

内蒙古季节冻土区地基土冻胀性研究

银英姿 (内蒙古科技大学建筑与土木工程学院, 内蒙古包头014010)

摘要 我国国土面积约50%地处季节冻土区,大量的渠系水工建筑物由于基土不均匀冻胀而产生破坏。水工冻害已成为灌区工程管理中亟待解决的问题。内蒙古河套地区是我国的四大灌区之一,土体长期受到冻融循环使得渠道破坏严重。为此,对内蒙古河套地区的地基土冻胀性进行研究,找到其中的一些规律。

关键词 内蒙古;季节冻土区;冻胀性

中图分类号 S152.2 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)09-03840-02

Study on the Froze-expand Performance of the Soil in Construction Ground in Seasonal Frost Region of Inner Mongolia

YIN Ying-zi (College of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010)

Abstract 50% of area in Inner Mongolia is in seasonal frost region. Most water engineers were destroyed due to the uneven froze-expand in ground. Frost in water engineer was serious thing. Hetao Irrigation Area was one of biggest areas in China. Channels were destroyed because of long-term frost-melt cycle. So the study on the froze-expand performance of the soil of construction ground in seasonal frost region of Inner Mongolia was conducted.

Key words Inner Mongolia; Seasonal frost area; Froze-expand performance

1 季节冻土冻结环境条件

试验场位于黄河河套沉积平原区,地势南高北低,地面高程1 037.4~1 034.4 m, 坡降1/3 000~1/4 000, 土地较平整。

1.1 气候条件 属温带大陆干旱、半干旱气候,冬长夏短,干燥风多,温差较大,年平均气温6.9℃,平均相对湿度40%~50%,降雨稀少,蒸发强烈,温差较大,光照充足,光能资源丰富,年总辐射 $6.4 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$,年日照时数3 100~3 300 h。无霜期较短,平均133~150 d。土壤一般在11月中旬封冻,翌年4月下旬至5月上旬融通,形成一个冻融周期,冻结历时180 d左右。冻结指数536~955℃·d,冻深在70~120 cm。

1.2 土壤条件 由于河套平原系黄河多次泛滥改道而成,因此灌区土壤具有“远沉红泥近沉砂”的水平分布特征。靠近黄河及古河道地带以砂土及砂壤土为主;远离黄河及古河道地带以粘土为主,两者之间的过渡带以砂壤土及轻砂壤土为主。试验场土质以壤土为主,表层土容重1.34~1.44 g/cm³,孔隙度46.43%~49.73%。

1.3 水文条件 试验场处于灌区中上游地带,地表水主要是引黄灌溉,农田用地下水灌溉,地下水资源主要为降雨、灌溉入渗补给和黄河侧渗补给。地下水位的年内变化,随着灌溉水量的多少而升降,一般冬春季水位埋深最大,在1.5~2.5 m,灌溉期水位最浅,在0.5~1.0 m;灌溉期(5月中旬~9月前)、土壤封冻期(11月中下旬~翌年3月初)及秋浇期(10月中旬~11月上旬)水位平均埋深分别为1.0~2.0和1.3 m。灌溉入渗水是潜水变化的主要原因。

1.4 地温条件 地温直接影响衬砌渠道表面的温度,同时地温受气温的影响。日气温变化较大,地温变化也较大,同时,随深度的增加,各层土的温差减小。地表温度相对整个土层温度最低。

2 季节冻土冻结过程

冻结过程有4个阶段。非稳定冻结阶段(11月上旬~中旬):气温昼夜正负波动,土层融冻变化,水-冰和冰-水的交替相变作用缓解冻深进程。稳定冻结阶段(11月中旬~翌

年2月上旬):气温下降,冻结速率较大,仅有水-冰相变作用,冻深增长较快;前期冻结速率年际间表现不同,后期冻深接近最大值。拟稳定冻结阶段(2月中旬~下旬):上下边界热流作用处于动态平衡状态,冻结速率很小,冻深缓慢达最大值。回融阶段(3月上旬~4月下旬):地表温度回升到0℃以上,由于冻土开始融化,负温热流向地表和地下两个方向耗散,加之地下融土层边界热流作用,使冻土双向融化,历时较短。

