

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006045

基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

王 玮, 钱家忠, 马 雷, 王德健, 马海春, 赵卫东
(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 掌握岩体的渗透性是精细化描述一个地区水文地质特征的重要工作。渗透系数是表征岩体渗透性的重要指标, 研究渗透系数估算模型对于实际工程应用具有重要意义。在现有的渗透系数估算模型中, 单因子模型忽略了其他因素对该地区渗透系数的综合影响, 复合因子模型存在参数选取不够灵活、部分参数较难获取等问题。基于公开数据, 分类整理和对比分析了影响裂隙岩体渗透性的正、负相关参数, 提出一种拟合效果好、参数选取灵活的渗透系数估算模型——PNC (Positive and Negative Correlation) 模型。研究结果表明: 在研究区一, PNC 模型的拟合效果 (可决系数 $R^2=0.964$ 和 $R^2=0.801$) 优于 HC 模型的拟合效果 ($R^2=0.905$ 和 $R^2=0.563$); 在研究区二, PNC 模型的拟合效果 ($R^2=0.959$) 优于 RMP 模型的拟合效果 ($R^2=0.927$); 在研究区三, PNC 模型的拟合效果 ($R^2=0.94 \sim 0.99$) 优于 ZRF 模型的拟合效果 ($R^2=0.92 \sim 0.99$)。利用纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe Coefficient, NSE) 进行模型误差分析, 7 组数据中有 5 组数据的误差系数在 0.95 以上。这说明 PNC 模型具有便利性和可靠性, 可以为实际工程估算和验证渗透系数提供一定的参考。

关键词: 渗透系数; 正、负相关指标; 估算模型; 裂隙岩体

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0082-08

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

WANG Wei, QIAN Jiazhong, MA Lei, WANG Dejian, MA Haichun, ZHAO Weidong
(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Mastering hydraulic conductivity of rock mass is an important way to precisely describe hydrogeological characteristics of a certain region. Hydraulic conductivity is a significant indicator to reflect the rock mass' permeability. The studies of hydraulic conductivity estimation models have important implications for the development of actual engineering. In the existing estimation models of hydraulic conductivity, the single-factor model cannot take into consideration of the comprehensive influence of various factors on hydraulic conductivity in the area, and the parameters selection of the multi-factor model lacks the flexibility and its application is limited when some parameters are difficult to be obtained, etc. The classification and comparative analyses of the positive and negative correlation parameters are conducted based on public data. We propose a set of high-fitting hydraulic conductivity estimation models, which are the PNC (Positive and negative correlation) model. The research results show that the fitting result of the PNC model ($R^2=0.964$ and $R^2=0.801$) is superior to that of the HC model ($R^2=0.905$ and $R^2=0.563$) in No. 1 study area. In No. 2 study area, the fitting result of the PNC model ($R^2=0.959$) is superior to that of the RMP model ($R^2=0.927$). In No. 3 study area, the fitting result of

收稿日期: 2020-06-14; 修订日期: 2020-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41831289; 41772250; 41972278)

第一作者: 王玮 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质研究。E-mail: hgdzhhww@163.com

通讯作者: 马雷 (1985-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事裂隙水运移多尺度模拟研究。E-mail: Lei8505@hfut.edu.cn

the PNC model ($R^2=0.94$ to 0.99) is also better than that of the ZRF model ($R^2=0.92$ to 0.99). By using Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) to carry out the error analyses of the model, it is found that the error coefficients of 5 in 7 sets of data are above 0.95. It further illustrates the convenience and reliability of the PNC model, which can provide a certain reference for estimating and verifying hydraulic conductivity in actual engineering.

Keywords: hydraulic conductivity; positive and negative correlation indicators; estimation model; fractured rock mass

渗透系数是定量描述地下水在岩石裂隙中流动和运移的基本参数^[1],是水文地质的一项重要指标^[2],在实际工程中得到了广泛的应用。然而,裂隙岩体具有高度的复杂性和不确定性^[3],如何较准确地在野外现场快速确定渗透系数一直是工程应用中面临的难题。

