

软弱夹层引起围岩系统强度变化的试验研究

郭富利¹, 张顶立¹, 苏洁¹, 牛晓凯²

(1. 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: 堡镇隧道地质条件复杂, 埋深大且地应力高, 地下水丰富, 岩体软弱破碎, 隧道自稳能力差, 存在顺层偏压。围岩变形具有“变形速度快、变形量大且破坏严重、持续时间长”的基本特征, 同时又表现出时间和空间上不均匀、不对称等诸多特性。通过对隧道左线出口段围岩变形量测资料和掌子面地质素描的比较分析后发现, 掌子面有软弱夹层沿洞室径向分布时, 其变形破坏程度较相邻段同类围岩严重得多, 不同夹层厚度对围岩变形的影响程度也不同。因此, 依据堡镇隧道开挖以来变形破坏程度最严重的高地应力炭质页岩段软弱夹层和围岩的典型组合结构, 设计了不同厚度软弱夹层的三轴试验方案, 进行了含软弱夹层围岩的室内三轴试验研究和三轴力学性质测试, 描述了软弱夹层厚度为 2.5 cm 和围压为 4 MPa 时的全应力-应变曲线特征, 探讨了系统强度变化规律, 分析了围压和夹层厚度对系统强度变化的作用机理及特点。

关键词: 软弱夹层; 高地应力; 大变形机理; 围岩稳定性; 岩石试验

中图分类号: TU458 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2009)05-0720-07

作者简介: 郭富利(1976-), 男, 内蒙古丰镇人, 博士研究生, 主要从事岩石力学试验研究方面的工作。E-mail: guofulil@sina.com。

Change of strength of surrounding rock system induced by weak interlayer

GUO Fu-li¹, ZHANG Ding-li¹, SU Jie¹, NIU Xiao-kai²

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing 100037, China)

Abstract: Baozhen tunnel is the only soft rock tunnel and the key project of Yichang-wanzhou Railway. The complex geological environments, such as high earth stress, deep-buried rock mass, rich groundwater, very weak and cracked rock masses and bias pressure along the rock seam, make the self-stability of the tunnel unfavorable. During construction, intense deformation and serious failure happened. Many serious failures happened due to large deformation, for example, roof subsidence, wall crushing, shotcrete flaking, s-shape twisted steel support, broken lining, floor upheaval, invert crazing and lots of cracks distributed everywhere. The monitoring data show that deformation is rapid with long duration, and at the same time, the deformation presents asymmetric and uneven features. For either sandy shale whose strength is higher or macker whose strength is lower, by comparing and analyzing the monitoring data of surrounding rock and the geologic sketch of work face, the weak interlayer is thought to be the key cause of induced intense deformation and serious failure. So according to the typical composite structure between weak interlayer and surrounding rock in the heaviest deforming section, the rock strength tests on surrounding rock contained weak interlayer are executed, the stress-strain complete procedure curves are described (the thickness of weak interlayer is 2.5 centimeters and confining pressure is 4 MPa), and their variation rules of system strength with both the confining pressure and the thickness of weak interlayer are analyzed. In addition, the mechanics and features, including the effect of both the confining pressure and the thickness of weak interlayer on strength, are studied.

Key words: weak interlayer; high earth stress; mechanics of large deformation; surrounding rock stability; rock test

0 引言

随着我国铁路事业的迅猛发展, 修建山岭隧道的技术比过去有了长足的进步, 其长大、深埋的特点日趋明显, 而山区地质构造和岩性较为复杂, 隧道、洞室的开挖往往不得不穿越各种不良地质, 软弱夹层就

是其中之一。软弱夹层指岩体中, 在岩性上比上、下岩层显著软弱的岩层, 层状夹层的厚度变化较大。国内外学者对层状岩体的力学特性都曾进行过大量的研

究工作^[1-3]。

大量工程实践表明^[4-8], 层状岩体中的软弱夹层对岩体的整体稳定性具有重要影响, 甚至在某些条件下控制着岩体的稳定性。本文依托《宜万铁路堡镇隧道软弱围岩大变形控制技术试验研究》科研课题, 以层状岩层中存在顺层发育的软弱夹层为研究对象, 结合围岩赋存条件, 利用常规三轴压缩试验研究夹层厚度对岩石强度的影响规律, 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。

