庞大的预紧螺栓连接,使管片通过预紧力组合成一个牢固整体. 管片预紧拼装中,施工不规范的人为因素,或隧道穿越各种岩层和土层等地质因素,都会使预紧管片在施工及营运阶段承受复杂的荷载环境,导致管片预紧程度不一致或不达标,从而产生管片错位及渗漏等缺陷,影响隧道的正常使用;如管片局部螺栓脱落,结构失稳,将危及通行其中的列车的安全. 可见管片预紧拼装在整个隧道工程中起着至关重要的作用^[2-5].

由于管片环在预紧力作用下彼此紧密接触,缝隙尺寸狭小,一般无法安装标准测力计. 而预紧力的大小又超过了薄膜型测力传感器的量程. 在某些必须实施安全监测地段,可以将测力传感器预埋进管片混凝土中,但因需铺设供电和信号传输线路致使用成本过高,所以管片预紧力大规模检测一直是个难题. 本文探讨一种新的管片预紧力的快速无损的检测方法.

2 实验原理

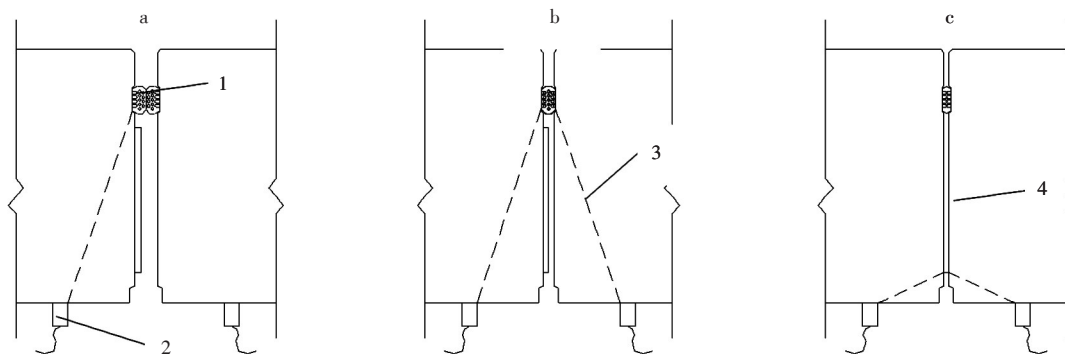
混凝土结构检测采用的超声波是由仪器内部电脉冲触发声源而产生的间歇性地发射出一组组超声波,声波在被检测物体内部通过质点的间歇脉

冲振动实现传递^[6],根据声波脉冲穿过混凝土的声时和波幅的变化情况来判定被测结构内部弹性模量、强度和缺陷分布. 隧道盾构由管片和螺栓按照错缝方式拼装而成,纵向螺栓为管片结构提供预紧作用,每个纵向螺栓都有预紧影响区域,其预紧力随距螺栓距离而减小^[7]. 管片间预紧力通过止水条和垫片的压缩变形来传递.

在没有外力作用时,止水条内被大量管状空隙所占据,而空气对超声波产生巨大衰减,导致声波无法传递. 随着管片间预紧力的增大,止水条弹性模量不断增加,超声波的声时不断变化^[8],所以笔者以声时作为评价管片预紧力的第一参数. 同时,止水条填塞封堵管片间透水缝隙. 首波波幅是衡量超声波衰减程度的指标,在缺陷区波幅的变化要明显于声时变化^[9-10],随着预紧力增加,止水条空隙的缺陷减少,波幅衰减也会收窄,所以笔者以信号幅值作为判定管片预紧力的第二参数.

声波仪所测得的测量声时是由管片声时和中间介质(即止水条和螺栓垫片)声时组成. 而管片作为隧道的重要支护结构,其生产工艺和产品质量在预制场里受到严格控制,从而最大程度的保障了声波在其中传递的高效性和一致性,也就是说管片声时是恒定不变的,决定测量声时大小的因素是中间介质声时.

