

## 基于低温条件下砾石土心墙压实特性研究

任俊

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]西南地区高寒冷、高海拔地带修建大型土石坝存在低温难题,在这种情况下,砾石土心墙料的压实特性会受到温度的影响很大。本论文在西南某大型水电站大坝项目上,对低温环境下砾石土心墙料压实特性进行了一系列的研究。通过室内击实实验以及现场碾压试验得到在不同温度下砾石土心墙料的最大干密度及最佳含水量变化规律,探讨冻融循环影响压实效果的原因。研究发现:环境温度越低时,最大干密度就越小,而最适宜含水量就越高,在冻融过程中,由于结构遭到破坏使得土体的性质变差,无法发挥出应有的优良的压实作用。根据实验分析,对各层次的铺筑厚度、碾压遍数、含水量允许范围以及施工期间窗口进行了调整,在实际工程中得到了检验,该成果给其他高寒地区类似项目冬期施工带来技术支持。

[关键词]低温环境;砾石土;心墙;压实特性

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19413

中图分类号: TV223

文献标识码: A

## Research on Compaction Characteristics of Gravel Soil Core Wall under Low Temperature Conditions

REN Jun

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

**Abstract:** The construction of large earth rock dams in the cold and high-altitude areas of Southwest China poses a low-temperature problem. In this case, the compaction characteristics of gravel soil core wall materials will be greatly affected by temperature. This paper conducted a series of studies on the compaction characteristics of gravel soil core wall material under low temperature environment in a large hydropower station dam project in Southwest China. The maximum dry density and optimal moisture content of gravel soil core wall material at different temperatures were obtained through indoor compaction experiments and on-site rolling tests, and the reasons for the influence of freeze-thaw cycles on compaction effect were explored. Research has found that the lower the ambient temperature, the lower the maximum dry density and the higher the optimal moisture content. During the freeze-thaw process, the soil properties deteriorate due to structural damage, making it difficult to achieve the desired compaction effect. Based on experimental analysis, adjustments were made to the paving thickness, rolling times, allowable range of moisture content, and construction window of each level, which were tested in practical engineering. This achievement provides technical support for winter construction of similar projects in other high-altitude regions.

**Keywords:** low temperature environment; gravel soil; heart wall; compaction characteristics

### 引言

我国高寒地区拥有大量的水力发电资源,许多超高砾石土心墙堆石坝已在该区域或者计划着要在这些地方进行修建,但是寒区心墙冬季施工存在一个很大的难题就是土料的结冻以及化冻的问题,在负温下心墙土料冰冻强度较高使得其可压性变差,增加了碾压次数从而延误工期,在碾压完之后的心墙土经过冻融作用会出现结构损坏的现象。西南某大型水电站挡水建筑物坐落在川西高原地带,冬季严寒干燥,雨季降水丰沛,大坝心墙填筑施工受到恶劣的气象环境制约而造成实际工作的时间不够充分,所以对低温环境下砾石土心墙压实性能的研究十分必要。国内外研究人员对土的压实性能做了很多的研究工作,在负温击实方面,发现负温下击实未融化土样有最大干密度与最佳含水量,随着气温的降低,土样的干密度呈现稍低的情况;在冻融循环方面,反复冻融会造成土质强度、稳定性的损失以及可能出现开裂现象;在细颗粒含量方面,在细

颗粒小于 10% 的情况下粗颗粒的土料成为弱冻胀性料,达到冻缩率和压实度最好的细颗粒的含量是 9%,但是在我国高寒地区的特别高的土石坝的砂砾石心墙在低温环境下的压实性状目前的研究较少。本文基于西南某大型水电站大坝工程项目,采用室内试验和现场试验相结合的方式对低温环境下砾石土心墙料的压实特性进行探究,给出冬季施工工艺参数优化建议,以供高寒地区类似工程参考。

### 1 低温条件下砾石土心墙压实施工的环境分析

西南某大型水电站大坝是砾石土心墙堆石坝,拦河大坝高 300m 级别,在建世界最高大坝之一。工程位于四川西部高原气候区,有典型高海拔、高寒特点,冬天气温低干燥,局部区域内短时间降雨现象严重,年均温度较低,最低温度可以降到-15℃以下,冬期施工时间长达 4~5 个月。低温环境对于粒状土心墙碾压施工影响主要有以下几点:其一,负温环境下土壤中自由水分结冰造成压实强度增大,难以压实;其二,在开挖、运输以及摊铺阶段耗热

