文章编号：1001-4632（2025）06-0001-11
引用格式：余雷，蒋红光，王祥，等. 高速铁路中低压缩性地基土固-液-气三相演化机制研究[J]. 中国铁道科学，2025，46(6)：1-11.
Citation：YU Lei，JIANG Hongguang，WANG Xiang，et al. Study on the Solid-Liquid-Gas Phase Evolution Mechanism of Medium-Low Compressible Foundation Soils for High-Speed Railways [J]. China Railway Science，2025，46 (6)：1-11.

高速铁路中低压缩性地基土固-液-气三相演化机制研究

余 雷[1]，蒋红光[2]，王 祥[3]，周先才[4]，刘依依[2]，姚成志[5]，
黄世光[4]，杨为民[2]，孙健凯[6]

（1. 中国铁路经济规划研究院有限公司，北京 100038；
2. 山东大学 齐鲁交通学院，山东 济南 250002；
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司 技术中心，湖北 武汉 430063；
4. 中铁工程设计咨询集团有限公司，北京 100055；
5. 中铁第四勘察设计院集团有限公司 地路院，湖北 武汉 430063；
6. 山东建筑大学 土木工程学院，山东 济南 250101）

摘 要：中低压缩性黏土作为高速铁路的天然地基，呈现出较好的沉降控制效果，但该类土在压缩变形过程中的变形特性难以用传统排水固结理论解释，限制了其在工程实践中应用。为系统揭示其液-固-气三相演化机制，以合肥地区该类土质为研究对象，开展高精度压缩排水、强弱结合水含量、土-水特性及微观孔隙结构试验。结果表明：中低压缩性黏土在加载初期变形迅速、收敛速度快，加载后0.5 h内变形比例达80%，孔隙水排出极少，呈现出明显的非典型排水变形特征；结合水占天然含水率的74.4%，其中强结合水为32.7%、弱结合水为41.7%，自由水比例虽达6.0%（占天然含水率的25.6%），但因毛细吸力主导、水力梯度不足及孔隙结构受限等原因，难以从孔隙中有效排出；颗粒破碎细化导致粒径小于2 μm的颗粒含量从8.1%上升至15.3%，大孔隙压缩转化为小孔隙，0.2 μm以下的小孔隙比例提升至25.4%，形成颗粒细化、孔隙压缩、结构致密的微观重构特征。中低压缩性黏土在外荷载作用下的压缩变形过程，是固相重组、液相吸附与孔隙压缩三者协同演化的结果，为该类土地基在高速铁路中的变形控制提供了微观依据与理论支撑。

关键词：高速铁路；中低压缩性黏土；压缩变形；结合水；微观结构演化
中图分类号：U238；U213.1 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1001-4632.2025.06.01

近年来，我国高速铁路运营里程不断增加，截至2024年底已达到4.8万km，居世界首位。高速铁路作为国家综合交通运输体系的核心动脉，其轨道结构的长期稳定性直接关系到列车的高速、平稳、安全运行[1]，对路基沉降的控制精度提出了毫米级的严格要求[2]，这对于不同工程地质条件下的地基土变形控制均提出了极高要求。

现有的土体变形理论基本以Terzaghi一维固结理论[3]为基础，即变形是孔隙压缩、超孔隙水压力消散、孔隙水排出和有效应力增加的综合作用过程[4-5]，变形速率受控于土体的渗透性与排水路径，能够划分出主固结（孔压消散）与次固结（结构调整）2个阶段[6-7]。该理论在高压缩性黏土地基中的应用已较为成熟，揭示了软土、淤泥质土等

收稿日期：2025-07-15；修订日期：2025-11-29
基金项目：国家自然科学基金资助项目（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重点课题（KY2024A010）
第一作者：余 雷（1973—），男，湖北松滋人，正高级工程师。E-mail：yuleichina@126.com
通讯作者：蒋红光（1985—），男，山东临沂人，教授，博士研究生导师，博士。E-mail：hongguang_jiang@sdu.edu.cn

地基沉降的主要成因。后续学者在此基础上发展了大变形固结、非饱和固结等理论模型，进一步拓展了变形固结理论在复杂工况下的适用性。

然而，随着工程实践的深入，传统压密型固结理论在部分土类中显示出适用性局限[8−9]。广泛分布于我国高速铁路沿线的中低压缩性土[10]，已被成功用作高速铁路的天然地基，并表现出良好的沉降控制效果。目前已有大量针对高铁中低压缩性土地基的现场工程实践及室内试验研究。其中，余雷等[11]基于工程实践发现，这类地基普遍具有超固结特性，其总变形相对较小、可快速稳定，且地基中超孔压很小，表明饱和土变形理论对其不适用。王祥等[12]开展的沉降实测研究表明，填筑完成时，中低压缩性土的沉降完成比例约为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。基于以上特性，余雷等[13]构建了高铁中低压缩性土路基工后沉降控制与技术管理体系，有效确保了该类路基满足毫米级工后沉降要求。此外，秦尚林等[14]依托大量现场原位试验数据，建立了基于神经网络的中低压缩性土快速智能识别方法。综上所述，尽管中低压缩性土展现出良好的工程性能，且相关沉降控制技术体系已较为完善，但其压缩变形机制尚未阐明，变形特性难以用传统排水固结理论解释，这在一定程度上限制了其在工程实践中的进一步应用。

考虑到土体的压缩变形本质上是固相（颗粒结构）-液相（水分赋存）-气相（孔隙压缩）三相协同演化的结果，以合肥地区典型中低压缩性黏土为研究对象，开展压缩排水、等温吸附、热重分析（Thermogravimetry，TG）、土-水特征曲线以及环境扫描电镜（Environmental Scanning Electron Microscope，ESEM）测试，聚焦固-液-气三相演化角度，系统揭示其微观结构重构与压缩变形机制，为该类土地基在高速铁路中的科学评价与工程利用提供微观依据与理论支撑。

