

文章编号: 1001-1986(2016)03-0097-06

基于三维结构面网络模拟的岩体变形模量确定方法

王昌硕¹, 梁 焯¹, 王亮清¹, 沈 龙²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 国核电力规划设计研究院, 北京 100095)

摘要: 变形模量作为表征岩体变形特征的重要参数, 是岩体工程设计的基础力学参数之一。在综合前人研究的基础上提出了基于三维结构面网络模拟确定岩体变形模量的方法, 编制了三维结构面网络模拟及计算 RQD 值的程序。以西南山区某水电站坝址区岩体为实例, 在概率统计各组优势结构面几何要素分布形式的基础上, 采用 Monte Carlo 法生成三维结构面网络模型, 据此获得岩体三维 RQD 值, 利用 RMR 法进行质量评价和变形模量的确定, 并与钻孔资料统计法和原位试验结果进行对比分析。结果表明: 基于钻孔资料统计的估算结果与原位试验相对误差达 31.62%, 且其估算值偏低; 基于三维结构面网络模拟的估算结果与原位试验相对误差仅为 2.56%, 估算结果精度较高。该方法考虑了岩体质量的空间各向异性, 对岩体的质量评价和参数确定更为合理, 研究成果为该工程的优化设计提供了合理的计算参数。

关键词: 变形模量; 三维结构面网络模拟; 三维 RQD; RMR 法

中图分类号: P642.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2016.03.018

Method of determining deformation modulus of rock mass based on three-dimensional discontinuity network simulation

WANG Changshuo¹, LIANG Ye¹, WANG Liangqing¹, SHEN Long²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. State Nuclear Electric Power Planning Design and Research Institute, Beijing 100095, China)

Abstract: As an important parameter to characterize the deformation characteristics of the rock mass, deformation modulus is one of the basic mechanical parameters in rock mass engineering design. Based on previous studies, a method in determining rock mass modulus of deformation is proposed on the basis of three-dimensional discontinuity network simulation method, and then a three-dimensional network simulation program and a RQD values calculation program were completed. Taking the rock mass in a hydropower station dam area located in the southwest of China as an example, a three-dimensional discontinuity network model was generated by using the Monte Carlo method, based on the distribution form of geometric elements of each preponderant discontinuities group from statistical analysis, and thereby obtained three-dimensional RQD values of rock mass. Deformation modulus and the quality of dam area rock mass were then evaluated and compared to drilling data statistics method and in-situ test. The results showed that the relative error between the estimation result based on drilling data statistics and the result of in-situ test is up to 31.62%; the relative error between the estimation result based on three-dimensional network simulation and the result of in-situ test is only 2.56%. This method takes into account of the spatial anisotropy of rock mass quality, which provides a more reasonable evaluation for the rock mass quality and parameter determination, and meanwhile provides reasonable mechanical parameters for optimization design of the project.

Key words: deformation modulus; three-dimensional network simulation; three-dimensional RQD; RMR method

收稿日期: 2015-06-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB710604); 国家自然科学基金项目(41372310); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CUG090104)

Foundation item: Major State Basic Research Development Program of China(973 Program)(2011CB710604); National Natural Science Foundation of China(41372310); Fundamental Research Funds for the Central Universities(CUG090104)

作者简介: 王昌硕(1990—), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 从事岩土体工程性质与稳定性方面的研究。E-mail: wcshuo@126.com

引用格式: 王昌硕, 梁焯, 王亮清, 等. 基于三维结构面网络模拟的岩体变形模量确定方法[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 97-102.
WANG Changshuo, LIANG Ye, WANG Liangqing, et al. Method of determining deformation modulus of rock mass based on three-dimensional discontinuity network simulation[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 97-102.

