

陕西省工程建设标准

城市轨道交通工程穿越土遗址振动  
控制与监测标准

Standard for vibration control and monitoring of crossing earthen  
sites for urban rail transit

(征求意见稿)

《城市轨道交通工程穿越土遗址振动控制与监测标准》编制组

2023年4月

## 前言

根据陕西省住房和城乡建设厅《关于下达 2021 年度工程建设标准制订计划的通知》（陕建标发〔2021〕3 号）文件要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结本地区工作实践经验，参考有关国内标准和国际标准，结合陕西省轨道交通工程的实际情况，并在广泛征求意见的基础上，编制了本标准。

本标准共分 8 章，主要内容包括：1 总则；2 术语和符号；3 城市轨道交通工程振动对土遗址结构影响的评估；4 城市轨道交通工程振源特性；5 土遗址结构动力特性和响应的测试；6 土遗址结构动力特性计算；7 土遗址结构的容许振动标准；8 预防性保护及防振措施；附录。

本标准由陕西省住房和城乡建设厅负责归口管理，由陕西省建设标准设计站组织编制并负责出版，由西安建筑科技大学负责具体技术内容解释，在执行过程中若有修改意见或建议，请反馈至西安建筑科技大学（地址：西安市雁塔路 13 号，邮政编码：710055，电话：13379099527，邮箱：ldb@xauat.edu.cn）。

本规程主编单位：西安建筑科技大学

本规程参编单位：西安市轨道交通集团有限公司

陕西省文化遗产研究院

中铁第一勘察设计院集团有限公司

西安建筑科大工程技术有限公司

本规程主要起草人：曹 振 曹双胜 任 瑞 李东波 张新颖 李文博

雷 斌 刘 庚 范 力 毛筱霏 王旭杰 张 宁

耿 娟 芦 苇 赵 冬 汤成功 冯佳豪 孙玉辉

本规程主要审查人：

# 目 次

1 总则.....	1
2 术语、符号.....	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	3
3 城市轨道交通工程振动对土遗址结构影响的评估.....	4
3.1 一般规定.....	4
3.2 评估流程.....	4
3.3 评估内容.....	5
4 城市轨道交通工程振源特性.....	7
4.1 一般规定.....	7
4.2 振动速度.....	7
4.3 振动频率.....	10
5 土遗址结构动力特性和响应的测试.....	11
5.1 一般规定.....	11
5.2 测试方法.....	12
5.3 数据处理.....	13
6 土遗址结构动力特性计算.....	14
6.1 一般规定.....	14
6.2 土遗址结构频率计算.....	14
7 土遗址结构的容许振动标准.....	17
7.1 一般规定.....	17
7.2 容许振动标准.....	17
8 预防性保护及防振措施.....	19
8.1 一般规定.....	19
8.2 环境振动监测及预警.....	19
8.3 防振距离.....	20
8.4 振源减振.....	20
附录 A 弹性波传播速度的测试.....	21
附录 B 评估报告大纲.....	22
附录 C 监测报表.....	22
本标准用词说明.....	26
引用标准名录.....	26

# Contents

1 General Provisions.....	1
2 Terms and Symbols.....	2
2.1 Terms.....	2
2.2 Symbols.....	3
3 Evaluation of Vibration Effect of Urban Rail Transit on Earthen site.....	4
3.1 General Reuirements.....	4
3.2 Evaluation Process.....	4
3.3 Evaluation Content.....	5
4 Vibration Source Characteristics of Urban Rail Transit .....	7
4.1 General Reuirements.....	7
4.2 Vibration Velocity.....	7
4.3 Vibration Frequency.....	10
5 Testing of Dynamic Characteristics and Responses of Earthen Sites.....	11
5.1 General Reuirements.....	11
5.2 Test Method.....	12
5.3 Data Processing.....	13
6 Calculation of Structural Dynamic Characteristics of Earthen Sites.....	14
6.1 General Reuirements.....	14
6.2 Structural Frequency Calculation of Earthen Sites.....	14
7 Allowable vibration criteria for Earthen sites .....	17
7.1 General Reuirements.....	17
7.2 Allowable Vibration Standard.....	17
8 Preventive Protection and Vibration Prevention Measures.....	19
8.1 General Reuirements .....	19
8.2 Environmental Vibration Monitoring and Early Warning.....	19
8.3 Anti-vibration Distance.....	20
8.4 Vibration Source Damping.....	20
Appendix A: Test of The Propagation Velocity of Elastic Waves.....	21
Appendix B: Evaluation report outline.....	22
Appendix C: Monitoring report.....	22
Explanation of Wording in This Standard .....	26
Normative standard .....	25

# 1 总则

**1.0.1** 为防止城市轨道交通工程穿越土遗址引起的地面振动对土遗址结构产生有害影响，保护历史文化遗产，特制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于陕西省城市轨道交通工程、城际及市域轨道交通工程。

**【条文说明】**城市轨道交通为采用轨道结构进行承重和导向的车辆运输系统。城市轨道交通包括：地铁系统、轻轨系统、单轨系统、有轨电车、磁浮系统、自动导向轨道系统、市域快速轨道系统。振源特性差异大，振动影响复杂，加之文物保护的特殊性，致使城市轨道交通工程对土遗址的影响研究是一个崭新、跨学科的课题，各国学者研究较少，编制标准缺乏必要的资料和数据，故本标准编制前进行了专题研究：对城市轨道交通工程施工、运营过程中的振源、有代表性的土遗址结构、不同工艺的建筑材料等进行了现场测试和室内实验。取得了大量可供分析的原始数据，并从理论、实验和数值分析等方面进行全面系统地研究和分析，从而为制定标准提供了科学、可靠的依据。

