

关于“对‘大理岩孔道试样的强度及变形特性的试验研究’的讨论”的答复

REPLY TO “DISCUSSION ON ‘EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF HOLLOW CYLINDRICAL SPECIMENS OF MARBLES’ ”

尤明庆(YOU Mingqing), 苏承东(SU Chengdong), 缙 勇(GOU Yong)

(河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454010)

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454010, China)

中图分类号: TU 458.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2008)08-1725-03

1 引言

感谢杨圣奇博士对拙稿“大理岩孔道试样的强度及变形特性的试验研究”^[1](以下简称“原文”)和缙 勇等^[2]一文的仔细阅读, 并指出其中错误、欠妥或可能引起误解的地方。笔者认真学习讨论稿后, 又阅读相关论文, 核对原始试验数据, 对杨圣奇^[3](以下简称“讨论稿”)提出的问题逐条答复如下。错误、欠妥之处, 还请大家继续批评指正。

2 对讨论稿意见的答复

(1) 在原文投稿时, 笔者已经将缙 勇等^[2]的修改稿作为附件提交给编辑部, 说明了两者之间的关系。现在两文都可以从各种论文数据库获得, 感兴趣的读者可以进行比较, 做出判断; 因而笔者似乎没有必要在此说明两者的异同。毕竟一切发生的事情都已经成为历史。

原文称“试样产生屈服破坏之前内部承载均匀的单向压缩应力, 其单轴压缩的强度、杨氏模量与孔道没有明显关系。当然, 孔道在试样内部形成了自由面, 有助于局部破坏的产生, 因而峰值强度可能随孔道尺度增大而略有降低”; 基于试验结果(原文图 3 也就是讨论稿图 1), 原文又称“需要说明的是, 试样之间存在差异, 孔道试样增加了加工环节, 尤其是直径 $\phi 5$ mm 的内孔需要从试样两端钻进, 可能引起更大的差异, 因而试验结果的离散性不可避免; 而同一岩块加工的试样数量有限, 难以进行大量的重复试验。不过, 试样单轴压缩强度确实存在随孔道直径增大而降低的趋势”。这

只是说具有某种趋势, 并不是说具有某种规律; 原文也没有给出平均值进行连线, 这是笔者的谨慎之处。

岩石试样具有离散性, 试样数量越多, 强度的变动范围就可能增大, 当然并不是必定增大。这可以从讨论稿图 1 看出。就实际研究而言, 固然希望进行较多的重复试验, 但从同一岩块加工的试样毕竟有限, 而试验的项目又较多, 因而通常都是对单轴压缩进行较多的重复试验, 对试样的离散程度作一大致判断, 其他试验条件下的重复次数则较少, 乃至不作重复试验^[4]。这也是没有办法的事情。原文共得到中晶大理岩的试验数据 32 个, 对于直径 50 mm、长度 100 mm 的圆柱试样而言, 固然不多, 但似乎也不能算少了。

确实如讨论稿所说, “即使在围压作用下, 岩石试样之间也会有较大的离散性”。不过, 与单轴压缩相比, 围压下压缩时试样强度离散性相对较小, 如果某一数据与其他数据明显不能协调, 就需要分析引起差异的原因^[5-6]; 有时也会进行补充试验。讨论稿所说围压 5 MPa 下 2 个细晶大理岩试样, 强度较高者是 2006 年 7 月 21 日得到的; 因仍有试样, 在 2007 年 3 月 30 日又补充试验; 两者强度相差 3.6 MPa。讨论稿说两者强度差异高达 5 MPa, 误差达 39%, 似乎有些过大。笔者从原文图 8 多次判读的结果是 (3.6 ± 0.1) MPa。

(2) 原文图 3 即讨论稿图 1 所示试验数据, 离散性还是较小的; 只是纵坐标刻度为 60~66, 方显得差异较大。图示 12 个数据的相互关系是清楚的; 若需要具体数值, 从图上数字化的误差不会超过 ± 0.1 MPa, 似乎没有必要再用表格给出。这也是笔者作图时所追求的。

