

高孔隙水压力对岩石蠕变特性的影响

余成学, 崔旋

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 设计 3 种加载方式, 其中一种施加高孔隙水压力, 分别进行分级加载蠕变试验, 用于研究分析高孔隙水压对岩石蠕变特性的影响。首先, 利用大理石加工的标准圆柱试件, 按 3 种加载方式分别进行蠕变试验, 得到轴向、横向的蠕变变形过程曲线, 以及岩石破坏时的破坏形态; 然后, 对 3 种加载方式下的岩石轴向应变、横向应变、剪应变、体积应变以及破坏形态等进行比较分析; 最后, 在比较分析的基础上, 总结高孔隙水压力对于岩石蠕变及破坏的影响。研究表明: 孔隙水压力作用明显, 但不是完全作用, 即孔隙水压力作用系数接近于 1; 在高孔隙水压力作用下, 岩石的强度大大降低, 承载时间大大缩短, 破坏时的应变也降低; 虽然 3 种加载情况都是以剪切破坏为主, 但在有高孔隙水压力作用下, 岩石的破坏更具有突发性; 可能不存在一个统一的等效应变阈值, 使在不同的加载情况下, 应变超过该阈值后即产生加速蠕变破坏; 在加速破坏前, 除瞬时加载产生的体积应变外, 在蠕变过程中, 岩石体积应变几乎不变。该成果对于进一步研究考虑孔隙水压力影响的非线性蠕变模型具有指导意义, 也可对高孔隙水压力作用下的岩石结构工程处理措施提供指导。

关键词: 岩石力学; 孔隙水压力; 蠕变特性; 试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)08 - 1603 - 07

INFLUENCE OF HIGH PORE WATER PRESSURE ON CREEP PROPERTIES OF ROCK

SHE Chengxue, CUI Xuan

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Three types of loading modes are designed in which a high pore water pressure is applied; and creep tests are performed respectively to study the influence of pore water pressure on creep properties of rock. Firstly, with the normal marble samples, the triaxial tests in the three loading modes are performed to get the axial and lateral creep deformation curves as well as the failure patterns of the rock samples. Then the analyses and comparisons of the test results of axial, lateral, shear and volumetric strains as well as failure patterns are performed. Finally, based on the analysis and comparisons, the influence of high pore water pressure on the creep and failure of rock is analyzed. The research shows that the effects of the pore water pressure on creep of rock are obvious with the influential coefficient of pore water pressure less than 1, but approaching to 1. Under the action of high pore water pressure, the strength, strain and the time of creep to failure are lessened greatly. Though the samples are all in shearing failure, the failure under high pore water pressure is more sudden. There might be no definite equivalent strain under which the tertiary stage of creeps under different loading conditions begin to occur. And the pore water pressure has no effect on the volumetric strain before failure occurs. The results can be applied to guide the establishment of the nonlinear creep constitutive model of rock under high pore water pressure. And it

收稿日期: 2010 - 03 - 17; **修回日期:** 2010 - 04 - 25

基金项目: 国家自然科学基金委员会、雅砻江水电开发联合研究基金项目(50639100)

作者简介: 余成学(1964 -), 男, 博士, 1986年毕业于武汉水利电力学院施工专业, 现任教授, 主要从事水工结构工程方面的教学与研究工作。E-mail: cxshe@126.com

is also useful for guiding the design and construction of rock structures under high pore water pressure.

Key words: rock mechanics; pore water pressure; creep properties; test

1 引言

在水利水电工程中,经常遇到高外水压力作用下的隧洞长期变形与稳定问题,如锦屏二级引水隧洞中遇到高外水压力作用^[1~3]。为此,杜小凯等^[4~8]利用数值方法或物理模型试验方法,研究了高外水压力耦合作用下的围岩稳定问题;朱珍德等^[9]探讨了高围压高水压对大理岩变形、强度、脆-塑转化特性及破坏断裂损伤劣化的影响;陈秀铜和李璐^[10]对高水压下岩石的卸荷力学性质进行了试验研究;S. Y. Xie 等^[11~13]就饱和情况下孔隙水压力的模拟进行了探讨。饱和情况下岩石蠕变试验研究成果^[14~16]表明,饱和情况下水对岩石的蠕变特性具有很大的影响。然而,迄今为止,对于高水压条件下岩石蠕变特性的研究成果还非常少。通过试验研究高孔隙水压力作用对于岩石的蠕变特性影响,将有助于了解在蠕变过程中,高孔隙水压力的作用规律以及高孔隙水压对于岩石蠕变特性、长期稳定的影响,为深入研究高孔隙水压作用下的岩石蠕变破坏模型奠定基础,也可对高孔隙水压力作用下的岩石结构工程处理措施提供指导。

