

压密试验后破碎岩石的透水系数试验研究

雷 鸣¹, 羽柴公博², 福井胜则², 大久保诚介²

(1. 江苏圣泰实田环境修复有限公司, 江苏南京 211106; 2. 东京大学工学系研究科, 日本 东京 113-8656)

摘要: 通过室内试验研究探讨了破碎岩石压密后试样的透水系数降低。对于田下凝灰岩、来待砂岩、河津凝灰岩、三城目安山岩、本小松安山岩等 5 种岩石, 在 MTS 伺服试验机下压碎空心钢制圆筒中的岩石试样, 并持续加载压密至指定的最大轴向荷载。卸载后将钢制圆筒取出置于自制的试验装置中, 利用变水头透水试验求解压密后试样的透水系数。试验结果表明, 压密后的岩石试样的透水系数变小, 透水系数的对数值与压密试验中的最终的轴向应变成反比例关系, 且与压密试验中最大轴向应力/完整岩石单轴抗压强度的比值的对数值成反比例关系。挖掘扰动区内的部分岩石在满足一定的支护条件下, 强度恢复和渗透性降低是值得期待的。研究结果可以为建立挖掘扰动区损伤恢复模型提供参考依据。

关键词: 岩石; 压密试验; 开挖扰动区; 透水系数; 损伤恢复

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1006-7192(2017)02-0235-07

Experimental study on the coefficient of permeability of broken rock specimens after compaction test

LEI Ming¹, HASHIBA Kimihiro², FUKUI Katsunori², OKUBO Seisuke²

(1. In Situ Solution China Co. Ltd, Nanjing 211106, China;

2. Department of Systems Innovation, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan)

Abstract: Strength healing of compacted rock in the Excavation Disturbed Zone (EDZ) has been verified through field observation and laboratory test. Tuge tuff, Kimachi sandstone, Kawazu tuff, Sanjome andesite and Honkomatsu andesite were employed to investigate water permeability of the compacted rocks in this study. Firstly, rock specimens were broken in a hollow steel cylinder under the MTS servo testing machine, and then loaded to the predetermined axial load. Following the unloading, the cylinder was placed in the self-made falling head permeability test device. Coefficients of permeability of the compacted rock specimens were obtained through falling head permeability test. From the experimental data, it can be concluded that coefficients of permeability of the compacted rock specimens decrease after the compaction test. There exists an inverse semi-logarithmic relationship between coefficients of permeability of the compacted rock specimens and the ultimate axial strain in the compaction test. Furthermore, there is also an inverse logarithmic relationship between the coefficients of permeability and the ratio of maximum axial stress to uniaxial compressive strength of intact specimens for the five rock types. For some rocks in the EDZ, strength healing and decrease of water permeability were expected after being properly supported. These experimental results may be helpful in building a damage-healing model for rocks in the EDZ.

Key words: rock; compaction test; excavation disturbed zone; coefficient of permeability; damage-healing

掘扰动区内岩石的强度恢复和透水系数的变化对于地下建筑物的长期稳定性会产生一定的影响^[1]。在存储废弃物的地下建筑物中, 从围岩流入储存室的地下水会造成储存物的腐蚀, 同时, 储存室的污水也有可能渗透到围岩中。因此, 正确评估透水系数的变化对于地下构筑物的长期稳定性具有重要意义。从室内压密试验以及现场的观测中可以得出, 在进行适当的支护之后, 随着

时间的推移, 地下建筑物挖掘扰动区的岩石存在强度恢复的可能性^[2-3]。由于挖掘扰动区损伤的恢复, 透水系数也存在减小的可能性。长期以来, 现场观测的涌水现象还很难从理论上进行阐述, 主要依靠经验来进行处理。高桥彦治等收集了较多的关于隧道涌水现象的实测数据。一般情况下, 在进行支护之后, 掌子面处的涌水会随着时间的推移而减少^[4]。此外, 在隧道竣工之后, 涌水量通

收稿日期: 2016-08-26

修改稿日期: 2016-12-11

基金项目: 日本学术振兴会科学研究基金资助项目(基础研究 B: 20360404)

作者简介: 雷鸣(1982-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事岩土力学、工程地质研究和工程施工管理工作。E-mail: leiion@163.com

常也会逐渐慢慢减少,经过数年之后,大多数的涌水量趋于恒定值.关于涌水量何时变为恒定值还存在着争议,通常认为5年之后,涌水量变为初始的50%~80%.但是,目前关于长时间内涌水量变化的知识还不充分.

