

古建筑结构安全性鉴定技术规范 第2部分：石质构件

Technical code for appraiser of structural safety of ancient buildings
Part 2: stone components

2018- 12 - 17 发布

2019- 04 - 01 实施

目 次

前言.....	11
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 符号.....	2
5 鉴定对象和程序.....	2
6 初步调查.....	3
7 制定勘察方案.....	3
8 勘察.....	3
9 安全性风险等级判定.....	4
附录 A（规范性附录） 石质构件内部缺陷无损检测方法	7
附录 B（规范性附录） 古建筑石质构件力学性能超声波波速检测方法	9
附录 C（规范性附录） 基于超声波法的石质构件表面裂隙深度测量	11
附录 D（资料性附录） 石质构件表层裂隙测量统计工作要求	15
附录 E（规范性附录） 石质构件计算	17

前 言

DB11/T 1190《古建筑结构安全性鉴定技术规范》：

——第1部分：木结构；

——第2部分：石质构件

本部分为DB11/T 1190为第2部分。

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由北京市文物局提出并归口。

本标准由北京市文物局组织实施。

本标准主要起草单位：北京市古代建筑研究所。

本标准参与起草单位：北京化工大学、建研科技股份有限公司、中国地质大学（北京）。

本标准主要起草人：黎冬青、张涛、王菊琳、徐福泉、姜玲、张中俭、吴进贤、杜德杰、王丹艺、胡睿等。

古建筑结构安全性鉴定技术规范 第2部分：石质构件

1 范围

本部分规定了北京市行政区域内古建筑石质构件安全性风险等级鉴定的鉴定对象和程序、勘察、安全性风险等级判定。

本部分适用于北京市行政区域内以下建筑中材质为青白石和汉白玉的石质构件的安全性检查与鉴定：

- a) 被各级政府核定公布为文物保护单位的古建筑；
- b) 尚未核定公布为文物保护单位，但被区、县级政府文物行政部门登记公布为不可移动文物的古建筑；
- c) 尚未列为不可移动文物，但经各级政府确定公布为历史建筑的古建筑；
- d) 尚未确定公布为历史建筑，但确有保护价值的古建筑。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 50266 工程岩体试验方法标准
GB/T 50292 民用建筑可靠性鉴定标准
GB/T 50344 建筑结构检测技术标准
WW/T 0002 石质文物病害分类与图示
WW/T 0052 文物建筑维修基本材料 石材
WW/T 0063 石质文物保护工程勘察规范
JTG E41 公路工程岩石试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

石质构件 stone member

采用青白石和汉白玉等制作的石枋、石板、石梁、石柱等单件或组合件的统称。

3.2

主要构件 dominant member

自身失效将导致相关构件失效，且危及结构体系稳定性的构件。

3.3

一般构件 common member

自身失效不导致主要构件失效，且不危及结构体系稳定性的构件。

3.4

受力裂隙 stressed crack

在荷载直接作用下，构件由于承载力不足而产生的裂隙。

3.5

非受力裂隙 non-bearing crack

除受力裂隙以外的其他裂隙，主要包括风化裂隙和原生裂隙。

4 符号

下列符号适用于本文件。

a 、 b 、 c 、 d ：构件整体的安全性风险等级。

a_u 、 b_u 、 c_u 、 d_u ：构件或其检查项目的安全性风险等级。

R ：石质构件的承载力设计值。

S ：荷载效应组合设计值。

γ_0 ：结构重要性系数。

5 鉴定对象和程序

5.1 鉴定对象

鉴定对象应包括，但不限于以下内容：

- a) 重点工程维修；
- b) 古建筑的定期鉴定；
- c) 改变用途或使用条件的；
- d) 使用过程中发现安全问题的；
- e) 有特殊使用要求的；
- f) 遭受地震、风灾、水灾等较大灾害的。

