

节理岩体力学参数确定的数值试验方法

严秋荣^{1,2}, 冯君^{3,4}, 杨涛^{3,4}, 邓卫东²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067;
3. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 4. 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要:为解决现场或室内试验条件下难以测试大尺度岩体并确定其参数的问题,总结提出了应用数值试验方法确定节理岩体宏观力学参数的方法流程。即将节理岩体单元离散为岩块和节理两种类型,通过室内试验分别研究其力学特性,再把岩块和节理进行组合形成岩体,通过数值计算得出节理岩体的力学特性。将这套方法应用到贵州省某高速公路岩质边坡的岩体参数优化分析中,研究了试件尺寸、各向异性、岩块及节理力学参数等对岩体宏观力学参数的影响。数值试验方法为工程节理岩体参数的确定和优化提供了一种新的思路。

关键词: 节理岩体; 岩体力学参数; 数值试验; 尺寸效应

中图分类号: U416.1⁺4

文献标志码: A

Numerical Experiment Method to Determining Mechanical Parameters of Jointed Rock Mass

YAN Qiurong^{1,2}, FENG Jun^{3,4}, YANG Tao^{3,4}, DENG Weidong²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd, Chongqing 400067, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 4. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering of the Ministry of Education, Chengdu, 610031, China)

Abstract: Determination of mechanical parameters of rock mass is very important for the design and optimization in rock engineering. It is difficult to get the mechanical parameters of rock mass by field or lab tests, hence the method to determine macro mechanical parameters of jointed rock mass using numerical experiment is presented in this paper. Firstly, jointed rock mass are discretized into rock and joints; then determine their mechanical parameters by lab test; after that, assemble the rock and joints to form rock mass; finally get the mechanical parameters of rock mass using numerical experiments. This method is applied in expressway project in Guizhou province. The optimization analysis of rock mass

parameters for rock slope is conducted. The effects of specimen size, anisotropy, mechanical parameters of rock and joints on the macro parameters of rock mass are studied. The numerical test method provides a new idea for determination and optimization of mechanical parameters for jointed rock mass in engineering.

Key words: jointed rock mass; mechanical parameters of rock mass; numerical test; dimension effect

工程岩体力学参数的合理确定是多年来岩石力学界存在的一大难题^[1]。岩体力学参数的确定方法通常包括经验法、物理试验法和数值方法。经验法是通过岩体质量评价,运用经验方法获得参数,该方法简单易行,在多年的实际工程中积累了大量的数据,是当前岩体工程设计中一种常用的方法^[2]。经验法便于实际运用,但往往存在“适用性”和“局限性”的困扰。物理试验直接针对岩块或岩体进行试验,是一种较为直接的方法。然而,岩块试验尺寸较小,因存在“尺寸效应”的问题,岩块参数尚不能直接用于岩体工程分析;大量的岩体力学现场试验耗时费力,仅依靠少量的岩体力学试验获取工程参数,不科学也不现实^[3-4]。

数值方法是近年来用于岩体参数确定的一种新方法,其特点在于模拟能力强、擅长定量对比分析、代价低,正好可以弥补物理试验方法“尺寸效应”和“耗时费力”的缺点,因此适量的物理试验加上大批的数值试验被认为是确定岩体力学参数较为理想的方法。数值试验方法确定岩体力学参数包含多个重要环节,例如岩体试样几何尺度分析,岩体各向异性分析、岩体结构测量方法以及数值模拟技术等。在数值模拟技术方面,周维垣和杨延毅^[5]基于损伤数值方法,提出了一种确定节理岩体力学参数的计算机

收稿日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(No.51178402)

