

DOI: 10.11779/CJGE2019S2029

# 维多利亚褐煤的固结和渗透特性试验研究

刘 侃<sup>1</sup>, 李忠诚<sup>1</sup>, 杨 敏<sup>2</sup>

(1. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 维多利亚褐煤一般被认为是一种中级岩土材料 (IGMs), 其岩土工程性质介于常规土体和岩石之间。褐煤富含有机质, 其自然结构和物理组分比较复杂。褐煤具有不同于常规软黏土的基本岩土参数, 包括自然密度和相对密度低、天然含水率高、孔隙比大, 渗透系数相对较低等。采用原状褐煤试样开展了标准室内固结试验, 褐煤材料的固结变形曲线主要表现为: 初始阶段变形明显且很快完成, 初始阶段变形占比很大, 在数分钟内应变可达 50%, 在较明显的拐点之后, 后续变形相对较缓慢。标准 Terzaghi 固结并不能很好地适用于褐煤材料。设计开展了褐煤材料的常水头渗透试验, 基于不同超静孔压消散路径采用 2 种方法测量了褐煤的渗透系数, 试验测得的褐煤材料渗透系数值相对较小。

**关键词:** 维多利亚褐煤; 固结试验; 渗透系数; 有机质

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0113-04

作者简介: 刘 侃(1987—), 男, 博士, 主要从事土体基本性质、桩基及深基坑工程等的研究与设计工作。E-mail: csliukan@vip.qq.com。

## Experimental study on consolidation and hydraulic behaviors of Victorian brown coal

LIU Kan<sup>1</sup>, LI Zhong-cheng<sup>1</sup>, YANG Min<sup>2</sup>

(1. Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200011, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The Victorian brown coal is usually considered as a kind of intermediate geotechnical material (IGM), which has the properties between traditional rocks and soft soils. The brown coal is rich in organic matters and has complex textures and physical composition. It has different basic geotechnical index values from soft clays including low density and specific gravity, high water content, large void ratio and a relatively low hydraulic conductivity. The consolidation tests are carried out using the undisturbed brown coal samples, and the test results show special deformation behaviors of the brown coal. There is an instantaneous settlement at the early stage of the consolidation process, and the immediate settlement contributes to more than 50% of the total settlement occurring in the first several minutes. The Casagrande graphic method is not applicable to the brown coal to determine parameter  $t_{90}$  and other parameters. Even the traditional Terzaghi's consolidation theory can not describe the consolidation curves appropriately. The constant head tests are designed and carried out under relatively low confining pressures. The test results show that the brown coal has a relatively low hydraulic conductivity.

**Key words:** Victorian brown coal; consolidation test; hydraulic conductivity; organic matter

## 0 引言

褐煤 (Brown Coal 或 Lignite) 主要是一种矿产资源和化工原材料。褐煤属于低质煤, 在世界多地均有分布。澳大利亚褐煤资源丰富, 其中维多利亚州的 Latrobe Valley 有全澳洲最大的褐煤矿。

中国褐煤资源主要分布于云南和内蒙古地区, 目前对于褐煤材料岩土工程性质的研究涉及甚少, 相关研究有助于类比应用于中国褐煤资源的开发中。

源于 Latrobe Valley 一露天褐煤矿的坍塌事故, 学

者们开始关注褐煤的岩土工程性质。褐煤由于其自然组分、物理属性独特, 表现出的岩土工程性质也不同, 一般将褐煤视为广义上的岩土材料, 认为其是一种 Intermediate Geotechnical Materials, 即 IGMs 材料, 直译为中级岩土材料, 其意是指一类工程性质介于常规土体和岩石之间的岩土材料。

Li 等<sup>[1]</sup>关于维多利亚褐煤的专著对褐煤材料各方

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41572258)

收稿日期: 2019-04-29

面的性质进行了全面的分析。Robert 等<sup>[2]</sup>主要基于两种试验方法对 Morwell 褐煤颗粒相对密度进行了试验测定。Covey 等<sup>[3]</sup>对维多利亚褐煤的流变特性进行了分析。Liu 等<sup>[4]</sup>基于理论模型对褐煤渗透试验过程进行了模拟计算。Couling 等<sup>[5]</sup>开展了褐煤材料的三轴试验，主要测定了非饱和褐煤的孔压系数  $B$  值。

