

水 - 盐 - 温环境耦合作用模拟实验系统研究

葛玲茹¹, 杨保存^{1,2}, 杨 柳^{1,2*}

¹塔里木大学, 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔

²塔里木大学, 南疆岩土工程研究中心, 新疆 阿拉尔

收稿日期: 2022年1月23日; 录用日期: 2022年2月14日; 发布日期: 2022年2月21日

摘 要

本文基于水 - 盐 - 温环境耦合作用模拟实验系统的设计研究, 总结分析了多种环境作用模拟实验系统的研究进展, 研发适用于荒漠盐渍土环境工程灾变机理与防灾研究的水 - 盐 - 温环境耦合作用模拟实验系统, 该实验系统可实现水盐干湿循环作用和盐冻融循环作用多种环境耦合作用下工程灾变机理的模拟试验, 同时可以开展荷载作用状态下水 - 盐 - 温耦合作用环境的材料与构件防灾效能研究。

关键词

水 - 盐 - 温环境耦合作用, 实验系统, 防灾减灾

Study on Simulation Experiment System of Water-Salt-Temperature Environment Coupling Effect

Lingru Ge¹, Baocun Yang^{1,2}, Liu Yang^{1,2*}

¹Tarim University School of Water Conservancy and Building Engineering, Aral Xinjiang

²Tarim University School of South Xinjiang Geotechnical Engineering Research Center, Aral Xinjiang

Received: Jan. 23rd, 2022; accepted: Feb. 14th, 2022; published: Feb. 21st, 2022

Abstract

Based on the design and research of water-salt-temperature coupling simulation experiment system, this paper summarizes and analyzes the research progress of many kinds of environment interaction simulation experiment system; a water-salt-temperature environment coupling simula-

*通讯作者。

tion experimental system is developed for the study of disaster mechanism and disaster prevention of desert saline soil environmental engineering; the experimental system can be used to simulate the engineering disaster mechanism under the coupled action of water-salt drying-wetting cycle and salt freezing-thawing cycle; at the same time, it can be used to study the disaster prevention efficiency of materials and components in water-salt-temperature coupling environment.

Keywords

Water-Salt-Temperature, Experimental System, Disaster Prevention and Mitigation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景与意义

新疆南疆属于暖温带极端大陆性干旱荒漠气候, 夏季炎热, 冬季寒冷, 冻土深度可达 80 cm, 属于季节性冻土区域。全年平均气温 10.8℃。年最大降水量为 92 mm, 气候干燥, 最大蒸发量为 3067 mm, 年均蒸发量是降水量的 43 倍, 年均相对湿度为 51% [1]。昼夜温差大, 地下水矿化度高, 强烈的毛细作用使得水盐积聚、干湿循环作用明显。季节性盐冻融循环作用使得路面结构变形破坏严重。水盐干湿循环作用和季节性冻融循环作用是南疆主要的特殊的环境作用类型。南疆的这种特殊的气候和水文地质环境, 使得桥梁墩台基础和道路路基路面结构发生盐冻胀破坏。温度降低时, 盐渍土中的部分盐分向冷端迁移, Na_2SO_4 会同水分子结合, 析出结晶, 造成土体的盐胀变形。温度低于 0℃时, 水冻结成冰体积膨胀 1.09 倍发生冻胀变形。

本文归纳总结了近年来用于模拟干湿循环和盐冻融循环的装置, 同时提出了各装置的优点和局限性, 对于水盐干湿循环作用和盐冻融循环作用及多种环境作用的耦合对工程结构的损伤破坏机理, 盐渍土环境作用对工程结构的影响问题, 以及对道路结构变形效应的研究具有重要意义。

2. 研究现状

学者们通过模拟干湿循环和盐冻融循环作用对道路结构的损伤效应, 分析其对道路结构的破坏机理, 提出防灾路基结构设计方案。目前关于模拟土体水 - 盐 - 温耦合作用方面的装置, 可以分为模拟冻融循环的装置, 模拟水盐迁移的装置, 模拟耦合作用下测试土体力学性能指标的装置以及模拟干湿、冻融和耦合作用于一体的装置。

