DOI:10.3969/j. issn. 1672 - 1144. 2020. 06. 033

济南地区盾构隧道富水闪长岩物理力学特性试验研究

刘　浩[1],徐前卫[2],刘　毅[1],孙庆文[1],贺　翔[2]
(1. 济南轨道交通集团有限公司,山东 济南 250101;
2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘　要: 济南地区存在富水闪长岩地层,其强度离散性大,了解其性质对于盾构选型、刀盘配置及盾构掘进施工等具有重要意义。以济南地铁 R2 线长途汽车站地铁站在建基坑附近钻芯获取的不同风化闪长岩作为研究对象,通过电镜扫描实验在微观层面观察其结构和矿物组成,利用岩石耐崩解实验在宏观视角分析其遇水崩解的发展程度,并根据单轴及三轴压缩试验得到相关力学指标,分析其对盾构掘进能力的影响,可为盾构在类似地层中施工提供参考。

关键词: 隧道;闪长岩;电镜扫描;耐崩解性;压缩试验
中图分类号: TU45　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1672—1144(2020)06—0196—06

Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Water-rich Diorite in Shield Tunnels in Jinan Area

LIU Hao[1], XU Qianwei[2], LIU Yi[1], SUN Qingwen[1], HE Xiang[2]
(1. *Jinan Rail Transit Group Co. ,Ltd.* , *Jinan*, *Shandong* 250101, *China*;
2. *Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education*, *Tongji University*, *Shanghai* 201804, *China*)

Abstract: The strength of water-rich diorite strata in Jinan area has the characteristics of large dispersion. Therefore, it is of great significance to understand the rock mechanical properties for the selection of shield machine, configuration of cutter-head and tunnel construction. In this paper, by taking the sample of different weathered diorite obtained by drilling cores at the foundation pit of the long-distance bus station of Jinan Metro R2 line as an example, the structure and mineral composition of the rock mass are observed from the microscopic level through the scanning electron microscope test, while the disintegration test is used to analyze the development degree of its water disintegration from a macro perspective. Furthermore, according to the uniaxial and triaxial compression tests, the relevant mechanical indexes can be obtained. The above results can be used to analyze its influence on the tunneling capacity of the shield machine, whicha can also provide references for the tunel construction of shield machine in similar formations.

Keywords: **tunnel**; **diorite**; **scanning electron microscope**; **disintegration resistance**; **compression test**

随着我国经济的迅速发展,城市地下工程建设的速度也逐渐加快,其地质条件和周边环境也越来越复杂,无论是工程规模还是技术难度都越来越大,因此加强对岩土体工程性质的认识尤为重要[1-3]。以济南地区为例,该区地质条件复杂,尤其是较为特殊的富水闪长岩地层,岩体强度离散性大,其工程性质对于盾构选型、刀盘配置以及盾构在上软下硬复合地层施工具有重要影响[4-8]。

对于岩体而言,其工程性质的研究主要包括岩石矿物组成的微观分析[9-10]和室内实验两方面。岩石室内实验则主要涉及耐崩解性[11-12]、单轴和三轴压缩等实验[13-14],据此获取岩石的物理力学性质。目前,关于闪长岩工程性质的研究,已有一些工程实践见诸于报道。例如,周恩革[15]通过研究发现

收稿日期:2020-08-14　　**修稿日期:**2020-09-10
基金项目:国家自然科学基金项目(41672360)
作者简介:刘　浩(1988—),男,山东潍坊人,工程师,主要从事隧道与地下工程等领域的建设与研究工作。E-mail:552066437@ qq. com

闪长岩强风化带的物理性质非常稳定,能有效作为高层建筑的天然地基。但是,鲜见有盾构在类似于济南地区富水闪长岩地层中进行掘进的案例报道。因此,本文以济南地铁 R2 线长途汽车站在建基坑中钻芯获取的不同风化程度闪长岩为研究对象,通过对岩石试样进行电镜扫描,观察分析其微观结构和矿物组成;利用单轴压缩实验获取岩石的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比等物理力学参数,了解岩石单轴压缩过程的变形特征和破坏类型;借助耐崩解性试验,计算岩石耐崩解性指数,分析不同深度岩石的耐崩解性。根据相关试验结果,对盾构施工可能遇到的问题提出相应解决措施,供施工决策参考。

