

节理岩体不连续面广义 H-H 迹长估计*

黄润秋¹ 范留明¹ 陈龙生²

1. 成都理工大学地质灾害防治国家专业实验室, 成都 610059;

2. 香港大学地球科学系, 香港

摘要 总结了目前国内外已有的节理迹长估计概率模型, 分析和提出了各种模型的特点及局限性. 在此基础上, 从结构面与统计窗口交切关系出发, 在更为严密的考虑结构面产状特性(倾角)的基础上, 提出了一种新的结构面迹长估计模型, 即广义的 H-H 迹长估计模型, 并采用实际数据对该模型的可靠性进行了检验.

关键词 不连续面 迹长 概率模型 广义 H-H 迹长估计

通常情况下, 由于受地质建造和构造改造的影响, 岩体中普遍存在各类不同性质的不连续结构面, 其中节理是最为常见的结构面形式; 遍布节理的岩体工程上称为“节理岩体”(jointed rockmass). 节理作为岩体中的不连续面, 控制了岩体的工程地质性状和各类变形破坏特征. 因此, 对节理岩体的研究关键是对这些不连续面性状的研究^[1-3]. 这其中, 节理结构面的迹长是表征结构面规模的重要量化指标, 它控制了不连续结构面的抗剪强度和水力学特性.

在实际工程中, 由于野外露头的局限性, 要准确地测量节理的迹长往往是非常困难的. 因此, 尽管迹长是一个基本参数, 概念也非常简单, 但是, 在岩体工程地质研究中, 一直是人们关注和研究的难点问题. 一般是采用概率模型进行迹长估计, 即在一定的露头上, 布设一定面积的统计“窗口”或测线; 然后, 根据窗口内节理可见迹长的分布特征及其与窗口(或测线)的交切关系, 采用一定的概率模型公式进行迹长估计. 因此, 问题的关键是提出合理的迹长估计概率模型.

近 20 年来, 国内外学者在这方面作了大量的工作, 提出了许多迹长估计模型. 代表性的有 Kulatilake 算法^[1]、Cruden 迹长估计法^[4]、Laslett 迹长估计法^[5]、统计窗口法、H-H 迹长估计法和倍半

迹长法(2L_{0.5})等^[5-7]. 其中 Kulatilake 算法要求由倾向和倾角两个独立变量定义的不连续面二维概率密度函数是已知的, 所以实用性较差; Cruden 公式假设迹长服从负指数分布, 然而众多学者则认为迹长服从对数正态分布. 实践表明, Laslett 迹长估计、2L_{0.5}和 H-H 算法这 3 种方法相对较为合理, 下面作一简单介绍.

Laslett(1982)基于极大似然原理, 推导了由窗口数据估计不连续面平均迹长的极大似然公式^[5]

$$l = \frac{2}{2n + m} \left(\sum_{i=1}^n X_i + \sum_{j=1}^m Y_j + \sum_{k=1}^p Z_k \right), \quad (1)$$

式中 X_i 是第 i 条两端可见结构面迹长, Y_j 是第 j 条一端可见结构面可见迹长, Z_k 是第 k 条两端均不可见结构面可见迹长, n 为两端可见结构面个数, m 为一端可见结构面个数, p 为两端均不可见结构面个数.

当两端可见结构面个数 n 和两端均不可见结构面个数 p 均为零时, 上式简化为如下形式

$$l = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m Y_i. \quad (2)$$

上式的物理含义是结构面平均迹长等于可见迹

2002-02-20 收稿, 2002-03-25 收修改稿

* 国家杰出青年科学基金资助项目(批准号: 49525204)

E-mail: hrq@chut.edu.cn

长的数学期望的两倍, 故称之为倍半迹长估计公式(简记为 $2L_{0.5}$).

Laslett 极大似然迹长估计没有考虑到测量窗口尺度对迹长估计的影响. 黄润秋、黄国民等提出的平均迹长计算公式, 即 H-H 迹长估计模型弥补了这一缺陷^[7,8]. 如图 1, 在宽度为 w 高度为 h 的取样窗内, 结构面与窗口的几何交切形式共有 3 种: (a) 两端可见; (b) 一端可见; (c) 两端均不可见. 根据结构面交切窗口概率与测量窗口尺度之间的关系, 推导了裂隙中点服从均匀分布条件下的迹长估算公式(简称 H-H 迹长估算公式)

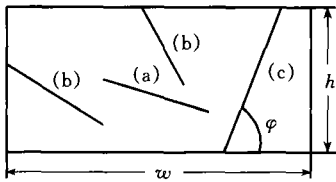


图 1 结构面与窗口交切关系

$$l = \frac{n_1 + 2n_0}{2N} \frac{\pi w h}{w + h}, \quad (3)$$

式中 n_0 是两端均不可见的数; n_1 是一端可见另一端不可见的结构面数, N 是结构面的总数, $N = n_1 + n_2 + n_3$ (n_2 是两端可见的结构面数).

