

隧道含水围岩非均质各向异性渗透特性的研究

杨立中* 黄涛 钟生军

(西南交通大学)

提 要 在隧道突水预测中,由于含水围岩渗透具有较强的非均质各向异性,常影响隧道突水预测、预报的准确性。为了解决这个问题,本文以中国南昆铁路二排坡隧道为例,提出了用渗透张量新方法进行隧道含水围岩非均质各向异性渗透的计算分析,以提高隧道突水来源、突水位置、以及突水量的预测预报准确度。

主题词 隧道含水围岩 渗透特性 非均质性 各向异性 渗透张量

1 前 言

在山区铁路建设中,隧道突水的预测和防治是一个重要问题。为解决这个问题,最关键的是获取含水围岩的水文地质参数,特别是渗透系数,以计算突水量的大小和确定治水的位置。由于长大隧道多施工在岩体中,其含水围岩具有较强的非均质各向异性,导致所赋存的地下水运动产生强烈方向性和不均一性。由于这一独特性质,普通的含水介质渗透系数已难以满足计算的需要,必须采用非均质各向异性渗透系数。获取非均质各向异性渗透系数的传统方法不仅耗资巨大,而且需要较大的场地和较长的周期,无法适应隧道施工时有限空间和时间。为了在隧道施工的特定条件下,求得围岩裂隙含水介质的非均质各向异性渗透系数,本文采用了渗透张量(permeability tensor)计算和分析新方法,解决上述问题。

2 非均质各向异性渗透的形成及渗透张量

隧道含水围岩多属于裂隙含水介质或岩溶裂隙含水介质,它是由定向分布的裂隙组构成的不均一裂隙含水网络。在裂隙介质中,由于定向展布的裂隙组控制了地下水的运动方向,使垂直于隙面法线方向的渗透性最大、而平行隙面法线方向的渗透性最小,导致了裂隙含水介质渗透的各向异性。另外,构造应分布的非均匀性和地层岩性的差异性,又导致了裂隙含水介质渗透的非均质性。

对于含水围岩渗透的这一特性,可以通过地下水渗流场变化研究,然而,裂隙发育的规律

* 本文收稿日期 1996-01-23 杨立中 博士 教授 西南交通大学工程地质系副主任 成都 邮码:610031

性及其参数的可量度性,使我们也可用渗透张量法进行研究。这方面 D. T. Snow(1969), E. E. Pomm(1961), 田开铭(1984), 杨立中(1986)等作过大量研究,建立了裂隙含水介质渗透张量的数学模型。

$$K = \frac{b^3 f}{12} \begin{bmatrix} 1 - \cos^2 \beta \sin^2 \gamma & -\sin \beta \cos \beta \sin^2 \gamma & -\cos \beta \sin \gamma \cos \gamma \\ -\sin \beta \cos \beta \sin^2 \gamma & 1 - \sin^2 \beta \sin^2 \gamma & -\sin \gamma \sin \gamma \cos \gamma \\ -\cos \beta \sin \gamma \cos \gamma & -\sin \beta \sin \gamma \cos \gamma & 1 - \cos^2 \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, K ——渗透张量

b ——隙宽

f ——裂隙密度

β ——裂隙面倾向

γ ——裂隙面倾角

这样,只要测量出含水围岩裂隙的倾向、倾角、密度、隙度等参数值,代入(1)式便可计算出该组裂隙的渗透张量理论值。然而,实际隧道含水围岩裂隙介质复杂得多,要进行隧道含水围岩裂隙介质的渗透张量计算,必须根据隧道所处的地质背景,对围岩的裂隙参数进行分析处理,而后进行裂隙网络系统的渗透张量计算,以及含水围岩裂隙介质的非均质各向异性分析。现以中国南昆铁路二排坡隧道的岩溶裂隙含水围岩为例,研究如下。

