

剪切速率对岩石节理强度特性的影响

郑博文^{1,2}, 祁生文¹, 詹志发^{1,2}, 邹宇^{1,2}, 张世殊³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要:不同剪切速率下岩体结构面的力学特性研究是进行岩质边坡动力反应分析的重要前提。基于 Barton 峰值抗剪强度理论和均方根一阶导数值法的节理粗糙度系数计算方法, 对前人研究中关于定法向应力条件下不同剪切速率的岩石节理峰值抗剪强度的室内直剪试验结果进行整理与计算, 探究剪切速率对岩石节理总摩擦角的影响规律, 提出与速率相关的岩石节理峰值抗剪强度经验公式。结果表明: 当剪切速率在 $0 \sim 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内时, 岩石节理试样的总摩擦角随剪切速率的变化呈现负对数变化规律; 对于均质性和各向同性较强的岩石节理随剪切速率的增大, 总摩擦角呈现减小趋势, 对于非均质性和各向异性较强的岩石节理随剪切速率的增大, 总摩擦角呈现增大趋势, 且后者总摩擦角增大幅度小于前者的减小幅度; 岩石节理的物性和微观几何形态对总摩擦角随剪切速率的增加而变化的影响较大, 节理面的物性主要影响总摩擦角随剪切速率增加呈现增大或减小的变化趋势, 节理面的微观几何形态主要影响总摩擦角随剪切速率的变化幅值。

关键词:岩石力学; 节理; 直剪试验; 剪切速率; 峰值抗剪强度; 总摩擦角; 微凸体

中图分类号: TU432; TU452

文献标志码: A

Effect of Shear Rate on the Strength Characteristics of Rock Joints

ZHENG Bo-wen^{1,2}, QI Sheng-wen¹, ZHAN Zhi-fa^{1,2}, ZOU Yu^{1,2}, ZHANG Shi-shu³

(1. Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: The study on mechanical characteristics of rock discontinuity under different shear rates is an important premise of rock slope dynamic response analysis. Based on Barton peak shear strength theory and root mean square first-order derivative method calculating joint roughness coefficient, the laboratory direct shear test results of peak shear strength of rock joint under different shear rates with constant normal stress in previous researches were calculated, the effects of shear rate on total friction angle of rock joint were discussed, and the empirical formula of peak shear strength of rock joint related to the shear rate was proposed. The results show that when the shear rates are $0 \sim 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, the total friction angles of rock joint samples vary in the form of negative logarithm with the variation of shear rate; the total friction angles of rock joints decrease with the increase of shear rate for rock joints with relative strong homogeneity and isotropy, and increase with the increase of shear rate for rock joints with relative strong heterogeneity and anisotropy, and the increase range of the latter is less than that of the former; the physical property and

收稿日期: 2015-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41322020, 41172272); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK10B06-02)

作者简介: 郑博文(1987-), 男, 河北乐亭人, 中国科学院大学工学博士研究生, E-mail: zhengbowen@mail.iggcas.ac.cn.

通讯作者: 祁生文(1975-), 男, 宁夏彭阳人, 研究员, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: qishengwen@mail.iggcas.ac.cn.

microscopic geometry of rock joints play an important effect on the variation of total friction angles with the increase of shear rate, the physical property of rock joints plays an important effect on the increase or decrease tendency of total friction angle, and the microscopic geometry of rock joints plays a significant effect on the variation range of total friction angle.

Key words: rock mechanics; joint; direct shear test; shear rate; peak shear strength; total friction angle; asperity

0 引言

岩质边坡动力反应在很大程度上受到结构面的制约,因此,研究结构面的动力特性特别是动力剪切特性是进行岩质边坡动力反应分析的重要前提^[1]。地震荷载既是动荷载也是循环荷载^[2],对于静力条件下稳定的岩质边坡,在地震荷载的动态循环剪切作用下,结构面强度降低,导致坡体沿结构面发生错动或滑移,进而引发地震滑坡,因此,岩体结构面在动态循环剪切荷载作用下的强度劣化及变形机制是进行工程边坡地震防控中亟待解决的关键问题之一。基于上述认识,Plesha 等进行了一些研究工作^[3-11]。刘博等研究了天然岩石节理(或人工岩石节理)在循环荷载作用下的剪切力学行为^[2,12]。Crawford 等对 4 种岩性的节理试样进行剪切速率为 $0\sim 200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的试验,结果表明:在低法向应力下,软岩节理峰值抗剪强度随剪切速率的增加经历先增大后不变再减小的过程;中硬岩石节理的峰值抗剪强度与剪切速率无关;硬岩节理峰值抗剪强度随剪切速率变化显著^[13]。Jafari 等对人工锯齿形岩石节理试样进行剪切速率为 $0.05\sim 0.4\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的试验,结果表明,随着剪切速率的增加,试样的峰值抗剪强度减小;并提出了基于循环加卸载次数和剪切速率的岩石节理峰值抗剪强度经验公式,但该公式缺乏明确的物理意义,不符合莫尔-库仑公式形式^[11]。李海波等对水泥锯齿形节理试样进行剪切速率为 $0.02\sim 0.8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的试验,结果表明,岩石节理的峰值抗剪强度随剪切速率的增大而减小,减小幅度随剪切速率的增大而减小,并提出基于起伏角度和剪切速率的岩石节理峰值抗剪强度经验公式,但该公式仅适用于规则锯齿形人工节理面^[14]。Mirzaghorbanali 等对人工锯齿形节理试样进行剪切速率为 $0.5\sim 20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的定法向刚度试验,结果表明,随着剪切速率的增大,节理峰值抗剪强度降低^[15]。Atapour 等对石膏节理试样和混凝土节理试样进行剪切速率为 $0.005\sim 0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的试验,结果表明,石膏平滑节理试样的总摩擦角随剪切速

