

# 不同地质条件下盾构工程孤石处理工艺及实例

王鹏华

(台山核电合营有限公司, 广东 台山 529228)

**摘要:** 花岗岩风化土中存在的球状风化核, 俗称“孤石”, 其埋藏分布及大小是随机的, 且形状各异, 直径从几十厘米到几米, 岩石单轴抗压强度可以达到 200 MPa 以上。为解决盾构在存在孤石的花岗岩残积层中掘进时面临的极大施工风险, 通过分析珠三角地区及台山盾构隧道工程的孤石处理工艺方法, 总结各项目孤石处理的成功经验和失败教训, 得出不同地质条件和不同工况条件下有效的孤石处理技术, 这些处理技术包括: 地下深孔爆破, 冷冻、地面冲孔和人工挖孔, 地表注浆以及盾构直接切削。

**关键词:** 盾构隧洞; 孤石; 地铁; 花岗岩; 深孔爆破

**DOI:** 10.3973/j.issn.1672-741X.2012.04.025

**中图分类号:** U 455

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1672-741X(2012)04-0571-05

## Treatment of Boulders Encountered in Shield Tunneling under Different Geological Conditions

WANG Penghua

(Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd., Taishan 529228, Guangdong, China)

**Abstract:** Boulder is a kind of weathered granite core. The diameter of boulders ranges from dozens of centimeters to several meters and the uniaxial compressive strength of boulders can reach 200 MPa. The treatment technologies for boulders encountered in shield tunneling in Peal River Delta and in Taishan are analyzed, and the experience in boulder treatment is summarized, so as to minimize the risk of shield tunneling in ground containing boulders. The paper can provide reference for similar projects in the future. The treatment technologies including underground deep hole blasting, freezing, hole punching and hole cutting, ground surface grouting and cutting by shield machines.

**Key words:** shield-bored tunnel; boulder; Metro; granite; deep hole blasting

### 0 引言

孤石是指存在于软质风化层中的花岗岩球状风化体, 球状风化是花岗岩层中十分常见的现象, 属于花岗岩的不均匀风化。花岗岩球状风化体在珠三角地区常见于广州北部、深圳的大部分地区以及珠海沿岸大部分地区, 搬迁作用在广东台山海底淤泥层, 成都、长沙的少数卵石地层中被发现, 但分布数量较少。孤石有自然风化产物和搬迁作用 2 种成因, 花岗岩球状风化体以及大型卵石都可能成为孤石, 成为盾构法隧道掘进过程中的巨大障碍<sup>[1-3]</sup>。

由于孤石埋藏分布是随机的, 且形状各异, 大小不一, 强度可达到 200 MPa 以上, 对地铁盾构工程施工极为不利。盾构隧道施工前多采用盾构机破岩和人工破岩、或进行洞内静态爆破、火药爆破孤石, 也有的利

用地面钻孔爆破或冲孔破除孤石等方法进行预处理<sup>[4-10]</sup>。本文以广东省内某核电站取水隧洞采用地下深孔爆破处理孤石的成功实例为背景, 参考深圳地铁 5 号线民治站一五和站区间通过冷冻、地面冲孔和人工挖孔等综合方法进行提前预处理的成功案例, 长沙地铁 2 号线 7 标通过地表注浆固定孤石进行预处理的成功案例以及广州地铁 3 号线天河客运站通过盾构机直接切削孤石的工程实例, 重点研究解决不同地质和工况条件下盾构施工孤石处理的技术难题。

### 1 孤石分布规律

虽然孤石分布具有离散性大、埋藏深度范围广、空间赋存特征不规则的特点, 但仍具一定规律, 为:

1) 孤石的自然风化产物主要分布于花岗岩的全风化带和强风化带中;

**收稿日期:** 2012-04-27; **修回日期:** 2012-05-18

**作者简介:** 王鹏华(1982—), 男, 河南浉池人, 2007年毕业于华南理工大学岩土工程专业, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程、水利工程和海工工程的研究和工程管理工作。

2) 孤石大小一般为 0 ~ 5 m, 对于盾构隧道施工, 300 mm 以上的孤石应重点关注;

