DOI：10.16285/j.rsm.2016.1757

灰岩隧道掘进机隧道点荷载试验评价岩石强度方法的研究与探讨

刘泉声，赵怡凡，张晓平，孔晓璇

（武汉大学 土木建筑工程学院，湖北 武汉 430072）

摘 要：使用隧道掘进机（TBM）开挖隧道时刀盘和盾体阻碍了对岩石状态的观察，这时可使用岩渣对岩石条件进行预测和评价。从滚刀破碎掌子面产生的岩渣中选取块状岩石进行点荷载试验可以获得岩石强度，但是受过滚刀损伤作用的岩石强度值与未受损伤的岩石强度值之间的关系尚不明确。从吉林引松供水工程 TBM 破岩产生的岩渣中挑选块状试样进行点荷载试验，同时在产生岩渣的相应位置钻取岩芯获取点荷载强度，与单轴抗压强度进行了对比，记录了取样地点地质状态、试样的尺寸、破碎状态以及等效断裂面积。结果表明：岩渣中的岩块受到滚刀作用产生的损伤强度值有所下降，为完整取芯试样的 63.25%，原岩越完整受损程度越大；灰岩点荷载强度换算岩石单轴抗压强度系数约为 25.3，直接使用岩渣时建议系数约为 42.1；峰值荷载与等效断裂面积成正比；尺寸过大的试块往往与岩体原有裂隙有关，强度极低，不适宜用作点荷载试验。研究结果为 TBM 隧道现场快速获取岩石强度参数提供了方法和依据。

关 键 词：隧道掘进机（TBM）；岩渣；点荷载；损伤；引松供水工程

中图分类号：U 451+.2 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 03－0977－08

Study and discussion on point load test for evaluating rock strength of TBM tunnel constructed in limestone

LIU Quan-sheng, ZHAO Yi-fan, ZHANG Xiao-ping, KONG Xiao-xuan

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: When using tunnel boring machine (TBM) to excavate a tunnel, engineers are hindered to observe the state of surrounding rock by the cutter-head and shield of TBM. Under this circumstance, the state of rock muck can be used to predict and evaluate rock mass conditions as well. The strength of blocky fragments in TBM muck can be obtained by the point load test. However, the relationship between blocky fragments and the intact surrounding rock has been unknown. In this study, point load tests are performed on the blocky fragments selected from the Yinsong Water Supply Project. Meanwhile, rock core samples are taken by drilling at corresponding locations of blocky fragments. Their strengths are also measured by point load tests, and then compared with uniaxial compressive strengths. In addition, geological conditions, the size of specimens and the breaking state are also recorded. The results show that the point load strength of blocky fragments reduces to 63.25% of core samples from side walls. It is found that the reducing ratio is greater when rock mass is more complete. The conversion factor from point load strength to uniaxial compressive strength for limestone is 25.3, whereas the conversion factor from the point load strength of blocky fragments to uniaxial compressive strength is 42.1. The breaking force depends on the breaking surface and oversize blocky fragments are not suitable for testing the strength. In conclusion, this study provides a useful method and basis for the rapid acquisition of rock strength in TBM tunnelling.

Keywords: tunnel boring machine (TBM); blocky fragments; point load strength; damage; Yinsong Water Supply Project

1 引 言

TBM 作为一种机械开挖法以其高效快捷的优势正成为长大隧道建设的主流。在使用 TBM 开挖隧道时，岩石裸露空间有限阻碍了获取岩石信息[1]。因为掘进步进等作业速度快，在 TBM 开挖隧道时逐段取芯测试岩石强度效率较低，除此之外，当 TBM 经过某些破碎地层时，喷浆等支护方式在开

收稿日期：2016-07-20
基金项目：国家重点基础研究发展计划（973）项目（No.2014CB046904，No.2015CB058102）。
This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973) (2014CB046904, 2015CB058102).
第一作者简介：刘泉声，男，1962 年生，博士，教授，博士生导师，主要从事岩土与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

挖后立刻进行，这些因素都增加了 TBM 施工时获取岩石强度的难度；使用双护盾 TBM 开挖隧道时，护盾则完全阻挡了施工人员观察周围岩体的状况[2]。在这种情况下，通过分析岩渣来获取岩石强度就显得快捷有效且十分必要。