3 二排坡隧道的地质背景

二排坡隧道位于昆明市西南,地处高原山丘,发育的地层从老到新有寒武系下统龙王庙组(ϵ_1)白云岩及白云质灰岩;志留系中统马龙群下段(S_{2m}^b)白云质灰岩夹页岩,中段(S_{2m}^a)泥质砂质绢云母页岩夹泥灰岩,上段(S_{2m}^c)生物灰岩夹黄绿色泥质页岩;下第三系路美邑组(E_2)泥岩,砂岩夹泥灰岩;第四系(Q)冲积层,残坡积层。该区位于著名的小江大断裂北东向“入”字形构造带中,由于多次构造活动,形成了各种规模不等的断裂和褶皱,其中断裂构造尤为发育,多为北东和北西走向的冲断层。如图1所示。该区的地下水为岩溶裂隙类型,其赋存不均,其中 ϵ_1 和 S_{2m}^c 的白云岩和石灰岩富水性较强, S_{2m}^b 富水性较差, S_{2m}^a 富水性居中。另外,在断裂带附近,各种地层的富水性均有所增强。显然,在上述地质及水文地质背景下,二排坡隧道所处的含水围岩为一套渗透具有非均质各向异性的岩溶裂隙含水介质。

4 含水围岩裂隙参数的分析

(1)、均质离散子区的划分

根据前面渗透张量计算分析的要求,选择围岩裂隙的倾向(β)、倾角(γ)、密度(f)、隙度(b)、切穿长度(q)等为含水围岩渗透张量计算的裂隙参数,沿二排坡隧道地下及地表,在24个测点上统计了760余条裂隙,获得了1千余个裂隙参数值。由于研究区裂隙渗透的非均质性是由地层岩性和地质构造影响所致。为此,根据研究区的地质背景,隧道含水围岩分为4个相对均质的各向异性渗透子区,即I子区(ϵ_1),II子区(S_{2m}^c),III子区(S_{2m}^a),青山村断层IV子区。(如图1所示)

(2)、子区裂隙组的划分

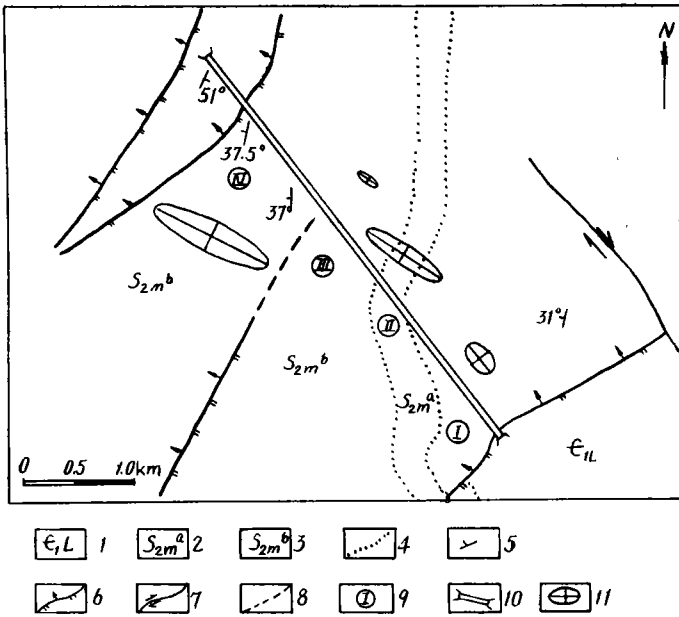


图 1 二排坡隧道地质及含水围岩渗透椭圆分布图

1、寒武系下统龙王庙组， 2、志留系中统马龙群下段， 3、马龙群中段， 4、地层分界线，5、地层产状， 6、逆冲断层， 7、平移断层， 8、推测断层， 9、离散子区， 10、二排坡隧道， 11、渗透椭圆

由于隧道含水围岩的裂隙系统由多组裂隙构成，因此把量测的所有裂隙的倾向、倾角按赤平投影的方法作出各子区的极点图，通过极点图的分析，I 子区可划分三组裂隙，倾向分别为 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ， $100^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ， $250^{\circ} \sim 279^{\circ}$ ，II 子区可划分四组裂隙，倾向分别为 $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ， $140^{\circ} \sim 160^{\circ}$ ， $170^{\circ} \sim 210^{\circ}$ ， $260^{\circ} \sim 280^{\circ}$ ，III 子区可划分三组裂隙倾向分别为 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ， $100^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ， $250^{\circ} \sim 280^{\circ}$ ，IV 子区可划分组裂隙，倾向分别为 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ， $110^{\circ} \sim 130^{\circ}$ ， $260^{\circ} \sim 280^{\circ}$ ，这些裂隙组的倾角大多数大于 50° 。总体倾向为 NE，SE，W。