3) 孤石主要集中在埋深 10 ~ 30 m 处, 正是国内大多数盾构隧道所处的深度范围;

4) 在垂直风化剖面上具有“上多下少、上小下大”的特点, 即随着高程的增加, 孤石的密集程度愈来愈大, 而体积越来越小;

5) 孤石的大小随风化程度的增强而减小, 而数量却随着风化程度的增强而增加。

### 2 孤石对盾构隧道的危害

1) 由于孤石单轴抗压强度非常高, 与四周风化碎屑强度差异较大, 在刀盘切削时, 孤石将发生滚动, 很难被刀具破碎, 掘进效率低下, 极易造成刀具过载, 甚至严重损坏刀盘结构。

2) 由于盾构掘进时孤石在地层内随机滚动, 极易造成刀盘偏载, 盾构姿态难以控制。

3) 在此条件下掘进, 刀具贯入度极低, 掘进过程对周边土体扰动大, 容易造成地层沉降超标, 甚至危及周边建(构)筑物安全。

4) 由于孤石周围强风化和全风化地层的稳定性差, 遇水极易软化崩解, 且其渗透性因风化程度的差异极不均匀, 更换刀具时往往需要采取非常规手段, 效率低且安全保障性差。

### 3 孤石处理的主要方法

孤石处理的总体思路首先是通过必要的手段进行详细勘探, 查清其分布的具体位置、形状和大小, 再根据地面条件和地层条件决定处理方法。但无论采用何种方法进行勘探, 都具有一定的不确定性, 都可能产生

漏判; 所以, 在孤石地层中掘进, 盾构必须具备相应的破岩能力。

针对孤石对盾构掘进危害的类型, 在工程中常用的孤石处理方法有:

1) 盾构直接破除孤石。这需要满足 2 个条件: 一是盾构及刀具必须具备足够的破岩能力; 二是在切削过程中, 孤石必须处于固定状态。若要直接破除, 一般情况下需提前采用注浆或冷冻等措施固定孤石, 然后破除。

2) 地面预处理人工破除。通常有地面冲孔、地下深孔爆破以及人工挖孔破碎或者液压劈裂机法等措施。

3) 洞内人工破除。采用静态爆破、定向爆破和岩石分裂机等设备破除, 通常需要对土体进行加固或者采用气压作业的方式, 但由于施工风险问题, 洞内人工破除方法不能作为孤石处理的常规手段。

## 4 孤石处理工艺及工程实例

### 4.1 地下深孔爆破

#### 4.1.1 工程概况

广东省内某核电站取水隧洞全长 4 300 m, 采用直径 9.03 m 的复合泥水盾构, 所采用泥水盾构设备要求出渣粒径不能大于 140 mm, 进入刀盘的石块粒径不能大于 300 mm, 否则石块将不能进入碎石机进行二次破碎, 而在碎石机进口产生堆积, 造成堵塞。

#### 4.1.2 孤石探测方法

通过海上走航式地震法物探和钻孔验证相结合的方法对陆域侧基岩及孤石存在的区域进行勘探, 基本准确地探测出孤石及孤石群的具体位置, 确定在盾构始发阶段约 360 m 范围内都存在孤石及孤石群的分布(见图 1)。

