ICS 91.080
CCS P 20

DB11

北 京 市 地 方 标 准

DB11/T 1955—2022

古建筑维护与加固技术规范 石结构

Technical code for maintenance and strengthening of ancient buildings stone structures

2022 - 03 - 24 发布 2022 - 07 - 01 实施

北京市市场监督管理局 发 布

目　　次

前言 II
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　基本要求 2
5　程序 3
6　勘查 3
7　安全评估 5
8　维护 6
9　加固 7
10　验收 11
附录 A（资料性）　石结构材质鉴定和性能测试 12
附录 B（资料性）　古建筑石结构维护方法 15
附录 C（资料性）　石构件受弯加固法 17
参考文献 19

前　　言

本文件按照GB/T 1.1的规则起草。

本文件由北京市文物局提出并归口。

本文件由北京市文物局组织实施。

本文件起草单位：北京市文化遗产研究院、建研科技股份有限公司、中冶建筑研究总院有限公司、中国地质大学（北京）、北京市文物古建工程公司、北京市文物建筑保护设计所、北京市北海公园管理处。

本文件主要起草人：姜玲、张涛、徐福泉、张文革、张中俭、张兴、居敬泽、孙淼、王嵩、张晓波、吴婧姝、王丹艺、胡睿、付永峰、杜德杰、夏艳臣、岳明、李博。

古建筑维护与加固技术规范 石结构

1 范围

本文件规定了古建筑石结构的勘查、安全评估、维护、加固、验收。

本文件适用于下列古建筑的石结构维护与加固：

a) 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，但被登记为不可移动文物的古建筑。

其他具有保护价值的建筑可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 39056 古建筑砖石结构维修与加固技术规范

GB 50003 砌体结构设计规范

GB 50009 建筑结构荷载规范

GB 50367 混凝土结构加固设计规范

GB 50702 砌体结构加固设计规范

JGJ 123 既有建筑地基基础加固技术规范

JTG/T J22 公路桥梁加固设计规范

WW/T 0007 石质文物保护修复方案编写规范

WW/T 0028 砂岩质文物防风化材料保护效果评估方法

DB11/T 1190.2 古建筑结构安全性鉴定技术规范 第2部分：石质构件

DB11/T 1828 文物保护工程资料管理规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

勘查 reconnaissance and survey

对场地地质、岩土、环境、结构体系、保护现状和主要病害等进行调查、分析与评价，编制成果文件，为后期保护工程的设计与实施提供资料的活动。

[来源：GB/T 39056-2020，3.1.8]

3.2

病害 disease

在长期使用、保存过程中，古建筑石结构在材料、结构构造、外貌形态上发生的一系列引起古建筑石结构损坏的现象。

3.3

损伤 damage

由于荷载作用、环境侵蚀、自然灾害和人为因素等对结构构件造成非正常的位移、变形、开裂及材料的破损和劣化等损害。

[来源：GB/T39056-2020，3.1.10]

3.4

风化 weathering

由于物理、化学、生物等因素，导致的古建筑石结构表面破坏现象。

3.5

非结构病害 unstructured disease

通过维护手段可处理，对安全稳定性不产生影响的石结构损坏现象。

3.6

结构病害 structural disease

必须通过加固手段进行处理，对安全稳定性产生影响的石结构损坏现象。

4 基本要求

4.1 古建筑中石结构的维护与加固应坚持不改变原状、最低限度干预、保护文化传统、使用恰当的保护技术的原则。

4.2 古建筑中石结构的维护与加固应在古建筑残损现状勘查的基础上，对结构病害进行安全性评估，研究分析病害发生的原因和机理，根据勘查及评估结果进行维护或加固；对非结构病害可根据病害类别进行维护。

4.3 勘查宜采用无损或微损探测、原位测试与取样试验相结合的综合勘探方式进行。

4.4 勘查应在初步分析造成文物病害主因的基础上进行，病害主因与地基、基础（含台基）无关时，可只进行主体结构勘查；病害主因与地基、基础有关联时，应同时进行地基与基础勘查和主体结构勘查。

4.5 维护与加固施工期间若发现与之前勘查结果不一致时，应进行有针对性的补充勘查。

4.6 石结构的维护与加固应综合考虑其文物价值及文物结构的安全性，并应符合下列规定：

a) 替换下的原构件应保留；
b) 发现隐蔽部位的构造有严重缺陷，或所处的环境条件存在有害因素时，应采取措施消除隐患；
c) 通过加固可继续使用的构件应保留；
d) 新增加固部分，应易于拆除且不损伤古建筑原有部分；
e) 更换的构件需注明更换日期，标注位置不应影响外观；
f) 应使用原材料及原工艺，当采用新材料和新工艺时，应做相关试验，根据试验结果，选择适宜的方法。

4.7 技术资料应真实反映维护与加固过程，存档备查。

5 程序

维护与加固应按照下列程序进行：

a) 调查研究，确定历史年代和风格特点，收集整理历年维修资料；
b) 勘查；
c) 评估；
d) 制定维护、加固设计方案；
e) 维护、加固施工；
f) 验收，资料归档。

