

DOI: 10.11779/CJGE202204012

堆石料微侧壁摩擦力固结仪的研制与应用

王 龙¹, 朱俊高^{*1}, 袁俊平¹, 陆阳洋²

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 固结仪是研究堆石料长期变形特性最常用的仪器之一, 但其应用受到侧壁摩擦力的限制。针对此问题, 研制了一种加载稳定、可测量侧壁摩擦力的新型固结仪, 介绍了该仪器的结构和工作原理。采用由互不接触的尼龙片组成衬垫贴于固结仪内壁的方法减小侧壁摩擦力。对风干堆石料进行固结试验, 系统研究比较了衬垫层数为1~3层和厚度分别为0.3和0.5 mm时该方法的效果。试验结果表明, 3层0.5 mm衬垫的效果最优; 与无衬垫时相比, 该方法下试样侧壁摩擦力平均下降91%, 竖向应变是无衬垫时的1.2~1.8倍。将容器内壁覆盖3层0.5 mm衬垫作为减小侧壁摩擦力方法, 对风干堆石料分别进行了使用该方法和无衬垫条件下的流变试验。结果表明, 微侧壁摩擦力条件下试验结束时试样的竖向应变和次固结系数分别是无衬垫时的2.0和2.2倍。该仪器有效解决了侧壁摩擦力问题, 提高了长期变形试验结果的可靠性。

关键词: 堆石料; 微侧壁摩擦力; 固结仪; 衬垫; 流变试验

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)04-0696-06

作者简介: 王 龙(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事堆石料基本性质与本构关系研究。E-mail: longwang@hhu.edu.cn。

Development and application of an oedometer with negligible side-wall friction for rockfill materials

WANG Long¹, ZHU Jun-gao¹, YUAN Jun-ping¹, LU Yang-yang²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The oedometer is one of the most commonly used apparatuses to investigate the long-term deformation behaviors of rockfill materials. However, the side-wall friction restrains its application. To overcome this limitation, an oedometer that can provide long-term and stable loading and measure the side-wall friction is developed. The main features of the apparatus are presented. To minimize the side-wall friction, the linings that consist of spaced and greased Polyamide plates are used to cover the oedometer wall. The consolidation tests are carried out to evaluate the performance of the anti-friction linings with layers in the range of 1~3 and with layer thickness of 0.3 and 0.5 mm, respectively. The best test results are obtained by using 3 layers of 0.5 mm-thick linings. At the same vertical stress, the side-wall friction is 91% smaller on average while the vertical strain is 20%~80% larger with 3 layers of 0.5 mm-thick anti-friction linings than that without linings. Therefore, the proposed method is chosen to reduce the side-wall friction, and the creep tests are carried out on air-dried rockfill materials. The test results show that the vertical strain at the end of the tests and the coefficient of the secondary consolidation are about 1.0 and 1.2 times larger with 3 layers of 0.5 mm-thick linings than those without linings. The apparatus substantially reduces the side-wall friction and improves the accuracy of creep test results.

Key words: rockfill material; negligible side-wall friction; oedometer; lining; creep test

0 引 言

大量现场监测资料表明, 土石坝在蓄水后的几年甚至几十年内仍持续变形。土石坝的长期变形可能会引起面板的压裂或坝壳和心墙间的不协调变形, 威胁大坝安全。随着中国一系列300 m级超高土石坝的规划和建设, 土石坝长期变形问题已引起工程界和学术界的高度重视。

作为主要筑坝材料, 堆石料的长期变形与土石坝的长期变形息息相关。研究堆石料长期变形特性及揭示其机理需要开展试验研究。目前, 堆石料长期变形

基金项目: 长江水科学研究联合基金重点支持项目(U2040221); 国家自然科学基金委员会-雅砻江流域水电开发有限公司雅砻江联合项目(U1865104); 高等学校学科创新引智计划(111计划)(B13024)
收稿日期: 2021-05-07

*通信作者(E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn)