2.1. 季节性冻融循环作用模拟试验系统研究

李海鹏[2], 魏海斌[3]等人研发的土体冻融过程水 - 热 - 力耦合作用实验系统, 实时获得土体竖向整体变形、侧向变形、土体内部的水分盐分含量分布、压力分布、温度分布、孔隙水压力分布信息, 为大尺度土体的水 - 热 - 力 - 盐四场耦合作用研究提供了技术保证。但李海鹏的实验系统在施加荷载后使用限定位移的铁板将土体顶部固定, 使得土体固定空间内进行冻胀试验, 这样限制了土体的冻胀融沉位移, 对水分迁移, 压力变化等也产生了一定影响。

李清林[4], 裴万胜[5]等人研发的模拟冻融环境的设备, 通过制冷或制热模拟不同环境温度, 为土体冻融研究提供支持。

韩红卫[6]等人发明了一种非扰动季节土体冻融深度监测装置,利用固液相变实时反应观测点冻土深度,方便固定监测站点周期性观测。结构简单,安装后可在不扰动原土层结构的前提下进行连续观测,极寒气候也可稳定测试试样的深度。精确测量冻土深度,研究其演变规律,对于冻土区工程建设具有重要意义。

2.2. 水盐迁移模拟试验系统研究

毛雪松[7]、王清[8]和周凤玺[9]等人研发的土体冻结过程水-热-力综合试验系统,系统设计合理,操作便捷,可以实现室内对土体冻结过程的模拟。采用自上而下的降温机制,受热受冷均匀。实验系统实时监测冻结过程中土体内部含水量和温度的变化规律,同时能测试得出冻结过程中土体在不同位置处的竖向变形量,了解土体在冻结过程中的变形规律。毛雪松的实验系统可以使土体自由冻胀并测试相关水-热-力耦合参数,但该实验系统不对试验土体提供荷载,仅可以用于研究土体在自重情况下冻结过程的水-热-力耦合机制。

曾铃[10],张留俊[11]研发的水盐迁移试验装置模拟盐渍土路基在自然条件下的降雨入渗,用于路基内部水盐迁移规律的研究。张留俊的降雨装置可以模拟不同的降雨工况,利用海绵吸水入渗路基模拟冬季积雪融化入渗路基的情况。曾铃设置在试样上表面的储水器使得补水更均匀,通气孔道和竖直方向具有一定倾斜,以此来模拟不同风力条件下的降雨,风力越大,倾斜角度越大。利用杠杆实现加压,通过小砝码实现大重量模拟,定滑轮改变力的方向,解决了费力费钱的问题。在不扰动试样的前提下,直接进行直剪试验。

王飞[12]等人研发了一个模拟盐渍土环境路基结构层变形破坏机理的实验装置,以解决水-盐-温环境模拟与控制问题。设计了自然状态下水盐入渗、道路两侧水盐入渗和道路两侧绿化带灌溉水渗流作用三种模具模拟水盐迁移对路基结构的破坏。

王娟[13]等人研发的一种基于土水曲线研究非饱和和盐分迁移规律的室内试验装置,通过叠式压力板仪和电导仪组合进行土水测试中盐分丢量的精确测试,从而可以确定非饱和土增湿和减湿过程中的水盐迁移规律,为盐渍土以及高含盐量土体的非饱和强度测试以及预测提供理论依据。

2.3. 盐冻胀模拟实验系统应力应变测试研究

辛全明[14]等人研发了一种寒区土体多向应力场水-热-力耦合土压力测试方法与装置,可以对试样进行竖向加载,水平加载及固结,可以实现寒冷地区负温环境下含水(尤其富水)土体冻胀在一定应力条件和一定约束条件下的冻胀耦合特性研究,对于研究深基坑的冻胀具有重要意义。

王伯昕[15]等人研发了一个考虑水-热-力-盐耦合作用的土体直剪试验装置,解决了水-热-力-盐四相耦合作用下土体抗剪强度测试的问题。本实验装置结构完善,能满足四场耦合作用下的抗剪强度测试。设计了水盐补给装置,考虑了水分迁移对土体抗剪强度的影响,与实际情况相符。

综上,目前关于水-盐-温-力四场耦合作用实验系统存在以下不足之处:

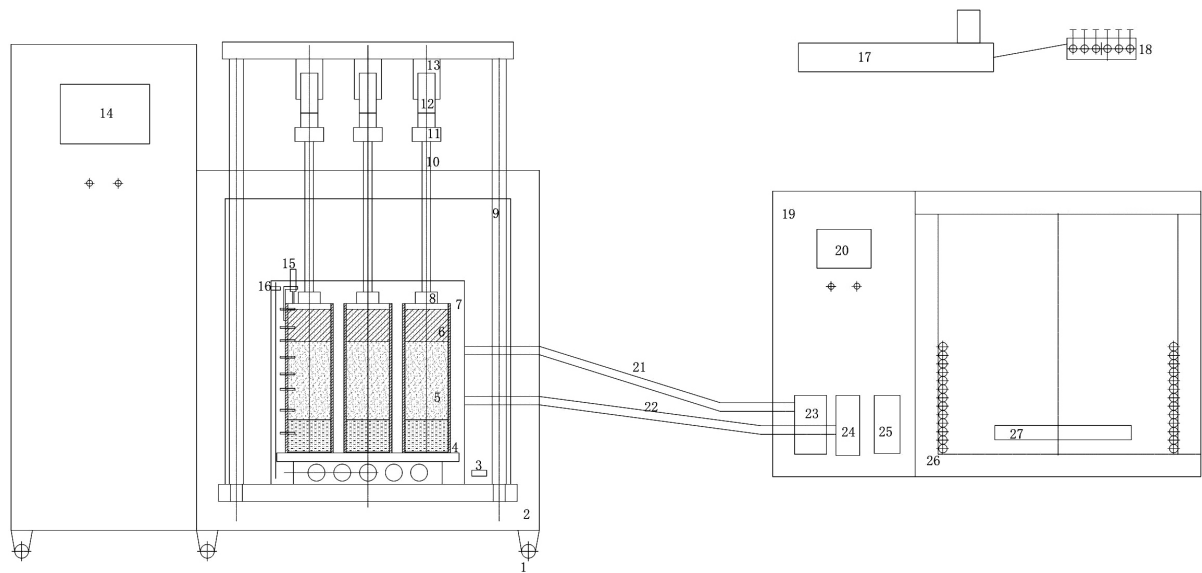
1) 现有的装置中土体从四周向中心冻结,与实际自上而下的降温过程不符合。有的土柱直径过细,与实际有很大差异。使用具有导热性的材料进行保温,导致实验系统的温度损失不能控制。大多装置的升降温采用电阻丝加热、水浴加热等方法,电阻丝加热不均匀,水浴加热时水分易蒸发,热量易损失,实际操作麻烦,测试结果不准确。

2) 试验筒多采用有机玻璃筒,在强内压下,刚度和强度不足,侧向产生的变形影响应力的测量。实验结束后剖开试样测试内部含水率,这种测试手段不能实时和直接获得试样内部水分的变化。

3) 现有的装置很难同时实现水-盐-温-力四场耦合作用,在使用上具有局限性。

3. 水 - 盐 - 温多场耦合作用环境模拟实验系统

目前国内无通用的模拟干湿循环和盐冻融循环耦合作用的实验系统, 现有的实验系统自动化程度低, 在数据采集和智能控制方面存在不足之处, 较多课题组采用人为操作, 操作时间长, 人为误差大, 无法实时采集所需数据。基于此, 本课题组研发了一种水 - 盐 - 温环境耦合作用模拟实验系统, 相比前人利用小型土柱进行实验, 本实验系统可对大体积模型进行研究, 配置的水盐循环控制系统可以模拟不同地下水位补给进行恒压补水, 实现真正意义上的自动化模拟水 - 盐 - 温 - 力四场耦合作用对道路结构的损伤破坏。该实验系统包括主试验箱、水 - 盐 - 温多场耦合环境模拟实验筒、加载系统、温度控制系统、水盐循环控制系统和数据采集监测系统, 如下图 1 所示。



