

广州地区花岗岩风化层中孤石的识别与勘探技术

文 / 吴之岱 广东省地质局肇庆地质调查中心

摘要: 在花岗岩分布地区的全风化与强风化土层中, 孤石存在是普遍现象, 其赋存特征对工程建设和地质灾害防治构成显著风险。本文通过对比分析孤石的形成机理、工程危害及勘探方法发现: 第一, 查明场地内孤石的空间分布特征是有效降低工程地质风险的关键; 第二, 受单一勘探技术原理限制, 仅依靠某一种方法难以全面查明孤石分布; 第三, 基于地质背景与场地构造特征, 采用钻探与物探相结合的方法可系统性降低孤石风险。

关键词: 孤石; 勘探; 风险; 声波; 花岗岩

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.037

引言

在地质历史上, 广州地区岩浆活动强烈, 岩浆岩分布广泛, 其中侵入岩出露面积超过 2700 平方公里, 占区内纵面约 37.6%^[1], 时代包括了晚志留世、晚三叠世、侏罗纪和白垩纪。以侏罗纪侵入岩最为发育。岩石类型有碱性、基性、中性和酸性, 以酸性为主。

广州地区位于华南褶皱系粤中拗陷带, 经历了多期构造运动和岩浆侵入活动。晚中生代燕山期花岗岩体广泛出露, 形成以瘦狗岭断裂、广从断裂为边界的复式岩基。这些岩体在长期湿热气候条件下, 发育了厚度达 30-50 米的风化壳, 其垂直分带特征显著: 表层为含孤石的残积土层 (厚度 5-15m), 中部为球状风化带 (10-25m), 底部为微风化基岩。

近年城市开发中, 孤石问题呈现新特点: ①空间分布具“三高”特征——地铁沿线高密度 (南沙自贸区每公里发现孤石 12.3 处)、建筑基坑高频率 (黄埔科学城项目基坑揭露率 68%)、边坡区域高风险 (从化温泉镇边坡失稳案例中孤石占比 41%); ②形态多样性显著, 既有传统球状孤石 (直径 0.5-3m), 也有板状、柱状等新型态, 如天河金融城项目发现的板状孤石最大延伸达 8.2m。这些新特征对传统勘探技术提出了严峻挑战。

花岗岩风化区是广州市新城市建设的主要分布区域, 分别为南沙、黄埔、萝岗和从化大部, 天河局部。花岗岩风化区存在的孤石给地铁车站地下连续墙、桩基础、盾构隧道, 各种建筑的桩基础、边坡和基坑斜坡稳定性等带来巨大的风险。

一、孤石的形成机理

孤石的形成是酸性侵入岩在内在成因、矿物分布、地质历史、风化作用等因素共同作用的结果。

(一) 酸性侵入岩的化学成分团块聚集特性

矿物成分不均性, 花岗岩主要由石英 (SiO_2)、钾长石 (KAlSi_3O_8) 和斜长石 ($\text{Na/Ca}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$) 组成, 其中石英抗风化能力最强, 而长石易与水发生化学反应 (如钾长石的溶解-胶体迁移)。

1、团块效应: 当花岗岩原岩中石英颗粒局部富集 (如斑状结构或条带状分布), 或暗色矿物 (如黑云母) 集中分布时, 形成硬脆抗风化团块与软弱易风化夹层的组合。

2、化学分异: 高温岩浆结晶过程中, 矿物析出顺

序差异导致成分分层 (如边缘富钾长石、核心富石英), 形成原岩内部的化学弱面。

3、风化速率差异: 易风化的长石和云母在水中逐渐水解, 而石英残留形成砂砾或碎屑; 团块边缘因矿物成分变化成为风化前锋带, 加速整体剥蚀。

(二) 岩石节理裂隙发育特性

1. 原生节理控制风化路径

垂直节理: 花岗岩常见节理走向与构造应力方向一致 (如片麻理), 形成深而陡的裂缝, 为水、空气渗透提供通道;

水平节理: 基底抬升或卸荷作用产生层间断裂, 削弱岩石整体性。

节理密集带: 多组节理交汇处 (如“X”型节理) 形成破碎带, 成为风化-侵蚀的优先部位。

2. 裂隙网络促进物质迁移

裂隙中的水流携带溶解氧和酸性物质 (如 CO_2 形成的碳酸) 深入岩石内部, 加剧矿物分解; 裂隙扩大后形成风化穴或溶沟, 进一步切割孤立岩块。

(三) 异风化与球状风化的耦合作用

1. 差异风化塑造初始孤立体

边缘弱化: 长石和云母沿节理或解理面优先风化, 形成薄壳状风化层 (如“铁帽”);

核部保存: 石英核心因抗风化能力较强得以保留, 逐渐脱离周围风化土层, 形成小型孤石。

2. 球状风化强化孤石形态

核心-边缘动态平衡:

水分在孤石表面蒸发形成结晶压力, 沿微裂隙向内部渗透;