试验多使用大型三轴压缩仪和大型固结仪。三轴流变试验的优点在于可模拟现场土样的应力状态, 但几乎无法逾越的障碍是长时间试验后期由管路渗漏和温度变化引起的体积应变测量误差。而单向压缩流变试验只需测量试样的竖向变形, 具有受外界环境影响程度低、操作简单等优点, 理应受到科研人员的青睐。然而, 固结容器内壁和试样间的侧壁摩擦力大大降低了试验的准确性, 影响大型固结仪的广泛应用^[1]。

国内外已有一些学者研制了可减小侧壁摩擦力的固结仪。总结后可分为两种, 第一种为传统固结仪, 但其容器内壁经过特殊处理。处理方法有朱文君等^[2]、Molina 等^[3]采用的在内壁贴衬垫的方法; 标准规定^[4]及孙国亮^[5]、曹光翎^[6]采用的涂抹油脂的方法。第二种为叠环式固结仪。相较于第一种类型固结仪, 后者应用较少。就笔者所知, 国内仅有长江科学院^[7]和中国水利水电科学研究院^[8]使用叠环式固结仪进行了堆石料的流变试验。值得注意的是, 上述两种类型仪器均无法测量侧壁摩擦力, 因此各仪器可减小侧壁摩擦力至何种程度, 不得而知。

Marsal^[9]研制了使用千斤顶加载的固结仪, 采用容器内壁贴三层聚苯乙烯衬垫的方法减小侧壁摩擦力, 此仪器可将摩擦系数降至 0.1 左右。但是此研究未进行不同层数、不同厚度衬垫下的试验, 因此是否存在更优方法不得而知。Oldecop 等^[10]研制了使用气压加载并可以测量侧壁摩擦力的固结仪, 采用在容器内壁贴 2 层 0.1 mm 厚聚乙烯板的方法减小侧壁摩擦力。但笔者的经验表明, 高应力下堆石料尖锐的棱角可以轻易将此厚度的衬垫刺穿。此外, 上述两种仪器分别采用千斤顶和气压进行加载。对于试验周期动辄几天甚至几周的长期试验来说, 这些仪器是否可以提供稳定的加载值得商榷。

综上所述, 研制适用于堆石料长期变形试验的微侧壁摩擦力固结仪不仅可以丰富堆石料室内测试仪器, 而且对研究堆石料的长期变形特性十分重要。本文研制了一种满足上述要求的固结仪, 并在堆石料流变试验中进行初步应用。试验结果表明该仪器有效解决了堆石料试验的侧壁摩擦力问题, 提高了长期变形试验结果的可信性。

1 大型固结仪的研制

1.1 研制目标

研制仪器的目的是研究超高土石坝筑坝堆石料的长期变形特性。为达到此目标, 仪器应满足以下要求:

(1) 对于 300 m 级超高土石坝而言, 坝体堆石料上覆压力可达数兆帕。比如, 双江口土石坝坝体的

最大压力高达 6 MPa 以上^[11], 因此仪器应能进行压力 6 MPa 的长期变形试验。

(2) 堆石料长期变形试验周期可达几天或数周, 这要求仪器能维持长期稳定的加载。

(3) 根据现有认识, 水饱和以及干湿循环^[12-13]等环境因素引起的变形可能是堆石料长期变形的重要来源。为探究这些因素的影响, 仪器应能实现试样的饱和以及排干。