5.2 鉴定程序

石质构件安全性风险等级鉴定应按图1所示流程进行。

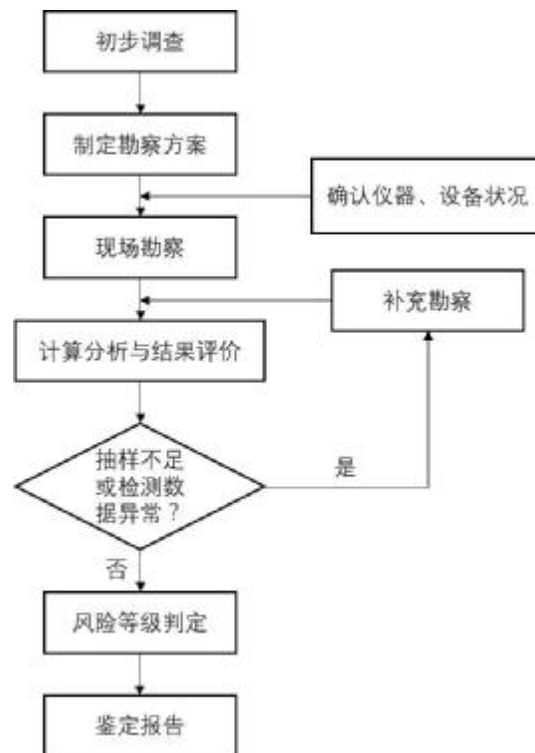


图1 鉴定流程图

6 初步调查

初步调查应包括：图纸资料、建筑历史、以往修缮资料的收集与分析，进行现场踏勘。

7 制定勘察方案

勘察方案制定及勘察工作应符合WW/T 0063的规定。

8 勘察

8.1 基本要求

- 8.1.1 主要构件及节点应逐个检查。
- 8.1.2 不具备检测条件的构件，应在检测报告中记录。

8.2 勘察

勘察应包括构造现状勘察、历次加固现状勘察和表层病害勘察，检测内部缺陷，应采用非破损检测方法，见附录A。

8.3 构造现状勘察

- 8.3.1 石质构件构造状况勘察应包括构件及其连接情况、构件位移以及构件的材质、几何尺寸和物理力学性能等。
- 8.3.2 石质构件及其连接情况的勘察应包括以下内容：

- a) 主要节点的工作状态;
 - b) 石质构件的荷载及其分布;
 - c) 石质构件的拼接组合方式, 受力方式及支座情况。
- 8.3.3 石质构件位移的勘察应在普查的基础上, 对发生明显位移的构件进行检测, 并应包含以下内容:
- a) 柱脚与柱础的错位;
 - b) 石柱顶点的位移。
- 8.3.4 石质构件的材质, 档案资料完全, 可仅进行校核性检测; 缺少相关资料, 应在不对石质构件外观及受力结构产生影响的前提下, 少量取样, 进行薄片显微镜下鉴定和 X 射线衍射分析。
- 8.3.5 石质构件的几何尺寸应包括以下内容:
- a) 截面形状及尺寸;
 - b) 水平标高;
 - c) 严重风化、局部缺失处的实际截面尺寸。
- 8.3.6 石质构件的物理力学性能, 可利用更换或塌落下来的构件取样分别按 GB/T 50266 和 JTG E41 相关规定进行物理性质和力学性能试验;
- 8.3.7 无更换或塌落下来的构件, 可采用超声波波速测试无损测试方法测量石质构件力学性能指标, 方法见附录 B。
- 8.3.8 应进行石质构件材料的采石场调查和采样以测量岩石的物理性能指标。

8.4 历次加固勘察

历次加固现状的勘察应包括以下内容:

- a) 石质构件的受力状态改变情况;
- b) 新出现的位移;
- c) 加固材料或构件的劣化、变形或缺失;
- d) 修补材料与石材的粘结情况;
- e) 因维修加固对其他构件造成的影响。

8.5 石质构件表层病害勘察

8.5.1 石质构件表层病害的勘察应包括以下内容:

- a) 石质构件表层裂隙的走向、分布和程度; 裂隙的深度在肉眼不可见, 可采用超声波波速测试的方法, 见附录 C;
- b) 石质构件局部缺失处的受力情况, 必要时应对其进行承载力验算;
- c) 构件表面剥落、孔洞、粉化、溶蚀等风化病害的部位、范围和程度。

8.5.2 对石质构件的风化、裂隙和局部缺失等病害应进行全面检测, 应按 WW/T 0002 规定绘制病害分布图。

8.5.3 在表面病害勘察的基础上, 应对所有裂隙进行进一步测量和统计, 具体要求参见附录 D 的规定。

9 安全性风险等级判定

9.1 判定方法

9.1.1 石质构件安全性风险等级判定, 应对承载能力、构造、裂隙和历次加固情况等项目逐一进行检查, 分别判定每一受检项目的等级。石质构件存在严重剥落、粉化、孔洞、表面溶蚀、裂隙、残损等表面病害, 结构、尺寸发生明显变化, 应进行承载力验算。