6 勘查

6.1 收集资料

6.1.1 勘查时应获取历史、环境、工程与水文地质、地基与基础、主体结构、保护现状等基础资料及其他有害影响因素资料。

6.1.2 勘查资料收集宜包括下列内容：

a) 历史文献、考古成果、历史保护等资料；
b) 区域气象、空气质量、水文、地质、地震资料；
c) 周边现代工程建设资料；
d) 法式勘查。

6.2 场地、地基基础及结构

6.2.1 场地、地基基础勘查应包括下列内容：

a) 场地稳定性状况，包括岩溶、土洞、滑坡、泥石流、崩塌、大的沉降、地下洞室、断层、地震效应等；
b) 场地地质条件，包括岩土性质、地层划分、岩土物理力学性质等；
c) 地下水对基础的影响；
d) 地基承载力及地基稳定性；
e) 由于基础不均匀沉降而产生的主体结构的倾斜变形、裂缝破坏等现象。

6.2.2 结构勘查应包括下列内容：

a) 沉降情况；
b) 倾斜情况；
c) 结构布置、构造等。

6.2.3 石砌体含石墙勘查应包括下列内容：

a) 砌体轴线位移变化；
b) 基础和砌体顶面标高变化；
c) 砌体厚度变化；
d) 砌体墙面垂直度变化；
e) 砌体墙面平整度变化；
f) 砌体水平灰缝平直度变化；
g) 内外搭砌、上下错缝情况；

h) 拉结石、丁砌石设置方式；
i) 砌体灰缝密实情况；
j) 灰浆的品种；
k) 裂缝、空鼓、坍塌、残缺情况；
l) 顶部渗水情况。

6.2.4 石桥、石拱券勘查应包括下列内容：
a) 梁式桥上部承重构件控制截面的开裂情况；
b) 梁式桥组合结构上部承重构件结合面的开裂情况；
c) 梁式桥上部承重构件稳定性情况；
d) 主体结构梁板完好情况；
e) 结构永久变形情况；
f) 拱式桥拱脚变形情况；
g) 拱圈变形情况；
h) 拱桥拱圈的砌体完好情况；
i) 腹拱、侧墙、立墙或立柱的受力情况；
j) 桥墩的稳定性。

6.2.5 石牌坊现场勘查应包括下列内容：
a) 整体变位及支承状态；
b) 倾斜、位移及扭转情况；
c) 构件断裂、风化情况；
d) 构造与连接情况等。

6.3 病害

6.3.1 非结构病害

6.3.1.1 表面风化病害勘查应包括下列内容：
a) 酸碱与泛盐情况；
b) 层片状剥落情况；
c) 表面溶蚀情况；
d) 粉化情况；
e) 风化裂隙情况。

6.3.1.2 生物病害勘查应包括下列内容：
a) 植物病害情况；
b) 动物病害情况；
c) 微生物病害情况。

6.3.1.3 表面污染病害勘查应包括下列内容：
a) 积尘情况；
b) 水锈结壳情况；
c) 人为污染情况。

6.3.1.4 构件缺失勘查应包括下列内容：
a) 构件整体缺失情况；
b) 构件局部缺失情况；

c) 石砌体局部块体缺失情况。

6.3.2 结构病害

6.3.2.1 构件级别的病害勘查应包括下列内容:

a) 断裂情况；
b) 机械裂隙病害情况；
c) 原生裂隙病害情况；
d) 人为破坏情况。

6.3.2.2 结构级别的病害勘查应包括下列内容:

a) 歪闪倾斜情况；
b) 鼓胀、内陷情况；
c) 沉降情况；
d) 水平位移情况；
e) 坍塌情况。

6.4 材质与性能

6.4.1 石结构应进行石材种类鉴别，可进行岩石学名称鉴定、物理性能测试、力学性能测试和评价、风化程度和风化深度的判定。

6.4.2 石结构材质鉴定和性能测试参见附录 A。

6.5 历代维护与加固措施及效果

古建筑的历代维护与加固应查清以下内容：

a) 结构形式、使用功能、受力状态等变化情况；
b) 出现新的变形、位移、裂缝等；
c) 存在因维护与加固不当而造成的不良影响；
d) 历代维护加固措施有效性。

7 安全评估

7.1 古建筑石结构的安全性评估应按 GB/T 39056 相关条款执行。

7.2 安全性评估分为两级评估。第一级评估应以外观损伤等宏观控制和构造鉴定为主进行综合评定，第二级评估应以承载能力验算为主进行综合评定。

7.3 古建筑石结构的第一级安全性评估各层次分级标准及处理建议应符合表 1 的规定。

表1 第一级评估各层次分级标准

层次	鉴定对象	等级	分级标准	处理建议
一	单个构件	a1	符合 a1 级的要求,具有足够的承载能力,安全	不需要进行处理
		b1	不符合 a1 级的要求,有缺陷	需要进行处理
		cl	不符合 al 级的要求,存在安全隐患,危险	需要采取应急措施
二	分部结构	Al	符合 A1 级的要求,具有足够的承载能力,安全	不需要进行处理

表 1　第一级评估各层次分级标准（续）

层次	鉴定对象	等级	分级标准	处理建议
二	分部构件	B1	不符合 A1 级的要求,有缺陷	需要进行处理
		C1	不符合 A1 级的要求,存在安全隐患,危险	需要采取应急措施
三	整体结构	Ⅰ	符合Ⅰ级的要求,具有足够的承载能力,安全	不需要进行处理
		Ⅱ	不符合Ⅰ级的要求,有缺陷	需要进行处理,并需要进行第二级评估
		Ⅲ	不符合Ⅰ级的要求,存在安全隐患,危险	需采取应急措施,并需要进行第二级评估

