

破碎、较破碎岩体渗透系数与埋深关系的研究

——以某石灰石矿山为例

吴占廷

(西北综合勘察设计院贵阳分院, 贵州 贵阳 550001)

[摘要] 岩体的渗透性与其埋深关系紧密,一般表现为岩体的渗透性随埋深增加而逐渐减小的规律,本文开展破碎、较破碎岩体随单一埋深关系的渗透系数研究,采用负指数相关性模型和幂次函数模型对丽江古城某石灰石矿山在地表浅部 55 m 深度范围进行的 5 次压水水样数据进行拟合相关模型计算参数,发现幂次函数模型的相关性 ($R=0.9165$) 比负指数模型相关性 ($R=0.8842$) 优越。并根据拟合参数与 CHEN Y F (2018) 通过我国西南地区 12 个大坝上万组注水试验数据得出的拟合参数进行对比,得出基于常数头注水试验在地表以下较浅深度段的渗透系数可以代替地表渗透系数,采用多段不同埋深渗透系数拟合 K_0 时宜采用负指数相关模型,确定地表渗透系数后或已知地表渗透系数的情况下宜采用幂次函数模型预测不同深度渗透系数。

[关键词] 破碎岩体;渗透系数;地表渗透系数;深度

[中图分类号] P588.2;P642 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2023)02-159-06

1 引言

岩体渗流研究最为基础的工作系渗流模型和渗透系数的研究,其渗透系数直接影响着研究成果的合理性及实用性(陈洪凯,1996,1998)。目前岩体渗透系数的研究主要有现场水文地质试验、裂隙样本法、反分析法和渗透系数估算法(孙蓉林等,2006;景来红等,2007;陈君等,2016),但现场测试存在费用高周期长及受测试尺度现限制等问题(黄俊等,2012),且只在一些重要部位开展,难以真实反映工程区岩体的渗透特性,且现场试验主要在工程建设阶段进行,在可行性研究阶段往往还需要借助工程类比、地质分析等手段估算岩体的渗透性(陈君等,2016)。

目前关于渗透系数与深度的关系的研究基于多指标,SNOW D T 等最早提出考虑初始渗透系数、裂缝开度、裂缝正向刚度及裂缝间距的线性预

测模型(SNOW D T,1968),开启了渗透系数与深度关系预测的先河;Hsu 等(2009)提出 HC 模型,利用岩石质量指标 RQD、深度指标 DI、泥质充填物指标 GCD 和岩石渗透性指标 LPI 等指标估算碎裂沉积岩的渗透系数;宋琨等(2014)建立了考虑 RQD、岩体完整性指标 RID、裂隙宽度指标 AD 和 LPI 等指标的 RMP 模型,用以估算地下水封洞库围岩的渗透系数;陈君等(2016)提出考虑 Z、RQD 和 FSD 等因素的岩体渗透系数估算 ZRF 模型,估算岩体渗透系数(陈君等,2016)。多指标的渗透系数模型需要大量测试数据,在工程咨询及项目可行性研究阶段往往试验数据少,因而这些模型在实际工作中往往受到限制,开展基于单一应力或埋深关系的深部岩体渗透系数预测研究有重要的意义。

部分学者注意到岩体的渗透性与其埋深关系紧密,一般表现为岩体的渗透性随埋深增加而逐渐减小的规律(SNOW D T,1968;周维垣,1990;蒋

[收稿日期]2023-01-19 [修回日期]2023-04-10

[作者简介]吴占廷(1988—),男,贵州石阡人,本科,工程师,主要从事地质工程勘察设计。E-mail:1031782691@qq.com。

小伟, 2009; 万力等, 2010; ZHANG Lian - yang, 2013; 吴顺川, 2021)。但基于单一埋深关系的渗透系数研究较少, 且不同学者提出的相关预测模型相差较大, 得到工程界认可的模型相对较少。根据将单一深度预测模型采用模拟函数 (Louis, 1974; Jones, 1975; Louis, 1976; Carlsson. H. et al., 1983; Black J H, 1987; Wei, et al, 1995; CHEN Y F (2018) 的不同划分为笔者将其划分为三种函数模型: (1) 幂次函数模型, 例如 (Carlsson (1983) 模型、Black (1987) 模型; (2) 负指数函数模型, 如路易斯 (Louis, 1974) 模型、路易斯 (Louis, 1976) 模型; (3) 多项式及对数多项式模型, 例如 Wei 等 (1995) 模型。根据模拟采用的初始渗透系数或地表渗透系数的不同划分为三种类型: (1) 不考虑初始渗透系数或地表渗透系数, 典型的模型为路易斯 (Louis, 1974) 模型、H. Carlsson (1983) 模型、Black (1987) 模型、Wei 等 (1995) 模型; (2) 初始渗透系数为基数计算模型, 例如 Jones (1975) 模型、路易斯 (Louis, 1974) 模型; (3) 地表渗透系数为基数计算模型, 例如路易斯 (1976)、CHEN Y F (2018)。

