

文章编号:1005-1538(2017)01-0027-08

声频应力波法检测土遗址加固用玻璃纤维锚杆锚固质量初探

郭庆¹,张景科¹,樊孟¹,王南¹,郭青林²,赵林毅²

(1. 兰州大学土木工程与力学学院,甘肃兰州 730000; 2. 敦煌研究院,甘肃敦煌 736200)

摘要: 土遗址锚杆锚固质量一直是土遗址加固工程中关注的重点问题。目前,土遗址领域均采用具有破坏性的拉拔试验对其进行检测。基于土遗址的文物属性,本研究尝试利用无损检测技术评价土遗址加固用玻璃纤维锚杆的锚固质量。通过锚杆无损检测仪与拉拔仪分别对甘肃省红沙堡遗址与永泰城址加固工程中的玻璃纤维锚杆锚固系统进行检测。比较实际测量杆长与仪器测量杆长结果,得出杆长指标可以判断无损检测仪所测结果的真实性。无损检测仪得出的检测波形衰减规律显著,对比相应锚杆的拉拔试验的评价结果,证实了声频应力波法在土遗址玻璃纤维锚杆锚固系统无损检测中的适用性。本研究结果将为评价土遗址加固用玻璃纤维锚杆锚固质量提供可靠的依据。

关键词: 土遗址;玻璃纤维锚杆;声频应力法;无损检测;拉拔试验

中图分类号: TU753 **文献标识码:** A

0 引言

随着我国文物保护事业快速发展,锚杆加固技术在土遗址保护加固工程中得到了广泛的应用^[1]。因锚杆加固工程属于隐蔽工程,对其施工质量的检测一直都是加固工程的一大重点与难点。目前,我国土遗址锚杆锚固系统检测的主要方式为拉拔试验。该法能准确反映锚杆的整体抗拔能力,但其检测周期长、操作不便,且具有破坏性^[2]。因此,利用该法评价不符合文物保护“最小干预”的原则^[3]。通过检索 CNKI、CSCD、Ei Compendex、ASCE 等数据库发现,截止目前,还未有土遗址用锚固系统无损检测技术的研究报道。为更好地对土遗址进行保护,避免出现遗址体“保护性破坏”现象,进行土遗址锚杆锚固质量无损检测技术研究势在必行。

20 世纪 80 年代,岩土工程中开始利用超声能量损耗法检测砂浆锚杆灌注质量^[4],该方法可迅速地进行锚固质量的无损检测。由于超声反射法检测条件过于苛刻,且衰减较快,此种方法并未得到大面积推广应用^[4]。随后,国外导向超声法^[5-8]的出现

一定程度上解决了该问题,通过得出理想的超声波激振频率以检测锚固质量。20 世纪 90 年代,我国开始利用声频应力波法^[5,9]来检测锚固质量。21 世纪初,基于声频应力波法的锚杆锚固质量综合参数无损检测方法^[10-12]开始出现,因该方法适用性较好,故得到广泛应用。

鉴于此,本研究选择红沙堡遗址和永泰城址保护加固用玻璃纤维(以下简称 GFRP)锚杆系统开展无损检测与拉拔试验,初步探究适用于土遗址用 GFRP 锚杆系统的无损检测技术。利用拉拔结果,讨论无损检测与现有评价体系之间的关联性。

1 理论概述

1.1 基本原理

当锚杆端头受到瞬时激励时(图 1)形成沿杆系传播的应力波^[13]。

波在遇到具有不同波阻抗的界面时,会产生能量变化,一部分能量穿过界面继续顺向传播为透射波;另一部分能量未穿过界面发生反向传播为反射波^[13]。它们的大小与界面两侧波阻抗差异有关:当

收稿日期:2016-06-25;修回日期:2016-07-08

基金项目:国家科技支撑计划资助(2014BAK16B02),国家文物局文物保护科技优秀青年研究计划资助(2014225),国家自然科学基金资助(51578272)

作者简介:郭庆(1989—),男,硕士研究生,研究方向为文物保护,E-mail: qguo2014@lzu.edu.cn

通讯作者:张景科(1980—),男,博士,副教授,主要从事岩土工程教学与科研工作,研究方向为文物保护,E-mail: zhangjink@lzu.edu.cn

锚杆与锚固浆液未充分粘结时,应力波穿过波阻抗差异较明显的区域,接收器接收到反射波波峰明显,衰减缓慢。当锚杆与锚固浆液充分粘结时,可认为应力波穿过波阻抗差异较小的区域,接收器接收到反射波波峰不明显,衰减迅速^[14]。因此,根据仪器显示应力波形态可对锚杆系统实际锚固情况进行分析。