Laslett 极大似然迹长估计没有考虑到测量窗口尺度对迹长估计的影响, $2L_{0.5}$ 迹长估计只适用于某些特定的情形. 比较而言, H-H 迹长估计公式没有涉及概率密度函数具体形式, 仅仅利用交切窗口结构面的数量 n_0, n_1, n_2 来估计结构面平均迹长, 具有简便实用的优点. 但是该算法具有较强的“不稳定性”, 主要表现为迹长估计值较真实值有显著偏大或偏小的现象.

1 广义 H-H 迹长估计法

通过对“H-H 算法”的原理分析表明, 导致其“不稳定性”的主要原因是该模型没有考虑结构面倾角的影响, 而结构面倾角对结构面与窗口的交切条件的形成是有重要影响的. 为此, 我们从 H-H 迹长估计模型的基本原理出发, 在考虑“窗口”中结构面(视)倾角的基础上, 建立了广义 H-H 迹长估计模型.

事实上, H-H 公式可以推广到对任意一组(视)倾角结构面的迹长估计. 如图 1 所示, 以 x 表示结构面中点与窗口顶底边界线中最近边的距离, 以 φ

表示结构面与窗口底边线的交角(视倾角), 可知

$$\begin{aligned} 0 &\leq x \leq \frac{h}{2}; \\ 0 &\leq \varphi \leq \pi. \end{aligned} \quad (4a)$$

由(4a)式可以确定 $x - \varphi$ 平面上的一个矩形 Ω , 结构面与窗口相交的充要条件是

$$x \leq \frac{l}{2} \sin \varphi. \quad (4b)$$

由(4b)式表示的区域 A 是图 2 中的灰色部分. 假设结构面中心在窗口内是均匀分布的, 由等可能性知: 对于测量窗口顶、底边, 结构面交切概率 $P(A)$ 为

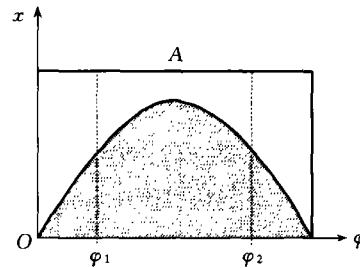


图 2 结构面与测网交切条件

$$P(A) = \frac{S_A}{S_\Omega} = \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{l}{2} \sin \varphi d\varphi}{\frac{h}{2}(\varphi_2 - \varphi_1)} = \frac{l(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)}{h(\varphi_2 - \varphi_1)}, \quad (5)$$

其中 φ_2, φ_1 为某组结构面倾角区间的上、下限值. 同理, 对于测量窗口两侧边, 结构面交切概率 $P(B)$ 为

$$P(B) = \frac{S_B}{S_\Omega} = \frac{\int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{l}{2} \sin \psi d\psi}{\frac{w}{2}(\psi_2 - \psi_1)} = \frac{l(\cos \psi_1 - \cos \psi_2)}{w(\psi_2 - \psi_1)}, \quad (6)$$

而且 φ 与 ψ 有如下几何关系(见图 3)

$$\psi = \begin{cases} \varphi + \frac{\pi}{2} & 0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2}, \\ \varphi - \frac{\pi}{2} & \frac{\pi}{2} \leq \varphi < \pi. \end{cases} \quad (7)$$

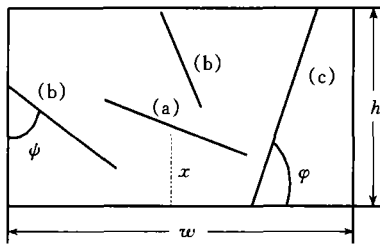


图3 结构面与窗口交切关系

以 φ 代替 ψ , 则 $P(B)$ 表示为

$$P(B) = \begin{cases} \frac{l(\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1)}{w(\varphi_2 - \varphi_1)} & 0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2} \\ \frac{l(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2)}{w(\varphi_2 - \varphi_1)} & \frac{\pi}{2} \leq \varphi < \pi. \end{cases} \quad (8)$$

