

复杂地质条件下既有建筑沉降控制与加固设计研究

彭立顺

广东省广建设计集团有限公司, 广东 广州 510013

DOI:10.61369/ERA.2026070034

摘 要： 文章以珠海市斗门区某办公楼为例，针对深厚软土、上软下硬等复杂地质条件既有建筑不均匀沉降问题，分析其成因、评估方法及控制策略。基于地质资料、非线性有限元模拟与结构安全验算，揭示沉降作用下结构损伤演化规律，评估安全状态并预测沉降趋势。研究表明，深厚软土固结沉降与桩基负摩阻力是关键，精细化实体模型可有效评估结构塑性损伤状态，加固设计需从区域整体稳定性出发，提出针对性建议，为同类工程提供参考。

关 键 词： 既有建筑；地基加固；沉降控制

Research on Settlement Control and Reinforcement Design of Existing Buildings under Complex Geological Conditions

Peng Lishun

Guangdong Guangjian Design Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510013

Abstract： Taking an office building in Doumen District, Zhuhai City as an example, this paper analyzes the causes, assessment methods, and control strategies for differential settlement of existing buildings under complex geological conditions such as deep soft soil and soft-over-hard strata. Based on geological data, nonlinear finite element simulations, and structural safety checks, the paper reveals the structural damage evolution laws under settlement effects, evaluates safety conditions, and predicts settlement trends. The research indicates that consolidation settlement in deep soft soil and negative skin friction on pile foundations are key factors. A refined solid model can effectively assess the plastic damage state of the structure. Reinforcement design should consider overall regional stability, and targeted recommendations are proposed to provide references for similar projects.

Keywords： existing buildings; foundation reinforcement; settlement control

引言

复杂地质条件下建筑易发生不均匀沉降，危及结构安全。珠海市斗门区某办公楼地处珠三角海陆交互沉积地层，具有“上软下硬、软硬突变”的典型地质特征，建设及使用过程中因深厚软土固结与桩基负摩阻力等因素持续沉降，虽经多次加固仍未收敛。以此为案例，分析沉降机理，评估结构安全状态，探讨加固策略，为复杂地质条件下既有建筑的沉降控制与加固设计提供参考。

一、工程地质特性与沉降机理分析

（一）该工程地质概况

项目场区位于珠江三角洲前缘，属典型的河、海相交互沉积地貌。地质勘察揭示，场区第四纪沉积层厚度巨大，平均达40至50米。地层结构极为复杂，呈现出“汉堡包”式的多层交互沉积特征，主要由流塑状的淤泥、淤泥质土以及松散状态的淤泥质粉砂、细砂等软弱土层构成。物理力学性质方面，这些软土层具有高含水量、高压缩性、低强度、低渗透性的典型特征。尤为不利的是，下伏基岩为燕山期花岗岩，其全风化及强风化层遇水易软化崩解，而中风化层则坚硬完整，岩面起伏较大。这种“上软下硬，软硬突变”的地层组合，为桩基工程带来了巨大挑战。

（二）沉降机理分析

基于地质资料与建设过程回顾，该建筑的不均匀沉降机理可归结为内外因共同作用的结果。内因在于极其不利的地质条件，外因则与特殊建设工况密切相关。

项目前期虽采用了塑料排水板结合堆载预压的方式进行软基处理，但回填土厚度高达7至10米。建筑物建成后，深层软土在长期持续的附加应力作用下，持续发生排水固结与压缩变形。在此过程中，桩周土层的沉降变形显著大于桩身沉降，从而对桩侧产生向下的负摩阻力。该负摩阻力不仅抵消了桩身的部分承载力，还作为下拉荷载作用于桩身，导致桩端持力层（强风化或中风化岩层）承受额外压力。加之持力层岩面起伏，在负摩阻力持续作用下，部分管桩发生沉降，进而引发上部结构的联动变形与

不均匀沉降。现场观测到加固前承台开裂、加固后沉降速率反复波动等现象，均证实了该沉降机理。

（三）沉降发展规律

根据沉降监测数据，可以梳理出沉降发展的大致规律。自加固施工以来，沉降经历了几个阶段：一度趋于稳定，之后又再度加剧，随后有所收敛，但最近又出现速率加大的情况。加固处理后，沉降曾短暂趋于稳定，然而2022年底以后，部分观测点的沉降速率再次提高，到报告完成时仍未收敛。从监测结果看，沉降主要集中在 F-H 轴区域，最大累计沉降已接近 -48 毫米。近一百天内的沉降速率显示，部分测点的变形速率超过了规范限值。上述情况说明，深厚软土的固结沉降是一个长期缓慢的过程，其对桩基产生的负摩阻力影响会持续存在，结构沉降难以在短期内真正稳定^[1]。

