

# 板岩力学性质影响因素综述

郭彬彬<sup>1,2)</sup>, 王红才<sup>1,2)</sup>

1) 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京, 100081;

2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081)

## 1 引言

由于来自应用(如岩土工程和地震前兆的识别等)和基础研究(如认识地壳的构造运动)这两方面的推动<sup>[1]</sup>, 对岩石力学性质的研究获得了长足的发展, 岩石力学的试验水平也有了较大提高<sup>[2]</sup>。但关于变质岩的力学性质, 尤其是像板岩这种“软弱”浅变质岩的研究程度还是相对薄弱。板岩是由粘土质、粉砂质沉积岩或中酸性凝灰质岩石、沉凝灰岩等经区域低温动力变质作用形成的一种浅变质岩(绿片岩相, 没有明显的重结晶现象), 在我国有着广泛的分布, 是工程中常见的岩体结构形式, 对其力学性质的认识自然成为工程安全设计与施工所要解决的关键问题<sup>[3]</sup>。而在这一复杂介质中往往发育有板状劈理、微裂隙等缺陷, 使得其力学行为显得更为复杂<sup>[4]</sup>。

目前, 国内外对板岩力学特性的试验研究经历了以下两个阶段: 将板岩视为具有结构面的“软岩”, 通过简单的剪切试验、三轴压缩试验等来了解它的力学特性<sup>[5-9]</sup>(特别是强度特性); 结合更为先进的技术如 CT 扫描、X-射线衍射、扫描电镜、能谱分析、室内波速试验等来分析板岩力学性质各向异性的产生机理。对板岩本构模型、强度准则等理论方面的探讨也取得了不少成果<sup>[10-15]</sup>。而在总结板岩力学性质影响因素这一方面的工作还相对较少。本文在总结前人对板岩试验及理论研究成果的基础上, 系统介绍了板岩力学性质的影响因素。

## 2 板岩的力学特性

各向异性是岩体的一个重要性质, 随着岩体力学和本构理论的不断深入研究, 逐步被人们所认

识, 并一直是国内外研究领域的重点和热点之一<sup>[5]</sup>。板岩宏观上具有明显的结构面(板理)属于典型的各向异性岩石<sup>[16]</sup>, 所以对板岩的力学性质研究从一开始就针对这一标志性特征(结构面)展开<sup>[17]</sup>。国内不少学者在这方面进行了大量工作如周瑞光等人发现在板岩原位单轴蠕变实验中板岩的流动变形、破坏特性受结构面控制, 且在一种应力方向作用下, 其流动变形破坏表现出平行走向、反倾向、顺倾向方向的差异也主要是板岩内部结构面造成的<sup>[11]</sup>。冒海军和杨春和将 Jeager 等建立的单结构面理论与莫尔-库仑准则相结合并对比南水北调西线板岩单轴、三轴试验数据建立考虑层理面的单轴抗压强度  $\sigma_{mc}$  与结构面倾角  $\beta$  之间的关系, 指出当结构面倾角  $\beta=51^\circ$  左右时, 抗压强度取得最小值, 向两边对称增大; 当  $18.77^\circ \leq \beta \leq 82.34^\circ$  时, 板岩只能沿结构面破坏; 当  $\beta < 11.4^\circ$  或  $\beta > 82.34^\circ$  时, 板岩只会产生剪切破坏; 当  $11.4^\circ \leq \beta \leq 18.77^\circ$  时, 板岩会产生复合破坏<sup>[12]</sup>。刘运思等人通过不同层理角度影响下板岩的巴西圆盘劈裂试验(图 1)进行研究发现: 当  $\theta < 45^\circ$  时, 圆盘沿加载力之间纯拉伸破坏; 当  $45^\circ < \theta < 75^\circ$  时, 圆盘剪切拉伸破坏; 当  $\theta > 75^\circ$  时, 圆盘沿层面纯剪切破坏<sup>[10]</sup>。结构面对板岩力学性质的控制性影响已是不争的事实, 这种影响的作用过程主要是由矿物成分、内部结构、含水状况等引起的。

## 3 板岩力学性质影响因素

### 3.1 板岩成分与结构

板岩岩性致密、发育板状劈理, 显微镜下可见一些分布不均匀的石英、绢云母、长石等矿物颗粒, 但大部分为绿泥石和隐晶质的粘土矿物(伊利石等)。按照不同分类方法可分为多个亚类, 如根据

注: 本文为国土资源部公益性行业科研专项课题项目(200911015-06、201011070 和 201011071)和国土资源部深部探测技术与实验研究专项项目(Sinoprobe-07)资助。

