

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.17

陇西黄土构造节理几何特征分析

康尘云,王少凯,贺 鸣

(长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘要:节理影响岩土体的力学和渗流特性,是坡体失稳的几何和力学边界,准确分析陇西黄土构造节理发育特征,是理解该地区频发坡体灾害的关键性步骤。通过现场调查、结合数理统计、概率分析等方法,对该地区的节理几何特征进行系统研究。结果表明:(1)陇西地区发育走向为 NWW、NNW 和 NE 的优势节理,受区域走滑断裂和逆倾滑断裂控制;(2)节理倾角多在 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$,倾向和倾角均服从正态分布;(3)节理的平均间距服从正态分布,从西南向东北整体上呈增加趋势,延续性低,中等开裂;(4)节理连通率较小,92.5% 的节理连通率小于 0.4,不易发生贯通式破坏。研究结果可为掌握节理发育规律,恢复新构造应力场,乃至区域稳定性评价提供基础数据。

关键词: 陇西黄土;构造节理;几何特征;优势节理组;连通率

中图分类号: P642.13+1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0131-08

Geometrical features of tectonic joints in loess of central Gansu and southern Ningxia

KANG Chenyun, WANG Shaokai, HE Ming

(School of Geology Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Joints affect the mechanical and seepage characteristics of rock-soil mass, which is considered as the geometric and mechanical boundary of slope in stability. Accurate analysis of the development features of loess tectonic joints in Longxi is a key step to understand the frequent slope disasters in this area. Based on field investigation, mathematical statistics and probability analysis, the geometry of joints in this area are systematically studied. The results show that: (1) Longxi region has dominant joint group with trend NWW, NNW and NE, which are controlled by regional strike-slip and reverse tilting faults; (2) the inclination angles of joints are mostly between 60° and 80° , and the inclination and inclination angles obey normal distribution; (3) the average spacing of joints obeys normal distribution, and increases from southwest to northeast with low continuity and moderate cracking; (4) joint connectivity rate is small. 92.5% joints have a connectivity rate of less than 0.4, which is difficult to occur through failure. The research results can provide basic data for researches of mastering the developmental law of tectonic joints, recovering the Neotectonic tectonic stress fields, as well as conducting regional stability assessment.

Keywords: loess; tectonic joints; geometrical features; dominant joint; connectivity rate

收稿日期: 2019-01-25; 修订日期: 2019-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41790441;41807234);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102269203)

第一作者: 康尘云(1995-),男,陕西咸阳人,地质资源与地质工程专业,硕士研究生,主要从事黄土地质灾害防治方面的研究工作。

E-mail: kangchenyun@outlook.com

通讯作者: 王少凯(1989-),男,河南洛阳人,地质工程专业,博士研究生,主要从事黄土地质灾害方面的研究工作。E-mail:

543718972@163.com

0 引言

陇西地区由甘肃省中部和宁夏省南部组成,东起六盘山脉,西至乌鞘岭,北抵中卫沙漠,南达西秦岭,面积约 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,是我国黄土高原的最西端^[1]。该区域生态环境脆弱,自然灾害频发,1983 年的东乡酒勒山滑坡体积 $3.1 \times 10^7 \text{ m}^3$,造成 220 人死亡^[2];永靖县黑方台滑坡群线密度大于 10 个/km,累计造成 39 人死亡,直接经济损失上亿元^[3];兰州市 2010 年统计的滑坡、崩塌、不稳定斜坡灾害隐患点达 519 处,黄土灾害数量多、危害大、难以预防^[4]。黄土中的节理纵横交错,它是地下水流动的主要通道和赋存的场所,是地裂缝、滑坡、崩塌和水土流失的构造基础,是风化和应力侵蚀开始的地层软弱面,对坡体的失稳破坏起到控制作用,极大的影响了黄土地貌的演化,是黄土坡体灾害研究的重点内容之一^[5]。

节理是岩土体中普遍存在的一种断裂构造,其空间展布受区域构造应力场和地质环境综合影响。黄土中的节理包括构造节理、垂直节理、卸荷节理等,它们切割土体,改变其连续性,是影响其渗流特性和力学特性的决定性因素之一。在工程实践中,节理是坡体失稳的几何和力学边界,也是岩土体工程质量评价的重要因素之一^[6]。因此,对节理发育特征的分析评价是研究黄土坡体失稳破坏机制的基础。

