

基于数字图像的岩石非均匀性表征技术在流固耦合分析中的应用

朱万成¹, 康玉梅¹, 杨天鸿¹, 李占海¹, 刘继山²

(1. 东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110004; 2. 澳大利亚西澳大学油气工程系, 珀斯 6009, 澳大利亚)

摘要: 岩石的非均匀性对于其破裂及渗流过程具有显著的影响。本文提出了用数字图像处理技术表征岩石非均匀性的基本方法, 并通过把该技术实施到岩石破裂过程分析程序 RFPFA 中, 来模拟非均匀岩石在外载荷和渗流耦合作用下发生破裂的整个过程。结果表明, 基于数字图像的技术是表征岩石细观非均匀性的一种有效方法, 为研究非均匀性对于岩石破裂过程及渗流特性的影响提供了一个重要的手段。

关键词: 岩石; 非均匀性; 基于数字图像的技术; 数值模拟

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)12-2087-05

作者简介: 朱万成(1974-), 男, 新疆呼图壁县人, 博士, 教授, 主要从事岩石力学方面的教学和研究工作。

Application of digital image-based heterogeneity characterization in coupled hydromechanics of rock

ZHU Wan-cheng¹, KANG Yu-mei¹, YANG Tian-hong¹, LI Zhan-hai¹, LIU Ji-shan²

(1. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Oil and Gas Engineering, University of Western Australia, WA 6009, Australia)

Abstract: The heterogeneity has significant effect on the failure process and seepage characteristics of rock. A digital image-based (DIB) technique was proposed to characterize and quantify the heterogeneity of rock, and it was implemented into RFPFA (Rock failure process analysis) code in order to simulate the complete failure process of rock under both the external loading and fluid pressure. It was shown by numerical simulations that the DIB technique was effective in capturing the rock heterogeneity, and it paved a new way for quantifying the effect of local heterogeneity on macroscopic failure process and seepage characteristics.

Key words: rock; heterogeneity; digital image-based technique; numerical simulation

0 引言

岩体是由多种矿物晶粒、胶结物及孔隙缺陷等组成的混合物, 是自然界中经过亿万年的地质演变和地质构造运动所形成的最为复杂的固体材料之一。在外部载荷作用下岩石的非均匀性对其破坏行为产生显著影响。岩石中的流体渗流过程也明显地受控于岩石的非均匀性, 并与岩石的破裂过程密切相关。研究岩石的非均匀性及其对于岩石破裂过程以及流体渗流过程的影响具有重要的理论价值和工程意义。

为了在数值模拟中考虑岩石的非均匀性, 人们进行了许多的尝试。最为常见的做法是假定岩石中含有节理等构造, 在理论以及数值模型中针对节理和岩块建立各自的本构关系, 并基于此讨论节理裂隙的分布对整个岩石(或岩体)变形与破裂过程的影响。在数

值模拟中, 另一种较为普遍的做法是假定岩石为非均匀性材料, 通过在数值模型中引入材料参数的统计分布来反映岩石材料物理力学性质的非均匀性, 并基于此探讨非均匀性对于岩石破裂过程的影响。文献[1~3]都是通过如此方式考虑了岩石等脆性材料的非均匀性, 在探讨非均匀性对于破裂过程影响的同时, 也对破裂过程中表现出的一些基本特征(例如尺寸、围压、加载方式的影响等)进行了系统的研究。岩石破裂过程分析 RFPFA (Rock failure process analysis) 程序也是

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50504005); 国家自然科学基金资助项目(50490274); 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室开放基金资助项目(GZ2005-01)

收稿日期: 2005-10-13

通过引入材料参数的统计分布实现了岩石非均匀性的数值描述。在实际应用时,人们普遍的疑问就是如何建立实际岩石的非均匀结构与该数值模型中材料参数随机分布的定量关系。此外,对于含有典型内部结构的节理岩体而言,把其假定为具有随机统计分布的非均匀性会掩盖内部结构对于岩石变形破裂过程的真实作用。为了研究岩石内部细观结构对于宏观非均匀性的影响,在数值上对岩石的非均匀性结构进行更为有效的表征是十分必要的。