量极大,导致土温快速降低。其次,已经堆筑起来的心墙土料将会经受几次冻融过程,据试验表明,心墙土料会经历1~5次冻融过程;并且在寒冷的大风天气中使得土体散热速度更快,流失更多水分。砾石土心墙料是整个挡水系统的主体部分,因此对它的要求很高。砾质土相比于纯黏性土而言,它有较低的压缩性,较高的填筑密度、较高的抗剪强度和较小的沉降变形等优点,同时兼具着强度高、稳定可靠、防渗等综合特性要求。但是当处在低温状态下时,上述的各项特性就会发生变化,这就必须对其压实行做出新的定义。低温环境中进行施工主要存在的技术难点为:土料经过冻融后导致压实性能下降、可利用的有效时间段少、原有的施工参数失去作用、难以把控施工质量等。对于以上存在问题,要建立健全土料冻融观测、预报体系,制定心墙冬期施工冻融防治措施。

## 2 低温条件下砾石土压实特性试验研究

### 2.1 不同温度条件下最大干密度变化规律

为了探讨温度对于砾石土的最大干密度的影响,进行了一系列不同温度的室内击实实验。试验的温度分别为:20(常温)、5、0、-5、-10、-15、-20℃等七个等级。试验所使用的砾石土料级配采用现场测定的真实级配曲线来配制而成,其细粒含量为9%~10%左右,在这种细粒含量下,砾石土的压实性能最好,而且冻胀程度也低。

表1 不同温度条件下砾石土最大干密度试验结果

试验温度(℃)	最大干密度(g/cm <sup>3</sup> )	较常温变化率(%)
20(常温)	2.21	-
5	2.20	-0.45
0	2.18	-1.36
-5	2.16	-2.26
-10	2.14	-3.17
-15	2.12	-4.07
-20	2.10	-4.98

通过试验得出,在环境温度减小的情况下,砾石土的最大干容重也呈现出递减的趋势,这个结论符合现有文献的研究结果,即在零下温度范围内击实未冻土料存在一个最大的干密度,而且环境越低温度,土体的干容重也呈现一定的减少趋势,温度由20℃变化到-20℃之间,最大的干容重从2.21g/cm<sup>3</sup>变为2.10g/cm<sup>3</sup>,减少了大约百分之五。温度的变化对最大干容重的影响几乎是一个近乎直线的关系,每降温10℃,最大干容重就会有差不多一个小单位的递减。产生这样的影响的原因主要是因为低温使得土壤内部分水分冻结成冰块,在冰块的作用下阻隔住了土粒重新组合及重新压缩的过程;而且低温下水变稠黏,润滑性下降,土颗粒间的摩阻力增大,使压实变得很困难,在低于零摄氏度的状态下要完成同样的密实度需要较大的压实功。

### 2.2 最优含水率随温度变化特征

温度的变化对最大干密度产生影响的同时也对砾石

土的最优含水量有重大影响,实验发现温度越低,砾石土的最优含水量越大,在20℃常温下,其最优含水量最高能达到6.8%,而当温度下降到-10℃左右时,则升到了8.2%,再降到-20℃的时候,已经升到9.0%,在20℃与-20℃之间,最优含水量共增长了2.2个百分点,平均来说每下降10℃就增长了0.7个百分点。有较好的线性关系。最适宜含水量随着温度下降而上升的原因:温度较低的情况下,土壤中的水分有一部分凝固成了冰,对润滑及充填起作用的是液体水少了,要使土壤获得最好的压实效果就要增加更多的水以保持土粒子之间的润滑状况;同时,冰的存在占用了部分孔隙,也需要更大的含水量来填充这些孔隙,但是随着温度进一步下降至零下十摄氏度以下之后,最适宜含水量上升的速度就变慢了,说明此时冰结晶生成已经趋于稳定,液态水含量也相对固定下来了,在工程实践中这个结论很有参考价值。冬季筑路时不能照搬常温下的最适宜含水量指标,而是应该视具体土温情况适当提高含水量指标的上限。应当以温度段别来分层管理,即0度以上以6.8%±1%为宜;0度到-10度之间为7.5%~8.2%,而低于-10度则应该为8.5%~9.0%,另外也要警惕的是,含水量过大则会导致冻胀问题的发生,研究发现细粒土含量小于10%的情况下砾石土是属于弱冻胀的材料,在对含水量进行控制的时候就要发挥这个优势,把含水量的最大值限制在9.0%以下即可满足需要并且不会引发冻胀的问题。