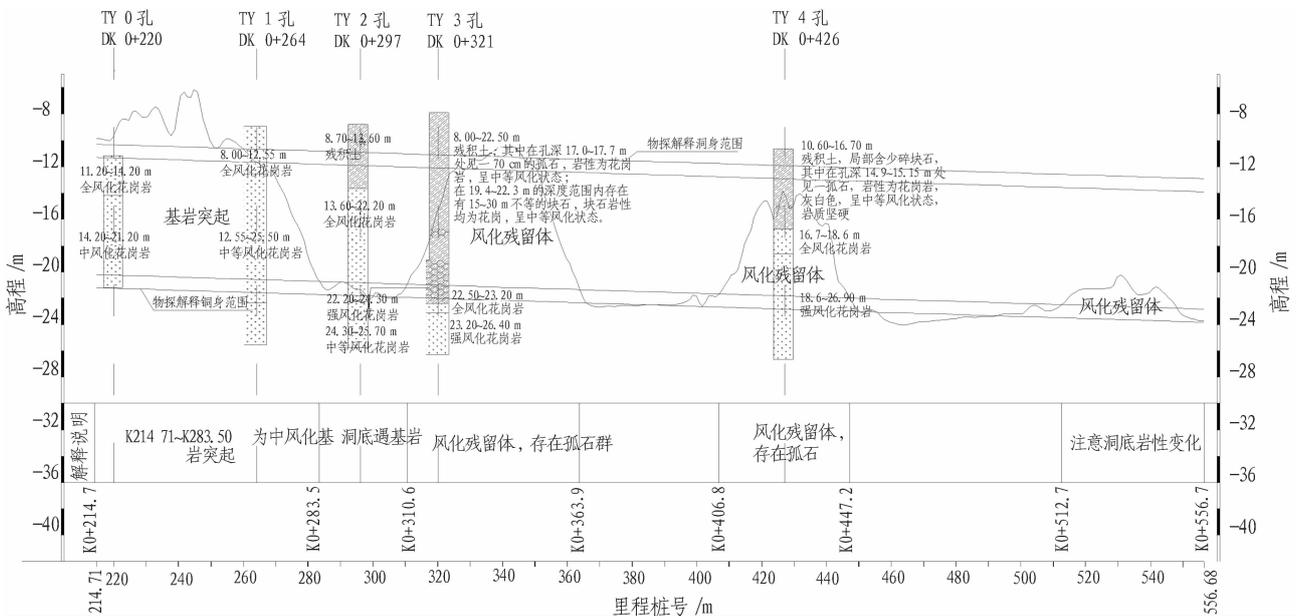


图 1 基岩及孤石群分布图

Fig. 1 Distribution of bedrocks and boulders

### 4.1.3 孤石处理工艺

由于盾构隧洞处于海域条件下施工,隧道埋深在水面下 20 m(水深为 0~8 m),在这个深度和地表条件下,不适合采用冷冻、注浆、地面冲孔、人工挖孔等预处理方法,故选用地表及海面钻孔进行地下深孔爆破的方法进行预处理。在此之前,国内尚无在海面条件下进行如此大规模爆破预处理的先例。

需处理的基岩段长 126 m(处理里程 DK0+157~+283)、孤石群段 216 m(DK0+283~+499)。冲击钻孔区域拟投入 1 台型号为 JB106B 液压凿岩钻机,爆破区域投入 4 台跟管潜孔钻机和 12 台地质钻机。

### 4.1.4 孤石处理成效

由于 DK0+218~+283 段处于近海海域,为了加快施工进度,该区段采用石碴回填填筑平台,海域段采用多钻机钻孔平台作业,多作业面进行施工。本段基岩及孤石群的实际处理共计 90 d。

自 2010 年 8 月 15 日—12 月 14 日,盾构顺利穿过基岩及孤石群长度 342.2 m(K0+157~+499.2)仅历时 4 月,在这个过程中,仍遭遇遗漏的大约 600 mm 以内的小型孤石,更换滚刀 166 把、切刀 201 把、边刮刀 186 把,爆破后的石碴尺寸基本都维持在 100 mm 以内,完全满足本项目泥水系统的要求。盾构刀盘得到

了很好的保护,在盾构通过 4 300 m 的掘进后仅进行少量修复就再次投入了 2 号隧道的施工。

本项目的处理工艺和方法在国内外盾构界罕有先例,为总体工期和安全保障提供了有力保障,为国内海底盾构第一难的隧洞按期贯通排除了最大的障碍。冲击钻冲孔和水中爆破方式进行基岩和孤石处理技术在盾构隧道尤其是越海工程中取得了良好成效,是盾构顺利通过基岩和孤石群的成功案例。

