

DOI: 10.11779/CJGE201803024

一种用于计算 JRC 的节理面起伏形态表征方法

赵志鹏¹, 马 明¹, 王 刚^{*1, 2}, 王 珂¹

(1. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室(山东科技大学), 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘要: 通过间隔取样的方式将 Barton 所提出的十条标准 JRC 曲线离散化, 获取其离散数据点后尝试不同的函数形式对离散数据点进行拟合, 探求能够描述节理面剖面线起伏形态的函数表达式。在获取节理剖面线的近似函数表达式后用其计算标准 JRC 曲线的节理参数。分析对比拟合结果与节理参数计算结果发现: 节理面剖面线具有较强的三角函数特性, 利用正弦函数逼近获取的近似函数表达式在形态上可以很好地表征节理面的起伏情况, 并可以近似代替节理曲线对 JRC 值进行计算, 其结果相比较于通过离散点得到的计算结果更为精确。这也为进一步利用 JRC-JCS 模型准确计算节理面剪切强度奠定了基础。

关键词: 岩石力学; 岩石节理; JRC; 剪切强度; 离散间距

中图分类号: TU431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)03-0576-07

作者简介: 赵志鹏(1992-), 男, 硕士研究生, 山东莱芜人, 主要从事岩石力学与工程方面的科研工作。E-mail: 9946030@qq.com。

New method of joint surface morphology for calculating JRC

ZHAO Zhi-peng¹, MA Ming¹, WANG Gang^{1, 2}, WANG Ke¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to explore the expression that well describes the fluctuations of the section line of joints, ten typical JRC curves proposed by Barton are discretized by using the interval sampling, and then the discrete data points are fitted by different functions. The expression obtained from the fitting of the data is used to calculate the joint parameters of the standard JRC curve. Comparison between the results of the fitting and the calculated values of the joint parameters shows that the section line of the joint conforms to the trigonometric function. The approximate function obtained by the sine function approximation can well characterize the fluctuation of the joint. The values of JRC calculated by the approximate joint curve replaced by the sine approximate function are more accurate than those obtained by using the discrete points. This also makes it possible to accurately estimate the joint shear strength by using the JRC-JCS model.

Key words: rock mechanics; rock joint; JRC; shear strength; sampling interval

0 引言

在人们赖以生存的自然界中, 存在着大量的天然岩体, 人类在生存发展过程中不可避免地需要对各类岩体进行改造。而天然岩体中大量存在的节理面是影响岩体物理力学性质的重要因素, 探究节理面对岩石强度的影响规律对岩土工程技术的发展具有重要意义。而节理面粗糙度与节理面剪切强度息息相关。这就需要对节理面粗糙度系数 JRC 进行合理有效地计算。

为了测量岩石节理面的粗糙度系数 JRC, 首先应获取节理面的表面轮廓形态。从 Barton 等^[1-2]提出可

以对比测量节理面粗糙度系数的十条标准 JRC 曲线以及估算节理面剪切强度的 JRC-JCS 模型以来, 已经发展出多种方法来测量与计算节理面粗糙度系数^[3-9]。Gadelmawla 等^[10]列举了描述节理面形态的 59 个参数; Tse 等^[3]研究了 11 个节理参数与 JRC 值的关系; Li 等^[11]对众多节理参数的符号进行了规范化并优化了各节理参数与粗糙度系数 JRC 之间的计算公式; 部

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51479108, 51379117); 中国博士后科学基金面上项目(2015M580599)

收稿日期: 2017-05-25

*通讯作者(wanggang1110@gmail.com)

分学者^[14-17]将分形理论引进到岩石力学中用来评价 JRC 的大小并取得了较好的成果。

但现有的计算方法计算节理参数时均依赖于一定离散间距的离散点进行计算。孙辅庭等^[12]探索了部分节理参数与离散间距之间的关系,发现节理参数与离散间距呈现一定的幂函数关系,并尝试建立了独立于离散间距的 JRC 计算方法。部分学者虽然提出了积分形式的节理参数计算公式,但由于天然岩石节理面的复杂性与多样性,并不能给出节理剖面线的函数表达式。因此在使用时只能将其简化成基于离散点的计算形式。