管片预紧状态示意图如图1所示. 状态a:低压接触,此时止水条弹性模量较小,超声波未能通过,管片未预紧;状态b:止水条压缩预紧,超声波从止水条通过,传递到邻近管片,传递路径为管片—止水条—管片的等腰三角形;状态c:螺栓垫片压缩预紧,超声波以最短路径通过压紧垫片传递,传递路径为管片—垫片内边缘—管片的等腰三角形.



1-止水条;2-声波换能器;3-超声波路径;4-螺栓垫片

1-Water-stopper and rubber gasket; 2-Acoustic wave transducer; 3-Ultrasonic path; 4-Gasket

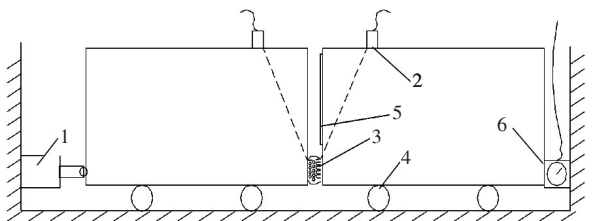
图1 管片预紧状态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pre-tightening status of shield segment

3 结果与讨论

3.1 室内模拟测试及数据分析

为探求管片预紧力与超声波声时与波幅之间的对应关系,在实验室中设计如图2所示的装置进行管片预紧施工的模拟.千斤顶提供水平荷载,模拟盾构机轴向推力;实验室按管片配合比室内预制2块强度等级为C50的混凝土立方体试块,尺寸为300 mm×300 mm×600 mm,用来模拟混凝土管片,其下用滑轮减小摩擦;右端为数字测力计,精度0.1 kN,测量试块承受的水平荷载;2个振动频率为50 kHz声波换能器,间距200 mm,跨缝对称布置,一个作为发射换能器,一个作为接收换能器;中介介质采用三元乙丙橡胶止水条(高22.4 mm,边长46.38 mm)和螺栓垫片(厚度4 mm,边长200 mm).它们在模拟装置中的位置,与现场实际情况保持一致.试验时,记录逐级荷载对应的超声波声时与幅值^[11].



1-千斤顶;2-声波换能器;3-橡胶止水条;4-滑轮;
5-螺栓垫片;6-数字测力器
1-Oil jack; 2-Acoustic wave transducer; 3-Water-stopper and rubber gasket; 4-Pulley; 5-Gasket; 6-Digital force-measuring device

图2 室内模拟试验装置图

Fig. 2 Diagram of indoor simulated test apparatus

图3为根据试验数据形成的试验荷载-声时、荷载-波幅关系曲线,表1为室内试验各级应力对应的声时和波幅.

从图3得知:

1) 荷载以1 kN为单位,逐级加载,荷载从0 kN增加到3 kN,声时和波幅都为零,这时橡胶止水条弹性模量未达到阈值,声波仪没有接收到有效信号.荷载增加至4 kN后声时、波幅随荷载增加分别均有明显下降和上升趋势,且都在10 kN处形成拐点.

2) 曲线在4 kN~10 kN荷载区间内,面积为0.003 m²的止水条单独承受轴向推力,相应管片间止水条预紧处的应力范围为1.33 MPa~3.33 MPa.此时止水条内空隙体积逐渐减小,直至为0,传递振动的质点排列逐渐紧密,其弹性模量不断增加,