当前,野外获取裂隙岩体渗透系数的方式主要有抽水试验^[4]、微水试验^[5]、压水试验^[6]、排水试验^[7-8]、示踪试验^[9]以及联合试验^[10]等方法,但是这些试验方法普遍耗时长、费用高,不同方法得到的结果差异大。因此,有必要开发一种获取参数灵活、准确率高、快速便捷的估算渗透系数的方法。渗透系数的估算模型作为一种便捷快速的方法已经在工程领域得到广泛的应用。Louis^[11]、Black^[12]、Snow^[13]、Wei等^[14]、Carlsson等^[15]、Chen等^[16]分别总结了渗透系数和深度之间的关系(表1)。蒋小伟等^[17]总结提出了岩石质量指标(RQD)与平均渗透系数之间的关系。Hsu等^[18]和Ku等^[19]提出了一种基于岩石质量指标(RQD)、深度指标(DI)、泥质含量指标(GCD)、岩性渗透指标(LPI)的HC模型。宋琨等^[20]提出了一种基于岩石质量指标(RQD)、岩石渗透性指标(LPD)、裂隙宽度指标(AD)、岩体完整性指标(RID)的RMP模型。陈君等^[21]提出了一种基于埋深(Z)、岩石质量指标(RQD)和充填物指标(FSD)的ZRF模型。

前人提出的方法为野外快速、便捷地获取渗透系数提供了重要的依据。但是,有的模型仅考虑了深度或者岩石质量指标单个因素;有的模型虽然综合考虑多种因素,但是在参数选取方面不够灵活,而且实际拟合效果有待提高。因此,现有的估算模型作为野外获取渗透系数的通用模型有一定的局限性。在实际应用中,不同地区的地质条件差异较大,在工程实践中获得的参数亦不尽相同。现有的渗透系数估算模型参数固定、适用性差。因此,建立一种参数选取灵活、准确性高的渗透系数估算模型很有必要。

本文通过对公开数据的整理与分析,提出了一种基于相关性指标的PNC模型。该模型在参数选取方面比较灵活,可以利用现场可获取的参数,选择合理

的正、负相关性参数进行拟合,是一种指标选取灵活的渗透系数估算模型。该方法可以为现场条件下快速估算渗透系数提供一种计算依据。

1 渗透系数估算模型

1.1 现有估算模型

现有的渗透系数估算模型,主要分为两种类型。一种是基于单因子估算,例如,表1所示的利用深度估算渗透系数,蒋小伟等^[17]利用岩石质量指标估算不同深度的渗透系数,对大尺度范围的估算具有重要意义。但是,由于场地尺度裂隙的复杂性,裂隙的渗透系数不仅受深度或者岩石质量指标等某一种因素的影响,还受到隙宽、裂隙壁面的粗糙度、裂隙的填充指标和岩石基质的渗透性等多重因素的影响。学者们^[18,20-21]提出了复合因子的渗透系数估算模型,见表2。

虽然有学者提出了复合因子模型,但仍需要进一步改进。本文重点对比了Hsu等^[18]、宋琨等^[20]、陈君等^[21]提出的复合因子估算模型,分析现有估算模型的局限性。

Hsu等^[18]在研究中国台湾中部和南部砂岩地区时,提出了基于岩石质量指标 RQD 、深度指标 DI 、泥质含量指标 GCD 和岩性渗透性指标 LPI 的HC模型:

$$HC = (1 - RQD)(DI)(1 - GCD)(LPI) \quad (1)$$

$$K = 2.93 \times 10^{-6}(HC)^{1.380} \quad (2)$$

表1 考虑深度 Z 的渗透系数估算模型

Table 1 Estimation model of hydraulic conductivity considering depth Z

作者	拟合方程	参数含义
Louis ^[11]	$K = K_s e^{(-AZ)}$	K_s 为近地表的渗透系数, A 为水力梯度, Z 为深度
Black ^[12]	$K = aZ^{-b}$	a, b 为系数, Z 为深度
Snow ^[13]	$\lg K = 8.9 - 1.67 \lg Z$	Z 为深度
Wei等 ^[14]	$K = K_s [1 - Z/(58 + 1.02Z)]^3$	K_s 为近地表的渗透系数, Z 为深度
Carlsson等 ^[15]	$K = 10^{-(1.6 \lg Z + 4)}$	Z 为深度
Chen等 ^[16]	$K = K_s Z^{-a}$	K_s 为近地表的渗透系数, Z 为深度, a 为系数

表 2 复合因子的渗透系数估算模型

Table 2 Multi-factor estimation model of hydraulic conductivity

作者	拟合方程	参数含义
Hsu等 ^[18]	$HC = (1 - RQD)(DI)(1 - GCD)(LPI)$, $K = \alpha \cdot (HC)^\beta$	RQD 为岩石质量指标, DI 表示深度指标, GCD 表示泥质含量指标, LPI 表示岩性渗透性指标, α, β 为经验参数
宋琨等 ^[20]	$RMP = (1 - RQD)(1 - RID)(AD)(LPD)$, $K = \alpha \cdot (RMP)^\beta$	RQD 为岩石质量指标, RID 表示岩体完整性指标, AD 表示裂隙宽度指标, LPD 表示岩石渗透性指标, α, β 为经验参数
陈君等 ^[21]	$\lg K = \alpha + \lambda \cdot PD + \gamma \cdot \lg Z$, $PD = (1 - RQD)(1 - FSD)$	RQD 为岩石质量指标, FSD 表示充填物指标系数, Z 表示深度, α, λ, γ 为经验参数

$$DI = 1 - \frac{L_C}{L_T} \quad (3)$$

式中: L_C ——封隔器测试区间中心点的深度;