1 工程概况

堡镇隧道位于贺家坪至榔坪之间, 采用左、右两单线方案, 全长约 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 左右; 左线穿越志留系碎屑岩 10.263 km, 其中 o_{2+3} 泥灰岩、页岩段长 1.3 km, 按照国际岩石力学学会于 1990 年和 1993 年定义的软岩概念 (单轴抗压强度为 0.5~25 MPa 的一类岩石) 来看, 基本为软岩。围岩级别划分情况如下: III 级 4818 m, 占整个隧道长度的 41.67%; IV 级 6589 m, 占 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 14.75 MPa。对应岩体 (炭质页岩、砂质页岩、灰岩), 其单轴抗压强度 R_c 为 3.9~9.1 MPa, $R_c / \sigma_{\max} = 0.26 : 0.6 < 4$, 根据国标《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。

2 含软弱夹层的围岩系统变形情况

在地下洞室施工过程中, 软弱夹层对洞室围岩稳定性的影响是巨大的, 目前已引起了工程地质界的广泛关注, 相关规范中已将其定性为不良工程地质。针对软弱夹层的发育规律及与其密切相关的特殊岩体结构形式, 围岩的变形和破坏也是特殊的。从堡镇隧道左线出口所揭示的炭质页岩段围岩收敛变形情况和掌子面地质素描来看, 当隧道围岩分布有顺层发育的软弱夹层时 (见图 1 所示), 其变形破坏程度较相邻段同类围岩严重得多, 同时不同夹层厚度对围岩变形的影响程度也不同, 大变形段往往发生喷射混凝土层开裂、掉块、钢拱架严重扭曲变形、局部地段甚至发生钢拱架折断 (见图 2 所示)。

3 软弱夹层的力学试验设计

地下岩石工程尤其是在高地应力 (深埋) 隧道工程中, 洞室一经掘出, 则原岩应力重新分布, 导致洞

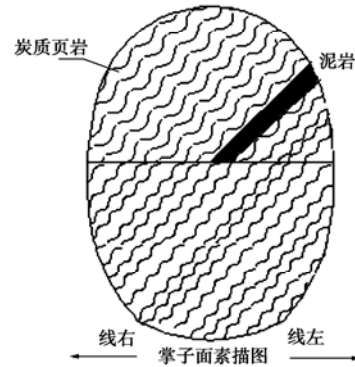


图 1 隧道围岩与软弱夹层组合情况素描图

Fig. 1 Geologic sketch of the structure between surrounding rock and weak interlayer

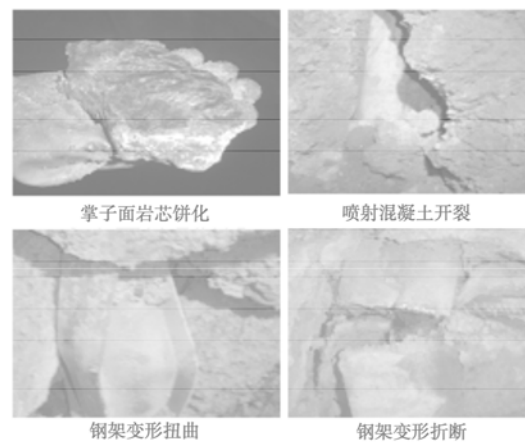


图 2 DK79+170~DK78+970 段围岩破坏情况

Fig. 2 Damages in DK79+170~DK78+970

室周边附近环向应力有很大增加, 即出现应力集中, 但沿隧道轴向的应力基本不变, 径向应力则显著降低, 且趋于零。根据堡镇隧道高地应力大变形段隧道掌子面的地质素描 (图 1), 将其简化为图 3 所示的变形分析模型, 由于软弱夹层近乎沿洞室径向分布, 与最大主应力 (切向应力) 近于垂直, 所以在试验中不考虑夹层与围岩之间的夹角, 只考虑单一夹层不同厚度时对围岩系统强度的影响。将洞室周边到一定深度范围的围岩变形、破坏看作是环形试件的三轴 (低围压) 压缩试验, 此时隧道周边的切向应力等价于环形试件的轴向应力, 径向应力 (等于支护阻力) 等价于岩石试件所受的围压。因此开展软弱夹层 (泥岩) 与炭质页岩的不同厚度组合在不同围压下力学性质变化规律的室内试验研究, 对于揭示软弱夹层对围岩力学性质的影响规律、指导大变形段工程实践具有重要意义。