而在实验室或者工程现场条件下获取的节理面剖面线离散点,离散间距不一,造成最终的计算结果存在较大偏差。为了消除离散间距对节理参数的影响,这就需要对节理剖面线进行函数化的表征,在得出合理的节理剖面线函数表达式后,再用其代替节理面剖面线来进行节理参数的计算,从而消除离散间距对计算结果的影响。

本文将对以 Barton 所提出的十条标准 JRC 曲线为代表的节理剖面线进行研究,探究可以适用于复杂节理曲线的节理面 JRC 值计算方法。由于 Barton 所提出的十条标准 JRC 曲线均来源于复杂的天然节理面,因此,可以认为对于十条标准 JRC 曲线所适用的计算方法,对于天然岩体节理面同样是适用的。

首先将十条标准 JRC 曲线按照一定的离散间距进行离散,然后尝试不同的拟合方式对离散点进行拟合,探究节理剖面线起伏形态的函数表达式。进而利用节理剖面线的函数表达式对节理参数进行计算,与基于离散点的计算结果对比,探究其节理参数计算结果与 JRC 值的关系。

1 节理面剖面线离散数据点拟合

1.1 离散数据点的获取

选取 Barton 所提出的十条标准 JRC 曲线作为研究对象,以其中区分度较高的第 6, 8 条曲线为代表,研究各拟合方法对离散点的拟合情况。

首先利用 CAD 软件分割取样^[12],用一定的取样间隔将十条标准 JRC 曲线进行离散化,获得标准 JRC 曲线的离散点图。由于 Barton 所提出的十条标准 JRC 曲线在取样时选取的取样间隔为 0.5 mm,而在计算中发现当取样间隔大于 1 mm 时又会产生较大误差,因此取样间隔适宜在 0.5~1 mm 内选取。然后对 10 条标准 JRC 曲线进行拟合,获取其拟合曲线。

这里,选取以第 6, 8 条曲线为代表的散点图进行对比分析,见图 1。

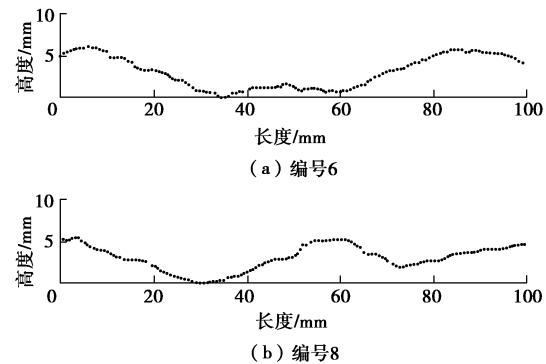


图 1 标准 JRC 剖面线离散点图

Fig. 1 Scattered points of typical JRC profiles

1.2 离散数据点的拟合

为了获取连续的节理剖面线函数表达式,分别对 10 条标准 JRC 曲线的离散数据点进行拟合。并分别尝试指数逼近、傅里叶级数逼近、高斯逼近、多项式逼近、正弦曲线逼近对数据点进行拟合,使用计算机辅助计算获取其拟合函数。

在离散点数量不变的情况下,通过提高拟合项数来提高逼近精度。但在拟合项数达到 10 以后,计算精度变化开始趋于稳定,且随着项数的增大,其计算速度会有所减慢,因此一般考虑项数在 10 以下的拟合。考虑计算速度与精确性,对拟合项数进行选取,见表 1, 2。

表 1 各拟合方式不同项数的决定系数(曲线 6)

Table 1 Coefficients of determination of different numbers of different fitting methods (Curve No. 6)