1. 可移动脚轮(主试验箱及其温控储液箱均配备); 2. 主试验箱; 3. 温度传感器; 4. 底板; 5. 试样; 6. 钢筒; 7. 不锈钢内试验箱; 8. 上压板; 9. 重型反力框架; 10. 传力杆; 11. 压力传感器; 12. 蓄能装置; 13. 千斤顶; 14. 干湿循环、盐冻融控制系统; 15. 位移传感器; 16. 液位调整装置; 17. 手动液压泵; 18. 六分阀; 19. 温控储液箱; 20. 储液箱控制系统; 21. 循环进水管; 22. 循环回水管; 24. 水泵一; 25. 水泵二; 26. 制冷系统; 27. 加热系统

Figure 1. Schematic diagram of the experimental system

图 1. 实验系统构成示意图

3.1. 实验系统组成

3.1.1. 主试验箱

主试验箱尺寸: 长 × 宽 × 高 = 1000 mm × 800 mm × 1000 mm。箱体内胆采用不锈钢材质, 焊接形式采用满焊形式, 具有不漏气和保温节能的优点; 外壳采用钢板静电喷涂。箱体内部采用独特风道设计, 提高实验所需温度的精确性与均匀性。箱体保温层采用特种岩棉材质, 提供良好的保温性能。主试验箱采用触摸屏 + PID 的方式控温, 温度控制范围为 -25°C ~ 85°C , 控温精度为 0.1°C , 温度均匀性为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。各通道的温度可以自动储存并以曲线的形式显示, 方便查看历史温度值。

主试验箱的加载力值范围为 0~100 kN, 加载精度为 0.1 kN, 配置 6 个加载通道。主试验箱配备四立柱高强反力框架, 刚性好, 承载性能好。整体结构配置了加强结构, 经过特殊热处理, 有效提高了强度和刚度, 在强压力下不会产生形变。主试验箱配置了压缩机、冷凝器、蒸发器、过滤器、膨胀阀、加热系统、水泵、重型反力框架、传力杆、手动加压泵、六分阀各一个, 压力传感器、高压油管和千斤顶各

六个。主试验箱用于模拟季节性环境作用，与水-盐-温多场耦合环境模拟实验筒通过水盐循环控制系统来实现模拟不同环境作用工况。

3.1.2. 水-盐-温多场耦合环境模拟实验筒

水-盐-温多场耦合环境模拟实验筒(以下简称实验筒)由不锈钢内试验箱、六个不锈钢试样筒、多孔底板、上压板、传力杆、液位调整装置等组成。不锈钢内试验箱放置在主试验箱内，用于模拟干湿循环、盐冻融循环和耦合作用实验。目前室内模型受限于试验装置进行干湿和冻融实验大多采用小型圆柱体土柱，不能准确反映自然条件下的环境作用。本装置配备的不锈钢试样筒内径为 152 mm，高度为 550 mm，可根据试验目的和相似准则进行试验模型尺寸的设定。在其圆周侧高度方向呈螺旋式布置 8 个水分盐分温度传感器孔位，可以实时监测试样内部水分、盐分和温度的变化，如下图 2 所示。上压板是多孔板，放置在试样上方，确保试样和外部环境连通。多孔底板放置在不锈钢试样筒下方，承载不锈钢试样筒，水分从底板入渗，模拟水盐迁移的作用。传力杆连接上压板和压力传感器，和压力传感器共同测定试样的应力变化。液位调整装置可以调整盐溶液的液位高度，模拟无地下水补给条件和不同地下水埋深条件对试样的损伤作用。

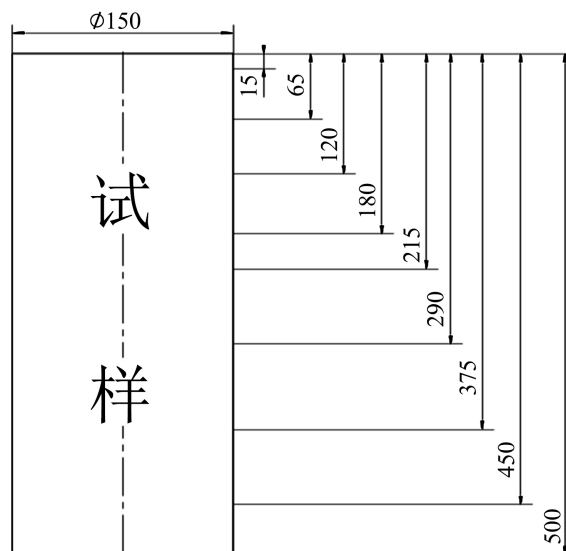


Figure 2. Schematic diagram of sensor arrangement along the height direction of stainless steel sample cylinder