第一作者: 严秋荣(1978—),男,博士生,副研究员,主要研究方向为公路路基岩土及工程检测。E-mail: yanqiurong@cmhk.com

通讯作者: 冯君(1977—),男,工学博士,副教授,主要研究方向为岩石力学与边坡工程。E-mail: fengjun4316@163.com

模拟试验法. 该法把完整岩体看做无损伤材料, 节理岩体看做损伤材料, 通过定义的损伤张量将岩块和节理的力学参数与节理岩体的等效力学参数联系起来; 陈志坚和卓家寿^[6]应用连续有限元方法对含裂隙层状岩体进行研究, 采用样本单元法实现了通过岩块参数和岩体结构获取岩体参数的目的; 李世海和汪远年^[7]应用三维离散元方法, 模拟了含节理岩块的单轴压缩试验, 给出了三维离散元计算参数的选取方法. 在试样几何尺度分析方面, 何满潮等^[1]提出了工程岩体的连续性理论, 给出了一种基于现场勘察、室内物理试验和数值分析的工程岩体力学参数的确定方法, 即通过野外工程地质调查, 根据某一岩体所含结构面的不同及结构体特性的差异, 从中选取具有代表性的不同尺寸的岩块和结构面, 然后进行一系列室内力学实验和数值模拟实验. 岩体结构的测量是数值方法确定岩体参数的重要环节之一. 目前岩体结构测量的方法主要有测线法、统计窗法、全息数字摄影测量法等. 胡波等^[4]将这几种方法整合、取长补短, 发展成为一种岩体现场测绘的工作方法——统计窗数码成像综合法. 在岩体各向异性研究方面, 曾纪全^[8]等对岩体抗剪强度参数的结构面倾角效应进行了研究. 刘爱华等^[9-10]采用数值模拟方法和物理试验方法研究了含不同倾角层理面的岩体在抗拉、抗压试验下的破坏过程, 数值试验结果同物理试验结果较为吻合.

本文在总结前人研究成果的基础上, 进一步细化了采用数值试验方法确定节理岩体力学参数的方法与程序, 并将这套方法应用到贵州省毕节至威宁高速公路的岩质边坡的岩体参数优化分析中, 系统地研究了各种因素(试件尺寸、各向异性等)对岩体参数的影响. 数值试验方法操作灵活、适用性强, 解决了现场或室内试验条件下难以测试大尺度岩体并获取其参数的问题, 为工程节理岩体参数的确定和优化提供了一种新的方法和思路.

1 数值试验方法

数值试验方法是指基于室内小试件试验成果, 应用数值模拟技术确定节理岩体宏观力学参数的方法. 该方法具有广阔的应用前景, 这是因为, 采取原状节理岩体试样是一件非常困难的工作, 如果需要通过现场试验来研究足够多节理材料单元的力学特性, 所需试件尺度可能达到十余米至数十米, 这在一般情况下是不现实的. 此外, 由于岩体的不均质性和

试验中的尺寸效应, 现场试验结果很难具有代表性. 数值试验方法的基本思路是: 将节理岩体单元离散为岩块和节理两种类型, 首先分别研究其力学特性, 之后再把岩块和节理组合形成岩体, 通过数值分析计算得出节理岩体的力学特性. 也就是说, 根据岩石的力学参数、节理的力学参数、节理的分布, 采用数值分析方法确定节理岩体的宏观力学参数. 这样, 只要弄清岩块和节理的力学参数(室内试验确定)和节理裂隙的几何分布特征(现场统计确定), 就可以计算出节理岩体的宏观力学参数.

具体实施方案如下:

(1) 现场调查. 采用测线法、统计窗法、全息数字摄影测量等方法测量岩体结构的几何特征, 包括结构面的间距、组数、产状等. 根据测量数据, 抽象出岩体结构的几何模型.

(2) 制取岩石试样, 进行岩块的力学试验(如三轴压缩试验), 确定岩石的力学参数(如弹性模量、泊松比、粘聚力、内摩擦角等).

(3) 制取结构面试样, 开展结构面力学参数试验, 如室内直剪、现场大剪等, 获取结构面的力学参数, 如法向刚度、切向刚度、粘聚力、内摩擦角等.

(4) 根据岩体结构几何特征、岩块力学特性和结构面力学特性, 应用数值分析软件, 建立起岩体的数值试验模型.

(5) 基于该数值试验模型, 首先开展试件几何尺寸的研究(尺度效应), 即分析不同几何尺寸情况下岩体变形及强度特征的变化规律, 从而确定出合理的试件尺寸; 开展试件各向异性的研究, 即分析结构面产状对岩体宏观力学参数的影响; 分析岩块力学参数和结构面力学参数(包括强度参数和变形参数)对岩体变形及强度特性的影响. 这些计算分析结果主要为下一步针对具体工程的试件尺寸及参数确定提供基础数据.