## 4.2 冷冻、地面冲孔和人工挖孔

### 4.2.1 工程概况

深圳地铁 5 号线民治站—一和站区间在深圳梅林关外,盾构机直径 6.28 m,隧道埋深为 12~18 m。项目设计勘察阶段发现有基岩突起及孤石存在,通过施工阶段的详勘,发现从隧道始发井开始近 800 m 的范围内存在孤石(见图 2)。

### 4.2.2 孤石处理工艺及成效

始发井端头为全风化的花岗岩地层,地下水位在地面以下 1 m,必须进行加固处理,考虑到端头以外 3 m 有一个暗渠,如采用注浆或旋喷桩加固方式,地面条件不足,根据各方案比选,采用冷冻方式进行端头加固。在这个范围内存在的孤石也通过冷冻方式予以固结,采用盾构直接切削,盾构平稳始发,未发生刀具损坏等现象。

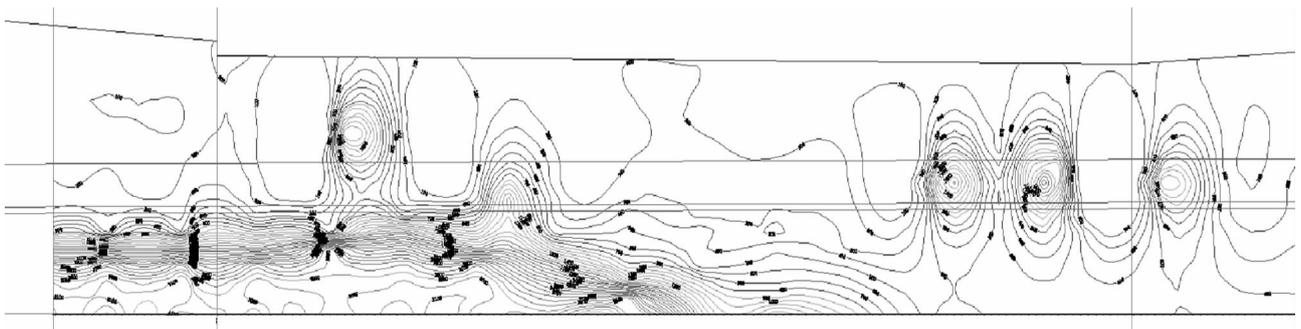


图 2 孤石分布示意图

Fig. 2 Distribution of boulders

在其余约 800 m 的隧道范围内,地面条件相对较好。通过瑞雷波物探和地质钻孔相结合的方式,探测出 19 处孤石,大小为 1.1~3.6 m。由于距线路 10 m 处地面为平南铁路,轨线与线路平行,爆破法可能会对铁路路基造成难以预见的损害。经协调、论证后,决定采用人工挖孔和地面冲孔相结合的方法,多个工作面同步作业,以减少对周边环境的影响。最终在盾构掘进之前完成了孤石的预处理,仅用 5 月就完成了 800 m 长的孤石区段盾构掘进,10 月内完成了整个项目 2 100 m 的区间隧道掘进任务。这在孤石普遍存在的深圳地铁隧道施工中是一个典型的成功案例,具有积极的借鉴意义。

## 4.3 地表注浆

### 4.3.1 长沙地铁 2 号线 7 标概况

由于古河床冲刷搬运的作用,在石灰岩溶岩群中存在大量泥沙及卵石,五一广场站的施工也揭示有直径超过 1 m 的大型卵石。如此大型卵石同花岗岩风化层内的孤石一样,对盾构施工来说是一个巨大的风险。

地层分布的卵石粒径一般为 2~10 cm,存在极少数大型卵石。因同时需要对该区段存在的溶洞进行填充,通过密集的钻孔注浆,既对溶洞起到填充作用,也对分布在该区段的卵石进行了相应的固结。在左右线盾构掘进都遭遇孤石后,通过调整掘进参数,降低刀盘转速,减少冲击等技术措施,盾构顺利通过,按期完成了五一

广场站—芙蓉广场站区间隧道的掘进。

#### 4.3.2 经验教训

该项目通过地表注浆固定孤石进行预处理的成功技术值得推广,但在盾构掘进过程中,大块卵石进入螺旋输送机导致设备被卡死的情况多次出现,故在刀盘设计时应考虑类似条件下格栅的尺寸和形式,避免螺旋机卡死。

