

文章编号:1004-2954(2026)10-0033-07

合肥地区中低压压缩性黏土固结变形的微观机制研究

黄世光¹, 余雷², 周先才¹, 崔俊杰¹, 蒋红光³, 王祥⁴, 刘依依³, 史佳豪⁵

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055; 2. 中国铁路经济规划研究院有限公司, 北京 100038;

3. 山东大学齐鲁交通学院, 济南 250002; 4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063;

5. 山东建筑大学土木工程学院, 济南 250101)

摘要:【目的】中低压压缩性土地基广泛分布于我国高速铁路沿线, 具有结构性强、压缩性低、沉降收敛快等特点。然而, 该类土体在加载过程中孔隙水压力响应微弱、排水变形不显著, 传统排水固结理论难以有效解释其变形机制。为揭示中低压压缩性黏土在固结加载过程中的微观结构演化机制, 明确其微观结构变化对宏观沉降特性的影响规律。【方法】以合肥地区中低压压缩性黏土为研究对象, 旨在通过多尺度试验手段揭示微观结构与土体工程性能之间的内在联系, 为类似地基工程中的沉降控制与稳定性分析提供理论依据。采用环境扫描电镜(ESEM)及压汞试验(MIP), 对合肥地区不同深度(4.4~5.0 m和7.6~8.2 m)原状黏土样在不同固结轴压下的微观结构演化特征进行分析。【结果】试验表明, 原状土孔径分布呈现双峰特征, 反映出骨架孔与胶结孔共存的结构。随着固结轴压提升, 孔隙结构由双峰向单峰演化, 最大主峰频率达21.3%。同时, ESEM图像显示, 随着轴压增大, 黏结的土体颗粒破碎呈小颗粒, 颗粒重组增强, 孔隙闭合加剧, 结构致密性显著提高。孔隙压缩与颗粒结构演变同步发展, 共同构成中低压压缩性黏土快速固结的微观机制。微观结构重构支撑土体呈现出小变形和快速收敛的宏观特征。【结论】研究成果可为同类土质地基变形与稳定性分析提供理论支撑。

关键词:铁路路基; 土体结构演化; 环境扫描电镜; 中低压压缩性黏土; 压汞试验; 孔径分布

中图分类号:U213.1; S152 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202507310001

Study on Microscopic Mechanism of Consolidation Deformation of Medium-Low-Compressibility Clay in Hefei Area

HUANG Shiguang¹, YU Lei², ZHOU Xiancai¹, CUI Junjie¹,
JIANG Hongguang³, WANG Xiang⁴, LIU Yiyi³, SHI Jiahao⁵

(1. China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China; 2. China Railway Economic and Planning Research Institute Co., Ltd., Beijing 100038, China; 3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China; 4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 5. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: [Objective] Medium-low-compressibility soil foundations are widely distributed along high-speed railway lines in China and exhibit strong structural characteristics, low compressibility, and rapid settlement convergence. However, this type of soil exhibits weak pore water pressure responses and insignificant drainage deformation during loading, making it difficult for traditional drainage consolidation theory to effectively explain its deformation mechanism. This study aims to reveal the microstructural evolution mechanism of medium-low-compressibility clay during consolidation loading, and clarify the

influence of microstructural changes on macroscopic settlement characteristics.

[Methods] Medium-low-compressibility clay from the Hefei area was used as the research object. Multiscale test methods were used to reveal the intrinsic relationship between soil microstructure and engineering properties, thereby

收稿日期:2025-07-31; 修回日期:2025-08-02; 网络首发日期:2025-08-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52378353); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2023G062); 中铁工程设计咨询集团有限公司科研重点课题(KY2024A010)

作者简介:黄世光(1985—),男,高级工程师,工学博士,主要从事岩土工程、地质工程和路基工程研究工作, E-mail: 305744885@qq.com。

通信作者:蒋红光(1985—),男,教授,主要从事交通岩土工程研究工作, E-mail: hongguang_jiang@sdu.edu.cn。

providing a theoretical basis for settlement control and stability analysis in similar foundation engineering. Environmental scanning electron microscopy (ESEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP) were used to analyze the microstructural evolution characteristics of undisturbed clay samples collected at different depths (4.4~5.0 m and 7.6~8.2 m) in the Hefei area under different axial consolidation stresses. [Results] The test results showed that the pore size distribution of undisturbed soil exhibited bimodal characteristics, reflecting the coexistence of framework pores and cementation pores. As the axial consolidation stress increased, the pore structure evolved from a bimodal distribution to a unimodal distribution, and the maximum dominant peak frequency reached 21.3%. ESEM images showed that, as the axial stress increased, bonded soil particles fragmented into smaller particles, particle rearrangement intensified, pore closure intensified, and structural compactness increased significantly. Pore compression and particle structure evolution occurred simultaneously, jointly constituting the microscopic mechanism of rapid consolidation of medium-low-compressibility clay. Microstructural reorganization supported the macroscopic characteristics of small deformation and rapid convergence exhibited by the soil. [Conclusion] The findings provide theoretical support for deformation and stability analysis of similar soil foundations.