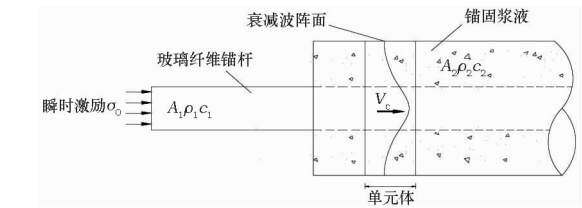


图 1 锚固系统内应力波传播示意图

Fig.1 Sketch stress wave of propagation in anchorage system

1.2 评判指标

1.2.1 界面应力波波速公式 基于一维应力波反射原理及应力波在锚固系统中的传播、反射和衰减特性来分析锚杆的长度、锚杆与锚固浆液的胶结质量,即在小应变情况下有^[15]:

$$V_c = \sqrt{\frac{A_1c_1 + A_2c_2}{A_1\rho_1 + A_2\rho_2}} \tag{1}$$

式中, V_c 为锚杆系统中的应力波波速; A_1 、 A_2 为锚杆和锚固浆液在单元体中的横截面面积; ρ_1 、 ρ_2 为锚杆和锚固浆液的密度; c_1 、 c_2 为锚杆和锚固浆液在锚固状态下的折算弹性模量: $c_1 = \sigma_1/\varepsilon_1$, $c_2 = \sigma_2/\varepsilon_2$, 其中 σ_1 为锚杆单元应力值, ε_1 为锚杆单元应变值, σ_2 为锚固浆液单元应力值, ε_2 为锚固浆液单元应变值。

1.2.2 波形真实性判据 全长粘结型锚杆系统可利用杆系(体)波速作为波形真实性判据^[16]:

$$|V_{bi} - V_b|/V_b \leq 5\% \tag{2}$$

式中, V_{bi} 指相同材质和规格的第 i 根锚杆杆体波速值; V_b 指相同材质和规格的锚杆波速平均值。

同时,全长粘结型锚杆系统锚杆杆体长度不小于设计长度的 95%,且不足长度不超过 0.5m,可评定锚杆长度合格^[16]。换言之,当能确保实际锚杆长度合格时,无损检测可利用杆长指标作为波形真实性判据:

$$|L_{bi} - L|/L \leq 5\% \tag{3}$$

式中, L_{bi} 指相同材质和规格第 i 根锚杆杆体无损检测的杆长测量值; L 指所用锚杆实际锚杆长度。

借鉴上述理论,不妨假设土遗址用玻璃纤维锚杆系统在判别无损检测波形真实性时,有如下两者判据:

1) 单根锚杆测量无损检测波形所对应的波速相对与相同材质和规格锚杆杆系(体)波速允许误差值不超过 5%。

2) 单根锚杆测量无损检测波形所对应的杆长值相对于实际测量杆长允许误差不超过 5%,且允许误差长度不超过 0.5m。

2 试验方案

2.1 试验场地

试验场地位于明长城红沙堡城墙和永泰城址城墙(图 2)。

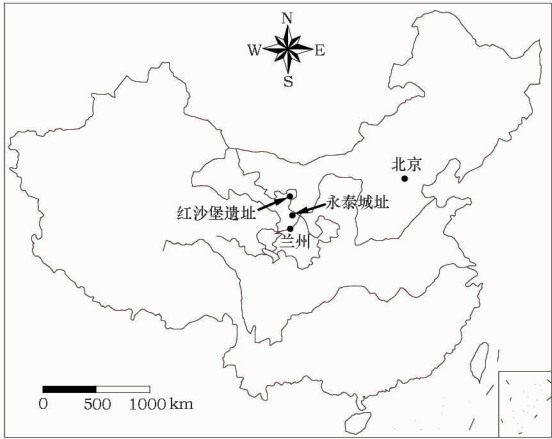


图 2 试验场地分布图

Fig.2 Distribution map of test sites

明长城红沙堡遗址位于甘肃省武威市民勤县新河乡泉水村东北 0.5km 处。其始建于明嘉靖七年(1528),万历九年(1581)展筑东、西、北三面^[17]。

永泰城址位于甘肃省白银市景泰县寺滩乡永泰村,城平面形似乌龟,又名龟城。永泰城建成于明万历三十六年(1608),它是一座用于驻军防务的大型土筑古城。城平面呈椭圆形,该城始建于明代,清代曾补筑^[18]。

2.2 试验材料

1) 玻璃纤维锚杆。试验选用南京奥沃科技发展有限公司生产的 GFRP 锚杆,其物理力学性质如表 1 所示。

表 1 玻璃纤维锚杆材料物理性质

Table 1 Basic properties of GFRP bolt

材料名称	直径/ mm	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	玻璃纤维/ 含量%	树脂含量/ %	弹性模量/ GPa
GFRP	20	2.20	72.00	28.00	46.58