(4) 仪器的一个重要特征是微侧壁摩擦力, 为此需要研究减小侧壁摩擦力的方法并进行定量评价。这要求仪器能测量侧壁摩擦力。

1.2 仪器结构

为满足上述要求, 在借鉴常规固结仪结构特点后研制了一种新型大型固结仪, 其示意图如图 1 所示。

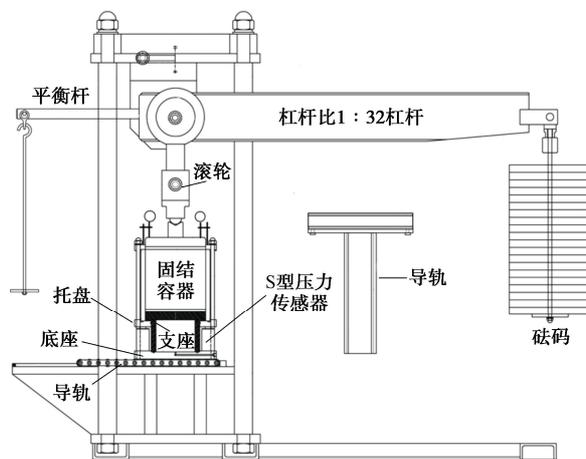


图 1 大型固结仪示意图

Fig. 1 Schematic view of large-scale oedometer

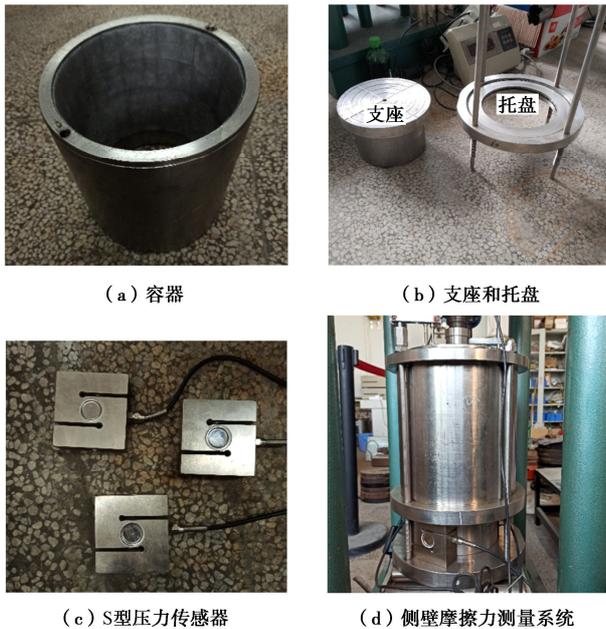
固结仪主要由加载系统、固结容器、侧壁摩擦力测量系统、竖向力调节系统和干湿循环系统组成。加载系统由加载框架、杠杆、平衡杆和加载横梁等部分组成。加载方式为机械式加载, 可保证加载的长期稳定性。设计杠杆比为 1:32, 施加的最大竖向荷载为 20 t。容器为图 2 (a) 所示钢桶, 壁厚 1.5 cm, 可容纳高度 $h=20$ cm, 直径 $\phi=20$ cm 的试样, 最大竖向荷载对应的压力约为 6.2 MPa。

侧壁摩擦力的测量通过传统固结仪的基础上增加支座、托盘和荷重传感器实现。如图 2 (b) 所示, 支座穿过中空托盘坐于底座上。试验时托盘下放置 4 个如图 2 (c) 所示荷重传感器将托盘托起, 容器放置于托盘上, 如图 2 (d) 所示。试验过程中容器和托盘等的自重以及侧壁摩擦力与荷重传感器提供的反力在竖直方向达到平衡, 因此侧壁摩擦力可通过荷重传感器所测荷重减去容器和托盘等的自重后求得。

竖向力调节系统由布置在水平和垂直方向的 4 个滚轮和 2 个导轨组成, 如图 3 所示。导轨的凹槽宽度

略大于滚轮直径, 2个导轨分别穿过对应的2个滚轮后通过内六角螺丝连接。该系统限制了加载横梁水平的活动, 进而保证竖向荷载始终垂直于试样。

为保证容器的密封, 底座处与支座接触部位、托盘处与支座接触部位以及托盘处与容器接触部位设置凹槽, 凹槽内放置O型圈。试样饱和时, 通过放在加载框架顶部的水箱向试样供水。水由底座上的进水孔进入支座, 然后由支座的透水孔进入试样; 排干时试样中自由水则在重力作用下从底座的排水孔排出。