9.1.2 验算被鉴定构件的承载能力应符合下列规定：

- a) 构件验算采用的结构分析方法，应符合现行相关领域设计规范的规定；
- b) 构件验算使用的计算模型，应符合其实际受力与构造状况；
- c) 构件的几何参数应采用实测值，并应计入风化、裂隙、缺陷以及损伤等的影响；
- d) 石质构件计算见附录 E。

9.1.3 石质构件符合下列条件，可直接确定为安全构件：

- a) 该构件工作正常，且可靠；
- b) 经检测，该构件内部不存在缺陷；
- c) 该构件未呈现明显的风化、裂隙病害及局部缺失等情况的破坏；
- d) 该构件未受灌缝、粘接等修复加固措施或用途、使用条件改变的影响。

9.2 石质构件安全性风险等级判定

9.2.1 石质构件应根据构件种类、检测结果及计算结果进行安全性风险等级判定。

9.2.2 石质构件整体安全性风险等级应划分为 a、b、c、d 四个等级，各等级处理要求应按表 1 规定执行。

表1 石质构件整体安全性风险等级划分及处理原则

安全性风险等级	等级划分	处理要求
a	可接受风险，风险性符合本标准对 a 级的要求，具有足够的承载能力	不必采取措施
b	一般风险，风险性略低于本标准对 a 级的要求，尚不显著影响承载能力	有条件时可采取措施
c	中等风险，风险性不符合本标准对 a 级的要求，尚不显著影响承载能力	应采取措施
d	重大风险，风险性不符合本标准对 a 级的要求，已严重影响承载能力	应及时或立即采取措施

9.2.3 当石质构件及其连接件的安全性风险等级按承载能力判定时，应按表 2 规定判定。

表2 石质构件承载能力等级判定

构件分类	$R/\gamma_0 S$			
	a_0 级	b_0 级	c_0 级	d_0 级
主要构件	≥ 1.0	≥ 0.95	≥ 0.90	< 0.90
一般构件	≥ 1.0	≥ 0.90	≥ 0.85	< 0.85

注：表中 R 和 S 分别为结构构件的抗力和作用效应； γ_0 为结构重要性系数，世界文化遗产地及全国重点文物保护单位的建筑取 1.1，其他建筑取 1.0。

9.2.4 当石质构件安全性风险等级按构造判定时，应按表 3 的规定判定。

表3 石质构件构造等级判定

检查项目	a_i 级或 b_i 级	c_i 级或 d_i 级
构件构造	构件的构造合理,符合或基本符合现行设计规范要求	构件的构造不当,或有明显缺陷,不符合现行设计规范要求
节点、连接构造	连接方式正确,构造符合现行设计规范要求,无缺陷,或仅有局部的表面缺陷,工作无异常	连接方式不当,构造有明显缺陷,已导致构件或连接部位开裂、位移、松动,或已造成其它损坏
注:判定结果取 a_i 级或 b_i 级,应根据其实际完好程度确定;评定结果取 c_i 级或 d_i 级,可根据其实际严重程度确定。		

9.2.5 石质构件安全性风险等级按裂隙的检测结果判定应符合下列规定:

- a) 石质构件出现受力裂隙时,应直接定为 d_i 级;
- b) 对石质构件的非受力裂隙,依据裂隙状态,判定为 c_i 级或 d_i 级,对于 d_i 级宜进行定期观测后进行最终判定。

9.2.6 石质构件的安全性风险等级按历次加固现状判定时,应按表4中的规定判定检查项目的等级,石质构件未发生表4中各检查项目的情况时,检查项目的等级可根据其完好程度判定为 a_i 级或 b_i 级。

表4 历次加固等级判定

检查项目	c_i 级或 d_i 级
历次加固	原拼接已变形或锚杆已松动
	铁扒铜锈蚀、变形,或榫卯已开裂
	断裂粘接材料、裂隙灌浆材料与石材粘结状况不良,粘接部位重新出现裂隙或变形

9.2.7 石质构件存在可能影响结构安全性的损伤,应根据其严重程度直接定为 c_i 级或 d_i 级

9.2.8 柱顶的水平位移(或倾斜)较大,应按实际受力情况进行承载能力计算,评估其安全性风险等级。

9.2.9 石质构件整体安全性风险等级判定,应按承载能力、构造、裂隙和历次加固情况等项目中的最低一级作为该构件整体的安全性风险等级。

- a) 石质构件全部检查项目都为 a_i 级,则石质构件整体安全性风险等级判定为 a 级;
- b) 石质构件全部检查项目中包含 b_i 级,但无 c_i 级和 d_i 级,则石质构件整体安全性风险等级判定为 b 级;
- c) 石质构件全部检查项目中包含 c_i 级,但无 d_i 级,则石质构件整体安全性风险等级判定为 c 级;
- d) 石质构件全部检查项目中包含 d_i 级,则石质构件整体安全性风险等级判定为 d 级。

