维普资讯 http://www.cqvip.com

⑯ 74-78

第 28 卷 第 3 期 西北农业大学学报 Vol. 28 No. 3
2000 年 6 月 Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis Jun. 2000

[文章编号]1000-2782(2000)03-0074-05

冻结对黄土灰土碾压质量的影响*

TU44
TU 752

张伯平[1]，陈友富[2]，崔鹏飞[2]，王宏辉[2]

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院；2 基建处，陕西 杨陵 712100)

[摘 要] 通过对几组低温下不同冻结历时黄土三七灰土击实试验结果，与现场低温下施工碾压效果的对比分析表明：冻结会对黄土灰土产生显著冻胀作用，直接影响碾压质量，当温度从－1 ℃降低到－9 ℃，土体压实干密度从 1.58 t/m³ 降至 1.41 t/m³；在同一低温下冻结历时从 2 h 增长到 6 h，而土体压实干密度也相应降低；同时，最优含水量也相应减小，当土体含水量≤130 g/kg 时，灰土碾压质量几乎不受冻结的影响，即黄土三七灰土冻结起始含水量为 130 g/kg。本研究还分析了灰土冻结的机理和发生发展过程，对灰土碾压冬季施工的工程质量评价和施工对策提供了理论和量化分析依据。

[关键词] 黄土；三七灰土；冻结；碾压质量；压实度 、冬季施工、地基

[中图分类号] TU 445；TU 444 [文献标识码] A

随着我国计划经济向市场经济的深化转轨，建筑市场对施工质量和工期的要求越来越高，我国北方各地建筑物的冬季施工已习以为常，特别是野外露天施工，地基土体的冻结对施工质量的影响已成为很现实的工程问题，但在深冬严寒季节施工如何保证工程质量显得尤为重要。人们一般认为，所谓土的冻结，只有象美国阿拉斯加和俄罗斯的西伯利亚等极其寒冷的永久冻土地带，或对日本北海道及我国东北的高寒区才有影响，所以前苏联和日本科学家对此问题研究较多，以 H·A 崔托维奇著《冻土力学》[1]和木下诚一编著《冻土物理学》[2]为代表对冻土的物理力学性质进行了较为系统的研究，我国中国科学院兰州冰川冻土研究所近些年来结合我国青藏高原和西北高寒区对冻土的物理力学性质进行研究，曾于 1995 年出版了《冻土工程国家重点实验室》1994 年年报，1996 年在兰州召开了第二届全国冰川冻土学术研讨会并出版了论文集(上册)。但以上研究均未涉及黄土灰土冻结对碾压质量的影响，对于温带短期季节冻结地区的填方工程问题更是未被人们重视，事实上我国长江以北特别是秦岭以北广大地区冬季施工都受到冻害影响。笔者于 1998 年元月针对某住宅楼工程黄土三七灰土碾压地基在气温 1～－9 ℃下施工遇到碾压质量达不到设计要求的实际工程问题，进行了不同低温下黄土三七灰土的击实试验和工程现场压实试验，分别得出几组低温下黄土灰土的击实曲线，并与现场碾压试验结果比较分析，得出较为一致的规律和结论，以期为我国北方冬季地基施工提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验土料

试验是结合西北农业大学农场住宅楼地基工程进行的，该建筑物场地位于陕西省杨

* [收稿日期] 2000-01-17
[作者简介] 张伯平(1945－)，男，副教授。

维普资讯 http://www.cqvip.com

凌示范区渭河北Ⅰ级阶地中部,场地自然地形呈北高南低缓坡,地貌单元单一,地下水埋藏较深,施工土料属新黄土沉积物,试验土料物理性质见表1。

表1　土样颗粒成分及物理性质

取土深度/m	土类	颗粒成分/% 0.1～0.05 mm	0.05～0.005 mm	<0.005 mm	不均匀系数	曲率系数	含水量(ω)/(g·kg⁻¹)	相对密度(Gs)	塑限(ωp)/(g·kg⁻¹)	液限(ωL)/(g·kg⁻¹)
0.5～1.7	Q_4	4	62	34	36	1.11	203.8	2.71	171	261
1.7～3.4	Q_3	3	62	35	40	1.26	218.1	2.72	175	275

1.2　试验灰料

试验用灰料是经过5 mm筛后的新鲜熟石灰粉沫,干燥新鲜,活性强。

1.3　试验方法

击实试验是用SJ南实处型新式击实仪进行的,击实筒容积1 000 cm³,击锤的质量是2.5 kg,落距46 cm,锤底直径5 cm,试验时分3层装料击实,每次击数为25。

土料冻结是在露天实验场,中午自然气温2～－1 ℃,下午气温－2～－5 ℃,早晨气温为－6～－9 ℃,室内温度为10～15 ℃,试验前在室内分别给土料配不同的水量,静置10 h以上,后搅拌均匀移到露天拌灰后静置,分别在冻结历时2,4和6 h后进行击实试验。

现场碾压机具是18 t压路机,每层铺土虚方厚30 cm,三七灰土搅拌均匀,每层碾压3遍,现场试验时气温与露天实验场气温基本相同。碾压完后分5点分别取样,测其干密度和含水量,取其平均值。