而窗口边界被交切的平均概率为

$$P = P(A) + P(B) = \frac{n_1 + 2n_0}{N}. \quad (9)$$

综合(5)~(9)式, 经整理得

$$l = \begin{cases} \frac{n_1 + 2n_0}{N} \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)hw}{h(\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1) + w(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)} & 0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2} \\ \frac{n_1 + 2n_0}{N} \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)hw}{h(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) + w(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)} & \frac{\pi}{2} \leq \varphi < \pi. \end{cases} \quad (10)$$

上式可称为“推广的 H-H 公式”, 它与 H-H 公式不同之处是:

(1) n_0 , n_1 和 n_2 不是指测量窗口内所有结构面数量, 而是指视倾角(由 φ 表示)在 $\varphi_1 \sim \varphi_2$ 之间的结构面数量, 即 n_0 , n_1 和 n_2 是视倾角 φ 的函数.

(2) 在给定的测量窗口内, 结构面平均迹长不仅仅与视倾角在 $\varphi_1 \sim \varphi_2$ 之间的结构面数量 n_0 , n_1 和 n_2 有关, 而且还与 φ_1 和 φ_2 有关. 即平均迹长不仅仅是 n_0 , n_1 和 n_2 的函数, 而且还是视倾角 φ 的函数.

当 w 为整个测段长度时, w 比平硐高度 h 大得多, 即如下关系成立

$$\lim_{(w-h) \rightarrow \infty} \frac{h}{w} = 0, \quad (11)$$

则(10)式演变为如下形式

$$l = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2} \frac{n_1 + 2n_0}{N} h. \quad (12)$$

此式与 w 无关, 其物理意义是: 当 w 为无限长时, 相对 w 而言, h 对迹长估计的影响可以忽略不计, 即可以认为与无限远处两侧边交切的结构面数量趋近于零(不予考虑). (12)式可称之为“无限长窗口 H-H 迹长估计公式”.

尽管推广后的 H-H 迹长估计方法建立了估计迹长与结构面产状(倾角)的显式关系, 在理论上较 H-H 迹长估计公式更加严密, 但是在应用上仍然存在一定缺陷: 当两端可见结构面数量 n_2 占优势时, 因交切窗口结构面数量很少而导致 H-H 迹长估计方法失效. 一种可能的改进方法是将结构面分成 2 组, 其中一组由交切窗口的结构面组成, 平均迹长 l_h 按照推广的 H-H 公式((10)式)计算; 另一组为两端可见结构面, 其平均迹长 l_2 等于全迹长均值, 具体算法如下:

$$l_g = \frac{n_2}{N} l_2 + \left(1 - \frac{n_2}{N}\right) l_h, \quad (13)$$

其中,

$$l_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} l_{2i}; \quad (14)$$

$$l_h = \begin{cases} \frac{n_1 + 2n_0}{n_1 + n_0} \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)hw}{h(\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1) + w(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)} & 0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2} \\ \frac{n_1 + 2n_0}{n_1 + n_0} \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)hw}{h(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) + w(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)} & \frac{\pi}{2} \leq \varphi < \pi. \end{cases} \quad (15)$$

实际上, 交切窗口的结构面代表了长迹长结构面, 迹长估计需要用(10)式的概率模型进行估计; 两端可见结构面代表了短迹长结构面, 迹长估计问题成了求其统计平均值的确定性问题.

关于 l_g 迹长估计公式(13)~(15)虽然是从 H-H 公式导出, 但是从方法分类上, 既不属于纯粹的交流

切法,也不是单纯的迹长法,而是两者有机的结合,所以称为“广义 H-H 迹长估计公式”,简称 H-H2 迹长估计公式。

当在勘探平洞进行结构面测量时,一般情况下, w 比平洞高度 h 大得多,故可视为无限宽度窗口,由公式(13)~(14),经推导整理后可得

$$l_g = \frac{1}{N} \left[\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2} (n_1 + 2n_0)h + \sum_{i=1}^{n_2} l_{2i} \right]. \quad (16)$$