率的增加而减小,混凝土平滑节理试样的总摩擦角随剪切速率的增加而增大^[16]。

本文基于 Barton 峰值抗剪强度理论^[17],对文献[13]、[14]和[16]中定法向应力条件下不同剪切速率的岩石节理峰值抗剪强度的室内直剪试验结果进行整理与计算,探究剪切速率对岩石节理总摩擦角的影响规律,提出与速率相关的岩石节理峰值抗剪强度模型。

1 节理试样制备及描述

文献[14]和[16]的试验数据均来自于人工岩石节理试样(水泥节理试样、石膏节理试样和混凝土节理试样)的室内直剪试验(表 1)。文献[13]的室内直剪试验对象为天然岩石节理试样,包括 4 种岩性和 5 组试验,其物理力学参数见表 2。

表 1 人工岩石节理试样

Tab. 1 Preparation of Artificial Rock Joint Samples

试样类型	试样材料质量比	养护时间、温度	试样尺寸/ mm ²	文献来源
水泥节理	水泥与水为 5:2	室温下养护 14 d	150×150	[14]
石膏节理	石膏与水为 5:3	首先灌注进入模型箱里不被扰动 1 h 以达到足够的强度,然后在室温下养护 14 d	116×100	[16]
混凝土节理	水泥、砂与水为 1:1:0.43	首先灌注进入模型箱里不被扰动 24 h 以达到足够的强度,然后放置在 40℃ 水中 4 d,再室温养护 14 d	116×100	[16]

表 2 天然岩石节理物理力学参数

Tab. 2 Physical and Mechanical Parameters of Natural Rock Joints

岩性	正长岩	正长岩	白云岩	砂岩	花岗岩
试验序号	1	2	3	4	5
试样尺寸/mm ²	204×198	197×198	193×191	190×197	200×180
干密度/(g·cm ⁻³)	2.65	2.65	2.43	2.53	2.66
孔隙度/%	1.2	1.2	6.3	3.2	1.2
单轴抗压强度/MPa	97	97	142	198	160
硬度	68	68	47	80	62

注:数据引自文献[13]。

Patton 提出一级起伏体和二级起伏体的概念^[18]。就试样尺寸而言,一级起伏体是节理的总体起伏或宏观起伏,二级起伏体是叠加在一级起伏体上随机分布的局部起伏或微观起伏^[1]。一级起伏体代表了节理面的起伏度,起伏度分为平直的、台阶状的、锯齿状的和波浪状的;二级起伏体代表了节理面的粗糙度,粗糙度包括粗糙的、平滑的和镜面的^[19]。从起伏度和粗糙度两方面对上述节理试样表面形态进行描述(表 3)。

表 3 不同类型节理试样表面形态
Tab. 3 Surface Morphology of Different Joint Samples

试样类型	节理表面形态	文献来源
水泥节理	锯齿平滑	[14]
石膏节理	平直平滑	[16]
混凝土节理	平直平滑	[16]
正长岩节理	平直粗糙	[13]
白云岩节理	平直粗糙	[13]
砂岩节理	平直粗糙	[13]
花岗岩节理	平直粗糙	[13]

2 试验结果整理与计算

除了法向应力之外,总摩擦角是岩石节理抗剪强度的另一个决定性因素,因此,总摩擦角的特征能够代表节理抗剪强度的特征,成为节理抗剪强度研究的焦点。通过分析总摩擦角与剪切速率的关系,探究剪切速率对节理峰值抗剪强度特性的影响。目前,岩石力学界提出了超过 10 个节理峰值抗剪强度公式,如 Patton 强度公式^[20]、Ladanyi 强度公式^[21]、Barton 强度公式^[17]、Jing 强度公式^[22]、Amadei-Saeb 强度公式^[23]、Homand 强度公式^[9]等。其中 Barton 强度公式^[17]形式简单且能够反映节理的粗糙度,是目前应用最为广泛的强度公式。

当 $1 \leq \frac{J_{JCS}}{\sigma_n} \leq 100$ 时,峰值抗剪强度计算公式为

$$\tau = \sigma_n \tan [J_{JRC} \log \frac{J_{JCS}}{\sigma_n} + \varphi_b] \quad (1)$$

对式(1)进行变形,总摩擦角计算公式为

$$\varphi = \arctan \frac{\tau}{\sigma_n} = J_{JRC} \log \frac{J_{JCS}}{\sigma_n} + \varphi_b \quad (2)$$

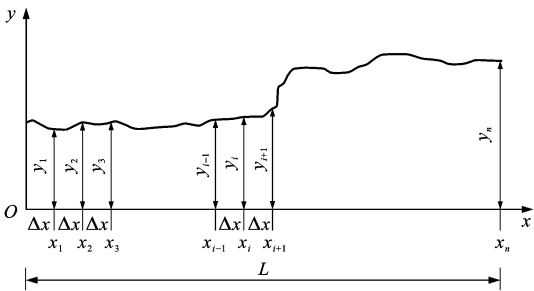
式中: φ 为总摩擦角; τ 为峰值抗剪强度; σ_n 为有效法向应力; J_{JRC} 为节理粗糙度系数; J_{JCS} 为节理壁岩强度,对于未风化节理,取单轴抗压强度值; φ_b 为基本摩擦角。

Barton 等通过 10 条标准粗糙度剖面将节理粗

糙度系数划分为 10 级^[24]。节理粗糙度系数取值为 0~20,通过视觉比较法和试验反分析法得到。为了精确得到节理粗糙度系数,数字测量方法和统计学参数被引入到节理粗糙度系数的计算中,如 Tse 均方根一阶导数值(Z_2)法^[25];Maerz 粗糙度剖面指数(R_p)法^[26];Tse 结构方程(SF)法^[25];Turk 分形(D)法等^[27]。Jang 等对上述计算方法进行比较并优化了基于均方根一阶导数值的节理粗糙度系数计算公式^[28]。均方根一阶导数值计算公式为

$$Z_2 = [\frac{1}{L} \int_0^L (\frac{dy}{dx})^2 dx]^{1/2} = [\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{x_{i+1} - x_i}]^{1/2} = [\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{\Delta x}]^{1/2} \quad (3)$$