1　工程概况

1.1　工点概述

济南轨道交通 R2 线一期工程贯穿济南市西部和东部主城区,连接了西部新城核心区、老城区、高新区、唐冶新城及郭店片区等重点区域,是缓解东西向交通压力、支撑带状城市空间拓展的轨道交通骨干线路。拟建的长途汽车站站—生产路站区间隧道位于济南市堤口路,线路沿北园大街走行,起点里程 CK14 + 322.036,终点里程 CK15 + 995.628,全长 1 673.592 m,采用盾构法施工。

1.2　工程地质

济南轨道交通 R2 线长途汽车站站—生产路站区间地层自上而下依次由近代人工填土、第四系全新统冲积(Q_4^{al})粉质黏土、黏土,第四系全新统冲洪积(Q_4^{al+pl})粉质黏土及下伏燕山期(δ_5^3)辉长岩、闪长岩等构成。第四系最大厚度约 5.5 m ~ 13.5 m,生产路站及盾构区间存在卵石夹层,其地质纵断面图如图 1 所示。

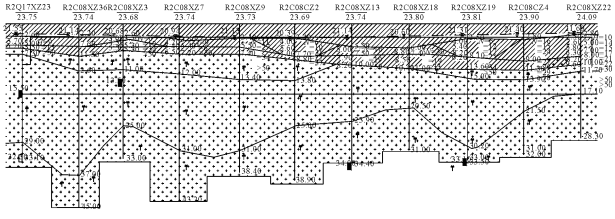


图 1　长途汽车站站地质纵断面图

根据济南地铁 R2 线的设计方案,盾构在掘进过程中,分别会遇到全风化、强风化和中风化闪长岩,部分断面甚至同时含 2 ~ 3 种风化程度不一的闪长岩。相对于已建及部分在建城市的地层而言,盾构在黏土、粉土、砂砾、卵石及花岗岩等各种地层中的掘进技术已较为成熟,而类似于济南闪长岩地层的盾构掘进案例很少有见报道,且风险性极高,故亟须开展不同风化程度的闪长岩地层盾构掘进问题的研究。

2　试验概况

2.1　试件制备及说明

试验所用岩样为风化程度不同的闪长岩,取自 R2 线长途汽车站站在建基坑。考虑到基坑开挖导致岩石暴露时间长,且岩石容易受到机械设备等施工荷载的影响,所以采取地面上钻芯的方式以获得试验所需的岩样,根据前期地质勘探情况,取样深度按 40 m 考虑。钻探采用 XY - 150 型工程钻机,开孔直径 127 mm,终孔直径 108 mm,钻孔直径满足试验要求。土层及全风化岩层采用泥浆护壁合金钻头岩芯管钻进,回次进尺 1.0 m ~ 1.5 m,岩芯采取率不低于 90%;强风化、中等风化岩层采用金刚石钻头清水正循环钻进,回次进尺 1.0 m ~ 1.5 m,强风化岩层采取率不低于 65%,中等风化岩层采取率不低于 80%。

不同试验采用分类标准不同的岩样进行。图 2 为按照国际岩石力学学会试验标准方法加工的闪长岩三轴压缩试验圆柱体试件,其尺寸为 Φ50 mm × 100 mm,试件两端面不平行误差不大于 0.05 mm,沿试件高度,直径的误差不大于 0.3 mm,端面垂直于试件轴线,最大偏差不大于 0.25°。

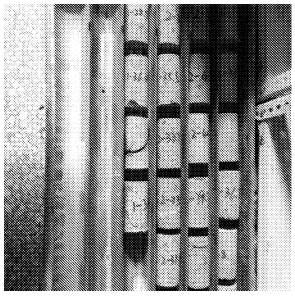


图 2　岩石加工试件图

2.2　试验设备及方法

(1) 岩石扫描电镜试验。对强、中风化闪长岩进行电镜扫描处理,观察岩石的微观结构并分析其矿物组成,试验步骤如下:

① 试验选取不同深度的岩样 5 组,见表 1。将各组岩样加工成边长约为 1 cm 的石块并进行打磨。

② 将石块放入烘干箱内,在设定温度(105℃ ~ 110℃)下烘干后,放入干燥器内冷却至室温。

③ 将石块放入镀膜机内镀膜。

④ 把石块放入载物台并用导电胶将其固定,然后将其装入机箱。

⑤ 采集不同放大倍数下的电镜扫描图片。

表 1 岩石扫描电镜试验取样分组表

岩样序号	取样深度/m	岩样类型
A1	31.3	强风化闪长岩
A2	32.8	中风化闪长岩
A3	33.4	中风化闪长岩
A4	36.1	中风化闪长岩
A5	40.1	中风化闪长岩

(2) 岩石耐崩解循环试验。试验选取不同深度的岩石并分成四组,见表 2。每组岩样各取 40 g ~ 60 g 的岩块 10 块。

表 2 岩石耐崩解循环试验取样分组表

岩样序号	深度范围/m	岩样类型
B1	28.9 – 30.1	强风化闪长岩
B2	32.5 – 33.6	中风化闪长岩
B3	36.6 – 37.2	中风化闪长岩
B4	39.6 – 40.1	中风化闪长岩

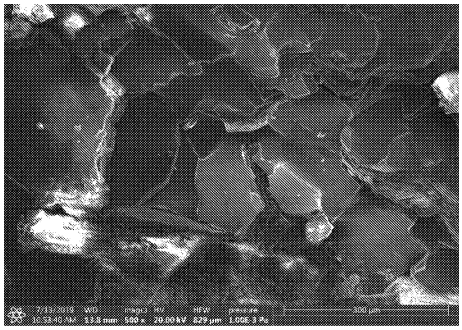
(3) 岩石单轴及三轴压缩试验。采用微机控制 RLW – 1000 型岩石三轴流变仪进行试验。在三轴压缩试验中,先施加 50 kN 的纵向载荷固定试样,然后缓慢施加围压到指定值范围,稳定数分钟,使围压基本保持恒定且变动范围不超过指定值的 2% 后,以 0.5 MPa/s 的速率加载,直至试件破坏。单轴压缩试验不考虑围压施加,其余步骤与三轴压缩试验相同。

3 岩石电镜扫描成分检测试验

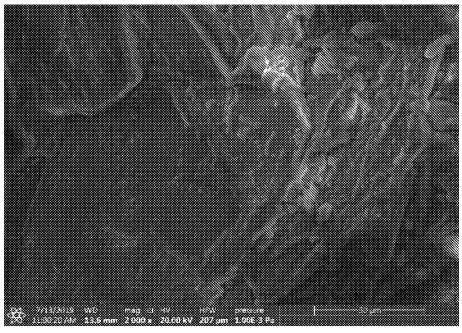
3.1 试验结果

(1) 矿物组成。对岩石标本进行观察,岩石呈灰色。其中浅色矿物含量较多,主要为斜长石、碱性长石,肉眼可见带状斜长石、碱性长石,斜长石含量约为 60%。另外,含有少量暗色矿物,主要为角闪石、辉石,肉眼可见褐绿色角闪石颗粒,含量约为 20%。由电镜扫描情况可见,岩石含有少量片状黑云母,可观察到黑云母出现绿泥石化,如图 3 所示。

岩体的主要矿物成分为斜长石、碱性长石、角闪石、辉石和云母矿,岩体主要以硅酸盐矿物为主,这是隧道围岩总体较为坚硬的主要原因。另一方面,由于岩体含有大量的斜长石、云母等矿物,使得定向性的板块状结构发育,各向异性明显,容易在受力时发生层间变形错动、剥离或溃曲破坏,而绿泥石富集成膜时会降低岩体强度,遇水软化后导致结构面强度显著减弱,结构劣化时更为明显。