(a) 容器

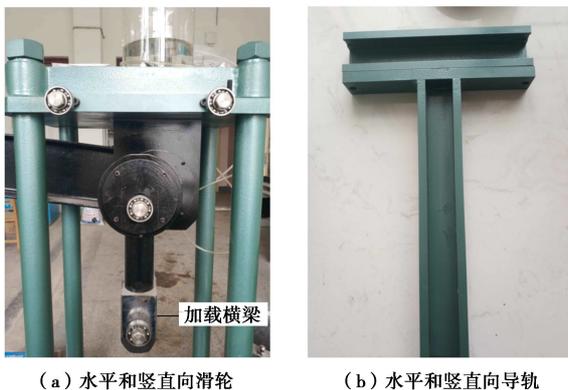
(b) 支座和托盘

(c) S型压力传感器

(d) 侧壁摩擦力测量系统

图2 容器和侧壁摩擦力测量系统实物图

Fig. 2 Photos of container and measuring system for side-wall friction



(a) 水平和竖直向滑轮

(b) 水平和竖直向导轨

图3 竖向力调节系统实物图

Fig. 3 Photos of regulating system for vertical load

2 减小侧壁摩擦力方法试验研究

2.1 方法的提出

如引言所述, 容器内壁贴衬垫的方法具有简单实

用且成本低的优点, 被很多学者采用。本文同样采用此方法减小侧壁摩擦力。

笔者曾使用研制的固结仪进行了堆石料的单向压缩试验, 容器内壁处理方法为贴两层尺寸为 $63\text{ cm} \times 20\text{ cm}$, 厚 0.2 mm 的聚四氟乙烯薄膜覆盖容器内壁, 薄膜与内壁、薄膜之间靠涂抹凡士林固定, 试验最大压力 6.2 MPa 。拆样时发现, 堆石料尖锐的棱角将薄膜多处刺穿。此外还发现, 聚四氟乙烯薄膜上出现大量褶皱, 可能是由褶皱处上下部颗粒相对运动挤压形成。褶皱可能会填充于颗粒间的孔隙, 进而阻碍试样的变形。此试验为改善衬垫效果提供了以下两点思路: ①衬垫不宜太薄; ②衬垫面积应尽量小以减小与其相接触的颗粒数量, 进而减小褶皱数量。

总结上述经验后决定采用将塑料薄膜裁剪成块状后贴于容器内壁的方法来减小侧壁摩擦力。衬垫应选用轻质材料, 防止其脱落; 此外还应具有一定的抗穿刺性。综合考虑上述因素, 最终选用尼龙 (Polyamide, 简称 PA) 66 板材作为衬垫材料。PA66 板材的相对密度为 1.14 g/cm^3 , 抗拉强度为 74 MPa , 具有高耐热不变性。

选定衬垫材料后, 将容器内壁分别按下列方法处理:

- (1) 常规试验方法, 即不做处理。
- (2) 仅均匀涂抹 1 层白凡士林。

(3) 将裁剪后尺寸为 $5\text{ cm} \times 4.6\text{ cm}$ (下文中均使用该尺寸, 将不再进行说明), 厚度 0.3 mm 的 PA66 板贴满内壁作为衬垫, 衬垫层数为 1 层。为了使板与板在试验中不重叠, 各板之间留有适当的间距, 如图 4 (a) 所示。

(4) 贴 2 层 0.3 mm 厚衬垫, 第 1 层处理方法与方法 (3) 相同。第 2 层衬垫覆盖第 1 层衬垫的间隙, 衬垫间涂有白凡士林, 如图 4 (b) 所示。

(5) 贴 3 层 0.3 mm 厚衬垫, 前 2 层处理方法与方法 (4) 相同。第 3 层衬垫覆盖第 2 层衬垫的间隙, 衬垫间涂有白凡士林, 如图 4 (b) 所示。

(6) 将方法 (5) 中的衬垫厚度增至 0.5 mm , 其他条件不变。

上述试验中, 方法 (1) 的目的是作为对比标准, 方法 (2) 的目的是评价标准^[4]规定以及目前常用的方法是否有效; 方法 (3) ~ (5) 的目的是确定最优垫层数; 试验 (6) 的目的为确定最优衬垫厚度。