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, 炭质页岩重度为 27.19 kN/m^3 , 含水率 2%~4%; 软弱夹层 (泥

岩) 重度为 20.78 kN/m^3 。试验岩样尺寸为 $\phi 50.00 \text{ mm} \times 100.00 \text{ mm}$ ；软弱夹层在岩样的中部，夹层直径为 50.00 mm ，厚度见试验设计流程(图4所示)，夹层两侧围岩力学特性相同，制样过程造成的岩样尺寸误差为 $\pm 0.4 \text{ mm}$ 。

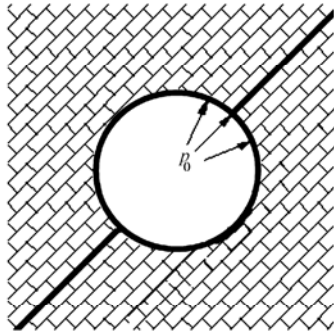


图3 变形分析模型

Fig. 3 Analytic model of deformation

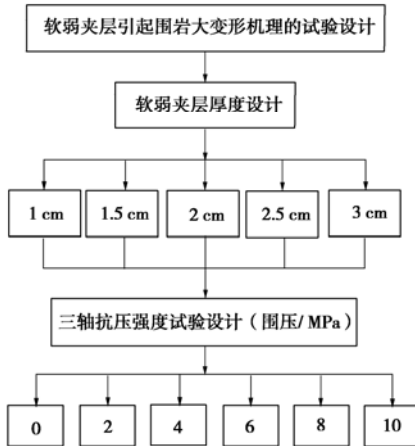


图4 试验设计流程图

Fig. 4 Flow chart of experimental design

试验仪器采用长春市新特技术有限责任公司研制的 XTR01-01 型微机控制电液伺服岩石三轴试验仪(图5所示)可作岩石单轴、三轴(包括带孔隙水压)的各种试验,自动数据采集,自动存储,屏幕动态显示试验全过程^[9]。



图5 XTR01-01 型微机控制电液伺服岩石三轴试验仪

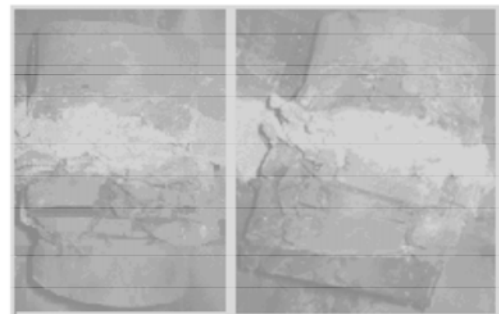
Fig. 5 XTR01-01 microcomputer-controlled electro-hydraulic servo triaxial test machine

4 试验结果及分析

4.1 全应力 - 应变曲线特征

首先,将所采集的岩样进行分类、选样并用油性彩笔标号,选取天然状态的岩样试件进行试验。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值,然后加轴向力直至试样破坏的方法。最后,根据计算机自动采集的数据进行统计和拟合,绘出全应力 - 应变曲线。

试件破坏形式如图6所示,主要表现为相邻岩层的破坏(图6(a))或试件整体破坏(图6(b))。图7为比较有代表性(软弱夹层厚度为 2.5 cm ,围压为 4 MPa)的全应力 - 应变曲线,从图中可以看出,应力 - 应变全过程曲线以 B 点为界,可以划分为两个阶段,第一阶段主要由夹层的力学特性决定,第二阶段由夹层和围岩组成的系统的力学特性决定。



(a) 相邻岩层破坏 (b) 试件整体破坏

图6 软弱夹层引起围岩变形破坏图

Fig. 6 Weak interlayer induced failure of surrounding rock

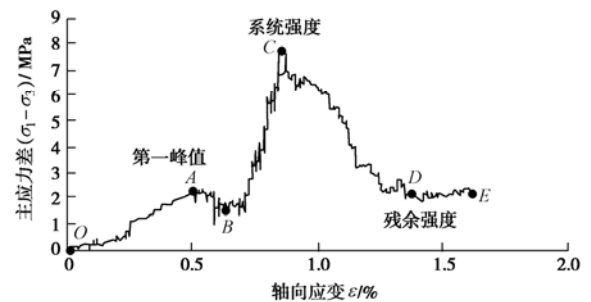


图7 含软弱夹层岩石试件的全应力 - 应变曲线

Fig. 7 Stress-strain complete procedure curves on macker under which including weak interlayer

