DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.261129

大厚度湿陷性黄土地基处理浸水试验及数值分析研究

童景盛,张伟强,赵国锐,黎大玮
(中国市政工程西北设计研究院有限公司,甘肃 兰州 730000)

摘 要: 我国西北高寒地区广泛分布大厚度自重湿陷黄土,部分场地自重湿陷土层厚度达到34 m。受季节冻融交替影响,黄土颗粒胶结结构发生劣化,遇水易产生大规模自重湿陷变形,威胁各类工程服役安全。常规常温试坑浸水试验难以适配高寒场地水-热迁移特征。以兰州Ⅳ级大厚度自重湿陷黄土场地为研究对象,开展室内冻融循环试验,编制高寒适配型原位试坑浸水试验方案并构建一体化监测体系;基于Biot固结理论建立渗流-应力耦合轴对称有限元模型,分析冻融-浸水耦合作用下浸润锋、变形场与应力场演化规律,对比评价不同地基处理工艺的高寒适用性,建立工法选型框架。结果表明:经10次冻融循环后,黄土湿陷系数增大40%~65%,黏聚力降低30%~36%;冻融产生的微观裂隙形成优势渗流通道,加快水分入渗并提前湿陷启动时间;数值模型可较好复现浸水沉降空间分布;强夯、灰土挤密桩仅适宜暖季施工,注浆加固低温适应性更优。研究成果可为西北高寒大厚度湿陷黄土场地勘察、原位浸水试验实施及地基加固设计提供技术参考。

关键词: 大厚度自重湿陷黄土;原位浸水试验;冻融-湿陷耦合;渗流-应力耦合;地基处理;数值模拟
中图分类号: U451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)11-0029-06

Study on Water-immersion Test and Numerical Analysis for Foundation Treatment of Thick Collapsible Loess

TONG Jingsheng, ZHANG Weiqiang, ZHAO Guorui, LI Dawei
(CSCEC North west Municipal Engineering Design and Research Institute Co.,Ltd., Lan zhou, 730000, China)

Abstract: Thick self-weight collapsible loess is widely distributed in the alpine regions of Northwest China, and the thickness of self-weight collapsible soil layer can reach 34 m in some sites. Affected by seasonal freeze-thaw alternation, the cementation structure of loess particles deteriorates, and large-scale self-weight collapsible deformation is prone to occur upon water infiltration, which threatens the long-term service safety of engineering structures. Conventional pit immersion tests under normal-temperature conditions cannot adapt to the hydro-thermal migration characteristics of alpine sites. Taking a grade-IV thick self-weight collapsible loess site in Lanzhou as the research object, laboratory freeze-thaw cycle tests on undisturbed loess were carried out. An in-situ pit immersion test scheme suitable for alpine conditions was compiled, and an integrated field monitoring system was established. An axisymmetric seepage-stress coupling finite element model was constructed based on Biot consolidation theory to analyze the evolution laws of wetting front, deformation field and stress field under coupled freeze-thaw and water-immersion effects. The adaptability of different foundation treatment technologies to alpine environments was evaluated, and a selection framework for construction methods was proposed. The results indicate that after 10 freeze-thaw cycles, the collapsibility coefficient of loess increases by 40%-65%, and the cohesion decreases by 30%-36%. Micro-cracks induced by freeze-thaw form preferential seepage channels, accelerating water infiltration and advancing the initiation of collapsible deformation. The numerical model can well reproduce the spatial distribution of immersion-induced settlement. Dynamic compaction and lime-soil compaction piles are only suitable for construction in warm seasons, while grouting reinforcement has better low-temperature adaptability. The research outcomes can provide technical references for site investigation, implementation of in-situ immersion tests and foundation reinforcement design for thick collapsible loess sites in alpine areas of Northwest China.