Key words: railway subgrade; soil structure evolution; environmental scanning electron microscopy; medium-low-compressibility clay; mercury intrusion porosimetry; pore size distribution

引言

近年来,我国高速铁路建设持续推进,截至2024年年底,全国高铁运营里程已突破4.8万km,稳居世界首位^[1-2]。路基结构作为高速铁路结构体系的重要组成部分,其变形控制不仅关系到列车运行的平稳与安全^[3-5],也对不同工程地质条件下地基土变形特性的研究提出更高要求^[6-8]。

在经典的Terzaghi一维固结理论^[9]框架下,土体变形主要通过孔隙水压力的逐步消散与有效应力的增强实现^[10-12],该理论已被广泛用于解释软土地基的沉降过程^[13-15]。然而工程实践表明,广泛分布于我国高铁沿线的中低压缩性黏土地基^[16],在实际加载过程中常表现出压缩性低、变形幅度小、稳定速度快等特征^[17-18],且孔压响应不明显^[19],表明其变形过程并不以排水为主控机制,从而使传统以排水为核心的固结理论在该类土体中存在适用性局限。

目前已有多项研究从宏观变形量、沉降速率与现场监测角度分析中低压缩性黏土地基特征。余雷等^[20]研究发现该类地基普遍具有超固结特性,变形在施工早期即大量完成,工后沉降控制效果良好,但地基中超孔压响应很低,表明饱和土固结理论并不适用。王祥等^[21]实测结果进一步验证其快速收敛、小变形特点,填筑完成时,中低压缩性土沉降完成比例约为50%;预压9个月后,完成比例可达90%~95%,施工期沉降完成比例高,对路基工后沉降控制极为有利。LI等^[22]通过大量室内及现场试验,亦证

明中低压缩性土具有含水量低、孔隙率低、强度高、承载力强的特点。依托丰富的原位试验数据,秦尚林等^[23]构建了一套基于神经网络算法的中低压缩性土识别体系,为该类地基的快速识别与分类提供有效手段。当前,已有较多工程实践与变形规律方面的研究成果^[24-26],然而对于此类中低压缩性黏土在加载过程中的内部结构演化机制尚缺乏系统研究,微观结构变化与宏观变形行为之间的关系尚不明确,导致传统排水固结理论在解释其变形特性时存在明显局限。这一理论空白在一定程度上限制了该类地基土在高标准工程建设中的设计与应用,亟需通过多尺度试验手段揭示其微观演化机制,为地基稳定性分析与沉降控制提供科学支撑。

土体压缩的实质是固相颗粒重排及孔隙结构压缩共同驱动的宏观变形过程。为此,选取合肥地区典型中低压缩性黏土为研究对象,基于环境扫描电镜(ESEM)测试和压汞试验(MIP),从微观角度分析固结过程中的微观结构的演化过程,旨在为中低压缩性黏土地基在高速铁路中的科学评价与工程应用提供微观层面依据与理论支撑。

1 试验方案

1.1 试验材料

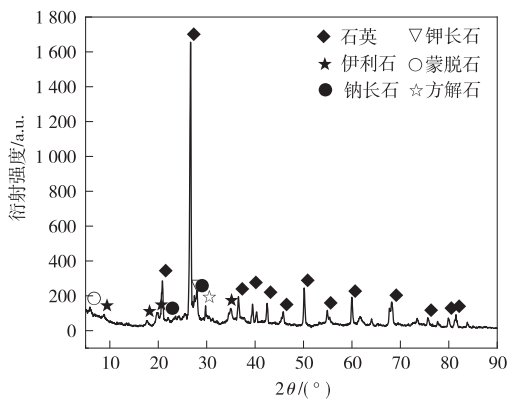
本研究所用土样来源于合肥合福高铁长临河站附近的长江二级阶地坳谷区,取土深度为4.4~5.0m及7.6~8.2m。依据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》测试其基本物理性质,结果见表1。颗粒分析显

