

露天矿边坡岩体抗剪强度参数取值方法研究^①

刘宏¹, 董明华², 张诏飞², 闻磊³

(1.伊春鹿鸣矿业有限公司,黑龙江伊春 152500; 2.中铁资源集团勘察设计院有限公司,河北廊坊 065000; 3.石家庄铁道大学,河北石家庄 050000)

摘要:以刚果(金)SCM铜钴矿西帮边坡为例,分别通过室内大三轴压缩试验、滑坡反分析、岩体质量评价和Hoek-Brown强度准则换算等方法获取岩体抗剪强度参数,并对获取的强度参数进行对比和验证。结果表明,受样品尺寸效应影响,室内大三轴压缩试验获取的岩体抗剪强度中的黏聚力可能存在偏差;所得参数应用于边坡稳定性分析时,对摩擦角敏感度较高的边坡模型可取得较准确的评价结果,而对黏聚力敏感度较高的边坡模型评价准确度相对较低。相同工况下,坡面浅层滑坡反分析所得边坡岩体参数适用于局部或单台阶稳定性分析,深层滑坡或由软弱结构面造成的滑坡反分析所得边坡岩体参数适用于整体边坡稳定性分析。Hoek-Brown强度准则换算法得到的抗剪强度参数与室内大型三轴压缩试验结果接近,使用该准则计算岩体强度参数具有操作性强、适用范围广、准确度高优点。

关键词:边坡稳定性; 抗剪强度; 三轴压缩试验; 滑坡反分析; Hoek-Brown强度准则

中图分类号: TD854

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.002

文章编号: 0253-6099(2023)03-0006-05

Determination of Shear Strength Parameters of Slope Rock Mass in Open-Pit Mine

LIU Hong¹, DONG Minghua², ZHANG Zhaofei², WEN Lei³

(1.Yichun Luming Mining Co Ltd, Yichun 152500, Heilongjiang, China; 2.China Railway Resources Group Survey and Design Co Ltd, Langfang 065000, Hebei, China; 3.Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: The west slope of SCM copper cobalt mine in DRC was taken as an example for determining the shear strength parameters of rock mass by a laboratory triaxial compression test, back analysis of landslides, evaluation of rock mass quality and strength conversion with Hoek-Brown criterion, and then the obtained strength parameters were verified. The results show that due to the size effect of the samples, there may be deviation in the cohesion of rock mass shear strength obtained from the laboratory triaxial compression tests. It is found that with the obtained parameters used in slope stability analysis, more accurate evaluation results can be obtained from the slope model with higher sensitivity to friction angle, while lower accuracy from the slope model with higher sensitivity to cohesion. Under the same working condition, the parameters of slope rock mass obtained from the back analysis of shallow landslides can be used for analyzing local or single bench stability, and the parameters of slope rock mass from back analysis of deep-seated landslides or the landslides due to weak structural planes can be used for overall stability analysis. It is found that the shear strength parameters obtained based on Hoek-Brown failure criterion are close to the results from laboratory triaxial compression test, also easy to operate and more accurate, which can have a wide application.

Key words: slope stability; shear strength; triaxial compression test; back analysis of landslide; Hoek-Brown failure criterion

岩体强度是指岩体抵抗外力破坏的能力。在露天矿山中,岩体强度是决定边坡岩体稳定性的控制性因素。岩体是含软弱结构面的地质体,岩体抗剪强度取

决于岩石抗剪强度、弱面抗剪强度以及岩体中弱面的分布,此外还受岩体结构控制。因此,岩体强度可能比其主体物质——岩石的强度小很多。准确获取岩体力

① 收稿日期: 2022-11-30

基金项目: 河北省自然科学基金重点项目(A2020210008)