L_T ——钻孔的总长度;

K ——渗透系数。

实际上, 渗透系数的值不会因钻孔的长度而改变。Hsu 等^[18]选取的两口钻井位于中国台湾的不同地区, 钻孔岩芯差异很大。使用 HC 模型拟合 HB-94-01 岩芯的渗透系数的效果较好 ($R^2=0.905$), 但是在拟合 HB-95-02 时, 拟合效果不是很理想 ($R^2=0.495$)^[21], 说明该模型适应性有待提高。

宋琨等^[20]研究烟台地下水洞库渗透系数时提出了基于岩石质量指标 RQD 、岩体完整性指标 RID 、裂隙宽度指标 AD 和岩石渗透性指标 LPD 的 RMP 模型为:

$$RMP = (1 - RQD)(1 - RID)(AD)(LPD) \quad (4)$$

$$K = 10.855 \cdot (RMP)^{0.8666} \quad (5)$$

其中, RID 是《工程岩体分级标准》(GB 50218—94)^[22]中定义的岩体弹性纵波速度与岩石弹性纵波速度之比的平方^[22]。但是若实验室测试的岩石弹性纵波速度小于钻孔岩体的弹性纵波速度, 会导致 RID 大于 1, 这一结果不太合理, 所以选取较完整、均质的岩体段作为标准样, 采用标准样的最大波速值作为岩石弹性纵波速^[20]。这一过程需要人工经验和实验操作判断相结合。人工经验判断存在主观性和不稳定性, 难以保证其准确性; 而野外现场环境一般不具备实验室操作条件。因此, RMP 模型作为一种快速估算岩体渗透系数的通用方法时, 具有一定的局限性。

陈君等^[21]在对四川省甘孜州雅江县的牙根二级水电站坝体渗透系数的研究中, 提出了基于岩石质量指标 RQD 、充填物指标 FSD 和深度 Z 的 ZRF 估算模型:

$$\lg K = \alpha + \lambda \cdot PD + \gamma \cdot \lg Z \quad (6)$$

$$PD = (1 - RQD)(1 - FSD) \quad (7)$$

该模型参数的获取方式相较前两种模型较为便捷。但是陈君等^[21]在数据处理的过程中将大部分的

RQD 都处理为 1 (例如 ZK204 和 ZK223), 导致最后的渗透系数估算值忽略了充填物指标的影响, 主要受到深度的单因素影响。用 ZRF 模型拟合 HB-95-01 和 HB-95-02 的钻孔数据, 效果不太理想 (图 1)。这是因为这两处钻孔的主要地层均为砂岩和泥岩, 地应力较大, 为 8~9 MPa。由 RQD 可知, 该地区岩石较为破碎, 导致 ZRF 估算模型^[21]拟合效果不太理想, 很难准确地估算该地区渗透系数。

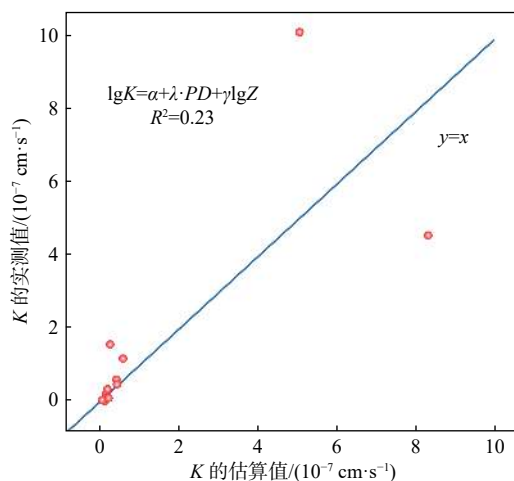


图 1 ZRF 公式估算的渗透系数与 HB-95-01、HB-95-02 孔实测 K 值的拟合结果

Fig. 1 Fitting results of hydraulic conductivity estimated with the ZRF formula and the measured K values of boreholes HB-95-01 and HB-95-02