项数	拟合方式				
	指数逼近	傅里叶级数逼近	高斯逼近	多项式逼近	正弦曲线逼近
1	0.0286	0.9260		0.0143	0.0142
2	0.7492	0.9436	0.9582	0.7870	0.9364
3		0.9826	0.9736	0.8425	0.9834
4		0.9842	0.9594	0.9436	0.9927
5		0.9931	0.9704	0.9436	0.9929
6		0.9949	0.9790	0.9603	0.9949
7		0.9954	0.9744	0.9679	0.9962
8		0.9957	0.9962	0.9760	0.9966
9				0.9769	

表 2 各拟合方式不同项数的决定系数(曲线 8)

Table 2 Coefficients of determination of different numbers of different fitting methods (Curve No. 8)

项数	拟合方式				
	指数逼近	傅里叶级数逼近	高斯逼近	多项式逼近	正弦曲线逼近
1	0.0590	0.6186	0.0590	0.0488	0.0486
2	0.4083	0.9346	0.5573	0.2118	0.4286
3		0.9572	0.9658	0.4395	0.9423
4		0.9676	0.6172	0.6050	0.9653
5		0.9814	0.9792	0.7249	0.9834
6		0.9833	0.9803	0.8619	0.9858
7		0.9836	0.9799	0.9161	0.9860
8		0.9841	0.9735	0.9351	0.9883
9				0.9657	

以编号 6 与编号 8 为代表的各拟合函数基本形式及拟合图像如下:

(1) 指数逼近, 其基本形式为

$$y = ae^{bx} + ce^{dx}, \quad (1)$$

采用二项指数形式 (见图 2), 其中 a, b, c, d 均为常数项。

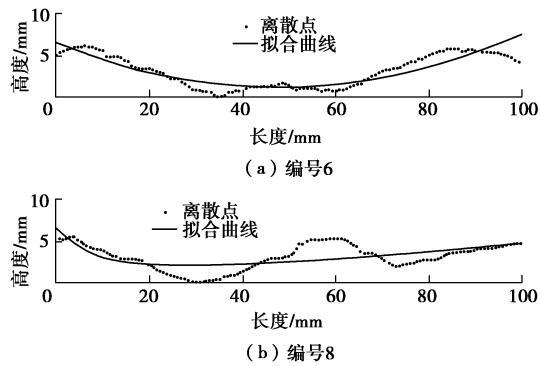


图 2 指数逼近拟合曲线

Fig. 2 Fitted curve of exponential

(2) 傅里叶级数逼近, 其基本形式为

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(nwx) + b_i \sin(nwx), \quad (2)$$

采用 8 项傅里叶级数的形式 (见图 3), 其中 a 为基于 $i=0$ 的余弦常数, w 为基本频率, n 为项数。该方法将一系列正弦与余弦函数相加, 因此该方法具有较强的周期性。

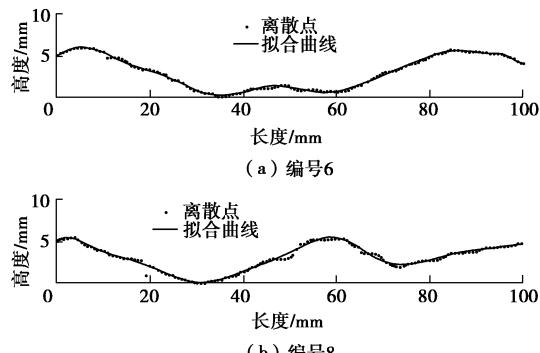


图 3 傅里叶级数逼近拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of Fourier method

(3) 高斯逼近, 其基本形式为

$$y = \sum_{i=1}^n a_i e^{-\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)^2}, \quad (3)$$