Keywords: thick self-weight collapsible loess; in-situ water-immersion test; freeze-thaw-collapse coupling; seepage-stress coupling; foundation treatment; numerical simulation

收稿日期:2026-10-06
基金项目:甘肃省建设厅重点攻关项目基金(JK2026-27)
作者简介:童景盛(1973—),男, ,教授级高级工程师,博导,公司副总工程师,从事道桥隧研究与设计咨询工作。

0　引　言

高寒区域受季节交替冻融、昼夜温差剧烈等环境条件耦合影响，黄土内部不断萌生、扩展微观裂隙，土体湿陷敏感性进一步加剧，由此诱发的路基塌陷、建构筑物不均匀沉降等地质灾害频发，给工程建设与后期运维带来严峻挑战地质科学。

围绕冻融环境下黄土工程特性，国内外学者已开展大量室内宏-微观试验研究。国外相关研究更多聚焦寒区粉质土体冻融后渗透特性[1-2]、应力-应变本构关系演变[3]，揭示冻胀-融沉作用对土体骨架的改造效应[4-5]，但针对大厚度自重湿陷黄土的原位浸水耦合试验研究相对较少。国内学者借助直剪、三轴及扫描电镜测试证实，冻融循环会造成原状黄土黏聚力显著衰减，孔隙比与渗透系数增大，土体力学损伤程度和初始含水率、冻融循环次数密切相关[6-8]；部分研究指出经过多次冻融作用后，黄土内部贯通裂隙增多，会为水分迁移提供优势渗流通道，提升土体遇水湿陷风险地质科学[9-10]。在现场测试方面，国内已在关中、陇东等温带黄土场地完成多组大型试坑浸水试验[11-13]，揭示出试坑中心沉降最大、沿径向向外沉降逐步衰减的变形规律，建立了湿陷变形、水分浸润锋演化的基本认知，但多数现场试验均在常温条件开展，较少考虑前期冻融损伤对场地湿陷行为的预扰动效应。少数高寒场地探索性试验表明[14-16]，低温环境会改变土体水热迁移路径，冬季水体结冰会直接干扰浸水边界，若直接照搬温带地区试验方案，极易造成监测数据失真，给场地湿陷等级评价带来偏差。

仅依靠现场原型试验手段，难以捕捉土体内部应力场、渗流场随时间的完整演化过程，而室内试验又无法完全还原原位地应力与地层分布条件。渗流-应力耦合数值仿真手段可以弥补现场监测只能获取离散测点数据的短板，实现场地多物理场全过程可视化解析，是开展湿陷变形机制分析的重要补充工具。目前多数数值模型未充分引入冻融造成的土体力学劣化参数，难以真实复现高寒场地浸水湿陷的演化全过程。

本文以兰州近郊Ⅳ级大厚度自重湿陷黄土典型场地为研究对象，构建一套适配高寒气候特征的原位试坑浸水试验实施方案；开展原状黄土室内冻融循环土工试验，探明冻融作用下土体力学参数劣化规律；依托Biot固结理论建立轴对称渗流-应力耦合有限元模型，设置多组工况开展仿真计算；综合室内试验、现场方案设计与数值模拟结果，对比分析不同地基处置技术的高寒环境适配性，提出高寒大厚度湿陷黄土地基选型原则，可为西北同类高寒黄土场地勘察评价、原位浸水试验实施以及地基加固设计提供参考依据。

1　试验场地与土体力学特性

1.1　场地工程地质条件

试验场地位于兰州近郊，为Ⅳ级自重湿陷性黄土场地，自重湿陷土层下限埋深为34～36 m，勘探深度内未见稳定地下水。场地地层分布均匀，无滑坡、大型黄土陷穴等不良地质作用。区域属半干旱大陆高寒气候，历史极端最低气温-22 ℃，场地标准冻深1.03 m，每年11月下旬至次年3月上旬为土体冻结时段。场地马兰黄土原状土物理力学指标统计表及地层柱状图详如表1和图1所示。

表1　场地原状黄土基本物理力学指标

埋深m	天然含水率(%)	干密度/(g·cm^{-3})	湿陷系数δ	自重湿陷系数δ	黏聚力c/kPa	内摩擦角φ
3	17.2	1.31	0.078	0.061	58	21.2
10	16.5	1.35	0.048	0.037	55	20.5
18	15.1	1.41	0.028	0.021	47	19.6
25	14.3	1.44	0.019	0.013	42	18.8