#### 4.4 盾构直接切削孤石

广州地铁3号线天河客运站采用直径6.28 m复合式土压平衡盾构进行掘进,由于对孤石存在的判断和勘探工作未受重视,盾构选型时仅对刀盘及其支撑机构进行了相应的改造。

隧道右线第一次遭遇孤石时,未提前进行处理,采用盾构直接切削的方式进行孤石处理,导致历时107 d,仅掘进15 m(YDK1+691~+706)孤石区域,期间更换刀具51把,对刀盘产生了严重的损坏,滚刀刀座出现变形(图3),导致刀具更换困难,还严重影响到地面环境安全(图4)。



图3 变形及破坏的滚刀刀具

Fig. 3 Damaged disc cutters and cutting tools



图4 地面塌陷

Fig. 4 Ground surface settlement

在通过YDK1+691~+706段仅10 m后,再一次遭遇孤石,由于对孤石的认识和危害不充分,仍采用盾构直接通过的方法进行施工。在加强刀具检查和更换时,气压作业压力无法建立,最终通过盾构后退,采用洞内注浆、掌子面喷射混凝土等方法进行作业面封闭,

并进行了3次带压进仓换刀,耗时85 d。

本工程是采用盾构刀盘直接切削并进行人工洞内处理孤石的一个典型实例,在总计不到30 m的隧道范围内,共耗时192 d,工程付出了巨大代价。实践证明,在未探明孤石分布并采取相应的预处理措施的情况下,盾构直接掘进孤石区,是一种不可取的方法。

## 5 结论与建议

因孤石分布随机、形状大小各异且强度不一,致使盾构掘进范围内土层软硬不均,在盾构隧道施工过程中对刀盘、刀具产生极大伤害,盾构姿态控制困难、对周边环境造成极大破坏,严重影响施工进度、大幅增加工程成本,甚至因处理条件问题导致工程失败。如何处理隧道范围内的孤石,是盾构隧道施工的一大技术难题。

对于复杂地质条件下的盾构施工,尤其是存在花岗岩全风化或者强风化地层的隧道区间的施工,在项目策划时需要将其作为一个重大风险予以对待。针对这类地层的盾构施工,应遵循以下基本原则进行施工决策:

1)在地质勘探方面,详实的地质勘察工作是不可缺少的。对花岗岩风化地层,采用30~50 m间距的地质钻孔难以满足对孤石探测的要求,需要采用合适的物探工艺和钻孔探查相结合的方式,准确探测孤石存在的位置分布、大小及形状。

2)对孤石处理应遵循预处理在先的原则,严禁在毫无措施的情况下直接采用盾构进行切削,否则将造成不可挽回的损失,轻则造成工期严重滞后、工程成本大幅增加,重则造成工程失败。

3)根据不同地质和环境条件制定不同的处理工艺。地下深孔爆破是处理孤石运用最新也最有效率的方法之一,建议优先选用;冷冻法、注浆固结、人工挖孔、冲孔破碎等各种辅助工艺都在工程实践中有过成功的先例,具体工艺措施要根据项目的不同条件来选取。

4)应合理选择盾构类型,优化刀盘设计和刀具选择,增强其破岩能力,使其能够满足经预处理后可能遗漏的孤石的需求。

5)盾构在预处理过的孤石地段掘进时,掘进参数的监控尤为重要,刀具贯入度应保持相对较小的数值;同时,刀盘转速的变化是刀盘前负载情况最直观的反映,一旦产生明显变化,需引起特别注意。