岩体的形成经历了漫长的地质历史过程,在岩体中存在着片理、层理、节理裂隙等多种结构面,这些结构面的存在加剧了岩体的非均质性和各向异性,使得岩体变形模量的准确测定变得极为困难^[1-2]。而变形模量作为表征岩体变形特征的重要参数,是各种岩体工程尤其是大型水电工程设计的基础力学参数之一,因而对岩体变形模量确定方法的研究具有重要意义。

对于裂隙岩体的变形模量而言,目前国内外常用的确定方法主要包括:原位试验法、理论分析法、反分析法、数值试验法与经验公式法等^[3-5]。原位试验是获取岩体变形模量最直接的方法,但试验费用昂贵、周期长,一般只用于大型水电工程之中。理论分析法的优点是考虑了结构面的分布情况,但在解析式推导过程中对结构面的假设与其实际分布情况存在较大差别且没有考虑结构面之间相互作用。反分析法是在现场实测位移或应力等资料的基础上,采用一定的数值方法反演岩体的变形模量,但反分析结果的可靠性依赖于数值方法的选取,当数值方法选取不当时,反分析的效率及结果的可靠性将会受到很大的影响^[6-8]。数值实验法可以通过数值模拟技术进行各种尺寸下的岩体力学试验,进而得到岩体的变形模量,在经济性等方面具有一定的优势,但当结构面发育情况复杂且数量众多时,数值实验的建模将存在很大困难。经验公式法是在通过分析影响岩体力学性质的各种指标(如岩块强度、节理条件、RQD 等),在对岩体质量进行评价分级的基础上,利用岩体变形模量与岩体质量分级评分值之间的经验公式来估算岩体的变形模量,该方法在确定岩体变形模量的过程中较全面的考虑了对岩体力学性质产生影响的多种因素,得到的变形模量能够综合反映岩体所处的工程地质条件的实际情况,且该方法结构清晰、易于应用,在长期的工程实践中积累了大量的经验,是工程实践中常采用的方法。

经验公式法主要包括 RMR 法、Q 法、RMi 法、GSI 法等^[9],其中 RMR 法是参数估算中常用的方法。利用 RMR 法估算岩体变形模量主要考虑完整岩石强度、RQD 值、节理间距、节理条件和地下水条件 5 个指标,在这 5 个指标的确定中,RQD 值的确定离散性较大,因此 RQD 能否准确选取是确定岩体变形模量的关键。RQD(Rock Quality Designation)的概念最初是由 D. U. Deere^[10]在 1964 年提出的。通过钻探取心的方法确定 RQD 值时,由于岩体的各向异性和钻探方向的单一性,且受到钻探工艺及技术的影响,所获得的 RQD 值,不仅离散性较大而且只能反映局部岩体的质量情况。除了钻探取心确定

RQD 值的方法,目前国内外还有一些其他方法如二维结构面网络模拟^[11],窗口测线法^[12],激光扫描技术^[13-14],地质统计学模拟方法^[15-16]和利用 RQD 与地震波波速相关联的理论计算 RQD^[17]等方法用于 RQD 值的确定,但以上几种方法主要集中于一维线性和二维平面的层面,在三维层面确定 RQD 值的研究成果较少。王国欣等^[18]初步探究了基于三维结构面网络模拟确定岩体 RQD 值的方法,三维结构面网络模拟的优势在于它具有统计意义上的仿真性,能够较真实全面的反映岩体的三维空间特征,因此基于三维结构面网络确定岩体三维 RQD 值是发展趋势。

综上所述,目前基于三维结构面网络模拟确定岩体的三维 RQD 值,进行岩体变形模量确定的研究成果较少。本文以西南山区某水电站下坝址岩体为例,在野外结构面调查与测量的基础上,进行结构面优势分组并统计分析其各几何要素的概率模型,基于 Monte Carlo 法采用所编制的程序对坝址区岩体进行三维结构面网络模拟并计算得到岩体的三维 RQD 值,然后利用 RMR 法对坝址区岩体进行质量评价并估算其变形模量,并与基于钻孔资料和原位试验两种方法确定岩体变形模量的结果进行对比分析。