1.2　原状土室内冻融循环土工试验

分别在场地3、10、18 m埋深位置采集原状黄土试样，开展冻融循环条件下的力学性能测试。试验冻结温度设定-15 ℃，融化温度控制+15 ℃，分别设置0、5、10次冻融循环三组试样，完成湿陷特性与抗剪强度指标测定。选取埋深10 m试样，不同循环次数对应的土体力学参数统计结果见表2。

试验结果表明，随冻融循环次数增加，黄土孔隙比逐步增大，颗粒间胶结结构发生损伤劣化。经历10次冻融循环后（见图2），试样湿陷系数增幅达62.5%，黏聚力下降36.4%。土体初始含水率越高，冻融引发的力学性能劣化效应越突出。冻融作用产生的大量微观裂隙可为水分入渗提供优势通道，进而增大黄土发生湿陷破坏的风险。

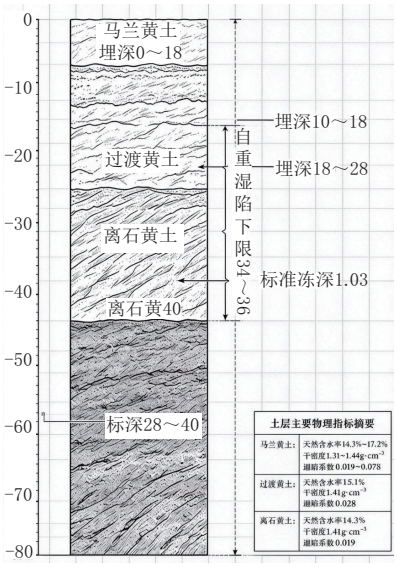
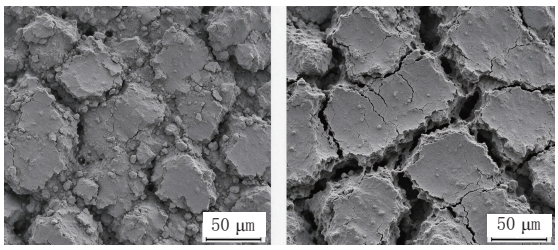


图1　场地地层综合柱状图(单位：m)

表2　不同冻融循环次数土体力学参数变化(10 m深度土样)