岩石中含有不同的矿物组成,这些矿物一般具有不同的颜色。用数码相机或显微镜获取岩石新鲜断面的二维数码照片,借助于数字图像处理技术就可以对这些矿物进行分辨。要了解岩石内部的矿物三维空间分布,X光CT透视技术是一个很好的途径,它可以探测出岩石内部的矿物构成及空隙率的空间分布。数字图像处理的技术已经被应用于区分岩石中的节理裂隙,文献[4~6]用数字图像处理技术表征了岩石中的矿物分布,在这个方面具有代表性。如果能够基于矿物学分析确定了矿物类型及其物理力学参数,就可以较好地实现岩石非均匀的定量化,这为探讨非均匀性对于岩石变形与破裂过程的影响提供了重要手段。本文用基于图像处理的技术进行岩石非均匀性的表征和定量化,并且把产生的数据直接导入到 RFPA 程序中,来研究非均匀性对于岩石破裂过程流固耦合规律的影响。

1 基于数字图像的非均匀表征技术

岩石表面的数字图像被用来进行非均匀性表征之前,首先要对其进行对比度提高和噪声去除,可以用专业的数字图像处理软件 Photoshop 等来完成。数字图像都是由像素(Pixel)组成的,对于黑白的灰度图像而言,图像文件为每个像素储存一个数字,该数字用于反映颜色的灰度的大小。对于24位真彩色(RGB)图像而言,在每个像素,有三个整数来代表红色R、绿色G和蓝色B的数值。因此,对于RGB图像而言,图像数据可以由三个离散的函数 $f_k(i,j)$ 来表达:

$$f_k(i,j)=\begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \cdots & f(1,M) \\ f(2,1) & f(2,2) & \cdots & f(2,M) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(N,1) & f(N,2) & \cdots & f(N,M) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, M 和 N 分别为水平和垂直方向像素的个数。对于RGB图, $k=1,2,3$ 。对于单色灰度图像 $k=1$ 。

在数字图像处理技术中,人们通常采用HSI颜色空间来表述数字图像,因为该图像空间有利于人肉眼的识别。HSI色彩空间中,颜色用色度(Hue)、饱和度(Saturation)和亮度(Intensity)来表示。其中 H

表示了肉眼看到的颜色, S 表示该颜色相对于白色的饱和度, I 表示亮度。HSI的颜色空间的数值可以从RGB的数据转换而来,表达式见文献[7]。其中 I 的数值是 R 、 G 和 B 的算术平均值。图1给出了一个岩石断面的数值图像及其 I 值的分布。对该图像而言, I 值较好地反映了岩石中的矿物分布,能够较好地反映岩石中明显的软弱面。

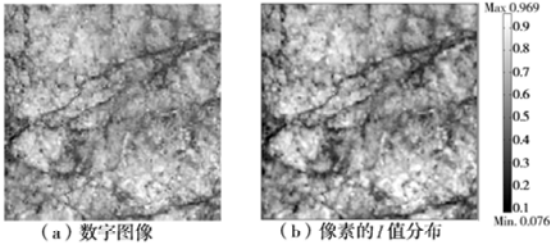


图1 岩石试样断面的数字图像及图像中像素的I值

Fig. 1 The digital image of cross section of the rock sample and its I values of pixels

理论上讲,必须借助于图像分析技术,对岩石中的矿物进行识别,并基于此来给出各矿物的弹性模量等参数。由于本文的工作主要在于介绍该技术,假定该岩石由5种矿物组成,见表1所列,并根据 I 值的不同阈值,来区分不同的矿物。这里假定颜色暗的矿物M1具有较低的弹性模量和强度、较高的渗透率。如果给各矿物赋予不同的弹性模量、强度和渗透率等参数,我们就可以在 I 值分布图的基础上得到弹性模量、强度和渗透率的分布图(见图2所示)。由该图可以看出矿物M1和M2具有较低的弹性模量和较高的渗透率,相当于试样中的软弱面。

