

围压和地下水对软岩残余强度及峰后体积变化影响的试验研究

郭富利¹, 张顶立¹, 苏洁¹, 牛晓凯²

(北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044; 2. 北京市市政工程研究院, 北京 100037)

摘要: 就宜万铁路堡镇隧道高地应力大变形段中所揭示的黑色炭质页岩设计不同饱水时间下的三轴试验方案, 进行三轴力学性质测试, 获得围压和饱水时间对软岩残余强度和峰后体积变化的影响规律, 探讨二者对软岩残余强度和体积变化的作用机制及特点, 对隧道二次衬砌作用时机进行分析。

关键词: 岩石力学; 峰后力学性质; 峰后体积变化; 饱水软岩; 力学性质软化; 三轴试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 2644 - 07

EXPERIMENTAL STUDY OF INFLUENCES OF CONFINING PRESSURES AND GROUND WATER ON RESIDUAL STRENGTH AND POST-PEAK VOLUMETRIC CHANGE OF SOFT ROCK

GUO Fuli¹, ZHANG Dingli¹, SU Jie¹, NIU Xiaokai²

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Education Ministry, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing 100037, China)

Abstract: The post-peak mechanical behaviors of black macker widely distributed in Baozhen tunnel are discussed by a series of triaxial compressive tests under different saturated times, and research on changing laws of rock residual strengths and post-peak volumetric strain under different confining pressures and saturated times is carried out. In addition, the mechanism and features of confining pressure, saturation time acting on remnant strength are researched. Finally, the timing of carrying out secondary lining is analyzed.

Key words: rock mechanics; post-peak mechanical properties; post-peak volumetric change; saturated soft rocks; softening of mechanical properties; triaxial compression test

1 引言

在实际岩体工程中, 尤其隧道工程, 围岩通常遭受地下水的作用。国内外许多隧道都发生过涌水现象, 如法国仙尼斯峰隧道、日本青函隧道、前苏

联北穆隧道、我国大瑶山隧道和军都山隧道等。我国有近 1/3 的铁路隧道发生漏水, 如成昆铁路的 415 座隧道中, 在施工期间有 93.5% 的隧道发生不同程度的涌水或突水灾害, 其中涌水量超过 10 000 m³/d 的有 8 座, 而严重涌水的有 13 座。

从 20 世纪 70 年代开始, 人们开始认识到岩石

收稿日期: 2008 - 06 - 20; **修回日期:** 2008 - 09 - 22

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”资助项目(2006AA11Z119)

作者简介: 郭富利(1976 -), 男, 2003 年毕业于太原理工大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学试验方面的研究工作。E-mail: guofuli1@sina.com

峰后力学性质的重要性并开展一些研究工作^[1~13], 但迄今为止, 就水对岩石残余强度和峰后体积变化影响规律的试验研究非常少。

对于软岩隧道, 围岩体实际上是处于应力峰后状态条件下的, 因此, 研究水和围压对岩石残余强度和峰后体积变化的影响规律, 对有地下水存在的软岩隧道工程的设计与施工有着非常重要的意义。鉴于此, 本文以宜万铁路堡镇隧道高地应力大变形段的炭质页岩为研究对象, 结合围岩赋存条件, 利用常规三轴压缩试验研究不同围压和饱水状态下软岩残余强度和峰后体积变化的变化规律, 为堡镇隧道高地应力大变形段的设计、施工和安全运营等提供理论依据。

2 工程概况

堡镇隧道位于贺家坪—榔坪, 采用左、右两单线方案, 全长 11.5 km。左线 DK72+834~DK79+887 段及右线 YDK72+248~YDK79+995 段埋深较大, 局部地段达到 630 m; 左线穿越志留系碎屑岩 10.263 km, 其中 O₂₊₃ 泥灰岩、页岩段长 1.3 km, 其按照国际岩石力学学会定义的软岩概念来看, 基本可定为软岩。围岩级别划分情况如下: III 级 4 818 m, 占整个隧道长度的 41.67%; IV 级 6 589 m, 占整个隧道长度的 56.98%; V 级 156 m, 占整个隧道长度的 1.35%。根据测试及分析隧道洞身最大水平主应力为 16 MPa, 隧道横截面内的最大初始应力 σ_{\max} 约为 14.75 MPa。对应岩体(炭质页岩、砂质页岩和灰岩), 其单轴抗压强度(R_c)为 3.9~9.1 MPa, $R_c/\sigma_{\max} = 0.26\sim 0.60 < 4.00$, 根据《工程岩体分级标准》(GB50218-94), 该区属极高应力区, 隧道极可能产生大的位移和变形。

