 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9322

Study on the Mechanism of Settlement Control of Foundation Reinforced by Expansive Geopolymer

Wei Wei

jie Aobei Construction Engineering (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 201800, China

Abstract

As a novel green curing material, expansive geopolymer demonstrates outstanding mechanical properties and environmental friendliness in foundation reinforcement. Through the synergistic effects of chemical expansion and structural densification, it effectively improves the bearing capacity and settlement deformation characteristics of weak foundations. This paper systematically analyzes the reinforcement and settlement control mechanisms of expansive geopolymer from three aspects: expansion reaction mechanism, microstructural evolution, and macroscopic deformation control. Based on laboratory tests, numerical simulations, and field measurements, the study explores the influence of material expansion rate, dosage, and grouting pressure on foundation deformation, revealing the coupling relationship between chemical expansion and stress redistribution. The research indicates that within an appropriate expansion rate range, expansive geopolymer can achieve active prestress compensation and pore closure in foundations, effectively reducing the risk of uneven settlement. This provides theoretical and engineering references for foundation repair and stability control under complex geological conditions.

Keywords

Expansive geopolymer; Foundation reinforcement; Settlement control; Microstructure; Stress redistribution

膨胀型地质聚合物加固地基的沉降控制机理研究

魏巍

捷敖贝建筑工程（上海）有限公司，中国·上海 201800

摘　要

膨胀型地质聚合物作为一种新型绿色固化材料，在地基加固领域展现出优异的力学性能与环境友好性。其通过化学膨胀与结构致密化的协同效应，能够有效改善软弱地基的承载力与沉降变形特性。本文从膨胀反应机理、微观结构演化与宏观变形控制三方面系统分析膨胀型地质聚合物的加固与沉降控制机理。基于室内试验、数值模拟及现场实测结果，探讨材料膨胀速率、掺量与注浆压力对地基变形的影响规律，揭示了化学膨胀与应力重分布之间的耦合关系。研究表明，膨胀型地质聚合物在适宜膨胀率范围内可实现地基的主动预应力补偿与孔隙闭合，有效降低不均匀沉降风险，为复杂地质条件下的地基修复与稳定性控制提供了理论与工程参考。

关键词

膨胀型地质聚合物；地基加固；沉降控制；微观结构；应力重分布

1 引言

地基沉降问题长期困扰着建筑与交通基础设施的安全运行，尤其在软弱土层或旧建筑改造场景中更为突出。传统的地基加固方法如水泥注浆、化学固化或桩基处理虽然能一定程度提高承载力，但常伴随施工扰动大、材料收缩、生态污染等问题。随着绿色低碳建材与地质工程技术的发展，地质聚合物因其低碳、高强、耐腐蚀等特性逐渐成为地基改良领域的研究热点。膨胀型地质聚合物在固化过程中通过化学反应产生体积膨胀，形成可控的内部应力场，从而实现地基的主动加固与沉降补偿。该材料的应用不仅改善了地基的承载性能，还显著降低了后期沉降速率。本文旨在从材料反应机理、力学行为与工程应用三方面揭示膨胀型地质聚合物的沉降控制机制，为地基长期稳定提供新的思路。

2 膨胀型地质聚合物的反应与结构特征

2.1 膨胀反应机理与体系构成

膨胀型地质聚合物是一种以硅铝酸盐固体原料（如粉煤灰、矿渣、偏高岭土等）与碱性激发剂（通常为 NaOH、Na_2SiO_3）为基础的无机高分子材料。其化学反应过程主要包括溶解、聚合与凝胶化三个阶段，最终形成以 C-A-S-H 或 N-A-S-H 凝胶为主的三维网状结构。当体系中引入膨胀组分，如氧化钙、硫铝酸钙或铝粉等反应物时，早期化学