1 试验材料

研究所用土样取自合福高铁合肥段长临河站附近，取样深度约5 m，区域地处长江二级阶地坳谷区，沿线高铁网密集分布。根据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》，测试其物理性质，结果见表1。

表1 试验材料物理指标

天然密度/(g·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}
1.99	23.6	0.68	94.0	42.9	19.2	23.7	0.28

颗粒分析结果表明，该土样中黏粒占18.5%，粉粒占69.3%，砂粒占12.2%。液塑限联合测定法表明，该土样的液限为42.9%，塑限为19.2%，塑性指数为23.7。综上，判定该土体为低液限黏土。一维固结试验测得压缩系数为0.28 MPa^{-1}，属中低压缩性。X射线衍射（X-Ray Diffraction，XRD）分析显示，主要由石英、伊利石、钠长石等6种矿物组成，其中石英含量最高（52.9%），黏土矿物为伊利石（16.4%）和蒙脱石（3.5%）。较高的黏土矿物含量表明土体有较强的结合水吸附能力，具体矿物组成分别如图1及表2所示。

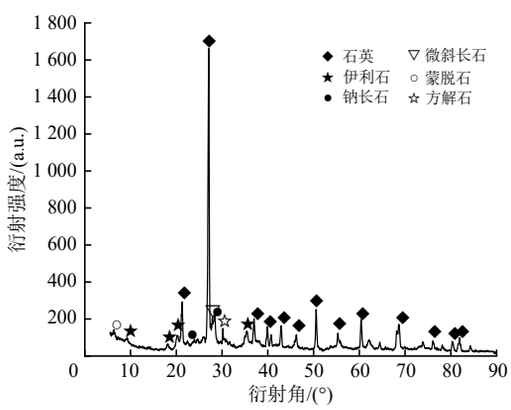


图1 XRD图谱

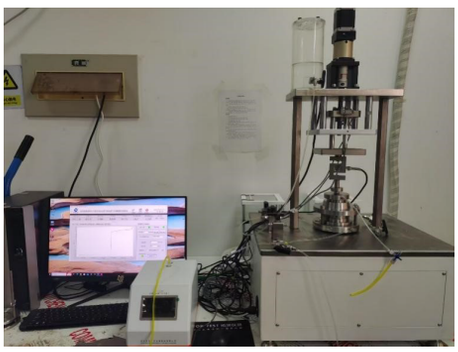
表2 试验材料的矿物组成

矿物	含量/%
石英	52.9
伊利石	16.4
纳长石	12.3
钾长石	9.3
方解石	5.6
蒙脱石	3.5

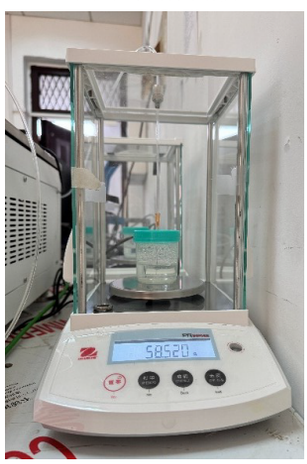
2 压缩过程中的孔隙水演化

2.1 压缩排水特性

为获取土体的压缩变形及排水特性，采用全自动非饱和固结仪开展一维压缩变形试验（图2）。设备配备有高精度电子天平，精度为0.001 g，可



（a）全自动固结仪



（b）高精度电子天平

图 2　压缩排水试验设备

精确测量变形过程中土体产生的排水。根据土样采集深度及沿线高铁路基填高，设置荷载等级为 50，100，150，200 和 300 kPa。变形稳定的判断标准为在施加荷载后的 2 h 内，土样的变形量小于 0.01 mm。排水量稳定的判断标准是 2 h 内排水量不超过 0.012 g。

土样在荷载作用下压缩变形随时间的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知：在各级荷载施加后的初期阶段，土样迅速发生明显压缩，变形速率较快；加载后 0.5 h 内的变形量占该级总变形的比例普遍

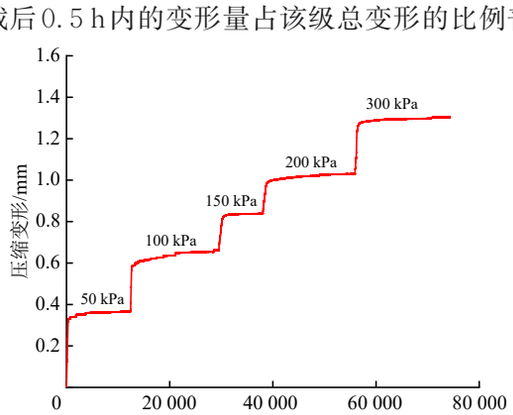


图 3　压缩变形随时间变化曲线

超过 80%，部分荷载条件下甚至超过 90%，说明土体在应力作用下的压缩变形主要集中于加载初期，表现出高度的时间相关性和快速响应特征；变形速率随着时间推移迅速下降，后续压密过程中变形增量显著减少。

试验结果表明，在每级荷载施加后，土样均能在 2～5 h 内趋于变形稳定状态，基本完成该阶段的压缩变形过程。其中，在最高荷载 300 kPa 条件下，试样最终稳定后的总位移为 1.3 mm。在相同轴压等级下，高压缩性土[15]累计沉降量约为 2.9 mm，主固结持续约 1～5 h，但随后仍出现明显次固结变形，持续约 20 h。由此可见，研究所用中低压缩性黏土在相同应力水平下表现出变形幅度小、收敛速度快的变形特性。

