轨道交通车辆段软土地基处理技术研究现状

李真玉 [1], 林大地 [2*], 李莉 [3]
1. 温州职业技术学院，瑞安学院，浙江 温州，325000
2. 温州理工学院，建筑与能源工程学院，浙江 温州，325000
3. 齐齐哈尔高等师范专科学校，黑龙江 齐齐哈尔，161000

摘要：城市轨道交通建设当前已成为城市现代化建设的重要名片，也是城市发展的关键，截至到 2025 年我国已开通城市轨道交通的城市共计 54 个，累计已开通运营的城市轨道交通线路 333 条，实际运营里程共计 11330.5 公里，累计完成客运量已达 26.9 亿人次，越来越多的居民选择城市轨道交通出行，保证城市轨道交通运营的安全稳定和舒适是重中之重。本文根据地基处理、沉降计算方法总结以及数字化分析等角度梳理了车辆段地基处理技术核心问题，为沿海城市及软土地基处理技术提供研究方向。

关键词：轨道交通；地基处理；数字建模；地基沉降

Research Status of Soft Soil Foundation Treatment Technology for Rail Transit Depots

Zhenyu Li[1]，Dadi Lin[2,*]，Li Li[3]
1. Rui'an College, Wenzhou Polytechnic, Wenzhou, Zhejiang, China, 325011
2. College of Architecture and Energy Engineering, Wenzhou University of Technology, Wenzhou, Zhejiang, China, 325011
3. Qiqihar Teachers College, Qiqihar, Heilongjiang, China, 161000

Abstract：Urban rail transit construction has become a significant symbol of modern urban development and a key driver of city growth. By 2025, a total of 54 cities in China had opened urban rail transit lines, with 333 operational routes, an actual operating mileage of 11,330.5 kilometers, and cumulative passenger traffic reaching 2.69 billion trips. As more residents choose urban rail transit for travel, ensuring its safe, stable, and comfortable operation is of utmost importance. From perspectives such as ground treatment, settlement calculation methods, and digital analysis, this paper examines the core issues of depot foundation treatment technologies, providing research directions for coastal cities and soft soil foundation treatment techniques.

Key words: Rail Transit; Foundation Treatment; Digital Modeling; Foundation Settlement

1 地基处理与沉降控制

城市轨道交通路基工程需保证列车运行安全、稳定、舒适和平顺，须具备足够强度、稳定性和耐久性。规范要求[1]：有砟轨道路基工后沉降<200mm；路桥过渡段<100mm，沉降速率≤50mm/年。无砟轨道路基工后不均匀沉降与扣件调高量差值≤15mm，过渡段折角≤1/1000。地铁路基工后沉降要求苛刻，凸显地基处理技术研究的重要性。

二战后，美国开发就地搅拌桩法（MIP），通过旋转螺旋钻压注水泥浆形成水泥土桩，桩径

0.3~0.4m，长 10~12m。日本 1953 年引进后研发 CSL 法与 MR-D 法[2]。1974 年，日本开发水泥搅拌固化法（CMC），后续提出 CDM、DJM、DCS 等工法[3]。我国 1977 年启动试验，1978 年研制首台 SLB-1 型深层搅拌机[4]。1985 年起用于滨海软弱地基加固。Wen Zhongyi 等[5]研究珠江三角洲软土工程，证实水泥搅拌桩与级配边坡联合加固可抑制变形、增强稳定性。太原西南环铁路项目[6]采用双向水泥搅拌桩，通过钻芯法和载荷试验检测质量与承载力。尹忠辉[7]分析工艺参数对成桩质量影响。刘大华等[8]总结施工工艺与质量控制，表明该技术能提高承载力、控制工后沉降。