二、既有建筑安全状态的综合评估方法

（一）精细化数值模拟技术

针对已进入塑性受力阶段的既有建筑，传统结构分析软件（如盈建科、PKPM）大多基于线弹性理论，较难真实反映结构的损伤状态。因此，本文尝试引入 Abaqus 有限元软件，建立一个包含混凝土和钢筋的精细化实体模型。该模型考虑了材料的非线性特征：混凝土部分采用塑性损伤模型来模拟开裂和压碎，钢筋部分按理想弹塑性材料设定，同时引入几何非线性，从而能够较细致地捕捉构件截面的变形过程及损伤发展轨迹。以现场监测得到的柱底沉降数据作为边界条件，模型可以重现当前沉降状态下结构的应力分布、应变响应和裂缝开展情况，并进一步预测后续沉降对结构安全的影响。这种从沉降结果反推结构响应的分析方式，有助于评估结构当前的安全储备，也为判断未来风险提供一定依据。

（二）沉降数据的处理与应用

沉降数据的准确运用，是评估工作能否顺利开展的基础。由于监测点布设数量有限，无法覆盖所有柱位，研究中采用线性内插法估算未设监测点位置的沉降值，并借助反推法对估算结果的合理性进行验证。在对建筑当前状态进行评估时，选取自2022年9月10日以来的累计沉降数据作为输入荷载，用以反映结构在已有变形条件下的受力响应。在进行未来趋势预测时，则假定各柱位后续沉降速率与近一百天内的实测速率保持一致，依此推算达到结构损伤临界状态（如钢筋屈服）时对应的累计沉降值。这种数据处理方式虽然存在一定的近似性，但依据现有监测数据建立合理假设，为定量分析沉降发展趋势提供了可行的技术路径，也使评估结论更具实际参考价值^[2]。

（三）模拟与验算结果的相互验证

为确保评估结论可靠，研究同时采用 Abaqus 非线性有限元分析与盈建科弹性阶段结构验算两种方法，并将两者计算结果进行对比。

Abaqus 分析结果显示，在当前沉降作用下，混凝土开始出现以受拉为主的损伤，但内部钢筋尚未达到屈服强度，结构仍保有

一定安全储备。盈建科验算则表明，现有沉降使部分框架梁的配筋需求增加 5% 至 30% 不等，且配筋需求增大的位置与实际开裂部位基本吻合。当进一步预测至钢筋屈服对应的沉降值时，Abaqus 模型显示大量构件出现损伤，钢筋应力达到屈服极限，而盈建科模型则显示配筋需求成倍增长，结构整体性受到严重影响。

两种评估方法分别基于非线性有限元理论与线弹性结构分析原理，理论体系不同，但得出的结论在趋势上相互印证。Abaqus 从材料损伤和应力发展角度揭示了结构从局部开裂到钢筋屈服的渐进破坏过程，盈建科则从承载力需求变化侧面反映了沉降对结构安全的影响。两者结果一致表明，当前沉降尚未导致结构丧失承载能力，但若沉降持续发展，结构将面临较大风险。这种多方法、多角度的对比验证，避免了单一分析方法可能带来的偏差，使评估结论更具科学依据和说服力，也为后续加固设计提供了更为可靠的技术支撑^[3]。

三、沉降控制策略与加固设计优化

（一）加固方案回顾与问题分析

面对持续发展的沉降问题，项目设计单位采取了“承台扩大、增补方桩、增设结构板”的综合加固方案，希望通过增加桩基数量与刚度、提升上部结构整体性来抵抗不均匀沉降。但加固后的监测数据显示，沉降并未完全停止，部分区域仍有进一步发展。这说明加固设计虽在一定程度上提高了结构安全性，却未能从根源上解决深厚软土固结沉降对桩基产生的负摩阻力问题。尤其是仅对 H 轴进行止沉处理的设想，经数值模拟验证后暴露出明显缺陷。

模拟结果显示，只加固 H 轴虽然缩小了其相邻 G 轴之间的相对沉降差，但其他柱位沉降仍在继续，反而导致差异沉降进一步扩大，在新的位置引发应力集中与结构损伤。这反映出局部加固思路难以应对深厚软土区整体沉降的持续性与传递性，加固后的受力重新分配反而可能催生新的薄弱环节。

（二）基于模拟结果的加固策略优化

根据非线性有限元分析结果，研究提出了一套更具系统性的加固策略。一是明确沉降控制的重点区域。模拟显示，当沉降持续发展至钢筋屈服时，G-1、F-3、G-7、F-10、F-17 等柱位会首先出现弯折或拉拔，这些位置应作为后续加固的优先关注点。二是提出整体稳定、局部加强的思路。考虑到仅加固 H 轴存在局限，建议对沉降尚未稳定的区域进行系统评估，对沉降速率持续超限的柱位——尤其是位于差异沉降较大范围内的桩基——采取针对性的补强措施，比如增设桩基或桩侧注浆，以主动控制沉降。三是强调加固施工与监测的联动。在加固过程中应加强全程监测，根据实时数据动态调整施工参数，从而保障加固效果^[4]。

（三）动态监测与预警机制

沉降发展可能持续较长时间，因此有必要建立动态监测与预警机制。监测内容包括建筑沉降、倾斜、裂缝，以及周边地下水位、深层土体位移等指标。监测频率根据沉降速率灵活调整，沉降活跃期适当加密。依据数值模拟得到的临界沉降值，可设立分