关于黄土节理的研究一般针对其成因、力学特性等方面^[7],本文侧重研究其几何特征,且区域范围大,这在岩体节理中已有大量研究,但针对黄土节理展开的则很少。描述节理几何特征的主要参数有:倾向、倾角、组数、条数、间距、迹长、张开度、连通率等。国内外对此已有大量研究,BINGHAM C^[8]针对节理极点的球形分布特征,提出了 Bingham 分布;KULATILAKE P H^[9]提出了不连续面的产状 Fisher 分布模型;ZHANG L 等^[10]提出估算节理平均迹长的圆形窗口法;PRIST 等^[11]根据大量野外实测资料认为:节理间距分布形式符合负指数函数;杨春和等^[12]对圆形窗口法加以改进,计算迹线中点面密度和平均迹长。

本文对区域内的地表露头进行研究,基于大范围现场调查,对陇西地区不同区域的节理绘制玫瑰花图、划分优势组,绘制了区域优势节理分布图,对各节理组进行概率统计分析,计算间距密度、平均迹长和连通率等几何特征参数,并拟合其概率密度分布形式。研究结果有助于理解区域构造应力场对陇西地区黄土节理空间展布的影响和准确把握其发育特征。

1 研究区概况和方法

1.1 研究区概况

陇西地貌为典型的黄土地貌,沟壑纵横,沟谷密度大,斜坡普遍较陡,流水侵蚀严重,陷穴、盲沟、天然桥、碟形洼地等潜蚀地貌发育^[13]。地层主要为新近堆积黄土、马兰黄土、离石黄土,少数地区可见午城黄土,其中偶夹河流相卵石层和砂层,下伏第三纪红褐色或灰绿色泥岩^[1]。

研究区属于祁连—秦岭褶皱影响带,受海原—六盘山构造带控制,为新生代构造盆地,经历地壳缩短和走滑剪切变形^[14],故多发育走滑挤压型断裂和逆断裂^[15-16],各断裂带活动性质见表 1。

表 1 陇西地区主要断裂运动性质

Table 1 Main fault movement properties in Longxi

区域编号	控制性断裂	走向	运动性质	活动速率/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)
XG	西秦岭北缘断裂带 锅麻滩段 漳县段 天水段	NNW	左旋走滑 兼挤压	0.1 ~ 1.0 0.2 ~ 0.5
XZ				
XT				
LPS	六盘山断裂带	NNW	左旋走滑	2.0 ~ 5.5
HY	海原断裂带		兼挤压	0.5 ~ 3.0
ZLH	庄浪河断裂	NNW	逆倾滑	0.6 ~ 1.2
MXS	马衔山断裂	NW	左旋走滑	3

陇西地区的构造应力场主要受印度板块和欧亚板块碰撞的影响,青藏高原板块 NE 向的运动使得区域最大压应力亦表现为 NE 向,因为受到周围刚性的阿拉善地块和鄂尔多斯地块阻挡形成强大的反作用力,其东北缘的最大主压应力从北向东,直至东南部呈放射状偏转。地震应力场、现代构造应力场、新构造应力场趋于一致,晚第三纪以来,地壳构造应力场相对稳定^[17],区域构造见图 1。

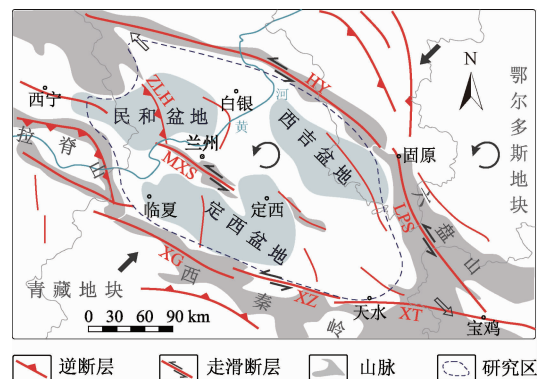


图 1 陇西地区区域构造图

Fig.1 Tectonic map of Longxi

1.2 调查方法

土体中的节理易受到风化、卸荷作用等因素的影响,为准确研究构造节理,首先要对其进行辨别,排除非构造节理。以图2为例,该露头位于临夏回族自治州东乡县高山乡簸箕湾(图3红色标记处),风化程度低,在其中识别出3组构造节理,以红、橙、黄进行区分,它们均具有方向性强、倾角较陡、成组分布、张开度小、延伸平直等构造节理的典型形态特征^[5],其中橙色组和黄色组相互交切限制,应为同期形成的扭裂面,具有共轭关系,并影响边坡临空面的稳定性;红色组节理则应是在不同的构造应力作用下形成的。