示,4.4~5.0 m、7.6~8.2 m 土样中黏粒含量分别为 8.1%与 6.7%,粉粒含量分别为 81.4%与 81.1%,砂粒含量分别为 10.5%与 12.2%,均以粉粒为主。经液塑限联合测定,4.4~5.0 m、7.6~8.2 m 土样的液限分别为 42.9%和 42.8%,塑限分别为 19.2%和 15.8%,塑性指数分别为 23.7 和 27.0。综合以上指标,判断两

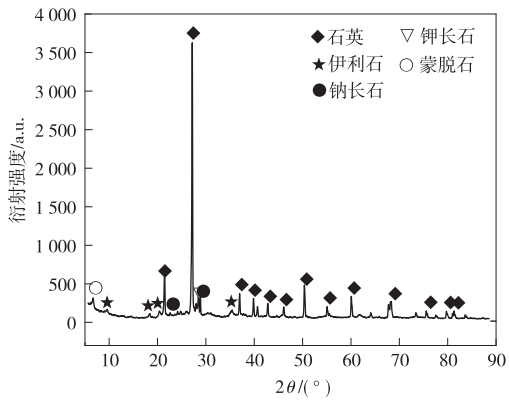
个深度的土体均为低液限黏土。一维固结试验结果显示其压缩系数分别为 0.28 MPa^{-1} 和 0.26 MPa^{-1} ,均属于中低压压缩性土。X 射线衍射(XRD)分析表明(图 1 及表 2),矿物组成主要包括石英、伊利石、钠长石等在内的 5 至 6 种矿物。石英含量最高(47.3%~52.9%),黏土矿物为伊利石和蒙脱石。

表 1 试验材料基本物理指标
Tab. 1 Basic physical properties of test materials

深度/m	天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/%	孔隙比	饱和度/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	压缩系数/ MPa^{-1}
4.4~5.0	1.99	23.6	0.68	94.0	42.9	19.2	23.7	0.28
7.6~8.2	2.04	19.8	0.59	91.1	42.8	15.8	27.0	0.26



(a) 取土深度4.4~5.0 m



(b) 取土深度7.6~8.2 m

图 1 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns

表 2 试验材料矿物组成
Tab. 2 Mineral composition of test materials

深度 /m	石英 /%	伊利石 /%	钠长石 /%	钾长石 /%	方解石 /%	蒙脱石 /%
4.4~5.0	52.9	16.4	12.3	9.3	5.6	3.5
7.6~8.2	47.3	28.2	11.8	8.0	—	4.6

1.2 环境扫描电镜测试及压汞试验

环境扫描电镜(ESEM)可在低真空环境对土样表面进行微观成像,无需干燥、喷金等处理,在保持土样自然状态的同时实现高分辨率成像。压汞试验(MIP)

采用电容式压汞仪,基于 Washburn 方程通过电容响应间接获取孔径分布。ESEM 与 MIP 技术的联合应用能够协同分析土体微观结构,为固结作用下中低压压缩性土微观结构演化研究提供更为系统、精确的观测方法。

1.3 试验方法

分别制备深度为 4.4~5.0 m 和 7.6~8.2 m 的原状土标准环刀样,并采用全自动固结仪对其施加一维固结压力,加载等级依据土样深度及沿线高铁路基填土高度设定。(1)土样深度 4.4~5.0 m:50,100,150,200,300 kPa;(2)土样深度 7.6~8.2 m:50,100,150,200,300,400 kPa。进行微观结构测试的试样,均取自该固结仪中各级轴向压力下达到变形稳定的环刀样。对于 ESEM 测试,使用小刀从该环刀样中切取数个尺寸为 50 mm×10 mm×10 mm 的长条形试样,直接将长条形试样轻轻掰断,以露出未受扰动的土体新鲜断面作为观测表面,无需进行干燥处理。ESEM 测试时,对于每一级压力下的试样,分别在放大倍率为 1 000 和 4 000 倍下进行观察与图像采集。MIP 试验则从同一个环刀样中另外切出边长约 15 mm 的数个方块状试样,随后进行冷冻干燥处理:先将试样在-196 ℃液氮条件下干燥 15 min,再放入冷冻干燥机冷冻干燥 8 h;冷冻干燥完成后,小心存放,用于后续测试。

