

柱状节理岩体压缩破坏过程模拟及机制分析

朱道建^{1,2}, 杨林德^{1,2}, 蔡永昌^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 将柱状节理岩体整体考虑为一种广义宏观复合材料是一种行之有效的研究方法, 为此建立复合型多弱面软化模型, 采用 VC++ 语言成功开发并嵌入 FLAC^{3D} 程序。以白鹤滩水电站的地质条件为研究背景, 对柱状节理岩体进行单轴压缩和三轴压缩的模拟计算, 分析不同节理面倾角和倾向的试块破坏过程, 得出各种情况下破裂面分布和破坏形态, 并总结具有普遍意义的破坏规律。通过三轴试验还得到在处于合适的地应力条件时, 柱状节理岩体整体强度及节理面之间的咬合力均较高的结论, 与现场勘测结果一致。同时, 研究压缩破坏过程中外载和变形的规律、塑性破坏区的产生、破裂区的分布和发展以及能量的耗散等, 从多方面对柱状节理岩体的破坏机制进行探讨, 以便更好地了解该类岩体的力学特性。

关键词: 岩石力学; 柱状节理岩体; 单轴压缩; 三轴压缩; 破坏机制

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)04 - 0716 - 09

SIMULATION OF COMPRESSIVE FAILURE PROCESS OF COLUMNAR JOINTED ROCK MASS AND ITS FAILURE MECHANISM ANALYSIS

ZHU Daojian^{1,2}, YANG Linde^{1,2}, CAI Yongchang^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The columnar jointed rock mass is considered as a macroscopic composite material in a broader sense. A softening model of mixed multi-weakness planes is developed. Based on the second developing platform of constitutive model in FLAC^{3D}, the mixed softening model has been successfully established and embedded. Taking the geological conditions of Baihetan Hydropower Station as research background, uniaxial and triaxial compressions of columnar jointed rock mass are simulated; and then the failure processes of test blocks with different dip angles and directions are analyzed. The distribution of fractured planes and the failure modes are achieved; and the failure law of general significance is summarized. Through triaxial compression test, it is obtained that the strength of columnar jointed rock mass and cohesion of joint surface can reach high level under certain in-situ stress level, which agrees well with the results of field investigation. Meanwhile, the laws of load and deformation, occurrence of failure zone, distribution and development of fractured zone as well as energy dissipation are studied. Failure mechanism in many respects is discussed so as to better understand the mechanical properties.

Key words: rock mechanics; columnar jointed rock mass; uniaxial compression; triaxial compression; failure mechanism

收稿日期: 2008 - 10 - 09; **修回日期:** 2008 - 12 - 12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678135)

作者简介: 朱道建(1981 -), 男, 博士, 2003年毕业于中国矿业大学建筑工程学院工业与民用建筑专业, 主要从事隧道工程及岩石力学方面的研究工作。E-mail: zdj38@126.com

1 引言

岩土工程中经常遇到层状或具有密集定向节理切割的破碎岩体。节理的存在大大影响着整个岩体结构的力学行为^[1], 对其的研究也一直是岩土界的热点之一, 主要从其本构关系、岩体参数确定方法、岩体分类和质量分级方法及室内外试验手段等多方面展开研究^[2], 其最终目的是为了更好地了解节理岩体的力学性质, 从而为实际工程的设计和施工提供设计和计算依据。而对该类岩体力学性质的研究最直接的手段是结合相关试验结果来进行分析。由于节理岩体较为破碎, 该类试验又以现场试验为主, 而现场试验与室内试验相比, 存在试验种类单一、试验过程相对粗糙以及受周围环境及人为因素影响偏大等缺点。进行室内试验, 现场采集试块几乎很难完成, 最主要的原因是大量节理面切割岩体使得采样破碎不堪, 而实验室制作这种多组节理面切割的试块难度也很大。对于单一的柱状节理岩块而言, 其宏观上简化为由 3 组节理面切割形成, 即竖向由 2 组相垂直或成一定角度的节理面切割形成柱面的形状, 水平向由 1 组节理面切割形成柱状节理岩体的长度。同时, 柱体内部存在大量的微裂隙, 使柱状节理岩体更显破碎。因此, 由大量这种单一的柱状节理岩块挤压形成的柱状节理岩体的试验试块进行现场采集和实验室制作难度将更大, 而数值计算方法的发展使研究柱状节理岩体的压缩破坏过程及破坏机制成为了可能。

本文将 3 组节理面斜交密集切割的柱状节理岩体考虑为一种广义宏观复合材料^[3], 建立了相应的复合型多弱面软化模型, 并采用 VC++ 语言成功开发并嵌入 FLAC^{3D} 程序, 对柱状节理岩体进行了单轴压缩试验和三轴压缩试验的数值模拟, 分析柱状节理岩体压缩破坏的全过程, 研究其压缩破坏过程中外载和变形的规律、塑性破坏区的产生、破裂区的分布和发展以及压缩过程中能量的耗散等, 从多方面对该类岩体的破坏机制进行探讨, 其目的是为了更好地了解柱状节理岩体的力学性质, 从而为相关实际工程作参考和指导。