式中: y_i 为节理剖面在 x_i 点的高度; L 为节理剖面的水平投影长度,约 100 mm; Δx 为 x_i 点与 x_{i+1} 点的水平间距(图 1); x_i 为水平长度, $i=1,2,\dots,n$ 。



图件引自文献[29]

图 1 节理剖面线统计参数示意

Fig. 1 Diagram of Statistical Parameters
Shown on Joint Profile Lines

节理粗糙度系数与均方根一阶导数值的关系可表示为

$$J_{JRC} = aZ_2^b - c \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 c 为常数,取值与节理剖面取样间距 Δx 有关(表 4)。

表 4 节理粗糙度系数与均方根一阶导数值
的关系式常数取值

Tab. 4 Parameter Choices of the Relationship Between
Joint Roughness Coefficient and Root Mean
Square First-order Derivative

参数	不同取样间隔(mm)条件下参数的值			
	0.1	0.5	1.0	2.0
a	54.57	51.16	53.15	54.14
b	0.394	0.531	0.692	0.650
c	-19.13	-11.44	-6.32	-6.40
R^2	0.962	0.972	0.986	0.990

注:数据引自文献[28]。

当 $\Delta x = 2 \text{ mm}$ 时,判定系数 (R^2) 最大,节理粗糙度系数计算公式为

$$J_{\text{JRC}} = 54.14 Z_2^{0.65} - 6.4 \quad (5)$$

考虑到尺寸效应对峰值抗剪强度的影响,Barton 提出节理粗糙度系数尺寸效应公式^[30],表达式为

$$J_{\text{JRC}} = J_{\text{JRC0}} (L/L_0)^{-0.02 J_{\text{JRC0}}} \quad (6)$$

式中: J_{JRC} 为待研究节理长度 L 的节理粗糙度系数; J_{JRC0} 为节理长度 L_0 的节理粗糙度系数, L_0 一般取 100 mm 。

由于受仪器设备的限制,文献[14]和[16]试验数据的剪切速率均在 $0 \sim 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,而文献[13]的试验数据涵盖剪切速率大于 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的峰值抗剪强度。考虑到试验数据的多元化和广泛性,本文仅研究当剪切速率为 $0 \sim 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,剪切速率对节理总摩擦角的影响规律;基于 Barton 强度理论和均方根一阶导数值的节理粗糙度系数计算方法,提出考虑剪切速率的峰值抗剪强度模型。

Dieterich 提出,当剪切速率为 $0 \sim 0.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,滑动摩擦系数满足下列公式^[31]

$$\mu = \mu_0 + A \log\left(\frac{B d_c}{V} + 1\right) \quad (7)$$

式中: μ 为无量纲滑动摩擦系数; μ_0 为无量纲常数; A 、 B 为与静摩擦强度有关的系数; d_c 为临界位移,与节理粗糙度呈正相关关系; V 为剪切速率。

根据 Atapour 等的结论,当剪切速率在 $0 \sim 0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内时,对于平滑人工岩石节理(节理粗糙度系数为 0),峰值抗剪强度随剪切速率的变化而变化^[16]。根据式(2),可有

$$\varphi = \varphi_b = f(V) \quad (8)$$

式(8)表明基本摩擦角 φ_b 是剪切速率 V 的函数($f(V)$),随剪切速率的变化而变化。因此,基于式(7)对式(2)做出如下假设

$$\left. \begin{aligned} \arctan \frac{\tau}{\sigma} - J_{\text{JRC}} \log \frac{J_{\text{JCS}}}{\sigma} &= \varphi_v \\ \varphi_v &= \varphi_b + A \log \frac{1}{V} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: φ_v 为与速率相关的摩擦角,简称速率摩擦角; $1/V$ 即 $(1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1})/V$,为无量纲变换。

为了验证式(9)的假设是否成立,需要首先确定节理粗糙度系数,考虑节理粗糙度系数尺寸效应,根据式(3)~(6),采取 $\Delta x = 2 \text{ mm}$ 和 $L_0 = 100 \text{ mm}$,对节理粗糙度系数进行延拓(节理粗糙度系数大于 20),得到不同人工岩石节理粗糙度系数;由于天然岩石节理粗糙度系数无法计算^[13],所以根据文献[13]对天然岩石节理粗糙程度的描述估算节理粗糙度系数

(表 5)。白云岩节理试验数据量不足,不予分析。

表 5 不同节理试样的节理粗糙度系数

Tab. 5 Joint Roughness Coefficients of Different Joint Samples

试样类型	节理起伏度	节理粗糙度系数	文献来源
水泥节理	15°锯齿型	14.396	[14]
	30°锯齿型	22.646	[14]
	45°锯齿型	30.588	[14]
石膏节理	平直型	0.000	[16]
混凝土节理	平直型	0.000	[16]
正长岩节理	平直型	5.000	[13]
正长岩节理	平直型	3.000	[13]
砂岩节理	平直型	1.000	[13]
花岗岩节理	平直型	2.000	[13]

根据表 5 和式(9),对不同节理定法向应力条件下不同剪切速率的室内直剪试验数据进行整理,并对相关参数进行计算(表 6)。

3 强度模型分析

由 Barton 强度公式可知,总摩擦角由剪胀角和基本摩擦角两部分组成。在静态或准静态直剪试验中,剪胀角受到节理粗糙度、节理所受法向应力和节理壁岩强度 3 个因素影响。为了研究剪切速率对总摩擦角的影响,排除其他因素的干扰,式(9)引入速率摩擦角,将剪切速率对岩石节理总摩擦角的影响转化为剪切速率对速率摩擦角的影响,多因素变量变成单因素变量,待研究问题得到简化。