堡镇隧道是宜万铁路建设的控制性工程之一, 地质条件之复杂实属罕见, 工程特点可以概括为: 深埋、偏压、富水、高地应力, 软岩、顺层、山高谷深、地质复杂、施工风险多、科技含量大及建设标准高。

3 软岩饱水的力学试验设计

在高地应力软岩隧道工程中, 岩石一般处于三向应力状态并经常承受地下水的作用。隧道开挖

前, 岩体处于三向应力平衡状态, 所有节理裂隙、含一定厚度断层泥的大小断层以及接触破碎带紧密闭合, 导水性较弱。隧道开挖导致原岩应力重新分布, 切向应力增加, 即出现应力集中, 隧道周边到一定深度范围的围岩在切向应力(等价于岩石试件的轴向应力)的作用下发生破坏, 径向应力(等于支护阻力)等价于岩石试件所受的围压。因此, 利用 XTR01-01 型微机控制电液伺服岩石三轴试验仪(如图 1 所示)进行岩石试件的三轴压缩试验, 试验设计流程如图 2 所示, 采用不同围压和不同饱水状态下炭质页岩的三轴试验方法。



图 1 XTR01-01 型微机控制电液伺服岩石三轴试验仪
Fig.1 Microcomputer electro-hydraulic servo-controlled triaxial test machine XTR01-01

试验岩样取自大变形段广泛分布的炭质页岩, 岩体中裂隙发育, 失水易干裂, 浸水易软化, 岩体强度低, 胶结程度差, 易风化, 地下水较发育。炭质页岩容重为 27.19 kN/m³, 含水率 2%~4%。试验岩样尺寸: $\phi 50.00 \text{ mm} \times 100.00 \text{ mm}$, 制样过程造成的岩样尺寸误差为 $\pm 0.4 \text{ mm}$ 。

4 软岩饱水三轴试验结果及其分析

4.1 软岩峰后残余强度变化规律

首先, 将所采集的岩样进行分类、选样并用油性彩笔标号, 按照图 2 所示的设计流程, 将所采集的岩样分别在天然状态(0 d)、饱水 14, 30, 60 和 90 d 时, 开展软岩的力学性质试验, 试验(包括单轴和三轴试验)采用轴向位移控制, 轴向应变率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。对于三轴压缩试验采用先加围压至预定