2 复合型多弱面软化模型的建立

本文所建立的复合型多弱面软化模型属于弹塑

性本构模型, 该模型从 2 个方面对节理岩体进行了复合: (1) 将节理岩体材料视为由岩体和节理组成的一种广义宏观复合材料, 岩体和节理材料分别服从自身的应力-应变本构关系并设置了反映自身属性的评价指标, 可分别进行相关属性的赋值。(2) 岩体材料采用弹塑性本构关系, 其屈服准则是将 Mohr-Coulomb 和 Hoek-Brown 强度屈服准则^[4]复合嵌入本构模型中, 通过设定引入的屈服因子, 可根据工程情况合理方便地选择相应的屈服准则。而硬化/软化阶段则根据不同的强度屈服准则, 对相关的塑性参数指标进行软化曲线设置。

由于岩体的抗拉强度远不及其抗压强度, 因此在应用 Mohr-Coulomb 强度屈服准则的同时, 引入了抗拉强度屈服准则, 即当岩体所承受的拉应力超过其抗拉强度时, 岩体材料即发生拉破坏, 同时还可以考虑材料的双线性特性, 见图 1, 其中 f_1^s , f_2^s 及 f^t 分别为 BC, AB 段 Mohr-Coulomb 屈服准则及 CD 段受拉屈服准则。

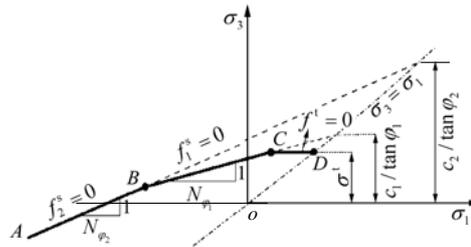


图 1 岩体 Mohr-Coulomb 强度屈服准则

Fig.1 Mohr-Coulomb strength yield criterion of rock mass

模型中考虑了 3 组独立的节理弱面, 每组节理面可以任意正交或斜交。可以按照工程的需要, 设置所需的节理面位置和数目。各节理面均设置独立的局部坐标系^[5], 参考基面为 x - y 坐标平面, 节理面与基面形成的夹角为节理面倾角, 节理面法向量在基面内的投影与 y 轴正向所形成的夹角为节理面倾向^[5]。

各节理面强度屈服准则均采用 Mohr-Coulomb 和抗拉屈服的复合型强度屈服准则, 采用该强度准则使节理面参数的确定简易化, 可直接由现场试验数据获取。同时, 对节理面也考虑了双线性特性, 如图 2 中 AB 段和 BC 段, 均满足复合型强度屈服准则, 但两阶段与各自设置的塑性参数值有关, 而 CD 段则为受拉屈服段^[6]。

节理面和岩体的软化特性均通过引入软化参数来进行设置, 它主要与材料的塑性变形有关。其中,

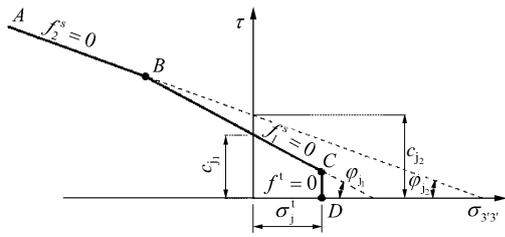


图2 节理面强度屈服准则
Fig.2 Strength yield criterion of joint plane



图3 柱状节理岩体分布
Fig.3 Distribution of columnar jointed rock

节理面参数 k_j^s 和 k_j^t 主要与节理面塑性剪切应变和拉应变相关，其数学表达式分别为

$$\Delta k_j^s = \frac{1}{3} \sqrt{2(\Delta \varepsilon_{3'3'}^{Ps})^2 + (\Delta \varepsilon_{1'3'}^{Ps})^2 + (\Delta \varepsilon_{2'3'}^{Ps})^2} \quad (1)$$

$$\Delta k_j^t = \Delta \varepsilon_{3'3'}^{Pt} \quad (2)$$

式中： $\Delta \varepsilon_{i'3'}^{Ps}$ ($i = 1, 2, 3$) 为节理面局部坐标系内各主方向应变增量， $\Delta \varepsilon_{3'3'}^{Pt}$ 为节理面拉应变增量。

采用 VC++ 语言在 FLAC^{3D} 的自写本构平台下进行二次开发^[7, 8]，嵌入 FLAC^{3D} 程序后则可进行节理岩体的计算研究及工程应用。本模型的特点是将节理岩体看成是由节理和岩体组成的一种广义复合材料，可对节理和岩体单独定义材料属性。2 种材料均是弹塑性本构关系^[9]，但岩体材料可以通过设定其屈服因子选择 Mohr-Coulomb 或 Hoek-Brown 强度屈服准则。节理面则考虑了多组弱面的情况，最多可设置 3 组相互正交或斜交的节理面，节理面强度屈服准则均服从 Mohr-Coulomb 强度准则，同时可考虑节理材料的双线性特性，该特性可通过设定材料因子确定是否考虑其双线性特性。岩体材料和节理材料的软化特性均通过引入与应变相关的软化参数来进行描述，进入软化阶段后随着塑性变形的增大自动更新材料参数值。