图 2. 不锈钢试样筒沿高度方向布设传感器示意图

3.1.3. 加载系统

加载系统由传力杆、压力传感器、蓄能装置、千斤顶等组成。每个试样都配备了传力杆和压力传感器。加压装置的加载力值量程为 10 T，用于防灾路基的模拟加载试验。千斤顶可以对试样同时加载，也可单独加载，针对每个试样的加载均配有蓄能装置，力值稳定，可以减轻操作者频繁的补压量。

3.1.4. 温度控制系统

温度控制系统由高温外循环水浴、低温外循环水浴、顶板循环装置、底板循环装置、荷载加载固定架、冷凝器、压缩机和加热装置组成。

高温外循环水浴的温度控制范围是 0℃~30℃，循环介质为水或者防冻液。顶板循环装置 6 套，底板循环装置 6 套，均采用优质不锈钢材质。低温循环水浴的温度控制范围是-20℃~25℃，循环介质为酒精。

高(低)温外循环水浴控温精度是 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，温度波动度为 0.2°C 。低温外循环水浴给试样上顶板控温，高温外循环水浴给试样下底板控温，保证每个试样均有好的温度稳定性。冷凝器和压缩机对试样所处的环境进行降温，加热装置用于给试样所处的环境进行升温。

3.1.5. 水盐循环控制系统

水盐循环控制系统由温控储液箱、上循环顶板、下循环底板、水泵和液位调整装置等组成。

温控储液箱内胆为优质不锈钢拉丝板材质，箱体外壳为钢板静电喷涂。温度控制范围为 $-10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，温度控制精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，温度均匀性为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，温控储液箱采用触摸屏 + PID 控制系统控制，该箱与主试验箱实现干湿循环、盐冻融循环试验过程的控制，设置参数后自动进行恒温控制。温控储液箱配置有压缩机、冷凝器、蒸发器、过滤器、膨胀阀、加热系统、触摸屏各一个，配有两个水泵。液位调整装置通过液位传感器监测液面的高度，模拟干湿循环不同浸润状态对试样的损伤破坏。

3.1.6. 数据采集监测系统

数据采集监测系统由温度采集系统、压力采集系统、位移采集系统和温度盐分水分梯度采集系统组成，可以实时监测试样的梯度温度、冻胀力和位移的变化。

温度采集系统由 24 个温度传感器组成，每个试样对应 4 个传感器，温度采集范围为 $-50^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，温度采集精度为 0.1°C 。

压力采集系统由 6 个压力传感器组成。上循环顶板上方安装有压力传感器，旋转螺柄锁定试样的轴向距离，试样膨胀产生的压力就可以通过压力传感器采集。压力采集范围是 $0\sim 100\text{ KN}$ ，采集精度是 10 N 。

位移采集系统由 6 个位移传感器和位移传感器支架组成。不锈钢试样筒圆周上安置一个位移传感器支架，支架上方安装位移传感器，监测实验过程中试样轴向的形变量。位移传感器采集范围是 $0\sim 10\text{ mm}$ ，采集精度是 0.01 mm 。

温度盐分水分梯度采集系统采集温度范围为 $-50^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，采集精度为 0.1°C ；采集水分量程范围为 $0\%\sim 100\%$ ，采集精度为 1% ；采集盐分范围为 $0\sim 10,000\text{ us/cm}$ ，精度为 50 us/cm ，采集试样轴向方向的温度、盐分、水分梯度变化。各传感器采集范围和采集精度如下表 1 所示。

Table 1. Acquisition Range and accuracy of each sensor

表 1. 各传感器采集范围和精度

类别	采集范围	采集精度
位移传感器	$0\sim 10\text{ mm}$	0.01 mm
压力传感器	$0\sim 100\text{ KN}$	10 N
温度传感器	$-50^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$	0.1°C
水分传感器	$0\%\sim 100\%$	1%
盐分传感器	$0\sim 10,000\text{ us/cm}$	50 us/cm