【作者简介】魏巍（1984—），男，蒙古族，硕士，工程师，从事岩土工程研究。

反应伴随结晶水生成或气体析出，使浆体体积产生可控微膨胀。此膨胀效应在浆体硬化初期可对地基孔隙施加反向应力，从而改善孔隙结构并增强界面黏结。相较传统水泥体系，地质聚合物反应中 $Ca(OH)_2$ 生成量较少、碳化速率低，结构致密度高，膨胀过程中的内应力分布更加均匀。反应体系在凝结与膨胀同步进行的过程中形成化学—力学耦合机制，为后续强度增长、应力平衡与沉降抑制提供持续的能量驱动。

2.2 微观结构演化与孔隙重构

通过 SEM 与 XRD 等微观分析可知，膨胀型地质聚合物内部呈现凝胶相与结晶相的复合结构，膨胀产物如钙矾石与 C-A-S-H 凝胶共同填充孔隙空间，形成多尺度的致密网络层。膨胀反应过程中，局部形成的微裂隙会因后期凝胶相扩展与再固结作用得到自愈合，表现出材料的自修复特征。随着时间推移，孔隙分布由随机离散状态向分级有序结构转变，小孔隙比例显著增加，大孔隙被逐步压缩闭合。该微观重构过程增强了土颗粒间的骨架支撑与黏聚作用，使复合地基的结构从疏松型转变为强结构型。宏观力学性能测试表明，经过膨胀型地质聚合物加固后，地基的压缩模量提高 30%—50%，抗剪强度提升 40% 以上，变形模量增长明显，表明微观致密化过程直接促进了宏观承载性能的提升。

2.3 化学膨胀与应力场耦合作用

膨胀型地质聚合物在固化过程中产生的体积膨胀应力与地基自重应力、外荷载之间形成复杂的叠加耦合关系。膨胀产生的内向应力可在一定程度上抵消地基受压引起的沉降变形，从而形成“主动补偿”效应。当膨胀速率与土体变形速率协调时，体系内部应力达到动态平衡，使沉降控制效果最为显著。若膨胀过度或速率失衡，则会导致上覆结构翘曲、裂隙或层间分离等问题。实验与数值分析结果表明，当体积膨胀率控制在 0.8%—1.5% 之间时，膨胀应力与地基压缩应力基本相互抵消，形成稳定的“应力平衡区”。此时地表沉降可降低约 40%，地基应力重分布更为均匀。由此可见，化学膨胀与力学应力的耦合调控是实现沉降主动控制的核心机制，为膨胀型地质聚合物在复杂地层条件下的应用提供了理论基础与设计指导。

3 地基沉降控制的力学机制分析

3.1 地基变形响应与膨胀应力传递规律

膨胀型地质聚合物在固化过程中释放的体积膨胀应力通过注浆体与土体界面逐层传递，引起地基结构的再压密与应力重分布。有限元分析结果表明，竖向膨胀应力随深度呈指数式衰减，而水平应力则沿注浆体边界呈径向扩散，形成以注浆区为中心的“椭圆型应力场”。应力扩散半径与地质聚合物弹模、土体黏聚力及界面黏结性能呈正相关关系。当地基中存在软弱夹层或饱水砂层时，应力传递可能出现局部集中与剪切弱化，易导致变形不均。为实现应力场均匀化，应结合地层分布优化注浆量与分区压力控制，从而确保膨胀应力在纵横两个方向的有效扩散，提高加固层整体承载一致性。

3.2 沉降演化阶段与地基承载特征

地质聚合物注入后，地基沉降过程呈现明显的阶段性特征。初期阶段，膨胀反应产生的化学体积增长形成主动上拱效应，使地表产生短时抬升；中期阶段，膨胀应力与土体蠕变应变趋于平衡，系统进入稳定压密期；后期阶段，膨胀反应逐渐衰减，地基进入长期缓释期，变形趋于稳定。长期监测结果显示，经膨胀型地质聚合物处理后，累计沉降量减少超过 40%，不均匀沉降差降至原值的约三分之一。承载板加载试验表明，复合地基极限承载力提升 1.5 倍以上，变形模量显著增长，显示出结构性增强与沉降协调性改善的双重效果，验证了膨胀应力对承载力与变形控制的积极作用。