作为一种简便快捷的试验方法，点荷载试验可以针对不规则形状、圆柱体试样快速进行大量试验，且试验设备可在现场使用。这种方法最早是由 Broch 和 Franklin 于 1972 年提出的[3]，国际岩石力学学会（International Society for Rock Mechanics，ISRM）于 1985 年给出了测定岩石点荷载强度的建议方法[4]。 1995 年 7 月 1 日开始，国家标准 《工程岩体分级标准》允许使用岩石点荷载试验确定岩石的坚硬程度[5]，随后这一方法在工程中不断得到应用。王祥厚等[6]对使用不规则岩石试件进行点荷载测试的截面面积、数据取舍等诸多问题进行了研究和探讨。张宇等[7]在现场开展了大量点荷载试验对武当山群片岩进行风化程度和各项异性的研究并与单轴压缩试验对比，结果表明：点荷载强度与单轴抗压强度具有较为稳定的关系，点荷载试验足以替代单轴抗压试验。苏承东等[8]对煤层煤样进行了单轴压缩、巴西劈裂、捣碎法和点荷载试验，发现点荷载强度与其他强度指标具有关联性，可为煤岩强度分级提供依据。付志亮等[9]通过分析煤层顶底板岩石点荷载强度与拉压强度的对比试验，认为点荷载试验可为岩石强度确定及岩体分级提供依据。张建明等[10]通过大量的数据收集归纳了岩浆岩点荷载强度与岩石单轴抗压强度的关系。Zhang 等[11]使用点荷载强度值对丹巴水电站水利勘探隧洞石英云母片岩的各向异性指数随风化程度的变化规律进行了评价。Kohno 等[12]分别对地表收集的受侵蚀岩块和同种岩石取芯进行了点荷载试验，通过对比点荷载强度发现侵蚀作用会破坏岩石内部结构，使岩石点荷载强度降低。这些试验结果表明，点荷载试验是一种测试岩石强度的有效方法，点荷载强度值是衡量岩石强度的可靠指标。

岩渣来自掌子面岩石，是在滚刀与岩石的相互作用下产生的。通常，岩渣中包含粉状、片状、块状等形态，其中往往存在许多形状和尺寸都适合点荷载试验的石块，这些不规则块状岩石试块可以直接在皮带输送机上截取，也可以在渣场拾取，取样方便，尺寸满足点荷载试验要求。在某些无法获取完整岩芯或获取完整岩芯代价较大的情况下，可以利用 TBM 出渣过程中块状岩渣的点荷载强度值（point load strength，简称 PLS）来获得围岩的单轴抗压强度（UCS）进而对工程围岩强度进行评价。

但是，在滚刀破岩作用下，岩渣中岩块的形成也伴随着内部微裂纹的产生和微结构的改变，在这些因素的影响下，直接使用文献[4]或文献[5]建议的公式换算岩渣试块的点荷载强度值与围岩岩石单轴抗压强度的关系不能准确描述 TBM 隧道的岩石强度。因此，本文旨在探明两种试样点荷载强度值与单轴抗压强度值的关系，以及块状岩渣与取芯试样点荷载强度值的关系，建立三者之间的相互关系，改进使用点荷载试验评价 TBM 隧道围岩岩石质量的方法。

2 滚刀与岩石的相互作用

滚刀是 TBM 破岩的有效工具，滚刀通过贯入和滚动实现掌子面裂隙的萌生、扩展和交汇。由于刀盘的阻挡，难以实现直接观察掌子面。目前，滚刀−掌子面相互作用主要通过室内试验和数值模拟的方法来研究。

滚刀贯入岩石时，从滚刀与岩石接触开始，滚刀下方形成一个扇形应力区域，这个区域内的岩石迅速经历弹、塑性阶段，通过垂直贯入试验可以发现，此时滚刀下方出现压痕。继续贯入，压痕深度增大，塑性区扩大，刀刃边缘岩石逐渐超过极限强度发生破坏，与此同时，岩石中开始萌生微裂纹。在滚刀进一步贯入的作用下，岩石中产生大量微裂纹，其中一部分微裂纹贯通在一起形成宏观裂纹，宏观裂纹呈辐射状，当宏观裂纹扩展到自由面或宏观裂纹相互连接在一起时，形成的岩片岩块脱离掌子面，成为岩渣[13]。马洪素等[14]通过室内试验指出，随着围压增大，边裂纹逐渐向水平方向扩展，破岩角增大，岩片厚度降低，即破岩时产生更多的片状岩渣。节理也是影响滚刀与岩石相互作用的因素，龚秋明等[15]在进行了室内线性切割试验后指出，分层节理距掌子面较近时，滚刀产生的裂纹易与分层节理贯通，容易导致岩块剥落，破碎掌子面所需要的法向力、比能都较小。为弥补室内试验无法进行细观特性研究的缺陷，孔晓璇等[16]基于颗粒流程序（PFC）研究了滚刀与节理岩石相互作用的过程，研究结果表明：在节理岩石中，主裂纹会扩展到节理面，滚刀贯入引起的主裂纹与节理面连通共同形成岩渣，节理的存在加速了滚刀破岩过程；与此同时，滚刀引起的主裂纹可能不再向节理后方扩展，节理又对裂纹扩展起到了阻隔作用。概括来说，滚刀破碎岩石的过程，就是在滚刀压入作用下，岩石内部裂隙萌生、扩展直至交汇形成岩渣剥落的过程，