**1.0.3** 城市轨道交通工程穿越土遗址区域时，应委托第三方单位在初步设计阶段开展针对性的土遗址结构影响评估工作，在施工阶段开展针对性的土遗址结构影响监测工作。

**【条文说明】**文物保护行业有其严格的保护流程和要求，加之土遗址经历自然环境和人为因素的侵害，各类结构性病害广泛存在。故而城市轨道交通工程穿越土遗址区域时，首先应委托有资质及文物保护经验的第三方单位在初步设计阶段开展针对性的土遗址结构影响评估工作，以便针对影响程度开展后期工作。振动效应不但与其幅值有关，与其作用时长也密切相关，故而在施工阶段应针对振源特性有针对性的开展监测工作，定期开展并留档保存。

**1.0.4** 土遗址为防止城市轨道交通工程振动，除应执行本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语、符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 土遗址 earthen sites

以土为主要建筑材料的具有历史、艺术、科学以及社会和文化价值的古文化遗址（不含墓葬结构）。

#### 2.1.2 台体类土遗址 hathpace earthen sites

指长、宽尺寸相差不大的结构。一般指长度不超过 5 倍宽度的土遗址。如烽火台、城台、基座等。

#### 2.1.3 墙体类土遗址 wall earthen sites

指长度显著大于宽度的结构，一般指长度大于 5 倍宽度的土遗址。如城墙、长城等。

#### 2.1.4 城市轨道交通工程 urban rail transit engineering

采用专用轨道导向运行的城市公共客运交通系统，包括地铁、轻轨、单轨、有轨电车、磁浮、自动导向轨道、市域快速轨道系统。

#### 2.1.5 振动 vibration

物体或质点在平衡位置附近做周期性或随机性的运动。

#### 2.1.6 动力特性 dynamic characteristic

表示结构动态特性的基本物理量，如固有频率、振型和阻尼等。

#### 2.1.7 动力响应 dynamic response

结构受动力输入作用时的输出，如位移响应、速度响应、加速度响应等。

#### 2.1.8 速度时程 velocity time history

结构质点振动速度在时域内的变化过程。

#### 2.1.9 综合变形系数 multi-transfiguration coefficient

结构弯曲变形、剪切变形、转动惯量等对固有频率影响的系数。

#### 2.1.10 质量刚度参数 mass and stiffness parameter

结构总体质量和刚度的大小及其分布的参数。

#### 2.1.11 动力放大系数 dynamic magnification coefficient

单质点结构在动荷载作用下最大速度响应与地面同方向最大速度的比值。

### 2.1.12 防振距离 vibration-proof distance

将引起地面振动的振源远离土遗址结构,使之不受振动的有害影响所需的最小距离。

### 2.1.13 振源减振 vibration absorption of source

通过采取措施以减小振源产生的振动。

## 2.2 符号

### 2.2.1 作用及作用效应符号

$f_r$ ——城轨振源地面振动频率;

$f_j$ ——结构第  $j$  阶固有频率;

$v_r$ ——城轨振源地面振动速度,

$v_{\max}$ ——结构最大速度响应。

### 2.2.2 几何参数和计算参数、系数符号

$A$ ——截面面积;

$b_0$ ——底面宽度;

$H$ ——计算总高度;

$\beta$ ——动力放大系数;

$\gamma$ ——振型参与系数;

$\alpha$ ——综合变形系数;

$\lambda$ ——固有频率计算系数;

$\psi$ ——质量刚度参数。

### 2.2.3 材料性能及其他符号

$E$ ——弹性模量;

$[v]$ ——容许振动速度;

$V_p$ ——弹性纵波(拉压波)传播速度;

$V_s$ ——弹性横波(剪切波)传播速度。

**【条文说明】**本标准采用的符号及其意义,是根据现行国家标准《工程结构设计通用符号标准》(GRIT 5132)规定的符号用字规则及其表达方法制定的,制定过程中,注意了与有关标准的协调和统一问题。

## 3 城市轨道交通工程振动对土遗址结构影响的评估

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 评估城市轨道交通（以下简称城轨）工程振动对土遗址结构的影响，应根据土遗址现状、城轨施工及运营振源特性，测试分析土遗址结构速度响应，并结合容许振动速度，综合分析并提出评估结论。

**3.1.2** 评估宜分为两级。第一级应以宏观控制和构造鉴定为主进行综合评估，第二级应以承载能力和稳定性验算为主进行综合评估。

**【条文说明】**第一级评估应根据土遗址结构受力体系完整性、结构材料强度、结构性病害发育状况以及植物夹层、原木骨架等构造措施方面进行评估。第二级评估，应在结构检测、材料性能实验、病害详细勘察基础上，通过考虑结构损伤及材料劣化等效应，通过计算分析，以承载能力和稳定性为控制目标，进行综合评估。

**3.1.3** 当土遗址结构受城轨工程振动影响时，其结构速度响应宜采用测试及计算法综合确定。

**3.1.4** 存在结构安全隐患的土遗址在城轨施工及运营前应进行预防性保护。

**【条文说明】**残存土遗址在既有静力效应作用下，其承载能力冗余度有限，针对存在一定结构性病害土遗址，应根据文物领域预防性保护导则及标准进行保护。

**3.1.5** 对土遗址结构进行现状评估及监测时，不得对文物本体造成损伤。

### 3.2 评估流程

**3.2.1** 评估城轨施工及运营振动对土遗址结构的影响，可按下列步骤进行：

- (1) 调查土遗址和城轨施工及运营振源状况；
- (2) 测试弹性波在场地及土遗址结构中的传播速度；
- (3) 测试计算土遗址结构的速度响应；
- (4) 计算土遗址结构的容许振动速度；
- (5) 综合分析并提出评估结论。

