

广西壮族自治区文物保护单位

灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程 设计方案

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司

2024年01月





项目名称：灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程

现场勘察：唐骏 陈旺生 邓诗媛

报告编写：刘志强 陈煜权 邓诗媛

设计：刘志强 覃木庆 梁秀香

复核：唐永观

审核：刘立志
唐美芳
文物保护工程责任设计师

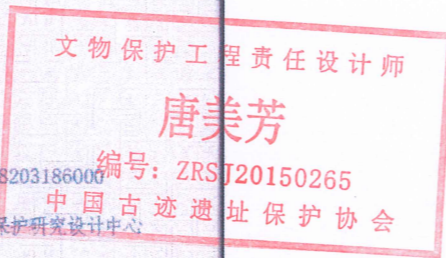
项目负责人：唐美芳 ZRSJ20150265
中国古迹遗址保护协会

审定：朱志成

勘察设计单位：广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司

委托单位：灵川县文物管理所

编制日期：2024年01月



目 录

第一部分 现状勘察报告	1
一、项目概况	1
1.1 任务由来	1
1.2 项目主要工作思路、内容	1
1.3 项目工作计划及成果	2
1.4 勘察实施概况	3
1.4.1 勘察范围	3
1.4.2 主要保护内容	3
1.4.3 勘察依据	3
二、文物概况及价值评估	3
2.1 文物概述	3
2.1.1 文物简介	3
2.1.2 地理位置	4
2.2 历史沿革	5
2.2.1 灵川县历史建置	5
2.2.2 海阳庙历史沿革	5
2.3 历次维修情况	5
2.4 价值评估	5
2.4.1 历史价值	5
2.4.2 艺术价值	6
2.4.3 社会与文化价值	6
三、区域环境条件	6
3.1 气象条件	6
3.1.1 气温	6
3.1.2 降雨	7
3.1.3 风	8
3.2 地形地貌	8
3.2.1 区域地形地貌	8
3.2.2 场地地形地貌	9
3.3 地层岩性	10
3.3.1 区域地层岩性	10
3.3.2 场地地层岩性	11
3.4 地质构造	11
3.4.1 区域地质构造	11
3.4.2 场地地质构造	12
3.5 水文地质条件	13
3.5.1 地表水	13
3.5.2 地下水	13
3.5.3 水质分析	14

3.6 地震	14
3.6.1 地震活动	14
3.6.2 抗震区划	15
3.7 不良地质及特殊性岩土	15
3.8 岩石基本性质	15
3.8.1 岩石物理力学性质	15
3.8.2 岩石微观结构特征	16
四、危岩体病害现状及成因分析	18
4.1 整体保存现状	18
4.2 裂隙发育现状	18
4.2.1 裂隙调查分类	18
4.2.2 裂隙调查统计	19
4.3 危岩体病害	22
4.3.1 危岩体基本特征	22
4.3.2 危岩体分类	27
4.3.3 危岩体成因和失稳破坏机理分析	27
4.3.4 危岩体稳定性计算	29
六、文物本体病害现状及成因分析	34
6.1 病害现状调查	34
6.1.1 病害分类	34
6.1.2 病害调查	36
6.2 可溶盐分析	38
6.3 石刻病害调查统计	39
6.4 病害成因分析	39
七、结论与建议	41
7.1 结论	41
7.2 建议	42
第二部分 现状图	43
第三部分 设计说明	59
一、设计依据	59
1.1 法律法规	59
1.2 参考文件	59
1.3 国家规范及文件标准	59
二、设计原则	59
三、工程性质、内容	60
四、文物本体保护措施	60
4.1 现场试验	60
4.1.1 现场试验实施的必要性	60
4.1.2 现场试验实施的选点及环境要求	60
4.1.3 现场试验实施内容及周期	60
4.1.4 现场试验效果评估	60
4.2 表面污染物清理	60

4.2.1 保护思路	60
4.2.2 清理目的与原则.....	61
4.2.3 手工机械清理.....	61
4.2.4 水蒸气清理.....	61
4.3 裂隙注浆	62
4.3.1 裂隙灌浆加固的必要性.....	62
4.3.2 裂隙灌浆加固措施.....	62
4.4 表面脱盐	63
4.5 表面微生物防治	64
4.6 表面防水	64
4.7 本体保护工程量统计.....	65
五、三维数字化信息采集及数字化拓片.....	65
5.1 三维数字化信息采集.....	65
5.2 三维数字化拓片	77
5.3 工程量统计	78
六、传统拓片制作	78
6.1 工艺流程	78
6.2 工程量统计	79
七、岩体加固	79
7.1 裂隙治理	79
7.1.1 主要目的	79
7.1.2 治理措施	79
7.1.3 灌浆材料选择.....	80
7.1.4 工程范围	86
7.1.5 现场实验	86
7.1.6 施工工艺	86
7.1.7 工程量统计.....	87
7.2 危岩体加固	87
7.2.1 锚杆设计	87
7.2.2 锚固方案	88
7.2.3 锚杆锚固后岩体稳定性.....	89
7.2.4 锚杆施工工艺流程.....	91
7.3 植被清理	92
八、施工注意事项	93
第四部分 设计图	95

第一部分 现状勘察报告

一、项目概况

1.1 任务由来

海阳庙由明心寺、灵泽庙、海阳山摩崖石刻三部分组成，本次工程对象为海阳庙—海阳山摩崖石刻。海阳山石刻凿于海阳山北麓，露天保存，周边植被生长茂盛，石刻的保存容易受到区域地质环境条件的影响。在漫长的历史年代中，随着区域地质环境的变迁，在自然因素的不断影响下，海阳山摩崖石刻区域地质和环境载体发生了变化，石刻所依附载体崖壁发育裂隙切割破坏和危岩体崩塌病害，石刻本体发育表面风化、表面泛盐、裂隙、生物病害、表面污染与变色等病害。

根据现场踏勘和走访调查显示，海阳山摩崖石刻所发育病害正处于活跃状态，近年来，随着区域自然环境与气候环境的劣化，病害发育有明显加剧的趋势，石刻所依附载体危岩体病害的持续发育已直接危及到文物本体的整体性、稳定性和安全性，威胁过往行人、游客的生命财产安全；石刻本体病害的持续发育已直接危及到文物本体的真实性、完整性，导致石刻表面字迹轮廓逐渐变得模糊不清，难以辨识。因此，亟需对海阳山摩崖石刻进行全面的病害勘察，并采取有效措施的进行加固保护，使得这一珍贵历史文化遗存得以长久保存，文物保护工作刻不容缓。

海阳山摩崖石刻病害引起了广西壮族自治区文化和旅游厅、灵川县文物管理所的高度重视，并及时开展了海阳山摩崖石刻病害治理相关的前期工作。为做好这一优秀历史文化遗产的保护工作，受灵川县文物管理所委托，广西鼎之晟园林古建筑工程有

限公司承担了灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻保护工程设计方案任务。接受委托后，我公司成立了海阳山摩崖石刻保护工程项目组，立即组织技术力量，按照业主要求进行任务分配和工作前的技术交底及工作实施要求。项目组成员于 2023 年 12 月 13 日多次前往现场进行现场勘察工作，完成了海阳山摩崖石刻病害现状勘察记录和相关技术、历史文物资料的查阅整理等工作。在此期间，项目承担单位的数位领导和文物保护专家，在内业资料整理中给予了多次悉心指导。在此基础上于 2024 年 01 月完成了《灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程设计方案》文件的编制。

1.2 项目主要工作思路、内容

海阳山摩崖石刻所处环境地质条件较简单，现场勘察条件有限，海阳山摩崖石刻发育病害具有多样性等特点，勘察、治理工程需循序渐进、综合考虑。本项目的任务主要是针对海洋山摩崖石刻文物本体及载体在自然和人为等不利因素下发育的病害进行全面调查，并有针对性的提出加固治理方案。

(1) 工程地质勘察：详细查明海阳山摩崖石刻所在区域的地形地貌、地层岩性、地质构造、自然环境演变历史和水文气象等与工程地质相关的因素，并取样进行室内试验分析、检测，为本次工程设计提供相关的技术参数。详细查明该地区地质构造发育演化历史、各种地质构造、岩质坡体结构面（断层、节理、岩性分界面等）的位置及空间分布、类型、产状、间距、延伸性、张开度、粗糙度、充填及胶结情况、力学特性、分组及各组间的交切组合关系和主要软弱结构面（优势结构面）产状与崖壁坡

面的交切关系，构造裂隙分布特征，各软弱结构面的张开、充填情况，分析软弱结构面对岩体的影响，尤其分析断层、节理与石刻边坡的交切关系，分析石刻坡体工程地质结构特征，为岩体稳定性分析提供模型。

(2) 工程测绘：采用 RTK、无人机设备仪器进行海阳山摩崖石刻区域地形图测绘、崖壁立面测绘和断面测绘等，完成工程地质图、石刻本体病害现状图。

(3) 病害勘察：绘制海阳山摩崖石刻分布立面图，拍摄各个石刻本体病害现状照片，详细记录每个石刻病害发育及分布情况。调查石刻区域危岩体分布范围、规模，并对危岩体破坏形式和稳定性做出定性判断，分析发展趋势；对危岩体进行稳定性定量计算，做出分析评价；对危岩失稳后的运动情况进行调查和计算分析；分析危岩体病害成因及对文物本体及载体的危害性。

(4) 水文地质调查：详细查明海阳山摩崖石刻所在区域水文地质条件，即地下水埋藏特征、地下水类型、地下水动态变化情况，地下水的补给、渗流途径、排泄情况；查明各类渗水病害的水源，石刻边坡主要渗水点调查，查明各地层、地质构造含水、透水特征，裂隙含水状况及裂隙水运移特征；分析岩土层、软弱夹层和结构面的渗透特征、含水特性及主要渗流通道，进行相应的渗透系数和渗流途径测试。收集该地区气象（特别是雨期、降雨量）水文资料，汇水区域地貌特征及地表径流特征，分析其与海阳山摩崖石刻区域有关地表水体、地表水流和石刻边坡渗水等之间的关系，地表水与地下水之间关系，地表水、地下水与石刻水害之间关系。

(5) 文本编制：根据《文物保护工程设计文件编制深度要求（试行）》及相关规范文件编制《灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程设计方案》。

1.3 项目工作计划及成果

在充分收集已有气象、工程地质资料、水文地质资料、已有工程资料和文物历史资料的基础上，结合本单位长期石质文物保护研究成果和设计经验，制定具有科学性、可行性、经济合理性的治理方案。本方案设计工期 30 天。我单位将科学划分工作时间，做好全面、全过程、全员质量控制，做好事前、事中、事后设计进度调整。

1、工作计划

① 2023.12.13~2023.12.15：完成海阳山摩崖石刻区域现场勘察及测绘工作，包括工程地质调绘、区域地质调查、石刻本体病害调查与评估、石刻载体崖壁危岩体病害调查与评估等。



图 1.3-1 工作人员现场勘察

② 2023.12.16~2024.1.11：进入室内资料汇总整理工作，完成《灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程设计方案》文件的编制工作，主要包括方案比选、方案设计、预算编制等文件的编制及图纸绘制等工作，并在单位内部召开专家论证评审会议，进行技术经济比选，最终确定经济合理、技术先进、便于实施的方案。

2、工作成果

- ① 《灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程设计方案》（2024.1.11）；
- ② 《灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程设计方案—工程概算》（2024.1.11）。

1.4 勘察实施概况

1.4.1 勘察范围

本次勘察工作范围为以海阳山摩崖石刻为中心，往南向约 20m，往东向至明心寺，往北向包括整座海阳山，往西向 20m，调查面积约 5000m²。

1.4.2 主要保护内容

本次工程保护内容主要包括以下 2 个方面：

（1）本体

海阳山摩崖石刻：经现场确认的石刻共计 6 处。

（2）载体

海阳山摩崖石刻文物本体所依附崖壁或岩体。

1.4.3 勘察依据

1、法律法规

- ① 《中华人民共和国文物保护法》（2017 年修订版）；
- ② 《中华人民共和国文物保护法实施条例》（2017 年修订版）；
- ③ 《中华人民共和国文物维修工程管理办法（试行）》；
- ④ 《国际古迹保护与修复宪章》（威尼斯宪章）
- ⑤ 《中国文物古迹保护准则》（2015 年修订）；
- ⑥ 《国务院关于加强文化遗产保护的通知》（2005）；

- ⑦ 《<中华人民共和国文物保护法>办法》（2005 年）；
- ⑧ 《文物保护工程管理办法》（2003 年）；
- ⑨ 《中华人民共和国文物保护法实施细则》。

2、技术规范

- ① 《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010）；
- ② 《岩土工程勘察规范》（GB50021-2001）（2009 年版）；
- ③ 《工程地质手册》（第五版）；
- ④ 《石质文物保护工程勘察规范》（WW/T0063-2015）；
- ⑤ 《工程测量标准》（GB 50026-2020）；
- ⑥ 《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330-2013）；
- ⑦ 《岩土锚杆（索）技术规程》（CECT 22:2005）；
- ⑧ 《地质灾害防治工程勘察规范》（DB 50/T 143-2018）；
- ⑨ 《危岩防治工程技术规范》（DB 45/T 1696-2018）；
- ⑩ 《馆藏砖石质文物病害与图示》（GB/T 30688-2014）；
- (11) 《工程岩体实验方法标准》（GB/T 50266-2013）；
- (12) 《岩体锚固与喷射混凝土支护工程技术规范》（GB 50086-2015）；
- (13) 《历史建筑材料中水溶盐危害程度的评价指标》。

二、文物概况及价值评估

2.1 文物概述

2.1.1 文物简介

海阳庙位于灵川县海洋乡大庙塘村委大桐木湾村海阳山北麓，距乡政府 1.5 公里，由明心寺、灵泽庙、海阳山摩崖石刻三部分组成。海阳庙始建于唐代，宋赐名灵泽庙，明更名龙母庙，清称海阳庙，民国时期改称明心寺，以祭祀湘漓二水之源神。



图 2.1-1 海阳庙航拍总图

今存明心寺为清代所建，明心寺依海阳山（龙母山）而建，占地面积 5300 平方米，建筑面积 900 平方米。灵泽庙紧临明心寺东侧，为民国时期重建，庙内供奉灵泽大王。海阳山北麓岩石上有摩崖石刻 6 方：其一，宋淳熙十四年静江府府学教授陈邕撰并书，进士秦焯石刻《海阳山灵泽庙之记》，详细记载了海阳山的历史沿革及范成大奏请敕封海阳山神、灵庙额的经过，其二，宋代摩崖石刻“湘漓二水之源”，六个大字为行书，字径 28 厘米。其三，宋淳熙六年书法家、岳阳太守马子严撰并书的《祈雨记》，该壁书记载了马子严祈雨和寻找庙的敕额经过。其四，民国十七年灵川县知事陈美文撰写《禁止开凿海阳山岩石》碑文。其五，1938 年蒋柱南诗刻。其六，1939 年郑丙笋诗刻。后两方均为抗日战争时期到过海阳山的国军将官题咏。海阳庙（包括

明心寺、灵泽庙、海阳山摩崖石刻）历史悠久，文化渊源流长，自然环境优美，既是佛教圣地，又是考古、旅游胜地，具有重要的历史、艺术、科学价值。海阳庙于 2000 年 7 月 19 日由自治区人民政府公布为第五批自治区文物保护单位。

2.1.2 地理位置

灵川县位于广西壮族自治区东北部，地处桂林地区中部。县境最大东西横距 68 公里，南北最大纵距 83 公里。为漓江、湘桂铁路、国道 322 线中经之地。治所灵川镇（地名甘棠渡），公路里程南距桂林市中心广场 14 公里，北距兴安县城 47 公里。按铁路里程计，南去南宁自治区首府 447 公里。

海阳庙-海阳山摩崖石刻位于灵川县海洋乡大庙塘村委大桐木湾村海阳山北麓，距乡政府 1.5 公里，地处北纬 25°18'36.9"，东经 110°34'15.7"，海拔高度 306.6m，海阳山紧挨于明心寺后方。



图 2.1-2 海阳山摩崖石刻地理位置图

2.2 历史沿革

2.2.1 灵川县历史建置

灵川县建置之前，古属百越之地。战国属楚，秦为桂林郡地，汉属零陵郡始安县，唐初属桂州始安县地。

唐龙朔二年（662）[一说武德四年（621）]，析始安置灵川县。属桂州总管桂州。五代十国先属楚，后归南汉。[据清·吴任臣《十国春秋·楚·文昭王世家》：“开运三年（946）春三月，升桂州全义县为溇州；仍改全义县为德昌县，并割桂州之灵川、广明、义宁等三县隶之，从王奏也”。宋隶广南西路静江府。元隶广西行中书省静江路。明属广西承宣布政使司桂林府。清属广西行省桂林府。

民国 2 年 7 月，裁府设道，灵川隶属广西省漓江道（3 年改称桂林道）。15 年 10 月废道后，隶属广西省桂林行政督察委员会。19 年，属桂林民团区。23 年 3 月，属桂林行政区。29 年 4 月，属广西省第一行政督察区。31 年 3 月，第一行政督察区所辖县归省直隶。33 年 5 月至 38 年 11 月，隶属广西省第八行政区。

1949 年 11 月 22 日，灵川解放。属广西省桂林专区。1954 年 6 月，灵川县与临桂县合并为一县，称临桂县，仍属桂林专区。1958 年 3 月，隶属广西僮族自治区桂林专区。1961 年 6 月，复置灵川县。1965 年 10 月属广西壮族自治区桂林专区。1968 年 8 月，属广西壮族自治区桂林地区。

历代县等级的划分，按当时划分标准，灵川在唐代划为中等县，宋属望等县，元属下等县，明清划为中等县，民国 19 年划为二等县，21 年划为三等县，28 年划为三等乙级县。1950 年划丁等县。

2.2.2 海阳庙历史沿革

（1）海阳庙始建于唐代，宋代时期赐名灵泽庙，明代更名为龙母庙，清代海阳庙，民国时期改称为明心寺。

（2）今存明心寺为清代所建，据记载，明心寺曾在“文革”时期中遭破坏。

（3）紧临明心寺的灵泽庙为民国时期所建。

（4）海阳山北麓的摩崖石刻共有六方，最早篆刻于宋代时期，最晚篆刻于 1939 年抗日时期。

（5）1992 年留寺神职人员主持集资修葺并举行佛像开光大法会。

（6）2000 年 7 月广西壮族自治区人民政府将海阳庙公布为第五批自治区级文物保护单位。（桂政发〔2000〕37 号）。

2.3 历次维修情况

（1）寺庙曾在“文革”时期中遭破坏，1992 年留寺神职人员主持集资修葺。

（2）建筑多年来均由当地居民、寺庙信众进行日常简单维护，没有具体修缮记录。

（3）海阳山摩崖石刻未曾开展过任何修缮保护工程。

2.4 价值评估

2.4.1 历史价值

海阳山北麓岩石上有摩崖石刻 6 方：其一，宋淳熙十四年静江府府学教授陈邕撰并书，进士秦焯石刻《海阳山灵泽庙之记》，详细记载了海阳山的历史沿革及范成大奏请敕封海阳山神、灵庙额的经过，其二，宋代摩崖石刻“湘漓二水之源”，六个大字为行书，字径 28 厘米。其三，宋淳熙六年书法家、岳阳太守马子严撰并书的《祈雨记》，该壁书记载了马子严祈雨和寻找庙的敕额经过。其四，民国十七年灵川县知事

陈美文撰写《禁止开凿海阳山岩石》碑文。其五，1938 年蒋柱南诗刻。其六，1939 年郑丙笋诗刻。后两方均为抗日战争时期到过海阳山的国军将官题咏。

海阳山摩崖石刻历史悠久，文化渊源流长，是灵川县各代重要历史事件的见证，对研究桂林地区历史文化具有重要的历史价值。

2.4.2 艺术价值

海阳山摩崖石刻既有楷书字体，也有行书字体，作为历史上杰出的人工创造物，能够反映个体或群体的创造力与精神追求。宋代摩崖石刻“湘漓二水之源”，六个大字即为行书，字径 28 厘米。字体优美，苍劲有力，极富表现力，展现了古代桂林地区摩崖石刻的刻画内容和刻画风格，具有丰富的艺术价值。

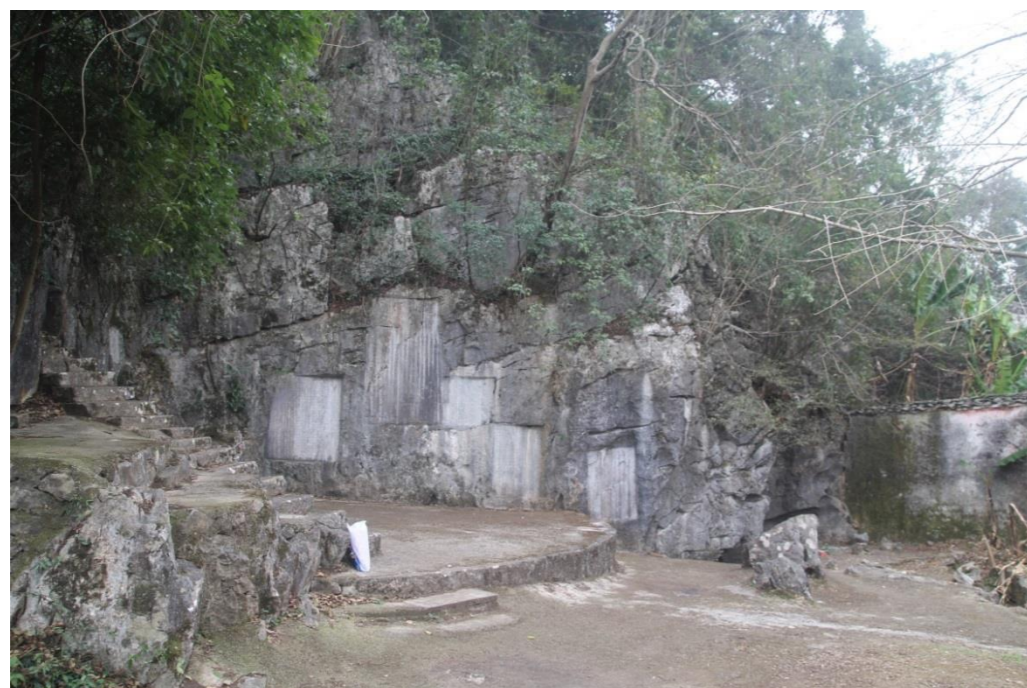


图 2.4-1 海阳山摩崖石刻全景

2.4.3 社会与文化价值

这些石刻对研究灵川民俗、文化及雕刻艺术提供了重要的历史实物资料，是桂林地区社会与文化生活的反应。同时，依托于海阳庙文物保护区的建成，改善了海阳山

摩崖石刻周边环境的同时，满足了市民对优美生态需求的同时丰富了灵川县人民群众的生活内容。在海阳山观赏着这些珍贵的石刻、古老的庙宇的同时，它们真切地展现在眼前，让人仿佛穿越到了唐朝，呼吸着上千年前的空气，感受几个世纪前的文化气息。在漫长历史中，海阳山摩崖石刻承载着厚重的文化，见证万盛沧海桑田的变迁。

三、区域环境条件

3.1 气象条件

桂林市灵川县区属亚热带湿润气候区，具有副热带东亚季风特点，气候温和，雨量充沛，四季分明，大陆性季风气候明显，表现为春早、夏热、秋阴、冬暖。春季气温变化大，盛夏炎热、伏旱偏重、强对流天气频繁、局部风雹雷雨多，秋季日照少、阴雨时间长，冬天湿度小、霜期短。全县总体多云日照少，境内各地光、温、水有明显的地区差异。

3.1.1 气温

2006~2020 年，历年平均值为 18.7℃。最冷年 1984 年为 17.9℃，最暖年 1990 年为 19.3℃。极端最高为 38.5℃，出现在 1963 年 9 月 3 日，一般为 36℃~37℃。极端最低为 -5.1℃，出现在 1963 年元月 4 日，大部分年 -1~2℃。1~2 月为县境寒冷月份，气温降至最低，月平均值为 7.8℃，月平均值最低 2008 年为 3.4℃。2 月份平均气温比元月份高 1℃左右。3 月份，气温逐渐上升，但日平均温度通过 12℃还不十分稳定，且稳定通过 12℃日期也有迟早之差，历年平均为 3 月 24 日；最早年为 2011 年 3 月 5 日，最晚年为 2007 年 4 月 14 日。5 月份气温大幅度上升，日平均气温 20℃以上；有早有迟，最早年为 2013 年 5 月 3 日，但也有部分年份 5 月份日平均温度全无低于 20℃的；最晚年 2015 年 5 月 22 日才稳定通过 20℃。6 月份历年平均温度比 5 月高 3~4℃，

7、8 月月平均温度在 28℃左右，极端最高于晴天一般都在 35℃以上。9 月下旬气温逐步下降，若遇冷空气入侵则下降明显；10 月上、中旬下降更为显著，常出现寒露风天气（日平均气温低于 21℃），11、12 月气温大幅度下降，有时出现初霜、初雪、冰冻等。

表 3.1-1 灵川县累年气温表

2006-2020 年平均气温及极端气温表 单位：℃																	
年份	全年平均	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年极端最高气温	日期日/月	年极端最低气温	日期日/月
2006	19.0	7.5	11.0	11.8	18.6	22.5	26.8	28.2	28.2	26.5	20.5	15.2	10.7	37.5	19/7	-2.3	28/12
2007	19.2	8.8	9.3	10.8	20.6	22.4	25.4	27.4	29.3	26.6	20.4	16.8	12.5	37.4	5/9	-0.2	15/1
2008	18.7	6.6	11.4	13.4	18.6	22.4	26.1	27.1	28.1	25.5	19.6	15.3	10.3	36.4	2/6	-0.8	16/1
2009	19.0	9.3	8.9	12.0	20.1	24.5	26.1	27.3	26.9	24.6	18.9	15.3	11.7	36.9	3/7	-0.5	21/1
2010	19.1	7.6	10.1	13.3	19.1	23.3	26.5	28.2	27.4	25.9	21.5	16.0	10.7	37.9	31/7	-0.3	5/1
2011	18.8	7.4	9.4	11.7	16.5	22.2	26.5	27.1	27.2	26.6	21.9	15.9	12.3	37.3	26	-1.2	20/2
2012	18.9	9.8	10.6	15.3	18.7	24.0	25.8	26.2	27.6	22.8	20.8	15.0	9.6	36.0	1/8	0.7	10/1
2013	19.8	6.5	10.5	12.3	21.7	23.2	25.5	27.8	29.0	26.5	23.4	17.7	12.9	37.8	22/8	0.0	19/1
2014	19.5	9.8	12.7	13.2	19.7	22.5	27.0	27.6	27.1	25.8	21.2	15.8	11.1	36.3	29/7 13/9	-2.8	23/12
2015	18.7	8.0	7.6	13.8	18.4	23.6	26.1	29.0	28.0	25.0	20.2	13.3	11.6	38.8	17/7	-0.4	31/1 1/2
2016	19.2	8.6	10.4	14.9	18.1	23.5	26.0	28.3	27.5	26.4	22.2	16.1	8.3	36.6	5/7	0.1	29/12
2017	19.3	11.1	12.3	15.1	19.4	23.0	26.9	27.6	26.4	24.5	20.0	16.3	9.2	37.2	14/7	-1.7	27/12
2018	19.5	9.0	11.4	13.3	19.6	23.0	25.9	29.6	29.0	25.9	20.5	15.8	10.4	39.5	23/7	-1.5	7/1
2019	19.4	7.9	12.4	13.3	20.8	22.9	26.5	26.5	27.8	26.1	21.5	16.7	10.6	37.8	1/7	-1.2	21/1
2020	19.1	6.1	6.2	12.6	20.3	25.2	26.5	28.9	27.7	26.6	21.6	17.5	9.4	38.5	12/8	-0.9	14/1
平均值	19.1	8.3	10.3	13.1	19.3	23.3	26.2	27.8	27.8	25.7	20.9	16.0	10.8	—	—	—	—

3.1.2 降雨

境内主要受海洋暖湿季风影响，雨量比较充沛，历年降雨量平均值为 1932.9 毫米，年降雨量最多为 2477.5 毫米（1968 年），年降雨量最少为 1543.2 毫米（1966 年），最多年与最少年相差 900 毫米。历年月降雨量最多为 1978 年 5 月，多达 813.0 毫米，最少 1987 年 11 月只有 0.2 毫米。降雨量具有单峰型特点，5、6 月为全年高峰期。12 月至次年元月为少雨期。县内各地降雨量，各有差异。东南部大圩、潮田、海洋、大境等乡镇，因地处背风面，气流下沉，降雨量偏少。中部、西北部，特别是青狮潭、九屋、潭下等乡镇，地处迎风面，加上地形的峪谷效应，有利气流辐合上升，易于成云致雨，降雨量比其它乡镇偏多，为县境降雨中心。

表 3.1-2 灵川县降雨量特征值表

2006-2020 年灵川县降雨量特征值表			
年份	降雨径（毫米）	最大一天	
		出现时间	降雨量
2006	1656.7	6月7日	132.7
2007	2172.9	6月17日	212.4
2008	2792.7	6月18日	185.7
2009	2477.3	6月13日	311.1
2010	1598.0	6月15日	106.3
2011	1904.1	4月19日	129.6
2012	2234.3	5月16日	141.8
2013	2214.7	6月24日	176.7
2014	2235.2	7月11日	207.4
2015	2009.8	6月9日	101.4
2016	1666.5	5月25日	101.8
2017	2581.5	6月15日	155.0
2018	1807.3	5月15日	139.1
2019	2041.0	7月11日	124.2
2020	1877.1	6月19日	141.9

注：表中数据由县气象局提供

3.1.3 风

县境终年受季风影响。历年 10 月至次年 3 月，盛吹东北风；4 月至 9 月，盛吹偏南风。年平均风速为 3.0 米每秒。12 月至次年 2 月，月平均风速 3.8~4.0 米每秒。风向频率最多的是偏北风，历年 10 月至次年 2 月风向频率都在 42% 以上。1964 年 2 月东北风频率达 80%，风速为 5.4 米每秒。在恶劣天气影响下，有时风速大于或等于 17 米每秒。据县近 28 年资料统计，共出现大风 179 次。最多是 4 月份出现 34 次，最少 9 月份出现 4 次。风速最大一次出现在 1965 年 7 月 26 日，达 40 米每秒，相当于 12 级。月大风最多的是 1966 年 3 月和 1967 年 4 月，每月达 5 次，以寒潮大风最多，县范围均有出现；雷雨大风次之，通常在局部地区发生。

3.2 地形地貌

3.2.1 区域地形地貌

县境地貌呈马鞍形分布。西北重峦叠嶂，溪河纵横交错，东南崇山峻岭，河谷切割明显。由于地质构造与岩层分布不同，将灵川县域明显分割成三条川：海洋山与尧山之间为东川，尧山与长蛇岭之间为中川，长蛇岭与越城岭余脉之间为西川。西北部的县境最高峰锅底塘顶与东南方的县境第二高峰崧坪龙两山对峙、遥相呼应，形成灵川独特的地形地貌。灵川属桂林岩溶地貌区，境内山峰多由石灰岩组成。由于长期受雨水侵蚀，形成无数溶洞，故灵川流传“有山必有洞，有洞就有水”之说。据调查，县境较大的溶洞有 20 余处，其中较著名的有 6 处。位于定江镇的太平岩，洞长 1300 余米，宽 10-25 米，最宽处达到 50-60 米，高约 14 米，洞底面积 2.12 万平方米，是县境洞体最大的溶洞。而龙岩因岩壁常受山洪冲蚀，形成片片鳞状，如“龙鳞”斑驳，倒映水中，水流波移，如龙游动，是地下河袭夺地表河的典型实例。

县境地貌呈马鞍形分布。西北重峦叠嶂，溪河纵横交错，地属公平乡、兰田瑶族乡、九屋镇、青狮潭乡和潭下镇；东南崇山峻岭、沟谷切割明显，有“兴安高万丈，海洋在天上”之说，地属海洋乡、潮田乡、大境瑶族乡、灵田乡和大圩镇；县境中部，地势较为平坦，有“灵川平原”之称，地属三街镇、灵川镇、定江镇。由于地质构造与岩层分布不同，将县域明显分割成三条川：海洋山与尧山之间为东川，尧山与长蛇岭之间为中川，长蛇岭与越城岭余脉之间为西川。位于西北部兰田瑶族乡境内的县境最高峰锅底塘顶(海拔 1722.40 米)和位于东南方潮田乡境内的县境第二高峰崧坪龙(海拔 1701 米)，两山对峙、遥相呼应，形成灵川独特的地形地貌。

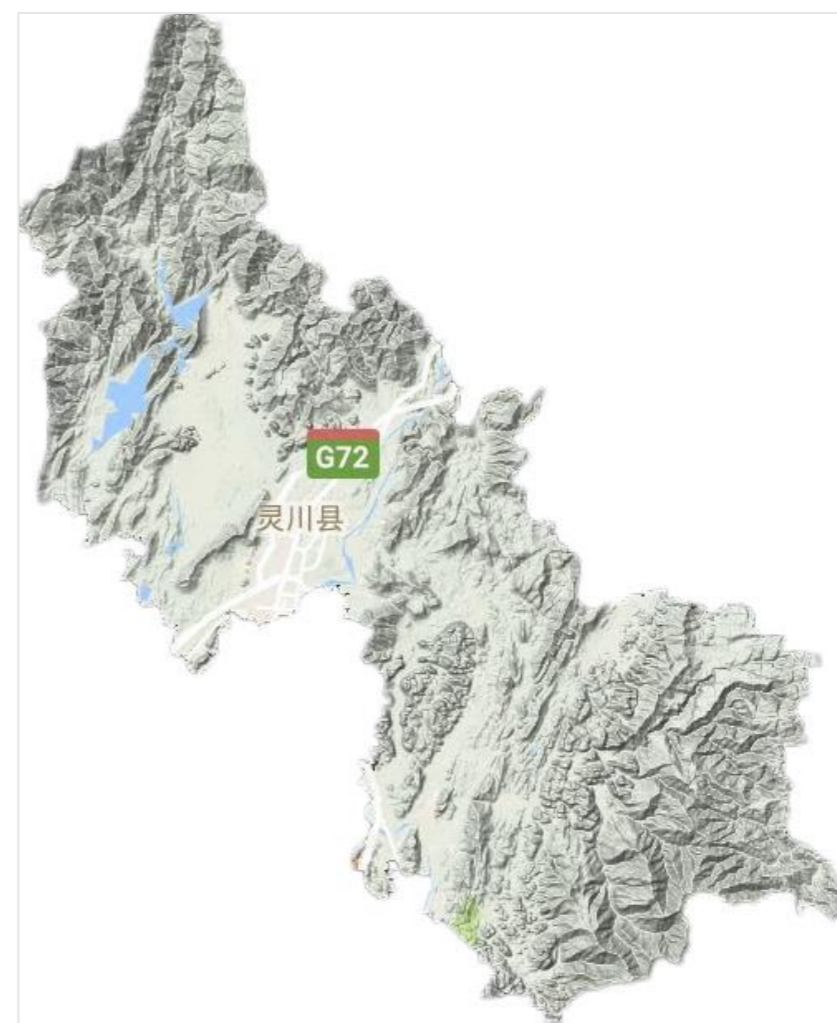


图 3-1 灵川县地形地貌图

县境地貌类型有山地、丘陵、台地、平原等，其分布状态大致为“八山半水分半田”。

(1) 山地

面积 946.66 平方千米，占全县土地总面积的 41.53%，主要分布在县境西北部的公平乡、兰田瑶族乡、青狮潭乡、九屋镇，东南部的海洋乡、潮田乡、灵田乡、大境瑶族乡和大圩镇。

(2) 丘陵

海拔 250~500 米，相对高度不超过 200 米，坡度较缓，面积 844.27 平方千米，占全县土地总面积的 37.04%，主要分布在海洋乡、潮田乡、灵田乡、大圩镇、九屋镇、潭下镇。

(3) 台地

包括阶地，海拔 200~300 米，平均坡度 7°~15°，相对高度 30~60 米。面积 250.78 平方千米，占全县土地总面积的 11%，全县各乡镇均有零星分布。

(4) 平原

包括河流冲积平原、洪积冲积平原、河谷平原等，海拔 100~200 米，平均坡度 3°~7°，相对高度小于 10~30 米。面积 192.71 平方千米，占全县土地总面积的 8.45%，主要分布在三街镇、灵川镇、定江镇、潭下镇、大圩镇、九屋镇、青狮潭乡、潮田乡的漓江、甘棠江、桃花江、潮田河等河流两岸。还有 45 平方千米（占全县土地总面积的 1.97%）为水域面积。

(5) 岩溶

县境岩溶地貌分布较广，全县各乡镇均有分布，面积 1201.86 平方千米，占全县

土地总面积的 53.25%。

(6) 山脉

灵川县境内有两大山系余脉：西北部山脉属越城岭山系余脉，为县境西北部屏障，分为三支。西支，为北西-南东走向，沿县界分布，其西北的锅底塘顶为灵川县与龙胜族自治县分界，境内则由兰田瑶族乡过烟棚界入公平乡境，再经鸡笼山、大黄山、磨石岭，进入临桂县庙岭镇境。中支，为北向南西走向，自九屋镇才喜界往东而南，经该镇东源、西岭、黄梅 3 个村委东折，经石洞村委沿青狮潭水库东岸南下，再经潭下镇蔡岗、合堡 2 个村委进入定江镇，经该镇金陵村委入临桂县境。东支，即长蛇岭支系，北起潭下镇老街村委山口自然村，南至定江镇法源村委山脚自然村，土山绵延，为桂林市城区北郊西部屏障。东南部山脉为都庞岭山系余脉。为县境东南部屏障，分为二支，皆北东—南西走向。东支，由东山东南至枫木界，为灵田乡正义村委小乐自然村与兴安县高尚镇东源村界，至老雷公殿，过海洋乡水头村委岐岭，下延黄泥岭，折而向南，沿灌阳县、恭城瑶族自治县界陂陀而下。西支，自东山沿漓江东岸逶迤南下，至尧山入桂林市城区。

(7) 溶洞

灵川属桂林岩溶地貌区，境内山峰多由石灰岩组成，由于长期受雨水侵蚀，易形成溶洞，故灵川流传“有山必有洞，有洞就有水”之说。据调查，县境较大的溶洞有 20 余处，其中比较著名的有 6 处。

3.2.2 场地地形地貌

海洋乡境内大部为山前平原，海阳山崖壁陡峭，岩石裸露，具典型的石灰岩喀斯特地貌发育。海阳山摩崖石刻位于海阳庙位于灵川县海洋乡大庙塘村委大桐木湾村海

阳山北麓，属丘陵地貌，海拔约 306 米，周围多以丘陵、平原为主，地势南高北低，南临龙母山，另外 3 面均为平原地带。

海阳山摩崖刻所在海阳山，山体节理裂隙、溶蚀裂隙极其发育，山体上植被生长茂盛。周边场地宽阔平整，地形起伏不大，属岩溶平原场地，多被开垦为耕地，种植有农作物，修建有大量的民居，人类生产、生活活动频繁。

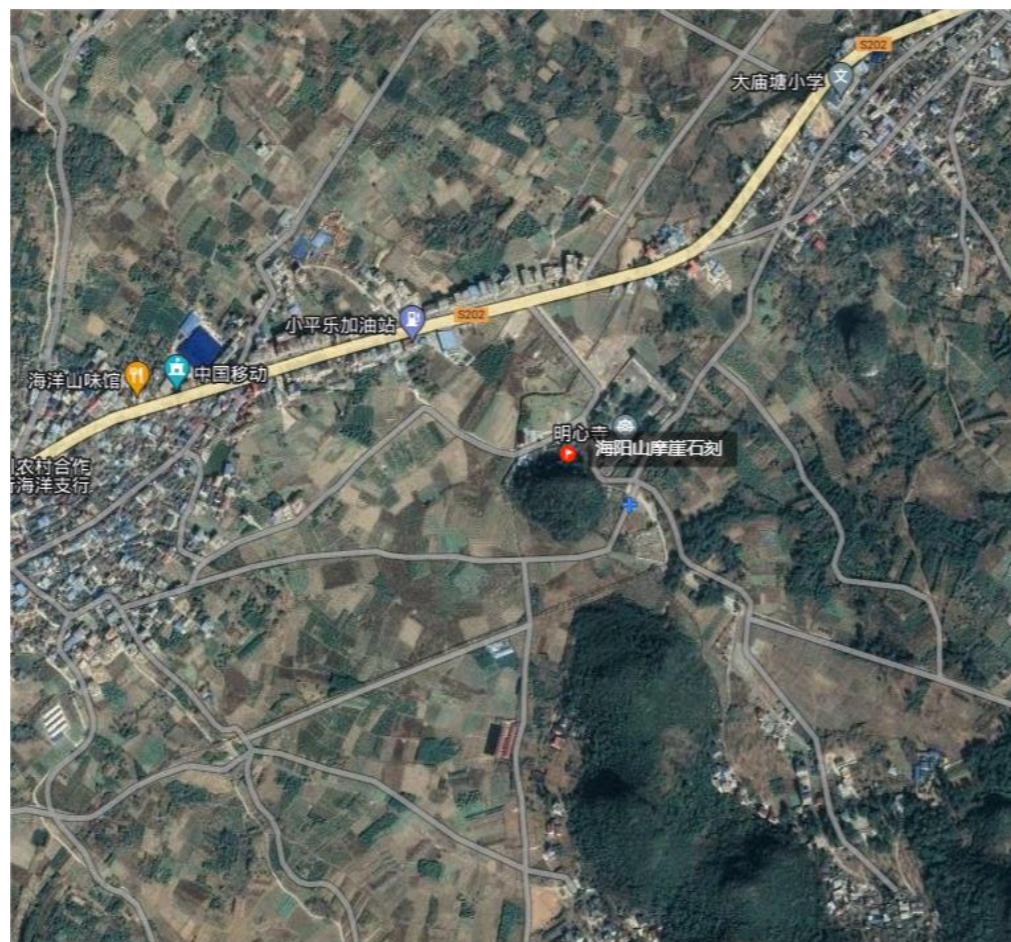


图 4-1 海阳山摩崖石刻区域地形地貌卫星图

3.3 地层岩性

3.3.1 区域地层岩性

境内以沉积岩居多，岩浆岩为少，按出现先后为序如下：

丹洲群-为灵川最古老的地层，出露于九屋乡白崖岭附近，面积不足 1 平方公里，为变质的砂质页岩夹钙质条带组成。成为高山之巅。

震旦系-围绕马海背斜丹洲群分布，境内仅见于蓝田堡北白崖涪至汀江屯一带，所占面积约 20 平方公里。下部为含砾石灰岩，上部为页岩和硅质岩，沉积物具有浅海环境特点，岩层总厚约 1600 米。

寒武系-居于震旦系之上，岩层出露蓝田堡至大屯一带，面积约 120 平方公里。下部为一套黑色炭质页岩所组成，总厚 300 余米，上部多为细灰岩，页岩次之，偶夹灰岩，总厚千米左右。东南大境乡宝塔龙一带，寒武系也有分布，面积约 35 平方公里，厚度 3600 米左右。

奥陶系-县境分布于竹山铺左边，面积 120 平方公里，常有铅锌矿化和灰岩，厚度达 3000 余米。

下志留统-田林口组均为黄绿色灰岩。据现今出版的兴安幅 1: 20 万地质图，于凉风桥北鸟崖岭附近，中、上奥陶统出露范围相当宽广。

泥盆系-构成境内峰林地形的石灰岩均属泥盆系。面积不下于 1500 平方公里

石炭系-分布于甘棠渡、定江圩、大面圩、灵田圩、熊村圩与大圩一带，组成向斜构造核部岩层。大面、花江一带分布三段：下段为灰白至浅灰白色灰岩，有呈肉红色厚层块状，分布于漓江边，厚约 30 米；中段以泥灰岩为主，夹薄层至中层泥质灰岩和白云岩透镜体，见于金家村至姚家村一线，厚 70~100 米；上段为泥质灰岩夹泥灰岩和硅质层，厚度大于 100 米，见于花江至粑粑厂一线。在海洋一带，岩关组为墨色钙质页岩、泥岩、泥灰岩夹燧石条带，总厚度大于 100 米。下石炭统上部只见于大圩附近，厚度大于 1233 米。

第四纪-主要分布于漓江河谷，以红土砾石层为主，形成岗垅状地形，从兴安溶江到灵川三街，再南近县城。红土砾石层集中分布于三个高度：50~60 米高砾石层为中更新世初期、中期沉积；甘棠渡一带 30~40 米高砾石层为中更新世末期形成；河谷平原 15~25 米高砾石层可能为晚更新世初期沉积；7~10 米高河流阶地则为晚更新世晚期或全新世早期产物。

3.3.2 场地地层岩性

根据现场地质调查可知，海阳山摩崖石刻区域范围已揭露基岩地层全部为沉积岩，保护工程范围内出露的地层由老到新简述如下：

1、泥盆系桂林组灰岩（D_{3g}）

根据中华人民共和国地质图 G-49-27 桂林幅，海阳山摩崖石刻所依附载体主要由泥盆系桂林组灰岩（D_{3g}）灰岩组成（图 3.3-1），中晶结构，中厚层~厚层构造，主要矿物为方解石，另外含少量的菱锰矿。岩石结构致密，孔隙率极低，解理面较发育，以粒屑结构为主。

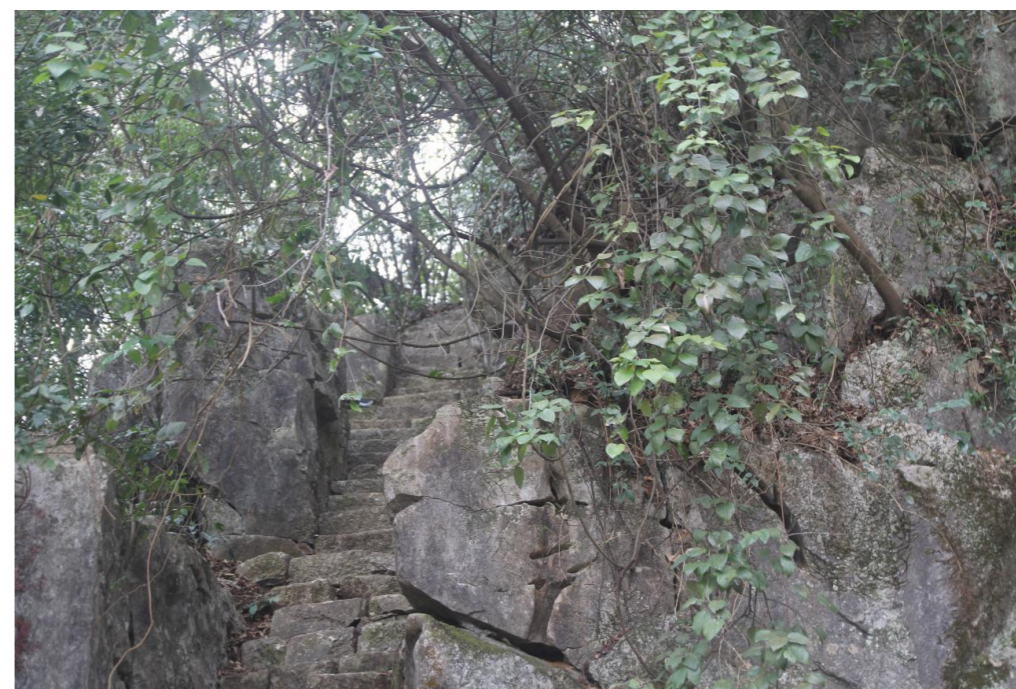


图 3.3-1 场地揭露基岩

2、第四系全新统（Q₄）

残坡积层(Q₄^{el+dl})，主要分布调查崖壁坡体上及坡脚部位，厚度一般约 0.2~1.2m，坡顶及坡脚部位厚度相对较大。该层主要以粉质黏土为主，局部夹杂有少量的碎石，状态为稍密~中密，碎石粒径 2cm~10cm，棱角状，原岩为强风化灰岩，表层富含植物根系和腐殖质。

3.4 地质构造

3.4.1 区域地质构造

县境地质构造复杂，具有“背斜成山，向斜成谷”特点。西北为越城岭复背斜，东南为海洋复背斜。两者之间为湘桂夹道，可称“灵川复向斜”，总体呈北东走向。

越城岭复背斜-主要背斜是马海背斜，核部岩层为板溪群；长蛇岭背斜，核部为下泥盆统紫色红灰岩。大庙圩向斜，核部为下石炭统岩关组，两翼为泥盆系灰岩和灰

岩。

海洋复背斜-境内主要由三个背斜和相间的两个向斜构成。老厂穹隆状背斜，位于最东部，其核部为寒武系；长山坡背斜位于中间，核部岩层为中泥盆统应堂组。冷水田-坪山向斜位于两背斜之间，核部为下石炭统岩关组。尧山-金竹山背斜位于最西部，核部为中泥盆统应堂组碎屑岩。灵田街-大圩向斜位于尧山-金竹山背斜与长山背斜之间，核部出露下石炭统大塘组沉积。

灵川复向斜-由二个向斜和一个极狭窄背斜组成，总体呈北东走向。其中，甘棠渡-大面圩向斜在东北部，核部为下石炭统岩关组。定江街向斜在西南部，核部亦为下石炭统岩关组。粟家背斜位于两者之间，为上泥盆统桂林灰岩和融县灰岩，背斜上泥盆统南延桂林市区。

断裂构造“灵川断层”位于长蛇岭东麓，介于长蛇岭与盘古庙山之间，为县境最重要的区域性断层。全长数百公里，自全州、界首西南经兴安永兴街与溶江而入灵川；于定江街西侧延入桂林。县境跨度约 30 公里，呈北东 45 度走向。断层分布于湘桂夹道西北侧，切断数列背斜与向斜，错断地层有奥陶系、泥盆系、石灰系和自垩系，并多处被第四纪掩埋。断层面倾向西北，倾角在 30~60 度之间，且西北盘向北东方向逆冲，断层具平移兼逆冲性质。

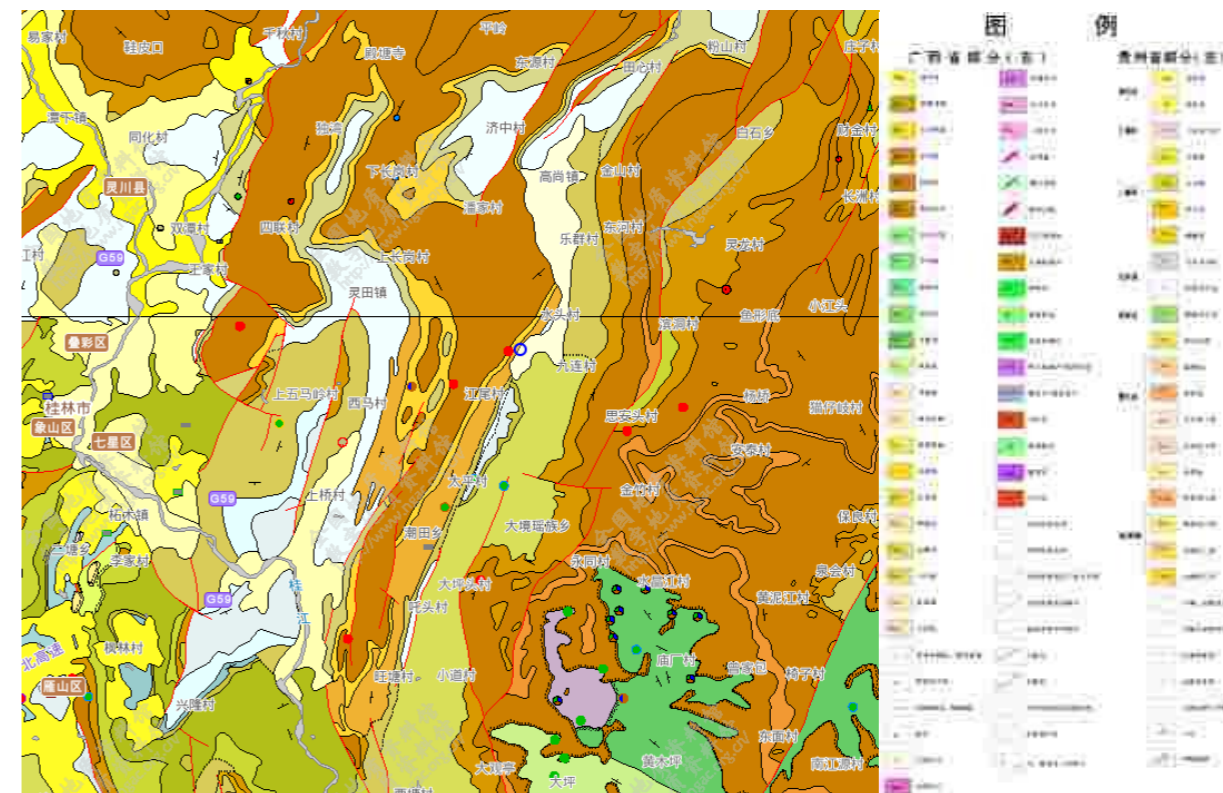


图 3.4-1 灵川县区域地质构造图

3.4.2 场地地质构造

区域内区内褶皱为海洋山复背斜，主要由 3 个背斜和相同的 2 个向斜构成：老厂穹隆状背斜，位于最东部，核部为寒武系；长山坡背斜，位于中间，核部岩层为中泥盆系应堂组；冷水田—坪山向斜，位于上述两背斜之间，核部为下石炭系岩关组；尧山—金竹山背斜，位于最西部，核部为中泥盆系应堂组碎屑岩；灵田街—大圩向斜，位于尧山—金竹山背斜与长山坡背斜之间，核部出露下石炭系大塘组沉积。总体呈北东走向。