3 柱状节理岩体的特征

本文中所研究的柱状节理岩体是以我国即将投建的白鹤滩水电站的地质条件为研究背景。该水电站坝区玄武岩属于大陆裂谷环境，是岩浆顺扬子板块西缘的小江大断裂喷溢的产物，区内熔岩厚度较大，化学成分相近。坝区内柱状节理分布见图 3。

现场根据柱状节理岩体的分布密度、直径大小、柱体长度以及微裂隙切割程度等将其分为 3 类。I 类柱状节理发育的密度较大，柱体细长，长度一般为 2~3 m，直径为 13~25 cm，岩石呈灰黑色，其

内微裂隙发育，切割岩体块度为 5 cm 左右；II 类柱状节理发育不规则，未切割成完整的柱体，柱体长度一般为 0.5~2.0 m，直径为 25~50 cm，其内微裂隙较发育，但相互咬合，未完全切断，块度约为 10 cm；III 类柱体粗大，长度在 1.5~5.0 m 不等，直径为 0.5~2.5 m，切割不完全，嵌合紧密。其中，以 I 类柱状节理最为常见。同时，柱体内存在密集分布的微裂隙，一种是近平行柱面的微裂隙(纵向微裂隙)，迹长为 0.3~2.0 m 不等，另一种为横切柱体的缓倾角微裂隙(横向微裂隙)，迹长一般为 3~20 cm，2 种微裂隙进一步将柱状节理岩体切割后，柱体内岩块截面多呈四边形、五边形，直径一般以 5~10 cm 为主(见图 4)。

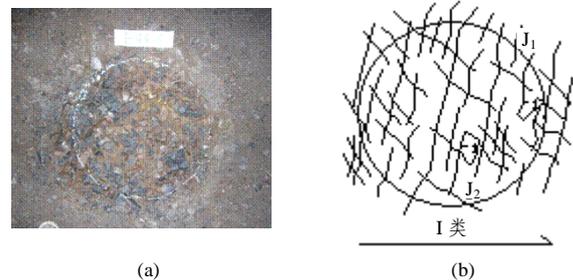


图4 柱状节理岩体断面图
Fig.4 Cross-section of columnar jointed rock

4 柱状节理岩体破坏过程的数值模拟

采用数值模拟方法对试块进行单轴压缩和三轴压缩试验，分析压缩过程中试块应力 - 应变规律、塑性破坏区的分布、剪切带的产生及能量的集中和耗散等，从而更好地了解节理岩体的破坏机制。

4.1 单轴压缩试验

结合柱状节理岩体现场的分布情况，单轴压缩试验建立的计算模型尺寸是半径为 50 cm，高为 200 cm 的圆柱体，该尺寸范围内包含了足够多的相互斜交的节理面，且节理面比较密集。此处将柱面简化为四面体，主要考虑 2 组相互斜交的节理面，其各自倾角和节理面夹角可发生变化，而不考虑节理面

间距变化带来的影响,即节理面间距固定不变。垂直方向节理面贯穿整个模型,即柱体的长度均为 200 cm。对 2 组节理面不同倾角和倾向的情况进行了大量的模拟计算,以研究其变形破坏的普遍规律。现列出以下 5 种情况的计算结果,并作详细分析:

- (1) 节理面倾角均为 50°, 倾向角分别为 0°和 90°;
 - (2) 一组节理面为 70°, 另一组为 120°, 倾向角分别为 0°和 90°;
 - (3) 一组节理面为 90°, 另一组为 110°, 倾向角分别为 0°和 90°;
 - (4) 一组节理面为 10°, 另一组为 165°, 倾向角分别为 0°和 90°;
 - (5) 一组节理面为 45°, 另一组为 135°, 倾向角均为 90°。
- 岩体材料的强度屈服准则采用复合型软化模型中的综合型 Mohr-Coulomb 强度准则。岩体和节理面的力学参数^[9]见表 1。节理面所处位置处的弹性常数通过岩体材料统一进行输入。

表 1 岩体和节理面模型力学参数^[9]

Table 1 Mechanical parameters of joint model and rock mass^[9]

介质	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(^{\circ})	抗拉强度 /MPa	剪胀角 /(^{\circ})
岩体	8.46	4.18	1.42	37	1.89	18
节理面 1	-	-	0.75	28	0.78	14
节理面 2	-	-	0.75	28	0.78	14

图 5~7 分别为各种情况单轴压缩试验的模拟计算结果,从其剪切应变率的分布云图看,当两节理面倾角相同时,沿着节理面方向形成由上至下的 2 个破裂面,该破裂面均通过试块的中心。当 2 组

节理面倾角不同时,存在一个优势破裂面,该破裂面倾角等于两组节理面中倾角偏小的那组,同时通过试块中心,若倾角 α 为钝角,则比较 $(180-\alpha)$ 的大小。如情况 2,优势破裂面则沿着倾角为 120°的节理面产生。而当存在一组节理面倾角为 90°时,破裂面多沿着另一组节理面走向,如情况 3,优势破裂面沿着节理面倾角为 110°产生。情况 4 由于节理倾角均较小,最终主要是岩体材料发生剪切屈服,形成新的剪切破裂面,未沿着原有的节理面发生破坏,这种破坏可称为“抗剪断破坏”。情况 5 中 2 组节理面对称分布,其破坏形态为常见的“共轭剪切”,破裂面沿着 2 组节理面同时产生^[10]。