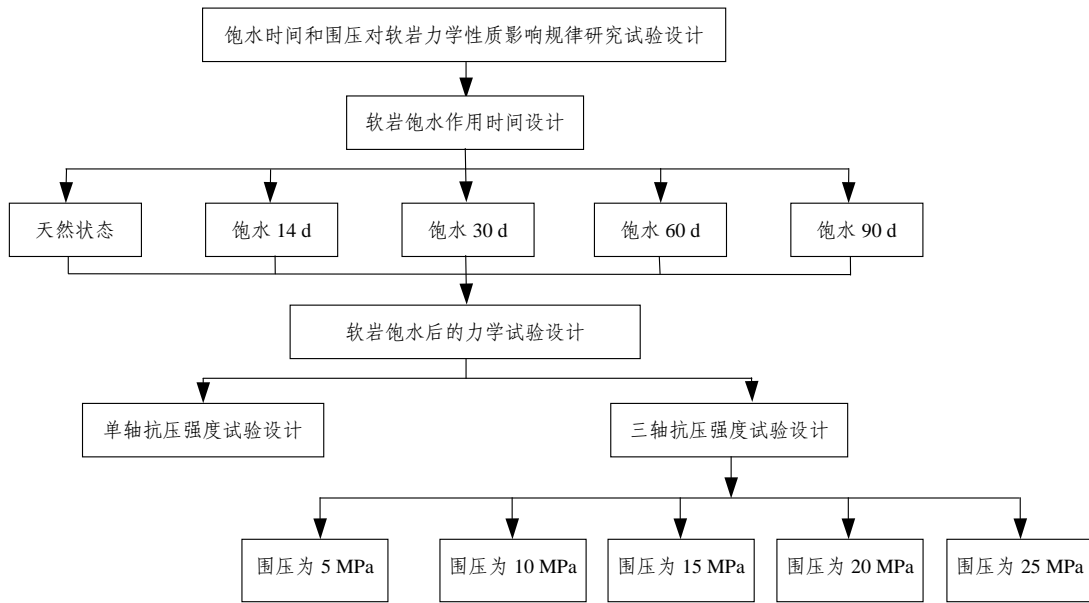


图2 试验设计流程图

Fig.2 Flowchart of experimental design

值，然后加轴向力直至试样破坏^[14]。最后，根据计算机自动采集的数据进行统计和拟合，分析岩石峰值后残余强度的变化规律。

对于岩石的强度特征，很多学者已进行了多方面的研究，但对峰值后岩石强度的基本特性研究较少。对于深部巷道围岩支护来讲，岩石峰值后强度特性又显得尤为重要^[15]。因此，重点分析岩石在不同围压和饱水状态下的残余强度变化特征。

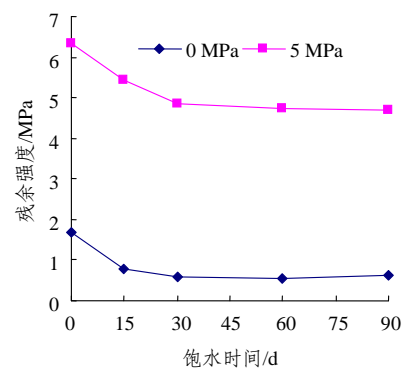
4.1.1 饱水时间对残余强度的影响规律及作用机制

图3给出了不同围压条件下的饱水时间与软岩残余强度的关系曲线。由图中可知：

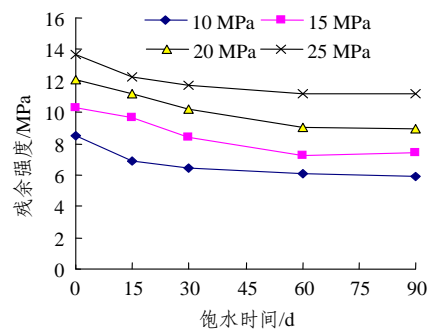
(1) 在低围压(0~5 MPa)条件下，在饱水时间为30 d内，水对岩样的残余强度软化严重；当饱水时间为30 d以后，岩样的残余强度基本不再变化，可以将饱水30 d时的残余强度作为低围压条件下的长期残余强度。

(2) 在高围压(10~25 MPa)条件下，在饱水时间为60 d内，岩样的残余强度随饱水时间而降低，当饱水时间为60 d以后，岩样的残余强度基本不再变化，将饱水60 d时的残余强度作为高围压条件下的长期残余强度。

(3) 从不同围压条件下残余强度与饱水时间的关系曲线来看，在低围压条件下(0~5 MPa)，其试验曲线近似于指数函数变化，在30 d的饱水时间之内时，其残余强度有较大降低，表明在低围压下残余强度表现出对饱水时间具有较强的敏感性；在高



(a) 低围压(0~5 MPa)



(b) 高围压(10~25 MPa)

图3 不同围压条件下饱水时间与软岩残余强度关系曲线
Fig.3 Relationship curves between saturated times and soft rock remnant strengths under different confining pressures

围压条件下(10~25 MPa)，其试验曲线近似于线形函数变化，在90 d的饱水时间之内时，其残余强度变化幅度较小，表明在高围压下残余强度对饱水时

间不敏感。

(4) 水对岩石试件峰后残余强度软化作用的机制包括以下几个方面:

① 水分子进入粒间间隙而削弱了粒间连结, 软化了岩石峰后的力学性质。

② 水是一种良好的溶剂, 可以溶解许多岩石试件中的矿物成分, 对岩石试件也起了软化作用。

③ 水沿着孔隙、裂隙等结构面渗透到岩体中的过程中发生了一系列的物理和化学作用, 从而使岩体发生物理或化学方面的变化, 如体积增大、容重增加, 有些含亲水性高的矿物浸水后其颗粒之间水膜增厚而引起岩石的膨胀。由于膨胀作用, 使得岩体内部产生应力不均匀或部分胶结物被溶解, 从而导致岩石颗粒分散, 即崩解, 因此造成峰后残余强度相对降低。

4.1.2 围压对残余强度的影响规律

图 4 给出了不同饱水状态下, 围压与软岩残余强度的关系曲线。从图中可以看出, 围压对不同饱水状态岩石试件的影响规律基本相同。当围压为 0~5 MPa 时, 岩石试件的残余强度增幅最大, 表现出对围压具有较强的敏感性; 围压大于 5 MPa 时, 岩石试件的残余强度和围压基本呈线性变化, 残余强度增幅变缓, 对围压的敏感性减弱。

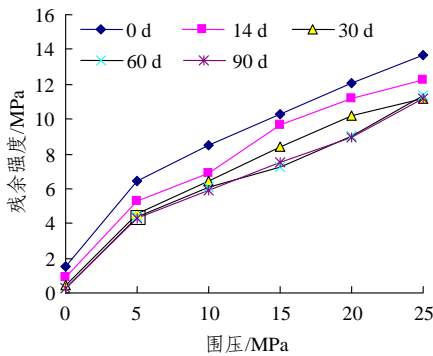


图 4 围压与软岩残余强度关系曲线

Fig.4 Relationship curves between confining pressures and remnant strengths under different saturated times

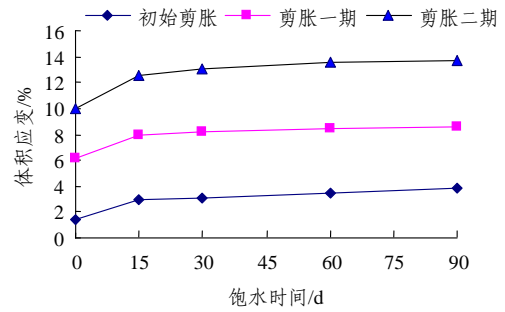
4.2 软岩峰后体积变化规律

体积膨胀是岩石峰后的变形特性, 与围岩的稳定性和支护理论有着密切关系。巷道支护的作用是限制围岩松动圈形成过程中碎胀力所造成的有害变形。根据岩石峰后变形特点可知: 支护与围岩间的相互作用是接触应力, 因此, 围岩稳定的关键是控制围岩变形。普遍认为岩石体积膨胀(体积应变为正)

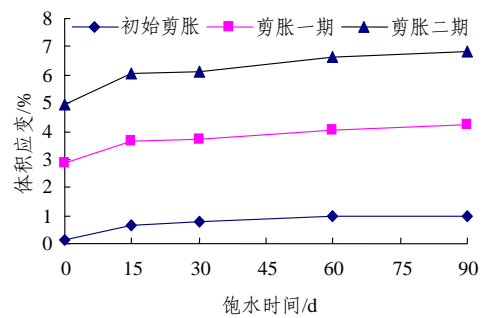
是从应力达到峰值强度开始的, 因此, 将峰后岩石体积膨胀分为“初始膨胀”(应力峰值对应的体积应变)、“膨胀一期”(软化段)和“膨胀二期”(残余变形段)3 个阶段。