冻融循环次数	湿陷系数δ	黏聚力 c/kPa	孔隙比 e
0	0.048	55	0.98
5	0.062	43	1.07
10	0.078	35	1.10



(a)0次冻融　　(b)10次冻融

图2　冻融循环后黄土微观SEM对比图

2　高寒环境原位试坑浸水试验方案

2.1　试验研究目标

本次原位浸水试验研究目标如下。

(1)通过现场原型浸水试验实测场地自重湿陷量，精准确定大厚度黄土自重湿陷下限深度，结合室内土工试验结果开展对比分析，修正并获取适配高寒区域的黄土湿陷特征参数；

(2)采集浸水作用下地表及不同土层深度的分层沉降时序数据，明确水分在大厚度黄土土体内部的浸润扩散范围与渗透规律；

(3)监测浸水全过程土体含水率、土压力的动态变化特征，揭示冻融预损伤作用下高寒黄土场地的浸水湿陷演化机理；

(4)如图3所示，依托现场实测监测数据标定渗流-应力耦合数值计算模型，为高寒湿陷性黄土地基加固方案的优化设计、数值模拟分析提供可靠的数据支撑。

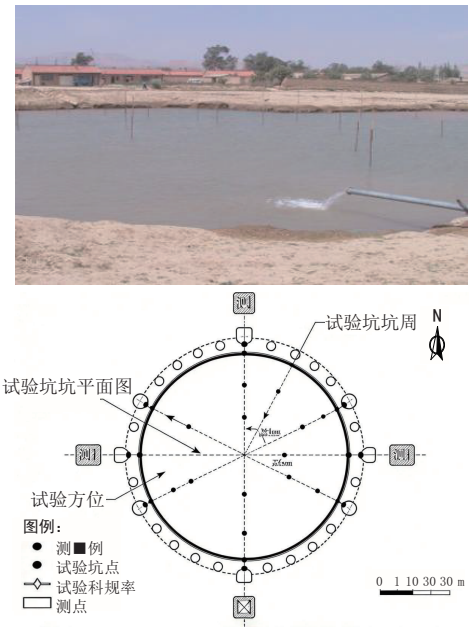


图3　原位浸水场地及试坑测点总体布置图

2.2　试坑几何构型设计

本次试坑设计严格依据《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)，结合场地自重湿陷下限34～36 m的地层特征，采用圆形试坑布置形式，坑径25 m、开挖深度0.5 m(见图4)。坑底铺设10 cm厚砂砾石垫层，有效削弱注水水流对原状黄土的冲刷扰动；坑壁设置简易防护措施，规避降雨入渗引发的坑壁失稳坍塌风险。

针对研究区高寒气候特征，试验优选每年4—10月非冻结期开展浸水测试；若受工期限制需跨年试验，可通过布设外围保温围挡、水面覆盖保温浮盖等措施，抑制水体冻结，保障高寒工况下试验连续稳定开展。

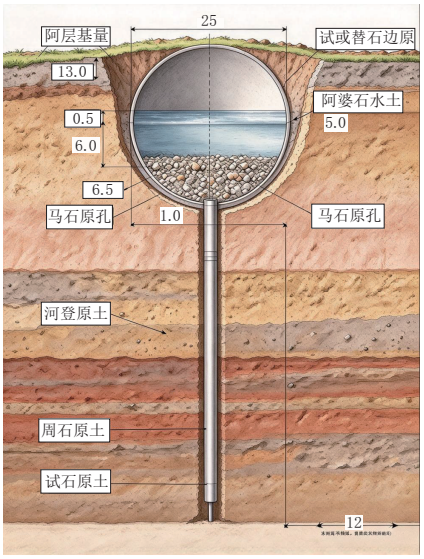


图4　直径25 m浸水试坑竖向剖面示意图

2.3　多维度监测系统布设

2.3.1　地表浅层沉降标点

由试坑圆心向外布设三条互成120°的放射状测线，每条测线布置18个测点，连同试坑中心点共设置55个浅层标点。测点间距2 m，标点采用ϕ25 mm镀锌钢管，底部浇筑C20混凝土基座并置于原状土层；钢管顶端焊接角铁，用于安置全站仪反光片，实现地表沉降观测。

2.3.2　深部机械式分层沉降标点

如图5所示，在距试坑圆心9 m的圆周上，以30°间隔布设12组深部标点S1-S12。竖向测点间距3m，最大埋设深度36 m。标点采用内外套管结构，ϕ32 mm镀锌钢管作为内管，外侧配套ϕ75 mmPVC保护套管，消除上层土体摩擦拖拽影响，保证内管与目标土层协同沉降。

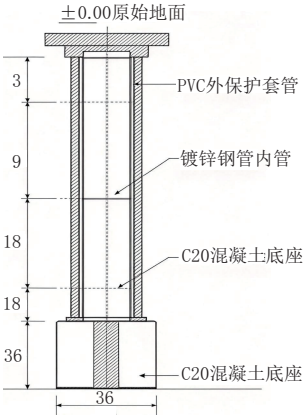


图5　深部机械式分层沉降标点内外套管剖面结构示意图

2.4　高寒工况试验保障与观测控制标准

为保障高寒地区原位浸水试验精度与连续性，本次试验严格依据规范要求构建监测体系，明确观测频次、变形终止判定条件，并配套针对性高寒防护措施，具体控制标准如下。

2.4.1　监测基准网布设

基准点位布置于试坑外缘50 m以外区域，埋设深度5 m，采用C20混凝土浇筑标石；基准点周边2 m范围换填50 cm厚3∶7灰土，提升点位稳定性。点位埋设完成后静置7d待土体与结构固结稳定，方可开展正式观测，整体观测精度满足《建筑变形测量规范》(JGJ 8—2016)二等变形测量标准。

2.4.2　观测周期与采集频次

本次试验总观测时长约200 d，包含3 d注水预观测期、130 d持续浸水阶段及不少于67 d停水固结阶段。试验期间每日8∶00、14∶00、19∶00开展3次定时监测，同步采集沉降数据、注水量、坑内水头高度，记录地表裂缝发育位置、宽度及土体错台变形情况。