在较均质的泥岩岩层的垂直巷道中,挖掘后在离壁面1~4.5m的地方进行低压压水试验,支护后透水系数显著降低^[5].Z. M. Hou指出岩盐的时间依存性性质显著,长期蠕变变形大.在应力状态满足一定的条件之后,挖掘扰动区损伤恢复,透水系数存在减小的可能性^[6].笔者所在的研究室从上世纪80年代开始,在调研坑道的过程中发现,很多坑道支护的后面存在岩石碎片组成的集合体.几年之后,坑道断面变窄,但变形速度逐渐变小,且支护背面的岩石变硬,具有一定的强度.以此类推,破坏后的岩石碎片在支护和围压的作用下,存在强度恢复的可能性.在与现场的技术人员交流的过程中,关于是否存在强度恢复以及涌水是否随着时间推移减少,存在不同的意见.关于破碎岩石压密后渗透性的变化,还没有相关的试验和现场检测来验证.

影响岩石试样透水系数的因素很多,例如施加围压之后,透水系数降低;渗透压增加后,裂隙尺寸增加,透水系数也随之增大^[7].此外,温度也对透水系数产生影响.岩体自身含有很多的裂隙,J. Zhang等研究了裂隙的形状、尺寸对透水系数的影响^[8].结果表明,透水系数与裂隙尺寸的3次方成正比.K. B. Min等利用UDEC对应力状态和透水系数的关系进行了数值模拟^[9].对于含有裂隙的岩石,在应力较小时透水系数也减小;但是体积膨胀之后,裂隙张开,透水系数随之增大^[10].俞缙等研究发现,低围压下砂岩出现贯通的剪切带,裂隙易张开,对渗流具有显著的促进作用.围压越高,砂岩试样的黏结断裂数量和范围越大,裂隙数量增多,但裂隙和孔洞也容易被压密,从而对渗流起抑制作用^[11].

针对破碎岩石压密后的渗透性变化,在底部装有金属网的钢制空心圆筒中进行压密试验,将压缩破坏后的岩石试样压密至事先指定的最大轴向荷载.卸载之后,取出钢制空心圆筒,利用变水头透水试验研究了压密试验后岩石试样的透水系数,得到了透水系数与压密试验中轴向应变(孔隙比变化)以及正规化轴向最大应力(压密试验中最大轴向应力/完整岩石试样单轴抗压强度的比值)的关系.

1 压密试验后的透水试验

1.1 压密试验的试验条件

压密试验中采用了田下凝灰岩、来待砂岩、河津凝灰岩、三城目安山岩和本小松安山岩等5种岩石.田下凝灰岩产自栃木县,位于大谷石(Oyatuff)层的下方.与大谷石相比,含有方解石较多,局部变得坚硬.河津凝灰岩产自静冈县,是由火山灰质粒子组成的浅灰色的凝灰岩.来待砂岩产自岛根县,有时也被称之为来待石的凝灰质砂岩.质地柔软,色泽略显黑色,均质且易加工,通常用作制作石灯笼.三城目安山岩产自福島县,是一种含有大量孔隙的灰白色安山岩.在玻璃质的基质中含有紫苏辉石、普通辉石、斜长石、磁铁矿石等斑晶.本小松安山岩产自神奈川县,是一种质地致密的辉石安山岩,含有极少量的斜长石的斑晶,柱状节理非常发育.田下凝灰岩、来待砂岩、河津凝灰岩、三城目安山岩和本小松安山岩的单轴抗压强度分别为19 MPa, 32 MPa, 31 MPa, 82 MPa, 85 MPa.