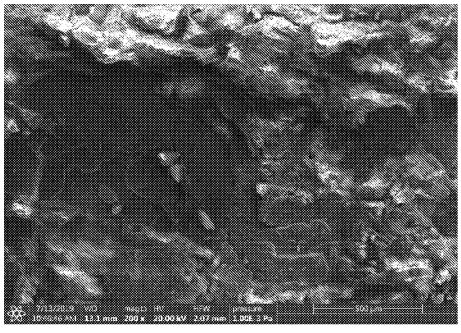
(a) 片状云母



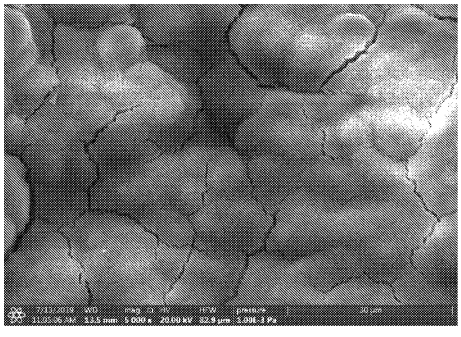
(b) 绿泥石化

图 3 部分岩样电镜扫描图(片状云母及绿泥石化)

(2) 微观结构。图 4 是部分岩样电镜扫描结果,可以看出岩石普遍呈块状结构,结构较紧密,矿物具有一定方向性,不同深度岩样风化程度不同。



(a) 块状结构



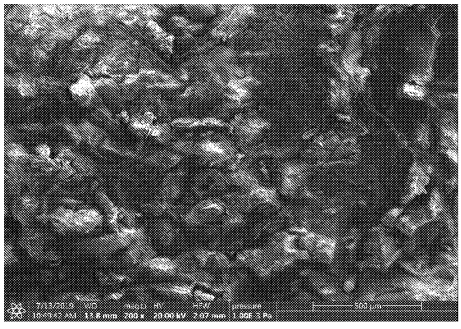
(b) 微裂隙

图 4 部分岩样电镜扫描图(块状结构及微裂隙)

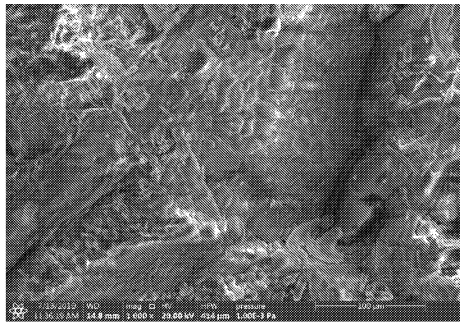
提高放大倍数可以看到风化闪长岩微裂隙较为发育,宽度为 3 μm ~ 15 μm,部分裂隙之间具有连通性,少量微裂缝中石英充填。微结构面的存在大大降低了岩石的强度,由于岩石中这些缺陷的存在,当其受力时,在微孔或微裂隙末端,易造成应力集中,使裂隙可能沿末端继续扩展,导致岩石在比完全无缺陷时所能承受的拉应力或压应力低的多的应力值的作用下破坏。

3.2　结果分析

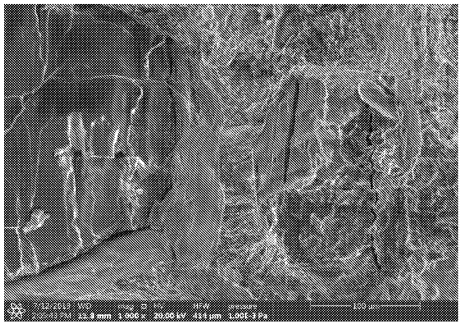
图 5 是在同等放大 1 000 倍的前提下不同深度闪长岩扫描电镜的结果。A1 强风化闪长岩比较破碎,并且风化比较明显,微裂隙发育,微裂隙宽度为 3 μm ~ 10 μm,裂隙之间具有连通性,少量微裂缝中石英充填;A2 中风化闪长岩比较破碎,并且风化比较明显,微裂隙发育,微裂隙宽度为 3 μm ~ 10 μm,裂隙之间具有连通性,样品存在少量孔隙;A3 中风化闪长岩矿物具有一定向性,岩石比较破碎并且风化比较明显,微裂隙发育明显,微裂隙宽度为 5 μm ~ 15 μm,裂隙之间具有一定连通性;A4 中风化闪长岩,结构紧密,岩石风化比较明显,少量微裂隙发育,微裂隙宽度为 5 μm ~ 10 μm,裂隙之间连通性较差;A5 中风化闪长岩结构紧密,风化程度较低,长石晶体具有一定向性,少量微裂隙发育,微裂隙宽度为 3 μm ~ 10 μm,裂隙连通性较差。可以看出,A4、A5 中风化闪长岩岩样裂隙发育程度相较而言明显不如 A1、A2 和 A3 岩样,且 A2 和 A3 中风化闪长岩岩样裂隙发育最为明显,这说明岩样裂隙发育程度在不同深度上存在差异,间接说明了闪长岩的强度具有变异性和随机性,其与岩样深度和风化程度相关性较小。