从应力状态来看, 单轴压缩时孔道试样的强度应该与孔道尺寸无关; 但孔道增加了自由面, 有助于局部破坏, 可能

收稿日期: 2008-06-11; 修回日期: 2008-07-17

作者简介: 尤明庆(1964-), 男, 博士, 1984年毕业于复旦大学数学系力学专业, 现任教授, 从事岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: youmq@hpu.edu.cn

使强度降低；而试样之间又存在离散性。图示数据就是这些因素的综合体现。因自身能力和试验条件所限，笔者承认不能给出这些因素的独立作用。

(3) 谢谢杨圣奇博士的指正。原文式(11)上方 2 行和下方 3 行中的 4 处“单轴压缩强度”应为“强度”，或“三轴压缩强度”。讨论稿所作其他说明和更正没有必要。

(4) 原文 2 425 页左栏第 2 行中“式(5)”应为“式(6)”。

(5) 原文式(15)右侧第 2 项分母中的 π 应予删除。

还需要更正的是，原文图 9(c)的纵坐标刻度应为 0, 30, 60, 90 和 120，即每格相差 30 而不是原文中的 40。

上述 4 处笔误，除第(4)条外，其余 3 处在原文初稿和修改稿上都是正确的，差错源于笔者阅读校样稿时的疏忽。笔者感谢讨论稿所提供的更正机会，并向读者致歉。

(6) 尤明庆发现缙 勇等^[2]中的平均模量不能满足其定义、试验机提供的应力不适用于孔道试样后，即与相关编辑部联系，重新提交修改稿。原文中平均模量是尤明庆计算的。由于平均模量的定义不够准确、具体，计算具有一定的人为性，因而原文和缙 勇等^[2]中部分试样的平均模量存在差异。除一个试样外，其余差异都小于 10%，且多数试样的数据大致相同。可参见图 1(原文图 12)和讨论稿图 2。

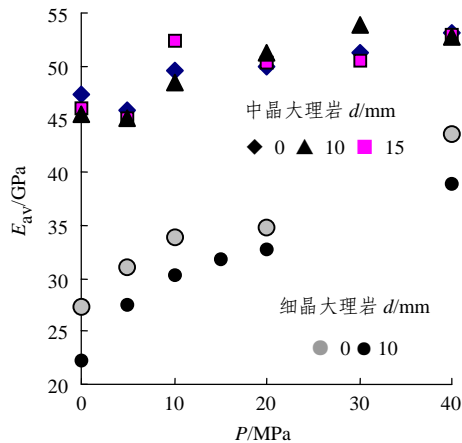


图 1 不同孔径大理岩试样平均模量与围压的关系^[1]
Fig.1 Relation between average moduli of specimens with various inner diameters and confining pressure^[1]

平均模量是应力 - 应变曲线峰值之前近似直线部分的斜率^[4]，即 Average Young's modulus, E_{av} , is determined from the average slopes of the more-or-less straight line portion of the axial stress-axial strain curve^[7]。与静态电阻应变仪间断读数或利用 X-Y 记录仪、光线示波器连续记录曲线不同，现在岩石力学试验机多利用计算机采样，为参数计算提供了便利。然而计算机也难以处理上述定义的平均模量。笔者使用的试验机所输出的平均模量，实际上是应力为强度 30%和 70% 两点间的割线模量，有时未必相当于“近似直线部分的斜率”。试验机伺服控制加载，应力 - 应变曲线可能存在波动，有时计算区间稍有变化，结果就会发生明显变化^[6-8]。

讨论稿称：“按理说，一个岩样对应着一条应力应变曲线，一条应力应变曲线峰前近似直线部分的斜率当然应该是

一个恒定值”。或许讨论者并没有实际确定过平均模量，不知道“近似直线部分”并非直线。笔者确定平均模量的方法是，在计算机显示器上绘出或者在 A4 纸上打印出应力 - 应变曲线的峰前部分，然后作出近似直线部分的拟合直线，计算其斜率。不过，确定拟合直线也颇不容易，有时斜率相差 10% 的两条直线都可以对应力 - 应变曲线有很好的拟合。