此外，在压缩变形试验过程中对孔隙水排出情况进行了实时监测。结果显示，仅在轴向压力为 50 和 300 kPa 时检测到微量排水，排水量分别为 0.001 和 0.004 g，其余各级加载过程中均未观察到明显排水现象。这一现象表明，中低压缩性黏土在荷载作用下孔隙水排出受限，其压缩变形并非主要通过传统的压密排水机制实现，可能由土体微结构重构主导的一种非典型变形机制所控制。

为进一步揭示该类土体在压缩变形过程中排水受限的根本原因，有必要从水分赋存状态与能量束缚角度进行多维度分析。下文首先通过等温吸附与 TG 试验，从微观层面对孔隙水中结合水的赋存比例与类型进行定量识别。在此基础上，进一步开展土-水特征曲线（Soil-Water Characteristic Curve，SWCC）测试，结合吸力-含水率关系探究不同水分状态的束缚程度与排出潜力，以综合揭示低排水性的微观机制。

2.2　孔隙水赋存形态

结合水测试的具体试验方案如下。

1）等温吸附试验

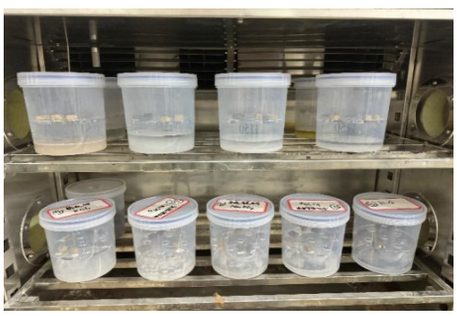
选取初始质量和尺寸相近的块状黏土样，在 250 ℃条件下烘干 8 h。配制 13 种不同相对湿度（Relative Humidit，RH）的溶液，包括 LiBr，LiCl，CH_3COOK，$MgCl_2$，K_2CO_3，NaBr，KI，NaCl，KCl，Na_2SO_3，Na_2SO_4，K_2SO_4溶液及蒸馏水，每种溶液分别配备 3 个平行试件。所有试验容器均置于 20 ℃恒温环境中，每日记录试件吸附量的变化，直至吸附稳定。

2）TG 试验

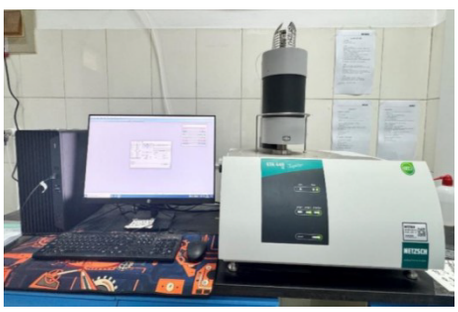
取吸附稳定后的试件放置于热重分析仪中，在

氮气环境下以 5 ℃ · min^{-1}的升温速率从 25 ℃升温至 300 ℃，并实时记录土样重量的变化。

结合水测试试验如图 4 所示。



（a）等温吸附



（b）TG 试验

图 4　结合水测试试验

等温吸附试验结果如图 5 所示。由图 5 可知：当 RH 处于 6.6%～90.8% 时，土体吸附水汽的增量较为缓慢，等温吸附曲线基本呈线性变化，表明该过程以土颗粒-水分子间的静电引力主导型物理化学吸附为主，此时吸附水分子与黏土矿物表面通过强相互作用固结，从结晶化学视角构成矿物晶格整体的一部分，属于固态（即强结合水）；当 RH 超过 90.8% 后，吸附曲线随湿度上升呈指数型增长，与多分子层吸附模型（Brunauer-Emmett-Teller theory，BET）高度吻合[16]，证实土体发生多层分子吸附，所吸附水分已超出纯固相范畴。

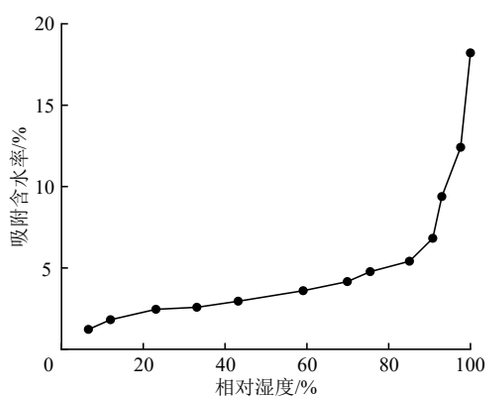
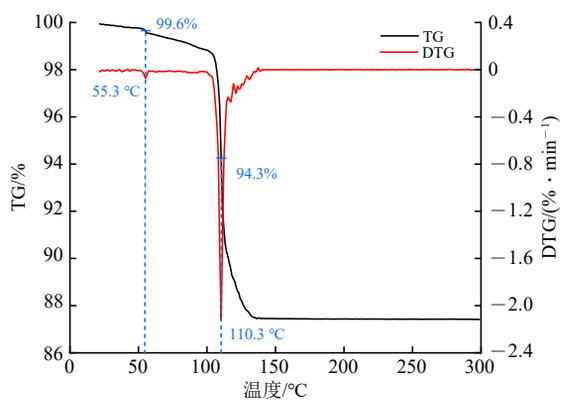