1 方法与原理

1.1 三维结构面网络模拟获取岩体三维 RQD 值

通过三维结构面网络模拟确定岩体三维 RQD 值的步骤如下:

a. 野外地质原型调研。主要完成岩体结构面的调查与测量,只有获取了统计学上要求的足够数量的样本,才能保证模拟的精度和有效性;

b. 建立结构面概率模型。野外发育的结构面具有很大的随机性,其倾向、倾角、迹长、隙宽等几何要素在统计意义上均服从一定的概率分布。在对结构面样本进行优势分组的基础上,采用统计学方法确定各组优势结构面几何要素的最佳概率分布形式;

c. 建立三维结构面网络模型。假定结构面为薄圆盘状形态,其空间位置由圆盘的中心位置坐标,圆盘的半径大小,结构面的倾向和倾角以及隙宽决定^[19]。采用 Monte Carlo 法,在 Excel 中生成结构面各几何要素所遵循的特定概率分布形式的随机数,并利用编制好的程序生成 LSP 文件,导入 AutoCAD 中绘制生成三维结构面网络模型;

d. 获取岩体三维 RQD 值。在上述得到的三维结构面网络模型中,选取具有代表意义的多组剖面,

在各个网络剖面图中分别布置多条测线模拟钻孔，模拟钻孔被其中的结构面截断所得到的线段可视为钻孔钻进过程中获取的“岩心柱”，统计大于 10 cm 的“岩心柱”的累计长度占模拟钻孔总长度的百分比，便得到该钻孔的 RQD 值。取所有模拟钻孔 RQD 值的平均值用以衡量岩体的三维空间质量情况。其流程见图 1。

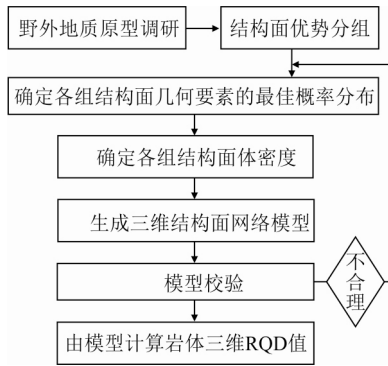


图 1 三维结构面网络模拟获取岩体三维 RQD 值流程图
Fig.1 Flowchart for obtaining three-dimensional RQD values of rock mass based on three-dimensional discontinuity network simulation

1.2 RMR 确定及变形模量估算方法

RMR(Rock Mass Rating)法是由南非 Z. T. Bieniawski^[20]于 1976 年提出的国际上著名的节理岩体的地质力学分类法，J. L. Serafim 等^[21]，Z. T. Bieniawski^[22]对其进行了改进。由于该方法考虑的指标比较全面且在工程中易于获取，因此基于 RMR 法进行岩体变形模量的估算广泛应用于工程实践中。基于上述得到的三维 RQD 值以及其它指标通过查表^[23-24]获得岩体的 RMR 评分值，然后可利用下列经验公式估算岩体的变形模量^[25]：

$$E_m = (2RMR - 100), RMR \geq 55 \quad (1)$$

$$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}}, 30 < RMR < 55 \quad (2)$$

2 岩体质量评价与变形模量确定

2.1 工程概况

研究区水电站拟建的最大坝高约为 315 m，水库正常蓄水位 2 895 m，采用堤坝式开发。其下坝址所在山体高 1 400 m，最高点高程 3 930 m，岩性以三叠系中统竹卡组(T_{2z})浅灰到深灰色英安岩为主，少量肉红、墨绿色英安岩。由于该水电站规模巨大，如何合理的确定坝址，尤其是坝肩岩体的变形模量是安全经济设计施工的关键。

2.2 三维结构面网络模拟参数的获取

选取下坝址平硐内的编录资料及现场采用测线

法精细测量采集的结构面数据为样本，绘制结构面极点等值线图(图 2)。

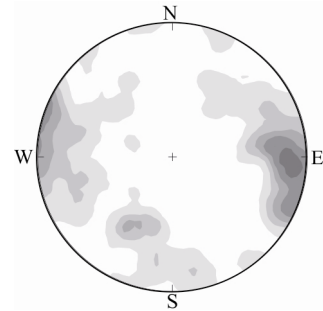


图 2 结构面极点等值线图
Fig.2 Contour of structural surface poles

通过对结构面样本地质成因的野外判断及结构面极点等值线图(图 2)统计分析，分为三组优势结构面：I 组结构面样本数目为 48，优势倾向为 93.3°，优势倾角为 83.5°；II 组结构面样本数目为 119，优势倾向为 274.0°，优势倾角为 79.9°；III 组结构面样本数目为 44，优势倾向为 25.9°，优势倾角为 61.1°。