7.4　古建筑石结构的第二级安全性评估各层次分级标准及处理建议应符合表 2 的规定。

表2　第二级评估各层次分级标准

层次	鉴定对象	等级	分级标准	处理建议
一	单个构件	a	符合 a 级的要求,具有足够的承载能力	不需要进行处理
		b	不符合 a 级的要求,尚不显著影响承载能力	可不进行处理
		c	不符合 a 级的要求,显著影响承载能力	应进行处理
		d	极不符合 a 级的要求,已严重影响承载能力	应立即进行处理
二	分部结构	A	符合 A 级的要求,具有足够的承载能力	不符合要求的次要构件宜进行适当处理
		B	不符合 A 级的要求,尚不显著影响承载能力	不符合要求的构件应进行处理
		C	不符合 A 级的要求,显著影响承载能力	应进行处理,且不符合要求的构件应立进行处理
		D	极不符合 A 级的要求,已严重影响承载能力	应立即进行处
三	整体结构	一	符合一级的要求,具有足够的承载能力	不符合要求的次要构件宜进行适当处理
		二	不符合一级的要求,尚不显著影响整体承载	不符合要求的构件应进行处理
		三	不符合一级的要求,显著影响整体承载	应进行处理,且不符合要求的构件应立即进行处理
		四	不符合一级的要求,已严重影响整体承载	应立即进行处理

8　维护

8.1　石结构归安

石结构归安应符合下列规定:

a)　石结构拆除前应记录构件规格尺寸、材质类型、灰浆种类、砌筑方式、损坏程度等信息，做好影像及文字记录，构件拆卸前应做好编号；

b)　石结构拆卸前应做好周边其它结构的加固支顶，不可因拆卸对其它石结构的稳定性造成干扰，必要时需先拆除上部关联构件，降低荷载后再拆除需修复的石结构

c)　石结构归安应满足原材料、原结构、原形制、原工艺、原位置的要求。

8.2　石结构清洗

石结构清洗应符合下列规定:

a) 有效清除文物表面污染物和文物材质孔隙中的深层污染物；
b) 不伤害文物本体，施工速度可以控制，并根据施工情况进行调节，可随时开展和终止；
c) 清洗结束后，不在文物上留下有害物质，不引起二次污染。

8.3 石结构表面处理

石构件表面处理应符合下列规定：

a) 表面渗透加固，应依据 WW/T 0007 和 WW/T 0028 中的相关规定，对主要的材料、方法、工具等进行研究。并掌握加固过程的养护条件、完善加固效果的评估方法，论证表面渗透加固对石结构文物颜色及加固材料老化后的影响。
b) 表面封护处理，应研究拟使用的材料成分及透光性、耐酸性、毒性等性能指标，确定封护处理的工艺、浓度配方、施涂工具与方法、成膜养护条件等，并进行封护效果评估。

8.4 生物病害去除

生物病害去除应符合下列规定：

a) 优先考虑物理方法，再考虑化学方法；
b) 材料无毒或者低毒；
c) 材料低残留；
d) 材料不应污染石材表面。

8.5 石构件补配

8.5.1 对于石结构中缺失的石构件，当影响结构安全时，应采取补配的措施。补配前应明确缺失石构件在建筑物的位置、作用、石材种类、表面做法及安装要求等信息，材质、色度、规格等应与原材料保持一致。

8.5.2 对于石结构中存在不影响其结构安全的局部破损、残缺、开裂等现象时，可对其采取修补措施。

8.6 石结构修补

石结构修补应符合下列规定：

a) 根据石结构表面破损的程度分别采取相同材质的石粉粘接和石材粘接修补等方法。
b) 当石结构中非承重构件出现裂隙时可采取裂隙注浆和增设铁锔、银锭隼等方法。

8.7 石构件更换

当受力石构件出现影响结构安全的破损、裂隙、断裂或风化病害时，可对该构件进行更换。石构件更换应符合下列规定：

a) 构件拆卸前应对石构件的尺寸、所在建筑物的位置、石材种类、表面做法及安装要求等信息进行详细记录。
b) 石构件拆卸前应对周边石结构进行支顶加固，拆卸时不应伤及周边石构件棱角，有多个石构件拆卸时应进行编号并记录所在位置。

8.8 石结构维护方法及要求见附录 B

9 加固

9.1 加固原则

9.1.1 古建筑石结构的加固设计，应采用线弹性分析方法计算结构的作用效应，并应符合 GB 50702 的有关规定。

9.1.2 验算古建筑中石结构的承载能力时，其作用应依据建筑的现状使用功能确定。作用的组合、作用的分项系数及组合值系数应按照 GB 50009 的规定采用。

9.1.3 结构的重要性系数 γ_0 按下列规定确定:

a) 全国重点文物保护单位，重要性系数取 1.2；
b) 市级文物保护单位，重要性系数取 1.1；
c) 其他类，重要性系数取 1.0。

9.1.4 石砌体强度参数（标准值与设计值）和弹性模量应依据石砌体的残损情况实测确定。当无实测条件时，砌体强度参数（标准值与设计值）和弹性模量应按照 GB 50003 的规定取值，并乘以折减系数 0.9。对外观已显著变形或石材已明显风化、酥碱的构件，应乘以表 3 的调整系数。

表3 调整系数表

古建筑物修建距 1840 的时间（年）	调整系数		
	抗压设计强度	抗弯和抗剪设计强度	弹性模量
100	0.81	0.77	0.81
300	0.72	0.77	0.77
＞500	0.68	0.63	0.68