根据表 6 和式(9),计算不同剪切速率下不同节理试样的速率摩擦角 φ_v 平均值进行数据拟合(图 2、3)。

从图 2(a)可以看出,水泥节理试样 φ_v 与 $\log(1/V)$ 呈较好的线性关系。其表达式为 $\varphi_v = 1.428 \log(1/V) + 36.432$,截距为 36.432° ,与文献[14]水泥节理基本摩擦角平均值(36.22°)基本相同, R^2 为 0.997 6,因此,前述所做假设式(9)成立。为了分析剪切速率对速率摩擦角变化幅值的影响,考虑室内试验仪器设备的具体情况,规定剪切速率最小值为 $0.001 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当 $V_{\min} = 0.001 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $V_{\max} = 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $\varphi_{v_{\max}} - \varphi_{v_{\min}} = 4.147 9^\circ$ 。

从图 2(b)可以看出,石膏节理试样 φ_v 与 $\log(1/V)$ 呈较好的线性关系。其表达式为 $\varphi_v = 7.435 \log(1/V) + 23.76$, $R^2 = 0.912 8$, $\varphi_{v_{\max}} - \varphi_{v_{\min}} = 21.585 9^\circ$ 。

从图 2(c)可以看出,混凝土节理试样 φ_v 与 $\log(1/V)$ 呈较好的线性关系。其表达式为 $\varphi_v = -1.673 1 \cdot$

表 6 不同节理试样剪切速率在 0~0.8 mm·s⁻¹ 范围内的峰值抗剪强度试验结果

Tab. 6 Experimental Results of Peak Shear Strength for Different Joint Samples with Shear Rates of 0-0.8 mm·s⁻¹

试样类型	剪切速率/(mm·s ⁻¹)	峰值抗剪强度/MPa	法向应力/MPa	J _{JRC}	J _{JCS} 估算值/MPa	arctan(τ/σ)/(°)	J _{JRC} log(J _{JCS} /σ)/(°)
水泥节理	0.020	1.695	1.0	14.396	22.5	59.461	19.467
	0.020	2.390	1.0	22.646	22.5	67.295	30.622
	0.020	2.710	1.0	30.588	22.5	69.746	41.360
	0.020	3.110	2.0	14.396	22.5	57.255	15.133
	0.020	4.208	2.0	22.646	22.5	64.579	23.805
	0.020	4.580	2.0	30.588	22.5	66.410	32.152
	0.020	4.450	3.0	14.396	22.5	56.014	12.598
	0.020	6.289	3.0	22.646	22.5	64.498	19.817
	0.020	6.690	3.0	30.588	22.5	65.847	26.766
	0.100	1.675	1.0	14.396	22.5	59.162	19.467
	0.100	2.330	1.0	22.646	22.5	66.772	30.622
	0.100	2.630	1.0	30.588	22.5	69.182	41.360
	0.100	3.020	2.0	14.396	22.5	56.485	15.133
	0.100	4.020	2.0	22.646	22.5	63.549	23.805
	0.100	4.310	2.0	30.588	22.5	65.107	32.152
	0.100	4.300	3.0	14.396	22.5	55.098	12.598
	0.100	5.960	3.0	22.646	22.5	63.281	19.817
	0.100	6.270	3.0	30.588	22.5	64.430	26.766
	0.400	1.640	1.0	14.396	22.5	58.627	19.467
	0.400	2.290	1.0	22.646	22.5	66.410	30.622
	0.400	2.570	1.0	30.588	22.5	68.739	41.360
	0.400	2.830	2.0	14.396	22.5	54.751	15.133
	0.400	3.810	2.0	22.646	22.5	62.303	23.805
	0.400	4.140	2.0	30.588	22.5	64.215	32.152
	0.400	4.090	3.0	14.396	22.5	53.740	12.598
	0.400	5.790	3.0	22.646	22.5	62.610	19.817
	0.400	5.990	3.0	30.588	22.5	63.397	26.766
	0.800	1.630	1.0	14.396	22.5	58.471	19.467
	0.800	2.280	1.0	22.646	22.5	66.318	30.622
	0.800	2.550	1.0	30.588	22.5	68.587	41.360
	0.800	2.750	2.0	14.396	22.5	53.973	15.133
	0.800	3.750	2.0	22.646	22.5	61.928	23.805
	0.800	4.030	2.0	30.588	22.5	63.606	32.152
	0.800	3.950	3.0	14.396	22.5	52.784	12.598
	0.800	5.610	3.0	22.646	22.5	61.864	19.817
	0.800	5.890	3.0	30.588	22.5	63.009	26.766
石膏节理	0.005	1.430	1.8	0.000	10.5	38.456	0.000
	0.005	0.992	1.2	0.000	10.5	39.589	0.000
	0.005	0.577	0.6	0.000	10.5	43.883	0.000
	0.030	1.346	1.8	0.000	10.5	36.797	0.000
	0.030	0.835	1.2	0.000	10.5	34.831	0.000
	0.030	0.385	0.6	0.000	10.5	32.667	0.000
	0.250	1.137	1.8	0.000	10.5	32.270	0.000
	0.250	0.765	1.2	0.000	10.5	32.518	0.000
	0.250	0.323	0.6	0.000	10.5	28.332	0.000
	0.500	0.918	1.8	0.000	10.5	27.022	0.000
	0.500	0.616	1.2	0.000	10.5	27.188	0.000
	0.500	0.184	0.6	0.000	10.5	17.015	0.000