作者简介: 刘宏(1968—),男,黑龙江哈尔滨人,高级工程师,主要从事矿山采矿选矿地质技术管理工作。

通信作者: 张诏飞(1987—),男,河北唐山人,高级工程师,主要从事矿山工程地质方面的科研工作。

学参数的方法是进行现场大型试验,但其工程浩大、费用高昂。一般情况下边坡稳定性计算所采用的岩体强度是按岩石强度换算得到的。近年来,国内学者对岩体强度参数取值方法进行了较为广泛的研究,并取得了一定研究成果^[1-5]。本文在刚果(金)SCM矿区,通过室内试验、滑坡反分析、岩体质量评价和Hoek-Brown强度准则换算等方法分别获取岩体抗剪强度参数,并进行验证分析,研究了以上取值方法在边坡稳定性分析中的适用性。

1 研究区域概况

SCM铜钴矿位于刚果(金)东南部,是中刚“资源财政化—揽子合作”的重要项目。矿山采用露天开采,西帮为固定边帮,坡顶高程1420 m,坡底普遍在1220 m以下,最深处为1200 m,边坡最大高度220 m,边坡角37°,其中1260 m以上坡面角38°,1260 m以下坡面角普遍大于40°,单台阶高度15 m,台阶宽度10 m。边坡岩体以RAT岩组为主,岩性多为白云质泥岩、白云质砂岩,深部分布有砾岩、石英砂岩和硅化白云岩。从揭露的坡面上看,主要岩性为白云质泥岩,白云质砂岩呈沙云状无规则分布在白云质泥岩中间。受区域性逆冲推覆构造作用影响,岩层产状由西向东由平缓逐步变陡,再恢复至平缓,到采坑中心岩层再次陡立。其中在边坡西段,1300 m以上岩层近似水平,中段岩层倾角10°~30°,现状坑底倾角约50°。岩层走向约NW155°。

受构造活动影响,RAT岩组中的岩体质量呈现层状或条带状差异,分布为散体结构岩组(RAT-1)、碎裂结构岩组(RAT-2)和块状结构岩组(RAT-3)。

2 基于室内试验的岩体强度参数

基于本文所研究破碎岩体的颗粒组成和结构特征,进行了室内大型三轴压缩试验。试验在SZLB-4型应力式粗粒土三轴试验机上进行,试样尺寸为 $\Phi 300\text{ mm} \times 600\text{ mm}$,可提供最大轴向荷载1500 kN、最大围压3.0 MPa。

在散体结构岩组(RAT-1)中采取3组样品,每组4个,最大粒径均小于60 mm。样品制备时,以边坡硐探采取样品的密度和含水率为标准,分层铺填、夯实至充满样品室内筒;之后以真空泵抽气,使试样直立,撤去内筒、安装压力室、灌水。试验过程采用固结不排水法^[6],分别按设计压力值进行试验,结果见表1,图1为样品1的莫尔圆强度包络线,图2为样品1的应力-应变曲线。

从表1结果来看,室内三轴压缩试验所得内摩擦

角数值较稳定,黏聚力数值稳定性较差。在岩土力学中,通常认为黏聚力为通过岩石(体)抗剪性能表现出来的理论参数,是物质组成、矿物颗粒结构、摩擦、胶结、微裂隙、微孔隙分布等因素影响的结果^[7]。推测因样品组成成分不均匀和尺寸效应等,影响黏聚力稳定性,造成试验结果差距较大。

表1 大型三轴压缩试验结果

样品编号	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	126.00	23.59
2	117.80	23.03
3	146.40	23.60
平均值	130.07	23.41