2　结果与分析

2.1　击实试验

将拌好的土料(三七灰土)在3组低温下分别冻结2,4和6 h后进行击实试验,得到不同的试验结果如表2,再将试验结果用图表示,并与室温下击实试验结果比较(图1),可看出冻结对黄土三七灰土击实效果的影响规律。

表2　冻结温度与历时对三七灰土击实干密度影响的试验结果

冻结气温/℃	冻结历时/h	最大干密度/(t·m⁻³)	压实度/%	最优含水量/(g·kg⁻¹)
2～－1	2	1.57	0.99	187
	4	1.55	0.98	182
	6	1.52	0.96	180
－2～－5	2	1.48	0.94	180
	4	1.42	0.90	161
	6	1.40	0.89	155
－6～－9	2	1.41	0.89	170
	4	1.35	0.85	152
	6	1.31	0.83	132

维普资讯 http://www.cqvip.com

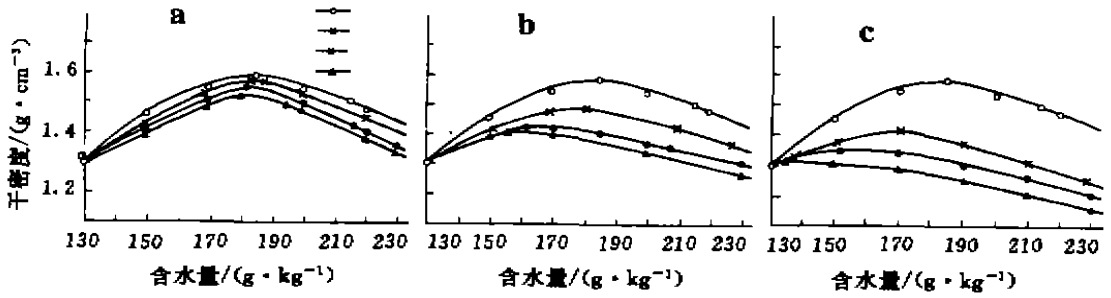

图1 不同冻结温度和历时的击实曲线与室温击实曲线比较

a. 2～－1 ℃；b. －2～－5 ℃；c. －6～－9 ℃

—○—室温；—×—2 h；—●—4 h；—▲—6 h

从图1中曲线比较分析可以看出，在同样压实功能条件下，当气温在2～－1 ℃时黄土三七灰土冻结2 h对压实结果影响很小，按照工程压实质量评价指标压实度公式，

$$\lambda = \rho_d / \rho_{dmax} \tag{1}$$

式中，λ 为填料压实度，无因次；ρ_d 为实际压实干密度，t/m³ 或 g/cm³；ρ_{dmax} 为（常温下）设计压实干密度，t/m³ 或 g/cm³。该情况下三七灰土压实度 λ=1.57/1.58=0.99；当冻结历时为4 h，则按公式(1)计算得压实度 λ=1.55/1.58=0.98；当冻结历时为6 h，则计算得压实度 λ=1.52/1.58=0.96，均符合工程质量要求标准（一般为 $\lambda \geqslant 0.95$）。

在相同压实功能下，当气温为－2～－5 ℃时黄土三七灰土冻结历时为2 h，则按公式(1)计算得压实度 λ=1.48/1.58=0.94；当冻结历时为4 h，则压实度 λ=1.42/1.58=0.90；当冻结历时为6 h，则压实度 λ=1.40/1.58=0.89，均不符合工程质量要求。

在相同压实功能下，当气温为－6～－9 ℃时黄土三七灰土冻结历时为2 h，则压实度 λ=1.41/1.58=0.89；当冻结历时为4 h，则压实度 λ=1.35/1.58=0.85；当冻结历时为6 h，则压实度 λ=1.31/1.58=0.83，更不符合工程质量要求。

以上分析说明，冻结温度越低，对黄土三七灰土压实质量影响越明显；同一冻结温度下，冻结历时越长对压实质量影响越突出。同时，灰土压实的最优含水量也相应减小，当土体含水量≤130 g/kg时，压实干密度几乎不受冻结的影响，所以可以推断，在气温不低于－9 ℃，冻结历时不超过6 h，黄土三七灰土冻结起始含水量为130 g/kg。

从理论上分析，一是由于冻结使土体中水分迁移引起水分凝冰层出现[1]，土中水变成冰，向冻结区吸水，而水变成冰放出自由能，导致土体冻胀，水的密度一般为1 t/m³，冰的密度只有0.92 t/m³，但冰的强度远高于灰土土体，抵消部分击实功能，使击实质量降低。

二是伴随水分迁移产生溶质迁移，引起灰土中高浓度带出现，导致灰土中融弱层[2]存在，因为冻结作用对灰土土体施加外力会对灰土土体产生再造作用，灰土中孔隙水一但结冰，体积将增加9%左右[3]，即灰土土体密度将减小9%左右，而且是自由水先冻结，结合水后冻结，所受束缚能越大的水冻结越缓慢，灰土中不但有粘粒和胶粒等细小颗粒电分子引力对水作用形成的强结合水束缚力，而且还有石灰粉末颗粒对水的电分子束缚力，所以灰土冻结历时越长，使孔隙水冻结越充分，对击实效果影响越大。

