

DOI: 10.11779/CJGE2023S10031

# 冰碛土现场大尺寸蠕变试验研究

郭喜峰, 王中豪

(长江科学院重庆分院, 重庆 400026)

**摘 要:** 雅康高速公路兴康特大桥康定岸为巨厚层冰碛土, 为研究冰碛土蠕变特性, 采用自主研发的电气液伺服联控野外岩土力学试验装置开展现场米级大尺寸蠕变试验, 实现了全过程的荷载伺服与数据自动采集。通过在现场开展常规直剪试验和直剪蠕变试验, 获得了冰碛土的峰值强度参数和长期强度参数。根据现场压缩蠕变试验结果, 分析了每级荷载下沉降变形的蠕变变形规律并获得了冰碛土压缩蠕变模型。研究表明: 冰碛土瞬态蠕变持续时间不超过 5 min, 且具有加载后延迟变形的现象; 减速蠕变阶段蠕变速率呈波动性下降; 稳态蠕变阶段往往表现波动增长和收敛特征, 反映了土体骨架颗粒的变形调整作用。

**关键词:** 冰碛土; 蠕变试验; 长期强度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0144-04

**作者简介:** 郭喜峰(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩石力学特性及工程应用方面的研究工作。E-mail: xifeng1984@126.com。

## Large-scale field creep tests on moraine soil

GUO Xifeng, WANG Zhonghao

(Chongqing Branch, Changjiang River Scientific Research Institute, Chongqing 400026, China)

**Abstract:** The sediment of the Kangding Bank of Xingkang Bridge of Sichuan-Tibet Expressway is mostly consisted of very thick moraine soil. In order to study the creep characteristics of the moraine soil, the large-scale field creep tests in meters are carried out using the self-developed electric-gas-liquid servo joint control geotechnical mechanics test devices, and the load servo control and the data automatically collected in the whole process are successfully achieved. The peak strength parameters and long-term strength parameters of the moraine soil are obtained by conducting the conventional direct shear tests and shear creep tests in the field. The creep deformation laws and the revelant creep model for settlement deformation under each load are obtained by analyzing the results of the field compression creep test. The study shows that the duration of transient creep is less than 5 min. In addition, the transient creep is characterized by the delayed deformation after loading, and the creep rate fluctuantly decreases in the decelerating creep stage. In addition, the creep rate exhibits a raising curve with fluctuation in the steady creep stage, which indicates the deformation-adjusting effects of soil skeleton particles.

**Key words:** moraine soil; creep test; long-term strength

## 0 引 言

冰碛土是形成于第四纪的一种特殊土或半成岩, 呈胶结状态, 是漂石、碎石、砂砾、粉土和黏土在冰川行进融化过程中未经分选而快速混杂堆积而成, 一般层次多变、分布不均、天然密度大、含水率低<sup>[1]</sup>。多呈架空结构、各方向层位差异性大、存在工程性状较差的软弱夹层等原因, 导致勘察、测试、施工难度大和不均匀沉降等工程问题<sup>[2]</sup>。

冰碛土在中国主要分布在青藏高原周边等高海拔地区。随着西部大开发建设的不断深入, 由冰碛土引发的山区工程问题也日益增多, 如康定机场冰碛土富含有机质遇水软化的问题; 瀑布沟土石坝用冰碛土作

心墙产生的渗透对钢结构的弱腐蚀以及胶结程度不一造成结构强度差异大的等问题<sup>[3-4]</sup>。国内外学者对第四纪冰川堆积物的工程地质和灾害地质研究越来越多, 大部分探讨研究了冰碛体特殊性原因<sup>[5-6]</sup>。20 世纪 60 年代, 国外就开始研究冰碛体。Insley 等<sup>[6]</sup>研究了冰碛体的物理力学性质对工程的影响, Springman 等<sup>[7]</sup>采用模拟试验研究孔压诱发冰碛体斜坡失稳机制, Hughes 等<sup>[8]</sup>研究了英国北部山区冰碛体边坡稳定问题。近年来, 也有部分学者对冰碛体力学特性开展了一些试验研究<sup>[9]</sup>, 但大多采用室内重塑土样研究其瞬时力学特