总结来说，已有对褐煤材料岩土工程性质的系统研究非常少见。本文基于澳大利亚维多利亚州 Gippsland 地区露天矿的原状褐煤试样，开展了基本室内试验，分析了其基本岩土参数，开展固结试验和常水头渗透试验，对试验结果进行了初步分析。

## 1 褐煤基本岩土性质

褐煤具有复杂的自然结构和物理组分，其固相由有机质和矿物质组成。褐煤在较干燥状态下颜色为深褐色或褐黄色，但在湿润饱和状态下呈现出黑色或深黑褐色，比干燥状态下颜色要深得多。并且原状褐煤完整性很好，无肉眼可观察到的明显裂隙，但烘干后会出现干裂破碎。图 1 所示为原状近饱和状态下的褐煤试样。



图 1 原状饱和褐煤试样

Fig. 1 Undisturbed saturated brown coal sample

作为一种 IGM 材料，维多利亚褐煤的饱和硬度比普通黑煤软，比常规黏土硬。褐煤在地质历史上是前期泥炭地层长期煤化作用的产物，因此具有非常高的有机质含量。褐煤的组成成分有水，木质有机质，黏土、砂砾等无机材料，气体等。富含有机质的天然特性使褐煤的物理成分及结构组成与常规土体和岩石均不相同，褐煤还具有储气性，内部含瓦斯等煤层气。

褐煤与常规软黏土相比，具有高有机质含量、低矿物质含量、自然密度低，天然孔隙比大，含水率高，渗透系数低等特点。本文取维多利亚州 Gippsland 地区 Loy Yang 露天褐煤矿的原状褐煤进行了一系列常规室内试验。试验中 6 组褐煤试样的基本岩土工程参数列于表 1。作为对比，表 2 同时给出了上海地区典型软土和不同地区泥炭土的基本参数对比。

从表中可以看出，褐煤与常规软土比较，各参数均有显著不同。褐煤的天然密度和颗粒相对密度比常规软土小的多，而孔隙比与含水率很大，尤其含水率达 150%。这主要是由于褐煤的组分与软土不同，褐煤含有很高含量的有机质，其值高达 97.5%。由于有机质自身密度低导致褐煤的天然密度和颗粒相对密度很小，有机质微观结构与矿物质不同导致褐煤孔隙比较大。但相对于较大的孔隙比，褐煤的渗透系数却很小，只有  $10^{-9}$  m/s 数量级，这可能与其含有有机质的组成结构有一定关系。而与中国云南地区的泥炭土相比，褐煤的孔隙比和含水率要比泥炭土小，但天然密度和颗粒相对密度与泥炭土相近甚至更小，这主要是由于其有机质含量比泥炭土高的缘故，也从侧面说明褐煤由于长期的地质作用其整体密实度相对泥炭土要高。

表 1 原状褐煤试样基本参数

Table 1 Basic indexes of undisturbed brown coal

| 序号 | 密度 $\rho$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 颗粒相对密度 $G_s$ | 含水率 $w/\%$ | 孔隙比 $e$ | 有机质 $\omega_m/\%$ |
|----|--|--------------|------------|---------|-------------------|
| Y1 | 1.132  | 1.424        | 141.7      | 2.086   | 97.5              |
| Y2 | 1.126  | 1.388        | 145.5      | 2.151   | 97.5              |
| Y3 | 1.131  | 1.387        | 144.5      | 2.123   | 97.5              |
| Y4 | 1.135  | 1.464        | 151.1      | 2.197   | 97.5              |
| Y5 | 1.117  | 1.395        | 152.4      | 2.264   | 97.5              |
| Y6 | 1.162  | 1.480        | 150.1      | 2.119   | 97.5              |

表 2 不同岩土材料基本参数对比

Table 2 Comparison of basic indexes of different geotechnical materials

| 土样  | 密度 $\rho$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 颗粒相对密度 $G_s$ | 含水率 $w/\%$ | 孔隙比 $e$ | 渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 有机质 $\omega_m/\%$ |
|-----|--|--------------|------------|---------|---------------------------------------|-------------------|
| 软土  | 1.82   | 2.66         | 36         | 1.01    | $10^{-7}\sim 10^{-9}$                 | —                 |
| 褐煤  | 1.15   | 1.42         | 150        | 2.05    | $10^{-9}\sim 10^{-10}$                | 97.50             |
| 泥炭土 | 1.02   | 1.97         | 603        | 2.58    | $10^{-6}\sim 10^{-8}$                 | 47.10             |
| 泥炭土 | 1.08   | 1.77         | 320        | 5.88    | $10^{-6}\sim 10^{-8}$                 | 51.90             |