表1 岩石中各矿物的弹性模量、单轴抗压强度和渗透率

Table 1 Young's modulus, strength and permeability of minerals in the rock

像素的I值	矿物	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/MPa	渗透率/ m^2
$0.0 \leq I < 0.2$	M1	8.0	20.0	1.0×10^{-14}
$0.2 \leq I < 0.4$	M2	30.0	100.0	1.0×10^{-15}
$0.4 \leq I \leq 0.6$	M3	80.0	150.0	1.0×10^{-16}
$0.6 \leq I \leq 0.8$	M4	70.0	250.0	1.0×10^{-16}
$0.8 \leq I \leq 1.0$	M5	90.0	150.0	1.0×10^{-16}

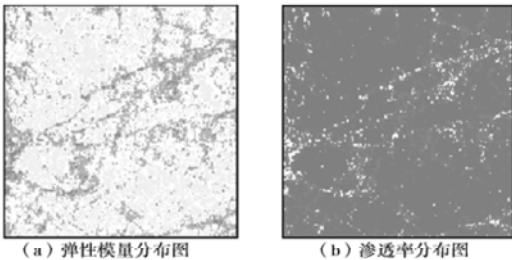


图2 弹性模量和渗透率的分布图

Fig. 2 Distribution of Young's modulus and permeability
把如上方式获得的岩石非均匀性数据直接导入到

RFPA 中, 可以进行岩石破裂过程过程及其应力 - 损伤 - 渗流耦合的数值模拟, 并探讨非均匀性对于该耦合过程的影响。

2 基本方程

RFPA 的流固耦合分析过程的控制方程包括流体的渗流方程、固体的变形与损伤方程、流体渗流和固体变形及损伤之间的耦合方程。

2.1 渗流方程

饱和流体在空隙介质中的渗流方程可以表达为

$$\nabla \cdot \left[\frac{k \rho_l g}{\mu_l} (\nabla p - \rho_l g \nabla z) \right] = 0, \quad (2)$$

式中, p 为流体压力, k 为渗透率, ρ_l 为流体密度, μ_l 为流体的动态粘度, g 为重力加速度。实验结果表明, 渗透率并不是一个常数, 而是应力以及损伤演化过程的一个函数, 在下面的耦合方程部分, 将给出此关系。

2.2 固体的平衡方程

固体变形的弹性力学平衡方程为

$$-\sigma_{ij,j} = F_i \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (3)$$

式中, σ_{ij} 为应力张量, F_i 为体积力。

本构方程的表达式为

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} - \alpha \delta_{ij} p \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (4)$$

式中, D_{ijkl} 为弹性张量, 对于各向同性弹性介质其值只与弹性模量和泊松比有关。本文中引入弹性损伤的本构关系来表达单元的破坏过程, 因此, 弹性模量的数值是随着应力或应变状态而不断演化。 α 为孔隙水压力系数。这里应变张量 $\varepsilon_{ij} = (U_{i,j} + U_{j,i})/2$, U_i 为固体的位移。

2.3 损伤和渗透率的演化方程

在 RFPA 中, 单元的变形与破坏过程满足一个弹性损伤力学的本构关系, 即弹性模量和损伤变量有如下关系:

$$E = (1 - \omega) E_0, \quad (5)$$

式中, ω 代表损伤变量, E_0 和 E 分别为单元的初始和损伤后的弹性模量。该损伤后的弹性模量被代入式 (4) 用于计算弹性张量。由于损伤变量的计算在许多文献^[8,9]中都已经给出, 这里不再叙述。

采用如下关系来反映渗透率与应力状态以及单元损伤之间的关系, 即

$$k = \xi \cdot k_0 \exp[-\beta(\sigma_{ii} - \alpha p)], \quad (6)$$

式中, k_0 为无应力条件下的渗透率, σ_{ii} 为平均应力, α 为孔隙水压力系数, β 为耦合系数, ξ 为渗透率突跳系数。当单元处于弹性阶段时, $\xi = 1$; 当单元应力或者应变状态达到最大拉应力准则或者 Mohr-Coulomb 准则时, 单元的弹性模量按式 (5) 进行损伤演化处理,