试样为直径25 mm,高25 mm的圆柱体.在整形之后放置在恒温恒湿的环境下至少2周,进行自然干燥.试验在干燥环境下进行,位移控制式荷载速率为 2.0×10^{-4} /s.试验采用容量为1 500 kN的MTS伺服试验机,荷载通过应变式压力传感器测量,位移则通过内置的LVDT位移传感器测量.与之前的压密试验不同的是为了防止破碎岩石试样的脱落,在内径为27mm的空心圆柱体的底部贴上金属网,然后将岩石试样在钢制的空心圆筒中压缩破坏.压密试验中轴向荷载与轴向位移的示意图如图1所示.单轴压缩应力下的破坏点P之后,轴向荷载开始降低.持续加载后,在O点处破碎的岩石与圆筒内壁接触,轴向荷载开始再次增加,试样被压密至指定的最大轴向荷载的A点,压密试验停止.压密试验具体操作方法同参考文献[2].

1.2 透水试验

文中研究了轴向荷载再次增加之后压密岩石试样的透水系数.破坏后的岩石试样由很多大小尺寸不同的碎片组成,通常的透水试验所采用的过滤网很容易被堵塞.在经历了预备试验的失败之后,采用如图2所示的金属网.首先在钢制空心圆筒的下方安装上金属网,进行上述的压密试验.压密试验之后,取出其中装有被压密岩石试样的

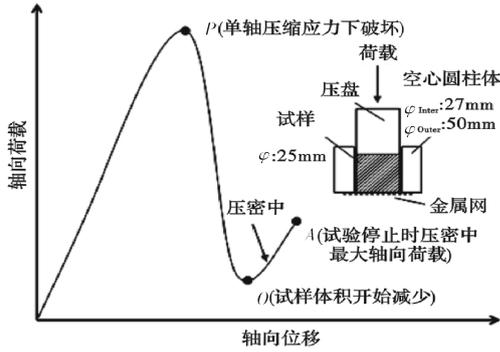


图 1 压密试验中轴向荷载—轴向位移的示意图
 Fig. 1 Schematic illustration of the axial load-axial displacement curve in the compaction test



图 2 圆筒底部的防止破碎岩石脱落的金属网
 Fig. 2 Steel meshes adhered to the bottom of the cylinder to retain crushed specimen debris in compaction and subsequent permeability tests

圆筒, 进行变水头透水试验, 自制变水头透水试验装置如图 3 所示. 透水系数的计算如下式所示^[12]:

$$k = \frac{A_1}{A_2} \frac{L}{t} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (1)$$

式中: H_1 、 H_2 分别为试验开始和结束时的水头; L 为压密试样的高度; t 为试验时间; A_1 为塑料圆管的横截面积; A_2 为压密试样的横截面积. 在本试验中, H_1 为 104 cm, H_2 在 12 cm 以上.

压密中最大轴向荷载为 8.3 kN 的田下凝灰岩的透水试验后的试样照片如图 4(a) 所示. 对应的渗透水量与时间的关系如图 5 所示. 对同一个岩石试样, 连续进行 4 次变水头透水试验. 随着试验次数的增加, 透水系数也略有增加, 但是相差很小. 最大轴向荷载为 10.96 kN 的来待砂岩, 透水试验后的试样照片如图 4(b) 所示. 对同一个岩石试样, 连续进行 3 次变水头透水试验. 同田下凝灰岩一样, 随着试验次数的增加, 透水系数也略有增加, 但是相差很小.

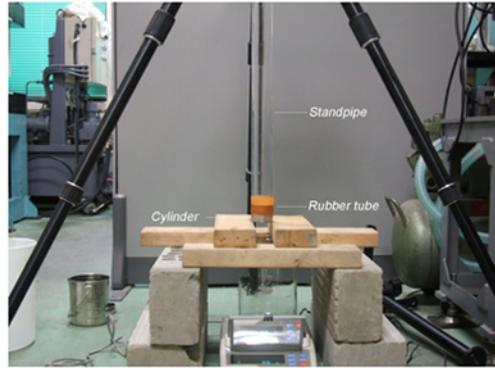
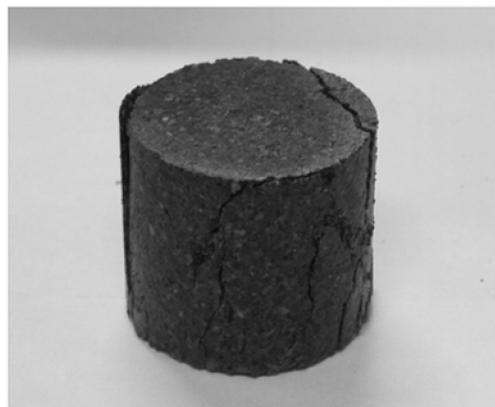