3.3 多因素耦合下的沉降控制模型

地基沉降控制受膨胀速率、浆液扩散特征、土体力学参数与加载历史等多因素的耦合影响。基于理论推导与实测数据，建立了膨胀应力—沉降响应的非线性模型，用以刻画化学膨胀与土体变形之间的动态平衡关系。模型结果表明，膨胀持续时间与环境温度呈正相关，适度的温控可延长应力释放阶段；膨胀剂掺量过高会导致初期反应过快，使应力峰值提前、补偿不足。调控激发剂碱度与浓度可实现膨胀速率与反应持续期的动态匹配，从而在长期服役过程中形成可持续的内生应力补偿机制。该耦合模型揭示了膨胀反应、应力传递与沉降演化间的相互作用规律，为工程设计中实现定量化的沉降预测与控制提供了理论基础与优化路径。

4 实验研究与数值模拟验证

4.1 室内模型试验设计与结果分析

为定量分析膨胀型地质聚合物对软土地基的加固与沉降控制效果，设计了标准化室内模型试验。试验土样采用天然软黏土，含水率 32%，天然孔隙比 0.85，均匀置于 500 mm × 500 mm × 500 mm 的刚性模型箱中。通过分层压实保证初始密实度一致，以三种膨胀剂掺量（2%、4%、6%）配制聚合物浆液注入地基中。试验采用位移传感器与应变计同步监测沉降与应力变化。结果显示，4% 掺量组在膨胀速率与结构致密化之间取得最佳平衡，其 30 天累计沉降减少约 45%，地基剪切模量提升 38%，承载板极限荷载提高近 50%。微观分析表明，该比例下 C-A-S-H 凝胶与钙矾石的生成比例协调，界面结合紧密，未出现贯通裂隙。6% 掺量组虽早期沉降减小更快，但因膨胀反应过强导致局部空洞与应力集中。由此确定 4% 为最优配比，为后续数值模拟与工程应用提供实验依据。

4.2 数值模拟与力学参数校正

为进一步揭示膨胀型地质聚合物在地基加固过程中的力学响应机制，基于 ABAQUS 软件建立三维固结—膨胀耦合模型。模型中膨胀效应被等效为时变体积应变场，利用用

户子程序（UMAT）定义非线性膨胀特征。输入参数包括实测弹模、泊松比、膨胀率与时间衰减系数。模拟结果与模型试验曲线高度吻合，最大误差小于 5%，表明模型参数设定合理。结果揭示，膨胀体内部等效压缩模量随时间呈对数增长趋势，地表沉降速率呈指数式衰减。计算显示，膨胀体在承载层与基底交界处形成环状“反拱应力壳”，使上覆应力重新分布，沉降中心向外迁移，从而有效减缓局部变形集中。该机理说明膨胀聚合物的长期稳定性主要依赖于化学反应持续提供的内生应力补偿效应，为后续工程预测提供了可靠的理论模型与参数标定依据。

4.3 现场工程应用与沉降监测

在沿海港区道路地基加固工程中，为验证膨胀型地质聚合物的实际效果，选取软弱回填层段实施注浆试验。该地段地下水位高、孔隙比约 0.9，传统水泥浆处理效果不理想。采用复合膨胀型地质聚合物进行分区注浆，注浆深度 1.5—2.0 m，压力控制在 0.4 MPa。施工完成后通过精密水准仪、动模量仪及孔隙水压力计进行连续监测。结果显示，施工后 30 天地表累计沉降由 7.5 mm 降至 1.9 mm，且未出现二次沉降现象。地基动模量较改造前提升约 60%，孔隙比降低 0.12，渗透系数下降一个数量级。钻芯检测表明，浆体在地下形成连续加固层，膨胀反应产生的体积应力均匀传递至地基深部，增强了地层整体性。该工程实例表明，膨胀型地质聚合物能在复杂水文与荷载条件下实现地基沉降的长期抑制与结构稳固，为港区、轨道交通及旧城改造工程提供了可靠的加固新方案。