9.1.5 古建筑中石构件应按 DB11/T 1190.2 的有关规定验算其承载能力，若原有构件已部分缺损或酥碱，应按剩余的截面进行验算。

9.1.6 古建筑石结构加固包括地基与基础加固、主体结构加固。

9.1.7 主体结构加固分为墙体加固、拱券结构加固、石构件加固、断裂石构件修复加固。

9.1.8 现状结构为危险的石结构构件，应优选支撑或局部更换等传统加固方法；必要时也可采取体外预应力加固、角钢-打包带加固等措施，并对加固件进行防锈防腐处理。

9.1.9 古建筑石结构的加固应在结构变形稳定的条件下进行。

9.1.10 古建筑石结构的加固不应破坏建筑的法式特征，不宜改变原有结构的受力体系。

9.1.11 古建筑石结构的加固过程中不应采取对石材有害的材料，所用材料应尽可能与原有结构材料相匹配。加固措施完成后不应有非必要的残留物质。

9.1.12 对因断裂而丧失承载力的横向受力构件可另加支撑，新增支撑应可识别；传统方法无法解决的，也可采用植筋、粘接等措施加固，实施前，应进行现场试验。

9.1.13 加固部分宜与原结构采取可去除的隔离措施，以实现可逆化加固。

9.1.14 对加固过程中可能出现断裂或坍塌的石结构，应在加固设计文件中提出相应的临时性安全措施。

9.2 地基与基础

9.2.1 地基与基础依据现状勘查及安全性评估结论确需进行加固的应当进行加固处理，古建筑无显著的不均匀沉降、倾斜，且其使用功能无大的变更时，不应对地基与基础有大的扰动。

9.2.2 地基与基础加固方法的选择应综合考虑当地工程地质和水文地质资料、地基受力影响深度、材料来源和施工设备等条件，并应考虑主体结构、基础和地基的共同作用，进行多种方案的技术经济比较，选用地基处理或加强主体结构与地基处理相结合的方案。地基的加固方法选用见表 4，基础的加固方法

选用见表 5。

表4　地基加固方法

加固方法	适用范围
木桩法	适用于软弱地基土层的加固。
石灰桩法	适用于处理水位以下的粘性土、粉土、松散粉细沙、淤泥、淤泥土质、杂填土或饱和黄土等地基及基础周围土体的加固。
树根桩法	适用于淤泥、淤泥土质、粘性土、粉土、沙土、碎石土及人工填土等地基土上既有建筑的修复和增层。
坑式静压桩法	适用于淤泥、淤泥土质、粘性土、粉土和人工填土等地基加固，且地下水位较低的情况。
锚杆静压桩法	适用于淤泥、淤泥土质、粘性土、粉土和人工填土等地基加固。
注浆加固法	适用于沙土、粉土、粘性土和人工填土等地基加固。一般用于防渗堵漏、提高地基土的强度和变形模量以及控制地基沉降等。
深层搅拌法	适用于处理淤泥、淤泥土质、粉土和含水量较高的粘性土的地基。
灰土挤密桩法	适用于处理地下水位以上的失陷性黄土、素填土和杂质土等地基。
高压喷射注浆法	适用于淤泥、淤泥土质、粘性土、粉土、黄土、沙土、人工填土和碎石土等地基加固。

表5　基础的加固方法

加固方法	适用范围
加大基础底面积法	适用于既有建筑的地基承载力或基础底面积尺寸不满足设计要求的基础加固。
基础补强注浆加固	适用于因不均匀沉降、冻涨或其他原因引起的基础裂损的加固。

9.2.3　地基处理方法的确定宜按下列步骤进行：

a)　根据结构类型、荷载大小及使用要求，结合地形地貌、地层结构、土质条件、地下水特征、环境情况和对邻近建筑的影响等因素进行综合分析，初步选出几种可供考虑的地基处理方案，包括选择两种或多种地基处理措施组成的综合处理方案；

b)　对初步选出的各种地基处理方案，分别从加固原理、适用范围、预期处理效果、耗用材料、施工机械、工期要求和对环境的影响等方面进行技术经济分析和对比，选择最佳的地基处理方法；

c)　对已选定的地基处理方法，应按建筑物地基基础设计等级和场地复杂程度以及该种地基处理方法在本地区使用的成熟程度，在场地有代表性的区域进行相应的现场试验或试验性施工，并进行必要的测试，以检验设计参数和处理效果。如达不到设计要求时，应查明原因，修改设计参数或调整地基处理方案。

9.2.4　地基与基础加固应符合 JGJ 123 的要求，并应符合下列规定：

a)　应验算地基承载力；

b)　应计算地基变形；

c)　应验算基础抗弯、抗剪、抗冲切承载力；

d)　受较大水平荷载或位于斜坡上的既有建筑物地基与基础加固，以及邻近新建建筑、深基坑开挖、新建地下工程基础埋深大于既有建筑基础埋深并对既有建筑产生影响时，应进行地基稳定性验算。

9.2.5 加固时应采取有效措施防止对古建筑及邻近建筑产生不良影响。

9.2.6 对处在湿陷性黄土、膨胀土、冻土等特殊土地区的古建筑，应按相应的现行有关标准执行。

9.2.7 对于实施地基与基础加固的古建筑，宜在施工期间设置现场监测系统，当发现异常情况时，应及时分析原因并采取有效处理措施。并应在施工完成后一定时期内进行沉降观测，直至沉降达到稳定为止。

