工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

深基坑开挖诱发斜桩基础内力重分布特性研究

黄锐林
中煤江南建设发展集团有限公司　广东省广州市　528226

DOI：10.32629/ems.v8i10.22554

［摘　要］本文立足于常规竖直工程桩受开挖扰动发生偏斜的工程实际，剖析基坑分层开挖全过程中偏斜桩基的轴力、弯矩、剪力演化规律，揭示土体卸荷条件下桩基偏斜后内力重分布内在机理，分析土体条件、开挖工况、桩身约束条件对内力重分布的影响规律。分析情况表明，基坑卸荷打破原有桩土应力平衡，桩基发生被动偏斜之后，桩侧摩阻力重新调整，桩身弯矩出现反弯点迁移，局部桩段轴力甚至出现压- 拉交替的变化特征；场地土层特性、分层开挖方式、桩顶上部结构约束是控制偏斜桩内力重分布程度的关键因素。希望本文的研究成果可为临近基坑竖向工程桩的施工管控、风险判别与预警处置提供工程参考。

［关键词］深基坑；内力重分布；卸荷效应；特性研究

引言

当前城市高层建筑的桩基大多采用竖直灌注桩，设计阶段假定桩身保持垂直状态承受上部竖向荷载。但在深基坑开挖实践当中，当工程桩距离基坑支护结构较近，坑外土体在开挖卸荷作用下产生向坑内的侧向流动，土体位移会对桩身施加侧向推力，原本竖直的工程桩会产生不同程度的被动偏斜。桩基一旦发生偏斜，桩土接触关系发生改变，桩侧摩阻力的传递方向、土压力的作用模式均会出现变化，引发桩身内力重分布。

1 基坑开挖下斜桩基础内力重分布内在机理

1.1 坑底卸荷引发桩侧摩阻力重分布

基坑开挖之后，坑底位置竖向应力释放，土体产生向上回弹。斜桩埋置在土体当中，桩身与周围土体之间产生相对位移，直接改变桩侧摩阻力的大小与方向。对于竖直桩，坑底回弹主要改变坑底以下桩段的摩阻力；而斜桩存在倾角，桩身一部分位于基坑开挖面以上，一部分埋于坑底以下，回弹变形沿着斜向桩身持续传递，造成不同桩段摩阻力出现差异化变化。开挖前期，坑底土体回弹幅度有限，桩身大部分区段依旧保持正摩阻力；随着开挖深度不断增加，坑底回弹量增大，坑底附近桩段桩土相对位移反转，局部位置摩阻力方向发生改变，进一步引发桩身轴力重新分布，部分区段甚至出现受拉状态。

1.2 侧向土体位移诱发桩身弯矩与剪力演化

基坑外侧土体向坑内产生侧向位移，土体位移作用于斜桩桩身，产生侧向土压力。斜桩倾斜的几何特征，使得土压力除产生弯矩、剪力之外，还会分解出沿桩身轴向的分力，同步影响桩身轴力。开挖初期，侧向位移较小，斜桩弯矩峰值集中在开挖面附近；随着开挖持续推进，土体侧向变形增大，弯矩峰值位置不断向桩身下部迁移，桩身出现明显反弯点。和竖直桩相比，斜桩的弯矩分布更加复杂，同一根桩身上会同时出现正弯矩、负弯矩区段，这也是斜桩容易出现桩身开裂的重要原因[1]。

1.3 多因素耦合加速内力重分布进程

斜桩内力重分布很少由单一因素主导，是竖向卸荷效应、侧向土压力变化、桩端约束弱化三者耦合作用的结果。坑底卸荷带来土体回弹，改变桩侧摩阻力；土体侧向位移带来侧向荷载，诱发弯矩剪力变化；如果坑底以下存在软弱夹层，开挖扰动会进一步降低桩端土体的约束效果，桩端位移增大，反过来放大桩身内力变化。施工层面的不当操作会加剧重分布效应，例如超深度开挖、开挖之后没有及时施作垫层、坑边堆载过大，都会加大土体回弹与侧向变形，使斜桩轴力、弯矩短时间剧烈变化，增大桩基损伤风险。

2 深基坑开挖之中诱发斜桩的主要影响因素

2.1 桩- 顶约束条件与桩身自身特性

基坑开挖阶段桩基的约束状态对内力分布影响很大。开挖时如果承台尚未浇筑，桩顶处于自由状态，桩身挠曲变形更大，弯矩峰值会向中下部转移；若承台已经浇筑完成，多根桩由承台形成整体约束，可以有效限制单桩的偏斜程度，