下面就含软弱夹层岩石试件的全应力 - 应变曲线做全面描述:

(1) 夹层的峰前阶段(OA段)

OA段曲线分两部分,第一部分,夹层中原有的张开性结构面或微裂隙在压力的作用下逐渐闭合,夹层被压密,曲线呈上凹型,曲线斜率随应力增加而逐渐增大,表明微裂隙的闭合开始较快,随后逐渐减慢。

对于所研究的含软弱夹层的围岩, 层理、节理和裂隙发育, 压密是其强度性质的重要特征之一。第二部分, 该阶段的应力-应变曲线成近似直线型, 从图7可以发现, 该阶段没有明显的非线性应变强化过程, 在A点达到第一个峰值强度。

试验表明, 在应力达到第一个峰值强度前, 夹层与围岩是按其弹性模量来分配应变的, 而不同岩层弹性模量的不同导致应变值的不同, 表征了不同岩层的变形程度不同。由于夹层和围岩弹性模量相差较大, 这一阶段岩石试件的变形主要由夹层来承担。

(2) 夹层的应变软化阶段(AB段)

从达到第一个峰值强度(图7中A点所对应的值)开始, 应力开始下降, 发生应变软化, 强度降低, 这种应变软化是在应变较小的情况下完成的(图7中AB两点所对应的应变值), B点的应力为夹层的残余强度。试验表明, 夹层越厚, 第一个峰值强度和夹层的残余强度就越低。在应力达到第一个峰值强度后, 软弱夹层首先发生挤出变形, 但从试件解剖中发现, 这种挤出变形只发生在夹层边缘, 夹层中央形成剪切破裂面。

(3) 夹层与围岩系统应力调整阶段(BC段)

夹层破坏以后, 伴随着体积膨胀和顺层变形, 但处于弹性状态的围岩限制了这种变形, 相当于增加了夹层所受的围压, 由此引起夹层应力状态的变化, 由堡镇隧道不同围岩的三轴试验结果可知^[10], 提高了夹层的残余强度。相反, 夹层的顺层变形降低了围岩的围压, 围岩的强度降低。因此, 夹层破坏后所进行的应力调整结果使夹层的残余强度提高, 围岩的强度降低, 而当降至系统所承受的应力时, 则围岩发生破坏。C点的应力称为系统强度。从试验曲线来看, 该曲线段不稳定, 应力处于震荡变化中, 表明在应力调整阶段围岩内部应力状态不稳定。

(4) 达到系统强度后的应变软化阶段(CD段)

夹层与围岩系统发生破坏后, 随着应变的增加应力下降, 轴向压力使围岩形成破裂面, 强度降低, 应变增长。这种强度随应变增长而逐渐下降的破坏为渐进破坏。D点的应力为系统残余强度。

(5) 塑性流动阶段(DE段)

随着塑性变形的持续发展, 最终强度不再降低, 达到破碎、松动的残余强度, 并有相当大的体积扩容, 这个阶段可以认为是理想的塑性阶段。

4.2 强度变化规律

按照图4的试验设计流程进行试验, 得到软岩系统在不同夹层厚度和不同围压下三轴试验强度值, 结果如表1所示。

表1 不同围压、不同夹层厚度下炭质页岩试验强度表

Table 1 The macker test strength under different confining pressures and thicknesses of interlayer

围压 /MPa	系统强度/MPa				
	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0 cm
0	5.67	3.32	2.25	2.02	1.93
2	7.52	5.67	4.32	3.95	3.78
4	11.38	9.27	8.21	7.85	7.62
6	14.52	12.65	11.29	10.57	10.63
8	17.35	16.28	15.51	14.59	14.34
10	22.16	21.34	20.12	19.35	19.3

(1) 围压对系统强度的影响规律

软弱夹层厚度不同时, 岩样在不同围压下的系统强度试验曲线如图8所示。从图中可以发现, 围压对试验曲线的影响近似于线性变化。因而, 采用关系式 $y = a + bx$ 对岩样在不同围压下系统强度试验值进行拟合, 可以得到不同夹层厚度时系统强度与围压的关系式。

从图8可以看出, 拟合曲线与试验结果基本吻合, 分析图中的拟合曲线, 可以发现: 软弱夹层厚度不同时, 系统强度随围压的变化基本符合线性变化规律, 强度的变化规律不受夹层厚度的影响, 随围压的增长系统强度线性增高。