本文根据丽江古城某石灰石矿山在地表浅部 55 m 深度范围进行的 5 次压水水样数据, 根据 Louis (1976) 负指数模型和地表渗透系数幂次函

数模型拟合相关模型计算参数, 以建立破碎、较破碎岩体的渗透系数-深度关系模型, 为高边坡边坡渗流场的分析提供依据。

2 工程案例

2.1 工程概况

丽江古城某石灰石矿山, 地理坐标北纬 26° 58'02"~26°58'34"、东经 100°20'32"~100°21'01", 行政区划属云南省丽江市金山街道, 根据采矿许可证可开采标高介于 2 500 ~ 2 916 m, 高差为 416 m。矿区主要出露的地层为三叠系中统北衙组中段 (T₂b²) 与二叠系上统黑泥哨组 (P₂h), 根据设计方案将在其北侧形成 416 m 高终采边坡, 边坡岩体渗透系数的研究关系着边坡渗流场的分析, 对边坡稳定性有着重要的影响 (陈洪凯, 1996; 陈洪凯, 1998)。

2.2 岩体物理力学测试

2.2.1 密度测试

本次分别取 9 件式样进行天然和饱和进行密度试验, 其密度测试统计结果如表 1 所示。

表 1 岩石密度统计表 (单位 g/cm³)

Table 1 Statistics of rock density (unit g/cm³)

状态	统计数	范围	平均值	标准差	变异系数	修正系数	建议值
天然	9	2.68 ~ 2.71	2.70	0.01	0.003	1.002	2.68
饱和	9	2.69 ~ 2.71	2.70	0.01	0.003	1.002	2.70

2.2.2 岩体纵波波速测试

波速的测试分别采用室内试验和现场试验, 室内压缩波速测试在同一钻孔岩芯中均匀采取 18 个岩芯, 岩芯为柱状、每个试块取样长度大于 15 cm, 取样后用防撞膜进行包裹, 其中 9 个为天然状态, 另外 9 个试件进行饱和处理, 岩块波速试验结果统如计如表 2 所示。现场试验通过钻孔波

速获取岩体的纵波波速值, 采用武汉中岩科技生产的 SR-RCT 松动圈检测仪进行测试, 该设备只能测试纵波, 由于其探头是自发超声的, 因此可以测试深孔波速, 在 ZK102 钻孔中从 5 m 测试到 132 m, 1 m 采集一个数据, 共获得 128 个数据, 对其岩体钻孔纵波波速测试结果统计如表 3 所示。

表 2 岩块波速测试结果统计表 (单位 m/s)

Table 2 Statistics of rock wave velocity testing results (unit g/cm³)

状态	统计数	范围	平均值	标准差	变异系数	修正系数	建议值
天然	9	4 905 ~ 5 550	5 247	229.7	0.044	0.973	5 103
饱和	9	4 953 ~ 5 454	5 239	184.5	0.035	0.987	5 124

表 3 岩体钻孔纵波波速测试结果统计表 (单位 m/s)

Table 3 Statistics of rock drill longitudinal wave velocity testing results (unit g/cm³)

测试深度 (m)	统计数	范围	平均值	小值平均值	大值平均值
5 ~ 132	128	2 321.1 ~ 6 081.2	3 891.1	3 270.2	4 511.99

根据表2和表3测试结果分析,岩体波速平均值为3 891.1 m/s,岩块波速天然状态平均值为5 247 m/s,小值平均值为3 270.2 m/s,大值平均值为4 511.99 m/s。其天然状态岩块波速最大值为5 550 m/s小于岩体波速最大值6 081.2 m/s,本次综合考虑采用岩体最大波速6 081.2 m/s代表岩块波速,故其波速比为0.54~0.74,岩体完整指数 K_v 为0.29~0.54,根据《岩土工程勘察规范》GB50021-2011(2009年版)岩体完整程度属于破碎至较破碎。