## 2 褐煤固结试验

褐煤组分及基本岩土参数与常规软土有所不同，相应的其压缩固结曲线也比较特殊。本文开展了褐煤原状试样的压缩固结，共进行了 6 组试验。试验使用标准的室内固结仪，各级加载时间为 24 h。

试验中原状试样取自 Gippsland 附近的 Loy Yang 露天褐煤矿。试样尺寸均为直径 61.8 mm，高 20 mm。褐煤制样不像常规软土易于切割，人为切割易导致试样破碎，试验室配备有专用压样制样设备，所得试样表面光洁平整，与环刀贴合很好，满足试验要求。试样制备完成后的状态如图 2 所示。6 组原状试样的相关基本参数如前述表 1 所示。试验期间试验室保持恒温 20℃。试验过程中加载采用分级加载的形式，各级总应力分别为 75—150—300—600—1200 kPa，排水条

件为单面排水。

各组试样所得的试验结果相似, 本文举例给出试样 Y1 各级应力下的固结曲线, 如图 3 所示。图 3 采用标准时间坐标而非对数坐标, 以便于更直观地展现应变随时间的变化趋势, 而褐煤材料的主次固结、孔压消散等并不能从变形曲线直观反映, 下文详述。



图 2 制备完成的褐煤试样

Fig. 2 Brown coal samples for consolidation

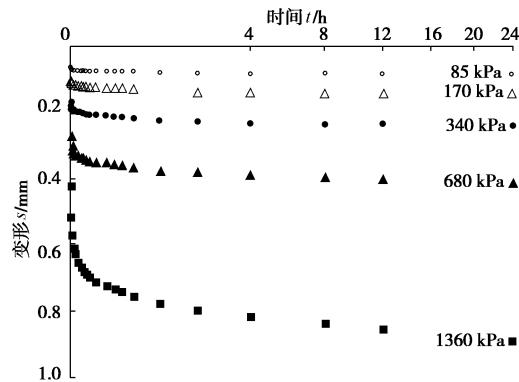


图 3 典型压缩固结变形曲线(试样 Y1)

Fig. 3 Typical consolidation results of sample Y1

从结果可以看出, 褐煤材料压缩固结变形曲线表现出的特点与常规软土有所不同。

(1) 褐煤材料压缩固结变形曲线的初始阶段变形明显且很快完成, 初始阶段变形占比较大, 在数分钟内应变可达 50%。在较明显的拐点之后, 后续变形相对较缓慢。考虑褐煤材料渗透系数在  $10^{-9}$  数量级, 较低的渗透系数下, 其固结过程孔压消散不可能在初始阶段较短时间内完成。尽管实际孔压消散不能通过常规固结试验测得, 但从理论上来说这造成了褐煤材料由孔压消散定义的固结程度与变形定义的固结程度的不统一, 试验采用单面排水以尽量减缓孔压消散, 也是为更明显的分析该现象, 并利于后续理论计算。

(2) 事实上, 笔者尝试基于常规分析中的时间平方根拟合法确定褐煤材料的  $t_{90}$  值, 但在试验曲线上很难确定, 或即使得到  $t_{90}$  值, 其值也非常小, 这也从侧面反映了前述讨论的不统一性。同理, 由试验曲线确定其  $t_{50}$  值也将很小, 与孔压固结度不符。

(3) 由于高有机质含量, 褐煤的固结过程比较特殊, 前述分析也反映了标准 Terzaghi 固结可能并不能

很好地适用于褐煤材料。笔者考虑有机质的影响和封闭气体的存在, 基于含有机质材料的多相组成定义<sup>[6]</sup>, 提出了褐煤的概念模型并推导了相应的固结理论, 进行了模型参数分析并与褐煤标准固结试验结果进行对比验证<sup>[7]</sup>, 所得的固结方程能更好地描述褐煤材料的固结过程。