**3.2.2** 土遗址结构安全性评估程序应按图 3.1 所示进行：



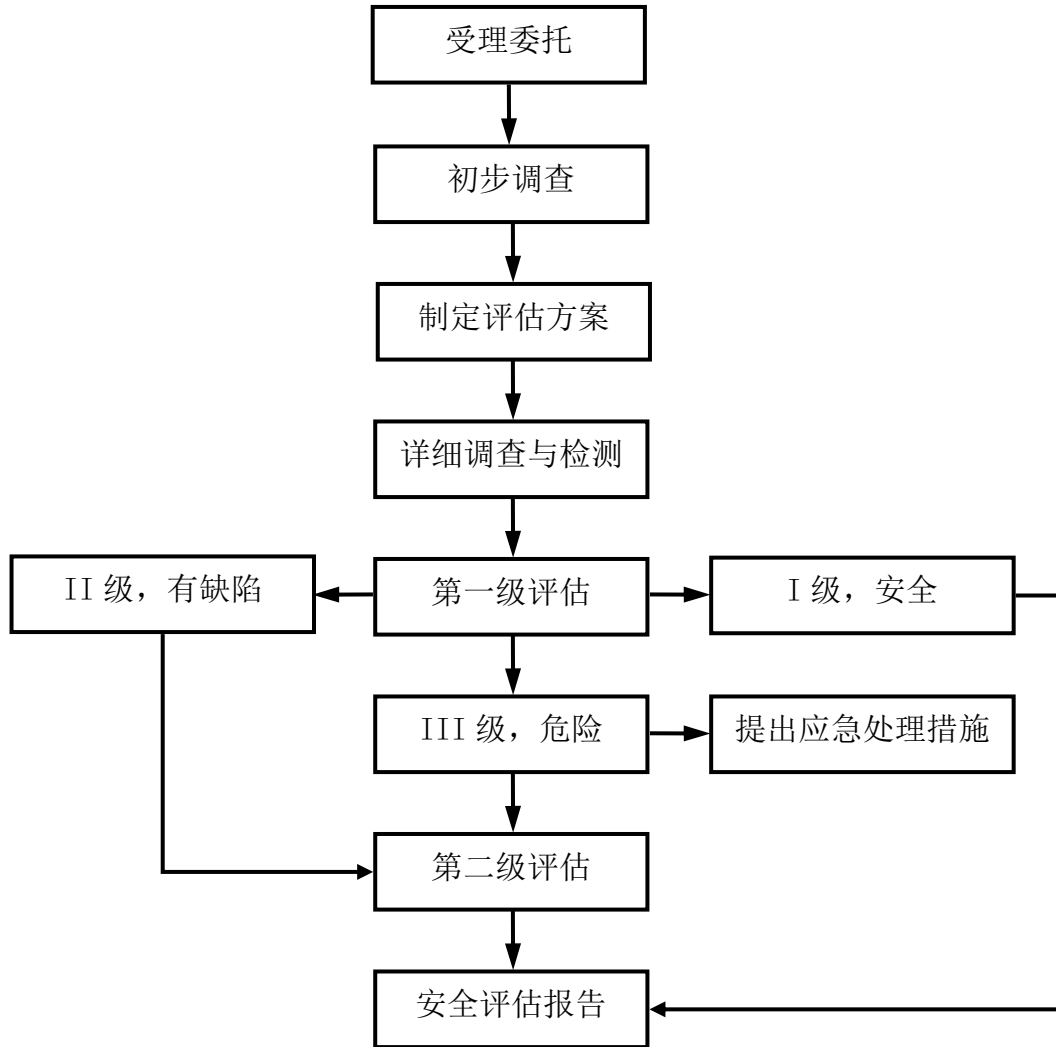


图 3.1 土遗址结构安全性评估流程图

### 3.3 评估内容

**3.3.1** 评估包括:现状调查和资料收集、材料性能检测、结构动力响应测试、结构安全性评价。

#### 3.3.2 现状调查和资料收集

(1) 调查、收集土遗址的历史沿革、结构尺寸、结构类型、土体类型、结构病害、区域土体特征等, 以及与修缮相关的历史资料;

(2) 工程概况及施工、运营振源的类型、频率、持时、分布状况等;

(3) 施工及运营振源与土遗址的相对位置关系。

#### 3.3.3 材料性能检测

土遗址结构及材料性能检测内容应符合表 3.3.3 的规定。

表 3.3.3 土遗址结构及材料性能检测

序号	检测对象	检测内容
1	土体	力学性能、含水量、密度、干缩率、外观质量；
2	砖石	块材力学性能、材料成分、强度、尺寸偏差、外观质量； 灰浆强度及材料成分；砌体强度、砌筑质量。
3	结构	地基稳固性；结构完整性；受力与变形状态

**【条文说明】**材料强度检测宜采用无损检测方法，减小对土遗址的损伤。其中，土体材料性能检测可按照现行国家标准《土工试验方法标准》（GB/T50123）进行测试；砖石块体强度可参照现行国家标准《砌体工程现场检测技术标准》（GB/T50315）进行测试；灰浆强度参照现行行业标准《贯入法检测砌筑砂浆抗压强度技术规程》（JGJ/T 136）进行测试。结构检测采用地质雷达、表观测试等方法，对土遗址裂缝、内部空洞等进行测试。