对于侧裂结构面(陡裂)而言, φ_1, φ_2 变化范围要比在 $0 \sim \pi$ 区间小,统计表明,其倾角在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化,相应地, φ_1, φ_2 分别为 60° 和 120° ,则上式变为

$$l_g = \frac{1}{N} \left[(n_1 + 2n_0) \frac{\pi h}{3} + \sum_{i=1}^{n_2} l_{2i} \right]. \quad (17)$$

(17)式为“无限长窗口广义 H-H 迹长估计公式”,

简称 H-H2W 迹长估计公式。

2 广义 H-H 迹长估计方法检验

任何一种算法除了具有理论上的严密性和完备性外,更重要的是还必须通过实际数据的检验,为此,我们对广义 H-H 迹长估计算法进行了验证.按照圆盘理论,随结构面走向和倾向的迹长应大致相当.为此,我们以某水电工程勘探平洞(包括支洞)为基本统计单位,一方面,在其走向上,通过追索与平洞走向一致的陡倾结构面,可以获得其迹长真实值,即全迹长.另一方面,在与之相垂直的平洞中,即结构面的倾向上,布设测量统计窗口,通过(13)式,即广义 H-H 迹长估计公式对同组结构面迹长进行估计;其中取 φ_1, φ_2 分别为 $\pi/3$ 和 $2\pi/3$,两者对比计算结果如表 1 所列。

通过同组结构面的估计迹长与真实全迹长对比发现,两者近似相等,除 PD76 差别较大外,多数不超过 0.3 m. 因此,广义 H-H 迹长估计算法具有较高的可靠性和估计精度。

表 1 侧裂结构面估计迹长与全迹长对比

岸别	基于概率模型的估计迹长				基于确定模型的平均迹长			
	洞号	岩性	岩性段长/m	平均迹长/m	洞号	岩性	岩性段长/m	平均迹长/m
左岸	PD45-4	角砾熔岩	263	3.42	PD45-3	角砾熔岩	145	3.40
	PD45-5	角砾熔岩	69	3.49				
	PD75	角砾熔岩	181	1.85				
	PD75-1	角砾熔岩	53	1.82				
	PD87 交	斑状玄武岩	330	1.81				
	PD87-3	斑状玄武岩	120	1.24				
右岸	PD18-5	玄武岩	92	2.68	PD18-3	玄武岩	504	2.84
	PD18-6	玄武岩	140	2.76				
	PD56	玄武岩	108	1.65				
	PD76	玄武岩	153	1.98				
					PD76 交	玄武岩	148	1.52

3 广义 H-H 迹长估计方法的应用及对比

拟建的西南某大型水电站是一巨型的水力发电工程,大坝为双曲拱坝,坝高 270 m. 其坝肩抗滑稳定性受到一组断续延伸的结构面控制. 查明这组结构面的工程地质特性对坝肩抗滑稳定性评价具有至为关键的作用,为此,我们采用包括广义 H-H 算法在内的多种迹长估计模型对该组结构面的迹长进行了研究。

勘探揭露表明,控制坝肩抗滑稳定的该组结构面多为迹长短小且呈随机分布的陡倾角基体裂隙. 由于平洞揭露的有限性(平洞断面为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$), 只

有少量结构面在洞壁上可以测量到其全迹长;而大部分结构面只能观察到部分迹长,必须依靠概率模型进行迹长估计. 为此,在勘探平洞中,以整个洞壁(高度 2 m)为统计窗口,采集这组结构面与洞壁测网交切关系的数据,然后利用广义 H-H 迹长估计模型等多种算法进行迹长估计. 表 2 列出了各勘探平洞采用不同方法的迹长估计结果;可见,各种方法迹长估计值有以下特点:

(1) 当迹长短小时,广义 H-H 方法计算结果与 Laslett 接近,反映了结构面的实际迹长; $2L_{0.5}$ 法和 H-H 方法迹长估计结果略微偏高,基本上反映了其平均迹长的上限. 例如 PD17, PD18-1, PD32,

PD52 以及 PD45-2 等。

(2) 当迹长较大时, H-H 方法与 Laslett 方法迹长估计值均显著偏大, 与实际情况显然不符, 例如厂房平洞 PD13, PD45-4 和 PD45-5, 且由于 Laslett 算法不受窗口尺度限制, 其偏大的幅度还明显高于