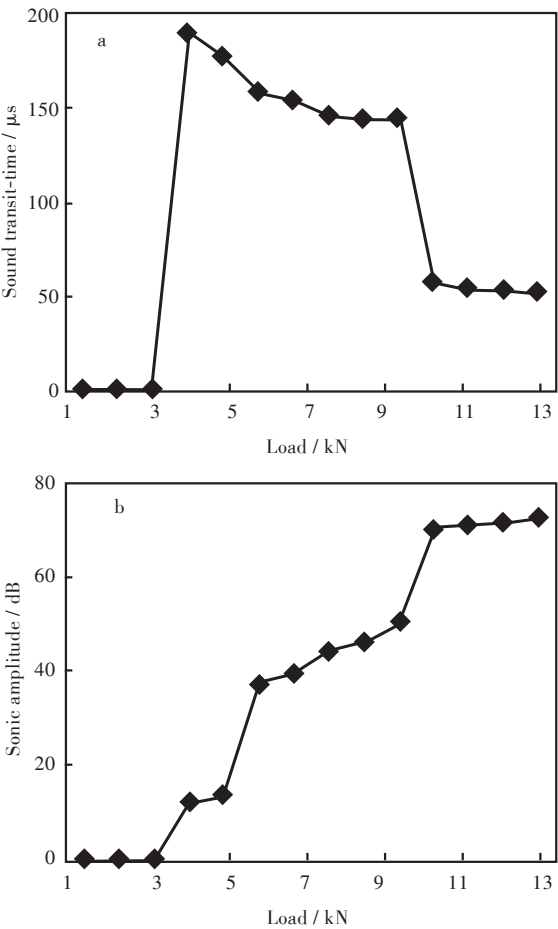


图3 (a)试验荷载-声时、(b)荷载-波幅关系曲线
Fig. 3 Experimental relationship curves between (a) load and sound transit time and (b) load and sonic amplitude

表1 预紧力、声时和波幅

Tab. 1 Pre-tightening force, sound transit-time and sonic amplitude

load / kN	stress of water-stopper / MPa	sound transit-time/ μs	sonic amplitude / dB
1	0.33	—	—
2	0.67	—	—
3	1.00	—	—
4	1.33	188.24	12.21
5	1.67	176.36	13.47
6	2.00	157.18	36.87
7	2.33	153.12	39.64
8	2.67	144.85	44.17
9	3.00	143.25	46.38
10	3.33	143.12	50.26
11	3.37	56.14	69.96
12	3.41	53.36	70.87
13	3.45	52.73	71.42
14	3.49	51.03	72.43

超声波声时不断减小. 同时空隙缺陷对波幅吸收、分散衰减作用不断减小, 波形信号逐渐清晰稳定, 首波波幅增加^[12].

3) 当荷载增加到 11 kN 时, 管片间的螺栓垫片开始加入接触预紧, 且继续增加的预紧力主要由螺栓垫片承担, 垫片应力区间为 0.04 MPa~0.15 MPa. 测得声时陡降为 56.14 μ s~51.03 μ s, 由图 1 可知, 这是垫片预紧后超声波从垫片边缘以最短路径传递到邻近试块所致. 该阶段波幅提高到 69.96 dB~72.43 dB, 原因在于橡胶垫片材质较止水条密实, 且超声波传递路径大幅缩短, 避开了原有的缺陷, 其衰减明显降低. 室内模拟试验装置见图 4.

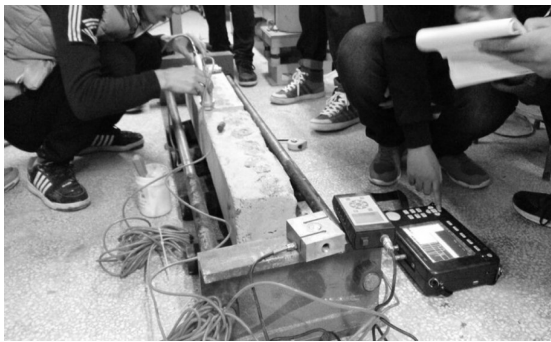


图 4 室内测试图片

Fig. 4 Photos of indoor testing

3.2 隧道内现场应用及讨论

试验地点位于武汉轨道交通 3 号线汉江至中间风井区间. 采用矿山法开挖, 盾构空推管片通过, 隧道基底依此位于中风化灰岩、中风化石英砂岩、中风化砂岩、泥质砂岩. 沿线地下水主要有上层滞水、潜水、承压水等, 均以长江和汉江两岸一级阶地覆盖层中空隙承压水对本工程影响最为突出. 测试地点为右线隧道 Dk11+402 处, 以相邻两管片环接缝为测线, 步距 50 mm 进行跨缝声波测试. 发射和接收换能器间距 200 mm, 垂直接缝等距布置. 由于数据量大, 选取连续 4 m 测线的测试数据形成曲线, 如图 5 所示.