2 试验结果及分析

2.1 ESEM 图像

图 2 为两个深度处放大 1 000 倍和 4 000 倍下的原状土及不同固结压力下土样 ESEM 图像,从图中可以看出,原状土的颗粒在自然状态下呈现出较为松散的排列,颗粒形态以片状、絮状及团聚特征为主,其中较大的、棱角状的颗粒(主要为石英和长石)构成土体骨架,较小颗粒则填充于孔隙中,或附着于大颗粒的表面,形成黏聚体结构。颗粒间的接触方式主要表现为面接触和边缘接触,这种接触类型具有胶结增强效果,是其在受力后展现良好结构稳定性的微观基础之一。

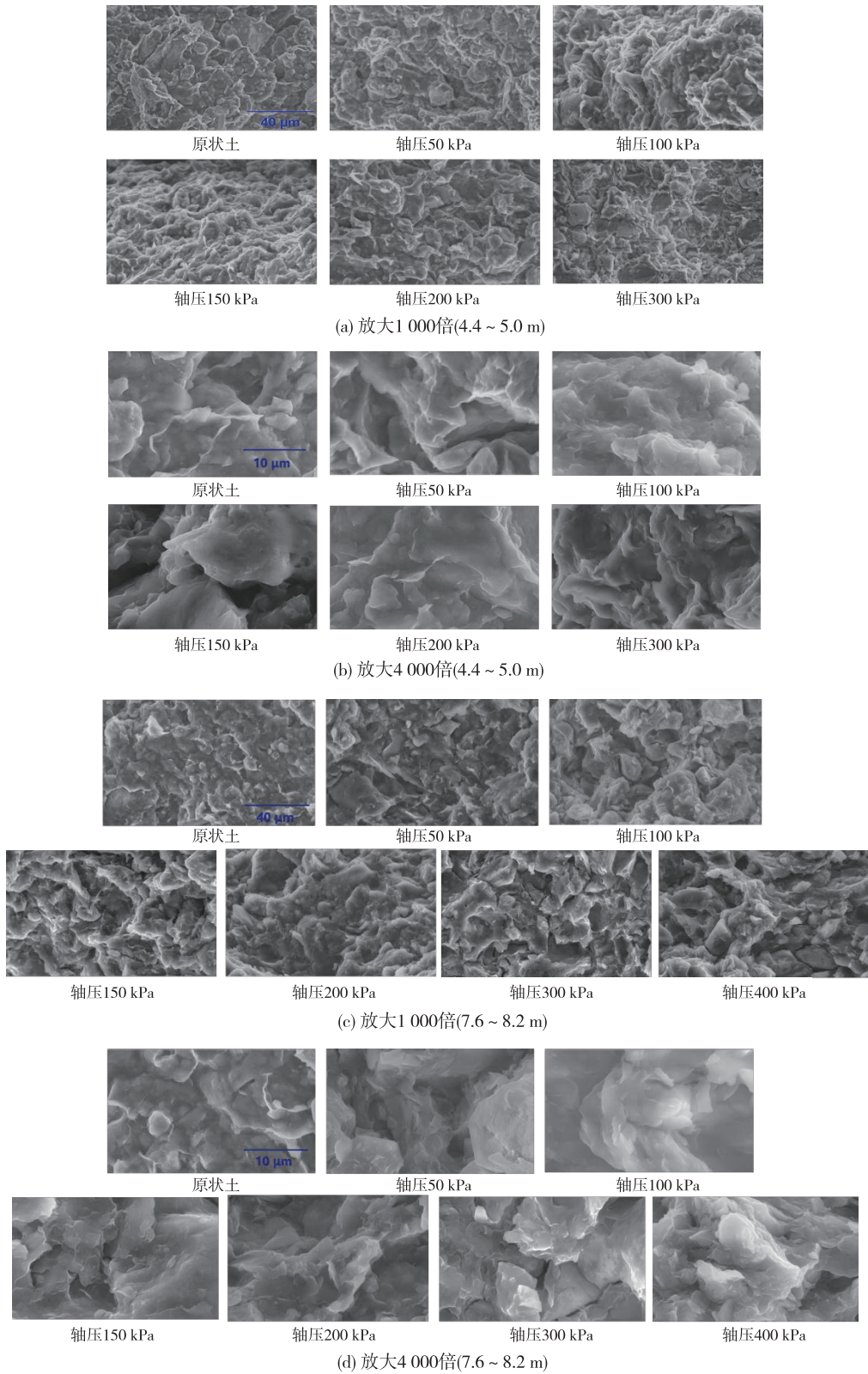


图 2 原状土及不同固结压力下的 ESEM 图像

Fig. 2 ESEM images of undisturbed soil and soil subjected to different consolidation pressures

