

高层建筑基础岩土力学特性及极限承载力影响因素分析

刘前益

四川高地工程设计咨询有限公司，四川省成都市，610000；

摘要：面向高层建筑的基础设计常受软弱夹层、结构面取向与地下水复杂耦合的制约，荷载路径与应力历史会改变土体与岩体的等效强度与刚度，导致承载与变形边界条件随时间演化。本文基于有效应力原理与临界状态思路，梳理颗粒骨架重排、结构性破坏与孔压消散对极限承载力的控制机理，构建由强度指标、变形指标与时效指标组成的性能框架，解析桩筏协同与群桩效应、基岩风化分带与规模效应、循环荷载与负摩阻等关键因素的作用路径，并提出面向不确定性的参数反演与可靠度校核方法。

关键词：高层建筑基础；岩土力学；极限承载力；桩筏协同；不确定性

DOI：10.69979/3029-2727.25.01.066

引言

高层建筑对基础的承载与变形提出更高要求，地基土与基岩在高应力水平下表现出非线性与各向异性，结构基础与地基体系之间存在显著相互作用。围绕极限承载力的分析，需要综合强度理论、变形协调与渗流固结，将短期稳定与长期沉降统一在同一性能目标中。随着超大荷载与复杂场地增多，桩筏基础、深大基坑覆盖下的复杂边界、海相软黏土与风化花岗岩等多类型地层并存，使承载机制与控制因素呈现多尺度耦合特征。设计与评估亟需建立从原位测试到数值反演再到可靠度的闭环，以降低模型与参数的不确定性对安全储备与经济性的双重影响。

1 岩土体本构特征与极限状态界定

1.1 土体与岩体的强度来源与结构性演化

高层建筑基础所承受的高应力使土体进入接近临界的状态区间，摩阻与黏聚的来源受颗粒级配、孔隙比与有效应力控制。天然结构性与沉积成因造成各向异性，微裂隙与弱胶结在加载过程中逐步破坏，强度与刚度产生路径依赖^[1]。扰动会降低短时强度，固结与时效又带来迟后恢复与次生固结，承载边界因而具备时间维度。强度准则的选择需要兼顾剪切主控与拉张脆弱区，地层分带与应力路径差异将改变破坏面倾角与抗剪参数的等效取值。应力水平升高时，结构面法向闭合与切向滑移并存，体变与剪胀呈现非线性耦合，等效摩阻随剪应变发展而先增后减。触变软化使短时模量下降，随后在排水与结构重排作用下出现部分恢复。细观上，力链在高应力下趋于稳定取向，接触面粗糙度与吸附水膜厚度

改变边界摩擦与粘结。宏观上，屈服面随主应力旋转而迁移，硬化与软化阶段交替，承载上限取决于硬化速率与体变约束。在复合地层中，软土与硬土或风化岩共同承载，刚度对比决定应力重分配与剪切集中位置。孔压消散速率影响抗剪与变形的同步性，加载节奏不当会诱发未排水破坏与边界隆起。循环荷载引起累积应变与强度退化，裂隙岩体在反复剪切下出现黏聚衰减与摩阻滑移转化。为界定极限状态，需要在强度破坏与变形极限之间建立协调指标，以承载能力曲线与变形速率阈值共同判定，确保安全裕度与使用性能同时满足。等效参数的确定需要与原位测试建立映射，贯入阻力与剪切波速可作为刚度与强度的先验信息，再通过载荷试验与沉降曲线校正。对微结构明显的黏土与粉土，可引入结构参数与固结状态参数，共同描述强度随应力路径与时间的演化。对于裂隙岩体，可采用分区本构与弱面模型，将节理方向与密度纳入承载评估，使极限状态的判据更加贴近真实工作条件。

1.2 承载机理的多尺度描述与边界条件

地基的承载由微观接触到宏观拱效共同构成，颗粒间法向与切向接触在局部形成力链，结构层在面内张力作用下与地基共同分担变形。群桩条件下土拱效应使应力跨越桩间，桩土应力比随沉降协调而演化，群效应可能放大也可能削弱单桩承载。桩端进入基岩时，端阻与侧阻的耦合取决于岩面粗糙度与扰动影响深度，泥皮与软弱夹层会显著降低侧阻发挥^[2]。边界条件包含基坑开挖引起的卸荷与回填再加载，地下水波动带来的有效应力变化，地震与风荷载组合产生的循环效应。排水边界