2.2 试验材料和试验方法

为评价上述方法的效果, 使用按上述 6 种方法处理后的固结仪分别进行两河口板岩堆石料的固结试验。试样 h 和 $\phi=20\text{ cm}$, 试验土料的最大粒径为 4 cm , 级配如图 5 所示。试样采用风干土料制备, 制样干密

度为 2.06 g/cm³。

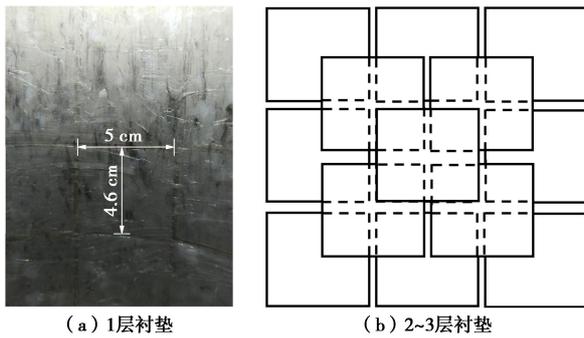


图 4 衬垫排列方式

Fig. 4 Arrangement of anti-friction linings

装样后, 对试样施加 5 kPa 预压力, 使试样和仪器之间接触良好, 随后分级施加压力, 压力等级为 100, 200, 404, 812, 1628, 3212 和 6182 kPa。加压后用秒表计时, 每级压力下稳定 10 min。试样的竖向变形通过 2 支对称布置的数显百分表连接电脑自动采集, 数显百分表精度为 0.01 mm; 施加下一级压力前记录侧壁摩擦力数值。

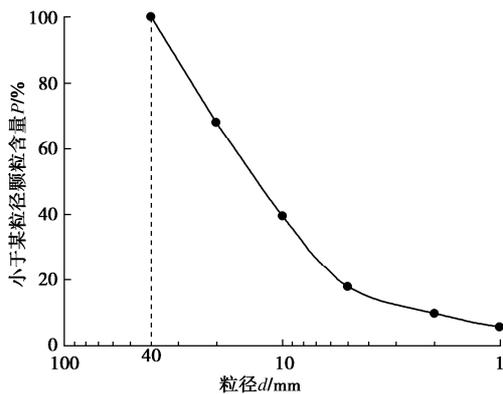


图 5 试验土料级配曲线

Fig. 5 Grain-size distribution curve of test soil

2.3 试验结果及分析

图 6 给出了方法 (1) 下侧壁摩擦力随竖向力 (竖向力并未根据侧壁摩擦力进行修正) 的变化曲线, 如虚线所示。可以看出, 侧壁摩擦力和竖向力关系近似为一条直线。随着竖向力的变化, 侧壁摩擦力与竖向力的比值在 30%~46% 之间变化, 平均值为 42%。这表明侧壁摩擦力不可忽视, 有必要研究减小侧壁摩擦力的方法。

根据试验结果, 整理出各方法下归一化侧壁摩擦力与竖向力的关系曲线, 同样绘于图 6 中。对于给定条件和竖向力, 归一化侧壁摩擦力等于此条件下侧壁摩擦力与方法 (1) 下侧壁摩擦力之比。由图可见, 方法 (2) 下的归一化摩擦力基本维持在 1 附近, 这意味着对于本文所用土料, 标准^[4]规定方法的效果极其有限。此方法对于其他堆石料是否有效, 有待进一步研