海阳山场地区域范围内未见明显褶皱，周边及场地内无明显断裂构造通过，并且受区域大构造影响甚微，场地属构造稳定区域。

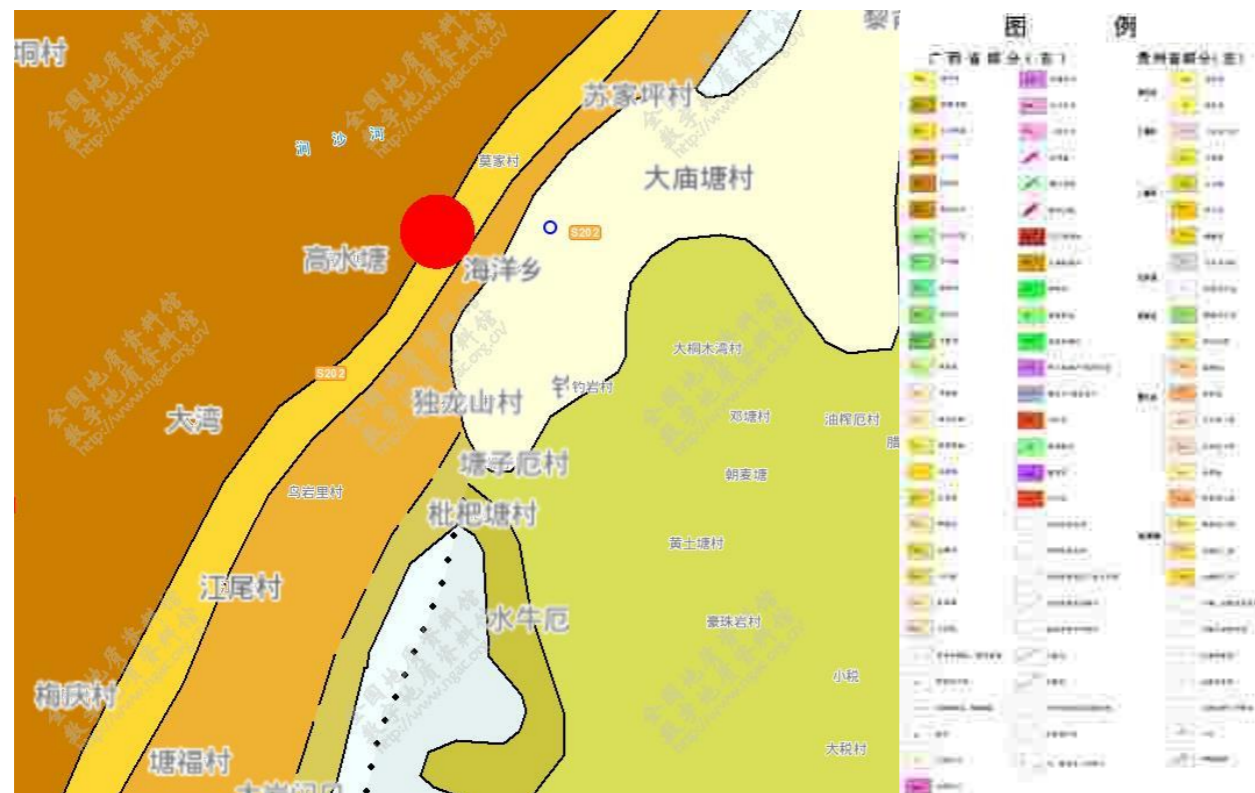


图 3.4-2 海洋乡区域地质构造图

3.5 水文地质条件

灵川县水资源丰富。集雨面积 10 平方千米以上的河流 66 条，总长 796 千米，其中集雨面积 50 平方千米以上的河流 19 条，九层镇境内的东江瀑布总长 513.20 千米，年径流总量 50 亿立方米，河网密度 0.35 千米每平方千米。地下水资源遍布全县，许多农村村庄附近随处挖掘 4 米以上就有水冒出。境内已发现泉水 386 处和 2 条较大的地下河，据初步勘查，全县地下水蕴藏量 3.23 亿立方米。县境内河流多发源于东西两侧的海洋山、越城岭。

3.5.1 地表水

灵川县内河流分属珠江、长江两大水系。以珠江流域为主，按农业区划资料，其流域面积 2178.29 平方公里，占全县总面积 96.28%；长江流域 83.9 平方公里，占

3.72%。漓江纵贯南北，为广西西江一级支流，是县内最大的河流。漓江支流众多，于东、西两侧，呈枝状分布；河流发源地及河床多为岩石、卵石、细沙，故其水色澄碧、清澈。海洋河属长江流域，自县境东北流向兴安县境。

河流名称	流经乡镇	县境流域面积 (平方千米)	县内长度 (千米)	县内落差 (米)	平均比降	年平均最大流量 (立方米每秒)	年平均最小流量 (立方米每秒)	多年平均流量 (立方米每秒)
漓江	三街镇、灵川县、大圩镇	2194.63	45.00	35.7	1/1260	134.82	72.19	100.5
小溶江	三街镇	23.60	9.20	62.2	1/148	22.09	11.99	19.8
潯江	九屋镇、三街镇	58.85	20.18	699.6	1/29	2.92	1.56	2.7
甘棠江	青狮潭、九屋镇、潭下、灵川	767.22	60.00	1485.9	1/17.7	16.42	10.63	11.3
东江	九屋镇、青狮潭乡	152.90	22.60	1406.0	1/16	8.31	6.27	8.2
兰田河	兰田瑶族乡	81.73	15.40	879.9	1/17.5	6.22	3.62	4.2
七都河	兰田瑶族乡、公平乡	76.25	14.70	845.0	1/17.4	7.07	2.96	5.4
社江	九屋镇	79.28	21.30	634.0	1/33.6	4.92	2.67	2.9
绿宝河	潭下镇、灵川县	96.29	17.00	524.0	1/32.4	5.37	3.35	3.5
桃花江	公平乡、定江镇	119.23	10.60	605.0	1/17.5	17.96	11.18	12.2
滄江	灵田乡、大圩镇	89.08	16.30	314.2	1/52	4.10	2.24	2.8
黄沙河	灵田乡、大圩镇	207.45	48.71	882.0	1/55	9.88	4.87	7.3
润沙河	海洋、灵田、潮田、大圩	129.18	32.71	853.0	1/38	5.61	3.15	3.7
潮田河	海洋、大境、潮田、大圩	450.14	44.20	1004.0	1/44	5.85	3.28	13.3
大江源	潮田乡、大境瑶族乡	148.48	23.90	1325.7	1/18	3.41	1.91	2.3
四源河	潮田乡	83.50	8.47	1459.5	1/5.8	2.94	1.88	2.4
黄泥江	大境瑶族乡	82.78	22.80	668.5	1/34	3.97	2.23	2.4
松江	海洋乡、大境瑶族乡	78.44	18.50	785.0	1/23.6	3.74	2.01	2.7
海洋河	海洋乡	84.79	11.21	733.5	1/15.3	2.51	1.41	2.7

注：1. 漓江流域面积包括四源河和黄泥江的流域面积。

图 3.5-1 灵川县河流基本情况特征表

海洋河又称海阳江，发源于县境海洋山龙门界西侧，源头海拔 1017.50 米，汇 3 条小溪至大江村成河。向北流，途纳小江、山背塘、穿岩与海洋诸水汇合后称海洋河，流经水头村委，至石堰湾自然村进入兴安县境后称湘江。灵川县境内河长 11.21 千米，流域面积 84.79 平方千米。河宽：田里村以上河段约 12 米，田里村以下河段约 20 米，河床为卵石夹泥沙。海洋河是县境唯一一条属于长江水系的河流。

3.5.2 地下水

灵川地处桂林复式向斜带，为地下水富集的蓄水构造，岩溶发育强烈，地下水资源较为丰富，境内共有泉水 386 处，已引用的有 69 处，多分布在灵田、海洋、潮田、大圩、定江、潭下、九屋、公平等石灰岩区。1984 年据中英专家联合考察，发现寨底和毛村两条较大的地下河。据广西地质部门勘测桂林市附近的灵川辖区，有矿泉水，优质水点近 10 处。

3.5.3 水质分析

本次勘察收集了场地地表水水样进行水质简分析，实验结果详见表 3.5-1。

表 3.5-1 水样检测结果

离子		mg/L	离子		mg/L
阳离子	Ca ²⁺	79	阴离子	Cl ⁻	9.77
	Mg ²⁺	33.58		SO ₄ ²⁻	244.70
	NH ₄ ⁺	0.40		HCO ₃ ⁻	233.05
	/	/		CO ₃ ²⁻	0.00
	/	/		OH ⁻	0.00
	统计	112.98		统计	487.52
分析项目		单位		数值	
总硬度		mg/L		182.93	
硬度		mg/L		335.62	
溶解性总固体（总矿化度）		mg/L		842.52	
游离 CO ₂		mg/L		24.55	
侵蚀性 CO ₂		mg/L		13.01	
PH 值		mg/L		6.52	

按照《岩土工程勘察规范》GB50021-2001（2009 版），按环境类型评价，海阳山摩崖石刻场地环境类别为II类，水对混凝土结构具有微腐蚀性；按地层渗透性评价，属 B 类评判标准，水对混凝土结构具有微腐蚀性，水对钢筋混凝土结构中钢筋具有微腐蚀性。

3.6 地震

3.6.1 地震活动

据《广西地质志》等文献记载，从明万历六年迄今的 412 年间，有过 3 级左右地震、地陷共 12 次。但危害不大。明万历六年正月十一日（1578 年 2 月 17 日），灵川冷水村地陷，震声如雷，深不可测。震中：桂林东郊冷水塘。震级：四又四分之三级(疑陷落地震)(冷水村、冷水塘实为一地)。万历廿七年仲秋(八月)(1599 年 9 月 19 日~10 月 18 日间)，在城乡各处俱有地震崩裂之异。震中：灵川。震级：四又四分之三级(疑是山崩)。万历三十三年六月(庚午)二十七日(1605 年 8 月 1 日)，“灵川六月(庚午)，社坛有声，地陷十余丈，深丈余。”震中：灵川。震级：地陷。天启二年(1622 年)，“四月大雷雨，五月北街地陷阔二丈余，深数尺”。清康熙四年(1665 年 8 月)地震。康熙廿四年十二月(1686 年 1 月 8 日)地震。震中：平乐附近。震级四又四分之三级。康熙卅四年正月初三日(1695 年 2 月 15 日)，早晨地震。震中：融水与柳城之间。震级：五又二分一级。乾隆廿三年(1758 年)地震。震中：临桂。震级：3 级。乾隆四十七年三月初一日(1782 年 4 月 13 日)地震，屋宇动摇有声，逾刻才定。震中：临桂。震级：3 级。咸丰七年春正月(1857 年 1 月 23 日~2 月 21 日间)，地震。震中：临桂。震级：3 级。光绪十五年八月(1889 年 8 月 22 日~9 月 24 日间)，灵川地震，九月又震。震中：灵川，震级：3 级(二次)。民国 7 年(1918 年)2 月 13 日，地震，四区大面

圩，五区灵田圩震甚。一区六、七段微动而已。震中：广东南澳(23°5'N；117°0'E)。震级：七又四分一级。

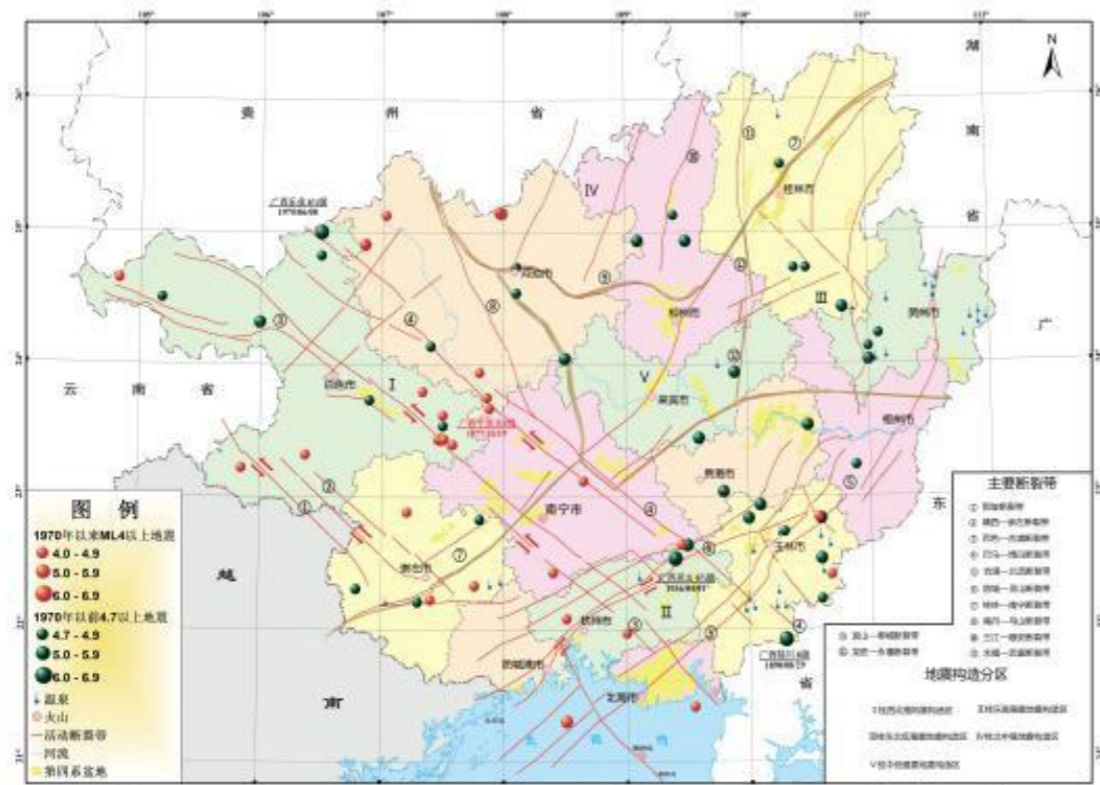


图 3.6-1 区域地震构造图

3.6.2 抗震区划

项目区地质构造简单，地震活动较少，对项目区影响甚微。按《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）附录 A.0.20 条之划分及《中国地震动峰值加速度区划图》（GB 18306-2015）规定，灵川县地震峰值加速度为 0.05g，对应地震基本烈度为VI度区，第一组，抗震设计特征周期为 0.35s。根据上述条件进行地壳稳定性划分，根据《活动断层与区域地壳稳定性调查评价规范》（DD2015-02）表 5~表 7 判断可知，场地区域属地壳稳定区。



图 3.6-2 地震动峰值加速度区划图



图 3.6-3 地震动加速度反应谱特征周期区划图

3.7 不良地质及特殊性岩土

本次工程地面勘察场地的不良地质现象主要为危岩体崩塌，根据现场实际情况进行了详细的勘测，具体内容详见现状勘察报告第四章部分内容。

本次勘察现场踏勘未发现软土、湿陷性土、膨胀土、红黏土等特殊性岩土。

3.8 岩石基本性质

3.8.1 岩石物理力学性质

泥盆系桂林组灰岩构成了海阳山摩崖石刻所依附载体，灰岩物理性质控制文物本体及其所依附载体的稳定安全性。本次工作在附近山体采取掉落的岩块进行物理力学试验。岩石试验结果见表 3.8-1，岩石属于坚硬程度属于较硬岩。

表 3.8-1 岩石物理力学性质

指标类别	单位	灰岩
岩石干密度	g/cm ³	2.64
岩石天然密度	g/cm ³	2.67

指标类别		单位	灰岩
岩石饱和密度		g/cm ³	2.72
比重			2.75
含水量		%	0.1
吸水率		%	0.18
饱和吸水率		%	0.26
总孔隙率		%	3.58
软化系数			0.77
单轴饱和抗拉强度		MPa	3.28
单轴抗压强度	天然	MPa	62.2
	干	MPa	67.9
	饱和	MPa	52.1
抗剪强度	饱和	MPa	C=2.36
		°	φ=40.2°
岩体结构面抗剪强度	饱和	摩擦系数 f	0.78
		MPa	13.2
		°	φ=38°

3.8.2 岩石微观结构特征

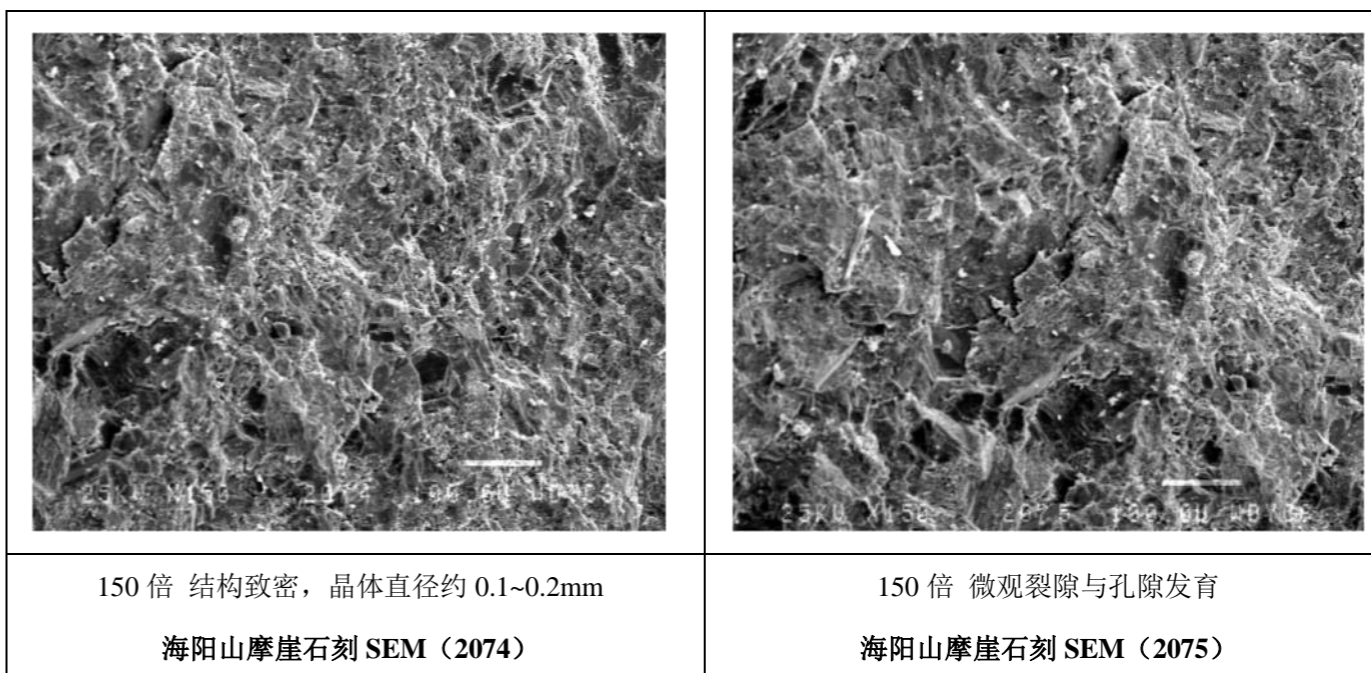
本次勘察对海阳山摩崖石刻区域灰岩的微观特征进行了 SEM 测试。从微观结构形态看，样品主要由方解石及白云石组成，方解石为主体。矿物晶形良好，解理面发育，岩石矿物颗粒直径约为 0.1~0.2mm 左右。岩石结构相对致密，但在颗粒之间仍然发育有粒间孔、晶间孔和裂隙，这些局部孔隙的张开度一般较小。沿上述孔隙发育有不同程度的溶蚀现象，溶蚀孔形状不规则，大小约为 1~20μm。

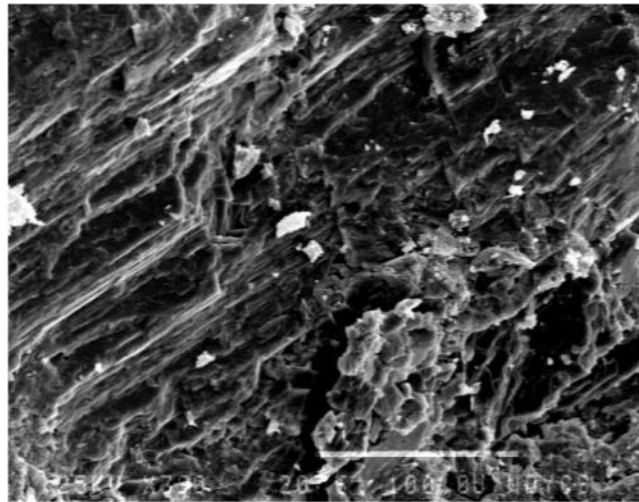
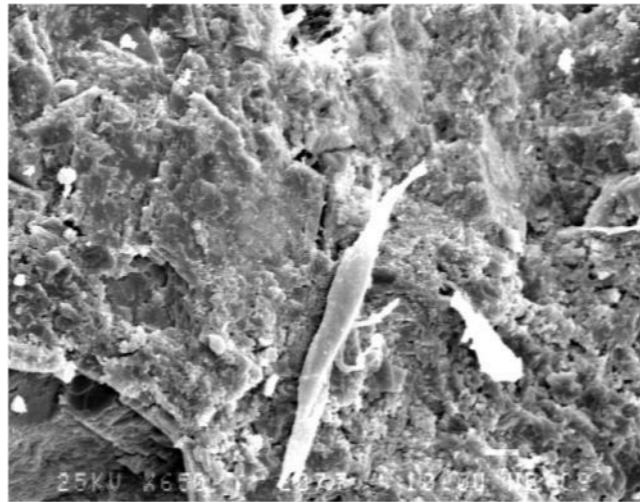
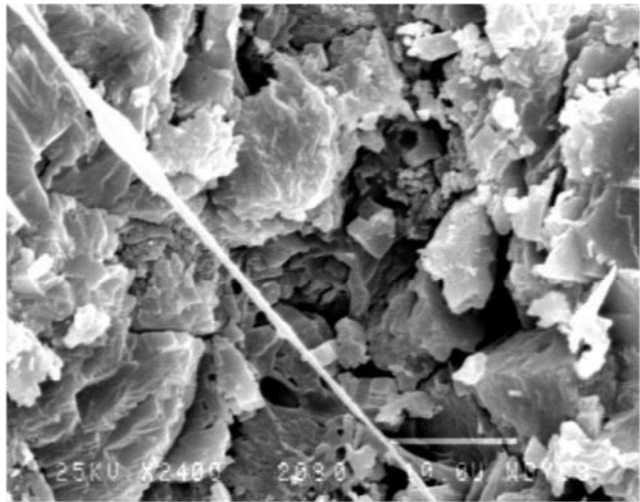
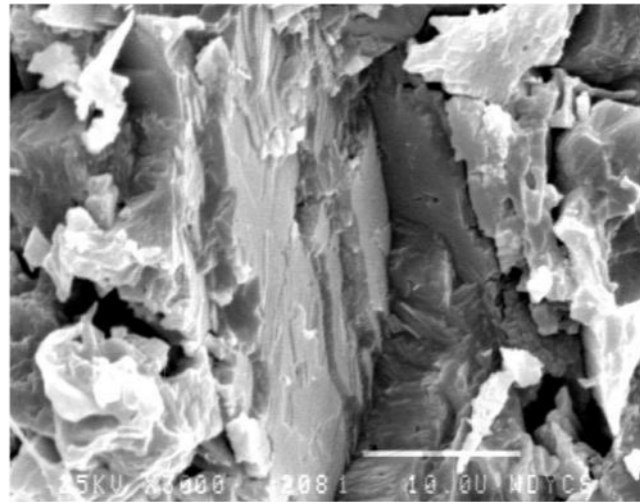
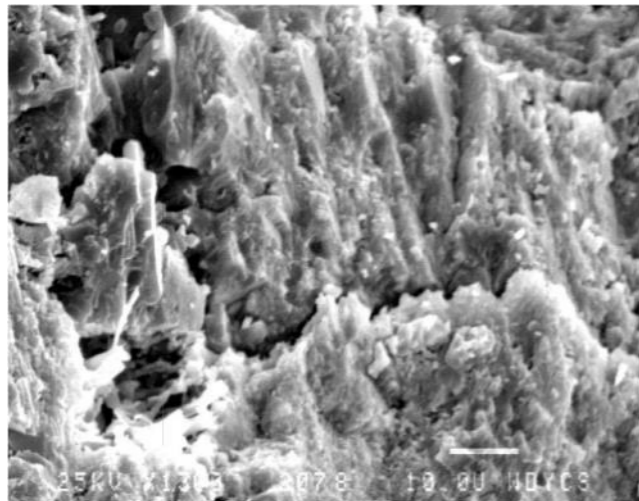
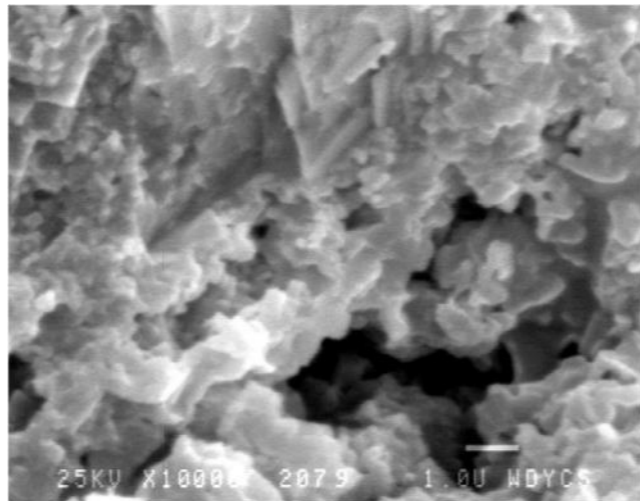
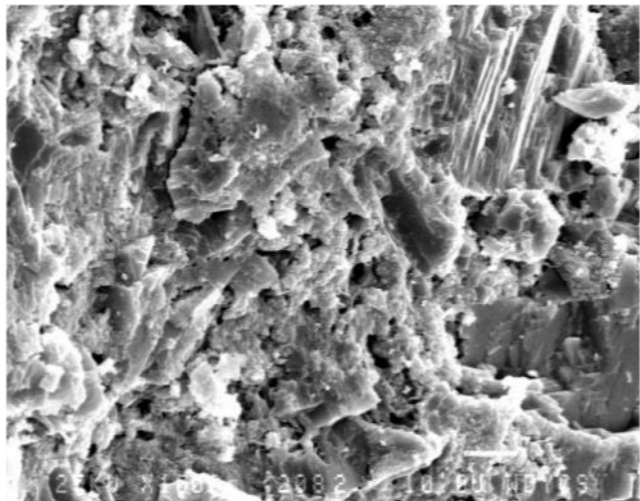
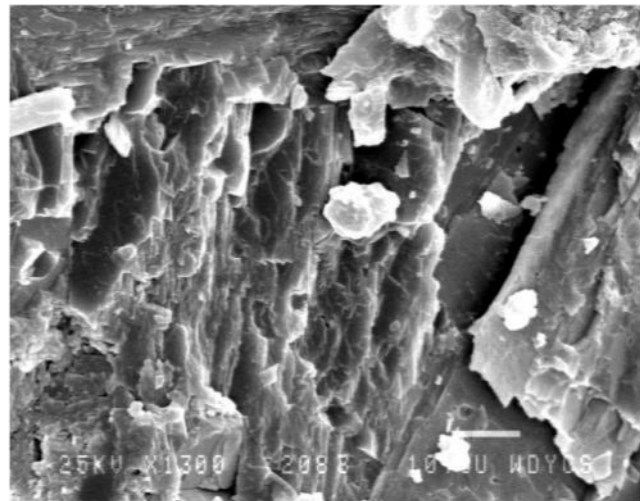
总的说来，海阳山摩崖石刻岩体的矿物成分主要为方解石，含少量白云岩，对

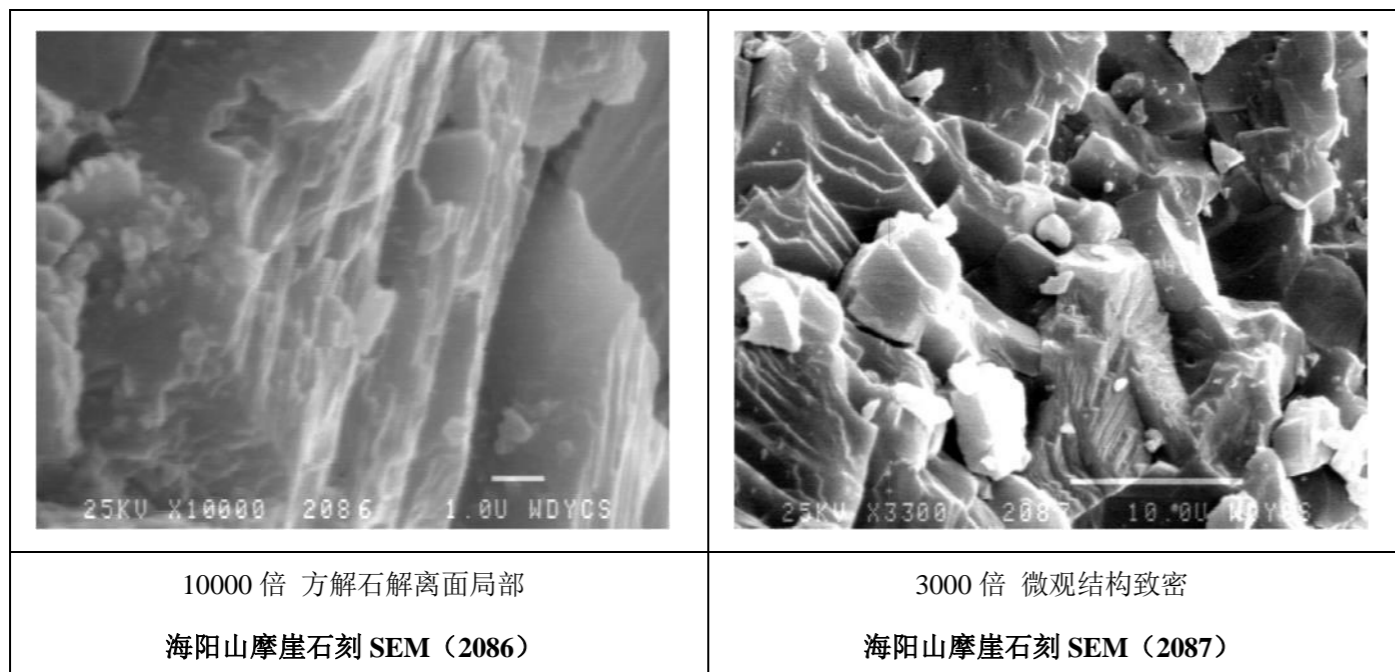
环境污染敏感。岩石的微观结构形态整体致密，但微观裂隙、孔隙发育，见溶蚀现象。

表 3.8-2 灰岩微观结构 SEM 测试成果表

底片号	倍数	描述	底片号	倍数	描述
2074	×150	结构相对紧密	2080	×2400	白云石、溶蚀孔
2075	×150	不规则孔隙	2081	×3000	溶蚀孔
2076	×390	解理	2082	×1000	表面溶蚀
2077	×650	溶蚀孔	2083	×1300	溶蚀孔和粒间孔
2078	×1300	方解石、白云石	2086	×10000	方解石解理面
2079	×10000	方解石	2087	×3300	结构致密



			
390 倍 方解石解离面，见少量溶蚀 海阳山摩崖石刻 SEM (2076)	650 倍 隙间及表面溶蚀 海阳山摩崖石刻 SEM (2077)	2400 倍 白云石及溶蚀空洞 海阳山摩崖石刻 SEM (2080)	3000 倍 解离面及附近溶蚀孔 海阳山摩崖石刻 SEM (2081)
			
1300 倍 方解石与白云石晶体 海阳山摩崖石刻 SEM (2078)	10000 倍 方解石晶形及微观溶蚀孔隙 海阳山摩崖石刻 SEM (2079)	1000 倍 表面溶蚀 海阳山摩崖石刻 SEM (2082)	1300 倍 隙间孔和粒间孔 海阳山摩崖石刻 SEM (2083)



四、危岩体病害现状及成因分析

4.1 整体保存现状

海阳山摩崖石刻所在岩洞崖壁陡倾近乎直立，天然坡度多在 80°以上，岩性为泥盆系桂林组灰岩，石刻主要分布在海阳山岩壁上。石刻所依附山体高约 40m，崖壁近东西走向，调查段长约 30m。根据现场调查显示，海阳山摩崖石刻发育病害类型主要有：（1）裂隙切割破坏；（2）危岩体崩塌病害。在长期自然因素作用下，海阳山摩崖石刻所依附岩体节理裂隙发育，裂隙类型主要有卸荷裂隙、层理裂隙和构造裂隙三种类型，裂隙之间相互组合切割，将岩石分割成多个块状体。

根据现场观察显示，裂隙还处于缓慢扩张、发展阶段；受裂隙切割破坏影响，岩体发育形成块状危岩体。危岩体在自然状态下处于基本稳定~欠稳定状态，在外界诱因和裂缝持续发展作用下，危岩体稳定性下降，有可能发生整体性的失稳崩塌，破坏崖壁岩体的整体性和完整性，威胁洞口区域平台上过往行人、游客和管理人员的生命

财产安全，危及下部石刻文物本体的安全。因此，亟需采取有效措施对该区域发育危岩体进行加固处理。

4.2 裂隙发育现状

4.2.1 裂隙调查分类

根据现场调查显示，海阳山摩崖石刻所依附岩体节理裂隙十分发育，裂隙类型主要为卸荷裂隙，其次为层理裂隙。崖壁上植被生长茂盛，部分裂隙受植物根劈作用影响较大。

1、卸荷裂隙

岩体发育的卸荷裂隙产生原因有以下三点：（1）由于岩体应力集中作用，岩体沿着临空面产生一些不规则的卸荷裂隙；（2）由于岩体表面风化较严重，长期经受干湿、冷热交替作用，使岩体内部结构发生变化发育形成的卸荷裂隙；（3）由于上覆荷载及侧向约束解除或削弱的前提下，在一定深度和宽度范围内，因岩体内部应力重分布发育形成的卸荷裂隙。岩体发育的卸荷裂隙是形成危岩体破坏的主要因素，影响深度最大约 2~5m，控制着危岩体的几何形态。

2、层理裂隙

本次调查区域层理裂隙产状 200°∠4°；层厚较大，发育的层理裂隙延展广阔，发育贯通，压张性、压紧性，微张开，缝宽 10~20mm。层理裂隙与卸荷裂隙相互组合切割，破坏危岩的稳定性，形成块状、板状危岩体，最终发生崩塌破坏。

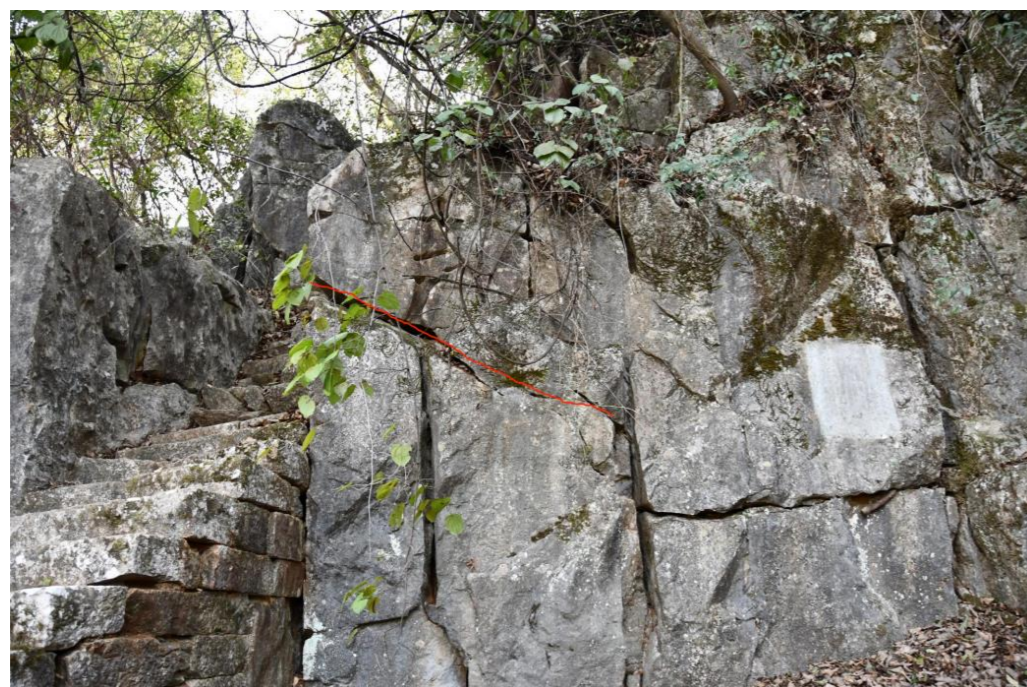


图 4.2-1 崖壁发育卸荷裂隙



图 4.2-2 崖壁发育层理裂隙

3、构造裂隙

本次调查区域构造裂隙发育明显，主要发育有 1 组构造裂隙，近垂直于崖面，产状 $28^{\circ}\sim 29^{\circ}/77^{\circ}\sim 79^{\circ}$ 。构造裂隙组合切割岩体，控制着崖壁岩体的周界、崩塌次序及

崩塌规模，破坏了岩体的稳定性，致岩体产生变形崩塌。构造裂隙以张性裂隙为主，裂隙面粗糙不平，延伸较长，少则数米，多达数十米，沿裂隙延伸方向，岩体一般破碎较严重。由于溶蚀作用、根劈作用和其他风化营力的作用，大部分构造节理均有一定的张开度，张开度较大，一般张开数厘米至数十厘米，缝内泥质风化物 and 溶余粘土充填。构造裂隙是崖壁产生危岩体的基础和先天条件，控制着危岩体变形的规模和形式。



图 4.2-3 崖壁发育构造裂隙

4.2.2 裂隙调查统计

本次调查对海阳山摩崖石刻所依附岩体发育的 28 道节理裂隙进行了调查统计分析（见图 4.2-4~图 4.2-7），可以得到导致危岩体发育的构造地质力学背景条件。崖壁上发育节理裂隙贯通性强，且深入岩体内部，裂缝张开度较大，缝宽一般约 5mm~50mm，内部填充黏土、岩溶堆积物，部分裂隙有明显的渗水痕迹；沿节理裂隙延伸方向，岩体一般较破碎，局部会发生小块状岩土的崩塌；节理裂隙局部段生长

有茂盛的植被，植物根系发达，受植物根劈作用剧烈。该类型裂隙的持续发育、扩张，裂隙之间相互组合切割，相互联系贯通，不断交切破坏崖壁岩体，会导致崖壁上已发育形成的危岩体稳定性降低，容易发生失稳崩落；也可能导致崖壁上亟需发育产生新的危岩体。因此，亟需采取有效措施对该类型裂隙进行注浆加固封堵，防止其进一步扩张发育。

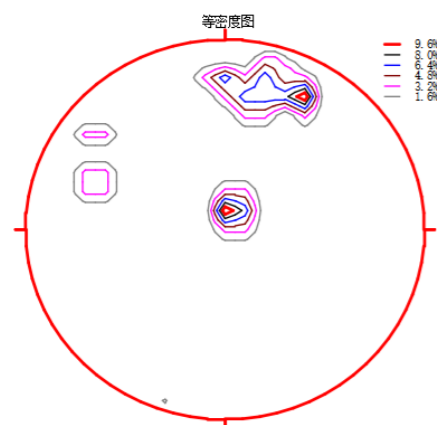


图 4.2-4 等密度图

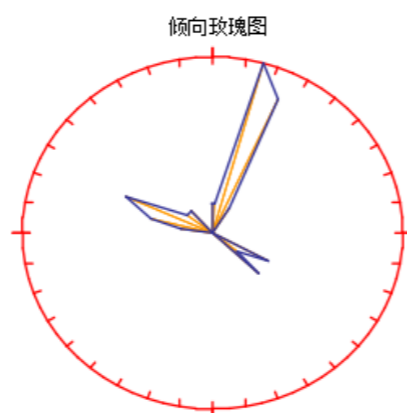


图 4.2-5 倾向玫瑰图

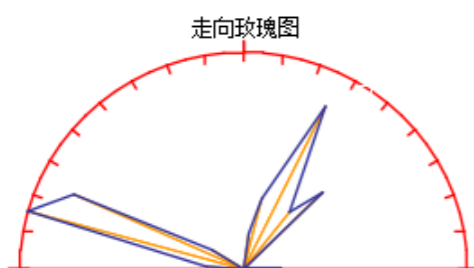


图 4.2-6 走向玫瑰图

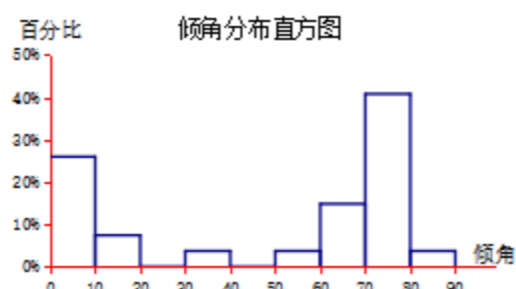


图 4.2-7 倾角分布直方图

表 4.2-1 主要节理裂隙调查统计表

裂隙编号	裂隙性质	产状		裂隙特征
		倾向(°)	倾角(°)	
L1	卸荷裂隙	280	6	节理裂隙呈压张性；缝宽 10~30mm，迹长 2.6m；裂缝近平行于地面发育，发育贯通，缝内无填充。
L2	卸荷	24	72	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~40mm，有利于充水，迹长 1.3m，裂缝近

裂隙编号	裂隙性质	产状		裂隙特征
		倾向(°)	倾角(°)	
	裂隙			垂直于崖面，发育贯通，有渗水痕迹，缝内填充碎石和黏土。
L3	卸荷裂隙	292	12	节理裂隙呈压张性；缝宽 10~25mm，迹长 2.7m，裂缝近平行于地面，发育贯通，沿裂隙延伸方向岩石破碎，缝内填充黏土和碎石，裂隙内有植被生长。
L4	卸荷裂隙	299	32	节理裂隙呈拉张性；缝宽 20~50mm，有利于充水，迹长 1.6m，裂缝近垂直于崖面，发育贯通，沿裂隙延伸方向岩石破碎，缝内填充碎石和黏土，裂隙四周有植被生长。
L5	卸荷裂隙	278	5	节理裂隙呈压张性；缝宽 10~20mm，迹长 2.4m，裂缝近平行于地面，发育贯通，缝内无填充，沿裂隙延伸方向岩石破碎。
L6	构造裂隙	28	79	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~50mm，有利于充水，迹长 7.1m，裂缝近垂直于崖面，发育贯通，沿裂隙延伸方向岩石破碎，缝内填充碎石和黏土，裂隙上部有植被生长。
L7	构造裂隙	29	77	节理裂隙呈拉张性；缝宽 5~30mm，有利于充水，迹长 6.7m，裂缝近垂直于崖面，发育贯通，沿裂隙延伸方向岩石破碎，缝内填充碎石和黏土，裂隙上部有植被生长。
L8	卸荷裂隙	318	65	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~25mm，有利于充水，迹长 0.8m，裂缝近垂直于崖面，发育贯通，缝内填充黏土。
L9	卸荷裂隙	119	53	节理裂隙呈压张性；缝宽 10~25mm，迹长 2.4m，裂缝沿水平方向延伸，发育贯通，缝内无填充。
L10	卸荷裂隙	14	9	节理裂隙呈压张性；缝宽 10~30mm，迹长 4.3m，裂缝沿水平方向延伸，发育贯通，缝内无填充。
L11	卸荷裂隙	29	8	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~20mm，迹长 1.5m，裂缝近平行于地面，发育贯通，沿裂隙延伸方向岩石破碎，缝内填充碎石和黏土，裂隙内有植被生长。
L12	卸荷裂隙	32	74	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~25mm，有利于充水，迹长 3.3m，裂缝近垂直于崖面，发育贯通，缝内填充碎石和黏土。

裂隙 编号	裂隙 性质	产状		裂隙特征
		倾向(°)	倾角(°)	
L13	卸荷 裂隙	288	3	节理裂隙呈压张性；缝宽 15~35mm，迹长 2.7m，裂缝近水平方向延伸，发育贯通，缝内无填充。
L14	卸荷 裂隙	135	78	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~20mm，有利于充水，迹长 2.7m，裂缝近垂直于崖面，发育贯通，沿裂隙延伸方向岩石局部破碎，缝内填充黏土，裂隙上部有植被生长。
L15	卸荷 裂隙	307	79	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~20mm，有利于充水，迹长 2.7m，裂缝近垂直于崖面，发育贯通，缝内填充黏土，裂隙内有植被生长。
L16	卸荷 裂隙	19	17	节理裂隙呈压张性；缝宽 15~15mm，迹长 5.3m，裂缝沿近水平方向延伸近，发育贯通，缝内无填充，裂隙上部有植被生长。
L17	卸荷 裂隙	118	72	节理裂隙呈拉张性；缝宽 15~30mm，有利于充水，迹长 4.0m，裂缝近垂直于崖面，发育贯通，缝内填充黏土和碎石，裂隙内有植被生长。
L18	卸荷 裂隙	16	8	节理裂隙呈压张性；缝宽 20~40mm，迹长 14.3m，裂缝沿近水平方向延伸近，发育贯通，缝内无填充，裂隙右侧有植被生长。
L19	层理 裂隙	200	4	节理裂隙呈压张性；缝宽 10~40mm，迹长 3.0m，裂缝沿近水平方向延伸近，发育贯通，缝内无填充，裂隙中部有植被生长。
L20	卸荷 裂隙	21	8	节理裂隙呈压张性；缝宽 15~30mm，迹长 7.2m，裂缝沿近水平方向延伸近，发育贯通，缝内无填充，裂隙右侧有植被生长。
L21	卸荷 裂隙	132	78	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~25mm，有利于充水，迹长 4.8m，裂缝近垂直于崖面，发育贯通，缝内填充黏土和碎石。
L22	卸荷 裂隙	292	69	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~30mm，有利于充水，迹长 5.7m，裂缝近平行于崖壁发育，发育贯通，缝内填充黏土和碎石。
L23	卸荷 裂隙	358	64	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~28mm，有利于充水，迹长 6.3m，裂缝近平行于崖壁发育，发育贯通，缝内填充黏土。
L24	卸荷 裂隙	4	77	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~20mm，有利于充水，迹长 1.4m，裂缝近平行于崖壁发育，发育贯通，缝内填充黏土。
L25	卸荷	14	64	节理裂隙呈拉张性；缝宽 8~15mm，有利于充水，迹长 3.6m，裂缝近平


裂隙 编号	裂隙 性质	产状		裂隙特征
		倾向(°)	倾角(°)	
	裂隙			行于崖壁发育，发育贯通，缝内填充黏土。
L26	卸荷 裂隙	13	68	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~22mm，有利于充水，迹长 3.3m，裂缝近平行于崖壁发育，发育贯通，缝内填充黏土。
L27	卸荷 裂隙	17	75	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~20mm，有利于充水，迹长 4.3m，裂缝近平行于崖壁发育，发育贯通，缝内填充黏土。
L28	卸荷 裂隙	129	68	节理裂隙呈拉张性；缝宽 10~25mm，有利于充水，迹长 1.9m，裂缝近垂直于崖面，发育贯通，缝内填充黏土，裂隙内有植被生长。

4.3 危岩体病害

4.3.1 危岩体基本特征

危岩体是指陡边坡上被多组结构面切割，在重力、风化营力、地应力、地震、水体等作用下与母岩逐渐分离，形成稳定性较差的岩体。本次调查发现危岩体共计 9 处，编号 W1~W9，分布于摩崖石刻所依附崖壁上，其孕发过程具有渐进性，失稳过程具有突变性，潜在威胁严重。因此，需查明单个危岩体的边界条件，几何形态，控制性结构面的特征，分析其成因，确定单个危岩体的地质稳态等级以及可能的失稳方式、运动轨迹以及对文物本体的影响等。现将各个危岩体的基本特征描述如下：



表 4.3-1 危岩体基本特征调查统计表

危岩体编号	基本特征	稳定性评价、分析	崩塌方式	现状照片
W1	W1 危岩体位于 Q7 石刻正上方，主要受 L5、L6、L7 和 L22 等 4 组节理裂隙相互组合切割形成，危岩体主崩方向为 ES51°。崩塌影响范围内分布有 Q7 石刻，所在崖壁走向 35°，崖面自然坡度约 70°~75°。危岩体所处相对高度约 8m，属于低位危岩。危岩体形态呈块状，左侧临空，岩体受风化作用和溶蚀作用强烈。卸荷裂隙贯通性较强，岩石较为破碎，岩体几何特征为长 2.0m，厚 2.0m，高 1.8m，单体方量约 7.2m ³ ，属于小型危岩体。危岩体受多组裂隙相互组合切割破坏，主控裂隙为①近平行于崖面的卸荷裂隙 L22，控制危岩体变形厚度，结构面延伸尺度长，连通率高，属张性结构面，②近平行于地面方向的卸荷裂隙 L5，控制危岩体的下侧界，结构面延展性较好延伸尺度长，属压张性结构面。③近垂直于崖面的构造裂隙 L7，控制危岩体的右侧界，结构面延伸尺度长，属张性结构面。危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式破坏。	目前，在自然工况下危岩体处于基本稳定状态，雨水易沿节理面进入岩体内部，加速岩体崩解、风化；危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式崩塌破坏。危岩体一旦发生崩塌，将会破坏崖壁的整体性和完整性，危及 Q7 石刻文物本体的整体性、稳定性和安全性，威胁下部平台上过往行人的生命财产安全。	滑移	

<p>W2</p>	<p>W2 危岩体位于底部台阶右侧，主要受 L3、L6、L12、L13、L22 等 5 组节理裂隙相互组合切割形成，危岩体主崩方向为 ES51°。危岩体上分布有 Q7 石刻，所在崖壁走向 35°，崖面自然坡度约 70°~75°。危岩体所处相对高度约 2m，属于低位危岩。危岩体形态呈块状，左两侧临空，岩体受风化作用和溶蚀作用强烈。卸荷裂隙贯通性较强，岩石较为破碎，危岩体几何特征为长 2.4m，厚 2.0m，高 1.8m，单体方量约 8.6m³，属于小型危岩体。危岩体受多组裂隙相互组合切割破坏，主控裂隙为①近平行于崖面的卸荷裂隙 L22，控制危岩体变形厚度，结构面延伸尺度长，连通率高，属张性结构面，②近平行于地面方向的卸荷裂隙 L13，控制危岩体的下侧界，结构面延展性较好延伸尺度长，属压张性结构面。③近垂直于崖面的构造裂隙 L6，控制危岩体的右侧界，结构面延伸尺度长，属张性结构面。危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式破坏。</p>	<p>目前，在自然工况下危岩体处于基本稳定状态，雨水易沿节理面进入岩体内部，加速岩体崩解、风化；危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式崩塌破坏。危岩体一旦发生崩塌，将会破坏崖壁的整体性和完整性，威胁下部平台上过往行人的生命财产安全，导致其所载负的 Q7 石刻随着崩塌滚落，造成不可挽回的损失。</p>	<p>滑移</p>	
<p>W3</p>	<p>W3 危岩体位于 W2 危岩体右上方，主要受 L7、L10、L11、L23 等 4 组节理裂隙相互组合切割形成，危岩体主崩方向为 ES46°。崩塌影响范围内未见有文物分布，所在崖壁走向 115°，崖面自然坡度约 65°~70°。危岩体所处相对高度约 6m，属于低位危岩。危岩体形态呈块状，岩体受风化作用和溶蚀作用强烈。卸荷裂隙贯通性较强，岩石较为完整危，岩体几何特征为长 1.5m，厚 1.5m，高 1.8m，单体方量约 4.05m³，属于小型危岩体。危岩体受多组裂隙相互组合切割破坏，主控裂隙为①近平行于崖面的卸荷裂隙 L23，控制危岩体变形厚度，结构面延伸尺度长，连通率高，属张性结构面，②近平行于地面方向的卸荷裂隙 L10、L11，控制危岩体的下、上侧界，结构面延展性较好延伸尺度长，属压张性结构面。③近垂直于崖面的卸荷裂隙 L7、L28，控制危岩体的左、右侧界，结构面延伸尺度长，属张性结构面。危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式破坏。</p>	<p>目前，在自然工况下危岩体处于欠稳定状态，雨水易沿节理面进入岩体内部，加速岩体崩解、风化；危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式崩塌破坏。危岩体一旦发生崩塌，将会破坏崖壁的整体性和完整性，威胁下部平台上过往行人的生命财产安全。</p>	<p>滑移</p>	

<p>W4</p>	<p>W4 危岩体位于 W3 危岩体右上方，主要受 L8、L9、L10 和 L23 等 4 组节理裂隙相互组合切割形成，危岩体主崩方向为 SW20°。崩塌影响范围内分布有 Q1 石刻，所在崖壁走向 115°，崖面自然坡度约 65°~70°。危岩体所处相对高度约 7m，属于低位危岩。危岩体形态呈楔形状，右侧临空，岩体受风化作用和溶蚀作用强烈。卸荷裂隙贯通性较强，岩石较为破碎，危岩体几何特征为长 2.7m，厚 2.5m，高 1.6m，单体方量约 10.8m³，属于中型危岩体。危岩体受多组裂隙相互组合切割破坏，主控裂隙为①近平行于崖面的卸荷裂隙 L23，控制危岩体变形厚度，结构面延伸尺度长，连通率高，属张性结构面，②近垂直于崖面的卸荷裂隙 L8，控制危岩体的左侧界，结构面延伸尺度长，属张性结构面。③近平行于地面方向的卸荷裂隙 L9、L10，控制危岩体的上、下侧界，结构面延展性较好延伸尺度长，属压张性结构面。危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式破坏。</p>	<p>目前，在自然工况下危岩体处于欠稳定状态，雨水易沿节理面进入岩体内部，加速岩体崩解、风化；危岩体在水压力、地震及自重作用下容易绕崖壁岩体后缘剪切面形成累进破坏，发生整体性坠落式崩塌破坏。危岩体一旦发生崩塌，将会破坏崖壁的整体性和完整性，危及下方 Q1 石刻文物本体的整体性、稳定性和安全性，威胁下部平台上过往行人的生命财产安全。</p>	<p>滑移</p>	
<p>W5</p>	<p>W5 危岩体位于 W4 危岩体下方，Q1 石刻上方，主要受 L7、L10、L11、L14、L19 和 L23 等 6 组节理裂隙相互组合切割形成，危岩体主崩方向为 SW20°。崩塌影响范围内分布有 Q1 石刻，所在崖壁走向 115°，崖面自然坡度约 70°~75°。危岩体所处相对高度约 4.0m，属于低位危岩。危岩体形态呈楔形状，岩体受风化作用和溶蚀作用强烈。卸荷裂隙贯通性较强，岩石较为完整，危岩体几何特征为长 4.0m，厚 3.0m，高 2.7m，单体方量约 32.4m³，属于中型危岩体。危岩体受多组裂隙相互组合切割破坏，主控裂隙为①近平行于崖面的卸荷裂隙 L23，控制危岩体变形厚度，结构面延伸尺度长，连通率高，属张性结构面，②近平行于地面方向的卸荷裂隙 L10、L19，控制危岩体的上、下侧界，结构面延展性较好延伸尺度长，属压张性结构面。③近垂直于崖面的卸荷裂隙 L7、L14，控制危岩体的左、右侧界，结构面延伸尺度长，属张性结构面。危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式破坏。</p>	<p>目前，在自然工况下危岩体处于基本稳定状态，雨水易沿节理面进入岩体内部，加速岩体崩解、风化；危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑移式崩塌破坏。危岩体一旦发生崩塌，将会破坏崖壁的整体性和完整性，危及 Q1 石刻文物本体的整体性、稳定性和安全性，威胁下部平台上过往行人的生命财产安全。</p>	<p>滑移</p>	