附 录 A
(规范性附录)
石质构件内部缺陷无损检测方法

A.1 检测设备

A.1.1 工作原理

A.1.1.1 X射线探伤仪通过石质构件时被不同程度地吸收,通过被测构件不同区域的X射线量有所不同,从而携带了被测构件各部分密度分布或缺陷的信息,因而在荧光屏上将显示出不同密度的阴影,根据阴影浓淡的对比,判断被测石质构件内部的缺陷情况。

A.1.2 技术指标。

A.1.2.1 高频恒压便携式X射线探伤仪由控制台、高压发射器、射线管头、冷却装置、高压线缆和低压线缆等组成,配套ZET-1-X-RAY Image Processing System软件进行图像处理。主要参数:管电压为200kV~220kV,管电流应为0.100mA,焦点尺寸不应大于1.5mm,焦距应为55mm,曝光时间应为1min,探头到样品距离应为430mm。

A.1.3 安全要求

A.1.3.1 作业时,应对工作场所进行分区,并在相应的边界设置警示标识。

A.1.3.2 控制区应设置在作业场所中周围剂量当量率大于 $15\mu\text{Sv/h}$ 的范围内,控制区边界应悬挂清晰可见的“禁止进入X射线区”警示牌。作业人员应在控制区边界外操作,采取专门的防护措施。

A.1.3.3 现场检测作业时,控制区内不应同时进行其他工作。X射线探伤仪应使用准直器,并视情况采用局部屏蔽措施(如铅版)。

A.1.3.4 控制区的边界应设定实体屏障。使用临时屏障时,应设警戒线等。

A.1.3.5 监督区应设置在控制区边界外、作业时周围剂量当量率大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的范围内,并在其边界上悬挂清晰可见的“无关人员禁止入内”警示牌,必要时设专人警戒。