究。

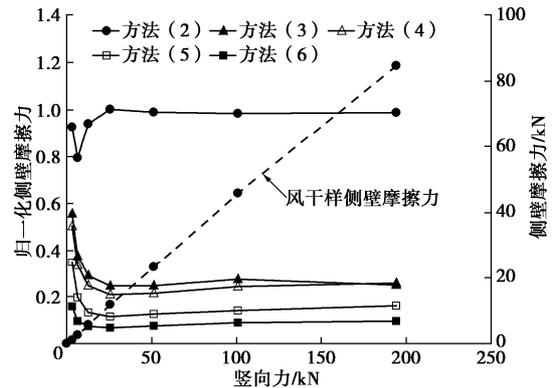


图 6 不同条件下归一化侧壁摩擦力随竖向力变化曲线

Fig. 6 Variation of normalized friction force with vertical load under different conditions

对比图 6 各方法下试验结果可以发现, 即使只有 1 层 0.3 mm 厚衬垫, 侧壁摩擦力也会大幅度下降, 各竖向力下归一化侧壁摩擦力的平均值只有 32% 左右。当衬垫层数增加到 2 层时, 归一化侧壁摩擦力的降幅并不明显。而当衬垫数增加到 3 层时, 归一化侧壁摩擦力再次大幅度下降, 且 3 层 0.5 mm 衬垫下的降幅更明显。不同压力下, 方法 (5) 下侧壁摩擦力相较于方法 (1) 下降 65%~80%, 平均值为 83%; 使用方法 (6) 时, 下降幅度增加至 84%~93%, 平均值为 91%。

侧壁摩擦力的变化势必会引起变形的差异。图 7 整理给出了不同方法下试样的竖向应变 ϵ_z 和压力 σ_z 的关系曲线。值得注意的是, 本文所有图表中 σ_z 都没有根据侧壁摩擦力进行修正。与图 6 的结论相对应, 相同 σ_z 时侧壁摩擦力小的试样的 ϵ_z 更大。对于使用方法 (6) 的试样而言, 这种趋势最明显。相同压力下, 使用方法 (6) 时试样的 ϵ_z 是方法 (1) 下试样的 1.2~1.8 倍。

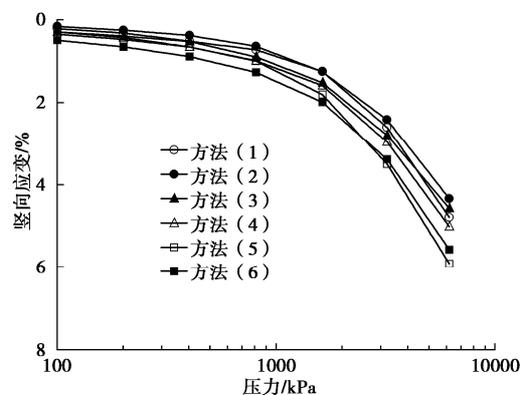


图 7 竖向应变和压力关系曲线

Fig. 7 Variation of vertical strain with vertical stress for all specimens

图 8 为使用方法 (1) 时试样的 $\epsilon_z - \lg t$ 曲线, 其

他试样的 $\epsilon_z - \lg t$ 曲线规律均与之相似,限于篇幅不再列出。由图 8 可见,堆石料的主固结一般发生在 10 min 内,这表明,本文选择 10 min 的稳定时间对于固结试验是合理的。另一方面,图 8 表明试样明显存在次固结变形。尽管次固结持续时间较短,但仍为研究各处理方法对次固结系数的影响提供了可能。将不同方法下试样分级加载得到的次固结系数 $C_{\alpha\epsilon} = \Delta\epsilon_z / \Delta\lg t$ 整理后点绘于图 9,可见方法(6)下 $C_{\alpha\epsilon}$ 的数值最大。相同压力下,方法(6)下试样的 $C_{\alpha\epsilon}$ 为方法(1)下试样的 2.0~6.1 倍,平均为 3.3 倍。