2) 土体性质。试验土体为自然塌落的遗址土体(表 2 和 3)。

表 2 红沙堡遗址土体物理性质

Table 2 Basic properties of soil on Hongshabao ruins				
土名称	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	比重	孔隙率/ %
含粉土的粉砂	1.66	2.52	2.68	39.50

表 3 永泰城遗址土体物理性质

Table 3 Basic properties of soil on Yongtai site				
土名称	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	比重	孔隙率/ %
含粉土的砾砂	1.92	1.31	2.53	49.09

3) 浆液配制。锚固浆液(表 4 和 5)选用粉碎筛析后的遗址土与烧料礓石配置。在保证浆液强度与可灌性的基础上,参照锚固施工现场实际配比确定,遗址土与烧料礓石为 1:1,水灰比为 0.65。

表 4 红沙堡锚固浆液物理性质

Table 4 Basic properties of anchorage grout on Hongshabao				
干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重	孔隙率/ %	抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa
1.14	2.75	58.51	3.71	1.22

表 5 永泰城址锚固浆液物理性质

Table 5 Basic properties of anchorage grout on Yongtai site				
干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重	孔隙率/ %	抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa
1.35	2.80	55.32	2.75	1.45

2.3 锚固系统锚杆设计参数

红沙堡遗址与永泰城址锚固设计参数一致。锚杆设计长度为 1.5m,直径为 20mm,锚孔直径为 70mm,设计锚固长度为 1.0m,外露段为 0.5m。

2.4 测试仪器设备与方案

试验分别对红沙堡西城墙内侧 3 根试验锚杆(编号分别为 H_1 、 H_2 、 H_3)和永泰城址 6 根试验锚杆(编号分别为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 、 Y_6)进行无损检测与拉拔试验。本次无损检测试验采用武汉龙昊科技发展有限公司生产的 LHMG(G1)式锚杆无损检测仪。其中在红沙堡遗址处每根锚杆采集了 30 次无损数据,永泰城址处每根锚杆采集了 24 次数据。拉拔试验采用北京海创高科技有限公司生产的 HCYL-60 型锚杆综合参数测定仪。

锚杆无损检测试验操作依据《锚杆锚固质量无损检测技术规程》(JGJ/T182-2009),锚杆拉拔试验依据《土遗址保护试验技术规范》(WW/T 0038-2012)。

3 测试结果

3.1 检测波形

1) H_1 、 H_2 波形规则(图 3),首波位置具有较为良好的相似性,其后周期波形相似性则不明显,波峰值呈指数型衰减。波形差异主要体现在衰减速率与各个周期零值的位置。 H_3 波形不规则,衰减较快且较波折,衰减形式无明显规律,各周期峰值和波动形态较为跳跃、不规律。 H_3 无损检测采样曲线总体与 H_1 、 H_2 不协调,即首波位置较其他波形差异较大,但首波采集得前半周期的第一次波峰位置与 H_1 、 H_2 无损检测采样曲线重合度较好。

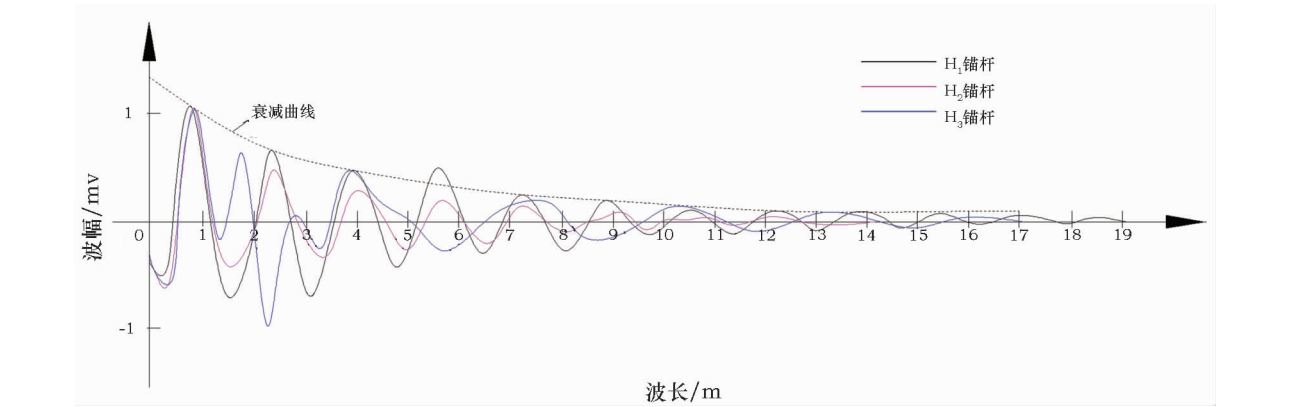


图 3 红沙堡锚杆无损检测采样曲线

Fig.3 Sample curve of Hongshabao anchor nondestructive testing

2) Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_5 波形规律与 H_1 、 H_2 相似(图 4)。 Y_4 、 Y_6 波形不规则且衰减规律性较差,各周期波峰值不规律出现且波动形态跳跃,无明显规