图 2 中曲线是原文图 9(c)曲线的近似直线部分，是由试验机操作系统直接给出的。对于外径为 D 、内径为 d 的孔道试样，具有围压自平衡系统的试验机，轴向油缸载荷所对应的轴向应力^[1]为 $\sigma_1 - \lambda P = \sigma_1 - PD^2 / (D^2 - d^2)$ ，而原文上试验曲线是利用 Excel 处理原始数据后绘出的，纵坐标是主应力差，以满足作图惯例。感兴趣的读者可以具体确定图 2 中的 3 条曲线平均模量，体验笔者所说的“颇不容易”。

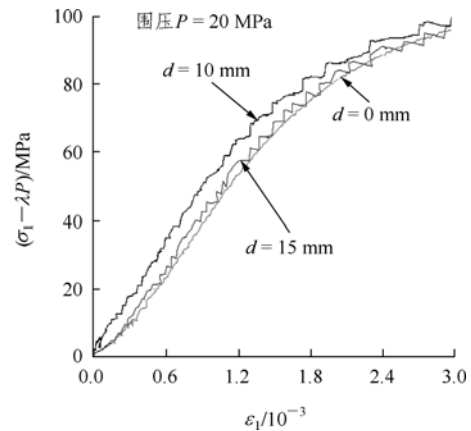


图 2 孔道大理岩试样轴向压缩应力 - 应变的局部曲线
Fig.2 More-or-less straight line portion of axial stress-axial strain curves of hollow specimens

由于平均模量的确定方法不够明确，尤明庆和苏承东^[9]建议对计算机连续采样记录的试验数据定义最大割线模量，即应力差为强度 50% 的所有割线模量的最大值。

讨论稿称：“此外，需要特别指出的是，缙 勇等^[2]给出的中晶大理岩试验结果并没有围压 30 MPa 时不同孔径岩样的数据，但原文却给出了围压 30 MPa 时不同孔径岩样的数据”，及“图 9 所示的不同孔径中晶大理岩试样三轴压缩主应力差 - 应变曲线中给出了围压 5, 10, 20 和 40 MPa，然而却不存在围压 30 MPa 时的试验曲线，让人更进一步怀疑围压 30 MPa 时的试验结果真实性”。

笔者对此略作解释。原文前言中已经说明，原文是在缙 勇等^[2]基础上完成的，增加了细晶大理岩的试验数据，中晶大理岩的数据也有所增加。笔者觉得这也是常有的事情。如 B. Haimson^[10]中 Westerly granite 试验结果比 B. Haimson 和 C. Chang^[11]中的略多，新增数据与原有数据似乎并不完全协调，但总不能就此指控 B. Haimson^[10]编造试验结果吧。

原文图 9 共有 4 个曲线图，正好半栏。似乎选择围压 5, 10, 20 和 40 MPa 的 4 组曲线比较合适，而围压 30 MPa 的曲线不是首选，现补充给出(见图 3)。图 3 中曲线也是由试验机操作系统直接给出的。又原文图 7(b)已给出一条围压

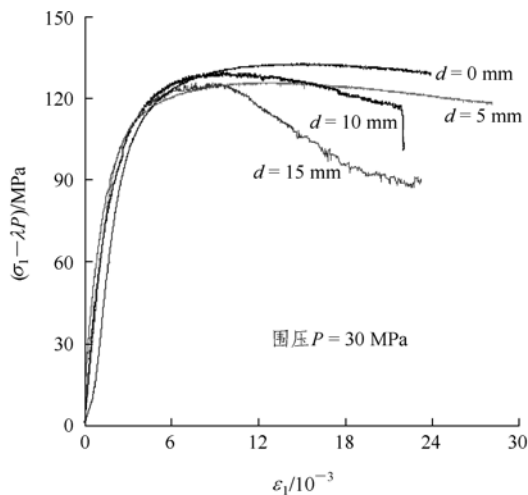


图 3 孔道大理岩试样的轴向压缩应力 - 应变曲线
Fig.3 Axial stress-axial strain curves of hollow specimens compressed under confining pressure of 30 MPa