1) 现场研究小组用声波仪测得的声时、波幅曲线以 1 m 为周期规律波动. 由管片衬砌的实际构造可知, 相邻两个管片环是由均匀布置于圆周内测的 16 颗预紧螺栓纵向相连的, 螺栓弧线间距 1 m, 且每个螺栓孔处设有边长 200 mm、厚度 4 mm 的方形橡胶预紧螺栓垫, 而止水条处于与橡胶垫片同一平面靠圆周外侧的位置^[13-14]. 所以声波仪沿跨缝环形测线所测得的声时和幅值曲线就形成了

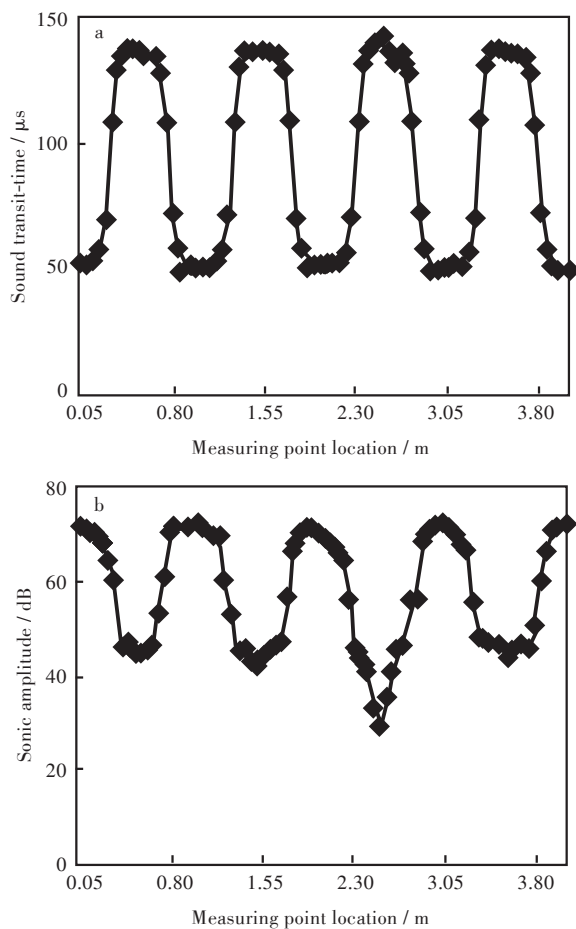


图 5 现场测试(a)荷载-声时和(b)荷载-波幅关系曲线

Fig. 5 Curves of field testing relationship between (a) load and sound transit time and (b) load and sonic amplitude

具有规则周期的波形曲线, 各螺栓间对称测试点的声时值与波幅值应趋于一致. 超声波在止水条处通过路径最远, 声时也最大; 而超声波在螺栓垫片处通过时, 路径最短, 声时最小^[15]. 可见测试曲线规则波动符合管片环构造规律.

2) 声时曲线峰值集中于 136.06 μ s~144.78 μ s 的区间, 而这些测点的幅值在波幅曲线上集中在 42.47 dB~51.71 dB 之间, 处于曲线的低值区, 将其带入由表 1 建立的预紧力与声时数值对应关系进行内插, 得出这些测点处管片间的预紧力区间为 2.45 MPa~3.33 MPa. 这些测点在环形测线上距离螺栓最远, 处于相邻螺栓孔中间位置, 所以这些测点处的预紧力最小, 可知实际管片环在止水条处的纵向预紧力在 2.5 MPa 以上.

3) 由于实际工况复杂, 导致整个管片衬砌结构受力不均, 会出现 5(b) 中 2.5 m 测点周边的幅值下降区, 最低点下降到 29.92 dB, 对应预紧力为 1.75 MPa. 这表明该区域存在预紧力异常降低, 应该引起施工技术人员重视, 查明原因, 及时调整. 现场管片拼装测试见图 6.