(2) 夹层厚度对系统强度的影响规律

在不同围压下, 夹层厚度对系统强度影响曲线近似于指数变化, 因而, 采用关系式 $y = a + b \exp(-kx)$ 对夹层厚度与系统强度试验值进行拟合, 如图9所示。从图中可以发现, 拟合曲线与试验结果基本吻合, 软弱夹层厚度不同时, 系统强度随围压的变化基本符合指数函数形式的变化规律, 强度变化规律不受围压的影响, 随夹层厚度的增长系统强度逐渐降低, 当夹层厚度达到2.5 cm时, 强度不再变化。

4.3 试验结果分析及对工程的指导意义

(1) 围压对试验结果的影响分析

a) 含软弱夹层岩样试件在受压后发生的变形与破坏形态与其所受的围压密切相关, 随着围压的增大, 系统强度相应提高, 表明岩样试件的强度(系统强度)随围压的增大而增大, 有一定的压硬性。

b) 含夹层的岩石试件破坏后, 系统残余强度随围压增大而提高, 同时, 系统强度对应的应变值有所增大, 但在试验设计的围压范围内, 岩石的变形、破坏主要表现为脆性特征, 没有延性特征。

c) 试验设计中围压值最大为10 MPa, 在此围压范围内, 岩石性质以各向异性为主导, 岩石呈脆性拉张破坏, 即破坏面平行于主压应力方向, 或者沿裂隙面发生破坏(见图10)。