如图 1 所示。这一过程除宏观裂纹产生的岩渣之外，自始至终伴随着滚刀附近区域岩石内部微裂隙的产生和微结构的改变。

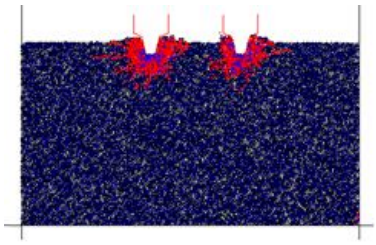


图 1　双滚刀破岩数值模拟[16]
Fig.1　Numerical simulation of rock fragmentation under double disc cutters[16]

3　试验方案

3.1　工程地质概况

本文所使用的岩石试样均取自吉林引松供水工程四标段里程桩号 66 km+630 m～66 km+720 m 区间段和 68 km+120 m～68 km+370 m 泥盆系中下统碱草甸-常家街组灰岩。这一标段由一台直径为 7.93 m 的开敞式 TBM 开挖，刀盘内安装 19 寸滚刀，刀间距为 83 mm。取样区间段岩石呈灰黑色，水平层理，交错层理，部分层理伴有碳化杂质，岩石呈微-弱风化，埋深小于 40 m。

3.2　试验仪器

点荷载试验使用 HDH-1B 数显式点荷载试验仪，该仪器最大工作压强为 60 MPa，活塞最大行程为 160 mm，最大加载压力为 100 kN，允许试样最大高度为 150 mm，如图 2 所示。采用手动液压泵加压，可控制加载时间；数显仪可自动记录峰值荷载。4 立柱之间安装有一个黑色凹槽用于固定试样，凹槽中间有一圆柱形贯通空隙，可以使加压时试样被牢固地压在两个圆形压头之间。



图 2　点荷载试验设备
Fig.2　Apparatus of point load test

3.3　点荷载试样获取

块状岩渣取自皮带输送机末端。计算好掌子面开挖时刻和皮带输送机运行速度，经过一段时间后使用装载机铲斗在皮带输送机末端接住岩渣，从中挑选适合点荷载试验的试块（如图 3(a)所示）。通过计算获得岩渣所在的掌子面位置，当 TBM 向前掘进一段距离后，利用取芯钻在岩渣的生成位置钻取岩芯，这样就保证了块状岩渣和岩芯来自同一位置，确保了点荷载强度值具有可比性。在 1～3 号取样点的每个里程桩号处的 TBM 岩渣中挑选了至少 50 个试块用于点荷载强度试验；在 4～6 号取样点，每组挑选了至少 30 个满足点荷载强度试验的试块，挑选试块时，确保其尺寸满足 $0.3W < T < W$，$0.5D < L$，其中，L、W、T 分别为试块的长、宽、高。试块上、下两侧应相对平整以便点荷载试验仪平稳加载，存在小尖角和表面凹凸的试块上、下表面在收集后打磨整平。在岩渣中挑选适用于点荷载试验的试块时，尺寸过小的试块不会被选取，因为其测量误差会对计算结果产生较大影响。利用取芯钻获取的岩芯长度一般在 150～300 mm 之间，每个取样点钻取数量大于 10 根的岩芯，每根岩芯表面无可见裂隙（如图 3(b)所示）。文献[4]指出，相对于轴向加载，圆柱体点荷载试验径向加载所获得的结果具有更小的离散性。使用圆柱形试样做径向点荷载试验时，加载点到自由面的最小距离不小于 50 mm。本文对岩芯径向加载主要是以圆柱形岩芯点荷载强度值作为参照标准，为了减少对圆柱形岩芯试样的破坏和干扰，发挥点荷载试验高效快速的优势，使其更适合在 TBM 施工现场使用，在满足文献[4–5]规定的前提下，只去除长岩芯两端尖角，不对岩芯试样进行其他预处理，减少破坏。较长的岩芯试样从距离自由面大于 50 mm 处开始施加点荷载，加载断裂后的一端如满足点荷载试验要求，则收集起来再进行点