结合剪切破坏面的分布形态,同样反映了上述规律。对于情况 2 和 3,节理面倾角不相等,对于情况 2,优势破坏面为倾角 120°通过试块中心的斜面,同时,垂直于优势破坏面还存在 2 个可能发生破坏的剪切面,图 7 中的情况 2,其中“yield1”的塑性剪切应变率仅为“yield2”的 1/10,此处显示“yield1”主要是为了作对比,表明破坏面主要沿倾角 120°的节理面产生。情况 3 的剪切破坏面则在试块中部发生错动,这与倾角为 90°节理面的存在有关。情况 4 则主要以岩体材料的屈服破坏为主,出现了类似于网状的多剪切破坏面形态。情况 5 和 1 均为 2 组节理面均发生剪切破坏的情况,图 7 中的情况 5 所显示的是两组节理面中同时满足应变率大于 0.2 的破坏面。

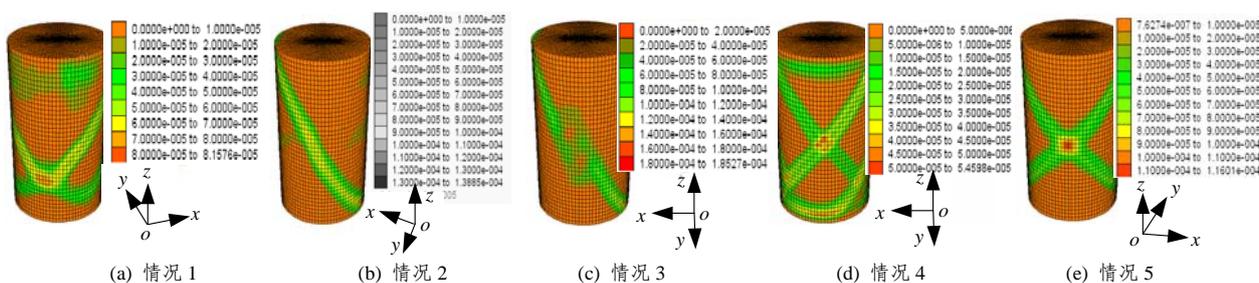


图 5 剪切应变率分布云图(单位: rad/时步)

Fig.5 Nephograms of shear strain rates(unit: rad/step)

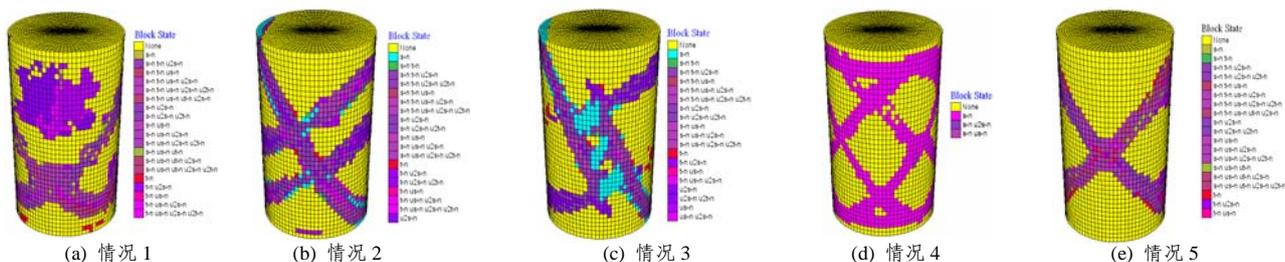


图 6 塑性破坏区分布图

Fig.6 Distribution of block plastic zones

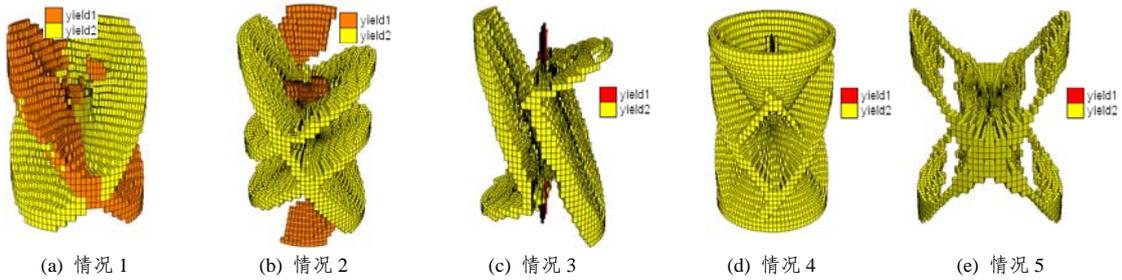
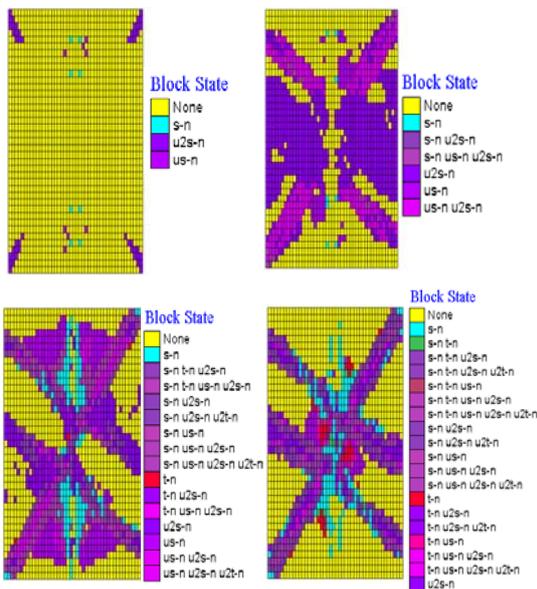