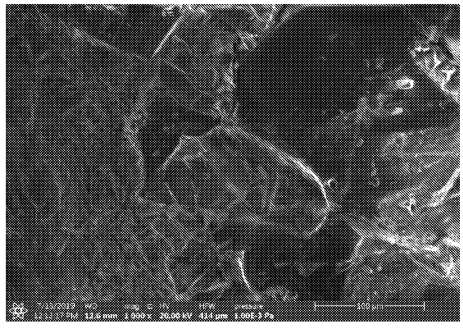
(a) 埋深31.3 m处岩样(A1)



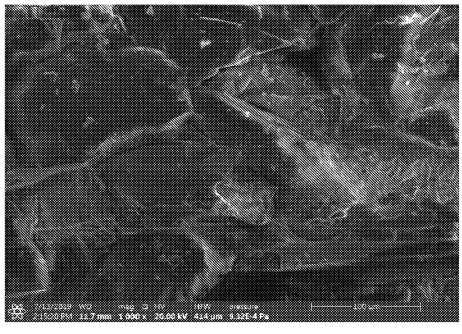
(b) 埋深32.8 m处岩样(A2)



(c) 埋深33.4 m处岩样(A3)



(d) 埋深36.1 m处岩样(A4)



(e) 埋深40.1 m处岩样(A5)

图 5　不同深度闪长岩试样放大 1 000 倍电镜扫描结果

4 岩石耐崩解循环试验

4.1 试验结果

将 4 组岩样每次标准循环下的残留颗粒质量进行统计,如表 3 所示。

表 3 岩样每次标准循环下的残留颗粒质量统计表

循环次数	残留质量/g			
	B1 岩样	B2 岩样	B3 岩样	B4 岩样
0(试验前)	517.2	561.5	558.3	528.2
1	499.2	534.8	546.6	523.6
2	470.7	521.1	537.5	520.4
3	437.4	470.7	527.0	516.2
4	409.8	458.6	507.8	509.0
5	383.4	448.8	475.9	503.0
6	355.9	430.5	458.4	498.9
7	332.2	416.6	436.4	493.7
8	309.3	404.6	409.7	490.2

4.2 结果分析

根据表 3 统计结果可以发现:在经历 8 次标准循环后,B1 岩样由最初的 517.2 g 降至 309.3 g,质量减少 40.2%;B2 岩样由最初的 561.5 g 降至 404.6 g,质量减少 27.9%;B3 岩样由最初的 558.3 g 降至 409.7 g,质量减少 26.6%;B4 岩样由最初的 528.2 g 降至 490.2 g,质量减少 7.2%。

绘制各组岩样经历不同循环次数时崩解残留物质量变化曲线及循环 2 次和 8 次的质量损失率直方图,如图 6 所示。

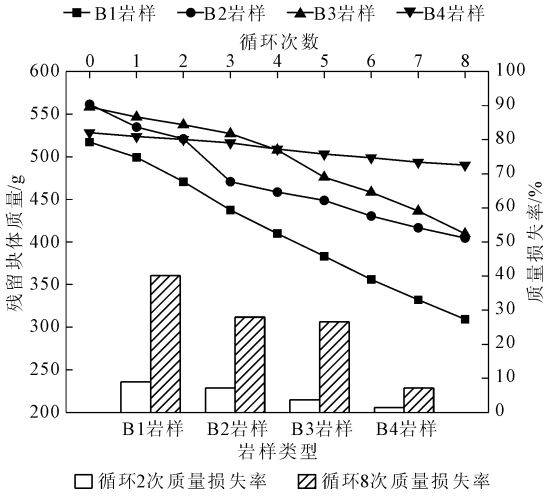


图 6 残留块体形态变化曲线及质量损失率直方图

由图 6 可以看出,随着循环次数的增加,4 组岩样残留物质量逐渐减小,其中 B1 和 B4 岩样残留物质量随循环次数增加呈近似线性关系降低,其崩解质量损失相对均匀。B1 岩样质量减小幅度明显大于其他岩样,B4 岩样质量减小幅度最小,说明风化程度与岩石耐崩解性相关。