此时孔隙结构仍较明显,但分布均匀,孔隙之间的连通性较好,整体结构较为疏松。

当土体受到固结荷载时,其微观结构会发生显著变化,颗粒之间的有效应力增大,导致颗粒间相互挤

压、接触更加紧密。随着荷载的增加,原本疏松的土体逐渐被压实,孔隙密度显著提高,土体强度也随之增强。微观形貌显示,部分黏结的大颗粒因受压,黏结物破碎,转化为更为细小的颗粒,伴随细粒含量显著增

加,颗粒间孔隙逐渐闭合,孔隙结构趋于紧密。此时颗粒之间的黏结增强,但颗粒表面轮廓呈现出明显的不规则性,局部结构出现重组特征。在持续加载下,土体微结构发生显著重构,原有大孔隙和中孔隙明显减少,内部孔隙结构破碎,产生更多的微小孔隙。部分较大的颗粒解体成更细小的颗粒,并进一步形成新的团聚结构。随着这种破碎和再团聚过程的不断进行,孔隙面积显著减小,土体的整体密实度和强度进一步提升,最终重构形成一个更为致密、稳定的结构。这种由固有微观结构支撑的致密化过程,使得土体在固结中表现出小变形、快速收敛的特征,沉降趋于快速收敛。

2.2 孔径分布特征

图 3 为合肥地区两个深度土样在不同固结轴压下的孔径分布演化趋势。从图 3 可见,两组土样初始均表现一定程度的双峰分布,反映出结构中同时存在骨架孔隙与细小胶结孔隙。随着固结轴压逐级增加,两组土样均呈现出孔隙细化、分布收敛的趋势,反映出压密-稳定的过程。

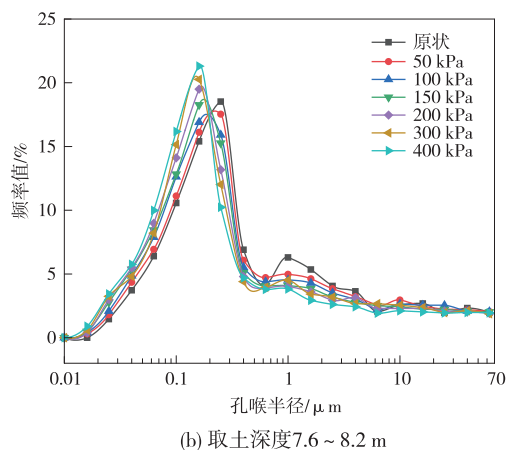
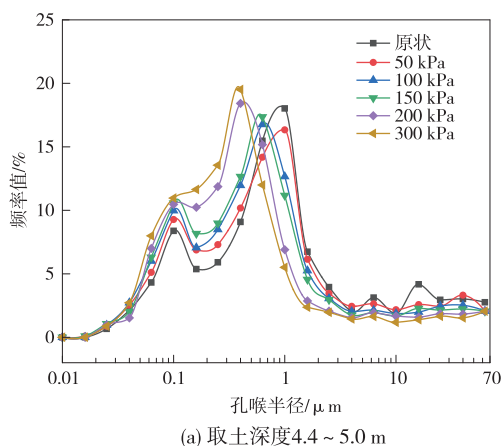


图 3 孔径分布曲线

Fig. 3 Pore size distribution curves

取土深度 4.4~5.0 m 的土样在原状状态下孔径分布呈明显双峰,分别对应 0.25~2.5 μm 与 0.06~

0.16 μm。随着轴压从 50 kPa 提升至 300 kPa,主峰逐步减弱并向小孔方向偏移,次峰增强并展宽,平台区逐步收缩,说明压实过程中大孔压塌,小孔占比显著上升,孔径趋于集中,结构趋于密实。压实至 300 kPa 时,其孔径高度集中于 0.06~1.0 μm 范围,主峰频率达 19.5%,反映出结构压缩和孔隙细化。

取土深度 7.6~8.2 m 土样初始双峰特征相对较弱,主要集中于 0.04~0.6 μm 区间。在固结加载下呈现由双峰向单峰过渡,孔径分布收敛性更强。小孔段频率持续上升,400 kPa 时主峰集中于 0.16 μm,频率高达 21.3%,显示其微孔主导性更强、孔隙更致密。较高压实状态下结构趋于均质,说明其具备更强的抗压稳定性和应力传递能力,微观结构的稳定性对应了其变形幅度小、沉降过程快速收敛的宏观特性。