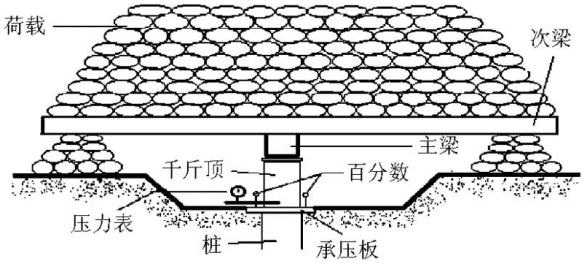

图 1 复合地基荷载试验

Fig. 1 Plate Load Test on Composite Foundation

预制混凝土桩技术的发展轨迹始于材料与工艺革命，深化于构件形态创新，最终臻于体系化集成[9,10]。19 世纪末欧洲的工程实践，如 Hennebigue 的预制混凝土管桩与 W. Hume 的离心工艺，奠定了工业化基础。20 世纪中叶，美国将预应力技术与离心工艺结合（1949），催生了高性能预应力混凝土管桩（PHC）[9]。日本系统性地深化该技术，形成了从钢筋混凝土桩（RC）、预应力混凝土桩（PC）到 PHC 的完整序列[10]。为针对性提升承载力，日本开发了扩底 PHC 桩（ST 桩）以增强端承力，并首创带节 PHC 桩（“节桩”）以显著提高侧摩阻力[11]。中国在引进技术的同时改进截面形式，如带桩大头[13]、带肋（翼）板预应力管桩，以及融合高强预应力与增摩截面的机械连接竹节桩[14]，通过材料、工艺与设计优化不断突破承载性能极限[12]。

为严格控制工后沉降与差异沉降[15,16]，发展了以桩为核心的复合地基体系，主要包括“桩网结构”和“桩板结构”。桩网结构结合桩与土工格栅等加筋材料，1975 年由日本学者工藤升在堤岸工程中率先实践[15]，后在英国机场等深厚软土地基中用于协调差异沉降[16]；中国于 2006 年在高速铁路无砟轨道地基中引入该技术[17]。桩板结构在桩顶设置连续混凝土承载板，形成刚性传力平台，芬兰在 20 世纪 90 年代重载铁路中成功应用，验证了其沉降控制能力[18]；中国在京津城际铁路中采用多种桩型复合的桩板结构，进一步证实了该体系在高速铁路路基工程中的可靠性与有效性[19]。

岩土工程发展遵循从简单到复杂、从局部到整体、从单一性能追求到多目标协同优化的路径。早期对混凝土强度、预应力工艺和离心密实的探索解决了构件“本体性能”问题[9,10]；对扩底、竹节、带肋等截面形式的创新优化了桩-土相互作用界面[11,13,14]；而桩网、桩板等复合结构则将桩转化为与加筋体、承载板协同的“系统组件”[15-19]。日本在技术的精细化、系列化与标准化方面展现先发优势[10,11,15]，中国则依托大规模工程实践，在技术引进、推广、再创新及复合体系应用方面贡献突出[12-14,17,19]。这项百年技术为高层建筑、桥梁港口乃至高速铁路、跨海工程等重大基础设施提供了关键支撑，体现了工程技术持续迭代服务社会发展的动力。

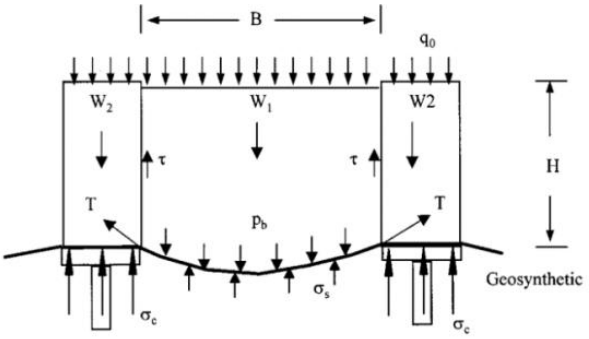

图 2 加筋土工合成材料-桩基支撑土体平台的荷载传递机制

Fig. 2 Load Transfer Mechanisms of Geosynthetic-reinforced pile-supported Earth Platforms