定量分析闪长岩的耐崩解性,采用岩石二次循环耐崩解性指数反映岩石抵抗软化和崩解的能力。其计算公式如下:

$$I_{d2} = \frac{m_r}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中:I_{d2} 为岩石二次循环耐崩解性指数,%;m_s 为原试件烘干质量,g;m_r 为残留试件烘干质量,g。

岩石耐久性划分见表 4,将经计算所得各组岩样二次循环耐崩解性指数汇总至表 5。可以看出,B1、B2、B3 岩样均为高耐久性,B4 岩样为极高耐久性。其中,B1 岩样的耐崩解性相对较差,这说明闪长岩风化程度越高,其耐崩解性越差。但就总体而言,盾构在强风化、中风化闪长岩地层中正常掘进时,考虑到岩石耐久性程度较高,故可以忽略其遇水崩解的不利影响,亦即岩石渗透性不发生明显变化。

表 4 岩石耐久性划分表

耐久性划分	极高耐久性	高耐久性	中等耐久性	低耐久性	极低耐久性
二次循环耐崩解性指数/%	$I_{d2}>98$	$98 \geqslant I_{d2} \geqslant 85$	$85 > I_{d2} \geqslant 60$	$60 > I_{d2} \geqslant 30$	$I_{d2}<30$

表 5 各组岩样二次循环耐崩解性指数汇总表

岩样序号	二次循环耐崩解性指数/%	岩样类型	耐久性程度
B1	91.01	强风化闪长岩	高耐久性
B2	92.80	中风化闪长岩	高耐久性
B3	96.27	中风化闪长岩	高耐久性
B4	98.52	中风化闪长岩	极高耐久性

5 岩石三轴压缩试验及单轴压缩试验

5.1 单轴压缩试验结果

经整理计算,试验数据汇总如表 6 所示。可以看出,对于不同深度的 6 组岩样,其软化系数、吸水率差距不大,而其弹性模量、泊松比差异很大,同时与深度并无明显相关性,空间变异性较大。不仅如此,除了 D1 岩样外,其余 5 组岩样单轴极限抗压强度均为 15 MPa ~ 20 MPa,岩体自上而下并未因风化程度的不同而呈现强度逐渐增加的趋势,这说明浅层的全风化、强风化闪长岩地层可能存在球状风化、软硬不均现象。因此,在盾构施工中不仅应注意衬砌所受围岩压力的变化,更要注意球状风化、软硬不

均对刀盘切削岩体的影响,表现为刀具磨损严重、刀盘偏磨等现象。

5.2　三轴压缩试验结果

经整理计算,岩石三轴试验结果汇总至表 7。对于不同深度的 7 组岩样,在自然含水状态下,其密度存在一定差异。针对中风化闪长岩,侧向压力 2 MPa、4 MPa、6 MPa、8 MPa 下岩石的平均最大主应力分别为 22.995 MPa、49.320 MPa、70.620 MPa、81.540 MPa,根据以上数据所绘制莫尔圆如图 7 所示,可得中风化闪长岩的黏聚力为 0.861 MPa,内摩擦角为 55.11°。由此可见,中风化闪长岩具有较高的抗剪切强度,这就要求盾构刀盘、刀具须具有较高的抗冲切能力。

表 6　岩石单轴试验结果汇总表

岩石序号	取样深度/m	单轴极限抗压强度/MPa			软化系数	吸水率/%	弹性模量/GPa	泊松比
		饱和	天然	干燥				
D1	28.9	45.88	49.87	55.69	0.82	3.05	22.158	0.45
D2	31.5	11.42	12.85	14.26	0.80	3.77	4.326	0.68
D3	35.5	16.54	18.61	20.16	0.82	3.53	6.165	0.46
D4	36.3	11.35	13.35	14.69	0.77	3.72	2.713	0.41
D5	39.1	13.48	15.01	16.31	0.83	3.08	5.352	0.61
D6	40.3	17.11	19.75	21.85	0.78	3.82	17.364	0.33