#### 3.3.4 结构动力响应

（1）弹性波传播速度的测试，应符合本标准附录 A 的规定。

（2）土遗址结构速度响应的测试和计算，应分别按本标准第 5 章和第 6 章的规定进行。当计算值和测试值不同时，应取两者的较大值。

（3）土遗址结构的容许振动速度，应根据结构类型、保护级别和弹性波传播速度按本标准第 7 章的规定确定。

#### 3.3.5 结构安全性评价

结构安全性评价宜考虑遗址现状、材料性能、结构动力响应等做出综合评价，并提出保护性建议。评估报告大纲见附录 B。

## 4 城市轨道交通工程振源特性

### 4.1 一般规定

4.1.1 城市轨道交通工程振源指城市轨道交通在施工和运营阶段引起的振动。

4.1.2 振源特性包括振动速度、振动频率等。

【条文说明】城市轨道交通工程振源的来由，对不同振源形式，根据其振源特性，进行影响评估。振动控制中，以振动速度、振动频率为主控因素。

4.1.3 在条件允许时，应首选原位测试法获取振源特性；条件不允许时，可通过理论分析、数值模拟等方法获取。

### 4.2 振动速度

4.2.1 施工及运营振源引起的不同距离处的地面振动速度，可根据振源类型和场地土类别，按表 4.2.1 选用。

表 4.2.1 振动速度 $V_r$  (mm/s)

振源类型	场地土类别	$V_s$ (m/s)	距离 $r$ (m)					
			10	50	100	200	400	$\geq 500$
运营工况	黄土	140~220	0.406	0.132	0.062	0.045	0.034	—
	砂砾	200~280	—	0.206	0.113	0.030	0.020	—
施工工况	明挖	黄土	—	0.102	0.058	0.026	—	—
		砂砾	—	0.230	0.110	0.050	0.025	—
		回填土	—	0.121	0.051	0.021	—	—
	盾构	黄土	—	0.012	—	—	—	—
		砂砾	—	0.028	—	—	—	—

4.2.2 对表 4.1.1 中未做规定的振源和场地土，其不同距离处的地面振动速度，应按现行国家标准《地基动力特性测试规范》（GB/T 50269）的规定进行现场测试。

【条文说明】城市轨道交通振源引起的振动，通过土层以波动形式向外传播。在传播过程中，其幅值随距离增加而逐渐减小，并与振源类型、场地土类别有关。表 4.2.1 中所列不同距离处振动速度值是城市轨道交通工程在施工及运营期间典型振动在未采取减振措施时不同场地土传播的实测、分析后得出的。

4.2.3 无条件时，振动传播和衰减的计算可按以下方法进行计算：

(1) 距城轨振源中心  $r$  处地面的竖向或水平向振动速度，可按下列公式计算：

$$V_r = V_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} \left[ 1 - \xi_0 \left( 1 - \frac{r_0}{r} \right) \right] \exp [ - \alpha_0 f_0 (r - r_0) ] \quad (4.2.3-1)$$

式中： $V_r$ ——距振源中心  $r$  处地面振动速度（mm/s），当其计算值等于或小于场地地面脉动值时，其结果无效；

$V_0$ —— $r_0$  处地面振动速度（mm/s）；

$r_0$ ——振源半径（m），见第(2)条的规定；

$r$ ——距振源中心的距离（m）；

$\xi_0$ ——与振源半径等有关的几何衰减系数，见第(3)条的规定；

$\alpha_0$ ——土的能量吸收系数（s/m），见第(4)条的规定；

$f_0$ ——地面振动频率（Hz）。

(2) 振源半径  $r_0$  可按下列规定取值：

(i) 城轨

$$\begin{aligned} r \leq H, \quad r_0 &= r_m \\ r > H, \quad r_0 &= \delta_r r_m \end{aligned} \quad (4.2.3-2)$$

$$r_m = 0.7 \sqrt{\frac{BL}{\pi}} \quad (4.2.3-3)$$

式中： $B$ ——城轨隧道宽（m）；

$L$ ——引机车车身长（m）；

$H$ ——隧道底深度（m）；

$\delta_r$ ——隧道埋深影响系数。

$$\frac{H}{r_m} \leq 2.5, \delta_r = 1.30$$

$$\frac{H}{r_m} = 2.7, \delta_r = 1.40$$

$$\frac{H}{r_m} \geq 3.0, \delta_r = 1.50$$

(ii) 打桩

$$r_0 = \beta r_p \quad (4.2.3-4)$$

$$r_p = 1.5 \sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad (4.2.3-5)$$

式中， $\beta$ ——系数，淤泥质黏土、新近沉积的黏土、非饱和松散砂， $\beta=4.0$ ；软塑的黏土， $\beta=5.0$ ；软塑的粉质黏土、饱和粉细砂， $\beta=6.0$ ；

$F$ ——桩的横截面面积（ $m^2$ ）。

(3) 几何衰减系数 $\xi_0$ 与振源类型、土的性质和振源半径 $r_0$ 有关，其值可按表 4.2.3-1~4.2.3-2 采用。

表 4.2.3-1 城轨振源几何衰减系数 $\xi_0$

土类	$V_s(m/s)$	r 与 H 的关系	$r_0$ (m)	$\xi_0$
饱和淤泥质粉质黏土	80 ~ 280	$r \leq H$	5.00	0.800
黏土及可塑粉质黏土			6.00	0.800
硬塑粉质黏土			>7.00	0.750
硬塑粉质黏土黏土 及可塑粉质黏土	150 ~ 280	$r > H$	5.00	0.400
			6.00	0.350
			$\geq 7.00$	0.150 ~ 0.250
饱和淤泥质粉质黏土	80 ~ 110	$r > H$	5.00	0.300 ~ 0.350
			6.00	0.250 ~ 0.300
			7.00	0.100 ~ 0.200