6)刀盘的保护是孤石地层掘进过程中的重点。刀具的完好和正常工作是保护刀盘不受损失的最直接手段,掘进过程中对刀具应做到勤检查、勤更换。

7)泥水盾构浆液的对比对保护刀具和刀盘、提高掘进效率至关重要,浆液要有利于提高泥水管路携渣能力,有利于降低对刀具、刀盘的磨损;土压平衡盾构

能改善渣土的流动性、降低土仓温度,是保护刀具的有效手段。

8)必须防止在盾构掘进困难时进行盲目作业,降低刀盘结构性损伤的风险。

9)孤石预处理是一项工艺复杂且耗资巨大的辅助工程,在地面无条件进行预处理的情况下,盾构机本身尚无有效措施处理孤石,建议在项目初步设计阶段就将该风险纳入工程策划决策中。

#### 参考文献(References):

- [1] 付冬平. 广州北部孤石的特征及其工程特性[J]. 广东土木与建筑,2009(6): 21-22,33. (FU Dongping. The character and engineering properties of the solitary stone in the area of North Guangzhou [J]. Guangdong Architecture Civil Engineer, 2009(6): 21-22, 33. (in Chinese))
- [2] 鲍晓东. 深圳地区花岗岩残积土工程特性的研究[J]. 铁道勘察,2004(2): 72-74. (BAO Xiaodong. Engineering geological properties of the remainder soil from weathering granite in Shenzhen district [J]. Railway Investigation and Surveying, 2004(2): 72-74. (in Chinese))
- [3] 王典. 地铁工程球状风化专题勘察方案研究[J]. 广州建筑,2011(2): 42-46. (WANG Dian. Discussion about special investigation programmes of spheroidal weathering in subway project [J]. Guangzhou Architecture, 2011(2): 42-46. (in Chinese))
- [4] 祁世亮. 隧道孤石处理技术应用研究[J]. 隧道建设,2010,30(1): 110-113. (QI Shiliang. Application of hydraulic splitter in boulder treatment during tunneling [J]. Tunnel Construction, 2010, 30(1): 110-113. (in Chinese))
- [5] 竺维彬,黄威然,孟庆彪,等. 盾构工程孤石及基岩侵入体爆破技术研究[J]. 现代隧道技术,2011(5): 12-17. (ZHU Weibin, HUANG Weiran, MENG Qingbiao, et al. Research on controlled blasting technology for boulders and invading bedrock in shield construction [J]. Modern Tunneling Technology, 2011(5): 12-17. (in Chinese))
- [6] 古力. 盾构机破碎孤石条件及预处理方法[J]. 隧道建设,2006,26(S2): 12-13,220. (GU Li. Qualifications for boulder breaking by shield machines and pre-treatment of boulders [J]. Tunnel Construction, 2006, 26(S2): 12-13,220. (in Chinese))
- [7] 李玉春. 盾构法隧道球状风化孤石处理关键技术[J]. 中国科技信息,2009(23): 75-76. (LI Yuchun. Construction technology of treating spherical weathered boulders on shield tunneling [J]. China Science and Technology Information, 2009(23): 75-76. (in Chinese))
- [8] 贺朝荣. 深圳地铁2号线盾构机通过孤石的处理技术[J]. 城市道桥与防洪,2010(12): 114-116, 12. (HE Chaorong. Treatment technology of shield machine to pass through isolated stone in Shenzhen Metro No. 2 Line [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2010(12): 114-116, 12. (in Chinese))
- [9] 李熙福. 冲击钻机钻孔遇孤石的处理方法[J]. 广东土木与建筑,2011(2): 47-49. (LI Xifu. The processing method of percussion drill hitting boulders [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2011(2): 47-49. (in Chinese))
- [10] 杨雄飞,袁鸿. 广州地铁3号线孤石地层的探测及处理[J]. 建筑机械化,2011(6): 73-76, 7. (YANG Xiongfei, YUAN Hong. The detecting and measure of the boulder layer at the site of Guangzhou Metro Line 3 [J]. Construction Mechanization, 2011(6): 73-76, 7. (in Chinese))

(上接第570页)

- [4] 刘建国. 深圳地铁盾构隧道施工技术研究与实践[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [5] 汪旭光,于亚伦,刘殿中,等. 爆破安全规程实施手册

[M]. 北京:人民交通出版社,2004.

- [6] 刘殿中,杨仕春. 工程爆破实用手册[M]. 2版. 北京:冶金工业出版社,2003.