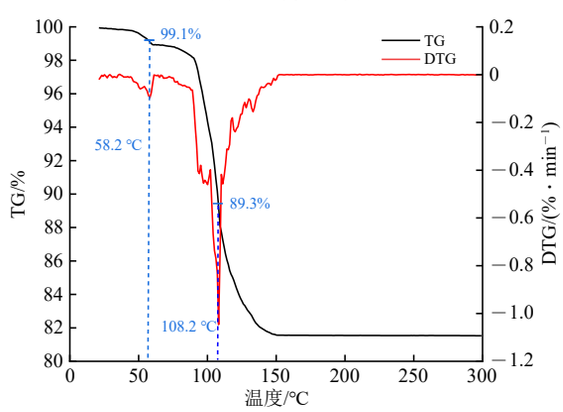
图 5　等温吸附曲线

黏土常将 RH 为 90.8% 和 97.6% 作为强-弱结合水、弱结合水-自由水分界，但等温吸附试验得到的吸附含水率曲线在 97.6%～100% 区间内吸附含水率仍有显著增长，说明在这一阶段生成 1 种新的形式的水[17]。因此，无法简单地将 97.6% 视作弱结合水-自由水分界，需要引入 TG 法同步判定。

TG 曲线为样品重量随温度的变化情况。导数热重（Derivative Thermogravimetry，DTG）曲线为 TG 曲线对温度的 1 阶微分，即重量变化速度随温度变化情况。DTG 曲线的波谷即最大反应速率代表产生新的水类型，可用来判定边界温度，联合 TG 曲线定量分析黏土的孔隙水赋存形态。TG 试验结果如图 6 所示，由于篇幅所限，只列出最关键的 2 个 RH 对应的曲线。



（a）RH 为 97.6%



（b）RH 为 100%

图 6　不同 RH 下的 TG 和 DTG 曲线

由图 6 可知：RH 为 97.6% 和 100% 的土样 DTG 曲线在 25～300 ℃的温度区间内存在 2 个峰值；第 1 个峰值对应的温度在 55.3～58.2 ℃，对应弱结合水的初始脱水温度 T_w；最明显的分界温度出现在 DTG 曲线的峰值处，对应最大的质量损失速率，当温度高于强结合水的初始脱水温度 T_s 时，

质量损失速率随温度的升高而降低，表明水以新的形式释放，即强结合水[18]，RH为97.6%和100%的土样对应的T_s为108.2～110.3 ℃。

强结合水含量可以通过T_s到300 ℃之间的质量损失来确定。而从T_w到T_s的温度区间代表了弱结合水的脱水，毛细-自由水在55.3～58.2 ℃以下发生质量损失。由于毛细凝聚作用，黏土在较低温度下发生脱水。非黏土矿物因表面解离较弱，在RH低于90.8%时不产生弱结合水。当RH大于90.8%时，试样DTG曲线在56.5～58.2 ℃区间显现弱结合水分界温度T_w，此现象与云母、黏土矿物表面60 ℃附近的弱结合水释放规律一致[19]。对于高含水量的样品，在T_w至T_s温度区间发生伴有弱结合水参与的脱水过程，而毛细-自由水已在60 ℃前完全脱失。

孔隙中结合水的定量结果见表3。在RH为100%条件下，土样达到最大吸附含水率，对应于其吸附饱和值。毛细-自由水用于表征最大RH条件的吸附增量，不等同于天然状态自由水即天然含水条件的可排水自由水。在RH为100%条件下的TG试验结果表明，该中低压缩性黏土中强结合水含量为7.7%，弱结合水为9.8%，自由水含量为6.1%。据此计算，强结合水约占天然含水率的32.7%，弱结合水占比为41.7%，结合水（强结合水＋弱结合水）占比达74.4%，而自由水比例仅为6.0%（占天然含水率的25.6%），表明结合水在该类土体中占据主导地位。

表3　结合水试验结果汇总

RH/%	等温吸附/%	TG结果					
		脱水/%	强结合水/%	强结合水的初始脱水温度/℃	弱结合水/%	弱结合水的初始脱水温度/℃	毛细-自由水/%
6.6	1.2	1.2	1.1	101.8			0.1
12.0	1.8	1.8	1.7	102.8			0.1
23.1	2.4	2.4	2.3	103.2			0.1
33.1	2.6	2.5	2.4	103.4			0.1
43.2	2.9	2.9	2.8	102.4			0.1
59.1	3.6	3.5	3.4	104.6			0.1
69.9	4.2	4.1	3.9	103.4			0.2
75.5	4.8	4.7	4.5	104.3			0.2
85.1	5.4	5.3	5.1	104.4			0.2
90.8	6.8	6.7	6.4	105.0			0.3
93.0	9.4	9.2	6.6	109.5	2.4	56.5	0.2
97.6	12.4	12.5	6.9	110.3	5.3	55.3	0.3
100.0	18.3	18.4	7.7	108.2	9.8	58.2	0.9

图7进一步对比了不同土质中结合水、弱结合水及强结合水在天然含水率中的占比。由图7可知：与其他地区不同土质的黏土相比，合肥中低压缩性黏土的结合水占比最高，强结合水和弱结合水占比也均表现出优势；相比之下，天津软土[20]虽也具有较高的结合水占比（68.5%），但其强结合水含量为27.6%，吸附能力略低于合肥黏土；威海海相黏土与青岛淤泥质黏土[21]结合水占比进一步下降，尤其是强结合水分别仅为16.2%和14.0%，表示其矿物表面对水分的吸附能力较弱，结构稳定性相对较差。