图 7 剪切破坏面

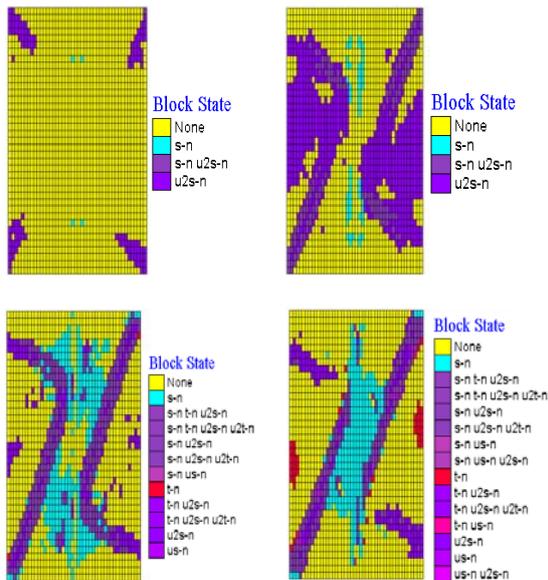
Fig.7 Shear failure planes

在计算过程中，对柱状节理岩体的压缩破坏过程进行的分析，以情况 2 和 3 为例。图 8 为情况 2

时节理岩体破坏开展的过程，以 $y = 0$ 断面为参考，当试块受压破坏初期，首先试块四角出现塑性破坏区，主要是倾角为 120° 的节理面发生屈服，即图中所示的“u2s-n”。随着外荷载的持续作用，右侧对角破坏区不断扩展进而贯通形成优势破坏面，左侧对角方向扩展而形成 2 个可能的剪切破坏面，同时伴随着岩体材料的剪切屈服和受拉破坏。



(a) 情况 2



(b) 情况 3

图 8 节理岩体破坏开展过程

Fig.8 Failure processes of jointed rock mass

同样，对于情况 3，由于试块两端直接受力，倾角为 110° 的节理面首先发生剪切屈服，随着外荷载的持续作用，塑性破坏区不断发展，由于存在垂直方向的节理，左侧上下对角部位塑性区相互发展进而贯通，右侧上下对角也相互贯通，两破坏面之间同时伴随着岩体材料的屈服，进而形成整个试块的破裂，见图 8(b)。

对含有 2 组不同节理面倾角的试块进行了大量的模拟计算^[11]，对柱状节理岩体的破坏规律进行了总结分析，得出以下一些结论：

(1) 两节理面倾向角垂直且倾角相等时，一般情况下，当节理倾角大于 15° ，小于 75° 时，主要以节理面发生破坏，剪切破坏带为沿着 2 组节理面走向并通过试块中心的 2 个斜面。当节理面倾角小于 15° 或大于 75° (即接近 0° 或 90°) 时，其破坏主要以岩体材料破坏为主，其破坏形态以剪切形成多组交叉网状破坏面为主。

(2) 两节理面倾向角垂直但倾角不相等时，当其中存在一组节理面或两组节理面倾角均大于等于 15° ，小于 75° 时，主要以其中倾角较小(若存在倾角为钝角的情况，则比较其补角大小)的那组节理面优先发生破坏，其剪切破坏面为沿着该组节理面走向并通过试块中心的一个斜面。当两组节理面均接近 0° 或 90° 时，仍以岩体材料破坏为主，其破坏形式仍以网状破坏为主。

(3) 两节理面中存在倾角为 90° 节理面时，多以另一组节理面的破坏为主。进行柱状节理岩体水平压缩时，若倾角相等，发生共轭剪切破坏，若倾角

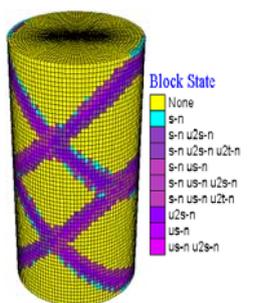
不等,其破坏形态类似与图 7 中的情况 2。

(4) 两节理面倾向的夹角由相互垂直逐渐减小或逐渐增大时,对试块整体破坏时的形态无太大影响,所不同的是影响剪切破坏面的位置。

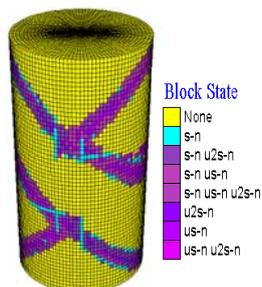
4.2 三轴压缩试验

柱状节理岩体三轴压缩试验试块的尺寸大小与单轴压缩时相同,以两节理面倾角分别为 45°和 135°,倾向角为 90°的情况为例,对该试块在不同围压下进行三轴压缩试验,分析不同围压下其破坏形态的差异。