(a) 不规则岩块



(b) 岩芯

图 3　3 号取样点未加载试样
Fig.3　Unloaded specimens from sampling site #3

荷载加载，直到断开后的两端长度都不再满足要求。两种点荷载试验加载破坏后的试样如图 4 所示。统计块状岩渣点荷载试验结果时每组试验舍弃 3 个最大值和 3 个最小值，统计岩芯的点荷载试验结果时舍弃两个最大值和两个最小值。为达到饱和度一致，试验开始前，所有试样浸泡 48 h 以上。



(a) 不规则岩块



(b) 岩芯

图 4 点荷载试验破坏的试样

Fig.4 Fractured specimens after point load tests

对各取样点同时进行了单轴压缩试验，灰岩试样在单轴压缩下的破坏形式如图 5 所示。获得了单轴抗压强度（UCS）。



图 5 某灰岩试样在单轴压缩下的典型破坏形态

Fig.5 Failure pattern of a limestone sample after uniaxial compressive test

4 试验结果及分析

本文点荷载试验采用国际岩石力学学会[4]推荐的方法，试样的标准点荷载强度可由以下公式计算得到：

$$A = WD \tag{1}$$

$$D_{\mathrm{e}}^2 = \frac{4A}{\pi} \tag{2}$$

$$I_s = \frac{P}{D_{\mathrm{e}}^2} \tag{3}$$

$$F = \left(\frac{D_{\mathrm{e}}}{50}\right)^{0.45} \tag{4}$$

$$I_{\mathrm{s}(50)} = FI_{\mathrm{s}} \tag{5}$$

式中：A 为破坏面最小截面面积；D 为破坏发生时两加载点间的距离；W 为断裂面宽度；I_{s} 为未经修正的点荷载强度；P 为破坏时的峰值荷载；D_{e} 为等效直径；F 为转换系数。点荷载试验的峰值荷载与断面面积密切相关，为了可以使不同试样获得统一的表征岩石性质的强度参数，需要将所有试样换算成 50 mm 直径圆柱形试样破坏时的等效点荷载强度 ($I_{\mathrm{s}(50)}$)。对于径向加载的圆柱形试样，断裂面可能为圆形或椭圆形，这取决于断裂面是否为圆柱体横截面。圆柱形试样径向加载有时产生贯入，即断裂时两个加载点之间的距离小于试样直径，这种情况下产生的断裂面为椭圆面。因此，对于圆柱形试样有：

$$D_{\mathrm{e}}^2 = DD' \tag{6}$$

$$D' = D - 2\alpha \tag{7}$$

式中：D' 为断裂时两个加载点之间的实际距离；α 为加载点贯入岩石试验的距离。本文所用试样分别收集于隧道内 6 个区间段，为便于后续说明和讨论，将这 6 个取样里程桩号地点分别定义为 1～6 号取样点，各取样点对应的里程桩号区间对应情况在表 1 中列出。

表 1 各个取样点里程桩号及 3 种参数对比

Table 1 Tested mechanical parameters of all sampling sites

取样点编号	里程桩号	点荷载强度/ MPa		单轴抗压强度/ MPa
		岩渣	岩芯	
1	66 km+710 m～66 km+720 m	2.491	4.754	110.62
2	66 km+660 m～66 km+680 m	2.620	3.163	85.44
3	66 km+630 m～66 km+650 m	2.261	4.147	108.93
4	68 km+360 m～68 km+370 m	3.718	5.824	130.81
5	68 km+170 m～68 km+180 m	2.588	3.963	117.36
6	68 km+120 m～68 km+130 m	2.446	4.035	93.65

4.1 两种试样点荷载强度值对比

表 1 列出了 6 个不同里程桩号位置处不规则岩块标准点荷载强度值、圆柱式样径向加载标准点荷载强度值以及与之相对应的单轴抗压强度值。图 6 则列出 6 个取样点两种点荷载强度值的对比关系。从图中可知：① 不规则岩块的点荷载强度值相比于