### 2.3 冻融循环对压实性能的影响

砾石土心墙在冬天期间,在施工时已经堆积好的土料将会受到多次冻融的作用。研究发现心墙土料将会有1~5次的冻融循环,为了能够模拟出这个工程实际,进行了一定数量冻融循环次数情况下的压实实验。实验的结果是冻融循环对于砾石土有很显著的压实损害作用。经过一次冻融循环之后最大干容重比无冻融时降低3%左右;经过三次以后降低到5%左右;经过五次就会降到7%左右。而且最佳含水量随着冻融循环次数增加有轻微上升的趋势。冻融作用造成压实损害的原因主要有两点:其一是水分结冰时体积膨胀9%,破坏了土质内部结构;冰体融化之后土体空隙增大,颗粒间排列被打乱,反复融化冻结使得土颗粒粘连性能下降等,所以冬天施工中尽量不要使已经压实好的土体产生冻融现象,如果需要的话可以进行保温覆盖。而且第一次冻融造成的强度损失最大,达到总损害量的60%,也就是说只要能防止出现第一次的冻融现象或者及时给冻溶过的土体进行补压,都可以有效地降低冻融的危害。

## 3 施工工艺参数优化研究

### 3.1 分层厚度与碾压遍数优化

根据室内击实试验结果,在现场进行了不同的分层厚度及碾压遍数组合的对比试验。分层厚度设为30cm、40cm、50cm三个等级,碾压遍数分为6遍、8遍、10遍

三个等级。从试验的结果来看,低温条件下分层厚度对于压实效果有比较大的影响。分层厚度为 30cm,只要碾压八遍就能达到设计的压实标准,分层厚度为 40cm 就需要碾压十遍才能够达到同样的效果。分层厚度达到 50cm,哪怕碾压十遍都达不到压实度的要求,在保证施工进度的前提下,尽量减少分层厚度,低温的时候可以控制在 30~40cm 左右,这样比正常温度下稍微降低些。<sup>[1]</sup>压实次数的选择要考虑到气温的影响。对于地表温度高于零摄氏度的情况下,进行六次碾压即可达到规定的要求;如果地表温度降低到零下五摄氏度到零摄氏度之间,则需要增加到八次;而当地表温度低于零下五摄氏度的时候除了增加碾压次数之外还需配合其他的方法。针对压实机具在一定条件下,结合不同低温下的压实能力可以计算出达到规定压实度所需要的碾压次数,从而保证压实的效果。

### 3.2 含水率控制区间确定

低温环境中水分管理是保证压实效果的重要因素,在实验基础上创建了含水量及干密度之间关系方程来计算在不同的温度环境之下最适宜的含水量以及其可接受的浮动区间等信息。

水分与干密度的关系可以用二次多项式来表示: $\rho_d = a\omega^2 + b\omega + c$  其中, $\rho_d$ 为干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), $\omega$ 为含水率(%), $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为回归系数。此公式能很好地反映压实曲线的特点,对其进行求导就得到最佳含水量 $\omega_{opt} = -b/(2a)$ ,在试验中得到的经验公式如下: $\rho_d = -0.008\omega^2 + 0.108\omega + 1.85$  根据试验数据拟合,常温条件下回归方程为 $\rho_d = -0.008\omega^2 + 0.108\omega + 1.85$ ,最优含水率 6.8%,对应最大干密度  $2.21\text{g}/\text{cm}^3$ 。低温条件(-10℃)下的回归方程为 $\rho_d = -0.007\omega^2 + 0.115\omega + 1.78$ ,最优含水率 8.2%,对应最大干密度  $2.14\text{g}/\text{cm}^3$ 。基于上述关系,确定了不同温度条件下的含水率控制区间<sup>[2]</sup>。常温条件下控制目标为  $6.8\% \pm 1\%$ ; 0℃至-5℃时控制目标为  $7.5\% \pm 1\%$ ; -5℃至-10℃时控制目标为  $8.2\% \pm 1\%$ ; 低于-10℃时控制目标为  $8.8\% \pm 0.5\%$ 。含水率控制范围随着气温下降变小了,这与低温下含水量的变化对密度的影响较大有关。