9.3 主体结构

9.3.1 墙体

墙体加固应符合下列规定：

a) 墙体裂缝的加固应根据成因采取不同的处理方法。由地基不均匀沉降产生的斜裂缝，应在地基基础沉降稳定或地基进行加固处理后再进行加固；地基基础稳定后，墙体裂缝不再继续变化，可用灰浆封护，定期进行观察。因墙体倾斜、扭转而造成的裂缝，应在结构整体整修复位后方可进行处理。

b) 结构裂缝的修补应根据其种类、性质及出现部位进行设计，选择适宜的修补材料、修补方法和修补时间。

c) 修补裂缝应符合下列规定：

   1) 石块材开裂修补应阻止水或其他有害物质进入裂隙；修补填充应注意材料的匹配性，修补主体材料应与修补对象材质相同或相近；修补后表面感观应协调一致；

   2) 石材间砌筑灰缝修补应采用传统材料、传统工艺进行，慎用现代材料。修补以勾缝、填补为主，勾补前应按实际情况对灰缝进行必要的清理。灰缝填补应充盈整个裂隙，并应采取防护措施，避免污染周围；

d) 石结构内部有空鼓时宜优先采用传统材料灌浆处理；传统材料无法满足要求时，可采用压力灌浆法；压浆的材料宜采用无收缩灌浆料；空气压缩机的压力值宜控制在 0.2MPa~0.3MPa；压浆时应严格控制压力，防止损坏边角部位和小截面的砌体，必要时，应作临时性支护；

e) 坍塌部位应采用原石构件按原工艺进行补砌；

f) 鼓闪比较严重的部位，宜增加拉结措施。

9.3.2 拱券结构

当拱券结构承载力、稳定性、整体性及耐久性不满足要求时应进行加固，加固应符合下列规定：

a) 新增加固部分应对原有本体部分尽量小的干预，并应做到可逆、可识别；

b) 拱券结构加固可根据拱券结构病害情况按 JTG/T J22 的规定选用拱下增设支承拱、拱背加大截面、调整拱上建筑恒载以及增加横向整体性等方法；

c) 加固设计计算应按照 JTG/T J22 的规定进行，并应考虑结构损伤、材料劣化、新旧材料的结合性能及材性差异等因素的影响。材料、几何等参数应通过实测确定。因加固导致恒载增加时，应对拱座及基础进行验算；

d) 拱下增设支承拱加固时，新增恒载、临时卸除荷载的恢复及使用荷载由加固后的组合截面拱承担；

e) 拱背加大截面加固新增部分与原砌体结合面应考虑有足够的抗剪能力。采用增大截面或在主拱券上采取增强加固措施时，应根据平截面假定计算原拱券和新增部分的应力，并应分阶段计算受力；

f) 更换破损的石质构件应逐个或小批量分次进行，修补用的石材强度指标不应低于原构件，必要时应采取临时支撑措施。

9.4 构件

9.4.1 梁板式石构件发现结构病害时应进行加固，加固应符合下列规定：

a) 文物保护等级高的梁板构件宜进行可逆的预防性加固；
b) 构件加固承载力不宜考虑原石构件承载能力，加固部分承载能力应可承受结构自重及使用荷载；
c) 传统做法不能满足加固要求时，梁板式石构件可采用体外预应力加固、角钢-打包带加固等措施，具体方法参见附录 C。

9.4.2 断裂石构件应进行修复，修复加固应符合下列规定：

a) 断裂石构件的粘接修复，应使用与石材性能相匹配的胶粘剂。当石构件受力较大或石材的性能较差时，除选用低强度胶粘剂修复外，尚应借助拉结措施来固定石材。石材粘接面应清理干净，加固剂均应渗透到石材空隙内；
b) 粘接施工时宜施加压力，以保证界面粘接性能；
c) 拉结措施宜采用经防腐处理的铁锔、石榫等传统方式，传统方式不能满足加固要求时，也可采用植筋加固。

10 验收

10.1 古建筑石结构维护与加固工程的验收应符合 GB/T 39056。

10.2 古建筑石结构维护与加固工程资料应符合 DB11/T 1828。

附 录 A
（资料性）
石结构材质鉴定和性能测试

A.1 基本要求

石结构材质鉴定和性能测试的基本要求：

a) 岩石学名称的鉴定；
b) 物理性能的测试；
c) 力学性能的测试和评价；
d) 风化程度和风化深度的判定。

A.2 岩石学名称的鉴定

A.2.1 现场描述石质材料的颜色、构造、矿物成分、颗粒大小、颗粒之间的胶结情况，并初步判断岩石学名称。北京地区的石质古建筑主要由大理岩、石灰岩、白云岩、花岗岩、砂岩建造的。

A.2.2 薄片鉴定：按照WW/T 0063的规定在古建筑上采集代表性的样品，切割并制作薄片，薄片制作方法按照SY/T 5913的相关规定执行。在偏光显微镜下观察薄片，并描述其结构、构造、矿物成分及含量、填隙物、孔隙特征等。薄片的鉴定方法参见SY/T 5368规范。同时进行矿物成分和化学成分的测定。根据薄片镜下观察结果，参考矿物成分和化学成分的测试结果结合现场判断，鉴定样品的岩石学名称。

A.2.3 矿物成分测试：采用Ｘ射线衍射定量分析方法测试样品的矿物成分及含量。取少量古建筑石材用研钵盆研磨至粒径小于0.040mm的粉末，低温烘干（小于60℃）冷却至室温，进行矿物成分测试。测试和鉴定方法参见SY/T 5163规范。对于砂岩、凝灰岩等含有黏土矿物较多的样品，采用自然试片、乙二醇饱和试片和高温试片的衍射峰面积差减法测定各黏土矿物的相对含量。黏土矿物种类主要包括高岭石、蒙皂石、伊利石、绿泥石、伊利石/蒙皂石间层矿物、绿泥石/蒙皂石间层矿物。