(3)、子区裂隙组方向及其参与与渗透张量计算参数的确定

在极点图划分了各子区裂隙组的基础上，可利用数理统计的方法具体确定各裂隙组的方向及倾角，并去掉非系统裂隙。理论证明，裂隙组的隙面法线存在一个趋势方向，而每个裂隙面法线与趋势方向的夹角(θ)符合 Fisher 分布，根据子区的裂隙组划分极点图假设某裂隙组的趋势方向矢量，并计算各裂隙隙面法矢量与趋势方向矢量的夹角 θ_i ，同时，按由小到大对 θ_i 值进行聚类归组，并用 X^2 分布检验它们是否服从 Fisher 分布、一旦归入某一条裂隙不服从该分布，则结束聚类。这样反复试算、聚类、检验，最后得出某组裂隙最合理的趋势方向矢量和裂隙数，把该趋势方向定为子区某一裂隙组方向，聚类裂隙的参数参与渗透张量计算。因不服从 Fisher 分布未进行聚类的裂隙，则视为非系统裂隙，不参与渗透张量的计算。如此重复，确定出子区的其它裂隙组方向及其参与渗透张量计算的裂隙参数。通过电算，研究区 4 个子区聚类分析后裂隙组数及其参数如表 1 所示。

5 各子区含水围岩裂隙系统渗透张量的计算

由于实际含水围岩中的裂隙系统为多组裂隙，且各个裂隙组的切穿长度不一，隙间距不等，其连通情况有差异，因此，根据张量的迭加性，某子区含水围岩裂隙系统的渗透张量，应该是各组裂隙渗透张量的迭加，并在迭加项前一个与裂隙组切穿长度和隙间距有关，且小于 1 的修正系数，即所谓的裂隙网络“导水链系数”(цепь водопроводящих трещин)。针对这一问题，本文采用了如下迭加式计算各子区裂隙系统的渗透张量：

$$K = \sum_{i=1}^n B_i(K); \quad (2)$$

表1 子区裂隙参数表

子区号	裂隙组号	裂隙倾向 (°)	裂隙倾角 (°)	裂隙隙宽 (mm)	裂隙密度 (l/m)	切穿长度 (m)
I	1	14.6	83.8	0.2262	4.0145	1.2285
	2	104.3	73.2	0.2527	2.3600	0.8201
	3	263.2	24.1	0.0681	1.6793	0.8976
II	1	95.3	55.2	0.0922	0.8569	1.3670
	2	143.3	61.6	0.1836	1.4937	1.3363
	3	201.5	88.7	0.2996	4.0766	0.6850
	4	270.6	33.8	0.1964	1.4995	1.0000
III	1	27.0	77.4	0.0347	4.3085	1.5170
	2	105.7	63.7	0.0310	2.3674	0.9320
	3	258.6	31.9	0.0293	1.5349	1.0000
IV	1	19.2	79.7	0.3544	5.4201	0.8535
	2	126.5	61.1	0.1887	3.4176	0.9088
	3	275.5	37.1	0.0966	1.5765	1.0000

其中,

$$B_i = \begin{cases} 0 & 0 < Q \sin \varphi < n \cdot S \\ \frac{Q \cdot \sin \varphi}{m \cdot S} & n \cdot S \leq Q \cdot \sin \varphi \leq m \cdot S \\ 1 & m \cdot S < Q \cdot \sin \varphi < \infty \end{cases}$$

S ——任一方向裂隙组平均隙间距,即 $S = 1/f$ 。

Q ——另一方向裂隙组平均切穿长度。

φ ——裂隙组间方向夹角。

m, n ——与导水链系数有关的上、下界值。

B_i ——导水链系数。

这样,我们计算出各子区含水围岩裂隙系统的渗透张量。再利用雅可比(Jacobi)方法,计算出各子区含水围岩裂隙系统的主渗透值及渗透主方向,

$$[P_{ij}]^{-1} \cdot K_{ij} \cdot [P_{ij}] = K_{ii} \quad (3)$$

式中, K_{ij} ——渗透张量方阵

K_{ii} ——渗透张量主对角线方阵

$[P_{ij}]$ ——特征向量矩阵

同时,按矢量运算法则计算出三个渗透主方向的方位。

倾向为: $\beta_i = \arctg(P_{ij}/P_{2j})$

(4)

$$\text{倾角为: } \gamma_j = \arcsin(P_{3j} / \sqrt{P_{1j}^2 + P_{2j}^2 + P_{3j}^2}) \quad (5)$$