5 影响因素与优化控制策略

5.1 膨胀剂配比与激发剂浓度调控

膨胀型地质聚合物体系中膨胀剂的类型与掺量是决定其化学反应速率、体积变化及结构稳定性的关键参数。实验研究表明，氧化钙与硫铝酸钙的复合膨胀体系能够在早期提供稳定的膨胀源，通过生成钙矾石和氢氧化钙等晶体相形成均匀的体积膨胀效应。当复合掺量控制在胶凝材料质量的 4% 左右时，体系在凝结硬化过程中产生的化学膨胀与地基约束应力达到动态平衡，可有效避免过度膨胀造成微裂纹。激发剂中 Na_2SiO_3 与 NaOH 的浓度比例直接影响硅铝组分溶解速率与聚缩合动力学过程，实验确定 1.5:1 的比例可获得适宜的反应速率与凝结时间，使生成的 C-A-S-H 凝胶结构更为致密。通过调节膨胀剂和激发剂浓度，可实现微膨胀与结构稳固的协调统一，为地基的长期变形控制提供化学反应层面的支撑。

5.2 注浆压力与扩散模式优化

注浆压力是影响地质聚合物浆液扩散形态、膨胀力传递路径以及地基加固效果的重要因素。研究结果显示，在 0.3—0.6 MPa 的压力范围内，浆液能有效渗入软弱夹层并沿土体孔隙扩散，形成连续、均匀的固结结构。当注浆压力过高时，浆液易突破土层导致地表鼓起或渗漏；而压力过低则造成浆液扩散半径不足，形成孤立固结体。为此，分级注浆与恒压注入技术可在控制扩散速率的同时，确保浆液在不同深度层次均匀分布。扩散半径与浆液黏度、水胶比密切相关，适度降低水胶比可增大浆体的黏聚力并提高其扩散稳定性。通过实时监测注浆压力曲线并结合地应力条件进行反馈调节，可实现注浆区的力学场与流变场优化，从而最大限度提升膨胀应力的有效传递效率与地基的整体承载性能。

5.3 环境温湿条件与长期稳定性

环境温度与湿度对膨胀型地质聚合物的反应过程与力学性能具有显著影响。低温环境会抑制硅铝组分的溶解与聚合反应，导致早期凝结延迟与强度增长缓慢；高温条件则促进膨胀剂的反应速率，使内部气体析出与晶体生成过快，易在体系中形成细微裂隙。试验结果表明，将养护温度控制在 20—30℃之间、相对湿度维持在 70% 以上，可获得理想的强度发展与膨胀稳定性。长期干湿循环试验表明，经过 120 次循环后，膨胀型地质聚合物的抗压强度保持率仍高于 90%，渗透系数变化小于 10^{-9} m/s，显示出优异的耐久性与抗渗性能。这种环境适应性使材料在复杂地质及气候条件下仍能维持膨胀与沉降控制的平衡效果，为长期地基加固提供可靠保障，也为绿色地基工程的可持续发展提供了重要技术支撑。

6 结语

膨胀型地质聚合物在地基加固与沉降控制中的应用展示了化学膨胀与力学补偿的协同潜力。研究表明，通过合理设计膨胀体系与注浆参数，可在不显著增加施工成本的前提下有效提升地基承载性能与长期稳定性。膨胀效应在微观层面通过孔隙重构实现致密化，在宏观层面通过预应力补偿减少沉降变形。数值与现场验证均表明，该材料具有良好的适应性与工程推广价值。未来研究可进一步聚焦于不同地层条件下的膨胀反应时空演化规律及其与环境因素的耦合影响，为智能化地基加固与可持续基础设施建设提供理论依据与技术支撑。

参考文献

[1] 汪贵平,钮旋敏,王利侠.地基加固用地质聚合物灌浆料研究[J].建筑技术开发,2023,50(06):155-156.

[2] 苑雪冬.利用地质聚合物对软土地基加固的处理方法[J].粘接,2026,53(02):340-343.

[3] 李新宇,李银光.地质聚合物在软土地基处治中的应用分析[J].市政技术,2022,40(01):58-61.

[4] 征西遥.地质聚合物在软土加固中的应用研究[D].上海工程技术大学,2020.

[5] 闵一凡.地质聚合物固化软土的动态力学性能研究[D].上海工程技术大学,2021.