<p>W6</p>	<p>W6 危岩体位于 W5 危岩体右侧，主要受 L14、L15、L16 和 L19、L24 等 5 组节理裂隙相互组合切割形成，危岩体主崩方向为 SW20°。崩塌影响范围内分布有 Q1~Q3 石刻，所在崖壁走向 115°，崖面自然坡度约 70°~75°。危岩体所处相对高度约 5.0m，属于低位危岩。危岩体形态呈块状，岩体受风化作用和溶蚀作用强烈。卸荷裂隙贯通性较强，岩石较为完整，危岩体几何特征为长 2.0m，厚 2.0m，高 1.5m，单体方量约 6.0m³，属于小型危岩体。危岩体受多组裂隙相互组合切割破坏，主控裂隙为①近平行于崖面的卸荷裂隙 L24，控制危岩体变形厚度，结构面延伸尺度长，连通率高，属张性结构面，②近平行于地面方向的卸荷裂隙 L16、L19，控制危岩体的上、下侧界，结构面延展性较好延伸尺度长，属压张性结构面。③近垂直于崖面的卸荷裂隙 L14、L15，控制危岩体的左、右侧界，结构面延伸尺度长，属张性结构面。危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式破坏。</p>	<p>目前，在自然工况下危岩体处于基本稳定状态，雨水易沿节理面进入岩体内部，加速岩体崩解、风化；危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式崩塌破坏。危岩体一旦发生崩塌，将会破坏崖壁的整体性和完整性，危及 Q1~Q3 石刻文物本体的整体性、稳定性和安全性，威胁下部平台上过往行人的生命财产安全。</p>	<p>W6</p> <p>转移</p>	
<p>W7</p>	<p>W7 危岩体位于 W6 危岩体右侧，主要受 L15、L16、L17、L19 和 L25 等 5 组节理裂隙相互组合切割形成，危岩体主崩方向为 SW20°。崩塌影响范围内分布有 Q2~Q4 石刻，所在崖壁走向 115°，崖面自然坡度约 70°~75°。危岩体所处相对高度约 5.0m，属于低位危岩。危岩体形态呈块状，岩体受风化作用和溶蚀作用强烈。卸荷裂隙贯通性较强，岩石较为完整，危岩体几何特征为长 3.7m，厚 3.5m，高 3.7m，单体方量约 47.9m³，属于中型危岩体。危岩体受多组裂隙相互组合切割破坏，主控裂隙为①近平行于崖面的卸荷裂隙 L25，控制危岩体变形厚度，结构面延伸尺度长，连通率高，属张性结构面，②近垂直于崖面的卸荷裂隙 L15、L17，控制危岩体的左、右侧界，结构面延伸尺度长，属张性结构面。③近平行于地面方向的卸荷裂隙 L19，控制危岩体的下侧界，结构面延展性较好延伸尺度长，属压张性结构面。危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下容易绕崖壁岩体底部形成转动破坏，发生整体性倾倒地崩塌破坏。</p>	<p>目前，在自然工况下危岩体处于基本稳定状态，雨水易沿节理面进入岩体内部，加速岩体崩解、风化；危岩体在水压力、地震及自重作用下容易绕崖壁岩体底部形成转动破坏，发生整体性倾倒地崩塌破坏。危岩体一旦发生崩塌，将会破坏崖壁的整体性和完整性，危及 Q2~Q4 石刻文物本体的整体性、稳定性和安全性，威胁下部平台上过往行人的生命财产安全。</p>	<p>W7</p> <p>倾倒地</p>	

<p>W8</p>	<p>W8 危岩体位于 W7 危岩体右侧，主要受 L17、L18、L19 和 L26 等 4 组节理裂隙相互组合切割形成，危岩体主崩方向为 SW22°。崩塌影响范围内分布有 Q5 石刻，所在崖壁走向 115°，崖面自然坡度约 65°~75°。危岩体所处相对高度约 5.3m，属于低位危岩。危岩体形态呈块状，右侧临空，岩体受风化作用和溶蚀作用强烈。卸荷裂隙贯通性较强，岩石较为完整，危岩体几何特征为长 3.0m，厚 3.5m，高 3.1m，单体方量约 32.5m³，属于中型危岩体。危岩体受多组裂隙相互组合切割破坏，主控裂隙为①近平行于崖面的卸荷裂隙 L26，控制危岩体变形厚度，结构面延伸尺度长，连通率高，属张性结构面，②近垂直于崖面的卸荷裂隙 L17，控制危岩体的左侧界，结构面延伸尺度长，属张性结构面。③近平行于地面方向的卸荷裂隙 L19，控制危岩体的下侧界，结构面延展性较好延伸尺度长，属压张性结构面。危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式破坏。</p>	<p>目前，在自然工况下危岩体处于基本稳定状态，雨水易沿节理面进入岩体内部，加速岩体崩解、风化；危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下与母岩逐渐分离，易沿结构面向崖壁临空面发生滑动变形，发生整体性滑动式破坏。危岩体一旦发生崩塌，将会破坏崖壁的整体性和完整性，危及 Q5 石刻文物本体的整体性、稳定性和安全性，威胁下部平台上过往行人的生命财产安全。</p>	<p>滑移</p>	
<p>W9</p>	<p>W9 危岩体位于 W8 危岩体下侧，主要受 L20、L21、L27 等 3 组节理裂隙相互组合切割形成，危岩体主崩方向为 SW22°。危岩体上分布有 Q5 石刻，所在崖壁走向 115°，崖面自然坡度约 65°~75°。危岩体所处相对高度约 0m，属于低位危岩。危岩体形态呈块状，左侧临空，岩体受风化作用和溶蚀作用强烈。卸荷裂隙贯通性较强，岩石较为完整，危岩体几何特征为长 3.5m，厚 1.5m，高 4.3m，单体方量约 22.6m³，属于中型危岩体。危岩体受多组裂隙相互组合切割破坏，主控裂隙为①近平行于崖面的卸荷裂隙 L27，控制危岩体变形厚度，结构面延伸尺度长，连通率高，属张性结构面，②近垂直于崖面的卸荷裂隙 L21，控制危岩体的右侧界，结构面延伸尺度长，属张性结构面。③近平行于地面方向的卸荷裂隙 L20，控制危岩体的上侧界，结构面延展性较好延伸尺度长，属压张性结构面。危岩体在重力、风化营力、地震和水压力等作用下容易绕崖壁岩体底部形成转动破坏，发生整体性倾倒式崩塌破坏。</p>	<p>目前，在自然工况下危岩体处于欠稳定状态，雨水易沿节理面进入岩体内部，加速岩体崩解、风化；危岩体在水压力、地震及自重作用下容易绕崖壁岩体底部形成转动破坏，发生整体性倾倒式崩塌破坏。危岩体一旦发生崩塌，将会破坏崖壁的整体性和完整性，危及 Q5 石刻文物本体的整体性、稳定性和安全性，威胁下部平台上过往行人的生命财产安全。</p>	<p>倾倒</p>	

4.3.2 危岩体分类

1、按危岩体体积分类

本次调查区域发育危岩体形状各异，规模大小不等，主要为单体危岩体，主要呈块状。将本次调查发现发现的 9 处危岩体按照《地质灾害防治工程勘察规范》(DB 50/T 143-2018 附表 A.2-2) 危岩单体体积分类标准进行分类。

表 4.3-2 危岩按危岩体体积分类

危岩单体体积 (V) m ³	V≤10	10<V≤100	100<V≤1000	V>1000
危岩单体类型	小型危岩体	中型危岩体	大型危岩体	特大型危岩体

根据统计，本次调查区域共发育危岩体共有 9 处，编号 W1~W9，主要为小型危岩体和中型危岩体，未见有大型危岩体和特大型危岩体发育。危岩体单体体积 ≤10m³ 的小型危岩体 4 处；占总数的 44.4%；危岩体单体体积 10~100m³ 的中型危岩体 5 处，占总数 55.6%；。

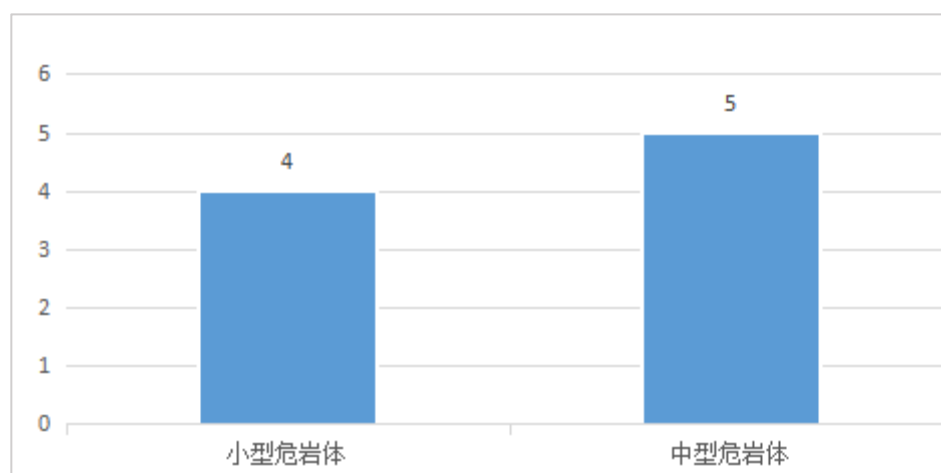


图 4.3-1 危岩体单体体积分类柱状统计图

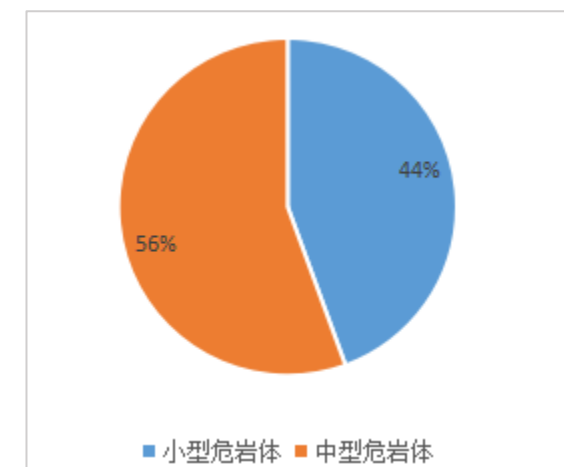


图 4.3-2 危岩体单体体积分类饼状统计图

2、按所处相对高度分类

将本次调查发现发现的 9 处危岩体按照《地质灾害防治工程勘察规范》(DB 50/T 143-2018 附表 A.2-3) 危岩按所处高度分类标准进行分类。

表 4.3-3 危岩按所处相对高度分类

危岩体相对高度 (H) m	H≤15	15<H≤50	50<H≤100	H>100
危岩类型	低位危岩	中位危岩	高位危岩	特高位危岩

根据调查统计，本次调查区域发育的 9 处危岩体，危岩体所处相对高度均小于 15m，均属于低位危岩。

4.3.3 危岩体成因和失稳破坏机理分析

危岩体的形成与发展是多种因素综合作用的结果，有其潜在的内在因素和外动力因素，现分述如下：

1、控制性结构面是岩体后期变形的前提

海阳山摩崖石刻造像所依附岩体卸荷裂隙、构造裂隙较发育，裂隙贯通性强，卸荷裂隙和构造裂隙的发育是形成危岩体病害的主要因素，裂隙之间相互组合切割，

控制着危岩体的几何形态、变形深度、周界、形状和变形的规模、方量。

2、地层岩性是危岩体形成的基本物质基础

海阳山摩崖石刻所依附灰岩属于坚硬脆性岩层，在地质构造作用下，易于切割成块，并且“记忆继承”构造作用力，在岩体上形成几组控制性的节理裂隙，在多种自然营力的长期共同作用下，形成危岩体。在地质构造作用及外力作用下，易于切割成块，并且“记忆继承”构造作用力，在岩体上形成几组控制性的节理裂隙，在多种自然营力的长期共同作用下，形成危岩体。

3、持续强降雨的灌入是危岩体崩塌变形的重要诱发因素之一

持续强降雨的灌入是危岩体崩塌变形的重要诱发因素之一，也是影响岩体不稳定的主要因素。大量调查资料说明，危岩体的崩塌失稳与降雨有下列关系：

(1) 危岩体的崩塌失稳有 70% 以上发生在雨季，特别是在雨中或雨后不久，很少发生在旱季和非雨天。

(2) 连续降雨时间越长，暴雨强度越大，危岩体崩塌失稳次数越多。

(3) 阴雨连绵天气较短促的暴雨天气引起的危岩体崩塌失稳多。

(4) 长期大雨比连绵细雨造成的危岩体的崩塌失稳多。

在危岩体治理工程中常有“大雨大塌，小雨小塌，无雨不塌”之说，足见降水与危岩体崩塌变形的密切关系。岩体自身发育卸荷裂隙宽度较大，在雨季大量降水直接沿节理裂隙灌入，弱化危岩体与母岩之间的粘结力。具体表现在 5 个方面：

①雨水的渗入，除起冲刷作用外，其本身具有静水压力及动水压力，会在裂缝中形成瞬时高水头产生劈楔作用，加速开裂缝的发展，破坏岩体的稳定性。

②雨水会使结构面的填充物软化，降低其抗剪强度，若裂隙中为黏土填充，黏

土被液化产生膨胀力，也会破坏岩体的稳定性，加剧润滑作用，促使危岩体失稳。

③充满节理裂隙中的水对危岩体产生侧向水压力，软化和削弱了岩体的抗剪强度和粘聚力。

④充满危岩体两侧节理裂隙中的水，使危岩体与稳定体之间的侧向摩擦力减小，加速了危岩体侧界的贯通性破坏。

⑤水对岩体的长期潜蚀、水解作用，溶蚀了岩体中的可溶性矿物，加速了化学风化速度，降低了岩体物理力学性能、改变了矿物组成和结构，加剧了岩体变形。

4、植物根系的根劈作用助长了危岩体变形

海阳山摩崖石刻造像所依附岩体卸荷裂隙、构造裂隙缝内生长有植物根系发达的植被，植物根系沿裂隙不断生长、延伸，不断地从裂隙中汲取水分和养分，使得原有的节理裂隙不断张开扩大，并使岩体进一步破坏，导致原本的危岩体变形不断加剧。

5、风化作用

岩石长期裸露在外，在温度变化、大气、水溶液、生物等因素作用下，使岩石在原地逐渐破碎疏松，以及化学成分、矿物成分均发生变化，称为风化。风化营力主要包括阳光、气温、雨水等。岩壁岩体在各种风化营力长期作用下，其强度和稳定性不断降低，从而促进危岩体发育。

6、温差作用

温差是促进危岩体发育的又一个重要因素，也是物理风化的一种重要营力。孤石岩体受太阳照射后，表面受热，产生热胀，形成向自由面的拉力。夜晚降温，岩表散热，形成收缩。由于岩石是热的不良导体，在温度的变化下，表层与内部受热

不均，产生膨胀与收缩，长期作用的结果就会使岩体的表面发育危岩体，进而发生崩解破碎，其影响深度范围约 1~2m。

另外，岩体表面处于吸热放热的胀缩变化时，热量变化仍以缓慢速度继续在内部传递，直达地下常温带，呈现年温变化规律，其深度影响可达 20~40m。在年变温带内的地温，随暑寒季节变呈之后的缓慢性升降，坡内岩体亦随温度而胀缩，形成向崖体外的拉张与收缩，当岩体中有损伤结构面时，收缩呈多中心特点，将损伤面进一步劣化，对崖体起间接的拉张特性。

岩体在接受日光照射后，受热膨胀，呈向崖体外的拉应力，由此而使岩体产生裂隙或使原裂隙扩张。当岩体受冷后收缩，受节理切割的岩体，则向岩块核心收缩，亦会导致裂隙扩张，加剧危岩体的变形。

4.3.4 危岩体稳定性计算

1、计算原理及方法

本次勘查条件限制，缺乏结构面的原位大面积剪切试验成果。因此，对危岩体的稳定性分析与评价主要采取现场工程地质调查、工程地质原理分析、工程地质比拟、赤平投影分析、岩石室内物理力学实验和矿物分析等综合定性分析的方式为主，辅以定量计算；并且，计算所用参数系根据已有试验成果、项目所在地附近工程试验数据、区域经验数据和结合危岩体稳定性现状的反分析结果等综合取值。

目前，按照不同的标准，危岩分类系统多样。但是，从工程防治的角度按照危岩失稳类型进行分类更有价值，可将本次调查区域危岩概化分为倾倒地危岩、滑移式危岩两类。这两类危岩体崩塌计算原理基于静力解析法，稳定性计算按照《地质灾害防治工程勘察规范》（DB 50/T 143-2018）13.3.15 之规定进行计算。以下为这

两种崩塌类型的稳定性计算方法。

2、稳定性计算方法

(1) 滑移式崩塌

①后缘有陡倾裂隙且滑面缓倾的滑移式危岩稳定性按下式计算：

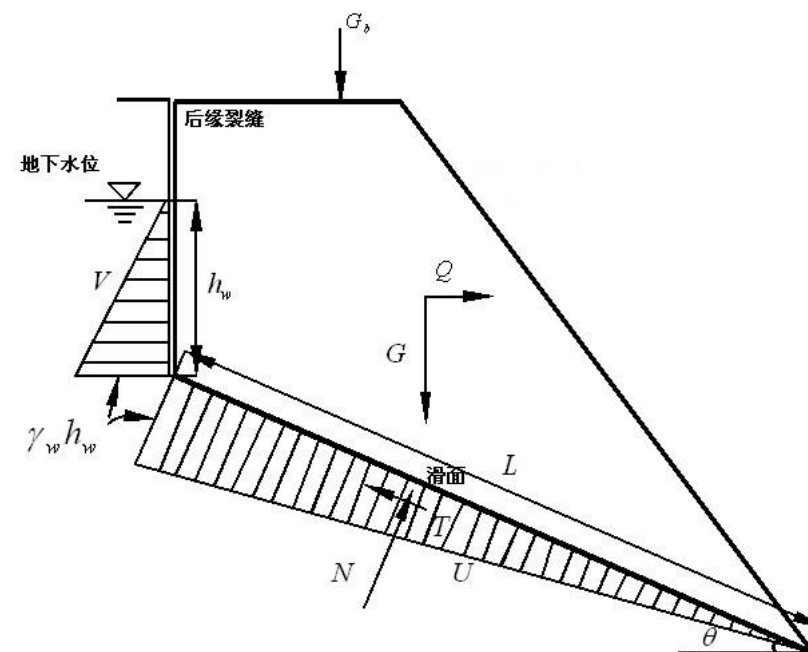


图 4.3-3 后缘有陡倾裂隙的滑移式危岩计算模型

稳定性计算公式如下：

$$F = \frac{[(G + G_b) \cos \theta - Q \sin \theta - V \sin \theta - U] \tan \varphi + CL}{(G + G_b) \sin \theta + Q \cos \theta + V \cos \theta}$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w h_w^2$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w h_w L$$

式中：

F——危岩稳定性系数；

V——后缘陡倾裂隙水压力（KN/m）；

U ——滑面水压力 (KN/m)；

h_w ——后缘陡倾裂隙充水高度 (m)，根据裂隙情况及汇水条件确定；

L ——滑面长度 (m)；

G ——危岩自重 (KN/m)；

G_b ——危岩竖向荷载 (KN/m)；方向指向下方时取正直，指向上方时取负值；

Q ——危岩水平荷载 (不含后缘陡倾裂隙水压力) (KN/m)；方向指向坡外时取正值，指向坡内时取负值；当考虑地震力时，地震力取危岩自重与危岩竖向附加荷载之和与水平地震系数 0.05 的乘积；

C ——滑面粘聚力 (kpa)；

φ ——滑面内摩擦角 (°)；

θ ——滑面倾角 (°)。

②后缘无陡倾裂隙的滑移式危岩体稳定性按下式计算：

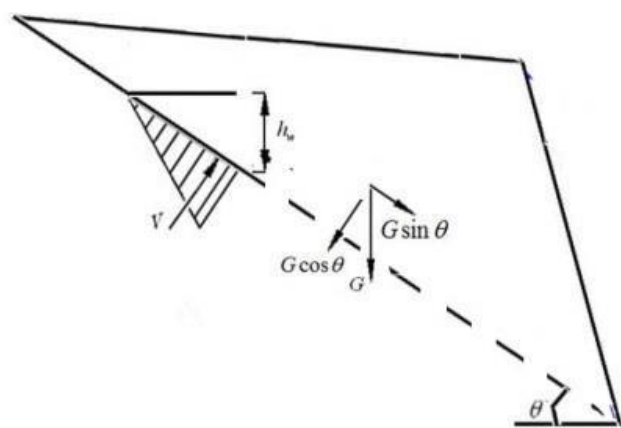


图 4.3-4 后缘无陡倾裂隙的滑移式危岩稳定性计算

稳定性计算公式如下：

$$F = \frac{[(G + G_b) \cos \theta - Q \sin \theta - V] \tan \varphi + CL}{(G + G_b) \sin \theta + Q \cos \theta}$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w h_w^2$$

式中：

F ——危岩稳定性系数；

C ——滑面粘聚力 (kpa)；当充当滑面的裂隙未贯通时取贯通段和未贯通段粘聚力按面积加权的加权平均值，未贯通段粘聚力取岩体粘聚力；

φ ——滑面内摩擦角 (°)；当充当滑面的裂隙未贯通时取滑面平均内摩擦系数的正切，滑面平均内摩擦系数取贯通段和未贯通段内摩擦系数按面积加权的加权平均值，未贯通段内摩擦系数取岩体内摩擦系数；

V ——充当滑动面的裂隙贯通段水压力 (KN/m)；

h_w ——后缘陡倾裂隙充水高度 (m)，根据裂隙情况及汇水条件确定；

其余各符号意义同前。

(2) 倾倒式崩塌

①倾倒式危岩体底部折断倾倒稳定性按下式计算：

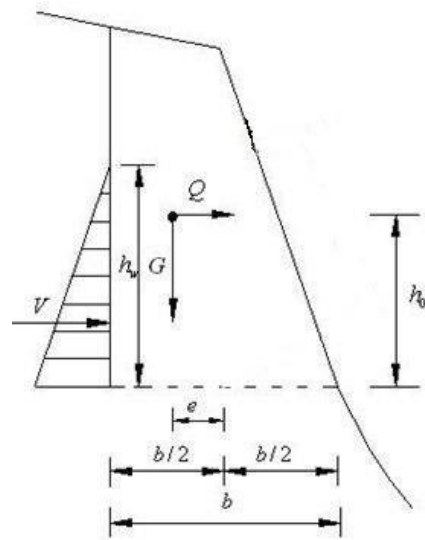


图 4.3-5 倾倒式危岩折断倾倒稳定性计算

当危岩体重心位于危岩体底面中点内侧时，稳定性计算公式如下：

$$F = \frac{\zeta \sigma_t b^2 + (G + G_b) e}{Q h_0 + \frac{1}{3} V h_w}$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w h_w^2$$

当危岩体重心位于危岩体底面中点外侧时，稳定性计算公式如下：

$$F = \frac{\zeta \sigma_t b^2}{Q h_0 + (G + G_b) e + \frac{1}{3} V h_w}$$

式中：

V——后缘陡倾裂隙水压力（KN/m）；

h_w ——后缘陡倾裂隙充水高度（m），根据裂隙情况及汇水条件确定；

e——危岩体竖向荷载作用点到危岩体底面中点的水平距离（m）；

h_0 ——危岩体水平荷载作用点到危岩体底面中点的竖直距离（m）；

b——危岩体底面平行失稳方向宽度（m）；

ζ ——危岩抗弯力矩计算系数，按折断面形态在 1/12~1/6 之间取值，当折断面为矩形时取 1/6；

其余各符号意义同前。

② 倾倒式危岩后部拉断倾倒稳定性按下式计算：

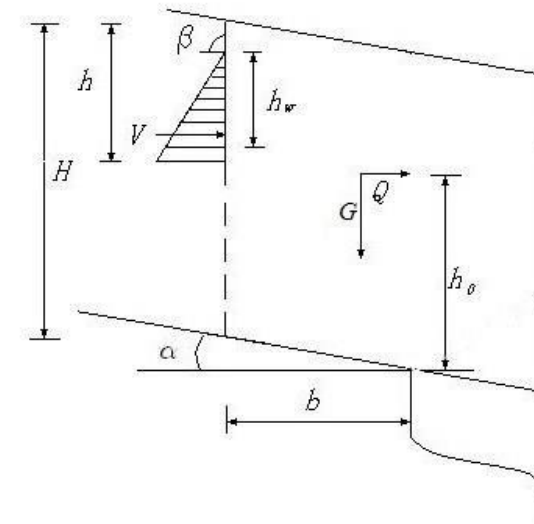


图 4.3-6 倾倒式危岩拉断倾倒稳定性计算

对危岩体重心在基座顶面前缘内侧情形，稳定性计算公式如下：

$$F = \frac{(G + G_b) a + 2 \zeta \sigma_t \frac{(H - h)^2}{\cos \alpha^2}}{Q h_0 + V \left[\frac{1}{3} \frac{h_w}{\sin \beta} + \frac{H - h}{\sin \beta} + \frac{b \cos(\beta - \alpha)}{\cos \alpha} \right]}$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w h_w^2$$

对危岩体重心在基座顶面前缘外侧情形，稳定性计算公式如下：

$$F = \frac{2 \zeta \sigma_t \frac{(H - h)^2}{\cos \alpha^2}}{(G + G_b) a + Q h_0 + V \left[\frac{1}{3} \frac{h_w}{\sin \beta} + \frac{H - h}{\sin \beta} + \frac{b \cos(\beta - \alpha)}{\cos \alpha} \right]}$$

式中：

V ——后缘陡倾裂隙水压力 (KN/m)；

h_w ——后缘陡倾裂隙充水高度 (m)，根据裂隙情况及汇水条件确定；

a ——危岩体竖向荷载作用点到转动点的水平距离 (m)；

β ——后缘陡倾结构面倾角 (°)；

h_0 ——危岩体水平荷载作用点到转动点的垂直距离 (m)；

α ——危岩体与基座接触面倾角 (°)；

b ——后缘裂隙的延伸段下端到转动点的水平距离 (即块体与基座接触面长度的水平投影) (m)；

ζ ——危岩抗弯力矩计算系数，按折断面形态在 1/12~1/6 之间取值，当折断面为矩形时取 1/6；

其余各符号意义同前。

3、计算工况选取和参数确定

(1) 危岩体定量计算，需要考虑稳定性的计算工况和荷载组合情况。根据大量实例工程并结合规范要求，考虑到文物的重要性，本次危岩体稳定性计算共选取以下四种工况：

- ①组合一：天然状态 (自重)；
- ②组合二：暴雨状态 (饱和+自重)；
- ③组合三：地震状态 (自重+地震力)；
- ④组合四：暴雨+地震状态 (自重+饱和+地震力)。

(2) 荷载类型

①危岩体自重：为危岩体的体积与天然容重的乘积。

②孔隙水压力：主要考虑静水压力。自然和地震工况下不考虑孔隙水压力，暴雨和暴雨+地震工况下取三分之二孔隙水柱高。对危岩实施有效治理后可不考虑孔隙水压力。

③地震力：主要考虑水平地震力，为危岩体自重与水平地震系数的乘积，作用点为危岩体重心。

4、计算参数选取

根据现场调查结果及室内实验成果，危岩体稳定性计算各项参数取值详见表 4.3-4。

按《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)附录 A.0.18 条之划分及《中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306-2015)规定，海阳山摩崖石刻区域场地的抗震设防烈度 VI 度，设计基本地震加速度取 0.05g。

表 4.3-4 建议岩土物理力学指标

岩石	密度 (g/cm ³)		内摩擦角 φ (°)	黏聚力 C (MPa)	抗拉强度 (Mpa)
	天然	饱和			
灰岩	2.67	2.72	38	13.2	3.28

5、稳定性评价标准

合理评价危岩体在不同荷载组合条件的稳定性，是考虑是否需要进行工程治理以及采用合理治理技术措施的重要依据。因此，必须进行危岩体的稳定性计算与分析。在建立危岩稳定性计算方法的过程中，基于极限平衡理论建立稳定性计算方法。根据《石质文物保护工程勘察规范》及《边坡工程勘察规范》中的有关规定，可把

危岩体分为不稳定岩体、欠稳定岩体、基本稳定岩体和稳定岩体四个等级。

本次工程结合现场勘察，确定各个危岩体可能的破坏形式，然后根据上述公式分别计算在天然状态、暴雨状态、地震状态及暴雨+地震四种工况条件下危岩体稳定性系数 F 值的大小，并对危岩体的稳定性进行评价。

表 4.3-5 危岩体稳定程度等级划分表

崩塌类型	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
倾倒式危岩	$F < 1.0$	$1.0 \leq F \leq 1.25$	$1.25 < F \leq 1.50$	$F > 1.50$
滑移式危岩	$F < 1.0$	$1.0 \leq F \leq 1.15$	$1.15 < F \leq 1.50$	$F > 1.50$

6、稳定性计算结果及评价

表 4.3-6 危岩体稳定性计算结果

危岩编号	崩塌类型	危岩体稳定系数及稳定性评价								
		自然状态		暴雨状态		地震状态		暴雨+地震		
		稳定性系数	稳定性评价	稳定性系数	稳定性评价	稳定性系数	稳定性评价	稳定性系数	稳定性评价	
危岩体	W1	滑移	1.35	基本稳定	1.12	欠稳定	1.08	欠稳定	0.78	不稳定
	W2	滑移	1.39	基本稳定	1.09	欠稳定	1.03	欠稳定	0.89	不稳定
	W3	滑移	1.13	欠稳定	1.05	欠稳定	0.85	不稳定	0.76	不稳定
	W4	滑移	1.12	欠稳定	0.93	不稳定	1.02	欠稳定	0.81	不稳定
	W5	滑移	1.40	基本稳定	1.20	基本稳定	1.11	欠稳定	0.92	不稳定
	W6	滑移	1.28	基本稳定	1.08	欠稳定	1.06	欠稳定	0.86	不稳定

危岩编号	崩塌类型	危岩体稳定系数及稳定性评价							
		自然状态		暴雨状态		地震状态		暴雨+地震	
		稳定性系数	稳定性评价	稳定性系数	稳定性评价	稳定性系数	稳定性评价	稳定性系数	稳定性评价
W7	倾倒	1.36	基本稳定	1.20	欠稳定	1.11	欠稳定	0.86	不稳定
W8	滑移	1.26	基本稳定	1.05	欠稳定	0.96	不稳定	0.85	不稳定
W9	倾倒	1.20	欠稳定	1.09	欠稳定	0.91	不稳定	0.75	不稳定

根据各个危岩体稳定性计算结果和分析评价成果可知，在自然工况下，危岩体处于欠稳定~基本稳定状态，其中处于基本稳定状态的 6 处，占总数的 66.7%；处于欠稳定状态的 3 处，占总数的 33.3%。危岩体在暴雨、地震和暴雨+地震三种工况下，各个危岩体的稳定性系数均有明显的下降，表明危岩体在外界诱因下有可能进一步发生失稳崩塌。在暴雨工况下，危岩体处于不稳定~基本稳定状态，其中处于不稳定状态的 1 处，占总数的 11.1%；处于欠稳定状态的 7 处，占总数的 77.8%；处于基本稳定状态的 1 处，占总数的 11.1%。在地震工况下，危岩体处于不稳定~欠稳定状态，其中处于不稳定状态的 3 处，占总数的 33.3%；处于欠稳定状态的 6 处，占总数的 66.7%。在暴雨+地震工况下，危岩体均处于不稳定状态。因此，亟需采取有效措施对海阳山摩崖石刻所依附崖壁发育危岩体进行加固治理。

六、文物本体病害现状及成因分析

6.1 病害现状调查

6.1.1 病害分类

本次主要针对经现场辨识发现的 7 处石刻进行详细的病害现状调查,编号 Q1~Q7。根据现场调查显示,海阳山摩崖石刻露天保存,现场保存条件相对较差,石刻本体发育表面风化、表面泛盐、裂隙、生物病害、表面污染与变色等 5 种类型病害,病害的持续发育导致石刻表面模糊不清,局部字迹、轮廓已难以辨识,对石刻本体造成严重的破坏,影响石刻的观瞻,甚至完全遮蔽了文物本体导致石刻信息难以辨认,严重影响海阳山摩崖石刻历史信息和艺术价值的表达,不利于后期的展示与利用。目前,病害正处于活跃状态。因此,亟需采取有效措施对石刻进行系统的保护。

本次海阳山摩崖石刻的病害调查以正射影像图、CAD 矢量图为基础记录底图,根据《石质文物病害分类与图示》(WW/T0002-2007)中的病害分类标准对石刻病害进行记录和标注,并对各类病害进行详细描述与分类,建立石刻现状分布图和记录档案,进行统计、汇总、分析与评估。

1、表面风化

石质文物病害中,风化病害是普遍存在且破坏性很大的一种。在长期温差作用、水岩作用、干湿循环作用、盐结晶作用等自然因素作用下,石刻岩石表面几乎都处于中风化~强风化状态,且有累进加剧之趋势。海阳山摩崖石刻表面风化病害主要表现为表面溶蚀,长期遭受雨水冲刷的石质文物,特别是碳酸盐类质地文物的表面形成坑窝状或沟槽状溶蚀现象,酸性降雨会加剧病害的发育,病害的发育具有分布范围广、

危害程度高和持续作用时间长等特点,是导致石刻表面字迹模糊不清的最主要原因。

表面风化病害的持续发育,将直接危及到文物本体的真实性和完整性,导致石刻表面字迹逐渐模糊不清,最终将难以辨识,影响石刻自身历史信息和艺术价值的表达。

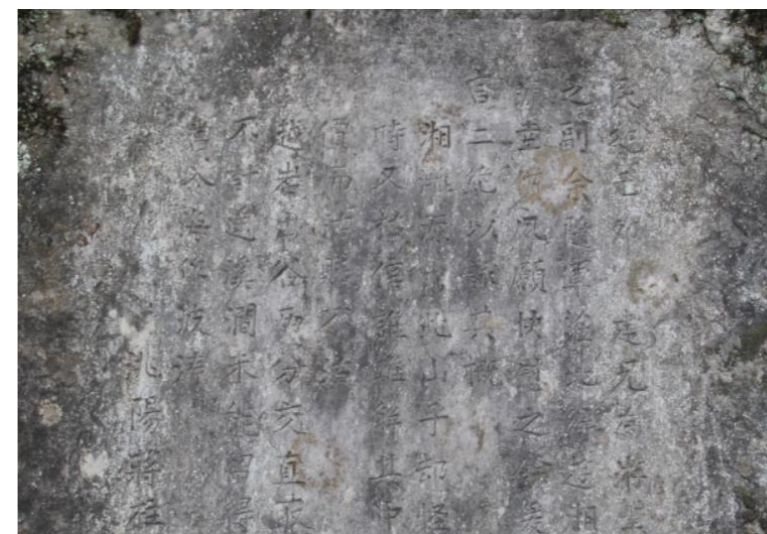


图 6.1-1 石刻表面风化病害

2、表面泛盐

表面泛盐是指由于水与可溶盐活动,使得可溶盐在石刻表面富集析出的现象,析出为灰白色结晶状物质,一般附着力不强,呈细小针状。石刻表面泛盐病害普遍存在,石质文物中可溶盐的反复溶解、结晶,会使得石质文物膨胀,孔隙增大,在表面形成裂纹甚至鳞片形状。

石刻表面泛盐病害的持续发育,会加剧石质文物表面风化病害的发育,危及石刻文物本体的真实性和完整性。



图 6.1-2 石刻表面泛盐病害

3、裂隙

石质文物裂隙有浅表性风化裂隙、机械裂隙和原生构造裂隙，海阳山摩崖石刻表面发育的浅表性风化裂隙，是指由于自然风化、溶蚀现象导致的沿石材纹理发育，一般比较细小，延伸进入石刻内部较浅，多呈里小外大的 V 字型裂隙；石刻表面发育的原生构造裂隙，是指岩石自身带有的构造性裂隙，类裂隙深入岩石内部；石刻表面发育的机械裂隙，是指因外力扰动、受力不均等引起的石质文物开裂现象，该类裂隙深入岩石内部。

石刻表面裂隙病害的持续发育，严重时威胁到石刻的整体性，裂隙交切、贯穿会导致石质文物发生整体断裂与脱落现象。



图 6.1-3 石刻表面裂隙病害

4、生物病害

海阳山摩崖石刻生物病害主要分为微生物病害。微生物病害是指苔藓、地衣等微生物菌群在石质文物表面及其裂隙中繁衍生长，导致石质文物表面变色及表层风化的现象。由于石刻露天保存，降雨期间，遭受降雨直接淋蚀破坏和崖壁上面流水侵蚀破坏作用，降雨为微生物的生长提供了条件，在受水害影响区域，表面滋生大量苔藓等微生物。微生物紧贴岩面生长，根系沿细小的岩石缝隙钻进浅表层，苔藓微生物新陈代谢产生的分泌物和生物死亡后有机体的腐烂分解的产物会使岩石分解破坏，加速岩石风化，使得石质文物表层矿物颗粒松散、脱落。待天晴后，经过太阳长期曝晒，微生物缺水死亡，苔藓尸体呈黑色~灰黑色附着在石刻表面，遮盖文物本体表面，影响文物观瞻。

石刻表面微生物病害的持续发育，将会加剧岩体表面风化作用，并影响文物表面观瞻。



图 6.1-4 石刻表面微生物病害

5、表面污染与变色

海阳山摩崖石刻表面污染物主要为粉尘和泥渍。石刻周边区域分布有寺庙和公路，来往车辆频繁，会导致区域空气中粉尘含量较高，长此以往，空气中的粉尘容易附着在石刻本体表面。石刻受崖壁面流水水害影响，面流水中携带有泥渍，部分泥质最终会停留、覆盖在石刻表面。

石刻表面污染病害的持续发育，一方面会影响石刻观赏及文物的艺术文化价值，不利于后期文物的展示与利用；另一方面也会对文物的保存和保护产生不利影响，加剧石材表面风化，使得岩石表面出现变色、风化剥落等现象。



图 6.1-5 石刻表面污染与变色

6.1.2 病害调查

1、Q1 石刻

Q1 石刻，尺寸 1500×1300，露天保存，整体保存及保存条件较差。石刻为《海阳山之记》。石刻为原岩开凿，石刻稳定性好；表面风化有一定程度，表面泛盐，表面字迹较为清晰。石刻表面覆盖一层薄薄的粉尘，受面流水水害影响，局部表面覆盖有泥渍覆盖，局部表面滋生有微生物，呈灰黑色，遮蔽了文物本体导致石刻信息难以辨认。

2、Q2 石刻

Q2 石刻，尺寸 2370×1440，露天保存，整体保存及保存条件较差。石刻为宋淳熙十四年静江府府学教授陈邕撰并书，进士秦焯石刻《海阳山灵泽庙之记》，详细记载了海阳山的历史沿革及范成大奏请敕封海阳山神、灵庙额的经过。石刻为原岩开凿，石刻稳定性好；表面风化有一定程度，存在明显的溶蚀现象，表面泛盐，表面字迹较为清晰。石刻表面覆盖一层薄薄的粉尘，受面流水水害影响，局部表面覆盖有灰黄色、

土黄色泥渍覆盖，局部表面滋生有微生物，呈灰黑色，遮蔽了文物本体导致石刻信息难以辨认。石刻表面发育有 3 道裂隙，裂隙切割穿过石刻本体。



图 6.1-6 Q1 石刻



图 6.1-7 Q2 石刻

3、Q3 石刻

Q3 石刻，尺寸 900×630，露天保存，整体保存及保存条件较差。石刻为民国二十八年 7 月邑人郑丙炎题并书碑。石刻为原岩开凿，石刻稳定性好；表面风化有一定程度，表面泛盐，表面字迹较为清晰；石刻下部表面溶蚀现象较严重，局部字迹已逐渐变得模糊不清。石刻表面覆盖一层薄薄的粉尘，受面流水水害影响，局部表面覆盖有灰黄色泥渍覆盖，局部表面滋生有微生物，呈灰黑色，遮蔽了文物本体导致石刻信息难以辨认。

4、Q4 石刻

Q4 石刻，尺寸 1380×990，露天保存，整体保存及保存条件较差。石刻为民国十七年灵川县知事陈美文撰写《禁止开凿海阳山岩石》碑文。石刻为原岩开凿，石刻稳

定性好；表面风化有一定程度，表面泛盐，表面字迹较为清晰；右侧受面流水水害较严重，发育明显的溶蚀现象，局部字迹已逐渐变得模糊不清。石刻表面覆盖一层薄薄的粉尘，受面流水水害影响，局部表面覆盖有灰黄色泥渍覆盖，呈条带状，局部表面滋生有微生物，呈灰黑色，遮蔽了文物本体导致石刻信息难以辨认。

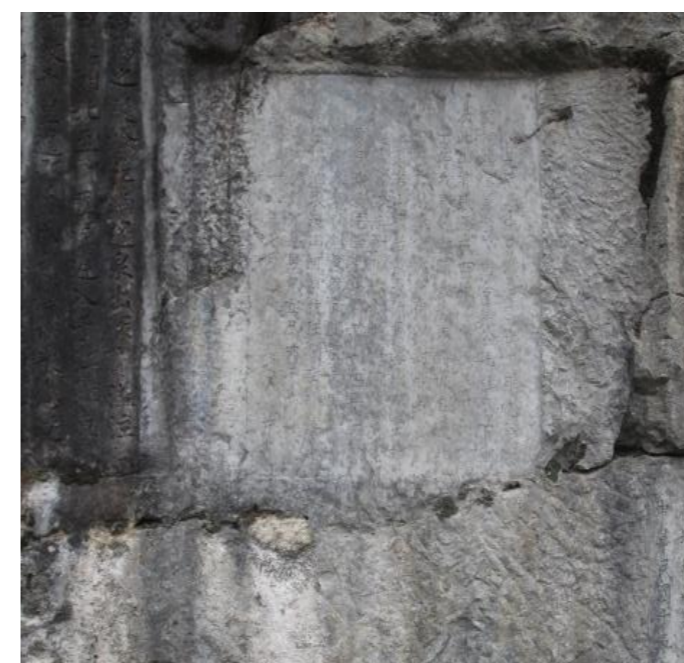


图 6.1-8 Q3 石刻



图 6.1-9 Q4 石刻

5、Q5 石刻

Q5 石刻，尺寸 1440×980，露天保存，整体保存及保存条件较差。石刻为“淳熙乙亥岁夏五月...”碑。石刻为原岩开凿，石刻稳定性好；表面风化有一定程度，表面泛盐，表面字迹较为清晰；石刻右下角部位表面溶蚀现象较严重，局部字迹已逐渐变得模糊不清。石刻表面覆盖一层薄薄的粉尘，受面流水水害影响，局部表面覆盖有土黄色泥渍覆盖，局部表面滋生有微生物，呈灰黑色，遮蔽了文物本体导致石刻信息难以辨认。石刻表面发育有 3 道裂隙，裂隙切割穿过石刻本体。

6、Q6 石刻

Q6 石刻，尺寸 860×860，露天保存，整体保存及保存条件较差。石刻为宋代摩崖石刻“湘漓二水之源”，六个大字为行书，字径 28 厘米。石刻为原岩开凿，石刻稳定性好；表面风化有一定程度，表面泛盐，表面字迹清晰。石刻表面覆盖一层薄薄的粉尘，受面流水水害影响，局部表面滋生有微生物，呈灰黑色，遮蔽了文物本体导致石刻信息难以辨认。石刻表面发育有 2 道浅表性风化裂隙，裂隙切割穿过石刻本体。



图 6.1-10 Q5 石刻



图 6.1-11 Q6 石刻

7、Q7 石刻

Q7 石刻，尺寸 520×440，露天保存，整体保存及保存条件较差。石刻为“民纪己卯”碑。石刻为原岩开凿，石刻稳定性好；表面风化有一定程度，表面泛盐，表面字迹较为清晰；局部受溶蚀较严重部位，字迹已逐渐变得模糊不清。石刻表面覆盖一层薄薄的粉尘，受面流水水害影响，局部表面覆盖有土黄色泥渍覆盖，局部表面滋生有微生物，呈灰黑色，遮蔽了文物本体导致石刻信息难以辨认。



图 6.1-12 Q7 石刻

6.2 可溶盐分析

现场取石刻表面风化样进行可溶盐分析，实验结果详见表 6.2-1。

表 6.2-1 可溶盐分析实验结果

样品编号	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	离子总量
Y1	5.52	2.32	48.36	1.35	3.31	0.93	37.66	99.45
Y2	2.66	8.15	56.32	1.20	1.56	2.03	42.37	114.29

注：单位 mg/L

根据实验结果可知，海阳山摩崖石刻文物本体表面可溶盐主要为石膏（CaSO₄·2H₂O）、芒硝（Na₂SO₄·10H₂O）和钠硝酸盐（NaNO₃）等，岩石表层风化样中易溶盐离子总量较高，主要阴阳离子种类一致，阳离子为 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺，阴离子为 Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻。

鉴于可溶盐富集是造成石刻表面风化、结构破坏及强度降低的重要因素之一，所以评估岩石表层可溶盐危害程度对研究岩石风化机理和岩石风化加固保护具有重要意义。评估标准参考《历史建筑材料中水溶盐危害程度的评价指标》（WW 2020-006-T 征求意见稿）。

表 6.2-2 可溶盐危害程度评价指标

单位：重量百分比（Wt%）

程度		微弱	中等	严重	极其严重
盐的类型	Cl ⁻	≤0.03	0.03~0.10	0.10~0.30	≥0.30
	NO ₃ ⁻	≤0.05	0.05~0.15	0.15~0.50	≥0.50
	SO ₄ ²⁻	≤0.10	0.10~0.25	0.25~0.80	≥0.80
评估及宜采取的技术措施		一般不需要采取措施。	需要具体分析，重要的不可移动文物及其砖石构件保存环境存在频繁干湿交替时，需要降低盐分。	需要采取措施降低盐份，否则影响保护质量，或对砖石质文物产生持续破坏影响，缩短其寿命或艺术价值体现。	需采取紧急措施降低盐分。

表 6.2-3 可溶盐危害程度统计表

取样编号		盐的类型		
		Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
可溶盐	Y1	5.55%（极其严重）	2.33%（极其严重）	48.63%（极其严重）
	Y2	2.33%（极其严重）	7.13%（极其严重）	49.28%（极其严重）

根据可溶盐危害程度评价统计分析可知，海阳山摩崖石刻受氯盐盐害程度为极其严重；受硝酸盐盐害程度为极其严重；受硫酸盐盐害程度为极其严重。综合评价海阳山摩崖石刻所受可溶盐危害程度为极其严重。

6.3 石刻病害调查统计

根据海阳山摩崖石刻文物本体保存现状及现场病害调查结果，对石刻本体现存病害类型及病害分布面积进行统计，具体详见表 6.3-1。

表 6.3-1 海阳山摩崖石刻病害调查统计表

石刻编号	病害分类				
	表面风化（m ² ）	表面泛盐（m ² ）	粉尘或泥渍（m ² ）	微生物病害（m ² ）	裂隙（m）
Q1	1.95	1.95	1.95	0.98	/
Q2	3.41	3.41	3.41	3.41	3.37
Q3	0.57	0.57	0.57	0.43	/
Q4	1.37	1.37	1.37	0.69	
Q5	1.37	1.37	1.37	1.37	1.29
Q6	0.74	0.74	0.74	0.74	1.06
Q7	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
合计	9.64	9.64	9.64	7.85	5.95

6.4 病害成因分析

岩体自身的特性和自然环境因素的干扰是引起海阳山摩崖石刻本体病害发育的驱动力，自然环境因素主要包括风化作用、干湿循环作用、温差作用、可溶盐作用等。石刻本体发育病害种类繁多，病害的发育往往是多种因素共同作用的结果，主要归结于石刻本体材质原因、风化原因和保存环境原因三个方面。

1、石刻本体材质原因

海阳山摩崖石刻岩石本体为沉积岩灰岩，岩体内部节理裂隙发育，岩体本身孔隙

率较大，其中富含有大量的粘土矿物和胶结物，极易析出钾盐和钙盐等可溶盐，造成石质文物表面可溶盐破坏。岩石主要成分为方解石，碳酸盐的材质特性决定了石刻的耐溶蚀性能较弱。另外，海阳山摩崖石刻存在时间久远，时间因素也是其遭到破坏的不可忽视的因素。

2、风化作用

石质文物的风化受外部因素的影响，主要包括：大气中之有害气体、尘埃、酸雨、地下水中可溶盐、油烟等化学因素；水、温度、风、砂、岩石空隙中盐的结晶与潮解等物理因素；菌类、苔藓、藻类等生物因素。以上这些外部因素是引起石质文物风化，造成石质文物损蚀破坏的重要因素。按照风化的成因，可将岩石风化按其外部因素分为以下三种类型，即物理风化、化学风化和生物风化。

(1) 物理风化

物理因素对石质文物的破坏是石质文物风化的一个重要因素。物理风化作用主要指：水、温度、风砂、盐的结晶与潮解、溶盐的晶变等物理作用对石质文物的影响。物理风化作用使岩体整体性发生破坏作用，产生风化，这种风化整个过程中不改变原有矿物成分，不涉及化学变化。

①温度对石材的机械破坏作用机理，表现在岩体是热的不良导体，岩石传热过程缓慢，当外界温度发生变化时，吸热与散热过程不平衡，导致产生温差应力。对于海阳山摩崖石刻来说，白天在阳光照射下，岩石表层因吸热而升温，并处于相对热膨胀状态，而岩体里层仍处于较低的温度之下，相对处于冷缩状态；但是在夜间则相反，岩体表层因散热而降温，相对处于冷缩状态，岩体里层却因为白天所吸收的热量不能及时散发而处于相对热膨胀状态。这样的反复作用，在岩体内产生较大的温差应力，

引起各种形态的裂缝，久而久之，这些裂缝日益扩大增多，被裂缝割裂开来的岩石表皮层层脱落，原本完整的石刻，就会因温度的变化而表面松散，形态逐渐模糊。

②除去温度外，水对石刻的影响很大，其破坏是通过雨水的直接冲刷、结晶，引起岩石的膨胀收缩作用实现的。海阳山摩崖石刻水分别来自两个方面，第一即为雨水，由于石刻本身无任何遮挡，经受降雨直接淋蚀作用。除直接作用的雨水外，石刻上方无排水系统，多雨季节在崖壁上形成面流水直接流向石刻，冲刷岩体；第二为热空气遇到冷的岩石表面时，有相当一部分潮湿空气凝结在岩石表面，气温下降时，水分会游离出来聚集浓缩甚至向岩石内部游动。同时，水分的存在也是导致生物病害、可溶盐富集、表面污染等病害的诱导因素。

(2) 化学风化

化学风化作用主要是水溶液与石材中的矿物进行化学反应，使石材逐渐分解的作用。在此过程中石质文物的结构遭到破坏，岩石的成分发生改变，并往往产生一些在地表条件下稳定的新矿物。在各种危害中，化学风化造成的后果尤其严重，我国很多地区的空气质量不容乐观，空气中含有大量的氮氧化物和硫氧化物，直接影响石质文物的寿命。酸雨、氮氧化物和硫氧化物与石材产生化学反应，生成可溶于水的盐类，使其表面腐蚀。空气中的游离水或自由水与大气中 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等有害气体共同作用形成酸雾， $2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2\uparrow$ ，石刻与酸性水接触生成易溶的 Ca^{2+} 的碳酸盐、硫酸盐和硝酸盐，随水分流失， $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 。石质文物长期暴露在开放环境中，必然会受到酸性水的侵蚀，变得疏松，易风化。

除空气中的污染外，岩体中可溶盐分的迁徙与活动给岩石带来较大的损害。地下水一般都是溶液，其中含有各种盐分的溶解物质，这些盐分的浓度过大或地下水所处

的环境发生变化而沉淀结晶，对岩壁产生较大压力，具有破坏力。此外，岩体表面易存在干湿循环，盐分的存在使干湿过程中盐分的结晶不断的进行，造成表面酥粉等风化现象。

（3）生物风化

生物风化是指由于生物活动而对岩石造成的破坏，在高温高湿环境下其作用非常明显。生物风化分为机械风化和化学风化。生物的机械风化主要表现为植物树根在石质文物的裂隙中长粗，对裂隙两壁产生压力，据测算这种压力可达1~1.5MPa，最终会导致岩石破裂，称为根系劈裂作用。

生物的化学风化作用指生物的新陈代谢产生的分泌物和生物死亡后有机体的腐烂分解的产物对石质文物的化学破坏作用。植物和细菌在新陈代谢中常常析出有机酸、硝酸、亚硝酸、碳酸和氢氧化铵等溶液，腐蚀石质文物并在石刻表面形成淀积物。腐殖质也是一种有机酸，对石质文物有腐蚀作用。微生物对岩石的化学风化作用较强烈，它们不停地创造各种酸类物质，其分解能力远远超过全部动植物所具有的化学分解能力，在微生物的参与下会加速石质文物的化学风化作用。

微生物侵蚀石材的过程可以分为三个阶段：微生物的传播与沉积阶段（诱导期）、微生物与岩石的相互作用阶段（对数期）、腐蚀层的剥离和腐蚀循环（恒定期）。微生物的种类主要包括细菌、真菌、光合类微生物地衣等。

以上多种风化原因是相互关联，相互促进的，各种风化和水的关系均较密切。物理风化产生的裂隙加速了岩石的化学风化和生物风化的进程，生物作用同样促进了化学风化作用，而化学风化作用又促进物理风化，加快岩石质文物的破裂程度，也为微生物的生长植入石质文物内部供了合适的场所和部位。总之，石质文物的风化是多种

因素的综合反映。

3、保存环境原因

海阳山摩崖石刻所在区域总体气候特点是：热量丰富，降水充沛，光照充足，四季分明，年均降水量 1932.9 毫米，年均相对湿度 77%~90%。石刻所在崖壁上植被生长茂盛，造成石刻保存区域相对湿度较高，导致石刻表面及载体岩石表面极易滋生生物病害。

石刻均为露天保存，降雨冲刷以及地表水冲刷石刻也是病害产生的主要原因。

七、结论与建议

7.1 结论

（1）海阳庙由明心寺、灵泽庙、海阳山摩崖石刻三部分组成，本次工程对象为海阳庙—海阳山摩崖石刻，2000 年 7 月由自治区人民政府公布为第五批重点文物保护单位。海阳山摩崖石刻位于灵川县海洋乡大庙塘村委大桐木湾村海阳山北麓，有石刻 7 方，最早一石刻修建于宋淳熙十四年，最晚修建于民国时期，历史跨度长，石刻主要坐北向南，为摩崖石刻，楷书与行书字体皆有，字体优美，苍劲有力，极富表现力。