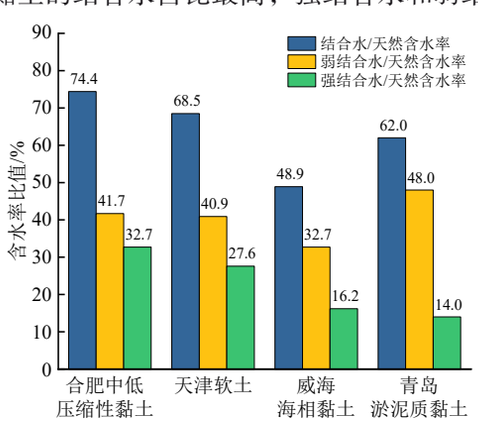


图7　不同土质结合水占比

从结构组成角度看，弱结合水占比高的土体（如合肥中低压缩性黏土和天津软土），更容易在初期加载时形成多分子层吸附膜，产生一定的润滑效应。这种多分子膜或扩散层分布于矿物颗粒表面与片层间，能够降低颗粒接触的摩阻与界面黏滞性，使颗粒在低应力或初始加载阶段更易发生相对滑移与重排，从而促进微观结构的快速调整与早期收敛[22]。而强结合水比例较高则说明水分稳定吸附

于矿物晶格中，不参与自由排水过程，且难以脱附，可视为固相组分，限制颗粒表面活性点的运动自由度，增强颗粒间“胶结-骨架”作用，因而提高了骨架刚性并抑制后期大变形，有助于维持骨架结构的完整性[23−24]。此外，结合水总占比越高，意味着孔隙水迁移能力越弱，其压缩变形过程中的变形不再主要依赖传统排水压密机制，而是由微结构重组和颗粒重排主导。正是这种机制转变，导致合肥中低压缩性黏土在加载过程中表现出低排水性、高稳定性、快收敛、小变形的典型工程特性。

2.3 土-水特性

尽管合肥中低压缩性黏土中仍存在6.1%的自由水，但在压缩变形过程中几乎未观察到排水现象。为进一步解释，引入该土样的SWCC对自由水及结合水在不同吸力区间的分布与可排性进行分析。

SWCC是反映土体基质吸力与含水率之间关系的基本曲线，一般在半对数坐标系下呈现典型的反S型，如图8所示。根据水分迁移特征，SWCC可划分为3个分区：①边界效应区，土体近饱和，吸力接近零，气相未连通；②过渡区，吸力达到进气值后，气体进入大孔隙，孔隙水排出，含水率迅速下降，土体转为三相状态；③非饱和残余区，水分以结合态或强毛细水残留于微孔中，含水率趋稳，即便吸力增加也难以排出。

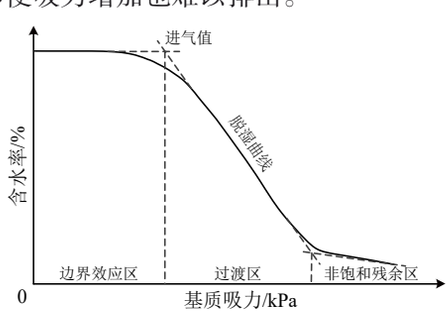


图8 典型土-水特征曲线

使用压力板仪与饱和盐溶液法联合开展合肥中低压缩性黏土的全吸力范围SWCC测试。其中，压力板仪设置的吸力等级为0，10，25，50，100，200，500，800和1 000 kPa。饱和盐溶液法的原理与等温吸附法相同，不同种类的饱和盐溶液在20 ℃条件下对应特定的RH，该RH可换算为相应的吸力。各类饱和盐溶液及其对应的吸力见表4。

图9为基于VG模型[25]拟合得到的全吸力范围内的中低压缩性黏土SWCC。由图9可知：试样含水率在基质吸力0～105 kPa范围内由25.2%缓慢下降至23.5%，对应边界效应区，土体基本处于饱和状态，其天然含水率为23.6%，对应基质吸力约为100 kPa，位于边界效应区的末段。此时气相尚未连通，水势差极小，因此土体水分难以排出，含水率变化极为缓慢。

表4 饱和盐溶液及其对应吸力

溶液类型	RH/%	吸力/kPa
LiBr	6.6	367 540
LiCl	12.0	286 300
CH_3COOK	23.1	197 900
$MgCl_2$	33.1	149 300
K_2CO_3	43.2	113 300
NaBr	59.1	71 000
KI	69.9	48 420
NaCl	75.5	37 900
KCl	85.1	21 800
Na_2SO_3	90.8	13 030
Na_2SO_4	93.0	9 800
K_2SO_4	97.6	3 300

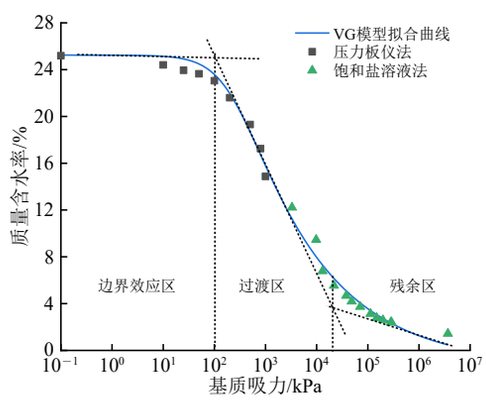


图9 中低压缩性黏土SWCC

已知该类黏土的天然含水率为23.6%，其中17.5%为结合水，其余6.1%为自由水。根据全量程SWCC曲线，含水率为17.5%时对应的基质吸力约为650 kPa，处于过渡区初段。已知，自然状态下黏土的饱和度一般为80%～90%，其对应的孔隙水压系数约为0.2～0.5[26−27]。据此估算，在施加300 kPa外荷载条件下，孔隙水所承受的压力增量约为60～150 kPa，仅接近自由水吸力区间的下限，远不足以克服高吸力下的毛细束缚，亦难以建立有效水势梯度驱动水分迁移。

综上所述，尽管试样中存在一定比例的自由水，但其所处吸力区间仍受毛细吸力控制，水分排出需克服较高的基质吸力。加载过程中所产生的孔隙水压力仍不足以克服高吸力区间的限制，难以形