收稿日期: 2023-07-06

性<sup>[10]</sup>, 而针对原状冰碛土体开展大尺寸现场试验研究蠕变力学特性几乎未见已有成果。

本文结合兴康特大桥康定岸重力锚碇, 重点研究冰碛土层的蠕变特性, 分析冰碛土在长期荷载作用下强度参数和变形规律。

1 试验条件

1.1 赋存地质环境

雅康高速公路兴康特大桥位于四川泸定, 主跨 1100 m, 单根缆索拉力达  $2.67 \times 10^5$  kN。康定岸重力锚基底面积 4980 m<sup>2</sup>, 属国内首次设置在深厚冰碛层内的大体积混凝土 (91000 m<sup>3</sup>)。锚碇所在山包上部为厚度较大的冰碛层, 大量块、碎石土夹少量黏土和角砾, 块石主要为闪长岩, 部分花岗岩, 强—中风化, 棱状, 周边多包裹泥膜。冰碛体前缘为完整坚硬花岗岩闪长岩, 冰碛体整体稳定, 横向宽度约 1800 m, 纵向长度约 1150 m, 最大厚度 181.7 m。土体具有较好的密实度, 局部半成岩, 冰碛体中两条自然沟谷, 沟壁通常高约 50~110 m, 横坡坡度约 40°~80°, 未见明显新鲜垮塌迹象, 表明土体力学性质较好。

1.2 土体颗粒组成

为研究冰碛土体颗粒组成, 在试验洞和钻孔中取样进行了筛分试验。结果表明, 土体以粗粒组 (0.075~20 mm) 和巨粒组 (>20 mm) 为主, 细粒组 (<0.075 mm) 含量极少。根据地表及基坑开挖调查、地质钻探及筛分试验综合分析, 冰碛土体中, 粒径大于 1000 mm 颗粒含量约占 5%, 粒径大于 200 mm 颗粒含量约占 30~40%, 粒径大于 20 mm 的含量约占 70~80%, 粒径小于 0.075 mm 的颗粒含量小于 3%。

对土体结构的分析表明, 土体颗粒大小混杂, 堆积无序, 无成层性, 有较大的不均匀性。而块、碎石土也相间混杂分布, 无明显的成层性, 并且部分碎石土或角砾土也因块石风化破碎形成。土体颗粒呈悬浮状、局部点接触, 颗粒间充填混杂、堆积无序, 土体结构紧密, 无明显孔隙。不同位置土体力学性质较为接近, 可作为各向同性介质研究。

1.3 蠕变试验设备

对于土石混合体等复杂岩土体, 室内重塑土试验不能较好反映土体力学特性, 原位试验是获取可靠岩土力学参数的重要手段, 已有电液式伺服设备笨重且成本高, 无法进行全程自动补偿压力和自动化数据采集, 压力波动范围大, 本次试验采用本单位自主研发的电气液联控大型野外岩土力学试验装置, 采用气压和气控元件实现对高液压的伺服控制, 压力波动控制在 ±30 kPa 以内, 试样尺寸达到 1 m, 有效降低土石混

合体骨架效应影响, 采用微机系统实现自动化连续试验数据采集。

采用光栅传感器测量位移, 数据采集系统实时显示及存储。加载过程中 0.02 min 记录 1 次, 此后 1 d 内间隔 0.1 min 记录 1 次, 2 d 以后间隔 0.2 min 记录 1 次。

2 直剪蠕变试验

首先按照《水力发电工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006》进行 1 组现场常规直剪试验。获得冰碛土抗剪断强度为  $f=0.765$ ,  $c=64.2$  kPa, 内摩擦角  $\varphi=37^\circ$ 。

2.1 直剪蠕变试验方法

在选定的部位, 在试验平洞底板上清除松动层, 手工切槽形成长×宽×高约为 90 cm×90 cm×45 cm 的冰碛土层试样, 用 100 cm×100 cm×50 cm 的钢模套在试体上, 周边空隙用砂浆充填。每个试点的正应力连续施加后, 待法向位移在每 24 h 内绝对位移不大于 ±3 μm 后开始施加剪应力, 根据常规剪切试验结果预估破坏最大荷载, 使其不少于 4 级至破坏。试验采用等时法, 每级剪应力施加后保持恒定, 蠕变 5 d, 再施加下一级荷载。法向载荷和剪切载荷采用新型气液蠕变试验系统施加, 可自动补压以保持试验载荷稳定, 实际试验载荷波动小于 1.5%。