（2）本次勘察详细查明了海阳山摩崖石刻区域气候条件、地形地貌、地质构造、地层岩性和水文地质等工程地质条件；查明了区域地表水特点（地下水对石刻本体无影响）；查明了文物本体及载体发育病害，并分析其成因，为本次加固保护工程提供必要的依据。

（3）根据现场勘察，海阳山摩崖石刻露天保存，现场保存条件相对较差。根据

现场调查显示，海阳山摩崖石刻露天保存，现场保存条件相对较差，石刻本体发育**表面风化、表面泛盐、裂隙、生物病害、表面污染与变色**等 5 种类型病害，病害的持续发育导致石刻表面模糊不清，局部字迹、轮廓已难以辨识，对石刻本体造成严重的破坏，影响石刻的观瞻，甚至完全遮蔽了文物本体导致石刻信息难以辨认，严重影响海阳山摩崖石刻历史信息和艺术价值的表达，不利于后期的展示与利用。目前，病害正处于活跃状态。因此，亟需采取有效措施对石刻进行系统的保护。

(3) 岩体自身的特性和自然环境因素的干扰是引起海阳山摩崖石刻本体病害发育的驱动力，自然环境因素主要包括风化作用、干湿循环作用、温差作用、可溶盐作用等。石刻本体发育病害种类繁多，病害的发育往往是多种因素共同作用的结果，主要归结于**石刻本体材质原因、风化原因和保存环境原因**三个方面。

(6) 经过现场勘察，发现海阳山摩崖石刻所依附山体发育危岩体病害，共计调查发现危岩体共计 9 处，编号 W1~W9。危岩体的孕发过程具有渐进性，失稳过程具有突变性，潜在威胁严重。本次勘察详细查明了危岩体的边界、形态和规模特征，掌握了危岩体崩塌的运动路径和运动形式。危岩体一旦发生崩塌，将会破坏崖壁的整体性和完整性，危及下方石刻文物本体的整体性、稳定性和安全性，威胁下部平台上过往行人的生命财产安全。根据各个危岩体稳定性计算结果和分析评价成果可知，在自然工况下，危岩体处于欠稳定~基本稳定状态，在暴雨、地震和暴雨+地震三种工况下，各个危岩体的稳定性系数均有明显的下降，表明危岩体在外界诱因下有可能进一步发生失稳崩塌。危岩体稳定性计算结果表明，目前，危岩体病害正处于活跃状态。因此，亟需采取有效措施对海阳山摩崖石刻所依附崖壁发育危岩体进行加固治理。

7.2 建议

(1) 文物保护设计中，所用工程措施要在保证崖壁区岩体整体稳定和文物安全的前提下进行设计，注重工程措施的可行性。

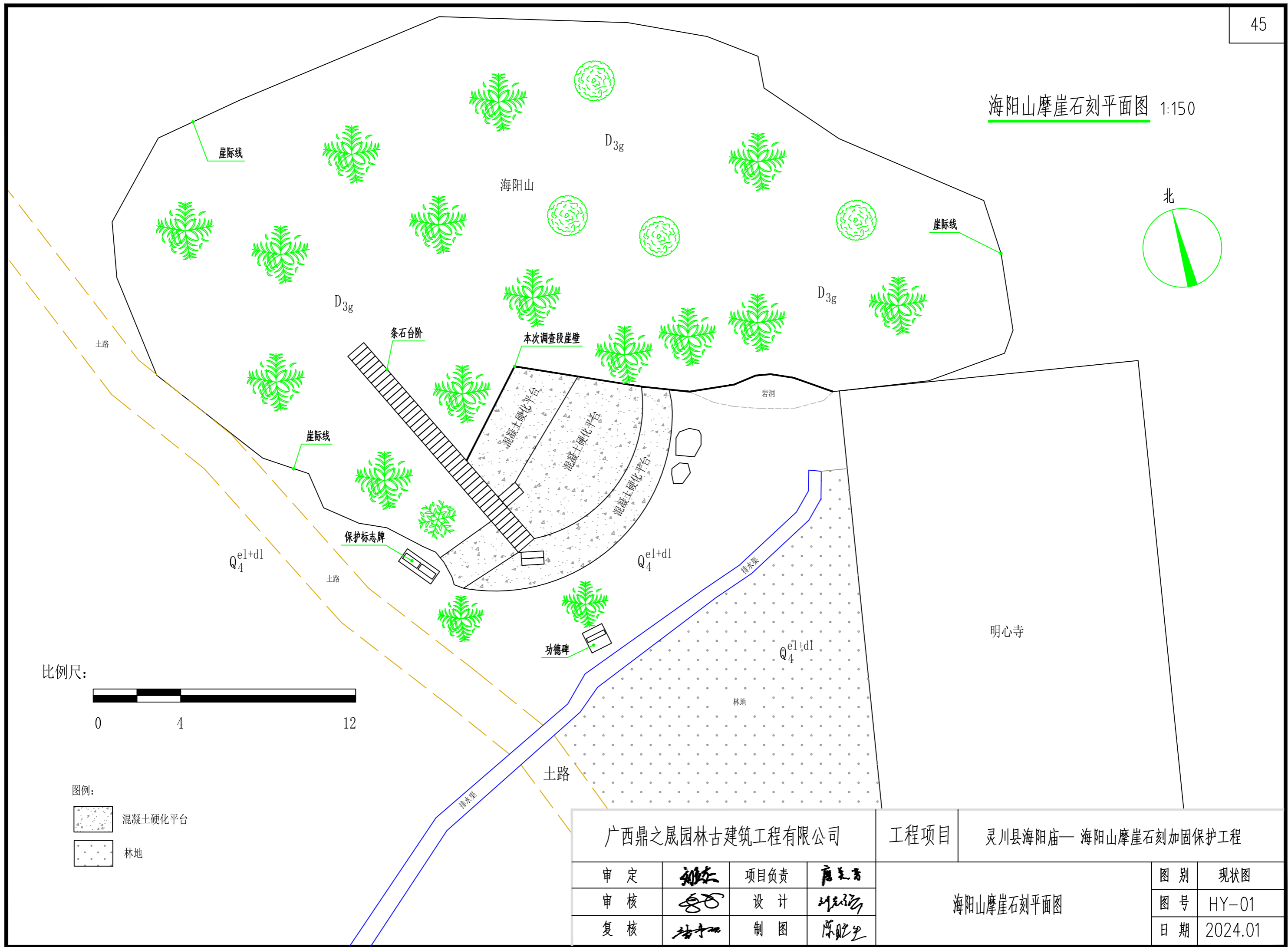
(2) 根据海阳山摩崖石刻本体病害发育特征，建议对石刻表面污染物进行清洁处理，对石刻表面进行脱盐、微生物防治处理，对石刻表面进行防水处理。为保证工程措施的有效性，建议在施工前开展现场试验。

(3) 根据各个危岩体崩塌破坏模式和稳定性计算结果，采用不同的有针对性的方式进行加固支护，治理措施主要为锚固、裂隙注浆等。由于危岩体病害的发生具有突发性，建立健全的地表位移监测系统和裂缝位移自动监测系统，进行长期监测，为危岩体的变形趋势预报和后期施工安全提供可靠的依据。

(4) 本次勘察是针对现状环境和条件下进行的，随着时间推移和环境地质条件的变化，潜在危岩将会形成新的危岩体，故建议做好监测预警工作，对新产生的危岩体及时上报，及时采取防治措施。

第二部分 现状图

海阳山摩崖石刻平面图 1:150



比例尺:

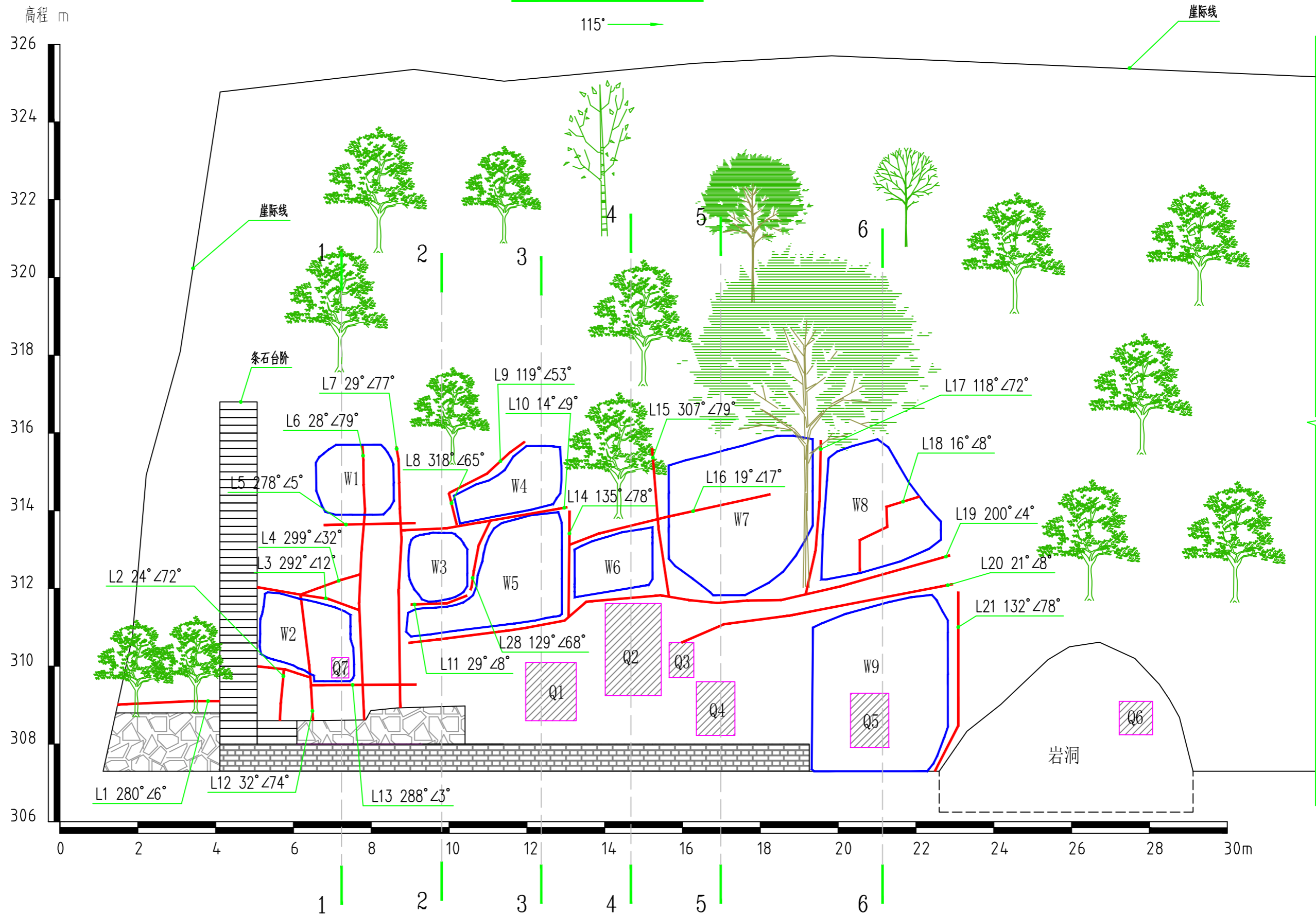


图例:

- 混凝土硬化平台
- 林地

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责		海阳山摩崖石刻平面图	图别	现状图
审核		设计			图号	HY-01
复核		制图			日期	2024.01

海阳山摩崖石刻立面图 1:100



图例:



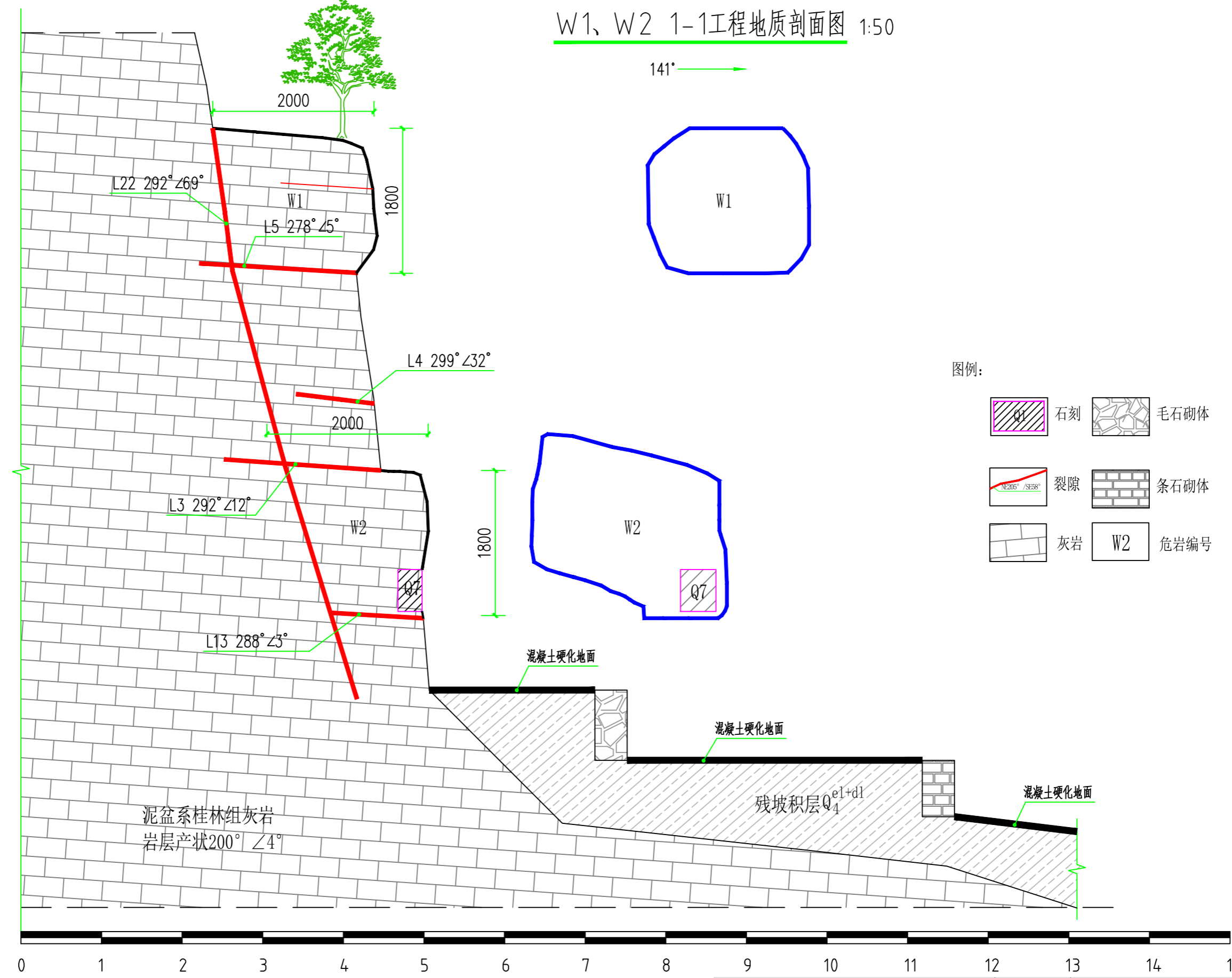
广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责人		海阳山摩崖石刻立面图	图别	现状图
审核		设计			图号	HY-02
复核		制图			日期	2024.01

高程: m



W1、W2 1-1工程地质剖面图 1:50

141° →



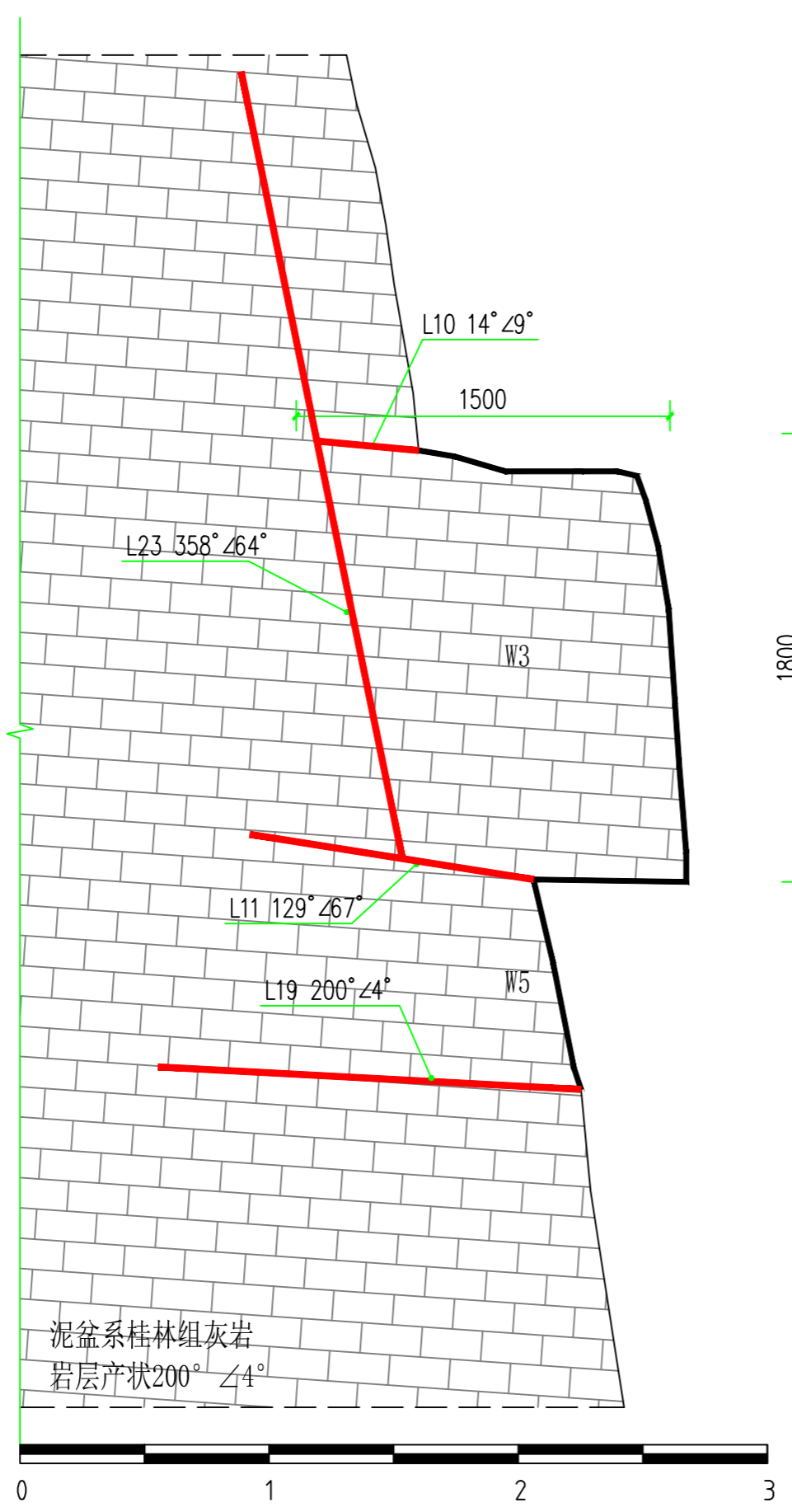
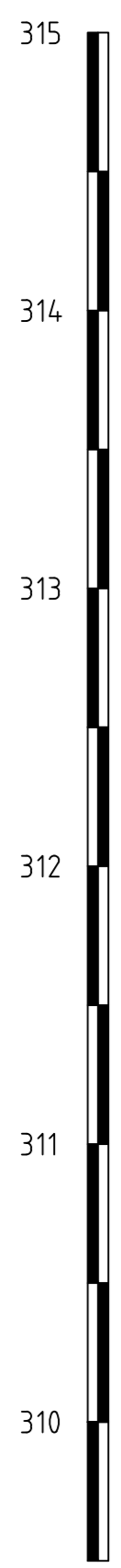
图例:

- 石刻
- 毛石砌体
- 裂隙
- 条石砌体
- 灰岩
- W2 危岩编号



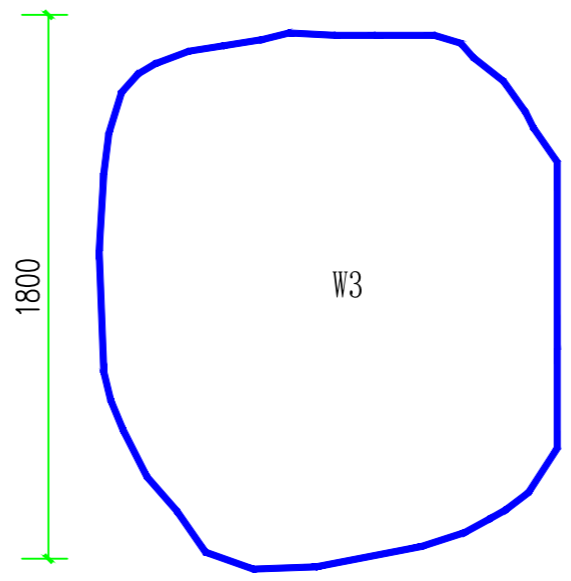
广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责		W1、W2 1-1工程地质剖面图	图别	现状图
审核		设计			图号	HY-03
复核		制图			日期	2024.01

高程: m



W3 2-2工程地质剖面图 1:25

136°



图例:

- 石刻
- 毛石砌体
- 裂隙
- 条石砌体
- 灰岩
- W2 危岩编号

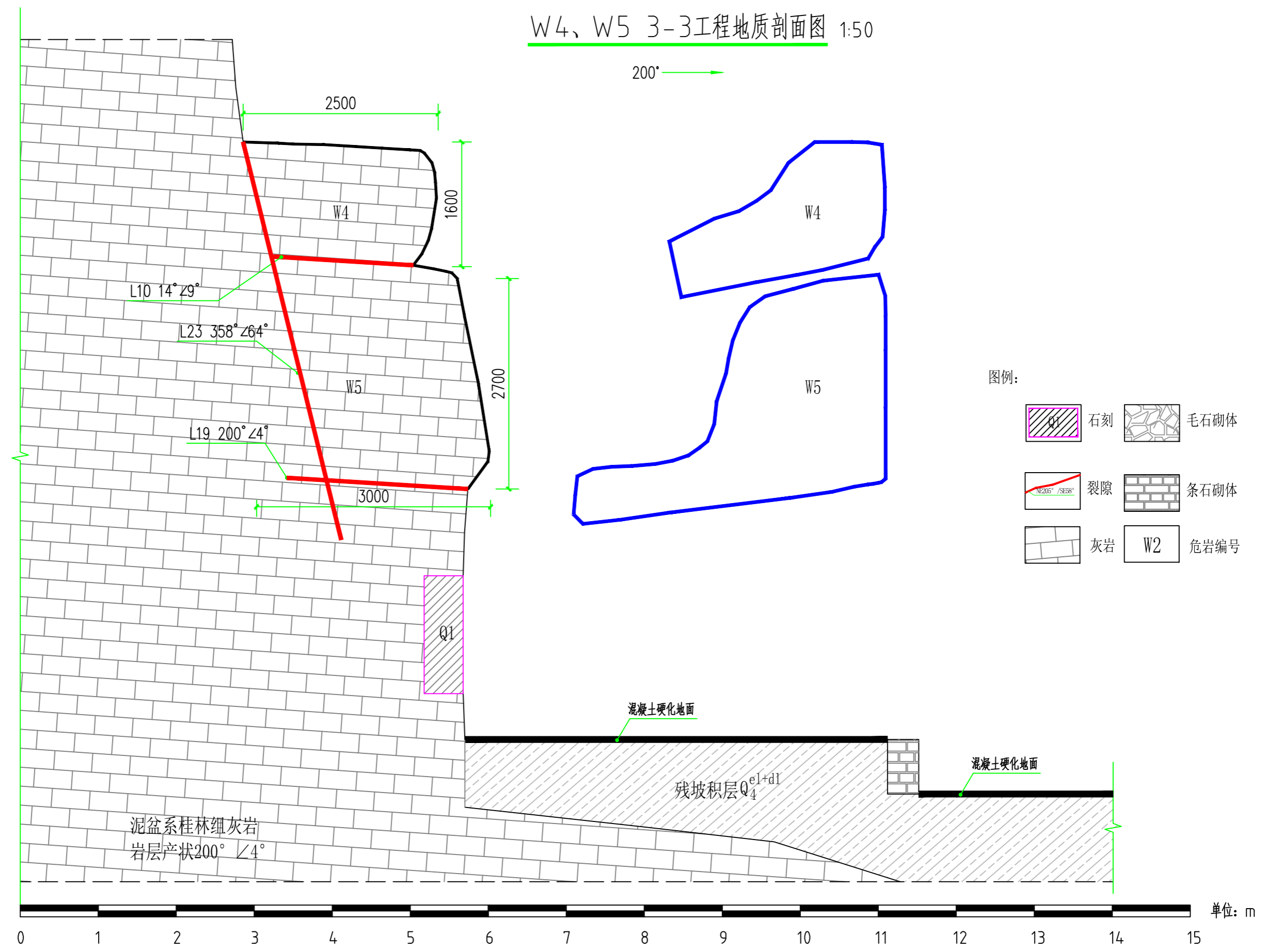
单位: m

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目		灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定	[Signature]	项目负责	[Signature]	W3 2-2工程地质剖面图	图别	现状图	
审核	[Signature]	设计	[Signature]		图号	HY-04	
复核	[Signature]	制图	[Signature]		日期	2024.01	

高程: m
 317
 316
 315
 314
 313
 312
 311
 310
 309
 308
 307
 306

W4、W5 3-3工程地质剖面图 1:50

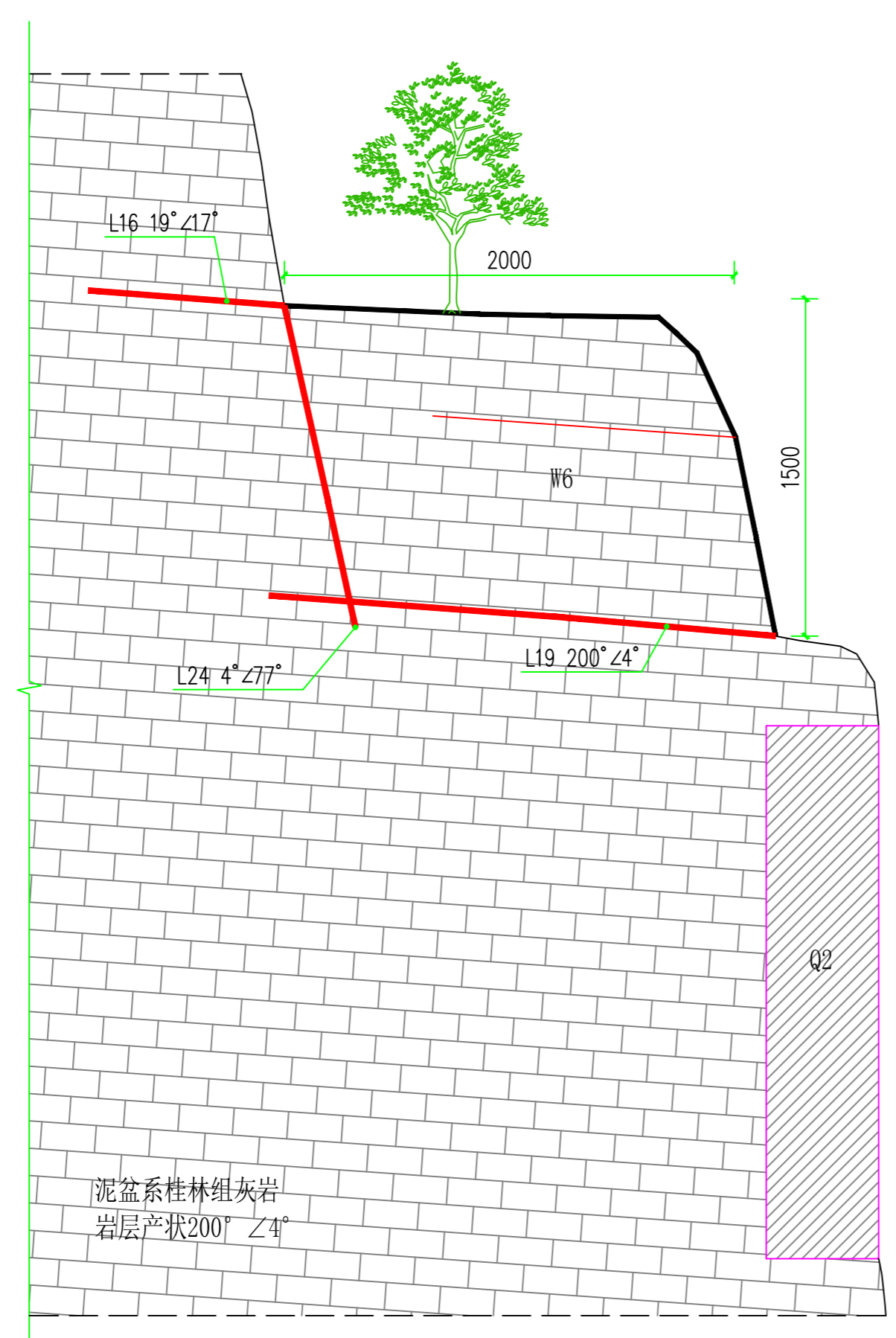
200° →



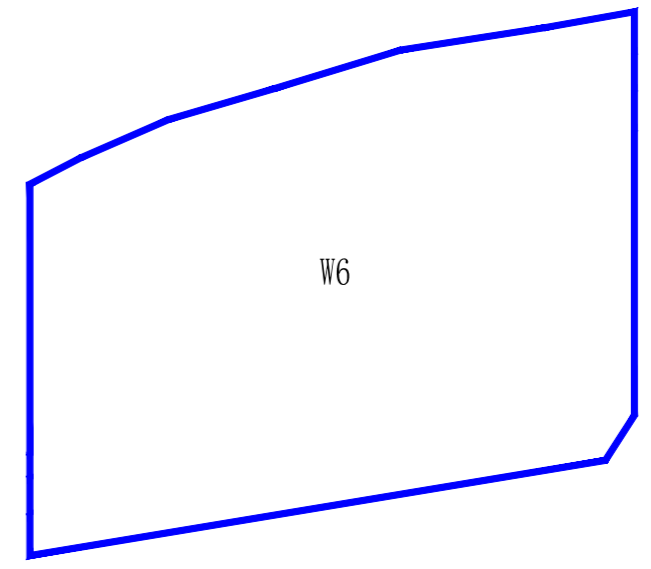
广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定	陈东	项目负责	廖志勇	W4、W5 3-3工程地质剖面图	图别	现状图
审核	李强	设计	陈东		图号	HY-05
复核	陈东	制图	陈东		日期	2024.01

W6 4-4工程地质剖面图 1:25

高程: m



200° →



图例:

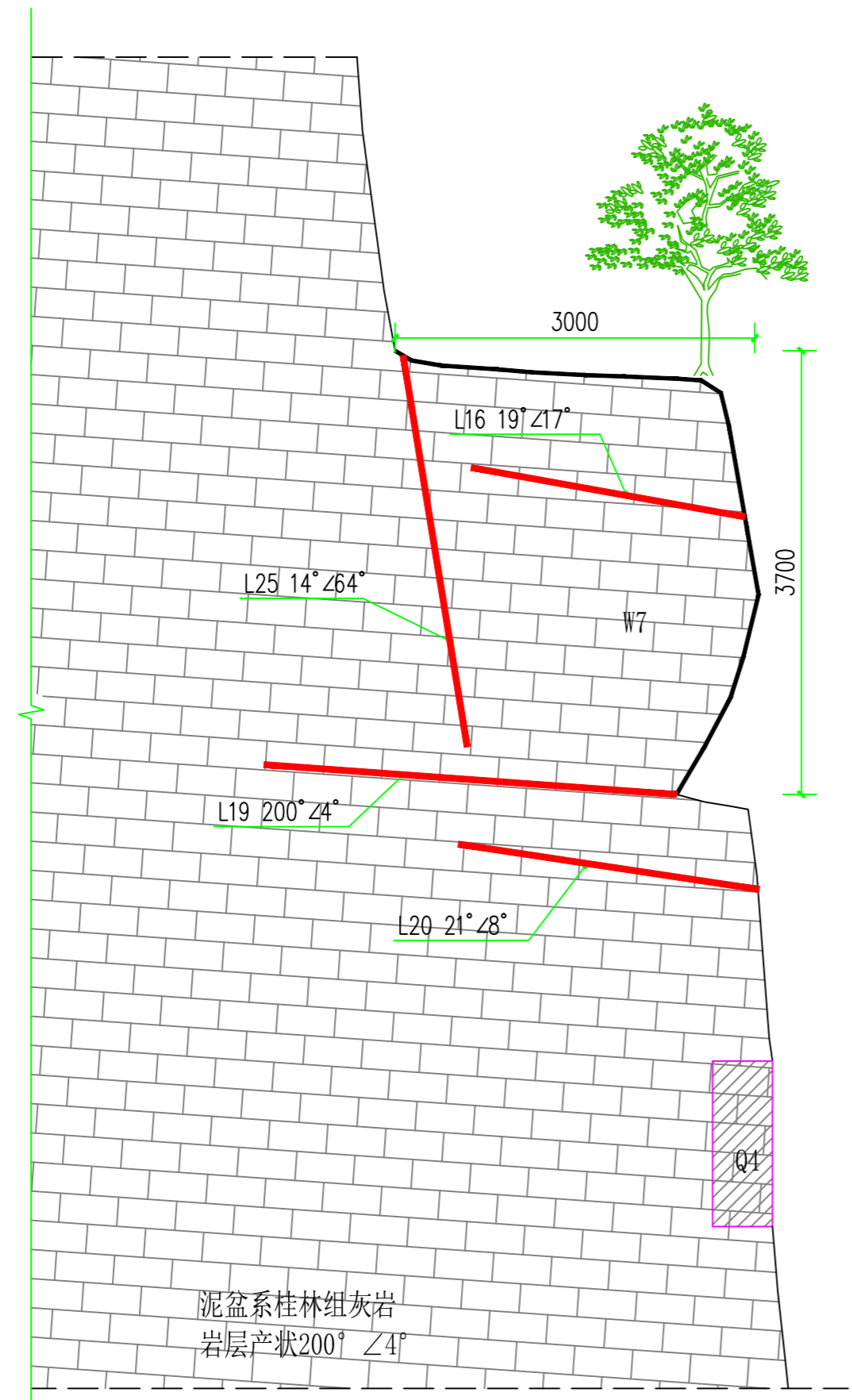
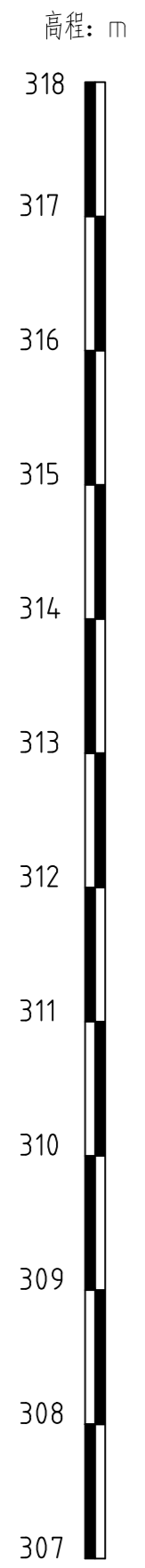
- 石刻
- 毛石砌体
- 裂隙
- 条石砌体
- 灰岩
- 危岩编号



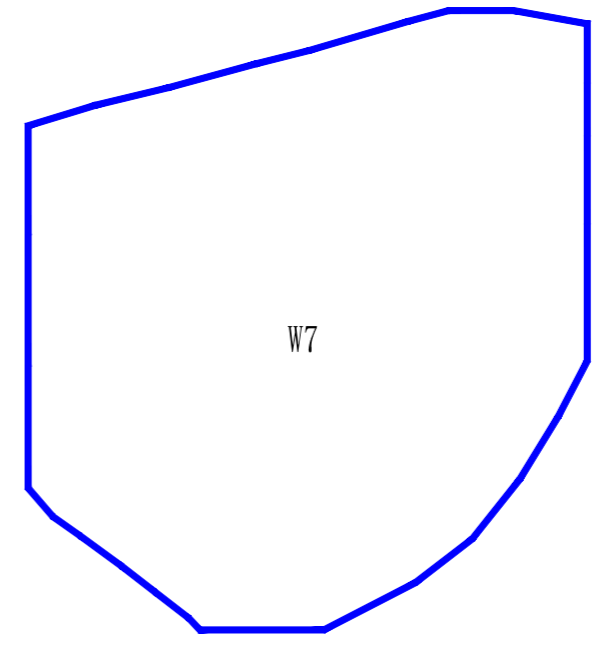
单位: m

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责		W6 4-4工程地质剖面图	图别	现状图
审核		设计			图号	HY-06
复核		制图			日期	2024.01

W7 5-5工程地质剖面图 1:50



200° →



图例:

- 石刻
- 毛石砌体
- 裂隙
- 条石砌体
- 灰岩
- 危岩编号

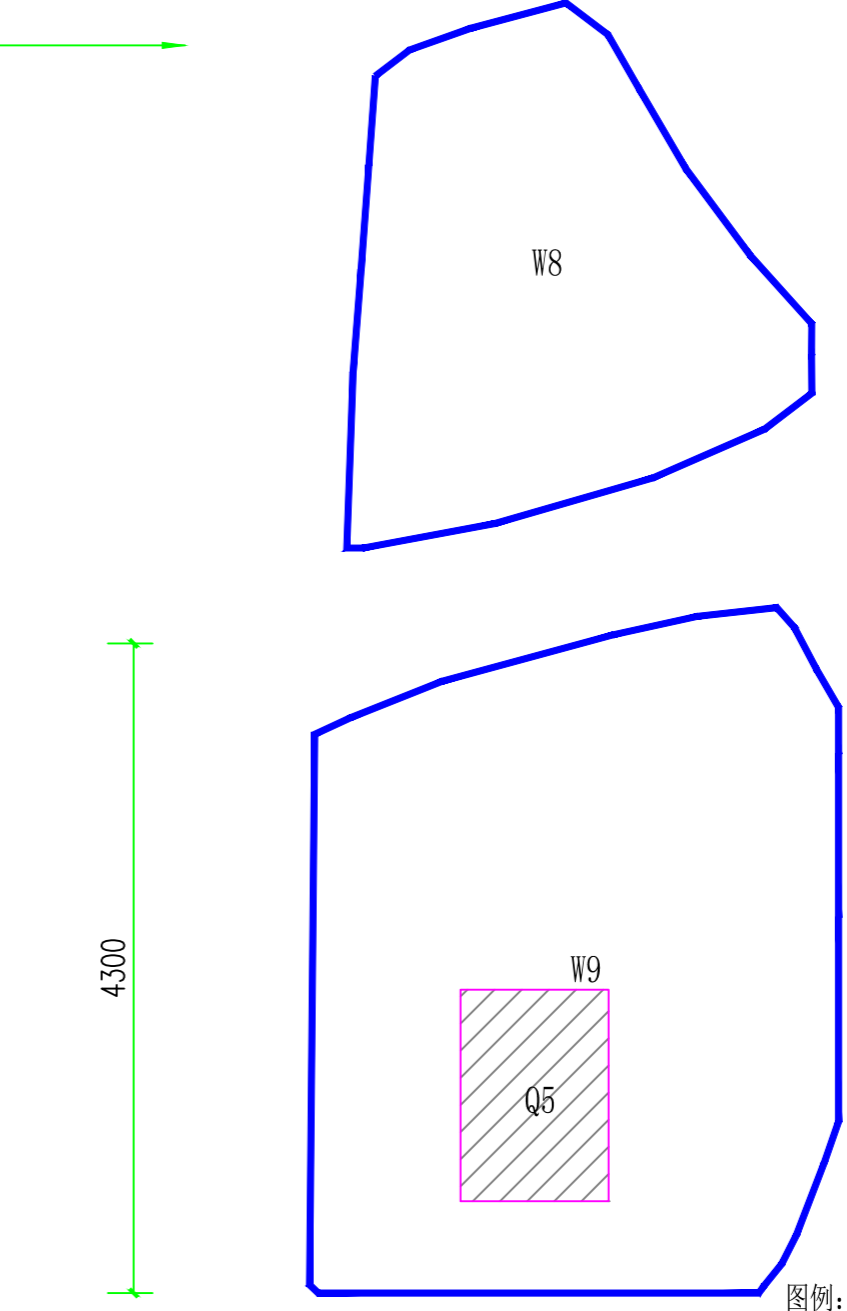
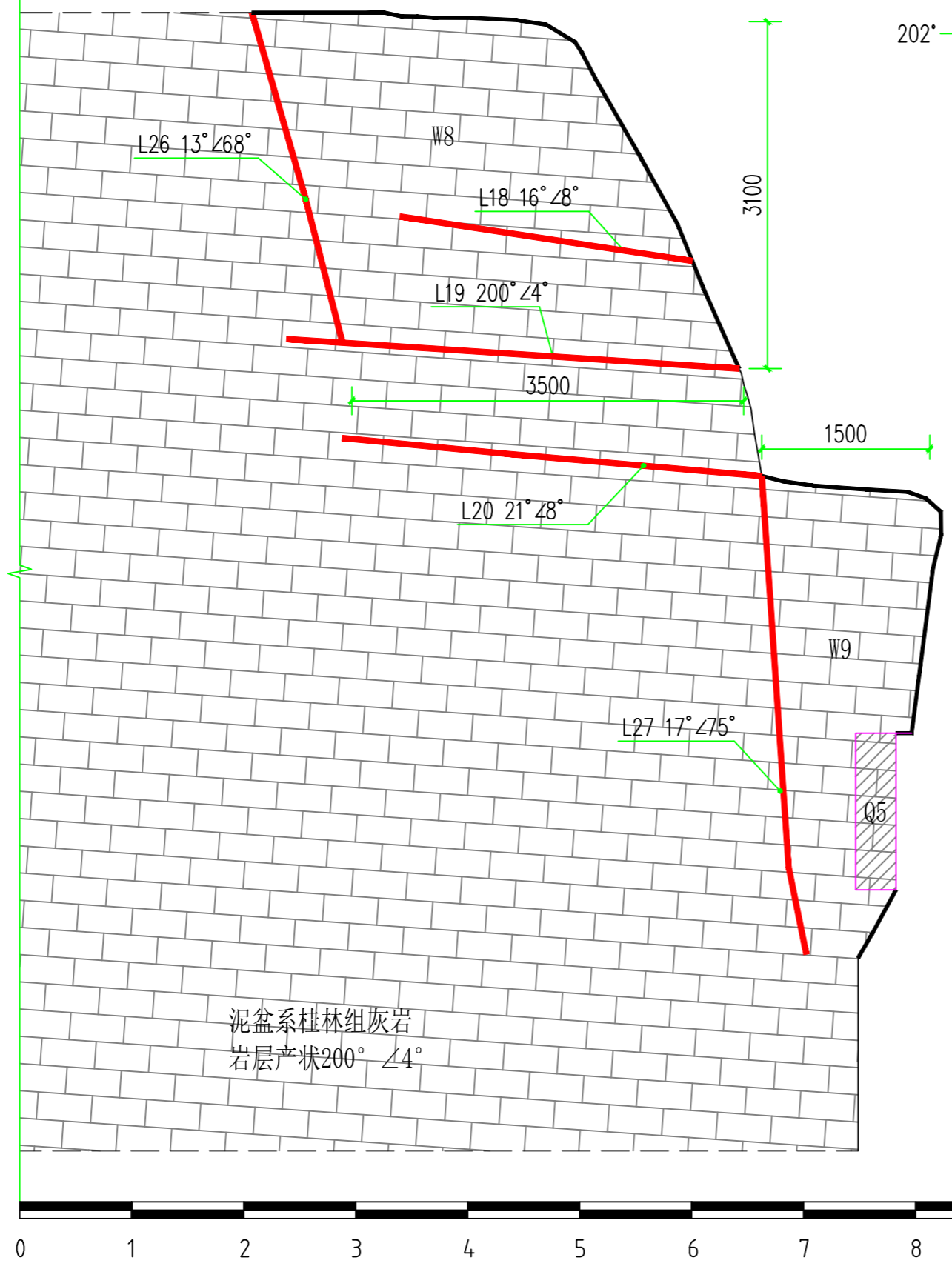


单位: m

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责		W7 5-5工程地质剖面图	图别	现状图
审核		设计			图号	HY-07
复核		制图			日期	2024.01

高程: m
316
315
314
313
312
311
310
309
308
307
306
305

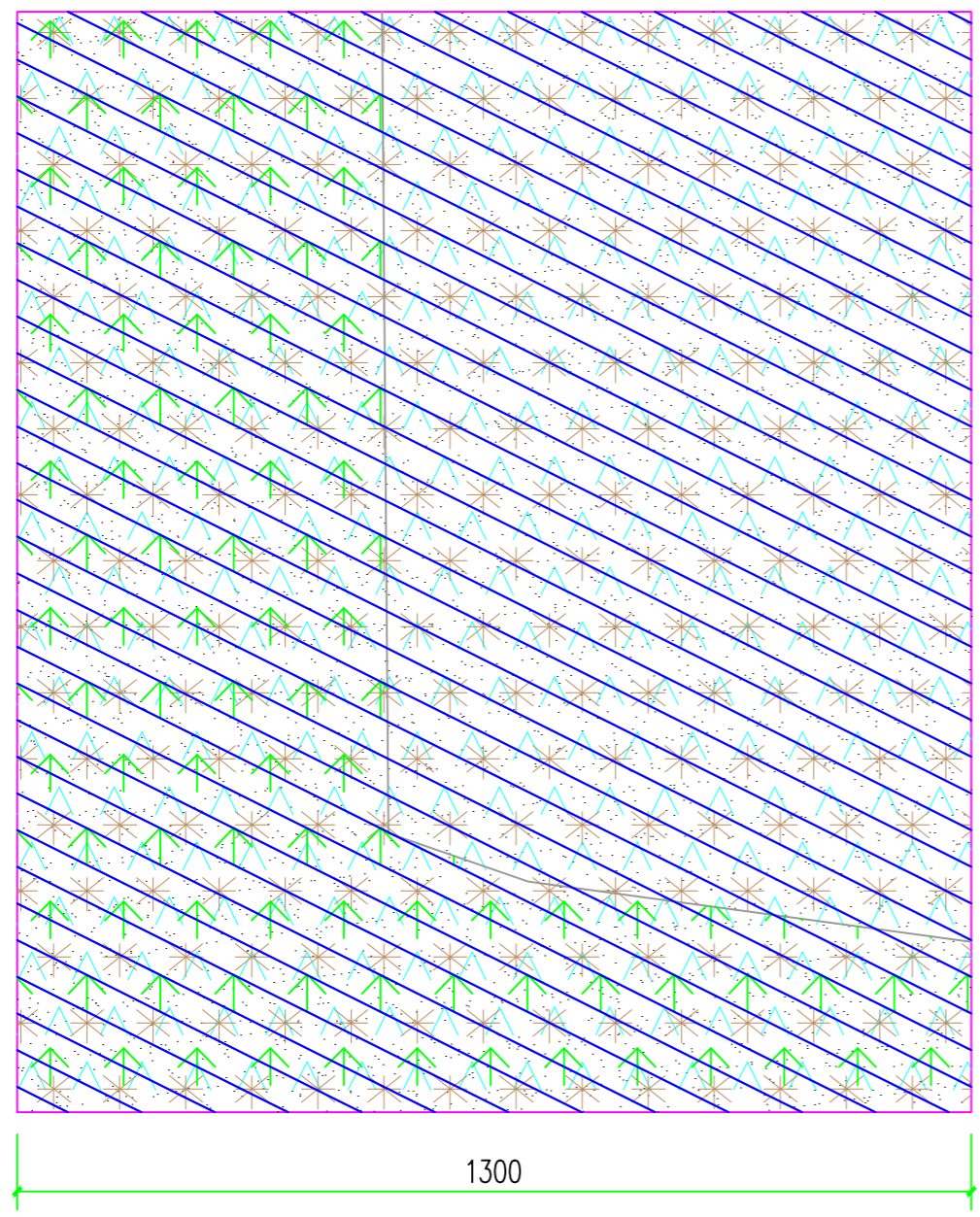
W8、W9 6-6工程地质剖面图 1:50



- 图例:
- Q5 石刻
 - 毛石砌体
 - 裂隙
 - 条石砌体
 - 灰岩
 - W2 危岩编号







0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 单位: m

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定	陈东	项目负责	廖志杰	W8、W9 6-6工程地质剖面图	图别	现状图
审核	李	设计	叶		图号	HY-08
复核	李	制图	陈		日期	2024.01



Q1石刻立面图 1:10

图例

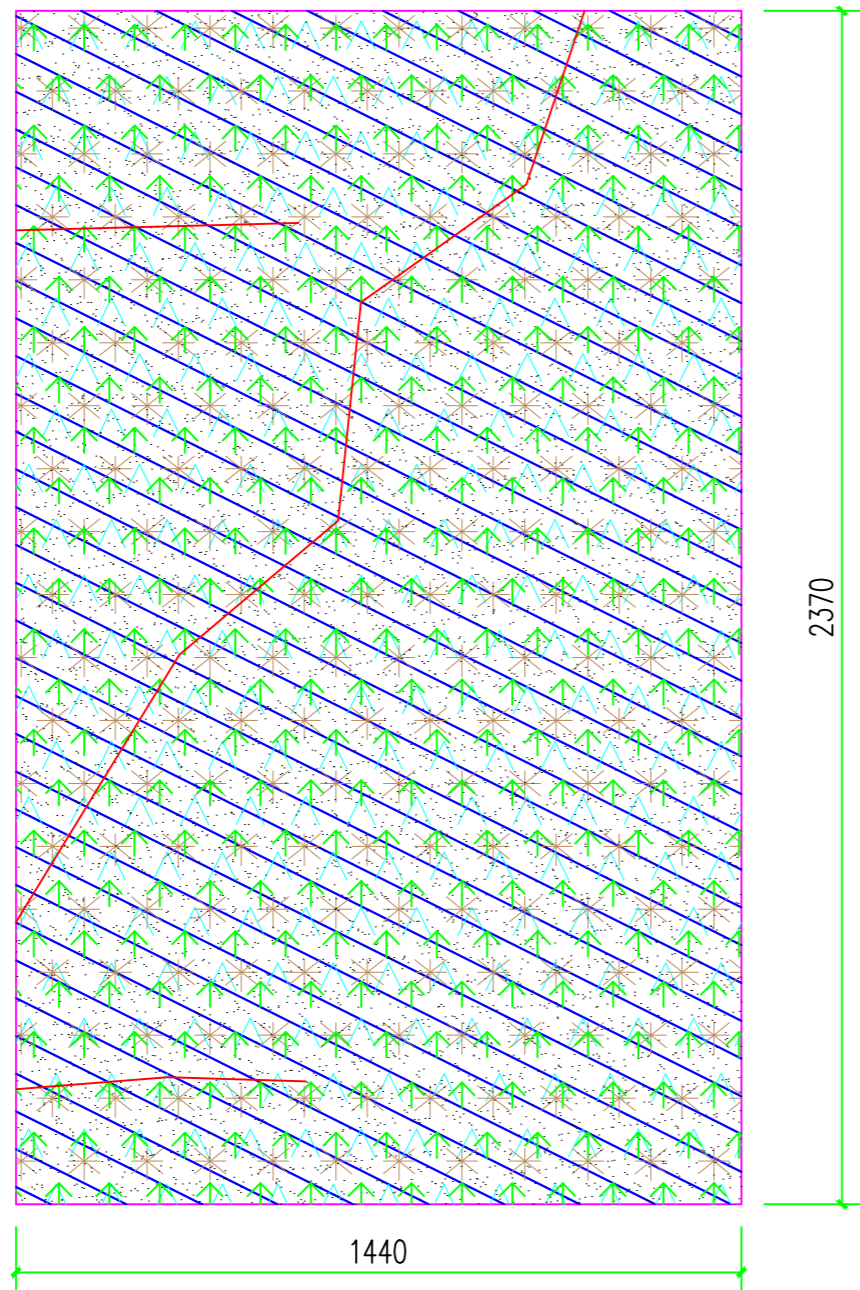
-  表面风化
-  表面泛盐
-  粉尘或泥垢
-  微生物病害
-  表面溶蚀
-  裂隙



Q1石刻影像图







病害类型	病害面积 (m ²)
风化	1.95
泛盐	1.95
粉尘或泥垢	1.95
微生物病害	0.98
裂隙 (m)	/

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程		
审定		项目负责		Q1石刻病害现状图	图别	现状图	
审核		设计			图号	HY-09	
复核		制图			日期	2024.01	



Q2石刻立面图 1:15



图例

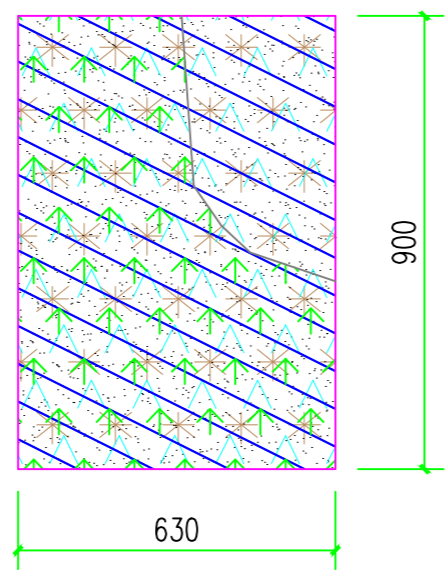
-  表面风化
-  表面泛盐
-  粉尘或泥垢
-  微生物病害
-  表面溶蚀
-  裂隙



Q2石刻影像图

病害类型	病害面积 (m ²)
风化	3.41
泛盐	3.41
粉尘或泥垢	3.41
微生物病害	3.41
裂隙 (m)	3.37

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程		
审定		项目负责		Q2石刻病害现状图		图别	现状图
审核		设计				图号	HY-10
复核		制图				日期	2024.01