级预警。当相邻柱基沉降差或整体倾斜接近规范限值，或关键构件裂缝宽度超出控制标准时，应及时启动预警并采取应急措施。同时，沉降数据分析要形成常态化机制，通过趋势分析预判未来风险，为主动干预提供依据。这样有助于将结构风险控制在可接受范围，实现对沉降问题的过程主动控制，而非事后被动加固^[5]。

监测系统要覆盖传感器布设、数据采集传输、分析反馈和预警响应，实现从监测到处置的闭环。按沉降速率、差异沉降量和构件损伤划分预警等级，不同等级对应加密监测、局部处理或紧急加固等逐步升级的措施。持续积累监测数据并反演分析，不断修正模型参数，提高预测准确性，让预警机制更好指导实践。

四、项目研究主要结论

（一）不均匀沉降的成因与机制

软土区在长期荷载下持续固结。软土层压缩，桩周土体随之明显下沉，产生负摩阻力，使桩身额外承受向下的拉力。上部软、下部硬的地层结构，在软硬土层交界处易出现变形不一致，这会进一步加剧不均匀沉降。

（二）评估方法的可靠性与互补性

采用精细化非线性实体有限元模拟技术，可以细致展现混凝土开裂、钢筋屈服等塑性阶段特征，据此判断结构的损伤状态与安全储备。这种方法的分析结果与基于弹性理论的计算结论趋势相近。两种方法互相补充，可提升评估结论的可信度。

（三）当前安全状态与潜在风险

从当前沉降情况看，裂缝大多出现在受力较大的部位。这些裂缝尚未贯通，内部钢筋也未达到屈服强度。结构仍保留一定的安全储备，整体处于可控范围。不过，如果沉降按照现有速度继续发展，就会逐渐接近钢筋屈服的临界点。届时部分关键柱位将面临破坏风险，对此需要给予重视。

（四）加固设计的优化方向

原有的局部加固方案存在不足。设计时需更多考虑区域整体稳定性，优先控制差异沉降较大的关键区域，同时兼顾地基处理与上部结构加强。此外，可配套建立动态监测预警机制，根据监测数据灵活调整方案，从而保障建筑的长期使用安全。

五、项目研究主要建议

（一）多手段综合查明地质条件

在软土分布区域，可以综合运用钻探、原位测试和物探等技术手段。这些手段相互验证，用于查明软土厚度、分层特征和基岩起伏形态。这样能为桩基选型与承载力设计提供更可靠的依据，也能减少单一方法可能带来的信息缺失。

（二）充分考虑负摩阻力与时间效应

在深厚软土区域设计桩基时，桩侧负摩阻力对承载力和沉降的影响不容忽视。需结合软土固结特性，合理判断其发展过程。可采用桩身涂层、预钻孔植桩等措施来减轻负摩阻力的作用，同时也不能忽略桩土相互作用随时间变化的特征。

（三）坚持动态设计与信息化施工

施工阶段可以遵循动态设计、信息化施工的思路。及时把监测数据反馈给设计方，便于根据实际沉降情况调整后续工序或加固措施，让设计与施工之间形成更紧密的配合。

（四）建立长期监测体系与应急预案

特殊地质条件下的既有建筑，需要建立一套长期的沉降与结构健康监测体系。监测系统应覆盖关键柱位和结构敏感部位，并定期分析数据变化趋势。同时还要制定应急预案，发现异常能及时启动，避免小变形长期累积而引发结构性风险，从而保障建筑在整个使用周期内的安全。

六、结束语

复杂地质条件下既有建筑沉降控制与加固设计，需立足工程地质特性，深入揭示沉降机理，并采用精细化数值模拟等手段科学评估结构安全状态。透过系统分析沉降发展规律、验证加固方案有效性，明确整体稳定与局部加强相结合的设计原则，建立动态监测与预警机制，方能实现对沉降风险的有效控制。研究为类似深厚软土、上软下硬地层条件下的既有建筑加固提供理论依据与技术参考，对提升复杂地质环境下工程结构的安全保障能力具有重要意义。

参考文献

- [1] 王凯. 基础加固及沉降控制设计的研究与实践 [J]. 建筑施工, 2024, 46 (09): 1460-1464.
- [2] 薛国东. 新建建筑物地基处理对既有建筑物沉降量的影响研究 [J]. 河南建材, 2025(9): 41-43.
- [3] 何小飞, 胡娟. 既有应急低层建筑基础不均匀沉降紧急注浆加固综合处理措施 [J]. 建筑技术, 2021, 52(10): 1255-1258.
- [4] 夏长华, 闫双跃, 段启伟. 某高层建筑不均匀沉降原因分析及加固处理措施 [J]. 建筑科学, 2025, 41(7): 109-115.
- [5] 瞿嘉玮, 何新东. 既有建筑物地基处理加固方法应用 [C]// 第十三届建筑物建设改造与病害处理学术会议 论文集. 2021: 80-82.