综合来看,两组土样均经历由孔隙多尺度分布向微细孔主导、单峰分布演化的过程,且压实速率较快、变化主要集中于固结初期。

3 微观-宏观机制耦合分析

在中低压压缩性黏土地基的固结过程中,孔隙结构的演化对其变形机制起关键作用。试验结果表明,孔径分布由初始的双峰向以微小孔隙主导的单峰模式转变,大孔隙压缩、微小孔隙增多,孔隙结构趋于致密、均一。颗粒结构在固结过程中表现出显著的细化特征。在轴压加载下,部分较大的颗粒发生破碎,生成更多的小颗粒。

总而言之,孔隙压缩与颗粒结构演变在微观层面呈现出同步发展特征,构成中低压压缩性黏土固结快速稳定的微观机制。孔隙结构的细化与压缩有效降低土体的可压缩性,限制了后续变形的发展;颗粒在加载过程中发生破碎与重排,结构复杂性增强,体现出显著的重构过程。上述微观结构的持续演化,使土体在加载早期即完成主要调整,从而在宏观上表现出小变形、快速收敛的工程特性。

4 结论

(1)原状土普遍存在双峰型孔径分布,分别对应骨架孔与细小胶结孔。随着固结轴压从 50 kPa 提升至 300~400 kPa,孔径分布由双峰向单峰演化,主峰频率集中于 0.06~0.16 μm(最高达 21.3%),大孔塌陷,小孔占比上升,孔隙结构趋于密实。

(2)土颗粒在受荷后表现出明显的细化趋势,部分黏结的大颗粒因受压,黏结物破碎,转化为更为细小的颗粒,颗粒间接触由边缘接触向面接触转变,黏结增强、结构重组现象显著。

(3)孔隙压缩与颗粒细化构成固结过程中的耦合机制。土体在轴压加载早期即完成孔隙闭合与颗粒重排,沉降过程迅速收敛,表现出较强的稳定性和低压缩性。

利益冲突声明/Conflict of Interests:

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献/Authors' Contributions:

黄世光、余雷、周先才、崔俊杰参与了研究设计,黄世光、蒋红光、王祥、刘依依、史佳豪参与了论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

参考文献:

- [1] 2024 年我国交通运输行业发展统计公报发布[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(6): 1101.
Release of the Statistical Bulletin on China's Transportation Industry Development in 2024[J]. Tunnel Construction, 2025, 45(6): 1101.
- [2] 王兆善. 从文化视角解码中国高铁成功的深层基因[J]. 理论学习与探索, 2025(6): 76-77.
WANG Zhaoshan. Decoding the Deep Genetic Factors of China's High-speed Railway Success from a Cultural Perspective[J]. Theoretical Learning and Exploration, 2025(6): 76-77.
- [3] 钟阳龙, 马超智, 高亮, 等. 基于车辆响应的无砟轨道路基不均匀沉降评价指标理论研究[J]. 工程力学, 2021, 38(12): 147-157.
ZHONG Yanglong, MA chaozhi, GAO liang, et al. Theoretical Research on Evaluation Index of Uneven Settlement of Ballastless Track Subgrade Based on Vehicle Response[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 147-157.
- [4] 王衍汇. 深厚土层高压段压缩模量预测研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(2): 41-46.
WANG Yanhui. Research on the Prediction of Compressive Modulus for High Pressure Segment on Deep Soil[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(2): 41-46.
- [5] GUO Y, SUN Q, SUN Y. Dynamic Evaluation of Vehicle-Slab Track System under Differential Subgrade Settlement in China's High-speed Railway[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 164: 107628.
- [6] ZHOU G Y, ZHU Z H, HUANG Y, et al. Post-earthquake Damage Probability Assessment of High-speed Railway Simply Supported Bridge Based on Traffic Capacity[J]. Engineering Structures, 2024, 318: 118741.
- [7] LI S C, WANG D X, WU Y L. Strength and Load-Bearing Behaviors of Cement-Industrial By-products Solidified Crust Layer over Soft Subsoil[J]. Construction and Building Materials, 2024, 412: 134744.
- [8] GU Z A, YOO C, CHEN J F. Behavior of Geosynthetic-encased Stone Column Reinforced Foundation under Freeze-Thaw Cycles[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2024, 52(4): 479-493.
- [9] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York; London; J. Wiley and Sons, inc., Chapman and Hall, limited, 1943: 154-168.
- [10] 许光映, 王晋宝, 沈良朵. 一维饱和土固结问题合理边界条件的研究[J]. 力学学报, 2025, 57(8): 1944-1951.
XU Guangying, WANG Jinbao, SHEN Liangduo. Study on Reasonable Boundary Conditions for One-dimensional Saturated Soil Consolidation Problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2025, 57(8): 1944-1951.
- [11] 程宁, 张莹晨, 王艳萍, 等. 不同有机质含量泥炭土的固结特性研究[J]. 路基工程, 2025(1): 14-21.
CHENG Ning, ZHANG Yingchen, WANG Yanping, et al. Study on Consolidation Characteristics of Peat Soils with Different Organic Matter Contents[J]. Subgrade Engineering, 2025(1): 14-21.
- [12] OLEK B S. State-of-the-art Review on Determining One-Dimensional Consolidation Parameters Based on Compression and Distribution of Pore Water Pressure: Coefficient of Consolidation (C_v), End of Primary (EOP) Consolidation[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2025, 32(1): 605-644.
- [13] 张宁. 黏土固结变形规律试验研究[J]. 中国新技术新产品, 2025(8): 89-91.
ZHANG Ning. Experimental Study on Consolidation Deformation Law of Clay[J]. New Technologies and New Products of China, 2025(8): 89-91.
- [14] 杭荟旻. 上海第④层淤泥质黏土的次固结试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022(5): 24-25.
HANG Huimin. Experimental Study on Secondary Consolidation of the Fourth Layer Muddy Clay in Shanghai[J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2022(5): 24-25.
- [15] 顾迪, 严学新, 张云, 等. 上海黏土压缩回弹变形的微观机理[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 123-131.
GU Di, YAN Xuexin, ZHANG Yun, et al. Micro-mechanism of Compression and Rebound of Clay in Shanghai[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(4): 123-131.
- [16] 陈善雄, 崔俊杰, 罗强, 等. 高速铁路中低压缩性土路基沉降计算与分析[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(7): 24-29, 50.
CHEN Shanxiong, CUI Junjie, LUO Qiang, et al. Prediction and Analysis of Subgrade Settlement of Medium-low Compressible Soil for High-speed Railways[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(7): 24-29, 50.
- [17] 靳朝辉. 中低压缩性黏性土地基特性与勘察方法研究[C]//2020 年全国土木工程施工技术交流会论文集. 北京: 2020: 128-132.
- [18] 熊勇. 高速铁路中低压缩性土地基变形时间效应状态特征分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2016: 44.
XIONG Yong. Analysis of Time Effect of Deformation of Foundation Composed of Medium-Low Compressibility Soil in High-speed Railway[D]. Road and Railway Engineering, Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016: 44.
- [19] 余雷, 崔俊杰. 高速铁路路基土压缩性分类及中低压缩性土变形特性研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(7): 7-11, 56.
YU Lei, CUI Junjie. Research on the Compressible Classification of High-speed Railway Foundation Soil and Deformation Characteristics of Medium-low Compressible Soil[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(7): 7-11, 56.
- [20] 余雷, 陈善雄, 余飞, 等. 高速铁路中低压缩性土路基工后沉降控制与技术管理体系[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(7): 36-41.
YU Lei, CHEN Shanxiong, YU Fei, et al. Post-construction Settlement Control and Technical Management System of Medium-Low Com-

- pressible Soil Subgrade for High-speed Railways[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(7): 36-41.
- [21] 王祥,余雷,王亚威,等. 高速铁路中等压缩性土沉降试验研究[J]. 铁道标准设计,2023,67(7):30-35.
WANG Xiang, YU Lei, WANG Yawei, et al. Settlement Study on Medium Compressible Soil of High-Speed Railways[J]. Railway Standard Design, 2023,67(7):30-35.
- [22] LI J, LI L W, YU L, et al. Progress in the Treatment Technique of Medium-and Low-compressibility Soil Foundations under High-speed Railway Subgrade[J]. International Journal of Geomechanics, 2025, 25(10):04025206.
- [23] 秦尚林,戴张俊,陈善雄,等. 基于原位试验的高速铁路中低压压缩性土智能识别方法研究[J]. 铁道标准设计,2023,67(7):12-18.
QIN Shanglin, DAI Zhangjun, CHEN Shanxiong, et al. Research on Intelligent Identification Method of Medium-Low Compressible Soil for High-speed Railway Based on in-situ Test[J]. Railway Standard Design, 2023,67(7):12-18.
- [24] 王瑗琳,崔俊杰,韩志霞,等. 高速铁路中低压压缩性土地基沉降控制有关问题研究[J]. 铁道标准设计,2018,62(11):10-14.
WANG Ailin, CUI Junjie, HAN Zhixia, et al. Research on Settlement Control of Medium-Low Compressible Soil Foundation of High Speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(11): 10-14.
- [25] 熊勇,罗强,张良,等. 基于变形时间效应的高速铁路地基压缩层厚度计算方法[J]. 中国科学:技术科学,2014,44(7):755-769.
XIONG Yong, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Calculating Method Based on Deformation Time Effect on Thickness of Compressible Stratum in High-speed Railway Foundation[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014,44(7):755-769.
- [26] 李剑,陈善雄,王祥,等. 高速铁路中低压压缩性土路基工后沉降计算方法研究[J]. 铁道标准设计,2023,67(7):19-23.
LI Jian, CHEN Shanxiong, WANG Xiang, et al. Research on Settlement Calculation Method of High-speed Railway Medium-Low Compressible Soil Subgrade[J]. Railway Standard Design, 2023,67(7): 19-23.