### 3 常水头渗透试验

由于褐煤制样困难, 本文设计了一款三轴常水头渗透装置开展试验, 其原理示意图如图 4 所示。

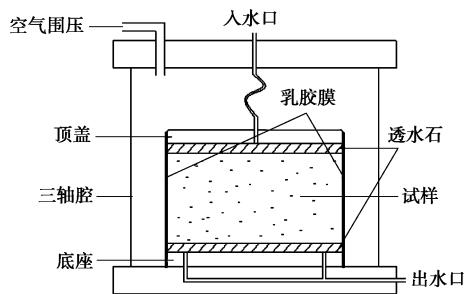


图 4 常水头渗透试验装置设计图

Fig. 4 Schematic diagram of constant head permeameter

基于本试验装置设计, 空气围压和入口水压分别可控, 因此本文设计了两种试验方法来对比验证试验结果的可靠性。两种试验方法的描述如下: 对于一对给定的空气围压和入口水压, 试验开始时两个压力同时施加, 为方法一; 或先施加空气围压, 待保持稳定 12 h 后, 施加入口水压。

本节渗透试验中使用的原状褐煤试样与上节相同。试样尺寸直径 100 mm, 高 50 mm。试验过程中实验室温度基本保持稳定 20℃ 左右。受试验系统自身限制, 渗透试验在较低应力水平下进行, 试验中所需施加的一对压力表示为空气围压-入口水压的形式, 比如 20–10 kPa。

基于前述两种试验方法分别开展了 3 组褐煤试样的渗透试验。为了更明确地表示试验结果, 将试验测得的流量换算为各时间间隔内的平均渗透速率与时间  $t$  的关系。图 5 为 20–10 kPa 下的试验结果示例, 其他应力对下试验结果相似。从试验结果可以看出, 对于方法一, 起始平均渗透速率较大, 随着试验的进行渗透速率逐渐降低并趋于平稳; 对于方法二, 趋势相反。两种方法最终的稳定渗透速率比较接近, 此时的结果可用于计算渗透系数  $k$ 。

需要指出的是, 试验两种方法中的平均流速变化趋势不同, 是由于两种试验方法下孔隙水压力经历了不同的变化路径。且试验结果趋势可侧面反映前文讨论的孔压固结度变化趋势及其不统一性, 将另文详述。

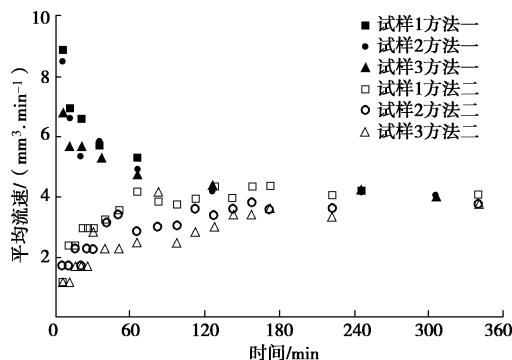


图 5 20–10 kPa 应力下的试验结果

Fig. 5 Average volumetric flow rates under 20–10 kPa

取上述各组试验的稳定段结果, 对褐煤的渗透系数  $k$  进行计算, 其结果如表 3 所示(部分)。暂不讨论不同压力对渗透系数的微小影响规律, 从结果可以看出, 总体上各组试验得到的褐煤渗透系数  $k$  平均值在  $10^{-9} \text{ m/s}$  数量级, 其值相对于常规软土等材料偏小。

表 3 试验结果渗透系数  $k$  计算汇总(部分)Table 3 Calculated results of hydraulic conductivity  $k$ 