由于气候年际变化,冻结和融化有提前或滞后现象,过程时段略有差异;各类土冻结融化,过程差异不大。

3 季节冻土冻结特征

在一个冻融周期内,产生的最大冻结深度反映了季节冻土系统的基本特征,是受区域自然环境条件所控制的。

3.1 温度条件对冻深的影响特征 温度条件对冻深的影响特征表现为单向冻结,双向融化。冻结过程中,环境负温条件为上边界负温变化大,下边界正温变化小,冻深主要受上边界制约,即冻深取决于冻结指数。该试验区冻结指数小,土层温度场温度梯度小,冻结速率低,因此,冻深不大;由于回融阶段下边界处于融土层,正温变化小,而上边界正温变化较大(升温较快),因此,冻土层自上而下融化部分占主体。

3.2 水分条件对冻深的影响特征 土壤水分状态对冻深的变化具有重要作用。地下水作为天然热源,极大地影响冻结土体的温度状况,使冻深形成不同地下水位地段的冻深差异。地下水位较高,则冻深最大值出现较早,稳定冻结阶段时间增长,冻深相对较小,反之亦然。把影响冻深强弱的地下水位分界点称为临界点,小于临界点时,地下水对冻深影响较强;处于临界点时,出现冻深极大值。这是由于地下水位埋深浅时,冻结过程中,地下水较多地向冻结锋面迁移,导致相变潜热增加,而阻滞冻深的发展。这也说明在上边界温度条件相同的情况下,冻深的随机涨落变化,主要取决于下边界环境水分条件。

4 季节冻土冻结规律

数值回归分析表明,冻深极大值 H_{\max} 与冻结指数 F 的关系曲线呈指数型,表达式为:

$$H_{\max} = 102.897e^{0.00024F}$$

基金项目 内蒙古自治区自然科学基金项目(200607010709)。

作者简介 银英姿(1968-)女,内蒙古包头人,副教授,从事季节冻土区冻胀规律研究。

收稿日期 2007-12-11

即冻深最大值随冻结指数的增加,呈指数规律增大,反之亦然;冻深 H_f 与冻前地下水位 Z_0 的关系、与正冻期地下水位埋深平均值 Z 的关系及与冻结面至地下水位平均距离 L 的关系曲线均呈二次抛物线,表达式分别为:

$$H_f = 88.17 + 38.50 Z_0 - 9.75 Z_0^2$$

$$H_f = 31.54 + 60.89 Z - 9.84 Z^2$$

$$H_f = 51.2575 + 0.6080 L - 0.0123 L^2$$

即冻深随冻前地下水位埋深的增加、正冻期地下水位埋深平均值的增加、随冻结面至地下水位平均距离的增加呈抛物线规律增大,反之亦然;冻深 H_f 与土层初始含水量 W_0 的关系曲线呈二次抛物线型,表达式为:

$$H_f = 111.4 + 2.67 W_0 - 0.009 W_0^2$$

即冻深随冻前土层初始含水量的增加,呈抛物线规律衰减,反之亦然。

5 冻结过程中水分迁移特征

5.1 冻结类型特征 冻结过程中,有地下水补给的称为开放系统,无地下水补给的称为封闭系统。冻结类型反映季节系统冻土的基本特征。该试验场冻前平均地下水位高(100 cm),初始含水量大,因此,冻结过程中,水分迁移量大,土层聚冰严重,即为开放冻结类型。

5.2 水分迁移过程特征 冻前地下水位高,土体初始含水量大,水分的冻结作用推迟了冻结锋面的下移,因此,冻结前期总的水分迁移量并不是最大的;冻结过程中,水分迁移过程相对充分,出现了水分迁移量最大值,冻土层水分聚集及聚冰严重。

5.3 水分迁移分布特征 水分迁移是区域(地段)环境温度、水分、土质等条件综合作用的结果。从观测资料分析,水分迁移与其他冻土现象一样,具有较大的随机性和时序上的连续性。同时,在环境负温和土质条件一定时,由于地下水位条件的差异性,导致水分迁移的分异特征。

该试验衬砌渠道采取保温措施后^[1],阻碍外界冷空气进入土体,使土体温度场相对稳定,在外界温度急剧下降时,它不发生太大的变化。相对于对比段(不做保温处理),保温措施提高了地基土的温度,使土中的含冰量大大减少,甚至没有;同时,使地下水埋深相对稳定,水分迁移量减小,从而使土体不具备冻结条件,减小或消除了土的冻胀。