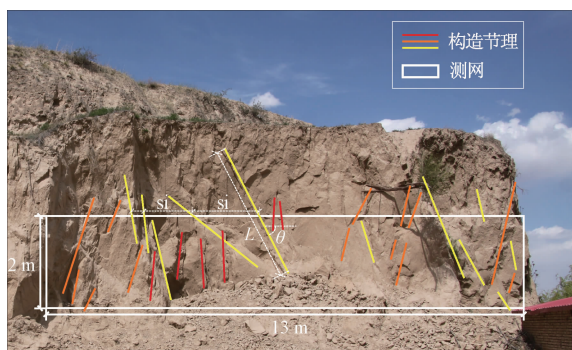


图2 调查方法示意图

Fig.2 Survey method

采用综合节理测量法对陇西地区良好露头进行详细测量和统计^[6],即:选定表面新鲜、尺寸合理的露头,用GPS定位,设置测网,测网高度一般为2 m,即人体可量测最大高度,考虑到黄土中节理密度较低,测网长度不设限定,视露头长度而定,测量测网内部的节理和与测网相交的外部节理,根据产状对节理进行分组,测量以下要素:

(1)节理数据:产状(倾向和倾角)、迹长和间距、每组个数、张开度和填充物。

(2)测网数据:长度和高度、方向。

本次调查的范围包含陇西地区的绝大部分区域,调查露头259个、1 057组构造节理,根据与断裂带的距离合理分配调查密度(图3)。

2 节理几何特征研究

地表黄土中节理通常具有较强的随机性,但其根本成因是区域构造应力场作用^[6],所以一定区域内节理的几何展布会表现出很强规律性,而进行大范围的数理统计和概率分析是探寻其规律的有效手段,节理

的几何特征参数的分析也是得到节理系统模型的关键,上述认识是对节理进行数理统计和概率分析的理论基础。

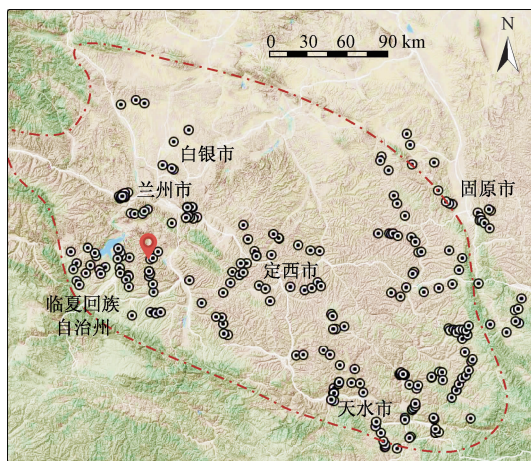


图3 研究区位置及调查露头分布图

Fig.3 Map showing the study area and survey locations

2.1 优势组划分

首先对调查的露头进行分区,比较图3中每个露头点位和周边断裂带的垂直距离,将其划分到距离最近的断裂带影响范围内,即其控制断裂带,每条控制性断裂带影响下的诸多露头构成一个分区,本文将陇西地区分为八个子区域(图4),然后将每个分区内的所有露头记录到的节理数据综合处理,绘制分区级别的节理极点等密度图(图5)和节理走向玫瑰花图(图6),以避免单个露头中的数据偶然性产生的偏差。