2.3 注水试验

根据《水电工程钻孔注水试验规程(NB/T 35104-2017)》(国家能源局,2018),对矿区钻孔ZK101进行5段钻孔常水头注水试验,对试验段止水后,向钻孔内注入清水,使钻孔中水位高出止

水底部一定高度,水位观测间隔为5 min,连续量测5次;以后每隔20 min量测一次并至少连续量测6次,当连续2次量测注入流量之差不大于最后一次注入流量的10%时,即可结束试验,用最后一次注入流量作为计算值。

对试验地层的渗透系数按下式计算,其结果见表4。

$$K = \frac{7.05Q}{lH} \lg \frac{2l}{r} \quad (1)$$

式中:

K ——试验岩土层的渗透系数,cm/s;

Q ——注入流量,L/min;

l ——试验段长度,cm;

r ——钻孔内半径,cm;

H ——试验水头,cm。

表4 钻孔注水试验数据一览表

Table 4 Data of borehole waterflooding experiments

段号	段落	试验段长度 l (cm)	水头高度 H (cm)	计算流量 Q (L/min)	渗透系数 K (cm/s)
1	10.0~14.0m	400	227	69.141	6.58×10^{-3}
2	20.0~24.0m	400	231	60.723	5.68×10^{-3}
3	30.0~34.0m	400	333	56.023	3.64×10^{-3}
4	40.0~44.0m	400	280	46.621	3.60×10^{-3}
5	50.0~54.0m	400	286	42.874	3.24×10^{-3}

3 埋深关系的渗透系数计算模型

3.1 深度关系的渗透系数模型的选择

结合矿山特征及参数较少的特点,本次根据仅对一个钻孔不同深度的5段进行注水试验的特点对深度关系的渗透系数模型进行选择。(1)本次未进行初始应力状态的渗水试验,故不采用与初始渗透系数相关的模型;(2)岩体的渗透性随埋深增加而逐渐减小,初始渗透系数或地表渗透系数是采用单一深度计算模型的基础,因此必须考虑初始渗透系数或地表渗透系数;(3)排除(1)、(2)两条情况后,适宜使用的仅有Louis(1976)考虑地表渗透系数的负指数相关模型和CHEN Y F(2018)考虑地表渗透系数幂次函数。

Louis(1976)通过大量裂隙岩体的钻孔抽水试验结果,得出渗透系数与有效应力的负指数相关的广义表达式,即

$$K_f = K_0 \text{Exp}[-\beta(\gamma H - p)] \quad (2)$$

式中: K_f 为不同深度渗透系数; K_0 为地表渗透系数,cm/s; β 拟合系数; γ 为岩石重度 KN/m^3 ; H 为垂直厚度 m ; p 孔隙水压力 KPa 。

CHEN Y F(2018)通过我国西南地区12个大坝岩体上万组注水试验数据,发现峡谷岩体的渗透系数随埋深服从幂次函数变化规律。

$$K_f = K_0 H^{-a} \quad (3)$$

式中: a 为拟合系数,CHEN Y F(2018)研究认为在500~600 m埋深范围内,最佳拟合参数 K_0 为 $2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$, $a=0.48$ 。

本次结合野外注水试验特征,结合CHEN Y F(2018)的研究结果,考虑到陈益峰系通过大量数据模拟得到 K_0 为定值,且与本次注水试验所得的地表渗透系数 K_0 为 6.58×10^{-3} 相差较大,考虑应对地表渗透系数进行修正。

3.2 预测模型参数的确定

3.2.1 负指数相关模型系数确定

根据Louis(1976)负指数相关模型,结合钻孔注水试验结果对地表渗透系数 K_0 和 β 的进行模

拟,见图1。根据矿山地下水埋深较大,无孔隙水压,故 P 为 0,则有 $-\beta\gamma = -0.019$, 计算可得 $\beta = 0.000712$, 地表渗透系数 K_0 为 $8.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 与现场注水试验 10.0 ~ 14.0 m 段所得渗透系数 6.58×10^{-3} 基本一致。可以考虑采用 $8.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 作为地表渗透系数代表值。