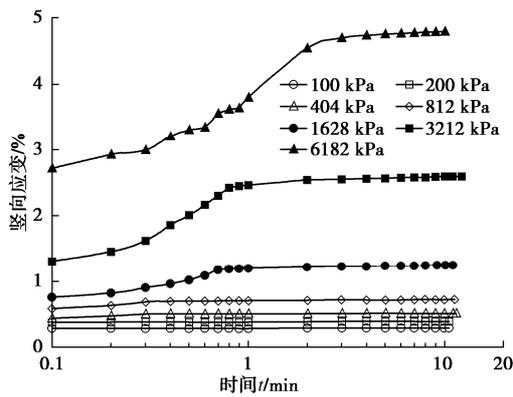


图 8 无减阻措施试样的竖向应变和时间关系曲线

Fig. 8 Variation of vertical strain with time for specimens without anti-friction treatment

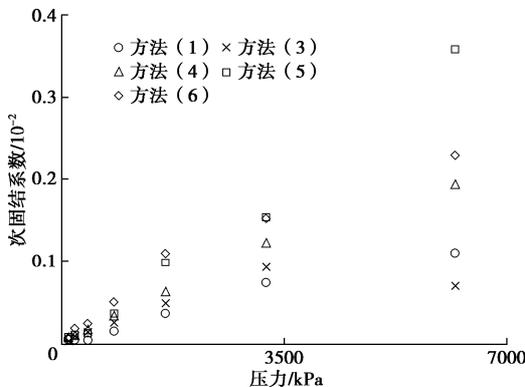


图 9 次固结系数与压力关系曲线

Fig. 9 Variation of coefficient of secondary consolidation with vertical stress for all specimens

上述分析表明,方法(6)的效果最明显,因此本文最终选择其作为减小侧壁摩擦力的方法。值得注意的是,本文没有再进行衬垫层数更多或衬垫厚度更厚条件下的试验。一方面是由于在试验中发现随着厚度的增大,板材越难弯曲,更容易从内壁脱落。另一方面,方法(6)可以降低 91% 的侧壁摩擦力,笔者认为已没有必要再花费精力验证更多衬垫数下的效果。

3 应用实例

为验证微侧壁摩擦力固结仪的适用性,对第 2 节

所述土料分别使用方法(1)和(6)进行了分别加载流变试验,试验压力为 3212 kPa。试验前用千斤顶将杠杆撑起,施加相应数量的砝码后拧开千斤顶阀门快速施加压力。根据流变试验结果绘制的 $\epsilon_z - \lg t$ 曲线如图 10 所示。

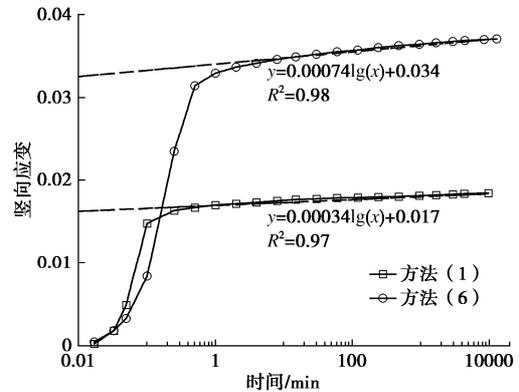


图 10 流变试验结果

Fig. 10 Creep test results

对比图 10 中两条曲线可见,相同时间时方法(1)下试样的竖向应变明显小于方法(6)下试样。试验结束时方法(6)下试样的竖向应变为 3.71%,是方法(1)下试样的竖向应变 1.85% 的 2 倍。另一方面,对 $\epsilon_z - \lg t$ 曲线直线段采用对数函数拟合,如虚线所示,拟合公式列于曲线旁。由图可见方法(6)下试样的 $C_{\alpha\epsilon}$ 值是方法(1)下试样的 2.2 倍。

上述分析表明所研制的仪器有效解决了侧壁摩擦力问题。试验结果还表明,侧壁摩擦力过大可能是导致室内长期变形试验试样很快进入稳定阶段的重要因素。

4 结 论

(1) 研制了一种适用于堆石料长期变形试验的固结仪。仪器相较于目前常用的固结仪,具有加载稳定、可以测量侧壁摩擦力以及保证竖向力始终垂直于试样的特点。

(2) 对于本文所用土料,容器内壁涂抹凡士林这一减小侧壁摩擦力方法的效果极其有限。

(3) 使用由互不接触尼龙板组成的衬垫来减小侧壁摩擦力的方法是可行的。当衬垫层数在 1~3 层,厚度在 0.3~0.5 mm 范围内变化时,3 层 0.5 mm 衬垫的效果最明显。与常规试验方法相比,此方法下侧壁摩擦力平均降幅达 91%,试样的竖向应变是其 1.2~1.8 倍。