图 3 自制变水头透水试验装置
 (橡皮圈是为了防止塑料圆管与钢制圆筒之间的渗漏)
 Fig. 3 Schematic illustration of the falling-head permeability test (Rubber tube prevents water leakage from the joint between the standpipe and cylinder)



(a) 田下凝灰岩
 (压密中最大轴向荷载: 8.3 kN)



(b) 来待灰岩
 (压密中最大轴向荷载: 10.96 kN)

图 4 变水头透水试验后的压密试样
 Fig. 4 Photographs of the testing specimens after falling-head permeability test for compacted specimens

变水头透水试验结果如表 1 所示. 表 1 中列出了不同最大轴向荷载下的透水系数的平均值. 对同一个压密试样, 试验的次数以及从干燥或湿润状态开始进行试验对透水系数影响小. 对于田下凝灰岩, 分别在最大轴向荷载为 4.67 kN, 4.68

kN, 4.75 kN, 4.92 kN, 5.01 kN 时, 每一个试样都进行了两次试验. 此外, 在文中还对河津凝灰岩、三城目安山岩、本小松安山岩等进行了变水头透水试验.

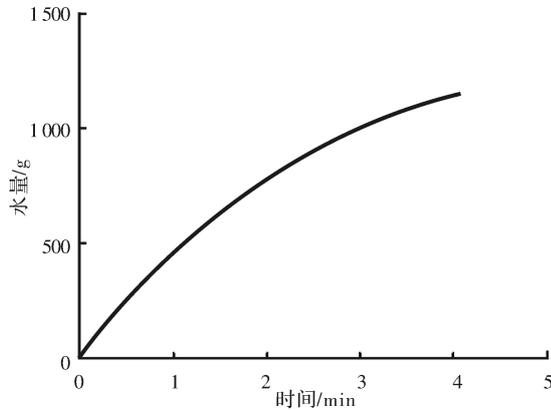


图5 田下凝灰岩的4次透水试验中渗透水量与时间的关系(压密中最大轴向荷载: 8.3 kN)

Fig. 5 Relationship between the permeated water and time for Tage tuff with the maximum axial load of 8.3 kN in four permeability tests

表1 变水头透水试验得到的压密试样的透水系数

Tab. 1 Coefficient of permeability via falling head method

岩石种类	轴向应变 /%	压密中最大轴向荷载/kN	透水系数平均值/cm·s ⁻¹
田下凝灰岩 (Tage tuff)	4.16	4.75	4.9×10 ⁻²
	4.52	5.01	3.7×10 ⁻²
	4.88	4.67	3.5×10 ⁻²
	5.00	4.92	1.2×10 ⁻²
	5.02	4.68	3.6×10 ⁻²
	5.30	11.76	5.9×10 ⁻²
	5.44	8.30	4.8×10 ⁻²
	9.89	15.68	2.9×10 ⁻⁴
	来待砂岩 (Kimachi sandstone)	3.18	8.42
3.48		6.31	1.5×10 ⁻¹
3.77		6.61	7.6×10 ⁻²
4.07		6.70	1.6×10 ⁻¹
4.09		7.49	9.9×10 ⁻²
4.2		10.96	6.7×10 ⁻²
河津凝灰岩 (Kawazu tuff)	7.89	13.72	7.3×10 ⁻⁴
	4.54	4.35	9.6×10 ⁻¹
	5.87	3.57	9.7×10 ⁻¹
三城目安山岩 (Sanjome andesite)	13.45	12.57	2.1×10 ⁻³
	3.15	17.30	4.4×10 ⁻²
	3.64	23.14	1.6×10 ⁻²
	4.47	21.62	1.2×10 ⁻²
	4.72	17.57	7.3×10 ⁻³
本小松安山岩 (Honkomatsu andesite)	5.33	20.65	4.8×10 ⁻³
	4.24	12.73	3.9×10 ⁻¹
	4.89	11.58	3.3×10 ⁻¹
	5.28	11.77	2.7×10 ⁻¹
	5.39	10.26	3.0×10 ⁻¹
	5.55	14.55	4.8×10 ⁻¹
	11.40	24.33	6.5×10 ⁻³