2 试验设计及试验过程

2.1 试验设计

为了研究高孔隙水压力作用对于岩石蠕变特性的影响,采用室内三轴压缩蠕变试验方法进行试验研究。以大理岩作试件(见图1),直径50 mm,高径比为2:1,其中由试验测得大理岩单轴抗压强度约97 MPa。试验设备采用法国进口的三轴室(见图2)。该设备可以同时施加围压、轴压和两端施加水压力。若在试件两端施加的水压力不同,则可用于模拟渗流作用;若在试件两端施加相同的水压力,则可用于模拟孔隙水压力作用。具体设计下列3种加载方式:

(1) 试件两端不施加水压力,围压2 MPa,分级加轴向偏压,蠕变至破坏,相应的试件称为1#试件。

(2) 试件两端施加水压力9 MPa,围压11 MPa,



图1 大理岩标准试件

Fig.1 Standard test samples of marble



图2 三轴试验设备

Fig.2 Triaxial cell test device

分级加轴向偏压,蠕变至破坏,相应的试件称为2#试件。

(3) 试件两端不施加水压力,围压11 MPa,分级加轴向偏压,蠕变至破坏,相应的试件称为3#试件。

上述3种加载方式中,2#试件是实际受孔隙水压力作用的情况,在1#和2#试件的加载方式中,试件不受孔隙水压力作用,是2种参考加载方式,目的是为了用于比较说明岩石中孔隙水压力作用对于岩石蠕变特性的影响。

假如2#试件试验结果与1#试件试验结果一致,则借鉴土力学中的有效应力理论,有效应力=总应力-孔隙水压力,2#试件的有效应力为围压2 MPa,轴向有效偏压为总偏压减去孔隙水压力,即2#试件的有效应力将等同于1#试件所施加的应力作用,说明在高孔隙水压力作用下,岩石的蠕变主要受有效应力所控制,孔隙水压力对岩石蠕变的影响很小;而假如两者差异较大,说明在蠕变过程中,孔隙水

压力对岩石蠕变过程具有影响。

假如 2[#]试件试验结果与 3[#]试件试验结果很相近, 说明在蠕变过程中, 2[#]试件内部几乎不受孔隙水压力作用, 此时 2[#]试件所受的总应力与 3[#]试件所受的总应力一样, 也即岩石的蠕变由总应力所控制; 而假如两者差异很大, 说明 2[#]试件中孔隙水压力发挥作用, 孔隙水压力对岩石蠕变有影响。

由上述分析可知, 上述 3 种加载设计, 将承受孔隙水压力作用的岩石蠕变试验与 2 种极端参考情况进行比较, 将可以从定性的角度判断孔隙水压力作用对于岩石蠕变特性的影响。

2.2 试验过程

针对前面设计的 3 种加载方式进行蠕变试验。

在试验前, 大理岩试样在水中浸泡了 6 个月, 使其达到完全充分饱和, 然后再进行试验。试验过程具体说明如下:

(1) 首先将长期浸泡、完全饱和的大理岩试件套上橡胶管后, 放置于三轴室圆形底板, 对中安装好, 并安装好位移传感器等量测设施(见图 3)。



图 3 安装在三轴室中的试件

Fig.3 Rock sample in the triaxial cell

(2) 利用液压装置抬升图 3 中圆形底板, 将试件封闭在三轴室容器中。待所有准备工作就绪后, 向三轴室容器中充油施加围压, 围压大小由前面设计的试验方案确定。

(3) 然后, 施加孔隙水压力。对于 2[#]试件, 施加孔隙水压力至设计值; 而对于 1[#], 3[#]试件, 尽管加载方案中不施加孔隙水压力作用, 但仍然在橡胶管中充水至微量的孔隙水压力, 以便在试验过程中, 使橡胶管中始终充满水, 岩石则完全浸泡在水中, 处于饱和状态, 从而防止在长时间试验过程中, 由于岩石干燥, 使饱和度变化而影响试验结果的可比性。在围压及孔隙水压力施加以后, 保持其压力值