4.2.1 饱水状态对软岩体积应变的影响规律

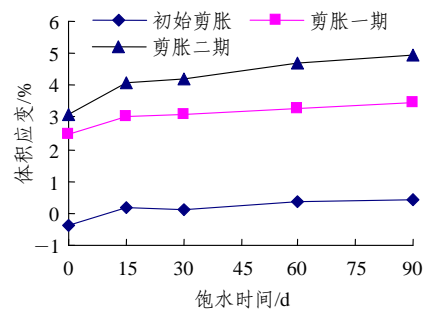
通过试验结果分析, 得出软岩饱水时间与体积应变关系如图 5 所示。



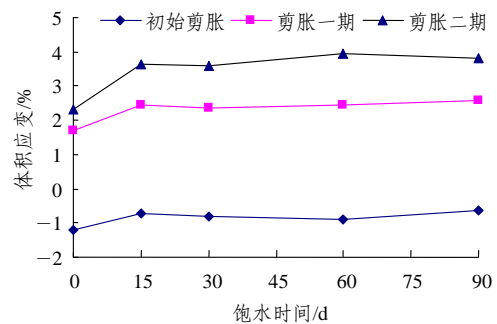
(a) $\sigma_3 = 0$ MPa



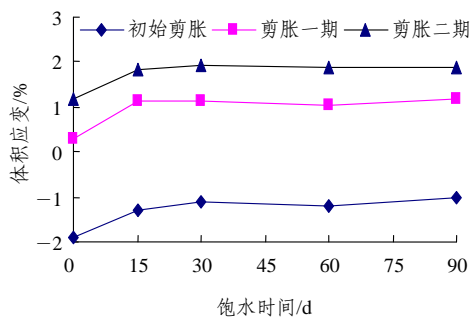
(b) $\sigma_3 = 5$ MPa



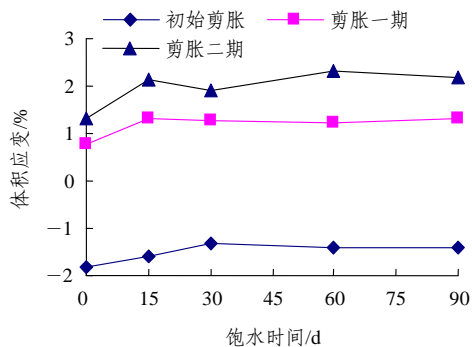
(c) $\sigma_3 = 10$ MPa



(d) $\sigma_3 = 15$ MPa



(e) $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$



(f) $\sigma_3 = 25 \text{ MPa}$

图5 饱水时间与体积应变关系曲线

Fig.5 Relationship curves between saturated times and volumetric strains under different confining pressures

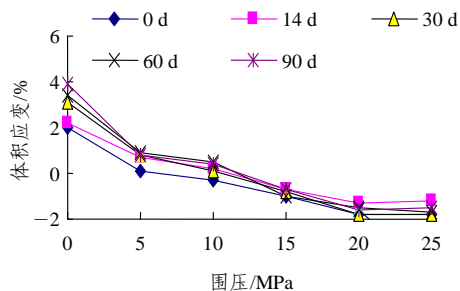
从图中可以发现:

(1) 峰值时初始膨胀体积应变、峰值后岩石“膨胀一期”末尾段(膨胀二期初始段)和“膨胀二期”末尾段体积应变随饱水时间而增大的变化趋势基本相同, 饱水初期(14 d)对岩石试件体积应变有显著的影响, 而饱水时间再延长时, 体积应变变化幅度较小。因此, 可以认为水对岩石体积应变的影响主要集中在最初的 14 d 内。

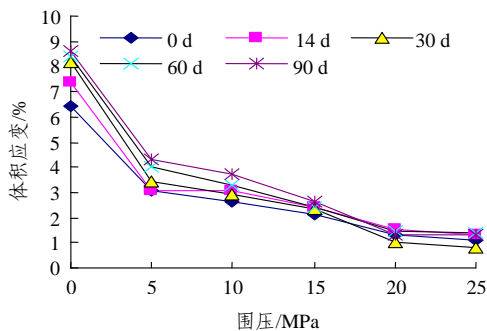
(2) 在低围压条件下(0~5 MPa), “初始膨胀”体积应变为正值, 表明当岩石达到峰值应力时, 岩石试件开始发生体积膨胀。当围压为 10 MPa 时, 除天然状态下岩石试件的“初始膨胀”体积应变是负值外, 其他饱水状态的岩石试件的“初始膨胀”体积应变基本为 0, 当围压大于 10 MPa 时, 岩石试件的“初始膨胀”的体积应变小于 0, 可以认为 10 MPa 是软岩达到峰值强度时体积由膨胀到压缩的转折点。