A.1.3.6 探伤仪控制台应设有延时开机装置。

A.1.3.7 实施现场检测前,运营单位应对工作环境进行全面评估,评估内容应包括工作地点的选择、接触的工人与附近的公众、天气条件、检测时间等。

A.1.3.8 现场检测前,检测工作人员应检查控制区内没有任何其他人员,并设置警示牌。

A.1.3.9 现场检测的探伤设备中应配备不少于1台的便携式剂量仪。

A.1.3.10 现场检测前,应对剂量仪进行检查,确认剂量仪能正常工作。现场检测期间,便携式剂量仪应一直处于开机状态,X射线不应出现曝光异常或不能正常终止。

A.1.3.11 现场检测期间,工作人员应佩戴个人剂量仪、直读剂量计和个人剂量报警仪。

A.2 检测程序

A.2.1 采用超声波波速检测仪对石质构件内部缺陷进行普查,对波速明显低于正常值的石质构件使用X射线探伤仪进行内部缺陷的定量检测。

A.2.2 选定石质构件待测区域,对待测区域进行布点,测试区域应有部分交叉。

A.2.3 使用X射线探伤仪对构件表面布点区域依次检测，记录出现缺陷的位置。

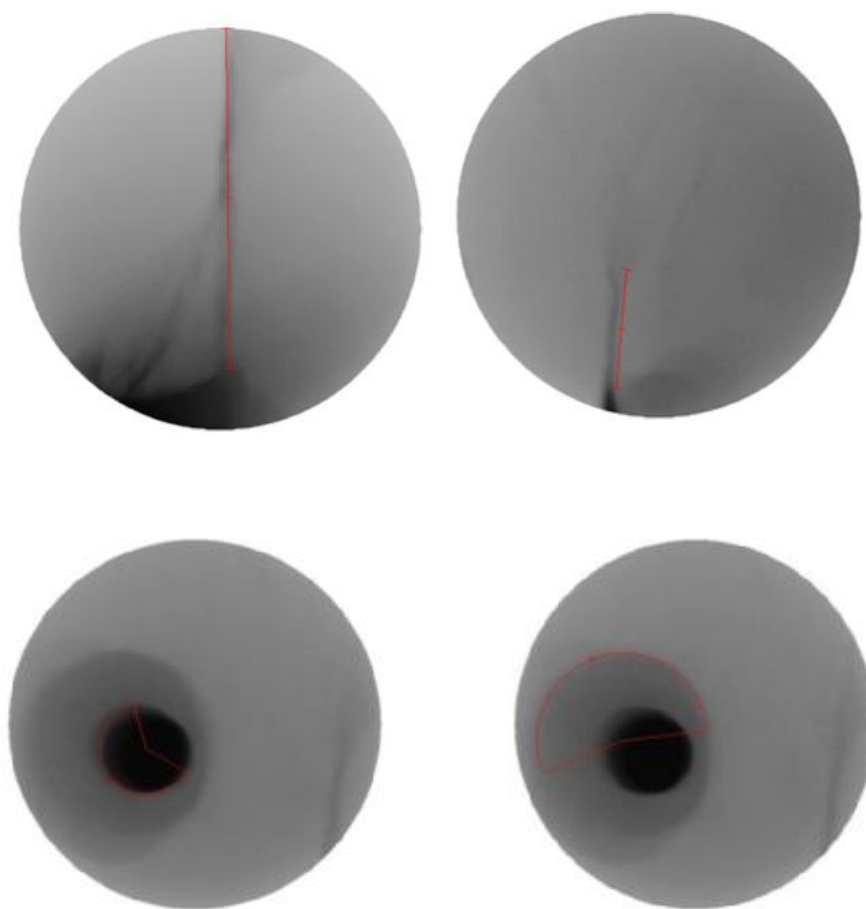
A.2.4 有明显缺陷的区域，应在该区域增加检测次数并在缺陷周边进行延伸测试，确定缺陷尺寸和范围。

A.3 结果与判定

X射线探伤仪可得到石质构件内部影像，影像的灰度直观显示了石质构件内部缺陷的尺寸、形状及分布。X射线影像灰度分布由构件不同区域对X射线吸收量大小决定，如图A.2：X射线影像由白色过渡到深灰表示对X射线吸收量由多到少，按表A.1规定，应根据灰度变化对影像内各区域是否存在缺陷进行判断。

表A.1 受检石质构件厚度、缺陷差异与X射线影像关系

厚度或缺陷	吸收X射线量	透过X射线量	X射线影像
厚	多	多	白
薄	稍少	稍多	灰
内部缺陷（孔、裂隙）	更少	更多	深灰



图A.1 X射线探伤仪检测结果

附录 B

(规范性附录)

古建筑石质构件力学性能超声波波速检测方法

B.1 检测设备

B.1.1 工作原理

采用带波形显示的低频超声波检测仪和声波换能器，测量声波在石材中的传播速度、波幅和主频等声学参数，并以超声波波速的大小（此处特指纵波波速）作为判定石材强度的相关指标之一。

B.1.2 技术指标

超声波检测仪由检测仪和换能器两部分组成，主要技术要求如下：

- a) 具有波形清晰、显示稳定的示波装置；
- b) 声时最小分度为 $0.1\mu\text{s}$ ；
- c) 具有最小分度为 1dB 的衰减系统；
- d) 接受放大器频响范围 $10\text{kHz}\sim 500\text{kHz}$ ，总增益不应小于 80dB，接受灵敏度不应大于 50mV；
- e) 换能器的实测主频与标称频率相差不应大于 $\pm 10\%$ 。

B.2 现场检测操作步骤与数据处理方法

B.2.1 检测对象确定

古建筑出现明显的表面粉化、剥落、孔洞及裂隙等病害现象，且不可进行荷载试验的受力石质构件，包括石梁、石柱、石板等。

B.2.2 测区位置的确定

石质构件检测位置表面应清洁、平整，换能器应通过耦合剂的辅助与石质构件测试表面保持紧密结合。测定区域应选择石质构件应力集中部位。承受弯曲载荷的构件（如横梁），应选择产生拉应力最大的部位，即中间部位下表面；承受轴向载荷的构件（如立柱），应选择沿高度方向的不同部位。

B.2.3 耦合剂的选择

岩石表面测试所用耦合材料的选择应以易于清除且对岩石表面影响最小为原则，不宜选用凡士林或黄油为耦合剂，可选用液体胶水作为耦合剂。

B.2.4 超声波测试方式

石质构件的超声波测试方式中最常用的两种方法为对穿直透法与直达波法。穿直透法是将收、发换能器平行放置于受检石质构件两侧；直达波法是将收、发换能器放置于受检石质构件同一侧。