对于完整的岩石试样和最大轴向荷载为 78.4 kN 的压密试样采用定流量泵透水试验, 试验条件以及试验结果如表 2 所示. 以田下凝灰岩为例, 采用定流量泵透水试验得到的压密试验中最大轴向荷载为 78.4 kN 的田下凝灰岩的水头与时间的关系曲线如图 6 所示. 其它的岩石试样也可得到类似的曲线, 在这里不再赘述. 从透水试验结果可以得出定性的结论, 随着轴向压密荷载的增加, 轴向应变增加, 压密岩石的透水系数变小. 在 78.4kN 的压密荷载作用下, 田下凝灰岩、来待砂岩、河津凝灰岩的压密试样的透水系数仅仅比完整岩石试样高 1~2 个数量级, 压密作用对于透水

表2 定流量泵透水试验得到的压密试样的透水系数

(围压: 1.2 MPa, 反压: 0.2 MPa)

Tab. 2 Coefficient of permeability via flow-pump method for original and compacted specimens (Confining pressure: 1.2 MPa, Back pressure: 0.2 MPa)

岩石种类	轴向应变 /%	压密中最大轴向荷载/kN	流量 /cm ³ ·min ⁻¹	水头 /cm	透水系数平均值 /cm·s ⁻¹
田下凝灰岩	—	—	0.001	1355.2	3.2×10 ^{-9*}
灰岩	17.7	78.4	0.2	2441.5	5.4×10 ⁻⁷
来待砂岩	—	—	0.005	2645.7	8.1×10 ^{-9*}
砂岩	14.5	78.4	0.1	1923.2	3.4×10 ⁻⁷
河津凝灰岩	—	—	0.01	872.3	4.9×10 ^{-8*}
灰岩	24.4	78.4	0.1	563.2	9.9×10 ⁻⁷
三城目安山岩	—	—	0.01	2254.5	1.9×10 ^{-8*}
安山岩	9.60	78.4	2.0	55.6	2.4×10 ⁻⁴
本小松安山岩	—	—	0.0005	3138.3	6.9×10 ^{-10*}
安山岩	15.9	78.4	1.0	110.05	5.7×10 ⁻⁵

* 完整岩石试样的透水系数

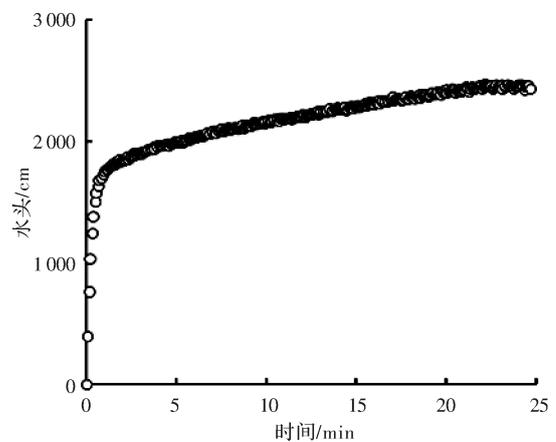


图6 田下凝灰岩定流量泵透水试验中水头与时间的关系(压密中最大轴向荷载: 78.4 kN)

Fig. 6 Measured water head during the flow-pump permeability test for Tage tuff with the maximum axial load of 78.4 kN

系数变化的影响大, 而对于三城目安山岩和本小松安山岩, 压密后试样的透水系数仍比完整岩石试样高 4~5 个数量级, 压密作用对于透水系数变化的影响不明显。

2 讨 论

在土力学领域, 很早就有关于土体压密后的透水系数变化的研究。对于砂质土, 经常使用的有 Kozeny-Carman 公式^[13]。从实用面出发, 鹿岛建设土木设计部采用了更加简单的 Hazen 公式^[14]。此外, Terzaghi 提出了以孔隙比为 0.85 时的透水系数为 $k_{0.85}$ 基础, 用简单的近似式子表述透水系数^[15]。以上均为关于砂质土的研究。砂质土粒子的刚性大, 即使被压密之后, 透水系数的变化也较小。对于粘性土, 透水通道的变化将使透水系数产生很大的变化。在此基础上, 透水系数与孔隙比之间存在如下的实验关系式^[16]:

$$e - e_0 = C_p \log(k/k_0) \quad (2)$$

式中: k 为透水系数; e 为孔隙比; C_p 为透水变化指数; e_0, k_0 分别为初始时刻的孔隙比和透水系数。 e_0 为 0.8~3.0 时, 可用式(3)近似表示:

$$C_p = 0.5e_0 \quad (3)$$

对于承压破碎岩石, 李顺才等研究表明其渗透特性随着轴向位移或载荷的变化而产生显著变化。随着孔隙率的减少, 渗透系数呈现整体下降的趋势^[17]。在三轴压缩的过程中, 局部化结构压缩带的形成, 较大地降低了岩石渗透性。渗透性一般随着轴向应变的增加而降低^[18]。大久保诚介等研究得到了压密试验后试样的轴向应变与单轴抗压强度之间的关系。对于试验中采用的岩石试样, 试验数据点均位于同一条曲线上, 可以通过测量压密后轴向应变, 大致预测压密后试样单轴抗压强度^[19]。由表 3 可以得出, 在压密试验中孔隙比 e 与压密过程中的轴向应变 ϵ 成反比例关系。在本文中, 压密试样透水系数与压密试验中试样的轴向应变之间的关系如图 7 所示。随着压密试样轴向应变的增加, 压密后试样的透水系数大幅降低。不同的岩石种类, 在同一轴向应变处, 透水系数按河津凝灰岩、本小松安山岩、田下凝灰岩、来待砂岩、三城目安山岩的顺序逐渐变小。

关于透水系数的研究, 到目前为止, 已有一些试验或理论的式子。在文中, 假定的参数如表 3

所示, 利用式(2)求解透水系数, 试验结果如图 7 的虚线所示。从结果可以看出, 试验得到了压密试样的轴向应变与压密后透水系数的定性的关系。透水系数降低可能是因为压密作用使得岩石碎片之间相互咬合, 具有粘聚性的细粒子被挤入到碎片的空隙之间, 使得有效孔隙率降低。由此可以得出, 采用的岩石试样在强度恢复的同时, 透水系数也降低。

表 3 根据式(2)估算透水系数

Tab. 3 Estimation of the coefficients of permeability for the compacted specimens based on Eq. (2)

变量符号	定义	表达式或数值	量纲单位
V	体积	$V_s + V_v$	cm^3
V_s	固体体积	—	cm^3
V_v	孔隙体积	$V - V_s$	cm^3
e	孔隙比	V_v/V_s	无量纲
ϵ	轴向应变	—	无量纲
V_0	初始试样体积	12.27	cm^3
A_c	圆筒内截面面积	5.726	cm^2
A_{v0}	初始圆筒体积	14.31	cm^3
A_v	圆筒体积	$(1 - \epsilon)A_{v0}$	cm^3
k	透水系数	$k_0 \exp(\frac{e - e_0}{C_p})$	$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
k_0	初始透水系数	1	$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
e_0	初始孔隙比	0.4	无量纲
C_p	透水系数变化指数	0.017	无量纲

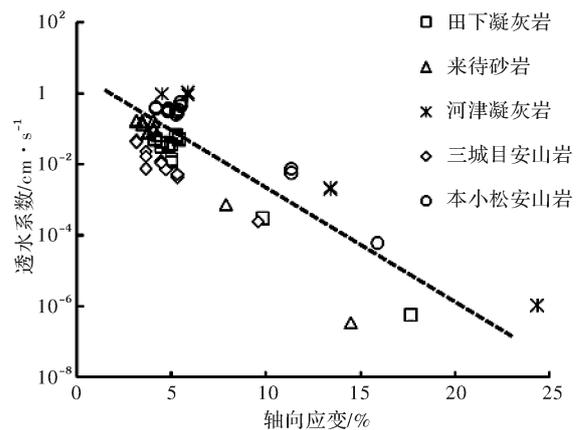


图 7 压密试样透水系数与压密试验中轴向应变的关系

Fig. 7 Relationship between coefficients of permeability of the compacted specimens and the axial strain in the compaction test

在图 8 中, x 轴为正规化轴向最大应力(压密试验中最大轴向应力与完整岩石单轴抗压强度的比值), y 轴为压密试样的透水系数, 直线斜率为

—4.5. 可以得出, 压密试样的透水系数随着正规化轴向最大应力的增加而降低. 由于田下凝灰岩的最大轴向应力与压密试验结束时的轴向应变之间的相关性不高, 其中的两个数据点位于直线的上方, 且偏离较大. 这两个试验点对应的是最大轴向应力较小, 轴向应变较小的情况.