| 应力对<br>/kPa | 试样 | 试验<br>方法 | 流速<br>$/(mm^3 \cdot Min^{-1})$ | $k$<br>$/(m \cdot s^{-1})$ | 平均值 $k$<br>$/(m \cdot s^{-1})$ |
|-------------|----|----------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 20–10       | 1  | I        | 3.54                           | $9.19 \times 10^{-9}$      |                                |
|             |    | II       | 4.21                           | $1.10 \times 10^{-8}$      |                                |
|             | 2  | I        | 3.25                           | $8.46 \times 10^{-9}$      | $9.22 \times 10^{-9}$          |
|             |    | II       | 3.76                           | $9.76 \times 10^{-9}$      |                                |
|             | 3  | I        | 3.01                           | $7.82 \times 10^{-9}$      |                                |
|             |    | II       | 3.52                           | $9.16 \times 10^{-9}$      |                                |
| 30–20       | 1  | I        | 5.41                           | $9.38 \times 10^{-9}$      |                                |
|             |    | II       | 4.37                           | $7.56 \times 10^{-8}$      |                                |
|             | 2  | I        | 5.79                           | $1.00 \times 10^{-8}$      | $8.85 \times 10^{-9}$          |
|             |    | II       | 4.24                           | $7.34 \times 10^{-9}$      |                                |
|             | 3  | I        | 5.95                           | $1.03 \times 10^{-8}$      |                                |
|             |    | II       | 4.88                           | $8.46 \times 10^{-9}$      |                                |
| 40–20       | 1  | I        | 6.78                           | $8.82 \times 10^{-9}$      |                                |
|             |    | II       | 5.20                           | $6.75 \times 10^{-9}$      |                                |
|             | 2  | I        | 6.53                           | $8.49 \times 10^{-9}$      | $7.84 \times 10^{-9}$          |
|             |    | II       | 5.18                           | $6.73 \times 10^{-9}$      |                                |
|             | 3  | I        | 6.98                           | $9.07 \times 10^{-9}$      |                                |
|             |    | II       | 5.53                           | $7.19 \times 10^{-9}$      |                                |

## 4 结论与建议

本文分析了维多利亚褐煤的基本岩土参数。分别开展了褐煤材料的常规室内试验、固结试验和渗透试验, 并对试验结果进行了分析。初步结论与建议如下:

(1) 褐煤基本岩土性质指标与常规软黏土不同, 主要包括: 其天然密度和相对密度较小、高含水率、孔隙比大, 并富含有机质且具有相对较低的渗透系

数。

(2) 褐煤试样固结变形曲线比较特殊, 初始阶段变形明显且很快完成, 初始阶段变形占比很大, 在数分钟内应变可达 50%, 在较明显的拐点之后, 后续变形相对较缓慢。标准 Terzaghi 固结并不能很好地适用于褐煤材料, 可考虑有机质和封闭气体的影响建立褐煤材料的固结方程, 能较好地描述其固结过程。

(3) 在低应力水平下, 设计开展了褐煤材料的常水头渗透试验, 采用 2 种试验方法测量了褐煤的渗透系数, 试验测得的褐煤材料渗透系数  $k$  约为  $10^{-9} \text{ m/s}$  数量级, 相对于常规软土等材料, 其值偏小。

## 参考文献:

- [1] LI C Z. Advances in the science of Victorian brown coal. Elsevier, 2004.
- [2] ROBERT S Y, DENNIS E C. Shrinking, swelling and true density of Morwell brown coal[J]. Fuel, 1990, **69**(5): 648 – 650.
- [3] COVEY G H, STANMORE B R. Rheological behavior of Victorian brown coal[J]. Fuel, 1980, **59**(2): 123 – 127.
- [4] LIU K, MACKAY R, XUE J F, et al. Experimental study of brown coal hydraulic behavior at low confining stress[C]// Unsaturated Soils: Research and Applications-Proceedings of the 6th International Conference on Unsaturated Soils, Sydney, 2014: 1125 – 1130.
- [5] COULING C, TOLOOYAN A, MACKAY R, et al. Measurement of pore water pressure properties of unsaturated brown coal using triaxial test[C]// Unsaturated Soils: Research and Applications-Proceedings of the 6th International Conference on Unsaturated Soils, Sydney, 2014: 1531 – 1535.
- [6] 刘侃, 杨敏. 泥炭土的概念模型和一维固结理论分析[J]. 水利学报, 2015, **46**(增刊 1): 225 – 230. (LIU Kan, YANG Min. A conceptual model and one-dimensional consolidation theory for peat[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(S1): 225 – 230. (in Chinese))
- [7] LIU K, XUE J F, YANG M. Deformation behaviour of geotechnical materials with gas bubbles and time dependent compressible organic matter. Engineering Geology, 2016, **213**: 98 – 106.

(责编: 孙振远)