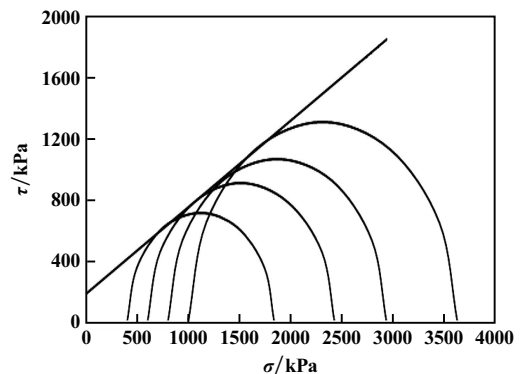


图1 样品组1莫尔圆强度包络线

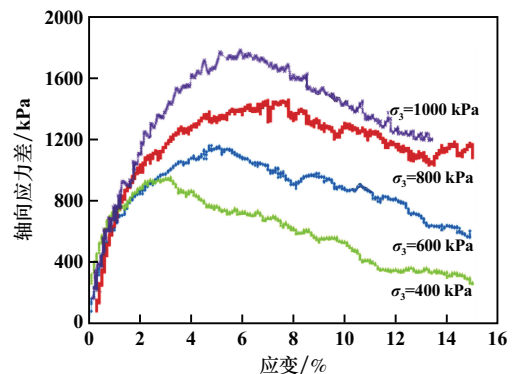


图2 样品组1应力-应变曲线

本文尝试对矿区采取的碎裂结构岩体样品经相似级配原则进行等量替换处理后,进行大型三轴压缩试验,所得黏聚力极差率大于50%,可见在一定样品尺寸条件下,大型三轴压缩试验对样品粒径极大值有限制^[8-9]。对于样品粒径较小的散体状结构岩体,将大型三轴压缩试验所得强度参数应用于边坡稳定性分析时,对内摩擦角敏感度较高的边坡模型可取得较为准确的评价结果,对黏聚力敏感度较高的边坡模型,评价结果准确度相对较低;对于粒径较大的碎裂结构岩体

进行此类试验时,需要较大的样品尺寸,用以避免样品成分不均匀性和尺寸效应等因素造成试验结果偏差过大,这在现场可能造成取样成本过高。

3 基于滑坡反分析的岩体强度参数

在露天矿山,滑坡相当于一次大型岩体原位剪切试验,它是采矿和地质综合作用的结果。一般认为,利用滑坡反分析得到的岩体抗剪强度指标更具代表性^[10]。本文选取发生在采坑西南帮 RAT-1 散体结构边坡岩体的某次滑坡地形数据进行参数反算,滑坡发生的特征剖面见图 3。

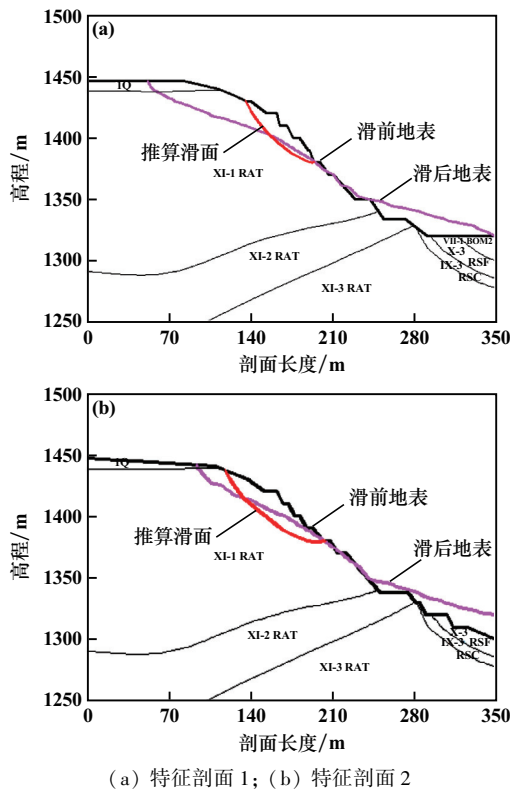


图 3 滑坡特征剖面

假定推算滑面处安全系数为 1.0,对以上剖面进行极限平衡分析试算,得到如图 4 所示的反算指标:黏聚力为 87.0 kPa,内摩擦角为 13.6°。与室内大型三轴压缩试验结果相比,滑坡反分析所得岩体抗剪强度参数显著偏低。从实际工况来看,滑坡体位于坡面浅层,坡面开挖后经历卸荷回弹和风化作用,处于应力松弛状态,与较深部岩体相比,其抗剪强度经历了降低过程;另一方面,经开挖晾晒后,坡面岩体含水量大幅降低,也造成了岩体黏聚力下降。将滑坡反分析结果运用到边坡稳定性分析时,应保持两者所处工况一致,坡面浅层滑坡反分析的结果适于进行局部或单台阶稳定性分析,深层滑坡或由软弱结构面造成的滑坡反分析结果适于进行整体边坡稳定性分析。