不变。

(4) 在围压、孔隙水压力施加 24 h 后, 分级施加轴向偏压进行蠕变试验。每级偏压加载量不一定相同, 一般情况下, 第一、二两级偏压增量较大, 随后加载的每级偏压增量较小。为方便比较分析, 在轴向偏压力加载过程中, 尽量使 3 种加载方案中每级轴向偏压力加载量、加载延续时间分别对应相等。按设计的分级加载增量和延续时间进行蠕变试验, 直至岩石试件破坏, 由设备自动记录加载过程以及试件轴向、横向蠕变变形过程。

3 岩石蠕变变形及破坏分析

3.1 岩石轴向蠕变过程曲线分析

按照前面设计的加载方式, 分别进行分级加载蠕变试验。不同加载条件下的轴向应变试验结果见图 4, 其中每一分级偏压加载量也在图中表示。

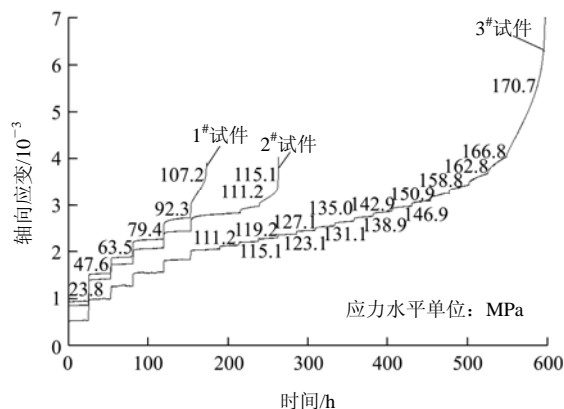


图 4 不同加载条件下的轴向应变试验结果

Fig.4 Axial creep strains under different loading conditions

从图 4 中可以看出:

(1) 从破坏时间来看, 对于前述 1[#]试件, 即较低围压、无孔隙水压力作用情况下的蠕变试验, 总的蠕变持续时间最短; 而 3[#]试件, 即模拟较高围压、无孔隙水压力作用情况的蠕变试验, 总的蠕变持续时间最长; 2[#]试件的蠕变总持续时间则介于两者之间, 但更靠近 1[#]试件试验结果。

(2) 从最终破坏时的轴向偏应力来看, 1[#]试件破坏时的偏应力最小; 2[#]试件破坏时的偏应力略大于 1[#]试件; 3[#]试件最终破坏时所承担的偏应力远大于其他两种加载方式。由于前面几级加载等级与持续时间是完全一样的, 因此, 最终的破坏偏应力与破坏时间代表了各试件之间的差异。所以, 试验结

果表明了 1#试件承担的偏应力最小，3#试件最大，而 2#试件则介于其中。

(3) 从破坏时的蠕变曲线变化情况来看，1#试件在施加 107.2 MPa 的偏压力时，岩石经历一段时间的蠕变后，突然加速破坏；2#试件在施加 107.2 MPa 的偏压力后，又增加了 2 级偏压，在偏压为 115.1 MPa 后，没有多久即突然破坏；3#试件与前面 2 种试件情况差异很大，在施加了 107.2 MPa 的偏压力后，又不断增加偏压荷载至 170.7 MPa 的情况下，经历一段时间的蠕变后，快速破坏，但突然性似减弱了。从最终破坏时的变形情况来看，三者并不相同，3#试件破坏时的轴向应变远大于 1#，2#两种试件，而 1#与 2#试件破坏时的轴向应变比较接近。

3.2 岩石横向蠕变变形分析

横向应变与时间关系曲线如图 5 所示，图中横向应变以向外侧膨胀定义为正值。由图 5 可见，与轴向蠕变应变相比，低应力水平时横向应变不是很明显，变形随时间的变化过程线几乎呈水平状；但在接近破坏时，横向变形急剧增大，即使是 3#试件，在受到较高围压限制的情况下，在破坏时，横向变形也一样急剧增大。