2 线路沉降数字化分析研究

2.1 线路沉降数值分析计算分析

在桩基工程与软土地基处理中，数值模拟方法是揭示桩-土-结构相互作用机理、优化设计参数与控制沉降的核心工具，通过精细化模型模拟复杂工况，提升分析准确性与预见性。Milos 等[36]提出有限元与无限元耦合分析方法，模拟桩-土-承台相互作用，以有限元模拟近场土体，无限元模拟远场，将土体视为弹性并引入软弱区解释桩土滑移，奠定理论框架。

在软基处理实践中，Yang Liang[20]基于高速公路软土路基拓宽工程，采用有限元分析水泥搅拌桩对沉降的影响，揭示桩长和桩间距的控制规律；陈景榜[21]利用 Midas GTS 探究土工格室-水泥搅拌桩复合地基的沉降特性；陈页开等[22]通过数值模拟分析土工格栅与水泥搅拌桩加固软基的固结行为，评估参数敏感性。

针对桩网复合结构，朱彦博等[23]建立哈—大铁路桩网结构路基有限元模型，分析路基高度和桩间距对应力传递的影响，验证模拟可靠性；陈勋[24]针对甬台温铁路软土路基，建立三维模型揭示碎石注浆桩-网复合地基的动应力及变形趋势；郑江等[25]基于 PLAXIS 软件对 PHC 管桩处理软基进行稳定性与沉降计算，表明数值模拟更准确。

对于桩板结构及其他复合体系，王业顺等[26]推导桩板结构路基沉降解析解，并与 FLAC 3D 数值结果对比，证实互补性；詹永祥等[27]采用 ANSYS 分析无碴轨道桩板结构路基沉降，探究桩径、桩间距、板厚等参数影响；秦晓光[28]对上海市有轨电车软土地基 PHC 桩桩板结构进行数值模拟优化设计。

2.2 地铁车辆段线路工后沉降预测分析

速铁路路基工后沉降的精确预估，是确保工程长期稳定与安全运营的核心技术挑战。该领域的方法论演进呈现出从经典理论解析到数据驱动智能预测的清晰轨迹。Asaoka [29]对一维固结理论的创造性发展，基于 Mikasa[30]的固结微分方程，通过级数形式的微分方程进行计算，并利用已观测的沉降数据直接外推预测最终沉降量，形成了简洁实用的 Asaoka 法。该方法因其对实测数据的有效利用而在工程界获得广泛应用。目前，高铁路基沉降预测方法主要可归纳为理论计算、数值模拟与数据预测三大类[31]。理论计算如分层总和法，以及数值计算法（如有限元法），虽具有明确的物理基础，但其计算精度受土工参数选取、本构模型简化等诸多因素影响，往往难以精确控制。GM 模型[32]、神经网络模型[33]，在处理高噪声、小样本的工程数据时表现出更高的预测精度与容错率，代表了当前智能预测的主流方向[31,33]。这些数据驱动方法的核心优势在于，它们绕过了对复杂土体本构关系

的直接描述，转而从沉降过程数据本身挖掘演化规律，从而更有效地应对岩土工程固有的不确定性。

为了验证与提升各种预测方法的可靠性与适用性，大量研究通过具体工程案例进行了深入的对比分析与融合创新。沈卓恒[34]以软土区道路地基为对象，将有限元数值模拟结果与 Asaoka 法的预测结果进行对比，相互校验并综合确定了路面的最终沉降量，体现了传统解析法与现代数值法的结合。王志亮等[35]则致力于改进 Asaoka 法，通过引入物插值法和直线最小二乘拟合法与之结合，编写了新的预测程序，成功应用于多级加载路堤的沉降预测，验证了该方法结合的可行性。在多种方法的系统性评述方面，薛祥等[36]对三点法、曲线拟合法、灰色模型、神经网络法以及 SFIA 方法进行了全面分析，为方法优选提供了依据。在重大交通基础设施的实践中，王小军等[37]基于实测数据，以多种方法计算了荷载预压所需时间，展现了多方法集成应用的工程价值。此外，预测方法的应用场景也从天然地基扩展到施工扰动环境，曹佳宁[38]基于南京地铁项目为软土区高速铁路等邻近工程的沉降变形控制提供了重要参考。