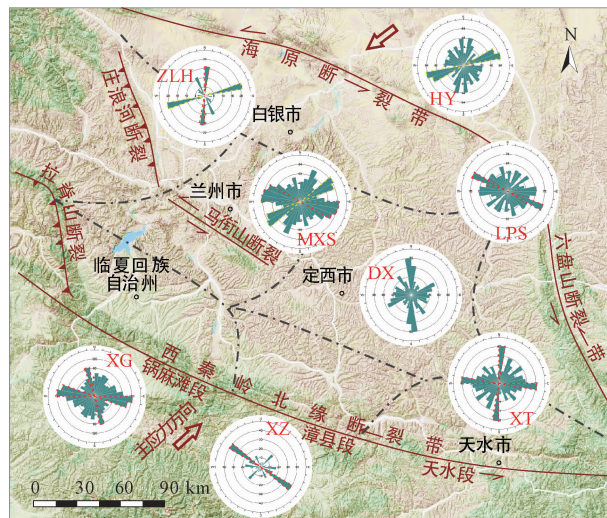


图4 陇西黄土优势节理分布图

Fig.4 Distribution of dominant joints of loess in Longxi

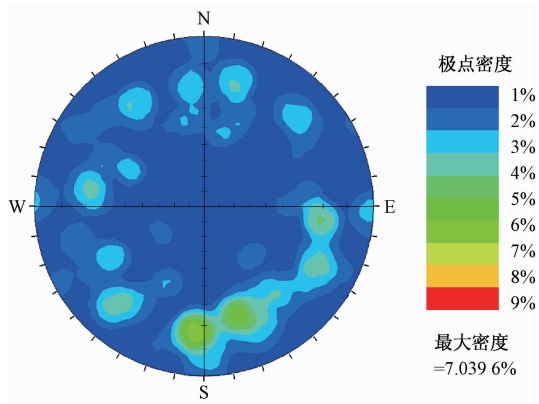


图 5 XT 区节理极点等密度图

Fig. 5 Joints pole iso-density map in XT zone

以西秦岭北缘断裂带天水段(图 5)为例,对其影响下的露头进行汇总分析,由极点等密度图可以看出节理的集中分布情况,由蓝到红节理组的占比逐渐升高,也即密度增大,高密度中心的产状为,占比 7.04%。另外一个优势组为,占比 6.78%,倾角多为 60°以上的陡倾角,从玫瑰花图(图 6)也可以看出其优势组与高密度中心相对应。对其余七个区域进行相同的分析,得到各区的节理优势产状(表 2)和节理走向玫瑰花图。

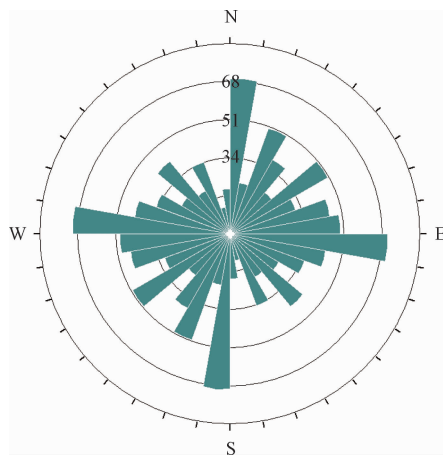


图 6 XT 区节理走向玫瑰花图

Fig. 6 Joints trend rose diagram in XT zone

将每个子分区的节理走向玫瑰花图置于其控制性断裂附近(图 4),进行优势组和控制性断裂的产状对比,并联系区域主应力方向,发现:研究区的节理优势组走向多在 NWW 和 NNW 之间,且多为两个优势组交叉;每一区域的节理的优势组(红色虚线框出)走向与其控制性断裂带走向表现出很好的一致性;断裂带交汇处则会有两组与不同断裂带分别对应的优

势组;区域西北角发育有与断裂近垂直的 NE 向优势组。

节理优势组呈现以上特点的原因是:断裂的形成是区域构造应力场的作用结果,而研究区南北控制性断裂带(走滑)走向为 NWW,东(走滑)西(逆倾滑)控制性断裂带为 NNW,内部次级断裂与控制性断裂平行,同时区域受 NE—SW 向挤压,这些断裂带对节理的形成起到了宏观控制性作用,邻近走滑断裂带的形成的优势节理组平行于断裂带,如 XG、XZ、XT、LPS 区;邻近逆倾滑断裂带的形成两组共轭优势节理组,两组破裂面锐角平分线指示挤压应力方向,钝角平分线指示拉伸应力方向,如受庄浪河断裂、马街山断裂影响的 ZLH、MXS 区。

表 2 陇西黄土构造节理优势组及平均占比

Table 2 The dominant group and average percentage of the loess tectonic joints in Longxi

区域 编号	优势组	优势产状		占比/%
		倾向/(°)	倾角/(°)	
XG	1	183	57	7.48
	2	74	68	4.5
XZ	1	32	66	18.53
	2	94	69	6.78
XT	1	183	73	7.04
	2	94	69	6.78
LPS	1	49	73	6.54
HY	1	161	61	9.1
ZLH	1	165	47	20.81
	2	94	62	13.75
MXS	1	147	53	5.5
	2	77	61	6.0
DX	1	85	78	4.94

2.2 产状概率分析

节理产状特征可以用其要素的概率分布形式来表示,对各区域的节理产状进行频率分布统计,绘制相应的直方图、拟合曲线和概率密度函数。其中 XT 区的优势组的产状分布、拟合曲线及函数如图 7 所示。

从拟合结果来看,优势节理组倾角和概率的分布都可以用正态函数分布形式来进行有效拟合,其遵循的表达式如下:

$$y = \frac{1}{\delta \sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{\delta^2}} \quad (1)$$

通过对其余区域(图 8)的优势节理组进行相同分析,得出以下结论:陇西黄土节理产状的概率密度分布均服从正态分布形式,且具有较好的拟合度, $R^2 > 0.945$ (倾角), $R^2 > 0.843$ (倾向)。

节理产状符合正态分布的地质力学原因可能是:

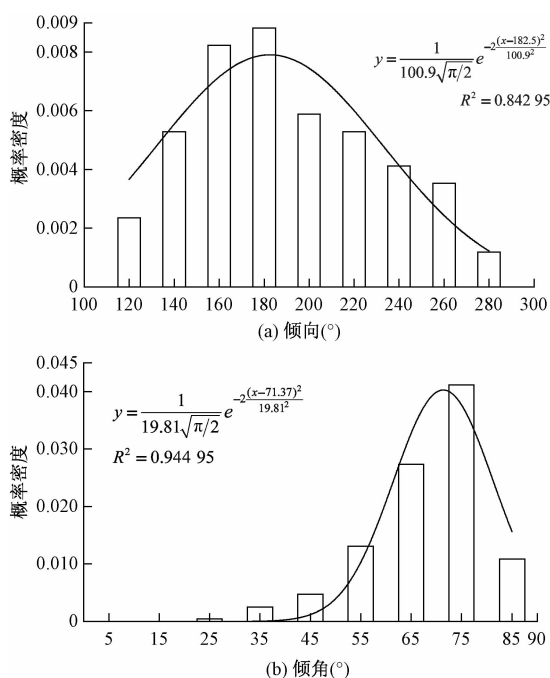


图7 XT区优势组产状直方图、拟合曲线及概率密度函数

Fig.7 Histogram, fitting curve and probability density function of joints occurrence of dominant group 92°/71° in XT zone

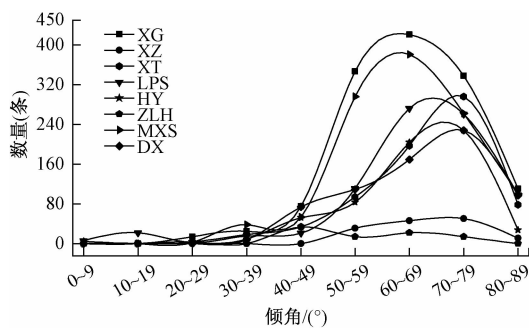


图8 陇西黄土节理倾向分布图

Fig.8 Joints dip distribution of loess in Longxi

节理在一定的构造应力场下形成,其空间展布通常具有一致性,但是由于所处地质条件的差异性、间断性,几何边界和力学边界的不同则会产生绕某一中心分布的节理。陇西地区黄土节理受长大断裂带控制,被区域次级断裂带影响,构造应力场复杂,因而其产状符合正态分布形式。

2.3 平均间距、张开度和延续性

节理间距是指一组节理中节理间的垂直距离,显示节理间的相对位置,它反映了岩土体中节理的发育程度,影响岩土体的完整性、强度和变形。现场测量的节理间距为视间距,即节理在露头上的距离,存在测量

误差,实际平均间距要在室内数据处理中加以校正,校正后的平均间距考虑了节理的连续性等概率,是一种统计平均值。

节理的延续性是表征节理可见长度的一个定性描述指标,是指在露头中可见节理的可追索长度。因为露头 and 测网的限制,其本身不具有任何绝对值含义。张开度是描述节理结构特征的另外一个重要指标,它直接影响岩土体的变形和强度特性,更重要的是,它是水的运移通道,影响岩土体的水力学特性。由于黄土节理的评价并没有专门的标准,在此借用国际岩石力学学会的关于不连续面描述评价体系。

某一调查点的节理平均间距可用以下方式求得:

$$\bar{S}_i = \frac{L}{N} \quad (2)$$

式中: L ——测网长度;

N ——节理数量。

区域内的节理间距则为区内各点的平均值:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{S}_i \quad (3)$$

节理的密度定义为距离的倒数:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{\bar{S}} \quad (4)$$

对 XG 区的节理平均间距进行统计分析,发现其平均间距大部分位于 6 m 以下,但仍有相当一部分大于 6 m,这已属于“极宽的间距”,以 1 m 作为组距绘制概率密度图(图 9),发现其亦服从正态分布形式。

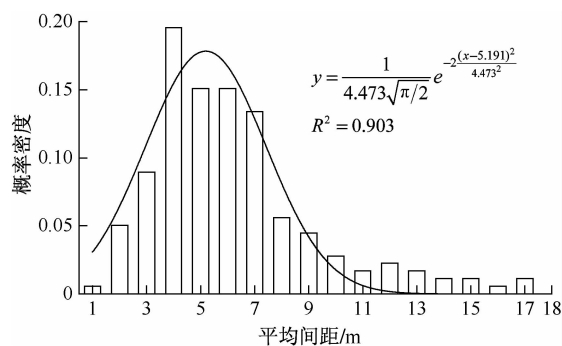


图9 XG区节理平均间距直方图、拟合曲线及概率密度函数

Fig.9 Histogram, fitting curve and probability density function of joints average spacing in XG zone