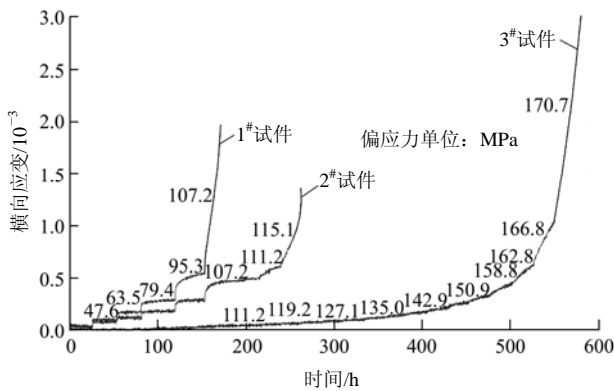


图 5 横向应变与时间关系曲线
Fig.5 Lateral strain-time relation curves

从图 5 可以看出，孔隙水压力对于试件横向变形的影响规律与轴向变形大致相同。2#试件与 1#，3#试件存在很大差异，一方面说明了在含有高孔隙水压力作用情况下，孔隙水压力对岩石的蠕变有影响；另一方面也说明了在含有高孔隙水压力作用情况下，岩石的蠕变不是由总应力控制的。另外，需要指出的是，三者加速破坏时，横向蠕变应变并不一致。

3.3 岩石剪切蠕变变形分析

假定岩样为各向同性体，根据 Mohr 应力圆，

则最大剪应力和最大剪应变分别为

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \tag{1}$$

$$\gamma_{\max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \tag{2}$$

根据前面的轴向应变与横向应变试验结果，得到剪应变与时间关系曲线(见图 6)。

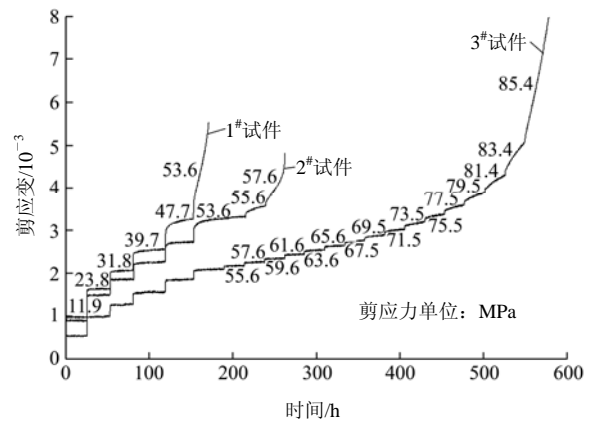


图 6 剪应变与时间关系曲线
Fig.6 Shear strain-time relation curves

图 6 中剪应变随时间的变化规律与轴向变形变化规律大致相同，同样说明了在含有高孔隙水压力情况下，岩石试件的剪切蠕变受孔隙水压力影响，但不受总应力控制。

3.4 岩石体积蠕变变形分析

根据体积应变与轴向与横向应变的关系，可以得到体积应变与时间的关系曲线(见图 7)。

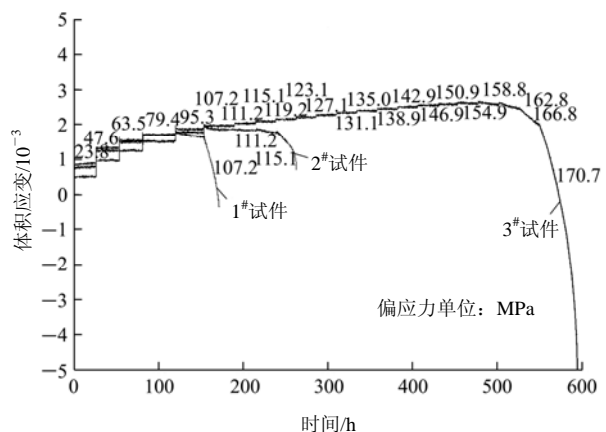


图 7 体积应变与时间关系曲线
Fig.7 Volumetric strain-time relation curves

从图 7 可以看出，在较低偏应力情况下，不论何种加载情况，瞬时加载使体积瞬时压缩。而在瞬时变形完成后，体积变形曲线基本与水平轴平行，

不再增加, 表示此时体积蠕变增量几乎为 0。对于 1[#], 2[#]试件, 最后 2 级偏应力增量施加后, 发生非线性的体积膨胀, 开始产生扩容。对于 3[#]试件, 则在倒数第 3 级加载时体积开始膨胀。所有加载方式, 均在接近破坏时岩石体积急剧膨胀。