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

但会在桩顶位置产生较大的约束弯矩。桩身配筋率、桩径大小同样会影响受力响应，配筋不足的桩，在偏斜引发交变弯矩作用下更容易出现裂缝损伤[2]。

2.2 场地岩土体条件

土层条件是决定土体侧向位移大小的基础。硬塑黏土、密实砂土场地，基坑开挖后土体侧向变形小，桩基偏斜幅度有限，内力重分布程度相对较轻。软土、饱和残积土场地，土体流变特性突出，开挖卸荷之后土体位移持续发展，即使开挖结束，桩身内力还会随时间不断调整。当桩身穿越软弱夹层，土层刚度差异大，在地层分界面位置容易出现应力集中，弯矩突变大多出现在这类位置。勘察报告如果只提供天然状态土体参数，没有考虑开挖卸荷后的强度折减，计算得到的桩身内力会明显偏小，留下安全隐患。

2.3 基坑开挖施工工况

开挖深度、分层开挖厚度、开挖顺序、垫层施工速度，直接决定土体侧向位移发展。一次性大深度开挖，土体瞬间卸荷，侧向位移快速发展，桩基短时间产生较大偏斜，内力急剧变化；分层分段限时开挖能够有效控制土体变形，减轻内力重分布。坑顶堆载、降水也会改变桩周应力场，降水过快会改变有效应力，引起桩侧摩阻力变化。大量工程实例证明，很多桩基的偏斜与内力损伤发生在土方开挖过程，而不是基坑全部施工结束之后。

3 开挖诱发桩基偏斜及内力重分布的工程防控技术要点

3.1 优化计算工况，削弱内力重分布的驱动源头

勘察阶段要查清临近基坑桩基穿越的全部地层，探明软弱夹层、风化界面，提供考虑开挖卸荷扰动后的土体强度折减参数。设计环节不能只采用理想竖直桩模型做最终工况验算，需要把分层开挖全过程作为计算工况，模拟土体侧向位移作用下桩身发生挠曲偏斜后的内力重分布，考虑弯矩反弯点迁移、局部桩段受拉的不利情况。临近基坑的主体工程桩，应当适度提高桩身配筋率，兼顾受压与受拉受力需求，提升桩身抵抗交变弯矩的能力。条件允许情况下，可以对基坑被动区土体实施注浆加固，减小土体侧向流动，从源头降低桩基发生明显偏斜的可能性。对于距离基坑较近的桩基，开展仿真分析预判土体侧推带来的附加内力，不能完全套用常规竖向桩基的计算成果。土方开挖阶段，对支撑系统格构柱做好承载力检测，按设计要求布设轴力监测点，做好测点保护。

3.2 施工过程管控，降低扰动水平

施工现场严格落实分层、分段、限时开挖原则，严控单次开挖厚度，禁止超挖、掏挖。开挖到坑底标高之后，尽快浇筑混凝土垫层，利用垫层约束坑底土体回弹，缩短土体无约束暴露时间。做好坑边荷载管控，不在基坑边缘堆放建材、弃土。基坑降水作业要有序开展，避免地下水位短时间急剧下降，造成桩侧摩阻力异常变化。土方开挖机械作业时，注意保护桩体，避免机械碰撞桩身带来额外附加应力。施工技术交底中，要向现场管理人员明确斜桩在开挖过程中的受力风险，改变原来的固有认知[3]。某山地商住项目前期施工中，班组为赶进度局部加大单次开挖厚度，且开挖后垫层浇筑滞后两天，监测数据显示临近基坑斜桩弯矩出现明显抬升。现场立刻叫停土方作业，对开挖区段临时压载，以期能够调整开挖步距，加快垫层施工节奏，后续内力变化才逐步趋于平稳。该现场教训充分说明，斜桩对开挖扰动十分敏感，看似常规的赶工行为，都会放大桩- 土体系内力重分布，只有把开挖厚度、垫层施工时限等要求落到现场工序，才能减少不必要的桩基受力风险。

3.3 查找扰动来源，建立全过程监测体系

基坑工程监测不能仅仅关注支护结构位移，临近基坑的主体工程桩需要设置专项监测。工程实践经常出现一种现象：桩顶位移变化不大，但桩身内部因为偏斜挠曲已经积累较高的拉压应力，仅依靠外部位移监测很难识别内部风险。位移反映的是桩土体系的宏观表象，桩身钢筋应力监测才可以捕捉桩- 土荷载传递变化，识别偏斜之后的内力重分布。

监测应当坚持 “内力优先，位移佐证” 的思路，除常规深层土体位移、地下水位监测之外，对临近基坑桩基布设钢筋应力计，跟踪开挖全过程桩身轴力、弯矩变化。预警阈值不能直接照搬规范通用数值，结合本项目地质条件、桩径配筋、数值计算得到的内力包络，划分黄、橙、红三级预警。一旦监测发现桩段出现受拉应力、弯矩快速增长，应当立刻暂停开挖，复核体系稳定性，查找扰动源头，落实处置措施后方可复工，不能等到桩身肉眼可见开裂再开展处置。部分