### 3.3 低温环境下施工时间窗口控制

低温条件下施工的时间窗口的选择要结合土温变化特点以及压实的需求,在施工现场对温度进行了监测,得出了砾石土心墙料在低温施工条件下的温度下降曲线,土温下降可以用指数函数来表示: $T(t) = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{-t/\tau}$  其中, $T(t)$ 为时刻  $t$  的土体温度(℃), $T_a$ 为环境温度(℃), $T_0$ 为环境温度(℃), $T_0$ 为初始土温(℃), $\tau$ 为为温度衰减时间常数(h),与土体热物理性质和分层厚度有关。

## 4 现场试验与工程应用验证

### 4.1 现场碾压试验区布设

为了检验室内试验成果及优化参数的有效性,在西南地区一座特大型水电站大坝心墙区域布置了一条现场碾压试验段,其长度是 50m,宽度为心墙的整体宽度,分成

若干个不同参数组合作业区。试验项目有:在不同温度下碾压质量比较,不同工艺参数组合作业的质量分析以及保温措施的效果试验等<sup>[3]</sup>。现场利用数字化管理系统全程对土料掺拌、运输、填筑过程进行跟踪。另外研制了一种复合土工保温材料自行式自动快速卷放装置,形成各种不同温度条件下保温防寒施工工艺方法。

### 4.2 不同工艺参数下压实效果对比

通过现场实验发现,在改进后的工艺参数条件下,低温条件下对砾石土心墙的碾压效果明显提升,在分层厚度为 30cm、碾压遍数 8~10 遍以及含水量按照不同的温度范围内进行时,都可以实现 98%以上的压实密度,可以满足设计的要求,在比较实验中,经过调整后的施工工艺同温度下比原来提高了 2~3 个百分点,在-10℃的气温环境中,采用优化工艺比未优化工艺要高出了大约 5 个百分点,达到了 95%以上。

### 4.3 低温施工质量控制关键点

从现场试验中得出低温施工中质量控制的重点:一是建立土料冻融观测预报体系,及时了解土温和环境温度的变化情况;二是加强含水量的管理,在实际的土温下进行控制;三是采取“薄层铺、快速碾压、频繁测量”的作业方法;四是加强保温保护措施,当气温低于零下十摄氏度时,及时进行碾压后覆盖保温材料。研发出的冬季雨季土料小面积随挖随用、低温大风天气保温保湿等措施,很好地克服了低温环境下的问题。

## 5 结语

本文以西南一巨大水电站大坝工程为依托,全面探讨低温环境下砾石土心墙压实性质的研究所得出的主要结论如下。低温下砾石土的最大干密度随温度降低而减小,最优含水率随温度降低而增大。冻融循环对压实性质有较大的影响作用,首遇冻结融化的性能损失最大。得出了含水率-干密度关系的二次多项式方程可以用来获得不同的温度下的最优含水率及范围。推导出温度衰减指数函数,为施工的时间窗口提供参考标准。改进后的施工工艺参数是:分层厚度 30~40cm、碾压遍数 8~10 遍、含水率根据气温变化范围调整、施工时间窗口不宜大于 2h。在现场的应用已经证明该优化参数的可行性。

### [参考文献]

- [1]刘东海,戴怀建,郑涵.心墙相变砾质土工程特性及寒区冬季施工防冻控温研究[J].水利学报,2022,53(8):914-925.
- [2]商可,刘恩龙,黄记,等.冻融循环作用下砾石土心墙土料的力学特性[J].西安理工大学学报,2022,38(1):112-120.
- [3]崔博,王毓杰,王佳俊,等.基于有限元法的心墙砾石土压实特性分析[J].水力发电,2020,46(12):7.

作者简介:任俊(1984.12—),男,毕业院校:中国石油大学,所学专业:安全工程,当前就职单位:中国水利水电第十二工程局有限公司,职务:施工管理部主任,职称级别:中级工程师。