律性。 Y_4 的采样曲线在第一周期内与其他锚杆无损检测波形较为一致。后续周期曲线较不规整,波形跳跃,波峰、波谷呈现不规律地靠近横轴

趋势。

Y₆ 采样曲线在第一周期内与其他锚杆无损检测波形相似,其第二周期记录波形十分不规则:波峰间距过小,波谷呈非负值,峰值与谷值跳动剧烈。

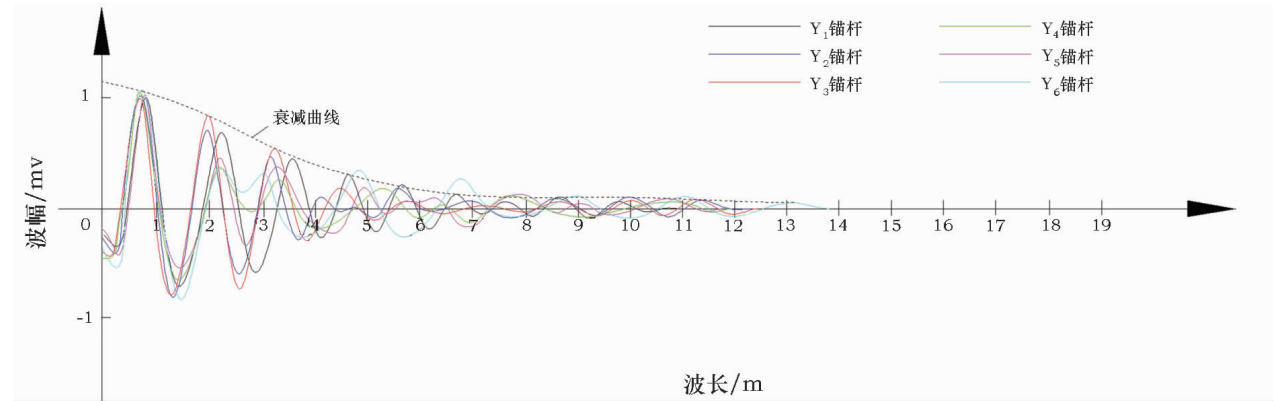


图 4 永泰城址锚杆无损检测采样曲线

Fig. 4 Sample curve of Yongtai site anchor nondestructive testing

3.2 杆长与速度指标特性

观察仪器所测结果发现:H₁ 锚杆杆长全部落入杆长允许误差范围内,而无一落入速度允许误差内(图 5)。

H₂ 锚杆结果检测杆长 80.0% 落入杆长允许误差范围内,所测速度指标无落入速度允许误差内;H₃ 锚杆仪器所测杆长、所测速度均未落入速度允许误差内。

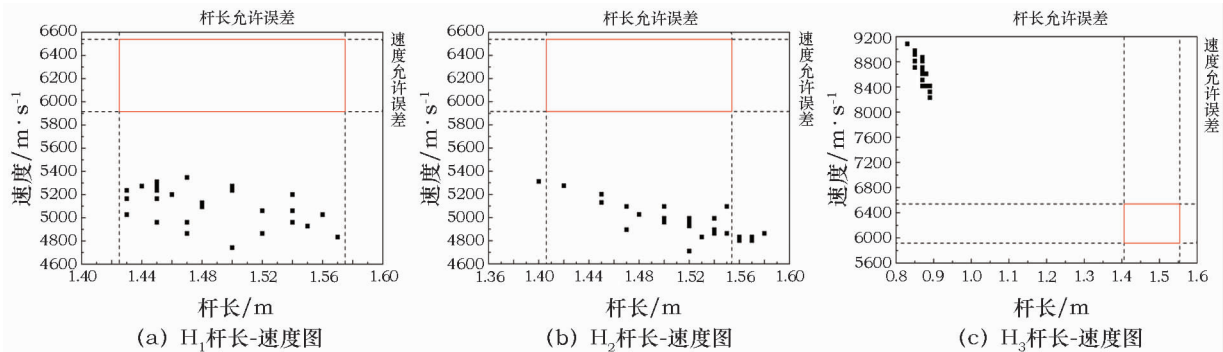
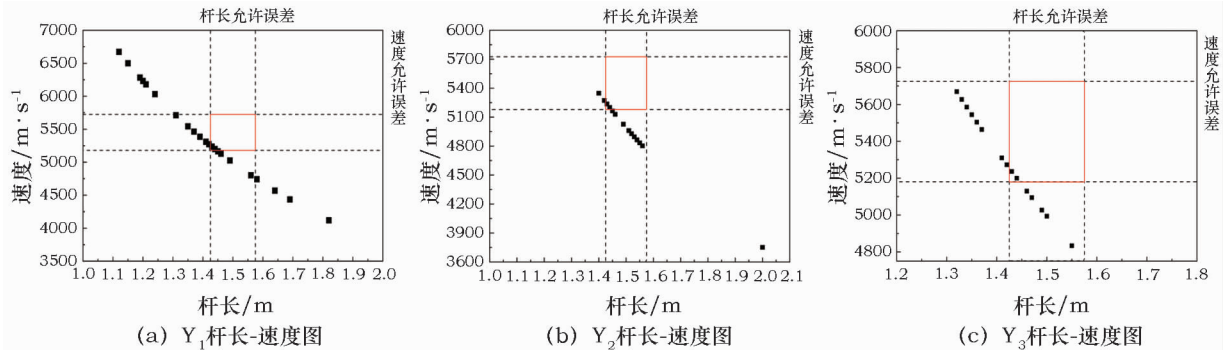


图 5 红沙堡锚杆无损检测杆长 - 速度图

Fig. 5 Length - velocity diagram of Hongshabao anchor nondestructive testing