与加载速率共同决定孔压生成与消散,固结时间尺度与施工时间尺度的错配将延长附加沉降。基础与上部结构之间的相互作用改变荷载时程与空间分布,刚度比的选择决定承载转移与沉降协调的路径。温度与化学环境在长周期内会改变微结构与渗透能力,对长期承载与耐久产生影响。为获得可靠的极限值,需要将原位试验、室内试验与数值分析在统一边界下耦合,利用现场监测反演关键参数,使承载判定与现场响应保持一致。侧向边界的约束条件也会改变破坏模式,开阔场地更易出现广域沉降,狭窄场地易出现拱起与剪切带集中。筏板外缘与基坑支护的相互影响可能在早期形成应力峰值区,若不及时调整施工节奏,长期沉降与裂缝风险将被放大。通过在关键断面布置沉降板与测斜管,并与桩身应变同步观测,可在早期识别不利边界并实施针对性加固。在分析方法上,可将有限元与离散元进行耦合,使微观接触与宏观连续能量耗散一致。对于长期工况,可在流固耦合框架内引入变渗模型与黏滞项,刻画渗透场与应力场的相互影响。对于高层建筑与深大基坑并存的场地,建议展开阶段性反演工作,将开挖与回填期间的监测数据用于更新边界与参数,再据此调整承载目标与施工节奏,以降低不利叠加的风险。

2 高层建筑常见基础型式的承载机制

2.1 桩筏协同体系的承载分担与控制参数

桩筏基础通过筏板与桩群共同工作,筏板承担近场扩散与沉降协调,桩群提供深部承载与水平约束。承载分担与沉降协调受桩长与桩径、桩距与布置、筏板厚度与刚度以及地层分带的综合影响^[3]。起步阶段沉降速率较高,桩土应力比随沉降协调逐步降低,筏板参与度提升,最终形成相对稳定的承载分配。筏土界面的接触状态会随着沉降发展而改变,接触破裂与再闭合使局部刚度呈现时变特性。影响极限承载的关键在于桩端进入强风化或中风化分带的深度与质量,孔壁稳定与成桩工艺决定桩周结构扰动程度。负摩阻会在地表填土沉降或软土固结时出现,增加桩身压应力并降低可用承载,需通过桩端超前进入高强度层与筏板预拱度控制来缓解。群效应的不利影响可通过不等长桩与分区布置削弱,也可通过加密筏板下的加劲肋提高局部刚度。评价承载分担可依托桩顶应变与筏板应变的联合观测,并配合位移曲线识别中性面位置与演化,进而校正设计中的承载配比与裂缝控制目标。在水平荷载与竖向荷载共同作用下,筏板的面内拉力与桩群的侧向抗力共同提供整体稳定,

抗震需求高的工程可通过增设抗拔桩与加密连接构件提高韧性。对于长周期建筑物,徐变与次生固结会改变承载分配,宜在运营初期保持观测与调平措施,使沉降差控制在允许范围。若场地具备地表回填计划,可在结构完成前安排阶段性预压,缩短后续沉降尾段。筏土接触的持久性与均匀性取决于找平层与施工质量,若出现局部脱空,会导致应力集中与裂缝早发。为提升承载与耐久,可在筏板底部设置高模量缓冲层以改善接触,在桩顶设置桩帽或加厚整浇段以提高传力稳定。对沉降控制要求较严的工程,可通过分级加载与观测拐点来确定承载与变形的平衡点,再实施结构层施工与荷载转换。

2.2 大直径桩与嵌岩桩的规模效应与极限判定

大直径桩在高承载需求下常作为主承载构件,端阻与侧阻的发挥受桩径与嵌岩深度共同影响。直径增大带来周边土体或岩体的应力扩散范围扩大,局部剪切面形态与破坏模式随之变化,极限状态不再等同于小直径桩的简化假定^[4]。嵌岩段的剪切与压缩共同作用决定端阻发展曲线,粗糙界面与不规则孔底会改变接触面积与法向应力分布,局部破碎带可能成为薄弱环节。规模效应还体现在施工扰动与孔壁完整性上,泥浆残留与软弱污染层引起的界面弱化会显著降低侧阻。循环荷载作用下,侧阻产生降幅,端阻在重复压缩中趋于稳定,承载分量在时间轴上发生转移。对于超大直径构件,截面刚度提高使沉降更为缓慢,但也可能诱发端区脆性破坏,需要在约束与延性之间取得平衡。极限承载的判定可基于沉降速率拐点与荷载位移曲线的斜率下降阈值,同时结合桩身应变分布识别分项阻力是否达到饱和。为提高判定可靠性,宜将静载试验、动测响应与数值反演联合使用,并对不确定性进行敏感性分析与可靠度评估。在取芯与孔底成像质量良好的前提下,可引入端区改良与面层找平工艺以提升端阻,必要时布置短桩作为临时分担来降低单桩极限需求。对于海相软土覆盖下的嵌岩桩,还应关注负摩阻与侧向位移耦合,适当提高嵌岩深度并优化桩端形态,有助于缓解侧阻衰减。对于易崩解岩层,应控制钻进方式与泥浆参数,避免扩大破碎带厚度。当直径与嵌岩深度达到一定组合时,桩端堵塞效应可能导致局部应力集中,需要在施工控制与验收评定中识别并处理。对于存在侧向滑移面的岩层,可设置带键槽的桩端形态以提升抗剪,或在端区进行二次压浆提升接触质量。通过分区加载与卸载观测位移回弹,可判断端区受压与剪切的耦合比例,从而优化极限承载的分项设计。