将表1中的各个子区裂隙组的参数值代入(1)、(2)、(3)、(4)、(5)式中,则计算出各子区含水围岩裂隙系统的渗透张量,其电算结果如表2所示。该计算结果与实际抽水试验求得的渗透系数很接近。如Ⅲ子区计算的渗透张量平均值为0.01m/d,而该子区的Z1一排-5孔和Z2-01-62孔抽水试验求得的渗透系数值分别为0.029m/d和0.018m/d,与计算值非常相近。另外从各子区隧道工记录反映的含水围岩富水性为Ⅳ区最强,Ⅲ区最弱,Ⅰ区和Ⅱ区一般,这也和渗透张量计算的结果一致。说明渗透张量计算结果与实际情况符合。

表2 各子区含水围岩裂隙系统的渗透张量值表

子区号	渗透张量主轴	渗透张量主值(m/d.)	方位		子区号	渗透张量主轴	渗透张量主值(m/d.)	方位	
			倾向(β)	倾角(γ)				倾向(β)	倾角(γ)
Ⅰ	K ₁₁	2.211	226.0	21.3	Ⅲ	K ₁₁	0.020	122.4	23.0
	K ₂₂	3.221	322.5	16.3		K ₂₂	0.002	220.7	18.8
	K ₃₃	6.497	86.9	62.7		K ₃₃	0.018	346.1	59.9
Ⅱ	K ₁₁	9.695	301.9	2.0	Ⅳ	K ₁₁	20.814	114.4	12.5
	K ₂₂	0.597	32.0	3.0		K ₂₂	2.689	207.9	15.5
	K ₃₃	7.695	182.5	86.0		K ₃₃	19.124	347.1	69.9

6 隧道含水围岩非均质各向异性渗透特性的分析

(1) 含水围岩渗透主方向的分析

由于本文研究的是三维问题,所以选择表2中近水平方向的两个渗透张量主值和相应的渗透主方向绘成渗透椭圆,并展布于各相应子区中,如图1所示。由图中分析,各向异性渗透椭圆主轴(长轴)方向均为NNW,由表2中的数值计算,平均方位为305.3°。假设渗透椭圆主轴的摆动方位服从正态分布,可以计算,渗透主轴方位在95%置信度下的置信区间为:

$$(305.3^\circ - 12.036 / \sqrt{4} \times 3.1824, 305.3^\circ + 12.036 / \sqrt{4} \times 3.1824) \\ = (286.15^\circ, 305.3^\circ)$$

即,隧道含水围岩渗透性最强的方向有95%的可能性在268.15°~324.45°之间,这一方向与本区的几条主要逆冲断层的走向基本垂直,说明这几条主要逆冲断层两侧垂直的配套张裂隙,导水性良好,是隧道围岩来水的主要通道。

(2) 含水围岩渗透各向异性的分析

渗透椭圆的长轴与短轴之比反映了渗透各向异性强弱,从表2中可计算出四个子区的该比值分别为:1.457、16.240、10.0、7.741。这一数值特征,从图1中可分析如下:Ⅰ子区由于NE和NW向两条相互垂直的断裂交汇,使得长轴方向基本垂直的两个主渗透方向相互迭加,造成了含水围岩渗透各向异性减弱。Ⅱ、Ⅳ子区,由于位于两条近于平行的NE向断裂之间,使得长轴方向基本平行的两个主渗透方向相互迭加,增强了含水围岩渗透各向异性的控制。

(3) 含水围岩渗透非均质性的分析

渗透椭圆面积的大小反映了渗透的强、弱,从表2中可计算出四个子区的渗透椭圆面积分别为:5.592、4.546、0.00603、43.958。这一数值特征,从图1中可分析如下:由于地层岩性的影

响, I、II子区的含水围岩富水性较好, 渗透性较强, 而III子区的含水围岩富水性很差, 其渗透性很弱, 对于IV子区, 虽然地层岩性使围岩的富水性差, 但由于两条断岩的影响, 裂隙发育, 使围岩的富水性得到很大改善, 其渗透性也增强。

综上所述, 该隧道可能发生突水的地段, 主要为IV子区, 其次为I、II子区, 而III子区可视为隔水段。另外, 隧道突水时, 地下水的强径流方向主要为 305.4° 或 125.4° , 即NW或SE方向, 而这种方向性在II、IV子区尤为明显。

7 结束语

通过隧道含水围岩非均质各向异性渗透张量的计算和分析, 可得如下认识:

(1) 渗透张量作为一种简捷有效的方法, 适合于在隧道施工有限的空间和时间条件下, 研究隧道含水围岩的非均质各向异性渗透特性。

(2) 渗透张量法不仅可以分析隧道含水围岩的富水区, 而且可以判断含水围岩中地下水的强径流方向, 以及方向性的强弱, 为预测隧道突水的区域、突水的方向, 以及水害治理等创造有利条件。

(3) 由于围岩裂隙参数的测量带有经验性, 因此, 渗透张量法计算结果与实际条件会有一定误差。所以, 在利用渗透张量法的同时, 应利用必要的抽水或压水试验, 给予验证和修正, 以期得到更符合实际的结果。

铁道部第二勘测设计院、铁道部第十五工程局、以及西南交通大学地九零级对论文的现场工作给予了很大的帮助, 在此一并致谢。

参考文献

- 1 杨立中. 非均质各向异性裂隙含水介质研究方法的探讨. 水文地质工程地质. 1986年. 4
- 2 田开铭、万力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与分析. 学苑出版社. 1989年
- 3 帕森斯. M. L. 裂隙岩石水文地质特征的确定. 水文地质译文集. 地质出版社. 1979年
- 4 路易斯. C. . 岩体水力学. L. 米勒主编. 岩石力学. 煤炭工业出版社. 1987年
- 5 Ромм, Е. С. . Методка исследования коллекторских свойств трещиноватых торных пород. труды ВНИГРИ Вып. 1961г. 165.
- 6 чернышев. С. Н. . Движение воды по сетям трещин. Москва 'недра'. 1979г.
- 7 Snow. D. T. . Anisotropic permeability of fractured media. Water Resource Research. 1969. 5. (6)
- 8 Legrand. H. . Evaluation techniques of fractured—rock hydrology. Contemporary Hydrogeology. 1979.

A STUDY OF INHOMOGENEOUS AND ANISOTROPIC PERMEABILITY ON AQUIFEROUS TUNNEL—SURROUNDING ROCK

Yang Lizhong Huang Tao Zhong Shengjiun

Southwest Jiaotong University

Abstract In the prediction of gush water inistunnel, itis quite difficult to predict the gush

water accurately due to the surrounding rock with obvious inhomogeneity and anisotropy. This paper, taking the Erpaipo Tunnel in the Nan—Kun Railway as an example, presents a new permeability tensor method to make an analysis and calculation of inhomogeneous and anisotropic permeability on the aquiferous tunnel—surrounding rock, It improves the accuracy of prediction of the gush water source, site and quantity.

Keywords aquiferous tunnel—surrounding rock; permeability; inhomogeneity; anisotropy; permeability tensor

铁道部第一勘测设计院工质工作简况

铁一院共有地质勘探队 11 个,测量队 14 个,试验室 5 个。地质专业技术人员 446 人,其中高级工程师 50 人,工程师 205 人,助工及技术员 191 人,技术工人 530 人。有汽车 354 辆,各类钻机 78 台,触探设备 32 台,价值 2794.1 万元。24 道、12 道等多道地震仪 7 台,各类电法仪 16 台,频率测深仪、管线探测仪、磁力仪各 1 台,加拿大凤凰公司多功能大地电磁测深仪 1 台,测井仪 2 台。经纬仪 191 台,水准仪 116 台,测距仪 32 台,遥感图象处理工作站系统一套。静三轴岩土试验机 8 台,固结仪 10 台,压缩仪 57 台,剪切试验机 28 台,显微镜 2 台,X 射线衍射仪和光谱仪各 1 台。(以上为 1993 年资料)

近年来主要地质勘探成果:

据统计资料:1993 年共完成铁路勘测 4314.21 换算公里。桥 880 座,其中特大桥 8 座,计 19.28km;完成大于 3km 的隧道 9 座计 32.84km;完成钻探工作量 68206 实钻米;物探标准点 65729 个。

1994 年铁一院在新勘测方法与技术的应用上做了许多工作,如:把音频大地电磁法投入到秦岭隧道定测勘探,收到良好的效果;地震反射法用于隧道施工现场的不良地质预报取得阶段性成果;开发出“铁路工程地质断面图及勘测资料 CAD 软件”用于近百个工点设计中,效果良好;继续推广使用“次时差法”。

(摘编自《中国铁路地质年鉴》)