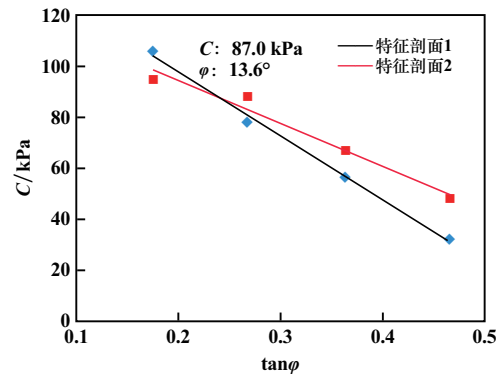


图 4 滑坡反分析曲线

4 基于岩体质量评价和 Hoek-Brown 准则的岩体强度参数

依据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)相关规定,以所研究边坡的勘探、测试及坡面调查等数据为基础,对本文所涉及的边坡岩体进行 RMR 指标赋值和质量评价,赋值过程见表 2。

表 2 边坡岩体质量评价计算表

边坡岩体	完整岩石强度 R_c		RQD		节理间距		节理条件		地下水(现状)		总值	质量等级
	取值/MPa	评分	取值/%	评分	取值/cm	评分	状态	评分	状态	评分		
RAT-1	26.6	4	<25	3	<6	5	节理张开度 1~5 mm,连续展布	10	湿	10	32	差
RAT-2	26.6	4	25~50	8	6~20	8	节理连续,开口宽度 1~5 mm	10	湿	10	40	差
RAT-3	26.6	4	80~95	17	20~60	10	轻微风化,开口宽度小于 1 mm	25	湿	10	66	好

以室内试验得出的岩石物理力学参数和岩体质量评价 RMR 值为依据,采用 Hoek-Brown 强度准则将岩石力学参数进行折减修正后换算成岩体力学参数。Hoek-Brown 强度准则公式如式(1)所示,其中各参数的计算方法如式(2)所示,计算结果见表 3。

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \\ C = \frac{\sigma_c [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}] (s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\begin{cases} m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \\ s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \\ a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \\ \sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_c} \end{cases} \quad (2)$$

式中 σ_{3n} 为最大围岩与岩块单轴抗压强度之比; GSI 为强度指标, $GSI = RMR - 5$; m_i 为完整岩石常数; D 为爆破影响系数; σ_c 为单轴抗压强度, MPa; σ_{3max} 为最大围压, MPa; C 为黏聚力, kPa; φ 为内摩擦角, ($^\circ$)。

表3 Hoek-Brown 强度准则计算表

岩组	GSI	m_i	D	σ_c/MPa	σ_{3max}/MPa	C/kPa	$\varphi/(^\circ)$
RAT-1	27	10	0.9	26.6	0.7	120	23.7
RAT-2	35	10	0.9	26.6	1	180	30.4
RAT-3	61	10	0.9	26.6	1	450	36.68

从计算结果来看, Hoek-Brown 强度准则下的抗剪强度参数与室内大型三轴压缩试验结果接近, 起到了取值方法相互验证的作用。从计算过程来看, Hoek-Brown 强度准则运用现场勘探、坡面调查、室内试验获取的参数, 并结合采矿工艺条件, 综合计算岩体强度参数, 一方面, 考虑因素全面, 对岩石本身强度、节理条件、地下水条件和采矿工艺进行了综合考量; 另一方面, 配合成熟的岩体质量评价和强度折减理论, 可获取各种结构条件下的岩体强度参数。综合来看, Hoek-Brown 强度准则下计算岩体强度参数具有操作性强、适用范围广、周密性好、准确度高优点。