2.4.3　试验终止判定准则。

(1)浸水阶段：试坑范围内土体连续5 d平均湿陷沉降速率≤1 mm/d，判定土体湿陷变形趋于稳定，停止注水作业；

(2)停水固结阶段：停水后持续观测不少于10 d，且连续5 d平均沉降速率≤1 mm/d，即可终止全部现场观测工作。

2.4.4　高寒环境保障措施

针对区域低温冻融特征，供水管路加装伴热保温结构，野外监测设备内置保温箱防护；全部传感器采用低温标定元器件，规避低温环境对监测数据的干扰。同时在试坑周边布设隔离警示设施，定期巡查土体裂缝与沉降动态，保障高寒工况下试验安全、数据连续可靠。

3　基于Biot固结理论的渗流-应力耦合数值仿真计算

3.1　有限元模型构建

建立轴对称有限元模型，模拟圆形试坑浸水工况下大厚度湿陷黄土渗流与变形演化全过程。模型径向范围80 m，竖向深度40 m；采用孔压实体单元进行离散，对试坑附近及浅层土体网格加密，远端网格适度粗化，兼顾计算精度与求解效率。边界条件设置如下。

如图5所示，模型底部，约束全部位移自由度，封闭法向渗流；侧向边界，限制径向位移，允许孔隙水自由渗出；地表边界，试坑以外区域设置降雨-蒸发自由边界，试坑区域施加0.3 m恒定水头以模拟持续浸水；初始场，地应力场由自重应力生成，初始含水率依据勘察资料分层赋值。

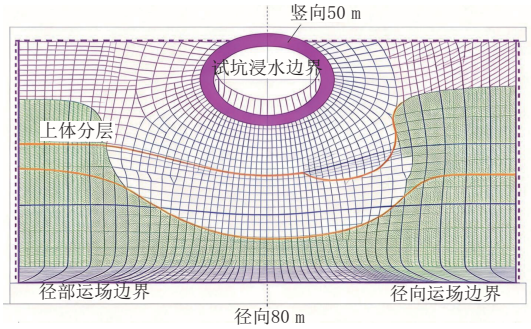


图6　渗流-应力耦合有限元模型网格与边界条件示意图

3.2　模型材料参数与计算工况

本次仿真设置2套计算工况：

工况1为未遭受冻融损伤的原始场地条件；

工况2为经历10次冻融循环预损伤的场地条

件，输入室内冻融试验得到劣化后的土体力学参数　　如表 3 所示。

表 3　数值模拟土体分层输入参数

土层埋深/m	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	渗透系数 k/(m·s^{-1})	湿陷系数 δ 工况 1	湿陷系数 δ（工况 2 冻融损伤）
0~8	8.2	0.33	2.2×10^{-6}	0.072	0.078
8~18	11.5	0.32	1.6×10^{-6}	0.046	0.061
18~28	16.3	0.30	1.1×10^{-6}	0.027	0.038
28~40	22.0	0.28	0.7×10^{-6}	0.014	0.020

本计算模型依托 Biot 固结理论，嵌入湿陷本构子程序：单元饱和度达到预设阈值时，触发湿陷塑性应变计算，实现浸水诱发附加沉降的模拟计算。

3.3　仿真结果解析

3.3.1　水分浸润锋演化规律

冻融预损伤工况下，土体渗透性能显著提升，水分竖向入渗与侧向扩散速率均高于原状无损伤场地。受冻融裂隙优势渗流通道影响，水分浸润锋快速向下扩展，且浸润深度随浸水时长持续增大。相同浸水历时条件下，冻融损伤场地的水分浸润深度较原始场地提升约 16%。

3.3.2　地表沉降空间分布特征

如图 7 所示，各工况地表沉降均呈现试坑圆心沉降量最大、沿径向向外逐步衰减的分布规律。相较于原状场地，冻融预损伤场地的整体沉降变形显著增大，表明冻融劣化效应显著加剧了高寒黄土场地的浸水湿陷变形（见表 4）。