同时渗透率增加, $\xi > 1$ 。参数 ξ 可以由试验确定^[9]。

3 数值模型

为了研究非均匀的影响, 对图 1 试样施加两种不同的边界条件 (图 3)。

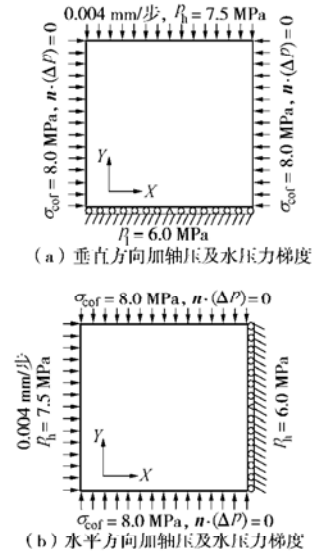


图 3 数值模拟的边界条件

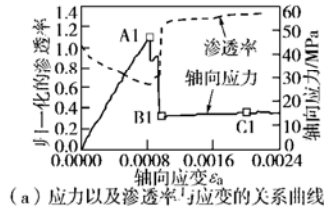
Fig. 3 The boundary conditions for the numerical simulations

图 3 (a) 为垂直方向施加轴压和水压力梯度, 而在水平方向施加侧压时的边界条件。加载位移量为 0.004 mm/步, 恒定的侧压力 $\sigma_{\text{cof}} = 8.0$ MPa。对于渗流过程, 只是在垂直方向施加压力梯度, 上边界高压 $p_h = 7.5$ MPa, 下边界的低压 $p_l = 6.0$ MPa; 另一个方向的两个边界都隔绝。类似地, 当水平方向施加位移控制的轴向载荷和水压力梯度时, 施加如图 3 (b) 所示的边界条件。数值模型中用到的其它参数包括: 孔隙水压力系数 $\alpha = 0.9$, 流体密度 $\rho_l = 1000$ kg/m³, 流体的动态粘度 $\mu_l = 0.001$ Pa·s, 耦合系数 $\beta = 0.01$, 渗透率突跳系数 $\xi = 500$ 。

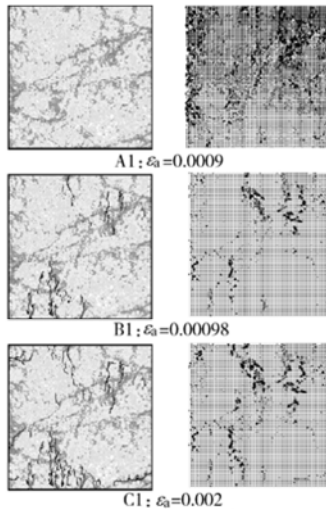
4 数值模拟结果及讨论

当对试样在施加如图 3 (a) 所示的边界条件时, 试样的应力、整体渗透率和应变的关系曲线见图 4 (a) 所示。为了便于比较, 渗透率的数值用零应力下的渗透率 5.4×10^{-15} m² 作了归一化。图 4 (b) 给出了试样破裂过程中的破裂模式和渗流速度矢量图。峰值前渗透率随着应力水平的提高而不断降低, 最小降低到零应力值的 62%, 试样的破坏点主要分布在软弱的矿物中, 待达到峰值强度 (51.9 MPa) 后, 在试样失稳破裂的同时其渗透率骤然增加。在峰值后阶段, 渗透率呈现出逐渐增加的趋势, 但是由于裂纹并没有纵向贯通整个试样, 故渗透率增加到初始值的 1.2 倍。由于

岩石中各矿物材料力学性质的不同, 试样中的应力的分布也会呈现出明显的非均匀性, 裂纹往往绕过强度高的矿物扩展, 所以裂纹样式出现断续、曲折的形态。该数值模拟结果和以往的一些实验结果^[8,10]在趋势上是完全一致的。



(a) 应力以及渗透率与应变的关系曲线



(b) 破裂模式和渗流速度矢量图

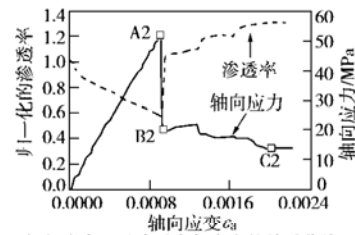
图 4 在垂直方向加轴向载荷时试样破裂过程及渗流特性

Fig. 4 Failure process and flow characteristics of rock sample under the axial loading and pressure gradient in vertical direction