B.2.5 超声波波速测试

- B.2.5.1 石质构件进行波速测试时构件应干燥。露天石质构件宜选择晴天、空气湿度较小时进行测试，并且测试前3d均无降水发生。

B.2.5.2 把两个换能器按一定距离分别用耦合剂固定于受检石质构件的表面，并把两换能器中心点间的距离作为声波在构件中的传播距离（精确到mm）。当波速仪启动后，将波形曲线的最先起跳点所对应的时标值作为纵波到达时间。

B.2.5.3 当测试采用对穿直透法时，在受检构件互相平行的一对测试面上进行布点，测量一对平行测点之间的距离。检测时将两个换能器平行放置于受检石质构件两侧，使用耦合剂的换能器与测试表面应紧密结合。发现数值异常时，可移动两换能器到适当位置，直至波形稳定。根据平行测点之间间距和超声波声时计算超声波波速(km/s)。

B.2.5.4 当测试采用直达波法时，可按时距法求得受检石质构件的平均波速。测试时，将一条线段的一个端作为发射点，然后在该线段上依次以不等距布置4个~6个接收点，分别测得各点间的波速到达时间。以时间为纵坐标，测距为横坐标，分别作出通过原点的时距线，该线斜率的倒数即为平均波速。

B.2.6 测试成果应用

B.2.6.1 干燥状态下的未风化青白石波速值为4.5 km/s~6.4 km/s。干燥状态下的未风化汉白玉波速值为3.5 km/s~4.7km/s。当现场石质构件的波速值低于上述数值时，可判断受检构件表面有隐裂隙（直达波法）、内部存在缺陷（对穿直透法）或有一定程度的风化。

B.2.6.2 根据实验室内对40个青白石和汉白玉试块的波速、单轴抗压强度、弹性模量的测试结果，得出B.1、B.2 线性回归方程：

$$\sigma = 32.06v + 30.28 \quad (r=0.80) \dots\dots\dots (B.1)$$

$$E = 4.92v + 21.30 \quad (r=0.83) \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

- σ ——单轴抗压强度，单位为MPa；
- E ——弹性模量，单位为GPa；
- v ——超声波波速，单位为km/s；
- r ——相关系数。

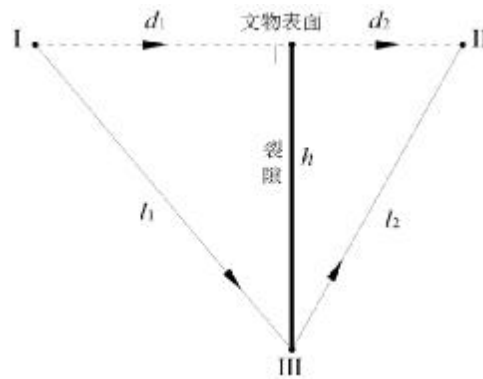
附录 C
(规范性附录)

基于超声波法的石质构件表面裂隙深度测量

C.1 测试原理

C.1.1 裂隙垂直于文物表面

如图C.1所示，文物表面不存在裂隙时，超声波从点I沿直线传播到点II。当文物内有垂直于表面的裂隙时，超声波将绕射裂隙进行传播，即从点I沿直线传播到点III，再由点III沿直线传播到点II。



图C.1 裂隙垂直于石质文物表面时超声波传播示意图

具体测量时，应在两个超声波测点之间没有裂隙处进行超声波测试。根据公式C.1得出超声波波速：

$$v = \frac{l}{t} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

- v —— 超声波波速；
- l —— 发射和接收换能器之间的距离；
- t —— 超声波在岩体中传播的时间。

两个超声波换能器之间有垂直于表面的裂隙时，超声波的传播时间 t 应由超声波仪得到。设裂隙深度为 h ， d_1 、 d_2 、 l_1 、 l_2 等几何尺寸如图C.1所示。可得方程组C.2：

$$\begin{cases} d_1^2 + h^2 = l_1^2 \\ d_2^2 + h^2 = l_2^2 \\ l_1 + l_2 = vt \end{cases} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

- h —— 裂隙深度；
- d_1 —— 换能器I到裂隙的垂直距离；
- d_2 —— 换能器II到裂隙的垂直距离；
- l_1 —— 换能器I到裂隙内部端点的距离；