A.2.4 化学成分测试：采用X射线荧光光谱法测定古建筑石材的化学成分。采用熔融法或粉末压片法制样并进行化学成分测定。熔融法参见GB/T 14506.28规范，粉末压片法参见DZ/T 0279.1规范。

A.3 物理性能的测试

A.3.1 古建筑物理性质的测试项目应包括块体密度、颗粒密度、吸水率、孔隙率等。有要求时，还可以测定其孔径分布、吸水性能等。

A.3.2 块体密度宜采用水中称量法测定，但对于遇水崩解、溶解和掉块的样品，应采用蜡封法测定。测定块体密度时，所需样品宜大于15g，不能小于5g。上述两种测定方法参见GB/T 50266规范。

A.3.3 颗粒密度宜采用比重瓶法测定。测试时，使用容积为50ml的短颈比重瓶。所需样品约为10克。测定方法参见GB/T 50266规范。

A.3.4 孔径分布可采用压汞法测定，参见GB/T 21650.1规范。

A.3.5 吸水性能用毛细吸水系数表征。在古建筑现场，可采用卡斯特量瓶法测定，测试和计算方法参见WW/T 0063规范；实验室内应测定吸水率和饱和吸水率。

A.4 力学性能的测试和评价

A.4.1 石材力学性能测试

A.4.1.1 石材力学性能测试项目应包括单轴抗压强度、抗拉强度（巴西劈裂强度）、弹性模量等。应进行建造材料的采石场调查并取样，或者利用古建筑更换或塌落下来的构件取样进行测试。

A.4.1.2　测试方法应按照 GB/T 50266 的相关规定执行。若无法在建造材料的采石场取样、无更换或塌落下来的构件，可采用超声波仪、回弹仪、里氏硬度等无损或微损方法间接地测定古建筑石构件的力学性质。

A.4.2　超声波仪测试

测试区域、测试方法、数据处理等可按照DB11/T 1190.2-2018中的附录B执行。

A.4.3　回弹仪测试

古建筑石构件表层较致密，可使用回弹仪间接测定石构件的力学强度。回弹仪的测试方法和石构件单轴抗压强度的确定应按照WW/T 0063的规定执行。

A.4.4　里氏硬度计测试

对于表层劣化严重或胶结性差的古建筑石构件，可选用里氏硬度计间接测定石构件的力学强度。测试要点如下：

a)　宜选用 D 型（标准型）冲击装置，对于风化严重的构件可选用 C 型冲击装置；

b)　每个测区内不少于 5 个测点，各测点间距应大于 2cm，每个测点只测试一次；

c)　石构件的单轴抗压强度（UCS）可根据其里氏硬度值由下式计算得到：

$$UCS = 8 \times 10^{-6} L^{2.5} \qquad (R^2=0.77) \quad \cdots\cdots (A.1)$$

式中：

UCS——单轴抗压强度，单位为MPa；

L　——使用D型冲击装置测定的里氏硬度值。

R^2 ——判定系数，R^2值越接近1，说明回归方程对观测值的拟合程度越好。

A.5　风化程度和风化深度的判定

A.5.1　风化程度的判定

A.5.1.1　石构件的风化程度可用风化系数来表示。风化系数可由石构件的纵波波速测值得到。石构件纵波波速按照 WW/T 0063 和 DB11/T 1190.2 规范来测定。纵波波速测定后，石构件的风化系数 Fs 可以按照下式确定：

$$F_s = \frac{V_{p0} - V_p}{V_p} \quad \cdots\cdots (A.2)$$

式中：

Fs——石构件的风化系数

V_{p0}——新鲜岩石的纵波波速；

V_p——古建筑石构件的纵波波速。风化系数越大，风化程度越高，具体的评价与分级要求可按照表A.1执行。

表 A.1 岩石风化系数 Fs 风化程度分级表

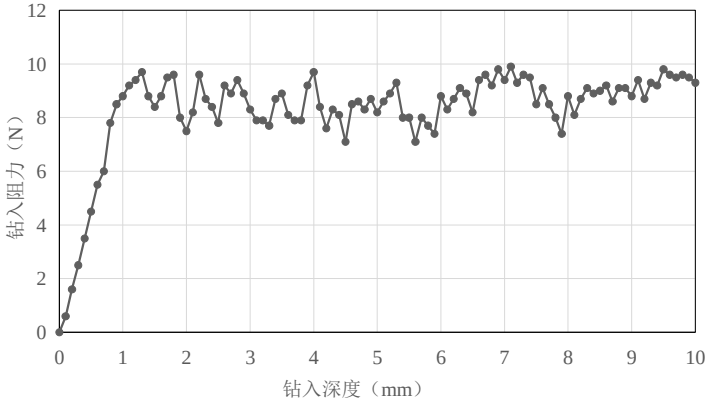
风化程度	风化系数 Fs
未风化	Fs< 0.10
微风化	0.10≤Fs< 0.25
弱风化	0.25≤Fs< 0.50
强风化	Fs≥ 0.50