收稿日期: 2013-03-13; 改回日期: 2013-03-31; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 郭彬彬, 男, 1989, 硕士, 主要从事岩体力学及岩石物性方面的研究, E-mail: guobinbinlq@163.com。

岩石中的成分可以分为碳质板岩、泥质板岩、钙质板岩、砂质板岩等；根据颜色分为黑色板岩、绿色板岩、紫色板岩、锈色板岩等。

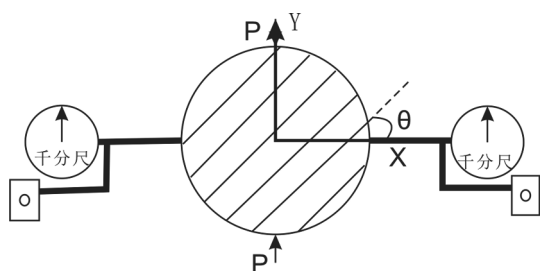


图1 巴西劈裂试验示意图( $\theta=0^\circ \sim 90^\circ$ ，据刘运思等)

尽管可以把板岩分为不同的亚类但是他们具有类似的成分和相同的结构，通常情况下板岩中绿泥石、伊利石、绢云母等矿物呈（次）棱角状，定向排列，与胶结物中的变质矿物和泥质紧密胶结，形成层理面。在垂直于层理切面的 SEM 图像中可见粘土矿物之间以及粘土和刚性颗粒之间存在层理近似平行的微裂隙，这就使得在层理面附近胶结相对松散，黏结力也比较低[18]，因此板理面成为木桶效应中的“短板”。

### 3.2 水的影响

岩石含水后破裂强度降低，这一结论无论是对单轴试验还是三轴试验均成立，而且不论加载速率快慢均成立<sup>[19,20]</sup>。目前，水对岩石力学性质的影响<sup>[21]</sup>，国内认识主要有以下几个方面：①物理方面，主要有孔隙压力作用和连接作用，连接作用即束缚在矿物表面的水分子通过其吸引力将矿物颗粒接近拉紧从而起到连接作用，但它远远小于矿物颗粒间的连接作用；②化学方面，主要有溶蚀及潜蚀作用；③物理化学结合方面，岩石遇水会产生双电层，就是从微观方面看双电层厚度变化会引起矿物颗粒附近的固定层和扩散层的厚度变化，则相邻矿物颗粒之间的粘聚力、摩擦力会变化，从而整体表现出岩石的强度变化。同时，国外对于岩石遇水软化作用及其机理的成果分析主要有<sup>[22]</sup>：①化学效应，岩石成分与水中成分发生水岩反应，这种理论需要很长的地质时期作保证；②Rhebinden 效应即水分子被吸附到岩石颗粒表面，使岩石的表面特性发生变化；③毛细管压力作用造成的岩石饱水软化作用。

板岩在泡水条件下力学性质<sup>[23]</sup>会发生大幅度的降低，尤其是对于含有粘土矿物特别是膨胀性矿物、易溶性矿物或有机质的板岩<sup>[24]</sup>。戴永浩等利用

CT 机及配套三轴试验加载设备对板岩试样进行分析得到岩石饱和度与损伤量之间的关系式<sup>[4]</sup>，

通过微观分析，水对板岩力学性质的影响主要表现在：一方面是矿物颗粒如绿泥石、伊利石等遇水膨胀，如伊利石与水反应过程为： $K_{0.9}Al_{2.9}Si_{3.1}O_{10}(OH)_2 + nH_2O \rightarrow K_{0.9}Al_{2.9}Si_{3.1}O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ ，使得矿物颗粒之间的毛细管力降低<sup>[25-29]</sup>，从而黏结力降低，宏观上则体现为板岩发生软化；另一方面是矿物颗粒表面产生的双电层厚度变化引起相邻矿物颗粒之间粘聚力、摩擦力的变化，从而整体表现为板岩的强度变化。

## 4 结论与讨论

综上所述，影响板岩力学性质的主要因素有矿物成分、内部结构以及饱水状态等，但这些因素对其产生影响的作用过程无一例外的表现在它们主要是通过改变板岩结构面（板理）性质使得板岩力学特性发生改变，即能够引起结构面性质变化的因素就会对板岩的力学性质产生影响。如水的作用（当然水对岩石力学性质的影响十分复杂，这里只是针对一方面而言），由于水主要是沿层理面附近的裂缝及孔隙进入岩石内部，因此在层理面附近矿物（绿泥石、伊利石等）优先体积膨胀，使原本黏结力就低的层理面变得更“松散”，从而改变了板岩的力学特性。在今后对板岩力学性质的研究中，还是要对哪些因素会改变结构面的性质、结构面对板岩力学性质的影响程度的定量表示等问题进行深入探讨。