4.2.2 围压对软岩体积应变的影响规律

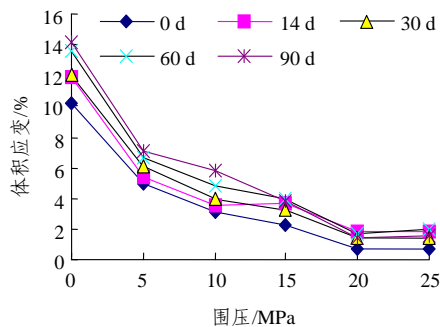
分析试验结果可以得出软岩围压与体积应变关系如图 6 所示。



(a) 初始膨胀



(b) 膨胀一期



(c) 膨胀二期

图6 围压与体积应变关系曲线

Fig.6 Relationship curves between confining pressures and volumetric strains under different saturated times

从图中可以发现: 围压对岩石试件峰值或峰后不同阶段体积应变的影响作用总体上可分为 3 个阶段:

(1) 剧烈影响阶段

在低围压条件下(0~5 MPa), 不同阶段的体积应变随围压的增大而明显下降, 表现出对围压具有很强的敏感性。在该阶段, “初始膨胀”对应的体积应变基本都大于 0, 表明低围压条件下, 岩石达到峰值强度时体积开始膨胀。

(2) 平缓阶段

当围压在 5~20 MPa 范围时, 体积应变随围压的增大而下降的幅度减缓, 对围压的敏感性减弱,

体积应变随围压增加基本呈线性变化。在该阶段, 岩石试件达到峰值强度时体积既有膨胀, 也有压缩, 但当围压大于 10 MPa 后, 峰值点对应的体积应变处于压缩状态, 这与通常认为的岩石达到峰值强度时体积开始膨胀相矛盾, 表明围压在控制岩石峰后体积变化方面具有决定性作用。

(3) 稳定阶段

当围压大于 20 MPa 以后, 体积应变处于稳定阶段。在该阶段, 体积应变不再随围压的增大而降低, 且基本保持稳定, 可以认为围压等于 20 MPa 时岩石的体积应变不再随围压的增大而变化。

5 二次衬砌施作时机分析

在初期支护作用后, 初支开始发挥作用承担围岩荷载, 围岩和初支并没有达到稳定状态。在二次衬砌施作完成后, 围岩 - 初支 - 二衬(二次衬砌)的变形协调, 二衬承担通过初支传递过来的围岩荷载, 二衬所受荷载与二衬施作时机和初支、二衬的相对刚度等因素有关, 此时初支和二衬又作为一个新的体系共同承担围岩荷载。

堡镇隧道施工中围岩和初期支护变形破坏反映出来的问题, 不等满足现行《铁路隧道设计规范》规定二次支护施作条件就已经发生塌方。因此, 鉴于初期支护和二衬之间存在一定量的“自然间隙”, 二衬施作时机明确为某一时刻在实践中不可行, 将“膨胀一期”末尾阶段和“膨胀二期”开始阶段作为二衬的施作时机, 可以经济合理的支护型式使支护阻力有效控制破裂岩体产生的有害变形。

图 7 为堡镇隧道典型围岩位移 - 时间曲线与二

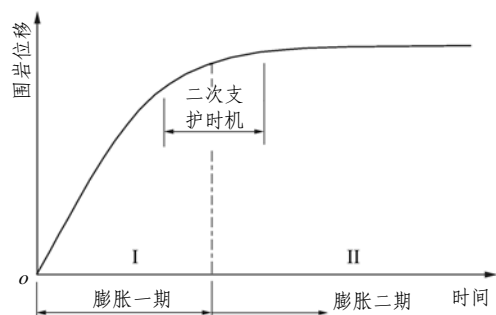


图 7 典型围岩位移 - 时间曲线与二衬施作时机关系

Fig.7 Relationship between typical displacement-time curve and second liner

衬施作时机关系图, 围岩变形显示出极强的时效特征, 可以分为 2 个变形阶段, I 为急剧变形阶段, II 为稳定变形阶段。由于围岩初次量测时机的滞后性, 围岩变形是从“膨胀一期”开始算起, 对应图 7 中的 I(急剧变形阶段), 对于堡镇隧道高地应力炭质页岩段, 急剧变形阶段持续时间 30 d 以上, 稳定变形阶段对应“膨胀二期”, 围岩变形速率明显下降。将峰后非连续体变形控制在“膨胀二期”的初始阶段, 能以相对较低的支护阻力有效控制过高的破裂膨胀变形发生。