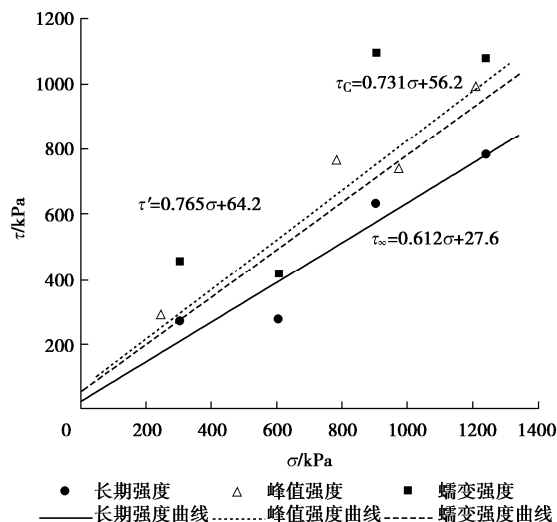
2.2 长期抗剪强度

依据《水利水电工程岩石试验规程: SL264—020》7.3 和 8.4 要求, 对各级剪切荷载下的剪切流变曲线, 取不同时刻 (如  $t=0, 0.2, 0.5, 1, 10, 50, 100, 120$  h 等) 的剪应力及剪切位移值, 绘制剪切位移  $u$ -剪应力  $\tau$  等时簇曲线。连接不同历时  $u$ - $\tau$  关系曲线的屈服点, 得到屈服强度曲线, 该曲线随历时增加而趋向平缓, 其水平渐近线与  $\tau$  轴的交点即为长期强度  $\tau_\infty$ 。直剪蠕变试验和常规直剪试验剪应力  $\tau$  与正应力  $\sigma$  关系曲线见图 1, 常规直剪试验峰值抗剪强度参数、蠕变抗剪强度参数及长期抗剪强度参数见表 1。

表 1 抗剪试验强度参数

Table 1 Strength parameters of shear creep					
常规直剪试验		直剪蠕变试验			
峰值强度参数		蠕变强度参数		长期强度参数	
$f'$	$c'/\text{kPa}$	$f_c$	$c_c/\text{kPa}$	$f_\infty$	$c_\infty/\text{kPa}$
0.765	64.2	0.731	56.2	0.612	27.6

直剪蠕变试验 L4 试样破坏瞬间, 有明显感觉沿岩石剪断, 破坏后地质描述表明, 该点破坏面含有大块石, 且起伏差较同组其它 3 点要大, 该点蠕变试验剪应力峰值不具有代表性, 故蠕变强度参数只将 L1、L2、L3 参与回归分析, 得到  $f_c=0.731$ ,  $c_c=56.2$  kPa。

图1 直剪试验  $\sigma$ - $\tau$  关系曲线Fig. 1  $\sigma$ - $\tau$  curves of shear tests

### 3 压缩蠕变

现场试验选择在平洞中进行, 参照《水利水电工程岩石试验规程: SL264—2020》6.1 和 8.3 相关规定。试验采用直径 80 cm 刚性承压板法, 加载方向为铅直向, 选定试样位置时避开大块石, 以保证承压板直径与最大粒径比不小于 5。制样时在试验洞底板上清除松动层, 直径 1 m 范围内起伏差小于 1 cm。试验最大荷载按照重力锚基底应力的 1.2 倍选取, 即为 900 kPa。共进行 1 点压缩蠕变试验。共进行 445, 900 kPa 两级荷载下的蠕变试验, 试验时间分别为 298.3, 454.7 h。试验时一次加载至试验荷载, 然后进行蠕变观测。稳定标准为: ①每 24 h 内压缩量不大于  $\pm 3 \mu\text{m}$ ; ②每级荷载维持不少于 5 d。终止蠕变观测后, 慢速卸载。