(6) 根据第(5)步中依托岩体数值试验模型开展的参数敏感性分析成果, 结合实际工程的设计施工情况, 最终确定适合于该工程岩体的试件尺寸及参数.

(7) 应用数值模拟方法进行试件变形及强度的测试计算, 最终确定工程岩体的宏观力学参数.

数值试验方法确定工程岩体力学参数的流程如图1所示.

2 数值试验及结果分析

工程节理岩体结构各不相同, 不同的工程岩体

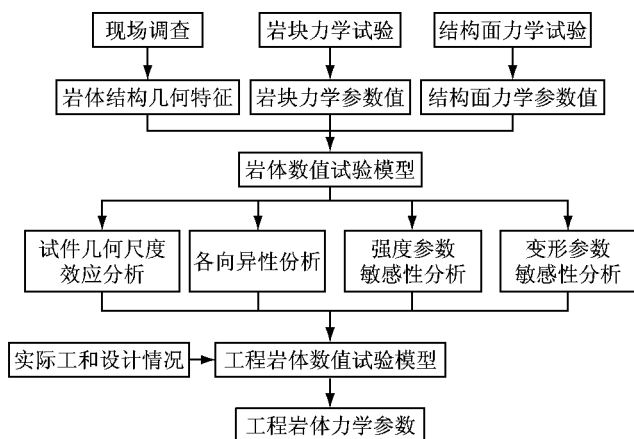


图 1 数值试验方法确定工程岩体力学参数流程图

Fig.1 Flow chart to determine mechanical parameters of rock mass by numerical test method

结构具有不同的连续微元尺寸^[11-12]及其相应的工程岩体强度参数和变形力学参数,本项研究以贵州省毕节至威宁高速公路边坡岩体为例,详细叙述了确定工程节理岩体的力学参数的方法和流程.节理岩体力学参数的数值试验主要包括以下几个方面:①连续微元尺寸的确定,具体分为试件几何尺寸(节理数量)及各向异性特征(节理产状)研究;②力学参数敏感性分析,包括抗剪强度指标 c 和 φ 以及变形指标 E 的研究;③参考现场勘察情况综合确定节理岩体宏观力学参数.

2.1 连续微元试件几何尺寸分析

连续微元尺寸包括试件几何尺寸(节理数量)及各向异性特征(节理产状),首先对试件几何尺寸进行分析,然后在此基础上研究节理产状对岩体参数的影响.

(1) 试件几何尺寸

现场地质勘察表明,贵州省毕节至威宁高速公路 K86 边坡岩体强风化层厚,岩石节理裂隙极发育,岩体破碎,岩层产状为 $260^\circ \angle 25^\circ$.通过现场测绘及数字摄影分析,获得岩体地质模型如图 2 所示,节理间距基本在 0.5 m 左右,其间完整岩块尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$.

为研究试件几何尺寸对岩体力学参数的影响,岩体试件的横截面尺寸分别取为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 、 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 、 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 、 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$,试件厚度均等于 1 m.由于现场岩层倾角为 25° ,故将一组节理(层面)的倾角设为 25° ,另一组节理与之垂直.

(2) 岩块、节理参数及本构关系

通过室内力学试验获取完整岩块力学参数及节理力学参数,然后选用合适的本构关系分别模拟岩

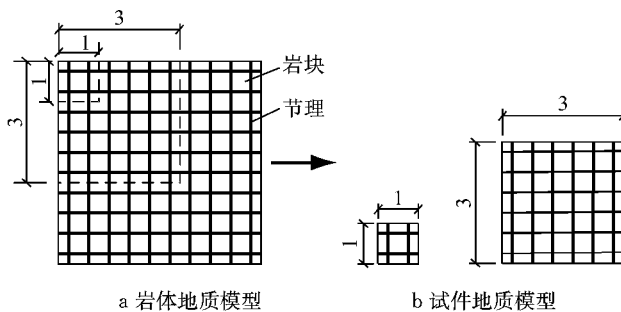


图 2 岩体及试件地质模型示意图(单位:m)