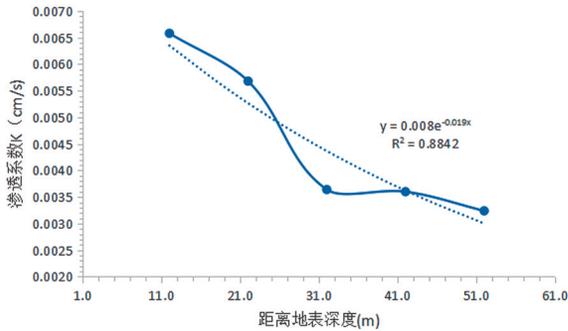


图1 渗透系数 K 与深度 H 的负指数相关拟合模型

Fig. 1 Negative index relative fitted model of permeability coefficient (K) and depth (H)

3.2.2 幂次函数模型系数确定

根据钻孔注水试验 10.0 ~ 14.0 m 段渗透系数为 6.58×10^{-3} , 幂次函数模型对不同深度的 5 次注水试验结果进行模拟结果, 地表渗透系数 K_0 为 $8.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 按幂次函数模型拟合确定拟合系数 α , 拟合得渗透系数与深度关系图 2, 则有拟合系数 α 为 0.52, 其中 α 与 CHEN Y F (2018) 大量数据研究所得的最佳拟合值 0.48 相差较小。

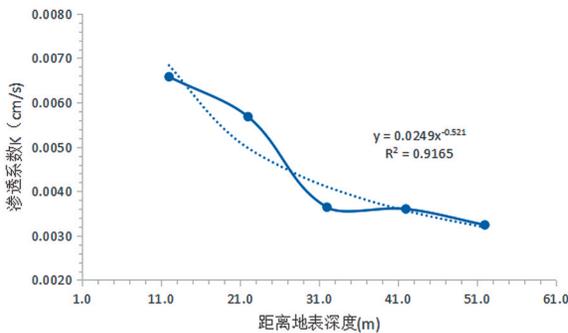


图2 渗透系数 K 与深度 H 的幂次函数拟合模型

Fig. 2 Exponential functional fitted model of permeability coefficient (K) and depth (H)

4 不同深度渗透系数的确定

4.1 负指数相关模型不同深度渗透系数的预测

根据前文分析负指数相关模型中选取 Louis (1976) 公式、地表渗透系数 K_0 为 $8.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,

$\beta = 0.000712$ 。由于矿山地下水埋深较大, 故孔隙水压 P 取 0 kPa , 对矿山不同深度渗透系数进行预测, 计算结果见表 5。对计算结果绘制半对数坐标图(3), 可以清楚的看出, 随着深度的增加, 渗透系数的对数($\lg K$)呈线性降低。

表5 负指数相关模型不同深度渗透系数

Table 5 Permeability coefficient of negative index relative model in different depth

埋深 H (m)	K_0	β	K_f
50	0.008	0.000712	3.08×10^{-3}
100	0.008	0.000712	1.19×10^{-3}
150	0.008	0.000712	4.57×10^{-4}
200	0.008	0.000712	1.76×10^{-4}
250	0.008	0.000712	6.78×10^{-5}
300	0.008	0.000712	2.61×10^{-5}
350	0.008	0.000712	1.01×10^{-5}
400	0.008	0.000712	3.88×10^{-6}
450	0.008	0.000712	1.49×10^{-6}

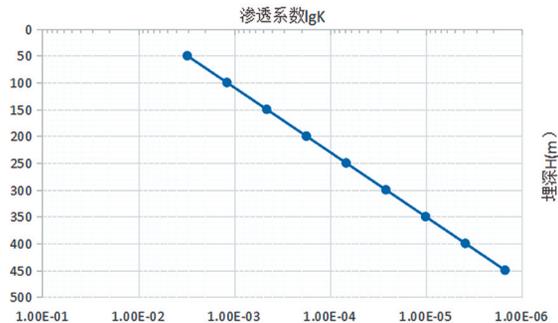


图3 负指数相关模型的半对数坐标图

Fig. 3 Semilog coordinate picture of negative index relative model

4.2 幂次函数模型不同深度渗透系数的预测

根据前文拟合结果可知, 地表渗透系数 K_0 为 $8.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 拟合系数 α 为 0.52, 与 CHEN Y F (2018) 大量数据研究所得的最佳拟合值 0.48 有一定相差。本次根据 CHEN Y F (2018) 计算公式, 按幂次函数模型对 α 为 0.48 和 0.52 分别对不同深度渗透系数进行计算, 结果见表 6。对计算结果绘制半对数坐标图(4), 可以看出因为地表渗透系数 K_0 的不同, CHEN Y F (2018) 经验值计算得的不同深度渗透系数值与修正 K_0 后的渗透系数值小得多, 而修正 K_0 后的渗透系数随 α 的增大而减下, 但根据本次 5 段注水试验拟合所得的 α 与 CHEN Y F (2018) 大量数据研究所得的最佳拟合值 0.48 相差较小。