坝址区结构面的倾向多服从正态分布、对数正态分布。采用统计软件 SPSS 中的单样本 K-S 检验法对 I 组结构面倾向样本的概率分布形式进行检验。检验结果显示，正态分布的渐进显著性(双侧) $P=0.739$ ，对数正态分布的渐进显著性(双侧) $P=0.701$ ，均大于 0.05，因此两种分布形式的假设均可接受，但正态分布对于 I 组结构面倾向样本数据的概率分布形式拟合程度更好，最终 I 组结构面倾向采用正态分布。同理，可获得各组优势结构面其它几何要素的最佳概率分布，见表 1。

在确定了结构面各几何要素的概率模型参数后，还需确定模拟区内结构面的数量，因此需要确定各组结构面的体密度。本文确定各组结构面体密度的方法为^[26]：首先对 I 组结构面的体密度数值进行假定，基于表 1 中结构面各几何要素的概率模型采用 Monte-Carlo 法生成三维结构面网络模型，然后在模型中切取剖面计算野外测线走向的线密度，如果计算的线密度与野外实测线密度相同，则接受该结构面体密度的假定，若不同，则改变体密度的取值重复上述步骤，直至计算的线密度与野外实测线密度相同，此时便得到了该组优势结构面的真实体密度，同理可获得其它两组优势结构面的体密度，见表 1。

2.3 岩体三维 RQD 值的确定

参照图 1 流程及上述工作得到的结构面模拟参数，采用 Monte Carlo 法在 AutoCAD 中共生成 334 个结构面三维网络实体，模型的尺寸为 5 m × 5 m × 5 m，

表 1 各几何要素概率模型参数
Table 1 Probability and model parameters of geometric elements

分组名称	倾向			倾角			半径			隙宽			体密度 / (条·m ⁻³)
	分布形式	期望 / (°)	标准差 / (°)	分布形式	期望 / (°)	标准差 / (°)	分布形式	期望 / m	标准差 / m	分布形式	期望 / mm	标准差 / mm	
节理 I	正态	93.291 7	16.182 4	正态	83.479 2	4.015 9	对数正态	-0.209 3	0.507 5	负指数	5.851 4	5.851 4	0.792
节理 II	对数正态	5.611 7	0.053 1	正态	79.865 5	7.094 9	对数正态	-0.055 3	0.416 6	负指数	6.370 5	6.370 5	1.368
节理 III	正态	25.886 4	9.695 9	对数正态	4.108 3	0.098 9	对数正态	-0.248 3	0.413 5	正态	1.136 4	0.685 1	0.512

如图 3 所示。为了研究坝址区岩体在不同区域及不同方向上的岩体质量分布情况，可以在模型中的不同方位进行剖切，得到一系列的结构面网络剖面图，分别在图 4 所示 3 个结构面网络剖面图中 360°全方位布置测线模拟钻孔，相邻钻孔角度间隔 5°，每个剖面中均布置 36 条测线模拟钻孔，共计 108 个钻孔。以垂直 X 轴的剖面为例，模拟钻孔布置图如图 5 所示，同理可在其它两个剖面中布置模拟钻孔。分别统计各剖面上每个钻孔中被结构面所截断的大于 10 cm 的“岩心柱”的累计长度占钻孔总长度的百分比，得到各剖面中每个钻孔的 RQD 值，各剖面 RQD 值玫瑰花图如图 6 所示。