仪器所测 Y₁ 锚杆杆长 41.7% 落入杆长允许误差范围内(图 6)。而速度指标 45.8% 落入速度允许误差内,其中对应波形反映正确杆长的占 81.8%。Y₂、Y₃、Y₅ 锚杆测量结果所反映现象与 Y₁

相同,即落入速度允许范围内的波形部分无法正确检测出真实杆长值。Y₄、Y₆ 杆仪器所测结果仅部分杆长落入杆长允许误差范围内,而无一落入速度允许误差内。



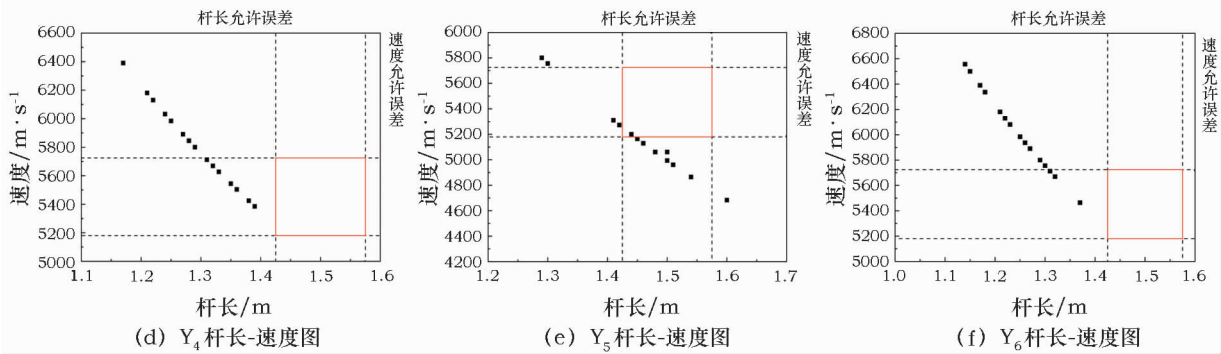


图 6 永泰城址锚杆无损检测杆长 – 速度图

Fig.6 Length – velocity diagram of Yongtai site anchor nondestructive testing

3.3 检测波衰减趋势与极限锚固力

无论红沙堡遗址还是永泰城址其所得无损检测波形都呈现出指数型衰减趋势(图 7 和 8)。

通过对锚杆采样波形峰值衰减曲线进行拟合,得出其衰减变化规律为:

$$Y = C_1 e^{-C_2 x}$$
 (4)

式中,Y 代表采样波形振幅;X 代表采样波形波长; C_1 、 C_2 为常数。

分析两地锚杆拉拔试验的测试锚固力值(表 6), H_3 、 Y_6 锚杆测试拉拔力值较大,均超过 10kN, Y_4 锚杆测试拉拔力值最低仅为 5kN。通过与衰减曲线拟合函数相比较,得出除 H_3 、 Y_4 、 Y_6 锚杆外,极限锚固力值与拟合函数中常数 C_2 正相关。