表 4.2.3-2 打桩振源几何衰减系数 $\xi_0$

土类	$V_s(m/s)$	$r_0$ (m)	$\xi_0$
软塑的黏土	100 ~ 220	$\leq 0.50$	0.720 ~ 0.955

软塑粉质黏土、饱和粉细砂		1.00	0.550
		2.00	0.450
		3.00	0.400
淤泥质黏土 新近沉积的黏土 非饱和松散砂	80 ~ 220	≤0.50	0.700~0.950
		1.00	0.500~0.550
		2.00	0.400
		3.00	0.350~0.400

(4) 能量吸收系数 $\alpha_0$ 可根据振源类型和土的性质按表 4.2.3-4 采用。

表 4.2.3-4 土的能量吸收系数 $\alpha_0$

振源	土 类	$V_s$ (m/s)	$\alpha_0$ (s/m)
城轨	硬塑粉质黏土	230~280	$(2.00\sim3.50) \times 10^{-4}$
	黏土及可塑粉质黏土	200~250	$(2.15\sim2.20) \times 10^{-4}$
	饱和淤泥质粉质黏土	80 ~ 110	$(2.25\sim2.45) \times 10^{-4}$
打桩	软塑的黏土	150~220	$(12.50\sim14.50) \times 10^{-4}$
	软塑粉质黏土、饱和粉细砂	100~120	$(12.00\sim13.00) \times 10^{-4}$
	淤泥质黏土	90 ~ 110	$(12.00\sim13.00) \times 10^{-4}$
	新近沉积的黏土	110~140	$(18.00\sim20.50) \times 10^{-4}$
	非饱和松散砂	150~220	

### 4.3 振动频率

4.3.1 施工及运营振源引起的不同距离处的地面振动频率，可根据振源类型和场地土类别，按表 4.3.1 选用。

表 4.3.1 振动频率 $f_r$  (Hz)

振源 类型	场地土类 别	$V_s$ (m/s)	距离 $r$ (m)						
			10	50	100	200	400	$\geq 500$	
运营工况	黄土	140~220	13.21	12.52	12.36	12.31	12.21	—	
	砂砾	200~280	—	6.75	5.82	5.01	4.32	—	
施工工 况	明挖	黄土	140~220	—	13.46	13.35	13.27	13.14	—
		砂砾	200~280	—	6.91	6.07	5.21	4.53	—
		回填土	110~130	—	14.28	14.16	14.01	—	—
	盾构	黄土	140~220	—	15.51	—	—	—	—
		砂砾	200~280	—	8.37	—	—	—	—

**4.3.2** 对表 4.2.1 中未做规定的振源和场地土，其不同距离处的地面振动频率，应按现行国家标准《地基动力特性测试规范》（GB/T 50269）的规定进行现场测试，测试数据应按本标准第 5.3 节的规定进行处理。

**【条文说明】**由于土质的非均匀性，振动在不同土层中的传播均存在频率随距离而变化的现象，也就是频散现象，这对于准确计算土遗址结构的动力响应十分重要，因为随着距离的增加，振动强度虽逐渐减弱，但振动频率却逐渐趋近于土遗址结构的固有频率，其动力响应可能增大。表 4.3.1 列出了城市轨道交通振动在未采取减振措施时不同场地土中传播的频率随距离变化的实测值。

## 5 土遗址结构动力特性和响应的测试

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 本章适用于土遗址结构的动力特性（固有频率、振型和阻尼）和响应的测试。

5.1.2 土遗址的动力特性主要受水平方向控制，对于水平动力特性和响应的测试，当结构对称时，可按任一主轴水平方向测试；当结构不对称时，应按各个主轴水平方向分别测试。

【条文说明】对土遗址结构动力特性和响应的测试表明，水平方向速度响应最大，故规定按水平方向测试。

## 5.2 测试方法

5.2.1 土遗址结构动力特性和响应的测试应符合下列要求：

(1) 测试仪器应满足低频、微幅的要求，其低频起始频率不应高于 0.5Hz，测振系统的分辨率不应低于  $10^{-6}\text{m/s}$ ；

(2) 测试仪器应在标准振动台上进行系统灵敏度系数的标定，并给出灵敏度频率的变化曲线；

(3) 动力特性应在脉动环境下测试，结构响应应在振源作用下测试；测试时不得有任何机、电、人为及不良天气的干扰影响；

(4) 传感器应牢固固定在被测结构构件上；测线电缆应与结构构件固定在一起，不得悬空；

(5) 测试时应详细记录测试日期、周边环境、风向风速、测试次数、记录时间、测试方向、测点位置、各测点对应的通道号、传感器编号、放大倍数以及标定值、各通道的记录情况等；

(6) 低通滤波频率和采样频率应根据所需频率范围设置，采样频率宜为 100 Hz~120Hz；记录时间每次不应少于 15min，记录次数不得少于 5 次。

【条文说明】本条主要规定了对测试仪器、测试环境以及测试操作的基本要求。

地脉动引起的结构振动一般很小，且频率较低，结构和工业振源的频带范围约为 20~200Hz。按照采样定理，采样频率为所需频率上限的 2 倍即可，但实际工作中，最低采样频率通常取分析上限频率的 3~5 倍；考虑到频域分析中频率分辨率的要求，条文中提出采样频率宜为 100~120Hz。