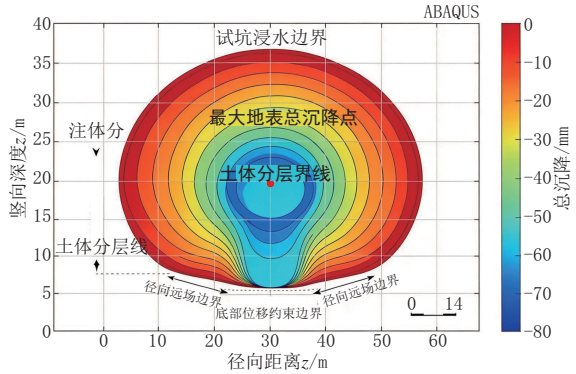


图 7　冻融损伤场地浸水 120 d 地表总沉降云图（工况 2）

表 4　不同工况关键位置模拟地表沉降对比（浸水 120 d）

计算工况	试坑中心点（r=0 m）	r=10 m	r=20 m	r=40 m
工况 1：无冻融损伤/mm	562	287	114	26
工况 2：10 次冻融预损伤/mm	714	376	162	43

3.3.3　应力场演变规律

土体发生浸水湿陷的全过程，内部有效应力出现重分布现象；试坑正下方一定深度范围内有效应力下降幅度较为突出；冻融损伤工况下，应力重分布的影响范围进一步扩大。

3.4　模拟结果与试验预期响应对比

本次基于 Biot 固结理论的渗流-应力耦合数值模型，完整复现了高寒黄土场地浸水条件下“水分浸润锋推进—土体饱和度提升—湿陷变形持续发育—沉降逐渐收敛稳定”的全过程演化机制。数值计算结果表明，相较于无冻融损伤的原状场地，冻融预损伤工况下黄土土体渗透性与湿陷敏感性显著提升，不仅场地整体沉降变形量明显增大，且湿陷变形启动时间显著提前。该仿真规律与室内冻融循环试验所得的土体力学劣化、渗透性能提升的结论高度吻合，有效验证了数值模型的合理性与可靠性。

同时，现阶段数值模拟仅基于理论参数开展仿真计算，后续可依托本次原位浸水试验获取的地表沉降、分层变形、土体含水率等实测时序数据，对模型土体参数、边界条件进行反演迭代与优化修正，进一步提升数值模型对高寒大厚度湿陷黄土场地变形演化的预测精度，为实际工程的风险评估与加固设计提供更为精准的数值依据。

4　高寒大厚度湿陷黄土地基处置工艺对比与选型

结合室内土工测试、数值仿真揭示的冻融-浸水耦合致灾机制，针对工程领域常用的地基处置工艺开展多维度对比分析（见表 5）。

4.1　依托试验-仿真成果的工艺选型准则

（1）地基处理深度优先参考原位浸水测试实测自重湿陷下限，不能直接照搬室内土工试验计算得到的结果；数值仿真可以辅助评估不同处理深度之下残余湿陷的发生风险。

（2）0~5 m 浅层土体：环境温度条件达标的前提下优先选用复合固化剂改良手段；

（3）5~12 m 中等埋深，周边不存在敏感建构筑物，且处于适宜施工的温暖季节，优先采用灰土挤密桩、强夯工艺；

（4）湿陷土层埋深超过 12 m，或是项目必须开展

表5　高寒大厚度湿陷黄土地基处置工法综合对比表

处置工艺	有效处理深度/m	适宜施工时段	主要优势	高寒环境主要短板
强夯工艺	5~8	4—10月温暖季节	工程造价适中，现场施工效率高	土体处于冻结状态不可施工；临近既有建构筑物会产生振动扰动风险
灰土挤密桩	5~12	4—10月	湿陷消除效果稳定，复合地基承载力提升明显	冬季冻土条件成孔质量较差，不适合低温环境施工
GS-1复合固化剂浅层改良	1~5	环境温度高于5 ℃	现场施工作业简便，适配浅层土体改良	低温环境强度增长受阻，冬季施工需要加温保温处理
注浆加固技术	5~20	全年均可作业，低温适应性较好	能够处理深部湿陷土层，受季节条件约束小	整体工程建设成本相对偏高
预浸水处置	匹配自重湿陷下限深度	优先非冻融周期	可充分消除深部自重湿陷变形	测试周期漫长，水资源消耗量大；高寒冬季水体容易结冰，风险管控难度较高