3.2. 实验系统原理

以主试验箱模拟自然环境温度。实验筒通过承重支架放置于主试验箱内。路基结构试样放置在顶部开放，四周和侧面密闭的实验筒内。实验筒模拟实际工程中路基结构深度范围竖向水 - 盐 - 温环境状态，与主试验箱通过水盐循环控制系统和温度同步控制系统模拟不同环境作用工况。模拟控制的环境作用将

通过实验筒从路基结构表面向下传导，来模拟实际气候环境温湿度沿路面向路基结构层的传递。实验系统中的水盐循环控制系统和温度控制系统将根据实际环境路基不同深度的温度与环境温度相对应的温差和时差来控制模拟路基结构试样所处的流固介质环境中水 - 盐 - 土的相态和温度梯度。实验系统中的数据采集系统将实时监测记录路基结构中不同深度的水分、盐分、温度数据和盐冻胀应力应变数据。如下图 3 所示。

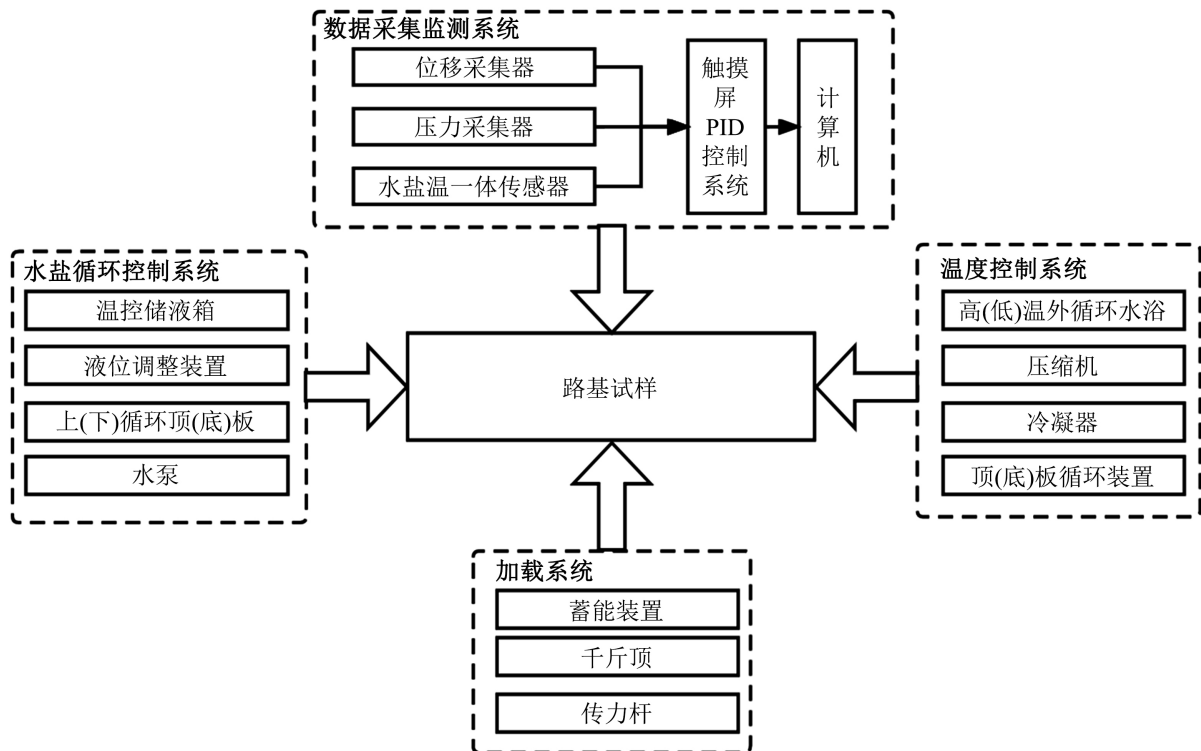


Figure 3. Schematic diagram of experimental system

图 3. 实验系统原理框架图

3.3. 实验系统的功能

研发的水 - 盐 - 温多场耦合作用环境模拟实验系统可以室内模拟水盐运移、干湿循环和冻融循环对道路路基结构的影响。

3.3.1. 干湿循环环境作用模拟试验

进行干湿循环实验时，先将实验所需的盐溶液注入到温控储液箱中，温控储液箱内含有两个水泵，可以将盐溶液通过循环进水管泵送给不锈钢试样筒，也可以通过循环回水管抽回到温控储液箱。储液箱控制系统设定好所需温度，恒温控制盐溶液温度。将养护完成的试样放置于不锈钢试样筒内，水盐温一体传感器放入到不锈钢试样筒预留的孔洞中。干湿循环、盐冻融循环控制系统设定好浸泡温度和浸泡时间。启动液位调整装置控制盐溶液的高度使试样处于无浸润状态、半浸润状态或者完全浸润状态，水 - 盐 - 温环境模拟实验系统开始自动运行。达到浸泡时间后，该实验系统自动停止。水泵将盐溶液通过循环回水管抽回到温控储液箱中。接着设定好烘干温度和烘干时间，实验系统自动运行到设定的时间后，一个干湿循环就完成了。干湿循环的次数可以通过干湿循环、盐冻融循环控制系统设定。试验完成后，取出试样观察试样表面的变化并且测试其相关指标。

3.3.2. 冻融循环环境作用模拟试验