(4) 进行了堆石料常规试验方法和 3 层 0.5 mm 衬垫条件下的流变试验,结果表明侧壁摩擦力对试验结果影响极大。微侧壁摩擦力条件下试验结束时试样

的竖向应变和次固结系数是常规试验方法下试样的2.0倍和2.2倍。

参考文献:

- [1] 郭万里, 朱俊高, 王俊杰, 等. 粗粒土静力特性及室内测试技术研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(增刊2): 3570 - 3585. (GUO Wan-li, ZHU Jun-gao, WANG Jun-jie, et al. Research progress on static properties and laboratory testing technology of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(S2): 3570 - 3585. (in Chinese))
- [2] 朱文君, 张宗亮, 袁友仁, 等. 粗粒料单向压缩湿化变形试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2009(3): 99 - 102. (ZHU Wen-jun, ZHANG Zong-liang, YUAN You-ren, et al. Study on wetting deformation behavior of coarse-grained materials under axial compression condition[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(3): 99 - 102. (in Chinese))
- [3] MOLINA S L, BRADFIELD L, FITYUS S G, et al. Design of a 720 mm square direct shear box and investigation of the impact of boundary conditions on large-scale measured strength[J]. Geotechnical Testing Journal, 2020, **43**(6): 20190344.
- [4] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [5] 孙国亮. 堆石料风化过程中的抗剪强度和变形特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2009. (SUN Guo-liang. Studies on Shear Strength and Deformation Characteristics of Rockfill During Weathering[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese))
- [6] 曹光栩. 山区机场高填方工后沉降变形研究[D]. 北京: 清华大学, 2012. (CAO Guang-xu. Study on Post-Construction Settlement of High Fill Foundation in Mountainous Airport[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese))
- [7] 石修松, 左永振, 张 婷, 等. 堆石体 K_0 状态单向压缩流变实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, **35**(9): 1451 - 1455. (SHI Xiu-song, ZUO Yong-zhen, ZHANG Ting, et al. Experimental study of unidirectional compression creep in K_0 state for rockfill material[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(9): 1451 - 1455. (in Chinese))
- [8] 汪小刚. 高土石坝几个问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(2): 203 - 222. (WANG Xiao-gang. Discussion on some problems observed in high earth-rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(2): 203 - 222. (in Chinese))
- [9] MARSAL R J. Mechanical Properties of Rockfill[M]// Embankment Dam Engineering, New York: John Wiley & Sons, 1973.
- [10] OLDECOP L A, ALONSO E E. Measurement of lateral stress and friction in rockfill oedometer tests enabling the analysis of the experimental results in the p - q space[J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, **40**(5): 822 - 832.
- [11] 刘 君, 刘福海, 孔宪京. 考虑破碎的堆石料颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增刊1): 107 - 112. (LIU Jun, LIU Fu-hai, KONG Xian-jing. Particle flow code numerical simulation of particle breakage of rockfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(S1): 107 - 112. (in Chinese))
- [12] 王海俊, 殷宗泽. 堆石料长期变形的室内试验研究[J]. 水利学报, 2007, **38**(8): 914 - 919. (WANG Hai-jun, YIN Zong-ze. Experimental study on deformation of rockfill material due to long term cyclic wetting-drying[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, **38**(8): 914 - 919. (in Chinese))
- [13] 张丙印, 孙国亮, 张宗亮. 堆石料的劣化变形和本构模型[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 98 - 103. (ZHANG Bing-yin, SUN Guo-liang, ZHANG Zong-liang. Degrading deformation of rockfill materials and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 98 - 103. (in Chinese))