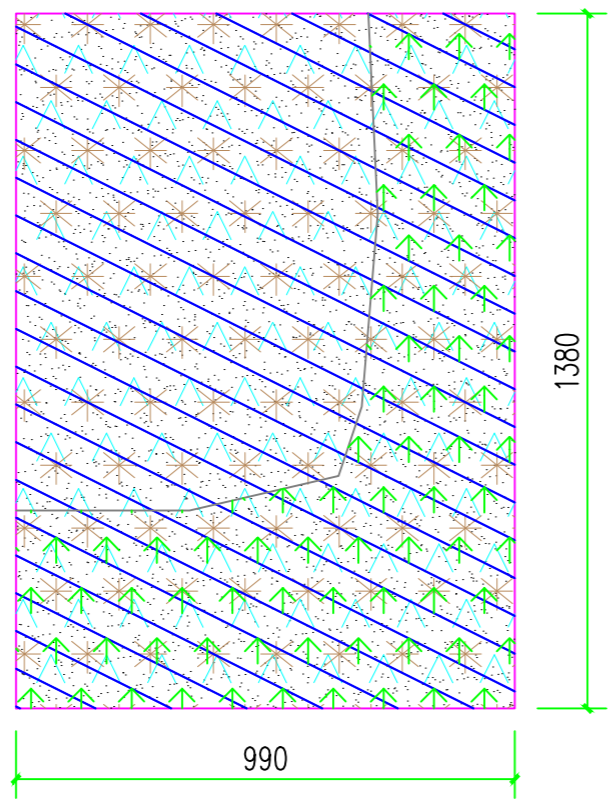


Q3石刻立面图 1:15



Q3石刻影像图

病害类型	病害面积 (m ²)
风化	0.57
泛盐	0.57
粉尘或泥垢	0.57
微生物病害	0.43
裂隙 (m)	/









Q4石刻立面图 1:15









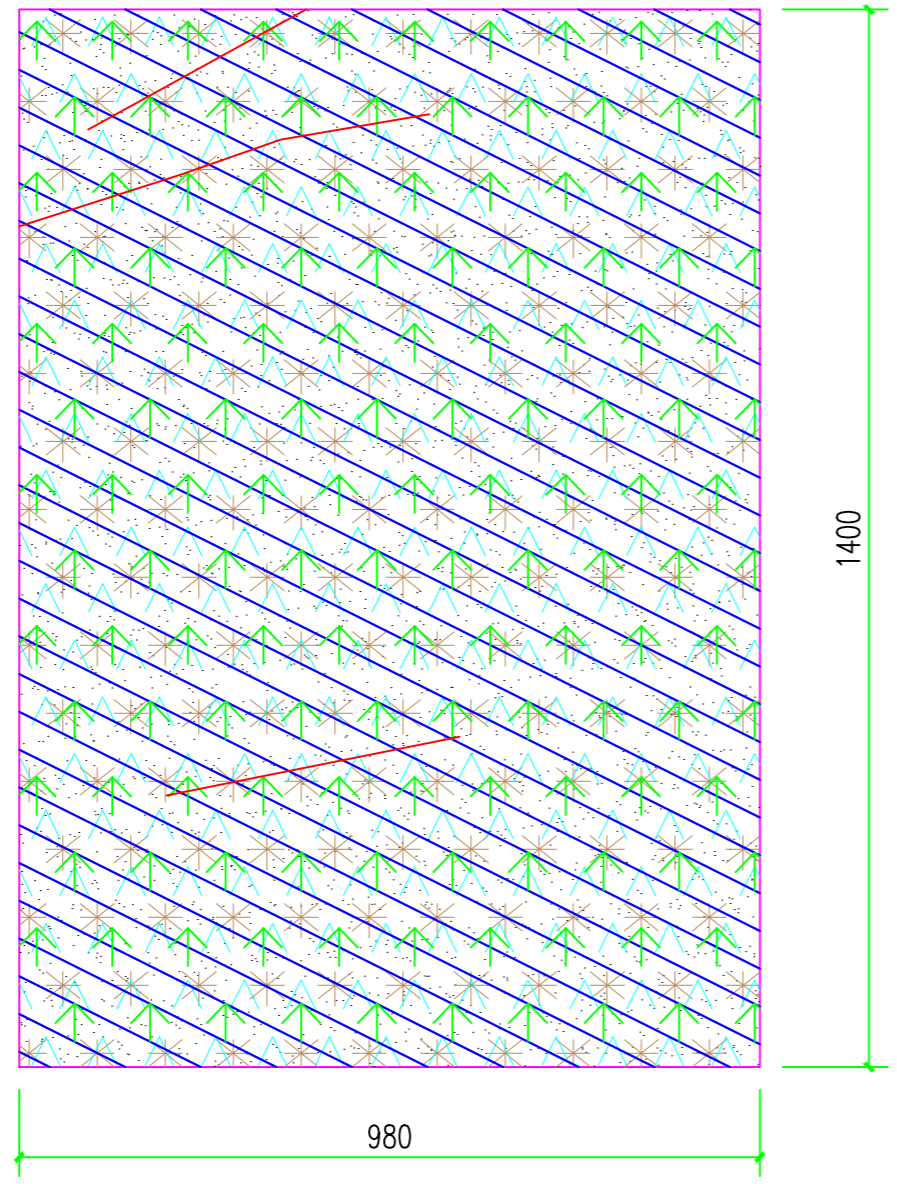
Q4石刻影像图

病害类型	病害面积 (m ²)
风化	1.37
泛盐	1.37
粉尘或泥垢	1.37
微生物病害	0.69
裂隙 (m)	/

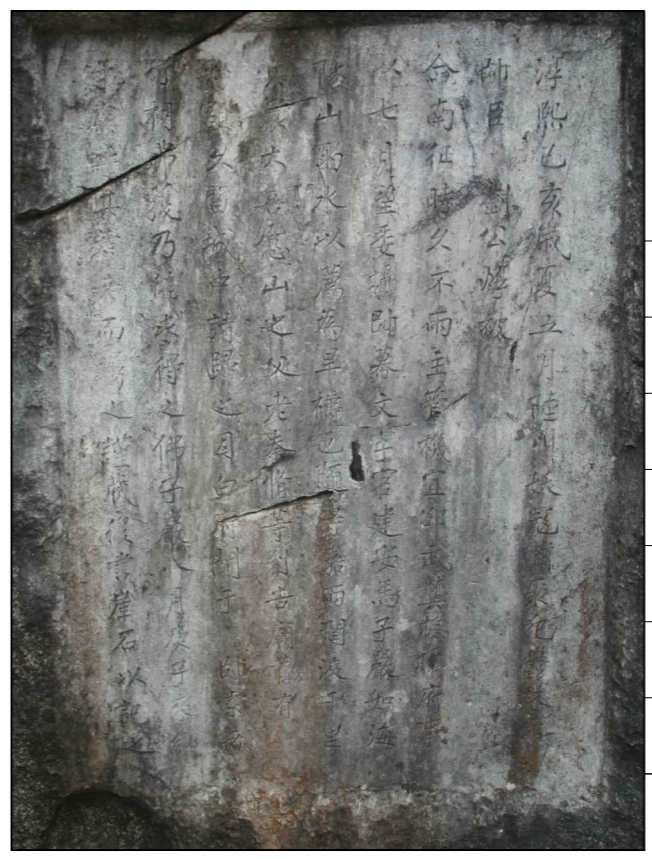
图例

-  表面风化
-  表面泛盐
-  粉尘或泥垢
-  微生物病害
-  表面溶蚀
-  裂隙

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程		
审定		项目负责		Q3石刻病害现状图	图别	现状图	
审核		设计			图号	HY-11	
复核		制图			日期	2024.01	
				Q4石刻病害现状图			









Q5石刻立面图 1:10



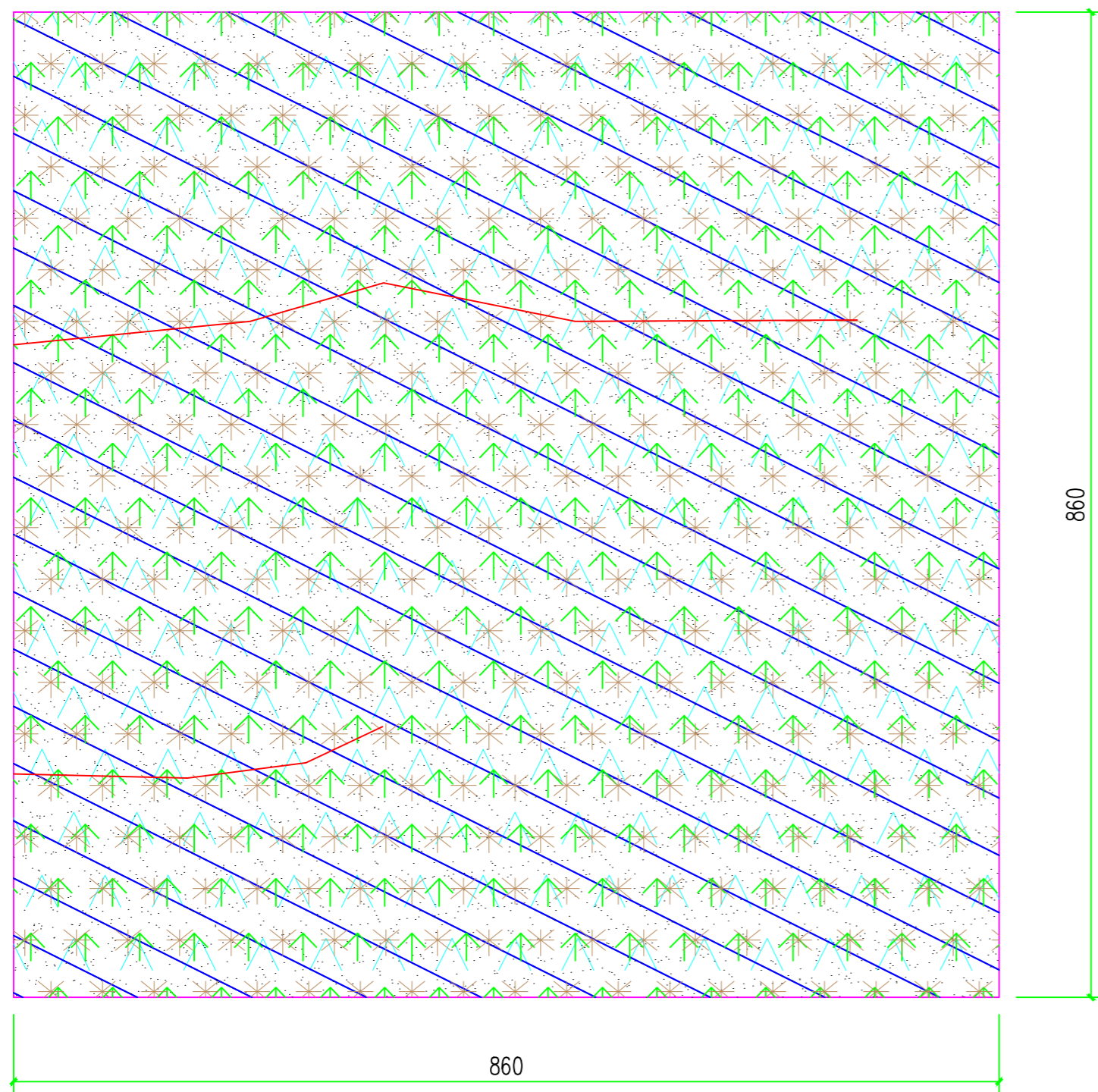
Q5石刻影像图

病害类型	病害面积 (m2)
风化	1.37
泛盐	1.37
粉尘或泥垢	1.37
微生物病害	1.37
裂隙 (m)	1.29

图例







-  表面风化
-  表面泛盐
-  粉尘或泥垢
-  微生物病害
-  表面溶蚀
-  裂隙

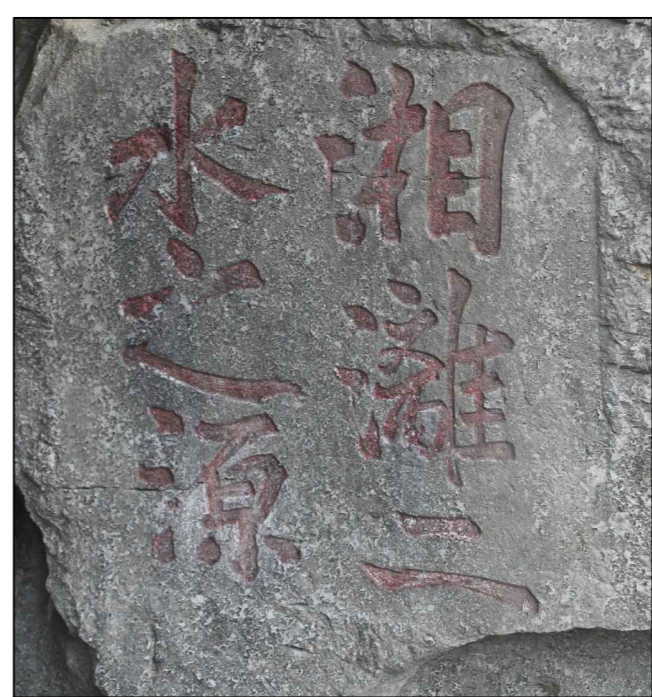
广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责		Q5石刻病害现状图	图别	现状图
审核		设计			图号	HY-12
复核		制图			日期	2024.01



Q6石刻立面图 1:5







图例

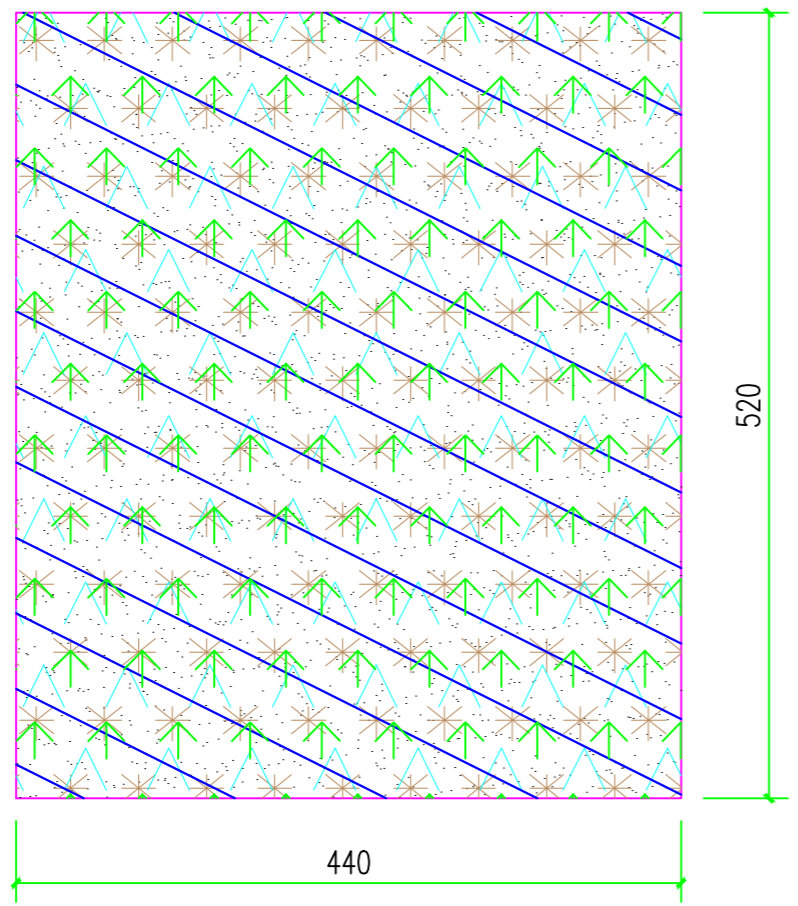
-  表面风化
-  表面泛盐
-  粉尘或泥垢
-  微生物病害
-  表面溶蚀
-  裂隙



Q6石刻影像图







病害类型	病害面积 (m ²)
风化	0.74
泛盐	0.74
粉尘或泥垢	0.74
微生物病害	0.74
裂隙 (m)	1.06

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程		
审定		项目负责		Q6石刻病害现状图	图别	现状图	
审核		设计			图号	HY-13	
复核		制图			日期	2024.01	



Q7石刻立面图 1:5







图例

-  表面风化
-  表面泛盐
-  粉尘或泥垢
-  微生物病害
-  表面溶蚀
-  裂隙



Q7石刻影像图

Q7石刻病害统计表	
病害类型	病害面积 (m ²)
风化	0.23
泛盐	0.23
粉尘或泥垢	0.23
微生物病害	0.23
裂隙 (m)	/

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程		
审定		项目负责		Q7石刻病害现状图		图别	现状图
审核		设计				图号	HY-14
复核		制图				日期	2024.01

第三部分 设计说明

一、设计依据

1.1 法律法规

1. 《中华人民共和国文物保护法》；
2. 《中华人民共和国文物保护法实施条例》；
3. 《纪念建筑、古建筑、石窟寺等修缮工程管理办法》；
4. 《文物保护工程管理办法》（2003 年文化部颁发）。

1.2 参考文件

1. 《国际古迹保护与修复宪章》（1964 年）；
2. 《中国文物古迹保护准则》（ICOMOS CHINA, 2015）；
3. 《保护世界文化和自然遗产公约》；
4. 《关于加强文化遗产保护的通知》；
5. 《考古遗址保护与管理宪章》。

1.3 国家规范及文件标准

1. 《石质文物保护工程勘察规范》（中华人民共和国文物保护行业标准 WW/T/0063-2015）；
2. 《石质文物保护修复方案编写规范》（中华人民共和国文物保护行业标准 WW/T/007-2007）；

3. 《房屋建筑制图统一标准》GB/T50001—2017；
4. 《岩土锚杆（索）技术规程》（CECS 22：2005）；
5. 《岩土工程勘察报告编制标准》（CECS 99：98）；
6. 《岩土工程勘察规范》（GB 5021-2001）（2019 年版）；
7. 《工程岩土分级标准》（GB/T 50218-2014）；
8. 《工程岩土实验方法标准》（GB/T 50266-2013）；
9. 《文物保护工程设计文件编制深度要求（试行）》；
10. 《钢筋焊接及验收规范》（JGJ18-2012）；
11. 《地质灾害防治工程勘察规范》（DB50/T143-2018）；
12. 《工程地质手册》第五版；
13. 《危岩防治工程技术规范》（DB45T1696-2018）；
14. 《砂岩质文物防风化材料保护效果评估方法》（中华人民共和国文物保护行业标准 WW/T/0007-2007）；
15. 《石质文物保护修复档案记录规范》（中华人民共和国文物保护行业标准 WW/T/0012-2008）。

二、设计原则

在遵循文物保护原则的前提下，实施全面、科学的保护工作，消除石刻存在的安全隐患和危害因素，确保石刻的长久安全。

(1) 不改变原状原则：真实、完整地保护石刻在历史过程中形成的价值及体现这种价值的状态。

(2) 最低限度干预原则：应把对石刻的干预限制在保护其安全和基本的展示功能需要的程度上，避免保护措施过度干预造成对石刻价值和历史信息的变化和破坏。

(3) 使用恰当的保护技术原则：对石刻采取的保护技术和将要运用的保护材料应经过前期试验，证明其在发挥保护作用的同时，长期对石刻无害方可使用。

三、工程性质、内容

根据《中华人民共和国文物保护法》、《文物保护工程管理办法》等法规的规定及工程分类，结合海阳山摩崖石刻文物本体病害发育特征、规律等，本次工程性质为保护修缮工程。

本次工程内容主要包括：海阳山石刻文物本体保护、三维数字化信息采集及数字化拓片、传统拓片制作和危岩体加固。

四、文物本体保护措施

4.1 现场试验

4.1.1 现场试验实施的必要性

为科学、有效的保护海阳山摩崖石刻，为保护设计施工提供科学参数，根据《中国文物保护准则》(2015)，针对海阳山摩崖石刻本体保护工程，在后期各项保护修复工作实施前，应根据不同阶段的保护修复工作开展相应现场试验。由于现场情况的复杂性和多样性，在进行施工前，有必要在现场进行小范围的现场试验，以论证本体保护措施的可性。

4.1.2 现场试验实施的选点及环境要求

- (1) 现场试验选点要求具有代表性，可论证不同保护措施的实施效果。
- (2) 现场试验选点要避开重要文物点，在相对不重要的区域进行试验。
- (3) 试验要避开极端气候条件。温度在 10°C-30°C，相对湿度 40%-80%之间。

4.1.3 现场试验实施内容及周期

(1) 根据海阳山摩崖石刻本体病害发育类型、特征等具体情况，现场试验实施内容包括各项本体保护措施的具体操作细节、流程。现场试验内容主要有：**表面污染物清理试验、裂隙注浆试验、表面脱盐试验、表面微生物防治试验和表面防水试验**和等 6 项内容。

- (2) 根据各项本体保护措施要求，试验周期约 7~28 天。

4.1.4 现场试验效果评估

采取现场目视评估，现场、实验室仪器检测等方法对现场各项保护试验效果进行评估，评估修复效果对文物本体观感的影响，评估保护修复材料各项性能是否能达到文物的保护要求。

4.2 表面污染物清理

4.2.1 保护思路

通过现状调查发现，海阳山摩崖石刻处在露天的环境中，石刻表面附着粉尘、泥渍和微生物等污染物。石刻表面附着的污染物，一方面会影响石刻观赏及文物的艺术文化价值；另一方面也会对文物的保存和保护产生不利影响，加剧石材表面风化，使得岩石表面出现变色、风化剥落等现象。因此，有必要对岩石表面进行清洁处理。

通过对岩石表面进行必要的清洗，一方面可以还原石质文物的本来面貌，将其原本的历史价值、艺术价值、文化价值、社会价值最大化的展现出来，有利于后期的展示利用；另一方面，清除文物表面的沉积污染物和文物材质孔隙中的深层污染物，可以有效的打开岩石孔隙结构从而增加孔隙结构的贯通性，恢复石材微孔隙的水蒸气通道，为后续的保存与保护工作打下基础，可以提高石材对保护剂的吸收率和吸收深度等。

在石质文物的清洗中，必须严格制止使用对文物本体有害的方法，限制使用对环境有害的方法。因此，本次表面污染物清理主要采用手工机械清理+高温蒸汽清洗相结合的方式清洁，首先采用手工机械清理的方式进行清洁，清理完成后配合采用水蒸气清理的方式进行清洁，达到清洁的目的，去除残留污染物和顽固物质。

4.2.2 清理目的与原则

(1) 清理石刻表面病害及有害污染物，打开石刻被积尘或污染物封闭的孔隙，恢复其呼吸性。

(2) 清理后不应在石刻表面或内部留下有害物质。

(3) 清理过程不应在石刻岩石基体产生新的腐蚀和破坏。

(4) 清理程度要适度，清理前后色差不能太大，清理后石刻整体颜色要与周边岩石基体风貌相一致和相协调。

(5) 清理程序中的每一个步骤都是可控、渐进的与有选择性的。

(6) 实行整体清理时要注意适度，把握好清理程度，清理前后反差不能太大，其总体色调不宜过新；清理到与周边岩体颜色相协调即可。对于微生物需清理干净，确保表面无残留。

(7) 石刻表面清理程度要达到能保证后续石刻本体保护修复施工顺利实施的程度。

4.2.3 手工机械清理

1、施工工艺

(1) 首先，确定清洗对象和范围，对周边不需要清洗的区域进行隔离保护；可采用塑料薄膜、宣纸等材料对非施工区域做好遮蔽防护。

(2) 采用软毛刷轻轻地刷除表面粉尘等松散沉积物；然后，用洗耳球吹除表面缝隙内细小的粉尘。

(3) 使用竹签、手术刀、排刷等工具将石刻表面较厚的泥质、顽固物质等顽固污染物进行清除。

(4) 采用压缩空气吹除表面残留粉尘。

(5) 针对石刻表面细小夹缝中的附着灰尘，采用棉签蘸取去离子水在待清洁表面轻轻滚动将灰尘沾附到棉签上再行去除；清理过程中在清理部位下方用脱脂棉衬托，随时吸取留下的清理液，防止在岩面上形成“流挂”现象。

(6) 在整个清理过程中，须采用吸水吸尘器随时收集清理的污染物和清洗后的污水，并及时运至施工区域外。

2、质量检验

(1) 检查清洁区域是否有清洗不干净现象。

(2) 检查清理后石刻整体颜色是否与周边相协调。

4.2.4 水蒸气清理

1、施工工艺

(1) 选择合适位置安装蒸汽清洗设备，并配备齐全脱脂棉、软毛刷、吸尘器等辅助工具。

(2) 根据石刻表面污染程度，调整蒸汽清洗机的压力、温度（小于 60°C）、距离、角度以及清洗作用时间等对污染区进行清洗，并用脱脂棉反复清理表面残留液体。

(3) 清洗过程中要控制作用时间，避免在岩面上形成“流挂”现象。

(4) 清洗过程中必须用吸水吸尘器随时收集清理的污染物和清洗后的污水，并及时运至施工区域外。

2、质量检验

(1) 检查清洁区域是否有清洗不干净现象。

(2) 检查清理后石刻整体颜色是否与周边相协调。

4.3 裂隙注浆

4.3.1 裂隙灌浆加固的必要性

海阳山摩崖石刻表面存在裂隙病害。裂隙容易造成在自然环境因素下，雨水、积尘及泥土等会顺开裂区域渗入，加速岩石内部风化，影响石刻的稳定性。对裂隙病害主要采取修补的措施，裂隙较深时配合灌浆加固后再修补。

4.3.2 裂隙灌浆加固措施

1、施工工艺

(1) 清洗裂隙面：首先，用竹签等工具初步去除裂隙内填充物；用去离子水清洗裂隙面，并配合软毛刷轻缓清洗，用脱脂棉吸干清洗部位；待裂隙面干燥后，采用压缩空气进行最后的清洁处理。

(2) 封缝、布置注浆管：采用天然水硬性石灰 NHL-A05 对裂隙进行封缝处理，并预留注浆孔，水灰比 0.2~0.3。要求封堵位置适当凹进 1cm，便于后期表面修补作旧。注浆孔间距控制在 3~5cm，宽缝或平缝间距可适当增大，细缝或垂直缝间距可适当减小，裂缝交错时交叉处必须设注浆管。

(3) 注浆：用注射器对裂隙注浆，注浆材料天然水硬性石灰 NHL-I07，水灰比 0.4~0.5。注浆操作时采用注射器将浆液按自下而上的次序通过注浆管进行注浆，当相邻的上方注浆孔中出现浆液溢出时应停止注浆，并堵塞该注浆孔，再向上方的注浆管中注浆。一次性注浆量不宜太大，按照实际情况进行注浆，一般采用不同裂隙间隔注浆法，防止注浆过量带来的其它问题。

(4) 修补做旧：待注浆浆液固化后，及时清除裂隙口残余材料，并将表面打磨平整；然后采用天然水硬性石灰 NHL-A05+灰岩岩粉材料修补注浆孔和做旧处理，水灰比 0.2~0.3，具体材料配比在现场进行调配，要求修补后裂缝颜色与周边岩面相协调。

2、施工材料

表 4.3-1 天然水硬性石灰 NHL-A05 材料性能

外表	粉状
颜色	灰色
容重	1.0~1.2kg/L
经过 28 天硬化	
抗折强度	≥1.0MPa
抗压强度	≥3.0MPa
毛细吸水率	≥3.0kg/m ²

表 4.3-2 天然水硬性石灰 NHL-i07 材料性能

外表	粉状
颜色	灰白色
容重	0.7~0.8kg/L
经过 28 天硬化	
抗折强度	≥3.0MPa
抗压强度	≥8.0MPa
毛细吸水率	≥10.0kg/m ²
收缩率	≤0.3%
截锥流动度	≥240mm

3、质量检验

(1) 用红外热成像仪对现场裂缝注浆结果进行检测，要求注浆材料部位与周围岩体温差在 5℃以内。

(2) 用色差仪对现场裂缝注浆部位进行检测，要求色度明值与周围石材相差<5。

(3) 在现场制作裂缝修补、注浆加固材料的留样试块各 6 块，要求在养护一个月后试块体积收缩率小于 4%，粘接强度大于 0.1Mpa，抗压强度大于 6.5Mpa；注浆材料和修补材料作为牺牲材料，其最终抗压强度要小于石材本身抗压强度。

4.4 表面脱盐

1、施工工艺

(1) 检测岩石基层油漆表面是否干净、无浮尘、干燥，满足要求后即可开始施工。

(2) 确定实施范围，对周边不需要排盐的区域进行隔离保护；可采用塑料薄膜、

宣纸等材料对非施工区域做好遮蔽防护。

(3) 戴上乳胶手套，用小灰刀在需要脱盐部位表面直接批刮一层碧林®排盐纸浆 DP-02，敷贴厚度约 10~15mm。根据以往工程经验碧林®排盐纸浆 DP-02 单次施工用量 20kg/m²，具体用量可根据现场试验确定。

(4) 自然通风条件下养护 7~14 天，待纸浆自然干透起翘后，手工剥离，揭取掉干固的纸浆。

(5) 揭取定量的纸浆放到量杯中，加入定量的去离子水将其搅拌分散，测定其电导率。

(6) 重复以上 3~5 步骤，直至揭取的纸浆测定的电导率恒定，则表面敷贴脱盐结束。一般需要重复 2~3 次。

(7) 脱盐结束后，采用水蒸气清洗的方式将排盐实施表面清洗干净。

2、施工材料

表 4.4-1 排盐纸浆 PD-02 相关参数信息一览表

颜色	土黄色
气味	无味或略带黏土味
pH 值	8±0.5
密度	1.0g/cm ³
用量	厚约 5-15mm
适用范围	排除与上升毛细水及其他水有关的富集于材料表层的水易溶性盐份，适合于花岗岩、砂岩、石灰岩、汉白玉等天然石材、粘土砖等等无机多孔材料。

3、效果检测

在排盐面上用小刮刀和毛刷取粉末样品进行离子浓度检测以评估敷贴排盐的效

果，与电导率测定结果进行相互印证；当可溶盐危害程度评价等级为微弱时，则表示脱盐完成。

4、施工注意事项

- (1) 如果排盐纸浆在初始干燥时被雨淋，会出现不均匀收缩而达不到应有的排盐效果，这时需去除已松散的排盐纸浆，重新施工一层。
- (2) 在有明显水珠的基材上不可使用。
- (3) 将干固的排盐纸浆从基层撕下来后，作为一般垃圾处理。
- (4) 施工环境温度在 5°C~30°C，并保持通风良好。
- (5) 如遇排盐纸浆与皮肤或眼睛接触，立即用水冲洗干净。

4.5 表面微生物防治

1、施工工艺

- (1) 清理：清理待处理表面灰尘及其他附属物。
- (2) 防护：采用塑料薄膜、宣纸等材料对非施工区域做好遮蔽防护。
- (3) 涂刷：利用刷子或低压喷涂设备将碧林 BFA10 杀菌剂施于待处理表面，杀灭菌团、藻类等微生物；重复处理 2~3 次，“湿对湿”对接处理，时间间隔 20~30 分钟。根据以往工程经验碧林 BFA10 杀菌剂单次施工用量 0.5kg/m²，具体用量可根据现场试验确定。
- (4) 养护：处理完成后避雨防灰养护 1 周。

2、施工材料

表 4.5-1 碧林 BFA10 杀菌剂相关参数信息一览表

密度 (20°C)	1.0g/cm ³
溶解性	易溶于水
pH 值	8
外观颜色	无色
应用范围	用于无机建筑材料表面细菌、真菌及藻类的灭杀和抑制。

3、施工注意事项

- (1) 切忌用水冲刷施工后的表面，残留的药剂仍可起到持续防菌抑藻的功效。
- (2) 禁止在雨天和暴晒的环境下施工。
- (3) 如果不慎与皮肤或眼睛接触，立即用水冲洗干净。
- (4) 残余液不可倒入下水道或地表水，可作稀释剂使用或燃烧处理。

4.6 表面防水

1、施工工艺

- (1) 检测岩石基层油漆表面是否干净、无浮尘、无泛盐、干燥，满足要求后即可开始施工。
- (2) 确定实施范围，对周边不需要防水处理的区域进行隔离保护；可采用塑料薄膜、宣纸等材料对非施工区域做好遮蔽防护。
- (3) 用软毛刷将憎水剂 RS-96 材料均匀涂刷于基层表面，重复处理 2~3 次，“湿对湿”对接处理，时间间隔 20~30 分钟，使石材充分吸收防水材料。根据以往工程经验憎水剂 RS-96 材料单次施工用量 0.8kg/m²，具体用量可根据现场试验确定。
- (4) 新处理过的表面在 5 小时内应保护不受雨淋，然后在自然通风条件下养护 1 周。

2、施工材料

表 4.5-2 憎水剂 RS96 相关参数信息一览表

外表	无色透明液体
有效成分	硅氧烷（约 7wt%）

3、施工注意事项

- (1) 憎水剂 RS-96 材料为易燃品，施工现场及储存处严禁烟火。
- (2) 如果产品与皮肤或眼睛接触，立即用水冲洗干净。

4.7 本体保护工程量统计

表4.7-1 本体保护工程量统计表

石刻编号	保护措施及工程量统计					
	手工机械清理 (m ²)	水蒸气清理 (m ²)	裂隙注浆 (m)	脱盐 (m ²)	微生物防治 (m ²)	防水 (m ²)
Q1	1.95	1.95	/	1.95	0.98	1.95
Q2	3.41	3.41	3.37	3.41	3.41	3.41
Q3	0.57	0.57	/	0.57	0.43	0.57
Q4	1.37	1.37		1.37	0.69	1.37
Q5	1.37	1.37	1.29	1.37	1.37	1.37
Q6	0.74	0.74	1.06	0.74	0.74	0.74
Q7	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
合计	9.64	9.64	5.95	9.64	7.85	9.64

五、三维数字化信息采集及数字化拓片

5.1 三维数字化信息采集

1、三维数字化信息采集

三维数字化技术是近年来发展起来的一项高新技术，它采用高速光学数字化测量的方法，以被测物体的采样点集合（点云）的形式获取物体或地形表面的阵列式几何图像数据，为快速、精确地获取物体的三维信息，并进而建立科学准确的数据模型提供了一种全新的技术手段。三维数字化技术可将摩崖石刻形态信息永久保存，可为摩崖石刻修复与保护、病害分析、病害演变、虚拟保护修复等工作提供良好数据基础。据实际工作经验来看，摩崖石刻保护工作是一项多专业、多学科的综合性工作。在保护过程中，每一种新技术的引入，都会将保护工作带入到一个新的领域，摩崖石刻保护也会更加准确与细致。鉴于这种情况，我们将三维数字化技术引入到摩崖石刻基础数据采集与记录工作中去，以期从一个新的角度来诠释摩崖石刻信息，是对传统摩崖石刻记录的一种补充与加强。

(1) 摩崖石刻数字化的基本准则

海阳山摩崖石刻具有极高的历史价值、科学价值与艺术价值，在此次文物本体数字化项目设计与实施过程中，须遵循以下准则：

①全面保护准则

摩崖石刻是不可再生的文化遗产，具有很高的历史、文化、艺术价值，数字化方案设计和实施过程中必须配合文物管理人员和保护人员对文物全面保护。

②无损伤，无干预准则

由于摩崖石刻是宝贵的文化遗产，具有易损性和不可再生性，摩崖石刻三维化需采用非接触式的仪器和设备，并由文物保护专业人员负责安全监督。

③数字化数据的真实性准则

摩崖石刻三维数字化所获得各类信息和数据需能客观、真实地反应文物本体现状，为今后的病害分析和保护研究工作提供良好的基础。

④数字化数据的高精度准则

由于摩崖石刻表面不甚规整，属于非规则物体，其表面有较多文字信息、大量细小的凹凸、色彩及病害信息，三维数字化工作所取得的信息和数据需要尽量减小误差，最大化的准确记录文物现状。

⑤数据优化准则

摩崖石刻数字化工程的成果为“海量数据”，在不降低数字化成果质量的前提下，应尽量减小数据文件的大小，并使用通用的数据格式，以保证数据文件的可操作性和易用性。

⑥经济性准则

在不降低摩崖石刻三维数字化工程质量的前提下，最大化降低工程造价、缩短施工时间。

(2) 三维数字化所需软硬件

硬件及配套设施		
序号	硬件名称	参数要求
1	白光三维数字化仪 (Shinning3DOptimScan II)	单幅测量精度: 0.01mm-0.02mm 数据拼接精度: 0.02mm-0.04mm 平均采样点距: 0.2mm-0.3mm 单面数字化时间: <5S
		
2	数码相机	单幅像素 7360x4912 (约 3600 万像素)
3	三脚架	数字化仪、数码相机
4	移动工作站及存储设备	
5	发电机或交流电源	220V

相关软件	
序号	软件
1	三维数字化仪相关驱动软件
2	三维数字化仪相关控制软件
3	文物数字化数据合并、优化软件 、RapidformXOR 等
4	文物数字化成果后期处理、转换软件 Zbrush、Autodesk.Maya、Autodesk3dsMax 等

备注：文物数字化方案实施中，要求所有使用的软件均具有正版授权，以避免不必要的纠纷。

(3) 本方案用到的主要技术

①传统测量方法

传统测量方法主要包括人工丈量（如目视步量、绳量、尺量以及基准格网坐标量测法等）和利用传统的测量仪器（如水准仪、经纬仪、全站仪等仪器）进行的石质文物三维坐标数据的获取两种。传统测量方法的原理和操作方法都较为简单，文物保护工作者一般都可以灵活掌握。但它存在很多技术上的缺陷，如测量时必须接触目标文物，致使文物受到人为的损害；工作量大，成图速度慢、周期长；许多石刻雕塑往往处于悬崖峭壁上，使得测量工作具有一定的危险性；测量得到的成果一般是文物特征点的数据，包含的信息量很少，测量的结果精度低，测量的效率低，不能满足现代考古测量的需求。

②近景摄影测量方法

近景摄影测量方法是石质文物测绘中最常用的方法，特别是一些石刻文物的测绘。近景摄影测量方法是借助测量人员双眼的视差，通过拍摄不同位置的物距不大于 300m 的目标物照片，能在拍摄的瞬间获取大量被测目标的物理几何信息，然后利用后方交会—前方交会的方法解算相片的内、外方位元素，并由此解析计算像控点在现实中的实际地面坐标，进而得到目标物体的三维坐标。

近景摄影测量方法适合对数据量比较多的目标进行测量；属于非接触测量手段，有利于对珍贵石质文物的保护，且可在环境恶劣的条件下作业；较适合于动态目标的测量，可获取被测目标的瞬间信息；影像信息量丰富逼真，可保证很高的精度与可靠性；可提供基于三维空间坐标的各种成果资料，作业效率高，成果便于长期保存。

③结构光测量方法

结构光测量方法是一种主动式光学测图技术，其原理是由结构光投射器向石质文

物表面投射一组规则形状（黑白相间的栅格、小方块或其他更为复杂的形状）的光。实际应用时经常采用黑白相间的条形光图案，分别将不同的粗细的条形光投影到石质文物表面，使其表面产生明暗相间的光条纹，从某一特定的角度观看，物体表面的凹凸变化会形成许多起伏变形的光条纹线，通过图像传感器获得石质文物表面的光影图像，在后期处理中计算光条纹中心的各点坐标，再通过系统几何关系和三角原理计算目标物体的三维空间坐标。结构光测量方法的解算方法简单，使用的仪器体积小、价格低、大频程且便于安装和维护。不仅可以获取文物三维空间几何数据，还可以得到文物表面的纹理图像，在石质文物三维轮廓测量中被广泛使用。但结构光测量方法存在投影和图像摄影景深相互制约的问题，其测量精度容易受到物理光学的限制，与测量速度相互矛盾，两者难以同时得到提高。结构光测量方法的测量原理如下图所示：

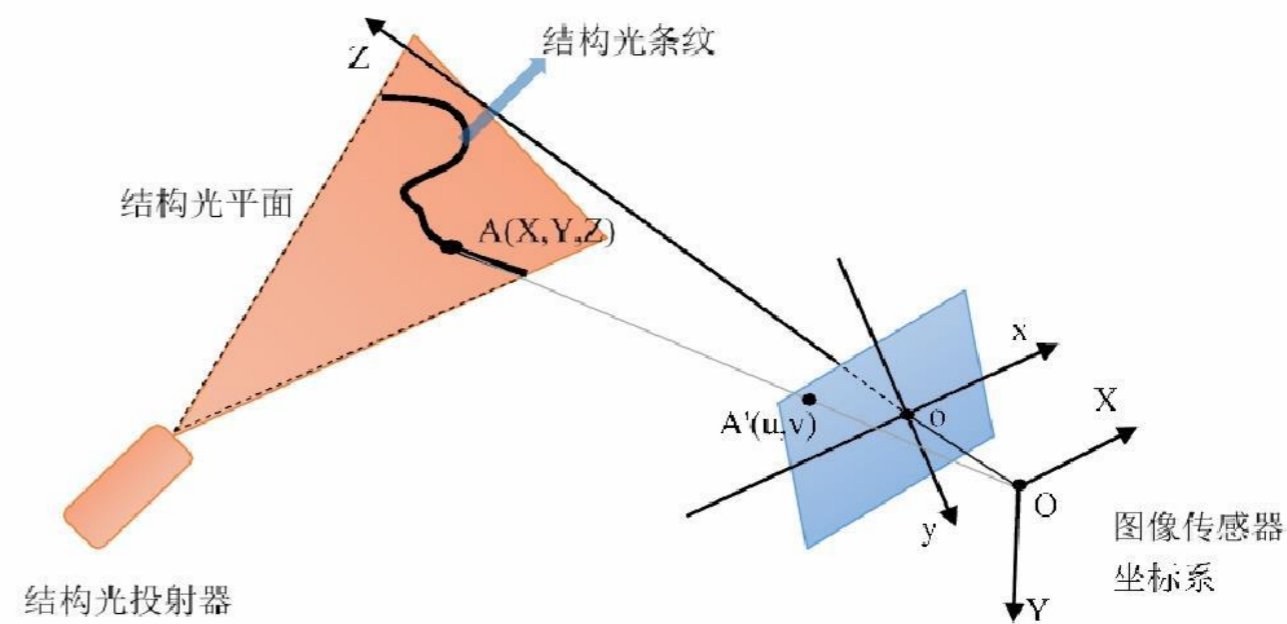


图5.1-1 结构光测量基本原理示意图

④三维数字化方法

三维数字化方法是近年来才发展成熟的测绘技术，早在二十世纪九十年代就开始广泛地应用于空间三维信息的获取工作。该方法起源于激光测距技术，采用非接触、主动的外业测量方式，直接获取被测物体表面大量的密集的点空间三维坐标、反射强度和纹理等信息，并能够实时的将这些信息传输到计算机上，利用专业软件快速构建被测物体的三维模型，从而得到文物线、面、体等各种图件数据资料。

三维数字化方法相比于其他方法有许多优势：

1) 测量精度高

三维激光数字化方法获得的三维点云数据，其单点通常能够达到毫米级的精度，有时候其精度甚至可以达到微米级。

2) 主动性强

数字化仪器的自动化程度高，在选定目标区域后，三维激光扫描仪可以自动对目标进行连续数字化，且数字化期间不需要对其进行人为的操作干预。

3) 无接触

数字化时，仪器和人都不与被测物体接触，最大限度的减少了数字化时对文物的破坏，保证文物安全。

4) 直观性和现势性强

三维激光数字化方法获取的被测物体表面点三维坐标能实时的传输到计算机中，在计算机的中同步显示，工作人员可以实时检查数字化的进度，保证数字化数据的精确度。数字化得到的数据信息丰富、准确性高。

5) 适应性强

三维激光数字化仪采用激光作为光源，抗干扰能力强，不受时间和光照的限制，

能够对任意可见物体表面进行数字化。

6) 速度快

相对于传统测量方法，三维激光数字化方法的测量速度快、精度高；相对于近景摄影测量方法，后期数据处理简单、节省资金和时间。

在石质文物的测绘工作中，对于一些由连续曲面构成的测绘对象如石雕等，必须以等值线的形式是将其表现出来。三维激光数字化方法得到的高密度点云能很好的实现石质文物的等值线精细测绘和三维模型重构，准确地实现石质文物现状的定量化记录。

(4) 摩崖石刻三维数字化的基本流程

本次三维数字化的对象为海阳山摩崖石刻，依据文物的本体特征及形变病害铭文信息分析与量化、虚拟修复等需要，对海阳山摩崖石刻三维数字化方案具体流程设计如图5.1-2。

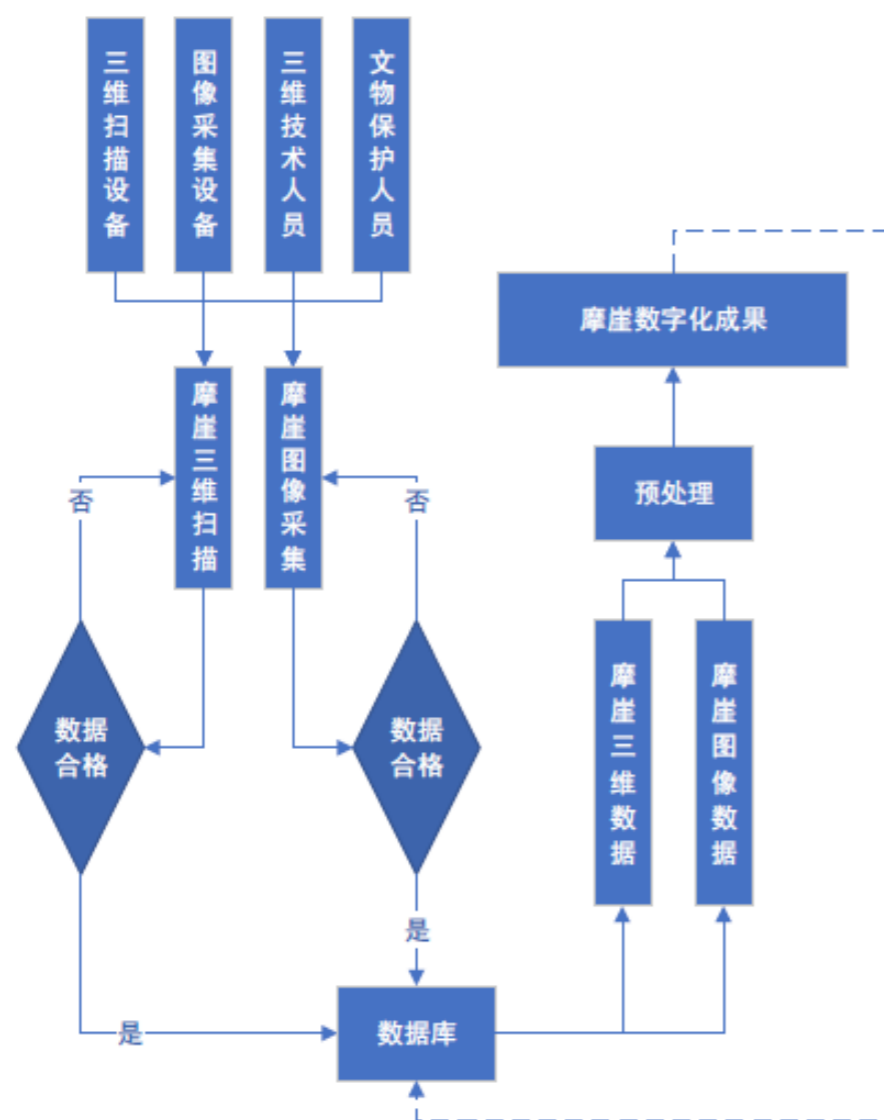


图5.1-2 三维数字化基本流程图

①摩崖石刻三维数字化前期工作

1) 现场踏勘

在摩崖石刻数字化进行之前，需先行到数字化地点进行踏勘，提前熟悉要数字化的石质文物，了解石质文物的分布位置、实际形状和大小，结合所采用的数字化仪参数，制定后续具体的数字化计划。在数字化的石质文物规模过大时，尤其是具有相当高度的石质文物，应考虑采用其他的辅助测量手段，保证石质文物点云数据的精度和

完整性。

2) 控制网布设

一般情况下，在一个数字化站点上是不可能把石质文物的点云数据全部获取到，这就需要进行多站数字化。为了保证多站数字化时每次数字化得到的点云数据能够统一到一个坐标系下，需要事先布设数字化控制网。控制网的布设需要根据现场踏勘的实际情况来布设，在控制网中数字化站点数量的过多或过少都是不合理的。

一般来说，完成数字化工作所需的测站数量取决于石质文物本身、工程要求的数字化精度和数字化现场的周边环境。需要认真分析数字化现场地形、地物的分布特点，合理设置每个数字化站点，要考虑以下因素。

将数字化站点的位置设置在数字化仪的最佳工作范围内。保证数字化所得的点云数据精度。

减少数字化站点间点云数据的重叠度。并不是点云数据重叠越多越好，能保证整个文物数字化数据的完整性和数字化站点间点云数据拼接的最低要求就行，减少后期数据处理的工作量。

尽量地避免数字化盲区出现。重点保证重要特征部位不会在盲区中出现。

尽量保证正直数字化。数字化仪激光束数字化方向与石质文物表面形成倾斜角时，会加大数字化误差，影响点云精度，因此应尽量避免数字化时的倾角过大。

根据工程实际要求，可以考虑与控制测量相结合。

由于此次数字化的摩崖石刻体量较大，为此需布设四至八个测站来获取摩崖石刻表面完整的点云数据，并在测站点做相应记号标记，方便后面的架站数字化。采用独立坐标系。

②摩崖石刻数字化信息采集

数据获取是后期数据处理的基础，按要求获取高质量的点云数据，可减少数据处理的工作量，提高石质文物三维模型重构的精度。

石质文物数字化的具体步骤：

1) 支起脚架，架设数字化仪，布设标靶。

由于ScanStation2数字化仪比较重，架设仪器时要注意脚架要架稳，螺旋要拧紧。

本次数字化准备四站数字化完，所以准备了四个标靶，每站布设三个标靶，一个标靶作为备用，保证每站至少有三个公共标靶。

2) 在软件上完成数字化定向。

ScanStation2 数字化仪开机后要进行自检，自检完就可以进行数字化。在数字化仪自带的软件中建立石质文物的数字化工程数据库，输入本站坐标以及后视坐标，对准定向标靶进行定向。

3) 设置数字化参数，包括数字化范围以及数字化的精度。

设置数字化距离和数字化点间隔。选定合适的数字化区域进行数字化，不能把被测目标以外的物体也选取进来，影像数字化的速度，增加后期数据处理中点云去噪的工作量。

4) 数字化石质文物（数字化所花时间依据先前数字化精度和数字化范围的设置而定）。

设置好数字化参数后，数字化仪就开始自主对框选区域进行数字化，获取需要的点云数据。

5) 获取石质文物的高精度照片。

用携带的数码相机获取此站的影像数据。在获取影像时要注意尽可能地在相片中保留石质文物的三维信息，建立石质文物和所采集影像在空间上的对应关系。

6) 数字化完成后，搬站进行下个测站的数字化，直至获取整个石质文物的完整点云数据和影像数据。搬站时，务必注意公共标靶不能移动。

5、数字化时应注意以下问题

(1) 布设标靶

标靶的布设，是为了在后期数据处理时，能够快速实现多测站点云数据的拼接，提高石质文物三维模型重构的精度和速度。因此，在两个不同的数字化站点上，必须保证至少有三个公共标靶，且为了保证拼接时的点云精度，标靶不能处于一条直线上，若放置四个及四个以上的标靶，则其位置不应分布在同一个平面上。在对同一个目标进行数字化时，每个公共标靶应尽可能多的和多个测站点保持通视，尽量减少标靶点的移动次数。

(2) 坐标系的选择

数字化仪在测站点数字化文物时，数字化仪会在内部数据库中自动建立一个独立的空间直角坐标系，此坐标系的Z轴为数字化仪的旋转轴，坐标系的O-XY面为数字化仪的旋转平面。数字化获取的数据都在此坐标系内，因此每次数字化，点云的坐标系都不同，在点云数据合并时就会存在拼接误差，影响整体的点云数据精度。因此数字化前要进行合理安排，选择好参考坐标系。

(3) 现场环境影响

因为三维激光数字化技术是由光电测距原理发展而来，现实中，激光在穿越湿度高的空气时，空气中的水蒸汽会吸收激光的能量，使激光衰减一部分，而且被测目标

表面附着的水也会产生镜面反射使发射的激光和接收时的激光差别变大,使数字化仪的测量距离降低,影响数字化获得的点云数据精度,所以数字化时要选择合适的天气环境,尽量避免在潮湿的区域数字化,特别是不要在封闭潮湿的环境中数字化。

6、石质文物测绘的精度分析

(1) 激光光斑

数字化仪发射的脉冲激光光斑大小是影响数字化仪数字化精度的重要因素。一些石质文物表面通常有精细的纹饰,激光光斑太大,光斑覆盖文物表面的范围就越大,光斑范围内的地方反映到电脑上就是一个点,不能很好的反映文物表面信息,且激光光斑越大,激光衰减越厉害,反射强度越低。所以,激光点在石质文物表面形成的光斑尺寸越小越有助于提高石质文物细节数字化的分辨率,尤其是对石质文物的复杂表面。因为激光具有发散性,距离仪器越近,激光光斑越小,所以实际数字化过程中要求数字化仪与石质文物的距离不能太大。数字化仪的激光光斑在50m处大小为4mm,距离越近,激光发散小,形成的光斑越小,可满足石质文物测绘对精度的要求。

(2) 激光点间距

数字化仪的激光点间距也不能太大,不然,激光点间的石质文物信息就会被忽略。激光点间距是由数字化仪内部的步进角度值决定的,从某种意义上说,数字化分辨角度也是影响数字化仪数字化精度的重要因素,甚至比激光点光斑大小更为重要。根据一些研究成果显示,在一定数字化距离内,用20mm的激光点数字化被测对象时,仍可以获得2.5mm的激光点间间距的数字化精度。所以,只要数字化仪的脉冲激光具有很好的信噪比和较高的角度分辨率,就可以在目标表面纹饰重迭的情况下进行数字化,获取文物表面的细节数据,提高数字化仪的数字化分辨率。数字化仪的激光点间

距最小可为1mm,相对来说已经是一个很小的点间隔了。

(3) 数字化仪架设的位置

数字化仪架设的位置决定了数字化仪工作时的数字化角度和数字化距离。当数字化仪工作时与被测目标平面呈垂直状态时,激光在文物表面形成的点间距会是最小的。而且当数字化仪到被测目标的距离比较近时,数字化仪往被测目标两侧数字化时形成的数字化角度会很大,激光形成的激光光斑会倾斜变大,点间距也会变大,使得数字化精度降低。三维激光数字化仪的分辨精度与数字化距离相关的。若一台三维激光数字化仪的内置步进角度是 0.01° ,那么在分别数字化10m、100m、1000m处的目标时,其可达到的数字化分辨精度分别为2mm、17mm、174mm,也就是数字化精度是随着数字化距离的增加而变差的。所以,要选择在合适的位置架设数字化仪器,不能太远也不能太近。