核心石英缓慢溶解 (石英在 $\text{pH}<4$ 时可发生溶蚀), 而边缘残留的黏土矿物收缩膨胀, 导致球形化;

多阶段演化: 初始棱角分明的孤立体逐渐变为浑圆形孤石 (如直径数米至数十米的“馒头石”)。

3. 孤石发育的完整机理链

内因驱动: 花岗岩原岩的化学分异和节理发育为风化提供物质基础与空间条件;

外因主导: 差异风化剥离软弱夹层, 球状风化进一步雕琢形态, 最终形成孤石;

动态调整: 在风化-侵蚀-重力作用下, 孤石可能

继续崩解或稳定留存,取决于其尺寸、形状与地下水条件。例如中国南方红壤区:花岗岩风化壳中常见孤石,其边缘因钾长石风化形成红色铁锰氧化物胶膜,核心保留白色石英颗粒;

该机理对工程地质具有指导意义:在花岗岩风化区进行基础施工时,需重点排查孤石分布及潜在塌陷风险。

(四) 微观结构演化机制

通过扫描电镜(SEM)和X射线衍射(XRD)分析发现,孤石形成存在明显的微观演化过程:

微裂隙网络发育阶段(图1a):

初始微裂隙宽度 < 10 μm,沿长石双晶面、石英颗粒边界延伸

能谱分析显示裂隙壁富集 Fe³⁺ (3.12wt%) 和 Al³⁺ (2.87wt%),证实水解作用。

结构重组阶段(图1b):

黏土矿物定向排列形成“抗风化壳”,厚度8-100 μm。

矿物相变阶段(图1d):

钾长石向伊利石转化,体积膨胀率达18%,产生内部应力

石英颗粒表面出现溶蚀坑(直径0.1-0.5 μm),能谱显示 Si/O 比从 1:2 降至 1:2.3。

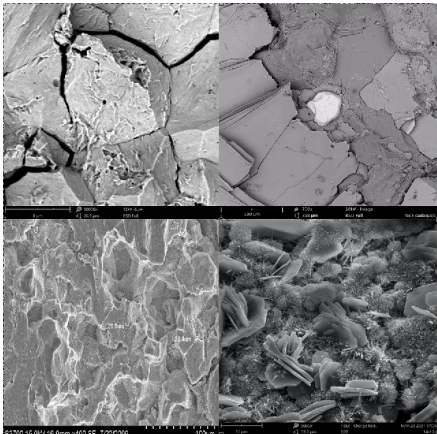


图1 花岗岩孤石电镜扫描图

核部石英含量 > 85%,边缘降至62%,过渡带出现次生硅质胶结

表1 典型孤石微观特征对比

Table 1. Comparison of Typical Boulder Microstructural Features

区域	石英含量 (%)	黏土矿物类型	微裂隙密度 (条/mm ²)
核部	82-91	无	3-5
过渡带	65-78	高岭石	12-18
边缘带	48-57	伊利石	25-32

二、孤石的主要工程地质问题

(一) 基础工程问题

不均匀沉降:孤石与周围土体刚度差异大,易产生差异沉降,导致建筑物倾斜或开裂。地基承载力突变:孤石可能形成局部高承载区,周边土体承载力低,需特殊处理。

(二) 基础施工困难

大型孤石难以机械开挖,人工破除成本高,工期延长。桩基施工受阻碍:若孤石位于桩位下方,需采用冲击钻或爆破成孔,增加难度。

(三) 边坡稳定性问题

滑坡隐患:孤石与周围岩土体接触面易产生剪切破坏,尤其在降雨或地震作用下可能诱发滑坡。基底孤石可能导致边坡整体失稳,需采取支护措施。

崩塌风险:风化孤石或陡峭边坡上的孤石可能因重力作用滚落,威胁施工安全。

卢少壮,张新,钟长平等[2-5],表明盾构隧道施工中孤石的风险,施工塌方:隧道掘进中孤石可能因应力释放突然塌落,需提前探测并加固。爆破作业时孤石可能飞散,造成施工危险。

围岩稳定性差:孤石周围岩体破碎,易形成松动圈,降低隧道支护效果。

(四) 水文地质问题

渗漏通道:孤石裂缝可能成为地下水渗流通道,导致基础渗漏或管涌。坑道工程中可能引发突水事故。

冻胀影响:在寒冷地区,孤石与冻土接触可能加剧冻胀力,破坏基础。

(五) 地震与动力荷载问题

地震响应敏感:孤石与周围岩土的阻尼差异可能放大地震振动,影响结构安全性。

动荷载破坏:交通工程(如桥梁、道路)振动可能引发孤石松动或基础共振。

(六) 其他工程问题

管线穿越风险:地下管线施工中可能误判孤石位置,导致管道破损或需迂回绕行。

机械操作受限:大型设备(如塔吊、挖掘机)基础需避开孤石,或进行地基加固。

三、勘探与识别技术

为降低和消除孤石带来的工程地质风险,首先必须查明孤石的分布特征,其次在采取相应的施工措施以保障地基和边坡的稳定。欧志笔,黄加旭^[6]对孤石的勘探防范进行了研究和阐述。但指明行之有效的单一手段极少,以下以地铁孤石专项勘察对孤石勘察技术的说明。