Fig.2 Sketch of geological model of rock mass and specimen(unit: m)

块和结构面.莫尔-库仑破坏准则是现今工程实践中最常用的岩石破坏准则,基本输入参数便于获取,所以岩块采用理想弹塑性本构模型,服从莫尔-库仑破坏准则,节理面则采用面-面接触的摩尔-库仑破坏准则.根据室内力学试验确定岩块及节理的计算参数见表 1—2 所示.针对每一种尺寸的试件,进行单轴抗压强度数值试验.

表 1 岩块计算参数

Tab.1 Calculation parameters of rock

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
岩块	20 000	0.2	25	3 400	55

表 2 节理计算参数

Tab.2 calculation parameters of joint

材料	法向刚度 $K_n/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	切向刚度 $K_s/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
节理	200	20	5	25

(3) 结果分析

绘制抗压强度与试件尺寸关系曲线如图 3 所示.由图可知,当试件尺寸较小时,试件中包含的节理数量少,岩体完整程度较高,其单轴抗压强度也高;随着试件尺寸的增大,节理数量增多,岩体完整性降低,单轴抗压强度也随之降低,当试件尺寸增加至 5 m 时(为节理间距的 10 倍),抗压强度与试件尺寸关系曲线图趋于一条水平线,表明此时试件尺寸对岩体强度已基本无影响.因此,节理岩体的连续微元尺寸应至少为节理间距的 10 倍,对于本工程而言,试件尺寸取 5 m 比较合适.

2.2 连续微元各向异性特征分析

连续微元试件几何尺寸分析表明,试件几何尺寸不宜小于节理间距的 10 倍,因此以下分析均取 5 m 作为标准试件尺寸.以往研究表明节理的产状对岩体的各向异性特征有影响,下面就此问题采用数值试验方法进行研究.岩块及节理物理力学参数与

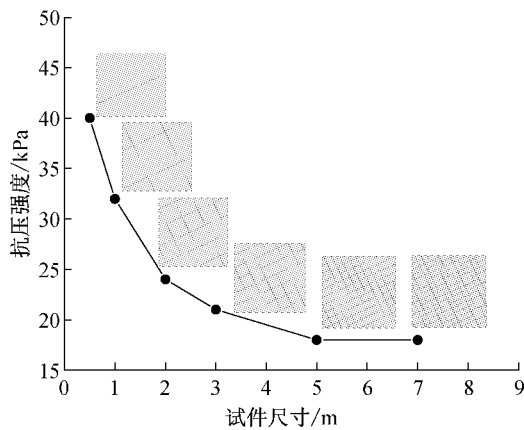


图 3 连续微元试件尺寸的确定

Fig. 3 Determination of the continuous element size

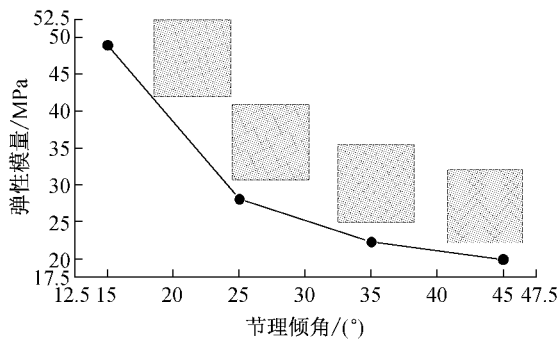


图 4 节理产状对岩体弹性模量的影响

Fig. 4 Effect of joint occurrence on the elastic modulus of rock mass

第 2.1 节相同,在此不再赘述. 试件中包含两组相互垂直的节理,第一组节理与水平面的夹角分别取为 15° 、 25° 、 35° 和 45° .

计算结果图 4—5 所示,可以看出节理产状对岩体各向异性有较大影响. 节理倾角越大,岩体弹性模量越低,节理倾角为 35° 时,岩体抗压强度最低.