6 季节冻土区地基土冻胀特征及规律

6.1 地基土天然冻胀过程 冻胀量是冻结过程中伴随孔隙水迁移水相变产生的垂直于冻结锋面的位移量。冻胀量的大小直接影响渠道衬砌工程的安全与稳定,一般情况下,地基土冻胀过程伴随冻结过程发生、发展和消亡。冻胀发生于土体所形成的缓慢冻结层,发展于迅速冻结阶段,即伴随冻结过程的推进,呈线性增长。迅速冻结阶段冻胀量接近于冻胀总量的95%左右时,最大冻胀量出现于拟稳定阶段,并保持稳定状态,以后随气温上升冻土层回融,冻胀呈线性消减直到回位。地下水位低,即地下水位深埋,达到最大冻胀量的时间较早,冻胀量小;地下水位高,即地下水位浅埋,达到最大冻胀量的时间较晚,冻胀量较大。对于封闭系统,水分补给条件相对差,冻胀量小;而开放系统,水分补给条件好,冻胀量大。

6.2 地基土季节冻土冻胀特征

6.2.1 季节冻土系统要素整体效应特征。 一个冻融周期内产生的最大冻胀量,反映了季节冻土系统冻胀的基本特征,受区域自然条件所控制,主要表现为冻胀量受环境(温度、水分等)和内部条件(土质、粒径、成分等)控制。在一个冻融周期内,产生冻胀量极大值是出现“水、土、温、压”等因素随机涨落的水热综合运输的最终结果,体现了季节冻土冻胀区域特征,即冻结指数小,冻结速率小,地下水位高,冻胀量大;年内和年际冻胀变化在时序过程中具有连续性和随机性。

6.2.2 季节冻土环境因素分异特征。 季节冻土系统冻胀性对水分条件极为敏感,冻胀是由土体内孔隙水和外界迁移水两部分组成的冰析。所以,水分是冻胀产生和发展的必要条件和生成环境。季节冻土的冻胀性不仅在温度条件上具有随机性,而且在同一温度条件下,冻胀量由微小到最大值的随机变化,也受制于水分条件,反映了环境水分条件的差异性,导致季节冻土冻胀过程中,冻胀强弱和冻胀分层分布出现分异特征。

环境水分参变量包括:冻前地下水位、冻结面距地下水位距离、冻前含水量、冻结期含水量变化以及水分迁移量等,它们之间相互联系,并具有相对独立性。

6.2.3 冻胀量的分层特征。 不同地下水位地基土冻胀量的分布,反映了冻结期地下水位补给的差异性。不同地下水位地基土冻胀量分层分布,分为3种类型。第1类为地下水位深埋情况,属于封闭系统,无底水补给,冻胀量分布于冻深上部的50%范围内,即冻胀量呈上有、下无状态;第2类为地下水位浅埋情况,属于开放系统,冻胀量主体分布在冻深上部的67%范围内,即冻胀量呈上、中大,下小状态;第3类介于二者之间,冻胀量的80%以上分布于冻深上部的67%范围内,即冻胀量呈上小、下无,中大状态。

按照上述分类,该试验场接近第2种类型,这为水工建筑物基础埋深确定和地基处理提供了理论依据。

6.2.4 地基土季节冻土冻胀规律。 数值回归分析表明,冻胀量 h 与冻前地下水位埋深 Z_0 、与冻结期地下水位平均埋深 Z 及与冻结面至地下水位的平均距离 L 的关系曲线均呈三次抛物线型,表达式依次为:

$$h = 16.09 - 1.16 Z_0 - 9.58 Z_0^2 + 3.11 Z_0^3$$

$$h = -18.13 + 61.97 Z - 33.59 Z^2 + 5.01 Z^3$$

$$h = 10.33 - 0.22 L + 0.002 L^2 + 4.5 \times 10^{-5} L^3$$

即冻胀量随冻前地下水位埋深的增加、冻结期地下水位平均埋深的增加、冻结面至地下水位平均距离的增加呈抛物线规律衰减,反之亦然;冻胀量与土中冻前初始含水量、水分迁移量均呈二次抛物线型,表达式分别为:

$$h = 21.10 - 3.39 W_0 - 0.003 W_0^2$$

$$h = -2.438 + 3.401 Q - 0.148 Q^2$$

即冻胀量随冻前初始含水量的增加、水分迁移量的增加呈抛物线规律增长,反之亦然;冻胀量与冻结指数 F 呈指数型,表达式为:

$$h = 11.46e^{0.00045F}$$

即冻胀量随冻结指数的增加呈指数规律增大,反之亦然。

中,稀释至100 ml,调整pH值为6,吸附剂用量为0.1 g,根据标准曲线可知,初始浓度是0.525 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 。在不同吸附时间下 Cr^{6+} 去除率的变化如图2所示。由图2可见, Cr^{6+} 去除率随着时间的增加而增加,达140 min后,去除率趋于平稳。这说明从时间上来讲, Cr^{6+} 去除率和吸附时间在某个时间段内成正比,不是越长越好。主要原因:一是磁性微球通过壳聚糖高分子与耗氧物质发生反应形成絮体;二是壳聚糖絮凝剂的架桥网捕作用吸附整合水中的耗氧物质,而吸附时间的增加是在不断的搅拌中进行的,如果时间太长,会打断架桥作用产生的大分子絮凝物,从而造成 Cr^{6+} 去除率的降低。因此适当控制吸附时间,可达到良好的吸附效果。

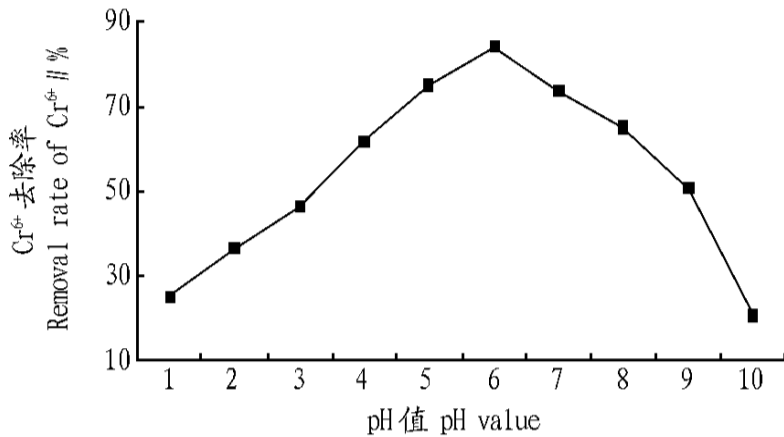


图1 溶液pH值与 Cr^{6+} 去除率的关系

Fig.1 Relationship between pH value of solution and removal rate of Cr^{6+}

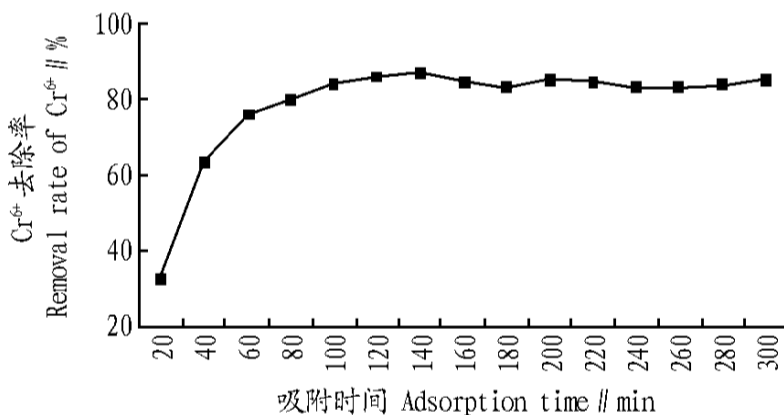


图2 吸附时间与 Cr^{6+} 去除率的关系

Fig.2 Relationship between adsorption time and removal rate of Cr^{6+}

2.3 吸附剂用量对吸附的影响 取25 ml水样加入100 ml三角瓶中,稀释至100 ml,调整pH值为6,吸附时间为140 min,根据标准曲线可知,初始浓度是0.525 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 。改变吸附剂的用量,其 Cr^{6+} 去除率的变化如图3所示。