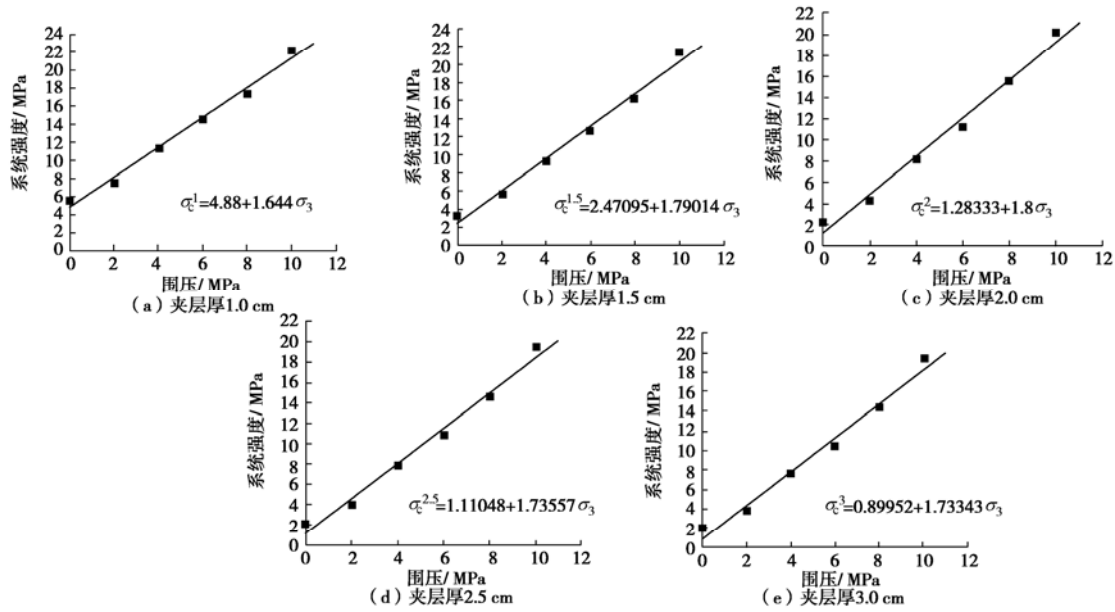


图8 围压与强度关系曲线

Fig. 8 Relationship between confining pressure and system strength

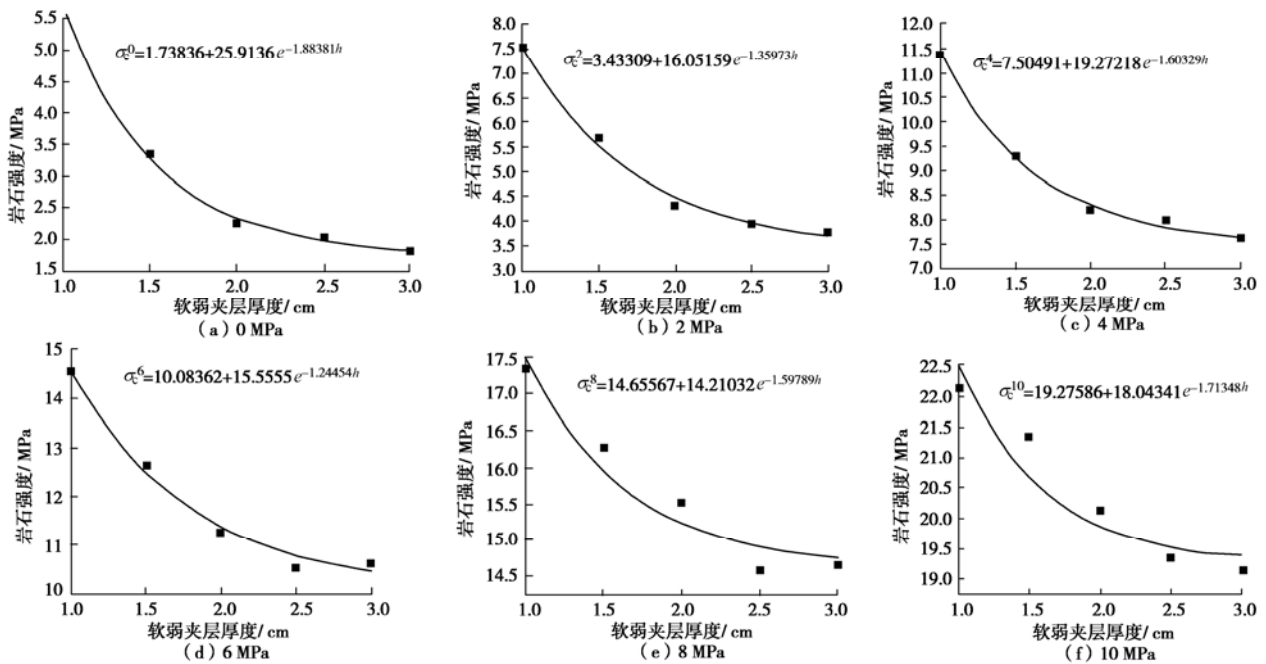


图9 夹层厚度与强度关系曲线

Fig. 9 Relationship between thickness of interlayer and system strength

(2) 夹层厚度对试验结果的影响分析

a) 从图9可以看出,当夹层厚度小于2.5 cm时,系统强度随着夹层厚度的增加而降低;夹层厚度大于2.5 cm时,系统强度基本不再降低,夹层厚度为2.5 cm时是含夹层围岩系统强度趋于稳定的转折点。

b) 由于围岩的强度大于软弱夹层,软弱夹层作为围岩组合系统力学模型中的薄弱环节而成为控制系统稳定性的关键因素。从试件中岩层的组合情况来看,夹层和围岩的轴向应力相等,即

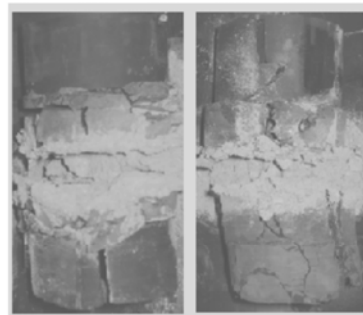


图10 岩样破坏后的典型破坏状况
Fig. 10 Typical failure modes of test samples

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{夹层}} &= \sigma_{\text{围岩}}, \\ E_{\text{夹层}} \varepsilon_{\text{夹层}} &= E_{\text{围岩}} \varepsilon_{\text{围岩}}, \end{aligned}$$

那么,

$$\frac{\varepsilon_{\text{夹层}}}{E_{\text{围岩}}} = \frac{\varepsilon_{\text{围岩}}}{E_{\text{夹层}}} \quad (1)$$

从上面分析计算可见, 夹层破坏之前, 夹层与围岩是按其弹性模量来分配应变的, 弹性模量相差越大, 应变值相差也就越大, 弹性模量相差越小, 应变值相差也就越小。为了定量表示夹层和围岩的变形程度, 在夹层破坏之前分别对夹层和围岩的应变大小进行了跟踪量测, 量测数据满足等式 (1)。

c) 夹层破坏之后进入塑性变形阶段, 已出现宏观破坏, 同时伴随着体积膨胀和顺层变形, 从而对尚处于完整状态的围岩形成拉应力作用。由此引起围岩应力状态发生变化, 这与岩石三轴试验中低围压下岩石破坏相类似, 主要以拉裂破坏形式为主, 形成和最大应力平行的拉裂面 (见图 10 所示)。