在蠕变过程中, 在产生明显体积扩容前, 岩石内部的微裂隙发展不明显, 所以岩石在宏观上无明显扩容效应, 蠕变产生的体积应变几乎为 0; 而在接近破坏时, 岩石内部微裂隙张开、扩展及贯通, 使岩石内部孔隙率大大增加, 表现出扩容现象。

从图 7 还可以看到, 对于 3 种不同的加载方式, 1[#], 2[#]试件两者在体积发生明显增加时的体积应变比较接近, 而与 3[#]试件差异很大。

3.5 试件的蠕变破坏方式

对于上述 3 种加载方式, 其最后的破坏情况见图 8。



(a) 1[#]试件



(b) 2[#]试件



(c) 3[#]试件

图 8 大理岩试件破坏情况

Fig.8 Failure situations of test samples

从图 8 可以看到: 1[#]试件大理岩破坏剧烈, 产生较大的错动位移, 岩石比较破碎, 部分呈粉末状。试件两端近似锥状, 外表面亦有较多纵向裂纹, 因此, 岩石以剪切破坏方式为主, 也含有拉裂破坏现象。2[#]试件破裂面为斜向剪切破裂面, 基本无纵向裂纹, 呈现出脆性剪切破坏现象。对于 3[#]试件, 图中标示了可见裂纹的分布状况, 可以看出, 试件表面出现贯穿性的斜向剪切裂纹和局部纵向张裂纹; 由于围压的作用, 在破坏后, 试件仍然黏结在一起, 没有散开, 仍然有一定的残余强度。

从上述破坏情况可以看到, 3 种加载方式均以剪切破坏为主要破坏方式。1[#]试件围压较低, 岩石破坏方式脆性明显; 2[#]试件由于受孔隙水压力作用, 有效围压降低, 岩石破坏方式脆性也很明显; 3[#]试件由于受到高围压作用, 试件破坏脆性减弱, 有向延性方向发展的趋势。

4 孔隙水压力对岩石蠕变的作用效应分析

根据上述针对大理岩的试验结果及分析, 可以进一步讨论孔隙水压力作用对于岩石蠕变特性的影响:

(1) 蠕变过程中的孔隙水压力作用规律

2[#]试件受孔隙水压力作用, 其试验结果与 1[#]试件的试验结果差异比较明显, 说明 2[#]试件在蠕变过程中, 其中的孔隙水压力作用与土力学理论中孔隙水压力作用规律不完全一样, 即岩石中的有效应力 $\sigma' = \sigma - \beta P_w$ (β 为孔隙水压力作用系数, P_w 为孔隙水压力)。由于 2[#]试件最终破坏时的轴向偏应力较高, 总的破坏时间较长, 可以说明 β 值应小于 1。但两者差别又不是很大, 说明即使是低渗透性的大理岩, 在蠕变过程中, 孔隙水压力作用也是非常明显的, β 参数值很接近于 1。

从机制上来分析, 2[#]和 1[#]试件试验结果存在差异, 说明了在高孔隙水压力作用下, 在岩石蠕变破坏过程中, 当岩石内部局部区域开裂后, 孔隙水不是瞬时进入裂隙, 而是有一个时间过程, 也就使得在某一个瞬时时刻, 局部区域孔隙水压力不是全部发挥作用, 在宏观上表现出 β 值小于 1; 但是由于岩石蠕变过程是一个较为缓慢的过程, 其破裂不是瞬时完成, 而是有一个时间过程, 孔隙水压力作用效应与岩石蠕变破裂时间有关, 而且破裂过程持续

时间越长,与孔隙水侵入时间相差越小,孔隙水发挥就越充分,在宏观上表现出 β 值越接近于1。

(2) 孔隙水压力对岩石蠕变特性影响

由前面试验结果可以看到,3[#]试件破坏时的偏应力大于2[#]试件破坏时的偏应力,破坏时的时间远长于2[#]试件破坏时的时间,以及2[#]试件破坏时的偏应力大于1[#]试件破坏时的偏应力,破坏时的时间长于1[#]试件破坏时的时间,说明了在岩石内部孔隙水压力作用越完全,岩石的强度降低越多,蠕变至破坏的延续时间缩短越多。