3 结论

城市轨道交通对路基工后沉降的严苛要求，对地基处理与沉降预测技术构成重大挑战。相关技术发展呈现出从构件到系统、从单一性能到多目标协同的清晰演进路径。

地基处理技术的发展，始于通过材料和工艺提升桩基本体性能；进而通过创新截面形式（如扩底、竹节桩）优化桩-土相互作用；最终发展为桩网、桩板等复合地基体系，实现了桩与加筋体、承载板的系统协同，完成了从孤立构件到系统组件的飞跃。

沉降计算方法也在不断深化。理论计算从早期经验公式发展到分层分区的实用框架；数值模拟成为揭示复杂机理、优化设计的关键工具。工后沉降预测则呈现出从经典解析法向数据驱动智能预测（如灰色模型、神经网络）发展的趋势，后者能更好地处理不确定性，已成为主流方向。

参考文献

[1] GB50157-2013 地铁设计规范[S]. 中国建筑工业出版社, 2014.
[2] 赵铁平. 青银高速公路水泥搅拌桩复合地基承载力研究[D]. 河北: 河北工业大学, 2006.
[3] 蔡德钩. 加筋网垫在桩网结构路基中的计算方法研究[R]. 中国铁道科学研究院, 2010.
[4] 赵铁平. 青银高速公路水泥搅拌桩复合地基承载力研究[D]. 河北工业大学. 2006.
[5] Zhong Yi W, Zi Cong F, Li Juan Z, et al. Applied research on slope reinforcement with cement mixing pile in deep soft soil foundation pit[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 570(3): 032037.
[6] 李晓鹏. 双向水泥搅拌桩施工工艺及加固效果检测[J]. 交通科技, 2016(02): 136-139.
[7] 尹忠辉. 水泥搅拌桩施工参数间相关关系研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021: 1-8.
[8] 刘大华, 卢 颖, 郑六龄等. 水泥搅拌桩施工技术在山区公路软土地基处理中的应用[J]. 工程建设与设计, 2022(04): 123-125.
[9] 刘利民, 舒 翔, 熊巨华. 桩基工程的理论进展与工程实践[M]. 北京: 中国建材工业出版社. 2002.
[10] 匡红杰, 朱群芳, 徐祥源. 先张法预应力混凝土异型桩的发展概况调研[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(12): 27-30.
[11] Huang J, Han J, Collin J G. Geogrid-reinforced pile-supported railway embankments: A three-dimensional numerical analysis[J]. Transportation research record, 2005, 1936(1): 221-229.
[12] 中国预应力混凝土管桩的发展状况及同日本管桩的差距[C]. 预制混凝土桩—中国硅酸盐学会钢筋混凝土制品专业委员会、中国混凝土与水泥制品协会预制混凝土桩委员会 2007-2008 年年会论文集. 2008: 4-14.
[13] 黄 敏, 韩少华, 邹宗煊. 建筑基础带桩大头预应力管桩: 02265809. 2[P]. 2003-08-20.
[14] 周兆弟. 连节式竹筋管桩: 200620107743. X[P]. 2007-11-14.
[15] Han J, Gabr M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2002, 128(1): 44-53.
[16] 饶为国. 桩-网复合地基原理及实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