(4) 摩崖石刻点云数据预处理

点云数据的预处理是三维建模的基础阶段,直接影响着三维建模的精度,包括点云拼接、点云合并与点云去噪等过程。本文应用软件来完成石质文物点云数据的预处理。软件是Leica公司为其旗下的三维激光数字化仪开发的配套数据处理软件系统,广泛应用于工程测量、文物考古、工业生产等领域中的海量点云数据处理,具有构建三维模型,动态漫游和虚拟展示等功能。

(5) 摩崖石刻点云拼接

在实际数字化作业中,一处完整的石质文物只用一个测站数字化往往是不能完整的获取其空间信息的,这需要对其进行多测站式数字化,如此就会引发多测站间数字化数据的拼接匹配问题。点云拼接就是把不同测站的点云数据拼接成完整的实体点云

数据。点云拼接的原理就是实现两个数字化测站所处坐标系间的转换，将其中一个测站的坐标系作为目标坐标系，把另一测站的点云数据转换到目标坐标系中。

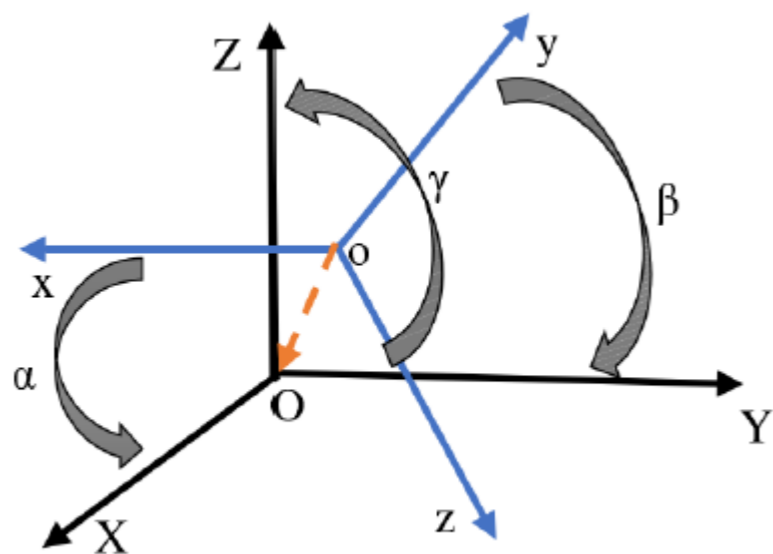


图5.1-3 点云拼接原理

点云拼接的方法一般有四种：

①基于控制点的拼接

数字化前先确定各测站点的绝对坐标。把数字化点云置于已知坐标系内，适用于大场景的点云拼接。

②基于标靶的拼接

数字化时要在数字化视场中布设标靶，且相邻测站间必须具有3个以上的公共标靶。

③基于公共点云的拼接

也叫手动拼接，通过寻找不同测站里被测目标相同特征部分的点云来完成拼接。

④混合拼接

是在标靶不够的情况下，结合手动拼接来完成目标点云的拼接。

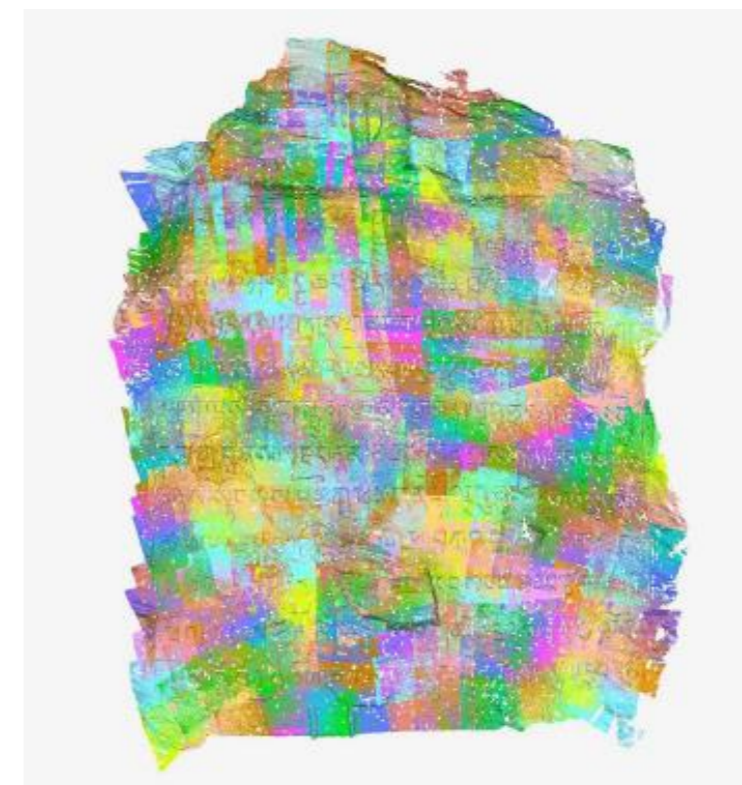


图5.1-4 点云拼接示意图

本次是在软件里采用基于公共标靶的拼接方法实现石质文物的点云拼接。其过程是在软件中建立点云拼接空间，选择要拼接的点云数据，添加约束条件（即选择公共标靶），计算拼接的误差，然后完成石质文物点云数据的拼接。

（6）摩崖石刻点云合并

完成拼接后的点云数据是四个测站的点云数据拼接起来的，还不是一个整体，要将其合并成整体的点云数据后，才能继续进行后续的模式重构工作。本次石质文物点云数据的合并工作是利用软件中的点云合并功能来完成，同时将四个测站的点云数据拼合成整体的摩崖石刻点云数据。

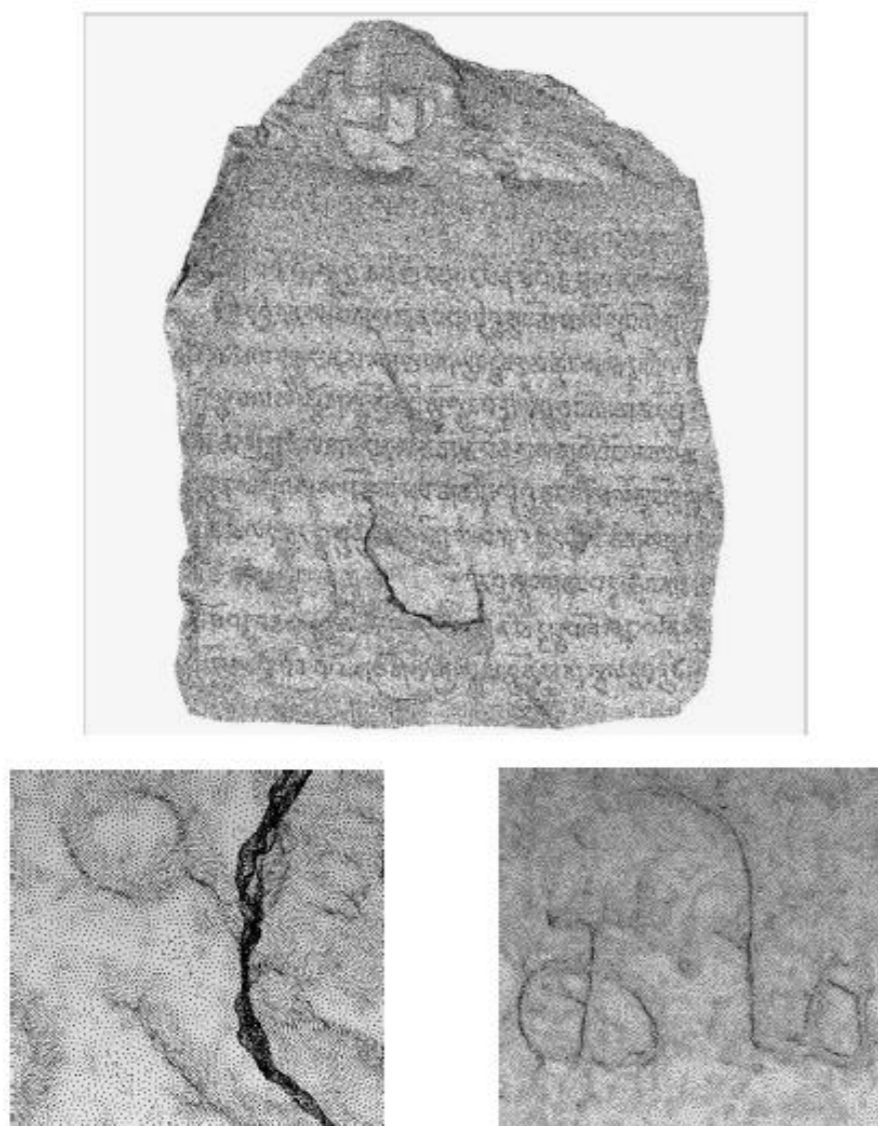


图5.1-5 点云拼接成果示意图

(7) 摩崖石刻点云去噪

点云去噪是指将初始数据中不属于数字化对象的多余数据去除。拼接后的三维点云数据，并不是所有的点云都是有效和有用的，对获取的点云数据和影像数据进行预处理，去除原始点云中与被测物无关的点云数据，应用某些滤波算法剔除初始点云中的错误点和误差点。从而使点云数据更加精简、有效，节省了计算机的存储空间和后续数据的处理速度。

原始数据中噪声主要分为三类：

第一类噪声是数字化仪本身和数字化方法造成的误差。其主要原因是所选数字化仪能达到的数字化精度以及数字化过程中数字化仪震动、下沉等。数字化前要根据工程的精度要求选择合适的三维激光数字化仪，数字化时将数字化仪架设在硬质地面上，减少仪器周边振动源等方法，最大限度的减少此类噪声的产生。

第二类噪声是由被测目标的材质、表面颜色及粗糙度、数字化时脉冲激光的入射角、数字化距离等因素影响数字化仪发射的脉冲激光的反射率和反射强度而产生的误差点。通过实验分析不同材质、颜色、粗糙度的被测目标在不同入射角、不同数字化距离时对点云数据质量的影像，确定数字化摩崖石刻时安放仪器的最佳位置。

第三类噪声是在数字化过程中，因为偶然或不可避免的原因数字化到非目标物，比如移动的车辆、行人及树木等，产生的无用的点云数据，也称为粗差。主要原因是工作人员在选取数字化范围时不能精确选定只包含目标物的数字化范围以及数字化是通过被测目标的车辆、行人等。

在上述三种噪声中，第一类噪声是可以说是人为产生的，可以通过选择合适的数字化方法、精度高的数字化仪器、良好的数字化环境等来避免。

第二类噪声是由于被测目标本身产生的，是不可避免的，可以应用某些滤波算法或建模软件中的消噪功能来消除此类噪声。

第三类噪声的产生主要取决于数字化时数字化范围的选择，数字化范围选择越精确，产生的三类噪声越少，也可以在后期数据处理时选择人工删除的方法来消除这类噪声。

(8) 摩崖石刻三维模型重构

软件是一款高效且兼容性强的三维逆向建模软件，它以一些先进的数学模型及曲面构造理论为基础，可快速地将数字化所得的点云数据生成准确的多边形模型或网格模型，并可将多边形自动转换为NURBS 曲面，还可衔接市场上大多数主流的三维数字化设备和CAD/CAM 软件。相比于其它逆向建模软件，软件操作更简便，且易于掌握。在软件中进行三维模型重构的过程分为三个阶段：点云阶段，多边形阶段和曲面阶段。

①点云阶段

1) 导入点云数据

将去噪后的石质文物点云数据从软件中以 $xxx.xyz$ 的格式导出，再将此数据导入软件。数据导入后，在软件中显示为一团黑色的点，难以辨认，且摩崖石刻数据的视角也是歪的。在进行建模工作前，要先将点云进行着色，使点云将摩崖石刻的大致轮廓显示出来，同时将点云数据的视角调整到操作方便角度，方便后续建模工作的开展。

2) 点云数据重采样

因为数字化得到的石质文物不同部位的点云数据的密度是根据数字化距离的长短和激光入射角的大小而异的，从而得到的整个点云数据中的坐标点是分布不均匀的。且在点云数据拼接过程中石质文物公共部分点云数据会重复叠加，使公共部分的点云密度很大。所以，为了避免出现因点云稀疏而使模型表面破损，减少后期建模的工作量，在三维建模前一定要对点云数据先进行重采样，采样的密度要根据工程的精度要求来确定，必要时可以参照点云数据中点云比较稀疏位置的点云密度，使得采样后的点云数据均匀分布，从而保证整个文物点云数据质量的均匀分布。此次石质文物点云数据的重采样是在软件中完成的。软件中提供了四种点云数据采样方

法：曲率采样、格栅采样、统一采样和随机采样。一般选择进行统一采样，把统一采样的参数根据自己的需要设置为合适的数值，可多试几次，观察摩崖石刻数据的采样效果。采样后石质文物的点云数据精简了许多。

②点云封装

所谓点云封装就是对点云数据进行创建多边形的过程。三维激光数字化仪数字化获取的文物点云模型，是由一团杂乱的空间离散点组合而成的，由于数字化仪的数字化间隔致使这些空间离散点之间存有空隙，并没有构成文物的实际表面。所以要得到有拓扑关系的摩崖石刻真实表面，还要通过一些特殊的算法模型来恢复摩崖石刻表面的这种拓扑关系。现阶段，点云封装的方法主要有两种：曲面封装和体积封装。曲面封装主要用于数据均匀且清晰定义了完整曲面的点云数据，曲面封装创建多边形模型的过程速度比较快而且节省计算机内存，但一些因数字化不到位而点云数据不完整的地方会产生孔洞。体积封装主要用于数据不均匀或不完整的点云数据，这种方法需要花费大量的时间，对计算机内存消耗也大。体积封装创建的多边形数量比较多，根据数据中的每个点创建了一个多边形网格。一般情况下，先对点云模型进行曲面封装，观察封装的效果，再根据实际情况决定是否进行体积封装，本次石质文物数据采用了曲面封装的方法。

③多边形阶段

1) 空洞区域的修补填充

封装后，模型构建就进入多边形阶段。多边形阶段也叫三角网模型，在构建三角网模型时，由于一些原因会造成构建三角网模型出现许多空洞。需要修补好这些空洞后才能进行下面的重建工作。

造成三角网模型出现空洞的原因主要有以下几点：

- 数字化目标时，由于目标自身空间拓扑结构复杂，会存在自遮挡。或在数字化时，目标某些部分前面有树木、车辆、行人甚至标靶的遮挡。使被遮挡部分的数据采集不到；

- 目标某些部分表面颜色比较深，材质吸光性较强，或数字化时目标表面产生镜面反射，都会使数字化工作产生数据缺失；

- 点云数据处理过程中一些参数的设置不当，或操作错误也会使点云数据封装产生空洞。修补这些空洞要依据石质文物表面的形态特征来进行相应的数据补充，使其形成比完整的石质文物三角网模型。利用软件对三角网模型的孔洞进行修补时，可以根据空洞的分布情况灵活选择修补方式。处于石质文物比较规则的区域缺损空洞，选择单个孔填充进行修补，也就是用平面直接填充缺损孔洞；处于石质文物结构比较复杂部位的缺损空洞，选择基于曲率的填充方式进行修补。且由于模型的边界曲线不规则，在利用软件功能修补缺损空洞时，会将模型的边界曲线误当作模型的最大缺损空洞区域来处理，因此在进行修补前必须取消软件对模型边界的识别。

查看修补空洞后的三角网模型，会发现模型上还是存在一些细小的空洞，而且在一些数据质量差的部位会发生三角网错乱，使模型产生细小变形。对于这种情况可以用软件的格网医生功能，它会将多边形模型上的这些缺陷自动修复掉，修复后的多边形模型与实际图像对照会发现模型修复效果很明显。

2) 多边形模型表面的光顺

由于石质文物点云数据的采集质量不佳（也就是有噪音）而消噪处理时又没滤除干净，从而造成由点云数据生成的多边形模型表面某些部位会有毛糙并不光滑。既影

响石质文物模型的美观也影响后期文物模型的精度。可用软件的快速光顺功能来去除模型表面的毛糙，使石质文物模型表面平滑光顺。对于模型表面的小肿块用软件的砂纸功能对其进行打磨。

3) 三角网模型的简化

由于点云数据直接生成的三角网模型一般都很大，三角网面片数量多，尤其是石质文物表面的纹理一般都比较复杂精致，需要许多细小三角网片来表达出来。这就对计算机的运行速度、存储容量、制图速度、输入和输出效率等都有很高的硬件要求，这也成为制约现在实时三维可视化发展的一个难题。在大多数情况下，根据工程的实际精度要求，我们并不需要追求高分辨率的复杂三角网模型。在保证模型的精确度和计算机的运算时间之间，我们也常需要作一个折中。因此，在多数实际工程中，必须将复杂的原始模型用其它相对简易的模型来替代，即对三角网模型进行简化处理，以降低其对计算机硬件配置的高要求。

三角网模型简化，就是生成初始三角网模型的较低分辨率的三角网模型，也就是在尽可能保持初始三角网模型特征的情况下，将三角网模型的三角面片数量和顶点数目进行最大幅度的削减。

(9) 摩崖石刻纹理映射

在石质文物的三维模型重构完成后，为了使重构模型看起来更逼真，达到接近现实的效果，必须对重构模型进行渲染。目前，常用的模型渲染方法有两种，第一种方法是利用模型颜色的渐变效果，例如从蓝色到红色的变化过程。另外一种渲染方法是对重构模型进行纹理映射，得到的模型的真实感强。纹理映射是石质文物三维模型重构的最后步骤，是将预先采集的纹理数据按照某种映射算法覆盖到文物三维模型的表

面，创建纹理数据与文物模型的拓扑对应关系。模型的纹理数据一般来源于数字化时获取的文物影像数据，也可来源于文物激光点云的红绿蓝三色RGB值。本文主要采用的是纹理映射的模型渲染方法，利用数字化时数码相机拍摄的石质文物影像对重构模型进行纹理映射，从而完成整个石质文物模型的视觉渲染。

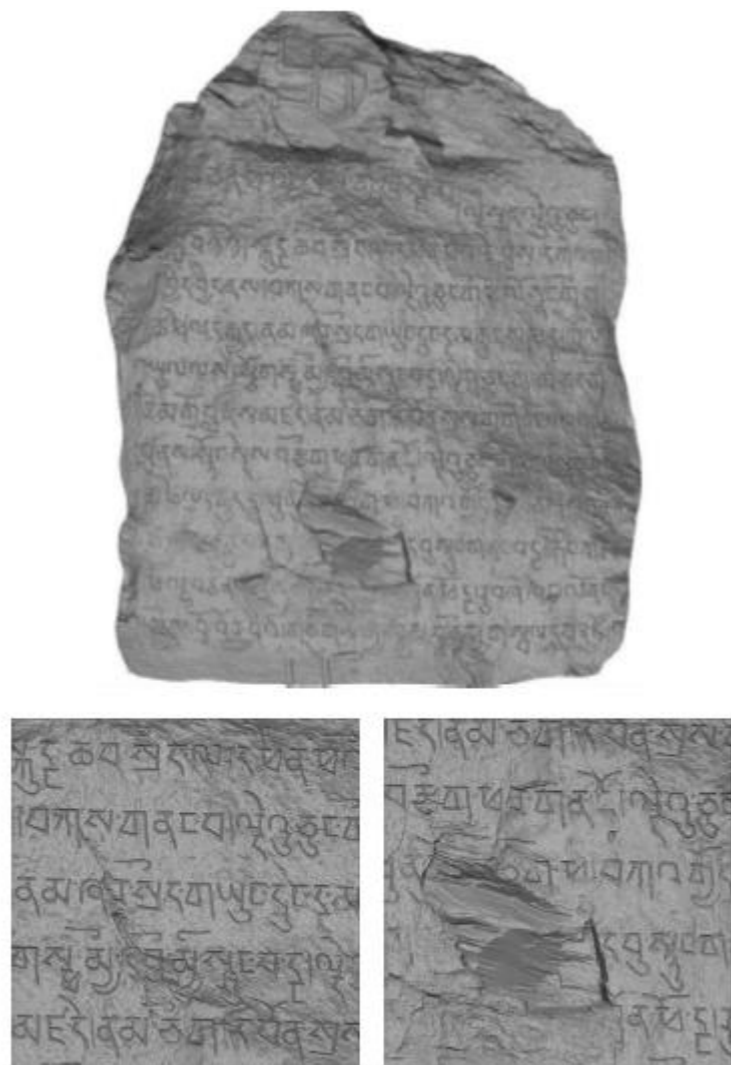


图5.1-6 三维模型示意图

利用软件中的纹理贴图功能对石质文物模型进行纹理映射，首先建立文物的纹理映射模型，调整模型的颜色值，使模型表面颜色接近石质文物表面真实颜色值。

然后加载石质文物的数码影像数据，建立影像数据与文物模型的空间特征对应关

系，完成整个重构模型的纹理贴图。

2、色彩信息采集

(1) 拍摄对象

海阳山摩崖石刻。

(2) 设备与器材

①相机：D810 全画幅数码单反相机

②镜头：105 标准定焦微距镜头2.3 云台：节点云台，球形阻尼云台

③三脚架：全部展开高度不低于175cm

④色卡：爱色丽专业校色卡

⑤专业白平衡、灰度标板

⑥摄影灯：标准光源，D65 光源，色温6500K，功率18W

⑦不同刻度比例尺

⑧二维滑轨：适宜二维文物长度的直形双轨。

(3) 拍摄环境

拍摄环境的搭建应遵守以下标准，确保文物在安全范围内。

事项	内容
拍摄地点	选取符合文物拍摄的场地，不受外界环境光线的影响
拍摄环境	布置灯光，摆放色卡标尺
拍摄对象的摆放	应垂直固定于平整的物体或是墙体的表面
拍摄距离	将拍摄器材水平摆放，距离不小于被摄石刻的宽度（安全距离）
拍摄温度	现场安置温度检测设备，在安全范围允许的情况下开展工作
拍摄湿度	现场安置湿度检测设备，在安全范围允许的情况下开展工作

(4) 拍摄流程

①拍摄前的准备

做好对拍摄对象的地理、天气、环境、交通以及是否允许试用三脚架、闪光灯等前期准备；检查拍摄地点用电安全；检查相机、镜头、色卡、标尺、三脚架、清洁工具、快装组件、二维滑轨等装备是否安装牢固，设备是否完好。

②遵照以下参数，设置相机拍摄模式。

事项	内容
相机拍摄模式	手动模式(M档)
图片格式	JPEG+RAW
白平衡	自动
对焦模式	单次AF
光圈	f=5.6
感光度	iso=100

③设置曝光值(试用矩阵测光或平均测光、包围曝光模式、快门速度和感光度)：包围曝光模式(±3档)。

④用移轴拍摄模式进行拍摄时：将相机安装在立体轨道上，调整相机位置水平放置，相机与被摄藏品保持平行。用亿像素拍摄方法拍摄完整的亿像素照片时，每平方米拍摄100张照片。

⑤拍摄后的检查：检查曝光值、清晰度，及是否有漏拍等情况，确认无误后，请库管员收回藏品。

⑥储存和备份：异机保存两份，并用1000G以上的移动硬盘保存；在拍摄完毕后

第一时间备份原始拍摄素材；备份的文件名称(时间+地点+场景名+图像原始名)，填写拍摄工作表格及存储表格。

(5) 采集标准

①亿像素图片的格式：PSB(大型文件格式)；

②亿像素图片的尺寸：不低于1亿像素；

③亿像素图片的文件大小：不低于300M(SB格式)。

5.2 三维数字化拓片

通过三维数据扫描仪对石刻及碑刻进行扫描，将扫描获得的、点云数据输入软件，经处理后获得三角网格模型，建立起3D模型。根据碑刻的3D模型，获得深度图后采用数字图像处理的方法获得对应的数字拓片。

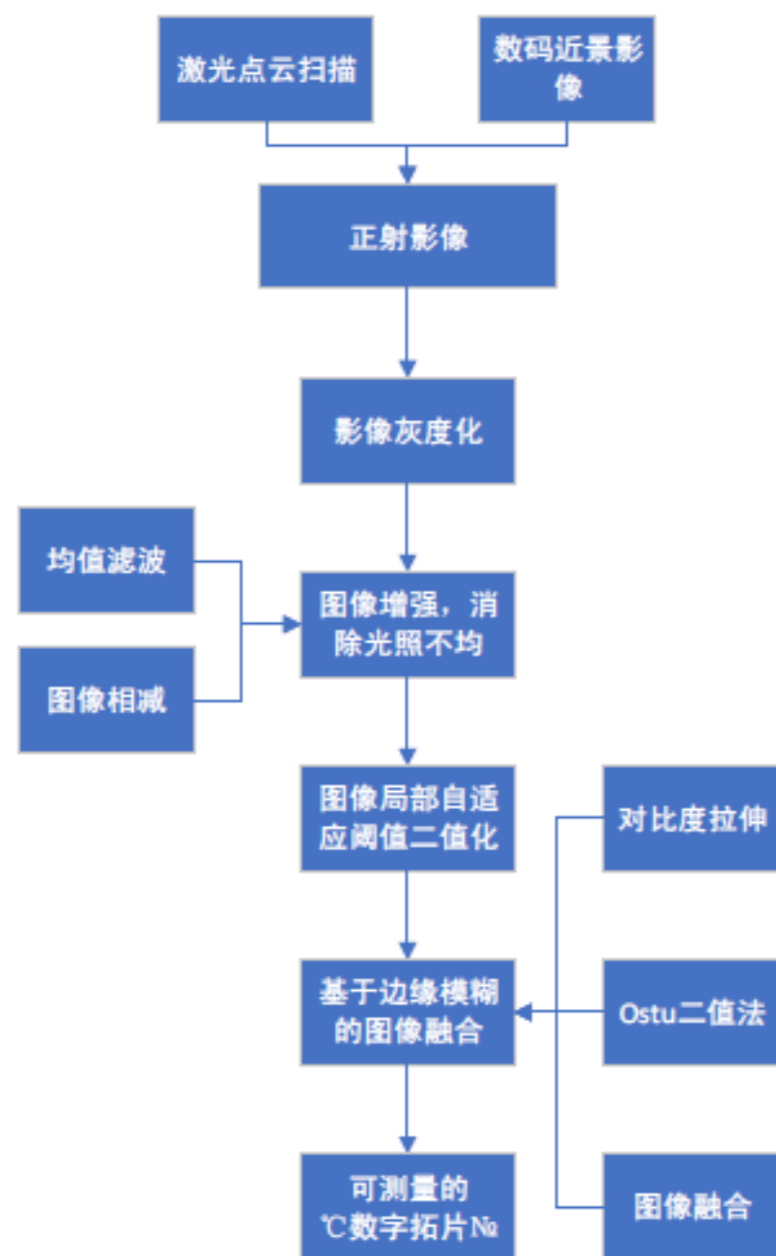


图5.1-7 三维数字化拓片制作工艺流程图

六、传统拓片制作

6.1 工艺流程

1、上纸

(1) 拓片前必须先用水清洁石刻表面，将石刻表面苔痕土垢洗刷干净，以免玷污拓本，然后等表面干燥。如有油污泥封，可用小刀或清洁剂清除，但不可损坏文物。

(2) 先在石刻上刷一层白芨水，必须涂均匀，使拓纸牢牢沾在碑上而不会移位。

(3) 上纸后用软毛刷（油漆滚筒亦可）刷平，赶走空气使纸与碑面密合，切忌出现褶皱。

2、敲打

(1) 用鬃刷敲打，使文字凹入，但不能用力过猛，以免拓纸破裂。可在第一张纸上加垫一张干净白纸后敲打。

(2) 敲打时力量需均匀，不轻不重，每个字凹入，字迹清晰显现即可，等字全部均匀凹入即完成。

3、上墨

(1) 在上墨之前，宣纸的干湿程度必须适中，纸略呈泛白，方能上墨。过于干燥，石刻、纸间容易渗入空气，造成送浮现象，字迹易位；太潮湿，墨渍易渗入碑文之中，拓本字迹模糊不清，失去传真的效果。

(2) 上墨时左右手各执一拓包，（以惯用手为例）左手拓包沾墨汁，右手拓包均匀左手拓包的墨色，两拓包相互捶打，左手拓包引墨汁至右手拓包，使之墨色均匀，可先在预备纸上试打，看色泽是否均匀。

5.3 工程量统计

表5.3-1 三维数字化拓片工程量统计表

石刻编号	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7
工程量	2.0 m ²	3.5 m ²	0.6 m ²	1.4 m ²	1.5 m ²	0.8 m ²	0.3 m ²

(3) 拓纸七八成干时迅速用拓包上下来回渐次密集捶打，不可左右斜打或过分局力，也不可专打一处或东打一下、西打一下，一般上三次墨直至全碑皆上色完毕即可。

(4) 第一次上墨时墨汁要干且浅，以后逐次加浓，上墨不宜太浓太潮，以七成干为佳。

4、取下拓片

(1) 取下拓片的最好时机是拓本八至九成干时，因为此时拓片较不易破损且易于取下，若尚潮湿即急于取下，易破裂。

(2) 事先预备好报纸，平面放置，自然晾干，若让拓片晒太阳则拓片将出现凹凸不平及发硬的现象。

5、表面清洗

待拓片完成后，采用高温蒸汽机自上往下，从左到右清洗石刻表面残留的墨迹。

6、拓印要求

(1) 在数量上，拓片原则上一式四份。在实际拓印过程中，会根据石刻的保存与保护清洗情况会酌情调整，如部分保存情况较差的石刻可以减少拓印数量或不拓，在说明调整原因的基础上用拍摄照片代替。

(2) 在材料上，保证拓印使用材料的质量。宣纸品牌及质量参考如下：安徽小岭檀皮宣纸，汪同和檀皮宣纸，安徽红星宣纸，或是不低于以上三种品牌质量的宣纸。墨汁品牌及质量参考如下：华山拓片专用墨汁，一得阁墨汁，云头艳墨汁，艺德轩拓片墨汁，或是不低于以上品牌质量的其它墨汁。

(3) 此外每份拓片要字迹清晰、内容完整，并在拓片右下角用铅笔标注编号。

对于面积过大的石刻，接纸时要保证拓印纸张连接处整齐。

6.2 工程量统计

表6.2-1 传统拓片工程量统计表

石刻编号	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7
工程量	8.0 m ² /4份	14.0 m ² /4份	2.4 m ² /4份	5.6 m ² /4份	6.0 m ² /4份	3.2 m ² /4份	1.2 m ² /4份

七、岩体加固

7.1 裂隙治理

7.1.1 主要目的

- (1) 防止或减缓裂隙的进一步风化。
- (2) 消除裂隙的透水性。
- (3) 消除或降低由于裂隙对岩体的切断作用而产生的不利影响，提高岩体的整体性。

7.1.2 治理措施

综合考虑裂隙分布位置的特点、形成原因和对岩体整体性的影响，根据治理的目的不同，裂隙的主要治理措施为裂隙灌浆：

- (1) 对裂隙进行填充，防止风以及大气降水反复进入裂隙，防止或减缓裂隙的进一步风化，因此，要求灌浆材料化学稳定，强度适中。
- (2) 对裂隙进行灌浆填充密实，灌浆材料不透水，强度适中。
- (3) 通过对裂隙进行灌浆加固，灌浆材料具有一定的强度，能有效提高被裂隙切割岩体的整体性，化学稳定。

7.1.3 灌浆材料选择

灌浆材料选择是整个保护项目中的一个核心问题，灌浆按照所使用浆液材料组成一般分为无机灌浆材料、有机材料灌浆及复合灌浆材料。

1、偏高岭土改性灌浆材料

偏高岭土（Meta Kaolin, MK）是高岭土在一定温度脱水后形成的无水硅酸铝。高岭土为一种层状结构粘土矿物，在温度为 400~450°C，高岭土开始脱水，虽然仍然保持一定的层状结构，但产生较大位错形成结晶度很差的过渡相——偏高岭土。一般认为在 600~900°C形成的偏高岭土具有较高的活性。

当温度超过 980°C时，就会产生莫来石和方石英稳定性的晶体，反而失去活性。

偏高岭土含有较高的火山灰活性材料。在水泥中，MK 能与水泥中的 CH 反应生成 C-S-H 凝胶、水化铝酸钙（C₄AH₁₃、C₃AH₆）等，具有较高的水化活性，并降低水泥中的 CH 含量，大量用于水泥改性使用。在碱激活剂（Alkali Activator）作用下，MK 又可以形成以铝硅酸大分子链聚合物，在工程中一般称其为地质聚合物。

MK 将活泼的碱金属离子固化到聚合物中，减少 K、Na 离子的析出，避免出现泛盐碱的现象。虽然 MK 能消耗大量水泥产物中 CH，提高水泥耐久性及抗碳化能力，但是，水泥中石膏与 MK 之间反应暂无报道，石膏的负面作用依然存在，因此严格控制水泥用量在 20% 以下。但是如不使用水泥类材料，MK 激活将主要依靠碱激活剂，过高碱用量对文物同样会造成严重影响。因此，在总结以往类似工程保护经验、材料试配及文献资料基础上，决定采用偏高岭土作为主料，并掺入少量的超细水泥（MicroFine Cement, MFC），并使用碱激活剂，形成一种强度较低、抗渗性及耐久性良好、对文物本体无负面影响的复合灌浆材料。

试验用 MFC 的比表面积在 800m²/kg 以上，平均粒径 10um 以下，浆液流动性好，因而其稳定性及可灌性高。由于水泥材料自身存在许多不足，本次试验控制 MFC 用量在 20% 以下。

通过 MK、MFC 和其他辅料不同掺和配比试验，从灌浆材料的粘度（流动性）、收缩变形性、抗渗性及易溶盐含量等方面确定此种灌浆材料的性能。

①粘度（流动性）

与一般无机浆体材料类似，水灰比是影响复合材料粘度最明显的参数。但除了水灰比 W/C，MFC 及碱激活剂用量对粘度（或流动性）也有一定影响。从 MFC 掺量（MFC 占 MFC 及 MK 总量质量百分比）与粘度之间的关系图可以看出，水灰比控制在 0.65，碱激活剂用量为 1%。从试验结果可以看出，MFC 掺量小于 10% 时，粘度主要由 MK 来控制，达到 15% 时，粘度随 MFC 的用量而增高，主要是因为在该用量时，两种活性材料比较容易相互反应，虽然对增加了灌浆阻力，但却有利于初期凝固的形成。当 MFC 用量达到 20% 时，粘度反而降低，即 MFC 对初期反应有一定抑制作用，但后期强度却影响不大。

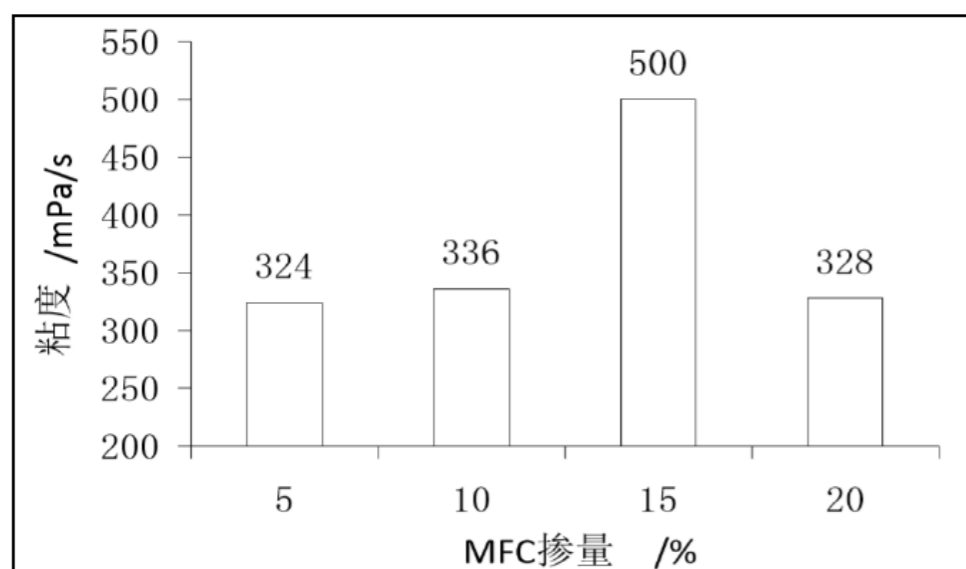


图 7.1-1 MFC 掺量对浆液粘度影响

②收缩性

灌浆材料的固化过程中的收缩变形是影响灌浆效果的一个关键因素，材料的收缩变形主要与用水量有密切关系外，MK 与 MFC 复合材料的收缩变形与激活剂掺量有密切关系。图 7.1-2 与图 7.1-3 为 MFC 用量 20%、激活剂用量 1% 复合材料收缩变形测试结果。

从用水量（W/C 比）对不同水灰比下样品的收缩率测试结果图可以看出，收缩性与材料的水灰比的增加基本呈线性增加关系，但总体收缩率不大，最大为 0.41%。收缩主要发生在 7d 以内，7d 以后收缩幅度有限。水灰比为 0.65 的样品在 28d 的收缩率小于 7d 数值，也就是说，后期样品出现了轻微膨胀，样品硬化膨胀可以提高灌浆材料的密实度及与岩体之间粘结性能。从不同激活剂对收缩率影响图可以看出，当水灰比统一为 0.75，当不掺入激活剂时，样品收缩率较高，但仍然满足试验要求，在添加激活剂后，收缩率减少约一倍。当激活剂用量 2%、3% 时，28 天的收缩率较 7 天要低，表明样品后期出现了轻微膨胀。

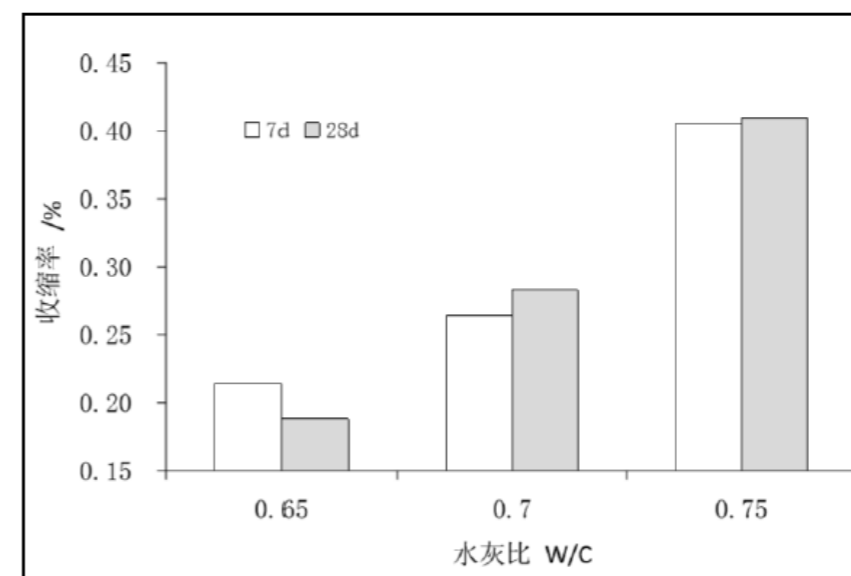


图 7.1-2 不同水灰比样品 7d 及 28d 收缩率

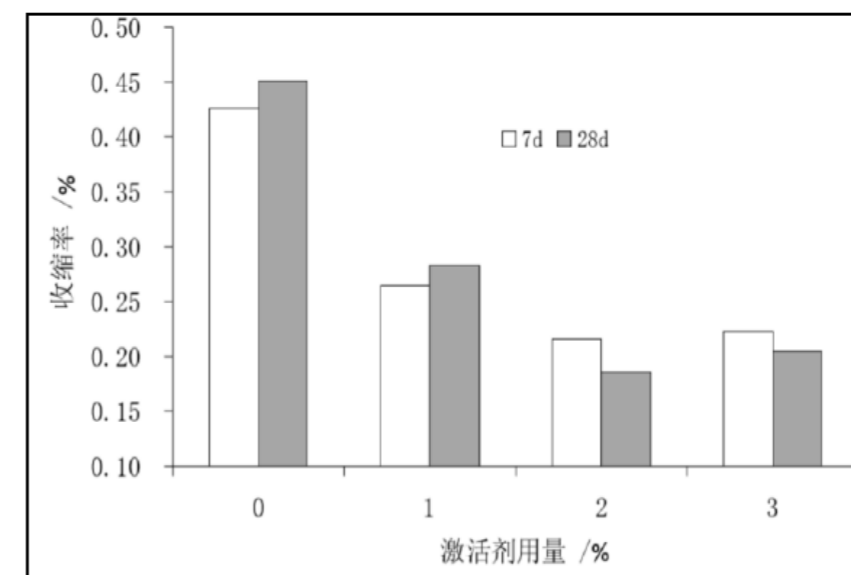


图 7.1-3 不同激活剂量样品 7d 及 28d 收缩率

③抗渗性

良好的抗渗性是裂隙灌浆材料一个基本要求。图 7.1-4 为水灰比控制 0.75，MFC 掺量分别为 20% 与 15%，不同碱激活剂用量下试件标准养护 28d 后的渗透系数测试结果。试验表明：各试样的渗透系数的数量级均为 10~6cm/s，基本达到抗渗要求；MFC 用量提高将导致渗透性增加；当激活剂用量大于 1% 时，材料的渗透性也将增加。

因此，从提高强度上看，适当增加 MFC 用量是必要的，但从提高抗渗性能上，建议适当提高 MK 的用量；材料的渗透性与强度受激活剂影响基本类似，建议控制在 1% 以内。

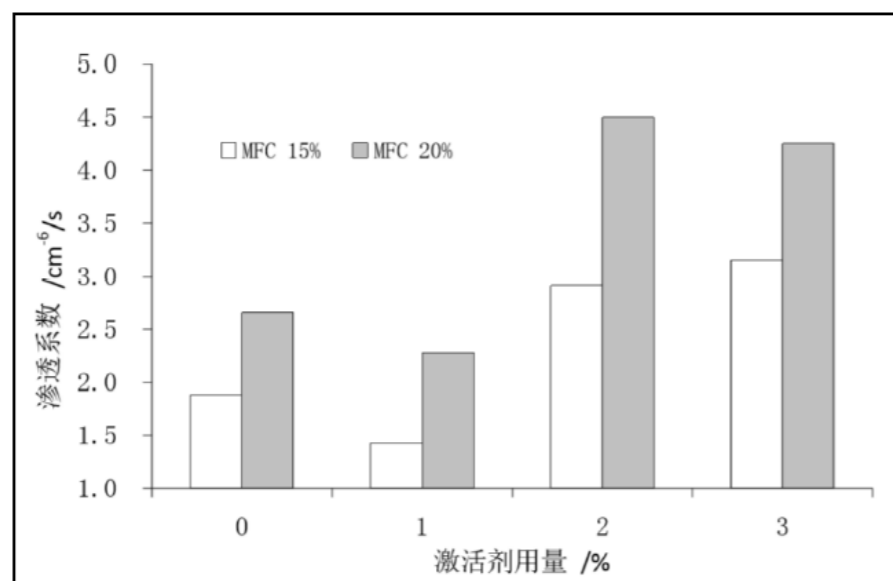


图 7.1-4 MFC 与激活剂用量对渗透系数影响

④易溶盐

激活剂用量为 1%，W/C 比为 0.75，对 MFC 含量为 15%和 20%的试样（编号分别为 PC15 和 PC20）进行易溶盐含量的测定，并与同样水灰比 MFC 浆体的含盐量对比。以 MK 与 MFC 混合材料为主剂的配方中，试样的易溶盐含量低，为 4.340~4.979‰，仅为 MFC 硬化浆体易溶盐含量的 12.4~14.2%。特别是 Ca²⁺、K⁺+Na⁺含量明显降低，这是因为在 MK 激活过程中，上述离子参与了固化反应，形成不可溶晶体一部分。这样大幅度降低了可溶盐对文物本体的破坏可能性。

表 7.1-1 不同配比试样易溶盐含量测试结果

编号	易溶盐含量 (g/kg)							
	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	CL ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺	总含量
PC20	0.628	0.510	0.067	1.613	0.180	0.002	1.340	4.34
PC15	1.159	0.263	0.070	1.824	0.098	0.009	1.554	4.979
MFC	1.34	8.40	0.135	0.605	19.0	0.019	5.45	34.947

PC20	0.628	0.510	0.067	1.613	0.180	0.002	1.340	4.34
PC15	1.159	0.263	0.070	1.824	0.098	0.009	1.554	4.979
MFC	1.34	8.40	0.135	0.605	19.0	0.019	5.45	34.947

总的说来，以低碱超细水泥+偏高岭土为活性材料的灌浆料，具有较好的强度与抗渗性，远低于水泥的析盐量，与裂隙中泥质与钙质充填具有良好的粘结性的材料，具有较好的材料性能及适用性。

建议配合比：

超细低碱水泥：偏高岭土：碱激活剂=0.15：1：0.01，水灰比 0.40~0.65。

2、改性水性环氧树脂

一般普通硅酸盐水泥最大粒径约为 0.1mm，用它来灌填细微的裂隙难度较大，而化学灌浆比水泥更具裂隙可灌性，且能够按照工程的需求调节浆液的胶凝时间，而且有的化学灌浆材料还具有较高的粘结强度，因此本设计在某些特定区域采用化学灌浆方式进行岩体裂隙灌浆加固。

化学灌浆是将一定的化学材料按比例配制成浆液，用压送设备将其灌入地层或裂隙内，使其扩散、胶凝或固化，以达到加固或防渗堵漏，保证工程的顺利进行或提供工程质量的目的。目前应用于化学灌浆的材料品种较多，它们的性能也各不相同，但到目前为止，尚未找到一种能够完全满足文物保护工程中应具备一切特性的理想化学灌浆材料。因此，只能根据不同的工程要求选择最合适的灌浆材料。

根据过往工程积累的经验，本次设计化学灌浆材料选用德国进口的 Viscacid®灌浆环氧树脂（REMERS）100。

灌浆材料 Viscacid®灌浆环氧树脂（REMERS）100 具有如下特点：

①力学性能高。环氧树脂具有很强的内聚力，分子结构致密，所以它的力学性能高于酚醛树脂和不饱和聚酯等通用型热固性树脂。

②附着力强。环氧树脂固化体系中含有活性极大的环氧基、羟基以及醚键、胺键、酯键等极性基团，赋予环氧固化物对金属、陶瓷、玻璃、混凝土、木材等极性基材以优良的附着力。

③固化收缩率小。一般为 1%~2%。是热固性树脂中固化收缩率最小的品种之一（酚醛树脂为 8%~10%；不饱和聚酯树脂为 4%~6%；有机硅树脂为 4%~8%）。线胀系数也很小，一般为 $6 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，所以固化后体积变化不大。

④工艺性好。环氧树脂固化时基本上不产生低分子挥发物，所以可低压成型或接触压成型。能与各种固化剂配合制造无溶剂、高固体、粉末涂料及水性涂料等环保型涂料。

⑤稳定性好，抗化学药品性优良。不含碱、盐等杂质的环氧树脂不易变质。

⑥粘度低，粘着力强，抗拉拔能力强，剪切力大并且毛细上升强，适用于各种压力及非压力灌注法。

⑦特性参数：为 A、B 两组分的混合物。

粘度：（20 摄氏度）550mPas、75mPas、100mPas；

密度：1.13g/cm³、0.87 g/cm³、1.07 g/cm³；

闪点：142℃、108℃、120℃；

气味：无味；

类胺：轻微类胺。

抗拉拔强度（23 摄氏度）：51N/mm² 7 天后；

黏着强度、抗拉拔强度（23 摄氏度）：7.4N/mm²（7 天后）；

剪切强度（23 摄氏度）：16.8N/mm² 7 天后。

Viscacid®灌浆环氧树脂 100 灌浆液推荐配比组成：

一般配比率：A 组分：B 组分

按重量：100：28

按体积：100：36

⑧在不利自然环境下易老化，如长期自然光照射、湿热、低温、干热等因素均会造成环氧树脂自身质量不断损失，通过查阅相关研究资料，其中自然光照射（主要是紫外线）是环氧树脂老化的主要因素，同时该种类环氧树脂成本较高。

考虑崖壁上分布各种复杂及种类繁多的裂隙，一部分裂隙即需要用灌浆料填充防止裂隙继续风化侵蚀，还要通过灌浆料的填充阻断外界水的侵入及渗透，同时灌浆料的有效粘接性能也是需要利用的性能，综合考虑以上因素以及环氧树脂灌浆料的优缺点，在自然光不能照射，需利用灌浆材料粘接加固，裂隙宽度小，需灌浆料体量较小的裂隙，可采用此种环氧树脂灌浆充填加固。

实际施工时实际灌浆液配比也应参照推荐配合比在现场试验基础上最终确定。

3、水硬性石灰加固材料

水硬性石灰属于无机灌浆材料，近些年，水硬性石灰在文物保护中得到较广泛的应用，通过对水硬性石灰、偏高岭土、石英砂的科学配比，并添加膨胀剂等外加剂后得到水硬性石灰的抗压强度能够达到 15MPa 以上，因此可以根据加固对象的特点，通过调整材料配合比而得到不同强度的加固材料，提高其适用性。为探求更优益的加固材料，本设计方案在总结过往类似工程保护经验、材料适配及文献资料基础上，以

NHL5 型水硬性石灰、偏高岭土和石英砂为灌浆材料主料，形成性能优良对文物本体无负面影响小的加固材料，该改性无机材料主要应用于外露浅部裂隙以及文物本体附近裂隙灌浆和表面风化的治理。

配比试验：

加固材料的流动性关系到工程应用中材料与岩体裂缝间的填充效果，而流动性指标的大小并非是单一的，需要保持在一定区间。

实验配比采用水硬性石灰、偏高岭土和石英砂作为主料，同时添加外加剂，共设计 4 种实验配比，通过改变两种主料的不同比例研究其流动性，其流动性如下表 4-2 不同水灰比条件下流动度所示：

表7.1-2 不同水灰比条件下流动度

编号	S40-1	S40-2	S40-3	S40-4
主材料比	1:0.6:0.4	1:0.6:0.4	1:0.6:0.4	1:0.6:0.4
水灰比	0.50	0.60	0.70	0.80
流动性mm	165	205	235	279

将上面数据整理成曲线如图 7.1-5 所示。

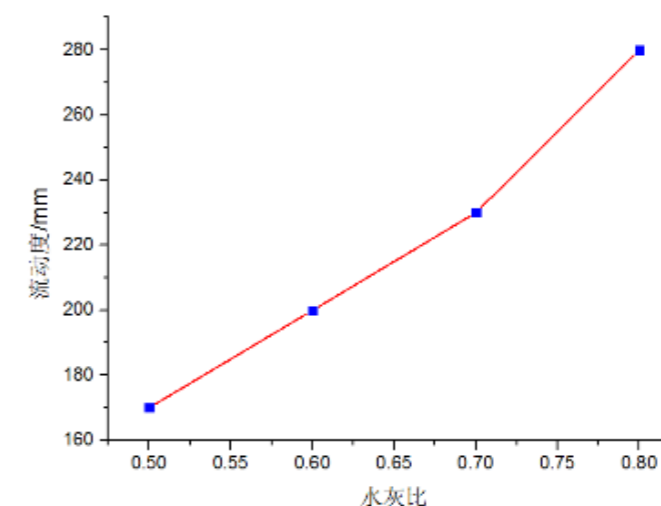


图 7.1-5 不同水灰比对流动度的影响

由图 7.1-5 可知，在材料配比一定的条件下，流动度受水灰比的影响也基本成线性形态。

由以上实验配比浇筑试块后，标养(90%湿度、20°C)条件下进行养护，通过在不同龄期条件下的抗压、抗折强度研究其强度变化规律，如下图 7.1-6 所示：

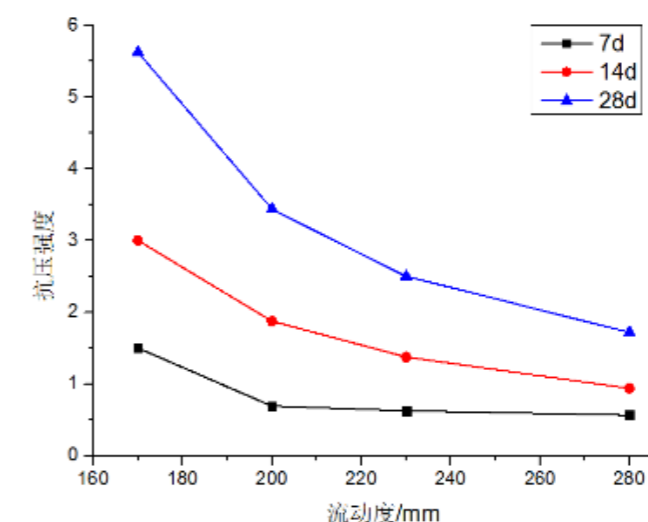


图 7.1-6 不同流动度比对材料强度的影响

由实验结果可知，水灰比与强度成反比例关系，因此为了在增加流动度的同时减小对强度的影响，实验中引进减水剂。

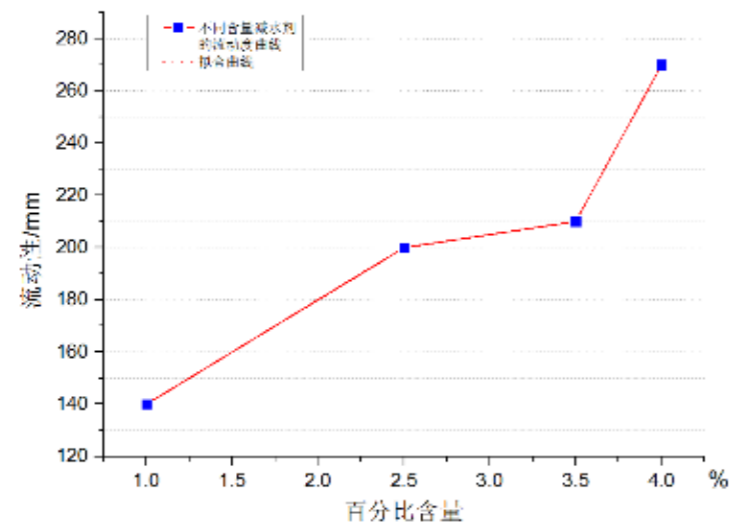


图 7.1-7 减水剂对流动度的影响

由图 7.1-7 可知,适当添加减水剂完全可以解决水灰比与强度成反比例关系问题。

加固材料一般在硬化过程中容易产生不同程序的收缩,实验中引进膨胀剂来减小或抵消水硬性石灰在硬化中产生的收缩效果。当添加不同比例的添加后,材料硬化过程的收缩率见表 7.1-3 收缩率监测结果表。