表 6 幂次函数模型不同深度渗透系数

Table 6 Permeability coefficient of exponential functional model in different depth

埋深 H(m)	幂次函数模型		
	CHEN Y F(2018) $K_0=0.0002, \alpha=0.48$	$K_0=0.008, \alpha=0.48$	CHEN Y F(2018)修正 K_0 $K_0=0.008, \alpha=0.52$
50	3.06×10^{-5}	1.22×10^{-3}	1.046×10^{-3}
100	2.19×10^{-5}	8.77×10^{-4}	6.001×10^{-4}
150	1.81×10^{-5}	7.22×10^{-4}	4.860×10^{-4}
200	1.57×10^{-5}	6.29×10^{-4}	4.185×10^{-4}
250	1.41×10^{-5}	5.65×10^{-4}	3.726×10^{-4}
300	1.29×10^{-5}	5.18×10^{-4}	3.389×10^{-4}
350	1.20×10^{-5}	4.81×10^{-4}	3.128×10^{-4}
400	1.13×10^{-5}	4.51×10^{-4}	2.918×10^{-4}
450	1.07×10^{-5}	4.26×10^{-4}	2.745×10^{-4}

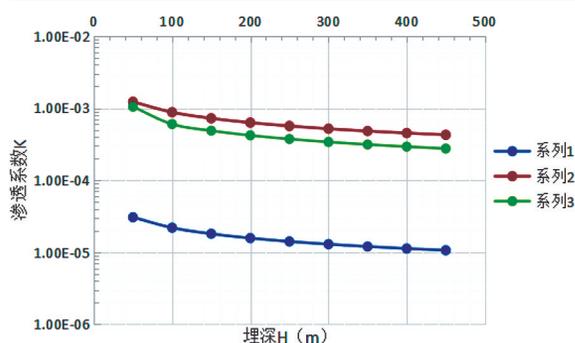


图 4 幂次函数模型的半对数坐标图

Fig. 4 Semilog coordinate picture of exponential functional model (系列 1 为 CHEN Y F(2018) 参数计算结果, 系列 2 为 $K_0=0.008, \alpha=0.48$, 系列 3 为 $K_0=0.008, \alpha=0.52$)

5 结语

(1) 据 Louis(1976) 负指数模型和地表渗透系数幂次函数模型拟合相关模型计算参数, 发现幂次函数模型的相关性 ($R=0.9165$) 比负指数模型相关性 ($R=0.8842$) 优越。

(2) 负指数相关模型在半对数坐标中, 岩体渗透系数随深度的增加呈线性关系下降, 深度增加 100 m, 渗透系数下降一个数量级。

(3) 采用幂次函数模型时岩体渗透系数主要受地表渗透系数 K_0 的影响, 拟合常数 α 对渗透系数的影响相对较小, 基于 5 段不太深度注水试验结果拟合的 α 与 CHEN Y F(2018) 大量数据研究所得 α 相差较小, 表明采用幂次函数模型确定地表渗透系数是非常关键的工作。

(4) 基于常数头注水试验在地表以下较浅深度段的渗透系数可以代替地表渗透系数, 采用多段不同埋深渗透系数拟合 K_0 时宜采用负指数相

关模型, 但确定地表渗透系数后或已知地表渗透系数的情况下宜采用幂次函数模型预测不同深度渗透系数。

致谢: 感谢编辑和审稿专家对本文提出详细的修改意见, 并对文章修改做出重要的指导。

[参考文献]

陈洪凯. 1996. 三峡工程永久船闸岩体渗流与排水机理研究[D]. 重庆建筑大学博士学位论文, 5-60.

陈洪凯, 唐红梅. 1998. 三峡工程永久船闸边坡岩体渗透结构面分组方案及应用研究[J]. 重庆交通学院学报, 17(3): 13-19.