(编辑:杨中)

(上接第 23 页)

- [14] 边利平. 国家能源集团铁路网扩能改造方案与车流径路联合优化模型[J]. 铁道运输与经济,2022,44(增刊1):148-156.
BIAN Liping. Joint Optimization Model for Network Capacity Expansion Revamping Scheme and Car Flow Routing of China Energy[J]. Railway Transport and Economy, 2022,44(S1):148-156.
- [15] 李崇. 东北铁路运输能力适应性分析和补强措施研究[J]. 铁道货运,2024,42(11):25-30.
LI Chong. Adaptability Analysis and Reinforcement Measures of Northeast Railway Transportation Capacity [J]. Railway Freight Transport, 2024,42(11):25-30.
- [16] 赵荣辉. 唐遵铁路扩能改造方案研究[J]. 铁道经济研究,2023(4):39-43.
ZHAO Ronghui. Research on Tangzun Railway Expansion and Reconstruction Program[J]. Railway Economics Research, 2023(4):39-43.
- [17] 田雨. 能源保供形势下临哈铁路扩能改造方案研究[J]. 中国铁路,2024(12):68-74.
TIAN Yu. Research on Capacity Expansion and Reconstruction Scheme of Linhe-Hami Railway in the Context of Energy Supply Guarantee[J]. China Railway, 2024(12):68-74.
- [18] 呼泉. 大准铁路单线区段运输能力提升研究[J]. 交通运输工程与信息学报,2021,19(3):93-101.
HU Xiao. Research on Transport Capacity Expansion of the Dazhun Railway in Single Line Section[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021,19(3):93-101.
- [19] 杨丽娟,刘剑飞. 既有单线半自闭铁路扩能改造方案研究[J]. 铁道勘察,2022,48(4):91-97.
YANG Lijuan, LIU Jianfei. Research on the Schemes of Capacity Expansion for the Existing Single Track Semi-automatic Block Railway [J]. Railway Investigation and Surveying, 2022,48(4):91-97.
- [20] 冯德泉. 格库铁路最大坡度方案研究[J]. 铁道标准设计,2023,67(1):62-69.
FENG Dequan. Study on Maximum Gradient Scheme of Golmud-Korla Railway[J]. Railway Standard Design,2023,67(1):62-69.
- [21] 李敬伟. 广大单线铁路扩能改造方案研究[J]. 铁道运输与经济,2020,42(6):12-16.
LI Jingwei. A Study on the Reconstruction Plan of the Guangtong-Dali Single Track Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(6):12-16.
- [22] 杨浩. 新建包西一瓦日铁路联络线工程建设方案研究[J]. 铁道工程学报,2024,41(4):7-12.
YANG Hao. Research on the Construction Plan of the New Baoxi to Wari Railway Connection Line Project[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024,41(4):7-12.
- [23] 王子健. 格库铁路扩能改造需求与对策研究[J]. 铁道勘察,2024,50(3):115-121.
WANG Zijian. Study on the Demand and Countermeasures of Capacity Expansion and Renovation of Golmud-Korla Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2024,50(3):115-121.
- [24] 韩冰,吴明辉. 天津至蓟州铁路扩能改造工程方案研究[J]. 铁道货运,2023,41(8):25-31.
HAN Bing, WU Minghui. Research on Capacity Expansion and Reconstruction Project of Tianjin-Jizhou Railway[J]. Railway Freight Transport, 2023,41(8):25-31.

(编辑:邓帅)