为了减小干扰的后期处理，提高采集、分析数据的准确性，对测试环境和测试记录做了规定。

5.2.2 场地水平动力特性测试应按以下要求布置测点：



测试场地的水平振动,测点应结合振源及与土遗址的相对位置关系综合布置。

### 5.2.3 土遗址结构水平响应测试应按以下要求布置测点:

测试土遗址结构的水平响应,测点应沿两个主轴方向分别布置。

**【条文说明】**响应测试的测点位置是依据反映整体承重结构最大响应的原则确定的。一般来说,土遗址最高处的响应是结构的最大响应,因而结构的测点位置为结构中部顶面。

## 5.3 数据处理

5.3.1 数据处理前,应对实测原始记录信号去掉零点漂移和干扰,并对电信号干扰进行带阻滤波,处理波形的失真。

5.3.2 土遗址结构动力特性应按下列方法确定:

(1) 对处理后的记录进行自功率谱、互功率谱和相干函数分析,同时宜加指数窗,平均次数宜为 100 次左右;

(2) 结构固有频率和振型应根据自功率谱峰值、各层测点间的互功率谱相位确定,测点间相干函数不得小于 0.8;

(3) 模态阻尼比可由半功率带宽法确定。

5.3.3 土遗址结构响应应分别按同一高度、同一方向各测点速度时程最大峰峰值的一半确定,并取 5 次的平均值。

**【条文说明】**对动力特性实测记录进行自功率谱、互功率谱分析时,为了减少频谱的泄漏,需要加窗函数。同时为减小干扰,提高分析精度,平均次数不宜太少;平均次数太多又导致实测记录时间太长,综合上述的影响,平均次数宜为 100 次左右。

确定结构的频率和振型时,除了自功率谱的峰值和互功率谱的相位符合要求外,还要求测点间的相干函数不小于 0.8。相干函数小于 0.8 时,干扰太大,不能确定该频率为结构振动频率。

## 6 土遗址结构动力特性计算

### 6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于土遗址结构动力特性和响应的计算。

6.1.2 土遗址结构动力特性和响应的计算，应根据本标准第3章的规定对土遗址进行现状调查和资料收集，确定计算相关数据。

6.1.3 土遗址结构动力特性和响应的计算，当结构对称时，可按任一主轴水平方向计算，当结构不对称时，应按各个主轴水平方向分别计算。

### 6.2 土遗址结构频率计算

6.2.1 台体类与墙体类土遗址的水平固有频率可按下式计算：

$$f_i = \frac{1}{2\pi H} \lambda_i \psi \quad (6.2.1)$$

式中： $f_i$ ——遗址第*i*阶固有频率（Hz）；

H——遗址计算总高度（地面至承重结构最高处的高度，m）；

$\lambda_i$ ——遗址第*i*阶固有频率计算系数，按表6.2.1-1、6.2.1-2选用；

$\psi$ ——结构质量刚度参数（m/s），台体类取39，墙体类取48。

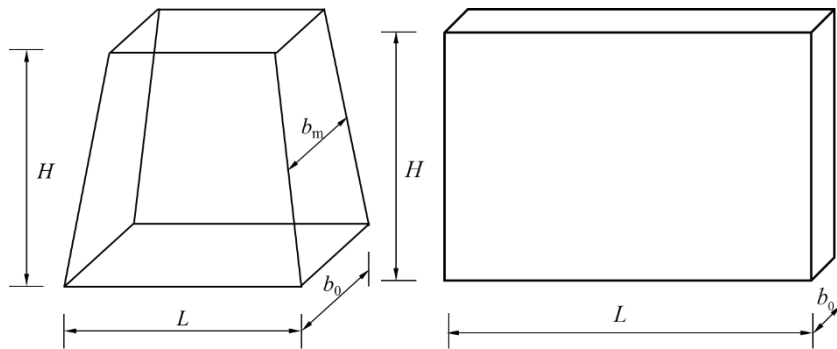


图 6.2.1-1 台体类遗址图 6.2.1-2 墙体类遗址

表 6.2.1-1 台体类遗址固有频率计算系数  $\lambda_i$

$H/b_0$	$b_m/b_0$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1.0	$\lambda_1$	2.740	2.273	1.966	1.742	1.571
	$\lambda_2$	4.756	3.785	3.034	2.499	2.108

	$\lambda_3$	5.547	4.942	4.427	4.045	3.733
2.0	$\lambda_1$	1.935	1.550	1.328	1.184	1.067
	$\lambda_2$	4.772	4.173	3.283	2.678	2.233
	$\lambda_3$	4.788	4.433	4.267	4.041	3.708
3.0	$\lambda_1$	1.489	1.187	1.018	0.900	0.792
	$\lambda_2$	4.178	3.792	3.708	2.970	2.389
	$\lambda_3$	4.244	3.817	3.804	3.682	3.562

注： $b_0$ 为遗址底部结构宽度， $b_m$ 为高度  $H$  范围内平均宽度（m）。

表 6.2.1-1 墙体类遗址固有频率计算系数  $\lambda_i$

$H/b_0$	$L/b_0$	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1.0	$\lambda_1$	1.551	1.563	1.574	1.635	1.675	1.687
	$\lambda_2$	1.639	1.643	1.659	1.668	1.681	1.698
	$\lambda_3$	1.747	1.753	1.809	1.831	1.881	1.902
2.0	$\lambda_1$	1.082	1.119	1.275	1.311	1.317	1.415
	$\lambda_2$	1.346	1.288	1.433	1.402	1.398	1.522
	$\lambda_3$	2.285	1.971	1.992	1.876	1.759	1.849
3.0	$\lambda_1$	0.783	0.820	0.948	0.938	1.105	1.075
	$\lambda_2$	1.335	1.198	1.295	1.187	1.336	1.259
	$\lambda_3$	3.012	2.448	2.255	1.962	2.045	1.809