试验取得压缩变形与蠕变时间关系曲线见图 2, 蠕变速率随时间变化曲线见图 3。冰碛土的压缩蠕变可划分为瞬态蠕变阶段、减速蠕变阶段、稳态蠕变阶段 3 个阶段。

(1) 瞬态蠕变阶段: 图 2 可见冰碛土加载后短时间内压缩变形量快速增加, 试验数据统计表明瞬态蠕变变形时间不超过 5 min。图 3 给出了加载后 0.5 h 时间段内, 压缩蠕变速率随时间变化的曲线, 加载后压缩沉降变形从 0 开始快速增加, 2~3 min 内压缩蠕变速率迅速达到峰值 20~50 mm/h。图 3 中蠕变速率曲线出现小幅度波动, 主要原因是加载后冰碛土体孔隙间颗粒结构调整, 蠕变变形短暂滞后, 并非全部立即发生变形。相对整个蠕变试验的时间, 该阶段历时很短, 可认为本阶段是瞬间完成, 即瞬态蠕变阶段是荷载施加后立即发生变形, 蠕变速率短时间内迅速达到峰值。

(2) 减速蠕变阶段: 由图 3 蠕变速率曲线可见明显的瞬态蠕变和减速蠕变两阶段的分界点, 蠕变速率到达峰值前为瞬态蠕变阶段, 之后蠕变速率呈波动降低。应力水平较低时 (445 kPa), 减速蠕变历时 0.15 h, 应力水平较高时 (900 kPa), 减速蠕变历时 0.3 h, 随着应力水平的提高, 减速蠕变的时间呈增长的趋势。

(3) 稳态蠕变阶段: 减速蠕变阶段后, 蠕变速率趋于零, 进入稳态蠕变阶段, 压缩蠕变变形有保持不变 (蠕变速率为 0) 和缓慢增长 (蠕变速率为定值) 两种情况。

a) 变形跳跃增长: 由图 2 可见稳态蠕变阶段曲线并非平滑曲线, 部分曲线呈阶梯状增长和跳跃的特征。一方面是由于冰碛土为粗粒土, 土体骨架在压缩变形过程中发挥作用, 土体颗粒变形调整, 结构重组, 骨架不断填充孔隙导致压缩变形跳跃增长。另一方面, 野外试验加载稳压时, 现场恶劣环境导致瞬间掉压而后自动补压, 这一过程也会导致波动变形的发生。

b) 蠕变速率逐步减小: 试验表明稳态蠕变阶段变形量占总变形量的比例小于 50%。由图 2 可见稳态蠕变阶段曲线并非完全水平直线, 而是斜率逐渐减小, 曲线逐步趋缓, 最终呈近似水平的直线, 即收敛型蠕变。

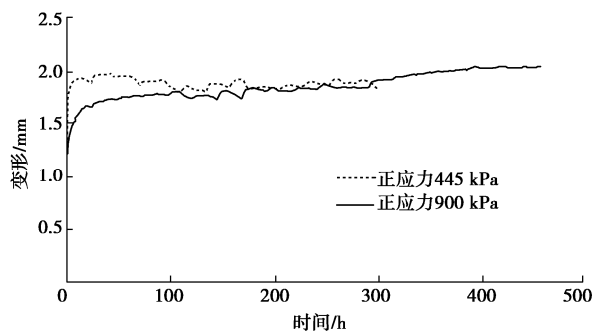


图2 变形与时间关系曲线

Fig. 2 Relationship between compression deformation and time

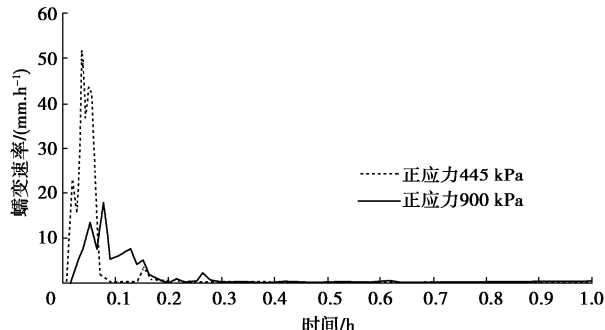


图3 蠕变速率与时间关系曲线

Fig. 3 Relationship between creep rate and time

瞬态蠕变和减速蠕变的过程很短, 由图 3 可以看出, 在 0.3 h 后蠕变速率接近于 0。结合分析试验数据表明, 在 445 kPa 应力下, 在 3.8 h 后进入稳态蠕变阶