图6 现场测试图片

Fig. 6 Photos of field testing

4 结 语

1) 笔者对超声波的声时、波幅与管片拼装预紧力对应关系进行了研究,证明超声波在隧道管片施工质量和营运期健康状态进行检测的可行性。

2) 该检测方法无需在结构中预埋测力传感器及与其配套的供电设备和数据传输设备,不会对管片结构造成任何破坏,而且大幅削减了监测费用。

3) 声波换能器与盾构管片接触紧密程度等因素对于超声波波幅波动的影响需进一步研究。

参考文献:

- [1] 傅冰骏. 国际隧道及地下工程发展动向——“2002年世界隧道及地下工程博览会暨学术交流会”情况报导[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2002(5): 54-57.
FU B J. The international development trend of tunnel and underground engineering——“tunnel and underground engineering in 2002 the world exposition and situation of academic exchange” [J]. Exploration engineering (rock & soil drilling and tunneling), 2002(5): 54-57.
- [2] 郭侠云, 常翔, 陈智, 等. 隧道工程篇[C]//建设部工程质量安全监督与行业发展司, 中国土木工程学会. 工程技术发展研究报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 59-106.
- [3] 陈馈, 洪开荣, 吴学松. 盾构施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [4] BOSSÉ M C. Performance of EPB-TBM in mixed face conditions: city of edmonton south LRT extension-university station to health sciences station [D]. Edmonton: University of Alberta, 2005.
- [5] 贾朝福. 盾构技术的发展及展望[J]. 建筑机械, 2012(Z1): 44-47.
- [6] 肖风云. 钢管混凝土拱桥无损检测技术及应用研究

[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.

- [7] 封坤, 何川, 皱育麟. 大断面越江盾构隧道管片拼装方式对结构内力的影响效应研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 114-124.
FENG K, HE C, ZHOU Y L. Study on the effect of assembling method on the inner force of segmental lining for cross-river shield tunnel with large cross-section [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(6): 114-124.
- [8] 黄志伟. 超声波检测桩完整性的模糊综合评判研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2008.
- [9] 陈信春. 灌注桩声波透射法应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.
- [10] 牙马忠, 李小萍, 刘婷. 某单体工程钻孔灌注桩的超声波检测[J]. 山西建筑, 2009, 35(3): 150-151.
YA M Z, LI X P, LIU T. Ultrasonic testing of the case-in-place bored pile in a project[J]. Shanxi architecture, 2009, 35(3): 150-151.
- [11] 孙旭曙, 李建林, 王乐华, 等. 节理岩体超声测试及单轴压缩试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3474-3478, 3488.
SUN X S, LI J L, WANG L H, et al. Study of ultrasonic test and uniaxial compression test of jointed rock masses [J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35(12): 3474-3478, 3488.
- [12] 徐珂. 浅谈超声波测试技术在岩土工程中的应用[J]. 中国建材科技, 2014(5): 175-176.
- [13] 高波, 吴挺, 彭红霞, 等. 盾构隧道管片拼装纵缝变形规律研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 145-149.
GAO B, WU T, PENG H X, et al. On the deformation law of longitudinal joints of shield tunnel segment rings [J]. Modern tunneling technology, 2014, 51(5): 145-149.
- [14] 李围, 何川. 盾构隧道通用管片结构力学行为与控制拼装方式研究[J]. 铁道学报, 2014, 29(2): 77-82.
LI W, HE C. Study on mechanical behavior and controlling assembling modes of universal segment lining for shield tunnel [J]. Journal of the China railway society, 2014, 29(2): 77-82.
- [15] 檀永杰, 徐波, 吴智敏, 等. 基于超声对测法的钢管混凝土脱空检测试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 102-110.
TAN Y J, XU B, WU Z M, et al. Experiment on void area testing of concrete-filled steel tube based on ultrasonic method [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2012, 29(2): 102-110.

本文编辑: 陈小平