(3) 对工程实践的指导意义

对于具有明显的层状岩体结构特征的围岩, 由于其沉积环境的不同以及地质运动的影响, 造成各岩层的破坏强度不同, 有时差别甚大^[11-15]。不同的矿物本身有着不同的强度, 而围岩系统变形破坏发展的程度则取决于各岩层间的相互作用关系。下面就试验结论对堡镇隧道含软弱夹层的围岩变形特征做初步分析:

a) 左线出口段 DK79+850~DK79+380 段围岩为砂质页岩, 局部地段分布着不同厚度的炭质页岩, 根据堡镇隧道所揭示的不同围岩室内三轴试验结果可以知道^[9], 炭质页岩为软弱夹层。围岩变形情况如图 11 所示, 图中百分数代表夹层厚度, 没有标百分数的地段表示掌子面没有炭质页岩分布。从图中可以看出, 软弱夹层的厚度与围岩变形程度密切相关, 软弱夹层越厚, 围岩变形程度越严重, 软弱夹层成为控制围岩变形破坏的关键性因素, 掌子面没有软弱夹层分布的围岩变形量一般较小。

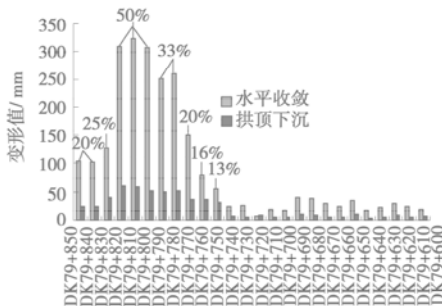


图 11 DK79+850~DK79+380 段围岩变形统计图

Fig. 11 Statistical chart of DK79+850~DK79+380 deformation

对于上述含软弱夹层的隧道围岩, 其变形特征由

其应力 - 应变关系和受力状态决定。从试验结果可知, 夹层破坏后对相邻围岩的应力调整引起围岩系统强度的变化, 从而导致围岩应力状态发生相应的变化。应变和位移反映了应力状态的改变, 围岩变形与破坏由应力状态决定, 并反映在围岩位移特征上。因此, 由夹层厚度与强度关系曲线 (图 9) 可以发现, 不同厚度的软弱夹层引起围岩强度变化的程度不同, 进而引起围岩应力状态的不同, 最终导致围岩变形的不同。

b) DK79+170~DK78+970 段遇到了炭质页岩, 局部地段掌子面分布着泥岩夹层, 其中监测断面围岩收敛变形速率与时间关系曲线如图 12 所示。从图中可以看出, 曲线在总体上有逐渐下降的趋势, 但从第一次量测开始直到围岩变形趋于稳定, 大约经历了 2 个多月, 在开始量测的前 1 个月内, 围岩变形速率一直处于剧烈震荡之中。

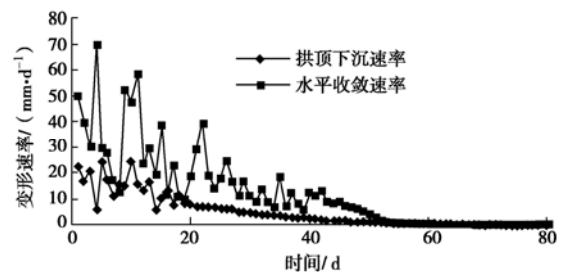


图 12 典型断面围岩收敛速率图

Fig. 12 Deformation velocity of typical cross-section

对于上述含泥岩夹层的炭质页岩隧道围岩, 其收敛速率特征和其应力状态密切相关。从图 7 试验曲线 BC 段可以看出, 夹层破坏后对围岩的应力调整导致围岩应力状态不稳定, 岩体自身特性也随应力和时间变化, 岩体特性的变化也反过来影响应力状态, 导致应力场的相应改变, 而应力场的改变又导致围岩的再次变化, 如此相互影响, 并最终体现在围岩的收敛速率具有震荡变化的特征。