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

项目地表各项位移指标尚在规范允许范围，但桩身应力监测捕捉到局部受拉，通过及时缩小开挖分区、被动区局部注浆，遏制了内力继续恶化，避免出现桩身结构性损伤，充分体现桩身内力监测的实际价值。

3.4 强化桩- 土界面防护，减少开挖阶段次生扰动

斜桩桩土界面的工作状态，直接决定摩阻力传递效果，也是控制内力重分布不可忽视的环节。很多项目重点关注桩身本体设计，却忽视开挖过程对桩周土体的破坏。土方开挖过程中，机械扰动、坑内渗水冲刷都会破坏桩周原有土体结构，造成局部土拱失效，桩侧摩阻力出现非正常衰减，进一步放大斜桩内力波动。施工时，斜桩周边应当预留一定厚度的土体保护层，禁止挖掘机直接贴近桩身切削土体，桩周保护层改用人工清理，避免机械搅动造成桩周土体松散。基坑施工期间要做好坑内导排水,防止积水长时间浸泡桩周土层，避免土体遇水软化，造成桩侧摩阻力大幅下降。对于成孔施工留下的桩孔周边裂隙，条件允许时可采用低压注浆做充填处理，注浆压力严格把控，不宜高压冲挤桩身，主要目的是封堵土体裂隙，维持桩土界面的整体性，减少开挖卸荷带来的应力重分布幅度。同时，现场要做好成品保护，杜绝土方机械剐蹭、撞击桩体，防止桩身产生初始损伤，降低桩身抵御交变内力的性能。

3.5 完善现场技术交底与动态施工调整机制

要针对临近基坑桩基开展专项技术交底，明确分层开挖限值、桩周土体保护、监测预警处置流程，让作业班组理解违规开挖带来的桩基损伤风险。实际施工过程中工作人员不能僵化照搬图纸，结合现场开挖揭露的地质情况动态调整。如果实际地层比勘察报告软弱，出现软弱夹层厚度变大，主动减小分层开挖厚度，放缓开挖推进速度。监测数据接近预警阈值时，停工复盘开挖工序、降水情况、坑边堆载，找准扰动根源再制定处置方案，杜绝盲目抢工复工，把风险管控落实到土方作业每一道工序。

在多个城郊软土基坑项目中就出现过这类现实问题，项目前期虽然编制完整施工方案，但技术交底只做通用版全员交底，没有针对临近基坑的主体桩基做专项讲解。现场土方班组认为桩基已经检测合格，便可以加快挖土进度，没有充分意识到土体侧推会让完好的竖直桩发生偏斜。开挖过程揭露局部淤泥质软弱土层，实际土体条件比勘察资料反映得更差，现场依旧按照原定分层厚度开挖，没有及时下调开挖步距。后续桩身应力监测数据逼近橙色预警，项目才紧急停工排查。经过复盘发现，坑边还临时堆放大量钢筋原材料，叠加软弱土层的流变效应，进一步加剧土体侧向位移，推动工程桩产生挠曲变形，桩身弯矩持续上涨。项目后续重新组织面向技术员、班组长、挖土班组的专项交底，把桩基偏斜的监测曲线、风险后果拿出来做现场案例教育。现场动态调整开挖方案，缩小每层开挖深度，清理坑边堆载，增加被动区局部压载措施，待监测数据回归安全区间之后，才分块恢复土方施工。这件案例充分说明，纸面方案不能直接等同于现场执行力，专项交底和动态调整不是形式流程，是阻挡桩基风险发生的重要环节，不能等出现桩身明显病害之后再采取补救措施。

结束语

深基坑开挖卸荷作用会诱发斜桩基础显著的内力重分布，其本质是坑底土体回弹、侧向土体位移共同改变桩- 土相互作用关系，造成桩侧摩阻力方向改变、土压力重新分配，最终带来桩身轴力、弯矩、剪力的动态演化。应当认识到，基坑开挖下斜桩内力重分布是多因素耦合的复杂过程，现有理论计算仍然存在一定局限，实际工程应当结合现场监测数据动态调整设计与施工方案。此外，后续还需要积累更多现场实测案例，进一步完善受开挖扰动被动偏斜桩基的内力计算方法，为城市复杂基坑下主体桩基安全提供技术支撑。

[参考文献]

[1]戴玉树.城市深基坑咬合桩支护结构受力特性分析研究[J].广东建材, 2025, 41(12):138-141.

[2]杨瑞,干飞,王寿红,等.卸荷桩板挡墙力学性能及工作机制试验研究[J].岩土力学, 2026(5):1672-1685.

[3]郑刚。基坑开挖对邻近工程桩影响研究进展 [J]. 岩土工程学报，2023,45 (01):1- 14.

作者简介：黄锐林，1973 年 2 月，男，汉族，广东省清远市佛冈县，本科，工程师，地基基础。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.