从最终破坏时的应变值情况来看,在3种加载方式情况下,岩石试件的轴向应变、横向应变、剪应变以及体积应变都各不相同,在高围压且没有孔隙水压力作用下,其破坏时的应变大于有孔隙水压力作用情况,说明围压的作用可以增加岩石的延性;反过来,孔隙水压力降低了岩石的围压,减少了岩石破坏时的应变,增加了岩石的脆性。

从破坏方式来看,三者都以剪切破坏为主要破坏方式,也即在总体来说,孔隙水压力作用并没有改变岩石的破坏方式。但图8显示,孔隙水压力对岩石的破坏程度具有很大影响。孔隙水压力使岩石的破坏脆性增加,破坏更具有突然性。

(3) 工程上如何合理处理孔隙水压力

在计算分析中,如果将岩石近似按完全作用情况考虑,即取 $\beta=1$,则高估了岩石中孔隙水压力的作用,而低估了岩石的强度及蠕变破坏延续时间,因此在工程上是偏于安全的。考虑到1[#]与2[#]试件试验结果很相近,为方便简化计算分析,这样近似处理也是合理的。

锦屏二级引水隧洞工程完成以后,隧洞围岩将长期受高孔隙水压力作用。根据上述研究的结果,高孔隙水压力对于围岩的长期稳定是非常不利的。如果在隧洞周围灌注水泥浆,降低洞壁附近围岩的渗透性,而且使衬砌具有更高的透水性,则可以大大降低洞壁附近围岩中的孔隙水压力,这已经为大家所熟知。显然从长期稳定角度来看,这样处理,可以提高洞壁围岩强度,延长围岩蠕变破坏时间,这对隧洞围岩长期稳定而言是非常有利的。

5 结 论

通过设计3种加载方式,以反映高孔隙水压力作用下,孔隙水压力对于岩石蠕变特性的影响,就

本试验结果而言,得到如下结论:

(1) 由于蠕变作用过程不是瞬时作用过程,因此,即使是低渗透性的大理岩,其孔隙水压力作用明显;孔隙水压力不是完全作用,但接近完全作用,即孔隙水压力作用系数接近于1。在高孔隙水压力作用下,由于孔隙水压抵消了部分围压,使岩石的强度大大降低,承载时间大大缩短,破坏时的应变降低。从破坏情况来看,孔隙水压力作用并不改变岩石的破坏方式,但在孔隙水压力作用下,岩石的破坏脆性增加,破坏更具有突然性。

(2) 在3种加载情况下,考虑到岩石在加速破坏时,各类应变各不相同,由此推测,在岩石蠕变破坏过程中,可能不存在一个统一的应变阈值或等效应变阈值,使得在不同的加载情况下,超过该阈值后岩石即产生加速蠕变破坏。当然,这一推测只就本试验范围而言作出的,是否具有普遍性,还有待于结合其他类岩石作进一步试验研究后,才能最后确定。

(3) 在3种加载情况下,在加速破坏前,除了瞬时加载产生的体积应变外,在蠕变过程中,由蠕变产生的体积应变几乎不变,只在接近破坏时,岩石中的裂隙急剧扩展,岩石体积应变急剧增加。

(4) 本文从定性方面说明了岩石孔隙水压力作用系数 β 的取值情况,但还不能定量得出其具体取值,其值还有待于设计新的试验方法进行测定。

参考文献(References):

- [1] 张春生. 雅鲁江锦屏二级水电站引水隧洞关键技术问题研究[J]. 中国勘察设计, 2007, (8): 41 - 44.(ZHANG Chunsheng. Key technical research problems of hydraulic tunnel of the Jinping II hydropower station on Yalongjiang River[J]. China Investigation and Design, 2007, (8): 41 - 44.(in Chinese))
- [2] 任旭华, 王美芹, 王树洪, 等. 锦屏二级水电站深埋隧洞外水压力研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, (3): 85 - 88.(REN Xuhua, WANG Meiqin, WANG Shuhong, et al. Study of the external water pressure of deep-lying tunnel in Jinping II hydropower station[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, (3): 85 - 88.(in Chinese))
- [3] 苏国韶, 燕柳斌, 李海. 高地应力与强渗透水压下软弱围岩支护[J]. 广西大学学报, 2009, 34(5): 613 - 618.(SU Guoshao, YAN Liubin, LI Hai, et al. Support for weak surrounding rock under high