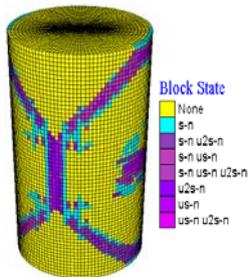
图 9, 10 分别是围压 0.5, 2.0, 5.0 和 12.0 MPa



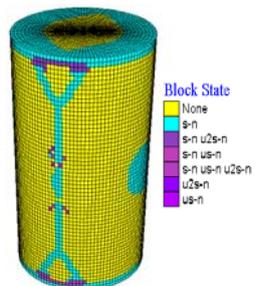
(a) 围压为 0.5 MPa



(b) 围压为 2.0 MPa



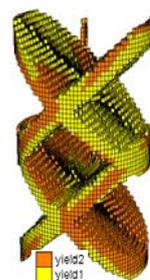
(c) 围压为 5.0 MPa



(d) 围压为 12.0 MPa

图 9 不同围压时三轴压缩破坏形态

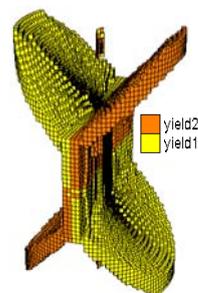
Fig.9 Failure modes of triaxial compression under different confining pressures



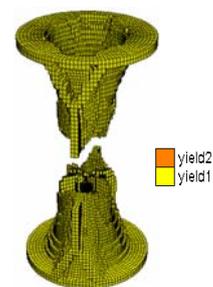
(a) 围压为 0.5 MPa



(b) 围压为 2.0 MPa



(c) 围压为 5.0 MPa



(d) 围压为 12.0 MPa

图 10 三轴压缩剪切破坏面

Fig.10 Shear failure planes under triaxial compression

情况下三轴压缩的破坏形态和破坏面分布图。当围压为 0.5 MPa 的低围压时,出现了多个剪切破坏面,主要是以节理面的屈服为主。当围压增大至 2.0 MPa 时,仍以节理面的剪切破坏为主,但破坏面相对减少。当围压增大至 5.0 MPa 时,其破坏形态发生了一定的变化,两节理破坏面由试块顶面和底面的端部逐渐向对角方向开展,在试块中部突然发生破裂进行形成破坏面的贯通,破坏形式相比之前更为简单。当围压增大至 12.0 MPa 时,试块的破坏则以岩

体材料的破坏为主，节理面很少出现屈服，其破坏形态为“轴向劈裂”。

在三轴压缩过程中，对整个试块弹性应变能^[12]的分布情况也进行了计算。试块在压缩过程中，破坏面上的应变能处于最低水平，并随着压缩的不断进行，能量不断的耗散。而在试块中部，两破坏面中间的区域，弹性应变能处于最高状态。

上述模拟计算的结果表明，对该试块进行三轴压缩试验时，随着围压的增大，材料的破坏由低围压时的多个节理剪切破坏面，逐渐转变为两个或单个节理面剪切破坏面，进而发展至仅出现岩体材料的剪切破坏面，此时并未发生“重剪破坏”。对不同节理面倾角和倾向角的情况也作了大量的模拟，均符合上述规律。因此，当处于合适的围压时，富含节理的岩体，其稳定性和强度也能达到较高水平。这符合现场勘测过程得出的结论：未扰动的柱状节理岩体，其强度较高，承载能力大，柱体间相互咬合力很好；但探洞和模拟试验洞中扰动后的岩体承载力较差，有些甚至出现自然脱落的情况。

5 柱状节理岩体破坏机制的探讨

5.1 柱状节理岩体的重剪破坏判据

从岩石力学的角度来说，在地质构造应力的作用下，岩体受力产生变形及运动破坏，形成了地层中常见的断层、节理以及众多的微裂隙等，统称为结构面。由于后期人为的开挖及施工扰动等，使岩体又进一步发生变形。一般来说，含有结构面的岩体，在外力的作用下，重新沿着结构面破裂，一般称为“重剪破坏”。如果不是沿着原有的结构面破坏，而是形成新的剪切破坏面，则称为“抗剪断破坏”。通过上面的模拟计算，柱状节理岩体在进行压缩试验时，一般发生“重剪破坏”^[13]，即试块沿着原有的节理面发生破坏。在本文建立的复合型多弱面软化模型中，节理面的剪切破坏判据是采用 Mohr-Coulomb 强度准则。现采用图解法对单个节理面发生重剪破坏的情况进行分析，当岩体中存在多个结构面时，其原理是类同的。

由 Mohr-Coulomb 强度准则，节理面强度的表达式为

$$\tau = c_j + \sigma \tan \varphi_j \quad (3)$$

式中： c_j 和 φ_j 分别为节理面的黏聚力和内摩擦角。

如图 11 所示，当 Mohr 应力圆与节理面强度曲线 AD 相切于点 M 时，此时刚好处于节理面破坏的临界状态。假设节理面倾角为 β ，当节理面发生重剪破坏时，其破裂角也为 β 。则有