取样岩芯的点荷载强度值有所降低，在 1～6 号这 6 个取样位置的下降幅度有所不同，分别为 47.60%、17.17%、45.48%、36.16%、34.70%、39.38%，不规则岩块的整体下降幅度为 36.75%，；不规则试块点荷载强度是岩芯的 63.25%；② 对比 1～3 号取样点的取样岩芯发现，2 号取样点处点荷载强度值最低，岩石强度最弱，通过观察洞壁可发现此处岩体破碎，岩体中包含大量裂隙，裂隙中夹杂填充物（见图 7），裂隙内流淌的地下水长期的侵蚀作用导致了裂隙周围岩石劣化，由此可见裂隙对 TBM 施工隧道的影响是双重的，岩体中的裂隙不仅降低了岩体的完整性，还使岩石强度有所降低。需要特别指出的是，不规则试块相比于岩芯的点荷载强度值有所降低，但各个取样地点强度降低的幅度不一样，本文试验对象在 2 号取样点岩石点荷载强度值下降幅度最小，下降幅度最小的地方正好发生在围岩岩石强度最低、岩体最破碎的地点。根据参考文献[15–16]的室内试验和数值模拟结果可知，滚刀作用下产生的裂隙会与岩体中原有裂隙贯通，从而使掌子面岩石剥落，岩体裂隙对滚刀破坏作用的传递起到了阻碍作用，削弱了滚刀作用向岩石内部的传递，也就是说，裂隙临近处的岩石受到的滚刀破坏更小，微观结构的改变相对较小，岩渣试块保留了相对更高的强度，与本文的试验结果一致。研究结果表明岩体裂隙对滚刀作用在岩石中的传播起到了阻隔效果。

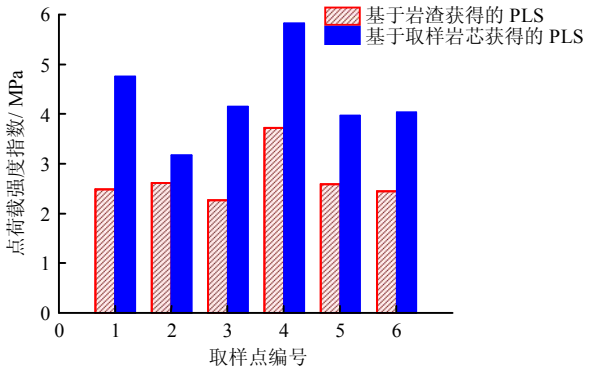


图 6　两种试样点荷载强度值对比图

Fig.6　Comparison of point load strength of two kinds of specimen



图 7　2 号取样点洞壁围岩

Fig.7　Photo of rock conditions at the sampling site No. 2

4.2　受损程度与工作参数的关系

6 个取样点的 TBM 工作参数记录如表 2 所示，将 66 km+630 m～66 km+720 m 区间段中的 1～3 号取样点与 68 km+120 m～68 km+370 m 区间段中的 4～6 号取样点进行对比，前者受滚刀作用后岩石点荷载强度下降 38.89%，后者的下降值则为 36.68%，前者略大。通过对比可以发现，在 66 km+630 m～66 km+720 m 区间段采用了较大的刀盘转速，为 5.8～6.1 r/min；在 68 km+120 m～68 km+370 m 区间段内则小于 5 r/min。本文研究对象的对比结果表明，转速提高，刀盘对岩石造成的损伤程度略有增大。

表 2　各个取样点里程桩号的 TBM 工作参数

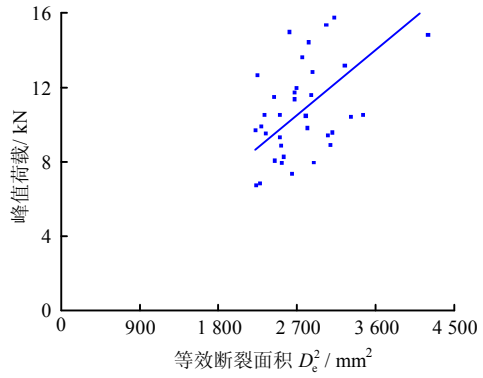
Table 2　TBM operational parameters of all sampling sites

取样点	刀盘转速 / (r/min)	刀盘扭矩 / (kN·m)	推进速度 / (mm/min)	总推力 / kN	贯入速度 / (mm/r)
1	5.74	1 426.9	46.4	8 755.0	8.08
2	6.09	1 531.6	68.2	9 000.1	11.20
3	5.80	1 965.8	64.4	9 714.7	11.10
4	4.55	2 094.8	50.6	11 896.0	11.12
5	4.97	1 979.9	54.0	8 861.6	10.87
6	4.51	1 466.4	50.8	7 378.4	11.26