- geostress and high seepage pressure condition[J]. Journal of Guangxi University, 2009, 34(5): 613 - 618.(in Chinese))
- [4] 杜小凯, 任青文, 夏 宁. 高压引水隧洞若干问题的研究现状和存在的问题[J]. 水力发电, 2007, 32(6): 65 - 68.(DU Xiaokai, REN Qingwen, XIA Ning. Status quo of the study on the several problems of high pressure diversion tunnel and its existing problems[J]. Water Power, 2007, 32(6): 65 - 68.(in Chinese))
- [5] 陈卫忠, 伍国军, 戴永浩, 等. 锦屏二级水电站深埋引水隧洞稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1 184 - 1 190.(CHEN Weizhong, WU Guojun, DAI Yonghao, et al. Stability analysis of diversion tunnel for Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1 184 - 1 190.(in Chinese))
- [6] 陈国庆, 冯夏庭, 周 辉, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞长期稳定性数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增 1): 1 184 - 1 190.(CHEN Guoqing, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Numerical analysis of the long-term stability of the seepage tunnel in Jinping II hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Supp.1): 1 184 - 1 190. (in Chinese))
- [7] 吴世勇, 任旭华, 陈祥荣, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞围岩稳定分析及支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3 777 - 3 782.(WU Shiyong, REN Xuhua, CHEN Xiangrong, et al. Stability analysis and supporting design of supporting rocks of diversion tunnel for Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3 777 - 3 782.(in Chinese))
- [8] 王克忠, 李仲奎. 深埋长大引水隧洞三维物理模型渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 725 - 731.(WANG Kezhong, LI Zhongkui. Study of 3D physical modest test of seepage of deep-buried long and large diversion tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 725 - 731.(in Chinese))
- [9] 朱珍德, 张 勇, 徐卫亚, 等. 高围压高压条件下大理岩断口微观机制分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 44 - 51.(ZHU Zhende, ZHANG Yong, XU Weiya, et al. Experimental studies and microcosmic mechanics analysis of marble rupture under high confining pressure and high hydraulic pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 44 - 51. (in Chinese))
- [10] 陈秀铜, 李 璐. 高围压、高水压条件下岩石卸荷力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(Supp.1): 2 694 - 2 699. (CHEN Xiutong, LI Lu. Experimental study of unloading mechanical properties of rock under high confining pressure and high water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2 694 - 2 699.(in Chinese))
- [11] XIE S Y, SHAO J F. Elastoplastic deformation of a porous rock and water interaction[J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22(12): 2 195 - 2 225.
- [12] JIA Y, BIAN H B, DUVEAU G, et al. Hydro-mechanical modelling of shaft excavation in Meuse/Haute-Marne laboratory[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008, 33(Supp.): 422 - 435.
- [13] YARIV H, VLADIMIR L, AMOTZ A. Rock dilation, nonlinear deformation, and pore pressure change under shear[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 237(3 - 4): 577 - 589.
- [14] 朱合华, 叶 斌. 饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1 791 - 1 796.(ZHU Hehua, YE Bin. Experimental study of mechanical properties of rock creep in saturation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1 791 - 1 796.(in Chinese))
- [15] 杨圣奇, 徐卫亚, 谢守益, 等. 饱和状态下硬岩三轴流变变形与破裂机制研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 962 - 969.(YANG Shengqi, XU Weiya, XIE Shouyi, et al. Studies of triaxial rheological deformation and failure mechanism of hard rock in saturated state[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 962 - 969.(in Chinese))
- [16] 李 钊, 朱维申, 白世伟, 等. 风干与饱水状态下花岗岩单轴流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 673 - 1 677.(LI You, ZHU Weishen, BAI Shiwei, et al. Uniaxial experimental study of rheological properties of granite in air-dried and saturated states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 673 - 1 677.(in Chinese))