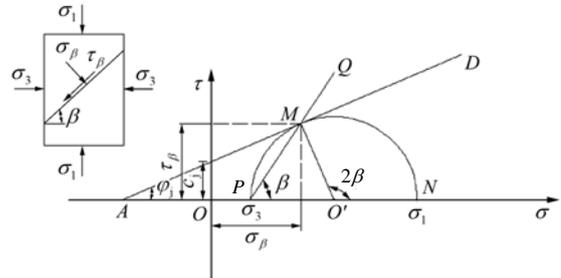


图 11 沿节理面破坏图解

Fig.11 Graphics of failure along joint plane

$$\tau_\beta = c_j + \sigma_\beta \tan \varphi_j \quad (4)$$

式中： τ_β 和 σ_β 分别为节理面上的剪应力和正应力。

连接 PM，则其表示该临界状态时节理面的应力线。采用三线相交原理，可判定节理面发生重剪破坏的条件为：

(1) 若三线正好交于点 M，表示此时处于重剪破坏的临界状态，即该应力条件下所产生的 τ_β 和 σ_β 值正符合式(1)中对 τ 和 σ 值的要求。

(2) 若 Mohr 应力圆与 AD 处于相离的位置，此时节理面上的应力值未达到发生重剪破坏时的应力值，即不会发生重剪破坏。

(3) 若 Mohr 应力圆与 AD 处于相割的位置，则表示节理面上的应力已超过了发生重剪破坏的要求，将肯定发生重剪破坏。这种情况只是作为是否发生重剪破坏的判定标准，实际上，该情况在应力圆与强度曲线相切时就开始发生破坏。

5.2 柱状节理岩体的破坏机制

经典的岩石本构关系和破坏准则大多借鉴金属材料力学形态建立起来的，但是岩石的破坏过程无论是从宏观上还是从微观上都与金属材料有很大的不同，造成此原因主要是对岩石破坏过程及机制还没有完全研究清楚。本文对柱状节理岩体建立了复合型软化模型，通过进行单轴压缩和三轴压缩试验对柱状节理岩体的破坏过程和破坏形态进行了研究，此处对其破坏机制作进一步的探讨，有助于更好地了解柱状节理岩体的力学特性。

运用解析法^[13]可求解在外荷载作用下节理面的应力值。当进行单轴压缩时，最大主应力方向为

竖向加载方向, 此时围压为 0, 由图 11 的 Mohr 应力圆中的几何关系可得

$$\sigma_{\beta} = \frac{1}{2}\sigma_1 - \frac{1}{2}\sigma_1 \cos(180^{\circ} - 2\beta) = \sigma_1 \cos^2 \beta \quad (5)$$

同样, 进行三轴压缩时

$$\sigma_{\beta} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (6)$$

将式(5), (6)代入式(4)可知, 当有 2 组或多组节理面存在时, 倾角较小的那组节理面上, 其剪应力偏大, 因而相比之下更易发生重剪破坏。从而验证了节 3 的相关结论。

同样, 由图 11 也可直接得出 τ_{β} 的表达式, 与 σ_{β} 的表达式同时代入式(2), 进而化简可得到 σ_1 和 σ_3 的关系式, 进而可判断不同围压下, 是否会发生重剪破坏。这从理论上给出了柱状节理岩体的破坏形态的判断方法。

岩石的破坏主要是由于在荷载作用下岩石内部裂纹产生、扩展及汇合所致。因此从损伤的观点来看, 岩石的破坏是一个过程, 不是一个状态^[14]。本文所研究的柱状节理岩体, 由于其内部富含节理, 其破坏过程和破坏形态与普通的岩石相比差异性很大。在外荷载持续作用下, 不仅包括岩体材料的屈服, 同时还伴随着节理面的屈服, 两者之间还存在相互影响。进入软化阶段, 节理面和岩体材料的软化程度又存在差异, 使得柱状节理岩体的破坏过程更为复杂。

图 12, 13 分别为柱状节理岩体单轴和三轴压缩的应力 - 应变曲线图。结合应力 - 应变曲线和试块破坏过程的模拟计算结果发现, 对于 2 节理面倾角大于 15°且小于 75°的情况, 试块的破坏经历了以下 4 个阶段^[15]:

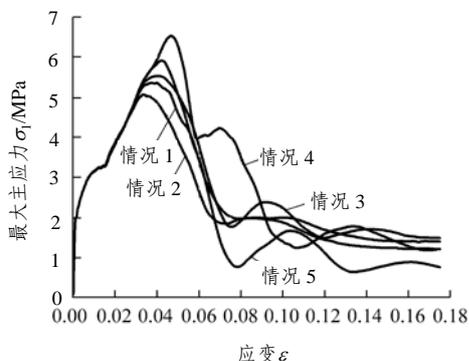


图 12 单轴压缩时应力 - 应变曲线

Fig.12 Curves of stress-strain under uniaxial compression

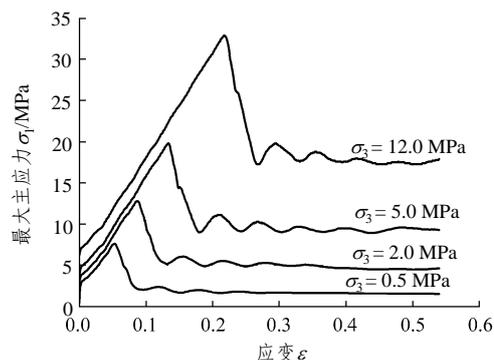


图 13 三轴压缩时应力 - 应变曲线

Fig.13 Curves of stress-strain under triaxial compression

(1) 线弹性阶段。模型承载的初始阶段, 由于应力水平较低, 节理面还未发生滑移及屈服, 整个试块处于线弹性状态。由于节理变形和岩体材料变形的不协调, 曲线图上表现出局部线性的特征。