表 6 测试拉拔力值与 C_2 值表

Table 6 The test force of bolt anchoring and C_2 table		
锚杆编号	测试拉拔力/kN	C_2 值
H_1	5.48	0.20
H_2	9.69	0.38
H_3	11.39	0.49
Y_4	5.00	0.56
Y_1	7.03	0.32
Y_3	7.05	0.35
Y_5	7.10	0.41
Y_2	7.12	0.44
Y_6	10.50	0.30

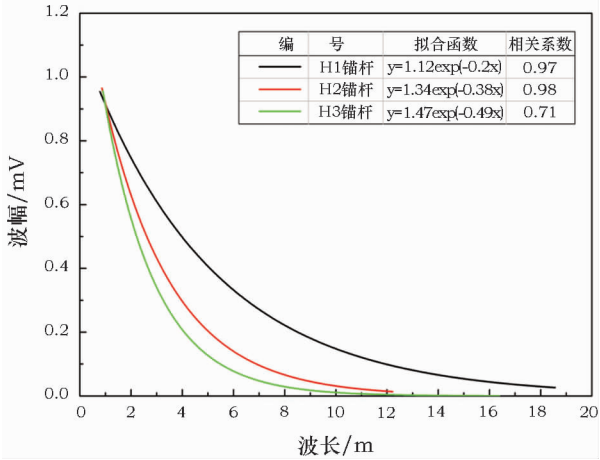


图 7 红沙堡锚杆采样波形峰值衰减曲线

Fig.7 Sampling waveform peak decay curve of Hongshabao anchor

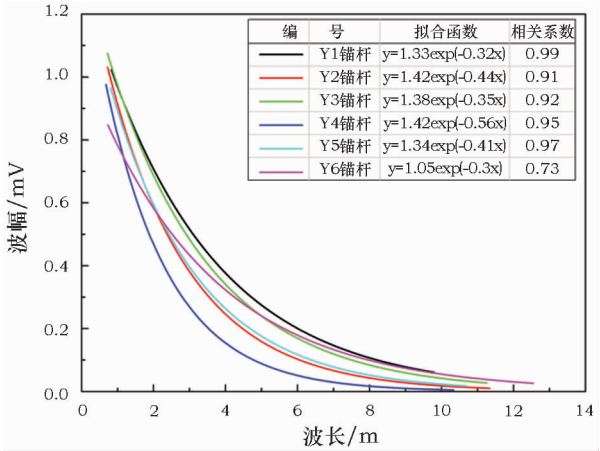


图 8 永泰城址锚杆采样波形峰值衰减曲线

Fig.8 Sampling waveform peak decay curve of Yongtai site anchor

4 讨 论

4.1 声频应力法在土遗址用 GFRP 锚固系统的适用性

利用应力波反射法对土遗址加固用 GFRP 锚杆锚固系统进行无损检测,其指标清晰明确,各根锚杆检测实测指标特性显著,同类型锚杆采样波形首波具有较好的规律性。这说明应力波反射法对土遗址用 GFRP 锚杆系统检测评价效果较好,波形衰减特征可用于定性评价该锚杆系统锚固质量。

因介质、击震方式与传播条件的不同,应力波会

呈现不同的衰减规律^[19]。对比土遗址 GFRP 锚杆系统与水泥砂浆的全长粘结型锚杆系统发现,前者具有独特的衰减规律。现阶段,若想将无损检测方法投入应用,应对土遗址 GFRP 锚杆系统的标准锚杆模拟试验进行深入研究,以期建立标准波形库从而科学地对该锚杆系统进行质量评价。

4.2 土遗址用 GFRP 锚固系统的声频应力法评价指标

将仪器测出的首波波速与杆长进行比较,得出的杆长评价所获波形的一致性效果较好、可靠性强且容易实现。

比较图 5 中实验数据与图 6 中实验数据可以看出:红沙堡波速的离散性较强,永泰城址利用波速遴选出的波形杆长仅部分合格。由此看出,速度指标无法稳定、真实地反应出杆系锚固质量的真实情况。因此,在土遗址用 GFRP 锚杆系统中利用允许波速误差指标无法得到真实波形,这说明上文所述采样波形真实性判据假设(1.2.2 节)中(1)项不成立。速度指标不稳定性与遗址所处环境、气候与浆液性质有关,其具体相关性仍需进一步研究。

锚杆长度指标则由反射应力波的走时和波速共同确定^[17],且前期有可靠地量测记录。因此在土遗址用 GFRP 锚杆系统无损检测中,杆长更适宜作为仪器所测结果的真实性判据。