5 岩体强度参数验证

以前述3种方法获取的岩体强度参数, 采用加拿大岩土计算软件 GeoStudio 中的边坡分析模块 GeoSLOPE, 计算如图5所示的滑体在自重+地下水工况下, Morgenstern-Price 法极限平衡条件下的边坡安全系数, 计算结果见表4。从表4可见, 在相同条件下进行极限平衡分析, 应用室内大型三轴压缩试验和 Hoek-Brown 强度准则获取的岩体强度参数所得相同滑面的安全系数相近, 均大于 1.25, 评价边坡处于稳定状态; 应用滑坡反分析获取的岩体强度参数计算所得安全系数小于 1.10, 评价边坡安全储备水平偏低。

结合在计算滑面范围所做的深部岩体位移监测数据(见图6), 监测孔 50 m 深度内监测点历次监测位移

速率均小于 0.2 mm/d, 且随时间延长逐步减小, 至监测后期, 不同深部位移趋势基本接近, 认为所计算边坡体处于稳定状态。证实以室内试验和 Hoek-Brown 强度准则获取的岩体强度参数进行边坡稳定性分析评价准确度较高, 滑坡反分析获取的岩体强度参数所做分析评价结论与监测结果存在偏差。

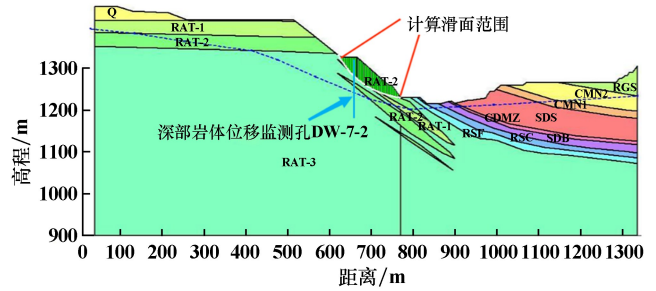


图5 边坡稳定性分析示意图

表4 不同岩体参数取值方法的安全系数对比

岩体参数取值方法	黏聚力/kPa			内摩擦角/($^\circ$)			安全系数
	RAT-1	RAT-2	RAT-3	RAT-1	RAT-2	RAT-3	
室内试验	130.07	180.00*	450.00*	30.40*	450.00*	36.68*	1.256
滑坡反分析	87.00	180.00*	450.00*	30.40*	450.00*	36.68*	1.089
Hoek-Brown	120.00	180.00	450.00	30.40	450.00	36.68	1.339

注: * 表示室内试验及滑坡反分析结果参数均为 Hoek-Brown 强度准则结果参数补齐。

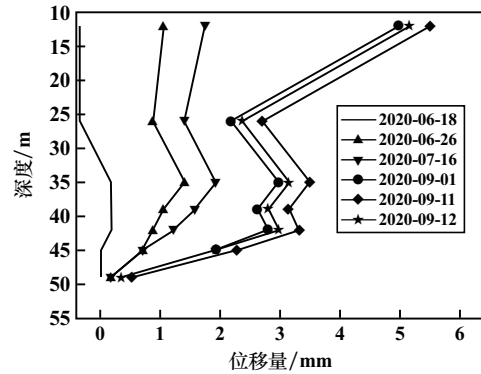


图6 深部位移监测孔 DW-7 数据

6 结论

分别通过室内大型三轴压缩试验、滑坡反分析、岩体质量评价和 Hoek-Brown 准则强度换算等方法获取岩体抗剪强度参数, 进行对比分析和验证, 获得了以下结论:

- 1) 受样品尺寸效应影响, 室内大型三轴压缩试验获取岩体抗剪强度中的黏聚力可能存在偏差; 所得强度参数应用于边坡稳定性分析时, 对摩擦角敏感度较高的边坡模型可取得较为准确的评价结果, 对黏聚力敏感度较高的边坡模型, 评价结果的准确度相对较低。