(一) 钻探

钻探是孤石勘察最直接的手段,但需要进行大量的钻孔,这不仅使勘探成本高昂,作业空间受限,还受人员技术水平限制。

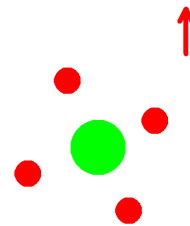


图2 某地铁线孤石勘探布孔示意图

图2所示是某地铁勘察工作中的钻孔布设示意图,土中红色钻孔和绿色钻孔中心距离为2.5m,施工顺序是先完成绿色钻孔的钻探,再对红色钻孔进行钻探,若在绿色钻孔内揭露孤石,并对周边编号为A~D的4个钻孔实施钻探,否则就取消红色钻孔以节约成本。

钻探结果如图3和图4所示,B255B号钻孔在13.00m~21.90m段揭露孤石5个,揭露高度为0.20m~1.50m。B255C号钻孔在12.10m~22.70m段揭露4个孤石,揭露高度为0.60m~2.50m,且分布与隧道范围和顶底板处。



图3 B255B号钻孔岩芯图



图4 B255C号钻孔岩芯图

该案例表明采用钻孔钻探方法进行孤石勘探,即时付出高昂的成本,依旧容易出现遗漏,而且是大规模的遗漏,这对盾构隧道、地下联系墙、桩基施工将造成局的风险。

(二) 挖探方法

物探相对于钻探可进行大范围的,概括性的扫描,但这种扫描受时空关系和环境特征影响较大,徐佩芬,侍文等阐明了微动对孤石的探测有效性,但在大量的工程实践中表明这种方法可靠度相对较低,而且需要进行后期的钻探验证后才能作为施工参考,这可能是该方法得不到广泛引用的原因。

(三) 新勘探方法的探索

在钻探和物探均有各自优缺点的环境下,为推动技术发展苏再非等同志,探索采用声波作为媒介,结合钻孔对钻孔周边5~10m半径内的孤石分布进行测量,测量原理如图5所示,钻孔A和B在进行孤石勘探时,存

在2种状态,要么揭露孤石,要么未揭露孤石,但不论是揭露还是未揭露,因孤石与周边地层具有明显的声阻抗特性。利用该特性可以有效的对孤石界面进行识别。该方法有效集合钻探与物探的优点,也弥补了钻探与物探的缺点。为未来孤石勘探提供一种新的勘探方法。

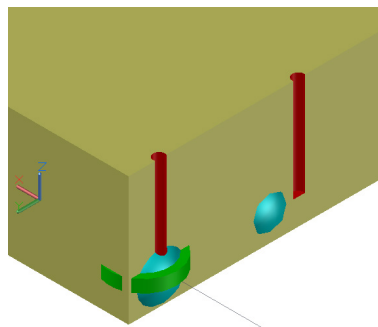


图5 孤石声波探测示意图

1. 超声波孤石勘探方法,主要应用于需要进行钻孔周边孤石勘探的情形,如花岗岩区地铁盾构隧道、管廊隧道的孤石勘探,站场地下联系墙基础、桩基础持力层是否存在孤石的勘探等均可采用。

2. 超声波孤石勘探,因采用矩阵式发射与接收数据,对探头与地层间的耦合效果要求较高。三维罗盘受周边顺磁性材料与磁场影响较大,方位确定受干扰。

结语

1 花岗岩风化层中孤石分布特征的不明确,给边坡、基坑等斜坡稳定性带来危害,对地铁隧道施工、地下连续墙,建筑桩基施工造成较大的安全风险,为基础提供假稳定持力层。

2 采用钻探方法进行孤石勘探,具有明显的一孔之见和分别困难,且孤石遗漏是不可避免的问题。

3 物探方法干扰强,准确度低,需要后期验证,且在很多条件下无法直接作为设计依据。

4 在当前市场和技术环境条件下,探索新的、有效的综合性勘探方法非常必要。

参考文献

[1] 庄文明,黄宇辉,林小明等.广州城市地质[M].地质出版社.2017.7,1:38-40.
 [2] 卢少壮,赵璐,郭志峰.大直径盾构穿越滨海孤石地层精准物探与处置技术研究[J].现代隧道技术,2023,60(5):195-204.
 [3] 张新.基于随机源模型的新型微动探测技术在上软下硬地层盾构隧道中的应用研究[J].现代隧道技术,2020,57(5):43-50.
 [4] 钟长平,竺维彬,周翠英.花岗岩风化地层中盾构施工风险和对策研究[J].现代隧道技术,2013,50(3):17-23.
 [5] 何沙沙,沈敦桂.管桩基础遇大面积孤石时的补桩措施探讨.广东土木与建筑.2024,31(11):34-36.
 [6] 欧志笔,黄加旭.岩土工程勘察中孤石的探测方法研究.云南地质.2024,43(03):428-431.