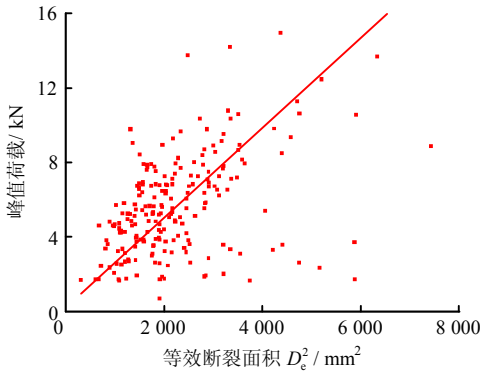
4.3　峰值荷载与断裂面面积关系

国际岩石力学学会对于使用点荷载试验的建议方法有效地消除了试样形状、尺寸对获取统一的点荷载强度值的影响。标准点荷载强度值 $I_{s(50)}$代表岩石的固有强度性质，与试样形状尺寸无关，但施加点荷载直到试样破坏时的峰值荷载与试样尺寸有关。在点荷载作用下，断裂面两侧承受作用力抵抗破坏，因此，峰值强度和等效面积的比值可以视为岩石内部单位面积抗破坏的指标。图 8 为 1～3 号取样点两种试样峰值荷载和等效破坏面积的关系，岩芯和不规则岩块的点荷载强度值与等效断裂面积线性拟合关系的斜率分别为 0.003 88 和 0.002 41，斜率表示了单位面积抵抗荷载的能力。由此可见，岩芯具有更高的强度。值得注意的是，岩芯全部是由相同设备钻取的，钻取所获得的岩芯试样直径相同，但断裂面积并不相同，有些试样加载破坏时断裂面与圆柱形岩芯的轴线垂直，有些试样加载破坏时断裂面与圆柱形岩芯轴线呈一定角度，断裂面呈椭圆形面积也较大，这一现象导致了岩芯试样破坏时断

裂面积不同。通过试验过程中的记录发现，断裂面积较大时，峰值荷载一般也较大。



(a) 岩芯



(b) 不规则岩块

图 8 峰值荷载与等效面积的关系

Fig.8 Relationships between D_e^2 and peak load

4.4 点荷载试验与块状试样尺寸的关系

块状 TBM 岩渣大多是近似长方体的不规则形状（如图 3(a)所示），点荷载试验的准确性又受到试块形状尺寸的影响，可以说准确判断和量测试块尺寸是点荷载试验准确与否的关键。图 9～11 列出了 1～3 号取样点试样的长、宽、高与峰值荷载的关系，由图可见，岩渣试样的宽度和厚度与峰值荷载呈近似线性相关关系，峰值荷载受试样长度影响不

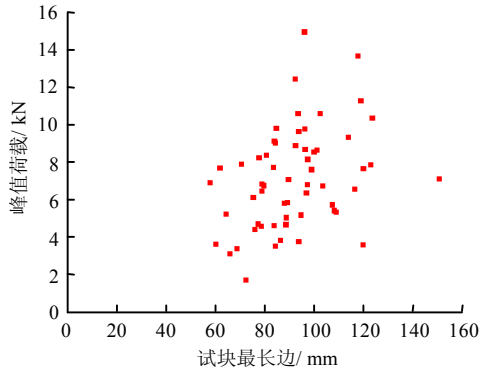


图 9 岩渣试样最长边与峰值荷载的关系

Fig.9 Relationship between length and peak load

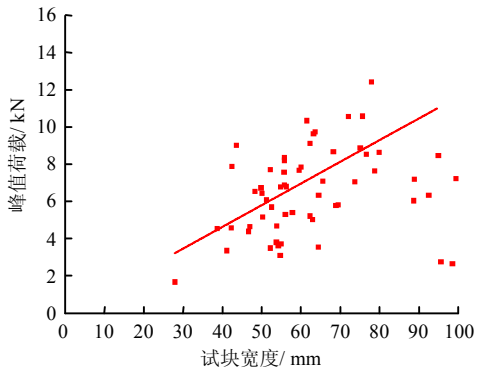


图 10 岩渣试样宽度与峰值荷载的关系

Fig.10 Relationship between width and peak load

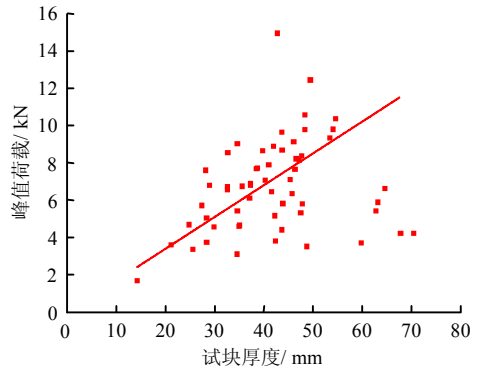


图 11 岩渣试样厚度与峰值荷载的关系

Fig.11 Relationship between thickness and peak load

大。从图中可以看出，当宽度大于 80 mm，厚度大于 60 mm，试块破坏的峰值荷载逐渐偏离回归曲线呈现减小的趋势，峰值荷载比预估值小，再考虑其尺寸效应，可见其点荷载强度更低。考虑到滚刀刀间距的因素，推断这些大尺寸试样并不是在滚刀破坏岩石试样时产生的，其强度逐渐偏离了拟合曲线，不适宜用作评价岩石强度的点荷载强度试验。