表7.1-3 收缩率监测结果表

编号	膨胀剂含量	水灰比	收缩率
S80-8	3%	0.5	3.0‰
S80-9	5%	0.5	1.7‰
S80-10	7%	0.5	1.0‰
S80-11	9%	0.5	0.3‰

根据收缩率表制作以下柱状图,见图 7.1-8。

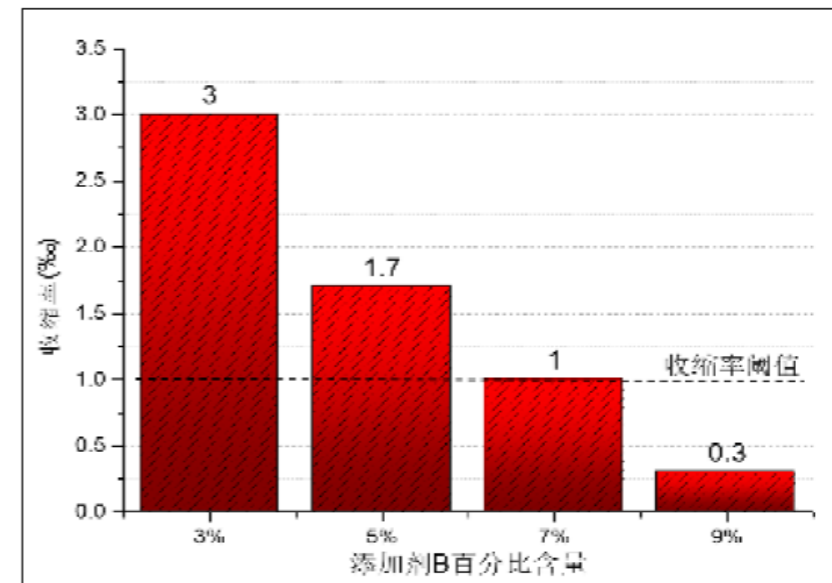


图7.1-8 膨胀剂含量对收缩率的影响

从结果可知,在膨胀剂添加量达到7%时,膨胀剂作用效果基本可以满足要求。

在完成配合比实验后,在不同的时间、用不同的设备和不同批号的材料,制作两批(B80-19、B80-20)试块进行验证,排除偶然因素的影响。对实验进行数据统计,数据变化规律如图 7.1-9、图 7.1-10 所示。

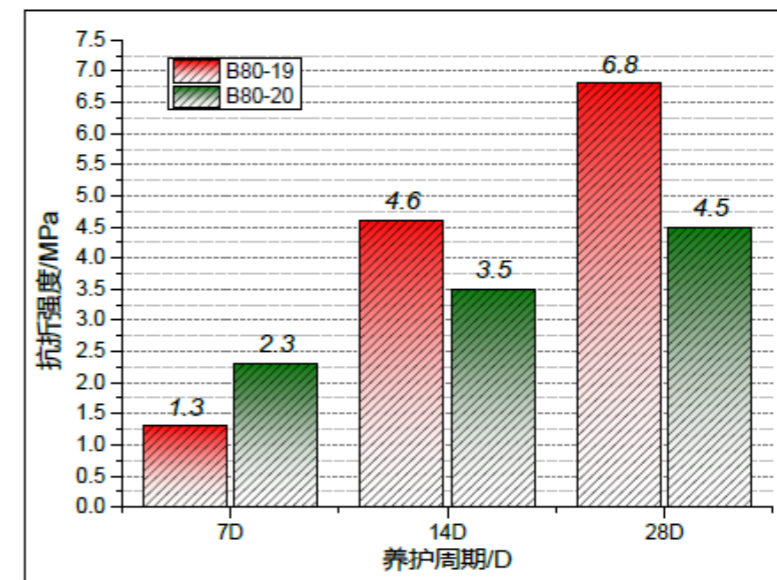


图7.1-9 标准养护条件下抗折强度

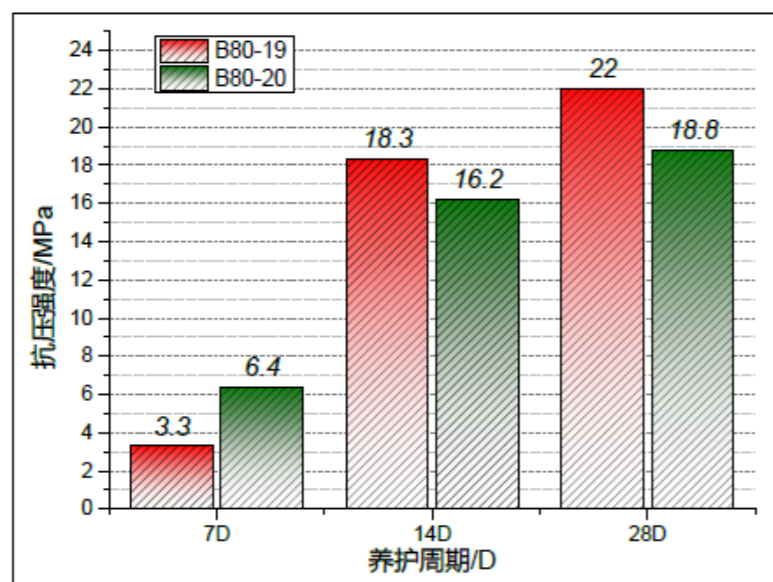


图7.1-10 标准养护条件下抗压强度

通过统计发现：B80-19、B80-20 两组实验取得的抗压、抗折强度都得到了较好的结果，两组配比实验同时满足工程可灌入要求和微膨胀要求。因此，在裂隙灌浆的治理中，本设计方案推荐采用以下配比方案：

NHL5：偏高岭土：石英砂=1：0.6：0.4，水灰比 0.45~0.5。

现场应用前，需综合考虑裂隙赋存状态、应用条件、原材料种类及质量等因素参照推荐配比在现场实验基础上确定最终现场实施配合比。

水硬性石灰、偏高岭土改性材料和改性水性环氧树脂三种裂隙灌浆材料在重庆北岩题刻和洛阳龙门石窟等区域岩体裂隙治理中得到广泛应用，并取得了良好的治理效果。综合以上，本设计选用的灌浆材料以及应用范围如表 4-4 所示。

表4-4 灌浆材料选配表

编号	材料名称	适用范围	建议配合比	备注
1	水硬性石灰	裂隙注浆封缝	NHL5：偏高岭土：石英砂=1:0.6:0.4	水灰比=0.45~0.50
2	偏高岭土改性材料	裂隙灌浆	超细低碱水泥：偏高岭	水灰比=0.40~0.65

			土：碱激活剂=0.15:1:0.01	
3	改性水性环氧树脂	需要提供较高粘结力的危岩	A组分：B组分 按重量 100:28 按体积 100:36	德国进口Remmers® 灌浆环氧 树脂100

7.1.4 工程范围

本次调查发现的 28 道节理裂隙，编号 L1~L28。

7.1.5 现场实验

鉴于裂隙灌浆工作具有极强的技术性、复杂性和严谨性，为切实解决岩体稳定性问题，提高文物保护工作质量，保障裂隙注浆最终实施效果。在裂隙注浆工作正式实施前，在拟实施灌浆加固的周边同条件岩体上，综合考虑裂隙赋存状态、应用条件、原材料种类及质量等因素，参照灌浆材料推荐配合比进行现场实验，并对实验效果进行跟踪监测与评估，在现场实验的基础上确定灌浆材料的最终实施配合比。

(1) 灌浆现场配比实验：裂缝灌浆材料在正式灌注施工前均应进行现场灌注试验，并记录实验的气温、岩体温度、裂隙是否充水等情况，确定最佳的最佳配合比和施工工艺等。

(2) 封缝材料现场实验：正式施工前对封缝材料进行粘结强度实验，把控强度与养护时间的关系。

(3) 灌浆效果检验：对实验性灌浆加固的部位进行破除，检验灌浆加固工艺效果及灌浆材料的粘结强度性能指标等。

7.1.6 施工工艺

(1) 搭建脚手架：由于崖壁直立陡峭，且高度较大，在裂隙注浆加固施工中，首先应根据相关技术规范规程搭建脚手架，详细计算、分析脚手架在工作的状态下的

稳定状态，确保施工过程安全。

(2) 文物本体的防护：在裂隙注浆实施前，对灌浆裂隙以外的文物本体进行防护，采用塑料薄膜、宣纸等材料做好遮蔽防护，确保灌浆不会对文物本体产生影响的情况下再进行施工。灌浆施工过程中，也应注意对成品的保护。

(3) 清洁裂面：采用毛刷、低温蒸汽或压缩空气清洁裂隙面，保证灌浆料与裂隙两侧岩石的粘接强度。

(4) 布设注浆管：根据裂隙张开度、分布情况以及灌浆料性质，沿着裂隙按间距 0.5~1m 埋设注浆管及观察管，注浆管与观察管间隔布置。对于裂隙张开度较大的裂隙，注浆管可选用直径 DN4、DN10 的钢管，钢管外露段需车制丝扣以利于注浆泵与注浆管的连接，不锈钢钢管 200mm，接头为不锈钢阀门；裂隙很微小时，可埋设注射针头或者输液管，埋置深度根据裂隙深度进行确定。

(5) 封缝：采用水硬性石灰作为裂隙表面封堵材料，宽度大于 10cm 的裂隙应采用进行填砌后再进行封缝；封缝材料应用专制的勾缝工具沿裂缝表面按压勾缝，表面应低于裂隙表面，宽度方向应不超过裂隙表面宽度，为后续做旧层预留作业空间。水硬性石灰材料配比 NHL5：偏高岭土：石英砂=1:0.6:0.4。

(6) 试漏：灌浆前选取适量蒸馏水进行试灌，检查是否存在漏浆部位，避免正式灌浆时浆液渗漏污染文物本体。

(7) 灌浆：根据灌浆部位的实际情况以及灌浆材料的特点，选择泵送、人工注射器注射等方式将浆料压进岩石裂缝，灌浆压力不大于 0.3Mpa。本次裂隙灌浆材料选用偏高岭土改性材料，材料配比超细低碱水泥：偏高岭土：碱激活剂=0.15:1:0.01。

(8) 修补做旧：待注浆浆液固化后，及时清除裂隙口残余材料，然后采用水硬

性石灰+灰岩岩粉材料修补注浆孔和做旧处理，确保处理后的裂隙表面与岩面颜色、质感相协调。

7.1.7 工程量统计

表 7.1-5 裂隙治理工作量统计表

序号	工作内容	单位	工程量
1	脚手架	m ²	242
2	文物本体防护	m ²	10
3	裂缝清理	m	110
4	裂隙表面封堵（水硬性石灰）	m	110
5	裂隙密闭性检测	m	110
6	裂隙灌浆（偏高岭土改性材料）	m ³	4.25
7	表面做旧（水硬性石灰+灰岩岩粉）	m	110
8	现场配比实验	组	3
9	封缝材料现场实验	组	3

7.2 危岩体加固

7.2.1 锚杆设计

锚杆采用全粘接锚杆，用1根HRB400φ28mm钢筋制作而成，锚杆长度为6~15m，单根锚杆设计抗拔力80~150KN。锚杆钻孔直径80mm，钻孔倾角10°，确保锚杆进入稳定岩层长度不小于3m，钻孔沉渣段0.2m。锚垫板为直径150mm×厚25mm的钢板制作而成。灌浆材料采用水泥砂浆，配置浆液所需水泥采用低碱型42.5级水泥，砂子采

用石英砂，要求砂内含泥量小于0.50%，泥块含量小于0.20%；水泥砂浆水灰比宜为0.40~0.50，砂灰比宜为0.30~0.50，水泥砂浆锚固体强度等级 \geq M30，具体施工时可根据现场试验确定配比。锚杆布置水平间距2m，竖向间距2m，多排布置时采用菱形交错布置的方式，锚杆布置间距和孔位可根据崖面岩体裂隙分布、崖面形态特征进行局部调整。此外，水泥砂浆应添加AEA型膨胀剂，添加量宜为8~12%，同时添加低碱型减水剂，施工时砂浆内添加剂含量应根据现场试验确定。为确保文物本体的安全，锚孔距离岩画本体距离要求不小于1.0m。锚杆注浆完成后，锚头部位用M30水泥砂浆、岩粉等材料进行封口和做旧处理，保证孔口表面与周边岩体一致。

锚杆成孔选择回转钻进的方式，采取必要措施尽可能地减少震，并设置防尘装置，一方面要尽可能的减少在钻进过程中粉尘的产生；另一方面要安排作业人员随时清理钻孔期间产生的岩渣和废水，避免在崖壁上形成挂流污染崖面和石刻本体。

7.2.2 锚固方案

(1) W1危岩体，采取裂隙灌浆+锚杆加固的方式进行综合治理，防止裂隙充水及继续发育扩张，提高结构面的抗剪强度，改变现有危岩体的受力状态，提高稳定系数。首先，对危岩体的主控裂隙及其他裂隙进行灌浆治理；危岩体布置1根 ϕ 28mm长6m的HRB400钢筋。

(2) W2危岩体，采取裂隙灌浆+锚杆加固的方式进行综合治理，防止裂隙充水及继续发育扩张，提高结构面的抗剪强度，改变现有危岩体的受力状态，提高稳定系数。首先，对危岩体的主控裂隙及其他裂隙进行灌浆治理；危岩体布置1根 ϕ 28mm长6m的HRB400钢筋。

(3) W3危岩体，采取裂隙灌浆+锚杆加固的方式进行综合治理，防止裂隙充水

及继续发育扩张，提高结构面的抗剪强度，改变现有危岩体的受力状态，提高稳定系数。首先，对危岩体的主控裂隙及其他裂隙进行灌浆治理；危岩体布置1根 ϕ 28mm长5m的HRB400钢筋。

(4) W4危岩体，采取裂隙灌浆+锚杆加固的方式进行综合治理，防止裂隙充水及继续发育扩张，提高结构面的抗剪强度，改变现有危岩体的受力状态，提高稳定系数。首先，对危岩体的主控裂隙及其他裂隙进行灌浆治理；危岩体布置1根 ϕ 28mm长6m的HRB400钢筋。

(5) W5危岩体，采取裂隙灌浆+锚杆加固的方式进行综合治理，防止裂隙充水及继续发育扩张，提高结构面的抗剪强度，改变现有危岩体的受力状态，提高稳定系数。首先，对危岩体的主控裂隙及其他裂隙进行灌浆治理；危岩体布置1根 ϕ 28mm长6m的HRB400钢筋。

(6) W6危岩体，采取裂隙灌浆+锚杆加固的方式进行综合治理，防止裂隙充水及继续发育扩张，提高结构面的抗剪强度，改变现有危岩体的受力状态，提高稳定系数。首先，对危岩体的主控裂隙及其他裂隙进行灌浆治理；危岩体布置1根 ϕ 28mm长6m的HRB400钢筋。

(7) W7危岩体，采取裂隙灌浆+锚杆加固的方式进行综合治理，防止裂隙充水及继续发育扩张，提高结构面的抗剪强度，改变现有危岩体的受力状态，提高稳定系数。首先，对危岩体的主控裂隙及其他裂隙进行灌浆治理；危岩体布置2排锚杆，锚杆间距2m，共计布置3根 ϕ 28mm长6m的HRB400钢筋。

(8) W8危岩体，采取裂隙灌浆+锚杆加固的方式进行综合治理，防止裂隙充水及继续发育扩张，提高结构面的抗剪强度，改变现有危岩体的受力状态，提高稳定系

数。首先，对危岩体的主控裂隙及其他裂隙进行灌浆治理；危岩体布置1根φ28mm长6m的HRB400钢筋。

(9) W9危岩体，采取裂隙灌浆+锚杆加固的方式进行综合治理，防止裂隙充水及继续发育扩张，提高结构面的抗剪强度，改变现有危岩体的受力状态，提高稳定系数。首先，对危岩体的主控裂隙及其他裂隙进行灌浆治理；危岩体布置1排锚杆，锚杆间距2m，共计布置2根φ28mm长6m的HRB400钢筋。

7.2.3 锚杆锚固后岩体稳定性

根据以往工程经验，裂缝注浆加固之后危岩体主控结构面抗剪强度指标为： $c=23\text{kpa}$ ， $\varphi=21^\circ$ ，按此结构面参数进行危岩体稳定性验算分析。对危岩实施有效治理后可不考虑孔隙水压力。在工程正式实施前，应在危岩体主控结构面两侧不影响文物本体区域采用岩样，采用偏高岭土改性材料注浆加固后，进行岩体的直接剪切试验，确定主控结构面抗剪强度指标。

根据危岩变形失稳特征分析可知，本次调查危岩体失稳破坏方式主要为滑移式和倾覆式两种类型。根据各个危岩体的变形破坏特征，对采用锚杆进行加固的危岩体采用极限平衡法进行加固设计，具体设计计算原理如下：

1、根据危岩体地质力学模型计算危岩结构面上受力 N、T

由于危岩水平和垂直上未受其他外荷载作用，稳定性分析时仅考虑地震和孔隙水压力作用，按下式进行计算：

$$N = N_l + N_e + N_w$$

$$T = T_l + T_e + T_w$$

式中：

N—结构面上的正压力（KN）；

T—结构面上的下滑力（KN）；

E—地震力（KN）；

P_w —裂隙水压力（KN）；

U—滑面水压力（KN）；

N_l —重力在垂直于结构面方向分力（KN）， $N_l = W \cos \alpha$ ；

T_l —重力在平行于结构面方向的分力（KN）， $T_l = W \sin \alpha$ ；

N_e —地震力在垂直于结构面方向的分力（KN）， $N_e = E \sin \alpha$ ；

T_e —地震力在平行于结构面方向的分力（KN）， $T_e = E \cos \alpha$ ；

N_w —裂隙水压力在垂直于结构面方向的分力（KN）， $N_w = -P_w \sin \alpha - U$ ；

T_w —裂隙水压力在平行于结构面方向的分力（KN）， $T_w = P_w \cos \alpha$ ；

W—危岩体自重（KN）；

α —结构面倾角（°）。

2、计算安全系数达到要求 k 时所需的锚固力

$$k = \frac{(N + R_m \sin(\alpha + \theta)) \tan \varphi + cL}{T - R_m \cos(\alpha + \theta)}$$

$$R_m = \frac{kT - (N \tan \varphi + cL)}{\sin(\alpha + \theta) \tan \varphi + k \cos(\alpha + \theta)}$$

式中：

R_m —每延米范围内锚杆的锚固力（KN），假定锚杆设计时， R_m 由所有锚杆平均分担；

θ —锚杆倾角（°），取 10° ；

k—安全系数，取 1.5；

c—结构面粘聚力（kpa），取 23kpa；

L—结构面长度（m）；

φ —结构面内摩擦角（°），取 21°。

3、锚杆有效锚固长度设计值的确定

锚杆锚固长度应满足式（1）：

$$L_{ia} \geq \frac{R_m \cdot S_{ix}}{\pi \cdot D_i \cdot f_{rbk}} \quad (1)$$

同时，还应满足式（2）：

$$L_{ia} \geq \frac{R_m \cdot S_{ix}}{n \cdot \pi \cdot d \cdot f_b} \quad (2)$$

式中： L_{ia} —第 i 道锚杆有效锚固段长度（m），是指锚固段在结构面以外部分；

f_{rbk} —岩土层与锚固体极限粘接强度标准值（kPa），取 1200kpa；

f_b —钢筋与锚固砂浆间的粘接强度设计值（kPa），取 2400kpa；

D_i —第 i 道锚杆锚固孔钻孔直径（mm），取 80mm；

d—锚筋直径（mm）；

S_{ix} —第 i 道锚杆的水平间距（mm），取 2.0m；

n—锚杆中钢筋的根数，取 1。

4、配筋计算

$$A_s \geq \frac{R_m \cdot S_{ix}}{f_y} \quad (3)$$

式中： f_y —钢筋抗拉强度设计值（N/mm²）。

本次调查危岩破坏形式主要为滑移式和倾倒式，在危岩变形演化过程中，设置的锚杆主要承受拉力及剪力，因此锚杆材料必须具备较佳的抗拉伸及抗剪性能，同时考虑加固对象的特殊性，在保障锚杆加固性能的基础上，尽量减小锚杆成孔直径并采用较小的直径的杆体材料，以减少加固作业对石刻的影响。综合考虑上述因素，锚杆杆体材料选用HRB400热轧带肋钢筋。

根据锚杆加固稳定性计算结果可知（详见表7.2-1），经过锚杆加固、裂隙治理后的危岩体，在四种工况下均处于稳定状态，可岩体治理要求。

表7.2-1 锚杆加固后稳定性系数

危岩 编号	实施加固前								加固措施	实施加固后							
	自然状态		暴雨状态		地震状态		暴雨+地震			自然状态		暴雨状态		地震状态		暴雨+地震	
	稳定性 系数	稳定性 评价	稳定性系 数	稳定性 评价	稳定性 系数	稳定性 评价	稳定性 系数	稳定性 评价		稳定性 系数	稳定性 评价	稳定性 系数	稳定性 评价	稳定性 系数	稳定性 评价	稳定性 系数	稳定性 评价
W1	滑移	1.35	基本稳定	1.12	欠稳定	1.08	欠稳定	0.78	①裂隙灌浆；②布置 1 根长 6m 的 $\phi 80$ 普通锚杆。	1.61	稳定	1.57	稳定	1.57	稳定	1.53	稳定
W2	滑移	1.39	基本稳定	1.09	欠稳定	1.03	欠稳定	0.89	①裂隙灌浆；②布置 1 根长 6m 的 $\phi 80$ 普通锚杆。	1.60	稳定	1.56	稳定	1.55	稳定	1.53	稳定
W3	滑移	1.13	欠稳定	1.05	欠稳定	0.85	不稳定	0.76	①裂隙灌浆；②布置 1 根长 5m 的 $\phi 80$ 普通锚杆。	1.64	稳定	1.58	稳定	1.56	稳定	1.52	稳定
W4	滑移	1.12	欠稳定	0.93	不稳定	1.02	欠稳定	0.81	①裂隙灌浆；②布置 1 根长 6m 的 $\phi 80$ 普通锚杆。	1.59	稳定	1.55	稳定	1.56	稳定	1.52	稳定

危岩 编号	实施加固前								加固措施	实施加固后							
	自然状态		暴雨状态		地震状态		暴雨+地震			自然状态		暴雨状态		地震状态		暴雨+地震	
	稳定性 系数	稳定性 评价	稳定性系 数	稳定性 评价	稳定性 系数	稳定性 评价	稳定性 系数	稳定性 评价		稳定性 系数	稳定性 评价	稳定性 系数	稳定性 评价	稳定性 系数	稳定性 评价	稳定性 系数	稳定性 评价
W5	滑移	1.40	基本稳定	1.20	基本稳定	1.11	欠稳定	0.92	①裂隙灌浆;②布置 1 根长 6m 的 φ80 普通锚杆。	1.64	稳定	1.60	稳定	1.56	稳定	1.53	稳定
W6	滑移	1.28	基本稳定	1.08	欠稳定	1.06	欠稳定	0.86	①裂隙灌浆;②布置 1 根长 5m 的 φ80 普通锚杆。	1.60	稳定	1.55	稳定	1.55	稳定	1.52	稳定
W7	倾倒	1.36	基本稳定	1.20	欠稳定	1.11	欠稳定	0.86	①裂隙灌浆;②布置 3 根长 6m 的 φ80 普通锚杆。	1.63	稳定	1.58	稳定	1.57	稳定	1.51	稳定
W8	滑移	1.26	基本稳定	1.05	欠稳定	0.96	不稳定	0.85	①裂隙灌浆;②布置 1 根长 6m 的 φ80 普通锚杆。	1.62	稳定	1.57	稳定	1.54	稳定	1.52	稳定
W9	倾倒	1.20	欠稳定	1.09	欠稳定	0.91	不稳定	0.75	①裂隙灌浆;②布置 2 根长 6m 的 φ80 普通锚杆。	1.61	稳定	1.56	稳定	1.55	稳定	1.52	稳定

7.2.4 锚杆施工工艺流程

锚固施工质量的好坏直接影响锚杆的锚固能力及危岩的稳定性,施工前应根据工程施工条件和地质条件选择适宜的施工方法,精心组织施工。锚固施工工序总体包括 5 个环节:搭建脚手架、锚固钻孔施工、锚杆制作与安装、注浆施工、锚固锁定及表面做旧。

1、搭建脚手架

由于崖壁面直立陡峭,且高度较大,锚固工程施工中,首先应根据相关技术规范规程搭建脚手架,详细计算、分析脚手架在工作的状态下的稳定状态,确保施工过程安全。

2、锚固钻孔

按设计、施工要求进行钻孔,钻孔是锚固工程费用最高、控制工期的作业,因而是影响锚固工程经济效益的主要因素。钻孔应满足设计要求的孔径、长度和倾角,采

用适宜的钻孔方法确保精度,要使后续的杆体插入和注浆能顺利的进行。一般要求如下:

① 在钻机安放前,按照设计图并根据现场情况确定孔位及锚孔方位角,并作出标记。要求锚孔点位水平、垂直方向误差不应大于 50mm。

② 确定孔位后根据实际地层及钻孔方向选取适当的钻孔机具并确定机座水平定位和立轴倾角(即锚孔倾角),钻机立轴的倾角与钻孔的倾角应尽量吻合。特别是在洞窟周边孔位,开孔后尽量保持精准的钻进方向。钻机机座固定稳固,在钻进过程中根据实际地层变化情况,随时调整钻进参数,防止造成孔斜偏差。

对于项目区崖壁危岩加固治理,锚孔钻进过程中建议采取回转风力排渣的方式进行钻探,不可采用冲击成孔方式(如潜孔钻机),采取必要措施尽可能地减少震动。在钻探施工过程中,监理及施工人员应多次进行孔位和钻孔钻进方向的自检校核,确保万无一失。

3、锚杆制作与安装

锚杆的制作较简单，一般首先按要求的长度切割钢筋，然后在杆体上每隔 1~2m 安放对中支架以使杆体在孔中居中，最后对杆体按要求进行防腐处理。对于各种形式的锚杆技术要求如下：

① 严格按照设计进行钢筋选材。对进场的钢筋必须验明其产地、生产日期、出场日期、型号，核实生产厂家的资质证书及其各项力学性能指标。同时须进行抽样检查，以确保其各项参数达到锚固工程要求。

② 严格按照设计长度进行下料。对进场钢筋经检验达到相关技术要求后，即可进行校直、除锈处理，然后按照施工设计长度进行断料，其长度误差不应大于 50.00mm。一般实际长度应大于计算长度的 0.30~0.50m，但不可下得过短，以至无法锁定或给后续工作带来不便。

③ 锚杆组装可在严格管理下有熟练人员在工地制作。锚杆全段必须按照设计要求作防腐处理和定位处理。

④ 锚杆放入钻孔之前，应检查孔道是否阻塞，查看孔道是否清理干净，并检查锚杆体的质量，确保锚杆组装满足设计要求。安放时，应防止锚杆压弯、弯曲，注浆管及排气管随锚杆体一同放入钻孔，管底距孔底宜为 50.00~100.00mm，锚杆放入角度应于钻孔角度保持一致，在入孔过程中，注意避免移动对中器。锚杆入孔内深度不应小于锚杆长度的 95%。

4、注浆施工

注浆是锚固施工过程中的一个重要环节，注浆质量的好坏将直接影响锚固的锚固能力。锚孔按灌浆要求进行灌注，浆液的拌合成分、质量和灌浆方式在很大程度上决

定了锚杆的粘结强度和防腐效果。因此锚杆注浆施工应当严格把握浆材质量、浆液性能、注浆工艺和注浆质量。注意两方面的要求：

① 锚孔注浆材料严格采用设计要求材料。注浆采用孔底注浆法，注浆压力不宜小于 0.60~0.80MPa，浆液灌注必须饱满密实，第一次注浆完毕，待浆液凝固收缩后，孔口应进行补浆。

② 注浆作业连续紧凑，中途不得中断，使注浆工作在初始注入的浆液仍具塑性的时间内完成；在注浆过程中，边灌边提注浆管，保证注浆管管头插入浆液液面下 50~80cm，严禁将导管拔出浆液面而出现断杆事故。实际注浆量不得少于设计锚杆的理论计算量，即注浆充盈系数不得小于 1.00。

本次工程为全粘接锚杆。

5、锚固

① 锚具安装前，要对锚具进行逐个严格检查。锚具安装必须与孔道对中，安装要整齐，理顺注浆管后依次套入锚垫板、工作锚、限位板等。

② 锚固安装固定后，锚头部分应涂防腐剂，并用低碱型水泥砂浆掺白云岩岩粉填充，使之与岩面齐平。垫板采用 25mm 厚钢板。锚头选用自然锁定，不另施加预应力，锁定后埋入岩壁内，做旧处理。所有铁件，在安装前均进行防锈预处理。

锚固施工中有关混凝土、锚杆等单项工程，除应按上述要求执行外，尚应执行的《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》（GB50084-2015）等相关标准的规定。

7.3 植被清理

清理石刻周围植被。对附生在崖壁上和裂缝内的杂草、树木使用小型工具人工刈

割,对残留根系注射除草剂进行灭活处理,待根系枯萎后用牙科工具将残留根系清除。5%的除草剂,对于附生植物都具有一定的抑制作用,尤其对于附生类植物、杂草具有特效的灭杀作用。植物清理完毕后采用目测或借助放大镜对清除区域进行初步质量检验,检查植物根系是否清除干净,若尚未清除干净则返工继续清除残留的根系。

主要工程量:清理脚手架搭设范围内影响岩体稳定植被,清理面积242m²,需清理胸径大于12cm的乔木15株,并对植物根系进行灭活处理。

八、施工注意事项

- (1) 要严格按照设计要求进行施工,确保工程质量和文物安全。
- (2) 施工中要充分作好施工记录和档案;修补、增加部位的记录;特殊工艺和方法记录。
- (3) 由于大部分保护材料本身有一定的毒副作用,施工时必须做好防护工作。
- (4) 在石刻表面进行施工时,要保证文物安全。
- (5) 保护材料涂刷要均匀,喷涂的压力要把握好,避免压力过大造成石刻表面的破坏。
- (6) 对废弃化学药剂进行统一管理,交由专门机构或单位处理,同时施工周边环境要采取必要的保护措施,以保证保护区自然环境不被污染。
- (7) 由于石刻病害情况复杂,因施工过程中根据遇到的实际情况,设计做适当变更。
- (8) 石刻本体保护工程难度大,要把好每个工序的质量关,要建立严格的监理验收制度。

(9) 施工时严格按照各种材料的施工工艺进行,下个程序的施工要在上一程序检查合格后才能进行。

(10) 应尽量避免雨天施工,以免影响保护效果。

(11) 脚手架搭设中严禁违规操作,杜绝钢管等施工材料搬运中碰触石刻本体,造成石刻破坏。

(12) 连墙件锚杆或工程锚杆注浆时进行注浆周边封堵,防止浆液流出对石刻本体及崖面产生污染。

(13) 在脚手架搭设和工程施工过程中,对石刻所依附载体裂隙较严重的地方或在施工中可能造成节理裂隙加重甚至剥落的区域进行预加固或临时支护措施,保证脚手架搭设过程中石刻本体的安全。

(14) 布置锚杆孔位时要结合裂隙发育实际情况和石刻位置进行布置。

(15) 锚杆钻孔过程中控制好钻机的给进压力,尽量减少对崖面岩体的振动,防止局部岩体裂隙扩张或产生岩体掉块。

(16) 施工完毕后要仔细做好修复作旧工作,尽量减少工程施工对崖面表面产生的改变。

(17) 在石刻本体上部施工时,在顶部搭设水平竹串片脚手板防护层,防止上部落物对石刻本体造成破坏;同时在脚手架和崖面之间布设密目防护网。

(18) 石刻上部要小心施工,尽量避免高处落物,处理好锚杆钻孔岩渣的排放,避免岩渣对石刻本体的污染。

(19) 组织全体员工认真学习《中华人民共和国文物保护法》、《文物保护法实施条例》等国家和广西壮族自治区有关文物保护、管理等方面的法律法规,增强文物

保护意识，提高对文物保护重要性的认识，明白文物对祖国悠久历史、灿烂文明的意义和历史文物的不可再生性。让所有施工人员懂得文物和石窟寺石刻属国家所有，是珍贵的国家财产，必须倍加珍惜，悉心呵护。

(20) 应尽早建立安全监测预警方案，对危险性较大的区域在工程实施阶段制定详细的专项监测预警方案，确保文物和人员的安全。

(21) 该工程要尽快进入实施阶段，避免滞后实施造成不良后果。在工程实施中，应严格按照国家相关规范要求进行，各项工程措施实施前应做好文物的安全临时防护工作，工程实施中应尽量少扰动文物本体，工程实施后应进行复旧处理，恢复外观，力求协调，达到“保持现状，修旧如旧”的文物保护原则。

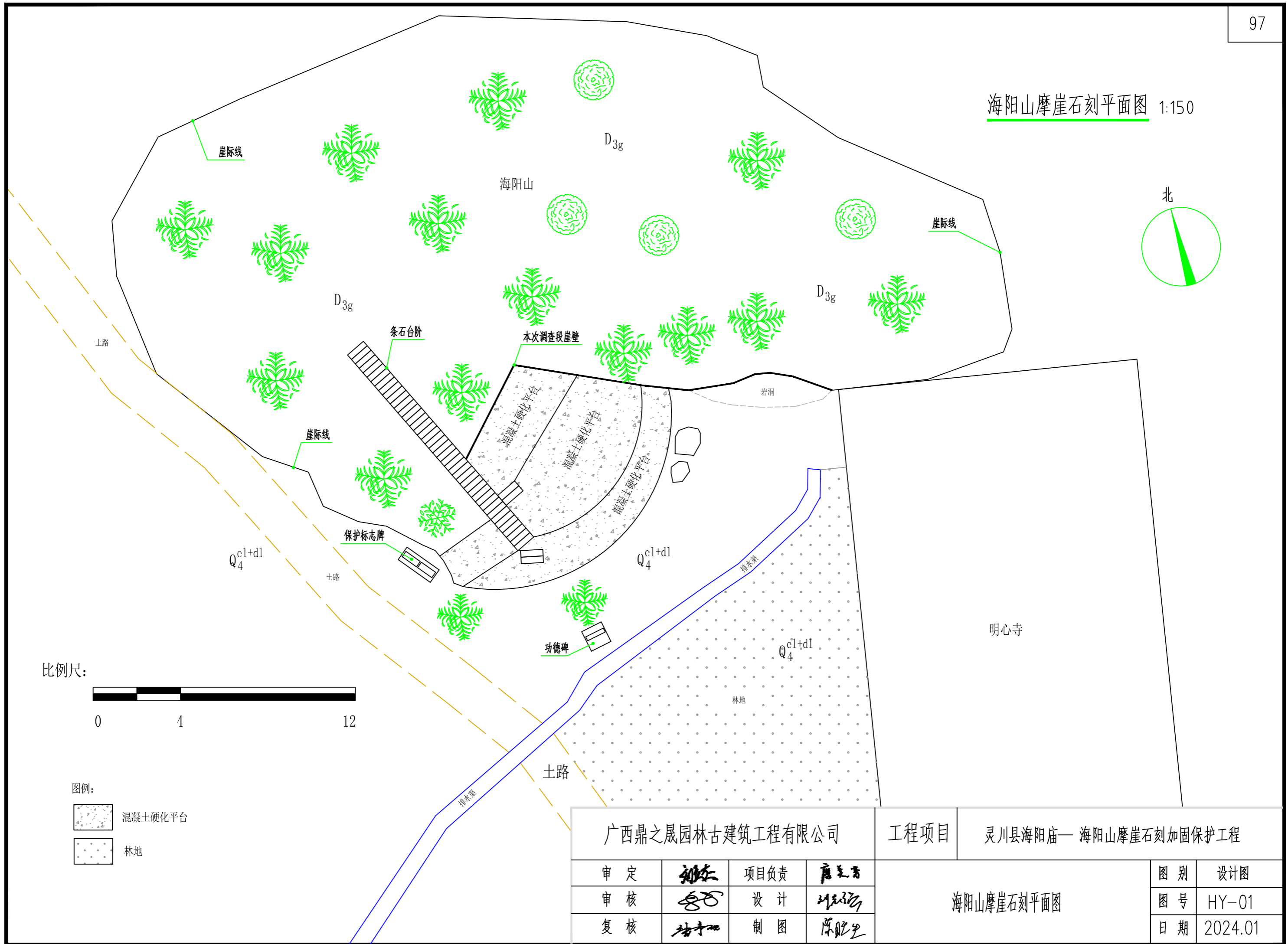
(22) 在工程实施过程中，裂隙灌浆注意对外侧危岩体的临时性支护或与工程措施相结合进行临时性支护，防止灌浆过程中因灌浆危岩体侧向压力增大而产生破坏。

(23) 施工过程中注意对钻孔工艺的除尘，防止对周边环境的污染。

(24) 工作中由于地形等条件限制，难免疏漏，在施工过程中，建议安排有工作经验的地质人员和设计人员配合施工，根据现场施工过程中所进一步掌握的实际地质情况，进一步补充和完善地质资料，及时变更，优化设计，即按“动态设计、信息化施工”的原则确保加固工程的顺利进行。

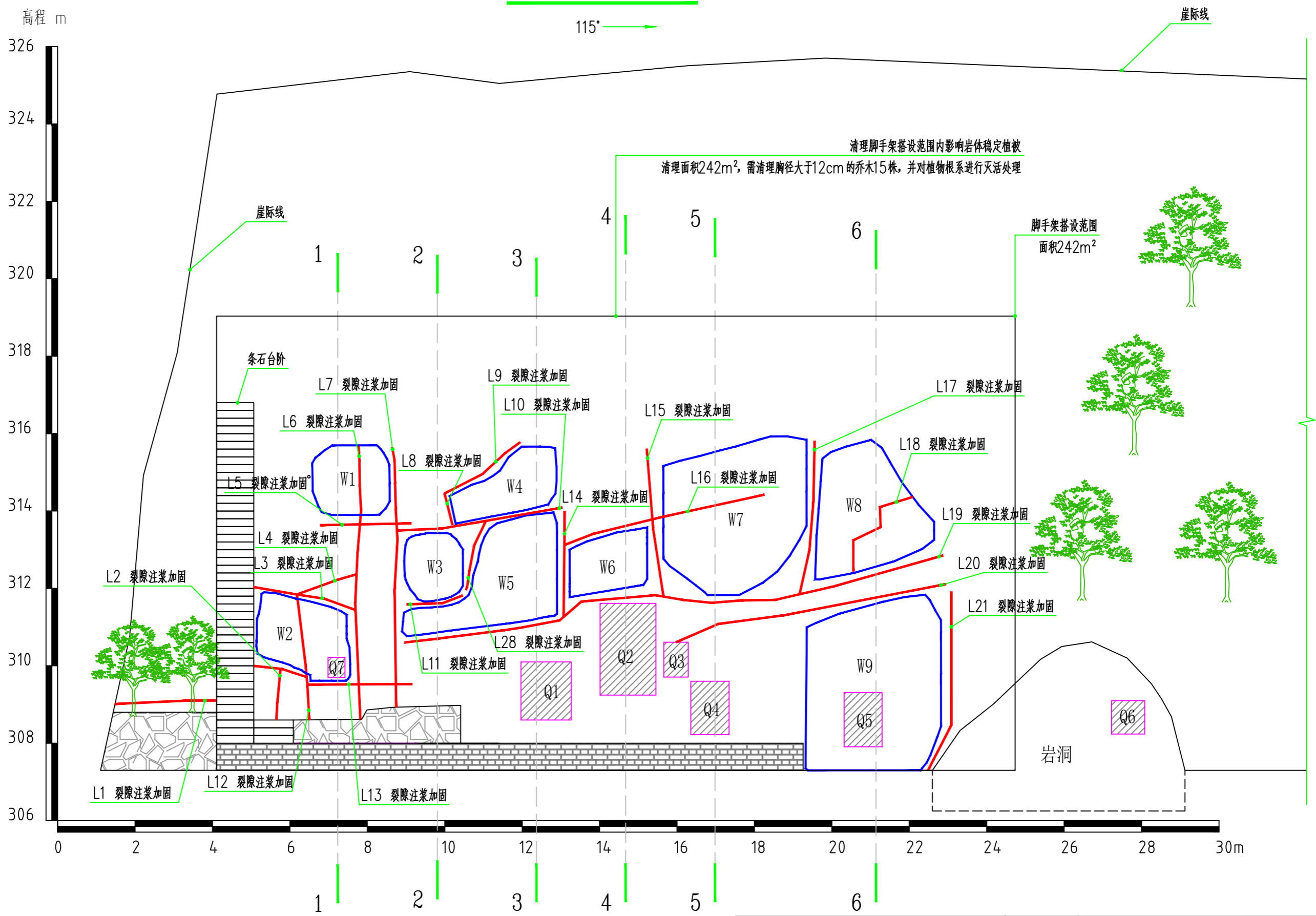
第四部分 设计图

海阳山摩崖石刻平面图 1:150



广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定	刘杰	项目负责	唐文秀	海阳山摩崖石刻平面图	图别	设计图
审核	张	设计	刘		图号	HY-01
复核	杨	制图	陈		日期	2024.01

海阳山摩崖石刻立面图 1:100



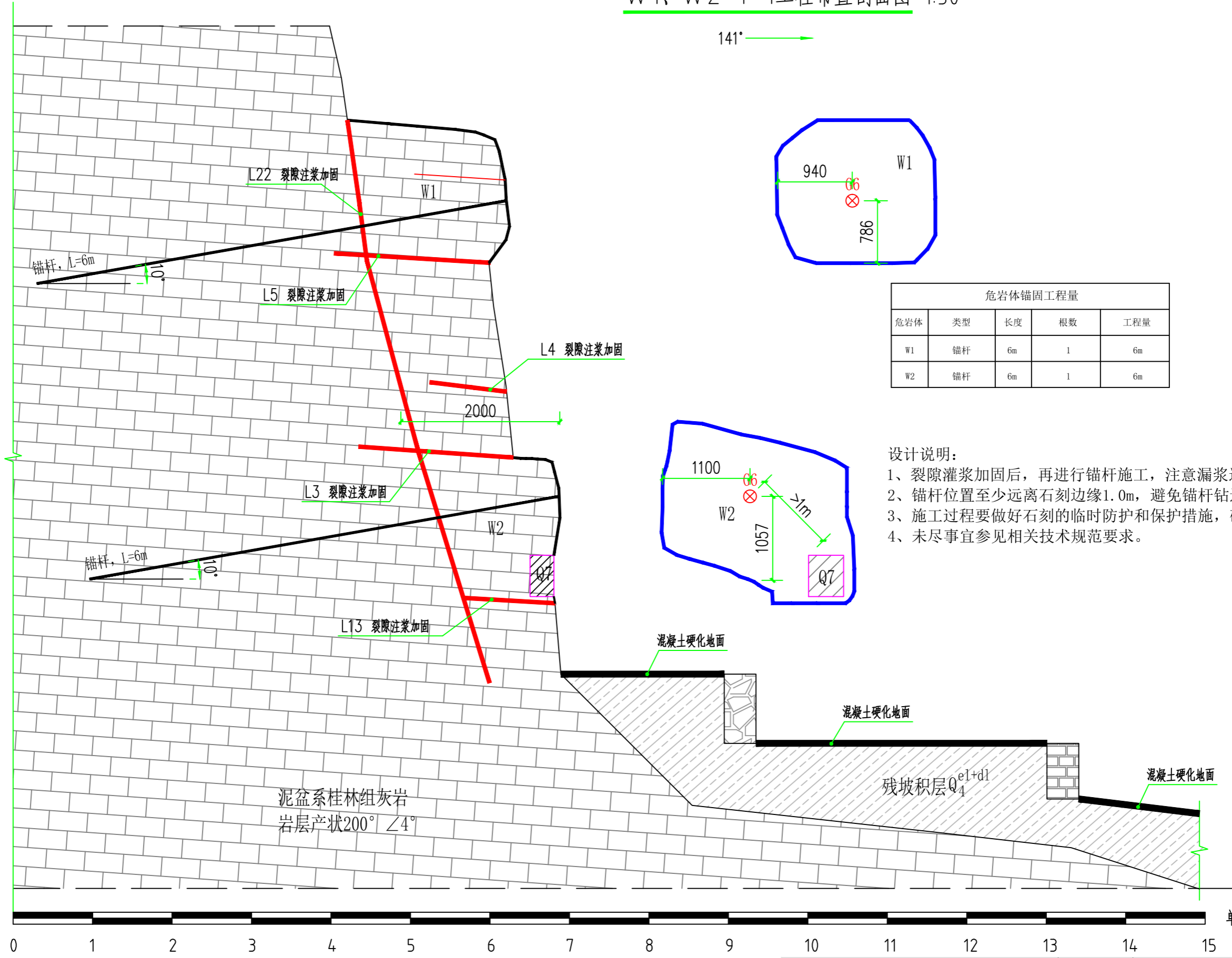
图例:



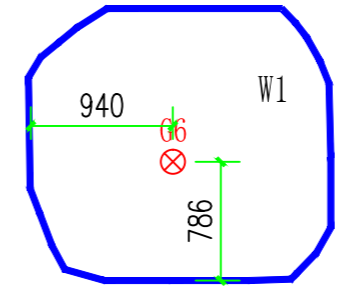
广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定	<i>陈东</i>	项目负责人	<i>唐志奇</i>	海阳山摩崖石刻立面图	图别	设计图
审核	<i>李</i>	设计	<i>陈东</i>		图号	HY-02
复核	<i>唐志奇</i>	制图	<i>陈东</i>		日期	2024.01

W1、W2 1-1工程布置剖面图 1:50

高程: m
317
316
315
314
313
312
311
310
309
308
307
306



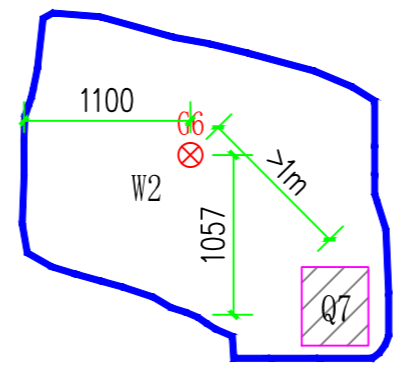
141° →



危岩体锚固工程量				
危岩体	类型	长度	根数	工程量
W1	锚杆	6m	1	6m
W2	锚杆	6m	1	6m

设计说明:

- 1、裂隙灌浆加固后, 再进行锚杆施工, 注意漏浆巡查。
- 2、锚杆位置至少远离石刻边缘1.0m, 避免锚杆钻进对石刻造成破坏。
- 3、施工过程中要做好石刻的临时防护和保护措施, 确保文物和施工安全。
- 4、未尽事宜参见相关技术规范要求。



泥盆系桂林组灰岩
岩层产状200° ∠4°

残坡积层Q₄^{el+dl}

单位: m

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责		W1、W2 1-1工程布置剖面图	图别	设计图
审核		设计			图号	HY-03
复核		制图			日期	2024.01

W3 2-2工程布置剖面图 1:25

136°

危岩体锚固工程量				
危岩体	类型	长度	根数	工程量
W3	锚杆	5m	1	5m

高程: m

315

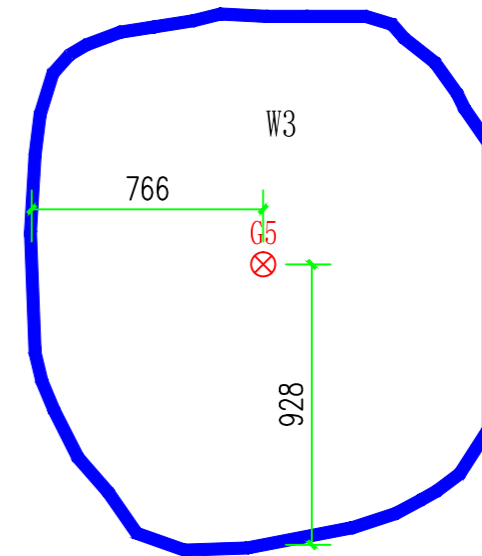
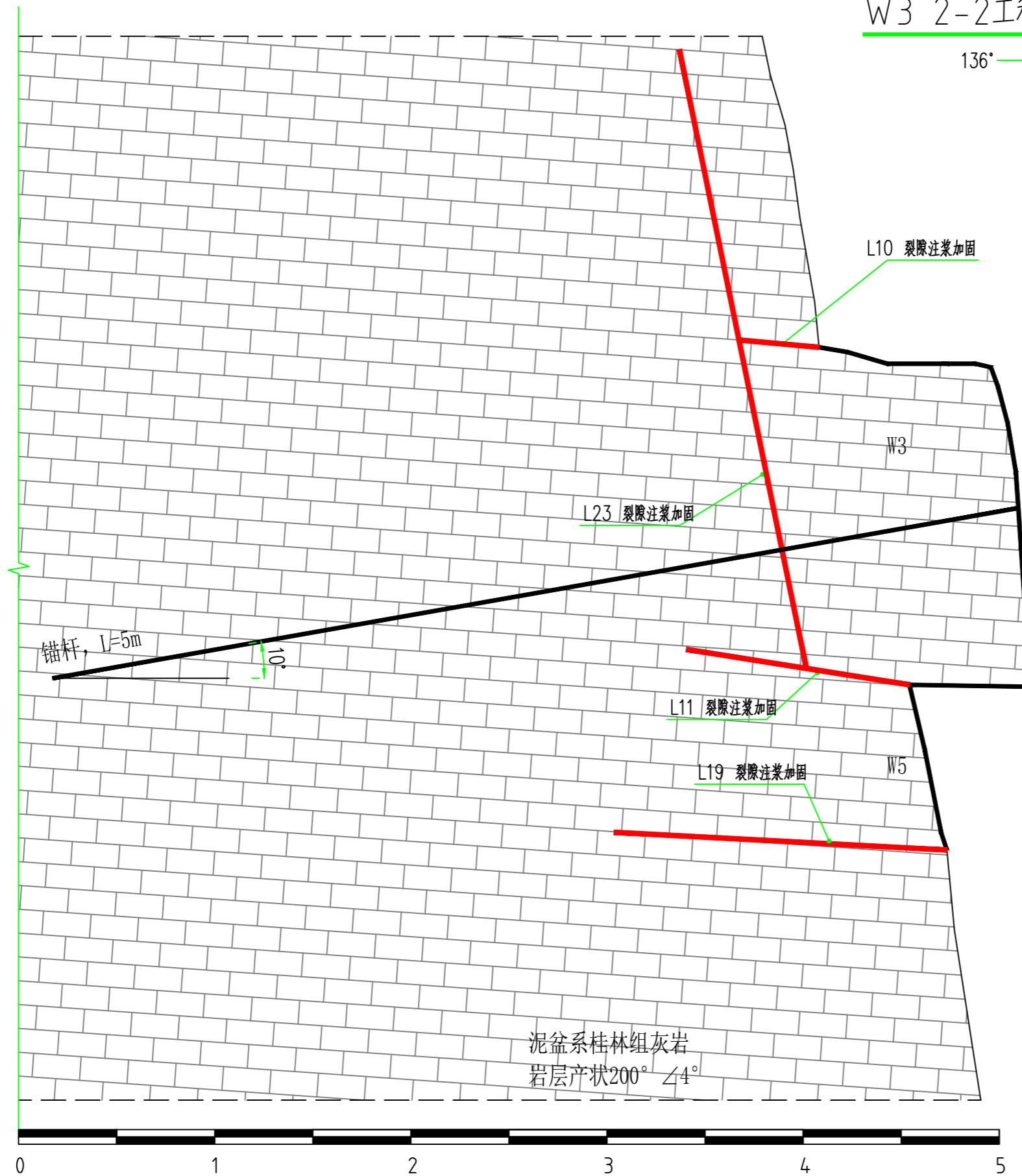
314

313

312

311

310



设计说明:

- 1、裂隙灌浆加固后, 再进行锚杆施工, 注意漏浆巡查。
- 2、锚杆位置至少远离石刻边缘1.0m, 避免锚杆钻进对石刻造成破坏。
- 3、施工过程中要做好石刻的临时防护和保护措施, 确保文物和施工安全。
- 4、未尽事宜参见相关技术规范要求。

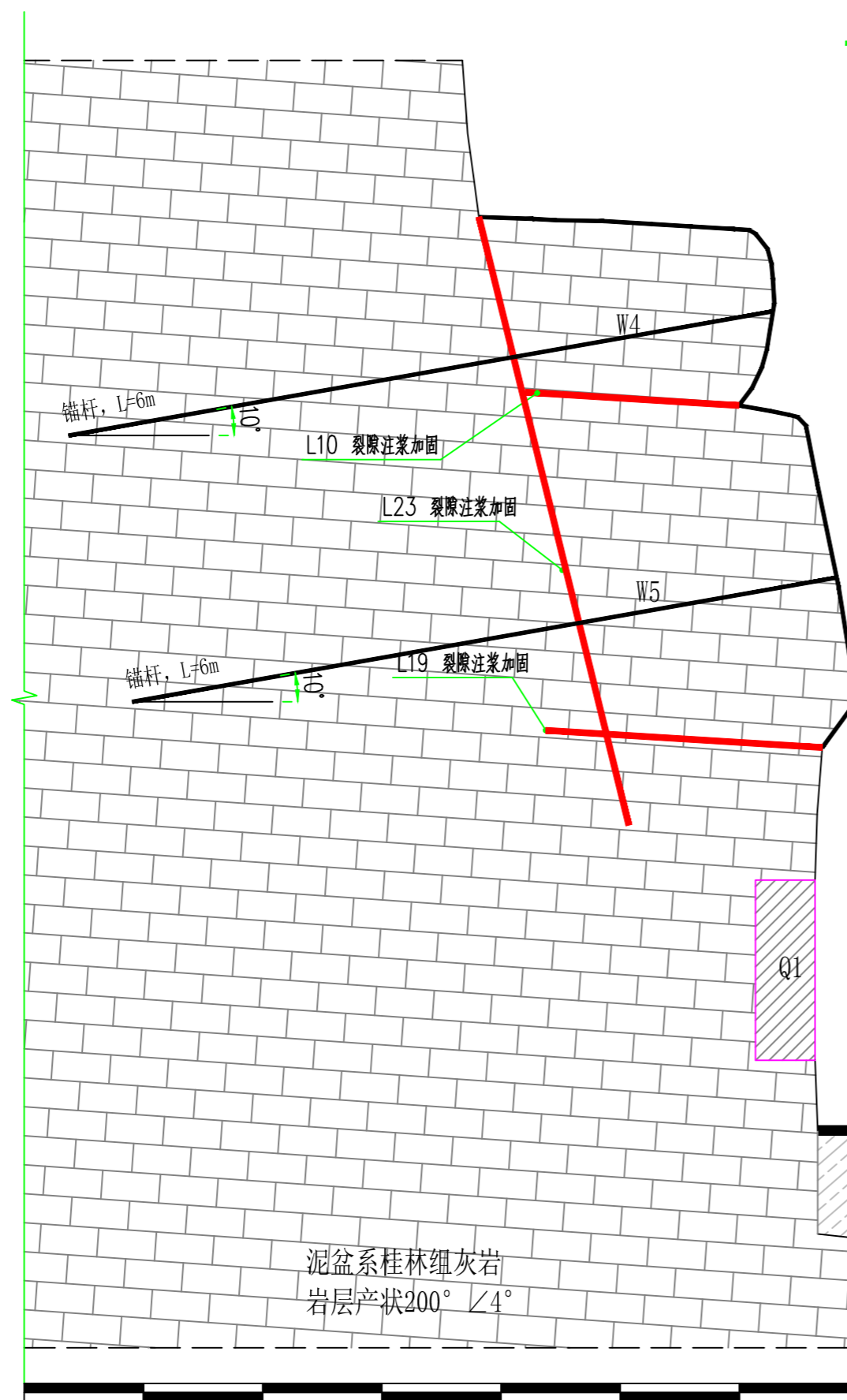
泥盆系桂林组灰岩
岩层产状 $200^{\circ} \angle 4^{\circ}$