根据对堡镇隧道高地应力大变形段围岩变形量测资料的统计分析, 急剧变形阶段(I)围岩变形量占总变形量的 70% 以上。因此, 在二次支护的实践中, 可以通过围岩变形量来确定二次支护的施作时机。

6 结论与建议

(1) 堡镇隧道分布的软岩多处于高地应力环境, 地下水发育, 长期饱水对其力学性质具有较强的软化作用。试验结论较好地反映了软岩的残余强度和体积变化特征, 从而为该地区的工程实践提供了较好的参考。

(2) 低围压(0~5 MPa)条件下, 饱水时间 30 d 时岩样的残余强度为长期残余强度; 高围压(10~25 MPa)条件下, 饱水时间为 60 d 的残余强度是高围压条件下的长期残余强度。

(3) “膨胀一期”末尾阶段和“膨胀二期”开始阶段作为二衬的施作时机; 在二次支护的实践中, 当围岩变形量占总变形量的 70% 时施作二次支护。

参考文献(References):

- [1] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Soft rock engineering mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [2] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.(ZHU Weishen, HE Manchao. Stability of surrounding rock in complex condition and dynamic construction mechanics of rock mass[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))
- [3] POUYA A, GHOREYCHI M. Determination of rock mass strength properties by homogenization[J]. International Journal for Numerical

- and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25(13): 1 285 - 1 303.
- [4] FENNER R. A study of ground pressure[J]. Cluekanf., 1938, 74(2): 601 - 605, 705 - 715.
- [5] WITTKE W, PIERAU B. 膨胀岩石中隧道的修建和设计原理[C]// 第四届国际岩石力学会议文集. Rotterdam: A. A. Balkema, 1985: 328 - 352.(WITTKE W, PIERAU B. Construction and design of tunnel in swelling rocks[C]// Proceedings of the 4th ISRM Congress. Rotterdam: A. A. Balkema, 1985: 328 - 352.(in Chinese))
- [6] PRIEST S D. Discontinuity analysis for rock engineering[M]. London: Chapman and Hall, 1993.
- [7] 刘 高. 高应力区结构性流变围岩稳定性研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2001.(LIU Gao. Stability study on surrounding rock with structural rheology in high stress area[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2001.(in Chinese))
- [8] PRIEST S D. Hemispherical projection methods in rock mechanics[M]. Boston: Allen and Unwin, 1985.
- [9] KAISER P K, MALONEY S, MORGENSTERN N R. Time-dependent behavior of tunnels in highly stressed rock[C]// Proceedings of the 5th Congress of International Society-Rock Mechanics. Rotterdam: A. A. Balkema, 1983: 329 - 335.
- [10] GROB H. Swelling and heave in Swiss tunnels[J]. Bulletin of IAEG Krefeld, 1976, 13 (1): 55 - 60.
- [11] EINSTEIN H H. Design of tunnels in swelling rocks[C]// Proceedings of Design Methods in Rock Mechanics 16th Symposium on Minneapolis. Minneapolis: [s. n.], 1979: 51 - 61.
- [12] STEINER W. Swelling rock in tunnels: rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(4): 361 - 380.
- [13] 关宝树. 隧道工程维修管理要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(GUAN Baoshu. The key issues of maintenance and control of tunnel engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [14] 长春市新特技术有限责任公司. XTR01 - 01 型微机控制电液伺服岩石三轴试验仪使用说明书[R]. 长春: 长春市新特技术有限责任公司, 2002.(Changchun Xinte Technology Co., Ltd.. The specification about XTR01 - 01 microcomputer electro-hydraulic servo-controlled triaxial test instrument[R]. Changchun: Changchun Xinte Technology Co., Ltd., 2002.(in Chinese))
- [15] 靖洪文. 峰后岩石剪胀性能试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 93 - 96. (JING Hongwen. Experimental study on dilatancy nature of the rock post-peak behavior[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 93 - 96.(in Chinese))