冻融实验采用水冻水融的方法进行。为模拟实际大气温度变化对试样的冻融循环作用，低温外循环水浴位于不锈钢试样筒上方，使试样从表层产生热量变化而后传递到试样内部，符合自上而下的单向冻融情况。控制器要求能实现温度显示、温度控制、冻融过程的转化和冻融次数的记录，温度控制以主试验箱中的环境温度传感器和埋置在各个结构层界面处的水盐温一体传感器通过温度同步控制系统实现。

将达到养护时间的试样放置于不锈钢试样筒中，干湿循环、盐冻融循环控制系统设定好冻结的温度和恒温时间进行冻结实验，再设定好融化温度和恒温时间模拟试样的融化过程，此为一个冻融循环。各通道的温度可以自动记录并储存，方便实时查看冻融过程。

3.3.3. 干湿循环和盐冻融循环耦合作用模拟试验

干湿循环和盐冻融循环耦合作用也可以通过程序设定好命令。

控制系统设定好干湿循环所需的浸润温度、浸润时间、烘干温度、烘干时间和干湿循环次数，干湿循环的部分运行完后，设定好冻融循环所需的冻结温度、冻结时间、融化温度、融化时间和冻融循环次数。干湿循环和冻融循环交替进行，实现干湿循环和冻融循环的耦合作用。本实验系统可进行的耦合作用组合如下表 2 所示。

Table 2. Experimental combination of coupling effect of freezing-thawing cycle of dry-wet cycle salt

表 2. 干湿循环 + 盐冻融循环耦合作用试验组合

盐冻融作用类型 干湿作用 + 冻融作用耦合 干湿作用浸润类型	完全浸润状态 DW1	半浸润状态 DW2	无浸润状态 DW3
FT1: 盐胀 + 冻胀	DW1 + FT1	DW2 + FT1	FT1 (毛细作用)
FT2: 冻胀 + 聚流	DW1 + FT2	DW2 + FT2	FT2
FT3: 不产生盐胀冻胀	DW1	DW2	路基结构干燥基本为水盐流体介质

4. 研究展望

基于目前水 - 盐 - 温多场耦合作用环境模拟实验系统的研究现状，应着重开展以下研究：

1) 实验系统设定为开展封闭系统和开放系统冻融试验，可实现同步冻结和异步冻结的控制，满足不同冻结模式的需要。完善自动化控制系统使其可以用于其它材料和构件的环境作用实验。数据采集系统方面采用更加耐高温耐腐蚀的传感器，比如光纤光栅传感器。

2) 设置水盐补给装置，模拟水盐迁移对试样的影响。降温设置为从试样上部单向降温；应注重温控系统、加载系统和水盐补给系统的联合应用，模拟季冻盐渍土环境路基结构受盐冻胀作用其内部水盐迁移与水盐相态变化产生的应力应变，提供符合工程实际的水 - 盐 - 温 - 力多场耦合作用环境模拟试验系统。