(2) 裂纹稳定扩展阶段。当应力增大至一定程度后, 节理面首先发生屈服, 由试块端部逐渐向对角方向发展, 随着应力的增大, 影响范围不断增大, 同时伴随着局部岩体材料的屈服。

(3) 裂纹失稳扩展阶段。随着外荷载的进一步增加, 节理面屈服变形加剧, 在向对角方向过程中, 节理破坏面急速扩展进而贯通形成了优势破裂面, 承载能力逐渐降低, 整个试块也渐渐进入失稳状态。

(4) 残余强度阶段。试块沿优势破裂面发生了破坏, 节理面强度及破裂面附近岩体材料强度均大大降低, 承载能力降至最低限度。

6 结 论

本文针对柱状节理岩体建立了复合型多弱面软化模型, 在此基础上, 对柱状节理岩体进行了单轴压缩和三轴压缩的数值模拟, 主要目的是为了了解不同节理面位置时, 其压缩破坏过程及破坏形态的差异, 从而更好地了解柱状节理岩体的力学性质。在计算所得结论的基础上, 运用图解法和解析法对所得结论进一步验证, 并对柱状节理岩体的破坏机制进行了探讨。目前对柱状节理力学性质的研究成果很少, 本文的研究有助于更好地了解该类岩体。同时, 为我国正要投建的白鹤滩水电站的设计和施工提供了理论参考和现场指导。

参考文献(References):

[1] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the

- mechanics of joint rock[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(3): 637 - 659.
- [2] HART R D, CUNDALL P A, LEMOS J V. Formulation of a three-dimensional distinct element model—part II: mechanical calculations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1988, 25(3): 117 - 126.
- [3] 牛斌, 杨海天. 基于均匀化方法的斜交节理岩体复合本构关系研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 773 - 778.(NIU Bin, YANG Haitian. Homogenization-based investigation on constitutive relationship of oblique joint rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 773 - 778.(in Chinese))
- [4] CUNDALL P, CARRANZA-TORRES C, HART R. A new constitutive model based on the Hoek-Brown criterion[C]// Proceedings of the 3rd International Symposium on FLAC and FLAC^{3D} Numerical Modeling in Geomechanics. Sudbury: [s. n.], 2003.
- [5] Itasca Consulting Group, Inc.. Fast Lagrangian analysis of continua in three dimensions(version 3.0) user's Manual[R]. [S. l.]: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [6] GERRARD C M. Elastic models of rock masses having one, two and three sets of joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1982, 19(1): 15 - 23.
- [7] MARTI J, CUNDALL P. Mixed discretization procedure for accurate modeling of plastic collapse[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1982, 6(1): 129 - 139.
- [8] 陈育民, 刘汉龙. 邓肯-张本构模型在 FLAC^{3D} 中的开发与实现[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2 123 - 2 126.(CHEN Yumin, LIU Hanlong. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2 123 - 2 126.(in Chinese))
- [9] 朱道建, 杨林德, 黄建勇. 厦门海底隧道地表沉降控制效果分析及其预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2 356 - 2 362. (ZHU Daojian, YANG Linde, HUANG Jianyong. Analysis and prediction of controlling effect of surface settlement on Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2 356 - 2 362.(in Chinese))
- [10] 梁正召, 杨天鸿, 唐春安, 等. 非均匀性岩石破坏过程的三维损伤软化模型与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1 447 - 1 452.(LIANG Zhengzhao, YANG Tianhong, TANG Chun'an, et al. Three-dimensional damage softening model for failure process of heterogeneous rocks and associated numerical simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1 447 - 1 452.(in Chinese))
- [11] 李连崇, 徐涛, 唐春安, 等. 单轴压缩下岩石蠕变失稳破坏过程数值模拟[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1 978 - 1 986.(LI Lianchong, XU Tao, TANG Chun'an, et al. Numerical simulation of creep induced progressive failure process of rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1 978 - 1 986. (in Chinese))
- [12] 王耀辉, 陈莉雯, 沈峰. 岩爆破坏过程能量释放的数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 790 - 794.(WANG Yaohui, CHEN Liwen, SHEN Feng. Numerical modeling of energy release in rockburst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 790 - 794.(in Chinese))
- [13] 苏汝民. 一种确定岩体强度的方法[J]. 勘察科学技术, 1986, (6): 1 - 5.(SU Rumin. A method for determining the strength of rock mass[J]. Investigation Science and Technology, 1986, (6): 1 - 5.(in Chinese))
- [14] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 60 - 62.(XIE Heping, CHEN Zhonghui. Rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2004: 60 - 62.(in Chinese))
- [15] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 平面应力条件下闭合断续节理岩体破坏机制及强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 635 - 640.(BAI Shiwei, REN Weizhong, FENG Dingxiang, et al. Failure mechanism and strength properties of rock mass containing close intermittent joints under plane stress condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 635 - 640.(in Chinese))