综上所述, 以往的渗透系数估算模型主要存在两方面问题: (1) 部分模型只考虑单因子影响, 而岩体渗透系数的影响因素较为复杂, 仅靠某一种因子计算求解渗透系数过于粗略; (2) 复合因子的模型存在参数选取不够灵活, 公式构建不够合理的问题, 导致在一些地区进行数据拟合时, 效果不够理想。因此, 需要提出一种基于复合因子、指标选取灵活、拟合效果较好的岩体渗透系数估算模型。

1.2 建立正负相关指标的渗透系数估算模型

本文在 Hsu 等^[18]、宋琨等^[20]、陈君等^[21]对渗透系数估算模型研究的基础上, 总结提出了一种基于正、

负相关指标的开放型渗透系数估算模型。以前学者采用的复合因子主要有:HC模型中的岩石质量指标、深度指标、泥质含量指标、岩性渗透性指标;RMP模型中提出岩体完整性指标、岩石渗透性指标、裂隙宽度指标;ZRF模型中的岩体充填物指标。并将对这些影响因子进行正、负相关性归类分析,构建出新的拟合模型。

1.2.1 负相关指标(K_N)

渗透系数负相关指标,主要是指对渗透系数起负影响作用的参数。例如,岩石质量指标(RQD)是作为评价岩体破损程度的一个重要指标,得到了工程界的普遍认可和广泛应用^[23-25]。 RQD 的计算公式为:

$$RQD = \frac{H_L}{H_T} \quad (8)$$

式中: H_L ——完整岩芯大于 10 cm 的长度总和;

H_T ——岩芯的总长。

RQD 值越大,完整岩体在总岩体中占比越大。前人^[17,26-28]研究 RQD 与渗透系数 K 的关系见表 3。 RQD 与渗透系数 K 之间呈现负相关,即 RQD 越大,岩体的渗透系数 K 越小。因此,可以将 RQD 作为渗透系数的负相关指标。

表 3 岩石质量指标 RQD 与渗透系数 K 的拟合方程

Table 3 Fitting equations of RQD and hydraulic conductivity K

作者	拟合方程	参数含义
蒋小伟等 ^[17]	$K = 0.5102 \times e^{-0.0548RQD}$	K 为岩体的渗透系数,
Qureshi等 ^[26]	$K = 0.01382 - 0.003 \ln RQD$	k_{Lu} 是以吕荣值表示的岩体渗透率,
El-Naqa ^[27]	$K = 177.45 \times e^{(-0.0361 \times RQD)}$	RQD 为岩石质量指标,
Öge ^[28]	$k_{Lu} = e^{[4.5 + \frac{16.5 JCond - 165}{RQD}]}$	$JCond$ 为不连续条件系数

RID 是通过岩体纵波速度指数反映岩体完整性指标的参数, RID 的计算公式为:

$$RID = \left(\frac{V_m}{V_n} \right)^2 \quad (9)$$

式中: V_m ——岩体弹性纵波速/($m \cdot s^{-1}$);

V_n ——岩石弹性纵波速/($m \cdot s^{-1}$)。

RID 值越大,表示岩石的完整性越好,岩体的渗透系数随之降低。因此,推断 RID 与渗透系数 K 应该呈现负相关,从而可以将 RID 作为渗透系数的负相关指标。

深度是影响渗透系数的重要指标,已有学者发现渗透系数随深度的增加而衰减的规律^[29],因此,深度可以作为影响渗透系数的负相关指标。

1.2.2 正相关指标(K_p)

渗透系数的正相关指标,主要是指对渗透系数起正影响的参数。岩性渗透指标 LPI ^[18] 和岩石渗透性指

标 LPD ^[20] 反映渗透性的基本参数,其数值越大,渗透性越好。因此,这两项可以作为正相关指标。

裂隙宽度可以用裂隙宽度指标 AD 表征:

$$AD = \frac{L_F}{L_T} \quad (10)$$

式中: L_F ——计算段内裂隙宽度之和 /m;

L_T ——计算段总长/m。

AD 越大,岩体中的空隙越大,渗透性越好,故此项可以作为渗透系数的正相关指标。

泥质含量指标 GCD 和岩体的充填物指标 FSD ,表示岩体被填充的情况,最大值为 1。在文献中使用 $(1-GCD)$ ^[18-19] 和 $(1-FSD)$ ^[21] 表示,即 $(1-GCD)$ 和 $(1-FSD)$ 数值越大代表未被填充的越多,岩体中空隙越大,渗透性越好,故这两项可以作为渗透系数的正相关指标。

1.2.3 改进的渗透系数估算模型

对上述参数进行正、负相关性分类后,提出一种基于正、负相关指标的渗透系数估算 PNC 模型:

$$PNC = \alpha \ln K_N + \beta \ln K_p + \gamma \quad (11)$$

$$K = e^{PNC} \quad (12)$$

式中: K ——估算的渗透系数;