2.3 节理岩体强度参数敏感性分析

强度参数敏感性分析包括岩块强度参数及节理强度参数对岩体强度的影响. 边坡属于浅部岩体工程,构造应力在漫长的地质历史时期已基本消失殆尽,坡体中主要是自重应力起作用,其量级相对较小,岩体破坏主要沿结构面(节理)破坏,岩体的宏观强度也是由节理强度控制,因此在做岩体强度敏感

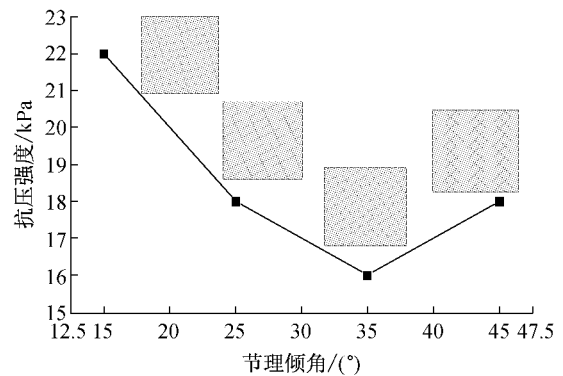


图 5 节理产状对岩体抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of joint occurrence on the compressive strength of rock mass

性分析时,仅考虑节理强度变化对岩体强度的影响. 以尺寸 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 试件为研究对象进行分析,包含两组相互垂直的节理,其中一组节理倾角为 25° .

当粘聚力变化时,内摩擦角固定为 25° ;内摩擦

角变化时,粘聚力固定为 30 kPa . 由计算结果(图 6—7)可知,岩体强度主要受节理强度控制,节理强度越高,岩体强度越高,岩体抗压强度与节理强度指标基本呈线性增加关系.

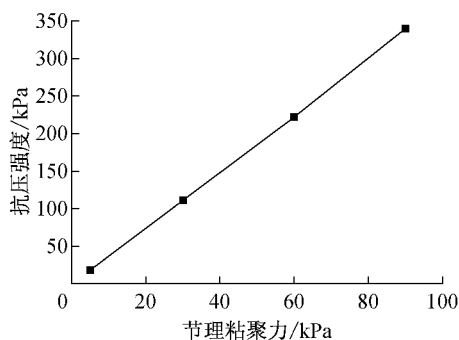


图 6 试件抗压强度与节理粘聚力的关系

Fig. 6 Relationships between compressive strength and joint cohesion

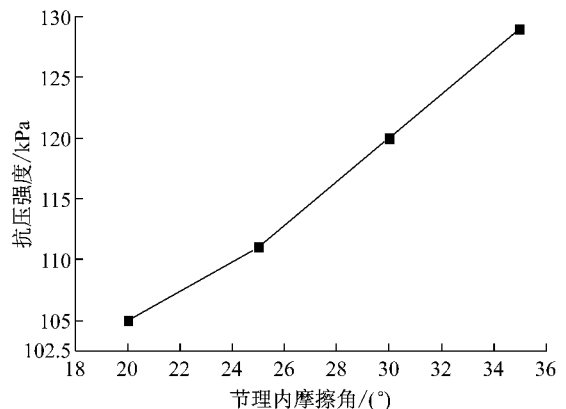


图 7 试件抗压强度与节理内摩擦角的关系

Fig. 7 Relationships between friction angle of the compressive strength and the joint

2.4 节理岩体变形参数敏感性分析

变形参数敏感性分析包括岩块变形参数及节理变形参数对岩体强度的影响. 岩块变形参数有弹性模量 E 和泊松比 ν , 其中弹性模量相对泊松比而言离散性更大, 属于岩块的主要变形参数, 故本研究对岩块的弹性模量进行敏感性分析. 节理变形参数由于采用接触单元模拟, 其主要变形参数包括法向刚度系数 K_n 和切向刚度系数 K_s , 二者存在相关性,

即一个量变化会引起另一个量的变化, 参考国内外的有关研究成果^[13-14], 将其比例关系固定为 10, 即 $K_n/K_s=10$, 据此进行节理变形参数的敏感性分析. 岩体试件尺寸仍取为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$, 包含两组相互垂直的节理, 其中一组节理倾角为 25° .