成有效水势梯度并驱动水分迁移。因此，自由水的存在并不等同于可排出状态，其释放能力受限于基质吸力、水势差以及孔隙连通性等多因素的共同作用。

3　压缩变形过程中的固-气演化

3.1　环境电镜扫描测试

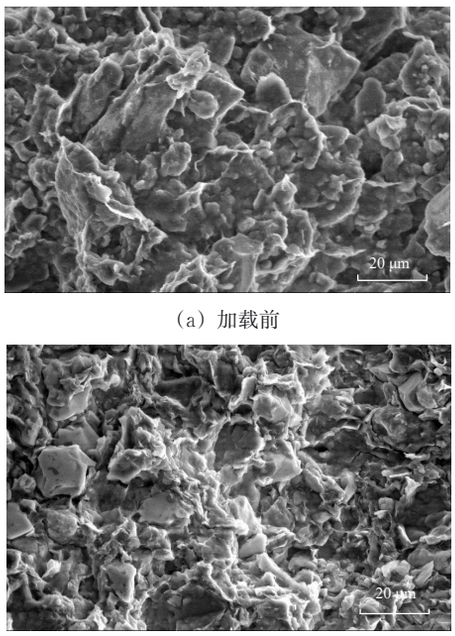
ESEM可在较高环境压力下工作，无需对样品进行脱水或导电处理，不仅保留了传统扫描电镜（Scanning Electron Microscope，SEM）在成像分辨率、放大倍率和三维立体感等方面的优势，还能最大限度地保持土样的天然结构与含水状态，从而显著提升测试结果的真实性与代表性。在加载前与加载后分别于试件中部取样，制备ESEM样本。综合考虑图像清晰度与特征代表性，最终选用1 000倍倍率对土体微观形貌进行定性观察与定量分析。

3.2　微观结构的定性分析

加载前、后的ESEM图像如图10所示。图10（a）是加载前原状中低压缩性黏土的图像，图10（b）是加载至300 kPa稳定后的中低压缩性黏土的孔隙及颗粒图像。

由图10可知，对于原状样品，大多数黏土和粉土颗粒并不以独立分散的形式存在，而是较大、棱角状的粉土颗粒（主要为石英和长石）构成刚性骨架结构，黏土颗粒以面面接触为主，填充于孔隙中，或附着在粉土颗粒表面，从而形成黏聚体结构，使整体呈现出致密、定向排列的骨架型微观结构。此时孔隙结构仍较明显，但分布均匀，孔隙间连接性较好。

在施加300 kPa轴压后，样品进入高压压实阶段，大部分粉粒级颗粒发生破碎并转化为更细的黏粒，粒径分布整体向细化发展。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。微观形貌显示，颗粒之间黏结增强，但表面轮廓呈现明显的不规则性，边界变得曲折、粗糙，局部结构出现扭曲与重组特征。孔隙形态也不再规则均匀，而是呈现出弯曲、裂缝状的闭塞结构，连通性较差。这些变化表明，在持续加载下，土体微结构发生显著重构，整体趋于致密、连续，但局部呈现较强的几何复杂性，反映出材料在压实过程中的骨架调整与颗粒重排。



（a）加载前

（b）加载后

图10　加载前后的ESEM图像

3.3　孔隙压缩与颗粒重排

选取加载前与加载后土样的1 000倍倍率ESEM图像，对其孔径和粒径分布进行定量分析。孔（粒）径d是指孔隙或颗粒的等效直径，即与其面积相当的标准圆形直径。表5列出了加载前、后土样的孔径与粒径分布特征。

表5　加载前后土样的孔（粒）径分布

试样状态	孔径分布/%				粒径分布/%		
	＜0.2 μm	0.2～1 μm	1～5 μm	＞5 μm	＜2 μm	2～75 μm	＞75 μm
加载前	16.3	45.3	34.5	3.8	8.1	81.4	10.5
加载后	25.4	49.1	23.4	2.1	15.3	78.2	6.5

由表5可知：加载前原状样的孔径主要集中分布于0.2～1和1～5 μm这2个区间内，二者合计占比达到孔隙总数的约80%；在施加300 kPa轴压后，1～5 μm及大于5 μm的大孔隙数量显著减少，而小于0.2 μm和0.2～1 μm的小孔隙数量明显增加，孔隙总体向细化方向演化，其中小于0.2 μm孔隙所占比例由16.3%显著上升至25.4%。这一变化表明，压缩变形过程中大孔隙受到压缩并转化

为更小尺度的孔隙，孔隙结构趋于紧密，土体微观结构整体向致密化方向发展。

加载前、后土体的颗粒粒径分布发生显著变化，整体呈现出颗粒细化的趋势。其中，粒径小于2 μm含量由8.1%增加至15.3%，增幅达7.2%，表明较大颗粒在压实过程中被破碎，生成大量细粒并填充原有孔隙结构；粒径为2～75 μm的比例由81.4%降至78.2%，减少3.2%，表明中等粒径颗粒也经历了一定程度的破碎及重组；加载后粒径大于75 μm的比例由10.5%降至6.5%，减少了4.0%，进一步印证了粗颗粒团聚体在荷载作用下的破碎演化。总体来看，外部荷载促使颗粒结构朝向细化方向演变，不仅增强了土体的致密性，也反映出其微观结构在压缩变形过程中的重构特征。

从孔径与粒径变化综合分析可知，加载过程中土体微观结构发生显著变化，表现为颗粒细化与孔隙结构重组。粒径分布数据显示，加载后粒径小于2 μm的比例大幅增加了7.2%，表明大粒径颗粒在压实过程中发生破碎，生成了大量细颗粒。同时，孔径分布亦发生明显变化，小孔隙比例上升，说明新增的细颗粒有效填充了原有的大孔隙，使得孔隙结构趋于致密。两者变化趋势一致，均体现出外部荷载作用下土体由松散结构向细密结构演化。这种微观结构的重构过程促进了孔隙填充和结构致密化，反映了其在外部荷载作用下的结构演化机制。