α 、 β 、 γ ——经验参数;

K_N 、 K_p ——负相关参数的乘积和正相关参数的乘积。

Hsu 等^[18]的研究中, K_N 为负相关指标 RQD 和 Z 的乘积, K_p 为正相关指标 $(1-GCD)$ 和 LPI 的乘积。

本模型充分考虑了对渗透系数产生影响的各因素,并且在参数选择上更加灵活。以往研究提出的复合因子模型,大多只是将几组数据进行简单相乘,并未进行分类,导致拟合的效果不够理想。本模型将所有参数进行汇总、评估、分类,分为正、负相关指标,最后采用自然对数进行拟合,得到的公式拟合效果更好。

为了保证估算渗透系数的准确性,正、负相关指标至少需要测试一项。此外,估算模型中的 α 、 β 、 γ 作为经验参数,与岩性、裂隙发育程度等相关。在实际应用中,可以先用尽可能多的正、负相关指标数据进行拟合,求出相应的 α 、 β 、 γ ,然后再将这些参数用于该场地类似条件下岩体渗透系数的估算。

1.3 纳什效率系数

纳什效率系数(NSE)一般用于验证水文模型模拟结果,是水文学中应用最广泛的误差函数之一^[30-31]。本文用 NSE 作为评价模型方法,进一步验证 PNC 模

型的可靠性:

$$f_{\text{error}} = 1 - \frac{\sum (K_0 - K_1)^2}{\sum (K_0 - \bar{K}_0)^2} \quad (13)$$

式中: K_0 ——渗透系数的实测值;

$\bar{K}_0$ ——渗透系数实测值的平均值;

K_1 ——渗透系数的估算值;

f_{error} ——误差系数, 其值越接近 1 代表拟合结果越好。

2 模型评估

为了评估 PNC 模型的拟合效果, 本文按照研究区不同岩性进行划分, 对 Hsu 等^[18]、宋琨等^[20]和陈君等^[21]文中的数据进行拟合, 并与原文的拟合结果进行对比。

2.1 模型评估一(以 Hsu 等^[18]研究区的数据为例)

文献 [18] 中的 HB-94-01、HB-95-01 和 HB-95-02 钻孔位于中国台湾中部的砂岩和粉砂岩地区。对 3 口钻孔的数据按照正、负相关指标的思路进行分类整理, 结果见表 4。值得注意的是, 参考文献 [20] 中的

处理方法, 将 RQD 、 $1-GCD$ 和 LPI 等于 1 的值取为 0.999, 其主要目的是为了防止估算模型中某一项数值为 0, 避免因未能充分考虑所有影响因素而得到不够精确的结果。此处使用 PNC 模型拟合 3 口钻孔渗透系数, 并将得到的结果与原文提出的 HC 模型进行对比分析, 拟合对比结果见表 4。因为 HB-95-01 钻孔数据只有 3 组, 故将该钻孔和地理位置相近的 HB-95-02 钻孔一并拟合分析。

结果显示, PNC 模型在拟合 Hsu 等^[18]研究区的钻孔岩性渗透系数方面拟合效果 ($R^2=0.964$ 和 $R^2=0.801$) 均优于原文的 HC 模型的拟合效果 ($R^2=0.905$ 和 $R^2=0.563$), 说明 PNC 模型在该砂岩地区具有较好的适用性。

2.2 模型评估二(以宋琨等^[20]研究区的数据为例)

文献 [20] 中 ZK10 钻孔位于山东烟台地下水封洞库的花岗岩地区, 对该钻孔的数据按照正、负相关指标的分类思路进行整理(表 5)。此处用 PNC 模型拟合 ZK10 钻孔的数据, 并与原文的 RMP 模型进行对比, 结果见表 5。PNC 模型在拟合宋琨等^[20]研究区的数据时表现出了更好的拟合效果 ($R^2=0.959$), 优于原文的 RMP 模型的拟合效果 ($R^2=0.927$), 表明 PNC 模

表 4 HB-94-01、HB-95-01 和 HB-95-02 相关数据的分类整理与渗透系数拟合

Table 4 Classification of relevant data of borehole HB-95-01, HB-95-01 and HB-95-02