A.5.1.2　对于无法确定新鲜岩石纵波波速的情况，可根据石构件的岩石学名称，查询相关手册通过经验来确定。

A.5.2　风化深度的判定

对于风化深度在1mm～20mm的石构件，可采用钻入阻力仪对风化深度进行快速、精确测量。测试要点如下：

a) 宜选择石构件表面较为平整处作为测点；
b) 针对不同病害类型和风化程度，选择有代表性的部位作为测点；
c) 根据被测石构件的硬度选用不同直径的钻头，通常选用直径 5mm 的钻头；
d) 由于钻头磨损影响测试结果，不宜采用磨损较为严重的钻头，同时记录钻头使用的次数；
e) 当结构疏松易产生钻屑时，钻入深度不宜过深；
f) 测试结束后，可得到钻进深度与钻入阻力的关系曲线（如图 A.1 所示），一般认为钻入阻力值在风化层一直增长，钻入阻力值不再增长时的钻入深度即为风化深度（图 A.1 所示岩石的风化深度为 1.3mm）。



图A.1 钻进深度与钻入阻力值关系曲线

附 录 B
（资料性）
古建筑石结构维护方法

B.1 古建筑石结构维护方法

古建筑石结构维护方法见表B.1。

表B.1 古建筑石结构维护方法

序号	方法	要求
1	石结构归安	a) 拆卸石构件：拆卸石构件时不应伤及棱角。有多个石构件时应编号。拆卸前应对石构件棱角加以保护，不应使旧的石构件产生新的损伤； b) 砌筑结构需清铲灰浆结合层：用灰浆稳固的石构件需用錾子剔除粘在石构件或砌体上的灰浆结合层，清理基层浮土； c) 原位归安：用灰浆稳固的石构件归安时，将走闪旧石构件拆下后铺坐灰浆，重新安装。安装就位后用石片或经过防腐处理的铸铁片背山，使构件稳固。归安的石构件应与原有石构件平直、齐顺，缝隙符合要求； d) 砌筑结构需灌浆时：用灌浆方法稳固的，应先用麻刀灰勾缝，细缝用油灰或石膏浆勾缝。安装面积大的应多设置浆口。从浆口向里先灌适量清水，用桃花浆或生石浆多次灌入，每次间隔应在 4h 以上，直至灌满为止； e) 打点、勾缝：旧石构件归安后，对接缝处进行修理，将灰缝勾严勾平。
2	石结构清洗	a) 一般污染及轻微风化的石构件，可利用去离子水清洗。使用工具：软牙刷、毛刷。首先对石构件表面用去离子水进行浸润，浸润期间用软牙刷等工具对石构件表面附着的尘土、风化产物等污染物进行清洗。最后使用去离子水进行冲洗； b) 微生物（地衣、菌类、藻类）污染物、积尘水垢以及油类污染物，可使用饱和蒸汽与去离子水进行清洗； c) 对石质文物表面的水垢结壳，以及部分与文物本体粘结力较强的污染物宜采用机械清洗法。可使用竹签、医用手术刀或者微粒子喷射来清洗。使用微粒子喷射清洗时应根据被清洗文物的石料、部位和水垢成分选择粒子材料，带有雕刻的石构件不宜使用微粒子喷射清洗； d) 针对石构件表面可溶盐的处理可使用纸浆吸附法，可使用纸浆、纸巾、脱脂棉、纱布、活性白黏土等，用去离子水湿润敷在石构件上，外面再覆盖塑料薄膜。过一段时间揭开薄膜，使吸附材料干燥。随着外表面水分的蒸发，盐溶液向外迁移，逐渐转移到吸附物上。可用测定吸附材料电导率来检验除盐量及清洗效果。
3	生物病害的去除	杂草、树木去除： a) 杂草、灌木需去除时，宜采用机械方式去除，机械去除过程中应剔除侵入石结构内部的草木根茎； b) 当采用化学制剂对杂草、灌木进行去除时，应采用注射方式操作；杀草剂应选择低毒、环保、对石本体无危害，对后期保护处理无不良影响的药剂； c) 杂草、灌木去除过程中不得采用火烧、直接拔出等手段； d) 剔除完成后应对破损部位进行修补与复原。 微生物病害去除：

表 B.1 古建筑石结构维护方法（续）

序号	方法	要求
3	生物病害的去除	a) 苔藓地衣去除宜采用机械方式去除； b) 当采用化学制剂对微生物进行去除时，应选择低毒、环保、对石本体无危害，对后期保护处理无不良影响的药剂； c) 剔除完成后应对破损部位进行修补与复原。
4	石结构补配	a) 石构件制作：补配选用的石料应挑选与原石材种类相同，无瑕疵、隐裂、纹斑或质地均匀的石料，石构件应使用传统工具并按传统工艺进行加工制作，然后根据原做法和设计方案要求进行雕刻、表面刷道、剁斧、砸花锤或磨光、扁光等处理； b) 石构件安装：石构件安装前应核对构件所在位置、标高、与古建筑的关系等信息，拴好垂直和水平控制线，对于不稳定的构件可使用经防腐处理的铸铁片进行背山、垫稳、找平，补配石构件应与原有石构件平直、齐顺、缝隙一致。 c) 修活、打点：石构件安装后应对接槎、水平缝等处进行修活打点，将局部凸起处用传统工具并按传统工艺修平； d) 勾缝：对有勾缝要求的石构件，补配完成后用与原灰缝材料一致的材料将缝子勾抹严实。
5	石结构修补	a) 当石结构表面存在轻微破损、残缺现象时可使用相同材质的石材研磨成石粉，掺入粘合剂后对其进行修补，待修补面固化后应参照构件表面做法对其进行雕刻、刷道、剁斧等表面处理。 b) 对于石结构存在较大的破损、残缺现象时，可采用同材质的石材进行粘接修补，修补前需将破损处剔凿成规整的凹槽状，然后将修补石材加工成与凹槽尺寸接近的形状，将凹槽内清理干净后均匀的涂上粘合剂，然后将石材镶嵌于凹槽内，待粘合剂完全固化后还需根据石结构表面做法对修补处进行雕刻、刷道、剁斧等表面处理。 c) 当石结构中非承重构件出现裂隙时可采取裂隙注浆和安装经过防腐处理的铁锔、银锭隼等修补方法，操作方法为将粘接剂注入到石材裂隙中，待粘合剂固化后在裂隙表面剔凿出倒置等腰梯形，恰似银锭状，将此凹槽填以一体的生铁锭或石料，即形成了一对牢固的银锭榫卯结构，也可在裂隙上并排布置生铁锔，对裂隙进行加固。 d) 宜选择流动性好的粘接剂，便于短时间内在修补面上铺展，也更易于渗入石材孔隙内；固化时间适中，放热小、收缩小；固化后强度适中，具有好的黏结能力，不改变文物外观，耐老化的材料。