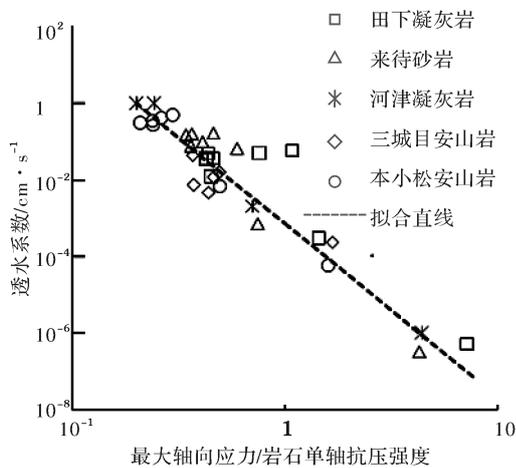


图8 透水系数变化与最大轴向应力/岩石单轴抗压强度比值的关系

Fig. 8 Relationship between the coefficient of permeability variation and the ratio of the maximum axial stress to uniaxial compressive strength of intact specimens

此外, 强度高、弹性模量大的三城目安山岩和本小松安山岩的透水系数的最大值约比其他3种岩石的大4个数量级, 可能由于最大轴向荷载与完整试样的强度相比较小, 岩石内部变形产生的填充空隙的作用弱.

本次试验的压密试样透水系数的数量级约为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$, 数值偏大是因为变水头透水试验是在压密试验卸载之后进行的, 沿压密试样和圆筒内壁之间存在着渗漏的可能. 但是, 从图7可以看出, 压密试样的透水系数随着轴向应变的增加而变小, 由于渗漏产生的误差也不大. 本文得到的压密试样的透水系数可能比真实值大, 如果应用到现场的检测, 可以认为是从安全的角度出发的评估. 这个定性的结果在以后向隧道周边的居民说明隧道的安全性、稳定性时是很有效的. 研究结果可以得出, 田下凝灰岩、河津凝灰岩的透水系数降低较为显著, 而三城目安山岩、本小松安山岩的透水系数降低不明显.

目前压密试样透水系数降低的机理还不明确, 但是可以通过简单的透水试验得到岩石是否容易产生透水系数降低现象. 文中的作者与具有丰富隧道和矿山经验的技术人员讨论本文的试验结果

时, 有的很赞同并讲述了自己的实际经验, 同时也有工程师根据自己的经验认为不能过于期待透水系数降低, 可能因为岩石种类不一样. 在实际的应用中为了使得透水系数降低, 需要采用高强度的支护, 压密挖掘扰动区的破碎岩石. 支护是否足够可以通过监测施加在刚性支护上的荷载, 或者是通过监测设置于围岩内的引伸仪.

为了更加近似地反映支护开挖扰动区岩石后, 压密岩石透水系数的变化, 室内试验还需保持轴向压密荷载不变, 在加载的状态下研究透水系数的变化. 为此, 以后计划开发将压密试验和透水试验组合在一起的仪器设备. 根据岩石种类的不同, 选择不同的压密荷载, 从而得到对于不同种类岩石, 压密荷载对透水系数影响的关系曲线, 为实际的设计提供参考.

3 结论

通过室内试验, 近似模拟挖掘扰动区岩石的支护状态, 探讨了挖掘扰动区内压密岩石的透水特性, 得出了以下的结论:

(1) 在钢制空心圆筒中压碎岩石试样, 强度破坏点之后, 应力逐渐降低. 继续加载, 在破碎岩石试样与圆筒内壁接触之后, 应力开始再次增加. 压密初期透水系数大, 但是随着强度恢复过程的进行, 压密试样的透水系数急剧降低.