冬季施工作业，优先选择注浆加固方案，也可采用多种处置工艺联合实施；

（5）高寒场地工艺选型必须充分考量施工季节、场地标准冻深两大约束条件，不能直接套用温带黄土区域的设计经验。

5　现场试验风险识别与质量管控要点

（1）地基加固深度应以原位浸水试验实测自重湿陷下限作为主要依据，不宜直接采用室内土工试验的计算结果；可借助数值仿真手段，评估不同加固深度下场地残余湿陷风险。

（2）埋深0～5 m浅层土体，在满足温度施工条件时，优先采用复合固化剂进行土体改良。

（3）埋深5～12 m的中层土体，当周边无敏感建构筑物且处于温暖施工窗口期，推荐选用强夯或灰土挤密桩工艺。

（4）当湿陷土层埋深大于12 m，或是工程需冬季施工时，优先采用注浆加固，亦可采用多种工法联合处置。

（5）高寒场地的地基处理方案需综合考虑施工季节与场地标准冻深的约束，不可直接沿用温带黄土地区的工程设计经验。

6　结　论

本文以兰州Ⅳ级大厚度自重湿陷性黄土地为研究对象，结合室内冻融试验、原位浸水试验方案与Biot渗流-应力耦合数值模拟，揭示冻融-浸水耦合下黄土湿陷变形规律，评估各类地基加固工艺的高寒适配性，主要结论如下：

（1）冻融循环会劣化黄土力学与水理性能，增大湿陷敏感性。经历10次冻融作用，土体湿陷系数提高40%～65%，黏聚力下降30%～36%。冻融产生的贯通裂隙形成优势渗流通道，加快水分入渗，因此常温条件下的浸水试验方案不能直接用于高寒场地。

（2）构建适用于高寒环境的大厚度湿陷黄土原位浸水试验体系。采用直径25 m圆形试坑，配套深浅分层沉降、含水率及土压力监测系统；确定二等水准观测标准、观测频次与浸水-停水双阶段沉降稳定判定条件，配套防冻保温措施，可为寒区同类现场试验提供参考。

（3）轴对称渗流-应力耦合模型能够再现浸水湿陷全过程。冻融预损伤可加深水分浸润范围，同等浸水时长下地表沉降大于原状场地；地表沉降呈试坑中心最大、沿径向逐步衰减的分布特征，该数值手段可用于高寒场地湿陷风险预测。

（4）不同地基处理工法对低温环境适应性差异明显。强夯、灰土挤密桩受季节冻土限制，仅适合暖季施工；注浆加固低温适用性更好，可满足冬季作业要求。地基处理深度优先依据原位浸水试验测得的自重湿陷下限确定，结合土层埋深、施工季节与周边构筑物保护需求，选用单一或联合加固方案，不宜直接照搬温带黄土地区设计经验。

参考文献：

[1] Li G Y, Mu Y H, Wang F, et al. Strength deterioration and micro-structural damage of compacted loess under multi-cycle freeze-thaw action[J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(8): 1482-1496.

[2] Kang W M, Tian J, Xue D X, et al. Characterization of preferential flow occurrence during freeze-thaw cycles[J]. Water Resources Research, 2026, 62(2): e2025WR041926.

[3] Lu S F, Lan T G, Zhao T, et al. Hydro mechanical analysis of collapse settlement of loess during field immersion tests: Field investigation sand numerical modeling[J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(10): 04024078.

[4] Wang L, Qin B, Huang L K. Transient hydro mechanical response of loess during wetting process: Numerical simulation and field test verification[J]. Engineering Geology, 2025, 327: 107321.

[5] Ma J H, Zeng R Q, Yao Y Q, et al. Characterization and quantitative evaluation of preferential infiltration in loess, based on asoil column

（下转第49页）