H-H 方法。2L_{0.5}方法的迹长估计值从统计意义来看一般不超过2倍的洞高(4m), 因此, 当迹长较大时, 其估计值偏小, 例如 PD45-4 和 PD45-5. 在所有方法中, 只有广义 H-H 方法真实反映了侧裂结构面的实际迹长。

表2 各种算法估计迹长对比表

洞号	N	n ₂	n ₁	n ₀	H-H(m)	Laslett(m)	2L _{0.5} (m)	广义H-H(m)
PD1	44	15	29	0	2.06	1.77	2.63	1.70
PD2	11	1	9	1	3.10	2.33	2.17	2.18
PD13	20	1	12	7	4.01	4.38	2.46	2.75
PD16	53	20	21	12	2.66	2.35	2.51	2.10
PD17	54	26	25	3	1.79	1.70	2.76	1.66
PD18-1	15	7	7	1	1.86	1.78	2.31	1.81
PD32	29	14	12	3	1.92	1.52	2.17	1.69
PD45-2	24	11	13	0	1.66	1.37	2.27	1.52
PD52	21	5	15	1	2.49	2.09	2.50	1.95
PD69	17	16	1	0	0.18	0.90	3.53	0.89
PD69-1	29	10	11	8	2.88	2.60	2.37	2.34
PD45-4 ^{a)}	68	0	25	43	5.09	10.08	2.70	3.42
PD45-5 ^{a)}	27	0	9	18	5.09	11.18	2.27	3.49

a) 厂房区勘探平洞

(3) H-H 迹长估计会出现“不稳定”的情况。如当 n₂ 接近 N 时, H-H 方法几乎完全失效, 迹长估计值明显偏小(不足 2m), 例如 PD69 平洞; 而当 n₀ 较大时, 其迹长估计值又明显增大, 例如 PD2, PD13, PD45-4 和 PD45-5 等, 主要原因是 H-H 迹长估计与结构面在窗口内的视倾角 φ 无关。相比而言, 广义 H-H 模型的迹长估计值较为稳定。

(4) 2L_{0.5}是 Laslett 公式在 n₁ = N 时的一种特殊情形, 通常情况下, 其估计迹长值与 n₂ 和 n₀ 的相对数量有关, 且与 n₂ 成正相关, 即当 n₂ 较 n₀ 大, 则估计迹长较广义 H-H 估计迹长偏高; 反之, 当 n₂ 较 n₀ 小时, 估计迹长较广义 H-H 估计迹长偏低, 这表明 2L_{0.5}迹长估计属于有偏估计。

综上所述, 广义 H-H 迹长估计模型在各种情形下, 均具有较好的适用性, 且估计的精度是最高的。

4 结论

迹长是岩体结构面定量描述的重要指标之一。通过本文的研究, 我们分析了目前各种迹长估计方法的特点及适用性。在此基础上, 从结构面与窗口交切的概率关系出发, 导出了理论上更为严密的迹长估计公式, 即广义 H-H 迹长估计模型。现场实测数据的检验表明, 该迹长估计模型具有较高的估计精度; 通过与其他模型的对比分析表明, 该模型不

仅适用性强, 对短迹长和长迹长结构面均具有较好的估计能力, 并考虑了结构面的产状因素; 而且, 模型避开了结构面迹长的概率密度函数, 直接通过考察结构面与“窗口”的交切关系来进行迹长估计, 因而, 现场数据采集简便, 实用性和可操作性强。目前, 该模型已在西南地区某大型水电工程的坝肩抗滑稳定性评价中得到应用, 取得了很好的效果。

参 考 文 献

- Hudson A, et al. Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. London: Pergamon, 1995
- Cruden M. Describing the size of discontinuity. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstracts, 1977, 14: 992
- Kulatilake PHSW, et al. Estimation of mean length of discontinuity. Rock Mech & Rock Eng, 1984, 17: 346
- Priest S D, et al. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstracts, 1981, 18: 78
- 潘别桐, 等. 岩体结构概率模拟和应用. 岩石力学新进展. 沈阳: 东北工学院出版社, 1989
- 陈剑平, 等. 随机不连续面三维网络计算机模拟原理. 长春: 东北师范大学出版社, 1995
- 黄国明, 等. 基于交切条件下的不连续面迹长估计算法. 地质科技情报, 1998, 25(6): 27
- 黄国明, 等. 复杂岩体结构的几何描述. 成都理工大学学报, 1998, 25(4): 552