4.5 点荷载强度与单轴抗压强度的关系

国内外学者对于使用点荷载强度值预估单轴抗压强度值做过大量的工作，由于岩石的不均匀性和各向异性等特性，专家的研究角度不同，得出的结果也不同。对于不同种类的岩石，其转换系数也不相同。ISRM 建议的点荷载强度与单轴抗压强度的转化公式为

$$R_c = 24 I_{s(50)} \tag{8}$$

式中：R_c 为单轴抗压强度。

对于灰岩来说，点荷载强度换算单轴抗压强度的转换系数在 15～38 之间，如果在 TBM 施工隧道使用岩渣换算岩石单轴抗压强度时，15～38 这个系数区间范围显然不准确。通过分析滚刀破岩过程可以看出，剥落的岩块中含有微裂隙，与未受滚刀作

用的岩石相比，微观结构发生了改变，这一过程导致了从岩渣中拾取的不规则岩块强度降低，直接使用某一类岩石的岩渣点荷载强度很难准确获取岩石的单轴抗压强度。在岩渣中挑选不规则岩块并以其点荷载强度值作为评价隧道掌子面或围岩岩石强度值时，可以适当放大转换系数。对于本文的研究对象平均值约为 42.1，未受损灰岩的点荷载强度和单轴抗压强度的转换系数为 25.3。

5　结　论

（1）相对于完整的取芯岩样，TBM 块状岩渣受滚刀作用产生损伤，点荷载强度值降低，降低幅度与岩体破碎程度和工作参数有关，本文研究对象下降幅度的平均值约为 36.75%；

（2）点荷载试验峰值荷载与试样的宽度和厚度有关，与试样长度无关。岩渣中过大的试块不适用于点荷载强度试验，建议点荷载试验宜选用厚度在 20～60 mm 范围内，宽度在 40～80 mm 范围内。

（3）峰值荷载-等效断裂面积近似呈线性相关关系。针对本文研究的灰岩，岩石受滚刀作用前、后的峰值荷载-等效断裂面积曲线斜率分别为 0.003 88 和 0.002 41，滚刀作用降低了岩石单位面积承受荷载的能力。

（4）灰岩径向加载时，点荷载强度与单轴抗压强度的换算系数为 25.3；TBM 在灰岩地层中掘进时，使用岩渣点荷载强度换算围岩岩石单轴抗压强度的转换系数建议值为 42.1。

参 考 文 献

[1] 刘泉声, 黄兴, 时凯, 等. 煤矿超千米深部全断面岩石巷道掘进机的提出及关键岩石力学问题[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2006－2013.
LIU Quan-sheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. Utilization of full face roadway boring machine in coal mines deeper than 1 000 km and the key rock mechanics problems[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(12): 2006－2013.

[2] 刘泉声, 黄兴, 时凯, 等. 深部挤压性地层 TBM 掘进卡机孕育致灾机理[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊): 75－82.
LIU Quan-sheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. The mechanism of TBM shield jamming disaster tunneling through deep squeezing ground[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(Supp.): 75－82.

[3] BROCH E, FRANKLIN J A. Point-load strength test[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**, 1972, 9(6): 669－697.

[4] ISRM (International Society of Rock Mechanics). Suggested method for determining point load strength[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**, 1985, 22(2): 51－60.

[5] 中华人民共和国建设部. GB50218-94 工程岩体分级标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50218-94 Standard for engineering classification of rock mass[M]. Beijing: China Planning Press, 1995.

[6] 王祥厚, 李明勇, 佘洛斐, 等. 点荷载测试岩石强度使用不规则试件的研究与探讨[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 46－56.
WANG Xiang-hou, LI Ming-yong, SHE Luo-fei, et al. Discussion and research with irregular test piece of the point load measurement rock strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(4): 46－56.

[7] 张宇, 干泉, 余飞, 等. 基于点荷载试验武当群片岩的风化分组及强度特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 229－232.
ZHANG Yu, GAN Quan, YU Fei, et al. Study of weathering grouping and strength characteristics of Wudang group schist based on point load testing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.1): 229－232.