5 结 论

(1) 利用常规三轴压缩试验研究夹层厚度对岩石强度的影响规律, 揭示了软弱夹层对围岩力学性质具有较强的“弱化”作用。

(2) 软弱夹层是影响洞室围岩稳定性的关键因素, 软弱夹层的厚度与围岩变形程度密切相关。

(3) 夹层破坏之前夹层与围岩协调变形, 按其弹性模量来分配应变, 弹性模量相差越大, 应变值相差也就越大, 对系统的整体稳定有害; 夹层破坏之后, 引起系统应力状态变化: 围岩围压降低, 夹层围压增加, 但系统总的强度降低, 当降至系统所承受的应力时, 则围岩发生破坏。

(4) 强度随围压变化的定量表征关系一般服从线形变化规律, 即 $y = a + bx$, 抗压强度随着围压的增大而提高。

(5) 强度随夹层厚度变化的定量表征关系服从指数函数形式的变化规律, 即 $y = a + b \exp(-kx)$, 抗压强度随着夹层厚度的增大而降低, 当夹层厚度达到 2.5 cm 时, 系统强度趋于稳定。

(6) 含软弱夹层的隧道围岩, 其变形特征由其应力 - 应变关系和受力状态决定, 不同厚度夹层引起围岩应力状态的变化不同, 最终引起围岩位移的不同, 软弱夹层越厚, 围岩变形程度越严重。

(7) 夹层破坏后围岩的应力调整导致围岩内部应力状态不稳定, 最终体现在围岩的收敛速率具有震荡变化的特征, 尤其在开始量测的前一个月围岩变形速率一直处于剧烈震荡之中。

参考文献:

- [1] 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 Bao-shu. The key issues of maintenance and control of tunnel engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 陈宗基. 根据流变学与地球动力学观点研究新奥法[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(2): 97 - 106. (CHEN Zong-ji. Study on NATM from the viewpoint of rheology and geodynamics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1988, 7(2): 97 - 106. (in Chinese))
- [3] 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 Man-chao, JING Hai-he, SUN Xiao-ming. Mechanics for soft rocks[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [4] WITTKÉ 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. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 328 - 352. (WITTKÉ W, PIERAU B. Construction and design of tunnel in swelling rocks[C]// Proc 4th ISRM Cong. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 328 - 352. (in Chinese))
- [5] 董方庭, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 21 - 31. (DONG Fang-ting, et al. The theory of supporting broken zone in surrounding rock[J]. Journal of China coal Society, 1994, 19(1): 21 - 31.)
- [6] PRIEST D. Discontinuity analysis for rock engineering[M] London: Chapman & Hall, 1993.
- [7] POUYA A, GHOREYCHI M. Determination of rock mass strength properties by homogenization[J]. Int J Numer Anal Meth Geomech, 2001, 25: 1285 - 1303.
- [8] PRIEST S D. Hemispherical projection methods in rock mechanics [M]. Boston: Allen & Unwin, 1985.
- [9] XTR01—01 型微机控制电液伺服岩石三轴试验仪使用说明书, 长春市新特技术有限责任公司. (The specification about XTR01—01 microcomputer electro-hydraulic servo controlling triaxial test instrument, Changchun XINTE technology Co., Ltd. (in Chinese))
- [10] 郭富利, 张顶立, 苏洁, 等. 地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2324 - 2332. (GUO Fu-li, ZHANG Ding-li, SU Jie, et al. Experimental study on influences of ground water and confining pressure on mechanical behaviors of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2324 - 2332. (in Chinese))
- [11] 张顶立, 王悦汉, 曲天智. 夹层对层状岩体稳定性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 140 - 144. (ZHANG Ding-li, WANG Yue-han, QU Tian-zhi. Influence analysis of interband on stability stratified rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 140 - 144. (in Chinese))
- [12] 刘高. 高应力区结构性流变围岩稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2001. (LIU Gao. Stability study on surrounding rock with structural rheology in high stress area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2001. (in Chinese))
- [13] KAISER P K, MALONEY S, MORGENSTEM N R. The Time dependent properties of tunnel in highly stressed rocks[C]// Proc the 5th Cong. Rotterdam: A A Balkema, 1983: 329 - 335.
- [14] 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 Wei-shen, HE Man-chao. Mechanics for dynamic construction of rock mass and stability of surrounding rocks under complex conditions[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [15] EINSTEIN H H. Tunnel in swelling rock[J]. Underground Space, 1979, 4(1): 51 - 61.