其中, a 为振幅, b 为形心位置, c 为相关峰宽, n 为拟合峰数, 这里采用有 8 个峰的 8 项高斯逼近 (见图 4)。

(4) 多项式逼近, 其基本形式为

$$y = \sum_{i=1}^{n+1} p_i x^{n+1-i}, \quad (4)$$

采用 9 次多项式逼近 (见图 5), 其中 p_i 为常数项, n 为多项式次数。

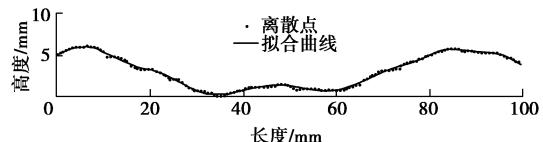


图 4 高斯逼近拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of Gaussian method

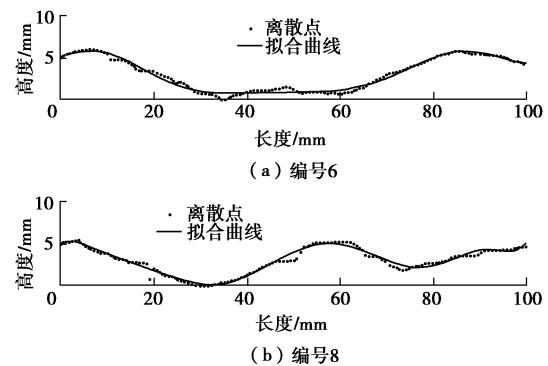


图 5 多项式逼近拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of polynomial method

(5) 正弦曲线逼近, 其基本形式为

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \sin(b_i x + c_i), \quad (5)$$

采用 8 项正弦函数逼近 (见图 6), 其中 a 为振幅, b 为频率, c 为相位常数, n 为正弦函数项数。

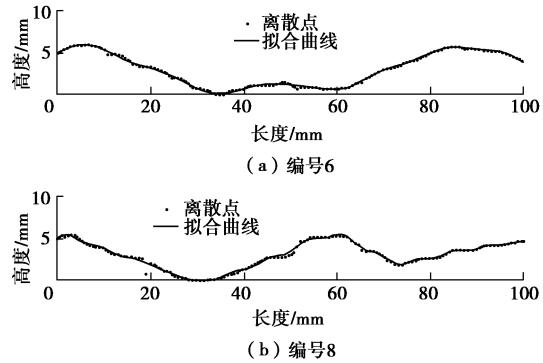


图 6 正弦曲线逼近拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of sum of sine function

对各方法的拟合结果进行分析, 其决定系数 R^2 见表 3。

表 3 各拟合方式决定系数

Table 3 Coefficients of determination by different fitting methods

编号	指数逼近	拟合方式及其决定系数 R^2			
		傅里叶逼近	高斯逼近	多项式逼近	正弦曲线逼近
1	0.0858	0.8616	0.6867	0.7286	0.8945
2	0.7332	0.9394	0.9555	0.8902	0.9486
3	0.2062	0.9126	0.7921	0.7273	0.9281
4	0.6280	0.9197	0.8603	0.8080	0.9420
5	0.6608	0.9807	0.9806	0.9464	0.9866
6	0.7492	0.9957	0.9962	0.9769	0.9966
7	0.6649	0.9892	0.9274	0.9321	0.9953
8	0.4083	0.9841	0.9735	0.9657	0.9883
9	0.7003	0.9814	0.9465	0.9000	0.9847
10	0.2892	0.9227	0.9538	0.6866	0.9470

通过对比分析拟合曲线与其对应的决定系数 R^2 可以发现, 指数逼近、多项式逼近两种方法的拟合度较低且不稳定, 当 JRC 曲线的起伏趋于复杂化时, 其拟合程度显著降低。多项式逼近的拟合曲线虽然与离散数据点的走向较为一致, 但在对描述节理面粗糙度有关键性影响的细节起伏方面相关性较差。两种方法明显的不适合来描述节理面的起伏情况。但是, 指数

逼近的拟合函数形式较为简洁明了, 在对精度要求不高或只是用来分级确定节理面粗糙度的时候可适当考虑使用。

傅里叶逼近与高斯逼近的拟合度相对较高且拟合曲线与原节理面剖面线的相似度相对较高。但这两种方法在节理面剖面线起伏程度变化较大时, 拟合度开始出现较为明显的下降, 而且其拟合公式过于复杂。分析图 4 (b) 可知, 基于高斯逼近的拟合曲线, 在局部变化较大时, 会出现局部曲线的严重偏移, 因此不适合描述节理曲线的起伏情况。