续表 6

试样类型	剪切速率/(mm·s ⁻¹)	峰值抗剪强度/MPa	法向应力/MPa	J_{JRC}	J_{JCS} 估算值/MPa	$\arctan(\tau/\sigma)/(^{\circ})$	$J_{JRC}\log(J_{JCS}/\sigma)/(^{\circ})$
混凝土 节理	0.005	1.118	1.920	0.000	47.0	30.211	0.000
	0.005	0.781	1.280	0.000	47.0	31.386	0.000
	0.005	0.416	0.640	0.000	47.0	33.007	0.000
	0.030	1.124	1.920	0.000	47.0	30.336	0.000
	0.030	0.719	1.280	0.000	47.0	29.327	0.000
	0.030	0.510	0.640	0.000	47.0	38.550	0.000
	0.250	1.258	1.920	0.000	47.0	33.242	0.000
	0.250	0.848	1.280	0.000	47.0	33.534	0.000
	0.250	0.478	0.640	0.000	47.0	36.728	0.000
	0.500	1.287	1.920	0.000	47.0	33.824	0.000
	0.500	0.865	1.280	0.000	47.0	34.055	0.000
	0.500	0.472	0.640	0.000	47.0	36.404	0.000
正长岩 节理,前 向剪切	0.050	2.020	2.476	5.000	97.0	39.206	7.965
	0.200	2.044	2.476	5.000	97.0	39.537	7.965
	0.780	2.072	2.476	5.000	97.0	39.921	7.965
正长岩 节理,后 向剪切	0.050	2.029	2.476	5.000	97.0	39.343	7.965
	0.200	2.070	2.476	5.000	97.0	39.898	7.965
	0.780	2.083	2.476	5.000	97.0	40.079	7.965
正长岩 节理,前 向剪切	0.100	2.028	2.564	3.000	97.0	38.340	4.734
	0.100	1.052	1.282	3.000	97.0	39.380	5.637
	0.200	2.087	2.564	3.000	97.0	39.154	4.734
	0.780	2.099	2.564	3.000	97.0	39.308	4.734
	0.780	1.095	1.282	3.000	97.0	40.516	5.637
	0.780	0.598	0.641	3.000	97.0	43.013	6.540
正长岩 节理,后 向剪切	0.100	2.064	2.564	3.000	97.0	38.843	4.734
	0.100	1.083	1.282	3.000	97.0	40.181	5.637
	0.200	2.103	2.564	3.000	97.0	39.358	4.734
	0.200	1.108	1.282	3.000	97.0	40.831	5.637
	0.780	2.101	2.564	3.000	97.0	39.337	4.734
	0.780	0.598	0.641	3.000	97.0	43.013	6.540
砂岩 节理,前 向剪切	0.100	0.676	1.336	1.000	198.0	26.858	2.171
	0.200	0.626	1.336	1.000	198.0	25.124	2.171
	0.780	0.596	1.336	1.000	198.0	24.028	2.171
砂岩 节理,后 向剪切	0.100	0.386	0.668	1.000	198.0	30.043	2.472
	0.200	0.392	0.668	1.000	198.0	30.416	2.472
	0.780	0.698	1.336	1.000	198.0	27.599	2.171
花岗岩 节理,前 向剪切	0.100	1.067	1.263	2.000	160.0	37.530	4.123
	0.200	1.078	1.263	2.000	160.0	37.806	4.123
	0.200	0.529	0.631	2.000	160.0	37.311	4.725
	0.780	2.161	2.525	2.000	160.0	37.876	3.521
	0.780	1.102	1.263	2.000	160.0	38.428	4.123
	0.780	0.550	0.631	2.000	160.0	38.401	4.725
花岗岩 节理,后 向剪切	0.100	2.097	2.778	2.000	160.0	37.054	3.521
	0.200	2.133	2.778	2.000	160.0	37.526	3.521
	0.200	1.026	1.389	2.000	160.0	36.441	4.123
	0.200	0.536	0.694	2.000	160.0	37.676	4.725
	0.780	2.142	2.778	2.000	160.0	37.643	3.521
	0.780	1.082	1.389	2.000	160.0	37.922	4.123
	0.780	0.527	0.694	2.000	160.0	37.169	4.725

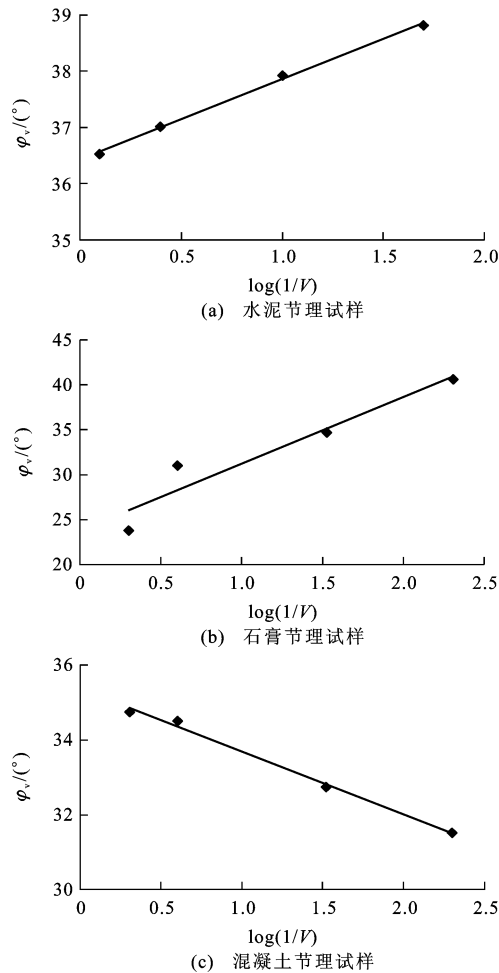


图2 人工岩石节理试样速率摩擦角与 $\log(1/V)$ 的关系

Fig. 2 Relationships Between Rate Friction Angle and $\log(1/V)$ for Artificial Rock Joint Samples