3) 配置加载系统可以实现对试样施加竖向荷载、水平荷载以模拟车辆等荷载作用，应用动态荷载技术和横向加围压等加载技术对大尺度路基结构模型进行荷载试验，为防灾路基结构动力响应模型提供设计依据，便于优选路基结构材料。

基金项目

本论文受到国家自然科学基金项目的资助，项目名称：水 - 盐 - 温多场耦合作用下南疆盐渍化路基结构损伤破坏机理研究(52068062)。

参考文献

- [1] Yang, B.C., Qin, Z.P., Zhou, Q.P., Li, H.W., Li, L. and Yang, X.S. (2020) Pavement Damage Behaviour of Urban Roads in Seasonally Frozen Saline Ground Regions. *Cold Regions Science and Technology*, **174**, Article ID: 103035. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103035>
- [2] 李海鹏, 胡琛琛, 宋雷, 汪汝锋, 张涛, 任彦龙, 杨志江. 大尺度高压土体冻融过程水-热-力耦合作用试验系统[P]. 中国, CN103116014A. 2013-05-22.
- [3] 魏海斌, 李清林, 贾江坤, 韩雷雷, 张仰鹏, 王富玉, 陈昭. 大尺度土体水-热-力-盐四场耦合作用试验系统及方法[P]. 中国, CN108645885A. 2018-10-12.
- [4] 魏海斌, 李清林, 王富玉, 张仰鹏, 韩雷雷, 李子奇, 张继, 陈昭. 冻融环境下受荷载土体水-热-力-位移实验系统及方法[P]. 中国, CN108344850A. 2018-07-31.
- [5] 裴万胜, 张明义, 赖远明, 王林, 王冲. 模拟混凝土超低温-大温差冻融过程的冻融试验设备[P]. 中国, CN113466286A. 2021-10-01.
- [6] 韩红卫, 富翔, 徐雷, 汪恩良, 刘兴超. 一种非扰动季节冻土冻融深度监测装置及方法[P]. 中国, CN109884268B. 2021-09-21.
- [7] 毛雪松, 侯仲杰, 张慧军, 王铁权. 土体冻结过程水热力综合试验系统及试验方法[P]. 中国, CN104749205A. 2015-07-01.
- [8] 王清, 王伯昕, 范建华, 谢苏吉. 一种可控温土体冻胀试验装置[P]. 中国, CN108037268A. 2018-05-15.
- [9] 周凤玺, 应赛, 文桃, 马强, 柳鸿博, 叶泽国, 陈浩, 王立业, 梁玉旺, 周立增, 刘世杰. 一种实现水热力耦合作用的盐冻胀测试仪[P]. 中国, CN109945928A. 2019-06-28.
- [10] 曾铃, 邱健, 刘杰, 查焕奕. 基于湿热力耦合的岩土强度及水盐迁移试验装置[P]. 中国, CN113533159A. 2021-10-22.
- [11] 张留俊, 李雄飞, 张发如, 刘军勇. 盐渍土水盐迁移试验装置及其方法[P]. 中国, CN111272979A. 2020-06-12.
- [12] 杨保存, 邱平, 王飞, 王成, 安巧霞, 杨柳, 杨晓松, 张勤玲, 王荣, 李宏伟, 巨澍朋, 黎亮. 一种模拟盐渍土环境路基结构层变形破坏机理的实验装置[P]. 中国, ZL201610507171.2. 2019-04-09.
- [13] 王娟, 谌文武, 刘伟, 孙冠平. 一种基于土水曲线研究非饱和和盐分迁移规律的室内试验装置及其试验方法[P]. 中国, CN108061740B. 2020-07-31.
- [14] 辛全明, 曹洋, 张丙吉, 余小康, 尹志伟, 赵晨, 梁海, 季铁军. 寒区土体多向应力场水-热-力耦合土压力测试方法与装置[P]. 中国, CN111474063A. 2020-07-31.
- [15] 王伯昕, 潘精精, 王清. 考虑水热力盐耦合作用的土体直剪试验装置[P]. 中国, CN111948031A. 2020-11-17.