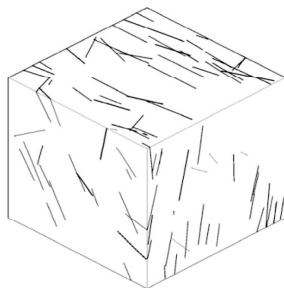


图 3 三维结构面网络模型

Fig.3 Three-dimensional discontinuity network mode

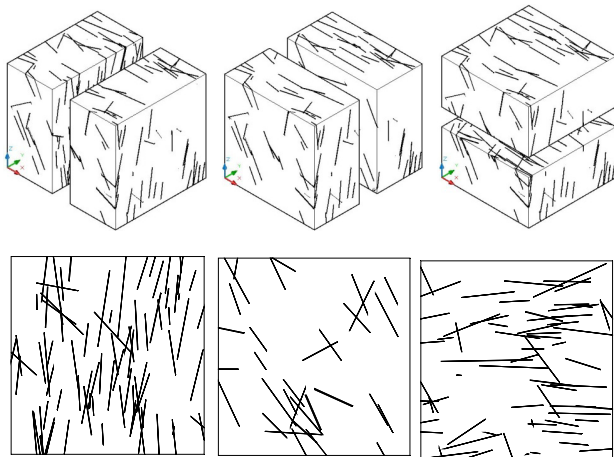


图 4 结构面网络剖面图

Fig.4 Profiles of discontinuity network

由各剖面 RQD 值的玫瑰花图可知，坝址区岩体在不同区域的质量分布情况有较大差异，即使是在

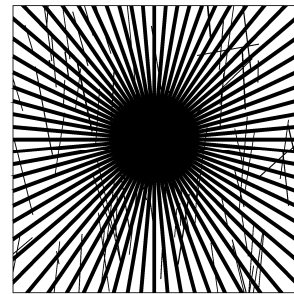


图 5 垂直 X 轴剖面钻孔布置图

Fig.5 Layout of borehole at vertical axis X

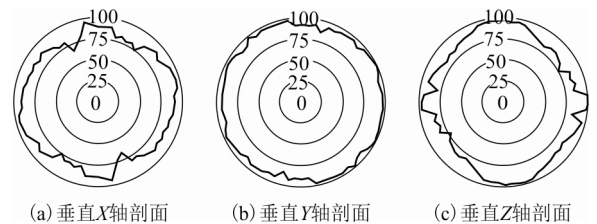


图 6 各剖面 RQD 值玫瑰花图

Fig.6 Rose diagrams in each profile

同一区域，在不同方向其质量也不尽相同，这反映了坝址区岩体质量的空间各向异性。经统计分析可知，坝址区岩体的 RQD 值在垂直 X 轴的剖面上服从期望为 86.14%、标准差为 6.843%的正态分布，在垂直 Y 轴的剖面上服从期望为 89.91%、标准差为 2.804%的正态分布，在垂直 Z 轴的剖面上服从期望为 88.32%、标准差为 6.569%的正态分布。在 3 个剖面中共计得到 108 个 RQD 值，平均值为 88.12%，取其平均值作为坝址区岩体的最终 RQD 值。

2.4 岩体质量评价与变形模量的估算

采用 RMR 法对坝址区岩体进行质量评价并估算其变形模量，需要准确计算 RMR 值的大小，其值由 5 个指标的评分值组成。其中完整岩石强度的评分值通过点荷载强度指标和单轴抗压强度查表获得，节理间距、节理条件和地下水条件的评分值可根据野外地质调查结果分别查表获得，RQD 值的评分值分别采用钻孔资料统计和三维结构面网络模拟两种方法计算并查表获得。在得到 RMR 总评分值后代入式(1)和式(2)便可得到坝址区岩体的变形模量，见表 2。

表 2 坝址区岩体变形模量估算表
Table 2 Deformation modulus calculation of dam area rock mass

岩体评价及变形模量估算	三叠系中统竹卡组英安岩	
	特征	得分
单轴抗压强度/MPa	78.51	8
RQD/%	三维结构面网络模拟	88.12
	钻孔资料统计	51.36
结构面间距/cm	35	10
结构面性状	稍粗糙, 硅泥质填充	20
地下水条件	湿(有裂隙水)	7
RMR 评分	三维结构面网络模拟	62
	钻孔资料统计	58
岩体分级及描述	三维结构面网络模拟	好岩体
	钻孔资料统计	一般岩体
变形模量 E_m /GPa	三维结构面网络模拟	24
	钻孔资料统计	16