$\log(1/V) + 35.361, R^2 = 0.9947, \varphi_{v\max} - \varphi_{v\min} = 4.8572^\circ$ 。

从图3(a)可以看出,正长岩节理($J=5$)试样 φ_v 与 $\log(1/V)$ 呈较好的线性关系。对于前向剪切,其表达式为 $\varphi_v = -0.6175\log(1/V) + 32.242, R^2 = 0.9234, \varphi_{v\max} - \varphi_{v\min} = 1.7927^\circ$ 。对于后向剪切,其表达式为 $\varphi_v = -0.5989\log(1/V) + 32.01, R^2 = 0.9977, \varphi_{v\max} - \varphi_{v\min} = 1.7387^\circ$ 。

从图3(b)可以看出,正长岩节理($J=3$)试样 φ_v 与 $\log(1/V)$ 呈较好的线性关系。对于前向剪切,其表达式为 $\varphi_v = -1.0873\log(1/V) + 34.929, R^2 = 0.8323, \varphi_{v\max} - \varphi_{v\min} = 3.1565^\circ$ 。对于后向剪切,其表达式为 $\varphi_v = -1.3172\log(1/V) + 35.718, R^2 = 0.9735, \varphi_{v\max} - \varphi_{v\min} = 3.8240^\circ$ 。

从图3(c)可以看出,砂岩节理试样 φ_v 与 $\log(1/V)$ 呈较好的线性关系。对于前向剪切,其表达式为 $\varphi_v = 2.9885\log(1/V) + 21.366, R^2 = 0.9039, \varphi_{v\max} -$

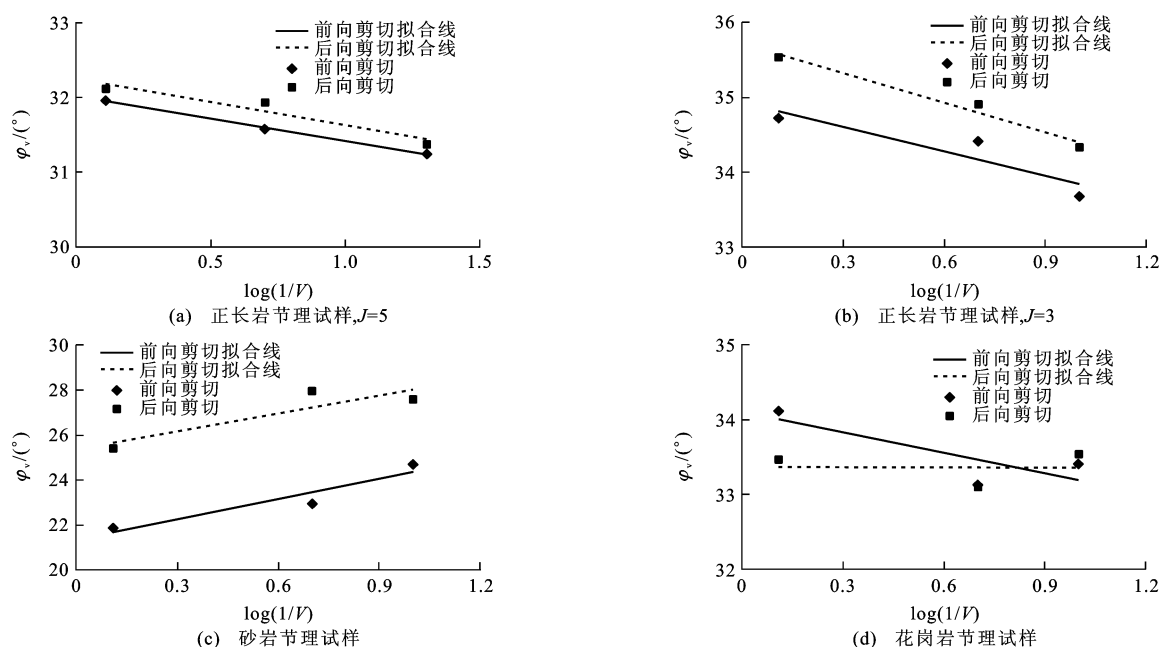
$\varphi_{v\min} = 8.6759^\circ$ 。对于后向剪切,其表达式为 $\varphi_v = 2.6594\log(1/V) + 25.379, R^2 = 0.79, \varphi_{v\max} - \varphi_{v\min} = 7.7205^\circ$ 。

从图3(d)可以看出,花岗岩速率摩擦角 φ_v 与 $\log(1/V)$ 的线性关系不强。

对于人工岩石节理试样,当剪切速率在 $0 \sim 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内时,随着剪切速率的增加,不同节理试样呈现不同的规律:混凝土节理试样速率摩擦角与剪切速率的负对数呈较好的线性增大关系,根据拟合后的公式计算得到的速率摩擦角最大值与最小值之间相差 5° ;石膏节理试样和水泥节理试样的速率摩擦角与剪切速率的负对数均呈较好的线性减小关系,根据拟合后的公式计算得到的速率摩擦角最大值与最小值之间分别相差 22° 和 4° 。对于天然岩石节理试样,当剪切速率在 $0 \sim 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内时,随着剪切速率的增加,不同节理试样呈现不同的规律:砂岩速率摩擦角与剪切速率的负对数呈较好的线性减小关系,根据拟合后的公式计算得到的速率摩擦角最大值与最小值的差值较大,为 $8^\circ \sim 9^\circ$;正长岩速率摩擦角与剪切速率的负对数呈较好的线性增大关系,根据拟合后的公式计算得到的速率摩擦角最大值与最小值的差值较小,为 $2^\circ \sim 4^\circ$;花岗岩速率摩擦角最大值与最小值之差小于 1° ,基本不变。