2) 基于坡面浅层滑坡反分析所得边坡岩体参数,与实际强度水平相比偏低;运用至边坡稳定性分析时,应保持工况条件一致,坡面浅层滑坡反分析的结果适于进行局部或单台阶稳定性分析,深层滑坡或由软弱结构面造成的滑坡反分析结果适于进行整体边坡稳定性分析。

3) Hoek-Brown 强度准则下的抗剪强度参数与室内大型三轴压缩试验结果接近;该准则下计算岩体强度参数具有操作性强、适用范围广、周密性好、准确度高等优点。

参考文献:

- [1] 叶智英,王 滕,梅松华,等. 某长江大桥高峰岸锚碇基础边坡稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):11-15.
- [2] 王 鹏,周传波,郭廖武,等. 基于 FLAC 及神经网络的岩体力学参数反分析[J]. 矿冶工程, 2009,29(2):5-8.
- [3] 谭本兴,罗 荣,唐爱松,等. 川藏铁路工程破碎岩体力学参数取

值研究[J]. 长江科学院院报, 2022,39(6):76-81.

- [4] 张雅贤,侯中杰. 基于支持向量机和贝叶斯方法的岩体参数反分析[J]. 人民长江, 2022,53(6):186-192.
- [5] 杜 俊,程 涌,冯国建,等. 不同堆置状态粗粒土剪切强度试验研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(5):28-32.
- [6] 陈雪松,刘晶辉,白富英. 露天煤矿岩土大三轴试验分析[J]. 露天采煤技术, 2000(4):6-8.
- [7] 石 熊,张家生,彭 状,等. 加筋粗粒土强度变形特性试验研究[J]. 矿冶工程, 2014,34(4):1-5.
- [8] 杜 俊,侯克鹏,程 涌,等. 高台阶排土场粒径分布特征与抗剪强度特性[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):29-33.
- [9] 刘 春. 大冶铁矿岩体力学参数模糊综合评价研究[J]. 矿冶工程, 2005(5):24-27.
- [10] 戴 粤,戴吾蛟,余文坤. 综合地表与深部位移监测数据的滑坡多目标加权位移反分析方法[J]. 测绘学报, 2022,51(10):2149-2159.

引用本文: 刘 宏,董明华,张诏飞,等. 露天矿边坡岩体抗剪强度参数取值方法研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):6-10.

(上接第5页)

2) 钻孔应尽量布置在巷道帮部的中间位置;钻孔深度应穿过塑性区,达到应力最大值位置;钻孔间距选取钻孔水平方向塑性区的距离;钻孔排距不应大于钻孔上下产生的应力降低区范围。

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(16):2803-2813.
- [2] 李向阳,韩立军,宗义江. 深埋软岩巷道破坏机理与控制技术研究[J]. 矿冶工程, 2012,32(6):21-25.
- [3] 付建军,刘泉声,赵海斌,等. 煤矿深部巷道底臌发生机理及防治对策研究[J]. 矿冶工程, 2010,30(5):21-26.
- [4] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [5] 李金奎,刘东生,李学彬,等. 小煤柱应力集中区钻孔卸压效果的

数值模拟[J]. 西安科技大学学报, 2009,29(5):527-530.

- [6] 赵从国. 煤层注水工艺与效果分析[J]. 煤炭科技, 2005(1):45-47.
- [7] 王建军. 袁庄矿回采巷道卸压槽技术研究及应用[D]. 淮南:安徽理工大学能源与安全学院, 2016.
- [8] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2003.
- [9] 王御宇,李学锋,李向东. 深部高应力区卸压开采研究[J]. 矿冶工程, 2005(4):4-7.
- [10] 刘红岗,贺永年,徐金海,等. 深井煤巷钻孔卸压技术的数值模拟与工业试验[J]. 煤炭学报, 2007(1):33-37.
- [11] 张伟杰,兰思栋. 高应力下卸压巷道围岩破坏机理及卸压过程数值分析[J]. 矿冶工程, 2014,34(4):34-38.

引用本文: 汪学清,吴帅军,唐红平,等. 深部巷道钻孔卸压对巷道稳定性的影响及钻孔参数确定[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):1-5.