由计算结果(图 8—9)可知, 岩体刚度受节理刚度控制, 岩块刚度对岩体刚度基本无影响(图 8). 岩体弹性模量与节理剪切刚度呈线性增加关系(图 9).

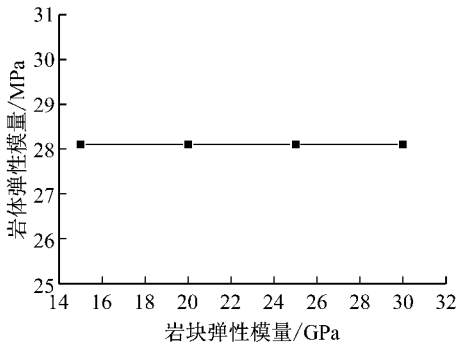


图 8 岩块模量对岩体刚度的影响

Fig.8 Effect of rock modulus on rigidity of rock

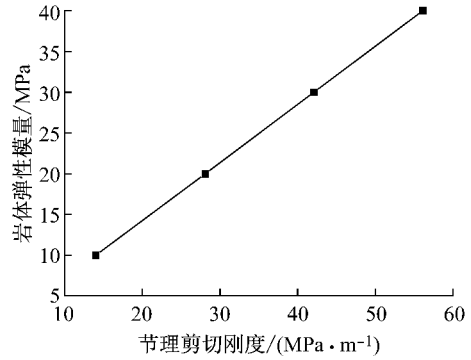


图 9 节理刚度对岩体刚度的影响

Fig.9 Influence of joint stiffness on the stiffness of rock

2.5 节理岩体力学参数的确定

采用类似三轴压缩试验确定试件抗剪强度指标的方法, 给试件施加不同的围压 σ_3 , 计算不同围压所对应的轴向极限压力 σ_1 , 可得到多个极限应力圆, 然后绘制与极限应力圆相切的强度包络线, 该强度线与剪应力轴的截距即为粘聚力 c , 强度线与主应力轴的夹角即为内摩擦角 φ . 根据研究对象的坡体应力状态, 围压分别取为 0、50、150 和 300 kPa.

根据连续微元试件尺寸的研究成果, 确定 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 作为试件尺寸, 包含两组相互垂直的节理, 其中一组节理与倾角为 25° , 节理间距为 0.5 m. 根据现场的实际情况, 分别计算两种情况下的岩体力学参数, 一种情况下节理强度较高(峰值强度), 另一种情况节理强较低(残余强度). 岩块参数如表 1 所示. 现场节理参数见表 3.

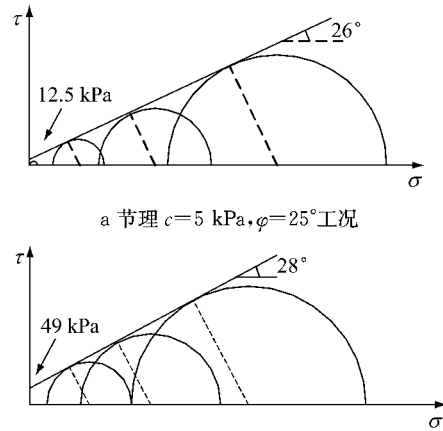


图 10 节理岩体抗剪强度指标的确定

Fig.10 Determination of shear strength parameters of jointed rock mass

表 3 现场节理计算参数

Tab.3 Calculation parameters of joint in site

材料	法向刚度 $K_n / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	切向刚度 $K_s / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	残余强度		峰值强度	
			粘聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	粘聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
节理	200	20	5	25	40	26

根据极限应力圆的强度包线, 如图 10 所示, 确定出残余强度情况下节理岩体的宏观强度参数粘聚力 $c=12.5\text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi=26^\circ$. 节理岩体弹性模量与围压有关, 其关系如图 11 所示. 当围压较小时,

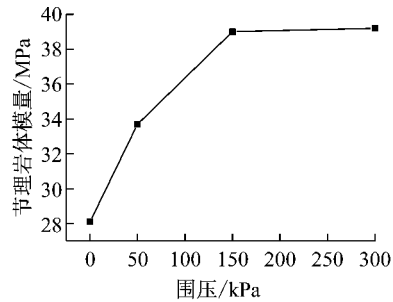


图 11 节理岩体模量与围压的关系

Fig.11 Relationships between jointed rock mass modulus and confining pressure

岩体模量较低,随着围压增加,岩体宏观模量逐渐增大,最终接近一个界限值,这也揭示出节理岩体具有卸荷损伤性质.本次参数计算暂不考虑损伤对岩体模量的影响,视其为常刚度材料,所以最终取其界限值 39MPa 作为节理岩体的弹性模量值.