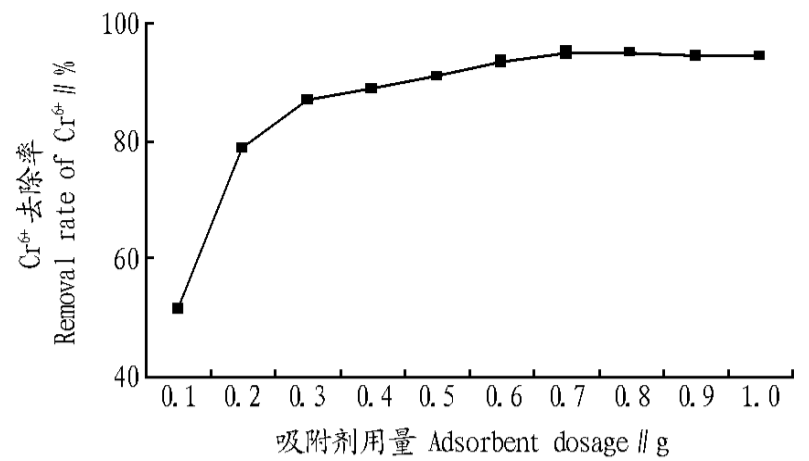


图3 吸附剂用量与 Cr^{6+} 去除率的关系

Fig.3 Relationship between adsorbent dosage and removal rate of Cr^{6+}

由图3可见, Cr^{6+} 去除率随吸附剂用量的增加而增加,且影响效果明显。但投加到0.7 g以后,去除率无显著提高,产生此种现象的原因主要有两方面:一是吸附剂的量增加时,溶液pH值降低,影响了壳聚糖所带正电与溶液悬浮物质所带负电之间的静电引力,因此影响了絮凝效果;二是壳聚糖是有机高分子化合物,它作为有机物本身就是一种耗氧物质,所以加入量过大,也会影响去除率。

3 结论

利用铁酸钴/壳聚糖核壳磁性微球吸附剂能有效去除废水中含有的 Cr^{6+} ,该吸附剂对六价铬的吸附符合Freundlich经验公式^[5]。对于 Cr^{6+} 的质量浓度为0.525 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 的100 ml水样,吸附剂用量0.1 g,吸附时间140 min,溶液pH值6,此时 Cr^{6+} 去除率为85.3%。与相关资料^[6]比较可看出,去除效率比活性炭稍低,但它具有磁分离效果好,对 Cr^{6+} 的吸附选择性高,且交联磁性壳聚糖还有吸附速度快、无污染隐患、易分离和回收利用等优点。

参考文献

- [1] 蒋挺大. 甲壳素M. 北京: 化学工业出版社, 2001: 1-3.
- [2] 朱伟长, 周安娜, 晋传贵, 等. 铁酸钴纳米晶体的制备及机理过程[J]. 工程学报, 2000, 21(21): 56-57.
- [3] 丁明, 孙红. 壳聚糖包裹[J]. 磁性材料及器件, 2001, 32(6): 23-28.
- [4] 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英, 等. 环境监测[M]. 修订本. 北京: 高等教育出版社, 2001: 78-80.
- [5] 鲁秀国, 刘秀兰, 梁淑轩, 等. TiO_2 掺杂 Pd^{2+} 吸附剂去除废水中 Cr^{6+} 的实验研究[J]. 工业用水与废水, 2002, 33(5): 26-29.
- [6] 刘维俊. 高分子壳聚糖对微量金属离子的螯合作用研究[J]. 应用化工, 2002, 31(4): 16-18.

(上接第3841页)

7 荷载对地基土冻胀的影响^[2]

增加外荷载对土体冻胀发生显著作用。其原因,一方面土体外部附加压力增加,将增大土粒间的接触应力,降低土中水的冻结温度,影响土中水的相态的转换,从而减小未冻土区水分向冻结前缘带的迁移量;另一方面,外荷载的约束压力影响水分迁移的抽吸力。

地基土冻结过程中,荷载对土体的冻胀有明显的抑制作用,在冻结环境条件一定时,外荷载强度越大,土体冻胀越小;地下水埋深越浅,荷载对冻胀影响越大。

对于一定的外荷载,承载面积越大,冻胀量越小,反之亦

然;在外荷载作用下,荷载强度不变,冻胀量随荷载承载面积的增大呈指数规律减小,最终趋于一个稳定值。

8 结束语

季节冻土区地基土受温度、水分、土质及其外荷载的共同影响。在掌握其冻胀基本规律后,为季节冻土区地基土的冻胀性提供可靠的基础数据,对季节冻土区渠系水工建筑物防冻胀破坏提供理论依据^[3]。

参考文献

- [1] 贾山, 白霜. 季节冻土区水工建筑物防冻害保温措施[J]. 吉林水利, 2004(10): 10-11.
- [2] 银英姿. 渠系水工建筑物保温措施的研究与计算机模拟[J]. 内蒙古科技大学学报, 2007(2): 183-186.
- [3] 中华人民共和国水利部. 渠系工程抗冻胀设计规范SL23-2006[S]. 2006.