4.3 土遗址用 GFRP 锚固系统的声频应力法衰减形式

一般地说,波在其传播过程中,其能量衰减主要有扩散衰减、散射衰减、吸收衰减等形式。上文通过拟合方式得到应力波在土遗址用 GFRP 锚杆系统传播过程衰减形式为 $Y = C_1 e^{-C_2 x}$,而三种衰减形式只有扩散衰减形式呈现单指数型衰减^[10]。故应力波在土遗址用 GFRP 锚杆系统传播过程中其主要呈现扩散衰减形式。

4.4 锚杆测试拉拔力与衰减指数相关性

分析红沙堡遗址、永泰故城遗址各根锚杆对应的衰减曲线与其拉拔试验所得锚杆测试拉拔力发现,除 H_3 、 Y_4 、 Y_6 锚杆外,各根锚杆测试拉拔力与衰减指数常数 C_2 呈正相关,与水泥砂浆的全长粘结型锚杆相类似^[10]。

结合红沙堡与永泰城址试验结果可得,对于具有规则采样曲线的土遗址用 GFRP 锚杆系统,采样曲线衰减越快(C_2 越大)则测试拉拔力越高。对于非规则波形锚杆,本次试验测试拉拔力离散,说明对信号复杂,波形凌乱的土遗址用 GFRP 锚杆系统仅利用无损检测手段亦较难判断该类锚杆锚固质量,

也应结合其他检测方法进行检测^[15]。

4.5 偏孔现象

拉拔试验完成后,发现红沙堡 3 根锚杆中 H_3 锚杆上下偏孔严重,杆体沉底(图 9)。观察永泰城址 6 根锚杆整体情况,发现 Y_4 与 Y_6 锚杆偏孔严重(图 10)。而在土遗址用 GFRP 锚固系统进行无损检测试验数据中, H_3 、 Y_4 、 Y_6 锚杆所测波形形态杂乱,且只有 H_3 、 Y_4 、 Y_6 锚杆,锚杆测试拉拔力与衰减指数常数 C_2 比较离散,不呈现正相关关系。



图 9 红沙堡锚杆偏孔

Fig. 9 Misregistration of Hongshabao site



图 10 永泰城址锚杆偏孔

Fig. 10 Misregistration of Yongtai site

通过上述分析得出:土遗址用 GFRP 锚杆系统若出现偏孔现象则无损检测宜结合其他检测方法共同进行检测。由于场地的不同,影响因素较多,对土遗址用 GFRP 锚杆系统偏孔现象对无损检测的影响还应作进一步的研究。