段: 在 900 kPa 正应力下, 约 14 h 后进入稳态蠕变阶段。在 445 kPa 应力下, 稳态蠕变阶段曲线近似水平直线, 变形趋于稳定; 在 900 kPa 正应力下, 稳态蠕变阶段变形缓慢增长。

## 4 结 论

针对雅康高速公路泸定大渡河桥巨厚层冰碛土体, 通过开展现场力学试验, 得到以下 2 点结论。

(1) 通过在现场开展 1 m×1 m 大尺寸常规直剪试验和直剪蠕变试验, 获得了冰碛层的峰值强度参数  $f'=0.765$ ,  $c'=64.2$  kPa; 长期强度参数  $f_{\infty}=0.612$ ,  $c_{\infty}=27.6$  kPa。

(2) 压缩蠕变试验表明, 土体在 445 kPa 正应力下, 3.8 h 后进入稳态蠕变阶段, 稳态蠕变阶段曲线近似水平直线, 变形趋于稳定; 在 900 kPa 正应力下, 约 14 h 后进入稳态蠕变阶段, 稳态蠕变阶段变形缓慢增长。

## 参考文献:

- [1] 袁广祥, 尚彦军, 林达明. 帕隆藏布流域堆积体边坡的工程地质特征及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 188-194. (YUAN Guangxiang, SHANG Yanjun, LIN Daming. Engineering geological properties and stability analysis of moraine debris slopes in palong river drainage area along sichuan-tibet highway[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 188-194. (in Chinese))
- [2] 方学东, 黄润秋. 青藏高原典型冰碛土的物理力学特性研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 123-128. (FANG Xuedong, HUANG Runqiu. Physical and mechanical properties of typical moraine soil on the qinghai-tibet plateau[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 123-128. (in Chinese))
- [3] 吕士展, 汪 稔, 胡明鉴, 等. 冰碛土工程特性研究的现状, 问题及展望[J]. 工程地质学报, 2011, 19(增刊): 298-303. (LÜ Shizhan, WANG Ren, HU Mingjian, et al. Current status, problems and future trends of the research on engineering properties of moraine soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(S0): 298-303. (in Chinese))
- [4] 屈智炯, 刘开明, 肖晓军, 等. 冰碛土微观结构、应力应变特性及其模型研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 19-28. (QU Zhijiong, LIU Kaiming, XIAO Xiaojun, et al. Study of microstructure, stress-strain behavior and constitutive model of till[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 19-28. (in Chinese))
- [5] 张永双, 曲永新, 王献礼, 等. 中国西南山区第四纪冰川堆积物工程地质分类探讨[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 581-589. (ZHANG Yongshuang, QU Yongxin, WANG Xianli, et al. On the engineering geological classification of quaternary glacial deposits in southwestern mountain area of China[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(5): 581-589. (in Chinese))
- [6] INSLEY A E. Triaxial shear characteristics of compacted glacial till under unusually high confining pressures[C]// 5<sup>th</sup> International Conference Soil Mechanics & Foundation Engineering, 1965.
- [7] SPRINGMAN S M, JOMMI C, TEYSSEIRE P. Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history[J]. Géotechnique, 2003, 53(1): 3-10.
- [8] HUGHES D B, CLARKE B G, MONEY M S. The glacial succession in lowland Northern England[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1998, 31(3): 211-234.
- [9] 冯俊德, 李建国, 汪 稔, 等. 云南某铁路冰碛土大型直剪强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3205-3210. (FENG Junde, LI Jianguo, WANG Ren, et al. Large scale direct shear test on strength behavior of railway moraine soils in Yunnan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3205-3210. (in Chinese))
- [10] 徐鼎平, 汪 斌, 江龙剑, 等. 冰碛土三轴数值模拟试验方法探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3466-3470. (XU Dingping, WANG Bin, JIANG Longjian, et al. Study of methods of triaxial numerical simulation test of glacial till[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3466-3470. (in Chinese))

(编校: 孙振远)