- l_2 ——换能器II到裂隙内部端点的距离；
- v ——超声波波速；
- t ——超声波在岩体中传播的时间。

C.1.1.1 由于 d_1 、 d_2 、 v 、 t 为已知数据，解方程组C.2，可求得裂隙深度 h ， h 计算见C.3：

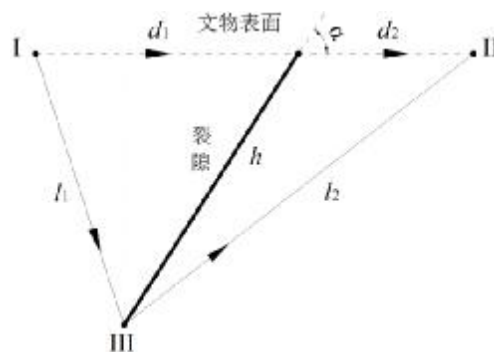
$$h = \sqrt{\left(\frac{d_1^2 - d_2^2}{vt} + vt\right)^2 / 4 - d_1^2} \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

- h ——裂隙深度；
- d_1 ——换能器I到裂隙的垂直距离；
- d_2 ——换能器II到裂隙的垂直距离；
- l_1 ——换能器I到裂隙内部端点的距离；
- l_2 ——换能器II到裂隙内部端点的距离；
- v ——超声波波速；
- t ——超声波在岩体中传播的时间。

C.1.2 裂隙斜交于文物表面

C.1.2.1 若裂隙不与文物表面垂直，而是与其呈角度 α 相交，如图C.2所示。 α 角是裂隙面的倾角。 α 角可通过罗盘粗略测量，也可通过三维激光扫描仪精确测量。根据三维激光扫描仪测量的裂隙面上3个不共线的点的坐标即可求出 α 角，具体如下所述。



图C.2 裂隙斜交于石质文物表面时超声波传播示意图

C.1.2.2 假定裂隙面为平面，平面方程式为C.4：

$$Ax + By + Cz + D = 0 \dots\dots\dots (C.5)$$

式中：

- A 、 B 、 C 、 D ——平面方程的系数和常数；
- x 、 y 、 z ——平面方程的未知数。

C.1.2.3 若已知在0-xyz坐标系下裂隙面上有3个不共线的点，它们的坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 和 $(x_3, y_3, z_3)A\sim D$ 可由式C.5得出：

$$\begin{cases} A = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1) \\ B = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_1) \\ C = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) \\ D = -(A \times x_1 + B \times y_1 + C \times z_1) \end{cases} \dots\dots\dots (C.7)$$

式中:

A 、 B 、 C 、 D ——平面方程的系数和常数;

(x_1, y_1, z_1) ——由三维激光扫描仪测出的裂隙面上点1的坐标;

(x_2, y_2, z_2) ——由三维激光扫描仪测出的裂隙面上点2的坐标;

(x_3, y_3, z_3) ——由三维激光扫描仪测出的裂隙面上点3的坐标。

C.1.2.4 由式(C.5)可求出裂隙面的法向矢量 **错误! 未找到引用源。** $= (l, m, n)$ 。若规定 X 轴和 Y 轴的正方向分别为正东和正北方向,可根据已求得的裂隙面的法向矢量,由式C.6求出裂隙面的倾角 α 和倾向 θ :

$$\begin{cases} l = \sin \alpha \times \sin \theta \\ m = \sin \alpha \times \cos \theta \\ n = \cos \alpha \end{cases} \dots\dots\dots (C.8)$$

式中:

α ——裂隙面的倾角;

θ ——裂隙面的倾向;

(l, m, n) ——裂隙面的法向矢量。

此时,超声波仍将绕射裂隙进行传播,即从点 I 沿直线传播到点 III,再沿直线传播到点 II。超声波波速 v 可根据公式 C.1 测得,而传播时间为 t 可由超声波仪测试得到。仍设裂隙深度为 h ,其它几何尺寸如图 C.2 所示。方程组 C.7:

$$\begin{cases} (d_1 - h \cos \alpha)^2 + h^2 \sin^2 \alpha = l_1^2 \\ (d_2 + h \cos \alpha)^2 + h^2 \sin^2 \alpha = l_2^2 \\ l_1 + l_2 = vt \end{cases} \dots\dots\dots (C.9)$$

式中:

h ——裂隙深度;

d_1 ——换能器 I 到裂隙的垂直距离;

d_2 ——换能器 II 到裂隙的垂直距离;

l_1 ——换能器 I 到裂隙内部端点的距离;

l_2 ——换能器 II 到裂隙内部端点的距离;

v ——超声波波速;

t ——超声波在岩体中传播的时间;

α ——裂隙面的倾角;