PRIEST S D 等^[18]相关研究表明:岩体的节理间距分布有均匀分布、成群分布、随机分布、负指数分布等几种形式,取决于岩性和所处应力环境,例如均匀柱状玄武岩受到均一的节理化作用,节理间距均匀排列,呈正态分布;裂隙化程度很高的砂岩、粉砂岩节理间距

则成群分布;黄土属于较均匀的介质,当受一定构造应力作用时,推断存在一个最优平均间距,对应的概率密度最大,当偏离最优平均间距时,节理的概率密度则变小,即服从正态分布。

关于平均间距、延续性和张开度的统计结果见表 3。

表 3 陇西黄土节理几何特征评价

Table 3 Geometric feature description of the loess joints in Longxi

区域	间距/mm	密度/(个/m)	描述	延伸/m	描述	张开度/mm	描述
XG	1 310	0.76	宽	2.22	低	3.6	中等
XZ	1 750	0.57	宽	1.69	低	3.1	中等
XT	3 200	0.31	很宽	1.64	低	7.0	中等
LPS	4 180	0.24	很宽	1.74	低	5.2	中等
HY	2 230	0.45	很宽	2.86	低	3.4	中等
ZLH	2 150	0.47	很宽	3.95	中等	2.8	中等
MXS	990	1.01	宽	2.68	低	3.0	中等
DX	920	1.09	宽	1.40	低	3.0	中等

节理间距方面,陇西黄土节理只有不到三分之一属于“宽间距”,其余则均属于“很宽的间距”。从统计结果来看,构造节理的平均间距最小为 920 mm,出现在 DX 区,最大为 4 180 mm,以 LPS 区居多;节理间距显示出从西南向东北增加的总体趋势,密度则反之。

延续性方面,ZLH 区的构造节理延伸最大,平均为 3.95 m,属于“中等延续性”,此外其他地区的节理均为“低延续性”,平均延伸长度从 1.4 ~ 2.86 m 不等,说明黄土中的节理延续性没有显著的地域差异,且长度分布较集中。

张开度方面,构造节理均为“开裂”状态中的“中等宽度”,XT 区和 LPS 区平均张开度较大,分别为 7.0 mm 和 5.2 mm;其余区域则为“中等宽度”。在两个断裂带交汇的区域,可能由于构造应力场的叠加而导致了节理张开度的增大。

2.4 连通率分布

连通率是节理的另外一项重要的基本属性,其值在 0 ~ 1 之间变化,反映节理的贯通程度,对岩土体的变形、强度、破坏、渗透性都有较大影响。它的计算方法有数种,在此根据调查数据选取考虑构造节理面的破坏形式、具有显著力学含义的计算公式(式 5)。黄土中的构造节理断续错列排布,通常是潜在的滑面,滑移面由节理段和节理之间的“岩桥”构成。连通率的定义为:

$$k_l = \frac{L_{ep}}{L_{ep} + L_k} \quad (5)$$

式中: k_l ——连通率;

L_{ep} ——单组结构面的平均迹长。

L_k 为以节理的垂直平均间距按岩土体破坏准则修正后的值,以此表示节理之间的岩土体抗剪强度,按下式计算:

$$L_k = \frac{a}{\sin\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (6)$$

式中: φ ——岩土体内摩擦角;

a ——节理垂直间距。

a 按下式求得:

$$a = \frac{L}{N} \sin\alpha \sin\beta \quad (7)$$

式中: L ——测网长度;

N ——该组节理的总数;

α ——节理倾角;

β ——节理走向和测网方向的夹角。

对 XG 区的节理连通率进行概率统计,当连通率升高时,概率密度会随之降低,进一步拟合发现,连通率 x 符合负指数分布形式(图 10):

$$y = \lambda e^{-\lambda x} \quad (8)$$

上式有个重要的分布特征,连通率的总体偏差和标准差正好相等。

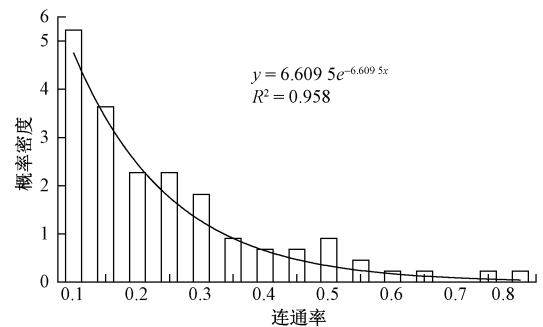


图 10 XG 区节理连通率直方图、拟合曲线及概率密度函数

Fig. 10 Histogram, fitting curve and probability density function of joints connectivity in XG zone