用正弦曲线逼近对节理面剖面线进行拟合的拟合效果相对较好。且该方法的拟合稳定性较好, 随着节理面剖面线趋于复杂化, JRC 的提高, 其拟合度降低幅度较小, 具有较好的适用性。且其拟合公式相对傅里叶逼近、高斯逼近等方法都较为简洁, 便于后续的分析计算。

综上所述, 选取正弦函数逼近的方式来对节理面剖面线离散数据点进行拟合。求得其拟合函数, 各曲线拟合函数表达式的各项系数见表 4。

表 4 标准 JRC 曲线正弦函数拟合结果

Table 4 Fitting results of typical JRC profiles by sum of sine function

系数	标准 JRC 曲线编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R^2	0.8945	0.9486	0.9281	0.9420	0.9866	0.9966	0.9953	0.9883	0.9847	0.9470
a_1	1.0880	2.8650	1.2920	1.9080	3.6360	4.2340	4.9170	5.3630	9.3070	6.7400
b_1	0.0411	0.0467	0.0335	0.0242	0.0329	0.0266	0.0276	0.0363	0.0396	0.0415
c_1	-0.4813	-0.9842	-0.0675	0.5666	-0.2963	-0.0453	-0.2404	-0.4908	-0.8047	-0.6765
a_2	0.6285	2.2820	0.3249	0.8042	0.9758	3.4780	3.7550	4.0660	6.6660	3.9710
b_2	0.0757	0.0859	0.1347	0.0508	0.1418	0.0611	0.1038	0.0727	0.0689	0.0665
c_2	0.8015	0.2481	0.5786	2.0180	0.9948	1.4640	0.1570	0.9654	0.8798	1.3140
a_3	0.1319	1.8280	0.2650	0.3911	0.7804	0.9519	2.5210	3.2130	3.9520	3.0580
b_3	0.2090	0.1313	0.0610	0.1312	0.2963	0.0958	0.1168	0.1133	0.0920	0.2268
c_3	0.4137	1.0430	2.3700	-0.0935	2.3360	1.1340	2.2770	1.6510	2.5630	0.1755
a_4	0.0761	0.9801	0.8955	0.2070	0.4451	0.9297	2.1980	0.6982	0.8146	9.4340
b_4	0.2123	0.1550	0.4315	0.3543	0.1801	0.1603	0.3107	0.2271	0.2475	0.3808
c_4	1.7630	2.8140	-0.9315	-1.4800	2.7680	0.4856	2.1180	1.1940	0.5084	-4.4990
a_5	0.1997	0.0428	2.9580	0.1132	0.5892	1.7440	0.2100	0.3022	0.6722	2.6060
b_5	0.1420	0.2651	0.4602	0.2594	0.2874	0.2931	0.4248	0.3067	0.3269	0.2456
c_5	-0.3340	-1.1130	3.9960	0.3899	-0.7550	2.6730	-2.3840	1.9840	0.5709	2.1430
a_6	0.0359	0.5424	3.5500	0.0749	0.1157	1.9660	2.0940	0.1154	19.970	9.5730
b_6	0.3220	0.4709	0.4546	0.4422	0.5023	0.2895	0.3024	0.8346	0.5091	0.3835
c_6	-0.7865	3.4340	1.1050	-1.6940	1.1800	-0.1731	-0.4163	0.4047	-4.5930	-1.4940
a_7	0.0458	0.0404	0.0555	0.0990	0.1922	0.3689	0.1972	0.3562	0.3981	0.3246
b_7	0.6351	0.3713	0.2849	0.9294	0.3942	0.4559	0.6237	0.2542	0.4082	0.6410
c_7	-3.0840	-2.5330	-2.4110	1.5440	-1.7400	-3.8890	3.2920	-3.1790	0.7404	-2.5300
a_8	0.0591	0.5048	0.1538	0.1115	0.1117	0.3150	0.1728	0.1111	20.0400	0.1723
b_8	0.5141	0.4640	0.2215	0.5354	0.7889	0.4668	0.4832	0.7556	0.5096	0.4775
c_8	1.2460	-5.7020	-0.4923	1.0070	-0.4432	-1.0970	-2.5670	-0.8375	-1.4770	1.7460