5 结 论

1) 应力波反射法可用于土遗址用 GFRP 锚杆系统检测评价,波形衰减特征适用于定性的评价该锚杆系统锚固质量。

2) 在土遗址用 GFRP 锚杆系统无损检测中,杆长更适宜作为仪器所测结果的真实性判据。

3) 应力波在土遗址用 GFRP 锚杆系统传播过程中其主要呈现扩散衰减形式。

4) 对无损检测波形凌乱、信号复杂的土遗址用 GFRP 锚杆检测宜结合其他检测方法进行评价。

5) 土遗址用 GFRP 锚杆系统若出现偏孔现象,则无损检测宜结合其他方法进行检测。偏孔现象对无损检测的影响还应作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 孙满利. 土遗址保护研究现状与进展[J]. 文物保护与考古科学, 2007, **19**(4): 64-70.
SUN Man-li. Research status and development of the conservation of earthen sites[J]. Sci Conserv Archaeol, 2007, **19**(4): 64-70.
- [2] 柯玉军. 锚杆检测技术研究及应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2006:7-30.
KE Yu-jun. The study on detection of bolting quality and its application[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006:7-30.
- [3] 郭 宏. 论“不改变原状原则”的本质意义——兼论文物保护科学的文理交叉性[J]. 文物保护与考古科学, 2004, **16**(1): 60-64.
GUO Hong. Discussion on the substance and importance of the “principle of keeping the former condition” and the intersection of arts and science in conservation[J]. Sci Conserv Archaeol, 2004, **16**(1): 60-64.
- [4] Turner H F. Boltometer—instrument for non-destructive testing of grouted rock bolts[C]//The 2nd International Symposium on Filed Measurements in Geomechanics. Rotterdam: AA Balkema. 1988: 135-143.
- [5] 汪明武,王鹤龄. 声频应力波在锚杆锚固状态检测中的应用[J]. 地质与勘探, 1998, **34**(4): 54-56.
WANG Ming-wu, WANG He-ling. Application of sonic frequency stresswave to inspection of anchoring state of rock bolts[J]. Geol Explorat, 1998, **34**(4): 54-56.
- [6] Bernard A, Lowe M J S, Deschamps M. Guided waves energy velocity in absorbing and non-absorbing plates[J]. J Acoust Society Am, 2001, **110**(1): 186-196.
- [7] Beard M D, Lowe M J S, Cawley P. Ultrasonic guided waves for inspection of grouted tendons and bolts[J]. J Mat Civil Eng, 2003, **15**(3): 212-218.
- [8] Beard M D, Lowe M J S. Non-destructive testing of rock bolts using guided ultrasonic waves[J]. Int J rock Mech Min Sci, 2003, **40**(4): 527-536.
- [9] 汪明武,王鹤龄. 无损检测锚杆锚固质量的现场试验研究[J]. 水文地质工程地质, 1998, **18**(1): 56-58.
Wang Ming-wu, Wang he-ling. On-site test of anchor rod firmly quality nondestructive testing study [J]. Hydrogeol Eng Geol, 1998, **18**(1): 56-58.
- [10] 任智敏. 锚杆锚固质量无损检测研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007:6-20.
REN Zhi-min. Research on nondestructive detection in anchorage quality of rock bolts[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007:6-20.
- [11] 李张明. 锚固系统质量的无损检测理论与智能诊断技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007:15-33.
LI Zhang-ming. A study on nondestructive detection theory and intelligent diagnosis technology of rockbolt anchorage quality[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007:15-33.
- [12] 许 明. 锚固系统质量的无损检测与智能诊断技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002:11-21.
XU Ming. Nondestructive detection of anchorage system quality and intelligent diagnosis technology research [D]. Chongqing: Chongqing University, 2002:11-21.
- [13] 李 义, 王 成. 应力反射波法检测锚杆锚固质量的实验研究[J]. 煤炭学报, 2000, **25**(2): 160-164.
LI Yi, WANG Cheng. Experiment study on bolt bonding integrity with stress reflected wave method [J]. J China Coal Society, 2000, **25**(2): 160-164.
- [14] 李 义, 张昌锁, 王 成. 锚杆锚固质量无损检测几个关键问题的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(1): 108-116.
LI Yi, ZHANG Chang-suo, WANG Cheng. Study on several key issues in nondestructive detection of bolt bonding integrity [J]. Chin Rock Mech Eng, 2008, **27**(1): 108-116.
- [15] 李 义, 刘海峰, 王富春. 锚杆锚固状态参数无损检测及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(10): 1741-1744.
LI Yi, LIU Hai-feng, WANG Fu-chun. Nondestructive testing of parameters of bolt anchoring state and its application[J]. Chin J Rock Mech Eng, 2004, **23**(10): 1741-1744.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 182—2009 锚杆锚固质量无损检测技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ/T 182—2009 Technical specification for nondestructive testing of rock bolt system[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [17] 民勤县志编纂委员会. 民勤县志[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994:486-487.
Minqin county annals compilation committee. Minqin county annals[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994:486-487.
- [18] 王治国. 景泰县志[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1996:698-699.
WANG Zhi-guo. Jingtai county annals[M]. Lanzhou: Lanzhou university press, 1996:698-699.
- [19] 陈建功, 张永兴. 锚杆系统动测信号的特征分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(7): 1051-1057.
CHEN Jian-gong, ZHANG Yong-xing. Analysis on characteristics of dynamic signal for bolt anchorage system [J]. Chin J Geotech Eng, 2008, **30**(7): 1051-1057.

Preliminary study on sonic frequency stress wave method to detect anchor bolt quality of glass fiber reinforced polymer in earthen sites

GUO Qing¹, ZHANG Jing – ke¹, FAN Meng¹, WANG Nan¹, GUO Qing – lin², ZHAO Lin – yi²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Dunhuang Academy China, Dunhuang 736200, China)

Abstract: The reinforcement of earthen sites always focuses on quality of the anchor system. Currently, pull – out testing is the only way to test earthen site anchor systems. This research used nondestructive testing technology for the first time to evaluate glass fiber reinforced polymer (GFRP) anchor system in earthen sites. In the Hongshabao and Yongtaisites, in Gansu Province, GFRP anchor system in earthen sites was tested by using a nondestructive an- chortesting instrument and a pull – out apparatus. By comparing the actual measuring bolt length and instrument measuring bolt length, it is found that the length index is good at judging the validity of results measured using the nondestructive detector. In comparison with bolt pull – out testing results, it is confirmed that the nondestructive method for testing GFRP anchor system in earthen sites is suitable and accurate. The results of nondestructive tes- ting of GFRP anchor system of earth sites is proved to be accurate.

Key words: Earthen sites; Glass fiber reinforced polymer(GFRP) bolt anchoring system; Sonic frequency stress wave method; Nondestructive test; Pull – out test

(责任编辑 潘小伦)