3 对比分析

基于钻孔资料统计和三维结构面网络模拟两种方法估算岩体变形模量的对比结果(表 2)显示 a. 采用三维结构面网络模拟获得的坝址区岩体 RQD 的平均值为 88.12%, 而通过钻孔资料统计得到的坝址区岩体 RQD 的平均值为 51.36%; b. 基于三维结构面网络模拟对坝址区岩体进行评价的结果为好岩体, 而基于钻孔资料统计对坝址区岩体进行评价的结果为一般岩体; c. 基于三维结构面网络模拟估算得到的坝址区岩体变形模量值为 24 GPa, 而基于钻孔资料统计估算得到的坝址区岩体变形模量值为 16 GPa。

在坝址平硐内共作了 18 个点变形试验, 变形试验采用承压板法, 五级循环加载的方式进行, 由原位试验得到的坝址区岩体的变形模量值为 23.4 GPa。基于三维结构面网络模拟对坝址区岩体变形模量估算的结果与原位试验结果的相对误差仅为 2.56%, 同原位试验的结果相近。而基于钻孔资料统计对坝址区岩体变形模量估算的结果与原位试验结果的相对误差达 31.62%, 同原位测试的结果相差较多, 且其估算值偏低。

4 结论

a. 通过钻孔资料统计得到的 RQD 值是一维指标且其值偏低, 甚至存在对岩体质量做出错误判断的可能。根据现场工程地质调查和邻区类比, 坝址区三叠系中统竹卡组(T_2z)岩组岩体为好岩体, 而利用钻孔资料评价结果为一般岩体, 导致对其变形模量的估算值偏低。

b. 利用三维结构面网络模拟技术获取的 RQD 值是三维指标, 可以反映岩体质量的空间各向异性, 更符合岩体的实际情况。基于三维结构面网络模拟对坝址区岩体进行质量评价的结果显示, 坝址区三叠系中统竹卡组(T_2z)岩组岩体为好岩体, 符合现场工程地质调查和邻区类比的结果。

c. 通过对坝址区岩体变形模量的估算表明, 基于三维结构面网络模拟确定岩体变形模量的方法与原位试验结果相近, 较钻孔资料统计法的精度大大提高, 研究成果为该工程的优化设计提供了合理的计算参数。

d. 基于三维结构面网络模拟确定岩体变形模量的方法精度虽高, 但仍存在一定的偏差, 产生偏差的原因有: 结构面野外采集的数量和质量受人为因素影响较大; 结构面的形态假定与其实际形态存在一定差别; 结构面的几何参数并非完全理想符合某种理论概率模型; 所采用的随机数是“伪随机数”, 并非真正意义上的随机数; 未考虑结构面中的充填物; 三维结构面网络模型仅具有统计意义上分布形式的一致性。为使得结构面网络模拟结果及 RQD 的取值更符合岩体的实际情况, 保证岩体变形模量估算的精度, 在实际工程应用中应尽可能采集数量较多且质量较高的结构面样本, 并有待对如何降低影响结构面网络模拟精度的因素的影响进行进一步分析。

参考文献

- [1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 1-4.
- [2] 宋建波, 张倬元, 于远忠, 等. 岩体经验强度准则及其在地质工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 69-71.
- [3] 李宁, SWOBODA G. 当前岩石力学数值方法的几点思考[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 502-505.
LI Ning, SWOBODA G. Discussion on the application of numerical methods to rock mechanics and engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(5): 502-505.
- [4] 吕爱钟. 试论我国岩石力学的研究状况及其进展[J]. 岩石力学, 2004, 29(增刊 1): 1-9.
LYU Aizhong. Some situation and progress in rock mechanics study in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 29(S1): 1-9.
- [5] 邓勇. 边坡岩体力学参数反分析遗传神经网络算法[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 751-757.
DENG Yong. A genetic-artificial neural network algorithm for mechanical parameters of rock slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 751-757.
- [6] 孙均, 蒋树屏, 袁勇, 等. 岩石力学反演问题的随机理论与方法[M]. 汕头: 汕头大学出版社, 1996.
- [7] 杨林德, 朱合华, 丁文其, 等. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