### 参考文献 / References

- [1] 陈颢.1983.岩石力学性质研究近况.国际地震动态, 9:15~15.
- [2] 于德海, 彭建兵.2009.三轴压缩下水影响绿泥石片岩力学性质试验研究.岩石力学与工程报, 28(1):205~211.
- [3] 刘亚群, 李海波, 李俊如, 王学潮, 刘博, 谢冰.2009.基于 Hoek-Brown 准则的板岩强度特征研究.岩石力学与工程报, 28(2):3452~3457.
- [4] 戴永浩, 陈卫忠, 王者超, 朱维申, 蒲毅彬, 王雁然.2006.非饱和板岩裂隙扩展机制 CT 试验研究.岩石力学与工程报, 25(12):2537~2545.
- [5] 鄢定媛, 张学民, 李兵, 阳军生.2012.具有层理弱面砂质板岩力学特性的试验研究.桥隧工程, (2):174~176.
- [6] 李国权, 闫长斌, 齐菊梅, 秦建甫.2011.南水北调西线工程板岩强度的各向异性特征.工程地质学报, 19(6):917~921.
- [7] 曾泉.黔东南地区板岩的工程特性及其应用.1999.贵州地质,

- 4(16):351~353.
- [8] 肖尧, 付小敏.2011.碳质板岩力学性质研究.地质灾害与环境保护, 22(1):84~86.
- [9] 韦立德, 杨春和, 冒海军, 陈从新.2007.压剪应力条件下板岩细观力学本构模型.岩土力学, 28(06):25~31.
- [10] 刘运思, 傅鹤林, 饶军应, 董辉, 曹琦.2012.不同层理方位影响下板岩各向异性巴西圆盘劈裂试验研究.岩石力学与工程报, 31(4):785~791.
- [11] 周瑞光, 程彬放, 郭磊.1997.板岩流动变形破坏的各向异性.水文地质工程地质, 5:46~48.
- [12] 冒海军, 杨春和.2005.结构面对板岩力学特性影响研究.岩石力学与工程报, 24(20):3651~3656.
- [13] Tao G, King M S. 1990. Shear-wave velocity and Q anisotropy in rocks:a laboratory study. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 27(5):353~361.
- [14] Lerau J, Saint-Leu C, Sirieys P. 1981. Anisotropy of dilatancy of slates. Rock Mechanics, 13(3):185~196.(in French)
- [15] Vinagard H L, de Wal J A, Wellington S L. 1991. CT studies of brittle failure in Castlegate sandstone. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 28(5):441~448.
- [16] 王林, 龙岗文夫.2003.关于沉积软岩固有各向异性特性的研究.岩石力学与工程报, 22(6):894~898.
- [17] 冒海军, 杨春和, 刘江, 王学潮.2006.板岩蠕变特性试验研究与模拟分析.岩石力学与工程报, 25(6):1204~1209.
- [18] 邓继新, 史葛, 刘瑞, 俞军.2004.泥岩、页岩声速各向异性及其影响因素分析.地球物理学报, 47(5):862~868.
- [19] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 刘祚秋, 尚伟, 詹胜.2005.饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用.岩石力学与工程报, 24(1):33~38.
- [20] 耿乃光.1988.水对岩石力学性质影响的实验研究.国际地震动态, 4:7~10.
- [21] 鄢文清.1991.裂隙对岩石力学性质影响的研究.水电站设计, 7(3):28~35.
- [22] 徐礼华, 刘素梅, 李彦强.2008.丹江口水库区岩石软化性能试验研究.岩土力学, 5:1430~1434.
- [23] 苏承东, 吴秋红.2011.含天然贯通弱面石灰岩试样的力学性质研究.岩石力学与工程报, 30(增 2): 3944~3951.
- [24] 杨灿宇.2011.板岩水理特性试验研究.企业技术开发, 30(10):126~127.
- [25] 冒海军, 杨春和, 黄小兰, 王学潮.2006.不同含水条件下板岩力学实验研究与理论分析.岩土力学, 27(9):1637~1642.
- [26] 周辉, 杨鑫, 胡其志, 程昌炳.2011.绿泥石片岩遇水软化的强度试验及机理研究.土工基础, 25(1):45~48.
- [27] 贺智慧.2012.影响岩石力学性质和岩石变形的.山西焦煤科技, 7:53~56.
- [28] 刘向君, 申剑昆, 梁利喜.2011.孔隙压力变化对岩石强度特性的影响.岩石力学与工程报, 30(s2):3457~3463.
- [29] 杨春和, 冒海军, 王学潮, 李晓红, 陈剑文.2006.板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究.岩土力学, 27(12):2090~2098.