维普资讯 http://www.cqvip.com

三是冻结会使灰土颗粒在内外应力作用下位移，引起冷生面的变化，导致灰土性质的改变，尽管不同粒径组成的土体孔隙空间分布具有随机性，但粗颗粒组成大孔隙的机率比细颗粒组成同等孔隙的机率要大的多。因此，灰土冻结过程中就可能是大孔隙中水先冻结，把大颗粒顶起，再随小孔隙水冻结将大颗粒向上抬升，造成冻结过程中颗粒垂直位移现象，即热筛效应[4]，使土体性质变化，影响地基承载力。

2.2　现场碾压试验

1998年元月正是陕西关中最冷季节，而且当年元月份气温也是多年少见的寒冷天气，西北农业大学农场住宅楼地处陕西杨陵，该工程黄土地基三七灰土填筑过程基坑气温均在2～－9 ℃循环，地基黄土三七灰土填筑碾压现场试验分别在中午(气温2～－1 ℃)、下午(－2～－5 ℃)和早晨(－6～－9 ℃)进行，为了便于比较，冻结历时均为2 h，试验结果见表3，试验结果均为碾压完后5个点取样试验平均值。

表3　黄土三七灰土冻结2 h现场碾压试验结果

基坑气温/℃	平均干密度 $\bar{\rho}_d$/(t·m^{-3})	压实度/%	平均含水量 $\bar{\omega}$/(g·kg^{-1})
2～－1(中午)	1.58	1.00	185
－2～－5(下午)	1.47	0.93	181
－6～－9(早晨)	1.40	0.89	184

从表3可见，当基坑气温为2～－1 ℃时黄土三七灰土碾压效果最大干密度为1.58 t/m^3，按公式(1)计算压实度 λ=1.0；当基坑气温为－2～－5 ℃时碾压最大干密度为1.47 t/m^3，计算压实度 λ=1.47/1.58=0.93；当基坑气温为－6～－9 ℃时碾压最大干密度为1.40 t/m^3，计算压实度为 λ=1.40/1.58=0.89，现场试验结果与前述击实试验结果(冻结历时2 h)非常吻合，可以得出较为一致的规律和结论。

3　结论与讨论

1)冻结对黄土三七灰土碾压质量有显著影响，不但影响灰土碾压效果，而且温度越低影响越大，冻结历时越长影响越大。

2)由于灰土土体冻结过程的热筛效应引起土体冷生面的变化，导致土层中融弱层存在，会影响压实土的性质和地基承载力。

3)当气温不低于－9 ℃，冻结历时不超过6 h，黄土三七灰土冻结起始含水量为130 g/kg。即当黄土三七灰土含水量≤130 g/kg时，土体压实质量不受冻结的影响。

4)建议工程中冬季施工应控制施工现场温度不低于－2 ℃，否则应分块铺土，边铺边压，尽量减少冻结历时，同时对压好后的土体立即用草帘或彩条布盖好防止冻胀。

[参考文献]

[1] 〔苏〕H. A. 崔托维奇. 冻土力学[M]. 张长庆，朱之林译. 北京：科学出版社，1985.

[2] 〔日〕木下诚一. 冻土物理学[M]. 王　异，张志权译. 长春：吉林科学技术出版社，1985.

[3] 马　巍，徐学祖，张立新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J]. 岩土工程学报，1999，3(2)：158－160.

[4] 徐学祖，王家澄. 冻融循环对灰土路基稳定性的影响[A]. 第二届全国冰川冻土学术会论文集(上册)[C]. 兰州：甘肃文化出版社，1996. 627－631.

维普资讯 http://www.cqvip.com

Influence of freezing on rolling quality of loess-lime soil

ZHANG Bo-ping[1], CHEN You-fu[2], CUI Peng-fei[2], WANG Hong-hui[2]

(1 *College of Water Conservancy and Architectural Engineering*, 2 *Department of Capital Construction*, *Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: The results of comparing the results of several compaction test on loess-lime soil (the ratio of lime to loess is 3 : 7) after different frozen duration with the effect of site operation at low tempreture indicate that freezing can cause loess producing significant heaving, which directly influences rolling quality. When the temperature decreases from −1 ℃ to −9 ℃, soil's dry density after packing decreases from 1.58 t/m^3 to 1.41 t/m^3. When the freezing time increases from 2 h to 6 h at the same low temperature, soil's dry density decreases, and at the same time, brings down the best water content. When the water content is 130 g/kg, soil is not influenced by heaving. So the initial water content of this kind of loess-lime soil is 130 g/kg. In this paper, the mechanism and development course of lime soil freezing are analysed, which offers the reference of theory and quantitative analysis for assessing operation quality of rolling lime, soil in winter and giving operation strategy.

Key words: loess; lime soil; freezing; rolling quality; densitication rate