表 7　岩石三轴试验结果汇总表

岩石序号	取样深度/m	岩石类型	含水状态	天然密度/(g·cm^{-3})	侧向压力/MPa	破坏载荷/kN	最大主应力/MPa
C1	30.2	强风化闪长岩	自然	2.83	4	106.1	54.03
C2	33.0	中风化闪长岩	自然	2.64	2	45.1	22.94
C3	33.7	中风化闪长岩	自然	2.96	2	45.3	23.05
C4	35.8	中风化闪长岩	自然	2.77	4	87.6	44.61
C5	39.6	中风化闪长岩	自然	2.91	6	138.7	70.62
C6	39.8	中风化闪长岩	自然	2.72	8	127.6	64.97
C7	40.8	中风化闪长岩	自然	2.88	8	192.6	98.11

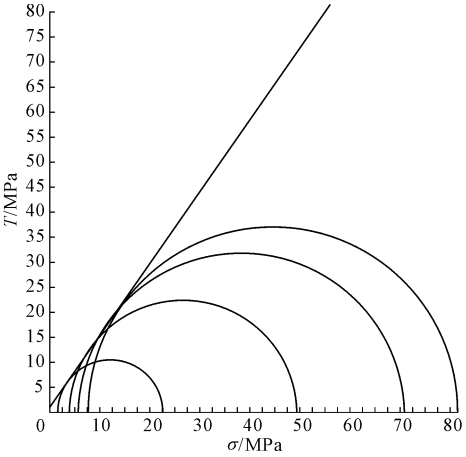


图 7　莫尔圆应力参数曲线图

6　结　论

(1) 岩体主要以硅酸盐矿物为主,这是中风化、微风化闪长岩总体较为坚硬的主要原因,故在配置刀盘刀具时应考虑具有足够的抗冲击性和耐磨性。

(2) 由于斜长石、云母、绿泥石等矿物的存在,使得岩体易发生层间变形错动,剥离或溃曲破坏,故在全风化、强风化闪长岩中掘进时,尤其要注意盾构开挖面失稳的问题。

(3) 闪长岩强度自上而下并未因风化程度的不同而逐渐增加,即闪长岩地层存在球状风化、软硬不均现象。因此,在盾构施工中要注意刀具磨损严重、刀盘偏磨等不利情况的发生。

参考文献:

[1] 员建峰,洪　波,李宝辉. 城市地下工程建设中的环境工程地质问题的分析[J]. 中国水运(下半月),2015,15(1):122-123,175.

[2] 蒋　磊,钟　可,戴　勇,等. 穿越湘江水下岩溶发育区地铁盾构选型研究与应用[J]. 都市快轨交通,2019,32(2):85-90,131.

[3] 牟军东. 盾构穿越上软下硬复合地层施工风险与控制技术研究[J]. 中国水运(下半月),2020,20(5):189-191.

[4] 门燕青,王永军,周建国,等. 济南复合地层土压平衡盾构掘进效能实测分析[J]. 土木工程学报,2019,52(8):110-119.

[5] 卢庆亮,许京伟,于普涟. 济南地铁隧道复合地层盾构施工选型与对策[J]. 现代制造技术与装备,2017(11):171-173,176.

[6] 张伟森. 上软下硬地层盾构机滚刀磨损特性研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(2):583-588.

[7] 田瑞忠. 盾构长距离穿越上软下硬富水石灰岩地层施工技术[J]. 铁道建筑技术,2020(4):73-76.

(下转第 222 页)

表 5 吊车梁计算成果对比表

标准类型	计算跨度/m	最小保护层厚度/mm	竖向最大弯矩/(kN·m)	竖向最大剪力/kN	横向最大弯矩/(kN·m)	横向最大剪力/kN	最大扭矩/(kN·m)	计算抗弯纵筋 A_s/mm^2	计算抗扭纵筋 A_s/mm^2	计算抗剪扭箍筋 A_{sw}/s/mm	裂缝宽度/mm
中国规范	8.40	30	4398.13	2697.31	184.25	114.63	181.0	7680	1291	3.14	0.22
欧洲规范	8.39	30	6115.45	3494.38	241.35	140.68	202.4	8385	1887	3.93	0.21
备注							腹板+翼缘	腹板+翼缘	腹板+翼缘		