综上可见，与传统以排水为主的固结变形机制不同，中低压缩性黏土在外部荷载作用下的变形过程，实质上是固（颗粒重构）-液（水分稳定赋存）-气（孔隙压缩）三相协同演化的结果。在固相方面，颗粒在轴压作用下发生破碎与细化，形成大量细粒并填充孔隙，促使微观结构由松散向致密重构，提升了整体结构的稳定性。在液相方面，中低压缩性黏土具有较高比例的结合水，其中弱结合水以多分子膜状吸附于颗粒表面，能够在初期加载阶段降低颗粒接触摩阻，促进结构重组与颗粒重排；强结合水则以固态形式稳定吸附于矿物晶格中，具有较高的脱附能，不参与排水过程，显著降低了孔隙中自由水的比例。此外，强结合水可视为固相组成部分，增强骨架刚性，有助于抑制后期大变形。虽存在一定比例的自由水，但孔隙水迁移能力受限，使土体变形主要依赖微结构调整与颗粒重排，而非传统压密排水机制。在气相方面，大孔隙在外荷载下显著压缩，小孔隙比例明显上升，孔隙连通性下降，反映出气相空间的大幅缩减，结构趋于致密。综上，固-液-气三相在荷载作用下协同演化，从微观尺度揭示了中低压缩性黏土在压缩变形过程中小变形-快速收敛的变形演化机制。

4 结 论

（1）合肥地区典型中低压缩性黏土在一维压缩变形试验中表现出非典型变形特征：变形主要集中在加载初期，0.5 h内完成比例普遍超过80%，总沉降量不超过1.3 mm，且大部分荷载阶段排水量低于0.001 g，显示出快速响应、小变形和低排水的显著特性。

（2）结合水分析表明，该类黏土中结合水占天然含水率的74.4%，其中强结合水和弱结合水占比分别为32.7%和41.7%，而自由水比例仅为6.0%（占天然含水率的25.6%），说明其内部水分主要以稳定吸附状态赋存，为压缩变形过程中变形不依赖排水机制提供了微观证据。

（3）SWCC结果表明，该中低压缩性黏土天然基质吸力约为100 kPa，位于边界效应区末端，气相未连通，水分难以排出。自由水分布于过渡区初段，在孔压系数0.2～0.5条件下，300 kPa荷载仅引起60～150 kPa孔压增量，难以克服毛细吸力限制，亦不足以形成有效水势梯度，使得压缩变形过程中未发生显著排水。

（4）ESEM测试显示，加载后土体颗粒显著细化，粒径＜2 μm比例由8.1%增至15.3%；小孔隙（＜0.2 μm）比例上升至25.4%，大孔隙（＞5 μm）占比下降至2.1%，孔隙结构向细化和低连通性方向演化，反映出颗粒破碎、孔隙压缩和结构致密是其微观演化主导机制。

（5）中低压缩性黏土的变形源于固相（颗粒细化与重构）、液相（结合水主导吸附机制）与气相（孔隙压缩）协同演化的过程，揭示了该类土体在高速铁路工程中的小变形-快收敛行为的变形演化机制。

参 考 文 献

[1] 杨光,刘丰收,张银花,等.400 km·h^{-1}速度条件下高速铁路钢轨适应性研究[J].中国铁道科学,2025,46(4):1-11.

(YANG Guang, LIU Fengshou, ZHANG Yinhua, et al. Research on Adaptability of High-Speed Railway Rails under 400 km · h^{-1} Conditions [J]. China Railway Science, 2025, 46 (4): 1-11. in Chinese)

[2] 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. Prediction of Compression Modulus in High-Pressure Section of Deep Soil Layers [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38 (2): 41-46. in Chinese)

[3] TERZAGH K T. Theoretical Soil Mechanics [M]. New York, London: John Wiley & Sons, Inc., 1943.

[4] 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. Rational Boundary Conditions for One-Dimensional Saturated Soil Consolidation [J]. Acta Mechanica Sinica, 2025, 57 (8): 1944-1951. in Chinese)

[5] 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. Consolidation Characteristics of Peat Soil with Different Organic Matter Contents [J]. Subgrade Engineering, 2025 (1): 14-21. in Chinese)

[6] 阮永芬,张福禄,乔文件,等.泥炭质土非线性固结理论研究[J].公路交通科技,2024,41(2):69-78.
(RUAN Yongfen, ZHANG Fulu, QIAO Wenjian, et al. Nonlinear Consolidation Theory for Peaty Soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41 (2): 69-78. in Chinese)

[7] 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 Deformation Patterns in Clay Consolidation [J]. China New Technologies and Products, 2025 (8): 89-91. in Chinese)

[8] 秦爱芳,郑青青,江良华.统一边界条件下非饱和土一维固结理论研究[J].工程力学,2024,41(3):63-72.
(QIN Aifang, ZHENG Qingqing, JIANG Lianghua. One-Dimensional Consolidation Theory for Unsaturated Soil Under Unified Boundary Conditions [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41 (3): 63-72. in Chinese)

[9] 黄晓鹏.加载方式对淤泥质土固结特性影响试验研究[J].北方建筑,2025,10(2):123-126.
(HUANG Xiaopeng. Loading Method Effects on Consolidation Characteristics of Silty Soil [J]. Northern Architecture, 2025, 10 (2): 123-126. in Chinese)

[10] 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. in Chinese)