钻孔名称	负相关指标 K_N		正相关指标 K_P		渗透系数实测值 $K/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	PNC模型的拟合值 $K/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	HC模型的拟合值 $K/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
	岩石质量指标	深度指标	泥质含量指标	岩性渗透性指标			
	RQD	Z/m	$1-GCD$	LPI			
HB-94-01	0.906	35.50	0.999	0.999	7.060	13.700	5.710
	0.562	37.20	0.999	0.999	164.000	136.000	43.800
	0.937	57.50	0.999	0.950	1.530	0.947	1.930
	0.500	75.40	0.999	0.400	5.300	3.050	5.640
	0.999	78.00	0.999	0.400	0.042	0.075	0.028
	0.875	83.40	0.999	0.400	0.231	0.113	0.618
	0.999	91.00	0.999	0.400	0.029	0.034	0.014
	0.500	95.00	0.999	0.400	0.453	0.832	1.840
HB-95-01	0.655	100.45	0.200	0.400	0.980	0.832	1.020
	0.310	118.65	0.999	0.850	97.600	101.000	57.700
	0.276	134.65	0.286	0.999	4.680	6.140	11.400
	0.929	90.00	0.999	0.600	15.600	16.700	2.510
	0.969	97.60	0.999	0.600	2.420	12.400	0.770
	0.781	120.10	0.071	0.700	0.136	0.186	0.324
	0.656	136.40	0.727	0.700	11.700	10.100	13.400
	0.062	156.40	0.103	0.700	1.990	2.050	3.170
HB-95-02	0.062	174.60	0.103	0.700	0.908	1.760	2.760
	0.406	191.40	0.999	0.700	101.000	45.400	29.300
	0.464	198.20	0.500	0.999	6.000	6.140	16.100
	0.321	214.60	0.999	0.999	45.400	45.400	46.300
	0.607	250.40	0.091	0.700	0.403	0.306	0.317
	0.786	273.40	0.999	0.700	3.360	6.140	2.620

表 5 ZK10 相关数据的分类整理与渗透系数拟合
Table 5 Classification of relevant data and hydraulic conductivity fitting of borehole ZK10

钻孔名称	负相关指标 K_N		正相关指标 K_P		渗透系数实测值 $K/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	PNC模型的拟合值 $K/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	RMP模型的拟合值 $K/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
	岩石质量指标 RQD	岩体完整性指标 RID	裂隙宽度指标 AD	岩性渗透性指标 LPD			
ZK10	0.870	0.88	1.007	0.15	0.170	0.205	0.172
	0.860	0.84	1.231	0.15	0.272	0.277	0.275
	0.880	0.87	1.530	0.15	0.242	0.306	0.240
	0.870	0.79	0.418	0.15	0.124	0.124	0.128
	0.810	0.80	4.244	0.15	1.260	1.240	1.260
	0.810	0.80	0.213	0.15	0.100	0.113	0.094
	0.540	0.61	3.780	0.15	4.460	6.140	4.350
	0.590	0.69	3.961	0.15	4.280	4.330	4.060
	0.820	0.73	3.693	0.15	1.350	1.370	1.370
	0.530	0.59	3.977	0.15	9.860	1.010	6.900
	0.670	0.69	3.623	0.15	3.940	2.760	3.180
	0.660	0.67	3.891	0.15	4.980	5.030	3.620
	0.690	0.69	3.354	0.15	2.190	2.260	2.290
	0.840	0.83	3.566	0.15	0.816	0.832	0.808
	0.820	0.82	3.920	0.15	1.050	1.020	1.040

型在该花岗岩地区具有较强的适用性。

2.3 模型评估三(以陈君等^[21]研究区的数据为例)

文献 [21] 中的 ZK343、ZK204、ZK223 和 ZK153 钻孔位于四川牙根二级水电站的花岗岩地区,按照正、负相关指标的分类思路整理 4 口钻井的数据,将 RQD 和 Z 归为负相关指标, $(1-FSD)$ 归为正相关指标。此处用 PNC 公式进行拟合,并与原文提出的 ZRF 模型拟合效果进行对比分析,结果见表 6。由表 6 可知 PNC 模型拟合结果相较于 ZRF 模型效果更好,而且拟合效果都达到 $R^2=0.9$ 以上,说明 PNC 模型在岩

石较为完整的花岗岩地区具有较好的适用性。

2.4 模型的误差分析

为了进一步评估 PNC 模型的准确性,对以上 7 组数据利用纳什效率系数进行误差分析,结果见表 7。通过纳什效率系数的误差分析可知,7 组数据中有 5 组数据的 f_{error} 都在 0.95 以上,说明 PNC 模型对以上三个地区的数据都表现出了较好的拟合效果。同时,文中提到的 8 个钻孔(分为 7 组,其中 HB-95-01 和 HB-95-02 合为一组)拟合的可决系数 R^2 均大于 0.8,且 $R^2\geq 0.95$ 占 71%,进一步说明了 PNC 模型拟合效果较好。