30 MPa 的应力 - 应变曲线, 可能没有引起讨论者的注意。

拟定试验方案时通常都预留一定数量的备用试样, 以确保在试验条件设定等操作失误和停电等试验机故障的情况下, 仍能完成主要的试验目标; 并能在处理试验结果后进行补充试验, 解决可能产生的疑问。就此而言, 围压 30 MPa 的试验通常也并非首选, 多是在试样充分时补充所做。

(7) 讨论稿称: “原文所给出的围压 30 MPa 时中晶大理岩试验数据的真实性值得怀疑”, 进而详细分析, 说明原文中图 10, 11 给出的围压 30 MPa 时不同孔径岩样强度数据的不可信。笔者已在图 3 给出相关试验曲线, 并于 2008 年 6 月 11 日将 4 个原始数据文件发送到《岩石力学与工程学报》编辑部及部分编委, 以证明试验结果真实性。对该段内容笔者实在难以答复, 还请杨圣奇博士多多谅解。

(8) 岩样剪切滑移面上的正压力和剪切力, 由整体力平衡确定, 与内部孔道无关; 孔道使试样的承载面积减小, 引起围压对强度的贡献增加。原文已具体分析计算, 说明孔道直径对试样强度的影响随围压而变化, 并非单调关系。

3 结 论

原文是由第一作者执笔完成的, 另两位作者都对文稿分别进行了 3~4 次的修改; 第一作者在 2008 年 6 月 5 日收到讨论稿后, 拟出答复稿, 经与另两位作者多次讨论修改后, 于 6 月 11 日提交给编辑部。

因学术水平和工作环境所限, 笔者只能做些简单的室内试验工作。笔者已发表论文中的试验结果都是真实的, 但考虑欠周或者一时疏忽的情形时有发生; 对于他人的批评和提醒, 总是表示由衷的感激!

参考文献(References):

[1] 尤明庆, 苏承东, 缙 勇. 大理岩孔道试样的强度及变形特性的

试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2 420 - 2 429. (YOU Mingqing, SU Chengdong, GOU Yong. Experimental study on strength and deformation properties of hollow cylindrical specimens of marbles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2 420 - 2 429.(in Chinese))

[2] 缙 勇, 苏承东, 秦莞臻. 含孔道大理岩圆柱试样的尺寸效应[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 302 - 305.(GOU Yong, SU Chengdong, QIN Guanzhen. Size effect of hollowed marble cylinder specimen[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(3): 302 - 305.(in Chinese))

[3] 杨圣奇. 对“大理岩孔道试样的强度及变形特性的试验研究”的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1 722 - 1 724.(YANG Shengqi. Discussion on “Experimental study on strength and deformation properties of hollow cylindrical specimens of marbles” [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 722 - 1 724.(in Chinese))

[4] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264 - 2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL264 - 2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))

[5] 尤明庆, 华安增, 李玉寿. 缺陷岩样强度和变形特性的研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 97 - 101.(YOU Mingqing, HUA Anzeng, LI Yushou. Study on triaxial strength and deformation of flawed specimen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 97 - 101.(in Chinese))

[6] 尤明庆, 苏承东. 具有沉积弱面试样的剪切拉伸破坏及强度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 618 - 3 622.(YOU Mingqing, SU Chengdong. Discussion on strength and shear-tensile failure of rock specimens with sedimentary weaks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 618 - 3 622.(in Chinese)).

[7] FAIRHURST C E, HUDSON J A. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for the intact rock in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1999, 36(3): 279 - 289.

[8] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 14 - 16. (YOU Mingqing. Mechanical properties of rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 14 - 16.(in Chinese))

[9] 尤明庆, 苏承东. 岩石的非均质性与杨氏模量的确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 757 - 761.(YOU Mingqing, SU Chengdong. Heterogeneity of rock and the definition of Young's modulus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 757 - 761.(in Chinese))

[10] HAIMSON B. True triaxial stresses and the brittle fracture of rock[J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163(5/6): 1 101 - 1 130.

[11] HAIMSON B, CHANG C. A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of westerly granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(1/2): 285 - 296.