采用类似方法可以确定峰值强度情况下岩体的宏观强度参数 $c=49$ kPa,内摩擦角 $\varphi=28^\circ$,岩体模量同样为 39 MPa.最终确定的岩体力学参数如表 4 所示.

表4 节理岩体力学参数

Tab.4 Mechanical parameters of jointed rock mass

试件说明	围压 σ_3 / kPa	破坏时轴 压 σ_1 /kPa	粘聚力 c /kPa	内摩擦 角 φ ($^\circ$)	弹性模量 E /MPa
尺寸:5 m×5 m	0	18	12.5	26	28.1
两组相互垂直节理	50	162	12.5	26	33.7
节理间距 0.5 m	150	395	12.5	26	39.0
$c=5$ kPa, $\varphi=25^\circ$	300	776	12.5	26	39.2
尺寸:5 m×5 m	50	302	49.0	28	34.5
两组相互垂直节理	150	566	49.0	28	39.3
节理间距 0.5 m	300	996	49.0	28	39.5
$c=40$ kPa, $\varphi=26^\circ$					

3 结论

本文总结提出了应用数值试验方法确定节理岩体宏观力学参数的方法流程.即将节理岩体单元离散为岩块和节理两种类型,首先分别通过室内试验研究其力学特性,之后再吧岩块和节理组合形成岩体,通过数值计算得出节理岩体的力学特性,结论如下:

(1) 节理岩体的连续微元尺寸分析表明,试件尺寸应至少为节理间距的 10 倍时,其对岩体强度已基本无影响.

(2) 节理产状对岩体各向异性影响较大,节理倾角越大,岩体弹性模量越低,当节理倾角为 35° 时,岩体强度最低.

(3) 岩体强度主要受节理强度控制,其与节理强度指标基本呈线性增加关系,同样,岩体刚度也主要受节理刚度控制,其弹性模量与节理刚度呈线性增加关系.

(4) 毕威高速边坡节理岩体力学参数可采用类似三轴压缩数值试验确定,当节理强度分别采用峰值强度、残余强度时,岩体宏观强度参数分别呈现高低差别,峰值粘聚力为 49 kPa,峰值内摩擦角为 28° ,残余粘聚力为 12.5 kPa,残余内摩擦角为 26° ;岩体宏观弹性模量最终接近同一个界限值,其值为 39

MPa.

综上,数值试验方法操作灵活、适用性强,解决了现场或室内试验条件下难以测试大尺度岩体并获取其参数的问题,为工程节理岩体参数的确定和优化提供了一种新的方法和思路.

参考文献:

- [1] 何满潮,薛廷河,彭延飞. 工程岩体力学参数确定方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(2):225.
HE Manchao, XUE Tinghe, PENG Yanfei. A new way of determination mechanical parameters of engineering rock masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 225.
- [2] 陈昌彦,王贵荣. 各类岩体质量评价方法的相关性探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(12):1894.
CHEN Changyan, WANG Guirong. Discussion on the interrelation of various rock mass quality classification systems at home and abroad[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1894.
- [3] 胡波,曾钱帮,饶旦,等. 锚碇-围岩系统在拉剪复合应力条件下的变形规律及破坏机制研究——以坝陵河特大岩锚悬索桥为例[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(4):712.
HU Bo, ZENG Qianbang, RAO Dan, et al. Study on deformation law and failure mechanism of anchorage-surrounding rock system under tensile-shear complex stresses—taking super-large suspension bridge on Baling River for example [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 712.
- [4] 胡波,王思敬,刘顺桂,等. 基于精细结构描述及数值试验的节理岩体参数确定与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2007, 26(12): 2458.
HU Bo, WANG Sijing, LIU Shungui, et al. Determination and application of jointed rock mass parameters based on fine structure description and numerical experiment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 26(12): 2485.
- [5] 周维垣,杨延毅. 节理岩体力学参数取值研究[J]. 岩土工程学报,1992,14(5):1.
ZHOU Weiyan, YANG Yanyi. A computer simulation method to predict the mechanical properties of jointed rock mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(5): 1.
- [6] 陈志坚,卓家寿. 样本单元法及层状含裂隙岩体力学参数的确定[J]. 河海大学学报:自然科学版,2000,28(1):14.
CHEN Zhijian, ZHUO Jiashou. Application of "sample element method" to determination of mechanical parameters of stratified crack rock mass [J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2000, 28(1): 14.
- [7] 李世海,汪远年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(21):3642.
LI Shihai, WANG Yuannian. Selection study on computational parameters for DEM in geomechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3642.
- [8] 曾纪全,杨宗才. 岩体抗剪强度参数的结构面倾角效应[J]. 岩石力学与工程学报,2004, 23(20): 3418.

- ZENG Jiquan, YANG Zongcai. Dip effect of structural plane on shearing strength parameters of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3418.
- [9] 刘爱华,董蕾,董陇军. 节理岩体强度参数的数值模拟及工程应用[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(1): 177.
- LIU Aihua, DONG Lei, DONG Longjun. Numerical simulation and engineering application of strength parameters of jointed rock mass[J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2011,42(1): 177.
- [10] 刘爱华,黄敏. 岩石弱面与岩体各向异性的力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(1): 152.
- LIU Aihua, HUANG Ming. Study on rock joints and anisotropy of rock mass by laboratory tests [J]. Chinese Journal of RockMechanics and Engineering, 2008, 27(1): 152.
- [11] Hudson John A. Engineering Rock Mechanics[M]. London : Redwood Publishing Company,1997.
- [12] Oda M A. Method of evaluating representative elementary volume based on joint survey of rock mass [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 25(3): 281.
- [13] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D (fast lagrangian analysis of continua in 3 Dimensions) user manuals, version 2.1[M]. Minneapolis; Itasca Consulting Group Inc., 2002.
- [14] 王芝银,段品佳. 基于岩体三轴压缩试验的节理力学参数确定方法[J]. 岩土力学,2011,32(11): 3219.
- WANG Zhiyin, Duan Pinjia. A new method for determining mechanical parameters of joints based on triaxial compressive test for rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (11): 3219.
- [14] Qiang X, Bijlaard F S K, Kolstein H, *et al.* Behaviour of beam-to-column high strength steel endplate connections under fire conditions—part 2: numerical study [J]. Engineering Structures, 2014, 64(4):23.
- [15] Qiang X, Jiang X, Bijlaard F S K, *et al.* Post-fire behavior of high strength steel endplate connections—part 2: numerical study [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 108 (5): 94.
- [16] Lou G B, Yu S, Wang R, *et al.* Mechanical properties of high-strength bolts after fire[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Structures and Buildings, 2012, 165 (7): 373.
- [17] Qiang X. Behavior of high strength steel endplate connections in fire and after fire[D]. Deft: Deft university of Technology, 2013.
- [18] Coelho A M G. Characterization of the bolted endplate beam-to-column steel connections [D]. Coimbra: University of Coimbra, 2004.
- [19] Jaspert J P. Study of the semi-rigidity of beam-to-column joints and its influence on the resistance and stability of steel buildings [D]. Liège: Liège University, 1991.
- [20] Wilkinson S, Hurdman G, Crowther A. A moment resisting connection for earthquake resistant structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(3): 295.
- [21] Qiang X, Bijlaard F S K, Kolstein H. Post-fire mechanical properties of high strength structural steels S460 and S690[J]. Engineering Structures, 2012, 35(2): 1.
- [22] Qiang X, Bijlaard F S K, Kolstein H. Post-fire performance of very high strength steel S960 [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80(1): 235.

(上接第 179 页)