表 6 PNC 模型与 ZRF 模型拟合结果对比

Table 6 Comparison of the fitting results between the PNC model and the ZRF model

钻孔名称	α	β	γ	PNC模型拟合的 R^2	ZRF模型拟合的 R^2
ZK343	2.937	-5.637	16.030	0.94	0.92
ZK204	-9.118	-0.780	-7.083	0.99	0.99
ZK223	9.857	-1.281	-4.927	0.97	0.94
ZK153	1.330	-1.921	-2.241	0.96	0.95

表 7 纳什效率系数误差分析

Table 7 The NSE error analyses

钻孔名称	f_{error}
HB-94-01	0.95
HB-95-01和HB-95-02	0.70
ZK10	0.96
ZK343	0.90
ZK204	0.98
ZK223	0.97
ZK153	0.96

3 结论

(1)PNC 模型是一种基于正、负相关指标的复合因子模型。该模型作为一种参数开放型的模型,在指标选取方面灵活性较高,应用便捷。

(2)采用 PNC 模型对 7 组钻孔岩性的渗透系数进行拟合,结果显示 PNC 模型拟合的 R^2 均大于 0.8,并且拟合 R^2 大于 0.95 的占 71%。对比原作者的估算模型发现,PNC 模型表现出较好的拟合效果,并且在常见的砂岩和花岗岩地区中具有较好的适用性。同时,利用 NSE 进行误差分析,说明 PNC 模型在估算和验证渗透系数方面具有一定的实际工程应用价值。

(3)PNC 为参数开放型模型,本文采用验证模型的钻孔数据量和参数量有限。建议在实际应用中选取尽可能多的参数作为 PNC 模型的组成部分,使结果

可以涵盖多方面因素的影响。另外 α, β, γ 为不确定参数, 需要利用尽可能多的钻孔数据拟合获得, 从而提高渗透系数估值的准确性。

参考文献 (References) :

- [1] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: American Elsevier Publication Company, 1972.
- [2] 马婧, 鲁春辉, 吴吉春, 等. 一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 1 - 7. [MA Jing, LU Chunhui, WU Jichun, et al. A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic islands[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 樊贵超, 钟登华, 任炳昱, 等. 基于分形理论的坝基裂隙岩体注灰量与导水率关系研究[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 576 - 587. [FAN Guichao, ZHONG Denghua, REN Bingyu, et al. Research on the relationship between cement take and transmissivity of fractured rocks under dam foundation based on fractal theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(5): 576 - 587. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杜欣, 曾亚武, 唐冬云. 基于水下抽水试验的岩体渗透系数研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 3542 - 3548. [DU Xin, ZENG Yawu, TANG Dongyun. Research on permeability coefficient of rock mass based on underwater pumping test and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup2): 3542 - 3548. (in Chinese with English abstract)]
- [5] QUINN P M, PARKER B L, CHERRY J A. Using constant head step tests to determine hydraulic apertures in fractured rock[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2011, 126(1/2): 85 - 99.
- [6] 张必昌, 胡成, 陈刚, 等. 利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 62 - 69. [ZHANG Bichang, HU Cheng, CHEN Gang, et al. Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 62 - 69. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 翟晓荣, 吴基文, 韩东亚. 补给边界群孔放水试验的含水层参数计算[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 837 - 840. [ZHAI Xiaorong, WU Jiwen, HAN Dongya. Aquifer parameter calculation of pumping test of group holes with recharge boundary[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(5): 837 - 840. (in Chinese with English abstract)]
- [8] XU J P, CHEN M Y, HONG H, et al. Differences of hydraulic conductivities from pumping and draining tests with intensity effects[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579(9): 1 - 10.
- [9] 尹尚先, 徐斌, 徐慧, 等. 化学示踪连通试验在矿井充水条件探查中的应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 129 - 134. [YIN Shangxian, XU Bin, XU Hui, et al. The application of chemical tracer experiments on exploring the mine water filling conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 129 - 134. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李亚美, 成建梅, 崔莉红, 等. 分层监测孔现场分级联合试验确定含水层参数[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 132 - 137. [LI Yamei, CHENG Jianmei, CUI Lihong, et al. Determination of aquifer parameters from comprehensive *in situ* pumping and tracing test in the multi-layer monitoring boreholes[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(3): 132 - 137. (in Chinese with English abstract)]
- [11] LOUIS C. Rock hydraulics [M]. Muller L. Vienna: Springer Verlag, 1974: 299-387.
- [12] BLACK J H. Flow and flow mechanisms in crystalline rock[J]. Geological Society, 1987, 34(1): 185 - 200.
- [13] SNOW D T. The frequency and apertures of fractures in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1970, 7(1): 23 - 40.
- [14] WEI Z Q, EGGER P, DESCOEUDRES F. Permeability predictions for jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(3): 251 - 261.
- [15] CARLSSON A, OLSSON T. Hydraulic properties of Swedish crystalline rocks-hydraulic conductivity and its relation to depth[J]. Bulletin of the Geological Institute, 1977(7): 71 - 84.
- [16] CHEN Y F, LING X M, LIU M M, et al. Statistical distribution of hydraulic conductivity of rocks in deep-incised valleys, Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 566(9): 216 - 226.
- [17] 蒋小伟, 万力, 王旭升, 等. 利用RQD估算岩体不同深度的平均渗透系数和平均变形模量[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3163 - 3167. [JIANG Xiaowei, WAN Li, WANG Xusheng, et al. Estimation of depth-dependent