(2) 透水系数的对数值与压密试验中最终的轴向应变成反比例关系. 此外, 压密试样的透水系数与正规化轴向最大应力(压密试验中最大轴向应力/完整岩石单轴抗压强度的比值)大致成反比例对数关系.

(3) 从研究结果可以看出, 对于部分岩石, 在满足一定的支护条件下, 挖掘扰动区内岩石的强度恢复和渗透性的降低是值得期待的. 研究结果可以为建立挖掘扰动区损伤恢复模型提供参考依据, 有助于核废料等地下建筑物的密闭性、隔离性、安定性等的长期稳定性评估.

参考文献 References

- [1] TSANG C F, BERNIER F, DAVIES C. Geohydro-mechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays-in the context of radioactive waste disposal[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2005, 42(1): 109-125.
- [2] 雷鸣, 羽柴公博, 福井胜则, 等. 挖掘扰动区内岩石的压密特性和强度恢复性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2710-19.

- LEI Ming, HASHIBA K, FUKUI K, et al. Study on compaction characteristics and strength recovery of rock in the loosen zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2710-19.
- [3] 雷鸣, 羽柴公博, 福井胜则, 等. 压密试验中破碎岩石压密特性的本构方程及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1258-65.
- LEI Ming, HASHIBA K, FUKUI K, et al. A constitutive equation and numerical simulation analysis for broken rock behaviour in compaction test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1258-65
- [4] TAKAHASHI H, IKUCHI K, YOSHIKAWA S, et al. Engineering geology of construction [M]. Tokyo: Kajima Press, 1985.
- [5] SUGIHARA H. A study on rock properties and spatial extent of excavation disturbed zone and its investigation method by means of field tests in soft sedimentary rock[M]. Tokyo: The University of Tokyo, 2003.
- [6] HOU Z M. Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2003, 40(5): 725-738.
- [7] INADA Y. Rock mechanics [M]. Tokyo: Morikita Press, 1997.
- [8] ZHANG J, STANDIFIRD W B, ROEGIERS J C, et al. Stress dependent fluid flow and permeability in fractured media: from lab experiments to engineering applications[J]. Rock Mech. Rock Engng., 2007, 40(1): 3-21.
- [9] MIN K B, RUTQVIST J, TSANG C F, et al. Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2004, 41(7): 1191-1210.
- [10] ALKAN H, CINAR Y, PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2007, 44(1): 108-120.
- [11] 俞缙, 穆康, 李宏, 等. 砂岩渗透性演化特性的孔隙率分布细观模拟分析[J]. 工程力学, 2014, 31(11): 124-131.
- YU Jin, MU Kang, LI Hong, et al. The porosity distribution mesoscopic simulation analysis of the permeability evolution property of sandstone. Engineering Mechanics[J], 2014, 31(11): 124-131.
- [12] MOROTO N. Soil mechanics [M]. Tokyo: Gendaiogaku Press, 1986.
- [13] ADACHI T. Soil mechanics [M]. Tokyo: Kyoritsu Press, 2002.
- [14] Civil Engineering Design Division in Kajima Corporation. Fundamental knowledge on civil engineering design[M]. Tokyo: Kajima Press, 1993.
- [15] TERZAGHI P. Soil mechanics[M]. Tokyo: Maruzen Press, 1969.
- [16] ISHIHARA K. Soil mechanics[M]. Tokyo: Maruzen Press, 1988.
- [17] 李顺才, 缪协兴, 陈占清, 等. 承压破碎岩石非 Darcy 渗流的渗透特性试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 85-92.
- LI Shuncai, MIAO Xiexing, CHEN Zhanqing, et al. Experimental study on seepage properties of non-darcy flow in confined broken rocks[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(4): 85-92.
- [18] 韩国锋, 王恩志, 刘晓丽. 压缩带形成过程中渗透性变化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 991-997.
- HAN Guofeng, WANG Enzhi, LIU Xiaoli. Experimental study of permeability change during compaction bands formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 991-997.
- [19] OKUBO S, FUKUI K, SUGITA T. Study on strength recovery of loose zone[J]. Journal of MMIJ, 2001, 117(8): 631-638.

(编辑 沈波)