[17] 蒋关鲁, 詹永祥, 陈 睿等. 无碴轨道桩板结构路基设计理论及计算理论的探讨[C]. 铁路客运专线建设技术交流会论文集. 2005: 407-410.
[18] Han J, Huang J, Porbaha A. 2D numerical modeling of a constructed geosynthetic-reinforced embankment over deep mixed columns[M]//Contemporary issues in foundation engineering. 2005: 1-11.
[19] 沈宇鹏, 李小和, 冯瑞玲等. 客运专线桩板结构复合地基的沉降特性[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(06): 32-35.
[20] Liu W, Novak M. Soil–pile–cap static interaction analysis by finite and infinite elements[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(6): 771-783.
[21] Yang L, Xu W, Li K. Analysis of the embankment settlement on soft soil subgrade with a cement mixed pile[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 9949720.
[22] 陈景榜. 土工格室-水泥搅拌桩复合地基沉降特性试验研究[D]. 浙江工业大学大学, 2020.
[23] 陈页开, 艾建文, 周捡平等. 土工格栅和水泥搅拌桩加固软基数值分析研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017(4): 1422-1430.
[24] 朱彦博, 凌贤长, 闫穆涵等. 高速列车荷载下桩网结构路基竖向动应力传递分析[J]. 铁道建筑, 2020, 60(09): 93-96.
[25] 陈 勋. 甬台温铁路线某段桩-网复合地基的动力变形分析[J]. 路基工程, 2016(03): 40-45.
[26] 郑 江, 俞琴云, 高 钰等. 预应力管桩处理傍山路段软基分析[J]. 地基处理, 2021, 3(01): 13-20.
[27] 王业顺, 陈晓斌, 蔡德钩. 桩板结构路基沉降计算方法及对既有桩基侧摩阻力的影响[J]. 铁道建筑, 2019(2): 22-25.
[28] 詹永祥, 蒋关鲁, 魏永幸. 桩板结构路基沉降影响因素的有限元分析[J]. 路基工程, 2007(3): 12-14.
[29] 秦晓光.现代有轨电车线路深厚软土地基一体化桩板结构沉降控制研究[J].城市轨道交通研究,2019,22(06):80-84.
[30] Asaoka A. Observational procedure of settlement prediction[J]. Soils and foundations, 1978, 18(4): 87-101.
[31] Miskasa M. Consolidation of soft clay [M]. Tokyo: Kajima-Shuppan-Kai, 1963.
[32] Andrew H T, Bruce W. Large mammal biomass predicts the changing distribution of hunter -gatherer settlements in mid -late Holocene Alaska [J]. Journal of Anthropological Archaeology,2017(45):81-97.
[33] Xiao X, Hu Y, Guo H. Modeling mechanism and extension of GM (1, 1)[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(3): 445-453.
[34] Lee K Y, Chung N, Hwang S. Application of an artificial neural network (ANN) model for predicting mosquito abundances in urban areas[J]. Ecological informatics, 2016, 36: 172-180.
[35] 沈卓恒, 阮世强. 软土地层路基工后沉降预测及控制研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(04): 17-21.
[36] 王志亮, 黄景忠, 李永池. 沉降预测中的 Asaoka 法应用研究[J]. 岩土力学, 2006(11): 2025-2028+2032.
[37] 王小军, 屈耀辉, 魏永梁等. 郑西客运专线湿陷性黄土区试验路堤的沉降观测与预测研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 220-231.
[38] 曹佳宁. 软土地质条件下盾构穿越高速铁路对路基工后沉降的影响[J]. 路基工程, 2022(01): 112-116.

[1] **第 1 作者简介：**李真玉（1996-），女，硕士研究生，讲师，研究方向：城市轨道交通管理、交通设施建设、数字孪生与智慧交通等相关基础研究和应用研究。E-mail：2021000129@wzpt.edu.cn。
[*] **通讯作者简介：**林大地（1992-），男，博士研究生，讲师，研究方向：高性能橡胶混凝土路面材料性能、再生混凝土力学性能、再生粗骨料细观数字建模、多尺度下再生粗骨料模型混凝土损伤机理等研究。E-mail：20240136@wzut.edu.cn。