- hydraulic conductivity and deformation modulus using RQD[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3163 – 3167. (in Chinese with English abstract)]
- [18] HSU S M, CHUNG M C, CHENG Y K, et al. A rock mass classification scheme for estimating hydraulic conductivity of fractured rocks[C]//Geocongress 2008. Reston: American Society of Civil Engineers, 2008 : 452-459.
- [19] KU C Y, HSU S M, CHIOU L B, et al. An empirical model for estimating hydraulic conductivity of highly disturbed clastic sedimentary rocks in Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2009, 109(3/4): 213 – 223.
- [20] 宋琨, 晏鄂川, 陈刚. 地下水封洞库岩体渗透系数估算研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(3): 575 – 580. [SONG Kun, YAN Echuan, CHEN Gang. Hydraulic conductivity estimation of rock mass in water sealed underground storage caverns[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(3): 575 – 580. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈君, 刘明明, 李星, 等. 一种基于地质指标的裂隙岩体渗透系数估算模型[J]. *岩土力学*, 2016, 37(6): 1706 – 1714. [CHEN Jun, LIU Mingming, LI Xing, et al. A geological indexes-based empirical model for estimation of permeability coefficient in fractured rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1706 – 1714. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 中华人民共和国建设部. 中华人民共和国国家标准: 工程岩体分级标准: GB 50218—1994[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China: Standard for engineering classification of rock masses: GB 50218—1994[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995. (in Chinese)]
- [23] 蔡海兵, 程桦. 基于FDAHP理论的深部岩体分级方法[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(6): 43 – 49. [CAI Haibing, CHENG Hua. Classification method of deep rock mass based on FDAHP theory[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(6): 43 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈剑平, 范建华, 刘迪. RQD应用与研究的回顾与展望[J]. *岩土力学*, 2005, 26(增刊2): 249 – 252. [CHEN Jianping, FAN Jianhua, LIU Di. A review and prospect on the application and research of RQD[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(Sup2): 249 – 252. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 陈康达, 宋彦辉, 巨广宏, 等. 坝体岩体岩石质量指标、波速和透水率的关系: 以青海玛沁地区玛尔挡水电站为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(6): 822 – 827. [CHEN Kangda, SONG Yanhui, JU Guanghong, et al. Relationships among rock quality designation, wave velocity and permeability of dam foundation rock mass: Taking Maerdang hydropower station in Maqin Area of Qinghai, China as an example[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, 40(6): 822 – 827. (in Chinese with English abstract)]
- [26] QURESHI M U, KHAN K M, BESSAIH N, et al. An empirical relationship between in-situ permeability and RQD of discontinuous sedimentary rocks[J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 19: 4781 – 4790.
- [27] EL-NAQA A. The hydraulic conductivity of the fractures intersecting Cambrian sandstone rock masses, central Jordan[J]. *Environmental Geology*, 2001, 40(8): 973 – 982.
- [28] ÖGE İ F. Assessing rock mass permeability using discontinuity properties[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 191: 638 – 645.
- [29] 万力, 蒋小伟, 王旭升. 含水层的一种普遍规律: 渗透系数随深度衰减[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(1): 7 – 12. [WAN Li, JIANG Xiaowei, WANG Xusheng. A common regularity of aquifers: the decay in hydraulic conductivity with depth[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(1): 7 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [30] KRAUSE P, BOYLE D P, BÄSE F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment[J]. *Advances in Geosciences*, 2005, 5: 89 – 97.
- [31] PIÑA A, DONADO L D, BLESSENT D, et al. Analysis of the scale-dependence of the hydraulic conductivity in complex fractured media[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 556 – 572.

编辑: 张若琳