注： $b_0$ 为遗址底部结构宽度， $L$ 为遗址结构长度（m）。

**【条文说明】**台体类与墙体类土遗址结构频率的计算公式和有关参数的取值是在参考国家现行标准《古建筑防工业振动技术规范》（GB/T50452），并结合

大量实测数据和数值模拟结果所得出的。

## 7 土遗址结构的容许振动标准

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 土遗址结构的容许振动应以结构的最大动应变为控制标准，以振动速度表示。

**【条文说明】**土遗址结构容许振动标准的制订，是从两个基本点出发的：一是城市轨道交通振动对土遗址结构的影响是长期的、微小的，而地震的影响则是短暂的、强烈的。二是现代建筑的容许振动标准是针对结构本身的安全性制定的，而土遗址结构，由于其历史、文化和科学价值。不能和现代建筑一样仅考虑安全性，必须在考虑安全性的同时，还要考虑其完整性。据此，本规范提出以疲劳极限作为土遗址结构防城市轨道交通振动的控制指标，从而达到保护土遗址结构完整性的目的。

**7.1.2** 土遗址结构的容许振动速度，应根据结构类型、保护级别和弹性波传播速度选用。

**【条文说明】**鉴于我国土遗址众多。其结构类型、土体性质及保护现状不尽相同，历史、科学价值也各异，故本规范规定土遗址结构的容许振动速度应根据其结构类型、保护级别和弹性波在土遗址结构中的传播速度选用。

### 7.2 容许振动标准

**7.2.1** 土遗址结构的容许振动速度应按表 7.2.1-1 的规定采用。

表 7. 2. 1-1 土遗址结构的容许振动速度 [v] (mm/s)

保护级别	土遗址结构类型	控制点位置	控制点方向	土遗址 $V_p$ (m/s)		
				<1000	1000~1500	>1500
全国重点文物保护单位	台体类土遗址	结构最高处	水平	0.15	0.15~0.20	0.20
	墙体类土遗址	结构最高处	水平	0.20	0.20~0.25	0.25

省级 文物保护单位	台体类土遗址	结构最高处	水平	0.27	0.27~0.36	0.36
	墙体类土遗址	结构最高处	水平	0.32	0.32~0.41	0.41
市、县级 文物保护单位	台体类土遗址	结构最高处	水平	0.45	0.45~0.60	0.60
	墙体类土遗址	结构最高处	水平	0.50	0.50~0.65	0.65

注：当 $V_p$ 介于1600~2100m/s之间时， $[v]$ 采用插入法取值。

**【条文说明】**表 7.2.1 中的容许振动速度值是根据上述原则，通过对不同夯土、土坯等土遗址材料 300 多个试件的室内实验、多处土遗址结构的现场测试以及理论分析确定的。表中保护级别的划分是根据《中华人民共和国文物保护法》分第三条的规定。即依据土遗址的历史、艺术、科学价值确定为全国重点文物保护单位，省级文物保护单位，市、县级文物保护单位；弹性波在土遗址结构中的传播速度  $V_p$  系通过对不同年代、不同环境的各类土遗址弹性波传播速度的实测和分析加以规定的。测试和分析表明，弹性波传播速度能反映土遗址结构的现状。

## 8 预防性保护及防振措施

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 城轨施工及运营振动对土遗址结构的影响超过本标准第4章规定的容许振动速度值时，应针对性的开展防振措施研究。

**8.1.2** 防振措施应根据防振效果、技术可靠程度、施工难易等进行技术经济比较后综合确定。

**8.1.3** 涉及文物本体预防性保护时，应按照文物部门相关规定执行。

### 8.2 环境振动监测及预警

#### 8.2.1 环境振动监测

(1) 实施振动监测前，应根据监测目的、土遗址结构特性及振源特点确定监测方案。

(2) 原则上土遗址结构最高处应布置振动监测点，监测周围环境振动对其的影响。在体型突变、材料变化部位均需布设振动监测点，明确周围环境（马路、铁路、隧道）等对土遗址产生的影响。

(3) 监测内容应符合表8.2.1的规定。

表 8.2.1 土遗址振动监测内容

序号	检测内容	检测内容
1	动力特性	固有频率、振型、阻尼
2	结构响应	位移响应、速度响应、加速度响应

#### 8.2.1 监测预警

全国重点文物保护单位应建立起全面监测体系，对于主体结构监测数据应设置预警阈值（参见7.2容许振动标准），一旦监测数据超过预警阈值应进行报警，及时上报上级管理单位。

**【条文说明】**环境振动监测及预警是做好土遗址预防性保护的重要手段，实际中，应严格制定检测方案，按要求布置测点，测试相关数据。到达预警阈值时应立即采取相应措施。

### 8.3 防振距离

**8.3.1** 采用计算法时，防振距离可按下列步骤确定：

(1) 根据城轨施工及运营振源与土遗址结构之间的距离，按本标准第4章表4.3.1分别选用或测试该距离处的地面振动速度和振动频率；

(2) 按本标准第6章的规定求出土遗址结构的最大速度响应；

(3) 当  $v_{\max} \leq [v]$  时，则该距离满足防振要求；当  $v_{\max} > [v]$  时，则应调整距离，继续按以上步骤进行计算，直至  $v_{\max} \leq [v]$ 。

**8.3.2** 采用测试法时，可按本标准第7章的规定测得土遗址结构的最大速度响应，当  $v_{\max} \leq [v]$  时，则城轨施工及运营振源与土遗址结构之间的距离满足防振要求；当  $v_{\max} > [v]$  时，则应采取防振措施。

**【条文说明】**防振距离为城市轨道交通工程振源引起的地面振动对土遗址结构不产生有害影响的最小距离。条文对防振距离的确定，按获得土遗址结构速度响应的计算法和测试法分别做了规定。前者既可用于城市轨道交通工程的布局，也可用于评估其振动对土遗址结构的影响；后者仅用于土遗址周边有城市轨道交通工程振源的评估。