θ ——裂隙面的倾向。

解方程组(C.7),可求得此时的裂隙深度 h 。

C.2 测试方法

用超声波测试石质文物表面裂隙深度时,一般采用同侧直达波法。测试时应按下列步骤执行:

第一步，当两个换能器不通过裂隙时，量测两个换能器中心点之间的距离，记为 l ；根据传播时间 t 求得该岩石的超声波速 v 。

第二步，将两个换能器分别置于裂隙两侧，并量出换能器中心点至裂隙的距离 d_1 和 d_2 。根据上述 C.1 节所示的公式可以求出裂隙深度 h 。

第三步，更换换能器的位置，重复第二步，对裂隙深度求3次~5次，平均值即为所求得裂隙深度。

附录 D
(资料性附录)
石质构件表层裂隙测量统计工作要求

D.1 测量统计内容

测量统计内容详见表D.1。

表 D.1 石质构件表层裂隙测量统计表

编号	位置	裂隙长度 mm	裂隙宽度 mm	裂隙深度 mm	裂隙类型	照片编号

填表人：

日期：

D.2 测量统计表填写要求

D.2.1 编号

调查时，所有裂隙应逐一编号，编号应根据古建筑中构件所处位置，按构件类型或构件顺序排列，并以此为序标注在现状实测图上。

D.2.2 位置

应填写裂隙所处石质构件名称及具体部位。

D.2.3 裂隙长度

应按裂隙表面实际长度填写。

D.2.4 裂隙宽度

应填写裂隙表面开裂最大宽度。

D.2.5 裂隙深度

应填写肉眼观察和可测量到的裂隙深度。

D.2.6 裂隙类型

根据裂隙产生原因及受力状态，应按“受力裂隙”和“非受力裂隙”填写。

DB11/T 1190.2—2018

D.2.7 照片编号

应填写裂缝部位的全景照片图版号。

附 录 E
(规范性附录)
石质构件计算

E.1 轴心受压石质构件承载能力验算

轴心受压石质构件的承载能力，应按公式(E.1)进行验算：

$$\text{错误！未找到引用源。错误！未找到引用源。} \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

- f_c ——石材抗压强度设计值(N/mm²)；
- A ——受压构件的净截面面积(mm²)；
- N ——轴心受压构件的压力设计值(N)；
- γ_0 ——结构重要性系数。

E.2 受弯石质构件抗折承载能力验算

受弯石质构件的抗折承载能力，应按公式(E.2)进行验算：

$$\frac{R}{\gamma_0 S} = \frac{f_b}{\gamma_0 M/W} \dots\dots\dots (E.3)$$

式中：

- f_b ——石材抗折强度设计值(N/mm²)；
- M ——受弯石质构件弯矩设计值(N·mm)；
- W ——受弯石质构件的净截面抵抗矩(mm³)；
- γ_0 ——结构重要性系数。

E.3 受弯石质构件抗剪承载能力验算

受弯石质构件的抗剪承载能力，应按公式(E.4)进行验算：

$$\frac{R}{\gamma_0 S} = \frac{f_s}{\gamma_0 VS/lb} \dots\dots\dots (E.5)$$

式中：

- f_s ——石材抗剪强度设计值(N/mm²)；
- V ——受弯石质构件剪力设计值(N)；
- I ——构件的全截面惯性矩(mm⁴)；
- b ——构件的截面宽度(mm)；
- S ——剪切面以上的截面面积对中性轴的面积矩(mm³)；

γ_0 ——结构重要性系数。

E.4 石材设计强度

石材强度标准值应根据结构的实际状态按下列原则确定：

- a) 未风化汉白玉、青白石的抗折强度、轴心抗压强度和抗剪强度设计值可按表 E.1 采用，其他物理性能可参见 WW/T 0052；

表E.1 未风化汉白玉、青白石强度设计值

石材种类	抗折强度 fb/MPa	抗压强度 fc/MPa	抗剪强度 f _s /MPa
青白石	2.9	75.3	2.9
汉白玉	2.9	59.4	2.9

- b) 当检查其它材质的构件或一种构件的材质由于与时间有关的环境效应或其它作用因素引起的性能变化时，允许采用随机抽样的方法，在该种构件中取 5 个~10 个构件作为检测对象，并按 JTG E41 规定测定其单轴抗压强度、抗剪强度和抗折强度或其它力学性能；
- c) 当构件总数少于 5 个时，应逐个进行检测；
- d) 当委托方对该种构件的石材强度检测有较严的要求时，也可通过协商适当增加受检构件的数量。