基于上述结果,无论是人工岩石节理还是天然岩石节理,当剪切速率在 $0 \sim 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内时,剪切速率对速率摩擦角(即总摩擦角)的影响较大,究其原因因为节理上、下表面含有的大量微观二级起伏体,而在节理粗糙度系数经验取值和公式计算值中均无法很好地反映这些微凸体。实际上,节理上、下表面通过微凸体相互接触,微凸体的存在使得节理面间的真实接触面积较小,微凸体的接触方式和破坏模式决定了节理面的接触行为和力学特性。当剪切速率发生变化时,微凸体的接触方式和破坏模式发生变化,使得节理总摩擦角随之增大或减小。当剪切速率较低时,微凸体间的接触时间增加,微凸体变形使节理面间的真实接触面积增大^[16],微凸体间的互锁作用增强,即节理面间的内锁程度增大,因此,需要更大的剪切力克服节理面间的内锁作用,使节理峰值抗剪强度增大。当剪切速率增加时,微凸体变形时间减少,微凸体间的接触面积减小,节理面间的内锁程度下降^[16],导致抗剪强度降低,因此,随着剪切速率增加,水泥、石膏和砂岩节理试样的总摩擦角减小,且减小幅值较大。

对于混凝土节理试样和正长岩节理试样,随着

图3 天然岩石节理试样速率摩擦角与 $\log(1/V)$ 的关系Fig. 3 Relationships Between Rate Friction Angle and $\log(1/V)$ for Natural Rock Joint Samples

剪切速率增加,总摩擦角增大。从基体材料的角度分析,混凝土节理和正长岩节理微凸体具有较水泥节理、石膏节理和砂岩节理的微凸体更强的非均质性和各向异性,因此,微凸体的强度存在差异。当节理面的微凸体相互接触时,由于微凸体存在强度差异,强度较大的微凸体被压入强度较小的微凸体。当剪切速率较低时,微凸体间接触的时间增加,较强微凸体被挤压嵌入较弱微凸体的比例增大,较弱微凸体被破坏,节理面的较强微凸体发挥主要的阻滑和抗剪断作用。当剪切速率增加时,微凸体间没有充分的时间相互挤压嵌入,除了节理面微凸体间的阻滑作用外,剪切力还要克服强、弱微凸体共同的抗剪断作用,加之节理面旧微凸体被剪断后新微凸体裸露,使节理面的非均质性和各向异性增强,导致强、弱微凸体的共同抗剪作用进一步增大,从而可能造成总摩擦角随剪切速率的增加而增大。另外,天然岩石节理前向剪切和后向剪切试验的总摩擦角随剪切速率的变化趋势相同,但变化幅值存在差异,主要原因在于只有面向剪切方向的微凸体接触面对节理的抗剪行为发挥主要作用。

总之,节理面的物性和微观几何形态对改变剪切速率情况下总摩擦角的变化产生重要影响,节理面的物性主要影响总摩擦角随剪切速率增加呈增大或减小的变化趋势,而节理面的微观几何形态主要影响总摩擦角随剪切速率的变化幅值。

基于以上分析,当剪切速率在 $0 \sim 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

范围内时,总摩擦角计算公式为

$$\varphi = \log\left[\frac{J_{\text{JCS}}^{J_{\text{JRC}}}}{\sigma_{\text{JRC}}}\left(\frac{1}{V}\right)^C\right] + \varphi_b \quad (10)$$

对式(10)进行变形,得到与速率相关的峰值抗剪强度公式

$$\tau = \sigma \tan\left\{\log\left[\frac{J_{\text{JCS}}^{J_{\text{JRC}}}}{\sigma_{\text{JRC}}}\left(\frac{1}{V}\right)^C\right] + \varphi_b\right\} \quad (11)$$

式中: C 为与节理试样物性和微观几何形态有关的系数。

4 结 语

(1)基于均方根一阶导数值法的节理粗糙度系数计算方法对 Barton 提出的节理粗糙度系数进行延拓,利用 Barton 强度理论对前人关于定法向应力条件下不同剪切速率的岩石节理峰值抗剪强度的室内直剪试验结果进行整理与计算。结果表明:当剪切速率在 $0 \sim 0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内时,岩石节理试样的总摩擦角随剪切速率的变化呈现负对数变化规律。

(2)对于均质性和各向同性较强的节理(如石膏、水泥和砂岩节理等)随剪切速率的增大,总摩擦角减小;对于非均质性和各向异性较强的节理(如混凝土、正长岩节理等)随剪切速率的增大,总摩擦角增大;后者总摩擦角增大幅度小于前者的减小幅度。

(3)岩石节理的物性和微观几何形态对总摩擦角随剪切速率呈增大或减小趋势及幅值变化情况产

生重要影响。

(4)由于仪器设备的限制,剪切速率大于 $0.8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的试验数据较少,本文所涉及剪切试验数据的剪切速率在 $0\sim 0.8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内;总摩擦角随剪切速率的变化规律具有一定的局限性,但本文的工作可为与速率相关的岩石节理剪切力学特性研究提供一些参考。

参考文献:

References:

- [1] 祁生文,伍法权,严福章,等.岩质边坡动力反应分析[M].北京:科学出版社,2007.
QI Sheng-wen, WU Fa-quan, YAN Fu-zhang, et al. Rock Slope Dynamic Response Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [2] 刘博,李海波,朱小明.循环剪切荷载作用下岩石节理强度劣化规律试验模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2033-2039.
LIU Bo, LI Hai-bo, ZHU Xiao-ming. Experiment Simulation Study of Strength Degradation of Rock Joints Under Cyclic Shear Loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2033-2039.
- [3] PLESHA M E. Constitutive Models for Rock Discontinuities with Dilatancy and Surface Degradation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1987, 11(4): 345-362.
- [4] HUTSON R W, DOWDING C H. Joint Asperity Degradation During Cyclic Shear[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1990, 27(2): 109-119.
- [5] JING L, NORDLUND E, STEPHANSSON O. An Experimental Study on the Anisotropy and Stress-dependency of the Strength and Deformability of Rock Joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1992, 29(6): 535-542.
- [6] JING L, STEPHANSSON O, NORDLUND E. Study of Rock Joints Under Cyclic Loading Conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, 26(3): 215-232.
- [7] HUANG X, HAIMSON B C, PLESHA M E, et al. An Investigation of the Mechanics of Rock Joints; Part I. Laboratory Investigation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(3): 257-269.
- [8] QIU X, PLESHA M E, HUANG X, et al. An Investigation of the Mechanics of Rock Joints; Part II. Analytical Investigation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(3): 271-287.
- [9] HOMAND F, BELEM T, SOULEY M. Friction and Degradation of Rock Joint Surfaces Under Shear Loads[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25(10): 973-999.
- [10] LEE H S, PARK Y J, CHO T F, et al. Influence of Asperity Degradation on the Mechanical Behavior of Rough Rock Joints Under Cyclic Shear Loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 967-980.
- [11] JAFARI M K, HOSSEINI K A, PELLET F, et al. Evaluation of Shear Strength of Rock Joints Subjected to Cyclic Loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(7): 619-630.
- [12] 刘博,李海波,刘亚群.循环剪切荷载作用下岩石节理变形特性试验研究[J].岩土力学,2013,34(9):2475-2488.
LIU Bo, LI Hai-bo, LIU Ya-qun. Experimental Study of Deformation Behavior of Rock Joints Under Cyclic Shear Loading[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2475-2488.
- [13] CRAWFORD A M, CURRAN J H. The Influence of Shear Velocity on the Frictional Resistance of Rock Discontinuities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(6): 505-515.
- [14] 李海波,冯海鹏,刘博.不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2435-2440.
LI Hai-bo, FENG Hai-peng, LIU Bo. Study on Strength Behaviors of Rock Joints Under Different Shearing Deformation Velocities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2435-2440.
- [15] MIRZAGHORBANALI A, NEMCIK J, AZIZ N. Effects of Shear Rate on Cyclic Loading Shear Behaviour of Rock Joints Under Constant Normal Stiffness Conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1931-1938.
- [16] ATAPOUR H, MOOSAVI M. The Influence of Shearing Velocity on Shear Behavior of Artificial Joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1745-1761.
- [17] BARTON N. Review of a New Shear-strength Criterion for Rock Joints[J]. Engineering Geology, 1973, 7(4): 287-332.

- [18] PATTON F D. Multiple Modes of Shear Failure in Rock and Related Materials[D]. Urbana: University of Illinois, 1966.
- [19] 夏才初. 岩石结构面的表面形态特征研究[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 71-78.
XIA Cai-chu. A Study of the Surface Morphological Features of Rock Structural Faces[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(3): 71-78.
- [20] PATTON F D. Multiple Modes of Shear Failure in Rock[C]// International Society for Rock Mechanics. The 1st ISRM Congress. Lisbon: International Society for Rock Mechanics, 1966: 509-513.
- [21] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Simulation of Shear Behavior of a Jointed Rock Mass[C]// American Rock Mechanics Association. The 11th US Symposium on Rock Mechanics(USRMS). Berkeley: American Rock Mechanics Association, 1969: 105-125.
- [22] JING L. Numerical Modelling of Jointed Rock Masses by Distinct Element Method for Two- and Three-dimensional Problems[D]. Lulea: Lulea University of Technology, 1990.
- [23] SAEB S, AMADEI B. Modelling Rock Joints Under Shear and Normal Loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1992, 29(3): 267-278.
- [24] BARTON N, CHOUBEY V. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1/2): 1-54.
- [25] TSE R, CRUDEN D M. Estimating Joint Roughness Coefficients[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1979, 16(5): 303-307.
- [26] MAERZ N H, FRANKLIN J A, BENNETT C P. Joint Roughness Measurement Using Shadow Profilometry[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1990, 27(5): 329-343.
- [27] TURK N, GREIG M J, DEARMAN W R, et al. Characterization of Rock Joint Surfaces by Fractal Dimension[C]// American Rock Mechanics Association. The 28th US Symposium on Rock Mechanics(USRMS). Tucson: American Rock Mechanics Association, 1987: 1223-1236.
- [28] JANG H S, KANG S S, JANG B A. Determination of Joint Roughness Coefficients Using Roughness Parameters[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(6): 2061-2073.
- [29] KULATILAKE P H S W, SHOU G, HUANG T H, et al. New Peak Shear Strength Criteria for Anisotropic Rock Joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(7): 673-697.
- [30] BARTON N, BANDIS S. Effects of Block Size on the Shear Behaviour of Jointed Rock[R]. Berkeley: American Rock Mechanics Association, 1982.
- [31] DIETERICH J H. Time-dependent Friction and the Mechanics of Stick-slip[J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116(4/5): 790-806.

《地球科学与环境学报》2016 年再次增加页码的通告

《地球科学与环境学报》从 2016 年第 1 期起每期页码由 112 页变更为 144 页, 欢迎广大作者踊跃投稿!

《地球科学与环境学报》作为教育部主管、长安大学主办的地球科学与环境领域的权威性学术刊物, 长期以来一直受到广大地球科学与环境领域科研工作者的关爱, 学术质量不断提高, 影响力不断扩大, 投稿量不断增加。为了进一步缩短论文发表时滞, 使地球科学与环境领域的学术成果更多、更快地发表, 打造更权威的地球科学与环境领域学术交流平台, 编辑部继 2013 年、2014 年连续两年增加页码以及 2015 年变更为双月刊之后决定再次扩容, 从 2016 年第 1 期起每期页码由 112 页变更为 144 页。