### 8.4 振源减振

**8.4.1** 城轨轨道减振可采用以下措施：

(1) 轨道减振，包括浮置板、弹性支承块、高弹性扣件、道碴垫；

(2) 无缝线路或重型钢轨。

**8.4.2** 土遗址保护区内不得实施强夯；保护区外的采石工程作业，应控制装药量。

**【条文说明】**对城市轨道交通工程的减振分别列出了可供采用的措施，具体设计尚需按相应的国家和行业标准、规范进行；大型动力设备的减振，按国家现行标准《隔振设计规范》（GB 50463）有关规定执行。



## 附录 A 弹性波传播速度的测试

### A.1 一般规定

**A.1.1** 本附录适用于土遗址结构的弹性波传播速度测试。

**A.1.2** 弹性波传播速度测试采用非金属超声检测分析仪，其声时测读精度不得低于  $0.1\mu\text{s}$ 。

### A.2 测试方法

**A.2.1** 弹性波传播速度的测试应符合下列规定：

(1) 弹性波传播速度应采用平测法测试（即发射换能器和接收换能器均布置在构件同一平面内）；

(2) 测点处的表面宜清洁、平整；

(3) 采用纵波换能器，换能器和测点表面间用黄油耦合；

(4) 用钢卷尺测量发射换能器和接收换能器两者中心的距离（以下简称测距），记录数据应精确到  $1\text{mm}$ 。

**A.2.2** 土遗址结构的弹性波传播速度测试尚应符合下列规定：

(1) 测试土体的纵波传播速度；

(2) 测点应布置在遗址底部和顶部以及风化、开裂、鼓凸处；每层测点不应少于 10；

(3) 测距宜选择  $200\text{mm} \sim 250\text{mm}$ 。

### A.3 数据处理

**A.3.1** 每处测点应改变发射电压，读取 2 次声时，取其平均值为本测距的声时。

对于声时异常的测点，必须测试和读取 3 次声时，读数差不宜大于 3%，以测值最接近的 2 次平均值作为本测距的声时。

**A.3.2** 测距除以平均声时为该测点的传播速度；所有测点的平均传播速度即为该土遗址结构的弹性波传播速度。

## 附录 B 评估报告大纲

### B.1 评估报告目录设置

#### B.1.1 土遗址影响报告目录包括：

第一章总论（包括项目背景、评估内容及范围、土遗址简介、历史沿革、考古情况、价值论述）；

第二章工程概况与工程分析（详细的工程概况、与土遗址相对位置关系、施工工法等）；

第三章评估依据（主要包括法律法规、技术规范及其他相关文件）；

第四章现场勘查与检测（主要包括现状调查、变形观测、材料强度及缺陷检测等）；

第五章工程项目合规性评价（论述工程项目是否符合现有涉文物保护法律、法规、规划等条文）；

第六章历史文化要素影响评估（包括历史文化要素分析、现状描述、论述工程建设对历史文化要素的影响）；

第七章安全性评估（包括现状安全性评估、工程施工及运营对土遗址安全的影响）；

第八章结论及建议。

### B.2 评估报告主要附表

#### B.2.1 土遗址影响评估报告主要附表包括：

- (a) 评估范围内沿线土遗址总表；
- (b) 城市轨道交通工程与沿线土遗址位置关系；
- (c) 历史文化要素影响评估表；
- (d) 主要施工机械振动速度；
- (e) 影响评估结论表。

### B.3 评估报告主要附图

#### B.3.1 土遗址影响评估报告主要附图包括：

- (a) 城市轨道交通工程建设规划图；

- (b) 文物保护单位保护范围和建设控制地带示意图；
- (c) 站点或区间线路设计图；
- (d) 城市轨道交通工程与土遗址位置关系图；
- (e) 主要施工步骤图；
- (f) 土遗址结构图。

## **B.4 评估报告**

**B.4.1** 文物影响报告书应全面、概括性地反映土遗址影响评估的全部工作，要求资料准确，文字简洁，论点清晰，结论明确。报告书可采用图、表和照片，评估图册可放于附录。



表 C. 0. 2 监测报表

工程名称：					报表编号：						
本次监测时间：					上次监测时间：						
监测数据统计	测点位置	监测内容	测点号	阶段变化最大值	累计变化最大值	阶段变化速率	测点位置	测点号	阶段变化最大值(mm)	累计变化最大值(mm)	阶段变化速率(mm/d)
不可移动文物变化时程曲线图											
现场监测人：				计算人：				复核人：			
监测单位：第 2 页 共 2 页											

## 本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 1 《城市轨道交通工程项目规范》 GB55033
- 2 《地铁工程施工安全评价标准》 GB50715
- 3 《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》 GB50652
- 4 《建筑地基基础设计规范》 GB 50007
- 5 《城市轨道交通技术规范》 GB50490
- 6 《城市轨道交通监测技术规范》 GB 50911
- 7 《地下铁道工程施工质量验收标准》 GB/T50299
- 8 《城市轨道交通工程测量规范》 GB/T50308
- 9 《古建筑防工业振动技术规范》 GB/T50452
- 10 《城市轨道交通工程基本术语标准》 GB/T50833
- 11 《建筑基坑支护技术规程》 JGJ 120
- 12 《建筑地基处理技术规范》 JGJ 79
- 13 《干燥类土遗址保护加固工程设计规范》 WW/T 0038
- 14 《土遗址保护工程勘察规范》 WW/T0040
- 15 《西安城市轨道交通工程监测技术规范》 DBJ61-98