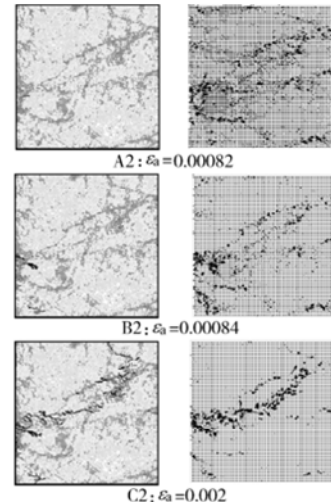
在水平方向施加轴向载荷以及水压力梯度时, 应力-应变曲线以及试样的破裂形态和渗透速度矢量图见图 5。渗透率的演化呈现出与垂直方向轴向加载时相同的趋势, 在峰值载荷前, 渗透率随着岩石的压缩逐渐降低, 在峰值应力时降低到初始零应力数值的 59%。伴随着峰值后岩石试样的失稳破裂, 渗透率增加。在该条件下, 由于试样中最终形成了近水平方向的贯通裂纹(图 5), 所以从渗流速度图上可看到明显的优势渗流通道, 最后渗透率增加到初始值的 1.3 倍。

在这里给出的两种受力条件下, 由于所受的围压比较小, 再加之水压力的作用, 试样中更容易萌生与轴向载荷方向平行的拉裂纹。对于垂直方向加轴压的情况, 由于高强度矿物的阻碍, 使得总体上处于垂直方向的裂纹并没有贯通整个试样的整个垂直方向, 故没有形成优势渗流通道。对于后者的边界条件, 试样中的弱面分布有利于使岩石在水平方向发生劈裂, 更趋向于生成明显的渗流通道, 故峰值后的渗透率增加

也相对比较显著。



(a) 应力以及渗透率与应变的关系曲线



(b) 破裂模式和渗流速度矢量图

图 5 在水平方向加轴向载荷时试样破裂过程及渗流特性

Fig. 5 Failure process and flow characteristics of rock sample

under the axial loading and pressure gradient in horizontal direction

总体上讲, 对于本文所研究的具有明显局部非均匀性的岩石而言, 岩石破裂过程以及渗流过程主要受控于材料参数的非均匀性。从数值模拟结果来看, 该岩石试样在水平和垂直方向强度和整体渗透率是不同的, 裂纹扩展路径以及渗流速度的变化也表现出很大的差异。

5 结论与讨论

本文用数字图像处理技术进行了岩石非均匀性的数值表征, 并实施到 RFPA 中, 进行非均匀岩石的变形与破裂过程的流固耦合分析, 得到如下结论:

(1) 基于数字图像处理的技术能够有效地捕捉岩石的局部非均匀性, 为研究非均匀性对于岩石破裂过程以及相关的渗流规律提供了一个有效的手段。本文的数值模拟表明, 基于数字图像处理技术并结合 RFPA, 可以较好地研究岩石的局部非均匀对于岩石宏观破裂过程的影响。

(2) 在流固耦合作用下, 数值模拟较好地再现了岩石试样的整体渗透率在峰值应力前降低、在失稳破

裂时骤然增加、以及峰值后随着岩石的软化而升高的趋势。在峰值应力前, 渗流主要集中在渗透率较高的矿物中, 而在峰值后岩石中新裂纹的萌生与扩展提供了更优先的渗流通道。

(3) 由于岩石的非均匀性, 在两个方向进行轴向加载和施加水压力梯度时, 试样的强度和总体渗透系数都是不同的, 因此试样在宏观上表现出明显的各向异性。

作为数字图像技术应用于岩石非均匀性描述的基础, 用矿物分析方法确定岩石中的矿物组成, 并给出各矿物的物理力学参数, 将是推动该技术在岩石力学中应用的研究重点。

参考文献:

- [1] BLAIR S C, COOK N G W. Analysis of compressive fracture in rock statistical techniques, Part I: A non-linear rule-based model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, **35**: 837 - 848.
- [2] TANG C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, **34**: 249 - 261.
- [3] VAN Mier J G M. Fracture processes of concrete: assessment of material parameters for fracture models [M]. Florida: CRC Press Inc, 1997: 23 - 50.
- [4] YUE Z Q, CHEN S, THAM L G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing [J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**: 375 - 397.
- [5] YUE Z Q, MORIN I. Digital image processing for aggregate orientation in asphalt concrete mixtures [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, **23**: 479 - 489.
- [6] CHEN S, YUE Z Q, THAM L G. Digital image-based numerical modelling method for prediction of inhomogeneous rock failure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**: 939 - 957.
- [7] GONZALEZ R C, WOODS R F. Digital image processing [M]. USA: Addison Wesley Reading MA, 1992.
- [8] TANG C A, THAM L G, LEE P K K, YANG T H, LI L C. Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, **39**: 477 - 489.
- [9] ZHU W C, TANG C A. Micromechanical model for simulating the fracture process of rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, **37** (1): 25 - 56.
- [10] HEILAND J. Laboratory testing of coupled hydro-mechanical processes during rock deformation [J]. Hydrogeology Journal, 2003, **11**: 122 - 141.

第一届中国水利水电岩土力学与工程学会讨论会会议纪要

2006 年 11 月 10~13 日, 第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会在昆明隆重召开, 来自全国勘测、设计、施工、科研单位和大专院校的 200 多位岩土力学和工程专家学者欢聚一堂, 共同就我国水利水电工程建设中出现的岩土力学和工程问题进行了广泛的学术交流。

本次会议由水利学会岩土力学专业委员会主办, 由云南省水利水电勘测设计研究院、南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、长江科学院和武汉大学共同承办, 昆明勘测设计研究院对本次讨论会给予大力支持。

会议由中国水利学会岩土力学专业委员会副主任兼秘书长、南京水利科学研究院岩土工程研究所蔡正银所长主持, 出席会议的嘉宾包括中国工程院郑颖人院士等专家领导, 中国水利学会赵洁群处长代表学会致贺信, 云南省水利厅杨荣新副厅长、中国水利学会岩土力学专业委员会郇能惠主任委员和 5 个承办单位的领导南京水利科学研究院陈生水副院长、云南省水利水电勘测设计研究院高嵩副院长、长江科学院程展林副总工、武汉大学周创兵副校长出席了会议并在开幕式上致辞。

会上郑颖人、郇能惠、周创兵、孔宪京、张宗亮、徐卫亚、程展林、蔡正银、陶忠平分别作了主题报告, 会议邀请新加坡国立大学李福豪和台湾中原大学张达德作了特邀报告, 数十位

岩土力学与工程工作者作了分报告。会议代表就岩体力学性质和本构关系、土的力学性质和本构关系、地质灾害和工程安全、渗流计算和渗流控制、土石坝工程、边坡工程、地下工程、地基处理工程、桩基和支护工程、土动力学、岩土工程监测和测试技术, 模型试验和数值计算等岩土力学与工程的专题和热点进行广泛的交流和讨论, 会议组织代表参观了云南省水利水电勘测设计研究院设计的已建成坝高 101.8 m 的柴石滩面板堆石坝工程。

经过论文评审委员会评审有 321 篇论文录用刊登在会议论文集, 经过岩土力学专业委员会和各刊物组织评审, 有 29 篇论文被《岩土工程学报》专刊录用, 有 189 篇论文被《岩土力学》增刊录用, 有 94 篇论文被《河海大学学报》增刊录用, 共计在期刊公开发表论文 312 篇, 创学会历史之最。这充分说明当前是我国岩土力学与工程工作者千载难逢的机遇, 坚持可持续发展, 建设创新型国家给我们提出了前所未有的要求。

会议期间召开了水利学会岩土力学专业委员会工作会议, 会议决定 2008 年在武汉召开第二届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会, 会议由武汉大学、南京水利科学研究院等承办。

(中国水利学会岩土力学专业委员会 供稿)