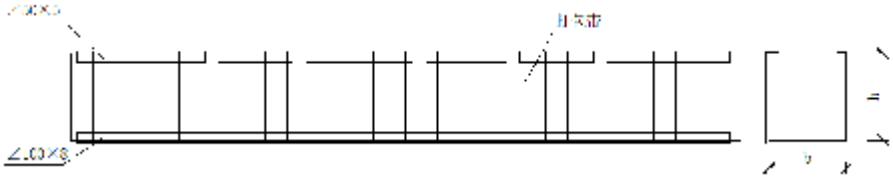
附　录　C
（资料性）
石构件受弯加固法

C.1　体外预应力加固法

C.1.1　体外预应力加固法可参考JGJ/T 279。
C.1.2　采用体外预应力加固石构件时，可不考虑原石构件承载能力。

C.2　角钢—打包带加固法

C.2.1　角钢-打包带加固石构件示意图可参见图C.1。
C.2.2　加固采用的打包带宜采用塑钢打包带，常规尺寸宽为19mm，厚为1mm，弹性模量不宜小于10000 MPa，屈服强度不宜小于140MPa，极限强度不宜小于260MPa。
C.2.3　受力角钢宜为等边角钢，规格不宜小于∟100×8，材质宜为Q235，受力角钢应对称放置于被加固构件的受拉区域角部。
C.2.4　在设置打包带位置，被加固构件的上面两个角部宜打磨成圆角，或采用短角钢，规格可取∟50×5。
C.2.5　打包带应采用配套金属打包扣锚固连接，连接锚固位置的金属打包扣宜取3个。
C.2.6　石构件加固后，宜定期进行检查，检查周期由使用单位确定，但不大于3年。
C.2.7　对加固过程中可能出现倾斜、失稳、过大变形或坍塌的石结构，应在加固设计文件中提出相应的临时性安全措施，并明确要求施工单位应严格执行。



图C.1 角钢打包带加固示意图

C.2.8　采用角钢-打包带加固石构件，可不考虑原石构件承载能力，其加固后受弯承载力应按下式计算。

$$M = n \times 2\sqrt{2} \times e EA \times m \times (h - Z_0) + f_y \times W_x^{\min} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (C.1)$$

式中：

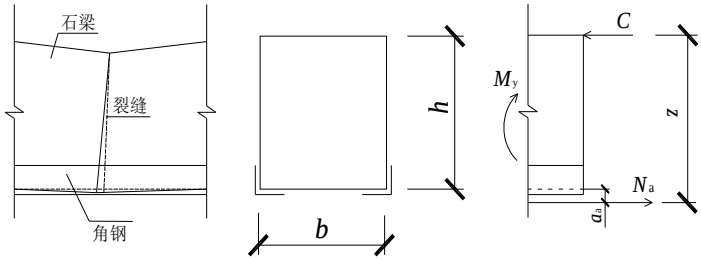
M ——加固后的受弯承载力；
n ——石构件半跨范围内发挥锚固作用的打包带个数；
e ——打包带的应变，取为张拉有效应变；
E ——打包带的弹性模量；
A——单支打包带的截面积；
m——角钢与石材间的摩擦系数，取为0.8。

h ——梁截面高度；

Z_0——角钢重心距；

f_y ——角钢抗拉强度设计值，依据现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017取值；

W_x^{min}——受拉角钢截面模量，取两个受拉角钢截面模量之和。



图C.2 角钢-打包带加固石构件受弯承载力计算简图

C.2.9 角钢-打包带加固石结构时，打包带可采用控制张拉量的方法实现定量张拉，有效张拉应变宜控制在3000με～5000με，实际张拉量应根据现场实测结果进行修正。

C.2.10 角钢-打包带加固石构件应按照下列工序实施：张拉、锚固、张拉变形量测、放张。

参 考 文 献

[1] GB/T 14506.28 硅酸盐岩石化学分析方法　第28部分：16个主次成分量测定

[2] GB/T 21650.1 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度第1部

[3] GB/T 50266 工程岩体试验方法标准

[4] DZ/T 0279.1 区域地球化学样品分析方法第1部分：三氧化二铝等24个成分量测定粉末压片—X射线荧光光谱法

[5] JGJ/T 279 建筑结构体外预应力加固技术规程

[6] ST/T 5913 岩石制片方法

[7] SY/T 5163 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法

[8] SY/T 5368 岩石薄片鉴定

[9] WW/T 0063 石质文物保护工程勘察规范

[10]《全国重点文物保护单位文物保护工程竣工验收管理暂行办法》