单位: m

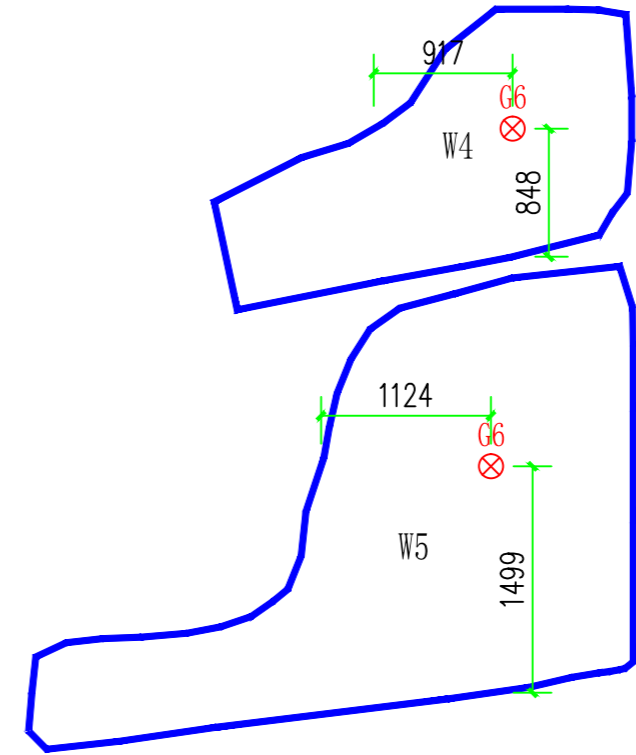
广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目		灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责		W3 2-2工程布置剖面图	图别	设计图	
审核		设计			图号	HY-04	
复核		制图			日期	2024.01	

W4、W5 3-3工程布置剖面图 1:50

高程: m



200° →



危岩体锚固工程量				
危岩体	类型	长度	根数	工程量
W4	锚杆	6m	1	6m
W5	锚杆	6m	1	6m

设计说明:

- 1、裂隙灌浆加固后,再进行锚杆施工,注意漏浆巡查。
- 2、锚杆位置至少远离石刻边缘1.0m,避免锚杆钻进对石刻造成破坏。
- 3、施工过程中要做好石刻的临时防护和保护措施,确保文物和施工安全。
- 4、未尽事宜参见相关技术规范要求。

混凝土硬化地面

残坡积层 Q_4^{e1+d1}

混凝土硬化地面

单位: m



广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目		灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定	张东	项目负责	廖志杰	W4、W5 3-3工程布置剖面图	图别	设计图	
审核	李	设计	叶		图号	HY-05	
复核	李	制图	陈		日期	2024.01	

高程: m

W6 4-4工程布置剖面图 1:25

200° →

314

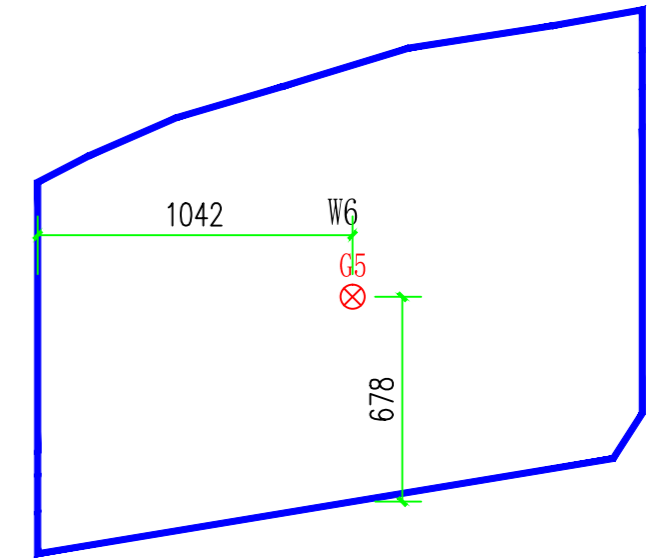
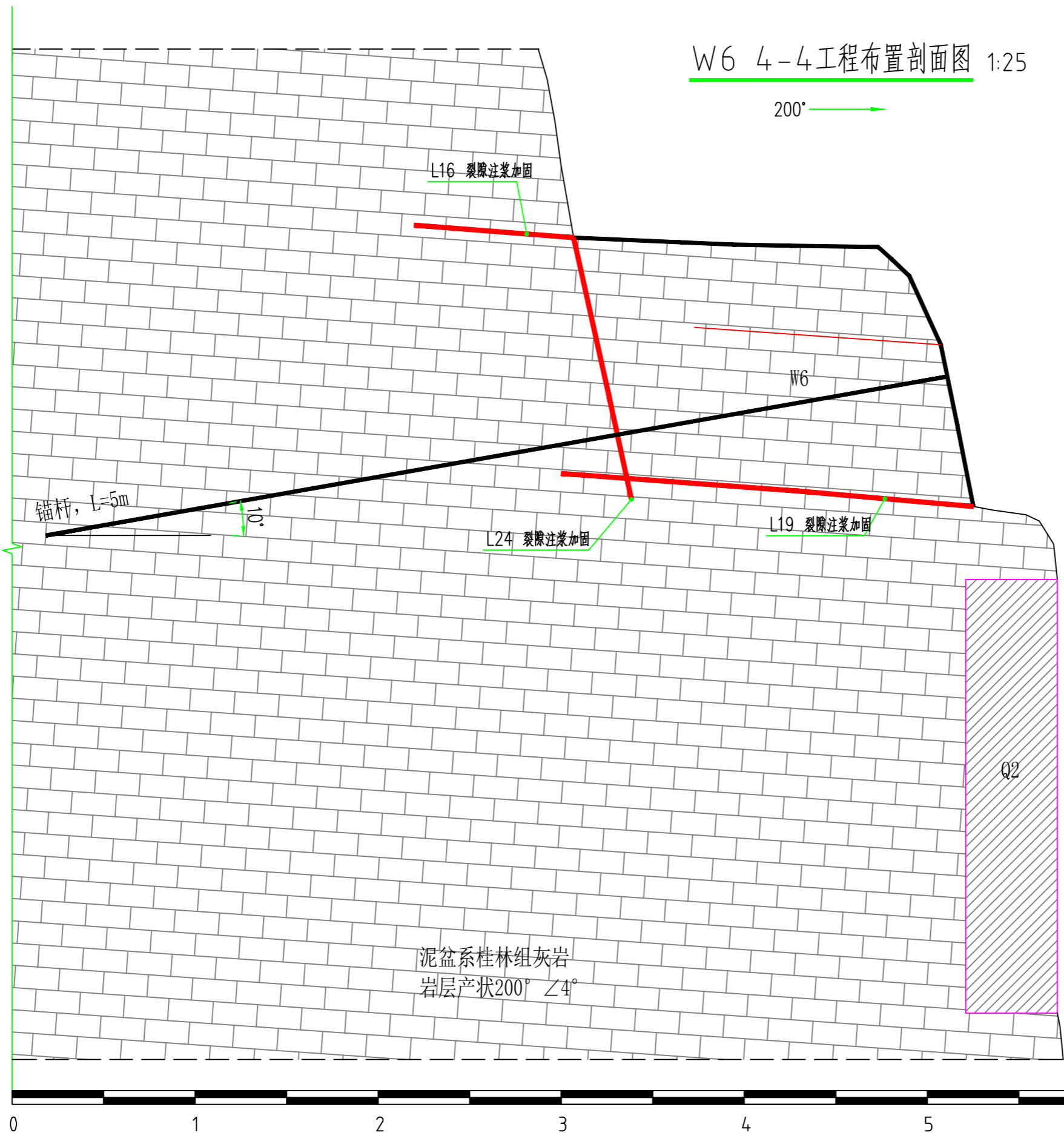
313

312

311

310

309



危岩体	类型	长度	根数	工程量
W6	锚杆	5m	1	5m

单位: m

设计说明:

- 1、裂隙灌浆加固后,再进行锚杆施工,注意漏浆巡查。
- 2、锚杆位置至少远离石刻边缘1.0m,避免锚杆钻进对石刻造成破坏。
- 3、施工过程中要做好石刻的临时防护和保护措施,确保文物和施工安全。
- 4、未尽事宜参见相关技术规范要求。

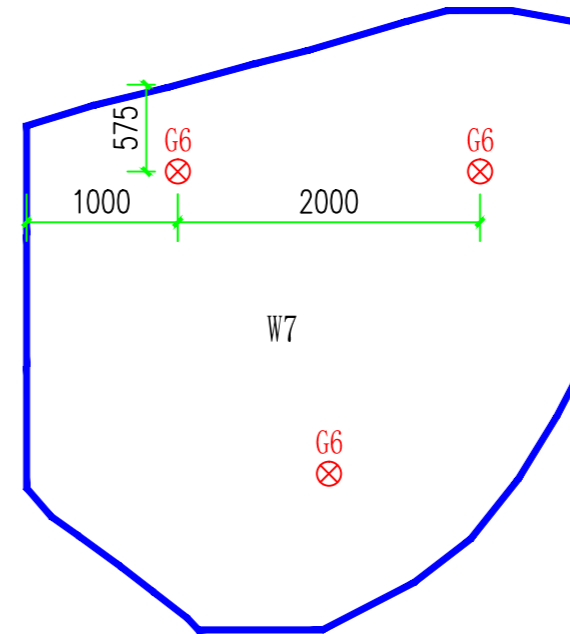
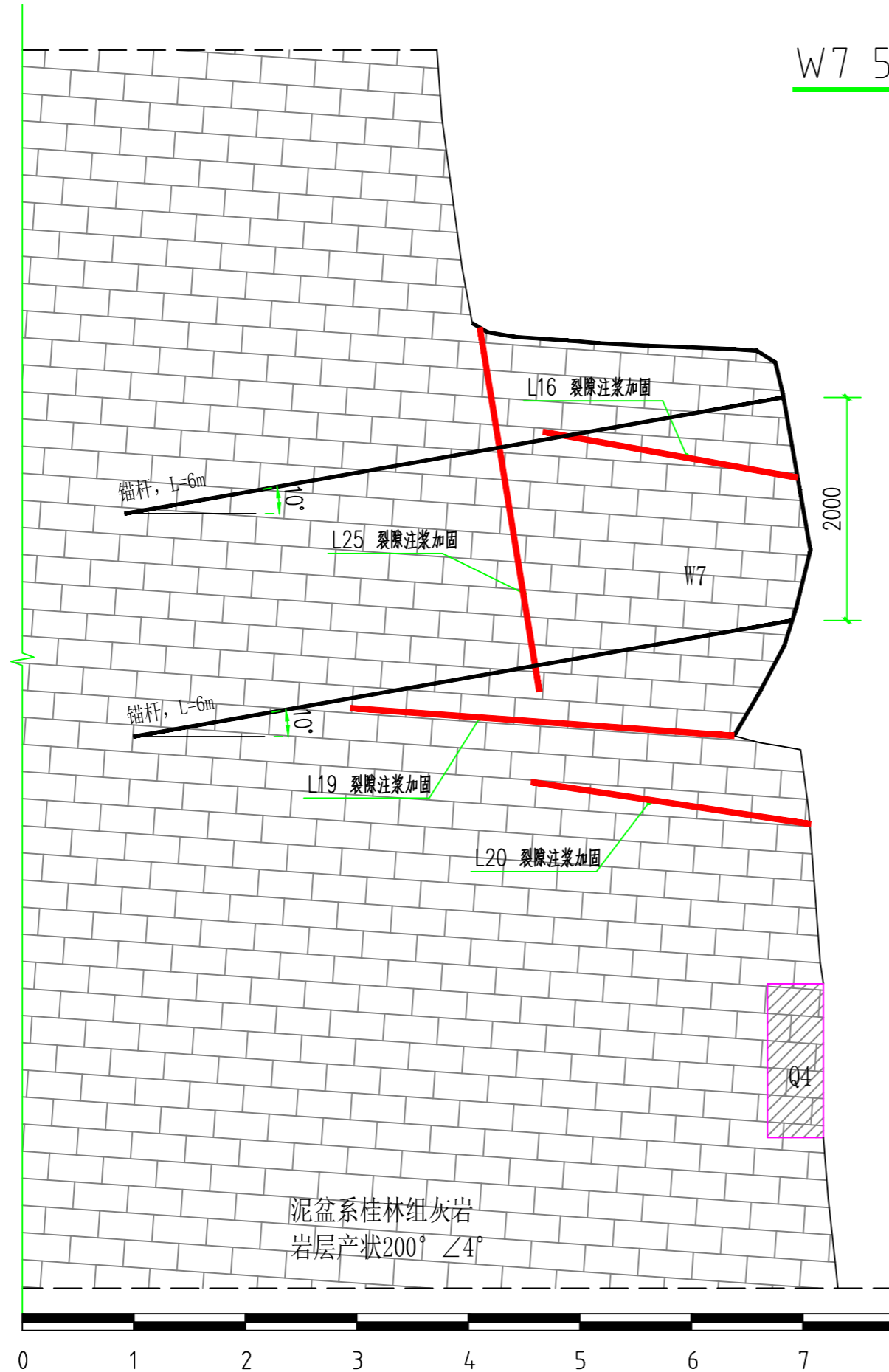
广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责		W6 4-4工程布置剖面图	图别	设计图
审核		设计			图号	HY-06
复核		制图			日期	2024.01

高程: m



W7 5-5工程布置剖面图 1:50

200° →



危岩体锚固工程量				
危岩体	类型	长度	根数	工程量
W7	锚杆	6m	3	18m

设计说明:

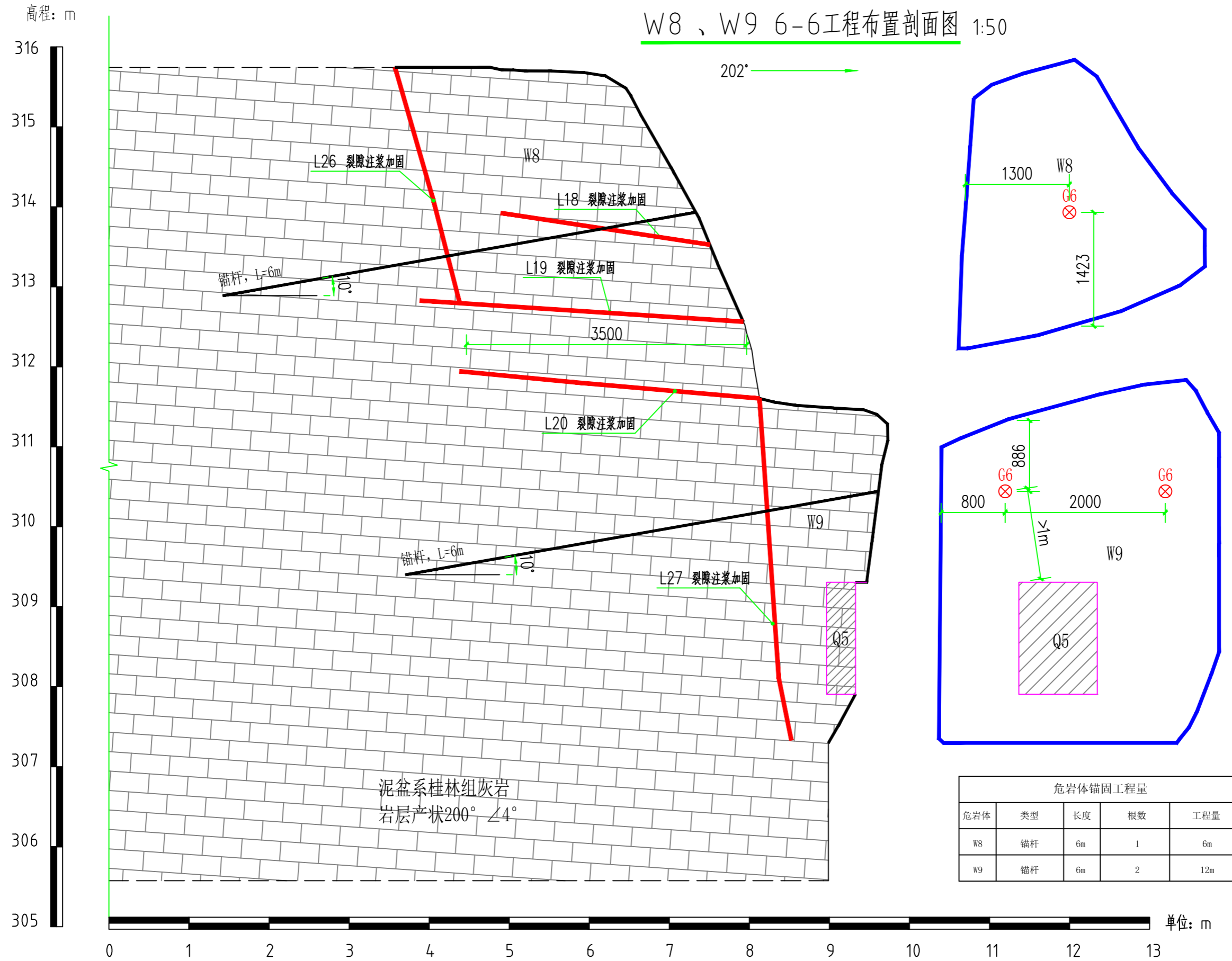
- 1、裂隙灌浆加固后,再进行锚杆施工,注意漏浆巡查。
- 2、锚杆位置至少远离石刻边缘1.0m,避免锚杆钻进对石刻造成破坏。
- 3、施工过程中要做好石刻的临时防护和保护措施,确保文物和施工安全。
- 4、未尽事宜参见相关技术规范要求。

单位: m



广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责		W7 5-5工程布置剖面图	图别	设计图
审核		设计			图号	HY-07
复核		制图			日期	2024.01

W8、W9 6-6工程布置剖面图 1:50



设计说明:

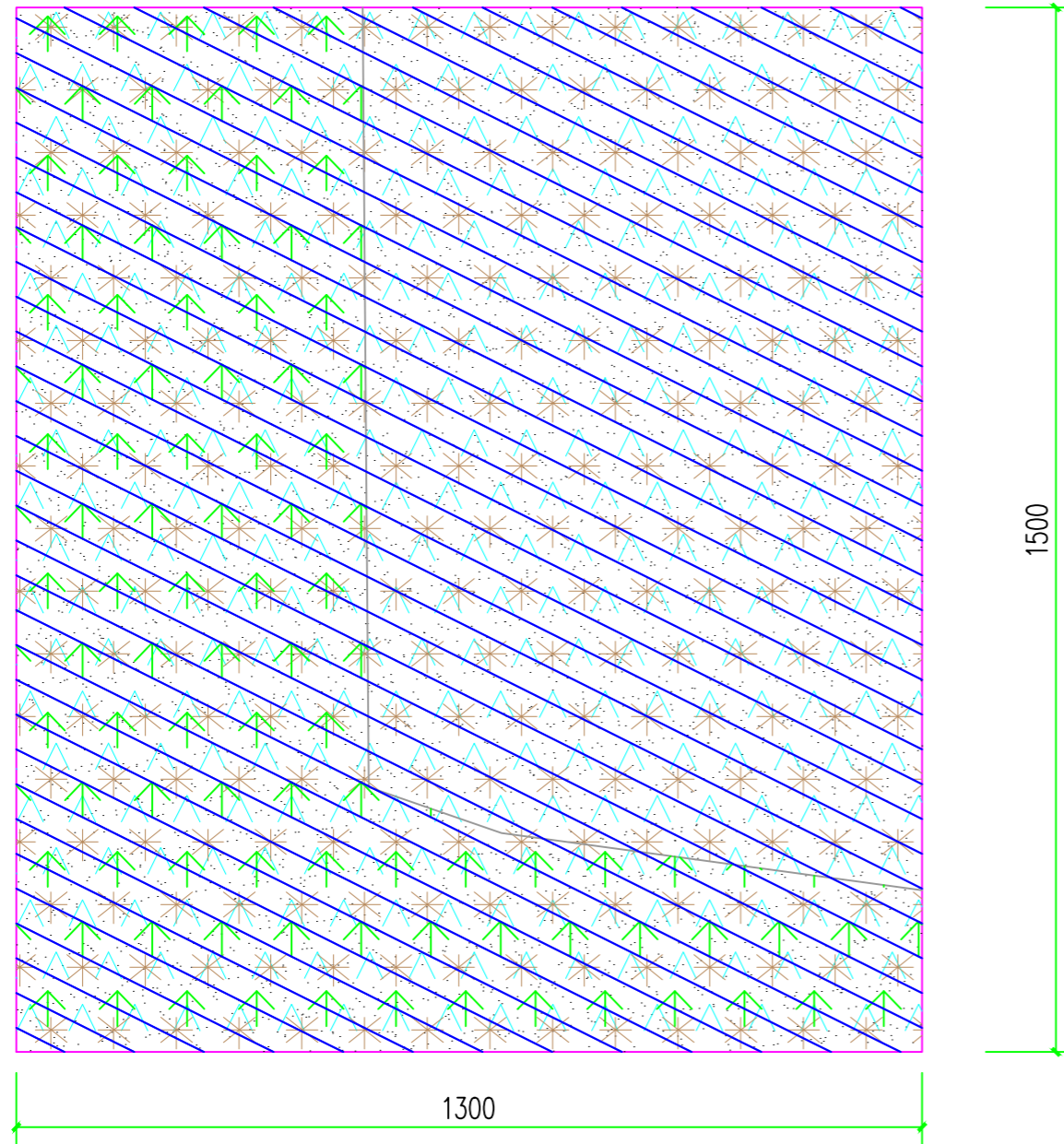
- 1、裂隙灌浆加固后,再进行锚杆施工,注意漏浆巡查。
- 2、锚杆位置至少远离石刻边缘1.0m,避免锚杆钻进对石刻造成破坏。
- 3、施工过程中要做好石刻的临时防护和保护措施,确保文物和施工安全。
- 4、未尽事宜参见相关技术规范要求。

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定	<i>陈东</i>	项目负责人	<i>陈东</i>	W8、W9 6-6工程布置剖面图	图别	设计图
审核	<i>李</i>	设计	<i>李</i>		图号	HY-08
复核	<i>李</i>	制图	<i>陈东</i>		日期	2024.01

施工作业流程:

- 1、手工机械清理;
- 2、水蒸气清理;
- 3、裂隙注浆;
- 4、表面脱盐;
- 5、表面微生物防治;
- 6、表面防水;

具体施工工艺详见设计说及相关技术规范要求。



Q1石刻立面图 1:10

图例

- | | | | |
|-------|------|--------|-------|
| 防水 | 脱盐 | 手工机械清理 | 微生物防治 |
| 水蒸气清理 | 裂隙注浆 | | |

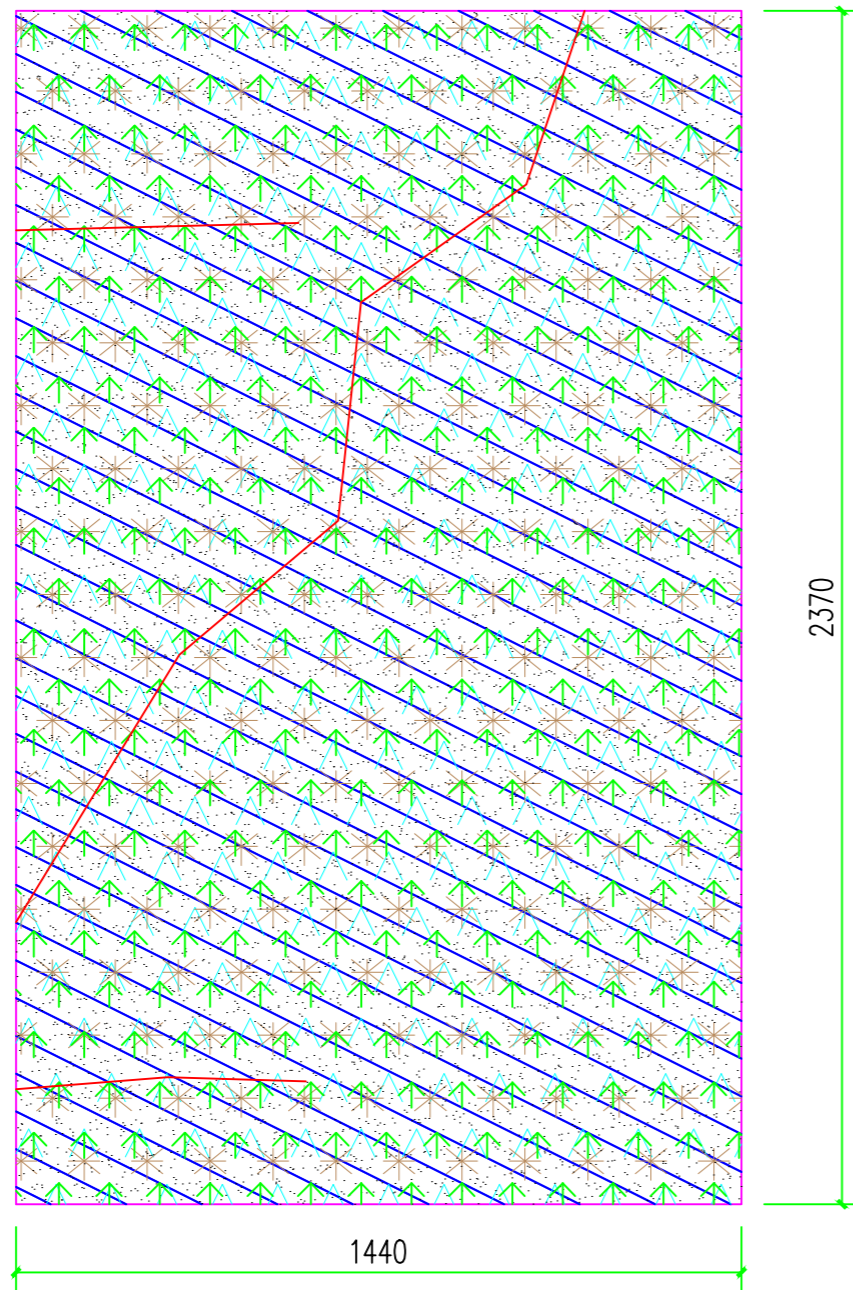


Q1石刻影像图

Q1石刻工程量统计表







工程措施	工程量 (m2)
防水	1.95
脱盐	1.95
手工机械清理	1.95
微生物防治	0.98
裂隙 (m)	/
水蒸气清理	1.95

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程		
审定		项目负责		Q1石刻病害设计图	图别	设计图	
审核		设计			图号	HY-09	
复核		制图			日期	2024.01	



Q2石刻立面图 1:15

图例

-  防水
-  脱盐
-  手工机械清理
-  微生物防治
-  水蒸气清理
-  裂隙注浆

施工作业流程:




- 1、手工机械清理;
- 2、水蒸气清理;
- 3、裂隙注浆;
- 4、表面脱盐;
- 5、表面微生物防治;
- 6、表面防水;

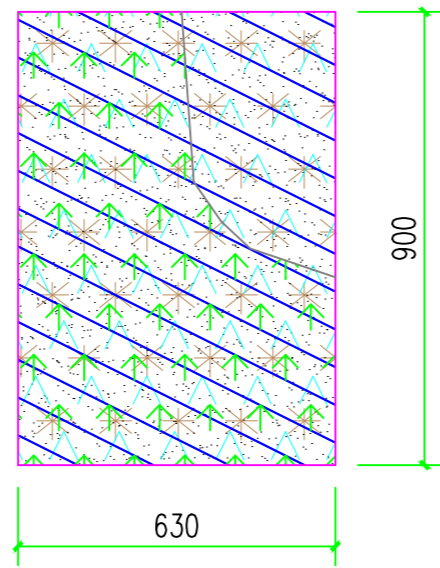
具体施工工艺详见设计说及相关技术规范要求。



Q2石刻影像图

工程措施	工程量 (m ²)
防 水	3.41
脱 盐	3.41
手工机械清理	3.41
微生物防治	3.41
裂隙 (m)	3.37
水蒸气清理	3.41

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程		
审 定		项目负责		Q2石刻病害设计图		图 别	设计图
审 核		设 计				图 号	HY-10
复 核		制 图				日 期	2024.01

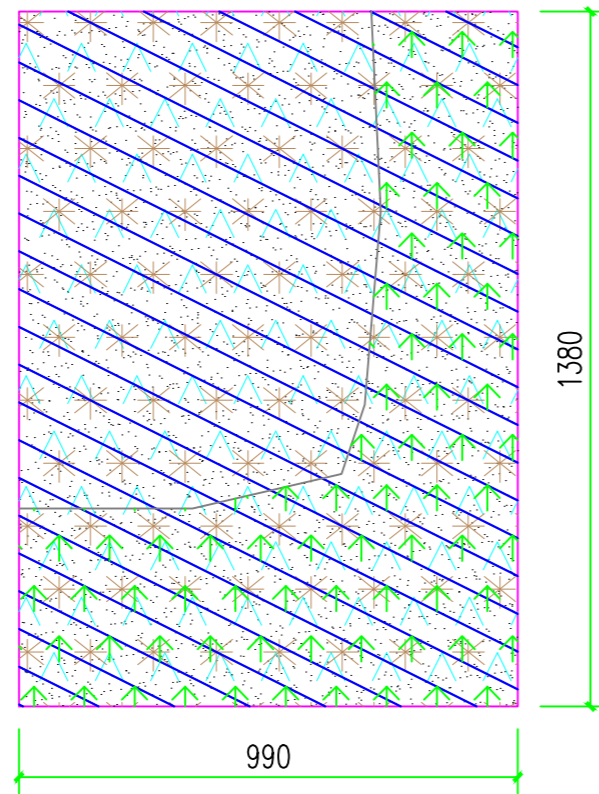


Q3石刻立面图 1:15



Q3石刻影像图

工程措施	工程量 (m ²)
防水	0.57
脱盐	0.57
手工机械清理	0.57
微生物防治	0.43
裂隙 (m)	/
水蒸气清理	0.57



Q4石刻立面图 1:15



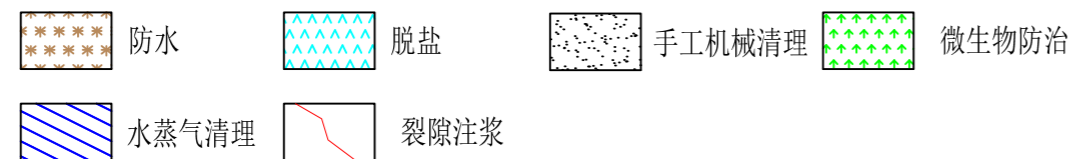
Q4石刻影像图

工程措施	工程量 (m ²)
防水	1.37
脱盐	1.37
手工机械清理	1.37
微生物防治	0.69
裂隙 (m)	/
水蒸气清理	1.37

- 施工作业流程：
 1、手工机械清理；
 2、水蒸气清理；
 3、裂隙注浆；
 4、表面脱盐；
 5、表面微生物防治；
 6、表面防水；

具体施工工艺详见设计说及相关技术规范要求。

图例

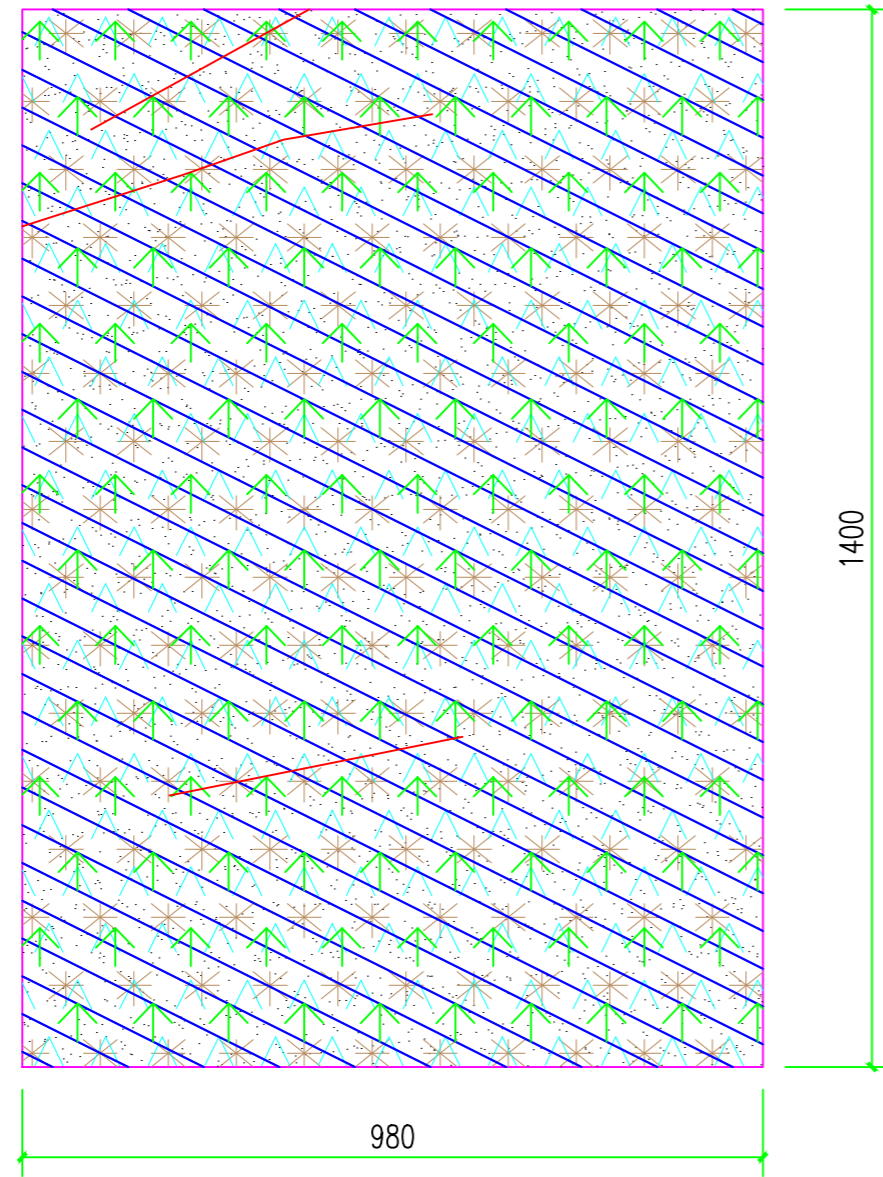


广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程		
审定	张本	项目负责	唐志军	Q3石刻病害设计图 Q4石刻病害设计图	图别	设计图	
审核	李	设计	李		图号	HY-11	
复核	李	制图	唐志军		日期	2024.01	

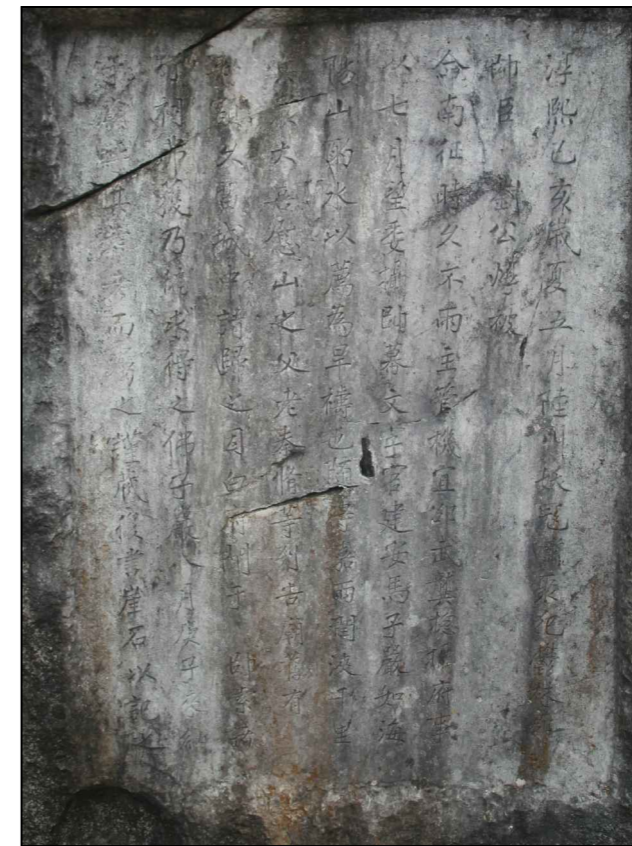
施工作业流程:

- 1、手工机械清理;
- 2、水蒸气清理;
- 3、裂隙注浆;
- 4、表面脱盐;
- 5、表面微生物防治;
- 6、表面防水;

具体施工工艺详见设计说及相关技术规范要求。



Q5石刻立面图 1:10



Q5石刻影像图

Q5石刻工程量统计表

工程措施	工程量 (m2)
防 水	1.37
脱 盐	1.37
手工机械清理	1.37
微生物防治	1.37
裂隙 (m)	1.29
水蒸气清理	1.37

图 例

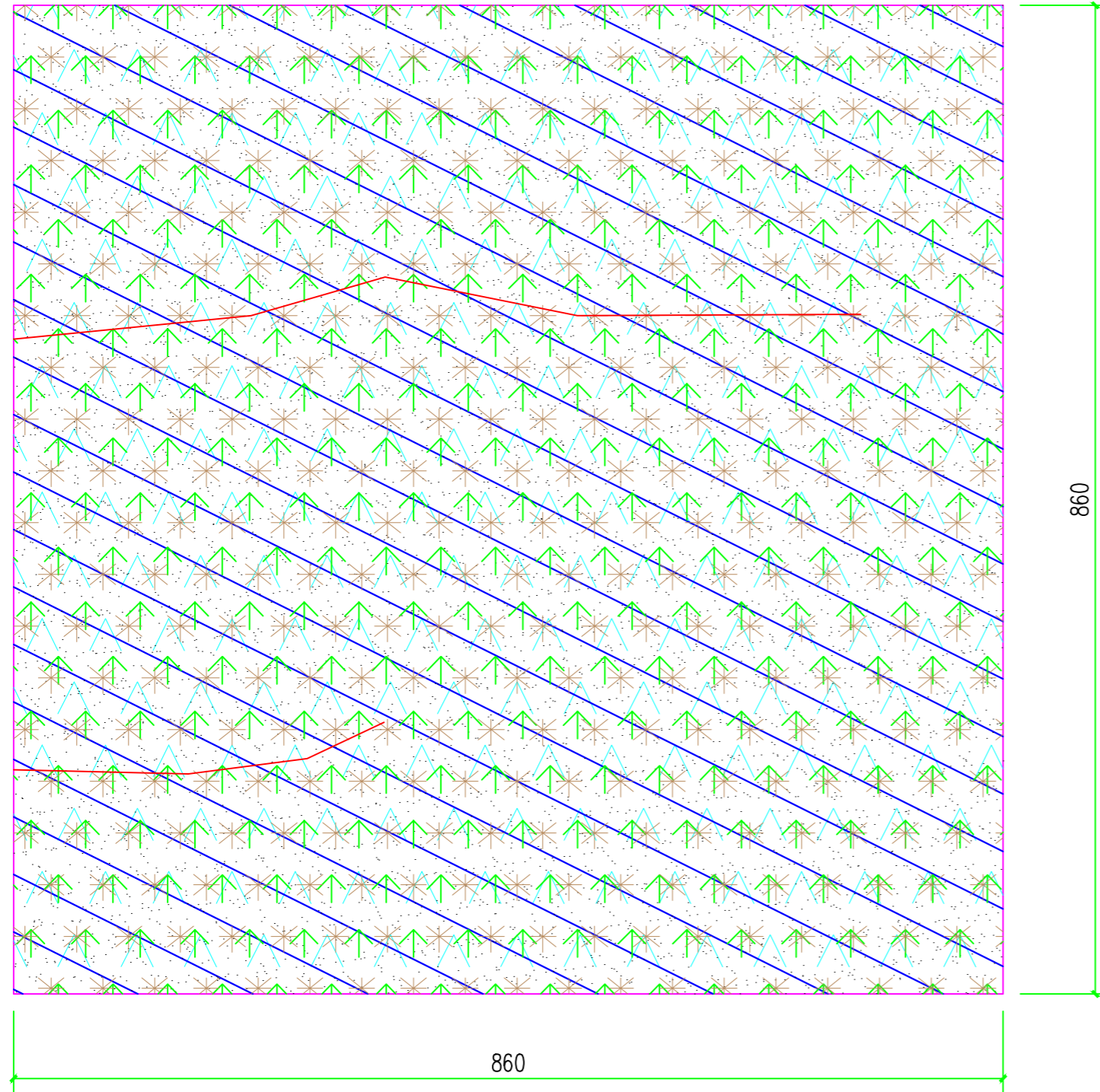
- | | | | |
|-------|------|--------|-------|
| 防水 | 脱盐 | 手工机械清理 | 微生物防治 |
| 水蒸气清理 | 裂隙注浆 | | |

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审 定		项目负责		Q5石刻病害设计图	图 别	设计图
审 核		设 计			图 号	HY-12
复 核		制 图			日 期	2024.01

施工作业流程:

- 1、手工机械清理;
- 2、水蒸气清理;
- 3、裂隙注浆;
- 4、表面脱盐;
- 5、表面微生物防治;
- 6、表面防水;

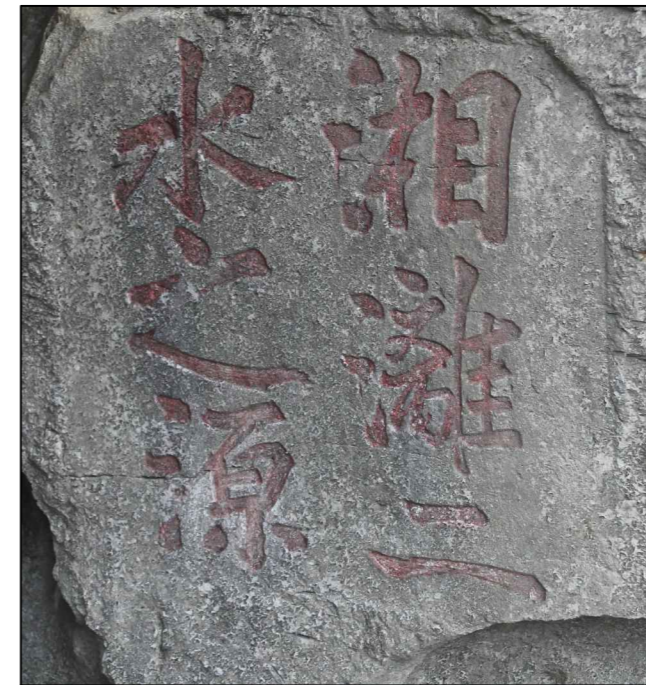
具体施工工艺详见设计说及相关技术规范要求。



Q6石刻立面图 1:5

图例

- | | | | |
|-------|------|--------|-------|
| 防水 | 脱盐 | 手工机械清理 | 微生物防治 |
| 水蒸气清理 | 裂隙注浆 | | |



Q6石刻影像图

Q6石刻工程量统计表

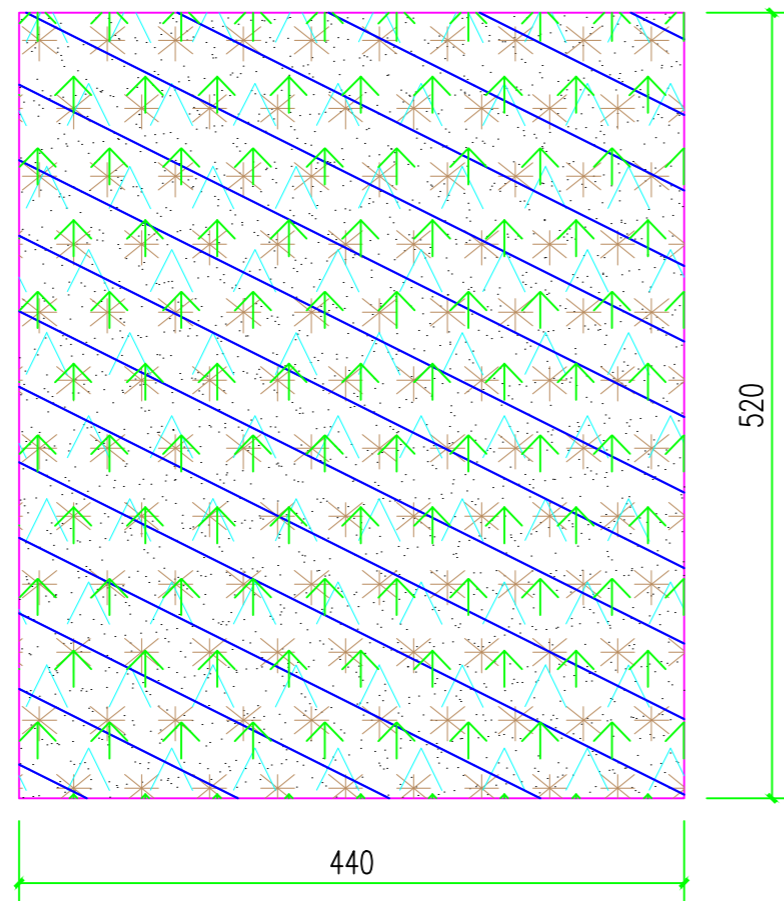
工程措施	工程量 (m2)
防水	0.74
脱盐	0.74
手工机械清理	0.74
微生物防治	0.74
裂隙 (m)	1.06
水蒸气清理	0.74

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程	
审定		项目负责人		Q6石刻病害设计图	图别	设计图
审核		设计			图号	HY-13
复核		制图			日期	2024.01

施工作业流程:

- 1、手工机械清理;
- 2、水蒸气清理;
- 3、裂隙注浆;
- 4、表面脱盐;
- 5、表面微生物防治;
- 6、表面防水;

具体施工工艺详见设计说及相关技术规范要求。



Q7石刻立面图 1:5



Q7石刻影像图

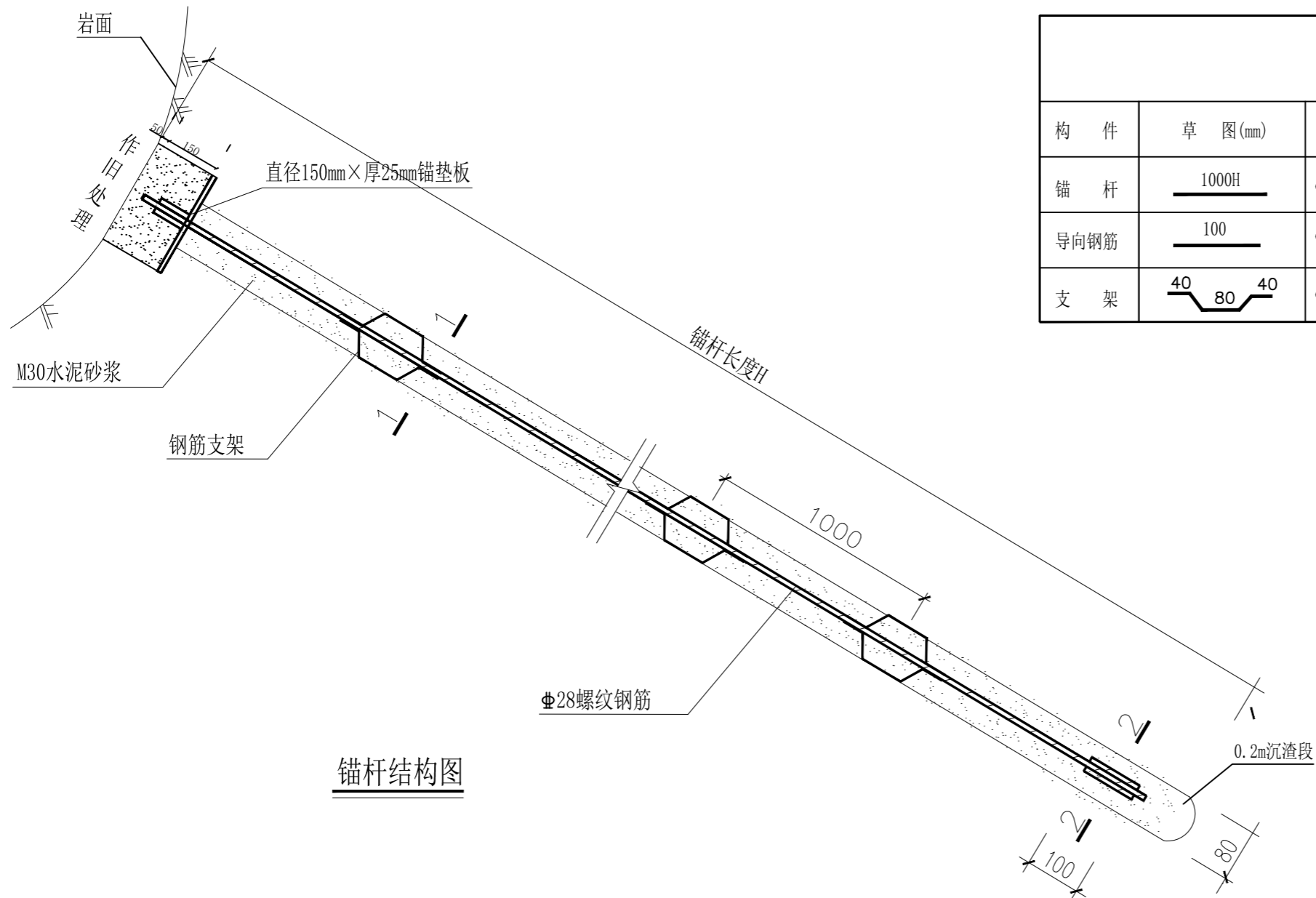
Q7石刻工程量统计表

工程措施	工程量 (m2)
防水	0.23
脱盐	0.23
手工机械清理	0.23
微生物防治	0.23
裂隙 (m)	/
水蒸气清理	0.23

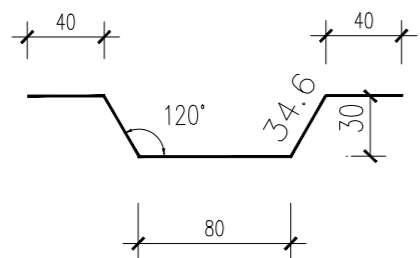
图例

- | | | | |
|-------|------|--------|-------|
| 防水 | 脱盐 | 手工机械清理 | 微生物防治 |
| 水蒸气清理 | 裂隙注浆 | | |

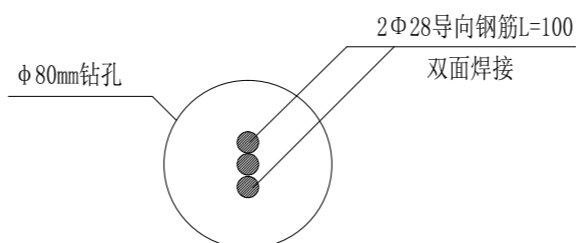
广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程		
审定		项目负责人		Q7石刻病害设计图	图别	设计图	
审核		设计			图号	HY-14	
复核		制图			日期	2024.01	



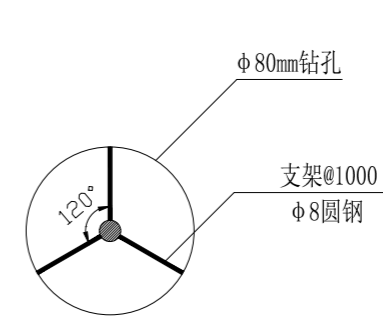
锚杆结构图



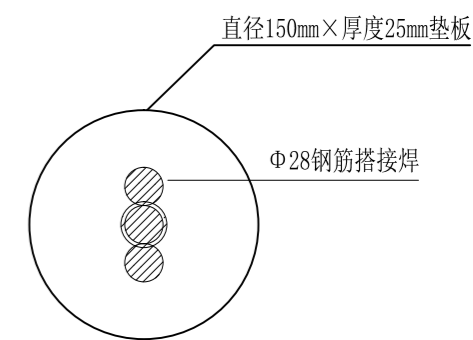
钢筋支架 1:4



2-2剖面 1:5



1-1剖面 1:5



锚头垫板 1:5

工程数量表							汇总表
构件	草图(mm)	规格	根数	长度(mm)	单位重(kg/m)	总重(kg)	每根锚杆
锚杆	1000H	Φ28	1	1000H	4.83	4.83H	II级钢筋:(4.83H+0.97) Kg I级钢筋: 0.273(H-1) Kg
导向钢筋	100	Φ28	2	200	4.83	0.97	
支架	40 80 40	Φ8	3(H-1)	690(H-1)	0.395	0.273(H-1)	

附注:

1. 本图尺寸除注明者外, 均以mm计。
2. 本图使用于危岩体加固普通锚杆施工, 锚杆长为5~6m, 钻孔直径80mm; 锚杆采用HRB400 Φ28 螺纹钢制作。
3. 锚杆注浆采用M30水泥砂浆, 水灰比0.4~0.50。
4. 孔口设置直径150mm厚25mm钢垫板, 以Φ28螺纹钢搭接焊接固定。
5. 锚杆注浆完成后, 锚头部位用M30水泥砂浆、岩粉等材料进行封口和做旧处理, 保证孔口表面与周边岩体一致。
6. 图中钢筋尺寸未计损耗量。

广西鼎之晟园林古建筑工程有限公司				工程项目	灵川县海阳庙—海阳山摩崖石刻加固保护工程			
审定		项目负责		锚杆结构图			图别	设计图
审核		设计					图号	HY-15
复核		制图					日期	2024.01