[11] 余雷,崔俊杰.高速铁路地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. Compressibility Classification of HSR Foundation Soils and Deformation Characteristics of Moderately-Low Compressible Soils [J]. Railway Standard Design, 2023, 67 (7): 7-11, 56. in Chinese)

[12] 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. Experimental Settlement Study on Medium-Compressibility Soils in HSR [J]. Railway Standard Design, 2023, 67 (7): 30-35. in Chinese)

[13] 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 for Moderately-Low Compressible Soil Subgrade in HSR [J]. Railway Standard Design, 2023, 67 (7): 36-41. in Chinese)

[14] 秦尚林,戴张俊,陈善雄,等.基于原位试验的高速铁路中低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. in Chinese)

[15] 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):206-208.
(HANG Huimin. Secondary Consolidation Characteristics of Shanghai's Fourth Layer Silt Clay [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022 (5): 206-208. in Chinese)

[16] 吴谦,毛雪松,王常明.结合水对软土次固结特性的影响机制研究[J].中国公路学报,2021,34(7):215-225.
(WU Qian, MAO Xuesong, WANG Changming. Bound Water Effects on Secondary Consolidation Characteristics of Soft Clay [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (7): 215-225. in Chinese)

[17] 张锐,肖宇鹏,刘闯.海南高液限土结合水试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(1):10-16.
(ZHANG Rui, XIAO Yupeng, LIU Chuang. Bound Water Characteristics in High-Liquid-Limit Soil of Hainan [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 16 (1): 10-16. in Chinese)
[18] LI S, WANG C M, ZHANG X W, et al. Classification and Characterization of Bound Water in Marine Mucky Silty Clay [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19 (5): 2509-2519.
[19] MORIN R, SILVA A J. The Effects of High Pressure and High-Temperature on Some Physical Properties of Ocean Sediments [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1984, 89 (B1): 511-526.
[20] 吴谦,毛雪松,王常明.结合水对软土次固结特性的影响机制研究[J].中国公路学报,2021,34(7):215-225.
(WU Qian, MAO Xuesong, WANG Changming. Influence Mechanism of Bound Water on Secondary Consolidation Characteristics of Soft Clay [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (7): 215-225. in Chinese)
[21] 李硕.结合水对海相黏性土力学特性的影响研究[D].吉林:吉林大学,2022.
(LI Shuo. Bound Water Effects on Mechanical Properties of Marine Clay [D]. Jilin: Jilin University, 2022. in Chinese)
[22] LI S, WANG C M, GUO F Y, et al. Effect of Bound Water Content on Secondary Compression of Three Marine Silty Clays [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10 (2): 261.
[23] KASPRZHITSKII A, KRUGLIKOV A, ERMOLOV Y, et al. Structure of Bound Water Layer on Montmorillonite Surface: the Role of Trans-and Cis-Vacant Sites [J]. Applied Surface Science, 2024, 642: 158565.
[24] ZHANG S Q, PEI H F. Determining the Bound Water Content of Montmorillonite from Molecular Simulations [J]. Engineering Geology, 2021, 294: 106353.
[25] VAN GENUCHTEN M T. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44 (5): 892-898.
[26] MORVAN M, VERNAY M, BREUL P. Study of the Variation of B with Sr [J]. E3S Web of Conferences, 2016, 9: 10003.
[27] 林成功,吴德伦.非饱和黏土孔隙压力计算与实验研究[J].岩土工程学报,2002,24(5):605-607.
(LIN Chenggong, WU Delun. Pore Pressure Calculation and Experimental Study for Unsaturated Clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (5): 605-607. in Chinese)

Study on the Solid-Liquid-Gas Phase Evolution Mechanism of Medium-Low Compressible Foundation Soils for High-Speed Railways

YU Lei[1], JIANG Hongguang[2], WANG Xiang[3], ZHOU Xiancai[4], LIU Yiyi[2], YAO Chengzhi[5], HUANG Shiguang[4], YANG Weimin[2], SUN Jiankai[6]

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

Abstract: Medium-low compressible clays are used as natural foundations for high-speed railways (HSR), demonstrating favorable settlement control. However, their deformation characteristics during compression are difficult to explain by conventional drainage-consolidation theory, limiting their engineering application. This study focuses on such soils in the Hefei area, conducting high-precision compression drainage tests, measurements of strongly and weakly bound water content, soil-water characteristic curve (SWCC) tests, and

microstructural pore analyses. The research systematically reveals their liquid-solid-gas phase evolution mechanism. The results indicate that: Medium-low compressible clay exhibits rapid deformation and fast convergence during initial loading, with approximately 80% of the total deformation occurring within 0.5 hour after loading and minimal pore-water drainage, showing distinct atypical drainage deformation behavior; Bound water accounts for 74.4% of the natural water content (strongly bound: 32.7%; weakly bound: 41.7%). Although free water constitutes 25.6% of the natural water content (6.0% of total water), its effective drainage is impeded due to dominant capillary suction forces, insufficient hydraulic gradient, and the constraints of the pore structure. Particle fragmentation and refinement increase the content of particles smaller than 2 μm from 8.1% to 15.3%. Compression leads to the conversion of larger pores into smaller ones, increasing the proportion of pores smaller than 0.2 μm to 25.4%. Results signify a microstructural restructuring characterized by particle refinement, pore compression, and structural densification. The compression deformation process of medium-low compressible clays under external loading results from the co-evolution of solid-phase reorganization, liquid-phase adsorption/retention, and pore compression, providing a micro-scale basis and theoretical support for deformation control of such soil foundations in high-speed railways.

Key words: High-speed railways; Medium-low compressible clay; Compression deformation; Bound water; Microstructural evolution

（责任编辑　王蕴嘉）