[8] 苏承东, 唐旭, 倪小明. 煤样抗压、拉强度与点荷载指标关系的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 511－515.
SU Cheng-dong, TANG Xu, NI Xiao-ming. Study on correlation among point load strength, compression and tensile strength of coal samples[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2012, 29(4): 511－515.

[9] 付志亮, 王亮. 煤层顶底板岩石点荷载强度与拉压强度对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 88－96.
FU Zhi-liang, WANG Liang. Comparative experimental research on point load strength, uniaxial compressive strength and tensile strength for rocks in roof and floor of coal seam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(1): 88－96.

[10] 张建明, 唐志成, 刘泉声. 点荷载强度指数估算与岩浆岩的单轴压缩强度的关系[J]. 岩土力学 2015, 36(增刊 2): 595－602.
ZHANG Jian-ming, TANG Zhi-cheng, LIU Quan-sheng. Relationship between point load index and uniaxial compressive strength for igneous rock[J]. **Rock and Soil**

Mechanics, 2015, 36(Supp.2): 595－602.

[11] ZHANG X P, WU S, AFOLAGBOYE L O, et al. Using the point load test to analyze the strength anisotropy of quartz mica schist along an exploration adit[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, DOI 10.1007/s00603-015- 0792-0.

[12] KOHNO M, MAEDA H. Relationship between point load strength index and uniaxial compressive strength of hydrothermally altered soft rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 50(1): 147－157.

[13] 孙金山, 陈明, 陈保国, 等. TBM 滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1891－1897.
SUN Jin-shan, CHEN Ming, CHEN Bao-guo, et al. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6):1891－1897.

[14] 马洪素, 龚秋明, 王驹, 等. 围岩对 TBM 滚刀破岩影响规律的线性切割试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 346－355.
MA Hong-su, GONG Qiu-ming, WANG Ju, et al. Linear cutting tests on effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(2): 346－355.

[15] 龚秋明, 苗崇通, 马洪素, 等. 节理间距对滚刀破岩影响的线性破岩试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(6): 97－105.
GONG Qiu-ming, MIAO Chong-tong, MA Hong-su, et al. Effect of joint spacing on rock breaking under disc cutter by linear cutting experiments[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(6): 97－105.

[16] 孔晓璇, 刘泉声, 赵怡凡, 等. 节理倾角对岩石隧道掘进机破岩特性影响的数值研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1257－1262.
KONG Xiao-xuan, LIU Quan-sheng, ZHAO Yi-fan, et al. Numerical simulation on the effect of joint orientation on rock fragmentation by TBM disc cutters[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(6): 1257－1262.

上接第 966 页

[18] ANG A H, TANG W H. Probability concepts in engineering: emphasis on applications in civil and environmental engineering[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

[19] AU S, BECK J L. Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation[J]. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 2001, 16(4): 263－277.

[20] 李典庆, 肖特, 曹子君, 等. 基于极限平衡法和有限元法的边坡协同式可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 38(6): 1004－1013.
LI Dian-qing, XIAO Te, CAO Zi-jun, et al. Auxiliary slope reliability analysis using limit equilibrium analysis and finite element analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 38(6): 1004－1013.

[21] LI H, MA Y, CAO Z. A generalized subset simulation approach for estimating small failure probabilities of multiple stochastic responses[J]. **Computers & Structures**, 2015, 153: 239－251.

[22] KIM D, OK S, SONG J, et al. System reliability analysis using dominant failure modes identified by selective searching technique[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2013, 119: 316－331.

[23] NEVES R A, MOHAMED-CHATEAUNEUF A, VENTURINI W S. Component and system reliability analysis of nonlinear reinforced concrete grids with multiple failure modes[J]. **Structural Safety**, 2008, 30(3): 183－199.

[24] LI L, WANG Y, CAO Z, et al. Risk de-aggregation and system reliability analysis of slope stability using representative slip surfaces[J]. **Computers and Geotechnics**, 2013, 53(3): 95－105.

[25] JI J, LOW B K. Stratified Response Surfaces for System Probabilistic Evaluation of Slopes[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(11): 1398－1406.

[26] KANG F, HAN S, SALGADO R, et al. System probabilistic stability analysis of soil slopes using Gaussian process regression with Latin hypercube sampling[J]. **Computers and Geotechnics**, 2015, 63(2): 13－25.

[27] CHO S E. First-order reliability analysis of slope considering multiple failure modes[J]. **Engineering Geology**, 2013, 154(3): 98－105.