2 节理参数与 JRC 相关性分析

2.1 节理参数的计算

众多学者的研究结果表明^[10-12], 在众多节理参数中, 均方根一阶导数 Z_2 与 JRC 之间具有较高的相关性, 因此选取均方根一阶导数 Z_2 作为指标对拟合曲线进行计算分析。

分别采用均方根一阶导数 Z_2 的离散形式与积分形式对节理面剖面线的离散点与拟合函数进行计算。

均方根一阶导数 Z_2 的离散形式为

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{x_{i+1} - x_i} \right]^{1/2}。 \quad (6)$$

积分形式为

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \right]^{1/2}。 \quad (7)$$

2.2 真实 JRC 值的获取与计算 JRC 值的对比

采用 Barton 等^[1-2]通过大量试验获取的 JRC 值作为标准 JRC 曲线的真实 JRC 值。选取 Li 等^[11]所列举的 Z_2 与 JRC 拟合公式, 分别计算通过离散点与拟合函数求得的 JRC 值。

分别使用表 5 中的公式 (1)、(2)、(3), 计算各曲线的 JRC 值, 然后将计算结果与真实 JRC 值平均差值的绝对值作为平均偏差值, 计算结果见表 6, 7。

表 5 基于均方根一阶导数的 JRC 计算公式

Table 5 Formulae for JRC based on root mean square of first deviation

公式编号	公式	R^2
(1)	$JRC = 64.28 \tan(Z_2) - 5.06$	0.969
(2)	$JRC = 64.22Z_2 - 2.31$	0.983
(3)	$JRC = 66.86 \tan(Z_2) - 2.57$	0.983

对比表 6, 7, 发现其平均偏差值具有较大差异。这是由于在利用离散数据点计算过程中, 忽略掉了两个离散点之间的节理曲线, 并且每一步计算的偏差值逐一累加, 在经过上百次甚至更多的累加之后, 其偏差值累加至一个相对而言十分不精确的值。而利用连续的拟合函数进行计算的过程, 实际上是一个计算积分的过程, 其每一步计算的误差趋于无限小, 并且有有限的考虑了完整的节理曲线。

对比基于节理面剖面线离散点与拟合函数的计算结果可知, 基于拟合函数计算出的节理曲线 JRC 值的偏差值, 介于 0.40~2.88 之间, 而基于离散点的计算结果则介于 2.13~13.79。利用拟合函数计算出的节理曲线 JRC 值偏差明显的小与离散点的计算结果。

表 6 基于离散数据点的 JRC 计算结果

Table 6 Calculated results of JRC based on scattered data points

曲线 编号	真实 JRC 值	公式 (1) 计算值	公式 (2) 计算值	公式 (3) 计算值	平均偏 差值
1	0.4	6.72	5.87	5.99	5.79
2	2.8	8.32	7.44	7.66	5.01
3	5.8	8.45	7.56	7.79	2.13
4	6.7	13.36	12.29	12.89	6.15
5	9.5	13.43	12.36	12.97	3.42
6	10.8	14.25	13.13	13.83	2.94
7	12.8	16.77	15.49	16.45	3.44
8	14.5	22.02	20.22	21.90	6.88
9	16.7	29.33	26.42	29.51	11.72
10	18.7	33.64	29.83	33.99	13.79