3 影响极限承载力的主要因素与评估路径

3.1 地层条件与应力历史对承载与变形的控制

高压缩性软黏土、粉细砂夹层与风化岩互层的组合,决定了承载机制的空间差异。孔隙比与天然含水状态决定初始结构强度,超固结比与前期卸荷再加载经历改变应力路径与屈服面位置。地下水位与渗流条件影响有效应力与排水能力,固结速率与加载节奏的不匹配会引起附加沉降尾段延长,局部剪切区易在堤脚与突变边界附近出现。风化分带中,从强风化到中风化再到微风化的级配,表现为弹塑性脆性占比的变化,裂隙密度与充填类型决定嵌岩桩端阻的发挥。砂土中的密实度与相对密度控制剪胀与抗剪峰值,过细颗粒比例过高会削弱结构强度。黄土或粉土中结构性与湿陷性并存,浸润边界变化将导致突增沉降。地震与风荷载引入的循环效应使累积变形增长,尤其在饱和砂土与裂隙岩体中更为敏感。基于这些特征,需要构建从勘察取样到原位测试再到参数反演的链路,将分带参数与空间随机性一并纳入承载计算与可靠度评估,并通过现场监测进行持续校核。原位勘察中,静力触探与剪切波测试能够快速给出分层刚度与强度的对比,压力计与板载荷能够获得局部承载与变形信息,联合使用可提高参数代表性。对深厚软土区,可增加固结与渗透试验,得到等效渗透与固结系数的分布,用以评估沉降时间尺度。对风化花岗岩区,可通过声波与取芯质量指数识别结构完整性,并与嵌岩段设计联动。在参数化评估阶段,可引入场地分区与情景组合的方法,将不同分带与应力历史映射到承载与沉降的响应族,并用风险图谱表达空间差异与时间演化。对复杂互层可设置等效层模型,在满足计算效率的同时保留关键控制量,使极限承载与变形控制更具针对性。

3.2 施工方法与参数不确定性对极限值的影响

成桩方法决定初始缺陷与界面状态,钻孔灌注在孔壁稳定与清底质量不佳时易形成泥皮,搅拌类桩在能量与配比失衡时强度离散度增大,沉管类桩对周边土体扰动较强而密实度提高,承载组合随之变化。基坑开挖导致的卸荷会改变浅层应力场,必须在施工顺序与临时支护上实现与基础设计的协调,以避免早期沉降超限。桩身混凝土的龄期发展与温度变化会引起早期收缩与徐变,承载分担与裂缝控制随时间发生调整。参数不确定性来自试验方法、样本代表性与尺度转换,模型不确定

性来自本构与边界的理想化。为减少偏差,需要在设计阶段设置观测与反演的预案,通过施工期的沉降、孔压与应变监测不断更新关键参数,使计算模型与现场响应一致。可采用分级决策策略,将先验参数通过反演更新为后验,再以可靠度指标作为验收与优化的依据。灵敏度排序有助于识别对承载贡献与对失效概率影响最大的因素,从而把资源与控制措施集中在关键环节。施工质量控制应围绕测量放样、孔壁稳定、成桩成形与清底检核展开,并辅以过程化监测与即时纠偏。对群桩工程,可分区设置试验桩与监测桩,建立承载分担与沉降发展的对比曲线,用于检验模型与参数。数据不足时,可采用保守的承载配比并设置可调构造,在后续观测中逐步释放安全储备。在数据分析层面,可采用贝叶斯更新与序贯反演,将监测信息转化为参数与模型的修正值,再反馈到承载评估与施工决策中。对关键不确定量建立阈值管理与预警规则,一旦偏离目标区间即触发复核与加固方案。通过这一闭环,可逐步降低极限承载判定的波动并提升整体可靠度。

4 结语

高层建筑基础的极限承载力来源于岩土体强度与结构体系变形协调的共同作用,受地层条件、应力历史、边界约束与施工方法的综合影响。以性能目标与可靠度为核心的评估路径,将勘察测试、数值反演与现场监测贯通,可在控制风险的同时提升承载潜力与使用性能。面向复杂场地与超大荷载,应在桩筏协同、嵌岩质量与群效应控制上形成成套技术,并通过参数更新与阈值管理实现全寿命期的持续优化。建议同步更新规范与评价体系,使工程实践具备统一口径与可追溯依据。

参考文献

- [1] 赖琼华. 高层建筑桩、筏基础共同作用沉降分析计算[J]. 广州建筑, 2009, 37 (05): 31-33.
- [2] 叶国太, 袁正宏, 李明超. 谈高层建筑软土地基加固处理技术[J]. 四川建材, 2009, 35 (01): 165-167.
- [3] 杨光华, 李思平, 杜秀忠, 等. 岩溶地区高层建筑筏板基础的实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, (S2): 3363-3371.
- [4] 高大钊. 关于岩土力学新分析方法的回顾与思考[J]. 工业建筑, 2006, (01): 58-61+106.