结果表明黄土中构造节理的贯通程度较低,发生“贯通式”破坏的几率较低。当连通率较低时,节理之间微裂纹组成的宏观破裂带(翼型裂纹)宽度较大,而当连通率较高时,微破裂总数会减少,但其中张拉型微破裂占比提高^[19]。

将不同地区的连通率进行对比可以看出(图 11):陇西黄土的节理连通率都是比较低的,XG、LPS、DX 三处 0.2 以下的连通率占比超过 65%,0.4 以下的连通率占比 60.8% ~ 92.5%,是大部分节理的分布区间,

且当样本数量较大时,服从负指数分布形式。

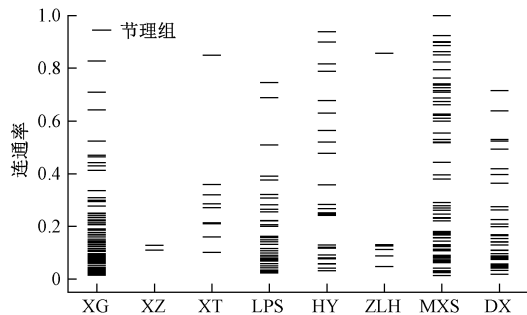


图 11 陇西黄土节理连通率分布特征

Fig. 11 Joints connectivity distribution of loess in Longxi

3 讨论

本文进行了大尺度的区域性黄土构造节理研究,应用数理统计方法定量分析陇西黄土构造节理的几何特征,得出其概率分布形式,探讨区域构造对节理产状的控制作用。这些方法在岩体评价中应用较广,但鲜见于黄土节理的研究中,由于土、岩性质差异,活用调查方法虽然得到一些新颖成果,但也遇到问题,例如黄土平均间距较岩石更大,密度低,其概率分布形式并非岩石节理普遍服从的负指数分布,并且岩石评价标准的尺度分级也无法准确描述黄土;又如黄土遇水强度急剧降低,而作为水入渗通道的垂直、卸荷等节理却缺少相应的调查方法。

黄土构造节理的现有研究多侧重成因分析^[7],影响土体力学特性的室内试验^[19],或其对边坡稳定性的影响机制^[5],多从微观机理角度出发,对于基本的几何特征却研究较少,本文试图通过大范围的统计分析更全面的认识黄土构造节理空间发育、展布的普遍规律,这也是从定性分析转向定量评价的基础,量化的评价标准和操作性强、可指导实践的调查手段是黄土高原日渐增多的工程建设项目和频发的地质灾害亟需的。

统计分析结果虽然揭示了黄土构造节理发育分布的一些规律,但却难以将其特征联系起来对不同区域节理的发育程度做出评价,今后的研究目标则是建立节理发育程度关于基本几何特征参数的函数关系,形成适用于黄土节理的评价体系,并在不同的空间尺度上进行验证与完善,使其可以方便、有效的应用于工程建设和灾害防治的工作中。

4 结论

(1) 陇西地区的节理具有区域性和系统性,主要

发育 3 个优势组:受南北走滑断裂带控制的 NWW 向和东部走滑断裂带控制的 NNW 向节理,受西部逆倾滑断裂控制的 NE 向节理;倾向和倾角的分布均服从正态分布函数;倾角以 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的陡倾角为主。

(2) 节理的平均间距大部分为 1 ~ 10 m,为“很宽的间距”,服从正态分布,从西南向东北呈增加的总体趋势;平均延伸长度为 1.4 ~ 2.86 m 不等,属于“低延续性”;平均张开度为 2.8 ~ 7.0 mm,属“开裂”状态中的“中等宽度”。

(3) 连通率服从负指数分布,且总体偏差等于标准差,0.2 以下的连通率占比超过 65%,0.4 以下的则为 60.8% ~ 92.5%,普遍较低,节理发生贯通式破坏的几率较小。

参考文献:

- [1] 丁宏伟,李莉,姚兴荣,等. 大气降水对黄土滑坡的影响和控制——以甘肃省陇西黄土高原为例[J]. 甘肃地质, 2013, 22(1): 55-60.
DING Hongwei, LI Li, YAO Xingrong, et al. The impact and control of atmospheric precipitation on the formation of loess landslides: an example of Longxi loess plateau in Gansu Province[J]. Gansu Geology, 2013, 22(1): 55-60.
- [2] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312.
XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Loess in China and loess landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312.
- [3] 董英,贾俊,张茂省,等. 甘肃永靖黑方台地区灌溉诱发作用与黄土滑坡响应[J]. 地质通报, 2013, 32(6): 893-898.
DONG Ying, JIA Jun, ZHANG Maosheng, et al. An analysis of the inducing effects of irrigation and the responses of loess landslides in Heifangtai area[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(6): 893-898.
- [4] 梅海,张纪勋. 兰州市地质灾害类型及其分布规律[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(4): 53-57.
MEI Hai, ZHANG Jixun. Types and distribution of geological hazards in Lanzhou City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4): 53-57.
- [5] 王景明,倪玉兰,孙建中. 黄土构造节理研究及其

- 应用[J]. 工程地质学报, 1994, 2(4): 31-42.
- WANG Jingming, NI Yulan, SUN Jianzhong. A study on structural joints in loess and its practical applications [J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(4): 31-42.
- [6] 雷光伟, 杨春和, 王贵宾, 等. 北山预选区新场地段岩体节理几何特征及评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 896-905.
- LEI Guangwei, YANG Chunhe, WANG Guibin, et al. Geometric features of joints and quality evaluation of rock mass in Xinchang section, Beishan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 896-905.
- [7] 卢全中, 彭建兵. 黄土体结构面的发育特征及其灾害效应[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(4): 446-450.
- LU Quanzhong, PENG Jianbing. Characteristics of structural planes of loess mass in loess plateau of China and its hazard effect [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(4): 446-450.
- [8] BINGHAM C. Distributions on the sphere and on the Projective Plane. [J]. 1972.
- [9] KULATILAKE P H. Fitting fisher distributions to discontinuity orientation data [J]. Journal of Geological Education, 1985, 33(5): 266-269.
- [10] ZHANG L, EINSTEIN H. Estimating the mean trace length of rock discontinuities [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, 31(4): 217-235.
- [11] PRIEST S, HUDSON J. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys[C]// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Elsevier, 1981, 18: 183-197.
- [12] 杨春和, 包宏涛, 王贵宾, 等. 岩体节理平均迹长和迹线中点面密度估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2475-2480.
- YANG Chunhe, BAO Hongtao, WANG Guibin, et al. Estimation of mean trace length and trace midpoint density of rock mass joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2475-2480.
- [13] 张丽萍, 张海霞. 简论黄土高原地貌类型的空间组合结构-以陇东、陕北、晋西为例[J]. 山西大学师范学院学报(综合版), 1991(1): 88-92.
- ZHANG Liping, ZHANG Haixia. A brief discussion on the spatial combination structure of landform types in the loess plateau: a case study of eastern Yunnan, Northern Shaanxi and Western Shanxi [J]. Journal of Teachers College of Shanxi University (Comprehensive Edition), 1991(1): 88-92.
- [14] 郝明, 秦姗兰, 李煜航, 等. 青藏高原东北缘近期地壳水平运动研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(3): 99-103.
- HAO Ming, QIN Shanlan, LI Yuhang, et al. Recent horizontal velocity field of northeastern Tibetan plateau [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(3): 99-103.
- [15] 陈长云, 贺建明. 西秦岭北缘断裂分段运动变形特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(9): 784-788.
- CHEN Changyun, HE Jianming. Deformation characteristics of sectional movement in northern margin of West Qinling Mountains [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(9): 784-788.
- [16] 周德敏, 甘卫军, 任金卫, 等. 基于 GPS 观测资料反演庄浪河断裂带、马衔山北缘断裂带的滑动速率[J]. 地震地质, 2005, 27(4): 706-714.
- ZHOU Demin, GAN Weijun, REN Jinwei, et al. Inversion of slip rates of the Zhuanglanghe Faults and the northern marginal fault of Maxianshan based on GPS measurements [J]. Seismology and Geology, 2005, 27(4): 706-715.
- [17] 卜玉菲, 万永革, 张元生. 甘肃及邻近地区的构造应力场[J]. 地震地质, 2013, 35(4): 833-841.
- PU Yufei, WAN Yongge, ZHANG Yuansheng. Tectonic stress analysis in Gansu and its adjacent areas [J]. Seismology and Geology, 2013, 35(4): 833-841.
- [18] PRIEST S D, HUDSON J A. Discontinuity spacings in rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1976, 13(5): 135-148.
- [19] 周喻, 张怀静, 吴顺川, 等. 节理连通率对岩体力学特性影响的细观研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增2): 29-36.
- ZHOU Yu, ZHANG Huaijing, WU Shunchuan, et al. Meso-research on mechanical properties of rock mass affected by joint connectivity rate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 29-36.