陈君, 刘明明, 李星, 等. 2016. 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, 37(6): 1707-1714.

黄俊, 邹鹏飞, 蒋小伟, 等. 2012. 利用声波速度估算岩体不同深度的平均渗透系数[J]. 岩土力学, 36(04): 101-104.

景来红, 段世超, 杨顺群. 2007. 渗流反演分析在工程设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 26(增刊 2): 4503-4509.

蒋小伟, 万力, 王旭升, 等. 2009. 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, 30(10): 3163-3167.

景来红, 段世超, 杨顺群. 2007. 渗流反演分析在工程设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 26(增刊 2): 4503-4509.

孙蓉林, 梁杏, 靳孟贵. 2006. 裂隙岩体渗透系数确定方法综述[J]. 水文地质工程地质, 33(06): 120-123.

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, 33(3): 575-580.

万力, 蒋小伟, 王旭升. 2010. 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, 16(1): 7-12.

吴顺川. 2021. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社. 381-385.

周维垣. 1990. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 272-295.

BLACK J H. 1987. Flow and flow mechanisms in crystalline rock [C]//Fluid Flow in Sedimentary Basins and Aquifers. [S. l.]: Geological Society Special Publications, 185-200.

- CARLSSON H, CARLSSON L, JAMTLID A, et al. 1983. Cross-hole techniques in a deep seated rock mass[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 26-27: 377-384.
- CHEN Y F, LING X M, LIU M M, et al. 2018. Statistical distribution of hydraulic conductivity of rocks in deep-incised valleys, southwest China[J]. Journal of Hydrology, 566: 26-226.
- JONES F O. A. 1975. Laboratory study of the effects of confining pressure on fracture flow and storage capacity in carbonate rocks [J]. Journal of Petroleum Technology, 27(1): 21-27.
- HSU S M, CHUNG M C, KU C Y, et al. 2008. A rock mass classification scheme for estimating hydraulic conductivity of fractured rocks [C]//Characterization, Monitoring, and Modeling of Geosystems. New Orleans, United States: ASCE Geotechnical Special Publication, 452-459.
- LOUIS C. 1974. Rock hydraulics[M]. New York: Verlay Wien.
- LOUIS C. 1976. Introduction a l'hydraulique des roches; article principal[D]. Paris: universite Pierre et Marie Curie, 1976.
- SNOW D T. 1968. Hydraulic character of fractured metamorphic rocks of the front range and implications of the rocky mountain arsenal well[J]. Colorado School of Mines Quarterly, 63(1): 167-199.
- WEI Z Q, EGGER P, DESCOEUDRES F. 1995. Permeability predictions for jointed rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geotechnics Abstracts, 32(3): 251-261.
- ZHANG Lian-yang. 2013. Aspects of rock permeability [J]. Frontier Structural and Civil Engineering, 7(2): 102-116.

Research on the Relationship between Permeability Coefficient and Burial Depth of Broken and Relatively Broken Rock Masses

——A Case Study of Some Limestone Mine

WU Zhan-ting

(Guiyang Branch of Northwest Comprehensive Survey and Design Institute, Guiyang 550001, Guizhou, China)

[Abstract] The permeability of rock mass is closely related to its burial depth, which is generally shown as the law that the permeability of rock mass decreases gradually with the increase of burial depth. In this paper, the permeability coefficient of broken and relatively broken rock mass with a single burial depth is studied, and the negative exponential correlation model and power function model are used to fit the relevant model calculation parameters for the five times of water pressure sample data of a limestone mine in Lijiang Ancient City at the depth of 55m in the shallow surface. It is found that the correlation of power function model ($R=0.9165$) is superior to that of negative exponential model ($R=0.8842$). According to the comparison between the fitting parameters and the fitting parameters obtained by Chen Yifeng (2018) through tens of thousands of sets of water injection test data of 12 dams in southwest China, it is concluded that the permeability coefficient based on the constant head water injection test at the shallower depth below the surface can replace the surface permeability coefficient, and the negative exponential correlation model should be used when fitting K_0 with the permeability coefficient of multiple sections with different burial depths. After determining the surface permeability coefficient or when the surface permeability coefficient is known, the power function model should be used to predict the permeability coefficient at different depths.

[Key Words] Broken rock mass, Permeability coefficient; Surface permeability coefficient; Depth