从表 5 可以看出,吊车梁在相同荷载情况下,采用中国规范计算出的所需钢筋面积比采用欧洲规范计算的小,这和 4.2 节得出的安全度对比结论是相吻合的。

5 结 论

中欧混凝土结构设计规范有关受扭构件承载力计算的基本原理是相同的,都是采用以概率论为基础的极限状态设计方法,同样采用分项系数法,但两种规范的计算公式和要求存在较大差异,分项系数取值也不相同。通过对比和实例分析,采用欧洲规范进行受扭构件结构计算的安全度要高于中国规范,计算所需钢筋截面面积也更大。因此,在国际项目上的受扭构件结构计算,合理选择计算标准是很重要的,但需要先征得业主或者监理工程师的同意。

参考文献:

[1] 贡金鑫,车 秩,李荣庆. 混凝土结构设计(按欧洲规范)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:5-24.

[2] 李先顺,李 刚. 中、欧标准中混凝土结构基本要求的对比研究[J]. 建筑结构,2020,50(5):99-103,92.

[3] 蒋国栋,张建鑫. 中欧混凝土结构设计规范的差异[J]. 水运工程,2017(9):53-57.

[4] 袁 博. 国内外混凝土简支梁受弯设计比较[J]. 铁道勘测与设计,2012(4):40-43.

[5] 丁少凌,周国玲,易 蓓,等. 中欧规范混凝土构件承载力对比[J]. 中外公路,2017,37(2):276-280.

[6] 王新洋. 中欧混凝土结构设计规范中材料特性对比[J]. 四川建材,2017,43(1):60-61,68.

[7] 李 旭,段世明. 中欧规范混凝土梁受剪承载力公式对比[J]. 低温建筑技术,2015,37(1):85-87.

[8] 夏 进. 中欧混凝土结构设计规范对比研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2014.

[9] 祝振兴. 中欧美标钢筋混凝土梁设计对比分析[J]. 水泥工程,2018(2):8-12,16.

[10] 石程程,马 颖,罗国杰, 等. 国内外不同规范对弯剪破坏钢筋混凝土墩柱的受剪承载力计算比较[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(5):20-25.

[11] 水工混凝土结构设计规范:DL/T 5057—2009[S]. 北京:中国电力出版社,2009.

[12] European Committee for Standardization. Eurocode 2 - Design of concrete structures - part1 - 1: General rules and rules for buildings: EN 1992—1—1[S]. BSI: Brussels,2004.

[13] 张晓昕,王 涛,谷金操, 等. 考虑围岩开挖响应的岩壁吊车梁受力分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):56-60.

[14] European Committee for Standardization. Eurocode 1 - Actions on structures part3: Actions induced by cranes and machinery: EN 1991—3[S]. BSI: Brussels,2006.

[15] 水工建筑物荷载设计规范:DL 5077—1997[S]. 北京:中国电力出版社,1997.

(上接第 201 页)

[8] 张亚洲,温竹茵,由广明,等. 上软下硬复合地层盾构隧道设计施工难点及对策研究[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(4):669-676.

[9] 杨才千,刘 强,瞿 冯,等. 砒砂岩风化特性试验[J]. 水利水电科技进展,2019,39(5):10-15.

[10] 王 含,周征宇,郭恺鹏,等. 昌化地开石次生矿风化层矿物学特征[J]. 岩石矿物学杂志,2019,38(3):410-416.

[11] 金 旭,熊传祥,钟富林. 酸污染条件下花岗岩残积土崩解特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(6):194-198.

[12] 柴肇云,张亚涛,张学尧. 泥岩耐崩解性与矿物组成相关性的试验研究[J]. 煤炭学报,2015,40(5):1188-1193.

[13] 蒲 诚,陈蕴生,周 冲,等. 岩石室内单轴压缩试验位移加载速率的研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):161-164.

[14] 夏 磊,姚劲松,蒋 磊. 层状类岩体室内制样方法及单轴压缩力学机理研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):70-76,98.

[15] 周恩革. 闪长岩强风化带做高层建筑天然地基的可行性研究[J]. 智能城市,2018,4(4):44-45.