表 7 基于拟合函数的 JRC 计算值

Table 7 Calculated results of JRC based on fitting function

曲线 编号	真实 JRC 值	公式 (1) 计算值	公式 (2) 计算值	公式 (3) 计算值	平均偏 差值
1	0.4	1.58	0.78	0.65	0.60
2	2.8	2.10	1.29	1.18	1.28
3	5.8	3.48	2.67	2.62	2.88
4	6.7	5.56	4.73	4.79	1.67
5	9.5	7.48	6.62	6.78	2.54
6	10.8	10.10	9.17	9.51	1.21
7	12.8	12.75	11.71	12.26	0.56
8	14.5	14.60	13.46	14.18	0.42
9	16.7	17.47	16.13	17.17	0.22
10	18.7	19.68	18.14	19.48	0.40

3 新的 JRC 计算公式

在前文的分析对照中, 发现了通过拟合函数来计算节理面粗糙度系数 JRC 值的精确性要高于通过离散点的计算值。因此, 之前学者提出的适用于离散点的 Z_2 -JRC 计算公式已不再适用于基于拟合函数计算出的 Z_2 值。

因此, 我们提出新的适用于连续函数方法所求出的均方根一阶导数 Z_2 值的 Z_2 -JRC 计算公式: 将通过拟合曲线计算出的均方根一阶导数 Z_2 值与 Barton 进行大量试验后得出的节理曲线真实 JRC 值进行拟合, 得出新的 Z_2 -JRC 计算公式:

$$JRC = 5.293e^{4.001Z_2} - 43.18e^{-41.8Z_2}。 \quad (8)$$

其决定系数 R^2 为 0.9946, 可以很好地表征基于连续函数计算出的节理参数与 JRC 之间的关系。可以通过前文方法计算得到的 Z_2 值来计算节理曲线的 JRC 值。该方法基于节理面的连续函数表达而建立, 具有分析方便和计算精度高的优点。

4 讨 论

对比表 6 与表 7 发现, 采用通过节理面剖面线离散点的拟合函数计算出的 Z_2 值, 与节理面粗糙度系数 JRC 的相关性明显要优于离散点的计算结果。这是因为采用拟合函数的计算结果, 可以有效地消除离散间隔对计算结果的误差。

由表 4, 对比各条标准 JRC 曲线的拟合函数可知: 各拟合函数的决定系数 R^2 大小不一。最高值为 0.9966, 已经可以极好的反映节理曲线的走向; 最低值为 0.8945, 也可以较好地反映节理曲线的大致形状。并且其决定系数在节理面粗糙度系数较高且较低时均有所降低, 在第 5, 6, 7 条曲线时, 拟合度最高。但不管是决定系数较高的拟合曲线还是较低的拟合曲线, 均能够较好地对节理曲线的节理参数进行计算, 也均高于通过离散点得到的计算结果。因此, 可以认为通过正弦函数逼近对节理面剖面线离散点进行拟合得到的拟合函数, 对描述节理面剖面线的起伏形态具有较好的效果。

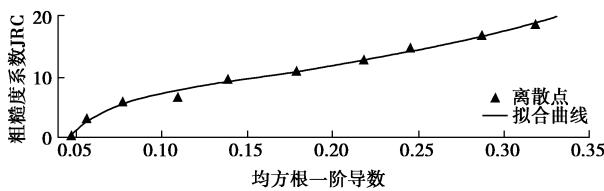


图 7 均方根一阶导数与 JRC 的拟合关系

Fig. 7 Fitting relationship between JRC and root mean square of first deviation

此外, 在对节理面剖面线离散点进行拟合时, 傅里叶级数逼近与正弦函数逼近表现出的高决定系数也表明: 三角函数周期性的特点与节理面曲面的周期性和规律性吻合, 从而从另一个方面说明用三角函数来拟合 JRC 曲线这一做法的正确性。

5 结 论

通过对 Barton 的十条标准 JRC 曲线离散化后再次进行拟合计算, 获得一种基于连续节理剖面线的 JRC 计算方法, 并得出以下结论:

(1) 建立了不依赖于节理剖面线离散间距的 JRC 计算方法: 将节理剖面线离散数据点拟合后获得节理剖面线的近似函数表达式, 然后通过其计算节理的 JRC 值。

(2) 节理面剖面线的起伏形态表现出较好的周期性, 可以通过基于三角函数的和函数形式进行较好的表达。

(3) 通过对比获取的节理剖面线与其近似函数表达式, 发现通过正弦函数逼近获取的函数表达式, 其决定系数介于 0.8945~0.9966 之间, 形态上可以近似的代替原节理剖面线。

(4) 通过正弦函数逼近的方法对节理面剖面线进行逼近, 发现第 5 到第 9 条曲线的拟合程度较好, 当节理曲线的 JRC 值较高与较低时, 对离散点的拟合程度均有所降低, 说明正弦函数的最佳适用范围应处于 JRC 值 9.5~16.7 之间。

参考文献:

- [1] BARTON N. A relationship between joint roughness and joint shear strength[C]// Proceedings of the International Symposium on Rock Fracture. Nancy, 1971: 1~8.
- [2] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, **10**(1/2): 1~54.
- [3] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, **16**(5): 303~307.
- [4] YU X B, VAYSSADE B. Joint profiles and their roughness parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, **28**(4): 333~336.
- [5] YANG Z Y, LO S C, DI C C. Reassessing the joint roughness coefficient(JRC) estimation using Z_2 [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2001, **34**(3): 243~251.
- [6] TATONE B S A, GRASSELLI G. A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, **47**(8): 1391~1400.
- [7] MAERZ N H, FRANKLIN J A, BENNETT C P. Joint roughness measurement using shadow profilometry[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1990, **27**(5): 329~343.
- [8] BEER A J, STEAD D, COGGAN J S. Technical note estimation of the joint roughness coefficient(JRC) by visual comparison[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, **35**(1): 65~74.
- [9] STIMPSON B. A rapid field method for recording joint roughness profiles[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1982, **19**(6): 345~346.

- [10] GADEMAWLA E S, KOURA M M, MAKSOUD T M, et al. Roughness parameters[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, **123**(1): 133 – 145.
- [11] LI Y, ZHANG Y B. Quantitative estimation of joint roughness coefficient using statistical parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, **77**: 27 – 35.
- [12] 孙辅庭, 余成学, 万利台. Barton 标准剖面 JRC 与独立于离散间距的统计参数关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(a02): 3539 – 3544. (SUN Fu-ting, SHE Cheng-xue, WAN Li-tai. Research on relationship between JRC of Barton's standard profiles and statistic parameters independent of sampling interval[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(a02): 3539 – 3544. (in Chinese))
- [13] 孙洪泉, 谢和平. 岩石断裂表面的分形模拟[J]. 岩土力学, 2008, **29**(2): 347 – 352. (SUN Hong-quan, XIE He-ping. Fractal simulation of rock fracture surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(2): 347 – 352. (in Chinese))
- [14] 于广明, 谢和平, 王金安, 等. 地质断裂面分形性研究[J]. 煤炭学报, 1996, **21**(5): 459 – 463. (YU Guang-ming, XIE He-ping, WANG Jin-an, et al. Fractal geometry of geological fracture[J]. Journal of China Coal Society, 1996, **21**(5): 459 – 463. (in Chinese))
- [15] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: W H Freeman, 1982: 361 – 366.
- [16] 孙洪泉, 谢和平. 分形插值曲面及其维数定理[J]. 中国矿业大学学报, 1998(2): 217 – 220. (SUN Hong-quan, XIE He-ping. Fractal interpolated surface and its dimensional theorem[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998(2): 217 – 220. (in Chinese))
- [17] 谢和平. 岩石节理的分形描述[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(1): 18 – 23. (XIE He-ping. Fractal discription of rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(1): 18 – 23. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 重庆地质仪器厂
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 南瑞集团水利水电技术分公司