- [8] 杨志法,王思敬,冯紫良,等. 岩土工程反分析原理及应用[M]. 北京:地震出版社,2002.
- [9] 张志刚,乔春生. 改进的节理岩体变形模量经验确定方法及其工程应用[J]. 工程地质学报,2006,14(2):233-238.
ZHANG Zhigang, QIAO Chunsheng. Improved empirical method for determination of deformation modulus of jointed rock mass and its application in engineering[J]. Journal of Engineering Geology,2006,14(2):233-238.
- [10] DEERE D U. Technical description of rock cores for engineering purposes[J]. Rock Mechanics and Engineering Geology,1964,9(1):17-22.
- [11] 张永荣,余宏明,殷坤龙,等. 江西某厂厂区边坡岩体结构面网络模拟研究[J]. 地质科技情报,2000,19(1):85-88.
ZHANG Yongrong, YU Hongming, YIN Kunlong, et al. Analog and analysis of discontinuity network of a rock slop in Jiangxi[J]. Geological Science and Technology Information,2000,19(1):85-88.
- [12] 陈剑平,王清,赵红亮. 窗口测线法获取岩体 RQD[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(9):1491-1495.
CHEN Jianping, WANG Qing, ZHAO Hongliang. Obtaining RQD of rock mass by sampling window method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(9):1491-1495.
- [13] GIGLI G, CASAGLI N. Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2011,48(2):187-198.
- [14] 霍俊杰,黄润秋,董秀军,等. 3D 激光扫描与岩体结构精细测量方法比较研究——以锦屏 I 级水电站为例[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2011,26(3):39-44.
HUO Junjie, HUANG Runqiu, DONG Xiujun, et al. Comparison analysis on 3D laser scanning technology and refined mesh investigation of rock mass structure[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition),2011,26(3):39-44.
- [15] ESFAHANI N M, ASGHARI O. Fault detection in 3D by sequential Gaussian simulation of rock quality designation (RQD) case study: Gazestan phosphate ore deposit, Central Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences,2013,6(10):3737-3747.
- [16] OH S. Geostatistical integration of seismic velocity and resistivity data for probabilistic evaluation of rock quality[J]. Environmental Earth Sciences,2013,69(3):939-945.
- [17] GASMI H, HAMDI E, ROMDHANE N B. Numerical homogenization of jointed rock masses using wave propagation simulation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2014,47(4):1393-1409.
- [18] 王国欣,肖树芳,陈剑平. 不连续面三维网络在 RQD 中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(12):1761-1764.
WANG Guoxin, XIAO Shufang, CHEN Jianping. Study on application of 3D network of discontinuities to RQD[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(12):1761-1764.
- [19] 贾洪彪,唐辉明,刘佑荣,等. 岩体结构面三维网络模拟理论与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [20] BIENIAWSKI Z T. Rock mass classifications in rock engineering[C]//BALKEMA A A. Exploration for rock engineering, Proceedings of the Symposium. Geotech Div, Transvaal, Cape Town, S Afr,1977:97-106.
- [21] SERAFIM J L, PEREIRA J P. Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski[C]//Soc Portuguesa de Geotecnia and Lab Nacional de Engenharia Civil, Proceedings-International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction. Lisbon, Port,1983:II.33-II.42.
- [22] BIENIAWSKI Z T. Engineering rock mass classification[M]. New York:John Wiley and Sons,1989:1-251.
- [23] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体分级标准 GB50218-94[S]. 北京:中国计划出版社,1995.
- [24] 刘佑荣,唐辉明. 岩体力学[M]. 北京:化学工业出版社,2008:115-128.
- [25] BIENIAWSKI Z T. Determining rock mass deformability: experience from case histories[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract,1978,15(5):237-247.
- [26] 章广成,李华章,林叶,等. 岩体节理体积频率的计算方法及工程应用[J]. 工程地质学报,2012,20(4):585-590.
ZHANG Guangcheng, LI Huazhang, LIN Ye, et al. Assessment of joint volume frequency in rock mass and its application in engineering[J]. Journal of Engineering Geology,2012,20(4):585-590.

(责任编辑 张宏)